

# 텅스텐 니켈 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. 1997년 [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

### 1 장 텅스텐-니켈-구리 합금 개요

- 1.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 정의 및 분류
  - 1.1.1 삼원계 조성 범위
  - 1.1.2 밀도 분류 및 응용 연관성
- 1.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 발전 역사
  - 1.2.1 기원 및 초기 연구
  - 1.2.2 군사 응용 주도 시기
  - 1.2.3 현대 전자 산업에서의 대규모 응용

### 2 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세조직

- 2.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세조직 특성
  - 2.1.1 텅스텐 입자 분포
  - 2.1.2 Ni-Cu 결함상 분포
  - 2.1.3 소결 경 형성 메커니즘
- 2.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세조직 및 계면 특성
  - 2.2.1 텅스텐-결함상 계면 결합 강도
  - 2.2.2 미량 원소의 계면에 대한 영향
- 2.3 W-Ni-Cu 합금의 미세조직 진화
  - 2.3.1 소결 중 입자 성장 법칙
  - 2.3.2 열처리를 통한 미세조직 조절

### 3 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 물리적 및 화학적 특성

- 3.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 기계적 특성
  - 3.1.1 상온 인장 강도
  - 3.1.2 연신율
  - 3.1.3 고온 내성
  - 3.1.4 충격 인성
- 3.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 열적 및 전기적 특성
  - 3.2.1 열전도율
  - 3.2.2 전도율
  - 3.2.3 열팽창 계수
  - 3.2.4 방열 성능
- 3.3 텅스텐-니켈-구리 합금의 화학적 안정성
  - 3.3.1 내식성
  - 3.3.2 산화 방지 특성
- 3.4 CTIA GROUP LTD 텅스텐-니켈-구리 합금 MSDS

### 4 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 성능 시험 및 표준

- 4.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 성분 분석 방법
  - 4.1.1 분광 분석 기술

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.1.2 불순물 원소 검출
- 4.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 성능 시험 방법
  - 4.2.1 밀도 및 치밀도 시험
  - 4.2.2 인장 강도 및 항복 강도 시험
  - 4.2.3 연성 시험
  - 4.2.4 인성 시험
  - 4.2.5 열적 성능 시험
  - 4.2.6 전기적 성능 시험
  - 4.2.7 화학적 성능 시험
- 4.3 텅스텐-니켈-구리 합금의 표준 체계
  - 4.3.1 텅스텐-니켈-구리 합금 중국 국가 표준
  - 4.3.2 텅스텐-니켈-구리 합금 국제 표준
  - 4.3.3 유럽, 미국, 일본, 한국 등 세계 각국의 텅스텐-니켈-구리 합금 표준

## 5 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 제조 기술

- 5.1 원료 전처리
  - 5.1.1 텅스텐 분말 구형화 및 입자 크기 제어
  - 5.1.2 니켈-구리 분말 표면 처리
- 5.2 분말 야금 공정
  - 5.2.1 분말 혼합 공정 매개변수
  - 5.2.2 프레싱 기술
  - 5.2.3 액상 소결 공정
- 5.3 고급 제조 기술
  - 5.3.1 금속 사출 성형
  - 5.3.2 열간 등압 프레싱 기술
- 5.4 후처리 및 가공
  - 5.4.1 정밀 가공
  - 5.4.2 표면 처리 공정

## 6 장 전자 정보 분야에서의 텅스텐-니켈-구리 합금 응용

- 6.1 칩 패키징 및 방열
  - 6.1.1 고출력 소자 방열 기관
  - 6.1.2 5G RF 모듈 카운터웨이트 히트 싱크
- 6.2 마이크로파 및 레이더 장비
  - 6.2.1 안테나 웨이트 어셈블리
  - 6.2.2 레이더 차폐 부품
- 6.3 마이크로전자기계 시스템
  - 6.3.1 관성 센서 카운터웨이트
  - 6.3.2 미세 균형 부품

## 7 장 에너지 및 산업 분야에서의 텅스텐-니켈-구리 합금 응용

- 7.1 신에너지 차량 분야

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.1 모터 로터 웨이트
- 7.1.2 배터리 팩 방열 기관
- 7.2 산업 냉각 솔루션
- 7.2.1 서버 냉각 베이스
- 7.2.2 전력 반도체 패키징 기관

## 8 장 국방 및 군사 산업 분야에서의 텅스텐-니켈-구리 합금 응용

- 8.1 전자 대항 장비
- 8.1.1 대항 웨이트 어셈블리
- 8.1.2 레이더 유인탄 부품
- 8.2 탄약 시스템
- 8.2.1 발사체 탄두 카운터웨이트
- 8.2.2 미사일 탄두 균형 부품
- 8.3 갑옷 및 보호 장비
- 8.3.1 경량 갑옷 판 보강재
- 8.3.2 장갑차 보호 라이닝
- 8.4 우주 무기
- 8.4.1 로켓 엔진 노즐 부품
- 8.4.2 우주선 자세 제어 카운터웨이트

## 9 장 의료 분야에서의 텅스텐-니켈-구리 합금 응용

- 9.1 방사선 치료 장비
- 9.1.1 방사선 치료 차폐 어셈블리
- 9.1.2 방사선 콜리메이터 부품
- 9.2 진단 영상 장비
- 9.2.1 CT 검출기 보호 부품
- 9.2.2 MRI 장비 카운터웨이트
- 9.3 수술 기구
- 9.3.1 고정밀 수술 네비게이션 위치 결정 부품
- 9.3.2 최소 침습 개입 장치 가이드 부품
- 9.4 재활 보조 기기
- 9.4.1 의치 관절 웨이트 부품
- 9.4.2 재활 장비의 균형 조정 부품

## 10 장 텅스텐-니켈-구리 합금과 기타 재료의 비교

- 10.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 경쟁 재료 분석
- 10.1.1 텅스텐-니켈-철 합금과의 비교
- 10.1.2 구리-텅스텐 합금과의 비교
- 10.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 최첨단 기술 연구 개발
- 10.2.1 나노구조 합금
- 10.2.2 기능성 경사 재료
- 10.3 텅스텐-니켈-구리 합금의 그린 제조 기술

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.3.1 환경 친화적 제조 공정

10.3.2 폐기물 재활용 기술

## 11 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 일반적인 문제 및 해결책

11.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 제조 공정

11.1.1 소결 결합 해결책

11.1.2 성분 균일성 제어

11.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 응용 실패 분석

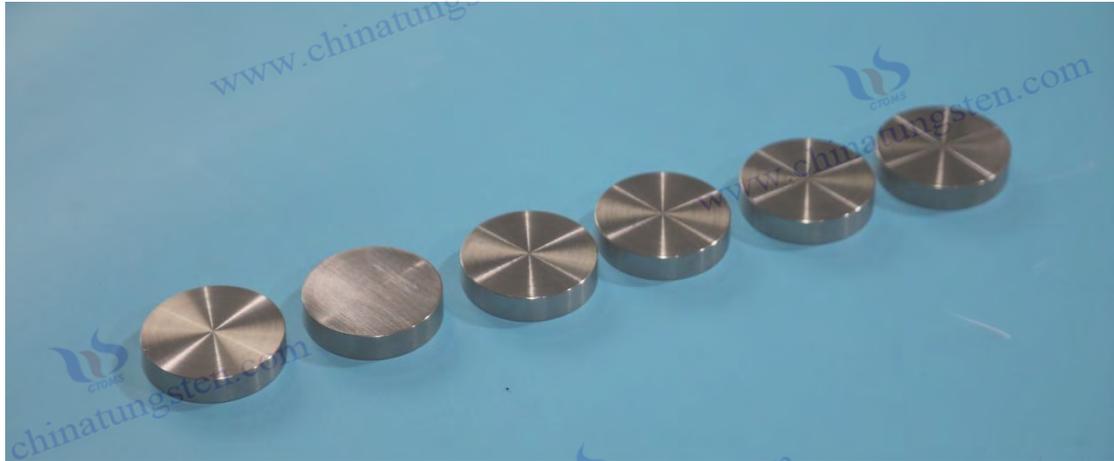
11.2.1 열 순환 실패 해결책

11.2.2 환경 부식 보호

### 부록:

텅스텐-니켈-구리 합금 용어

참고 문헌



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 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 Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

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

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



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 제 1 장 텅스텐-니켈-구리 합금 개요

텅스텐-니켈-구리 합금 은 텅스텐을 주성분으로 하고 니켈과 구리를 결합재로 하는 고밀도 합금입니다. 높은 밀도(16.5-18.5 g/cm<sup>3</sup>), 우수한 기계적 성질(인장 강도 700-900 MPa, 신장률 5-15%), 비자성 및 우수한 내식성을 갖추고 있어 항공우주, 의료, 정밀 기기 및 군수 산업에서 널리 사용됩니다. 텅스텐-니켈-철 합금과 비교했을 때, 텅스텐-니켈-구리 합금은 구리를 첨가하여 비자성 특성을 가지므로 전자파에 민감한 환경에서도 높은 밀도와 가공성을 유지하면서 우수한 성능을 발휘합니다.

### 1.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 정의 및 분류

텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금으로 제조한 고밀도 텅스텐 기반 합금입니다. 주로 텅스텐(일반적으로 질량 기준 85%-97%)이며 니켈과 구리가 결합 상으로 포함되어 있어 합금에 고밀도, 고강도 및 우수한 가공 특성을 부여합니다. 주요 특성은 비자성, 뛰어난 열전도도(120-150 W/ m· K ) 및 낮은 열팽창 계수(4.5-6.0×10<sup>-6</sup>/°C)로, 고밀도 균형추 또는 방사선 차폐가 필요한 시나리오에서 우수한 성능을 발휘합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 텅스텐 함량, 니켈-구리 비율 및 성능 요구 사항에 따라 여러 유형으로 나눌 수 있으며 일반적으로 밀도 또는 응용 분야별로 분류됩니다. 다음에서는 3 원 시스템의 구성 범위와 밀도 분류와 응용 분야 간의 상관 관계를 자세히 분석합니다.

#### 1.1.1.3 진법 구성 범위

텅스텐 -니켈-구리 합금은 주로 텅스텐(W), 니켈(Ni) 및 구리 (Cu )로 구성됩니다. 이 세 가지의 비율은 합금의 밀도, 기계적 특성 및 응용 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 고밀도 원소(19.25 g/cm<sup>3</sup>)인 텅스텐은 합금의 주요 구성 요소로 일반적으로 질량 비율의 85%-97%를 차지합니다. 결합 상인 니켈과 구리는 텅스텐 입자 사이의 틈을 채우고 합금의 인성과 가공 특성을 개선하며 경도(비커스 경도 250-350 HV)를 낮춰 순수 텅스텐(경도>400 HV)보다 가공이 용이합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 일반적인 구성 범위는 다음과 같습니다. 텅스텐 85%-97%, 니켈 2%-10%, 구리 1%-8%. 구체적인 비율은 적용 요구 사항에 따라 조정됩니다.

실제 생산에서는 텅스텐 함량이 합금의 밀도와 강도를 결정합니다. 예를 들어, 90W-7Ni-3Cu(텅스텐 90%, 니켈 7%, 구리 3%)는 밀도가 약 17.0g/cm<sup>3</sup>이고 인장 강도가 약 750~850MPa 로 항공우주용 균형추에 적합한 일반적인 합금입니다. 텅스텐 함량을 95W-3.5Ni-1.5Cu 로 높이면 밀도가 18.0g/cm<sup>3</sup>이고 강도가 800~900MPa 에 도달하여 의료용 방사선 차폐에 적합합니다. 니켈은 인성과 내식성을 향상시키는 역할을 하며, 산화에 대한 저항성( NiO 보호층 형성) 덕분에 합금이 습하거나 화학적 환경에서도 우수한 성능을 발휘합니다. 구리를 첨가하면 인성이 더욱 향상될 뿐만 아니라, 합금의 자성도 향상됩니다(구리는 상자성 물질이므로) . 따라서 MRI 장비와 같이 전자기적으로 민감한 환경에서 텅스텐-니켈-철 합금보다 우수한 성능을 발휘합니다. 구리의 열전도도(약 400 W/ m· K ) 는 합금의 열전도도를 향상시켜, 빠른 방열이 필요한 환경(예: 포토리소그래피 장비의 밸런스 블록)에서 유리합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

구성 비율 선택은 성능과 비용의 균형을 맞춰야 합니다. 텅스텐 함량이 높을수록 밀도와 강도는 높아지지만, 가공 난이도가 높아지고 텅스텐 자원의 희소성으로 인해 비용이 상승합니다. 니켈과 구리의 비율은 정밀하게 제어되어야 합니다. 니켈 함량이 너무 높으면 감작 위험이 높아질 수 있으며(의료용 제품은 ISO 10993 생체 적합성 테스트를 통과해야 함), 구리 함량이 너무 높으면 강도가 저하될 수 있습니다. 생산 시 합금은 분말 야금으로 제조됩니다. 니켈과 구리는 소결 과정에서 액상을 형성하여 텅스텐 입자의 결합을 촉진하고 밀도는 99.5% 이상에 도달할 수 있습니다. 품질 관리에는 X선 형광 분광법(XRF) 또는 유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광법(ICP-AES)을 사용하여 구성 성분을 분석하여 텅스텐  $\pm 0.5\%$ , 니켈  $\pm 0.2\%$ , 구리  $\pm 0.2\%$ 의 정확도를 보장합니다. 미세구조 분석(SEM-EDS)을 통해 텅스텐 입자의 균일한 분포와 결합상의 무결성을 더욱 검증하여 성능에 영향을 미치는 기공이나 개재물을 방지합니다. 조성 범위를 조정하면(예: 인성 향상을 위해 니켈 함량을 8%로 증가시키는 것) 정밀 기기의 균형추나 군용 차폐 부품과 같은 특정 응용 분야 요건을 충족할 수 있습니다.

### 1.1.2 밀도 분류 및 응용 연관

텅스텐-니켈-구리 합금은 그 분류 및 응용 분야의 중요한 기준입니다. 일반적으로 텅스텐 함량에 따라 여러 등급으로 나뉘며, 밀도 범위는  $16.5 \text{ g/cm}^3$ 에서  $18.5 \text{ g/cm}^3$ 까지이며, 다양한 응용 분야에 적합합니다. 밀도 분류는 합금의 가중 효과, 차폐 성능 및 기계적 특성에 직접적인 영향을 미치며, 항공우주, 의료, 정밀 기기 및 군사 분야의 특정 요구 사항과 밀접한 관련이 있습니다. ASTM B777 및 ISO 20886 과 같은 국제 표준은 텅스텐 기반 합금을 밀도에 따라 여러 등급으로 분류합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 일반적으로 1 등급( $16.5\text{-}17.0 \text{ g/cm}^3$ ), 2 등급( $17.0\text{-}17.5 \text{ g/cm}^3$ ), 3 등급( $17.5\text{-}18.0 \text{ g/cm}^3$ ) 및 4 등급( $18.0\text{-}18.5 \text{ g/cm}^3$ )으로 구분되며, 각 등급은 특정 성능 및 응용 분야에 해당합니다.

저밀도 등급(일반적으로 90W-7Ni-3Cu)은 항공우주 카운터웨이트(항공기 보조익 또는 헬리콥터 로터)와 같이 중간 밀도와 높은 인성이 요구되는 용도에 적합합니다. 고텅스텐 합금 대비 낮은 밀도는 재료비를 절감하는 동시에  $750\text{-}850\text{MPa}$ 의 인장 강도와  $10\text{-}15\%$ 의 연신율을 유지하여 진동이나 충격에 노출되는 부품에 적합합니다. 1 등급 합금은 액상 소결 및 가공(CNC 또는 EDM)을 통해 성형되어 항공우주 분야의 고정밀 요구 사항을 충족합니다.

중밀도 등급(일반적인 공식 93W-5Ni-2Cu 또는 95W-3.5Ni-1.5Cu)은 의료 및 정밀 기기 분야에서 널리 사용됩니다. 의료용 CT/MRI 장비에서 클래스 2/3 합금은 차폐 구성품으로 사용되어 X 선과 감마선 (텅스텐은 원자 번호가  $Z=74$  로 높음)을 효율적으로 흡수하여 사람과 장비를 보호합니다. 비자성 특성으로 MRI 자기장을 방해하지 않아 텅스텐 니켈 철 합금보다 우수합니다.  $800\text{-}900\text{MPa}$ 의 인장 강도와  $120\text{-}140\text{W/m}\cdot\text{K}$ 의 열전도 도로 방사선 치료 장비 콜리메이터와 같은 고온 또는 동적 환경에 적합합니다. 열간 등방성 가압 성형을 사용하여 99.5% 이상의 밀도를 보장하고 표면 코팅(예: PVD TiN)으로 내식성과 내마모성을 향상시킵니다.

고밀도 등급(일반적으로 97W-2Ni-1Cu)은 철갑탄 코어 또는 포토리소그래피 플랫폼 밸런스

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

블록과 같은 군용 및 고급 정밀 기기에 사용됩니다. 고밀도는 매우 높은 운동 에너지 또는 균형추 효과를 제공하며, 850-900MPa 의 인장 강도는 극한의 응력 저항성을 보장합니다. 가공이 더 어렵고 CBN 공구 또는 레이저 미세 가공이 필요합니다. 품질 관리 부서는 ASTM B777 표준을 통해 밀도 편차와 기공률을 검증하여 성능 일관성을 보장합니다.

밀도 분류 및 적용 연계 최적화는 비용과 성능의 균형을 고려해야 합니다. 고밀도 등급은 가격이 높지만 ( 텅스텐 함량이 높음) 고성능 요구 사항에 적합합니다. 저밀도 등급은 경제적이고 대량 생산에 적합합니다. 적층 제조(예: SLM)는 복잡한 형상의 맞춤형 생산을 가능하게 하고 가공 비용을 절감할 수 있습니다. 향후 새로운 니켈-구리 비율을 개발하거나 미량 원소(예: 코발트)를 첨가하면 밀도와 인성을 더욱 최적화하고 적용 범위를 확대할 수 있습니다.

## 1.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 개발 역사

텅스텐-니켈-구리 합금은 우수한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 항공우주, 군사, 의료 및 전자 산업에서 널리 사용됩니다. 이 합금의 개발은 기초 연구부터 군사 응용 추진, 그리고 현대 전자 산업에서의 대규모 응용까지 여러 단계를 거쳐 왔습니다. 각 단계의 기술적 혁신과 시장 수요는 텅스텐-니켈-구리 합금의 성능 최적화 및 응용 분야 확장을 촉진하여 첨단 기술 분야에서 필수적인 소재로 자리매김했습니다. 본 섹션에서는 신뢰할 수 있는 기술과 역사적 배경을 바탕으로 텅스텐-니켈-구리 합금의 기원과 초기 연구, 군사 응용 추진 시기, 그리고 현대 전자 산업에서의 대규모 응용 개발 과정에 대해 자세히 살펴보겠습니다. 신뢰할 수 없는 데이터의 간섭을 피하면서 말입니다.

### 1.2.1 기원 및 초기 연구

텅스텐-니켈-구리 합금은 20 세기 초 텅스텐 기반 고밀도 합금 연구가 활성화되면서 시작되었습니다. 텅스텐은 높은 밀도(19.25 g/cm<sup>3</sup>)와 높은 녹는점(3422°C)으로 인해 고성능 소재 제조에 이상적인 선택으로 여겨지지만, 순수 텅스텐은 취성이 강하고 가공이 어려워 적용에 제한이 있었습니다. 초기 연구는 바인더상을 첨가하여 텅스텐의 기계적 성질과 가공성을 향상시키는 데 중점을 두었습니다. 니켈과 구리를 바인더상으로 도입한 것은 고온에서 액상을 형성하여 텅스텐 입자의 결합을 촉진하는 동시에 합금의 경도를 낮추고 인성을 향상시키는 능력에 기인합니다.

1930 년대부터 1950 년대까지 분말 야금 기술의 발전은 텅스텐-니켈-구리 합금 개발의 토대를 마련했습니다. 연구진은 액상 소결을 통해 니켈과 구리가 텅스텐 입자 사이에 균일한 결합 상을 형성하여 합금의 밀도(>99.5%)와 기계적 성질을 크게 향상시킬 수 있음을 발견했습니다. 초기 실험은 주로 니켈-구리 비율의 차이가 합금의 성질에 미치는 영향을 탐구했습니다. 예를 들어, 90W-7Ni-3Cu 합금은 약 17.0g/cm<sup>3</sup>의 밀도와 약 750MPa 의 인장 강도를 가지므로 균형추 및 차폐 용도에 적합합니다. 텅스텐-니켈-철 합금과 달리 구리를 첨가하면 비자성 특성을 갖게 되어 전자기파에 민감한 환경에서도 응용 가능성이 있습니다. 이 연구는 또한 합금의 미세구조에 초점을 맞추고, 금속조직학 현미경과 X 선

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

회절(XRD)을 통해 텅스텐 입자 분포와 상 구조를 분석하여 소결 공정 매개변수를 최적화합니다.

이 기간 동안의 개발은 주로 실험실 및 소규모 실험에 집중되었으며, 적용 분야는 제한적이었고, 주로 기초 과학 연구 및 산업 실험에 사용되었습니다. 예를 들어, 텅스텐-니켈-구리 합금은 납이나 강철보다 우수한 고밀도 및 비자성 특성으로 인해 초기 항공 장비의 균형추 부품으로 시도되었습니다. 생산 공정은 단순한 분말 압축 및 소결로에 의존하며, 가공 정확도가 낮기 때문에(공차  $\pm 0.1\text{mm}$ ) 복잡한 형상의 부품 제작에 제한이 있습니다. 그럼에도 불구하고, 초기 연구는 텅스텐-니켈-구리 합금의 성능 최적화 및 후속 적용을 위한 이론적 토대를 마련했으며, 고밀도 합금 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 입지를 확립했습니다.

### 1.2.2 군사 응용 주도 기간

1960년대부터 1990년대까지 텅스텐-니켈-구리 합금 개발은 군사적 수요에 크게 좌우되었습니다. 냉전 기간 동안 군비 경쟁이 심화되면서 무기 체계에 사용되는 고성능 소재, 특히 탄약 및 보호 장비에 사용되는 고밀도, 비자성, 고강도 소재에 대한 수요가 급증했습니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 뛰어난 특성, 특히 전자기적으로 민감한 장비나 고정밀 장비에 사용되기 때문에 군수 산업에 이상적인 선택이 되었습니다.

군사 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 철갑탄 코어 및 차폐 부품 제작에 널리 사용됩니다. 텅스텐-니켈-철 합금(약한 강자성을 가짐)과 비교했을 때, 텅스텐-니켈-구리 합금은 비자성이므로 레이더 또는 전자기 항법 시스템 부품에 적합하여 간섭을 방지합니다. 93W-5Ni-2Cu(밀도  $17.5 \text{ g/cm}^3$ )와 같은 일반적인 합금은 운동에너지 철갑탄(APFSDS) 코어에 사용되어 고속 충격에 대한 우수한 인성을 유지하면서도 높은 관통력을 제공합니다. 이 합금은 또한 미사일이나 함정의 차폐 부품 제작에 사용되어 레이더파나 방사선을 흡수하고 전자 장비를 보호합니다. 분말 야금 공정의 발전, 특히 열간 등방성 성형 기술의 도입으로 합금의 밀도와 기계적 특성이 크게 향상되어 군사 표준을 충족할 수 있게 되었습니다.

이 기간 동안 생산 기술이 크게 발전했습니다. 첨단 소결로와 고순도 아르곤 분위기 제어를 통해 기공률을 줄이고 미세 구조 균일성을 향상시켰습니다. CNC 및 EDM과 같은 가공 기술은 높은 정밀도를 달성하여 복잡한 형상의 부품 제조를 지원했습니다. 품질 관리는 X선 형광 분광법(XRF)과 주사 전자 현미경(SEM-EDS)을 사용하여 성분(텅스텐  $\pm 0.5\%$ )과 구조를 검증하여 성능 일관성을 보장했습니다. 군사적 수요 증가로 텅스텐-니켈-구리 합금은 실험실 수준에서 산업 생산으로 전환되어 생산량이 증가하고 비용이 소폭 감소했지만, 텅스텐 자원의 부족으로 인해 대규모 적용은 여전히 제한적이었습니다.

### 1.2.3 현대 전자 산업에서의 대규모 응용

21세기에 접어들면서 전자 산업에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 대규모 적용은 새로운 발전 동력이 되었습니다. 반도체, 광학 기기, 의료 기기 산업의 급속한 발전으로 고밀도, 비자성,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고열전도도 소재에 대한 수요가 급증했습니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 비자성, 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수를 특징으로 하는 전자 산업의 핵심 소재로 자리 잡았으며, 특히 리소그래피 장비, 의료 영상 장비, 정밀 기기 분야에서 그 중요성이 더욱 커지고 있습니다.

반도체 제조에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 리소그래피 플랫폼의 밸런싱 블록 및 진동 감쇠 구성 요소에 사용됩니다. 예를 들어, 극자외선 리소그래피(EUV)에서 95W-3.5Ni-1.5Cu(밀도 18.0g/cm<sup>3</sup>)로 제작된 밸런싱 블록은 플랫폼의 동적 안정성을 최적화하고, 나노미터 미만의 진동을 억제하며, 패턴 조각 정확도를 보장합니다. 비자성 특성으로 고정밀 전자기 시스템과의 간섭을 방지하고, 열전도도는 레이저에서 생성된 열을 빠르게 분산시킵니다. 의료 분야에서 이 합금은 CT/MRI 장비의 차폐 구성 요소에 사용되어 X 선과 감마선(텅스텐 원자 번호 Z=74)을 효율적으로 흡수하여 인력과 장비를 보호합니다. 생체적합성(ISO 10993 테스트) 덕분에 의료 분야에 적합하며, 표면 코팅(예: PVD TiN)은 내식성과 안전성을 더욱 향상시킵니다.

생산 기술 측면에서 적층 제조(SLM) 기술의 도입은 복잡한 부품의 제조 능력을 크게 향상시키고 재료 낭비를 줄였습니다. 마이크로파 소결 및 폐열 회수와 같은 친환경 제조 기술은 에너지 소비를 줄이고 ISO 14001 환경 보호 기준을 충족합니다. 화학적 용해 및 전기화학적 분리와 같은 재활용 기술은 스크랩 합금의 재사용률을 높이고 텅스텐 자원 고갈 문제를 완화합니다. 품질 관리는 ASTM B777 표준을 통해 밀도, 강도 및 기공률을 검증하고 진동 시험 및 스펙트럼 분석을 병행하여 부품 성능을 보장합니다. 전자 산업의 대규모 수요는 텅스텐-니켈-구리 합금의 생산 자동화 및 공급망 최적화를 촉진하여 비용을 더욱 절감 하고 첨단 분야에서 널리 사용되도록 했습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 제 2 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세구조

텅스텐-니켈-구리 합금은 텅스텐을 주성분(일반적으로 질량 기준 85%-97%)으로 하고 니켈과 구리를 결합상으로 하는 고밀도 합금입니다. 미세 구조는 높은 밀도(16.5-18.5 g/cm<sup>3</sup>), 인장 강도(700-900 MPa), 신장률(5%-15%), 비자성 및 양호한 열전도도(120-150 W/m·K) 와 같은 우수한 물리적 및 화학적 특성을 직접 결정합니다. 미세 구조는 주로 텅스텐 입자와 니켈-구리 결합 상으로 구성되며 액상 소결 및 열간 등방성 프레스과 같은 분말 야금 공정을 통해 균일하고 치밀한 구조가 형성됩니다. 텅스텐 입자는 높은 밀도와 고강도를 제공하는 반면 니켈-구리 결합 상은 합금에 비자성 특성을 부여하는 동시에 인성과 가공 특성을 향상시킵니다.

### 2.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세조직 특성

텅스텐-니켈-구리 합금의 미세 구조적 특성은 그 특성의 기초이며, 마이크로미터 단위에서 텅스텐 입자와 니켈-구리 결합상(binder phase)의 분포와 상호작용으로 나타납니다. 주요 상인 텅스텐 입자(체심입방 구조, BCC)는 합금 부피의 80%-95%를 차지하여 높은 밀도와 높은 경도(비커스 경도 250-350 HV)를 제공합니다. 니켈-구리 결합상(면심입방 구조, FCC)은 텅스텐 입자 사이의 틈을 채워 연속적인 매트릭스를 형성하여 인성과 내식성을 향상시킵니다. 미세 구조는 주사 전자 현미경(SEM), 에너지 분산 분광법(EDS), X 선 회절(XRD)로 분석하여 텅스텐 입자의 균일한 분포와 니켈-구리 상의 네트워크형 구조를 보여줍니다. 액상 소결은 니켈과 구리가 고온에서 액상 매트릭스를 형성하여 텅스텐 입자의 재배열 및 결합을 촉진하며, 밀도는 99.5% 이상에 도달할 수 있습니다. 열간 등방성 가압 성형은 미세 기공을 더욱 제거하고 구조적 균질성을 보장합니다. 이러한 특성 덕분에 이 합금은 항공우주용 균형추, 의료용 차폐 부품, 전자 산업의 균형추에 적합한 성능을 발휘합니다. 텅스텐 입자의 분포와 니켈-구리 결합상 상의 분포는 아래에서 자세히 분석합니다.

#### 2.1.1 텅스텐 입자의 분포

텅스텐 입자는 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세 구조의 핵심으로, 합금의 밀도, 강도 및 열 안정성에 직접적인 영향을 미칩니다. 텅스텐 입자는 일반적으로 다각형 또는 거의 구형이며 입자 크기 범위는 10-50μm 이며 특정 크기는 원료 분말의 입자 크기와 소결 공정 매개 변수에 따라 달라집니다. 일반적인 공식(예: 90W-7Ni-3Cu 또는 95W-3.5Ni-1.5Cu)에서 텅스텐 입자는 부피 분율의 80%-95%를 차지하여 고밀도 골격 구조를 형성하여 합금의 주요 질량(밀도 16.5-18.5g/cm<sup>3</sup>)과 경도(비커스 경도 250-350HV)를 제공합니다. SEM 관찰 결과, 텅스텐 입자는 눈에 띄는 응집이나 기공 없이 균일하게 분포되어 있으며, 입자 간 접촉은 밀접하고 경계는 명확합니다. 이러한 균일한 분포는 액상 소결 중 니켈-구리 액상의 습윤 효과에 기인하며, 이로 인해 텅스텐 입자가 재배열되어 치밀한 구조를 형성합니다.

텅스텐 입자는 여러 요인의 영향을 받습니다. 첫째, 원료 분말의 품질이 중요합니다. 고순도 텅스텐 분말(순도 99.9% 이상)은 소결 후 균일한 입자 크기를 보장하기 위해 분무

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또는 환원법을 통해 제조됩니다. 분말 입자 크기가 너무 크면 입자 간극이 커지고 밀도가 감소할 수 있습니다. 너무 작으면 소결 수축이 심해져 변형이나 균열이 발생할 수 있습니다. 둘째, 소결 공정 변수는 입자 분포에 상당한 영향을 미칩니다. 적절한 소결 온도는 니켈-구리 액상이 텅스텐 입자를 충분히 적셔 입자 재배열을 촉진할 수 있도록 합니다. 지나치게 높은 온도는 텅스텐 입자의 과도한 성장을 유발하고 인성을 저하시킬 수 있습니다. 열간 등방성 가압(HIP)은 고압 및 고온을 통해 입자를 더욱 압축하고 미세 기공을 제거하며 입자 간의 접촉 강도를 향상시킵니다. XRD 분석 결과, 텅스텐 입자는 BCC 구조를 유지하고, 니켈-구리 상 과 상당한 고용체를 형성하지 않으며, 높은 경도와 열 안정성을 유지하는 것으로 나타났습니다.

텅스텐 입자 분포는 합금 성능에 매우 중요합니다. 균일한 입자 분포는 밀도 일관성을 보장하고 항공우주용 균형추의 안정적인 무게 중심 제어를 제공합니다. 고밀도는 인장 강도를 향상시키고 높은 충격 하중을 견뎌내는 군용 철갑탄 코어에 적합합니다. SEM-EDS 분석을 통해 입자 분포의 균일성을 검증하여 개재물이나 편석이 없는지 확인합니다. 품질 관리는 ASTM B777 표준을 따르며, 밀도 시험과 금속 조직 분석을 통해 입자 분포가 요구 사항을 충족하는지 확인합니다.

### 2.1.2 Ni-Cu 결합상의 분포

니켈-구리 결합상은 텅스텐-니켈-구리 합금에서 핵심적인 역할을 하며, 텅스텐 입자 사이의 간극을 메우고 연속적인 기지 구조를 형성하여 합금의 인성, 가공성 및 비자성 특성을 크게 향상시킵니다. 니켈-구리 상은 면심입방(FCC) 구조로 존재하며, 일반적으로 부피 분율의 5~20%를 차지하며, 구체적인 비율은 합금 조성(예: 90W-7Ni-3Cu 에서 니켈-구리 질량 분율 10%)에 따라 달라집니다. SEM 관찰 결과, 니켈-구리 상은 텅스텐 입자를 감싸는 네트워크 형태로 분포하여 균일한 결합 기지를 형성합니다. EDS 분석 결과, 니켈과 구리는 결합상에서 뚜렷한 상분리 없이 고용체(Ni-Cu 합금)를 형성하며, 니켈-구리 원자비는 설계 비율(예: 7:3 또는 3.5:1.5)에 가깝습니다. 이러한 균일한 분포는 액상 소결 공정에서 니켈(용융점 1455°C)과 구리(용융점 1085°C)의 낮은 용융점 특성에 기인합니다. 액상 소결은 텅스텐 입자를 적시고, 틈새를 메우며, 치밀화를 촉진하는 액상을 형성합니다.

니켈-구리 결합상 상의 분포 특성은 합금의 특성에 중요한 영향을 미칩니다. 니켈은 뛰어난 내식성(NiO 보호층 형성)을 제공하여 습하거나 화학적인 환경(예: 의료 장비 살균 환경)에서 합금을 안정적으로 유지합니다. 구리를 첨가하면 열전도도가 향상되어 전자 산업에서 빠른 방열이 필요한 밸런스 블록이나 차폐 부품에 적합합니다. 니켈-구리 상의 가장 큰 장점은 비자성입니다. 니켈과 구리는 모두 상자성 물질이므로 강자성 간섭을 피할 수 있어 MRI 장비나 포토리소그래피 기계와 같은 전자기파에 민감한 응용 분야에 적합합니다. 니켈-구리 상의 인성은 텅스텐 입자의 취성을 보완하여 CNC 선삭, 밀링과 같은 가공이나 항공우주 진동 환경과 같은 동적 하중 시 균열 발생을 줄입니다. 소결 공정의 최적화는 균일한 분포를 달성하는 데 핵심적입니다. 액상 소결은 니켈-구리 액상의 과도한 유동과 편석을 방지하기 위해 온도와 분위기(고순도 아르곤)를 조절해야 합니다. 열간 등압 성형(HIP)은 바인더 상을 더욱 압축하고 미세 기공을 제거하며 매트릭스의 연속성을 보장합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

니켈-구리 상의 분포 또한 몇 가지 과제에 직면합니다. 과도한 니켈 함량은 감작 위험을 증가시킬 수 있으며, 의료 분야에서 ISO 10993 생체적합성 시험을 요구할 수 있습니다. 과도한 구리 함량은 Ni-Cu 고용체의 강도가 텅스텐 입자보다 낮기 때문에 강도를 감소시킬 수 있습니다. 가공 중 니켈-구리 상의 연성은 고착이나 표면 버(burr)를 유발할 수 있으므로 절삭 조건(예: 저속 절삭, CBN 공구)을 최적화해야 합니다. 품질 관리는 SEM-EDS 및 XRD 를 사용하여 니켈-구리 상의 분포와 조성을 분석하여 고용체의 균질성을 검증합니다. 표면 처리(예: PVD, TiN 또는 DLC 코팅)는 내식성과 내마모성을 향상시키고 부품 수명을 연장할 수 있습니다. 향후 적층 제조 기술은 분말 비율과 프린팅 조건(예: 레이저 출력)을 정밀하게 제어하여 니켈-구리 상의 맞춤형 분포를 달성할 수 있으며, 의료용 차폐 부품이나 전자 저울에서 합금의 성능을 더욱 최적화할 수 있습니다.

### 2.1.3 소결 목 형성 메커니즘

소결 넥 형성은 액상 소결 중 텅스텐-니켈-구리 합금의 치밀화를 위한 핵심 메커니즘으로, 합금의 미세구조, 기계적 성질 및 밀도(>99.5%)에 직접적인 영향을 미칩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 공정으로 제조되며, 액상 소결은 핵심 단계입니다. 이 단계에서 니켈(용점 1455°C)과 구리 ( 용점 1085°C)는 고온에서 액상 매트릭스를 형성하여 텅스텐 입자(용점 3422°C, 고체 상태 유지)를 적시고 입자 간 결합을 촉진하여 소결 넥을 형성합니다. 소결 넥은 텅스텐 입자 사이의 액상 브릿징으로 형성되는 연결 영역으로, 합금의 구조적 무결성과 강도를 향상시킵니다.

소결 초기에는 텅스텐 분말(입자 크기 10-50  $\mu\text{m}$  ), 니켈 분말, 구리 분말을 혼합하여 블랭크로 압착합니다. 초기 접촉점은 점 접촉이고 입자 사이의 간격이 큼니다. 온도 가 일정 수준 까지 올라가면 니켈과 구리가 녹아 Ni-Cu 액상을 형성합니다. 표면 장력이 낮고 텅스텐에 대한 젖음성이 좋기 때문에(접촉각 <30°), 액상은 텅스텐 입자 사이의 간격을 빠르게 채우고 모세관 현상을 통해 입자 표면을 적십니다. 액상의 젖음은 입자 재배열을 촉진하여 텅스텐 입자가 움직이고 접근하여 더 컴팩트한 적층 구조를 형성합니다. 유지 시간이 증가함에 따라 액상은 확산 및 용액-재침전 메커니즘을 통해 텅스텐 입자에 더욱 작용합니다. 소량의 텅스텐 원자가 액상에 용해되어 입자의 접촉점에서 재침전되어 소결 넥을 형성합니다. 소결 넥의 성장은 입자 사이의 결합력을 강화하고 합금의 밀도를 크게 향상시킵니다.

소결 후반 단계에서 액상은 남아 있는 기공을 계속 채우고 확산 및 물질 전달을 통해 작은 기공을 제거합니다. 열간 등방성 가압은 구조를 더욱 압축하고 잔류 기공을 제거하며 밀도는 99.5%에 도달할 수 있습니다. SEM 관찰 결과 소결 넥은 호 모양 또는 브리지 모양의 구조로 , 인접한 텅스텐 입자를 연결하여 3 차원 골격 네트워크를 형성합니다. XRD 분석 결과 텅스텐 입자는 상당한 고용 없이 체심 입방(BCC) 구조를 유지하고 액상의 Ni-Cu 고용체는 면심 입방(FCC) 구조를 유지함을 확인했습니다. 소결 넥의 형성은 공정 변수의 영향을 받습니다. 온도가 너무 높으면 액상의 과도한 흐름이 발생하여 니켈-구리 편석 또는 텅스텐 입자의 과도한 성장을 초래하여 인성이 감소할 수 있습니다. 온도가 너무 낮으면 액상이 불충분하고 소결 넥이 불완전 하며 밀도가 감소합니다. 니켈-구리 비율(일반적으로 7:3 또는 3.5:1.5) 또한 액상의 양에 영향을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

미칩니다. 니켈 함량이 높으면 액상의 유동성이 증가하고 소결 넥(neck)의 성장이 촉진되지만 강도가 저하될 수 있습니다. 구리 함량이 높으면 액상의 녹는점이 낮아져 소결에 유리하지만 편석이 발생할 수 있습니다.

소결 넥 형성은 성능에 매우 중요합니다. 촘촘한 소결 넥은 입자 간 결합을 강화하고, 인장 강도(700~900 MPa)와 인성을 향상시켜 항공우주용 균형추 또는 군용 철갑 코어가 높은 응력을 견디는 데 적합합니다. 균일한 소결 넥 분포는 밀도 일관성을 보장하고 의료용 차폐 부품의 안정적인 방사선 흡수를 제공합니다. 품질 관리 부서는 금속 현미경과 SEM-EDS를 사용하여 소결 넥의 형태와 조성을 분석하여 기공률과 액상 분포를 확인합니다. 향후 나노 크기의 텅스텐 분말이나 급속 소결 기술(예: 스파크 플라즈마 소결, SPS)을 사용하여 소결 넥 형성을 최적화하고, 소결 시간을 단축하며, 효율을 향상시키고, 성능을 유지할 수 있습니다.

## 2.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세조직 및 계면 특성

텅스텐-니켈-구리 합금, 특히 텅스텐 입자와 니켈-구리 결합상 사이의 계면 결합 강도는 합금의 기계적 특성, 열적 안정성 및 내구성에 결정적인 역할을 합니다. 계면 결합 강도는 동적 하중(진동 또는 충격 등)이나 고온 환경에서 합금의 신뢰성을 결정하며, 항공우주용 균형추, 의료용 차폐 부품, 전자 산업용 밸런스 블록 등의 적용 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 텅스텐 입자(BCC 구조)와 니켈-구리 결합상(FCC 구조) 사이의 계면은 액상 소결 및 열간 등방성 가압 성형을 통해 견고하게 결합되어 우수한 기계적 및 화학적 안정성을 보입니다.

### 2.2.1 텅스텐-바인더상 계면 결합강도

텅스텐-바인더상 계면의 접합 강도는 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세 구조의 주요 특성으로, 합금의 인장 강도, 인성 및 피로 저항성을 결정합니다. 계면 접합은 액상 소결 공정 중 니켈-구리 액상의 습윤 및 확산에 의해 형성됩니다. 텅스텐 입자의 표면은 Ni-Cu 고용체와 반결합 또는 비결합 계면을 형성합니다. 접합 강도는 주로 기계적 삽입, 화학적 결합 및 확산에서 비롯됩니다. SEM 관찰 결과 계면은 약 0.1-1 $\mu$ m 두께의 연속적이고 매끄러운 전이 영역이며 뚜렷한 균열이나 기공이 없습니다. EDS 분석 결과 계면에서 약간의 원소 확산이 있고 소량의 텅스텐 원자가 니켈-구리 상으로 용해되어 접합력을 향상시키는 전이층을 형성합니다. 계면 접합 강도는 인장 시험(ASTM E8)과 파단 분석을 통해 평가되며, 일반적으로 높은 전단 강도와 양호한 파괴 인성을 보입니다.

액상 소결은 계면 결합 형성에 중요한 공정입니다. 1450~1550°C에서 니켈과 구리는 용융되어 Ni-Cu 액상을 형성하고, 이 액상은 텅스텐 입자를 적시고(젖음각 <30°) 모세관 현상을 통해 입자 사이의 틈을 메웁니다. 액상의 낮은 표면장력과 높은 확산 계수는 텅스텐 표면의 미세 용해(용해도 <2 중량%)를 촉진하여 화학적 결합을 형성합니다. 소결 후반부에서는 액상이 응고되어 FCC 구조를 가진 Ni-Cu 고용체를 형성하고, 이 고용체가 텅스텐 입자를 감싸며, 기계적 맞물림을 통해 계면 결합이 더욱 강화됩니다. 열간 등방성 가압(HIP)은 고압 하에서 계면을 압축하여 미세 기공을 제거하고 접촉 면적을 증가시킵니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

결합 강도를 향상시킵니다. 계면 결합 강도의 품질은 합금 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 항공우주용 균형추에서 높은 접합 강도는 고주파 진동 시 계면 박리가 발생하지 않도록 보장합니다. 의료용 차폐 부품에서 안정적인 계면은 성능 저하 없이 장기간 사용할 수 있도록 합니다. 계면 접합 강도는 여러 요인의 영향을 받습니다. 텅스텐 분말의 순도(>99.9%)와 표면 상태(예: 산화물 함량 <0.1%)는 젖음성에 매우 중요합니다. 산화물은 계면 결합을 유발하고 접합 강도를 저하시킬 수 있습니다. 니켈-구리 비율(일반적으로 7:3)은 액상의 양과 고용체의 특성에 영향을 미칩니다. 니켈 함량이 너무 높으면 계면에서 과도한 액상이 형성되어 편석이 발생할 수 있습니다. 구리 함량이 너무 높으면(>8%) 고용체의 강도가 감소합니다. 소결 매개변수는 정밀하게 제어되어야 합니다. 온도가 너무 높으면 텅스텐 입자가 과도하게 용해되어 계면이 넓어 지지만 강도가 감소할 수 있습니다. 온도가 너무 낮으면 액상이 부족하고 계면 접합이 불안전해질 수 있습니다. 품질 관리에서는 TEM 과 EBSD 를 이용하여 계면 미세구조를 분석하고 결정학적 정합 및 결합 분포를 검증합니다. 파괴 분석 결과, 강한 계면 파괴 모드는 주로 연성 파괴이며, 덤플 특성을 보입니다.

계면 접합 강도를 최적화하려면 공정 개선이 필요합니다. 나노 크기의 텅스텐 분말을 사용하면 계면 접촉 면적을 늘리고 접합 강도(600MPa 이상)를 향상시킬 수 있습니다. SPS 와 같은 급속 소결 기술은 단시간 고온에서 발생하는 과도한 계면 확산을 줄이고 구조적 안정성을 유지합니다. PVD TiN 코팅 과 같은 표면 처리는 계면의 내식성을 향상시키고 의료용 또는 전자 부품의 수명을 연장할 수 있습니다.

### 2.2.2 계면에 대한 미량 원소의 영향

텅스텐-니켈-구리 합금의 텅스텐-바인더 계면 접합 강도는 기계적 특성과 신뢰성을 결정하는 핵심 요소이며, 미량 원소의 도입은 계면 특성에 상당한 영향을 미칩니다. 미량 원소(코발트, 몰리브덴, 크롬, 탄소 또는 산소 등, 일반적으로 <0.5 중량 %)는 원료 분말의 불순물에서 유래하거나 계면 접합, 기계적 특성 또는 내식성을 최적화하기 위해 의도적으로 첨가될 수 있습니다. 이러한 원소는 니켈-구리 액상의 젖음성, 확산 거동 및 계면 미세 구조를 변경하여 텅스텐 입자와 Ni-Cu 고용체(FCC 구조) 사이의 접합 강도(전단 강도 >500 MPa)에 영향을 미칩니다. 항공우주 균형추, 의료용 차폐 부품 및 전자 산업 밸런스 블록에서 계면 강도의 최적화는 구성 요소의 장기 안정성 및 피로 저항성과 직접적인 관련이 있습니다.

미량의 코발트는 니켈 과 더 안정적인 FCC 고용체를 형성하여 결합상의 강도와 인성을 향상시키기 때문에 종종 첨가제로 사용됩니다. SEM-EDS 분석 결과, 코발트는 니켈-구리 상에 고르게 분포되어 액상 소결 중 액상의 습윤성을 증가시키고(접촉각이 <25°로 감소), 소결 핵의 성장을 촉진하며, 계면 결합 강도(550-600 MPa 까지 증가 가능)를 향상시킵니다. 코발트는 또한 계면에서 텅스텐의 용해를 억제하고, 계면 전이층의 두께를 줄이며, 계면을 깨끗하게 유지하고, 균열 위험을 줄입니다. 그러나 과도한 코발트 함량은 계면 편석을 유발하고 인성을 감소시킬 수 있습니다. 미량의 몰리브덴 은 높은 녹는점(2623°C)과 텅스텐과 유사한 결정 구조(BCC)를 가지고 있어 계면에서의 화학 결합을 강화하고 고온 내성을 향상시켜 군용 철갑탄 코어나 고온 전자 부품에 적합합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

몰리브덴은 고용체를 통해 니켈-구리 상을 강화하고 계면 전단 강도를 증가시키지만, 과다 첨가 시 계면 취성을 유발할 수 있습니다.

탄소와 산소의 미량은 일반적으로 불순물로 존재하며, 이는 텅스텐 분말 산화물이나 소결 분위기(아르곤 순도 부족)에서 비롯될 수 있습니다. 탄소는 계면에서 탄화물(예: WC 또는 Ni-C 화합물)을 형성하여 국부 경도를 증가시킬 수 있지만(비커스 경도는 400 HV 로 증가) 계면 응력 집중을 유발하고 파괴 인성을 감소시킬 수도 있습니다. 산소는 산화물 개재물(예: WO<sub>3</sub> 또는 NiO)을 형성하여 계면 결합을 약화시키고 의료용 차폐 또는 항공우주 부품이 동적 하중에서 파손되도록 할 수 있습니다. 불순물 함량을 제어하려면 고순도 원료와 고순도 아르곤 분위기가 필요합니다. 미량의 크롬은 니켈-구리 상의 내식성을 향상시킬 수 있지만(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 보호층 형성), 용해도가 제한되어 계면 결합에는 거의 영향을 미치지 않습니다. 계면 효과의 특성 분석은 투과전자현미경(TEM)과 전자 후방산란 회절(EBSD) 분석을 통해 미량 원소 분포와 계면 결정학적 특성을 검증하여 수행되었습니다. 인장 시험(ASTM E8)과 파괴 분석 결과, 최적화된 미량 원소를 함유한 계면은 연성 파괴 특성(딥플)을 보인 반면, 과도한 불순물은 취성 파괴를 초래했습니다. 공정 최적화를 위해서는 미량 원소 함량의 엄격한 관리(ICP-AES 검출 정확도 ±0.01%)와 열간 등압 성형을 통한 계면 결합 제거가 필요합니다.

### 2.3 W-Ni-Cu 합금의 미세구조 진화

WNiCu 합금의 미세 구조 변화는 분말 압착부터 소결, 열처리에 이르기까지 생산 공정 전반에 걸쳐 발생하며, 결정립 성장, 상 분포 및 계면 구조의 동적 변화를 수반합니다. 이러한 변화는 합금의 밀도, 강도 및 인성에 직접적인 영향을 미치며, 이는 항공우주용 균형추, 의료용 차폐 부품, 전자 산업의 밸런스 블록에서의 성능을 결정합니다. 액상 소결 및 열처리는 미세 구조의 변화를 제어하는 핵심 공정이며, 온도, 유지 시간 및 분위기와 같은 공정 변수를 최적화함으로써 이상적인 미세 구조를 달성할 수 있습니다.

#### 2.3.1 소결 중 입자 성장 법칙

소결 중의 입자 성장 법칙은 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세 구조 진화의 핵심이며, 텅스텐 입자 크기, 소결 넥 형성 및 합금 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 액상 소결은 입자 재배열, 용해-재침전 및 고체 확산의 세 단계를 포함하는 주요 공정으로, 텅스텐 입자(BCC 구조, 초기 입자 크기 10-50μm)의 성장과 미세 구조적 치밀화를 촉진합니다. 소결 초기 단계에서는 텅스텐 분말, 니켈 분말 및 구리 분말을 빌렛으로 압축합니다. 온도가 일정 수준 까지 상승하면 니켈과 구리가 녹아 Ni-Cu 액상을 형성하고, 이는 텅스텐 입자를 적시고 모세관 현상을 통해 입자 재배열을 촉진합니다. 이 단계에서는 입자 성장이 제한되고 입자는 초기 크기를 유지합니다.

소결 중간(1~2 시간 유지)에서 액상은 용해-재침전 메커니즘을 통해 입자 성장을 촉진합니다. 소량의 텅스텐 원자가 액상에 용해되어 입자 접촉 지점에서 재침전되어 소결 넥(sintering neck)을 형성합니다. 입자 성장은 오스트발트 숙성 법칙(Ostwald ripening law)을 따릅니다. 큰 입자는 작은 입자를 삼켜 성장하며, 입자 크기 분포는 더 넓어집니다. 소결

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

온도와 유지 시간은 주요 영향 요인입니다. 온도가 너무 높거나 유지 시간이 너무 길면 과도한 성장과 인성 감소로 이어지고, 온도가 너무 낮으면 액상이 부족하여 입자 성장이 느려지고 밀도가 감소합니다. 니켈-구리 비율(일반적으로 7:3) 또한 액상의 양에 영향을 미칩니다. 니켈 함량이 높으면 액상의 유동성이 증가하고 입자 성장이 촉진되지만 편석이 발생할 수 있습니다. 구리 함량이 높으면 액상의 점도가 낮아지고 성장이 촉진되지만 강도가 저하될 수 있습니다.

소결 후반 단계에서는 고체 확산으로 구조가 더욱 치밀해지고 기공률은 1% 미만으로 감소합니다. 열간 등압 성형은 고압 하에서 입자를 압축하여 과도한 입자 성장을 억제합니다. SEM 분석 결과 입자는 다각형 또는 거의 구형이며, 소결 넥(neck)은 고르게 분포되어 있습니다. XRD 분석 결과 텅스텐은 상당한 상 변화 없이 BCC 구조를 유지함을 확인했습니다. 입자 성장 법칙 제어는 성능에 매우 중요합니다. 적절한 입자 크기는 높은 강도와 인성을 보장하여 의료용 콜리메이터에 적합하며, 더 큰 입자 크기는 높은 밀도를 제공하여 군용 발사체 코어에 적합합니다.

### 2.3.2 열처리에 의한 미세조직 조절

열처리는 텅스텐-니켈-구리 합금의 미세 구조를 조절하는 중요한 수단입니다. 열처리는 결정립 크기, 계면 결합 및 잔류 응력을 조절하여 기계적 성질, 내식성 및 열 안정성을 최적화합니다. 열처리는 일반적으로 소결 후 어닐링, 시효 또는 담금질-템퍼링을 포함한 공정을 거칩니다. 특정 공정은 응용 분야의 요구 사항에 따라 설계됩니다. 어닐링은 가장 일반적으로 사용되는 열처리 방법으로, 소결 및 가공 중 잔류 응력을 제거하고, 인성과 가공 성능을 향상시키는 동시에 합금의 고밀도 및 비자성 특성을 유지하는 것을 목표로 합니다. 어닐링 공정은 확산과 재결정을 통해 미세 구조를 조절합니다. 고온에서는 니켈-구리 결합상(FCC 구조)의 결정 결합(전위 및 결정립계 등)이 확산에 의해 복구되어 내부 응력을 감소시킵니다. 텅스텐 입자(BCC 구조)는 높은 용점(3422°C)으로 인해 상당한 재결정을 겪지 않지만, 계면에 용해된 미량의 텅스텐은 계면을 더욱 매끄럽게 하고 결합 강도(전단 강도 >550 MPa)를 향상시킵니다.

어닐링 온도가 너무 높으면 니켈-구리 상의 결정립 성장이 유도되어 강도가 저하될 수 있으며, 너무 낮으면 응력 완화가 불충분하고 인성 향상이 제한됩니다. 시효 처리는 Ni-Cu 고용체에 미량의 제 2 상(예: Ni<sub>3</sub>Cu)을 석출시켜 결합상의 강도를 향상시킬 수 있지만, 과도한 석출은 취성을 유발하므로 피해야 합니다.

열처리는 내식성과 열전도도를 조절할 수 있습니다. 어닐링 후, 니켈-구리 상 표면에 치밀한 NiO 보호층이 형성되어 내식성이 향상되고(내산성이 20~30% 증가), 의료 장비의 장기 사용에 적합합니다. 열전도도는 결정립계 분포를 최적화하여 5~10% 정도 향상되며, 이는 전자 산업의 방열 부품에 유용합니다. TEM 및 EBSD 분석 결과, 열처리 후 계면 전이층이 더욱 균일해지고, 결정립계 결합이 감소하며, 파단 시 인성(딤플)이 나타나는 것으로 나타났습니다. 품질 관리는 인장 시험(ASTM E8) 및 경도 시험(ASTM E92)을 통해 성능 향상을 검증합니다. 산화물 개재물 생성을 방지하기 위해 고순도 아르곤 가스에서 열처리를 수행해야 합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 제 3 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 물리적 및 화학적 특성

텅스텐-니켈-구리 합금은 고유한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 항공우주, 의료, 전자 및 군사 분야에서 널리 사용되는 고성능, 고밀도 소재입니다. 이 합금은 주로 텅스텐으로 구성되며, 니켈과 구리를 결합상으로 첨가하여 고밀도, 우수한 기계적 특성 및 비자성 구조를 형성합니다. 높은 밀도는 제한된 공간에서 효율적인 질량 분포를 보장하고, 니켈-구리 결합상은 합금에 우수한 인성과 가공성을 부여하며, 비자성 특성은 전자기파에 민감한 환경에서도 우수한 성능을 발휘합니다.

#### 3.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 기계적 성질

텅스텐-니켈-구리 합금은 고성능 응용 분야에서 핵심적인 장점으로, 특히 항공우주용 균형추, 의료용 콜리메이터, 군용 철갑 코어와 같이 기계적 응력, 진동 또는 충격을 견뎌야 하는 경우에 유용합니다. 기계적 특성은 주로 인장 강도, 신장률, 경도 및 피로 저항성을 포함하며, 이는 텅스텐 입자의 높은 경도와 니켈-구리 결합상의 인성의 상승 효과에서 비롯됩니다. 이 합금은 분말 야금법으로 제조되며, 액상 소결 및 열간 등방성 프레스 공정을 통해 치밀한 미세 구조를 형성하여 동적 환경에서 구조적 무결성을 유지합니다. 순수 텅스텐의 취성에 비해 니켈-구리 결합상은 합금의 가소성과 가공성을 크게 향상시켜 복잡한 형상 및 고정밀 제조 요건을 충족합니다.

##### 3.1.1 실은 인장 강도

텅스텐-니켈-구리 합금의 기계적 특성은 합금의 핵심 지표로, 인장 하중 하에서 파괴 저항성을 나타냅니다. 이러한 특성 덕분에 항공우주용 균형추, 군용 발사체 코어, 전자 산업의 균형 블록에서 높은 응력을 견뎌내 부품의 구조적 안정성과 신뢰성을 보장합니다. 텅스텐 입자의 높은 경도와 니켈-구리 결합상의 강화 효과 덕분에 인장 강도가 우수합니다. 주성분인 텅스텐은 견고한 골격 구조를 제공하며, 체심입방 결정 구조는 합금에 매우 높은 경도와 변형 저항성을 부여합니다. 니켈-구리 결합상은 액상 소결을 통해 연속적인 매트릭스를 형성하여 텅스텐 입자 사이의 간극을 메우고 입자 간의 결합력을 향상시키며, 인장 시 응력을 효과적으로 분산시켜 국부 파괴를 방지합니다.

인장 강도의 성능은 합금 조성 및 공정 조건에 의해 공동으로 영향을 받습니다. 텅스텐 함량이 높은 합금(예: 95% 텅스텐)은 일반적으로 텅스텐 입자의 밀도와 경도가 주요 지지체 역할을 하기 때문에 인장 강도가 더 높습니다. 니켈과 구리의 비율도 강도에 중요한 영향을 미칩니다. 니켈은 접합상의 인성과 내식성을 향상시키는 반면, 구리는 열전도도와 비자성 특성을 개선합니다. 적절한 니켈-구리 비율(예: 7:3 또는 3.5:1.5)은 접합상과 텅스텐 입자 사이의 양호한 접합을 보장하여 균일한 미세 구조를 형성하고 응력 집중을 방지합니다. 액상 소결 공정은 고온에서 니켈과 구리의 액상 매트릭스를 형성하고, 텅스텐 입자를 적시고, 소결 넥 형성을 촉진하며, 입자 간의 접합력을 더욱 향상시킵니다.

응용 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 인장 강도는 항공우주 부품의 고주파 진동이나 군용 발사체 코어의 고속 충격을 견뎌낼 수 있도록 합니다. 예를 들어, 항공기 보조의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

균형추에서 합금은 비행 중 동적 하중을 견뎌야 하며, 높은 인장 강도는 부품의 변형이나 파손을 방지합니다. 의료 분야의 방사선 치료 장비에서 콜리메이터는 장기간 사용으로 인한 기계적 응력과 피로를 견뎌야 하며, 높은 인장 강도는 정밀성과 내구성을 보장합니다. 인장 강도 향상의 핵심은 소결 온도 및 유지 시간 제어, 텅스텐 입자의 과도한 성장이나 니켈-구리 상의 편석 방지, 미세 구조의 균일성 확보 등 공정 최적화입니다.

### 3.1.2 신장

파괴 전에 소성 변형을 얼마나 잘 견딜 수 있는지를 나타냅니다. 순수 텅스텐의 취성에 비해 텅스텐-니켈-구리 합금의 연신율은 크게 향상되어 충격이나 진동에 노출되었을 때 취성 파괴가 발생할 가능성이 낮아 수술용 로봇 균형추나 전자 장비 진동 감소 부품과 같이 일정 수준의 인성이 요구되는 응용 분야에 적합합니다. 연신율의 우수한 성능은 주로 니켈-구리 결합상의 인성에 기인합니다. 니켈은 면심 입방 결정 구조로 우수한 소성 변형 능력을 제공하는 반면, 구리는 결합상의 연성을 더욱 향상시켜 합금이 응력을 받을 때 소성 변형을 통해 에너지를 흡수하고 갑작스러운 파괴를 방지할 수 있도록 합니다. 이러한 특성 덕분에 합금은 동적 환경에서 우수한 피로 저항성을 발휘합니다.

연신율은 합금 조성, 미세구조, 그리고 제조 공정의 영향을 받습니다. 니켈 함량이 증가하면 일반적으로 연신율이 증가하는 이유는 니켈이 텅스텐보다 인성이 우수하여 응력을 효과적으로 분산시키고 변형 과정을 지연시킬 수 있기 때문입니다. 그러나 니켈 함량이 너무 높으면 전체 강도가 감소할 수 있으므로 인성과 강도의 균형을 맞춰야 합니다. 구리를 첨가하면 연신율이 더욱 향상되는데, 구리의 높은 연성이 결합상의 경도를 감소시켜 합금이 인장 과정에서 소성 유동에 더 취약해지기 때문입니다. 액상 소결 공정은 고온에서 균일한 니켈-구리 매트릭스를 형성하여 텅스텐 입자 사이의 틈새를 메워 응력 전달과 소성 변형을 촉진하는 연속적인 네트워크 구조를 형성합니다. 열간 등방성 가압 공정은 미세 기공을 제거하고 계면 결합을 최적화하여 합금의 인성과 연신율을 더욱 향상시킵니다. 어닐링과 같은 열처리 공정 또한 잔류 응력을 제거하고 결정립계 구조를 최적화하여 합금의 소성 성능을 향상시킬 수 있습니다.

응용 분야에서 연신율은 합금의 적용 가능성에 직접적인 영향을 미칩니다. 항공우주 분야에서는 균형추가 고주파 진동과 충격을 견뎌야 합니다. 높은 연신율은 부품이 동적 하중 하에서 취성 파괴를 방지하고 수명을 연장합니다. 전자 산업에서는 리소그래피 플랫폼의 밸런스 블록이 미세 진동을 견뎌야 하며, 적절한 연신율은 장기 사용 시 부품의 안정성을 보장합니다. 의료 분야의 차폐 부품은 주로 고밀도에 의존하지만, 적절한 연신율은 가공 및 설치 중 균열 발생 가능성을 줄여줍니다. 공정 최적화는 미량 원소 및 불순물 관리에 중점을 두어야 합니다. 예를 들어, 산소나 탄소와 같은 불순물을 제거하여 취성상을 형성하고 연신율을 낮추는 것이 좋습니다. 표면 처리(연마 또는 코팅 등)는 표면 결함을 줄이고 소성 변형 능력을 향상시킬 수 있습니다. 앞으로 니켈-구리 비율을 정밀하게 제어하고 첨단 제조 기술(적층 제조 등)을 도입하면 신장률을 더욱 최적화하여 높은 인성이 요구되는 상황에서 합금의 성능을 개선할 수 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.1.3 고온 저항성

텅스텐-니켈-구리 합금은 고온 환경에서 중요한 기계적 특성을 지니며, 고온 응력 하에서 합금의 강도 유지 및 구조적 안정성을 반영합니다. 이러한 특성으로 인해 미사일 부품, 터보차저 카운터웨이트 또는 고온 전자 장비의 밸런스 블록과 같이 고온 환경을 견뎌야 하는 항공우주, 군수 산업 및 전자 산업 분야에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 텅스텐의 높은 용점과 니켈-구리 바인더 상의 열 안정성이 시너지 효과를 발휘하여 우수한 고온 내성을 제공합니다. 주성분인 텅스텐은 매우 높은 용점을 가지며 고온에서 결정 구조의 무결성을 유지하고 열 변형 및 연화에 저항할 수 있습니다. 니켈-구리 바인더 상은 안정적인 고용체를 형성하여 합금의 고온 기계적 특성과 내산화성을 더욱 향상시켜 고온 환경에서 장기간 성능을 유지할 수 있도록 합니다.

고온 저항성은 합금 조성 및 미세 구조에 의해 상당한 영향을 받습니다. 텅스텐 함량이 높은 합금은 텅스텐의 체심입방 결정 구조가 매우 높은 열적 안정성을 가지고 있어 고온에서 발생하는 결정립계 미끄러짐이나 전위 이동을 견딜 수 있기 때문에 고온 연화에 대한 저항성이 더 강합니다. 니켈은 결합재 상에 산화 방지 기능을 제공하며, 표면에 형성된 산화층은 산소 침식을 효과적으로 방지하고 합금의 구조적 무결성을 유지합니다. 구리를 첨가하면 결합재 상의 용점은 낮아지지만, 높은 열전도도는 열을 빠르게 분산시키고 국부 과열로 인한 성능 저하를 줄이는 데 도움이 됩니다. 액상 소결 공정은 고온에서 균일한 미세 구조를 형성하며, 텅스텐 입자는 소결 넥을 통해 니켈-구리 결합재 상과 단단히 결합되어 고온에서 계면 결합 강도를 향상시킵니다. 열간 등방성 가압 공정은 미세 기공을 더욱 제거하여 고온에서 기공 확장으로 인한 합금의 파손 가능성을 줄입니다. 어닐링과 같은 열처리 공정은 잔류 응력을 제거하고 결정립계 구조를 최적화함으로써 고온에서의 기계적 안정성을 더욱 향상시킵니다. 실제 응용 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 고온 환경에 이상적인 선택입니다. 예를 들어, 항공우주 분야에서 터보차저나 미사일 카운터웨이트는 고온 가스 또는 마찰로 발생하는 열을 견뎌야 합니다. 이 합금의 고온 저항성은 부품이 극한 조건에서도 형태와 강도를 유지하도록 보장합니다. 전자 산업에서 고온 전자 장비(예: 리소그래피 장비의 열 관리 부품)는 고온에서 치수 안정성을 유지하는 재료가 필요합니다. 이 합금의 낮은 열팽창 특성과 고온 저항성은 이러한 요구를 충족합니다. 고온 저항성을 향상시키려면 공정 최적화가 필수적입니다. 예를 들어, 소결 온도와 분위기를 제어하고, 산화물 개재물이나 과도한 결정립 성장을 방지하고, 미세 구조의 안정성을 유지하는 것이 중요합니다. 미량 원소(예: 몰리브덴)를 첨가하면 고온 강도를 더욱 향상시킬 수 있지만, 계면 취성을 방지하기 위해 과도한 첨가는 피해야 합니다. 품질 관리 부서는 고온 인장 시험 및 열 사이클링 시험을 통해 합금의 성능 안정성을 검증하여 고온 환경에서의 신뢰성을 보장합니다.

### 3.1.4 충격 인성

충격 인성은 텅스텐-니켈-구리 합금이 갑작스러운 충격이나 동적 하중을 받았을 때 파괴에 저항하는 능력으로, 고응력 환경에서의 인성과 신뢰성을 반영합니다. 이 특성은 항공우주용 균형추, 군용 철갑탄 코어, 의료 장비용 콜리메이터와 같은 응용 분야에서

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

특히 중요하며, 진동, 충격 또는 과도 하중 하에서 부품이 취성 파괴되지 않도록 보장합니다. 순수 텅스텐의 취성과 비교했을 때, 텅스텐-니켈-구리 합금의 충격 인성은 니켈-구리 결합상의 소성 효과로 인해 크게 향상됩니다. 니켈의 인성은 충격 시 에너지를 흡수하고 소성 변형을 통해 응력을 분산시키는 기능을 하며, 구리의 높은 연성은 결합상의 균열 저항성을 더욱 향상시켜 합금이 충격 시 우수한 인성 파괴 거동을 나타낼 수 있도록 합니다.

충격 인성은 합금 조성, 미세 구조 및 제조 공정의 영향을 받습니다. 텅스텐 입자는 높은 경도와 강도를 제공하여 합금의 견고한 골격을 형성하지만, 니켈-구리 결합상이 이러한 취성을 보완해야 합니다. 니켈-구리 결합상은 텅스텐 입자를 감싸는 연속적인 매트릭스를 형성하여 계면 결합을 통해 충격 에너지를 효과적으로 전달하고 분산시킵니다. 니켈 함량을 증가시키면 일반적으로 충격 인성이 향상되는데, 이는 니켈의 면심입방 구조가 우수한 소성 변형 능력을 가지고 충격 시 덩이를 형성하여 에너지를 흡수할 수 있기 때문입니다. 구리를 첨가하면 인성이 더욱 향상되고, 구리의 연성은 결합상의 경도를 감소시켜 충격 시 취성 파괴보다는 소성 유동에 더 취약하게 만듭니다. 액상 소결 공정은 입자 간의 결합력을 향상시키고 균일한 소결 핵과 치밀한 미세 구조(기공률 <1%)를 형성하여 충격 시 계면 탈착을 방지합니다. 열간 등방성 압축 공정은 구조를 압축하여 충격 인성을 더욱 향상시키고 미세 균열의 시작점을 줄입니다.

적용 시나리오에서 충격 인성은 합금의 신뢰성과 내구성을 직접적으로 결정합니다. 항공우주 분야에서 항공기 또는 헬리콥터의 균형추는 이륙, 착륙 또는 난류로 인한 진동과 충격을 견뎌야 합니다. 높은 충격 인성은 부품이 과도 하중으로 인해 파손되지 않도록 보장합니다. 군용 철갑탄 코어의 경우, 합금은 고속 충격(초속 1500~1800m/s)을 견뎌야 하며, 우수한 충격 인성은 코어가 장갑을 관통할 때 무결성을 유지하도록 보장합니다. 의료 장비의 경우, 콜리메이터 또는 수술 로봇 부품이 우발적으로 충격을 받을 수 있으며, 충격 인성은 정확도와 기능에 영향을 미치지 않도록 보장합니다. 공정 최적화는 인성을 저하시키는 취성 상 형성을 방지하기 위해 미량 불순물(예: 탄소 또는 산소) 제어에 중점을 두어야 합니다. 표면 처리(예: 연마 또는 코팅)는 표면 결합을 줄이고 충격 저항성을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

### 3.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 열 및 전기적 특성

텅스텐-니켈-구리 합금의 열적 및 전기적 특성은 첨단 기술 분야, 특히 효율적인 열 관리 또는 전자기 호환성이 요구되는 전자 산업의 리소그래피 기계 밸런스 블록, 의료용 CT/MRI 차폐 부품, 항공우주 산업의 고온 부품 등에 적용하는 데 중요한 기반이 됩니다. 열적 특성에는 주로 열전도도와 열팽창 특성이 포함되며, 이는 고온 환경에서 합금의 방열 성능과 치수 안정성을 결정합니다. 전기적 특성은 주로 전기 전도성과 비자성으로 나타나 합금이 전자기적으로 민감한 환경에서 간섭을 일으키지 않도록 합니다. 이러한 특성은 텅스텐의 높은 열적 안정성과 니켈-구리 결합상의 우수한 열 및 전기 전도성에서 비롯되며, 분말 야금 공정의 최적화를 통해 시너지 효과를 발휘합니다. 열적 특성 측면에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 열전도도를 가지고 있어 열을 빠르게 분산시키고 국부 과열을 방지할 수 있습니다. 이는 구리의 높은 열전도도와 니켈-구리 고용체의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

균일한 분포 때문입니다. 텅스텐 입자의 높은 열 안정성은 고온에서 합금의 구조적 무결성을 더욱 보장합니다. 낮은 열팽창 계수는 온도 변화에도 합금이 치수 안정성을 유지하여 열응력으로 인한 변형을 방지합니다. 특히 리소그래피 기계 플랫폼이나 의료 장비와 같이 매우 높은 정밀도가 요구되는 응용 분야에 적합합니다. 생산 공정에서 액상 소결 및 열간 등방성 성형은 미세 구조의 치밀성을 보장하고 열전도 시 결정립계 저항을 줄입니다. 열처리 공정은 낮은 열팽창 특성을 유지하면서 결정립계 구조를 최적화하여 열전도도를 더욱 향상시킵니다.

전기적 특성 측면에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 비자성 특성은 가장 큰 장점으로, 니켈과 구리의 상자성 특성으로 인해 전자기 간섭을 피하고 MRI 장비, 리소그래피 기계 및 레이저 시스템과 같은 전자기적으로 민감한 환경에서 우수한 성능을 발휘할 수 있습니다. 합금의 전기 전도도는 순수 구리보다 낮지만 대부분의 전자 응용 분야의 요구 사항을 충족하기에 충분하며 특히 고밀도와 전자기 호환성을 고려해야 하는 시나리오에서 그렇습니다. 니켈-구리 바인더 상의 전도도는 합금에 안정적인 전기적 특성을 제공하는 반면 텅스텐 입자의 낮은 전도도는 미세 구조의 최적화를 통해 보상됩니다. 공정 제어는 전도도 또는 비자성에 영향을 미치는 산화물 개재물이나 편석을 피해야 합니다. 표면 코팅(예: PVD TiN)은 합금을 환경 부식으로부터 추가로 보호하고 전기적 특성의 안정성을 유지할 수 있습니다.

### 3.2.1 열전도도

텅스텐-니켈-구리 합금은 열 성능의 핵심 지표로, 합금이 열을 빠르게 전도하고 분산시키는 능력을 반영합니다. 이러한 특성은 전자 산업의 리소그래피 기계 밸런스 블록, 의료 장비의 방사선 차폐, 고온 항공우주 부품과 같이 효율적인 열 관리가 필요한 응용 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 우수한 열전도도 성능은 주로 구리의 높은 열전도도와 니켈-구리 결합상의 상승 효과에 기인합니다. 열전도도가 높은 금속인 구리는 열원에서 다른 영역으로 열을 빠르게 전달하여 국부 과열을 방지할 수 있으며, 니켈을 첨가하면 안정적인 고용체를 형성하여 결합상의 열전도도를 향상시킵니다. 텅스텐은 구리보다 열전도도가 낮지만, 높은 열 안정성 덕분에 고온에서 구조적 무결성을 유지하고 열 응력으로 인한 변형이나 파손을 방지할 수 있습니다.

열전도도는 합금 조성 및 미세 구조에 의해 상당한 영향을 받습니다. 니켈-구리 결합상의 비율은 열전도도 성능을 직접적으로 결정합니다. 구리 함량이 높은 합금은 일반적으로 구리의 열전도도가 텅스텐과 니켈의 열전도도를 훨씬 능가하기 때문에 더 나은 열전도도를 갖습니다. 그러나 과도한 구리 함량은 합금의 전반적인 강도를 저하시킬 수 있으므로 열전도도와 기계적 특성 간의 균형을 찾아야 합니다. 액상 소결 공정은 고온에서 균일한 니켈-구리 매트릭스를 형성하고, 텅스텐 입자 사이의 간극을 채우고, 결정립계와 기공의 열전도 저항을 줄여 열전도도를 향상시킵니다. 열간 등방성 가압 공정은 미세 기공을 제거하여 미세 구조의 밀도를 최적화하고 열 전달을 원활하게 합니다. 어닐링과 같은 열처리 공정 또한 결정 결함을 복구하고 결정립계 구조를 최적화하여 열전도도를 효과적으로 향상시키고, 고온 환경에서 합금의 성능 안정성을 보장합니다. 실제 응용 분야에서 열전도도는 첨단 기술 분야의 합금 성능에 직접적인 영향을 미칩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

예를 들어, 리소그래피 플랫폼에서 합금은 나노미터 미만의 정밀도를 유지하기 위해 레이저나 모터에서 발생하는 열을 빠르게 분산시켜야 합니다. 뛰어난 열전도도는 플랫폼의 열 안정성을 보장합니다. 의료용 CT 장비에서 차폐 부품은 고에너지 방사선 하에서 열을 발생시킵니다. 높은 열전도도는 열을 빠르게 방출하여 장비의 과열이나 성능 저하를 방지합니다. 항공우주 분야에서는 미사일이나 터빈 부품이 고온 가스 환경에서 작동합니다. 합금의 열전도도는 부품의 열 관리 기능을 보장하고 수명을 연장합니다. 공정 최적화는 열전도도를 저하시키는 산화물 개재물이나 편석을 방지하기 위해 원료 순도 및 소결 매개변수에 주의를 기울여야 합니다.

### 3.2.2 전도도

텅스텐-니켈-구리 합금은 합금의 전류 전도 능력을 반영하는 전기적 특성의 중요한 지표입니다. 순수 구리보다 전기 전도도가 낮지만 대부분의 전자 및 의료 응용 분야, 특히 고밀도 및 전자기 호환성을 고려해야 하는 시나리오의 요구를 충족하기에 충분합니다. 적당한 전기 전도도 성능은 니켈-구리 결합 상의 전도도와 텅스텐 입자의 비교적 낮은 전도도 사이의 균형에서 비롯됩니다. 고전도성 금속인 구리는 합금의 주요 전류 전도 경로를 제공하는 반면, 니켈을 첨가하면 안정적인 Ni-Cu 고용체를 형성하여 적당한 전기 전도도를 유지합니다. 텅스텐의 높은 저항 특성은 전체 전도도를 감소시키지만, 높은 밀도와 비자성으로 인해 전자기적으로 민감한 환경에서 자기 간섭을 완전히 방지하는 고유한 이점을 제공합니다.

전기 전도도 성능은 합금 조성, 미세 구조 및 생산 공정의 영향을 받습니다. 구리 함량이 높은 합금은 일반적으로 구리의 전기 전도도가 니켈과 텅스텐보다 훨씬 높기 때문에 전기 전도도가 더 높습니다. 그러나 구리 함량이 너무 높으면 강도가 저하될 수 있으므로, 니켈-구리 비율(예: 7:3 또는 3.5:1.5)을 최적화하여 전기 전도도와 기계적 특성 간의 균형을 맞춰야 합니다. 액상 소결 공정은 결정립계 저항을 줄이고 연속적인 니켈-구리 매트릭스를 형성하여 원활한 전류 전달을 촉진합니다. 열간 등방성 가압 성형 공정은 미세 구조의 밀도를 더욱 향상시키고 기공 및 개재물이 전도도에 미치는 부정적인 영향을 제거합니다. 불순물 관리는 매우 중요합니다. 예를 들어, 산소나 탄소와 같은 불순물은 비전도성 산화물이나 탄화물을 형성하여 전도도를 저하시킬 수 있습니다. 따라서 소결에는 고순도 원료(텅스텐 >99.9%)와 고순도 아르곤 분위기가 필요합니다. 응용 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 적당한 전도성과 비자성으로 인해 전자 산업 및 의료 분야에서 우수한 성능을 발휘합니다. 예를 들어, MRI 장비에서 합금의 차폐 부분은 자기장 간섭을 피해야 하며, 적당한 전도성과 비자성 특성이 결합되어 장비의 높은 감도와 정밀도를 보장합니다. 리소그래피 장비에서 밸런스 블록의 전도성은 전자기 환경에서의 정상적인 작동을 지원하고 정전기 축적이나 간섭을 방지합니다. 공정 최적화는 전도성을 저하시키는 편석이나 결합을 방지하기 위해 미세 구조의 균일성에 중점을 두어야 합니다.

### 3.2.3 열팽창계수

텅스텐-니켈-구리 합금은 열 성능의 핵심적인 특징으로, 온도 변화에 따른 합금의 치수

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

안정성을 반영합니다. 낮은 열팽창 계수는 리소그래피 플랫폼, 의료용 콜리메이터, 항공우주용 균형추와 같이 높은 정밀도와 열 안정성이 요구되는 응용 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 낮은 열팽창 성능은 주로 텅스텐의 고유한 낮은 열팽창 특성과 니켈-구리 결합상의 적절한 연성 덕분에 가능합니다. 이러한 특성은 온도 변화에도 합금이 형태와 치수 안정성을 유지하여 열 응력으로 인한 변형이나 균열을 방지합니다.

열팽창 계수는 합금 조성 and 미세 구조 모두의 영향을 받습니다. 텅스텐은 높은 용점과 체심입방 구조로 인해 매우 낮은 열팽창률을 가지며, 이는 합금의 전반적인 열팽창 특성을 좌우합니다. 니켈과 구리는 텅스텐보다 열팽창 계수가 높지만, 적절한 비율 설계를 통해 결합상이 열팽창에 미치는 영향을 최소화합니다. 액상 소결 공정은 균일한 미세 구조를 형성하고, 텅스텐 입자는 소결 벽을 통해 니켈-구리 매트릭스에 단단히 결합되어 결정립계 슬라이딩이나 열응력 집중을 줄입니다. 열간 등방성 가압 공정은 미세기공을 제거하여 구조의 밀도와 열 안정성을 더욱 향상시킵니다. 어닐링과 같은 열처리 공정은 결정립계 구조를 최적화하고 잔류 응력을 제거하여 열 사이클 동안 합금의 치수 안정성을 향상시키고, 온도 변화로 인한 미세균열을 방지합니다.

실제 응용 분야에서 낮은 열팽창 계수는 텅스텐-니켈-구리 합금을 고정밀 장비에 이상적인 선택으로 만듭니다. 예를 들어, 포토리소그래피 장비에서 플랫폼은 레이저 가열 및 냉각 사이클 동안 나노미터 미만의 정밀도를 유지해야 합니다. 낮은 열팽창 계수는 플랫폼의 안정성을 보장하고 패턴 조각에 영향을 미치는 열 변형을 방지합니다. 항공우주 분야에서는 평형추가 고온 가스 또는 저온 환경에서 작동하며, 낮은 열팽창 계수는 무게 중심의 안정성을 보장합니다. 의료 장비의 콜리메이터는 방사선에서 발생하는 열에도 형태를 유지해야 하며, 낮은 열팽창 특성은 정확도와 신뢰성을 보장합니다. 공정 최적화는 전체 성능에 영향을 미치는 불순물 ( 산소 또는 탄소 등)이 고폭창 상을 형성하는 것을 방지해야 합니다.

### 3.2.4 방열 성능

텅스텐 -니켈 구리 합금은 열 성능을 종합적으로 반영합니다. 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수의 장점을 결합하여 열을 빠르게 분산시키고 치수 안정성을 유지합니다. 이러한 성능은 전자 산업의 포토리소그래피 장비의 열 관리 부품, 의료 장비의 방사선 차폐, 항공우주 산업의 고온 부품과 같이 효율적인 열 관리가 필요한 응용 분야에 탁월합니다. 구리의 높은 열전도도와 니켈-구리 매트릭스의 균일한 분포 덕분에 탁월한 방열 성능을 발휘하며, 열원에서 외부로 열을 빠르게 전달하여 국부 과열을 방지합니다. 동시에 낮은 열팽창 특성은 열 사이클 동안 부품이 변형되거나 파손되지 않도록 보장합니다.

방열 성능은 합금 조성, 미세 구조, 그리고 생산 공정의 영향을 받습니다. 구리 함량을 높이면 구리가 텅스텐이나 니켈보다 열전도도가 훨씬 높고 열을 빠르게 전달할 수 있기 때문에 방열 효율이 크게 향상됩니다. 니켈을 첨가하면 안정적인 Ni-Cu 고용체가 형성되어 결합상의 열전도도를 높이고 고온 산화로 인한 방열 성능 저하를 방지하는 항산화 보호 효과를 제공합니다. 텅스텐 입자의 높은 열 안정성은 고온에서 합금의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

구조적 무결성을 보장하여 열 연화 또는 성능 저하를 방지합니다. 액상 소결 공정은 연속적인 니켈-구리 매트릭스를 형성하여 결정립계와 기공의 열전도 방해를 줄입니다. 열간 등방성 성형 공정은 미세 구조의 밀도를 더욱 향상시키고 열전도에 대한 미세 기공 저항을 제거합니다. 표면 처리(예: 고열전도도 코팅 또는  $Ra < 0.4 \mu m$  의 연마)는 표면 방열 효율을 높이고 열이 주변 환경으로 전달되는 것을 가속화할 수 있습니다.

실제 응용 분야에서 방열 성능은 첨단 기술 분야에서 합금의 적용 가능성을 직접적으로 결정합니다. 포토리소그래피 장비에서 밸런스 블록은 레이저 또는 모터에서 발생하는 열을 신속하게 분산시켜야 하며, 우수한 방열 성능은 플랫폼의 열 안정성과 정확성을 보장합니다. 의료용 CT 장비에서 차폐 부품은 고에너지 방사선 하에서 열을 발생시키며, 효율적인 방열은 장비의 과열을 방지하고 수명을 연장합니다. 항공우주 분야에서 터빈 또는 미사일 부품은 고온 가스 환경에서 작동하며, 방열 성능은 부품의 신뢰성과 내구성을 보장합니다. 공정 최적화는 방열 효율을 저하시키는 산화물 개재물이나 편석을 방지하기 위해 원료 순도 및 소결 변수에 주의를 기울여야 합니다.

### 3.3 텅스텐-니켈-구리 합금의 화학적 안정성

텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도, 우수한 기계적 특성, 비자성 특성, 그리고 뛰어난 열적 및 전기적 특성으로 인해 항공우주, 의료, 전자 및 군사 분야에서 널리 사용됩니다. 이 합금은 분말 야금 공정으로 제조되며, 텅스텐을 주성분으로 하고 니켈과 구리를 결합상으로 첨가하여 치밀한 미세 구조를 형성하고 우수한 화학적 안정성을 보입니다. 화학적 안정성은 주로 내식성과 내산화성에 반영되어 습도, 산성 또는 고온과 같은 가혹한 환경에서도 장기간 성능을 유지합니다. 이러한 안정성은 텅스텐의 화학적 불활성과 니켈-구리 결합상의 보호 효과에 기인하며, 고신뢰성 응용 분야의 요구를 충족합니다.

#### 3.3.1 내식성

텅스텐-니켈-구리 합금은 화학적 안정성을 나타내는 중요한 지표로, 습기, 산 또는 염분 분무와 같은 부식성 환경에서 화학적 침식에 대한 저항성을 나타냅니다. 이러한 특성 덕분에 의료 장비, 해양 공학, 전자 산업(의료용 CT 차폐, 선박 균형추 또는 전자 장비 하우징 등)과 같이 장기간 안정적인 작동이 요구되는 환경에서 우수한 성능을 발휘합니다. 텅스텐의 우수한 내식성은 주로 텅스텐의 화학적 불활성과 니켈의 내식성이 시너지 효과를 발휘하기 때문입니다. 주성분인 텅스텐은 화학적 안정성이 매우 뛰어나 대부분의 산성 또는 알칼리성 환경에서 반응하기 어려운 합금의 내식성을 뒷받침합니다. 니켈은 결합 단계에서 안정적인 보호층을 형성하여 외부 화학 물질의 침식을 효과적으로 방지하고 합금의 수명을 연장합니다.

내식성은 합금 조성, 미세구조, 그리고 표면 상태의 영향을 받습니다. 니켈은 니켈-구리 결합 단계에서 중요한 역할을 합니다. 면심입방 구조와 산화 방지 특성 덕분에 습하거나 산성 환경에서 치밀한 산화물 보호층을 형성하여 부식성 매질의 추가 침투를 방지합니다. 구리를 첨가하면 열전도도와 비자성이 향상되지만, 내식성은 니켈보다 약간 떨어집니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

질산과 같은 일부 산성 환경에서는 경미한 부식이 발생할 수 있습니다. 따라서 적절한 니켈-구리 비율(예: 7:3 또는 3.5:1.5)을 통해 전반적인 내식성을 최적화해야 합니다. 액상 소결 공정은 고온에서 균일한 니켈-구리 매트릭스를 형성하고, 텅스텐 입자 사이의 간극을 메우며, 미세기공과 결정립계 노출을 줄이고, 부식성 매질의 침투 경로를 줄입니다. 열간 등압 성형 공정은 미세 구조의 밀도를 더욱 향상시키고, 합금 표면을 더욱 매끄럽게 만들며, 부식의 시작점을 줄입니다. 연마 또는 화학적 부동태화와 같은 표면 처리 공정은 내식성을 더욱 강화하고 더욱 치밀한 보호층을 형성할 수 있으며, 이는 멸균 환경에서의 의료 장비를 장기간 사용하는 데 특히 적합합니다.

실제 응용 분야에서 내식성은 합금의 신뢰성과 내구성을 직접적으로 결정합니다. 의료 분야에서 CT 또는 MRI 장비의 차폐 부품은 소독제나 습한 환경에 장시간 노출되어야 합니다. 뛰어난 내식성은 부품의 표면 무결성과 기능적 안정성을 보장합니다. 해양 공학 분야에서 선박의 균형추는 해수나 염분 분무에 노출될 수 있습니다. 합금의 내식성은 재료 열화를 방지하고 수명을 연장합니다. 전자 산업에서 하우징 또는 균형추는 생산 환경의 화학 물질에 대한 내성을 가져야 합니다. 내식성은 장비의 장기적인 작동을 보장합니다. 공정 최적화는 산소나 황과 같은 불순물이 쉽게 부식되는 상을 형성하지 않도록 원자재 순도를 엄격하게 관리해야 합니다. 표면 코팅(예: PVD, TiN 또는 DLC)은 특히 혹독한 화학 환경에서 내식성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 품질 관리는 합금이 산업 표준(예: ISO 9227)을 충족하는지 확인하기 위해 염분 분무 시험 및 침지 실험을 통해 내식성을 검증합니다.

### 3.3.2 항산화 특성

텅스텐-니켈-구리 합금은 화학적 안정성이라는 또 다른 주요 특징으로, 고온 또는 산화성 분위기에서 산화 반응에 저항하는 합금의 능력을 반영합니다. 이러한 특성은 고온 항공우주 부품, 전자 산업의 열 관리 부품, 그리고 터빈 카운터웨이트, 포토리소그래피 장비용 방열판, 미사일 차폐막과 같은 군용 장비에 상당한 이점을 제공합니다. 내산화성이 우수한 것은 주로 니켈의 내산화성과 텅스텐의 열 안정성 때문입니다. 니켈은 고온에서 치밀한 산화 보호층을 형성하여 산소가 내부 구조를 더 이상 부식시키지 못하도록 합니다. 텅스텐은 높은 용점과 화학적 불활성을 가지고 있어 고온에서 구조적 무결성을 유지하고 산화로 인한 성능 저하를 방지합니다. 구리는 내산화성이 약하지만, 니켈의 보호 하에 그 부정적인 영향이 최소화됩니다.

내산화성은 합금 조성, 미세 구조 및 공정 조건에 따라 크게 영향을 받습니다. 니켈은 니켈-구리 바인더상에서 주요 산화 방지제 역할을 합니다. 니켈의 산화물층 (NiO)은 고온(<1000°C)에서 확산 속도가 낮아 산소 침투를 효과적으로 차단하고 내부 텅스텐 입자와 니켈-구리 매트릭스를 보호할 수 있습니다. 텅스텐의 높은 열 안정성은 내산화성을 더욱 향상시킵니다. 고온 환경에서도 체심입방 구조는 안정적으로 유지되어 산화 부식에 강합니다. 구리는 산화 분위기에서 구리 산화물 (CuO 또는 Cu<sub>2</sub>O)을 형성할 수 있지만, 니켈의 보호 효과는 적절한 니켈-구리 비율(예: 7:3)을 통해 구리 산화를 효과적으로 억제할 수 있습니다. 액상 소결 공정은 고온에서 치밀한 미세 구조를 형성하여 기공과 결정립계 노출을 줄이고 산소 침투 경로를 줄입니다. 열간 등방성 성형

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

공정은 미세 기공을 제거하여 구조 밀도를 더욱 향상시키고 합금 표면의 산화를 방지합니다.

실제 응용 분야에서 내산화성은 고온 환경에서 합금의 신뢰성과 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. 항공우주 분야에서 터빈이나 미사일 부품은 고온 가스 환경에서 작동합니다. 우수한 내산화성은 균형추나 차폐 부품의 표면 무결성을 보장하고 산화로 인한 변형이나 파손을 방지합니다. 전자 산업에서 포토리소그래피 장비의 방열 부품은 레이저나 모터에서 발생하는 열을 견뎌야 하며, 내산화성은 장기간 고온 작동 시 안정성을 보장합니다. 군용 장비에서 차폐 부품은 고온 산화 분위기에 노출될 수 있으며, 합금의 내산화성은 전자파 차폐 기능을 유지합니다. 공정 최적화는 탄소나 황과 같은 불순물이 쉽게 산화되는 상을 형성하지 않도록 불순물 관리에 중점을 두어야 합니다. 표면 처리(화학적 부동태화 또는 산화 방지 코팅 등)는 특히 고온 순환 환경에서 내산화성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 품질 관리 부서는 고온 산화 시험과 열중량 분석(TGA)을 통해 산화 저항성을 검증하여 합금이 항공우주 또는 전자 산업의 표준을 충족하는지 확인합니다.

### 3.4 CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금 MSDS

물질안전보건자료(MSDS)는 텅스텐-니켈-구리 합금의 물리적 및 화학적 특성과 안전 사용 지침을 기술한 중요한 문서로, 사용자와 운영자에게 안전한 취급 및 응급 조치에 대한 지침을 제공합니다. CTIA GROUP LTD 에서 생산하는 텅스텐-니켈-구리 합금(W-Ni-Cu)은 항공우주, 의료, 전자 및 군수 산업에서 널리 사용되는 고밀도 합금입니다. 높은 밀도, 우수한 기계적 특성, 비자성 특성, 그리고 우수한 열전도도로 인해 많은 사랑을 받고 있습니다.

#### 1. 제품 정보

제품명 : 텅스텐 니켈 구리 합금(W-Ni-Cu 합금)

별칭 : 고밀도 텅스텐 합금, 텅스텐 중합금

용도 : 항공우주용 균형추, 의료용 방사선 차폐 부품, 전자산업용 방열판 및 밸런스 블록 등에 사용

#### 2. 위험 식별

텅스텐 니켈 구리 합금은 일반적으로 정상적인 사용 조건(관, 막대 또는 기계 가공 부품과 같은 고체 형태)에서 유해 물질로 간주되지 않으며, GHS(글로벌 통합 분류 및 표시 체계)에 따라 유해 물질로 분류되지 않습니다.

#### 3. 구성/성분 정보

텅스텐 니켈 구리 합금은 복합 소재이며 구성 요소는 다음과 같습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 텅스텐(W): 주성분은 90%-97%를 차지하며 높은 밀도와 높은 경도를 제공합니다.
- 니켈(Ni): 결합상, 2~7% 차지, 인성 및 내식성 향상.
- 구리(Cu): 결합상 1~5%를 차지하며, 열전도도와 비자성 특성을 향상시킵니다.
- 미량 원소 : 생산 공정에 따라 미량의 코발트, 몰리브덴 또는 기타 불순물(<0.5%)이 포함될 수 있습니다.

## 5. 소방대책

텅스텐-니켈-구리 합금은 폭발 위험이 없는 불연성 재료입니다.

## 6. 누출의 응급 처리

텅스텐-니켈-구리 합금은 누출 위험이 없는 견고한 소재입니다.

## 7. 취급 및 보관

- 안전한 작업 : 처리 작업은 환기가 잘 되는 환경에서 수행해야 하며 작업자는 보호 안경과 장갑을 착용해야 합니다.
- 보관 조건 : 건조하고 서늘한 곳에 보관하고, 습기나 고온을 피하십시오. 운송 및 보관 중 손상을 방지하기 위해 제품 포장은 충격 방지용(나무 상자 또는 쿠션 등)이어야 합니다.

## 8. 물리적 및 화학적 특성

- 외관 : 표면이 매끈하거나 특정 모양(예: 판, 막대, 블록)으로 가공된 은회색 금속 고체입니다.
- 냄새 : 무취.
- 녹는 점 : 텅스텐은 매우 높은 녹는점(약 3422°C)을 가지고 있으며, 니켈-구리 결합상의 녹는점은 약 1300~1450°C입니다.
- 밀도 : 높은 밀도, 일반적인 값은 16.5-18.5 g/cm<sup>3</sup>입니다.
- 용해도 : 물에 녹지 않으며 산과 알칼리 부식에 강하고 일부 산성 환경(질산 등)에서는 구리가 약간 부식될 수 있습니다.
- 화학적 안정성 : 실온에서는 안정합니다. 고온에서는 니켈이 보호 산화막을 형성하여 산화 저항성을 향상시킵니다.

## 9. 안정성 및 반응성

- 안정성 : 일반적인 사용 및 보관 조건에서 안정적이며 분해 위험이 없습니다.
- 반응성 : 물, 공기 또는 일반 화학물질과 격렬하게 반응하지 않습니다.
- 피해야 할 조건 : 고온 산화 환경이나 강산(예: 농축 질산)과의 장기간 접촉을 피하세요. 이러한 환경은 구리를 약간 부식시킬 수 있습니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 10. 폐기 고려 사항

- 폐기물 처리 : 현지 환경 규정(예: 중국 GB 5085 또는 국제 유해 폐기물 기준)에 따라 분류 및 재활용하십시오. 텅스텐, 니켈, 구리는 화학적 용해 또는 전기화학적 분리 방법을 사용하여 재활용하는 것이 좋습니다.
- 포장재 폐기 : 포장재(나무 상자나 플라스틱 등)는 현지 규정에 따라 재활용하거나 폐기해야 합니다.

## 11. 배송 정보

- 운송 분류 : 위험물이 아니며 특별 운송 요구 사항 없음.
- 포장 요구 사항 : 운송 중 손상이 발생하지 않도록 충격 및 습기 방지 포장재(예: 나무 상자 또는 폼 충전재)를 사용하세요.

## 12. 규제 정보

- 국제 규정 : OSHA 위험 통신 표준 (29CFR1910.1200) 및 GHS 요구 사항을 준수합니다.
- 중국 규정 : 유해 화학물질 안전 관리 규정 및 GB/T 26038-2010(텅스텐 합금 표준)을 준수합니다.
- 기타 : 니켈은 REACH 규정을 따르며, 함량을 신고해야 합니다. 합금 전체에는 특별한 화학 물질 등록이 필요하지 않습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

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

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



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### 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-니켈-구리 합금의 성능 시험 및 표준

고밀도 재료인 텅스텐-니켈-구리 합금은 우수한 기계적 특성(인장 강도 700-900 MPa, 신장 5%-15%), 비자성 특성, 우수한 열전도도(120-150 W/ m·K ) 및 화학적 안정성으로 인해 항공우주, 의료, 전자 및 군사 분야에서 널리 사용됩니다. 성능이 엄격한 적용 요구 사항(예: 항공우주 균형추 또는 의료용 차폐 부품)을 충족하는지 확인하기 위해 정밀한 성능 시험 방법 및 국제 표준을 통해 품질 관리를 수행해야 합니다. 성분 분석은 성능 시험의 핵심 링크이며 합금의 밀도, 기계적 특성 및 비자성 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 성분 분석은 주요 원소(텅스텐, 니켈, 구리)의 비율을 검증할 뿐만 아니라 미량 불순물을 감지하여 합금의 순도와 성능 일관성을 보장합니다.

### 4.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 조성 분석 방법

텅스텐 -니켈-구리 합금은 품질 관리의 기초입니다. 주요 원소(텅스텐 85%-97%, 니켈 2%-10%, 구리 1%-8%)의 비율이 설계 요구 사항을 충족하는지 확인하고 미량 불순물(산소, 탄소, 황 등)이 성능에 영향을 미치지 않는지 확인하는 데 사용됩니다. 조성 분석 방법에는 주로 분광 분석, 화학 분석, 표면 분석 기술이 포함되며, 이 중 분광 분석은 높은 정밀도, 신속성, 비파괴성으로 인해 가장 많이 선택됩니다. 분석 결과는 항공우주 균형추, 의료용 폴리메이터 또는 전자 산업 밸런스 블록에서 합금의 신뢰성을 보장하기 위해 국제 표준(예: ASTM B777 또는 GB/T 26038)을 충족해야 합니다. 검출 프로세스는 깨끗한 환경에서 수행해야 하며 결과의 정확성을 보장하기 위해 고순도 교정 샘플을 사용해야 합니다.

#### 4.1.1 분광분석 기술

분광 분석 기술은 텅스텐-니켈-구리 합금의 조성을 분석하는 핵심 방법입니다. 특정 파장에서 시료가 방출하거나 흡수하는 스펙트럼을 측정하여 원소의 종류와 함량을 결정합니다. 이 방법은 높은 감도(검출 한계가 ppm 수준에 도달할 수 있음), 빠른 분석 속도(단일 분석 <5 분), 그리고 여러 원소를 동시에 검출할 수 있는 능력으로 인해 합금 생산 및 품질 관리에 널리 사용됩니다. 분광 분석 기술에는 X 선 형광 분광법(XRF), 유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광법, 원자 흡광 분광법(AAS)이 있으며, 그중 XRF 와 ICP-AES 가 가장 일반적으로 사용되는 방법으로 텅스텐, 니켈, 구리의 함량 및 미량 원소 분포를 확인하는 데 적합합니다.

X 선 형광 분광법(XRF)은 X 선을 이용하여 시료 표면의 원자를 여기시켜 특징적인 형광을 생성하고, 파장과 세기를 분석하여 원소 함량을 결정하는 비파괴 분석 기법입니다. XRF 는 고체 합금 시료(예: 판, 막대 또는 가공 부품)에 적합하며, 복잡한 전처리가 필요하지 않고 텅스텐, 니켈, 구리의 비율을 빠르게 검출할 수 있습니다(정확도  $\pm 0.2\%$ ). XRF 의 장점은 조각이 간편하고 생산 현장에서 실시간 품질 관리에 적합하다는 것입니다. 예를 들어, 항공우주용 균형추 생산에서 XRF 는 합금 조성이 ASTM B777 표준을 충족하는지 신속하게 검증하여 밀도와 비자성 특성이 표준을 충족하는지 확인할 수 있습니다. XRF 의 한계는 탄소, 산소와 같은 가벼운 원소의 검출 감도가 낮다는 점이며, 보완 분석을 위해

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다른 방법과 결합해야 한다는 점입니다.

유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광법(ICP-AES)은 시료를 용해하고, 플라즈마 여기를 유도하고, 방출 스펙트럼을 측정하여 원소 함량을 측정하는 고정밀 분석 기술입니다. ICP-AES 는 텅스텐-니켈-구리 합금의 주요 원소 및 미량 원소 검출에 적합하며, 검출 한계는 최대 ppb 수준입니다. 시료는 질산이나 왕수와 같은 산 용해 전처리를 거쳐 용액에 용해하여 분석해야 합니다. ICP-AES 는 여러 원소를 동시에 검출할 수 있으며, 실험실 환경에서 포괄적인 성분 분석에 적합합니다. 예를 들어, 의료용 차폐 부품 생산 시 ICP-AES 는 니켈 함량이 ISO 10993 생체 적합성 요건을 충족하는지 확인하고 과도한 니켈로 인한 알레르기 위험을 방지할 수 있습니다. 단점은 시료 전처리가 복잡하고 현장에서 신속하게 검출하기 어렵다는 것입니다.

스펙트럼 분석 기술은 적용 분야 요건 및 장비 조건에 따라 선택해야 합니다. XRF 는 신속하고 비파괴적인 현장 검사에 적합한 반면, ICP-AES 는 고정밀 실험실 분석에 더 적합합니다. 매트릭스 효과나 기기 드리프트가 결과에 영향을 미치지 않도록 분석 중 교정에는 고순도 표준 시료(>99.99%)를 사용해야 합니다. 환경 관리(클린룸 또는 항온항습 등)를 통해 먼지나 습도로 인한 간섭을 줄일 수 있습니다. 품질 관리는 반복적인 검사 및 표준편차 분석을 통해 결과의 신뢰성을 검증합니다.

#### 4.1.2 불순물 원소 검출

불순물 원소 검출은 텅스텐-니켈-구리 합금의 조성 분석에서 중요한 부분입니다. 산소, 탄소, 황, 질소 또는 철과 같은 미량 불순물(일반적으로 0.5% 미만)을 식별하고 정량화하여 합금의 기계적 특성, 열전도도 또는 화학적 안정성에 영향을 미치지 않는지 확인하는 것을 목표로 합니다. 불순물은 원료 분말(텅스텐, 니켈, 구리), 소결 분위기 또는 가공 환경에서 발생할 수 있습니다. 함량이 기준을 초과하면 미세 구조 결함(산화물 개재물 또는 탄화물)이 발생하고, 인성, 내식성 또는 비자성 특성이 저하될 수 있습니다. 불순물 검출 방법에는 분광 분석, 화학 분석, 특수 기기 분석 등이 있으며, 항공우주, 의료 및 전자 산업의 요구 사항을 충족하기 위해 높은 감도(ppb-ppm 수준)를 달성해야 합니다.

산소와 탄소는 텅스텐-니켈-구리 합금에서 가장 흔한 불순물이며 특수 분석 기술로 검출해야 합니다. 산소 분석은 일반적으로 불활성 가스 용합 법을 사용합니다. 이때 시료는 고순도 헬륨이나 아르곤에서 2000°C 이상으로 가열되어 산소를 방출하고 탄소와 반응하여 CO 또는 CO<sub>2</sub> 를 형성하며, 산소 함량은 적외선 검출기로 측정합니다. 산소 함량이 높으면 산화물 개재물(예: WO<sub>3</sub> 또는 NiO ) 을 형성하여 계면 결합 강도를 감소시키고 의료용 차폐 부품의 내식성에 영향을 미칩니다. 탄소 분석은 연소법을 사용합니다. 이때 시료는 산소에서 연소하여 CO<sub>2</sub>를 생성하고, 탄소 함량은 적외선 검출기로 측정합니다. 탄소 함량이 높으면 탄화물(예: WC)을 형성하여 경도는 증가하지만 인성은 감소하여 항공우주 균형추의 내충격성에 영향을 미칩니다.

황 및 질소와 같은 불순물은 글로우 방전 질량 분석법(GD-MS) 또는 ICP-AES 로 검출합니다. GD-MS 는 글로우 방전을 통해 샘플 표면을 여기시키고 이온 질량 스펙트럼을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분석합니다. 검출 한계는 다중 원소 불순물 분석에 적합한 ppb 수준에 도달할 수 있습니다. 황 함량이 너무 높으면 황화물 개재물이 형성되어 내식성이 감소할 수 있습니다. 질소 함량이 너무 높으면 결정립계 취성이 발생하고 전자 산업에서 저울의 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다. 원자재 또는 가공 도구에서 유래한 잠재적 불순물인 철은 약한 자성을 유발하고 합금의 비자성 특성을 파괴하며 MRI 장비 차폐 부품의 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 특별한 주의가 필요합니다. ICP-AES 는 샘플을 산으로 용해한 다음 분석하여 철 함량을 정확하게 검출할 수 있습니다.

불순물 검사는 시료 준비 및 환경 조건에 대한 엄격한 관리가 필요합니다. 오염 방지를 위해 시료 표면을 연마하고 에탄올로 세척해야 합니다. 분석 장비는 정기적으로 교정해야 하며, 정확도를 보장하기 위해 고순도 표준 시료를 사용합니다. 소결 공정 최적화를 통해 산소와 질소의 유입을 줄일 수 있으며, 원료 선별을 통해 초기 불순물을 제어할 수 있습니다. 품질 관리는 다점 샘플링 및 통계 분석을 통해 불순물 분포의 균일성을 검증합니다. 합금 성능의 일관성을 보장하기 위해 시험 결과는 ASTM B777 또는 GB/T 26038 표준을 준수해야 합니다.

## 4.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 성능 시험 방법

텅스텐 -니켈-구리 합금은 목표 응용 분야에서 합금의 성능을 보장하기 위해 물리적 및 기계적 특성을 종합적으로 평가하도록 설계되었습니다 . 시험 방법에는 밀도 및 치밀성 시험, 기계적 특성 시험, 열적 특성 시험, 미세 구조 분석이 포함되며, 각 시험 방법은 특정 특성에 대한 정확한 데이터를 제공합니다. 밀도 및 치밀성 시험은 합금의 질량 분포와 구조적 무결성을 검증하고, 기계적 특성 시험은 응력 하에서의 강도와 인성을 평가합니다. 이러한 시험은 일반적으로 표준화된 장비와 공정을 사용하여 실험실이나 생산 현장에서 수행되어 결과가 항공우주, 의료 또는 전자 산업의 엄격한 요구 사항을 충족하는지 확인합니다. 시험 환경의 제어는 결과의 정확성을 위해 매우 중요합니다.

### 4.2.1 밀도 및 치밀성 시험

밀도 및 치밀성 시험은 텅스텐-니켈-구리 합금 성능 시험의 기초입니다. 이 시험은 합금의 질량 분포 및 미세 구조 치밀성을 평가하는 데 사용되며 , 이는 항공우주용 균형추, 의료용 차폐 부품, 전자 산업용 밸런스 블록의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 밀도는 단위 부피당 합금의 질량을 나타내며, 고밀도 특성을 나타내는 핵심 지표로, 부품이 제한된 공간에서 효율적인 질량 분포를 달성하는지 확인합니다. 밀도는 합금 내부의 기공 함량을 측정하며, 제조 공정(액상 소결 또는 열간 등압 성형 등)의 영향을 반영합니다. 치밀한 미세 구조는 합금의 강도, 인성 및 내식성을 향상시킬 수 있습니다.

밀도 시험은 일반적으로 아르키메데스 원리를 사용하여 공기와 액체(예: 물 또는 에탄올)에서 합금 샘플의 질량 차이를 측정하여 밀도를 계산합니다. 이 방법은 간단하고 효율적이며 고체 샘플(예: 막대, 판 또는 가공 부품)에 적합하며 합금이 설계 밀도에 도달하고 항공우주 균형추 또는 의료용 차폐 부품의 높은 밀도 요구 사항을 충족하는지 신속하게 확인할 수 있습니다. 시험 중 샘플 표면을 세척하고 연마하여 오일이나 산화물

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

층을 제거하여 측정 정확도를 보장해야 합니다. 액체를 선택할 때는 표면 반응이 결과에 영향을 미치지 않도록 합금에 대한 부식 방지성을 고려해야 합니다. 밀도 시험 결과는 텅스텐 함량 비율을 직접적으로 반영합니다. 텅스텐 함량이 높은 합금은 일반적으로 밀도가 더 높으며 군용 철갑 코어와 같이 매우 높은 질량 분포가 필요한 응용 분야에 적합합니다.

밀도 시험은 일반적으로 밀도 측정과 미세 구조 분석을 결합하는 더욱 복잡한 방법을 통해 합금 내 기공률을 평가합니다. 일반적인 방법은 측정된 밀도와 이론 밀도를 비교하여 기공률을 추정하는 것입니다. 또 다른 방법은 현미경을 사용하여 시료의 단면을 관찰하고, 금속 현미경이나 주사 전자 현미경을 통해 텅스텐 입자와 니켈-구리 결합상의 분포를 분석하여 미세 기공이나 개재물의 존재를 확인하는 것입니다. 고밀도 합금은 더 나은 기계적 성질과 화학적 안정성을 제공하며, 특히 동적 환경이나 부식성 환경에서 장기간 사용하기에 적합합니다. 액상 소결 공정은 고온에서 균일한 니켈-구리 매트릭스를 형성하여 텅스텐 입자 사이의 간극을 채우는 반면, 열간 등방성 가압 공정은 구조를 더욱 압축하여 밀도를 크게 향상시키고 기공이 성능에 미치는 부정적인 영향을 줄입니다.

실제 적용 분야에서 밀도 및 치밀도 시험은 고정밀 환경에서 합금의 신뢰성을 보장합니다. 예를 들어, 포토리소그래피 장비의 밸런스 블록에서 고밀도는 무게 중심의 안정성을 보장하고, 치밀한 미세 구조는 진동으로 인한 미세 균열을 방지합니다. 의료용 콜리메이터에서 고밀도 합금은 장기 사용 시 구조적 무결성을 유지하면서 방사선을 효율적으로 흡수할 수 있습니다. 시험 최적화는 표면 결함이나 내부 개재물이 결과에 영향을 미치지 않도록 시료 전처리의 균일성에 중점을 두어야 합니다. 환경 제어 및 고정밀 기기 교정 또한 중요합니다.

#### 4.2.2 인장강도 및 항복강도 시험

인장 강도 및 항복 강도 시험은 텅스텐-니켈-구리 합금의 기계적 특성을 평가하는 핵심 방법으로, 인장 하중 하에서 합금의 파괴 및 소성 변형 저항 능력을 측정하는 데 사용됩니다. 이러한 특성은 항공우주용 균형추, 군용 발사체 코어, 전자 산업의 진동 감쇠 부품에서 합금의 신뢰성과 내구성을 직접적으로 결정합니다. 인장 강도는 최대 인장 응력 하에서 합금의 파괴 저항성을 나타내며, 고응력 환경에서의 성능을 평가하는 데 적합합니다. 항복 강도는 합금이 비가역적인 소성 변형을 겪기 시작하는 응력 수준을 나타내며, 하중 하에서 변형에 대한 저항성을 나타냅니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 탁월한 기계적 특성은 텅스텐 입자의 높은 경도와 니켈-구리 결합상의 인성이 시너지 효과를 발휘하여 동적 또는 충격 환경에서 구조적 무결성을 유지하는 데 기여합니다.

인장 강도 시험은 일반적으로 인장 시험기를 사용하여 수행됩니다. 시료는 표준 모양(예: 덤벨 모양 시편)으로 가공되고, 제어된 조건에서 인장력이 점차 증가하여 시료가 파단될 때까지 가해집니다. 시험 중, 인장 과정에서 시료의 거동을 분석하기 위해 응력-변형률 곡선을 기록합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 높은 인장 강도는 텅스텐 입자의 견고한 골격과 니켈-구리 매트릭스의 균일한 분포에 기인합니다. 니켈-구리 상은 소결 넥을 통해 텅스텐 입자를 단단히 연결하여 응력을 효과적으로 분산시키고 국부적인 파괴를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

방지합니다. 기계적 특성에 대한 온도의 영향을 배제하기 위해 시험은 일정한 온도 환경(일반적으로 실온)에서 수행해야 합니다. 시료 준비는 결과 편차를 유발하는 응력 집중을 방지하기 위해 매끄럽고 결함 없는 표면이 필요합니다. 시험 결과는 합금이 항공우주 또는 군수 산업의 표준을 충족하는지 검증하여 높은 응력이나 진동을 견딜 수 있는지 확인하는 데 사용됩니다.

항복 강도 시험은 인장 강도 시험과 동시에 수행되며, 합금이 소성 변형을 시작하는 시점은 응력-변형 곡선을 분석하여 결정합니다. 니켈-구리 결합재상의 인성은 합금이 항복 전 일정량의 소성 변형을 견뎌내고, 에너지를 흡수하며, 취성 파괴를 방지할 수 있도록 합니다. 항복 강도 성능은 합금 조성 및 미세 구조의 영향을 받습니다. 텅스텐 입자 변형에 대한 주요 저항을 제공하기 때문에 텅스텐 함량이 높은 합금은 일반적으로 항복 강도가 더 높습니다. 니켈-구리 비율(예: 7:3 또는 3.5:1.5)을 최적화하면 결합재상의 인성과 강도 사이의 균형을 유지하여 강도를 저하시키는 과도한 니켈 함량이나 경도를 저하시키는 과도한 구리 함량을 방지할 수 있습니다. 액상 소결 및 열간 등방성 가압 성형 공정은 기공 및 결정립계 결함을 줄이고 조밀한 미세 구조를 형성하여 항복 강도를 증가시킵니다. 어닐링과 같은 열처리 공정은 잔류 응력을 제거하여 합금의 소성 거동을 더욱 최적화합니다.

실제 적용에서 인장 강도와 항복 강도 시험 결과는 합금의 선정 및 설계에 직접적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 항공우주용 균형추에서 높은 인장 강도는 부품이 고주파 진동이나 충격에 파손되지 않도록 보장하는 반면, 항복 강도는 하중을 받을 때 항상 안정성을 유지하도록 보장합니다. 군용 철갑탄 코어의 경우, 합금은 고속 충격에 견디기 위해 높은 인장 강도가 필요하며, 항복 강도는 장갑을 관통할 때 탄두 코어의 구조적 무결성을 보장합니다. 시험 최적화는 표준화된 시편 크기와 시험 절차(예: ASTM E8)를 사용하여 시료의 일관성에 중점을 두어야 합니다. 파괴 분석은 SEM 을 통해 연성 또는 취성 파괴 특성을 관찰하여 시험 결과의 신뢰성을 더욱 검증할 수 있습니다.

#### 4.2.3 연성 시험

연성 시험은 텅스텐-니켈-구리 합금이 인장 하중 하에서 소성 변형을 겪는 능력을 평가하는 중요한 방법으로, 합금이 응력을 받을 때 소성 유동을 통해 파괴되는 것을 방지하는 능력을 나타냅니다. 연성은 합금의 인성과 가공성을 측정하는 핵심 지표이며, 특히 항공우주용 균형추, 의료용 콜리메이터, 전자 산업의 진동 감소 부품과 같이 진동, 충격 또는 복잡한 가공을 견뎌야 하는 부품에 중요합니다. 순수 텅스텐의 취성에 비해 텅스텐-니켈-구리 합금의 연성은 니켈-구리 결합상의 소성 효과로 인해 크게 향상됩니다. 니켈의 면심입방 구조는 우수한 연성을 제공하고 인장 시 에너지를 흡수할 수 있으며, 구리를 첨가하면 결합상의 연성과 가공성이 더욱 향상되어 합금이 응력을 받을 때 우수한 소성 변형 능력을 발휘할 수 있습니다.

연성 시험은 일반적으로 인장 시험을 통해 수행되며, 표준화된 시편(예: 덤벨 모양 시편)을 사용하여 인장 시험기에 인장력을 점진적으로 증가시켜 시편이 파단될 때까지 가합니다. 시험 중 시편의 신장 및 단면 수축을 기록하여 파단 전 소성 변형 정도를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

평가합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 연성은 텅스텐 입자와 니켈-구리 결합상의 상승 효과에 기인합니다. 텅스텐 입자는 높은 경도와 강도를 제공하는 반면, 니켈-구리 매트릭스는 소결 넥을 통해 연속적인 네트워크를 형성하여 응력을 분산시키고 소성 유동을 촉진합니다. 시험 결과는 합금이 인장 중 에너지를 흡수하는 능력을 반영하며, 동적 환경에서의 신뢰성 검증에 적합합니다. 시험은 결과에 대한 외부 요인의 간섭을 제거하기 위해 제어된 환경(예: 실온 및 일정한 습도)에서 수행해야 합니다. 시험 준비는 응력 집중으로 인한 조기 파단을 방지하기 위해 매끄럽고 결함 없는 표면이 필요합니다.

연성은 합금 조성 및 미세구조에 상당한 영향을 받습니다. 니켈 함량이 증가하면 일반적으로 연성이 향상되는데, 이는 니켈의 인성으로 인해 인장 시 더 큰 소성 변형을 겪을 수 있기 때문입니다. 구리를 첨가하면 연성이 더욱 향상되고, 높은 연성은 결합재상의 경도를 감소시켜 합금이 응력을 받을 때 소성 유동에 더 취약해집니다. 그러나 니켈-구리 비율은 적절하게 설계되어야 하며, 니켈 또는 구리 함량이 너무 높으면 강도가 감소하고 전반적인 성능에 영향을 미칠 수 있습니다. 액상 소결 공정은 고온에서 균일한 니켈-구리 매트릭스를 형성하고, 텅스텐 입자 사이의 간극을 채우고, 입자 간 결합력을 강화하며, 소성 변형 능력을 향상시킵니다. 열간 등방성 가압 공정은 미세 기공을 제거하고 계면 결합을 최적화하여 연성을 더욱 향상시키고 파괴 위험을 줄입니다. 어닐링과 같은 열처리 공정은 잔류 응력을 제거하고 결정립계 구조를 최적화하여 합금이 인장 시 더욱 균일한 변형 거동을 나타내도록 합니다.

실제 응용 분야에서 연성 시험 결과는 수요가 높은 시나리오에서 합금의 적용 가능성에 직접적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 항공우주 분야에서 균형추는 이륙, 착륙 또는 난류로 인한 진동을 견뎌야 합니다. 높은 연성은 부품이 동적 하중 하에서 취성 파괴를 일으키지 않도록 보장합니다. 전자 산업에서 리소그래피 플랫폼의 진동 감소 부품은 미세 진동을 견뎌야 하며, 우수한 연성은 부품의 변형 능력과 장기 안정성을 보장합니다. 의료 분야에서 콜리메이터 또는 수술 로봇 부품은 가공 또는 설치 과정에서 인장될 수 있으며, 연성은 균열 발생 가능성을 낮춥니다. 시험 최적화는 표준화된 시험 크기와 시험 절차(예: ASTM E8)를 사용하여 시험의 일관성에 중점을 두어야 합니다. 파괴 분석은 덤플과 같은 연성 파괴 특징을 관찰하여 연성 성능을 더욱 검증할 수 있습니다.

#### 4.2.4 인성 시험

인성 시험은 텅스텐-니켈-구리 합금이 충격 또는 급속 하중 조건에서 에너지를 흡수하고 파괴에 저항하는 능력을 평가하는 중요한 방법으로, 동적 환경에서 합금의 균열 저항성과 신뢰성을 반영합니다. 인성은 항공우주 균형추, 군용 철갑탄 코어, 의료 장비 콜리메이터와 같은 응용 분야에서 합금의 핵심 특성으로, 부품이 진동, 충격 또는 과도 하중 하에서 구조적 무결성을 유지하도록 보장합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 인성은 순수 텅스텐보다 우수하며, 이는 주로 니켈-구리 결합상의 소성 효과 때문입니다. 니켈의 면심입방 구조는 우수한 에너지 흡수 능력을 제공하고 충격 시 소성 변형을 통해 에너지를 분산시킬 수 있으며, 구리의 높은 연성은 결합상의 균열 저항성을 더욱 향상시켜 합금이 충격 시 연성 파괴 특성을 나타내도록 합니다. 인성 시험은 일반적으로 충격 시험을 통해 수행됩니다. 일반적인 방법으로는 샤르피 충격 시험과 드롭 해머

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

시험이 있습니다. 샤르피 충격 시험은 표준 시편(일반적으로 V-노치 포함)을 사용하여 진자 충격 기계에서 시험하고 시편이 파단될 때 흡수되는 에너지를 기록합니다. 드롭 해머 시험은 무거운 물체를 특정 높이에서 자유 낙하시켜 시편에 충격을 가하여 파단 저항성을 평가합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 인성은 텅스텐 입자와 니켈-구리 결합상의 상승 효과에 기인합니다. 텅스텐 입자는 높은 경도와 강도를 제공하며, 니켈-구리 매트릭스는 연속 소결 넥 네트워크를 통해 충격 에너지를 분산시켜 취성 파괴를 방지합니다. 결과의 반복성을 보장하기 위해 시험은 제어된 온도에서 수행해야 합니다. 시편은 표준 크기로 가공해야 하며, 결합의 충격을 줄이기 위해 표면을 연마해야 합니다.

인성은 합금 조성, 미세구조, 그리고 제조 공정의 영향을 받습니다. 니켈 함량이 증가하면 니켈의 가소성이 충격 시 더 많은 에너지를 흡수하여 연성 파괴 특성을 형성하기 때문에 인성이 크게 향상됩니다. 구리를 첨가하면 인성이 더욱 향상되고, 구리의 연성은 결합상의 경도를 감소시켜 충격 시 취성 파괴보다는 소성 변형에 더 취약해집니다. 액상 소결 공정은 치밀한 미세구조를 형성하여 텅스텐 입자와 니켈-구리 매트릭스 사이의 계면 결합을 강화하고 충격 시 균열 전파를 줄입니다. 열간 등방성 가압 공정은 구조를 압축하고 미세기공과 결정립계 결합을 제거하여 인성을 더욱 향상시킵니다. 어닐링과 같은 열처리 공정은 결정립계 구조를 최적화하고 잔류 응력을 제거하여 합금이 충격 시 더욱 균일한 에너지 흡수 성능을 발휘하도록 합니다.

실제 응용 분야에서 인성 시험 결과는 동적 환경에서 합금의 적합성을 직접적으로 결정합니다. 항공우주 분야에서 헬리콥터 로터나 항공기 보조의 균형추는 고주파 진동과 충격을 견뎌야 합니다. 높은 인성은 극한 조건에서 부품이 취성 파괴되지 않도록 보장합니다. 군사 분야에서 철갑탄 코어는 고속으로 장갑에 충돌할 때 엄청난 에너지를 흡수해야 합니다. 우수한 인성은 코어의 무결성을 보장합니다. 의료 분야에서 수술 로봇 부품은 우발적인 충격을 받을 수 있습니다. 인성은 균열을 방지하고 기능을 유지하는 데 도움이 됩니다. 시험 최적화는 산소나 탄소와 같은 불순물이 인성을 저하시키는 취성상을 형성하지 않도록 불순물 관리에 중점을 두어야 합니다. 표면 처리(연마 또는 코팅 등)는 표면 결합을 줄이고 내충격성을 향상시킬 수 있습니다. 품질 관리는 파괴 분석(딥플의 SEM 관찰) 및 반복 시험을 통해 인성 성능을 검증합니다.

#### 4.2.5 열 성능 시험

열 성능 시험은 텅스텐-니켈-구리 합금의 열전도도 및 열 안정성을 평가하는 것입니다. 고온 또는 열 사이클 환경에서의 성능을 검증하는 데 사용됩니다. 특히 전자 산업의 포토리소그래피 기계용 방열판, 의료 장비의 방사선 차폐 또는 항공우주 산업의 고온 부품과 같이 효율적인 열 관리 또는 치수 안정성이 필요한 응용 분야에 적합합니다. 열적 특성에는 주로 열전도도 및 열팽창 특성이 포함되며, 이는 각각 온도 변화 하에서 합금의 열을 빠르게 분산시키는 능력과 치수 안정성을 반영합니다. 이러한 특성은 구리의 높은 열전도도와 텅스텐의 낮은 열팽창 특성에 니켈-구리 결합 단계의 상승 효과와 결합되어 합금이 고정밀 및 고온 환경에서 성능을 유지할 수 있도록 합니다.

열전도도 시험은 일반적으로 레이저 플래시법 또는 열류계법으로 수행됩니다. 레이저

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

플래시법은 짧은 레이저 펄스를 시료 표면에 조사하고 열이 시료를 통과하는 데 걸리는 시간을 측정하여 합금의 열전도도를 평가합니다. 이 방법은 고체 시료(예: 판 또는 블록)의 신속한 시험에 적합하며, 실제 적용 시 합금의 방열 성능을 정확하게 반영할 수 있습니다. 열류 계법은 시료 양면에 안정적인 온도 구배를 설정하고 열유속 밀도를 측정하여 열전도도 성능을 평가합니다. 두 방법 모두 외부 온도 또는 기류 간섭을 피하기 위해 제어된 환경(예: 일정한 온도 또는 진공 상태)에서 수행해야 합니다. 시료 전처리에는 일관된 열 전달을 보장하기 위해 매끄러운 표면과 균일한 두께가 필요합니다. 시험 결과는 니켈-구리 접합 단계에서 구리의 역할을 입증합니다. 구리는 높은 열전도도를 가지고 있어 합금의 열을 빠르게 분산시켜 리소그래피 기계나 의료 기기와 같은 고열 부하 환경에 적합합니다. 액상 소결 및 열간 등방성 압축 공정은 밀도가 높은 미세 구조를 형성하여 열전도에 대한 기공 및 결정립계의 저항을 줄여 열전도도를 더욱 향상시킵니다.

열팽창 계수 시험은 일반적으로 팽창계 또는 시차 주사 열량계(DSC)를 사용하여 수행됩니다. 팽창계는 제어된 가열 동안 샘플의 길이 변화를 측정하여 온도 변화에 따른 치수 안정성을 평가합니다. 샘플을 특정 온도 범위까지 서서히 가열하고 변형을 기록하여 합금이 열 사이클링 동안 정확도를 유지할 수 있는지 확인합니다. DSC 방법은 가열 중 샘플의 열적 영향을 분석하여 열팽창 특성을 간접적으로 추론합니다. 이러한 시험은 정밀하게 제어된 환경에서 수행되어야 하며, 결함의 영향을 제거하기 위해 샘플 표면을 연마해야 합니다. 텅스텐의 낮은 열팽창 특성은 합금이 온도 변동 중에도 안정적인 치수를 유지할 수 있도록 하여 포토리소그래피 플랫폼과 같은 고정밀 응용 분야에 적합합니다. 니켈-구리 바인더상은 균일하게 분포되어 있으며, 소결 벽과 결합하여 열 응력 집중을 줄이고 열 안정성을 향상시킵니다. 어닐링과 같은 열처리 공정은 결정립계 구조를 최적화하여 열 사이클링 동안 합금의 성능을 더욱 향상시킵니다.

실제 응용 분야에서 열 성능 시험은 고온 또는 고정밀 환경에서 합금의 신뢰성을 보장합니다. 예를 들어, 포토리소그래피 장비에서 밸런스 블록은 열을 빠르게 방출하고 치수 안정성을 유지해야 합니다. 뛰어난 열전도도와 낮은 열팽창 계수는 플랫폼의 나노미터 미만의 정밀도를 보장합니다. 의료용 CT 장비에서 차폐는 방사선에서 발생하는 열에 의해 작동하며, 열 성능은 장비의 장기적인 안정성과 안전성을 보장합니다. 시험 최적화는 열전도도를 감소시키는 불순물(산소 또는 탄소 등)이나 미세 기공을 방지하기 위해 시료 전처리 및 장비 교정의 일관성에 중점을 두어야 합니다.

#### 4.2.6 전기 성능 시험

전기적 성능 시험은 텅스텐-니켈-구리 합금의 전류 전도 및 전자기 적합성을 평가하는 것입니다. 전자기적으로 민감한 환경에서 성능을 검증하는 데 사용됩니다. 특히 의료용 MRI 차폐, 리소그래피 기계 진동 감소 구성 요소 또는 레이더 시스템 구성 요소와 같은 응용 분야에 적합합니다. 전기적 특성에는 주로 전도도와 비자성 특성이 포함되며, 이는 합금의 전류 전도 및 전자기 간섭 방지 능력을 반영합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 비자성 특성은 니켈과 구리 의 상자성 에서 비롯되어 전자기적으로 민감한 환경에서 우수한 성능을 발휘하는 가장 큰 장점입니다. 전도도는 순수 구리보다 낮지만 대부분의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전자 응용 분야의 요구 사항을 충족하기에 충분합니다. 고밀도 및 비자성과 결합하여 고정밀 장비에 적합합니다.

전도도 시험은 일반적으로 4 점 프로브 방법 또는 저항률 측정을 사용하여 수행됩니다. 4 점 프로브 방법은 시료 표면에 미량의 전류를 흘려 전압 강하를 측정하고 전도도를 계산합니다. 이 방법은 고체 시료(예: 막대 또는 박판)의 신속한 시험에 적합하며, 전자 응용 분야에서 합금의 전류 전도 능력을 정확하게 평가할 수 있습니다. 저항률 측정 방법은 시료의 저항을 측정하고 기하학적 치수를 기반으로 전도도를 추정합니다. 온도나 습도가 저항에 미치는 영향을 피하기 위해 시험은 일정한 온도 및 습도 환경에서 수행해야 합니다. 산화물층이나 먼지의 간섭을 제거하기 위해 시료 표면을 연마하고 세척해야 합니다. 시험 결과는 니켈-구리 결합 단계에서 구리가 주요 역할을 한다는 것을 보여주며, 구리의 높은 전도도는 합금에 안정적인 전류 전도 경로를 제공합니다. 니켈을 첨가하면 균일한 Ni-Cu 고용체가 형성되어 적당한 전도도를 유지하는 반면, 텅스텐의 높은 저항 특성은 미세 구조의 최적화를 통해 상쇄됩니다. 액상소결 및 열간등방압성프레스 공정은 치밀한 미세구조를 형성하고 전도도를 향상시켜 결정립계 저항과 기공의 영향을 줄입니다.

비자성 시험은 일반적으로 자력계 또는 진동 샘플 자력계(VSM)를 사용하여 자기장에서 합금의 반응을 평가하는 자화 강도 측정 또는 자기 투자율 시험을 통해 수행됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 비자성 특성은 니켈과 구리의 상자성 특성으로부터 이점을 얻어 강자성 간섭을 피하고 MRI 장비 또는 사진 평판 인쇄 기계와 같은 전자기적으로 민감한 응용 분야에 적합합니다. 시험은 외부 자기장 간섭을 제거하기 위해 차폐된 자기장 환경에서 수행해야 합니다. 샘플은 철(원료 또는 가공 도구)과 같은 자성 원소에 의한 약한 자성의 도입을 방지하기 위해 엄격한 불순물 관리를 거쳐야 합니다. 소결 공정은 고순도 아르곤 분위기를 사용하여 산화물 개재물이 비자성 특성에 영향을 미치지 않도록 합니다. 표면 처리(예: PVD 전도성 코팅)는 합금을 더욱 보호하고 전기적 특성의 안정성을 유지할 수 있습니다.

실제 응용 분야에서 전기 성능 시험은 전자기적으로 민감한 환경에서 합금의 신뢰성을 보장합니다. 예를 들어, MRI 장비의 경우, 차폐 부품은 자기장 간섭을 방지하기 위해 비자성이어야 하며, 적절한 전도성은 전자기 환경에서 장비의 안정적인 작동을 지원합니다. 리소그래피 장비의 경우, 밸런스 블록의 전도성과 비자성은 고정밀 전자기 시스템에서 플랫폼의 정상적인 작동을 보장합니다. 시험 최적화는 산소나 황과 같은 불순물이 전도성을 저하시키는 비전도성 상을 형성하지 않도록 불순물 관리에 중점을 두어야 합니다. 품질 관리는 표준 시료를 사용한 반복 시험 및 교정을 통해 결과의 신뢰성을 검증합니다.

#### 4.2.7 화학적 성능 시험

화학 성능 시험은 부식성 또는 산화성 환경에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 안정성을 평가하는 중요한 방법입니다. 내식성과 내산화성을 검증하고 습기, 산성 또는 고온과 같은 가혹한 조건에서 합금의 장기 신뢰성을 보장하는 데 사용됩니다. 이 시험은 의료 장비

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

차폐, 해양 엔지니어링 균형추, 전자 산업 방열판과 같은 응용 분야에서 특히 중요하며, 이러한 응용 분야는 부품이 복잡한 환경에서도 성능을 유지하는지 확인할 수 있습니다. 텅스텐의 탁월한 화학적 특성은 화학적 불활성과 니켈-구리 결합상의 보호 효과에 기인합니다. 니켈은 치밀한 산화물 보호층을 형성하여 부식성 매체의 침투를 방지하는 반면, 텅스텐의 높은 안정성은 합금의 화학적 침식 저항성을 향상시킵니다. 화학 성능 시험은 내식성 및 내산화성 시험을 포함하며, 실제 적용 조건을 시뮬레이션하기 위해 제어된 환경에서 수행되어야 합니다. 내식성 시험은 일반적으로 침지 시험 또는 염수 분무 시험으로 수행됩니다. 침지 시험은 합금 샘플을 특정 부식성 매질(예: 묽은 산, 알칼리 용액 또는 염수)에 넣고 제어된 온도와 시간에서 표면 변화, 질량 손실 또는 부식 생성물을 관찰합니다. 이 시험은 멸균 환경에서 의료 기기의 장기 사용 조건이나 해수에서 해양 구성 요소의 사용 조건을 시뮬레이션하여 합금의 내식성을 평가하도록 설계되었습니다. 시험 결과가 재료 자체의 성능을 반영하도록 하려면 샘플을 연마하고 세척하여 표면 산화층이나 먼지를 제거해야 합니다. 니켈-구리 결합 단계에서 니켈의 내식성은 합금이 습하거나 산성 환경, 특히 의료 분야에서 우수한 성능을 발휘하도록 합니다. 이러한 환경에서 내식성은 구성 요소의 생체 적합성과 내구성을 보장합니다. 염수 분무 시험은 샘플을 염수 분무 환경(예: 중성 염수 분무 또는 산성 염수 분무)에 노출시켜 부식 반점이나 표면 열화를 관찰함으로써 해양 또는 산업 환경을 시뮬레이션합니다. 액상소결 및 열간등방압성소결 공정은 밀도가 높은 미세구조를 형성하여 기공과 결정립계 노출을 줄이고, 부식성 매체의 침투 경로를 줄이며, 내식성을 향상시킵니다.

내산화성 시험은 일반적으로 고온 산화 시험 또는 열중량 분석을 통해 수행됩니다. 고온 산화 시험은 고온의 공기 또는 산소 환경에 시료를 배치하여 표면 산화층 형성, 질량 증가 또는 성능 변화를 관찰하는 것으로, 고온 작동 중인 고온 항공우주 부품이나 전자 방열판의 조건을 시뮬레이션합니다. 니켈의 내산화성은 고온에서 보호 산화층을 형성하여 산소에 의한 추가 부식을 방지하고, 텅스텐의 높은 열 안정성은 합금의 구조적 무결성을 보장합니다. 열중량 분석은 가열 중 시료의 질량 변화를 정확하게 측정하여 산화 반응의 속도와 정도를 평가하는 것으로, 고정밀 실험실 시험에 적합합니다. 시험은 정밀한 온도 제어가 가능한 용광로에서 수행해야 하며, 초기 결합의 영향을 줄이기 위해 시료 표면은 매끄러워야 합니다. 소결 공정은 내산화성에 영향을 미치는 산화물 개재물을 방지하기 위해 고순도 아르곤 분위기를 사용합니다. 표면 처리(화학적 수동화나 산화 방지 코팅 등)를 통해 산화 저항성을 더욱 강화하고 부품 수명을 연장할 수 있습니다. 실제 응용 분야에서 화학적 특성 시험은 가혹한 환경에서 합금의 신뢰성을 보장합니다. 예를 들어, 의료용 CT 차폐에서 내식성은 멸균 환경에서 부품의 장기적인 안정성을 보장하며, 항공우주 터빈 균형추에서 내산화성은 고온 가스 환경에서 성능 유지를 보장합니다. 시험 최적화는 불순물 ( 산소 또는 황 등)이나 표면 결함이 결과에 영향을 미치지 않도록 시료 준비의 일관성과 환경 시뮬레이션의 신뢰성에 중점을 두어야 합니다. 품질 관리는 표준 시료를 사용한 반복 시험 및 교정을 통해 결과의 신뢰성을 검증합니다.

### 4.3 텅스텐-니켈-구리 합금의 표준 시스템

텅스텐-니켈-구리 합금은 조성 요건, 성능 지표, 시험 방법 및 품질 관리 프로세스를 포괄하여 품질, 성능 및 적용 일관성을 보장하는 중요한 프레임워크입니다. 이러한 표준은

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

국제, 국가 또는 산업 기관에서 생산, 시험 및 적용 프로세스를 규제하여 글로벌 시장에서 합금의 규정 준수 및 경쟁력을 보장하기 위해 제정되었습니다. 표준 시스템에는 국제 표준(예: ASTM B777, ISO 20886), 국가 표준(예: 중국의 GB/T 시리즈) 및 산업 표준(예: MIL-T-21014D)이 포함되어 항공우주, 의료 및 전자 산업에 대한 통합 품질 벤치마크를 제공합니다. 중국의 국가 표준은 텅스텐-니켈-구리 합금의 생산 및 적용에 있어 중요한 지침 역할을 하며, 국내 기술 및 시장 수요의 특성을 반영합니다.

#### 4.3.1 텅스텐-니켈-구리 합금에 대한 중국 국가 표준

중국의 국가 표준(GB/T 시리즈)은 텅스텐-니켈-구리 합금의 생산, 시험 및 적용에 대한 주요 규격입니다. 이 표준은 국가표준화국에서 제정되었으며 국내 항공우주, 의료, 전자 및 군사 분야에서 널리 사용됩니다. 이 표준은 합금의 구성 범위, 성능 요구 사항, 시험 방법 및 품질 관리 프로세스를 명시하여 제품이 항공기 균형추, 의료용 콜리메이터 또는 포토리소그래피 기계 밸런스 블록과 같은 고신뢰성 응용 분야의 요구를 충족하도록 보장합니다. 세계 주요 텅스텐 자원국(매장량 약 350 만 톤)이자 텅스텐 합금 생산 중심지인 중국은 고밀도 텅스텐 합금에 대한 여러 표준을 제정했습니다. 비자성 고밀도 합금의 대표로서 텅스텐-니켈-구리 합금은 특별한 관심을 받았습니다.

구리 합금을 포함한 고밀도 텅스텐 기반 합금에 적용되며, 조성 범위(예: 85%-97% 텅스텐, 니켈 및 구리가 결합체 상), 밀도 요구 사항, 기계적 특성 및 시험 방법을 지정합니다. 이 표준은 합금이 균형추 및 차폐의 요구 사항을 충족할 만큼 높은 밀도를 가져야 하며, MRI 장비와 같은 전자기 민감 환경에 적합한 비자성 특성을 강조해야 합니다. 조성 분석에는 분광학 기술(예: XRF 또는 ICP-AES)을 사용하여 텅스텐, 니켈 및 구리의 비율을 확인해야 하며, 성능 저하를 방지하기 위해 불순물(예: 산소 및 탄소)의 함량을 엄격하게 제어해야 합니다. 기계적 특성 시험에는 인장 강도 및 연성이 포함되며, 인장 시험은 고응력 하에서 합금의 신뢰성을 검증하는 데 필요합니다. 화학적 특성 시험은 습하거나 고온 환경에서 합금의 안정성을 보장하기 위해 내식성과 산화 저항성을 평가해야 합니다.

또한, GB/T 228.1-2010 금속 재료 인장 시험 1 부: 실온에서의 시험 방법은 텅스텐-니켈-구리 합금의 기계적 특성 시험에 대한 사양을 제공하며, 인장 강도 및 항복 강도 측정을 안내하여 결과가 항공우주 또는 군사 요건을 충족하는지 확인합니다. GB/T 231.1-2018 금속 재료의 브리넬 경도 시험 1 부: 시험 방법은 합금의 표면 경도 및 가공 특성을 평가하기 위한 경도 시험 절차를 명시합니다. GB/T 1423-2012 귀금속 및 그 합금의 밀도 측정 방법은 합금의 고밀도 특성이 설계 요건을 충족하는지 확인하기 위한 표준화된 밀도 시험 방법을 제공합니다. 이러한 표준은 텅스텐-니켈-구리 합금에 대한 포괄적인 시험 프레임워크를 형성합니다.

중국 국가 표준의 적용은 국내 텅스텐-니켈-구리 합금의 품질 향상과 시장 경쟁력 강화에 기여했습니다. 예를 들어, 의료 분야에서는 차폐 부품의 비자성 및 내식성 특성이 ISO 생체 적합성 요건을 충족하도록 보장하며, 전자 산업에서는 고정밀 성능을 보장하기 위해 포토리소그래피 장비의 밸런스 블록 밀도 및 열전도도 시험을 관리합니다. 이러한 표준의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적용은 액상 소결 및 열간 등압 성형을 통한 밀도 향상, 엄격한 원자재 및 분위기 관리, 그리고 불순물 저감 등 생산 공정 최적화와 결합되어야 합니다. 품질 관리는 표준화된 다점 시험 및 제3자 인증(CNAS 연구소 등)을 통해 검증됩니다.

#### 4.3.2 텅스텐-니켈-구리 합금에 대한 국제 표준

국제 표준은 텅스텐-니켈-구리 합금의 품질 관리 및 시장 적용을 위한 국제 규격으로, 국제표준화기구(ISO) 및 기타 권위 있는 기관에서 제정했으며 항공우주, 의료 및 전자 산업에서 널리 사용됩니다. 이러한 표준은 합금의 조성, 성능, 시험 방법 및 품질 인증에 대한 통일된 지침을 제공하여 다양한 국가 및 산업에서 제품의 일관성과 신뢰성을 보장합니다. 고밀도 비자성 재료인 텅스텐-니켈-구리 합금의 국제 표준은 주로 조성 범위, 밀도, 기계적 특성 및 비자성 특성에 중점을 두며, 고정밀 및 전자기 민감 응용 분야에 적합합니다.

ISO 20886:2004 고밀도 텅스텐 합금 기술 사양은 국제 표준화 기구에서 개발한 텅스텐-니켈-구리 합금에 대한 주요 국제 표준 중 하나로, 텅스텐 기반 고밀도 합금(W-Ni-Cu 및 W-Ni-Fe 포함)에 적용됩니다. 이 표준은 합금의 조성 범위(텅스텐 함량 85%-97%, 결합상으로 니켈 및 구리)를 지정하고 밀도, 기계적 특성(인장 강도 및 연성 등) 및 비자성 특성의 검증을 요구합니다. 이 표준은 스펙트럼 분석(예: XRF 또는 ICP-AES)을 통한 주요 원소 비율의 검출, 인장 시험 및 충격 시험을 통한 기계적 특성의 평가, 자화 강도 시험을 통한 비자성 특성의 확인을 강조하여 의료용 MRI 차폐 또는 전자 산업 저울의 요구 사항을 충족합니다. ISO 20886은 또한 생산 공정(액상 소결이나 열간 등방성 압축 등)에서 미세 구조의 치밀성을 보장하고 성능에 미치는 기공과 불순물의 영향을 줄여야 한다고 규정하고 있습니다.

또 다른 관련 국제 표준은 의료 분야(예: CT 차폐기 또는 콜리메이터)에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 적용에 적용할 수 있는 ISO 10993 의료 기기의 생물학적 평가 시리즈입니다. 이 표준은 합금의 생체적합성 검증, 특히 알레르기 반응을 피하기 위한 니켈 함량 제어를 요구합니다. 내식성 및 내산화성 시험은 멸균 또는 습한 환경에서 합금의 장기 안정성을 보장하기 위해 이 표준의 요구 사항을 충족해야 합니다. 이 국제 표준은 또한 기계적 특성 시험을 규제하고, 인장 강도 및 항복 강도 측정을 안내하며, 고응력 환경에서 합금의 신뢰성을 보장하기 위해 ISO 6892-1 금속 재료의 인장 시험을 참조합니다. 이러한 표준은 텅스텐-니켈-구리 합금의 글로벌 적용을 위한 기술 지원을 제공합니다. 국제 표준의 시행은 텅스텐-니켈-구리 합금의 세계 시장 유통을 촉진했습니다. 예를 들어, 항공우주 분야에서는 이러한 표준이 균형추의 고밀도 및 비자성 특성이 설계 요건을 충족하도록 보장하며, 의료 분야에서는 차폐 부품의 생체 적합성과 내구성을 보장합니다. 이러한 표준 시행 과정은 표준 요건 준수를 보장하기 위해 고정밀 시험 장비(예: SEM 또는 VSM)와 엄격한 품질 관리 절차(예: 제3자 인증)의 결합을 필요로 합니다.

#### 4.3.3 유럽, 미국, 일본, 한국 등 세계 각국의 텅스텐-니켈-구리 합금 표준

유럽, 미국, 일본, 한국 등 각국의 텅스텐-니켈-구리 합금 표준은 국제 표준을 기반으로

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

현지 기술 및 시장 수요를 고려하여 더욱 구체적이고 세부적인 사양을 정립했습니다. 이러한 표준은 성분 관리, 성능 요건 및 시험 방법 측면에서 일정한 차이를 보이는데, 이는 각국의 항공우주, 의료 및 전자 산업 적용 분야를 반영합니다. 아래에서는 미국, 유럽, 일본, 한국의 관련 표준을 각각 살펴보고, 각 표준의 특징과 적용 사례를 중심으로 살펴보겠습니다.

**미국 표준 :** 미국은 ASTM B777-15 고밀도 텅스텐 합금 사양을 텅스텐-니켈-구리 합금의 주요 표준으로 채택하며, 이는 W-Ni-Cu 및 W-Ni-Fe 합금에 적용됩니다. 이 표준은 텅스텐 합금을 4 가지 범주(1-4 등급)로 나누고, 텅스텐 함량(90%-97%) 및 바인더상 비율을 기반으로 성능 요구 사항을 정의하며, 밀도, 기계적 특성(인장 강도 및 경도 등) 및 비자성 시험을 다룹니다. ASTM B777 은 인장 시험(ASM E8 참조)으로 강도를 검증하고 자화 강도 시험으로 비자성 특성을 확인하도록 요구하며, 이는 의료용 MRI 차폐 부품 및 전자 산업 밸런스 웨이트에 적합합니다. 이 표준은 또한 미세 구조가 조밀하고 기공이 감소되도록 생산 공정(예: 분말 야금)을 요구합니다. 미국 군사 표준 MIL-T-21014D 텅스텐 기반 고밀도 합금은 군용 적용 요건을 더욱 강화하고, 철갑탄 코어 또는 항공우주용 균형추의 성능 지표를 명시하며, 내충격성과 고온 안정성을 강조합니다. 이러한 표준은 미국 항공우주 및 방위 분야에서 합금의 높은 신뢰성 요건 충족을 보장하기 위해 널리 사용되고 있습니다.

**유럽 표준 :** 유럽은 주로 "EN 1982 구리 및 구리 합금 잉곳과 주조물" 및 기타 고밀도 합금 표준을 참조합니다. 주로 구리 기반 합금에 적용되지만, 일부 규격은 텅스텐-니켈-구리 합금의 주조 및 가공에도 적용됩니다. EN 표준은 조성 제어(예: 니켈과 구리의 비율) 및 내식성 시험을 강조하며, 이는 해양 엔지니어링 및 의료 장비 분야에 적합합니다. 또한 유럽은 "EN ISO 6892-1 금속 재료 인장 시험"을 사용하여 기계적 특성 시험을 표준화하며, 고응력 환경에서 합금의 성능 검증을 요구합니다. 유럽 표준은 특히 의료 분야에서 환경 보호 및 생체 적합성에 중점을 두고 있으며, 알레르기 위험을 방지하기 위해 니켈 함량을 제어하는 "EN ISO 10993" 생물학적 평가 표준을 준수하도록 요구합니다. 유럽의 텅스텐-니켈-구리 합금은 주로 선박의 균형추 및 의료용 차폐 부품에 사용되며, 해수 내식성과 비자성 특성을 강조합니다.

**일본 표준 :** 일본은 항공우주, 전자 및 의료 분야에 적합한 텅스텐-니켈-구리 합금의 주요 표준으로 "JIS H7202 고밀도 텅스텐 합금"을 채택하고 있습니다. 이 표준은 텅스텐 함량 범위(90%~95%)와 접합상의 조성을 명시하고 있으며, 스펙트럼 분석을 통한 조성 검증과 인장 및 충격 시험을 통한 기계적 특성 평가를 요구합니다. 일본 표준은 리소그래피 밸런스 블록 및 MRI 차폐 부품의 고정밀 응용 분야에 적합한 비자성 및 열전도도 시험에 특히 중점을 두고 있습니다. "JIS Z2241 금속 재료의 인장 시험 방법"은 결과의 일관성을 보장하기 위한 기계적 특성 시험 지침을 제공합니다. 생산 기술 측면에서 일본은 고순도 원료 사용과 진공 소결에 중점을 두어 산소나 철과 같은 불순물이 비자성 및 내식성에 미치는 영향을 줄입니다. 특히 전자 산업 분야에서 일본 표준을 적용하는 것이 두드러지며, 이는 반도체 장비에서 합금의 대중화를 촉진했습니다.

**한국 표준 :** 한국은 항공우주, 전자 및 군사 분야에 적합한 텅스텐-니켈-구리 합금의 생산

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

및 시험을 규제하기 위해 KS D 5201 텅스텐 및 텅스텐 합금을 채택합니다. 이 표준은 합금의 밀도, 기계적 특성 및 비자성 특성을 검증해야 하며, 스펙트럼 분석 및 자화 강도 시험을 통해 구성 및 성능이 요구 사항을 충족하는지 확인합니다. 한국 표준은 전자 산업의 히트 싱크 및 밸런스 블록의 요구를 충족하기 위해 열 성능 시험(열전도도 및 열팽창 계수 등)에 중점을 둡니다. 한국에서 텅스텐-니켈-구리 합금을 생산할 때는 대부분 미세 조직의 밀도를 보장하기 위해 액상 소결 및 열간 등방성 압축 공정을 채택합니다. 이 표준은 또한 기계적 특성 시험을 위해 KS D ISO 6892 금속 재료의 인장 시험을 참조하여 고응력 환경에서 합금의 신뢰성을 강조합니다. 한국의 전자 및 반도체 분야 급속한 발전으로 인해 합금이 고정밀 장비의 요구 사항을 충족하도록 보장하기 위해 이러한 표준이 구현되었습니다.

각국의 표준 차이는 주로 적용 분야와 시험 세부 사항에 반영됩니다. 미국 표준은 군사 및 항공우주 분야의 고강도 요건에 중점을 두고, 유럽은 해양 및 의료 분야의 내식성에 중점을 두며, 일본은 전자 산업 분야의 비자성 및 고정밀성을 강조하고, 한국은 전자 및 열 관리 분야에 중점을 둡니다. 이러한 표준을 구현하려면 합금 성능의 일관성을 보장하기 위해 고정밀 시험 장비와 엄격한 불순물 관리(예: 산소 함량 <math><0.05\%</math>)가 결합되어야 합니다. 품질 인증은 일반적으로 국제 무역 촉진을 위해 제3자 기관의 검증을 받습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 제 5 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 제조 기술

텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 고성능 소재입니다. 우수한 기계적 특성, 열전도도, 화학적 안정성으로 인해 항공우주, 의료, 전자 및 군사 분야에서 널리 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 제조 공정은 주로 분말 야금 기술을 기반으로 하며, 원료 전처리, 분말 혼합, 프레스, 액상 소결, 후가공 등의 단계를 거쳐 고밀도 및 균일한 미세 구조를 얻습니다. 원료 전처리는 제조 공정의 시작점으로, 분말의 유동성, 혼합 균일성, 소결 특성에 직접적인 영향을 미쳐 합금의 품질과 성능을 결정합니다. 텅스텐 분말의 구상화 및 입자 크기 제어와 니켈-구리 분말의 표면 처리는 원료 전처리의 두 가지 핵심 요소이며, 이를 통해 분말의 고순도, 적절한 입자 크기 및 표면 활성을 확보할 수 있습니다.

### 5.1 원료 전처리

텅스텐-니켈-구리 합금 제조는 고순도 텅스텐 분말, 니켈 분말, 구리 분말을 원료로 사용하고, 분말 야금 공정을 통해 치밀한 합금 구조를 형성합니다. 원료 전처리는 입자 크기, 형태, 순도 및 표면 상태를 포함한 분말의 물리적 및 화학적 특성을 최적화하여 분말의 유동성, 혼합 균일성 및 소결 활성을 향상시키는 것을 목표로 합니다. 주성분인 텅스텐 분말은 합금의 고밀도 및 기계적 특성을 보장하기 위해 고순도 및 적절한 입자 크기 분포를 가져야 합니다. 결합상인 니켈 분말과 구리 분말은 액상 소결 시 텅스텐 입자와의 결합을 촉진하기 위해 우수한 표면 활성 및 습윤성을 가져야 합니다. 원료 전처리에는 분말 제조, 스크리닝, 세정 및 표면 개질과 같은 단계가 포함되며, 이러한 단계는 불순물(산소 및 탄소 등)에 의한 오염을 방지하기 위해 깨끗한 환경에서 수행되어야 합니다. 다음에서는 텅스텐 분말 구형화 및 입자 크기 제어, 니켈-구리 분말 표면 처리의 공정과 응용 분야에 대해 자세히 설명합니다.

#### 5.1.1 텅스텐 분말 구형화 및 입자 크기 제어

텅스텐 분말의 구상화 및 입도 제어는 원료 전처리의 핵심 요소로, 텅스텐 분말의 형태와 입도 분포를 최적화하고, 유동성, 체적 밀도 및 소결 성능을 향상시키며, 텅스텐-니켈-구리 합금의 밀도와 미세 구조 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다. 텅스텐 분말은 일반적으로 수소 환원 또는 플라즈마 공정으로 제조되며, 초기 형태는 대부분 불규칙한 다각형 또는 각진 형태이며, 입자 크기가 다양합니다. 구상화 처리는 텅스텐 분말 입자를 구형으로 만들고, 모서리를 줄이며, 유동성(유동 시간 단축)과 체적 밀도를 향상시키고, 분말 혼합 및 가압에 유리합니다. 입도 제어는 분말 입도 분포가 적절한 범위 내에 있도록 보장하고, 소결 중 입자 재배열 및 치밀화를 촉진하며, 합금 특성에 영향을 미치는 기공이나 편석을 방지합니다. 구형화 처리에는 플라즈마 구형화 기술 또는 고온 용융 분무가 자주 사용됩니다. 플라즈마 구형화는 텅스텐 분말을 고온 플라즈마 화염에 공급하여 입자를 순간적으로 용융시켜 표면 장력의 작용으로 구형 입자를 형성한 후, 급속 냉각 및 응고시키는 방식으로 이루어집니다. 이 방법은 텅스텐 분말의 구형도를 크게 개선하고, 표면 결함을 줄이며, 분말의 유동성을 향상시켜 포토리소그래피 장비의 밸런스 블록과 같은 고정밀 응용 분야에 적합합니다. 고온 용융 분무법은 텅스텐 원료를 용융하여

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

미세한 입자로 분무한 후, 아르곤과 같은 불활성 가스에서 냉각하여 구형 입자를 형성하므로 대량 생산에 적합합니다. 구형화된 텅스텐 분말은 겉보기 밀도가 더 높아서 압축된 블랭크의 균일성을 높이고 불균일한 소결 수축 위험을 줄입니다.

입자 크기 제어는 일반적으로 스크리닝, 기류 분류 또는 초음파 분산 기술을 통해 이루어집니다. 스크리닝 방법은 표준 스크린을 사용하여 다양한 입자 크기의 텅스텐 분말을 분리합니다. 간단하고 효율적이지만 정확도가 낮습니다. 기류 분류는 기류를 통해 입자를 분리하고 입자 크기 분포를 정확하게 제어하여 수요가 높은 응용 분야에 적합합니다. 초음파 분산은 초음파를 사용하여 응집된 입자를 분해하고 입자 크기 균일성을 최적화합니다. 적절한 입자 크기 범위는 소결 활성화와 구조적 안정성의 균형을 맞출 수 있습니다. 미세한 입자는 소결 중 용해-재침전 효과를 향상시키고 치밀화를 촉진합니다. 거친 입자는 안정적인 골격 구조를 제공하여 균용 철갑탄 코어의 고강도 요구 사항에 적합합니다. 산소 또는 탄소 불순물이 분말 성능에 영향을 미치지 않도록 입자 크기 제어는 원료 순도 관리와 결합되어야 합니다.

생산 과정에서 텅스텐 분말의 구상화 및 입자 크기 제어는 합금의 높은 밀도와 기계적 특성을 보장합니다. 예를 들어, 항공우주용 균형추에서 구상화된 텅스텐 분말은 블랭크의 밀도를 향상시키고 무게 중심의 안정성을 보장합니다. 의료용 차폐 부품에서는 균일한 입자 크기 분포가 기공률을 줄이고 방사선 흡수 효율을 향상시킵니다. 공정 최적화는 장비의 고정밀도(예: 플라즈마 온도 제어)와 환경 청결(클린룸 운영)에 중점을 두어 먼지 오염을 방지해야 합니다. 품질 관리는 레이저 입도 분석기 및 SEM 관찰을 통해 입자 크기 분포와 형태를 검증합니다.

### 5.1.2 니켈-구리 분말의 표면 처리

니켈-구리 분말의 표면 처리는 원료 전처리의 또 다른 핵심 단계로, 니켈 및 구리 분말의 표면 화학적 상태, 청결도 및 활성을 최적화하고 액상 소결 중 텅스텐 입자와의 젖음성과 결합력을 향상시키는 것을 목표로 합니다. 결합상인 니켈과 구리는 소결 중 액상을 형성하여 텅스텐 입자 사이의 틈을 채우고 합금의 인성, 비자성 및 열전도도를 향상시킵니다. 처리되지 않은 니켈-구리 분말은 표면에 산화층(예: NiO 또는 CuO), 유기 오염 물질 또는 흡착 가스가 있을 수 있으며, 이는 젖음성과 소결 활성을 감소시켜 계면 결합 불량 또는 기공 증가를 초래합니다. 표면 처리는 세척, 화학적 개질 또는 코팅 기술을 통해 분말 특성을 개선하여 합금의 치밀성과 균일성을 보장합니다. 표면 세척은 일반적으로 화학 세척이나 초음파 세척을 사용합니다. 화학 세척은 묽은 산(염산이나 질산 등)이나 알칼리성 용액을 사용하여 니켈-구리 분말 표면의 산화막과 불순물을 제거한 후, 탈이온수로 헹구고 진공 또는 불활성 가스(아르곤 등)에서 건조하여 2차 산화를 방지합니다. 초음파 세척은 고주파 초음파를 사용하여 세척액(에탄올 등)에 미세 기포를 생성하여 표면 오염 물질을 파열시키고 제거하므로 고정밀 응용 분야에 적합합니다. 세척 공정은 과도한 부식과 분말 형태의 손상을 방지하기 위해 용액 농도와 시간을 제어해야 합니다. 세척 후 니켈-구리 분말의 표면 청결도가 향상되고 액상과의 젖음성이 향상되어 소결 Neck 형성에 도움이 됩니다. 화학적 개질은 니켈-구리 분말 표면에 활성화제 또는 환원제를 도입하여 니켈-구리 분말의 소결 성능을 더욱 향상시킵니다. 예를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

들어, 미량의 환원제(예: 수소 또는 포름산)를 사용하여 분말 표면을 처리하여 산화물을 환원시키고 활성 금속 표면을 형성하여 텅스텐 입자와의 화학적 결합을 강화합니다. 표면 코팅 기술(예: 화학 기상 증착, CVD)은 니켈 또는 구리 분말 표면에 탄소 또는 금속(예: Ni 또는 Cu)의 얇은 층을 증착하여 내산화성과 젖음성을 향상시켜 고온 소결 환경에 적합합니다. 개질된 분말은 액상 소결에서 더욱 균일한 액상 분포를 형성하고, 편석을 줄이며, 텅스텐 입자의 재배열 및 결합을 촉진합니다. 생산 시 니켈-구리 분말의 표면 처리는 합금의 미세 구조와 특성을 최적화합니다. 예를 들어, 전자 산업용 히트 싱크에서 표면 처리된 니켈-구리 분말은 열전도도와 계면 결합 강도를 향상시킵니다. 의료용 콜리메이터에서는 습윤성 향상으로 기공을 줄이고 방사선 차폐 효율을 향상시킵니다. 공정 최적화는 2 차 오염을 방지하기 위해 세척액의 친환경성과 공정 환경의 청결에 중점을 두어야 합니다. 품질 관리는 XPS 또는 EDS 분석을 통해 표면의 화학적 상태를 검증하고, SEM 을 통해 분말 형태를 관찰합니다.

## 5.2 분말야금 공정

분말 야금법은 텅스텐-니켈-구리 합금을 제조하는 주요 방법입니다. 텅스텐 분말, 니켈 분말, 구리 분말을 혼합하고 가압 및 소결하여 고밀도 합금 구조를 형성합니다. 이 공정은 구성 요소의 비율을 정확하게 제어하고 미세 구조를 최적화하며, 항공우주용 균형추, 의료용 차폐 부품, 전자 산업용 밸런스 블록의 고성능 요구 사항을 충족할 수 있습니다. 분말 야금 공정은 분말 혼합, 가압, 액상 소결, 후처리(예: 열간 등방성 가압 또는 열처리) 등의 단계로 구성됩니다. 이 중 분말 혼합 및 가압은 균일한 빌릿을 형성하는 데 중요한 역할을 하며, 소결 과정에서 입자 재배열, 액상 분포 및 밀도에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 공정은 고순도 원료와 정밀 장비를 사용하여 깨끗한 환경에서 수행되어야 합금 성능의 일관성과 신뢰성을 보장할 수 있습니다.

### 5.2.1 분말 혼합 공정 매개변수

분말 혼합 공정은 분말 야금의 시작 단계로, 텅스텐 분말, 니켈 분말, 구리 분말을 설계된 비율에 따라 균일하게 혼합하여 성분이 균일하게 분포된 분말 혼합물을 형성하고, 이를 통해 후속 압착 및 소결 공정의 기반을 마련하는 것을 목표로 합니다. 균일한 분말 혼합은 합금 미세 구조의 균일성을 보장하고, 성분 편석이나 과도한 기공을 방지하여 밀도, 기계적 특성 및 비자성 특성을 향상시킵니다. 주성분인 텅스텐 분말은 높은 밀도와 경도를 제공하며, 결합상인 니켈 분말과 구리 분말은 인성과 열전도도를 향상시킵니다. 분말 혼합 공정의 성공은 분말 입자 크기, 형태, 혼합 장비 및 공정 조건을 최적화하여 분말 입자가 완전히 접촉하고 균일하게 분포되도록 하는 데 달려 있습니다.

분말 혼합은 일반적으로 기계적 혼합 또는 볼 밀링 혼합 기술을 채택합니다. 기계적 혼합은 V 형 믹서 또는 3 차원 믹서를 사용하여 회전 또는 진동을 통해 용기 내의 분말 입자를 텀블링 및 혼합하며, 이는 대량 생산에 적합합니다. 믹서는 입자 형태 손상이나 약간의 응집을 유발하는 과도한 혼합을 방지하기 위해 고정밀 속도 제어가 필요합니다. 볼 밀링 혼합은 볼 밀에 분쇄 매체(예: 지르코니아 볼)를 추가하고 충돌 및 마찰을 사용하여 분말의 균일한 분산을 달성하며, 이는 고정밀 소량 생산에 적합합니다. 볼 밀링

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

공정 중에 불 대 재료 비율과 분쇄 시간을 제어하여 입자 과손이나 불순물 (예 : 산소 또는 철)의 유입을 유발하는 과도한 분쇄를 방지해야 합니다. 혼합 환경은 분말 산화를 방지하고 니켈-구리 분말의 표면 활성을 유지하기 위해 고순도 불활성 가스(예: 아르곤) 또는 진공 조건에서 수행해야 합니다.

분말 혼합 공정은 분말의 입자 크기 매칭 및 혼합 균일성을 최적화하는 것입니다. 텅스텐 분말은 일반적으로 입자 크기가 큰 반면, 니켈 분말과 구리 분말은 더 미세합니다. 적절한 입자 크기 매칭은 혼합물의 충전 밀도를 높이고 가압 및 소결 시 치밀화를 촉진할 수 있습니다. 분말의 형태 또한 중요합니다. 구형화된 텅스텐 분말은 높은 유동성을 가지므로 균일한 혼합에 도움이 됩니다. 니켈 및 구리 분말의 표면 처리(예: 화학 세척)는 산화층을 제거하고 입자 간 접촉 및 액상 소결의 습윤성을 향상시킵니다. 공정 조건의 최적화에는 혼합 시간, 회전 속도 및 환경 제어가 포함됩니다. 적절한 혼합 시간은 균일성을 보장하며, 혼합 시간이 너무 길면 입자 응집이나 표면 손상이 발생할 수 있습니다. 소량의 윤활제를 첨가하면 분말 유동성을 향상시킬 수 있지만, 탄소 잔류물을 방지하기 위해 소결 전에 제거해야 합니다.

실제 생산에서 분말 혼합 공정의 균일성은 합금의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 의료용 차폐 부품에서 균일한 성분 분포는 방사선 흡수 효율과 비자성을 보장합니다. 항공우주용 균형추에서 균일한 분말 혼합은 밀도 일관성을 개선하고 무게 중심 안정성을 보장합니다. 품질 관리는 샘플링 분석(XRF 또는 ICP-AES)을 통해 성분 비율을 검증하고, 레이저 입도 분석기 및 주사전자현미경(SEM)을 통해 혼합 균일성과 입자 형태를 관찰합니다. 공정 최적화는 불순물 오염을 방지하기 위해 장비의 청결과 분말 순도(>99.9%)에 중점을 두어야 합니다.

## 5.2.2 프레싱 기술

프레싱 기술은 분말 야금 공정의 핵심 단계입니다. 균일하게 혼합된 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 특정 형상과 강도를 가진 블랭크로 압축하여 후속 소결을 위한 기초를 제공합니다. 프레싱의 품질은 블랭크의 밀도, 형상 정확도, 소결 성능에 직접적인 영향을 미치며, 이는 고밀도, 강도, 인성과 같은 합금의 최종 특성을 결정합니다. 프레싱은 분말 입자가 단단하게 충전되고 기공률이 감소(초기 기공률은 약 20~30%)하는 동시에 블랭크의 구조적 무결성을 유지해야 합니다. 이 기술은 복잡한 형상의 항공우주 카운터웨이트, 의료용 콜리메이터 또는 전자 산업의 히트 싱크에 적합합니다. 프레싱 기술은 블랭크가 소결 요건을 충족하도록 분말 특성 및 목표 응용 분야와 함께 공정 매개변수를 최적화해야 합니다.

프레스 성형은 일반적으로 냉간 압착 또는 등압 압착 기술을 채택합니다. 냉간 압착은 유압 프레스 또는 기계식 프레스를 사용하여 분말을 금형에 넣고 고압에서 특정 모양의 블랭크로 압축합니다. 이는 단순한 모양(예: 막대 또는 판)의 부품 생산에 적합합니다. 금형 설계는 블랭크 내부의 균일한 밀도를 보장하고 균열이나 박리를 방지하기 위해 분말의 유동성과 압축비를 고려해야 합니다. 등압 압착(냉간 등압 압착, CIP)은 분말을 유연한 금형(예: 고무 주머니)에 넣고 액체 매체에서 모든 방향으로 동일한 압력을 가하여 고밀도

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

블랭크를 형성합니다. 복잡한 모양이나 고정밀 부품에 적합합니다. 등압 압착은 블랭크 내부의 응력 집중과 기공률을 크게 줄일 수 있으며 의료용 차폐 부품이나 사진 평판 인쇄 기계의 균형 블록 제조에 적합합니다.

프레스 성형의 성공은 분말 특성 및 공정 조건의 최적화에 달려 있습니다. 구형화된 텅스텐 분말과 표면 처리된 니켈-구리 분말은 높은 유동성을 가지고 있어 프레스 공정 중 더욱 치밀한 적층 구조를 형성하고 블랭크의 초기 밀도를 높일 수 있습니다. 분말의 입도 분포는 적절하게 일치해야 하며, 미세 입자가 큰 입자 사이의 틈을 채워 기공률을 줄여야 합니다. 소량의 바인더(예: 폴리비닐알코올)를 첨가하면 블랭크의 그린 강도를 향상시킬 수 있지만, 소결 전에 탈지하여 제거해야 합니다. 프레스 압력은 분말 종류 및 목표 밀도에 따라 조정해야 합니다. 너무 높으면 금형 마모 또는 블랭크 균열이 발생할 수 있으며, 너무 낮으면 밀도가 부족해질 수 있습니다. 클린룸 운영과 같은 환경 관리는 먼지나 불순물 오염을 방지하고 블랭크의 순도를 유지합니다. 탈지 공정은 프레스 후 수행되며, 바인더와 윤활제는 저온 가열을 통해 제거되어 탄소 잔류물이 소결 품질에 영향을 미치지 않도록 합니다.

실제 생산에서 프레스 기술은 합금의 성능과 응용 분야에 직접적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 군용 철갑탄의 핵심 부품에서 고밀도 빌릿은 소결 후 합금의 높은 밀도와 강도를 보장합니다. 전자 산업의 방열판에서 균일한 빌릿 구조는 열전도도와 치수 정확도를 향상시킵니다. 품질 관리는 밀도 측정(아르키메데스법)과 현미경 관찰을 통해 빌릿의 균일성과 기공률을 검증합니다. 공정 최적화는 금형의 내마모성과 고정밀 유압 장비 또는 자동 등압 프레스 시스템을 이용한 정밀한 압력 제어에 중점을 두어야 합니다.

### 5.2.3 액상소결 공정

액상 소결 공정은 텅스텐-니켈-구리 합금 제조의 핵심 단계입니다. 고온에서 니켈 및 구리와 액상을 형성하여 텅스텐 입자를 적시고, 입자 재배열 및 치밀화를 촉진하며, 고밀도의 균일한 미세 구조를 형성합니다. 이 공정은 텅스텐의 높은 용점(약 3422°C)과 니켈 및 구리의 낮은 용점(약 1300-1450°C)을 활용하여 액상의 작용으로 텅스텐 입자를 단단히 결합시키고, 합금의 기계적 특성(인장 강도, 인성), 열전도도 및 비자성 특성을 향상시킵니다. 액상 소결은 이론 밀도에 가까운 합금을 생산하고 엄격한 품질 요건을 충족할 수 있기 때문에 항공우주용 균형추, 의료용 차폐 부품, 전자 산업의 방열판과 같은 고성능 응용 분야에 이상적인 선택입니다.

액상 소결 공정은 일반적으로 산화 및 불순물 유입을 방지하기 위해 진공 또는 고순도 불활성 가스(예: 아르곤) 분위기에서 수행됩니다. 이 공정은 가열, 절연, 냉각의 세 단계로 구성됩니다. 가열 단계에서는 균일하게 혼합된 텅스텐, 니켈, 구리 빌릿을 니켈과 구리의 녹는점 이상으로 가열하여 니켈과 구리가 용융되어 액상을 형성하고, 이는 텅스텐 입자 표면을 적십니다. 액상의 낮은 표면 장력과 우수한 습윤성으로 인해, 액상 니켈과 구리는 텅스텐 입자 사이의 틈을 빠르게 채우고 모세관 현상을 통해 입자 재배열을 촉진하며, 빌릿의 기공률을 크게 감소시킵니다. 절연 단계는 치밀화의 핵심입니다. 액상은 용해-재침전 메커니즘을 통해 텅스텐 입자에 작용합니다. 소량의 텅스텐 원자가 입자 접촉

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

지점에서 용해되었다가 재침전되어 소결 넥 을 형성하여 입자 간의 결합력을 향상시킵니다. 열응력으로 인한 균열을 피하기 위해 냉각 단계에서 냉각 속도를 제어해야 하며, 니켈-구리 액상이 응고되어 안정적인 면심 입방 구조를 형성하고 텅스텐 입자와 강력한 계면 결합을 형성해야 합니다.

액상 소결의 성공은 공정 조건의 최적화에 달려 있습니다. 니켈-구리 비율(일반적으로 7:3 또는 3.5:1.5)은 액상의 양과 유동성에 영향을 미칩니다. 니켈 함량이 높으면 습윤성이 향상되지만 편석이 발생할 수 있습니다. 구리 함량이 높으면 액상의 녹는점이 낮아져 소결에 유익하지만 강도 손실을 피해야 합니다. 소결 온도와 유지 시간을 정확하게 제어하는 것이 중요합니다. 온도가 너무 높으면 텅스텐 입자가 과도하게 성장하거나 액상이 손실될 수 있으며, 온도가 너무 낮으면 액상이 부족하고 밀도가 감소합니다. 분위기 제어는 고순도 아르곤이나 진공 환경을 사용하여 비자성 특성이나 내식성에 영향을 미치는 산화물(예:  $WO_3$  또는  $NiO$ ) 이 형성되는 것을 방지합니다. 빌렛의 초기 밀도(프레스로 최적화)도 소결 효과에 영향을 미칩니다. 고밀도 빌렛은 기공률을 줄이고 최종 밀도를 높일 수 있습니다.

실제 생산에서 액상 소결은 합금의 고성능을 보장합니다. 예를 들어, 의료용 콜리메이터에서 고밀도 및 균일한 미세 구조는 탁월한 방사선 차폐 성능을 제공하며, 항공우주용 균형추에서 소결 넥의 강력한 결합력은 높은 강도와 내진성을 보장합니다. 품질 관리는 밀도 측정(아르키메데스법), 소결 넥 형태의 SEM 관찰, 그리고 상 구조의 XRD 분석을 통해 공정 효과를 검증합니다. 공정 최적화를 위해서는 온도 곡선과 분위기 순도의 정밀한 제어, 그리고 고정밀 소결로 및 온라인 모니터링 시스템의 활용에 주의를 기울여야 합니다.

### 5.3 고급 준비 기술

항공우주, 의료 및 전자 산업에서 복잡한 형상과 고정밀 부품에 대한 수요가 증가함에 따라, 기존의 분말 야금 공정은 복잡한 형상을 제조하는 데 한계에 직면하고 있습니다. 금속 사출 성형(MIM), 적층 제조(AM), 스파크 플라즈마 소결(SPS)과 같은 첨단 제조 기술은 텅스텐-니켈-구리 합금 제조에 새로운 가능성을 제공합니다. 이러한 기술은 형상 자유도를 높이고, 생산 주기를 단축하며, 미세 구조를 최적화함으로써 고성능 응용 분야의 요구를 충족합니다. 금속 사출 성형은 작고 복잡한 형상의 부품을 생산할 수 있는 장점으로 인해 텅스텐-니켈-구리 합금 제조에 중요한 기술로 자리 잡았으며, 의료 기기, 전자 장비 및 군수 부품에 널리 사용되고 있습니다.

#### 5.3.1 금속 사출 성형

금속 사출 성형(MIM)은 분말 야금과 플라스틱 사출 성형을 결합한 첨단 제조 기술입니다. 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하여 유동성 슬러리를 형성합니다. 사출 성형 후 탈지 및 소결 과정을 거쳐 고밀도 합금 부품을 형성합니다. MIM 은 의료 수술 기기, 전자 산업용 커넥터, 항공우주용 소형 카운터웨이트와 같이 작고 복잡한 형상의 고정밀 부품 제조에 특히 적합합니다. MIM 의 장점은 높은 형상 자유도, 높은 재료 활용도, 그리고

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

높은 생산 효율입니다. 기존 프레스 성형과 비교하여 MIM 은 얇은 벽이나 내부 채널과 같은 복잡한 기하학적 구조를 구현하고, 후속 가공을 줄이며, 비용을 절감할 수 있습니다.

MIM 공정은 혼합, 사출 성형, 탈지, 소결의 네 가지 주요 단계로 구성됩니다. 혼합 단계에서는 텅스텐, 니켈, 구리 분말(텅스텐 85~97%, 니켈 2~10%, 구리 1~8%)을 바인더(폴리프로필렌 또는 왁스 기반 바인더 등)와 혼합하여 균일한 슬러리를 형성합니다. 텅스텐 분말은 유동성을 개선하기 위해 구형화해야 하며, 니켈과 구리 분말은 결합력을 강화하기 위해 표면을 세척해야 합니다. 분말과 바인더가 완전히 분산되도록 고온 교반 장치에서 혼합을 수행해야 합니다. 사출 성형 단계에서는 슬러리를 정밀 금형에 주입합니다. 금형 설계는 수축과 형상 정확도를 고려하여 목표 형상의 그린 바디를 형성해야 합니다. 탈지 단계에서는 열 탈지 또는 용매 탈지를 통해 바인더를 제거하는데, 일반적으로 블랭크의 균열이나 변형을 방지하기 위해 저온에서 천천히 가열합니다. 액상 소결은 소결 단계에서 사용되며, 니켈과 구리는 고온에서 액상을 형성하여 텅스텐 입자를 적시고, 밀도화를 촉진하며, 이론 밀도에 가까운 합금 구조를 형성합니다.

MIM 의 성공은 공정 매개변수의 최적화에 달려 있습니다. 슬러리의 유동성과 블랭크의 밀도를 개선하기 위해 분말 입자 크기는 미세하고 고르게 분포되어야 합니다. 바인더의 선택과 비율은 사출 성형의 평활성과 탈지 효율에 영향을 미치며 유동성과 그린 강도의 균형을 맞춰야 합니다. 소결 공정은 온도와 분위기의 정밀한 제어가 필요하며, 산화를 방지하고 비자성 특성을 보장하기 위해 고순도 아르곤 또는 진공 환경을 사용합니다. MIM 부품의 최종 성능은 잔류 기공과 응력을 제거하고 강도와 인성을 향상시키기 위한 후처리(예: 열간 등방성 가압 또는 어닐링)를 통해 더욱 최적화됩니다. 품질 관리는 ASTM B777 또는 GB/T 26036 표준을 준수해야 하는 미세 구조의 SEM 관찰, 밀도 측정 및 기계적 특성 시험을 통해 부품의 성능을 검증합니다.

실제 생산에서 MIM 기술은 텅스텐-니켈-구리 합금의 제조 유연성을 크게 향상시켰습니다. 예를 들어, 의료 분야에서 MIM 으로 제작된 복잡한 형상의 콜리메이터는 높은 정밀도와 방사선 차폐 효율을 가지고 있으며, 전자 산업에서 MIM 으로 제작된 마이크로 히트 싱크나 커넥터는 높은 열전도도와 비자성 특성을 모두 갖추고 있습니다. 공정 최적화는 금형 설계의 높은 정밀도와 바인더의 친환경성에 중점을 두고, 환경 영향을 줄이기 위해 생분해성 또는 무독성 바인더를 사용해야 합니다. 앞으로 MIM 과 적층 제조(예: 3D 프린팅 금형)를 결합하면 더욱 복잡한 형상의 신속한 생산이 가능해지고 첨단 기술 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 응용 가능성이 향상될 것입니다.

### 5.3.2 열간 등압 성형 기술

열간 등방성 가압 성형(HIP)은 고온 고압의 불활성 가스 환경에서 텅스텐-니켈-구리 합금 빌렛에 등방성 압력을 가하여 미세 기공을 제거하고 밀도를 높이며 미세 구조의 균일성을 개선하는 첨단 분말 야금 후가공 공정입니다. 이 기술은 특히 항공우주용 균형추, 의료용 차폐 부품, 전자 산업의 방열판과 같은 고성능 부품 생산에 적합하며, 합금의 밀도, 기계적 성질(인장 강도, 인성), 내식성을 크게 향상시킬 수 있습니다. 열간

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

등방성 가압 성형은 액상 소결 후 구조를 더욱 압축하여 기존 소결 공정에서 발생할 수 있는 미세 결함을 보완합니다. 이를 통해 합금의 밀도는 이론 밀도에 가까워지고 고신뢰성 응용 분야의 요구를 충족합니다.

열간 등방압 성형 공정은 일반적으로 고순도 아르곤을 압력 매체로 사용하여 전용 HIP 장비에서 수행됩니다. 이 공정은 가열, 단열, 냉각의 세 가지 주요 단계로 구성됩니다. 가열 단계에서는 소결된 텅스텐-니켈-구리 합금 빌렛을 밀폐된 캐비티에 넣고 니켈-구리 결합상의 녹는점(약 1200~1400°C)에 가까운 온도로 가열하여 재료를 소성화합니다. 단열 단계에서는 높은 등방압(일반적으로 아르곤 분위기)을 가하여 빌렛 내부의 미세 기공을 모든 방향으로 동일한 압력으로 압축하여 텅스텐 입자와 니켈-구리 결합상의 긴밀한 결합을 촉진합니다. 니켈-구리 상은 고온에서 일정한 유동성을 유지하여 기공을 채우고 계면 결합력을 향상시킵니다. 텅스텐 입자는 체심입방 구조를 유지하고 안정적인 골격을 제공합니다. 열응력으로 인한 균열을 방지하고 합금 조직의 안정성과 성능의 균일성을 확보하기 위해 냉각 단계는 천천히 진행되어야 합니다.

열간 등방성 가압 성형의 성공은 공정 조건의 최적화에 달려 있습니다. 온도와 압력의 정밀한 제어가 핵심입니다. 온도는 니켈-구리 상이 충분한 유동성을 갖도록 하되 텅스텐 입자의 과도한 용해를 방지해야 합니다. 압력은 기공을 제거하기에 충분해야 하지만 장비 과부하를 피할 정도로 높아서는 안 됩니다. 고순도 아르곤은 합금의 비자성 또는 내식성에 영향을 미치는 산화물(예:  $WO_3$  또는  $NiO$ ) 형성을 방지하는 데 필수적입니다. 빌렛의 초기 밀도(분말 혼합 및 가압으로 최적화)는 HIP 효과에 영향을 미칩니다. 초기 기공률이 낮은 빌렛은 이론 밀도에 가까운 상태에 더 효율적으로 도달할 수 있습니다. 열간 등방성 가압 성형은 액상 소결과 단일 공정 단계로 결합하여 분말 프레스된 빌렛에서 최종 고밀도 부품으로 직접 제작할 수 있으므로 생산 주기를 단축할 수 있습니다. 실제 생산에서 열간 등방성 가압 성형은 텅스텐-니켈-구리 합금의 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 항공우주 분야에서 HIP 처리된 균형추는 밀도와 진동 저항성이 높아 무게 중심 안정성과 장기 신뢰성을 보장합니다. 의료용 콜리메이터의 경우, 이론 밀도에 가까운 구조는 방사선 차폐 효율과 내식성을 향상시킵니다. 품질 관리는 밀도 측정(아르키메데스법), SEM 미세 구조 관찰, 그리고 기계적 특성 시험을 통해 HIP 효과를 검증합니다. 공정 최적화는 장비의 고압 밀봉 및 온도 균일성에 중점을 두고, 자동화 제어 시스템을 활용하여 정확도를 향상시켜야 합니다.

#### 5.4 후처리 및 처리

후가공 및 기계 가공은 텅스텐-니켈-구리 합금 제조의 마지막 단계로, 소결 또는 열간 등방성 성형 후 부품의 치수 정확도, 표면 품질 및 성능을 최적화하여 항공, 의료 및 전자 산업의 엄격한 요구 사항을 충족하는 것을 목표로 합니다. 후가공 공정에는 열처리, 표면 처리 및 기계 가공 단계가 포함되어 잔류 응력을 제거하고 표면 조도를 개선하며 복잡한 형상을 구현합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 경도와 인성을 가지고 있어 가공이 까다롭지만, 최적화된 공정을 통해 고정밀 및 고품질 최종 부품을 얻을 수 있습니다. 후가공 및 기계 가공은 부품의 기능을 향상시킬 뿐만 아니라 열악한 환경에서의 내구성과 신뢰성을 향상시킵니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열처리는 후가공에서 중요한 단계로, 일반적으로 어닐링 또는 시효 처리를 포함합니다. 이는 소결 또는 HIP(고온 인장 인성) 공정 중 발생하는 잔류 응력을 제거하고, 미세 구조를 최적화하며, 인성과 내식성을 향상시키는 것을 목표로 합니다. 어닐링은 텅스텐 입자의 안정성을 유지하면서 저온(약 800~1000°C)에서 절연체를 통한 확산을 통해 니켈-구리 결합상의 결정 결합(전위 또는 결정립계 응력 등)을 복구합니다. 시효 처리는 니켈-구리 상에 미량 석출상 형성을 촉진하고, 저온에서 장기간 절연을 유지함으로써 결합상의 강도를 향상시킵니다. 열처리는 산화를 방지하고 합금의 비자성 및 화학적 안정성을 보장하기 위해 고순도 아르곤 또는 진공 환경에서 수행해야 합니다. 열처리된 부품은 더욱 균일한 기계적 성질과 더 높은 피로 저항성을 나타내므로 항공우주용 균형추 또는 의료용 수술 도구에 적합합니다.

표면 처리는 연마, 화학적 부동태화 또는 코팅 기술을 통해 부품의 표면 품질과 성능을 향상시킵니다. 기계적 연마 또는 전기화학적 연마는 표면을 매끄럽게 만들고, 표면 결함(예: 긁힘이나 미세 균열)을 줄이며, 내식성과 미관을 개선하고, 특히 의료용 차폐 또는 전자 방열판에 적합합니다. 화학적 부동태화는 산성 용액 처리를 통해 보호 산화층을 형성하고 내식성을 향상시키며, 해양 환경이나 멸균 환경에서의 적용에 적합합니다. 코팅 기술(예: PVD TiN 또는 DLC 코팅)은 표면 경도, 내마모성, 내산화성을 더욱 향상시키고 부품 수명을 연장할 수 있습니다. 열전도도나 비자성에 영향을 미치는 지나치게 두꺼운 코팅을 피하기 위해 적용 요건에 따라 표면 처리를 선택해야 합니다.

가공에는 선삭, 밀링, 연삭 또는 방전가공(EDM)이 포함되며, 이는 복잡한 형상과 고정밀 치수를 구현하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 경도를 지니므로 초경 또는 다이아몬드 공구를 사용해야 하며, 열응력과 공구 마모를 줄이기 위해 가공 과정에서 낮은 절삭 속도와 충분한 냉각수가 필요합니다. 방전가공은 복잡한 형상(예: 내부 채널 또는 얇은 벽 구조)에 적합하며, 전기 펄스를 통해 재료를 제거하여 높은 정밀도를 유지합니다. 가공된 부품은 잔류 응력이나 표면 손상이 없는지 확인하기 위해 세척 및 검사가 필요합니다. 품질 관리는 치수 측정(CMM), 표면 조도 테스트, SEM 관찰을 통해 가공 정확도와 표면 품질을 검증합니다.

실제 생산에서 후가공 및 가공은 텅스텐-니켈-구리 합금의 적용성을 크게 향상시켰습니다. 예를 들어, 포토리소그래피 장비의 밸런스 블록에서는 정밀 가공을 통해 나노미터 미만의 정확도를 보장하고, 표면 연마를 통해 열전도도와 내식성을 향상시킵니다. 균용 철갑탄의 코어에서는 열처리를 통해 인성을 높이고, 가공을 통해 복잡한 형상을 구현합니다. 공정 최적화는 공구 내마모성과 가공 환경의 청결에 중점을 두고, 자동화된 가공 장비를 사용하여 효율성을 높여야 합니다. 품질 관리는 비파괴 검사(초음파 또는 X 선 검사 등)를 통해 부품의 무결성을 검증합니다.

#### 5.4.1 정밀 가공

정밀 가공은 텅스텐-니켈-구리 합금 후가공의 핵심 공정입니다. 소결 또는 열간 등압 성형된 블랭크를 고정밀 치수와 복잡한 형상을 가진 최종 부품으로 가공하여 항공우주, 의료 및 전자 산업의 엄격한 요구 사항을 충족하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

합금은 높은 경도와 인성을 가지고 있어 가공이 까다롭지만, 공구와 공정을 최적화하면 밀리미터 또는 마이크론 미만의 정밀도를 달성할 수 있으며, 이는 리소그래피 기계 진동 감소 부품, 의료용 콜리메이터 또는 군용 철갑 코어에 적합합니다. 정밀 가공은 부품의 형상 및 치수 정확도를 보장할 뿐만 아니라 표면 조도를 개선하여 성능과 신뢰성을 향상시킵니다.

정밀 가공에는 일반적으로 선삭, 밀링, 연삭, 방전 가공(EDM)과 같은 기술이 포함됩니다. 선삭 및 밀링은 수치 제어(CNC) 기계를 사용하여 합금을 절삭하며, 막대나 판과 같은 규칙적인 모양의 부품을 생산하는 데 적합합니다. 텅스텐은 높은 경도를 지녔기 때문에 초경 또는 다이아몬드 코팅 공구를 사용해야 하며, 열 응력과 공구 마모를 줄이기 위해 가공 과정에서 낮은 절삭 속도와 충분한 냉각수(예: 수성 에멀전)가 필요합니다. 연삭은 연삭 휠이나 연마재를 사용하여 표면을 더욱 미세하게 다듬어 높은 마감 및 치수 정확도를 달성하며, 이는 특히 의료용 차폐 부품이나 전자 방열판의 표면 요구 사항에 적합합니다. EDM은 전기 펄스를 사용하여 전도성 소재에서 미량의 재료를 제거하며, 이는 항공우주 산업에서 소형 카운터웨이트의 미세 구조 가공과 같이 복잡한 형상이나 내부 채널을 제조하는 데 적합합니다. EDM은 직접 접촉 없이 높은 정밀도를 달성하여 공구 마모와 재료 응력을 줄일 수 있습니다.

가공 공정은 텅스텐-니켈-구리 합금의 특성에 맞게 최적화되어야 합니다. 니켈-구리 결합층의 인성은 가공 중 합금이 공구에 달라붙는 원인이 될 수 있으므로, 절삭 속도와 이송 속도를 최적화하여 표면 버를 줄여야 합니다. 텅스텐 입자의 높은 경도는 공구의 빠른 마모를 유발할 수 있으므로, 가공의 일관성을 유지하기 위해 공구를 정기적으로 점검하고 교체해야 합니다. 부품 성능에 영향을 미치는 먼지나 불순물을 방지하기 위해 가공 환경은 청결하게 유지해야 합니다(클린룸 운영). 냉각수는 표면 부식이나 잔류물을 방지하기 위해 환경 보호 및 합금의 비부식성을 고려하여 선택해야 합니다. 가공된 부품은 초음파 세척을 통해 칩과 냉각수를 제거하여 깨끗한 표면을 유지해야 합니다.

실제 생산에서 정밀 가공은 텅스텐-니켈-구리 합금 부품의 적용 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 포토리소그래피 장비의 밸런스 블록에서 CNC 가공은 나노미터 미만의 정밀도를 달성하고 플랫폼의 안정성을 보장합니다. 군용 철갑탄의 코어에서는 전기 스파크 가공을 통해 복잡한 기하학적 형상을 형성하고 관통력을 향상시킵니다. 품질 관리는 3 차원 측정기(CMM), 레이저 간섭계, 표면 조도 시험을 통해 치수 정확도와 마감을 검증합니다. 공정 최적화는 자동화된 가공 장비의 통합과 공구 재료의 내마모성에 중점을 두고, 지능형 CNC 시스템을 활용하여 효율성을 향상시켜야 합니다.

#### 5.4.2 표면처리 공정

표면 처리는 텅스텐-니켈-구리 합금 후가공에서 중요한 단계로, 의료, 전자 및 항공우주 산업의 특정 요구 사항을 충족하기 위해 부품의 표면 마감, 내식성, 내마모성 및 미관을 개선하는 것을 목표로 합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 표면 품질은 가혹한 환경(예: 살균, 해양 또는 고온 환경)에서의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 표면 처리는 표면 상태를 최적화하여 합금의 내식성, 내산화성 및 기능성을 향상시킵니다. 표면 처리 공정에는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기계적 연마, 화학적 부동태화, 전기화학적 연마 및 코팅 기술이 포함되며, 적용 요건에 따라 적절한 처리 방법을 선택해야 합니다.

기계적 연마는 일반적으로 사용되는 표면 처리 방법입니다. 부품 표면을 연삭 휠, 연마포 또는 연마재로 점진적으로 연마하여 가공 흔적, 긁힘, 미세한 결함을 제거하여 경면 마감을 구현합니다. 연마 후 표면의 평활성이 향상되어(표면 거칠기가 감소) 미관상 개선뿐만 아니라 부식성 매체의 부착 지점도 감소시켜 의료용 콜리메이터 또는 전자 방열판 적용에 적합합니다. 연마에는 점진적으로 정련된 연마재를 사용해야 하며, 과열이나 표면 응력 집중을 방지하기 위해 연마 압력과 속도를 제어합니다. 전기화학적 연마는 전해질에 전류를 흘려 합금 표면을 약간 용해시켜 표면을 매끄럽게 하고 얇은 부동태 피막을 형성하여 내식성을 더욱 향상시킵니다. 특히 해양 환경의 선박 균형추에 적합합니다.

화학적 부동태화는 부품을 산성 또는 중성 용액(희석된 질산이나 구연산 용액 등)에 담가 표면에 치밀한 산화물 보호층(주로 NiO)을 형성하여 내식성과 내산화성을 향상시킵니다. 부동태화 처리에는 과도한 부식과 표면 열화를 피하기 위해 용액 농도와 침지 시간을 제어해야 합니다. 처리된 부품은 멸균 또는 습한 환경에서 더 높은 안정성을 보이며 의료 기기의 장기간 사용에 적합합니다. 코팅 기술(물리적 기상 증착 PVD 또는 화학적 기상 증착 CVD 등)은 표면에 얇은 재료층(예: TiN, DLC 또는 CrN)을 증착하여 표면 경도, 내마모성 및 내식성을 크게 향상시킵니다. PVD TiN 코팅은 부품에 황금색 외관과 우수한 내마모성을 제공하여 항공우주 균형추에 적합합니다. DLC 코팅은 마찰 계수가 낮아 전자 산업의 슬라이딩 부품에 적합합니다. 코팅 두께는 열전도도나 비자성에 영향을 미치지 않도록 정밀하게 제어해야 합니다.

표면 처리는 먼지나 오일 오염을 방지하기 위해 깨끗한 환경에서 수행되어야 합니다. 처리 전에는 부품을 초음파 세척하여 가공 잔여물을 제거하고, 처리 후에는 탈이온수로 세척하고 건조하여 2차 오염을 방지해야 합니다. 품질 관리는 표면 거칠기 시험(예: 프로파일로미터), 표면 형태에 대한 SEM 관찰, 염수 분무 시험을 통해 내식성을 검증합니다. 공정 최적화는 처리 용액의 친환경성과 장비의 고정밀성에 중점을 두고, 자동화된 연마 또는 코팅 장비를 사용하여 일관성을 향상시켜야 합니다. 실제 생산에서 표면 처리는 합금의 적용 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 의료용 CT 차폐 부품에서 전기화학적 연마는 표면 마감과 내소독성을 향상시키고, 포토리소그래피 히트 싱크에서 PVD 코팅은 내마모성과 열전도도를 향상시킵니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

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

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



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 제 6 장 전자정보 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 응용

텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 우수한 열전도도, 낮은 열팽창 계수로 인해 전자정보 분야에서 널리 사용되고 있으며, 특히 칩 패키징, 방열 관리, 고정밀 카운터웨이트 부품에 널리 사용됩니다. 본 합금은 분말 야금 공정으로 제조되며, 텅스텐의 고밀도와 니켈-구리 접합상의 인성 및 열전도도를 결합하여 열 관리, 전자파 적합성, 치수 안정성 등 전자 장비의 높은 요구 사항을 충족합니다. 5G 기술, 인공지능, 사물 인터넷의 급속한 발전으로 전자 정보 분야에서 고성능 소재에 대한 수요가 증가하고 있습니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고유한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 칩 패키징, RF 모듈, 포토리소그래피 장비에 이상적인 소재로 자리매김했습니다.

### 6.1 칩 패키징 및 방열

칩 패키징 및 방열은 전자 정보 분야의 핵심 기술로, 칩을 기판에 고정하고 작동 중 발생하는 열을 효율적으로 관리하여 소자의 고성능과 장수명을 보장합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 칩 패키징에서 방열 기판, 히트싱크, 균형추 부품으로 사용됩니다. 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수, 비자성 특성을 갖추고 있어 열을 효과적으로 분산시키고 치수 안정성을 유지하며 전자기 간섭을 방지하여 고출력 및 고주파 전자 장비의 요구를 충족합니다. 액상 소결 및 열간 등방성 프레스 공정을 통해 합금의 미세 구조를 최적화하여 치밀한 텅스텐 입자와 니켈-구리 결합 상 네트워크를 형성하여 우수한 열전도도와 기계적 안정성을 제공합니다. 고출력 소자, 5G RF 모듈, 리소그래피 장비 등 고정밀 장비에 적용되어 전자 정보 산업의 성능 향상 및 소형화에 핵심적인 역할을 합니다.

#### 6.1.1 고전력 소자 방열 기판

고전력 소자의 방열 기판은 칩 패키징의 핵심 요소입니다. 칩 작동 중 발생하는 고열을 빠르게 분산시켜 과열로 인한 성능 저하나 소자 고장을 방지하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 뛰어난 열전도도와 낮은 열팽창 계수를 갖추고 있어 고전력 소자(예: 전력 증폭기, GPU, 레이저 다이오드)의 방열 기판으로 이상적인 소재입니다. 이 합금의 높은 열전도도는 구리의 빠른 열전도도에 기인하며, 칩에서 발생하는 열을 방열 시스템으로 빠르게 전달할 수 있습니다. 낮은 열팽창 계수는 실리콘이나 질화갈륨과 같은 칩 소재의 열팽창 특성과 일치하여 열 응력으로 인한 변형이나 균열을 줄이고 패키징 구조의 장기적인 안정성을 보장합니다. 비자성 특성은 전자기 간섭을 방지하며 고주파 전자 소자에 적합합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 공정을 통해 고밀도 기판으로 성형됩니다. 액상 소결은 니켈-구리 결합상을 균일하게 분포시켜 열전도 효율을 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 미세 기공을 제거하고 기판의 밀도와 강도를 향상시킵니다. 정밀 가공 및 표면 처리(예: 전기화학 연마 또는 PVD 코팅)는 기판의 표면 마감을 최적화하고 열 저항을 줄이며 칩과의 접촉 효율을 향상시킵니다. 텅스텐-니켈-구리 기판의 표면은 일반적으로 용접 또는 접합 공정을 통해 칩과 결합되며, 열 사이클 중

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

탈락이나 균열을 방지하기 위해 계면이 단단히 접합되어야 합니다. 고전력 소자에서 텅스텐-니켈-구리 방열 기관을 적용하면 소자 성능이 크게 향상됩니다. 예를 들어, 고성능 컴퓨팅(HPC) 칩에서는 기관의 빠른 방열이 고부하에서 칩의 안정성을 보장합니다. 레이저 다이오드에서는 낮은 열팽창 계수가 광학 부품의 위치 정확도를 유지합니다. 최적화 방향으로는 니켈-구리 비율을 조정하여 열전도도를 향상시키거나, 나노 코팅(예: DLC)을 사용하여 표면 열 저항을 줄이거나, 적층 제조 기술을 결합하여 복잡한 방열 구조를 맞춤 설계하는 것이 있습니다. 품질 관리는 열전도도 테스트(레이저 플래시 방식) 및 열팽창 계수 측정을 통해 기관 특성을 검증하여 전자 산업 표준(예: JEDEC)을 준수하는지 확인합니다.

### 6.1.2 5G RF 모듈 카운터웨이트 히트싱크

5G RF 모듈 카운터웨이트 히트싱크는 5G 통신 장비의 핵심 부품입니다. 방열 기능과 카운터웨이트 기능을 모두 갖추고 있어 고주파 동작 시 모듈의 열 관리 및 무게 중심 안정성을 보장합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수를 특징으로 하여 RF 모듈 카운터웨이트 히트싱크로 선호되는 소재입니다. 5G RF 모듈은 고주파 신호(밀리미터파)에서 작동해야 하므로 많은 열을 발생시키는 동시에 소형화 및 고정밀화가 요구됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 열을 빠르게 분산시키고 치수 안정성을 유지하며 전자파 간섭을 방지하여 모듈의 고성능 요구 사항을 충족합니다. 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 제한된 공간에서 충분한 카운터웨이트를 제공하고, 모듈의 무게 중심 분포를 최적화하며, 신호 전송에 대한 진동의 영향을 줄일 수 있습니다.

텅스텐-니켈-구리 합금은 금속 사출 성형(MIM) 또는 분말 야금 기술을 통해 복잡한 형상의 카운터웨이트 히트 싱크를 제조하는 데 사용됩니다. MIM 기술은 분말과 바인더를 혼합하고, 사출 성형하고, 탈지하고, 소결하는 과정을 통해 고정밀 부품을 형성하며, 이는 소형 모듈의 복잡한 형상 요구 사항에 적합합니다. 액상 소결은 니켈-구리 액상이 텅스텐 입자를 적셔 치밀한 미세 구조를 형성하여 열전도도와 기계적 특성을 향상시킵니다. 표면 처리는 표면의 내식성과 마감을 개선하고, 내열성을 낮추며, 내산화성을 향상시킵니다. 후가공 시 정밀 가공을 통해 부품의 치수 정확도를 보장하고 5G 모듈의 엄격한 공차 요건을 충족합니다. 5G RF 모듈에서 텅스텐-니켈-구리 카운터웨이트 히트 싱크는 모듈 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 기지국 안테나 모듈에서 이 합금의 고밀도는 안테나 무게 중심의 안정성을 보장하고, 열전도도는 RF 칩의 열을 빠르게 분산시켜 신호 전송의 안정성을 유지합니다. 모바일 단말기에서는 소형 카운터웨이트 히트 싱크가 모듈의 컴팩트한 설계를 지원하는 동시에 열 관리 효율을 보장합니다. 최적화 방향으로는 니켈-구리 비율을 최적화하여 열전도도를 향상시키거나, 미세 구조 설계(예: 허니콤 방열 채널)를 통해 방열 성능을 강화하거나, 열간 등방압 성형 기술을 결합하여 밀도를 더욱 향상시키는 것이 있습니다. 품질 관리는 밀도 측정, 열전도도 시험, 자화 강도 시험을 통해 부품 성능을 검증하여 5G 통신 표준을 준수하는지 확인합니다.

## 6.2 마이크로파 및 레이더 장비

마이크로파 및 레이더 장비는 전자 정보 분야의 핵심 기술입니다. 통신, 항법, 원격 감지,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

국방 분야에 널리 사용됩니다. 고주파, 고출력 및 복잡한 환경에서 장비의 성능을 보장하기 위해서는 고밀도, 비자성, 높은 열전도도 및 치수 안정성을 갖춘 소재가 필요합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고유한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 마이크로파 및 레이더 장비의 안테나 중량 부품 및 차폐 부품에 선호되는 소재가 되었습니다. 고밀도 특성은 정밀한 무게 중심 제어를 제공하고, 비자성 특성은 전자기 간섭을 방지하며, 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수는 열 관리 및 치수 안정성을 보장하고, 고온, 진동 또는 전자기 간섭과 같은 극한 환경에서 장비의 신뢰성 요구 사항을 충족합니다. 이 합금은 액상 소결 및 열간 등방성 프레스 공정을 통해 치밀한 미세 구조를 형성하고, 정밀 가공 및 표면 처리를 결합하여 마이크로파 및 레이더 장비의 고정밀 요구 사항을 충족합니다.

### 6.2.1 안테나 무게 어셈블리

안테나 중량 부품은 마이크로파 및 레이더 장비의 핵심 부품으로, 위성 이동이나 선박 진동과 같은 동적 환경에서 안테나의 안정성과 지향 정확도를 보장하기 위해 안테나의 무게 중심 분포를 조정하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도와 비자성 특성으로 인해 안테나 중량 부품에 이상적인 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 합금은 제한된 부피 내에서 충분한 질량을 제공하고, 안테나 시스템의 무게 중심 위치를 최적화하며, 진동이나 풍하중으로 인한 편차를 줄일 수 있습니다. 비자성 특성은 자기장 간섭을 방지하고 고주파 마이크로파 신호(예: Ku 대역 또는 밀리미터파) 전송 시 안테나의 정확도와 안정성을 보장합니다. 합금의 낮은 열팽창 계수는 온도 변화(주야간 온도 차이 또는 고고도 저온)에서도 치수 안정성을 보장하고 안테나의 기하학적 정확도를 유지합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 공정을 통해 안테나 중량 부품을 제조하는 데 사용되며, 일반적으로 금속 사출 성형(MIM) 또는 냉간 등방압 성형 기술을 사용하여 복잡한 형상의 빌릿을 형성하여 안테나 시스템의 소형 설계 요건을 충족합니다. 액상 소결은 니켈-구리 액상이 텅스텐 입자를 적셔 치밀한 미세 구조를 형성하여 중량 부품의 밀도와 기계적 특성을 향상시킵니다. 열간 등방압 성형은 미세 기공을 제거하고 밀도를 향상시켜 위성 통신 안테나와 같은 고신뢰성 응용 분야에 적합합니다. 정밀 가공(CNC 밀링 또는 EDM 등)은 중량 부품의 치수 정확도를 보장하며, 표면 처리(전기화학 연마 또는 PVD 코팅 등)는 내식성과 표면 조도를 향상시켜 신호 산란이나 환경 부식을 줄입니다.

안테나 애플리케이션에서 텅스텐-니켈-구리 중량 부품은 장비 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 5G 기지국 안테나의 경우, 고밀도 중량은 고주파 진동 환경에서 안테나의 안정성을 보장하고 비자성 특성은 신호 간섭을 방지합니다. 위성 통신 안테나의 경우, 낮은 열팽창 계수는 고고도 환경에서 포인팅 정확도를 유지합니다. 최적화 방향에는 니켈-구리 비율 최적화를 통한 열전도도 향상, 미세 구조 설계(예: 내부 보강 리브)를 통한 기계적 특성 개선, 또는 적층 제조 기술과의 결합을 통한 복잡한 형상 맞춤 제작 등이 포함됩니다. 품질 관리는 밀도 측정, 자화 강도 시험, 진동 시험을 통해 부품 성능을 검증하여 마이크로파 통신 표준 준수를 보장합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.2.2 레이더 차폐 구성 요소

레이더 차폐 부품은 전자파 간섭을 차단하고, 표류 신호를 흡수하며, 레이더 장비의 민감한 전자 부품을 보호하여 고주파 및 고전력 환경에서 시스템의 안정적인 작동을 보장하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 비자성, 고밀도, 우수한 열전도도를 갖추고 있어 레이더 차폐 부품으로 선호되는 소재입니다. 비자성 특성은 레이더 신호에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 특히 고감도 레이더 시스템(예: 위상 배열 레이더)에 적합합니다. 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 전자파를 효과적으로 흡수하고 차폐하여 신호 누설이나 외부 간섭을 줄일 수 있습니다. 열전도도는 레이더 송신기 또는 수신기에서 발생하는 열을 빠르게 분산시켜 과열로 인한 장비 성능 저하를 방지합니다. 낮은 열팽창 계수는 부품이 고온 또는 열 사이클 환경에서 치수 안정성을 유지하여 차폐 효과에 영향을 미치는 변형을 방지합니다.

제조 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 또는 MIM 기술을 통해 차폐 부품을 제조하여 복잡한 형상과 컴팩트한 설계 요구를 충족합니다. 액상 소결은 니켈-구리 결합상이 균일하게 분포된 치밀한 미세 구조를 형성하여 열전도도와 기계적 특성을 향상시킵니다. 열간 등방성 가압 성형은 잔류 기공을 제거하고 차폐 부품의 밀도와 내구성을 향상시키며, 군용 레이더 또는 항공 레이더의 까다로운 요구 사항을 충족합니다. 정밀 가공(연삭 또는 EDM 등)은 고정밀 형상을 구현하여 부품과 레이더 시스템의 완벽한 통합을 보장합니다. 표면 처리(PVD, CrN 코팅 또는 화학적 부동태화 등)는 내식성과 내산화성을 향상시켜 습하거나 고온 환경에서 부품의 수명을 연장합니다.

레이더 애플리케이션에서 텅스텐-니켈-구리 차폐 부품은 시스템 신뢰성을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 군용 위상 배열 레이더에서 비자성 차폐 부품은 신호 간섭을 방지하고, 고밀도 차폐는 전자기 차폐 효율을 향상시킵니다. 기상 레이더에서 열전도도는 고출력 송신기의 열 관리를 보장합니다. 최적화 방향에는 니켈-구리 비율을 조정하여 전도도를 향상시키거나, 다층 복합 코팅을 사용하여 차폐 효과를 강화하거나, 3D 프린팅 기술을 결합하여 복잡한 차폐 구조를 제작하는 것이 포함됩니다. 품질 관리는 전자기 차폐 시험(예: MIL-STD-461), 열전도도 시험, 염수 분무 시험을 통해 부품 성능을 검증하여 레이더 시스템 표준(예: IEC 61000) 준수 여부를 확인합니다.

## 6.3 마이크로 전기 기계 시스템

미세전자기계 시스템(MEMS)은 미크론에서 밀리미터 단위의 미세 전자공학과 기계 구조를 통합하는 기술입니다. 가속도계, 자이로스코프, 마이크로 액추에이터 등 스마트폰, 자동차, 의료기기, 항공우주 산업 등에서 널리 사용되고 있습니다. MEMS 소자는 소형화된 균형추를 구현하기 위해 고밀도 소재, 전자기 간섭을 방지하기 위한 비자성 특성, 좁은 공간에서 열을 효율적으로 관리하기 위한 뛰어난 열전도도, 그리고 치수 안정성을 보장하기 위한 낮은 열팽창 계수를 필요로 합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도 및 비자성 특성을 통해 작은 부피에서도 충분한 질량을 제공하고 MEMS 소자의 무게 중심 분포를 최적화할 수 있습니다. 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수는 열 관리 및 장기 안정성을 보장하여 고정밀 및 동적 환경의 응용 분야에 적합합니다. 합금은 금속

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사출 성형(MIM)이나 정밀 분말 야금술을 통해 제조되며, 정밀 기계 가공과 표면 처리와 결합되어 MEMS의 소형화 및 고정밀 제조 요구 사항을 충족합니다.

### 6.3.1 관성 센서 카운터웨이트

관성 센서 카운터웨이트는 MEMS 가속도계 및 자이로스코프의 핵심 부품입니다. 센서 질량 블록의 관성 특성을 조정하여 가속도 또는 각속도에 대한 높은 감도 응답을 보장하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도와 비자성 특성으로 인해 관성 센서 카운터웨이트에 이상적인 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 작은 부피에 충분한 질량을 제공하고 센서의 감도와 응답 정확도를 향상시키며, 스마트폰이나 웨어러블 기기용 MEMS 센서와 같은 소형화된 설계에 적합합니다. 비자성 특성은 센서 신호에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 자동차 전자 장치 또는 항공 내비게이션 시스템과 같은 복잡한 전자기 환경에서 고정밀 측정을 보장합니다. 합금의 낮은 열팽창 계수는 온도 변화 시 카운터웨이트의 치수 안정성을 보장하고 센서의 장기적인 신뢰성을 유지합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 금속 사출 성형(MIM) 기술을 통해 마이크로웨이트를 제조하여 복잡한 형상과 고정밀을 요구하는 MEMS 소자의 요건을 충족합니다. MIM 공정은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하고, 사출 성형 후 탈지 및 액상 소결을 통해 치밀한 구조를 형성합니다. 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적셔 기공률을 줄이고 밀도와 기계적 성질을 향상시킵니다. 정밀 가공(마이크로 밀링 또는 레이저 가공 등)은 균형추의 치수 정확도를 미크론 단위의 공차까지 최적화합니다. 표면 처리(전기화학 연마 또는 PVD 코팅 등)는 표면 조도를 개선하고 마찰 및 열 저항을 줄이며 MEMS 구조와의 완벽한 통합을 보장합니다. 미세 부품의 성능에 영향을 미치는 먼지 오염을 방지하기 위해 가공 및 취급은 클린룸에서 수행되어야 합니다.

관성 센서 애플리케이션에서 텅스텐-니켈-구리 카운터웨이트는 장치 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 스마트폰 가속도계에서 고밀도 카운터웨이트는 동작 감지 감도를 향상시키고, 비자성 특성은 전자기 간섭 환경에서 안정적인 작동을 보장합니다. 자동차 에어백 시스템에서 카운터웨이트의 치수 안정성과 열전도도는 극한 온도에서 센서의 신뢰성을 보장합니다. 최적화 방향으로는 니켈-구리 비율을 최적화하여 열전도도를 향상시키거나, 관성을 유지하면서 질량을 줄이기 위해 미세 구조 설계(예: 다공성 카운터웨이트)를 사용하거나, 적층 제조 기술을 결합하여 더욱 정밀한 소형화를 달성하는 것이 있습니다. 품질 관리는 MEMS 표준(예: ISO 16063)을 준수하는지 확인하기 위해 밀도 측정, 자화 강도 시험, 진동 시험을 통해 카운터웨이트 성능을 검증합니다. 향후 MEMS 센서가 더 높은 감도와 소형화로 발전함에 따라, 텅스텐-니켈-구리 카운터웨이트는 나노 소재를 통합하여 성능을 더욱 최적화할 수 있습니다.

### 6.3.2 마이크로 밸런스 구성 요소

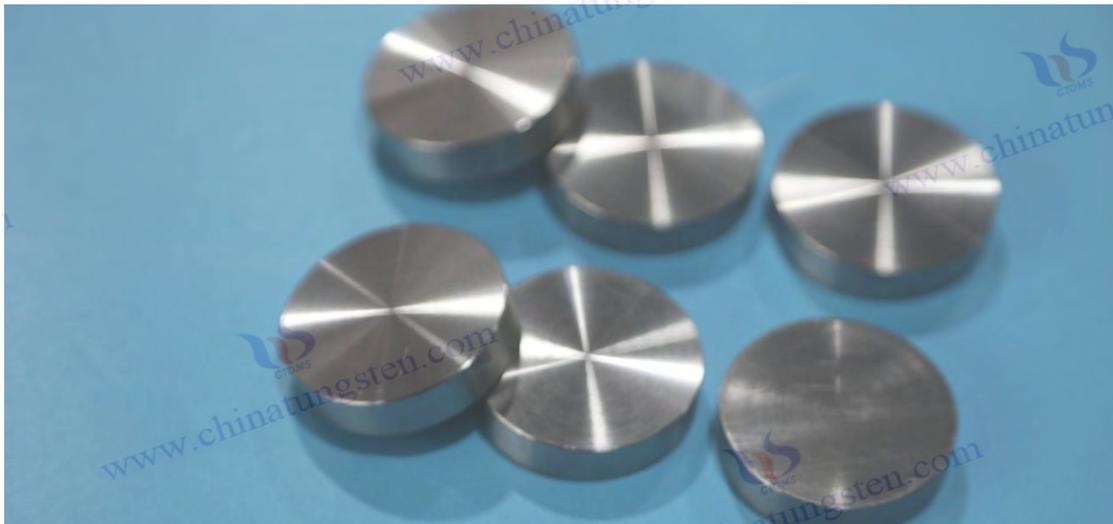
마이크로 밸런스 부품은 MEMS 액추에이터, 발진기 또는 마이크로 미러의 핵심 부품입니다. 마이크로 기계 구조물의 동적 균형과 무게 중심 분포를 조정하여 고주파

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

진동이나 빠른 움직임 시 안정성을 확보하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 낮은 열팽창 계수를 갖추고 있어 마이크로 밸런스 부품에 적합한 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 작은 부피에 충분한 질량을 제공하고, MEMS 장치(예: 광학 마이크로 미러 또는 마이크로 자이로스코프)의 무게 중심 위치를 최적화하며, 진동 오프셋이나 기계적 공진을 줄일 수 있습니다. 비자성 특성은 전자기 간섭을 방지하여 고정밀 광학 또는 통신 장비에 적합합니다. 낮은 열팽창 계수는 온도 변화 시 부품의 기하학적 안정성을 보장하고 MEMS 구조의 작동 정확도를 유지합니다.

제조 공정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 MIM(미세 분말 야금) 공정을 통해 미세 균형 부품을 제조하여 복잡한 형상과 마이크론 단위의 정밀도 요건을 충족합니다. MIM 공정은 사출 성형을 통해 미세 빌릿을 형성하고, 액상 소결 및 열간 등방성 가압 성형은 밀도를 더욱 향상시키고 미세 기공을 제거하며 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 레이저 미세 가공이나 전기 스파크 가공과 같은 정밀 가공은 마이크론 단위로 제어되는 공차를 가진 고정밀 기하학적 형상을 구현하며, 이는 MEMS 발진기의 미세 구조에 적합합니다. DLC 코팅이나 화학적 부동태화와 같은 표면 처리는 내마모성과 내부식성을 향상시키고 동적 환경에서 부품의 수명을 연장합니다. 미세 부품의 성능에 먼지 오염이 영향을 미치지 않도록 가공 공정은 고정정 환경에서 수행되어야 합니다.

MEMS 애플리케이션에서 텅스텐-니켈-구리 마이크로 밸런스 부품은 장치 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 레이저 스캐닝 마이크로미러에서 고밀도 밸런스 부품은 발진기의 무게 중심 분포를 최적화하고 스캐닝 정확도와 속도를 향상시킵니다. 마이크로 자이로스코프에서는 비자성과 낮은 열팽창 계수를 통해 높은 감도와 환경 적응성을 보장합니다. 최적화 방향에는 미세 구조 설계(예: 중공 구조)를 통한 질량 감소, 나노 코팅을 사용한 표면 특성 향상, 또는 3D 프린팅 기술을 결합하여 복잡한 형상의 신속한 맞춤 제작 등이 포함됩니다. 품질 관리는 CMM 치수 정확도 측정, 열전도도 테스트, 전자파 차폐 테스트를 통해 부품 성능을 검증하여 MEMS 표준(예: IEEE 1833) 준수를 보장합니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 제 7 장 에너지 및 산업 분야에서의 텅스텐-니켈-구리 합금의 응용

텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 우수한 열전도도, 낮은 열팽창 계수를 특징으로 하여 에너지 및 산업 분야에서 탁월한 응용 잠재력을 보여주었으며, 특히 신에너지 자동차, 항공우주 및 산업 장비와 같이 수요가 높은 분야에서 그 잠재력이 매우 큼니다. 본 합금은 분말 야금 공정으로 제조되며, 텅스텐의 고밀도와 니켈-구리 접합의 인성 및 열전도도를 결합하여 열 관리, 중량 균형 및 전자파 적합성 등 에너지 장비의 엄격한 요건을 충족합니다. 청정 에너지와 효율적인 산업 기술에 대한 전 세계적인 수요 증가에 따라, 신에너지 자동차 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 적용이 점차 중요해지고 있으며, 특히 모터 로터 카운터웨이트 및 배터리 팩 방열 기관 분야에서 그 중요성이 더욱 커지고 있습니다.

### 7.1 신에너지 자동차 분야

신에너지 자동차(순수 전기 자동차 및 하이브리드 자동차 포함)는 효율적인 모터 시스템과 배터리 관리 시스템에 의존하며, 재료의 밀도, 열전도도, 비자성 및 치수 안정성에 대한 높은 요구 사항을 충족합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고유한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 모터 및 배터리 시스템의 핵심 부품에 이상적인 소재로 자리 잡았습니다. 고밀도 특성은 정밀한 중량 균형을 제공하고 모터 로터의 동적 균형을 최적화합니다. 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수는 배터리 시스템의 열 관리를 지원하고 작동 안정성과 안전성을 유지합니다. 비자성 특성은 전자기 간섭을 방지하고 모터 및 전자 시스템의 성능을 보장합니다. 이 합금은 액상 소결, 열간 등방성 성형 및 정밀 가공 공정을 통해 제조되어 신에너지 자동차의 고정밀 및 내구성 요구를 충족합니다.

#### 7.1.1 모터 로터 중량

모터 로터 카운터웨이트는 신에너지 자동차 구동 시스템의 핵심 부품입니다. 로터의 무게 중심 분포를 조정하고, 고속 회전 시 모터의 동적 균형을 확보하며, 진동과 소음을 줄이고, 효율과 수명을 향상시키는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도와 비자성 특성으로 인해 모터 로터 카운터웨이트에 적합한 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 제한된 체적 내에서 충분한 질량을 제공하고, 로터의 무게 중심 위치를 정확하게 제어하며, 고속 회전 시 편심 진동을 줄이고, 모터 베어링의 수명을 연장합니다. 비자성 특성은 자기장 간섭을 방지하고 고주파 전자기 환경에서 모터의 안정적인 작동을 보장합니다. 특히 영구 자석 동기 모터 또는 유도 모터에 적합합니다. 합금의 낮은 열팽창 계수는 모터 작동으로 발생하는 온도 상승에도 카운터웨이트가 치수 안정성을 유지하고 로터 밸런스 정확도를 유지합니다. 제조 공정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 금속 사출 성형 또는 분말 야금 공정을 통해 카운터웨이트 부품을 제조하여 복잡한 형상 및 소형화 설계 요건을 충족합니다. MIM 기술은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하고, 사출 성형 후 탈지 및 액상 소결을 통해 고밀도 구조를 형성합니다. 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적셔 기계적 성질과 열전도도를 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 미세 기공을 제거하고 카운터웨이트의 밀도와 강도를 향상시키며 고성능 모터 응용 분야에 적합합니다. 정밀 가공은 마이크론 수준의 공차를 달성하여 카운터웨이트와 로터의 정확한 매칭을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

보장합니다. 표면 처리는 내식성과 표면 조도를 향상시키고 마찰과 마모를 줄입니다.

신에너지 자동차에서 텅스텐-니켈-구리 모터 로터 중량은 구동 시스템 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 전기 자동차 주 구동 모터에서 고밀도 중량은 진동과 소음을 줄이고 출력 효율을 향상시킵니다. 하이브리드 자동차 모터 시스템에서는 비자성 중량이 전자기 간섭을 방지하고 제어 정확도를 향상시킵니다. 최적화 방향에는 니켈-구리 비율 최적화를 통한 열전도도 향상, 경량 미세 구조 설계(예: 중공 중량)를 통한 질량 감소, 또는 적층 제조 기술을 결합하여 복잡한 형상 맞춤화 등이 있습니다. 품질 관리는 밀도 측정, 진동 시험, 자화 강도 시험을 통해 중량 성능을 검증하여 자동차 산업 표준 준수를 보장합니다.

### 7.1.2 배터리 팩 방열 기관

배터리 팩의 방열 기관은 신에너지 자동차의 배터리 관리 시스템에서 핵심 구성 요소입니다. 배터리 작동 중 발생하는 고열을 신속하게 분산시켜 과열로 인한 성능 저하나 안전 위험을 방지하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수를 가지고 있어 배터리 팩의 방열 기관으로 이상적인 소재입니다. 높은 열전도도는 구리의 빠른 열전도도에 기인하며, 이는 배터리(예: 리튬 이온 배터리)에서 발생하는 열을 방열 시스템으로 빠르게 전달하여 배터리의 이상적인 작동 온도를 유지할 수 있도록 합니다. 낮은 열팽창 계수는 배터리 소재(예: 흑연 또는 세라믹 격막)의 열팽창 특성과 일치하여 열 응력으로 인한 변형이나 균열을 줄이고 배터리 팩의 구조적 안정성을 보장합니다. 비자성 특성은 전자기 간섭을 방지하며 배터리 관리 시스템의 전자 제어 장치(ECU) 근처에서 사용하기에 적합합니다.

제조 공정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 또는 MIM 기술을 통해 방열 기관을 제조하여 배터리 팩의 얇은 벽, 고정밀 구조 요건을 충족합니다. 액상 소결은 니켈-구리 결합상이 고르게 분포된 치밀한 미세 구조를 형성하여 열전도도와 기계적 특성을 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 잔류 기공을 제거하고 기관의 밀도와 내구성을 향상시키며 고출력 배터리 응용 분야에 적합합니다. 정밀 가공(마이크로 밀링 또는 레이저 가공 등)을 통해 복잡한 방열 채널 또는 박판 구조를 구현하여 배터리 모듈과의 밀착성을 확보합니다. 표면 처리(PVD TiN 코팅 또는 화학적 부동태화 등)는 내식성과 내산화성을 향상시키고 습하거나 고온 환경에서 기관의 수명을 연장합니다. 열전도 효율에 영향을 미치는 먼지 오염을 방지하기 위해 가공은 클린룸에서 수행해야 합니다.

신에너지 자동차에서 텅스텐-니켈-구리 방열 기관은 배터리 팩 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 고성능 전기 자동차의 경우, 기관의 빠른 방열은 배터리 온도 상승을 줄여 배터리 수명과 충전 효율을 향상시킵니다. 상용 전기 버스의 경우, 낮은 열팽창 계수는 열 사이클 동안 배터리 팩의 구조적 안정성을 보장합니다. 최적화 방향으로는 마이크로채널 설계를 통한 방열 효율 향상, 복합 코팅(예: 그래핀)을 이용한 열 저항 감소, 또는 3D 프린팅 기술을 결합하여 복잡한 방열 구조를 맞춤 제작하는 것이 있습니다. 품질 관리 부서는 열전도도 시험(레이저 플래시 방식), 열팽창 계수 측정, 염수 분무 시험을 통해 기관 성능을 검증하여 자동차 산업 표준 준수를 보장합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 7.2 산업용 냉각 솔루션

산업용 방열 솔루션은 현대 산업 장비의 안정적인 작동을 위한 핵심 기술입니다. 고전력 전자 부품이나 시스템에서 발생하는 열을 효율적으로 관리하여 과열로 인한 성능 저하나 장비 고장을 방지합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수, 그리고 비자성 특성을 갖추고 있어 산업용 방열 부품에 이상적인 소재입니다. 열을 빠르게 분산시키고, 치수 안정성을 유지하며, 전자기 간섭을 방지합니다. 이 합금은 고밀도와 우수한 기계적 특성을 갖추고 있어 데이터 센터 서버, 산업 자동화 장비, 전력 반도체 모듈과 같은 열악한 환경에서 장기간 사용하기에 적합합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 액상 소결, 열간 등방성 성형, 정밀 가공 공정을 통해 제조되어 치밀한 미세 구조를 형성합니다. 이는 산업용 방열의 높은 정밀도와 내구성 요구를 충족하며, 고성능 산업 장비의 안정적인 작동을 지원합니다.

### 7.2.1 서버 냉각베이스

서버 방열판은 데이터 센터 서버의 핵심 구성 요소입니다. CPU, GPU 또는 메모리 모듈에서 발생하는 높은 열을 빠르게 분산시켜 고부하 환경에서 서버의 안정성과 신뢰성을 보장합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 열전도율과 낮은 열팽창 계수를 가지고 있어 서버 방열판에 적합한 소재입니다. 높은 열전도율은 구리의 빠른 열전도율에 기인하며, 프로세서에서 발생하는 열을 라디에이터 또는 수냉 시스템으로 빠르게 전달하여 칩 온도를 낮추고 장비 수명을 연장합니다. 낮은 열팽창 계수는 실리콘 기반 칩이나 세라믹 기판의 열팽창 특성과 일치하여 열 응력으로 인한 변형이나 균열을 줄이고 기판과 칩 사이의 장기적인 접촉 안정성을 보장합니다. 비자성 특성은 전자기 간섭을 방지하며 데이터 센터의 고밀도 전자기 환경에 적합합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 공정을 통해 방열판으로 제조되며, 일반적으로 냉간 등방압 성형 또는 금속 사출 성형(MIM) 기술을 사용하여 고정밀 빌릿을 형성합니다. 액상 소결은 니켈-구리 액상이 텅스텐 입자를 적셔 치밀한 미세 구조를 형성하고 열전도도와 기계적 특성을 향상시킵니다. 열간 등방압 성형은 미세 기공을 제거하고 기판의 밀도와 내구성을 향상시키며 고부하 서버 애플리케이션에 적합합니다. 정밀 가공을 통해 복잡한 방열 채널 또는 박판 구조를 구현하여 칩과의 밀착성을 확보합니다. 표면 처리(전기화학 연마 또는 PVD TiN 코팅 등)는 표면 조도와 내식성을 향상시키고, 내열성을 낮추며, 내산화성을 향상시킵니다. 열전도 효율에 영향을 미치는 먼지 오염을 방지하기 위해 가공은 클린룸에서 수행해야 합니다.

서버 애플리케이션에서 텅스텐-니켈-구리 방열판은 데이터 센터 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 고성능 컴퓨팅(HPC) 서버에서는 베이스의 빠른 방열이 칩 온도 상승을 줄이고 지속적인 고부하 작동을 지원합니다. 클라우드 컴퓨팅 서버에서는 낮은 열팽창 계수가 열 사이클에서 구조적 안정성을 보장하고 유지 보수 비용을 절감합니다. 최적화 방향으로 마이크로채널 설계를 통한 방열 효율 향상, 나노 코팅(예: 그래핀)을 통한 열 저항 감소, 또는 3D 프린팅 기술을 결합하여 복잡한 방열 구조를 맞춤 설계하는 것이 있습니다. 품질 관리는 열전도도 테스트(레이저 플래시 방식), 열팽창 계수 측정,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

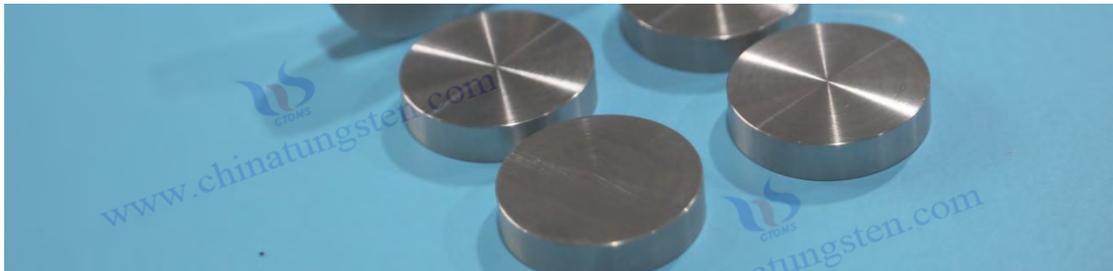
내구성 테스트를 통해 베이스의 성능을 검증하여 ASHRAE 등 데이터 센터 표준 준수를 보장합니다.

### 7.2.2 전력 반도체 패키징 기판

전력 반도체 패키지 기판은 고전력 전자 소자의 핵심 부품입니다. 칩을 지지하고 작동 중 발생하는 고열을 빠르게 분산시켜 고전압, 고전류 환경에서 소자의 성능과 신뢰성을 보장합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수, 그리고 비자성 특성을 갖추고 있어 전력 반도체 패키지 기판에 이상적인 소재입니다. 높은 열전도도는 반도체 칩에서 방열 시스템으로 열을 빠르게 전달하여 접합 온도를 낮추고 소자의 효율과 수명을 향상시킵니다. 낮은 열팽창 계수는 실리콘이나 탄화규소와 같은 칩 소재의 열팽창 특성과 일치하여 열 응력으로 인한 패키지 고장을 줄이고 장기적인 안정성을 보장합니다. 비자성 특성은 전자파 간섭을 방지하여 고주파 전력 전자 응용 분야에 적합합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 또는 MIM 기술을 통해 얇은 벽의 고정밀 구조에 대한 요구를 충족하는 패키징 기판을 제조하는 데 사용됩니다. 액상 소결은 니켈-구리 결합상이 균일하게 분포된 치밀한 미세 구조를 형성하여 열전도도와 기계적 특성을 향상시킵니다. 열간 등방성 가압 성형은 잔류 기공을 제거하고 기판의 밀도와 내구성을 향상시키며 고출력 응용 분야에 적합합니다. 정밀 가공(예: 마이크로 밀링 또는 전기 스파크 가공)은 칩과의 밀착 접합을 위해 마이크론 단위로 제어되는 공차로 평평한 표면과 정밀한 치수를 구현합니다. 표면 처리(예: PVD CrN 코팅 또는 화학적 부동태화)는 내식성과 내산화성을 향상시키고 고온 또는 습한 환경에서 기판의 수명을 연장합니다. 기판 표면은 일반적으로 용접 또는 열전도성 접착제를 통해 칩에 접합되며, 계면 열 저항은 최소화되어야 합니다.

전력 반도체 애플리케이션에서 텅스텐-니켈-구리 패키징 기판은 소자 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 산업용 인버터에서 기판의 빠른 방열은 IGBT 모듈의 전력 밀도와 신뢰성을 향상시킵니다. 풍력 발전 인버터에서는 낮은 열팽창 계수가 열 사이클에서 패키지의 안정성을 보장합니다. 최적화 방향으로서는 니켈-구리 비율을 최적화하여 열전도도를 향상시키거나, 다층 복합 구조를 사용하여 열 확산 효율을 개선하거나, 적층 제조 기술을 결합하여 복잡한 방열 경로를 맞춤형하는 것이 있습니다. 품질 관리는 열전도도 테스트, 열팽창 계수 측정, 고온 노화 테스트를 통해 기판 성능을 검증하여 산업 표준(예: IEC 60747) 준수를 보장합니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

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

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



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 제 8 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 국방산업 응용

텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 우수한 열전도도, 낮은 열팽창 계수를 특징으로 하여 국방 및 군수 산업 분야에서 탁월한 응용 가치를 보여주었으며, 특히 전자 대응 장비, 무기 시스템 및 보호 장비에 널리 사용됩니다. 본 합금은 분말 야금 공정으로 제조되었으며, 텅스텐의 고밀도와 니켈-구리 접합의 인성 및 열전도도를 결합하여 군수 장비의 엄격한 중량 제어, 전자파 적합성 및 극한 환경 내성 요건을 충족합니다. 현대전에서 고정밀, 고신뢰성, 그리고 은폐성에 대한 수요가 증가함에 따라, 전자 대응 장비, 특히 재머 중량 부품 및 레이더 기만 부품에 텅스텐-니켈-구리 합금을 적용하는 것이 점점 더 중요해지고 있습니다.

### 8.1 전자 대응 장비

전자대책 장비는 현대 국방 및 군수 산업 분야의 핵심 기술입니다. 적의 레이더, 통신 시스템, 항법 장비를 교란하거나 기만하여 아군이나 장비의 안전을 보호하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수를 갖추고 있어 전자대책 장비의 핵심 부품으로 이상적인 소재입니다. 고밀도 특성은 제한된 부피 내에서 충분한 질량을 제공하고 장비의 무게 분포와 동적 균형을 최적화합니다. 비자성 특성은 전자기 간섭을 방지하고 고주파 전자기 환경에서의 작동 안정성을 보장합니다. 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수는 열 관리 및 치수 안정성을 지원하여 고강도 및 신속한 배치가 요구되는 군사 시나리오에 적합합니다. 이 합금은 액상 소결, 열간 등방성 성형, 정밀 가공 공정을 통해 제조되어 전자대책 장비의 고정밀 및 내구성 요건을 충족하는 치밀한 미세 구조를 형성합니다.

#### 8.1.1 대책 및 중량 구성요소

재머의 카운터웨이트 어셈블리는 전자 대응 장비의 핵심 부품입니다. 재머(동축 채프 또는 적외선 기만 장치 등)의 무게 중심을 조정하여 고속 발사 및 비행 시 동적 안정성과 궤적 정확도를 보장하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도 및 비자성 특성으로 인해 재머의 카운터웨이트 어셈블리에 적합한 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 작은 부피로 충분한 질량을 제공하고, 재머의 무게 중심을 정확하게 제어하며, 공기역학적 성능을 최적화하고, 비행 거리를 늘리거나 전달 정확도를 향상시킬 수 있습니다. 비자성 특성은 재머 내부 전자 부품(예: 탐색기 또는 제어 회로)에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 복잡한 전자기 환경에서도 정상적인 작동을 보장합니다. 합금의 낮은 열팽창 계수는 고속 비행으로 발생하는 공기 마찰열이나 주변 온도 차이에서도 카운터웨이트 어셈블리의 치수 안정성을 보장합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 금속 사출 성형(MIM) 또는 분말 야금 공정을 통해 카운터웨이트 부품을 제조하여 소형화 및 복잡한 형상을 요구하는 재머의 요구 사항을 충족합니다. MIM 기술은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하고, 탈지 및 사출 성형 후 액상 소결을 통해 고밀도 구조를 형성합니다. 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적서 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 미세 기공을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제거하고 카운터웨이트의 밀도와 강도를 향상시키며, 높은 동적 하중 적용 분야에 적합합니다. 정밀 가공(CNC 밀링 또는 EDM 등)을 통해 마이크론 수준의 공차를 달성하여 카운터웨이트와 재머 구조의 정밀한 일치를 보장합니다. 표면 처리는 내식성과 내산화성을 향상시켜 습하거나 고온 환경에서 부품의 수명을 연장합니다.

전자 대응책 응용 분야에서 텅스텐-니켈-구리 균형추 어셈블리는 재머의 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 함선용 채프 재머에서 고밀도 균형추는 미사일 본체의 궤적을 최적화하여 적의 레이더 탐지 범위를 정확하게 포착합니다. 적외선 기만 폭탄에서 비자성 균형추는 전자 유도 시스템 간섭을 방지하고 유도 효과를 향상시킵니다. 최적화 방향에는 니켈-구리 비율을 최적화하여 열전도도를 높이고, 미세 구조 설계(예: 중공 균형추)를 사용하여 질량을 줄이거나, 적층 제조 기술을 결합하여 복잡한 형상을 맞춤형 제작하는 것이 포함됩니다. 품질 관리는 밀도 측정, 진동 시험, 자화 강도 시험을 통해 균형추의 성능을 검증하여 균 표준을 준수하는지 확인합니다.

### 8.1.2 레이더 미끼 구성 요소

레이더 디코이 부품은 전자 대응 장비의 중요한 부분으로, 표적 신호를 모사하거나 적 레이더를 교란하여 아군의 항공기, 함선 또는 지상 장비를 탐지 및 공격으로부터 보호하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도, 비자성, 높은 열전도도를 갖추고 있어 레이더 디코이 부품에 이상적인 소재입니다. 높은 밀도 덕분에 작은 부피에도 충분한 질량을 제공하여 실제 표적의 레이더 단면적(RCS)을 모사하고 디코이의 기만 효과를 강화할 수 있습니다. 비자성 특성은 디코이 내부 전자 부품(예: 안테나 또는 신호 발생기)에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 고주파 전자기 환경에서 안정적인 작동을 보장합니다. 높은 열전도도는 고속 비행 또는 고출력 작동 시 디코이에서 발생하는 열을 빠르게 분산시켜 과열 및 고장을 방지합니다. 낮은 열팽창 계수는 극한 온도 차이에서도 부품의 치수 안정성을 보장합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 MIM(분말 야금) 공정을 통해 레이더 디코이 부품을 제조하여 복잡한 형상과 고정밀도 요건을 충족합니다. MIM 기술은 사출 성형을 통해 미세 빌릿을 형성하고, 액상 소결 및 열간 등방성 가압 성형은 밀도를 향상시키고 미세 기공을 제거하며 열전도도와 기계적 특성을 향상시킵니다. 정밀 가공(예: 레이저 미세 가공 또는 전기 스파크 가공)은 마이크론 단위로 제어되는 공차를 가진 복잡한 기하학적 형상을 구현하여 레이더 디코이의 소형화 설계에 적합합니다. 표면 처리(예: PVD TiN 코팅 또는 전기 화학적 연마)는 내식성과 표면 조도를 향상시키고, 신호 산란을 줄이며, 내산화성을 향상시킵니다. 먼지 오염으로 인한 부품 성능 저하를 방지하기 위해 가공은 클린룸에서 수행되어야 합니다.

레이더 유인 장치(decoy)에서 텅스텐-니켈-구리 부품은 대응 효과를 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 드론 유인 장치에서 고밀도 부품은 실제 항공기의 RCS(무인비행대수)를 시뮬레이션하여 적 레이더를 기만합니다. 함상 유인 장치에서는 비자성 특성과 높은 열전도도를 통해 고출력 작동 시 유인 장치의 안정성과 신뢰성을 보장합니다. 최적화 방향으로는 니켈-구리 비율을 조정하여 전도성을 향상시키거나, 다층 복합 구조를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사용하여 전자과 차폐 효과를 강화하거나, 3D 프린팅 기술을 결합하여 복잡한 유인 장치 구조를 제작하는 것이 있습니다. 품질 관리 부서는 전자과 차폐 시험(MIL-STD-461), 열전도도 시험, 고온 노화 시험을 통해 부품 성능을 검증하여 군 표준 준수를 보장합니다.

## 8.2 탄약 시스템

방위 산업의 핵심 부품으로서, 중량 분포 최적화를 위한 고밀도, 고속 충격에 대한 우수한 기계적 특성, 그리고 전자기 간섭 방지를 위한 비자성 특성을 요구하는 소재입니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도, 비자성, 고강도, 그리고 낮은 열팽창 계수를 갖추고 있어 탄약 시스템의 균형추 및 균형 부품에 이상적인 소재입니다. 높은 밀도 덕분에 제한된 부피 내에서 충분한 질량을 제공하여 탄약의 비행 안정성과 관통력을 최적화할 수 있습니다. 비자성 특성은 탄약의 전자 유도 시스템을 방해하지 않습니다. 높은 강도와 인성은 발사 및 비행 중 극한의 기계적 하중을 견딜 수 있도록 합니다. 낮은 열팽창 계수는 고온 또는 온도차 환경에서 치수 안정성을 보장합니다. 이 합금은 액상 소결, 열간 등방성 성형, 정밀 가공 공정을 통해 탄약 시스템의 고정밀 및 내구성 요건을 충족하는 치밀한 미세 구조를 형성합니다.

### 8.2.1 발사체 탄두 균형추

발사체 탄두의 균형추는 발사체 설계의 핵심 요소입니다. 탄두의 균형추는 발사체의 무게 중심을 조정하고 고속 발사 및 비행 시 동적 안정성과 관통 정확도를 보장하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도와 비자성 특성으로 인해 발사체 탄두의 균형추로 선호되는 소재입니다. 높은 밀도 덕분에 이 합금은 제한된 체적 내에서 충분한 질량을 제공하고, 발사체의 무게 중심을 정확하게 제어하며, 공기역학적 성능을 최적화하고, 비행 중 편향을 줄이며, 명중 정확도를 향상시킵니다. 비자성 특성은 발사체 내부의 전자 부품(예: 유도 시스템 또는 신관)에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 복잡한 전자기 환경에서 안정적인 작동을 보장합니다. 합금의 높은 강도와 인성은 발사체 발사 시 발생하는 엄청난 충격력과 고속 비행 시 발생하는 진동을 견딜 수 있도록 합니다. 낮은 열팽창 계수는 높은 발사 온도 또는 주변 온도 차이에서도 치수 안정성을 보장합니다.

제조 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 또는 금속 사출 성형(MIM) 기술을 통해 균형추를 제조하여 포탄의 복잡한 형상과 고정밀도 요건을 충족합니다. MIM 기술은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하고, 탈지 및 사출 성형 후 액상 소결을 통해 고밀도 구조를 형성합니다. 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적셔 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 미세 기공을 제거하고 균형추의 밀도와 내충격성을 향상시켜 고성능 포탄에 적합합니다. CNC 선삭 또는 EDM 과 같은 정밀 가공은 마이크론 수준의 공차를 달성하여 균형추와 탄두 구조의 정밀한 일치성을 보장합니다. 표면 처리는 내식성과 내산화성을 향상시키고 습하거나 고온 환경에서 균형추의 수명을 연장합니다.

포탄 적용 분야에서 텅스텐-니켈-구리 균형추는 탄약 성능을 크게 향상시킵니다. 예를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

들어, 전자 포탄에서 고밀도 균형추는 탄두의 비행 안정성을 최적화하고 장갑 관통력을 향상시킵니다. 함포 탄약에서 비자성 균형추는 전자 신관의 간섭을 방지하고 명중률을 향상시킵니다. 최적화 방향에는 니켈-구리 비율 최적화를 통한 인성 향상, 미세 구조 설계(예: 밀도 구배 균형추)를 통한 무게 중심 분포 최적화, 또는 적층 제조 기술과의 결합을 통한 복잡한 형상 맞춤 제작 등이 포함됩니다. 품질 관리 부서는 밀도 측정, 충격 시험, 자화 강도 시험을 통해 균형추 성능을 검증하여 군 표준 준수를 보장합니다.

### 8.2.2 미사일 탄두 균형 구성 요소

미사일 탄두 균형 부품은 미사일 시스템의 핵심 부품으로, 탄두의 무게 중심 분포를 조정하여 고속 비행 및 기동 시 미사일의 안정성과 정밀 유도 성능을 확보하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도, 비자성, 그리고 높은 강도를 갖추고 있어 미사일 탄두 균형 부품에 이상적인 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 작은 부피에 충분한 질량을 제공하고, 탄두의 무게 중심을 정확하게 제어하며, 특히 초음속 또는 고속 기동 비행 시 미사일의 비행 궤적과 자세 안정성을 최적화합니다. 비자성 특성은 탄두 전자 시스템(예: 레이더 탐색기 또는 관성 항법 시스템)에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 고정밀 유도를 보장합니다. 이 합금은 높은 강도와 인성을 갖추고 있어 발사 충격과 비행 중 극한의 기계적 하중을 견딜 수 있으며, 낮은 열팽창 계수는 고온 마찰이나 주변 온도 차이에서도 치수 안정성을 보장합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 MIM(분말 야금) 공정을 통해 균형 잡힌 부품으로 제조되어 미사일 탄두의 소형화 및 복잡한 형상 요구를 충족합니다. MIM 기술은 사출 성형을 통해 미세 빌릿을 형성하고, 액상 소결 및 열간 등방성 성형은 밀도를 향상시키고 미세 기공을 제거하며 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 정밀 가공(예: 레이저 미세 가공 또는 전기 스파크 가공)은 마이크론 단위로 제어되는 공차를 가진 복잡한 기하학적 형상을 구현하여 탄두의 소형 설계에 적합합니다. 표면 처리(예: PVD CrN 코팅 또는 전기화학 연마)는 내식성과 표면 조도를 향상시키고, 공기 마찰열의 영향을 줄이며, 내산화성을 향상시킵니다. 먼지 오염이 부품 성능에 영향을 미치지 않도록 고청정 환경에서 가공해야 합니다.

미사일 응용 분야에서 텅스텐-니켈-구리 밸런스 부품은 탄두 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 대함 미사일의 경우, 고밀도 밸런스 부품은 탄두의 무게중심 분포를 최적화하고 고속 비행 안정성을 향상시킵니다. 정밀 유도 미사일의 경우, 비자성 및 고강도는 유도 시스템의 신뢰성과 내충격성을 보장합니다. 최적화 방향에는 니켈-구리 비율 조정을 통한 열전도도 향상, 다층 복합재 구조를 통한 기계적 특성 향상, 또는 3D 프린팅 기술을 결합하여 복잡한 밸런스 구조 제작 등이 포함됩니다. 품질 관리는 밀도 측정, 진동 시험, 전자파 차폐 시험을 통해 부품 성능을 검증하여 군 표준 준수를 보장합니다.

### 8.3 장갑 보호 장비

장갑 보호 장비는 국방 군사 산업의 핵심 요소입니다. 투사체, 폭발 파편 또는 기타

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

위험으로부터 인원, 차량 및 시설을 보호하는 데 사용됩니다. 경량성과 높은 보호 성능의 균형을 이루기 위해서는 고밀도, 고강도, 인성 및 비자성 소재가 필요합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도와 우수한 기계적 특성으로 인해 강력한 충격 저항성을 제공합니다. 비자성 특성은 전자기 간섭을 방지하여 전자 장비가 통합된 최신 장갑 시스템에 적합합니다. 낮은 열팽창 계수는 극한 온도에서도 치수 안정성을 보장합니다.

### 8.3.1 경량 장갑판 보강재

경량 장갑판 보강재는 장갑 방호 장비의 핵심 부품입니다. 장갑판의 방탄 성능을 향상시키면서 무게를 최대한 줄이는 데 사용됩니다. 휴대용 방호 장비(예: 방탄조끼)나 경장갑차에 적합합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도, 높은 강도, 그리고 높은 인성으로 인해 경량 장갑판 보강재로 선호되는 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 합금은 제한된 부피 내에서 충분한 질량을 제공하고, 장갑판의 내충격성을 향상시키며, 발사체나 폭발 파편의 운동 에너지를 효과적으로 흡수하고 분산시킵니다. 니켈-구리 결합층의 높은 인성은 합금이 고속 충격 시 취성 파괴를 일으키지 않도록 하고, 소성 변형을 통해 에너지를 흡수하여 방호 성능을 향상시킵니다. 비자성 특성은 장갑판에 내장된 전자 장비(예: 통신 장비 또는 센서)에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 현대 전장의 복잡한 전자기 환경에 적합합니다. 낮은 열팽창 계수는 고온 폭발이나 주변 온도 차이에서도 보강재의 치수 안정성을 보장합니다.

텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 또는 금속 사출 성형(MIM) 기술을 통해 강화재를 제조하여 복잡한 형상과 경량화를 요구하는 경량 장갑판의 요구 사항을 충족합니다. MIM 기술은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하고, 사출 성형 후 탈지 및 액상 소결을 통해 고밀도 구조를 형성합니다. 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적셔 인성과 기계적 특성을 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 미세 기공을 제거하고 강화재의 밀도와 내충격성을 향상시키며, 높은 동적 하중 적용에 적합합니다. 정밀 가공(CNC 밀링 또는 EDM 등)을 통해 정밀한 기하학적 형상과 치수 공차를 확보하여 강화재와 장갑판의 완벽한 일체화를 보장합니다. 표면 처리(PVD TiN 코팅 또는 화학적 부동태화 등)는 내식성과 내마모성을 향상시켜 혹독한 환경에서도 강화재의 수명을 연장합니다. 장갑차 분야에서 텅스텐-니켈-구리 보강재는 경장갑판의 방호 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 방탄조끼의 경우, 보강재는 경량성을 유지하면서도 장갑 관통탄에 대한 저항력을 향상시키고 병사의 기동성을 향상시킵니다. 경장갑차의 경우, 고밀도 보강재는 장갑판의 내충격성을 최적화합니다. 최적화 방향에는 니켈-구리 비율을 최적화하여 인성을 향상시키거나, 복합 구조(예: 세라믹과 결합)를 사용하여 방호 효율을 높이거나, 적층 제조 기술을 결합하여 복잡한 보강재를 맞춤형 제작하는 것이 포함됩니다. 품질 관리는 밀도 측정, 충격 시험, 전자파 차폐 시험을 통해 보강재의 성능을 검증하여 군 표준 준수를 보장합니다.

### 8.3.2 장갑차 보호 라이닝

장갑차 보호 라이닝은 장갑차 내부의 핵심 보호 부품으로, 폭발 충격파, 투사체 또는 파편 에너지를 흡수 및 분산시켜 탑승자와 주요 장비를 손상으로부터 보호하는 데 사용됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 고강도, 비자성 특성으로 인해 장갑차 보호 라이닝 소재로 선호되고 있습니다. 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 충격 에너지를 효과적으로 흡수하고, 폭발물이나 투사체의 관통력을 줄이며, 차량의 보호 성능을 향상시킵니다. 니켈-구리 접합 상(phase)의 높은 인성은 라이닝이 고속 충격 시 소성 변형을 통해 에너지를 흡수하고, 취성 파괴를 방지하며, 다중 충격 저항력을 향상시킵니다. 비자성 특성은 라이닝이 차량 내부의 전자 시스템(예: 항법 장치 또는 통신 장비)을 방해하지 않도록 하여 최신 지능형 장갑차에 적합합니다. 낮은 열팽창 계수는 고온 폭발이나 주변 온도 차이에서도 라이닝의 치수 안정성을 보장하고 보호 구조의 무결성을 유지합니다.

제조 공정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 또는 MIM 기술을 통해 보호 라이닝을 제조하여 장갑차의 복잡한 형상 및 경량화 요구를 충족합니다. 액상 소결은 치밀한 미세 구조를 형성하고, 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적셔 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 열간 등방압 성형은 미세 기공을 제거하고 라이닝의 밀도와 내충격성을 향상시키며, 고강도 보호 용도에 적합합니다. CNC 연삭 또는 레이저 가공과 같은 정밀 가공을 통해 복잡한 기하학적 형상을 구현하고, 마이크론 단위의 공차를 제어하여 라이닝이 차량 구조에 정확하게 맞도록 합니다. 표면 처리(PVD CrN 코팅 또는 화학적 부동태화)는 내식성과 내산화성을 향상시키고 습하거나 고온 환경에서 라이닝의 수명을 연장합니다. 먼지 오염으로 인한 성능 저하를 방지하기 위해 고청정 환경에서 가공해야 합니다. 장갑차 분야에서 텅스텐-니켈-구리 보호 라이닝은 방호 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 주력전차에서 고밀도 라이닝은 폭발 충격 에너지를 효과적으로 흡수하여 탑승자의 안전을 보호합니다. 장갑차에서는 비자성 라이닝이 전자 장비의 안정적인 작동을 보장합니다. 최적화 방향으로 미세 구조 설계(예: 밀도 구배 라이닝)를 통한 에너지 흡수 효율 향상, 복합 코팅을 이용한 내마모성 향상, 3D 프린팅 기술을 활용한 맞춤형 라이닝 구조 제작 등이 있습니다. 품질 관리는 밀도 측정, 충격 시험, 고온 노화 시험을 통해 라이닝 성능을 검증하여 군 표준 준수를 보장합니다.

## 8.4 우주 무기

우주 무기에는 로켓, 미사일, 우주선과 같은 시스템이 포함되며, 이러한 시스템은 무게 분포를 최적화하기 위한 고밀도 소재, 극한의 열 환경을 견디기 위한 뛰어난 열전도도와 고온 저항성, 전자기 간섭을 방지하기 위한 비자성, 그리고 치수 안정성을 보장하기 위한 낮은 열팽창 계수를 필요로 합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고유한 물리적 및 화학적 특성으로 인해 항공우주 무기의 핵심 부품에 이상적인 소재로 자리 잡았습니다. 고밀도 특성은 제한된 부피 내에서 충분한 질량을 제공하여 시스템의 무게 중심 분포와 동적 균형을 최적화합니다. 높은 열전도도와 고온 저항성은 높은 열 흐름 환경에서 부품의 성능을 지원합니다. 비자성 특성은 정밀 전자 시스템의 간섭을 방지하며, 낮은 열팽창 계수는 극한 온도에서 기하학적 안정성을 보장합니다.

### 8.4.1 로켓 엔진 노즐 구성 요소

로켓 엔진 노즐 부품은 항공우주 무기의 핵심 부품입니다. 고온 및 고압 가스를 유도하고 가속하여 로켓 추력을 효율적으로 출력하는 데 사용되며, 극한의 고온, 열충격 및 기계적

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

응력을 견뎌야 합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 열전도도, 고온 저항성, 낮은 열팽창 계수를 갖추고 있어 노즐 부품(예: 스포트 라이너 또는 노즐 연장부)에 적합한 소재입니다. 높은 열전도도는 구리의 빠른 열전도도에 기인하며, 연소실 내 고온에서 노즐의 열을 빠르게 분산시켜 국부 과열 및 재료 파손을 방지합니다. 낮은 열팽창 계수는 급격한 온도 차이에서도 노즐의 기하학적 안정성을 보장하고, 가스 흐름의 정밀한 유도를 유지하며, 추력 효율을 향상시킵니다. 합금의 높은 밀도와 인성은 고속 가스 흐름의 마모 및 진동을 견딜 수 있도록 하며, 니켈-구리 접합상의 가스성은 열충격 에너지를 흡수하여 취성 파괴를 방지합니다. 비자성 특성으로 인해 로켓 항해나 제어 시스템의 전자 부품에 간섭이 발생하지 않습니다.

제조 공정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 또는 금속 사출 성형(MIM) 기술을 통해 노즐 부품을 제조하여 복잡한 형상과 고정밀도 요건을 충족합니다. 액상 소결은 치밀한 미세 구조를 형성하고, 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적서 열전도도와 기계적 특성을 향상시킵니다. 열간 등방성 가압 성형은 미세 기공을 제거하고 부품의 밀도와 고온 저항성을 향상시키며, 고열 유동 환경에 적합합니다. 정밀 가공(CNC 연삭 또는 전기 스파크 가공 등)은 마이크론 단위로 제어되는 공차로 복잡한 기하학적 형상을 구현하여 노즐의 공기역학적 성능을 보장합니다. 표면 처리(PVD CrN 코팅 또는 화학적 부동태화 등)는 고온 산화 저항성과 내식성을 향상시키고 극한 환경에서 부품의 수명을 연장합니다. 먼지 오염이 성능에 영향을 미치지 않도록 고정밀 환경에서 가공을 수행해야 합니다. 항공우주 무기 분야에서 텅스텐-니켈-구리 노즐 부품은 로켓 엔진 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 고체 로켓 엔진에서 높은 열전도도의 노즐 부품은 고온 가스 흐름을 효과적으로 관리하고 수명을 연장합니다. 액체 로켓 엔진에서는 낮은 열팽창 계수가 열 사이클 동안 노즐의 기하학적 안정성을 보장합니다. 최적화 방향에는 니켈-구리 비율을 최적화하여 열전도도를 향상시키거나, 복합 코팅을 사용하여 고온 저항성을 개선하거나, 3D 프린팅 기술을 결합하여 복잡한 노즐 구조를 제작하는 것이 포함됩니다. 품질 관리는 열전도도 시험, 열충격 시험, 고온 노화 시험을 통해 부품 성능을 검증하여 항공우주 표준 준수를 보장합니다.

#### 8.4.2 우주선 자세 제어 균형추

우주선 자세 제어 균형추는 우주 무기 및 위성 시스템의 핵심 구성 요소입니다. 우주선의 무게 중심 분포를 조정하여 궤도 작동 또는 기동 중 자세 안정성과 정밀한 제어를 보장하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도, 비자성, 낮은 열팽창 계수를 가지고 있어 자세 제어 균형추에 이상적인 소재입니다. 높은 밀도 덕분에 이 합금은 작은 부피에 충분한 질량을 제공하여 우주선의 무게 중심을 정확하게 제어하고, 자세 조정 효율을 최적화하며, 추진제 소비를 줄일 수 있습니다. 비자성 특성은 우주선 항법 시스템(예: 별 센서 또는 자이로스코프)에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 고정밀 자세 제어를 보장합니다. 낮은 열팽창 계수는 우주 환경의 극한 온도 차이에서도 균형추의 치수 안정성을 보장하고 우주선의 동적 균형을 유지합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 MIM(분말 야금) 공정을 통해 균형추를 제조하여 우주선의 소형화 및 복잡한 형상 요구를 충족합니다. MIM 기술은 사출 성형을 통해 미세

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

빌릿을 형성하고, 액상 소결 및 열간 등방성 성형은 밀도를 향상시키고 미세 기공을 제거하며 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 레이저 미세 가공이나 전기 스파크 가공과 같은 정밀 가공은 마이크로 단위로 제어되는 공차를 가진 복잡한 기하학적 형상을 구현하여 우주선의 소형 설계에 적합합니다. 표면 처리는 내식성과 표면 조도를 향상시키고, 우주 환경에서 미립자 오염이나 방사선 영향을 줄입니다. 먼지 오염이 부품 성능에 영향을 미치지 않도록 고정정 환경에서 가공을 수행해야 합니다.

우주선 응용 분야에서 텅스텐-니켈-구리 균형추는 자세 제어 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 군 정찰 위성에서 고밀도 균형추는 무게 중심 분포를 최적화하고 자세 조정 반응 속도를 향상시킵니다. 미사일 방어 시스템에서는 비자성 균형추가 항법 시스템의 안정적인 작동을 보장합니다. 최적화 방향에는 미세 구조 설계를 통한 질량 감소, 우주 환경 적응성 향상을 위한 내방사선 코팅 사용, 또는 적층 제조 기술을 결합하여 맞춤형 균형추 구조를 구현하는 것이 포함됩니다. 품질 관리는 밀도 측정, 진동 시험, 자화 강도 시험을 통해 균형추 성능을 검증하여 항공우주 표준 준수를 보장합니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 제 9 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 의료 분야 응용

텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 우수한 열전도도, 그리고 우수한 생체적합성으로 인해 의료 분야에서 탁월한 응용 가치를 보여주었으며, 특히 방사선 치료 장비, 영상 장비, 수술 도구 등에 널리 사용됩니다. 본 합금은 분말 야금 공정으로 제조되었으며, 텅스텐의 고밀도와 니켈-구리 접합상의 인성 및 열전도도를 결합하여 의료 장비의 엄격한 방사선 차폐, 열 관리 및 전자파 적합성 요건을 충족합니다. 정밀 의학 및 비침습적 치료 기술의 발전으로 방사선 치료 장비에 텅스텐-니켈-구리 합금을 적용하는 것이 점점 더 중요해지고 있습니다.

### 9.1 방사선 치료 장비

방사선 치료 장비(선형 가속기, 감마 나이프 등)는 현대 의학에서 암 치료에 사용되는 핵심 기술입니다. 이 장비는 고에너지 방사선(X 선 또는 감마선 등)을 정밀하게 제어하여 종양 조직을 표적으로 삼고 주변의 건강한 조직은 보호합니다. 이러한 장비는 방사선을 효과적으로 차폐하기 위한 높은 밀도, 정밀 전자 시스템 간섭을 방지하기 위한 비자성, 작동 중 발생하는 열을 관리하기 위한 뛰어난 열전도도, 그리고 안전을 보장하기 위한 우수한 생체적합성을 요구하는 매우 높은 재료 요건을 가지고 있습니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도 및 비자성 특성으로 인해 방사선을 효과적으로 흡수하고 차폐하며 환자와 의료진을 보호할 수 있습니다. 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수는 고효율 작동 시 장비의 열 관리 및 치수 안정성을 지원합니다. 니켈-구리 바인더 상의 인성은 부품의 내구성을 향상시킵니다. 이 합금은 액상 소결, 열간 등방성 성형, 정밀 가공 공정을 통해 제조되어 의료 장비의 높은 정밀도와 신뢰성 요구를 충족하는 치밀한 미세 구조를 형성합니다.

#### 9.1.1 방사선 치료 차폐 어셈블리

방사선 치료 차폐 부품은 방사선 치료 장비의 핵심 부품으로, 고에너지 방사선을 차폐 및 제한하고, 방사선이 표적 치료 부위에만 작용하도록 하며, 환자의 건강한 조직과 의료진을 불필요한 방사선 노출로부터 보호하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도 및 비자성 특성으로 인해 방사선 치료 차폐 부품에 이상적인 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 X 선이나 감마선을 효과적으로 흡수하고, 방사선 누출을 크게 줄이며, 탁월한 차폐 효과를 제공합니다. 기존 납 소재보다 가볍고 환경 친화적입니다. 비자성 특성은 방사선 치료 장비의 정밀 전자 시스템(예: 자기공명유도시스템)에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 치료 정확도를 보장합니다. 높은 열전도율은 작동 중 발생하는 열을 빠르게 분산시켜 차폐 커버가 과열되어 장비 성능에 영향을 미치는 것을 방지합니다. 낮은 열팽창 계수는 열 사이클 동안 부품의 치수 안정성을 보장하고 차폐 구조의 정확도를 유지합니다.

제조 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 분말 야금 또는 금속 사출 성형(MIM) 기술을 통해 차폐 부품을 제조하여 복잡한 형상과 고정밀도 요건을 충족합니다. MIM 기술은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하고, 탈지 및 사출 성형 후 액상 소결을 통해 고밀도 구조를 형성합니다. 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적셔 기계적 특성과

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열전도도를 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 미세 기공을 제거하고 차폐재의 밀도와 방사선 흡수력을 향상시키며, 고에너지 방사선 치료 분야에 적합합니다. 정밀 가공(CNC 밀링 또는 전기 스파크 가공 등)을 통해 마이크론 단위로 제어되는 허용 오차를 가진 복잡한 형상을 구현하여 방사선 치료 장비와의 완벽한 통합을 보장합니다. 표면 처리(전기 화학적 연마 또는 화학적 부동태화 등)는 내식성과 생체 적합성을 향상시키고, 장기간 사용 시 산화 또는 살균 환경에서의 부식을 방지합니다.

방사선 치료 분야에서 텅스텐-니켈 구리 차폐 부품은 치료 안전성과 정밀도를 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 선형 가속기에서 고밀도 차폐는 방사선 산란을 효과적으로 제한하고 환자의 건강한 조직을 보호합니다. 감마 나이프 장비에서 비자성 차폐는 치료 시스템의 전자파 적합성을 보장합니다. 최적화 방향으로 니켈-구리 비율을 최적화하여 열전도도를 향상시키거나, DLC 와 같은 복합 코팅을 사용하여 내식성을 강화하거나, 3D 프린팅 기술을 결합하여 맞춤형 차폐 구조를 제작하는 것이 있습니다. 품질 관리는 방사선 차폐 시험, 열전도도 시험, 생체 적합성 시험(ISO 10993)을 통해 부품 성능을 검증합니다.

### 9.1.2 방사선 콜리메이터 구성 요소

방사선 콜리메이터 부품은 방사선 치료 장비의 핵심 부품으로, 방사선의 방향과 범위를 정확하게 제어하고, 고에너지 방사선이 종양 조직에 집중되도록 하며, 주변 건강한 조직의 손상을 최소화하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 높은 열전도도를 가지고 있어 방사선 콜리메이터 부품에 적합한 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 산란 방사선을 효과적으로 흡수 및 차폐하고, 정밀한 방사선 빔 형상을 형성하며, 치료의 표적 정확도를 향상시킬 수 있습니다. 비자성 특성은 콜리메이터 근처의 전자 제어 시스템(예: 서보 모터 또는 센서)에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 방사선 빔의 동적 조정 정확도를 보장합니다. 높은 열전도도는 고에너지 방사선의 작용으로 콜리메이터에서 발생하는 열을 빠르게 분산시켜 과열로 인한 변형을 방지합니다. 낮은 열팽창 계수는 열 사이클 동안 부품의 치수 안정성을 보장하고 콜리메이터의 정확도를 유지합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 MIM(분말 야금) 공정을 통해 콜리메이터 부품을 제조하여 복잡한 형상과 마이크론 단위의 정밀성 요건을 충족합니다. MIM 기술은 사출 성형을 통해 미세 빌릿을 형성하고, 액상 소결 및 열간 등방성 성형은 밀도를 향상시키고 미세 기공을 제거하며 방사선 차폐 성능과 기계적 특성을 향상시킵니다. 정밀 가공(예: 레이저 미세 가공 또는 전기 스파크 가공)은 다중 잎 콜리메이터(MLC)의 박판 구조와 같은 복잡한 형상을 구현하며, 마이크론 단위의 공차를 제어하여 빔의 정밀한 제어를 보장합니다. 표면 처리(예: PVD TiN 코팅 또는 전기 화학적 연마)는 내식성과 표면 조도를 향상시키고, 방사선 산란을 줄이며, 내산화성을 향상시킵니다. 먼지 오염이 부품 성능에 영향을 미치지 않도록 고정정 환경에서 가공해야 합니다.

방사선 치료 분야에서 텅스텐 니켈 구리 콜리메이터 부품은 치료 정확도와 안전성을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 세기 변조 방사선 치료(IMRT)에서 고밀도 콜리메이터는 빔을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정확하게 형성하고 복잡한 모양의 종양을 타겟팅합니다. 양성자 치료 장비에서 비자성 콜리메이터는 고정밀 전자기 제어 시스템의 안정적인 작동을 보장합니다. 최적화 방향에는 미세 구조 설계(예: 다공성 콜리메이션 블레이드)를 통한 질량 감소, 내마모성 및 생체 적합성 향상을 위한 나노 코팅 사용, 또는 적층 제조 기술을 결합하여 복잡한 콜리메이션 구조를 구현하는 것이 포함됩니다. 품질 관리는 방사선 차폐 시험, 열전도도 시험, 기하학적 정확도 측정을 통해 부품 성능을 검증하여 의료 표준 준수를 보장합니다.

## 9.2 진단 영상 장비

진단 영상 장비는 현대 의학에서 질병 진단 및 치료 계획 수립에 사용되는 핵심 기술입니다. 고정밀 방사선 또는 자기장을 통해 인체 내부 영상을 생성하기 때문에 방사선 차폐를 위한 고밀도 소재, 전자파 간섭을 방지하는 비자성 소재, 장비 작동 시 발생하는 열을 효과적으로 제어하는 우수한 열전도도, 그리고 안전성을 보장하는 우수한 생체적합성을 갖춰야 합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도 및 비자성 소재로 X 선을 효과적으로 차폐하거나 무게 균형을 유지할 수 있습니다. 높은 열전도도와 낮은 열팽창 계수는 열 관리 및 치수 안정성을 지원합니다. 니켈-구리 바인더 상의 인성은 부품의 내구성을 향상시킵니다. 이 합금은 액상 소결, 열간 등방성 성형, 정밀 가공 공정을 통해 제조되어 진단 영상 장비의 고정밀 및 신뢰성 요구를 충족하는 치밀한 미세 구조를 형성합니다.

### 9.2.1 CT 검출기 보호 부품

CT 검출기 차폐막은 컴퓨터 단층촬영(CT) 장비의 핵심 부품으로, 산란된 X 선을 차폐하고, 검출기 모듈과 환자를 불필요한 방사선 노출로부터 보호하며, 영상 신호의 선명도와 정확성을 보장합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도 및 비자성 특성으로 인해 CT 검출기 차폐막에 선호되는 소재가 되었습니다. 고밀도 특성 덕분에 X 선을 효과적으로 흡수하고 산란된 방사선을 크게 줄일 수 있습니다. 기존 납 소재 보다 얇고 환경 친화적이어서 탁월한 차폐 효과를 제공합니다. 비자성 특성은 자기장이 CT 장비의 정밀 전자 부품(예: 검출기 어레이 또는 신호 처리 회로)에 영향을 미치지 않도록 하여 영상 획득의 안정성을 보장합니다. 높은 열전도율은 작동 중 검출기에서 발생하는 열을 빠르게 분산시켜 과열로 인한 검출기 감도 저하를 방지합니다. 낮은 열팽창 계수는 열 사이클 동안 차폐막의 치수 안정성을 보장하고 검출기 모듈과의 정밀한 맞춤을 유지합니다.

텅스텐-니켈-구리 합금은 금속 사출 성형(MIM) 또는 분말 야금 공정을 통해 보호 부품을 제조하여 복잡한 형상과 고정밀을 요구하는 CT 장비의 요구 사항을 충족합니다. MIM 기술은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하고, 사출 성형 후 탈지 및 액상 소결을 통해 고밀도 구조를 형성합니다. 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적셔 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 미세 기공을 제거하고 보호 부품의 밀도와 방사선 흡수 능력을 향상시키며, 고에너지 X 선 환경에 적합합니다. 정밀 가공은 미크론 단위로 제어되는 공차를 가진 복잡한 기하학적 형상을 구현하여 보호 부품과 검출기 모듈의 완벽한 통합을 보장합니다. 표면 처리(예: 전기 화학적 연마 또는 화학적 부동태화)는 내식성과 생체 적합성을 향상시키고, 장기간 사용 시 산화 또는 살균 환경에

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

의한 부식을 방지합니다.

CT 장비에서 텅스텐-니켈-구리 보호 부품은 영상 품질과 장비 안전성을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 고해상도 CT 스캐너에서 고밀도 보호 부품은 산란선을 효과적으로 줄이고 영상 대비를 향상시킵니다. 이동식 CT 장비에서는 비자성 및 경량 설계를 통해 장비의 휴대성과 전자파 적합성을 지원합니다. 최적화 방향으로 니켈-구리 비율을 최적화하여 열전도도를 향상시키거나, 나노 코팅(예: DLC)을 사용하여 내식성을 강화하거나, 3D 프린팅 기술을 결합하여 맞춤형 보호 구조물을 제작하는 것이 있습니다. 품질 관리는 방사선 차폐 시험(IEC 60601 표준 준수), 열전도도 시험, 생체 적합성 시험(ISO 10993)을 통해 보호 부품의 성능을 검증합니다.

### 9.2.2 MRI 장비용 균형추

자기공명영상(MRI) 장비의 카운터웨이트는 MRI 시스템에서 장비의 무게 중심이나 기계 구조의 균형을 조정하여 작동 중 스캐닝 플랫폼 또는 자석 어셈블리의 안정성과 정확성을 보장하는 핵심 부품입니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도, 비자성, 낮은 열팽창 계수를 가지고 있어 MRI 장비의 카운터웨이트로 이상적인 소재입니다. 이러한 높은 밀도 특성 덕분에 이 합금은 작은 부피에 충분한 질량을 제공하고, MRI 장비(예: 스캐닝 베드 또는 경사 코일)의 무게 중심 분포를 정확하게 제어하며, 진동이나 기계적 오프셋을 줄이고, 영상 선명도를 향상시킬 수 있습니다. 비자성 특성은 MRI의 고강도 자기장(1.5T~7T)과 자기장의 간섭을 방지하여 자기장의 균일성과 신호 획득의 정확성을 보장하는 데 필수적입니다. 낮은 열팽창 계수는 장비 작동 중 온도 상승이나 주변 환경의 온도 차이에 대한 카운터웨이트의 치수 안정성을 보장하고 기계 구조의 장기적인 신뢰성을 유지합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 MIM(금속성 사출 성형) 또는 분말 야금 공정을 통해 균형추를 제조하여 MRI 장비의 복잡한 형상 및 소형화 요구를 충족합니다. MIM 기술은 사출 성형을 통해 미세 빌릿을 형성하고, 액상 소결 및 열간 등방성 성형은 밀도를 향상시키고 미세 기공을 제거하며 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 정밀 가공(CNC 밀링 또는 EDM 등)은 마이크론 단위로 제어되는 공차를 가진 복잡한 기하학적 형상을 구현하여 MRI 장비의 소형 설계에 적합합니다. 표면 처리(PVD TiN 코팅 또는 전기화학 연마 등)는 내식성과 표면 조도를 향상시키고 멸균 환경에서 산화 또는 오염 위험을 줄입니다. 먼지 오염이 부품 성능이나 MRI 자기장에 영향을 미치지 않도록 고청정 환경에서 가공을 수행해야 합니다. MRI 응용 분야에서 텅스텐-니켈-구리 균형추는 장비 성능을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 고자기장 MRI 장비에서 고밀도 카운터웨이트는 스캐닝 플랫폼의 동적 균형을 최적화하고 진동이 영상 품질에 미치는 영향을 줄입니다. 휴대용 MRI 시스템에서는 비자성 카운터웨이트가 자기장 안정성과 전자기 적합성을 보장합니다. 최적화 방향에는 미세 구조 설계(예: 중공 카운터웨이트)를 통한 질량 감소, 생체 적합성 향상을 위한 부식 방지 코팅 사용, 또는 적층 제조 기술을 결합하여 맞춤형 카운터웨이트 구조를 구현하는 것이 포함됩니다. 품질 관리는 밀도 측정, 자화 강도 시험, 진동 시험을 통해 카운터웨이트 성능을 검증하여 의료 표준 준수를 보장합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 9.3 수술 도구

수술 도구는 현대 의학에서 정밀한 진단과 치료를 위한 핵심 도구로, 수술 내비게이션 시스템, 최소 침습 중재 수술 도구, 이식형 의료 기기 등을 포함합니다. 수술 도구는 무게 균형을 최적화하기 위한 고밀도 소재, 전자기 간섭을 방지하기 위한 비자성 특성, 내구성을 보장하는 우수한 기계적 특성, 그리고 생체 내 또는 표면 사용 시 안전 기준을 충족하는 우수한 생체 적합성을 필요로 합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도 및 비자성 특성으로 정밀한 무게 조절과 전자기 적합성을 제공합니다. 니켈-구리 접합상의 인성과 높은 열전도도는 도구의 내구성과 열 관리 능력을 향상시킵니다. 낮은 열팽창 계수는 체온이나 멸균 환경에서 치수 안정성을 보장합니다. 이 합금은 액상 소결, 열간 등방성 성형, 정밀 가공을 통해 제조되어 높은 정밀도와 신뢰성을 요구하는 수술 도구의 요구를 충족하는 치밀한 미세 구조를 형성합니다.

#### 9.3.1 고정밀 수술 내비게이션 위치 지정 구성 요소

고정밀 수술용 내비게이션 위치 결정 부품은 수술용 내비게이션 시스템에서 수술 도구의 위치를 파악하고 유도하는 데 사용되는 핵심 부품입니다. 신경외과, 정형외과, 심혈관 수술에서 수술 경로의 정확성과 안전성을 보장하기 위해 널리 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도, 비자성, 낮은 열팽창 계수를 가지고 있어 수술용 내비게이션 위치 결정 부품에 적합한 소재입니다. 이러한 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 작은 부피에 충분한 질량을 제공하고, 위치 결정 부품의 무게 중심 분포를 최적화하며, 수술용 내비게이션 시스템의 안정성을 향상시키고, 특히 로봇 보조 수술과 같은 동적 조정 시 위치 결정 정확도를 향상시킵니다. 비자성 특성은 내비게이션 시스템(예: 전자기 추적기 또는 광학 센서)의 전자기 간섭을 방지하여 자기 공명 유도 또는 전자기 내비게이션 환경에서 신뢰성을 보장합니다. 낮은 열팽창 계수는 체온 또는 멸균 환경에서 위치 결정 부품의 치수 안정성을 보장하여 내비게이션 정확도를 유지합니다.

텅스텐-니켈-구리 합금은 금속 사출 성형(MIM) 또는 분말 야금 공정을 통해 위치 결정 부품을 제조하는 데 사용되며, 복잡한 형상과 마이크론 단위의 정밀도를 요구하는 수술용 내비게이션 시스템의 요건을 충족합니다. MIM 기술은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하고, 탈지한 후 사출 성형 후 액상 소결하여 고밀도 구조를 형성합니다. 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적셔 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 미세 기공을 제거하고 위치 결정 부품의 밀도와 내구성을 향상시키며 고정밀 응용 분야에 적합합니다. 레이저 미세 가공 또는 전기 스파크 가공과 같은 정밀 가공은 마이크론 단위로 제어되는 공차를 가진 복잡한 형상을 구현하여 내비게이션 시스템과의 완벽한 통합을 보장합니다. 표면 처리(전기화학적 연마 또는 PVD TiN 코팅 등)는 내식성과 생체적합성을 개선하고, 살균 또는 생체 내 환경에서 산화를 방지하며, ISO 10993 생체적합성 표준을 충족합니다.

외과용 내비게이션 분야에서 텅스텐-니켈-구리 위치 결정 부품은 수술 정밀도와 안전성을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 신경외과 내비게이션 분야에서 고정밀 위치 결정 부품은 유도 시스템의 안정성을 최적화하고 마이크론 수준의 정밀도로 뇌 수술을 보장합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정형외과 수술 분야에서는 비자성 위치 결정 부품이 전자기 간섭을 방지하고 내비게이션 시스템의 신뢰성을 향상시킵니다. 최적화 방향으로는 니켈-구리 비율 최적화를 통한 인성 향상, 나노 코팅을 통한 내마모성 및 생체 적합성 향상, 3D 프린팅 기술을 활용한 맞춤형 위치 결정 구조 제작 등이 있습니다. 품질 관리는 밀도 측정, 자화 강도 시험, 표면 거칠기 시험을 통해 위치 결정 부품의 성능을 검증하여 의료 기준을 충족합니다.

### 9.3.2 최소 침습적 중재 장치 가이드 구성 요소

최소 침습 수술(예: 심혈관 중재술 또는 내시경 수술)에서 가이드와이어, 카테터 또는 스텐트를 유도하는 데 사용되는 핵심 부품입니다. 수술 성공과 환자 안전을 보장하기 위해 높은 정밀도, 생체 적합성 및 내구성이 요구됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 그리고 우수한 기계적 특성으로 인해 가이드 부품에 이상적인 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 이 합금은 작은 부피에 충분한 질량을 제공하고, 가이드 부품의 무게 중심 분포를 최적화하며, 특히 복잡한 혈관 경로에서 정밀한 유도를 위해 가이드와이어 또는 카테터의 기동성과 안정성을 향상시킵니다. 비자성 특성은 중재적 장치의 전자 부품(예: 센서 또는 영상 모듈)에 대한 자기장의 간섭을 방지하며, 자기공명 유도를 사용하는 최소 침습 수술에 적합합니다. 니켈-구리 바인더 상의 강인함으로 인해 구성품이 반복적인 굽힘과 비틀림을 견딜 수 있으며, 낮은 열팽창 계수로 인해 체온이나 살균된 환경에서 치수 안정성이 보장됩니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 MIM(미세 분말 야금) 공정을 통해 가이드 부품을 제조하여 소형화 및 복잡한 형상을 요구하는 최소 침습 의료기기의 요구를 충족합니다. MIM 기술은 사출 성형을 통해 미세 빌릿을 형성하고, 액상 소결 및 열간 등방성 가압 성형은 밀도를 높이고 미세 기공을 제거하며 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 정밀 가공(예: 레이저 미세 가공 또는 전기 스파크 가공)을 통해 가이드 와이어 가이드 링이나 카테터 팁과 같은 복잡한 형상을 구현할 수 있으며, 마이크론 단위로 공차를 제어하여 수술 중 정밀한 조작을 보장합니다. 표면 처리(예: DLC 코팅 또는 화학적 부동태화)는 내마모성, 내부식성 및 생체 적합성을 향상시키고, 혈관 조직과의 마찰을 줄이며, 장기간 사용 시 산화 또는 소독 부식을 방지합니다. 먼지 오염이 부품 성능에 영향을 미치지 않도록 가공은 고청정 환경에서 수행되어야 합니다.

최소 침습 수술 분야에서 텅스텐-니켈-구리 가이드 구성 요소는 수술 효율성과 안전성을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 심혈관 스텐트 삽입술에서 고밀도 가이드 구성 요소는 가이드 와이어의 기동성을 최적화하고 정밀한 위치 결정을 보장합니다. 신경중재술에서는 비자성 가이드 구성 요소가 MRI 환경의 간섭을 피하고 영상 유도의 신뢰성을 향상시킵니다.

최적화 방향으로는 미세 구조 설계(예: 중공 가이드)를 통한 질량 감소, 생체 적합성 코팅을 이용한 조직 친화성 향상, 적층 제조 기술을 결합하여 맞춤형 가이드 구조 구현 등이 있습니다. 품질 관리는 기계적 특성 시험, 생체 적합성 시험(ISO 10993) 및 표면 거칠기 측정을 통해 부품 성능을 검증합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9.4 재활 보조 장치

재활 보조기구(의수, 보조기, 재활 훈련 장비 등)는 현대 의학에서 환자의 운동 기능 회복 및 삶의 질 향상을 돕는 중요한 도구입니다. 재활 보조기구는 체중 분배 최적화를 위한 고밀도 소재, 내구성 확보를 위한 우수한 기계적 특성, 전자기 간섭 방지를 위한 비자성 특성, 그리고 장기 사용 안전 기준을 충족하는 우수한 생체적합성을 필요로 합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도 및 비자성 특성으로 정밀한 체중 조절 및 전자기적 적합성을 제공합니다. 니켈-구리 접합상의 인성과 높은 열전도도는 부품의 내구성과 열 관리 능력을 향상시킵니다. 또한, 낮은 열팽창 계수는 체온이나 주변 온도 차이에서 치수 안정성을 보장합니다. 이 합금은 액상 소결, 열간 등방성 가압 성형, 정밀 가공을 통해 제조되어 재활 보조기구의 고정밀도 및 신뢰성 요건을 충족하는 치밀한 미세 구조를 형성합니다.

### 9.4.1 의수 관절 중량 구성 요소

의족 관절 중량 부품은 의족 설계의 핵심 부품으로, 의족의 중심 분포를 조정하고, 운동 균형과 자연스러운 보행을 최적화하며, 환자의 편안함과 기능성을 향상시키는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 높은 밀도, 비자성 및 우수한 기계적 특성으로 인해 의족 관절 중량 부품에 선호되는 소재가 되었습니다. 고밀도 특성 덕분에 합금은 작은 부피로 충분한 질량을 제공하고, 의족 관절의 중심을 정확하게 제어하며, 자연스러운 사지의 중량 분포를 시뮬레이션하고, 의족 사용 시 환자의 피로를 줄여줍니다. 비자성 특성은 의족에 내장된 전자 부품에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 지능형 의족 시스템에 적합합니다. 니켈-구리 바인더 상의 강인함은 중량 부품이 걷기나 달리기 중의 응력과 같은 반복적인 기계적 하중과 충격을 견딜 수 있도록 합니다. 낮은 열팽창 계수는 체온이나 주변 온도 차이에서 구성 요소의 치수 안정성을 보장하고 관절의 동작 정확도를 유지합니다.

텅스텐-니켈-구리 합금은 금속 사출 성형(MIM) 또는 분말 야금 공정을 통해 중량 부품을 제조하여 소형화, 복잡한 형상 및 고정밀 보철물의 요건을 충족합니다. MIM 기술은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 바인더와 혼합하고, 사출 성형 후 탈지 및 액상 소결을 통해 고밀도 구조를 형성합니다. 니켈-구리 액상은 텅스텐 입자를 적셔 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 미세 기공을 제거하고 중량 부품의 밀도와 내구성을 향상시키며, 장기 보철 적용에 적합합니다. 레이저 미세 가공 또는 CNC 밀링과 같은 정밀 가공은 마이크론 단위로 제어되는 공차로 복잡한 형상을 구현하여 보철 관절과의 정밀한 맞춤을 보장합니다. 표면 처리로 내식성과 생체적합성이 향상되고, 장기간 사용 시 산화가 방지되며, 피부와 접촉 시 자극이 발생하지 않으며, ISO 10993 생체적합성 표준을 충족합니다.

### 9.4.2 재활장비의 균형조정부품

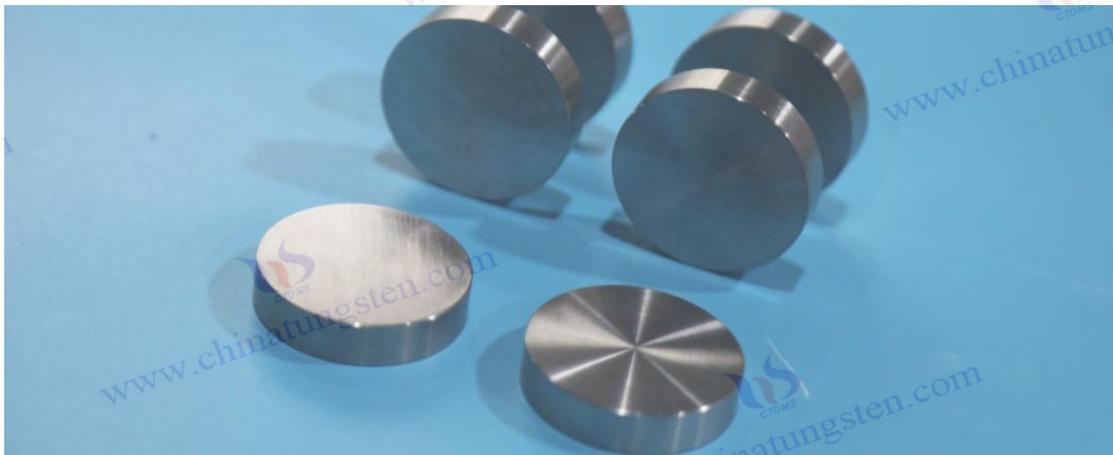
재활 장비용 균형 조절 부품은 보행 훈련기나 근력 운동 장비 등 재활 훈련 장비의 핵심 부품입니다. 훈련 중 안정성과 안전성을 확보하고 환자의 재활 효과를 최적화하기 위해

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

장비의 무게 중심이나 운동 저항을 조절하는 데 사용됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 그리고 우수한 기계적 성질을 갖추고 있어 재활 장비용 균형 조절 부품에 이상적인 소재입니다. 고밀도 특성 덕분에 합금은 제한된 부피 내에서 충분한 질량을 제공하고, 장비의 무게 중심 분포를 정확하게 제어하며, 동적 운동 시 장비의 안정성을 향상시키고, 환자에게 가해지는 진동이나 오프셋의 간섭을 줄여줍니다. 비자성 특성은 재활 장비(모션 센서 또는 제어 시스템 등)의 전자 부품에 대한 자기장의 간섭을 방지하여 지능형 재활 장비에 적합합니다. 니켈-구리 접합부의 높은 인성은 조절 부품이 반복적인 기계적 하중을 견딜 수 있도록 하며, 낮은 열팽창 계수는 체온이나 주변 온도 차이에서 치수 안정성을 보장하여 조절 정확도를 유지합니다.

준비 과정에서 텅스텐-니켈-구리 합금은 MIM(금속성 사출 성형) 또는 분말 야금 공정을 통해 균형 조절 부품을 제조하여 복잡한 형상과 고정밀을 요구하는 재활 장비의 요건을 충족합니다. MIM 기술은 사출 성형을 통해 미세 밀릿을 형성하고, 액상 소결 및 열간 등방성 성형은 밀도를 높이고 미세 기공을 제거하며 기계적 특성과 열전도도를 향상시킵니다. 정밀 가공(예: EDM 또는 CNC 연삭)을 통해 복잡한 기하학적 형상을 구현하고, 마이크론 단위의 공차를 제어하여 조절 부품이 장비 구조에 정확하게 맞도록 합니다. 표면 처리(예: DLC 코팅 또는 화학적 부동태화)는 내마모성, 내부식성 및 생체 적합성을 향상시키고, 환자 피부와의 마찰을 줄이며, 멸균 환경에서 산화를 방지합니다. 먼지 오염이 부품 성능에 영향을 미치지 않도록 가공은 고청정 환경에서 수행되어야 합니다.

재활 장비 분야에서 텅스텐-니켈-구리 밸런스 조절 장치는 훈련 결과와 장비의 신뢰성을 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 보행 훈련기에서 고밀도 조절 장치는 장치의 무게 중심을 최적화하고 훈련 중 안정성을 향상시킵니다. 근력 재활 장비에서 비자성 조절 장치는 전자 제어 시스템의 간섭을 피하고 동작 궤적의 정확도를 향상시킵니다. 최적화 방향에는 미세 구조 설계(예: 경사 밀도 조절 장치)를 통한 체중 분배 최적화, 나노 코팅을 통한 내구성 및 생체 적합성 향상, 또는 적층 제조 기술을 결합하여 개인 맞춤형 조절 구조 구현 등이 포함됩니다. 품질 관리는 밀도 측정, 진동 시험, 생체 적합성 시험을 통해 조절 장치의 성능을 검증하여 의료 표준(예: ISO 13485)을 준수하는지 확인합니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 제 10 장 텅스텐 니켈 구리 합금과 다른 재료의 비교

텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 우수한 열전도도, 낮은 열팽창 계수로 인해 항공우주, 의료, 전자 정보, 국방 및 에너지 분야에서 폭넓은 응용 가치를 보여 왔습니다. 분말 야금으로 제조된 텅스텐-니켈-구리 합금은 텅스텐의 고밀도와 니켈-구리 접합의 인성 및 열전도도를 결합하여 다양한 고수요 시나리오의 요구를 충족합니다. 그러나 실제 응용 분야에서는 텅스텐-니켈-구리 합금이 텅스텐-니켈-철 합금 및 구리-텅스텐 합금과 같은 다른 고성능 소재와 비교되어 성능 이점과 적용 가능성을 평가하는 경우가 많습니다. 다양한 소재의 물리적 및 화학적 특성, 제조 공정 및 비용 차이는 특정 응용 분야에서의 경쟁력을 결정합니다.

### 10.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 경쟁소재 분석

텅스텐-니켈-구리(W-Ni-Cu) 합금은 높은 밀도(15-18 g/cm<sup>3</sup>), 비자성, 우수한 열전도도 및 생체적합성으로 인해 중량, 방열, 차폐 및 보호 부품에 널리 사용됩니다. 그러나 텅스텐-니켈-철(W-Ni-Fe) 및 구리-텅스텐(W-Cu)과 성능 및 비용 면에서 상당한 차이가 있습니다. 텅스텐-니켈-철 합금은 높은 강도와 낮은 비용으로 인해 군사 및 산업 분야에서 이점이 있지만 자성으로 인해 전자기적 적합성 요구 사항이 높은 응용 분야에는 제한이 있습니다. 구리-텅스텐 합금은 우수한 열 및 전기 전도성으로 인해 전자 및 열 관리 분야에서 탁월하지만 밀도가 낮고 인성이 낮습니다. 경쟁 재료를 선택할 때는 응용 분야 요구 사항(비자성 특성, 열전도도 또는 비용 등)을 고려해야 합니다.

#### 10.1.1 텅스텐-니켈-철 합금과의 비교

텅스텐-니켈-철(W-Ni-Fe)은 군수 산업(예: 철갑탄 코어), 항공우주용 균형추, 산업 장비에 널리 사용되는 고밀도 합금입니다. 주성분은 텅스텐(85%~98%), 니켈, 철이며, 밀도 범위는 텅스텐-니켈-구리 합금과 유사합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금과 비교했을 때, 텅스텐-니켈-철 합금은 기계적 특성, 비용 및 적용 분야 측면에서 상당한 차이를 보입니다.

**성능 비교 :** 텅스텐-니켈-철 합금의 강도와 경도는 일반적으로 텅스텐-니켈-구리 합금보다 높습니다. 철을 첨가하면 니켈-철 결합 단계의 기계적 특성이 향상되어 내충격성 및 내마모성 시나리오(예: 철갑탄 코어 또는 기계적 균형추)에서 더욱 유리합니다. 그러나 철을 첨가하면 자성이 약해져 전자기 적합성 요구 사항이 높은 응용 분야(예: MRI 장비 및 전자 대책 장비)에서의 사용이 제한됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 비자성 특성은 핵심 장점이며, 의료 장비 및 레이더 시스템과 같이 전자기 간섭을 피해야 하는 경우에 적합합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 열전도도는 텅스텐-니켈-철 합금보다 약간 높습니다. 구리는 철보다 열전도도가 우수하기 때문에 방열 응용 분야(예: 전자 방열판)에 적합합니다. 두 재료의 열팽창 계수는 비슷하며, 둘 다 우수한 치수 안정성을 제공할 수 있습니다.

**제조 공정 비교 :** 두 합금 모두 분말 혼합, 프레스, 액상 소결 등 분말 야금법으로 제조되지만, 텅스텐-니켈-철 합금의 소결 온도는 약간 낮고, 철의 가격이 구리보다 훨씬

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

낮기 때문에 공정 비용도 낮습니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 제조는 구리 산화를 방지하기 위해 더 엄격한 환경 관리(예: 고순도 아르곤 또는 진공)가 필요하여 생산 비용이 증가합니다. 텅스텐-니켈-철 합금의 가공 성능은 경도가 높아 공구 마모가 발생할 수 있기 때문에 약간 떨어지는 반면, 텅스텐-니켈-구리 합금의 인성은 정밀 가공(예: MIM 또는 CNC 가공)에서 복잡한 형상을 더 쉽게 구현할 수 있도록 해줍니다.

**적용 가능한 시나리오 및 장단점 :** 텅스텐-니켈-철 합금은 높은 강도와 낮은 비용으로 군사 분야(예: 철갑탄 코어, 미사일 균형추) 및 산업용 균형추(예: 진동 억제기)에 널리 사용되지만, 자성이 약하여 전자기파에 민감한 환경에는 적합하지 않습니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 의료 분야(MRI 균형추, 방사선 치료 차폐), 전자 정보 분야(5G 무선 주파수 모듈) 및 항공우주 무기(자세 제어 균형추)에서 더 많은 장점을 제공합니다. 비자성 특성과 생체 적합성은 높은 정밀도 및 안전 요건을 충족합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 단점은 높은 비용으로, 특히 구리 가격 변동 시 경제성에 영향을 미칩니다. 최적화 방향으로는 니켈-구리 비율을 조정하여 성능을 개선하거나 적층 제조를 통해 가공 비용을 절감하는 것이 있습니다.

### 10.1.2 구리 텅스텐 합금과의 비교

구리-텅스텐 합금(W-Cu)은 텅스텐을 모재로 하고 구리를 바인더로 하는 복합 소재입니다. 전자 방열, 전기 접점 및 고온 부품에 널리 사용됩니다. 일반적인 조성은 텅스텐(70%~90%)과 구리로 구성되며, 밀도는 12~17 g/cm<sup>3</sup>입니다. 텅스텐-니켈-구리 합금과 비교했을 때, 구리-텅스텐 합금은 열전도도, 전기 전도도 및 적용 분야에 상당한 차이가 있습니다.

**성능 비교 :** 구리-텅스텐 합금의 열전도도와 전기 전도도는 텅스텐-니켈-구리 합금보다 우수합니다. 높은 구리 함량(10~30%)은 열 및 전기 전도 효율을 향상시켜 고전력 전자 방열(전력 반도체 기관, 서버 방열판 등) 및 전극 소재에 적합합니다. 그러나 구리-텅스텐 합금의 밀도는 텅스텐-니켈-구리 합금보다 낮아 높은 중량 균형이 필요한 응용 분야(항공우주 균형추 및 미사일 균형 부품 등)에는 적용이 제한됩니다. 구리-텅스텐 합금의 기계적 특성은 약하고 인성과 내충격성은 텅스텐-니켈-구리 합금만큼 좋지 않습니다. 니켈의 강화 효과가 부족하여 높은 응력 하에서 파손되기 쉽습니다. 텅스텐-니켈-구리 합금의 비자성 특성은 전자파에 민감한 환경에 적합하다는 장점이 있습니다. 구리-텅스텐 합금도 비자성이지만, 밀도가 낮아 차폐 성능이 다소 떨어집니다. 두 합금의 열팽창 계수는 유사하며, 치수 안정성이 요구되는 환경에 적합합니다.

**공정 비교 :** 구리-텅스텐 합금과 텅스텐-니켈-구리 합금은 모두 분말 야금으로 제조되지만, 구리-텅스텐 합금은 일반적으로 함침(텅스텐 골격을 먼저 소결한 후 액상 구리에 함침) 방식으로 제조되는데, 이는 복잡하고 에너지 집약적입니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 액상 소결을 사용하는데, 이는 더 유연하고 MIM 을 통해 복잡한 형상을 구현할 수 있어 소형 부품(예: 의료용 콜리메이터 및 MEMS 카운터웨이트)에 적합합니다. 구리-텅스텐 합금은 경도가 높고 구리 상이 부드러워 가공이 어려워 표면이 고르지 않을 수 있는 반면, 텅스텐-니켈-구리 합금은 인성이 높아 정밀 가공에 유리합니다. 구리-텅스텐 합금은 구리

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

함량이 높기 때문에 산화 방지를 위해 소결 분위기를 엄격하게 제어해야 하며, 이는 공정 비용을 증가시킵니다.

**적용 가능한 시나리오 및 장단점** : 구리-텅스텐 합금은 우수한 열전도도 및 전기 전도성으로 인해 전자 산업(전력 반도체 패키징, 전기 접점 등) 및 고온 부품(로켓 노즐 라이닝 등)에 널리 사용되지만, 낮은 밀도와 낮은 인성으로 인해 고밀도 균형추 또는 고충격 시나리오에서의 적용이 제한됩니다. 텅스텐-니켈-구리 합금은 의료(방사선 치료 차폐, MRI 균형추), 국방(레이더 기만 장치, 미사일 균형추) 및 신에너지 자동차(모터 균형추)에서 더 많은 이점을 제공합니다. 높은 밀도와 인성은 복잡한 기계적 및 전자기적 요구 사항을 충족합니다. 구리-텅스텐 합금의 가격은 높은 구리 함량으로 인해 크게 변동하는 반면, 텅스텐-니켈-구리 합금의 가격은 니켈과 구리의 가격에 영향을 받으며, 경제적 압력을 줄이기 위해 비율을 최적화해야 합니다. 최적화 방향으로는 복합 코팅을 통해 구리-텅스텐 합금의 인성을 개선하거나, 나노 스케일 텅스텐 분말을 사용하여 텅스텐-니켈-구리 합금의 성능을 개선하는 것이 있습니다.

## 10.2 텅스텐-니켈-구리 합금을 위한 최첨단 기술 연구 개발

고성능 소재에 대한 수요가 증가함에 따라, 텅스텐-니켈-구리 합금 연구 개발은 기존의 성능 최적화에서 미세 구조 설계 및 기능 혁신으로 전환되고 있습니다. 나노구조 합금은 분말 입자 크기를 나노 수준으로 줄여 재료의 강도, 인성 및 열전도도를 크게 향상시켜 고정밀 및 극한 환경 응용 분야에 적합합니다. 기능성 경사형 소재는 합금 내 조성 또는 구조의 점진적인 분포를 도입하여 복잡하고 다양한 기능적 요구를 충족함으로써 맞춤형 성능을 구현합니다. 이러한 기술은 첨단 제조 공정을 통해 의료, 전자, 국방 및 에너지 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 새로운 응용 분야를 촉진하여 차세대 고성능 부품 개발을 지원합니다.

### 10.2.1 나노구조 합금

분말을 사용하여 제조되며, 이는 합금의 미세 구조와 특성을 크게 향상시킵니다. 나노스케일 입자는 높은 비표면적과 표면 활성을 가지고 있어 소결 과정에서 더욱 균일한 미세 구조를 형성하고, 기공률을 줄이며, 밀도, 강도 및 인성을 향상시킬 수 있습니다. 기존의 마이크론 스케일 텅스텐-니켈-구리 합금과 비교할 때, 나노구조 합금은 나노입자의 결정립계 강화 효과로 내충격성과 내피로성이 향상되어 기계적 특성이 크게 향상됩니다. 비자성 특성은 유지되므로 높은 전자파 적합성 요건(예: MRI 장비, 레이더 시스템)이 요구되는 응용 분야에 적합합니다. 또한, 나노스케일 입자의 균일한 분포는 열전도도를 향상시켜 전력 반도체 기판, 5G RF 모듈과 같은 방열 응용 분야에서 합금의 성능을 향상시킵니다. 나노구조의 미세 입자는 열팽창 계수를 감소시켜 치수 안정성을 더욱 향상시킵니다.

**제조 방법** : 나노구조 합금은 일반적으로 고에너지 불 밀링, 화학 기상 증착(CVD) 또는 플라즈마 보조 방법을 통해 나노 크기의 분말을 제조한 후, 분말 야금 공정(액상 소결 또는 스파크 플라즈마 소결, SPS)을 통해 치밀한 합금을 형성합니다. 고에너지 불 밀링은

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기계적 분쇄를 통해 분말 입자를 나노 크기로 미세화하며, 불순물 유입을 방지하기 위해 분쇄 시간과 환경(고순도 아르곤 또는 진공)을 제어해야 합니다. SPS 기술은 고전압 및 펄스 전류를 사용하여 나노 분말을 빠르게 소결하고, 소결 시간을 단축하며, 입자 성장을 억제하고, 나노 구조 특성을 유지합니다. 열간 등방성 가압(HIP)은 밀도를 더욱 향상시키고 미세 기공을 제거합니다. 정밀 가공(예: 레이저 미세 가공)을 통해 복잡한 형상을 구현하고, 표면 처리를 통해 내식성과 생체 적합성을 향상시킵니다. 제조 공정은 나노 구조의 안정성과 성능 일관성을 보장하기 위해 분말 순도와 소결 조건을 엄격하게 제어해야 합니다.

**응용 분야 및 장점 :** 나노구조 텅스텐-니켈-구리 합금은 고정밀 응용 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 예를 들어, 의료 분야에서 나노구조 합금은 방사선 치료 콜리메이터 부품에 사용되어 방사선 차폐 효율과 치수 정확도를 향상시킵니다. 전자 정보 분야에서 나노합금은 뛰어난 열전도도를 지녀 고출력 서버 방열판에 적합합니다. 방위 분야에서는 고강도 나노합금을 미사일 밸런스 부품에 사용하여 내충격성을 향상시킬 수 있습니다. 최적화 방향으로 더욱 효율적인 나노파우더 제조 기술 개발, 복합 나노코팅을 사용한 성능 향상, 또는 적층 제조를 통한 복잡한 나노구조 구현 등이 있습니다. 나노파우더의 높은 비용과 제조 공정 중 산화 제어가 과제이므로, 생산 효율 향상을 위해 자동화 장비 및 온라인 모니터링 기술이 필요합니다.

### 10.2.2 기능적으로 등급이 매겨진 재료

기능적 경사 소재(FGM)는 텅스텐-니켈-구리 합금 내부에 조성 또는 구조를 점진적으로 분포시킴으로써 고밀도에서 고열전도도 또는 고인성으로의 원활한 전환을 달성하여 다기능 부품의 요구를 충족합니다. 기존 텅스텐-니켈-구리 합금의 균일한 조성은 복잡한 작업 조건에서의 적응성에 제한을 주는 반면, FGM은 경사 설계(예: 텅스텐 함량을 고함량에서 저함량으로 점진적으로 변경하거나 니켈-구리 비율을 지역적으로 변경)를 통해 성능을 최적화합니다. 예를 들어, 표면 근처의 고구리 함량 영역은 열전도도를 향상시키고 방열 요구에 적합합니다. 내부의 고텅스텐 함량 영역은 고밀도를 제공하여 중량 요건을 충족합니다. FGM의 비자성 특성은 그대로 유지되어 전자기적으로 민감한 환경에 적합합니다. 또한 경사 구조는 열충격 저항성과 계면 접합력을 향상시켜 고온 또는 고응력 환경에 적합합니다.

**제조 방법 :** FGM 텅스텐-니켈-구리 합금은 일반적으로 액상 소결 또는 적층 제조 기술과 결합된 층상 분말 적층 방식으로 제조됩니다. 층상 분말 적층은 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 금형에 층층이 적층하여 경사 구조를 형성합니다(예: 텅스텐 함량이 높은 층에서 구리 함량이 높은 층으로 경사 배치). 그런 다음 액상 소결을 통해 경사 구조를 형성합니다. 계면 결합을 보장하기 위해 소결 공정 중 온도와 분위기를 정밀하게 제어해야 합니다. 선택적 레이저 용융(SLM)과 같은 적층 제조는 다양한 조성의 분말을 층층이 적층하여 경사 구조를 직접 형성하며, 이는 복잡한 형상의 부품에 적합합니다. 열간 등방성 성형은 밀도를 더욱 향상시키고 경사 계면의 미세 기공을 제거합니다. 정밀 가공(예: CNC 밀링 또는 전기 스파크 가공)은 정밀한 형상을 구현하며, 표면 처리(예: 화학적 부동태화 또는 PVD 코팅)는 내식성과 생체 적합성을 향상시킵니다. 준비

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

과정에서는 구매 계면에서 응력 집중을 피하기 위해 분말 분포와 소결 매개변수를 최적화해야 합니다.

**응용 분야 및 장점** : 기능적 경사 텅스텐-니켈-구리 합금은 다기능 부품에서 상당한 이점을 제공합니다. 예를 들어, 신에너지 자동차 배터리 팩의 방열 기관에서 표면의 높은 구리 함량은 열전도도를 향상시키고 내부의 높은 텅스텐 함량은 구조적 지지력을 제공합니다. 의료용 방사선 치료 차폐 커버에서 경사 구조는 방사선 차폐 및 경량화를 최적화합니다. 항공우주 무기 노즐 부품에서 경사 설계는 열충격 저항성을 향상시킵니다. 최적화 방향에는 더욱 정밀한 경사 제어 기술(예: 다중 재료 3D 프린팅), 복합 코팅을 사용한 표면 특성 개선, 또는 시뮬레이션을 통한 경사 분포 최적화가 포함됩니다. 과제는 높은 제조 비용과 경사 계면의 안정성이며, 자동화된 생산 및 온라인 모니터링을 통해 이를 줄여야 합니다.

### 10.3 텅스텐-니켈-구리 합금의 친환경 제조 기술

텅스텐-니켈-구리 합금은 고에너지 분말 야금 공정과 화학 처리를 거치는데, 이 과정에서 폐가스, 폐액 및 고형 폐기물이 발생하여 환경에 상당한 부담을 줍니다. 친환경 제조 기술은 제조 공정을 개선하고 효율적인 폐기물 재활용 방법을 개발하여 환경 영향을 크게 줄이는 동시에 자원 활용도와 생산 효율을 향상시킵니다. 친환경 제조 공정은 생산 공정을 최적화하고 유해 화학 물질 사용을 줄이며 에너지 소비를 줄임으로써 청정 생산을 실현합니다. 폐기물 재활용 기술은 생산 과정에서 폐기물과 폐기 부품을 재활용하여 자원 낭비와 환경 오염을 줄입니다. 이러한 기술은 환경 규제 요건을 충족할 뿐만 아니라 의료, 전자, 국방 등 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 시장 경쟁력을 강화하여 지속 가능한 제조를 위한 새로운 길을 제시합니다.

#### 10.3.1 환경 친화적 제조 공정

친환경 제조 공정은 텅스텐-니켈-구리 합금 생산 공정을 최적화하고, 에너지 소비, 배기가스 배출 및 유해 화학물질 사용을 줄임으로써 깨끗하고 효율적인 제조 공정을 구축하는 것을 목표로 합니다. 기존 분말 야금 공정은 고에너지 소결 및 화학 세정 단계를 거치는데, 이 과정에서 산화물 배기가스 또는 산성 폐액이 발생할 수 있습니다. 친환경 제조 공정은 저에너지 소결 기술, 친환경 바인더, 그리고 청정 가공 방식을 채택하여 환경 영향을 크게 줄입니다. 저에너지 소결 기술은 펄스 전류와 고압을 통해 빠르게 가열하는 스파크 플라즈마 소결(SPS)과 같은 고속 소결 방식을 사용하여 합금의 밀도와 성능을 유지하면서 소결 시간을 단축하고 에너지 소비를 줄입니다. 친환경 바인더는 분해성 또는 무독성 재료를 사용하여 기존 파라핀 또는 폴리머 바인더를 대체하고, 금속 사출 성형(MIM) 시 휘발성 유기 화합물 배출을 줄이며, 탈지 과정에서 발생하는 배기가스 오염을 줄입니다. 깨끗한 가공 방법은 오일 기반 냉각수 대신 수성 냉각수를 사용하여 가공 중 유해한 폐액을 줄이는 동시에 정밀 가공 공정을 최적화하여 먼지와 폐기물 발생을 줄입니다.

친환경 제조 공정은 생산 환경 관리에도 중점을 둡니다. 고순도 불활성 가스 또는 진공

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

환경에서 소결 및 가공함으로써 텅스텐, 니켈, 구리 분말의 산화를 방지하고 산화 폐가스 발생을 줄입니다. 폐수 재활용 처리 시스템은 생산 과정에서 발생하는 세정액을 회수하고 정화하여 폐수 및 환경 오염을 줄입니다. 공정 최적화에는 소결 온도와 분위기를 정확하게 제어하고, 생산 일관성을 개선하며, 공정 오류로 인한 폐기물을 줄이기 위한 자동 제어 시스템 사용도 포함됩니다. 친환경 제조 공정의 장점은 에너지 소비와 배출량을 줄이는 동시에 합금의 높은 밀도, 비자성 및 열전도도를 유지하여 의료용 방사선 차폐, 전자 방열 기관, 국방용 균형추 부품 등의 요구를 충족한다는 것입니다. 최적화 방향에는 더욱 효율적인 급속 소결 기술 개발, 바이오 기반 바인더 적용 연구, 그리고 생산 효율을 더욱 향상시키기 위한 지능형 제조 시스템 통합이 포함됩니다.

### 10.3.2 폐기물 재활용 기술

합금 생산 시 폐기물(분말, 칩 등)과 폐기 부품(의료용 차폐 부품 및 균형추 등)을 재활용하여 자원 낭비와 환경 오염을 줄이고 재료의 경제성과 지속가능성을 향상시킵니다. 기존의 재활용 방법은 고에너지 제련이나 화학적 처리를 수반하여 2차 오염을 발생시킵니다. 친환경 폐기물 재활용 기술은 물리적 분리, 화학적 정제 및 효율적인 재사용 공정을 통해 높은 회수율과 낮은 환경 영향을 달성합니다. 물리적 분리는 기계적 분쇄 및 선별을 사용하여 폐기물의 텅스텐, 니켈, 구리 성분을 초기에 분리하므로 화학적 처리의 필요성이 줄어듭니다. 화학적 정제는 환경 친화적인 용매(수성 용액 또는 저독성 산성 액체 등)를 사용하여 금속 성분을 분리 및 정제하므로 기존의 강산 또는 고온 제련에서 발생하는 폐가와 폐액이 발생하지 않습니다. 효율적인 재사용 공정은 회수된 금속 분말을 분말 야금 또는 MIM 공정에 맞게 재분배하여 새로운 합금 부품을 제조하고 성능의 일관성을 유지합니다.

폐기물 재활용 기술에는 폐기 부품의 재활용도 포함됩니다. 폐기된 의료용 콜리메이터, 전자식 방열판 또는 방위용 균형추를 분해 및 분류하여 사용 가능한 텅스텐-니켈-구리 재료를 추출한 후, 세척, 분쇄 및 재소결 과정을 거쳐 고품질 분말 원료로 전환합니다. 재활용 공정은 합금의 비자성 및 생체 적합성에 영향을 미치는 불순물 오염을 방지하기 위해 깨끗한 환경에서 수행되어야 합니다. 고급 온라인 모니터링 기술을 사용하여 재활용 분말의 성분과 순도를 측정하여 생산 기준을 충족하는지 확인합니다. 폐기물 재활용 기술의 장점은 텅스텐, 니켈, 구리의 주요 광물에 대한 의존도를 크게 줄이고, 채굴 및 정련의 환경 영향을 줄이며, 고품질 폐기물의 축적을 줄인다는 것입니다. 최적화 방향으로는 전자기 선별 또는 레이저 선별과 같은 더욱 효율적인 분리 기술 개발, 폐쇄 루프 재활용 시스템 탐색, 그리고 적층 제조 기술을 통합하여 재활용 분말을 복잡한 부품 생산에 직접 사용하는 것이 포함됩니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 니켈 구리 합금

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### Tungsten Nickel Copper Alloy Introduction

#### 1. Overview of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten nickel copper alloy is an alloy composed of tungsten with added nickel and copper, typically in a nickel-to-copper ratio of 3:2. This alloy is non-ferromagnetic, exhibits relatively good electrical and thermal conductivity, and is commonly used in specialized applications such as gyroscope rotors, components for devices and instruments operating under magnetic fields, electrical contacts for high-voltage switches, and electrodes for certain electrical machining processes.

#### 2. Features of Tungsten Nickel Copper Alloy

**High Density:** Typically 16.5 - 18.75 g/cm<sup>3</sup>

**High Thermal Conductivity:** Approximately 5 times that of mold steel

Compared to tungsten-nickel-iron alloy, since copper does not have the sintering activation effect of nickel and iron on tungsten, tungsten-nickel-copper alloy has a slightly lower sintered density, lower strength and plasticity, and is generally not subjected to heat treatment or deformation processing.

#### 3. Production Methods for Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy is typically produced using powder metallurgy. First, high-purity tungsten, nickel, and copper powders are mixed in specific proportions, often using equipment like a ball mill to achieve uniform mixing. The mixture is then pressed into shape, commonly using cold isostatic pressing technology under a specific pressure to form a green compact. Subsequently, sintering is performed, generally in a hydrogen protective atmosphere, using a two-step sintering process to address collapse and deformation issues caused by liquid-phase sintering, ensuring the product's density.

#### 4. Applications of Tungsten Nickel Copper Alloy

Tungsten-nickel-copper alloy, with its high density and excellent thermal and electrical conductivity, has a wide range of applications. In the aerospace sector, it can be utilized to manufacture components such as rocket engine nozzles and gas rudders. In the medical field, due to its strong radiation absorption capability and non-magnetic properties, it is suitable for radiation shielding in magnetic resonance imaging rooms. Additionally, it can serve as a counterweight material for precision instruments.

#### 5. Purchasing Information

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

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



CTIA GROUP LTD tungsten nickel copper alloy

#### 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 11 장 텅스텐-니켈-구리 합금의 일반적인 문제 및 해결책

텅스텐-니켈-구리 합금은 고밀도, 비자성, 우수한 열전도도, 낮은 열팽창 계수를 특징으로 하여 항공우주, 의료, 전자 정보, 국방 및 에너지 분야에서 널리 사용됩니다. 분말 야금으로 제조된 이 합금은 텅스텐의 고밀도와 니켈-구리 접합의 인성 및 열전도도를 결합하여 고정밀 및 혹독한 환경의 요구를 충족합니다. 그러나 제조 과정에서 소결 결합, 불균일한 조성, 가공 어려움 등 합금의 성능과 신뢰성에 영향을 미치는 다양한 문제가 발생할 수 있습니다. 이러한 문제를 해결하려면 공정 흐름 최적화, 장비 제어 개선, 그리고 합금의 고품질과 일관성을 보장하기 위한 첨단 기술 도입이 필요합니다.

### 11.1 텅스텐-니켈-구리 합금의 제조 공정

텅스텐-니켈-구리 합금은 주로 분말 혼합, 프레스, 소결 및 후가공을 포함한 분말 야금 공정에 의존합니다. 부적절한 원료, 장비 또는 공정 변수로 인해 각 단계에서 문제가 발생할 수 있습니다. 핵심 단계인 소결은 합금의 밀도, 미세 구조 및 성능에 직접적인 영향을 미치지만, 가공, 균열 또는 부품 편석과 같은 결함이 발생하기 쉽습니다. 이러한 문제는 합금의 기계적 특성 저하, 열전도도 저하 또는 비자성 특성 손상을 초래하여 의료용 차폐 부품, 전자 방열 기관 또는 국방용 균형추 부품에 대한 적용에 영향을 미칠 수 있습니다. 제조 공정 문제를 해결하려면 원료 선택, 공정 최적화 및 품질 관리부터 시작하여 합금 성능이 까다로운 응용 분야의 요구를 충족하도록 해야 합니다.

#### 11.1.1 소결 결합 솔루션

소결 결합은 텅스텐-니켈-구리 합금 제조 공정에서 흔히 발생하는 문제로, 주로 가공, 균열, 성분 편석 또는 불균일한 소결로 나타납니다. 이러한 결함은 합금의 밀도, 기계적 성질 및 열전도도를 감소시켜 고정밀 응용 분야에서의 신뢰성에 영향을 미칩니다. 가공은 일반적으로 분말 입자 사이의 간극이나 잔류 가스가 완전히 채워지지 않아 발생하며, 이는 밀도 부족으로 이어져 방사선 차폐 또는 균형추 효과를 약화시킬 수 있습니다. 균열은 소결 중 열응력이나 불균일한 냉각 속도로 인해 발생하는 경우가 많으며, 합금의 인성과 내구성에 영향을 미칩니다. 성분 편석은 텅스텐, 니켈, 구리 분말의 불균일한 분포 또는 액상 소결 중 유동성 부족으로 인해 발생하며, 이는 열전도도 감소 또는 비자성 특성 저하와 같은 국부적인 특성의 불일치로 이어질 수 있습니다. 불균일한 소결은 노 내 온도 구배 또는 분위기 제어의 부적절함과 관련이 있으며, 이는 합금 미세 구조의 균일성에 영향을 미칩니다.

**해결책 :** 소결 결합은 원료 선택 최적화, 소결 공정 개선, 공정 제어 강화를 통해 해결할 수 있습니다. 고순도의 균일한 입자 크기의 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 사용하여 분말의 화학적 조성 및 물리적 특성을 일정하게 유지하고 가공 및 편석 발생을 줄입니다. 고에너지 볼 밀링 또는 기계적 합금 기술을 사용하여 분말을 혼합하여 입자의 균일성과 접촉 면적을 개선하고 액상 소결 시 니켈과 구리 상의 습윤 및 충전 효과를 향상시킵니다. 소결 공정 매개변수를 최적화하고, 단계적 온도 상승 소결 전략을 채택하여 액상 소결 온도까지 서서히 가열하여 니켈과 구리 액상이 완전히 유동하고 텅스텐 입자 사이의 틈을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

채우며 기공 형성을 줄입니다. 동시에 냉각 속도를 제어하여 열 응력으로 인한 균열을 방지합니다. 소결 시 고순도 불활성 가스(예: 아르곤) 또는 진공 환경을 사용하여 산화물 형성을 방지하고 합금의 비자성 및 열전도도를 유지합니다. 펄스 전류와 고압을 사용하여 빠르게 가열하고, 소결 시간을 단축하고, 입자 성장을 억제하고, 기공 및 편석을 줄이는 스파크 플라즈마 소결(SPS)과 같은 급속 소결 기술을 도입합니다.

소결 공정 중 품질 관리를 강화하고, 온라인 모니터링 시스템을 사용하여 소결로 내 온도, 분위기, 압력을 실시간으로 감지하여 소결 조건의 안정성을 확보합니다. 열간 등압 성형(HIP)은 고온 고압을 통해 잔류 기공과 미세 균열을 제거하고 합금의 밀도와 균일성을 향상시키는 후처리 공정으로 사용되며, 특히 의료용 콜리메이터나 항공우주용 균형추 부품과 같이 수요가 높은 분야에 적합합니다. 소결 장비를 정기적으로 교정하여 소결로 내 균일한 온도 영역을 확보하고 국부 과열이나 저온 영역으로 인한 불균일한 소결을 방지합니다. 또한, 시뮬레이션 기술을 결합하여 소결 매개변수를 최적화하고, 액상 흐름 및 응력 분포를 예측하며, 시행착오 비용을 절감합니다. 이 솔루션의 장점은 합금의 밀도, 기계적 특성 및 성능 일관성을 크게 향상시켜 의료, 전자 및 방위 분야의 엄격한 요구 사항을 충족한다는 것입니다. 최적화 방향에는 더욱 효율적인 고속 소결 장비 개발, 공정 안정성 향상을 위한 자동 제어 시스템 탐색, 그리고 적층 제조 기술을 통합하여 복잡한 형상을 직접 제작하고 후속 가공 결함을 줄이는 것이 포함됩니다. 향후 친환경 제조 기술과의 결합을 통해 소결 공정은 에너지 소비와 배출량을 더욱 줄이고 텅스텐-니켈-구리 합금의 지속 가능한 개발을 촉진할 수 있습니다.

### 11.1.2 조성 균일성 제어

조성 균일성 문제는 텅스텐-니켈-구리 합금 제조에서 흔히 발생하는 문제입니다. 합금 내 텅스텐, 니켈, 구리 성분의 불균일한 분포를 말하며, 이는 국부적인 밀도 차이, 열전도도 감소 또는 비자성 특성 저하로 이어질 수 있습니다. 조성 불균일성은 일반적으로 분말 혼합 부족, 입자 크기 차이 또는 액상 소결 중 유동성 저하로 인해 발생합니다. 텅스텐의 높은 밀도는 분말 혼합 과정에서 침전되기 쉬운 반면, 니켈-구리 결합상의 불균일한 분포는 소결 후 국부적인 편석을 유발하여 합금의 성능 일관성에 영향을 미칠 수 있습니다. 예를 들어, 의료용 방사선 치료 차폐 부품에서 불균일한 조성은 방사선 차폐 효과를 감소시킬 수 있으며, 전자 방열판에서는 열전도도가 불안정해지고 방열 효율에 영향을 미칠 수 있습니다.

**해결책** : 조성의 균일성을 확보하기 위해서는 분말 선정 최적화, 분말 혼합 공정 개선, 그리고 소결 제어 강화를 통해 해결할 수 있습니다. 입자 크기가 일정한 고순도 텅스텐, 니켈, 구리 분말을 선택하여 입자 침전 및 층화 경향을 줄이고 혼합 초기 단계의 균일성을 확보하십시오. 분말 혼합에는 고에너지 볼 밀링 또는 기계적 합금 기술을 사용하십시오. 장기간 고강도 분쇄를 통해 텅스텐, 니켈, 구리 입자가 완전히 분산되고, 입자 간 접촉 균일성이 향상되며, 불순물 유입이 방지됩니다. 3 차원 분말 혼합 장비 또는 초음파 보조 분말 혼합을 사용하여 분말의 분산 및 유동성을 더욱 향상시키고 침전을 줄입니다. 액상 소결 공정을 최적화하고, 단계적 가열 전략을 통해 니켈-구리 액상의 용융 및 흐름을 제어하여 텅스텐 입자를 완전히 적시고, 입자 간 틈을 메우며, 편석을 줄입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

소결 과정에서 고순도 불활성 가스나 진공 환경을 사용하면 구리 산화로 인한 구성 불균형을 방지할 수 있습니다.

공정 제어 강화는 조성 균일성 확보의 핵심입니다. 온라인 모니터링 시스템을 통해 소결 중 분말 혼합도와 조성 분포를 실시간으로 감지하고, X 선 형광 분석 또는 전자 현미경을 통해 균일성을 검증합니다. 열간 등압 성형(HIP)은 고온 고압을 통해 국부적인 편석 및 미세 기공을 제거하고 합금의 밀도와 조성 일관성을 개선하는 후처리 공정으로, 특히 항공우주용 균형추나 의료용 콜리메이터와 같은 고정밀 응용 분야에 적합합니다. 안정적인 공정 매개변수를 확보하고 장비 편차로 인한 조성 불균일성을 방지하기 위해 분말 혼합 및 소결 장비를 정기적으로 교정하십시오. 또한, 시뮬레이션 기술을 결합하여 분말 혼합 및 소결 매개변수를 최적화하고, 액체 흐름 및 조성 분포를 예측하며, 테스트 비용을 절감합니다. 이 솔루션의 장점은 의료, 전자 및 방위 분야의 엄격한 요구 사항을 충족하도록 합금의 성능 일관성을 크게 향상시킨다는 것입니다. 최적화 방향으로 자동화된 분말 혼합 시스템 개발, 나노 스케일 분말을 탐색하여 균일성을 더욱 개선하고, 첨가 제조 기술을 통합하여 구성 분포를 직접 제어하는 것이 포함됩니다.

## 11.2 텅스텐-니켈-구리 합금의 적용 실패 분석

텅스텐-니켈-구리 합금은 재료 결함, 환경 요인 또는 부적절한 사용으로 인해 의료용 방사선 치료 차폐, 전자 방열 기관, 방위용 균형추 부품과 같은 까다로운 응용 분야에서 성능이 저하되거나 부품이 손상될 수 있습니다. 응용 분야의 고장은 기계적 특성 부족, 열전도도 감소, 표면 부식 또는 치수 불안정성으로 나타나 장비의 안전성과 신뢰성에 영향을 미칠 수 있습니다. 예를 들어, 의료 장비의 경우 고장으로 인해 방사선 차폐 효과가 저하될 수 있으며, 전자 기기의 경우 과열 고장이 발생할 수 있습니다. 방위 장비의 경우 균형추 정확도 또는 내충격성이 저하될 수 있습니다. 재료 준비, 환경 적응성 및 사용 조건부터 시작하여 고장 원인을 분석하고 해결책을 제시하는 것이 합금 응용 분야의 신뢰성을 향상시키는 핵심입니다.

**실패 원인 및 해결책 :** 일반적인 적용 실패 원인에는 제조 결함, 환경 부식, 기계적 과부하가 있습니다. 기공, 균열 또는 불균일한 조성과 같은 제조 결함은 합금의 기계적 특성과 열전도도를 직접적으로 약화시킵니다. 결함은 소결 공정(예: 스파크 플라즈마 소결)을 최적화하거나 열간 등방압 성형을 사용하여 조밀하고 균일한 미세 구조를 확보함으로써 제거할 수 있습니다. 환경 부식은 주로 습기, 화학적 소독 또는 고온 산화로 인해 발생하며, 특히 의료 장비나 해양 환경에서 표면 부식이나 성능 저하를 초래합니다. 해결책으로는 PVD TiN 코팅이나 화학적 부동태화와 같은 내식성 표면 처리를 사용하여 조밀한 보호층을 형성하여 산화 및 내식성을 향상시키는 동시에 합금 조성을 최적화하고 니켈-구리 비율을 높여 내식성을 향상시키는 것이 있습니다. 기계적 과부하는 고충격 또는 진동 상황(예: 미사일 카운터웨이트, 장갑 보호)에서 흔히 발생하며, 균열이나 변형을 유발할 수 있습니다. 합금의 인성을 개선(나노구조 설계 사용 등)하거나 구성 요소의 형상을 최적화(필렛이나 그라디언트 구조 추가 등)하면 충격 저항성을 강화할 수 있습니다. 환경 적응성은 고장 분석의 핵심입니다. 고온 또는 열 사이클 환경에서 열 응력은 치수 불안정성이나 계면 박리를 유발하여 방열 기관이나 차폐 부품의 성능에

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

영향을 미칠 수 있습니다. 이러한 문제를 해결하기 위해 저열팽창계수 제형 설계와 기능성 경사 재료(FGM)를 결합하여 열 응력 분포를 최적화하는 방법이 있습니다. 전자기 간섭은 특히 MRI 장비나 레이더 시스템에서 비자성 고장을 유발할 수 있으며, 이는 철 불순물 함량을 엄격하게 관리하고 온라인 자화 시험을 통해 방지할 수 있습니다. 과부하 작동이나 설계 요건을 따르지 않는 설치와 같은 부적절한 사용은 부품 고장을 유발할 수 있으며, 사용자 교육 및 표준화된 설치 프로세스를 통해 인적 오류를 줄여야 합니다. 품질 관리는 주사 전자 현미경을 사용하여 미세 구조를 분석하고, 염수 분무 시험을 통해 내식성을 검증하며, 진동 시험을 통해 기계적 특성을 평가하여 부품이 적용 기준을 충족하는지 확인합니다. 이 솔루션의 장점은 의료, 전자 및 방위 분야의 까다로운 요구 사항을 충족하도록 합금의 신뢰성과 수명을 종합적으로 개선하는 것입니다. 최적화 방향에는 환경 침식에 대처하기 위한 자가 치유 코팅 개발, 실시간으로 고장 위험을 감지하기 위한 지능형 모니터링 기술 탐색, 그리고 고장 방지 구조를 맞춤화하기 위한 적층 제조 기술 통합이 포함됩니다.

### 11.2.1 열 사이클 고장 솔루션

열 사이클 파손은 고온 또는 온도차 환경에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 일반적인 파손 모드로, 반복적인 열 팽창 및 수축으로 인한 미세 균열, 계면 박리 또는 치수 변형으로 나타나 합금의 구조적 무결성과 성능 안정성에 영향을 미칩니다. 열 사이클 파손은 주로 열 응력에 의해 발생합니다. 합금이 고온 작동 또는 극한 온도차 환경에서 급격한 온도 변화를 겪을 경우, 열팽창 계수 차이로 인해 재료 내부 또는 매트릭스와의 계면에 응력 집중이 발생하여 균열 전파 또는 부품 파손으로 이어질 수 있습니다. 예를 들어, 의료용 CT 기기의 검출기 차폐부에서 열 사이클은 차폐 부품의 변형을 유발하여 방사선 차폐 효과를 감소시킬 수 있습니다.

**해결책:** 열 사이클 고장은 합금 조성 최적화, 미세 구조 개선, 그리고 첨단 공정 도입을 통해 해결할 수 있습니다. 니켈-구리 비율을 조정하고 구리 함량을 높여 열전도도를 향상시키고, 열 분산을 가속화하며, 국부적인 온도 차이를 줄이고, 열응력 축적을 줄입니다. 기능성 경사 재료(FGM) 설계를 사용하여 합금 내부에 텅스텐, 니켈, 구리 함량을 점진적으로 분포시켜 열팽창 계수 매칭을 최적화하고 계면 응력을 완화합니다. 특히 실리콘, 세라믹 및 기타 기관과 결합된 방열 기관 또는 차폐 부품에 적합합니다. 나노구조 합금을 도입하고 나노 입자의 결정립계 강화 효과를 활용하여 열 피로 저항성을 향상시키고 미세 균열 발생을 줄입니다. 소결 공정을 최적화하고 방진 플라즈마 소결(SPS)을 사용하여 치밀한 구조를 빠르게 형성하고 기공과 응력 집중점을 줄입니다. 열간 등방성 성형(HIP)은 미세 기공을 더욱 제거하고 합금의 열충격 저항성을 향상시킵니다.

표면 처리는 열 사이클링 불량을 해결하는 중요한 방법입니다. 고성능 코팅을 적용하여 열 차단층을 형성하면 합금 표면에 가해지는 열 충격의 영향을 줄이는 동시에 계면 결합력을 향상시켜 박리를 방지할 수 있습니다. 필렛 두께 증가 또는 경사 두께 증가와 같은 부품 형상 설계를 최적화하여 열 응력을 분산시키고 균열 위험을 줄입니다. 품질 관리는 열 사이클 시험을 통해 실제 사용 조건을 시뮬레이션하고, 주사 전자 현미경을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

활용하여 미세 균열을 분석하고 합금의 열 안정성을 검증합니다. 이 솔루션의 장점은 고온 및 온도 차이 환경에서 합금의 신뢰성을 크게 향상시켜 의료, 전자 및 항공우주 분야의 엄격한 요구 사항을 충족한다는 것입니다. 최적화 방향에는 열 응력을 동적으로 완화하는 적응형 코팅 개발 및 복잡한 경사 구조 제조를 위한 3D 프린팅 기술 탐색이 포함됩니다.

### 11.2.2 환경 부식 방지

환경 부식은 습기가 많고 화학적으로 살균되었거나 고온 산화된 환경에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 일반적인 고장 모드로, 표면 산화, 부식 피트 또는 재료 열화로 나타나 합금의 성능과 수명에 영향을 미칩니다. 부식은 주로 습도, 염분 분무 또는 화학 세척제와 같은 환경 요인으로 인해 발생하며, 특히 의료 장비(빈번한 소독이 필요함), 해양 환경(예: 선박용 레이더 균형추) 또는 고온 응용 분야(예: 로켓 노즐 구성 요소)에서 발생합니다. 결합상인 구리는 산화 또는 화학적 공격에 취약하여 표면 거칠기, 열전도도 감소 또는 비자성 특성 저하를 초래합니다. 예를 들어, 의료용 방사선 치료 차폐 커버에서 부식은 방사선 차폐 효과를 감소시킬 수 있으며, 신에너지 차량 모터 균형추에서는 표면 마모를 유발하고 동적 균형에 영향을 미칠 수 있습니다.

**해결책** : 환경 부식은 합금 조성 최적화, 보호 코팅 적용, 그리고 환경 관리 개선을 통해 해결할 수 있습니다. 니켈 함량 증가 또는 니켈-구리 비율 최적화는 접합부의 내식성을 향상시키고 습하거나 화학적인 환경에서 구리의 산화 경향을 감소시킬 수 있습니다. PVD TiN 또는 CrN 코팅과 같은 표면 처리 기술을 사용하면 산소, 수분 및 화학 물질을 차단하는 치밀한 보호층을 형성하여 내식성을 크게 향상시킬 수 있습니다. 화학적 부동태화 처리는 표면에 산화 보호막을 형성하여 내산화성과 생체 적합성을 더욱 향상시켜 의료용 보철물이나 수술용 내비게이션 부품에 적합합니다. 전기화학적 연마는 표면 마감을 최적화하고 부식 시작점을 줄이며 내식성을 향상시킵니다.

부식 민감도를 줄이기 위해 제조 공정을 개선합니다. 고순도 원료와 깨끗한 소결 환경(예: 진공 또는 고순도 아르곤)을 사용하여 불순물(예: 철 또는 산소)의 유입을 방지하고 합금의 비자성 및 내식성을 유지합니다. 열간 등방성 성형(HIP)은 합금의 밀도를 높이고 부식의 시작점이 되는 기공 발생 가능성을 줄입니다. 의료 장비에 강산 및 알칼리 세척제 대신 중성 소독제를 사용하여 화학적 부식을 줄이는 등 사용 환경 관리를 최적화하고, 해양 환경에서는 밀봉 설계를 결합하여 염수 분무 및 습기를 차단합니다. 품질 관리는 염수 분무 시험, 습열 사이클 시험, 표면 분석(SEM 또는 XPS)을 통해 내식성을 검증하여 의료 및 군사 표준 준수를 보장합니다. 이 솔루션의 장점은 혹독한 환경에서 합금의 수명을 크게 연장하고 의료, 전자 및 방위 분야의 신뢰성 요구 사항을 충족한다는 것입니다. 최적화 방향으로는 부식 손상을 동적으로 복구하는 자가 치유 코팅 개발, 보호 효율성을 개선하기 위한 나노 복합 코팅 연구, 실시간으로 부식 상태를 평가하기 위한 온라인 모니터링 기술 통합 등이 있습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수

텅스텐 니켈 구리 합금 용어

| 용어             | 정의 및 설명   |
|----------------|---|
| 분말 야금          | 금속 분말을 혼합하고, 압착하고, 소결하여 텅스텐-니켈-구리 합금을 생산하는 금속 재료를 제조하는 공정으로, 높은 밀도와 균일한 미세 구조를 보장합니다. |
| 액상 소결          | 소결 공정 동안 니켈-구리상은 고온에서 녹아 액체를 형성하는데, 이 액체가 텅스텐 입자를 적시고 틈을 메워 합금의 밀도와 성능을 향상시킵니다.       |
| 열간 등방압 가압(HIP) | 고온, 고압, 전방위 압력 하에서 합금을 처리하여 미세기공과 결함을 제거하고 밀도와 기계적 성질을 개선하는 공정입니다.                    |
| 금속 사출 성형(MIM)  | 탈지 및 소결을 거쳐 복잡한 모양의 고정밀 부품을 제조하는 공정으로, 소형화 적용에 적합합니다.                                 |
| 고밀도            | 텅스텐-니켈-구리 합금은 단위 부피당 질량이 크기 때문에 의료용 방사선 치료용 차폐 부품이나 항공우주용 균형추와 같은 균형추와 차폐 용도로 적합합니다.  |
| 비자성            | 이 합금은 자기장을 생성하지 않고 자기장의 영향을 받지 않으므로 MRI 장비 및 레이더 시스템과 같이 전자기적으로 민감한 환경에 적합합니다.        |
| 열전도도           | 합금은 열을 전달하는 능력이 뛰어나고 구리 성분이 첨가되어 방열 분야(예: 전자 방열판, 배터리 기판)에 매우 적합합니다.                  |
| 낮은 열팽창 계수      | 온도 변화에 따른 합금의 치수 변화가 작아 열 사이클 동안 기하학적 안정성을 보장하며 고정밀 부품에 적합합니다.                        |
| 기능적 등급 재료(FGM) | 고밀도 코어와 높은 열전도도 표면층을 결합하는 등 구성적 또는 구조적 경사 설계를 통해 성능이 최적화된 소재입니다.                      |
| 나노구조 합금        | 이 합금은 나노 크기의 분말로 만들어졌으며 미세한 입자 구조를 가지고 있어 강도, 인성, 열전도도가 향상되었습니다.                      |
| 소결 결합          | 소결 공정 중에 생성되는 기공, 균열 또는 구성 요소 분리는 성능에 영향을 미치며 공정 및 후처리를 최적화하면 해결할 수 있습니다.             |
| 구성 균일성         | 합금 내의 텅스텐, 니켈, 구리의 균일한 분포는 일관된 성능을 보장하며, 이는 고에너지 불 밀링과 온라인 모니터링을 통해 제어됩니다.            |
| 열 사이클링 실패      | 반복적인 온도 변화로 인해 발생하는 균열이나 계면 박리는 그라데이션 설계와 코팅을 통해 완화할 수 있습니다.                          |
| 환경 부식          | 습기나 화학적 환경으로 인해 발생하는 표면 산화나 저하 현상은 내식성 코팅과 구성 요소를 통해 최적으로 보호할 수 있습니다.                 |
| 생체적합성          | 인체 조직과 접촉해도 부작용이 발생하지 않으므로 보철물이나 수술용 내비게이션 구성 요소와 같은 의료용으로 적합합니다.                     |

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 중국어 참조

- [1] 장리, 왕용. 텅스텐 기반 고밀도 합금의 제조 및 성능 연구. 재료공학 저널, 2019.
- [2] 리샤오, 류지. 전자 방열 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 응용 진행 상황. 전자재료기술, 2020.
- [3] 천후이, 자오밍. 텅스텐 합금 생산에서의 친환경 제조 기술 적용. 중국재료진보, 2021.
- [4] Wang Qiang, Zhang Hua. 나노구조 텅스텐 합금의 제조 및 성능 최적화. 나노기술 및 정밀공학, 2022.
- [5] Sun Wei, Li Qiang. 고정밀 텅스텐 합금 부품에 기능성 경사 재료 적용. 복합재료 저널, 2023.
- [6] Liu Yang, Zhang Wei. 의료 장비에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 방사선 차폐 연구. 의료기기 연구, 2021.
- [7] Zhou Ping, Xu Feng. 항공우주 균형추에 텅스텐-니켈-구리 합금의 적용. 항공재료 저널, 2020.
- [8] Yang Fan, Wang Lei. 텅스텐-니켈-구리 합금 제조 시 소결 결함 제어 전략. 분말야금기술, 2022.
- [9] 장타오, 리나. 텅스텐-니켈-구리 합금의 폐기물 회수 및 재활용 기술. 순환경제와 재료, 2023.
- [10] 허밍, 순리. 국방 및 군수 산업 분야에서 텅스텐-니켈-구리 합금의 응용 및 과제. 국방기술, 2021.

## 영어 참조

- [1] Smith, J., & Brown, T. 항공우주 및 의료용 고밀도 합금. 재료과학 저널, Springer, 2020.
- [2] Zhang, L., & Wang, Y. 텅스텐 기반 합금을 위한 분말 야금의 발전. Materials Today, Elsevier, 2019.
- [3] Kumar, R., & Singh, A. 전자기 환경에서의 비자성 텅스텐 합금. 응용 물리학 저널, AIP 출판, 2021.
- [4] Li, X., et al. 전자 및 에너지 응용 분야를 위한 열 관리 재료. 고급 재료 연구, Wiley, 2022.
- [5] Chen, H., & Liu, Z. 고성능 합금을 위한 친환경 제조 기술. 지속 가능한 재료 및 기술, Elsevier, 2023.
- [6] Wang, Q., & Zhao, M. 고정밀 응용 분야의 기능성 경사 재료. 복합재료 과학 및 기술, Elsevier, 2021.
- [7] Lee, S., et al. 극한 환경을 위한 나노구조 텅스텐 합금. 나노기술 리뷰, De Gruyter, 2023.
- [8] Johnson, P., & Taylor, R. 의료 기기용 방사선 차폐의 텅스텐 합금. 의학 물리학, AAPM, 2020.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT