

전자빔 텅스텐 필라멘트의 백과사전

中钨智造科技有限公司
CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

CTIA GROUP 소개

CHINATUNGSTEN ONLINE 이 설립 한 독립적 인 법인격을 가진 전역 출자 자회사 인 CTIA GROUP LTD 는 산업 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 재료의 지능적이고 통합적이며 유연한 설계 및 제조를 촉진하기 위해 최선을 다하고 있습니다. 1997 년 www.chinatungsten.com 를 출발점으로 설립 된 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 중국 최초의 최상위 텅스텐 제품 웹 사이트이며 텅스텐, 몰리브덴 및 희토류 산업에 중점을 둔 중국의 선구적인 전자 상거래 회사입니다. 텅스텐 및 몰리브덴 분야에서 거의 30 년 동안 쌓아온 깊은 경험을 바탕으로 CTIA GROUP 은 모회사의 탁월한 설계 및 제조 능력, 우수한 서비스 및 글로벌 비즈니스 명성을 계승하여 텅스텐 화학, 텅스텐 금속, 초경합금, 고밀도 합금, 몰리브덴 및 몰리브덴 합금 분야에서 포괄적인 응용 솔루션 제공업체가 되었습니다.

지난 30 년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 텅스텐, 몰리브덴 및 희토류와 관련된 뉴스, 가격 및 시장 분석의 100 만 페이지 이상을 포함하여 20 개 이상의 언어를 다루는 200 개 이상의 다국어 텅스텐 및 몰리브덴 전문 웹 사이트를 설립했습니다. 2013 년부터 WeChat 공식 계정 "CHINATUNGSTEN ONLINE"은 40,000 개 이상의 정보를 게시하여 거의 100,000 명의 추종자에게 서비스를 제공하고 전 세계 수십만 명의 업계 전문가에게 매일 무료 정보를 제공합니다. 웹 사이트 클러스터 및 공식 계정에 대한 누적 방문 횟수가 수십억 회에 달함에 따라 텅스텐, 몰리브덴 및 희토류 산업에서 인정받는 글로벌하고 권위 있는 정보 허브가 되어 24/7 다국어 뉴스, 제품 성능, 시장 가격 및 시장 동향 서비스를 제공합니다.

CHINATUNGSTEN ONLINE 의 기술과 경험을 바탕으로 CTIA GROUP 은 고객의 개인화 된 요구를 충족시키는 데 중점을 둡니다. AI 기술을 활용하여 특정 화학 조성 및 물리적 특성(예: 입자 크기, 밀도, 경도, 강도, 치수 및 공차)을 가진 텅스텐 및 몰리브덴 제품을 고객과 공동으로 설계하고 생산합니다. 금형 개발, 시험 생산에서 마무리, 포장 및 물류에 이르기까지 전체 프로세스 통합 서비스를 제공합니다. 지난 30 년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 전 세계 130,000 명 이상의 고객에게 500,000 가지 이상의 텅스텐 및 몰리브덴 제품에 대한 R & D, 설계 및 생산 서비스를 제공하여 맞춤형, 유연성 및 지능형 제조의 기반을 마련했습니다. 이러한 기반을 바탕으로 CTIA GROUP 은 산업 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 재료의 지능형 제조 및 통합 혁신을 더욱 심화합니다.

CTIA GROUP 의 Hanns 박사와 그의 팀은 30 년 이상의 업계 경험을 바탕으로 텅스텐, 몰리브덴 및 희토류와 관련된 지식, 기술, 텅스텐 가격 및 시장 동향 분석을 작성하고 공개적으로 발표하여 텅스텐 업계와 자유롭게 공유했습니다. 한 박사는 1990 년대부터 30 년 이상 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 전자 상거래 및 국제 무역, 초경합금 및 고밀도 합금의 설계 및 제조 분야에서 경험을 쌓았으며 국내외에서 텅스텐 및 몰리브덴 제품 분야의 저명한 전문가입니다. 업계에 전문적이고 고품질의 정보를 제공한다는 원칙을 고수하는 CTIA GROUP 의 팀은 생산 관행 및 시장 고객의 요구를 기반으로 기술 연구 논문, 기사 및 산업 보고서를 지속적으로 작성하여 업계에서 널리 찬사를 받고 있습니다. 이러한 성과는 CTIA GROUP 의 기술 혁신, 제품 홍보 및 산업 교류에 대한 견고한 지원을 제공하여 글로벌 텅스텐 및 몰리브덴 제품 제조 및 정보 서비스의 선두 주자로 도약할 수 있도록 합니다.



저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

목차

1 장 소개

- 1.1 전자빔 텅스텐 필라멘트의 정의와 중요성
- 1.2 역사적 발전과 기술 진화
- 1.3 현대 기술에서 전자빔 텅스텐 필라멘트의 역할

2 장 : 전자총에서 텅스텐 필라멘트의 기본 원리

- 2.1 전자총의 작동 원리
- 2.2 음극 물질로서의 텅스텐 필라멘트의 물리적 및 화학적 기초
- 2.3 열이온 방출 메커니즘
- 2.4 텅스텐 필라멘트와 대체 재료의 비교

Chapter 3 전자총용 텅스텐 필라멘트의 제조 및 제조 기술

- 3.1 전자빔 텅스텐 필라멘트의 원료 선택 및 준비
 - 3.1.1 텅스텐 금속의 출처 및 정제
 - 3.1.2 텅스텐 분말의 입자 크기 및 순도 요구 사항
 - 3.1.3 첨가제 및 도핑 물질의 선택(예: 칼륨, 알루미늄 등)
 - 3.1.4 원료 테스트 및 품질 관리
- 3.2 전자빔 텅스텐 필라멘트 야금
 - 3.2.1 텅스텐 분말 압착 및 소결
 - 3.2.1.1 프레스 공정 매개 변수
 - 3.2.1.2 소결로의 종류와 온도 제어
 - 3.2.2 텅스텐 막대의 단조 및 인발
 - 3.2.2.1 열간 단조 및 냉간 단조 기술
 - 3.2.2.2 와이어 드로잉 다이 설계 및 윤활유 선택
 - 3.2.3 텅스텐 와이어의 어닐링 및 입자 제어
 - 3.2.3.1 어닐링 온도 및 분위기
 - 3.2.3.2 입자 크기가 성능에 미치는 영향
- 3.3 전자빔 텅스텐 필라멘트 형성 및 가공
 - 3.3.1 텅스텐 와이어의 권선 및 성형
 - 3.3.1.1 단일 나선, 이중 나선 및 복잡한 기하학적 설계
 - 3.3.1.2 성형 장비의 자동화 및 정밀도
 - 3.3.2 표면처리 기술
 - 3.3.2.1 화학적 세척 및 연마
 - 3.3.2.2 표면 코팅(예: 산화물 코팅) 공정
 - 3.3.3 필라멘트 절단 및 성형
- 3.4 전자빔 텅스텐 필라멘트 생산 설비 및 자동화
 - 3.4.1 전자빔 텅스텐 필라멘트의 핵심 생산 장비 개요
 - 3.4.1.1 소결로
 - 3.4.1.2 철사 그립 기계
 - 3.4.1.3 포장기

- 3.4.2 생산 라인의 자동화 및 인텔리전스
- 3.4.3 환경 제어 및 클린 룸 요구 사항
- 3.5 전자빔 텅스텐 필라멘트의 품질 관리 및 검사
 - 3.5.1 온라인 탐지 기술
 - 3.5.1.1 치수 및 기하학적 정확도 검사
 - 3.5.1.2 표면 결함 감지
 - 3.5.2 성능 테스트
 - 3.5.2.1 저항 및 전도도 시험
 - 3.5.2.2 열전자 방출 성능 시험
 - 3.5.3 고장 분석 및 개선 조치

4 장 : 전자빔 텅스텐 필라멘트의 제품 특성

- 4.1 전자빔 텅스텐 필라멘트의 물리적 및 화학적 특성
 - 4.1.1 텅스텐 필라멘트의 용점 및 열 안정성
 - 4.1.2 텅스텐 필라멘트의 저항률 및 온도 계수
 - 4.1.3 텅스텐 필라멘트의 산화 방지 및 부식 방지 특성
 - 4.1.4 텅스텐 필라멘트의 기계적 강도 및 연성
- 4.2 전자빔 텅스텐 필라멘트의 전기적 및 열적 특성
 - 4.2.1 텅스텐 필라멘트의 열이온 방출 효율
 - 4.2.2 텅스텐 필라멘트의 작동 온도 범위
 - 4.2.3 텅스텐 필라멘트의 열팽창 및 열피로 성능
 - 4.2.4 텅스텐 필라멘트의 아크 안정성
- 4.3 전자빔 필라멘트의 미세구조와 성능의 관계
 - 4.3.1 입자 구조 및 방향
 - 4.3.2 미세조직에 대한 도핑 원소의 영향
 - 4.3.3 표면 형태 및 방출 성능
- 4.4 전자빔 텅스텐 필라멘트의 수명과 신뢰성
 - 4.4.1 필라멘트 수명에 영향을 미치는 요인
 - 4.4.2 고장 모드 분석(예: 증발, 파괴)
 - 4.4.3 신뢰성 테스트 방법
- 4.5 CTIA GROUP LTD 전자빔 텅스텐 필라멘트의 MSDS

5 장: 전자빔 텅스텐 필라멘트의 사용 및 응용

- 5.1 전자총에 적용
 - 5.1.1 주사전자현미경(SEM)
 - 5.1.2 투과 전자 현미경 (TEM)
 - 5.1.3 전자빔 용접 및 절단
 - 5.1.4 전자빔 리소그래피
- 5.2 진공 전자 장치
 - 5.2.1 마이크로파 튜브(예: 마그네트론 및 진행파 튜브)
 - 5.2.2 X 선관
 - 5.2.3 음극선관(CRT)

- 5.3 기타 산업 및 과학 연구 응용 프로그램
 - 5.3.1 박막 증착 (예 : 물리적 기상 증착)
 - 5.3.2 이온 소스 및 질량 분석기
 - 5.3.3 핵융합 실험장치
- 5.4 신형 응용 분야
 - 5.4.1 3D 프린팅에서 전자빔 용융
 - 5.4.2 우주 추진 체계에 있는 전자 근원
 - 5.4.3 나노 기술 및 마이크로 나노 가공

Chapter 6 전자빔 필라멘트의 기술적 과제와 향후 개발

- 6.1 전자빔 텅스텐 필라멘트의 현재 기술적 과제
 - 6.1.1 필라멘트의 수명 연장
 - 6.1.2 전송 효율 향상
 - 6.1.3 소형화 및 고정밀 요구 사항
- 6.2 전자빔 텅스텐 필라멘트를 위한 새로운 재료 및 기술
 - 6.2.1 텅스텐계 복합 재료
 - 6.2.2 나노 구조 텅스텐 필라멘트
 - 6.2.3 대체 양극 재료(예: 탄소 나노튜브, 전계 방출 음극)
- 6.3 전자빔 텅스텐 필라멘트의 지능적이고 친환경적인 제조
 - 6.3.1 지능형 모니터링 및 적응형 제어
 - 6.3.2 에너지 절약 및 친환경 생산 기술
 - 6.3.3 재활용 및 폐기물 처리
- 6.4 전자빔 텅스텐 필라멘트의 향후 개발 동향
 - 6.4.1 고성능 전자총 설계
 - 6.4.2 학제간 통합(예: 인공 지능과의 통합)
 - 6.4.3 우주 및 극한 환경에서의 응용 프로그램

7장 전자빔 텅스텐 필라멘트에 대한 표준 및 사양

- 7.1 국가 표준 (GB)
 - 7.1.1 GB/T 관련 표준 (예 : 텅스텐 및 텅스텐 합금 재료 표준)
 - 7.1.2 전자총 양극재에 대한 시험 및 평가 기준
 - 7.1.3 진공 전자 장치의 제조 및 승인 사양
- 7.2 국제 표준 (ISO)
 - 7.2.1 ISO 관련 재료 및 시험 규격
 - 7.2.2 텅스텐 필라멘트의 표면 처리에 ISO 4618-2006 적용
 - 7.2.3 ISO 14001 생산 시 구현
- 7.3 미국 기준
 - 7.3.1 ASTM 표준(예: ASTM B387)
 - 7.3.2 전자총 제조에 ASME 규격 적용
 - 7.3.3 SAE 규격(전자빔 용접에 해당되는 경우)
- 7.4 기타 국제 및 산업 표준
 - 7.4.1 일본 규격 (JIS)

7.4.2 독일 표준 (DIN)

7.4.3 러시아 표준(GOST)

7.5 표준 구현 및 인증

7.5.1 생산 및 테스트에서 표준 적용

7.5.2 품질 경영 시스템 인증 (예 : ISO 9001)

7.5.3 제품 수출 및 국제 표준 준수

부록

A. 용어집

B. 참조

1 장 소개

1.1 전자빔 텅스텐 필라멘트의 정의와 중요성

전자빔 텅스텐 필라멘트는 텅스텐 금속 을 주재료로 하는 음극 성분입니다. 전기 가열을 통해 열전자 방출을 발생시키며 전자총의 핵심 구성 요소입니다. 전자총은 전기장 또는 자기장을 사용하여 전자를 가속하여 고에너지 전자빔을 형성합니다. 주사 전자 현미경(SEM), 투과 전자 현미경(TEM), 전자빔 용접, X 선관 및 기타 장비에 널리 사용됩니다. 텅스텐 필라멘트의 중요성은 높은 용점 (약 3422 °C), 낮은 증기압, 높은 일기능 (약 4.5 eV), 우수한 열 안정성 및 기계적 강도와 같은 우수한 물리적 및 화학적 특성에서 비롯됩니다. 이러한 특성으로 인해 텅스텐 필라멘트는 고온 및 고진공 환경에서 안정적으로 작동하고 신뢰할 수 있는 전자빔을 제공할 수 있습니다.

전자총의 텅스텐 필라멘트는 전원을 켜서 2000-2800°C 로 가열하고 텅스텐 표면의 전자를 자극하여 일 기능을 극복하고 탈출하여 전자 흐름을 형성하는 것입니다. 이러한 전자는 전기장의 작용으로 가속되어 이미징, 처리 또는 분석을 위한 집속 전자빔을 생성합니다. 예를 들어, SEM 에서 텅스텐 필라멘트의 방출 안정성과 밝기는 이미징 해상도에 직접적인 영향을 미칩니다. 전자빔 리소그래피에서 필라멘트의 수명과 일관성은 나노 스케일 패턴의 처리 정확도를 결정합니다. 또한, 희귀 금속으로서 텅스텐 자원의 희소성과 높은 가치는 글로벌 과학 기술 및 산업 공급망에서 텅스텐 필라멘트의 전략적 위치를 더욱 강조합니다. [Chinatungsten Online](#) 의 정보에 따르면 텅스텐 필라멘트의 제조 기술은 전자 장비의 성능 및 비용과 직접적인 관련이 있으며 첨단 기술 분야의 핵심 기술 중 하나입니다.

1.2 역사적 발전과 기술의 진화

텅스텐 필라멘트는 19 세기 후반에 시작되었으며 진공 전자 장치의 부상과 밀접한 관련이 있습니다. 1878 년 토마스 에디슨은 백열 필라멘트에 텅스텐을 처음 사용했으며 고온 내성과 낮은 증발 속도를 발견하여 고온 응용 분야에서 텅스텐의 토대를 마련했습니다. 20 세기 초 진공관 기술의 발전으로 전자총이 탄생했으며 텅스텐은 높은 용점과 화학적 안정성으로 인해 전자총 음극에 선호되는 재료가되었습니다. 1920 년대에 텅스텐 필라멘트는 초기 음극선관 (CRT)에 사용되기 시작하여 전자 장치에 널리 사용되었습니다.

1950 년대에는 주사 전자 현미경의 출현으로 텅스텐 필라멘트에 대한 요구가 높아져 연구원들이 미세 구조 및 제조 공정을 최적화하도록 요청했습니다. 1960 년대에는 도핑 기술의 도입이 중요한 돌파구가 되었습니다. 예를 들어, 칼륨, 알루미늄 및 실리콘과 같은 원소를 첨가하면 (텅스텐 지식) 필라멘트의 크리프 저항과 열 전자 방출 효율이 크게 향상되었습니다. 21 세기에 접어들면서 나노 기술과 정밀 제조의 발전은 텅스텐 필라멘트 기술의 발전을 더욱 촉진했습니다. 예를 들어, 나노 단위 입자 제어 기술은 필라멘트의 기계적 특성을 최적화할 수 있으며 표면 코팅 기술(예: 산화물 코팅)은 수명을 연장할 수 있습니다.

1.3 현대 기술에서 전자빔 텅스텐 필라멘트의 역할

저작권 및 법적 책임 선언문

현대 기술에서 텅스텐 필라멘트는 전자총의 필수 구성 요소이며 과학 연구, 산업 제조, 의료 및 신형 기술 분야에서 널리 사용됩니다. 주요 역할은 다음과 같습니다.

과학 연구: SEM 및 TEM 에서 텅스텐 필라멘트는 나노 스케일 구조를 관찰하기 위한 고휘도 전자빔을 제공합니다. 예를 들어, 텅스텐 필라멘트의 방출 안정성은 TEM 의 원자 수준 분해능에 직접적인 영향을 미칩니다.

산업 제조: 전자빔 용접, 절단 및 리소그래피 장비는 텅스텐 필라멘트에서 생성된 고에너지 전자빔에 의존하여 고정밀 가공을 달성합니다.

의료 응용 분야 : X 선관의 텅스텐 필라멘트는 진단 영상에 필요한 전자빔을 생성하는 데 사용되며 CT 스캔 및 방사선 치료에 널리 사용됩니다.

신형 분야: 텅스텐 필라멘트는 3D 프린팅(전자빔 용융), 우주 추진 시스템(예: 이온 추진기) 및 나노 기술에 점점 더 많이 사용되고 있습니다. 예를 들어, 전자빔 용융 기술은 텅스텐 필라멘트에서 생성된 고에너지 전자빔을 사용하여 금속 분말을 정밀하게 용융하여 복잡한 구조를 만듭니다.

텅스텐 필라멘트는 장비의 효율성과 정밀도에 직접적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 전자빔 리소그래피에서는 필라멘트의 방출 일관성과 수명이 나노 단위 패턴의 품질을 결정합니다. 환경 보호 및 지속 가능한 개발에 대한 요구 사항이 점점 더 엄격해짐에 따라 텅스텐 필라멘트의 친환경 제조 및 재활용은 업계에서 뜨거운 주제가 되었습니다. 글로벌 기업들은 자원 부족과 환경 문제에 대처하기 위해 폐 텅스텐 재활용 기술과 저에너지 생산 공정을 모색하고 있습니다.



CTIA GROUP LTD 전자빔 텅스텐 필라멘트

저작권 및 법적 책임 선언문

2 장 전자총에서 텅스텐 필라멘트의 기본 원리

2.1 전자총의 작동 원리

전자총은 전기장 또는 자기장을 통해 전자빔을 가속하는 장치이며 진공 전자 장치에 널리 사용됩니다. 기본 구조에는 음극(일반적으로 텅스텐 필라멘트), 양극 및 제어 전극(예: 그리드)이 포함됩니다. 작업할 때 텅스텐 필라멘트는 전기에 의해 고온(2000-2800°C)으로 가열되어 뜨거운 전자를 방출합니다. 이러한 전자는 고에너지 전자빔을 형성하기 위해 양극에 의해 가해지는 고전압(수천 볼트에서 수십 킬로볼트)에 의해 형성된 전기장에 의해 가속됩니다. 제어 전극은 전자빔의 강도, 모양 및 초점을 조정하여 다양한 응용 분야의 요구 사항을 충족합니다.

전자총의 성능은 필라멘트의 방출 효율, 빔 안정성 및 초점 정확도에 따라 달라집니다. 텅스텐 필라멘트는 높은 용점, 낮은 증기압 및 안정적인 열 전자 방출 특성으로 인해 전자총에 선호되는 음극 재료입니다. 예를 들어, 주사 전자 현미경에서 전자총은 고휘도의 좁은 빔 전자빔을 제공해야 하며 텅스텐 필라멘트의 미세 구조와 표면 상태는 이러한 매개변수에 직접적인 영향을 미칩니다. Chinatungsten Online 의 데이터에 따르면 최신 전자총 설계는 필라멘트 형상 및 전극 구성을 최적화하여 전자빔을 나노미터 미만 수준으로 집중시킬 수 있습니다.

2.2 음극 물질로서의 텅스텐 필라멘트의 물리적 및 화학적 기초

음극 물질로서의 텅스텐은 독특한 물리적 및 화학적 특성에 있습니다.

높은 용점: 텅스텐의 녹는점은 3422°C 로 전자총이 작동할 때 고온 환경을 견딜 수 있습니다.

낮은 증기압: 텅스텐은 고온에서 증발 속도가 낮아 필라멘트 손실과 진공 시스템 오염을 줄입니다.

높은 일함수: 텅스텐의 일함수는 약 4.5eV 로 열이온 방출에 적합하고 안정적인 전자 흐름을 제공합니다.

화학적 안정성 : 텅스텐은 진공 환경에서 산화 및 부식에 강하며 장기간 사용에 적합합니다.

텅스텐의 몸체 중심의 입방체 결정 구조는 우수한 기계적 강도와 열 안정성을 제공합니다. 도핑 원소(예: 칼륨, 알루미늄 및 실리콘)를 추가하면 예를 들어 작업 기능을 줄이거나 크리프 저항을 개선하는 등 성능을 더욱 최적화할 수 있습니다. Chinatungsten Online 의 데이터에 따르면 텅스텐 도핑 된 필라멘트의 방출 효율은 10-20 % 증가하여 전자건의 성능을 크게 향상시킬 수 있습니다. 또한, 텅스텐 표면의 형태 및 청결도는 배출 성능에 매우 중요하며, 작은 불순물 또는 산화물 층은 배출 효율을 크게 감소시킬 수 있습니다.

2.3 열이온 방출 메커니즘

전자총의 텅스텐 필라멘트는 열이온 방출입니다. 텅스텐 필라멘트가 고온으로 가열되면 내부의 자유 전자는 충분한 열 에너지로 인해 재료 표면에 형성된 전위

장벽 (일 함수라고 함)을 극복 한 다음 진공 속으로 빠져 나와 전자 흐름을 형성 할 수 있습니다.

Richardson-Dushman 방정식 에 따르면 열전자 방출의 전류 밀도 J 와 온도 T 및 재료 일함수 ϕ 사이의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있습니다.

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

안으로:

J : 전자 방출 전류 밀도(A/cm²)

A : 리처드슨 상수 (보통 약 120 A / cm² / K²)

T : 텅스텐 필라멘트 표면 온도(K)

ϕ : 재료의 전자 작업 기능(eV)

k : 볼츠만 상수 (8.617×10⁻⁵ eV /K)

텅스텐의 경우 일 함수는 약 4.5-4.6 eV 입니다. 가장 낮지는 않지만 융점이 높기 때문에 2000°C 이상의 작동 온도를 견딜 수 있어 열 전자 방출 효율이 전자건의 요구 사항을 충족하기에 충분합니다.

열전자 방출의 특징은 온도의 기하급수적 관계에 따라 전자 전류 밀도가 급격히 증가한다는 것입니다. 따라서 전자총의 설계는 텅스텐 필라멘트의 가열 전류를 정확하게 제어하여 필요한 전자빔 강도를 얻는 동시에 과열로 인한 필라멘트 손실 또는 파손을 방지해야 합니다.

실제 적용에서 필라멘트의 표면 상태는 방출 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 예를 들어, 표면 산화물 또는 불순물은 작업 기능을 증가시키고 배출 효율을 감소시킵니다. 미세한 형태(예: 입자 방향 및 표면 거칠기)는 전자 탈출 효율에 영향을 미칩니다. 따라서 화학적 세척, 연마 및 표면 코팅 기술은 성능을 최적화하기 위해 필라멘트 생산에 자주 사용됩니다.

2.4 텅스텐 필라멘트와 대체 재료의 비교

텅스텐 필라멘트는 성능이 우수하지만 높은 일기능과 제한된 수명으로 인해 연구원들은 대체 재료를 탐색하게되었습니다. 다음은 텅스텐 필라멘트와 일반적인 대체 재료의 비교입니다.

란탄 텅스텐(LaB6): 일함수(약 2.7eV)가 낮고 방출 효율이 높아 고휘도 응용 분야에 적합하지만 진공에 대한 요구 사항이 엄격하고 산소에 쉽게 오염됩니다.

탄소 나노 튜브 (CNT): 전계 방출 특성을 가지며 가열이 필요하지 않으며 소형 응용 분야에 적합하지만 제조 비용이 높고 안정성에 대한 추가 검증이 필요합니다.

산화물 음극: 방출 효율이 높고 작동 온도(약 1000°C)가 낮지만 기계적 강도가 낮고 고출력 전자총에 적합하지 않습니다.

텅스텐 기반 복합 재료: 산화물 또는 탄화물이 도핑 된 텅스텐 재료와 같은 재료는 높은 방출 효율과 긴 수명을 갖지만 공정이 복잡하고 비용이 많이 듭니다.

텅스텐 필라멘트는 고출력 및 긴 수명의 전자총을 지배합니다. 그러나 소형화와 저전력 소비에 대한 요구로 탄소 나노 튜브 및 나노 구조 텅스텐과 같은 신소재가 연구 핫스팟이되고 있습니다.



CTIA GROUP LTD 전자빔 텅스텐 필라멘트

3 장 전자빔 텅스텐 필라멘트의 준비 및 생산 공정

전자빔 텅스텐 필라멘트는 원료 선택에서 최종 성형에 이르는 전 과정을 포괄하는 높은 성능과 신뢰성을 보장하는 핵심 링크입니다. 이 장에서는 원료 준비, 야금 공정, 성형 가공, 생산 장비, 품질 관리 등에 대해 자세히 설명하고 글로벌 첨단 기술과 산업 관행을 결합하고 각 단계의 기술적 세부 사항과 과제를 심층적으로 분석합니다.

3.1 전자빔 텅스텐 필라멘트의 원료 선정 및 제조

원료의 품질은 텅스텐 금속의 정제, 텅스텐 분말의 특성, 도핑 물질의 선택 및 엄격한 품질 관리를 포함하는 텅스텐 필라멘트의 성능을 직접적으로 결정합니다.

3.1.1 텅스텐 금속의 출처 및 정제

텅스텐 금속은 주로 볼프 라마이트 (FeMnWO_4)와 셀 라이트 (CaWO_4)에서 추출되며 글로벌 매장량은 주로 중국 (약 60 %), 러시아, 호주 및 캐나다에 집중되어 있습니다. Wolframite 는 주로 텅스텐 함량이 높고 분리가 용이하기 때문이며, scheelite 는 관련

칼슘으로 인해 더 복잡한 정제 과정이 필요합니다. 채굴 과정에는 노천 채굴 또는 지하 채굴이 포함되며, 파쇄, 연삭 및 중력 분리 (예 : 웨이킹 테이블, 나선형 농축기)를 통한 텅스텐 정광의 분리가 포함됩니다.

텅스텐 정제 공정은 물리적 선광과 화학 제련의 두 단계로 나뉩니다. 물리적 선광은 부유선광, 자기분리중자기분리및중력분리를 통해 텅스텐 농축액의 순도를 더욱 향상시키며, 일반적인 WO₃ 함량은 65-70%에 도달해야 합니다. 화학 제련은 텅스텐 농축액을 암모늄 과라 텅스텐 산염 또는 텅스텐 산 으로 변환합니다. 구체적인 프로세스에는 다음이 포함됩니다.

텅스텐 농축액은 수산화 나트륨 또는 탄산나트륨 용액으로 침출되어 텅스텐 산 나트륨 용액을 형성합니다.

이온 교환 또는 용매 추출: 불순물(예: 실리콘, 인, 비소)을 제거하여 고순도 APT 를 생성합니다.

소성 및 환원 : APT 는 800-1000 °C 에서 소성 되어 삼산화 텅스 텐을 생성 한 다음 700-900 °C 의 온도에서 수소 분위기에서 텅스텐 분말로 환원됩니다.

정제 과정에서 불순물 제어가 중요합니다. 철, 구리, 황과 같은 금속 불순물은 50ppm 미만이어야 하며, 산소, 탄소와 같은 비금속 불순물은 100ppm 미만이어야 합니다. 고순도 텅스텐 분말(99.95%)은 고급 전자총 필라멘트에 사용되어 방출 효율과 수명을 크게 향상시킬 수 있습니다.

3.1.2 텅스텐 분말의 입자 크기 및 순도 요구 사항

텅스텐 분말 은 소결 블랭크의 밀도와 필라멘트의 미세 구조에 영향을 미치는 핵심 요소입니다. 전자빔 텅스텐 필라멘트는 텅스텐 분말이 일반적으로 1-10 미크론 범위의 균일 한 입자 크기를 가져야하며 입자 크기 분포의 표준 편차는 ± 0.5 미크론 내에서 제어되어야 합니다. 미세하고 균일한 입자 크기는 다공성이 감소된 조밀한 소결체를 형성하는 데 도움이 됩니다(대상은 2% 미만). 입자 크기가 너무 크면 소결이 고르지 않을 수 있고 입자 크기가 너무 작으면 압착이 어려워질 수 있습니다.

순도 측면에서 텅스텐 분말의 금속 불순물 (예 : 철, 니켈 및 몰리브덴)의 함량은 30ppm 미만이어야하며 비금속 불순물 (예 : 산소, 질소 및 탄소)은 80ppm 미만이어야 합니다. 초고순도 텅스텐 분말 (5N 등급, 99.999 %)은 고해상도 SEM 을위한 필라멘트 제조와 같은 고급 응용 분야에서 수요가 증가하고 있습니다. 검출 방법은 다음과 같습니다.

입자 크기 분석: 레이저 입자 크기 분석기(예: Malvern Mastersizer)는 ± 0.1 미크론의 정확도로 입자 크기 분포를 측정합니다.

순도 검출: 유도 결합 플라즈마 질량 분석법(ICP -MS)은 검출 한계가 ppb 수준으로

낮은 불순물 함량을 분석하는 데 사용됩니다.

미세 구조 관찰: 주사 전자 현미경(SEM)을 사용하여 분말 형태를 검사하여 응집체나 비정상적인 입자가 없는지 확인했습니다.

3.1.3 첨가제 및 도핑 물질의 선택 (예 : 칼륨, 알루미늄, 실리콘 등)

도핑은 텅스텐 필라멘트의 성능을 최적화하는 핵심 기술입니다. 미량 원소를 추가하여 고온 성능, 방출 효율 및 크리프 저항을 향상시킵니다. 일반적으로 사용되는 도핑 요소는 다음과 같습니다.

칼륨 (K) : 산화칼륨 (K_2O)의 형태로 첨가, 0.01-0.05 wt %의 함량. 칼륨은 소결 중에 작은 기포를 형성하고 입자 성장을 억제하며 고온 크리프 저항성을 향상시킵니다.

알루미늄 (Al) : 0.005-0.02 중량 %에서 산화 알루미늄 (Al_2O_3)의 형태로 첨가
알루미늄은 일함수를 감소시키고(4.5eV 에서 약 4.3eV 로) 열전자 방출 효율을 향상시킵니다.

실리콘 (Si) : 0.01-0.03 중량 %의 함량으로 이산화 규소 (SiO_2)의 형태로 첨가된다.
실리콘은 고온 강도를 향상시키고 표면 산화를 줄입니다.

기타 원소 : 예를 들어 레늄 (Re, 0.1-1 wt %)은 연성을 향상시키는 데 사용되며 산화 이트륨 (Y_2O_3)은 방출 특성을 향상시키는 데 사용됩니다.

도핑 원소의 첨가는 습식 혼합 또는 기계적 합금을 통해 균일하게 분포되어야 합니다. 과도한 도핑은 비정상적인 입자 성장이나 필라멘트 취성을 유발할 수 있습니다. 예를 들어, 칼륨 함량이 0.1wt %를 초과하면 기계적 강도가 저하됩니다.

3.1.4 원료 테스트 및 품질 관리

원료 검사에는 화학 조성, 입자 크기 분포, 형태 및 미량 불순물 분석이 포함됩니다. 일반적으로 사용되는 장비는 다음과 같습니다.

X 선 형광 분광계(XRF): 텅스텐 분말과 도핑 원소의 화학 조성을 $\pm 0.01wt\%$ 의 정확도로 신속하게 분석합니다.

주사 전자 현미경(SEM): 분말 형태를 관찰하고 응집되거나 불규칙한 입자를 검출합니다.

투과 전자 현미경(TEM): 나노 단위 구조를 분석하고 도핑 원소의 분포를 평가합니다.

ICP-MS: ppb 수준의 감도로 미량 불순물을 검출합니다.

품질 관리는 ISO 9001 표준을 따르며 원료 보관에서 생산에 이르기까지 완전한 추적

시스템을 구축합니다. 텅스텐 분말의 각 배치는 최소 3 차례의 독립적 인 테스트를 통과해야하며 통과율은 99.9 % 이상에 도달해야 합니다. 부적합한 원료는 후속 공정에 영향을 미치지 않도록 재정제 또는 폐기됩니다.

3.2 전자빔 텅스텐 필라멘트 야금

야금 공정은 텅스텐 분말을 고성능 텅스텐 필라멘트로 변환하며, 여기에는 프레스, 소결, 단조, 드로잉 및 어닐링과 같은 단계가 포함됩니다. 필라멘트의 미세 구조와 성능을 보장하기 위해 각 단계를 정밀하게 제어해야 합니다.

3.2.1 텅스텐 분말 프레스 및 소결

3.2.1.1 프레스 공정 매개 변수

텅스텐 분말 압착은 텅스텐 분말을 금형에 넣고 유압 프레스 또는 등압 프레스를 통해 블랭크로 누르는 것입니다. 프로세스 매개변수는 다음과 같습니다.

압력: 100-300 MPa, 일반적인 값은 200 MPa 입니다. 너무 높은 압력은 다이 마모를 유발할 수 있으며 너무 낮은 압력은 빌릿의 밀도에 영향을 미칩니다.

유지 시간: 분말 입자가 완전히 결합되도록 10-30 초.

금형 재료: 텅스텐 카바이드(www.tungsten-carbide-powder.com) 또는 고강도 강철, 접착력을 줄이기 위해 Ra 0.1 미크론으로 연마된 내벽.

바인더: 0.5-2wt % 폴리비닐 알코올(PVA) 또는 파라핀을 첨가하여 블랭크의 강도를 향상시키며, 이는 소결 시작 시 완전히 제거해야 합니다.

프레스된 블랭크의 상대 밀도는 60-70%에 도달해야 하며 다공성은 30% 이내로 제어되어야 합니다. CIP 기술은 밀도 균일성을 더욱 향상시킬 수 있으며 고성능 필라멘트 제조에 적합합니다.

3.2.1.2 소결로의 종류와 온도 제어

소결은 다공성을 2% 미만으로 줄이고 균일한 입자 구조를 형성하는 것을 목표로 고온에서 압착된 빌릿을 조밀화하는 과정입니다. 일반적인 소결로는 다음과 같습니다.

저항 가열로: 소량 생산에 적합, 온도 범위 1800-2800°C.

유도 가열로: 대규모 생산, 높은 가열 속도 및 우수한 균일성에 적합합니다.

마이크로파 소결로: 마이크로파 가열을 통해 빠른 밀도를 달성하여 에너지 소비를 20-30% 줄이는 신흥 기술.

소결 공정은 세 단계로 나뉩니다.

저온 스테이지 (800-1200 °C) : 바인더와 휘발성 불순물을 제거하고 30-60 분 동안

지속됩니다.

중간 온도 단계(1500-2000°C): 입자 결합을 촉진하고 모공이 닫히기 시작하여 1-2 시간 동안 지속됩니다.

고온 스테이지 (2500-2800 °C): 완전 고밀도화를 달성하고 30-90 분 동안 지속됩니다.

소결 분위기는 산화를 방지하기 위해 고순도 수소(순도 99.999%) 또는 진공(10^{-4} Pa)입니다. 온도 제어 정확도는 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 에 도달해야 합니다. 온도가 너무 높으면 비정상적인 입자 성장이 발생하고 온도가 너무 낮으면 밀도에 영향을 미칩니다.

3.2.2 텅스텐 막대의 단조 및 인발

3.2.2.1 열간 단조 및 냉간 단조 기술

소결 텅스텐 빌릿은 내부 구조와 밀도를 향상시키기 위해 단조에 의해 텅스텐 막대 가공됩니다. 단조는 열간 단조와 냉간 단조로 나뉩니다.

열간 단조: 1500-1800°C 에서 회전식 단조 기계 또는 유압 단조 기계를 사용하여 수행됩니다. 변형량은 매번 10-20%로 제어되며 총 변형률은 50-70%에 이릅니다. 열간 단조는 소결 기공을 제거하고 밀도를 99% 이상으로 증가시킬 수 있습니다.

냉간 단조 : 실온에서 수행되며 최종 마무리에 적합합니다. 냉간 단조는 표면 마감과 치수 정확도를 향상시키지만 균열을 방지하기 위해 변형률(0.1-0.5mm/s)을 제어해야 합니다.

단조 장비에는 텅스텐 막대 직경 허용 오차가 $\pm 0.05\text{mm}$ 이내인지 확인하기 위해 고정밀 금형 및 온도 모니터링 시스템이 장착되어야 합니다.

3.2.2.2 와이어 드로잉 다이 설계 및 윤활유 선택

텅스텐 막대는 여러 인발 공정을 통해 0.01-0.5mm 직경의 와이어로 가공됩니다. 와이어 드로잉 프로세스의 핵심 요소는 다음과 같습니다.

금형 재료: 텅스텐 카바이드 또는 다결정 다이아몬드(PCD), 금형 조리개 정확도 ± 0.1 미크론, 표면 거칠기 Ra 0.05 미크론.

드로잉 패스: 20-40, 각 패스에 대해 10-15%의 표면 감소율과 99% 이상의 총 표면 감소율.

윤활제: 흑연 에멀전, 몰리브덴 기반 윤활제 또는 나노 다이아몬드 현탁액으로 마찰 계수를 0.1 미만으로 줄입니다.

드로잉 속도: 0.5-5m/s, 와이어 직경 및 금형 상태에 따라 동적으로 조정해야 합니다.

와이어 드로잉 과정에서 텅스텐 와이어의 표면 온도는 300-500°C 에 도달할 수 있으며

열 축적은 냉각 시스템(예: 수냉식 또는 공랭식)에 의해 제어되어야 합니다. 와이어 드로잉 기계에는 장력 센서와 레이저 직경 게이지가 장착되어 와이어 직경 편차(± 0.5 미크론)를 실시간으로 모니터링합니다.

3.2.3 텅스텐 와이어의 어닐링 및 입자 제어

3.2.3.1 어닐링 온도 및 분위기

어닐링은 인발 과정에서 내부 응력을 제거하고 텅스텐 와이어의 입자 구조와 연성을 최적화하는 데 사용됩니다. 어닐링 공정 매개변수는 다음과 같습니다.

온도: 1200-1600°C, 일반적인 값은 1400°C 입니다. 저온 어닐링(1200°C)은 얇은 와이어에 적합하고 고온 어닐링(1600°C)은 두꺼운 와이어에 사용됩니다.

시간: 10-60 초, 과도한 곡물 성장을 피하기 위한 짧은 어닐링 시간.

분위기 : 산화를 방지하기 위해 고순도 수소 (99.999 %) 또는 불활성 가스 (예 : 아르곤).

장비 : 연속 어닐링로 또는 진공 어닐링로, 온도 제어 정확도 $\pm 3^\circ\text{C}$.

어닐링 과정에서 텅스텐 와이어는 저항 가열 또는 유도 가열에 의해 가열되며 국부 과열을 피해야 합니다.

3.2.3.2 입자 크기가 성능에 미치는 영향

입자 크기는 텅스텐 와이어의 기계적 강도, 연성 및 열전자 방출 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 이상적인 입자 크기는 1-5 미크론입니다.

너무 큰 입자(>10 미크론): 인장 강도를 줄이고 고온 크리프를 증가시킵니다.

너무 작은 입자(<1 미크론): 취성을 증가시키고 연성을 감소시킵니다.

입자 제어는 도핑 및 어닐링 공정을 통해 이루어집니다. 칼륨 도핑은 작은 기포를 형성하여 입자 경계 이동을 방해하고 미세한 입자를 유지합니다. 어닐링 온도와 시간의 정밀한 제어는 2 차 재결정화를 방지합니다. 주사 전자 현미경 및 전자 후방 산란 회절(EBSD)은 섬유질 구조의 형성을 보장하기 위해 입자 크기와 방향을 분석하는 데 사용됩니다.

3.3 전자빔 텅스텐 필라멘트 성형 및 가공

성형 및 가공은 텅스텐 필라멘트를 특정 기하학적 모양(예: 나선형 또는 원뿔)으로 가공하여 전자총에서 필라멘트의 방출 성능과 기계적 안정성을 보장하는 과정입니다.

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

3.3.1 텅스텐 와이어의 권선 및 성형

3.3.1.1 단일 나선, 이중 나선 및 복잡한 기하학적 설계

텅스텐 필라멘트의 기하학은 전자빔의 밝기와 초점 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 일반적인 설계는 다음과 같습니다.

단일 나선형 필라멘트: 저전력 전자총(예: 소형 SEM)에 적합합니다.

이중 나선 필라멘트 : 두 개의 텅스텐 필라멘트가 병렬로 감겨 방출 면적을 증가시켜 고휘도 응용 분야 (예 : TEM)에 적합합니다.

복잡한 기하학적 설계: 테이퍼 나선, 다중 세그먼트 나선 또는 평평한 나선과 같은 특수 전자총용, 예: 고해상도 리소그래피 장비.

완화곡선 설계에 대해 고려해야 하는 매개변수는 다음과 같습니다.

나선형 직경 : 0.5-2.0 mm.

간격 균일성: 방출 균일성을 보장합니다.

나선 각도 : 30-60 °, 전자빔의 초점 특성에 영향을 줍니다.

복잡한 기하학적 설계는 CAD(Computer-Aided Design) 및 FEA(유한 요소 해석)를 통해 최적화되어 열 분포 및 기계적 안정성을 보장합니다.

3.3.1.2 성형 장비의 자동화 및 정밀도

권선 장비는 고정밀 서보 모터와 레이저 거리 측정기가 장착된 CNC 시스템을 채택합니다. 핵심 기술은 다음과 같습니다.

서보 제어 : 권선 속도 0.1-10 rpm, 정확도 ± 0.01 rpm.

레이저 거리 측정: 나선형 직경 및 피치의 실시간 모니터링, ± 1 미크론의 정확도.

장력 제어 : 0.1-5 N, 텅스텐 와이어의 변형 또는 파손을 방지합니다.

자동 와인딩 머신은 다축 연결을 지원하여 복잡한 기하학적 형상을 신속하게 프로토타이핑할 수 있습니다. 최신 장비는 머신 비전 시스템을 통합하여 나선형 결함(예: 고르지 않은 간격 및 표면 굽힘)을 감지하여 스크랩 비율을 0.5% 미만으로 줄입니다.

3.3.2 표면처리 기술

3.3.2.1 화학적 세척 및 연마

텅스텐 와이어의 표면에는 방출 성능을 보장하기 위해 산화물, 오일 및 드로잉 잔류

물이 없어야합니다. 화학 세척 공정에는 다음이 포함됩니다.

산세 : 불산 (HF)과 질산 (HNO₃) (비율 1:3)의 혼합물을 사용하고 10-30 초 동안 담가 표면 산화물을 제거합니다.

알칼리성 세척: 수산화나트륨(NaOH) 용액을 사용하여 산성 잔류물을 중화하고 세척 시간은 5-15 초입니다.

초음파 세척 : 탈 이온수, 주파수 40kHz, 시간 1-3 분에서 작은 입자를 제거하기 위해 수행됩니다.

세척 후 인산(H₃PO₄)과 황산(H₂SO₄)의 혼합 전해질, 0.1-0.5A/cm²의 전류 밀도, 10-20 초의 연마 시간을 사용하여 전기화학적 연마를 수행합니다. 연마 후 표면 거칠기 Ra 가 0.05 미크론 미만으로 떨어지며 방출 균일성이 크게 향상됩니다.

3.3.2.2 표면 코팅(예: 산화물 코팅) 공정

표면 코팅은 작업 기능을 줄이고 배출 효율과 수명을 향상시킵니다. 일반적인 코팅에는 이트륨 산화물 (Y₂O₃), 지르코늄 산화물 (ZrO₂) 및 토륨 산화물 (ThO₂)이 포함됩니다. 코팅 공정에는 다음이 포함됩니다.

화학 기상 증착법(CVD): 600-800°C 에서 0.1-1 미크론의 두께와 ±0.01 미크론의 균일성으로 산화물 코팅을 증착합니다.

플라즈마 분무: 두꺼운 코팅(1-5 미크론)에 적합하고 고온에서 강한 접착력을 제공합니다.

Sol-gel 방법: 고정밀 필라멘트에 적합한 나노 크기 코팅을 생산합니다.

코팅은 고온으로 인한 벗겨짐을 방지하기 위해 단단해야 합니다.

3.3.3 필라멘트 절단 및 성형

필라멘트 절단은 ±5 미크론의 정확도로 레이저 절단 또는 EDM 절단을 사용합니다. 레이저 절단은 펄스 레이저(파장 1064nm, 출력 10-50W), 절단 속도 0.1-1mm/s 를 사용하여 열 영향부를 피합니다. EDM 절단은 복잡한 형상에 적합하며 전극 갭은 10-20 미크론으로 제어됩니다.

절단 후 필라멘트의 모양을 조정하기 위해 고정밀 고정 장치와 현미경을 사용하여 필라멘트의 모양을 형성합니다. 성형 장비에는 나선형 형상이 설계 요구 사항을 충족하는지 확인하기 위해 ±2 미크론의 위치 정확도를 가진 서보 시스템이 장착되어 있습니다.

3.4 전자빔 텅스텐 필라멘트 생산 설비 및 자동화

생산 장비 및 자동화 기술은 필라멘트 일관성과 효율성을 개선하는 데 핵심적인 역할을 하며, 소결로, 와이어 드로잉 기계, 와인딩 머신 및 지능형 생산 라인을 포괄합니다.

3.4.1 주요 생산 장비 개요

3.4.1.1 소결로

소결로는 고온(2800°C) 및 고진공(10^{-5} Pa) 환경을 지원해야 합니다. 현대 소결로는 다음 기술을 사용합니다.

PLC 제어 : 다단 가열 프로그램, 온도 편차 $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

대기 시스템: 고순도 수소 또는 아르곤, 흐름 제어 정확도 $\pm 0.1\text{L/min}$.

냉각 시스템: 수냉식 또는 공냉식, 냉각 속도 $10\text{-}50^{\circ}\text{C/min}$.

마이크로파 소결로는 에너지 소비를 30% 줄이고 소결 시간을 50% 단축하는 새로운 트렌드입니다.

3.4.1.2 철사 그림 기계

철사 그림 기계에는 다 통행 거푸집 및 자동적인 윤활 체계 장비됩니다. 주요 매개변수는 다음과 같습니다.

금형 수 : 20-40, 조리개 감소율 10-15 %.

드로잉 속도: 0.5-10m/s, 와이어 파손을 방지하기 위해 동적으로 조정됩니다.

직경 측정 시스템: 레이저 직경 측정기, 정확도 ± 0.5 마이크론.

고속 와이어 드로잉 머신은 단일 드로잉 길이가 수천 미터에 이르는 연속 생산을 지원합니다.

3.4.1.3 포장기

와인딩 머신은 복잡한 나선형 설계를 지원하기 위해 6 축 CNC 시스템을 채택합니다. 핵심 기술은 다음과 같습니다.

서보 모터: 속도 정확도 $\pm 0.01\text{rpm}$.

레이저 모니터링: ± 1 마이크론의 정확도로 나선형 형상을 실시간으로 감지합니다.

장력 제어: 0.1-5N, 동적으로 조정 가능.

자동 와인딩 머신은 0.3% 미만의 스크랩 비율로 분당 150-200 개의 스파이럴을 생성할 수 있습니다.

3.4.2 생산 라인의 자동화 및 인텔리전스

자동화된 생산 라인은 다음과 같은 기술을 통합합니다.

센서: 온도, 압력, 와이어 직경 및 기타 매개변수를 $\pm 0.1\%$ 의 정확도로 모니터링합니다.

머신 비전: 99.9%의 인식률로 표면 결함 및 기하학적 편차를 감지합니다.

AI 알고리즘: 생산 데이터를 분석하고, 장비 고장을 예측하고, 프로세스 매개변수를 최적화합니다.

지능형 생산 라인은 산업용 사물 인터넷(IIoT)을 통해 장치를 연결하고 데이터는 분석을 위해 실시간으로 클라우드에 업로드됩니다.

3.4.3 환경 제어 및 클린 룸 요구 사항

텅스텐 필라멘트 생산은 ISO Class 5 (Class 100) 클린룸에서 수행해야 합니다. 환경 매개변수는 다음과 같습니다.

온도: $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 정확도에 영향을 미치는 열팽창을 피하기 위해.

습도 : 40-60 %, 정전기 축적을 방지합니다.

공기 청결 : 입방 미터당 100 0.5 미크론 입자 미만.

클린룸에는 고효율 필터(HEPA)와 양압 시스템이 장착되어 먼지 오염을 방지합니다.

공기 입자 농도는 ISO 14644-1 표준을 준수하는지 확인하기 위해 정기적으로 테스트됩니다.

3.5 전자빔 텅스텐 필라멘트의 품질 관리 및 검사

품질 관리는 필라멘트 성능이 전자총의 요구 사항을 충족하는지 확인하기 위해 온라인 검사, 성능 테스트 및 고장 분석을 포함하여 전체 생산 프로세스를 통해 실행됩니다.

3.5.1 온라인 탐지 기술

3.5.1.1 치수 및 기하학적 정확도 검사

치수 검사는 레이저 직경 게이지와 광학 현미경을 사용하여 텅스텐 와이어 직경, 나선형 피치 및 기하학적 편차를 측정합니다.

직경 : 정확도 $\pm 0.1\text{mm}$, 편차 $\pm 1.0\text{mm}$ 미만.

나선형 피치 : $2.0\text{mm} \pm$ 정확도로 방출 균일 성을 보장합니다.

기하학적 편차 : 3D 스캐너로 측정 한 편차는 $\pm 0.5\text{mm}$ 미만입니다.

온라인 감지 시스템은 초당 1,000 개의 데이터 포인트를 수집하고, 제어 시스템에 실시간 피드백을 제공하며, 프로세스 매개변수를 자동으로 조정합니다.

3.5.1.2 표면 결함 감지

표면 결함(예: 균열, 산화물 잔류물, 금힘)은 다음 기술로 식별됩니다.

주사 전자 현미경 (SEM): 배율 1000-10000 배, 나노 스케일 결함을 감지합니다.

X 선 비파괴 검사: 내부 균열 및 기공 식별, 침투 깊이 0.1-1mm.

머신 비전: AI 알고리즘과 결합된 고해상도 카메라로 감지율이 99.8%입니다.

결함 감지는 제품의 100%를 커버하며 스크랩 비율은 0.2% 미만으로 제어됩니다.

3.5.2 성능 테스트

3.5.2.1 저항 및 전도도 시험

저항 테스트는 4 프로브 방법을 사용하여 텅스텐 와이어의 저항률 ($5.6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, 20°C)과 온도 계수 ($0.0045 / ^\circ \text{C}$)를 측정합니다. 테스트 조건은 다음과 같습니다.

온도 범위: $20\text{-}2800^\circ \text{C}$, 실제 작업 환경 시뮬레이션.

전류 정확도: $\pm 0.1 \mu\text{A}$ 로 측정 정확도를 보장합니다.

전도도 테스트는 고온에서 필라멘트의 전기적 안정성을 확인하기 위해 진공 챔버에서 수행됩니다.

3.5.2.2 열전자 방출 성능 시험

열이온 방출 테스트는 $2000\text{-}2800^\circ \text{C}$ 에서 필라멘트의 방출 전류 밀도를 측정하기 위해 고진공(10^{-6}Pa) 환경에서 수행됩니다. 테스트 장비에는 다음이 포함됩니다.

진공 챔버 : 전자 수집기와 전압 소스가 장착되어 있습니다.

온도 모니터링 : 적외선 온도계, 정확도 $\pm 5^\circ \text{C}$.

전류 측정 : Picoammeter, 정확도 $\pm 0.1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$.

테스트 결과는 Richardson-Dushman 방정식을 준수해야 하며 방출 전류 밀도 목표는 $1\text{-}5 \text{A}/\text{cm}^2$ 입니다.

3.5.3 고장 분석 및 개선 조치

저작권 및 법적 책임 선언문

고장 분석은 필라멘트 파손, 증발 또는 표면 열화의 원인을 식별합니다. 일반적인 방법은 다음과 같습니다.

SEM 및 에너지 분산 분광계(EDS): 파괴 형태 및 화학 조성을 분석하고 결정립 경계 결합 또는 불순물을 식별합니다.

X 선 단층 촬영(CT): ± 1 미크론의 정확도로 내부 균열과 기공을 감지합니다.

열중량 분석(TGA): 고온 증발 속도를 측정하고 수명을 평가합니다.

개선 사항에는 도핑 공식 최적화(예: 칼륨 함량 증가), 소결 온도 조정(50°C 감소) 및 표면 코팅 강화가 포함됩니다.



CTIA GROUP LTD 전자빔 텅스텐 필라멘트

4 장 전자빔 텅스텐 필라멘트의 제품 특성

전자빔 텅스텐 필라멘트s는 주사 전자 현미경, 전자빔 용접 장비 및 X선관을 포함한 고정밀 전자 장비에서 성능을 직접 결정합니다. 이 장에서는 텅스텐 필라멘트의 물리적 및 화학적 특성, 전기 및 열 특성, 미세 구조 및 성능 관계, 수명 및 신뢰성, CTIA GROUP LTD.에서 제공하는 물질 안전 데이터 시트(MSDS)에 대해 자세히 설명합니다. 이러한 특성에 대한 심층 분석을 통해 극한 조건에서 텅스텐 필라멘트의 거동과 최적화 방향이 밝혀집니다.

4.1 전자빔 텅스텐 필라멘트의 물리화학적 성질

텅스텐 필라멘트는 전자총에서 음극 물질로 사용하기 위한 기초이며 고온 및 고진공 환경에서 안정성과 기능을 결정합니다.

저작권 및 법적 책임 선언문

4.1.1 텅스텐 필라멘트의 용점 및 열 안정성

텅스텐 필라멘트는 자연에서 발견되는 금속의 가장 높은 용점 중 하나인 매우 높은 용점 (3422 °C)으로 알려져 있습니다. 이 특성을 통해 전자총의 작동 온도(일반적으로 2000-2800°C)에서 용융되거나 크게 변형되지 않고 구조적 무결성을 유지할 수 있습니다. 텅스텐의 높은 용점은 원자 사이에 매우 강한 금속 결합을 갖는 몸체 중심 입방체(BCC) 결정 구조에서 비롯됩니다.

열 안정성은 텅스텐 필라멘트의 또 다른 주요 장점이며, 매우 낮은 증기압에 반영됩니다. 2800 °C 에서 텅스텐의 증기압은 10^{-7} Pa 에 불과하며, 이는 장시간 고온에서도 재료의 증발 속도가 매우 낮다는 것을 의미합니다. 예를 들어, 2500°C 에서 텅스텐 필라멘트의 질량 손실률은 약 $0.01\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$ 로 란탄 텅스텐(LaB6)과 같은 다른 음극 재료보다 훨씬 낮습니다. 이러한 낮은 증발 특성은 필라멘트 직경의 얇아짐을 줄여 서비스 수명을 연장하는 동시에 진공 시스템 내의 오염을 방지합니다.

열 안정성의 또 다른 징후는 열 충격에 대한 텅스텐 필라멘트의 내성입니다. 전자총의 시작 및 종료 동안 필라멘트는 빠른 고온 및 저온 주기(실온에서 2500°C 까지, 최대 $100^\circ\text{C}/\text{s}$ 의 가열 속도)를 거칩니다. 텅스텐의 높은 열용량($0.13\text{J}/\text{g}\cdot\text{K}$) 및 우수한 열전도율($173\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)로 열을 빠르게 분산시켜 국부 과열 및 열 응력을 줄일 수 있습니다. 도핑 원소(예: 칼륨)는 열 안정성을 더욱 향상시키고, 작은 기포를 형성하여 입자 성장을 억제하며, 고온 크리프 속도를 감소시킵니다. 실제 테스트에 따르면 칼륨 도핑 텅스텐 필라멘트는 2600 °C 에서 5000 시간 이상 지속적으로 작동할 수 있으며 질량 손실은 5 % 미만입니다.

4.1.2 텅스텐 필라멘트의 저항률 및 온도 계수

텅스텐 필라멘트는 가열 효율과 전류 안정성에 직접적인 영향을 미치는 전기적 성능의 핵심 매개 변수입니다. 20°C 에서 텅스텐의 저항은 $5.6\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 이며 온도가 상승함에 따라 저항은 비선형적으로 증가합니다. 2500°C 에서 저항은 약 10 배 증가한 $50\text{-}60\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 까지 상승할 수 있습니다. 이러한 변화는 전자 산란에 대한 온도의 영향 때문입니다. 고온에서는 격자 진동이 증가하여 전자의 이동을 방해합니다.

텅스텐의 TCR)은 20-1000 °C 범위에서 약 $0.0045 / ^\circ\text{C}$ 이며, 이는 저항률이 온도에 따라 선형 적으로 증가하지만 더 높은 온도 (예 : $>2000^\circ\text{C}$)에서는 TCR 이 약간 감소하여 (약 $0.0038 / ^\circ\text{C}$) 결정 구조의 약간의 변화를 반영합니다. 저항률의 안정성은 필라멘트가 동적 온도 조건에서 예측 가능한 전기적 특성을 갖도록 합니다. 예를 들어, 전자총에서 필라멘트는 일반적으로 정전류 전원 공급 장치(전류 0.5-5A)에 의해 가열되며 저항률의 안정적인 변화로 인해 가열 전력(50-200W)을 정밀하게 제어하여 과열 또는 과열을 방지할 수 있습니다.

도핑 원소는 저항률에 작은 영향을 미칩니다. 예를 들어, 0.01wt % 알루미늄을 첨가하면 알루미늄 원자가 텅스텐 원자를 부분적으로 대체하여 전자 전도 경로를 최적화하기 때문에 저항을 약 5% 줄일 수 있습니다. 표면 처리(예: 산화물 코팅)는 저항에 미치는 영향이 적지만 코팅의 분해로 인해 고온에서 표면 저항을 약간

증가시킬 수 있습니다. 실제 응용 분야에서 필라멘트 저항은 배치 간 일관성을 보장하기 위해 $\pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 의 정확도로 4개의 프로브 방법으로 측정됩니다.

4.1.3 텅스텐 필라멘트의 산화 방지 및 부식 방지 특성

텅스텐 필라멘트는 표면이 잔류 산소와 반응하여 산화물을 형성하기 어렵기 때문에 고진공 환경(10^{-6} Pa)에서 우수한 내산화성을 나타냅니다. 일반적인 전자총 작동 조건(2500°C , 진공 10^{-7} Pa)에서 산화 속도는 거의 0이며 표면은 매끄럽고 산화물 축적이 없는 상태로 유지됩니다. 그러나 이상적이지 않은 진공 환경 (예 : 10^{-4} Pa) 또는 공기 중에서 텅스텐은 고온에서 산소와 쉽게 반응하여 황색 휘발성 화합물인 삼산화 텅스텐을 형성합니다. 예를 들어, 1000°C 의 공기에서 텅스텐 표면 산화 속도는 약 $0.1 \text{ mg} / \text{cm}^2 \cdot \text{min}$ 이므로 재료 손실이 급격히 발생합니다.

내식성을 통해 텅스텐 필라멘트는 수증기, 질소 및 미량 탄화수소와 같은 전자총의 잔류 가스를 견딜 수 있습니다. 고진공에서 이러한 가스의 분압은 매우 낮고($<10^{-8}$ Pa) 텅스텐에 미치는 영향은 무시할 수 있습니다. 그러나 낮은 진공 수준(예: 10^{-5} Pa)에서는 수증기가 표면에 미세 부식을 일으켜 얇은 산화물 층을 형성하고 배출 효율을 감소시킬 수 있습니다. 이트리아 또는 산화 지르코늄과 같은 표면 코팅은 가스 분자의 침투를 차단하는 보호층을 형성하여 내식성을 크게 향상시킵니다. 테스트에 따르면 산화 이트륨 코팅은 산화 속도를 60 % 감소시키고 10^{-5} Pa의 진공 상태에서 2000 시간 동안 명백한 열화를 유지할 수 없습니다.

화학적 부식에 대한 텅스텐 필라멘트는 아크 방전 생성물에 대한 내성에도 반영됩니다. 전자총에서 아크 방전은 활성 이온 (예 : O^2 , N^2)을 포함하는 플라즈마를 생성할 수 있습니다. 텅스텐의 높은 화학적 안정성은 표면이 이온 충격에 의한 손상에 덜 취약하여 장기적인 성능을 유지합니다.

4.1.4 텅스텐 필라멘트의 기계적 강도 및 연성

텅스텐 필라멘트는 고온 및 높은 응력 환경에서 중요한 특성입니다. 실온에서 텅스텐은 인장 강도가 800-1000 MPa이고 항복 강도가 약 600 MPa입니다. 2500°C 에서도 인장 강도는 300-500MPa로 유지되며, 이는 니켈($<100\text{MPa}$)과 같은 다른 금속 재료보다 훨씬 높습니다. 높은 강도는 텅스텐의 BCC 결정 구조와 낮은 결합 밀도에서 비롯되며 도핑 원소는 특성을 더욱 최적화합니다. 예를 들어, 0.05wt % 칼륨을 첨가하면 결정립 강화를 통해 인장 강도를 20% 증가시키고 고온 변형을 줄일 수 있습니다.

연성은 인발 및 권선 중 텅스텐 필라멘트의 핵심 매개 변수입니다. 순수한 텅스텐은 실온에서 부서지기 쉽고 파단 신율은 1-2 %에 불과하지만 도핑 (예 : 레늄, 0.1-1 중량 %) 및 어닐링 공정을 통해 파단 연신율을 5-10 %로 높일 수 있습니다. 레늄 도핑은 전위 이동에 대한 에너지 장벽을 줄이고 소성 변형 능력을 향상시킵니다. 어닐링(1200 - 1600°C , 수소 분위기)은 인발 응력을 제거하고 균일한 섬유질 입자 구조를 형성하며 연성을 더욱 향상시킵니다. 실제 테스트에 따르면 인발 중 레늄 도핑 텅스텐 와이어의 파손률은 0.1 % 미만으로 복잡한 나선형 성형에 적합합니다.

기계적 강도와 연성 사이의 균형은 필라멘트의 진동 저항에 매우 중요합니다. 전자총에서 필라멘트는 기계적 진동(10-100Hz) 또는 열 충격을 받을 수 있습니다. 최적화된 텅스텐 필라멘트는 1000 번의 진동 테스트(진폭 0.5mm)에서 균열이 없이 우수한 기계적 신뢰성을 보여주었습니다.

4.2 전자빔 텅스텐 필라멘트의 전기적 및 열적 특성

전기적 및 열적 특성은 전자총에서 텅스텐 필라멘트의 가열 효율, 전자 방출 성능 및 열 관리 기능을 결정하며 그 기능의 핵심입니다.

4.2.1 텅스텐 필라멘트의 열 이온 방출 효율

열 이온 방출 효율은 음극 물질로서의 텅스텐 필라멘트의 핵심 지표이며, 이는 일 함수, 표면 상태 및 작동 온도에 의해 결정됩니다. 순수한 텅스텐의 일 함수는 4.5 eV 이며, 이는 전자가 표면에서 빠져 나가는 데 필요한 에너지가 높다는 것을 나타냅니다. 2500°C 에서 텅스텐 필라멘트의 방출 전류 밀도는 1-5 A/cm²이고 밝기는 약 10⁵-10⁶ A/cm²·SR , 대부분의 전자총 응용 분야에 적합합니다. 방출 효율은 Richardson-Dushman 방정식을 따릅니다.

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

여기서 (J)는 방출 전류 밀도, (A)는 리처드슨 상수(약 120A/cm²·K²), (T)는 절대 온도, (ϕ)는 일 함수, (k)는 볼츠만 상수(8.617×10⁻⁵ eV/K)입니다. 이 방정식은 방출 효율이 온도에 따라 기하급수적으로 증가하지만 고온은 증발을 가속화하므로 균형을 최적화해야 함을 보여줍니다.

도핑 및 표면 코팅은 배출 효율을 크게 높입니다. 0.01wt% 알루미늄을 추가하면 작업 기능이 4.3eV 로 감소하고 방출 전류 밀도가 15-20% 증가할 수 있습니다. 이트륨 산화물 (Y2O3) 코팅 (두께 0.1-1 마이크론)은 작업 기능을 4.2 eV 로 더욱 감소시키고 방출 효율을 30 % 증가시켜 2600 °C 에서 8 A / cm²에 도달합니다. 표면 청결도는 배출 성능에 큰 영향을 미치며 미량 산화물 또는 탄소 오염은 작업 기능을 0.1-0.2eV 증가시키고 효율성을 10% 감소시킬 수 있습니다. 화학적 세척(불산+질산) 및 전기화학적 연마(Ra < 0.05 마이크론)는 순수한 표면을 보장하고 배출 균일성을 최적화합니다.

실제 응용 분야에서 방출 효율은 전자 수집기와 피코 전류계가 장착된 진공 테스트 장비로 ±0.1 μA/cm²의 정확도로 측정됩니다. 도핑 및 코팅된 필라멘트는 10⁷ A/cm²·고해상도 SEM 의 sr 은 나노미터 미만 이미징의 요구 사항을 충족합니다.

4.2.2 텅스텐 필라멘트의 작동 온도 범위

텅스텐 필라멘트는 응용 시나리오에 따라 2000-2800°C 입니다. 저전력 장치(예: 음극선관)는 2000-2200°C 와 0.1-1mA 의 방출 전류를 사용합니다. 고휘도 장치(예: 투과 전자 현미경)는 2600-2800°C 와 5-10mA 의 방출 전류를 사용합니다. 온도 선택은 방출

효율과 수명의 균형을 맞춰야 합니다. 온도가 100°C 상승할 때마다 방출 전류 밀도는 약 2 배 증가하지만 증발 속도는 3-4 배 증가하고 수명은 30-50% 단축됩니다.

온도 제어는 정전류 또는 정전압 전원 공급 장치를 통해 이루어지며 일반적인 가열 전력은 50-200W 입니다. 적외선 온도계(정확도 $\pm 5^{\circ}\text{C}$) 또는 열전대는 필라멘트 온도를 실시간으로 모니터링하여 국부 과열을 방지합니다. 필라멘트 형상 설계(예: 이중 나선)는 열 방출 면적을 증가시키고, 온도 구배를 줄이며, 열 응력을 줄입니다. 예를 들어, 이중 나선 필라멘트의 온도 균일성은 단일 나선의 온도 균일성보다 20% 더 높고 국소 핫스팟은 50% 감소합니다.

극한 조건(예: 핵융합 장치)에서 필라멘트는 잠시 동안 3000°C 이상에 도달할 수 있으며, 이 경우 성능을 유지하기 위해 특수 도핑(예: 레늄) 또는 코팅(예: 산화지르코늄)이 필요합니다. 테스트에 따르면 레늄이 도핑된 필라멘트는 2900°C 에서 100 시간 동안 10% 미만의 질량 손실로 작동할 수 있습니다.

4.2.3 텅스텐 필라멘트의 열팽창 및 열피로 성능

텅스텐의 열팽창 계수는 $4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (20-1000°C)로 금속 중에서 상대적으로 낮아 고온에서 변형이 거의 없음을 나타냅니다. 2500°C 에서 열팽창 계수는 $5.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 약간 증가하지만 여전히 우수한 치수 안정성을 유지합니다. 낮은 열팽창은 고온 및 저온 사이클 동안 필라멘트의 기계적 응력을 감소시키며, 이는 전자총의 빈번한 시작 및 종료에 특히 적합합니다. 예를 들어, 필라멘트가 20°C 에서 2500°C 로 상승할 때 필라멘트의 길이는 1.1%만 변하며 나선형 형상에 미치는 영향은 무시할 수 있습니다.

열 피로 성능은 반복되는 가열-냉각 주기에서 필라멘트의 내구성을 반영합니다. 1000 회 냉온 사이클 테스트 (20-2500 °C, 가열 속도 100 °C / s)에서 칼륨 도핑 된 텅스텐 필라멘트의 균열 발생률은 1 % 미만으로 순수한 텅스텐 (균열률 5 %)보다 훨씬 우수합니다. 열 피로의 개선은 다음과 같은 요인에 기인합니다.

결정립 구조 최적화: 미세 입자(1-5 미크론)는 결정립 경계를 통해 응력을 분산시키고 균열 전파를 줄입니다.

도핑 강화: 칼륨 기포와 레늄 도핑은 입계 강도를 증가시키고 미세 균열 형성을 억제합니다.

표면 처리: 연마 및 코팅은 표면 응력 집중을 줄이고 피로 시작점을 줄입니다.

열 피로 테스트는 고온 사이클로와 주사 전자 현미경(SEM)을 사용하여 균열 형태를 분석하고, 유한 요소 시뮬레이션과 결합하여 응력 분포를 예측하고 필라멘트 설계를 최적화합니다.

4.2.4 텅스텐 필라멘트의 아크 안정성

아크 안정성은 고전압(5-20kV)에서 비정상적인 방전(예: 아크 파괴)을 피할 수 있는

필라멘트의 능력을 말하며, 이는 전자총 빔 품질의 핵심입니다. 아크는 표면 결함, 잔류 가스 또는 전기장 불균일성으로 인해 발생할 수 있으며, 이로 인해 전자빔 지터 또는 장비 손상이 발생할 수 있습니다. 텅스텐 필라멘트의 높은 화학적 안정성과 표면 마감 ($Ra < 0.05$ 미크론)은 아크 위험을 크게 줄입니다.

진공도는 아크 안정성에서 중요한 요소입니다. 10^{-7} Pa 에서 잔류 가스 분압은 매우 낮고 아크 발생 확률은 0.01% 미만입니다. 낮은 진공도(예: 10^{-5} Pa)에서는 수증기 또는 산소로 인해 미세 방전이 발생할 수 있습니다. 표면 코팅(예: 산화지르코늄)은 절연 강도를 증가시켜 방전 위험을 50% 줄입니다. 필라멘트 형상 설계도 안정성에 영향을 줍니다. 이중 나선 필라멘트는 균일한 전기장 분포를 통해 아크 발생률을 30% 줄입니다.

아크 안정성 테스트는 10-20kV 의 전압이 적용되고 방전 전류가 모니터링된 고진공 챔버에서 수행되었습니다($<1\mu A$ 는 허용 가능한 것으로 간주됨). 테스트 결과는 최적화된 표면 처리가 된 필라멘트가 아크 없이 15kV 에서 1000 시간 동안 지속적으로 작동하여 고정밀 전자건의 요구 사항을 충족할 수 있음을 보여주었습니다.

4.3 전자빔 텅스텐 필라멘트의 미세 구조와 성능의 관계

입자 구조, 도핑 원소 분포 및 표면 형태를 포함한 텅스텐 필라멘트의 미세 구조는 기계적, 전기적 및 방출 특성에 직접적인 영향을 미칩니다.

4.3.1 입자 구조 및 방향

텅스텐 필라멘트는 일반적으로 평균 크기가 1-5 미크론 인 미세한 등축 결정입니다. 드로잉 및 어닐링 공정은 축 방향을 따라 섬유질 구조를 형성하며 입자 방향은 주로 $<110>$ 방향으로 70-80%를 차지합니다. 섬유질 구조는 결정립계를 강화(15-20% 증가)하여 인장 강도를 향상시키는 동시에 전자 전도성 경로를 최적화하고 저항률을 5% 감소시킵니다. 전자 후방 산란 회절(EBSD) 분석은 $<110>$ 지향 입자가 고온에서 크리프 속도가 낮고 필라멘트 수명을 30% 연장하는 것을 보여줍니다.

입자 크기는 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 너무 큰 입자(>10 미크론)는 기계적 강도를 감소시키고 고온 변형을 증가시킵니다. 너무 작은 입자(<1 미크론)는 입자 경계 밀도를 증가시키고 취성을 유발합니다. 이상적인 크기(2-4 미크론)는 도핑 및 어닐링에 의해 제어되며, 예를 들어 칼륨 도핑은 작은 기포를 형성하여 입자 경계 이동을 방해하고 균일한 입자를 유지합니다. SEM 및 투과 전자 현미경(TEM) 관찰에 따르면 최적화된 입자 구조를 가진 필라멘트는 400MPa 의 인장 강도와 2500°C 에서 8%의 파단 신율을 갖습니다.

4.3.2 미세조직에 대한 도핑 원소의 영향

도핑 원소(예: 칼륨, 알루미늄, 레늄)는 입자 성장과 표면 전자 구조를 변경하여 필라멘트 성능을 최적화합니다.

칼륨 (K, 0.01-0.05 wt %) : 소결 중 직경 0.1-0.5 μm 의 기포를 형성하여 입자 경계에

분포하여 입자 성장을 방해하고 2-3 μm 의 입자 크기를 유지합니다. 칼륨 기포는 또한 입계 강도를 높이고 고온 균열을 줄이며 서비스 수명을 20-40% 연장합니다.

알루미늄(Al, 0.005-0.02 wt %): {100} 결정면의 노출을 촉진하고 작업 기능을 0.2eV 감소시키며 방출 전류 밀도를 15% 증가시킵니다. 격자에서 알루미늄 원자의 균일한 분포(TEM-EDS에 의해 검증됨)는 전자 전도성을 최적화합니다.

레늄 (Re, 0.1-1 wt %) : 격자 가소성을 개선하고 전위 밀도를 줄이며 연성을 10 % 증가시킵니다. 레늄은 또한 고온 재결정화를 억제하고 섬유질 구조를 유지합니다.

도핑 원소의 분포는 불균일한 성능으로 이어지는 국부적 농축을 피하기 위해 균일해야 합니다. 에너지 분산 분광법(EDS) 분석에 따르면 텅스텐 도핑은 입계 결함을 30% 감소시키고 결정립 배향 일관성을 20% 개선하며 기계적 및 방출 특성을 크게 향상시킵니다.

4.3.3 표면 형태 및 방출 성능

거칠기, 결정면 노출 및 미세한 결함을 포함한 표면 형태는 열 전자 방출의 균일성과 효율성에 직접적인 영향을 미칩니다. 0.05 μm 이하의 표면 거칠기 Ra는 전기화학적 연마를 통해 달성되며, 이는 국소 전기장 집중을 줄이고 방출 일관성을 10% 향상시킵니다. 원자력 현미경(AFM) 분석에 따르면 연마된 표면의 피크-밸리 높이는 10nm이며, 이는 처리되지 않은 표면(50-100nm)보다 훨씬 낮습니다.

크리스탈 표면 노출은 방출 성능에 매우 중요합니다. {100} 패킷은 일 함수(4.3eV)가 낮기 때문에 {110} 패킷(4.6eV)보다 전자 탈출에 더 유리합니다. 알루미늄 및 표면 코팅(예: 산화이트륨)을 도핑하면 {100}면의 비율이 20% 증가하고 방출 전류 밀도가 15% 향상됩니다. 이트륨 산화물 코팅(두께 0.1-1 μm)은 나노 크기의 결정 구조를 형성하여 표면 전자 상태를 최적화하여 작업 기능을 4.2eV로 더욱 줄입니다.

표면 결함(예: 금힘 및 산화물 잔류물)은 국부 과열 또는 아크 방전을 일으켜 배출 효율을 감소시킬 수 있습니다. 화학적 세척 및 플라즈마 처리는 결함을 제거하고 표면 청결도는 99.9%에 달하여 배출 균일성을 보장합니다. 실제 테스트에 따르면 2600°C에서 최적화된 표면 형태를 가진 필라멘트의 방출 전류 밀도 편차는 1% 미만으로 고해상도 전자건의 요구 사항을 충족합니다.

4.4 전자총 텅스텐 필라멘트의 수명과 신뢰성

전자총 텅스텐 필라멘트의 수명과 신뢰성은 고정밀 장비(예: 주사 전자 현미경, X선관 및 전자빔 리소그래피 장비)에서 응용 성능을 결정하는 핵심 지표입니다. 텅스텐 필라멘트의 수명은 일반적으로 500-2000 시간 사이이며 작업 조건, 재료 특성, 제조 공정 및 환경 요인을 포함한 많은 요인의 영향을 받습니다. 이 섹션에서는 필라멘트 수명에 영향을 미치는 요인, 주요 고장 모드 및 분석 방법, 필라멘트 설계 최적화 및 서비스 수명 연장을 위한 기술 지원을 제공하기 위한 표준화된 신뢰성 테스트

프로세스에 대해 자세히 설명합니다.

4.4.1 필라멘트 수명에 영향을 미치는 요인

텅스텐 필라멘트의 수명은 여러 내부 및 외부 요인의 조합에 의해 영향을받습니다. 다음은 주요 요인과 작용 메커니즘입니다.

작동 온도

기능 : 텅스텐 필라멘트는 일반적으로 2500-2800 °C 에서 작동합니다. 고온은 텅스텐 원자의 증발을 가속화하여 직경이 얇아지고 저항이 증가합니다.

기술적 세부 사항 : 2700C 에서 증발 속도는 약 0.01-0.05 mg/cm²·h 이고 직경 회석 속도는 0.1-0.5 μm/h 입니다. 예를 들어, 주사전자현미경(SEM)에서 필라멘트 직경을 0.2mm 에서 0.15mm 로 얇게 한 후 방출 전류 밀도가 20% 감소하고 수명이 500 시간으로 단축됩니다. 온도가 100°C 상승할 때마다 증발 속도는 약 4 배 증가하고 수명은 50% 감소합니다.

최적화 전략: 칼륨(0.01-0.05 wt%)을 도핑하여 입자 성장을 억제하고 증발 속도를 30% 감소시킵니다. 표면 코팅(예: 산화지르코늄, 두께 0.5-1 미크론)은 증발 속도를 50% 줄이고 수명을 1500 시간으로 연장합니다.

진공 환경

작용: 잔류 가스(예: 산소 및 질소)는 표면 산화 또는 아크 방전을 유발하여 필라멘트 분해를 가속화합니다.

기술적 세부 사항 : 10⁻⁵ Pa 진공에서 산소 분압 > 0.01 Pa 는 삼산화 텅스텐 (WO₃, www.tungsten-oxide.com)의 형성으로 이어지고 작업 기능을 0.1-0.2 eV 증가시키며 방출 효율을 15 % 감소시킵니다. 아크 방전(발생률 0.01%)은 필라멘트 파손 또는 전극 손상의 원인이 될 수 있습니다. 예를 들어, X 선관에서 진공도가 10⁻⁷ Pa 에서 충분하지 않으면 필라멘트 수명이 2000 시간에서 1000 시간으로 단축됩니다.

최적화 전략: 터보 분자 펌프(펌핑 속도 10-8 L/s)가 장착된 고진공 시스템(500⁻²⁰⁰⁰ Pa)을 사용하여 산화 속도를 80% 줄입니다. 고온 베이킹(400°C, 24 시간)으로 잔류 가스를 제거하고 수명을 25% 연장합니다.

열 사이클 및 열 응력

작용: 전자총의 고온 및 저온 주기(20-2700°C, 가열 속도 100°C/s)는 열 응력을 유발하여 결정립계에 미세 균열을 일으킵니다.

기술적 세부 사항 : 1000 회 열처리 후 순수 텅스텐 필라멘트의 균열률은 5 %에 도달하고 인장 강도는 10 % (800 MPa 에서 720 MPa 로) 감소했습니다. 투과 전자 현미경(TEM)에서 열 응력으로 인해 빔이 0.5nm 이동하여 해상도에 영향을 미쳤습니다. 레늄 (0.1-1 wt %)을 사용한 도핑은 연성을 향상시키고 균열 속도를 1 %로 감소시켰다.

최적화 전략: 필라멘트 형상을 최적화하면(예: 이중 나선, 방출 면적 30% 증가) 열 응력이 분산되고 균열률이 20% 감소합니다. 느린 가열(50°C/s)은 응력 축적을 줄이고 수명을 15% 연장합니다.

현재 부하

효과: 높은 방출 전류(예: 10-100mA)는 필라멘트의 열 부하를 증가시켜 증발 및 기계적 피로를 가속화합니다.

기술적 세부 사항: 전자빔 용접(EBW)에서 100mA 의 전류는 필라멘트 온도를 국부적으로 50°C 증가시키고 증발 속도를 2 배 증가시키며 수명을 1000 시간에서 600 시간으로 단축시킵니다. 전류 변동>1%는 열 불균일성을 유발하여 파손률이 10% 증가합니다.

최적화 전략: 정전류 전원 공급 장치(정확도 $\pm 0.1\text{mA}$)를 사용하여 전류 안정성을 제어하면 파손률이 50% 감소합니다. 다중 세그먼트 나선형 필라멘트는 분할된 배출을 통해 국부 과열을 줄이고 수명을 20% 연장합니다.

제조상의 결함

효과: 표면 결함(예: 긁힘, 개재물, $R_a > 0.05$ 미크론) 또는 내부 기공은 국부적인 과열 및 파손을 유발합니다.

기술 세부 정보: 표면 긁힘은 EBL 에서 전류 밀도에서 5% 편차와 $>1\text{nm}$ 의 패턴 편차를 유발합니다. 내부 기공(직경 >1 미크론)은 인장 강도를 15% 감소시키고 파손률은 2%에 이릅니다. 예를 들어, SEM 필라멘트의 수명은 표면 산화물 축적으로 인해 1500 시간에서 800 시간으로 단축됩니다.

최적화 전략: 전기화학적 연마($R_a < 0.05$ 미크론)는 표면 결함을 제거하고 방출 균일성을 15% 향상시킵니다. X 선 단층 촬영(해상도 0.1 미크론)은 내부 결함을 감지하고 폐기율을 0.3%로 줄입니다.

도핑 및 코팅 품질

기능: 도핑 원소와 코팅의 불균일성은 열 안정성과 방출 효율에 영향을 미칩니다.

기술적 세부 사항: $>5\%$ 의 편차로 칼륨 도핑(0.01-0.05 wt%)은 입자 크기(2-10 미크론)가 고르지 않고 열 안정성이 10% 감소합니다. 박리율이 $>1\%$ 인 이트리아 코팅 (두께 0.1-1 미크론)은 텅스텐 기판을 노출시키고 산화 속도를 50 % 증가시킵니다. TEM 에서 코팅 결함은 밝기를 20% 감소시킵니다(10^7 에서 $8 \times 10^6 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ 로).

최적화 전략: 분말 야금은 도핑 균일성(편차 $<1\%$)을 보장하고, 화학 기상 증착(CVD)은 코팅 두께 편차($<5\%$)를 제어하며 수명을 30% 연장합니다.

4.4.2 고장 모드 분석 (예 : 증발, 파괴)

텅스텐 필라멘트의 고장 모드는 주로 증발, 파괴, 표면 열화 및 아크 방전을 포함하며, 각각은 수명과 성능에 큰 영향을 미칩니다. 다음은 자세한 분석입니다.

증발

정의 : 텅스텐 원자는 고온에서 표면에서 빠져 나와 필라멘트 직경이 얇아지고 성능이 저하됩니다.

메커니즘 : 2700 °C 에서 증발 속도는 $0.01\text{-}0.05 \text{ mg / cm}^2 \cdot \text{h}$, 직경은 $0.1\text{-}0.5 \mu\text{m / h}$ 로 얇아지고 저항은 20 % 증가하며 방출 전류 밀도는 30 % 감소합니다. 예를 들어, SEM 에서 필라멘트가 $<0.15\text{mm}$ 의 직경으로 증발한 후 밝기가 10^6 에서 $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ 로 떨어지고 이미징 품질이 저하됩니다.

영향 요인: 작동 온도(>2600°C), 진공(>10⁻⁷ Pa), 표면 거칠기(Ra>0.05 미크론).
분석 방법: 주사 전자 현미경 (SEM)으로 직경 변화를 관찰하고 (정확도 ±0.1 미크론), 열 중량 분석 (TGA, 정확도 ±0.01 mg)으로 증발 속도를 측정합니다.
최적화 조치: 알루미늄 도핑(0.005-0.02 wt%)은 증발 속도를 30% 감소시키고 산화 지르코늄 코팅(두께 0.5 미크론)은 증발 속도를 50% 감소시킵니다. 지능형 모니터링 시스템(적외선 온도 측정, 정확도 ±2°C)은 실시간으로 온도를 조정하고 수명을 20% 연장합니다.

굴절

정의: 열 응력 또는 기계적 피로로 인한 필라멘트의 취성 또는 연성 파괴.
메커니즘: 열 순환 (20-2700 °C, 1000 회)은 결정립계에서 미세 균열 (길이 1-10 미크론)을 유도하고 인장 강도가 15 % 감소합니다. 고전류(>10mA)는 국부 과열을 일으키고 파괴율을 10% 증가시킵니다. 예를 들어, EBW 에서 필라멘트 파손으로 인해 용접이 중단되고 >4 시간 동안 가동 중단됩니다.
영향 요인: 입자 크기(>5 미크론), 열 응력(>100MPa), 표면 결함(스크래치 깊이>1 미크론).
분석 방법: 균열(결정립계 또는 표면)의 원인을 파악하기 위한 파괴 분석(SEM, 배율 1000 배), 결정립 배향을 분석하기 위한 전자 후방 산란 회절(EBSD)(<110> 80%를 차지함).
최적화 조치: 레늄 도핑(0.1-1 wt%)으로 연성 향상, 이중 나선 설계로 응력 분산, 파괴율 30% 감소. 느린 가열(50°C/s)은 열 충격을 줄이고 수명을 15% 연장합니다.

표면 열화

정의: 산화, 오염 물질 축적 또는 코팅 박리로 인한 표면 성능 저하.
메커니즘: 10⁻⁵ Pa 에서 산소는 WO₃ 형성 (두께 0.1-1 미크론)을 유발하고 작업 기능은 0.2 eV 증가하며 방출 효율은 15 % 감소합니다. 코팅 박리 (>1 %)는 텅스텐 기판을 노출시키고 산화 속도를 50 % 증가시킵니다. 예를 들어, X 선관에서는 표면 열화로 인해 이미징 해상도가 0.8mm 로 떨어집니다.
영향 요인: 진공도(>10⁻⁷ Pa), 코팅 품질(균일성 편차>5%), 잔류 가스(O₂>0.01 Pa).
분석 방법: X 선 광전자 분광법(XPS, 정확도 ±0.1 at%)은 표면 화학 조성을 분석하고 원자력 현미경(AFM, 정확도±1nm)은 거칠기(Ra<0.05 미크론)를 측정합니다.
최적화 조치: 고진공(10⁻⁸ Pa)은 산화 속도를 80% 감소시키고 원자층 증착(ALD) 코팅(두께 10-50nm)은 접착력을 향상시키고 박리 속도를 0.5%로 줄입니다.

아크 방전

정의: 잔류 가스 또는 표면 결함으로 인한 비정상적인 방전으로 인해 필라멘트가 손상되거나 파손되는 경우.
메커니즘: 10⁻⁶ Pa 에서 아크 발생률은 0.01 %이고 국부 온도가 상승 > 3000 °C 로 용융 또는 파괴를 일으킨다. 예를 들어, TEM 에서 아크는 빔이 1nm 이동하고 해상도가 0.3nm 로 떨어지게 합니다.
영향 요인: 진공도(>10⁻⁷ Pa), 표면 거칠기(Ra>0.05 미크론), 전극 간격(편차>0.01mm).
분석 방법: 고주파 오실로스코프 (샘플링 속도 1GHz)는 아크 파형을 기록하고 질량

분석기 (정확도 $\pm 0.01\text{ppm}$)는 잔류 가스를 분석합니다.

최적화 조치: 정밀 전극 설계(간격 허용 오차 $\pm 0.01\text{mm}$)로 아크 위험 50% 감소, 고온 베이킹(400°C , 24 시간)으로 가스 제거, 입사율 0 상승으로 떨어짐

최적화 조치: 정밀 전극 설계(간격 허용 오차 $\pm 0.01\text{mm}$)로 아크 위험 50% 감소, 고온 베이킹(400°C , 24 시간)으로 가스 제거, 입사율 0.001%로 떨어짐.

4.4.3 신뢰성 테스트 방법

신뢰성 테스트는 표준화 된 방법을 통해 텅스텐 필라멘트의 수명, 성능 안정성 및 고장 위험을 평가하여 실제 응용 분야에서 신뢰성을 보장합니다. 다음은 주요 테스트 방법입니다.

가속 수명 테스트

정의: 고온 및 고전류 조건에서 장기 작동을 시뮬레이션하여 필라멘트 수명을 예측합니다.

방법: 2700°C , 10^{-7}Pa 진공 챔버에서 1000 시간 동안 10-100mA 의 방출 전류로 실행하고 전류 밀도 감소(목표 $<5\%$)를 기록합니다. 100 시간마다 직경(SEM, 정확도 ± 0.1 미크론)과 저항(4 프로브 방법, $\pm 0.1\mu\Omega\cdot\text{cm}$)을 측정합니다.

적용 시나리오: SEM 필라멘트 테스트에서 가속 수명 테스트는 1500 시간의 수명과 GB/T 15065 표준을 충족하는 $0.02\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$ 의 증발 속도를 예측합니다.

기술 세부 사항: 피코 전류계(정확도 $\pm 0.1\mu\text{A}$)를 사용하여 전류를 측정하고 적외선 온도계($\pm 5^\circ\text{C}$)를 사용하여 온도를 모니터링합니다. 데이터를 Weibull 분포에 적합하고 고장 시간(오차 $<5\%$)을 예측합니다.

최적화: 자동화된 테스트 플랫폼(응답 시간 <1 초)은 효율성을 50% 향상시키고 배치 일관성을 $>99\%$ 향상시킵니다.

열 사이클 테스트

정의: 열 및 저온 주기($20-2700^\circ\text{C}$, 1000 회)를 시뮬레이션하여 열 응력 및 기계적 안정성을 평가합니다.

방법: 가열 속도 $100^\circ\text{C}/\text{s}$, 20°C 로 냉각, 사이클 시간 10 분. 균열(SEM, 배율 1000 배) 및 인장 강도(만능 재료 시험기, $\pm 0.1\text{MPa}$)를 감지합니다.

적용 시나리오: TEM 필라멘트 테스트에서 열 사이클 테스트는 레늄이 도핑된 필라멘트의 균열률이 $<1\%$ 이고 인장 강도가 400MPa 로 유지됨을 보여줍니다.

기술적 세부 사항: EBSD 는 결정립 방향($<110>$ 이 80%를 차지함)을 분석하는 데 사용되며 파괴 분석은 균열(결정립 경계 또는 표면)의 원인을 파악합니다. 이 테스트는 ISO 11539 표준을 준수합니다.

최적화: 저속 가열($50^\circ\text{C}/\text{s}$)은 균열률을 20% 감소시키고 자동 기록 시스템(정확도 $\pm 0.1\%$)은 데이터 신뢰성을 향상시킵니다.

배기가스 안정성 시험

정의: 장기간 작동 중 전류 변동 및 밝기 감소를 측정합니다.

방법 : 2600°C , 10^{-8}Pa 에서 500 시간 동안 실행, 방출 전류 1-10 μA , 기록 변동 (목표

<0.5 %). 피코 전류계($\pm 0.01\mu\text{A}$) 및 밝기 측정기($10^5\text{--}10^8\text{ A/cm}^2\cdot\text{sr}$)를 사용합니다.
응용 시나리오: EBL 필라멘트 테스트에서 안정성 테스트는 0.1%의 전류 변동과 <3%의 밝기 감소를 보여 7nm 노드 칩 제조 요구 사항을 충족합니다.
기술적 세부 사항: 전류는 피드백 제어 시스템(응답 시간<1ms)에 의해 조정되고 데이터는 정규 분포($\sigma < 1\%$)를 따릅니다. 이 테스트는 DIN EN 60695 표준을 따릅니다.
최적화: AI 알고리즘(정확도>95%)은 변동 추세를 예측하고 전원 공급 장치 매개변수를 조정하며 안정성을 10% 향상시킵니다.

항산화 시험

정의: 미량 산소 환경에서 필라멘트의 표면 안정성을 평가합니다.
방법 : 산소 분압 0.01 Pa 로 1000 시간 동안 10^{-5} Pa , 2600 °C 에서 산화물 층 두께 (XPS, $\pm 0.1\text{ nm}$)를 측정합니다.
적용 시나리오: X 선관 필라멘트 테스트에서 이트리아 코팅 필라멘트 산화물 층 두께 <0.1 미크론 및 일기능 변화 <0.1 eV.
기술적 세부 사항 : 산화물 형태 (WO_3 입자 <100 nm)의 SEM 관찰, 질량 손실 ($\pm 0.01\text{ mg}$)의 TGA 측정. 테스트는 ISO 6848 을 준수합니다.
최적화: 고진공(10^{-8} Pa)은 산화 속도를 80% 감소시키고 ALD 코팅(두께 10nm)은 내산화성을 50% 향상시킵니다.

고장 모드 분석

정의: 고장 원인을 파악하고 다양한 기술적 수단을 통해 개선 방안을 제안합니다.
방법: SEM(파괴 분석), XPS(표면 화학), EBSD(결정립 구조) 및 TGA(증발 속도)를 결합하여 증발, 파괴, 표면 열화 및 아크 방전을 분석합니다.
적용 시나리오: EBW 필라멘트 테스트에서 분석에 따르면 실패의 80%가 표면 산화로 인해 발생하며 코팅 공정을 개선한 후 수명이 40% 연장됩니다.
기술 세부 정보: 데이터는 FMECA(고장 모드, 영향 및 위험 분석) 모델에 통합되며 위험 우선 순위(RPN)는 <100 입니다. 분석 보고서는 ISO 9001 요구 사항을 충족합니다.
최적화: 머신 러닝(정확도>95%)은 고장 모드를 예측하고, 도핑(레늄 0.1 wt%) 및 코팅(지르코니아 0.5 미크론)을 최적화하며, 스크랩 비율은 0.2%로 감소합니다.

신뢰성 테스트는 실제 응용 분야에서 필라멘트의 안정성을 보장합니다. 테스트 데이터는 ISO 9001 및 GB/T 9383 표준에 따라 5 년 동안 기록되어야 합니다. 앞으로는 다중 매개변수 통합 테스트 플랫폼(현재 수준의 50%로 비용 절감)을 개발하고 효율성을 30% 개선해야 합니다.

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

4.5 CTIA GROUP LTD 의 전자총 텅스텐 필라멘트의 MSDS

물질안전보건자료(MSDS)는 GB/T 16483 및 OSHA 요구 사항에 따라 전자총 텅스텐 필라멘트의 안전한 사용, 보관 및 폐기에 대한 표준화된 정보를 제공합니다. 다음은 생산, 운송 및 사용 중 안전 규정 준수를 보장하기 위한 세부 정보입니다.

파트 I: 제품 이름

영문 이름 : 전자빔 텅스텐 필라멘트

CAS 번호: 7440-33-7

파트 II: 성분/구성 정보

콘텐츠 $\geq 99.95\%$

총 불순물 함량 $\leq 0.05\%$

파트 III: 위험 개요

건강 위험: 이 제품은 눈과 피부에 자극을 주지 않습니다.

폭발 위험: 이 제품은 불연성이며 자극성이 없습니다.

파트 IV: 응급 처치 방법

피부 접촉: 오염된 의복을 벗고 흐르는 물로 충분히 헹굽니다.

눈 접촉: 눈꺼풀을 들어 올리고 흐르는 물이나 식염수로 헹굽니다. 의사의 진료를 받으십시오.

흡입: 신선한 공기가 있는 곳에 두십시오. 호흡이 곤란하면 산소를 공급하십시오. 의사의 진료를 받으십시오.

섭취: 따뜻한 물을 많이 마시고 구토를 유도합니다. 의사의 진료를 받으십시오.

파트 V: 소방 대책

유해한 연소 생성물: 자연 분해 생성물은 알려져 있지 않습니다.

소화 방법: 소방관은 방독면과 전신 방화복을 착용하고 바람이 부는 방향으로 화재를 진압해야 합니다. 소화제: 마른 가죽 가루, 모래 및 흙.

파트 VI: 누출 응급 치료

응급 처치: 누출된 오염 지역을 격리하고 출입을 제한합니다. 불의 근원을 차단하십시오. 비상 대응 요원은 방진 마스크(전면 마스크)와 독성 방지 의류를 착용하는 것이 좋습니다. 먼지가 발생하지 않도록 조심스럽게 쓸어 가방에 넣고 안전한 장소로 옮깁니다. 누출량이 많으면 비닐 시트나 캔버스로 덮으십시오. 수거 및 재활용하거나 폐기물 처리장으로 운반하여 폐기하십시오.

파트 VII: 작동, 폐기 및 보관

작동 주의 사항: 작업자는 특별 교육을 받고 운영 절차를 엄격히 준수해야 합니다. 작업자는 자체 프라이밍 필터 방진 마스크, 화학 안전 보호 안경, 독성 침투 작업복 및 고무 장갑을 착용하는 것이 좋습니다. 화기 및 열원에서 멀리 떨어지고 직장 내 흡연은 엄격히 금지되어 있습니다. 방폭 환기 시스템 및 장비를 사용하십시오. 먼지가 발생하지 않도록 하십시오. 산화제 및 할로젠과의 접촉을 피하십시오. 포장 및 용기의

손상을 방지하기 위해 운송 중에 부드럽게 적재 및 하역하십시오. 해당 유형과 수량의 소방 장비 및 누출 응급 치료 장비를 갖추십시오. 빈 용기에는 잔류 유해 물질이 있을 수 있습니다.

보관 주의 사항: 서늘하고 통풍이 잘되는 창고에 보관하십시오. 화기 및 열원에서 멀리 보관하십시오. 산화제 및 할로젠과 분리하여 보관해야 하며 혼합해서는 안 됩니다. 해당 유형과 수량의 소방 장비를 갖추십시오. 보관 영역에는 누출을 억제할 수 있는 적절한 재료가 장착되어 있어야 합니다.

파트 VIII.: 연락처 제어/개인 보호

중국 MAC(mg/m³): 6

구 소련 MAC(mg/m³): 6

TLVTN: ACGIH 1mg/m³

TLVWN: ACGIH 3mg/m³

모니터링 방법: Potassium thiocyanate-titanium chloride spectrophotometry

엔지니어링 제어: 생산 공정은 먼지가 없고 완전히 환기됩니다.

호흡기 보호: 공기 중의 먼지 농도가 기준을 초과하는 경우 자체 프라이밍 필터 방진 마스크를 착용해야 합니다. 비상시 구조 및 대피 시에는 공기 호흡기를 착용해야 합니다.

눈 보호: 화학 물질 보안경을 착용하십시오.

신체 보호: 독성 침투를 방지하는 작업복을 착용하십시오.

손 보호: 고무 장갑을 착용하십시오.

파트 IX.: 물리적 및 화학적 특성

주요 성분 : 순수

외관 및 속성 : 단단하고 금속성 밝은 흰색

녹는점(°C): N/A

끓는점 (°C): N / A

상대밀도 (물 = 1): 13~18.5 (20°C)

증기 밀도 (공기 = 1): 데이터 없음

포화 증기압 (kPa): 데이터 없음

연소열 (kJ/mol): 데이터 없음

임계 온도(°C): 데이터 없음

임계 압력(MPa): 데이터 없음

물의 로그 분배 계수 : 데이터 없음

인화점(°C): 데이터 없음

점화 온도 (°C): 데이터 없음

폭발 상한 % (V/V): 데이터 없음

폭발 한계 하한 % (V/V): 데이터 없음

용해도 : 질산 및 불산에 용해 됨

파트 X: 안정성 및 반응성

저작권 및 법적 책임 선언문

금지된 비호환성: 강산 및 염기

파트 XI:

급성 독성: 데이터가 없습니다

LC50: 데이터가 없습니다

파트 XII: 생태 정보

이 부분에 대한 데이터가 없습니다.

파트 XIII: 폐기물 처리

폐기물 속성폐기물 처리 방법: 처리하기 전에 관련 국가 및 지역 규정을 참조하십시오. 가능하면 재활용하십시오.

파트 XIV: 교통 정보

포장 카테고리: Z01

운송 주의 사항: 포장에 완료되어야 하며 선적 시 적재가 안전해야 합니다. 운송 중에는 용기가 누출, 붕괴, 낙하 또는 손상되지 않도록 하십시오. 산화제, 할로젠, 식용 화학 물질 등과 혼합 및 운송하는 것은 엄격히 금지되어 있습니다. 운송 중에는 햇빛, 비 및 고온에 노출되지 않도록 보호해야 합니다. 운송 후에는 차량을 철저히 청소해야 합니다.

파트 XV: 공급업체 정보

공급 업체: CTIA GROUP LTD

전화: 0592-5129696/5129595



CTIA GROUP LTD 전자빔 텅스텐 필라멘트

저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

5 장 전자총에서 텅스텐 필라멘트의 목적과 응용

전자총의 텅스텐 필라멘트는 과학 연구, 산업 제조, 의료 장비 및 신흥 기술에 널리 사용됩니다. 높은 용점, 낮은 증기압 및 높은 방출 효율로 인해 전자총의 핵심 구성 요소가 되어 나노 단위 이미징에서 고정밀 처리에 이르기까지 다양한 응용 분야를 주도합니다. 이 장에서는 전자총, 진공 전자 장치, 산업 및 과학 연구 응용 분야, 신흥 분야에서 텅스텐 필라멘트의 구체적인 용도에 대해 자세히 설명하고 성능 요구 사항, 기술적 과제 및 최적화 방향을 분석합니다.

5.1 전자총에 적용

전자총은 텅스텐 필라멘트를 사용하여 고에너지 전자빔을 생성하며 현미경, 가공 장비 및 반도체 제조에 널리 사용됩니다. 이 섹션에서는 주사 전자 현미경(SEM), 투과 전자 현미경(TEM), 전자빔 용접 및 절단, 전자빔 리소그래피에서 텅스텐 필라멘트의 주요 역할을 살펴봅니다.

5.1.1 주사 전자 현미경 (SEM)

주사 전자 현미경(SEM)은 텅스텐 필라멘트에서 생성된 전자빔을 사용하여 샘플 표면을 스캔하고 2 차 전자, 후방 산란 전자 또는 특징적인 X 선을 감지하여 고해상도 이미지를 형성합니다. 재료 과학, 생물학 및 반도체 분석에 널리 사용됩니다. SEM 의 해상도는 일반적으로 1-5nm 이고 피사계 심도가 커서 복잡한 3 차원 구조를 관찰하는 데 적합합니다.

SEM 의 텅스텐 필라멘트는 높은 밝기와 안정적인 전자빔을 제공하는 것입니다. 일반적인 작업 조건은 다음과 같습니다.

방출 전류: 1-10 μ A, 이미징 안정성을 보장하기 위해 변동을 1% 미만으로 유지해야 합니다.

밝기: 10⁵-10⁶ A/cm². SR 은 해상도와 신호 강도에 영향을 미칩니다.

작동 온도: 2500-2700°C, 방출 효율과 수명의 균형.

진공 정도: 10⁻⁷ Pa, 산화 및 아크 방전을 방지합니다.

텅스텐 필라멘트 는 SEM 의 해상도와 이미징 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 예를 들어, 고해상도 모드에서 필라멘트는 빔 폭이 좁은 전자빔(<5nm)을 제공해야 하며, 칼륨 도핑(0.01-0.05wt %)은 입자 구조를 최적화하여 방출 균일성을 15% 향상시킬 수 있습니다. 표면 코팅(예: 이트륨 산화물, 0.1-1 미크론 두께)은 일 함수(4.5eV 에서 4.2eV 로)를 감소시키고 밝기를 20% 증가시켜 반도체 웨이퍼의 결함 또는 생물학적 샘플의 미세 구조와 같은 나노 단위 기능을 관찰하는 데 적합합니다.

필라멘트 수명은 SEM 운영 비용의 핵심 요소입니다. 표준 텅스텐 필라멘트 수명은

저작권 및 법적 책임 선언문

500-2000 시간이며 도핑 및 코팅을 최적화하여 3000 시간까지 연장 할 수 있습니다. 예를 들어, 이중 나선 필라멘트는 방출 면적을 증가시켜 국부 과열을 줄이고 수명을 30% 늘립니다. 실제 응용 분야에서 필라멘트 교체 주기는 장비 가동 중지 시간에 영향을 미치며 자동화된 필라멘트 정렬 시스템(정확도 ± 1 마이크론)은 유지 보수 시간을 50%까지 줄일 수 있습니다. 기술적 과제는 다음과 같습니다.

방출 안정성: 전류 변동($>1\%$)으로 인해 이미지 노이즈가 발생하므로 정전류 전원 공급 장치(정확도 $\pm 0.1\text{mA}$)와 고진공 환경이 필요합니다.

수명 및 비용: 필라멘트를 자주 교체하면 운영 비용이 증가하고 수명이 긴 필라멘트를 개발해야 합니다(목표 5,000 시간).

소형화: 휴대용 SEM 을 사용하려면 높은 밝기를 유지하면서 필라멘트 직경을 0.05-0.1mm 로 줄여야 합니다.

최적화 전략에는 나노 스케일 표면 처리(예: 플라즈마 연마, $R_a < 0.02$ 마이크론) 및 지능형 모니터링 시스템(전류 및 온도의 실시간 감지)을 사용하여 스크랩 비율을 0.5% 미만으로 줄이고 이미징 품질을 10% 향상시키는 것이 포함됩니다.

5.1.2 투과 전자 현미경 (TEM)

투과 전자 현미경(TEM)은 고에너지 전자빔을 사용하여 얇은 샘플을 투과하고 원자 수준 해상도 이미지(0.1-0.2nm)를 생성합니다. 결정 구조 분석, 나노 물질 특성화 및 생체 분자 이미징에 널리 사용됩니다. TEM 은 SEM 보다 텅스텐 필라멘트에 대한 성능 요구 사항이 높기 때문에 더 높은 밝기와 더 좁은 빔 폭이 필요합니다.

TEM 의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 10-50 μA , 원자 수준 분해능을 보장하기 위해 0.5% 미만의 변동이 필요합니다.

밝기: 10^7 - 10^8 A/cm²·SR , 고해상도 이미징을 지원하기 위해서는 높은 방출 효율이 필요합니다.

작동 온도: 2600-2800°C, 장기 작동을 유지하려면 높은 열 안정성이 필요합니다.

진공도: 10^{-8} Pa, 전자빔 산란 및 필라멘트 산화를 방지합니다.

텅스텐 필라멘트는 TEM 분해능의 핵심입니다. 예를 들어, 고해상도 TEM(HRTEM)에서 필라멘트는 빔 폭이 $<0.5\text{nm}$ 인 전자빔을 제공해야 합니다. 알루미늄(0.005-0.02wt %) 및 산화이트륨 코팅을 사용한 도핑은 밝기를 30% 증가시키고 작업 기능을 4.2eV 로 줄여 옹스트롬 미만 이미징의 요구 사항을 충족합니다. 이중 나선 또는 테이퍼 필라멘트는 전기장 분포를 최적화하여 빔 초점을

개선하고 빔 폭 편차를 20% 줄입니다.

필라멘트 수명은 교체 비용이 높기 때문에(진공 시스템 유지 보수 포함) TEM 에 특히 중요합니다. 최적화된 필라멘트는 2600°C 에서 800-1500 시간의 수명을 가지며 레늄 도핑(0.1-1wt%) 필라멘트는 2000 시간에 달할 수 있어 연성을 높여 기계적 파괴를 줄일 수 있습니다. 표면 연마($Ra < 0.05$ 마이크론) 및 고진공 환경(10^{-8} Pa)은 증발 속도를 50% 줄이고 수명을 25% 연장합니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

높은 밝기 요구 사항: TEM 에는 $10^8 A/cm^2$ 가 필요합니다. 순수한 텅스텐 필라멘트로 만나기 어려운 SR 밝기. 새로운 코팅 또는 복합 재료가 필요합니다.

열 드리프트: 필라멘트 온도 변동($>5^{\circ}C$)은 빔 드리프트를 유발하고 정밀한 온도 제어($\pm 2^{\circ}C$)가 필요합니다.

긴 수명: 높은 작동 온도는 증발을 가속화하고 고온 내성 코팅(예: 산화 지르코늄)을 개발해야 합니다.

최적화 전략에는 나노 구조 텅스텐 필라멘트(입자 크기 $< 100nm$)를 사용하여 방출 효율을 20% 개선하고, AI 모니터링 시스템을 통합하여 필라멘트 수명을 예측하고 예기치 않은 고장을 50% 줄이는 것이 포함됩니다.

5.1.3 전자빔 용접 및 절단

전자빔 용접 (EBBW) 및 절단은 텅스텐 필라멘트에서 생성된 고에너지 전자빔(10-100kW)을 사용하여 고정밀 가공을 위해 재료를 녹이거나 기화시킵니다. 항공 우주, 자동차 제조 및 원자력 산업에서 널리 사용됩니다. EBW 는 깊은 용접(깊이 대 폭 비율 $>20:1$)을 형성할 수 있으며 절단 정확도는 $\pm 0.01mm$ 입니다.

EBW 및 절단의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 10-100mA, 고전류는 고전력 출력을 지원합니다.

가속 전압 : 50-150 kV, 고 에너지 전자빔 생성.

작동 온도: 2600-2800°C, 높은 열 부하를 견뎌야 합니다.

진공도: 10^{-5} Pa, 약간의 잔류 가스가 허용됩니다.

필라멘트는 고출력의 안정적인 전자빔을 제공해야 합니다. 예를 들어, EBW 에서 필라멘트는 60kW 전자빔을 생성하고, 티타늄 합금(50mm 두께)을 용접할 때 용접 폭은 $< 1mm$, 열 영향부는 $< 0.5mm$ 입니다. 칼럼 도핑된 필라멘트는 입자 성장을

억제하여 열 안정성을 향상시키고 수명을 1000 시간입니다. 표면 코팅(예: 산화지르코늄)은 작업 기능을 감소시키고 방출 전류 밀도를 20% 증가시켜 높은 출력을 지원합니다.

절단 응용 분야에서 필라멘트는 빔 너비가 좁은 전자빔(<0.1mm)을 제공해야 합니다. 스테인리스강(두께 10mm)을 절단할 때 절단 평활도 Ra 는 <0.1 미크론입니다. 이중 나선 필라멘트는 빔 안정성을 향상시키기 위해 방출 면적을 증가시키고 전류 변동은 <1%입니다. 고진공 환경(10^{-5} Pa)은 빔 산란을 줄이고 처리 정확도를 보장합니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

높은 전력 안정성: 전류 변동(>2%)으로 인해 고르지 않은 용접이 발생하므로 정전류 전원 공급 장치(정확도 $\pm 0.5\text{mA}$)가 필요합니다.

필라멘트 수명: 높은 전류는 증발을 가속화하므로 수명이 긴 필라멘트(목표 2000 시간)가 필요합니다.

잔류 가스: 10^{-5} Pa 의 산소는 산화를 유발할 수 있으며 표면 보호 코팅이 필요할 수 있습니다.

최적화 전략에는 복합 텅스텐 필라멘트(예: 텅스텐-이트륨 산화물)를 사용하여 방출 효율을 30% 높이고 실시간 빔 전류 모니터링 시스템(정확도 $\pm 0.1\mu\text{A}$)을 사용하여 처리 일관성을 보장하는 것이 포함됩니다.

5.1.4 전자빔 리소그래피

전자빔 리소그래피(EBL)는 텅스텐 필라멘트에서 생성된 전자빔을 사용하여 나노 단위 패턴을 직접 작성하여 반도체 장치, 마스크 및 나노 구조를 제조합니다. 해상도는 <10nm 에 달할 수 있으며 칩 연구 개발 및 양자 장치 제조에 널리 사용됩니다.

EBL 의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 1-10nA, 매우 높은 안정성 필요(변동 <0.1%).

밝기: 10^7 - 10^8 A/cm²·sr, 나노 스케일 포커싱을 지원합니다.

작동 온도: 2500-2700°C, 균형 잡힌 방출 및 수명.

진공도: 10^{-8} Pa, 빔 산란을 방지하기 위해.

필라멘트의 방출 일관성은 EBL 의 핵심입니다. 예를 들어, 7nm 노드 칩을 제조할 때 필라멘트는 빔 너비가 <5nm 인 전자빔을 제공해야 합니다. 알루미늄 및 산화이트륨

코팅을 도핑하면 밝기가 25% 증가하여 $\pm 1\text{nm}$ 의 패턴 정확도가 보장됩니다. 이중 나선 필라멘트는 전기장 분포를 최적화하여 빔 안정성을 향상시키며 전류 편차는 $<0.05\%$ 입니다. 필라멘트 수명은 500 시간 이상이어야 합니다. EBL 장비의 높은 유지 보수 비용으로 인해 레늄 도핑 필라멘트는 1,000 시간에 도달할 수 있으며 증발 속도가 40% 감소합니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

초고 안정성: 전류 변동($>0.1\%$)으로 인해 패턴 왜곡이 발생하므로 초정밀 전원 공급 장치(정확도 $\pm 0.01\text{nA}$)가 필요합니다.

긴 수명: 높은 밝기에 대한 요구는 필라멘트 손실을 가속화하고 새로운 재료(예: 나노 구조 텅스텐)를 필요로 합니다.

빔 포커싱: 나노스케일 패턴에는 나노미터 미만의 빔 너비가 필요하며, 이를 위해서는 최적화된 필라멘트 형상과 전극 설계가 필요합니다.

최적화 전략에는 밝기를 30% 증가시키기 위한 현장 보조 방출 코팅(예: thoria)의 사용과 실시간 보정을 보장하기 위한 통합 빔 피드백 시스템(응답 시간 $<1\text{ms}$)이 포함됩니다.

5.2 진공 전자 장치

진공 전자 장치는 텅스텐 필라멘트를 사용하여 전자 전류를 생성하고 마이크로파, X 선 및 디스플레이 기술을 구동합니다. 이 섹션에서는 마이크로파 튜브, X 선관 및 음극선관에서의 응용 분야에 대해 설명합니다.

5.2.1 마이크로파 튜브(예: 마그네트론 및 진행파 튜브)

마이크로파 튜브는 텅스텐 필라멘트를 사용하여 자기장 또는 전기장의 작용으로 고주파 전자기파를 생성하는 전자 흐름을 생성합니다. 그들은 레이더, 위성 통신 및 마이크로파 가열에 널리 사용됩니다. 마그네트론은 전자레인지 및 군용 레이더에 사용되며 진행파 튜브(TWT)는 고주파 통신에 사용됩니다.

마이크로파 튜브의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 1-10mA, 신호 품질을 보장하기 위해 안정성 $<1\%$ 필요.

작동 온도: 2400-2600°C, 균형 잡힌 방출 및 수명.

진공 정도: 10^{-6} Pa , 아크 및 산화를 방지하기 위해.

전원 출력 : 마그네트론 1-10 kW, TWT 10-100 W.

저작권 및 법적 책임 선언문

마그네트론에서 필라멘트는 5mA 의 전자 전류를 제공하여 1kW 의 전력으로 2.45GHz 마이크로파를 생성합니다. 칼륨 도핑된 필라멘트는 열 안정성을 향상시켜 수명을 5,000 시간으로 연장하여 가정용 전자레인지에 적합합니다. 진행과 튜브는 <0.5%의 필라멘트 전류 변동으로 더 높은 안정성이 필요합니다. 알루미늄 및 산화이트륨 코팅을 사용한 도핑은 방출 효율을 20% 증가시키고 10GHz 고주파 신호를 지원합니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

높은 안정성: 전류 변동(>1%)으로 인해 신호 왜곡이 발생하며 정밀 전원 공급 장치(정확도 $\pm 0.1\text{mA}$)가 필요합니다.

긴 수명: 고출력 출력은 증발을 가속화하고 고온 내성 코팅이 필요합니다.

소형화: 위성 TWT 는 높은 방출을 유지하기 위해 필라멘트 직경이 0.1mm < 필요합니다.

최적화 전략에는 나노 크기의 입자 필라멘트(입자 <100nm)를 사용하여 배출 효율을 15% 높이고 진공 패키징 기술(10^{-7} Pa)을 사용하여 수명을 30% 연장하는 것이 포함됩니다.

5.2.2 X 선관

X 선관은 텅스텐 필라멘트를 사용하여 전자 빔을 생성하고, 이 전자빔은 금속 표적(예: 텅스텐 또는 몰리브덴)을 충격하여 X 선을 생성합니다. 의료 영상(CT, X 선 기계) 및 산업용 비파괴 검사에 널리 사용됩니다.

X 선관의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 1-10mA, 고강도 X 선 지원.
가속 전압: 30-150kV, X 선 에너지를 결정합니다.

작동 온도: 2500-2700°C, 높은 열 안정성 필요.

진공 정도: 10^{-7} Pa , 산화 및 아크를 방지하기 위해.

필라멘트는 높은 배출 효율과 긴 수명을 제공해야 합니다. 예를 들어, CT 스캔에서 필라멘트는 5mA 전자 전류를 생성하고, 120kV X 선을 생성하며, 이미징 해상도는 <0.5mm 입니다. 칼륨 도핑된 필라멘트의 수명은 1000-3000 시간이며 표면 코팅(예: 산화지르코늄)은 방출 전류 밀도를 20% 증가시켜 고처리량 이미징을 지원합니다. 이중 나선 필라멘트는 배출 면적을 증가시켜 국부 과열을 줄이고 수명을 25% 연장합니다.

저작권 및 법적 책임 선언문

기술적 과제는 다음과 같습니다.

고강도 요구 사항: 고선량 X 선에는 고전류(>10mA)가 필요하며, 이는 필라멘트 손실을 가속화합니다.

열 관리: 필라멘트와 타겟 사이의 거리가 작고(<10mm) 효율적인 방열이 필요합니다.

수명 비용: 필라멘트를 자주 교체하면 의료 장비 유지 보수 비용이 증가합니다.

최적화 전략에는 복합 텅스텐 필라멘트(예: 텅스텐-이트륨 산화물)를 사용하여 배출 효율을 30% 높이고 통합 냉각 시스템(수냉식, 유량 0.5L/min)을 사용하여 필라멘트 온도를 50°C 낮추는 것이 포함됩니다.

5.2.3 음극선관(CRT)

CRT(음극선관)는 텅스텐 필라멘트를 사용하여 형광 스크린을 폭격하여 이미지를 생성하는 전자빔을 생성합니다. 그들은 전통적인 디스플레이, 산업 모니터링 및 항공 기기에 사용됩니다. LCD 와 OLED 가 CRT 를 점차 대체하고 있지만 여전히 특정 영역(예: 고신뢰성 디스플레이)에서 사용됩니다.

CRT 의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 0.1-1mA, 저전류는 디스플레이 기능을 지원합니다.

작동 온도: 2000-2200°C, 저온은 서비스 기간을 머리말을 붙입니다.

진공 정도: 10^{-6} Pa, 형광성 스크린의 오염을 방지하기 위하여.

가속 전압: 10-30kV, 밝은 이미지를 생성합니다.

필라멘트는 안정적인 저전력 전자 흐름을 제공해야 합니다. 예를 들어, 항공 디스플레이에서 필라멘트는 0.5mA 전자 흐름을 생성하고 고대비 이미지를 생성하며 수명은 5,000-10,000 시간입니다. 칼륨 도핑된 필라멘트는 일기능을 줄여 배출 효율을 15% 증가시킵니다. 단일 나선 필라멘트는 구조가 간단하고 비용이 저렴하여 대규모 생산에 적합합니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

긴 수명: CRT 는 매우 긴 수명(>10,000 시간)을 가져야 하며 고온 증발이 병목 현상입니다.

낮은 전력 소비: 디스플레이는 낮은 발열량(<50W)과 최적화된 필라멘트 형상을 필요로 합니다.

환경 적응성: 항공 CRT 는 진동(10-100Hz)과 온도 변화(-40-70°C)를 견뎌야 합니다.

최적화 전략에는 작동 온도를 100°C 낮추기 위해 저작업 기능 코팅(예: 산화토륨)을 사용하고, 신뢰성을 20% 향상시키기 위해 방진 설계(± 1 미크론의 필라멘트 고정 정확도)를 사용하는 것이 포함됩니다.

5.3 기타 산업 및 과학 연구 응용 프로그램

텅스텐 필라멘트는 박막 증착, 이온 소스, 질량 분석기 및 핵융합 실험 장치에 중요한 응용 분야를 가지고 있으며 산업 생산 및 최첨단 과학 연구를 지원합니다.

5.3.1 박막 증착 (예 : 물리적 기상 증착)

PVD(Physical Vapor Deposition)는 텅스텐 필라멘트를 사용하여 전자빔을 생성하여 재료를 증발시키거나 스퍼터링하여 광학 코팅, 반도체 제조 및 내마모성 코팅의 응용 분야에 사용되는 박막(0.1-10 미크론 두께)을 증착합니다.

PVD 의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 1-10mA, 재료 증발 지원.

작동 온도: 2500-2700°C, 높은 열 안정성 필요.

진공 정도: 10^{-6} Pa, 필름 오염을 방지하기 위해.

전원 출력: 1-10kW, 증발원 구동.

필라멘트는 안정적인 고에너지 전자빔을 제공해야 합니다. 예를 들어, 광학 코팅에서 필라멘트는 5mA 전자 전류를 생성하고 이산화 규소 (SiO_2)를 증발 시키며 두께가 0.5 미크론이고 균일 성이 ± 1 %인 반사 방지 필름을 증착합니다. 알루미늄 도평 필라멘트는 방출 효율을 20% 증가시키고 이중 나선 필라멘트는 전류 변동을 <1%로 줄여 필름 품질을 보장합니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

박막 균일성: 불균일한 빔 전류는 두께 편차로 이어지며 필라멘트 형상을 최적화해야 합니다.

긴 수명: 고출력은 증발을 가속화하고 고온 내성 코팅이 필요합니다.

재료 호환성: 다양한 증발 재료는 빔 매개변수를 조정해야 합니다.

최적화 전략에는 다중 세그먼트 나선형 필라멘트를 사용하여 빔 균일성을 15% 개선하고 실시간 빔 제어 시스템(정확도 $\pm 0.1\mu\text{A}$)을 사용하여 증착 일관성을 보장하는

것이 포함됩니다.

5.3.2 이온 소스 및 질량 분석기

이온 소스는 텅스텐 필라멘트를 사용하여 전자 흐름을 생성하고 가스 분자를 이온화하여 이온 빔을 형성하며, 이는 질량 분석, 이온 주입 및 표면 분석에 사용됩니다. 질량 분석기는 10^{-6} Da의 분해능으로 화학 분석에 사용됩니다.

이온 소스의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 0.1-1mA, 높은 안정성 필요(변동 <0.1%).

작동 온도: 2400-2600°C, 균형 잡힌 방출 및 수명.

진공도: 10^{-7} Pa, 이온 빔 산란을 방지합니다.

이온화 효율 : >10 %, 고감도 분석 지원.

필라멘트는 안정적인 저전력 전자 흐름을 제공해야 합니다. 예를 들어, 질량 분석기에서 필라멘트는 0.5mA 전자 흐름을 생성하여 헬륨을 이온화하고 10^6 cps 이온 신호를 생성합니다. 칼륨 도핑된 필라멘트의 수명은 2000 시간이며 표면 연마($R_a < 0.05$ 미크론)는 전류 변동을 50% 줄여 분석 정확도를 향상시킵니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

초고 안정성: 전류 변동(>0.1%)으로 인해 분해능이 감소하고 정밀 전원 공급 장치가 필요합니다.

긴 수명: 필라멘트의 잦은 교체는 분석 효율성에 영향을 미칩니다.

소형화: 휴대용 질량 분석기에는 작은 필라멘트(직경 <0.1mm)가 필요합니다.

최적화 전략에는 전계 방출 보조 코팅을 사용하여 배출 효율을 20% 높이고 안정성을 보장하기 위한 통합 전류 피드백 시스템(응답 시간 <1ms)을 사용하는 것이 포함됩니다.

5.3.3 핵융합 실험장치

핵융합 실험 장치(예: 토카막 및 관성 구속 핵융합)는 텅스텐 필라멘트를 사용하여 고에너지 전자 흐름을 생성하고, 플라즈마 또는 진단 시스템을 구동하고, 고온 플라즈마의 거동을 연구합니다.

핵융합 장치의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 10-100mA, 고출력 플라즈마 지원.

작동 온도: 2700-3000°C, 매우 높은 열 안정성이 필요합니다.

진공 정도 : 10^{-8} Pa, 오염을 방지합니다.

방사선 저항: 중성자와 감마선에 강합니다.

필라멘트는 극한의 조건을 견뎌야 합니다. 예를 들어, 토카막에서 필라멘트는 50mA의 전자 전류를 생성하고, 1keV 플라즈마를 구동하며, 1000시간 동안 작동합니다. 레늄 도핑된 필라멘트는 연성을 높여 열 충격을 견디고, 산화 지르코늄 코팅은 증발 속도를 50% 줄여 고온 작동이 가능합니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

극한 환경: 고온(>3000°C)과 방사선은 필라멘트 열화를 가속화합니다.

고전력: 고전류(>100mA)는 높은 전송 효율을 필요로 합니다.

긴 수명: 이 장치는 유지 관리 비용이 높고 매우 긴 수명의 필라멘트(>5000 시간)가 필요합니다.

최적화 전략에는 텅스텐 기반 복합 재료(예: 텅스텐-텅스텐 카바이드)를 사용하여 방사선 저항을 30% 개선하고 진공 밀봉 기술(10^{-9} Pa)을 사용하여 수명을 40% 연장하는 것이 포함됩니다.

5.4 새로운 응용 분야

텅스텐 필라멘트는 3D 프린팅, 우주 추진 및 나노 기술과 같은 신흥 분야에서 큰 잠재력을 보여 기술 혁신을 주도하고 있습니다.

5.4.1 3D 프린팅에서 전자빔 용융

전자빔 용융(EBM)은 텅스텐 필라멘트를 사용하여 고에너지 전자빔(50-100kW)을 생성하여 금속 분말을 녹이고 ± 0.1 mm의 정확도로 복잡한 부품을 제조합니다. 항공 우주 및 의료용 임플란트에 널리 사용됩니다.

EBM의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 10-50mA, 고출력 용융 지원.

가속 전압: 60-100kV, 고에너지 빔 생성.

작동 온도: 2600-2800°C, 높은 열 안정성 필요.

저작권 및 법적 책임 선언문

진공 정도: 10^{-5} Pa, 약간의 먼지가 허용됩니다.

필라멘트는 고출력의 안정적인 전자빔을 제공해야 합니다. 예를 들어, 티타늄 합금 항공 부품을 제조할 때 필라멘트는 30mA 전자 흐름을 생성하고 분말을 녹여 0.05mm 의 층 두께를 형성하고 표면 거칠기는 $Ra < 5$ 마이크론입니다. 칼럼 도핑된 필라멘트의 수명은 최대 1000 시간이며 이중 나선 필라멘트는 빔 안정성을 20% 향상시킵니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

높은 출력 안정성: 전류 변동(>2%)으로 인해 레이어 두께가 고르지 않습니다.

먼지 오염: 금속 분말은 필라멘트를 오염시킬 수 있으며 보호 코팅이 필요할 수 있습니다.

긴 수명: 고출력은 증발을 가속화하고 고온 내성 재료가 필요합니다.

최적화 전략에는 방출 효율을 30% 높이기 위한 산화토륨 코팅과 용융 균일성을 보장하기 위한 빔 스캐닝 시스템(정확도 ± 0.1 mm)을 사용하는 것이 포함됩니다.

5.4.2 우주 추진 시스템의 전자 소스

텅스텐 필라멘트는 이온 추진기 및 홀 효과 추진기의 전자 소스로 사용되어 추진체 (예 : 크세논)를 이온화하여 추력을 생성하며, 이는 위성 및 심우주 탐사에 사용됩니다.

우주 추진 장치의 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 1-10mA, 효율적인 이온화를 지원합니다.

작동 온도: 2500-2700°C, 긴 수명 필요.

진공 정도 : 10^{-8} Pa, 공간 진공을 견딜 수 있습니다.

방사선 저항 : 우주선과 태양풍에 강합니다.

필라멘트는 전자의 꾸준한 흐름을 제공해야 합니다. 예를 들어, 이온 스터스터에서 필라멘트는 5mA 의 전자를 생성하고 크세논 가스를 이온화하여 0.1N 의 추력을 생성하며 수명은 몇 년입니다. 레늄이 도핑된 필라멘트는 연성을 높여 진동(10-100Hz)을 견디고 산화이트륨 코팅은 수명을 50% 연장합니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

저작권 및 법적 책임 선언문

매우 긴 수명: 우주 임무에는 >10,000 시간의 수명이 필요합니다.

환경 적응성: -100 에서 100°C 와 방사선을 견뎌야 합니다.

낮은 전력 소비: 스러스터는 낮은 화력(<100W)을 필요로 합니다.

최적화 전략에는 전계 방출 보조 필라멘트를 사용하여 작동 온도를 100°C 낮추고, 산화지르코늄과 같은 방사선 내성 코팅을 사용하여 신뢰성을 30% 향상시키는 것이 포함됩니다.

5.4.3 나노 기술 및 마이크로 나노 가공

텅스텐 필라멘트는 전자빔 유도 증착(EBID) 및 나노리소그래피에서 전자빔을 생성하여 1-5nm 의 분해능으로 센서, 양자 소자 및 MEMS 의 응용 분야를 위한 나노 규모 구조를 제조합니다.

마이크로 나노 가공에서 텅스텐 필라멘트는 다음과 같습니다.

방출 전류: 0.1-1nA, 초고 안정성 필요(변동 <0.05%).

밝기 : $10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{SR}$ 은 나노스케일 포커싱을 지원합니다.

작동 온도: 2500-2700°C, 긴 수명 필요.

진공도: 10^{-8} Pa , 빔 산란을 방지하기 위해.

필라멘트는 빔 폭이 매우 좁은 전자빔을 제공해야 합니다. 예를 들어, EBID 에서 필라멘트는 0.5nA 전자 전류를 생성하고 $\pm 0.5\text{nm}$ 의 정확도로 탄소 나노와이어(직경 <5nm)를 증착합니다. 필라멘트를 알루미늄과 산화토륨 코팅으로 도핑하면 밝기가 30% 증가하고 수명이 500 시간 증가합니다.

기술적 과제는 다음과 같습니다.

초고해상도: <1nm 빔 폭이 필요하며 필라멘트 형상을 최적화해야 합니다.

안정성: 전류 변동(>0.05%)으로 인해 구조적 결함이 발생합니다.

소형화: 나노 가공 장비에는 작은 필라멘트(직경 <0.05mm)가 필요합니다.

최적화 전략에는 나노 구조 텅스텐 필라멘트를 사용하여 방출 효율을 20% 높이고 빔 보정 시스템(정확도 $\pm 0.01\text{nA}$)을 사용하여 처리 정확도를 보장하는 것이 포함됩니다.



CTIA GROUP LTD 전자빔 텅스텐 필라멘트

1

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

6 장 전자빔 필라멘트의 기술적 과제와 향후 개발

전자빔 텅스텐 필라멘트는 고정밀 이미징, 처리 및 과학 연구에서 핵심적인 역할을 합니다. 그러나 응용 프로그램 수요가 증가함에 따라 텅스텐 필라멘트는 수명, 효율성, 소형화 및 환경 적응성 측면에서 기술적 인 문제에 직면 해 있습니다. 동시에 신소재, 지능형 기술 및 친환경 제조는 텅스텐 필라멘트 개발에 새로운 기회를 제공합니다. 이 장에서는 현재의 기술적 과제, 신소재 및 기술, 지능형 및 친환경 제조, 미래 개발 동향에 대해 자세히 논의하고 고성능 전자총 및 신흥 분야에서 텅스텐 필라멘트의 잠재력을 기대합니다.

6.1 전자빔 텅스텐 필라멘트의 현재 기술적 과제

전자총의 텅스텐 필라멘트는 장치의 해상도, 안정성 및 운영 비용에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 섹션에서는 필라멘트 수명, 방출 효율 및 소형화, 고정밀 요구 사항 측면에서 주요 기술적 과제를 분석합니다.

6.1.1 필라멘트의 수명 연장

텅스텐 필라멘트(500-2000 시간)는 특히 필라멘트가 2600-2800°C 에서 장기간 작동해야 하는 고휘도 응용 분야(예: 투과 전자 현미경, TEM)에서 전자총 작동의 효율성과 비용을 제한하는 핵심 요소입니다 . 주요 과제는 다음과 같습니다.

고온 증발 : 2700 °C 에서 텅스텐의 증발 속도는 약 $0.01-0.05 \text{ mg} / \text{cm}^2 \cdot \text{h}$ 로 필라멘트 직경 ($0.1-0.5 \mu\text{m} / \text{h}$)이 얇아지고 저항이 증가하며 방출 효율이 30 % 감소합니다. 예를 들어, SEM에서 필라멘트 직경이 0.2mm에서 0.15mm로 감소하면 방출 전류 밀도가 20% 감소하고 이미징 품질이 크게 저하됩니다.

열 피로: 전자총의 고온 및 저온 주기(20-2700°C, 가열 속도 100°C/s)는 열 응력을 유발하고 결정립계에서 미세 균열이 쉽게 형성됩니다. 테스트에 따르면 1,000 사이클 후에 순수한 텅스텐 필라멘트의 균열률은 5 %에 도달하는 반면 칼륨 도핑 필라멘트의 균열률은 1 %로 감소하지만 여전히 매우 긴 수명 (>5,000 시간)의 요구 사항을 충족하기에 충분하지 않습니다.

표면 열화 : 10^{-5} Pa 의 진공 상태에서 잔류 산소는 표면 산화를 일으켜 삼산화 텅스텐을 형성하여 일 기능을 $0.1-0.2 \text{ eV}$ 감소시키고 방출 효율을 15 % 감소시킵니다. 산화물 축적은 또한 아크 방전을 일으키고 전자총을 손상시킬 수 있습니다.

비용 및 유지 보수: 필라멘트를 자주 교체하면 장비 가동 중지 시간과 유지 보수 비용이 증가합니다. 예를 들어, TEM 필라멘트 교체는 4-8 시간이 걸리며 진공 시스템 유지 보수가 포함되며 단일 비용은 최대 수천 달러입니다.

대응 전략에는 고온 내성 코팅(예: 산화 지르코늄, 두께 $0.5-1 \mu\text{m}$)을 사용하여 증발 속도를 50% 줄이고, 레늄($0.1-1 \text{ wt} \%$)을 도핑하여 연성을 개선하고 균열을 30% 줄이며, 산화를 최소화하기 위해 진공 시스템(10^{-8} Pa)을 최적화하는 것이 포함됩니다.

저작권 및 법적 책임 선언문

목표는 필라멘트 수명을 5000 시간으로 연장하고 유지 보수 빈도를 50% 줄이는 것입니다.

6.1.2 전송 효율 향상

방출 효율은 전자빔의 밝기와 빔 품질을 결정하며, 이는 전자총의 해상도와 처리 정확도에 직접적인 영향을 미칩니다. 순수 텅스텐 필라멘트 (4.5 eV)의 일 함수는 상대적으로 높아 방출 전류 밀도 ($1-5 \text{ A/cm}^2$)를 제한합니다. 주요 과제는 다음과 같습니다.

높은 일기능: 2600°C 에서 텅스텐 필라멘트의 방출 전류 밀도는 $3-5 \text{ A/cm}^2$ 에 불과하여 TEM($10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ 필요) 또는 전자빔 리소그래피(EBL, 10 nA 안정 전류 필요)의 요구 사항을 충족하기 어렵습니다. 알루미늄($0.005-0.02 \text{ wt } \%$)을 도핑하면 일기능이 4.3 eV 로 감소하고 방출 효율이 15% 증가할 수 있지만 전계 방출 음극(일 $< 3 \text{ eV}$)과 경쟁하기에는 여전히 충분하지 않습니다.

방출 균일성: 표면 결함(예: 긁힘, 산화물, $R_a > 0.05$ 미크론)으로 인해 불균일한 국부 전기장과 최대 5%의 전류 밀도 편차가 발생하여 SEM 이미징 품질 또는 EBL 패턴 정확도에 영향을 미칩니다. 전기화학적 연마는 표면 거칠기를 0.02 미크론으로 줄일 수 있지만 비용이 많이 들고 공정이 복잡합니다.

전류 안정성: 필라멘트 온도 변동($> 5^\circ\text{C}$) 또는 전류 지터($> 1\%$)는 빔 전류 편차를 유발하고 분해능을 감소시킵니다. 예를 들어, EBL 에서 0.1%의 전류 변동으로 인해 패턴 편차가 $> 1 \text{ nm}$ 이므로 초정밀 전원 공급 장치(정확도 $\pm 0.01 \text{ nA}$)가 필요합니다.

고온 요구 사항: 배출 효율을 개선하려면 더 높은 작동 온도($> 2800^\circ\text{C}$)가 필요하지만 증발을 가속화하고 수명을 50% 단축합니다. 예를 들어, 온도가 2600°C 에서 2800°C 로 상승하면 방출 전류 밀도는 2 배 증가하지만 증발 속도는 4 배 증가합니다.

전략에는 배출 효율을 30% 향상시키기 위한 저일기능 코팅(예: 산화토륨, 일기능 4.1 eV) 개발, 방출 균일성을 20% 향상시키기 위해 입자 구조(크기 2-4 미크론)를 최적화, 현재 안정성을 보장하기 위한 빔 피드백 시스템(응답 시간 $< 1 \text{ ms}$) 통합이 포함됩니다. 목표는 방출 전류 밀도를 10 A/cm^2 로, 밝기를 10^8 A/cm^2 로 높이는 것입니다. 시니어 .

6.1.3 소형화 및 고정밀 요구 사항

휴대용 장치(예: 휴대용 SEM) 및 나노 제조(예: EBID)가 등장함에 따라 필라멘트는 소형화(직경 $< 0.1 \text{ mm}$)되고 고정밀 요구 사항을 충족해야 합니다. 주요 과제는 다음과 같습니다.

소형화 제조: 필라멘트의 직경이 0.2 mm 에서 0.05 mm 로 감소하여 초정밀 도면 및 권선 공정(공차 ± 1 미크론)이 필요합니다. 작은 필라멘트의 입자 제어는 더 어렵고 입자 크기가 > 5 미크론은 파괴율이 10%로 부서지기 쉽습니다. 칼륨 도핑은 곡물 (2-3 미크론)을 최적화 할 수 있지만 비용은 20 % 증가합니다.

고정밀 빔: 나노 제작에는 <1nm 의 빔 폭이 필요하며 필라멘트는 10^8A/cm^2 SR 밝기 및 0.05% 전류 안정성. 마이크로 필라멘트의 방출 면적이 작고 전류 밀도 편차가 쉽게 5%에 도달할 수 있으므로 형상(예: 테이퍼 필라멘트)과 전기장 분포를 최적화해야 합니다.

열 관리: 마이크로 필라멘트의 방열 면적이 작고 국부 과열 위험이 50% 증가하며 온도 구배가 100°C/mm 에 도달할 수 있어 열 변형 및 빔 편차가 발생할 수 있습니다. 예를 들어, EBID 에서 5°C 의 온도 변화는 0.5nm 빔 편차를 유발하여 처리 정확도를 감소시킵니다.

기계적 안정성: 마이크로 필라멘트는 진동 환경(10-100Hz)에서 변위(>100 미크론)가 발생하기 쉬워 빔 포커싱에 영향을 미칩니다. 항공 및 휴대용 장치에는 ± 0.5 미크론의 필라멘트 고정 정확도가 필요하며, 이를 위해서는 새로운 지지 구조가 필요합니다.

전략에는 나노 단위 인발 공정(허용 오차 ± 0.5 미크론)을 사용하여 제조 정확도를 개선하고, 열 관리를 개선하고 온도 구배를 30% 줄이기 위해 고열전도성 코팅(예: 텅스텐 카바이드)을 개발하고, 전기장 균일성을 최적화하기 위해 미세 전극(피치 <0.1mm)을 통합하는 것이 포함됩니다. 목표는 필라멘트 직경을 0.05mm 로 줄이고 빔 폭을 0.5nm 이내로 제어하는 것입니다.

6.2 전자빔 텅스텐 필라멘트의 신소재 및 기술

위의 문제를 해결하기 위해 새로운 재료 및 기술(예: 텅스텐 기반 복합 재료, 나노 구조 텅스텐 필라멘트 및 대체 음극 재료)은 필라멘트 성능을 개선할 수 있는 새로운 경로를 제공합니다.

6.2.1 텅스텐계 복합 재료

텅스텐 기반 복합 재료는 강화 상 또는 기능성 코팅을 추가하여 필라멘트의 열 안정성, 방출 효율 및 기계적 특성을 향상시킵니다. 주요 개발 방향은 다음과 같습니다.

텅스텐 - 레늄 합금 : 0.1-5 중량 % 레늄을 첨가하면 연성이 10 % 증가하고 고온 크리프 속도가 30 % 감소하며 수명이 40 % 연장됩니다. 레늄 원자는 격자 가소성을 최적화하고 열 피로 균열을 줄입니다. 예를 들어, 텅스텐 레늄 필라멘트 (www.tungsten-rhenium.com)는 2800°C 에서 3000 시간의 수명과 증발 속도가 20 % 감소합니다.

텅스텐 - 산화물 복합체 : 이트륨 산화물 (Y_2O_3 , 0.5-2 wt %) 또는 지르코늄 산화물 (ZrO_2 , 0.1-1 wt %)로 도핑하면 나노 스케일 분산상을 형성하고 입자 성장을 억제하며 입자 크기를 2-3 미크론으로 유지하고 인장 강도를 15 % 증가시킵니다. 산화물은 또한 작업 기능을 4.2eV 로 감소시키고 방출 전류 밀도를 25% 증가시켜 고휘도 TEM 에 적합합니다.

텅스텐 - 카바이드 복합재 : 텅스텐 카바이드 (WC, 0.1-0.5 wt %)를 첨가하면 표면 경도 (HV 2000)가 증가하고 내마모성이 50 % 향상되며 고출력 전자빔 용접에 적합합니다. 텅스텐 카바이드 층 (두께 0.1 미크론)은 또한 산화 저항성을 향상시키고 산화 속도를 60 % 감소시킵니다.

제조 기술: 분말 야금 및 플라즈마 스프레이는 도핑 원소의 균일한 분포(편차 <1%)를 보장하기 위해 복합 필라멘트를 준비하는 데 사용됩니다. 레이저 소결은 나노 스케일 강화 상을 형성하고 입계 강도를 20% 증가시킬 수 있습니다.

과제에는 복합 재료의 높은 비용 (순수 텅스텐보다 30-50 % 높음)과 복잡한 가공 (고온 소결, >2000 ° C)이 포함됩니다. 미래에는 화학 기상 증착(CVD)과 같은 저비용 준비 기술을 최적화하여 비용을 20% 절감해야 합니다.

6.2.2 나노 구조 텅스텐 필라멘트

나노 구조 텅스텐 필라멘트는 입자 크기(<100nm)와 표면 형태를 제어하여 성능을 향상시켜 소형화 및 고정밀 응용 분야에 특히 적합합니다. 핵심 기술은 다음과 같습니다.

나노 결정 텅스텐 : 입자 크기가 50-100 nm 로 감소하고, 입자 경계 밀도가 50 % 증가하고, 인장 강도가 20 % (1200 MPa 까지) 증가하고, 연성이 10 % 증가합니다. 나노 결정 구조는 입계 슬라이딩을 통해 열 응력을 분산시키고 열 피로 균열을 40% 감소시킵니다. 예를 들어, 2700°C 에서 나노결정질 필라멘트의 수명은 2500 시간입니다.

나노 스케일 표면 공학: 플라즈마 에칭 및 원자층 증착(ALD)을 사용하여 나노 스케일 텍스처($R_a < 0.01$ 마이크로미터)를 형성하여 노출된 {100} 결정 평면의 비율을 30% 증가시키고 작업 기능을 4.3eV 로 줄이며 방출 전류 밀도를 25% 증가시킵니다. 나노 코팅(예: 10-50nm 두께의 산화토륨)은 작업 기능을 4.1eV 로 더욱 감소시키고 밝기는 10^8 A/cm²에 도달합니다. 시니어 .

미세 가공: ± 0.5 미크론의 허용 오차로 0.05mm 직경의 필라멘트를 생산하기 위한 전기화학적 증착 및 레이저 미세 가공. 나노스케일 드로잉 프로세스는 입자 배향(<110> 80%를 차지)을 제어하고 방출 균일성을 15% 향상시킵니다.

열 관리 : 나노구조체는 비표면적을 증가시키고, 열전도율을 10%(190 W/m·K 까지) 향상시키며, 온도 구배를 30% 줄여 마이크로 필라멘트에 적합합니다.

과제에는 나노 구조 준비의 높은 비용(기준 필라멘트보다 50% 높음)과 안정성 문제(곡물이 고온에서 자랄 수 있음)가 포함됩니다. 앞으로는 나노 구조를 안정적으로 유지하기 위해 저온 소결 기술(<1500°C)과 자가 치유 코팅을 개발해야 합니다.

6.2.3 대체 양극 재료(예: 탄소 나노튜브, 전계 방출 음극)

텅스텐 필라멘트의 성능 병목 현상을 극복하기 위해 대체 음극 재료(예: 탄소

나노튜브 및 전계 방출 음극)가 연구 핫스팟이 되었습니다. 다음은 주요 지침입니다.

탄소 나노 튜브 (CNT) : CNT 는 낮은 일기능 (2.5-3 eV)과 높은 전류 밀도 ($>10^9 \text{ A/cm}^2$)를 가지며 고온 작동 ($<500^\circ\text{C}$)이 필요하지 않으며 최대 10,000 시간의 수명을 갖습니다. CNT 음극은 EBL 에서 $<1\text{nm}$ 빔 폭을 제공하여 나노 공정에 적합합니다. 그러나 CNT 는 기계적 안정성이 좋지 않고 진동 환경(10-100Hz)에서 파손되기 쉬우므로 복합 기관(예: 실리콘)의 지원이 필요합니다.

전계 방출 음극 (FEC) : 팁 방전 원리에 따라 FEC (예 : 텅스텐 바늘 또는 지르코늄 텅스텐 산화물)는 10^9 A/cm^2 · 실온에서 SR 밝기, 작업 기능 2.9eV 및 전류 안정성 0.01%. FEC 는 고해상도 TEM 에서 0.1nm 해상도를 달성하지만 매우 높은 진공 (10^{-10} Pa)이 필요하고 텅스텐 필라멘트보다 10 배 더 비쌉니다.

그래핀, MoS2 와 같은 2 차원 재료는 일함수(3-3.5eV)가 낮고 화학적 안정성이 높아 마이크로 음극에 적합합니다. 그래핀 음극은 이온 소스에서 0.1mA 의 안정적인 전류를 제공하고 수명을 5000 시간이지만 준비 과정이 복잡하고 수율이 $<50\%$ 입니다.

과제 및 통합: 대체 재료는 제조 비용, 환경 적응성 및 기존 전자총과의 호환성을 극복해야 합니다. 텅스텐 필라멘트는 CNT 또는 FEC 와 결합하여 고온 안정성과 낮은 일함수의 장점을 결합한 하이브리드 음극을 형성할 수 있습니다.

앞으로는 저비용 CNT 성장 기술(텅스텐 필라멘트의 2 배로 비용 절감)과 모듈러 양극 설계를 개발하여 대체 재료의 적용 주기를 단축할 필요가 있습니다.

6.3 전자빔 텅스텐 필라멘트의 지능적이고 친환경적인 제조

지능적이고 친환경적인 제조는 텅스텐 필라멘트 산업을 업그레이드하고, 생산 효율성을 개선하고, 에너지 소비를 줄이고, 지속 가능한 개발을 달성하기 위한 핵심 방향입니다.

6.3.1 지능형 모니터링 및 적응 제어

지능형 모니터링 및 적응형 제어는 실시간 데이터 분석을 통해 필라멘트 성능을 최적화하고 수명을 연장하며 전자총 안정성을 개선합니다. 주요 기술은 다음과 같습니다.

실시간 모니터링 시스템: 통합 적외선 온도계(정확도 $\pm 2^\circ\text{C}$), 피코 전류계(정확도 $\pm 0.1\mu\text{A}$) 및 진공 게이지(10^{-9} Pa)는 필라멘트 온도, 전류 및 진공을 모니터링합니다. AI 알고리즘은 데이터를 분석하여 수명(오류 $<5\%$) 및 고장 위험을 예측합니다. 예를 들어, 모니터링 시스템이 $>5^\circ\text{C}$ 의 온도 변화를 감지하면 자동으로 난방 전력을 조정하여 수명을 20% 연장합니다.

적응형 제어: 머신 러닝 기반 제어 시스템은 전류(정확도 $\pm 0.01\text{mA}$)와 전압($\pm 0.1\text{V}$)을 동적으로 조정하여 0.05%의 방출 안정성을 보장합니다. EBL 에서 적응형 제어는 패턴

편차를 0.5nm 로 줄이고 처리 정확도를 15% 향상시킵니다.

결합 진단: 딥 러닝 모델은 필라멘트 표면 형태(SEM 이미지를 통해)와 전류 과정을 분석하여 >95%의 정확도로 증발, 균열 및 산화와 같은 고장 모드를 식별합니다. 이 시스템은 조기 경고(>100 시간)를 제공하여 계획되지 않은 가동 중지 시간을 50% 줄일 수 있습니다.

적용 사례: 지능형 모니터링 시스템은 SEM 에서 실시간으로 빔을 보정하여 전류 변동을 0.1%로 줄이고 이미징 품질을 10% 향상시킵니다. 적응형 제어는 전자빔 용접에서 출력을 최적화하여 용접 일관성을 20% 향상시킵니다.

고가의 센서(디바이스 비용의 10%를 차지함)와 복잡한 알고리즘의 실시간 성능(<1ms 응답 필요)이 과제입니다. 앞으로는 시스템 통합을 개선하기 위해 저비용 센서(현재 수준의 50%로 비용 절감)와 엣지 컴퓨팅 모듈을 개발해야 합니다.

6.3.2 에너지 절약 및 친환경 생산 기술

텅스텐 필라멘트 생산에는 높은 에너지 소비의 제련(>2000°C)과 화학 공정이 포함되며, 탄소 발자국을 줄이기 위해 에너지 절약 및 환경 친화적인 기술이 필요합니다. 다음은 주요 지침입니다.

에너지 절약형 야금: 플라즈마 아크 용융은 기존 아크로를 대체하는 데 사용되어 에너지 소비를 30%(5kWh/kg 까지) 줄입니다. 저온 소결 (1500 ° C)은 플럭스 (예 : 실리콘, 0.1 중량 %)를 첨가하여 에너지 소비를 20 % 줄이고 2-3 미크론의 입자 크기를 유지합니다.

녹색 화학 처리: 전통적인 산세(불산+질산)는 독성 폐액을 생성하고 새로운 전기화학적 연마(전해질은 중성 염 용액)는 폐액 배출을 80% 줄이고 표면 거칠기는 0.02 미크론에 이릅니다. 플라즈마 세척은 화학적 세척을 대체하고 폐가스 배출량을 90% 줄입니다.

효율적인 드로잉: 서보 제어 드로잉 머신(정확도 ± 0.5 미크론)은 당기는 힘을 최적화하고 와이어 파손을 50% 줄이며 에너지 소비를 15% 줄입니다. 레이저 보조 드로잉은 처리 속도를 20% 증가시켜 마이크로 필라멘트(직경 0.05mm)에 적합합니다.

환경 영향: 에너지 절약 기술은 ISO 14001 에 따라 텅스텐 필라멘트 생산으로 인한 탄소 배출량을 10kg CO2/kg 에서 6kg CO2/kg 으로 줄입니다. 친환경 공정은 제품 수율을 10% 높이고 폐기물을 20% 줄입니다.

녹색 기술에 대한 높은 초기 투자(기존 장비보다 30% 높음)와 공정 안정성이 과제입니다. 앞으로는 투자 회수 기간을 2 년으로 단축하기 위해 모듈식 생산 장비를 추진해야 합니다.

저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

6.3.3 재활용 및 폐기물 처리

텅스텐 필라멘트의 재활용 및 폐기물 처리는 자원 폐기물과 환경 오염을 줄일 수 있습니다. 핵심 기술은 다음과 같습니다.

텅스텐 회수 : 화학적 환원 방법은 순도 99.9 %와 회수율 >95 %로 폐기물 필라멘트에서 텅스텐을 회수합니다. 이 공정에는 산 용해(황산 + 염산), 침전(텅스텐 산) 및 수소 환원(1000°C)이 포함되며 에너지 소비는 2kWh/kg 입니다. 회수된 텅스텐은 새로운 필라멘트 생산에 직접 사용할 수 있어 비용을 40% 절감할 수 있습니다.

코팅 분리 : 폐기물 필라멘트의 이트리아 또는 산화 지르코늄 코팅은 코팅이 텅스텐 기판을 오염시키는 것을 방지하기 위해 90 %의 회수율로 플라즈마 스트리핑에 의해 제거됩니다. 스트리핑 공정에는 화학 폐액이 없으며 환경 보호 표준을 충족합니다.

폐기물 처리 : 생산시 텅스텐 먼지 (입자 크기 <10 마이크론)는 정전기 먼지 제거에 의해 수집되며 회수율은 98 %이며 폐 손상 (노출 제한 5mg / m³)을 방지합니다. 폐액은 중화 및 여과로 처리되며 100% 배출 준수율을 보입니다.

순환 경제: 재활용 텅스텐 필라멘트는 총 수요의 20%를 차지하며 2030 년까지 40%에 이를 것으로 예상됩니다. 재활용은 텅스텐 채굴을 30% 줄이고 생태계 피해를 줄입니다.

문제는 재활용 과정에서 높은 에너지 소비와 가치가 낮은 코팅을 처리하는 데 드는 비용 등입니다. 앞으로는 재활용 효율을 20% 높이기 위해 저온 재활용 기술(에너지 소비량을 1kWh/kg 으로 줄임)과 자동 선별 장비를 개발해야 합니다.

6.4 전자빔 텅스텐 필라멘트의 향후 개발 동향

텅스텐 필라멘트는 고성능 전자총 설계, 학제 간 통합 및 극한 환경 응용을 중심으로 기술 혁신과 산업 업그레이드를 촉진 할 것입니다.

6.4.1 고성능 전자총 설계

고성능 전자총은 나노 단위의 이미징 및 처리를 촉진하기 위해 더 높은 밝기, 더 긴 수명 및 더 낮은 에너지 소비가 필요합니다. 개발 추세는 다음과 같습니다.

초고휘도 필라멘트: 최대 10^9 A/cm²의 밝기로 일함수가 <4eV(예: 텅스텐-토륨 산화물)인 복합 필라멘트 개발. sr , 차세대 TEM(해상도 <0.05nm) 및 EBL(빔 폭 <0.5nm)의 요구 사항을 충족합니다. 나노 단위 표면 엔지니어링(텍스처 <10nm)은 방출 균일성을 20% 향상시킵니다.

긴 수명 설계 : 목표 수명 > 10,000 시간, 텅스텐-텅스텐 카바이드 복합 재료 및자가 치유 코팅 (지르코니아 + 그래 핀)은 증발 속도를 60 % 감소시킵니다. 모듈식

필라멘트 설계(교체 시간 < 1 시간)로 유지 보수 비용을 50% 절감할 수 있습니다.

저에너지 전자총: 최적화된 필라멘트 형상(예: 다중 세그먼트 나선)은 가열 전력을 30%(<50W 까지) 감소시키고 통합 마이크로 전극(피치 0.05mm)은 빔 초점 효율성을 20% 증가시킵니다. 고효율 전원 공급 장치(효율 > 95%)로 에너지 소비를 더욱 줄입니다.

응용 프로그램 드라이버: 고성능 전자총은 6nm 노드 칩 제조, 나노미터 미만의 바이오 이미징 및 초고정밀 3D 프린팅(층 두께 < 0.01mm)을 지원합니다.

과제에는 높은 비용과 고성능 필라멘트의 복잡한 통합이 포함됩니다. 미래에는 생산 비용을 30% 절감할 수 있는 표준화된 전자총 모듈을 개발해야 합니다.

6.4.2 학제간 통합(예: 인공 지능과의 통합)

학제 간 통합은 텅스텐 필라멘트를 인공 지능 (AI), 빅 데이터 및 사물 인터넷 (IoT)과 결합하여 성능과 응용 프로그램 효율성을 향상시킵니다. 개발 추세는 다음과 같습니다.

AI 최적화 설계: AI 기반 재료 시뮬레이션(예: 밀도 함수 이론, DFT)은 텅스텐 기반 복합 재료의 성능을 예측하여 R&D 주기를 50% 단축합니다. GAN(Generative Adversarial Network)은 필라멘트 형상을 최적화하고 배출 효율을 15% 높입니다.

지능형 작동: AI 제어 시스템은 필라멘트 상태(온도, 전류, 진공)를 실시간으로 분석하고 매개변수를 적응적으로 조정하며 수명을 30% 연장합니다. SEM 에서 AI 는 빔 경로를 최적화하고 해상도를 10% 향상시킵니다.

빅 데이터 분석: IoT 플랫폼은 글로벌 전자총 작동 데이터를 수집하고, 필라멘트 고장 모드를 분석하고, 설계를 개선합니다. 예를 들어, 데이터 분석에 따르면 필라멘트 고장의 80%가 표면 산화로 인해 발생하며, 이로 인해 수명이 40% 늘어나는 새로운 코팅(산화토륨 + 그래핀)이 개발되었습니다.

교차 도메인 애플리케이션: 텅스텐 필라멘트와 결합된 AI 는 자동화된 제조(예: EBM, 정확도±0.05mm) 및 지능형 진단(예: CT, 해상도<0.1mm)을 지원합니다.

당면 과제로는 AI 알고리즘의 높은 개발 비용과 데이터 개인 정보 보호 문제 등이 있습니다. 미래에는 알고리즘 학습 비용을 50% 절감할 수 있는 오픈 데이터 플랫폼을 구축해야 합니다.

6.4.3 우주 및 극한 환경에서의 응용 프로그램

텅스텐 필라멘트는 우주 추진, 행성 탐사 및 핵융합과 같은 극한 환경에 적용할 수 있는 큰 잠재력을 가지고 있습니다. 개발 추세는 다음과 같습니다.

우주 추진 : 텅스텐 필라멘트는 이온 추진기의 전자 소스로 사용되며 5-10 mA 의 안정적인 전류, 0.1 N 추력 및 > 20,000 시간의 수명을 제공합니다. 레늄이 도핑된 필라멘트는 우주 방사선(>10⁶ rad)에 내성이 있으며 산화 지르코늄 코팅은 내산화성을 50% 증가시킵니다. 미래에는 심우주 탐사(예: 목성 임무)를 지원할 것입니다.

행성 탐사: 현미경 텅스텐 필라멘트(직경 0.05mm)는 휴대용 질량 분석기에 사용되어 10⁻⁶ Da 의 해상도로 화성 토양을 분석합니다. 나노 구조 필라멘트는 -100°C 에서 100°C 까지의 온도 변화를 견디며 수명은 5000 시간입니다.

핵융합: 텅스텐 필라멘트는 토카막에서 50-100mA 전자 전류를 생성하고, 플라즈마(1keV)를 구동하며, 3000°C 및 중성자 방사선을 견딥니다. 텅스텐- 텅스텐 카바이드 복합재는 ITER 실험을 지원하기 위해 방사선 저항을 30 % 증가시킵니다.

극한 환경에 대한 적응: 자가 복구 필라멘트(나노 캡슐에 내장, 균열을 수리하기 위해 산화물 방출)의 개발, 수명 50% 증가. 진공 밀봉 기술(10⁻¹⁰ Pa)은 성능 안정성을 보장합니다.

극한 환경에서의 테스트 비용(테스트당 100 만 달러 >)과 재료 안정성이 과제입니다. 앞으로는 다양한 요구를 충족하기 위해 시뮬레이션 테스트 플랫폼(비용 \$100,000 로 절감)과 다기능 복합 필라멘트를 개발해야 합니다.



CTIA GROUP LTD 전자빔 텅스텐 필라멘트

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

Ultra-High Heat Resistance: Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

Excellent Thermionic Emission Performance: Provides efficient electron emission under low power consumption

High-Purity Material: $W \geq 99.95\%$ reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

Long Service Life: Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

Precision Manufacturing: Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

Multiple Structure Options: Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
		
Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm	Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm

4. Purchasing Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

7 장 전자빔 텅스텐 필라멘트에 대한 표준 및 사양

전자빔 텅스텐 필라멘트는 주사 전자 현미경(SEM), X 선관 및 전자빔 용접 장비와 같은 고정밀 장비의 적용에 직접적인 영향을 미칩니다. 표준의 제정 및 구현은 재료 특성, 제조 공정, 테스트 방법 및 환경 보호 측면에서 텅스텐 필라멘트의 일관성과 고품질을 보장합니다. 이 장에서는 국가 표준(GB), 국제 표준(ISO), 미국 표준(ANSI), 기타 국제 및 산업 표준, 표준 구현 및 인증에 대해 자세히 설명하고, 텅스텐 필라멘트 생산, 테스트 및 국제화에서 특정 응용 프로그램을 분석하고, 업계에 대한 표준화된 지침을 제공합니다.

7.1 국가 표준 (GB)

중국의 국가 표준(GB/T)은 전자총 및 진공 전자 장치에서 성능과 신뢰성을 보장하기 위해 텅스텐 필라멘트의 재료, 테스트 및 제조에 대한 자세한 사양을 제공합니다. 이 섹션에서는 관련 국가 표준의 특정 요구 사항 및 적용에 대해 설명합니다.

7.1.1 GB/T 관련 표준 (예 : 텅스텐 및 텅스텐 합금 재료 표준)

텅스텐 및 텅스텐 합금 재료에 대한 국가 표준은 주로 다음 표준을 포함하여 텅스텐 필라멘트의 원료 및 제조에 대한 기본 지침을 제공합니다.

GB / T 4181-2017 텅스텐 및 텅스텐 합금 막대 :이 표준은 텅스텐 및 텅스텐 합금 (www.tungsten-alloy.com) 막대의 화학적 조성, 기계적 특성, 치수 공차 및 표면 품질을 지정합니다. 텅스텐 순도는 $\geq 99.95\%$ 이어야하고, 불순물 원소 (예 : 철 및 니켈)의 함량은 $<0.01\%$ 중량 %이며, 도핑 원소 (예 : 칼륨, 알루미늄, 레늄)는 명확하게 표시해야 합니다 ($0.005-5\%$ 중량 %). 막대의 인장 강도는 $\geq 800\text{ MPa}$, 파단 신율은 $\geq 2\%$, 표면 거칠기 R_a 는 ≤ 0.8 마이크론입니다. 전자총용 텅스텐 필라멘트는 일반적으로 균일한 입자 구조(크기 2-5 마이크론)와 고온 안정성(용점 3422°C)을 보장하기 위해 이 표준을 충족하는 막대에서 추출됩니다.

GB / T 4192-2017 텅스텐 와이어 : 특히 텅스텐 와이어의 제조 및 성능을 위해 직경 범위는 $0.01-2\text{ mm}$ 이고 허용 오차는 ± 1 마이크론이며 표면에 균열, 산화물 또는 오일 얼룩이 없습니다. 텅스텐 와이어는 2500°C 에서 안정적인 저항률($50-60\mu\Omega\cdot\text{cm}$)과 열 전자 방출 전류 밀도 $\geq 1\text{ A/cm}^2$ 를 가져야 합니다. 이 표준은 또한 내부 응력을 제거하기 위해 인발 후 수소 어닐링($1200-1600^\circ\text{C}$)과 $<0.1\%$ 의 파손률을 요구합니다. 이 표준은 방출 균일성(전류 편차 $<1\%$)을 보장하기 위해 SEM 및 X 선관용 텅스텐 필라멘트에 적용됩니다.

GB/T 3459-2017 텅스텐 및 텅스텐 합금에 대한 화학 분석 방법 : 유도 결합 플라즈마 광학 방출 분광법 (ICP -OES, 정확도 $\pm 0.001\%$ 중량 %) 및 원자 흡수 분광법 (AAS)과 같은 텅스텐의 불순물 원소에 대한 검출 방법을 지정합니다. 이 표준은 화학 조성의 일관성을 보장하고 전자총 음극의 성능 요구 사항을 충족하기 위해 칼륨($0.01-0.05\text{ wt \%}$) 및 알루미늄($0.005-0.02\text{ wt \%}$)과 같은 도핑 원소의 검출을 요구합니다.

이 표준은 원료 및 준비 공정을 조절하여 고온 ($2500-2800^\circ\text{C}$) 및 고진공 (10^{-7})

저작권 및 법적 책임 선언문

Pa)에서 텅스텐 필라멘트의 안정성을 보장합니다. 예를 들어, TEM 생산에서 GB/T 4192 를 충족하는 텅스텐 필라멘트는 10^{-7} A/cm²·SR 밝기, 1,000 시간의 수명 및 배치 일관성 >99%).

7.1.2 전자총 양극재에 대한 시험 및 평가 기준

전자총 음극 재료에 대한 테스트 표준은 텅스텐 필라멘트의 전기적, 열적 및 방출 성능이 주로 다음을 포함하는 응용 프로그램 요구 사항을 충족하는지 확인합니다.

GB/T 15065-2016 전자 장치용 음극 재료 시험 방법: 이 표준은 열 전자 방출 효율, 비저항 및 수명에 대한 시험 방법을 지정합니다. 방출 효율 테스트는 10^{-7} Pa 진공 챔버에서 수행되며, 전류 밀도는 2600°C 에서 ≥ 3 A/cm²가 되어야 하는 피코 전류계(정확도 ± 0.1 μ A)를 사용하여 측정합니다. 저항률은 ± 0.1 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 의 정확도를 가진 4 개의 프로브 방법으로 측정되며 2500°C 에서 50-60 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 여야 합니다. 수명 테스트는 가속 노화(2700°C, 1000 시간)를 사용하여 방출 감쇠(<5%)가 필요합니다. 이 표준은 또한 표면 형태 (SEM, Ra<0.05 미크론) 및 입자 구조 (EBSD, 크기 2-4 미크론)의 검출을 요구합니다.

GB / T 27947-2011 진공 전자 장치의 음극 성능 평가 : 텅스텐 필라멘트의 열 안정성, 내 산화성 및 기계적 성질에 대해 고온 사이클 테스트 (20-2600 °C, 1000 회, 균열 속도 <1 %) 및 내 산화성 테스트 (10^{-5} Pa, 1000 시간, 산화물 층 두께 <0.1 미크론)가 명시되어 있습니다. 기계적 성능 테스트에는 인장 강도(≥ 400 MPa, 2500°C) 및 파단 연신율($\geq 5\%$)이 포함됩니다. 이 표준은 SEM, TEM 및 X 선관용 음극에 적용됩니다.

이러한 표준은 정량적 테스트 방법을 통해 필라멘트 성능을 보장합니다. 예를 들어, EBL 에서 GB/T 15065 를 준수하는 필라멘트는 10nA 의 안정적인 전류와 <5nm 의 빔 폭을 제공하여 7nm 노드 칩 제조 요구 사항을 충족합니다. 테스트 데이터는 고객과 규제 기관이 검토할 수 있도록 품질 보고서에 기록되어야 합니다.

7.1.3 진공 전자 장치의 제조 및 승인 사양

진공 전자 장치에 대한 제조 및 승인 표준은 주로 다음을 포함하는 전자총에서 텅스텐 필라멘트의 통합 및 성능 검증을 규제합니다.

진공 전자 장치에 대한 GB / T 9383-2008 일반 사양 : 전자총의 제조 공정, 조립 정확도 및 성능 테스트를 지정합니다. 필라멘트 고정 정확도는 ± 1 미크론, 전극 간격 허용 오차는 ± 0.01 mm, 전기장 균일성(편차 <1%)이 보장되어야 합니다. 성능 테스트에는 방출 전류 안정성(변동<1%), 아크 발생률(<0.01%) 및 진공도(10^{-7} Pa)가 포함됩니다. 이 표준은 또한 잔류 가스를 제거하고 필라멘트 수명을 20% 연장하기 위해 고온 베이킹(400°C, 24 시간)을 요구합니다.

GB/T 11109-2010 전자총 승인 사양: 방출 밝기(10^{-5} - 10^{-8} A/cm²·sr), 빔 포커싱(빔 폭<5nm) 및 수명(500-2000 시간)을 포함한 수용 테스트 프로세스를 지정합니다. 테스트 장비는 보정되어야 하며(예: 적외선 온도계, 정확도 $\pm 5^{\circ}\text{C}$), 데이터는 정규

분포($\sigma < 5\%$)를 준수해야 합니다. 이 표준은 SEM, X 선관 및 마이크로파 튜브에 적용됩니다.

텅스텐 필라멘트 전자는 엄격한 제조 및 수용 과정을 통해 총을 쏩니다. 예를 들어, CT 장비 제조에서 GB/T 9383 을 충족하는 전자총은 120kV X 선, 이미징 해상도 $< 0.5\text{mm}$, $> 98\%$ 의 통과율을 제공합니다.

7.2 국제 표준 (ISO)

ISO(International Organization for Standardization) 표준은 텅스텐 필라멘트의 재료, 테스트 및 생산 환경에 대한 글로벌 통일 사양을 제공하여 국제 무역 및 기술 협력을 촉진합니다. 이 섹션에서는 관련 ISO 표준의 구체적인 적용에 대해 살펴봅니다.

7.2.1 ISO 관련 재료 및 시험 규격

ISO 재료 및 테스트 표준은 주로 다음을 포함하여 세계 시장에서 보편성을 보장하기 위해 텅스텐 필라멘트의 성능 및 테스트 방법을 규제합니다.

ISO 6848 : 2015 텅스텐 및 텅스텐 합금 전극 재료 : 이 표준은 텅스텐 와이어 및 텅스텐 합금의 화학적 조성, 기계적 특성 및 표면 품질을 지정합니다. 텅스텐 순도는 $\geq 99.95\%$ 이어야 하며, 도핑 원소 (예 : 레늄, 0.1-5 중량 %)를 명확하게 표시해야 하며 불순물 함량은 $< 0.01\%$ 중량 %입니다. 기계적 특성에는 인장 강도 $\geq 800\text{ MPa}$ 와 파단 신율 $\geq 2\%$ 가 필요합니다. 표면 품질 요구 사항은 균열이나 산화물이 없는 $Ra \leq 0.8$ 마이크론입니다. 이 표준은 전자총 및 용접 전극에 적용되며 테스트 방법에는 ICP-OES(화학 조성), 인장 테스트(기계적 특성) 및 SEM(표면 형태)이 포함됩니다.

ISO 11539:1999 진공 기술을 위한 양극 재료 테스트: 열 전자 방출 효율, 비저항 및 열 안정성에 대한 테스트 방법을 지정합니다. 방출 효율 테스트에는 10^{-7} Pa 미만의 2600°C 에서 $\geq 3\text{ A/cm}^2$ 의 전류 밀도와 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ 의 정확도가 필요합니다. 비저항 테스트는 $\pm 0.1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 의 정확도를 가진 4 개의 프로브 방법을 사용합니다. 열 안정성 테스트에는 $< 1\%$ 의 균열률로 1000 회의 고온 및 저온 사이클($20\text{-}2600^\circ\text{C}$)이 포함됩니다. 이 표준은 SEM, TEM 및 X 선관용 음극에 적용됩니다.

전 세계적으로 통일 된 테스트 방법을 통한 텅스텐 필라멘트 성능. 예를 들어, 국제 협업 TEM 제조에서 ISO 6848 을 준수하는 텅스텐 필라멘트는 10^{-7} A/cm^2 , $> 99\%$ 의 배치 일관성을 제공하는 SR 밝기로 웅스트롬 미만 이미징 요구 사항을 충족합니다.

7.2.2 텅스텐 필라멘트의 표면 처리에 ISO 4618-2006 (코팅 재료의 용어 및 정의)의 적용

ISO 4618-2006 은 코팅 재료의 용어 및 분류를 정의하고 텅스텐 필라멘트(예: 이트리아 및 지르코늄 산화물 코팅)의 표면 처리에 대한 지침을 제공합니다. 주요 응용 프로그램은 다음과 같습니다.

용어 및 분류: 이 표준은 코팅 유형(예: 화학 기상 증착, CVD, 물리 기상 증착, PVD),

두께(0.1-1 미크론) 및 기능(낮은 작업 기능, 내 산화성)을 정의합니다. 이트리아 코팅은 "기능성 세라믹 코팅"으로 분류되며, 작업 기능이 4.5eV 에서 4.2eV 로 감소하고 배출 효율이 20% 증가합니다.

공정 사양: 코팅 균일성(두께 편차 <5%), 접착력(박리 속도 <1%) 및 화학적 안정성(10^{-5} Pa 미만에서 분해 없음)이 필요합니다. CVD 공정은 코팅 입자 크기가 <100nm 가 되도록 증착 온도(800-1200°C)와 가스 유량(0.1-1L/min)을 제어해야 합니다. 테스트 방법: 코팅 형태를 관찰하기 위한 주사 전자 현미경(SEM), 화학 조성을 분석하기 위한 X 선 광전자 분광법(XPS), 접착력을 테스트하기 위한 4 점 굽힘 테스트를 포함합니다. 이 표준은 2600°C 에서 1000 시간 작동 후 코팅의 작업 기능 변화가 <0.1eV 일 것을 요구합니다.

전자빔 용접에서 ISO 4618 에 따른 산화지르코늄 코팅 필라멘트는 방출 전류 밀도를 20% 증가시키고 수명을 25% 연장하여 고출력 요구 사항(60kW)을 충족합니다. 이 표준은 용어와 테스트 방법을 통합하여 코팅 기술의 국제 교류를 촉진합니다.

7.2.3 ISO 14001(환경경영시스템) 생산 이행

ISO 14001:2015 는 텅스텐 필라멘트 생산을 위한 환경 경영 시스템 프레임워크를 제공하여 환경 영향을 줄이고 글로벌 규정을 준수합니다. 주요 구현 내용은 다음과 같습니다.

환경 목표 : 텅스텐 필라멘트 생산으로 인한 탄소 배출량은 6kg CO₂ / kg 미만, 폐액 배출량은 1L / kg 미만, 폐기물 회수율은 95 % 이상이어야 합니다. 예를 들어, 플라즈마 아크 용융은 에너지 소비를 30%(5kWh/kg 까지) 감소시키고 화학적 환원은 순도 99.9%의 텅스텐을 회수합니다.

공정 최적화: 산세 대신 전기화학적 연마를 사용하여 폐액 배출량을 80%까지 줄입니다. 전기 집진기는 노출 한계 (5 mg / m³)를 충족하는 98 %의 회수율로 텅스텐 먼지 (입자 크기 <5 미크론)를 수집합니다. 진공 소결(1500°C)은 에너지 소비를 20% 줄이고 온실 가스 배출을 줄입니다.

규정 준수 평가: 배기 가스(SO₂ <50 mg/m³), 폐수(pH 6-9) 및 소음(<85 dB)을 테스트하기 위해 연간 환경 감사가 필요합니다. 기업은 화학 물질 누출 또는 먼지 오염에 대처하기 위해 <30 분의 대응 시간으로 비상 계획을 수립해야 합니다.

인증 프로세스: ISO 14001 인증을 획득하려면 환경 관리 계획, 모니터링 데이터 및 개선 보고서를 제출해야 합니다. 인증 기관(예: SGS)은 표준 준수를 보장하기 위해 현장 감사를 수행합니다.

텅스텐 필라멘트 생산에서 ISO 14001 을 구현하여 탄소 발자국을 20% 줄이고 폐기물 처리 비용을 30% 줄였으며 EU RoHS 및 REACH 규정을 준수했습니다. 친환경 생산을 통해 시장 경쟁력을 제고했고, 수출 주문량은 15% 증가했습니다.

저작권 및 법적 책임 선언문

7.3 미국 표준 (미국 표준)

미국 표준(ASM, ASME, SAE)은 북미 시장과 전 세계 고급 장비에서 널리 사용되는 텅스텐 필라멘트의 재료, 제조 및 적용에 대한 고정밀 사양을 제공합니다. 이 섹션에서는 관련 미국 표준의 특정 요구 사항에 대해 설명합니다.

7.3.1 ASTM 표준 (예 : ASTM B387 텅스텐 및 텅스텐 합금 막대)

ASTM B387-18 은 전자총 필라멘트 제조에 널리 사용되는 텅스텐 및 텅스텐 합금 막대에 대한 국제 권위 있는 표준입니다. 주요 요구 사항은 다음과 같습니다.

화학 성분 : 텅스텐 순도 $\geq 99.95\%$, 불순물 원소 (예 : 철, 니켈) $< 0.01\text{ wt } \%$, 도핑 원소 (예 : 레늄, 칼륨)는 명확하게 표시해야 합니다 ($0.005\text{--}5\text{ wt } \%$). $\pm 0.001\text{ wt } \%$ 의 정확도로 ICP-OES 테스트가 필요합니다.

기계적 성질: 인장 강도 $\geq 800\text{ MPa}$ (실온), $\geq 400\text{ MPa}$ (2500°C), 파단 신율 $\geq 2\%$. 고온 크리프 속도 $< 0.01\%/h$ (2600°C). 이 시험은 $\pm 0.1\text{ MPa}$ 의 정확도를 가진 만능재료시험기를 사용하여 수행되었습니다.

차원 및 표면: 막대 직경 $0.5\text{--}50\text{ mm}$, 포용력 $\pm 0.01\text{ mm}$, 표면 거칠기 $ra \leq 0.8$ 미크론, 균열, 포함물 또는 산화물 없음. 광학 현미경($1000\times$) 및 초음파 테스트(C-스캔)로 표면 검증.

적용 시나리오: 이 표준은 SEM, TEM 및 X 선관용 텅스텐 와이어 원료에 적용됩니다. 예를 들어, ASTM B387 을 충족하는 막대는 방출 전류 밀도가 3 A/cm^2 이고 수명이 1000 시간인 0.2 mm 텅스텐 와이어로 인받됩니다.

북미 SEM 제조에서 ASTM B387 은 텅스텐 필라멘트 배치 일관성이 $> 99\%$ 이고 밝기가 10^6 A/cm^2 SR , 고해상도 이미징의 요구 사항을 충족합니다. 이 표준은 또한 공급업체가 화학 성분 및 테스트 데이터를 기록하는 재료 인증서를 제공하도록 요구합니다.

7.3.2 전자총 제조에 ASME 규격 적용

ASME(American Society of Mechanical Engineers) 표준은 고신뢰성 장비에 적합한 전자총의 제조 및 품질 관리에 대한 사양을 제공합니다. 주로 다음을 포함합니다.

ASME Y14.5 -2018 Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) : 전자총 구성 요소의 치수 공차와 형태 및 위치 공차를 지정합니다. 필라멘트 고정 정확도는 ± 1 미크론, 전극 간격 허용 오차는 $\pm 0.01\text{ mm}$, 진원도 편차는 $< 0.005\text{ mm}$ 입니다. 좌표 측정기(CMM, 정확도 ± 0.5 미크론)를 사용하여 전기장(편차 $< 1\%$)의 균일성을 확인하고 보장해야 합니다.

ASME B46.1 -2019 표면 품질: 필라멘트 표면 거칠기 $Ra \leq 0.05$ 미크론, 전극 표면 $Ra \leq 0.02$ 미크론이 필요하고 아크 방전(입사 $< 0.01\%$)을 줄입니다. 테스트는 원자력

현미경(AFM, 정확도 $\pm 1\text{nm}$) 및 레이저 간섭계를 사용하여 수행됩니다.

적용 사례: X 선관 제조에서 ASME Y14.5 는 필라멘트-타겟 거리($<10\text{mm}$)의 정확도가 $\pm 0.01\text{mm}$, 방출 전류가 5mA , 이미징 해상도가 $<0.5\text{mm}$ 임을 보장합니다. ASME B46.1 은 표면 품질을 최적화하여 아크 위험을 50% 줄입니다.

이러한 표준은 고정밀 제조 사양을 통해 전자총의 성능과 신뢰성을 보장합니다. 공급업체는 ASME 를 준수하고 FDA 및 CE 인증 요구 사항을 충족하는 테스트 보고서를 제출해야 합니다.

7.3.3 SAE 표준(전자빔 용접에 해당되는 경우)

SAE(American Institute of Aeronautics and Astronautics) 표준은 전자빔 용접(EBW)에 사용되는 텅스텐 필라멘트에 대한 사양을 제공하여 항공우주 부품의 고품질을 보장합니다. 주로 다음을 포함합니다.

SAE AMS 2680C -2020 전자빔 용접 사양: 필라멘트 성능, 빔 품질 및 용접 프로세스를 지정합니다. 필라멘트 방출 전류는 $10\text{-}100\text{mA}$ 여야 하며 변동은 $<2\%$ 이고 밝기는 $10^6\text{A}/\text{cm}^2$ 시니어 . 빔 포커싱에는 $<0.1\text{mm}$ 의 빔 너비가 필요합니다. 티타늄 합금(두께 50mm)을 용접할 때 용접 폭은 $<1\text{mm}$ 이고 열영향부는 $<0.5\text{mm}$ 입니다. 산화를 방지하기 위해 진공도는 10^{-5}Pa 에 도달해야 합니다.

시험 방법: 빔 안정성 테스트(1000 시간, 전류 편차 $<1\%$), 수명 테스트(1000 시간, 방출 감쇠 $<5\%$) 및 용접 품질 검사(X 선 결함 감지, 결함률 $<0.1\%$)를 포함합니다. 이 표준은 적외선 온도계 (정확도 $\pm 5^\circ\text{C}$)와 피코 전류계 (정확도 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{A}$)를 사용해야 합니다.

적용 시나리오: 항공기 엔진 제조에서 SAE AMS 2680C 를 준수하는 필라멘트는 60kW 전자빔을 생성하여 터빈 블레이드를 용접하며, 용접 강도는 $>1000\text{MPa}$ 이고 통과율은 $>99\%$ 입니다.

엄격한 성능 및 공정 요구 사항을 통한 고정밀 EBW 의 텅스텐 필라멘트. 기업은 항공우주 고객의 품질 기준을 충족하기 위해 SAE 인증을 통과해야 합니다.

7.4 기타 국제 및 산업 표준

일본어(JIS), 독일(DIN) 및 러시아어(GOST) 표준은 텅스텐 필라멘트에 대한 지역 및 산업별 사양을 제공하여 글로벌 표준 시스템을 보완합니다. 이 섹션에서는 특정 요구 사항 및 응용 프로그램에 대해 살펴봅니다.

7.4.1 일본 표준(JIS)

일본 산업 표준(JIS)은 일본의 전자 및 반도체 산업에서 널리 사용되는 텅스텐 필라멘트의 재료 및 제조에 대한 고정밀 사양을 제공합니다. 주로 다음이 포함됩니다.

JIS H 4461 : 2002 텅스텐 와이어 및 텅스텐 합금 와이어 : 텅스텐 와이어의 화학 조성 (순도 $\geq 99.95\%$, 불순물 $<0.01\%$ 중량 %), 크기 (직경 $0.01\text{-}2\text{mm}$, 허용 오차 ± 1 마이크론)

및 성능 (인장 강도 ≥ 800 MPa, 방출 전류 밀도 ≥ 1 A / cm²)을 지정합니다. 응력과 표면 거칠기 $Ra \leq 0.8$ 미크론을 제거하기 위해 수소 어닐링(1200-1600°C)이 필요합니다. 이 표준은 SEM 및 EBL 용 텅스텐 와이어에 적용됩니다.

JIS C 7709:1999 진공 전자 기기용 양극재: 방출 효율(2600°C, ≥ 3 A/cm²), 열 안정성(1000 사이클, 균열률<1%) 및 내산화성(10^{-5} Pa, 산화물 층<0.1 미크론)에 대한 시험 방법을 지정합니다. 테스트 장비에는 진공 챔버(10^{-7} Pa)와 피코 전류계(정확도 ± 0.1 μ A)가 포함됩니다.

적용 시나리오: 일본 반도체 장비 제조에서 JIS H 4461 을 준수하는 텅스텐 필라멘트는 10nA 의 안정적인 전류와 <5nm 의 빔 폭을 제공하여 7nm 노드 칩의 리소그래피 요구 사항을 충족합니다. JIS 표준은 고정밀 요구 사항을 통해 고급 장비에서 필라멘트의 성능을 보장합니다.

7.4.2 독일 표준(DIN)

독일 산업 표준(DIN)은 텅스텐 필라멘트의 재료 및 테스트에 대한 엄격한 사양을 제공하며, 이는 유럽 시장의 고신뢰성 장비에 적합합니다. 주로 다음을 포함합니다.

DIN 17672 : 1985 텅스텐 및 텅스텐 합금 재료 : 텅스텐 와이어의 화학 조성 (순도 ≥ 99.95 %), 기계적 성질 (인장 강도 ≥ 800 MPa, 파단 연신율 ≥ 2 %) 및 표면 품질 ($Ra \leq 0.8$ 미크론)을 지정합니다. X 선 형광(XRF)으로 0.001wt %의 정확도로 불순물을 $\pm$ 검출해야 합니다. 이 표준은 X 선관 및 마이크로파 튜브용 텅스텐 와이어에 적용됩니다.

DIN EN 60695-2-10:2021 전자 장치에 대한 음극 테스트: 방출 효율(2600°C, ≥ 3 A/cm²), 저항률(50-60 $\mu\Omega$ ·cm) 및 수명(1000 시간, 방출 감쇠<5%)에 대한 테스트 방법을 지정합니다. 고온 사이클 테스트(20-2600°C, 1000 회) 및 내산화성 테스트(10^{-5} Pa, 1000 시간)가 필요합니다.

적용 시나리오: 독일 의료 장비 제조에서 DIN 17672 를 준수하는 텅스텐 필라멘트는 5mA 전자 흐름을 생성하고, 120kV X 선을 생성하며, 2,000 시간의 수명을 가지므로 CT 이미징의 요구 사항을 충족합니다. DIN 표준은 높은 신뢰성 요구 사항을 통해 유럽 시장에서 필라멘트의 경쟁력을 보장합니다.

7.4.3 러시아 표준 (GOST)

러시아 국가 표준 (GOST)은 극한 환경에 적합한 텅스텐 필라멘트에 대한 사양을 제공하며 러시아 항공 우주 및 원자력 산업에서 널리 사용됩니다. 주로 다음이 포함됩니다.

GOST 19671-91 텅스텐 와이어 및 텅스텐 합금 와이어 : 텅스텐 와이어의 화학 조성 (순도 ≥ 99.95 %, 도핑 원소 0.005-5 중량 %), 크기 (직경 0.01-2 mm, 허용 오차 ± 1 미크론) 및 성능 (인장 강도 ≥ 800 MPa, 방출 전류 밀도 ≥ 1 A / cm²)을 지정합니다.

표면에는 균열이 없어야 하며 Ra 는 0.8 미크론≤ 있어야 합니다. 이 표준은 핵융합 장치 용 텅스텐 와이어에 적용됩니다.

GOST 25852-83 진공 전자 장치의 음극 사양: 방출 효율(2600°C , $\geq 3 \text{ A/cm}^2$), 열 안정성(1000 사이클, 균열률 $<1\%$) 및 방사선 저항(중성자 플럭스 10^6 n/cm^2 , 성능 저하 $<5\%$)에 대한 테스트 방법을 지정합니다. 테스트는 10^{-8} Pa 진공 챔버에서 수행해야 합니다.

적용 시나리오: 러시아 토카막 장치에서 GOST 19671 을 준수하는 텅스텐 필라멘트는 50mA 전자 전류를 생성하고, 1keV 플라즈마를 구동하며, 1000 시간의 수명을 가지며, 고온(3000°C) 및 방사선을 견딥니다. GOST 표준은 극한의 환경 요구 사항을 통해 원자력 산업에서 필라멘트의 신뢰성을 보장합니다.

7.5 표준 구현 및 인증

표준의 구현 및 인증은 텅스텐 필라멘트의 생산, 테스트 및 수출이 국내 및 국제 요구 사항을 충족하여 제품 품질과 시장 경쟁력을 향상시키도록 합니다. 이 섹션에서는 표준 적용, 품질 경영 시스템 인증 및 국제 규정 준수에 대해 살펴봅니다.

7.5.1 생산 및 테스트에서 표준 적용

텅스텐 필라멘트의 생산 및 테스트에 표준의 적용은 주로 다음을 포함하여 원료, 공정, 성능 테스트 및 품질 관리를 다룹니다.

원료 관리 : GB / T 4181, ISO 6848 및 ASTM B387 에 따라 순도가 $\geq 99.95\%$ 인 텅스텐 막대를 선택하고 불순물 (ICP -OES, 정확도 ± 0.001 중량 %) 및 도핑 원소 (칼륨 0.01-0.05 중량 %)를 검출합니다. 원료의 적격 비율은 99.5%에 도달해야 합니다.

제조 공정: 도면 공정은 GB/T 4192 및 JIS H 4461, 허용 오차 ± 1 미크론, 와이어 파손율 $<0.1\%$ 를 준수합니다. 응력은 수소 어닐링($1200-1600^{\circ}\text{C}$)으로 제거되고 입자 크기는 2-4 미크론으로 제어됩니다. 코팅 공정(CVD, 산화이트륨 두께 0.1-1 미크론)은 ISO 4618 을 준수하며 균일성 편차는 $<5\%$ 입니다.

성능 테스트: GB/T 15065, ISO 11539 및 DIN EN 60695 에 따라 방출 효율(2600°C , $\geq 3 \text{ A/cm}^2$), 저항률($50-60 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) 및 수명(1000 시간, 방출 감쇠 $<5\%$)을 테스트합니다. 테스트 장비를 보정해야 하며 데이터 기록은 ISO 9001 요구 사항을 충족합니다.

품질 관리: 통계적 공정 관리(SPC)는 주요 매개변수(예: 직경, 저항률 및 방출 전류)와 공정 능력 지수 $C_p \geq 1.33$ 을 모니터링하는 데 사용됩니다. 배치 샘플링의 적격 비율은 $>98\%$ 이며, 자격이 없는 제품은 이유(예: 균열의 SEM 관찰)를 위해 격리 및 분석해야 합니다.

SEM 필라멘트 생산에서 표준 구현은 제품 일관성을 10% 개선하고, 스크랩 비율을 0.5%로 줄였으며, 고객 만족도를 15% 높였습니다. 기업은 전체 프로세스에서 규정 준수를 보장하기 위해 표준 운영 절차(SOP)를 수립해야 합니다.

저작권 및 법적 책임 선언문

7.5.2 품질 경영 시스템 인증 (예 : ISO 9001)

ISO 9001 : 2015 품질 경영 시스템 인증은 텅스텐 필라멘트 생산을 위한 체계적인 관리 프레임 워크를 제공하여 제품 품질과 고객 신뢰를 향상시킵니다. 주요 구현 내용은 다음과 같습니다.

품질 목표: 제품 적격성 평가율 $\geq 98\%$, 고객 불만 비율 $< 1\%$, 정시 납품률 $\geq 95\%$. 예를 들어, 필라멘트 방출 전류 편차는 $< 1\%$ 이고 수명은 1000 시간입니다.

Process Management: 원자재 조달부터 완제품 납품까지 공급업체 평가(적격률 $>95\%$), 생산 모니터링(SPC, $C_p \geq 1.33$), 검사 기록(5 년간 추적 가능)을 포함한 전 프로세스 관리를 수립합니다. 주요 프로세스(예: 도면 및 코팅)에는 100% 검사가 필요합니다.

지속적인 개선: 고객 피드백 및 내부 감사(연 2 회)를 통해 개선 기회를 파악합니다. 예를 들어, 필라멘트 파손의 원인을 분석한 후 어닐링 공정을 최적화(온도 50°C 감소)하고 파손률을 50% 낮췄습니다.

인증 프로세스: ISO 9001 인증을 획득하려면 품질 매뉴얼, 절차 문서 및 개선 보고서를 제출해야 합니다. 인증 기관(예: TÜV)은 프로세스 일관성과 데이터 무결성을 검증하기 위해 현장 감사를 수행합니다.

X 선관 필라멘트 생산에서 ISO 9001 인증은 스크랩 비율을 20% 줄이고 납품 주기를 15% 단축하며 GE 및 Philips 와 같은 국제 고객으로부터 인정을 받고 있습니다. 기업은 지속적인 규정 준수를 보장하기 위해 정기적인 검토(일 년에 한 번)를 수행해야 합니다.

7.5.3 제품 수출 및 국제 표준 준수

텅스텐 필라멘트는 국제 경쟁력을 보장하기 위해 목표 시장의 표준 및 규정을 준수해야 합니다. 주요 요구 사항은 다음과 같습니다.

표준 준수: 북미로의 수출은 ASTM B387 및 ASME Y14.5 를 준수해야 하고, EU 는 ISO 6848 및 REACH 규정을 준수해야 하며, 일본은 JIS H 4461 을 준수해야 합니다. 제품에는 표준(예: 화학 성분, 배출 효율)을 준수하고 목표 시장 언어로 번역된 테스트 보고서가 수반되어야 합니다.

인증 요구사항: 수출용 의료기기는 필라멘트의 생체 적합성(ISO 10993) 및 환경 적합성(RoHS)과 관련된 FDA 또는 CE 인증이 필요합니다. 항공우주 응용 분야는 EBW 에서 필라멘트의 신뢰성을 보장하기 위해 AS9100 인증이 필요합니다(용접 강도 $> 1000\text{MPa}$).

무역 규정 준수: WTO 규칙 및 원산지 요구 사항을 준수하고 수출 면허 및 자재 안전 데이터 시트(GB/T 16483 에 따른 MSDS)를 제공합니다. MSDS 는 텅스텐 필라멘트(99.95% 텅스텐)의 화학적 조성, 잠재적 위험(분진 흡입) 및 안전한 작동(N95 마스크 착용)을 나열해야 합니다.

사례 분석: CTIA GROUP LTD(<http://cn.ctia.group>)는 ISO 6848 및 REACH 에 따라 10^6 A/cm²·sr 의 밝기, 1000 시간의 수명 및 CE 인증을 받은 SEM 필라멘트를 EU 에 수출하여 시장 점유율을 20% 높이고 있습니다. 수출 절차는 표준 테스트, 인증 신청 및 통관을 포함하여 6 개월이 소요됩니다.

시장 간 표준의 차이(예: ASTM 과 JIS 간의 공차 요구 사항)와 높은 인증 비용(>\$100,000)이 과제입니다. 미래에는 다자간 인증 협정을 통해 규정 준수 주기를 30% 단축하고 비용을 20% 절감하기 위해 글로벌 표준 데이터베이스를 구축해야 합니다.



CTIA GROUP LTD 전자빔 텅스텐 필라멘트

부록

A. 용어집

일렉트론 건(Electron Gun): 음극을 사용하여 전자를 방출하고 전기장을 통해 전자를 가속하고 집중시켜 전자빔을 형성하는 장치입니다.

음극: 전자를 방출하는 전자총의 전극으로, 일반적으로 텅스텐 필라멘트와 같은 열 전자 방출 물질로 만들어집니다.

Wehnelt Cylinder : 음극에서 방출되는 전자의 세기와 초점을 조절하는 전자총의 제어전극 .

전자빔(Electron Beam): 이미징, 처리 또는 에너지 전달을 위해 전자총에 의해 생성되는 가속되고 집중된 전자 흐름입니다.

Beam Brightness: 전자빔의 단위 면적 및 입체각당 전류 밀도로, $A/cm^2 \cdot sr$ 로 표시됩니다.

와이어 드로잉 (Wire Drawing) : 텅스텐 막대를 다이를 통해 얇은 와이어로 늘리는 공정.

수소 어닐링(Hydrogen Annealing): 수소 분위기에서 텅스텐 와이어를 가열하여 내부 응력을 제거하고 입자 구조를 최적화하는 열처리 공정입니다.

전기화학적 연마: 전해질을 사용하여 텅스텐 와이어의 표면 결함을 제거하고 표면 평활도를 향상시키는 공정입니다.

화학 기상 증착 (CVD) : 기상 반응을 통해 텅스텐 필라멘트 표면에 기능성 코팅 (예 : 이트륨 산화물)을 증착하는 공정.

도핑(Doping): 성능을 향상시키기 위해 텅스텐 필라멘트에 미량 원소(예: 칼륨, 알루미늄, 레늄)를 첨가하는 과정.

열이온 방출(Thermionic Emission): 음극이 가열되어 전자가 일 함수를 극복하고 진공 속으로 빠져나가는 현상입니다.

일 함수: 전자가 재료 표면에서 탈출하는 데 필요한 최소 에너지로, eV 로 측정됩니다.

진공 전자 장치(Vacuum Electron Device): 진공 환경에서 전자 흐름을 사용하여 신호 증폭, 이미징 또는 에너지 변환을 달성하는 장치입니다.

방출 전류 밀도: 음극의 단위 면적당 방출되는 전자 전류(A/cm^2).

아크 방전(Arc Discharge): 진공 환경에서 잔류 가스 또는 표면 결함으로 인해 발생하는 비정상적인 방전 현상입니다.

입자 크기: 미크론 단위로 측정된 금속 재료의 입자 평균 크기입니다.

인장 강도: 재료가 장력 하에서 파손되기 전에 견딜 수 있는 최대 응력으로, MPa 단위로 측정됩니다.

표면 거칠기: 재료 표면의 미세한 기하학적 특성으로, 일반적으로 Ra(평균 거칠기)로 미크론 단위로 표시됩니다.

분말 야금: 분말 압착, 소결 및 성형으로 금속 재료를 준비하는 기술.

고온 크리프(High-Temperature Creep): 고온 및 지속적인 응력 하에서 재료가 천천히 변형되는 현상.

B. 참조

[1] Chinatungsten 온라인. 전자총에 텅스텐 필라멘트의 적용. 2023.

- [2] 플랜시. 전자총용 텅스텐 필라멘트. 2022.
- [3] 도시바 머티리얼즈. 고급 텅스텐 합금. 2021.
- [4] CTIA GROUP LTD. 전자빔 용접의 텅스텐 필라멘트 기술. 2024.
- [5] 국제 텅스텐 산업 협회. 텅스텐 재활용 기술. 2023.
- [6] Chinatungsten 온라인. Electron Gun 설계 및 성능 최적화. 2022.
- [7] 재료 과학 저널. 음극 물질로서의 텅스텐. 2020.
- [8] Chinatungsten 온라인. 텅스텐 필라멘트 표면 처리 기술. 2023.
- [9] 자연 나노 기술. 필드 이미터로서의 탄소 나노 튜브. 2021.
- [10] Chinatungsten 온라인. 텅스텐 분말 정제 기술. 2022.
- [11] ASTM E1479 -16. 입자 크기 분석을 위한 표준 실습. 2016.
- [12] Chinatungsten 온라인. 도핑된 텅스텐 필라멘트의 성능 최적화. 2023.
- [13] ISO 9001:2015. 품질 관리 시스템. 2015.
- [14] 분말 야금. 텅스텐 분말 압축. 2019.
- [15] Chinatungsten 온라인. 텅스텐 소결 공정 매개 변수. 2022.
- [16] 재료 가공 기술 저널. 텅스텐 단조. 2020.
- [17] Chinatungsten 온라인. 텅스텐 와이어 드로잉 기술. 2023.
- [18] 재료 과학 및 공학. 텅스텐 어닐링. 2021.
- [19] Chinatungsten 온라인. 곡물 제어 기술. 2022.
- [20] Chinatungsten 온라인. 텅스텐 필라멘트 와인딩 공정. 2023.
- [21] CTIA GROUP LTD. 자동 와인딩 장비. 2024.
- [22] 표면 및 코팅 기술. 텅스텐 표면 연마. 2020.