

바륨 텅스텐 음극 백과사전

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA 그룹 소개

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

목차

머리말

목적 과 의의
장부 구조 개요
대상

1 장: 바륨 텅스텐 음극 개요

- 1.1 바륨 텅스텐 음극의 정의 및 기본 개념
 - 1.1.1 바륨 텅스텐 음극의 정의
 - 1.1.2 열음극과 냉음극의 비교
 - 1.1.3 바륨 텅스텐 음극과 다른 열 음극의 비교
- 1.2 바륨 텅스텐 음극의 역사적 발전
 - 1.2.1 바륨 텅스텐 음극의 기원과 기술적 진화
 - 1.2.2 주요 이정표 및 기술 혁신
- 1.3 바륨 텅스텐 음극의 응용 분야
 - 1.3.1 진공 전자 장치
 - 1.3.2 산업 및 과학 연구에서의 구체적인 용도
 - 1.3.3 교차 도메인 잠재력

2 장: 바륨 텅스텐 음극의 재료 과학

- 2.1 바륨 텅스텐 음극의 재료 구성
 - 2.1.1 다공성 텅스텐 매트릭스의 화학적 및 물리적 특성
 - 2.1.2 바륨 화합물의 특성 및 비율
 - 2.1.3 첨가제가 배출 성능에 미치는 영향
- 2.2 바륨 텅스텐 음극의 제조 공정
 - 2.2.1 다공성 텅스텐 매트릭스의 제조: 분말 야금 및 기공 제어
 - 2.2.3 바륨 화합물의 함침 공정: 용액 준비 및 함침 매개변수
- 2.3 바륨 텅스텐 음극의 미세 구조 및 특성
 - 2.3.1 다공성 텅스텐 매트릭스의 다공성 및 구조 분석
 - 2.3.2 바륨 활성층의 표면 형태와 방출 성능의 관계

3 장: 작동 원리 및 발사 메커니즘

- 3.1 열이온 방출 이론
 - 3.1.1 리처드슨-더쉬먼 방정식
 - 3.1.2 쇼트키 효과 및 전계 강화 방출
 - 3.1.3 양자역학 관점
- 3.2 바륨 텅스텐 음극의 방출 특성
 - 3.2.1 저전력 기능의 형성 메커니즘
 - 3.2.2 활성층의 동적 거동 및 열 안정성
- 3.3 바륨 텅스텐 음극의 방출 성능에 영향을 미치는 요인
 - 3.3.1 근무 환경

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3.3.2 노화 및 독성 영향의 메커니즘

3.3.3 고장 모드 분석

4 장: 바륨 텅스텐 음극의 제조 및 가공 기술

4.1 다공성 텅스텐 매트릭스 몰딩

4.1.1 텅스텐 분말의 스크리닝 및 압착 공정

4.1.2 다공성 및 기계적 강도의 최적화

4.2 바륨 화합물의 함침 및 활성화

4.2.1 함침 공정: 바륨 화합물 제형 및 함침 조건

4.2.2 활성화 공정: 열처리 및 표면 활성화층 형성

4.3 바륨 텅스텐 음극의 품질 관리 및 테스트

4.3.1 전송 성능을 위한 테스트 방법

4.3.2 일관성 및 신뢰성에 대한 평가 기준

4.3.3 고장 분석 및 개선

5 장: 바륨 텅스텐 음극의 적용

5.1 진공 전자 장치

5.1.1 전자레인지 튜브

5.1.1.1 마그네트론: 레이더 및 마이크로파 가열 장비에 사용

5.1.1.2 TWT: 고주파 통신 및 위성 증폭기

5.1.1.3 클라이스트론 튜브: 고출력 레이더 및 입자 가속기

5.1.2 엑스레이 튜브

5.1.2.1 의료 영상 장비

5.1.2.2 산업용 비파괴 검사

5.1.3 기타 진공 장치

5.2 과학 기기

5.2.1 전자현미경

5.2.2 질량 분석기: 고감도 이온원

5.2.3 표면 분석 장비

5.3 산업 및 통신 응용

5.3.1 레이더 시스템

5.3.2 통신 장비

5.3.3 진공 스위치 튜브

5.4 항공우주 및 방위

5.4.1 우주 전자 장치

5.4.2 전자 대책 시스템

5.5 새로운 및 교차 도메인 애플리케이션

5.5.1 테라헤르츠파 발생기

5.5.2 이온 추진기

5.5.3 고에너지 물리학 실험

5.5.4 생물의학 응용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

6 장: 바륨 텅스텐 음극 성능의 최적화 및 개선

- 6.1 발사 효율성 향상
 - 6.1.1 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공 구조 최적화
 - 6.1.2 새로운 바륨 화합물의 제형 및 도핑 기술
 - 6.1.3 나노기술 응용
- 6.2 서비스 수명 연장
 - 6.2.1 중독 방지 과정
 - 6.2.2 열 안정성 및 기계적 강도 향상
- 6.3 환경 적응성
 - 6.3.1 극한 환경에서의 성능
 - 6.3.2 저전력 소비 및 녹색 제조
- 6.4 지능형 설계

7 장: 도전 과 향후 발전

- 7.1 현재 기술적 병목 현상
 - 7.1.1 재료비 및 준비 복잡성
 - 7.1.2 성능 일관성 및 대량 생산 과제
 - 7.1.3 공급망 문제
- 7.2 신흥 기술 경쟁
 - 7.2.1 냉음극 기술
 - 7.2.2 기타 열 음극
 - 7.2.3 바륨 텅스텐 음극의 경쟁 우위 분석
- 7.3 향후 연구 방향
 - 7.3.1 새로운 재료 및 공정 탐색
 - 7.3.2 지능형 및 적응형 음극 설계
 - 7.3.3 학제간 연구

8 장 : 바륨 텅스텐 음극 표준

- 8.1 국제 및 산업 표준
 - 8.1.1 바륨 텅스텐 음극 관련 국제 표준
 - 8.1.2 바륨 텅스텐 음극과 관련된 산업 표준
- 8.2 바륨 텅스텐 음극 성능 매개변수 사양
 - 8.2.1 주요 매개변수에 대한 표준화 요구 사항
 - 8.2.2 테스트 방법 및 검증 프로세스
- 8.3 바륨 텅스텐 음극 제조 및 품질 관리 표준
 - 8.3.1 재료 순도 및 제조 공정에 대한 사양
 - 8.3.2 일관성 및 추적성 요구 사항
- 8.4 환경 및 안전 표준
 - 8.4.1 바륨 화합물의 안전 처리 및 환경 보호 사양
 - 8.4.2 생산 및 사용 시 규정 준수 지침
 - 8.4.3 폐기물 처리 사양

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부록

A. 용어집

B. 참고문헌

C. 테스트 표준 및 사양

국제 표준

산업 표준

중국 국가 및 산업 표준

D. 공급업체 및 자원

CTIA GROUP LTD 소개

CTIA GROUP LTD 바륨 텅스텐 전극 관련 웹사이트

E. 색인

키워드 색인

주제 색인



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

머리말

목적 과 의의

바륨 텅스텐 음극은 효율적인 열 방출 재료로서 현대 전자 기술 분야에서 중추적인 위치를 차지하고 있습니다. 낮은 일 함수, 높은 방출 전류 밀도, 우수한 열 안정성 및 긴 수명과 같은 핵심 특성은 다공성 텅스텐 매트릭스와 바륨-칼슘 알루미늄네이트와 같은 바륨 화합물의 독창적인 조합에서 비롯됩니다. 이 독특한 설계로 인해 바륨 텅스텐 음극은 진공 전자 장치(예: 마이크로파 튜브, X 선 튜브 및 광전자 증배관)에 이상적이며 항공 우주, 의료 영상, 통신 시스템, 과학 기기 및 고에너지 물리 실험과 같은 최첨단 분야에서 널리 사용됩니다. 바륨 텅스텐 음극은 진공 전자 기술의 지속적인 발전을 촉진할 뿐만 아니라 테라헤르츠파 발생기 및 이온 추진기와 같은 새로운 기술에 대한 잠재적인 지원을 제공합니다.

이 책은 재료 과학, 제조 공정, 작동 원리, 응용 분야 및 향후 개발 동향을 다루는 바륨 텅스텐 음극에 대한 포괄적이고 체계적인 참고 자료를 독자에게 제공하기 위해 고안되었습니다. 우리는 바륨-텅스텐 음극의 기술적 세부 사항을 탐구하는 동시에 학제 간 분야의 혁신 잠재력을 탐구함으로써 고성능 전자 제품에서 중요한 역할을 밝히기를 희망합니다.

장부 구조 개요

이 책은 기초에서 적용, 이론에서 실습, 논리적 엄격함, 계층별로 명확한 구조를 가지고 있으며 8 개의 장과 부록으로 나누어 바륨 텅스텐 음극의 모든 측면을 완전히 다루고 있습니다.

- 1 장: 바륨 텅스텐 음극 개요

이 장은 바륨과 텅스텐 음극의 정의, 기본 개념 및 비교와 다른 열음극과 냉음극과의 비교를 소개하고 기원에서 현대 기술까지 진화의 역사적 맥락을 정리하고 진공 전자 장치, 산업 및 과학 연구에서의 광범위한 응용 분야를 설명합니다.

- 2 장: 바륨 텅스텐 음극의 재료 과학

이 장에서는 바륨 텅스텐 음극의 재료 조성 및 제조 공정을 탐구하고 다공성 텅스텐 매트릭스, 바륨 화합물 및 첨가제의 화학적 및 물리적 특성을 분석하며 미세 구조(예: 다공성 및 표면 형태)와 방출 특성 사이의 내부 관계를 밝힙니다.

- 3 장: 작동 원리 및 배출 메커니즘

이 장에서는 열이온 방출 이론에서 시작하여 Richardson-Dushman 방정식, 쇼트키 효과 및 양자역학을 결합하여 바륨 텅스텐 음극의 낮은 일 함수의 형성 메커니즘, 활성층의 동적 거동 및 방출 성능에 영향을 미치는 환경 요인을 자세히 분석합니다.

- 4 장: 바륨 텅스텐 음극의 제조 및 가공 기술

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이 장에서는 다공성 텅스텐 매트릭스의 분말 야금 성형, 바륨 화합물의 합침 및 활성화 공정, 배출 특성의 테스트 및 품질 관리 방법을 다루는 제조 공정에 중점을 두고 산업 생산에 대한 기술 참고 자료를 제공합니다.

• **5 장: 바륨 텅스텐 음극의 적용**

이 장에서는 진공 전자 장치(예: 마이크로파관, X 선관), 과학 기기(예: 전자현미경, 질량 분석기), 산업 통신, 항공 우주 및 신항 분야에서 바륨 텅스텐 음극의 특정 응용 분야를 체계적으로 분류하여 교차 분야 잠재력을 강조합니다.

• **6 장: 바륨 텅스텐 음극 성능의 최적화 및 개선**

이 장에서는 새로운 바륨 화합물 제제, 나노기술 응용 및 지능형 설계와 같은 최첨단 방법을 포함하여 배출 효율을 개선하고 서비스 수명을 연장하며 환경 적응성을 강화하기 위한 전략에 대해 설명합니다.

• **7 장: 과제와 향후 발전**

이 장에서는 현재의 기술적 병목 현상(재료비, 성능 일관성 등)과 냉음극 등 경쟁 기술의 과제를 분석하고, 신소재, 신공정, 학제간 연구(인공지능, 양자컴퓨팅 등)의 미래 방향을 내다본다.

• **8 장 : 바륨 텅스텐 음극 표준**

이 장에서는 바륨 및 텅스텐 음극과 관련된 국제 및 산업 표준을 소개하고 성능 매개변수 사양, 테스트 방법, 제조 공정 및 환경 안전 요구 사항을 다루고 표준화된 생산을 위한 지침을 제공합니다.

• **부록 및 색인**

부록에는 용어집, 참고 자료, 테스트 표준, 성능 데이터 시트 및 공급업체 정보(예: CTIA GROUP LTD)가 포함되어 있어 쉽게 참조하고 심층적으로 연구할 수 있습니다. 인덱싱 섹션은 빠른 콘텐츠 타겟팅을 위한 키워드 및 주제 인덱스를 제공합니다.

이 책의 내용 디자인은 기초 과학에 대한 심도 있는 논의와 공학 응용에 대한 자세한 지침을 통해 이론과 실제의 결합에 중점을 두어 독자들에게 포괄적이고 실용적인 지식 체계를 제공하는 것을 목표로 합니다.

대상

이 책은 다음을 포함하되 이에 국한되지 않는 광범위한 독자를 대상으로 합니다.

- **재료 과학자:** 바륨 텅스텐 음극의 재료 구성, 미세 구조 및 제조 공정에 주의를 기울이고 새로운 재료 및 공정의 돌파구를 모색합니다.
- **전자 엔지니어:** 진공 전자 장치의 설계 및 개발에 종사하며 바륨 텅스텐 음극의 작동 원리 및 제조 기술을 숙지 해야 합니다.
- **진공 전자 기술 연구원:** 열 음극의 성능 최적화, 응용 확장 및 표준화 연구에 중점을 둡니다.
- **산업 기술자:** 마이크로파 튜브, X 선관, 레이더 시스템 및 기타 장비의 생산 및 유지 보수에 바륨 텅스텐 음극을 적용합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **학제 간 혁신가:** 테라헤르츠 기술, 이온 추진기, 생물 의학 등과 같은 신흥 분야에서 바륨 텅스텐 음극의 잠재력을 탐구합니다.
- **대학의 교사 및 학생:** 이 책은 재료과학, 전자공학, 진공전자기술 등의 전공을 위한 대학원 교과서 또는 참고서로 사용되어 학술 연구 및 교육을 지원할 수 있습니다.

바륨 텅스텐 음극을 처음 접하는 사람이든 관련 분야에서 다년간의 경험을 가진 전문가이든 이 책은 명확한 지식 프레임워크, 심층적인 기술 통찰력 및 실제 응용 가이드를 제공하는 것을 목표로 합니다.

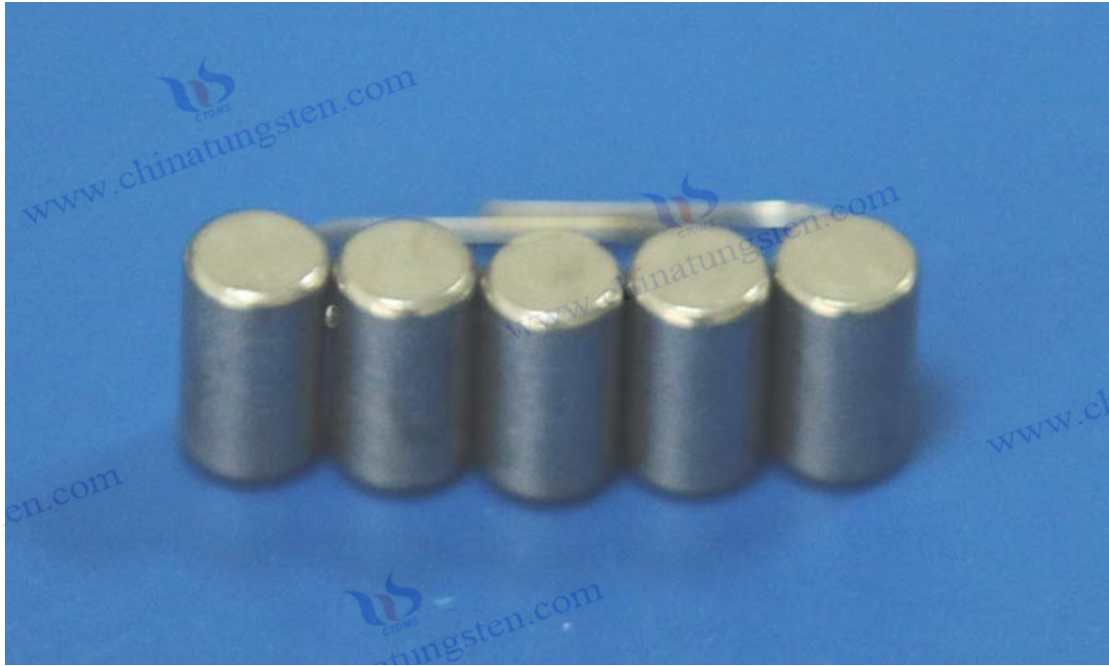
기능 및 값 쓰기

이 책은 학문적 가치와 실용성의 균형을 유지하기 위해 글쓰기 과정에서 다음과 같은 특징에 중점을 둡니다.

- **포괄적이고 체계적인**
이 책은 기초 이론부터 최첨단 응용, 재료 과학에서 산업 표준에 이르기까지 바륨 및 텅스텐 음극의 모든 차원을 포괄적으로 다루고 독자가 관련 내용을 체계적으로 파악할 수 있도록 완전한 지식 시스템을 구축합니다.
- **이론과 실제의 결합**
이 책은 열이온 방출 이론과 재료 과학의 원리를 심층적으로 설명하면서 학술 연구 및 엔지니어링 실습의 요구를 고려하여 상세한 제조 공정, 성능 테스트 방법 및 실제 적용 사례를 제공합니다.
- **미래 지향적이고 혁신적인**
이 책은 바륨 텅스텐 음극재의 기존 기술 성과를 요약할 뿐만 아니라 나노 기술, 지능형 설계 및 학제 간 연구(예: 인공 지능 및 양자 컴퓨팅)의 미래 발전 방향을 기대하여 독자들에게 혁신적인 영감을 제공합니다.
- **유용성과 조작성**
부록의 용어집, 성능 데이터 시트, 테스트 표준 및 공급업체 정보(예: CTIA GROUP LTD)는 독자에게 편리한 참조 리소스를 제공합니다. 색인 디자인은 주요 콘텐츠의 빠른 타겟팅을 용이하게 하고 유용성을 향상시킵니다.

이 책을 통해 독자들은 바륨 텅스텐 음극의 과학적, 기술적 의미를 깊이 이해할 수 있을 뿐만 아니라 진공 전자 기술 및 관련 분야의 혁신과 발전을 촉진하기 위해 영감을 얻을 수 있습니다. 우리는 바륨-텅스텐 음극이 고전적이고 역동적인 기술로서 미래의 기술 물결에서 계속해서 중요한 역할을 하여 고성능 전자 장치 및 학제 간 응용 분야에 무한한 가능성을 제공할 것이라고 믿습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



1 장: 바륨 텅스텐 음극 개요

고효율 열 방출 물질인 바륨 텅스텐 음극 은 진공 전자 및 첨단 기술 분야에서 대체할 수 없는 위치를 차지하고 있습니다. 독특한 다공성 텅스텐 매트릭스와 바륨 화합물 함침 구조로 인해 낮은 일 기능, 높은 방출 전류 밀도, 우수한 열 안정성 및 긴 수명의 특성을 제공하여 마이크로파 튜브, X 선관, 전자 현미경 및 기타 장비의 핵심 구성 요소입니다. 이 장은 독자들에게 바륨 텅스텐 음극에 대한 포괄적인 소개를 제공하고 정의와 기본 개념, 역사적 발전 맥락 및 광범위한 응용 분야를 다루고 후속 장에서 심도 있는 토론의 토대를 마련하는 것을 목표로 합니다. 바륨 텅스텐 음극과 다른 음극 유형의 성능 차이를 비교함으로써 기술 발전의 주요 이정표를 정리하고 전통 및 신흥 분야에서의 잠재력을 기대할 것입니다.

1.1 바륨 텅스텐 음극의 정의 및 기본 개념

1.1.1 바륨 텅스텐 음극의 정의

바륨 텅스텐 음극은 열이온 방출 원리에 기반한 음극이며 핵심 구조는 다공성이 높은 다공성 텅스텐 매트릭스와 바륨 칼슘 알루미늄 알루미네이트, Ba-Ca-알루미늄 알루미네이트와 같은 함침된 바륨 화합물로 구성됩니다. 다공성 텅스텐 매트릭스는 분말 야금 기술로 제조되며 균일한 기공 구조를 가지고 있어 바륨 화합물을 효과적으로 흡착하고 저장할 수 있습니다. 고온 작동 조건에서 바륨 화합물은 열분해를 통해 반응성 바륨 원자를 방출하며, 이는 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공을 통해 표면으로 확산되어 낮은 일 함수(약 1.1-1.5eV의 일 함수)를 가진 단일 원자층을 형성합니다. 이 저전력 기능은 전자 탈출에 필요한 에너지를 크게 줄여 바륨-텅스텐 음극이 높은 방출 전류

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

밀도를 제공하고 고전력, 고주파 및 고신뢰성 시나리오에서 우수한 성능을 발휘할 수 있도록 합니다.

바륨 텅스텐 음극의 설계는 텅스텐 매트릭스의 높은 용점(약 3422°C), 우수한 화학적 안정성 및 바륨 화합물의 낮은 일 함수 장점을 결합하여 마이크로파 튜브, X 선관 및 과학 기기와 같이 안정적인 전자원이 필요한 진공 전자 장치에 특히 적합합니다. 중독에 대한 저항성과 열 안정성은 고진공 또는 고방사선 시나리오와 같은 까다로운 환경에서의 적합성을 더욱 향상시킵니다.

1.1.2 열음극과 냉음극의 비교

전자 방출원은 주로 열음극과 냉음극의 두 가지 범주로 나뉘며 작동 원리, 성능 특성 및 응용 시나리오에 상당한 차이가 있습니다. 다음은 자세한 비교입니다.

- **열 음극(예: 바륨 텅스텐 음극)**

뜨거운 음극은 재료를 고온으로 가열하여 전자가 표면 장벽을 극복하고 열이온 방출을 달성하기에 충분한 에너지를 얻도록 합니다. 주요 기능은 다음과 같습니다.

- o **높은 전류 밀도:** 평방 센티미터당 수 암페어에서 수십 암페어에 도달하여 마이크로파 튜브 및 X 선관과 같은 고전력 장치에 적합합니다.
- o **안정성 및 성숙한 공정:** 거의 100 년의 개발 끝에 열 음극 기술은 성숙한 제조 공정과 고성능 일관성을 갖추고 있으며 산업 및 과학 연구에 널리 사용됩니다.
- o **긴 수명:** 바륨 텅스텐 음극은 올바른 조건에서 수천 시간에서 수만 시간 동안 작동할 수 있어 높은 신뢰성 요구 사항을 충족합니다. 한계는 지속적인 가열이 필요하여 높은 에너지 소비, 열 응력 또는 재료 노화를 유발할 수 있는 고온, 표면 오염을 방지하기 위한 진공 환경(일반적으로 10^{-6} Pa 이하)에 대한 높은 요구 사항입니다.

- **냉음극(예: 전계 방출 음극, 탄소 나노튜브 음극)**

냉음극은 고온 작동 없이 강한 전기장(보통 10^7 – 10^9 V/m)을 통해 전자 터널링 방출을 유도합니다. 주요 기능은 다음과 같습니다.

- o **낮은 전력 소비:** 가열이 필요하지 않아 휴대용 전자 제품과 같은 저에너지 장치에 적합합니다.
- o **빠른 응답:** 전자 방출은 응답 시간(나노초)이 짧아 고주파 또는 펄스 응용 분야에 적합합니다.
- o **소형화 가능성:** 컴팩트하고 전계 방출 디스플레이나 마이크로 X 선 소스와 같은 소형화된 장치에 적합합니다. 그러나 냉음극은 방출 전류 밀도가 낮고(보통 mA/cm^2 수준), 전기장 균일성 및 표면 청결도에 대한 요구 사항이 매우 높으며, 오염이나 손상에 취약하며, 제조 공정이 복잡하고 비용이 높습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다음 표에는 열음극과 냉음극의 성능이 요약되어 있습니다(일반적인 기술 매개변수를 기반으로 한 데이터).

특성	열 음극(예: 바륨 텅스텐 음극)	냉음극(예: 전계 방출 음극)
작동 방식:	열이온 방출(고온으로 가열)	자기장 유도 전자 터널링(강한 전기장)
공작 기능(ev)	1.1-1.5 (바륨 텅스텐 음극)	4-5(일반)
방출 전류 밀도	10-20 A/cm ²	0.01-1 A/cm ²
작동 온도	900-110850°C	실온
수명	수만 시간	수천 시간(환경에 따라 다름)
진공 요구 사항	높음(10 ⁻⁶ Pa 이하)	매우 높음(10 ⁻⁸ Pa 이하)
주요 이점	높은 전류 밀도 및 긴 수명	낮은 전력 소비, 빠른 응답
주요 제한 사항	높은 에너지 소비 및 고온 필요	낮은 전류 밀도 및 복잡한 공정
일반적인 응용 프로그램	마이크로파 튜브, X 선 튜브	전계 방출 디스플레이, 마이크로 X 선 소스

바륨 텅스텐 음극과 같은 열음극은 고전력, 긴 수명의 진공 전자 장치를 지배하는 반면, 냉음극은 저전력, 소형화된 새로운 응용 분야에 더 적합합니다. 이 둘은 서로 다른 시나리오에서 서로를 보완하고 전자 방출 기술의 발전을 공동으로 촉진합니다.

1.1.3 바륨 텅스텐 음극과 다른 열 음극의 비교

열 음극 제품군 중에서 바륨 텅스텐 음극은 우수한 종합 특성으로 널리 선호됩니다. 다음은 일반적인 열 음극 유형(산화물 음극, 토륨 텅스텐 음극, 순수 텅스텐 음극)과의 비교입니다.

- 산화물 음극

산화물 음극은 산화바륨(BaO), 산화스트론튬(SrO) 및 기타 재료가 니켈 매트릭스에 코팅되어 있으며 낮은 일 함수(약 1-2eV), 작동 온도는 800-1000°C, 방출 전류 밀도는 약 1-5A/cm²입니다. 장점은 비용이 저렴하고 저전력 진공관(예: 초기 라디오)에 적합합니다. 그러나 진공 환경(10⁻⁷Pa 미만)에 대한 엄격한 요구 사항이 있고 산소 또는 수증기 오염에 취약하여 배출 성능이 저하되며 일반적으로 수명이 수백에서 수천 시간입니다. 대조적으로, 바륨 텅스텐 음극은 독성 저항성과 열 안정성이 더 강하여 고전력, 장기 실행 시나리오에 적합합니다.

- 토륨 텅스텐 음극

토륨 텅스텐 음극은 텅스텐 매트릭스에 산화토륨(ThO₂)을 도핑하여 낮은 일 함수(약 2.6eV)를 달성하며, 작동 온도는 1700-1900°C 이고 방출 전류 밀도는 최대 5-10A/cm²이므로 고출력 마이크로파 튜브와 같은 고전류 밀도 응용 분야에 적합합니다. 그러나 토륨의 방사능은 인간과 환경에 잠재적인 위험을 초래하여 의료 및 민간 분야에서의 적용을 제한합니다. 바륨 텅스텐 음극은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

방사능 위험이 없고 작동 온도가 낮으며 에너지 효율이 높으며 수명이 더 깁니다(최대 수만 시간).

- **순수 텅스텐 음극**

순수 텅스텐 음극은 텅스텐 와이어 또는 텅스텐 시트로 만들어지며 높은 일 함수(약 4.5eV)를 가지며 충분한 방출 전류(약 2000-2500A/cm²)를 달성하기 위해 매우 높은 온도(0.1-1°C)가 필요합니다. 화학적 안정성이 강하고 극한 환경(예: 고진공 또는 고온)에 적합하다는 장점이 있지만 에너지 소비가 높고 배출 효율이 낮아 최신 고성능 장치의 요구 사항을 충족하기 어렵습니다. 바륨 텅스텐 음극의 낮은 작업 기능과 낮은 작동 온도는 에너지 효율성, 성능 및 수명 측면에서 전반적으로 순수 텅스텐 음극보다 성능이 뛰어납니다.

바륨 텅스텐 음극은 낮은 작업 기능, 높은 방출 효율, 긴 수명 및 비방사능의 장점으로 인해 현대 진공 전자 장치에서 선호되는 열 음극 재료가 되었으며 고신뢰성 및 고전력 시나리오에서 널리 사용됩니다.

1.2 바륨 텅스텐 음극의 역사적 발전

1.2.1 바륨 텅스텐 음극의 기원과 기술적 진화

바륨 텅스텐 음극의 기원은 20 세기 초 열이온 방출 기술의 부상으로 거슬러 올라갑니다. 1900 년대 초반, 핫 음극은 무선 통신의 다이오드 및 삼극관과 같은 초기 진공관에 적용되기 시작했습니다. 당시 순수 텅스텐 음극은 높은 용점과 화학적 안정성으로 인해 널리 사용되었지만 높은 일 함수(약 4.5eV)와 높은 작동 온도로 인해 배출 효율과 에너지 효율이 제한되었습니다. 20 세기 20 년대와 30 년대에 산화물 음극의 출현으로 일 기능이 크게 감소했지만 환경 민감성과 수명이 짧은 단점으로 인해 연구자들은 더 나은 열 음극 재료를 탐색하게 되었습니다.

1950 년대에는 레이더, 마이크로파 통신, 텔레비전 화관 등 진공 전자 장치에 대한 수요가 급증하면서 저전력 기능과 장수명 음극재의 연구 개발이 화두가 되었습니다. 1950 년대 후반, 미국 과학자들은 다공성 텅스텐 매트릭스에 바륨 화합물을 함침시키는 개념을 처음 제안하고 바륨 텅스텐 음극의 초기 프로토타입을 개발했습니다. 이 음극은 텅스텐 매트릭스의 높은 안정성과 바륨 화합물의 낮은 일 함수 특성을 결합하여 방출 성능을 크게 향상시킵니다. 1960 년대에는 다공성 텅스텐 매트릭스의 분말 야금 제조 기술과 바륨 화합물의 함침 공정이 점차 성숙해졌으며 바륨 텅스텐 음극은 마이크로파 튜브 및 X 선관에 상업적으로 적용되기 시작했습니다.

20 세기 70 년대와 80 년대에 바륨 텅스텐 음극 기술은 급속한 발전기에 접어들었습니다. 바륨-칼슘 알루미늄이트와 같은 새로운 화합물의 도입은 방출 특성을 최적화하고 활성화 공정의 표준화는 생산 일관성을 향상시킵니다. 20 세기 90 년대부터 항공우주, 의료 영상 및 고에너지 물리학 실험의 발전으로 바륨 텅스텐 음극의 적용 범위가 더욱 확대되었습니다. 21 세기 초, 나노 기술, 새로운 바륨 화합물 제제 및 지능형 제조 공정의 도입으로 바륨 텅스텐 음극의 성능과 응용 잠재력이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

새로운 차원으로 끌어올렸습니다. 이러한 기술 발전은 고출력, 고주파 및 긴 수명 방향으로 진공 전자 장치의 발전을 주도했습니다.

1.2.2 주요 이정표 및 기술 혁신

바륨 텅스텐 음극의 개발에서 몇 가지 주요 기술 혁신은 성능 향상 및 광범위한 응용 분야에 결정적인 역할을 했습니다.

- 다공성 텅스텐 매트릭스 기술의 획기적인 발전 (1950-1960년대)**
 분말 야금 기술의 발전으로 다공성 텅스텐 매트릭스를 제조하는 것이 가능해졌습니다. 다공성 구조는 모세관 작용을 통해 바륨 화합물의 저장 용량을 증가시키고 반응성 바륨의 표면으로의 확산을 촉진하여 배출 효율과 안정성을 향상시킵니다. 이 획기적인 발전은 바륨 텅스텐 음극의 상용화를 위한 토대를 마련했습니다.
- 바륨 화합물 제형의 최적화(1970년대)**
 바륨 칼슘 알루미늄네이트(예: $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)는 바륨 텅스텐 음극의 핵심 돌파구가 되었습니다. 이 화합물은 고온에서 천천히 분해되고 반응성 바륨을 지속적으로 방출할 수 있어 긴 음극 수명(수만 시간)과 안정적인 방출(전류 밀도 $10\text{-}20\text{A}/\text{cm}^2$)을 보장합니다. 최적화된 포물러는 또한 중독에 대한 저항성을 향상시키고 표면 오염의 영향을 줄입니다.
- 함침 및 활성화 공정의 표준화(1980년대)**
 함침 매개변수(예: 용액 농도, 함침 시간, 온도) 및 열처리 활성화 공정의 제어는 활성화층의 균일성과 방출 특성의 일관성을 크게 향상시켰습니다. 이 표준화된 공정은 바륨 텅스텐 음극의 산업 생산을 촉진하여 마이크로파 튜브, X 선관 및 기타 분야에서 더욱 널리 사용되었습니다.
- 나노 기술 도입 (2000년대부터 현재까지)**
 나노 스케일 다공성 텅스텐 매트릭스 및 나노바륨 코팅 기술의 탐구는 방출 성능을 더욱 향상시켰습니다. 나노기공 구조는 표면적을 증가시키고 바륨 원자의 확산 효율을 향상시킵니다. 란타나나 세륨과 같은 희토류 원소 첨가와 같은 새로운 도핑 기술은 일 기능과 열 안정성을 최적화합니다. 이러한 기술을 통해 바륨 텅스텐 음극은 테라헤르츠파 발생기와 같은 새로운 응용 분야에서 잠재력을 보여줄 수 있습니다.
- 지능형 제조 및 테스트(2010년대부터 현재까지)**
 현대 제조업에서는 생산 공정의 정확성을 보장하기 위해 자동화된 함침 장비와 실시간 모니터링 기술을 도입했습니다. 고급 테스트 방법(예: 주사 전자 현미경 분석, 방출 전류 밀도 측정)은 품질 관리를 개선하고 생산 시 성능 편차를 줄입니다.

이러한 기술 혁신은 바륨 텅스텐 음극의 성능을 향상시켰을 뿐만 아니라 레이더, 통신, 의료 및 과학 연구 분야에서 진공 전자 장치의 광범위한 적용을 촉진했습니다.

1.3 바륨 텅스텐 음극의 응용 분야

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3.1 진공 전자 장치

바륨-텅스텐 음극의 높은 방출 전류 밀도, 긴 수명 및 우수한 안정성으로 인해 다음을 포함한 다양한 진공 전자 장치의 핵심 구성 요소가 되었습니다.

- **마이크로파 튜브**

마이크로파 튜브는 레이더, 통신 및 산업용 난방에 널리 사용되는 고주파, 고전력 전자 장치입니다. 바륨 텅스텐 음극은 다음 마이크로파 튜브에서 중요한 역할을 합니다.

- **마그네트론:** 군용 및 민간 레이더(예: 기상 레이더, 항공 교통 관제 레이더) 및 마이크로파 가열 장비(예: 산업용 전자레인지)에 사용되는 높은 전류 밀도($10\text{--}20\text{A/cm}^2$)는 안정적인 고전력 출력(최대 메가와트 수준)을 지원합니다.
- **진행파관:** 위성 통신, 지상 기지국 증폭기 및 고주파 방송에 사용되며 현대 통신 시스템의 고주파 요구 사항을 충족하기 위해 광대역 및 고이득 신호 증폭을 제공합니다.
- **클라이스트론 튜브:** 고출력 레이더(예: 미사일 유도 시스템) 및 입자가속기(예: 싱크로트론 방사선원)에 사용되며 높은 펄스 전력(수백 킬로와트에서 메가와트)을 지원합니다. 바륨-텅스텐 음극의 높은 안정성과 노화 저항성은 고주파, 까다로운 환경에서 이러한 장치의 안정적인 작동을 보장합니다.

- **X 선관**

X 선관은 의료 영상 및 산업용 비파괴 검사의 핵심 구성 요소입니다. 바륨 텅스텐 음극은 다음 응용 분야를 지원하는 고휘도의 안정적인 전자빔을 제공합니다.

- **의료 영상:** CT 스캐너, X 선 진단 장비 등 높은 방출 효율로 고해상도 영상(최대 밀리미터 수준 이하의 해상도)과 빠른 스캐닝(2 단계 해상도)을 지원하여 진단 정확도와 환자 경험을 향상시킵니다.
- **산업용 비파괴 검사:** 산업 안전 및 제품 품질을 보장하기 위해 항공 부품의 균열, 용접 품질 및 파이프라인 부식을 감지하는 데 사용됩니다. 바륨 텅스텐 음극의 긴 수명(수만 시간)과 일관성은 장비 유지 보수 비용을 줄이고 운영 효율성을 향상시킵니다.

- **기타 진공 장치**

바륨 텅스텐 음극은 광전자 증배관(천체 관측 및 핵 물리학 실험과 같은 고감도 빛 감지용), 전자빔 용접 장비(항공우주 부품의 정밀 제조용) 및 진공 스위치(고전압 전력 시스템의 전자 제어용)에도 사용됩니다. 고성능은 전자 소스에 대한 이러한 장치의 엄격한 요구 사항을 충족합니다.

1.3.2 산업 및 과학 연구에서의 구체적인 용도

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

바륨 텅스텐 음극은 다음을 포함하여 산업 생산 및 과학 연구에 광범위하게 응용됩니다.

- 전자 현미경

주사 전자 현미경(SEM) 및 투과 전자 현미경(TEM)에서 바륨-텅스텐 음극은 나노 스케일 해상도 표면 지형 및 내부 구조 분석을 지원하는 고휘도의 안정적인 전자빔을 제공합니다. 높은 방출 전류 밀도와 저소음 특성으로 인해 재료 과학 (예 : 반도체 재료 분석), 생물학 (예 : 세포 구조 이미징) 및 나노 기술 연구에 적합합니다.

- 질량 분석기

고감도 이온 소스의 핵심 구성 요소인 바륨 텅스텐 음극은 환경 모니터링(예: 공기 중의 휘발성 유기 화합물 검출), 약물 개발(예: 대사산물 식별) 및 지질 연구(예: 동위원소 비율 분석)에서 중요한 역할을 합니다. 높은 방출 효율은 질량 분석기의 검출 감도를 향상시킵니다(최대 ppb 수준).

- 표면 분석 장비

- 오거 전자 분광계 (AES), X 선 광전자 분광계 (XPS) 및 2 차 이온 질량 분석기 (SIMS)에서 바륨 텅스텐 음극은 재료 표면의 화학 조성 및 전자 구조를 정확하게 분석하기 위해 안정적인 전자 흐름을 제공합니다. 이러한 기술은 신소재(예: 고성능 합금, 반도체 필름) 및 표면 공학(예: 코팅 성능 최적화) 개발에 널리 사용됩니다.

- 레이더 및 통신 시스템

바륨 텅스텐 음극은 군용 레이더(예: 미사일 유도 시스템), 민간 레이더(예: 항공 교통 관제) 및 통신 장비(예: 위성 증폭기, 5G 기지국)에 고효율 전자원을 제공하여 장거리 신호 전송 및 간섭 방지 기능을 지원합니다. 높은 신뢰성과 긴 수명으로 시스템 유지 관리 비용이 절감되고 최신 통신 시스템의 고성능 요구 사항을 충족합니다.

- 산업용 난방 및 가공

전자빔 용융, 전자빔 표면 개질 및 진공 열처리 장비에서 바륨 텅스텐 음극은 금속 정제(예: 티타늄 합금 생산), 합금 준비 및 케이스 경화(예: 항공 터빈 블레이드)를 위한 고에너지 전자빔을 제공하여 재료 특성과 산업 효율성을 크게 향상시킵니다.

1.3.3 교차 도메인 잠재력

과학 기술의 급속한 발전으로 바륨 텅스텐 음극의 응용 잠재력은 신흥 및 학제 간 분야로 확장되어 유망한 전망을 보여주고 있습니다.

- 새로운 에너지 기술

이온 추진기에서 바륨 텅스텐 음극은 우주선 마이크로 추력 시스템의 개발을 지원하는 고전류 전자원 역할을 합니다. 이온 추진기는 높은 비충격(최대 3000-9000 초)과 낮은 연료 소비로 심우주 탐사(예: 화성 탐사선, 성간 임무)에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이상적인 동력원입니다. 바륨 텅스텐 음극의 높은 안정성과 긴 수명은 우주 환경의 까다로운 요구 사항을 충족합니다.

- **테라헤르츠파 기술**

테라헤르츠파(0.1–10THz)는 이미징, 통신 및 스펙트럼 분석에서 고유한 이점을 제공합니다. 바륨 텅스텐 음극은 테라헤르츠 이미징(보안 검색, 조기 암 발견용) 및 고속 통신(차세대 6G 네트워크)을 지원하는 진공 전자 테라헤르츠파 발생기에 고출력 전자원을 제공합니다. 높은 방출 효율과 안정성은 테라헤르츠 기술의 상용화 가능성을 제공합니다.

- **고에너지 물리 실험**

입자 가속기(예: CERN 의 LHC) 및 싱크로트론 방사선원에서 바륨-텅스텐 음극은 고에너지 입자 빔을 생성하고 기본 입자의 특성과 구조를 탐색하기 위한 고전류 전자원을 제공합니다. 높은 배출 효율과 안정성은 장시간, 고강도 실험 실행을 지원합니다.

- **생물 의학 응용**

고정밀 질량 분석 분석을 통해 바륨 텅스텐 음극은 암 표지자 분석 및 대사체학 연구와 같은 질병 진단에서 분자 검출을 위한 이온 소스로 사용될 수 있습니다. 높은 감도와 신뢰성은 정밀 의학의 발전을 주도했습니다. 또한 전자빔 멸균 장비에 바륨 텅스텐 음극을 적용하면 의료 기기 멸균을 위한 효율적인 솔루션을 제공합니다.

- **양자 기술**

양자 컴퓨팅 및 양자 통신 장비에서 바륨 텅스텐 음극의 잠재적 적용이 모색되고 있습니다. 높은 안정성과 낮은 일 함수 특성은 양자 비트 조작 및 양자 상태 감지를 지원하는 고정밀 전자원을 개발하는 데 사용될 수 있습니다. 학제간 연구(예: 양자 재료와 진공 전자 기술의 결합)는 양자 기술에 새로운 돌파구를 가져올 수 있습니다.

- **녹색 에너지 및 환경 보호**

플라즈마 발생기에 바륨 텅스텐 음극을 적용하면 전자빔 유도를 통한 유기 오염 물질의 플라즈마 분해와 같은 효율적인 배기 가스 처리 및 수질 정화 기술을 지원합니다. 또한, 토카막 장치용 전자빔 가열 시스템과 같은 핵융합 연구에서의 잠재적 응용은 청정 에너지 개발의 가능성을 제공합니다.

요약하면, 우수한 성능과 폭넓은 적응성을 갖춘 바륨-텅스텐 음극은 전통적인 진공 전자 장치에서 핵심 위치를 차지할 뿐만 아니라 신에너지, 테라헤르츠 기술, 양자 기술 및 생물 의학과 같은 신흥 분야에서 큰 잠재력을 보여줍니다. 이 장에서는 바륨 텅스텐 음극의 정의, 다른 음극과의 비교, 역사적 발전 및 응용 분야에 대한 포괄적인 소개를 통해 독자들에게 명확한 지식 프레임워크를 제공합니다. 다음 장에서는 재료 과학, 작동 원리, 제조 공정 및 성능 최적화 전략을 더 자세히 살펴보고 독자들에게 보다 포괄적이고 심층적인 기술적 관점을 제공할 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



2 장: 바륨 텅스텐 음극의 재료 과학

바륨 텅스텐 음극의 우수성은 세심한 재료 구성, 정밀한 준비 공정, 복잡한 미세 구조와 성능 간의 상호 작용에서 비롯됩니다. 효율적인 열이온 방출 재료로서 바륨 텅스텐 음극의 다공성 텅스텐 매트릭스와 바륨 화합물의 시너지 효과는 낮은 일 기능, 높은 방출 전류 밀도 및 우수한 열 안정성을 달성하여 진공 전자 장치의 중심 위치를 차지합니다. 이 장에서는 바륨 텅스텐 음극의 재료 과학 기초를 탐구하고 재료 구성, 제조 공정 및 미세 구조가 성능에 미치는 영향을 자세히 분석하고 다공성 텅스텐 매트릭스의 화학적 및 물리적 특성, 바륨 화합물 비율의 최적화, 첨가제의 역할, 제조 공정의 핵심 기술, 미세 구조와 방출 특성 간의 관계를 다룹니다.

2.1 바륨 텅스텐 음극의 재료 구성

2.1.1 다공성 텅스텐 매트릭스의 화학적 및 물리적 특성

다공성 텅스텐 매트릭스는 바륨 텅스텐 음극의 핵심 구조이며 화학적 및 물리적 특성은 음극의 열 안정성, 기계적 강도 및 전자 방출 효율을 직접적으로 결정합니다. 다공성 텅스텐 매트릭스는 적절한 다공성과 기공 크기를 가진 고순도 텅스텐 (순도 $\geq 99.95\%$)을 사용하여 분말 야금 기술로 제조됩니다. 이 다공성 구조는 바륨 화합물을 저장할 수 있는 공간을 제공할 뿐만 아니라 모세관 작용을 통해 활성 바륨 원자의 확산을 촉진하여 음극 표면에 저일 함수층을 형성합니다. 다음은 다공성 텅스텐 매트릭스의 주요 화학적 및 물리적 특성입니다.

- **화학적 안정성:** 텅스텐의 높은 화학적 불활성은 고진공 환경(10^{-6} Pa 이하)에서 산소, 수증기 및 잔류 가스에 대한 내성이 뛰어납니다. 이러한 안정성은 표면 산화 또는 중독의 위험을 효과적으로 줄이고 음극 수명을 연장합니다. 또한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐은 바륨 화합물에 대한 화학적 반응성이 낮아 매트릭스와 활성 물질 사이의 불리한 상호 작용을 방지합니다.

- **물리적 특성:** 텅스텐의 높은 용점(약 3422°C)은 구조적 열화나 변형 없이 바륨-텅스텐 음극의 일반적인 작동 온도(900-1100°C)를 견딜 수 있습니다. 고밀도(약 19.25g/cm³)와 높은 기계적 강도(인장 강도 약 700-1000MPa)는 고온 및 고응력 환경에서 매트릭스의 안정성을 보장합니다. 다공성 구조의 모세관 작용은 바륨 화합물의 흡착 능력을 향상시키며, 기공 네트워크는 활성 바륨 원자가 표면으로 확산되기 위한 효율적인 채널을 제공합니다.
- **열 및 전기 전도성:** 텅스텐의 높은 열전도율(약 173W/m·K)은 작업 공정 중 열의 균일한 분포를 보장하여 국부적인 과열로 인한 재료 열화를 줄입니다. 높은 전도성(약 1.82×10^7 S/m)은 효율적인 전자 전송을 지원하므로 고전력 전자 장치의 요구에 적합합니다.
- **기공 특성:** 다공성 및 기공 크기 분포는 다공성 텅스텐 매트릭스의 핵심 매개변수입니다. 20-30%의 다공성은 바륨 화합물의 저장 용량과 기계적 강도의 균형을 맞추고 1-10μm의 기공 크기 범위는 모세관 작용의 효과를 보장합니다. 기공은 바륨 원자의 지속적인 확산을 지원하기 위해 연결된 네트워크를 형성해야 합니다.

다공성 텅스텐 매트릭스의 다공성 및 기공 크기 분포는 정밀한 준비 공정으로 제어되어야 하며, 다공성이 너무 높으면 기계적 강도가 부족할 수 있으며, 다공성이 너무 낮으면 바륨 화합물의 저장 및 확산 효율이 제한되고 방출 성능에 영향을 미칩니다. 매트릭스의 미세 구조는 일반적으로 기공 균일성과 일관성을 보장하기 위해 주사 전자 현미경(SEM) 또는 X 선 단층 촬영(X-CT)으로 분석됩니다.

2.1.2 바륨 화합물(예: 알루미늄에이트 바륨 칼슘)의 특성 및 비율

바륨 화합물은 낮은 작업 기능과 높은 방출 효율을 달성하기 위한 바륨 텅스텐 음극의 핵심 구성 요소이며 일반적으로 사용되는 바륨 화합물은 바륨 칼슘 알루미늄에이트(예: 4BaO·CaO·Al₂O₃, 4:1:1 비율로 약칭). 이 화합물은 고온(900-1100°C)에서 열분해에 의해 유리 바륨 원자를 방출하고 다공성 텅스텐 매트릭스 표면으로 확산되어 낮은 일 함수 층(약 1.1-1.5eV의 일 함수)을 형성하여 전자 탈출에 필요한 에너지를 크게 줄입니다. 다음은 바륨 화합물의 주요 특성과 비율 최적화입니다.

- **화학적 특성:** 바륨-칼슘 알루미늄에이트는 다음 반응을 통해 고온에서 분해됩니다.



방출된 자유 바륨 원자는 텅스텐 매트릭스 표면에 흡착되어 단일 원자층 또는 박막을 형성하여 일 함수를 감소시킵니다. 생성된 부산물(예: CaO, Al₂O₃)은 화학적 안정성이 높고 배출 성능을 방해하지 않습니다. 화합물의 분해 속도는 과도한 증발로 인한 활성 층 손실을 피하면서 장기간 작동 중에 지속적인 바륨 공급을 보장하기 위해 적당해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **물리적 특성:** 알루미네이트 바륨 칼슘의 녹는점은 음극 작동 온도보다 높아 조기 용융 또는 휘발을 방지합니다. 화합물의 입자 크기는 균일한 함침과 효율적인 확산을 보장하기 위해 텅스텐 매트릭스의 기공 크기와 일치해야 합니다. 화합물의 열팽창 계수는 텅스텐 매트릭스의 열팽창 계수와 다르며 공정 최적화를 통해 열 응력을 줄여야 합니다.
- **비율 최적화:** 4:1:1 비율($4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)은 바륨 방출률, 화학적 안정성 및 독성 저항성의 균형을 맞추기 때문에 산업 응용 분야의 표준입니다. 다른 구성으로는 $5:3:2(5\text{BaO} \cdot 3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3)$ 또는 $6:1:2(6\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3)$ 도 특정 시나리오에서 탐구됩니다. 예를 들어, 5:3:2의 비율은 중독 방지 능력을 향상시킬 수 있으며 잔류 가스가 많은 환경에 적합합니다. 6:1:2 비율은 바륨 방출 속도를 증가시켜 높은 전류 밀도 요구 사항에 적합하지만 수명을 단축할 수 있습니다. 비율 선택은 고출력 마이크로파 튜브 또는 수명이 긴 X 선관과 같은 적용 시나리오에 따라 최적화되어야 합니다.
- **환경 적응성:** 바륨 화합물은 산소와 수증기에 민감하므로 산화 또는 수화로 인한 분해를 방지하기 위해 고진공 환경에서 보관 및 취급해야 합니다.

바륨 화합물의 비율과 입자 특성은 활성층의 형성 효율과 음극의 장기 안정성에 직접적인 영향을 미치며 다양한 응용 분야의 요구 사항을 충족하기 위해 실험적으로 최적화해야 합니다.

2.1.3 첨가제가 배출 성능에 미치는 영향

바륨 텅스텐 음극의 배출 효율, 열 안정성 및 중독 방지 능력을 더욱 향상시키기 위해 첨가제는 종종 바륨 화합물 또는 텅스텐 매트릭스에 도입됩니다. 다음은 일반적인 첨가제와 그 효과입니다.

- **희토류 산화물(예: La_2O_3 , CeO_2):** 희토류 원소는 활성 층의 열 안정성을 향상시키면서 일 함수(최대 1.0eV 이하)를 감소시켜 배출 효율을 향상시킵니다. 예를 들어, 0.5–2wt% La_2O_3 를 도핑하면 일 함수가 크게 감소하고 내산화성이 향상되어 고출력 응용 분야에 적합합니다. CeO_2 는 표면 경도를 향상시키고 기계적 마모를 줄입니다.
- **칼슘(Ca) 또는 스트론튬(Sr) 화합물:** CaO 또는 SrO 의 비율을 조정하여 바륨 화합물의 분해 속도를 제어하고 음극 수명을 연장합니다. 예를 들어, CaO 비율(2:1:1 비율)을 높이면 바륨 방출 속도가 느려질 수 있어 위성 통신 장치와 같은 수명이 긴 응용 분야에 적합하지만 전송 전류 밀도가 약간 감소할 수 있습니다.
- **금속 첨가제(예: Os, Ir):** 텅스텐 매트릭스 표면에 오스뮴(Os) 또는 이리듐(Ir)(두께 약 0.1–1 μm)의 얇은 층을 코팅하면 표면의 촉매 작용을 향상시켜 바륨 원자의 확산과 활성층 형성을 촉진할 수 있습니다. OS 코팅은 일 함수를 약 1.0eV로 줄일 수 있지만 비용이 더 높고 경제성 간의 절충안이 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **규산염 또는 붕산염 첨가제:** 보호층을 형성하여 중독에 대한 저항성을 향상시키고 산소 또는 탄소 오염의 영향을 줄입니다. 그러나 과도한 규산염은 일 기능을 증가시킬 수 있으며 첨가 비율(보통 < 1wt%)을 제어해야 합니다.
- **기타 첨가제:** 산화이트륨(Y_2O_3) 또는 지르코니아(ZrO_2)와 같이 열 안정성과 기계적 강도를 향상시키며 극한 환경 응용 분야(예: 우주 전자 장치)에 적합합니다.

첨가제의 종류와 비율은 실험을 통해 정확하게 최적화되어야 하며, 과도하게 첨가하면 활성층이 고르지 않거나 부반응이 발생하여 배출 성능이 저하될 수 있습니다. 첨가제 선택은 높은 전류 밀도, 긴 수명 또는 중독 방지 요구 사항과 같은 특정 응용 시나리오에 맞게 설계되어야 합니다.

2.2 바륨 텅스텐 음극의 제조 공정

2.2.1 다공성 텅스텐 매트릭스의 제조: 분말 야금 및 기공 제어

다공성 텅스텐 매트릭스의 제조는 분말 야금 기술을 사용하는 바륨 텅스텐 음극 제조의 핵심 단계이며 공정에는 분말 스크리닝, 프레스 성형, 소결 및 기공 제어가 포함됩니다. 자세한 단계는 다음과 같습니다.

- **텅스텐 분말 스크리닝:** 매트릭스의 화학적 안정성과 균일성을 보장하기 위해 고순도 텅스텐 분말(순도 $\geq 99.95\%$, 입자 크기 $1-10\mu m$)을 선택합니다. 입자 크기 분포는 기공 구조에 직접적인 영향을 미치며 진동 스크리닝 또는 기류 분류 기술을 통해 최적화해야 합니다. 입자 크기가 작을수록 다공성이 증가하지만 기계적 강도가 감소할 수 있습니다. 입자 크기가 클수록 강도가 향상되지만 다공성은 감소합니다.
- **압착:** 텅스텐 분말을 금형에 넣고 고압($100-500MPa$)에서 압착하여 일반적으로 원통형(직경 $5-20mm$) 또는 시트(두께 $1-5mm$)의 블랭크를 형성합니다. 프레스 공정에서는 균일한 초기 기공 구조를 달성하기 위해 압력, 금형 설계 및 윤활제 사용을 제어해야 합니다. 양방향 프레스 또는 등방성 프레스 기술은 빌렛 밀도 균일성을 향상시킵니다.
- **소결 공정:** 진공($10^{-4}-10^{-6} Pa$) 또는 수소 분위기에서 고온 소결($2000-2500^\circ C$)을 통해 텅스텐 입자가 확산을 통해 결합하여 다공성 구조를 형성할 수 있습니다. 소결 시간($1-4$ 시간)과 온도를 정밀하게 제어해야 하며, 온도가 너무 높으면 기공이 붕괴될 수 있으며, 온도가 너무 낮으면 입자의 결합 강도에 영향을 미칩니다. 수소 분위기는 산화물 불순물을 줄이고 매트릭스 순도를 향상시킵니다.
- **다공성 제어:** 임시 충전제(예: 전분, 폴리메틸 메타크릴레이트)를 추가하거나 텅스텐 분말의 입자 크기 분포를 조정하여 다공성과 기공 크기를 제어합니다. 필러는 소결 과정에서 휘발되어 균일한 기공 네트워크를 형성합니다. 다공성 테스트에 따르면 20-30%의 다공성은 기계적 강도와 바륨 화합물 저장 용량의 균형을 맞추는 것으로 나타났습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다공성 텅스텐 매트릭스의 품질은 후속 함침 공정 및 음극 성능에 직접적인 영향을 미치며 기공 구조의 일관성은 SEM, X-CT 또는 비표면적 분석(BET)으로 검증해야 합니다. 최적화된 매트릭스는 균일한 기공 분포, 높은 기계적 강도(압축 강도>500MPa) 및 적절한 기공 크기(1-10 μ m)를 가져야 합니다.

2.2.3 바륨 화합물의 함침 공정: 용액 준비 및 함침 매개변수

바륨 화합물의 함침 공정은 바륨 화합물을 다공성 텅스텐 기관에 균일하게 도입하는 핵심 단계로, 활성층의 형성 효율과 방출 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 공정에는 다음과 같이 용액 준비, 함침, 건조 및 열처리가 포함됩니다.

- **용액 준비:** 바륨 칼슘 알루미늄이트(예: 4BaO·CaO·Al₂O₃)는 탈이온수 또는 에탄올과 같은 유기 용매와 혼합되어 현탁액 또는 용액을 형성합니다. 용액의 점도와 입자 분산은 기공에 균일하게 침투하도록 교반 또는 초음파 처리에 의해 최적화되어야 합니다. 폴리비닐알코올과 같은 소량의 계면활성제를 첨가하면 용액의 습윤성이 향상됩니다.
- **함침 공정:** 다공성 텅스텐 매트릭스를 바륨 화합물 용액에 담그고 진공 함침(10^{-2} – 10^{-4} Pa) 또는 압력 함침(0.1–1MPa) 기술을 사용하여 용액이 기공에 침투하는 것을 용이하게 합니다. 진공 함침은 기공에서 공기를 제거하고 충전 효율을 향상시킵니다. 압력 함침은 용액의 침투 깊이를 향상시킵니다. 함침 온도 및 시간과 같은 조건은 매트릭스의 다공성 및 용액 농도에 따라 최적화되어야 하며, 담금 시간이 너무 길면 기공이 막힐 수 있습니다.
- **건조 및 열처리:** 함침된 기관을 저온(100–300°C)에서 건조시켜 용매를 제거하고 기공 구조의 손상을 방지합니다. 그런 다음 진공 또는 불활성 분위기에서 고온 열처리(1000–1200°C)를 통해 바륨 화합물을 경화시키고 초기 활성층을 형성합니다. 열처리는 매트릭스의 균열을 유발하는 열 응력을 피하기 위해 단계적으로 가열해야 합니다.

함침 공정의 매개변수는 활성층의 균일성과 방출 특성에 상당한 영향을 미칩니다. 예를 들어, 용액 농도가 너무 높으면 표면에 바륨 화합물이 축적되어 방출 균일성이 감소할 수 있습니다. 열처리 온도가 너무 높으면 바륨의 증발이 가속화되고 수명이 단축될 수 있습니다. 공정 최적화에는 바륨 화합물과 안정적인 활성층의 균일한 분포를 보장하기 위한 실험적 검증(예: SEM 관찰 또는 방출 테스트)이 필요합니다.

2.3 바륨 텅스텐 음극의 미세 구조 및 특성

2.3.1 다공성 텅스텐 매트릭스의 다공성 및 구조 분석

다공성 텅스텐 매트릭스의 미세 구조는 바륨 텅스텐의 음극 성능의 기초이며 다공성, 기공 크기 분포 및 연결성은 바륨 화합물의 저장, 확산 및 방출 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. 주요 구조적 특성 및 분석 방법은 다음과 같습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **다공성:** 일반적인 다공성은 바륨 화합물의 저장 용량과 기계적 강도의 균형을 맞추기 위해 20-30%로 제어됩니다. 다공성이 높으면 매트릭스 강도가 부족하고 고온에서 쉽게 변형될 수 있습니다. 너무 낮으면 바륨 방출 속도가 제한되고 전송 전류 밀도가 감소합니다. 수은 침입 또는 가스 흡착(BET)은 일반적으로 다공성을 정확하게 측정하는 데 사용됩니다.
- **기공 구조:** 모세관 작용을 통해 바륨 원자가 표면으로 효율적으로 확산되도록 기공은 3 차원 네트워크를 형성해야 합니다. 기공 크기 분포는 균일해야 하며, 기공 크기가 너무 크면 바륨 화합물이 고르지 않게 분포될 수 있으며, 기공 크기가 너무 작으면 확산 효율이 제한됩니다. X 선 단층촬영(X-CT)은 기공의 3 차원 구조를 재구성하고 연결성을 확인합니다.
- **구조 분석:** 주사 전자 현미경(SEM)은 기공 형태 및 표면 특성을 관찰하는 데 사용되며, 비표면적 분석(BET)은 기공 표면적을 측정하는 데 사용됩니다. 에너지 분산 분광법(EDS)은 텅스텐 매트릭스의 불순물 분포를 분석하여 고순도를 보장합니다. 기공 구조의 균일성과 연결성은 음극의 장기적인 안정성에 매우 중요합니다.

기공 구조를 최적화하려면 텅스텐 분말의 입자 크기, 압착 압력 및 소결 매개변수를 조정하여 달성해야 합니다. 구조 분석 결과는 기공 설계의 효과를 검증하기 위해 방출 성능 테스트와 결합되어야 합니다.

2.3.2 바륨 활성층의 표면 형태와 방출 성능의 관계

바륨 활성층은 바륨 텅스텐 음극의 방출 성능의 핵심이며 표면 형태는 일 기능, 방출 전류 밀도 및 방출 균일성을 직접적으로 결정합니다. 다음은 주요 기능 및 성능과의 관계입니다.

- **표면 형태:** 활성층은 텅스텐 매트릭스 표면의 바륨 원자와 그 산화물에 의해 형성된 단일 원자층 또는 박막으로 구성됩니다. 이상적인 활성층은 전자 방출의 균일성과 저잡음 특성을 보장하기 위해 표면 거칠기가 낮은 균일하고 연속적이어야 합니다. 주사 전자 현미경(SEM) 및 원자력 현미경(AFM)은 일반적으로 표면 지형을 분석하고 활성 층의 평탄도와 적용 범위를 확인하는 데 사용됩니다.
- **일 기능:** 활성층의 형성은 순수 텅스텐의 경우 일 함수를 4.5eV 에서 1.1-1.5eV 로 감소시켜 전송 전류 밀도를 크게 증가시킵니다. 일 함수의 균일성은 바륨 원자의 확산 속도와 표면 피복에 따라 달라지며, 커버리지가 충분하지 않은(<80%) 국부적인 높은 일 함수 영역이 발생하여 방출 효율이 감소할 수 있습니다.
- **방출 성능:** 균일한 활성층은 높은 전송 전류 밀도와 낮은 잡음 방출을 허용하여 고출력 마이크로파 튜브 또는 X 선관의 요구 사항을 충족합니다. 표면 결함(예: 균열, 입자 축적)은 국부적인 아크 또는 고르지 않은 방출을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

유발하여 성능을 저하시킬 수 있습니다. 방출 성능은 일반적으로 열이온 방출 테스트로 평가됩니다.

- **영향 요인:** 활성 계층의 성능은 다음 요인의 영향을 받습니다.
 - **작동 온도:** 온도가 높으면 바륨의 증발이 가속화되어 활성층이 손실되고 수명이 단축됩니다. 온도가 너무 낮으면 바륨의 확산이 제한되고 방출 효율이 감소합니다.
 - **진공 환경:** 저진공($>10^{-6}$ Pa)은 표면 산화 또는 오염을 일으켜 작업 기능을 증가시킬 수 있습니다.
 - **표면 오염:** 산소, 수증기 또는 탄소 화합물은 바륨과 반응하여 높은 일 작용 화합물(예: BaO_2)을 형성하여 방출 성능을 저하시킬 수 있습니다.
 - **열처리 공정:** 단계별 활성화를 통해 균일한 활성층이 생성되어 배출 성능이 최적화됩니다.

함침 공정, 열처리 매개변수 및 첨가제 제형을 최적화함으로써 균일하고 안정적인 활성층을 형성하여 바륨 텅스텐 음극의 방출 성능과 수명을 향상시킬 수 있습니다. 표면 지형과 방출 성능 사이의 상관관계는 SEM, AFM 및 방출 테스트를 통해 종합적으로 분석하여 공정 개선을 안내해야 합니다.

요약하면, 바륨-텅스텐 음극의 재료 과학은 다공성 텅스텐 매트릭스, 바륨 화합물 및 첨가제의 복잡한 상호 작용을 포함하며, 그 제조 공정과 미세 구조는 방출 성능과 수명에 결정적인 영향을 미칩니다. 재료 구성, 준비 공정 및 미세 구조에 대한 포괄적인 분석을 통해 이 장은 작동 원리, 제조 기술 및 성능 최적화에 대한 후속 논의를 위한 견고한 토대를 마련합니다.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3 장: 작동 원리 및 발사 메커니즘

고효율 열이온 방출 재료인 바륨 텅스텐 음극은 고유한 작동 원리와 방출 메커니즘에서 파생됩니다. 이 장에서는 열이온 방출 이론, 방출 특성 및 바륨 텅스텐 음극의 성능에 영향을 미치는 다양한 요인에 대해 자세히 설명합니다. 열 방출의 기본 원리를 기반으로 Richardson-Dushman 방정식, 쇼트키 효과 및 양자 역학 관점과 결합하여 바륨 텅스텐 음극의 낮은 일 함수의 형성 메커니즘, 활성층의 동적 거동 및 열 안정성을 분석하고 작업 환경, 노화 및 중독 효과의 영향에 대해 자세히 설명합니다. 및 배출 성능에 대한 고장 모드.

3.1 열이온 방출 이론

열이온 방출은 바륨 텅스텐 음극의 핵심 작동 원리로, 전자가 표면 장벽을 극복하고 진공으로 빠져나갈 수 있는 충분한 에너지를 얻기 위해 재료를 가열하는 과정을 말합니다. 이 섹션에서는 Richardson-Dushman 방정식, 쇼트키 효과 및 양자역학과 결합된 고전적 열이온 방출 이론의 관점에서 바륨 텅스텐 음극의 방출 메커니즘을 분석합니다.

3.1.1 리처드슨-더쉬먼 방정식

Richardson-Dushman 방정식은 방출 전류 밀도와 온도 및 일 함수 사이의 관계를 표현하는 열이온 방출을 설명하는 기본 이론 모델입니다. 바륨 텅스텐 음극의 경우 방출 전류 밀도(J)는 다음 방정식으로 설명할 수 있습니다.

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

그 안에:

- (J): 전류 밀도 방출(단위: A/cm²);
- (A): 리처드슨 상수(이론값은 120.4A/cm²·K², 실제 값은 재료의 표면 특성에 따라 다르며 일반적으로 50-100 A/cm²·K²);
- (T): 절대 온도(단위: K, 바륨 텅스텐 음극의 일반적인 작동 온도는 1173-1373K, 즉 900-1100°C 입니다);
- ($\exp$): 지수 함수.
- (ϕ): 일 함수(단위: eV, 바륨 텅스텐 음극은 약 1.1-1.5eV);
- (k): 볼츠만 상수(8.617×10⁻⁵ eV/K).

바륨-텅스텐 음극에서 낮은 일 함수(1.1-1.5eV)는 지수 항을 크게 증가시켜 더 낮은 온도에서 10-20A/cm²의 방출 전류 밀도를 초래하며, 이는 순수 텅스텐 음극(약 4.5eV 및 약 0.1-1A/cm²의 전류 밀도)보다 훨씬 높습니다. 리처드슨 상수의 실제 값은 표면 상태, 바륨 활성층 피복 및 미세 구조의 영향을 받으며 고진공 환경에서 열이온 방출 테스트 장비를 사용하는 등 실험적으로 측정해야 합니다. 방정식의 적용은 예측

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정확도를 보장하기 위해 온도 균일성 및 진공 환경과 같은 실제 작동 조건을 고려합니다.

3.1.2 쇼트키 효과 및 전계 강화 방출

쇼트키 효과는 외부 전기장의 작용으로 재료의 표면 장벽이 감소하여 열이온 방출이 증가하는 현상을 말합니다. 바륨 텅스텐 음극에서 쇼트키 효과는 다음과 같은 수정된 일 함수로 설명됩니다.

$$\phi_{\text{eff}} = \phi - \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}}$$

그 안에:

- (ϕ_{eff}): 인가된 전기장의 작용으로 감소된 후 공 함수를 나타내는 유효 공 함수(단위: eV);
- (ϕ): 원작 기능(단위: eV);
- (e): 전자전력(1.602×10^{-19} C);
- (E): 적용된 전기장 강도(단위: V/m);
- (ϵ_0): 진공 유전 상수(8.854×10^{-12} F/m).

높은 전기장 조건(예: 마이크로파관이나 X 선관에서 흔히 볼 수 있는 10^7 – 10^8 V/m)에서 일 함수가 감소하면 전송 전류 밀도가 크게 증가할 수 있습니다. 쇼트키 효과는 낮은 온도에서 고전류 출력을 허용하여 에너지 소비와 열 스트레스를 줄이기 때문에 고전력 장치에 특히 중요합니다. 실제 응용 분야에서는 국부적인 과도한 전기장 및 음극 표면 손상으로 인한 아크를 방지하기 위해 전극 설계(예: 매끄러운 원형 전극 사용)를 통해 전기장 균일성을 최적화해야 합니다.

3.1.3 양자역학 관점

높은 전계 강도 또는 극한 조건에서 양자 역학 효과(예: 터널링 효과)는 바륨 텅스텐 음극의 방출 거동에 일정한 영향을 미칩니다. 터널링 효과는 표면 장벽을 완전히 극복하지 않고 양자 터널링을 통해 전자가 진공으로 탈출하는 것을 말합니다. 터널링 효과의 확률은 Fowler-Nordheim 방정식으로 설명됩니다.

$$J = \frac{A' E^2}{\phi} \exp\left(-\frac{B \phi^{3/2}}{E}\right)$$

그 안에:

- (J): 터널링 전류 밀도(단위: A/cm²), 단위 면적당 전자 흐름 강도를 나타냅니다.
- (A'), (B): 상수(재료 및 형상과 관련하여, 일반적인 값은 1.54×10^{-6} A·eV/V² 및 6.83×10^9 V/m·eV^{-3/2}임);
- (E): 전기장 강도(단위: V/m);
- (ϕ): 일 함수(단위: eV).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

바륨-텅스텐 음극에서 터널링 효과는 일반적으로 자기장 강화 마이크로파 장치 또는 테라헤르츠파 발생기와 같이 매우 높은 전기장에서 중요합니다. 낮은 일 기능은 터널링 장벽을 줄이고 터널링 확률을 향상시킵니다. 그러나 바륨 텅스텐 음극은 주로 열이온 방출에 의존하기 때문에 터널링 효과의 기여도가 적고 특정 고전계 강도 시나리오에서만 고려해야 합니다. 양자역학 관점은 복잡한 방출 메커니즘에 대한 이해를 보완하고 표면 지형(예: 나노 규모 돌출부)을 조정하여 전기장의 국부적 향상 효과를 개선하는 등 음극 설계를 최적화하는 데 도움이 됩니다.

3.2 바륨 텅스텐 음극의 방출 특성

3.2.1 저전력 기능의 형성 메커니즘

바륨-텅스텐 음극의 낮은 일 함수(1.1–1.5eV)는 다공성 텅스텐 매트릭스에서 바륨 원자의 확산 및 표면 작용으로 인한 높은 방출 효율의 핵심입니다. 다음은 형성 메커니즘에 대한 자세한 분석입니다.

- **바륨 원자의 확산:** 작동 온도에서 바륨 칼슘 알루미늄(예: $4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)은 열분해 반응을 통해 자유 바륨 원자를 방출합니다:



이 원자는 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공 네트워크를 통해 표면으로 확산되며, 확산 계수는 약 10^{-12} – 10^{-10} m²/s 로 몇 초 만에 균일한 표면 덮개를 형성하기에 충분합니다. 기공 연결성 및 다공성(20-30%)은 확산 효율에 매우 중요하며 분말 야금 공정을 통해 최적화해야 합니다.

- **표면 작용:** 바륨 원자는 텅스텐 매트릭스의 표면에 흡착되어 단일 원자층 또는 박막을 형성합니다. 바륨의 낮은 전기 음성도와 텅스텐의 높은 전기 음성도는 표면 쌍극자 층을 형성하여 표면 장벽을 감소시키고 텅스텐의 일 함수를 4.5 eV 에서 1.1-1.5 eV 로 감소시킵니다. 표면 피복률은 작업 기능의 균일성을 보장하기 위해 80% 이상에 도달해야 하며, 그 이하에서는 국부적인 높은 작업 기능 영역으로 이어지고 배출 효율이 감소할 수 있습니다.
- **화학적 및 물리적 흡착:** 바륨 원자는 화학적 흡착을 통해 텅스텐 표면과 강한 결합을 형성하여 활성층의 안정성을 향상시킵니다. 물리적으로 흡착된 바륨 원자는 동적 평형을 유지하기 위해 지속적인 바륨 보충을 제공합니다. 화학 흡착의 안정성은 고온에서 활성층의 장기적인 신뢰성을 보장합니다.

낮은 일 함수의 형성은 바륨 화합물의 분해 속도, 기공 구조의 확산 효율 및 표면 형태의 균일성에 따라 달라집니다. 이러한 요소를 최적화하면 안정적인 고전류 밀도와 낮은 소음 방출이 가능하므로 마이크로파 튜브 및 X 선관과 같은 고출력 진공 전자 장치에 적합합니다.

3.2.2 활성층의 동적 거동 및 열 안정성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

바륨 활성층의 동적 거동과 열 안정성은 음극의 성능과 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. 주요 기능은 다음과 같습니다.

- **동적 동작:** 활성 층은 작동 중에 동적 평형 상태에 있으며, 바륨 원자는 기공에서 표면으로 지속적으로 확산되는 반면 일부 바륨 원자는 증발로 인해 손실됩니다. 보충률이 손실률과 일치하도록 바륨 화합물 비율을 최적화해야 합니다. 활성 레이어 적용 범위는 시간에 따라 변동하며 초기 손실을 줄이기 위해 단계별 활성화 프로세스를 통해 초기 형성을 최적화해야 합니다.
- **열 안정성:** 활성층은 900–1100°C 에서 안정적이어야 하며, 너무 높은 온도에서는 바륨의 증발 손실이 가속화되어 일 함수가 증가합니다. 온도가 너무 낮으면 바륨 확산이 제한되고 배출 효율이 감소합니다. 텅스텐 매트릭스의 높은 열전도율(173W/m·K)과 낮은 열팽창 계수($4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)는 열 응력을 최소화하고 활성층의 구조적 무결성을 유지합니다.
- **표면 지형:** 활성 층의 표면 거칠기는 국부적인 고출력 함수 영역을 피하기 위해 낮게 유지되어야 합니다. 주사 전자 현미경(SEM) 및 원자력 현미경(AFM) 분석 결과 균일한 활성층이 방출 노이즈(노이즈 수준 <1%)를 줄이고 전류 안정성을 향상시키는 것으로 나타났습니다. 예를 들어, 입자 축적과 같은 표면 결함은 국부적인 전류 밀도 변동을 일으켜 소음을 증가시킬 수 있습니다.

활성층의 동적 거동과 열 안정성은 정밀한 공정 제어(예: 함침 매개변수, 활성화 온도)를 통해 최적화되어야 합니다. 예를 들어, 소량의 희토류 산화물을 첨가하면 활성층의 증발 저항을 향상시키고 수명을 연장할 수 있습니다. 표면 지형 및 방출 특성을 정기적으로 모니터링(예: SEM 또는 전류계)을 통해 활성층의 안정성을 평가할 수 있습니다.

3.3 바륨 텅스텐 음극의 방출 성능에 영향을 미치는 요인

바륨 텅스텐 음극의 방출 성능은 작동 환경, 노화 및 중독 효과, 고장 모드 등 다양한 요인의 영향을 받습니다.

3.3.1 근무 환경

작업 환경은 온도, 진공, 표면 오염, 외부 전기장 및 기계적 응력을 포함하여 바륨 텅스텐 음극의 방출 성능에 상당한 영향을 미칩니다.

- **작동 온도:** 바륨-텅스텐 음극의 이상적인 작동 온도는 900–1100°C(1173–1373K)이며, 이는 고전력 장치에 높은 전송 전류 밀도를 허용합니다. 과도한 온도는 바륨의 증발 손실을 가속화하고 활성층의 적용 범위에 영향을 미치며 일 기능을 증가시키고 전류 밀도를 감소시킵니다. 온도가 너무 낮으면 바륨 원자의 확산이 제한되고 방출 효율이 감소합니다.
- **영향 메커니즘:** 고온은 바륨 원자의 열 증발을 가속화하고 활성층의 피치를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

감소시킵니다. 온도가 낮으면 분해 및 확산 속도가 느려져 일 기능의 안정성에 영향을 미칩니다.

대처 전략:

- o 온도 균일성은 고정밀 가열 시스템에 의해 제어되며, 적외선 온도계를 사용하여 실시간 모니터링이 수행됩니다.
- o 바륨 화합물의 비율을 최적화하여 고온에서 바륨의 증발 손실을 낮추고 활성층의 수명을 연장합니다.
- o 국부적 과열을 방지하기 위해 효율적인 방열 구조(예: 텅스텐 매트릭스 뒷면에 냉각 채널 추가)를 설계하십시오.
- **진공 환경:** 바륨 텅스텐 음극은 잔류 가스 오염을 방지하기 위해 고진공 상태에서 작동해야 합니다. 낮은 진공은 산소, 수증기 또는 탄소 화합물이 바륨과 반응하여 방출 전류 밀도를 감소시키는 고일 함수 화합물을 형성합니다.

영향 메커니즘: 잔류 가스는 바륨 원자와 화학적으로 반응하여 불활성 화합물을 형성하여 표면 장벽을 증가시키고 전자의 탈출 효율을 감소시킵니다.

대처 전략:

- o 터보 분자 또는 이온 펌프와 같은 고효율 진공 펌프 시스템으로 진공을 유지합니다.
- o 진공 밀봉 기술(예: 금속-세라믹 밀봉) 및 사전 진공 처리는 잔류 가스를 줄입니다.
- o 진공 챔버를 정기적으로 청소(예: 플라즈마 세척 또는 고온 베이킹)하여 흡착된 가스 분자를 제거하십시오.
- **표면 오염:** 산소, 수증기, 탄소 화합물 또는 황화물은 바륨과 반응하여 고출력 기능 화합물(예: BaCO_3)을 형성하여 배출 효율을 크게 감소시킵니다. 오염물은 일반적으로 가스의 분압에 비례합니다. 일반적인 오염 물질은 다음과 같습니다.

- o 산소: BaO_2 를 형성합니다(일 함수 2.5eV).
- o 수증기: Ba(OH)_2 (일 함수 2.8eV)를 형성합니다.
- o 탄소 화합물: BaCO_3 의 형성(일 함수 3.0 eV).

영향 메커니즘: 오염물질은 화학흡착을 통해 활성 부위를 점유하고 저전력 기능층을 파괴하며 배출 성능을 저하시킵니다.

대처 전략:

- o 클린룸 환경은 초기 오염을 줄이기 위해 음극 제조 및 설치 중에 사용됩니다.
- o 사전 활성화 처리는 표면 오염 물질을 제거합니다.
- o 오염 반응 속도를 늦추기 위해 보호층을 형성하기 위해 항독성제가 첨가됩니다.
- o 주기적인 표면 재생(예: 이온 충격 또는 극저온 활성화)은 방출 성능을 복원합니다.
- **외부 전기장:** 인가된 전기장은 쇼트키 효과를 통해 방출 성능을 향상시켜 일 함수를 감소시키고 전류 밀도를 증가시킵니다. 그러나 과도한 전기장은 국부적인 아크를 유발하여 표면 손상이나 방출 불안정을 초래할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전기장 균일성이 부족하면 과도한 국부 전류가 발생하여 노화가 가속화될 수 있습니다.

영향 메커니즘: 높은 전기장은 잠재적인 장벽을 줄이고 방출을 향상시킵니다. 고르지 않은 전기장은 국부적인 과열 또는 아크를 유발하여 표면 구조를 손상시킵니다.

대처 전략:

- o 전극 형상(예: 매끄러운 원형 전극 또는 게이트 구조)을 최적화하여 전기장 균일성을 보장합니다.
- o 전기장 프로브를 사용하여 전기장 강도를 실시간으로 모니터링하여 과도한 전기장을 방지합니다.
- o 표면 연마 및 결함 수리(예: 레이저 수리)는 아크 위험을 줄입니다.
- **기계적 응력:** 고온 작동은 특히 온도 구배가 큰 경우 열 응력을 유발하여 텅스텐 매트릭스의 미세 균열 또는 기공 붕괴를 유발할 수 있습니다.

영향 메커니즘: 열 응력은 매트릭스 구조에 손상을 일으켜 바륨 확산 및 활성층 안정성에 영향을 미칩니다.

대처 전략:

- o 열 응력을 줄이기 위해 단계별 가열이 사용됩니다.
- o 다공성을 최적화하고 기계적 강도와 확산 효율의 균형을 맞춥니다.
- o 고강도 텅스텐 매트릭스를 사용하여 균열 저항성을 향상시킵니다.

작업 환경을 최적화하려면 온도 제어, 진공 기술, 전극 설계 및 기계적 안정성을 종합적으로 고려하여 일관된 높은 방출 성능을 보장해야 합니다.

3.3.2 노화 및 독성 영향의 메커니즘

노화 및 중독 효과는 바륨 텅스텐 음극 성능 저하의 주요 원인이며 메커니즘은 다음과 같습니다.

- **노화 효과:** 장기간 작동하면 바륨 화합물이 고갈되고 활성층 적용 범위가 감소하며 작업 기능이 증가합니다. 바륨 텅스텐 음극의 수명은 저장된 바륨의 양 및 작업 조건과 밀접한 관련이 있습니다.

영향 메커니즘: 바륨 고갈은 활성층의 피지를 감소시키고 표면 장벽을 증가시키며 전자 탈출 효율을 감소시킵니다.

대처 전략:

- o 다공성을 높이거나 바륨 화합물 비율을 최적화하여 바륨 저장량을 늘리고 수명을 연장합니다.
- o 정기적인 저온 활성화는 활성 층을 보충하여 적용 범위를 복원합니다.
- o 전송 전류의 실시간 모니터링, 노화 과정 예측 및 작동 매개변수의 사전 조정.
- o 고용량 바륨 화합물은 고전력 응용 분야의 초기 바륨 저장을 늘리는데 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **중독 효과:** 잔류 가스(예: O_2 , H_2O , CO_2)는 바륨과 반응하여 고출력 기능 화합물(예: BaO_2 , $BaCO_3$)을 형성하여 배출 효율을 감소시킵니다. 중독률은 가스의 분압에 정비례하며 일반적인 오염 물질과 그 영향은 다음과 같습니다.

- o 산소: BaO_2 를 형성합니다(일 함수 2.5eV).
- o 수증기: $Ba(OH)_2$ (일 함수 2.8eV)를 형성합니다.
- o 탄소 화합물: $BaCO_3$ 의 형성(일 함수 3.0 eV).

영향 메커니즘: 오염물질은 화학흡착을 통해 활성 부위를 점유하고 저전력 기능층을 파괴하며 배출 성능을 저하시킵니다.

대처 전략:

- o 항독성제를 첨가하여 보호층을 형성하여 반응 속도를 늦추고 성능 유지 시간을 연장합니다.
- o 진공 수준을 높이면 이온 펌프와 극저온 트랩 펌프의 조합을 사용하는 것과 같은 오염 가능성이 줄어듭니다.
- o 정기적인 표면 재생(예: 이온 폭격 또는 극저온 활성화)은 오염 물질을 제거하고 전류 밀도를 복원합니다.
- o 전극 설계를 최적화(예: 차폐 추가)하여 활성 층과의 오염 물질 접촉을 줄입니다.

노화 및 독성 영향의 관리는 재료 최적화, 공정 개선 및 환경 제어를 통해 달성되어야 합니다.

3.3.3 고장 모드 분석

바륨 텅스텐 음극의 고장 모드에는 다음과 같은 유형이 포함되며 각각 특정 진단 방법과 개선 전략이 필요합니다.

- **표면 오염으로 인한 방출 감소:** 오염 물질(예: BaO_2 , $BaCO_3$)은 일 함수를 증가시키고 전류 밀도와 성능을 감소시킵니다.

진단 방법:

- o X 선 광전자 분광법(XPS)은 표면의 화학 조성을 분석하고 Ba/O/C 비율을 감지하며 오염 물질의 유형을 확인합니다.
- o 열이온 방출 테스트는 전류 밀도 감소를 평가합니다.
- o 에너지 분산 분광법(EDS)은 표면 원소 분포를 검증합니다.

개선 전략:

- o 중독 방지 첨가제는 항산화 보호층을 형성하는 데 사용됩니다.
- o 고진공 환경과 플라즈마 세척을 사용하여 오염 물질을 제거하십시오.
- o 단계별 가열과 같은 활성화 프로세스를 최적화하여 초기 표면 청소를 보장합니다.

- **바륨 고갈:** 장기간 작동하면 바륨 화합물이 고갈되고 활성층 적용 범위가 감소하고 일 기능이 증가하며 전류 밀도가 감소합니다.

진단 방법:

- o SEM은 활성층의 형태를 관찰하고 커버리지를 검증했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 일 기능 측정(예: 열이온 방출 테스트)은 성능 저하를 평가합니다.
- o 바륨 함량의 EDS 분석.

개선 전략:

- o 바륨 저장량을 늘리십시오.
- o 최적화된 비율은 바륨 고갈을 늦추고 수명을 연장합니다.
- o 정기적인 저온 활성화는 활성 레이어를 보충하여 전류 밀도를 복원합니다.
- **기계적 고장:** 고온 열 응력은 텅스텐 매트릭스의 균열 또는 기공 붕괴를 일으켜 바륨 확산에 영향을 미칠 수 있습니다.

진단 방법:

- o X 선 단층촬영은 기공 구조를 분석하여 균열이나 붕괴를 감지합니다.
- o 압축 강도 테스트와 같은 기계적 테스트는 매트릭스 무결성을 평가합니다.

개선 전략:

- o 소결 공정을 최적화(예: 소결 온도 낮추기)하여 매트릭스의 강도를 향상시킵니다.
- o 열 응력을 줄이기 위해 단계별 가열이 사용됩니다.
- o 도핑은 균열 저항성을 향상시킵니다.
- **아크 실패:** 표면 결함(예: 입자 축적, 균열) 또는 고르지 않은 활성 층은 국부적인 아크를 유발하여 방출 불안정 또는 표면 손상을 초래합니다.

진단 방법:

- o 고주파 방출 테스트는 전류 변동을 감지합니다.
- o SEM은 표면 결함을 분석합니다.
- o 아크 모니터링 장치(예: 오실로스코프)는 비정상적인 방전을 기록합니다.

개선 전략:

- o 용액 농도 제어와 같은 함침 공정을 최적화하여 활성층의 균질성을 보장합니다.
- o 결함을 제거하기 위한 표면 연마 및 레이저 수리.
- o 전극 설계 최적화(예: 게이트 간격 증가)는 전기장 집중을 줄이고 아크 위험을 줄입니다.

고장 분석에는 고장 원인을 정확하게 식별하기 위해 다중 기술 진단(예: XPS, SEM, X-CT, 배출 테스트)의 조합이 필요합니다. 예를 들어, X 선관 응용 분야에서 정기적인 XPS 분석 및 활성화는 고장률을 줄일 수 있습니다. 개선 전략에는 음극 수명을 연장하기 위한 재료 최적화(예: 항독성제 추가), 공정 개선(예: 단계별 활성화) 및 환경 제어(예: 고진공)가 포함됩니다.

요약하면, 바륨-텅스텐 음극의 작동 원리와 방출 메커니즘에는 열 방출 이론, 활성층의 동적 거동 및 다양한 환경 요인의 복잡한 상호 작용이 포함됩니다. 이 장에서는 Richardson-Ducman 방정식, 쇼트키 효과, 양자역학적 관점, 방출 특성 및

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

영향 요인에 대한 포괄적인 분석을 제공하여 다음 장에서 제조 기술 및 성능 최적화에 대해 논의할 수 있는 토대를 마련합니다.



4 장: 바륨 텅스텐 음극의 제조 및 가공 기술

바륨 텅스텐 음극의 제조 및 가공 기술은 고성능과 신뢰성을 달성하는 데 핵심적인 연결 고리이며, 이는 진공 전자 장치의 방출 효율, 수명 및 안정성에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 장에서는 다공성 텅스텐 매트릭스의 성형 공정, 바륨 화합물의 함침 및 활성화 공정, 품질 관리 및 테스트 방법을 자세히 살펴보고 원료 준비에서 최종 성능 검증에 이르는 전체 프로세스를 다룹니다.

4.1 다공성 텅스텐 매트릭스 몰딩

다공성 텅스텐 매트릭스는 바륨-텅스텐 음극의 핵심 구조로, 활성 바륨 원자의 확산을 지원하기 위해 바륨 화합물과 채널을 저장하기 위한 기공 네트워크를 제공합니다. 성형 공정에서는 고성능 음극재의 요구 사항을 충족하기 위해 다공성, 기공 크기 분포 및 기계적 강도를 정밀하게 제어해야 합니다. 이 섹션에서는 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분말의 스크리닝 및 압착 공정과 다공성 및 기계적 강도에 대한 최적화 기술에 대해 자세히 설명합니다.

4.1.1 텅스텐 분말의 스크리닝 및 압착 공정

텅스텐 분말의 스크리닝 및 압착은 다공성 텅스텐 매트릭스 형성의 기본 단계로, 매트릭스의 초기 미세 구조와 후속 가공 특성을 결정합니다. 자세한 프로세스는 다음과 같습니다.

- 텅스텐 분말 스크리닝:
 - **원료 선택:** 화학적 안정성을 보장하기 위해 고순도 텅스텐 분말을 선택하여 철, 탄소 또는 산소와 같은 불순물로 인한 부반응 또는 표면 오염을 줄입니다. 과도한 불순물 함량은 고온에서 매트릭스의 산화 또는 분해를 일으킬 수 있습니다.
 - **입자 크기 제어:** 스크리닝 또는 기류 분류 기술을 통해 텅스텐 분말의 입자 크기 분포를 제어합니다. 입자 크기 범위는 기공 설계에 따라 최적화되어야 합니다. 더 미세한 분말은 보다 균일한 기공 구조를 생성하여 고전류 밀도 응용 분야에 적합합니다; 더 거친 분말은 기계적 강도가 향상되고 긴 수명이 필요합니다. 입자 크기 분포는 일관성을 보장하기 위해 레이저 입자 크기 분석기로 측정됩니다.
 - **분말 전처리:** 표면 산화물 층이나 수분을 제거하려면 텅스텐 분말을 진공 또는 수소 분위기에서 저온으로 예열해야 합니다. 전처리는 또한 후속 압착을 위한 분말 유동성을 향상시킵니다.
- **프레스 과정:**
 - **금형 설계:** 음극 응용 분야(예: 마이크로파 튜브 또는 X 선관)를 기반으로 원통형, 시트 또는 기타 기하학적 금형을 설계합니다. 빌렛 결함을 줄이기 위해 금형 표면을 연마해야 하며 재료는 일반적으로 고압을 견딜 수 있는 고장력강 또는 카바이드입니다.
 - **프레스 기술:** 텅스텐 분말은 단축 프레스 또는 냉간 등방성 프레스(CIP) 기술을 사용하여 빌렛으로 압착됩니다. 단일 축 프레스는 소량 생산에 적합합니다. 냉간 등방성 프레스는 압력을 고르게 가하여 보다 균일한 빌렛을 생성하므로 고정밀 응용 분야에 적합합니다. 빌렛의 균열을 방지하기 위해 압착 과정에서 압력 속도를 제어해야 합니다.
 - **바인더 추가:** 블랭크의 녹색 강도를 향상시키기 위해 소량의 유기 바인더(예: 폴리비닐 알코올 또는 폴리메틸 메타크릴레이트)를 첨가할 수 있습니다. 바인더는 기공 구조에 영향을 미치는 잔류물을 방지하기 위해 후속 소결에서 완전히 휘발되어야 합니다.
 - **빌렛 검사:** 프레스된 빌렛의 밀도와 표면 무결성을 확인해야 합니다. 밀도는 아르키메데스 방법으로 측정하고 표면 결함은 광학 현미경 또는 초음파 검사로 식별하여 균열이나 박리가 없는지 확인합니다.
- **프로세스 최적화:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 입자 크기 분포와 압축 압력을 최적화하여 균일한 초기 기공 구조를 만듭니다. 좁은 입자 크기 분포는 기공 균일성을 향상시키지만 강도를 감소시킬 수 있습니다. 입자 크기 분포가 넓으면 강도가 향상되지만 다공성이 고르지 않게 될 수 있습니다.
- o 압착 환경은 먼지 오염을 방지하기 위해 클린룸(ISO 레벨 7 이상)에서 제어되어야 합니다.
- o 초기 구조가 설계 요구 사항을 충족하는지 확인하기 위해 현미경을 사용하여 빌렛 섹션의 기공 분포를 관찰하는 것과 같은 압착 매개변수를 실험적으로 검증합니다.

스크리닝 및 압착 공정은 텅스텐 분말의 고순도와 빌렛의 구조적 일관성을 보장하여 후속 소결 및 함침을 위한 토대를 마련해야 합니다.

4.1.2 다공성 및 기계적 강도의 최적화

다공성과 기계적 강도는 다공성 텅스텐 매트릭스의 주요 성능 매개변수로, 바륨 화합물의 저장 용량과 구조적 안정성의 균형을 맞추기 위해 소결 공정 및 기공 제어 기술을 통해 최적화되어야 합니다. 다음은 자세한 최적화 프로세스입니다.

• 소결 공정:

- o **소결 환경:** 소결은 텅스텐 분말의 산화를 방지하기 위해 진공 또는 고순도 수소 분위기에서 수행됩니다. 수소 분위기는 또한 잔류 바인더와 표면 산화물을 제거합니다.
- o **온도 제어:** 소결 온도는 일반적으로 2000-2200°C 이며, 기공 구조를 보존하기 위해 텅스텐의 녹는점보다 낮습니다. 단계별 가열은 열 응력을 줄이고 빌렛의 균열을 방지합니다. 유지 시간은 빌렛의 크기에 따라 최적화됩니다.
- o **소결 장비:** 정밀한 온도 제어 시스템을 갖춘 고온 진공로 또는 수소 보호로를 사용합니다. 용광로의 대기는 산소나 수증기 오염이 없는지 확인하기 위해 가스 분석기로 모니터링해야 합니다.
- o **기공 형성:** 소결 과정에서 텅스텐 입자는 표면 확산 및 입계 결합을 통해 강력한 결합을 형성하는 동시에 3 차원 연결된 기공 네트워크를 유지합니다. 전분이나 폴리스티렌 마이크로스피어와 같은 임시 충전제는 소결 중에 휘발되어 추가적인 다공성을 생성할 수 있습니다.

• 다공성 최적화:

- o **목표 다공성:** 텅스텐 분말 입자 크기, 압착 압력 및 소결 조건을 조정하여 다공성을 제어합니다. 적절한 다공성 범위는 응용 분야에 따라 최적화되어야 하며 고전류 밀도 응용 분야는 바륨 저장을 늘리기 위해 더 높은 다공성을 가져야 합니다. 수명이 긴 응용 분야에서는 강도를 향상시키기 위해 더 낮은 다공성이 필요합니다.
- o **기공 연결성:** 기공 네트워크 연결은 바륨 확산에 매우 중요하며 입자 크기 분포를 제어(미세한 입자와 더 큰 입자 혼합)하거나 필러를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

추가하여 달성할 수 있습니다. X 선 단층촬영(X-CT)은 기공의 3 차원 구조를 재구성하고 연결성을 확인합니다.

- **측정 방법:** 다공성은 수은 침입 또는 가스 흡착(BET)으로 측정하고 일반적인 표면적은 BET 방법으로 평가합니다. 기공 크기 분포는 균일한 기공 크기를 보장하기 위해 현미경 또는 X-CT로 분석됩니다.
- **기계적 강도 최적화:**
 - **강도 목표:** 매트릭스는 고온 작동 중 열 응력 및 기계적 진동을 견뎌야 하며 압축 강도는 테스트를 통해 평가됩니다.
 - **공정 조정:** 소결 온도를 낮추거나 유지 시간을 단축하면 더 많은 다공성을 보존할 수 있지만 입자 결합 강도는 보장해야 합니다. 도핑 미량 첨가제는 입자 경계 결합을 강화하고 강도를 향상시킬 수 있습니다.
 - **검증 방법:** 압축 또는 인장 시험을 통해 기계적 강도를 평가하고, SEM과 함께 소결된 입자의 결합 상태를 관찰하여 미세 균열이나 기공 붕괴가 없는지 확인합니다.
- **프로세스 검증:**
 - X-CT를 사용하여 소결 매트릭스의 기공 구조를 분석하여 다공성과 연결성이 요구 사항을 충족하는지 확인했습니다.
 - 미세 구조 분석과 결합된 기계적 테스트는 고온 작동 중 매트릭스의 안정성을 보장합니다.
 - 공정을 최적화하려면 다공성과 강도의 균형을 맞추기 위해 소결 온도와 충전재 비율을 조정하는 등 반복적인 실험이 필요합니다.

다공성과 기계적 강도를 최적화하려면 매트릭스가 고성능 양극재의 구조적, 기능적 요구 사항을 충족하는지 확인하기 위한 정밀한 공정 제어와 다중 기술 검증이 필요합니다.

4.2 바륨 화합물의 함침 및 활성화

바륨 화합물의 함침 및 활성화는 다공성 텅스텐 매트릭스에 활성 물질을 도입하고 음극의 방출 성능과 수명에 직접적인 영향을 미치는 저일 기능 활성층을 형성하는 핵심 공정입니다. 이 섹션에서는 함침 공정의 제형 및 최적화는 물론 활성화 중 열처리 기술에 대해 자세히 설명합니다.

4.2.1 함침 공정: 바륨 화합물 제형 및 함침 조건

함침 공정은 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공 네트워크에 바륨 화합물을 균일하게 도입하여 활성 바륨 원자의 지속적인 공급을 보장하는 것을 목표로 합니다. 다음은 자세한 프로세스 흐름 및 최적화 방법입니다.

- **바륨 화합물 제형:**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **재료 선택:** 일반적으로 사용되는 바륨 칼슘 알루미늄이트는 우수한 열분해 특성과 화학적 안정성으로 인해 널리 사용됩니다. 이 제형은 다음 반응을 통해 작동 온도에서 유리 바륨 원자를 방출합니다. 부



산물(예: CaO, Al₂O₃)은 매우 안정적이며 방출 특성을 방해하지 않습니다.

- **비율 최적화:** 애플리케이션 요구 사항에 따라 비율을 조정합니다. 고전류 밀도 응용 분야에서는 높은 바륨 함량 비율을 사용하여 바륨 방출률을 높일 수 있습니다. 수명이 긴 응용 분야는 CaO 또는 Al₂O₃의 비율을 높여 분해 속도를 늦출 수 있습니다. La₂O₃ 또는 CeO₂와 같은 항독성제를 첨가하면 항산화 능력이 향상됩니다.
- **입자 특성:** 바륨 화합물은 기공이 막히거나 고르지 않은 분포를 방지하기 위해 매트릭스의 기공 크기와 일치하도록 마이크론 수준으로 분쇄되어야 합니다.
- **용액 준비:**
 - **용매 선택:** 바륨 화합물을 탈이온수 또는 에탄올 또는 이소프로판올과 같은 유기 용매와 혼합하여 현탁액을 제조합니다. 탈이온수는 비용이 저렴하지만 불순물이 없어야 합니다. 유기 용매는 분산성을 향상시킬 수 있지만 휘발성과 안전성이 고려됩니다.
 - **분산 처리:** 고속 교반 또는 초음파 처리는 응집을 방지하기 위해 입자의 균일한 분산을 보장합니다. 투과성 효율과 기공 충전의 균형을 맞추기 위해 용액 농도를 최적화해야 합니다.
 - **첨가제:** 폴리에틸렌 글리콜과 같은 소량의 계면활성제는 용액 습윤성을 향상시키고 기공으로의 침투를 촉진할 수 있습니다.
- **함침 과정:**
 - **진공 함침:** 다공성 텅스텐 매트릭스를 진공 챔버에 넣어 기공에서 공기를 제거한 후 바륨 화합물 용액을 도입합니다. 진공 환경은 용액 침투 효율을 높이고 기포 잔류물을 줄입니다. 함침 시간은 매트릭스의 다공성에 따라 최적화됩니다.
 - **압력 함침:** 용액이 기공에 침투하는 것을 촉진하기 위해 적당한 압력을 가하여 다공성이 높은 기판에 적용됩니다. 매트릭스의 변형이나 기공의 막힘을 방지하기 위해 압력을 제어해야 합니다.
 - **공정 제어:** 먼지나 불순물 오염을 방지하기 위해 클린룸(ISO 클래스 5 이상)에서 함침을 수행해야 합니다. 그리스나 산화물을 제거하기 위해 매트릭스 표면을 사전 세척(예: 초음파 세척)해야 합니다.
- **건조:**
 - 함침된 기판을 저온에서 건조시켜 용매를 제거합니다. 건조는 바륨 화합물이 공기 중의 산소 또는 수증기와 반응하는 것을 피하기 위해 진공 또는 불활성 분위기에서 수행되어야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 단계별 건조는 용액의 급격한 휘발로 인한 기공 막힘을 방지합니다. 건조 후 바륨 화합물 충전이 설계 요구 사항과 일치하는지 확인하기 위해 매트릭스의 중량 증가를 확인해야 합니다.
- 프로세스 검증:
 - o SEM과 EDS를 사용하여 바륨 화합물의 분포 균일성을 분석하여 기공 충전을 확인했습니다.
 - o 중량 분석을 통해 충전량을 확인하고 현미경과 함께 기공 부분을 관찰하여 막힘이나 공극이 없는지 확인합니다.
 - o 진공, 압력, 용액 농도와 같은 함침 매개변수를 최적화하여 충전 효율과 균일성을 향상시킵니다.

함침 공정에서는 바륨 화합물이 기공 네트워크 전체에 고르게 분포되어 후속 활성화를 위한 안정적인 바륨 공급원을 제공해야 합니다.

4.2.2 활성화 공정: 열처리 및 표면 활성화층 형성

활성화 공정은 열처리를 통해 함침된 바륨 화합물을 분해하고 텅스텐 매트릭스 표면에 저일 함수 활성화층을 형성하며, 이는 음극 방출 성능을 달성하는 핵심 단계입니다. 자세한 프로세스는 다음과 같습니다.

- 열처리:
 - o 환경 제어: 활성화는 바륨 화합물의 산화 또는 오염을 방지하기 위해 고진공 또는 불활성 분위기(예: 고순도 아르곤)에서 수행됩니다. 터보 분자 펌프와 같은 진공 펌프 시스템은 잔류 가스의 낮은 분압을 보장합니다.
 - o 온도 절차: 열 응력으로 인한 매트릭스의 균열을 방지하기 위해 단계별 가열이 사용됩니다. 유지 시간은 바륨 화합물의 비율에 따라 최적화됩니다. 고온은 바륨 화합물의 분해를 촉진하여 자유 바륨 원자를 방출하고 기공을 통해 표면으로 확산됩니다.
 - o 장비 요구 사항: 정밀한 온도 제어 시스템을 갖춘 고온 진공로 또는 저항 가열로를 사용하십시오. 적외선 온도계는 기관 온도를 실시간으로 모니터링하여 균일성을 보장합니다.
- 계면활성제 층 형성:
 - o 바륨 확산 및 흡착: 자유 바륨 원자는 기공 네트워크를 통해 텅스텐 매트릭스 표면으로 확산되어 단일 원자층 또는 박막을 형성합니다. 화학흡착된 바륨 원자는 텅스텐 표면과 강한 결합을 형성하여 일 함수를 1.1-1.5eV로 감소시킵니다. 물리적으로 흡착된 바륨 원자는 지속적인 보충을 제공하고 활성화층의 동적 평형을 유지합니다.
 - o 표면 지형 제어: 활성화층은 균일하고 연속적이어야 하며, 표면 거칠기는 연마를 통해 낮은 수준으로 제어되어야 합니다. 고르지 않은 활성화층은 국부적인 고전력 기능 영역으로 이어져 방출 효율을 감소시킬 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **첨가 효과:** 소량의 희토류 산화물을 첨가하면 활성층의 열 안정성을 향상시키고 바륨의 증발 손실을 늦출 수 있습니다.
- **프로세스 최적화:**
 - 활성화 온도와 시간은 바륨 화합물의 비율과 매트릭스의 기공 구조에 따라 조정되어야 합니다. 온도가 너무 높으면 바륨의 증발이 가속화되고 수명이 단축될 수 있습니다. 활성화가 충분하지 않으면 활성층 적용 범위가 낮아져 방출 성능에 영향을 미칠 수 있습니다.
 - 단계별 활성화는 단계적으로 수행될 수 있으며, 활성층을 형성하기 전에 바륨 화합물을 안정화시킵니다.
 - 활성화 후에는 열 응력으로 인한 표면 결함을 방지하기 위해 실온으로 냉각해야 합니다.
- **프로세스 검증:**
 - 활성 층의 방출 성능은 전류 밀도가 목표 값에 도달하는지 확인하기 위해 열이온 방출 테스트를 사용하여 검증됩니다.
 - AFM 과 SEM 은 표면 지형을 분석하여 활성 층의 균일성과 거칠기를 확인합니다.
 - XPS 는 표면의 화학 성분을 분석하여 바륨 원자 피복 효과와 일 함수 감소의 효과를 검증합니다.

활성화 공정에는 음극의 고성능 작동을 보장하기 위해 안정적인 활성 층을 형성하기 위해 정밀한 온도 및 환경 제어가 필요합니다.

4.3 바륨 텅스텐 음극의 품질 관리 및 테스트

품질 관리 및 테스트는 방출 성능 테스트, 적합성 평가 및 고장 분석을 포함하여 바륨 텅스텐 음극 성능의 일관성과 신뢰성을 보장하는 핵심 측면입니다. 이 섹션에서는 방법론과 표준에 대해 자세히 설명합니다.

4.3.1 전송 성능을 위한 테스트 방법

방출 성능 테스트는 제조 공정의 효율성을 검증하기 위해 바륨-텅스텐 음극의 전류 밀도, 일 기능 및 방출 안정성을 평가하도록 설계되었습니다. 자세한 테스트 방법은 다음과 같습니다.

- **열이온 방출 테스트:**
 - **테스트 조건:** 고진공 환경에서 음극을 작동 온도로 가열하고 양극 컬렉터와 정밀 전류계를 사용하여 방출 전류를 측정합니다. 테스트 장치에는 고정밀 전원 공급 장치 및 온도 제어 시스템이 장착되어 있어야 합니다.
 - **테스트 절차:** 점진적으로 증가하는 양극 전압을 적용하고 전류-전압 특성 곡선(IV 곡선)을 기록합니다. Richardson-Dushman 방정식을 사용하여 일 함수를 계산합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

일 함수가 1.1–1.5 eV 범위에 있고 전류 밀도가 설계 요구 사항을 충족하는지 확인합니다.

- 데이터 분석: 전송 전류의 안정성과 잡음 수준을 평가합니다. 비정상적인 변동은 고르지 않은 활성 층이나 표면 오염을 나타낼 수 있습니다.
- 맥박 테스트:
 - 테스트 목적: 고전력 장치의 과도 작동 조건을 시뮬레이션하고 높은 전기장 또는 높은 전류 밀도에서 음극의 성능을 평가합니다.
 - 테스트 프로세스: 펄스 전압을 적용하여 과도 전류 밀도와 응답 시간을 측정합니다. 테스트는 표면 결함 또는 불균일성으로 인해 방출되는 소음을 감지합니다.
 - 장비 요구 사항: 고주파 펄스 전원 공급 장치와 오실로스코프를 사용하여 전류 파형을 기록하여 측정 정확도를 보장합니다.
- 수명 테스트:
 - 테스트 조건: 시뮬레이션된 작동 조건에서 수천 시간 동안 연속 작동하여 전류 밀도 감쇠를 모니터링합니다.
 - 테스트 프로세스: 전류 밀도 및 작업 기능 변화를 정기적으로 기록하고 성능 감쇠 곡선을 그립니다. 테스트는 노화율과 활성 층 안정성을 평가합니다.
 - 데이터 분석: 감쇠 곡선을 통해 음극 수명을 예측하여 애플리케이션 요구 사항이 충족되도록 합니다.
- 확인 방법:
 - 테스트 결과는 전류 밀도가 목표 값에 도달해야 하고 작업 기능이 기대치를 충족해야 하는 것과 같은 설계 사양과 비교되어야 합니다.
 - 장비 오류나 환경 간섭을 제외하고 데이터 신뢰성을 보장하기 위한 여러 테스트.

방출 성능 테스트는 다중 매개변수 분석과 결합된 표준화된 테스트 환경에서 수행되어 음극 성능이 애플리케이션 요구 사항을 충족하는지 확인합니다.

4.3.2 일관성 및 신뢰성 평가 기준

일관성과 신뢰성은 바륨 텅스텐 음극의 대규모 생산을 위한 핵심 요구 사항이며 다음 기준에 따라 평가됩니다.

- 적합성 평가:
 - 매개변수 모니터링: 여러 음극 배치의 방출 전류 밀도, 일 함수 및 수명에 대한 통계 분석, 변동 계수(표준 편차/평균) 계산. 배치마다 일관된 성능을 보장하려면 변동 계수를 낮게 유지해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 미세 구조 검증: SEM 및 X-CT 를 사용하여 매트릭스 기공 구조와 바륨 화합물 분포를 분석하여 배치마다 일관된 다공성과 충전량을 보장합니다. 표면 거칠기는 AFM 으로 측정됩니다.
- 공정 제어: 통계적 공정 제어(SPC) 기술을 사용하여 압착 압력, 소결 온도 및 함침 매개변수를 실시간으로 모니터링하고 시간에 따라 편차를 조정합니다. 관리도를 사용하여 주요 매개변수의 안정성을 추적할 수 있습니다.
- 신뢰성 평가:
 - 가속 노화 테스트: 극한 환경에서 음극의 성능 저하를 평가하기 위해 고온 또는 고전류 밀도 조건에서 작동합니다. 테스트 결과는 평균 고장 간격(MTBF)과 고장 확률을 계산하는 데 사용됩니다.
 - 환경 적응성 테스트: 다양한 환경에서 음극의 안정성을 검증하기 위해 시뮬레이션된 작동 조건에서 테스트합니다.
 - 표준 개발: 신뢰성 지표는 애플리케이션 요구 사항(예: 마이크로파 튜브 또는 X 선관)을 기반으로 개발됩니다.
- 확인 방법:
 - 다중 배치 테스트 데이터를 결합하여 생산 공정의 반복성과 안정성을 평가합니다.
 - 통계 소프트웨어를 사용하여 매개변수 분포를 분석하여 정규 분포 또는 목표 허용 오차가 충족되는지 확인합니다.
 - 측정 정확도와 일관성을 보장하기 위해 테스트 장비를 정기적으로 교정하십시오.

적합성 및 신뢰성 평가에는 생산 및 응용 분야에서 음극의 성능 안정성을 보장하기 위한 체계적인 테스트와 데이터 분석이 필요합니다.

4.3.3 고장 분석 및 개선

고장 분석은 바륨 텅스텐 음극 열화 또는 고장의 원인을 파악하고 목표 개선 조치를 제안하는 것을 목표로 합니다. 다음은 일반적인 고장 모드 및 분석 방법입니다.

- 표면 오염:
 - 고장 메커니즘: 산소, 수증기 또는 탄소 화합물은 바륨과 반응하여 고일 함수 화합물(예: BaO_2 또는 $BaCO_3$)을 형성하여 배출 성능을 저하시킵니다.
 - 진단 방법:
 - X 선 광전자 분광법(XPS)은 표면의 화학 조성을 분석하고 Ba/O/C 비율을 감지하며 오염 물질의 유형을 확인합니다.
 - 열이온 방출 테스트는 오염 효과를 확인하기 위해 전류 밀도 감쇠를 평가합니다.
 - 개선 조치:
 - 잔류 가스 오염을 줄이기 위해 진공 수준을 높입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La_2O_3 와 같은 항독성제를 첨가하여 보호층을 형성합니다.
 - 플라즈마 세척은 표면 오염 물질을 제거하는 데 사용됩니다.
- **바륨 고갈:**
 - **고장 메커니즘:** 장기간 작동하면 바륨 화합물이 고갈되고 활성층 적용 범위가 감소하며 작업 기능이 증가합니다.
 - **진단 방법:**
 - SEM 과 EDS 는 바륨 함량과 활성 층 형태를 분석하여 적용 범위를 확인했습니다.
 - 일 기능 측정(열이온 방출 테스트에 의해)은 성능 저하를 평가합니다.
 - **개선 조치:**
 - 바륨 저장량을 늘리기 위해 바륨 화합물의 비율을 최적화합니다.
 - 충전 용량을 높이기 위해 다공성을 개선합니다.
 - 활성층을 보충하기 위한 정기적인 저온 활성화.
- **기계적 고장:**
 - **고장 메커니즘:** 열 응력이나 기계적 진동으로 인해 매트릭스 균열이나 기공 붕괴가 발생하여 바륨 확산에 영향을 미칠 수 있습니다.
 - **진단 방법:**
 - X-CT 는 기공 구조를 분석하여 균열이나 붕괴를 감지합니다.
 - 기계적 테스트(예: 압축 테스트)는 기관 강도를 평가합니다.
 - **개선 조치:**
 - 소결 공정을 최적화하여 입자 결합을 강화합니다.
 - 열 응력을 줄이기 위해 단계별 가열이 사용됩니다.
 - ZrO_2 를 도핑하면 균열 저항성이 향상됩니다.
- **아크 실패:**
 - **고장 메커니즘:** 표면 결함이나 고르지 않은 활성층은 국부적인 아크를 유발하여 방출 불안정이나 표면 손상을 초래합니다.
 - **진단 방법:**
 - SEM 은 입자 축적 또는 균열과 같은 표면 결함을 감지합니다.
 - 고주파 방출 테스트(주파수 1kHz)는 전류 변동을 기록합니다.
 - 오실로스코프는 아크 신호를 모니터링합니다.
 - **개선 조치:**
 - 최적화된 함침 공정은 활성 층의 균일성을 보장합니다.
 - 표면 연마는 결함을 줄입니다.
 - 전극 설계를 최적화하여 전기장 농도를 줄입니다.
- **고장 분석 방법:**
 - **결함 트리 분석(FTA):** 주요 고장 모드(예: 바륨 고갈 또는 표면 오염)와 근본 원인(예: 공정 매개변수 편차)을 식별하기 위해 고장 원인 트리를 구성합니다.
 - **통계적 프로세스 제어(SPC):** 고장 데이터를 분석하고, 프로세스 병목 현상을 식별하고, 주요 매개변수를 최적화합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 다중 기술 진단: XPS, SEM, X-CT 및 방출 테스트를 결합하여 고장 메커니즘을 종합적으로 분석합니다.
- 개선 전략:
 - o 공정 매개변수(예: 소결 온도, 함침 압력)를 최적화하여 음극 일관성을 개선합니다.
 - o 온도 센서나 가스 분석기 등 온라인 모니터링 시스템을 도입하여 공정 편차를 실시간으로 감지합니다.
 - o 고장 분석 결과를 공정 개선에 적용하고 고장률을 줄이기 위한 피드백 메커니즘을 구축합니다.

고장 분석에는 근본 원인을 파악하고 효과적인 개선 조치를 제안하기 위해 다중 기술 진단과 체계적인 분석 방법의 조합이 필요합니다.

이 장에서는 텅스텐 매트릭스 형성에서 활성층 형성에 이르는 공정의 각 단계와 성능 테스트 및 고장 분석의 주요 방법에 대해 자세히 설명하고 고성능 음극의 생산 및 최적화를 위한 견고한 기술 기반을 제공하고 후속 응용 프로그램 개발 및 성능 개선을 위한 공정 보증을 제공합니다.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

5 장: 바륨 텅스텐 음극의 적용

바륨 텅스텐 음극은 낮은 일 기능, 높은 방출 전류 밀도 및 우수한 열 안정성으로 인해 많은 첨단 기술 분야에서 효율적인 열이온 방출원으로 핵심적인 역할을 합니다. 이 장에서는 진공 전자, 과학 기기, 산업 및 통신, 항공 우주 및 방위, 신형 및 교차 분야 응용 분야에서 바륨 텅스텐 음극의 특정 용도에 대해 자세히 논의하고 다양한 시나리오에서 그 역할과 기술 요구 사항을 분석합니다.

5.1 진공 전자 장치

진공 전자 장치는 진공 환경에서 전자의 이동을 사용하여 신호 증폭, 진동 또는 에너지 변환을 달성하며 통신, 레이더 및 산업 분야에서 널리 사용됩니다. 바륨 텅스텐 음극은 고효율 전자 방출원 역할을 하여 이러한 장치에 고전류 전자의 꾸준한 흐름을 제공하여 높은 전력 및 주파수 요구 사항을 충족합니다.

5.1.1 전자레인지 튜브

마이크로파관은 전자빔을 사용하여 전자기장과 상호 작용하여 마이크로파 신호를 생성하거나 증폭하는 진공 전자 장치의 일종으로, 레이더, 통신 및 과학 실험에 널리 사용됩니다. 바륨 텅스텐 음극은 높은 방출 효율과 안정성으로 인해 마이크로파 튜브에 없어서는 안 될 필수 요소입니다.

5.1.1.1 마그네트론: 레이더 및 마이크로파 가열 장비에 사용

- **장비 소개:** 마그네트론은 전기장과 자기장의 상호 작용 하에 특정 궤도를 따라 전자를 움직여 공진기 캐비티를 여기시켜 고주파 마이크로파 신호(보통 GHz 범위)를 생성하는 고출력 마이크로파 발진기입니다. 핵심 구성 요소에는 음극 (전자원), 양극 공명 공동 및 자기장 시스템이 포함됩니다. 마그네트론은 고전력(kW 에서 MW) 펄스 또는 연속 마이크로파 신호를 생성하는 능력으로 인해 레이더 시스템(예: 기상 레이더, 군용 표적 추적 레이더) 및 마이크로파 가열 장비(예: 산업용 전자레인지, 마이크로파 건조 장비)에 널리 사용됩니다.
작동 원리: 음극은 전자를 방출하여 교차 전기장 및 자기장의 작용으로 회전하는 전자 구름을 형성하고 양극 공진 공동과 결합하여 특정 주파수의 마이크로파 신호를 생성합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 기능:** 바륨 텅스텐 음극은 마그네트론의 전자원 역할을 하여 고전류 밀도 전자 흐름을 제공하고 고출력 마이크로파 출력을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **높은 전류 밀도:** 마그네트론은 높은 전력 출력을 지원하기 위해 높은 전류 밀도가 필요합니다. 바륨 텅스텐 음극은 전력 수요를 충족하기 위해 고온에서 안정적인 방출을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **빠른 응답:** 레이더 펄스 작동을 위해서는 음극이 방출 잡음이 적고 활성층이 균일하여 마이크로초 이내에 고주파 펄스 전압에 응답해야 합니다.
- **진동 저항:** 군용 레이더의 기계적 진동은 기공 붕괴 또는 활성층 박리를 방지하기 위해 음극 매트릭스의 높은 기계적 강도를 요구하며 소결 공정 및 매트릭스 구조를 최적화해야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 낮은 작업 기능과 높은 열 안정성으로 인해 고전력 및 펄스 조건에서 장기간 작동할 수 있어 효율적이고 안정적인 전자원에 대한 마그네트론의 요구 사항을 충족합니다.

5.1.1.2 TWT: 고주파 통신 및 위성 증폭기

- **장비 소개:** TWT(Traveling Wave Tube)는 전자빔과 진행파장의 상호 작용을 통해 고주파 신호를 증폭하는 광대역 마이크로파 증폭기입니다. 핵심 구성 요소에는 음극, 서파 구조, 전자 빔 초점 시스템 및 수집 전극이 포함됩니다. TWT는 높은 이득과 광대역 특성으로 인해 위성 통신(업링크/다운스트림 신호 증폭), 5G 기지국 및 방송 시스템에 널리 사용됩니다.
작동 원리: 음극에서 방출되는 전자빔은 저속파 구조(예: 나선형)로 입력 마이크로파 신호와 동시에 이동하고 전자빔의 운동 에너지가 신호로 전달되어 증폭 및 출력을 달성합니다.
- **바륨-텅스텐 음극 작용:** 바륨-텅스텐 음극은 안정적인 전자빔을 제공하여 진행파관의 고주파 신호 증폭을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **높은 방출 균일성:** 진행파관은 신호 증폭 품질을 보장하기 위해 안정적인 전자빔이 필요하며 음극 활성층은 신호 왜곡을 피하기 위해 균일하고 표면 거칠기가 낮아야 합니다.
 - **긴 수명:** 위성 통신은 긴 음극 수명이 필요하며 바륨의 증발 손실을 늦추기 위해 바륨 화합물의 비율을 최적화해야 합니다.
 - **항독성:** 우주 환경에는 미량의 잔류 가스가 있을 수 있으며 성능을 유지하려면 항독성제를 추가해야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 높은 전류 밀도 및 중독 방지 기능은 고주파, 긴 수명 작동에서 진행파관의 신호 안정성과 신뢰성을 보장합니다.

5.1.1.3 클라이스트론 튜브: 고효율 레이더 및 입자 가속기

- **장비 소개:** 클라이스트론 튜브는 공진 공동에서 전자빔의 속도 변조를 통해 마이크로파 신호를 생성하거나 증폭하는 고효율 마이크로파 증폭기 또는 발진기입니다. 핵심 구성 요소에는 음극, 공진 공동, 드리프트 튜브 및 수집 전극이 포함됩니다. 클라이스트론 튜브는 고효율 레이더(예: 항공 교통 관제 레이더, 미사일 유도 레이더) 및 입자 가속기(예: 싱크로트론 방사선원, CERN의 LHC)에 널리 사용됩니다.
작동 원리: 음극에서 방출되는 전자빔은 공진 캐비티를 통과할 때 속도 변조되어 밀도 변조 빔을 형성하여 후속 캐비티에서 운동 에너지를 마이크로파 에너지로 변환합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 바륨 텅스텐 음극은 고전류 전자빔을 제공하여 클라이스트론 튜브의 고전력 출력을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **초고전류 밀도:** 클라이스트론은 MW 수준의 출력을 지원하기 위해 매우 높은 전자 흐름이 필요하며, 높은 전기장에서 방출을 향상시키기 위해 음극을 쇼트키 효과와 결합해야 합니다.
 - **열 안정성:** 작동 온도의 변동으로 인해 음극이 안정적인 성능을 유지해야 하며, 매트릭스의 열전도율과 활성층의 내열성을 최적화해야 합니다.
 - **고진공 호환성:** 초고진공 음극에서는 표면 오염으로 인한 성능 저하를 피해야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극은 고전력 및 고전기장 조건에서 안정적인 전자 방출을 제공하여 클라이스트론 튜브의 극한의 작동 요구 사항을 충족합니다.

5.1.2 엑스레이 튜브

X 선관은 금속 표적에 고에너지 전자를 가하여 X 선을 생성하는 진공 장치로 의료 및 산업 분야에서 널리 사용됩니다. 바륨 텅스텐 음극은 고효율 전자원을 제공합니다.

5.1.2.1 의료 영상 장비(예: CT 스캐너, X 선 진단 기계)

- **장비 소개:** X 선관은 인체 조직 이미징을 위해 양극 표적(예: 텅스텐 또는 몰리브덴)을 전자적으로 충격하여 X 선을 생성하는 의료 영상 장비(예: 컴퓨터 단층 촬영 CT, X 선 진단 장비)의 핵심 구성 요소입니다. 주요 구성 요소에는 음극, 양극 및 진공 주택이 포함됩니다. CT 스캐너는 다각도 X 선 투영을 통해 3 차원 이미지를 생성하고, 진단용 X 선 기계는 뼈나 연조직 검사에 사용됩니다.
- 작동 방식:** 음극은 고전압 전기장의 가속 하에서 양극에 충격을 가하는 전자를 방출하여 형광 투시 이미징을 위한 특성 X 선과 연속 스펙트럼 X 선을 생성합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 바륨 텅스텐 음극은 고품질 X 선 신호를 생성하는 고에너지 전자빔을 제공합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **높은 방출 안정성:** 이미징 품질에는 안정적인 전자 흐름이 필요하며 전류 변동을 줄이기 위해 음극이 고르게 방출되어야 합니다.
 - **빠른 시작:** 진단 장비는 빠르게 시작되어야 하며 음극은 작동 온도에 도달하고 짧은 시간에 안정적으로 방출되어야 합니다.
 - **긴 수명:** 의료 장비는 긴 음극 수명이 필요하며 바륨 저장 및 중독 방지 기능을 최적화해야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨-텅스텐 음극의 높은 전류 밀도와 빠른 응답 기능은 X 선관의 이미징 정확도와 신뢰성을 보장하여 의료 기기의 높은 표준을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.2.2 산업용 비파괴 검사

- **장비 소개:** X 선관은 산업용 NDT 에서 내부 결함(예: 균열, 다공성), 용접 품질 또는 전자 부품 구조를 감지하는 데 사용됩니다. 의료용 X 선관과 유사하게 작동하지만 두꺼운 금속이나 복합재를 관통하려면 더 높은 X 선 에너지가 필요합니다. 응용 시나리오에는 항공 부품 검사, 파이프라인 용접 분석 및 반도체 패키지 검사가 포함됩니다.
작동 방식: 고에너지 전자빔이 표적에 충격을 가하여 X 선을 생성하고, 샘플을 전송한 후 검출기에 의해 포착되어 내부 구조의 이미지를 형성합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 바륨 텅스텐 음극은 고강도 전자빔을 제공하여 고에너지 X 선 생성을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **고출력 :** 산업 검사에는 고에너지 X 선이 필요하고 음극은 높은 전류 밀도를 제공해야 합니다.
 - **환경 적응성:** 산업 환경에서는 진동이나 온도 변화가 발생할 수 있으며 음극재는 높은 기계적 강도와 열 안정성을 가져야 합니다.
 - **오염 저항성:** 이상적이지 않은 진공 조건에서는 첨가제를 통한 증독에 대해 음극을 강화해야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 견고성과 높은 방출 효율은 산업 검사의 까다로운 조건에 적합하며 고품질 X 선 신호를 제공합니다.

5.1.3 기타 진공 장치

- **광전자 증배관 :**
 - **장비 소개:** PMT(Photomultiplier Tube)는 약한 빛 신호를 전기 신호로 변환하는 고감도 광검출기로, 방사선 검출기(예: 감마선 검출), 천문 관측 및 과학 실험의 광자 계수에 널리 사용됩니다. 핵심 구성 요소에는 광음극, 전자 승수 및 양극이 포함됩니다.
작동 원리: 광음극은 광자를 흡수하고 전자를 방출하며, 전자는 승수에 의해 증폭되고 양극에 의해 수집되어 감지 가능한 전기 신호를 형성합니다.
 - **바륨 텅스텐 음극 작용:** 매우 민감한 전자 방출을 제공하고 초기 광전 신호 생성을 지원합니다.
 - **음극 요구 사항:** 광자 감지 정확도를 보장하려면 매우 낮은 방출 노이즈와 빠른 응답 시간이 필요합니다.
 - **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 저잡음 및 고감도 특성은 광전자 증배관에 이상적인 전자원입니다.
- **전자빔 용접 장비:**
 - **장비 소개:** 전자빔 용접 장비는 항공우주, 자동차 제조, 원자력 산업에서 널리 사용되는 고정밀 용접을 위해 고에너지 전자빔 용융 재료를 활용합니다. 핵심 구성 요소에는 음극, 전자 광학 시스템 및 진공 챔버가 포함됩니다.
작동 원리: 음극에서 방출되는 전자빔은 고진공 상태에서 가속되고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

집중되어 공작물에 충격을 가하여 국부적인 고온을 발생시키고 깊은 용융 용접을 달성합니다.

- o **바륨 텅스텐 음극 작용:** 딥 멜트 용접을 지원하는 고에너지 전자빔을 제공합니다.
- o **음극 요구 사항:** 높은 전류 밀도와 안정적인 전자빔 집속 성능이 필요하며 과열을 방지하기 위해 작동 온도를 정밀하게 제어해야 합니다.
- o **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 높은 방출 효율과 안정성은 용접의 정밀도와 효율성을 보장합니다.

5.2 과학 기기

바륨 텅스텐 음극은 과학 기기에서 고성능 전자원 역할을 하며 높은 정밀도와 감도의 요구 사항을 충족하는 고해상도 이미징 및 분석 작업을 지원합니다.

5.2.1 전자현미경

- **장비 소개:** 전자현미경은 전자빔 이미징을 사용하며 주사전자현미경(SEM)과 투과전자현미경(TEM)으로 구분됩니다. SEM 은 전자빔을 통해 샘플의 표면을 스캔하고 2 차 전자 또는 후방 산란 전자를 수집하여 나노미터 해상도의 표면 지형 이미지를 형성합니다. TEM 은 전자 빔으로 초박형 샘플을 관통하여 해상도가 옹스트롬 이하까지 내려가는 내부 구조의 이미지를 생성합니다. 둘 다 재료 과학, 생물학 및 나노 기술 연구에 널리 사용됩니다.
- 작동 방식:** 음극에서 방출되는 전자빔은 전기장에 의해 가속되고 자기장에 의해 집중되어 스캔(SEM) 또는 관통(TEM)되고 검출기에 의해 캡처되어 고해상도 이미지를 생성합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 고휘도 전자빔을 제공하고 나노 규모 이하의 이미징을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - o **고휘도:** 고해상도를 달성하려면 높은 전류 밀도와 낮은 방출 노이즈가 필요합니다.
 - o **안정성:** 장기 이미징에는 방출 전류의 변동이 적어야 하며 활성층의 균일성을 최적화 해야 합니다.
 - o **진공 호환성:** 초고진공은 오염에 대한 강력한 음극 저항성을 요구합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 높은 밝기와 안정성은 SEM 및 TEM 에 이상적인 전자원입니다.

5.2.2 질량 분석기: 고감도 이온 소스

- **장비 소개:** 질량 분석기는 시료 분자를 이온화하고 질량 대 전하 비율을 측정하여 분자 구성과 구조를 결정하는 분석 장비로 화학 분석, 환경 모니터링 및 생물 의학 연구에 널리 사용됩니다. 핵심 구성 요소에는 이온 소스, 질량 분석기 및 검출기가 포함됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

작동 원리: 음극은 전자를 방출하여 샘플 분자를 충격에 가하고, 이온을 생성한 후 전기장 또는 자기장에 의해 분리되고 질량 대 전하비에 따라 분자종을 감지합니다.

- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 샘플 이온화를 위해 안정적인 전자 흐름을 제공합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **고감도:** 이온화 효율을 향상시키기 위해서는 저에너지 전자의 꾸준한 흐름이 필요하며, 음극은 더 낮은 온도에서 작동해야 합니다.
 - **긴 수명:** 분석 작업은 장기간 실행되어야 하며 바륨 비율을 최적화하여 음극을 확장해야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨-텅스텐 음극의 낮은 작업 기능과 높은 방출 효율은 질량 분석기의 높은 감도와 장기적인 안정성을 보장합니다.

5.2.3 표면 분석 장비

- **장비 소개:** 오거 전자 분광계(AES) 및 X 선 광전자 분광계(XPS)는 재료 표면의 화학 조성과 전자 구조를 연구하는 데 사용되는 표면 분석 장비입니다. AES 는 원소 종을 분석하기 위해 전자 빔으로 샘플을 여기시켜 오거 전자를 생성합니다. XPS 는 X 선을 통해 광전자를 여기시켜 원소와 화학 상태를 측정합니다. 둘 다 재료 과학 및 반도체 연구에 널리 사용됩니다.
- 작동 방식:** 음극 방출 전자 또는 X 선 소스는 샘플을 여기시키고 에너지 스펙트럼 분석을 위해 방출된 전자를 수집합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 고정밀 표면 분석을 지원하기 위해 안정적인 전자빔(AES)을 제공합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **고정밀:** 저에너지 전자의 안정적인 흐름이 필요하며 음극은 균일한 방출과 저잡음 특성을 제공해야 합니다.
 - **초고진공 호환성:** 음극은 표면 오염을 피해야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 균일한 방출과 오염에 대한 저항성은 고정밀 표면 분석 작업에 적합합니다.

5.3 산업 및 통신 응용

바륨 텅스텐 음극은 산업 및 통신 분야의 고전력 전자 소스 및 신호 증폭 기능을 지원하여 높은 신뢰성과 효율성의 요구를 충족합니다.

5.3.1 레이더 시스템

- **장비 소개:** 레이더 시스템은 마이크로파 신호를 송수신하여 목표 위치와 속도를 감지하며 군용 레이더(예: 방공 레이더, 미사일 유도 레이더)와 민간 레이더(예: 항공 교통 관제, 기상 레이더)로 구분됩니다. 핵심 구성 요소에는 마이크로파 소스 (예: 마그네트론 또는 클라이스트론), 안테나 및 신호 프로세서가 포함됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

작동 원리: 음극에서 방출되는 전자빔은 마이크로파관에서 고출력 마이크로파 신호를 생성하며, 이는 안테나에 의해 전송된 후 검출기로 다시 반사됩니다.

- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 고출력 전자 흐름을 제공하고 마이크로파 신호 생성을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **고전력 출력:** 고전력 신호 전송을 지원하려면 높은 전류 밀도가 필요합니다.
 - **진동 저항:** 모바일 플랫폼(예: 선상 레이더)은 음극 매트릭스의 높은 기계적 강도를 요구합니다.
 - **빠른 응답:** 펄스 레이더는 음극에 의해 빠르게 시작되고 안정적으로 전송되어야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 높은 방출 효율과 견고성은 레이더 시스템에 이상적인 전자원입니다.

5.3.2 통신 장비

- **장비 소개:** 위성 통신 및 지상 기지국 증폭기는 장거리 신호 전송에 사용되며 진행파관이나 솔리드 스테이트 증폭기를 사용하여 고주파 신호를 증폭합니다. 위성 통신은 글로벌 통신망을 지원하며, 5G 와 방송 시스템에는 지상과 기지국이 활용되고 있습니다.
- 작동 원리:** 음극에서 방출되는 전자빔은 진행파관의 입력 신호를 증폭하고 고출력 신호를 출력합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 안정적인 전자 흐름을 제공하여 신호 증폭을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **고주파 안정성:** 저잡음 전자 흐름이 필요하며 음극 활성층이 균일해야 합니다.
 - **긴 수명:** 위성 통신은 긴 음극 수명이 필요하며 중독 방지 및 증발 성능을 최적화해야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극은 고주파 신호 증폭 및 장기 작동을 지원하여 통신 장비의 높은 신뢰성 요구 사항을 충족합니다.

5.3.3 진공 스위치 튜브

- **장비 소개:** 진공 스위치 튜브는 전력 시스템의 회로 차단기, 배전 및 부하 제어에 사용되는 고전압 스위칭 장치로, 전자 제어를 통해 빠른 스위칭을 달성합니다. 핵심 구성 요소에는 음극, 양극 및 진공 주액이 포함됩니다.
- 작동 원리:** 음극은 전자를 방출하여 고전압에서 아크 또는 온 전류를 형성하여 회로 스위칭을 실현합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 고전류 전자 흐름을 제공하고 빠른 스위칭 작동을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **고전류 밀도:** 고전류 스위칭 작동에 대한 지원이 필요합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **아크 저항:** 표면 결함으로 인한 아크를 방지하고 표면 지형을 최적화하는 것이 필요합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 높은 방출 효율과 안정성은 고전압, 고전력 스위칭 애플리케이션에 적합합니다.

5.4 항공우주 및 방위

바륨 텅스텐 음극은 극한 환경의 요구 사항을 충족하기 위해 항공 우주 및 방위 분야의 고신뢰성 및 고성능 전자 장치를 지원합니다.

5.4.1 우주 전자 장치

- **장비 소개:** 우주 전자 장치에는 극한의 진공 및 방사선 환경에서 작동해야 하는 심우주 탐사선 및 위성의 통신 모듈, 추진 시스템 및 과학 장비가 포함됩니다. 일반적인 응용 분야에는 위성 통신 시스템(예: GPS 위성) 및 탐사선(예: 화성 탐사선)을 위한 전자 소스가 포함됩니다.
- 작동 원리:** 음극은 전자 흐름을 제공하여 통신 신호 증폭 또는 추진제 이온화를 지원합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 장기 우주 임무를 지원하기 위해 신뢰성이 높은 전자원을 제공합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **극한 환경에 대한 적응성:** 우주 진공 및 방사선 환경에서 안정적으로 작동해야 합니다.
 - **긴 수명:** 임무 주기는 최대 몇 년이며 수명을 연장하려면 바륨 저장을 최적화해야 합니다.
 - **낮은 전력 소비:** 에너지를 절약하려면 낮은 화력이 필요합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 높은 신뢰성과 낮은 작업 기능으로 인해 우주 응용 분야에 선호되는 선택입니다.

5.4.2 전자 대책 시스템

- **장비 소개:** 전자 대책 시스템은 고출력 마이크로파 신호를 사용하여 고출력 마이크로파 무기 및 방해 전파를 포함한 적의 통신, 레이더 또는 전자 장비를 방해하거나 방해합니다. 핵심 구성 요소는 마이크로파 소스 (예 : 클로스트론 또는 마그네트론)입니다.
- 작동 원리:** 음극에서 방출되는 전자빔은 지향성 안테나를 통해 간섭 표적을 방출하는 고출력 마이크로파 신호를 생성합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 초고출력 전자 흐름을 제공하고 마이크로파 신호 생성을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **초고전력:** MW 수준의 출력을 지원하려면 매우 높은 전류 밀도가 필요합니다.
 - **빠른 응답:** 펄스 작동에는 빠른 시동과 안정적인 방출이 필요합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극은 높은 전기장과 고전력에서 안정적인 전자 흐름을 제공하여 카운터 시스템의 요구 사항을 충족합니다.

5.5 새로운 및 교차 도메인 애플리케이션

바륨 텅스텐 음극은 최첨단 연구 및 학제간 응용 분야를 지원하는 신흥 기술 분야에서 광범위한 잠재력을 보여줍니다.

5.5.1 테라헤르츠파 발생기

- **장비 소개:** 테라헤르츠파 발생기는 테라헤르츠 이미징(예: 보안, 의료 진단) 및 고속 통신을 위해 테라헤르츠파를 생성합니다. 핵심 구성 요소에는 전자 소스 및 발진기(예: 진행파 튜브 또는 클라이스트론 튜브)가 포함됩니다.
작동 원리: 음극에서 방출되는 전자빔은 고주파장에서 진동하여 테라헤르츠파를 생성합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 고주파 전자빔을 제공하고 테라헤르츠파 생성을 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **고주파 응답:** 터널링 효과와 함께 고자기장 강한 방출을 지원해야 합니다.
 - **안정성:** 고진공 및 고온에서 저소음이 필요합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 낮은 작업 기능과 높은 전류 밀도로 인해 테라헤르츠 파동 발생기의 높은 요구 사항에 적합합니다.

5.5.2 이온 추진기

- **장비 소개:** 이온 추진기는 심우주 탐사선이나 위성의 자세 제어를 위한 미세 추력(μN 에서 mN 수준)을 제공하기 위해 이온화 추진제(예: 크세논)를 통해 이온 빔을 생성하는 저추력, 고효율 우주 추진 시스템입니다.
작동 원리: 음극은 전자 이온화 추진제를 방출하고 전기장이 가속된 후 이온이 방출되어 추력을 생성합니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 고효율 전자를 제공하고 추진제 이온화를 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **고효율:** 이온화 효율을 향상시키기 위해서는 효율적인 전자 흐름이 필요합니다.
 - **긴 수명:** 심우주 임무에는 몇 년의 운영이 필요합니다.
- **기술적 이점:** 바륨-텅스텐 음극의 높은 방출 효율과 긴 수명은 이온 추진기의 낮은 전력 소비와 장기간 작동을 지원합니다.

5.5.3 고에너지 물리학 실험

- **장치 설명:** CERN의 LHC와 같은 입자 가속기는 고에너지 물리학 연구를 위해 전기장 및 자기장을 통해 하전 입자를 가속합니다. 전자 소스는 초기 입자 빔 또는 보조 빔을 생성하는 데 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

작동 원리: 음극에서 방출된 전자빔은 가속되어 가속기에 주입되어 입자 충돌 실험에 참여합니다.

- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 입자 빔 생성을 지원하기 위해 고전류 전자원을 제공합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **초고전류 밀도:** 고에너지 입자 빔을 지원해야 합니다.
 - **안정성:** 초고진공 상태에서 장시간 작동해야 합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 고성능 및 안정성은 고에너지 물리 실험의 극한 조건을 충족합니다.

5.5.4 생물 의학 응용

- **장비 소개:** 고정밀 질량 분석 분석은 바이오마커의 질량 대 전하 비율을 검출하여 질병 진단(예: 조기 암 검진, 대사 질환 발견)에 사용됩니다. 핵심 구성 요소는 질량 분석기의 이온 소스입니다.
- 작동 원리:** 음극은 전자를 방출하여 생물학적 샘플에 충격을 가하고 이온은 질량 분석법으로 생성 및 분석됩니다.
- **바륨 텅스텐 음극 작용:** 안정적인 전자 흐름을 제공하고 고감도 이온화를 지원합니다.
- **음극 요구 사항:**
 - **고감도:** 저에너지 전자의 안정적인 흐름이 필요합니다.
 - **저소음:** 분석 정확도를 위해서는 매우 낮은 방출 소음이 필요합니다.
- **기술적 이점:** 바륨 텅스텐 음극의 고감도 및 저잡음 특성은 생물 의학 질량 분석 분석에 이상적인 전자원입니다.

요약하면, 바륨 텅스텐 음극은 낮은 작업 기능, 높은 전류 밀도 및 우수한 안정성으로 인해 진공 전자, 과학 기기, 산업 및 통신, 항공 우주 및 방위 및 신형 분야에서 광범위한 응용 가치를 보여주었습니다. 이 장에서는 각 응용 시나리오의 장비 원리와 음극에 대한 기술 요구 사항을 자세히 소개하고, 첨단 기술 분야의 발전을 촉진하는 데 있어 바륨 텅스텐 음극의 핵심 역할을 명확히 하며, 후속 성능 최적화 및 학제 간 연구를 위한 응용 지향 참고 자료를 제공합니다.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 장: 바륨 텅스텐 음극 성능의 최적화 및 개선

바륨 텅스텐 음극의 성능 최적화 및 개선은 배출 효율 향상, 서비스 수명 연장, 환경 적응성 향상 및 지능형 설계 기능을 목표로 진공 전자 장치 및 첨단 응용 분야의 성능을 향상시키는 데 핵심입니다. 이 장에서는 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공 구조 최적화, 새로운 바륨 화합물의 제형, 나노 기술의 적용, 항독성 공정, 열 및 기계적 안정성 개선, 저전력 녹색 제조 및 지능형 모니터링 기술에 대해 자세히 논의하며 재료 설계에서 공정 최적화에 이르기까지 모든 전략을 다룹니다.

6.1 발사 효율성 향상

바륨 텅스텐 음극의 방출 효율을 향상시키는 것은 방출 전류 밀도를 높이고 일함수를 줄이며 전자의 방출 균일성을 향상시키는 것과 관련된 성능 최적화의 핵심 목표입니다. 이 섹션에서는 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공 구조 최적화, 새로운 바륨 화합물의 제형 및 도핑, 나노 기술의 적용에 대해 설명합니다.

6.1.1 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공 구조 최적화

다공성 텅스텐 매트릭스의 기공 구조는 바륨 원자의 확산 속도와 활성층의 형성 효율에 직접적인 영향을 미치며 다공성과 연결성을 최적화하여 방출 효율을 크게 향상시킬 수 있습니다.

- 다공성 조절:

- **최적화 목표:** 다공성을 조정하여 바륨 화합물 저장과 매트릭스 기계적 강도의 균형을 맞춥니다. 다공성이 높을수록 바륨 저장이 증가하여 높은 전류 밀도 방출에 도움이 됩니다. 낮은 다공성은 수명이 긴 응용 분야의 강도를 향상시킵니다.
- **공정 방법:** 미세한 텅스텐 분말을 더 큰 입자와 혼합하여 바이모달 기공 분포를 형성하고 연결성을 향상시킵니다. 폴리스티렌 마이크로스피어와 같은 임시 필러는 소결 중에 휘발되어 균일한 기공 네트워크를 생성합니다.
- **소결 파라미터 최적화:** 소결 온도, 가열 속도 및 유지 시간을 조정하여 입자가 기공을 유지하면서 결합하도록 합니다. 진공 또는 수소 분위기는 산화를 방지합니다.

- 기공 연결성 향상:

- **기술적 수단:** 텅스텐 분말의 입자 크기 분포와 압착 압력을 제어하여 3차원 연결 기공 네트워크를 형성하여 바륨 원자의 표면으로의 확산을 촉진합니다.
- **검증 방법:** X 선 단층촬영(X-CT)은 연결성을 확인하기 위해 기공 구조를 재구성합니다. 수은 압력 방법은 다공성과 기공 크기 분포를 측정합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **성능 향상:** 최적화된 기공 구조는 바륨 확산 효율을 향상시키고, 활성 표면층의 적용 범위를 늘리고, 일 함수를 감소시키고, 전송 전류 밀도를 증가시킬 수 있습니다.
- **공정 검증:** 주사 전자 현미경(SEM)은 기공 단면을 관찰하는 데 사용되며, 열전자 방출 테스트와 결합하여 방출 성능을 평가하여 균일성과 안정성을 보장합니다.

효율적인 배출을 위한 구조적 기반을 제공하기 위해 정밀한 분말 야금 및 소결 공정을 통해 기공 구조 최적화를 달성해야 합니다.

6.1.2 새로운 바륨 화합물의 제형 및 도핑 기술

새로운 바륨 화합물 제제 및 도핑 기술은 활성층의 형성과 안정성을 최적화하고 일 함수를 줄이며 배출 효율을 향상시킵니다.

- **새로운 바륨 화합물 제형:**
 - **공식 조정:** 전통적인 바륨 칼슘 알루미늄네이트($4\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 4:1:1)은 몰비를 조절하여 바륨 함량을 높이고 유리 바륨의 방출 속도를 가속화하여 고전류 밀도 응용 분야에 적합합니다. 낮은 바륨 비율은 분해 속도를 늦추고 긴 수명 요구에 적합합니다.
 - **대체 화합물:** 규산바륨(예: Ba_2SiO_4) 또는 티탄산바륨(예: BaTiO_3)은 특정 온도 범위에서 보다 안정적인 열 분해 특성으로 인해 대안으로 탐색하고 부산물 간섭을 줄입니다.
 - **입자 최적화:** 바륨 화합물을 서브미크론 수준으로 분쇄하여 매트릭스의 기공 크기와 일치시키고, 함침 균일성을 개선하며, 활성층 적용 범위를 향상시킵니다.
- **도핑 기술:**
 - **도펀트 선택:** 희토류 산화물(예: La_2O_3 , CeO_2 , <2wt%)을 첨가하여 활성층의 열 안정성을 높이고 일 함수를 감소시켰습니다. La_2O_3 는 일 기능이 낮은 Ba-La-O 복합체를 형성하고 CeO_2 는 항산화 능력을 향상시킵니다.
 - **도핑 방법:** 도펀트를 바륨 화합물과 혼합하고 분쇄하여 현탁액을 제조하거나 함침 후 2 차 함침을 통해 도입하여 균일한 분포를 보장합니다. 초음파 분산은 응집을 방지합니다.
 - **작용 메커니즘:** 도펀트는 표면의 전자 구조를 변화시켜 일 기능을 감소시키는 동시에 바륨 증발을 억제하고 활성층 수명을 연장합니다.
- **성능 향상:** 새로운 제형 및 도핑 기술은 일 함수를 줄이고 전송 전류 밀도를 높이며 방출 균일성을 향상시킵니다.
- **공정 검증:** X 선 광전자 분광법(XPS)을 사용하여 표면의 화학적 조성을 분석하고 도펀트 분포를 확인했습니다. 열이온 방출 테스트는 일 함수와 전류 밀도의 증가를 확인합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

새로운 제형과 도핑 기술은 매트릭스의 기공 구조와의 호환성을 보장하기 위해 실험적으로 최적화되어야 합니다.

6.1.3 나노기술 응용

나노기술은 나노 스케일 바륨 코팅과 나노 다공성 텅스텐 매트릭스를 포함하는 나노 스케일 구조를 구성하여 바륨 텅스텐 음극의 방출 효율을 향상시킵니다.

- 나노 스케일 바륨 코팅:
 - 준비 방법: 원자층 증착(ALD) 또는 화학 기상 증착(CVD)은 텅스텐 매트릭스 표면에 나노 스케일의 산화 바륨 코팅을 증착하는 데 사용됩니다. ALD 는 $Ba(C_2H_5O_2)_2$ 를 전구체로 사용하고 균일성을 보장하기 위해 특정 온도에서 층별로 증착됩니다.
 - 장점: 나노코팅은 바륨 원자의 표면 피복을 증가시키고 일 함수를 감소시키며 바륨 증발 손실을 줄입니다. 코팅의 높은 비표면적은 전자 방출 효율을 향상시킵니다.
 - 공정 제어: 증착 속도를 제어하고 코팅이 너무 두꺼워서 기공을 막지 않도록 고진공에서 증착을 수행해야 합니다.
- 나노다공성 텅스텐 매트릭스:
 - 준비 방법: 나노 기공은 전기화학적 에칭 또는 스텐실 방법(예: 양극 산화 알루미늄 템플릿)에 의해 텅스텐 매트릭스 표면에 형성됩니다. 템플릿 방법은 Al_2O_3 템플릿을 사용하여 플라즈마 강화 화학 기상 증착(PECVD)에 의해 텅스텐을 증착한 후 템플릿을 제거합니다.
 - 장점: 나노기공은 비표면적을 증가시키고 바륨 저장 및 확산 효율을 향상시키며 방출 전류 밀도를 향상시킵니다.
 - 공정 과제: 나노기공은 붕괴를 피하기 위해 연결성을 유지해야 합니다. 매트릭스의 강도는 ZrO_2 로 도핑하여 향상됩니다.
- 향상된 성능: 나노기술은 배출 효율을 높이고 작업 기능을 줄이며 배출 균일성을 향상시킬 수 있습니다.
- 검증 방법: 코팅 형태를 분석하고 거칠기를 확인하기 위한 원자력 현미경(AFM); 나노기공 구조를 감지하기 위한 SEM 및 X-CT; 전송 테스트는 증가된 전류 밀도를 확인합니다.

나노기술은 준비 비용과 확장성을 해결해야 하지만 상당한 성능 향상 가능성으로 인해 연구 핫스팟이 되었습니다.

6.2 서비스 수명 연장

수명 연장은 바륨 텅스텐 음극 최적화의 중요한 방향으로, 중독 방지 공정과 노화 및 고장을 늦추기 위한 열 안정성 및 기계적 강도 개선을 포함합니다.

6.2.1 중독 방지 과정

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

항독 공정은 환경 오염 물질에 대한 음극의 저항성을 향상시켜 활성층의 노화를 늦춥니다.

- **항산화 오염 메커니즘:**

- o **오염원:** 잔류 가스(예: O_2 , H_2O , CO_2)는 표면 바륨과 반응하여 고출력 기능 화합물(예: BaO_2 , $BaCO_3$)을 형성하여 배출 성능을 저하시킵니다.
- o **보호 정책:**
 - **항독성제 추가 :** 희토류 산화물(예: Sc_2O_3 , Y_2O_3)을 도핑하여 보호층을 형성하고 바륨과 산소의 반응을 억제합니다. Sc_2O_3 는 산화 속도를 감소시키는 안정적인 Ba-Sc-O 복합체를 형성합니다.
 - **표면 코팅:** 물리적 기상 증착(PVD)을 통해 Al_2O_3 와 같은 얇은 산화물 층을 장벽으로 증착하여 오염 물질의 침투를 방지합니다.
 - **활성화 후 처리:** 활성화 후 저온 어닐링은 안정적인 바륨 흡착층을 형성하여 오염 방지 능력을 향상시킵니다.

- **프로세스 최적화:**

- o 함침 및 활성화는 초기 오염을 줄이기 위해 초고진공에서 수행됩니다.
- o 불순물의 유입을 방지하기 위해 고순도 바륨 화합물과 클린룸을 사용하십시오.

- **성능 개선:** 중독 방지 공정은 진공 환경에서 음극의 수명을 연장하고 전송 전류의 감쇠율을 줄입니다.

- **검증 방법:** XPS 는 표면의 화학 성분을 분석하고 오염 물질의 함량을 감지합니다. 가속 노화 테스트는 항독성 특성을 평가합니다.

중독 방지 공정에는 이상적이지 않은 환경에서 음극의 장기적인 안정성을 보장하기 위한 보호 조치의 조합이 필요합니다.

6.2.2 열 안정성 및 기계적 강도 향상

향상된 열 안정성과 기계적 강도는 고온 작동 중 바륨 증발 및 구조적 결함을 줄여 음극 수명을 연장합니다.

- **열 안정성 개선:**

- o **바륨 화합물 최적화:** 기존 제형보다 더 높은 온도에서 분해되는 Ba_2SiO_4 와 같이 열적으로 안정성이 높은 바륨 화합물을 사용하여 바륨 증발을 늦 춥니다.
- o **도핑 강화:** ZrO_2 또는 HfO_2 를 매트릭스 또는 활성층에 첨가하여 고온에서 바륨 원자의 휘발을 억제하고 매트릭스에 대한 활성층의 결합력을 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **활성화 공정 최적화:** 단계별 활성화는 균일한 활성층을 형성하여 고온 활성화 중 바륨 손실을 줄입니다.
- **기계적 강도 향상:**
 - **매트릭스 강화:** 압축 강도를 향상시키기 위해 Re 또는 ThO₂를 도핑하여 텅스텐 매트릭스의 입계 결합을 강화합니다.
 - **소결 최적화:** 소결 온도를 낮추고 보온 시간을 연장하여 입자 결합이 더 조밀해지고 미세 균열이 감소합니다.
 - **기공 구조 설계:** 그라데이션 기공 구조(표면의 높은 다공성, 내부의 낮은 다공성)는 강도와 바륨 저장 요구 사항의 균형을 유지합니다.
- **성능 개선:** 향상된 열 안정성은 고온에서 음극의 수명을 연장합니다. 높은 진동 환경(예: 군용 레이더)을 견딜 수 있는 기계적 강도 증가.
- **검증 방법:** 열중량 분석(TGA)을 사용하여 바륨의 증발 속도를 평가했습니다. 매트릭스 강도 및 미세 구조를 관찰하기 위한 압축 테스트 및 SEM; 수명 테스트는 장기적인 성능을 검증합니다.

열 안정성과 기계적 강도 향상은 재료와 공정의 시너지 효과를 통해 달성됩니다.

6.3 환경 적응성

바륨 텅스텐 음극의 환경 적응성을 향상하면 극한의 환경 성능 및 저전력 설계와 관련된 극한 조건과 친환경 제조 요구 사항에서 작동할 수 있습니다.

6.3.1 극한 환경에서의 성능

극한 환경(예: 공간 진공, 높은 방사선, 온도 순환)은 음극 성능에 대한 요구 사항이 더 높으므로 안정성을 보장하기 위해 최적화된 재료와 구조가 필요합니다.

- **공간 진공 및 방사선:**
 - **최적화 전략:** 방사선 방지 첨가제를 추가하여 매트릭스와 활성층의 방사선 손상 방지 능력을 향상시킵니다. 방사 입자를 보호하기 위해 ZrO₂ 코팅으로 증착된 표면.
 - **진공 호환성:** 초고진공에서 음극을 활성화하고 밀봉하여 잔류 가스 오염을 줄입니다.
- **온도 순환:**
 - **최적화 전략:** 열팽창 계수가 낮은 텅스텐 매트릭스를 사용하여 열 응력을 줄입니다. 단계별 가열은 활성 층의 균열을 방지합니다.
 - **검증 방법:** 열 순환 테스트는 성능 저하를 평가합니다.
- **고진동 환경:**
 - **최적화 전략:** 진동 저항을 강화하기 위해 냉간 등방성 프레스를 통해 고밀도 매트릭스를 형성합니다. 그라데이션 기공 설계는 구조적 인성을 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **향상된 성능:** 최적화된 음극은 진공, 강한 방사선 및 진동 환경에서 안정적으로 작동할 수 있으며 수명이 연장됩니다.
- **검증 방법 :** 성능 안정성을 확인하기 위해 방출 테스트와 결합된 환경 시뮬레이션 테스트(방사선, 진공, 진동).

극한의 환경 최적화를 위해서는 재료, 공정, 구조 설계에 대한 포괄적인 고려가 필요합니다.

6.3.2 저전력 소비 및 녹색 제조

저전력 소비와 친환경 제조는 에너지 소비와 환경 영향을 줄이는 것을 목표로 하는 현대 양극재 설계의 중요한 방향입니다.

- **저전력 설계:**
 - **작동 온도 감소:** Sc_2O_3 또는 La_2O_3 를 도핑하여 음극이 작동 온도에서 높은 전류 밀도를 제공하여 가열 전력을 감소시켜 일 함수를 감소시킵니다.
 - **효율적인 가열 구조:** Mo 필라멘트와 같은 최적화된 히터로 높은 열전도를 매트릭스를 설계하여 열효율을 향상시킵니다.
 - **검증 방법:** 열이온 방출 테스트는 저온 성능을 평가합니다. 열화상은 가열 균일성을 분석합니다.
- **녹색 제조:**
 - **친환경 소재:** CeO_2 와 같은 무독성 첨가제를 사용하여 환경 피해를 줄입니다. 텅스텐 분말과 바륨 화합물을 회수하여 원료 소비를 줄입니다.
 - **에너지 절약 공정:** 저온 소결 및 고효율 함침(진공 침지)을 사용하여 에너지 소비를 줄입니다.
 - **폐기물 처리:** 바륨 화합물 폐액 회수 시스템을 구축하여 화학적 침전을 통해 Ba^{2+} 이온을 회수하고 배출량을 줄입니다.
- **향상된 성능:** 저전력 설계로 화력을 줄입니다. 친환경 제조로 인한 에너지 소비와 폐기물 배출을 줄입니다.
- **검증 방법:** 에너지 소비 분석은 제조 및 운영 효율성을 평가합니다. 환경영향평가(LCA)는 녹색 제조의 효과를 확인합니다.

낮은 전력 소비와 친환경 제조를 위해서는 성능과 환경적 이점 사이의 균형이 필요합니다.

6.4 지능형 설계

지능형 설계는 센서 통합 및 적응형 제어를 포함하는 실시간 모니터링 및 동적 조정을 통해 음극 성능을 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **센서 모니터링:**
 - o **센서 유형:** 통합 소형 온도 센서(예: 열전대) 및 전류 센서는 음극 상태를 모니터링합니다. 압력 센서는 진공 환경의 변화를 감지합니다.
 - o **설치 방법:** 센서는 음극 매트릭스 또는 진공 장치 하우징에 내장되어 있으며 미세 회로를 통해 데이터를 전송합니다.
 - o **모니터링 매개변수:** 작동 온도, 전송 전류 및 진공을 실시간으로 기록하여 활성층 노화 또는 오염을 예측합니다.
- **동적 조정:**
 - o **제어 시스템:** 센서 데이터를 기반으로 화력이나 활성화 조건을 조정하기 위해 마이크로제어 장치(MCU)를 기반으로 피드백 시스템을 개발합니다. 예를 들어, 방출 전류가 >5% 떨어지면 보조 바륨 원자의 저온 활성화가 트리거됩니다.
 - o **적응형 알고리즘:** 기계 학습 모델을 사용하여 과거 데이터를 분석하고, 작동 매개변수를 최적화하고, 수명을 연장합니다.
- **향상된 성능:** 지능형 설계로 음극 수명을 연장하고 우발적인 고장을 줄입니다.
- **검증 방법:** 센서 정확도 및 제어 시스템 응답을 평가하기 위한 시뮬레이션 작동 테스트; 고장 분석은 인텔리전스의 효과를 확인합니다.

지능형 설계는 센서 소형화 및 데이터 처리 복잡성을 해결하지만 그 잠재력은 상당합니다.

요약하면, 바륨 텅스텐 음극의 성능 최적화 및 개선은 기공 구조 최적화, 새로운 제형, 나노 기술, 중독 방지 공정, 열기계적 안정성 향상, 저전력 친환경 제조 및 지능형 설계를 통해 배출 효율, 수명 및 환경 적응성을 크게 향상시킵니다. 이 장에서는 고성능 양극재 개발을 위한 체계적인 기술 경로를 제공하여 다음 장의 기술적 과제와 향후 개발을 위한 토대를 마련합니다.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

7 장: 도전과 향후 발전

고효율 열이온 방출원으로서 바륨 텅스텐 음극은 진공 전자 장치 및 첨단 기술 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있지만 그 개발은 재료 비용, 성능 일관성 및 공급망 안정성과 같은 기술적 병목 현상에 직면해 있으며 냉음극 및 기타 열음극 기술의 경쟁 압력도 받고 있습니다. 이 장에서는 현재의 기술 과제에 대한 심층 분석을 제공하고, 신기술의 경쟁 환경에 대해 논의하며, 새로운 재료 및 공정, 지능형 설계 및 학제간 연구를 다루는 바륨-텅스텐 음극의 향후 연구 방향을 기대합니다.

7.1 현재 기술적 병목 현상

바륨 텅스텐 음극의 광범위한 적용은 재료 비용, 준비 복잡성, 성능 일관성 및 공급망 안정성과 같은 병목 현상으로 인해 제한되어 고성능 장치 및 대량 생산에서의 경쟁력을 제한합니다.

7.1.1 재료비 및 준비 복잡성

- **도전 과제 설명:**
 - **고가의 원료:** 바륨 텅스텐 음극은 고순도 텅스텐 및 바륨 화합물에 의존하므로 비용이 많이 들 수 있습니다. 텅스텐 분말은 균일한 입자 크기를 보장하기 위해 신중하게 스크리닝해야 하며, 바륨 화합물은 고순도로 합성되어야 하므로 재료 비용이 크게 증가합니다.
 - **복잡한 준비 공정:** 다공성 텅스텐 매트릭스의 분말 야금 공정(프레스 및 고온 소결 포함)과 바륨 화합물의 함침 및 활성화 공정에는 다단계 고정밀 작업이 포함됩니다. 고온 소결에는 엄격한 진공 또는 불활성 분위기가 필요하며, 함침 및 활성화에는 깨끗한 환경, 장비 투자 및 높은 에너지 소비가 필요합니다.
 - **공정 민감도:** 다공성, 바륨 패킹 및 활성화 조건의 작은 편차는 배출 성능에 큰 영향을 미쳐 시행착오 비용이 높아질 수 있습니다.
- **영향:** 높은 비용과 복잡성으로 인해 주거용 마이크로파 장비와 같이 비용에 민감한 응용 분야에서 바륨 텅스텐 음극재의 채택이 제한되고 중소기업의 진입 장벽이 높아집니다.
- **잠재적인 해결책:**
 - 텅스텐 사용량을 줄이기 위해 몰리브덴과 같은 저가 금속을 도핑하는 등 저가의 대체 소재를 모색하거나 보다 경제적인 바륨 화합물 체제를 채택하세요.
 - 공정 흐름을 최적화하고 자동화 장비로 압착 및 침지 단계를 단순화하여 에너지 소비를 적당히 줄입니다.
 - 통계적 공정 제어(SPC) 기술과 결합된 표준화된 공정 사양을 확립하여 매개변수 변동을 크게 줄이고 생산 효율성을 향상시킵니다.

7.1.2 성능 일관성 및 대량 생산 과제

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

• **도전 과제 설명:**

- o **배치 간 변형:** 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공 구조, 바륨 화합물 충전 및 활성층 균일성은 배치마다 다르기 때문에 방출 성능이 변동하고 장치 신뢰성에 영향을 미칩니다.
- o **공정 확장의 어려움:** 소규모 실험실 준비는 높은 일관성을 달성할 수 있지만 산업 규모 생산에서는 압착, 소결 및 함침 조건의 균일성을 유지하기 어려워 성능이 고르지 않습니다.
- o **품질 관리 복잡성:** 배출 성능 테스트에는 고진공 환경과 정밀 장비가 필요하므로 테스트 프로세스에 시간과 비용이 많이 듭니다. 고장 분석(예: 표면 오염 진단)에는 여러 기술의 조합이 필요하므로 품질 검사의 난이도가 높아집니다.

- **영향:** 일관되지 않은 성능은 신뢰성이 높은 응용 분야(예: 위성 통신, 입자 가속기)에서 바륨 텅스텐 음극의 신뢰성을 제한하고 대규모 산업화를 방해합니다.

• **잠재적인 해결책:**

- o 실시간 기공 구조 감지 및 온도 모니터링과 같은 온라인 모니터링 기술을 도입하면 공정 안정성이 크게 향상됩니다.
- o 자동화된 배출 테스트와 머신 비전 분석을 결합하여 배치 일관성을 신속하게 평가하는 고처리량 테스트 플랫폼을 개발합니다.
- o 생산 프로세스를 최적화하여 안정적인 원자재 배치를 보장하고 식스 시그마와 같은 데이터 기반 방법을 통해 성능 변동성을 크게 줄입니다.

7.1.3 공급망 문제

• **도전 과제 설명:**

- o **원자재 부족:** 텅스텐 및 바륨 자원이 부족하고 전 세계 매장량이 일부 지역에 집중되어 있으며 공급망은 지정학적 및 시장 변동에 취약합니다.
- o **물류 및 보관:** 고순도 텅스텐 분말 및 바륨 화합물은 특별한 보관 조건(수분 및 산화)이 필요하며 장거리 운송으로 인해 불순물이 발생하거나 비용이 증가할 수 있습니다.
- o **환경 및 규제 압력:** 바륨 화합물의 생산 및 폐기물 처리에는 엄격한 환경 규정을 준수해야 하는 잠재적으로 독성 물질이 포함되어 규정 준수 비용이 증가합니다.

- **영향:** 공급망 불안정으로 인해 원자재 부족이나 가격 변동이 발생하여 생산 계획 및 비용 관리에 영향을 미치고 산업화 과정이 제한될 수 있습니다.

• **잠재적인 해결책:**

- o 폐음극에서 텅스텐과 바륨을 추출하는 자원 회수 기술을 개발하여 원광에 대한 의존도를 적당히 줄입니다.
- o 다각화된 공급망을 구축하고, 다국적 공급업체와 협력하며, 지정학적 위험을 다양화합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 친환경 화학 공정을 장려하고 무독성 대안 또는 효율적인 폐액 처리 기술을 사용하여 환경 보호 요구 사항을 충족합니다.

7.2 신홍 기술 경쟁

바륨 텅스텐 음극은 냉음극 및 기타 열음극 기술과의 경쟁에 직면해 있으며, 시장 위치는 기술적 이점을 유지하고 다양한 응용 분야 요구에 적응하는 능력에 달려 있습니다.

7.2.1 냉음극 기술

- 경쟁력 있는 기술 설명:

- 탄소나노튜브(CNT) 음극: 탄소나노튜브의 전계 방출 특성을 활용하여 가열 없이 높은 전기장을 통해 전자를 방출하여 저전력 소비, 빠른 응답 및 소형화의 장점을 제공하여 평판 디스플레이 및 휴대용 X 선 소스와 같은 소형 전자 장치에 적합합니다.
- 기타 전계 방출 음극: 그래핀, 산화아연 나노와이어 및 최첨단 어레이 음극과 같은 것은 나노 구조의 높은 전기장 향상 효과에 의존하여 높은 방출 전류 밀도를 제공하며 신홍 분야에서 널리 사용됩니다.
- 응용 가능성: 냉음극은 저전력 및 소형화된 장치에서 전통적인 열음극을 점차적으로 대체하고 있으며 일부 바륨 텅스텐 음극 시장을 위협하고 있습니다.

- 경쟁 과제:

- 저전력 이점: 냉음극은 가열이 필요하지 않아 에너지 소비를 크게 줄여 휴대용 및 친환경 응용 분야에 적합합니다.
- 제조 비용 절감: 탄소나노튜브와 그래핀의 제조 기술은 더욱 성숙해지고 있으며, 비용은 점차 감소하여 시장 경쟁력을 강화하고 있습니다.
- 제한 사항: 저온 음극의 방출 전류 밀도와 수명은 일반적으로 바륨 텅스텐 음극보다 낮고 전계 방출 안정성은 표면 오염에 취약하여 높은 전기장 요구 사항으로 인해 장치 설계의 복잡성을 증가시킵니다.

- 바륨 텅스텐 음극 반응 전략:

- 고전력 이점을 강화하고 고전류 밀도 및 긴 수명 응용 분야(예: 마이크로파 튜브, X 선관)에서 바륨 텅스텐 음극의 대체 불가능성을 강조합니다.
- 저전력 바륨-텅스텐 음극을 개발하여 작업 기능과 작동 온도를 최적화하여 저음극과의 에너지 소비 격차를 좁힙니다.
- 우주 전자 등 고신뢰성 영역을 확장하여 방사선 및 진동 저항을 강화합니다.

7.2.2 기타 열 음극

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **경쟁력 있는 기술 설명:**
 - **산화물 음극:** 산화바륨 또는 산화스트론튬 코팅을 기반으로 비용이 저렴하고 작동 온도가 낮아 저전력 응용 분야(예: 소형 튜브)에 적합하지만 독성 저항성과 수명이 좋지 않습니다.
 - **육붕화란탄(LaB₆) 음극:** 고휘도 전자 방출을 제공하고 고해상도 전자 현미경에 적합하지만 작동 온도가 높고 준비 비용이 높습니다.
 - **도핑된 텅스텐 음극:** 레늄 도핑 또는 토륨 도핑 텅스텐 음극과 같이 고온 및 고강도 환경에 적합하지만 방출 효율은 바륨 텅스텐 음극보다 낮습니다.
- **경쟁 과제:**
 - **비용 대 성능 절충:** 산화물 음극은 저가 시장을 지배하지만 성능이 제한적입니다. LaB₆ 음극은 고휘도 응용 분야에서 바륨-텅스텐 음극과 경쟁하지만 에너지 소비와 비용이 더 높습니다.
 - **응용 분야별 경쟁:** LaB₆ 음극은 전자 현미경 검사에서 바륨-텅스텐 음극의 시장 점유율을 위협하는 반면, 산화물 음극은 저가형 시장에 압력을 가하고 있습니다.
- **바륨 텅스텐 음극 반응 전략:**
 - 성능 대비 비용 비율을 최적화하여 높은 배출 효율과 긴 수명 이점을 유지하면서 준비 프로세스를 단순화하여 비용을 절감합니다.
 - 고성능 애플리케이션(예: 마이크로파 튜브, 입자 가속기)을 위한 향상된 저전력 기능 및 열 안정성 이점.
 - 산화물 또는 LaB₆의 이점을 결합하여 다용도 음극을 개발하는 복합 음극 설계를 살펴보십시오.

7.2.3 바륨 텅스텐 음극의 경쟁 우위 분석

- **장점:**
 - **높은 방출 효율:** 저전력 기능과 높은 전류 밀도로 인해 고전력 진공 전자 장치에 탁월합니다.
 - **긴 수명:** 최적화된 바륨 저장 및 중독 방지 설계는 높은 신뢰성 요구 사항(예: 위성 통신)에 대한 가동 시간을 크게 연장합니다.
 - **기술적 성숙도:** 수십 년간의 공정 축적과 잘 확립된 산업화 체인은 전통적인 분야에서 경쟁력을 보장합니다.
- **단점:**
 - 에너지 소비 및 준비 비용이 높기 때문에 저전력 및 저비용 시장에서의 적용이 제한됩니다.
 - 성능은 환경에 민감하며 엄격한 진공 및 청소 조건이 필요합니다.
- **전략적 포지셔닝:**
 - 마이크로파 튜브, X 선관 및 우주 전자 장치와 같은 고전력 및 고신뢰성 시장을 통합합니다.
 - 기술 혁신(예: 나노기술, 저전력 설계)을 통해 신흥 분야(예: 테라헤르츠 소스)로 확장합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 냉음극의 저전력 소비 장점과 결합된 열장 복합 음극을 개발하여 전반적인 경쟁력을 강화합니다.

7.3 향후 연구 방향

바륨 텅스텐 음극재의 미래 개발은 기존 병목 현상을 돌파하고 신형 기술의 요구에 적응하며 새로운 재료 및 공정, 지능형 설계 및 학제 간 연구를 탐색하고 응용 전망을 넓혀야 합니다.

7.3.1 신소재 및 공정 탐색

- 신소재:
 - 대체 매트릭스 재료: 몰리브덴 또는 레늄이 도핑된 텅스텐 매트릭스를 개발하여 비용을 적당히 절감하고 열전도율과 기계적 강도를 향상시킵니다. 고온 산화에 대한 저항성을 강화하기 위해 텅스텐 카바이드 또는 세라믹 기판을 살펴보십시오.
 - 새로운 바륨 화합물: 규산바륨 또는 바륨 지르코니아와 같은 새로운 제형을 연구하여 열분해 특성과 안정성을 최적화하고 부산물이 배출 특성에 미치는 영향을 줄입니다.
 - 기능성 첨가제: 새로운 향독성제(예: 산화스칸듐)를 개발하여 방사선 저항성을 향상시키면서 저일 기능 복합체를 형성합니다.
- 새로운 프로세스:
 - 효율적인 함침 기술: 전기화학적 또는 플라즈마 강화 함침은 바륨 화합물 충전의 균일성을 향상시켜 공정 시간을 크게 단축합니다.
 - 저온 소결: 나노촉매를 첨가하여 소결 온도를 낮추고 에너지 소비를 줄이며 기공 구조를 보존합니다.
 - 적층 제조: 3D 프린팅 기술을 활용하여 다공성 텅스텐 매트릭스 구조를 정밀하게 제어하여 설계 유연성과 기공 균일성을 향상시킵니다.
- 예상 결과: 새로운 재료와 공정은 배출 효율을 크게 향상시키고 작업 기능을 줄이며 준비 비용을 적당히 줄일 수 있습니다.
- 검증 방법: 주사 전자 현미경(SEM)과 X 선 광전자 분광법(XPS)을 사용하여 재료의 미세 구조 및 표면 화학을 분석하고 열 이온 방출 테스트와 결합하여 성능 향상을 평가했습니다.

7.3.2 지능형 및 적응형 음극 설계

- 지능형 디자인:
 - 센서 통합: 작은 온도, 전류 및 진공 센서가 내장되어 음극 작동을 실시간으로 모니터링하고 노화 또는 오염 추세를 예측합니다.
 - 동적 제어: 마이크로 제어 장치를 기반으로 피드백 시스템을 개발하여 실시간 데이터를 기반으로 화력이나 활성화 조건을 동적으로 조정하여 수명을 연장합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 데이터 분석: 기계 학습 모델을 활용하여 운영 데이터를 분석하고 프로세스 매개변수를 최적화하며 운영 효율성을 크게 향상시킵니다.
- 적응형 디자인:
 - 환경 적응: 지르코니아 코팅과 같은 표면 화학적 변형을 통해 잔류 가스 오염에 동적으로 대응하여 환경 견고성을 향상시킵니다.
 - 다중 모드 작동: 고전력 및 저전력 모드를 모두 지원하는 음극을 개발하여 다양한 애플리케이션 요구 사항에 적응합니다.
- 예상 결과: 지능형 설계는 양극 수명을 크게 연장하고 계획되지 않은 고장을 줄이며 작동 안정성을 향상시킵니다.
- 검증 방법: 장기 작동 테스트를 통해 제어 시스템의 신뢰성을 평가하고 고장 분석과 결합하여 적응 효과를 검증합니다.

7.3.3 학제간 연구

- 인공 지능과 결합:
 - 공정 최적화: AI 기반 분자 역학 시뮬레이션을 통해 바륨 화합물 제형 및 활성화 조건을 최적화하여 연구 개발을 가속화합니다.
 - 성능 예측: 방출 성능에 대한 여러 매개변수의 영향을 신경망에 의해 분석하여 실험 기간을 크게 단축합니다.
- 양자 컴퓨팅과 결합:
 - 재료 설계: 양자 컴퓨팅을 사용하여 바륨-텅스텐 계면의 전자 구조를 시뮬레이션하고 초저일 함수 재료를 개발합니다.
 - 방출 메커니즘에 대한 연구: 고자기장 강한 방출에 대한 양자 터널링 효과의 기여도를 탐색하고 고온 자기장 복합 음극을 설계합니다.
- 다른 분야와의 통합 :
 - 나노기술: 원자층 증착(ALD)과 같은 기술을 결합하여 나노 규모의 활성층을 개발하여 방출 효율을 향상시킵니다.
 - 생물의학: 질병 진단을 지원하기 위해 고정밀 질량 분석법에서 바륨-텅스텐 음극의 성능을 최적화합니다.
 - 새로운 에너지: 핵융합 또는 연료 전지 기술을 제공하는 플라즈마 발전기에서 잠재력을 탐색하십시오.
- 예상 결과: 학제간 연구는 테라헤르츠파, 양자 장치 및 신에너지 분야에서 바륨-텅스텐 음극의 응용 가능성을 크게 넓힐 수 있습니다.
- 검증 방법: 다학제적 공동 실험을 통해 새로운 재료와 공정을 검증하고, 실제 적용 테스트와 함께 교차 영역 성능을 평가합니다.

요약하면, 바륨-텅스텐 음극재의 개발은 재료 비용, 성능 일관성, 공급망 안정성, 신흥 기술과의 경쟁과 같은 과제에 직면해 있지만 신소재 및 공정의 시너지 촉진, 지능형 설계 및 학제간 연구를 통해 고성능 진공 전자 장치 및 신흥 분야에서의 잠재력은 여전히 넓습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



8 장 : 바륨 텅스텐 음극 표준

표준화는 바륨 텅스텐 음극의 일관된 성능, 제조 신뢰성 및 환경 안전을 보장하는 열쇠이며, 진공 전자 및 첨단 기술 분야에 적용하기 위한 통일된 기술 프레임워크를 제공합니다. 이 장에서는 바륨 텅스텐 음극과 관련된 국제 및 산업 표준(중국 국가 및 산업 표준 포함), 성능 매개변수 사양, 제조 및 품질 관리 표준, 환경 및 안전 표준에 대해 자세히 설명합니다.

8.1 국제 및 산업 표준

바륨 텅스텐 음극의 표준화는 국제 표준화 기관(예: IEC, ISO), 중국 국가 표준(GB) 및 산업 표준(예: IEEE, MIL-STD, ASTM 및 중국 산업 표준)에 의존하여 재료 선택, 제조 공정 및 성능 테스트에 대한 통일된 사양을 제공합니다.

8.1.1 바륨 텅스텐 음극 관련 국제 표준

- **IEC 60601-1 의료용 전기 장비 - 파트 1: 기본 안전 및 필수 성능에 대한 일반 요구 사항**
 - **설명:** 이 표준은 방출 전류 밀도, 작동 수명 및 진공 환경 요구 사항과 같은 X 선관의 바륨 텅스텐 음극재의 성능 사양을 다루는 의료 전기 장비의 안전 및 성능 요구 사항을 지정합니다.
 - **적합성:** 의료 영상 장비(예: CT 스캐너, X 선 진단 기계)에 적합하며 음극이 고전력 출력에서 안정적인 전자 방출을 제공하여 영상 정확도와 환자 안전 요구 사항을 충족합니다.
 - **주요 요구 사항:** 음극은 높은 전송 전류 밀도, 낮은 전류 변동을 제공해야 하며 중독을 방지하기 위해 작동 환경에서 높은 진공(10^{-6} Pa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

미만)을 유지해야 하며 수명 테스트는 실제 작동 조건을 시뮬레이션해야 합니다.

- o **구현 지침:** 제조업체는 고정밀 전류계와 진공 게이지를 사용하여 음극 성능을 확인해야 하며 테스트 프로세스는 표준에 지정된 환경 및 안전 조건을 준수해야 합니다.
- **IEC 60050 국제 전기 기술 어휘**
 - o **설명:** 이 표준은 바륨 텅스텐 음극과 같은 열 음극에 대한 기술 용어(예: 일 기능, 방출 전류 및 활성층)를 포함하여 전기 공학 분야에 대한 용어의 통일된 정의를 제공합니다.
 - o **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 개발, 테스트 및 문서화에 대한 용어 일관성을 제공하여 기술 문서의 국경 간 커뮤니케이션과 정확성을 보장합니다.
 - o **주요 요구 사항:** 용어를 명확하게 정의해야 하며, 모호성을 피하기 위해 테스트 보고서 및 제품 설명서에 표준 어휘를 사용해야 합니다.
 - o **구현 지침:** R&D 인력과 제조업체는 용어가 표준화되었는지 확인하기 위해 IEC 60050 을 기반으로 기술 문서를 작성해야 합니다.
- **ISO 9001 품질 경영 시스템 - 요구 사항**
 - o **설명:** 이 표준은 바륨 텅스텐 음극 생산의 품질 관리 및 공정 관리를 안내하는 품질 관리 시스템의 요구 사항을 지정합니다.
 - o **적합성:** 산업용 NDT 및 과학 기기의 바륨 텅스텐 음극 생산에 적합하여 배치 일관성과 제품 신뢰성을 보장합니다.
 - o **주요 요구 사항:** 생산 환경은 클린룸 표준(예: ISO 레벨 5)을 준수해야 하고, 테스트 장비는 정기적으로 교정되어야 하며, 생산 기록은 원자재 출처 및 공정 매개변수를 포함하는 완전해야 합니다.
 - o **구현 지침:** ISO 9001 인증 제조업체는 포괄적인 품질 관리 시스템을 구축하고 정기적으로 프로세스를 감사하여 생산 일관성을 보장해야 합니다.
- **ISO 20431 진공 기술 - 진공 게이지 교정**
 - o **설명:** 이 표준은 진공 환경에서 테스트 장비(예: 진공 게이지)의 교정 방법을 지정하여 바륨 텅스텐 음극 성능 테스트의 정확성을 보장합니다.
 - o **적용 가능성:** 신뢰할 수 있는 측정 결과를 보장하기 위해 고진공 환경(예: 마이크로파 튜브, 전자 현미경)에서 음극 테스트에 적합합니다.
 - o **주요 요구 사항:** 진공 게이지는 정기적으로 교정해야 하고, 테스트 환경은 초고진공(10^{-8} Pa 미만)을 유지해야 하며, 측정 정확도는 표준 요구 사항을 충족해야 합니다.
 - o **구현 지침:** 제조업체는 보정된 진공 게이지를 사용하여 테스트 환경을 모니터링하고 추적성을 지원하기 위해 교정 데이터를 기록 해야 합니다.
- **IEC 60335-2-24 가정용 및 유사 전기 제품 - 안전 - 파트 2-24: 냉장 기기, 아이스크림 기기 및 제빙기에 대한 특정 요구 사항**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **설명:** 주로 가전 제품에 대한 것이지만 이 표준의 일부 장에서는 바륨 텅스텐 음극의 작동 환경 제어에 간접적으로 적용될 수 있는 진공 전자 장치의 열 음극의 안전 요구 사항을 다룹니다.
- o **적용 가능성:** 작동 안정성을 보장하기 위해 민간 장비(예: 마이크로파 가열 장비)의 바륨 텅스텐 음극에 대한 안전한 작동 사양을 제공합니다.
- o **주요 요구 사항:** 음극은 아크 방전 및 재료 휘발을 방지하기 위해 고온 및 진공 환경에서 작동해야 합니다.
- o **구현 지침:** 제조업체는 음극 작동 환경이 표준 요구 사항을 충족하는지 확인하기 위해 진공 밀봉 시스템을 설계해야 합니다.
- **ISO 19444-1 진공 기술 - 진공 시스템 성능 측정을 위한 표준 방법 - 파트 1: 일반 요구 사항**
 - o **설명:** 이 표준은 진공 시스템의 설계 및 성능 테스트 방법을 지정하며 바륨 텅스텐 음극 작동 환경 관리에 적용할 수 있습니다.
 - o **적용 가능성:** 마이크로파 튜브 및 X 선관의 진공 시스템 설계를 안내하여 고진공 환경에서 바륨 텅스텐 음극의 안정적인 성능을 보장합니다.
 - o **주요 요구 사항:** 진공 시스템은 낮은 누설률(10^{-9} Pa·m³/s 미만)을 유지해야 하며 테스트 방법을 표준화해야 합니다.
 - o **구현 지침:** 제조업체는 표준을 준수하는 진공 펌프 및 밀봉 기술을 사용하여 시스템 성능을 정기적으로 확인해야 합니다.

8.1.2 바륨 텅스텐 음극과 관련된 산업 표준

- **전자관에 대한 용어의 IEEE 161 표준 정의**
 - o **설명:** 이 표준은 일 기능, 방출 전류 밀도 및 열 안정성과 같은 성능 매개변수를 포함하여 진공 전자 장치의 용어를 정의합니다.
 - o **적용 가능성:** 특히 고전력 및 고주파 응용 분야의 마이크로파 튜브(예: 마그네트론, 진행파 튜브) 및 레이더 시스템에서 바륨-텅스텐 음극의 성능 평가에 대한 용어 사양을 제공합니다.
 - o **주요 요구 사항:** 음극은 지정된 온도 범위 내에서 안정적인 방출 성능을 제공해야 하고, 테스트는 빠른 응답 기능을 검증하기 위해 고주파 펄스 조건을 시뮬레이션해야 하며, 진동 저항은 표준을 충족해야 합니다.
 - o **구현 지침:** 제조업체는 통신 및 레이더 장비 요구 사항을 준수하는지 확인하기 위해 고주파 테스트 플랫폼과 같은 IEEE 권장 테스트 장비를 사용하여 음극 성능을 검증해야 합니다.
- **마이크로파 튜브 테스트 방법에 대한 IEEE 287 표준**
 - o **설명:** 이 표준은 바륨 텅스텐 음극의 방출 성능, 수명 및 환경 적합성에 대한 테스트를 포함하여 마이크로파 튜브의 음극에 대한 테스트 방법을 지정합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **적용 가능성:** 고출력 마이크로파 장치(예: 마그네트론, 쿼리스트림)에 적합하여 고주파 및 고전력 조건에서 음극의 안정적인 작동을 보장합니다.
- **주요 요구 사항:** 테스트는 고진공 환경에서 수행되어야 하며, 전송된 전류 밀도와 안정성을 확인하기 위해 펄스 또는 연속 작동 모드를 시뮬레이션 해야 합니다.
- **구현 지침:** 테스트 절차에는 고정밀 기기(예: 전류계, 스펙트럼 분석기)를 사용해야 하며 기록된 데이터는 표준 형식을 준수해야 합니다.
- **MIL-STD-810 환경 공학 고려 사항 및 실험실 테스트**
 - **설명:** 이 표준은 극한 환경(예: 고진동, 방사선, 온도 순환)에서 전자 장치에 대한 테스트 방법을 지정하고 바륨 텅스텐 음극의 성능 요구 사항을 다룹니다.
 - **적합성:** 바륨 텅스텐 음극은 위성 통신 및 전자 대책 시스템과 같은 항공우주 및 방위 분야에 적합하여 까다로운 환경에서도 신뢰성을 보장합니다.
 - **주요 요구 사항:** 음극은 고방사선 및 초고진공 환경에서 안정적인 성능을 유지해야 하고, 수명 테스트는 장기 작동 및 환경 스트레스 조건을 다루어야 하며, 기계적 강도는 내충격 표준을 충족해야 합니다.
 - **구현 지침:** 공급업체는 음극이 군사 표준을 충족하는지 확인하기 위해 환경 시뮬레이션 테스트(예: 셰이커, 방사선 노출)를 수행 해야 합니다.
- **MIL-STD-202 전자 및 전기 부품에 대한 테스트 방법 표준**
 - **설명:** 이 표준은 바륨 텅스텐 음극의 수명, 신뢰성 및 환경 적합성에 대한 테스트를 포함하여 전자 부품에 대한 테스트 방법을 지정합니다.
 - **적용 가능성:** 군사 및 항공우주 응용 분야의 바륨 텅스텐 음극에 적합하여 극한 조건에서 성능 안정성을 보장합니다.
 - **주요 요구 사항:** 테스트는 실제 작동 환경을 시뮬레이션하고 음극의 방출 성능 및 노화 특성을 평가해야 하며 신뢰성 분석을 지원하기 위해 데이터를 자세히 기록해야 합니다.
 - **구현 지침:** 제조업체는 음극의 장기적인 성능을 검증하기 위해 가속 노화 테스트와 함께 표준화된 테스트 장비를 사용해야 합니다.
- **ASTM F83 전자 방출기의 열이온 상수 정의 및 결정에 대한 표준 관행**
 - **설명:** 이 표준은 열이온 방출기의 열이온 상수(예: 일 함수, 방출 전류 밀도)를 정의하고 측정 방법을 지정합니다.
 - **적합성:** 특히 고전력 전자 장치에서 바륨 텅스텐 음극의 성능 테스트에 직접 적용할 수 있습니다.
 - **주요 요구 사항:** 테스트는 표준화된 열이온 방출 테스트 장비를 사용하여 고진공 환경에서 수행되어야 합니다.
 - **구현 지침:** 제조업체는 측정 결과의 정확성과 반복성을 보장하기 위해 표준을 참조하여 테스트 프로세스를 설계해야 합니다.
- **고전압 개폐 장치 및 제어 장치에 대한 IEEE C37.30 표준 정의**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **설명:** 이 표준은 고전압 개폐 장치의 전자 부품에 대한 용어 및 테스트 요구 사항을 정의하며 진공 개폐 장치의 바륨-텅스텐 음극에 부분적으로 적용됩니다.
- o **적용 가능성:** 진공 스위치 튜브의 음극 성능 평가를 안내하여 고전압 환경에서의 안정성을 보장합니다.
- o **주요 요구 사항:** 음극은 고전압 및 고진공 환경에서 안정적인 전자 방출을 제공해야 하며 테스트는 스위칭 펄스 조건을 시뮬레이션해야 합니다.
- o **구현 지침:** 제조업체는 고전압 테스트 플랫폼을 사용하여 음극 성능과 표준 요구 사항 준수 여부를 확인해야 합니다.
- **- GB 4943.1-2022 정보 기술 장비 안전 1부: 일반 요구 사항**
 - o **설명:** 이 중국 국가 표준은 IEC 62368-1:2018 을 기반으로 하며 바륨 텅스텐 음극과 같은 전자 장치의 전기 및 열 안전 성능을 포함하여 정보 기술 장비에 대한 안전 요구 사항을 지정합니다.
 - o **적용 가능성:** 정보 기술 장비(예: 전자 현미경, 진공관)에서 바륨 텅스텐 음극의 안전 설계 및 테스트에 적합합니다.
 - o **주요 요구 사항:** 음극은 전기 절연 및 열 안정성 요구 사항을 충족해야 하며 작동 환경은 아크 및 과열을 방지해야 합니다.
 - o **구현 지침:** 제조업체는 2023 년 8 월 1 일까지 표준 준수를 확인하고 인증 갱신을 완료하기 위해 테스트를 위해 양극 샘플을 CCC 인증 실험실로 보내 야 합니다.
- **- GB/T 3797-2016 전기 및 전자 제품의 환경 조건 2부: 테스트 방법**
 - o **설명:** 이 중국 산업 표준은 바륨 텅스텐 음극의 성능 검증에 적합한 고온, 고습 및 진동 테스트를 포함한 전기 및 전자 제품에 대한 환경 테스트 방법을 지정합니다.
 - o **적용 가능성:** 레이더 및 항공 우주 장비의 응용 분야와 같은 극한 환경에서 바륨 텅스텐 음극의 성능 테스트를 안내합니다.
 - o **주요 요구 사항:** 음극은 고온($\leq 2000^{\circ}\text{C}$) 및 고진공 환경에서 방출 안정성을 유지해야 하며 진동 저항은 표준을 충족해야 합니다.
 - o **구현 지침:** 제조업체는 환경 테스트 장비(예: 셰이커, 열 순환기)를 사용하여 음극 성능을 확인하고 표준 요구 사항을 충족해야 합니다.
- **- JB/T 6842-2018 진공 전자 장치의 일반 사양**
 - o **설명:** 이 중국 기계 산업 표준은 진공 전자 장치(예: 바륨 텅스텐 음극이 포함된 마이크로파 튜브, X 선관)에 대한 일반 기술 요구 사항 및 테스트 방법을 지정합니다.
 - o **적용 가능성:** 진공 전자 장치에서 바륨 텅스텐 음극의 성능 및 신뢰성 테스트에 적합합니다.
 - o **주요 요구 사항:** 음극은 방출 전류 밀도, 수명 및 진공 수준 요구 사항을 충족해야 하며 테스트는 실제 작동 조건을 시뮬레이션해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **구현 지침:** 제조업체는 업계 요구 사항을 준수하는지 확인하기 위해 고진공 테스트 플랫폼과 같은 표준화된 테스트 장비를 사용하여 음극 성능을 확인해야 합니다.

8.2 바륨 텅스텐 음극 성능 매개변수 사양

성능 매개변수 사양은 바륨 텅스텐 음극의 평가 및 적용에 대한 정량적 기준을 제공하며 주요 매개변수 및 테스트 방법의 정의를 다룹니다.

8.2.1 주요 매개변수에 대한 표준화 요구 사항

- **방출 전류 밀도:**
 - **정의:** 음극의 방출 효율을 반영하는 단위 면적당 음극 표면에서 방출되는 전자 흐름.
 - **표준 요구 사항:** 고전력 장치(예: tachlystron 튜브)는 ASTM F83 및 JB/T 6842-2018 에 따라 변동이 적은 높은 전류 밀도의 요구 사항을 충족해야 합니다.
 - **일반적인 응용 분야:** 마이크로파 튜브는 높은 전력 출력을 지원하기 위해 높은 전송 전류 밀도가 필요합니다. 전자 현미경은 이미징 정확도를 보장하기 위해 낮은 노이즈가 필요합니다.
- **작업 기능:**
 - **정의:** 전자가 음극 표면에서 빠져나가는 데 필요한 최소 에너지로, 방출 효율과 작동 온도를 결정합니다.
 - **표준 요구 사항:** ASTM F83 에 따라 안정성을 유지하면서 화력을 줄이기 위해 일 함수는 가능한 한 낮아야 합니다.
 - **일반적인 응용 분야:** 저전력 기능은 저전력 응용 분야(예: 우주 전자 장치)에 적합합니다.
- **수명:**
 - **정의:** 음극이 지정된 조건(예: 온도, 진공)에서 안정적인 방출을 유지하는 시간입니다.
 - **표준 요구 사항:** 수명이 긴 애플리케이션(예: 위성 통신)은 MIL-STD-202 및 JB/T 6842-2018 표준에 따라 수명이 긴 애플리케이션, 긴 작동 시간 및 낮은 성능 저하의 요구 사항을 충족해야 합니다.
 - **일반적인 응용 분야:** 레이더 및 우주 장치는 유지 보수 비용을 줄이기 위해 긴 수명이 필요합니다.
- **구현 지침:** 제조업체는 고전력 또는 고신뢰성과 같은 애플리케이션 시나리오에 적합한 매개변수 범위를 선택하고 IEC 60601-1, IEEE 287, ASTM F83 및 JB/T 6842-2018 표준을 참조하여 테스트 사양을 개발해야 합니다.

8.2.2 테스트 방법 및 검증 프로세스

- **다공성 텅스텐 매트릭스의 다공성 테스트 :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **방법:** 기공 연결성과 바륨 저장 용량을 보장하기 위해 수은 사격 또는 X 선 단층 촬영(X-CT)으로 다공성과 기공 크기 분포를 측정했습니다.
- o **표준 요구 사항:** 컴퓨터 단층촬영(CT) 이미징을 위한 ASTM E1441 표준 가이드 및 GB/T 21650.1-2008 수은 다공성 측정 및 가스 흡착에 의한 고체 물질의 기공 크기 분포 및 다공성에 따라 다공성은 균일해야 하며 기공 크기 분포는 적당해야 합니다 - 1 부: 수은 다공성 측정
- o **검증 과정:** 고해상도 X-CT(해상도 1μm 이상)를 사용하여 기공 구조를 재구성하고 SEM 과 함께 기공 단면을 분석하여 연결성을 확인합니다.
- **함침 테스트:**
 - o **방법:** 함침 균일성을 평가하기 위해 열중량 분석(TGA) 또는 화학적 적정으로 바륨 화합물 패킹을 측정하였다.
 - o **표준 요구 사항:** 바륨 화합물은 ASTM E168 열중량 분석의 일반 기술에 대한 표준 관행 및 GB/T 13247-2019 금속 재료의 열 분석을 위한 테스트 방법에 따라 기공을 잘 채우고 표면 활성층 피복이 높아야 합니다.
 - o **검증 과정:** XPS 와 함께 표면 화학을 분석하여 바륨 원자 분포의 균일성을 확인합니다.
- **전송 성능 테스트:**
 - o **방법:** 전류 밀도와 일 함수는 고진공 환경(10⁻⁶Pa 미만)에서 열이온 방출 테스트 장치를 사용하여 측정되었습니다.
 - o **표준 요구 사항:** 테스트는 ISO 20431, ASTM F83 및 JB/T 6842-2018 표준을 준수하는 신뢰할 수 있는 결과를 보장하기 위해 실제 작동 조건(예: 펄스 또는 연속 모드)을 시뮬레이션해야 합니다.
 - o **검증 프로세스:** 고정밀 전류계(정확도 0.1mA 이상)와 진공 게이지를 사용하여 전송 전류 변동 및 환경 매개변수를 기록합니다.
- **구현 지침:** 테스트 장비는 정기적으로 교정해야 하고, 테스트 환경은 ISO 20431 및 GB/T 3797-2016 표준을 준수해야 하며, 추적성을 지원하기 위해 데이터 로깅을 자세히 설명해야 합니다.

8.3 바륨 텅스텐 음극 제조 및 품질 관리 표준

제조 및 품질 관리 표준은 재료 순도, 공정 사양 및 추적성 요구 사항을 포괄하는 바륨 텅스텐 음극의 일관되고 안정적인 생산을 보장합니다.

8.3.1 재료 순도 및 제조 공정에 대한 사양

- **재료 순도:**
 - o **표준:**
 - 텅스텐 플레이트, 시트 및 호일에 대한 ASTM B760 표준 사양
 - **설명:** 텅스텐 재료의 순도 요구 사항(99.95% 이상) 및 불순물 제어가 지정되며 바륨 텅스텐 음극용 다공성 텅스텐 매트릭스의 제조에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **적용 가능성:** 텅스텐 분말의 고순도를 보장하여 불순물(예: Fe, C)이 방출 특성에 미치는 영향을 줄입니다.
- **- GB/T 4181-2017 텅스텐 및 텅스텐 합금의 화학 분석 방법**
 - **설명:** 텅스텐 및 텅스텐 합금에 대한 화학 분석 방법은 텅스텐 분말의 순도와 불순물 함량을 확인하기 위해 지정됩니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 텅스텐 매트릭스의 원료 품질을 보장하고 불순물 오염을 방지합니다.
- **- ASTM D3171 바륨 화합물에 적합한 복합 재료의 구성 성분 함량에 대한 표준 시험 방법**
 - **설명:** 알루미늄에이트 칼슘 바륨과 같은 바륨 화합물의 화학 분석을 안내하여 불순물에 의한 오염이 없는지 확인합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 화합물의 순도를 보장하여 표면 오염 및 방출 특성 저하를 방지합니다.
- **- ASTM E1479 유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광계를 설명하고 지정하기 위한 표준 관행**
 - **설명:** 텅스텐 분말 및 바륨 화합물의 순도를 확인하기 위해 ICP-OES 분석 방법이 지정됩니다.
 - **적용 가능성:** 원료 분석의 정확성을 보장하여 고품질 양극 생산을 지원합니다.
- **- GB/T 4325-2013 텅스텐에 적합한 폴리브덴 및 폴리브덴 합금의 화학적 분석 방법**
 - **설명:** 텅스텐 기반 재료의 순도 검증을 위해 폴리브덴 및 관련 내화 금속에 대한 화학 분석 방법을 제공합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 텅스텐 매트릭스의 품질 관리를 지원합니다.
- **검증 방법:** 유도 결합 플라즈마 방출 분광법(ICP-OES, ASTM E1479 및 GB/T 4181-2017 에 따름) 또는 질량 분석법으로 재료 순도를 확인합니다.
- **의의:** 고순도 소재는 표면 오염 위험을 크게 줄이고 안정적인 배출 성능을 보장합니다.
- **준비 과정 사양:**
 - **표준:**
 - 텅스텐 가공에 적합한 폴리브덴 및 폴리브덴 합금 막대, 막대 및 와이어에 대한 **ASTM B387 표준 사양**
 - **설명:** 텅스텐 분말의 스크리닝, 압착 및 소결 공정을 안내하여 입자 크기 분포 및 소결 조건을 지정합니다.
 - **적용 가능성:** 다공성 텅스텐 매트릭스를 사용하는 분말 야금 공정에 적합하여 다공성과 기계적 강도를 보장합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

■ **ASTM F288 전자 장치 및 램프용 텅스텐 와이어에 대한 표준 사양**

- **설명:** 프레스 및 고온 소결 조건을 포함하여 전자 장치의 텅스텐 기반 재료에 대한 가공 요구 사항을 지정합니다.
- **적용 가능성:** 균일한 가공 구조를 보장하기 위해 바륨 텅스텐 음극용 텅스텐 매트릭스 준비를 안내합니다.

■ **텅스텐의 전기 도금 코팅에 대한 ASTM B689 표준 사양**

- **설명:** 바륨 텅스텐 음극의 사전 함침 준비에 적합한 텅스텐 매트릭스의 표면 처리 및 코팅 공정을 안내합니다.
- **적용 가능성:** 텅스텐 매트릭스의 평평한 표면을 보장하고 바륨 화합물의 함침 효과를 최적화합니다.

■ **ASTM E925 분말 야금 장비의 교정 모니터링을 위한 표준 관행**

- **설명:** 텅스텐 매트릭스 장비의 일관된 준비를 보장하기 위해 분말 야금 장비에 대한 교정 및 다공성 테스트 방법을 지정합니다.
- **적용 가능성:** 다공성 텅스텐 매트릭스의 압착 및 소결 공정을 안내하고 가공 구조를 최적화합니다.

■ **GB/T 3461-2017 텅스텐 분말**

- **설명:** 텅스텐 분말의 입자 크기 분포, 순도 및 가공 요구 사항을 지정하며 바륨 텅스텐 음극의 분말 야금 공정에 적합합니다.
- **적용 가능성:** 텅스텐 분말의 품질을 보장하고 다공성 텅스텐 매트릭스의 준비를 최적화합니다.

■ **GB/T 4192-2010 소결 텅스텐 및 텅스텐 합금**

- **설명:** 텅스텐 및 텅스텐 합금 소결 블랭크의 공정 요구 사항 및 성능 테스트 방법이 지정되어 있으며 바륨 및 텅스텐 음극의 소결 공정에 적합합니다.
- **적용 가능성:** 고온 소결 공정을 안내하여 다공성 텅스텐 매트릭스의 다공성과 기계적 강도를 보장합니다.

○ **프로세스 요구 사항:**

- **분말 야금:** 텅스텐 분말 스크리닝은 입자 크기 분포를 제어해야 하며(GB/T 3461-2017 에 따름), 산화를 방지하기 위해 진공 또는 수소 분위기에서 압착 및 소결을 수행해야 하며, 소결 온도는 정밀하게 제어되어야 합니다(1900-2050°C, GB/T 4192-2010 에 따름).
- **함침 공정:** 바륨 화합물 용액은 균일하게 배합되어야 하며, 일관된 충전율 보장하기 위해 고진공 환경에서 함침을 완료해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **활성화 공정:** 열처리 온도를 정밀하게 제어해야 하며 열처리 공정은 ASTM E168 및 GB/T 13247-2019 표준에 따라 모니터링됩니다.
- **검증 방법:** 소결 온도는 적외선 온도계로 모니터링하고 활성 층의 형태 및 화학 성분은 ASTM E168, ASTM E1441, ASTM E925 및 GB/T 4192-2010 표준에 따라 SEM 및 XPS로 분석됩니다.
- **구현 지침:** 제조업체는 ISO 9001, ASTM B760, B387, F288, B689, GB/T 3461-2017 및 GB/T 4192-2010 을 참조하여 수동 오류를 줄이고 프로세스 반복성을 보장하기 위해 자동화 장비를 사용하는 표준 운영 절차(SOP)를 수립해야 합니다.

8.3.2 일관성 및 추적성 요구 사항

- **적합성 요구 사항:**
 - **표준:**
 - **ISO 10012 측정 관리 시스템 - 측정 프로세스 및 측정 장비에 대한 요구 사항**
 - **설명:** 측정 장비 및 프로세스에 대한 관리 요구 사항을 지정하여 테스트 데이터의 일관성과 신뢰성을 보장합니다.
 - **적합성:** 바륨 텅스텐 음극의 다공성, 방출 전류 밀도 및 수명 테스트에 적합하여 배치에서 배치로 일관된 성능을 보장합니다.
 - **ASTM E691 시험 방법의 정밀도를 결정하기 위한 실험실 간 연구 수행을 위한 표준 관행**
 - **설명:** 테스트 방법의 반복성 및 재현성 평가를 안내하여 음극 성능 테스트 결과의 일관성을 보장합니다.
 - **적용 가능성:** 배출 성능 및 다공성 테스트의 표준화에 적합하여 배치 간 변동을 줄입니다.
 - **통계적 공정 통제 구현을 위한 ISO 11462 지침**
 - **설명:** 통계적 공정 제어(SPC)의 구현을 안내하고 생산 공정의 주요 매개변수를 모니터링합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극의 압착, 소결 및 함침 공정에 적합하여 성능 변동을 줄입니다.
 - **측정 시스템 분석을 위한 ASTM E2782 표준 가이드**
 - **설명:** 측정 시스템의 분석 및 최적화를 안내하여 테스트 데이터의 일관성과 신뢰성을 보장합니다.
 - **적용 가능성:** 음극 성능 테스트를 위한 기기 교정 및 데이터 분석에 적합합니다.
 - **- GB/T 19022-2003 측정 관리 시스템 측정 프로세스 및 측정 장비에 대한 요구 사항**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **설명:** ISO 10012 에 해당하는 중국 산업 표준은 측정 장비 및 프로세스에 대한 관리 요구 사항을 지정하여 테스트 일관성을 보장합니다.
- **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 성능 테스트를 위한 기기 관리 및 데이터 검증에 적합합니다.
- **목표:** 성능 변동이 적은 음극 배치 전반에 걸쳐 일관된 다공성, 전송 전류 밀도 및 수명을 보장합니다.
- **방법:** 통계적 공정 제어(SPC, ISO 11462 및 GB/T 19022-2003 에 따름)를 사용하여 주요 공정 매개변수(예: 압착 압력, 소결 온도)를 모니터링하고 ASTM E691 및 E2782 표준에 따른 고처리량 테스트를 통해 배치 성능을 검증했습니다.
- **검증 프로세스:** 매개변수 편차는 IEEE 287, ASTM E691, E2782 및 GB/T 19022-2003 표준에 따라 배치 일관성을 평가하기 위해 방출 테스트와 결합된 관리도를 사용하여 분석됩니다.
- **추적성 요구 사항:**
 - **표준:**
 - **ISO 9001 품질 경영 시스템 - 요구 사항**
 - **설명:** 원자재 조달부터 완제품 테스트까지 전 과정을 포괄하는 추적 가능한 생산 기록 시스템의 구축이 필요합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산 문제의 추적성을 보장하여 품질 개선 및 고장 분석을 용이하게 합니다.
 - **ISO/IEC 17025 테스트 및 교정 실험실의 역량에 대한 일반 요구 사항**
 - **설명:** 실험실 테스트 및 교정에 대한 추적성 요구 사항을 지정하여 테스트 데이터의 정확성과 신뢰성을 보장합니다.
 - **적합성:** 음극 성능 테스트 및 품질 관리를 위한 데이터 로깅에 적합합니다.
 - **ASTM E2554 테스트 결과의 불확실성 추정 및 모니터링을 위한 표준 관행**
 - **설명:** 테스트 결과의 불확실성 평가 및 데이터 관리를 안내하여 추적성을 보장합니다.
 - **적합성:** 바륨 텅스텐 음극의 성능 테스트 및 품질 기록 관리에 적합합니다.
 - **- GB/T 27025-2019 테스트 및 교정 실험실의 역량에 대한 일반 요구 사항**
 - **설명:** ISO/IEC 17025 와 동등한 중국 산업 표준은 테스트 및 교정 실험실에 대한 데이터 추적성 요구 사항을 지정합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 성능 테스트의 데이터 관리 및 검증에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **목표:** 원자재 조달부터 완제품 테스트까지 전체 프로세스 데이터를 기록하여 문제를 추적할 수 있도록 합니다.
- o **방법:** ISO 9001, ISO/IEC 17025, ASTM E2554 및 GB/T 27025-2019 요구사항을 준수하여 원자재 배치, 공정 매개변수 및 테스트 결과를 포괄하는 전자 생산 기록 시스템을 구축했습니다.
- o **검증 프로세스:** 데이터 무결성을 보장하기 위해 정기적으로 기록을 감사하고 바코드 또는 RFID 기술을 통합하여 제품을 추적합니다.
- o **구현 지침:** 제조업체는 전체 프로세스에서 추적성을 보장하기 위해 ISO 9001, ISO/IEC 17025, ASTM E2554 및 GB/T 27025-2019 를 참조하여 품질 관리 시스템을 배포해야 합니다.

8.4 환경 및 안전 표준

바륨 텅스텐 음극의 생산 및 사용에는 독성 물질 및 폐기물 처리가 포함되며 엄격한 환경 및 안전 규정을 따라야 합니다.

8.4.1 바륨 화합물의 안전 처리 및 환경 보호 사양

- **안전한 취급:**
 - o **표준:**
 - **EN 374 위험한 화학 물질 및 미생물에 대한 보호 장갑**
 - **설명:** 바륨 화합물과 같은 화학 물질에 대한 보호 장갑의 투과성에 대한 요구 사항을 지정하여 작업자의 안전을 보장합니다.
 - **적합성:** 바륨 화합물 용액의 준비 및 함침 중 인력 보호에 적합합니다.
 - **OSHA 1910.1200 위험 통신 표준**
 - **설명:** 바륨 화합물과 같은 유해 화학 물질의 식별, 교육 및 안전 보건 자료(SDS) 관리가 필요합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산 담당자가 바륨 화합물의 독성 위험을 이해하도록 하십시오.
 - **- OSHA 1910.1450 실험실에서 유해 화학 물질에 대한 직업적 노출**
 - **설명:** 실험실에서 화학 물질(예: 바륨 화합물)에 대한 안전한 취급 및 보호 조치를 지정합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산에서 실험실 환경의 안전한 관리를 안내합니다.
 - **- GB 30000.1-2024 화학물질 분류 및 라벨링 규칙 1 부: 일반 규칙**
 - **설명:** 이 중국 국가 표준은 GB 13690-2009 를 대체하며 바륨 화합물과 같은 유해 화학 물질에 대한 분류, 라벨링 및 안전 보건 자료(SDS) 요구 사항을 지정합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산에서 바륨 화합물에 대한 안전 라벨링 및 작동 관행을 안내하며, 시행일은 2025 년 8 월 1 일입니다.
- **주요 요구 사항:** 바륨 화합물에 대한 표준 준수 SDS 및 직원 교육.
- **- GB/T 16483-2008 화학 제품 안전 보건 자료 섹션의 내용 및 순서**
 - **설명:** 바륨 화합물의 안전 관리에 적용할 수 있는 화학 안전 보건 자료의 내용 및 형식 요구 사항을 지정합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산에서 바륨 화합물의 안전성 정보의 투명성을 보장합니다.
- **요구 사항:** 바륨 화합물(예: BaCl₂)은 독성이 있으며 작동은 흡 후드에서 수행해야 하며 작업자는 EN 374, OSHA 1910.1200, OSHA 1910.1450, GB 30000.1-2024 및 GB/T 16483-2008 에 따라 보호 장비(예: 장갑, 마스크)를 착용 해야 합니다.
- **방법:** 누출 및 휘발을 방지하기 위해 바륨 화합물 용액을 준비하고 함침시키기 위해 폐쇄 시스템을 사용했습니다.
- **검증 프로세스:** 대기 질 모니터링(안전 한계 미만의 Ba²⁺ 농도)을 통해 OSHA 1910.1000 대기 오염 물질 표준 및 GBZ 2.1-2019 "작업장 내 유해 물질에 대한 직업 노출 제한 - 파트 1: 화학 유해 물질" 은 안전한 작동 환경을 보장합니다.
- **환경 보호 사양:**
 - **표준:**
 - **EU RoHS 유해 물질 제한 지침, 2011/65/EU**
 - **설명:** 전자 제품에 유해 물질(예: 바륨 화합물)의 사용을 제한하여 환경 기준을 충족하기 위해 폐액 처리를 요구합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산의 폐액 및 폐기물 처리에 적합합니다.
 - **EU REACH 화학물질 등록, 평가, 승인 및 제한, EC 1907/2006**
 - **설명:** 환경 안전을 보장하기 위해 바륨 화합물과 같은 화학 물질에 대한 등록 및 위험 평가가 필요합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 화합물 폐기물의 회수 및 처리 과정을 안내합니다.
 - **ISO 14040 환경 관리 - 수명 주기 평가 - 원칙 및 프레임워크**
 - **설명:** 생산 공정의 환경 영향 평가를 안내하고 폐기물 처리 및 자원 활용을 최적화합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산의 전체 수명 주기 환경 관리에 적합합니다.
 - **EPA 40 CFR Part 261 유해 폐기물의 식별 및 목록**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **설명:** 바륨 화합물 폐기물을 포함한 유해 폐기물의 식별 및 폐기에 대한 요구 사항을 지정합니다.
- **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산 폐기물의 분류 및 처리 과정을 안내합니다.
- **- GB 18597-2023 유해 폐기물 오염 통제를 위한 기술 사양**
 - **설명:** 이 중국 국가 표준은 바륨 화합물 폐기물의 환경 관리에 적합한 유해 폐기물의 수집, 저장, 운송 및 처리에 대한 요구 사항을 지정합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산에서 유해 폐기물의 표준화된 처리를 안내합니다.
- **- GB 5085.7-2019 유해 폐기물 식별 표준 일반 사양**
 - **설명:** 바륨 복합 폐기물의 분류에 적용할 수 있는 유해 폐기물의 식별 방법 및 표준을 지정합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산 폐기물의 적절한 분류 및 처리를 보장합니다.
- **요구 사항:** 바륨 화합물 폐액은 EU RoHS, EU REACH, EPA 40 CFR Part 261, GB 18597-2023 및 GB 5085.7-2019 규정을 준수해야 하며 직접 배출해서는 안 되며 중금속 함량은 배출 기준보다 낮아야 합니다.
- **방법:** Ba²⁺ 이온은 화학적 침전 또는 이온 교환을 통해 회수되었으며, EU REACH, EPA 40 CFR Part 261 및 GB 18597-2023 을 준수하기 위해 폐액 처리가 필요했습니다.
- **검증 프로세스:** 배출이 EU RoHS, EU REACH, GB 18597-2023 및 GB 5085.7-2019 를 준수하는지 확인하기 위해 ICP-OES(ASTM E1479 및 GB/T 4181-2017 에 따름)를 사용하여 폐액 성분을 분석합니다.
- **구현 지침:** 제조업체는 작업자를 교육하고, 폐기물 처리 절차를 수립하고, 정기적인 환경 검사를 받고, ISO 14001, GB 18597-2023 및 GB 5085.7-2019 표준을 준수해야 합니다.

8.4.2 생산 및 사용 시 규정 준수 지침

- **생산 규정 준수:**
 - **표준:**
 - **ISO 14001 환경 경영 시스템 - 사용 지침이 포함된 요구 사항**
 - **설명:** 환경 경영 시스템의 요구 사항을 지정하고 생산 공정에서 에너지 소비 및 배출 제어를 안내합니다.
 - **적합성:** 바륨 텅스텐 음극 생산 시설에 적합하여 환경에 미치는 영향을 줄입니다.
 - **전기 기술 산업 제품 및 전기 산업을 위한 IEC 62474 재료 선언**
 - **설명:** 환경 및 안전 영향을 평가하기 위해 바륨 화합물과 같은 전자 제품의 재료 신고가 필요합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산에서 재료 규정 준수 관리를 안내합니다.
- **ISO 50001 에너지 관리 시스템 - 사용 지침이 포함된 요구 사항**
 - **설명:** 에너지 관리에 대한 지침, 생산 공정의 에너지 효율성 최적화.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산의 고온 소결 및 열처리 공정에 적합합니다.
- **- GB/T 24001-2016 환경 경영 시스템 사용 지침이 포함된 요구 사항**
 - **설명:** ISO 14001 과 동등한 중국 산업 표준은 생산 공정의 환경 관리를 안내합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산 시설의 환경 규정 준수 관리에 적합합니다.
- **- GB/T 23331-2020 에너지 관리 시스템 사용 지침이 포함된 요구 사항**
 - **설명:** ISO 50001 과 동등한 중국 산업 표준은 생산 공정에서 에너지 효율 관리를 안내합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산의 고온 공정 최적화에 적합합니다.
- **요구 사항:** 생산 시설은 에너지 소비 및 배출을 줄이기 위해 ISO 14001, ISO 50001, GB/T 24001-2016 및 GB/T 23331-2020 표준을 준수해야 하며 재료는 IEC 62474 선언 요구 사항을 준수해야 합니다.
- **방법:** 에너지 절약 장비(예: 저온 소결로) 및 친환경 화학 공정을 사용하여 탄소 발자국을 줄이고 ISO 14040 및 GB/T 24001-2016 수명 주기 평가 요구 사항을 준수합니다.
- **검증 프로세스:** 수명 주기 평가(LCA, ISO 14040 에 따름)를 통해 생산이 환경에 미치는 영향을 분석하고 프로세스를 최적화합니다.
- **사용 규정 준수:**
 - **표준:**
 - **IEC 60601-1 의료용 전기 장비 - 파트 1: 기본 안전 및 필수 성능에 대한 일반 요구 사항**
 - **설명:** 음극 작동 환경은 잔류 가스 오염을 방지하고 안전한 사용을 보장하기 위해 고진공을 유지하는 데 필요합니다.
 - **적합성:** 의료 및 산업 장비의 바륨 텅스텐 음극 작동에 적합합니다.
 - **ISO 20431 진공 기술 - 진공 게이지 교정**
 - **설명:** 진공 환경 테스트 장비의 정확성을 보장하고 음극 작동의 안정성을 유지합니다.
 - **적합성:** 마이크로파 튜브 및 전자 현미경의 음극 작동 환경 관리에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

▪ IEC 60068-2-64 환경 테스트 - 파트 2-64: 진동, 광대역 무작위 및 지침

- 설명: 동적 환경에서 음극의 안정성을 보장하기 위해 진동 환경에서 전자 장치의 테스트 방법을 지정합니다.
- 적용 가능성: 항공 우주 및 레이더 시스템에서 바륨 텅스텐 음극의 작동 환경 관리에 적합합니다.

▪ - GB/T 3797-2016 전기 및 전자 제품의 환경 조건 2 부: 테스트 방법

- 설명: 바륨 텅스텐 음극의 작동 검증에 적합한 진동 및 고온 테스트를 포함한 전기 및 전자 제품에 대한 환경 테스트 방법을 지정합니다.
- 적용 가능성: 열악한 환경에서 음극 작동의 안정성을 보장합니다.

- 요구 사항: 음극 작동은 IEC 60601-1, ISO 20431, IEC 60068-2-64 및 GB/T 3797-2016 요구 사항에 따라 잔류 가스 오염을 방지하기 위해 고진공 환경(10^{-6} Pa 미만)에서 수행해야 합니다.
- 방법: 장치 설계에는 진공 밀봉 및 배기 시스템이 포함되어야 하며 진공 및 진동 저항을 보장하기 위해 정기적인 유지 관리를 수행해야 합니다.
- 검증 과정: 진공 게이지를 사용하여 작동 환경을 모니터링하고 진동 테스트는 IEC 60068-2-64 및 GB/T 3797-2016 을 준수해야 하며 유지 보수 로그가 기록됩니다.
- 구현 지침: 제조업체와 사용자는 생산 및 사용 시 안전한 규정 준수를 보장하기 위해 IEC, ISO 및 GB/T 지침을 따라야 합니다.

8.4.3 폐기물 처리 사양

• 표준:

○ EU WEEE 폐전기 및 전자 장비 지침, 2012/19/EU

- 설명: 폐 전자 장비(예: 바륨 텅스텐 음극이 포함된 장치)는 환경 오염을 방지하기 위해 분류, 재활용 및 처리해야 합니다.
- 적용 가능성 : 폐 바륨 텅스텐 음극의 재활용 및 폐기에 적합합니다.

○ UN 1564 위험물 운송에 관한 UN 권고, 바륨 화합물, NOS

- 설명: 바륨 화합물 폐기물에 대한 운송 및 취급 요구 사항을 지정하여 안전과 규정 준수를 보장합니다.
- 적용 가능성: 폐 바륨 텅스텐 음극의 운송 및 취급 과정을 안내합니다.

○ 유해 폐기물 발생기에 적용되는 EPA 40 CFR Part 262 표준

- 설명: 바륨 화합물 폐기물에 적용할 수 있는 유해 폐기물의 생성, 저장 및 폐기에 대한 요구 사항을 지정합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산 폐기물의 표준화된 관리를 안내합니다.
- **ISO 14044 환경 관리 - 수명 주기 평가 - 요구 사항 및 지침**
 - **설명:** 폐기물 처리의 수명 주기 평가를 안내하고 자원 회수 및 환경 영향 관리를 최적화합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 폐기물의 재활용 및 폐기 공정에 적합합니다.
- **- GB 18597-2023 유해 폐기물 오염 통제를 위한 기술 사양**
 - **설명:** 유해 폐기물의 수집, 저장, 운송 및 처리에 대한 요구 사항을 지정하고 바륨 화합물 폐기물의 환경 관리에 적합합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산 폐기물의 표준화된 처리를 안내합니다.
- **- GB 5085.7-2019 유해 폐기물 식별 표준 일반 사양**
 - **설명:** 바륨 복합 폐기물의 분류에 적용할 수 있는 유해 폐기물의 식별 방법 및 표준을 지정합니다.
 - **적용 가능성:** 바륨 텅스텐 음극 생산 폐기물의 적절한 분류 및 처리를 보장합니다.
- **요구 사항:** 폐 바륨 텅스텐 음극 및 생산 폐기물은 환경 오염을 피하기 위해 분류 및 폐기해야 하며 EU WEEE, UN 1564, EPA 40 CFR Part 262, ISO 14044, GB 18597-2023 및 GB 5085.7-2019 의 요구 사항을 준수해야 합니다.
- **행동 양식:**
 - 텅스텐 분말 및 바륨 화합물을 회수하여 고온 분해 또는 화학적 추출을 통해 유용한 물질을 분리합니다.
 - 재활용할 수 없는 폐기물은 밀봉된 용기에 보관하고 UN 1564, EPA 40 CFR Part 262 및 GB 18597-2023 요구 사항을 준수하는 유해 폐기물 표준에 따라 전문 기관에서 폐기해야 합니다.
- **검증 프로세스:** 폐기물 조성 분석(ICP-MS, ASTM E1479 및 GB/T 4181-2017 에 따름)을 통해 재활용 효율성을 확인하고, EU WEEE, EU REACH, ISO 14044, GB 18597-2023 및 GB 5085.7-2019 규정을 준수하기 위해 폐기물 처리 흐름을 문서화합니다.
- **구현 지침:** 폐기물 관리 시스템을 구축하고 환경 보호 부서에 정기적으로 처리 상황을 보고하여 ISO 14001, EU WEEE, UN 1564, EPA 40 CFR Part 262, GB 18597-2023 및 GB 5085.7-2019 요구 사항을 준수하는지 확인합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Barium Tungsten Cathode Introduction

1. Overview of Barium Tungsten Cathode

The Barium Tungsten Cathode is a type of thermionic emission material typically composed of high-purity tungsten as the base, impregnated with barium compounds. Upon high-temperature activation, it emits free electrons and is widely used in vacuum electronic devices. Due to its low work function and high electron emission efficiency, this cathode plays a critical role in high-power electronic equipment. CTIA GROUP LTD specializes in the global flexible customization of tungsten and molybdenum products, offering tailored high-performance barium tungsten cathodes according to customer requirements.

2. Characteristics of Barium Tungsten Cathode

- **High Electron Emission Efficiency:** The low work function of barium enables the cathode to emit a large quantity of electrons even at relatively low temperatures.
- **High-Temperature Resistance:** With a tungsten matrix that has a melting point of 3422° C, the cathode maintains structural stability in high-temperature operating environments.
- **Long Service Life:** Optimized barium compound impregnation techniques help minimize barium evaporation, thereby extending the cathode's lifespan.
- **Low Evaporation Rate:** Compared to other cathode materials, barium tungsten exhibits a lower evaporation rate at high temperatures, reducing contamination within the device.
- **Arc Stability:** Delivers a stable electron flow, making it ideal for high-precision electron beam applications.

3. Applications of Barium Tungsten Cathode

- **HID Lamps:** The cathode's low work function and high current density allow HID lamps to emit bright and stable light, making them suitable for applications that require high brightness and long service life, such as roadway and industrial lighting.
- **Vacuum and Laser Devices:** The low work function makes barium tungsten ideal for use in vacuum electronic and laser components.
- **Stage and Club Lighting Effects:** High-frequency strobe lights made from this material are known for their long lifespan and stable performance.
- **Film Projection and Video Recording:** The film and broadcast industry also relies heavily on this material for projection and recording equipment, where it ensures long-term operational stability and high efficiency.
- **Laser Mercury Pumps:** Its high electron emission capability and low operating temperature contribute to improved laser performance and stability.

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



부록

A. 용어집

다음은 국제 표준(예: IEC 60050, IEEE 161) 및 산업 관행을 기반으로 하는 바륨 텅스텐 음극 및 관련 분야에 대한 기술 용어 및 정의입니다.

- **바륨 텅스텐 음극:** 바륨-칼슘 알루미늄에이트와 같은 바륨 화합물이 함침된 다공성 텅스텐 매트릭스로 만들어진 열 방출 음극으로, 가열을 통해 고전류 밀도 전자를 생성하고 진공 전자 장치에 널리 사용됩니다.
- **열이온 방출:** 바륨-텅스텐 음극의 핵심 작동 메커니즘인 Richardson-Dushman 방정식에 따라 고온에서 재료의 표면 장벽에서 전자가 빠져나가는 현상입니다.
- **일 함수:** 전자가 재료 표면에서 빠져나가는 데 필요한 최소 에너지는 전자 볼트(eV)로 측정되며, 바륨-텅스텐 음극은 바륨 활성화층을 통해 일 함수를 감소시켜 방출 효율을 향상시킵니다.
- **다공성 텅스텐 매트릭스:** 분말 야금으로 만든 고순도 텅스텐 다공성 구조로 바륨 화합물을 저장 및 방출하여 방출 특성과 수명에 영향을 미칩니다.
- **바륨 화합물:** 바륨-칼슘 알루미늄에이트(Ba-Ca-Aluminate)와 같이 다공성 텅스텐 매트릭스에 함침되어 열 활성화를 통해 저일 기능 활성화층을 형성합니다.
- **방출 전류 밀도:** A/cm²로 측정된 음극 표면의 단위 면적당 방출되는 전자 흐름은 바륨-텅스텐 음극의 방출 효율을 측정합니다.
- **활성층:** 바륨 텅스텐 음극 표면의 열 활성화에 의해 형성된 저일 기능층으로 주로 바륨 원자 또는 산화 바륨으로 구성되어 방출 성능을 결정합니다.
- **중독 효과:** 음극 표면의 잔류 가스(예: 산소 및 탄소 화합물)의 오염으로 인해 방출 성능이 저하되는 현상입니다.
- **활성화 공정:** 바륨 화합물이 온도와 진공 환경을 제어하여 텅스텐 매트릭스 표면에 활성화층을 형성하는 공정입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- **진공 전자 장치:** 바륨 텅스텐 음극을 핵심 전자원으로 사용하여 마이크로 튜브 및 X 선관과 같은 진공 환경에서 전자 움직임을 사용하는 장치입니다.
- **쇼트키 효과:** 인가된 전기장 하에서 음극 표면 장벽이 감소하여 고전계 강도 응용 분야에서 흔히 볼 수 있는 열이온 방출이 향상됩니다.
- **다공성:** ASTM E1441 및 GB/T 21650.1 에 따라 테스트된 바륨 저장 용량 및 방출 특성에 영향을 미치는 총 부피에 대한 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공 부피 백분율.
- **분말 야금:** 텅스텐 분말을 스크리닝, 압착 및 소결하여 다공성 텅스텐 매트릭스를 제조하는 방법으로, GB/T 3461 및 GB/T 4192 를 준수해야 합니다.
- **함침 공정:** 다공성 텅스텐 매트릭스의 기공에 바륨 화합물 용액을 채우는 공정은 ASTM E168 에 따라 고진공 환경에서 수행됩니다.
- **중독 방지 기능:** 잔류 가스 오염에 저항하는 음극의 능력은 바륨 화합물 제제 및 표면 처리를 최적화함으로써 향상됩니다.
- **노화 테스트:** MIL-STD-202 및 JB/T 6842 에 따라 음극 방출 성능 감쇠를 평가하기 위해 장기 작동 조건을 시뮬레이션하는 테스트입니다.
- **고장 모드:** 표면 오염, 바륨 고갈 또는 기계적 손상과 같은 음극 성능 저하 메커니즘은 결함 트리 분석(FTA)과 같은 방법을 사용하여 분석됩니다.
- **고진공 환경:** 바륨-텅스텐 음극을 작동하는 데 필요한 저압 환경으로, 일반적으로 ISO 20431 에 따라 테스트된 10^{-6} Pa 미만입니다.

B. 참고문헌

[1] 바우어, E. (1994). 저에너지 전자를 사용한 표면 현미경. *물리학 저널: 응집 물질*, 6(31), 5793–5810.[2] 크로닌, JL (1981). 현대식 디스펜서 음극. *IEE 절차 I - 고체 및 전자 장치*, 128(1), 19–32.[3] Gaertner, G., & Koops, HWP (2008). 진공 전자원과 그 재료 및 기술. W. Zhou & Z. L. Wang(Eds.), *나노 기술을 위한 주사 현미경: 기술 및 응용* (pp. 1–40). 스프링거. [4] 가트너, G., & 배럿, D. (2010). 고출력 마이크로파 튜브를 위한 디스펜서 음극 기술. *전자 장치에 관한 IEEE 트랜잭션*, 57(11), 2956–2963.[5] 하스, GA (1972). 디스펜서 음극에서 열이온 방출. *응용 물리학 저널*, 43(6), 2643–2650.[6] 켄킨스, RO (1955). 열이온 음극에 대한 검토. *진공*, 5(1–2), 1–18.[7] 김, HJ, & 이, JJ (2004). 함침된 음극의 바륨 고갈 분석. *응용 표면 과학*, 233(1–4), 184–191.[8] 리우, Y., & 장, H. (2015). 고출력 마이크로파 튜브용 양극재의 발전. *중국 진공 과학 기술 저널*, 35(4), 421–428.[9] 마리안, CRK, & 시, A. (1996). 열악한 진공에서 코팅된 텅스텐 기반 디스펜서 음극의 작동. *전자 장치에 관한 IEEE 트랜잭션*, 43(12), 2165–2170.[10] 시, A., & 야터, JE (2002). 디스펜서 음극에서 2 차 전자 방출. *응용 표면 과학*, 192(1–4), 192–200.

C. 테스트 표준 및 사양

다음은 성능 테스트, 제조, 품질 관리 및 환경 안전 사양을 다루는 바륨 텅스텐 음극과 관련된 국제, 산업 및 중국 표준의 자세한 목록입니다.

국제 표준

- **IEC 60601-1 의료용 전기 장비 - 파트 1: 기본 안전 및 필수 성능에 대한 일반 요구 사항**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- 적용 가능성: 의료용 X 선관에서 바륨 텅스텐 음극의 성능 및 안전 요구 사항을 지정하고 방출 전류 밀도 및 진공 환경을 테스트합니다.
- 주요 요구 사항: 5% 미만의 전송 전류 변동, 10^{-6} Pa 미만의 진공도.
- **IEC 60050 국제 전기 기술 어휘**
 - 적용 가능성: 기술 문서의 일관성을 보장하기 위해 바륨 텅스텐 음극 관련 용어의 정의를 제공합니다.
 - 주요 요구 사항: 용어는 모호성을 피하기 위해 국제 표준을 준수해야 합니다.
- **ISO 9001 품질 경영 시스템 - 요구 사항**
 - 적용 가능성: 바륨 텅스텐 음극 생산의 품질 관리 시스템을 안내하여 배치 일관성을 보장합니다.
 - 주요 요구 사항: 생산 환경은 ISO 클래스 5 클린룸 표준을 준수해야 합니다.
- **ISO 20431 진공 기술 - 진공 게이지 교정**
 - 적합성: 바륨 텅스텐 음극 테스트에서 진공 게이지 정확도를 보장하며 마이크로파 튜브 및 전자 현미경에 적합합니다.
 - 주요 요구 사항: 게이지 교정 정확도는 0.1Pa 보다 우수해야 합니다.
- **ISO 19444-1 진공 기술 - 진공 시스템 성능 측정을 위한 표준 방법 - 파트 1: 일반 요구 사항**
 - 적용 가능성: 바륨 텅스텐 음극 작동 환경을 위한 진공 시스템 설계를 안내합니다.
 - 주요 요구 사항: 진공 시스템의 누출률은 10^{-9} Pa·m³/s 미만입니다.
- **ISO 16000-6 진공 기술 - 진공 펌프 - 파트 6: 일반 요구 사항**
 - 적용 가능성: 바륨 텅스텐 음극 생산 및 테스트에서 진공 펌프 성능 평가를 안내합니다.
 - 주요 요구 사항: 진공 펌프 펌핑 속도 안정성은 5% 이상입니다.

산업 표준

- **전자관에 대한 용어의 IEEE 161 표준 정의**
 - 적용 가능성: 바륨 텅스텐 음극의 성능 매개변수를 정의합니다., 일함수 및 방출 전류 밀도.
 - 주요 요구 사항: 테스트는 고주파 펄스 조건을 시뮬레이션해야 합니다.
- **마이크로파 튜브 테스트 방법에 대한 IEEE 287 표준**
 - 적용 가능성: 방출 성능 및 수명 테스트와 같은 마이크로파 튜브의 바륨 텅스텐 음극에 대한 테스트 방법을 지정합니다.
 - 주요 요구 사항: 테스트 환경은 높은 진공을 유지해야 하며 전류 밀도 테스트 정확도는 0.1mA/cm²보다 우수합니다.
- **MIL-STD-810 환경 공학 고려 사항 및 실험실 테스트**
 - 적용 가능성: 항공우주 분야에서 바륨 텅스텐 음극의 진동 및 방사선 테스트에 적합합니다.
 - 주요 요구 사항: 음극은 높은 방사선 환경에서 안정적인 성능을 유지해야 합니다.
- **MIL-STD-202 전자 및 전기 부품에 대한 테스트 방법 표준**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 적합성: 바륨 텅스텐 음극의 수명 및 신뢰성 테스트를 안내합니다.
- 주요 요구 사항: 가속 노화 테스트는 실제 작동 조건을 시뮬레이션해야 합니다.
- **ASTM F83 전자 방출기의 열이온 상수 정의 및 결정에 대한 표준 관행**
 - 적용 가능성: 바륨 텅스텐 음극의 일 함수와 전송 전류의 밀도에 대한 테스트 방법을 지정합니다.
 - 주요 요구 사항: 테스트는 0.01eV 이상의 정확도로 고진공 환경에서 수행되어야 합니다.
- **텅스텐 플레이트, 시트 및 호일에 대한 ASTM B760 표준 사양**
 - 적용 가능성: 바륨 텅스텐 음극의 다공성 텅스텐 매트릭스에 대한 텅스텐 재료의 순도 요구 사항을 지정합니다.
 - 주요 요구 사항: 텅스텐 순도는 99.95% 이상이어야 합니다.
- **컴퓨터 단층촬영(CT) 영상을 위한 ASTM E1441 표준 가이드**
 - 적용 가능성 : 다공성 텅스텐 매트릭스의 다공성 및 기공 크기 분포 테스트를 안내합니다.
 - 주요 요구 사항: 1 μ m 보다 나은 X-CT 해상도.
- **열중량 분석의 일반 기술에 대한 ASTM E168 표준 관행**
 - 적합성: 바륨 화합물의 함침량을 안내하는 열중량 분석(TGA).
 - 주요 요구 사항: 0.1mg 이상의 열 분석 정확도.

중국 국가 및 산업 표준

- **- GB 4943.1-2022 정보 기술 장비 안전 1 부: 일반 요구 사항**
 - 적합성: 정보 기술 장비에서 바륨 텅스텐 음극의 전기 및 열 안전 테스트에 적합합니다.
 - 주요 요구 사항: 작동 온도는 아크 방전을 방지하기 위해 안전한 범위 내에서 제어되어야 합니다.
- **- GB/T 3797-2016 전기 및 전자 제품의 환경 조건 2 부: 테스트 방법**
 - 적용 가능성: 고온, 고습 및 진동 환경에서 바륨 텅스텐 음극의 성능 테스트를 안내합니다.
 - 주요 요구 사항: 음극은 2000°C 및 고진공에서 안정적이어야 합니다.
- **- JB/T 6842-2018 진공 전자 장치의 일반 사양**
 - 적용 가능성: 진공 전자 장치에서 바륨 텅스텐 음극의 성능 및 테스트 요구 사항을 지정합니다.
 - 주요 요구 사항: 전송 전류 밀도는 고전력 장치의 요구 사항을 충족해야 합니다.
- **- GB/T 21650.1-2008 수은 기공성 측정 및 가스 흡착에 의한 고체 물질의 기공 크기 분포 및 다공성 1 부: 수은 기공성 측정**
 - 적용 가능성: 다공성 텅스텐 기관의 다공성 테스트를 안내합니다.
 - 주요 요구 사항: 다공성 측정 정확도는 1% 이상이어야 합니다.
- **- GB/T 13247-2019 금속 재료의 열 분석을 위한 테스트 방법**
 - 적합성: 바륨 화합물의 함침량을 안내하는 열중량 분석(TGA).
 - 주요 요구 사항: 열 분석 정확도는 0.1mg 이상이어야 합니다.
- **GB/T 3461-2017 텅스텐 분말**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 적용 가능성: 텅스텐 분말의 입자 크기 분포 및 순도 요구 사항을 지정합니다.
- o 주요 요구 사항: 텅스텐 분말의 순도는 99.95% 이상이어야 합니다.
- **GB/T 4192-2010 소결 텅스텐 및 텅스텐 합금**
 - o 적용 가능성: 바륨 텅스텐 음극 다공성 텅스텐 매트릭스의 소결 공정을 안내합니다.
 - o 주요 요구 사항: 1900–2050°C 로 제어되는 소결 온도.
- **- GB/T 4181-2017 텅스텐 및 텅스텐 합금의 화학 분석 방법**
 - o 적용 가능성: 텅스텐 분말 및 텅스텐 매트릭스의 순도 분석을 안내합니다.
 - o 주요 요구 사항: ICP-OES 분석 정확도는 10ppm 보다 우수합니다.
- **- GB 30000.1-2024 화학물질 분류 및 라벨링 규칙 1부: 일반 규칙**
 - o 적용 가능성: 바륨 화합물에 대한 안전 라벨링 및 작동 관행을 안내합니다.
 - o 주요 요구 사항: 구현 날짜가 2025 년 8 월 1 일인 표준 준수 SDS 를 제공합니다.
- **- GB/T 16483-2008 화학 제품 안전 보건 자료 섹션의 내용 및 순서**
 - o 적용 가능성: 바륨 화합물의 안전성 정보를 표준화하여 관리합니다.
 - o 주요 요구 사항: SDS 에는 화학적 독성 및 취급 요구 사항이 포함되어야 합니다.
- **- GB 18597-2023 유해 폐기물 오염 통제를 위한 기술 사양**
 - o 적용 가능성: 바륨 화합물 폐기물의 수집, 보관 및 폐기를 안내합니다.
 - o 주요 요구 사항: 폐액의 중금속 함량은 배출 기준보다 낮아야 합니다.
- **- GB 5085.7-2019 유해 폐기물 식별 표준 일반 사양**
 - o 적용 가능성: 바륨 화합물 폐기물의 식별 및 분류 요구 사항을 규정합니다.
 - o 주요 요구 사항: 폐기물은 유해 폐기물 기준에 따라 폐기해야 합니다.
- **- GB/T 14815-2008 진공 기술 어휘**
 - o 적용 가능성: 바륨 텅스텐 음극 테스트 및 작동에서 진공 기술 용어를 정의합니다.
 - o 주요 요구 사항: 용어는 국제 표준과 일치해야 합니다.
- **- GB/T 34590-2017 진공 기술 진공 시스템 성능 측정 방법**
 - o 적용 가능성: 바륨 텅스텐 음극 작동 환경에 대한 진공 시스템 성능 테스트를 안내합니다.
 - o 주요 요구 사항: 진공 시스템의 누출률은 $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 미만입니다.

D. 공급업체 및 자원

- **CTIA GROUP LTD 소개**

CTIA GROUP LTD 는 중국의 바륨-텅스텐 음극 및 진공 전자 재료의 선두 공급업체입니다. 이 제품은 마이크로파 튜브, X 선관, 레이더 시스템, 전자 현미경 및 항공 우주 분야에서 널리 사용됩니다. CTIA GROUP LTD 는 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 유연한 맞춤화를 전문으로 하며 고성능 음극 솔루션을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제공하며 고객의 요구에 따라 텅스텐 및 폴리브덴 제품의 다양한 사양, 성능, 크기 및 등급을 맞춤화하고 처리할 수 있습니다.

연락처 정보:

이메일: sales@chinatungsten.com

전화: 0592-5129696, 0592-5129595

- **CTIA GROUP LTD 바륨 텅스텐 전극 관련 웹사이트**

바륨 텅스텐 음극:

<http://tungsten.com.cn/barium-tungsten-cathode.html>

텅스텐 가격 및 뉴스:

<http://news.chinatungsten.com/en/>

<https://www.ctia.com.cn/en/>

텅스텐 및 폴리브덴 제품:

<http://www.chinatungsten.com/>

E. 색인

키워드 색인

- 바륨 텅스텐 음극 : 1.1, 2.1, 3.2, 4.1, 5.1, 6.1, 8.1, A, C, D
- 열이온 방출: 3.1, 3.2, 8.2, A
- 작업 기능: 3.2, 6.1, 8.2, A
- 다공성 텅스텐 매트릭스 : 2.1, 2.3, 4.1, 6.1, 8.3, A, C, D
- 바륨 화합물: 2.1, 4.2, 6.1, 8.4, A, C, D
- 전송 전류 밀도: 3.2, 5.1, 8.2, A
- 진공 전자 장치 : 1.3, 5.1, 8.1, A, C, D
- 독성 효과: 3.3, 6.2, A
- 활성화 프로세스: 4.2, 8.3, A
- 환경 및 안전: 8.4, C, D
- 제조 및 품질 관리: 4.3, 8.3, C, D
- 분말 야금: 2.2, 4.1, 8.3, A, C
- 다공성 : 2.3, 4.1, 8.3, A, C
- 진동 저항: 5.4, 8.1, A

주제 색인

- **재료 과학:** 2 장, 6.1, 8.3, A, C, D
 - o 다공성 텅스텐 매트릭스 : 2.1.1, 2.3.1, 4.1, 6.1, 8.3, C, D
 - o 바륨 화합물 특성: 2.1.2, 4.2, 6.1, 8.4, C, D
 - o 미세구조분석: 2.3, 4.3, 6.1
- **작동 원리:** 3 장, A
 - o 열이온 방출 이론: 3.1, A
 - o 방출 특성 및 고장 분석: 3.2, 3.3, A
 - o 쇼트키 효과 및 필드 강화: 3.1.2, A
- **제조 기술:** 4 장, 8.3, A, C, D
 - o 다공성 텅스텐 매트릭스 형성 : 4.1, 8.3, A, C
 - o 함침 및 활성화 과정: 4.2, 8.3, A, C

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o 품질 관리 및 테스트: 4.3, 8.3, C
- 응용 프로그램: 5 장, D
 - o 마이크로파 튜브 대 X 선관: 5.1, D
 - o 과학 기기: 5.2, D
 - o 항공 우주 및 방위: 5.4, D
 - o 새로운 응용 분야(예: 테라헤르츠, 이온 추진기): 5.5
- 성능 최적화: 6 장
 - o 발사 효율: 6.1
 - o 수명 및 중독 방지: 6.2
 - o 환경 적응성: 6.3
- 기술적 과제와 미래 발전: 7 장
 - o 재료비 및 일관성: 7.1
 - o 신흥 기술 경쟁: 7.2
 - o 향후 연구 방향: 7.3
- 표준 및 사양: 8 장, C
 - o 국제 및 산업 표준: 8.1, C
 - o 성능 매개변수 사양: 8.2, C
 - o 제조 및 품질 관리: 8.3, C
 - o 환경 및 안전: 8.4, C
- 공급업체 및 자원: D
 - o CTIA 그룹 주식회사: D



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT