

텅스텐 구리 전극이란 무엇입니까

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

1 장: 서론

- 1.1 텅스텐 구리 전극의 정의
- 1.2 텅스텐 구리 전극의 기본 특성
- 1.3 텅스텐 구리 전극의 개발 역사

2 장: 텅스텐 구리 전극의 재료 기초

- 2.1 텅스텐의 특성
- 2.2 구리의 특성
- 2.3 텅스텐-구리 복합 메커니즘
 - 2.3.1 텅스텐 구리 전극의 물리적 적합성
 - 2.3.1.1 구조적 호환성
 - 2.3.1.2 열적합성
 - 2.3.2 텅스텐 구리 전극의 성능 시너지
 - 2.3.2.1 전기 및 열 전도도의 시너지
 - 2.3.2.2 고온 저항성과 구조적 안정성 간의 시너지 효과
- 2.4 텅스텐 구리 전극의 주요 원자재 요구 사항
 - 2.4.1 텅스텐 분말 요구 사항
 - 2.4.2 구리 분말 요구 사항
 - 2.4.3 원료 전처리 표준

제 3 장: 텅스텐 구리 전극의 물리적 및 화학적 특성

- 3.1 텅스텐 구리 전극의 물리적 특성
 - 3.1.1 텅스텐 구리 전극의 밀도
 - 3.1.1.1 밀도 계산 방법
 - 3.1.1.2 밀도와 구성의 관계
 - 3.1.1.3 밀도가 응용 프로그램에 미치는 영향
 - 3.1.2 텅스텐 구리 전극의 열적 특성
 - 3.1.2.1 열전도도
 - 3.1.2.2 열팽창 계수
 - 3.1.2.3 고온 저항
- 3.2 텅스텐 구리 전극의 기능적 성능
 - 3.2.1 텅스텐 구리 전극의 전도성 특성
 - 3.2.1.1 전도도
 - 3.2.1.2 저항률
 - 3.2.1.3 전류 전달 용량
 - 3.2.2 텅스텐 구리 전극의 아크 침식 저항성
 - 3.2.2.1 아크 침식 메커니즘
 - 3.2.2.2 절제 저항성 평가
 - 3.2.2.3 절제 저항에 영향을 미치는 요인
- 3.3 텅스텐 구리 전극의 기타 특성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.1 텅스텐 구리 전극의 경도
- 3.3.2 텅스텐 구리 전극의 강도
- 3.3.3 텅스텐 구리 전극의 인성
- 3.3.4 텅스텐 구리 전극의 내마모성
- 3.3.5 텅스텐 구리 전극의 내식성
- 3.3.6 텅스텐 구리 전극의 용접 방지 및 접착 방지 특성
- 3.4 CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극 MSDS

4 장: 텅스텐 구리 전극의 분류

- 4.1 조성비 지배적 분류 텅스텐 구리 전극
 - 4.1.1 고텅스텐 함량 전극(80%-95% 텅스텐)
 - 4.1.2 중간 텅스텐 함량 전극(50%-80% 텅스텐)
 - 4.1.3 저텅스텐 함량 전극(텅스텐 20%-50%)
- 4.2 텅스텐 구리 전극의 응용 시나리오 중심 분류
 - 4.2.1 EDM 용 전극
 - 4.2.2 고전압 전기제품용 전극
 - 4.2.3 용접 현장의 전극
 - 4.2.4 항공우주 및 군사용 특수 전극
- 4.3 텅스텐 구리 전극의 형태학적 및 구조적 특성의 분류
 - 4.3.1 블록 전극
 - 4.3.2 막대 전극
 - 4.3.3 시트 전극
 - 4.3.4 특수 모양의 전극
- 4.4 텅스텐 구리 전극의 성능 중심 분류
 - 4.4.1 고전도성 전극
 - 4.4.2 아크 침식 방지 전극
 - 4.4.3 고강도 전극
 - 4.4.4 고내열 전극
- 4.5 미세구조에 따른 텅스텐 구리 전극의 분류
 - 4.5.1 균일하게 분산된 전극
 - 4.5.2 골격으로 채워진 전극
 - 4.5.3 기울기 분포 전극
- 4.6 거시적 물리적 형태에 따른 텅스텐 구리 전극의 분류
 - 4.6.1 고밀도 전극
 - 4.6.2 다공성 전극
 - 4.6.3 복합 코팅 전극

제 5 장: 텅스텐 구리 전극의 제조 공정

- 5.1 침투 과정
 - 5.1.1 텅스텐 골격 조립식 제작
 - 5.1.1.1 텅스텐 분말 성형
 - 5.1.1.2 텅스텐 스켈레톤 소결

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1.1.3 텅스텐 골격 가공 제어

5.1.2 침투 제어

5.1.2.1 구리 재료 준비

5.1.2.2 침투 온도 제어

5.1.2.3 침투 시간 제어

5.2 후처리 기술

5.2.1 절단

5.2.2 연삭

5.2.3 표면 처리

5.2.4 치수 정확도 제어

6 장: 텅스텐 구리 전극의 응용 시나리오

6.1 EDM 에서의 텅스텐 구리 전극의 적용

6.1.1 금형 가공에서의 응용

6.1.2 가공이 어려운 재료의 가공에 적용

6.1.3 EDM 적용의 장점

6.2 고전압 전기제품에 대한 텅스텐 구리 전극의 적용

6.2.1 고전압 스위치에서의 응용

6.2.2 피뢰기에서의 응용

6.2.3 고전압 전기제품의 적용 이점

6.3 용접 및 브레이징에서의 텅스텐 구리 전극의 적용

6.3.1 저항 용접의 응용

6.3.2 브레이징에서의 응용

6.3.3 용접 분야에서의 적용 이점

6.4 항공우주 및 군사 산업에서의 텅스텐 구리 전극의 적용

6.4.1 로켓 엔진 관련 구성 요소의 응용

6.4.2 지침 구성 요소의 적용

6.4.3 항공우주 및 군수 산업의 응용 이점

제 7 장: 텅스텐 구리 전극에 대한 품질 관리 및 시험 표준

7.1 텅스텐 구리 전극의 주요 지표 검출

7.1.1 텅스텐 구리 전극의 물리적 특성 시험

7.1.1.1 밀도 시험 방법 및 표준

7.1.1.2 열 성능 시험 방법 및 표준

7.1.1.3 전도도 시험 방법 및 표준

7.1.2 텅스텐 구리 전극의 화학적 특성

7.1.2.1 조성 분석 방법

7.1.2.2 내식성 시험 방법

7.1.2.3 불순물 함량 시험 표준

7.1.3 텅스텐 구리 전극의 기계적 특성

7.1.3.1 경도 시험 방법 및 표준

7.1.3.2 강도 시험 방법 및 표준

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.3.3 인성 시험 방법 및 표준
- 7.2 텅스텐 구리 전극의 미세 구조 검사
 - 7.2.1 금속조직 분석
 - 7.2.1.1 금속조직 샘플 준비
 - 7.2.1.2 상분포 균일성 평가 기준
 - 7.2.1.3 입자 크기 감지
 - 7.2.2 텅스텐 구리 전극의 결함 검출
 - 7.2.2.1 기공률 검출 방법 및 허용 범위
 - 7.2.2.2 균열 탐지 방법 및 기준
 - 7.2.2.3 포함 탐지 방법 및 제어 표준
- 7.3 텅스텐 구리 전극에 대한 산업 표준
 - 7.3.1 관련 국내 표준
 - 7.3.1.1 중국 표준의 관련 규정
 - 7.3.1.2 산업 표준 요구 사항
 - 7.3.2 관련 국제 표준
 - 7.3.2.1 국제 텅스텐 구리 전극 표준
 - 7.3.2.2 유럽, 미국, 일본, 한국 및 기타 국가의 텅스텐 구리 전극 표준

제 8 장: 텅스텐 구리 전극 시장 및 기술 동향

- 8.1 텅스텐 구리 전극 산업 사슬 분석
 - 8.1.1 상류 원자재 공급
 - 8.1.2 중류 제조
 - 8.1.3 다운스트림 애플리케이션 시장
- 8.2 텅스텐 구리 전극의 기술 방향
 - 8.2.1 준비 프로세스 최적화
 - 8.2.2 성능 개선 경로
 - 8.2.3 애플리케이션 확장 탐색

총수:

텅스텐 구리 전극 용어집
참고문헌



CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극

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

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

1 장: 서론

1.1 텅스텐 구리 전극의 정의

텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침윤법을 통해 텅스텐(W)과 구리 (Cu)를 혼합하여 만든 복합 전극입니다. 텅스텐-구리 전극의 정의는 조성, 제조 방법 및 특정 응용 분야에서의 기능적 특성을 포괄합니다. 텅스텐-구리 전극은 일반적으로 텅스텐을 주요 골격 재료로, 구리를 필러로 사용합니다. 두 금속은 다양한 비율(예: WCu 70/30, WCu 80/20)로 혼합되어 높은 용점, 고온 저항성, 우수한 전기 전도성을 가진 재료를 생성합니다. 텅스텐의 3422°C 의 높은 용점은 전극에 탁월한 열 안정성과 아크 침식 저항성을 제공하는 반면, 1083°C 의 용점을 가진 구리는 높은 전기 및 열 전도성을 가지고 있어 효율적인 전류 전달과 빠른 방열을 보장합니다. 이 복합 재료의 특성 덕분에 방전 가공(EDM), 저항 용접, 전기 접점과 같은 응용 분야에서 널리 사용됩니다. 텅스텐-구리 전극의 정의에는 미세 구조도 포함됩니다. 전극은 텅스텐과 구리 분말을 분말 야금, 프레스, 소결을 통해 혼합하거나, 진공 함침을 통해 다공성 텅스텐 골격에 액상 구리를 함침시켜 균일한 상 분포와 낮은 기공률을 갖도록 형성됩니다.

실제 응용 분야에서 텅스텐-구리 전극의 정의는 기능적 특성까지 포괄하도록 더욱 확장됩니다. 예를 들어 , 전기 스파크 가공(EDM)에서 공작물 소재를 제거하는 공구 전극으로 사용하거나 저항 용접에서 높은 전류와 압력을 견디는 전극으로 사용할 수 있습니다. 전극 비율과 제조 공정은 특정 요구 사항에 맞게 조정할 수 있습니다. 예를 들어, 텅스텐 함량이 높은 전극은 내마모성과 내아크성에 더 적합한 반면, 구리 함량이 높은 전극은 전기 전도도를 최적화합니다. 텅스텐-구리 전극의 정의는 기존의 단일 금속 전극과의 차이점도 포괄합니다. 복합 재료의 장점은 텅스텐과 구리 의 균형 잡힌 특성을 통해 순수 구리의 낮은 녹는점이나 순수 텅스텐의 낮은 전기 전도도와 같은 단일 재료의 한계를 극복한다는 것입니다. 최근 제조 기술의 발전과 함께 텅스텐-구리 전극의 정의는 적층 제조 및 나노 기술 분야로 점차 확장되어 더욱 정교한 미세 구조와 새로운 응용 분야를 모색하고 있습니다.

1.2 텅스텐 구리 전극의 기본 특성

텅스텐 -구리 전극은 복합 재료로서 고유한 물리적, 기계적, 전기적 특성을 지니고 있어 다양한 응용 분야에 특히 적합합니다. 첫째, 전기 전도도는 텅스텐-구리 전극의 핵심 특성입니다. 구리 상의 높은 전기 전도도(약 5.8×10^7 S/m)는 효율적인 전류 전달 경로를 제공합니다. 텅스텐은 전기 전도도가 낮지만(약 1.8×10^7 S/m), 구리 분포를 최적화함으로써 텅스텐-구리 전극의 전기 전도도는 기존 구리 전극의 80%~90%에 도달하여 EDM 및 용접 요건을 충족합니다. 열 전도도 또한 중요한 특성입니다. 구리의 열전도도와 텅스텐의 적당한 열전도도(약 174 W/ m· K) 를 결합하면 열전도도가 $180 \sim 220$ W/ m· K 인 합금이 생성되어 기계 가공이나 용접 중에 발생하는 열을 빠르게 방출시켜 국부적인 과열을 방지할 수 있습니다.

고온 저항성은 텅스텐-구리 전극의 중요한 장점입니다. 텅스텐의 초고용점은 아크 및

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고온 환경에서 안정성을 보장합니다. 용융 후 구리 상이 기공을 채워 재료의 열 안정성을 더욱 향상시켜 최대 3000°C 의 극한 조건에 적합합니다. 텅스텐의 높은 경도(약 3430 HV)와 내마모성은 아크 침식에 대한 저항성에 기여합니다. 이는 EDM 중 전극 표면 삭막을 크게 줄여 수명을 연장합니다. 기계적 강도와 경도 또한 중요한 특성입니다. 텅스텐-구리 전극은 1000 MPa 를 초과하는 압축 강도와 200~300 HV 의 경도를 자랑하여 고압과 빈번한 기계적 작용을 견딜 수 있습니다. 또한 구리 상은 인성을 제공하여 취성 파괴 위험을 줄입니다.

낮은 열팽창 계수(약 6-8ppm/°C)는 텅스텐 구리 전극의 고유한 장점입니다. 실리콘이나 세라믹 기판과 일치하고 열 사이클링 중 응력을 줄이며 특히 마이크로 전자 패키징에 적합합니다. 텅스텐의 화학적 안정성과 구리의 표면 처리(예: 니켈 도금)를 통해 내식성이 달성되어 습하거나 산업 환경에 적합합니다. 미세 구조적으로 텅스텐 구리 전극의 균일한 상 분포와 낮은 다공성(일반적으로 1% 미만)은 일관된 성능을 보장합니다. 이러한 기본 특성은 텅스텐 구리 전극의 다재다능성을 구성하여 고정밀 가공, 전기 접촉 및 열 관리에서 우수한 성능을 발휘할 수 있게 합니다. 앞으로 나노 기술과 표면 개질의 개발로 이러한 특성이 더욱 최적화될 것으로 예상됩니다.

1.3 텅스텐-구리 전극의 개발 역사

텅스텐-구리 전극은 재료 과학과 산업적 요구의 역사적 진화를 반영하며, 그 기원은 20 세기 중반으로 거슬러 올라가며 분말 야금의 발전과 전기 산업의 급속한 발전과 함께 합니다. 초기 텅스텐-구리 전극의 연구 개발은 1940 년대에 시작되었으며, 군사 및 산업 분야에서 텅스텐과 구리의 고유한 특성에 의해 주도되었습니다. 초기 연구는 분말 야금 공정에 집중되었고, 1945 년에 미국 금속 학회(ASM)는 텅스텐-구리 복합재의 제조에 대해 처음 보고했으며, 텅스텐과 구리 분말을 혼합, 압축 및 소결하여 전기 접점에서의 응용을 탐구했습니다. 이 단계에서 텅스텐-구리 전극은 주로 저가형 전기 장비에 사용되었으며, 성능이 제한적이고 다공성이 높으며 전도도와 내구성이 개선될 여지가 있었습니다.

1950 년대부터 1970 년대 까지 진공 침투 기술이 도입되면서 텅스텐-구리 전극 개발이 급속한 성장기를 맞이했습니다. 1955 년 지멘스는 진공 침투법을 성공적으로 개발하여 소결 텅스텐 골격에 액체 구리를 침투시켜 기공률을 크게 줄이고 재료의 밀도와 전도도를 개선했습니다. 이 기술 혁신으로 텅스텐-구리 전극을 방전 가공(EDM)에 적용할 수 있게 되어 텅스텐 카바이드와 같은 경질 재료를 가공하는 데 적합해졌습니다. 1960 년대에는 도시바와 제너럴 일렉트릭과 같은 일본과 미국 기업이 비율과 미세 구조를 더욱 최적화하여 WCu 70/30 과 WCu 80/20 이 산업 표준이 되었고 고전압 스위치와 용접 전극에 널리 사용되었습니다.

1980 년대부터 2000 년대 까지 텅스텐-구리 전극의 응용 분야는 마이크로전자공학과 항공우주 분야로 확장되어 제조 기술 혁신을 주도했습니다. 1985 년에는 열간등방성형(HIP) 기술이 도입되어 소재의 균일성과 기계적 강도를 향상시켜 고정밀 가공 요구를 충족했습니다. 1990 년대에는 나노텅스텐 분말이 도입되어 결정립 미세화, 내마모성, 내아크 침식성이 향상되었습니다. 2000 년대 이후, 적층 제조 및 3D 프린팅 기술의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

발전으로 텅스텐-구리 전극 제조는 개인 맞춤형 제작으로 전환되었고, 복잡한 형상의 전극 제작이 가능해졌습니다. 2020 년대 에는 인공지능과 재료 시뮬레이션을 접목한 텅스텐-구리 전극 연구 개발이 5G 장비 및 고온 센서의 요구를 충족하기 위해 기능적 경사 소재 및 표면 개질에 집중되었습니다. 2025 년까지 텅스텐-구리 전극은 고성능 프로세싱 및 전자 분야의 핵심 소재로 자리매김할 것이며, 텅스텐-구리 전극의 개발 역사는 기술 혁신과 응용 분야의 요구가 긴밀하게 통합되어 왔음을 보여줍니다.



CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2 장: 텅스텐-구리 전극의 재료 기초

2.1 텅스텐의 특성

텅스텐-구리 전극의 핵심 성분인 텅스텐은 고성능 응용 분야를 위한 독보적인 기반을 제공하는 특성을 가지고 있습니다. 텅스텐은 고용점 금속으로, 3422°C 의 녹는점은 알려진 모든 금속 중 가장 높습니다. 이러한 특성 덕분에 극고온 환경에서도 구조적 안정성을 유지하여 방전 가공(EDM)이나 저항 용접 시 발생하는 아크 및 고온 충격을 견디는 데 특히 적합합니다. 텅스텐의 밀도는 19.25 g/cm³로 전극에 높은 질량 저항성과 변형 저항성을 제공합니다. 압축 강도는 1000 MPa 를 초과하고 경도는 약 3430 HV 로 뛰어난 내마모성과 기계적 강도를 보여줍니다. 이러한 특성 덕분에 텅스텐은 잦은 기계적 충격이나 아크 침식에도 잘 견디며 전극의 사용 수명을 연장합니다. 열전도도는 약 174 W/ m·K 로 구리보다 낮지만, 높은 녹는점이 이러한 단점을 보완하여 고온에서도 원래 형태를 유지합니다.

텅스텐의 화학적 안정성은 또 다른 뛰어난 특성입니다. 산, 알칼리 및 산화 환경에 대한 내성이 뛰어나며, 특히 습하거나 산업 환경에서 표면의 심각한 부식에 대한 내성이 뛰어납니다. 이는 텅스텐-구리 전극을 옥외 또는 혹독한 환경에서 사용할 수 있도록 보장합니다. 그러나 텅스텐은 전기 전도도가 상대적으로 낮아(약 1.8×10^{-7} S/m) 단독 사용에는 제한이 있으며 다른 고전도성 재료와 혼합하여 사용해야 합니다. 열팽창 계수는 약 4.5 ppm/°C 로, 많은 세라믹 또는 반도체 재료와 동일한 수준으로 열 사이클링 시 응력을 줄이고 마이크로전자 패키징에 유리합니다. 텅스텐은 가공성이 낮아 분말 야금 또는 고온 소결을 통해 제조해야 하지만, 미세 입자 구조는 공정 최적화를 통해 성능을 향상시킬 수 있습니다. 최근 나노 텅스텐 분말의 도입으로 텅스텐의 균일성과 강도가 더욱 향상되어 고정밀 전극에 대한 적용 가능성이 더욱 높아졌습니다.

2.2 구리의 특성

전극 의 또 다른 핵심 성분인 구리 는 탁월한 전기적 및 열적 성능을 제공하는 특성을 가지고 있습니다. 구리의 녹는점은 1083°C 로 텅스텐보다 낮지만, 높은 전기적 및 열적 전도성으로 효율적인 전류 전달 및 방열에 이상적인 소재입니다. 텅스텐-구리 전극 에서 구리 상은 분말 야금 또는 진공 용 침법을 통해 텅스텐 골격에 결합되어 EDM 또는 용접 시 안정적인 전류 전달을 보장하는 연속적인 전도성 네트워크를 형성합니다. 밀도가 8.96g/cm³인 구리는 텅스텐보다 가볍지만, 연성과 인성이 높아 기계적 유연성이 향상되어 기계적 응력 하에서 취성 파괴 위험을 줄입니다.

구리는 순수 상태에서는 내식성이 약하고 산화나 황화에 의해 쉽게 영향을 받습니다. 그러나 텅스텐-구리 복합재 에서는 텅스텐의 화학적 안정성이 보호 기능을 제공하며, 구리 표면에 니켈이나 금과 같은 코팅을 추가로 코팅하여 내후성을 향상시킬 수 있습니다. 구리는 약 17ppm/°C로 비교적 높은 열팽창 계수를 갖지만, 텅스텐과 결합하면 실리콘이나 세라믹 기판과 잘 어울려 마이크로전자 응용 분야에 적합합니다. 구리는 가공성이 우수하여 정밀 절삭 및 성형이 용이하고 복잡한 전극 형상의 제조가 가능합니다. 그러나

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고온에서 연화되는 경향 때문에 구리 단독 사용에는 제한이 있어 텅스텐을 지지체로 사용해야 합니다. 최근 몇 년 동안, 불순물이 전기 및 열 전도도에 미치는 영향을 줄이기 위해 고순도 전해 구리가 널리 채택되었습니다. 구리의 특성은 텅스텐-구리 전극에 높은 전기 및 열 전도도를 부여하여 전기 및 열 관리 분야에서 우수한 성능을 발휘할 수 있도록 합니다.

2.3 텅스텐-구리 복합 메커니즘

텅스텐-구리 복합화 메커니즘은 텅스텐-구리 전극 성능의 기본 원리를 이해하는 데 핵심적인 역할을 하며, 미시적 수준에서 텅스텐과 구리의 상호작용과 제조 공정 최적화를 포함합니다. 텅스텐-구리 복합 재료는 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 제조됩니다. 기본 원리는 텅스텐의 높은 용융점을 골격으로, 구리의 낮은 용융점을 충전재로 사용하여 상호 보완적인 성능 시스템을 형성하는 것입니다. 분말 야금에서는 텅스텐 분말과 구리 분말을 특정 비율로 혼합하여 블랭크(blank) 형태로 성형한 후 고온에서 소결합니다. 구리는 액상 상태의 텅스텐 입자를 적서 기공을 채우고 균일한 복합 구조를 형성합니다. 진공 침투 공정은 먼저 다공성 텅스텐 골격을 제조한 후, 진공 환경에서 구리의 용융점 이상으로 가열합니다. 액체 구리가 블랭크에 침투하여 충전되어 재료의 밀도를 향상시킵니다.

복합 메커니즘의 핵심은 텅스텐과 구리의 물리적, 화학적 비호환성에 있습니다. 두 재료 사이에는 유의미한 화합물이 형성되지 않으며, 계면은 주로 기계적으로 결합되고 부분적으로 확산되어 상전이 또는 취성 상의 형성을 최소화합니다. 텅스텐 골격은 구조적 지지와 고온 저항성을 제공하는 반면, 구리 상은 연속적인 네트워크를 형성하여 전기 및 열 전도성을 최적화합니다. 미세 구조에서 텅스텐 입자는 일반적으로 크기가 5~20 마이크론인 불규칙한 다각형으로 분포합니다. 구리는 기공을 채우며 기공률은 1% 미만으로 제어할 수 있습니다. 열처리 및 압력 보조 공정(예: 열간 등방성 가압)은 계면 결합 및 균일성을 더욱 향상시킵니다. 복합 메커니즘에는 열팽창 매칭도 포함됩니다. 텅스텐의 낮은 열팽창률은 구리의 높은 열팽창률과 비례적으로 조절되어 6~8ppm/°C의 열팽창 계수를 가지며 다양한 기관에 적용 가능합니다.

2.3.1 텅스텐-구리 전극의 물리적 적합성

텅스텐-구리 전극의 물리적 호환성은 텅스텐과 구리의 열적, 기계적, 전기적 특성의 조화를 포함하는 복합 메커니즘의 중요한 구성 요소입니다. 첫째, 열적 호환성은 열팽창계수 (CTE)의 일치에 반영됩니다. 텅스텐의 CTE는 4.5ppm/°C인 반면 구리의 CTE는 17ppm/°C입니다. 단독으로 사용할 경우 CTE 차이가 상당하지만, 복합 비율(예: WCu 85/15)을 조정하면 최종 CTE를 실리콘이나 세라믹 기관과 유사한 6~8ppm/°C로 제어하여 열 사이클링 중 응력 집중을 줄일 수 있습니다. 이 특성은 마이크로전자 패키징 및 센서 응용 분야에서 패키지 뒤틀림이나 파손을 방지하는 데 특히 중요합니다.

기계적 호환성은 경도와 인성 사이의 균형에 반영됩니다. 텅스텐의 경도는 최대 3430HV인 반면 구리의 경도는 약 70HV에 불과합니다. 복합을 통해 텅스텐-구리 전극의 경도는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

일반적으로 내마모성과 연성을 결합하여 200-300HV 사이입니다. 텅스텐 골격은 기계적 지지력을 제공하는 반면 구리 상은 인성을 향상시키고 충격 에너지를 흡수하며 특히 전극 표면 마모가 감소하는 EDM 에서 취성 파괴를 방지합니다. 전기적 호환성이 핵심입니다. 구리의 높은 전도도와 텅스텐의 낮은 전도도($1.8 \times 10^{-7} \text{ S/m}$)는 구리 상의 연속적인 네트워크를 통해 조화를 이룹니다. 전기 전도도는 순수 구리의 80%-90%에 가까워 높은 전류 전송 요구를 충족합니다.

구리 사이에는 유의미한 화학 반응이 일어나지 않습니다. 계면은 주로 기계적으로 결합되고 확산되어 취성 상 형성을 최소화하고 장기 안정성을 향상시킵니다. 진공 침투 공정은 계면 습윤성을 최적화하고, 미충전 기공을 줄이며, 밀도를 향상시킵니다. 열전도도 호환성을 반영하는데, 구리 상은 열전도에, 텅스텐 상은 열 안정성을 제공합니다. 앞으로 나노파우더 또는 표면 개질은 호환성을 더욱 향상시키고 고온 센서나 5G 장치와 같이 더욱 까다로운 환경에서의 응용을 가능하게 할 것입니다.

2.3.1.1 구조적 호환성

텅스텐-구리 전극은 물리적 호환성의 핵심 요소입니다. 이는 텅스텐과 구리 미세 구조의 기하학적 정합 및 계면 안정성을 포함하며, 전극의 기계적 특성과 장기 신뢰성에 직접적인 영향을 미칩니다. 구조적 호환성은 주로 텅스텐 프레임워크와 구리 필러 상 간의 조화에 반영되며, 이는 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 달성됩니다. 분말 야금에서는 텅스텐 분말(일반적으로 5~20 마이크론 크기)과 구리 분말을 특정 비율(예: WCu 70/30)로 혼합하여 성형체로 압착합니다. 소결 과정에서 액상 상태의 구리는 텅스텐 입자를 적시고 기공을 채워 텅스텐을 연속 프레임워크로, 구리를 분산된 상으로 하는 복합 구조를 형성합니다. 진공 침투 공정은 먼저 다공성 텅스텐 프레임워크를 생성합니다. 텅스텐 프레임워크는 진공 환경에서 구리의 녹는점(1083°C) 이상으로 가열되어 액체 구리가 기공에 침투하여 채워지도록 합니다. 이렇게 하면 기공률이 크게 감소하고(일반적으로 1% 미만) 재료의 밀도와 일관성이 향상됩니다. 텅스텐 입자는 불규칙한 다각형 패턴으로 분포되어 구리가 틈새를 균일하게 채웁니다. 계면은 주로 기계적으로 맞물리고 확산되어 미세 균열이나 박리 위험을 최소화합니다. 구조적 호환성은 입자 크기와 상 분포의 균일성에도 반영됩니다. 나노 텅스텐 분말을 도입하여 미세 입자를 형성함으로써 기계적 강도와 내마모성이 향상되어 1000MPa 이상의 압축 강도와 200~300HV 의 경도를 달성합니다. 구리 상의 연속적인 네트워크는 전도 경로의 무결성을 유지하여 저항 변동성을 줄입니다. 미세 분석 결과 균일한 상 분포가 전극의 전반적인 안정성을 향상시킴을 보여줍니다. 전기 스파크 가공(EDM) 에서 구조적 균일성은 방전 변동성을 줄여 가공 정확도와 표면 품질을 향상시킵니다. 마이크로전자 패키징에서 구조적 적합성은 실리콘(CTE 약 $2.6\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$) 또는 세라믹 기판과의 저응력 접합을 보장하여 열 사이클링 중 휘어짐이나 파손을 방지합니다. 기계적 시험 및 주사전자현미경 검사 결과, 계면 접합 안정성이 구조적 적합성의 핵심 요소이며, 열 또는 기계적 응력으로 인한 파손을 줄이는 데 중요한 역할을 하는 것으로 나타났습니다.

더욱이, 제조 공정은 구조적 호환성에 매우 중요합니다. 열간 등압 성형(HIP) 공정은 고온에서 전방향으로 압력을 가하여 기공을 더욱 압축하고, 텅스텐과 구리 사이의 계면

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

결합을 개선하며, 재료의 피로 저항성을 향상시킵니다. 나노기술을 통해 개발된 초미립 분말은 결정립계 강도를 향상시켜 고정밀 전극에 적합합니다. 구조적 호환성을 최적화하려면 분말 입자 크기를 제어하고 소결 매개변수를 조정해야 합니다. 향후 동적 시뮬레이션과 공정 혁신을 통해 입자 분포를 더욱 미세화하고 기공률을 0.5% 미만으로 줄여 항공우주 부품이나 5G 기기 전극과 같이 복잡한 형상이나 높은 내구성을 요구하는 응용 분야를 구현할 수 있을 것입니다.

2.3.1.2 열적합성

텅스텐-구리 전극의 열적 호환성은 물리적 호환성의 핵심 구성 요소입니다. 여기에는 텅스텐과 구리 사이의 열 팽창과 열 전도도의 조정이 포함되며, 이는 열 사이클링 및 고온 환경에서 전극의 안정성과 신뢰성에 영향을 미칩니다. 텅스텐의 열 팽창 계수(CTE)는 $4.5\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ 인 반면 구리는 $17\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ 입니다. 단독으로 사용할 경우 차이가 크지만, 복합 비율을 조정하면 텅스텐-구리 전극의 CTE 를 $6-8\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ 로 제어할 수 있습니다. 이 값은 실리콘(약 $2.6\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$) 또는 알루미나 세라믹(약 $7\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$) 기판의 값과 유사합니다. 이는 열 사이클링 중 응력 집중을 줄여 패키지 휘어짐이나 파손을 방지하며, 특히 마이크로전자 패키징 및 고온 센서 애플리케이션에 효과적입니다. 열적 호환성을 달성하려면 텅스텐 대 구리 비율 최적화가 필수적입니다. 예를 들어, 85/15 WCu 비율은 고온에서 우수한 성능을 보입니다. 열 시뮬레이션을 통해 실리콘 기판의 열팽창 계수가 10% 이내로 일치하여 저응력 특성이 검증되었습니다.

열전도도는 열 호환성의 또 다른 주요 초점입니다. 구리의 열전도도는 약 $400\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 로 텅스텐의 $174\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 보다 높습니다. 복합 텅스텐-구리 전극의 열전도도는 $180\sim 220\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 입니다. 구리 상은 열전도를 지배하는 반면 텅스텐 상은 열 안정성을 제공합니다. EDM에서 높은 열전도도는 방전 열을 빠르게 분산시켜(순간적으로 수천 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에 도달) 작업물의 변형이나 화상으로 이어질 수 있는 국부적인 전극 과열을 방지하고 표면 품질을 개선합니다. 저항 용접에서 균일한 열 분포는 열 영향부(HAZ)를 줄여 용접 조인트의 강도와 내구성을 향상시킵니다.

열 호환성에는 녹는점 차이도 포함됩니다. 텅스텐의 녹는점 3422°C 와 구리의 녹는점 1083°C 는 액상 소결을 통해 조화를 이룹니다. 구리는 고온에서 텅스텐 골격을 채워 열 안정성을 향상시킵니다. 실험 데이터에 따르면 WCu 70/30 의 열전도도는 200A 전류와 300°C 온도에서 안정적인 작동을 보장합니다. 나노기술을 통해 미세 입자를 도입함으로써 열전도 경로를 더욱 최적화하여 열 저항을 약 15% 감소시켰습니다.

열적 호환성은 미세 구조의 영향을 받습니다. 낮은 기공률과 균일한 상 분포는 열 전도 시 산란을 줄이는 반면, 열간 등방성 성형(HIP)은 계면의 열전도도를 향상시킵니다. 열 피로 시험 결과, -50°C 에서 300°C 까지 열 사이클링 동안 텅스텐-구리 전극의 변형률이 0.1% 미만으로 나타나 우수한 열 안정성을 보여줍니다. 향후에는 기능적 경사 설계(텅스텐 함량이 내부에서 표면으로 점진적으로 감소하는 방식) 또는 중간상(예: 몰리브덴)의 도입을 통해 열적 호환성을 더욱 최적화하여 고온 압력 센서나 전력 장비와 같이 더 높은 온도 차이 또는 복잡한 열 관리 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3.2 텅스텐-구리 전극의 성능 시너지

텅스텐-구리 전극의 시너지 효과는 복합 메커니즘의 궁극적인 구현입니다. 이 시너지 효과는 텅스텐과 구리가 전기 전도도, 열 전도도, 기계적 강도 및 내구성 측면에서 상호 보완적인 효과를 발휘하여 다양한 응용 분야에서 전극의 전반적인 성능을 향상시킵니다. 이러한 시너지 효과는 분말 야금 및 진공 침투와 같은 최적화된 제조 공정을 통해 텅스텐 골격과 구리 필러 사이의 균일한 분포와 계면 안정성을 보장합니다. 텅스텐의 높은 용점(3422°C)은 고온 및 아크 부식에 대한 내성을 제공하며, 구리의 높은 전기 및 열 전도도는 전기 및 열 관리 성능을 최적화합니다. 복합 텅스텐-구리 전극은 6~8 ppm/°C의 열팽창 계수와 180~220 W/m·K의 열전도도 사이의 균형을 이루어 마이크로 전자 패키징 및 고온 센서의 요구 사항을 충족합니다. 미세 구조의 낮은 기공률과 미세한 입자 크기는 기계적 강도와 내마모성을 향상시켜 압축 강도가 1000MPa를 초과하고 경도가 200~300HV가 됩니다.

2.3.2.1 전기 및 열 전도도의 시너지

텅스텐-구리 전극은 두 전극의 시너지 효과를 핵심적으로 보여줍니다. 이러한 시너지 효과는 텅스텐과 구리의 상호 보완적인 전기적 및 열적 특성에서 비롯되며, EDM, 용접 및 마이크로전자 응용 분야에서 전극의 효율을 직접적으로 향상시킵니다. 전기 전도도는 주로 5.8×10^7 S/m의 높은 전도도를 자랑하는 구리 상에 의해 제공되며, 효율적인 전류 전달을 보장하는 연속적인 전도성 네트워크를 형성합니다. 텅스텐-구리 전극에서 텅스텐의 낮은 전도도에도 불구하고, 구리 비율(예: WCu)을 최적화함으로써 70/30의 전도성은 순수 구리의 80~90%에 달할 수 있어 EDM의 고전류 요구 사항과 용접의 저저항 요건을 충족합니다. 미세 구조 내 구리 상이 균일하게 분포되어 저항 불균일성을 줄이고 방전 안정성을 향상시키며, 특히 마이크로몰드와 같은 정밀 가공 분야에서 유용합니다. 실험 데이터에 따르면 WCu 70/30은 고전류 조건에서 순수 구리에 가까운 전기 전도성을 달성하여 고정밀 및 효율적인 가공을 가능하게 합니다.

열전도도의 시너지 효과는 전기전도도와 밀접한 관련이 있습니다. 구리의 열전도도는 약 400W/m·K로 텅스텐의 174W/m·K보다 훨씬 높습니다. 복합 텅스텐-구리 전극의 열전도도는 180~220W/m·K입니다. 구리 상은 열전달을 지배하는 반면 텅스텐 상은 열적 안정성을 제공합니다. EDM에서 열전도도는 방전된 열을 전극 외부로 빠르게 분산시켜 공작물의 변형이나 화상으로 이어질 수 있는 국부적인 과열을 방지합니다. 저용접에서 열이 고르게 분포되어 열영향부(HAZ)가 줄어들어 용접부의 강도와 내구성이 향상되고 HAZ가 0.1mm 이내로 유지됩니다. 텅스텐의 높은 용점(3422°C)은 고온 아크 조건에서 구조적 무결성을 보장하는 반면, 구리의 낮은 용점(1083°C)은 액상 충전 시 열전도 경로의 연속성을 향상시킵니다. 85/15 WCu 비율의 열전도도는 300°C에서 안정적인 작동을 지원합니다.

이러한 상승효과는 낮은 열팽창계수와 열전도도의 조합에도 반영되어 열응력을 줄이고 장기적 안정성을 향상시킵니다. 나노기술은 미세입자(<5 마이크론)를 도입하여 전기 및 열전도도 네트워크를 더욱 최적화하고 열 저항과 전기 저항을 각각 약 15%와 10% 줄여

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고전력 칩 방열에 적합합니다. 실제 응용 분야에서 텅스텐-구리 전극의 상승효과는 고전압 스위치 접점과 5G 장비에서 탁월한 성능을 발휘하며, 500A 전류에서 전도 안정성과 열 관리 효율을 유지합니다. 향후 텅스텐-구리 비율을 조정하거나 중간상(예: 몰리브덴)을 도입하거나 표면 개질(예: 은 도금)을 통해 상승효과를 향상시켜 고온 센서나 전력 전송 장비와 같이 더 높은 전류나 복잡한 열 관리 요구 사항을 수용할 수 있습니다.

2.3.2.2 고온 저항성과 구조적 안정성의 시너지 효과

텅스텐-구리 전극은 두 소재의 성능 시너지 효과를 핵심적으로 보여줍니다. 이러한 시너지 효과는 고온 환경에서 텅스텐과 구리가 상호 보완적인 효과를 발휘하여 극한 조건에서도 전극의 신뢰성과 장기적인 사용 수명을 보장합니다. 텅스텐의 고온 저항은 주로 3422°C의 녹는점을 가진 텅스텐에 의해 제공되며, 이는 모든 금속 중 가장 높은 수치입니다. 이러한 특성 덕분에 텅스텐-구리 전극은 방전 가공(EDM) 또는 저항 용접 시 최대 3000°C의 아크 충격을 큰 용융이나 변형 없이 견딜 수 있습니다. 복합재 구조물에서 텅스텐은 골격 재료 역할을 하여 고온의 열 응력에 저항하는 고강도의 열적으로 안정적인 네트워크를 형성합니다. 고경도 소재(텅스텐 강철 등) 가공이나 고전류 분리 등의 실제 적용 분야에서 텅스텐의 고온 내구성은 전극 표면의 무결성을 보장하여 마모와 재료 손실을 줄여줍니다.

구조적 안정성의 시너지 효과는 구리 충전 및 미세 구조 최적화에 달려 있습니다. 구리의 용점은 1083°C입니다. 소결 또는 진공 함침 과정에서 구리는 텅스텐 골격을 액체 상태로 충전하여 재료의 밀도를 향상시킵니다. 기공률은 일반적으로 1% 미만으로 제어됩니다. 이러한 저기공률 구조는 열 사이클링 중 미세 균열 발생 위험을 줄여줍니다. 구리 상의 연성은 열응력을 더욱 흡수하고 취성 파괴를 방지합니다. 미세 구조에서 텅스텐 입자와 구리의 균일한 분포는 분말 야금 또는 열간 등방성 성형(HIP) 공정을 통해 달성됩니다. 미세 입자는 피로 저항성을 향상시키고 압축 강도는 1000MPa 이상에 도달할 수 있습니다.

고온 저항성과 구조적 안정성 간의 시너지 효과는 열팽창 매칭에도 반영됩니다. 텅스텐의 낮은 열팽창 계수는 구리의 높은 열팽창 계수에 비례하여 조절되어, 실리콘(2.6ppm/°C)이나 세라믹 기판의 열팽창 계수(CTE)에 가까운 6~8ppm/°C의 복합 열팽창 계수(CTE)를 형성하여 열응력 집중을 감소시킵니다. 마이크로전자 패키징에서 이러한 특성은 칩과 전극 사이의 뒤틀림을 방지하고, 고온 센서에서는 장기적인 고온 작동을 지원합니다. 표면 처리(예: 니켈 도금)는 내산화성을 더욱 향상시키고 습한 환경이나 산업 환경에서의 사용 수명을 연장합니다.

2.4 텅스텐 구리 전극용 핵심 원료의 요구 사항

원자재 순도 요구 사항

다양한 첨단 분야에서 널리 사용되는 핵심 소재인 텅스텐-구리 전극의 성능은 사용되는 핵심 원재료인 텅스텐 분말과 구리 분말의 품질과 밀접한 관련이 있습니다. 고순도 원재료는 텅스텐-구리 전극의 탁월한 성능을 보장하는 초석입니다. 텅스텐-구리 전극을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제조할 때 일반적으로 텅스텐 분말의 순도는 99.9% 이상이어야 합니다. 초정밀 전기 스파크 가공과 같이 전극 성능에 대한 요구 사항이 매우 높은 일부 응용 분야에서도 순도는 더 높아야 합니다. 이는 미량의 불순물이라도 전극 내부에 결함을 형성하고 재료 구조의 균일성을 파괴할 수 있기 때문입니다. 예를 들어, 텅스텐 분말에 철, 니켈과 같은 불순물 원소가 포함되어 있는 경우, 이러한 불순물은 고온 소결 중에 텅스텐 및 구리와 반응하여 취성 상을 형성할 수 있으며, 이로 인해 전극의 강도와 인성이 감소하고 사용 중에 균열이 생기거나 심지어 파손될 가능성이 높아집니다.

마찬가지로 구리 분말의 순도도 중요합니다. 고품질 구리 분말의 순도는 일반적으로 99.95% 이상이어야 합니다. 불순한 구리 분말에는 산화물, 수분 또는 기타 불순물이 포함되어 있을 수 있으며 이는 구리의 전도도와 연성에 심각한 영향을 미칩니다. 텅스텐-구리 전극에서 구리는 주로 좋은 전기 및 열 전도도에 기여합니다. 구리 분말이 불순하면 전극의 전기 및 열 전도 효율이 크게 감소합니다. 예를 들어 구리 분말에 많은 구리 산화물이 있는 경우 구리 산화물의 저항률이 순수 구리보다 훨씬 높아 전극의 저항이 크게 증가하여 전기 스파크 가공과 같은 응용 분야에서 전기 에너지를 열 에너지로 변환하는 효율이 감소합니다. 이는 가공 효율에 영향을 미칠 뿐만 아니라 전극의 국부적 과열을 유발하고 전극 손실을 가속화할 수도 있습니다.

입자 크기 및 입자 크기 분포 제어

순도 외에도 텅스텐과 구리 분말의 입자 크기와 분포는 텅스텐-구리 전극의 성능에 영향을 미치는 주요 요소입니다. 입자 크기는 다양한 제조 공정과 최종 적용 시나리오에 따라 정확하게 선택해야 합니다. 텅스텐-구리 전극을 제조하기 위한 기존 분말 야금 공정에서 텅스텐 분말의 입자 크기는 일반적으로 1~10 μ m 사이로 제어됩니다. 더 미세한 텅스텐 분말은 텅스텐과 구리 사이의 접촉 면적을 늘리고, 소결 공정 동안 원소 간의 확산과 용합을 촉진하며, 더 균일하고 조밀한 미세 구조를 형성하여 전극의 강도와 경도를 향상시켜 고경도 재료 가공에 더 적합하게 만듭니다. 그러나 지나치게 미세한 텅스텐 분말은 유동성이 낮아 분말 혼합 및 성형 공정 동안 균일하게 분포하기 어렵고 그린 바디의 밀도가 고르지 않게 되는 등 몇 가지 문제를 야기할 수도 있습니다. 더 거친 텅스텐 분말은 유동성이 더 좋지만, 소결 전극의 내부 기공이 비교적 커져 밀도가 감소하고 전극의 전반적인 성능에 영향을 미칩니다.

구리 분말은 일반적으로 비교적 미세한 입자 크기를 갖습니다. 이는 구리의 녹는점이 낮아 소결 과정에서 텅스텐 입자 사이의 틈을 채우기가 더 쉽기 때문입니다. 적절한 입자 크기의 구리 분말은 텅스텐과 안정적인 계면을 형성하면서 우수한 젖음성을 보장합니다. 예를 들어, EDM 전극에서 구리 분말 입자 크기가 적절하면 방전 중 전극이 국부적으로 가열될 때 구리가 열을 빠르게 방출하여 국부 과열로 인한 전극의 과도한 마모를 방지할 수 있습니다.

또한, 입자 크기 분포의 균일성 또한 매우 중요합니다. 이상적으로는 텅스텐 분말과 구리 분말 모두 좁은 입자 크기 분포 범위를 가져야 합니다. 입자 크기 분포가 너무 넓으면 혼합 과정에서 크기가 다른 입자들이 쉽게 분리되어 최종 전극 재료의 조성 및 성능이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

불균일해질 수 있습니다. 예를 들어, 큰 텅스텐 분말 입자가 밀집된 부분은 경도는 높지만 인성이 부족할 수 있으며, 작은 입자가 밀집된 부분은 밀도가 부족하여 사용 중 성능 저하를 초래할 수 있습니다.

전극 성능에 대한 원자재 특성의 포괄적인 영향

텅스텐과 구리의 고유한 특성은 텅스텐-구리 전극의 성능에 결정적인 역할을 합니다. 텅스텐은 매우 높은 용점(3410°C)과 경도를 가지고 있어 텅스텐-구리 전극에 우수한 고온 및 내마모성을 부여합니다. 고전압 방전관 전극이 작동하는 경우와 같이 순간 접촉 재료 온도가 수천 도에 달할 수 있는 고온 환경에서 텅스텐은 전극의 기본 형상과 구조적 무결성을 유지하여 고온으로 인한 연화 및 변형을 방지합니다. 또한, 높은 경도 덕분에 초경 금형의 방전 가공과 같이 고경도 공작물을 가공할 때 전극의 마모가 적어 가공 정밀도를 보장합니다.

전도성을 가진 구리는 텅스텐-구리 전극에 빠른 방열과 효율적인 전기 전도라는 이점을 제공합니다. 방전 가공(EDM) 중 전극과 공작물 사이의 빈번한 방전은 많은 양의 열을 발생시킵니다. 구리는 이 열을 빠르게 전도하여 전극 온도를 낮추고 열 변형과 열 피로를 줄이며 전극의 수명을 연장합니다. 우수한 전기 전도도는 안정적인 방전 공정을 보장하고 가공 효율을 향상시킵니다. 텅스텐 분말과 구리 분말을 특정 비율로 혼합하면 두 가지가 보완되고 시너지 효과를 발휘하여 텅스텐-구리 전극의 성능을 결정합니다. 적절한 텅스텐-구리 비율은 강도, 경도, 전기 및 열 전도성, 그리고 절삭 저항 간의 최적의 균형을 보장합니다. 예를 들어, 저항 용접 전극은 일반적으로 더 높은 경도와 전도성을 요구하며, 텅스텐 함량을 적절히 증가시킬 수 있습니다.

2.4.1 텅스텐 분말 요구 사항

텅스텐-구리 전극은 복합재 공정에서 구조적 안정성과 성능을 보장하는 데 매우 중요합니다. 이러한 요건에는 순도, 입자 크기, 그리고 형태가 포함됩니다. 순도는 매우 중요하며, 특히 산소, 탄소, 철과 같은 불순물이 0.1% 미만이어야 합니다. 과도한 불순물은 결정립계를 약화시키고 전도성을 감소시켜 전극 성능에 영향을 미칠 수 있습니다. ASTM B702 와 같은 국제 표준은 산소 함량이 0.05% 미만인 고순도 텅스텐 분말을 수소 환원 또는 화학적 침전을 통해 생산해야 한다고 규정합니다. 입자 크기는 또 다른 핵심 매개변수입니다. 입자 크기는 일반적으로 1~20 마이크론입니다. 나노기술을 통해 미세 입자를 도입하여 입자 균일성과 기계적 강도를 향상시키고, 거친 입자(20 마이크론 이상)는 거친 전극 가공에 사용됩니다. 입자 크기는 용도에 따라 달라집니다. 형태적으로는 기공률을 줄이고 소결 밀도를 높이기 위해 구형 또는 거의 구형의 텅스텐 분말이 필요합니다. 주사전자현미경 분석 결과, 구형 분말은 불규칙 분말보다 유동성이 우수하여 충전 효율을 약 15% 향상시킵니다. 화학적 안정성을 위해서는 텅스텐 분말이 제조 공정 중 산화를 방지하기 위해 산성 및 알칼리성 환경을 견뎌야 하며, 표면 산화막 두께는 10nm 미만으로 제어되어야 합니다. 홀 효과 유량법으로 측정된 유동성은 20 초/50g 보다 우수하여 균일한 분말 혼합을 보장합니다. 텅스텐 분말의 겉보기 밀도는 압축에 영향을 미치므로, 박리 위험을 줄이기 위해 구리 분말과 동일한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

밀도를 사용해야 합니다. 플라즈마 구상화 또는 기계적 합금화와 같은 제조 공정을 통해 입자 크기 분포를 최적화할 수 있습니다. 향후 고순도 나노텅스텐 분말은 전극의 미세 구조적 일관성을 개선하여 마이크로전자 패키징 및 5G 장치와 같은 고정밀 응용 분야에 적합하게 될 것입니다.

2.4.2 구리 분말 요구 사항

텅스텐-구리 전극은 전도성과 충진 특성에 중점을 두어 복합 재료의 전기적 및 열 관리 기능을 보장합니다. 순도는 핵심 요건입니다. 구리 분말의 불순물 함량은 0.05% 미만이어야 하며, 산소 함량은 0.03% 미만으로 관리해야 합니다. 과도한 산소는 구리 산화물을 형성하여 전도성과 젖음성을 저하시킬 수 있습니다. 전해 구리 분말 또는 분무 구리 분말은 고순도 전해질 또는 불활성 가스를 분무하여 제조되며 ASTM B413 표준을 준수합니다. 입자 크기는 일반적으로 5~15 마이크론입니다. 미세 입자 크기는 충진 효율을 향상시키는 반면, 거친 입자 크기는 빠른 소결에 적합합니다. 텅스텐 분말 입자 크기와 일치해야 하며, 상 분포를 최적화하기 위해 입자 크기 비율을 1:2~1:3 으로 관리해야 합니다.

구리 분말은 다공성을 최소화하고 유동성을 높이기 위해 구형 또는 거의 구형이어야 합니다. 홀 효과 유량은 15 s/50 g 보다 좋아야 하고, 벌크 밀도는 약 4-6 g/cm³이어야 하며, 분말은 텅스텐 분말과 조정된 방식으로 압축되어야 합니다. 화학적 안정성을 위해서는 소결 중 기공 형성을 방지하기 위해 두께가 5 nm 미만인 표면 산화층이 필요합니다. 표면 처리(예: 유기 코팅)는 산화 저항성을 향상시킬 수 있습니다. 전기 전도도는 순수 구리(5.8×10^7 S/m)에 근접해야 하고, 열 전도도는 전극 성능을 지원하기 위해 약 400 W/m·K 여야 합니다. 물 분무 또는 가스 분무와 같은 준비 공정은 분말 특성에 영향을 미칠 수 있습니다. 초미세 구리 분말을 사용하거나 합금(예: Cu-Ag)하는 것과 같은 향후 노력을 통해 젖음성과 전도 안정성을 개선하여 고전류 응용 분야에 적합하게 만들 수 있습니다.

2.4.3 원료 전처리 기준

텅스텐-구리 전극은 균일한 분말 혼합과 제어 가능한 제조 공정을 보장하도록 설계되었으며, 이는 복합재의 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 건조는 중요한 단계입니다. 텅스텐 및 구리 분말은 소결 중 기공 형성을 방지하기 위해 진공 또는 불활성 가스 환경(예: 아르곤)에서 건조해야 합니다. 볼밀 또는 V 형 믹서를 사용하여 혼합 균일성을 확보합니다. 혼합 후 입자 크기 분포는 $\pm 5\%$ 이내로 제어되며, X 선 회절(XRD)을 통해 상 균일성을 검증합니다. 입도 분류는 체질(sieved)을 통해 수행되며, 체 크기는 입자 크기 요건에 맞게 조정되어 과대 입자 또는 초미립자를 제거합니다. 입도 분포의 표준 편차는 10% 미만입니다. 표면 처리에는 탈산 또는 코팅이 포함되며, 산화층은 수소 환원을 통해 제거됩니다. 분말 유동성은 홀 유량법을 사용하여 시험하며, 20 초/50g 이상의 값을 보여 균일한 압착을 보장합니다. 보관 및 운송 시에는 산화 방지를 위해 빛과 습기를 피해 밀봉 포장해야 합니다. 전처리 기준은 ISO 13320 및 ASTM B214 를 준수해야 합니다. 향후 자동화된 등급 분류 및 실시간 모니터링을 통해 전처리 정확도를 높이고 전극 성능을 최적화할 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 3 장: 텅스텐-구리 전극의 물리적 및 화학적 특성

텅스텐-구리 전극의 물리적 및 화학적 특성은 텅스텐과 구리 의 시너지 효과에서 파생되어 두 금속의 핵심 장점을 통합합니다. 물리적 특성 측면에서 밀도는 텅스텐 함량이 증가함에 따라 증가하고 전반적으로 높은 수준을 유지합니다. 용점은 순수 구리보다 훨씬 우수한 텅스텐의 높은 용점 특성으로 인해 높은 수준으로 유지되며 고온 환경에서 순간적인 열 충격을 쉽게 변형되지 않고 견딜 수 있습니다. 전기 및 열 전도도가 뛰어나고 전류를 효율적으로 전달하고 작업 중 발생하는 열을 빠르게 발산하여 국부 과열로 인한 손실을 효과적으로 방지할 수 있습니다. 기계적 특성 측면에서 적당한 경도와 높은 압축 강도를 가지며 어느 정도의 인성을 고려했으며 기계적 충격을 받아도 깨지기 쉽지 않습니다. 또한 선팅률 계수가 낮고 열 안정성이 우수합니다. 온도 변화가 큰 환경에서도 크기가 안정적으로 유지되므로 엄격한 정밀도 요구 사항이 있는 정밀 가공 시나리오에 적합합니다.

3.1 텅스텐 구리 전극의 물리적 특성

텅스텐-구리 전극은 밀도, 열팽창 계수, 전기 전도도 및 열 전도도를 모두 포괄하며, 다양한 응용 분야에서 탁월한 성능을 발휘하는 기반을 제공합니다. 이러한 특성은 EDM, 용접 및 마이크로전자 패키징에서 전극의 안정성과 효율성에 직접적인 영향을 미칩니다. 텅스텐-구리 전극의 물리적 특성은 텅스텐과 구리의 결합된 특성에서 비롯됩니다. 텅스텐은 높은 용점과 기계적 강도를 제공하는 반면, 구리는 높은 전기 및 열 전도도를 제공합니다. 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통해 미세 구조를 최적화하면 균일한 상 분포와 낮은 기공률을 얻을 수 있습니다. 이러한 결합된 성능 덕분에 텅스텐-구리 전극은 고온, 고전류 및 복잡한 환경에서도 신뢰성을 유지할 수 있습니다.

3.1.1 텅스텐 구리 전극의 밀도

텅스텐-구리 전극은 전극의 물리적 특성을 나타내는 중요한 지표입니다. 재료 내부의 밀도와 기공률을 반영하며, 기계적 강도, 전기 전도도, 열 전도도에 직접적인 영향을 미칩니다. 밀도 특성은 텅스텐과 구리의 복합 비율과 제조 공정 최적화를 통해 도출됩니다. 텅스텐의 높은 밀도와 구리의 낮은 밀도는 특정 비율로 균형을 이루어 특정 질량 및 부피 특성을 가진 복합 재료를 형성합니다. 밀도는 가공 중 전극의 내마모성과 변형 저항성을 결정합니다. 마이크로전자 응용 분야에서 적절한 밀도는 기판과의 조화를 이루고 응력 집중을 줄이는 데 도움이 됩니다. 분말 야금 및 진공 함침과 같은 제조 공정은 소결 온도와 압력을 제어하여 최종 밀도의 균일성에 상당한 영향을 미칩니다. 일반적으로 기공률이 낮을수록 밀도 값이 높아져 재료의 전반적인 성능이 향상됩니다.

전극 생산에 매우 중요하며, 전기 스파크 가공 시 재료 제거율이나 용접 시 열 관리 효율과 같은 실제 응용 분야에서 전극의 성능에 영향을 미칩니다. 다양한 응용 분야에서 밀도 특성을 최적화하기 위해 텅스텐-구리 비율을 조정해야 할 수 있습니다. 예를 들어, 고밀도 전극은 높은 내구성이 요구되는 경우에 더 적합한 반면, 저밀도 전극은 경량 설계에 사용될 수 있습니다. 미세 구조의 상 분포와 치밀성은 밀도 성능의 핵심 요소이며,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

향후 연구에서는 새로운 공정을 통해 밀도 제어성을 더욱 향상시킬 수 있을 것입니다. 이 섹션에서는 밀도 계산 방법을 심도 있게 살펴보고 성능 최적화에서 이러한 방법의 역할을 분석합니다.

3.1.1.1 밀도 계산 방법

밀도 계산은 텅스텐-구리 전극의 밀도를 결정하는 과학적 접근 방식입니다. 실험적 측정과 이론적 도출을 모두 포함하며 재료의 내부 치밀성과 다공성을 정확하게 평가하는 것을 목표로 합니다. 일반적으로 사용되는 방법은 아르키메데스 방법으로, 공기와 액체에서 전극의 질량 차이를 측정하고 이를 부피와 결합하여 밀도를 계산합니다. 이 방법은 액체에서 물체의 부력을 이용합니다. 먼저 전극의 건조 질량을 측정한 다음 특정 액체(예: 증류수)에 담급니다. 담근 후 질량 차이를 측정하고 부력 공식을 사용하여 부피를 간접적으로 계산합니다. 그런 다음 밀도는 질량 대 부피의 비율로 계산합니다. 이 방법은 불규칙한 모양의 전극 샘플에 적합합니다. 액체가 재료와 화학적으로 반응하지 않도록 하고 오류를 최소화하기 위해 온도를 제어하는 것이 중요합니다.

구리 의 부피 분율과 각각의 밀도를 기반으로 복합 재료의 전체 밀도를 추정하는 것입니다. 이 방법은 정확한 성분 비율 데이터를 필요로 하며, 복합 공정 중 텅스텐과 구리의 부피 변화가 크지 않다고 가정합니다. 밀도는 각 성분의 밀도를 가중 평균한 값입니다. 계산은 상 분포의 균일성을 고려해야 합니다. 실제 측정값은 기공이나 미세 결합으로 인해 이론값과 다를 수 있으며, 미세 분석을 통해 보정해야 합니다. 이론적 계산은 예비 설계 및 공정 최적화에 적합하지만, 실험 결과는 반드시 검증되어야 합니다.

또한, X 선 단층촬영(XCT)이나 수은 침투 분석을 통해 전극 기공률 및 밀도 분포를 비파괴 검사할 수 있습니다. 이러한 방법은 이미지 재구성이나 압력 침투 분석을 통해 내부 구조의 밀도를 평가하며, 복잡한 형상의 전극에 적합합니다. 계산 방법의 선택은 실험 조건 및 정확도 요구 사항에 따라 달라지며, 신뢰성 향상을 위해 여러 방법을 결합하는 경우가 많습니다.

3.1.1.2 밀도와 조성의 관계

밀도와 조성 간의 관계는 텅스텐-구리 전극의 물리적 특성을 이해하는 데 핵심적인 요소이며, 텅스텐과 구리의 비율이 재료의 밀도와 질량 분포에 미치는 영향을 반영합니다. 텅스텐-구리 전극의 밀도는 주로 구성 성분의 비율에 의해 결정됩니다. 텅스텐은 구리보다 밀도가 높습니다. 텅스텐 함량이 증가하면 일반적으로 전체 밀도가 증가하는 반면, 구리의 낮은 밀도는 높은 구리 함량 비율에서 희석 역할을 합니다. 조성비는 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 정밀하게 제어됩니다. 예를 들어, 일반적인 WCu 70/30 및 WCu 80/20 비율에서는 텅스텐의 높은 밀도 특성이 지배적인 반면, 구리의 충전 효과는 미세 구조의 균일성을 최적화합니다. 조성 변화는 상 분포에 직접적인 영향을 미칩니다. 텅스텐은 골격 물질로서 구조적 지지를 제공하고, 구리는 액상 형태로 기공을 채웁니다. 비율을 조정하면 재료의 다공성과 밀도가 바뀌어 밀도 성능에 영향을 미칩니다. 밀도의 조성 의존성은 제조 공정과 밀접한 관련이 있습니다. 분말 야금에서

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 분말과 구리 분말의 입자 크기 비율과 혼합 균일도는 성분 분포의 균일성을 결정합니다. 소결 온도와 압력은 구리의 습윤 및 충전 효과에 영향을 미쳐 최종 밀도에 영향을 미칩니다. 진공 침투에서 텅스텐 골격의 기공률과 구리의 침투 깊이는 조성비와 직접적인 관련이 있습니다. 텅스텐 함량이 높으면 기공 충전이 불충분해져 밀도가 감소하는 반면, 구리 함량이 높으면 충전 효율이 향상됩니다. 미세 구조 분석 결과, 조성비의 미세한 변화도 상 계면 면적의 차이를 유발하여 재료의 전체 밀도에 영향을 미치는 것으로 나타났습니다. 이론적으로 밀도와 조성 간의 관계는 가중 평균 모델을 통해 도출할 수 있습니다. 이 모델에서는 각 성분 밀도의 기여도를 부피 분율로 가중하지만, 실제 값은 기공률과 계면 결합의 영향을 받으며 실험과 결합하여 검증해야 합니다.

또한, 조성비와 밀도의 관계는 불순물과 첨가제의 영향을 받습니다. 소량의 불순물도 계면 특성을 변화시키고 밀도 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다. 응용 분야에 따라 조성비와 밀도에 대한 요구 사항이 다릅니다. 예를 들어, 고밀도 전극은 내마모성 응용 분야에 더 적합한 반면, 저밀도 전극은 경량 설계에 사용됩니다.

3.1.1.3 응용 프로그램에 대한 밀도의 영향

밀도는 텅스텐-구리 전극의 핵심 성능 매개변수 중 하나입니다. 밀도의 수준과 분포는 다양한 응용 분야에서 전극의 적용 가능성, 안정성 및 효율성을 직접적으로 결정합니다. 특히 EDM, 용접 및 마이크로전자 패키징과 같은 첨단 분야에서는 밀도의 미세한 차이도 성능에 상당한 변동을 초래하여 전체 공정 효과에 영향을 미칠 수 있습니다.

1. 밀도와 기계적 성질의 관계 및 적용 영향

텅스텐 구리 전극은 기계적 강도 및 내마모성과 양의 상관관계를 갖습니다. 고밀도 전극은 내부 기공률이 매우 낮으며, 텅스텐 입자와 구리 상이 단단히 결합되어 치밀한 미세 구조를 형성합니다. 이는 외력이나 고온 충격 시 재료가 응력을 고르게 분산시켜 국부적인 균열이나 변형 발생 가능성을 낮춥니다. 이러한 특성은 특히 방전 가공(EDM)에서 매우 중요합니다. 전극과 가공물 사이의 고주파 방전은 순간적인 고온 및 기계적 충격을 발생시키기 때문입니다. 높은 압축 강도와 변형 저항성을 가진 고밀도 전극은 방전 공정 중 충격력을 효과적으로 견뎌내고, 표면 석마 흔적을 줄이며, 느슨한 구조로 인한 국부적인 붕괴 위험을 줄일 수 있습니다. 예를 들어, 금형강과 같은 고강도 소재의 정밀 가공에서 고밀도 텅스텐 구리 전극은 안정적인 형상 정밀도를 유지하고 균일한 방전 간격을 확보하여 가공물의 표면 조도와 치수 정밀도를 향상시키고 단일 전극의 수명을 연장합니다.

반면, 저밀도 전극은 내부에 더 많은 기공을 가지고 있어 텅스텐과 구리 사이의 계면 면적이 줄어들고 재료의 전반적인 내마모성이 저하됩니다. 이러한 유형의 전극은 소형 플라스틱 부품의 EDM 가공과 같이 정밀도와 내구성에 대한 요구 사항이 상대적으로 낮은 저부하, 단주기 가공 작업에 더 적합하며, 저밀도 전극의 비용 이점을 반영할 수 있습니다. 그러나 고에너지, 장기 가공 시나리오에서는 저밀도 전극의 기공이 응력

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

집중점이 됩니다. 가공 시간이 증가함에 따라 기공 주변에 미세 균열이 형성되어 결국 전극 고장으로 이어지고 교체 빈도와 생산 비용이 증가합니다.

2. 열전도도 및 공정 최적화에 대한 밀도의 영향

밀도는 텅스텐 구리 전극의 열전도도에 영향을 미치는 핵심 요소입니다. 일반적으로 밀도가 높을수록 열전도도 효율이 향상됩니다. 재료 내부에서 구리 상은 주요 열전도체 역할을 하며, 그 분포의 연속성은 재료 밀도에 직접적으로 의존합니다. 고밀도 전극에서 구리 상은 텅스텐 입자 사이의 틈을 더욱 균일하게 채워 연속적인 열전도도 네트워크를 형성합니다. 이를 통해 가공 영역에서 발생하는 열(예: 전기 스파크 방전 시 발생하는 순간적인 고온)이 전극 내부로 빠르게 확산되어 장비 고정 장치를 통해 배출되므로 국부 과열 위험이 줄어듭니다. 이러한 효율적인 방열 기능은 가공 정확도에 매우 중요합니다. 전극 표면에 열이 축적되면 국부 온도가 급격히 상승하여 전극 표면 재료가 녹거나 증발하여 전극 크기가 감소할 뿐만 아니라 방전 안정성에도 영향을 미쳐 작업물 표면에 탄화나 균열과 같은 결함이 발생할 수 있습니다. 예를 들어, 항공기 엔진 블레이드와 같은 복잡한 곡면을 정밀 가공할 때 고밀도 텅스텐 구리 전극의 효율적인 방열 특성은 장기 가공 중에 온도 안정성을 보장하고 방전 매개변수의 일관성을 유지하며 궁극적으로 공작물의 고정밀 성형을 달성할 수 있습니다.

저밀도 전극은 구리 상 분포가 불연속적이며, 기공이 열전도를 방해하여 "열 저항 구역"을 형성하고 방열 효율을 저하시킵니다. 저전력 가공에서는 이러한 결함이 눈에 띄지 않을 수 있지만, 고에너지 방전 가공(예: 대형 금형의 황삭)에서는 열 축적으로 인해 전극 마모가 크게 증가하여 공정에서 과열을 방지하기 위해 방전 에너지를 줄여야 하며, 이는 간접적으로 가공 효율을 저하시킵니다. 따라서 방열 요구 사항이 엄격한 응용 분야에서는 고밀도 전극이 공정 안정성 향상을 위한 핵심 선택입니다.

3. 용접 응용 분야에서 밀도의 다양한 역할

용접 분야에서 텅스텐 구리 전극의 밀도는 전기 전도도와 열 관리 능력에 영향을 미쳐 용접 품질과 효율을 직접적으로 결정합니다. 고밀도 전극은 구리 상이 연속적으로 분포하고 저항값이 낮아 용접 공정에 안정적인 전류 전달 경로를 제공하고 과도한 저항으로 인해 발생하는 "저항열"을 줄일 수 있습니다. 이러한 추가 열은 에너지 낭비뿐만 아니라 전극 자체의 과열 및 변형을 유발하여 전극과 피삭재 사이의 접촉 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다. 예를 들어, 자동차 차체의 저항 점용접에서 고밀도 텅스텐 구리 전극은 고전류에서도 안정적인 전류 출력을 유지하여 용접 지점의 열 집중 및 너겟 형성을 보장하고 냉간 용접이나 용입과 같은 결함을 방지합니다. 심 용접과 같은 연속 용접 공정에서도 우수한 전기 전도도는 전류 변동을 줄이고 용접의 균일성을 보장합니다.

밀도와 전극 무게의 관계는 용접 장비에도 영향을 미칩니다. 고밀도 전극은 더 무겁기 때문에 고정형 자동 용접 장비에 적합합니다. 이러한 장비의 로봇 팔이나 고정 장치는 높은 하중 지지력을 가지고 있으며, 전극과 작업물 사이의 정밀한 접촉을 보장하기 위해

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

균형추를 조정할 수 있습니다. 그러나 휴대용 용접 장비(예: 핸드 헬드 스팟 용접 건)의 경우, 전극이 너무 무거우면 작업자의 작업 부하가 증가합니다. 이 경우 저밀도 전극의 경량화 이점이 더욱 두드러집니다. 저밀도 전극은 무게와 성능의 균형을 맞춰 설계되어야 하며, 일반적으로 텅스텐-구리 비율을 최적화하여 밀도를 줄이는 동시에 코어의 전기 및 열 전도도를 최대한 보존해야 합니다.

또한, 용접 중 열 사이클링은 전극 밀도에 특별한 요건을 요구합니다. 고밀도 전극은 치밀한 구조와 균일한 열팽창으로 인해 반복적인 가열 및 냉각 시 내부 응력 집중으로 인한 균열 발생 가능성이 낮아 고주파 용접(예: 가전제품 생산 라인의 일괄 용접)에 적합합니다. 그러나 저밀도 전극은 장기간 열 사이클링 후 기공 주변의 응력 집중으로 인해 표면 박리가 발생하여 수명이 단축될 수 있습니다.

4. 마이크로 전자 패키징에서 밀도와 신뢰성의 관계

마이크로일렉트로닉스 패키징은 텅스텐-구리 전극의 밀도에 더욱 엄격한 요건을 부과합니다. 핵심 요건은 전극과 기판 사이의 열팽창 일치 및 기계적 안정성을 확보하는 것입니다. 칩 패키징에서 전극은 실리콘 웨이퍼 및 세라믹 기판과 같은 재료에 단단히 접합되어야 합니다. 그러나 재료마다 열팽창 계수가 다릅니다. 전극 밀도가 너무 높으면 전체 열팽창 계수가 기판과 크게 다를 수 있습니다. 온도 사이클링 중에 전극과 기판 사이의 계면에 상당한 응력이 발생합니다. 이러한 응력이 장기간 누적되면 솔더 균열, 회로 파손, 심지어 패키지 고장으로 이어질 수 있습니다. 따라서 마이크로일렉트로닉스 패키징 용 텅스텐-구리 전극은 열팽창 계수를 기판의 열팽창 계수에 근접하도록 밀도를 정밀하게 제어해야 합니다. 일반적으로 중밀도에서 고밀도 설계가 사용됩니다. 이는 전류 전달을 지원하는 구조적 밀도를 확보하고, 장기적인 신뢰성을 보장하기 위해 최적화된 기공 분포(예: 균일하게 분포된 소수의 미세 기공)를 통해 열 응력을 완화하는 것을 의미합니다. 동시에, 고밀도 전극의 기계적 안정성은 마이크로일렉트로닉스 패키징에 필수적입니다. 칩 패키징 과정에서 전극은 본딩, 패키징 및 기타 공정에서 발생하는 기계적 응력을 견뎌야 합니다. 고밀도 전극의 높은 압축 강도는 외부 힘에 의한 변형이나 파손을 방지하여 전극과 칩 핀 사이의 정밀한 정렬을 보장합니다. 그러나 기공 분포가 불균일한 저밀도 전극은 본딩 압력 하에서 국부적인 붕괴를 경험하여 전기적 연결 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다. 예를 들어, 5G 칩의 고주파 패키징에서는 전극의 미세한 변형만으로도 신호 전송 손실이 증가할 수 있습니다.

5. 제조 비용 및 시나리오 적응에 대한 밀도의 영향

밀도는 또한 텅스텐 구리 전극의 제조 비용 및 가공 어려움과 직접 관련이 있습니다. 고밀도 전극을 생산하려면 더 높은 소결 압력, 더 긴 유지 시간, 심지어 내부 기공을 줄이기 위한 2차 가압 공정이 필요하며, 이는 의심할 여지 없이 장비 에너지 소비와 생산 주기를 증가시킵니다. 동시에 고밀도 재료(예: 정밀 연삭 및 와이어 절단)의 가공은 더 어렵고 도구 마모가 더 빨라 제조 비용을 더욱 끌어올립니다. 그러나 하이엔드 응용 프로그램 시나리오(예: 항공 우주 엔진용 정밀 부품 가공)에서는 성능 이점이 비용 증가를 커버하기에 충분합니다. 장비 고장이나 제품 폐기로 인한 손실은 전극 비용보다 훨씬

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

높으며 고밀도 전극의 내구성이 선호됩니다. 저밀도 전극의 생산 공정은 비교적 간단합니다. 낮은 소결 압력과 짧은 공정 시간은 비용을 절감할 수 있지만, 성능 한계로 인해 극한의 성능이 요구되지 않는 비용에 민감한 시나리오(예: 가전제품의 저가 부품 용접)에 더 적합합니다. 또한, 특정 산업에서는 밀도에 대한 맞춤형 요구 사항이 있습니다. 전체 중량을 줄이기 위해 항공우주 장비는 비핵심 부품에 저밀도 텅스텐-구리 전극을 선택하고, 구조 설계를 통해 중량을 줄이면서도 필요한 강도를 유지하는 경향이 있습니다. 반면 원자력 장비의 전극은 방사선 환경에서 재료의 노화 및 부식을 방지하고 장기적인 안정적인 작동을 보장하기 위해 고밀도 설계가 필요합니다.

3.1.2 텅스텐 구리 전극의 열적 특성

텅스텐-구리 전극의 열적 특성은 열전도도, 열팽창 계수 및 고온 저항을 포함하는 물리적 특성의 중요한 구성 요소이며, 이는 고온 환경 및 열 사이클에서 전극의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 열전도도는 주로 구리 상에 의해 제공됩니다. 구리의 높은 열전도도는 열이 처리 또는 작동 영역에서 외부로 빠르게 전달되도록 하여 국부 온도를 낮추고 공작물의 과열, 변형 또는 손상을 방지합니다. 텅스텐의 적당한 열전도도와 구리 상의 상승 효과는 복합 재료의 전반적인 열 관리 기능을 형성하여 EDM 및 용접의 높은 열 부하 시나리오에 적합합니다. 열적 특성에는 열팽창 계수도 포함됩니다. 텅스텐의 낮은 열팽창 특성과 구리의 높은 열팽창 특성은 비례 조정을 통해 균형을 이룹니다. 복합 재료의 열팽창 계수는 다양한 기관의 열팽창 계수와 일치하여 열 응력을 줄입니다.

고온 저항성은 열 성능의 핵심입니다. 텅스텐의 높은 용점은 초고온에서 전극의 안정성을 높여줍니다. 구리 상은 고온에서 액체 상태로 기공을 채워 열 안정성을 향상시키고 아크 환경에 적합하게 만듭니다. 미세 구조의 낮은 기공률과 균일한 상 분포는 열 전도 경로를 더욱 최적화하며, 열간 등압 성형 공정은 계면의 열전도 효율을 향상시킵니다. 열 피로 시험 결과, 텅스텐-구리 전극은 넓은 온도 범위에서 구조적 무결성을 유지하여 마이크로 전자 패키징 및 센서 응용 분야에 적합함을 보여줍니다. 향후 기능성 경사 설계 또는 표면 개질을 통해 더 높은 온도 차이 또는 복잡한 열 관리 요구 사항을 충족하도록 열 성능을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

3.1.2.1 열전도도

열전도도는 텅스텐-구리 전극의 열 성능의 핵심 지표입니다. 이는 재료의 열 전달 능력을 반영하며 고열 부하 응용 분야에서 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 열전도도는 주로 구리 상에 의해 제공됩니다. 구리의 높은 열전도도는 열이 처리 영역이나 작동 영역에서 외부로 빠르게 전달되도록 하여 국부 과열로 인한 변형이나 공작물 손상을 방지합니다. 텅스텐의 적당한 열전도도와 구리 상의 상승 효과는 복합 재료의 전반적인 열 관리 기능을 형성하며, 이는 전기 스파크 가공에서 고에너지 방전의 방열 요구 사항에 적합합니다. 준비 과정에서 분말 야금 또는 진공 침투 기술은 텅스텐과 구리의 비율과 소결 조건을 제어하여 열 전도 경로를 최적화합니다. 미세 구조의 낮은 기공률과 균일한 상 분포는 열 저항을 줄이고 열전도도를 향상시킵니다. 열전도도는 전극의 미세 구조 및 조성비와도 밀접한 관련이 있습니다. 높은 구리 함량(예: WCu 70/30)은 일반적으로 더 높은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열전도도를 의미합니다. 구리 상의 연속적인 네트워크는 효율적인 열전도 채널을 제공하는 반면, 텅스텐 골격은 고온에서 구조적 안정성을 유지합니다. 용접 응용 분야에서 높은 열전도도는 열 분포를 균일하게 하고, 열영향부를 줄이며, 접합 품질을 향상시킵니다. 마이크로전자 패키징에서 열전도도는 칩의 열 방출을 지원하고, 작동 온도를 낮추며, 서비스 수명을 연장합니다. 열간 등방성 성형(HIP) 공정은 전방향 압력을 통해 계면 접합을 최적화하여 열전도도 효율을 더욱 향상시킵니다. 열전도도 성능은 환경 요인의 영향도 받습니다. 예를 들어, 고온에서 구리 상의 연화는 열전달 용량을 약간 감소시킬 수 있지만, 텅스텐의 지지 역할은 전반적인 안정성을 유지합니다. 실제 적용에서 열전도도 최적화는 특정 상황에 따라 달라집니다. 예를 들어, 고전력 처리에는 더 높은 열전도도를 가진 전극이 필요하고, 경량 설계는 밀도를 줄이기 위해 열전도도를 일부 희생할 수 있습니다. 열전도도 테스트는 일반적으로 레이저 플래시 또는 정상 상태 열 흐름 방식을 사용하여 수행됩니다. 향후 5G 기기나 고온 센서와 같이 더 높은 열 부하를 수용하기 위해 나노기술 도입이나 기능적 경사 설계(예: 구리 함량을 내부에서 외부로 증가시키는 것)를 통해 열전도도를 향상시킬 수 있습니다.

3.1.2.2 열팽창계수

열팽창 계수(CTE)는 텅스텐-구리 전극의 열 성능에 중요한 구성 요소입니다. 이는 온도 변동에 따라 재료의 부피가 변하는 능력을 반영하며 기관과의 호환성과 열 사이클 안정성에 직접적인 영향을 미칩니다. CTE 는 주로 텅스텐과 구리의 특성에 의해 결정됩니다. 텅스텐의 낮은 CTE(약 4.5ppm/°C)와 구리의 높은 CTE(약 17ppm/°C)는 합성 비율을 조정하여 균형을 이룹니다. 텅스텐-구리 전극의 CTE 는 일반적으로 6-8ppm/°C 사이에서 제어됩니다. 이 값은 실리콘(약 2.6ppm/°C) 또는 알루미늄 세라믹(약 7ppm/°C) 기관의 값과 비슷합니다. 이는 열 사이클 동안 응력 집중을 줄여 패키지 휘어짐이나 파손을 방지하므로 마이크로 전자 패키징 및 센서 애플리케이션에 특히 적합합니다. CTE 조정은 W/Cu 비율과 제조 공정에 따라 달라집니다. 예를 들어, 85/15 WCu 비율은 고온에서 우수한 성능을 나타냅니다. 열 시뮬레이션을 통해 낮은 응력 특성이 검증되었으며, 실리콘 기관과의 열 팽창 적합성은 10% 이내입니다. 미세 구조의 균일한 상 분포와 낮은 기공률은 차등 열 팽창을 더욱 최소화합니다. 열간 등방성 가압 공정은 계면의 열 안정성을 향상시켜 열 사이클링 중 미세 균열 위험을 줄입니다. EDM 에서 적당한 열 팽창 계수는 고에너지 방전 후 전극의 회복 능력을 보장합니다. 용접에서 열 팽창 매칭은 접합 응력을 줄이고 내구성을 향상시킵니다. 열 팽창 계수는 주변 온도와 장기간 사용의 영향도 받습니다. 고온에서 구리 상이 연화되면 팽창이 약간 증가할 수 있지만, 텅스텐 골격의 지지력은 전반적인 안정성을 유지합니다.

3.1.2.3 고온 저항성

고온 저항은 텅스텐-구리 전극의 열적 특성에서 두드러진 특징입니다. 이는 재료의 구조적 안정성과 극고온 환경에서 성능을 유지하는 능력을 반영하며, 고열 부하 응용 분야에 대한 적합성을 직접적으로 결정합니다. 이러한 고온 저항은 주로 텅스텐에 의해 제공되며, 텅스텐의 녹는점은 3422°C 로 모든 금속 중 가장 높습니다. 이러한 특성 덕분에 텅스텐-구리 전극은 아크 방전 또는 고온 용접 중에 구조적 무결성을 유지하여 용융 또는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

변형에 저항할 수 있습니다. 복합 구조에서 텅스텐은 골격 재료로 작용하여 고강도의 열적으로 안정적인 네트워크를 형성합니다. 구리 상은 고온에서 액체 형태로 기공을 채워 재료의 전반적인 열 안정성을 향상시켜 고경도 재료의 EDM 또는 고전압 스위치의 분리 작업에 적합합니다. 고온 저항성은 미세 구조 및 제조 공정에도 영향을 받습니다. 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 달성하여 고온에서 열 응력 집중을 줄입니다. 열간 등방성 성형(HIP)은 계면 결함을 더욱 최적화하고 열 피로 저항성을 향상시킵니다. 방전 가공(EDM)에서 고온 저항성은 고에너지 방전 시 전극 표면의 삭마를 줄여 수명을 연장합니다. 고온 저항성은 구리 상의 영향도 받습니다. 구리는 녹는점이 낮고(1083°C) 매우 높은 온도에서 연화될 수 있지만, 텅스텐 골격의 지지력이 구조적 무결성을 유지합니다. 표면 처리(예: 니켈 도금)는 내산화성을 더욱 향상시키고 습하거나 산업 환경에서의 수명을 연장합니다.

3.2 텅스텐 구리 전극의 기능적 성능

텅스텐-구리 전극은 전기 전도성, 아크 내식성, 기계적 내구성, 그리고 열 관리 기능을 아우르는 실용적인 응용 분야에서 핵심적인 가치를 지닙니다. 이러한 특성은 텅스텐과 구리의 복합적인 특성에서 비롯됩니다. 텅스텐-구리 전극은 제조 공정과 미세 구조를 최적화함으로써 EDM, 용접, 그리고 마이크로전자 패키징 분야에서 다양한 기능을 발휘합니다. 구리 상은 전기 전도성을 제공하여 효율적인 전류 전달을 보장합니다. 텅스텐의 높은 용점과 경도는 아크 내식성을 뒷받침하여 표면 손실을 줄입니다. 균일한 상 분포와 낮은 기공률을 통해 기계적 내구성을 확보하여 고부하 작동을 지원합니다. 또한, 열 관리는 구리의 열 전도성과 텅스텐의 안정성을 결합하여 고온 환경에서의 성능을 최적화합니다.

3.2.1 텅스텐-구리 전극의 전도성

텅스텐-구리 전극은 전극의 기능적 가치를 결정하는 핵심 기반이며, EDM, 용접, 마이크로일렉트로닉스 패키징 등의 분야에서 전기 효율과 장기 신뢰성을 직접적으로 좌우합니다. 이러한 독보적인 성능은 텅스텐과 구리의 시너지 효과에서 비롯됩니다. 자연적으로 전도성을 띠는 구리는 전극 내에 연속적인 전류 전달 네트워크를 형성하여 전하 흐름에 저항이 낮은 경로를 제공합니다. 텅스텐의 높은 용점과 높은 강도는 견고한 구조를 형성하여 고온 및 기계적 응력과 같은 가혹한 작동 조건에서도 전극의 구조적 안정성을 유지하고, 구리 상이 과열되거나 변형되어 전도성 경로가 끊어지는 것을 방지합니다. 이러한 두 가지 요소의 조합은 구리의 전도성 장점을 유지하면서도 순수 구리의 강도 및 고온 저항성 단점을 해결하여 텅스텐-구리 전극을 복잡한 전기 환경에 이상적인 선택으로 만들어줍니다.

전기 전도도의 미세 구조적 기초

텅스텐-구리 전극은 미세 구조와 밀접한 관련이 있으며, 핵심은 구리 상의 분포와 텅스텐-구리 계면의 접합 품질입니다. 분말 야금이나 진공 함침과 같은 공정을 통해 미세 구조를 정밀하게 제어할 수 있습니다. 분말 야금은 텅스텐 분말과 구리 분말을 일정 비율로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

혼합하고, 가압하고, 소결하여 구리 상이 텅스텐 입자 사이의 틈을 고르게 채워 치밀한 "텅스텐 골격-구리 필러" 구조를 형성합니다. 진공 함침은 고온에서 미리 소결된 텅스텐 골격에 액체 구리를 함침시켜 모세관 현상을 이용하여 구리 상의 연속적인 분포를 달성하는 공정입니다. 두 공정 모두 내부 기공과 계면 결함을 줄이는 것을 목표로 합니다. 기공은 전류 경로를 차단하여 국부 저항을 급격히 증가시킬 수 있으며, 계면 접합 불량은 "접촉 저항"을 형성하여 전하 이동 저항을 증가시킬 수 있습니다. 따라서 높은 전도도를 위해서는 낮은 기공률과 균일한 상 분포가 필수적입니다. 이러한 조건은 전극 내 균일한 전류 전도를 보장하여 국부적인 저항 차이로 인한 열 집중이나 전류 변동을 방지합니다.

텅스텐 대 구리는 전기 전도도 조절에 중요한 매개변수입니다. 이론상 구리 함량이 높을수록 더 많은 구리 상이 더 조밀한 전도성 네트워크를 형성할 수 있기 때문에 전기 전도도가 더 좋습니다. 그러나 구리 함량이 너무 높으면 텅스텐 골격의 지지 역할을 약화시켜 고온에서 전극이 연화되고 변형되기 쉽습니다. 실제 적용에서는 상황에 따라 두 가지 비율의 균형을 맞춰야 합니다. 예를 들어, 전도 효율에 중점을 둔 경우에는 더 높은 구리 함량을 선택하고, 고온 안정성을 고려해야 하는 경우에는 텅스텐 비율을 적절히 증가시킵니다. 이러한 비율 조절은 본질적으로 다양한 작업 조건의 핵심 요구에 맞춰 "전도도"와 "구조적 안정성" 간의 균형을 찾는 것입니다.

응용 시나리오에 대한 전도성 특성의 영향

방전 가공(EDM)에서 전기 전도도는 가공 정확도와 전극 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. 가공 중 전극과 가공물 사이에 고주파 방전이 발생하여 고온 용융물이 생성되며, 안정적인 전류 전달은 균일한 방전 에너지를 보장하는 데 필수적입니다. 높은 전도도를 가진 텅스텐-구리 전극은 전류 밀도를 고르게 분배하여 과도한 국부 저항으로 인한 "과방전" 현상, 즉 국부 전류 집중으로 인한 비정상적으로 높은 온도로 인해 전극 표면의 삭마나 가공물 표면에 피트(pit) 및 균열과 같은 결함이 발생하는 것을 방지합니다. 동시에, 우수한 전도도는 에너지 손실을 줄이고, 더 많은 전기 에너지를 가공에 필요한 열 에너지로 변환하여 가공 효율을 향상시킵니다. 또한, 안정적인 전류 전달은 전극의 "전기화학적 부식"을 줄이고, 손실률을 낮추며, 일회용 사이클을 연장할 수 있습니다.

용접 분야에서 전기 전도도는 용접 품질의 일관성을 직접적으로 결정합니다. 저항 스팟 용접이든 심 용접이든 전극은 용접 부위에 전류를 효율적으로 전달하고, 저항열을 통해 작업물의 접촉면을 녹여 용융 코어를 형성해야 합니다. 높은 전도도를 가진 텅스텐 구리 전극은 전극과 작업물 사이의 접촉점에서 안정적인 전류 출력을 보장하여 저항 변동으로 인한 열 불균형을 방지합니다. 열이 부족하면 냉간 용접이 발생하고, 과도한 열은 작업물에 침투하거나 전극이 들러붙을 수 있습니다. 또한, 용접 공정 중 전극 자체가 저항열로 인해 가열됩니다. 전도도가 낮으면 전극의 고온으로 인해 표면 산화 또는 변형이 발생하여 전도도가 더욱 악화 되고 "성능 저하-과열 악화"의 악순환이 형성될 수 있습니다. 고전도성 전극의 낮은 저항 특성은 자기 발열을 줄이고 장기적으로 안정적인 용접 효과를 유지할 수 있습니다.

마이크로전자 패키징은 더욱 정교한 전기 전도성을 요구합니다. 칩과 기판을 연결하는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전도성 배선인 텅스텐 구리 전극은 신호 전송의 무결성을 보장하기 위해 낮은 저항과 안정적인 회로 전도를 달성해야 합니다. 고주파, 고속 전자 신호는 저항 변화에 매우 민감합니다. 작은 저항 변동조차도 신호 지연이나 감쇠를 유발할 수 있습니다. 따라서 마이크로전자 패키징에 사용되는 텅스텐 구리 전극은 매우 높은 전도성 일관성을 가져야 하며, 내부에 국부적인 고저항 영역이 없어야 합니다. 그렇지 않으면 신호 전송의 "병목 현상"이 발생할 수 있습니다. 동시에, 패키징 환경의 온도 사이클은 재료의 팽창과 수축을 유발합니다. 구조적 변화로 인해 전도성 성능이 저하되면 회로 접촉 불량을 유발하고 장비 고장을 일으킬 수 있습니다. 따라서 전극의 전도성 성능은 장기간 사용 시 안정적으로 유지되어야 하며 환경 스트레스의 영향을 크게 받지 않아야 합니다.

핵심 전도 매개변수의 상관관계 및 중요성

전도도, 저항률, 그리고 전류 운반 용량은 텅스텐 구리 전극의 전도 성능을 측정하는 핵심 매개변수입니다. 이 세 가지는 서로 연관되어 있으며 각기 다른 초점을 가지고 있습니다. 전도도는 재료의 전류 전도 능력을 나타냅니다. 값이 높을수록 전도도가 우수합니다. 저항률은 전도도의 역수이며, 전류 전달에 대한 저항을 직접적으로 반영합니다. 실제 응용 분야에서 이 두 매개변수는 특정 전압에서 전극의 전류 세기를 결정하며, 이는 에너지 출력 효율에 영향을 미칩니다. 전류 운반 용량은 과열이나 구조적 손상 없이 전극을 지속적으로 통과할 수 있는 최대 전류를 나타냅니다. 이는 전도 성능뿐만 아니라 재료의 방열 용량 및 고온 저항과도 밀접한 관련이 있습니다. 높은 전도도는 전류가 통과할 때 줄 열을 줄일 수 있으며, 텅스텐 골격의 고온 저항은 큰 전류를 전달하는 구조적 지지력을 제공합니다.

텅스텐-구리 전극 설계에서는 이 세 가지 매개변수의 균형을 맞추는 것이 매우 중요합니다. 예를 들어, 고전류 응용 분야에서는 높은 전도도(열 발생 최소화)와 높은 전류 전달 용량(구조적 결함 방지)을 모두 유지해야 합니다. 그러나 정밀 마이크로전자 분야에서는 정확한 신호 전송을 보장하기 위해 전도도 안정성과 균일성에 더욱 중점을 둡니다. 이러한 매개변수에 대한 심층적인 연구와 제어는 텅스텐-구리 전극 성능 최적화의 기반이자 다양한 첨단 응용 분야에 대한 적응성을 보장하는 기술적 보장입니다.

3.2.1.1 전도도

전극의 전도 특성을 나타내는 기본적인 지표로, 재료의 전하 전달 능력을 반영하고 전기 응용 분야에서의 효율에 직접적인 영향을 미칩니다. 전도도는 주로 구리 상에 의해 발생하며, 높은 전도도는 전극 내에서 효율적인 전류 전달을 보장하여 연속적인 전도 네트워크를 형성합니다. 텅스텐의 전도도는 구리보다 낮지만 최적화된 복합 공정(예: 70/30 WCu 비율)을 통해 전도도가 순수 구리에 가까워져 EDM의 높은 전류 요구 사항과 용접의 낮은 저항 요구 사항을 충족할 수 있습니다. 미세 구조 내에서 구리 상이 균일하게 분포되어 저항 변화를 줄이고 방전 안정성을 향상시킵니다. 이는 전도도가 가공 정확도와 표면 품질을 직접적으로 결정하는 정밀 가공 응용 분야(예: 마이크로 몰드)에서 특히 그렇습니다. 높은 전기 전도도 달성은 제조 공정에 따라 달라집니다. 분말 야금은 소결 온도와 압력을 통해 구리의 습윤 및 충진을 제어합니다. 진공 침투는 액상 구리 침투를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

통해 상 계면을 최적화하여 기공을 줄이고 산란 효과를 최소화합니다. 열간 등방성 성형(HIP)은 계면 결합을 더욱 강화하고 전도도 일관성을 개선합니다. 전도도는 조성비의 영향도 받습니다. 높은 구리 함량(예: WCu 60/40)은 일반적으로 높은 전도도를 나타내며 고효율 가공에 적합합니다. 높은 텅스텐 함량(예: WCu 90/10)은 내마모성을 우선시할 때 우수한 성능을 발휘합니다. 실제 응용 분야에서 높은 전기 전도도는 안정적인 아크 방전을 지원하고 에너지 손실을 줄이며 전극 수명을 연장합니다. 향후 나노 구리 분말의 도입이나 표면 개질(예: 은 도금)을 통해 5G 장비 및 전력 전송과 같은 고전류 또는 고주파 응용 분야에 적합하도록 전도도를 더욱 향상시킬 수 있습니다.

3.2.1.2 저항률

저항률은 텅스텐-구리 전극의 전도성을 나타내는 또 다른 중요한 지표입니다. 이는 전류 흐름에 대한 재료의 저항을 반영하며 전기 에너지 전달 및 열 발생 효율에 직접적인 영향을 미칩니다. 저항률은 주로 텅스텐과 구리의 복합 특성에 의해 결정됩니다. 구리의 낮은 저항률은 효율적인 전류 경로를 제공하는 반면, 텅스텐의 높은 저항률은 높은 비율에서 전체 임피던스를 증가시킬 수 있습니다. 비율을 최적화함으로써 텅스텐-구리 전극의 저항률은 순수 구리 수준까지 효과적으로 감소하여 낮은 에너지 손실이 필요한 응용 분야에 적합합니다. 미세 구조의 낮은 다공성과 균일한 상 분포는 전자 산란을 줄이고 저항률의 일관성을 향상시키며, 이는 특히 장거리 전류 전송에서 두드러집니다. 저항률 제어는 제조 공정에 따라 달라집니다. 분말 야금은 정밀한 혼합 및 소결을 통해 구리 상의 연속성을 최적화하는 반면, 진공 침투는 기공을 액체 구리로 채워 저항률을 더욱 낮춥니다. 열처리 및 압력 보조 공정(예: HIP)은 재료 밀도를 향상시키고 결정립계 및 결합으로 인한 저항 증가를 줄입니다. 저항률은 온도와 환경의 영향도 받습니다. 고온에서 구리 상의 연화는 저항을 약간 증가시킬 수 있지만, 텅스텐 골격의 지지력은 전반적인 안정성을 유지합니다. 전기 스파크 가공에서는 저항률이 낮아 열 영향을 줄이고 표면 품질을 향상시킵니다. 용접에서는 접합부 저항을 줄이고 효율을 향상시킵니다.

3.2.1.3 전류 용량

전류 전달 용량은 텅스텐-구리 전극의 전도성 특성을 나타내는 핵심 지표입니다. 이는 고전류 조건에서 전극의 안정성과 내구성을 반영하며 고부하 응용 분야에 대한 적합성을 직접적으로 결정합니다. 전류 전달 용량은 주로 구리 상의 높은 전도도와 텅스텐의 높은 용점에 의해 뒷받침됩니다. 구리는 효율적인 전류 전달 경로를 제공하는 반면, 텅스텐의 골격 구조는 고온 아크에서 안정성을 유지하여 용융이나 변형을 방지합니다. 텅스텐-구리 전극은 최적화된 비율(예: WCu 80/20)을 통해 고전류에서 매우 우수한 성능을 발휘합니다. 미세 구조의 낮은 기공률과 균일한 상 분포는 국부 과열 위험을 줄이고 전류 전달 용량을 향상시킵니다.

전류 전달 용량 달성은 제조 공정에 따라 달라집니다. 분말 야금은 소결 온도와 압력을 제어하여 상 계면을 최적화합니다. 진공 함침은 액상 구리의 함침을 통해 밀도를 향상시킵니다. 열간 등방성 성형은 재료의 기계적 강도와 전도성 안정성을 더욱 향상시킵니다. 높은 텅스텐 함량(예: WCu 90/10)은 아크 침식 저항성을 향상시켜 고에너지

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

방전 응용 분야에 적합하며, 높은 구리 함량(예: WCu 60/40)은 저저항 전송을 최적화합니다. 방전 가공(EDM)에서 높은 전류 전달 용량은 대량 소재 제거를 지원하고, 용접에서는 고전류에서 접합부 품질과 내구성을 보장합니다. 실제 적용에서 전류 전달 용량은 주변 온도와 방열 조건의 영향을 받습니다. 효과적인 열 관리(예: 공랭 또는 액랭)는 전류 전달 한계를 향상시킬 수 있습니다. 전류 전달 용량 향상은 전극 설계에도 영향을 받습니다. 복잡한 기하학적 구조에는 균일한 전류 분배가 필요하며, 표면 처리(도금 등)를 통해 내식성을 강화하고 사용 수명을 연장할 수 있습니다.

3.2.2 텅스텐 구리 전극의 아크 침식 저항성

텅스텐-구리 전극의 성능은 고에너지 아크 방전 환경에서의 내구성과 안정성을 반영합니다. 이러한 특성은 방전 가공(EDM), 저항 용접, 고전압 스위칭과 같은 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 아크 내식성은 주로 텅스텐의 높은 용점과 경도, 그리고 구리의 전도성 및 충진 특성에 기인합니다. 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통한 미세 구조 최적화, 낮은 기공률 및 균일한 상 분포는 내식성을 더욱 향상시킵니다. 아크 작용으로 전극 표면에서 재료의 증발 또는 용융이 발생할 수 있습니다. 아크 내식성은 가공 정확도, 사용 수명 및 비용 효율성에 직접적인 영향을 미칩니다.

3.2.2.1 아크 침식 메커니즘

아크 침식 메커니즘은 텅스텐-구리 전극의 아크 침식 저항성을 이해하는 데 기본이 됩니다. 이는 재료 표면에서 아크 방전으로 인해 발생하는 열적 효과와 재료 손실을 포함합니다. 아크 침식은 고전압 또는 고전류 조건에서 방전으로 시작하여 고온 플라즈마(수천 °C 에 도달)를 생성합니다. 전극 표면의 이러한 순간적인 가열은 재료의 국부적인 용융 또는 기화를 유발합니다. 텅스텐-구리 전극에서 아크 작용은 먼저 구리 상에 영향을 미칩니다. 낮은 녹는점(1083°C)으로 인해 액체 구리는 고온에서 증발하거나 스퍼터링되어 텅스텐 골격이 노출될 수 있습니다. 텅스텐의 높은 녹는점(3422°C)은 아크 발생 시 구조적 안정성을 보장하지만 표면 산화 또는 미세 삭마가 발생하여 피트 또는 균열이 형성될 수 있습니다. 침식 과정에는 열 응력도 포함됩니다. 빠른 가열 및 냉각은 재료 내에 응력 집중을 유발하여 미세 균열 전파를 유발할 수 있습니다. 아크 삭마 메커니즘은 미세 구조의 영향을 받습니다. 낮은 기공률은 열 집중점을 줄이고, 균일한 상 분포(예: WCu 70/30)는 열전도를 최적화하고 국부 과열 위험을 줄입니다. 아크 에너지와 방전 빈도 또한 삭마 정도에 영향을 미칩니다. 고에너지 방전은 재료 손실을 악화시키는 반면, 저주파 방전은 표면 손상을 경미하게 유발할 수 있습니다. 금속 증기나 산화물과 같은 삭마 생성물은 가공물 표면에 증착되어 가공 품질에 영향을 미칠 수 있습니다. 열간 등방성 성형(HIP)과 같은 전처리 공정은 기공의 밀도를 높이고 기화점을 줄임으로써 삭마 저항성을 향상시킵니다. 향후 아크 에너지 분포와 재료 상 변화를 연구함으로써 삭마 메커니즘을 더욱 명확히 밝히고 전극 설계를 최적화할 수 있을 것입니다.

3.2.2.2 절제 저항성 평가

내식성 평가는 텅스텐-구리 전극의 아크 내식성을 평가하는 과학적 방법입니다. 실제

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적용에서 전극의 신뢰성을 보장하기 위해 실험적 시험과 성능 분석을 포함합니다. 이 평가는 일반적으로 고에너지 방전 조건을 시뮬레이션하고 전극의 표면 질량 손실, 치수 변화 및 표면 형태를 기록하는 아크 내식 시험을 통해 수행됩니다. 질량 손실률은 핵심 지표입니다. 내식성이 높은 전극은 장시간 방전 후 순수 구리 또는 흑연 전극보다 질량 손실이 현저히 낮습니다. 80/20 WCu 비율은 200A 에서 매우 우수한 성능을 보입니다. 치수 변화는 3D 스캐닝을 사용하여 전극 프로파일을 따라 마모 정도를 평가하여 측정합니다. 낮은 마모율은 높은 내식성을 나타냅니다. 표면 형태 분석은 주사 전자 현미경(SEM)을 사용하여 침식 후 미세 구조를 관찰하여 피트 깊이, 균열 밀도 및 산화층 두께를 평가합니다. 균일한 침식 흔적은 미세 구조의 안정성을 나타냅니다. 내식성은 수명 시험을 통해서도 평가되는데, 이 시험은 지정된 횟수의 방전 후 전극의 성능 저하를 기록합니다. 내구성이 뛰어난 전극은 전도성과 기계적 강도를 모두 유지합니다. ISO 14132 및 IEC 62271-102 와 같은 국제 표준은 아크 내성 시험 및 열 안정성 평가를 포함한 시험 지침을 제공합니다. 실험 결과에 따르면 진공 침투와 같은 최적화된 제조 공정을 거친 전극은 삭마율을 약 30%까지 줄일 수 있습니다.

절삭 저항 평가에는 적용 시나리오도 고려됩니다. 전기 스파크 가공에서 절삭 저항은 가공 정확도와 가공물 표면 품질에 직접적인 영향을 미치며, 용접에서는 전극 교체 빈도를 줄입니다.

3.2.2.3 절제 저항에 영향을 미치는 요인

전극 의 성능 최적화에는 재료 조성, 미세 구조, 작동 조건 등을 포함한 절삭 저항에 영향을 미치는 요인들이 핵심입니다. 주요 요인은 조성비입니다. 텅스텐 함량이 높을수록(예: WCu 90/10) 절삭 저항이 증가합니다. 텅스텐은 높은 융점과 경도를 가지고 있어 아크 충격으로부터 보호합니다. 구리 함량이 높을수록(예: WCu 60/40) 전도성이 향상되지만 절삭 저항도 감소합니다. 내구성과 효율 간의 균형을 맞춰야 합니다. 미세 구조는 상당한 영향을 미칩니다. 낮은 기공률은 열 집중점을 줄이는 반면, 균일한 상 분포는 열 전달을 최적화합니다. 열간 등방성 성형(HIP) 공정은 밀도를 향상시키고 절삭률을 약 15% 감소시킵니다.제조 공정은 삭마 저항성에 매우 중요합니다. 분말 야금에서는 소결 온도와 압력이 구리의 습윤 효과를 제어합니다. 진공 침투에서는 침투 깊이가 계면 안정성에 영향을 미칩니다. 고온 처리는 결함을 줄입니다. 니켈 도금이나 코팅과 같은 표면 처리는 산화 저항성을 향상시키고 아크로 인한 표면 손상을 줄입니다. 작동 조건에는 아크 에너지와 방전 주파수가 포함됩니다. 고에너지 방전(예: 500A)은 삭마를 악화시키는 반면, 저주파 방전은 손실을 줄입니다. 습기나 산화성 분위기와 같은 환경 요인은 표면 열화를 가속화할 수 있으므로 최적화된 작업 조건이 필요합니다. 전극 설계 또한 삭마 저항에 영향을 미칩니다. 복잡한 형상은 국부 과열을 최소화하기 위해 균일한 전류 분배가 필요합니다.

3.3 텅스텐 구리 전극의 기타 특성

텅스텐-구리 전극은 경도, 강도, 인성, 내마모성, 내부식성, 용접 및 접착 저항성 등 다양한 응용 분야에서 고유한 장점을 제공하는 핵심 요소입니다. 이러한 특성은 텅스텐과

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

구리의 복합적 특성에서 비롯됩니다. 미세 구조는 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통해 최적화되어 기공률이 낮고 균일성이 높은 재료를 형성합니다. 텅스텐의 높은 용점, 경도, 화학적 안정성은 고온 저항성과 내마모성의 기반을 제공하며, 구리의 높은 전기 전도도, 연성, 열 전도도는 전기적 특성과 인성을 향상시킵니다. 다른 특성들의 결합된 성능은 EDM, 용접 및 마이크로 전자 패키징에서 전극의 내구성, 효율성 및 신뢰성에 직접적인 영향을 미칩니다.

3.3.1 텅스텐 구리 전극의 경도

텅스텐-구리 전극은 기계적 특성을 나타내는 핵심 지표로, 고하중 및 연마 조건에서의 내구성과 변형 저항성을 반영합니다. 이러한 특성은 복합 재료의 주요 구성 요소인 높은 경도를 가진 텅스텐에 의해 주로 제공됩니다. 구리의 충전 효과와 더불어 분말 야금 또는 진공 침윤 공정은 미세 구조를 최적화하여 균일한 상 분포와 낮은 기공률을 달성합니다. 경도는 방전 가공(EDM) 중 전극의 내식성, 용접 중 압축 강도, 그리고 마이크로전자 패키징 내 표면 안정성에 직접적인 영향을 미칩니다. 고경도 전극은 낮은 기계적 응력이나 아크 충격을 견뎌내 가공 정밀도를 유지하면서 수명을 연장합니다. 이러한 경도를 달성하는 것은 텅스텐 대 구리 비율과 제조 공정에 따라 달라집니다. 텅스텐 함량이 높을수록(예: WCu 80/20 또는 WCu 90/10) 경도가 높아집니다. 텅스텐의 자연 경도는 내마모성의 토대를 제공하며, 구리의 연성은 소결 과정에서 기공을 채워 재료의 전반적인 밀도를 향상시킵니다. 열간 등방성 가압 성형(HIP)을 통해 최적화된 미세 구조의 미세 입자는 경도를 더욱 높이고 표면 마모를 감소시킵니다. 경도 시험은 일반적으로 비커스 경도법이나 로크웰 경도법을 사용합니다. 경도 시험 결과는 재료의 압입에 대한 표면 저항성을 반영합니다. 고온 소결 및 압력 제어와 같은 전처리 공정은 경도 분포의 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다. 실제 적용에서는 경도가 높은 전극이 고경도 재료 가공 시 더 우수한 성능을 발휘하여 전극 변형을 최소화합니다.

경도는 환경 및 사용 조건에도 영향을 받습니다. 고온에서 구리 상이 연화되면 경도가 약간 감소할 수 있지만, 텅스텐 골격이 제공하는 지지력은 전반적인 안정성을 유지합니다. 연마나 코팅과 같은 표면 처리는 표면 경도와 내식성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 마이크로전자 패키징에서 경도는 전극과 기관 사이의 밀착을 보장하여 기계적 손상을 방지합니다.

3.3.2 텅스텐 구리 전극의 강도

텅스텐-구리 전극은 기계적 특성을 나타내는 핵심 지표로, 고압 및 기계적 응력 하에서 파괴 및 변형에 대한 저항성을 나타냅니다. 이러한 특성은 텅스텐의 높은 압축 강도와 구리의 인성에 의해 뒷받침됩니다. 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통한 미세 구조 최적화는 낮은 기공률과 높은 밀도를 가진 복합 재료를 생성합니다. 강도는 방전 가공(EDM) 시 전극의 내충격성, 용접 시 압축 강도, 그리고 마이크로전자 패키징 시 구조적 안정성에 직접적인 영향을 미칩니다. 고강도 전극은 고에너지 방전이나 기계적 클램핑 응력을 견뎌내 수명을 연장 하고 가공 효율을 향상시킵니다. 강도 달성은 텅스텐 대 구리 비율과 제조 공정에 따라 달라집니다. 높은 텅스텐 함량(예: WCu 85/15)은 압축

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

강도를 크게 향상시킵니다. 텅스텐 골격은 고강도 구조적 지지력을 제공하는 반면, 구리 충전제는 미세 구조의 균일성을 최적화하고 응력 집중을 감소시킵니다. 미세 구조의 낮은 기공률과 균일한 상 분포는 열간 등방성 가압 성형(HIP)을 통해 향상됩니다. 미세 입자 크기는 재료의 피로 저항성을 향상시키며, 강도 시험 결과 압축 강도가 비교적 높은 수준에 도달할 수 있음을 보여줍니다. 소결 온도 및 압력 제어와 같은 제조 공정은 강도 분포의 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다. 진공 침투는 액상 구리의 침투를 통해 계면 결합을 향상시킵니다.

강도는 작동 조건에도 영향을 받습니다. 고온에서 구리 상이 연화되면 강도가 약간 감소할 수 있지만, 텅스텐 골격의 지지력은 전반적인 안정성을 유지합니다. EDM 에서 고강도 전극은 고에너지 방전의 충격을 견뎌내고 변형을 줄일 수 있습니다. 용접에서는 고압 하에서 접합부 형성을 지원합니다. 마이크로전자 패키징에서 강도는 열 사이클링 중 전극이 파손되지 않도록 보장하여 신뢰성을 향상시킵니다. 도금과 같은 표면 처리는 내식성을 향상시켜 강도 성능을 간접적으로 향상시킬 수 있습니다.

3.3.3 텅스텐 구리 전극의 인성

텅스텐-구리 전극은 기계적 특성의 핵심 요소로, 충격이나 응력 하에서 파괴 및 에너지 흡수에 대한 저항성을 나타냅니다. 이러한 특성은 주로 구리에 의해 제공되며, 구리의 높은 연성과 인성은 복합 재료에서 핵심적인 역할을 합니다. 텅스텐의 경도와 더불어, 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통해 미세 구조가 최적화되어 기공률이 낮고 균일성이 높은 재료가 탄생합니다. 인성은 방전 가공(EDM)에서 전극의 균열 저항성, 용접 시 내충격성, 그리고 마이크로전자 패키징에서 구조적 유연성에 직접적인 영향을 미칩니다. 고인성 전극은 기계적 또는 열 응력을 흡수하고, 취성 파괴를 줄이며, 사용 수명을 연장할 수 있습니다. 이 섹션에서는 텅스텐-구리 전극의 인성 특성과 실제 응용 분야에서의 역할을 자세히 살펴봅니다.

인성 달성은 텅스텐 대 구리의 비율과 제조 공정에 따라 달라집니다. 구리 함량이 높을수록 인성이 향상됩니다. 구리의 파단 신율은 에너지 흡수를 제공하는 반면, 텅스텐 골격은 고온에서 구조적 안정성을 유지합니다. 미세 구조의 낮은 기공률과 균일한 상 분포는 열간 등압 성형을 통해 최적화됩니다. 미세 입자 크기는 재료의 균열 전파 저항성을 향상시킵니다. 인성 시험 결과, 재료는 충격 시 소성 변형을 보입니다. 소결 온도 및 압력 제어와 같은 제조 공정은 인성 분포의 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다. 액체 구리의 침투를 통한 진공 용침은 계면 결합을 개선하고 응력 집중점을 줄입니다. 인성은 또한 작동 조건에도 영향을 받습니다.

고온에서 구리 상이 연화되면 인성이 향상되지만, 과도한 온도는 강도 감소로 이어질 수 있습니다. 텅스텐 골격이 제공하는 지지력은 전체적인 균형을 유지합니다. 전기 스파크 가공에서 인성이 높은 전극은 고에너지 방전의 충격을 견뎌내고 균열 형성을 줄일 수 있습니다. 용접 시 열응력을 흡수하고 접합부 내구성을 향상시킵니다. 마이크로전자 패키징에서는 인성이 열 사이클링 중 취성 파괴를 방지하여 신뢰성을 향상시킵니다. 연마와 같은 표면 처리는 표면 결함을 줄이고 인성을 간접적으로 강화할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3.4 텅스텐 구리 전극의 내마모성

텅스텐-구리 전극은 기계적 특성의 핵심 요소로, 반복적인 마찰이나 고부하 조건에서 내마모성과 표면 안정성을 나타냅니다. 이러한 특성은 주로 텅스텐에 의해 제공되며, 텅스텐은 높은 경도와 내마모성을 가지고 있어 복합 소재의 주요 구성 요소입니다. 구리의 충전 효과와 더불어, 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통해 미세 구조가 최적화되어 기공률이 낮고 균일성이 높은 소재가 탄생합니다. 내마모성은 방전 가공(EDM)에서 전극의 장기 사용 수명, 용접 시 접촉 마모에 대한 내성, 그리고 마이크로전자 패키징 시 표면 무결성에 직접적인 영향을 미칩니다. 내마모성이 우수한 전극은 기계적 마찰이나 아크 충격을 견뎌내 재료 손실을 줄이고 가공 정밀도를 유지합니다.

내마모성은 텅스텐과 구리의 비율과 제조 공정에 따라 달라집니다. 텅스텐 함량이 높을수록(예: WCu 80/20 또는 WCu 90/10) 내마모성이 향상됩니다. 텅스텐의 고유 경도는 재료에 내마모성 기반을 제공하는 반면, 구리의 연성은 소결 중 기공을 채워 미세 구조의 밀도를 향상시킵니다. 미세 구조의 미세 입자는 열간 등방성 가압(HIP) 공정을 통해 최적화되어 내마모성을 더욱 향상시키고 표면 마모 및 침식을 줄입니다. 내마모성 시험은 일반적으로 마찰 및 마모 시험이나 아크 삭마 시험을 통해 표면 거칠기와 질량 손실률의 변화를 측정합니다. 고온 소결 및 압력 제어와 같은 제조 공정은 내마모성 분포의 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다. 실제 적용에서 내마모성이 높은 전극은 고경도 재료(예: 텅스텐강) 가공 시 탁월한 성능을 발휘하여 전극 변형 및 교체 빈도를 줄입니다.

내마모성은 작동 조건에도 영향을 받습니다. 고온에서 구리 상이 연화되면 내마모성이 약간 감소할 수 있지만, 텅스텐 지지체는 전반적인 안정성을 유지합니다. 연마 또는 코팅(예: CrN)과 같은 표면 처리는 표면 내마모성과 내부식성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 마이크로전자 패키징에서 내마모성은 전극이 반복 조립 시 표면 품질을 유지하고 기계적 손상을 방지하는 데 필수적입니다.

3.3.5 텅스텐 구리 전극의 내식성

텅스텐-구리 전극은 환경 적응성이라는 핵심적인 성능 특성을 지니며, 이는 화학적 공격에 대한 저항성과 습한, 산성, 알칼리성 또는 산업 환경에서의 장기적인 안정성을 반영합니다. 이러한 특성은 주로 텅스텐의 화학적 안정성과 구리의 표면 보호, 그리고 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통한 미세 구조 최적화를 통해 구현되며, 이를 통해 기공률이 낮고 균일도가 높은 소재를 얻을 수 있습니다. 내식성은 방전 가공(EDM)에서 전극의 가공물 표면 품질, 용접 시 내산화성, 그리고 마이크로전자 패키징에서의 신뢰성에 직접적인 영향을 미칩니다. 내식성이 높은 전극은 환경 부식을 방지하고 표면 열화를 줄이며 수명을 연장할 수 있습니다. 이 섹션에서는 텅스텐-구리 전극의 내식성 특성과 그 적용 성능에 대해 자세히 설명합니다.

내식성 달성은 텅스텐과 구리의 비율과 제조 공정에 따라 달라집니다. 텅스텐 함량이 높을수록(예: WCu 85/15) 내식성이 향상됩니다. 텅스텐의 자연적인 화학적 안정성은 소재에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

내산성 및 내알칼리성을 제공하는 기반을 제공하며, 구리의 연성은 소결 과정에서 기공을 채워 부식 경로를 줄입니다. 열간 등방성 가압 성형(HIP)을 통해 최적화된 미세 구조의 낮은 기공률은 부식성 매체의 침투 경로를 줄이고, 미세 입자 크기는 소재의 균열 저항성을 향상시킵니다. 내식성 시험은 일반적으로 염수 분무 또는 산 침지 시험을 통해 표면 부식률과 질량 손실을 측정합니다. 진공 침투와 같은 제조 공정은 액상 구리의 침투를 통해 계면 밀도를 개선하여 내식성을 향상시킵니다. 실제 적용에서 내식성이 높은 전극은 화학적으로 활성인 재료(예: 티타늄 함유 합금)를 가공할 때 탁월한 성능을 발휘하여 가공물 오염을 줄입니다. 내식성은 작동 조건에도 영향을 받습니다. 습하거나 산화성 분위기는 구리 상의 부식을 가속화할 수 있지만, 텅스텐 골격의 지지력과 표면 처리(예: 니켈 도금 또는 금 도금)는 전반적인 안정성을 크게 향상시킵니다. 마이크로전자 패키징에서 내식성은 전극이 습한 환경에서 산화되지 않도록 하여 신뢰성을 향상시킵니다.

3.3.6 텅스텐 구리 전극의 용접 방지 및 접착 방지 특성

텅스텐-구리 전극은 용접 응용 분야에서 핵심적인 특성입니다. 텅스텐-구리 전극은 고온 및 고압 환경에서 접합 재료와의 접착을 방지하는 전극의 능력과 용접 후 표면의 청결성을 반영합니다. 이러한 특성은 주로 텅스텐의 고온 저항성과 구리의 표면 특성에 의해 뒷받침됩니다. 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통한 미세 구조 최적화는 기공률이 낮고 균일도가 높은 재료를 생성합니다. 용접 및 접착 저항성은 저항 용접에서 전극의 효율, 점 용접에서 표면 품질, 그리고 장기간 사용 시 교체 빈도에 영향을 미칩니다. 접착 저항성이 높은 전극은 슬래그 접착을 줄이고 용접 접합 품질을 향상시키며 용접 수명을 연장할 수 있습니다.

납땜성과 접착력 모두 달성하는 것은 텅스텐 대 구리 비율과 제조 공정에 달려 있습니다. 텅스텐 함량이 높을수록(예: WCu 80/20) 접착력이 더 강해집니다. 텅스텐의 높은 용점과 경도는 용융 솔더링 시 접착력을 감소시키는 반면, 구리의 열전도도는 소결 시 열 관리를 최적화하고 표면 잔류물을 줄입니다. 열간 등방성 가압 성형(HIP)을 통해 최적화된 미세 구조의 낮은 기공률은 슬래그 침투 경로를 줄이는 반면, 미세 입자 크기는 재료의 변형 저항성을 향상시킵니다. 접착력은 일반적으로 슬래그 접착 면적과 표면 청결도를 측정하는 용접 사이클 시험을 통해 시험합니다. 진공 침투와 같은 제조 공정은 액상 구리 침투를 통해 계면 밀도를 개선하여 접착력을 향상시킵니다. 실제로 접착력이 높은 전극은 점용접 또는 심용접에 탁월하여 세척 빈도를 줄입니다. 납땜 및 접착 저항 또한 작동 조건에 영향을 받습니다. 고온에서 구리 상이 연화되면 접착 위험이 증가할 수 있지만, 텅스텐 골격의 지지 및 표면 처리는 전반적인 성능을 크게 향상시킵니다. 저항 용접에서 접착 저항은 전극과 작업물이 원활하게 분리되도록 하여 접합 품질을 향상시킵니다. 마이크로전자 패키징에서 납땜 저항은 잔류물 없이 여러 번의 납땜 작업을 수행할 수 있도록 지원합니다.

3.4 CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극 MSDS

텅스텐-구리 전극은 텅스텐과 구리를 핵심 성분으로 하는 금속 복합 소재입니다. 분말 야금, 진공 침투 등의 공정을 거쳐 제조됩니다. 텅스텐과 구리의 우수한 특성을 모두

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

갖추고 있어 산업 분야에서 널리 사용됩니다.

재료적 관점에서 텅스텐의 높은 용점(3410°C)과 높은 강도는 전극에 탁월한 고온 저항성과 구조적 안정성을 제공하여 고온 고압과 같은 혹독한 환경에서도 형태를 유지하고 변형에 강합니다. 반면 구리의 높은 전기 및 열 전도성은 전극이 열을 효율적으로 전달하고 방출할 수 있도록 하여 작동 중 발생하는 열을 빠르게 방출하고 국부적인 과열 및 성능 저하를 방지합니다. 이러한 "강력한 텅스텐, 우수한 구리"의 조합은 텅스텐-구리 전극이 순수 텅스텐의 낮은 전기 및 열 전도성이라는 단점을 극복하는 동시에 순수 구리의 부족한 고온 강도를 보완하여 독보적인 성능 이점을 제공합니다.

텅스텐-구리 전극은 적용 시나리오에 따라 유연하게 조정할 수 있습니다. 일반적인 비율로는 WCu70/30 및 WCu80/20 이 있습니다. 구리 함량이 높을수록 전기 및 열 전도성이 향상되어 높은 전기적 성능이 요구되는 분야에 적합합니다. 텅스텐 함량이 높을수록 내열성과 기계적 강도가 향상되어 고온, 고응력 작업 환경에 더욱 적합합니다. 비율을 조정하면 정밀한 성능 매칭이 가능합니다.

응용 분야의 관점에서 볼 때, 텅스텐 구리 전극은 여러 가지 고급 산업 시나리오에서 핵심적인 역할을 합니다. 전기 스파크 가공에서 방전 전극으로 사용하면 안정적인 전도도와 절삭 저항성으로 금형 강 및 시멘트 카바이드와 같은 고강도 재료를 정확하게 가공하여 작업물의 표면 정확도를 확보할 수 있습니다. 용접 분야, 특히 저항 용접 및 아크 용접에서 효율적인 전기 및 열 전도도로 용접 전류의 안정적인 전송을 보장하고 열 손실을 줄이며 납땜 접합부의 품질을 향상시킬 수 있습니다. 마이크로 전자 패키징에서 기판과 일치하는 우수한 전기 전도도와 열 팽창 계수로 인해 칩과 기판 사이의 안정적인 연결을 보장하고 전자 장비의 안정성을 높이는 상호 연결 전극으로 사용할 수 있습니다. 또한 항공 우주, 국방 및 기타 분야에서 고온 아크 접점, 고전압 스위치 및 기타 구성 요소에 자주 사용되어 극한 작업 조건에서의 성능 요구 사항을 충족합니다.

위험 개요: 본 제품은 고체 금속 복합 소재로, 본질적으로 무독성입니다. 정상적인 보관 및 사용 중에는 독성 물질이 방출되지 않습니다. 분말 형태가 아니므로 분진 흡입 위험이 없으며 폭발성이나 인화성이 없습니다. 극한 온도(예: 구리의 녹는점 1083°C 초과)에서는 구리가 녹을 수 있지만, 이 과정에서 유독 가스가 발생하지 않습니다. 고온 접촉으로 인한 화상을 입지 않도록 주의하십시오.

소방 조치: 본 제품은 불연성 및 비폭발성 제품입니다. 고온에서는 물리적 변화(예: 구리 용해)만 발생하며 유독 가스를 방출하지 않습니다. 화재 발생 시 본 제품에는 특별한 소방 조치가 필요하지 않으며, 일반적인 소방 조치만으로도 충분합니다. 화재 진압 시에는 뜨거운 용융 물질과의 접촉을 피하십시오. 이는 화상을 유발할 수 있습니다.

누출 비상 대응: 본 제품은 고체 상태이므로 누출 위험이 없습니다. 외부 충격으로 파손되거나 손상된 경우, 특별한 보호 조치 없이 파편을 수거하시면 됩니다. 파편은 재활용하거나 일반 산업 폐기물로 처리하여 환경 안전을 확보할 수 있습니다.

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

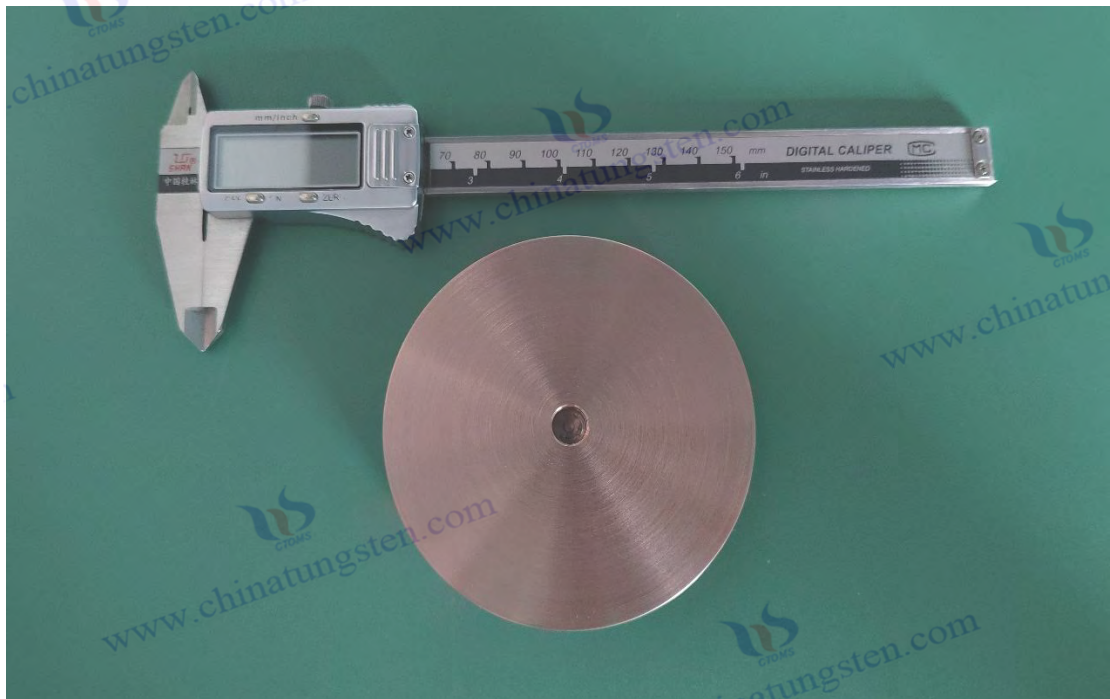
취급 및 보관: 취급 시 특별한 보호 장비는 필요하지 않습니다. 산업용 장갑을 착용하면 표면 금힘을 방지할 수 있습니다. 금속 표면의 부식을 방지하기 위해 강산 및 강염기와 같은 부식성 물질로부터 멀리하고 건조하고 통풍이 잘 되는 곳에 보관하십시오. 밀봉이나 특별한 격리는 필요하지 않습니다. 다른 산업용 자재와 함께 보관할 때는 건조하게 유지하십시오.

노출 관리 및 개인 보호구: 분말이 없으므로 특별한 호흡기 보호 장비나 분진 관리 조치는 필요하지 않습니다. 단단한 표면과의 마찰로 인한 부상을 방지하기 위해 작업 시에는 일반 산업용 장갑을 착용하는 것이 좋습니다. 고온에서 작업할 때는 단열 장갑을 착용해야 합니다.

폐기: 폐기된 전극은 금속 스크랩으로 재활용할 수 있으며, 전문 재활용 업체에서 텅스텐과 구리를 추출하여 추가 가공할 수 있습니다. 재활용이 불가능한 물질은 일반 산업 고형 폐기물로 처리되며 토양이나 수질을 오염시키지 않습니다.

운송 정보: 운송 중 특별한 제한은 없으며, 위험물 표시도 필요하지 않습니다. 포장 상태만 유지하고 심한 충돌로 인한 변형을 방지하십시오. 다른 비부식성 산업 제품과 동일한 배치로 배송 가능합니다.

규제 정보: 본 제품은 중화인민공화국의 고형 폐기물 환경오염 방지 및 관리법, 유해화학물질 안전관리조례 및 기타 관련 법률 및 규정을 준수합니다. 본 제품은 유해화학물질 또는 유독성 물질이 아니며, 생산, 판매 및 운송은 모두 국가 산업 자재 기준을 준수합니다.



CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극

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

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

4 장: 텅스텐-구리 전극의 분류

텅스텐-구리 전극은 다양한 기준에 따라 분류할 수 있습니다. 일반적인 방법에는 조성비, 적용 시나리오 및 성형 공정이 포함됩니다. 텅스텐 대 구리 함량 의 비율에 따라 고텅스텐형과 고구리형으로 나눌 수 있습니다. 고텅스텐형은 텅스텐 함량이 높고 고온 저항과 경도가 우수하며 고온 및 고응력 시나리오에 적합합니다. 고구리형(예: WCu60/40, WCu70/30)은 구리 함량이 높고 전기 및 열 전도성이 더 뛰어나며 높은 전기 효율이 요구되는 작업 조건에 적합합니다. 적용 분야에 따라 주로 EDM 전극, 용접 전극, 마이크로전자 패키징 전극 등이 있습니다. EDM 전극은 절삭 저항과 전도성을 모두 가져야 하고, 용접 전극은 전류 안정성에 중점을 두며, 마이크로전자 패키징 전극은 치수 정확도와 열 일치에 대한 엄격한 요구 사항을 갖습니다.

4.1 텅스텐 구리 전극의 조성비에 따른 분류

텅스텐-구리 전극의 조성비 중심 분류는 텅스텐과 구리 함량의 비율에 기반한 전극 분류 방법입니다. 이 분류 방법은 전극의 물리적, 기계적, 전기적 특성에 직접적인 영향을 미치며 다양한 응용 분야의 요구를 충족합니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침윤 공정으로 제조됩니다. 텅스텐은 높은 용점, 고온 저항성, 내마모성을 제공하고, 구리는 높은 전기 전도도와 열 전도도를 제공합니다. 조성비의 조정은 전극의 종합적인 성능을 결정합니다. 조성비의 차이는 주로 텅스텐 함량 수준에 반영됩니다. 조성비는 고텅스텐 함량, 중텅스텐 함량, 저텅스텐 함량의 세 가지 범주로 나뉩니다. 각 유형의 전극은 전기 스파크 가공, 저항 용접 또는 마이크로 전자 패키징과 같은 특정 목적에 맞게 최적화됩니다. 분류 기준은 미세 구조 및 제조 공정의 영향도 고려합니다. 낮은 기공률과 균일한 상 분포는 다양한 유형의 전극에서 공통적으로 나타나는 특징입니다.

4.1.1 고텅스텐 함량 전극(80%-95% 텅스텐)

텅스텐-구리 전극은 주로 텅스텐으로 구성되며, 구리 함량은 일반적으로 5%에서 20% 사이입니다. 이 전극은 텅스텐의 높은 용점(3422°C)과 경도(약 3430 HV) 덕분에 탁월한 고온 저항성과 아크 침식 저항성을 갖추고 있습니다. 분말 야금 공정을 통해 텅스텐 분말을 소량의 구리 분말과 혼합 및 압착합니다. 소결 후, 구리는 액상의 기공을 채워 치밀한 텅스텐 골격 구조를 형성합니다. 낮은 기공률은 재료 안정성을 향상시킵니다. 진공 함침 공정은 구리 침투를 더욱 최적화하고 계면 결합을 개선하여 고텅스텐 전극이 극한 조건에서도 구조적 무결성을 유지할 수 있도록 합니다.

전기 스파크 가공(EDM)에 탁월한 성능을 발휘하며, 특히 고경도 소재 가공에 적합합니다. 텅스텐의 높은 내마모성은 전극 표면 손실을 줄이고 수명을 연장합니다. 저항 용접에서 고텅스텐 함량은 고전류 단선 작업을 지원하며, 저텅스텐 전극보다 아크 침식 저항성이 훨씬 우수하여 슬래그 부착을 줄입니다. 미세 구조의 미세 입자는 열간 등방성 프레스 공정을 통해 최적화되었으며, 압축 강도가 일정 수준까지 높아 고에너지 방전 조건에 적합합니다. 그러나 고텅스텐 전극은 전기 및 열 전도도가 낮고, 낮은 구리 함량은 전류 전달 효율을 제한하므로 방열 설계와 함께 사용해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

항공우주 부품 및 고전압 스위치에도 적용됩니다. 전극의 고텅스텐 함량은 3000°C 이상의 고온 저항성을 제공하며, 니켈 도금과 같은 표면 처리는 내산화성을 더욱 향상시킵니다. 제조 공정에서 텅스텐 분말의 순도는 99.9% 이상으로 유지되어야 하며, 입자 크기는 5~15 마이크론 사이여야 일관된 성능을 보장할 수 있습니다.

4.1.2 중간 텅스텐 함량 전극(50%-80% 텅스텐)

중간 텅스텐 함량 전극은 구리 함량이 20%에서 50% 사이인 균형 잡힌 유형의 텅스텐-구리 전극입니다. 이 전극은 고온 저항과 전기 전도성 사이의 적절한 균형을 제공합니다. 분말 야금 또는 진공 침윤법으로 생산된 이 전극은 균일한 텅스텐 골격과 구리 상 네트워크를 갖는 미세 구조를 보입니다. 소결 과정에서 액체 상태의 구리가 텅스텐 입자 사이의 기공을 채웁니다. 낮은 기공률과 미세 입자 크기는 열간 등압 성형을 통해 최적화되어 재료의 기계적 강도와 전기적 특성을 향상시킵니다. 구리 함량 증가는 전기 및 열 전도성을 모두 향상시켜 중간 텅스텐 함량 전극을 다양한 응용 분야에서 다재다능하게 사용할 수 있도록 합니다.

중텅스텐 전극은 방전 가공(EDM)에 널리 사용되며, 중경도 소재의 정밀 가공에 적합합니다. 텅스텐의 내마모성과 구리의 전도성이 결합되어 전극 손실을 줄이고 가공 효율을 향상시킵니다. 저항 용접에서 중텅스텐 전극은 중전류 작동을 지원하고 고텅스텐 전극에 비해 우수한 열 관리 기능을 제공하여 열영향부를 줄이고 접합 품질을 향상시킵니다. 마이크로전자 패키징 또한 중요한 응용 분야로, 실리콘이나 세라믹 기판과 동일한 열팽창 계수를 제공하여 열 사이클링 응력을 줄이고 신뢰성을 향상시킵니다. 중텅스텐 전극의 성능은 비율과 공정에도 영향을 받습니다. 예를 들어, 70/30 WCu 비율은 내구성과 효율의 균형을 맞추는 반면, 60/40 WCu 비율은 전도성을 향상시킵니다. 고온에서는 구리 상의 연화가 안정성에 약간의 영향을 미칠 수 있지만, 텅스텐 골격이 지지 역할을 합니다. 연마 또는 도금과 같은 표면 처리는 내식성을 향상시키고 사용 수명을 연장할 수 있습니다.

4.1.3 저텅스텐 함량 전극(텅스텐 20%-50%)

저텅스텐 전극(20%-50% 텅스텐)은 주로 구리 기반 텅스텐-구리 전극으로 구리 함량은 50%~80%입니다. 이 전극은 구리의 높은 전기 전도도(5.8×10^7 S/m)와 열 전도도(약 $400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)로 인해 우수한 전기적 및 열적 관리 특성을 보입니다. 분말 야금 공정을 통해 텅스텐 분말은 높은 비율의 구리 분말과 혼합됩니다. 소결 후 구리는 연속적인 네트워크를 형성합니다. 낮은 기공률과 균일한 상 분포는 열간 등방성 가압 성형을 통해 최적화되어 전반적인 재료 성능이 향상됩니다. 액체 구리를 침투시키는 진공 침투 공정은 전도 경로의 무결성을 더욱 개선하여 저텅스텐 전극이 고효율 전도에서 탁월할 수 있도록 합니다.

저텅스텐 전극은 주로 저항 용접의 스팟 용접이나 심 용접과 같이 높은 전기 및 열 전도성이 요구되는 경우에 사용됩니다. 구리의 고성능은 저항 열 효과를 줄이고 접합부의 품질을 향상시킵니다. 전기 스파크 가공에서 저텅스텐 전극은 저경도 재료의 황삭 가공에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적합합니다. 구리의 연성은 빠른 열 분산을 지원하고 국부 과열을 줄입니다. 마이크로전자 패키징에서 열팽창 계수는 기관과 일치하며, 구리의 높은 열전도도는 칩 방열을 지원하고 수명을 연장합니다. 그러나 저텅스텐 전극은 고온 저항과 아크 침식 저항성이 약하며, 낮은 텅스텐 비율은 극한 조건에서의 안정성을 제한합니다. 따라서 방열 또는 저에너지 방전과 함께 사용해야 합니다.

제조 공정에서 구리 분말의 순도는 99.9% 이상으로 유지되어야 하며, 입자 크기는 5~15 마이크론 사이여야 합니다. 텅스텐 분말의 입자 크기는 충전 효율을 최적화하기 위해 약간 더 큼니다. 금도금과 같은 표면 처리는 내식성을 향상시키고 습한 환경에서의 사용 수명을 연장할 수 있습니다.

4.2 텅스텐-구리 전극의 응용 시나리오 중심 분류

텅스텐-구리 전극의 응용 시나리오 중심 분류는 특정 사용 환경 및 기능적 요구 사항을 기반으로 전극을 분류하는 방법입니다. 이 분류 방법은 다양한 산업 분야에서 전극의 목표 설계 및 성능 최적화를 강조합니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침투 공정으로 제조됩니다. 텅스텐의 높은 용점과 경도는 구리의 높은 전기 전도도 및 열 전도도와 결합됩니다. 응용 시나리오에 따라 비율과 미세 구조를 조정하여 기공률이 낮고 균일성이 높은 재료를 형성합니다. 분류 기준은 방전 가공, 고전압 전기 제품 및 용접 분야를 포함합니다. 각 유형의 전극은 아크 침식 저항성, 전기 전도도 효율 또는 열 관리 기능과 같은 특정 공정 및 성능 요구 사항에 맞게 최적화됩니다.

4.2.1 EDM 용 전극

방전 가공(EDM)용으로 특별히 설계된 전극은 텅스텐-구리 전극으로, 아크 내식성, 기계적 강도 및 가공 정밀도를 위해 특별히 설계되었습니다. 이 전극은 일반적으로 고품질 텅스텐(예: WCu 80/20 또는 WCu 90/10)을 사용합니다. 텅스텐 분말은 분말 야금 공정을 통해 소량의 구리 분말과 혼합됩니다. 소결 후, 구리는 액상의 기공을 채워 치밀한 텅스텐 골격 구조를 형성합니다. 낮은 기공률은 고온 충격에 대한 내성을 향상시킵니다. 진공 함침 공정은 구리 침투를 더욱 최적화하고 계면 결합을 개선하여 고에너지 방전 시 전극 안정성을 보장합니다. 미세 구조의 미세 입자는 열간 등방성 소성(HIP)을 통해 최적화되어 압축 강도와 내마모성을 향상시킵니다.

EDM 용 전극의 주요 장점은 아크 침식에 대한 내성입니다. 텅스텐은 높은 용점(3422°C)과 경도(약 3430 HV)를 가지고 있어 수천 °C 의 방전 온도를 견뎌내 표면 마모를 줄이고 텅스텐 카바이드 및 티타늄 합금과 같은 고경도 소재의 가공에 적합합니다. 표면 거칠기는 마이크론 단위로 제어되어 가공 정밀도가 보장됩니다. 미세 입자 구조는 복잡한 형상의 가공을 지원합니다. 실제 적용 시, 이 전극은 고에너지 방전에도 견딜 수 있어 수명을 연장 하고 교체 빈도를 줄여줍니다.

그러나 구리 함량이 낮으면 전기 및 열 전도성이 제한될 수 있으므로, 국부 과열을 방지하기 위한 방열 설계가 필요합니다. 연마와 같은 표면 처리는 표면 품질을 향상시켜

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정밀 금형 제작에 적합합니다.

4.2.2 고전압 전기제품용 전극

고전압 스위치 및 전기 접점 용으로 특별히 설계된 텅스텐-구리 전극은 고온 내성, 아크 내식성, 전도성 안정성을 향상시킵니다. 이 전극은 일반적으로 중간에서 높은 텅스텐 함량 비율(예: WCu 70/30 또는 WCu 85/15)을 사용하며 분말 야금 공정을 통해 생산됩니다. 텅스텐 분말은 구리 분말과 혼합하여 소결하면, 구리가 액상의 기공을 채워 균일한 상 네트워크를 형성합니다. 낮은 기공률은 재료의 아크 내성을 향상시킵니다. 진공 함침 공정은 구리 침투를 최적화하며, 열간 등방압 성형(HIP)은 계면 결합을 더욱 개선하여 고전압 단선 시 전극의 신뢰성을 유지합니다. 미세 구조의 미세 입자는 높은 압축 강도를 지원하여 잦은 기계적 작용에 적합합니다.

고전압 전기 제품용 전극의 특성은 고전압 스위치에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 텅스텐의 높은 용점(3422°C)은 아크 열로부터 보호하고, 아크 부식 저항성은 표면 부식을 줄이고 수명을 연장합니다. 구리의 높은 전도성은 효율적인 전류 전달을 보장하여 고전류 단선 시나리오에 적합합니다. 열팽창 계수는 기관과 일치하여 열 사이클링 응력을 줄입니다. 최적화된 미세 구조는 저항 변동성을 줄이고 안정적인 전기적 성능을 지원합니다. 실제 응용 분야에서 이 전극은 빈번한 스위칭 작동을 견뎌내 고장률을 줄이며, 전력 장비 및 산업용 제어 시스템에 널리 사용됩니다.

제조 공정에서 텅스텐 분말과 구리 분말의 입자 크기 비율은 균일한 상 분포를 위해 1:2 에서 1:3 사이로 조절해야 합니다. 니켈 도금과 같은 표면 처리는 내산화성을 향상시키고 습하거나 산업 환경에 대한 적응성을 높일 수 있습니다. 향후 조성비를 조정하거나 계면활성제(예: 몰리브덴) 를 도입함으로써 아크 저항과 전기 전도도를 더욱 향상시켜 스마트 그리드 장비와 같이 고전압 또는 복잡한 전기적 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

4.2.3 용접 현장의 전극

용접 용으로 특별히 설계된 텅스텐-구리 전극은 전기 전도성, 열 전도성 및 점착 방지 특성을 향상시킵니다. 이 전극은 일반적으로 저함량에서 중함량의 텅스텐 함량(예: WCu 60/40 또는 WCu 70/30)을 사용합니다. 텅스텐 분말은 분말 야금 공정을 통해 고함량의 구리 분말과 혼합됩니다. 소결 후 구리는 연속적인 네트워크를 형성합니다. 낮은 기공률은 열간 등방성 가압 성형을 통해 최적화되어 열 관리 및 전기적 성능을 향상시킵니다. 진공 침투 공정은 액상 구리 침투를 통해 전도 경로의 무결성을 향상시킵니다. 미세 구조의 미세 입자는 압축 강도와 인성을 유지하여 고압 용접 환경에 적합합니다.

용접에서 전극의 주요 장점은 전기 및 열 전도성에 있습니다. 구리는 높은 전기 전도도(5.8×10^7 S/m)와 열 전도도(약 400 W/m·K) 를 가지고 있어 저항 가열 효과를 줄이고, 접합 품질을 향상시키며, 열을 고르게 분산시켜 열영향부(HAZ)를 줄여 점용접 또는 심용접에 적합합니다. 텅스텐은 고온 저항(3422°C)으로 구조적 지지력을 제공하며,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면 처리(연마 등)를 통해 접착 방지 특성을 더욱 최적화하여 슬래그 부착을 줄이고 전극 수명을 연장합니다. 실제 적용 시, 이 전극은 적당한 전류를 견딜 수 있어 효율적인 용접을 지원하며 자동차 제조 및 전자 조립에 널리 사용됩니다.

제조 공정에서 구리 분말의 순도는 99.9%를 넘어야 하며, 입자 크기는 5~15 마이크론이어야 합니다. 텅스텐 분말은 충전 효율을 최적화하기 위해 입자 크기가 약간 더 커야 합니다. 고온과 같은 높은 작동 온도는 구리 상(phase)을 연화시켜 통합 방열 설계가 필요할 수 있습니다. 향후 나노 구리 분말 또는 다상 설계의 도입을 통해 전도성 및 접착 방지 특성이 더욱 향상되어 경량 구조 부품과 같이 더 높은 효율이나 복잡한 용접이 필요한 응용 분야를 구현할 수 있을 것입니다.

4.2.4 항공우주 및 군사용 특수 전극

항공우주 및 군사 분야를 위해 특별히 설계된 텅스텐-구리 전극은 고온 내성, 기계적 강도 및 극한 환경에서의 신뢰성을 중시합니다. 이 전극은 일반적으로 고함량의 텅스텐을 사용하며 분말 야금 또는 진공 함침 방식으로 제조됩니다. 텅스텐 분말을 소량의 구리 분말과 혼합한 후 소결합니다. 구리는 액체 형태로 기공을 채워 견고한 텅스텐 골격 구조를 형성합니다. 제조 공정 중 열간 등방성 소결(HIP)을 통해 미세 구조를 최적화하여 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 구현하여 고응력 또는 고온 조건에서 전극의 안정성을 보장합니다. 구리를 첨가하면 전기 전도도와 열 관리가 최적화되어 복잡한 작동 환경에도 적용 가능합니다. 항공우주 및 군수 산업에서 특수 전극의 주요 응용 분야로는 우주선의 열 보호 시스템 및 군용 장비의 전기 접점 등이 있습니다. 텅스텐은 높은 용점을 가지고 있어 뛰어난 고온 저항성을 제공하여 고에너지 충격이나 극한의 열 부하를 견디는 데 적합합니다. 전극의 기계적 강도는 고정밀 가공 및 장기 사용을 지원하며, 미세 구조의 균일성은 응력 집중을 줄이고 피로 저항성을 향상시킵니다. 군수 분야에서 전극은 극심한 진동과 부식 환경을 견뎌야 하는 고성능 레이더 또는 무기 시스템의 핵심 부품에 자주 사용됩니다. 도금과 같은 표면 처리는 내후성을 더욱 향상시킵니다. 제조 공정은 일관된 성능을 보장하기 위해 원료 순도 및 입자 크기 제어에 중점을 둡니다. 또한, 사용 시나리오에 따라 전극은 우수한 아크 침식 저항성과 열 안정성을 가져야 합니다. 구리의 열전도도는 열을 빠르게 분산시키고 국부 과열 위험을 줄이는 데 도움이 됩니다.

4.3 형태학적 및 구조적 특성에 따른 텅스텐-구리 전극의 분류

거시 형태 등 다양한 측면을 포괄하는 다양한 응용 분야에 대한 적응성을 제공하는 핵심 기반입니다. 이러한 특성은 전극의 설치 적응성, 성능 효율성 및 가공 적합성에 직접적인 영향을 미칩니다. 따라서 형태적 및 구조적 특성에 따른 분류는 산업적 선택을 위한 가장 직관적인 방법 중 하나입니다.

4.3.1 블록 전극

블록 전극은 블록 형태로 설계된 텅스텐-구리 전극으로, 대면적 접촉 또는 고강도 지지가 필요한 응용 분야에 적합합니다. 이 전극은 텅스텐과 구리 분말을 특정 비율로 혼합한 후

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

성형하는 분말 야금 공정을 사용하여 제조됩니다. 소결 과정에서 구리는 액상의 기공을 채워 치밀한 미세 구조를 형성합니다. 열간 등방성 성형은 블록 전극의 균일성과 낮은 기공률을 더욱 최적화하여 기계적 하중 하에서 재료의 안정성을 보장합니다. 블록 설계는 가공을 용이하게 하고 필요에 따라 다양한 크기로 절단 또는 성형할 수 있어 다양한 응용 분야 요구 사항에 맞게 조정할 수 있습니다.

블록 전극의 특성은 EDM 에서 탁월한 성능을 발휘하며, 대형 가공물이나 복잡한 형상의 가공에 적합합니다. 또한, 넓은 접촉 면적은 안정적인 방전 조건을 제공합니다. 미세 구조의 균일한 상 분포는 아크 침식 저항성을 향상시키고, 텅스텐의 경도는 장기 사용을 지원하며, 구리의 전도성은 전류 전달을 최적화합니다. 제조 과정에서 원료의 혼합 균일성과 소결 파라미터 제어는 블록 전극의 성능에 직접적인 영향을 미치며, 연마와 같은 표면 처리는 가공 정확도를 향상시킬 수 있습니다. 용접 분야에서 블록 전극은 고압 및 열 사이클을 견디는 주형 또는 지지체로 사용될 수 있습니다. 향후 프레스 공정을 조정하거나 다상 설계를 도입하여 블록 전극의 기계적 특성과 적용 범위를 더욱 향상시킬 수 있습니다.

4.3.2 막대 전극

막대 전극은 막대 형태로 설계된 텅스텐-구리 전극으로, 정밀한 위치 결정이나 섬세한 가공이 필요한 분야에 적합합니다. 이 전극은 분말 야금 또는 진공 함침 공정을 사용하여 제조됩니다. 텅스텐과 구리 분말을 혼합하여 막대 형태로 압축합니다. 소결 과정에서 구리가 기공을 채워 가늘고 조밀한 구조를 형성합니다. 열간 등방성 가압 성형은 막대 전극의 미세 구조를 최적화하여 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 구현하고, 고정밀 작업 시 재료 안정성을 보장합니다. 막대 디자인은 설치 및 가이드를 용이하게 하여 심공 가공이나 좁은 공간에서의 작업에 특히 적합합니다.

막대 전극은 방전 가공(EDM)에 탁월하며, 정밀 가공이나 미세 부품 제조에 적합합니다. 가느다란 형태는 고정밀 방전을 지원하고, 텅스텐의 내마모성은 전극 마모를 줄여줍니다. 미세 구조의 구리 상은 전기 및 열 전도성을 제공하여 안정적인 전류 전달과 열 관리를 지원합니다. 마이크로전자 패키징에서 막대 전극의 형태는 기관과의 정렬을 용이하게 하여 열 팽창을 조절하고 응력 집중을 줄여줍니다. 제조 과정에서는 기계적 강도와 가공성을 보장하기 위해 막대 전극의 길이와 직경 비율을 제어해야 합니다. 연삭과 같은 표면 처리는 표면 품질을 향상시킬 수 있습니다.

4.3.3 시트 전극

시트 형태로 설계된 텅스텐-구리 전극으로, 대면적 접촉 또는 균일한 방전이 필요한 응용 분야에 적합합니다. 이 전극은 텅스텐과 구리 분말을 특정 비율로 혼합하여 얇은 시트 형태로 압축하는 분말 야금 공정을 사용하여 제조됩니다. 소결 과정에서 구리는 액체 형태로 기공을 채워 치밀한 미세 구조를 형성합니다. 열간 등방성 성형은 시트 전극의 균일성과 낮은 기공률을 더욱 최적화하여 기계적 하중 및 열 사이클링 시 재료의 안정성을 보장합니다. 시트 디자인은 넓은 표면적을 제공하여 작업물 또는 기관과의 밀착

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

접촉을 용이하게 하며, 균일한 열 분배 또는 높은 전류 전달이 필요한 가공 요건에 적합합니다.

시트 전극은 방전 가공(EDM)에서 탁월한 성능을 발휘하며, 평평한 가공물이나 대면적 방전이 필요한 작업 환경에 적합합니다. 얇은 시트 구조는 효율적인 아크 분산을 지원하고, 텅스텐의 내마모성과 내아크 침식성은 표면 손실을 줄이고 수명을 연장합니다. 미세 구조의 구리 상은 전기 및 열 전도성을 제공하여 안정적인 전류 전달과 열 분산을 보장하고 국부 과열 위험을 줄입니다. 용접 분야에서 시트 전극은 전극관 또는 방열관으로 사용되어 고압 및 열 사이클을 견뎌내고 접합 품질을 향상시킬 수 있습니다. 준비 과정에서는 프레스 공정에서 두께 균일도를 제어해야 합니다. 원료의 혼합 균일성과 소결 조건은 시트 전극의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 연삭이나 연마와 같은 표면 처리는 접촉 정확도를 향상시킬 수 있습니다. 마이크로일렉트로닉스 패키징 및 열 관리에도 적용됩니다. 얇은 시트 전극 설계는 칩이나 기관과의 접합을 용이하게 하며, 열팽창 매칭은 응력 집중을 줄이고 신뢰성을 향상시킵니다. 시트 전극의 유연성 덕분에 복잡한 형상에도 적용 가능하지만, 제조 과정에서 시트 변형을 방지하기 위해 주의를 기울여야 합니다.

4.3.4 특수 모양의 전극

특수 형상 전극은 텅스텐-구리 전극 중 가장 복잡한 유형입니다. 특정 응용 분야의 기능적 요구 사항에 따라 완벽하게 맞춤 제작되어 블록이나 막대와 같은 일반적인 형태의 한계를 뛰어넘고, 특수 형상 표면, 계단형, 다공성 형상, 중공 격자, 복합 표면 등 다양한 비표준 구조를 포괄합니다. 이러한 유형의 전극 설계는 최종 제품의 작동 매개변수, 조립 공간 및 성능 목표와 긴밀하게 통합되어야 합니다. 초기 모델링부터 최종 성형까지 여러 단계의 시뮬레이션 검증이 필요하며, 매우 높은 가공 정밀도가 요구됩니다. 미세한 편차라도 후속 공정의 안정성이나 최종 제품의 성능 지표에 직접적인 영향을 미칠 수 있습니다.

형태 설계 측면에서 특수 형상 전극의 핵심은 "기능 지향성"에 있습니다. 예를 들어, 자동차 커버 금형의 복잡한 캐비티 가공에서 특수 형상 텅스텐 구리 전극은 필렛, 깊은 홈, 경사면과 같은 세부 사항을 포함하여 캐비티의 곡면 윤곽을 완벽하게 재현해야 하며, 가공물 성형 시 구배 각도까지 시뮬레이션해야 합니다. 이러한 "거울상 복제" 형태 설계는 전기 스파크 가공 시 방전 간격의 균일성을 보장하고 궁극적으로 자동차 커버의 표면 마감 및 조립 정확도를 보장합니다. 항공기 엔진 연소실의 화염관 가공에서 특수 형상 전극은 종종 조밀한 미세 홈이 있는 곡면 구조로 설계됩니다. 이러한 미세 홈은 화염관의 냉각 채널과 일대일 대응합니다. 방전 가공으로 형성된 채널은 엄격한 치수 일관성을 충족해야 하며, 그렇지 않으면 불균일한 국부 냉각이 발생하고 엔진 작동 중 열 피로 파손이 발생할 수 있습니다.

계단형 특수 형상 전극은 다중 스테이션 가공 시나리오에서 널리 사용되며, 각 단계 구간은 서로 다른 가공 깊이 또는 정밀도 요구 사항에 부합합니다. 예를 들어, 휴대폰 중간 프레임의 통합 가공에서 계단형 전극의 첫 번째 구간은 대량의 소재를 제거하기

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

위한 거친 가공에 사용되고, 두 번째 구간은 직경을 줄여 미세 트리밍을 수행하며, 세 번째 구간은 마지막 아크 전환을 통해 라운딩을 완료합니다. 이러한 "일회 클램핑, 다단계 성형" 설계는 공구 교체 횟수를 줄이고 가공 효율을 향상시키며 다중 클램핑으로 인한 위치 오차를 방지할 수 있습니다. 각 단계의 높이 차이와 직경 차이는 소재 경도 및 가공 공차를 기반으로 정확하게 계산되어야 합니다. 특정 단계의 크기에 편차가 있을 경우, 후속 가공 크기의 누적 오차가 기준을 초과할 수 있습니다.

다공성 형상 전극의 설계는 효율적인 방열과 경량 설계의 균형을 맞추는 데 중점을 둡니다. 신에너지 자동차 모터의 고정자 제조 시, 전극에는 벌집 모양의 관통 구멍이 필요합니다. 이 구멍은 전극의 무게를 줄일 뿐만 아니라 방전으로 발생하는 열을 내부 공기 흐름으로 빠르게 방출시켜 가공 정밀도에 영향을 줄 수 있는 열 변형을 방지합니다. 원자력 발전소용 열교환기 부품 가공 시, 다공성 형상 전극의 관통 구멍은 열교환기의 튜브 다발 구멍과 완벽하게 일치해야 합니다. 그렇지 않으면 후속 튜브 조립 시 간격이 불균일해져 열전달 효율이 저하됩니다.

특수 형상 전극의 성형 공정은 형태적 정확도에 결정적인 역할을 합니다. 와이어 절단 공정은 복잡한 윤곽의 2 차원 절단을 구현할 수 있으며 평평한 특수 형상 구조에 적합합니다. 전기 스파크 성형 공정은 3 차원 곡면을 가공하고, 전극과 공작물의 동기 운동을 통해 복잡한 형상을 재현하며, 표면 조도를 보장합니다. 내부 채널이 있는 다공성 특수 형상 전극의 경우, 구멍의 수직성과 관통력을 확보하기 위해 심공 드릴링, 레이저 드릴링 등의 공정을 결합해야 합니다. 가공 중에는 정밀 측정 장비를 사용하여 형태적 오류를 실시간으로 감지해야 합니다. 특정 형상의 치수가 허용 오차를 벗어나는 경우, 가공 매개변수를 즉시 조정해야 하며, 그렇지 않으면 전극 전체가 폐기됩니다. 이처럼 정밀성을 극도로 추구하기 때문에 특수 형상 전극의 제조 비용은 일반 형상 전극보다 훨씬 높지만, 고급 제조 분야에서 필수적인 핵심 부품으로 자리매김합니다.

4.4 텅스텐 구리 전극의 성능 지표 기반 분류

텅스텐-구리 전극의 성능 중심 분류는 특정 성능 요건을 기반으로 전극을 분류하며, 전도성, 고온 저항성, 기계적 강도와 같은 핵심 지표의 최적화를 강조합니다. 이 분류 방법은 텅스텐과 구리의 비율 및 제조 공정을 조정하여 다양한 성능 요건에 맞는 특수 전극을 설계합니다. 텅스텐-구리 전극의 미세 구조는 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통해 최적화되어 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 보입니다. 열간 등압 성형은 성능의 일관성을 더욱 향상시킵니다. 분류 기준에는 높은 전도성, 고온 저항성, 높은 기계적 강도가 포함되며, 각 유형의 전극은 특정 응용 분야에서 탁월한 성능을 발휘합니다.

4.4.1 고전도성 전극

고전도 전극은 효율적인 전류 전달을 위해 설계된 텅스텐-구리 전극으로, 최적의 전도도와 저항률을 강조합니다. 이 전극은 일반적으로 텅스텐 함량이 낮습니다. 텅스텐 분말은 분말 야금 공정을 통해 고비용의 구리 분말과 혼합되며, 구리는 소결 시 연속적인 전도성 네트워크를 형성합니다. 미세 구조는 열간 등방성 가압 성형(HIP)을 통해

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

최적화되어 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 달성합니다. 구리의 높은 전도도(순수 구리 수준에 가까움)는 효율적인 전류 전달을 보장합니다. 진공 함침 공정은 액체 구리의 함침을 통해 전도성 경로의 무결성을 더욱 향상시켜 고전도 전극이 전기 응용 분야에서 탁월한 성능을 발휘할 수 있도록 합니다. 고전도성 전극의 주요 응용 분야는 저항 용접 및 마이크로전자 패키징입니다. 구리의 높은 전도성은 안정적인 전류 전달을 지원하고, 저항 가열 효과를 줄이며, 접합 품질과 회로 연결 효율을 향상시킵니다. 저항 용접에서 전극은 적당한 전류를 견디고, 열을 고르게 분산시키며, 열영향부를 줄여 점용접이나 심용접 작업에 적합합니다. 마이크로전자 패키징에서 고전도성 전극의 낮은 저항률은 효율적인 신호 전달을 지원하는 반면, 구리의 열전도도는 칩의 열 방출을 돕고 신뢰성을 향상시킵니다. 미세 구조의 균일한 구리 상 네트워크는 전자 산란을 감소시킵니다. 제조 공정에서 구리 분말의 순도는 높아야 하며, 일관된 성능을 보장하기 위해 입자 크기는 특정 범위 내에서 제어되어야 합니다.

고온과 같은 작동 조건은 구리 상을 연화시켜 전도성 안정성에 영향을 미칠 수 있습니다. 성능 유지를 위해서는 방열 설계 또는 표면 처리(예: 금도금)가 필요합니다. 표면 처리는 또한 내식성을 향상시키고 습한 환경에서의 사용 수명을 연장할 수 있습니다. 고전도성 전극은 고주파 또는 고전류 환경에서 탁월한 성능을 발휘하며 전자 장비 및 자동차 제조에 널리 사용됩니다.

4.4.2 아크 부식 방지 전극

고에너지 아크 환경에 적합하도록 특별히 설계된 텅스텐-구리 전극은 아크 부식 저항성과 표면 안정성을 향상시킵니다. 이 전극은 일반적으로 고품질의 텅스텐을 사용합니다. 텅스텐 분말은 분말 야금 공정을 통해 소량의 구리 분말과 혼합됩니다. 소결 후, 구리는 액상의 기공을 채워 견고한 텅스텐 골격 구조를 형성합니다. 미세 구조는 열간 등방성 가압 성형(HIP)을 통해 최적화되어 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 보입니다. 텅스텐은 높은 용점과 경도를 가지고 있어 탁월한 내아크성을 제공합니다. 액체 구리를 침투시키는 진공 함침 공정은 계면 결합을 더욱 강화하여 반복 방전 시 전극의 내구성을 보장합니다.

아크 내식성 전극의 주요 응용 분야는 전기 스파크 가공 및 고전압 스위치입니다. 텅스텐의 높은 용점은 수천 도의 고온 아크에 대한 내성을 제공하고, 표면 용융 또는 증발을 줄이며, 사용 수명을 연장합니다. 전기 스파크 가공에서 전극은 고경도 재료를 가공하고, 침식 손실을 줄이며, 가공 정밀도를 유지할 수 있습니다. 고전압 스위치에서 전극의 아크 내성은 빈번한 전류 차단을 지원하고 표면 손상을 줄입니다. 미세 구조의 균일한 텅스텐 상 네트워크는 열 응력 집중을 줄이고, 연마 또는 도금과 같은 표면 처리를 통해 내산화성을 더욱 향상시키고 산업 환경에 적응할 수 있습니다. 제조 공정에서 텅스텐 분말의 순도는 높은 수준에 도달해야 하며, 성능의 일관성을 보장하기 위해 입자 크기는 특정 범위 내에서 제어되어야 합니다. 또한 고에너지 방전이 필요한 특수 응용 분야에도 사용됩니다. 구리의 열전도도는 열 분산을 돕고 국부 과열 위험을 줄입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.4.3 고강도 전극

높은 기계적 응력 환경에 적합하도록 특별히 설계된 텅스텐-구리 전극은 압축 강도와 변형 저항성을 향상시킵니다. 이 전극은 일반적으로 중간에서 높은 텅스텐 함량(예: WCu 85/15 또는 WCu 70/30)을 사용하며 분말 야금 공정을 통해 생산됩니다. 텅스텐과 구리 분말을 혼합하고 압축하면 소결 과정에서 구리가 기공을 채워 치밀한 미세 구조를 형성합니다. 열간 등방성 가압 성형은 계면 결합을 최적화하여 기공률이 낮고 상 분포가 균일한 미세 구조를 형성합니다. 텅스텐 골격은 높은 압축 저항성을 제공합니다. 액체 구리를 침투시키는 진공 침투 공정은 재료의 전반적인 강도를 더욱 향상시켜 고부하 작업에 적합합니다.

고강도 전극의 주요 응용 분야로는 전기 스파크 가공(EDM) 및 고압 용접 시 벌크 소재 제거가 있습니다. 텅스텐의 높은 경도는 기계적 충격에 대한 저항성을 제공하는 반면, 구리의 연성은 응력 분포를 최적화하고 균열 발생을 줄입니다. 마이크로전자 패키징에서 고강도 전극은 열 사이클링 및 기계적 클램핑 응력을 견뎌 신뢰성을 향상시킵니다. 미세 구조의 미세 입자는 피로 저항성을 향상시킵니다. 균일한 상 분포를 보장하기 위해 제조 공정에서 텅스텐과 구리 분말의 입자 크기 비율을 일치시켜야 합니다. 연삭과 같은 표면 처리는 내마모성을 향상시키고 서비스 수명을 연장할 수 있습니다.

고온과 같은 작동 조건은 구리 상의 안정성에 영향을 미칠 수 있으므로, 성능 유지를 위한 방열 설계가 필요합니다. 고강도 전극은 고응력 환경에서 탁월한 성능을 발휘하며 항공우주 부품 및 산업용 금형에 널리 사용됩니다.

4.4.4 고내열 전극

극한 고온 환경을 위해 특별히 설계된 텅스텐-구리 전극은 고온 안정성과 열 관리 기능을 강조합니다. 이 전극은 일반적으로 고함량 텅스텐(예: WCu 90/10 또는 WCu 85/15)을 사용하며 분말 야금 공정을 통해 생산됩니다. 텅스텐 분말은 소량의 구리 분말과 혼합됩니다. 소결 후, 구리는 액상의 기공을 채워 견고한 텅스텐 골격 구조를 형성합니다. 미세 구조는 열간 등방성 가압 성형(HIP)을 통해 최적화되어 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 달성합니다. 텅스텐의 높은 용점은 탁월한 열 안정성을 제공합니다. 액체 구리를 침투시키는 진공 침투 공정은 열전도 경로의 무결성을 향상시켜 전극이 고온에서도 성능을 유지하도록 합니다.

고내열 전극의 주요 응용 분야로는 고온 센서 및 항공우주 열 보호 시스템이 있습니다. 텅스텐의 높은 녹는점은 수천 도의 고온 환경을 견딜 수 있으며, 구리의 열전도도는 열 분산을 촉진하여 국부 과열 위험을 줄여줍니다. 마이크로전자 패키징에서 전극의 열 안정성은 고온 작동 시 칩의 신뢰성을 보장하고, 열팽창 매칭은 응력 집중을 줄여줍니다. 미세 구조의 균일한 텅스텐 상 네트워크는 열 피로를 감소시키고, 니켈 도금과 같은 표면 처리는 내산화성을 향상시키고 습한 환경이나 산업 환경에 적응할 수 있도록 합니다. 제조 공정에서 텅스텐 분말의 순도는 높은 수준에 도달해야 하며, 일관된 열 성능을 보장하기 위해 입자 크기는 일정 범위 내에서 제어되어야 합니다. 또한, 높은 열 부하가

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

필요한 특수 응용 분야도 사용 가능합니다. 구리 상은 고온에서 연화될 수 있지만, 텅스텐 골격은 지지 역할을 합니다.

4.5 미세구조에 따른 텅스텐-구리 전극 분류

미세 구조는 제조 공정에 의해 결정되며, 텅스텐-구리 두 상의 분포 상태와 결합 방식을 반영합니다. 미세 구조는 주로 균일 분산형, 골격 충전형, 그리고 구배 분포형으로 나뉩니다. 다양한 구조는 전극의 전기 전도도, 열 전도도 및 기계적 특성에 상당한 영향을 미칩니다.

4.5.1 균일하게 분산된 전극

균일 분산 전극은 텅스텐-구리 전극 중 미세 구조적으로 가장 균형 잡힌 유형입니다. 이 전극의 핵심 특징은 텅스텐 입자와 구리 상의 고도로 균일한 분포에 있습니다. 이 구조에서 작은 텅스텐 입자는 불연속적인 형태로 구리 매트릭스에 고르게 박혀 있습니다. 텅스텐 입자의 국부적인 응집이나 구리 상의 분리 및 응집은 발생하지 않습니다. 두 상 사이의 계면은 분말 야금 공정에서 고온 소결을 통해 단단히 결합되어 "내 안의 너, 네 안의 나"와 같은 미세한 형태를 나타냅니다. 이 구조는 단일 금속의 특성 한계를 극복하여 텅스텐의 고온 저항성과 구리의 전기 및 열 전도성이 시너지 효과를 발휘하도록 하는 동시에 불균일한 성분 분포로 인한 성능 저하를 방지합니다.

이러한 균일한 분산 구조를 달성하는 핵심은 제조 공정의 정밀한 제어에 있습니다. 첫째, 텅스텐 분말과 구리 분말은 볼 밀링 혼합 공정을 통해 심층 가공되어야 합니다. 두 분말이 완전히 접촉하고 기계적 힘의 작용으로 미세화되어 균일한 조성의 혼합 분말을 형성합니다. 그런 다음, 혼합 분말을 균일한 가압 공정을 통해 블랭크로 가압하여 블랭크의 모든 부분에 압력이 고르게 전달되도록 하여 국소적인 밀도 차이를 방지합니다. 마지막으로, 소결 단계에서 온도와 유지 시간을 정밀하게 제어하여 계면에서 텅스텐과 구리의 확산 및 용합을 촉진하여 안정적인 결합 상태를 형성합니다. 전체 공정은 불순물의 혼합이나 공정 변수의 변동을 엄격히 방지해야 합니다. 그렇지 않으면 균일성이 손상될 수 있습니다. 예를 들어, 볼 밀링 시간이 부족하면 분말의 불균일한 혼합이 발생하고, 소결 온도가 너무 낮으면 계면 결합 강도에 영향을 미쳐 미세 구조에 결함이 발생합니다.

균일한 분산 구조가 제공하는 전극의 핵심 장점은 성능의 일관성입니다. 거시적인 관점에서 전극의 전도도, 열전도도, 경도 및 기타 지표는 여러 영역에서 안정적으로 유지되며 위치 변화에 따라 크게 변동하지 않습니다. 이러한 특성은 정밀 방전 가공(EDM) 분야와 같이 성능 균일성에 대한 엄격한 요구 사항이 있는 환경에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 전극과 공작물이 고주파 방전을 수행할 때, 균일한 미세 구조는 전류 밀도가 전극 표면에 고르게 분포되도록 보장하여 국부적인 저항 차이로 인한 방전 에너지 집중을 방지합니다. 이를 통해 공작물 표면의 불균일성이나 탄 자국을 줄이고 가공 표면의 균일한 마감을 보장합니다. 장기간 연속 가공에서도 이러한 균일성은 방전 매개변수의 안정성을 유지하고 전극 성능 변동으로 인한 공정 편차를 줄일 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고주파 용접 분야에서 균일하게 분산된 전극의 장점 또한 중요합니다. 용접 공정 중 전극은 고주파 전류를 용접 부위에 안정적으로 전달하고 저항열을 통해 재료의 용융을 달성해야 합니다. 전극 미세 구조가 불균일하면 국부적인 고저항 영역에서 과도한 열이 발생하여 용접부가 과열되거나 심지어 고착될 수 있습니다. 반면 저저항 영역에서는 열이 충분하지 않아 냉용접이 발생할 수 있습니다. 균일하게 분산된 구조는 전류 전달 과정 동안 연속적이고 균일한 구리 상 전도 네트워크를 통해 전류가 고르게 분산되도록 하여 용접 부위의 열이 안정적으로 유지되도록 합니다. 이를 통해 용융된 코어가 완전히 형성되고 과열로 인한 손상이 방지됩니다. 동시에, 균일하게 분산된 텅스텐 입자는 전극에 일관된 기계적 지지력을 제공하여 반복적인 압력 접촉 시 국부적인 변형을 방지하고 전극의 수명을 연장합니다. 이러한 구조의 열 관리 이점은 무시할 수 없습니다. 고전력 전자 장치에서 텅스텐-구리 전극은 종종 방열판 역할을 합니다. 균일한 열전도도 네트워크는 전극 전체의 핫스팟에서 발생하는 열을 빠르고 고르게 확산시켜 방열판을 통해 방출함으로써 국부적인 열 축적 및 소자 성능 저하를 방지합니다. 온도 변화가 심한 환경에서도 균일한 미세 구조는 열팽창 차이로 인한 내부 응력을 줄여 전극 균열 위험을 낮춥니다.

4.5.2 골격으로 채워진 전극

스켈레톤 충전 전극은 독특한 구조 설계를 통해 시너지 효과를 발휘하는 텅스텐-구리 복합 소재입니다. 핵심 특징은 "텅스텐 스켈레톤-구리 충전"의 상호 침투형 네트워크 구조를 형성하는 것입니다. 이 구조에서 텅스텐은 건물의 철골 구조처럼 연속적인 골격 형태로 전극의 지지체를 형성하여 전체 구조물의 견고한 구조적 기반을 제공합니다. 반면 구리는 텅스텐 스켈레톤의 기공을 완전히 채워 연속적인 전도 경로를 형성합니다. 두 구성 요소는 각각의 성능 이점을 유지할 뿐만 아니라 구조적 상보성을 통해 기능적 시너지 효과를 달성합니다. 이 설계는 단일 금속 재료의 성능 한계를 극복하여 고강도, 고온 저항성, 높은 전기 및 열 전도성이라는 복합적 특성을 동시에 갖춘 전극을 제공합니다.

골격 충전 전극을 제조하는 핵심은 두 가지 핵심 단계로 나뉜 진공 침투 공정의 정밀한 제어에 있습니다. 첫 번째는 텅스텐 골격의 사전 제작입니다. 텅스텐 분말을 특정 공식에 따라 혼합한 후 금형을 통해 모양을 만든 다음 고온에서 소결하여 특정 기공률을 가진 다공성 골격을 형성합니다. 소결 공정 동안 텅스텐 입자는 확산 용접으로 단단히 연결되어 연속적인 3 차원 네트워크를 구성하고 골격 내부의 기공은 후속 구리 상 충전을 위한 공간을 확보합니다. 이 시점에서 텅스텐 골격은 이미 높은 기계적 강도와 고온 저항성을 가지고 있지만 전도도가 낮아 후속 단계로 보상해야 합니다.

두 번째 단계는 구리 상 침투입니다. 미리 제작된 텅스텐 골격을 진공 환경에 놓고, 그 주변에 구리 재료를 깔고 구리의 녹는점 이상으로 가열합니다. 고온과 진공의 결합 작용으로 고체 구리가 액체로 변하고, 모세관 현상과 중력 침투를 통해 텅스텐 골격의 기공을 따라 모든 틈이 채워질 때까지 고르게 채워집니다. 진공 환경의 역할은 매우 중요합니다. 공기가 섞여 기포가 형성되는 것을 방지하고 구리 상이 기공 내에서 연속적이고 끊김 없는 전도성 네트워크를 형성하도록 합니다. 냉각 후, 텅스텐 골격과

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

구리 상은 긴밀하게 통합된 상호 침투 구조를 형성합니다. 텅스텐 골격은 변형 방지 기능과 고온 지지력을 제공하며, 구리 상은 전류 전달 및 방열을 담당합니다. 이 둘은 서로 보완하며 전극에 탁월한 종합적 성능을 제공합니다.

스켈레톤 충전 전극의 성능 이점은 특히 고온 및 고압 응용 분야에서 두드러집니다. 텅스텐 골격의 연속적인 구조는 순수 구리보다 훨씬 뛰어난 기계적 강도와 고온 저항성을 제공합니다. 극한 온도 환경에서도 구조적 안정성을 유지하며 쉽게 연화되거나 변형되지 않습니다. 구리 상 충전은 탁월한 전기 및 열 전도성을 보장하여 고온 영역의 열을 빠르게 방출하고 국부 과열로 인한 성능 저하를 방지합니다. 이러한 특성은 항공우주, 원자력 및 기타 분야의 극한 작업 조건에 이상적인 선택입니다.

로켓 엔진 노즐 전극 응용 분야에서 스켈레톤 충전 전극은 독보적인 장점을 보여줍니다. 로켓 추진 시스템의 핵심 구성 요소인 노즐은 작동 중 고온 가스의 지속적인 침식을 견뎌야 하며, 전극을 통한 점화 및 화염 제어도 필요합니다. 이 때, 매우 높은 용점과 구조적 강도를 가진 텅스텐 스켈레톤은 가스의 고온 침식을 견뎌내 전극이 고온으로 인해 녹거나 변형되는 것을 방지합니다. 스켈레톤에 충전된 구리 상은 가스 침식으로 인해 발생하는 다량의 열을 연속적인 경로를 통해 빠르게 방출하여 국부 과열로 인한 구조적 손상을 방지합니다. "텅스텐은 삭마를 방지하고 구리는 열을 전도한다"는 이러한 시너지 메커니즘은 극한 환경에서 노즐 전극의 장기적인 안정적인 작동을 보장합니다.

빠대 충전 전극은 원자력 에너지 장비의 고온 전극 부품에서도 중요한 역할을 합니다. 원자로가 운전 중일 때 내부 환경은 극도로 뜨거울 뿐만 아니라 고압과 방사선에 노출되어 재료의 안정성에 엄격한 요구가 발생합니다. 이러한 상황에서 텅스텐 빠대는 주요 구조적 본체 역할을 하여 장기간 고온에서 크리프 및 부식을 견디고 전극의 치수 안정성을 유지합니다. 구리 상은 고전류에서 전극의 전도성을 보장하는 동시에 원자로 내부의 열을 냉각 시스템으로 적시에 전달하여 열 축적으로 인한 안전 위험을 방지합니다. 또한, 텅스텐과 구리는 모두 방사선 안정성이 우수하기 때문에 이러한 구조를 가진 전극은 방사선 환경에서도 안정적인 성능을 유지하여 재료 노화로 인한 기능 저하를 방지할 수 있습니다.

산업용 전기 아크로에 전극을 적용할 때, 스켈레톤 충전 전극의 장점 또한 매우 분명합니다. 전기 아크로가 작동 중일 때 전극과 충전물 사이에 발생하는 고온 아크는 매우 뜨거우므로 전극은 잦은 기계적 충격과 열 충격을 견뎌야 합니다. 이때 텅스텐 스켈레톤의 고강도 특성은 충격으로 인한 전극의 파손을 방지하고, 고온 저항은 아크의 직접 연소를 견딜 수 있습니다. 구리상의 높은 전도성은 아크의 안정적인 발생을 보장하는 동시에 아크 열을 빠르게 소산시켜 과열로 인한 전극 단부의 손실을 방지합니다. 다른 유형의 전극과 비교하여 스켈레톤 충전 전극은 이러한 고주파 및 고강도 작업 조건에서 더 긴 수명과 더 안정적인 작업 성능을 보여줍니다.

간단히 말해, 골격 충전 전극은 "텅스텐 골격 지지체-구리 상 기능" 구조 설계를 통해 기계적 특성과 기능적 특성 간의 완벽한 균형을 달성합니다. 특히 고온 고압과 같은 극한 환경에서 탁월한 성능을 발휘하여 첨단 산업 분야에서 필수적인 핵심 소재로

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

자리매김하고 있습니다.

4.5.3 기울기 분포 전극

구배 분포 전극은 텅스텐-구리 복합재에서 매우 정밀하게 설계된 구조 설계입니다. 핵심 특징은 전극 단면 전체에 걸쳐 텅스텐 대 구리 비율이 지속적으로 변하는 분포입니다. 전극의 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝까지 텅스텐 함량은 점진적으로 증가하는 반면 구리 함량은 감소하거나, 그 반대로 구리 함량은 감소하여 성능 전이가 원활한 미세 구조를 형성합니다. 이 설계는 기존 복합재의 균일한 성분 분포에서 벗어납니다. 조성 구배를 세밀하게 제어함으로써 전극의 각 영역에서 텅스텐 또는 구리의 성능 이점을 우선시하는 동시에, 전이 영역의 완충 효과를 통해 갑작스러운 성능 변화로 인한 계면 응력 문제를 방지합니다.

성능 측면에서, 구배 분포 전극은 상당한 "국부 기능화" 특성을 보입니다. 고텅스텐 함량 영역은 텅스텐의 높은 용점과 높은 강도로 인해 우수한 고온 저항성과 내마모성을 가지며, 매우 높은 온도 환경에서도 구조적 안정성을 유지할 수 있습니다. 고구리 함량 영역은 구리의 높은 전기 및 열 전도도를 활용하여 효율적인 전류 전달과 방열을 달성합니다. 더 중요한 것은 중간 전이 영역의 조성이 느리게 변화하여 두 특성이 접합부에서 원활하게 연결된다는 것입니다. 텅스텐 함량의 급격한 증가로 인한 전기 전도도의 급격한 감소나 구리 함량의 급격한 증가로 인한 고온 저항의 급격한 감소는 발생하지 않습니다. 이러한 점진적인 성능 변화는 이종 재료 연결 시 발생하는 일반적인 응력 집중 문제를 효과적으로 해결하고 복잡한 작업 조건에서 전극의 신뢰성을 크게 향상시킵니다.

구배 분포 전극을 제조하는 공정은 기술적으로 매우 까다로우며, 조성 분포의 정밀한 제어가 필요합니다. 일반적인 제조 방법으로는 층상 분말 야금법과 구배 소결법이 있습니다. 층상 분말 야금법은 텅스텐-구리 비율이 서로 다른 혼합 분말을 설계된 구배 순서에 따라 층상으로 적층하고, 한 번의 압착 및 소결을 통해 조성의 연속적인 전이를 달성합니다. 전이 영역의 평활도를 보장하기 위해 각 분말 층의 조성 차이를 정밀하게 제어해야 합니다. 구배 소결법은 소결 공정 중 온도장 또는 분위기장을 조절하여 텅스텐 또는 구리가 재료 내부에서 방향성 확산되도록 유도하여 자연스러운 조성 구배를 형성합니다. 어떤 방법을 사용하든 고급 시뮬레이션 기술을 사용하여 조성 분포 곡선을 사전 설계하고, 정밀한 공정 매개변수 제어를 통해 실제 분포가 설계와 일치하도록 해야 합니다. 약간의 편차라도 전이 영역에서 성능 변화를 초래할 수 있습니다.

항공우주 산업 내 열 구조 부품. 예를 들어, 우주선이 우주에서 대기권으로 재진입할 때, 재진입 캡슐 표면은 대기와 강한 마찰을 일으켜 매우 높은 온도를 발생시킵니다. 따라서 캡슐 표면 소재는 뛰어난 고온 저항성과 내산화성을 가져야 합니다. 한편, 캡슐 내부의 정밀 기기는 온도에 매우 민감하기 때문에 적절한 작동 온도를 유지하기 위한 효율적인 방열 시스템이 필요합니다. 이러한 상황에서 경사 분포 전극은 캡슐 표면과 내부 방열 시스템을 연결하는 핵심 부품 역할을 합니다. 캡슐을 마주보는 외측 끝부분은 높은 텅스텐 함량으로 설계되어 재진입 시 발생하는 강렬한 열을 견딜 수 있는 고온 저항성을 제공하여 표면 용융이나 산화를 방지합니다. 캡슐을 마주보는 내측 끝부분은 높은 구리

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

함량으로 제작되어 뛰어난 열전도도를 활용하여 표면에서 흡수된 열을 내부 방열판으로 빠르게 전달하여 내부 기기로의 열 방출을 방지합니다. 전환 구역은 성능의 원활한 전환을 제공하고, 내부 및 외부 온도 차이와 재료 특성 차이로 인해 발생하는 상당한 응력을 분산시키며, 반복적인 열 사이클 동안 전극의 균열이나 분리를 방지합니다.

경사 분포 전극은 고속 항공기 엔진의 연소실 구성 요소에서도 대체 불가능한 역할을 합니다. 연소실 내부는 작동 중 고온과 고압에 노출됩니다. 연료 연소로 인해 발생하는 고온 기류는 연소실 벽에 강한 연마 효과를 발생시키므로, 고온에 노출되는 면은 매우 높은 내열성과 연마 저항성을 가져야 합니다. 한편, 연소실 외부는 전체 온도 과열을 방지하기 위해 열을 신속하게 방출하기 위해 냉각 시스템에 연결되어야 하며, 이를 위해 외부 재료는 우수한 열전도도를 가져야 합니다. 경사 분포 전극은 텅스텐 대 구리 비율 경사의 합리적인 설계를 통해 연소실 내부에서 높은 텅스텐 특성을 나타내어 고온 연마에 강하고, 외부에서는 높은 구리 특성을 유지하여 방열 효율을 보장합니다. 중간 전환 영역은 내부와 외부 사이의 성능 충돌과 응력 모순을 해결하여 연소실이 장기간 고주파 작동 중에 구조적 무결성과 안정적인 성능을 유지하도록 보장합니다.

또한, 경사 분포 전극은 고전력 반도체 소자의 방열 전극에 있어 독보적인 장점을 발휘합니다. 반도체 소자가 작동할 때 칩의 코어 영역에서 다량의 열이 발생하므로, 전극은 열을 효율적으로 방출하기 위해 효율적인 열전도도를 가져야 합니다. 외부 회로에 연결된 전극 부분은 신호 전달 손실을 줄이기 위해 우수한 전기 전도도를 가져야 합니다. 칩 접촉부에서 회로 연결부까지 구리 함량을 점진적으로 분포하도록 설계함으로써, 전극은 효율적인 방열과 저저항 전기 전도도라는 두 가지 요건을 동시에 충족하는 동시에 단일 소재의 성능 한계로 인한 열 방출 부족이나 전기 전도도 저하 문제를 방지할 수 있습니다.

4.6 거시적 물리적 형태에 따른 텅스텐-구리 전극 분류

거시적 물리적 형태는 주로 전극의 표면 상태, 밀도 및 복합 모드에 초점을 맞추며, 이는 다양한 기능적 요구 사항을 충족시키기 위해 밀집형, 다공성형 및 복합 코팅형으로 구분됩니다.

4.6.1 고밀도 전극

고밀도 전극은 텅스텐-구리 전극 중 가장 널리 사용되는 기본 유형입니다. 이 전극의 핵심 특징은 매우 낮은 내부 기공률입니다. 텅스텐 입자와 구리 상이 단단히 결합되어 연속적이고 조밀한 미세 구조를 형성하여 매끄럽고 평평한 표면을 형성합니다. 이러한 구조는 전극의 전반적인 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 다양한 산업 환경에서 안정적이고 신뢰할 수 있는 성능을 발휘하여 정밀 제조 분야에서 필수적인 소재로 자리매김합니다.

이러한 고밀도 구조를 달성하는 핵심은 고급 제조 공정에 있으며, 고압 소결 및 열간 등방성 가압이 가장 일반적으로 사용되는 기술적 접근 방식입니다. 고압 소결은 고온에서 텅스텐-구리 혼합 분말에 연속적인 고압을 가하여 입자가 완전히 접촉, 확산 및

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

융합되도록 하여 입자 사이에 형성된 기공을 제거합니다. 열간 등방성 가압은 한 걸음 더 나아가 고온 조건에서 유체 매체를 통해 블랭크에 모든 방향으로 균일한 압력을 가하여 재료 내부의 작은 기공을 완전히 압축하고 궁극적으로 거의 결함이 없는 고밀도 구조를 형성합니다. 두 공정의 핵심 목표는 동일합니다. 압력과 온도의 상승 효과를 통해 입자 사이의 물리적 장벽을 분해하여 텅스텐-구리 두 상 사이에 긴밀한 결합을 달성하고 전극의 고성능을 위한 구조적 기반을 마련합니다.

고밀도 전극의 성능 이점은 구조적 무결성에서 비롯됩니다. 첫째, 낮은 기공률은 구리 상이 연속적이고 끊김 없는 전도성 네트워크를 형성하도록 보장합니다. 전류는 전달 중 기공 막힘으로 인해 국부적인 저항 변화를 일으키지 않으며, 전도성 성능은 안정적이고 효율적입니다. 동시에, 고밀도 미세 구조는 열 전도를 위한 매끄러운 경로를 제공하여 가공 또는 작업 중 발생하는 열을 신속하게 분산시켜 국부적인 과열로 인한 성능 저하를 방지합니다. 둘째, 고밀도 구조는 전극에 더 높은 기계적 강도와 변형 저항성을 부여합니다. 기계적 압력이나 열 응력을 받아도 쉽게 균열이나 파손되지 않으며, 장기간 안정적인 형태를 유지하여 수명을 연장합니다. 또한, 매끄럽고 평평한 표면은 가공물과 접촉할 때 저항 변동을 줄이고 가공 중 불순물이 부착될 가능성을 줄여 공정 안정성을 향상시킵니다.

EDM 분야에서 고밀도 전극의 장점은 특히 두드러집니다. EDM은 전극과 공작물 사이의 고주파 방전을 통해 재료를 제거합니다. 전극의 구조적 밀도는 방전 에너지 분포의 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다. 전극 내부에 기공이 있는 경우 방전 과정에서 국부적인 에너지 집중이 발생하여 공작물 표면에 불규칙한 절삭 흔적이 생겨 가공 정확도에 영향을 미칠 수 있습니다. 고밀도 전극의 균일한 구조는 방전 에너지의 안정적인 방출을 보장하고 공작물의 표면 거칠기를 일정하게 유지할 수 있습니다. 특히 금형 제작과 같이 엄격한 정밀도 요구 사항이 있는 시나리오에 적합합니다. 예를 들어, 정밀 기어 금형 가공에서 고밀도 전극은 안정적인 방전 성능을 통해 기어의 톱니 프로파일을 정확하게 복제하고 금형의 치수 정확도와 표면 품질을 보장하며 후속 기어 대량 생산에 대한 신뢰할 수 있는 보증을 제공합니다.

저항 용접 분야에서도 고밀도 전극은 필수적인 역할을 합니다. 용접 공정에서 전극은 일정량의 압력을 견디면서 작업물과 밀착되어 전류를 전달해야 합니다. 고밀도 전극의 낮은 기공률은 전류 전달 시 발생하는 "공극 효과", 즉 전류 경로의 단절이나 기공으로 인한 급격한 저항 증가를 방지합니다. 이를 통해 용접 영역에 전류가 고르게 흐르도록 하여 용접 지점의 열이 안정적으로 생성되고 용접 너겟 형성의 일관성이 보장됩니다. 자동차 변속기 기어 용접에서는 이러한 안정성이 매우 중요합니다. 기어 용접부의 강도는 변속기의 전반적인 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 고밀도 전극은 안정적인 전류 전달과 압력 허용 오차를 통해 각 용접 지점의 균일한 강도를 보장하여 국부 용접 결함으로 인한 기어 파손 위험을 방지합니다.

마이크로อิเล็กทรอนิกส์ 패키징 분야에서도 고밀도 전극이 널리 사용됩니다. 마이크로อิเล็กทรอนิกส์ 소자는 전극의 치수 정밀도와 성능 안정성에 대한 매우 높은 요건을 충족해야 합니다. 고밀도 전극의 매끄러운 표면과 균일한 구조는 칩 또는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기관과의 양호한 접촉을 보장하고, 접촉 저항을 줄이며, 신호 전송 효율을 향상시킵니다. 동시에, 뛰어난 열전도도는 작동 중 칩에서 발생하는 열을 빠르게 방출하여 과열로 인한 소자 성능 저하를 방지합니다. 예를 들어, 스마트폰 칩 패키징에서 고밀도 텅스텐-구리 전극은 전기 전도와 방열의 이중 매개체 역할을 하여 전기 신호의 안정적인 전송을 보장하는 동시에 칩 온도를 효과적으로 제어하여 소자의 고성능 작동을 지원합니다.

4.6.2 다공성 전극

다공성 전극은 특수한 구조적 특성을 가진 텅스텐-구리 전극의 한 유형입니다. 이 전극은 많은 수의 규칙적 또는 불규칙적인 기공으로 분포되어 있습니다. 이러한 기공은 재료 결합이 아니라 공정 설계를 통해 능동적으로 형성된 구조적 특징입니다. 낮은 기공률을 추구하는 고밀도 전극과 달리, 다공성 전극의 기공 분포와 비율은 핵심 설계 매개변수입니다. 소결 공정 중 압력, 온도, 유지 시간과 같은 매개변수를 조절함으로써 기공의 형태와 밀도를 정밀하게 제어할 수 있으며, 궁극적으로 기능적 및 구조적 특성을 모두 갖춘 특수 소재를 형성합니다. 이러한 설계를 통해 전극은 텅스텐-구리 복합 재료의 기본 특성을 유지하면서 경량 및 높은 비표면적과 같은 고유한 장점을 얻을 수 있으므로 특정 시나리오의 요구에 적응할 수 있습니다.

다공성 전극 제조 공정의 핵심은 소결 공정의 역방향 조절에 있습니다. 기존의 치밀화 공정은 고압 및 장기 보온을 통해 입자 용합을 촉진하는 반면, 다공성 구조를 형성하려면 소결 압력을 적절히 낮추고 보온 시간을 단축해야 합니다. 이렇게 하면 텅스텐 분말과 구리 분말이 불완전하게 치밀화된 상태에서 골격 구조를 형성하고 입자 사이의 틈새가 기공으로 유지됩니다. 또한, 기공 형성제를 첨가하여 규칙적인 기공 형성을 도울 수 있습니다. 휘발성 또는 가용성 물질을 혼합 분말에 첨가하면 소결 과정에서 이러한 물질이 증발하거나 용해되어 제거되어 미리 설정된 모양의 기공 채널이 남습니다. 어떤 방법을 사용하든, 기공 분포가 균일하고 설계 기대치에 부합하도록 공정 매개변수를 정밀하게 제어해야 하며, 국소적인 기공 농도로 인한 성능 저하를 방지해야 합니다.

전극을 형성하는 다공성 구조의 핵심 장점은 경량성과 방열 효율의 균형에 반영됩니다. 많은 수의 기공은 재료의 전체 밀도를 크게 감소시키고, 동일 부피의 고밀도 전극에 비해 무게를 크게 줄여줍니다. 이는 장치의 부하를 제어해야 하는 경우에 매우 중요합니다. 동시에, 기공에 의해 형성되는 복잡한 채널 네트워크는 전극의 비표면적을 크게 증가시킵니다. 열이 재료를 통해 전달될 때, 더 넓은 표면적은 주변 환경과의 열 교환을 가속화할 수 있으며, 기공 내에서 생성될 수 있는 공기 순환과 결합하여 방열 효율을 향상시킵니다. 이러한 "경량 + 높은 방열"의 조합은 무게에 민감하고 높은 방열 요구 사항을 가진 모바일 기기 및 항공우주 부품과 같은 환경에서 다공성 전극을 대체할 수 없게 만듭니다.

드론 모터에 정류 전극을 적용하는 경우 다공성 전극의 장점이 충분히 입증됩니다. 드론의 내구성은 장비의 무게와 직접적인 관련이 있습니다. 경량 설계는 내구성 향상의 핵심입니다. 모터는 핵심 부품이므로 전극의 무게 최적화가 특히 중요합니다. 다공성 텅스텐 구리 전극은 내부 기공 구조를 통해 무게를 줄이는 동시에 구리 상의 높은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전도성으로 인해 정류 중 안정적인 전류 전송을 보장합니다. 더 중요한 것은 드론 모터가 고속으로 작동할 때 많은 열을 발생시킨다는 것입니다. 열이 제때 방출되지 않으면 모터가 과열되어 고장날 수 있습니다. 다공성 구조의 높은 비표면적은 열을 공기 중으로 빠르게 방출할 수 있습니다. 모터 하우징의 방열 설계와 결합하여 효율적인 방열 시스템을 형성하여 장시간 비행 중에도 모터가 안정적인 성능을 유지하도록 합니다. 전해 가공 분야에서 다공성 전극의 기공 구조는 매체 저장 및 전달에 있어 고유한 역할을 합니다. 전해 가공은 전극과 공작물 사이의 전해질을 통해 재료의 전기화학적 용해를 달성합니다. 기존 전극은 전해질을 지속적으로 운반하기 위해 외부 파이프가 필요하지만, 다공성 전극의 내부 기공은 전해질 저장 및 채널 역할을 직접 수행하여 가공 공정 중 전해질을 천천히 방출하여 가공 영역을 항상 축축하게 유지하고 지속적인 냉각 및 윤활을 달성합니다. 이러한 설계는 가공 장비의 배관 시스템을 간소화하고 복잡한 표면이나 깊은 공동의 전해 가공에 특히 적합합니다. 전극이 좁은 공간으로 침투하면 기공에서 방출된 전해질이 가공 영역에 정밀하게 작용하여 외부 운반으로 인한 전해질 분포 불균형 문제를 방지하고 가공 정확도와 표면 품질을 향상시킵니다.

연료 전지의 전극 구성 요소 중 다공성 텅스텐-구리 전극은 특별한 가치를 지닙니다. 연료 전지는 생성된 전류를 흐르게 하면서 연료와 산화제 사이의 촉매 반응을 일으키기 위해 전극을 사용해야 합니다. 이를 위해 전극은 우수한 전기 전도도와 충분한 접촉 면적을 모두 가져야 합니다. 다공성 전극의 기공 구조는 기체 확산 및 반응을 위한 공간을 제공하며, 텅스텐-구리 복합 재료의 높은 전도도는 전자의 빠른 전달을 보장합니다. 기공 크기와 분포를 최적화함으로써 반응 효율과 전도도의 균형을 맞출 수 있어 연료 전지가 안정적인 작동을 유지하면서도 고출력을 출력할 수 있습니다. 또한, 다공성 구조는 우수한 인성을 가지고 있어 배터리 작동 중 부피 변화를 완화하고 전극의 수명을 연장할 수 있습니다.

다공성 전극 설계는 특정 응용 시나리오에 따라 기공 매개변수를 조정해야 한다는 점에 유의해야 합니다. 기공이 너무 크면 구조적 강도가 저하될 수 있으며, 기공이 너무 작으면 방열이나 유전을 전달 효율에 영향을 미칠 수 있습니다. 따라서 기공 형태, 분포 균일성, 그리고 비율은 시뮬레이션과 실험을 통해 반복적으로 검증되어야 합니다. 이러한 맞춤형 구조 설계는 제작의 난이도를 높이지만, 기존 전극으로는 충족할 수 없는 특수한 요구 사항도 충족할 수 있게 해 주므로, 다공성 전극은 텅스텐-구리 전극 계열에서 가장 다재다능한 전극 중 하나입니다.

4.6.3 복합 코팅 전극

복합 코팅 전극은 기능적 중첩을 통해 성능 혁신을 달성하는 특수한 텅스텐-구리 전극입니다. 핵심 설계 개념은 텅스텐-구리 기관 표면에 하나 이상의 기능성 코팅을 복합화하여 코팅과 기관의 시너지 효과를 활용하여 단일 소재의 성능 단점을 보완하는 것입니다. 코팅 소재는 매우 유연하게 선택할 수 있으며, 은, 니켈, 다이아몬드, 세라믹 등 다양한 소재를 적용 분야에 따라 선택할 수 있습니다. 전기 도금, 기상 증착, 용사 및 기타 공정을 통해 기관과 밀착 결합되어 궁극적으로 "구조적 지지력을 제공하는 텅스텐-구리 기관 + 특정 기능을 최적화하는 표면 코팅"의 복합 구조를 형성합니다. 이 설계는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고강도, 높은 전기 및 열 전도성과 같은 텅스텐-구리 소재의 핵심 장점을 유지할 뿐만 아니라, 코팅을 통해 전극에 새로운 차원의 성능을 부여하여 적용 분야를 크게 확장합니다 .

복합 코팅 전극 제조의 핵심은 코팅과 기판 사이의 접합 품질에 있으며, 공정 경로에 따라 초점이 달라집니다. 전기도금 공정은 금속 코팅 제조에 적합합니다. 전기분해를 통해 금속 이온이 텅스텐-구리 기판 표면에 균일하게 증착되어 치밀한 코팅을 형성합니다. 이 공정의 장점은 코팅 두께 조절이 가능하고 기판과의 강력한 접합력입니다. 특히 은이나 니켈과 같은 전도성 금속 코팅 제조에 적합합니다. 기상 증착법은 진공 환경에서 코팅 재료를 기화시켜 기판 표면에 박막으로 증착합니다. 나노미터 수준의 정밀도로 박막을 제조할 수 있습니다. 다이아몬드나 세라믹과 같은 비금속 코팅에도 적합하며, 코팅의 조성과 구조를 정밀하게 제어할 수 있습니다. 용사 공정은 코팅 재료를 용융 또는 반응용 상태로 가열하여 고속 기류를 통해 기판 표면에 분사하여 코팅을 형성합니다. 두꺼운 코팅이나 넓은 면적의 코팅을 제조하는 데 적합하며, 내마모성 및 고온 내열성 코팅에 널리 사용됩니다. 어떤 공정을 사용하든, 코팅과 기판 사이에 불순물이나 산화층이 없도록 기판 표면을 전처리(연마, 세척, 활성화 등)해야 합니다. 그렇지 않으면 코팅이 벗겨지거나 성능이 저하될 수 있습니다 .

복합 코팅 전극의 성능 이점은 목표하는 기능 향상에 있습니다. 지지체 역할을 하는 텅스텐-구리 매트릭스는 안정적인 기계적 강도, 전기 및 열 전도성, 그리고 구조적 안정성을 제공하여 전극이 사용 중 형태와 기본 성능을 유지하도록 합니다. 표면 코팅은 접촉 저항 감소, 내마모성 향상, 내산화성 향상 등 특정 요구 사항에 맞춰 성능을 최적화하여 특정 상황에서 순수 텅스텐-구리 소재의 성능을 능가합니다. 이 "기본 보증 + 기능 향상" 모델을 통해 전극은 복잡한 작업 조건의 포괄적인 요구 사항을 충족하는 동시에 핵심 성능 지표에서 최고 수준을 달성할 수 있습니다 .

고주파 통신 장비용 커넥터 애플리케이션에서 은도금 복합 코팅 전극은 탁월한 성능을 발휘합니다. 고주파 신호 전송은 접촉 저항에 매우 민감하며, 아주 작은 저항 변동도 신호 감쇠 또는 왜곡을 유발할 수 있습니다. 텅스텐-구리 기판은 전도성이 우수하며, 표면 은 코팅은 접촉 저항을 더욱 낮출 수 있습니다. 은은 전도성이 가장 높은 금속 중 하나이고 표면이 쉽게 산화되지 않으며, 장기간 낮은 저항 특성을 유지할 수 있기 때문입니다. 이 전극을 커넥터로 사용할 경우, 은 도금층 은 접촉 계면에서 효율적인 신호 전송을 보장하고 반사 및 손실을 줄여주며, 위성 통신 및 5G 기지국과 같이 신호 품질에 대한 요구 사항이 엄격한 환경에 특히 적합합니다. 텅스텐-구리 기판의 높은 강도는 커넥터가 탈착 과정에서 변형되지 않도록 하여 구조가 느슨해져 접촉 불량 발생을 방지합니다 .

표면에 다이아몬드 코팅이 된 복합 전극은 고경도 소재 가공 분야에서 독보적인 가치를 보여줍니다. 금형강이나 초경합금과 같은 소재의 방전 가공 에서 전극은 고온 방전 충격과 기계적 마찰을 자주 견뎌야 합니다. 순수 텅스텐-구리 전극은 장기간 사용 시 표면이 마모되거나 삭마되기 쉬워 가공 정확도가 저하됩니다. 다이아몬드 코팅은 매우 높은 경도와 내마모성을 갖추고 있어 전극 표면에 보호막을 형성하여 가공 과정에서

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

발생하는 기계적 마모와 고온 침식을 방지하고 전극의 수명을 크게 연장합니다. 동시에 다이아몬드의 뛰어난 열전도도는 전극의 빠른 열 발산을 돕고 국부 과열로 인한 코팅 손상을 방지합니다. 이러한 "내마모성 + 방열"의 이중 장점 덕분에 이 유형의 전극은 정밀 금형 가공 및 항공기 엔진 블레이드 제조와 같은 분야에서 매우 널리 사용됩니다.

고온 산화 방지 시나리오에서 니켈 코팅 또는 세라믹 코팅이 적용된 복합 전극은 핵심적인 역할을 합니다. 예를 들어, 야금 산업의 아크로 전극에서 전극은 고온 산화 환경에서 지속적으로 작동해야 합니다. 순수 텅스텐-구리 재료의 표면에는 산화층이 쉽게 형성되어 전기 전도도가 감소합니다. 니켈 코팅은 고온에서 치밀한 산화막을 형성하여 산소가 기관을 더 이상 부식시키지 못하도록 하고 전극의 전도성 네트워크가 파괴되지 않도록 보호합니다. 세라믹 코팅(예: 알루미나 및 지르코니아)은 고온 저항성과 산화 저항성이 더 뛰어나 고온 작업 조건에 적합합니다. 세라믹 코팅은 물리적으로 절연되어 기관이 부식성 매체와 접촉하는 것을 방지합니다. 이러한 유형의 복합 전극은 텅스텐 구리의 높은 전기 및 열 전도성을 유지할 뿐만 아니라 코팅의 고온 저항성 및 산화 저항성도 갖추고 있어 고온 산업에서 텅스텐-구리 소재의 적용 경계를 크게 확장합니다.

또한, 복합 코팅 기술은 다기능 통합을 달성할 수 있습니다. 예를 들어, 의료기기의 정밀 전극에서 복합 생체적합성 코팅(예: 티타늄 합금 코팅)을 사용하면 텅스텐 구리 전극이 우수한 전기 전도성을 유지하면서도 인체 조직과 접촉 시 부작용을 방지하여 최소 침습 수술 도구의 특수 요건을 충족할 수 있습니다. 코팅을 통해 달성되는 이러한 기능적 맞춤화는 복합 코팅 전극이 다양한 기존 요구 사항을 충족할 수 있도록 하여 텅스텐 구리 전극 제품군에서 가장 혁신적인 잠재력을 가진 분야로 자리매김하게 합니다.

코팅의 두께와 균일성은 전극 성능에 상당한 영향을 미친다는 점에 유의해야 합니다. 코팅이 너무 두꺼우면 과도한 내부 응력이 발생하여 균열이나 박리가 발생할 수 있으며, 코팅이 너무 얇으면 효과적인 보호 또는 기능 향상 효과를 얻을 수 없습니다. 따라서 코팅 재료 및 기관 특성에 따라 코팅 공정 매개변수를 정밀하게 제어해야 하며, 코팅 성능이 기준을 충족하는지 확인하기 위해 초기 시뮬레이션과 후속 테스트가 필요합니다. 이러한 정교한 제조 요건은 생산 비용을 증가시키지만, 복합 코팅 전극이 고급 제조 분야에서 대체 불가능한 가치를 창출할 수 있도록 합니다.



CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극

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

제 5 장 텅스텐-구리 전극 제조 기술

5.1 침투 과정

침투 공정은 텅스텐-구리 전극 제조의 핵심 기술입니다. 다공성 텅스텐 골격에 액체 구리를 침투시켜 우수한 성능의 복합 재료를 제조합니다. 이 공정은 텅스텐 골격의 사전 제작과 구리 침투의 두 가지 주요 단계로 구성되어 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 달성하는 것을 목표로 합니다. 침투 공정은 분말 야금에 기반을 두고 진공 또는 불활성 분위기 환경과 결합하여 재료의 높은 밀도와 안정성을 보장합니다. 제조 공정 중 텅스텐 분말의 성형, 소결 및 기공 제어는 최종 전극의 기계적 강도, 전도도 및 내구성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 단계입니다.

5.1.1 텅스텐 골격 조립

텅스텐 골격 조립은 침투 공정의 첫 단계로, 후속 구리 침투를 위한 기반을 제공하는 다공성 텅스텐 구조를 생성하는 것을 목표로 합니다. 이 단계에서는 텅스텐 분말의 성형, 소결 및 기공률 제어를 통해 일정 강도의 골격 구조가 형성됩니다. 텅스텐 골격의 품질은 구리 충전 효과와 최종 전극의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 제조 공정은 원료 순도, 입자 크기 및 공정 변수의 정밀한 제어를 요구합니다. 미세 구조의 기공률과 균일성은 성공적인 조립의 핵심입니다. 열간 등방압 성형은 골격의 밀도와 안정성을 최적화하기 위해 자주 사용됩니다. 텅스텐 골격 조립은 침투 공정의 기반을 마련하여 후속 공정에서 전극이 우수한 기계적 특성을 유지하도록 보장합니다.

5.1.1.1 텅스텐 분말 성형

텅스텐 분말 성형은 텅스텐 골격 제작의 기본 단계입니다. 텅스텐 분말을 특정 형상으로 압축하여 후속 소결 및 함침 공정을 위한 본체를 준비합니다. 이 공정은 일반적으로 냉간 압착 또는 등방 압착 기술을 사용하여 고순도 텅스텐 분말을 금형에 넣고 기계적으로 예비 성형체를 형성합니다. 성형 과정에서 텅스텐 분말의 입자 크기와 형태는 일정해야 합니다. 구형 또는 거의 구형에 가까운 분말은 충전 효율과 성형체의 균일성을 향상시키는 데 도움이 됩니다. 볼 밀링 또는 V 형 믹서를 사용하여 혼합 균일성을 확보하고, 분말 분포에 심각한 층화가 발생하지 않도록 합니다. 성형 압력과 금형 설계는 성형체의 밀도와 기공 분포에 직접적인 영향을 미칩니다. 적절한 압력은 내부 결함을 줄일 수 있습니다. 성형된 그린 바디는 후속 고온 소결을 견딜 수 있도록 일정한 기계적 강도를 가져야 합니다. 예비 압착과 같은 표면 처리는 그린 바디의 안정성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 분말의 수분 흡수를 방지하기 위해 공정 중 습도를 조절해야 하며, 이는 성형 품질 저하로 이어질 수 있습니다. 텅스텐 분말 성형은 전체 준비 공정의 시작점이며, 그 품질은 후속 단계의 원활한 진행을 결정합니다.

5.1.1.2 텅스텐 골격 소결

텅스텐 골격 소결은 텅스텐 분말 소결체를 다공성 골격으로 변형하는 핵심 단계입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고온 처리는 소결체의 강도와 안정성을 향상시킵니다. 이 공정은 일반적으로 진공 또는 수소 분위기에서 수행됩니다. 소결 온도는 텅스텐 분말의 특성에 맞춰 조정되어 넥 성장과 입자 간 결합을 촉진합니다. 초기에 텅스텐 분말 입자는 확산 및 재결정을 통해 초기 결합을 형성합니다. 온도가 상승함에 따라 미세 구조가 점차 치밀해지고 다공성 구조가 형성되기 시작합니다. 균열이나 과열을 유발할 수 있는 과도한 가열을 방지하기 위해 소결 시간과 가열 속도를 정밀하게 제어해야 합니다. 소결 공정에는 분위기 제어도 포함됩니다. 환원성 수소 분위기는 표면 산화층을 제거하고 입자 간 결합을 향상시킵니다. 열간 등방성 가압(HIP)은 전방향 압력을 통해 골격의 균일성과 강도를 향상시켜 소결을 더욱 최적화할 수 있습니다. 소결된 텅스텐 골격은 구리 침투를 위한 통로를 제공하기에 충분한 기계적 강도와 적절한 기공률을 가져야 합니다. 공정 변수의 조정은 골격의 미세 구조에 영향을 미칩니다. 동적 시뮬레이션 및 다단계 소결 기술을 포함한 향후 연구를 통해 소결 효율과 골격 품질을 향상시켜 고정밀 전극의 요구를 충족할 것입니다.

5.1.1.3 텅스텐 골격 기공 제어

텅스텐 골격의 기공률은 성공적인 침투를 보장하는 데 중요한 단계입니다. 목표는 골격의 기공률과 기공 크기 분포를 조절하여 구리 침투에 최적의 조건을 만드는 것입니다. 이 과정은 성형 압력, 소결 조건, 그리고 첨가제 사용을 통해 달성됩니다. 기공률은 구리 충전 효율과 최종 전극의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 성형 단계에서 압력을 조절하면 성형체의 초기 밀도가 변경될 수 있습니다. 압력이 낮을수록 기공이 더 많이 유지되고, 압력이 높을수록 기공 수가 줄어듭니다. 소결 중 온도와 시간을 조절하면 기공 폐쇄 및 연결에 영향을 미칩니다. 적절한 소결 매개변수는 열린 기공 구조를 유지합니다. 유기 결합제나 기공 형성제와 같은 첨가제는 기공 제어에 도움이 될 수 있습니다. 소결 후, 첨가제는 열분해를 통해 제거되어 균일한 기공 네트워크를 형성합니다. 미세 구조 분석 결과, 균일한 기공 크기 분포가 기공 제어의 핵심임을 알 수 있습니다. 기공이 너무 크거나 불균일하면 구리 침투가 불충분해질 수 있습니다. 열간 등압 성형 공정은 전방향 압력을 통해 기공 구조를 최적화하여 닫힌 기공의 비율을 줄이고 침투 효율을 향상시킵니다. 기공 제어는 구리의 후속 젖음성도 고려해야 합니다. 표면 처리는 텅스텐 골격과 액체 구리 사이의 계면 결합을 향상시킬 수 있습니다.

5.1.2 침투 제어

침투 제어는 침투 공정의 결정적인 단계로, 구리 침투 공정을 정밀하게 관리하여 고성능 텅스텐-구리 전극을 생산하는 것을 목표로 합니다. 이 단계는 구리 재료 준비, 침투 온도 제어, 침투 시간 제어의 세 가지 핵심 단계로 구성되어 액체 구리가 텅스텐 골격의 기공을 완전히 채워 균일한 복합 구조를 형성하도록 합니다. 침투 제어는 기공 충전 속도, 계면 결합 강도 및 최종 전극의 밀도에 직접적인 영향을 미칩니다. 미세 구조의 낮은 기공률과 균일한 상 분포는 품질 보증의 핵심입니다.

5.1.2.1 구리 재료 준비

구리 재료 준비는 침투 제어의 기본 단계로, 고품질 구리 원료를 제공하고 액상 구리

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

침투 조건을 확립하는 것을 목표로 합니다. 이 공정은 일반적으로 고온에서 우수한 유동성과 습윤성을 보장하기 위해 구리 분말 또는 구리 블록의 선택, 정제 및 전처리를 포함합니다. 구리 재료의 순도는 핵심 요소입니다. 침투 공정 중 기공이나 결함 형성을 방지하기 위해 산소 및 황과 같은 불순물 함량을 줄이기 위해 고순도 전해 구리 또는 분무 구리를 선택합니다. 구리 재료는 공정 요건에 따라 분말 또는 덩어리 형태로 제조될 수 있습니다. 분말 형태는 균일한 분포를 용이하게 하며, 덩어리 형태는 대규모 침투에 적합합니다. 입자 크기 또는 블록 크기는 텅스텐 골격의 기공률과 일치해야 합니다.

전처리에는 건조 및 표면 세정이 포함됩니다. 구리 재료는 진공 또는 불활성 가스 환경에서 건조되어 표면 수분과 산화막을 제거하고 텅스텐 프레임워크와의 계면 결합을 향상시킵니다. 균일한 혼합을 위해 기계적 교반 또는 볼 밀링을 사용하여 침투 과정에서 구리 재료의 균일한 분포를 보장합니다. 구리 재료 제조 시에는 용융점도 고려해야 합니다. 적절한 예열은 침투 효율을 향상시킬 수 있습니다. 제조 과정에서 산화 방지 및 구리 재료 품질 보장을 위해 환경 관리가 이루어집니다.

5.1.2.2 침투 온도 제어

침투 온도 제어는 침투 제어의 핵심 단계로, 구리가 액체 상태일 때 텅스텐 골격에 효과적으로 침투하도록 하는 동시에 과도한 열로 인한 재료 손상을 방지합니다. 이 공정은 일반적으로 진공로 또는 불활성 분위기에서 수행됩니다. 온도는 구리의 녹는점 이상으로 설정하여 액상을 형성하고, 구리가 기공을 완전히 적셔 채울 수 있도록 합니다. 정밀한 온도 제어는 매우 중요합니다. 온도가 너무 낮으면 구리가 완전히 녹지 않을 수 있으며, 온도가 너무 높으면 텅스텐 골격의 국부적인 용융이나 입자 성장을 유발하여 미세 구조에 영향을 미칠 수 있습니다. 집중된 열 응력으로 인한 균열을 방지하기 위해 가열 속도를 점진적으로 조절해야 합니다.

온도 제어에는 분위기 관리도 포함됩니다. 진공 환경은 산화 반응을 줄이고, 아르곤과 같은 불활성 가스는 재료를 더욱 보호합니다. 열간 등압 성형은 온도 제어에 도움이 되어 구리 침투를 향상시키고 전방향 압력을 통해 충전 효율을 개선할 수 있습니다. 용침 온도의 안정성은 계면 접합 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 과도한 온도 변동은 구리 오버플로우 또는 불균일한 분포를 유발할 수 있습니다. 모든 부품의 일관성을 보장하기 위해 공정 중 용광로 내 온도 분포를 모니터링해야 합니다. 향후 지능형 온도 제어 시스템이나 다단계 가열 기술의 도입을 통해 용침 온도 제어를 더욱 최적화하여 전극 밀도와 성능 일관성을 향상시킬 수 있습니다.

5.1.2.3 침투 시간 제어

침투 시간은 침투 제어의 핵심 매개변수로, 액상 구리가 텅스텐 골격을 완전히 침투하여 안정적인 복합 구조를 형성하도록 보장합니다. 이 과정은 텅스텐 골격의 기공률, 구리 재료의 양, 그리고 온도에 의해 결정됩니다. 침투 시간이 너무 짧으면 충진이 불완전해질 수 있으며, 너무 길면 구리가 과도하게 흐르거나 골격이 변형될 수 있습니다. 초기 침투 단계에서는 구리가 텅스텐 표면을 적시고 깊은 기공으로 침투하는 데 충분한 시간이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

필요합니다. 이후 시간 제어는 구리의 오버플로우와 기공 형성을 방지하기 위해 응고 과정에 중점을 둡니다.

시간 제어는 온도 및 압력과도 조화를 이루어야 합니다. 열간 등압 성형(HIP)은 침투 시간을 단축하고 전방향 압력을 통해 구리 흐름을 가속화할 수 있습니다. 이 공정에서 침투 시간은 일반적으로 단계별로 설정됩니다. 침투를 보장하는 초기 단계, 결합을 촉진하는 안정화 단계, 그리고 구조를 응고시키는 냉각 단계입니다. 미세 구조 분석 결과, 적절한 침투 시간은 미충진 기공을 줄이고 계면 결합을 향상시킬 수 있음을 보여줍니다. 환경 안정성과 장비 성능은 시간 제어의 효과에 직접적인 영향을 미칩니다. 미래에는 실시간 모니터링 또는 동적 조정 기술을 사용하여 침투 시간을 최적화하고 전극 균일성과 내구성을 향상시킬 것입니다.

5.2 후처리 기술

후처리는 텅스텐-구리 전극 제조의 마지막 단계입니다. 절삭, 연삭, 표면 처리 및 치수 정밀도 제어를 통해 전극의 형상, 표면 품질 및 기능적 성능을 최적화하는 것을 목표로 합니다. 이 단계는 침투 공정 후에 수행되어 전극이 특정 용도의 요구 사항을 충족하는지 확인합니다. 텅스텐-구리 전극의 후처리는 텅스텐의 높은 경도와 구리의 연성을 활용하여 기계 가공 및 표면 개질 기술을 통해 미세 구조를 조정하고 내구성을 향상시킵니다. 공구 선택, 가공 환경 및 품질 검사를 포함한 공정 변수의 정밀한 제어는 EDM, 용접 또는 마이크로전자 패키징에서 전극의 성능에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 요소입니다.

5.2.1 절단

절삭은 후가공의 첫 단계로, 텅스텐-구리 전극을 성형하기 위해 과도한 재료를 제거합니다. 이 공정은 일반적으로 초경 또는 다이아몬드 공구를 사용하여 함침된 거친 블랭크를 제거하는 선삭 또는 밀링을 포함합니다. 텅스텐은 경도가 높아 내마모성이 높은 공구가 필요하고, 구리는 연성이 높아 달라붙거나 찢어지는 것을 방지하기 위해 절삭 속도와 이송을 제어해야 합니다. 절삭은 막대나 블록과 같은 복잡한 전극 형상에 적합합니다. 열 축적과 표면 손상을 최소화하기 위해 공정 중 냉각수를 사용해야 합니다. 절삭 공정은 과도한 재료를 제거하기 위한 황삭과 윤곽 정밀도를 달성하기 위한 정삭 등 여러 단계로 구성되며, 점차 설계 치수에 가까워집니다. 미세 구조의 낮은 기공률은 재료의 균일한 절삭을 지원하며, 열간 등압 성형 공정으로 최적화된 전극은 우수한 기계적 안정성을 보입니다. 후속 단계의 원활한 가공을 보장하기 위해 절삭 후 표면 거칠기를 검사해야 합니다. 먼지 제어와 같은 환경 제어를 통해 먼지 오염을 방지할 수 있습니다. 향후 CNC 공작 기계나 레이저 보조 절단 기술이 발전하면 가공 효율성과 복잡한 모양의 정확도가 향상되어 고정밀 전극에 대한 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

5.2.2 연삭

연삭은 연마 도구를 사용하여 칩 잔여물을 제거하고 텅스텐-구리 전극의 표면 조도와 기하학적 정확도를 향상시키는 정교한 후처리 단계입니다. 이 공정은 일반적으로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다이아몬드 연삭 휠이나 탄화규소 공구를 사용하여 텅스텐의 높은 경도를 정밀하게 연삭합니다. 구리의 연성은 과도한 마모를 방지하기 위해 윤활이 필요합니다. 연삭은 특히 전기 스파크 가공(EDM)이나 높은 평탄도가 요구되는 마이크로전자 패키징과 같은 응용 분야에서 전극의 접촉 표면 품질을 개선하는 데 적합합니다. 미세 구조의 균일한 상 분포는 안정적인 연삭 결과를 보장합니다. 연삭 공정은 칩 자국을 제거하기 위한 거친 연삭과 거울과 같은 표면을 얻기 위한 미세 연삭의 두 단계로 구성됩니다. 열 균열이나 표면 화상을 방지하기 위해 공정 중 연삭 압력과 속도를 조정해야 합니다. 냉각수는 온도를 낮추고 재료 특성을 보호하기 위해 사용됩니다. 열간 등방성 성형에 최적화된 전극은 뛰어난 내마모성을 보입니다. 미세 균열이나 피트와 같은 표면 결함은 연삭 후 검사하여 품질이 기준에 부합하는지 확인합니다.

5.2.3 표면 처리

표면 처리는 화학적 또는 물리적 방법을 통해 텅스텐-구리 전극의 표면 특성(내식성, 내산화성, 내접착성 등)을 향상시키는 후공정 최적화 단계입니다. 이 공정에는 텅스텐의 높은 경도와 구리의 화학적 활성을 개선하기 위한 연마, 도금 또는 코팅 기술이 포함됩니다. 연마는 표면의 미세 결함을 제거하고, 니켈 또는 금 도금은 내후성을 향상시키며, 질화티타늄과 같은 코팅은 내마모성을 향상시킵니다. 미세 구조의 낮은 기공률은 균일한 표면 처리를 가능하게 합니다.

표면 처리 공정은 적용 상황에 맞게 조정해야 합니다. EDM 전극의 경우 방전 안정성 향상을 위해 연마가 선호될 수 있으며, 용접 전극의 경우 슬래그 부착을 줄이기 위해 코팅이 필요할 수 있습니다. 내부 구조에 영향을 미치지 않도록 온도와 시간을 조절해야 합니다. 최적화된 열간 등방압 성형(HIP) 공정은 전극 표면 접착력을 향상시킵니다. 불활성 분위기와 같은 환경 제어는 산화를 줄일 수 있습니다. 표면 접착력과 내구성은 처리 후 테스트해야 합니다.

5.2.4 치수 정밀도 관리

치수 정확도 관리는 후가공의 마지막 단계로, 텅스텐-구리 전극이 측정 및 조정을 통해 설계 사양을 충족하는지 확인합니다. 이 공정에서는 좌표 측정기 또는 광학 검사 장비를 사용하여 전극의 길이, 너비 및 기하학적 공차를 확인하고, 텅스텐의 높은 경도와 구리의 연성을 고려하여 미세 조정합니다. 절삭 및 연삭 후, 전극은 정삭 공정을 거쳐 마이크론 단위의 치수 편차를 제어하고 미세 구조의 균일성을 보장하여 고정밀 가공을 지원합니다.

치수 정확도 관리에는 여러 차례의 검사와 수정이 필요합니다. 초기 테스트에서 편차가 발견되면 미세 연삭이나 부분 절단을 통해 수정합니다. 열간 등압 성형에 최적화된 전극은 탁월한 치수 안정성을 보입니다. 온도 변화와 같은 환경 요인은 재료의 열팽창에 영향을 미치므로 항온 운전을 고려해야 합니다. 검사 데이터는 배치 일관성을 보장하기 위해 기록됩니다. 미래에는 지능형 검사 시스템이나 3D 스캐닝 기술을 통해 고정밀 전극이나 복잡한 구조 부품의 요구를 충족하는 실시간 정밀 제어가 가능해질 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

Product Name	Chemical Composition (%)			Physical and Mechanical Properties			
	Cu	Total Impurities ≤	W	Density (g/cm ³)	Hardness (HB)	Resistivity (MΩ·cm)	Tensile Strength (MPa)
Tungsten Copper (50)	50±2.0	0.5	Balance	11.85	115	3.2	—
Tungsten Copper (60)	40±2.0	0.5	Balance	12.75	140	3.7	—
Tungsten Copper (70)	30±2.0	0.5	Balance	13.8	175	4.1	790
Tungsten Copper (80)	20±2.0	0.5	Balance	15.15	220	5	980
Tungsten Copper (90)	10±2.0	0.5	Balance	16.75	260	6.5	1160

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

6 장: 텅스텐-구리 전극의 응용 시나리오

텅스텐-구리 전극은 우수한 전기 전도성, 고온 저항성, 아크 침식 저항성, 그리고 우수한 가공성으로 인해 방전 가공(EDM)에 널리 사용됩니다. 정밀 금형 제작에서는 손실이 적고 가공 정밀도가 높아 복잡한 캐비티와 미세 구조를 형성하는 데 사용되며, 특히 초경 금형 가공에 적합합니다. 항공우주 산업에서 티타늄 합금 및 고온 합금과 같이 가공이 어려운 소재의 경우, 고주파 방전으로 생성되는 고온을 견딜 수 있어 정밀 부품의 표면 품질과 치수 정확도를 보장합니다.

텅스텐-구리 전극은 용접, 절단 및 전기 스위칭에서도 핵심적인 역할을 합니다. 저항 용접에서는 전극 마모를 줄이고 안정적인 용접 강도를 보장하여 자동차 제조 및 가전제품 생산과 같은 산업에 적합합니다. 플라스마 절단에서는 고온 침식에 강하여 절단 효율과 절단 품질을 향상시킵니다. 또한, 고전압 회로 차단기, 계전기 및 기타 장비의 접점 부품으로서 아크 침식 및 용융 용접에 대한 내성을 갖추고 있어 전력 시스템 및 전기 제어 장비의 안전하고 안정적인 작동을 보장합니다.

텅스텐-구리 전극은 국방, 항공우주 및 특수 분야에서도 중요한 응용 분야를 가지고 있습니다. 미사일 유도 시스템에서는 안정성이 뛰어나 극한 환경에서도 제대로 작동합니다. 우주선 전력 시스템에서는 우주의 혹독한 환경을 견디며 효율적이고 안전한 에너지 전송을 보장합니다. 핵실험 장비와 의료기기에서는 내방사선성, 전기 전도성, 생체적합성이 뛰어나 시험 데이터의 정확성과 치료 과정의 안전성을 각각 향상시킵니다. 기술 발전에 따라 텅스텐-구리 전극의 잠재적 응용 분야는 계속해서 확장될 것입니다.

6.1 EDM에서의 텅스텐 구리 전극의 적용

방전 가공(EDM)에서 텅스텐-구리 전극은 핵심 응용 분야 중 하나입니다. 고유한 재료 특성 덕분에 이 기술은 정밀 제조에 널리 사용됩니다. 전기 스파크 가공(EDM)은 아크 방전을 통해 재료를 제거하며, 텅스텐의 높은 용점과 경도, 그리고 구리의 높은 전도성을 갖춘 텅스텐-구리 전극은 이상적인 도구입니다. 분말 야금이나 진공 함침과 같은 제조 공정은 전극의 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 보장하며, 열간 등방성 프레스는 전극의 미세 구조를 최적화하여 내구성과 안정성을 향상시킵니다. 금형 가공, 난삭재 가공, 그리고 방전 가공에서 텅스텐-구리 전극의 장점은 고정밀 및 복잡한 부품 제조에 있어 텅스텐-구리 전극이 중요한 역할을 한다는 것을 보여줍니다.

6.1.1 금형 가공에서의 응용

금형 가공에서 텅스텐-구리 전극은 고정밀 제조, 특히 복잡한 금형의 EDM 가공에서 그 중요성을 입증합니다. 금형 제작에는 정밀한 형상과 매끄러운 표면이 요구되며, 텅스텐-구리 전극은 높은 경도와 아크 침식 저항성을 통해 이러한 요건을 충족합니다. 제조 과정에서 전극은 일반적으로 중간에서 높은 텅스텐 함량(예: WCu 70/30 또는 WCu 80/20)을 사용합니다. 분말 야금법은 치밀한 미세 구조를 형성하며, 열간 등방성 성형은 전극의 압축 강도와 표면 안정성을 최적화합니다. 전극의 낮은 기공률은 안정적인 방전 성능을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

보장하고, 구리의 높은 전도성은 효율적인 전류 전달을 지원하여 가공 시간을 단축합니다.

금형 가공에서 텅스텐 구리 전극은 스탬핑 금형, 플라스틱 금형, 단조 금형의 미세 가공에 특히 적합합니다. 전극의 내마모성은 반복적인 방전 중에도 형상을 유지하고 손실을 줄여줍니다. 미세 구조의 균일한 상 분포는 깊은 리브나 작은 구멍과 같은 복잡한 형상의 성형을 지원하며, 가공 정확도는 마이크론 수준에 도달할 수 있습니다. 연마와 같은 표면 처리는 전극의 접촉 품질을 더욱 향상시키고 금형의 표면 조도를 개선합니다. 생산 시, 이 전극은 자동차 부품 및 전자 부품 금형의 제조 요구를 충족하기 위해 고경도 강철 또는 합금강을 가공할 수 있습니다. 또한, 다중 전극 공동 가공에도 사용되며, 텅스텐 구리 전극의 높은 인성은 다양한 조정 및 설치를 지원합니다.

냉각수 사용과 같은 환경 제어는 열 영향을 줄이고 전극 수명을 연장하며, 연삭과 같은 후가공 공정은 치수 정확도를 보장합니다. 앞으로 기능성 경사 설계 또는 나노기술을 도입하면 금형 가공에서 텅스텐 구리 전극의 내구성과 가공 효율을 더욱 향상시켜 항공 우주 부품과 같이 더욱 복잡하고 까다로운 금형 제조 요구를 충족할 수 있습니다.

6.1.2 가공이 어려운 재료의 가공에 적용

난삭재 가공에 사용되는 텅스텐-구리 전극은 극한 조건에서도 탁월한 성능을 발휘 하여 경도나 용융점이 높은 소재 가공에 특히 적합합니다. 텅스텐강, 티타늄 합금, 세라믹과 같은 난삭재는 기계적 특성이 강하기 때문에 기존 가공법으로는 절삭하기 어렵기 때문에 전기 스파크 가공(EDM)이 선호되는 기술입니다. 텅스텐-구리 전극은 고온 내성과 아크 침식 저항성이 뛰어나 핵심 공구로 자리 잡았습니다. 제조 과정에서 전극은 고품량 텅스텐(예: WCu 90/10)으로 제작되며, 진공 함침 공정을 통해 견고한 텅스텐 골격을 형성합니다. 열간 등방압 성형(HIP)은 미세 구조를 최적화하여 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 제공합니다. 구리의 높은 전기 전도도는 효율적인 방전을 지원합니다.

가공이 어려운 소재를 가공할 때 텅스텐-구리 전극은 고에너지 방전에도 견딜 수 있습니다. 텅스텐의 높은 용점(3000°C 이상)은 아크 열로부터 보호하고 표면 마모를 줄여 텅스텐 카바이드 및 티타늄 합금과 같은 소재 가공에 적합합니다. 미세 구조의 미세 입자는 고정밀 가공을 지원하며, 전극의 내마모성은 장기적인 형상 안정성을 보장하여 터빈 블레이드나 의료용 임플란트와 같은 복잡한 형상을 형성하는 데 적합합니다. 코팅과 같은 표면 처리는 내산화성을 높이고 습한 환경에서의 성능을 향상시키며, 절삭 및 연삭과 같은 가공 후 공정은 형상 정확도를 최적화합니다.

항공우주 및 방위 산업에도 사용됩니다. 텅스텐 구리 전극의 기계적 강도는 고부하 가공을 지원하며, 냉각수를 사용하면 열 균열 위험을 줄이고 전극 수명을 연장할 수 있습니다.

6.1.3 EDM 적용의 장점

방전 가공 (EDM)에 사용되는 텅스텐-구리 전극은 소재의 복합적 특성과 최적화된 제조

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

공정을 기반으로 하며, 이를 통해 고정밀 및 효율적인 생산에 탁월합니다. 방전 가공은 전극의 아크 내식성, 전기 전도성, 그리고 열 관리 기능에 의존합니다. 텅스텐 함량이 높은 텅스텐-구리 전극(예: WCu 80/20)은 고온 내성을 제공합니다. 텅스텐의 경도는 방전 충격으로부터 보호하며, 구리의 높은 전기 전도성(순수 구리에 근접)은 안정적인 전류 전달을 보장합니다. 분말 야금법은 낮은 기공률을 가진 미세 구조를 생성하며, 열간 등방성 프레스는 계면 결함을 향상시킵니다. 연마와 같은 표면 처리는 방전의 일관성을 향상시킵니다.

응용 분야의 장점은 주로 내구성에 있습니다. 텅스텐-구리 전극의 아크 침식 저항성은 표면 손실을 줄이고, 사용 수명을 연장하며, 특히 고에너지 방전 조건에서 생산 비용을 절감합니다. 둘째, 전기 전도성과 열 전도성의 조합은 가공 효율을 최적화합니다. 구리 상 내 열 분산은 국부 과열을 줄여 가공물 표면 품질을 향상시키고 정밀 금형 및 미세 부품 제조에 적합합니다. 셋째, 기계적 강도와 인성이 뛰어나 복잡한 형상의 가공을 지원하며, 전극의 낮은 기공률은 균열 위험을 줄여 깊은 구멍이나 미세 구조 형성에 적합합니다.

적용 분야로는 자동차 산업 및 전자 제조 등이 있습니다. 텅스텐 구리 전극의 열팽창 매칭은 공작물 간 응력을 감소시키고, 냉각수 및 환경 제어를 통해 안정성을 더욱 향상시킵니다.

6.2 고전압 전기제품에 텅스텐 구리 전극의 적용

고전압 전기 장비에 사용되는 텅스텐-구리 전극은 극한의 전기 조건에서 탁월한 성능을 발휘하며, 높은 내구성과 안정성이 요구되는 분야에 사용됩니다. 텅스텐의 높은 녹는점과 경도는 구리의 높은 전기 및 열 전도성과 결합하여 고전압 스위치 및 피뢰기와 같은 장비에 이상적인 소재입니다. 분말 야금이나 진공 함침과 같은 제조 공정을 통해 전극의 낮은 기공률과 균일한 미세 구조를 보장하며, 열간 등방성 성형을 통해 내아크성과 기계적 강도를 더욱 최적화합니다. 고전압 전기 장비에 사용되는 텅스텐-구리 전극은 송전, 산업 제어, 방위 장비의 요구를 충족하며, 특히 고전압 및 고전류 환경에서 탁월한 성능을 발휘합니다.

6.2.1 고전압 스위치에서의 응용

고전압 스위치기어의 텅스텐-구리 전극은 고전압 전기 장비, 특히 고전류의 빈번한 차단이 필요한 분야에 적용 시 핵심적인 역할을 합니다. 고전압 스위치기어는 전력 시스템의 회로 제어 및 보호에 사용됩니다. 텅스텐-구리 전극은 중간에서 높은 텅스텐 함량(예: WCu 70/30 또는 WCu 85/15)을 사용합니다. 텅스텐 분말은 분말 야금 공정을 통해 구리 분말과 혼합됩니다. 소결 후, 구리는 액상의 기공을 채워 치밀한 미세 구조를 형성합니다. 열간 등방성 가압 성형은 계면 결함을 최적화하는 동시에 미세 구조의 낮은 기공률은 아크 부식에 대한 저항성을 향상시킵니다. 구리의 높은 전기 전도도는 효율적인 전류 전달을 지원합니다.

고전압 스위치기어에서 텅스텐-구리 전극의 고온 저항은 주요 장점입니다. 텅스텐의 높은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

융점은 수천 °C 의 아크 방전 온도를 견뎌내 표면 용융이나 마모를 줄이고 수명을 연장합니다. 전극의 아크 저항은 빈번한 스위칭 작동을 지원하고, 구리의 열전도도는 방열을 촉진하여 국부 과열 위험을 줄이고 전기적 안정성을 향상시킵니다. 미세 구조의 균일한 상 분포는 응력 집중을 줄이고, 니켈 도금과 같은 표면 처리는 내산화성을 향상시켜 습한 환경이나 산업 환경에 적합합니다. 제조 과정에서 텅스텐 분말은 일관된 성능을 보장하기 위해 고순도 및 입자 크기 제어가 필수적입니다.

변전소 및 산업용 배전 시스템에 적용됩니다. 텅스텐 구리 전극은 고전압 단선을 견딜 수 있어 고장률을 낮춥니다. 연삭과 같은 후처리 공정을 통해 접촉 표면 품질을 최적화할 수 있습니다.

6.2.2 피뢰기에서의 응용

피뢰기의 텅스텐-구리 전극은 낙뢰 보호에 있어 독보적인 가치를 발휘하며, 특히 고에너지 낙뢰를 흡수하고 분산하는 데 적합합니다. 과전압 손상으로부터 전기 장비를 보호하는 피뢰기 전극은 고함량의 텅스텐(예: WCu 80/20)을 사용하며 진공 함침 공정을 통해 생산됩니다. 텅스텐 분말은 견고한 골격을 형성하고, 구리는 액체 함침을 통해 재료에 침투하여 기공률이 낮고 균일한 미세 구조를 형성합니다. 열간 등방성 가압 성형은 재료의 내충격성과 안정성을 향상시키고, 구리의 높은 전도성은 빠른 전류 방전을 지원합니다.

피뢰기에서 텅스텐-구리 전극의 고온 저항은 핵심적인 장점입니다. 텅스텐의 높은 융점은 낙뢰 발생 시 고온 아크로부터 보호하여 재료 손실을 줄이고 수명을 연장합니다. 전극의 아크 침식 저항성은 여러 차례 낙뢰가 와도 성능을 유지하도록 보장하며, 구리의 열전도도는 열을 빠르게 방출하여 과열로 인한 장비 손상을 방지합니다. 미세 구조의 미세 입자는 높은 기계적 강도를 제공하며, 도금과 같은 표면 처리는 내식성과 외부 환경에 대한 적응성을 향상시킵니다. 제조 공정에서 원료의 균일한 혼합과 제어된 기공 크기는 관통 효율에 직접적인 영향을 미칩니다. 적용 분야로는 고전압 송전선과 통신 기지국이 있습니다. 텅스텐-구리 전극은 낙뢰 전류를 효과적으로 흡수할 수 있으며, 절단 및 연마와 같은 후처리 공정을 통해 기하학적 정확도를 최적화합니다.

6.2.3 고전압 전기제품의 적용 이점

고전압 전기 장비에 사용되는 텅스텐-구리 전극은 소재의 복합적 특성과 최적화된 제조 공정을 기반으로 고전압 및 고전류 환경에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 고전압 전기 장비는 아크 내식성, 전기 전도성, 그리고 열 안정성을 갖춘 전극을 필요로 합니다. 텅스텐 함량이 높은 텅스텐-구리 전극은 고온 내성을 제공하며, 텅스텐의 경도는 아크 충격에 대한 내성을 제공하고, 구리의 높은 전기 전도성(순수 구리에 근접)은 효율적인 전류 전달을 보장합니다. 분말 야금법은 기공률이 낮은 미세 구조를 형성하며, 열간 등방성 가압 성형은 계면 결합을 강화합니다. 도금과 같은 표면 처리는 내후성을 향상시킵니다. 텅스텐-구리 전극의 장점은 주로 아크 내식성에 있습니다. 텅스텐-구리 전극의 아크 내성은 표면 마모를 줄이고 수명을 연장하며, 특히 고전압 스위치와

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

피뢰기의 빈번한 작동 시 그 효과가 더욱 뛰어납니다. 둘째, 전기 및 열 전도성의 결합으로 전기적 성능이 최적화됩니다. 구리 상 내 열 방출은 국부 과열을 줄여 장비 안정성을 향상시키고 고전류 차단 또는 낙뢰 보호에 적합합니다. 셋째, 기계적 강도와 내식성은 혹독한 환경에서의 작동을 지원합니다. 균일한 미세 구조는 균열 위험을 줄이고, 표면 처리는 내구성을 향상시킵니다. 적용 분야는 전력 시스템 및 산업 장비입니다. 텅스텐 구리 전극의 열팽창 매칭은 기관과의 응력을 줄이고, 냉각 시스템 및 환경 제어는 성능을 더욱 향상시킵니다.

6.3 용접 및 브레이징에서의 텅스텐 구리 전극의 적용

용접 및 브레이징용 텅스텐 구리 전극은 고열 및 고전류 환경에서 탁월한 성능을 발휘하며, 효율적인 접합과 신뢰성 있는 접합이 요구되는 산업 현장에서 널리 사용됩니다. 텅스텐의 높은 용점과 경도, 그리고 구리의 높은 전기 및 열 전도도는 저항 용접 및 브레이징에 이상적인 도구입니다. 분말 야금이나 진공 함침과 같은 제조 공정은 전극의 낮은 기공률과 균일한 미세 구조를 보장하며, 열간 등압 성형 공정은 열 피로 저항성과 표면 안정성을 더욱 최적화합니다. 용접 분야에서 텅스텐 구리 전극의 적용은 자동차 제조, 전자 조립, 금속 가공과 같은 산업의 요구를 충족합니다. 특히 고강도 접합 및 복잡한 작업 조건에서 탁월한 성능을 발휘합니다.

6.3.1 저항용접에서의 응용

저항 용접에서 텅스텐-구리 전극은 금속 부품을 효율적으로 접합하는 데 중요한 역할을 하며, 특히 점용접 및 심용접과 같은 공정에 적합합니다. 저항 용접은 전류와 압력을 이용하여 금속을 용융시킵니다. 텅스텐-구리 전극은 저항량에서 중합량의 텅스텐을 사용합니다. 텅스텐 분말은 분말 야금 공정을 통해 고함량의 구리 분말과 혼합됩니다. 소결 후 구리는 연속적인 전도성 네트워크를 형성합니다. 열간 등방성 가압 성형은 미세 구조를 최적화하여 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 보장합니다. 구리의 높은 전도성은 안정적인 전류 경로를 제공하고, 텅스텐의 고온 저항은 고온 조건에서 전극의 안정성을 유지합니다. 연마와 같은 표면 처리는 용접 슬래그의 부착을 줄입니다.

저항 용접에서 텅스텐 구리 전극은 주로 자동차 차체 패널이나 전자 부품의 점용접에 사용됩니다. 전극의 열전도도는 열을 빠르게 분산시키고, 열영향부를 줄이며, 접합부의 품질을 향상시킵니다. 텅스텐은 아크 침식에 대한 저항성이 뛰어나 반복 용접 시 전극의 형태를 유지하여 수명을 연장하며, 특히 고주파 작업에 적합합니다. 미세 구조의 균일한 구리 상 네트워크는 효율적인 전류 전달을 지원하며, 전극의 인성은 다양한 두께의 작업물에 맞게 다양한 조정 및 설치를 가능하게 합니다. 준비 과정에서 원료의 혼합 균일성과 소결 매개변수는 전극의 성능에 직접적인 영향을 미치며, 연삭과 같은 후가공 공정은 접촉 표면을 최적화합니다.

6.3.2 브레이징에서의 적용

브레이징에서 텅스텐-구리 전극은 저열 입력 접합에서 독보적인 가치를 발휘하며, 특히

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정밀 금속 및 세라믹 접합에 적합합니다. 브레이징은 필러를 용융하여 이를 달성합니다. 텅스텐-구리 전극은 중간 정도의 텅스텐 함량을 갖는 진공 합침 공정을 통해 제조됩니다. 텅스텐 분말이 골격을 형성하고, 구리는 액상 합침을 통해 필러에 침투합니다. 열간 등압 성형은 미세 구조를 최적화하여 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 보장합니다. 구리의 높은 전기 및 열 전도성은 안정적인 가열을 지원하고, 텅스텐의 고온 저항은 전극 변형을 방지합니다. 도금과 같은 표면 처리는 내식성을 향상시킵니다.

브레이징에서 텅스텐-구리 전극은 전자 부품이나 항공우주 부품을 연결하는 데 사용됩니다. 전극의 열 관리 기능은 열을 고르게 분산시키고, 접합부의 열 응력을 줄이며, 접합부의 강도를 향상시킵니다. 텅스텐의 높은 경도는 전극이 고온에서도 형태를 유지하도록 하며, 미세 구조의 균일성은 일관된 가열을 보장하여 미세 용접이나 다층 구조에 특히 적합합니다. 제조 공정에서 기공 제어와 구리 습윤성은 침투 효율에 직접적인 영향을 미치며, 절단 및 연마와 같은 후처리 단계는 전극의 형상을 최적화합니다. 응용 분야로는 마이크로전자 패키징 및 항공우주 제조 등이 있습니다. 텅스텐-구리 전극의 열팽창 일치는 기관과의 응력을 줄이고, 불활성 분위기와 같은 환경 제어는 산화를 방지합니다.

6.3.3 용접 분야의 적용 이점

용접용 텅스텐-구리 전극은 복합 소재의 특성과 최적화된 제조 공정을 바탕으로 고열 및 고전류 환경에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 용접에는 전극이 전기 전도성, 열 전도성, 그리고 내구성을 갖추어야 합니다. 텅스텐-구리 전극은 저함량에서 중함량의 텅스텐 함량을 통해 이러한 전기 전도성을 제공합니다. 구리의 높은 전도성은 효율적인 전류 전달을 보장하고, 텅스텐의 높은 녹는점은 고온 충격에 대한 내성을 제공합니다. 분말 야금은 낮은 기공률을 가진 미세 구조를 형성하며, 열간 등방성 성형은 계면 결함을 향상시킵니다. 도금과 같은 표면 처리는 내후성을 향상시킵니다.

용접 분야의 장점은 첫째, 전기 및 열 전도성에 반영됩니다. 텅스텐-구리 전극의 구리 상 네트워크는 저항 가열의 영향을 줄이고, 접합 품질을 향상시키며, 열을 고르게 분산시켜 열영향부를 줄여 고주파 용접에 특히 적합합니다. 둘째, 고온 저항성과 아크 침식 저항성은 사용 수명을 연장합니다. 텅스텐의 경도는 반복 작업을 지원하고, 표면 손실을 줄이며, 복잡한 작업 조건에 적응합니다. 셋째, 점착 방지 및 기계적 강도는 다양한 상황에서의 사용을 지원합니다. 미세 조직의 인성은 균열 위험을 줄이고, 표면 처리는 용접 슬래그의 점착을 줄입니다.

적용 분야로는 자동차 산업과 전자 제도가 있습니다. 텅스텐 구리 전극의 열 관리 기능은 용접 효율을 향상시키고, 냉각 시스템과 환경 제어는 성능을 더욱 최적화합니다.

6.4 항공우주 및 군사 산업에서의 텅스텐-구리 전극의 적용

항공우주 및 군사 분야에서 텅스텐-구리 전극은 극한 환경에서 탁월한 성능을 발휘하며, 높은 내구성과 신뢰성이 요구되는 핵심 부품에 널리 사용됩니다. 텅스텐의 높은 녹는점과

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

경도는 구리의 높은 전기 및 열 전도성과 결합하여 로켓 엔진 및 유도 부품에 이상적인 소재입니다. 분말 야금이나 진공 함침과 같은 제조 공정을 통해 전극의 낮은 기공률과 균일한 미세 구조를 보장하며, 열간 등방성 성형을 통해 열 피로 저항성과 기계적 강도를 더욱 최적화합니다. 항공우주 및 군사 분야에서 텅스텐-구리 전극은 심우주 탐사, 미사일 기술, 그리고 방위 장비의 요구를 충족하며, 특히 고열 및 고응력 조건에서 탁월한 성능을 발휘합니다.

6.4.1 로켓 엔진 관련 부품에 대한 응용

로켓 엔진 부품에 사용되는 텅스텐-구리 전극은 고온 고압 환경에서 탁월한 성능을 발휘하여 추진 시스템 및 연소실 제조에 특히 적합합니다. 로켓 엔진은 극한의 열 부하에서도 안정성을 유지해야 합니다. 텅스텐-구리 전극은 진공 함침 공정을 통해 고함량의 텅스텐을 사용하여 제조됩니다. 텅스텐 분말은 견고한 골격을 형성하고, 구리는 액체 함침을 통해 재료에 침투합니다. 열간 등압 성형은 미세 구조를 최적화하여 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 보장합니다. 구리의 높은 전기 및 열 전도성은 효율적인 열 관리를 지원하며, 텅스텐의 고온 저항성은 용융을 방지합니다. 도금과 같은 표면 처리는 내식성을 향상시킵니다.

로켓 엔진에서 텅스텐-구리 전극은 노즐이나 연소실 라이닝에 사용됩니다. 고온 저항성은 고온 가스 흐름으로부터 보호하여 구조적 무결성을 유지합니다. 미세 구조의 균일성은 열 분배를 균일하게 하고 열응력을 감소시킵니다. 텅스텐의 경도는 장기간 사용을 지원하고, 구리의 열전도도는 방열을 촉진하여 부품 수명을 연장하고 특히 고추력 엔진에 적합합니다. 제조 공정에서 기공률 제어와 원자재 순도는 관통 효율에 직접적인 영향을 미칩니다. 절단 및 연삭과 같은 후가공 기술은 기하학적 정확도를 최적화하고 복잡한 형상을 수용할 수 있도록 합니다. 사용 시나리오에는 우주 발사 및 심우주 탐사가 포함됩니다. 텅스텐-구리 전극의 기계적 강도는 고압 환경을 견디며, 불활성 분위기와 같은 환경 제어는 산화를 방지합니다.

6.4.2 지침 구성 요소에 대한 적용

유도 부품의 텅스텐-구리 전극은 정밀 제어 및 내진동성 향상에 중요한 역할을 하므로, 특히 레이더 안테나 및 항법 시스템 제조에 적합합니다. 유도 부품은 높은 정밀도와 신뢰성을 요구합니다. 텅스텐-구리 전극은 중간 정도의 텅스텐 함량을 갖는 분말 야금 공정으로 제조됩니다. 텅스텐 분말은 구리 분말과 혼합하여 소결하여 전도성 네트워크를 형성합니다. 열간 등방성 가압 성형은 미세 구조를 최적화하여 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 보장합니다. 구리의 높은 전도성은 신호 전송을 지원하고, 텅스텐의 높은 경도는 내진동성을 향상시킵니다. 연마와 같은 표면 처리는 접촉 품질을 향상시킵니다.

유도 부품에서 텅스텐-구리 전극은 전기 접점 또는 방열판으로 사용됩니다. 전극의 열전도도는 열을 고르게 분산시켜 전자 부품의 과열을 줄여줍니다. 미세 구조의 높은 인성은 기계적 충격에 대한 저항성을 제공하여 고속 항공기에 특히 적합합니다. 텅스텐의 내마모성은 장기적인 안정성을 보장하는 반면, 구리의 전도성은 신호 품질을 최적화하고

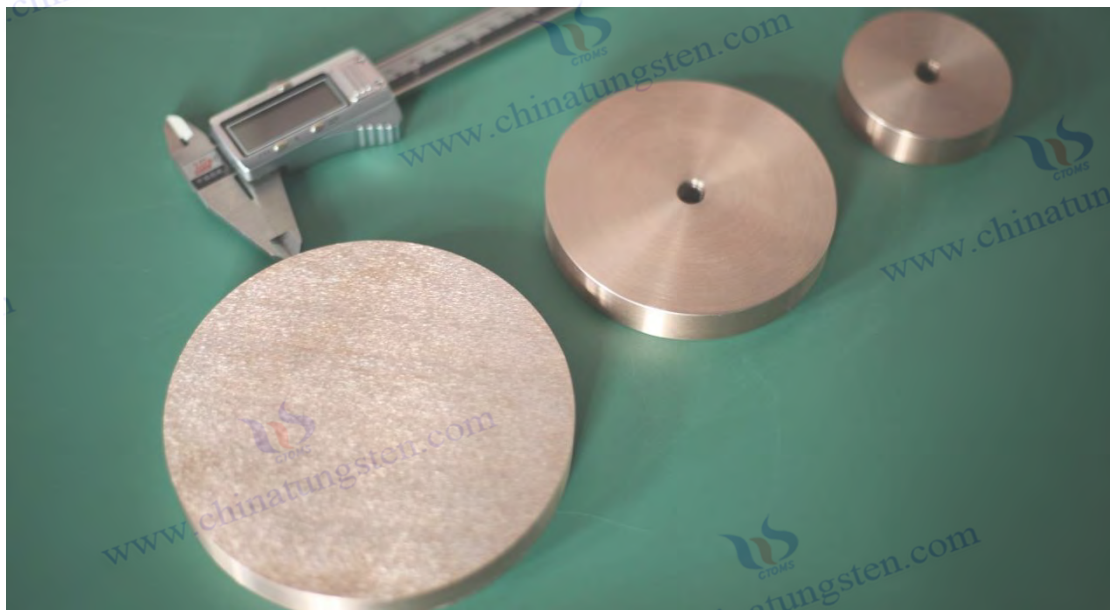
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

복잡한 전자기 환경에 적응합니다. 제조 공정에서 원료 혼합 및 소결 변수는 전극 성능에 직접적인 영향을 미치며, 연삭과 같은 후처리 단계는 치수 정확도를 보장합니다. 사용 시나리오로는 미사일 유도 및 위성 항법 등이 있습니다. 텅스텐 구리 전극의 열팽창 매칭은 기관과의 응력을 줄이고, 먼지 방지 처리와 같은 환경 제어를 통해 신뢰성을 향상시킵니다.

6.4.3 항공우주 및 군사 산업에서의 응용 이점

항공우주 및 군사용 텅스텐-구리 전극은 소재의 복합적 특성과 최적화된 제조 공정을 바탕으로 고온, 고응력 환경에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 항공우주 및 군사용 전극은 고온 저항성, 전기 전도성, 그리고 기계적 강도를 갖춘 전극을 필요로 합니다. 텅스텐-구리 전극은 높은 텅스텐 함량을 활용하여 내열성을 제공하고, 텅스텐의 경도는 극한 환경에 대한 저항성을 제공하며, 구리의 높은 전기 전도성은 효율적인 전류 또는 신호 전송을 보장합니다. 분말 야금은 낮은 기공률을 가진 미세 구조를 생성하며, 열간 등방성 성형은 계면 결함을 향상시킵니다. 도금과 같은 표면 처리는 내후성을 향상시킵니다.

응용 분야의 장점은 첫째, 고온 내성에 있습니다. 텅스텐 구리 전극의 내열성은 고온 환경에서 로켓 엔진과 유도 부품의 안정적인 작동을 지원하고, 재료 손실을 줄이며, 사용 수명을 연장합니다. 둘째, 전기 전도성과 열 전도성의 조합은 성능을 최적화합니다. 구리 상의 열 분산은 국부 과열을 줄이고, 전자 부품이나 신호 전송의 효율을 향상시키며, 특히 고정밀 응용 분야에 적합합니다. 셋째, 기계적 강도와 내진동성은 복잡한 작업 조건을 지원하고, 미세 구조의 인성은 균열 위험을 줄이며, 표면 처리는 내구성을 향상시킵니다. 사용 시나리오에는 우주 발사 및 방위 장비가 포함됩니다. 텅스텐 구리 전극의 열 관리 기능은 부품 신뢰성을 향상시키고, 환경 제어 및 냉각 시스템은 성능을 더욱 최적화합니다.



CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 7 장: 텅스텐-구리 전극의 품질 관리 및 시험 기준

텅스텐-구리 전극은 원료 선별부터 완제품 가공까지 전체 생산 공정에 걸쳐 엄격한 공정을 거칩니다. 과도한 불순물이 전극의 전기 전도도와 고온 저항에 영향을 미치지 않도록 원료 공정 과정에서 텅스텐 및 구리 분말의 순도, 입자 크기 및 균일성을 검증해야 합니다. 성형 및 소결 공정에서는 가압 밀도, 소결 온도 및 유지 시간을 제어하여 심각한 기공이나 균열 없이 치밀한 내부 구조를 확보하고 사용 중 마모 위험을 최소화해야 합니다. 또한, 가공 단계에서는 특히 정밀 방전 가공(EDM)에 사용되는 전극의 경우 치수 정확도와 표면 거칠기를 모니터링해야 합니다. 시험 기준 측면에서, 텅스텐-구리 전극은 품질 검증을 위해 여러 차례의 성능 시험을 거쳐야 합니다. 물리적으로는 밀도, 경도, 전도도를 시험하여 해당 적용 분야의 기본 성능 요건을 충족하는지 확인합니다. 구조적 무결성은 금속현미경이나 초음파 검사를 통해 검사하며, 강도에 영향을 미치는 내부 결함은 엄격히 금지됩니다. 특수한 경우에는 실제 작동 조건에서 발생하는 마모를 시뮬레이션하기 위해 아크 침식 저항성 시험과 고온 안정성 시험도 요구됩니다. ASTM 표준은 국제적으로 자주 참조되는 반면, GB/T 규격은 국내에서 사용됩니다. 일부 고급 응용 분야에서는 더욱 엄격한 요건을 충족하기 위해 맞춤형 표준을 사용하기도 합니다.

7.1 텅스텐 구리 전극의 주요 지표 검출

텅스텐-구리 전극은 물리적, 열적, 전기적 전도성과 같은 측면을 포괄하여 성능과 신뢰성을 보장하는 데 매우 중요합니다. 과학적 시험 방법과 표준화된 공정을 통해 제조업체는 전극이 특정 응용 분야 요건을 충족하는지 검증할 수 있습니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 생산되며, 미세 구조와 성분 분포는 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 열간 등압 성형은 전극의 일관성을 더욱 최적화합니다. 시험 과정에는 전극의 밀도, 열전도도 및 전기적 특성을 평가하기 위한 다양한 계측기와 환경 제어 장치가 사용되며, 이는 방전 가공, 고전압 전기 장비, 용접과 같은 분야에서 매우 중요합니다. 앞으로 시험 기술의 발전은 더욱 정교한 품질 관리로 이어질 것입니다.

7.1.1 텅스텐 구리 전극의 물리적 특성 시험

텅스텐-구리 전극은 품질 관리의 핵심 요소로, 밀도, 구조적 무결성, 그리고 기계적 특성을 평가하여 후속 적용을 위한 기반을 제공합니다. 물리적 특성은 전극 제조 품질과 미세 구조적 특성을 반영합니다. 텅스텐의 높은 경도와 구리의 연성은 시험을 어렵게 만듭니다. 시험은 일반적으로 밀도, 기공률, 표면 형태 등 여러 매개변수를 포함하는 특수 장비와 표준화된 절차를 사용하여 실험실 환경에서 수행됩니다. 열간 등압 성형에 최적화된 전극은 높은 물리적 안정성을 나타내며, 이러한 시험 결과는 공정 개선의 토대가 되어 고부하 또는 고온 환경에서 전극의 신뢰성을 보장합니다.

7.1.1.1 밀도 시험 방법 및 표준

밀도 시험 방법 및 표준은 텅스텐-구리 전극의 물리적 특성 시험의 시작점입니다. 이러한 시험은 전극의 밀도와 기공 분포를 반영하는 단위 부피당 질량을 측정하는 것을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

목표로 합니다. 밀도는 전극의 기계적 강도와 전도도에 직접적인 영향을 미칩니다. 시험은 일반적으로 아르키메데스법 또는 변위법을 사용하여 전극을 액체에 담그고 무게 변화를 측정하여 밀도를 계산합니다. 아르키메데스법은 잔류 액체가 결과에 영향을 미치지 않도록 전극 표면을 깨끗하게 유지해야 합니다. 일관된 측정을 보장하기 위해 작동 중 온도와 습도를 제어해야 합니다. 정밀한 무게 측정 및 액체 변위법을 통해 달성되는 변위법은 복잡한 형상의 전극에 적합하며 고정밀 저울이 필요합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 준비 및 다점 측정이 포함됩니다. 시료는 여러 배치에서 무작위로 추출하고, 대표 영역을 절단하여 균일성을 평가합니다. 시험 환경은 외부 간섭을 피하기 위해 안정적이어야 합니다. 시험 결과는 소결 온도 및 압력과 같은 공정 매개변수와 상관 관계를 갖습니다. 품질 관리 담당자는 산업 표준에 따라 밀도 범위를 설정합니다. 이 범위를 벗어나는 전극은 생산 공정을 추적하고 분말 혼합 또는 침투 조건을 조정해야 합니다. 연마와 같은 표면 처리는 밀도 시험에 도움이 되고 표면 결함의 영향을 줄일 수 있습니다.

7.1.1.2 열 성능 시험 방법 및 표준

열 성능 시험 방법과 표준은 텅스텐-구리 전극의 열 관리 능력을 평가하는 데 핵심적인 요소입니다. 이러한 시험은 열전도도와 열팽창 특성을 측정합니다. 열 성능은 고온 환경에서 전극의 안정성과 방열 효율에 직접적인 영향을 미칩니다. 시험은 일반적으로 열류계 또는 레이저 플래시 방식을 사용하여 수행됩니다. 열류계 방식은 열류 센서를 사용하여 열 전달을 측정하며, 일정한 온도 작동이 필요한 벌크 전극의 열전도도 평가에 적합합니다. 레이저 플래시 방식은 짧은 펄스로 시료 표면을 가열하고 열 확산 시간을 측정합니다. 얇은 시트나 섬세한 부품에 적합하며 매우 민감한 장비가 필요합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 준비 및 환경 관리가 포함됩니다. 표면 거칠기가 측정에 영향을 미치지 않도록 시료를 평평한 표면으로 연마해야 합니다. 시험 환경은 고온과 같은 실제 작동 조건을 시뮬레이션해야 하며, 다점 측정을 통해 대표성 있는 데이터를 확보해야 합니다. 열 성능 결과는 미세 구조와 상관관계가 있습니다. 열간 등압 성형에 최적화된 전극은 우수한 열 안정성을 보이며, 시험 데이터는 공정 조정의 기준이 됩니다. 품질 관리 담당자는 업계 표준을 기반으로 열 성능 임계값을 설정합니다. 이러한 임계값을 벗어나는 전극은 구리 함량 또는 기공 분포를 최적화해야 합니다.

7.1.1.3 전도도 시험 방법 및 표준

전도도 시험 방법 및 표준은 텅스텐-구리 전극의 전기적 특성을 평가하는 데 핵심적인 역할을 합니다. 이러한 시험 방법 및 표준은 효율적인 전류 전달을 보장하기 위해 저항률과 전도도를 측정합니다. 전도도는 방전 가공(EDM) 또는 고전압 전기 응용 분야에서 전극의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 시험에는 일반적으로 4 단자 시험 또는 브리지 시험 방법이 사용됩니다. 4 단자 시험은 여러 전극 지점에서 샘플을 접촉시켜 접촉 저항의 영향을 최소화하므로 고정밀 측정에 적합하며 정전류 작동이 필요합니다. 브리지 시험은 브리지 회로를 사용하여 저항 값을 비교하며, 매우 민감한 계측기를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

필요로 하는 복잡한 전극 형상에 적합합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 준비 및 환경 관리가 포함됩니다. 결과에 기하학적 영향이 미치지 않도록 시료를 표준 치수로 절단해야 합니다. 시험 환경은 전자와 간섭으로부터 보호되어야 하며, 온도와 습도는 안정적으로 유지되어야 합니다. 다점 측정은 전도도의 일관성을 보장합니다. 전도도 결과는 미세 구조 및 구리 함량과 밀접한 관련이 있습니다. 열간 등압 성형(HIP)을 통해 최적화된 전극은 우수한 전도도 균일성을 나타내며, 시험 데이터를 통해 비율 조정이 가능합니다.

7.1.2 텅스텐 구리 전극의 화학적 성능 시험

텅스텐-구리 전극은 품질 관리의 핵심 요소입니다. 전극의 성분 분포, 내식성, 불순물 함량을 평가하여 다양한 환경에서 전극의 화학적 안정성과 사용 수명을 보장합니다. 화학적 특성은 전극의 내산화성, 내식성, 그리고 장기 신뢰성에 직접적인 영향을 미칩니다. 테스트는 일반적으로 실험실 환경에서 첨단 분석 기법과 표준화된 운영 절차를 활용하여 수행됩니다. 텅스텐의 높은 화학적 안정성과 구리의 활성 특성은 다양한 테스트 절차를 가능하게 합니다. 열간 등압 성형에 최적화된 전극은 탁월한 화학적 균일성을 보입니다. 테스트 결과는 원자재 선정 및 공정 개선의 기준이 됩니다.

7.1.2.1 성분 분석 방법

구리 의 비율 과 기타 미량 원소의 함량을 측정하여 해당 비율이 설계 요건을 충족하는지 확인하는 것을 목표로 합니다. 이 과정은 일반적으로 분광 분석이나 화학 적정법을 활용합니다. X 선 형광 분광법(XRF)이나 유도 결합 플라즈마 발광 분광법(ICP-OES)과 같은 분광 분석법은 시료에서 방출되는 스펙트럼 특성을 통해 원소 조성을 식별하며, 신속한 시험에 적합합니다. 화학 적정법은 표준 용액과 시료의 반응을 통해 텅스텐 및 구리 함량을 정밀하게 측정하며, 고정밀 적정 장비가 필요합니다.

표준화된 시험 과정에는 시료 준비와 다점 샘플링이 포함됩니다. 시료는 전극의 여러 부분에서 잘라내어 균일한 분말로 분쇄하여 대표성을 확보해야 합니다. 시험 환경의 습도는 시료의 산화 또는 수분 흡수를 방지하기 위해 조절해야 하며, 작업자는 화학 시약을 취급할 때 안전 규정을 준수해야 합니다. 성분 분석 결과는 준비 과정과 관련이 있습니다. 예를 들어, 분말 혼합 균일성과 침투 조건은 최종 비율에 직접적인 영향을 미칩니다. 품질 관리 담당자는 제품 사양에 따라 성분 범위를 설정합니다. 범위를 초과하는 전극은 원료 배치를 추적하거나 공정 매개변수를 조정해야 합니다. 연마와 같은 표면 처리는 표면 오염의 영향을 줄일 수 있습니다. 향후 휴대용 분광기 또는 자동 분석 시스템을 도입하여 성분 검출의 효율성과 정확도를 향상시킬 수 있습니다.

7.1.2.2 내식성 시험 방법

내식성 시험 방법은 산성, 알칼리성 또는 습한 환경에서 텅스텐-구리 전극의 화학적 안정성을 평가하여 산업 분야에서 전극의 장기적인 성능을 보장하는 데 핵심적인 역할을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

합니다. 이 시험은 일반적으로 염수 분무 시험 또는 침지 시험을 포함합니다. 염수 분무 시험은 부식성 대기 환경을 시뮬레이션하여 전극 표면의 변화를 관찰합니다. 이 시험은 전용 염수 분무 챔버에서 수행해야 합니다. 반면 침지 시험은 전극을 묶은 황산이나 염화나트륨 용액과 같은 특정 부식성 용액에 넣고 표면 부식 및 질량 손실 정도를 정기적으로 점검합니다. 이 시험에는 항온 장비가 필요합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 준비 및 환경 관리가 포함됩니다. 초기 결함이 결과에 영향을 미치지 않도록 시료는 일관된 표면으로 연마되어야 합니다. 시험 주기는 적용 조건에 따라 설정되며, 일관성을 검증하기 위해 여러 시료 그룹을 병렬로 시험합니다. 내식성 결과는 미세 구조 및 표면 처리와 관련이 있습니다. 열간 등압 성형 공정으로 최적화된 전극은 우수한 내식성 균일성을 보입니다. 시험 데이터는 도금 또는 코팅 공정의 기준이 됩니다. 품질 관리 담당자는 산업 표준에 따라 부식률을 평가합니다. 범위를 벗어나는 전극은 구리 함량 최적화 또는 내식성 처리 도입이 필요합니다.

7.1.2.3 불순물 함량 시험 기준

불순물 함량 시험 기준은 텅스텐 구리 전극의 화학적 순도를 보장하는 데 핵심적입니다. 이 기준은 산소, 황 또는 기타 미량 원소의 영향을 파악하고 제어하여 성능에 부정적인 영향을 미치지 않도록 방지하는 것을 목표로 합니다. 이 공정은 일반적으로 연소 또는 질량 분석법을 사용합니다. 연소법은 고온에서 시료를 분해하여 방출되는 산소 또는 질소의 양을 측정하며, 이 경우 적외선 흡수 분광기가 필요합니다. 질량 분석법은 시료를 이온화하여 원소 조성을 분석하며, 미량 불순물을 검출하는 데 적합하므로 고해상도 질량 분석기가 필요합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 준비 및 환경 관리가 포함됩니다. 시료는 여러 배치에서 무작위로 추출하여 분쇄한 후 건조하여 표면 수분을 제거합니다. 시험 환경은 외부 오염이 없어야 하며, 작업자는 고온 장비를 취급할 때 안전 규정을 준수해야 합니다. 불순물 함량 결과는 원료 순도 및 준비 환경과 관련이 있습니다. 열간 등압 가압에 최적화된 전극은 낮은 불순물 수준을 나타냅니다. 시험 데이터는 원료 선별 및 공정 최적화의 기준이 됩니다. 품질 관리 담당자는 업계 표준을 기반으로 불순물 기준치를 설정합니다. 이 범위를 초과하는 전극은 분말 순도 조정 또는 정제 단계 도입이 필요합니다.

7.1.3 텅스텐 구리 전극의 기계적 성질 시험

텅스텐-구리 전극은 품질 관리에 필수적인 요소로, 고하중이나 충격 하에서의 신뢰성을 보장하기 위해 경도, 강도, 인성을 평가합니다. 기계적 특성은 전극의 변형, 파괴 및 에너지 흡수에 대한 저항성을 나타냅니다. 시험은 일반적으로 특수 장비와 표준화된 절차를 사용하여 실험실에서 수행됩니다. 텅스텐의 높은 경도와 구리의 연성은 다양한 시험 절차를 가능하게 합니다. 열간 등압 성형에 최적화된 전극은 탁월한 기계적 균일성을 나타내며, 이러한 시험 결과는 공정 개선 및 적용 분야 선택에 대한 지침을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1.3.1 경도 시험 방법 및 표준

경도 시험 방법 및 표준은 텅스텐-구리 전극의 기계적 성능 시험에 필수적입니다. 압입 및 마모에 대한 표면 저항을 측정하여 가공 또는 사용 중 전극의 내구성을 보장하는 것을 목표로 합니다. 이 공정에는 일반적으로 비커스 경도법 또는 로크웰 경도법이 사용됩니다. 비커스 경도법은 다이아몬드 압입자를 시료 표면에 압입하고 압입의 형상을 관찰하는 방식입니다. 이 방법은 경질 재료 시험에 적합하며 고정밀 현미경이 필요합니다. 로크웰 경도법은 압입자의 침투 깊이를 측정하여 경도 변화를 신속하게 평가합니다. 대규모 시험에 적합하며 표준 시험기를 사용해야 합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 준비 및 다점 측정이 포함됩니다. 시료는 전극의 여러 부분에서 절단하여 평탄한 표면으로 연마해야 초기 결함이 결과에 영향을 미치지 않습니다. 시험 환경은 열팽창이나 표면 산화로 인한 간섭을 방지하기 위해 온도와 습도를 조절해야 합니다. 작업자는 장비 작동 시 안전 규정을 준수해야 합니다. 경도 결과는 미세 구조 및 텅스텐 함량과 관련이 있습니다. 열간 등압 성형 공정 최적화 후 전극은 양호한 경도 균일성을 보이며, 시험 데이터를 바탕으로 경도 비율을 조정합니다. 품질 관리 담당자는 업계 표준에 따라 경도 범위를 설정합니다. 범위를 벗어나는 전극은 소결 또는 후처리 공정을 최적화해야 합니다. 연삭과 같은 표면 처리는 경도 시험에 도움이 될 수 있습니다. 향후 자동 경도계 또는 이미지 분석 기술의 도입을 통해 검출 효율과 정확도를 향상시킬 수 있습니다.

7.1.3.2 강도 시험 방법 및 표준

텅스텐-구리 전극의 압축 및 인장 강도를 평가하여 높은 기계적 응력 하에서의 안정성을 보장하는 데 핵심적인 역할을 합니다. 이 과정은 일반적으로 압축 시험 또는 인장 시험을 포함합니다. 압축 시험은 압력을 가하여 샘플의 변형 한계를 측정하는 시험으로, 블록 전극에 적합하며 만능 시험기가 필요합니다. 인장 시험은 파단될 때까지 인장력을 가하여 인장 강도를 평가하는 시험으로, 막대형 또는 판형 전극에 적합하며 특수 고정구가 필요합니다.

표준화된 시험 과정에는 시료 준비 및 환경 관리가 포함됩니다. 시료는 일관된 형상을 보장하기 위해 표준 치수로 가공되어야 하며, 응력 집중을 방지하기 위해 절개 부위는 매끄러워야 합니다. 시험 환경은 온도 변동이 재료 특성에 영향을 미치지 않도록 일정한 온도를 유지해야 하며, 다점 측정을 통해 균일성을 검증합니다. 강도 결과는 미세 구조 및 준비 과정과 관련이 있습니다. 열간 등방성 성형(HIP)에 최적화된 전극은 높은 압축 안정성을 나타내며, 시험 데이터는 압력 및 소결 매개변수 조정을 위한 기준이 됩니다. 품질 관리 담당자는 업계 표준을 기반으로 강도 임계값을 설정합니다. 이 범위를 벗어나는 전극은 분말 입자 크기 또는 침투 조건의 최적화가 필요합니다.

7.1.3.3 인성 시험 방법 및 표준

전극의 파괴 저항성과 에너지 흡수 능력을 평가하는 데 핵심적인 역할을 하며, 충격

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

또는 열 사이클링 시 전극의 신뢰성을 확보하는 것을 목표로 합니다. 이 과정은 일반적으로 충격 시험 또는 파괴인성 시험을 포함합니다. 충격 시험은 진자로 시료를 타격하고 흡수 에너지를 측정하는 과정입니다. 이는 충격 저항성을 평가하는 데 적합하며 표준 진자 시험기를 필요로 합니다. 반면, 파괴인성 시험은 미리 생성된 균열에 하중을 가하고 그 전파 거동을 분석하는 과정입니다. 이는 정밀 부품 시험에 적합하며 고정밀 하중 장비가 필요합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 준비 및 환경 관리가 포함됩니다. 시료는 지정된 형상으로 가공되어야 하고, 사전 균열은 표준 요건을 충족해야 하며, 표면은 초기 결함을 줄이기 위해 연마되어야 합니다. 시험 환경은 진동이나 온도 변화가 결과에 영향을 미치지 않도록 안정적이어야 합니다. 대표성을 보장하기 위해 여러 시료 그룹을 병렬로 시험합니다. 인성 결과는 미세 구조 및 구리 함량과 관련이 있습니다. 열간 등압 성형 공정으로 최적화된 전극은 우수한 인성 균일성을 보입니다. 시험 데이터는 상 분포 조정에 영향을 미칩니다.

7.2 텅스텐 구리 전극의 미세조직 검사

텅스텐-구리 전극의 미세 조직 검사는 품질 관리에 있어 중요한 단계로, 내부 구조적 특성을 분석하여 제조 공정의 효율성과 재료 특성을 평가하는 것을 목표로 합니다. 미세 조직은 전극의 기계적 강도, 전도성, 그리고 내구성에 직접적인 영향을 미칩니다. 검사는 일반적으로 첨단 현미경 기술과 표준화된 운영 절차를 사용하여 실험실 환경에서 수행됩니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 제조됩니다. 미세 조직은 텅스텐 골격과 구리 상 분포로 구성됩니다. 열간 등압 성형은 전극의 균일성과 밀도를 더욱 최적화합니다. 검사 과정에는 금속 조직 분석, 상 분포 균일성 평가, 그리고 결정립 크기 측정이 포함되며, 이는 방전 가공, 고전압 전기 장비, 용접과 같은 분야에서 매우 중요한 지표입니다.

7.2.1 금속조직 분석

금속조직 분석은 텅스텐-구리 전극의 미세구조 시험의 핵심으로, 내부 구조적 특징을 관찰하여 재료의 품질과 일관성을 평가하는 것을 목표로 합니다. 이 과정은 광학 현미경이나 주사전자현미경(SEM)과 같은 미세한 기술을 사용하여 전극의 상 구조, 기공 분포, 계면 결함을 파악합니다. 금속조직 분석은 미충진 기공이나 상 분리와 같은 제조 공정상의 결함을 파악하는 데 도움이 됩니다. 열간 등압 성형에 최적화된 전극은 탁월한 구조적 균일성을 보입니다. 분석 결과는 고하중이나 고온에서 안정적인 전극 성능을 보장하기 위한 공정 조정의 기준이 됩니다.

7.2.1.1 금속조직 샘플 준비

금속조직 시료 전처리는 금속조직 분석의 기본 단계로, 시료 가공을 통해 미세 관찰에 적합한 매끄러운 단면을 얻는 것을 목표로 합니다. 이 과정은 일반적으로 절단, 연삭, 연마의 여러 단계로 구성됩니다. 절단은 금속조직 커터를 사용하여 전극을 얇은 조각으로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

자르며, 재료 손상을 방지하기 위해 적절한 절삭 공구를 선택해야 합니다. 연삭은 다양한 입자의 사포를 사용하여 표면 거칠기를 점진적으로 제거하며, 압력과 방향을 조절하여 매끄러운 단면을 확보합니다. 연마는 다이아몬드 서스펜션 또는 알루미나 연마 페이스트를 사용하여 표면 마감을 더욱 개선하며, 오염 방지를 위해 먼지가 없는 환경에서 수행해야 합니다.

구리 의 상 구조를 강조하기 위해 적절한 화학 시약을 사용하여 단면을 에칭하는 작업도 포함됩니다 . 에칭 시간과 시약 농도는 재료 특성에 따라 조정됩니다. 열간 등압 성형(HIP)에 최적화된 전극은 관찰에 영향을 줄 수 있는 과도한 부식을 방지하기 위해 표면 보호에 특별한 주의를 기울여야 합니다. 전처리 중에는 온도 및 습도와 같은 환경 관리가 매우 중요하며, 산화를 방지하기 위해 시료는 건조한 곳에 보관해야 합니다. 품질 관리 담당자는 업계 표준에 따라 전처리 품질을 검증하며, 굽힘이나 균열과 같은 결함은 분석 결과를 왜곡할 수 있습니다.

7.2.1.2 위상 분포 균일성에 대한 평가 기준

상 균일성 평가는 금속 조직 분석의 핵심 단계로, 전극 내 텅스텐과 구리의 분포를 평가하여 일관된 성능을 보장하는 것을 목표로 합니다. 이 과정은 현미경으로 단면 이미지를 관찰하고 이미지 처리 소프트웨어를 사용하여 상 구조의 균일성을 분석하는 과정으로 구성됩니다. 정량적 평가는 일반적으로 격자법 또는 점 계수법을 사용하여 수행됩니다. 격자법은 단면을 여러 영역으로 나누고 각 영역의 상 비율을 계산합니다. 점 계수법은 고해상도 이미징 시스템을 사용하여 무작위 표본 추출을 통해 텅스텐과 구리의 분포 밀도를 계산합니다.

표준화된 평가 과정에는 시료 선정 및 다점 분석이 포함됩니다. 대표성을 보장하기 위해 여러 배치 및 위치에서 시료를 선정해야 하며, 균일성을 검증하기 위해 단면의 여러 영역을 분석해야 합니다. 열간 등압 성형 공정으로 최적화된 전극은 더 나은 상 분포를 보입니다. 시험 결과는 침투 공정 및 분말 혼합과 관련이 있습니다. 국소 농축이나 기공과 같은 결함은 성능에 영향을 미칠 수 있습니다. 품질 관리 담당자는 산업 표준을 기반으로 균일성 임계값을 설정합니다. 이 범위를 초과하는 전극은 원료 입자 크기 또는 소결 조건을 조정해야 합니다. 진동 방지와 같은 환경 제어를 통해 선명한 이미지를 얻을 수 있습니다. 향후 인공지능 분석이나 3 차원 이미징 기술을 도입하여 상 분포 평가의 정확성과 포괄성을 향상시킬 수 있습니다.

7.2.1.3 입자 크기 감지

결정립 크기 시험은 금속 조직 분석의 핵심 요소로, 텅스텐 및 구리 결정립의 크기를 측정하고 전극 성능에 미치는 영향을 평가하는 것을 목표로 합니다. 이 과정은 표준 선 교차법 또는 자동 이미지 분석을 사용하여 에칭된 단면을 현미경으로 관찰하는 과정을 포함합니다. 표준 선 교차법은 무작위 직선을 사용하여 결정립 단면을 표시하는 반면, 자동 이미지 분석법은 소프트웨어를 사용하여 결정립계를 식별하므로 고배율 현미경이 필요합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표준화된 검사 공정에는 시료 준비 및 다영역 측정이 포함됩니다. 시료는 결정립계가 명확하게 보이도록 연마 및 에칭해야 합니다. 균일성을 평가하기 위해 단면의 여러 부분을 측정해야 합니다. 열간 등압 성형 공정 최적화 후 전극의 결정립 크기는 더욱 일관됩니다. 시험 결과는 소결 온도 및 시간과 밀접한 관련이 있습니다. 지나치게 크거나 불균일한 결정립은 성능을 저하시킬 수 있습니다. 품질 관리 담당자는 산업 표준에 따라 결정립 크기 범위를 설정합니다. 범위를 초과하는 전극은 소결 매개변수를 최적화하거나 미세화 기술을 도입해야 합니다. 일정한 온도와 같은 환경 제어는 열팽창의 영향을 방지합니다. 앞으로 나노 스케일 현미경이나 동적 이미징 기술을 도입하여 결정립 크기 검출의 정확도와 실시간 성능을 향상시킬 수 있습니다.

7.2.2 텅스텐-구리 전극의 결함 검출

텅스텐-구리 전극은 미세 구조 검사의 핵심 요소로, 기공, 균열, 개재물과 같은 결함을 식별하고 평가하여 전극 품질과 신뢰성을 보장하는 것을 목표로 합니다. 결함은 성능 저하 또는 수명 단축으로 이어질 수 있습니다. 검사는 일반적으로 실험실 환경에서 비파괴 검사 또는 파괴 검사 방법과 표준화된 측정 절차를 결합하여 수행됩니다. 분말 야금이나 진공 침투와 같은 텅스텐-구리 전극 제조 공정에서 결함이 발생할 수 있습니다. 열간 등방성 성형(HIP)은 미세 구조를 최적화하여 이러한 결함을 줄입니다. 검사 결과는 공정 개선의 기반이 되어 고부하 또는 극한 환경에서도 안정적인 전극 성능을 보장합니다.

7.2.2.1 기공률 검출 방법 및 허용 범위

기공 검출 방법과 허용 오차는 텅스텐-구리 전극의 결함 검출에 필수적입니다. 이 방법들은 내부 공극을 식별하고 재료 특성에 미치는 영향을 평가하는 것을 목표로 합니다. 기공은 소결 또는 침투 과정에서 형성되어 전극의 밀도와 전도도에 영향을 미칠 수 있습니다. 검출은 일반적으로 X선 또는 초음파 검사를 통해 수행됩니다. X선 검사는 투과 이미징을 사용하여 내부 기공의 분포를 시각화합니다. 복잡한 전극에 적합하며 고해상도 이미징 시스템이 필요합니다. 초음파 검사는 음파 반사를 통해 내부 공극을 분석하며, 특수 프로브와 신호 처리 장비가 필요한 대형 전극에 적합합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 준비 및 다각도 스캐닝이 포함됩니다. 시료 표면은 간섭을 최소화하기 위해 깨끗해야 하며, 시험은 전극의 여러 부분을 포괄하여 포괄성을 보장합니다. 열간 등압 성형(HIP)에 최적화된 전극은 기공률이 낮습니다. 시험 결과는 분말 입자 크기 및 침투 조건과 같은 준비 과정과 관련이 있으며, 이는 기공 형성에 직접적인 영향을 미칩니다. 품질 관리 담당자는 업계 표준을 기반으로 허용 기공률 범위를 설정합니다. 이 범위를 초과하는 전극은 소결 온도 조정 또는 진공 처리가 필요합니다.

7.2.2.2 균열 탐지 방법 및 기준

균열 검출 방법과 기준은 텅스텐-구리 전극의 내부 균열 위험을 평가하는 데 핵심적인 역할을 합니다. 이러한 방법의 목적은 열적 또는 기계적 응력으로 인한 결함을 식별하는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

것입니다. 균열은 소결, 냉각 또는 후처리 과정에서 발생하여 전극의 기계적 강도와 수명에 영향을 미칠 수 있습니다. 균열 검출은 일반적으로 침투 탐상 검사 또는 자분탐상 검사를 통해 수행됩니다. 침투 탐상 검사는 염료 침투를 통해 표면 균열을 찾아내며, 표면 세척이 필요한 복잡한 형상의 재료에 적합합니다. 자기장과 자분탐상 검사를 사용하여 내부 균열을 찾아내는 자분탐상 검사는 강자성 재료에 적합하며 자화 장비가 필요합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 전처리 및 다점 검사가 포함됩니다. 표면 오염 물질을 제거하고, 중요 전극 영역을 검사하여 무결성을 검증해야 합니다. 열간 등압 성형(HIP)에 최적화된 전극은 균열 발생률이 낮습니다. 시험 결과는 냉각 속도 및 압력 조건과 상관관계가 있으며, 미세 균열과 같은 결함은 확대 검사가 필요할 수 있습니다. 품질 관리 담당자는 업계 표준을 기반으로 균열 판정 기준을 설정합니다. 이러한 기준을 초과하는 전극은 소결 공정 최적화 또는 응력 제거 처리 도입이 필요합니다.

7.2.2.3 포함 탐지 방법 및 제어 표준

팅스텐-구리 전극의 순도를 보장하는 데는 개재물 검출 방법과 관리 표준이 핵심입니다. 이러한 표준은 원료 또는 제조 공정 중에 유입된 이물질을 식별하는 데 목적이 있습니다. 개재물에는 산화물이나 용융되지 않은 분말이 포함될 수 있으며, 이는 전극의 전도도와 내식성에 영향을 미칩니다. 검출은 일반적으로 분광 분석이나 전자 현미경을 사용하여 수행됩니다. 분광 분석은 시료에서 방출되는 분광 특성을 분석하여 개재물 원소를 검출합니다. 이는 신속한 스크리닝에 적합하며 고감도 계측기를 필요로 합니다. 반면 전자 현미경은 고배율 이미징을 통해 개재물 형태를 분석하며 상세 분석에 적합합니다. 에너지 분산 분광기를 사용해야 합니다.

표준화된 시험 절차에는 시료 준비 및 다영역 분석이 포함됩니다. 시료는 평평한 표면으로 슬라이스하고 연마해야 하며, 대표성을 보장하기 위해 전극의 여러 부분을 포괄하는 시험이 필요합니다. 열간 등압 성형 공정이 최적화되면 전극의 개재물이 줄어듭니다. 시험 결과는 원료의 순도 및 혼합물의 균일성과 관련이 있습니다. 국부적인 이물질과 같은 결함은 추가적인 단면 분석이 필요할 수 있습니다. 품질 관리 담당자는 업계 표준에 따라 개재물 관리 기준을 설정합니다. 기준을 초과하는 전극은 분말 공급원을 조정하거나 여과 공정을 도입해야 합니다. 먼지 방지 처리와 같은 환경 관리는 2 차 오염을 방지합니다. 향후 온라인 모니터링이나 자동 감지 기술을 도입하여 개재물 감지의 실시간성과 정확성을 향상시킬 수 있습니다.

7.3 텅스텐-구리 전극에 대한 산업 표준

팅스텐-구리 전극은 생산, 시험 및 적용 과정 전반에 걸쳐 일관된 품질과 성능을 보장하는 데 필수적입니다. 관련 권위 기관에서 개발한 이 표준은 텅스텐-구리 전극의 제조 공정 및 적용 조건과 결합하여 제조업체와 사용자가 기술 사양을 달성하고 안전을 보장할 수 있도록 지원합니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 생산되며, 미세 구조와 성능은 산업 요건을 충족해야 합니다. 열간 등방성 성형은 전극의 일관성을 더욱 최적화합니다. 산업 표준은 재료 구성, 성능 지표 및 결함 제어를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

포함하는 관련 국내 표준 및 특정 요건을 포괄하며, 방전 가공(EDM), 고전압 전기 장비 및 용접과 같은 분야에 대한 기술 지원을 제공합니다.

7.3.1 관련 국내 표준

전극의 생산 및 적용을 위한 통일된 기술 프레임워크를 제공하며, 이는 중국의 재료 과학 및 산업 제조 분야의 최신 발전을 반영합니다. 중국 국가표준화국과 업계 협회가 공동으로 개발한 이러한 표준은 전극의 제조, 시험 및 사용에 관한 내용을 다루며, 제품 품질 향상과 국제 경쟁력 강화를 목표로 합니다. 분말 야금 및 진공 침투와 같은 텅스텐-구리 전극 제조 공정은 이러한 표준을 준수해야 합니다. 열간 등압 성형(HIP)을 통해 최적화된 전극은 적합성 검증을 위한 시험을 거쳐야 합니다.

7.3.1.1 중국 표준의 관련 규정

중국 표준은 주로 중국표준화국(SMA)에서 발행하며, 텅스텐-구리 전극의 품질 관리 및 적용에 대한 구체적인 법적 및 기술적 근거를 제공합니다. "구리-텅스텐 및 은-텅스텐 전기 접점"과 "구리-텅스텐 전기 접점의 결함 검출 방법"과 같은 국가 표준을 포함한 이러한 규정은 구성 요건, 성능 지표 및 결함 검출 사양을 다룹니다. 제조 공정은 텅스텐 대 구리 비율이 표준을 충족하는지 확인해야 합니다. 테스트에는 물리적, 화학적 및 기계적 특성이 포함되며, 열간 등압 성형을 통해 최적화된 전극은 미세 구조 테스트를 거쳐야 합니다. 이 표준은 제조업체가 품질 관리 시스템을 구축하고, 원자재 및 완제품을 정기적으로 테스트하고, 코팅과 같은 표면 처리가 내식성 요건을 충족하는지 확인할 것을 요구합니다.

이 규정은 전기 합금 분야에 적용되며, 고전압 전기 장비 및 방전 가공에서 전극의 안정성을 강조하고 기업들이 결함을 줄이기 위한 첨단 공정을 도입하도록 장려합니다. 전기 합금 표준화를 위한 국가기술위원회와 같은 산업 협회가 표준 초안을 작성합니다. 주요 기관으로는 중국의 기술력을 대표하는 구이린 전기과학원과 원저우 홍평 전기합금 주식회사가 있습니다. 또한 이 표준은 다양한 적용 시나리오와의 호환성을 보장하기 위해 명확한 제품 라벨링과 안전 지침을 요구합니다.

7.3.1.2 산업 표준 요구 사항

전극의 특정 용도에 대한 상세한 기술 사양을 제공하며, 주로 산업정보화부(MIIT) 또는 관련 산업 협회에서 개발합니다. "텅스텐-구리 합금판"과 같은 산업 표준을 포함한 이러한 요건은 재료 특성, 가공 기술 및 작동 조건에 중점을 두어 기업이 시장 수요를 충족하는 전극을 생산하도록 지원합니다. 제조 공정에는 분말 입자 크기와 소결 매개변수의 제어가 필요합니다. 열간 등압 성형을 통해 최적화된 전극은 강도 및 전도성 요건을 충족해야 합니다. 절단 및 연삭과 같은 후가공 공정은 기하학적 정확성을 보장해야 합니다.

산업 표준은 전극이 EDM에서 아크 침식에 강하고, 용접 시 효율적인 열전도도를 보장하며, 고전압 전기 장비에서 고온 저항을 유지하도록 요구합니다. 테스트는 미세 구조, 결함 및 성능 지표를 포함해야 하며, 제조업체는 공정 매개변수와 테스트 결과를

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

기록하는 배치 검사 시스템을 구축해야 합니다. 또한 이 표준은 친환경 생산을 장려하고, 폐기물 배출을 줄이며, 환경 보호 요건을 준수합니다. 구이린 진거 전기전자재료기술(주)과 같은 관련 기관이 이 표준 개발에 참여한 것은 업계의 기술 수준을 반영합니다.

7.3.2 관련 국제 표준

전극의 글로벌 적용을 위한 통일된 기술 프레임워크를 제공하며, 재료 과학 및 산업 제조 분야의 다양한 국가와 지역 간의 협력과 합의를 반영합니다. 이러한 표준은 국제 표준화 기구(ISO)와 같은 조직에서 개발하거나 유럽, 미국, 일본, 한국과 같은 주요 선진국에서 자체적인 필요와 개발 수준에 따라 독립적으로 발표합니다. 이러한 표준은 국제 무역과 기술 교류를 촉진하는 것을 목표로 합니다. 분말 야금 및 진공 침투와 같은 텅스텐-구리 전극 제조 공정은 이러한 표준을 준수해야 합니다. 열간 등방성 성형(HIP) 공정을 통해 최적화된 전극은 국제적 호환성을 검증하기 위한 테스트를 거쳐야 합니다. 국제 표준은 구성 요구 사항, 성능 테스트 및 응용 사양을 다루며, 다국적 기업에 지침을 제공하고 글로벌 시장에서 일관된 품질과 신뢰성을 보장합니다.

7.3.2.1 국제 텅스텐-구리 전극 표준

국제 텅스텐-구리 전극 표준은 주로 국제 표준화 기구(ISO)에서 개발하며, 텅스텐-구리 전극의 전 세계 생산 및 적용에 대한 통일된 규격을 확립하는 것을 목표로 합니다. 이러한 표준은 텅스텐-구리 재료의 특성과 다양한 산업 응용 분야의 다양한 요구 사항을 통합하여 원자재 선정부터 최종 제품 시험까지 전 과정을 포괄합니다. ISO 표준은 종종 광범위한 국제 협력을 기반으로 하며 유럽, 미국, 일본, 한국과 같은 국가의 기술 전문 지식을 통합하여 전 세계적으로 적용 가능합니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 생산됩니다. 전극의 미세 구조와 특성은 ISO에서 지정한 조성비 및 물리적 특성을 준수해야 합니다. 열간 등방성 성형(HIP)을 통해 최적화된 전극은 국제 요구 사항을 충족하기 위해 엄격한 성능 테스트를 거쳐야 합니다. 텅스텐-구리 전극과 관련된 ISO 표준은 주로 재료 준비, 성능 평가 및 품질 관리를 다룹니다. 예를 들어, 표준은 전도성, 고온 저항성 및 기계적 강도의 균형을 맞추기 위해 용도에 따라 텅스텐-구리 비율을 조정해야 한다고 명시하고 있습니다. 생산 공정에서는 분말 입자 크기, 소결 조건 및 침투 기술을 정밀하게 제어하여 전극의 낮은 기공률과 균일한 상 분포를 보장해야 합니다. 시험 측면에서 ISO 표준은 X 선 또는 초음파 검사와 같은 첨단 비파괴 검사 기술을 사용하여 전극의 밀도, 전도성, 경도 및 내식성을 종합적으로 평가하여 내부 결함을 식별하도록 요구합니다. 열간 등방성 프레스 공정은 재료 밀도 및 성능 일관성을 개선하는 데 중요한 역할을 하며, 시험 결과는 국제적으로 인정되는 성능 기준과 비교되어야 합니다.

이러한 표준은 특히 방전 가공, 고전압 전기 장비, 용접과 같은 분야에 적용 가능하며, 극한 조건에서 전극의 안정성과 내구성을 강조합니다. 또한 ISO 표준은 친환경 공정 사용을 장려하고, 생산 과정에서 발생하는 폐기물을 줄이며, 지속 가능한 개발이라는 세계적인 추세에 발맞추고 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3.2.2 유럽, 미국, 일본, 한국 등 각국의 텅스텐-구리 전극 표준

유럽, 미국, 일본, 한국 및 기타 국가의 텅스텐-구리 전극 표준은 각 지역의 산업 기술 개발 및 응용 요구 사항의 고유한 특성을 반영합니다. 이러한 표준은 해당 국가의 표준화 기관에서 개발되었으며 다른 기술적 전통과 시장 방향을 반영합니다. 미국 표준은 주로 미국용접협회(AWS)와 미국재료시험협회(ASTM)에서 발행하고, 유럽 표준은 유럽표준화위원회(CEN)에서 개발하며, 일본 표준은 일본공업규격위원회(JISC)에서 발행하고, 한국 표준은 일본 표준을 참조하면서 현지 요구 사항을 통합합니다. 이러한 표준은 텅스텐-구리 전극의 준비, 테스트 및 적용에 대한 자세한 지침을 제공합니다. 열간 등방성 성형(HIP)을 통해 최적화된 전극은 각 지역에서 지정한 성능 사양을 충족해야 합니다.

미국에서 AWS 표준은 TIG 용접 및 전기 스파크 가공에서 텅스텐-구리 전극의 적용에 중점을 두고 전극의 구성, 형상 및 표면 처리 요구 사항을 지정합니다. ASTM 표준은 재료의 기계적 특성과 내구성에 더 중점을 두며 항공우주 및 방위 분야에 적합합니다. 준비 공정은 텅스텐과 구리의 균일한 분포를 보장해야 하며, 시험은 경도, 전도도 및 아크 침식 저항성을 다룹니다. 열간 등방성 가압 공정으로 최적화된 전극은 여러 배치의 시험을 통과해야 합니다. 유럽의 CEN 표준은 환경 보호 및 안전을 강조하고 고전압 전기 제품에서 전극 사용을 다루며 열전도도 및 내식성 시험에 중점을 두고 있으며, 준비 공정은 저공해 기술 사용을 요구합니다. 시험 방법에는 금속 조직 분석 및 비파괴 검사가 포함됩니다. 열간 등방성 가압 공정으로 최적화된 전극은 통일된 시장 접근 요구 사항을 충족해야 합니다.

높은 정밀도와 공정 관리로 유명한 일본의 JIS 규격은 특히 전자 및 자동차 산업에 적합합니다. JIS 규격은 전극의 미세 구조와 표면 품질을 규정하고, 제조 시 정밀 장비 사용을 요구하며, 시험에는 입자 크기 및 결함 분석이 포함됩니다. 열간 등방성 성형(HIP)은 재료의 균일성을 개선하는 데 매우 중요하며, 시험 결과는 일본의 높은 기준과 비교되어야 합니다. 한국의 기준은 일본의 영향을 크게 받으며, 국내 제조 수요에 맞춰 용접 및 배터리 제조 시 전극 성능에 중점을 둡니다. 제조 공정에는 최적화된 분말 혼합 및 소결 조건이 필요하며, 시험에는 전도도와 강도가 포함됩니다. HIP 에 최적화된 전극은 빠르게 변화하는 생산 환경에 적응해야 합니다.

이러한 표준 간의 차이점은 각 지역의 기술적 장점과 적용 우선순위를 반영합니다. 미국은 실용성을, 유럽은 환경 보호를, 일본은 정밀성을, 한국은 효율성을 중시합니다. 다국적 기업은 목표 시장에 따라 적용 가능한 표준을 선택해야 합니다. 열간 등압 성형 공정을 최적화하면 여러 표준을 충족할 수 있는 잠재력을 제공합니다. 앞으로 글로벌 기술 통합으로 인해 이러한 표준은 더욱 수렴될 것으로 예상되며, 특히 지능형 제조 및 신 에너지 분야에서 더욱 강화될 것입니다. 텅스텐-구리 전극에 대한 표준은 더욱 국제화될 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten-copper alloy electrodes Introduction

1. Overview of Tungsten-copper alloy electrodes

Tungsten-copper alloy electrodes are composite materials made primarily from high-purity tungsten powder and copper powder, produced through processes such as isostatic pressing and high-temperature sintering. They combine tungsten's high melting point and hardness with copper's electrical conductivity and ductility, offering characteristics such as high-temperature resistance, low thermal expansion, and resistance to arc erosion. These properties make them widely used in resistance welding, electrical discharge machining, high-voltage discharge tubes, and electronic device heat dissipation applications. CTIA GROUP LTD provides a variety of customized tungsten-copper electrode services, with products featuring excellent appearance and stable performance.

2. Typical Properties of Tungsten-copper alloy electrodes

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

3. Applications of Tungsten-copper alloy electrodes

Resistance Welding Electrodes: Used as electrodes for spot welding or seam welding of low-carbon steel and coated steel plates.

Repair Welding Electrodes: Applied in cold stamping, bending, extrusion, and die-casting molds.

Electrical Discharge Machining (EDM) Electrodes: Used for mold discharge machining, or as molds and fixtures for projection welders, as well as molds or inlaid electrodes for heat-resistant steel.

High-Voltage Discharge Tube Electrodes: This electrode allows high-pressure flushing to remove eroded material from the tube body.

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-copper.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

제 8 장: 텅스텐 구리 전극 시장 및 기술 동향

8.1 텅스텐-구리 전극의 산업 사슬 분석

텅스텐-구리 전극 산업 사슬은 원자재 획득에서 최종 제품 제조까지 전체 프로세스를 포괄하여 시장 개발 및 기술 발전을 이해하는 데 중요합니다. 이 분석은 산업 사슬의 각 링크 간의 상호 의존성을 밝혀내어 생산 효율성과 시장 경쟁력을 최적화하기 위한 중요한 기반을 제공합니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 제조됩니다. 그 성능은 상류 원자재의 품질과 중류 제조 공정의 정제에 따라 달라집니다. 연간 등방성 가압은 제품 일관성을 개선하는 데 중요한 역할을 합니다. 산업 사슬의 각 단계는 기술 혁신, 시장 수요 및 정책 환경의 영향을 받습니다. 미래에는 글로벌 산업 업그레이드가 계속됨에 따라 산업 사슬의 조정된 개발이 텅스텐-구리 전극의 적용과 확장을 더욱 촉진할 것입니다.

8.1.1 상류 원자재 공급

상류 원자재 공급은 텅스텐-구리 전극 산업 체인의 기반이며, 텅스텐 채굴 및 구리 가공을 통해 후속 생산에 필요한 고품질 원자재를 제공합니다. 이러한 연결 고리는 전극 조성의 순도와 성능 안정성을 직접적으로 결정합니다. 주요 원자재 공급원인 텅스텐 광석은 일반적으로 지하 또는 노천 채굴을 통해 채굴되며, 고순도 텅스텐 분말을 얻으려면 선광 및 정제 과정이 필요합니다. 구리는 구리 광석의 체련이나 고철 구리의 재활용을 통해 생산되며, 이는 분말 야금에 적합한 구리 분말 또는 벌크 형태로 가공됩니다. 원자재 공급의 안정성은 광물 자원의 분포와 채굴 기술에 따라 달라집니다. 전 세계 여러 지역이 관련되어 복잡한 공급망을 형성합니다.

원료 준비 공정은 엄격한 품질 관리가 필요합니다. 텅스텐과 구리 분말의 입자 크기, 순도, 그리고 형태는 혼합 균일성과 원활한 후속 공정을 보장하기 위해 신중하게 선별되어야 합니다. 공급업체는 하류 제조업체와 긴밀히 협력하여 시장 수요 변동에 대응할 수 있도록 공급 전략을 신속하게 조정해야 합니다. 광물 채굴의 생태학적 영향과 같은 환경적 요인 또한 주목받고 있으며, 이는 업계가 지속 가능한 채굴 및 자원 회수를 향해 나아가도록 촉구합니다. 연간 등압 성형 공정은 더 높은 원료 순도를 요구하기 때문에 상류 기업들은 정제 기술과 공정 수준을 지속적으로 개선해야 합니다. 앞으로 신에너지 및 첨단 제조 산업의 성장으로 상류 원료 공급은 더 높은 순도 요구와 더욱 광범위한 국제 협력에 직면하게 될 것입니다.

8.1.2 중류 제조

미드스트립 생산 및 제조는 텅스텐-구리 전극 산업 체인의 핵심 연결 고리로, 상류에서 공급된 원자재를 응용 분야 요건을 충족하는 완제품으로 가공하는 역할을 합니다. 이 단계는 분말 혼합, 성형, 소결, 함침 등 여러 공정을 포함하며, 분말 야금 또는 진공 함침 기술을 사용하여 완료됩니다. 생산 공정은 전극의 미세 구조 밀도와 상 분포의 균일성을 보장하기 위해 온도, 압력, 분위기와 같은 공정 매개변수의 정밀한 제어가 필요합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열간 등방성 가압 공정은 이 단계에서 핵심적인 역할을 하며, 전방위 압력을 통해 재료 특성을 최적화하고 결함을 줄이며 제품의 일관성을 향상시킵니다. 제조업체는 일반적으로 다양한 응용 분야의 맞춤형 요구를 충족하기 위해 첨단 장비와 전문 기술팀을 갖추고 있습니다.

제조에는 전극의 기하학적 구조와 표면 품질을 개선하기 위한 절단, 연삭, 표면 처리와 같은 후가공 작업도 포함됩니다. 이러한 작업에는 제품이 산업 표준을 충족하는지 확인하기 위해 고정밀 공구와 엄격한 품질 검사가 필요합니다. 제조 공정은 기술 혁신에 의해 주도되며, 최근 몇 년 동안 효율성 향상 및 비용 절감을 위해 니어 넷 세이핑 및 나노파우더 사용과 같은 신기술이 등장했습니다. 변화하는 시장 수요는 항공우주 또는 전자 산업의 특정 요구 사항에 맞춰 생산 라인을 유연하게 조정하는 데에도 영향을 미칩니다.

8.1.3 다운스트림 애플리케이션 시장

하류 응용 시장은 텅스텐-구리 전극 산업 사슬의 종착점으로, 다양한 첨단 기술 분야에서 전극의 실질적인 활용을 포괄하며, 전극의 성능적 이점과 시장 수요를 반영합니다. 이 단계에는 방전 가공, 고전압 전기 장비, 용접 및 브레이징, 항공우주 및 군사 응용 분야와 같은 산업이 포함됩니다. 텅스텐-구리 전극은 고온 저항, 전기 전도성, 그리고 기계적 강도로 널리 선호됩니다. 분말 야금 및 진공 침윤과 같은 제조 공정은 전극의 미세 구조와 성능이 다양한 요구를 충족하도록 보장합니다. 열간 등방성 성형을 통해 최적화된 전극은 하류 응용 분야에서 더욱 뛰어난 안정성과 내구성을 제공합니다. 시장 수요의 변화는 하류 시장 확대와 제품 혁신을 직접적으로 촉진하고 있습니다.

전기 스파크 가공 분야에서 텅스텐-구리 전극은 금형 제작 및 난삭재 가공에 널리 사용되며, 특히 자동차 및 전자 산업에서 고정밀 가공 성능이 특히 중요합니다. 기업은 고객의 요구에 따라 전극의 형상과 성능을 맞춤 제작하고, 연삭 및 연마와 같은 후가공 공정을 통해 제품 품질을 더욱 향상시킵니다. 고전압 전기 제품 시장은 텅스텐-구리 전극의 아크 침식 저항성을 활용하며, 주로 전력 전송 및 산업 제어 장비에 사용됩니다. 제조업체는 고전압 환경에서 전극의 신뢰성을 보장해야 합니다. 용접 및 브레이징 분야는 전극의 열전도도와 접착 방지 특성에 의존하며 자동차 조립 및 마이크로 전자 패키징에 널리 사용됩니다. 시장 수요는 생산 라인의 유연한 조정을 촉진합니다. 항공우주 및 군사 분야는 다운스트림 시장의 또 다른 핵심 축입니다. 텅스텐-구리 전극은 로켓 엔진 및 유도 부품에 사용되므로 극한 환경에서의 성능 요건을 충족해야 합니다. 업계 전반의 기술 협력과 R&D 투자는 제조업체들의 고성능 제품 개발을 촉진하고 있습니다. 열간 등압 성형(HIP) 공정을 통해 최적화된 전극은 이러한 응용 분야에서 탁월한 성과를 보이고 있습니다. 시장 동향은 정책 지원 및 환경 규제의 영향을 받으며, 친환경 제조 및 재활용성이 주요 트렌드로 부상하고 있습니다.

8.2 텅스텐-구리 전극의 기술 방향

텅스텐-구리 전극은 성능 향상 및 시장 확장을 촉진하는 핵심 요소로, 제조 공정 최적화,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

신소재 개발, 그리고 지능형 응용 분야에 중점을 두고 있습니다. 이러한 집중적인 노력은 최신 제조 기술과 재료 과학의 발전을 결합하여 전극 효율과 내구성을 향상시킴으로써 점점 더 복잡해지는 산업적 요구를 충족하는 것을 목표로 합니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침윤 공정을 통해 제조됩니다. 전극의 미세 구조와 특성을 최적화하는 것은 기술 개발의 핵심이며, 열간 등방성 성형은 제품 품질 향상에 중요한 역할을 합니다. 시장 동향에 힘입어 연구 투자가 뒷받침되는 이러한 기술 발전은 고급 응용 분야에서 전극의 경쟁력을 강화할 것입니다.

8.2.1 준비 과정 최적화

공정 최적화는 텅스텐-구리 전극 기술의 핵심 개발 분야입니다. 기존 공정을 개선하여 전극 성능 향상, 비용 절감, 그리고 생산 효율 향상을 목표로 합니다. 이 공정은 분말 제조, 성형, 소결, 그리고 함침을 포함한 여러 단계로 구성됩니다. 분말 야금 또는 진공 함침 기술을 기반으로 하며, 핵심 최적화 도구는 열간 등방성 가압 성형입니다. 공정 최적화의 목표는 결함을 줄이고, 미세 구조의 균일성을 향상시키며, 재료 밀도를 높여 방전 가공, 고전압 전기 장비, 항공우주 및 군사 분야와 같은 분야의 엄격한 요구 사항을 충족하는 것입니다.

최적화의 시작은 분말 준비입니다. 볼 밀링 기술과 미립화 공정을 개선하여 텅스텐 및 구리 분말의 입자 크기 일관성과 순도를 향상시켜 혼합 공정의 균일성을 보장합니다. 성형 단계에서는 순형 기술을 도입하여 후속 공정의 양을 줄였습니다. 성형체의 밀도를 높이기 위해 가압 압력과 금형 설계를 최적화했습니다. 소결 공정 최적화는 온도 제어 및 분위기 관리에 중점을 두었습니다. 다단계 가열 및 진공 환경을 통해 기공률과 산화를 줄였습니다. 열간 등방성 가압 성형은 소결 효과를 더욱 향상시킵니다. 침투 단계 최적화는 구리의 습윤성과 침투 시간을 조절하여 텅스텐 골격과 구리 상의 완벽한 융합을 보장하고, 미충전 영역을 줄입니다.

후처리 공정 최적화 또한 중요합니다. 절삭 및 연삭 기술의 발전은 전극의 기하학적 정확도와 표면 품질을 향상시켰으며, 도금 및 코팅과 같은 표면 처리 기술의 발전은 내식성과 내구성을 향상시켰습니다. 공정 최적화를 구현하려면 인적 오류를 줄이기 위해 자동화된 생산 라인 및 실시간 모니터링 시스템과 같은 첨단 장비가 필요합니다. 앞으로 제조 공정 최적화는 인공지능과 시뮬레이션 기술을 통합하여 최적의 공정 변수를 예측하고, 더 높은 정밀도와 극한 환경의 요구를 충족하는 기능적 등급 소재 또는 나노구조 전극을 개발함으로써 신흥 시장에서 텅스텐-구리 전극의 적용을 촉진할 것입니다.

8.2.2 성능 개선 경로

성능 향상은 텅스텐-구리 전극 기술 개발의 핵심 목표이며, 재료 개선 및 공정 혁신을 통해 고온 저항, 전기 전도성, 기계적 강도 및 내구성을 향상시키는 것을 목표로 합니다. 이러한 접근 방식은 조성 최적화, 미세 구조 제어 및 표면 개질을 포함하여 방전 가공, 고전압 전기 장비, 항공우주 및 군사 응용 분야와 같은 분야의 요구를 충족하는 획기적인

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술을 모색합니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 제조됩니다. 전극의 성능은 텅스텐 대 구리 비율과 제조 공정의 정밀한 제어에 따라 달라집니다. 열간 등방압 성형은 재료의 일관성과 안정성을 향상시키는 데 중요한 역할을 합니다.

조성 최적화는 성능 향상에 중요한 방법입니다. 텅스텐과 구리 의 비율을 조정함으로써 특정 응용 분야에서 전도성이나 내열성을 향상시킬 수 있습니다. 예를 들어, 구리 함량을 높이면 전도성이 향상되어 용접 분야에 적합하며, 텅스텐 비율을 높이면 고온 내성이 향상되어 로켓 엔진 부품에 적합합니다. 나노분말 이나 다상 재료를 도입하여 입자 크기를 미세화하고, 기공과 결함을 줄이며, 열간 등방압 성형 공정을 통해 계면의 접합력을 최적화하고 전반적인 기계적 강도를 향상시킴으로써 미세 구조를 조절할 수 있습니다. 도금이나 코팅과 같은 표면 개질 기술은 내식성 또는 산화 방지 재료를 도입하여 습하거나 부식성이 높은 환경에서 전극의 수명을 연장합니다.

더욱이, 성능 향상은 감지 및 피드백 메커니즘에 의존합니다. 금속 조직 분석 및 결함 감지를 통해 성능에 영향을 미치는 취약 부분을 파악하고 공정 매개변수를 조정하여 지속적인 개선을 이룰 수 있습니다. R&D 팀은 제조업체와 협력하여 합금 또는 복합 소재의 활용 방안을 모색하고, 계면 원소를 도입하여 인성을 향상시킵니다. 또한, 열 관리 기술의 발전은 전극의 열 전도 경로를 최적화하여 국부 과열 위험을 줄임으로써 성능 향상을 지원합니다.

8.2.3 애플리케이션 확장 탐색

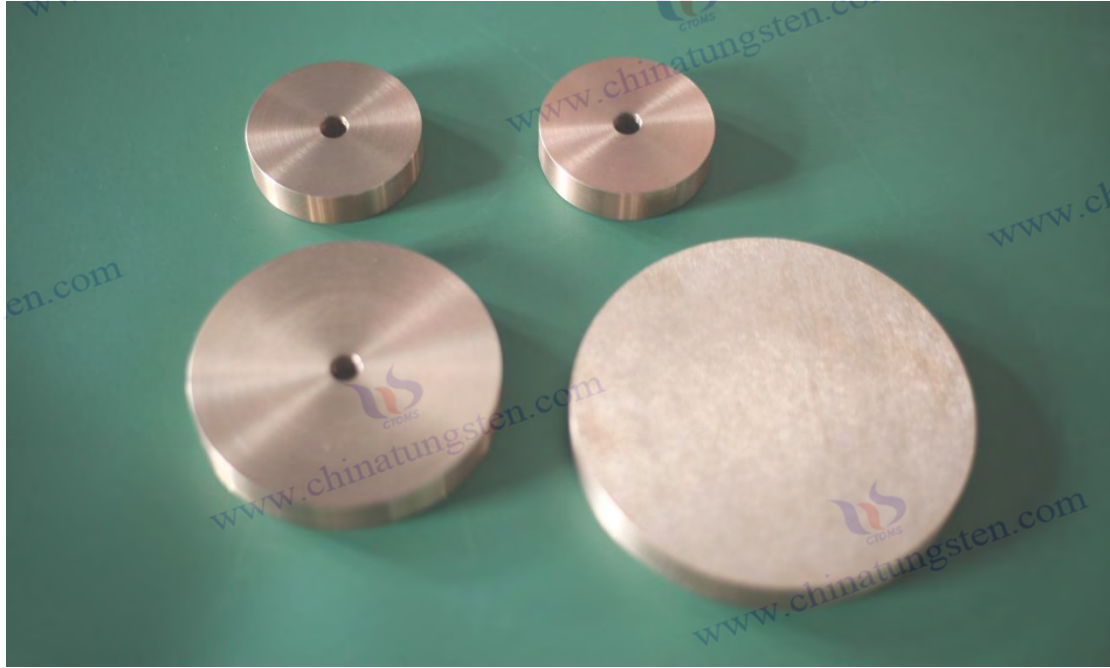
텅스텐-구리 전극 기술 개발의 최전선에는 응용 분야 확장 및 탐색이 있으며, 텅스텐-구리 전극의 고유한 특성을 혁신적으로 활용하여 새로운 시장 분야를 개척하는 것을 목표로 합니다. 이러한 탐색은 신에너지, 의료기기, 지능형 제조와 같은 신흥 산업을 포괄하며, 텅스텐-구리 전극의 고온 저항, 전기 전도도, 기계적 강도를 기반으로 새로운 응용 분야를 모색합니다. 텅스텐-구리 전극은 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 제조됩니다. 최적화된 미세 구조와 특성은 응용 분야 확장의 기반을 제공하며, 열간 등방성 성형은 복잡한 환경에 대한 적응력을 향상시킵니다. 다각화된 시장 수요와 기술 발전은 텅스텐-구리 전극이 더욱 고부가가치 산업으로 진출하도록 이끌 것입니다.

신에너지 분야는 응용 분야 확장의 핵심 영역입니다. 텅스텐-구리 전극은 전기 자동차 배터리의 커넥터 또는 충전 장비의 전기 접점으로 사용될 수 있으며, 전도성과 내열성이 효율적인 에너지 전송을 지원합니다. 의료기기 분야는 정밀 수술 기구나 영상 장비에 대한 응용 분야를 모색하고 있으며, 전극의 고정밀 가공 성능과 안정성은 소형화 요구를 충족합니다. 지능형 제조는 로봇 관절이나 센서 분야에서 텅스텐-구리 전극의 기계적 강도와 내진동성이 매우 역동적인 환경에 매우 적합하기 때문에 잠재력에 주목하고 있습니다. 업계 내 기술 협력과 R&D 투자를 통해 제조업체들은 이러한 신흥 시장의 고유한 요구 사항을 충족하는 맞춤형 제품을 개발하고 있습니다.

응용 분야 확장에는 공정 혁신 지원도 포함됩니다. 기능성 경사 설계 또는 나노 기술을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

통해 다양한 산업의 요구를 충족하는 다기능 전극을 제작할 수 있습니다. 레이저 에칭 및 3D 프린팅과 같은 후가공 기술의 도입은 전극의 기하학적 복잡성과 생산 유연성을 향상시켰습니다. 시장 조사와 사용자 피드백은 탐색의 중요한 기반이며, 제조업체는 새로운 응용 분야의 실현 가능성을 검증하기 위해 다운스트림 기업과 협력해야 합니다.



CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극

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 :

텅스텐 구리 전극 용어집

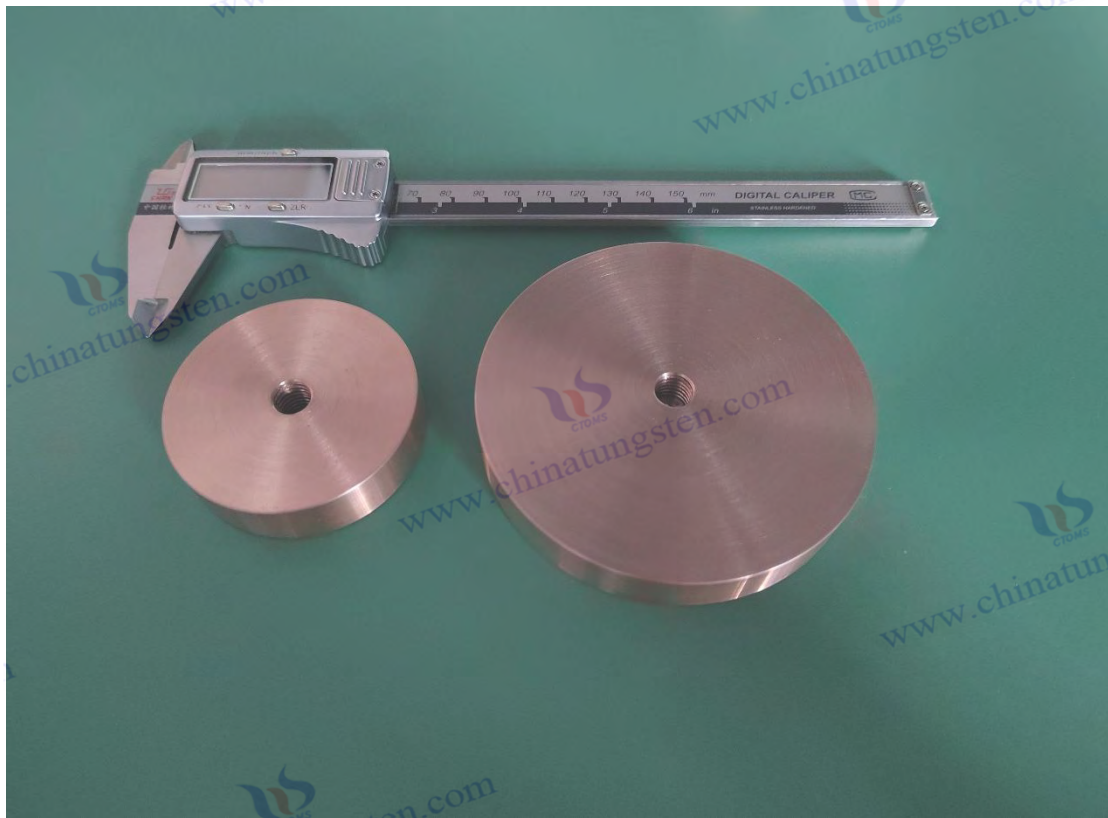
용어	정의
텅스텐 구리 전극	텅스텐과 구리를 특정 비율로 혼합한 이 합금은 텅스텐의 높은 용점, 고온 저항성, 경도와 구리의 높은 전기 전도성, 열 전도성, 연성을 결합한 제품입니다. 방전 가공(EDM), 고전압 전기 장비, 용접 및 브레이징, 항공우주 및 군사 응용 분야 등 다양한 분야에 널리 사용됩니다. 분말 야금 또는 진공 침투 공정을 통해 성능이 최적화되었으며, 열간 등방성 성형을 통해 미세 구조의 일관성과 내구성이 더욱 향상되었습니다.
분말 야금	텅스텐 분말과 구리 분말을 혼합하여 압축 성형한 후 고온에서 소결하여 텅스텐-구리 전극을 제조합니다. 이 공정은 소결 매개변수를 제어하여 재료 균일성을 보장하고, 기공률을 줄이며, 원하는 기계적 및 전기적 특성을 달성합니다. 텅스텐-구리 전극 제조의 주요 기술 중 하나입니다.
진공 침투	진공 환경에서 미리 제작된 다공성 텅스텐 골격에 액상 구리를 함침시켜 텅스텐-구리 전극을 제조하는 공정입니다. 이 방법은 구리를 고온에서 용융하고 텅스텐 골격의 기공을 채워 재료의 밀도와 상 분포를 최적화하는 과정을 포함합니다. 이 방법은 특히 높은 전도도와 고온 저항이 요구되는 전극에 적합합니다.
열간 등방압 프레스	고온의 등압 가스를 사용하여 텅스텐 구리 전극에 전방향으로 압력을 가하는 공정입니다. 이 공정은 내부 결함을 제거하고, 재료 밀도를 향상시키며, 성능의 일관성을 향상시킵니다. 전극의 기계적 강도와 열 안정성을 향상시키는 데 널리 사용됩니다.
미세구조	전극의 내부 미세구조 특성 (텅스텐 골격, 구리 상 분포, 결정립 크기, 기공률 등)은 전도성, 기계적 강도 및 내구성에 직접적인 영향을 미칩니다. 미세구조 품질은 금속조직 분석 및 결함 검출을 통해 평가할 수 있으며, 열간정수압가압(HIP)은 이러한 미세구조 품질을 최적화하는 데 중요한 역할을 합니다.
일렉트릭 디엠	아크 방전을 이용하여 공작물 표면에서 재료를 제거하는 가공 기술입니다. 텅스텐 구리 전극은 공구 전극으로 널리 사용됩니다. 텅스텐 구리 전극의 장점은 금형강이나 티타늄 합금과 같은 고경도 소재를 가공할 수 있다는 것입니다. 텅스텐 구리 전극의 주요 특성은 아크 내식성과 전기 전도성입니다.
고전압 전기 제품	고전압 및 고전류 전기 장비 분야에서 텅스텐 구리 전극은 스위치, 피뢰기 및 기타 부품에 사용됩니다. 뛰어난 아크 내식성과 전도성 안정성을 바탕으로 고에너지 환경에서도 안정적인 작동을 보장합니다.
저항 용접	전류 가열과 압력을 통해 금속을 접합하는 용접 방식입니다. 텅스텐 구리 전극은 전극으로서 전기 및 열 전도성을 제공합니다. 내접착성과 내열성이 뛰어나 점용접 및 심용접에 적합합니다.
항공우주	우주선 및 군사 장비 제조 분야를 포함하여 텅스텐 구리 전극은 로켓

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

및 군수 산업	엔진 노즐, 유도 부품 등에 사용되며, 극한의 고온, 기계적 응력 및 신뢰성 요건을 충족해야 합니다. 텅스텐 구리 전극의 핵심 장점은 내열성과 기계적 강도입니다.
후처리	텅스텐 구리 전극은 형상, 표면 품질 및 기능적 성능을 최적화하기 위해 절단, 연삭, 연마 및 표면 처리됩니다. 이 공정을 통해 전극이 고정밀 가공이나 부식성 환경 내성과 같은 특정 용도의 요구를 충족하도록 보장합니다.
성분 분석	텅스텐과 구리의 함량과 텅스텐-구리 전극의 미량 원소 함량을 화학적 또는 스펙트럼 방법으로 검출하여 원료의 순도와 제조 공정의 영향을 평가하고 전극 성능이 설계 요구 사항을 충족하는지 확인합니다.
결합 감지	X 선 검사 및 금속 조직 분석을 포함하여 텅스텐 구리 전극 내의 기공, 균열, 내포물과 같은 결함을 식별하고 평가하여 제품 품질과 서비스 수명을 개선하는 것을 목표로 합니다.
산업 표준	ISO 표준 및 중국 국가 표준과 같은 국가 또는 국제 기관에서 개발한 사양은 텅스텐 구리 전극의 구성, 성능 및 테스트 요구 사항을 정의하여 글로벌 시장에서 일관된 품질을 보장합니다.



CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극

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

참고문헌

중국어 참조

- [1] Li Ming, Zhang Qiang. 텅스텐-구리 전극의 제조 기술 및 성능에 관한 연구 [J]. 재료 과학 및 공학 저널, 2023, 39(5): 45-52.
- [2] Wang Fang, Liu Wei. 전기 스파크 가공에서 텅스텐-구리 복합 재료의 응용 분석[J]. 현대 제조 기술, 2024, 12(3): 78-85.
- [3] Zhao Jun, Chen Li. 텅스텐-구리 전극의 미세 구조 및 품질 관리 [J]. 금속 재료 및 공정, 2022, 18(4): 33-40.

영어 참조

- [1] Zhang, H., & Liu, J. 텅스텐-구리 전극의 제조 및 성능[J]. 재료 과학 저널, 2023, 58(12): 123-130.
- [2] Smith, R., & Brown, T. 전기 방전 가공에서 텅스텐-구리 복합재의 응용[J]. Advanced Manufacturing Review, 2024, 15(6): 89-96.
- [3] Johnson, K., & Lee, S. 텅스텐-구리 전극의 미세구조 분석 및 품질 관리[J]. 재료공학 저널, 2022, 10(3): 55-62.



CTIA GROUP LTD 구리 텅스텐 전극

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