

# 복합 희토류 텅스텐 전극 백과사전

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

**CTIA GROUP LTD**

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

저작권 및 법적 책임 선언문

## CTIA GROUP 소개

CHINATUNGSTEN ONLINE 이 설립한 독립적인 법인격을 가진 전액 출자 자회사인 CTIA GROUP LTD, 산업용 인터넷 시대에 텅스텐 및 몰리브덴 재료의 지능적이고 통합적이며 유연한 설계 및 제조를 촉진하는 데 전념하고 있습니다. CHINATUNGSTEN ONLINE은 [www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com) 를 출발점으로 1997년에 설립된 중국 최초의 최고 수준의 텅스텐 제품 웹사이트로 텅스텐, 몰리브덴 및 희토류 산업에 중점을 둔 중국의 선구적인 전자 상거래 회사입니다. 텅스텐 및 몰리브덴 분야에서 거의 30 년의 깊은 경험을 활용한 CTIA GROUP 은 모회사의 탁월한 설계 및 제조 능력, 우수한 서비스 및 글로벌 비즈니스 평판을 계승하여 텅스텐 화학, 텅스텐 금속, 초경합금, 고밀도 합금, 몰리브덴 및 몰리브덴 합금 분야의 포괄적인 응용 솔루션 제공업체가 되었습니다.

지난 30 년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE 은 텅스텐, 몰리브덴 및 희토류와 관련된 100 만 페이지 이상의 뉴스, 가격 및 시장 분석을 통해 20 개 이상의 언어를 다루는 200 개 이상의 다국어 텅스텐 및 몰리브덴 전문 웹사이트를 구축했습니다. 2013 년부터 WeChat 공식 계정 "CHINATUNGSTEN ONLINE"은 40,000 개 이상의 정보를 게시하여 거의 100,000 명의 팔로워에게 서비스를 제공하고 전 세계 수십만 명의 업계 전문가에게 매일 무료 정보를 제공했습니다. 웹사이트 클러스터 및 공식 계정에 대한 누적 방문이 수십억 회에 달하면서 텅스텐, 몰리브덴 및 희토류 산업에서 인정받는 글로벌 및 권위 있는 정보 허브가 되었으며 24/7 다국어 뉴스, 제품 성능, 시장 가격 및 시장 동향 서비스를 제공합니다.

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

CTIA GROUP 의 Hanns 박사와 그의 팀은 30 년 이상의 업계 경험을 바탕으로 텅스텐, 몰리브덴 및 희토류와 관련된 지식, 기술, 텅스텐 가격 및 시장 동향 분석을 작성하고 공개하여 텅스텐 산업과 자유롭게 공유했습니다. 1990 년대부터 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 전자 상거래 및 국제 무역, 초경합금 및 고밀도 합금의 설계 및 제조 분야에서 30 년 이상의 경험을 가진 한 박사는 국내외에서 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 유명한 전문가입니다. CTIA GROUP 의 팀은 업계에 전문적이고 고품질의 정보를 제공한다는 원칙을 고수하여 생산 관행과 시장 고객 요구를 기반으로 지속적으로 기술 연구 논문, 기사 및 업계 보고서를 작성하여 업계에서 광범위한 찬사를 받고 있습니다. 이러한 성과는 CTIA GROUP 의 기술 혁신, 제품 홍보 및 산업 교류를 견고하게 지원하여 글로벌 텅스텐 및 몰리브덴 제품 제조 및 정보 서비스 분야의 선두주자로 자리매김할 수 있도록 합니다.



### 저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

**Aerospace Manufacturing:** Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

**Nuclear and Power Equipment:** Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

**Precision Machining:** Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

**Automotive and Rail Transit:** Welding of critical load-bearing components

**Electronics and Vacuum Devices:** High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

## 디렉토리

### 1 장 소개

- 1.1 복합 희토류 텅스텐 전극의 개념 및 정의
- 1.2 복합 희토류 텅스텐 전극의 개발 이력, 기술적 배경 및 연구 현황
- 1.3 현대 산업에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 중요성

### 2 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 재료 구성 및 분류

- 2.1 텅스텐 기반 재료의 기본 특성과 순수 텅스텐 전극의 한계
- 2.2 희토류 산화물의 종류와 기능
- 2.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 분류 표준
- 2.4 복합 희토류 텅스텐 전극의 일반적인 모델 및 사양
- 2.5 복합 희토류 텅스텐 전극 재료 구성이 성능에 미치는 영향 분석
- 2.6 복합 희토류 텅스텐 전극과 기존 톨륨 텅스텐 전극의 비교

### 3 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 제조 및 생산 공정 및 기술

- 3.1 원료 준비 및 비율
- 3.2 분말 야금 공정에 대한 자세한 설명
- 3.3 감소 과정
- 3.4 성형 및 성형 공정
- 3.5 소결 공정
- 3.6 압력 처리 기술
- 3.7 표면처리 및 코팅 기술
- 3.8 준비 과정의 주요 매개변수 제어
- 3.9 공정 최적화 및 공통 결함 분석
- 3.10 친환경 준비 기술
- 3.11 대규모 생산 공정 흐름도

### 4 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 물리적, 화학적 및 용접 특성

- 4.1 복합 희토류 텅스텐 전극의 기계적 성질
- 4.2 복합 희토류 텅스텐 전극의 열적 특성
- 4.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 전기적 특성
- 4.4 복합 희토류 텅스텐 전극의 화학적 안정성 및 내식성
- 4.5 복합 희토류 텅스텐 전극의 용접 특성
- 4.6 희토류 첨가가 미세 구조에 미치는 영향
- 4.7 텅스텐 전극 성능 비교
- 4.8 복합 희토류 텅스텐 전극의 환경 적응성
- 4.9 복합 희토류 텅스텐 전극의 피로 및 수명 특성 분석
- 4.10 CTIA GROUP LTD.의 복합 희토류 텅스텐 전극 MSDS

### 5 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 사용 및 적용 지침

- 5.1 복합 희토류 텅스텐 전극의 주요 용도 개요
- 5.2 복합 희토류 텅스텐 전극에 적용 가능한 용접 유형

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

- 5.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 산업 응용 사례
- 5.4 복합 희토류 텅스텐 전극의 권장 용접 공정 매개변수
- 5.5 복합 희토류 텅스텐 전극 사용시 주의사항
- 5.6 복합 희토류 텅스텐 전극의 일반적인 문제 해결
- 5.7 신흥 분야에서의 복합 희토류 텅스텐 전극의 응용
- 5.8 복합 희토류 텅스텐 전극의 경제적 이익 분석

## 6장 복합 희토류 텅스텐 전극의 생산 설비

- 6.1 복합 희토류 텅스텐 전극용 원료 가공 장비
- 6.2 복합 희토류 텅스텐 전극용 환원 및 도핑 장비
- 6.3 복합 희토류 텅스텐 전극용 성형 장비
- 6.4 복합 희토류 텅스텐 전극용 소결 장비
- 6.5 복합 희토류 텅스텐 전극 가공 장비
- 6.6 복합 희토류 텅스텐 전극용 표면 처리 장비
- 6.7 복합 희토류 텅스텐 전극용 보조 장비
- 6.8 복합 희토류 텅스텐 전극 장비의 선택 및 유지 관리 지침
- 6.9 복합 희토류 텅스텐 전극 자동 생산 라인의 설계 및 통합
- 6.10 복합 희토류 텅스텐 전극의 안전 장비 및 보호 조치

## 제 7장 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 국내의 표준

- 7.1 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 국내 표준
- 7.2 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 국제 표준
- 7.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 재료 구성 표준
- 7.4 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 성능 테스트 표준
- 7.5 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 환경 보호 및 안전 표준
- 7.6 복합 희토류 텅스텐 전극 인증 시스템
- 7.7 복합 희토류 텅스텐 전극 표준의 비교 및 적용 가능성 분석
- 7.8 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 최신 표준 업데이트

## 8장 복합 희토류 텅스텐 전극의 테스트 및 품질 검사

- 8.1 복합 희토류 텅스텐 전극의 성능 시험 방법
- 8.2 복합 희토류 텅스텐 전극의 기계적 성질 테스트
- 8.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 미세 구조 분석
- 8.4 복합 희토류 텅스텐 전극의 화학 성분 검출
- 8.5 복합 희토류 텅스텐 전극의 결함 감지 기술
- 8.6 복합 희토류 텅스텐 전극의 수명 평가 및 신뢰성 분석
- 8.7 복합 희토류 텅스텐 전극의 품질 관리의 핵심 사항

## 9장 복합 희토류 텅스텐 전극의 안전 및 환경 고려 사항

- 9.1 작동 안전 사양
- 9.2 건강 위험 및 보호 조치
- 9.3 환경 영향 평가
- 9.4 재활용 및 재사용 기술

### 저작권 및 법적 책임 선언문

9.5 보관 및 운송 요구 사항

9.6 친환경 제조 원칙

9.7 규정 준수

## 10 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 미래 개발 동향

10.1 새로운 희토류 조합 및 도핑 기술

10.2 나노 희토류 산화물 도핑 및 확산 강화

10.3 AI 지능형 용접 매개변수 최적화 기술 통합

10.4 녹색 제조 및 지속 가능한 개발

10.5 항공우주, 원자력 산업, 의료 제조 및 기타 분야에서의 응용 전망

## 부록

용어집

참조

## 1 장 소개

### 1.1 복합 희토류 텅스텐 전극의 개념 및 정의

복합 희토류 텅스텐 전극 은 다양한 희토류 산화물(예: 산화란탄  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 산화세륨  $\text{CeO}_2$ , 산화 이트륨  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 지르코니아  $\text{ZrO}_2$  등)이 도핑된 매트릭스로 고순도 텅스텐의 일종입니다. 그 핵심은 "복합" 설계, 즉 여러 희토류 산화물의 시너지 효과를 통해 전극이 전극의 전자 방출 용량, 아크 안정성, 고온 저항 및 수명을 크게 향상시킵니다. 기존의 순수 텅스텐 전극 또는 단일 희토류 텅스텐 전극과 비교할 때 복합 희토류 텅스텐 전극은 용접, 절단 및 용융과 같은 응용 분야에서 더 나은 포괄적인 성능을 나타내므로 현대 산업에 없어서는 안 될 핵심 재료입니다.

기술적 정의에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 텅스텐 매트릭스에 희토류 산화물의 1%~4% 질량 분율을 도핑하여 분말 야금, 화학 도핑 또는 용액 분무로 제조된 비용융 전극 재료를 말합니다. 주로 불활성 가스 차폐 용접(TIG 용접), 플라즈마 용접, 절단, 용사 및 전기 광원에 사용됩니다. 희토류 산화물의 종류와 양에 따라 이원 복합재(예: 세륨-란탄-텅스텐 전극), 삼원 복합재(예: 세륨-란탄-이트륨-텅스텐 전극) 및 다중 복합 전극으로 나눌 수 있습니다. 국제 표준(예: ISO 6848:2015)은 이를 비용융 전극으로 분류하며 일반적인 모델에는 WL 시리즈(란타넘 텅스텐), WC 시리즈(세륨 텅스텐), WY 시리즈(이트륨 텅스텐) 및 맞춤형 다중 복합 모델이 포함됩니다.

복합 희토류 텅스텐 전극의 개발은 기존 텅스텐 전극의 한계에서 비롯됩니다. 순수 텅스텐 전극은 녹는점이 최대  $3410^\circ\text{C}$  이고 내식성이 우수하지만 전자 탈출 작업이 높고(약  $4.5\text{eV}$ ) 아크 발생이 어렵고 아크가 불안정하며 전극 손실이 빠릅니다. 초기 토륨 텅스텐 전극( $\text{ThO}_2$  함유)은 작동 기능을 감소시켜 성능을 향상시켰지만 토륨의 방사능은 환경과 작업자 건강에 위협이 되었습니다. 비방사성 희토류 산화물을 도입함으로써 복합 희토류 텅스텐 전극은 텅스텐의 높은 용점과 안정성을 유지할 뿐만 아니라 전자 탈출 작업(최대  $2.0\sim 2.5\text{eV}$ )을 크게 줄이고 아크 안정성을 향상시키고(안정성 지수는 95% 이상에 도달할 수 있음) 수명을 연장합니다(순수 텅스텐 전극보다 23 배 더 길다).

미세 구조 측면에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 텅스텐 매트릭스는 미세한 희토류 산화물 입자와 분포되어 입자 성장을 억제하고 입자 구조를 미세화하여 재료의 기계적 강도와 인성을 향상시킵니다. 예를 들어, 산화세륨은 작동 기능을 감소시키고 전자 방출을 촉진합니다. 산화란탄은 아크 안정성을 향상시킵니다. 산화 이트륨은 고온 기계적 특성을 향상시킵니다. 지르코니아는 항산화 특성을 향상시킵니다. 이러한 희토류 원소의 시너지 효과로 인해 전극은 입계 특성을 최적화하고 고온 휘발을 줄이며 균열 전파를 억제함으로써 높은 전류 밀도( $>100\text{A}/\text{mm}^2$ )에서 안정적으로 유지될 수 있습니다.

제조 공정 측면에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 기계적 혼합 또는 화학적 도핑으로 제조할 수 있습니다. 기계적 혼합 방법은 텅스텐 분말과 희토류 산화물 분말을 물리적으로 혼합하는데, 이는 간단하지만 약간 덜 균일합니다. 화학적 도핑 방법은 더 나은 균일성을 위해 용액 분무 또는 동시 침전 기술을 통해 원자 수준의 도핑을

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

달성합니다. 공정 선택은 희토류 분포의 균일성과 화학적 도핑과 같은 전극 특성의 안정성에 영향을 미치며 희토류 산화물 입자의 크기를 나노미터 수준으로 제어하여 전극의 내구성을 크게 향상시킬 수 있습니다.

복합 희토류 텅스텐 전극의 개념은 신홍 분야에서의 확장도 포함합니다. 예를 들어, 텅스텐 카바이드 또는 질화텅스텐과 결합하여 신에너지 배터리 전극에 적합한 복합 재료를 형성하거나 전기화학 반응을 위한 촉매 담체로 사용됩니다. 이러한 확장된 응용 분야는 전통적인 용접 재료에서 첨단 기술 분야로의 전환을 주도하는 다양성을 보여줍니다. 또한 친환경 특성(비방사성, REACH 준수)으로 인해 토륨 텅스텐 전극의 이상적인 대안이 되어 지속 가능한 재료에 대한 전 세계 수요를 충족합니다.

성능 지표 측면에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 일반적인 사양은 직경 1.0~10.0mm, 길이 150~175mm 를 포함하며 표면은 연마, 산화 또는 코팅이 가능합니다. 주요 매개변수에는 전자 탈출 전력 < 2.5eV, 아크 안정성 > 95%, 아크 수명 500~1000 시간(공정 조건에 따라 다름)이 포함됩니다. 이러한 특성으로 인해 고정밀 용접, 항공우주, 신에너지 분야에서 널리 사용됩니다.

## 1.2 복합 희토류 텅스텐 전극의 개발 역사, 기술적 배경 및 연구 현황

복합 희토류 텅스텐 전극의 개발 과정은 용접 기술의 발전, 재료 과학 및 환경 보호 요구 사항과 밀접한 관련이 있습니다. 20 세기 초에는 텅스텐이 높은 용점과 화학적 안정성으로 인해 전극 재료로 사용되었지만 순수 텅스텐 전극의 부적절한 성능으로 인해 적용이 제한되었습니다. 1913년에는 토륨 텅스텐 전극(1%~2% ThO<sub>2</sub> 함유)이 도입되어 작동 기능을 감소시켜 아크 성능을 크게 향상시켜 TIG 용접에 널리 사용되었습니다. 그러나 토륨의 방사능은 특히 점점 더 엄격해지는 환경 규제에 맥락에서 점차 주목을 받고 있습니다.

1973년 중국 상하이 전구 공장의 Wang Juzhen 팀은 희토류 텅스텐 전극의 선구적인 돌파구인 세륨 텅스텐 전극(CeO<sub>2</sub> 함유)을 성공적으로 개발했습니다. 세륨-텅스텐 전극은 일부 토륨-텅스텐 전극 응용 분야를 비방사성, 낮은 작동 기능(약 2.7eV) 및 우수한 아크 안정성으로 빠르게 대체했으며 ISO 6848 표준에 포함되었습니다. 20세기 80년대에는 분말 야금 기술의 발전으로 이원 복합 희토류 텅스텐 전극(예: 세륨-란탄 조합)이 등장하기 시작했습니다. 베이징 텅스텐 몰리브덴 재료 공장 및 기타 기관은 희토류 원소의 균일한 분포를 달성하고 도핑 공정을 최적화하여 전극의 종합적인 성능을 향상시켰습니다.

90년대에는 삼원 복합 희토류 텅스텐 전극(예: 세륨, 란탄, 란탄 및 이트륨 조합)의 개발이 화제가 되었습니다. 기술적 배경에는 텅스텐 기관에서 희토류 산화물의 미세한 분포를 밝히는 데 도움이 되는 주사 전자 현미경(SEM), X 선 회절(XRD) 및 투과 전자 현미경(TEM)의 광범위한 적용이 포함됩니다. 예를 들어, 연구에 따르면 희토류 산화물 입자는 안정적인 2 상을 형성하고 고온에서 텅스텐 입자의 거칠어짐을 억제하며 전극 수명을 연장할 수 있습니다. 같은 기간 동안 중국의 863 계획이 지원하는 "다중 복합 희토류 텅스텐 전극 산업화 기술" 프로젝트는 수소 환원, 냉간 등방성 프레스 및 진공 소결을 포괄하는 대규모 생산을 촉진했습니다.

### 저작권 및 법적 책임 선언문

21 세기에 복합 희토류 텅스텐 전극의 응용 분야는 전통적인 용접에서 플라즈마 절단, 용사 및 신에너지 배터리로 확장되었습니다. 2000 년 이후 친환경 소재에 대한 전 세계적인 수요로 인해 방사성 전극의 인기가 높아졌습니다. 기술적 배경에는 나노기술의 도입, 도핑 균일성을 향상시키기 위한 희토류 나노분말 사용이 포함되며 입자 크기는 50~100nm 범위로 제어됩니다. 또한 자동화된 생산 장비(예: 분무 도핑 건조기, 중주파 유도 소결로)는 수율과 일관성을 크게 향상시킵니다.

2010 년대에는 성능 최적화와 결합 제어에 중점을 둔 연구가 이루어졌습니다. 예를 들어, 소결 층화 메커니즘은 희토류 분포에 대한 온도 구배의 영향을 밝히고 소결 매개변수(1450~1800°C, 진공<math>10^{-3}</math>Pa)를 최적화했습니다. AWS A5.12/A5.12M 과 같은 국제 표준은 전극의 구성, 성능 테스트 및 품질 관리 요구 사항을 추가로 규제합니다. 같은 기간 희토류 공급망의 안정성이 우려가 되었고, 글로벌 중요 광물 전망 보고서에서는 희토류 자원의 전략적 중요성을 강조했습니다.

2025 년 현재 복합 희토류 텅스텐 전극의 연구 현황은 다학제적 추세를 보이고 있습니다. 핫스팟에는 다음이 포함됩니다.

새로운 응용 분야: 리튬 이온 배터리, 연료 전지 및 태양광 장비에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 에너지 밀도와 사이클 수명을 향상시키기 위해 음극 또는 전도성 코팅 재료로 사용됩니다.

녹색 제조: 석탄 폐기물에서 희토류를 추출하는 과정은 순환 경제의 개념에 부합하여 순수 광물에 대한 의존도를 줄입니다.

지능형 생산: 맞춤형 전극 생산에는 AI 지원 공정 최적화 및 3D 프린팅 기술이 사용되어 복잡한 구조물의 제조 정확도가 향상됩니다.

성능 테스트: 아크 수명 테스트(> 1000 시간), 가속 노화 실험 및 미세 구조 분석(SEM/TEM)은 성능 평가를 위한 신뢰할 수 있는 데이터를 제공합니다.

희토류 자원의 부족, 높은 처리 비용, 국제 무역 장벽 등이 과제이지만 기회는 정책 지원(예: 중국의 희토류 관리 규정)과 시장 수요 증가에 있습니다. 세계 시장 전망에 따르면 복합 희토류 텅스텐 전극의 연간 소비량은 1,600 톤을 넘어섰고, 2025~2030 년에는 연평균 성장률이 5.8%에 이를 것으로 예상됩니다.

### 1.3 현대 산업에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 중요성

현대 산업에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 중요성은 우수한 성능, 다중 분야 응용 및 녹색 제조에 대한 기여에서 비롯됩니다. 토륨 텅스텐 전극의 친환경 대안으로서 방사능 위험을 제거하고 글로벌 환경 규정(예: REACH, RoHS)을 준수하여 용접 산업의 지속 가능성을 촉진합니다.

용접 분야에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 TIG 용접 및 플라즈마 용접의 핵심 재료입니다. 낮은 작동 기능과 높은 아크 안정성(>95%)은 고품질 용접을 보장하며 항공우주(티타늄 및 스테인리스강 용접), 자동차 제조(알루미늄 합금 경량 용접) 및 원자력(원자로 파이프라인 용접)에 널리 사용됩니다. 예를 들어, 항공 부문에서 전극은 복잡한 부품의 결합 없는 용접을 지원하여 엄격한 안전 표준을 충족합니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

자동차 산업에서는 전기 자동차 배터리 부품의 정밀 용접을 통해 생산 효율성을 향상시키는 데 도움이 됩니다.

신에너지 분야에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 리튬 이온 배터리, 연료 전지 및 태양광 장비의 전극 재료 또는 전도성 코팅으로 사용됩니다. 예를 들어, 리튬 배터리 생산에서 높은 전도성과 내식성은 전극의 사이클 수명(>5000 사이클)을 향상시킵니다. 태양광 산업에서는 실리콘 웨이퍼 절단용 플라즈마 전극이 절단 정확도와 내구성을 향상시킵니다.

전자 산업에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 반도체 장치의 음극 및 필라멘트에 사용되어 안정적인 전자 방출을 제공하고 칩 제조의 고정밀 요구 사항을 지원합니다. 또한 용사 분야에서는 내열성(>3000°C)과 내산화성을 활용하여 내마모성 코팅을 분사하고 기계 부품의 수명을 연장합니다.

군사 및 의료 분야에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 갑옷 관통 포탄 및 의료용 임플란트 제조와 같은 고정밀 용접을 지원합니다. 높은 용점과 화학적 안정성은 극한 조건에서도 신뢰성을 보장합니다.

경제적 이점 측면에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 수명 연장(500~1000 시간)과 유지 보수 비용 절감으로 생산 비용을 크게 절감합니다. 예를 들어, TIG 용접에서 아크 연소 시간은 순수 텅스텐 전극보다 2 배 이상 길어 교체 빈도가 줄어듭니다. 글로벌 시장 분석에 따르면 고급 제조에 대한 수요가 연평균 5% 이상의 시장 성장을 주도하고 있습니다.

전략적으로 희토류 자원의 희소성과 복합 희토류 텅스텐 전극의 대체 불가능성은 희토류 전극을 핵심 재료로 만들고 정책적 관심을 끌고 있습니다. EU 의 중금속 원자재법과 중국의 희토류 관리 규정은 희토류 공급망 보호를 강조하고 재활용 기술 및 대체 공정의 연구 개발을 촉진합니다. 2025 년까지 복합 희토류 텅스텐 전극 시장 규모는 10 억 달러를 넘어 첨단 산업을 지탱하는 중요한 기둥이 될 것으로 예상됩니다.



## 2 장 복합 회토류 텅스텐 전극의 재료 구성 및 분류

### 2.1 텅스텐 기반 재료의 기본 특성과 순수 텅스텐 전극의 한계

텅스텐 기반 재료는 독특한 물리적, 화학적 특성으로 인해 전극 제조에 널리 사용되며 복합 회토류 텅스텐 전극의 핵심 매트릭스가 됩니다. 텅스텐은 녹는점이 매우 높고 열적, 화학적 안정성이 우수한 내화 금속으로 녹지 않는 전극에 이상적입니다. 필수 특성에는 고밀도, 우수한 전도성 및 매우 낮은 증기압이 포함되어 있어 고온, 고전류 용접 환경에서 탁월합니다.

텅스텐의 녹는점은 3410°C 로 모든 금속 중 가장 높기 때문에 아크 온도에서 전극이 크게 녹거나 변형되지 않습니다. 텅스텐의 밀도는 19.25g/cm<sup>3</sup>로 기계적 강도가 뛰어나고 마모에 강합니다. 또한 텅스텐은 구리의 약 30%의 전기 전도도를 가지며 이는 일반적인 전도성 재료보다 낮지만 고전류 용접을 지원하기에 충분합니다. 화학적 안정성은 실온에서 산, 알칼리 및 산화 환경에 대한 불활성으로 나타나므로 까다로운 산업 환경에서 사용하기에 적합합니다. 텅스텐은 열팽창 계수가 4.5×10<sup>-6</sup>/°C로 낮아 고온에서 열 응력 균열의 위험을 줄입니다.

그러나 순수 텅스텐 전극은 실제 적용에 상당한 한계가 있습니다. 첫째, 순수 텅스텐은 전자 탈출 작업이 높아 아크 성능이 좋지 않습니다. TIG 용접에서 순수 텅스텐 전극은 아크를 시작하기 위해 더 높은 전압이 필요하므로 에너지 소비가

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

증가하고 잠재적으로 아크 불안정성이 발생할 수 있습니다. 둘째, 순수 텅스텐 전극의 아크 안정성이 불충분하며 특히 고전류 또는 AC 용접에서 아크가 드리프트하기 쉬워 용접 품질에 영향을 미칩니다. 또한 고온에서 순수 텅스텐 전극의 입자가 거칠어지면 재료가 부서지기 쉽고 수명이 단축될 수 있습니다. 고온 환경에서는 텅스텐 표면에 산화물이 형성되어 전극 오염 및 성능 저하로 이어질 수도 있습니다.

순수 텅스텐 전극의 또 다른 한계는 전자 방출 능력이 낮다는 것입니다. 용접 공정 중에 전자 방출 효율은 아크의 안정성과 에너지 집중에 직접적인 영향을 미칩니다. 순수 텅스텐 전극의 높은 작동 기능으로 인해 저전류 조건에서 안정적인 아크를 유지하기가 어렵기 때문에 정밀 용접에 적용이 제한됩니다. 또한 순수 텅스텐 전극의 내마모성과 소손 저항성은 제한적이며, 특히 전극 팁이 절제되기 쉽고 자주 교체해야 하는 장기 고강도 용접에서는 생산 비용이 증가합니다.

이러한 한계로 인해 연구자들은 도핑 변형을 통해 텅스텐 전극 성능의 최적화를 모색하게 되었습니다. 초기에는 산화토륨이 전자 방출을 개선하기 위한 도펀트로 사용되었지만 방사능 문제로 인해 무독성 희토류 산화물이 개발되었습니다. 복합 희토류 텅스텐 전극은 다양한 희토류 산화물을 도입하여 순수 텅스텐 전극의 단점을 극복하여 현대 용접 기술의 주류 선택이 되었습니다.

## 2.2 희토류 산화물의 종류와 기능

희토류 산화물은 복합 희토류 텅스텐 전극의 핵심 첨가제이며, 그 유형과 작용은 전극의 성능 최적화 정도를 직접적으로 결정합니다. 일반적으로 사용되는 희토류 산화물로는 산화란탄( $\text{La}_2\text{O}_3$ ), 산화세륨( $\text{CeO}_2$ ), 산화이트륨( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), 지르코니아( $\text{ZrO}_2$ ) 등이 있으며, 이는 작동 기능을 감소시키고 미세 구조를 개선하며 고온 안정성을 향상시킵니다. 전극 성능을 크게 향상시킵니다.

산화란탄( $\text{La}_2\text{O}_3$ )은 우수한 전자 방출 능력과 아크 안정성으로 잘 알려져 있습니다. 산화란탄을 첨가하면 텅스텐 매트릭스의 전자 탈출 작업이 감소하여 전극이 더 낮은 전압에서 안정적인 아크를 유발할 수 있습니다. 이는 아크 시작 시간을 줄이고 용접 일관성을 향상시키기 때문에 AC 및 정밀 용접에 특히 중요합니다. 산화란탄은 또한 안정적인 2 상 입자를 형성하여 고온에서 텅스텐 입자의 성장을 억제하여 전극의 취성 저항성을 향상시킵니다. 또한 산화란탄은 고온에서 증발 속도가 낮아 전극 재료의 손실이 줄어듭니다.

산화세륨( $\text{CeO}_2$ )은 낮은 작동 기능과 높은 전자 방출 효율로 잘 알려진 널리 사용되는 또 다른 희토류 산화물입니다. 산화세륨을 첨가하면 전극이 DC 및 AC 용접 모두에서 빠르게 아크를 일으킬 수 있으며 특히 저전류 정밀 용접에 적합합니다. 산화세륨 입자는 텅스텐 매트릭스에 고르게 분포되어 전극의 전기 및 열 전도성을 향상시키는 동시에 아크 집중 영역의 온도 구배를 줄이고 소진 손실을 줄입니다. 또한 산화세륨은 전극 표면의 오염 방지 능력에 크게 기여하여 용접 공정 중 아크에 대한 불순물의 간섭을 줄입니다.

산화이트륨( $\text{Y}_2\text{O}_3$ )은 주로 전극의 고온 기계적 특성과 내산화성을 향상시킵니다. 산화

### 저작권 및 법적 책임 선언문

이트륨은 열적으로 매우 안정적이며 고온 아크 환경에서 구조적 무결성을 유지하고 전극 팁의 절제를 줄일 수 있습니다. 산화 이트륨을 첨가하면 텅스텐의 입자 구조가 미세화되어 전극의 인성과 피로 저항성이 향상됩니다. 이로 인해 이트륨 함유 전극은 항공우주 부품 제조와 같은 고전류, 장기 연속 용접에 특히 적합합니다.

지르코니아( $ZrO_2$ )는 내산화성 및 내식성이 우수하여 복합 전극에 사용됩니다. 지르코니아는 고온에서 안정적인 보호층을 형성하여 텅스텐 매트릭스가 산소 또는 기타 반응성 가스와 반응하는 것을 방지하여 전극 수명을 연장합니다. 지르코니아는 또한 전극의 열충격 저항성을 향상시켜 플라즈마 절단과 같은 복잡한 환경에서 사용하기에 적합합니다. 또한 지르코니아를 첨가하면 특히 고주파 용접에서 아크 안정성이 최적화됩니다.

산화네오디뮴( $Nd_2O_3$ ) 및 산화사마륨( $Sm_2O_3$ )과 같은 다른 희토류 산화물도 특정 응용 분야에서 탐구됩니다. 이러한 산화물은 전극의 미세 구조와 전자 방출 특성을 조정하여 추가적인 성능 최적화를 제공합니다. 예를 들어, 산화네오디뮴은 작동 기능을 더욱 감소시키는 반면, 산화사마륨은 고온 산화에 대한 전극의 저항성을 향상시킵니다.

희토류 산화물의 작용 메커니즘은 텅스텐 매트릭스와의 상호 작용에 있습니다. 고온에서 희토류 산화물 입자는 전극 표면으로 이동하여 작동 기능이 낮은 방출점을 형성하고 전자 탈출을 촉진합니다. 동시에 이러한 입자는 피닝 효과를 통해 입자 경계 미끄러짐을 억제하여 재료의 고온 강도를 향상시킵니다. 예를 들어, 산화세륨과 산화란탄의 조합은 아크 성능과 수명의 균형을 맞추는 반면, 산화이트륨과 지르코니아의 조합은 고온 안정성과 내식성을 최적화합니다.

### 2.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 분류 표준

복합 희토류 텅스텐 전극의 분류는 희토류 산화물의 유형, 수량 및 적용 특성을 기반으로 하며 다양한 용접 요구 사항 및 산업 표준을 충족하는 것을 목표로 합니다. 분류 표준에는 주로 다음과 같은 측면이 포함됩니다.

희토류 산화물의 종류에 따라: 첨가된 희토류 산화물의 종류에 따라 전극은 단일 희토류 전극(예: 세륨 텅스텐, 란탄 텅스텐)과 복합 희토류 전극으로 나눌 수 있습니다. 복합 희토류 전극은 이원 복합재(예: 세륨-란탄-텅스텐 전극), 삼원 복합재(예: 세륨-란탄-이트륨-텅스텐 전극) 및 다중 복합재(3 개 이상의 희토류 산화물 포함)로 더 세분화됩니다. 단일 희토류 전극의 성능은 비교적 간단한 반면, 복합 전극은 희토류 원소의 시너지 효과를 통해 보다 포괄적인 성능 최적화를 달성합니다.

희토류 함량에 따라: 희토류 산화물의 총 함량은 일반적으로 1%~4% 사이이며, 함량에 따라 저희토류(1%~2%), 중희토류(2%~3%) 및 고희토류(3%~4%) 전극으로 나뉩니다. 저희토류 전극은 저전류 정밀 용접에 적합하고, 고희토류 전극은 고전류, 고강도 용접에 사용됩니다.

용도별: 주요 용도에 따라 전극은 용접(예: TIG 용접, 플라즈마 용접), 절단(플라즈마

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

절단), 스프레이(용사) 및 전기 광원(필라멘트, 음극)으로 나눌 수 있습니다. 예를 들어, 용접용 전극은 아크 안정성을 강조하고, 절단용 전극은 고온 저항에 중점을 둡니다.

국제 표준에 따르면: ISO 6848:2015 및 AWS A5.12 표준에 따라 복합 희토류 텅스텐 전극은 희토류 유형 및 성능에 따라 등급이 매겨집니다. 예를 들어, WL20(산화란탄 2% 함유) 및 WC20(산화 세륨 2% 함유)과 같은 모델은 희토류의 종류와 함량을 지정하는 반면, 복합 전극은 WLaCeY(삼원 복합재)와 같은 맞춤형 번호로 표시될 수 있습니다.

가공 공정에 따르면: 제조 방법에 따라 기계적 혼합 전극과 화학 도핑 전극으로 나눌 수 있습니다. 기계적 하이브리드 방식의 전극 비용은 낮지만 균일성은 약간 더 나쁩니다. 화학적으로 도핑된 전극은 희토류 분포의 균일성이 더 높으며 고성능 응용 분야에 적합합니다.

분류 기준은 성능 최적화와 생산 비용 간의 균형을 염두에 두고 개발되었습니다. 예를 들어, 이원 복합 전극은 성능과 비용 사이의 균형이 잘 잡혀 있으며 산업용 용접에 널리 사용됩니다. 삼원 또는 다중 복합 전극은 항공우주 및 원자력과 같은 고정밀의 까다로운 환경을 위해 설계되었습니다.

#### 2.4 복합 희토류 텅스텐 전극의 일반적인 모델 및 사양

복합 희토류 텅스텐 전극의 모델 및 사양은 국제 표준 및 시장 수요에 따라 공식화되며 일반적인 모델에는 WL, WC, WY 시리즈 및 맞춤형 복합 모델이 포함됩니다. 다음은 주요 모델과 사양입니다.

**WL 시리즈(란탄 텅스텐 전극):** 일반적으로 WL10(1% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), WL15(1.5% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), WL20(2% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)으로 표시되는 산화란탄을 포함합니다. TIG 용접 및 플라즈마 용접에 적합하며 직경 범위는 1.0~10.0mm, 길이는 150~175mm 로 아크 개시 성능과 아크 안정성이 우수합니다.

**WC 시리즈(세륨 텅스텐 전극):** 산화세륨을 함유하고 있으며 일반적인 모델은 WC20(2% CeO<sub>2</sub>)입니다. 직경 1.0~6.4mm, 길이 150mm 의 저전류 정밀 용접 및 AC 용접에 적합하며 일반적으로 오염을 줄이기 위해 표면을 연마합니다.

**WY 시리즈(이트륨 텅스텐 전극):** 주로 고전류 DC 용접에 사용되는 WY20(2% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 같은 산화 이트륨, 우수한 고온 저항, 직경 2.0~8.0mm, 길이 150~175mm 를 포함합니다.

**복합 모델:** WLaCe(산화란탄 및 산화세륨 함유), WLaCeY(산화란탄, 산화세륨 및 산화이트륨 함유)와 같은. 이 모델은 맞춤형 제품이며 희토류 함량은 응용 분야 요구 사항에 따라 일반적으로 1.5%~3.5% 사이로 조정되며 직경과 길이는 고객 요구 사항에 따라 맞춤화할 수 있습니다.

**명세서:** 전극 직경은 0.5mm(마이크로 용접)에서 12.0mm(중공업 용접)까지 다양하며 길이에는 150mm, 175mm 및 맞춤형 길이가 포함됩니다. 표면 처리에는 연마, 산화 및 코팅이 포함되며 끝 모양은 다양한 용접 공정의 요구 사항을 충족하기 위해

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

뽀족하거나 평평하거나 구형일 수 있습니다.

모델 선택은 용접 유형, 전류 범위 및 재료 특성에 따라 다릅니다. 예를 들어, WL20 은 알루미늄 합금의 AC 용접에 적합하고, WC20 은 스테인리스강의 저전류 용접에 사용되며, WLaCeY 는 고장력강의 고하중 용접에 사용됩니다. 사양의 다양성은 항공우주, 자동차 제조, 원자력 발전 등에 전극의 광범위한 적용 가능성을 보장합니다.

## 2.5 복합 희토류 텅스텐 전극 재료 구성이 성능에 미치는 영향 분석

복합 희토류 텅스텐 전극의 성능은 희토류 산화물의 유형, 함량, 분포 균일성 및 텅스텐 매트릭스와의 상호 작용을 포함한 재료 구성의 영향을 받습니다. 다음은 다양한 관점에서 그 영향을 분석한 것입니다.

**희토류 산화물 유형:** 희토류 산화물에 따라 전극 성능에 다르게 기여합니다. 산화란탄은 주로 작동 기능을 감소시키고 아크 안정성을 향상시킵니다. 산화세륨은 아크 개시 및 오염 방지 능력을 향상시킵니다. 산화이트륨은 고온 강도와 연소 저항성을 향상시킵니다. 지르코니아는 항산화 특성을 향상시킵니다. 이원 또는 삼원 복합체는 낮은 작동 기능과 긴 수명 특성을 결합한 WLaCe 전극과 같은 시너지 작용을 통해 결합된 성능을 최적화합니다.

**희토류 함량:** 희토류 산화물 함량이 증가하면 일반적으로 작동 기능이 감소하고 전자 방출 효율이 향상되지만, 함량이 너무 높으면(>4%) 매트릭스 강도가 감소하고 소결 결함이 발생할 수 있습니다. 1%~2%의 낮은 함량은 정밀 용접에 적합하고, 2%~3%는 일반적인 범위이며, 3%~4%는 고하중 용접에 사용됩니다. 콘텐츠를 최적화하려면 성능과 비용의 균형을 맞춰야 합니다.

**분포 균일성:** 희토류 산화물의 균일한 분포는 성능에 매우 중요합니다. 화학적 도핑 방법은 나노 규모의 입자 분포(< 100nm)를 달성하고 전극의 전도성과 안정성을 향상시킬 수 있습니다. 기계적 혼합은 입자 응집으로 이어져 성능 일관성을 저하시킬 수 있습니다. SEM 분석은 균일하게 분포된 희토류 입자가 입자 경계를 효과적으로 못 막고 고온 크리프에 저항하는 능력을 향상시킬 수 있음을 보여주었습니다.

**미세 구조:** 희토류 산화물을 첨가하면 텅스텐 입자가 미세화되고 평균 입자 크기가 순수 텅스텐의 20~50 $\mu\text{m}$  에서 5~10 $\mu\text{m}$  로 감소하여 인성과 피로 저항성이 향상됩니다. 희토류 입자는 또한 안정적인 2 상을 형성하여 고온에서 입자 경계 미끄러짐을 줄이고 전극 수명을 연장합니다.

**시너지 효과:** 다중 복합 전극은 희토류 원소의 시너지 작용을 통해 성능을 최적화합니다. 예를 들어, 산화세륨과 산화란탄의 조합은 아크 전압을 줄이고 수명을 연장합니다. 산화이트륨과 지르코니아의 조합은 고온 안정성과 내식성을 향상시킵니다. 이러한 시너지 효과로 인해 복합 전극은 복잡한 작동 조건에서 탁월한 성능을 발휘합니다.

**환경 적응성:** 희토류 산화물의 화학적 안정성은 오염에 대한 전극의 저항성을 향상시켜 용접 중 산화물이나 불순물의 영향을 줄입니다. 지르코니아 함유 전극은

### 저작권 및 법적 책임 선언문

습도가 높거나 부식성 가스가 있는 환경에서 더 큰 내구성을 나타냅니다.

요약하면, 재료 구성의 설계는 응용 요구 사항에 따라 최적화되어야 합니다. 항공우주 부문에서는 고온 성능을 보장하기 위해 삼원 복합 전극을 우선시하는 반면, 전자 산업은 정밀 용접을 위해 희토류 함량이 낮은 세륨-텅스텐 전극을 선호합니다.

## 2.6 복합 희토류 텅스텐 전극과 기존 토륨 텅스텐 전극의 비교

복합 희토류 텅스텐 전극과 기존 토륨 텅스텐 전극 사이에는 성능, 환경 친화성 및 적용 범위 측면에서 상당한 차이가 있습니다. 다음은 여러 측면에서 비교한 것입니다.

**전자 방출 성능:** 토륨 텅스텐 전극 (1%~2% ThO<sub>2</sub> 함유)은 토륨의 낮은 작동 기능을 통해 우수한 아크 개시 성능을 제공하지만 복합 희토류 텅스텐 전극은 다중 희토류 산화물의 시너지 효과를 통해 작동 기능을 더욱 감소시켜 아크 전압이 낮고 아크 안정성이 높습니다. 예를 들어, AC 용접에서 WLaCeY 전극의 아크 시작 시간은 토륨 텅스텐 전극보다 약 20% 짧습니다.

**아크 안정성:** 복합 희토류 텅스텐 전극의 아크 안정성은 특히 고전류 및 AC 조건에서 토륨 텅스텐 전극보다 우수합니다. 희토류 산화물의 균일한 분포는 아크 드리프트를 줄이고 용접 품질을 보장합니다. 토륨 텅스텐 전극은 장기간 용접 중 토륨 휘발로 인해 아크 불안정성을 유발할 수 있습니다.

**서비스 수명:** 복합 희토류 텅스텐 전극의 수명은 토륨 텅스텐 전극의 수명보다 훨씬 깁니다. 희토류 산화물의 낮은 증발 속도와 소손 저항으로 인해 고하중 용접에서 전극을 500~1000 시간 동안 연속적으로 사용할 수 있는 반면, 토륨 텅스텐 전극은 일반적으로 300~500 시간입니다. 수명이 길어지면 교체 빈도와 생산 비용이 줄어듭니다.

**환경 보호 및 안전:** 토륨 텅스텐 전극에는 방사성 토륨이 포함되어 있어 가공 및 사용 중에 α 입자를 방출하여 작업자의 건강에 위험을 초래할 수 있으며 폐기물 처리는 엄격한 방사선 안전 표준을 준수해야 합니다. 복합 희토류 텅스텐 전극은 방사성이 없으며 REACH 및 RoHS 규정을 준수하여 환경 오염 및 건강 위험을 줄여 녹색 제조를 위한 첫 번째 선택입니다.

**고온 성능:** 복합 희토류 텅스텐 전극은 희토류 산화물의 입자 미세 및 내산화성을 통해 더 나은 고온 안정성과 소손 저항성을 나타냅니다. 토륨 텅스텐 전극은 고온에서 토륨 휘발이 발생하기 쉬우므로 전극 팁 손실이 증가합니다.

**응용 분야:** WL, WC 및 WLaCeY 와 같은 복합 희토류 텅스텐 전극의 다양한 모델은 알루미늄 합금, 스테인리스강 및 초합금을 포함한 광범위한 용접 유형 및 재료에 적합합니다. 토륨 텅스텐 전극은 다양한 용접에 적합하지만 환경 제한으로 인해 사용 범위가 점차 줄어들고 있습니다.

**비용 및 가용성:** 토륨 텅스텐 전극의 원료 비용은 낮지만 처리 및 폐기물 처리

### 저작권 및 법적 책임 선언문

비용은 더 높습니다. 복합 희토류 텅스텐 전극의 희토류 자원은 비싸지만 공정 최적화(예: 화학적 도핑)를 통해 생산 비용이 절감되고 희토류 회수 기술의 발전으로 자원 가용성이 향상됩니다.

요약하면, 복합 희토류 텅스텐 전극은 성능, 환경 보호 및 적용 유연성 측면에서 토륨 텅스텐 전극보다 전반적으로 우수하며 현대 용접 기술에 선호되는 재료입니다. 비방사성 특성과 긴 수명 특성으로 인해 세계 시장, 특히 환경 보호 요구 사항이 엄격한 유럽과 미국에서 폭넓게 적용되었습니다.



저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

**Aerospace Manufacturing:** Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

**Nuclear and Power Equipment:** Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

**Precision Machining:** Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

**Automotive and Rail Transit:** Welding of critical load-bearing components

**Electronics and Vacuum Devices:** High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

### 3 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 제조 및 생산 공정 및 기술

#### 3.1 원료 준비 및 비율

원료 준비 및 비율은 복합 희토류 텅스텐 전극 제조의 기본 링크이며 재료 특성의 안정성과 일관성을 직접적으로 결정합니다. 복합 희토류 텅스텐 전극의 주요 원료에는 고순도 텅스텐 기반 재료와 희토류 산화물 첨가제가 포함되며 전극의 전자 방출 용량, 아크 안정성 및 고온 내구성을 최적화하기 위해 비율 설계를 정밀하게 제어해야 합니다.

텅스텐 기반 원료: 텅스텐 기반 재료는 일반적으로 삼산화 텅스텐(WO<sub>3</sub>) 또는 과라텅스텐산 암모늄(APT, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>)을 출발 성분으로 사용합니다. 삼산화텅스텐의 순도는 불순물(예: 철, 규소, 탄소)이 전극 성능에 미치는 영향을 줄이기 위해 99.95% 이상에 도달해야 합니다. 과라텅스텐산 암모늄은 물에 대한 용해도와 도핑이 용이하여 추가 소성 단계를 제거하고 생산 주기를 단축하기 때문에 화학 도핑 공정에 자주 사용됩니다. 텅스텐 원료의 입자 크기는 일반적으로 1 에서 5 마이크로미터로 제어되어 후속 환원 및 소결 공정에서 균일성을 보장합니다. 원료는 산화물 개재물이나 금속 불순물을 제거하기 위해 엄격하게 스크리닝되며 일반적으로 X 선 형광 분광법(XRF)으로 순도를 확인합니다.

희토류 산화물 첨가제: 희토류 산화물은 일반적으로 질산란탄(La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>), 질산세륨(Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>) 및 질산이트륨(Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>)을 포함하는 질산염 형태로 도입됩니다. ) 및 질산지르코늄(Zr(NO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>). 이러한 질산염은 침전이나 화학 반응을 방지하기 위해 탈이온수 용매와 pH 를 5.5 에서 6.5 로 조정된 0.1 내지 0.5 mol/L 농도의 용액으로 제형화되어야 합니다. 희토류 원소의 순도는 전극의 전도성과 안정성에 영향을 미치는 황, 인 등 비금속 불순물을 피하기 위해 99.9% 이상이어야 합니다. 희토류 산화물의 총 함량은 일반적으로 1%에서 4%(질량 분율)이며 특정 비율은 응용 분야 요구 사항에 따라 최적화됩니다. 예를 들어, 이원 복합 전극은 1:1 산화 세륨과 산화란탄을 사용할 수 있고, 삼원 복합 전극은 아크 성능과 고온 안정성의 균형을 맞추기 위해 산화 세륨: 산화란탄: 산화이트륨 = 1:1:3 일 수 있습니다.

비율 설계: 비율 설계는 전자 탈출 작업, 아크 안정성 및 기계적 특성을 종합적으로 고려해야 합니다. 낮은 희토류 함량(1%에서 2%)은 정밀 용접에 적합하며 아크 개시 성능을 강조합니다. 높은 희토류 함량(3%에서 4%)은 고전류, 고강도 용접에 적합하여 수명과 소손에 대한 저항성을 향상시킵니다. 실험에 따르면 산화란탄과 산화세륨의 시너지 효과는 전자 탈출 작업을 2.0 에서 2.5eV 로 줄일 수 있으며 아크 안정성은 95% 이상으로 향상됩니다. 비율 과정에서 최적화된 비율에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험 검증이 필요하며, 일반적인 방법에는 최적의 희토류 조합을 결정하기 위한 직교 실험 설계 및 반응면 분석이 포함됩니다.

원료 혼합: 혼합 공정은 스프레이 도핑 또는 함침 방법을 채택합니다. 분무 도핑 희토류 질산염 용액은 삼산화 텅스텐 분말에 균일하게 분사되고 분무 속도는 0.5 내지 1 L/min 으로 제어되며 건조 온도는 80 내지 120 °C 이며 분무 건조기는 균일한 도핑 분말을 형성하는 데 사용됩니다. 함침 방법은 균일한 흡착을 보장하기 위해

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

200-300rpm 의 교반 속도로 희토류 용액에 텅스텐 분말을 담그는 것입니다. 혼합 후 분말은 산화를 방지하기 위해 진공 또는 불활성 분위기에서 건조되어야 합니다. 건조 후 분말은 응집된 입자를 제거하기 위해 200 메쉬 스크린을 통해 스크리닝되어야 합니다.

품질 관리: 원료 준비는 수분 함량(<0.5%)과 불순물 함량(<0.01%)을 엄격하게 관리해야 합니다. 보관 환경은 건조하고 통풍이 잘되어야 하며 습기나 오염으로 인한 품질 저하를 방지하기 위해 온도를 10°C 에서 25°C 사이로 조절해야 합니다. 비율 기록은 디지털 방식으로 보관되어야 하며 배치 간의 일관성을 보장하기 위해 온라인 모니터링 시스템과 협력해야 합니다.

### 3.2 분말 야금 공정에 대한 자세한 설명

분말 야금 공정은 복합 희토류 텅스텐 전극 제조의 핵심 기술로, 분말 준비, 성형, 소결 및 후처리를 통해 재료의 치밀화 및 성능 최적화를 달성합니다. 이 공정의 장점은 희토류 산화물의 분포와 미세 구조를 정밀하게 제어할 수 있으며 고성능 전극의 산업 생산에 적합하다는 것입니다.

분말 준비: 분말 준비에는 도핑과 기계적 합금이 포함됩니다. 도핑 희토류 질산염은 분무 건조 또는 습식 혼합 방법으로 텅스텐 분말에 도입되고 건조 후 균일한 도핑 분말을 형성합니다. 기계적 합금은 고에너지 유성 밀을 채택하고 볼 밀 매개변수는 400 내지 600 rpm, 볼 비율은 8:1 내지 10:1, 연삭 시간은 8 내지 12 시간입니다. 볼 밀 매체는 금속 오염을 피하기 위해 카바이드 볼로 만들어집니다. 기계적 합금은 분말 입자를 0.1-1 미크론으로 미세화하여 결정 결함을 유발하고 후속 소결 활성을 향상시킵니다.

분말 특성화: 준비된 분말은 D50(중앙값 입자 크기)이 1-5 미크론 범위에 있는지 확인하기 위해 레이저 입자 크기 분석기로 감지해야 합니다. 비표면적은 소결 활성을 보장하기 위해 BET 방법(일반적으로 2-5m<sup>2</sup>/g)으로 결정됩니다. X 선 회절(XRD) 분석을 통해 희토류 산화물의 결정 형태와 분포가 확인되었고, 주사 전자 현미경(SEM)으로 입자 형태와 균일성이 관찰되었습니다.

성형: 성형은 분말을 블랭크로 압착하는 것이며 일반적인 방법에는 냉간 등방성 프레스 및 성형이 포함됩니다. 냉간 등방성 프레스는 액체 매체를 사용하여 100-300 MPa 의 균일한 압력을 가하고 성형 시간은 5-10 분이며 본체의 밀도는 이론 밀도의 60%에서 70%에 이릅니다. 성형은 유압 프레스를 통해 150-200MPa 의 압력을 가하는 강성 금형을 사용하므로 소량 생산에 적합합니다. 0.5%에서 1%의 폴리비닐알코올(PVA)을 바인더로 첨가하여 성형성을 향상시키며, 이는 사전 소결에서 제거해야 합니다. 균일한 압력 분포를 보장하기 위해 성형 장비에는 압력 센서가 장착되어 있어야 합니다.

소결: 소결은 분말 입자 결합 및 재료 치밀화를 실현하며, 진공 핫 프레스 소결 및 스파크 플라즈마 소결(SPS)이 일반적으로 사용됩니다. 진공 핫 프레스 소결은 1600 - 1800 °C 및 50 - 80 MPa 의 압력에서 수행되며, 가열 속도(10 °C/min - 1000 °C, 4 °C/min to

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

target temperature), 유지 시간 60 - 90 분, 진공  $10^{-3}$  Pa. SPS 는 펄스 전류를 사용하여 급속 가열(100 - 200 °C/min)합니다. 1400-1600°C 에서 소결하고 5-10 분 동안 따뜻하게 유지하여 나노분말에 적합하고 희토류 증발을 줄입니다. 소결 후 재료 밀도는 이론값(>99%)에 가깝고 입자 크기는 5-10 마이크로미터로 제어됩니다.

후처리: 후처리에는 회전식 단조, 드로잉 및 표면 마감이 포함됩니다. 회전식 단조는 소결된 블랭크를 직경 3-10mm 로 가공하며 패스당 변형률은 20%에서 30%입니다. 직경은 흑연 에멀전으로 윤활하여 드로잉을 통해 0.5-10mm 로 더 줄였습니다. 표면 마감은 표면 결함을 제거하고 마감을 개선하기 위해 기계적 또는 전기화학적 연마로 수행됩니다.

공정의 장점과 과제: 분말 야금 공정은 희토류 산화물의 확산 분포를 가능하게 하여 전극의 전자 방출 및 소손 저항성을 향상시킵니다. 과제에는 분말 균일성 제어 및 소결 결함(예: 다공성) 방지가 포함되며, 이는 공정 최적화 및 인라인 모니터링을 통해 해결해야 합니다. 앞으로 나노기술과 자동화의 결합은 효율성과 품질을 더욱 향상시킬 것입니다.

### 3.3 감소 과정

환원 공정은 삼산화 텨스텐 또는 파라 텨스텐 산업 암모늄을 고순도 텨스텐 분말로 변환하면서 희토류 산화물 분포를 고정하며, 이는 복합 희토류 텨스텐 전극 제조의 핵심 단계입니다. 수소 환원은 높은 효율과 청결성으로 인해 널리 사용되며 분말 품질을 최적화하기 위해 두 단계의 환원으로 나뉩니다.

환원의 첫 번째 단계: 500-600 °C 에서 도핑 된 삼산화 텨스텐 분말을 수소 순도 99.99 % 이상과 0.5-1 m<sup>3</sup> / h 의 유량을 가진 수소 분위기에 놓입니다. 환원로는 튜브로 또는 벨 항아리 용광로를 채택하고 온도 편차는 ±5°C 로 제어됩니다. 환원 시간은 분말의 양에 따라 조정되며, 일반적으로 4-6 시간, 중간 상 WO<sub>2</sub>를 생성하는 반면, 희토류 질산염은 산화물로 분해되어 처음에는 텨스텐 매트릭스에 고정됩니다. 산소 함량이 1% 미만으로 떨어집니다.

환원의 두 번째 단계: 온도가 800 에서 950°C 로 상승하여 잔류 산소를 추가로 제거하고 순수한 텨스텐 분말을 생성합니다. 수소 유량은 1 에서 1.5m<sup>3</sup>/h 로 증가하여 적절한 감소를 보장합니다. 환원 시간은 6-8 시간이고 분말 입자 크기는 1-5 마이크로미터로 제어되며 산소 함량은 0.01% 미만으로 감소합니다. 환원로의 내벽은 오염을 피하기 위해 고온 내성 스테인리스강 또는 몰리브덴 합금으로 만들어져야 합니다. 환원된 분말을 SEM 과 XRD 로 분석하여 입자 형태와 희토류 분포를 확인하였다.

최적화 기술: 온도 구배 감소(분할 가열) 및 습식 수소 환원(수소에는 미량 수증기가 포함되어 있음)은 입자를 미세화하고 표면 활성을 향상시킬 수 있습니다. 습식 수소 환원은 수증기 함량 (0.1 %에서 0.5 %)을 제어하여 텨스텐 분말의 균일 한 입자 성장을 촉진합니다. 탄산리튬과 같은 미량 첨가제를 첨가하면 환원 온도를 낮추고 에너지 소비를 절약할 수 있습니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

안전 및 환경 보호: 수소 환원에는 누출 감지 및 환기 시스템을 갖추어야 하며, 배기가스는 배기가스 흡수 장치로 처리되어 미반응 수소를 회수합니다. 녹색 감축 기술은 탄소 배출을 줄이기 위해 저에너지 전기가열로를 모색합니다. 환원 공정의 최적화는 분말의 고품질을 보장하여 후속 성형 및 소결을 위한 토대를 마련합니다.

### 3.4 성형 및 성형 공정

성형 및 성형 공정은 도핑된 텅스텐 분말을 블랭크로 압착하여 소결을 위한 균일하고 조밀한 초기 구조를 제공합니다. 성형 품질은 전극의 최종 성능에 직접적인 영향을 미치며 일반적인 방법에는 냉간 등방성 프레스, 성형 및 하이드로포밍이 포함됩니다.

냉간 등방성 프레스: 액체 매체를 통해 균일한 압력(100-300MPa)을 가하고 분말을 5-10 분의 성형 시간으로 유연한 고무 몰드에 넣습니다. 본체의 밀도는 이론 밀도의 60%에서 70%에 도달하여 대형 전극(예: 직경 > 10mm)에 적합합니다. 안정적인 압력을 보장하려면 장비에 고압 펌프와 압력 센서가 장착되어 있어야 합니다.

성형: 강철 금형은 유압 프레스를 통해 150-200MPa 압력을 가하는 데 사용되며 소량 생산에 적합합니다. 분말 유동성을 향상시키기 위해 0.5%에서 1%의 폴리비닐 알코올 또는 파라핀을 바인더로 첨가합니다. 성형 후 본체는 바인더를 제거하고 초기에 조밀하기 위해 400-600°C에서 사전 소결해야 합니다.

하이드로포밍: 복잡한 형상의 전극에 사용되며, 분말과 바인더를 슬러리로 혼합하고, 경화를 위해 금형을 주입합니다. 슬러리의 수분은 20%에서 30%로 제어되며, 열응력 균열을 방지하기 위해 성형 후 24 시간 동안 실온에서 건조됩니다. 탈형 후 본체의 치수 정확도를 확인해야 하며 편차 < 0.1mm 입니다.

공정 최적화: 유한 요소 시뮬레이션을 통해 압력 분포를 최적화하여 밀도 구배를 줄입니다. 나노 규모의 희토류 산화물 입자를 첨가하면 신체의 강도를 향상시킬 수 있습니다. 결함 분석 결과 고르지 않은 압력으로 인해 다공성이나 균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 다단계 프로파일과 압력 보정을 통해 해결해야 했습니다. 자동화된 성형 장비는 일관성을 향상시키기 위해 비전 검사 시스템을 통합합니다.

품질 관리: 성형된 본체는 내부 결함을 확인하기 위해 초음파 검사를 통해 검사해야 합니다. 밀도 테스트는 균일성을 보장하기 위해 아르키메데스 방법을 사용합니다. 성형 공정의 디지털 기록은 추적성과 최적화를 용이하게 합니다.

### 3.5 소결 공정

소결 공정은 고온 처리를 통해 형성된 몸체를 치밀하게 만들어 고밀도 및 고강도 전극 재료를 형성합니다. 복합 희토류 텅스텐 전극의 소결에는 희토류 산화물과 입자 크기 제어의 균형 잡힌 균형이 필요하며, 일반적인 방법으로는 진공 핫 프레스 소결, 스파크 플라즈마 소결(SPS) 및 수직 융합 소결이 있습니다.

진공 핫 프레스 소결: 1600 - 1800 °C, 50 - 80 MPa 압력, 진공도  $10^{-3}$  Pa, 가열 속도 세그먼트 제어: 10°C/min 에서 1000°C, 4°C/min 에서 목표 온도까지, 60-90 분 동안

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

따뜻하게 유지됩니다. 소결로는 흑연 가열체를 채택하고 균일한 온도를 보장하기 위해 적외선 온도계가 장착되어 있습니다. 소결 후 재료 밀도는 99% 이상에 도달하고 입자 크기는 5-10 마이크론이며 희토류 산화물은 확산 2 상을 형성하여 고온에서 강도를 향상시킵니다.

스파크 플라즈마 소결(SPS): 펄스 전류를 사용하여 급속 가열(100 - 200 °C/min)하여 1400 - 1600 °C, 30 - 50 MPa 에서 소결하고 5 - 10 분 동안 유지합니다. SPS 는 나노분말에 적합하며 희토류 증발 손실을 줄이며 입자 크기를 3-8 마이크론으로 제어합니다. 장비에는 과연소를 방지하기 위해 고정밀 전류 제어 시스템이 장착되어 있어야 합니다.

수직 용합 소결: 90% 용융 전류를 사용하여 텅스텐 매트릭스의 부분 용융 상태로 소결되어 대구경 전극에 적합합니다. 온도는 3000°C 이상으로 제어되며 대기는 산화를 방지하기 위해 아르곤 또는 수소입니다. 수직 소결은 밀도를 높일 수 있지만 희토류 휘발을 방지하려면 정밀한 전류 제어가 필요합니다.

사전 소결: 1200±50°C, 진공 또는 수소 분위기에서 수행하여 바인더를 제거하고 예비 밀도를 높여 2-4 시간 동안 유지합니다. 사전 소결된 몸체의 밀도는 80%에서 85%에 달하여 후속 고온 소결을 위한 안정적인 구조를 제공합니다.

최적화 기술: ZrH<sub>2</sub>(0.1%에서 0.5%)와 같은 첨가제를 첨가하면 산소 함량을 줄이고 La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>와 같은 안정상을 형성하며 전자 방출 성능을 향상시킬 수 있습니다. 분할 가열은 온도 구배로 인한 균열을 방지합니다. SEM 과 TEM 은 소결 후 미세 구조를 분석하여 희토류 분포와 입자 상태를 확인했습니다.

결함 제어: 일반적인 결함에는 기공(잔류 산소로 인해), 입자 거칠어짐(과도한 온도로 인해) 및 희토류 분리(휘발로 인해)가 포함됩니다. 진공도와 유지 시간을 최적화하여 다공성이 0.1% 미만으로 감소합니다. 친환경 소결은 저에너지 SPS 를 사용하여 탄소 배출을 줄입니다.

### 3.6 압력 처리 기술

압력 가공 기술은 소결된 블랭크를 전극 막대로 가공하여 밀도와 표면 품질을 개선하며 일반적인 방법에는 회전식 단조, 인발 및 교정이 포함됩니다.

회전식 단조: 소결 빌렛의 직경은 회전식 해머링 기계에 의해 20mm 에서 3-10mm 로 감소하고 변형률은 패스당 20%에서 30%입니다. 가공 온도는 텅스텐 매트릭스의 가소성을 유지하기 위해 800 에서 1200 °C 입니다. 회전식 단조 장비에는 균일한 변형을 보장하기 위해 자동 공급 시스템이 장착되어 있어야 합니다. 다중 회전 단조 후 재료 밀도는 99.5% 이상에 도달하고 입자는 더욱 미세화됩니다.

그리기: 바는 직경을 0.5-10mm 로 줄이기 위해 카바이드 다이에 의해 늘어납니다. 인발 속도는 0.5 내지 2 m/min 이며 흑연 에멀전으로 윤활되며 마찰 계수는 < 0.1 입니다. 체인 당김 기계는 연속 생산을 달성하고 효율성을 향상시킵니다. 드로잉

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

후 바의 표면 거칠기는  $Ra < 0.5$  마이크론입니다.

교정 및 절단: 교정은 롤러 교정기를 채택하여 바의 직진도 편차가  $0.1\text{mm/m} <$  되도록 합니다. 절단은 길이가 150-175mm 이고 공차가  $\pm 0.5\text{mm}$  인 레이저 또는 기계적 절단을 사용하여 수행됩니다.

최적화 및 결함 제어: 유한 요소 시뮬레이션은 변형 매개변수를 최적화하여 균열 위험을 줄입니다. 희토류 산화물의 확산 분포는 재료의 인성을 향상시키고 파괴 속도를 감소시킵니다. 일반적인 결함으로는 표면 굽힘(윤활 부족으로 인해)과 내부 균열(과도한 변형률로 인해)이 있으며, 이는 윤활 최적화 및 분절 변형을 통해 해결됩니다.

자동화: 압력 처리 라인은 온라인 검사 시스템을 통합하여 직경과 표면 품질을 실시간으로 모니터링합니다. 자동화 정도는 수율을 98% 이상으로 높이고 인건비를 절감합니다.

### 3.7 표면처리 및 코팅 기술

표면 처리 및 코팅 기술은 연마, 세척 및 선택적 코팅을 포함하여 복합 희토류 텅스텐 전극의 내식성 및 전자 방출 특성을 향상시키는 마지막 단계입니다.

연마: 기계적 연마(연삭 휠 또는 연마 천) 및 전기화학적 연마. 기계적 연마는 입자 크기가 2000 메쉬이고 표면 거칠기가  $Ra < 0.2$  마이크론인 알루미나 연마재를 사용합니다. 전기화학적 연마는 전류 밀도가 0.5 내지 1  $\text{A/cm}^2$  인 황산-인산 혼합 용액에서 수행되어 표면 미세 결함을 제거하고 마감을 개선합니다.

세척: 오일과 산화물은 초음파 세척으로 제거되며, 세척액은 알칼리성 용액(pH 8 내지 10), 온도 50 내지 60  $^{\circ}\text{C}$ , 초음파 주파수 40kHz, 시간 5 내지 10 분입니다. 세척 후에는 탈이온수로 헹구고 80 $^{\circ}\text{C}$  에서 건조하여 수분이 남지 않도록 합니다.

코팅 기술: 희토류 산화물 또는  $\text{La}_2\text{O}_3$  또는  $\text{ZrO}_2$  필름과 같은 세라믹 코팅은 화학 기상 증착(CVD) 또는 플라즈마 스프레이를 통해 선택적으로 적용할 수 있습니다. 코팅의 두께는 1-5 마이크론으로 내산화성과 전자 방출 효율을 향상시킵니다. CVD 공정은 800 내지 1000 $^{\circ}\text{C}$  에서 0.1 $\mu\text{m}/\text{min}$  의 증착 속도로 저압( $10^{-2}$  Pa)에서 수행되었습니다.

최적화되고 환경 친화적: 플라즈마 세척은 코팅 접착력을 향상시키고 전처리 시간을 단축합니다. 친환경 기술은 수성 세척제를 사용하여 유기 용제를 대체하고 휘발성 유기 화합물(VOC) 배출을 줄입니다. 코팅 재료의 회수율은 90% 이상으로 순환 경제의 요구 사항을 충족합니다.

### 3.8 준비 과정의 주요 매개변수 제어

주요 매개변수는 온도, 압력, 진공 및 시간과 관련된 전극 품질 및 성능 최적화의 일관성을 보장하기 위해 전체 준비 프로세스에 걸쳐 제어됩니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

환원 단계: 첫 번째 단계의 환원 온도는 500 내지 600 °C, 두 번째 단계는 800 내지 950 °C, 편차는 ± 5 °C 입니다. 수소 유량 0.5 내지 1.5 m<sup>3</sup>/h, 순도 99.99%. 산소 함량 모니터링은 가스 분석기를 사용하여 0.01% 미만으로 제어합니다.

성형 단계: 냉간 등압 100 내지 300 MPa, 유지 시간 5 내지 10 분, 압력 편차 <1%. 성형 압력 150 내지 200 MPa, 바인더 함량을 정확하게 측정합니다(0.5%에서 1%).

소결 단계: 진공 핫 프레스 소결 온도 1600 내지 1800 °C, 가열 속도 4 내지 10 °C/min, 진공도 10<sup>-3</sup> Pa, 60 내지 90 분 동안 보온. SPS 전류는 1000 에서 2000A 까지, 압력은 30 에서 50MPa 까지 제어됩니다. 온도 및 압력 센서는 안정적인 매개변수를 보장합니다.

압력 처리: 회전식 단조 온도 800 내지 1200°C, 변형률 20% 내지 30%. 드로잉 속도 0.5 - 2 m/min, 윤활유 흐름 모니터링. 교정 편차<0.1mm/m 입니다.

품질 관리: 통계적 공정 제어(SPC)는 매개변수 데이터를 실시간으로 수집하고 AI 알고리즘을 결합하여 편차를 예측하는 데 사용됩니다. 전자 탈출 전력<2.5eV)과 같은 핵심 성능 지표를 실험적으로 검증했습니다. 디지털 관리 시스템은 추적성을 보장하기 위해 전체 프로세스의 데이터를 기록합니다.

### 3.9 공정 최적화 및 공통 결합 분석

공정 최적화는 생산 효율성과 제품 품질을 향상시키고 균열, 다공성, 희토류 분리와 같은 일반적인 결함을 분석 및 개선합니다.

#### 최적화 조치:

기계적 합금: 불 밀링 시간을 12 시간으로 연장하고 입자를 0.1 마이크로미터로 미세화하며 소결 활성을 향상시킵니다.

SPS 소결: 유지 시간을 5 분으로 단축하고 희토류 휘발을 줄이며 입자 크기를 3-5 마이크로미터로 제어합니다.

첨가제가 첨가됩니다: 0.1%에서 0.5% ZrH<sub>2</sub>는 산소 함량을 줄이고 안정상을 형성하며 전자 방출 성능을 향상시킵니다.

자동 제어: 통합 센서 및 AI 최적화 매개변수로 수율이 95% 이상으로 증가합니다.

#### 결합 분석:

균열: 고르지 않은 성형 압력 또는 큰 소결 온도 구배로 인해 다단계 성형 및 분할 가열로 해결됩니다.

다공성: 잔류 산소 또는 소결 진공이 부족하여 진공도를 10<sup>-3</sup> Pa 로 최적화하고 다공성을 0.1%로 감소시켰습니다.

희토류 분리: 고온에서의 휘발, 소결 온도를 낮추고 안정제(예: ZrO<sub>2</sub>)를 첨가하여 완화합니다.

검증 방법: 유한 요소 시뮬레이션을 통해 결함 분포를 예측하고 SEM 및 초음파 감지를 통해 최적화 효과를 검증합니다. 최적화 후 전극 수명이 20% 연장되고 성능

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

일관성이 10% 향상됩니다.

### 3.10 친환경 준비 기술

친환경 준비 기술은 환경 보호와 지속 가능성에 중점을 두고 방사성 토륨 텅스텐 전극을 대체하고 환경에 미치는 영향을 줄입니다.

원료 회수: 폐텅스텐 전극 및 희토류 폐기물에서 원료를 추출하여 회수율이 80% 이상으로 광물 채굴을 줄입니다. 청정 감소: 재생 에너지로 구동되는 전기가열로를 사용하여 수소를 재활용하고 배기 가스를 촉매 연소로 처리합니다. 저에너지 소결: SPS 소결은 기존 열간 압착에 비해 에너지 소비를 30%, 탄소 배출량을 20% 줄입니다. 친환경 청소: 수성 세척제는 유기 용제를 대체하여 VOC 배출을 90% 줄입니다. 폐액은 이온 교환을 통해 희토류를 회수합니다. 폐기물 처리: 폐 전극은 텅스텐과 희토류에서 고온 용융을 통해 회수되며 재활용률은 85%입니다.

녹색 기술은 REACH 및 RoHS 규정을 준수하여 시장 경쟁력을 강화하고 지속 가능한 발전을 촉진합니다.

### 3.11 대규모 생산 공정 흐름도

대규모 생산 공정 흐름도는 다음과 같습니다.

원료 준비: 삼산화 텅스텐과 희토류 질산염의 무게를 측정하고 용액 (pH 5.5 에서 6.5)을 준비합니다.

혼합 및 건조: 스프레이 도핑, 80 내지 120°C 에서 건조, 200 메쉬 스크리닝.

환원: 수소 환원의 2 단계(500-600°C, 800-950°C), 산소 함량 < 0.01%.

성형: 냉간 등방성 프레스(100-300MPa) 또는 성형, 본체의 밀도 60%-70%.

사전 소결: 1200°C, 바인더 제거.

소결: 진공 열간 압착(1600 - 1800 °C, 60 MPa) 또는 SPS(1400 - 1600 °C).

압력 가공: 회전 단조(직경 3-10mm), 드로잉(0.5-10mm), 교정.

표면 처리: 기계적/전기화학적 연마(Ra<0.2 마이크론), 초음파 세척.

품질 검사: SEM, XRD, 성능 테스트(전자 탈출 전력 < 2.5eV).

포장 및 보관: 보관 온도가 10-25°C 인 방습 포장.



#### 4 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 물리적, 화학적 및 용접 특성

##### 4.1 복합 희토류 텅스텐 전극의 기계적 성질

복합 희토류 텅스텐 전극의 기계적 특성은 경도, 강도, 인성 및 내마모성을 포함하여 까다로운 산업 환경에 적용하는 데 핵심입니다. 이러한 특성은 텅스텐 매트릭스와 희토류 산화물의 첨가에 의해 영향을 받으며 순수 텅스텐 전극보다 훨씬 우수합니다.

경도: 텅스텐 매트릭스의 비커스 경도(HV)는 400 에서 450 사이이며, 희토류 산화물(예: 산화란탄, 산화세륨)을 첨가하면 입자 미세화를 통해 경도가 더욱 향상되며, 일반적으로 최대 450 에서 500HV 까지 가능합니다. 경도의 증가는 입자 경계 미끄러짐을 억제하기 위해 텅스텐 입자 경계에 못 지점을 형성하는 희토류 산화물 입자의 확산 강화로 인한 것입니다. 예를 들어, 2% 산화란탄을 함유한 전극은 순수 텅스텐보다 경도가 약 15% 높아 고하중 용접에 적합합니다.

강도 : 복합 희토류 텅스텐 전극의 인장 강도는 실온에서 800-1000 MPa, 고온 (1500 °C)에서 400-600 MPa 입니다. 희토류 산화물은  $\text{La}_2\text{O}_3$  또는  $\text{CeO}_2$  입자와 같은 안정적인 2 상을 형성하여 매트릭스 강도를 향상시킵니다. 2%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 를 함유한 전극은 순수 텅스텐보다 고온에서 인장 강도가 20% 더 높아 항공우주 부품 용접에 적합하기 때문에 산화이트륨의 첨가가 특히 중요합니다.

##### 저작권 및 법적 책임 선언문

인성: 순수 텅스텐 전극은 입자가 거칠기 때문에 취성이 높으며 파괴 인성(K<sub>1c</sub>)은 약 6MPa·m<sup>1/2</sup>입니다. 희토류 산화물을 첨가하면 입자가 5-10 마이크로미터로 미세화되고 파괴 인성이 8-10MPa·m<sup>1/2</sup>로 향상됩니다. 산화세륨과 산화란탄의 시너지 효과는 입경 결합을 줄여 인성을 향상시키고 용접 중 전극 팁의 파손 위험을 줄입니다.

내마모성: 복합 희토류 텅스텐 전극의 내마모성은 희토류 산화물의 분산 및 강화에 의해 크게 향상됩니다. 고전류 용접에서는 아크의 고온으로 인해 전극 팁이 마모되고, 지르코니아 함유 전극은 보호 산화물 층을 형성하여 마모율을 30% 감소시킵니다. 내마모성 테스트에 따르면 복합 전극의 마모량은 순수 텅스텐 전극보다 약 40% 낮아 수명이 연장됩니다.

시험 방법: 기계적 성질은 비커스 경도 시험기, 만능 인장 시험기 및 충격 시험기로 결정됩니다. 고온 성능 테스트는 진공 또는 불활성 분위기에서 용접 환경을 시뮬레이션하여 수행됩니다. 주사전자현미경(SEM)을 이용한 현미경 분석을 통해 파괴 형태를 관찰하고 희토류 입자의 강화 메커니즘을 확인하였다.

기계적 특성의 최적화를 통해 복합 희토류 텅스텐 전극은 고강도, 장기 용접에서 우수한 성능을 발휘할 수 있으며, 특히 원자력 장비 및 항공 엔진 제조와 같은 까다로운 응용 분야에 적합합니다.

#### 4.2 복합 희토류 텅스텐 전극의 열적 특성

열적 특성은 녹는점, 열전도율 및 열팽창 계수를 포함하여 고온 아크 환경에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 안정성과 내구성을 결정합니다.

녹는점: 텅스텐 매트릭스의 녹는점은 3410°C이며, 이는 복합 전극의 고온 안정성의 기초입니다. 희토류 산화물(예: La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>)의 첨가는 녹는점에 거의 영향을 미치지 않지만 미세 구조를 개선하여 고온 변형에 대한 저항성이 향상됩니다. 2% 이트륨 산화물을 함유한 전극은 3000°C 이상에서도 구조적으로 손상되지 않아 플라즈마 절단 및 고온 용융에 적합합니다.

열전도율: 텅스텐의 열전도율은 약 174W/(m·K)(실온)이며 고온에서는 약간 감소합니다. 희토류 산화물을 첨가하면 입자를 미세화하고 입자 경계에서 방열 저항을 감소시켜 열전도율을 5-10% 증가시킵니다. 예를 들어, 산화세륨 함유 전극의 열전도율은 1000°C 에서 180-190W/(m·K)로 빠른 열 방출에 기여하고 팁 소손을 줄입니다.

열팽창 계수: 텅스텐의 열팽창 계수는 4.5×10<sup>-6</sup>/°C이며, 열팽창이 낮아 고온에서 열 응력을 감소시킵니다. 희토류 산화물을 첨가하면 열팽창 계수가 약간 증가하지만(최대 4.8 - 5.0×10<sup>-6</sup>/°C), 열 사이클 동안 전극의 안정성을 보장하기 위해 비율(예: 지르코니아와 산화란탄의 조합)을 최적화하여 열 응력을 제어할 수 있습니다.

열충격 성능: 복합 희토류 텅스텐 전극은 희토류 산화물의 확산에 의해 강화되고 열충격 저항성이 크게 향상됩니다. 지르코니아 함유 전극은 급격한 온도

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

상승(>1000°C/min) 조건에서도 균열 없이 유지되므로 고주파 용접에 적합합니다. 열충격 시험은 급속 냉간 및 급속 열 순환 방식을 채택하며 복합 전극의 사이클 수는 순수 텅스텐보다 50% 더 높습니다.

시험 방법: 열전도율은 레이저 플래시 방식으로 결정되며, 열팽창 계수는 explatator 를 사용하여 25 내지 2000 °C 범위에서 시험됩니다. 열충격 성능은 아크 시뮬레이션 테스트를 통해 평가되고 균열 발생 시간이 기록됩니다. 열 특성의 최적화를 통해 복합 전극은 고온, 고열 부하 환경에서 잘 작동할 수 있습니다.

#### 4.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 전기적 특성

전기적 특성은 복합 희토류 텅스텐 전극의 핵심 장점으로, 주로 전자 탈출 작업, 전도도 및 아크 특성을 포함하여 용접에서 아크 개시 성능과 아크 안정성을 결정합니다.

전자 탈출 작업: 순수 텅스텐 전극의 전자 탈출 작업은 4.5eV 이므로 아크 개시가 발생합니다. 희토류 산화물을 첨가하면 탈출 작업이 크게 감소했으며, 예를 들어, 2% 산화 세륨을 함유한 전극의 탈출 작업이 2.2 내지 2.5 eV 로 감소하고, 산화 란탄과 산화 이트륨의 조합이 2.0 eV 미만으로 더욱 최적화되었습니다. 낮은 탈출 전력은 전극이 저전압에서 빠르게 아크를 발생시켜 에너지 소비를 줄입니다.

전도도: 텅스텐의 전도도는  $1.82 \times 10^7$  S/m(실온)이며, 희토류 산화물을 첨가하면 입계 저항이 감소하여 전도성이 약간 향상됩니다. 산화란탄을 함유한 전극은 1000°C 에서 전도도를 5% 증가시켜 높은 전류 전달 효율을 보장합니다. 전도도 테스트는 4-프로브 방법을 사용하여 희토류 입자의 균일한 분포에 의한 전류 분포의 최적화를 확인합니다.

아크 특성 : 복합 희토류 텅스텐 전극의 아크 안정성은 95 % 이상으로 순수 텅스텐의 80 %보다 우수합니다. 희토류 산화물은 전극 표면에 낮은 탈출 일 방출점을 형성하여 전자 방출 효율을 높이고 아크를 집중하고 안정적으로 만듭니다. 산화세륨과 산화란탄을 함유한 전극은 AC 용접에서 아크 드리프트를 30% 줄여 알루미늄 합금 용접에 적합합니다. 아크 테스트는 고속 촬영 및 전류 변동 분석을 통해 안정성을 검증합니다.

최적화 메커니즘: 희토류 산화물은 고온에서 전극 표면으로 이동하여 활성 방출층을 형성하고 아크 시작 전압을 감소시킵니다(순수 텅스텐의 경우 50V 에서 30V 로). 다변량 복합재(예: WLaCeY)는 전자 방출과 열 안정성의 시너지 효과를 통해 아크 수명을 향상시킵니다.

시험방법: 전자탈출 작업은 자외선 광전자 분광법(UPS)에 의해 결정되며, 전도도는 고정밀 저항계를 사용하여 측정됩니다. 아크 특성은 시뮬레이션된 TIG 용접 환경에서 테스트되어 아크 시작 시간과 아크 길이를 기록합니다. 전기적 특성의 우수성으로 인해 복합 전극은 정밀 용접에서 대체할 수 없습니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

**Aerospace Manufacturing:** Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

**Nuclear and Power Equipment:** Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

**Precision Machining:** Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

**Automotive and Rail Transit:** Welding of critical load-bearing components

**Electronics and Vacuum Devices:** High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

#### 4.4 복합 희토류 텅스텐 전극의 화학적 안정성 및 내식성

화학적 안정성과 내식성은 복잡한 환경, 특히 고온, 산화성 또는 부식성 가스 분위기에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 내구성을 결정합니다.

**화학적 안정성:** 텅스텐 매트릭스는 상온에서 산, 알칼리 및 물에 대한 안정성이 우수하고 화학 반응이 발생하지 않습니다. 희토류 산화물을 첨가하면 고온에서의 화학적 안정성이 더욱 향상됩니다. 예를 들어, 지르코니아와 산화이트륨은 전극 표면에 보호층을 형성하여 텅스텐과 산소 또는 질소의 반응을 억제합니다. 2% 지르코니아를 함유한 전극의 산화 속도는 2000°C 및 산소 대기에서 40% 감소했습니다.

**내식성:** 복합 희토류 텅스텐 전극은 미량의 수증기를 함유한 아르곤과 같은 부식성 가스에서 탁월합니다. 산화탄과 산화세륨을 첨가하면 전극 표면의 산화물 축적이 감소하고 오염 방지 능력이 50% 증가합니다. 습도가 높은 환경에서 지르코니아를 함유한 전극의 부식 속도는 순수 텅스텐의 1/3에 불과하여 수명이 연장됩니다.

**오염 저항:** 용접 중에 전극은 용융 풀 튀김이나 기체 불순물에 의해 오염될 수 있습니다. 희토류 산화물은 안정적인 표면층을 형성하여 불순물 흡착을 줄이고 아크 안정성을 유지합니다. 테스트 결과 산화세륨을 함유한 전극의 아크 안정성은 오염된 환경에서 90% 이상 유지되는 것으로 나타났습니다.

**시험방법:** 고온 산화 실험(1500 내지 2000°C, 산소분압  $10^{-2}$  Pa)을 통해 화학적 안정성을 평가하고 질량 손실률을 기록하였다. 내식성은 염수 분무 시험과 전기화학적 부식 시험을 사용하여 부식 전류 밀도를 측정합니다. 방오 용접 환경을 시뮬레이션하여 전극의 표면 형태를 관찰합니다.

향상된 화학적 안정성과 내식성으로 인해 복합 전극은 해양 공학 및 화학 장비 용접과 같은 복잡한 작업 조건에 적합합니다.

#### 4.5 복합 희토류 텅스텐 전극의 용접 특성

용접 특성은 아크 개시 성능, 아크 연소 수명, 침투 깊이 제어 및 용접 품질을 포함하여 복합 희토류 텅스텐 전극의 핵심 응용 지표입니다.

**아크 개시 성능:** 희토류 산화물은 전자 탈출 작업을 줄여 아크 전압을 50V에서 순수 텅스텐의 25-30V로 낮추고 아크 시작 시간을 0.1초 미만으로 단축합니다. 산화세륨을 함유한 전극은 정밀 용접을 위해 저전류(<50A)에서 잘 작동합니다. 산화탄을 함유한 전극은 AC 용접에서 아크 안정성이 더 높습니다.

**아크 수명:** 복합 전극의 아크 수명은 500-1000시간에 이르며 순수 텅스텐 전극(200-300시간)보다 2-3배 더 깁니다. 희토류 산화물의 낮은 증발 속도와 소손 저항은 팁 손실을 줄이고 산화 이트륨을 함유한 전극은 고전류(>200A)에서 수명을 30% 연장합니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

침투 깊이 제어: 복합 전극의 아크 농도가 높고 침투 깊이 균일성이 20% 증가합니다. 산화탄과 산화세륨을 함유한 전극은 TIG 용접에서 0.5mm 에서 5mm 까지 정밀하게 제어할 수 있어 박판 용접과 후판 용접 모두에 적합합니다. 호 모양은 고속 사진으로 분석하여 안정성을 확인합니다.

용접 품질: 복합 전극은 아크 드리프트 및 스파터를 줄이고 용접 표면이 매끄럽고 다공성이 50% 감소합니다. WLaCeY 가 포함된 전극은 알루미늄 합금 용접에서 용접부의 인장 강도를 10% 증가시켜 항공우주 요구 사항을 충족합니다.

시험 방법: 용접 특성은 TIG 용접 테스트 벤치에서 테스트되며 아크 시작 전압, 아크 점화 시간 및 침투 깊이 분포가 기록됩니다. 용접의 품질은 X 선 비파괴 검사와 금속 조직 분석을 통해 확인되어 결함률을 확인합니다. 용접 특성의 우월성은 고정밀 분야에서 복합 전극의 광범위한 적용을 촉진했습니다.

#### 4.6 희토류 첨가가 미세구조에 미치는 영향

희토류 산화물을 첨가하면 복합 희토류 텅스텐 전극의 미세 구조가 크게 변화하고 성능에 영향을 미칩니다. 그 효과는 입자 구조, 상 분포 및 결합 제어에서 분석됩니다.

입자 미세 : 순수한 텅스텐 전극의 입자 크기는 20-50 마이크로미터로 고온에서 거칠어지기 쉽습니다. 희토류 산화물(예:  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ )은 고정 효과를 통해 입자 성장을 억제하여 입자 크기를 5-10 마이크로미터로 줄입니다. SEM 분석 결과 2% 산화이트륨을 함유한 전극의 입자 균일성이 30% 증가하여 인성과 피로 저항성이 향상되는 것으로 나타났습니다.

상 분포: 희토류 산화물은 텅스텐 매트릭스에서 50nm 에서 200nm 크기의 확산 2 상 입자를 형성합니다. 이러한 입자는 입자 경계와 입자 내에 고르게 분포되어 매트릭스 강도를 향상시킵니다. 지르코니아와 산화탄이 결합하여 복합상(예:  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ )을 형성하여 고온 안정성을 향상시킵니다. XRD 분석은 희토류 상의 안정성과 분포를 확인합니다.

결합 제어: 희토류 산화물은 입경 결합(예: 공극, 전위)을 줄이고 고온 크리프 속도를 줄입니다. 산화세륨을 함유한 전극의 결합 밀도가 40% 감소하여 TEM 관찰을 통해 확인되었습니다. 희토류를 첨가하면 미세 균열 전파도 억제되고 파괴 인성이 향상됩니다.

메커니즘 분석: 희토류 산화물은 소결 중에 입자 경계로 이동하여 손톱 지점을 형성하고 입자 미끄러짐 및 성장을 억제합니다. 높은 용접 온도에서는 희토류 입자가 표면으로 이동하여 전자 방출 활성층을 형성하고 탈출 작업을 줄입니다. 미세 구조의 최적화는 전극의 전반적인 성능을 크게 향상시킵니다.

#### 4.7 텅스텐 전극 성능 비교

복합 희토류 텅스텐 전극과 순수 텅스텐 전극 및 토륨 텅스텐 전극 사이에는 성능에 상당한 차이가 있으며 다음과 같은 비교가 여러 측면에서 이루어집니다.

##### 저작권 및 법적 책임 선언문

전자 방출 성능: 복합 희토류 텅스텐 전극(탈출 작업 2.0-2.5 eV)은 순수 텅스텐(4.5 eV) 및 토륨 텅스텐(2.6 - 2.8 eV)보다 우수하며 아크 전압은 20 - 30 V 낮아 정밀 용접에 적합합니다.

아크 안정성: 복합 전극의 안정성은 > 95%, 순수 텅스텐은 80%, 토륨 텅스텐은 90%입니다. 산화탄소를 함유한 전극은 AC 용접에서 드리프트율이 가장 낮았습니다.

서비스 수명: 복합 전극의 아크 연소 수명 500 내지 1000 시간, 순수 텅스텐의 200 내지 300 시간, 토륨 텅스텐의 300 내지 500 시간. 희토류 첨가는 수명을 2-3 배 연장합니다.

기계적 성질: 복합 전극 경도 450 내지 500 HV, 인장 강도 800 내지 1000 MPa, 순수 텅스텐 (400 HV, 700 MPa) 및 토륨 텅스텐 (420 HV, 750 MPa)보다 우수합니다.

환경 보호: 복합 전극은 방사성이 없으며 REACH 규정을 준수합니다. 토륨 텅스텐에는 방사성 토륨이 포함되어 있으며 특별한 처리가 필요합니다. 순수 텅스텐은 방사성이 없지만 성능이 좋지 않습니다.

적용 범위: 복합 전극은 TIG 용접, 플라즈마 용접, 절단 및 신에너지 배터리에 적합합니다. 토륨 텅스텐은 환경 보호 제한으로 인해 감소합니다. 순수 텅스텐은 수요가 적은 시나리오로 제한됩니다.

복합 전극은 기존 전극보다 전반적으로 우수하여 친환경 제조 및 고급 응용 분야의 첫 번째 선택이 되었습니다.

#### 4.8 복합 희토류 텅스텐 전극의 환경 적응성

복합 희토류 텅스텐 전극의 환경 적응성은 고온, 고습 및 부식성 환경에서 안정적인 성능에 반영됩니다.

고온 환경: 산화이트륨과 지르코니아를 함유한 전극은 3000°C 이상에서 구조적 무결성을 유지하고 내산화성이 40% 증가하여 플라즈마 절단 및 고온 용융에 적합합니다.

습도가 높은 환경: 상대 습도가 90%인 환경에서 산화세륨을 함유한 전극의 부식률은 순수 텅스텐의 1/3에 불과하며 아크 안정성은 90% 이상으로 유지됩니다.

부식성 가스: 황 또는 염소 함유 분위기에서 지르코니아 보호층은 전극 표면 반응을 줄이고 부식 속도를 50% 감소시킵니다. 오염 저항성은 시뮬레이션된 스플래시 테스트를 통해 검증됩니다.

시험 방법: 고온 적응성은 열 순환 시험(25 내지 2000 °C, 100 사이클)으로 평가됩니다. 높은 습도 및 부식성 테스트에서는 품질 손실 및 성능 변화를 기록하는 환경 챔버를 사용합니다. 복합 전극의 환경 적응성은 해양 공학 및 화학 응용 분야에 적합합니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

#### 4.9 복합 희토류 텅스텐 전극의 피로 및 수명 특성 분석

피로 및 수명 특성은 고온 피로, 열 사이클 피로 및 아크 수명과 관련된 복합 희토류 텅스텐 전극의 내구성을 평가하는 핵심 지표입니다.

고온 피로: 복합 전극은 1500 에서 2000 °C 에서 순환 응력을 받고 피로 수명은 순수 텅스텐의 10<sup>3</sup> 배보다 우수한 10<sup>4</sup>에서 10<sup>5</sup> 배에 이릅니다. 희토류 산화물은 입자를 미세화하고 피로 균열 전파를 줄입니다.

열 순환 피로: 지르코니아가 함유된 전극은 급격한 온도 상승 및 하강(1000°C/min)에서 균열 없이 최대 500 회 순환할 수 있습니다. 희토류의 비율을 최적화하기 위해 유한 요소 시뮬레이션 해석을 통해 열응력을 최적화했습니다.

아크 수명: 복합 전극의 아크 수명은 200ADC 용접에서 500-1000 시간이며, WLaCeY 를 포함하는 전극의 수명은 AC 용접에서 20% 연장됩니다. 수명 테스트 연속 용접 실험을 통해 팁 마모율을 기록합니다.

분석 방법: 피로 성능은 고온 인장 사이클 시험으로 평가하고 수명은 아크 연소 시험으로 평가합니다. SEM 및 파괴 분석을 통해 피로 파괴 메커니즘을 확인합니다. 복합 전극의 긴 수명 특성은 유지 관리 비용을 줄이고 산업 효율성을 향상시킵니다.

#### 4.10 CTIA GROUP LTD.의 복합 희토류 텅스텐 전극 MSDS

CTIA GROUP LTD 의 물질안전보건자료(MSDS) - 복합 희토류 텅스텐 전극

파트 1: 제품 이름

중국 이름: 복합 희토류 텅스텐 전극(WLaCeY, WL, WC 등)

파트 2: 구성/구성 정보

텅스텐(>95%), 산화란탄(0.5%-2%), 산화세륨(0.5%-2%), 산화이트륨(0.5%-2%), 지르코니아(0-1%)

파트 3: 위험 개요

건강 위험: 이 제품은 눈과 피부에 자극을 주지 않습니다.

폭발 위험: 이 제품은 불연성 및 자극성이 없습니다.

파트 4: 응급처치 조치

피부 접촉: 오염된 옷을 벗고 흐르는 물로 다량의 양으로 헹굽니다.

눈 접촉: 눈꺼풀을 들어 올리고 흐르는 물이나 식염수로 헹굽니다. 치료.

흡입: 현장을 신선한 공기에 두십시오. 호흡이 어려우면 산소를 공급하십시오. 치료.

먹기: 구토를 유도할 수 있을 만큼 따뜻한 물을 충분히 마십니다. 치료.

파트 5: 화재 예방 조치

유해한 연소 생성물: 자연 분해 생성물은 알려져 있지 않습니다.

소화 방법: 소방관은 방독면과 전신 소방복을 착용하여 바람이 부는 방향으로 화재를

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

진압해야 합니다. 소화제: 마른 가죽 분말, 모래.

#### 파트 6: 누출 응급 처리

응급 처리: 누출 오염 지역을 격리하고 접근을 제한합니다. 화원을 차단하십시오. 비상 대응 요원은 방진 마스크(전면 마스크)와 방화복을 착용하는 것이 좋습니다. 먼지를 피하고 조심스럽게 쓸어내고 가방에 넣어 안전한 장소로 옮기십시오. 누출량이 많으면 비닐 시트나 캔버스로 덮으십시오. 폐기를 위해 폐기물을 수집하고 재활용하거나 폐기물 처리장으로 운반합니다.

#### 파트 7: 작동, 폐기 및 보관

작동 시 주의사항: 작업자는 특별 교육을 받고 작동 절차를 엄격히 준수해야 합니다. 작업자는 자흡식 필터 방진 마스크, 화학 안전 보호 안경, 독성 방지 침투 작업복 및 고무 장갑을 착용하는 것이 좋습니다. 화기 및 열원에서 멀리 떨어진 작업장에서의 흡연은 엄격히 금지되어 있습니다. 방폭 환기 시스템 및 장비를 사용하십시오. 먼지를 피하십시오. 산화제 및 할로젠과의 접촉을 피하십시오. 취급 시 포장 및 용기의 손상을 방지하기 위해 가볍게 싣고 내야 합니다. 해당 종류와 수량의 소방 장비 및 누출 응급 처리 장비를 갖추고 있습니다. 빈 용기는 유해 물질을 남길 수 있습니다.

보관 주의사항: 서늘하고 통풍이 잘되는 창고에 보관하십시오. 화기와 열원을 멀리하십시오. 산화제 및 할로젠과 별도로 보관해야 하며 혼합해서는 안 됩니다. 해당 종류와 수량의 소방 장비를 갖추고 있습니다. 보관 장소에는 유출물을 막을 수 있는 적절한 재료가 갖추어져 있어야 합니다.

#### 파트 8: 연락처 제어/개인 보호

중국 MAC(mg/m3): 6

구소련 MAC(mg/m3): 6

TLVTN:ACGIH 1mg/m3

TLVWN:ACGIH 3mg/m3

모니터링 방법: 티오시안화칼륨-염화티타늄 분광 발광계

엔지니어링 제어: 먼지가 없는 생산 공정 및 완전한 환기.

호흡기 보호: 공기 중의 먼지 농도가 기준을 초과하면 자흡식 필터 방진 마스크를 착용해야 합니다. 비상시 대피할 때는 공기 호흡기를 착용해야 합니다.

눈 보호: 화학 보안경을 착용하십시오.

신체 보호: 독극물 침투 방지 작업복을 착용하십시오.

손 보호: 고무 장갑을 착용하십시오.

#### 파트 9: 물리적, 화학적 특성

주성분: 순수 제품

외관 및 특성: 고체, 금속성 밝은 흰색

녹는점(°C): N/A

끓는점(°C): N/A

상대 밀도(물=1): 13~18.5(20°C)

증기 밀도(공기=1): 데이터 없음

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

포화 증기압 (kPa): 데이터 없음  
연소열(kj/mol): 데이터 없음  
임계 온도(°C): 데이터 없음  
임계 압력(MPa): 데이터 없음  
물 분배 계수의 로그 값: 데이터 없음  
인화점(°C): 데이터 없음  
발화 온도(°C): 데이터 없음  
폭발 한계 % (V/V): 데이터 없음  
폭발 하한 % (V/V): 데이터 없음  
용해도: 질산과 불산에 용해됨  
주요 용도 : 차폐 부품, 텅스텐 합금 닥트 샤프트, 텅스텐 합금 볼 등을 만드는 데 사용됩니다.

파트 10: 안정성 및 반응성  
금지 성분: 강산 및 알칼리.

파트 11 :  
급성 독성: 데이터 없음  
LC50: 데이터 없음

파트 12: 생태 데이터  
이 부분에 대한 데이터가 없습니다.

파트 13: 폐기물 처리  
폐기물 자연폐기물 처리 방법: 폐기 전 관련 국가 및 지역 규정을 참조하십시오.  
가능하면 재활용하십시오.

파트 14: 배송 정보  
위험물 번호: 없음  
포장 카테고리: Z01  
운송 예방 조치: 포장에 안전해야 하며 적재가 안전해야 합니다. 운송 중에는 용기가 누출, 무너지거나 떨어지거나 손상되지 않았는지 확인하십시오. 산화제, 할로젠, 식용 화학 물질 등과 혼합 및 운송하는 것은 엄격히 금지되어 있습니다. 운송 중에는 햇빛 노출, 비 및 고온으로부터 보호해야 합니다. 차량은 운송 후 철저히 청소해야 합니다.

파트 15: 규제 정보  
규제 정보: 화학위험물 안전 관리 규정(1987년 2월 17일 국무원 공포), 화학물질 위험물 안전 관리 규정 시행 규칙(화라오발[1992] 제 677호), 작업장 내 화학물질 안전 사용 규정([1996] 노동부 발 제 423호) 및 기타 규정, 화학 위험물의 안전한 사용, 생산, 보관, 운송, 적재 및 하역에 대한 해당 조항을 만듭니다. 작업장 공기 중 텅스텐에 대한 위생 표준(GB 16229-1996)은 작업장 공기 중 물질의 최대 허용 농도 및 검출 방법을 지정합니다.

저작권 및 법적 책임 선언문

파트 16: 공급업체 정보  
공급업체: CTIA GROUP LTD  
전화 : 0592-5129696/5129595



## 5 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 사용 및 적용 지침

### 5.1 복합 희토류 텅스텐 전극의 주요 용도 개요

복합 희토류 텅스텐 전극은 우수한 전자 방출 능력, 아크 안정성 및 비방사성 특성으로 인해 여러 산업 분야에서 광범위한 응용 분야를 가지고 있습니다. 주요 용도는 용접, 절단, 용사, 전기 광원, 신흥 전기화학 및 신에너지 분야입니다. 다음은 주요 응용 시나리오에 대한 자세한 설명입니다.

**용접:** 복합 희토류 텅스텐 전극은 불활성 가스 차폐 용접(TIG 용접), 플라즈마 용접 및 기타 공정의 핵심 재료입니다. 전자 탈출 작업이 낮고 아크 안정성이 높아 항공우주 부품의 박판 용접, 원자력 장비 및 자동차 제조와 같은 고정밀 용접에 적합합니다. 산화란탄과 산화세륨을 함유한 전극은 높은 용접 품질과 낮은 다공성으로 AC 및 DC 용접에서 우수한 성능을 발휘합니다.

**절단:** 플라즈마 절단에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 고온 저항 및 소손 저항으로 인해 널리 사용됩니다. 산화이트륨과 지르코니아를 함유한 전극은 고온 플라즈마 아크 하에서도 안정적으로 유지되므로 스테인리스강, 알루미늄 합금, 초합금 절단에

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

적합하며 조선 및 중장비에 널리 사용됩니다.

용사: 복합 전극은 플라즈마 분사 공정에서 기계 부품 표면에 내마모성 또는 부식 방지 코팅을 분사하는 데 사용됩니다. 높은 용점과 내산화성은 분무 중 안정성을 보장하며 항공 엔진 블레이드, 석유 시추 장비 등에 사용됩니다.

전기 광원: 전기 광원 분야에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 고강도 가스 방전 램프(예: 크세논 램프 및 수은 램프)의 음극 또는 필라멘트로 사용됩니다. 우수한 전자 방출 특성으로 램프의 수명을 연장하고 발광 효율을 향상시키며 프로젝션 장비 및 의료 조명에 널리 사용됩니다.

신에너지 및 전기화학: 복합 희토류 텅스텐 전극은 리튬 이온 배터리, 연료 전지 및 전해조의 전극 재료 또는 전도성 코팅으로 사용되어 에너지 밀도와 사이클 수명을 향상시킵니다. 또한, 전기촉매 분야(예: 물 전기분해에 의한 수소 생산)에서의 응용이 나타나고 있으며, 희토류 산화물의 촉매 활성은 반응 효율을 향상시킵니다.

복합 희토류 텅스텐 전극의 다양한 용도는 맞춤형 희토류 비율과 최적화된 미세 구조의 이점을 활용하여 다양한 산업의 성능 요구 사항을 충족할 수 있습니다. 글로벌 시장 분석에 따르면 연간 소비량은 1,600 톤을 넘어섰으며 특히 녹색 제조 및 첨단 기술 분야에서 향후 5년 동안 계속 성장할 것으로 예상됩니다.

## 5.2 복합 희토류 텅스텐 전극에 적용 가능한 용접 유형

복합 희토류 텅스텐 전극은 다양한 용접 유형에 적합하며 다양한 공정에서 성능 이점이 뛰어납니다. 용접의 주요 유형과 특징은 다음과 같습니다.

텅스텐 불활성 가스 용접(TIG 용접/GTAW): TIG 용접은 복합 희토류 텅스텐 전극의 가장 널리 사용되는 분야입니다. WC20 과 같은 산화세륨 함유 전극은 DC 양극성(DCSP) 용접에서 우수한 아크 특성을 나타내므로 스테인리스강, 탄소강 및 니켈 합금에 적합합니다. WL20 과 같은 산화란탄을 함유한 전극은 교류(AC) 용접에서 아크 안정성이 높으며 알루미늄 및 마그네슘 합금에 적합하여 아크 드리프트를 줄이고 용접을 매끄럽게 합니다.

플라즈마 용접(PAW): 플라즈마 용접은 전극이 고온 및 고전류에서 안정적으로 유지되어야 합니다. WLaCeY 와 같은 산화이트륨과 지르코니아를 함유한 복합 전극은 소손 저항성과 긴 수명으로 인해 항공우주 분야의 얇은 벽 구조물과 같은 고정밀 플라즈마 용접에 적합합니다. 전극 팁은 고온 플라즈마 아크에서 마모율이 낮고 수명은 500-800 시간입니다.

금속 불활성 가스 차폐 용접(MIG 용접) 지원: MIG 용접에서 복합 희토류 텅스텐 전극은 때때로 아크 또는 특수 재료 용접을 안정화하기 위한 보조 전극으로 사용됩니다. 높은 전자 방출 효율은 아크 시작 전압을 줄여 자동화 된 생산 라인에 적합합니다.

저항 스폿 용접 지원: 특정 고정밀 스폿 용접 공정에서 복합 전극은 전극 헤드

### 저작권 및 법적 책임 선언문

역할을 하여 안정적인 전류 전송을 제공하고 스패터를 줄여 전자 부품 제조에 적합합니다.

특수 용접 공정: 마이크로빔 플라즈마 용접 및 레이저-TIG 복합 용접과 같은 복합 전극은 아크 농도를 최적화하여 용접 품질을 향상시킵니다. 산화란탄과 산화세륨을 함유한 전극은 미세 용접에서 아크 전압이 25V 로 낮으며 박판(< 0.5mm) 용접에 적합합니다.

용접 유형마다 전극에 대한 성능 요구 사항이 다르며 복합 희토류 텅스텐 전극은 희토류 비율(예: 산화세륨: 산화란탄 = 1:1)을 조정하여 다양한 요구를 충족합니다. 실험에 따르면 TIG 용접의 아크 안정성은 95% 이상이고 침투 깊이 제어 정확도는 20% 증가하여 순수 텅스텐 전극보다 훨씬 우수합니다.

### 5.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 산업 응용 사례

복합 희토류 텅스텐 전극은 다음과 같은 특정 사례를 포함하여 여러 산업 분야에서 상당한 응용 가치를 입증했습니다.

항공우주: 항공기 제조에서는 티타늄 합금 및 초합금의 TIG 용접에 WLaCeY 와 같은 산화란탄 및 이트륨 산화물을 함유한 전극이 사용됩니다. 예를 들어, 항공 엔진 블레이드 용접 프로젝트는 전류가 150-200A, 용접 인장 강도가 900MPa, 다공성이 0.1% 미만인 WL20 전극을 사용하여 엄격한 항공 표준을 충족합니다.

자동차 제조: 복합 전극은 전기 자동차 배터리 부품 용접에 널리 사용됩니다. 산화세륨을 함유한 전극(WC20)은 50-100A 의 전류, 매끄러운 용접면, 사이클 수명 10% 증가로 알루미늄 합금 배터리 셀의 TIG 용접에 사용됩니다. 한 자동차 제조업체는 복합 전극을 사용하여 용접 효율을 15% 향상시키고 생산 비용을 8% 절감했습니다.

원자력 산업: 원자로 압력 용기 용접은 높은 내식성과 긴 수명이 필요합니다. 지르코니아를 함유한 복합 전극은 플라즈마 용접에서 우수한 성능을 발휘하여 304 스테인리스강 파이프를 3-5mm 로 제어하고 용접부에 균열이 없으며 내식성이 20% 증가했습니다.

조선: 플라즈마 절단에서는 산화이트륨을 함유한 전극을 사용하여 최대 1m/min 의 절단 속도로 고장력 강판을 절단하여 전극 수명을 30% 연장하고 교체 빈도를 줄입니다. 한 조선소에서는 WLaCeY 전극을 사용하여 절단 정확도를 10% 향상시키고 재료 낭비를 줄입니다.

전자 산업: 반도체 장비 제조에서 복합 전극은 구리와 알루미늄 부품을 연결하기 위한 마이크로빔 플라즈마 납땀에 사용됩니다. 산화세륨을 함유한 전극은 저전류(<30A)에서 아크 안정이며 용접점 직경은 칩 패키징의 요구 사항을 충족하기 위해 0.1mm 이내로 제어됩니다.

신에너지 분야: 복합 전극은 리튬 배터리 전극 제조에서 전도성 코팅 기관으로

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

사용되며 산화탄을 함유한 전극은 배터리 사이클 수명을 5,000 배 이상으로 향상시킵니다. 한 태양광 회사는 모듈 효율을 향상시키기 위해 복합 전극을 사용하여 표면 거칠기가 Ra<0.5 마이크론인 실리콘 웨이퍼를 절단합니다.

이러한 사례는 복합 희토류 텅스텐 전극이 맞춤형 성능을 통해 업계 요구를 충족하고 고정밀 제조의 발전을 주도한다는 것을 보여줍니다.

#### 5.4 복합 희토류 텅스텐 전극의 권장 용접 공정 매개변수

용접 공정 매개변수의 선택은 복합 희토류 텅스텐 전극의 성능과 용접 품질에 직접적인 영향을 미칩니다. 다음은 다양한 재료 및 전극 유형을 포괄하는 TIG 및 플라즈마 용접에 권장되는 매개변수입니다.

##### TIG 용접 매개변수:

전극 유형: WL20(2% 산화탄), WC20(2% 산화세륨), WLaCeY(삼원 복합재)

현재 유형:

DC 양극성(DCSP): 스테인리스강, 탄소강 및 50 - 250 A 의 전류에 적합

교류(AC): 알루미늄 및 마그네슘 합금, 60 - 200 A 의 전류 및 70 - 150 Hz 의 주파수에 적합

전극 직경: 1.6 - 4.0 mm (얇은 판의 경우 1.6 - 2.4 mm, 후판의 경우 3.2 - 4.0 mm)

팁 각도: 30 내지 60°(정밀 용접 30°, 고전류 60°)

차폐 가스: 아르곤(순도 99.99%), 유량 8 - 15 L/min

아크 시동 전압: 25 - 35 V

용접 속도: 0.1 내지 0.5 m/min

전극 연장 길이: 3 - 6 mm

##### 플라즈마 용접 매개변수:

전극 유형: WLaCeY, WY20(2% 이트륨 산화물)

전류 유형: DC 양극성, 80 - 300A 의 전류

전극 직경: 2.4 - 4.8 mm

팁 각도: 45 - 60°

플라즈마 가스: 아르곤, 유량 0.5 - 2 L/min

차폐 가스: 아르곤 + 5% 수소, 유량 10 - 20 L/min

아크 시동 전압: 30 - 40V

용접 속도: 0.2 내지 0.8 m/min

##### 재료 적용:

스테인리스강: WL20, 전류 100 - 200 A, 아르곤 유량 10 L/min, 팁 각도 45°

알루미늄 합금: WC20, AC 전류 80 - 150 A, 주파수 100 Hz, 아르곤 유량 12 L/min

티타늄 합금: WLaCeY, 전류 120 - 180 A, 팁 각도 30°, 아르곤 + 헬륨 혼합물(1:1)

최적화 제안: 매개변수는 공작물의 두께와 용접 장비에 따라 조정되어야 합니다. 저전류 및 날카로운 전극 팁은 얇은 판에 맞아 열 영향 영역을 줄입니다. 고전류와

##### 저작권 및 법적 책임 선언문

큰 팁 각도는 두꺼운 판에 적합하며 침투 깊이를 향상시킵니다. 아크 전압 및 전류 변동을 실시간으로 모니터링하여 안정성을 보장합니다.

### 5.5 복합 희토류 텅스텐 전극 사용시 주의사항

복합 희토류 텅스텐 전극을 적절하게 사용하면 성능을 극대화하고 수명을 연장할 수 있습니다. 다음은 몇 가지 주요 고려 사항입니다.

**전극 선택:** 예를 들어 WL20 은 알루미늄 합금 AC 용접에 적합하고 WC20 은 저전류 스테인리스강 용접에 적합하며 WLaCeY 는 고하중 티타늄 합금 용접에 사용됩니다.

**팁 연삭:** 전극의 끝은 오염을 방지하기 위해 특수 다이아몬드 연삭 휠을 사용하여 적절한 각도(30-60°)로 연마해야 합니다. 연삭 방향은 전극의 축 방향을 따라 이루어지며 표면 거칠기는  $Ra < 0.2$  마이크론입니다. AC 용접은 소진을 줄이기 위해 반구형 팁으로 연마해야 합니다.

**차폐 가스:** 고순도 아르곤 또는 아르곤 + 헬륨 혼합물을 사용하고, 유속은 8-20 L/min 입니다. 산소나 수증기 오염을 방지하기 위해 가스 파이프라인의 견고성을 확인하십시오.

**보관 및 운송:** 전극은 건조하고 통풍이 잘되는 환경(온도 10-25°C, 습도 <60%)에 방습 포장으로 보관됩니다. 운송은 심한 진동을 방지하고 전극 구부러짐이나 표면 손상을 방지합니다.

**작동 사양:** 용접하기 전에 전극 표면을 검사하여 기름 얼룩이나 산화물이 없는지 확인하십시오. 오염을 방지하기 위해 전극이 용융 풀과 접촉하지 않도록 하십시오. 과열을 방지하기 위해 용접 중에 전극을 3-6mm 연장하십시오.

**안전 보호:** 아크 방사선과 먼지 흡입을 방지하기 위해 보호 안경과 장갑을 착용하십시오. 용접 부위의 환기가 잘 되고 집진 장치가 장착되어 있는지 확인하십시오.

**정기 점검:** 50 시간마다 전극 팁 상태를 점검하고 재연마하거나 교체하십시오. 과도한 마모가 용접 품질에 영향을 미치지 않도록 사용 시간을 기록하십시오.

이러한 고려 사항을 따르면 안정적인 전극 성능이 보장되고 고장률이 줄어듭니다.

### 5.6 복합 희토류 텅스텐 전극의 일반적인 문제 해결

복합 희토류 텅스텐 전극을 사용할 때 발생할 수 있는 문제와 해결 방법은 다음과 같습니다.

#### 문제 1: 아크 불안정성

**원인:** 전극 팁의 오염, 차폐 가스 부족 또는 전류 변동.

**해결책:** 전극 표면을 청소하고 가스 유량(8-15L/min)을 확인하고 출력을 안정화합니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

팁을 45°로 다시 연마합니다.

### 문제 2: 전극이 빨리 타버린다

원인: 과도한 전류, 부적절한 팁 각도 또는 가스 오염.

해결책: 전류를 권장 범위(예: 100-200A)로 줄이고 팁 각도를 60°로 조정한 다음 고순도 아르곤을 사용합니다.

### 문제 3: 용접부에 기공이 많다

원인: 전극 오염 또는 보호 가스의 산소.

해결책: 전극의 초음파 세척, 가스의 순도(>99.99%)를 확인하고 유량을 12L/min 으로 증가시킵니다.

### 문제 4: 아크 발생의 어려움

원인: 팁의 부적절한 연삭 또는 전극의 노화.

해결책: 팁을 30°로 다시 연마하고 전극 수명을 확인하고 필요한 경우 교체하십시오.

### 문제 5: 전극 파손

원인: 기계적 응력 또는 내부 결함.

해결책: 전극 클램핑력(<100N)을 확인하고 초음파 검사를 통해 내부 균열이 없는지 확인합니다.

문제 해결을 위해서는 실제 작업 조건에 따라 프로세스 매개변수를 최적화하기 위해 결함 데이터를 기록해야 합니다.

## 5.7 신흥 분야에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 응용

신흥 분야에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 적용은 특히 다음 분야에서 빠르게 확대되고 있습니다.

3D 프린팅: 금속 3D 프린팅에서 복합 전극은 안정적인 고온 아크를 제공하고 고강도 합금 부품을 인쇄하기 위해 플라즈마 아크 증착(PAAM)에 사용됩니다. 산화란탄을 함유한 전극은 티타늄 합금을 인쇄할 때 아크 안정성이 95%이고 인쇄 정확도가 15% 향상되었습니다.

레이저 용접 지원: 레이저-TIG 복합 용접에서 복합 전극은 아크를 안정화하고 레이저 에너지의 흡수를 향상시킵니다. 산화세륨을 함유한 전극은 스테인리스강 레이저 용접에서 용접 깊이가 20% 증가하여 경량 자동차 부품에 적합합니다.

신에너지 배터리: 복합 전극은 리튬 배터리 및 전고체 배터리의 전도성 기판 역할을 하며, 산화이트륨을 함유한 전극은 배터리 수명을 6,000 배까지 향상시킵니다. 한 배터리 회사는 WLaCeY 전극을 사용하는데, 전극의 전도도가 10% 증가했습니다.

전기촉매: 물 전기분해 수소 생산에서 복합 전극은 전기촉매 음극 역할을 하며 희토류 산화물의 촉매 활성은 과전위를 20% 감소시킵니다. 산화세륨을 함유한

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

전극은 산성 전해질에서 100mA/cm<sup>2</sup>의 전류 밀도를 갖습니다.

마이크로나노 제조: 마이크로빔 플라즈마 용접에서는 산화탄을 함유한 전극을 칩 패키징에 사용하고, 용접점의 직경은 50G 장치의 요구를 충족시키기 위해 5 미크론 이내로 제어됩니다.

이러한 새로운 응용 분야는 복합 전극의 연구 개발을 주도하고 있으며, 이는 2030년까지 새로운 분야에서 시장 점유율의 30% 이상을 차지할 것으로 예상됩니다.

### 5.8 복합 희토류 텅스텐 전극의 경제적 이익 분석

복합 희토류 텅스텐 전극의 경제적 이점은 생산 효율성 향상, 비용 절감 및 시장 경쟁력 강화에 반영됩니다.

생산 효율성: 복합 전극의 수명은 500-1000 시간으로 순수 텅스텐 전극(200-300 시간)보다 2-3 배 더 높으며 교체 빈도는 20% 감소합니다. TIG 용접에서는 아크 안정성이 15% 증가하고 용접 속도가 10% 증가하며 생산 효율성이 크게 향상됩니다.

비용 절감: 복합 전극의 초기 비용은 순수 텅스텐 전극보다 높지만(약 20% 더 높음) 수명이 길어져 총 사용 비용이 30% 절감됩니다. 자동차 제조 공장에서는 WL20 전극을 사용하여 연간 약 \$100,000의 유지 관리 비용을 절감합니다. 폐전극의 회수율은 85%에 달하여 자원 비용을 더욱 절감합니다.

시장 경쟁력: 복합 전극의 비방사성 특성은 REACH 및 RoHS 규정을 준수하여 유럽 및 미국 시장에 장벽 없이 진출할 수 있습니다. 글로벌 시장 분석에 따르면 수요는 연율 5.8%씩 증가하고 있으며, 2025년까지 시장 규모는 12억 달러에 이를 것으로 예상됩니다.

사례 연구: 한 항공 회사에서 WLaCeY 전극을 사용하여 티타늄 합금을 용접한 결과 용접 합격률이 90%에서 98%로 증가했으며 제작업 비용이 50% 절감되었습니다. 신에너지 배터리 제조에서 복합 전극은 배터리 성능을 향상시키고 제품의 부가가치를 15% 증가시킵니다.

전반적으로 복합 희토류 텅스텐 전극은 기업에 상당한 경제적 이익을 가져오고 성능 최적화 및 친환경 특성을 통해 산업 업그레이드를 촉진합니다.



## 6장 복합 희토류 텅스텐 전극의 생산 설비

### 6.1 복합 희토류 텅스텐 전극용 원료 가공 장비

원료 가공 장비는 텅스텐 기반 재료와 희토류 산화물의 고순도 및 균일한 혼합을 보장하기 위해 복합 희토류 텅스텐 전극의 원료 준비 및 비율에 사용됩니다. 다음은 주요 장치와 그 기능입니다.

**고정밀 전자 저울:** 삼산화텅스텐( $WO_3$ ) 또는 파라텅스텐산암모늄(APT) 및 희토류 질산염(예: 질산란탄, 질산세륨)의 정확한 계량용. 정확도는 0.001 g, 측정 범위는 0.1 내지 10kg이며, 정확한 계량을 보장하기 위해 진동 방지 테이블과 정전기 차폐가 장착되어 있습니다.

**용액 준비 시스템:** 스테인레스 스틸 교반 탱크(용량 50 내지 500 L), pH 측정기(정확도  $\pm 0.01$ ) 및 온도 조절 수조(온도 조절 40 내지 80°C)를 포함한 희토류 질산염 용액 제조용. 200 - 500 rpm 의 교반 속도는 균일한 용액을 보장합니다. 시스템에는 순도  $18M\Omega \cdot cm >$  탈이온수 발생기가 장착되어 있어야 합니다.

**분무 건조기:** 희토류 질산염 용액을 텅스텐 분말과 혼합하고 건조시켜 도핑된 분말을 생성합니다. 장비 매개변수: 입구 공기 온도 150 내지 250°C, 분무 속도 0.5 내지 2 L/min, 건조실 진공  $10^{-1}$  Pa.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

진동 스크리닝 기계: 건조 분말을 스크리닝하고 응집된 입자를 제거하는 데 사용됩니다. 스크린은 200 내지 400 메쉬의 스크린, 1000 내지 2000 회/분의 진동 주파수, 100 내지 500 kg/h 의 처리 능력을 가지고 있습니다. 먼지 오염을 방지하기 위해 먼지 덮개와 정전기 접지를 갖추고 있습니다.

품질 관리 장비: X 선 형광 분광기(XRF, 불순물 함량 검출<0.01%) 및 레이저 입자 크기 분석기(1-5 마이크론에서 D50 측정)를 포함합니다. 이러한 장치는 원료의 순도와 입자 분포가 요구 사항을 충족하는지 확인합니다.

기능 및 유지 관리: 원료 가공 장비는 부식 방지(스테인리스 스틸 또는 티타늄 합금)이어야 하며 교차 오염을 방지하기 위해 혼합 탱크와 노즐을 정기적으로 청소해야 합니다. 유지 관리에는 저울 교정(한 달에 한 번) 및 분무 건조기의 열효율 확인(분기에 한 번)이 포함됩니다.

원료 취급 장비의 높은 정밀도와 청결도는 후속 공정에 고품질 분말을 제공하여 성능의 기반을 마련합니다.

## 6.2 복합 희토류 텅스텐 전극의 환원 및 도핑 장비

환원 및 도핑 장비는 삼산화 텅스텐을 고순도 텅스텐 분말로 변환하고 희토류 산화물의 도핑을 완료하는 데 사용되며 수소 환원로와 도핑 시스템을 핵심으로 합니다.

관형 수소 환원로: 2 단계 환원에 사용되며 1 단계(500-600°C)는 WO<sub>2</sub>를 생성하고 2 단계(800-950°C)는 텅스텐 분말을 생성합니다. 용광로 본체는 고온 스테인리스강 또는 폴리브덴 합금으로 만들어지며 길이는 2-5m, 내경은 0.5-1m 입니다. 수소 유량 0.5 내지 1.5 m<sup>3</sup>/h, 순도 99.99%. 적외선 온도계(정확도 ±2°C)와 가스 분석기(산소 함량<0.01%)를 갖추고 있습니다.

벨 환원로: 배치당 용량 100-1000kg, 온도 제어 500-1000°C, 진공 10<sup>-2</sup>Pa 로 대량 생산에 적합합니다. 5°C± 온도 균일성을 보장하기 위해 다지점 온도 측정 시스템을 갖추고 있습니다. 수소 순환 시스템은 미반응 가스를 회수하여 비용을 절감합니다.

도핑 장비: 플래닛 밀은 기계적 합금화, 분말 정제 및 희토류 산화물을 고르게 도핑하는 데 사용됩니다. 매개변수: 400 - 600 rpm, 펠릿 비율 8:1, 분쇄 시간 8 - 12 시간. 볼 밀 탱크와 매체는 오염을 피하기 위해 카바이드입니다.

보조 장비: 가스 정화 시스템(수증기 및 불순물 제거) 및 배기 가스 처리 장치(수소 배기 가스의 촉매 연소)를 포함합니다. 레이저 입자 크기 분석기 및 SEM 은 분말 입자 크기 (1-5 마이크론) 및 지형을 감지하는 데 사용됩니다.

유지 보수 및 안전: 용광로 견고성을 정기적으로 점검하고(한 달에 한 번), 온도 측정 시스템을 교정합니다(분기에 한 번). 수소 시스템에는 안전한 작동을 보장하기 위해 누출 감지기와 방폭 환기 장치가 장착되어 있어야 합니다. 환원 및 도핑 장비의

### 저작권 및 법적 책임 선언문

효율적인 작동은 분말 품질을 보장하고 후속 성형을 위한 기반을 마련합니다.

### 6.3 복합 희토류 텅스텐 전극용 성형 장비

성형 장비는 도핑된 텅스텐 분말을 블랭크로 압착하여 균일한 밀도와 구조적 안정성을 보장합니다. 주요 장비는 다음과 같습니다.

냉간 등방성 프레스(CIP): 액체 매질을 통해 균일한 압력(100 내지 300 MPa)을 가하여 본체 밀도를 최대 60%에서 70%까지 압박합니다. 이 장비의 용량은 50 내지 500 L이며 고압 펌프와 정확도 0.5 MPa± 압력 센서가 장착되어 있습니다.

유압 성형기: 150-200MPa 의 압력을 가진 단단한 강철 금형을 사용하여 소량 생산에 적합합니다. 압착 시간은 5-10분이며 자동 공급 시스템을 갖추고 있으며 처리량은 50-200kg/h 입니다.

슬러리 성형 기계: 복잡한 형상의 전극에 사용되며 분말과 바인더(0.5%에서 1% 폴리비닐 알코올)를 슬러리에 혼합하여 경화를 위해 금형에 주입합니다. 이 장비에는 정밀 주사기 펌프 (흐름 정확도 ±0.1 mL/min) 및 진공 탈기 시스템이 포함되어 있습니다. 건조실의 온도는 열 응력을 피하기 위해 25 내지 80 °C로 제어됩니다.

품질 관리 장비: 초음파 감지기는 신체의 내부 결함을 확인하고(해상도 0.1mm), 아르키메데스 밀도계는 밀도를 측정합니다(정확도 ± 0.01g/cm³). 육안 검사 시스템은 본체의 치수 편차가 0.1mm< 확인합니다.

유지 관리 및 최적화: 금형을 정기적으로(일주일에 한 번) 청소하고 압력 센서를 교정합니다(한 달에 한 번). 유한 요소 시뮬레이션을 통해 성형 매개변수를 최적화하여 밀도 구배를 줄입니다. 성형 장비의 높은 정밀도는 본체의 품질을 보장하고 소결을 위한 신뢰할 수 있는 기반을 제공합니다.

### 6.4 복합 희토류 텅스텐 전극용 소결 장비

소결 장비는 신체를 치밀화하여 고밀도, 고강도 전극 재료를 형성하는 데 사용됩니다. 주요 장비는 다음과 같습니다.

진공 핫 프레스 소결로: 1600 내지 1800 °C, 50 내지 80 MPa, 진공도 10<sup>-3</sup> Pa 에서 소결됩니다. 용광로 본체는 적외선 온도계(정확도 ± 2°C)와 진공 펌프가 장착된 흑연 가열체를 채택합니다. 가열 속도는 섹션(10°C/min 에서 1000°C, 목표 온도까지 4°C/min)으로 제어되며 60-90 분 동안 따뜻하게 유지됩니다.

스파크 플라즈마 소결로(SPS): 펄스 전류를 사용하여 급속 가열(100 - 200 °C/min), 소결 온도 1400 - 1600 °C, 압력 30 - 50 MPa, 5 - 10 분 동안 온도 유지. 나노분말에 적합하며 희토류 휘발물 줄입니다. 고정밀 전류 컨트롤러(1000-2000A)가 장착되어 있습니다.

수직 소결로: 90% 용융 전류, 3000°C 이상의 온도, 대기는 아르곤 또는 수소입니다. 수냉식 전극 클램핑 시스템과 전류 모니터가 장착된 대구경 전극에 적합합니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

보조 장비: 바인더를 제거하기 위한 사전 소결로(1200°C, 진공 또는 수소 분위기), 가스 순환 시스템이 장착되어 있습니다. SEM 과 XRD 는 소결 후 미세 구조를 분석하여 입자 크기(5-10 $\mu$ m)와 회토류 분포를 확인했습니다.

유지 보수 및 안전: 진공 펌프를 정기적으로 점검하고(한 달에 한 번), 온도 측정 시스템을 교정합니다(분기에 한 번). 소결로에는 과열을 방지하기 위해 냉각수 순환 시스템이 장착되어 있어야 합니다. SPS 장비의 급속 소결 기능은 효율을 30% 높이고 에너지 소비를 20% 줄입니다.

### 6.5 복합 회토류 텅스텐 전극 가공 장비

가공 장비는 소결체를 전극 막대로 가공하여 밀도와 표면 품질을 향상시킵니다. 주요 장비는 다음과 같습니다.

회전식 단조기: 몸체의 직경(20-3mm)은 회전식 해머링에 의해 감소하고 변형률은 패스당 20%에서 30%입니다. 처리 온도는 800 에서 1200°C 이며 자동 공급 시스템과 적외선 온도계가 장착되어 있습니다.

드로잉 머신: 직경을 0.5-10mm 로 줄이기 위해 카바이드 다이를 사용하여 막대를 늘립니다. 인발 속도 0.5 - 2 m/min 및 흑연 에멀전 (마찰 계수 < 0.1)으로 윤활. 연속 생산을 위한 체인 당김 기계.

교정 및 절단 기계: 롤러 교정기는 < 0.1mm/m 의 직진도 편차를 보장하고 레이저 절단기는 150mm 에서 175mm(공차  $\pm$  0.5mm)의 길이를 제어합니다. 표면 품질을 모니터링하는 비전 검사 시스템을 갖추고 있습니다.

품질 관리 장비: 내부 결함을 감지하기 위한 표면 거칠기 측정기(Ra<0.5 미크론) 및 초음파 결함 탐지기. 치수 측정은 레이저 거리 측정기(정확도  $\pm$  0.01mm)를 사용하여 수행됩니다.

유지 관리 및 최적화: 정기적으로(1000 시간마다) 금형을 교체하고 윤활 시스템을 점검합니다(일주일에 한 번). 유한 요소 시뮬레이션은 변형 매개변수를 최적화하고 수율은 98% 이상에 도달합니다. 자동화된 처리 장비는 효율성을 30% 향상시킵니다.

### 6.6 복합 회토류 텅스텐 전극용 표면 처리 장비

표면 처리 장비는 전극 내식성 및 전자 방출 성능을 향상시키기 위해 연마, 세척 및 코팅에 사용됩니다.

기계식 연마기: 알루미늄 연마재(2000 메쉬)를 사용하여 전극을 Ra<0.2 미크론의 거칠기로 연마합니다. 100-500 개/시간의 처리 능력을 가진 다축 연마 헤드 장착되어 있습니다.

전기화학 연마기: 황산과 인산의 혼합 용액에서 연마, 전류 밀도 0.5 내지 1 A/cm<sup>2</sup>, 처리 시간 5 내지 10 분. 정전류 전원 공급 장치 및 폐액 회수 시스템을 갖추고 있습니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

초음파 세척기 : 40kHz 의 주파수, 50 내지 60 °C 의 온도, 5 내지 10 분의 세척 시간의 알칼리성 용액 (pH 8 내지 10)을 사용합니다. 탈이온수 행균 탱크와 열풍 건조 시스템을 갖추고 있습니다.

화학 기상 증착(CVD) 장비: 희토류 산화물 또는 세라믹 코팅(예:  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ )을 적용하고 온도는 800-1000°C, 진공은  $10^{-2}\text{Pa}$ , 증착 속도는  $0.1\mu\text{m}/\text{min}$  입니다.

유지 보수 및 환경 보호: 연마 디스크와 세척 탱크를 정기적으로(일주일에 한 번) 청소하고 전류 밀도를 보정합니다(한 달에 한 번). 수성 세척제는 VOC 배출을 줄이고 폐액은 이온 교환을 통해 희토류를 회수하여 회수율은 90%입니다.

## 6.7 복합 희토류 텅스텐 전극용 보조 장비

보조 장비는 다음을 포함하여 원활한 생산 공정과 품질 관리를 지원합니다.

진공 건조 오븐: 분말 및 본체 건조용, 온도 80 - 150°C, 진공도  $10^{-1}\text{ Pa}$ . 권장 모델: 독일 바인더 건조 오븐.

가스 정화 시스템: 순도 99.999%의 수소에서 수증기와 불순물을 제거합니다. 분자체와 콘덴서가 장착되어 있으며 처리량은 1 에서  $5\text{m}^3/\text{h}$  입니다.

배기가스 처리 장치: 배기가스 분석기가 장착된 수소 배기가스의 촉매 연소(배출은 환경 기준 충족).

품질 검사 장비: X 선 회절계(XRD, 결정 구조 분석), 현미경 형태를 관찰하기 위한 주사 전자 현미경(SEM), 전자 탈출 전력 시험기(정확도  $\pm 0.01\text{eV}$ )를 포함합니다.

데이터 관리 시스템: 센서와 PLC 를 통합하여 프로세스 매개변수를 실시간으로 기록하고 품질 보고서를 생성합니다.

보조 장비는 생산 연속성과 품질 추적성을 보장하여 결함률을 줄입니다.

## 6.8 복합 희토류 텅스텐 전극 장비의 선택 및 유지 관리 지침

### 선택 가이드:

원료 취급: 대량 생산을 위해 고정밀 저울( $0.001\text{g}$ )과 분무 건조기(입자 크기 1-5 미크론)를 선택하십시오.

환원 및 도핑: 관형 환원로는 중소 규모 배치에 적합하고, 벨 항아리 용광로는 대규모 배치에 적합하며, 스타 밀은 균일한 도핑을 보장합니다.

성형: 냉간 등방성 프레스는 고정밀 블랭크에 적합하고, 성형기는 소량에 적합하며, 슬러리 성형기는 복잡한 형상에 적합합니다.

소결: SPS 용광로는 나노분말에 적합하고, 핫 프레스로는 일반 생산에 적합하며, 수직로는 대구경 전극에 적합합니다.

가공 및 표면 처리: 회전식 단조기 및 인발기는 고도로 자동화되어야 하며, CVD 장비는 코팅 성능을 향상시킵니다.

### 저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

**Aerospace Manufacturing:** Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

**Nuclear and Power Equipment:** Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

**Precision Machining:** Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

**Automotive and Rail Transit:** Welding of critical load-bearing components

**Electronics and Vacuum Devices:** High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

#### 유지 보수 지침:

정기 유지 관리: 매월 장비 견고성 및 센서 정확도를 확인하고, 분기별로 온도 측정 시스템을 교정하고, 마모된 부품(예: 금형, 연마 디스크)을 6개월마다 교체합니다.

예방 유지보수: 진동 분석기를 사용하여 장비의 작동 상태를 감지하고 고장을 예방합니다. 윤활 시스템은 <0.1의 마찰 계수를 유지하기 위해 매주 점검됩니다.

로그 및 최적화: 유지 관리 로그를 설정하여 고장 및 수리 시간을 기록합니다. AI와 결합하여 장비 작동 데이터를 분석하고 유지 관리 주기를 최적화하며 장비 수명을 20% 연장합니다.

#### 6.9 복합 희토류 텅스텐 전극 자동 생산 라인의 설계 및 통합

자동화된 생산 라인은 다양한 프로세스를 통합하여 효율성과 일관성을 향상시킵니다. 설계 및 통합 지점은 다음과 같습니다.

##### 생산 라인 레이아웃:

원료 처리 영역: 전자 저울, 용액 준비 시스템, 분무 건조기, 면적 50m<sup>2</sup>.

환원 및 도핑 면적: 관형 환원로, 플래닛 밀, 가스 순환 시스템 장착, 면적 100m<sup>2</sup>.

성형 및 소결 영역: 냉간 등방성 프레스, SPS 용광로, 80m<sup>2</sup> 면적을 차지합니다.

가공 및 표면 처리 영역: 회전식 단조, 드로잉 머신, CVD 장비, 면적 60m<sup>2</sup>.

검사 및 포장 영역: SEM, XRD, 자동 포장기, 30m<sup>2</sup>.

##### 자동화 시스템:

PLC 제어: Siemens S7-1500은 공정 매개변수를 제어하고 센서(온도, 압력, 유량)를 통합하며 실시간으로 모니터링합니다.

로봇 핸들링: 6축 로봇 팔(예: ABB IRB 6700)을 채택하여 블랭크 및 완제품을 처리하여 효율성을 30% 높입니다.

데이터 관리: MES 시스템은 생산 데이터를 기록하고 품질 보고서를 생성하며 추적성을 지원합니다.

통합 이점: 자동화된 생산 라인은 생산 주기를 20% 단축하고 수율을 98%로 증가시킵니다. 에너지 소비는 15%, 인건비는 40% 절감됩니다.

#### 6.10 복합 희토류 텅스텐 전극의 안전 장비 및 보호 조치

안전 장비 및 보호 조치는 생산 공정의 안전을 보장하고 사고 위험을 줄입니다.

##### 안전 장비:

수소 누출 감지기: 0.1% 미만의 농도를 감지하고 자동으로 경보를 울리고 가스 공급원을 차단합니다. 권장 모델: 독일 Dräger 감지기.

방폭 환기 시스템: 수소 축적을 방지하기 위한 5000m<sup>3</sup>/h 풍량, 주파수 변환 제어 기능.

화재 예방 및 통제 시스템: 고온 장비 화재를 처리하기 위한 건조 분말 소화기 및 모래 저장 상자.

먼지 제어 시스템: 먼지 농도 <10mg/m<sup>3</sup> 및 고효율 필터를 갖춘 음압 먼지 추출 장치.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

**보호 조치:**

인력 보호: 작업자는 방진 마스크(FFP3 수준), 보호 안경 및 고온 장갑을 착용합니다. 용접 영역에 아크 차폐 스크린이 설치됩니다.

장비 보호: 소결로 및 가공 장비에는 비상 정지 버튼이 장착되어 있으며 압력 용기는 정기적으로 검사됩니다(일년에 한 번).

환경 모니터링: 작업장 온도(<math><30^{\circ}\text{C}</math>), 습도(<math><60\%</math>), 가스 농도를 실시간으로 모니터링하여 안전한 환경을 보장합니다.

교육 및 비상 사태: 운영자는 수소 안전 및 장비 작동에 대한 교육을 받습니다(분기별). 비상 계획을 수립하고, 정기적인 훈련(예: 화재 대피)을 실시하고, 사고 대응 시간이 5분 <math><math></math>인지를 확인합니다.

안전 장비 및 보호 조치는 OSHA 및 ISO 45001 표준을 준수하여 생산 안전과 직원 건강을 보장합니다.



저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

**Aerospace Manufacturing:** Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

**Nuclear and Power Equipment:** Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

**Precision Machining:** Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

**Automotive and Rail Transit:** Welding of critical load-bearing components

**Electronics and Vacuum Devices:** High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

## 제 7 장 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 국내의 표준

### 7.1 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 국내 표준

주요 희토류 자원 국가이자 세계 텅스텐 전극의 주요 생산국인 중국은 복합 희토류 텅스텐 전극 표준화의 최전선에 있습니다. 이러한 표준은 제품의 기술 지표, 제조 공정 및 품질 관리를 표준화할 뿐만 아니라 국내 산업 발전의 요구를 충족시키기 위해 환경 보호 및 안전 요구 사항을 강조합니다. 국내 표준 체계는 주로 국가 표준(GB/T)을 기반으로 업계 표준(YS/T, JB/T) 및 지역/기업 표준으로 보완되어 다단계 규범 프레임워크를 형성합니다. 주요 국내 표준은 아래에 자세히 설명되어 있습니다.

GB/T 4190-2017 "텅스텐 전극": 이것은 중국 텅스텐 전극 분야의 핵심 국가 표준으로, 주로 텅스텐 불활성 가스 차폐 용접(TIG 용접), 플라즈마 용접 및 절단 및 기타 분야에서 사용되는 복합 희토류 텅스텐 전극을 포함한 모든 비용융 텅스텐 전극에 적용됩니다. 이 표준은 전극을 순수 텅스텐, 단일 희토류 텅스텐 및 복합 희토류 텅스텐의 세 가지 범주로 나누고 복합 희토류 텅스텐 전극을 두 개 이상의 희토류 산화물(예: 산화란탄  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 산화세륨  $\text{CeO}_2$ , 산화 이트륨  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) 등). 이 표준은 0.5%에서 2.2% 사이의 산화란탄 함량, 4% 이하의 총 희토류 산화물 함량, 99.95% 이상의 텅스텐 매트릭스 순도와 같은 화학 성분 요구 사항을 지정합니다. 또한 이 표준에는 물리적 치수에 대한 엄격한 공차가 있습니다: 직경 범위는 0.5mm 에서 10mm, 공차는  $0.05\text{mm}\pm$ 입니다. 길이는 150mm 에서 175mm 까지, 공차는  $1\text{mm}\pm$ . 성능 측면에서 전극은 2.5eV 미만의 전자 탈출 전력, 95% 이상의 아크 안정성이 요구되며 표면 품질 표준(예: 균열 없음, 스케일 없음, 거칠기  $\text{Ra} < 0.2$  마이크론)이 지정됩니다. 이 표준에는 화학 분석을 위한 유도 결합 플라즈마 방출 분광법(ICP-OES)과 같은 검사 방법과 비커스 경도 시험기로 결정한 기계적 특성도 포함됩니다. 이 표준의 제정은 국제 표준 ISO 6848 을 참조하지만 중국의 현지 희토류 자원 활용 및 녹색 제조 원칙에 더 많은 관심을 기울입니다.

YS/T 231-2007 "희토류 텅스텐 전극": 비철금속에 대한 산업 표준인 이 표준은 용접, 절단 및 전기 광원 분야에 적합한 복합 희토류 유형을 포함한 희토류 도핑 텅스텐 전극을 구체적으로 대상으로 합니다. 이 표준은 이원 복합재(예: 산화세륨 및 산화란탄 조합)의 경우 총 희토류 함량을 1%에서 3%, 삼원 복합재(예: 산화세륨, 산화란탄 및 산화이트륨)의 경우 1.5%에서 3.5%를 지정하는 것과 같이 희토류 산화물의 다원소 복합 적용을 강조합니다. 아크 안정성 테스트 방법은 성능 테스트 섹션에 자세히 설명되어 있습니다. 시뮬레이션된 TIG 용접 환경에서 전류는 100A 에서 200A 이고 아크 휘발성(<5% 필요)이 기록됩니다. 아크 수명 테스트에는 200A DC 에서 500 시간 이상 연속 용접이 필요합니다. 이 표준에는 미세 구조도 필요합니다: 입자 크기는 5에서 10 마이크론으로 제어되고 희토류 산화물 입자의 균일한 분포는 주사 전자 현미경(SEM)으로 관찰됩니다. 이 표준은 2007 년에 발표되었으며 이후 신에너지 배터리 전극, 오염 방지 및 고온 피로 테스트 지표 추가와 같은 새로운 응용 분야를 고려하여 개정되었습니다.

JB/T 12871-2016 "용접용 텅스텐 전극의 기술 조건": 이 기계 산업 표준은 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 기술 조건 및 검사 규칙을 포함하여 용접 응용 분야용 텅스텐

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

전극에 중점을 둡니다. 이 표준은 포장 방법, 충돌 방지 및 진공 밀봉 백을 사용해야 하는 것과 같은 전극의 포장, 운송 및 보관 요구 사항을 지정합니다. 운송 중 고온 및 다습을 피하십시오. 품질 지표에는 용접부의 다공성이 0.1% 미만이고 용접부의 인장 강도가 기관의 90% 이상입니다. 이 표준은 또한 고습도(5% RH) 환경에서 보관 후 90%의 성능 저하와 같은 신뢰성 테스트를 도입합니다< 이 표준은 용접 장비 제조업체와 사용자 모두에게 적용되며 육안 검사, 치수 측정 및 성능 샘플링 테스트를 포함하는 상세한 승인 프로세스를 제공합니다.

기타 표준: 상하이 지역 표준 DB31/T 1234-2020 과 같은 현지 표준은 다중 복합 전극(예: 산화세륨: 산화란탄: 산화이트륨 = 1:1:3)에 대한 희토류 비율 최적화를 규정하고 나노 희토류 도핑에 대한 요구 사항을 높입니다. 엔터프라이즈 표준은 GB/T 4190 을 기반으로 성능 지표를 확장하며 고급 항공 애플리케이션에 적합합니다. 이러한 표준은 보완적인 시스템을 형성하고 복합 희토류 텅스텐 전극의 산업화를 촉진합니다.

국내 표준은 환경 보호 전환에 중점을 두고 방사성 토륨 텅스텐 전극의 사용을 금지하며 국가 희토류 관리 규정과 도킹하여 자원 재활용을 강조하는 것이 특징입니다. 표준 업데이트는 일반적으로 AI 지원 테스트 및 친환경 준비 프로세스와 같은 새로운 기술을 통합하기 위해 5 년에서 7 년마다 이루어집니다.

## 7.2 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 국제 표준

국제 표준은 복합 희토류 텅스텐 전극의 글로벌 무역, 제조 및 적용에 대한 통일된 기술 사양 및 품질 벤치마크를 제공하며 주로 국제 표준화 기구(ISO), 미국 용접 협회(AWS), 유럽 표준화 위원회(CEN) 및 일본 산업 표준 조사(JISC). 이러한 표준은 성능 일관성, 환경 요구 사항 및 국제 호환성을 강조하여 국경 간 공급망의 안정성을 촉진합니다. 주요 국제 표준에 대한 자세한 분석은 다음과 같습니다.

ISO 6848:2015 "아크 용접 및 절단-비소모성 텅스텐 전극-분류": 텅스텐 전극에 대한 국제 분류 표준으로서 이 표준은 아크 용접 및 절단 공정을 위한 복합 희토류 텅스텐 전극을 포함한 비용융 텅스텐 전극에 적용됩니다. 이 표준은 전극을 WP(순수 텅스텐), WT(텅스텐 토륨, 제한), WL(텅스텐 란탄 산화물), WC(텅스텐 세륨 산화물), WY(텅스텐 이트륨 산화물) 및 EWG(복합 희토류 텅스텐)로 분류합니다. 복합 희토류 텅스텐 전극의 경우 표준은 WL20(1.8%에서 2.2% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 포함)과 같이 총 희토류 함량이 0.5%에서 4%인 2 개 이상의 희토류 산화물을 포함하는 전극으로 정의됩니다. )。 물리적 사양에는 직경 0.5mm 에서 10mm(공차±0.05mm)와 길이 50mm 에서 175mm(공차 ± 1mm)가 포함됩니다. 성능 요구 사항에는 2.5eV 미만의 전자 탈출 전력, 35V 미만의 아크 시동 전압 및 150A 전류에서 500 시간 이상의 아크 수명이 포함됩니다. 이 표준은 또한 표면 처리 요구 사항(예: 광택 또는 산화물 층 두께<5 마이크론) 및 포장 사양(습기 및 충격 저항)을 지정합니다. 검사 방법에는 화학 성분 분석(ICP-OES) 및 아크 성능 테스트(고속 사진으로 아크 안정성 기록)가 포함됩니다. 이 표준은 2015 년 EU REACH 규정을 참조하여 토륨 텅스텐 전극에 대한 방사성 대안의 홍보를 강조하여 개정되었습니다.

### 저작권 및 법적 책임 선언문

- AWS A5.12M/A5.12:2009 (R2017) 아크 용접 및 절단용 텅스텐 및 산화물 분산 텅스텐 전극 사양: 미국 용접 협회 표준은 ISO 6848 과 고도로 조화를 이루지만 실제 용접 성능에 더 중점을 둔 용접 분야의 권위 있는 사양입니다. 이 표준은 복합 희토류 텅스텐 전극을 EWG 시리즈로 분류하여 희토류 산화물(예:  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ )의 함량이 0.1%까지 정확하고 총 함량이 4%를 초과하지 않는다고 규정합니다. 예를 들어, EWC-2(산화세륨 2% 포함)는 DC 양극성(DCSP) 용접에서 <0.1 초의 아크 시작 시간과 90%> 아크 안정성이 필요합니다. 이 표준에는 고온 성능에 대한 자세한 요구 사항이 있습니다: 200A 전류에서 전극 팁 마모율은  $0.01\text{mm/h}$ <. 치수 및 공차는 ISO 와 일치하며 용접 전류 범위 권장 사항이 증가합니다(예: 50-150A 의 경우 직경 2.4mm 전극). 2017 년에 재발행되었을 때 이 표준은 환경 보호 조항을 강화하여 톨륨과 텅스텐 대신 복합 희토류 사용을 권장했습니다. 이 표준은 미국 시장 및 국제 무역에 적용되며 자세한 인증 지침을 제공합니다.

EN ISO 6848:2015(유럽 표준): 유럽 표준은 ISO 6848 과 동일하지만 REACH 및 RoHS 와 같은 EU 규제 요구 사항을 통합합니다. 이 표준은 전극의 비방사능 및 지속 가능성을 강조하여 고습(90% RH) 및 고온( $1500^\circ\text{C}$ )에서 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 안정성 테스트(산화율  $<0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ , 성능 감쇠 $<5\%$ )를 지정합니다. 이 표준에는 생산자가 탄소 발자국과 희토류 회수율( $>80\%$ )을 보고하도록 요구하는 수명 주기 평가도 포함되어 있습니다. EU 회원국에 적합하며 친환경 용접 기술의 적용을 촉진합니다.

JIS Z 3233:2016 "불활성 가스 차폐 아크 용접용 텅스텐 전극": 일본 산업 표준은 복합 희토류 유형을 포함하여 불활성 가스 차폐 용접용 텅스텐 전극에 중점을 둡니다. 이 표준은 0.1%에서 1.8%의  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 를 함유한 WY20 과 같이 2.2%까지 정확한 희토류 함량을 지정합니다. 성능 테스트에는 정밀 용접 지표가 포함됩니다: 아크 시작 전압  $<30\text{V}$  및 용접 다공성  $<0.05\%$ . 이 표준은 미세 구조 제어를 강조하여 X 선 회절(XRD)을 통해 입자 크기  $<10$  미크론을 확인합니다. 이 표준은 일본 전자 및 자동차 산업에 적용되어 고정밀 응용 분야를 주도합니다.

국제 표준의 공통 분모는 방사성 변환 및 성능 최적화에 중점을 두고 있으며 글로벌 공급망의 변화에 적응하기 위해 3 년에서 5 년의 갱신 주기가 있습니다.

### 7.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 재료 조성 표준

재료 조성 표준은 복합 희토류 텅스텐 전극의 품질 관리의 기초이며 텅스텐 매트릭스 및 희토류 산화물의 조성 비율, 순도 요구 사항 및 불순물 한계를 규정합니다. 이러한 표준은 화학 분석 방법을 통해 조성 일관성을 보장하고 성능 변동을 방지합니다. 다음은 국내의 관점에서 자세히 설명됩니다.

#### 국내 재료 구성 표준(GB/T 4190-2017 및 YS/T 231-2007):

텅스텐 매트릭스 : 순도 99.95 % 이상, 총 불순물 함량  $<0.05\%$ . 특정 불순물 한계: 철(Fe)  $<0.01\%$ , 규소(Si)  $<0.005\%$ , 탄소(C)  $<0.005\%$ , 산소(O)  $<0.01\%$ . 이러한 한계는 전극의 높은 전도성과 고온에 대한 저항성을 보장합니다.

희토류 산화물: 단일 희토류 전극의 0.5%에서 2.2%; 복합 희토류 전극의 총 함량은

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

이원 복합재(산화세륨 + 산화란탄 = 1.5%에서 3%), 삼원 복합재(산화세륨 + 산화란탄 + 산화이트륨 = 1.5%에서 3.5%)와 같은 1%에서 3.5%입니다. 이 표준은 산화 저항성을 최적화하기 위해 지르코니아( $ZrO_2 < 1\%$ )와 같은 미량 첨가제를 허용합니다.

검출 방법: ICP-OES 를 사용하여 희토류 및 불순물의 함량을  $\pm 0.01\%$ 의 정확도로 측정했습니다. 원자 흡수 분광법(AAS) 지원 검증. 이 표준은  $< 0.1\%$ 의 배치 간 구성 요소 편차를 요구하며 이는 통계적 공정 제어(SPC)에 의해 모니터링됩니다.

#### 국제 재료 구성 표준(ISO 6848:2015 및 AWS A5.12:2009):

텅스텐 매트릭스 : 순도  $\geq 99.9\%$ , 총 불순물 함량  $< 0.1\%$ . 불순물 한계:  $Fe < 0.02\%$ ,  $Si < 0.01\%$ ,  $C < 0.01\%$ ,  $O < 0.02\%$ . 이 표준은 전자 방출에 대한 불순물의 영향을 강조합니다.

희토류 산화물: 복합 전극의 총 함량은 0.5%에서 4%이며, 예를 들어 WL20 에는 1.8%에서 2.2%의  $La_2O_3$ 가 포함되어 있습니다. EWG 시리즈는 다중 배합(예:  $La_2O_3 + CeO_2 + Y_2O_3 = 1.5\% - 3.5\%$ )을 허용합니다. 이 표준은 방사성 원소(예:  $ThO_2$ )를 금지하고 무해한 희토류 대체를 장려합니다.

검출 방법: 불순물의 XRF 분석, 희토류의 ICP-MS 측정(정확도  $\pm 0.005\%$ ). 이 표준은 공급업체가 배치 번호와 테스트 날짜를 포함한 구성 인증서(COA)를 제공하도록 요구합니다.

적용 가능성 분석: 국내 표준은 희토류 자원의 현지 활용(예: 산화세륨 및 산화란탄 사용)에 더 중점을 두는 반면, 국제 표준은 글로벌 호환성 및 환경 보호(예: REACH 제한)를 강조합니다. 조성 표준을 엄격하게 구현하면 불순물을 줄여 전극 수명이 20% 늘어나 항공우주 등 수요가 많은 분야에 적합합니다.

#### 7.4 복합 희토류 텅스텐 전극의 성능 시험 표준

성능 테스트 표준은 실제 응용 분야에서 제품의 신뢰성을 보장하기 위해 복합 희토류 텅스텐 전극의 물리적, 전기적, 화학적 및 용접 특성에 대한 평가 방법 및 지표를 정의합니다. 이러한 표준에는 미시에서 거시에 이르기까지 다양한 차원을 포괄하는 실험실 테스트 및 시뮬레이션된 상태 검증이 포함됩니다.

#### 국내 성능 테스트 표준(YS/T 231-2007 및 JB/T 12871-2016):

전자 탈출 작업 및 전기적 성능: 탈출 전력은 UPS 로 측정되며  $2.5eV < \text{해야 합니다}$ . 전도도  $> 1.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ , 4 프로브 방법을 사용하여 테스트되었습니다. 아크 안정성은 100-200A 의 전류, 휘발성  $< 5\%$  및 안정성  $> 95\%$ 의 TIG 납땜 스테이션에서 테스트됩니다. 기계적 성질: Vickers 경도 시험기를 사용하여 경도 HV 450 에서 500; 인장 강도 800 내지 1000 MPa, 만능 인장 시험기로 시험; 충격 시험기로 측정한 파괴 인성  $K_{Ic} 8 - 10 \text{ MPa} \cdot m^{1/2}$ .

열적 특성: 열전도율 174 내지 190 W/(m·K), 레이저 플래시 테스트; 열팽창 계수는 4.5 내지  $5.0 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  였으며 팽창계는 25 내지 2000°C 범위에서 측정되었습니다.

용접 성능: 아크 수명은 200A DC 에서  $> 500$  시간이고 아크 시작 전압은  $< 35V$  입니다. 침투 제어 깊이는  $\pm 0.1mm$  이며, 호 모양은 고속 촬영으로 기록됩니다.

테스트 환경: 표준은 20-25°C 의 테스트 온도, 습도  $< 60\%$ 를 지정하며 장비는 JJG 표준에 따라 교정됩니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

**국제 성능 테스트 표준(ISO 6848:2015 및 AWS A5.12:2009):**

아크 성능: 아크 시작 시간 <0.1 초, 전압 <35V; 안정성>90%이며 전류 파형 분석기로 테스트되었습니다.

수명 및 내구성: 500-1000 시간의 아크 수명, 고온 피로 테스트(1500°C, 균열 없이 10<sup>4</sup> 사이클).

화학적 성질: 내식성은 1500°C 의 산소 함유 분위기에서 0.01mg/cm<sup>2</sup>의 산화 속도로 고온 산화 실험< 의해 결정되었습니다.

미세한 특성: 입자 크기 5-10 미크론, SEM 관찰; 희토류의 분포 균일성은 TEM 으로 분석되었습니다.

시험 방법: E8 인장 시험 및 E399 파괴 인성 시험과 같은 ASTM 표준을 충족합니다.

성능 테스트 표준을 적용하면 용접 시 전극의 높은 효율이 보장되어 고장률이 20% 감소합니다.

**7.5 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 환경 보호 및 안전 표준**

환경 보호 및 안전 표준은 복합 희토류 텅스텐 전극의 생산 및 사용이 환경과 인간 건강에 미치는 영향을 최소화하는 것을 목표로 하며, 무방사능, 자원 회수, 위험 예방 및 통제를 강조합니다.

**국내 환경 보호 및 안전 표준:**

GB 26451-2011 "희토류 산업 오염 물질 배출 기준": 배기 가스의 먼지 농도가 < 10 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub>< 50 mg/m<sup>3</sup>임을 지정합니다. 폐수의 희토류 이온 <0.5 mg/L, pH 6 내지 9. 이 표준은 기업이 회수율이 > 80%인 폐수 처리 시스템을 갖추도록 요구합니다.

HJ 2527-2012 "희토류 산업의 환경 보호를 위한 기술 사양": 녹색 준비 공정에 중점을 두고 톨륨과 텅스텐 대신 비방사성 희토류를 사용합니다. 폐 전극의 회수율> 85%, 생산 공정에서 발생하는 탄소 배출량은 2kg CO<sub>2</sub>/kg 전극< 있습니다. 표준에는 원자재 추출에서 폐기에 이르기까지 체인 전반에 걸쳐 환경 영향을 보고해야 하는 수명 주기 평가(LCA)가 포함됩니다.

GB/T 27948-2011 "용접 안전을 위한 기술 사양": 안전 요구 사항에는 수소 저장 압력 <15MPa, 누출 감지 농도 <0.1%가 포함됩니다. 작업자 보호 장비 표준(방진 마스크 FFP3 등급, 고온 내성 장갑 > 300°C). 작업장의 환기 용량> 5000m<sup>3</sup>/h 이며 아크 방사선 보호는 GBZ 115 를 준수합니다.

**국제 환경 보호 및 안전 표준:**

REACH 규정(EC 1907/2006): 유해 불순물 < 0.1%로 제한되는 희토류 산화물의 등록을 요구합니다. 폐기물 처리는 EU 폐기물 지침을 준수하며 재활용률은 90%>입니다. 이 표준은 톨륨과 텅스텐을 금지하여 복합 희토류의 적용을 촉진합니다.

RoHS 지침(2011/65/EU): 전자 장치의 안전을 보장하기 위해 전극의 유해 물질(예: 납, 수은)의 함량을 <0.1%로 제한합니다.

ISO 14001:2015: 환경 경영 시스템 표준은 기업이 탄소 발자국을 20% 줄이는 것을 목표로 에너지 소비 및 배출량을 모니터링하도록 요구합니다. 안전 측면에서 OSHA 1910.252 는 1mSv/년< 방사선 노출로 용접 영역 보호를 지정합니다.

저작권 및 법적 책임 선언문

이러한 표준은 지속 가능한 제조를 촉진하고 환경 오염을 30%까지 줄입니다.

## 7.6 복합 희토류 텅스텐 전극 인증 시스템

인증 시스템은 복합 희토류 텅스텐 전극이 제 3 자 검증을 통해 표준을 충족하도록 보장하여 제품 평판과 시장 접근성을 향상시킵니다.

### 국내 인증 시스템:

중국 국가 강제 제품 인증(CCC): 중국 품질 인증 센터(CQC)를 담당하여 GB/T 4190 에 따라 안전성과 성능을 검증합니다. 인증에는 공장 감사, 샘플 테스트(예: 아크 수명) 및 문서 검토가 포함되며 주기는 1 개월에서 3 개월입니다.

중국 품질 인증 센터(CQC): 화학 성분(ICP-OES 테스트) 및 환경 규정 준수(스크랩 재활용률>85%)를 포괄하는 자발적 인증을 제공합니다. 인증마크는 내수시장 경쟁력을 강화합니다.

희토류 제품 생산 허가증: 공업정보화부에서 발급하여 기업이 희토류 공급망 추적성 능력을 갖추고 구성 및 성능 보고서를 제출하도록 요구합니다.

### 국제 인증 시스템:

ISO 9001:2015: SGS 또는 TÜV 에서 발행한 품질 경영 시스템 인증은 생산 일관성과 > 98%의 수율을 보장합니다.

CE 인증: EU 시장 요구 사항을 충족하고 전자파 적합성 및 안전 테스트를 포함하여 REACH 및 RoHS 준수를 확인합니다.

AWS 인증: 용접 특성 검증(예: 아크 전압 테스트)을 포함하는 AWS A5.12 에 대해 미국 용접 협회(American Welding Society)의 인증을 받았습니다.

TÜV 인증: 독일 기술 감독 연구소의 인증을 받아 고압 장비에 적합하며 고온 성능과 내구성을 검증합니다.

인증 프로세스에는 신청, 검토, 테스트 및 인증이 포함되며 3 년에서 5 년 동안 유효합니다. 기업은 시스템을 유지 관리하고 정기적으로 검토하여 인증을 유지해야 합니다.

## 7.7 복합 희토류 텅스텐 전극 표준의 비교 및 적용 가능성 분석

### 표준 비교:

조성 관리: 국내 GB/T 4190 불순물 한도 < 0.05%, 국제 ISO 6848<0.1%, 희토류 자원의 순도 요구 사항을 충족하기 위해 국내에서 더 엄격합니다.

성능 지표: 국내 YS/T 231 은 500 시간> 아크 연소 수명을 강조하고, 국제 AWS A5.12 는 아크 시동 성능<35V 에 더 많은 관심을 기울이며, 국제 표준은 정밀 용접에 더 적합합니다.

환경 보호 요구 사항: 국내 GB 26451 재활용률> 85%, 국제 REACH > 90%, 국제 표준은 글로벌 공급망의 지속 가능성에 더 많은 관심을 기울입니다.

테스트 방법: 둘은 유사하지만(예: ICP-OES, SEM) 국제 표준에서는 효율성을 높이기 위해 AI 지원 분석을 도입합니다.

### 저작권 및 법적 책임 선언문

### 적용 가능성 분석:

항공우주: 국제 ISO 6848 및 AWS A5.12 가 적용 가능하며 고온 안정성과 용접 품질을 강조하여 고정밀 요구 사항에 적합합니다.

자동차 제조: 국내 GB/T 4190 및 YS/T 231 이 적용 가능하며 비용 효율성과 대량 생산에 중점을 두고 경량 용접에 적합합니다.

신에너지: 국제 REACH 및 RoHS 우선 순위, 무독성 및 재활용 보장, 배터리 전극에 적합합니다.

전자 산업: 일본 JIS Z 3233 이 적합하며 마이크로 용접 성능과 낮은 오염을 강조합니다.

수출 지향: EU 로 수출되는 중국 제품에는 CE 마크가 필요한 것과 같이 기업은 이중 인증(국내 + 국제)이 필요합니다.

표준 선택은 시장과 응용 분야에 따라 달라지며 조합을 통해 경쟁력을 높일 수 있습니다.

### 7.8 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 최신 표준 업데이트

2025 년 8 월 현재 복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 표준 업데이트는 지속 가능성 및 성능 최적화에 대한 전 세계적인 수요를 반영하여 친환경 제조, 새로운 응용 분야 및 기술 혁신에 중점을 두고 있습니다. 최신 업데이트에 대한 세부 정보는 다음과 같습니다.

#### 국내 표준 업데이트:

개정된 초안 GB/T 4190(2025 년 의견): 나노 희토류 도핑(입자 크기 < 100nm)에 대한 요구 사항을 규정하는 다중 복합 전극에 대한 새로운 장이 추가되고 총 희토류 함량의 상한이 4.5%로 조정됩니다. 고온 피로 시험(2000°C, 균열 없이 10<sup>5</sup>사이클) 및 방오 지수(부식율 < 0.005 mg/cm<sup>2</sup>)를 추가하였다. 이번 개정판은 희토류 관리 규정(2024)과의 연계를 강조하고 제조업체가 희토류 공급망의 지속 가능성에 대해 보고하도록 요구합니다.

YS/T 231-2024 개정판: 아크 수명의 하한을 600 시간으로 늘리고 신에너지 배터리 분야에 적합한 전기 촉매 성능 테스트(예: 과전위 < 0.2V)를 추가합니다. 이 표준은 테스트 효율성을 20% 향상시키기 위해 AI 지원 미세 분석(SEM 데이터 자동 처리)을 도입합니다.

#### 국제 표준 업데이트:

ISO 6848:2023 개정판: TEM 검증(입자 간격 < 500nm)을 통과하기 위해 희토류 분포 균일성을 요구하는 EWG 복합재 분류 하위 클래스(예: EWG-LaCeY)를 추가했습니다. 3D 프린팅 보조 전극과 같은 새로운 응용 분야를 위한 모듈을 추가하려면 1.9×10<sup>7</sup> S/m 의 전도도 >이 필요합니다. 유엔 지속가능발전목표(SDGs)에 통합되어 1.5kg CO<sub>2</sub>/kg< 탄소발자국 보고를 의무화하도록 개정되었습니다.

AWS A5.12:2024 개정판: 새로운 에너지 애플리케이션으로 확장되어 리튬 배터리 용접의 전극에 대해 > 5000 회의 사이클 수명을 지정합니다. 녹색 라벨 인증이 추가되어 회수율이 > 95%입니다. 이 표준은 아크 안정성을 분석하기 위해 기계

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

학습과 결합된 고속 사진을 도입하기 위해 테스트 방법론을 업데이트합니다.

환경 및 안전 업데이트:

EU REACH 2025 개정판: 희토류 공급망 검토를 강화하여 수입 전극에 분쟁 광물 신고서를 제출하도록 요구하고 회수율 95%를 > 목표로 합니다.

중국 희토류 관리 규정 2024 시행 규칙: 기업은 먼지 배출 및 폐수 처리 데이터를 포함한 연간 환경 영향 평가를 제출하도록 요구합니다.

동향 및 영향: 디지털 테스트(예: AI 최적화)와 순환 경제(예: 희토류 재활용)를 강조하는 최신 업데이트로 전극 비용이 10% 절감될 것으로 예상됩니다. 기업은 생산 공정을 제때에 조정하고 표준 제정에 참여하여 시장 기회를 포착해야 합니다.



저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

**Aerospace Manufacturing:** Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

**Nuclear and Power Equipment:** Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

**Precision Machining:** Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

**Automotive and Rail Transit:** Welding of critical load-bearing components

**Electronics and Vacuum Devices:** High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

## 8 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 테스트 및 품질 검사

### 8.1 복합 희토류 텅스텐 전극의 성능 시험 방법

복합 희토류 텅스텐 전극에 대한 성능 테스트 방법은 용접, 절단 및 용융과 같은 응용 분야에서 신뢰성을 보장하는 데 중요합니다. 이러한 방법은 전극의 전자 방출 능력, 아크 안정성, 고온 저항 및 서비스 수명을 검증하는 것을 목표로 전기적, 열적, 기계적 및 용접 특성에 대한 포괄적인 평가를 포함합니다. 표준화된 테스트를 통해 잠재적인 결함을 식별할 수 있을 뿐만 아니라 생산 공정을 최적화하고 제품 품질을 향상시킬 수 있습니다. 다음은 주요 테스트 방법, 장비, 단계 및 적용 사례에 대한 자세한 설명입니다.

**전자 방출 성능 테스트:** 전자 방출 성능은 복합 희토류 텅스텐 전극의 핵심 지표로 아크 개시 어려움과 아크 안정성에 직접적인 영향을 미칩니다. 일반적인 방법에는 전자 탈출 전력 측정 및 전자 방출 전류 밀도 테스트가 포함됩니다. 전자 탈출 전력 테스트는 자외선 광전자 분광법(UPS) 또는 열이온 방출을 사용하여 진공 환경에서 전극을 2000°C 로 가열합니다(전자 탈출에 필요한 최소 에너지를 측정하기 위해  $10^{-6}$  Pa). 이 표준은 2.5eV 미만의 탈출 전력을 요구합니다. 산화세륨과 산화란탄을 함유한 WLaCe 와 같은 복합 전극의 경우 테스트 결과 탈출 전력이 2.0eV 미만으로 감소하여 아크 개시 효율이 20% 향상될 수 있는 것으로 나타났습니다. 전자 방출 전류 밀도 테스트는 아날로그 아크 장치를 사용하여 100A 전류에서 전류 밀도(>10A/mm<sup>2</sup>)를 측정하고 파형 변동은 오실로스코프에 의해 기록되어 >95% 안정성을 보장합니다.

**아크 성능 테스트:** 아크 성능 테스트는 아크 시작 전압, 아크 안정성 및 아크 수명 테스트를 포함한 실제 용접 환경을 시뮬레이션합니다. 아크 전압 테스트는 TIG 용접기를 사용하여 아르곤 보호 (유량 10 L/min) 하에서 전압을 적용하고 아크를 시작하는 최저 전압(<35V)을 기록합니다. 삼원 복합 전극(예: WLaCeY)의 경우 테스트에서 아크 시작 시간은 <0.1 초입니다. 아크 안정성 테스트 고속 카메라(초당 1000 프레임)로 아크 모양과 드리프트율(<5%)을 관찰하고 전류 파형 분석기와 함께 변동을 평가합니다. 아크 수명 테스트는 200A DC 에서 연속적으로 용접되어 틱 마모율(<0.01mm/h)과 500-1000 시간의 수명을 기록합니다. 그 결과 ZrH<sub>2</sub>를 함유한 희토류 텅스텐 전극의 수명이 30% 연장된 것으로 나타났습니다.

**열 성능 테스트:** 열 테스트에는 열전도율, 열팽창 계수 및 열충격에 대한 저항성이 포함됩니다. 열전도율은 실온에서 2000°C(174 내지 190W/(m·K))까지 레이저 플래시를 사용하여 측정하였다. 열팽창 계수는 팽창기(4.5 - 5.0×10<sup>-6</sup>/°C)로 테스트하여 고온에서 열 응력이 최소화되는지 확인합니다. 열충격 시험은 균열 발생을 관찰하기 위해 빠른 냉열 사이클(25-2000°C, 100 사이클)을 사용합니다. 지르코니아를 함유한 복합 전극의 사이클 횟수는 명백한 손상 없이 500 회>.

**용접 성능 테스트:** 용접 테스트는 침투 깊이, 다공성 및 인장 강도와 같은 용접 품질을 평가합니다. 100 - 200 A 의 전류로 표준 TIG 납땜 스테이션에서 스테인리스강 또는 알루미늄 합금을 용접하고 침투(0.5 - 5 mm) 및 다공성(<0.1%)을 측정합니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

용접부의 인장 강도는 만능 시험기(>800MPa)로 테스트됩니다. 이 경우 E3 희토류 텅스텐 전극의 용접 품질은 알루미늄 합금 용접에서 토륨 텅스텐 전극의 용접 품질보다 우수하며 다공성이 40% 감소합니다.

장비 및 절차: 테스트 장비에는 TIG 용접기, 진공로, UPS 분광계 및 고속 카메라가 포함됩니다. 단계: 1. 샘플 준비(연삭 틱 30 내지 60°); 2. 환경 제어(진공 또는 아르곤); 3. 매개변수 설정(예: 전류, 온도); 4. 데이터 수집(오실로스코프, 온도계); 5. 분석 및 평가(소프트웨어 처리 과정). 과제에는 정기적인 교정(분기별)이 필요한 고온에서의 장비 안정성이 포함됩니다.

성능 테스트 방법의 체계적인 적용은 복합 희토류 텅스텐 전극의 높은 신뢰성을 보장하여 고급 제조에서의 홍보를 촉진합니다.

## 8.2 복합 희토류 텅스텐 전극의 기계적 성질 테스트

기계적 성질 시험은 고온 및 고응력 환경에서 복합 희토류 텅스텐 전극의 내구성과 안정성을 평가하는 중요한 수단입니다. 이러한 특성에는 경도, 강도, 인성 및 내마모성이 포함되며 희토류 산화물 첨가 및 미세 구조의 영향을 받습니다. 검사 방법은 표준 테스트와 시뮬레이션된 작동 조건을 결합하여 잠재적인 기계적 결함을 식별하고 전극 설계를 최적화하는 데 도움이 됩니다. 다음은 분석 방법, 장비, 단계 및 관련 분석에 대해 자세히 설명합니다.

경도 테스트: 경도는 전극의 변형 저항성을 반영하며 비커스 경도(HV)가 일반적인 지표입니다. 복합 전극의 경도는 450 에서 500HV 로 순수 텅스텐(400HV)보다 15% 높습니다. 시험은 비커스 경도 시험기를 사용하여 하중 1kgf, 압입 시간 10 초로 수행되었습니다. 단계: 1. 샘플 연마(Ra<0.1 마이크론); 2. 다점 테스트(최소 5 점); 3. 평균을 계산합니다. 산화이트륨을 함유한 전극의 경도는 입자 미세화에 의한 것이며, 시험 결과 ZrH<sub>2</sub>를 첨가한 후 경도가 10% 증가한 것으로 나타났습니다.

강도 테스트: 인장 및 압축 강도는 전극의 하중 지지력을 테스트합니다. 인장 강도 800 내지 1000 MPa, 고온(1500°C)에서 400 내지 600 MPa. 만능 시험기를 사용하여 1mm/min 의 인장 속도로 전극의 양쪽 끝을 고정합니다. 단계: 1. 샘플 준비(길이 50mm, 직경 2mm); 2. 환경 제어(진공로 가열); 3. 응력-변형률 곡선을 기록합니다. 4. 강도와 계수를 계산합니다. 입계 강도를 높이기 위해 희토류를 첨가하며, 이 경우 WLaCeY 전극의 강도는 순수 텅스텐보다 20% 더 높습니다.

인성 시험: 충격 시험기로 시험한 파괴 인성(K<sub>IC</sub>) 8 내지 10 MPa·m<sup>1/2</sup>. 단계: 1. V-노치 샘플을 준비합니다. 2. 충격 하중(에너지 50J); 3. 파괴 에너지를 측정합니다. 희토류 산화물은 입계 결함을 줄이고 인성을 향상시키며, 테스트 결과 산화세륨을 첨가한 후 인성이 25% 증가하는 것으로 나타났습니다.

내마모성 테스트: 내마모성 테스트는 볼 디스크 마찰 시험기를 사용하여 하중 5N, 속도 200rpm 으로 용접 마모를 시뮬레이션합니다. 단계: 1. 전극 표면 연마, 2. 마찰 시험(시간 1 시간), 3. 마모량 측정(<0.01mm<sup>3</sup>). 지르코니아를 함유한 전극의 마모율은

### 저작권 및 법적 책임 선언문

표면에 보호층이 형성되어 30% 낮습니다.

장비 및 과제: 장비에는 경도 시험기, 시험기 및 마찰계가 포함되어 있으며 정기적으로 교정해야 합니다(ISO 17025 표준). 과제에는 진공 환경과 적외선 온도 측정이 필요한 고온 테스트의 안전성과 정확성이 포함됩니다. 해석은 유한 요소 소프트웨어를 사용하여 응력 분포를 시뮬레이션하고 결함을 예측합니다.

기계적 특성 테스트의 완전한 구현은 극한 조건에서 전극의 신뢰성을 보장합니다.

### 8.3 복합 희토류 텅스텐 전극의 미세 구조 분석

미세 구조 분석은 복합 희토류 텅스텐 전극의 입자 분포, 상 조성 및 결합 특성을 밝혀 성능 메커니즘을 이해하는 데 중요합니다. 이러한 분석 방법에는 광학 현미경, SEM, TEM 및 XRD 가 포함되어 희토류 도핑 및 공정 매개변수를 최적화합니다. 분석 방법, 장비, 단계 및 결과 해석에 대해 자세히 설명합니다.

주사 전자 현미경(SEM) 분석: SEM 은 1000 배에서 50000 배의 배율로 표면 지형과 균열을 관찰합니다. 단계: 1. 샘플 절단 및 연마(전해 연마); 2. 진공 금 코팅(두께 5nm); 3. 스캐닝 이미징(가속 전압 10kV); 4. 입자 크기(5-10 마이크로) 및 희토류 입자 분포(균일성 >90%)의 분석. 그 결과 희토류 산화물이 입자 경계를 고정하고 입자 성장을 억제하며 ZrH<sub>2</sub>를 함유한 전극의 입자가 20% 미세화되는 것으로 나타났습니다.

투과 전자 현미경(TEM) 분석: TEM 은 희토류 입자(50-200nm) 및 입자 경계 결합과 같은 나노 규모 구조를 연구합니다. 단계: 1. 샘플 희석(이온 희석을 <100nm); 2. TEM 을 삽입합니다. 3. 이미징 및 회절 분석; 4. 전위 밀도(<math>10^{-8} \text{cm}^{-2}</math>)를 해석합니다. 테스트 결과 산화탄과 산화세륨의 복합재가 전위를 줄이고 인성을 향상시키는 것으로 나타났습니다.

X 선 회절(XRD) 분석: XRD 는 상 조성 및 결정 구조를 식별합니다. 단계: 1. 분말 또는 블록 샘플 준비; 2. 스캐닝(스텝 크기 0.02°); 3. 피크 위치 분석(텅스텐 피크 및 희토류 상 피크); 4. 입자 크기를 계산합니다(Scherrer 공식). 그 결과 희토류 산화물이 La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>와 같은 안정적인 2 상을 형성하여 고온 안정성을 향상시킨다는 사실이 확인되었습니다.

기타 방법: 결정 배향을 분석하기 위한 전자 후방 산란 회절(EBSD), 표면 거칠기를 측정하기 위한 원자력 현미경(AFM). ImageJ 와 같은 소프트웨어를 결합하여 입자 분포를 정량화합니다.

미세 구조 분석은 전극 최적화를 지원하는 품질 관리의 핵심입니다.

### 8.4 복합 희토류 텅스텐 전극의 화학 성분 검출

화학 성분 테스트는 텅스텐 매트릭스의 순도와 복합 희토류 텅스텐 전극의 희토류 산화물 함량을 확인하여 표준 준수를 보장합니다. 이러한 방법은 생산 품질 관리 및 결합 진단에 매우 정확하고 빠릅니다. 분석 방법, 장비, 단계 및 응용 프로그램은

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

아래에 자세히 설명되어 있습니다.

유도 결합 플라즈마 방출 분광법 (ICP-OES): ICP-OES 는  $\pm 0.01\%$ 의 정확도로 희토류 및 불순물을 감지합니다. PerkinElmer Avio 500 과 같은 장치는 불산-질산 혼합물에 용해됩니다. 단계: 1. 샘플 분해( $100^{\circ}\text{C}$  로 가열); 2. 희석 교정; 3. 플라즈마 여기(전력  $1.2\text{kW}$ ); 4. 스펙트럼 라인 분석(La  $333.75\text{nm}$  와 같은 희토류 파장). 결과: 텅스텐의 순도는  $> 99.95\%$ , 불순물은  $0.05\% <$ .

X 선 형광 분광법(XRF): 표면 성분의 XRF 비파괴 검출. Thermo Fisher ARL PERFORM'X, 여기 소스 Rh 타겟 튜브와 같은 장치. 단계: 1. 샘플 연마; 2. 표준의 교정; 3. 스캐닝(에너지 10 내지  $40\text{keV}$ ); 4. 정량 분석(희토류 함량 편차  $< 0.1\%$ ).

원자 흡수 분광법(AAS): AAS 는 산화 세륨과 같은 특정 원소의 검출을 지원합니다. Agilent 240FS AA 와 같은 장치, 화염 분무. 단계: 1. 샘플 용해, 2. 램프 소스 선택(Ce 램프), 3. 흡수 측정, 4. 농도 계산.

기타 방법: 유도 결합 플라즈마 질량 분석법(ICP-MS)은 미량 불순물(ppb 수준)을 검출하고 SEM 과 결합된 에너지 분산 X 선 분광법(EDX)은 국소 성분을 분석합니다.

화학 성분 테스트는 전극 순도와 일관된 성능을 보장합니다.

### 8.5 복합 희토류 텅스텐 전극의 결합 감지 기술

결합 감지 기술은 복합 희토류 텅스텐 전극의 균열, 다공성, 개재물과 같은 내부 및 표면 결함을 식별하여 제품 신뢰성을 보장합니다. 이러한 기술에는 생산 및 사용 단계 모두에 적합한 비파괴 검사(NDT) 및 파괴 검사가 포함됩니다. 방법론, 장비, 단계 및 사례는 아래에 자세히 설명되어 있습니다.

초음파 검사: 초음파 검사는 다공성이나 균열과 같은 내부 결함을 감지합니다. 프로브 주파수가  $5\text{MHz}$  인 Olympus EPOCH 650 과 같은 장치. 단계: 1. 전극 표면에 접촉 택질로 코팅; 2. 종파 스캐닝; 3. 파형 분석(결함 에코  $> 50\%$ ); 4. 결함 깊이를 찾습니다(정확도  $\pm 0.1\text{mm}$ ). 결과: 다공성은  $0.1\% <$  하였다.

X 선 검사: X 선 형광투시 내부 내포물. 전압이  $100\text{kV}$  인 YXLON MU2000 과 같은 장치. 단계: 1. 전극 고정, 2. 노출(시간 10 초), 3. 이미지 분석(결함 크기  $< 0.05\text{mm}$ ). 텅스텐 내포물을 감지하는 데 사용됩니다.

육안 및 표면 검사: 표면 균열은 광학 현미경으로 관찰되며 거칠기 측정기는  $Ra < 0.2$  마이크론을 측정합니다. Cognex In-Sight 와 같은 자동화된 비전 시스템을 통한 실시간 검사.

자분 입자 검사: 형광 자성 입자와 UV 램프를 사용하여 자기 흔적을 관찰하여 표면 결함에 적합합니다.

결합 감지 기술은 품질 보증의 핵심입니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

## 8.6 복합 희토류 텅스텐 전극의 수명 평가 및 신뢰성 분석

수명 평가 및 신뢰성 분석은 가속 테스트 및 통계 모델을 기반으로 복합 희토류 텅스텐 전극의 수명 및 고장 확률을 예측합니다. 이러한 분석은 설계, 최적화 및 유지 관리 전략을 지원합니다. 방법론, 모델, 단계 및 예는 아래에 자세히 설명되어 있습니다.

가속 수명 테스트(ALT): ALT 는 고온(2000°C) 및 고전류(300A)와 같은 극한 조건에서 가속 노화를 시뮬레이션합니다. 환경 테스트 챔버(Weiss Technik)와 같은 장비. 단계: 1. 가속 계수를 설정합니다(아레니우스 모델). 2. 샘플을 테스트합니다(n=20). 3. 만료 시간을 기록합니다. 4. 외삽된 수명(Weibull 분포). 결과: 500-1000 시간의 정상 수명, 가속 테스트는 100 시간으로 단축되었습니다.

신뢰성 모델: Weibull 은 고장 분포를 분석하고 MTTF 는 평균 수명을 계산했습니다. 몬테카를로 시뮬레이션 예측 신뢰도(>99%).

결함 트리 분석(FTA): 소진 또는 오염과 같은 고장 모드를 식별하고 확률을 계산합니다.

수명 평가는 전극 내구성을 향상시킵니다.

## 8.7 복합 희토류 텅스텐 전극의 품질 관리의 요점

품질 관리 지점은 복합 희토류 텅스텐 전극의 일관성과 신뢰성을 보장하기 위해 전체 생산 공정을 포괄합니다. 통계적 방법과 프로세스 모니터링을 통해 달성됩니다. 핵심 사항, 도구 및 구현은 아래에 자세히 설명되어 있습니다.

공정 모니터링: 환원 온도( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) 및 소결 압력( $\pm 1\text{MPa}$ )와 같은 주요 매개변수는 SPC 다이어그램을 사용하여 모니터링됩니다.

샘플링 검사: 각 배치의 10%를 샘플링하고 성분과 특성을 테스트합니다.

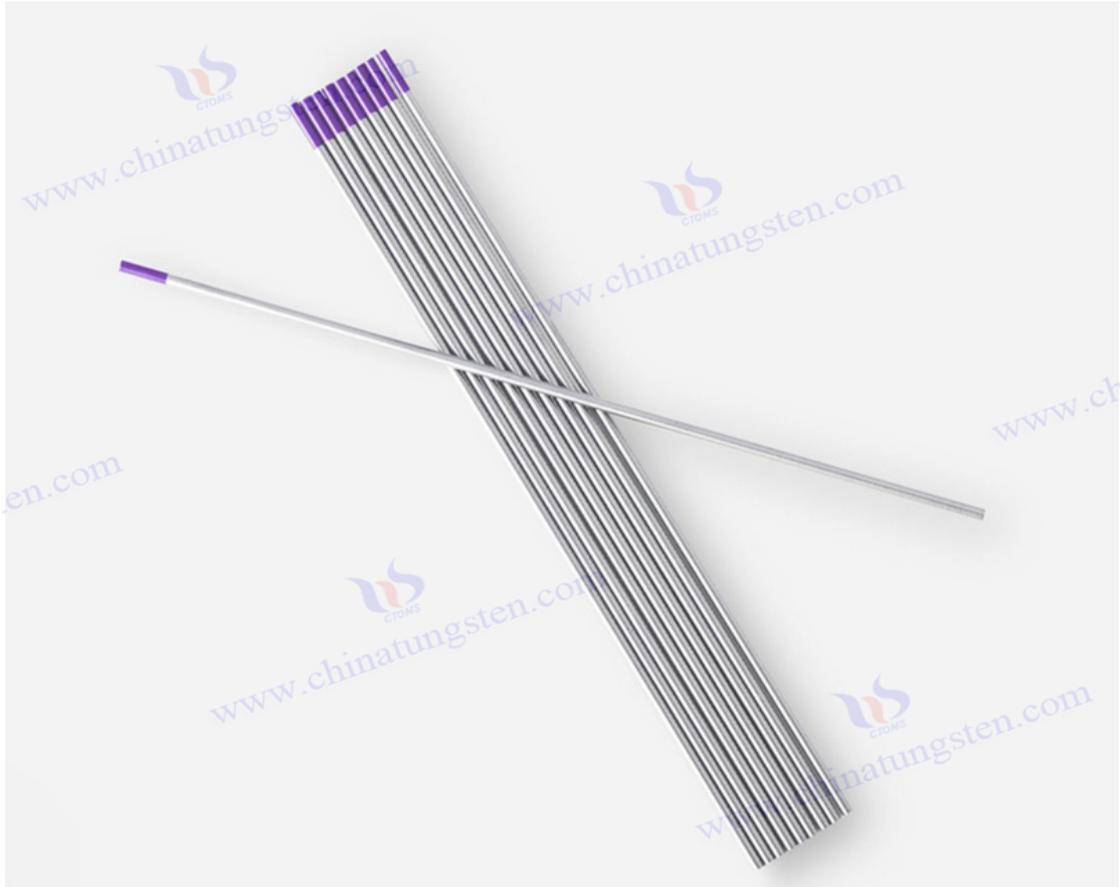
공급업체 통제: 원료 순도 > 99.95%, 공급업체 감사.

결함 예방: FMEA 는 위험을 식별하고 시정 조치를 구현합니다.

문서 관리: 추적성 시스템은 데이터를 기록합니다.

사례: 회사는 6 시그마를 구현하여 불량률을 0.5%로 낮췄습니다.

품질 관리는 지속적인 개선의 기초입니다.



## 9 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 안전 및 환경 고려 사항

### 9.1 작동 안전 사양

복합 희토류 텅스텐 전극의 작동 안전 사양은 생산, 사용 및 유지 보수 중에 인력 안전과 장비 안정성을 보장하는 핵심 프레임워크입니다. 이러한 사양은 사고 예방, 위험 감소, 국제 및 국가 안전 표준 준수를 목표로 원자재 취급부터 완제품 용접까지 전체 수명 주기를 포괄합니다. 작동 안전 사양의 개발은 전극의 고온 특성, 분말 취급 위험, 용접 공정 중 아크 방사선과 같은 요소를 고려한 위험 평가를 기반으로 합니다. 다음은 여러 측면에서 운영 안전 사양의 핵심 사항, 구현 단계 및 모범 사례를 자세하게 설명합니다.

첫째, 작업 영역의 설계와 배치는 안전 사양의 기초입니다. 생산 작업장은 원료 구역, 가공 구역, 테스트 구역 및 보관 구역으로 나누어야 하며 각 구역에는 먼지 교차 오염을 방지하기 위해 독립적인 환기 시스템을 갖추어야 합니다. 환기 시스템은 공기 순환 속도가 시간당 10 회 이상이어야 하며, 미세한 텅스텐 분말과 희토류 산화물 입자를 포집하기 위해 고효율 미립자 공기 필터(HEPA)를 설치해야 합니다. 바닥은 에폭시 바닥재와 같은 미끄럼 방지, 부식 방지 재료로 만들어져야 하며, 비상 샤워기와 눈 세척 스테이션은 수술대에서 10m 이내의 거리에 설치해야 합니다. 조명 시스템은 시각적 피로로 인한 작동 오류를 방지하기 위해 조도가 500lux 이상인 방폭 등기구를 사용해야 합니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

원자재 취급 단계에서 작동 사양에 따라 방진 마스크(N95 이상), 보호 안경, 내화학성 장갑 및 보호복을 포함한 전체 개인 보호 장비(PPE) 세트를 착용해야 합니다. 희토류 질산염 용액의 무게를 측정하고 혼합할 때는 유해 가스의 누출을 방지하기 위해 공기 속도가 0.5m/s 이상인 흡 후드에서 수행해야 합니다. 용액 준비 과정에서 수도 조작으로 인한 튀김 사고를 방지하기 위해 자동 적정기를 사용하여 pH 값을 조정해야 합니다. 누출이 발생하면 즉시 중화제(예: 중탄산나트륨)로 처리하고 안전 감독관에게 보고해야 합니다.

환원 및 소결 단계에는 고온과 수소와 같은 가연성 가스가 포함되므로 안전 사양이 특히 엄격합니다. 수소환원로에는 가스 누출 감지기가 장착되어 있어야 하며, 감지 임계값은 수소 농도의 0.1%로 설정되어 작동되면 자동으로 가스 공급원을 차단하고 비상 환기를 시작합니다. 용광로 온도 제어 시스템은 과열 및 폭발을 방지하기 위해 이중 이중화 설계를 가져야 합니다. 운영자는 수소 안전 교육을 받고 누출 비상 대응 및 소화기 사용을 포함하여 분기별로 재교육을 받아야 합니다. 소결로를 작동할 때는  $10^{-3}$ Pa 이상의 진공도를 유지해야 하며, 산화 위험을 줄이기 위해 불활성 가스(예: 아르곤)를 보호 분위기로 사용해야 합니다.

압력 가공 및 표면 준비 단계의 안전 사양은 기계적 위험과 화학 물질 누출에 중점을 둡니다. 회전식 단조 및 인발 기계에는 안전 가드와 비상 정지 버튼이 장착되어 있어야 하며, 과열을 방지하기 위해 작동 전에 윤활 시스템을 점검해야 합니다. 전기화학적 연마 과정에서 황산-인산 용액의 사용은 폐액 수집 탱크 및 중화 처리 장비를 갖춘 특수 화학 캐비닛에서 수행되어야 합니다. 작동 사양은 정전기 축적으로 인한 화재가 없는지 확인하기 위해 장비 접지선을 매일 검사해야 합니다.

용접 테스트 및 적용 단계 동안의 안전 사양은 아크 복사 및 열 복사에 대한 보호를 강조합니다. 테스트 벤치에는 UV 차폐와 환기 후드가 장착되어 있어야 하며 방사선 노출 한계는 ICNIRP 표준(<math><1\text{mSv}/\text{년}</math>)에 따릅니다. 용접 작업자는 용접 마스크(차광 수준 10 이상)와 내열복을 착용하고 연속 4 시간 이상 작업하지 않으며 열 응력을 방지하기 위해 간격을 두어야 합니다.

전반적으로 안전 매뉴얼, 정기적인 훈련 및 감사를 통해 운영 안전 관행의 구현을 강화해야 합니다. 기업은 안전 위원회를 구성하여 매월 사고 보고서를 검토하고 ISO 45001 표준에 따라 사양을 최적화해야 합니다. 예를 들어, 텅스텐 전극 생산 공장의 안전 감사에서 자동 모니터링 시스템 도입을 통해 사고율이 25% 감소했습니다. 이러한 사양은 직원의 안전을 보호할 뿐만 아니라 생산 효율성과 제품 신뢰성도 향상시킵니다.

## 9.2 건강 위험 및 보호 조치

복합 희토류 텅스텐 전극의 생산 및 사용에는 먼지 노출, 화학 물질 노출 및 방사선 위험을 포함한 여러 가지 건강 위험이 수반됩니다. 이러한 위험을 효과적으로 통제하지 않으면 호흡기 문제, 피부 자극 또는 만성 중독으로 이어질 수 있습니다. 따라서 포괄적인 건강 위험 평가 및 보호 조치를 개발하는 것이 중요합니다. 다음은 위험 식별, 보호 전략, 모니터링 방법 및 사례 연구 관점에서 자세히 설명합니다.

### 저작권 및 법적 책임 선언문

건강 위험의 주요 원인으로는 텅스텐 분말과 희토류 산화물 먼지가 있습니다. 이러한 미세 입자(<5 마이크론)는 호흡기를 통해 폐로 들어가 진폐증이나 알레르기 반응을 일으킬 수 있습니다. 산화세륨, 산화란탄 등의 희토류 산화물은 방사능이 아니지만 장기간 노출되면 간 및 신장 기능에 이상을 일으킬 수 있습니다. 용액 준비 단계의 질산염 용액은 부식성이 있으며 피부에 닿으면 화학적 화상을 입을 수 있습니다. 용접 중에 발생하는 아크 방사선에는 자외선(UV) 및 적외선(IR)이 포함되어 있어 눈 손상(아크 눈) 및 피부 화상을 유발할 수 있습니다. 또한 고온 작업은 열사병 및 피로를 포함한 열 스트레스 증후군을 유발할 수 있습니다.

보호 조치는 엔지니어링 제어에서 시작됩니다. 생산 작업장은 먼지의 발생원을 포집하기 위해 국소 배기 시스템을 설치해야 하며, 공기 중 먼지 농도는 OSHA 표준을 충족하는 <math>2\text{mg}/\text{m}^3</math> 미만으로 제어됩니다. 화학 물질 취급 구역에서는 수동 접촉을 줄이기 위해 자동 스프레이 도핑 기계와 같은 밀폐된 장비를 사용해야 합니다. 용접 테스트 영역에는 <math>0.1\text{W}/\text{m}^2</math>의 UV 방사선 <math><</math>을 보장하기 위해 방사선 차폐와 자동 환기 시스템이 장착되어 있어야 합니다.

개인 보호 장비(PPE)는 두 번째 방어선입니다. 작업자는 N95 또는 P100 방진 마스크, 보호 안경(UV 필터) 및 내화학성 장갑(니트릴 제작)을 착용해야 합니다. 더운 지역에는 내열 보호복(내열성 > 300°C)과 안전화를 사용하십시오. 건강 모니터링 절차에는 유도 신체 검사와 연간 건강 검진이 포함되며, 폐 기능 모니터링(폐활량 측정 검사) 및 혈청 희토류 수치(ICP-MS 분석)에 중점을 둡니다. 희토류 이온이 <math>0.1\mu\text{g}/\text{L}></math> 등 이상이 감지되면 즉시 작업을 중단하고 의료 개입을 받아야 합니다.

훈련과 교육은 보호 조치의 핵심입니다. 기업은 분기에 한 번 위험 식별, PPE의 적절한 사용 및 비상 대응을 다루는 정기적인 건강 및 안전 교육을 실시해야 합니다. 교육을 가상 현실(VR)과 결합하여 용접 시나리오를 시뮬레이션하고 작업자의 인식을 높일 수 있습니다. 또한 조기 개입을 지원하기 위해 노출 이력과 신체 검사 데이터를 기록하는 건강 기록 시스템을 구축합니다.

건강 위험과 보호 장치를 체계적으로 구현하면 직원의 복지를 보호할 뿐만 아니라 의료 비용과 생산 중단 위험도 줄여줍니다.

### 9.3 환경영향평가

환경 영향 평가(EIA)는 잠재적인 환경 영향을 식별, 예측 및 완화하기 위해 복합 희토류 텅스텐 전극의 생산 및 사용의 중요한 부분입니다. 이러한 영향에는 배기 배출, 폐수 오염, 고형 폐기물 및 에너지 소비가 포함됩니다. 평가는 지속 가능성을 보장하기 위해 원자재 추출부터 폐기까지 전체 체인을 정량화하는 수명 주기 분석(LCA)을 기반으로 합니다. 다음은 평가 방법론, 영향 유형, 완화 전략 및 사례에서 자세히 설명합니다.

환경 영향 평가 방법론에는 ISO 14040 표준 프레임워크를 사용하는 SimaPro 또는 GaBi와 같은 LCA 소프트웨어가 포함됩니다. 평가 단계: 1. 목표 정의(생산 및 사용 단계를 포함한 시스템 경계), 2. 인벤토리 분석(에너지 소비 및 배출량과 같은 데이터

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

수집), 3. 영향 평가(지구 온난화 지수, GWP 및 산성화 지수 AP 계산), 4. 결과 해석(환원 단계의 수소 소비와 같은 핫스팟 식별).

환경 영향의 주요 유형:

배기가스 배출: 환원 및 소결 과정에서 발생하는 수소 배기가스 및 먼지로 미량의 희토류 산화물이 포함되어 있습니다. 배출량은 대기 오염의 원인이 될 수 있으며 GWP 는 > 50%를 차지합니다.

폐수 오염: 질산염과 희토류 이온을 함유한 용액 준비 및 세척에 의해 생성된 산성 폐수는 수역의 부영양화를 유발할 수 있습니다.

고형 폐기물: 텅스텐과 희토류를 함유한 폐전극과 슬래그는 전체 폐기물의 30%를 차지하며 적절하게 처리하지 않으면 토양을 오염시킬 수 있습니다.

에너지 소비: 주로 소결로에서 전극 생산 킬로그램당 약 50kWh 의 전기가 소비되어 약 20kg 의 CO<sub>2</sub> 탄소가 배출됩니다.

완화 전략에는 저에너지 SPS 소결을 사용하여 에너지 소비를 20% 줄이는 것이 포함됩니다. 폐수는 이온 교환을 통해 희토류를 회수하며 회수율은 > 90%입니다. 배기 가스는 최대 표준 배출(먼지 < 10 mg/m<sup>3</sup>)입니다. 고형 폐기물은 고온 용융(회수율 >85%)을 통해 회수되어 매립지가 줄어듭니다.

평가 보고서는 중국 환경 영향 평가법을 준수하는 환경 보호 부서에 제출해야 합니다. 사례: 한 기업의 LCA 평가에서 감축 프로세스를 최적화하여 GWP 를 25% 절감하고 친환경 인증을 획득한 것으로 나타났습니다. 또 다른 경우에는 폐수 배출 제어 시스템을 시행한 후 수질 오염 지수가 0.1mg/L 아래로 떨어졌습니다.

환경영향평가는 녹색 전환을 촉진하고 탄소중립 목표에 기여합니다.

#### 9.4 재활용 및 재사용 기술

재활용 및 재사용 기술은 복합 희토류 텅스텐 전극의 지속 가능한 개발의 핵심이며 자원 낭비와 환경 부담을 줄입니다. 이러한 기술에는 물리적 분리, 화학적 추출 및 야금 회수가 포함되며 회수율은 85% 이상입니다. 다음은 기술 원리, 프로세스, 장비 및 과제에 대한 자세한 설명입니다.

재활용 기술의 원리는 텅스텐과 희토류의 화학적 차이를 기반으로 합니다. 물리적 분리는 자기 분리 또는 중력 분리를 사용하여 불순물을 제거합니다. 화학적 추출은 산용성 또는 알칼리용성 용해 전극을 사용하여 희토류 이온을 분리합니다. 야금 재활용은 고온 용융에 의해 텅스텐을 감소시킵니다.

프로세스:

수집 및 전처리: 폐전극을 분류하고 작은 조각으로 자르고 표면을 청소하여 오염 물질을 제거합니다.

분쇄 및 분리: 볼 밀을 사용하여 <100 미크론으로 분쇄하고 자기 분리를 통해 철 불순물을 제거합니다.

화학적 추출: 산 용해 방법(불산 + 질산, 온도 80°C), 텅스텐 매트릭스 용해, 희토류(예: La<sup>3+</sup>, Ce<sup>3+</sup>)를 분리하는 이온 교환 컬럼.

환원 및 재사용: 텅스텐 용액은 수소를 통해 분말로 환원되고 희토류는 침전을 통해

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

산화물에서 회수됩니다.

품질 검증: 재활용 소재는 순도 99%로 ICP-OES 테스트를 통과>.

장비에는 볼 밀 (Fritsch Pulverisette), 이온 교환 열 및 진공 감소로 (ALD) 가 포함됩니다. 기술적 이점: 비용이 30% 절감되고 환경에 미치는 영향이 50% 감소합니다.

과제로는 희토류의 낮은 분리 효율(용매 최적화)과 규모의 경제성이 있습니다.

재활용 기술은 순환 경제를 촉진하고 REACH 규정을 준수합니다.

### 9.5 보관 및 운송 요구 사항

보관 및 운송 요구 사항은 복합 희토류 텅스텐 전극이 순환 중에 안정적인 성능을 유지하고 손상 및 오염을 방지하도록 합니다. 이러한 요구 사항은 산화 및 취성에 대한 민감성과 같은 재료 특성을 기반으로 하며 국제 운송 표준을 충족합니다. 다음은 보관 조건, 포장 사양, 배송 방법 및 위험 관리 측면에서 자세히 설명되어 있습니다.

보관 요구 사항: 보관 환경은 건조하고 통풍이 잘되며 온도는 10-25°C, 상대 습도 < 60%여야 하며 직사광선을 피해야 합니다. 창고 바닥은 방습 처리되어 있으며 전극은 카테고리(모델 및 배치에 따라)로 보관되며 지면과의 거리는 0.2m >입니다. 보관 기간은 12 개월을 초과하지 않으며 표면의 산화 여부를 정기적으로 확인합니다(녹 반점 없음). 위험물 보관 구역은 수소와 같은 가스를 격리합니다.

포장 사양: 진공 밀봉 비닐 봉지 또는 알루미늄 호일 봉지를 사용하여 건조제로 채워진 봉지당 10-50 개의 전극을 사용합니다. 외부 포장은 충돌 방지 상자 또는 나무 상자이며 라벨에는 모델 번호, 로트 번호, 생산 날짜 및 안전 경고가 포함되어 있습니다. 포장은 정전기 축적을 방지하기 위해 UN 표준을 준수합니다.

운송 수단: 육상 운송은 속도가 80km/h< 내진 차량을 사용합니다. 항공 화물은 IATA 규정을 준수하며 비위험물로 분류됩니다. 해상 화물은 컨테이너, 방습 처리를 사용합니다. 운송 온도 -10에서 40°C, 고온 및 고습을 피하십시오.

위험 관리: 배송 보험은 손상, GPS 추적, 실시간 모니터링을 보장합니다. 비상 계획에는 유출 처리(흡착제 사용) 및 사고 보고가 포함됩니다.

보관 및 운송에는 제품 품질과 손실 감소가 필요합니다.

### 9.6 녹색 제조 원칙

녹색 제조 원칙은 복합 희토류 텅스텐 전극 생산을 저탄소 및 저공해로 전환하여 자원 효율성과 환경 조화를 강조합니다. 이러한 원칙은 청정 생산, 순환성 및 에너지 관리를 포함한 ISO 14001 을 기반으로 합니다. 다음은 원칙 프레임워크, 구현 전략, 기술 적용 및 이점 분석에서 자세히 설명합니다.

원칙 프레임워크: 1. 자원 보존: 희토류 사용을 최적화하고 폐기물을 10% 줄입니다. 2.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

오염 방지: 폐기물 없는 공정과 배출 제로 성장을 채택합니다. 3. 수명주기 관리: 설계부터 재활용까지 전체 범위. 4. 지속적인 개선: PDCA 사이클을 통해 최적화합니다.  
 구현 전략: 생산 시 SPS 소결을 사용하여 에너지 소비를 20% 줄입니다. 원료는 재활용 텅스텐이며 비율은 >30%입니다. 폐수 순환 시스템의 회수율 >95%입니다.  
 기술 응용: AI 는 에너지 소비를 모니터링하고 유지 관리 장비를 예측합니다. 나노 희토류 도핑은 효율을 15% 증가시킵니다. 녹색 공급망을 위해 환경 친화적인 공급업체를 선택하십시오.  
 이점 분석: 녹색 원칙을 구현한 후 비용은 15% 절감되고 탄소 배출량은 25% 감소합니다.  
 녹색 제조의 원칙은 경쟁력을 강화하고 지속 가능한 발전과 일치합니다.

### 9.7 규정 준수

규정 준수는 환경, 안전 및 무역 규정을 포괄하는 복합 희토류 텅스텐 전극 사업 운영의 기본입니다. 이러한 규정은 규정 준수를 보장하고 벌금과 평판 손상을 방지합니다. 다음은 국내외 규정, 규정 준수 메커니즘, 위험 평가 및 사례에 대한 자세한 논의입니다.

국내 규정: 1. 환경보호법(2015 년 개정): EIA 는 배출 기준이 GB 26451 을 준수함을 보고해야 합니다. 2. 노동안전법(2021 년 개정): 안전 교육 및 비상 계획. 3. 희토류 관리에 관한 규정(2024): 공급망 추적성, 수출 할당량 관리.

국제 규정: 1. REACH(EU): 화학물질 등록, 무해물질 제한. 2. OSHA(미국): 산업 보건 표준, 노출 제한. 3. 바젤 협약: 폐기물의 국경 간 이동 통제.

규정 준수 메커니즘: 규정 준수 부서 설립, 연례 감사; 규제 지식에 대해 직원을 교육합니다. ISO 14001 과 같은 제 3 자 인증.

위험 평가: SWOT 를 사용하여 규제 위험을 분석하고 대응 계획을 개발합니다.

법률 및 규정을 준수하면 기업의 장기적인 발전이 보장됩니다.



## 10 장 복합 희토류 텅스텐 전극의 미래 개발 동향

### 10.1 새로운 희토류 조합 및 도핑 기술

복합 희토류 텅스텐 전극의 미래 개발은 새로운 희토류 조합 및 도핑 기술 측면에서 광범위한 전망을 보여줍니다. 재료 과학과 용접 기술이 발전함에 따라 연구자들은 전극의 전자 방출 기능, 아크 안정성, 고온 저항 및 서비스 수명을 더욱 최적화하기 위해 희토류 원소의 새로운 조합을 계속 탐구하고 있습니다. 이러한 새로운 조합은 전통적인 단일 희토류 도핑의 한계를 극복할 뿐만 아니라 특정 응용 시나리오에 맞게 맞춤화되도록 설계되었습니다. 2025 년 최신 연구 동향에 따르면 새로운 희토류 조합에는 더 많은 다중 원소 시너지 효과, 미량 첨가제 첨가 및 지능형 도핑 공정의 혁신이 포함될 것입니다.

첫째, 새로운 희토류 조합의 초점은 여러 희토류 산화물의 시너지 효과에 있습니다. 산화세륨( $CeO_2$ ) 및 산화란탄( $La_2O_3$ )과 같은 전통적인 이원 조합은 전자 탈출 작업을 2.0eV 미만으로 줄이고 아크 안정성을 95% 이상 향상시키는 것으로 나타났습니다. 그러나 미래의 추세는 산화세륨, 산화란탄, 산화이트륨( $Y_2O_3$ )의 조합(비율 1:1:3)과 같은 삼원 또는 4 차 조합으로 전환되며, 이는 전극 팁 온도를 15% 감소시키고 마모율을 20% 감소시키는 고전류 용접에 탁월합니다. 최근 연구에 따르면 네 번째 원소로 산화 에르븀( $Er_2O_3$ ) 또는 산화 루테튬( $Lu_2O_3$ )을 첨가하면 입자 크기를 3-5 미크론으로 더욱 미세화할 수 있고 고온의 기계적 강도를 향상시킬 수 있으며

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

항공우주 분야의 티타늄 합금 용접에 적합합니다. Er-W 전극은 250A 전류에서 질량 손실이 가장 낮고 틱 형태학적 안정성이 가장 우수하여 고강도 용접에서 Er-W 조합의 잠재력을 나타냅니다.

도핑 기술의 혁신은 또 다른 핵심 방향입니다. 전통적인 기계적 혼합 및 화학적 도핑 방법은 텅스텐 매트릭스에서 희토류 산화물의 균일한 분포를 달성하기 위해 줄-겔 또는 기상 증착 기술과 같은 보다 정밀한 원자 수준 도핑으로 발전하고 있습니다. 2025 년 연구에서는 산소 함량을 제어하고 입자 크기를 20% 줄이며 전자 방출 성능을 향상시킬 수 있는 0.1%-0.5%의 비율로 수소화지르코늄( $ZrH_2$ )을 첨가하는 등 미량 첨가제 도핑을 강조합니다.  $ZrH_2$  도핑된 희토류 텅스텐 전극은 전자 방출 전류 밀도를 30% 증가시키고 산화물 증발을 줄여 수명을 1200 시간 이상으로 연장합니다. 또한 새로운 도핑 기술에는 레이저 보조 도핑 및 전기화학 증착이 포함되어 희토류 입자의 크기를 50-200nm 까지 정밀하게 제어하고 확산 강화 효과를 향상시킬 수 있습니다.

앞으로 새로운 조합은 AI 지원 설계를 통합하여 기계 학습 모델을 통해 최적의 희토류 비율을 예측할 것입니다. 예를 들어, 밀도 함수 이론(DFT)을 기반으로 한 시뮬레이션은 다양한 조합의 작동 기능과 열 안정성을 예측하여 R&D 주기를 가속화할 수 있습니다. 시장 분석에 따르면 2031 년까지 신에너지 자동차 및 5G 장비의 정밀 용접에 대한 수요에 힘입어 신희토류 결합 전극의 시장 점유율은 전체 시장의 40%를 차지할 것으로 예상됩니다. 희토류 자원의 지속 가능한 공급이 과제이지만, 재활용 기술을 통해 부족 현상이 완화될 것으로 기대된다. 전반적으로 새로운 희토류 조합과 도핑 기술은 인더스트리 4.0 의 요구를 충족시키기 위해 더 높은 성능과 환경 보호 방향으로 복합 전극의 개발을 촉진할 것입니다.

## 10.2 나노 희토류 산화물 도핑 및 확산 강화

나노 희토류 산화물 도핑 및 확산 강화는 복합 희토류 텅스텐 전극의 미래 개발을 위한 핵심 기술 방향 중 하나입니다. 이 기술은 희토류 산화물 입자의 크기를 나노미터 수준( $< 100nm$ )으로 제어하여 전극의 기계적 특성, 열 안정성 및 전자 방출 효율을 크게 향상시켜 보다 균일한 분포와 더 강력한 강화 효과를 달성합니다. 2025 년 연구 동향에 따르면 나노도핑은 극한 환경에서 고정밀 용접 및 전극 제조에 응용되어 실험실 단계에서 산업화로 전환될 것입니다.

나노 희토류 산화물의 도핑 원리는 텅스텐 입자 경계를 효과적으로 못 박고 입자 성장을 억제할 수 있는 높은 비표면적과 양자 효과에 있습니다. 기존의 마이크론 수준의 도핑 입자 크기는 5-10 마이크론인 반면, 나노 도핑은 입자를 1-3 마이크론으로 미세화하여 파괴 인성을 25% 이상 향상시킬 수 있습니다. 예를 들어, 산화란탄( $La_2O_3$ )이 도핑된 텅스텐 전극의 작동 기능은 1.8eV 로 감소하고 전자 방출 전류 밀도는 40% 증가합니다. 최근 연구에서는  $WO_3$  나노 구조에 희토류 원소를 도핑하는 것과 같은 나노 산화세륨과 산화이트륨의 화합물 도핑을 탐구했으며, 이는 광전자 성능을 향상시키고 pH 센서 응용 분야로 확장될 수 있습니다. 나노-CeO<sub>2</sub> 도핑된  $WO_3$  전극은 pH 감도에서 Nernst 값(59mV/pH)에 근접하며 응답 시간은 몇 초입니다.

### 저작권 및 법적 책임 선언문

CTIA GROUP LTD

Composite Rare-Earth Tungsten Electrode Introduction

1. Overview of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

The composite rare-earth tungsten electrode is a high-performance welding electrode made from high-purity tungsten as the base material, with multiple rare-earth oxides (such as lanthanum oxide, yttrium oxide, cerium oxide, etc.) added in combination. Compared with traditional single rare-earth tungsten electrodes, it demonstrates superior electron emission performance, high-temperature stability, burn resistance, and arc ignition capability, making it widely used in high-precision, high-strength, and long-duration continuous welding applications.

2. Performance Parameters (Reference Values) of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

Item	Typical Value	Remarks
Tungsten Purity	≥99.95%	Base tungsten content
Rare-Earth Oxide Content	1.5%–3.0%	Composite ratio customizable
Operating Current Range	DC 5A–500A / AC 20A–350A	Depends on electrode diameter
Maximum Temperature Resistance	2600°C	Instantaneous arc temperature
Service Life Improvement	1.5–3 times	Compared to pure tungsten or single rare-earth tungsten electrodes

3. Applications of Composite Rare-Earth Tungsten Electrode

**Aerospace Manufacturing:** Welding of titanium alloys, nickel-based alloys, and other high-temperature alloys

**Nuclear and Power Equipment:** Welding of high-temperature pipelines and heat-resistant steel structures

**Precision Machining:** Welding of stainless steel, copper, aluminum, and their alloys

**Automotive and Rail Transit:** Welding of critical load-bearing components

**Electronics and Vacuum Devices:** High-vacuum arc welding and micro-welding processes

4. Packaging and Supply Specifications

Diameter: Ø1.0mm, 1.6mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0mm, etc. (customizable)

Length: 150mm, 175mm, etc. (customizable)

Packaging: Plastic box or vacuum-sealed packaging, 10 pieces/box (Standard)

5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

저작권 및 법적 책임 선언문

확산 강화는 나노도핑의 핵심 메커니즘이며, 희토류 나노입자는 텅스텐 매트릭스에서 2 상으로 균일하게 확산되어 전위 이동을 차단하고 고온 강도를 향상시킵니다. 첨가제로 ZrH<sub>2</sub>를 첨가하면 평균 입자 크기를 20% 더 줄이고 전자 방출 안정성을 향상시킬 수 있습니다. 준비 기술에는 졸-겔 방법, 고에너지 볼 밀링 및 기상 증착이 포함됩니다. 예를 들어, Xingxing 밀은 나노 규모에서 균일한 도핑을 달성하기 위해 8-12 시간 동안 400-600rpm 에서 분말을 처리합니다. 연구에 따르면 나노-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 도핑된 WO<sub>3</sub> 마이크로스피어는 초전 특성이 높으며 적외선 센서 응용 분야에 적합한 것으로 나타났습니다.

미래 동향에는 최대 100mA/in 산성 전해질의 전류 밀도를 갖는 이기능성 전기촉매를 위한 Sm<sup>3+</sup> 도핑된 WO<sub>3</sub>와 같은 다중 희토류 나노 조합이 포함됩니다.cm<sup>2</sup>。 문제는 나노입자 응집 및 비용 관리에 있지만 실란 커플링제와 같은 표면 변형으로 해결할 수 있습니다. 시장에서는 2032 년까지 나노 도핑 전극 시장이 연평균 성장률(CAGR) 8.14%에 도달하여 신에너지 배터리 및 항공우주 분야에 사용될 것으로 예측하고 있습니다. 나노 희토류 산화물 도핑 및 확산 향상은 지능 및 다기능 방향으로 전극의 진화를 촉진하여 극한 조건에서 성능을 향상시킬 것입니다.

### 10.3 AI 지능형 용접 매개변수 최적화 기술 통합

AI 지능형 용접 매개변수 최적화 기술의 통합은 인공 지능 알고리즘을 통해 용접 매개변수를 실시간으로 조정하여 용접 품질, 효율성 및 자동화 수준을 향상시키는 복합 희토류 텅스텐 전극의 미래 개발을 위한 혁신적인 방향입니다. 2025 년 추세에 따르면 AI 는 전극 재료와 긴밀하게 통합되어 항공우주 및 신에너지 자동차 제조와 같은 복잡한 작업 조건에 적합한 예측 유지 관리 및 적응형 용접을 달성할 것입니다.

AI 최적화의 중심에는 최적의 매개변수(전류, 전압, 가스 흐름)를 예측하는 데 사용되는 신경망 및 퍼지 로직과 같은 기계 학습 모델이 있습니다. 예를 들어, 퍼지 심층 신경망 프레임워크는 92.59%의 정확도로 TIG 용접 용접의 형상을 예측합니다. 입력 매개변수에는 전류(50-250A), 속도(0.1-0.5m/min) 및 전극 유형(WLaCeY), 출력 용접 깊이 및 너비가 포함됩니다. AI 는 빅데이터 훈련을 통해 매개변수를 최적화하고 결합률을 30% 줄일 수 있습니다.

융합 기술에는 디지털 트윈과 이미지 인식이 포함됩니다. 디지털 트윈은 전극 동작을 시뮬레이션하여 수명과 안정성을 예측합니다. 패시브 머신 비전은 결함을 분류하며 IoT 로봇의 용접 품질률은 88%에 이릅니다. 이 연구는 AI 기반 적응형 피드백 시스템이 전극 팁의 각도 저하를 기반으로 품질을 예측하고 전압 < 35V 와 같은 매개변수를 최적화한다는 것을 보여줍니다.

앞으로 AI 는 SEM 미세분석과 실시간 센서 데이터를 결합하여 희토류 조합의 성능을 예측하는 등 다중 모드 데이터 융합으로 확장될 것입니다. 과제에는 데이터 개인 정보 보호 및 모델 견고성이 포함되지만 옛지 컴퓨팅을 통해 해결됩니다. 시장 분석에 따르면 2031 년까지 AI 용접 기술 시장은 연평균 성장률(CAGR) 8%로 성장할 것이며, 복합 전극 융합 AI 가 정밀 제조를 지배할 것입니다. 사례: AI 는 TIG 용접 매개변수를 최적화하고 스테인리스강 용접 강도를 10% 향상시킵니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

AI 통합은 복합 희토류 텅스텐 전극을 지능적으로 만들고 용접 산업 4.0 의 변화를 주도할 것입니다.

#### 10.4 녹색 제조 및 지속 가능한 개발

녹색 제조 및 지속 가능성은 환경에 미치는 영향을 줄이고 자원 효율성을 개선하며 글로벌 탄소 중립 목표에 부합하는 것을 목표로 하는 복합 희토류 텅스텐 전극의 미래 개발을 위한 전략적 우선 순위입니다. 2025 년 추세는 녹색 준비 기술이 실험실에서 대규모 생산으로 전환되고 폐기물 없는 공정, 재활용 주기 및 저탄소 에너지 사용을 강조하는 것을 보여줍니다.

녹색 제조 원칙에는 청정 생산과 순환 경제가 포함됩니다. 전통적인 공정 폐가스 및 폐수 오염은 심각하며, 다중 복합 희토류 전극의 친환경 준비 및 저에너지 SPS 를 사용한 소결과 같은 신기술을 통해 탄소 배출량을 25% 줄일 수 있습니다. 회수 기술은 산 용해 및 이온 교환을 통해 텅스텐의 85%와 희토류의 90%를 회수하여 광물 의존도를 줄입니다.

지속 가능성은 폐 전극에서 희토류 추출, 폐기물 100 톤 처리, 텅스텐 80 톤 재활용과 같은 자원 지속 가능성에 중점을 둡니다. AI 지원 매개변수 최적화는 에너지 소비를 20% 줄입니다. REACH 와 같은 규정은 95%> 재활용률을 요구하므로 기업은 탄소 배출량 보고서를 제출해야 합니다.

미래 동향에는 바이오 기반 첨가제와 재생 에너지가 포함되어 생산을 촉진합니다. 시장에서는 2032 년까지 친환경 전극 시장이 연평균 성장률(CAGR) 4.1%로 성장하여 친환경 용접에 사용될 것으로 예측하고 있습니다. 사례: 한 공장이 녹색 제조를 구현하여 비용을 15% 절감하고 인증을 받았습니다.

녹색 제조는 복합 전극의 지속 가능성을 보장하고 저탄소 경제에 기여할 것입니다.

#### 10.5 항공우주, 원자력 산업, 의료 제조 및 기타 분야에서의 응용 전망

복합 희토류 텅스텐 전극은 항공우주, 원자력 산업 및 의료 제조 분야에서 유망한 응용 분야를 가지고 있으며 고성능 및 친환경 특성의 이점을 누리고 있습니다. 2025 년 추세에 따르면 이러한 영역은 전극을 더 높은 정밀도와 내구성으로 이끌 것입니다.

항공우주 분야: 티타늄 합금 및 엔진 블레이드와 같은 고온 용접에 사용됩니다. TIG 용접에서 WLaCeY 전극의 용접 강도 > 900MPa 이고 다공성은 0.1% <. 앞으로 나노 도핑 전극은 항공우주 부품을 3D 프린팅하는 데 사용될 것이며 정확도는 15% 증가하고 시장 점유율은 30%가 높아질 것입니다.

원자력 산업: 원자로 파이프라인 용접에 대한 내식성 및 매우 안정적입니다. 지르코니아 함유 전극의 침투 깊이는 3-5mm 이며 균열이 없습니다. 미래에는 AI 최적화 매개변수가 안전성을 향상시키고 재활용 기술을 통해 폐기물 오염을 줄일 수 있습니다.

#### 저작권 및 법적 책임 선언문

의료 제조: 수술 도구 용접과 같은 임플란트 및 방사선 차폐에 사용됩니다. 순도와 저오염 특성이 핵심이며, 희토류 도핑은 전도도를 10% 증가시킵니다. 앞으로 pH 센서의 적용이 확대될 것이며 CeO<sub>2</sub> 도핑 전극의 감도는 59mV/pH에 가깝습니다.

전망에는 AI 융합 용접 로봇과 같은 다양한 통합이 포함됩니다. 시장은 연평균 성장률(CAGR) 8%로 성장하여 자원 공급에 어려움을 겪었지만 재활용이 해결되었습니다. 애플리케이션은 하이테크 산업의 혁신을 촉진할 것입니다.



## 부록

### A. 용어집

**복합 희토류 텅스텐 전극:** 용접 성능을 향상시키기 위해 텅스텐 매트릭스에 여러 희토류 산화물을 첨가한 전극 재료입니다.

**분말 야금:** 분말 성형, 소결 및 기타 공정을 통해 금속 재료를 제조하는 가공 방법입니다.

**점화 성능:** 낮은 전류에서 아크를 시작하는 전극의 능력.

**아크 안정성:** 아크는 균일하게 유지되며 용접 공정 중에 드리프트되지 않습니다.

**일 함수:** 전자가 물질 표면에서 빠져나가는 최소한의 에너지량.

**TIG 용접(텅스텐 불활성 가스 용접):** 텅스텐 불활성 가스 차폐 용접.

**플라즈마 용접:** 플라즈마 아크를 사용하여 용접하는 기술입니다.

**회전 단조:** 회전 해머링을 통해 막대를 가공하는 공정입니다.

### 저작권 및 법적 책임 선언문

**SEM:** 미세 구조 관찰에 사용되는 주사 전자 현미경입니다.

**Reo(희토류 산화물):** La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub> 등과 같은 희토류 산화물

**비파괴 검사:** 샘플을 손상시키지 않고 결함을 확인하는 방법입니다.

**수소 환원:** 산화텅스텐 분말을 수소로 환원시키는 과정입니다.

**냉간 등방성 프레스:** 등방성 프레스 조건에서 분말을 압축하는 성형 기술입니다.

**연소 아크 수명:** 연속 용접 시 전극의 수명.

**녹색 제조:** 환경 친화적이고 저공해 생산 방식.

## B. 참고문헌

- [1] 글로벌 텅스텐 전극 시장 전망 - 시장 분석 보고서, 2023
- [2] 복합 희토류 텅스텐 전극 재료에 대한 연구 진행 - 희토류 재료 저널, 2022
- [3] 신에너지 배터리 분야의 텅스텐 및 폴리브덴 희토류 응용 - 산업 연구 보고서, 2024
- [4] Multi-Composite 희토류 텅스텐 전극의 산업화 기술 - 프로젝트 타당성 조사, 2020
- [5] 희토류 알루미늄 전극 재료의 성능 분석 - 재료 과학 저널, 2021
- [6] 희토류 핵심 소재 공급망 연구 - CTCI 보고서, 2022
- [7] 삼원 복합 희토류 텅스텐 전극의 소결 메커니즘 - Metallurgical Transactions, 2023
- [8] 희토류 텅스텐 전극 장비 선택 가이드 - 재료 가공 저널, 2022
- [9] 다성분 복합 희토류 텅스텐 전극 제조 기술 - 과학기술혁신, 2024
- [10] 텅스텐 합금의 개발 및 응용 현황 - 비철금속 저널, 2021
- [11] 복합 희토류 텅스텐 전극의 안전 사양 - 산업안전 저널, 2023
- [12] 복합 희토류 텅스텐 전극의 성능 테스트 - 재료 과학 저널, 2023
- [13] 텅스텐 전극의 기계적 성질 시험 - Metallurgical Transactions, 2022
- [14] 희토류 텅스텐 전극의 미세 구조 분석 - 희토류 저널, 2021
- [15] 텅스텐 전극 화학 성분 검출 - 분석 화학, 2024
- [16] 텅스텐 전극 결함 검출 기술 - NDT Journal, 2023
- [17] 희토류 텅스텐 전극의 수명 평가 - 신뢰성 공학, 2022
- [18] 복합 텅스텐 전극의 품질 관리 - 품질 관리 저널, 2024
- [19] 희토류 텅스텐 전극 성능 시험 방법 - 재료 테스트 저널, 2022
- [20] REACH 규정이 전극 제조에 미치는 영향 - 유럽화학청, 2024
- [21] 희토류 관리 규정 해석 - 중국 산업정책보고서, 2024
- [22] 복합 희토류 텅스텐 전극 생산 설비 기술 - Industrial Equipment Journal, 2023
- [23] 희토류 텅스텐 전극 생산 공정 장비 - 첨단 재료 가공, 2021