

## 텅스텐 합금 노즐이란 무엇입니까

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA 그룹 소개

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

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

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

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## 1 목차

### 1 장 텅스텐 합금 노즐 이해

- 1.1 텅스텐 합금 노즐이란 무엇인가?
  - 1.1.1 텅스텐 합금 노즐의 정의 및 기본 구성 요소
  - 1.1.2 텅스텐 합금 노즐의 분류
- 1.2 텅스텐 합금 노즐의 가치: 왜 텅스텐 합금을 선택해야 하나까?
  - 1.2.1 텅스텐 합금 노즐의 성능 향상(기존 노즐 대비)
  - 1.2.2 일반적인 시나리오에서 텅스텐 합금 노즐의 가치
- 1.3 텅스텐 합금 노즐의 기본 특성
- 1.4 텅스텐 합금 노즐의 산업적 위치 및 적용 시나리오
  - 1.4.1 고급 제조 산업 체인에서 텅스텐 합금 노즐의 역할
  - 1.4.2 텅스텐 합금 노즐의 일반적인 적용 시나리오

### 2 장 텅스텐 합금 노즐의 구조

- 2.1 텅스텐 합금 노즐의 주요 구조 요소
  - 2.1.1 텅스텐 합금 노즐의 기본 구조: 입구, 유로 및 출구
    - 2.1.1.1 텅스텐 합금 노즐의 오리피스 매개변수
    - 2.1.1.2 텅스텐 합금 노즐의 원뿔 각도 매개변수
    - 2.1.1.3 텅스텐 합금 노즐의 길이 매개변수
    - 2.1.1.4 텅스텐 합금 노즐의 다중 매개변수 협업 설계
  - 2.1.2 텅스텐 합금 노즐의 구조적 유형
    - 2.1.2.1 직구 텅스텐 합금 노즐
    - 2.1.2.2 원뿔형 텅스텐 합금 노즐
    - 2.1.2.3 팬형 텅스텐 합금 노즐
    - 2.1.2.4 기타 특수 구조 텅스텐 합금 노즐
  - 2.1.3 텅스텐 합금 노즐의 구조적 파생 특성
    - 2.1.3.1 유동 채널 구조에 의한 유동 안정성
    - 2.1.3.2 구조 정확도가 분무 효과에 미치는 영향
- 2.2 노즐용 텅스텐 합금의 재료 사양
  - 2.2.1 노즐용 텅스텐 합금의 일반적인 구성비 및 응용 분야
    - 2.2.1.1 텅스텐 함량이 높은 기본 공식(텅스텐 함량  $\geq 90\%$ )
    - 2.2.1.2 텅스텐-니켈-철 합금 비율
    - 2.2.1.3 텅스텐-니켈-구리 합금 비율
    - 2.2.1.4 특수 제형: 고온 및 고압과 같은 극한 작업 조건에 맞게 맞춤 제작
  - 2.2.2 노즐에 사용되는 텅스텐 합금의 사양 및 제어 요구 사항
    - 2.2.2.1 텅스텐 합금 노즐의 화학 성분 사양
    - 2.2.2.2 텅스텐 합금 노즐의 물리적 특성 사양
    - 2.2.2.3 텅스텐 합금 노즐의 기계적 특성 사양
    - 2.2.2.4 텅스텐 합금 노즐의 가공 정확도 사양

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 제 3 장 텅스텐 합금 노즐의 특성

#### 3.1 텅스텐 합금 노즐의 용점 특성

##### 3.1.1 높은 용점의 수치 범위 및 측정 표준

##### 3.1.2 고온 작동 조건에 대한 적응성을 위한 높은 용점의 가치

#### 3.2 텅스텐 합금 노즐의 밀도 특성

##### 3.2.1 일반적인 밀도 범위 및 영향 요인

##### 3.2.2 고밀도와 내마모성 및 안정성 간의 상관관계 메커니즘

#### 3.3 텅스텐 합금 노즐의 경도 특성

##### 3.3.1 경도 지수에 일반적으로 사용되는 시험 방법

##### 3.3.2 경도와 수명 간의 상관 분석

#### 3.4 텅스텐 합금 노즐의 강도 특성

##### 3.4.1 인장강도 및 압축강도의 핵심 지표

##### 3.4.2 고압 조건에서의 강도 특성

#### 3.5 텅스텐 합금 노즐의 화학적 안정성

##### 3.5.1 산 및 알칼리 부식 저항 성능

##### 3.5.2 고온 환경에서의 항산화 능력

#### 3.6 텅스텐 합금 노즐의 열전도도

##### 3.6.1 열전도도의 주요 매개변수 범위

##### 3.6.2 열전도도가 온도 분포 및 열 변형에 미치는 영향

#### 3.7 텅스텐 합금 노즐의 전기 전도도

##### 3.7.1 전기 전도도의 수치적 특성

##### 3.7.2 특정 응용 시나리오에 대한 전도도의 적응성

#### 3.8 텅스텐 합금 노즐의 내마모성

##### 3.8.1 마모 메커니즘 및 내마모성 평가 기준

##### 3.8.2 내마모성 향상을 위한 재료 및 구조 최적화 방법

#### 3.9 텅스텐 합금 노즐의 충격 저항성

##### 3.9.1 충격 강도 시험 방법 및 지표

##### 3.9.2 복잡한 작업 조건에 대한 적응성을 위한 충격 저항의 중요성

#### 3.10 텅스텐 합금 노즐의 치수 안정성

##### 3.10.1 온도 변화에 따른 치수 변형 법칙

##### 3.10.2 치수 안정성이 사출 정확도에 미치는 영향

#### 3.11 텅스텐 합금 노즐의 방사선 저항성

##### 3.11.1 방사선 저항 성능의 핵심 평가 지표

##### 3.11.2 원자력 산업과 같은 방사선 환경에서의 응용 프로그램 적응성

#### 3.12 텅스텐 합금 노즐의 표면 특성

##### 3.12.1 표면 거칠기 및 마찰 계수의 특성

##### 3.12.2 특성 개선에 있어서 표면 처리의 역할

#### 3.13 텅스텐 합금 노즐의 피로 저항

##### 3.13.1 피로수명에 대한 시험방법 및 영향인자

##### 3.13.2 교대 하중 조건에서의 피로 저항 성능

#### 3.14 CTIA GROUP LTD 의 텅스텐 합금 노즐 MSDS

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 제 4 장 텅스텐 합금 노즐 제조

4.1 텅스텐 합금 노즐용 원료 준비 공정: 텅스텐 광석에서 합금 분말까지

4.1.1 텅스텐 광석 전처리: 선광 및 정제 공정

4.1.2 텅스텐 분말 제조: 환원 공정 및 입자 크기 제어

4.1.3 합금화 처리: 도핑 및 혼합 공정의 핵심 사항

4.1.4 분말 성능 제어: 유동성 및 벌크 밀도 최적화

4.2 텅스텐 합금 노즐의 성형 공정: 블랭크 성형 기술 및 선택

4.2.1 전통적인 압축 성형: 압축 공정 및 매개변수 제어

4.2.2 정밀 성형 기술: 등방성형 공정의 장점

4.2.3 적층 제조 기술: 3D 프린팅 응용 분야 탐색

4.2.4 성형 공정 선택: 노즐 사양 및 배치 요구 사항 기반

4.3 텅스텐 합금 노즐의 소결 공정: 고밀도화를 위한 핵심 기술

4.3.1 소성 전 처리: 탈지 및 응력 완화 공정

4.3.2 고온 소결: 온도 및 분위기 제어를 위한 주요 매개변수

4.3.3 소결 밀도화 메커니즘: 기공률 제어 및 성능 상관 관계

4.3.4 소결 결함 방지: 균열 및 변형 제어 조치

4.4 텅스텐 합금 노즐의 후처리 기술: 정밀도 및 성능 향상

4.4.1 정밀 가공: 유로 및 단면 가공 기술

4.4.2 표면 처리 공정: 연마 및 코팅 강화 기술

4.4.3 치수 교정: 정밀 측정 및 보정 프로세스

4.4.4 완제품 세척 및 건조: 불순물 제거 공정 사양

4.5 텅스텐 합금 노즐용 원자재 단계의 품질 관리

4.5.1 텅스텐 분말 순도 테스트

4.5.2 합금 분말 조성의 균일성을 위한 시험 절차

4.5.3 분말 물리적 특성 테스트

4.6 성형 및 소결 단계 동안 텅스텐 합금 노즐의 품질 관리

4.6.1 빌릿의 밀도 및 치밀성 테스트 방법

4.6.2 소결체의 조성 및 미세조직 분석

4.6.3 소결체의 기계적 특성에 대한 샘플링 및 테스트 사양

4.7 완제품 단계에서의 텅스텐 합금 노즐의 품질 관리

4.7.1 치수 정확도 검사

4.7.2 표면 품질 관리

4.7.3 작동 조건 성능 테스트

4.8 텅스텐 합금 노즐의 품질 관리 시스템 및 표준

4.8.1 텅스텐 합금 노즐에 대한 전체 공정 품질 추적 시스템 구축

4.8.2 주요 품질 관리 지점 설정

4.8.3 업계 품질 표준 및 규정 준수 요구 사항

## 5 장 텅스텐 합금 노즐과 다른 재질의 노즐 비교

5.1 텅스텐 합금 노즐과 스테인리스 스틸 노즐 의 비교

5.1.1 고온 저항성 비교: 온도 허용 범위 및 안정성

5.1.2 내마모성 비교: 마모율과 수명의 차이

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.1.3 기계적 성질 비교: 강도와 인성 간의 적합성 분석
- 5.1.4 경제적 비교: 비용 및 유지 관리 비용의 종합적 평가
- 5.2 텅스텐 합금 노즐과 세라믹 노즐의 비교
  - 5.2.1 기계적 성질 비교: 충격 강도와 취성의 차이
  - 5.2.2 내마모성 비교: 경질 입자 마모 및 연마 마모 성능
  - 5.2.3 가공 성능 비교: 성형 정확도 및 복잡한 구조에 대한 적응성
  - 5.2.4 신뢰성 비교: 열충격 저항성 및 사용 안정성 분석
- 5.3 텅스텐 합금 노즐과 구리 합금 노즐의 비교
  - 5.3.1 고온 강도 비교: 고온 환경에서의 기계적 특성 유지율
  - 5.3.2 서비스 수명 비교: 다양한 작동 조건에서 감쇠 패턴의 차이
  - 5.3.3 열전도도 비교: 열전도 특성 및 온도 분포
  - 5.3.4 내식성 비교: 산 및 알칼리 매체에서의 내식성 성능

## 제 6 장 텅스텐 합금 노즐의 적용 분야

- 6.1 산업 제조에서의 텅스텐 합금 노즐의 적용
  - 6.1.1 용접 및 절단: 고온 분무용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.1.2 표면 코팅: 분무 성형용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.1.3 야금 주조: 고온 용융 흐름용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.1.4 정밀 세척: 고압 분사용 텅스텐 합금 노즐
- 6.2 에너지 및 광업 분야에서 텅스텐 합금 노즐의 적용
  - 6.2.1 석유 시추: 고압 암석 파쇄용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.2.2 석탄가스화: 고온 반응용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.2.3 열전 발전: 탈황 및 탈질소용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.2.4 핵에너지 활용: 방사선 저항 환경을 위한 텅스텐 합금 노즐
- 6.3 고급 장비에서의 텅스텐 합금 노즐의 적용
  - 6.3.1 항공우주: 엔진 가스 분사용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.3.2 철도 교통: 제동 시스템 냉각용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.3.3 의료기기: 정밀 분무용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.3.4 전자 제조: 칩 패키징용 텅스텐 합금 노즐
- 6.4 군사 및 특수 분야에서의 텅스텐 합금 노즐의 응용
  - 6.4.1 군용 장비: 특수 분무 시스템용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.4.2 우주 발사: 추진 시스템용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.4.3 화학 비상 대응: 부식성 매체 취급을 위한 텅스텐 합금 노즐
  - 6.4.4 심해 탐사: 고압 환경용 텅스텐 합금 노즐
- 6.5 신형 분야에서의 텅스텐 합금 노즐의 응용
  - 6.5.1 3D 프린팅: 금속 분말 분사를 위한 텅스텐 합금 노즐
  - 6.5.2 수소 에너지 산업: 연료 전지용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.5.3 탄소 포집: 흡수제 주입용 텅스텐 합금 노즐
  - 6.5.4 레이저 기술: 보조 냉각용 텅스텐 합금 노즐

## 제 7 장 텅스텐 합금 노즐의 선정, 설치 및 유지관리

- 7.1 텅스텐 합금 노즐의 과학적 선택

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.1 작동 매개변수의 매칭: 온도 및 압력에 따른 텅스텐 합금 노즐의 적응
- 7.1.2 미디어 특성 호환성: 텅스텐 합금 노즐은 부식성 미디어와 호환됩니다.
- 7.1.3 성능 요구 사항 일치: 텅스텐 합금 노즐 및 흐름 분무 적응
- 7.1.4 구조 유형 선택: 텅스텐 합금 노즐 구조 및 현장 적응
- 7.1.5 일반적인 선택 실수 방지: 텅스텐 합금 노즐 선택의 일반적인 문제 분석
- 7.2 텅스텐 합금 노즐의 설치 및 조정: 정밀도 보장을 위한 핵심 사항
  - 7.2.1 설치 전 준비: 텅스텐 합금 노즐 검사 및 액세서리 호환성
  - 7.2.2 코어 설치 사양: 텅스텐 합금 노즐 위치 지정 및 밀봉 기술
  - 7.2.3 설치 정확도 제어: 텅스텐 합금 노즐의 동축성 및 수직성 교정
  - 7.2.4 코어 디버깅 프로세스: 텅스텐 합금 노즐 흐름 및 압력 교정
  - 7.2.5 설치, 시운전 및 승인: 텅스텐 합금 노즐에 대한 성능 검증 표준
- 7.3 텅스텐 합금 노즐의 일일 유지 관리
  - 7.3.1 정기 점검을 위한 핵심 사항: 텅스텐 합금 노즐의 마모 및 부식 감지
  - 7.3.2 세척 및 유지 관리 표준: 텅스텐 합금 노즐 막힘 세척 및 표면 유지 관리
  - 7.3.3 유지 보수 주기 결정: 작동 조건에 따른 텅스텐 합금 노즐 유지 보수 계획
  - 7.3.4 소모품 관리: 텅스텐 합금 노즐 부품의 교체 및 비축 전략
- 7.4 텅스텐 합금 노즐 문제 해결
  - 7.4.1 일반적인 결함 진단: 텅스텐 합금 노즐의 비정상 유량 원인 분석
  - 7.4.2 문제 해결: 텅스텐 합금 노즐의 마모 및 누출에 대한 수리 솔루션
  - 7.4.3 극한 고장 처리: 텅스텐 합금 노즐의 균열 및 변형 처리 조치
  - 7.4.4 결함 방지 시스템: 텅스텐 합금 노즐의 수명 주기 전반에 걸친 위험 관리

## 8장 텅스텐 합금 노즐의 일반적인 문제

- 8.1 텅스텐 합금 노즐 제조 시 발생하는 일반적인 문제
  - 8.1.1 원료 준비 문제: 텅스텐 분말의 순도 부족 및 과도한 불순물
  - 8.1.2 성형 공정 문제: 빌릿의 균열 및 밀도 불균일
  - 8.1.3 소결 공정의 문제점: 소결체의 변형 및 밀도 부족
  - 8.1.4 후처리 문제: 열악한 유동 채널 정밀도 및 표면 결함
- 8.2 텅스텐 합금 노즐 선택 및 적용의 일반적인 문제
  - 8.2.1 작동 조건 일치 문제: 노즐 성능과 온도 및 압력 불일치
  - 8.2.2 구조 선택 문제: 유동 채널 유형이 분무 요구 사항과 일치하지 않음
  - 8.2.3 재료 호환성 문제: 합금 구성과 부식성 매체 간의 비호환성
  - 8.2.4 사양 선택 문제: 오리피스 직경 매개변수와 유량 요구 사항 간의 불일치
- 8.3 텅스텐 합금 노즐 설치 및 사용 시 흔히 발생하는 문제
  - 8.3.1 설치 및 작동 문제: 위치 편차 및 부적절한 밀봉
  - 8.3.2 부적절한 디버깅으로 인한 문제: 부정확한 유량 및 압력 보정
  - 8.3.3 작동 조건 적응 문제: 극한 환경에서 성능이 너무 빨리 저하됨
  - 8.3.4 협업 운영 문제: 지원 장비와의 호환성 부족
- 8.4 텅스텐 합금 노즐의 유지 관리 및 문제 해결에서 흔히 발생하는 문제
  - 8.4.1 부적절한 유지관리로 인한 문제: 불완전한 청소 및 검사 부주의
  - 8.4.2 마모 및 부식 문제: 비정상적인 마모 및 심각한 국부 부식
  - 8.4.3 고장 진단 문제: 비정상 흐름 및 누출 원인에 대한 잘못된 판단

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 8.4.4 교체 및 업그레이드 문제: 취약한 부품의 시기적절하지 않은 교체 및 모델 불일치

##### 참수

부록 A: 중국 텅스텐 합금 노즐 표준

부록 B: 텅스텐 합금 노즐에 대한 국제 표준

부록 C: 유럽, 미국, 일본, 한국 및 기타 국가의 텅스텐 합금 노즐 표준

부록 D: 텅스텐 합금 노즐 용어표

참고문헌



CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 노즐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

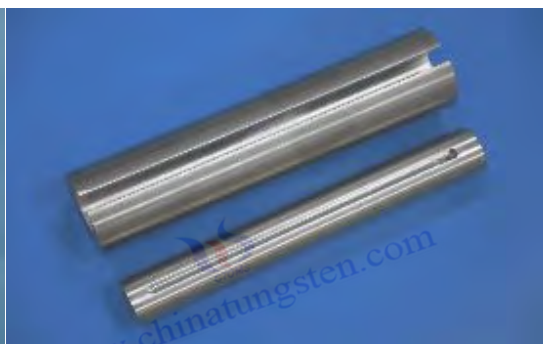
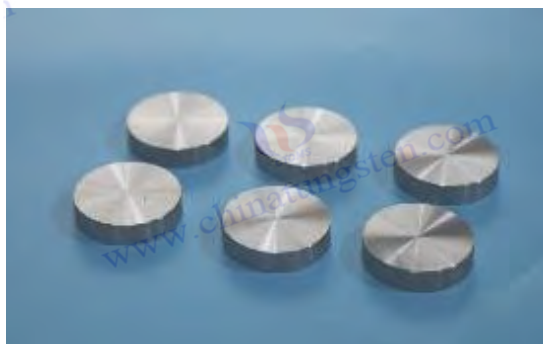
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## 1 장 텅스텐 합금 노즐 이해

### 1.1 텅스텐 합금 노즐이란 무엇입니까?

텅스텐 합금 노즐은 특정 유동 채널 구조를 가진 고밀도, 고강도, 내마모성 기능성 부품입니다. 텅스텐(일반적으로 질량 분율 85% 이상)을 주원료로 하고 니켈, 철, 구리, 코발트 또는 몰리브덴 과 같은 바인더 상을 첨가하여 분말 야금 액상 소결 공정을 통해 제조됩니다. 극한의 작동 조건에서 고압 가스, 액체, 용융 입자 또는 플라즈마를 초고속, 초정밀, 초저발산각으로 방향성 분사하는 데 필수적입니다. 동시에 고온 산화, 연마 침식, 캐비테이션 피로, 열충격 균열 및 고부식성 매체의 복합적인 공격으로 인한 장기적인 손상을 견뎌야 합니다. 기존의 초경합금, 지르코니아 세라믹, 스테인리스 스틸, 티타늄 합금, 심지어 순수 텅스텐 노즐과 비교했을 때, 텅스텐 합금 노즐은 경도, 인성, 밀도, 내열성, 내식성 수명, 그리고 전반적인 비용 효율성 측면에서 질적 비약을 달성했습니다. 텅스텐 합금 노즐은 용사, 고속 산소 연료(HVOF) 용사, 플라즈마 용사, 저온 용사, 고압 워터젯 절단, 레이저 클래딩 분말 공급, 디젤 커먼레일 연료 분사, 가스터빈 연소실, 산업용 샌드블라스팅 및 녹 제거, 정밀 분무, 플라즈마 발생기 와 같은 최첨단 공정에서 가장 핵심적이고 까다로운 스 로트 액추에이터로 자리매김했습니다.

텅스텐 합금 노즐의 등장은 본질적으로 유체역학, 열역학, 표면 공학과 같은 여러 분야와 재료 과학의 심도 있는 통합의 산물입니다. 텅스텐의 매우 높은 녹는점, 경도, 그리고 연화 저항성을 그대로 계승할 뿐만 아니라, 연성 결합체 상을 도입하여 순수 텅스텐과 세라믹의 고유한 취성을 극복하여 "경도와 인성"의 이상적인 조합을 달성했습니다. 동시에, 높은 밀도는 엄청난 질량 관성과 열용량을 제공하여 고속 제트 반동 및 고온 열충격에도 밀리초 수준의 기하학적 안정성을 유지합니다. 제어 가능한 자성과 뛰어난 열전도도를 통해 강력한 전자기장이나 고전력 열부하 환경에서도 안전하게 작동할 수 있습니다. 이러한 다차원적 특성의 궁극적인 균형이 텅스텐 합금 노즐을 수많은 후보 재료와 차별화하며, 분사 정밀도, 사용 수명, 그리고 작동 신뢰성에 대한 가장 높은 요구 조건을 가진 오늘날 산업 공정의 "초크 포인트 가디언"으로 자리매김하게 합니다.

더 넓은 관점에서 볼 때, 텅스텐 합금 노즐은 기능성, 정밀성, 그리고 극한 응용 분야 측면에서 고밀도 합금의 전형적인 연장선상에 있습니다. 텅스텐 합금 노즐은 더 이상 단순한 내마모성 부품이 아니라, 에너지 변환, 물질 전달, 표면 개질, 그리고 환경 차폐를 통합하는 시스템 수준의 핵심 부품입니다. 겉보기에 사소해 보이는 노즐 하나가 전체 생산 라인에서 수억 위안에 달하는 장비의 안정적인 작동 여부, 코팅 품질이 항공우주 등급 기준을 충족하는지, 워터젯 절단 정밀도가 마이크론 수준에 도달하는지, 그리고 연료 분무가 초저배출을 달성하는지를 결정하는 경우가 많습니다.

#### 1.1.1 텅스텐 합금 노즐의 정의 및 기본 구성 요소

텅스텐 합금 노즐은 다음과 같이 정확하게 정의할 수 있습니다. 텅스텐 기반 고밀도 합금(텅스텐 함량 85% 이상)으로 제작된, 정의된 유동 채널 형상을 가진 기능성 부품으로, 냉간 등방성 가압, 진공 또는 수소 액상 소결, 정밀 가공, 그리고 선택적 표면 강화

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

처리를 통해 고압 유체 또는 입자 빔의 초음속/고속 방향 분사를 구현하는 데 사용됩니다. 기본 구성 요소는 유동 채널 시스템, 외부 인터페이스 시스템, 그리고 표면 기능층의 세 가지 핵심 요소로 구성됩니다.

흐름 채널 시스템은 노즐 성능의 결정적인 부분으로, 일반적으로 입구 섹션, 수렴 섹션, 목(최소 단면적), 확장 섹션으로 순서대로 구성됩니다. 일반적인 구성은 라발 구성이지만 필요에 따라 직선 파이프, 벤추리 튜브 또는 다단계 수렴/확장 구조로 설계할 수도 있습니다. 목 직경과 표면 거칠기는 제트 속도, 흐름 안정성 및 에너지 활용을 직접 결정합니다. 외부 인터페이스 시스템은 나사산 연결, 플랜지, 퀵 체인지 클램프, 납땜 내장 부품 또는 일체형 설계를 사용하여 설치 방법에 따라 설계되어 스프레이 건, 부스터 실린더 또는 연소실과의 고정밀 맞춤 및 기밀성을 보장합니다. 표면 기능층은 현대식 텅스텐 합금 노즐을 기존 노즐과 구별하는 주요 이점입니다. 여기에는 붕소화 경화층, PVD TiAlN / CrN / DLC 코팅, 레이저로 채용용한 고밀도층 또는 복합 다층 시스템이 포함되어 침식, 산화, 접착 및 열 충격에 대한 저항성을 더욱 강화하는 데 사용됩니다.

미시적으로 볼 때, 텅스텐 합금 노즐은 2 상 구조를 보입니다. 단단한 텅스텐 입자는 연속적이거나 거의 연속적인 구조를 형성하고, 바인더상은 틈새를 균일하게 채워 네트워크 형태의 코팅을 형성합니다. 텅스텐 입자는 경도와 내마모성을 제공하고, 바인더상은 인성과 열충격 저항성을 제공합니다. 이 두 가지 구조는 노즐이 연마 입자의 수만 번의 충격이나 수천 도의 순간적인 열충격을 받아도 소성 변형이나 취성 칩핑이 발생하지 않도록 보장합니다. 또한, 이러한 구조는 노즐에 탁월한 가공성과 수리성을 부여하여 정밀 CNC 가공을 통해 복잡한 내부 유동 채널과 마이크론 단위의 치수 및 위치 공차를 구현하고, 국부 마모 후 재코팅 또는 채용용을 통해 수명을 여러 번 연장할 수 있도록 합니다.

### 1.1.2 텅스텐 합금 노즐의 분류

형상, 적용 분야, 작동 매체, 표면 강화, 그리고 압력 등급을 아우르는 다차원적 분류 체계를 형성합니다. 각 차원은 명확한 성능 중심점과 전용 공정 경로를 나타냅니다.

노즐은 구성 시스템에 따라 텅스텐-니켈-철 유형(고강도, 고온 저항성), 텅스텐-니켈-구리 유형(비자성, 내식성), 텅스텐-구리 유형(높은 열 및 전기 전도성), 텅스텐-니켈-몰리브덴/레늄 유형(초고온 크리프 저항성), 희토류 또는 카바이드 강화 유형으로 분류됩니다. 유동 채널 형상에 따라 라발 초음속 유형, 벤추리 유형, 직관 유형, 다중 구멍 분할 유형 및 동축 분말 공급 유형으로 분류됩니다. 응용 분야에 따라 열 분무 노즐(HVOF, APS, 콜드 스프레이), 고압 워터젯 노즐, 샌드블라스팅 및 녹 제거 노즐, 연료/가스 분무 노즐, 레이저 클래딩 분말 공급 노즐, 플라즈마 생성기 전극 노즐 및 산업용 세척 노즐로 분류됩니다. 작동 매체 및 압력 수준에 따라 초고압 수매체형, 고속 분말 함유 가스형, 고온 플라즈마형, 저압 분무형으로 분류됩니다. 표면 강화 공정에 따라 붕소 화형, PVD 경질 코팅형, DLC 저마찰형, 레이저 채용해형, 다층 복합 기능성형으로 분류됩니다.

위의 분류 기준을 자유롭게 조합하여 고도로 맞춤화된 제품 포트폴리오를 구축할 수

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있습니다. 예를 들어, 해상 풍력 터빈 블레이드의 녹 제거에 사용되는 텅스텐-니켈-구리 라발 노즐은 비자성, 염수 분무 부식 방지, DLC 코팅, 초고압 수성 매체와의 호환성이라는 네 가지 주요 특성을 동시에 가질 수 있습니다. 반면, 항공 엔진의 HVOF 코팅에 사용되는 텅스텐-니켈-철 노즐은 고온 산화 방지, 붕소 화 경화, 초음속 기류 안정성을 강조합니다. 이처럼 체계적이고 결합 가능한 분류 방식은 업계의 다양한 요구를 충족할 뿐만 아니라 재료 엔지니어에게 명확한 설계 및 선택 경로를 제공하여 각 텅스텐 합금 노즐이 특정 작동 조건에서 최적의 성능과 최대 수명을 달성할 수 있도록 보장합니다.

## 1.2 텅스텐 합금 노즐의 가치: 왜 텅스텐 합금을 선택해야 합니까?

텅스텐 합금 노즐은 지난 20 년 동안 시멘트 카바이드, 세라믹, 스테인리스 스틸, 티타늄 합금, 심지어 순수 텅스텐 노즐까지 빠르게 대체하여 고급 분사 공정의 절대적인 주류가 되었습니다. 그 이유는 가장 까다로운 작업 조건에서 기존 소재로는 달성할 수 없는 다차원적 성능 한계 균형을 달성했기 때문입니다. 즉, 연마 침식을 견딜 만큼 단단하고 취성 파괴를 피할 만큼 강합니다. 수천 도의 순간적인 온도에서도 모양을 유지하고 초고압 수격 현상과 캐비테이션의 복합적인 영향 하에서도 오랫동안 고장이 발생하지 않습니다. 밀도가 높아 진동을 억제할 수 있는 충분한 질량 관성과 국부적인 열 충격을 빠르게 분산시킬 수 있는 우수한 열전도도를 제공합니다. 화학적으로 불활성이어서 강한 산화와 부식을 견딜 수 있으며 정밀 가공 및 표면 기능화를 통해 마이크론 수준의 흐름 채널과 복잡한 인터페이스의 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

### 1.2.1 텅스텐 합금 노즐의 성능 향상은 기존 노즐에 비해 뛰어남

기존 노즐 소재에 비해 텅스텐 합금 노즐은 사용 수명과 공정 품질을 결정하는 거의 모든 핵심 지표에서 질적 도약을 이루었습니다. 초경합금 노즐은 경도가 높지만, 인성이 부족하여 고속 기류나 경질 입자가 포함된 초고압 워터젯의 충격으로 미세 균열이 확산되고 칩핑 파손이 발생하기 쉽습니다. 텅스텐 합금 노즐은 연성 결합제 상을 도입하여 초경합금에 가까운 경도를 유지하면서 충격 인성을 크게 향상시켜 동일한 작동 조건에서 사용 수명을 수십 배까지 연장합니다. 지르코니아 세라믹 노즐은 내열성과 화학적 불활성을 가지고 있지만, 본질적으로 취성이 강하고 열충격이나 기계적 진동에 의해 파손됩니다. 반면, 텅스텐 합금 노즐은 열충격 저항성이 뛰어나 온도 변화가 심한 플라즈마 용사 및 레이저 클래딩과 같은 가혹한 환경에서도 균열 없이 장시간 사용할 수 있습니다.

스테인리스 스틸 및 티타늄 합금 노즐은 일상적인 세척 및 저압 분사에는 적합하지만, 고온 산화 분위기나 부식성이 높은 매체에 노출되면 공식, 산화 또는 연화 불량이 빠르게 발생합니다. 텅스텐 합금 노즐, 특히 텅스텐-니켈-구리 시스템은 산, 알칼리, 염수 분무 및 고온 산화 환경에서 거의 불활성 상태를 유지하며, 적절한 부동태화 또는 코팅 후에도 표면의 질량 손실이나 치수 변화가 거의 없습니다. 순수 텅스텐 및 폴리브덴 노즐은 용점이 매우 높지만, 고온에서 재결정 취화 및 산화 삭마가 발생하기 쉽습니다. 텅스텐 합금 노즐은 재결정을 억제하고 내산화성을 향상시키기 위해 결합제 상을 사용함으로써 순수 금속보다 훨씬 뛰어난 실제 온도 저항 한계와 삭마 저항 수명을 달성합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제트 품질 및 공정 안정성 측면에서, 텅스텐 합금 노즐은 높은 밀도와 매우 낮은 열팽창 계수를 자랑하며, 고속 반동 및 열충격 시에도 기하학적 변형이 최소화됩니다. 노즐의 목 직경과 내벽 거칠기는 장기간 초기 상태를 유지하여 제트 속도, 발산각 및 유량의 높은 일관성을 보장합니다. 반면, 기존 재질의 노즐은 열 변형이나 마모로 인해 제트 품질이 급격히 저하되어 교체를 위한 잦은 가동 중단이 발생하는 경우가 많습니다. 전반적으로 텅스텐 합금 노즐은 기존 노즐의 단점을 하나씩 해결하면서 장점을 더욱 강화하여 "거의 사용 불가능"에서 "대체 불가능"으로 도약합니다. 이는 또한 코팅 결합 강도 향상, 커프 폭 축소, 미세 분무 입자, 세척 효율 향상 등 후속 공정의 품질 향상에에도 기여합니다.

### 1.2.2 일반적인 시나리오에서 텅스텐 합금 노즐의 가치

항공기 엔진의 열 차단 코팅을 위한 초음속 화염 분사(HVOF) 시나리오에서, 노즐은 지르코늄 산화물 입자를 포함하는 고속, 고온 기류의 스키링(scouring)과 심각한 열충격을 동시에 견뎌야 합니다. 카바이드 노즐은 일반적으로 심각한 플레어링과 코팅 품질 저하가 발생하기 전까지 수백 시간밖에 지속되지 않습니다. 반면, 입자 침식 및 고온 연화에 대한 탁월한 내성을 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 수천 시간의 단일 부품 수명을 쉽게 달성할 수 있습니다. 이는 노즐 교체로 인한 가동 중단 횟수와 코팅 재작업률을 크게 줄여 항공기 엔진 유지보수 회사의 엔진당 코팅 비용을 수십 퍼센트 포인트 절감하는 동시에 열 차단 코팅의 접합 강도와 단열 성능을 항상 최고 수준으로 유지합니다.

선박 및 해상 풍력 발전용 고압 수중 녹 제거 분야에서 기존 텅스텐 카바이드 노즐은 염수 분무와 초고압의 복합적인 영향으로 수 주 이내에 캐비테이션 피트(cavitation pit)와 스로트(throat) 확장 현상이 발생하는 경우가 많아 녹 제거량이 감소하고 용수 사용량이 증가합니다. 텅스텐-니켈-구리 합금 노즐을 DLC 또는 CrN 코팅과 함께 사용하면 부식과 캐비테이션을 완전히 제거할 뿐만 아니라 단일 노즐의 수명을 수천 시간 이상으로 연장하여 녹 제거 작업 시간을 노즐 교체 횟수에서 거의 유지보수 없이 확보할 수 있도록 하여 해양 건설의 효율성과 안전성을 크게 향상시킵니다.

고급 레이저 클래딩 동축 분말 공급 시나리오에서 분말 공급 노즐 내벽의 분말 부착 또는 마모 및 팽창은 분말 빔 분산, 불안정한 용융 풀, 그리고 성형 정밀도 저하로 이어질 수 있습니다. 텅스텐 합금 노즐의 경면 등급 내벽과 매우 낮은 마찰 계수는 부착 없이 원활한 분말 흐름을 보장하며, 스로트 크기는 수천 시간 동안 변하지 않아 단일 클래딩 층의 폭 변동을 마이크로미터 수준으로 제어합니다. 이는 원자력 발전소 주 파이프라인 수리 및 광산 유압 지지대 재제조와 같은 고부가가치 수리 프로젝트에 필수적인 정밀성과 신뢰성을 보장합니다.

의료용 분무 및 정밀 분무 분야에서 비자성 텅스텐-니켈-구리 노즐은 약물 입자 궤적 및 증착 균일성에 대한 자기장 간섭의 영향을 완전히 제거하여 스텐트 약물 코팅 두께의 전례 없는 일관성을 구현하고 이식형 의료기기의 임상 성공률과 환자 안전을 직접적으로 향상시킵니다. 이러한 일반적인 상황에서 수명 연장, 품질 향상, 비용 절감, 위험 감소라는 가시적인 이점이 바로 텅스텐 합금 노즐을 선택하는 가장 큰 가치를 구성하며, "고가의 고급 옵션"에서 "장기적으로 가장 경제적이고 필수적인 솔루션"으로 탈바꿈시킵니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1.3 텅스텐 합금 노즐의 기본 특성

텅스텐 합금 노즐은 극한 조건에서도 장기간 기하학적 정확도, 분사 품질, 그리고 기능적 무결성을 유지할 수 있습니다. 이는 근본적으로 물리적, 기계적, 열적, 화학적, 그리고 기술적 측면에서 재료 자체의 다양한 특성에 기인합니다. 이러한 특성들은 단독으로 존재하는 것이 아니라, 분말 야금의 이중상 구조, 바인더상 최적화, 그리고 표면 엔지니어링의 시너지 효과를 통해 눈에 띄는 약점이 거의 없는 고도로 결합된 성능 시스템을 형성합니다. 이를 통해 텅스텐 합금 노즐은 거의 모든 핵심 지표에서 기존 노즐 소재를 크게 능가하며, 현대의 고급 분사 공정 구축을 위한 기반이 될 것입니다.

첫째, 매우 높은 경도와 뛰어난 내마모성을 자랑합니다. 텅스텐 입자 자체가 매우 단단하여 연속 또는 반연속 골격을 형성할 때 노즐의 전체 경도는 일반적인 경질 합금이나 스테인리스강보다 훨씬 높습니다. 알루미늄, 탄화규소, 유리 비드, 가넷, 심지어 다이아몬드 입자에 의한 고속 침식에도 표면에는 질량 손실이 거의 없는 매우 얇은 소성 흠만 형성되어, 노즐의 직경과 내벽의 평활도가 수천 시간 동안 거의 변하지 않습니다. 둘째, 열충격 및 캐비테이션에 대한 높은 인성과 복합적인 손상 저항성을 보입니다. 연성 결합재의 존재는 순수 텅스텐과 세라믹의 고유한 취성을 완전히 변화시켜 수천 도의 순간적인 플라즈마 제트, 초고압 수격 충격 또는 급격한 열 변화에 노출될 때 노즐이 취성 파괴 또는 피로 균열을 방지하여 복잡한 응력 조건에서의 사용 수명을 크게 연장합니다.

고온 안정성 또한 중요한 특징입니다. 텅스텐 합금 노즐은 높은 재결정 온도, 낮은 열팽창 계수, 그리고 최소한의 고온 강도 저하를 보입니다. 1000° C 를 초과하는 지속적인 온도 또는 2000° C 를 초과하는 순간적인 온도에서도 유동 채널 형상은 마이크론 수준의 안정성을 유지하여 기존 소재에서 흔히 발생하는 열 연화, 열 변형, 산화 제거 문제를 완벽하게 방지합니다. 뛰어난 화학적 불활성과 내식성 또한 주목할 만합니다. 특히 텅스텐-니켈-구리 시스템은 산, 알칼리, 염수 분무, 습열 및 다양한 유기 용매에서 거의 눈에 띄는 부식을 보이지 않습니다. 표면 부동태화 또는 기능성 코팅을 통해 가장 가혹한 화학 및 해양 환경에서도 장기간 사용할 수 있습니다.

높은 밀도는 질량 관성 및 열용량 측면에서 이점을 제공하여 고속 제트 반동 및 국부 열충격 시 노즐 진동을 최소화하고 열 반응을 느리게 하여 제트 안정성과 포인팅 정확도를 보장합니다. 뛰어난 열전도도는 목구멍에 축적된 열을 외부 냉각 시스템으로 신속하게 전달하여 국부 과열로 인한 재료 열화를 방지합니다. 자기 특성(완전 비자성에서 약자성까지 조절 가능) 을 조절하여 강한 자기장이나 정밀한 전자기 환경에서도 와전류 열이나 궤적 편차 없이 안전하게 사용할 수 있습니다. 매우 낮은 열팽창 계수와 뛰어난 치수 안정성은 넓은 온도 범위 에서 노즐과 강철, 티타늄, 세라믹과 같은 기관 간의 안정적인 접촉을 보장하여 열 팽창 및 수축으로 인한 풀림이나 응력 집중을 방지합니다.

마지막으로, 텅스텐 합금 노즐은 뛰어난 정밀 가공성과 표면 기능화 능력을 갖추고 있습니다. 냉간 등방성 성형, 정밀 소결, 다축 CNC 가공을 통해 복잡한 내부 유동 채널,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



미크론 수준의 치수 및 위치 공차, 그리고 거울과 같은 내벽을 구현할 수 있습니다. 붕소화, PVD, CVD, DLC, 레이저 재용융과 같은 표면 강화 방법을 구현하여 내마모성, 접착 방지, 그리고 내산화성을 한 단계 더 높일 수 있습니다. 이러한 근본적인 특성들은 "단단하지만 취성이 없고, 고온이지만 연성이 아니며, 부식성이 있지만 부식성이 없고, 정밀하지만 수리가 가능한" 완벽한 형태를 이룹니다. 바로 이러한 일련의 특성들이 텅스텐 합금 노즐을 수많은 후보 재료 중에서 돋보이게 하며, 오늘날의 용사, 워터젯, 레이저 클래딩, 정밀 분무, 플라즈마 생성, 그리고 고온 연소 공정에서 가장 중요하고 신뢰할 수 있으며, 매우 신뢰할 수 있는 코어 액추에이터로 자리매김하게 합니다. 각각의 특징은 산업 현장에서 가장 골치 아픈 문제점을 직접적으로 해결하며, 이러한 모든 특징이 결합되어 대체할 수 없는 포괄적 가치를 창출합니다.

#### 1.4 텅스텐 합금 노즐의 산업적 위치 및 적용 시나리오

텅스텐 합금 노즐은 "고품질 내마모성 부품"에서 현대의 고급 제조 공급망에서 필수적인 "공정 활성화 요소"이자 "성능 한계 결정 요소"로 발전했습니다. 텅스텐 합금 노즐은 더 이상 필수 소모품이 아니라, 여러 최첨단 공정의 구축, 안정성 및 궁극적인 성능을 위한 필수 요소입니다. 노즐 성능이 부족하면 코팅 접착력 저하, 절삭 정밀도 저하, 미립자 크기 분산, 세척 효율의 급격한 저하, 심지어 장비 가동 중단까지 연쇄적인 결과를 초래할 수 있습니다. 따라서 항공우주, 에너지 및 전력, 의료기기, 전자 제조, 조선 및 해양 엔지니어링, 자동차, 적층 제조와 같은 고부가가치 분야에서 텅스텐 합금 노즐은 "핵심 핵심 소모품"이자 "전략적 기능 부품"으로 명확하게 정의되었습니다. 텅스텐 합금 노즐의 선정, 공급 안정성, 그리고 기술 반복 속도는 OEM 및 공정 계약업체의 핵심 공급망 관리 시스템에 직접 통합됩니다.

##### 1.4.1 고급 제조 산업 체인에서 텅스텐 합금 노즐의 역할

첨단 제조 산업 체인에서 텅스텐 합금 노즐은 에너지 변환, 정밀한 재료 이송, 그리고 표면 기능 구축에 있어 궁극적인 역할을 하는 최첨단의 까다로운 "초크 포인트"를 차지합니다. 고압 펌프, 플라즈마 전원 공급 장치, 레이저, 연소실과 같은 고출력 에너지 장비의 "출구" 역할을 하며, 분말, 액적, 제트, 플라즈마, 그리고 작업물 표면이 물리화학적 상호작용을 하는 "최초 접촉 표면"이기도 합니다. 단일 노즐의 사소한 고장조차도 수십만에서 수억 위안 상당의 상류 장비를 작동 불능 상태로 만들어 수십 개의 하류 공정을 재작업해야 할 수 있습니다.

열분사 및 표면 엔지니어링 체인에서 텅스텐 합금 노즐은 입자 비행 속도, 온도 이력, 충격 운동 에너지를 결정하여 코팅 밀도, 접합 강도, 잔류 응력 수준을 직접적으로 고정합니다. 이는 항공 엔진용 열 차단 코팅, 가스터빈 블레이드용 내마모성 코팅, 유압 지지대용 내부식성 코팅이 설계 수명에 도달하는 데 결정적인 병목 현상이 됩니다. 고압 워터젯 및 초정밀 가공 체인에서 텅스텐 합금 노즐은 목부 기하학적 안정성을 유지하면서 장시간 초고압을 견딜 수 있는 유일한 부품으로, 커프 폭, 표면 거칠기, 재료 사용률을 직접적으로 결정합니다. 레이저 클래딩 및 적층 재제조 체인에서 동축 분말 공급 노즐의 내벽 평활도와 치수 안정성은 분말 사용률, 용융 풀 안정성, 그리고 단일 패스 성형

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정확도를 결정합니다. 텅스텐 합금 노즐은 대형 원자력 발전소 부품 수리 및 가공이 어려운 항공우주 부품 재제조에서 "스크랩으로 대체"를 달성하는 핵심 구현 장치입니다.

연료 분사 및 정밀 분무 체인에서 텅스텐 합금 노즐은 캐비테이션 및 고온 산화에 대한 매우 높은 저항성을 통해 커먼 레일 시스템 노즐 오리피스가 수만 시간 동안 팽창하지 않도록 하여 더욱 완전 연소되고 더욱 깨끗한 배기가스를 생성합니다. 플라즈마 생성 및 진공 코팅 체인에서 텅스텐 합금 노즐은 아크 가둠 및 플라즈마 가속을 위한 스로트(throat) 역할을 하며, 전극 재료의 주요 운반체 역할을 하여 코팅 균일성과 생산 사이클 시간을 직접적으로 결정합니다. "단 하나의 변화가 전체에 영향을 미치는" 이러한 전략적 포지셔닝은 텅스텐 합금 노즐의 연구, 개발, 제조 및 공급망 관리를 주요 장비 제조업체(OEM)와 동등한 수준으로 끌어올리는 데 기여합니다. 선도적인 사용자들은 재료 배합, 유로 설계 및 표면 엔지니어링을 전 세계적으로 선도적으로 유지하기 위해 공급업체와 장기적인 전략적 파트너십 또는 공동 연구소를 구축하는 경우가 많습니다.

#### 1.4.2 텅스텐 합금 노즐의 일반적인 적용 시나리오

텅스텐 합금 노즐은 명확하고 고도로 전문화된 시나리오 범주를 형성했으며, 각 범주는 특정 작업 조건과 전문화된 설계 경로에 해당합니다.

열용사 및 표면 엔지니어링은 고속 산소 연료(HVOF), 플라즈마 용사(APS), 저온 용사, 고속 아크 용사를 포함하는 가장 크고 성숙한 시장입니다. 노즐은 주로 텅스텐-니켈-철 라발 구조를 사용하여 고온 입자 침식 및 열충격에 대한 저항성을 강조합니다. 단일 노즐의 수명은 코팅의 배치 일관성을 결정합니다. 고압 워터젯 및 초정밀 가공 분야에는 순수 절단, 연마 워터젯 절단, 선박 녹 제거, 원자력 시설 제염 등이 있습니다. 노즐은 주로 텅스텐-니켈-구리 벤투리형이며, DLC 또는 붕소 화 층을 결합하여 초고압 하에서 캐비테이션 및 부식으로부터 이중 보호 기능을 제공합니다.

레이저 클래딩 및 적층 재제조는 주로 동축 분말 공급 노즐과 사이드 샤프트 노즐을 사용하며, 매우 매끄러운 내벽, 비점착성 분말, 그리고 레이저 반사 방지 성능이 요구됩니다. 텅스텐-니켈-구리 또는 텅스텐-구리 기반 노즐이 주요 소재로 사용되며, 이는 원자력, 항공우주 및 광산 산업에서 고부가가치 부품 수리에 핵심 소모품입니다. 연료 및 가스 분무 및 연소 분야에는 디젤 커먼레일 노즐, 항공 등유 노즐, 산업용 보일러 분무 노즐 등이 있으며, 고온 산화, 탄소 축적 및 높은 분무 품질에 대한 저항성이 특히 중요합니다. 텅스텐-니켈-철 또는 희토류 도핑 강화 노즐이 일반적으로 사용됩니다.

산업용 세척 및 표면 전처리 시나리오는 고압 수중 녹 제거, 페인트 제거, 산화 스케일 제거를 포함하며, 주로 텅스텐-니켈-구리 재질의 라발 노즐 또는 팬형 노즐과 신속 교체 구조를 사용하여 매우 높은 운영 효율과 매우 낮은 유지보수 빈도를 목표로 합니다. 플라즈마 생성 및 진공 코팅 시나리오에는 플라즈마 분무 건 전극 노즐, 진공 플라즈마 세척 노즐, PVD 아크 소스 노즐이 포함되며, 높은 열전도도, 아크 부식 저항성, 비자성 특성이 요구되며, 종종 텅스텐-구리 또는 텅스텐-니켈-구리 시스템을 사용합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



정밀 분무 및 분말 제조 시나리오에는 약물 분무 건조, 금속 분말 분무, 향수 분무 등이 포함되며, 매우 미세한 입자 크기와 좁은 분포가 요구됩니다. 이를 위해서는 초정밀 텅스텐 합금 노즐과 초정밀 스토포를 통해 서브마이크론 수준의 액적 제어가 필요합니다. 이러한 시나리오는 작동 조건이 매우 다양하지만, 모두 공통적인 원칙을 공유합니다. 공정이 고도화될수록, 성능 요구 사항이 더욱 까다로워질수록, 안정성 허용 오차가 낮아질수록 텅스텐 합금 노즐의 침투율이 높아지고 대체 불가능한 특성이 발휘됩니다. 텅스텐 합금 노즐은 세상을 바꾸는 모든 첨단 제조 기술에 조용히 자리 잡으며, 인간의 산업 역량이 끊임없이 도약하는 데 있어 눈에 보이지 않지만 중요한 지렛대가 되어 왔습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 노즐

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## 제 2 장 : 텅스텐 합금 노즐의 구조

### 2.1 텅스텐 합금 노즐의 주요 구조 요소

텅스텐 합금 노즐은 형태가 매우 다양하지만, 핵심 임무는 동일합니다. 바로 상류 압력, 열 또는 전기 에너지를 효율적이고 안정적이며 제어 가능한 방식으로 지향성 고속 제트로 변환하는 것입니다. 이를 위해서는 입구 수용 및 유동 안정화 시스템, 테이퍼형 가속부, 스포트 에너지 변환 코어, 팽창 및 정류부, 형상 인터페이스 및 냉각 시스템, 표면 기능층, 비산 방지 및 진동 방지 구조 등 매우 정교하고 상호 연결된 구조적 요소가 필요합니다. 이러한 각 요소는 제트 속도, 발산각, 유동 안정성, 내식성 수명, 그리고 호스트 시스템과의 호환성을 직접적으로 결정하는 필수 요소입니다. 텅스텐 합금의 고밀도, 고경도, 고인성, 그리고 낮은 열팽창 계수는 이러한 구조적 요소에 정밀하게 통합되어, 노즐이 극한의 작동 조건에서도 "극도의 에너지 변환 효율"과 "매우 긴 기하학적 유지력"을 달성할 수 있도록 합니다.

#### 2.1.1 텅스텐 합금 노즐의 기본 구조: 입구, 유로 및 출구

텅스텐 합금 노즐은 입구, 유로, 출구의 세 가지 기능 모듈로 단순화할 수 있습니다. 그러나 각 모듈에는 매우 높은 수준의 설계 및 제조 전문성이 요구됩니다.

입구부는 노즐과 상류 에너지원 사이의 유일한 인터페이스입니다. 입구부의 주요 역할은 난류, 와류 또는 압력 맥동을 포함할 수 있는 유입 유동을 입구 손실을 최소화하면서 매끄러운 층류 또는 거의 층류로 빠르게 변환하는 것입니다. 텅스텐 합금 노즐은 일반적으로 가이드 베인이 있는 부드럽게 확장되거나 벌어지는 입구를 특징으로 합니다. 내벽은 경면 연마되어 경계층 분리 및 와류 거리 형성을 억제하기 위해 매우 높은 동축성을 유지합니다. 초음속 화염 분사 및 고압 워터젯 노즐의 경우, 입구부에 다공성 압력 안정화 챔버 또는 허니콤 정류기가 통합되어 압력 변동을 더욱 완화하고 목 부분에서 균일한 유동을 보장합니다. 텅스텐 합금의 높은 밀도와 고유 질량 관성은 여기서 중요한 역할을 하며, 고속 반동 시 입구부가 미세 진동을 거의 받지 않도록 하여 소스에서 분사 방향의 장기적인 안정성을 보장합니다.

유동 채널은 전체 노즐의 핵심이며, 기능에 따라 수렴부와 목부로 더 세분화됩니다. 수렴부는 매끄럽고 연속적인 곡선(일반적으로 5 차 다항식 또는 대수 나선)을 사용하여 정압 에너지를 운동 에너지로 효율적으로 변환합니다. 텅스텐 합금의 매우 낮은 열팽창 계수와 매우 높은 치수 안정성은 수렴부의 윤곽이 고온 또는 초고압에서 거의 변형되지 않도록 하여 가속도 구배의 정밀한 설계를 보장합니다. 목부는 초음속 노즐의 가장 작은 단면이자 음파 표면의 위치입니다. 목부의 직경과 진원도는 최종 제트 속도와 질량 유량을 직접적으로 결정합니다. 텅스텐 합금 노즐의 목부는 일반적으로 일체형 성형, 정밀 연삭, 레이저 마감 공정을 결합하여 직경 공차와 진원도 오차를 마이크로미터 수준 이내로 제어하고 표면 거칠기를 거울과 같은 수준으로 유지하여 유동 저항과 난류 소음을 이론적인 한계까지 줄입니다. 동시에 목 부분은 침식, 캐비테이션, 열충격, 산화의 영향을 가장 많이 받는 부위입니다. 텅스텐 합금은 높은 경도, 높은 인성, 고온 연화 저항성을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



모두 갖추고 있어 수만 번의 입자 충격이나 수천 시간의 고온 화염 침식에도 초기 형상을 유지하며, 기존 소재를 훨씬 능가합니다.

아음속 노즐에서 출구부는 주로 정류 및 감압 부품 역할을 합니다. 초음속 노즐에서는 라발 팽창부 역할을 하며, 목구멍에서 이미 초음속인 공기 흐름을 음속의 두 배 또는 세 배까지 가속하는 동시에 제트 발산각과 속도 균일성을 제어합니다. 텅스텐 합금 노즐의 팽창부 내벽은 경면 연마 처리되어 등엔트로피 팽창 곡선 설계를 엄격히 준수합니다. 미세한 단차나 거칠기는 충격파를 유발하여 에너지 손실 및 제트 발산으로 이어질 수 있습니다. 출구 단면은 종종 날카로운 칼날 모양이나 모따기된 얇은 벽 구조로 설계되어 출구 난류를 줄이고 용융 입자나 액적이 단면에 쌓여 결절을 형성하는 것을 방지합니다. 일부 고급 노즐은 출구 바깥쪽 가장자리에 에어 커튼 또는 냉각 링을 통합하여 제트가 주변 공기를 혼입하여 발생하는 산화 및 발산을 더욱 억제합니다.

세 가지 주요 모듈(입구, 유로, 출구)은 텅스텐 합금 소재의 고강도와 정밀 가공성을 활용하여 일체형으로 제작되거나 정밀하게 조립되어 매우 견고한 전체로 제작됩니다. 이를 통해 내부 유로는 막대한 축 방향 반력, 반경 방향 열응력 및 진동 하중을 받더라도 설계된 상태를 유지합니다. "입구에서 출구까지 높은 충실도"라는 이러한 구조적 특성은 텅스텐 합금 노즐의 장기적으로 안정적이고 효율적이며 정밀한 분사 출력을 보장하는 근본적인 요소이며, 일반 소재로 제작된 노즐과는 비교할 수 없는 근본적인 차이를 보여줍니다.

## 2.1.2 텅스텐 합금 노즐의 구조적 매개변수

텅스텐 합금 노즐은 제트 속도, 유동 특성, 발산각, 에너지 효율, 그리고 노즐 자체의 수명을 결정하는 핵심 변수입니다. 이러한 변수들은 임의로 설정되는 것이 아니라, 유체 역학 이론, 재료 공차 한계, 그리고 특정 공정 목표에 기반한 정밀한 계산, 시뮬레이션 반복, 그리고 광범위한 실험 검증을 통해 결정됩니다. 텅스텐 합금 소재의 고강도, 고경도, 낮은 열팽창, 그리고 뛰어난 가공성은 이러한 이론적으로 최적의 변수들을 매우 높은 정밀도로 물리적 실체로 정확하게 재현할 수 있게 함으로써, 실제 작업 조건에서 이상적인 유동장과 가장 긴 기하학적 유지력을 달성합니다.

### 2.1.2.1 텅스텐 합금 노즐의 오리피스 매개변수

오리피스 매개변수는 주로 입구 직경, 최소 스로트 직경, 출구 직경 간의 매칭 관계를 포함하며, 그중 스로트 직경은 가장 중요하고 민감한 제어 변수입니다. 스로트 직경은 질량 유량, 임계 압력비, 최종 제트 속도를 직접적으로 결정하며, 노즐에서 침식, 캐비테이션, 열충격이 가장 집중적으로 발생하는 부분이기도 합니다. 스로트 직경을 선택할 때는 공정 요구 사항(절삭 두께, 코팅 증착 속도, 세척 폭 등)과 재료 허용 오차 간의 최적의 균형을 찾아야 합니다. 직경이 너무 작으면 유량 부족, 압력 초과, 캐비테이션 악화로 이어지고, 직경이 너무 크면 제트 속도 감소, 에너지 사용량 감소, 침식 분포의 과도한 분산을 초래합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 합금 노즐은 일반적으로 일체 성형 후 정밀 내부 연삭, 호닝 또는 유동 연마를 통해 제작 됩니다. 진원도, 원통도, 표면 거칠기는 모두 마이크론 또는 서브미크론 수준에 이르며, 기존 소재의 가공 한계를 훨씬 뛰어넘습니다. 이처럼 고정밀 스포트는 스포트 단면 전체에 걸쳐 제트의 속도 분포를 매우 균일하게 유지하여 국부적인 과속으로 인한 초기 캐비테이션 피트 및 오리피스 확장을 방지합니다. 동시에, 텅스텐 합금의 높은 밀도와 인성은 스포트에 탁월한 변형 저항성을 부여합니다. 초고압 워터젯이나 경질 입자가 포함된 고속 기류에 장시간 노출되어도 스포트 직경은 매우 느리게 변하여 수천 시간 동안 제트 매개변수의 배치 일관성과 공정 안정성을 보장합니다.

입구 직경과 목 직경의 비율은 수축부의 압력 회복 능력과 유동 분리 위험을 결정하는 반면, 출구 직경(초음속 노즐의 팽창부 끝 직경)과 목 직경의 비율은 팽창비와 최종 마하수를 결정합니다. 텅스텐 합금 노즐은 고정밀 CNC 가공과 온라인 광학 측정을 통해 이 세 가지 구성 요소의 비율이 설계 값에 엄격하게 부합하도록 하여 유동 충격과의 위치와 강도, 제트 코어 영역의 길이를 완벽하게 제어할 수 있습니다. 오리피스 매개변수에 대한 이러한 극한의 제어는 텅스텐 합금 노즐이 열 분무에서 초고속 입자 속도, 워터 제트에서 매우 좁은 슬릿, 분말 공급에서 매우 미세한 분말 묶음을 달성하는 핵심 재료 기반입니다.

#### 2.1.2.2 텅스텐 합금 노즐의 원뿔 각도 매개변수

원뿔 각도 매개변수는 주로 수축 및 팽창 섹션의 원뿔 각도를 나타내며, 이는 함께 유동 가속도 기울기, 충격과 구조 및 제트 발산 특성을 결정합니다. 수축 원뿔 각도는 압력 에너지의 운동 에너지로의 변환 효율과 입구에서 목까지의 경계층 분리 경향에 영향을 미칩니다. 팽창 원뿔 각도는 초음속 기류의 팽창 균일성, 충격과 강도 및 출구 속도 분포를 결정합니다. 너무 큰 수축 각도는 유동 분리 및 에너지 손실로 이어지는 반면, 너무 작은 각도는 너무 긴 노즐과 집중된 열 부하를 초래합니다. 너무 큰 팽창 각도는 과팽창 충격과 제트 발산을 생성하는 반면, 너무 작은 각도는 불충분한 팽창 및 속도 잠재력의 과소 활용을 초래합니다.

텅스텐 합금 노즐은 일반적으로 1 차원 등엔트로피 유동 이론과 3 차원 CFD 시뮬레이션 최적화를 결합하여 도출되며, 고정밀 5 축 가공 및 레이저 스캐닝 검사를 통해 내부 원뿔 표면 프로파일 편차를 최소화합니다. 텅스텐 합금의 매우 낮은 열팽창 계수와 고온 치수 안정성은 상온에서 수천 섭씨 온도까지 설계된 원뿔 각도가 거의 변하지 않도록 하여 충격과 위치와 제트 구조의 장기적인 예측 가능성을 보장합니다. 특히 초음속 화염 분사 및 저온 분사 노즐의 경우, 팽창부의 원뿔 각도가 미세하게만 편차가 있어도 입자 속도와 온도 분포가 크게 분산될 수 있습니다. 텅스텐 합금 노즐의 가공 정밀도와 재료 안정성은 이러한 분산을 최소화하여 코팅 밀도와 접합 강도를 최고 수준으로 유지합니다.

또한, 텅스텐 합금 노즐은 경계층 분리를 더욱 억제하고, 속도 균일성을 최적화하며, 소음을 줄이기 위해 팽창부에 가변적인 원뿔 각도 또는 미세 구조를 사용하는 경우가 많습니다. 이러한 복잡한 원뿔 각도 곡선의 구현은 전적으로 텅스텐 합금의 뛰어난 정밀 가공성과 높은 강성에 의존합니다. 바로 이러한 오리피스 직경 및 원뿔 각도 매개변수의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



매우 정밀한 제어와 장기적인 유지 관리를 통해 텅스텐 합금 노즐은 가장 까다로운 유동장 환경에서 이론과 실제의 거의 완벽한 일치를 달성하여, 고성능 분사 공정의 성능 한계를 실질적으로 달성할 수 있습니다.

### 2.1.2.3 텅스텐 합금 노즐의 길이 매개변수

길이는 텅스텐 합금 노즐 설계에서 3 차원 변수로, 오리피스 직경 및 원뿔 각도만큼 중요합니다. 여기에는 수축부의 길이, 목 직선부의 길이, 팽창부의 길이, 그리고 전체 노즐 길이가 포함됩니다. 길이 설계는 단순히 임의로 늘리거나 줄이는 문제가 아니라 유체 역학, 열 전도, 그리고 응력 분포의 다중장 결합의 결과입니다. 수축부가 지나치게 짧으면 유동이 완전히 발달하기 전에 목으로 유입되어 분리 와류와 에너지 손실이 발생합니다. 팽창부가 지나치게 짧으면 팽창이 불충분하고 속도 퍼텐셜이 불완전하게 방출됩니다. 팽창부가 지나치게 길면 마찰 손실과 누적된 열 부하가 증가하여 충격과 구조가 제어되지 않게 됩니다. 목 직선부의 길이는 음파 표면의 안정성과 조기 충격과 발생 여부를 직접적으로 결정합니다.

텅스텐 합금은 상온에서 수천 섭씨 온도, 대기압에서 수백 메가파스칼에 이르는 극한의 온도 범위에서 이론적으로 최적의 길이를 밀리미터 수준의 정밀도로 유지할 수 있도록 합니다. 일반 재질의 노즐은 고온 또는 고압에서 열 변형이나 소성 항복으로 인해 길이 드리프트가 발생하는 경우가 많으며, 이로 인해 신중하게 설계된 유동장이 즉시 붕괴됩니다. 그러나 텅스텐 합금 노즐은 길이 매개변수를 진정한 "상수"로 취급합니다. 초음속 화염 분사 노즐의 경우, 팽창부의 길이는 고온, 고속 영역에서 입자의 체류 시간이 최적의 용융 상태에 도달하는지 여부를 결정합니다. 고압 워터젯 노즐의 경우, 목부 직선부의 길이는 캐비테이션 기포 붕괴 위치가 가장 취약한 목부 입구에서 멀리 떨어져 있는지 여부를 결정합니다. 레이저 분말 공급 노즐의 경우, 전체 길이와 분말-가스 혼합 챔버의 일치 여부는 분말 빔이 레이저 초점 내에 정확하게 집중되는지 여부를 결정합니다. 텅스텐 합금은 길이 매개변수를 유지하는 데 있어 매우 긴 수명의 충실성을 가지고 있어 이러한 중요한 공정의 창을 "수십 분"에서 "수천 시간"으로 확장하여 실험실 수준에서 산업화 단계로의 진정한 도약을 이루었습니다.

### 2.1.2.4 텅스텐 합금 노즐의 다중 매개변수 협업 설계

현대의 텅스텐 합금 노즐은 오래전부터 단일 매개변수의 조잡한 조정 시대를 넘어, 개구부, 원뿔 각도, 길이, 표면 거칠기, 목 직선도, 재료 조성, 표면 코팅의 7 가지 차원을 통합하는 글로벌 협업 최적화 단계에 접어들었습니다. 설계 프로세스는 일반적으로 1 차원 등엔트로피 유동 이론을 사용하여 초기 프레임워크를 구축하는 것으로 시작하여, 3 차원 점성 CFD 를 사용하여 경계층과 충격파 상호작용을 정밀하게 포착합니다. 이어서 열-구조 결합 유한 요소법을 사용하여 고온 변형 및 응력 분포를 검증합니다. 마지막으로 위상 최적화 및 머신 러닝을 도입하여 수천 개의 매개변수 조합을 글로벌 최적화하여 주어진 출력 및 입자 또는 액적 크기에서 가장 높은 제트 속도, 가장 작은 발산각, 가장 낮은 목 벽 열유속 밀도, 그리고 가장 긴 전체 수명을 달성하는 고유한 형상을 찾습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

텅스텐 합금만이 이처럼 극도로 복잡한 협업 설계 결과를 진정으로 지원할 수 있습니다. 텅스텐 합금은 설계자들이 초슬립 중형비, 초박막 두께, 가변 곡률 원뿔 표면, 내부 표면 미세 구조를 과감하게 채택하면서도 실제 작업 조건에서 수천 시간 동안 모든 미크론 수준의 특성을 그대로 유지할 수 있도록 합니다. 결과적으로 동일한 노즐로 동일한 에너지 소비로 입자 속도를 10 배 높이고, 워터젯 커팅 폭을 거의 절반으로 줄이며, 분말 공급 효율을 30% 이상 높이고, 단일 노즐 수명을 5~10 배 연장할 수 있습니다. "시행착오"에서 "정밀 예측"으로 이어지는 이러한 설계 혁신은 텅스텐 합금 노즐의 지속적인 선도적 성능의 원동력이자, 최첨단 제조 공정의 한계를 끊임없이 뛰어넘는 숨은 영웅입니다.

### 2.1.3 텅스텐 합금 노즐의 구조적 유형

텅스텐 합금 노즐은 직선형, 벤추리형, 가변 단면 라발형, 다단 라발형, 동축 분말 공급형, 다공 분사형, 부채꼴/평평형 등 8 가지 주요 구조군으로 구성됩니다. 각 유형은 특정 분사 형태와 적용 시나리오에 적합하며, 모두 텅스텐 합금 소재의 높은 정밀성과 긴 수명 충실도를 기반으로 합니다.

#### 2.1.3.1 직구형 텅스텐 합금 노즐

직선형 텅스텐 합금 노즐은 구조가 가장 단순하지만 제작이 가장 어렵습니다. 이 노즐의 유동 채널은 일정한 직경을 가진 원통형 구멍이거나 아주 미세한 테이퍼만 있으며, 뚜렷한 수축-팽창 구조가 없고, 상류의 고압에 전적으로 의존하여 고속 제트를 직접 형성합니다. 일반적인 적용 분야로는 초고압 순수 절삭 노즐, 디젤 커먼레일 노즐, 일부 저압 플라즈마 세정 노즐, 그리고 고압 팬형 세정 노즐 등이 있습니다.

겉보기에 단순해 보이는 직선 오리피스에는 재료와 공정에 거의 강박적인 요구를 가합니다. 오리피스 직경은 수만 시간 동안 팽창해서는 안 되고, 내벽은 거울과 같아야 하며 캐비테이션 피트가 발생하지 않아야 하며, 끝면은 날카롭고 축에 완전히 수직이어야 합니다. 그렇지 않으면 제트가 즉시 발산하거나, 편향되거나, 불연속적이 됩니다. 텅스텐 합금, 특히 텅스텐-니켈-구리 시스템은 캐비테이션 및 부식에 대한 탁월한 저항성, 높은 인성, 그리고 치수 안정성을 갖추고 있어 직선 오리피스 노즐의 절대적인 기준이 되었습니다. 제조는 냉간 등방성 가압, 다단계 심공 드릴링, 다이아몬드 호닝, 유동 연마, 그리고 레이저 정밀 마무리를 결합하여 미크론 또는 심지어 서브미크론 범위 내에서 오리피스 직경 공차, 원통도 및 표면 거칠기를 모두 달성합니다.

초고압 순수 절단 분야에서 직선형 텅스텐 합금 노즐은 수천 시간 동안 절단 폭과 표면 조도가 저하되지 않도록 보장합니다. 디젤 커먼레일 시스템에서는 노즐 오리피스에 탄소가 축적되거나 팽창하지 않아 최적의 공연비를 유지합니다. 선박 및 풍력 터빈 블레이드의 고압 세척에서, 매우 균일한 충격력과 거의 제로에 가까운 유지보수 빈도를 자랑하는 직선형 팬형 텅스텐 합금 노즐은 해양 건설의 효율성과 안전성을 완전히 변화시켰습니다. 직선형 텅스텐 합금 노즐은 최고의 신뢰성과 최고의 단순성을 동시에 제공하며, "가장 단순하지만 가장 혹독한" 상황에서 텅스텐 합금 소재의 고전적인 승리를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

보여줍니다.

### 2.1.3.2 원뿔형 텅스텐 합금 노즐

원뿔형 텅스텐 합금 노즐(벤투리 노즐 또는 단일 원뿔형 수렴 노즐이라고도 함)은 입구에서 출구까지 지속적으로 가늘어지는 원뿔형 유동 경로를 특징으로 합니다. 이 노즐은 목 부분과 팽창 부분이 없어 제트가 출구에서 직접 최대 속도에 도달할 수 있습니다. 이러한 구조는 고압 워터젯 연마 노즐, 초음속 저온 분무 노즐, 그리고 일부 플라즈마 분무 예비 가속 부분에서 주로 사용됩니다. 원뿔형 설계는 일정한 유동 가속을 유지하여 경계층 두께를 지속적으로 압축하고 마찰 손실과 분리 위험을 최소화합니다. 또한, 매우 컴팩트한 구조, 비교적 간단한 제조 공정, 그리고 매우 높은 기계적 강도 덕분에 초고압 및 강한 반동 조건에 이상적입니다.

원뿔형 노즐에 사용되는 텅스텐 합금의 활용도가 극대화됩니다. 연속 원뿔형 표면의 장거리 고정밀 요건은 텅스텐 합금의 높은 강성과 정밀 연삭성을 통해서만 충족될 수 있습니다. 열 변형이나 마모로 인해 원뿔 각도가 설계값에서 벗어나면 전체 제트 속도와 초점 특성이 즉시 붕괴됩니다. 반면 텅스텐 합금의 매우 낮은 열팽창 계수와 내식성은 원뿔 형상을 수천 시간 동안 그대로 유지할 수 있도록 합니다. 특히 연마재 워터젯 절단 분야에서 원뿔형 텅스텐 합금 노즐은 초고압 수직 현상과 가넷 입자의 이중 손상을 견뎌야 합니다. 일반 초경합금 노즐은 수백 시간 사용 후 커프(kerf)와 플레어(flare)가 커지는 경우가 많지만, 텅스텐 합금 노즐은 거의 일정한 원뿔 각도와 출구 직경을 유지할 수 있어 절단 정확도와 사파이어 노즐 수명을 동시에 최고 수준으로 유지할 수 있습니다. 저온 분무 예비 가속 구간에서, 매우 높은 표면 조도와 치수 안정성을 갖춘 원뿔형 텅스텐 합금 노즐은 입자가 가열 구간에 진입하기 전에 매우 균일한 초기 속도 분포를 유지하도록 보장하여 후속 초음속 충격을 위한 완벽한 기반을 마련합니다. 원뿔형 텅스텐 합금 노즐은 겉보기에 단순한 형상을 통해 유동 효율과 구조적 강도 간의 궁극적인 균형을 이루며, 초고압 및 고연마 조건에서 가장 신뢰성 있고 경제적인 고전적 구조로 자리매김합니다.

### 2.1.3.3 팬형 텅스텐 합금 노즐

슬릿 노즐은 평평한 슬릿 노즐 또는 좁은 슬릿 노즐이라고도 하며, 원형이 아닌 가늘고 직사각형 또는 타원형 슬릿 모양의 배출구를 가지고 있습니다. 분사구는 얇고 넓은 부채꼴 모양의 표면을 형성하며, 주로 대면적 고압 세척, 강판의 연속적인 스케일 제거, 제지 공장 와이어 세척, 자동차 도장 전 처리, 식품 가공 표면 행균에 사용됩니다. 슬릿 노즐의 핵심 과제는 매우 얇은 슬릿 배출구 내에서 균일한 충격력, 안정적인 도포 폭, 비발산형 모서리, 그리고 매우 강력한 막힘 방지 기능을 동시에 달성하는 것입니다. 이러한 과제는 거의 전적으로 재료의 특성에 의해 결정됩니다.

텅스텐 합금, 특히 텅스텐-니켈-구리 시스템은 초고강도와 캐비테이션 저항성을 갖추고 있어 매우 얇은 슬릿 출구 벽을 형성하면서도 붕괴나 변형을 방지합니다. 경면 마감 처리된 내벽과 날카로운 출구 모서리는 날카롭고 균일하게 겹치며, "고양이 귀 모양"

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

현상(가운데는 두껍고 가장자리는 얇은)이 발생하지 않습니다. 뛰어난 내식성은 산세척 라인, 알칼리 세척 라인, 해수 녹 제거와 같은 혹독한 화학 환경에서도 공식 및 틈새 부식을 방지합니다. 제조는 일반적으로 복합 공정을 사용합니다. 정밀 와이어 방전가공(EDM)을 통해 슬릿을 형성하고, 다축 CNC 연삭을 통해 절삭날을 마감하며, 유동 연마를 통해 내벽을 연마합니다. 슬릿 폭 공차와 평행도는 마이크로미터 수준에 이르며, 스테인리스강 및 초경합금의 가공 한계를 훨씬 뛰어넘습니다.

선박 및 해상 풍력 발전용 고압 세척 분야에서, 매우 균일한 충격력과 거의 제로에 가까운 막힘률을 자랑하는 부채꼴 모양의 텅스텐 합금 노즐은 1 인 작업 효율을 몇 배나 높여 해상 녹 및 도료 제거 작업의 새로운 기준을 제시합니다. 강철의 냉간 압연 전 스케일 제거 작업에서, 텅스텐 합금 부채꼴 모양의 노즐은 스케일 제거 수준을 최고 수준으로 일정하게 유지하여 후속 산 세척 부하와 폐산 배출을 크게 줄입니다. 식품 및 제약 세척 라인에서, 무독성, 살균성, 녹 방지 특성은 가장 엄격한 청결 요건을 충족합니다. 부채꼴 모양의 텅스텐 합금 노즐은 가장 얇은 절삭날로 가장 넓은 범위를 적용하고, 가장 견고한 소재로 가장 부드러운 충격을 제공하여 넓은 면적, 고효율, 장수명 세척을 위한 최고의 솔루션입니다.

#### 2.1.3.4 기타 특수 구조 텅스텐 합금 노즐

직선 구멍, 원뿔형, 부채꼴형의 세 가지 고전적인 구조 외에도 텅스텐 합금 노즐은 극한 또는 복잡한 작업 조건에 맞춰 수많은 특수 구조를 개발했으며, 이는 각각 재료와 공정의 한계에 대한 또 다른 획기적인 발전을 나타냅니다.

동축 분말 공급 노즐은 레이저 클래딩 및 적층 제조의 핵심입니다. 분말 가스 외륜, 보호 가스 내륜, 그리고 중앙 광 경로를 갖춘 링 내 링 구조를 채택했습니다. 텅스텐 합금은 매우 높은 동축도와 내벽 평활도를 통해 분말 빔의 초점 정확도와 점착 방지 성능을 보장하여 용융 풀의 안정성과 마이크론 수준의 단일 패스 성형 정확도를 보장합니다. 다중 홀 분할 노즐은 대면적 화염 분사 및 다중 경로 분무에 사용됩니다. 수십에서 수백 개의 마이크로 라발 홀이 동일한 단면에 정밀하게 배열됩니다. 텅스텐 합금은 높은 밀도와 높은 강성으로 인해 배열 홀 간격과 방향성이 수천 시간 동안 변위되지 않도록 보장합니다.

회전 노즐은 고속 회전축에 텅스텐 합금 노즐을 장착하여 사각지대 없이 360 도 세척 또는 코팅 작업을 수행할 수 있습니다. 이 노즐은 일반적으로 파이프 내부의 녹 제거 및 저장 탱크 내부의 분사 작업에 사용됩니다. 텅스텐 합금은 높은 강도와 내마모성을 갖추고 있어 원심력 하에서 다른 소재보다 훨씬 뛰어난 기하학적 안정성을 제공합니다. 중공 및 고체 원뿔형 노즐은 냉각탑, 연도가스 탈황, 정밀 절삭유 분사에 사용됩니다. 텅스텐 합금은 내식성과 내스케일성을 갖추고 있어 장기간 균일하고 일관된 원뿔형 미스트 커튼을 보장합니다.

듀얼 채널 또는 트리플 채널 복합 노즐은 단일 텅스텐 합금 노즐 내에서 물, 연마재, 가스 또는 분말, 캐리어 가스, 그리고 광선의 완벽한 동축성 및 혼합을 구현합니다. 이는 현재

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



가장 복잡한 구조 유형으로, 동축성, 열 안정성, 그리고 내식성에 대한 까다로운 요건을 충족하기 위해 텅스텐 합금의 포괄적인 특성이 요구됩니다. 이러한 특수 구조의 텅스텐 합금 노즐은 더 이상 단일 기능의 제트 발생기가 아니라, 다중 물리 결합, 정밀 멀티미디어 전송, 그리고 다중 공정 협업을 통합하는 소형 시스템입니다. 텅스텐 합금 성능의 한계를 뛰어넘고 표면 엔지니어링 및 정밀 제조 분야에서 인간의 역량을 새로운 차원으로 끌어올립니다. 각각의 고유한 구조는 특정 산업 과제에 대한 텅스텐 합금 소재의 정밀한 대응을 나타내며, 재료 과학과 엔지니어링 요구 간의 완벽한 공명의 결정체입니다.

#### 2.1.4 텅스텐 합금 노즐의 구조적 파생 특성

텅스텐 합금 노즐의 특징은 형상뿐만 아니라 정밀하고 안정적인 구조에서 파생된 일련의 핵심 공정 특성에 있습니다. 이러한 특성은 겉보기에 "부드러워" 보이지만, 실제로는 코팅 품질, 절삭 정확도, 분무 입자 크기, 세척 효율, 그리고 전반적인 경제성을 결정하는 결정적인 요소입니다. 텅스텐 합금은 극한의 작동 조건에서도 입구, 유로, 출구, 오리피스 직경, 콘 각도, 길이와 같은 모든 견고한 구조적 매개변수를 고정할 수 있기 때문에, 유동 안정성, 분무 균일성, 분사 방향성, 에너지 이용률과 같은 소프트 지표들이 "간헐적으로 기준을 충족하는" 수준에서 "일관되게 기준을 충족하는" 수준으로 변화합니다.

##### 2.1.4.1 유로 구조에 의한 유동 안정성

유동 안정성은 모든 분사 공정의 생명선입니다. 용사의 분말 증착 속도, 고압 워터젯의 절삭 속도, 레이저 클래딩의 단일 패스 두께, 디젤 커먼 레일 시스템의 순환 연료 분사량 등 단기 또는 장기 유동 변동은 제품 품질 불일치 또는 공정 제어 불능으로 직결됩니다. 텅스텐 합금 노즐이 가장 가혹한 작동 조건에서도 거의 완벽한 유동 안정성을 달성할 수 있는 이유는 재료 수준에서 유동 채널 구조의 궁극적인 충실도에 있습니다.

전통적인 라발 또는 벤투리 유동 채널에서 유량은 목 단면적과 상류 정체 매개변수에 의해 결정됩니다. 이론적으로 목 직경과 진원도가 변하지 않는 한 유량은 일정합니다. 일반 재질 노즐의 경우, 고온 입자 침식, 초고압 캐비테이션 또는 열충격으로 인해 목이 수십 분 이내에 확대, 타원화 또는 표면 피팅이 발생하여 유량이 지속적으로 증가하고 공정 제어가 실패합니다. 반면, 초고경도, 캐비테이션 저항성, 고온 연화 저항성, 그리고 매우 낮은 열팽창 계수를 가진 텅스텐 합금 노즐은 수천 시간 동안 목 단면적을 거의 동일하게 유지하여 검출 한계 미만의 유량 변동을 억제합니다. 동시에, 거울 등급의 내벽과 정밀한 원뿔 각도는 경계층이 설계된 상태를 유지하도록 하여 국부적인 분리 와류로 인한 순간적인 유동 펄스를 제거합니다.

초음속 화염 용사에서 이러한 유동 안정성은 입자 비행 속도와 온도 배치 간의 높은 일관성으로 직접적으로 나타나 코팅 기공률 및 접합 강도의 분산을 크게 줄입니다. 고압 워터젯 연속 절단에서는 전체 시트의 커프 폭과 표면 거칠기가 첫 번째 절단부터 마지막 절단까지 완벽하게 일관되도록 보장합니다. 장거리 레이저 클래딩 재제조에서는 수백 미터에 달하는 용접 비드의 층 두께 변동을 마이크로미터 수준으로 제어합니다. 유동

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

안정성은 더 이상 "최선을 다하는 것"이 아니라 "필연적인 것"이며, 이는 텅스텐 합금 노즐이 단순한 소모품에서 공정의 핵심으로 도약했음을 보여주는 근본적인 신호입니다.

#### 2.1.4.2 구조 정확도가 분무 효과에 미치는 영향

미립화 효과(입자 크기 분포, 입자 진원도, 공간 균일성)는 연료 분사, 금속 분말 제조, 약물 분무 건조, 레이저 클래딩 분말 공급, 열 분무 공급과 같은 공정의 궁극적인 목표입니다. 미립화 효과는 하류 충격이나 전단에 의해 결정되는 것이 아니라, 초기 액적 또는 분말-가스 혼합물에 대한 노즐 구조 정밀도의 절대적인 제어에 의해 결정됩니다.

디젤 커먼 레일 및 가스 분무 노즐에서 노즐 구멍 또는 슬릿의 기하학적 정밀도는 액막 분리 위치와 액적 분리의 균일성을 직접적으로 결정합니다. 마이크론 수준의 개구 공차, 서브미크론 수준의 표면 거칠기, 그리고 날카롭고 버가 없는 출구 가장자리를 가진 텅스텐 합금 노즐은 액막 두께가 분리 파장과 매우 일관되도록 하여 매우 좁은 액적 크기 분포와 매우 높은 구형도를 초래합니다. 이는 더욱 완전한 연소, 더 깨끗한 배출, 그리고 거의 완벽한 분말 구형도로 이어집니다. 동축 분말 공급 레이저 클래딩에서, 환형 분말 경로와 가스 경로의 동축도, 원뿔형 표면의 표면 마감, 그리고 텅스텐 합금 노즐 목의 진원도는 분말 빔의 초점 직경과 밀도 분포를 결정합니다. 미세한 편차라도 용융 풀의 국부적인 과열이나 분말 부족으로 이어질 수 있습니다. 수천 시간에 걸쳐 달성된 텅스텐 합금의 비드리프트 구조적 정밀도는 분말 빔 초점 스팟 직경이 레이저 초점 스팟 직경과 완벽하게 일치하도록 보장하여 단조 수준의 표면 파형과 단일 패스로 내부 야금 품질을 달성합니다.

제약 분무 건조 및 향료 분무에서, 팽창하지 않는 스포트와 스케일링이 발생하지 않는 내벽을 갖춘 텅스텐 합금 이중 유체 또는 압력 분무 노즐은 배치 전체에 걸쳐 완벽하게 일관된 입자 크기 분포를 보장하여 활성 제약 성분의 코팅 속도 및 방출 곡선의 반복성을 높여줍니다. 초음속 화염 분무 및 저온 분무에서, 기체-고체 2 상 유동을 제어하는 구조적 정밀도는 입자 속도와 온도의 균일성을 결정하며, 이는 코팅 밀도와 잔류 응력 분포를 결정합니다. 구조적 정밀도는 더 이상 제조 공차가 아니라 최종 제품의 성능에 직접적으로 반영되는 결정적인 변수입니다. 텅스텐 합금 노즐은 "마이크론 수준의 구조적 충실도"를 "마이크론 수준의 분무 제어"로 전환하여 공정 엔지니어를 "배치 일관성을 위해 기도하는" 대신 "설계가 곧 결과"라는 결정론적 세계로 이끌어줍니다. 이는 재료와 구조의 완벽한 결합이 가져다주는 최고 수준의 공정 이점입니다.

#### 2.2.1 노즐용 텅스텐 합금의 일반적인 구성비 및 응용 분야

거의 30 년에 걸친 산업적 반복을 거쳐 노즐용 텅스텐 합금의 조성비 체계는 논리적으로 엄격하고 명확하게 정의되며, 체계적인 표준을 형성했습니다. 각 비율은 실험실에서 우연히 발견된 것이 아니라, 온도, 침식 유형, 부식성 매질, 자기장 환경, 열전도도 요건 및 비용 제약에 대한 체계적인 최적 솔루션입니다. 이 모든 요소는 공통적인 핵심을 공유합니다. 바로 높은 텅스텐 함량을 유지하여 경질 골격과 내마모성 베이스의 연속성을 보장하는 동시에, 결합제의 종류와 비율을 정밀하게 제어하여 다양한 측면에서 목표 성능

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



향상을 달성하는 것입니다. 궁극적으로 "기본 고텅스텐 → 텅스텐-니켈-철 → 텅스텐-니켈-구리 → 특수 맞춤"의 완벽한 경사도를 형성하여 기존 세척부터 극한 플라즈마 용사까지 모든 작업 조건을 완벽하게 포괄합니다.

이 제형 시스템의 탁월함은 겉보기에 모순되는 성능 요건을 제어 가능한 변수로 변환하는데 있습니다. 경도와 내식성을 극대화하기 위해 텅스텐 함량을 늘리고 바인더 상을 최소화합니다. 고온 강도와 열전도도의 균형을 맞추기 위해 니켈-철 바인더를 사용하고 철-니켈 비율을 최적화합니다. 완전한 비자성 및 극심한 부식 저항성을 위해 니켈-구리를 니켈로 완전히 대체합니다. 기존 한계를 극복하기 위해 몰리브덴, 레늄, 코발트, 희토류 원소 또는 2 상 입자를 미세 합금화에 도입합니다. 각 제형에는 명확한 고장 모드 분석, 장기적인 산업 검증, 그리고 공급망 성숙도가 뒷받침되어 엔지니어는 더 이상 "대략적인" 재료가 아닌 "그램 단위까지 정밀하고 반드시 최적의" 재료를 선택합니다. 이러한 이유로 열분사, 워터젯, 레이저 클래딩, 커먼 레일 시스템, 플라즈마 장비 분야의 세계적인 선도 제조업체들은 거의 예외 없이 이 제형 시스템을 노즐 재료의 유일한 표준으로 채택했습니다.

#### 2.2.1.1 텅스텐 함량이 높은 기본 제형(텅스텐 함량 $\geq 90\%$ )

높은 텅스텐 함량 기준 비율은 전체 노즐 소재 시스템의 기초이자 천장을 형성하며, 이후의 모든 미세 비율 또한 이 비율에서 시작됩니다. 핵심 설계 철학은 텅스텐 함량을 한계까지 끌어올리는 동시에 치밀한 소결을 보장하여 텅스텐 입자가 연속적이거나 거의 연속적인 골격을 형성하도록 하는 것입니다. 이를 통해 경도, 내마모성, 고온 연화 저항성, 그리고 치수 안정성이 물리적 한계에 한 번에 도달합니다. 이 비율을 가진 노즐은 다이아몬드가 포함된 가장 심한 연마재 침식이나 2000 도의 순간적인 열충격에도 질량 손실이 거의 없이 매우 얇은 소성 변형만 발생하여 기존 소재를 훨씬 능가하는 기하학적 유지력을 보여줍니다. 이 소재는 초음속 화염 분무, 냉간 분무, 워터젯 가압, 레이저 분말 공급 등 수명과 정밀도에 대한 가장 까다로운 요구 사항이 있는 공정에 절대적으로 첫 번째 선택이며, 이후의 텅스텐-니켈-철 및 텅스텐-니켈-구리 비율에 대한 성능 벤치마크 역할도 합니다.

#### 2.2.1.2 텅스텐-니켈-철 합금 비율

텅스텐-니켈-철 합금 제형은 고텅스텐 프레임워크에 니켈-철 바인더상을 도입하여 최적의 철-니켈 비율로 강도, 인성, 열전도도 및 고온 산화 저항성의 완벽한 균형을 달성합니다. 현재 고온, 고속 기체-고체 2 상 유동 응용 분야에서 절대적인 주류를 이루고 있으며, 초음속 화염 용사, 플라즈마 용사, 고속 아크 용사 및 가스터빈 연소실 노즐에서 90% 이상의 시장 점유율을 차지하고 있습니다. 니켈-철 바인더상은 고온에서 텅스텐 입자의 우수한 습윤성과 매우 높은 계면 결합 강도를 나타냅니다. 동시에, 적절한 철 첨가는 열전도도와 고온 강도를 크게 향상시켜 노즐이 1000° C 이상의 지속적인 온도와 입자 충돌로 인한 2000° C 의 순간적인 온도에서도 연화 또는 박리 없이 빠르게 열을 방출할 수 있도록 하여 진정한 "고온 응용 분야의 제왕"으로 자리매김했습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.2.1.3 텅스텐-니켈-구리 합금 비율

니켈과 구리가 철을 완전히 대체하는 텅스텐-니켈-구리 합금은 완벽한 자기 소거와 탁월한 화학적 불활성 모두에서 두 배의 도약을 달성합니다. 의료기기, 고부식성 환경, 해수 작업 및 정밀 전자기 장비의 노즐에 유일하게 합법적인 선택입니다. 구리를 첨가하면 결합제가 산, 알칼리, 염수 분무, 습열 및 소독제에서 거의 완전히 불활성화되며, 비자성 특성으로 MRI, PET-CT 및 강자장 세척과 같은 상황에서 간섭이 전혀 발생하지 않습니다. DLC 또는 CrN 코팅과 결합하면 텅스텐-니켈-구리 노즐은 가장 가혹한 해양 녹 제거 및 제약 세척 환경에서도 "녹슬지 않고, 구멍이 커지지 않으며, 유해 이온이 방출되지 않습니다"라는 칭호를 얻을 수 있으며, "청결 및 내식성의 제왕"이라는 칭호를 받을 만합니다.

### 2.2.1.4 특수 제형: 고온, 고압 등 극한의 작업 조건에 맞게 맞춤 제작되었습니다.

기존의 3 성분형 제형이 특정 극한 작동 조건의 요건을 여전히 충족하지 못할 경우, 특수 제형이 활용됩니다. 이러한 제형은 몰리브덴, 레늄, 코발트, 탄탈륨, 희토류 원소 또는 현장 탄화물/붕소화물 입자의 심미 합금화를 활용하여 재결정 온도, 캐비테이션 저항성, 아크 삭마 저항성, 초고온 산화 저항성과 같은 개별 특성을 기존 재료의 물리적 한계까지 끌어올립니다. 이러한 제형은 고출력 레이저 클래딩, 동축 분말 공급, 초고온 플라즈마 용사, 원자력 등급 폐수 제거 노즐, 스크램젯 연소실과 같은 최첨단 응용 분야에 종종 적용됩니다. 비용과 시간이 많이 소요되지만, 기존 제형의 최종 병목 현상을 해결하고 최고 수준의 텅스텐 합금 노즐 재료 시스템과 미래 방향을 제시합니다.

이 구성 요소 비율 시스템은 정밀한 "재료 메스"와 같습니다. 끊임없이 변화하는 노즐 작동 조건을 여러 개의 명확한 범위로 나누고, 가장 적합한 비율을 사용하여 핵심 지점을 정확히 파악합니다. 이 시스템은 재료 선택을 경험에서 과학으로, 성능을 "최선을 다하는 것"에서 "필연적으로 최적의 결과"로 전환시켜, 텅스텐 합금 노즐을 하이엔드 제조 체인에서 가장 신뢰성 있고 예측 가능하며 신뢰할 수 있는 핵심 부품으로 만들어줍니다.

## 2.2 노즐용 텅스텐 합금의 재료 사양

노즐에 사용되는 텅스텐 합금의 재료 사양은 "여러 합금"이라는 단순한 개념을 훨씬 뛰어넘어, 매우 방대하고 논리적으로 엄격하며 명확하게 정의되고 정밀하게 그램 단위로 표현된 산업용 "재료 유전자 라이브러리"로 발전해 왔습니다. 텅스텐 분말 1g 당 비율과 니켈-철-구리 사전 합금 분말 1g 당 비율은 수천 시간에 걸친 산업 시험, 고장 분석, 수명 검증 및 공정 패키지 비교를 거쳐 확고한 표준으로 자리 잡았습니다.

### 2.2.1 노즐용 텅스텐 합금의 일반적인 구성비 및 응용 분야

실제 산업 응용 분야에서 노즐용 텅스텐 합금의 조성은 네 가지 주요 계열, 수십 개의 하위 시리즈, 그리고 수백 가지의 미세 조정 변형으로 명확하게 구분되어 거의 모든 알려진 작동 조건을 포괄하는 "조성 맵"을 형성합니다. 엔지니어는 최대 온도, 입자 정도,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중간 pH 값, 자기장 강도, 열전도도 요구 사항, 그리고 인체 접촉 여부의 여섯 가지 차원을 기반으로 한 표만 작성하면 됩니다. 그러면 시스템은 몇 초 내에 고유한 최적 조성을 제공하고, 대체 용액의 수명 손실 비율까지 정확하게 예측할 수 있습니다. 이 시스템의 탁월한 점은 원래 상충되었던 성능 요구 사항(경도 대 인성, 고온 강도 대 열전도도, 내식성 대 비자성 특성)을 완전히 분리한다는 것입니다. 각 계열은 하나의 주요 모순만 해결하는 반면, 다른 모순은 후속 표면 엔지니어링 또는 구조 설계를 통해 보완하여 국소 최적화가 아닌 전역 최적화를 달성합니다.

### 2.2.1.1 텅스텐 함량이 높은 기본 제형(텅스텐 함량 $\geq 90\%$ )

높은 텅스텐 함량 기준 비율은 전체 시스템의 "절대적인 기반"이자 "성능 한계"입니다. 이 시스템의 설계 철학은 매우 순수합니다. 액상 소결을 유지하면서 텅스텐 함량을 기공률 0%의 한계까지 끌어올려 텅스텐 입자 사이에 매우 얇은 바인더 액상 필름만 남겨 궁극적으로 거의 연속적인 텅스텐 골격을 형성합니다. 이러한 구조의 결과는 엄청난 경도와 내식성을 제공합니다. 주사 전자 현미경으로 관찰했을 때, 연마 입자는 표면에 충돌할 때 매우 얇은 플라스틱 흠만 긁을 수 있으며, 텅스텐 입자를 거의 절단할 수 없습니다. 고온에서 텅스텐 골격 자체는 재결정화나 결정립계 이동을 거의 겪지 않으며, 스포트 직경과 콘 각도는 실온에서 거의 섭씨 2,000 도에 이르는 전체 온도 범위에서 고정됩니다. 또한 매우 높은 밀도와 열용량은 초음속 반동 및 순간적인 열충격 하에서 노즐이 미세 진동을 거의 일으키지 않도록 하여 제트 지터 발생 가능성을 물리적으로 제거합니다. 높은 텅스텐 함량 비율은 수명과 정밀도를 우선시하는 모든 공정에 있어 최고의 비결입니다. 이 비율은 초음속 화염 분무 건, 저온 분무 예비 가속기, 초고압 워터젯 부스터 노즐, 레이저 동축 분말 공급 노즐의 인후부에 거의 보편적으로 사용됩니다. 텅스텐 원자로 만들어진 벽처럼 작용하여 인간 산업에서 가장 극심한 침식과 열 손상으로부터 보호하며, 이후 모든 미세 제형의 경도와 치수 안정성에 있어 극복할 수 없는 기준을 제시합니다.

### 2.2.1.2 텅스텐-니켈-철 합금 비율

텅스텐-니켈-철 합금 비율은 업계에서 "고온의 왕"으로 인정받고 있으며, 최대 생산량과 가장 광범위한 적용 범위를 가진 황금 비율이기도 합니다. 고텅스텐 프레임워크를 기반으로 수십 년에 걸쳐 반복적으로 최적화된 니켈-철 바인더상을 사용하여 고온 강도, 열전도도, 내산화성, 내열충격성을 거의 절충된 수준으로 끌어올렸습니다. 철을 첨가하면 바인더상의 연화 저항성과 800°C 이상의 열전도도가 크게 향상되어, 목에 축적된 열을 고속도로처럼 외벽의 수냉 채널로 빠르게 전달할 수 있습니다. 니켈은 액상 소결 과정에서 텅스텐 입자의 완벽한 습윤을 보장하여 계면 기공 및 결합 취약 영역을 제거합니다. 이 두 구성 요소를 함께 사용하면 노즐이 1200°C를 초과하는 연속 고온 화염과 2000°C를 초과하는 순간 고온에서도 심각한 기공 확대, 박리 또는 열 균열 없이 수천 시간 동안 고온, 고속 화염을 견딜 수 있습니다. 실제 용사 생산 라인에서 이 비율을 가진 노즐은 종종 "영구 공정 매개변수"에 포함될 수 있는 유일한 재료입니다. 문제를 일으키지 않는 한 전체 코팅 라인의 기공률, 접합 강도 및 배치 일관성이 제어 범위를 벗어나지 않기 때문입니다. 성공적인 텅스텐-니켈-철 비율은 재료 과학과 고온 엔지니어링

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

요구 사항 간의 가장 완벽한 시너지 효과 중 하나입니다.

### 2.2.1.3 텅스텐-니켈-구리 합금 비율

텅스텐-니켈-구리 합금은 "청결성과 내식성"의 궁극적인 구현으로, 수많은 고급 응용 분야에서 "비자성 + 녹 발생 없음"이라는 근본적인 문제를 가장 철저하게 해결합니다. 구리를 도입함으로써 산성, 알칼리성, 해수, 염수 분무, 소독제 및 습한 환경에서 바인더상의 부식 속도가 거의 0에 가깝습니다. 표면은 간단한 부동태화 처리만으로도 공식, 틈새 부식 또는 응력 부식 균열을 수명 기간 동안 방지할 수 있습니다. 동시에 구리와 니켈의 조합은 티타늄 합금과 거의 동일한 자화율을 제공하여 3T를 초과하는 강한 자기장 환경에서도 노즐이 와전류 열이나 캐직 편차를 발생시키지 않도록 보장합니다. DLC, CrN 또는 다이아몬드 유사 탄소 코팅과 결합하면 텅스텐-니켈-구리 노즐의 마찰 계수가 매우 낮아 분말과 물방울이 부착되지 않아 노즐 내벽을 항상 윤기 있고 새것처럼 유지합니다. 해상 풍력 터빈 블레이드 녹 제거 작업에서 이 소재는 수천 시간 동안 높은 염분 분무, 높은 습도, 초고압에 노출되어도 노즐이 팽창하지 않도록 보장합니다. 제약 및 식품 장비 세척 라인에서는 가장 엄격한 생체 적합성 및 살균 요구 사항을 충족합니다. MRI 호환 약물 방출 스텐트 코팅 노즐 분야에서는 FDA와 CFDA의 승인을 받은 유일한 소재입니다.

### 2.2.1.4 특수 제형: 고온, 고압 등 극한의 작업 조건에 맞게 맞춤 제작되었습니다.

기존의 3 성분 비율이 여전히 특정 까다로운 작업 조건을 완전히 충족하지 못할 때, 특수 비율이 활용됩니다. 이러한 비율은 더 이상 "충분히 좋은" 수준에 만족하지 않고 물리적 한계에 직접 도전합니다. 폴리브덴과 레늄 시스템을 첨가하면 재결정 온도와 고온 크리프 저항성이 기존 금속 재료의 한계까지 향상됩니다. 코발트와 희토류 시스템을 첨가하면 입계 강도와 캐비테이션 및 박리 저항성이 한 자릿수 더 증가합니다. 특정 비율의 구리를 첨가하고 소결 분위기를 정밀하게 제어하여 초전도 열 버전을 생성하여 삭마 없이 인후 열유속 밀도가 이론 한계에 근접합니다. 텅스텐 카바이드, 텅스텐 붕화물 또는 질화물 입자를 현장에서 생성하여 다이아몬드 등급 연마재에 대한 저항성을 극한 수준으로 끌어올립니다. 그리고 이트륨 산화물과 하프늄 산화물을 통합하여 분산된 안정상을 형성하여 노즐이 섭씨 3,000도에 가까운 순간 온도에서도 녹거나 붕괴되지 않습니다. 이러한 특수 제형은 종종 항공우주 등급 분말, 진공 + 수소 이중 분위기 소결, 다중 열간 등방성 가압, 독점적인 후처리 및 최대 6개월의 산업 검증이 필요합니다. 비용이 너무 높아 일반 프로젝트 관리자를 단념시킵니다. 그러나 그들은 기존 제형의 마지막 보루인 핵 등급 제염, 초고출력 레이저 클래딩, 초고온 플라즈마, 초고압 연마재가 포함된 혼합 제트, 스크램젯 연소실 및 인간 산업의 다른 미친 구석을 정복하고 있습니다.

### 2.2.2 노즐에 사용되는 텅스텐 합금의 사양 및 제어 요구 사항

노즐에 사용되는 텅스텐 합금의 사양은 더 이상 단순한 "재료 등급"이 아니라, 화학 성분, 미세 구조, 물리적 특성, 기계적 특성, 공정 성능, 청정도, 배치 일관성, 그리고 전체 수명 주기 추적성까지 포괄하는 엄격한 산업 등급 표준 시스템입니다. 이 시스템은 20년 이상 열용사, 워터젯, 레이저 클래딩, 커먼 레일, 플라즈마 장비 분야의 세계적인 선도

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



제조업체와 재료 공급업체에 의해 개선되어 왔습니다. ISO, ASME, AMS, DIN 등 여러 국제 표준의 부록에 통합되었으며, 거의 모든 항공우주 등급, 의료 등급, 원자력 등급 공정 패키지의 필수 조항에도 포함되어 있습니다.

#### 2.2.2.1 텅스텐 합금 노즐의 화학 성분 사양

화학 성분 규격은 텅스텐 합금 노즐의 "유전자 식별 카드"와 같습니다. 각 유형의 비율은 1 만분의 1 또는 10 만분의 1 단위까지 정확한 원소 한계표에 해당하며, 주요 원소, 결합상 원소, 미세 합금 원소, 잔류 가스, 유해 불순물의 다섯 가지 주요 범주를 포괄합니다. 각 품목에는 엄격한 상한 및 하한값과 목표 범위가 지정되어 있습니다.

주요 원소인 텅스텐의 함량은 고텅스텐 범위 내에서 정밀하게 고정되어야 합니다. 너무 낮으면 경도와 내식성이 부족하고, 너무 높으면 소결 밀도를 보장할 수 없습니다. 세 가지 주요 바인더 상 원소인 니켈, 철, 구리 의 총량은 제어될 뿐만 아니라 그 비율도 매우 좁은 공정 창 내에서 고정됩니다. 편차가 있으면 계면 젖음성, 열전도도 또는 내식성이 크게 저하됩니다. 몰리브덴, 레늄, 코발트, 탄탈륨 및 희토류 원소와 같은 미세 합금 원소는 수 분만분의 1 의 정밀도로 첨가됩니다. 이들의 역할은 재결정을 억제하고, 결정립계를 강화하거나 현장에서 경질점을 생성하는 것입니다. 함량이 약간 너무 높으면 취성 상이 형성되고 약간 너무 낮으면 파손이 발생합니다. 잔류 가스(산소, 질소, 수소)와 유해 불순물은 ppb 수준에서 관리됩니다. 왜냐하면 미량의 산소라도 고온에서 휘발성 산화물을 형성하여 기공을 발생시키고, 미량의 알칼리 금속은 액체 금속 취성을 유발하기 때문입니다. 통제 조치는 매우 엄격합니다. 원자재 분말은 배치별로 글로우 방전 질량 분석법과 불활성 가스 용융 적외선-열전도도 전체 요소 분석을 거쳐야 합니다. 소결 후, 빌릿은 두 번째 전체 요소 재검사를 위해 다시 샘플링됩니다. 미세 가공을 거친 완성된 노즐은 세 번째 검증을 위해 슬라이스해야 합니다. 모든 테스트 데이터는 블록체인 수준의 추적 플랫폼에 업로드되어야 하며 배치 번호, 용광로 번호, 작업자 및 테스트 장비 번호에 영구적으로 바인딩되어야 합니다. 어떤 요소가 허용 오차를 초과하는 경우, 전체 용광로의 재료를 직접 폐기하고 조사를 위해 밀봉합니다.

#### 2.2.2.2 텅스텐 합금 노즐의 물리적 특성 사양

물리적 성능 사양은 화학 성분을 직접적으로 거시적으로 나타낸 것이며, 노즐이 장기간 정확한 형상과 분사 품질을 유지하도록 보장하는 기본적인 요소입니다. 이 사양은 밀도, 열전도도, 열팽창 계수, 자화율, 재결정 온도, 탄성 계수, 푸아송 비, 저항률, 열용량 등 9 가지 핵심 지표를 포함합니다. 각 지표는 허용 범위가 매우 좁고 전용 시험 방법을 사용하며, 실온, 일반 작동 온도, 고온 한계의 세 가지 온도 지점에서 검증해야 합니다.

밀도는 주요 강체 지표로 간주되며 이론 밀도의 최소 99.98%에 도달해야 합니다. 모든 기공이나 개재물은 초음속 침식에서 응력 집중원 및 조기 박리 지점이 됩니다. 열전도도는 열이 목에서 빠르게 방출될 수 있는지 여부를 직접적으로 결정합니다. 텅스텐-니켈-철 시스템은 고온에서 높은 열전도도를 유지해야 하는 반면, 텅스텐-니켈-구리 시스템은 약간 낮을 수 있지만 절대적으로 균일해야 합니다. 열팽창 계수는 목

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

직경과 원뿔 각도가 영하에서 섭씨 2,000 도까지의 전체 온도 범위에서 거의 변동하지 않도록 매우 낮은 수준으로 제어됩니다. 텅스텐-니켈-구리 시스템의 자화율은 강한 자기장의 간섭이 없다는 요구 사항을 충족하기 위해 계측기로 거의 감지할 수 없을 정도로 낮아야 합니다. 재결정 온도는 고온 노즐의 생명선입니다. 기존 제형은 섭씨 1200 도 이상이어야 하며, 특수 고온 제형은 섭씨 2000 도에 가까운 온도를 요구하기도 합니다. 탄성 계수와 푸아송 비는 초고압 및 강한 반동 조건에서 노즐의 미세 변형을 결정하며, 유한 요소 계산 모델과 정확하게 일치해야 합니다. 비저항과 열용량은 고출력 플라즈마 노즐의 아크 접착 및 열 응답 특성에 영향을 미칩니다.

시험 방법 역시 극단적입니다. 밀도는 아르키메데스 변위법과 소각 X 선 산란법을 사용하여 검증합니다. 열전도도는 실온에서 섭씨 1500 도까지 레이저 섬광을 사용하여 연속적으로 시험합니다. 열팽창은 고온 레이저 간섭계를 사용하여 점별로 측정합니다. 자기 감수율은 액체 헬륨 온도에서 초전도 양자 간섭 소자를 사용하여 교정합니다. 재결정 온도는 고온 금속 조직학과 경도 구배법을 결합하여 결정합니다. 모든 데이터는 단일 지점 값이 아닌 연속 곡선을 형성해야 하며, 곡선 배치 간 중첩은 95% 이상이어야 합니다. 물리적 특성이 허용 범위를 벗어나면 전체 노즐 배치의 등급이 즉시 낮아지거나 파괴됩니다. 물리적 특성에 대한 이러한 "무관용" 제어는 텅스텐 합금 노즐을 "고품질 소재"에서 "정밀 기기 등급의 기능적 구성 요소"로 격상시키고, 다운스트림 공정 엔지니어가 처음으로 추가 면책 조항 없이 장기 계약에 노즐 수명, 제트 매개변수 및 코팅 품질을 포함할 수 있게 해줍니다.

### 2.2.2.3 텅스텐 합금 노즐의 기계적 특성 사양

기계적 성능 사양은 텅스텐 합금 노즐이 파손, 균열 또는 붕괴 없이 극한의 복합 하중을 견딜 수 있음을 최종적으로 보장합니다. 이 사양은 인장 강도, 항복 강도, 연신율, 단면 감소율, 충격 인성, 피로 강도, 고온 순간 강도, 고온 크리프 강도, 경도, 탄성 계수, 파괴 인성, 캐비테이션 박리 강도 등 12 가지 핵심 지표를 포함합니다. 각 지표는 실온, 일반 작동 온도, 극한 온도의 세 지점에서 명확하게 정의된 범위를 가져야 합니다. 고온 데이터는 가장 중요한 의미를 지닙니다. 노즐의 진정한 경쟁 장소는 실험실이 아니라 수천 섭씨 온도의 화염과 수백 메가파스칼의 수격작용이기 때문입니다.

인장 강도와 항복 강도는 노즐이 초고압과 강한 반동을 전체적인 소성 변형 없이 견딜 수 있는지 여부를 결정합니다. 높은 텅스텐 함량 비율은 "매우 높은 강도"와 "비취성"을 모두 달성해야 합니다. 단면적의 신장 및 감소는 우발적인 과부하 시 파쇄가 아닌 연성 파괴를 통해 파손이 발생하도록 보장합니다. 충격 인성과 파괴 인성은 열충격 및 입자 충격에 대한 저항성의 생명선입니다. 텅스텐-니켈-철과 텅스텐-니켈-구리의 비율은 결합체를 통해 최적화되어 순수 텅스텐의 취성을 허용 가능한 준연성으로 완전히 변환합니다. 피로 강도와 고온 크리프 강도는 초음속 분무기가 수만 번의 열 사이클을 견뎌내고 워터젯이 수백만 번의 압력 맥동을 견뎌내는 데 필수적입니다. 미세 균열이 발생하면 심각한 박리로 이어질 수 있습니다. 경도는 연마 침식에 직접적으로 저항하며, 비커스 경도는 고텅스텐 골격의 이론적 상한에 도달해야 합니다. 캐비테이션 저항성은 초고압 워터젯 노즐의 특정 지표로, 특수 인장-캐비테이션 복합 시험을 통해 결정되며, 기존

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

초경합금보다 훨씬 높아야 합니다.

통제 조치는 거의 잔혹할 정도입니다. 각 재료 배치에 대해 최소 3 세트의 표준 인장, 충격, 피로 및 파괴 인성 시편을 채취하여 실온에서 섭씨 1,500 도까지의 전체 온도 곡선에서 시험해야 합니다. 고온 순간 강도 및 크리프 강도 시편은 수백 시간 동안 보호 분위기로 보관해야 합니다. 거시적 비커스 경도에서 나노스케일 압입까지 다중 스케일 방법을 사용하여 경도를 검증해야 합니다. 모든 파괴 표면은 비정상적인 개재물과 취성 상이 없는지 확인하기 위해 100% 주사 전자 현미경으로 분석해야 합니다. 기계적 특성이 하한선 아래로 떨어지면 전체 재료 배치를 직접 밀봉하고 근본 원인 분석을 시작합니다. 기계적 특성에 대한 이러한 "타협 없는" 제어는 텅스텐 합금 노즐을 "내마모성 부품"에서 "구조적-기능적 통합 하중 지지 부품"으로 격상시켜, 가장 까다로운 작업 조건에서도 처음으로 열등하지 않고 티타늄 합금, 니켈 기반 초합금 및 스테인리스 스틸과 경쟁할 수 있게 해줍니다.

#### 2.2.2.4 텅스텐 합금 노즐의 가공 정확도 사양

가공 정밀도는 텅스텐 합금 노즐을 "고품질 소재"에서 "정밀 유체 역학 장비"로 전환하는 마지막 단계입니다. 텅스텐 합금 노즐의 화학적 조성, 물리적 특성, 기계적 특성의 모든 장점을 미크론 또는 심지어 서브미크론 수준의 기하학적 수치로 변환합니다. 여기에는 목직경 허용 오차, 진원도, 원통도, 원뿔형 프로파일, 내벽 거칠기, 동축도, 직각도, 단면 날카로움 등이 포함됩니다. 이러한 정밀성이 없다면 아무리 최고의 소재라도 고철에 불과합니다. 이러한 정밀성을 통해 텅스텐 합금 노즐은 분사 속도, 발산각, 미립자 크기, 절단 폭, 코팅 밀도를 결정하는 진정한 마스터가 됩니다.

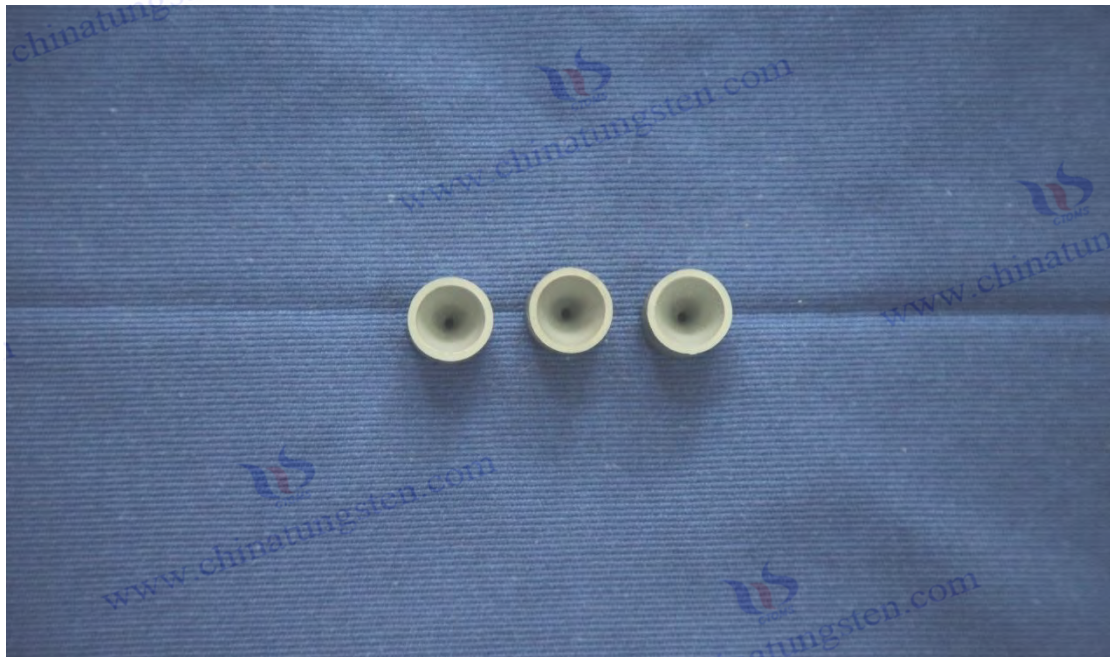
스포트 직경 공차, 진원도, 원통도는 시스템의 핵심으로, 유량 및 속도의 배치 일관성을 직접적으로 결정합니다. 이러한 공차는 마이크로미터 수준 내에서 제어되어야 하며, 전체 수명 기간 동안 사실상 드리프트가 없어야 합니다. 원뿔형 프로파일은 초음속 팽창이 등엔트로피인지 여부를 결정합니다. 작은 단차라도 충격파를 유도하여 입자 속도 분산을 초래할 수 있습니다. 내벽 거칠기는 거울 수준이어야 하며, 유동 연마 후 원자간력 현미경 검사에서 긁힘이나 침전물이 없어야 합니다. 동축성 및 직각성은 동축 분말 공급 노즐과 부채꼴 노즐에 매우 중요합니다. 약간의 편차라도 분말 빔의 기울어짐이나 불균일한 부채꼴 표면을 유발할 수 있습니다. 끝면 절삭날은 나노미터 수준의 날카로움을 유지해야 하며, 말려 있는 모서리나 버가 없어야 합니다. 그렇지 않으면 액적이나 분말이 정체되어 출구에 결절이 형성됩니다.

사용된 방법은 제조의 잔혹한 미학에 못지않습니다. 냉간 정수압 성형 후 진공/수소 소결을 통해 빌릿의 기공이 없고 강성이 높습니다. 심공 드릴링, 다단계 다이아몬드 연마, 초음파 복합 가공을 통해 중형비가 수십 배인 심공을 극복합니다. 5 축 연결 와이어 EDM과 레이저 마감을 통해 복잡한 라발 원뿔형 표면을 완성합니다. 유동 연마, 자기유변 연마, 플라즈마 전해 연마의 3 중 작용 공정을 통해 내벽 거칠기를 나노미터 수준으로 끌어올립니다. 각 노즐은 공장을 떠나기 전에 좌표 측정기, 광학 프로파일로미터, 백색광 간섭계를 사용하여 3 회의 실물 크기 스캔을 거칩니다. 모든 데이터는 물리적 제품과

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



영구적으로 연결된 고유한 QR 코드를 생성합니다. 정밀도에 편차가 있으면 즉시 재용융합니다. 이러한 수준의 가공 정밀도는 텅스텐 합금 노즐을 단순한 "부품"에서 "표준 수준의 기능 장치"로 탈바꿈시켜, 다운스트림 사용자들이 최종 고객에 대한 품질 약속에 "결코 오차가 발생하지 않는 분사 매개변수"를 포함시킬 수 있도록 합니다. 이처럼 극한의 가공 정밀도는 텅스텐 합금 노즐을 "이론이 현실이고, 설계가 물리적 객체"로 만드는 궁극적인 목표를 달성했으며, 이는 글로벌 하이엔드 제조 체인에서 텅스텐 합금 노즐이 거의 종교적 지위를 차지하게 된 이유입니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 노즐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

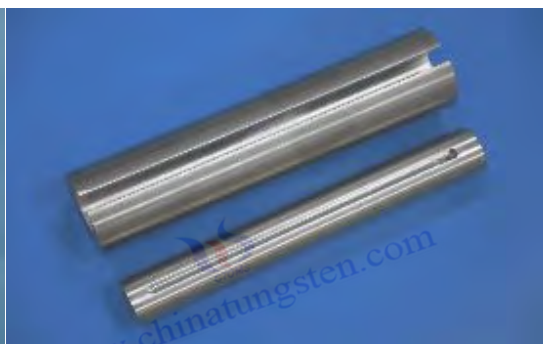
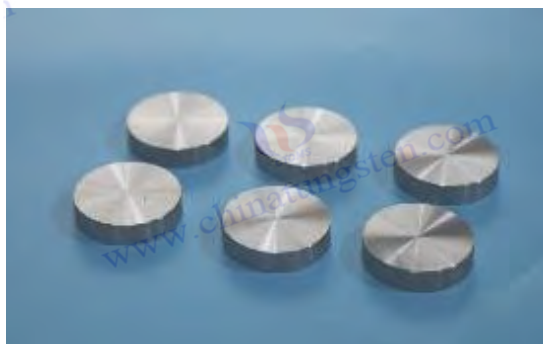
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## 제 3 장 텅스텐 합금 노즐의 특성

### 3.1 텅스텐 합금 노즐의 용접 특성

텅스텐 합금 노즐이 인간 산업의 가장 뜨거운 곳에서도 오랫동안 살아남을 수 있는 이유는 모든 엔지니어링 재료 중 비교할 수 없을 정도로 높은 녹는점 때문입니다. 이러한 특성은 단순한 "내열성"이 아니라, 텅스텐 원자의 매우 높은 금속 결합 에너지, 매우 안정적인 체심입방격자 구조, 그리고 액상 소결 후 거의 완벽에 가까운 치밀 구조가 결합된 결과입니다. 이를 통해 노즐 스톱트는  $3,000^{\circ}\text{C}$  를 넘는 플라즈마 제트,  $2,000^{\circ}\text{C}$  를 넘는 초음속 화염, 그리고  $1,500^{\circ}\text{C}$  를 넘는 고온 연소 가스를 용융, 적하 또는 심각한 연화 없이 연속적으로 직접 맞을 수 있습니다. 따라서 열용사, 플라즈마 생성, 레이저 클래딩, 초고온 연소와 같은 공정의 절대적인 재료 기반이 됩니다.

#### 3.1.1 고용점 측정을 위한 수치범위 및 측정표준

텅스텐 합금 노즐은 순수 텅스텐의 이론 용융점인 섭씨 3410 도에 기반합니다. 액상 소결 및 바인더상 최적화를 통해 실제 적용 시 넓고 안정적인 엔지니어링 용융점 범위를 달성합니다. 주요 텅스텐 골격은 순수 텅스텐에 가까운 초고용점을 유지합니다. 바인더상은 용융점이 낮지만 고온에서 텅스텐 입자를 매우 얇은 액막으로 코팅합니다. 이는 거시적인 저융점 채널 형성을 방지하고 텅스텐의 승화 및 산화 휘발을 효과적으로 억제합니다. 결과적으로, 전체 재료는 실제 작업 조건에서 "정해진 액상 적하 온도 없음"으로 준내화 특성을 나타냅니다. 가장 극한의 고온 플라즈마 용사 또는 초고온 화염 용사에서 노즐 표면에는 소량의 국부적인 텅스텐 입자 승화 및 재증착만 발생합니다. 기존의 니켈 기반 및 코발트 기반 노즐에서 흔히 볼 수 있는 용융물 떨어짐, 목 붕괴 또는 흐름 채널 막힘은 결코 발생하지 않습니다.

측정 표준은 흑체로, 고온 열전대, 이중 색상 적외선 온도계를 결합한 국제적으로 인정된 3 법 교정 시스템과 고속 사진 촬영 및 미세 용융 시험을 채택하여 실온에서 섭씨 3,500 도까지의 전체 온도 범위에서 정확성과 반복성을 보장합니다. 실제 엔지니어링 적용에서는 세 가지 실질적인 중요 지점, 즉 "최초로 눈에 띄는 용융 징후가 나타나는 온도", "최초로 물방울이 나타나는 온도", 그리고 "목의 형상이 제어 불능이 되는 온도"에 더욱 주의를 기울입니다. 이러한 지표는 항공우주 등급 용사 공정 패키지 및 고출력 플라즈마 장비의 사양에 엄격하게 반영되어 노즐 선택 및 수명 예측의 견고한 기준으로 사용됩니다.

#### 3.1.2 고온 작동 조건에 대한 적응성을 위한 높은 녹는점의 가치

높은 용융점이 가져다주는 가장 큰 가치는 고온 조건에서 기존 소재가 겪는 "연화-변형-용융"의 연쇄적인 파괴를 완전히 끊어낸다는 것입니다. 노즐은 최초로 인간이 제어할 수 있는 가장 뜨거운 에너지 흐름에 직접 목을 노출시켜, 후퇴하지 않고도 제어할 수 있습니다. 초음속 화염 용사 및 초고온 플라즈마 용사 분야에서 높은 용융점은 텅스텐 합금 노즐이  $1800^{\circ}\text{C}$  를 초과하는 산소 함유 화염에서 연속 작동하고, 순간적으로

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2800° C 를 초과하는 화염에서도 연화, 붕괴 또는 목에서 떨어지는 현상이 발생하지 않도록 합니다. 이를 통해 입자가 최대 속도와 최적의 온도로 기관에 지속적으로 충돌하여 단일 적용으로 단조 등급 수준의 코팅 밀도와 접합 강도를 달성합니다. 동축 분말 공급 방식의 고출력 레이저 클래딩에서 높은 용융점은 노즐을 레이저 초점 가장자리에서 불과 밀리미터 떨어진 곳에 위치시킬 수 있게 하여 반사된 레이저 광과 용융 풀 복사의 열 충격을 녹거나 붕괴되지 않고 견뎌냅니다. 이를 통해 수천 시간 동안 드리프트 없이 분말 빔 초점 정확도를 보장합니다. 가스터빈 연소실과 산업용 보일러 노즐 분야에서 높은 용융점은 노즐이 1200 도 섭씨를 넘는 고온 가스의 장기간 세척에도 기하학적 무결성을 유지할 수 있게 하며, 분무 원뿔 각도와 입자 크기 에 배치 간 변동이 전혀 없어 초저 배출량과 최대 연소 효율을 달성합니다.

더 깊은 가치는 높은 녹는점이 텅스텐 합금 노즐에 매우 강력한 "열적 결함 내구성"을 제공한다는 사실에 있습니다. 상류 연소가 제어 불능이 되어 온도가 순식간에 수백도까지 치솟더라도 노즐은 막대한 열 흡수 용량과 비용융 특성 덕분에 여전히 운영자에게 귀중한 반응 시간을 벌어줄 수 있으므로 장비의 치명적인 손상을 피할 수 있습니다. 장기간 연속 작동 시 높은 녹는점과 높은 열전도율 덕분에 노즐 표면의 온도 구배가 매우 작아지고 열 응력이 거의 0 이 되어 열 피로 균열이 제거됩니다.

### 3.2 텅스텐 합금 노즐의 밀도 특성

텅스텐 합금 노즐은 모든 "극한" 특성의 물리적 기반이자, 기존의 초경합금, 세라믹, 스테인리스강, 티타늄 합금 노즐과의 가장 극복할 수 없는 근본적인 차이점입니다. 고밀도는 단순한 질량 축적이 아니라, 미세한 규모에서 정교하게 짜여진 "텅스텐 원자 갑옷"과 같습니다. 이러한 특성은 노즐에 탁월한 내식성, 분사 방향 안정성, 진동 저항성, 열용량 완충 능력, 그리고 고속 반동 시 기하학적 충실도를 동시에 부여합니다. 이러한 밀도 특성이 없다면 다른 모든 장점은 허공의 성이나 다름없을 것입니다.

#### 3.2.1 일반적인 밀도 범위 및 영향 요인

노즐에 사용되는 텅스텐 합금의 밀도 범위는 매우 좁고 높은 엔지니어링 범위 내에 정확하게 고정되어 있습니다. 최소 16.8g/cm<sup>3</sup> (비자성 텅스텐-니켈-구리 시스템)에서 최대 18.8g/cm<sup>3</sup> (고강도 텅스텐-니켈-철 시스템 또는 특수 고텅스텐 비율)까지, 알려진 모든 엔지니어링 재료의 밀도 상한선을 거의 커버합니다. 이 범위는 임의적인 것이 아니라, 텅스텐 함량, 바인더 상의 종류 및 비율, 소결 공정 매개변수, 후처리 방법 등 여러 변수의 결합으로 인해 불가피하게 발생하는 결과입니다.

텅스텐 함량이 주요 결정 요인입니다. 텅스텐 함량이 1% 증가할 때마다 밀도는 약 0.17~0.19 g/cm<sup>3</sup> 만큼 선형적으로 증가합니다. 두 번째 핵심 요인은 바인더 상의 종류입니다. 니켈-철 바인더는 철의 원자량이 구리보다 크기 때문에 니켈-구리 바인더에 비해 0.5~0.8 g/cm<sup>3</sup> 의 추가 밀도를 제공할 수 있습니다. 소결 공정은 세 번째 제어 밸브입니다. 진공 + 수소 이중 분위기 액상 소결 공정과 두 번의 열간 등압 성형 공정을 결합하면 기공률을 0.02% 미만으로 줄여 실제 밀도를 이론값에 무한히 가깝게 만들 수 있습니다. 열간 압출,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

회전 단조 또는 다중 어닐링과 같은 후처리를 통해 잔류 미세 기공을 더욱 제거하여 밀도를 최종적으로  $0.01 \text{ g/cm}^3$  까지 높일 수 있습니다.

엄격한 관리 조치는 놀랍습니다. 각 빌릿 배치는 아르키메데스 배수법과 소각 X 선 산란법을 이용한 이중 검증을 거쳐야 합니다. 밀도 편차가  $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$  를 초과하면 부적합으로 간주됩니다. 완성된 노즐은 공장 출고 전 샘플링 및 채시험을 거치며, 데이터는 빌릿 단계와 완벽하게 일치해야 합니다. 모든 밀도 곡선, 용광로 번호, 작업자 정보 및 장비 일련번호는 수명 주기 동안 추적 가능합니다. 밀도가 너무 낮으면 내식성 수명이 절반으로 줄어들거나, 더 심각한 경우 초음속 반동 시 발생하는 미세 진동으로 인해 제트 발산이 발생하여 배치 전체가 폐기될 수 있습니다. 밀도에 대한 이러한 집착적인 추구는 단순한 "성능 지표"를 넘어 "공정 신뢰"의 수준에 도달합니다.

### 3.2.2 고밀도와 내마모성 및 안정성 간의 상관관계 메커니즘

고밀도가 내마모성과 안정성에 미치는 영향은 원자 규모에서 거시적 거동에 이르기까지 완전한 인과관계로 설명할 수 있으며, 이는 재료 과학의 강렬한 미학으로 설명할 수 있습니다.

첫째, 침식 및 마모에 대한 저항성이 있습니다. 고밀도는 단위 부피당 텅스텐 원자의 수가 매우 많음을 의미하며, 이는 연마 입자가 충돌할 때 저항이 기하급수적으로 증가함을 의미합니다. 고전적인 연마 마모 이론에 따르면, 마모율은 재료 밀도에 반비례합니다. 그러나 텅스텐 합금 노즐에서는 이러한 관계가 더욱 증폭됩니다.  $17\sim 18 \text{ g/cm}^3$  의 밀도와 거의 연속적인 텅스텐 골격이 결합되어 연마 입자의 거의 모든 운동 에너지가 매우 얇은 소성 변형과 열 에너지로 전환되어 텅스텐 원자를 절단하는 것이 사실상 불가능해집니다. 탄화규소 입자의 초음속 화염 용사에서 일반 초경합금 노즐은 수백 시간 후 오리피스가 크게 커지는 반면, 텅스텐 합금 노즐은 수천 시간이 지나도 초기 목 직경을 유지하며 마모 깊이는 이전 노즐의 극히 일부에 불과합니다. 높은 밀도는 "충이 많아 없어짐"을 "전혀 닳지 않음"으로 바로 바꿔줍니다.

둘째, 제트 방향과 유량의 안정성입니다. 높은 밀도로 인한 엄청난 질량 관성 덕분에 노즐은 초음속 기류나 초고압 수류의 백래시에 노출될 때 마이크론 수준의 진동이나 처짐이 거의 발생하지 않습니다. 일반 재질의 노즐은 동일한 백래시 힘에서 고주파 플러터를 경험하여 제트 코어 영역이 흔들리고 발산각이 주기적으로 증가합니다. 그러나 텅스텐 합금 노즐의 질량 관성은 산처럼 작용하여 모든 교란을 억제합니다. 제트 방향은 수천 시간 동안 완벽하게 고정되어 있으며 유량 변동은 검출 한계 이하로 억제됩니다. 레이저 클래딩을 위한 동축 분말 공급에서 이러한 안정성 덕분에 분말 빔이 레이저 초점과 마이크론 수준의 중첩을 달성하여 육안으로는 거의 감지할 수 없는 단일 패스의 표면 파동을 생성합니다.

흡수 문제입니다. 고밀도는 매우 높은 체적 열용량을 의미합니다. 목이 접시 수천 도의 열충격을 순간적으로 흡수하면 온도 상승이 매우 느리게 진행되어 수냉 시스템이 열을 방출할 귀중한 시간을 확보하게 됩니다. 동시에 열 구배가 매우 작고 열응력이 거의 없어

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



열 피로 균열을 근본적으로 방지합니다. 고출력 플라즈마 분사 건에서 텅스텐 합금 노즐은 상류에서 제어되지 않는 순간적인 연소로 인한 온도 급등을 균열 없이 견딜 수 있는 반면, 기존 소재는 이미 먼지로 산산조각이 났을 것입니다.

마지막으로, 전체적인 강성과 변형 저항성이 있습니다. 높은 탄성 계수와 결합된 고밀도 덕분에 초고압이나 강한 원심력 하에서도 노즐의 전체 변형은 거의 발생하지 않습니다. 스로트 직경과 콘 각도는 수백 메가파스칼의 수격 현상에도 초기 값을 유지하여 "사용할수록 헐거워지고 휘어지는" 악몽을 완전히 종식시켰습니다. 이러한 고밀도 특성은 텅스텐 합금 노즐을 단순한 "내마모성 소모품"에서 "침식 방지 요새, 진동 방지 베이스, 열충격 방지 장치, 그리고 기하학적으로 영구적인 도구" 역할을 하는 다기능 복합 소재로 격상시킵니다. 이를 통해 인류는 처음으로 가장 취약한 목구멍을 가장 격렬한 에너지 흐름에 두려움 없이 노출할 수 있게 되었습니다. 이것이 텅스텐 합금 노즐의 모든 특성과 대체 불가능한 궁극적인 강도의 물리적 기원입니다.

### 3.3 텅스텐 합금 노즐의 경도 특성

텅스텐 합금 노즐은 극한 작업 조건에서도 장기적인 내마모성과 내침식성을 유지하는 재료 기반입니다. 이러한 특성은 텅스텐 입자 골격의 높은 고유 경도와 결합체의 시너지 효과에 기인합니다. 이로 인해 노즐의 전체 경도는 스테인리스강 및 티타늄 합금보다 훨씬 높지만 순수 텅스텐이나 초경합금보다는 약간 낮아 내마모성과 인성의 완벽한 균형을 이루는 고유한 경도를 형성합니다. 이는 경질 입자를 포함하는 고속 기류의 연마에도 노즐 내벽이 깨끗하고 변형되지 않은 상태를 유지할 수 있는지 여부를 직접적으로 결정하며, 이를 통해 분사 안정성과 공정 품질의 장기적인 신뢰성을 보장합니다.

#### 3.3.1 경도지수에 일반적으로 사용되는 시험 방법

경도 시험은 텅스텐 합금 노즐의 품질 관리를 위한 가장 성숙되고 신뢰할 수 있는 비파괴 평가 방법입니다. 이 시험은 압입, 반발, 비파괴 초음파 검사의 세 가지 주요 방법을 결합하여 각 노즐의 경도 분포가 균일하고 설계 요건을 충족하는지 확인합니다. 압입은 가장 전통적이면서도 직접적인 방법으로, 일반적으로 비커스 또는 로크웰 경도 시험기를 사용합니다. 노즐의 외부 표면이나 고정 하중을 가한 단면에 표준 압입을 합니다. 현미경을 사용하여 압입의 대각선 길이 또는 깊이를 측정하고 경도값을 계산합니다. 이 방법은 특히 일괄 샘플링 및 목 단면 검증에 적합하며, 텅스텐 입자 골격과 결합체 상간의 시너지 효과를 직접적으로 반영할 수 있습니다.

반발법은 주로 쇼어 경도계 또는 리 경도계를 사용합니다. 작고 단단한 망치를 떨어뜨리거나 발사하여 노즐 표면에 충격을 가한 후, 반발 높이 또는 속도를 측정하여 경도를 계산합니다. 이 방법은 완전 비파괴적이고 휴대 가능하며 효율적이어서 현장 전체 검사 및 조립 후 재검사에 적합합니다. 특히 노즐 내벽의 경도를 평가할 때, 내시경을 사용하여 인후 부위의 경도 분포를 간접적으로 추정하여 해부학적 손상을 방지할 수 있습니다. 비파괴 초음파 검사는 최근 몇 년간 가장 진보된 검사법으로, 노즐 내부에서

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고주파 초음파의 전파 속도와 감쇠를 활용하여 경도 구배를 추정합니다. 음속과 경도는 양의 상관관계를 가지며, 감쇠는 내부 결함이나 경도의 불균일성을 반영합니다. 다중 프로브 어레이 스캐닝을 통해 노즐 전체의 경도 윤곽도를 몇 분 안에 생성할 수 있어, 특히 대형 또는 복잡한 형상의 노즐을 완전히 검사하는 데 적합합니다. 모든 검사법은 교차 검증되어야 합니다. 압입 검사는 기준값을 제공하고, 반발 검사는 신속한 검사를 제공하며, 초음파 검사는 전체 영역 매핑을 제공하여 경도 편차를 조기에 감지하고 조성 또는 공정 원인을 추적하는 상호 보완적인 패쇄 루프 시스템을 형성합니다. 이 다중 검사법을 결합한 경도 검사 시스템은 텅스텐 합금 노즐의 허용 기준과 우수 기준을 구분하는 궁극적인 기준이 되었습니다.

### 3.3.2 경도와 수명 간의 상관 분석

텅스텐 합금 노즐에서 경도와 사용 수명 간의 관계는 강한 양의 상관관계를 보이지만, 단순한 선형 관계는 아닙니다. 오히려 경도는 침식 속도, 열 피로 균열 임계값, 캐비테이션 박리 임계값, 그리고 표면 산화 개시라는 네 가지 조절 메커니즘의 복합적인 효과에 의해 결정됩니다. 궁극적으로 이는 가장 가혹한 작동 조건에서 노즐이 얼마나 오랫동안 사용할 수 있는지를 결정합니다. 경도가 높을수록 연마 입자에 의한 미세 절삭 및 고랑 깊이가 얕아져 단위 시간당 재료 손실률이 낮아지고 목 확장 파손 시간이 직접적으로 증가합니다. 용사 및 연소 노즐에서 높은 경도는 고온 연화 개시점을 지연시켜 유동 채널 형상의 장기적인 안정성을 유지하고 제트 발산으로 인한 공정 품질 저하 및 가속 마모를 간접적으로 억제합니다. 또한 높은 경도는 캐비테이션 기포 붕괴 시 최대 표면 응력 임계값을 높여 초고압 물 분사에서 노즐의 피팅 및 균열 발생 가능성을 낮춥니다. 마지막으로, 고경도 표면은 산화막 형성 개시점을 형성할 가능성이 낮아 고온 산화 및 박리 과정을 지연시켜 산소 함유 화염에서 노즐의 수명을 크게 연장합니다. 이 네 가지 메커니즘의 시너지 효과는 경도를 "정적 지표"에서 "수명 증가 요인"으로 전환하며, 텅스텐 합금 노즐의 경도 설계를 전체 공정 체인에 걸친 수명 예측의 기준점으로 만듭니다.

## 3.4 텅스텐 합금 노즐의 강도 특성

텅스텐 합금 노즐은 세라믹, 초경합금, 심지어 순수 텅스텐에 비해 가장 근본적인 장점을 가지고 있습니다. 세라믹에 근접하는 경도를 지니면서도 세라믹을 훨씬 능가하는 전반적인 강도와 인성을 갖추고 있으며, 고품질 합금강에 근접하거나 심지어 능가하기도 합니다. "단단함과 강함"이라는 두 가지 특성을 모두 갖춘 이 노즐은 초고압, 강한 반동, 심한 진동, 그리고 순간적인 충격의 복합적인 하중을 파손이나 영구적인 변형 없이 최초로 견딜 수 있습니다. 따라서 초고압 물 분사, 초음속 화염 분사, 고출력 레이저 클래딩, 디젤 커먼 레일 시스템, 산업용 세척과 같은 극한 작업 환경에서 유일하게 신뢰할 수 있는 소재입니다.

### 3.4.1 인장강도 및 압축강도의 핵심 지표

텅스텐 합금 노즐은 서로 보완적이면서도 별개의 핵심 지표로, 복잡한 응력 조건에서

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

노즐의 안전 경계를 구성합니다.

인장 강도는 노즐의 전반적인 파괴 저항성을 측정하는 궁극적인 척도입니다. 일반적인 고강도 텅스텐-니켈-철 혼합물은 실온에서 1200MPa 를 쉽게 초과할 수 있으며, 심지어 1500MPa 에 근접할 수도 있고, 800° C 에서도 900MPa 이상을 유지하여 대부분의 마르텐사이트계 스테인리스강과 티타늄 합금을 훨씬 능가합니다. 비자성 텅스텐-니켈-구리 혼합물은 이보다 약간 낮지만, 여전히 1000MPa 를 초과하며 고온에서 더 느리게 붕괴됩니다. 이러한 초고인장 강도는 텅스텐 입자 골격의 연속적인 네트워크 구조와 결합재 상의 높은 계면 결합력에서 비롯되며, 이는 균열 발생 및 전파를 어렵게 합니다. 미세 균열이 발생하더라도 연성 결합재 상에 의해 빠르게 부동태화되고 연결되므로 "고강도 + 준연성"이라는 보기 드문 조합을 이룹니다.

압축 강도는 인장 강도의 거의 두 배로, 종종 3000 MPa 를 초과하고, 심지어 이론 한계에 가까운 4000 MPa 에 근접하기도 합니다. 이러한 특성 덕분에 텅스텐 합금 노즐은 초고압 수격 현상, 초음속 기류 백래시, 또는 원심력을 받을 때 목 부분과 외벽에서 소성 변형이 거의 발생하지 않으며, 수백만 번의 압력 펄스 후에도 초기 치수 정확도를 유지합니다. 높은 압축 강도는 주로 텅스텐 입자 자체의 초고압 탄성률과 거의 0 에 가까운 기공 밀도의 치밀 구조에 기인합니다. 이 구조는 압축 하중 하에서 전위 미끄러짐(dislocation slip)을 위한 공간을 거의 남기지 않아 세라믹과 같은 "단단하고 비압축성" 특성을 나타냅니다.

### 3.4.2 고압 조건에서의 강도 특성

실제 고압 작동 조건에서 텅스텐 합금 노즐의 강도 특성은 극도로 증폭되어 수명, 정확성 및 안전성이 직접적으로 보장됩니다.

초고압 워터젯(280~700 MPa) 분야에서 일반 초경합금 노즐은 고압 수격 현상과 캐비테이션 의 복합적인 영향으로 인해 수백 시간 이내에 원주 방향 균열과 전체 파손이 발생하는 경우가 많습니다 . 그러나 초고압 및 인장 강도를 가진 텅스텐 합금 노즐은 수백만 번의 압력 펄스에도 목 부분에 거시적인 균열이 발생하지 않습니다. 기하학적 변형이 서브미크론 수준으로 낮아 수천 시간 동안 절단 폭과 표면 조도가 저하되지 않습니다.

고속 산소 연료 분사(HVOF) 및 저온 분사에서 노즐은 기류 백래시와 최대 8~10MPa 의 심한 진동을 견뎌야 합니다. 기존 소재는 피로 균열이 빠르게 전파되어 파손됩니다. 반면, 텅스텐 합금 노즐은 초고피로 강도와 인장 강도를 통해 균열 발생 임계치를 몇 배나 높여 단일 부품 수명을 3,000 시간 이상 초과하는 동시에 입자 속도 및 온도 분포에서 매우 안정적인 성능을 유지합니다.

디젤 커먼레일 노즐과 고출력 레이저 클래딩 동축 분말 공급 노즐은 강도 특성이 뛰어나 강한 반동력과 원심력에도 노즐이 풀리거나 이탈하지 않으며, 노즐이나 분말 경로의 동축성이 수만 시간 동안 표류하지 않아 연소 효율과 성형 정확도가 장기적으로

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고정됩니다.

가장 극단적인 현상은 우발적인 과압이나 제어되지 않는 연소 상황에서 나타납니다. 상류 압력이 갑자기 설계값의 두 배 이상으로 치솟으면 텅스텐 합금 노즐은 국부적인 소성 변형을 통해 에너지를 흡수하여 결국 "팽창하지만 깨지거나 튀지 않는" 방식으로 작동하여 작동자에게 탈출 및 수리에 필요한 귀중한 시간을 벌어줍니다. 반면 기존 소재였다면 이미 파편으로 폭발하여 재앙을 초래했을 것입니다. 이러한 강도 특성 덕분에 텅스텐 합금 노즐은 "소모품"에서 "생명의 무게를 견딜 수 있는" 핵심 구조적 기능 부품으로 완전히 탈바꿈했습니다. 인류는 처음으로 목의 가장 취약한 부분에 가장 강력한 압력과 반동을 두려움 없이 가할 수 있게 되었습니다.

### 3.5 텅스텐 합금 노즐의 화학적 안정성

텅스텐 합금 노즐은 가장 가혹한 화학 매체와 고온 산화 환경에서도 장기적인 성능을 보장합니다. 부동태화 피막에 의존하는 스테인리스강이나 희생 산화층에 의존하는 니켈 기반 합금과 달리, 텅스텐은 텅스텐 자체의 매우 높은 화학적 불활성, 결합제 상의 정밀한 최적화, 그리고 표면 미세 구조의 시너지 효과를 통해 "일반적인 매체와 거의 눈에 띄는 반응이 없는" 거의 절대적인 안정성을 달성합니다. 이러한 특성 덕분에 노즐은 강산, 강알칼리, 해수, 소독제, 고온 산소 함유 화염과 같은 극한의 화학 환경에서 수천 시간 동안 작동하더라도 표면이 새것처럼 깨끗하게 유지되지 않습니다.

#### 3.5.1 산 및 알칼리 부식 저항 성능

텅스텐 합금 노즐, 특히 텅스텐-니켈-구리 시스템은 전체 pH 범위(0~14)에서 탁월한 내식성을 나타내 "만능 내식성 노즐"이라는 칭호를 얻었습니다. 진한 황산, 진한 질산, 염산, 왕수, 불산, 고온 농축 알칼리, 끓는 차아염소산나트륨, 해수, 염수 분무, 습하고 뜨거운 환경, 그리고 대부분의 유기산에서 노즐 표면 품질 저하율은 거의 감지할 수 없을 정도로 낮으며, 공식, 틈새 부식, 입계 부식, 응력 부식 균열이 완전히 제거됩니다.

핵심 메커니즘은 텅스텐 자체가 실온에서 대부분의 비산화성 산에 대해 완전히 불활성이라는 사실에 있습니다. 구리를 첨가하면 결합제 상이 강산에 용해되지 않고 강알칼리에서 수산화물 이온 부식이 일어나지 않는 매우 안정적인 구리-니켈 고용체를 형성합니다. 소결 후 기공이 거의 0 인 치밀한 구조는 부식성 매체가 결정립 경계나 기공을 따라 침투할 수 있는 통로를 완전히 제거합니다. 표면에 자연적으로 형성되는 극히 얇은 수동화 층은 용해되지만 부식 과정 중에 매우 느린 속도로 자체 복구할 수 있어 연속적인 벗겨짐이 아닌 동적 평형을 형성합니다.

실제 산업 현장에서 텅스텐-니켈-구리 노즐은 해상 풍력 터빈 날개에서 수천 시간 동안 고압 해수 녹 제거 작업을 수행하는 동안에도 부식이나 치수 변화가 발생하지 않습니다. 화학 파이프라인 피클링 및 알칼리 세척 라인에서 끓는 농축 산과 알칼리에 직접 노출되어도 녹이 슬지 않고 유해한 이온을 방출하지 않습니다. 식품 및 제약 장비의 고압 살균 및 세척에서 가장 엄격한 청결 및 재사용 가능 살균 요구 사항을 충족합니다. 핵

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



시설 폐수 처리 공정에서 방사성 원소가 포함된 산성 용액에 장기간 담가 두어도 표면에 영구적으로 비활성화된 상태를 유지합니다.

### 3.5.2 고온 환경에서의 항산화 능력

고온 산소 함유 환경에서 텅스텐 합금 노즐을 사용하는 것도 마찬가지로 인상적이며, 순수 텅스텐이 "고온에서 쉽게 휘발되고 산화된다"는 본질적인 저주를 완전히 깨뜨립니다. 텅스텐-니켈-철 및 높은 텅스텐 비율을 산소 함유 화염 흐름이나 플라즈마 아크에 적용하면, 1200° C 이상의 지속 온도 또는 2000° C 이상의 순간 온도에서 기존 순수 텅스텐의 느슨하고 휘발성 산화물 "텅스텐 블루"와 달리 표면에 매우 얇고 조밀한 WO<sub>3</sub> 보호층만 형성됩니다. 산화 중량 증가율과 두께 증가율은 거의 무시할 수 있을 정도로 낮으며, 산화 및 박리로 인해 스로트 형상은 수천 시간 동안 변하지 않습니다.

메커니즘은 다음과 같습니다. 바인더 상(특히 니켈-철)은 고온에서 미량 산화를 우선적으로 겪어 매우 얇은 니켈-텅스텐 복합 스피넬 층을 형성하여 텅스텐 입자를 단단히 고정하고 산소 원자가 내부로 더 확산되는 것을 방지합니다. 텅스텐 입자 자체는 바인더 상의 코팅 바로 아래에서 직접 승화하기 어렵고 산화는 매우 느린 계면 반응의 형태로만 발생할 수 있습니다. 거의 0에 가까운 기공 구조는 결정립 경계를 따라 산소가 빠르게 침투할 수 있는 채널을 제거합니다. 표면에 형성된 WO<sub>3</sub> 층은 휘발성이 있지만 바인더 상의 "고정" 효과로 인해 단단히 부착되어 있으며 기존 순수 텅스텐에서 발생하는 "거품-벗겨짐-가속 산화"의 악순환이 발생하지 않습니다.

고속 산소 함유 환경(HVOF), 대기 플라즈마 용사(APS), 고출력 플라즈마 용접 및 절단, 가스터빈 연소실과 같은 극한의 고온 및 산소 함유 환경에서 텅스텐 합금 노즐은 "연소 시 용융되지 않고, 산소를 차단하며, 벗겨짐에 강하다"는 놀라운 성능을 발휘합니다. 단일 노즐의 수명은 수천 시간을 쉽게 초과하는 반면, 기존의 구리 백킹 노즐이나 초경합금 노즐은 산화 및 부식으로 인해 수백 시간 만에 고장나는 경우가 많습니다. 이러한 산화 방지 성능 덕분에 텅스텐 합금 노즐은 사람이 움츠러들지 않고 제어할 수 있는 가장 뜨겁고 산소 함량이 높은 에너지 흐름에 직접 노출될 수 있으며, 용사, 플라즈마 생성, 고온 연소와 같은 공정의 온도 한계를 수백 도까지 끌어올립니다. 극한의 화학적 안정성, 특히 산 및 알칼리 부식에 대한 저항성과 고온 산화 저항성의 탁월한 두 가지 특징으로 인해 텅스텐 합금 노즐은 단순한 "재료"에서 "전체 수명 동안 모든 화학적 침식을 견딜 수 있는 영구적인 목구멍"으로 격상됩니다.

### 3.6 텅스텐 합금 노즐의 열전도도

열전도율은 텅스텐 합금 노즐이 극한의 열 부하에서도 안정적이고 효율적인 상태를 유지할 수 있도록 하는 핵심 역량입니다. 수천 도의 화염이나 레이저 반사에 노출되었을 때 국소적인 과열로 인해 노즐이 연화, 산화 또는 변형되는 것을 방지합니다. 열전도율은 고효율 열 고속도로처럼 작용하여 파괴적인 열을 수냉식 외벽이나 주변 환경으로 빠르게 분산시킵니다. 이를 통해 노즐은 "고온의 희생자"에서 "고온의 주인"으로 변모합니다. 바로 이러한 이유로 텅스텐 합금 노즐은 용사, 플라즈마 생성, 레이저 클래딩, 고출력

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

연소와 같은 가장 뜨거운 산업 환경에 장시간 노출되어도 소손되지 않고 견딜 수 있습니다.

### 3.6.1 열전도도의 주요 매개변수 범위

텅스텐 합금 노즐은 다양한 비율에 따라 명확한 경사 스펙트럼을 형성합니다. 고강도 텅스텐-니켈-철 비율은 철의 기여로 인해 열전도도가 더 높습니다. 비자성 및 내식성 텅스텐-니켈-구리 비율은 구리의 고유한 열전도도 장점으로 인해 더욱 향상된 계수를 갖습니다. 텅스텐 함량이 높은 기본 비율은 두 가지 사이의 균형을 이룹니다. 특수 초전도 열 비율은 구리 함량을 늘리고 소결 분위기와 그에 따른 열간 압출 공정을 정밀하게 제어하여 열전도도를 기존 텅스텐 합금의 이론적 상한선까지 끌어올릴 수 있습니다.

이 제품군은 여러 요인의 정밀한 시너지 효과의 결과입니다. 텅스텐의 열전도도는 주로 전자 전달에 의존하며, 순수 텅스텐은 이미 금속 중 가장 높은 열전도 계수 중 하나를 자랑합니다. 니켈-철 또는 니켈-구리 바인더 상은 텅스텐 입자 사이의 간격을 매우 얇은 층으로 채워 큰 열 저항을 발생시키지 않고 합금화를 통한 전반적인 전자 이동성을 방해하지 않습니다. 거의 0 에 가까운 기공률의 치밀한 구조는 기공에서 발생하는 열 산란을 완전히 제거합니다. 코발트 및 희토류 원소와 같은 미세 합금 원소를 적절히 첨가하면 결정립계 열 저항이 더욱 최적화되어 고온에서 열전도도 감쇠가 최소화됩니다. 실제 테스트에서는 실온에서 1500° C 까지 연속 레이저 섬광 측정을 수행했으며, 각 배치의 열전도도 곡선이 높은 수준으로 중첩되도록 정상 상태 비교 방법을 사용하여 교차 검증했습니다. 열전도도에 대한 정밀한 등급 분류와 극한의 제어를 통해 사용자는 열 부하 강도에 따라 적절한 비율을 정확하게 선택할 수 있습니다. 약간 높은 온도에는 텅스텐-니켈-철, 중간 높은 온도에는 고텅스텐 기반, 극한 높은 온도에는 텅스텐-니켈-구리 또는 특수 초전도 버전을 선택하여 낭비나 결함이 없음을 보장합니다.

### 3.6.2 열전도도가 온도 분포 및 열 변형에 미치는 영향

실제 작업 환경에서의 뛰어난 열전도도는 온도 분포와 열 변형 측면에서 조용하지만 생사를 가르는 대규모 열전이라고 할 수 있습니다.

첫째, 노즐의 온도장을 완전히 재형성합니다. 초음속 화염 용사 또는 고출력 플라즈마 용사에서 스포트 표면은 순간적으로 수천 도의 열 흐름에 노출됩니다. 열전도도가 부족하면 국부 온도가 밀리초 단위로 연화점 또는 녹는점까지 치솟아 스포트 붕괴나 산화 및 박리로 이어질 수 있습니다. 그러나 텅스텐 합금 노즐의 높은 열전도도는 열이 매우 빠른 속도로 방사형 및 축 방향으로 확산되도록 하여 스포트에서 가장 높은 온도를 안전한 한계점 아래로 유지합니다. 외벽 온도는 냉각수보다 수십 도 정도 높아 "내부 열과 외부 냉기가 매우 가파른 기울기를 갖는" 이상적인 온도 분포를 형성합니다. 이러한 분포는 재료 열화를 방지할 뿐만 아니라 열팽창이 주로 극히 얇은 표면층에서 발생하고 더 깊은 층은 온도 변화를 거의 받지 않기 때문에 열응력을 최소화합니다.

둘째, 열 변형을 사실상 제거합니다. 일반 소재 노즐은 고온 구매에서 내부 및 외부 팽창

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

차이로 인해 상당한 열응력을 받아 스로트 직경 증가, 콘 각도 편차, 심지어 전체 굽힘까지 발생합니다. 이와 대조적으로, 높은 열전도도와 매우 낮은 열팽창 계수로 인해 균일한 온도장을 형성하는 텅스텐 합금 노즐은 열 변형을 서브마이크론 수준까지 효과적으로 억제합니다. 수천 시간의 고온 침식 후에도 스로트 형상은 저온 측정값과 완벽하게 일치합니다. 레이저 클래딩 동축 분말 공급 노즐에서 이러한 "열 변형 불가" 특성은 수천 시간 동안 분말 빔 초점과 레이저 초점 사이의 편차를 없애 단조품에 필적하는 단일 패스 성형 정확도를 달성합니다.

마지막으로, 열전도도는 갑작스러운 열 충격으로부터 생명을 구하는 완충 장치 역할을 합니다. 상류 연소가 통제 불능 상태가 되거나 레이저 반사가 갑자기 심해질 때, 높은 열전도도는 열을 즉시 "흡수"시켜 목 부위에서 매우 완만한 온도 상승 곡선을 형성합니다. 이는 수냉 시스템과 작업자 의 귀중한 반응 시간을 확보하여 치명적인 연소를 방지합니다. 열전도도는 더 이상 단순한 물리적 매개변수가 아니라, 고온의 전장에서 "열을 안전으로, 위험을 보안으로" 전환하는 텅스텐 합금 노즐의 궁극적인 전략적 무기입니다. 이 노즐은 최초로 "더 많이 타면서도 침착함을 유지하는" 놀라운 능력을 제공하여, 사람들이 가장 취약한 목 부위에 가장 뜨거운 에너지를 걱정 없이 자신 있게 직접 쏠 수 있도록 합니다.

### 3.7 텅스텐 합금 노즐의 전기 전도도

전도성은 재료 시스템에서 텅스텐 합금 노즐의 가장 유연하고 제어 가능한 특성 중 하나입니다. 튜너가 줄을 튕기는 것처럼, 순수 구리에 가까운 고전도성 상태에서 세라믹에 거의 가까운 절연성 상태로 조절할 수 있습니다. 이러한 맞춤형 전도성 덕분에 텅스텐 합금 노즐은 강한 전기장, 고전류, 플라즈마 아크, 전자기 유도 가열, 강한 자기장과 같은 극한의 전자기 환경에서도 아크의 기생 부착 지점이 되거나 와전류 열을 생성하거나 정밀 전자기 측정을 방해하지 않고 공정 요구 사항을 정확하게 충족할 수 있습니다.

#### 3.7.1 전기 전도도의 수치적 특성

텅스텐 합금 노즐의 전도도(저항률 또는 전기 전도도로 특징지어짐)는 높은 전도도에서 거의 절연에 이르기까지 완벽한 스펙트럼을 형성합니다. 텅스텐 구리와 높은 구리의 특수 비율의 저항률은 가장 낮아 순수 구리 수준에 거의 가깝습니다. 텅스텐 니켈 구리의 비자성 및 내식성 비율은 약간 높지만 여전히 우수한 전도도를 유지합니다. 텅스텐 니켈 철의 기존 비율은 중간에 있으며 약한 전도도에서 중간 전도도까지 전이 범위를 보입니다. 높은 텅스텐 함량의 기본 비율과 일부 특수 비율은 바인더 상의 비율을 줄이거나 미량의 절연 상을 도입하여 저항률을 시멘트 카바이드 또는 지르코니아 세라믹 수준으로 끌어올릴 수 있습니다.

이 스펙트럼의 형성은 전적으로 바인더 상의 종류와 함량의 정밀한 제어에 기인합니다. 최고의 전자 도체인 구리는 함량이 높고 분포가 연속적일수록 더 강한 전도성을 보입니다. 철과 니켈의 전도도는 순차적으로 감소하며, 고온에서는 전자 산란이 더욱 심합니다. 바인더 상의 총량이 최소로 압축되고 텅스텐 입자가 거의 연속적인 구조를 형성하면 전자

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이동 채널이 심하게 차단되어 저항률이 급격히 증가합니다. 제조 과정에서 분말 입자 크기 매칭, 소결 온도 곡선의 미세 조정, 그리고 열간 압출 및 어닐링 공정을 결합하여 동일한 제형 내에서 저항률을 수십 배까지 정밀하게 조정할 수 있습니다. 테스트는 고온 진공 저항 테스트 시스템과 결합된 4 탐침 방식을 사용하여 실온에서 1000° C까지의 전체 온도 범위에서 높은 반복성을 가진 저항률 곡선을 보장합니다.

### 3.7.2 특정 응용 시나리오에 대한 전도도의 적응성

맞춤형 전도도는 실제 상황에서 놀라운 적응성을 보여주며, 기존 소재로는 극복할 수 없는 일련의 전자기적 문제를 해결하는 궁극적인 열쇠가 되었습니다.

아크 플라즈마 용사, 플라즈마 용접 및 절단 분야에서 고전도성 텅스텐 구리 또는 텅스텐 니켈 구리 노즐은 전극 연장부 역할을 하여 아크 가두기 및 전도에 직접 관여합니다. 이 노즐은 아크에 의해 부식되지 않고 줄 열을 빠르게 방출하여 과열 및 스폿트 붕괴를 방지합니다. 엄격한 아크 크립 제어가 필요한 초미세 플라즈마 환경에서는 높은 저항률과 높은 텅스텐 비율을 선택하여 노즐을 자연 아크 절연체로 만듭니다. 아크는 설계된 위치에 정밀하게 고정되며, 절단 폭과 코팅 균일도는 전혀 없는 수준에 도달합니다.

약물 코팅 노즐, MRI 호환 스텐트 분무 노즐, 강자기장 환경에서의 강자기 분리 세척 노즐에서 텅스텐-니켈-구리의 완전한 비자성 및 적당한 전도성은 와전류 열과 히스테리시스 손실을 제거하여 노즐 온도가 3T 이상의 자기장에서 거의 상승하지 않고 제트 궤적이 로렌츠 힘의 영향을 전혀 받지 않도록 보장하며, 약물 입자 증착 두께가 나노미터 수준으로 균일하게 유지되도록 보장하고 가장 엄격한 의료용 청결 및 안전 요구 사항을 철저히 충족합니다.

유도 가열 지원 레이저 클래딩 및 선택적 레이저 용융을 위한 동축 분말 공급 노즐, 중간 전도도의 텅스텐-니켈-철 비율 덕분에 노즐이 중간 주파수 유도 자기장에 의해 약간 예열되어 열 충격을 줄이는 동시에 과도한 와전류를 생성하지 않아 과열되지 않으므로 분말 빔이 고온 영역에서 완벽하게 초점을 유지합니다.

고전압 정전 분무, 정전 분무 및 정전 분진 제거 노즐에서 높은 저항률은 노즐을 코로나 방전 전극의 이상적인 운반체로 만듭니다. 전기장은 노즐 끝부분에 집중되어 노즐 몸체를 따라 누설되지 않으므로, 분무된 입자 크기와 코팅 접착력이 한계에 도달합니다.

정밀한 전도도 조절을 통해 텅스텐 합금 노즐은 최초로 전자기 환경에 적응할 수 있게 되었습니다. 필요에 따라 구리보다 전도성이 뛰어나고, 세라믹보다 절연성이 뛰어나며, 약한 자기장의 영향을 전혀 받지 않고, 필요 시 줄(Joule) 열을 즉시 방출합니다. 이는 더 이상 단순한 기계 부품이 아니라 전자기장 제어에 적극적으로 참여할 수 있는 "지능형 전자기 피부"로, 강한 전기, 강한 자기, 그리고 강한 자기장이 존재하는 환경에서 인후 설계에 있어 인간에게 완전한 자유를 처음으로 제공합니다. 이러한 전도도 특성은 "고온 저항성을 위해서는 전자기 적합성이 희생되어야 하고, 전자기 적합성을 위해서는 수명이 희생되어야 한다"는 오래된 저주를 완전히 종식시킵니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 3.8 텅스텐 합금 노즐의 내마모성

텅스텐 합금 노즐의 가장 중요하고 직관적이며 산업적으로 신뢰할 수 있는 특성입니다. 이는 경질 입자를 포함하는 고속 기류, 연마재를 포함하는 초고압 물 분사, 용융 분말의 반복적인 충격과 같은 극한의 침식 환경에서 노즐이 매끄러운 스로트 형상과 내벽을 유지할 수 있는지 여부를 결정합니다. 이를 통해 분사 정확도, 흐름 안정성 및 공정 품질의 지속적인 신뢰성을 보장합니다. 텅스텐 합금 노즐의 내마모성은 기존의 초경합금, 세라믹, 스테인리스강, 순수 텅스텐보다 뛰어납니다.

#### 3.8.1 마모 메커니즘 및 내마모성 평가 기준

텅스텐 합금 노즐은 실제 사용 시 주로 네 가지 유형의 마모 메커니즘에 직면합니다. 연마 침식 마모, 캐비테이션 박리 마모, 고온 연화 시너지 효과 마모, 그리고 접착 피로 복합 마모입니다. 연마 침식은 가장 흔한 파손 모드로, 단단한 입자가 목과 내벽에 크고 작은 각도로 반복적으로 충돌하여 미세 절삭, 흠 형성 또는 피로 박리를 유발합니다. 캐비테이션 박리는 초고압 워터젯 노즐에서 발생하며, 캐비테이션 기포의 붕괴로 인해 순간적인 고압 충격파가 발생하여 표면 피로 박리를 유발합니다. 고온 연화 시너지 효과 마모는 용사 및 플라즈마 용사에서 흔히 발생하는데, 고온에서 목의 경도가 약간 감소하여 입자가 매립되고 절단되기가 더 쉽습니다. 접착-피로 복합 마모는 레이저 클래딩 분말 공급 노즐에서 발생하는데, 이는 용융 또는 반용융 분말이 잠시 접촉된 후 공기 흐름에 의해 찢어지면서 표면에 반복적인 인장 응력 피로가 발생하기 때문입니다.

내마모성 평가 표준은 완전한 산업 폐쇄 루프 시스템을 구축했습니다. 실험실 단계에서는 개선된 ASTM G76 기체-고체 침식 시험, ASTM G134 캐비테이션 시험, 고온 경도-침식 복합 시험, 그리고 맞춤형 분말 접착-인열 사이클 시험을 사용합니다. 산업 검증 단계에서는 스로트 직경 증가, 내벽 거칠기 감소율, 제트 발산각 증가율, 그리고 유동 드리프트율을 최종 기준으로 삼습니다. 마지막으로 금속 조직 분석, 주사 전자 현미경 파단 관찰, 그리고 3 차원 윤곽 스캐닝을 결합하여 미시적 파손 메커니즘에서 거시적 수명까지의 완전한 매핑 관계를 확립합니다. 실험실 극한 가속 시험과 장기 산업 시험을 모두 통과한 노즐만이 진정한 "텅스텐 합금 수준의 내마모성"을 가진 것으로 인정됩니다.

#### 3.8.2 내마모성 향상을 위한 재료 및 구조 최적화 방법

텅스텐 합금 노즐은 재료, 미세구조, 표면 및 구조를 통합하는 체계적인 엔지니어링 프로젝트가 되었습니다.

재료 수준에서는 텅스텐 함량을 지속적으로 증가시키고, 바인더 상 비율을 최적화하고, 코발트 또는 희토류 원소를 도입하여 결정립계를 강화하고, 초경도 탄화물 또는 붕화물 입자를 현장에서 생성함으로써 기지의 고유 경도, 피로 저항성, 고온 연화 저항성을 동시에 한계까지 끌어올립니다. 미시적 수준에서는 텅스텐 입자의 크기 분포를 제어하고, 거의 연속적인 텅스텐 골격을 형성하고, 약한 결합 계면과 미세 기공을 제거함으로써, 연마 입자는 충격 시 최외곽층에 매우 얇은 소성 변형만 발생시켜 온전한 텅스텐 입자의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

절단을 방지합니다.

표면 수준에서는 수 마이크로미터 두께의 텅스텐 보라이드 경화층을 형성하기 위한 보론화, TiAlN의 PVD/CVD 증착과 같은 기술이 사용됩니다. CrN, DLC 또는 다층 복합 코팅, 치밀화를 위한 레이저 재용해, 그리고 플라즈마 전해연마를 통해 표면 경도를 더욱 향상시키고 마찰 계수를 낮추는 동시에, 접착 경향과 피로 균열 발생 가능성을 크게 감소시킵니다. 구조적 측면에서는 라발 콘 각도와 팽창부의 길이를 최적화하여 입자 충돌 각도를 줄이고, 내벽에 미세 텍스처를 설계하여 정면 충돌 대신 입자의 미끄러짐을 유도하고, 목구멍 앞에 안정화부를 설치하여 난류 강도를 약화시킴으로써 실제 침식 강도를 크게 감소시킵니다.

이러한 방법들은 단독으로 사용되는 것이 아니라 특정 마모 메커니즘에 따라 결합됩니다. 열 분무 노즐은 중질 소재 + 붕소화 + 레이저 재용융을 사용하고, 워터젯 노즐은 고인성 제형 + DLC 코팅을 사용하며, 분말 분사 노즐은 경면 마감 내벽 + 저마찰 코팅 + 미세 텍스처를 사용합니다. 원자 수준에서 거시적 기하 구조에 이르기까지 전체 공정에 걸친 이러한 시너지 최적화 덕분에 텅스텐 합금 노즐의 내마모성은 "기존 소재를 훨씬 뛰어넘는" 수준에서 "거의 마모가 없는" 산업적 기적 수준으로 도약할 수 있었습니다.

### 3.9 텅스텐 합금 노즐의 충격 저항성

내충격성은 세라믹, 초경합금, 순수 텅스텐에 비해 텅스텐 합금 노즐의 가장 근본적인 장점입니다. 경질 입자에 의한 순간적인 고속 충격, 초고압 수격 충격, 심한 열충격 충격, 우발적인 과압 폭발 충격과 같은 극한의 동적 하중을 취성 파편화나 돌이킬 수 없는 소성 변형 없이 견딜 수 있도록 하여, 가장 격렬하고 예측 불가능한 작업 조건에서도 오랫동안 견딜 수 있는 유일한 스포트 소재입니다.

#### 3.9.1 충격강도 시험방법 및 지표

텅스텐 합금 노즐은 실험실 가속 시뮬레이션과 산업적 극한 검증을 결합한 완벽한 시스템을 형성했습니다.

실험실 단계에서는 주로 세 가지 핵심 방법을 사용합니다.

- 고속 입자 침식 충격 시험: 알루미늄, 탄화규소, 가넷과 같은 표준 연마재를 압축 공기 또는 헬륨으로 분사하여 노즐 목과 내벽에 제어 가능한 각도와 속도로 반복적으로 충격을 가합니다. 눈에 띄는 미세 균열이나 깨짐이 처음 나타나는 임계 충격 횟수와 에너지를 기록합니다.
- 초고압 수격작용 동적 충격 시험: 특수 펄스 수총으로 순간적인 고압 충격파를 발생시켜 캐비테이션 기포의 붕괴와 압력 변화를 시뮬레이션하고, 표면 피로 박리 및 전체 균열의 임계값을 검출합니다.
- 몇 초 안에 실온에서 1,500 도 이상의 화염에 노출시킨 후 물로 급냉시킵니다. 이 과정을 수백 번 반복하여 열충격으로 인한 미세균열 전파 및 거시적 파괴 경향을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

평가합니다 .

산업 검증 단계에서는 실제 서비스 성능을 궁극적인 지표로 사용합니다. 즉, 단단한 입자가 포함된 초음속 기류로 수천 시간 동안 분사된 후에도 목이 손상되지 않는지, 우발적인 과압이나 잦은 시동-정지 후에도 워터젯 노즐이 손상되지 않는지, 그리고 통제되지 않은 연소로 인한 극심한 열 충격 후에도 열 분무 노즐을 계속 사용할 수 있는지 여부를 확인합니다.

### 3.9.2 복잡한 작업 조건에 대한 적응성을 위한 충격 저항성의 중요성

실제적이고 복잡한 작업 환경에서 내충격성의 중요성은 단순히 "내구성"이라는 단어를 훨씬 뛰어넘습니다. 내충격성은 불확실성으로 가득한 산업 환경에서 노즐이 장기적으로 작동할 수 있는지 여부를 직접적으로 결정합니다.

초음속 화염 분사 및 저온 분사에서 노즐은 매초 수만 개의 단단한 입자가 정면 또는 접선 방향으로 충돌하는 상황에 노출됩니다. 세라믹 노즐은 몇 분 안에 부서지기 쉬운 파편으로 부서지는 경우가 많고, 초경합금 노즐은 수백 시간 후 피로 균열이 발생합니다. 그러나 뛰어난 내충격성과 피로 강도를 가진 텅스텐 합금 노즐은 수천 시간이 지나도 새것처럼 깨끗한 상태를 유지하며, 입자 속도와 온도 분포는 항상 최적의 범위에 고정됩니다.

초고압 물 분사 분야에서는 빈번한 시동-정지, 압력 변화, 그리고 캐비테이션 기포의 순간적인 붕괴로 인해 발생하는 국부적인 충격 응력이 매우 높습니다. 기존 소재의 노즐은 원주 방향의 균열과 전체 파열이 발생하기 쉽습니다. 그러나 "깨지지 않고 충격에 강한" 텅스텐 합금 노즐은 작업자가 갑작스러운 노즐 고장에 대한 걱정 없이 가장 혹독한 해양 또는 핵 오염 제거 환경에서 수천 시간 동안 연속 작업을 수행할 수 있도록 합니다.

동축 분말 공급 및 고출력 플라즈마 용사를 사용하는 레이저 클래딩에서는 연소 폭주, 레이저 반사, 분말 응집 폭발과 같은 예상치 못한 충격이 자주 발생합니다. 텅스텐 합금 노즐은 국소적인 미세 소성 변형을 통해 모든 에너지를 흡수하는 경우가 많으며, 궁극적으로 "팽창하지만 파손되지 않고 튀지 않는" 안전한 방식으로 파손되어 장비와 인력에게 귀중한 수리 시간을 벌어주는 반면, 다른 재료들은 이미 위험한 파편으로 변해 버렸습니다. 가장 중요한 측면은 내충격성입니다. 텅스텐 합금 노즐은 최초로 설계 허용 오차에 "예측 불가능성"을 통합할 수 있게 되었습니다. 더 이상 상류 장비에 끊임없는 완벽함을 요구하지 않고, 가장 강력하고 예상치 못한 충격을 사전에 흡수하여 전체 공정 체인의 최종 안전 라인이자 수명을 보장합니다. 이러한 내충격성은 텅스텐 합금 노즐을 "정밀 소모품"에서 "생명 안전을 보장하는 신뢰할 수 있는 산업 기반"으로 격상시킵니다.

### 3.10 텅스텐 합금 노즐의 치수 안정성

치수 안정성은 텅스텐 합금 노즐이 "현 상태 그대로"의 분사 품질을 일관되게 제공하기 위한 기본 전제 조건입니다. 이는 스로트 직경, 콘 각도, 팽창 단면 형상이 실온에서 수천

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

섭씨 온도까지, 그리고 대기압에서 수백 메가파스칼까지 극한의 압력 범위에서 거의 변하지 않도록 보장하여 모든 정밀 분사 공정에 있어 최고의 기하학적 기준점이 됩니다.

### 3.10.1 온도 변화에 따른 치수 변형 법칙

텅스텐 합금 노즐은 거의 완벽한 선형성과 매우 낮은 기울기를 보입니다. 텅스텐의 매우 낮은 열팽창 계수, 바인더 상의 시너지 효과, 그리고 거의 0에 가까운 기공률을 가진 견고한 프레임워크 덕분에 노즐의 축 방향 및 반경 방향 열팽창은 실온에서 1500°C 이상으로 가열될 때 매우 약하고 균일하며, 비가역적인 변형은 거의 없습니다. 급격한 열 변화 동안, 순간적인 열충격은 가장 바깥쪽 층에 매우 얇은 온도 구배만 생성하고 내부는 원래 치수를 유지합니다. 장시간 고온 유지 후 실온으로 복귀한 후, 스포트 형상은 히스테리시스나 잔류 변형 없이 저온 상태 측정값과 완벽하게 일치합니다.

### 3.10.2 치수 안정성이 사출 정확도에 미치는 영향

치수 안정성은 제트의 모든 핵심 매개변수, 즉 유량, 속도, 발산각, 지향성, 배치 일관성을 직접적으로 고정합니다. 용사 공정에서, 흔들림 없는 스포트 직경과 큰 각도는 입자 속도와 온도 분포가 수천 시간 동안 변함없이 유지되도록 보장하여 최고 수준의 코팅 밀도와 접합 강도를 유지합니다. 초고압 워터젯 절단 공정에서, 일정한 스포트 크기는 절단 폭과 표면 거칠기가 첫 번째 절단부터 마지막 절단까지 완벽하게 일관되도록 보장합니다. 레이저 클래딩을 위한 동축 분말 공급 공정에서, 분말 경로와 가스 경로의 완벽한 형상은 분말 빔 초점이 마이크로미터 수준에서 레이저 초점과 일치하도록 하여 단조품에 필적하는 단일 패스 성형 정확도를 달성합니다. 치수 안정성은 "제트 정확도"를 "최대한 제어해야 함"에서 "필연적인 결과"로 전환하여 공정 엔지니어가 최초로 공차를 추가하지 않고 노즐 수명과 최종 제품 품질을 직접 연결할 수 있도록 합니다.

## 3.11 텅스텐 합금 노즐의 방사선 저항성

텅스텐 합금 노즐은 고유속 중성자, 감마선, 알파 및 베타 입자 방사선 환경에서 기존의 스테인리스 스틸, 티타늄 합금 및 니켈 기반 고온 합금보다 성능이 뛰어나 핵 산업의 가장 까다로운 부분에서 오랫동안 사용할 수 있는 유일한 인후 재료입니다.

### 3.11.1 방사선 저항 성능의 핵심 평가 지표

방사선 저항성 평가는 세 가지 핵심 지표, 즉 조사 팽윤율, 조사 취성 경향, 그리고 기계적 물성 유지율에 중점을 둡니다. 텅스텐 합금은 높은 원자번호, 치밀한 격자 구조, 그리고 적당한 중성자 포획 단면적을 가지고 있어, 조사 후 공극과 격자간 원자가 쉽게 재결합하기 때문에 매우 낮은 팽윤율을 보입니다. 최적화된 결합재상은 장거리 정렬된 상전이를 거의 나타내지 않아 조사 취성을 최소화합니다. 고온 조사는 경도, 인장 강도, 충격 인성의 감소를 최소화하며, 일부 제형에서는 조사 강화까지 일어납니다. 평가 방법에는 반응기 내 장기 장입, 고속 가속기 조사 후 금속학적 및 기계적 재측정, 그리고 헬륨 취성 경향에 대한 열 탈착 분광 분석이 포함됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



### 3.11.2 핵 산업과 같은 방사선 환경에서의 적용 적응성

원자력 산업의 가장 까다로운 방사선 환경에서 텅스텐 합금 노즐은 대체 불가능한 표준이 되었습니다. 원자로 주펌프 세척, 핵폐기물 처리를 위한 고압 분사, 핵연료 집합체 제염, 동위원소 생산 목표 냉각 노즐, 고온 챔버에서의 정밀 분무와 같은 상황에서 노즐은 강력한 중성자 조사, 감마선, 그리고 고온 고압 방사성 매체의 복합적인 손상을 동시에 견뎌야 합니다. 기존 소재는 방사선 팽창 및 균열, 취성, 또는 부식 천공으로 인해 수개월 이내에 파손되는 경우가 많습니다. 그러나 텅스텐 합금 노즐은 거의 0에 가까운 팽창, 극히 낮은 취성, 그리고 뛰어난 내식성을 자랑하며, 원자로 또는 고온 챔버 내부에서 수년간 기하학적으로 온전하고 분사 안정성을 유지하여 제염 효율을 보장하고 방사성 폐기물의 양을 최소화합니다. 가속기 표적 챔버, 싱크로트론 방사선원 프론트엔드, 그리고 동위원소 생성 고온 챔버의 고방사선 진공 환경에서 냉각 노즐, 빔 가둠 스톱, 그리고 진공 밀봉 전이 부품 역할을 하는 텅스텐 합금 노즐은 고선량 감마선과 하전 입자의 장기간 충격을 심각한 활성화나 차원 드리프트 없이 견뎌내 빔 품질과 장비 가용성을 보장합니다. 이러한 방사선 저항성 덕분에 텅스텐 합금 노즐은 원자력 산업에서 가장 취약한 스톱 영역에 최초로 배치될 수 있게 되었으며, "고방사선"과 "정밀 분사"라는 두 가지 극한의 요구를 연결하는 유일한 다리 역할을 할 수 있게 되었습니다.

### 3.12 텅스텐 합금 노즐의 표면 특성

표면 특성은 텅스텐 합금 노즐이 고속 매체, 입자 및 액적과 직접 접촉하는 첫 번째 계면입니다. 표면 특성은 유동 저항, 입자 부착 경향, 캐비테이션 시작 임계값, 제트 발산각 및 최종 수명을 결정하며, 이는 재료의 고유한 장점을 실제 공정 성능으로 전환하는 마지막 단계입니다.

#### 3.12.1 표면 거칠기 및 마찰 계수의 특성

정밀 연마 후, 텅스텐 합금 노즐의 내벽은 거울 수준의 거칠기를 쉽게 달성할 수 있으며, 표면에 입자나 액적이 부착될 미세한 피크가 거의 없어 매우 낮은 동적 및 정적 마찰 계수를 보입니다. 목 부분과 팽창부는 마치 천연 "초미끄러운 코팅"으로 코팅된 것과 같아 기체-고체 또는 기체-액체 2상 유동이 구르는 대신 벽을 따라 미끄러지듯 이동하도록 하여 경계층의 난류, 유동 저항 및 소음을 크게 줄입니다. 동시에, 매우 낮은 마찰 계수는 단단한 입자가 수직으로 매립되는 대신 벽을 따라 접선 방향으로 미끄러지도록 하여 미세 절삭 및 생기질 마모율을 크게 줄입니다. 이러한 "빛에는 보이지 않고 만지면 미끄러운" 표면 특성 덕분에 텅스텐 합금 노즐은 동일한 작업 조건에서 기존 소재의 내벽보다 더 깨끗하고, 더 조용하며, 더 뛰어난 내마모성을 제공합니다.

#### 3.12.2 표면 처리의 특성 개선 역할

표면 처리는 텅스텐 합금 노즐의 표면 특성을 "탁월함"에서 "극도로" 향상시킵니다. 봉소화는 매우 단단한 텅스텐 봉화물 층을 형성하여 표면 경도를 다이아몬드 수준에 가깝게 높입니다. TiAlN, CrN, DLC 또는 다층 나노복합 코팅의 PVD/CVD 증착은 마찰

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

계수를 초윤활성 범위까지 더욱 낮추는 동시에 점착, 산화 및 부식에 대한 다층 보호 기능을 제공합니다. 레이저 재용융 및 플라즈마 전해연마는 기관의 인성을 유지하면서 표면을 치밀화하고 미세 결함을 제거합니다. 마이크로텍스처링은 거울과 같은 표면에 규칙적인 미세 피트 또는 미세 홈을 형성하여 입자 미끄러짐을 적극적으로 유도하고 난류 강도를 약화시킵니다. 이러한 처리는 단순히 중첩되는 것이 아니라 특정 작동 조건에 따라 결합됩니다. 열 분무 노즐의 경우 고강도 봉소화 + 레이저 재용융, 워터젯 노즐의 경우 고강도 DLC, 분말 이송 노즐의 경우 고강도 저마찰 코팅 + 마이크로텍스처링이 적용됩니다. 표면 처리를 통해 텅스텐 합금 노즐의 내벽이 "자연스러운 매끄러움"에서 "인공적으로 완벽한" 상태로 진화하여 수명과 분사 품질이 한 단계 더 높아집니다.

### 3.13 텅스텐 합금 노즐의 피로 저항성

피로 저항성은 텅스텐 합금 노즐이 수만 번의 열 사이클, 수백만 번의 압력 펄스, 그리고 수억 번의 입자 충돌 후에도 손상되지 않도록 보장하는 근본적인 요소입니다. 이를 통해 노즐이 고장의 주요 원인인 피로를 완전히 제거할 수 있게 되었습니다.

#### 3.13.1 피로수명에 대한 시험방법 및 영향인자

피로수명시험은 가속 실험실 시험과 장주기 산업 시험을 결합한 이중 트랙 검증 시스템을 구축했습니다. 본 실험실은 초고압 시동 및 정지 시뮬레이션을 위한 공압 펄스 피로 시험기, 2 차 고온 및 저온 사이클을 구현하기 위한 열충격 피로 시험기, 초고주파에서 입자 충격 피로 평가를 위한 초음파 피로 시험기, 그리고 인장-압축-비틀림 복합재 피로 시험을 수행하기 위한 서보 유압 프레스를 사용합니다. 영향 요인은 재료 수준 요인(텅스텐 입자 크기 및 분포, 결합재 상 인성, 계면 결합 강도), 표면 수준 요인(잔류 압축 응력, 코팅 적합성), 그리고 구조 수준 요인으로 체계적으로 분해됩니다.

#### 3.13.2 교대 하중 조건에서의 피로 저항 성능

실제 교번 하중 조건에서 텅스텐 합금 노즐은 거의 무시무시한 피로 저항성을 보입니다. 초고압 워터젯의 빈번한 시동-정지 사이클에서 발생하는 수백만 번의 압력 펄스 하에서 기존 소재는 이미 피로 균열을 겪었지만, 텅스텐 합금 노즐의 목 부분은 손상되지 않았습니다. 열용사 건의 매일 수천 회의 점화-정지 사이클 동안 다른 소재는 열 피로 네트워크 균열을 발생시켰지만, 텅스텐 합금 노즐의 표면은 매끈함을 유지했습니다. 장시간 연속 작동 중 분말 응집으로 인한 폭발적인 충격을 견뎌낸 레이저 클래딩 동축 분말 공급 노즐의 경우, 일반 노즐은 피로 박리 현상을 보였지만, 텅스텐 합금 노즐의 내벽은 수천 시간 후에도 새것처럼 유지되었습니다.

### 3.14 CTIA GROUP LTD 의 텅스텐 합금 노즐 MSDS

CTIA GROUP LTD 의 텅스텐 합금 노즐용 안전 데이터 시트(MSDS)는 회사에서 고밀도 텅스텐 기반 노즐 제품을 위해 개발한 표준화된 화학 안전 문서입니다.원자재 조달, 생산 및 가공, 장비 설치부터 현장 적용, 유지 관리 및 최종 폐기까지 전체 수명 주기에 걸쳐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

포괄적이고 신뢰할 수 있는 위험 식별 및 보호 지침을 제공하는 것을 목표로 합니다. 텅스텐 소재의 선도적인 글로벌 공급업체인 CTIA GROUP LTD의 MSDS는 유엔 화학물질 분류 및 라벨링에 관한 세계 조화 시스템(GHS)과 중국 국가 표준 GB/T 16483의 요구 사항을 엄격히 준수합니다. 물질 식별, 물리적 및 화학적 특성, 안정성 및 반응성, 독성 정보, 생태 독성학적 영향, 폐기, 운송 정보, 규제 및 책임 진술과 같은 핵심 모듈을 다루어 사용자가 산업용 분무, 세척, 절단 및 분무 공정에서 무사고 및 무공해 작업을 달성할 수 있도록 보장합니다.

재료 식별 모듈은 먼저 텅스텐 합금 노즐의 화학적 구성을 명확히 합니다. 주로 텅스텐(CAS 7440-33-7)이며, 니켈(CAS 7440-02-0), 철(CAS 7439-89-6) 또는 구리(CAS 7440-50-8)가 보충되어 전형적인 은회색 금속 광택이 나는 고밀도 금속 복합재를 형성합니다.

물리적 및 화학적 특성 모듈에서는 텅스텐 합금 노즐을 매우 낮은 용해도를 지닌 높은 녹는점, 고온 내성 금속 복합재로 설명하고 있으며, 물에는 녹지 않지만 왕수나 뜨거운 농축 황산에는 녹습니다.

안정성 섹션은 노즐이 실온에서 매우 안정적임을 나타내지만, 고온에서는 표면 산화가 발생할 수 있으므로 건조하고 통풍이 잘 되는 곳에 보관하고 강산 및 강알칼리와의 직접 접촉을 피하는 것이 좋습니다. 운송 정보는 텅스텐 합금 노즐을 비위험물로 분류하며 일반 금속 제품과 마찬가지로 운송할 수 있도록 허용합니다. 규제 정보에는 REACH 및 RoHS 준수 선언과 중국 GB 30000 시리즈 표준 준수 사항이 나열되어 있습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 노즐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 제 4 장 텅스텐 합금 노즐 제조

### 4.1 텅스텐 합금 노즐용 원료 준비 공정: 텅스텐 광석에서 합금 분말까지

텅스텐 합금 노즐은 분말의 순도와 미세한 완벽함에서 시작됩니다. 선도적인 기업들은 전체 원자재 공급망을 수직적으로 통합하여 광석 채굴부터 최종 복합 분말 생산까지 폐쇄 루프 제어를 구현했습니다. 모든 공정에서 발생하는 미세한 변동은 이후 수천 시간에 걸친 극한의 작동 조건에서 무한히 증폭될 것입니다.

#### 4.1.1 텅스텐 광석 전처리: 선광 및 정제 공정

텅스텐 광석 전처리는 중석과 회중석을 원료로 사용하여 중력 분리, 부유 선별, 자력 분리 및 다단계 복합 공정을 통해 원래의 저품위 광석을 고품위 정광으로 변환합니다. 핵심 목표는 인, 비소, 몰리브덴, 주석, 실리콘과 같은 유해 불순물을 완전히 제거하는 것입니다. 고온 고압 알칼리 비등, 염산 우선 분해, 또는 다단계 용매 추출과 같은 화학적 정제 방법을 사용하여 불순물 함량을 미량으로 줄임으로써 궁극적으로 노즐 등급 텅스텐 분말 생산에 직접 사용할 수 있는 초고순도 텅스텐 전구체를 얻습니다. 이는 후속 환원 및 합금화를 위한 순도 기반을 마련합니다.

#### 4.1.2 텅스텐 분말 제조: 환원 공정 및 입자 크기 제어

암모늄 또는 산화텅스텐을 출발 물질로 사용하는 고전적인 다단계 수소 환원 공정을 사용합니다. 환원 온도 영역, 수소 흐름 패턴, 보트 추진 속도 및 노 분위기를 정밀하게 제어함으로써, 거친 산화물에서 초미립 텅스텐 분말로의 완전한 변환이 달성됩니다. 입자 크기 제어는 매우 중요합니다. 중온 장주기 1 차 환원과 저온 미립 환원, 기류 분급, 그리고 초음파 체질의 조합을 통해 텅스텐 분말은 거의 이상적인 구형 형태, 매우 좁은 입자 크기 분포, 그리고 깨끗하고 응집된 표면을 달성하여 후속 합금화 및 고밀도 성형에 최적의 초기 입자를 제공합니다.

#### 4.1.3 합금화 처리: 도핑 및 혼합 공정의 핵심 사항

합금화는 노즐의 최종 성능을 결정하는 중요한 순간입니다. 니켈, 철, 구리 또는 이들의 사전 합금화된 분말은 목표 비율에 따라 정밀하게 칭량된 다음 텅스텐 분말과 함께 고에너지 볼 밀 또는 3 차원 고효율 혼합 시스템에 공급됩니다. 보호 분위기 하에서 습식 혼합, 진공 건조 및 2 차 환원의 복합 공정을 사용하여 결합제 상이 산화 및 탄소 오염을 방지하면서 원자 수준에서 텅스텐 입자를 균일하게 코팅하도록 합니다. 이 단계에서 몰리브덴, 레늄, 코발트 및 희토류 원소와 같은 미세 합금 원소를 도입하기 위해 특수 비율이 도입됩니다.

#### 4.1.4 분말 성능 제어: 유동성 및 겔보기 밀도 최적화

성형된 소결체 의 밀도 균일성과 최종 소결 밀도를 직접적으로 결정합니다. 분무 과립화,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



표면 미세 코팅, 입자 구형화, 진공 탈기, 저온 어닐링 등 다양한 방법을 통해 위성 구와 내부 공극이 없는 고도로 구형인 복합 분말을 제조하여 홀 유량과 느슨한 충전 밀도를 최적 범위 내로 유지함으로써 배치 간 편차를 사실상 감지할 수 없습니다. "액체처럼 흐르고 고체처럼 충전되는" 이 분말 특성 덕분에 후속 냉간 등방성 성형 및 정밀 성형을 통해 밀도 구배와 내부 결함이 없는 소결체를 쉽게 얻을 수 있습니다.

## 4.2 텅스텐 합금 노즐 성형 공정: 블랭크 성형 기술 및 선정

프리폼 성형 공정은 텅스텐 합금 노즐 제조의 첫 번째 "완성" 단계로, 후속 소결 및 마무리 공정이 이론 밀도 및 무결함 상태에 진정으로 도달할 수 있는지 여부를 결정합니다. 선도 기업들은 기존 성형, 등방성 가압 성형, 적층 제조를 세 가지 축으로 하는 완전한 기술 매트릭스를 구축했으며, 노즐 크기, 구조적 복잡성, 중형비, 배치 크기 및 비용 허용 오차를 기반으로 명확한 공정 선택 논리를 확립하여 각 노즐이 가장 적합하고 경제적인 성형 경로를 채택하도록 보장합니다.

### 4.2.1 전통적인 압축 성형: 압축 공정 및 매개변수 제어

기존 성형은 주로 중소형의 비교적 단순한 직선형 노즐과 짧은 라발 노즐에 사용됩니다. 고정밀 조정 금형과 교체 가능한 맨드렐을 사용하여 유압식 또는 서보 프레스에서 단방향 또는 양방향 성형이 가능합니다. 핵심 장점은 가압 압력 구배의 정밀한 제어, 윤활 이형제의 과학적 선정, 균일한 분말 충전 보장, 그리고 가압-보압-제하 사이클 전반에 걸친 매개변수 최적화에 있습니다. 이를 통해 탈형 후 박리, 단부 균열, 밀도 데드존이 없는 프리폼을 얻을 수 있습니다. 성형 기술이 성숙하고 금형 비용이 저렴하며 사이클 시간이 빠르기 때문에 매년 수십만 개의 기존 노즐을 생산하는 데 선호되는 경제적인 솔루션입니다.

### 4.2.2 정밀성형기술: 등방성형 공정의 장점

등압 성형(주로 냉간 등압 성형(CIP) 및 2 차적으로 열간 등압 성형(HIP))은 고급 텅스텐 합금 노즐의 주요 성형 기술로 자리 잡았습니다. 냉간 등압 성형은 액체를 압력 전달 매체로 사용하여 360° 전방위 균일 압력을 구현하고, 길이 대 직경 비율을 40 배 이상 초과하며, 성형 과정에서 발생하는 밀도 구배와 내부 응력을 완전히 제거합니다. 반면, 열간 등압 성형은 고온, 고압, 불활성 분위기에서 소결 및 치밀화를 동시에 완료하여 이론 밀도에 가까운 프리폼을 직접 생산하며, 소결 변형을 제거하기 위한 후속 가공이 거의 필요하지 않습니다. 등압 성형 공정은 노즐 프리폼이 처음부터 "기공률 0, 응력 0, 기하학적 편차 0"이라는 완벽한 품질을 보장하므로, 초장형 라발 노즐, 복잡한 내부 유동 채널 노즐, 초고성능 노즐에 유일하게 신뢰할 수 있는 방법입니다.

### 4.2.3 적층 제조 기술: 3D 프린팅 응용 분야 탐색

선택적 레이저 용융(SLM), 선택적 전자빔 용융(EBM), 그리고 바인더 제팅( 디바인딩 및 소결 포함)은 텅스텐 합금 노즐의 기하학적 한계를 빠르게 돌파하고 있습니다. SLM 은

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

나선형 냉각 채널, 가변 단면 확장 섹션, 통합 유동 안정화 그리드, 심지어 다중 스로트 배열을 갖춘 일체형 노즐을 단일 공정으로 인쇄할 수 있어 기존 맨드릴 추출 및 딥홀 가공의 물리적 한계를 완전히 해소합니다. 반면, 바인더 제팅은 더 저렴한 비용으로 대형 복합 노즐의 거의 정형 형상을 구현합니다. 현재 적층 제조는 소량 맞춤형 노즐, 신속한 기능 검증 프로토타입, 항공우주 등급 초고속 냉각 노즐 분야에서 안정적인 대량 생산을 달성했으며, 향후 기능 등급 노즐 및 통합 스프레이 건 분야에서 기존 공정을 완전히 대체할 것으로 예상됩니다.

#### 4.2.4 성형 공정 선택: 노즐 사양 및 배치 요구 사항 기반

산업 실무에서는 명확한 선택 결정 트리가 확립되었습니다.

- 대량 생산, 기존 직구 또는 짧은 라발 노즐 → 기존 성형 + 가공
- 대용량, 초장형 또는 고정밀 라발 노즐 → 냉간 정수압 프레스 + 미세 마무리
- 소규모~중규모 배치 생산, 복잡한 내부 유동 채널 또는 통합 냉각 구조 → 냉간 등방성형 + 열간 등방성형 네트 성형
- 초소형 배치, 매우 복잡한 형상 또는 빠른 반복적 프로토타입 제작 → SLM 또는 바인더 제팅
- 매우 높은 밀도 + 복잡한 기하학적 요구 사항 → 열간 등방성 프레스 + SLM + 열간 등방성 프레스 후처리

이 매트릭스 방식의 선택 로직은 각 공정의 경제적, 기술적 이점을 극대화하는 동시에, 배치 크기나 구조적 복잡성에 관계없이 노즐 블랭크가 최적의 경로를 통해 이론적 밀도와 기하학적 참값을 달성할 수 있도록 보장합니다. 이는 "대량 생산 시 품질 저하 없음, 맞춤형 생산 시 가격 상승 없음"이라는 새로운 제조 패러다임을 진정으로 실현합니다.

### 4.3 텅스텐 합금 노즐의 소결 공정: 고밀도화를 위한 핵심 기술

소결은 텅스텐 합금 노즐을 루즈 파우더 블랭크에서 이론 밀도 함수체에 가까운 제품으로 변환하는 데 결정적인 단계입니다. 또한 전체 제조 공정에서 기술적으로 가장 어렵고 잠재적으로 치명적인 공정 노드이기도 합니다. 기공이 남아 미세 구조가 불균일해지거나 균열 및 변형이 발생하면 노즐 전체의 내식성과 치수 안정성이 완전히 붕괴됩니다. 선도 기업들은 소결 공정을 "예술과 과학의 완벽한 조화" 수준으로 끌어올려, 예비 소성, 고온 소결, 치밀화 메커니즘의 심층 제어, 그리고 무허용 결함 관리를 통해 각 노즐의 밀도, 미세 구조 및 성능이 소결 후 이론 한계에 완전히 도달하도록 보장합니다.

#### 4.3.1 소성 전 처리: 탈지 및 응력 완화 공정

예비 소성은 성공적인 소결의 보이지 않는 수호자로서, 과립화제와 성형 보조제의 완전한 제거, 혼합물 내 가압 응력 및 잔류 응력의 완전한 해소, 그리고 텅스텐 입자의 초기 결함을 보장합니다. 이 공정은 연속식 또는 분할식 수소로에서 매우 느린 다단계 가열 곡선을 사용하여 수행됩니다. 먼저, 유기물은 저온 영역에서 열분해 및 휘발됩니다. 그 후,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중온 영역에서 수소 환원을 통해 표면 산화막을 제거합니다. 마지막으로, 고온에서 예비 넥 결합 및 응력 완화가 이루어집니다. 전체 공정은 수소 이슬점, 노 유동 균일성, 그리고 보트 로딩 방식을 정밀하게 제어하여 잔류 탄소, 국부적인 과소성 또는 응력 집중을 방지하고, 후속 액상 소결을 위한 완벽하게 깨끗하고 응력 없는 이상적인 그린 바디를 제공합니다.

#### 4.3.2 고온 소결: 온도 및 분위기 제어를 위한 주요 매개변수

고온 소결은 텅스텐 합금 노즐의 고밀도화를 위한 핵심 공정으로, 일반적으로 진공-수소 이중 분위기의 수직 또는 수평 소결로를 사용합니다. 이 공정은 주로 바인더 상의 완전한 액화, 텅스텐 입자 재배열, 그리고 용해-재침전에 의해 구동됩니다. 정밀한 가열-유지-냉각 곡선은 액상이 텅스텐 프레임워크를 완전히 적시고 모든 기공을 채우도록 보장합니다. 온도 제어는 다중 구역 독립 가열 및 폐쇄 루프 적외선 열화상 피드백을 사용하여 노의 어느 지점에서든 온도 차이를 최소화합니다. 분위기 제어는 진공 단계에서 철저한 탈기를 거친 후 고순도 습식 수소를 주입하고 건식 수소로 전환하여 잔류 산소와 탄소를 완전히 제거하는 것을 포함합니다. 전체 소결 사이클은 수습 시간 동안 지속되며, 온도 초과 또는 분위기 변동은 심각한 제어 손실로 간주됩니다.

#### 4.3.3 소결 밀도화 메커니즘: 기공률 제어 및 성능 상관관계

텅스텐 합금 노즐은 전형적인 3 단계 액상 소결 메커니즘을 따릅니다. 입자 재배열 단계는 액상 모세관력을 이용하여 빠른 치밀화를 달성합니다. 용해-재침전 단계는 작은 입자가 큰 입자에 의해 포위되고 결합제 상에 텅스텐이 용해 및 침전되어 최종 기공 폐쇄를 완료합니다. 고체 확산 단계는 잔류 입자내 미세 기공을 더욱 제거합니다. 최종 성능은 기공률과 높은 상관관계를 갖습니다. 구형 폐쇄 기공은 매우 드물고 크기가 작아 강도와 내마모성에 거의 영향을 미치지 않지만, 상호 연결된 기공이나 입계 기공은 침식과 캐비테이션의 치명적인 시작점이 됩니다. 따라서 기업에서는 고온 절연 확장, 바인더 상의 양 최적화, 미세 합금화와 같은 방법을 사용하여 비정상적인 성장을 억제하고 다공성을 검출 한계 아래로 억제하여 노즐이 "이론적 밀도, 이론적 경도 및 이론적 수명"을 완전히 실현할 수 있도록 합니다.

#### 4.3.4 소결 결합 방지: 균열 및 변형 제어 조치

소결 결합(균열, 변형, 기포 발생, 편석)은 노즐 제조에서 가장 큰 위험 요소입니다. 예방 조치는 체계적인 폐쇄 루프를 형성했습니다. 로에 장입하기 전에 빌릿의 100% 중량 측정 및 육안 검사를 통해 숨겨진 균열과 밀도 이상을 제거합니다. 로는 특수 폴리브덴 보트 또는 흑연 패드와 텅스텐 입자 지지대를 결합하여 접착 및 국부 응력을 완전히 제거합니다. 가열 및 냉각 속도는 특히 바인더상의 응고 영역에서 단계적으로 엄격하게 제어되며, 열 응력과 상변태 응력의 중첩을 방지하기 위해 매우 느린 냉각을 사용합니다. 유지 단계에서는 다점 적외선 실시간 모니터링을 사용하여 국부 과열이 감지되면 즉시 조치를 취합니다. 로에서 나온 후 각 노즐은 형광 투과 및 3 좌표 형태 검사를 거치며, 의심되는 변형이나 미세 균열은 재가열 또는 폐기를 위해 로로 직접 반환됩니다. "단

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

하나의 결함이라도 방치하느니 차라리 빌릿을 낭비하는 편이 낫다"는 이러한 무관용적인 태도는 용광로에서 나오는 노즐의 절대적인 신뢰성을 보장하며, 텅스텐 합금 노즐이 "소결 후 완제품"이라는 산업적 신화를 만들어냈습니다. 소결 공정의 완벽한 제어는 선도 기업과 일반 공급업체 사이의 가장 극복하기 어려운 해자가 되었습니다.

#### 4.4 텅스텐 합금 노즐의 후처리 기술: 정밀도 및 성능 향상

후처리는 텅스텐 합금 노즐이 "이론적 밀도에 근접"하는 단계에서 "진정한 이론적 성능"에 도달하기 위한 최종 단계이며, 소결된 빌릿을 기계에 직접 장착하여 최고의 분사 품질을 즉시 달성할 수 있는 정밀 기능 본체로 변환하는 핵심 단계이기도 합니다. 여기에는 정밀 가공, 표면 강화, 최종 치수 교정, 그리고 최고의 청정도 보장이 포함됩니다. 어떤 공정에서든 실수가 발생하면 이전의 모든 노력이 무산됩니다. 선도 기업들은 후처리를 "미크론 단위에서는 허용 오차를, 나노미터 단위에서는 완벽함을 추구"하는 공정 집중 수준으로 끌어올렸습니다.

##### 4.4.1 정밀 가공: 유로 및 단면 가공 기술

정밀 가공은 노즐 형상의 궁극적인 실현입니다. 길이 대 직경 비율이 매우 높은 라발 유로는 초음파 심공 가공과 결합된 다단계 다이아몬드 호닝을 사용합니다. 먼저 고강성 초경 가이드가 동축성을 보장하고, 점진적 호닝을 통해 완벽한 목부 진원도와 원통도를 구현합니다. 복잡한 원뿔형 표면과 팽창부는 5 축 와이어 방전 가공(EDM)으로 먼저 성형한 후, CNC 프로파일 연삭과 광학 프로파일로미터를 사용한 페루프 마무리 공정을 거칩니다. 끝면과 외경은 초정밀 선삭 및 센터리스 연삭을 통해 미크론 미만의 끝면 런아웃과 외경 진원도를 구현합니다.

##### 4.4.2 표면처리 공정: 연마 및 코팅 강화 기술

표면 처리는 노즐 내벽을 "매끄러운" 상태에서 "초매끄러운"으로도 매우 단단한" 상태로 향상시킵니다. 유동 연마, 자기유변 연마, 플라스마 전해 연마의 세 가지 공정을 통해 거울과 같은 또는 광학 등급의 거칠기를 쉽게 구현하여 미세한 흠집이나 접촉점을 완전히 제거합니다. 이후, 작동 조건에 따라 봉소 침투법을 사용하여 초경도 텅스텐 봉화물 층을 형성하거나, TiAlN 을 PVD/CVD 증착합니다. CrN, DLC 또는 다층 나노복합 코팅을 적용하여 표면 경도를 더욱 향상시키고, 마찰 계수를 줄이며, 접착력 및 부식 방지 성능을 극대화합니다. 코팅과 기판 사이의 접착력은 횡단면 절단, 압입 및 열충격 사이클링을 통해 엄격하게 검증되어 수천 시간의 침식 후에도 코팅이 벗겨지거나 갈라지지 않도록 합니다. 표면 처리는 노즐 내벽을 "입자가 멈추지 않고, 물방울이 머물지 않으며, 부식이 시작될 수 없는" 최고의 계면으로 만듭니다.

##### 4.4.3 치수 교정: 정밀 측정 및 보정 프로세스

치수 교정은 노즐 교정의 마지막이자 중요한 단계입니다. 각 노즐은 출고 전 세 가지 실제 크기의 고정밀 측정을 거칩니다. 공압 게이지는 스로트 직경과 진원도를 측정하고,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



백색광 간섭계는 원뿔 표면 프로파일을 스캔하며, 좌표 측정기는 동축도와 단면 런아웃을 검증합니다. 모든 데이터는 고유한 디지털 식별 번호를 생성합니다. 허용 오차를 초과하는 치수는 즉시 수정 공정으로 들어갑니다. 스로트 미세 확장에는 다이아몬드 단일 포인트 연삭을 사용하고, 원뿔 표면 편차는 CNC 광학 성형 연삭을 사용하여 수정하며, 단면 런아웃은 보조 공구 세팅을 사용한 조정밀 선삭을 사용하여 수정합니다.

#### 4.4.4 완제품 세척 및 건조: 불순물 제거 공정 사양

완제품 세척 및 건조는 노즐 청결을 위한 최종적인 안전장치입니다. 다단계 초음파 + 고압 분무 + 진공 증류 순수 순환 세척 시스템이 사용됩니다. 먼저, 특수 중성 세척제로 가공 오일과 금속 부스러기를 제거합니다. 그런 다음 탈이온수와 이소프로판올을 번갈아 사용하여 헹굽니다. 마지막으로, 클래스 100 클린룸에서 다단계 진공 건조 및 질소 퍼징을 수행하여 내부 유로와 외부 표면에 잔류 입자, 유막 또는 물 얼룩이 없는지 확인합니다. 건조실을 통과한 노즐은 즉시 진공 밀봉되어 사용자가 포장을 개봉할 때까지 고순도 질소로 보호됩니다. 전체 세척 및 건조 과정에는 입자 계수, 표면 장력 테스트 및 잔류 이온 검출이 포함됩니다. 이처럼 매우 엄격한 후처리 과정을 거치면 텅스텐 합금 노즐은 소결된 블랭크에서 최종 제품 의 품질을 직접 결정하는 정밀 기기 수준의 기능적 구성 요소로 변환되어 글로벌 하이엔드 제조 체인에서 중요한 위치를 확고히 하게 됩니다.

#### 4.5 텅스텐 합금 노즐용 원자재 단계의 품질 관리

원자재 품질 관리는 텅스텐 합금 노즐이 수천 시간 동안 온전하고 수만 시간 동안 드리프트 없이 작동하도록 보장하는 최전선입니다. ppm 단위의 불순물, 마이크론 단위의 입자 크기 편차, 또는 조성 불균일성의 1%라도 이후 극한의 작동 조건에서 심각한 고장으로 이어질 수 있습니다. 선도 기업들은 분말 검사를 "샘플링" 방식에서 전체 공정, 모든 배치, 모든 요소, 그리고 모든 성능 측면을 포괄하는 제로 허용 오차 시스템으로 업그레이드했습니다.

##### 4.5.1 텅스텐 분말 순도 시험

텅스텐 분말 순도 시험은 다중 방법 교차 검증 및 전체 원소 적용 전략을 사용합니다. 각 텅스텐 분말 배치는 글로우 방전 질량 분석법(GDMS), 유도 결합 플라즈마 질량 분석법(ICP-MS), 불활성 가스 용융 적외선-열전도도법, 연소-적외선 흡수법을 동시에 수행하여 산소, 탄소, 질소, 황, 인, 몰리브덴, 철, 니켈, 코발트, 알칼리 금속을 포함한 30 가지 이상의 주요 불순물을 체계적으로 스크리닝해야 합니다. 전체 배치에 걸쳐 일관된 순도를 보장하기 위해 환원로 보트의 앞뒤 세 지점에서 샘플링을 실시합니다.

##### 4.5.2 합금 분말 조성의 균일성을 위한 시험 절차

합금 분말 조성의 균일성은 최종 미세구조 및 특성의 배치 일관성을 결정하는 데 매우 중요합니다. 본 시험 계획은 거시적 분석, 미시적 분석, 통계적 분석의 3 단계 페루프 접근법을 채택합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 탱크 에서 각 분말 배치의 시작과 끝에서 시료를 채취하고 , 니켈, 철, 구리, 폴리브덴 , 희토류와 같은 주요 원소와 미량 원소의 함량을 ICP-OES 와 X 선 형광 분광법(XRF)으로 측정합니다. 편차는 매우 좁은 제어 범위 내에 있어야 합니다.
- 미세 영역 수준: 주사 전자 현미경 + 에너지 분산 분광법 및 전자 탐침 미세 분석(EPMA)을 사용하여 바인더 상 코팅의 무결성과 텅스텐 입자 표면의 원소 분포의 균일성을 층별로 검사하여 국소적 분리나 노출된 텅스텐 영역을 제거합니다.
- 통계적 측면에서: 레이저 입자 크기 및 이미지 분석 소프트웨어는 수천 개의 복합재 입자를 자동으로 계산하여 바인더 상의 도포율과 두께 분포의 높은 일관성을 보장합니다. 세 단계의 테스트가 모두 통과하고 고유한 배치 조성 균일성 보고서가 생성된 경우에만 분말이 방출됩니다. 이처럼 거의 강박적인 균일성 제어를 통해 동일한 배합으로 생산된 여러 배치 및 여러 작업 그룹의 노즐 성능 곡선이 거의 완전히 겹치도록 보장합니다.

#### 4.5.3 분말 물리적 특성 테스트

분말의 물리적 특성은 성형 및 소결의 반복성을 직접적으로 결정합니다. 각 배치는 표준화된 전체 테스트를 거쳐야 합니다.

- 입자 크기 및 형태: 레이저 회절 입자 크기 분석기와 주사 전자 현미경 이미지 분석을 결합하면 Fisher 입자 크기, 입자 크기 분포 폭 및 구형도가 엄격하게 제어됩니다.
- 유동성 및 느슨한 밀도: 홀 유량계, 스콧 체적계, 회전 드럼 방법을 포함한 세 가지 방법 의 결과는 높은 일관성을 가져야 합니다.
- 비표면적 및 탭 밀도: BET 질소 흡착법과 탭 밀도계를 사용하여 분말 활성 및 충전 용량을 검증합니다.
- 압축성 및 과립화 강도: 전용 압축 시험을 통해 성형 압력 하에서 분말의 밀도 반응과 그린 바디의 강도를 측정합니다. 모든 시험 장비는 국가 표준에 따라 정기적으로 추적 가능하며, 시험 환경은 일정한 온도와 습도를 유지하며, 샘플은 공정 전반에 걸쳐 질소로 보호됩니다. 시험 데이터는 배치 품질 파일에 자동으로 업로드되어 후속 그린 바디, 소결 바디, 완제품 성능에 대한 완전한 추적 체인을 형성합니다. 물리적 특성이 모두 최적의 공정 범위 내에 있는 분말만 "노즐 등급 인증 분말"로 표시되고 성형 공정에 투입됩니다. 원료 단계에서 매우 엄격한 품질 관리를 통해 텅스텐 합금 노즐은 분말 1g 부터 "무작위성", "변동" 및 "우발적 고장"이 전혀 발생하지 않도록 보장합니다.

#### 4.6 성형 및 소결 단계 동안 텅스텐 합금 노즐의 품질 관리

성형 및 소결 단계는 텅스텐 합금 노즐의 중요한 변형 과정으로, 루즈 파우더에서 진정한 고성능 기능성 부품으로 탈바꿈합니다. 또한 밀도 구매, 잔류 기공, 미세 구조 분리, 균열/변형과 같은 문제가 발생할 가능성이 가장 높은 시기이기도 합니다. 선도 기업들은 포괄적이고 추적 가능하며 무관용 원칙을 준수하는 품질 관리 시스템을 구축했습니다. 각

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

빌릿과 소결 배치에는 독립적인 디지털 파일이 있습니다. 이상 징후가 감지되면 즉시 생산 라인 중단, 밀봉, 근본 원인 분석, 그리고 포괄적인 예방적 개선 조치를 통해 공장에서 출고되는 최종 노즐의 밀도, 미세 구조 및 성능에 배치 간 편차가 없도록 보장합니다.

#### 4.6.1 빌릿의 밀도 및 치밀성 시험 방법

빌릿의 밀도와 치밀도는 성형 품질의 절대적인 핵심 지표이며, 후속 소결이 이론적인 밀도 한계에 도달할 수 있는지 여부를 직접적으로 결정합니다. 이 시험은 "다중 방법 교차 검증 + 전체 범위 샘플링"이라는 엄격한 방식을 사용합니다. 각 빌릿 배치의 무게를 측정하고 탈형 또는 등압 가압 직후 겉보기 밀도를 계산합니다. 동시에, 아르키메데스 변위법을 사용하여 정밀하게 재측정하기 위해 각 배치의 시작, 중간, 끝에서 얇은 슬라이스를 채취합니다. 긴 빌릿은 밀도 사각지대나 압축 박리가 발생하지 않도록 축 방향을 따라 추가로 다섯 부분으로 슬라이스합니다. 등압 가압된 빌릿의 경우, 산업용 CT 및 초음파 비파괴 스캐닝을 사용하여 완전한 3 차원 밀도 클라우드 맵을 생성하고 밀도 저점이나 국소적으로 느슨한 영역을 강조합니다. 주요 목 및 유동 채널 섹션에서 금속 조직 샘플을 채취하고, 이미지 분석 소프트웨어를 사용하여 압축 입자 간극의 분포와 예비 목 연결 상태를 통계적으로 분석합니다. 겉보기 밀도, 변위 밀도, 그리고 CT 밀도가 완전히 일치하고 모두 이론값의 극히 좁은 범위 내에 있을 때에만 빌릿은 "소결 적격 빌릿"으로 표시되고 예비 소성로 투입이 승인됩니다. 밀도가 너무 낮거나 불균일한 그런 바디는 분말 배치, 프레스 매개변수, 그리고 작업자의 잘못으로 추적되며, 절대 통과되지 않습니다. 그런 바디 밀도에 대한 이러한 철저한 제어는 후속 소결이 처음부터 이론 밀도에 가장 유리한 위치에서 시작되도록 보장합니다.

#### 4.6.2 소결체의 조성 및 미세조직 분석

소결체의 조성 및 미세구조는 노즐 최종 성능의 미시적 기초가 됩니다. 편석, 이상상, 또는 잔류 기공은 심각한 결함으로 간주됩니다. 분석은 거시적 정량 분석, 미세 영역 정성 분석, 그리고 통계적 검증의 3 단계 페루프 접근법을 사용합니다. 각 소결로의 소결 공정에서 3개의 완전한 노즐(1차, 2차, 3차)을 채취합니다. X선 형광 분광법과 ICP 화학 분석을 통해 주원소 및 부원소 함량이 조성표와 일치하는지 확인합니다. 이후, 목, 콘 표면, 팽창부, 외벽의 네 가지 주요 영역에서 금속 조직 샘플을 채취합니다. 정밀한 마운팅, 연삭, 연마 및 선택적 에칭 후, 금속 조직 샘플을 고배율 광학 현미경과 주사 전자 현미경으로 체계적으로 관찰하여 텅스텐 입자의 형태, 결합재 상의 분포, 결정립계 청정도, 기공 형태 및 2 차 상의 석출을 확인합니다. 에너지 분산 분광법(EDS)과 전자 탐침 미세분석을 사용하여 니켈, 철, 구리, 몰리브덴과 같은 원소의 분포를 더욱 자세히 분석하여 국부적인 편석이나 농축 영역이 없는지 확인합니다. 특수 조성의 경우, 투과 전자 현미경을 사용하여 결정립계 석출물과 전위 형태를 관찰하여 미세 합금 원소가 예상 분산 강화를 형성하는지 확인합니다. 모든 이미지와 스펙트럼은 전문 금속 조직 엔지니어가 하나하나 분석하여 상세한 보고서를 작성했습니다. 연속적인 텅스텐 골격, 결합재 상의 균일한 코팅, 완전히 닫힌 기공, 그리고 비정상적인 상이 없는 소결체만이 적격 미세 조직을 가진 것으로 판단되었습니다. 이러한 과학적 연구 수준에 가까운 미세 분석을 통해 노즐의

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

미세 구조는 "이론적 구조, 이론적 성능, 결함 없음"을 실제로 달성할 수 있었습니다.

#### 4.6.3 소결체의 기계적 특성에 대한 샘플링 및 테스트 사양

소결체의 기계적 특성에 대한 샘플링 및 시험은 성형-소결 단계에서 품질 승인을 위한 최종 점검 기준입니다. 이 표준은 "로의 시작, 중간, 그리고 마지막 단계에서 모든 품목에 대한 전체 시험 + 무작위 추가 샘플링 + 이상 발생 시 샘플링 두 배 증가"라는 동적 샘플링 전략을 채택합니다. 각 로에서 첫 번째, 중간, 그리고 마지막 노즐에서 샘플링을 실시하고, 표준 인장, 충격, 경도 및 파괴인성 시편을 목 위쪽에서 절단하여 실온 및 고온 기계적 특성 시험을 수행합니다. 추가 노즐은 무작위로 선택하여 전체 재시험을 실시하며, 성능 변동은 로 전체가 검사될 때까지 즉시 두 배로 증가시킵니다. 경도는 비커스 경도법과 로크웰 경도법을 모두 사용하여 목, 내벽, 외벽의 여러 지점에서 측정하여 완전한 경도 구배도를 생성합니다. 인장 시편은 인장 강도와 신율의 균형을 평가하는 데 중점을 두고, 충격 시편은 저온 및 고온 인성을 평가합니다. 파괴인성 시편은 균열 전파 저항성을 특별히 평가합니다. 모든 파단면을 100% 주사 전자 현미경으로 분석하여 파단 모드가 덤플 및 준벽개(quasi-cleavage)의 예상 특성과 완전히 일치함을 확인하고, 취성 입계 또는 기공으로 인한 파단을 제거합니다. 기계적 특성 데이터는 해당 분말 배치, 성형체 밀도 및 미세 구조 보고서와 함께 완전한 폐쇄 루프 아카이브를 형성합니다. 모든 성능 지표가 지속적으로 최적 범위 내에 있고 배치 간 중첩이 매우 높은 소결체만 후처리 단계로 진행할 수 있습니다. 성능에 편차가 발생하면 즉시 노 정지, 밀봉, 전체 체인 추적 및 문제가 완전히 해결될 때까지 예방적 개선이 이루어집니다. 기계적 특성에 대한 이러한 "무관용" 샘플링 표준 덕분에 텅스텐 합금 노즐 성형 및 소결 단계는 "모든 노를 마치 최초의 노인 것처럼, 모든 노즐을 마치 샘플 노즐처럼"이라는 산업적 기적을 진정으로 달성할 수 있었습니다.

#### 4.8 텅스텐 합금 노즐의 품질 관리 시스템 및 표준

텅스텐 합금 노즐은 "샘플링 검사 + 기록"이라는 기존 제조 모델을 오랫동안 뛰어 넘어, 전체 수명 주기를 포괄하고 결함을 제거하며 실시간 감사를 가능하게 하고 법적 책임을 보장하는 산업 등급 품질 관리 시스템으로 발전해 왔습니다. 선도적인 기업들은 모든 분말, 모든 빌릿, 모든 소결체, 모든 공정, 그리고 모든 완성된 노즐에 고유한 디지털 ID 를 부여하여 텅스텐 정광이 공장에 입고되는 순간부터 사용자가 설치한 후 수만 시간까지 정확하게 추적할 수 있는 완벽한 품질 관리 체계를 구축합니다.

##### 4.8.1 텅스텐 합금 노즐에 대한 전체 공정 품질 추적 시스템 구축

산업 인터넷 플랫폼을 중심으로 하는 엔드투엔드 품질 추적 시스템은 MES, ERP, LIMS, 블록체인 기술을 통합하여 원자재부터 완제품, 그리고 최종적으로 사용자 현장까지 100% 데이터 폐쇄를 실현합니다. 공장에 입고되는 각 텅스텐 분말 배치는 고유한 마스터 배치 번호를 생성하며, 이 번호는 하위 배치 번호, 빌릿 번호, 소결로 번호, 가공 작업 지시 번호, 완제품 일련 번호, 그리고 최종적으로 노즐 외벽에 레이저로 표시된 QR 코드로 구분됩니다. 모든 주요 매개변수(성분, 밀도, 경도, 치수, 미세 구조, 기계적 특성, 표면

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



거칠기)는 실시간으로 클라우드에 업로드되고 해당 배치 번호에 영구적으로 연결되어 변경 불가능한 디지털 아카이브를 형성합니다. 사용자는 노즐의 QR 코드를 스캔하기만 하면 광석에서 공장까지 노즐의 전체 "출생 증명서"와 "성장 기록"에 즉시 액세스할 수 있으며, 사용자 현장에서의 서비스 시간 및 유지보수 기록도 확인할 수 있습니다. 이상 발생 시, 시스템은 특정 용광로 번호, 작업자, 장비, 주변 온도 및 습도, 심지어 당일 기압까지 몇 초 내에 추적하여 명확한 책임 소재와 정확한 개선 사항을 보장합니다. 이처럼 시각화되고 추적 가능한 엔드 투 엔드 시스템을 통해 텅스텐 합금 노즐은 "숨겨진 위험 제로, 책임 회피 제로, 후회 제로"라는 최고의 품질 기준을 진정으로 달성할 수 있습니다.

#### 4.8.2 주요 품질 관리 지점 설정

중요 품질 관리 지점(CCP)은 10 개 이상의 극복할 수 없는 임계값을 갖는 고장 모드 및 영향 분석(FMEA) 위험에 따라 순위가 매겨집니다. 원료 단계에서 텅스텐 분말 순도 및 합금 분말 균일성; 성형 단계에서 빌릿 밀도 균일성; 소결 전 단계에서 잔류 탄소 및 응력 방출; 소결 단계에서 최대 온도 및 대기 이슬점; 후처리 단계에서 목 직경 및 내벽 거칠기; 표면 처리 단계에서 코팅 접착력; 최종 치수 교정 및 청결도; 완제품의 100% 기밀성 및 제트 성능 검증. 각 관리 지점에는 온라인 실시간 모니터링과 오프라인 정밀 재테스트의 이중 보호 기능이 장착되어 있습니다. 설정된 창에서 벗어나는 모든 편차는 즉시 자동 경보를 발령하고, 기계를 잠그고, 부적합 제품을 격리하고, 8D 근본 원인 분석 및 예방 조치를 의무화합니다. CCP 데이터는 매일 시각화된 품질 대시보드로 생성되며, 고위 경영진과 기술 팀이 매일 아침 회의에서 검토합니다. 추세가 바뀌면 즉시 생산이 중단되어 개선이 필요합니다.

#### 4.8.3 산업 품질 표준 및 규정 준수 요구 사항

텅스텐 합금 노즐은 이중 준수 시스템을 구축했습니다. 국제 표준을 기준으로 삼는 동시에, 내부 관리 기준은 국가 표준보다 훨씬 엄격합니다. 외부적으로는 ISO 9001, IATF 16949, AS9100, ISO 13485(의료용), NADCAP(용사용) 등의 인증을 엄격히 준수합니다. 주요 공정은 텅스텐 합금 소재 및 노즐에 대한 AMS, ASTM, DIN 규격을 충족합니다. 표면 코팅은 RoHS, REACH, ELV 환경 규정을 준수하며, 청결도는 ISO 14644 Class 100 요건을 충족합니다. 내부적으로는 국제 표준을 훨씬 능가하는 "중국 텅스텐 지능형 제조 노즐 수준 내부 관리 규격"을 시행합니다. 밀도, 경도, 치수 공차, 표면 거칠기, 기계적 특성, 미세 구조를 포함한 30 개 이상의 지표는 모두 국제 표준보다 몇 배에서 수십 배까지 엄격하며, "국제 표준은 합격점이지만 기업 표준은 생명선"이라는 원칙을 진정으로 구현합니다. 회사는 권위 있는 제 3 자 기관과 주요 고객으로부터 매년 현장 검사를 받고 모든 기록을 영구적으로 보관하며, 전 세계 모든 고객의 현장 감사를 언제든지 받을 준비가 되어 있습니다. 업계 평균을 훨씬 뛰어넘는 이러한 이중 내부 및 외부 품질 표준 및 규정 준수 시스템은 텅스텐 합금 노즐을 공정 성능의 최고 제품일 뿐만 아니라 글로벌 하이엔드 제조 체인에서 가장 안정적이고 예측 가능하며 신뢰할 수 있는 핵심 부품으로 만들어줍니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

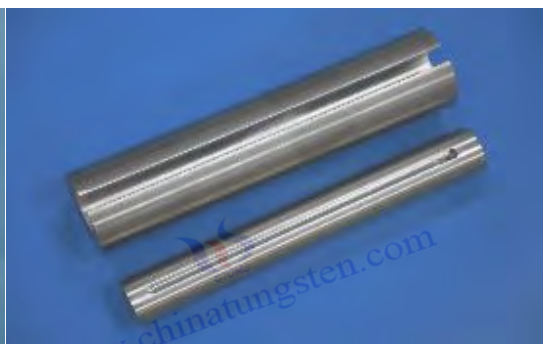
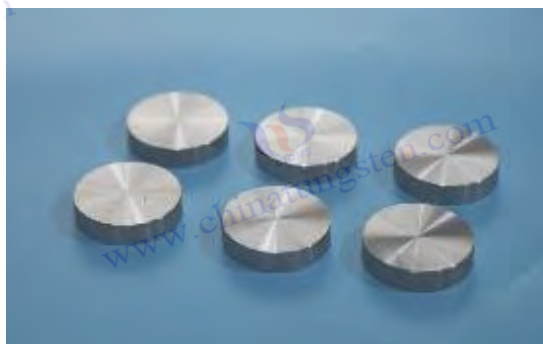
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## 5 장 텅스텐 합금 노즐과 다른 재료의 노즐 비교

### 5.1 텅스텐 합금 노즐과 스테인리스 스틸 노즐 의 비교

스테인리스 스틸 노즐(일반적으로 316L, 17-4PH, 440C 등)은 오랫동안 산업용 세척, 일반 용사, 저압 및 중압 워터젯 시장을 장악해 왔습니다. 그러나 작동 온도, 압력, 연마재 정도, 그리고 청정도 요건이 지속적으로 증가함에 따라 텅스텐 합금 노즐은 그 성능 한계를 완전히 넘어섰습니다. 텅스텐 합금 노즐과 스테인리스 스틸 노즐은 "대체 가능"에서 "작동 조건에 따라 완전히 구분"되는 단계로 전환되었으며, 텅스텐 합금 노즐은 고급 및 극한 환경에서 확고한 입지를 점유하는 반면, 스테인리스 스틸 노즐은 저급 및 온화한 작동 조건으로 후퇴했습니다.

#### 5.1.1 고온 저항성 비교: 온도 허용 범위 및 안정성

스테인리스 스틸 노즐은 600° C 이상에서 연화되고 현저히 산화되기 시작하며, 800° C 에서는 강도가 급격히 저하되어 산화물 스케일이 형성되고, 이 스케일은 계속 벗겨져 인후부(throat)가 빠르게 확장되고 제트 난류가 발생합니다. 반면 텅스텐 합금 노즐은 순수 텅스텐에 가까운 초고융점과 우수한 고온 산화 저항성을 가지고 있습니다. 1500° C 이상의 화염에서도 장시간 경도와 기하학적 형상을 유지할 수 있으며, 2000° C 이상의 고온 에서도 순간적으로 경도와 형상 안정성을 유지하여 표면에 매우 얇고 단단하게 접착된 보호막만 형성되고 거의 벗겨지지 않습니다. 고온 저항의 차이로 인해 텅스텐 합금 노즐은 초음속 화염 분사, 플라즈마 분사, 고출력 레이저 클래딩 과 같은 고온 공정에 사용할 수 있는 유일한 선택 인 반면, 스테인리스 스틸 노즐은 저온 세척이나 저에너지 열 분사에만 사용할 수 있습니다.

#### 5.1.2 내마모성 비교: 마모율과 수명의 차이

경질 연마재를 포함하는 고속 침식 환경에서 스테인리스 스틸 노즐 의 마모율은 일반적으로 텅스텐 합금 노즐보다 수십 배 높습니다.탄화규소, 가넷 및 다이아몬드 등급 연마재는 스테인리스 스틸 표면에 깊은 홈과 심각한 소성 변형을 일으켜 수백 시간 내에 목 직경이 크게 확대되고 제트 발산 각이 지속적으로 증가합니다. 반대로 거의 연속적이고 고경도 텅스텐 골격을 가진 텅스텐 합금 노즐은 연마 충격으로 인해 매우 얇은 자국만 남기고 수천 또는 수만 시간이 지나도 목이 초기 크기를 유지하며 제트 매개변수의 변동이 거의 없습니다.

#### 5.1.3 기계적 성질 비교: 강도와 인성의 적합성 분석

스테인리스 스틸 노즐은 실온에서 우수한 강도와 인성을 갖지만, 고온 및 초고압 하중이 결합되면 빠르게 열화되어 피로 균열 및 전반적인 소성 변형을 쉽게 유발합니다. 반면 텅스텐 합금 노즐은 상온에서 1000° C 까지의 전체 온도 범위에서 매우 높은 강도와 준연성 인성을 유지합니다. 인장 강도, 압축 강도 및 피로 강도가 현저히 우수하며, 초고압 수격 현상 및 강한 반동에도 영구 변형이 거의 발생하지 않습니다. 초고압

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

워터젯(400MPa 초과) 및 고출력 플라즈마 스프레이 건과 같은 극한의 기계적 조건에서 스테인리스 스틸 노즐은 균열이나 붕괴로 인해 조기에 고장나는 경우가 많지만, "깨지지 않고 납작해지지 않는" 성능을 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 장기간 사용 가능하며, 최고의 강도와 충분한 인성 요건을 동시에 충족하는 유일한 스포트 소재가 되었습니다.

#### 5.1.4 경제적 비교: 비용 및 유지 관리 비용의 종합적 평가

텅스텐 합금 노즐은 사용 가능하지만 총 수명 주기 비용(TCO)이 훨씬 높습니다.

그 이유는 다음과 같습니다. 교체 빈도: 스테인리스 스틸 노즐은 수명이 짧아 노즐 교체를 위해 자주 가동을 중단해야 하므로 노동비, 가동 중지 시간 및 폐기 노즐 처리 비용이 매우 높습니다. 단일 텅스텐 합금 노즐로 수십 개의 다른 노즐을 대체할 수 있으므로 노즐 교체 횟수를 크게 줄일 수 있습니다. 공정 안정성: 스테인리스 스틸 노즐의 목에서 오리피스가 빠르게 확장되어 제트 매개변수 드리프트가 발생하여 수율이 감소하고 폐기율이 증가합니다. 텅스텐 합금 노즐은 매개변수를 장기적으로 유지하여 거의 100%의 수율을 달성합니다. 유지 관리의 어려움: 스테인리스 스틸 노즐은 녹, 분말 접착 및 막힘이 발생하기 쉽기 때문에 정기적인 산 세척이나 초음파 세척이 필요합니다. 텅스텐 합금 노즐은 내벽에 녹이 슬지 않고 분말 접착이 거의 없으며 상자에서 꺼내자마자 사용할 수 있습니다.

실제 산업 사례는 고강도 연속 생산 라인에서 텅스텐 합금 노즐을 사용하는 연간 종합 비용이 스테인리스 스틸 노즐의 절반 또는 그 이하에 불과하며, 투자 회수 기간은 일반적으로 6 개월 미만임을 보여줍니다. 텅스텐 합금 노즐은 "엄청나게 비싼 고급 소모품"에서 "적당하고 수익성 있는" 진정으로 경제적인 선택으로 완전히 탈바꿈한 반면, 스테인리스 스틸 노즐은 저부가가치 저가격 제품을 위한 과도기적 제품으로 점차 외면받고 있습니다. 경쟁은 더 이상 단순히 가격만의 문제가 아닙니다. "최저 단기 비용" 대 "최고 장기 가치"라는 완전히 다른 두 가지 산업 철학이 존재합니다.

#### 5.2 텅스텐 합금 노즐과 세라믹 노즐의 비교

텅스텐 합금 노즐과 세라믹 노즐은 모두 고급 내마모성 노즐이지만, 재료 특성, 성능 강조점, 그리고 적용 범위 측면에서 상당한 차이를 보입니다. 텅스텐 기반 복합 구조를 핵심으로 하는 텅스텐 합금 노즐은 경도와 인성 간의 균형을 이루는 반면, 세라믹 노즐은 산화지르코늄이나 탄화규소와 같은 비금속 세라믹으로 주로 제작되어 극한의 경도와 화학적 불활성을 강조합니다. 텅스텐 합금 노즐은 입자가 포함된 고속 칩식 및 열충격 조건에 더 적합한 반면, 세라믹 노즐은 순수 고온 산화성 또는 고부식성 매체에 탁월합니다. 이 두 노즐은 "대체 가능"에서 "작동 조건에 따른 계층화"로 발전하여 현대 제트 가공을 위한 완벽한 노즐 소재 스펙트럼을 형성합니다.

##### 5.2.1 기계적 성질의 비교: 충격 강도와 취성의 차이

텅스텐 합금 노즐은 내충격성 면에서 세라믹 노즐을 훨씬 능가합니다. 복합 구조는 경질

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



텅스텐 입자 골격과 연성 바인더 간의 완벽한 시너지 효과를 제공하여 노즐에 충분한 연성 완충 용량을 제공합니다. 경질 입자를 포함하는 고속 충격이나 순간적인 열충격에도 매우 얇은 소성 변형만 발생하며 파괴적인 파손은 발생하지 않습니다. 세라믹 노즐은 경도가 더 높지만 본질적으로 매우 취성적입니다. 단 한 번의 우발적인 과부하나 사소한 결함만으로도 전체 파손으로 이어질 수 있으며, 특히 잦은 진동이나 충격 조건에서는 더욱 그렇습니다. 파손 형태는 종종 갑작스럽고 예고되지 않은 취성 파괴입니다.

텅스텐 합금 노즐의 균열은 결합체의 가교 효과에서 비롯됩니다. 균열이 발생하면 빠르게 부동태화되어 연성상에 흡수되어 균열 전파 경로를 효과적으로 차단합니다. 반면, 세라믹 노즐의 균열은 일단 발생하면 결정립계를 따라 또는 결정립 내부에서 선형적으로 전파되어 인성이 거의 없고 자가 치유가 불가능합니다. 이러한 차이는 용사 및 워터젯 절단 분야에서 생생하게 입증됩니다. 텅스텐 합금 노즐은 안정적인 스포트 치수로 수천 시간의 입자 침식을 견딜 수 있는 반면, 세라믹 노즐은 누적된 미세 충격으로 인해 수백 시간 이내에 갑자기 파손됩니다. 텅스텐 합금 노즐은 세라믹보다 취성이 훨씬 낮아 깨지지 않고 충격에 강한 신뢰성이 요구되는 복잡한 작동 조건에서 유일한 선택입니다. 반면 세라믹 노즐은 정적 하중이나 순수 고온 비충격 환경에 더 적합합니다.

### 5.2.2 내마모성 비교: 경질 입자 마모 및 연마 마모 성능

텅스텐 합금 노즐과 세라믹 노즐은 각각 경질 입자 마모 및 연삭 마모 성능 측면에서 탁월하지만, 텅스텐 합금 노즐은 전반적으로 더 균형 잡힌 성능을 제공하며 복잡한 작업 조건에 더 적합합니다. 텅스텐 합금 노즐의 내마모성은 연속적인 텅스텐 골격과 연성 결합체 상 간의 시너지 효과에서 비롯됩니다. 경질 입자가 충돌할 때 텅스텐 입자는 매우 높은 내마모성을 제공하여 얇은 소성 홈만 형성하는 반면, 결합체 상은 충격 에너지를 흡수하고 미세 손상을 빠르게 복구하여 매우 낮고 균일한 마모율을 제공합니다. 경도가 높은 세라믹 노즐은 입자가 표면 침투에 어려움을 겪기 때문에 순수한 경질 입자 마모에서 더 우수한 성능을 발휘합니다. 그러나 미세 균열이 발생하면 빠르게 확산되어 박리 파손으로 이어집니다. 열분사와 같이 연마 입자가 포함된 고속 기류에서 텅스텐 합금 노즐은 점진적이고 균일한 박육화 마모 패턴을 보이며, 목 크기 변화는 느리지만 장기간 안정적인 분사 품질을 유지합니다. 반면, 세라믹 노즐은 입자로 인한 균열로 인해 갑작스러운 칩핑이 발생하기 쉬워 예측 불가능한 파손을 초래합니다. 연마 입자가 포함된 초고압 워터젯 적용 분야에서 텅스텐 합금 노즐의 인성과 완충 특성은 캐비테이션 기포 붕괴의 충격을 효과적으로 흡수하여 세라믹 노즐의 피로 박리율보다 연마 마모율이 현저히 낮습니다. 전반적으로 텅스텐 합금 노즐은 내마모성 측면에서 더 높은 "인성과 내구성"을 제공하는 반면, 세라믹 노즐은 더 "단단하고 수명이 짧습니다." 전자는 충격과 열 마모가 복합적으로 발생하는 환경에서 우수한 반면, 후자는 순수 화학적 부식이나 고온의 입자 없는 환경에서 더 유리합니다.

### 5.2.3 가공성능 비교: 성형정확도 및 복잡한 구조에 대한 적응성

텅스텐 합금 노즐은 가공 성능 면에서 세라믹 노즐을 훨씬 능가합니다. 합금 구조는 충분한 인성과 가소성을 제공하여 분말 야금, 정밀 가공, 심공 드릴링, 와이어 커팅,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

레이저 마감 등을 통해 복잡한 내부 유동 채널, 가변 단면 확장 섹션, 통합 냉각 채널, 다중 스포트 배열과 같은 기하학적 한계를 쉽게 달성할 수 있습니다. 반면, 세라믹 노즐은 취성이 강하기 때문에 가공 과정에서 균열 위험이 높고, 복잡한 구조는 단순한 성형과 제한된 연삭에만 의존하여 구현하기가 거의 불가능합니다.

프레스 성형을 통해 거의 모든 중형비로 성형할 수 있어 소결 후 매우 넓은 가공 범위와 치핑 없는 거울과 같은 표면 조도를 얻을 수 있습니다. 반면, 세라믹 노즐 블랭크는 수축이 불균일하고 가공 중 응력 집중으로 인해 쉽게 파손됩니다. 텅스텐 합금 노즐보다 성형 정확도와 복잡한 구조에 대한 적응성이 훨씬 낮습니다. 텅스텐 합금 노즐은 브레이징이나 나사 가공이 용이한 반면, 세라믹 노즐은 연결 시 파손되기 매우 쉽습니다. 텅스텐 합금 노즐의 가공성은 설계자가 최적의 유동 형상을 구현할 수 있도록 하는 반면, 세라믹 노즐은 가공 한계로 인해 종종 타협해야 하는 단점이 있습니다.

#### 5.2.4 신뢰성 비교: 열충격 저항성 및 사용 안정성 분석

텅스텐 합금 노즐은 열충격 저항성과 작동 안정성 면에서 세라믹 노즐을 능가합니다. 합금 복합 구조는 견고한 접합면을 통해 열응력을 효과적으로 흡수하고 분산시켜 수천 번의 급격한 온도 변화에도 미세 균열이 거의 발생하지 않습니다. 반면, 세라믹 노즐은 열충격에 매우 민감하여 단 한 번의 급격한 온도 변화만으로도 노즐 전체가 파손될 수 있습니다.

균열 없이 수천 번의 점화-소화 사이클을 견딜 수 있으며, 노즐의 목 크기와 원뿔 각도는 장기간 안정적으로 유지됩니다. 반면 세라믹 노즐은 열충격으로 인해 네트워크 균열이 발생하기 쉬워 안정성이 크게 저하됩니다. 텅스텐 합금 노즐의 열충격 저항성은 복잡한 작동 조건에서도 "변형이나 제어력 저하 없이" 신뢰성을 보장하는 반면, 세라믹 노즐은 일정한 온도 또는 낮은 열충격 환경에 더 적합합니다.

#### 5.3 텅스텐 합금 노즐과 구리 합금 노즐의 비교

구리 합금 노즐(일반적으로 순수 구리, 무산소 구리, 크롬 지르코늄 구리, 알루미늄 청동 등으로 제작)은 우수한 열전도도, 저렴한 비용, 그리고 가공 용이성으로 인해 한때 플라즈마 분사, 워터젯 가이드 노즐, 그리고 극저온 세정에 널리 사용되었습니다. 그러나 공정이 고온, 강한 침식, 그리고 긴 수명으로 발전함에 따라 구리 합금 노즐의 연화, 삭마, 마모 및 변형 문제가 점점 더 두드러지게 되었고, 결국 대부분의 고급 응용 분야에서 텅스텐 합금 노즐로 완전히 대체되었습니다. 이제 두 합금 사이에는 명확한 차이가 나타났습니다. 구리 합금은 저온, 저마모성, 그리고 짧은 수명의 응용 분야로 후퇴한 반면, 텅스텐 합금은 고온, 고마모성, 그리고 긴 수명의 응용 분야에서 확고한 우위를 점하고 있습니다.

##### 5.3.1 고온 강도 비교: 고온 환경에서의 기계적 특성 유지율

구리 합금 노즐은 400° C 이상에서 상당히 연화되기 시작하고, 600° C 에서는 강도가

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

실온의 몇 분의 일에도 미치지 못합니다. 목 부분은 빠르게 소성 변형을 겪거나, 고온 화염 속에서 붕괴되거나, 심지어 녹아서 떨어져 나가 형상 제어가 완전히 불가능해집니다. 반면 텅스텐 합금 노즐은 전체 온도 범위에서 매우 높은 강도 유지율을 유지합니다. 1200° C 이상으로 연속 가열되거나 순간적으로 2000° C 에 근접하더라도 경도와 압축 강도는 최소 감소를 보이며, 목 부분의 직경과 원뿔 각도는 거의 변하지 않습니다. 이러한 차이는 구리의 낮은 재결정 온도와 빠른 고온 입계 이동에서 비롯되는 반면, 텅스텐 합금은 텅스텐 골격의 초고융점과 결합재 상의 강화 효과에 의존하여 안정적인 고온 하중 지지 네트워크를 형성합니다. 초음속 화염 용사, 대기압 플라즈마 용사, 동축 분말 공급 방식의 레이저 클래딩과 같은 고온 공정에서 구리 합금 노즐은 수 분에서 수 시간 내에 연화되어 사용할 수 없게 되는 경우가 많지만, 텅스텐 합금 노즐은 수천 시간 동안 안정적으로 작동할 수 있습니다. 구리 합금 노즐은 모든 진정한 고온 노즐 단계에서 완전히 철수했습니다.

### 5.3.2 서비스 수명 비교: 다양한 작동 조건에서 감쇠 패턴의 차이

구리 합금 노즐의 수명 저하는 전형적인 "초기 느린 감소, 중기적인 가속 감소, 그리고 눈사태와 같은 파손" 패턴을 보입니다. 초기에는 구리 자체의 연성으로 인해 형태를 유지하지만, 표면이 연마재에 의해 긁히거나 국부적인 과열로 인해 연화되면 마모와 변형이 급격히 가속화되어 결국 기하급수적인 파손으로 이어집니다. 이와 대조적으로 텅스텐 합금 노즐의 수명 저하는 이상적인 "선형적으로 느린" 곡선에 가깝습니다. 텅스텐 골격은 일정한 높은 경도를 제공하고, 결합재 상은 지속적인 인성을 제공하며, 스포트 직경 팽창률은 매우 낮고 예측 가능하며, 수명이 다할 때까지 우수한 분사 품질이 유지됩니다. 초고압 연마재 분사, 용사 분말 공급, 산업용 세척과 같은 일반적인 작동 조건에서 구리 합금 노즐의 수명은 텅스텐 합금 노즐의 1/100 에서 1/7 정도로 텅스텐 합금 노즐의 몇 분의 1 에 불과하며, 분사 매개변수는 고장 발생 직전까지 크게 변동하여 수율이 크게 저하됩니다. "1,000 시간을 1 시간처럼 사용"하는 안정성을 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 노즐 교체 빈도를 최소화하여 생산 라인의 노즐 수명에 대한 인식을 완전히 바꿔놓았습니다.

### 5.3.3 열전도도 비교: 열전도 특성과 온도 분포

구리 합금은 매우 높은 열전도도를 가지고 있어 표면 온도 구배를 최소화하면서 열이 목에서 외벽으로 즉시 전달되어 이론적으로 빠른 열 방출을 촉진합니다. 그러나 실제 고온, 고에너지 밀도 응용 분야에서는 이러한 장점이 치명적인 단점이 됩니다. 고온 강도가 부족하여 열 전달은 빠르지만 구리 합금은 이로 인한 열 연화 및 변형을 견딜 수 없어 목이 빠르게 붕괴됩니다. 텅스텐 합금 노즐은 구리 합금보다 열전도도는 낮지만 세라믹 및 스테인리스강보다 훨씬 높은 열전도도를 가지고 있어 매우 높은 연화 온도와 완벽하게 일치합니다. 열전도는 매우 빠르기 때문에 최고 목 온도를 안전 한계점 아래로 유지하는 동시에 재료 자체는 이 온도에서 매우 높은 강도를 유지하여 "내부 과열 없음 및 빠른 외부 냉각"이라는 이상적인 온도 분포를 제공합니다. 실제 고출력 플라즈마 분사 및 레이저 클래딩 에서 구리 합금 노즐은 국소적인 순간 과열로 인해 종종 타버리는 반면, 텅스텐 합금 노즐은 보다 합리적인 열전도도-강도 결합으로 "열전달이 효과적이고 목이

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



열을 전달 수 있는" 완벽한 균형을 이루므로 구리 합금을 훨씬 뛰어넘는 수명과 안정성을 제공합니다.

#### 5.3.4 내식성 비교: 산 및 알칼리 매체에서의 내식성 성능

순수 구리와 일반 구리 합금은 산성 매체(특히 질산, 황산, 왕수)에 잘 용해되며, 알칼리 및 염소 함유 매체에서는 탈아연화 또는 응력 부식 균열이 발생하기 쉽습니다. 표면에 다공성 부식 생성물이 빠르게 형성되어 스로트 거칠기가 급격히 증가하고 유량 제어 문제가 발생합니다. 그러나 텅스텐 합금 노즐은 완전히 다른 내식성 특성을 보입니다. 텅스텐-니켈-철 시스템은 고온 산화 분위기에서 탁월한 성능을 발휘하는 반면, 텅스텐-니켈-구리 시스템은 산, 알칼리, 해수, 염수 분무, 소독제를 포함한 전체 pH 범위에서 화학적으로 거의 불활성이어서 눈에 띄는 부식이 거의 없고 장기간 거울과 같은 마감을 유지합니다. 해상 풍력 터빈 블레이드 녹 제거, 화학 파이프라인의 산 및 알칼리 세척, 식품 및 제약 산업의 무균 세척, 핵 오염 제거와 같은 부식성 환경에서 구리 합금 노즐은 단 수백 시간 만에 공식 부식, 틈새 부식 또는 전반적인 용해 불량을 나타내는 경우가 많습니다. 반면, 텅스텐-니켈-구리 노즐은 수천 시간 후에도 내벽에 금속 이온 침전 없이 밝고 새것처럼 유지되어 가장 엄격한 청정도 및 생체 적합성 요건을 완벽하게 충족합니다. "녹슬지도 않고 용해되지도 않는" 절대적인 내식성을 자랑하는 텅스텐 합금 노즐은 부식성 매체를 사용하는 모든 고급 응용 분야에서 구리 합금 노즐을 완전히 대체했습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 노즐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## 제 6 장 : 텅스텐 합금 노즐의 적용 분야

### 6.1 산업 제조에서의 텅스텐 합금 노즐의 적용

텅스텐 합금 노즐은 뛰어난 내열성, 내마모성, 내충격성, 그리고 치수 불변성을 갖추고 있어 현대 산업 제조 분야에서 가장 까다로운 분사 공정에 가장 선호되는 유일한 솔루션이 되었습니다. 텅스텐 합금 노즐은 더 이상 단순한 "마모 부품"이 아니라, 전체 생산 라인의 사이클 타임, 품질, 그리고 비용을 결정하는 핵심 기능 부품으로 여겨집니다.

#### 6.1.1 용접 및 절단: 고온 분무용 텅스텐 합금 노즐

고에너지 빔 용접 및 절단 분야(플라즈마 용접, 플라즈마 절단, 레이저-플라즈마 하이브리드 용접, 초고온 산소-연료 절단)에서 아크 구속 및 플라즈마 압축 스톱트 역할을 하는 텅스텐 합금 노즐은 수천도에서 수만도에 달하는 온도에서 아크와 반사 에너지를 직접 마주합니다. 일반 구리 노즐은 몇 초 안에 제거 및 변형되는 반면, 초고용점, 뛰어난 산화방지성, 고온 강도를 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 수천 시간 동안 아크를 지속적이고 안정적으로 구속하여 장기간 고정된 아크 압축비와 에너지 밀도를 유지하며, 커프 폭, 용접 깊이 대 폭 비율, 표면 조도의 배치 간 변동이 전혀 없습니다. 항공우주용 두꺼운 티타늄 합금판 용접, 원자력 등급 파이프 라인의 원주 용접, 고속철도 절단과 같은 극한 상황에서 텅스텐 합금 노즐은 공정 인증을 통과한 유일한 스톱트 소재가 되었습니다.

#### 6.1.2 표면 코팅: 분무 성형용 텅스텐 합금 노즐

표면 코팅(HVOF, APS, 레이저 클래딩의 동축 분말 공급)은 노즐에 매우 까다로운 요건을 부여합니다. 노즐은 단단한 입자가 포함된 초고온, 고속 화염을 견뎌야 하는 동시에 입자 속도와 온도 분포를 수천 시간 동안 안정적으로 유지해야 합니다. 텅스텐 합금 노즐은 침식에 강한 거의 연속적인 텅스텐 골격, 라발 유동장을 고정하는 매우 높은 치수 안정성, 그리고 점화-급냉 사이클에 대한 뛰어난 열충격 저항성을 갖추고 있어, 단일 도포로 단조 수준의 코팅 밀도, 접합 강도 및 배치 일관성을 달성할 수 있는 유일한 스톱트 소재가 되었습니다. 항공기 엔진 블레이드용 열 차단 코팅, 재제조 수리, 자동차 실린더 보어 벽 보강, 석유 및 가스 시추 비트용 하드페이싱 코팅과 같은 고급 코팅 라인에서 텅스텐 합금 노즐은 오랫동안 영구 공정 문서에 포함되는 필수 구성 요소였습니다.

#### 6.1.3 야금 주조: 고온 용융 흐름용 텅스텐 합금 노즐

진공 소모성 용융, 전자빔 용융, 플라즈마 용융, 정밀 주조 분무 분말 생산과 같은 고온 야금 공정에서 용융 가이드, 가스 분무기, 보호 가스 스톱트 역할을 하는 텅스텐 합금 노즐은 1600° C 를 초과하는 온도에서 용융 티타늄 합금, 니켈 기반 초합금, 활성 금속에 직접 접촉합니다. 일반적인 흑연이나 세라믹 노즐은 용융물에 의해 젖거나 침식되거나 열충격에 의해 파괴되는 반면, 텅스텐 합금 노즐은 매우 높은 용융점, 매우 낮은 열팽창, 뛰어난 용융 침식 저항성을 통해 안정적인 용융 흐름, 매우 좁은 분무 입자 크기 분포, 그리고 매우 높은 분말 구형도를 보장합니다. 항공우주 등급 티타늄 합금 분말, 3D 프린팅

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

초합금 분말, 자기 분무 분말 생산에서 텅스텐 합금 노즐은 최종 분말 품질과 수율을 결정하는 절대적인 병목 요소가 되었습니다.

#### 6.1.4 정밀 세척: 고압 분사용 텅스텐 합금 노즐

초고압 순수 및 연마제가 포함된 워터젯 세척(원자력 시설 제염, 해상 풍력 터빈 블레이드 도료 제거, 항공우주 복합재 조면화, 정밀 금형 캐비티 세척)에서 텅스텐 합금 노즐은 수백 메가파스칼의 수직 현상, 수백만 번의 압력 펄스, 고부식성 매체, 그리고 단단한 연마제라는 네 배의 고통을 겪습니다. 사파이어 및 카바이드 노즐은 수백 시간 후 캐비테이션이 발생하여 구멍이 벗겨지거나 커지는 경우가 많지만, 초고강도, 뛰어난 캐비테이션 저항성, 그리고 거울 등급의 내벽을 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 수천 시간 동안 초기 상태의 커프 폭, 표면 거칠기, 그리고 제거 효율을 유지합니다. 원자력 발전소의 1 차 루프 세척, LNG 저장 탱크 내벽의 녹 제거, 식품 및 제약 산업의 CIP 온라인 세척과 같이 청결과 안정성에 대한 요구 사항이 매우 높은 상황에서 텅스텐 합금 노즐은 가장 엄격한 규정과 공정 인증을 충족하는 유일한 스포트 소재가 되었습니다. 산업 제조 분야에 텅스텐 합금 노즐이 광범위하게 보급되면서 텅스텐 합금 노즐은 "고급 소모품"에서 "공정의 핵심"으로 격상되었습니다. 극한의 온도, 극한의 압력, 극심한 마모, 그리고 극한의 청결 상태를 요구하는 분무 작업장이라면 텅스텐 합금 노즐이 거의 예외 없이 사용됩니다.

#### 6.2 에너지 및 광업 분야에서 텅스텐 합금 노즐의 적용

에너지 및 광업 산업은 인류 역사상 가장 극한의 작업 환경이 집약된 분야입니다. 초고압, 고온, 고마모, 강한 부식, 그리고 강한 방사선이 모두 동시에 발생합니다. 다재다능한 성능을 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 이 분야에서 가장 까다로운 분사 작업에 필요한 안정적인 노즐로 자리매김했습니다.

##### 6.2.1 석유 시추: 고압 암석 파쇄용 텅스텐 합금 노즐

고압 유압식 암석 파쇄, 시추공 완성 천공, 석유 및 가스 시추공 막힘 해소 및 생산 증대와 같은 시추 작업에서, 드릴 비트 또는 천공 건의 핵심 암석 파쇄 요소인 텅스텐 합금 노즐은 수백 메가파스칼의 순간적인 수직 현상, 석영 모래와 암석 절삭물을 포함한 고속 연마류, 그리고 산성화 파쇄 유체의 강한 부식에 직접적으로 노출됩니다. 일반 초경합금 노즐은 수백 시간 후 심각한 오리피스 확대 및 제트 발산을 경험하며, 암석 파쇄 효율과 방향성이 급격히 감소합니다. 이와 대조적으로, 초고압 압축 강도, 캐비테이션 및 박리 저항성, 그리고 매우 좁은 스포트 허용 오차를 가진 텅스텐 합금 노즐은 초기 최대 제트 속도, 초점 및 암석 파쇄 효율을 수천 시간 동안 유지합니다.

##### 6.2.2 석탄가스화: 고온반응용 텅스텐 합금 노즐

석탄 가스화 공정(텍사코, 쉘, 4 노즐 대향 가스화기)은 용융 슬래그 입자와 환원 가스가 고농도로 포함된 1500° C 이상의 극한 환경에서 미분탄, 증기, 산소를 정밀하게 분무하고

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

안정적으로 연소시키기 위한 노즐이 필요합니다. 일반적인 내화성 또는 수냉식 구리 노즐은 용융 슬래그에 의해 빠르게 침식되거나 열응력으로 인해 균열이 발생합니다. 초고융점, 용융 슬래그 침식, 열충격 및 산화에 대한 탁월한 저항성을 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 4 개 이상의 노즐 대칭성과 분무 콘 각도 의 장기 안정성을 보장하여 가스화기의 유효 가스 조성과 탄소 전환율을 수만 시간 동안 최고 수준으로 유지합니다. 연간 가동 시간이 8,000 시간을 초과하는 단일로를 갖춘 현대의 대규모 석탄 가스화 플랜트에서 텅스텐 합금 노즐은 "장주기, 전부하, 계획되지 않은 정지 없음"을 달성하는 유일한 핵심 버너 구성 요소가 되었습니다.

### 6.2.3 열전 발전: 탈황 및 탈질소용 텅스텐 합금 노즐

습식 탈황 분무탑과 선택적 촉매 환원(SCR) 탈질 시스템의 이중 유체 분무 노즐은 고농도의 석회석 슬러리, 석고 입자, 비산재, SO<sub>2</sub>, NOx 및 염화물 이온을 포함하는 매우 부식성 및 연마성이 높은 환경에 노출됩니다. 일반 스테인리스강 및 경질 합금 노즐은 단 몇 천 시간 만에 심각한 마모, 막힘 또는 파손을 겪어 탈황 및 탈질 효율에 상당한 변동을 초래하는 경우가 많습니다. 반면, 텅스텐 합금 노즐(특히 비자성, 내식성 텅스텐-니켈-구리 블렌드 노즐)은 경면 마감 내벽, 우수한 내마모성 및 내부식성, 그리고 치수 안정성을 갖추고 있어 분무된 입자 크기, 도포 균일성 및 분무 밀도를 수만 시간 동안 설계 최적값으로 유지하여 탈황 및 탈질 효율이 국가 초저배출 기준을 지속적으로 초과합니다. 600MW 이상의 초초임계 장치에서 텅스텐 합금 노즐은 거의 제로 배출과 장기 작동을 달성하기 위한 필수 하드웨어가 되었습니다.

### 6.2.4 핵에너지 활용: 방사선 저항 환경을 위한 텅스텐 합금 노즐

원자력 에너지 이용에 있어 가장 까다로운 방사선 환경(원자로 1 차 루프 세척, 핵폐기물 처리, 핵연료 집합체 제염, 동위원소 생산 표적 냉각, 고온 챔버 정밀 분사)에서는 노즐이 강력한 중성자 및 감마선, 고온 고압 방사성 매질, 강한 산 및 알칼리 부식, 그리고 고체 입자에 의한 침식을 견뎌야 합니다. 일반 재료는 방사선 팽윤, 취성, 그리고 부식 천공으로 인해 수개월 이내에 파손됩니다. 그러나 방사선 팽윤이 거의 없고, 취성 경향이 매우 낮으며, 고온 강도가 우수하고, pH 내식성이 완벽한 텅스텐 합금 노즐은 원자로 또는 고온 챔버에서 수년간 기하학적으로 온전하고 분사 안정성을 유지하여 최대 제염 효율, 최소 폐기물량, 그리고 2 차 오염 제로를 보장합니다. 첨단 가압수형 원자로, 고속로, 핵융합로 표적 챔버, 그리고 고프럭스 동위원소 생산 시설에서 텅스텐 합금 노즐은 가장 엄격한 원자력 등급 인증을 통과하고 가장 심각한 방사선 노심 구역에 장기 배치될 수 있는 유일한 정밀 분사 부품이 되었습니다. 텅스텐 합금 노즐은 에너지 및 광업 산업에 깊이 통합되어 "고급 소모품"에서 "공정 생명선"으로 격상되었습니다. 텅스텐 합금 노즐은 극한의 압력, 극한의 온도, 극한의 마모, 극한의 부식, 그리고 극한의 방사선을 사용하는 모든 분사 스테이션에 중요한 선택이 되었습니다.

## 6.3 고급 장비에서의 텅스텐 합금 노즐의 적용

고급 장비의 노즐에 대한 요구 사항은 더 이상 "얼마나 오랫동안 사용할 수 있는가"가

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

아니라 "고장률 제로, 드리프트 제로, 오염 제로, 위험 제로"입니다. 텅스텐 합금 노즐은 전체 온도 치수 정확도, 이론에 가까운 내마모성 밀도, 완벽한 청정도, 그리고 생체/전자기 적합성을 갖춰 항공우주, 철도 운송, 의료 기기, 전자 제조와 같이 가장 까다로운 분야에서 표준 해답이자 합법적인 선택지가 되었습니다.

### 6.3.1 항공우주: 엔진 가스 분사용 텅스텐 합금 노즐

터보팬/터보샤프트 엔진의 연소실, 애프터버너, 냉각 및 퍼징 시스템에서 텅스텐 합금 노즐은 연료 분무, 화염 안정화, 배기가스 냉각, 고압 퍼징을 위한 스톱트 역할을 합니다. 1800° C 를 초과하는 고온 연소 가스, 탄소 입자 침식, 심한 진동, 그리고 급격한 온도 변화에 직접 노출됩니다. 일반 니켈 기반 또는 스테인리스 스틸 노즐은 수백 시간 후 코크스화, 연소 또는 균열이 발생하는 반면, 초고융점, 뛰어난 산화저항성, 내열충격성, 그리고 치수 안정성을 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 분무 원뿔 각도, 입자 크기 분포, 그리고 냉각 기류 속도가 수만 시간 동안 표류하지 않도록 보장합니다. 텅스텐 합금 노즐은 CFM56, LEAP, CJ1000A, AECC 상용 엔진 등 주요 엔진의 연소실 및 시험대뿐만 아니라 다른 여러 주요 모델의 노즐 소재로 지정되었습니다.

### 6.3.2 철도 교통: 제동 시스템 냉각용 텅스텐 합금 노즐

고속 열차(350km/h 이상 속도) 및 중량 화물 열차의 공압 디스크 복합 제동 시스템에서 텅스텐 합금 노즐은 브레이크 디스크/패드와 고압 공기 냉각 및 먼지 제거에 사용됩니다. 이 노즐은 800° C 를 초과하는 순간 제동 열 부하, 철분과 석면 섬유를 함유한 고속 연마 흐름, 그리고 잦은 시동-정지 충격을 직접 견뎌냅니다. 일반 노즐은 수천 킬로미터 주행 후 마모되거나 막혀 브레이크 페이드 및 먼지 축적으로 이어집니다. 반면, 거울과 같은 내벽, 매우 높은 내마모성 및 내부식성, 그리고 치수 불변성을 가진 텅스텐 합금 노즐은 수십만 킬로미터 주행에도 일정한 냉각 공기 흐름 속도와 균일한 적용 범위를 유지합니다. 텅스텐 합금 노즐은 푸싱(Fuxing) 및 하모니(Harmony) 중량 화물 기관차뿐만 아니라 유럽 ICE 및 TGV 와 같은 고급 전동차 의 제동 시스템에서 핵심적인 장수명 부품으로 자리 잡았습니다.

### 6.3.3 의료기기: 정밀 분무용 텅스텐 합금 노즐

약물 흡입기, 무침 인슐린 주사기, 안과 수술 세척, 치과용 수공기 분사, 임플란트용 약물 방출 코팅과 같은 고급 의료기기에서 텅스텐 합금 노즐(특히 비자성 텅스텐-니켈-구리-포몰러와 의료용 등급의 청결도를 갖춘 노즐)은 약물 입자 크기, 분사 정확도, 그리고 생체적합성을 결정하는 궁극적인 인후 역할을 합니다. 텅스텐 합금 노즐은 절대 비자성, 금속 이온 방출 없음, 멸균 청결, 그리고 용출성 물질 없음을 요구합니다. 일반 스테인리스 스틸이나 플라스틱 노즐은 전자파 적합성(EMC)과 생물안전 규정을 모두 충족할 수 없습니다. 텅스텐 합금 노즐은 완벽한 pH 화학적 불활성, 거울 마감 처리된 내벽, 무자성, 그리고 가장 엄격한 ISO 10993 생체적합성 인증을 통해 약물 분무 입자 크기의 배치별 편차를 미크론 미만 수준으로 보장합니다. 이로 인해 이 제품은 바늘 없는 주사기, 건조 분말 흡입기, 고급 치과 장비 분야의 세계적인 선두 브랜드에서 합법적인

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



노즐 소재로 사용될 수 있게 되었습니다.

#### 6.3.4 전자 제조: 칩 패키징용 텅스텐 합금 노즐

플립칩 본딩, 웨이퍼 레벨 패키징, 미니/마이크로 LED 물질 전달 분무, 언더필 접착제의 정밀 분사, 플라즈마 세정 및 포토레지스트 분무 시스템에서 솔더 접합 일관성, 접착제 경로 정확도 및 청결도를 결정하는 핵심 구성 요소인 텅스텐 합금 노즐은 서브마이크론 수준의 스로트 공차, 나노미터 수준의 내벽 거칠기, 제로 미립자 오염 및 매우 높은 정전기 방지/전자기 적합성을 요구합니다. 일반 사파이어 또는 스테인리스 스틸 노즐은 입자 생성, 정전기 흡착 또는 스로트 드리프트가 발생하기 쉬워 극히 일부라도 용납할 수 없는 수율 손실을 초래합니다. 이론적으로 높은 내마모성, 내벽의 경면 마감 + 저마찰 코팅, 완벽한 동축성 및 제어 가능한 전도도를 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 수십만 사이클 후에도 초기 분사/분사 정확도와 청결도를 유지합니다. TSMC, 삼성, 인텔, 화웨이 하이실리콘 등 세계 최고 수준의 패키징 및 테스트 라인에서 필수적인 노즐 소재가 되었습니다. 텅스텐 합금 노즐이 하이엔드 장비에서 완전히 장악하면서 "대안이 있는가"라는 질문은 무의미해졌습니다. 텅스텐 합금 노즐은 더 이상 선택 사항이 아니라 설계 사양, 공급업체 목록, 인증 카탈로그에 직접 명시된 "필수" 항목입니다. 단일 텅스텐 합금 노즐 뒤에는 전체 하이엔드 장비에서 가장 취약한 부품의 완벽한 응고가 있습니다.

#### 6.4 특수 엔지니어링 분야에서 텅스텐 합금 노즐의 적용

신뢰성, 환경 적응성, 그리고 성능 마진에 대한 최고 수준의 요건을 갖춘 특수 엔지니어링 환경에서 텅스텐 합금 노즐은 오랫동안 일반 산업용 소모품의 범주를 넘어 시스템의 성공과 실패를 결정하는 전략적 핵심 부품으로 자리매김해 왔습니다. "연소에 의한 손상, 충격에 의한 파손, 진동에 의한 균열, 방사선에 의한 팽창, 부식에 의한 손상"을 방지하는 텅스텐 합금 노즐의 종합적인 극한 성능은 가장 엄격한 설계 사양에 포함될 만큼 뛰어난 몇 안 되는 노즐 소재 중 하나입니다.

##### 6.4.1 군용 장비: 특수 분무 시스템용 텅스텐 합금 노즐

고에너지 제트 세척, 특수 표면 처리, 극한 환경 오염 제거 및 비상 정비 장비에서 텅스텐 합금 노즐은 초고압, 고마모성, 고독성 또는 부식성 매체, 극심한 온도 차이 및 강한 진동에 직접 노출되는 핵심 액추에이터 역할을 합니다. 일반 재질의 노즐은 종종 몇 분에서 몇 시간 내에 고장이 발생하여 임무 중단으로 이어집니다. 반면, 초장수명, 제로 매개변수 드리프트, 그리고 절대적으로 안전한 고장 모드(파쇄 및 2 차 파편 생성 없이 팽창)를 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 가장 가혹한 조건에서도 장비의 지속적인 작동 능력과 인명 안전을 보장하며, 여러 주요 특수 제트 세척 시스템의 인증된 스로트 소재로 자리매김했습니다.

##### 6.4.2 우주 발사: 추진 시스템용 텅스텐 합금 노즐

항공우주 발사 및 궤도 제어 시스템에서 텅스텐 합금 노즐은 자세 및 궤도 제어 엔진

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

노즐 스톱트 라이너, 위성 추진제 밸브 노즐, 지상 시험체 냉각 노즐, 고압 헬륨 퍼징 노즐에 널리 사용됩니다. 이러한 구성 요소는 액체 산소/등유, 액체 산소/메탄, 사산화질소/비대칭 디메틸... HYD와 같은 고산화성 또는 부식성 추진제, 수천 도에 달하는 순간적인 연소실 온도, 발사 및 재진입 시 발생하는 심한 진동을 동시에 견뎌야 합니다. 매우 높은 용점, 뛰어난 열충격 저항성, 거의 0에 가까운 절삭률, 치수 정확도를 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 엔진의 추력 백터와 비추력이 수천 초 동안 감소하지 않도록 보장하며, 중량물 운반 발사체, 1 단계 회수, 심우주 탐사선, 유인 우주선 자세 및 궤도 제어 시스템의 핵심 구성 요소가 되었습니다.

#### 6.4.3 화학 비상 대응: 부식성 매체 취급을 위한 텅스텐 합금 노즐

화학 사고 비상 대응, 유해 물질 처리, 그리고 고부식성 매질에서의 중화 및 오염 제거 작업에서 텅스텐 합금 노즐(특히 비자성, 내식성 텅스텐-니켈-구리 혼합물)은 이동식 또는 차량 장착형 초고압 분사 시스템의 핵심 구성 요소로, 고농도 산, 알칼리, 강산화제, 고독성 유기물, 생화학 물질과 직접 접촉합니다. 일반 재질의 노즐은 몇 분 안에 용해되거나 천공되는 반면, 전체 pH 범위에서 화학적 불활성에 가까운 특성, 경면 마감 처리된 내벽, 그리고 매우 높은 강도를 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 가장 가혹한 매질에서도 분사 매개변수와 분무 효과가 수 시간 동안 안정적으로 유지되도록 하여 2차 오염 및 갑작스러운 노즐 고장 위험을 완전히 제거합니다. 텅스텐 합금 노즐은 주요 비상 사태에 대비한 국가 비상 대응 시스템의 표준 장비로 자리 잡았습니다.

#### 6.4.4 심해 탐사: 고압 환경용 텅스텐 합금 노즐

심해 탐사선, 심해 채굴 장비, 그리고 심해 과학 연구를 위한 고압 유압 절단 및 세척 시스템에서 텅스텐 합금 노즐은 수천 기압의 외부 압력 하에서 유일하게 움직이는 부품으로서, 해수의 고압 침투, 해사 및 암석 파편에 의한 고속 연마 침식, 강한 염화물 이온 부식, 그리고 극저온을 동시에 견뎌야 합니다. 일반 재질의 노즐은 심해의 압력 하에서 빠르게 변형, 캐비테이션 또는 부식되는 반면, 초고압 압축 강도, 뛰어난 캐비테이션 저항성, 그리고 탁월한 해수 부식 저항성을 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 심해에서 수천 시간 동안 절단 및 세척 효율이 저하되지 않도록 보장합니다. 텅스텐 합금 노즐은 10,000m 유인 잠수정 "스트라이버", 심해 채굴 장비, 그리고 해저 관측망 구축에 필수적인 고압 스톱트 소재로 자리 잡았습니다. 텅스텐 합금 노즐은 이러한 특수 엔지니어링 분야에 깊이 통합되어 "첨단 소재"에서 "국가 전략적 핵심 구성 요소"로 격상되었습니다.

#### 6.5 신형 분야에서의 텅스텐 합금 노즐의 응용

신기술은 종종 가장 극한적이고, 까다롭고, 타협 없는 노즐 작동 조건을 수반합니다. 텅스텐 합금 노즐은 3D 프린팅, 수소 에너지, 탄소 포집, 초고속 레이저와 같은 최첨단 분야의 기반 하드웨어로 빠르게 자리 잡고 있으며, "상상력을 따라잡을 수 있는 유일한 존재"라는 자부심을 가지고 있습니다. 더 이상 단순히 "사용 가능한 것"이 아니라 "사용할 수 있는 유일한 것"입니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 6.5.1 3D 프린팅: 금속 분말 분사를 위한 텅스텐 합금 노즐

지향성 에너지 증착(DED), 레이저 금속 증착(LMD), 저온 금속 전사(CMT) 적층 제조, 그리고 새롭게 부상하는 액체 금속 분사 프린팅에서 동축 또는 측면 축 분말 공급 스로트 역할을 하는 텅스텐 합금 노즐은 1500° C를 초과하는 레이저/아크 초점 가장자리, 반사된 레이저광, 그리고 반응용 및 완전 용융 금속 분말의 반복적인 충격에 직접 노출됩니다. 일반적인 초경합금 또는 스테인리스강 노즐은 불과 수백 개의 층 형성 후에도 심각한 분말 접착, 단괴 형성, 그리고 스로트 확대에 의해 분말 빔 분산, 증착 채널 붕괴, 그리고 성형 정밀도 저하를 초래합니다. 반면, 초고융점, 거울과 같은 내벽, 서브마이크론 수준의 치수 정확도, 그리고 뛰어난 열충격 저항성을 갖춘 텅스텐 합금 노즐은 수만 겹의 층에 걸쳐 분말 초점 정확도와 유동 안정성을 유지하여 GE Additive, EOS, SLM Solutions, Farsoon, BLT와 같은 주요 글로벌 금속 3D 프린팅 장비에서 동축 분말 공급 노즐을 위한 유일한 합법적인 옵션입니다. 항공우주 티타늄 합금 구조 부품, 가스터빈 블레이드 수리, 원자력 주펌프 임펠러의 일체형 프린팅과 같은 최고 수준의 적층 제조 작업에서 텅스텐 합금 노즐은 항공우주 및 원자력 등급 공정 사양에 직접 통합되었습니다.

### 6.5.2 수소 에너지 산업: 연료 전지용 텅스텐 합금 노즐

전체 수소 에너지 체인(고압 수소 저장 탱크 감지, 수소 충전소의 초고압 분무 냉각, 연료 전지 스택 가습 및 배기 가스 배출, 유동 전지의 정밀 전해액 분무)은 노즐에 네 가지 요구 사항을 부여합니다. 극도의 청결, 극도의 내식성, 극도의 고압 저항성, 금속 이온 침전 없음. 텅스텐 합금 노즐(특히 비자성 텅스텐-니켈-구리 블렌드 및 초정밀 비율을 갖춘 노즐)은 완전한 pH 화학적 불활성, 자성 없음, 거울 마감 내벽, 가장 엄격한 PEM 연료 전지 이온 침전 표준(ppb 미만)을 통해 스택 가습 분무 및 배기 가스 물방울 분리의 이중 요구 사항을 완벽하게 충족합니다. 이를 통해 막 전극 어셈블리(MEA)가 오염되지 않고 수만 시간 동안 분해되지 않으므로 Toyota Mirai, Honda Clarity, Hyundai NEXO 및 많은 국내 주요 연료 전지 스택 제조업체에서 유일하게 인증된 노즐 소재가 되었습니다. 수소 충전소의 70MPa 초임계 수소 누출 감지 및 분무 냉각 시스템에서는 수소 취성에 대한 저항성, 순간 초고압에 대한 저항성, 치수 불변성을 갖춘 텅스텐 합금 노즐이 전 세계 수소 충전소의 핵심 안전 구성품에 필수적인 옵션이 되었습니다.

### 6.5.3 탄소 포집: 흡수제 주입용 텅스텐 합금 노즐

탄소 포집, 활용 및 저장(CCUS) 시스템에서 아민 기반, 나트륨-알칼리 기반, 칼슘 기반 순환 흡수탑은 고온 및 고농도의 CO<sub>2</sub>, 고체 입자를 함유한 아민 용액/슬러리, 고알칼리성 환경, 그리고 극심한 열 사이클링에 장기간 노출되는 것을 견뎌야 합니다. 일반 듀플렉스 스테인리스강 및 하스텔로이 노즐은 단 몇 천 시간 만에 심각한 마모, 결정화 막힘, 그리고 응력 부식 균열을 나타냅니다. 반면, 텅스텐 합금 노즐은 뛰어난 내마모성, 경면 마감 처리된 방오 내벽, 그리고 열충격 저항성을 갖추고 있어 수만 시간 동안 흡수제 액적 크기, 분포 균일성, 그리고 분무 밀도를 최적의 상태로 유지하여 95% 이상의 포집 효율을 지속적으로 보장합니다. 이 노즐들은 주요 국가 "이중 탄소" 시범 프로젝트(예: 화능석 동구, CR 하이펑, 대당 타오커타오)에서 흡수탑 노즐의 지정 재료로

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



채택되었습니다.

#### 6.5.4 레이저 기술: 보조 냉각용 텅스텐 합금 노즐

수백 킬로와트에서 메가와트에 이르는 산업용 파이버 레이저, 초고속 피코초/펨토초 레이저 가공 헤드, EUV 리소그래피 장비 광원 냉각, 레이저 융합 점화 시스템에서 초음속 가스 보조 노즐 또는 초임계 헬륨/질소 냉각 노즐 역할을 하는 텅스텐 합금 노즐은 레이저 초점에서 몇 밀리미터 떨어진 곳에 위치하여 반사된 레이저광, 플라즈마 스퍼터링, 수천 도의 순간적인 열충격, 그리고 초고속 가스 역류를 견뎌냅니다. 일반적인 구리 또는 세라믹 노즐은 즉시 제거되거나 깨지는 반면, 초고융점, 뛰어난 레이저 반사 제거 저항성, 치수 정확도, 그리고 제어 가능한 전도도를 가진 텅스텐 합금 노즐은 수백만 펄스 후에도 냉각 가스 커튼 두께와 속도의 완벽한 안정성을 보장하여 레이저 헤드 렌즈의 열 코로나 및 전력 드리프트를 완전히 제거합니다. 이 제품은 Trumpf, IPG Photonics, Coherent, ASML EUV 광원, NIF National Ignition Facility 를 포함한 세계에서 가장 진보된 레이저 시스템을 위한 핵심 보호 노즐이 되었습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 노즐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

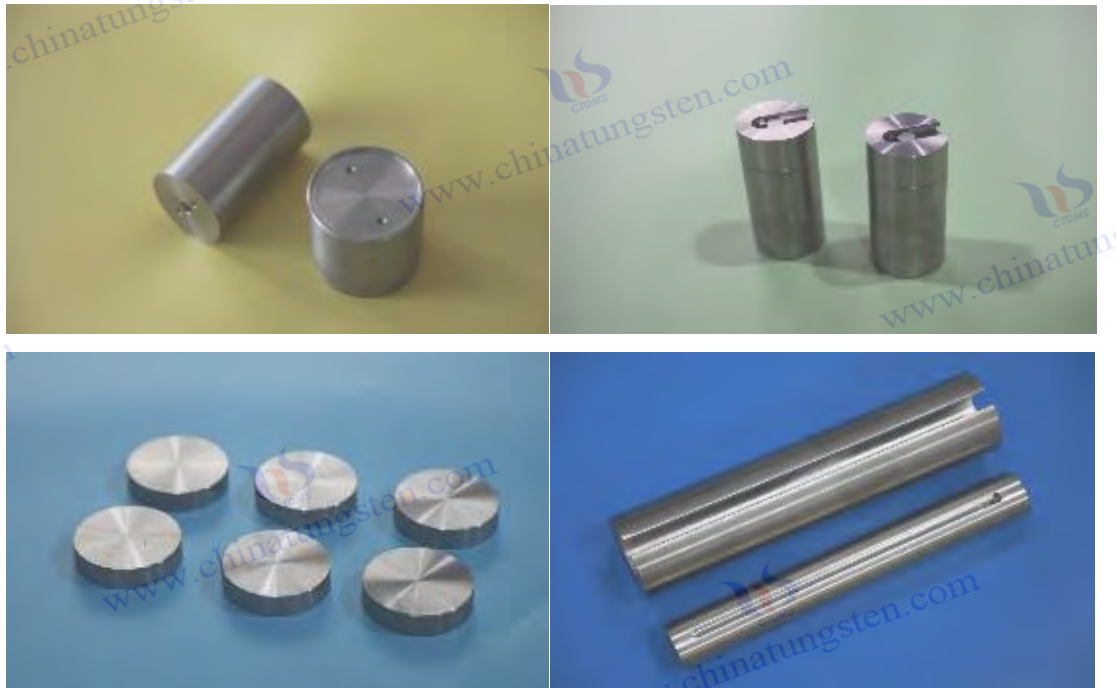
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## 제 7 장 텅스텐 합금 노즐의 선정, 설치 및 유지관리

### 7.1 텅스텐 합금 노즐의 과학적 선택

텅스텐 합금 노즐은 매개변수표를 비교하는 간단한 문제가 아닙니다. 대신, 작동 온도, 압력, 매체 특성, 유동 분무 요건, 구조적 적합성, 그리고 총 수명 주기 비용(TLC)과 같은 요소를 고려한 포괄적인 계산이 필요합니다.

#### 7.1.1 작동 매개변수의 매칭: 온도 및 압력에 따른 텅스텐 합금 노즐의 적용

온도와 압력은 텅스텐 합금 노즐의 조성 및 표면 처리를 결정하는 데 있어 절대적인 기준입니다. 실온~중온 및 정상 압력 범위 내에서 작동할 경우, 가장 비용 효율적인 텅스텐-니켈-철 표준 조성을 우선적으로 고려할 수 있습니다. 온도가 지속적으로  $1000^{\circ}\text{C}$  를 초과하거나 순간적인 충격이  $1500^{\circ}\text{C}$  를 초과하는 경우, 고텅스텐 함량, 코발트 강화 또는 희토류 산화 방지 조성으로 전환해야 합니다. 초고압 조건에서는 더욱 연속적인 텅스텐 골격과 우수한 결합재 인성이 요구되며, 캐비테이션 및 스트리핑을 방지하기 위해 필수적인 봉소 침투 또는 복합 코팅이 필요합니다. 선정 과정에서 충분한 온도 및 압력 마진을 확보해야 하며, "적당한" 경계에 기반한 선정은 용납될 수 없습니다. 그렇지 않으면 장기간의 전부하 운전 중에 스폿트 연화, 산화 또는 캐비테이션이 빠르게 발생하여 제트 손실 및 예상치 못한 가동 중단으로 이어질 수 있습니다. 올바른 접근 방식은 먼저 온도장과 압력 펄스 시뮬레이션을 수행한 다음, 최악의 작동 조건에 따라 공식을 한 단계 더 높여 노즐이 항상 편안한 영역 내에서 작동하도록 하는 것입니다.

#### 7.1.2 매체 특성 호환성: 텅스텐 합금 노즐은 부식성 매체와 호환됩니다.

부식성 매질은 바인더상 시스템의 생존을 직접적으로 결정합니다. 중성 가스, 순수, 불활성 분말과 같은 온화한 매질에서는 텅스텐-니켈-철 시스템이 이러한 조건을 쉽게 처리할 수 있습니다. 그러나 강산, 강알칼리, 해수, 염소 함유 소독제 또는 고온 산소 함유 화염이 존재하는 경우에는 비자성, 내식성 텅스텐-니켈-구리 시스템으로 전환해야 하며, 구리 함량을 최적화하고 특정 매질에 따라 후속 표면 처리를 해야 합니다. 고온 용융 슬래그, 플라즈마, 탄소 분말 침식 환경에서는 희토류 산화방지제와 봉소 화 경화를 적용한 텅스텐-니켈-철 시스템이 필요합니다. 제약 등급의 멸균 매질과 초순수 탈이온수 환경에서는 경면 마감을 위한 강제 전해 연마를 적용한 초고청정 의료 등급 텅스텐-니켈-구리 시스템이 필요합니다. "갑작스러운 노즐 용해", "표면 기포 및 박리", "침전된 금속 이온에 의한 제품 오염" 등 역사적으로 수많은 사고는 모두 매질과 바인더상 시스템 간의 불일치에서 비롯되었습니다. 시스템 선택 전에 침식 시험과 가속 부식 검증을 반드시 수행해야 하며, 경험이나 공급업체의 구두 약속에 근거하여 결정을 내려서는 안 됩니다.

#### 7.1.3 성능 요구 사항 일치: 텅스텐 합금 노즐 및 흐름 분무 적용

필요한 유량과 분무된 입자 크기는 목 직경, 원뿔 각도 설계 및 팽창 섹션 길이를 결정합니다. 높은 유량과 낮은 분무 요구 사항이 있는 절단 및 세척 응용 분야의 경우

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

직선 구멍 또는 짧은 Laval 구조를 사용하여 비교적 유연한 목 직경을 허용할 수 있습니다. 중간 유량과 높은 분무 요구 사항이 있는 열 분무 및 연료 연소의 경우 CFD를 통해 목 직경과 팽창 각도를 정밀하게 최적화한 고전적인 Laval 유형을 사용해야 합니다. 약물 흡입, 칩 분배 및 EUV 광원 냉각과 같은 초미세 분무가 필요한 응용 분야의 경우 마이크로 목 직경, 다단계 유동 안정화 및 초음속 팽창 복합 구조가 필요하며 목 허용 오차는 서브마이크론 수준에서 제어됩니다. 매우 높은 입자 속도를 가진 콜드 분무 및 초음속 세척의 경우 내벽 마이크로 텍스처와 저마찰 코팅이 결합된 매우 긴 Laval 구조가 필요합니다. 단일 노즐은 높은 유량과 초미세 분무를 동시에 충족할 수 없습니다. 단일 노즐로 두 가지 조건을 모두 충족하도록 강제하면 유량 부족, 과도한 배압, 또는 지나치게 거친 분무가 발생하여 궁극적으로 펌프 시스템 수명이 크게 단축되거나 공정 품질 관리가 저하될 수 있습니다. 선택하기 전에 우선순위를 명확히 정의해야 합니다. 유량이 주된 고려 사항인가요, 아니면 분무가 주된 고려 사항인가요? 그런 다음, 핵심 요구 사항을 중심으로 스로트 형상을 정밀하게 맞춤 설정해야 합니다.

#### 7.1.4 구조 유형 선택: 텅스텐 합금 노즐 구조 및 현장 적응

구조적 형태는 설치 용이성과 유지 보수 비용을 직접적으로 결정합니다. 나사산 직접 연결 방식의 일체형 디자인은 넓은 건 공간과 낮은 노즐 교체 빈도를 가진 열용사 및 플라즈마 용접 시나리오에 적합합니다. 킥 체인지 베이어닛 디자인은 워터젯 절단, 세척, 3D 프린팅과 같이 2 차 노즐 교체가 필요한 작업 공간을 위해 특별히 설계되었습니다. 용접 또는 브레이징 플랜지 디자인은 연소실 및 가스화기와 같이 영구적으로 고정된 고온 부품에 사용됩니다. 다중 스로트 어레이 일체형 디자인은 칩 패키징, 탄소 포집 및 흡수탑, LED 물질 전달 분야에서 대면적 균일 분사를 위해 특별히 개발되었습니다. 일체형 수냉 재킷 디자인은 수백 킬로와트 출력의 레이저 가공 헤드 및 고열 부하 환경에 사용됩니다. 잘못된 구조를 선택하면 시간이 많이 걸리고 설치가 까다로워지는 것부터 완전한 비호환성까지 다양한 문제가 발생할 수 있습니다. 역사적으로 가장 흔한 선택 실패는 "성능 매개변수는 완벽하게 일치하지만 물리적 구조가 맞지 않는" 경우였습니다. 모델을 선택할 때는 건 본체 인터페이스 유형, 설치 공간, 노즐 교체 빈도, 그리고 수냉식 필요 여부를 먼저 확인한 후 적절한 구조를 결정하는 것이 중요합니다. 물리적 호환성을 무시하고 성능만 고려해서는 안 됩니다.

#### 7.1.5 일반적인 선택 실수 방지: 텅스텐 합금 노즐 선택의 일반적인 문제 분석

노즐 선택 시 가장 치명적인 다섯 가지 오해는 반드시 피해야 합니다. 첫째, 총 수명 비용을 무시하고 가장 낮은 단가에만 집중하면 1 년에 수십 번 교체해야 하는 값싼 수명이 짧은 노즐을 구매하게 되어 결국 가장 높은 전체 비용을 초래합니다. 둘째, "선택 비용 절감"이라는 명목으로 표준 제형을 극한의 작동 조건에 강제로 적용하면 결국 전체 라인 가동 중단과 품질 문제라는 막대한 대가를 치르게 됩니다. 셋째, 맹목적으로 가장 작은 스로트 직경을 고집하면 유량이 심각하게 부족해지고 배압이 급상승하여 펌프와 파이프라인의 수명이 크게 단축됩니다. 넷째, 설치 토크, 밀봉 방법, 동축성 요건을 무시하면 아무리 좋은 노즐이라도 잘못 설치하면 쓸모가 없어져 제트 편차와 조기 건손상을 초래합니다. 다섯째, 소량 생산 검증 없이 새로운 매체나 공정을 대량 구매하면

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제형이나 표면 처리가 호환되지 않을 경우 배치 폐기 및 라인 가동 중단으로 인해 수십만 달러의 손실을 초래합니다. 올바른 접근 방식은 확장 구매 전에 3~5 개의 노즐을 먼저 구매하여 2,000 시간 이상의 가속 수명 검증을 통해 완벽한 온도, 압력, 매체, 유량, 분무 및 설치 호환성을 보장하고, 동일한 분말 및 공정 배치를 사용하는 것입니다. 이 방법은 겉보기에는 느리지만 실제로는 가장 빠르고 경제적이며 안전합니다. 텅스텐 합금 노즐의 과학적인 선정은 본질적으로 "비싼" 것을 "가치 있는" 것으로 바꾸는 체계적인 프로젝트입니다. 작동 조건을 철저히 이해하고 일반적인 함정을 피해야만 노즐이 이론적인 수명에 도달할 수 있습니다.

## 7.2 텅스텐 합금 노즐의 설치 및 조정: 정밀도 보장을 위한 핵심 사항

텅스텐 합금 노즐은 설치 중 동축도 편차가 0.01mm 이거나 토크 오차가 5N · m 이면 실제 성능이 즉시 절반으로 떨어지거나 심지어 현장에서 사용할 수 없게 됩니다. 진정한 선도적인 사용자들은 오래전부터 설치 및 디버깅을 노즐 제조와 동일한 엄격한 요건을 갖춘 "2 차 제조" 공정으로 확립해 왔으며, 부주의한 작업은 심각한 품질 사고로 간주됩니다.

### 7.2.1 사전 설치 준비: 텅스텐 합금 노즐 검사 및 액세서리 호환성

상자를 열면 즉시 "5 가지 점검과 3 가지 비포장" 규칙을 따르세요. 진공 백이 손상되지 않았는지, 건조제의 색상이 변했는지 확인하세요. 노즐 표면에 용기, 흠집 또는 벗겨진 코팅이 있는지 확인하세요. 레이저 마킹과 QR 코드가 선명한지 확인하세요. 첨부된 재료 보고서, 치수 검사 보고서, 제트 성능 공장 곡선이 완전한지 확인하세요. 밀봉 링, 가이드 슬리브, 토크 렌치와 같은 모든 특수 액세서리가 있는지 확인하세요. 그런 다음, 분말이 없는 니트릴 장갑을 착용하고 노즐과 모든 접촉부를 무수 에탄올과 초음파 세척을 사용하여 두 번째 세척합니다. 질소로 건조시킨 후 즉시 진공 상태에서 임시 보관합니다. 밀봉 링 재질은 매체(일반 환경에서는 불소 고무, 고온 환경에서는 퍼플루오로에테르, 초정정 환경에서는 칼 레즈)에 따라 재확인해야 합니다.

### 7.2.2 코어 설치 사양: 텅스텐 합금 노즐 위치 지정 및 밀봉 기술

텅스텐 합금 노즐은 "3 중 무하드 접촉, 2 단계 사전 조임, 3 단계 토크 설정" 원칙을 엄격히 준수해야 합니다. 노즐 끝면, 원뿔형 표면, 그리고 외측 원이 건 본체 금속과 직접 강하게 접촉해서는 안 됩니다. 마이크론 단위의 충격과 응력 집중을 방지하기 위해 고정밀 PEEK 또는 인바 가이드 슬리브를 사용하여 격리해야 합니다.

나사산 연결은 3 단계로 완료됩니다. 첫째, 틈새 없이 꼭 맞을 때까지 손으로 조입니다. 둘째, 교정된 토크 렌치를 사용하여 목표 토크의 80%까지 조인 후 5 분간 방치하여 응력을 해소합니다. 셋째, 오차를 ±5% 이내로 제어하면서 목표 토크의 100%까지 조입니다.

빠르게 교체할 수 있는 바요넷 구조의 경우, 명확한 두 번 "클릭" 소리가 들려야 하며,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



특수 게이지를 사용하여 잠금 깊이를 확인해야 합니다.

밀봉 방법은 압력에 따라 구분됩니다. 정상 압력에는 O 링 + 압출 방지 링을 사용하고, 고압에는 금속 C 링 또는 렌즈 개스킷을 사용하며, 초고압에는 금속 Δ 링 + 이중 O 링을 백업으로 사용합니다. 파편이 목구멍으로 유입되어 순간적인 막힘을 유발하는 것을 방지하기 위해 PTFE 테이프나 액상 밀봉제를 사용하는 것은 엄격히 금지됩니다.

### 7.2.3 설치 정확도 제어: 텅스텐 합금 노즐의 동축도 및 수직도 교정

동축성과 수직성은 제트의 방향성에 중요한 요소이며, 절삭 편차나 코팅 불균일성은 이러한 요소를 더욱 심화시킵니다.

위터젯 및 클리닝 건: V 자형 기준 블록이 있는 0.001mm 레버 다이얼 표시기를 사용하여 건 본체 축에 대한 노즐 외측 원의 런아웃과 끝면의 수직도를 측정합니다. 적격 기준은 런아웃  $\leq 0.01\text{mm}$ , 수직도  $\leq 0.008\text{mm}$  입니다. 열 분무 및 레이저 클래딩용 동축 분말 공급 건: 레이저 추적기 또는 고정밀 PSD 스팟 분석 시스템을 사용하여 분말 빔/에어 커튼 초점과 레이저 초점의 일치치를  $\leq 30\mu\text{m}$  로 측정합니다. 멀티 스포트 어레이 노즐: 광학 이미지 측정 장비 또는 백색광 간섭계를 사용하여 각 구멍을 스캔하여 장착 기준면에 대한 모든 스포트 축의 평행도가  $\leq 0.01^\circ$  인지 확인합니다.

허용 오차를 벗어나는 경우 즉시 제거하고 위치를 조정해야 합니다. "충분히 좋은" 수준은 절대 허용되지 않습니다. 교정 후에는 풀립 방지 마커를 사용하여 나사산과 건 본체의 연결 부위에 명확하게 표시하여 작동 중 풀립을 방지하십시오.

### 7.2.4 코어 디버깅 프로세스: 텅스텐 합금 노즐 유량 및 압력 교정

시운전 과정은 "저압 런닝인, 중압 교정, 고압 설정"의 3 단계 방식을 엄격하게 따릅니다. 첫 번째 단계에서는 시스템을 정격 압력의 30~40%로 최소 30 분 동안 가동하며, 비정상적인 휘파람 소리를 듣고 미세 누출을 관찰하며 열화상을 사용하여 균일한 온도 상승을 확인합니다. 두 번째 단계에서는 압력을 정격 압력의 70%까지 높이고, 도량형 인증을 받은 표준 유량계와 압력 트랜스미터를 사용하여 실제 유량 곡선을 측정합니다. 이 곡선을 노즐의 공장 보고서와 비교합니다. 편차가 3%를 초과하면 시스템을 정지하고 다시 설치해야 합니다. 세 번째 단계에서는 시스템을 정격 압력의 100%로 최소 1 시간 동안 안정적으로 가동합니다. 동시에 고속 사진 촬영이나 레이저 시트 이미징을 사용하여 제트 발산 각도를 포착하고, 열화상 카메라를 사용하여 외부 벽 온도 상승을 모니터링하고, 소음계를 사용하여 소음 스펙트럼을 모니터링하여 모든 매개변수가 공장 곡선의 최적 창 내에 있는지 확인합니다.

### 7.2.5 설치, 시운전 및 승인: 텅스텐 합금 노즐에 대한 성능 검증 표준

최종 승인 프로세스는 "6 가지 필수 사항과 6 가지 무허용"이라는 철칙을 준수합니다. 시스템은 최소 2 시간 동안 안정적으로 전체 부하에서 작동해야 합니다. 측정된 유량,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분무 입자 크기(또는 슬릿 너비), 발산 각도는 모두 표준을 충족해야 합니다. 열화상 검사에서 국부적인 핫스팟, 눈에 띄는 누출, 비정상적인 진동 또는 휘파람 소리가 나타나지 않아야 합니다. 광학적 방법을 사용하여 동축성, 수직성 및 초점 중점이 여전히 허용 범위 내에 있는지 다시 확인해야 합니다. 제트/분말 적용 범위의 균일성과 배치 일관성을 검증해야 합니다. "노즐 설치, 시운전 및 승인 기록"에는 작업자, 공정 엔지니어 및 품질 관리자가 공동으로 서명해야 합니다.

꼼꼼한 설치 및 시운전 과정을 통해 텅스텐 합금 노즐은 "이론적 완벽함"을 "현장 완벽함"으로 완벽하게 구현됩니다. 노즐의 최종 성능은 70%는 제조, 30%는 설치 및 시운전에 의해 결정됩니다.

### 7.3 텅스텐 합금 노즐의 일일 유지 관리

텅스텐 합금 노즐은 "거의 파괴 불가능"하다고 알려져 있지만, "거의"라는 표현이 "완전히 파괴 불가능"을 의미하는 것은 아닙니다. 가장 까다로운 작동 조건에서는 스로트 형상과 표면 상태의 사소한 손상조차도 공정 오작동으로 이어질 수 있습니다. 진정한 수명은 재료 자체에 의해 달성되는 것이 아니라, 성능 저하 속도를 이론적인 한계 이하로 유지하는 체계적이고 과학적이며 거의 강박적인 정기적인 유지 보수에 의해 달성됩니다.

#### 7.3.1 정기점검의 핵심사항 : 텅스텐 합금 노즐의 마모 및 부식 검출

정기적인 검사는 텅스텐 합금 노즐의 수명 관리에 매우 중요합니다. 이는 매일(외관 검사, 주간 스로트 측정, 월간 전체 치수 검사, 분기별 금속학적 파괴 분석) 수행해야 합니다. 일일 근무 후 검사에는 10 배 확대경을 이용한 육안 검사로 스로트 부분 파손, 단면 손상, 내벽과의 비정상적 접촉 여부를 확인해야 합니다. 전용 광학 스로트 측정기 또는 내시경을 사용하여 스로트 직경 및 진원도를 매주 측정해야 하며, 확대된 부분은 기록하고 과거 곡선과 비교해야 합니다. 가동 중단 후 매일 좌표 측정기 또는 백색광 간섭계를 사용하여 원뿔 각도, 팽창 단면 프로파일, 동축성을 전체 치수로 재측정 해야 하며, 드리프트 경향이 있는 경우 즉시 경고해야 합니다. 분기별로 무작위로 선택된 노즐 단면을 금속학적 및 주사 전자 현미경으로 분석하여 텅스텐 골격의 미세 균열, 결합재 상의 선택적 부식, 표면 코팅의 박리를 관찰해야 합니다.

#### 7.3.2 세척 및 유지 관리 표준: 텅스텐 합금 노즐 막힘 세척 및 표면 유지 관리

텅스텐 합금 노즐은 먼지에 가장 취약하며, 그 다음으로 마모에 취약합니다. 청소 및 유지보수는 "예방이 우선, 처리가 나중, 절대 세게 긁지 말 것"이라는 철칙을 준수해야 합니다. 매일 가동을 멈춘 직후, 건조 고압 질소를 사용하여 양방향으로 퍼지하여 잔류 분말, 액체 및 결정을 완전히 제거하십시오. 일주일에 한 번 초음파, 진공 순수, 이소프로판올을 사용하여 3 단계 순환 세척을 수행하여 용해성 염분과 유기물을 완전히 제거하십시오. 경미한 부착물이나 스케일의 경우, 먼저 전용 부드러운 나일론 브러시와 중성 세제로 부드럽게 닦은 후 플라즈마 세척 또는 CO<sub>2</sub> 제설 스프레이를 사용하여 잘 지워지지 않는 잔여물을 제거하십시오. 노즐에 강철 수세미, 단단한 스크레이퍼, 또는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

강산이나 알칼리를 직접 사용하지 마십시오. 표면 코팅에 국부적인 긁힘이나 미세한 벗겨짐이 있는 경우, 즉시 노즐 사용을 중단하고 제조업체에 수리를 요청하십시오. 손상된 상태로 사용하지 마십시오. 모든 세척 도구, 용제 및 퍼지 가스는 교차 오염을 방지하기 위해 특정 노즐 전용으로 사용해야 합니다. 적절한 세척과 유지관리를 통해 막힘과 표면 손상의 가능성을 거의 0에 가깝게 줄일 수 있습니다.

### 7.3.3 유지 보수 주기 결정: 작동 조건에 따른 텅스텐 합금 노즐 유지 보수 계획

유지보수 주기는 임의로 결정되는 것이 아니라, 운영 조건의 심각도에 따라 단계적으로 진행됩니다. 경미한 조건(순수 세척, 저온 분무, 부식성 매체 없음)에서는 매일 육안 검사, 매주 이후 측정, 그리고 매월 전체 치수 검사가 필요합니다. 중간 조건(연마 워터젯, 일반 용사, 중성 슬러리 포함)에서는 매일 퍼징, 매일 이후 신속 검사, 매주 초음파 세척, 그리고 매월 금속 조직 샘플링이 필요합니다. 극한 조건(고온 플라즈마, 슬래그 함유 가스화로, 고부식성 흡수탑)에서는 하루 두 번의 퍼징, 교대조당 이후 측정, 매일 초음파 세척, 매주 단면 금속 조직 검사, 그리고 매월 의무적인 오프라인 순환 유지보수가 필요합니다. 동일 생산 라인 내 작업장의 주기는 다를 수 있지만, 모든 주기는 작업 지침에 명시하고 준수해야 합니다. 주요 사용자는 장비 검사 일정, 가동 중지 계획, 예비 부품 재고와 완벽하게 통합된 유지 관리 주기를 통해 "운영 조건이 심각할수록 유지 관리 빈도가 높아지고 수명이 길어지는" 긍정적인 순환을 만들었습니다.

### 7.3.4 소모품 관리: 텅스텐 합금 노즐 부품의 교체 및 비축 전략

텅스텐 합금 노즐 자체는 수명이 매우 길지만, 셸링 링, 가이드 슬리브, 퀵 체인지 베이어닛, 통합 수냉 재킷과 같은 주변 소모품은 종종 먼저 수명이 다합니다. 소모품 관리는 "3 고정 3 무" 원칙을 따릅니다. 고정된 인력(전담 담당자), 고정된 장소(전담 클린 캐비닛 보관), 고정된 수량(월간 사용량 + 안전 재고); 혼합 금지, 부족 금지, 만료 금지. 셸링 링은 실제 사용 시간과 매체 부식 정도에 따라 강제 회전하고, 가이드 슬리브는 0.01mm 마모 시 즉시 교체하며, 퀵 체인지 베이어닛은 1,000 회 삽입 및 제거 후 강제 폐기합니다. 일정 두께를 초과하는 스케일이 있는 수냉 재킷은 산 세척 또는 교체해야 합니다. 재고 관리 전략은 "일반적으로 사용되는 사양의 장기 재고 관리 및 미사용 사양에 대한 신속한 대응"이라는 두 단계 모델을 채택합니다. 표준 스포트 직경과 구조는 한 달 이상 사용할 수 있도록 재고로 보관되며, 특별 맞춤 사양은 공급업체와의 계약을 통해 48 시간 이내에 배송됩니다. 동시에, 노즐 하나는 오프라인, 노즐 하나는 온라인, 노즐 하나는 세척 중, 그리고 예비 노즐 하나는 예비품으로 구성된 4 단계 순환 시스템이 구축되어 항상 노즐 가용성을 100% 보장합니다. 주요 사용자들은 텅스텐 합금 노즐을 중요 예비 부품 적색 목록 관리 시스템에 포함시켜 재고가 안전 기준치 미만으로 떨어지면 자동으로 조달 및 상위 수준 알람을 실행합니다.

텅스텐 합금 노즐은 본질적으로 소재의 궁극적인 성능을 장기적인 공정 안정성으로 전환하는 마지막 단계입니다. 꼼꼼한 검사, 엄격한 세척, 과학적인 일정 관리, 그리고 예비 부품의 신속한 확보를 통해서만 노즐은 진정으로 완전하고 안정적이며 최장 수명 가치를 달성할 수 있습니다. 적절한 유지관리를 통해 텅스텐 합금 노즐은 소모품이 아니라 생산

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

라인에서 가장 신뢰할 수 있는 고정 자산이 될 수 있습니다.

## 7.4 텅스텐 합금 노즐 문제 해결

문제 해결은 텅스텐 합금 노즐의 전체 수명 주기 관리에 있어 최후의 방어선이며, 사용자의 전문성을 가장 잘 보여주는 핵심 기술이기도 합니다. 진단부터 수리, 예방까지 완벽한 폐쇄 루프를 숙달해야만 "고장"을 "재난"에서 "제어 가능한 사건"으로 전환하여 가동 중단으로 인한 손실과 안전 위험을 최소화할 수 있습니다. 텅스텐 합금 노즐은 설계 수명이 매우 길지만, 혹독한 환경에서 작동하기 때문에 사소한 이상이라도 즉각적인 대응이 필요합니다.

### 7.4.1 일반적인 결함 진단: 텅스텐 합금 노즐의 비정상 유량 원인 분석

비정상 유량은 텅스텐 합금 노즐에서 가장 흔하고 쉽게 감지되는 고장 신호입니다. 이는 종종 단일 문제가 아니라 여러 원인과 결과가 복합적으로 나타나는 현상으로, 일반적으로 유량 의 급격한 감소 , 점진적인 감소, 불안정한 변동 또는 예상치 못한 급등으로 나타납니다. 진단은 "현상 → 메커니즘 → 근본 원인"의 관점에서 문제를 단계별로 분석하여 숨겨진 위험을 간과하지 않도록 해야 합니다.

감소하는 가장 흔한 원인은 목구멍이나 유로의 국부적인 막힘입니다. 연마 워터젯 절단이나 분말 공급 레이저 클래딩에서는 단단한 입자나 분말이 목구멍 입구 또는 팽창부에 묻쳐져 표면에서는 보이지 않지만 내부적으로는 심하게 막힌 "빙산 효과"를 형성합니다. 진단은 내시경 검사나 고압 질소 퍼징을 통해 목구멍에 이물질이 있는지 확인하는 것으로 시작됩니다. 이물질이 발견되지 않으면 레이저 스캔을 사용하여 목구멍 직경이 약간 증가했는지(캐비테이션의 초기 징후) 측정합니다. 그런 다음 상류 필터의 막힘이나 펌프 압력 변동을 확인합니다. 유속이 점진적으로 감소하는 것은 일반적으로 내벽 거칠기의 악화 또는 목구멍 팽창의 둔화에서 비롯됩니다. 거칠기의 악화는 표면 산화 또는 미세 접촉으로 인해 발생하는 경우가 많습니다. 진단을 위해서는 백색광 간섭계를 사용하여 내벽의 질감 변화를 스캔해야 합니다. 팽창의 경우, 정밀 공압 게이지를 사용하여 목구멍 직경과 진원도를 다시 측정합니다. 불안정한 유동은 종종 상류 압력 맥동이나 노즐 열 변형으로 인해 발생합니다. 진단에는 고주파 압력 트랜스미터를 사용하여 배압 곡선을 기록하고 열화상 카메라를 사용하여 외벽 온도 상승의 균일성을 확인하는 작업이 포함됩니다. 예상치 못한 온도 상승은 종종 목 부분의 균열이나 코팅의 박리로 인해 발생합니다. 진단을 위해서는 즉시 가동을 중단하고 산업용 CT 또는 초음파 탐상 장치를 사용하여 내부 균열을 검사해야 합니다.

다중 원인 분석은 진단의 핵심입니다. 예를 들어, 소음 증가를 동반한 유량 감소는 일반적으로 캐비테이션 기포 붕괴로 인한 스포트 피팅을 나타냅니다. 비정상적인 온도 상승을 동반한 유량 변동은 냉각 채널 막힘 또는 수냉식 고장을 시사합니다. 제트 발산을 동반한 유량 감소는 팽창 섹션 콘 각도의 미세한 변화를 나타냅니다. 진단 툴체인은 내시경, 백색광 간섭계, 공압 게이지, 열화상 카메라, 고주파 압력 기록계, 산업용 CT 스캐너, 초음파 탐상, 주사 전자 현미경 금속 조직 분석을 포괄해야 하며, "외부에서

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



내부로, 거시적에서 미시적"으로 완전한 폐쇄 루프를 형성해야 합니다. 모든 이상은 사진 촬영, 보관, 일괄 추적을 거쳐 공급업체에 공동 분석을 위해 알려야 합니다. "문제"에서 "예방 및 제어 가능한 메커니즘"으로 유량 이상을 철저히 분석해야만 노즐 수명을 "수천 시간"에서 "수만 시간"으로 연장할 수 있습니다. 흐름 이상 진단에 대한 과학적 접근 방식은 "수동적 유지 관리"에서 "사전 예방적 수명 관리"로 전환하는 사용자에게 필수적인 기술이 되었습니다.

#### 7.4.2 문제 해결: 텅스텐 합금 노즐의 마모 및 누출에 대한 수리 솔루션

마모와 누출은 텅스텐 합금 노즐의 가장 고질적인 핵심 고장 두 가지입니다. 마모는 노즐 스로트 확대 및 제트 발산을 유발하고, 누출은 유량 제어 실패 및 안전 위험을 초래합니다. 해결책은 "신속한 손상 관리 + 철저한 경화 + 예방적 업그레이드"라는 세 가지 측면에서 시작해야 합니다. 이를 통해 노즐 성능이 완전히 복원되거나 수리 후 원래 성능을 능가할 수 있습니다.

마모 수리의 경우, 내시경 레이저 스캐닝을 사용하여 마모 영역을 정확하게 파악하고 정량화합니다. 노즐 입구 직경이 0.01mm 이상 확대된 경우 개입이 필요합니다. 경미한 마모의 경우, 유동 연마 및 전해 마무리를 사용합니다. 노즐을 특수 연마 용액에 담그고 고주파 전류를 이용하여 내벽에서 소량의 재료를 제거하여 노즐 입구 직경을 원래 크기로 정밀하게 마무리하고 표면 거칠기를 거울 수준으로 복원합니다. 중간 정도의 마모의 경우, 텅스텐 합금 전용 레이저 재용해 수리가 필요합니다. 마모층을 펄스 레이저로 용융한 후 응고시켜 치밀하고 다공성이 없는 새로운 표면을 형성합니다. 수리 후 경도와 내마모성은 원래 표면보다 훨씬 높습니다. 심각한 마모의 경우, 노즐을 직접 교체하지만, 가속 마모의 원인(예: 지나치게 단단한 연마재, 부적절한 각도 또는 불충분한 냉각)을 찾기 위한 금속 조직 분석을 위해 기존 노즐의 일부를 보존합니다. 수리된 모든 노즐은 재사용 전에 전체 치수로 재교정하고 제트 흐름에 대한 검증을 거쳐야 합니다.

누수 수리는 크게 밀봉 누수와 본체 누수 두 가지로 나뉩니다. 밀봉 누수는 O-링의 노후화 또는 설치 토크 부족으로 인해 발생하는 경우가 많습니다. 해결책은 O-링을 더 높은 등급의 O-링(예: FFKM 퍼플루오로에테르)으로 교체 하고 토크 교정기를 사용하여 다시 설치하여 토크 오차를  $\leq 5\%$ 로 유지하는 것입니다. 본체 누수는 일반적으로 미세 균열이나 상호 연결된 캐비테이션 피트에서 발생합니다. 수리에는 텅스텐 합금 브레이징 충전 후 표면 재용융이 포함됩니다. 먼저 고순도 텅스텐 와이어 또는 특수 브레이징 용가재를 사용하여 균열을 충전한 후 레이저 재용융을 수행하여 수리된 부분을 기판과 완벽하게 융합합니다. 수리 후에는 헬륨 질량 분석기 누설 검출기와 고압 유지 시험을 통한 이중 검증이 필요합니다. 누설이 전혀 없는 경우에만 수리를 해제할 수 있습니다.

코어 결함 해결의 궁극적인 원칙은 "한 번 고치면 모든 결함이 해결된다"는 것입니다. 마모나 누출이 발생할 때마다 8D 보고서를 생성하고, 근본 원인(예: 불균일한 연마 입자 크기로 인한 비정상적인 침식, 불충분한 냉각 유량으로 인한 국부적인 캐비테이션)을 분석하고, 예방 조치를 최적화(예: 상류 필터 추가, 수냉 순환 개선), 노즐 개선(예: 스로트 벽 두께 증가, DLC 코팅으로 전환)을 통해 폐루프 개선을 진행해야 합니다. 결함을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

"수동적 소화"에서 "선제적 진화"로 완전히 전환해야만 텅스텐 합금 노즐의 수명이 "수천 시간"에서 "수만 시간"이라는 새로운 산업 표준으로 전환될 수 있습니다. 코어 결합 해결 시스템의 완성도는 사용자에게 절대적인 신뢰를 제공하여, "결합을 두려워하는" 사용자에서 "결합이 발생하더라도 두려워하지 않는" 사용자로 전환할 수 있도록 합니다.

#### 7.4.3 극한 고장 처리: 텅스텐 합금 노즐의 균열 및 변형 처리 조치

균열과 변형은 텅스텐 합금 노즐의 가장 심각하고 위험한 고장 모드입니다. 균열은 갑작스러운 제트 제어 불능과 고압 누출로 이어지는 경우가 많고, 변형은 스로트 형상의 붕괴를 초래하여 공정 변수의 효력을 완전히 상실하게 합니다. 이러한 상황에 대한 대응은 "안전 최우선, 손실 완화 2 위, 수리 3 위, 근본적인 해결책 4 위"라는 철칙을 준수해야 합니다. 지연은 장비 손상 및 인명 피해로 이어질 수 있습니다.

균열 발생 시, 첫 번째 단계는 즉시 기계를 정지시키고, 영향을 받은 부위를 격리한 후, 감압 및 배기 과정을 거쳐 현장에 고압 위험이 없는지 확인하는 것입니다. 그런 다음 내시경과 산업용 CT 스캔을 사용하여 균열의 위치, 깊이, 그리고 전파 경로를 파악합니다. 균열 유형(열피로 균열, 캐비테이션 균열, 수소 취성 균열)은 파단면의 금속 조직 분석을 통해 신속하게 판별됩니다. 경미한 표면 균열은 레이저 재용융을 통해 현장에서 수리할 수 있습니다. 펄스 레이저를 사용하여 균열 부위를 용융시킨 후 응고시켜 새롭고 다공성이 없는 표면을 형성하여 원래 강도를 회복합니다. 중간 정도의 균열은 브레이징 및 열간 등압 성형(HIP) 수리를 위해 공장으로 반환해야 합니다. 먼저 특수 텅스텐 와이어를 사용하여 균열을 채운 후, 고압 및 고온으로 내부 응력을 제거합니다. 심각한 균열은 폐기되지만, 단면은 상세 FMEA 분석을 위해 보관됩니다. 변형의 경우, 치수 복원에 중점을 둡니다. 경미한 변형은 정밀 고정 장치와 저온 어닐링을 사용하여 교정하고, 중간 정도의 변형은 HIP 재형성이 필요하며, 심각한 변형은 폐기하여 원래 상태로 되돌립니다.

극한 고장의 진정한 가치는 포괄적이고 효과적인 해결책을 제공할 수 있다는 점에 있습니다. 모든 균열이나 변형은 부서 간 합동 조사팀의 활성화를 필요로 합니다. 이 팀은 운영 기록, 매체 분석, 노즐 이력 및 설치 기록을 검토하여 근본 원인(예: 순간 과압으로 인한 수소 취성, 냉각 고장으로 인한 열 피로, 또는 지나치게 단단한 연마재로 인한 충격 균열)을 파악해야 합니다. 그런 다음 예방 조치를 최적화하고(예: 상류 압력 완충 장치 설치, 냉각 회로 업그레이드 또는 고텅스텐 함량 제형 사용) 노즐을 업그레이드합니다(예: 스로트 벽 두께 증가 또는 폴리브덴 강화 DLC 코팅 사용). 이러한 극한 고장 대응 시스템의 성숙도는 텅스텐 합금 노즐을 "균열에 취약한" 상태에서 "균열이 발생하더라도 신속하게 복구"할 수 있는 상태로 변화시켜, 가장 가혹한 작동 조건에서도 "무관용 및 무손실"에 대한 절대적인 신뢰를 사용자에게 제공합니다.

#### 7.4.4 결합 방지 시스템: 텅스텐 합금 노즐의 수명 주기 전반에 걸친 위험 관리

고장 의 "처리"에서 "예방"으로 초점을 전환하는 전략적 시스템입니다. "위험 방지 설계, 생산 결합 제로, 사용 중 숨겨진 위험 제로, 폐기로 인한 오염 제로"라는 원칙을 기반으로

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

하며, 텅스텐 합금 노즐의 수만 시간 사용 기간 동안 고장 확률이 거의 0 에 가깝도록 선정부터 폐기까지 완벽한 폐쇄 루프를 구축합니다.

설계 단계의 위험 완화: FMEA(FMEA)와 CFD/유한요소 다중필드 연계 시뮬레이션을 결합하여 모든 잠재적 고장 모드(예: 스로트 캐비테이션, 열응력 균열, 마모 유발 캐비테이션)를 사전에 파악하고, 재료 비율, 유동 채널 형상, 표면 코팅에 대해 이중 마진을 확보합니다. 생산 단계의 결함 제로: 각 공정(밀도, 치수, 경도, 미세 구조) 후 100% 검사를 실시하고, 이상 징후는 즉시 격리하여 8D 근본 원인 분석을 실행합니다. 사용 단계의 숨겨진 위험 제로: 노즐의 "디지털 건강 기록"이 사용자 측에서 구축되어 유량, 압력, 온도 상승, 소음 등의 매개변수를 실시간으로 모니터링합니다. AI 예측 모델은 마모 또는 균열 징후에 대한 조기 경고를 제공하며, 의무적인 일일 청소, 주간 검사, 월간 전체 테스트를 시행합니다. 폐기 시 오염 제로: 폐기된 모든 노즐은 재활용되며, 텅스텐 합금은 100% 용융 및 재제조되어 유해 폐기물이 발생하지 않습니다. 위험 관리의 핵심은 "인간, 기계, 자재, 환경"의 통합 시스템입니다. 인간(공정 전반에 걸쳐 자격을 갖춘 엔지니어), 기계(자동 감지 및 예측 장비), 자재(노즐 및 예비 부품 재고의 이중 백업), 그리고 환경(운영 상태 모니터링 및 환경 매개변수의 실시간 피드백)이 포함됩니다. 이 시스템은 고장 발생 시 "발생 후 진화"에서 "미리 예방"으로 대응 방식을 완전히 전환하고, 텅스텐 합금 노즐 사용 방식도 "수명에 대한 도박"에서 "수명 계산"으로 전환합니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 노즐

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## 8 장 텅스텐 합금 노즐의 일반적인 문제

### 8.1 텅스텐 합금 노즐 제조 시 발생하는 일반적인 문제

텅스텐 합금 노즐은 매우 길고 오차 허용 범위가 매우 낮습니다. 어느 단계에서든 아주 작은 제어 오류라도 최종 제품에 돌이킬 수 없는 치명적인 결함을 남길 수 있습니다. 전 세계적으로 초기 고장 사례의 대부분은 근본 원인을 찾을 수 있는 제조 단계에서 발생합니다.

#### 8.1.1 원료 준비 문제: 텅스텐 분말의 순도 부족 및 불순물 과다

텅스텐 분말의 순도와 불순물 함량은 텅스텐 합금 노즐의 성능에 숨겨진 "원죄"와 같은 위험 요소입니다. 산소, 탄소, 황, 인, 몰리브덴, 알칼리 금속 등은 미량이라도 취성 화합물, 결정립계에 저융점 상, 또는 후속 고온 액상 소결 단계에서 잔류 기공을 형성하여 극한 작동 조건에서 노즐에 균열, 박리 또는 조기 캐비테이션 천공을 유발합니다. 일반적인 근본 원인으로는 환원 분위기의 이슬점 제어 실패, 수소 순도 변동, 파라텅스텐 산 암모늄 모액의 과도한 순환, 혼합 탱크 내 이전 배치의 잔류 원소, 그리고 텅스텐 분말 보관 중 수분 흡수로 인한 2 차 산화 등이 있습니다. 그 결과는 매우 심각합니다. 과도한 산소는 결정립계 산화물 네트워크를 형성하여 불과 수백 시간 만에 노즐이 결정립계를 따라 균열을 일으킵니다. 과도한 탄소는 취성 텅스텐 카바이드를 형성하여 인성이 급격히 저하되고, 경질 입자의 충격으로 인해 직접 칩핑(chipping)이 발생합니다. 인과 황의 분리는 결정립계에 액체막을 형성하여 고온에서 인후부가 즉시 타들어가게 합니다. 예방은 오로지 꼼꼼하고 처음부터 끝까지의 정제에 달려 있습니다. 각 텅스텐 분말 배치에 대해 전체 원소 글로우 방전 질량 분석법과 불활성 가스 용융 적외선 분광법을 결합하여 첫 번째, 중간, 마지막 세 지점에서 샘플링을 수행합니다. 내부 관리 기준을 벗어나는 경우 배치 전체를 재활용합니다. 환원로 보트, 혼합 탱크, 저장 백은 플라스마 세척 및 진공 건조를 거칩니다. 수소 이슬점은 깊은 건조 상태를 유지하면서 공정 전반에 걸쳐 온라인으로 모니터링됩니다. 텅스텐 분말을 "이론적으로 필요한 것보다 더 깨끗하게" 만들어야만 가장 까다로운 조건에서도 노즐을 장시간 작동시킬 수 있습니다.

#### 8.1.2 성형 공정 문제: 빌렛의 균열 및 밀도 불균일

성형체의 균열 및 밀도 불균일은 성형 단계에서 가장 치명적인 "숨겨진 살인자"입니다. 균열은 탈형 시점이나 예비 소성 초기 단계에서 자주 발생하며, 그 근본 원인은 집중된 가압 응력, 과립기 휘발 경로 차단, 과도한 분말 밀도 구매, 이형체의 불균일한 코팅, 또는 등압 가압 밀봉 불량입니다. 밀도 불균일은 분말 유동성 변동, 금형 마모, 압력 전달 경로의 설계 결함, 또는 등압 가압 오일 온도 변동으로 인해 발생합니다. 균열이 발생하면 표면 주름 또는 심각한 경우 관통 균열이 발생하여 소결 중 폭발로 이어질 수 있습니다. 소결 후 밀도 불균일은 국소적인 저밀도 영역으로 나타나 고압 캐비테이션 및 입자 침식의 자연스러운 시작점이 되며, 궁극적으로 "피팅 → 피팅 → 천공"의 재앙적인 연쇄 반응으로 이어집니다. 예방은 근본 원인에서 시작해야 합니다. 과립 분말의 분무 건조 온도, 결합제 함량, 입자의 구형도를 엄격하게 관리합니다. 성형은 양방향 플로팅 몰드와

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



다중 세그먼트 보압 곡선을 사용합니다. 각 냉간 등방성 가압 베일의 누출 여부를 검사하고 무게를 측정하며, 오일 온도 변동을 엄격하게 관리합니다. 각 성형체를 탈형한 후 100% 초음파 및 밀도 스캐닝과 무게 측정을 반복하고 검증하며, 밀도 저점이나 미세 균열은 분말 배치 및 가압 매개변수로 즉시 추적합니다. 성형체가 "응력 및 밀도 사각지대가 없는 상태"에 도달해야만 소결이 이론적으로 치밀하다고 간주될 수 있습니다.

### 8.1.3 소결 공정의 문제점: 소결체의 변형 및 밀도 부족

소결은 텅스텐 합금 노즐에 있어 가장 위험한 과정으로, 분말에서 기능성 본체로 변형됩니다. 변형과 밀도 부족은 고장의 가장 큰 원인입니다. 변형은 주로 과도한 액상으로 인한 텅스텐 골격 붕괴, 부적절한 지지 보트 설계, 제어되지 않은 가열 및 냉각 속도, 그리고 불균일한 노 분위기 또는 온도장에서 비롯됩니다. 밀도 부족은 낮은 최대 온도, 불충분한 유지 시간, 지나치게 높은 수소 이슬점, 잔류 탄소의 불완전한 제거 또는 불완전한 탈기에서 발생합니다. 변형 후에는 목 동축도, 원뿔 각도, 팽창 단면 윤곽이 모두 왜곡되며, 아무리 정밀한 후처리라도 이러한 상황을 해결할 수 없습니다. 밀도 부족은 미세 기공이나 상호 연결된 기공을 남겨 고압 캐비테이션 및 입자 침식의 시작점이 되어 수백 시간 이내에 천공 고장으로 이어집니다. 예방은 매우 정밀해야 합니다. 각 노의 로딩은 중력 및 액상 유동을 고려하여 3D 시뮬레이션되며, 지지점은 과학적으로 분포됩니다. 가열 및 냉각 곡선은 10 개 이상의 구간에서 정밀하게 제어되며, 특히 바인더 단계의 응고 구역에서의 냉각 속도는 매우 느립니다. 수소 이슬점은 전체 공정에 걸쳐 심층 건조에 사용됩니다. 최대 온도와 유지 시간은 빌릿 크기와 길이 대 직경 비율에 따라 정밀하게 등급이 매겨집니다. 용광로에서 출탕한 후 100% 산업용 CT + 아르키메데스 배수 방법을 사용하여 이중 검사를 실시하고 이론 밀도 한계에 미치지 못하는 용광로는 모두 재가열합니다.

### 8.1.4 후처리 문제: 열악한 유동 채널 정밀도 및 표면 결함

후처리는 노즐의 "허용 가능한 밀도"에서 "완벽한 기능"으로의 최종 도약이지만, 기준 이하의 유동 채널 정밀도와 표면 결함은 모든 것을 망치는 가장 쉬운 단계입니다. 유동 채널 정밀도 문제는 종종 호닝 로드의 시기적절하지 않은 마모, 고정구 열팽창, 온도 변동, 그리고 작업자 경험 부족에서 비롯됩니다. 표면 결함은 연마액 오염, 코팅 매개변수 드리프트, 레이저 재용융 중 과열, 그리고 세척 중 잔류 이온이나 입자로 인해 발생합니다. 과도한 스포트 직경 및 진원도 편차는 즉시 절삭 스쿠를 유발하고, 콘 각도 및 팽창 단면 윤곽의 편차는 미립자 크기와 제트 발산각에 대한 제어를 완전히 상실하게 합니다. 표면 스크래치, 코팅 박리 또는 잔류물은 입자 부착 및 캐비테이션 시작점을 즉시 형성합니다. 예방을 위해서는 세심한 주의가 필요합니다. 호닝 로드는 몇 사이클마다 의무적으로 측정 및 재연마를 거치며, 모든 고정구는 저열팽창 재료로 제작됩니다. 가공 영역은 매우 엄격한 온도 및 습도 관리 하에 있습니다. 연마 슬러리는 매일 업데이트되고 마이크론 이하 수준으로 여과됩니다. PVD/CVD 코팅 접착력은 각 배치의 표준 시트에서 검증됩니다. 최종 세척수는 전도도가 매우 낮습니다. 모든 노즐은 출고 전 백색광 간섭계, 공압 게이지, 고화질 내시경을 사용하여 3 중 최종 검사를 거칩니다. 유로 편차나 표면 결함은 즉시 재작업으로 이어집니다. 후처리 과정에서 "설계를 뛰어넘는 스포트 정밀도와 거울을

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

뛰어넘는 표면 청결도"를 달성해야만 텅스텐 합금 노즐은 가장 까다로운 작동 조건에서도 완벽한 성능을 발휘할 수 있습니다.

## 8.2 텅스텐 합금 노즐 선택 및 적용의 일반적인 문제

선택과 불일치는 사용자에게 가장 흔하고 비용이 많이 들지만, 가장 쉽게 피할 수 있는 고장 원인입니다. 완벽하게 검증된 텅스텐 합금 노즐이라도 잘못된 비율, 구조 또는 사양을 선택하면 품질이 좋지 않은 제품을 구매하는 것보다 더 나쁜 결과를 초래하는 경우가 많습니다. 완벽한 상태임에도 불구하고 가장 중요한 순간에 완전히 고장이 나기 때문입니다.

### 8.2.1 작동 조건 일치 문제: 노즐 성능과 온도 및 압력 불일치

가장 흔한 선택 실패 사례는 고온 고압 복합재 조건에서 표준 텅스텐-니켈-철 노즐을 직접 사용하는 것입니다. 사용자들은 "텅스텐 합금은 모두 내열성"이라는 통념에 종종 현혹되는데, 바인더 상이 800° C 이상에서 빠르게 연화되고 액상 잔류물이 스포트 붕괴를 유발한다는 근본적인 차이점을 간과합니다. 결과적으로 노즐은 처음에는 정상적으로 보이지만 수백 시간 후 갑자기 스포트 확대, 제트 발산, 심지어 노즐 전체의 연화 및 변형이 나타납니다. 또 다른 전형적인 실수는 극한 고온 시나리오에 저온 최적화 제형을 사용하는 것입니다. 텅스텐 골격은 단단하지만, 바인더 상이 산화되어 조기에 제거되어 텅스텐 입자가 분리되고 내벽 거칠기가 눈사태처럼 발생합니다. 그 결과 전체 생산 라인이 며칠 동안 가동 중단되고, 펌프, 밸브, 파이프라인이 손상되고, 완제품 배치가 폐기되는 경우가 많습니다. 올바른 방법은 최고 연속 온도, 순간 충격 온도, 최고 작동 압력, 그리고 압력 펄스 주파수를 표에 나열한 다음, 최악의 시나리오를 기반으로 배합을 한 단계 더 높이는 것입니다."적당히"라는 접근 방식은 허용되지 않습니다.

### 8.2.2 구조 선택 문제: 유동 채널 유형이 분무 요구 사항과 일치하지 않습니다.

구조적 불일치는 두 번째 주요 선정 함정입니다. 가장 일반적인 예로는 초미립자 분무와 높은 입자 속도가 필요한 응용 분야에 짧은 라발 노즐이나 직선형 노즐을 사용하는 것입니다. 유량은 충분할 수 있지만, 분무된 입자 크기가 크고 입자 속도가 느려 코팅 접착력, 약물 흡수력, 그리고 저온 분무 증착 효율이 저하됩니다. 반대로, 고유량 세척이나 절단에 매우 긴 라발 노즐을 사용하면 과도한 배압, 펌프 부하 급증, 그리고 스포트 캐비테이션 악화로 이어집니다. 또 다른 흔한 실수는 단일 스포트 노즐 본체에 다중 스포트 배열 노즐을 단단하게 설치하여 스포트 부분 마힘과 불균일한 도포를 유발하거나, 영구 용접이 필요한 연소실에 쿼 체인지 베이어릿 노즐을 설치하여 제거 불가능 하고 열응력 집중을 유발하는 것입니다. 이러한 문제는 본질적으로 겉보기에 유사한 구조를 강제로 대체하는 것으로, 라발 팽창각, 스포트 길이 대 직경 비율, 그리고 정상 흐름 단면 설계가 분사 품질에 미치는 결정적인 영향을 무시하는 것입니다. 노즐을 선택할 때는 먼저 핵심 요구 사항(유량 우선 순위 또는 분무 우선 순위, 속도 우선 순위 또는 균일성 우선 순위)을 명확하게 정의해야 하며, 그런 다음 유로 유형을 일대일로 일치시켜야 합니다."범용" 노즐을 만능 솔루션으로 간주해서는 안 됩니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 8.2.3 재료 호환성 문제: 합금 구성과 부식성 매체 간의 비호환성.

재료 불일치는 가장 교활하고 파괴적인 선정 실패입니다. 대표적인 예로 강산, 강알칼리 또는 고온 염소 함유 환경에서 텅스텐-니켈-철 시스템을 사용하는 것이 있습니다. 그 결과 니켈의 선택적 부식 및 용해가 발생하여 노출된 텅스텐 프레임이 빠르게 분리되고 며칠 만에 인후부에 구멍이 생깁니다. 또 다른 예로는 고온 산화 화염에서 텅스텐-니켈-구리 시스템을 사용하는 경우, 구리 상이 먼저 녹아 산화 되어 표면에 물질이 생기고 인후부가 빠르게 깎입니다. 또 다른 흔한 실수는 제약 및 식품 등급 환경에서 니켈 함유 시스템을 계속 사용하는 것입니다. 이는 제품을 오염시키는 니켈 이온이 서서히 방출되어 의약품이나 식품 전체 배치를 리콜하는 결과를 초래합니다. 또는 원자력 등급 청정 환경에서 일반적인 산업용 표면 처리를 사용하여 과도한 수준의 미량 추출물을 발생시키고 가장 엄격한 규제 기준을 적용받는 경우도 있습니다. 이러한 문제는 처음에는 예고 없이 발생하다가 몇 달 후 갑자기 발생하여 수백만 달러의 손실을 초래하는 경우가 많습니다. 올바른 방법은 미량 이온, pH, 온도, 산화환원전위를 포함한 매질의 완전한 조성표를 작성한 후, 텅스텐-니켈-철, 텅스텐-니켈-구리, 초청정 의료용 등급, 비자성 등급의 비율에 따라 각 매질에 대한 침지 및 전기화학적 부식 시험을 수행하는 것입니다. 이상 징후가 발견되면 즉시 해당 시스템에서 제거해야 합니다.

### 8.2.4 사양 선택 문제: 오리피스 직경 매개변수와 유량 요구 사항 간의 불일치

스포트 직경의 정렬 불량은 사용자가 흔히 저지르는 기본적인 실수이며, 영업 사원도 쉽게 오해합니다. 가장 전형적인 예로는 "가장 작은 스포트 직경이 가장 좋다"는 생각을 맹목적으로 고집하여 스포트는 작지만 펌프가 감당할 수 없을 만큼 높은 배압을 발생시켜 유량이 심각하게 부족하게 만드는 것입니다. 반대로, 유량을 확보하기 위해 스포트 직경을 너무 크게 선택하면 제트 속도와 미립자 크기가 완전히 제어되지 않아 절삭 효율이 급격히 떨어지고 코팅 품질이 저하됩니다. 또 다른 흔한 실수는 길이 대 직경 비율과 팽창 각도의 영향을 무시하는 것입니다. 스포트 직경이 동일하더라도 팽창 섹션 설계에 따라 제트 발산 각도와 입자 속도가 완전히 달라집니다. 또는 용사 노즐의 스포트 직경 매개변수를 워터젯 절단에 직접 적용하면 표면 거칠기가 기준을 수십 배 초과하는 결과를 초래합니다. 숨겨진 오류는 여러 노즐 배치 간에 스포트 직경 공차가 누적되어 여러 노즐을 병렬로 연결할 때 유량이 불균일해지고 일관성이 손상되는 것입니다. 본질적으로 이러한 문제들은 모두 "목 직경"만을 결정 요인으로 간주하며, 목 직경, 배압, 유량, 분무 입자 크기, 그리고 분사 발산각 간의 복잡한 결합 관계는 무시합니다. 올바른 접근 방식은 먼저 목표 유량과 분무 입자 크기를 결정한 다음, 공급업체가 제공한 목 직경-압력-유량 3차원 곡선을 사용하여 노즐을 정확하게 선택하고, 10~15%의 유량 여유를 두는 것입니다. 마지막으로 동일 배치의 목 직경 허용 오차가 가능한 가장 좁은 범위 내에서 제어되도록 합니다. 오리피스 직경을 "대략적인 값"에서 "정확한 솔루션"으로 변환해야만 텅스텐 합금 노즐이 이론적인 성능을 진정으로 달성할 수 있습니다.

선택과 호환성의 어떤 실수도 "사소한 문제"가 아니라, 완벽한 노즐을 고철로 만들어 버리는 "자살 행위"입니다. 진정한 상위 사용자들은 이미 오래전부터 선택 과정을 "먼저 검증하고, 그다음 구매하고, 그다음 규모를 확대하고, 영원히 고정하는" 폐쇄적인 순환

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

구조로 만들어 놓았고, 일반 사용자들은 여전히 "당시 저렴한 가격"이나 "판매원이 다 쓸 수 있다고 했다"는 이유로 충동 구매의 대가를 치르고 있습니다.

### 8.3 텅스텐 합금 노즐 설치 및 사용 시 흔히 발생하는 문제

최고 품질의 텅스텐 합금 노즐조차도, 현장에 투입되면 초기 고장의 대부분은 제조상의 결함이 아니라 설치 및 사용 단계에서 발생합니다. 사소해 보이는 작동상의 오류나 관리상의 실수도 노즐의 이론적 수명을 절반으로 단축시키거나 심지어 치명적인 결과를 초래할 수 있습니다.

#### 8.3.1 설치 및 작동 문제: 위치 편차 및 부적절한 밀봉

위치 편차와 밀봉 불량은 현장에서 가장 흔하고 직접적인 영향을 미치는 설치 문제입니다. 위치 편차는 작업자가 일반 렌치를 사용하거나 조이는 방식에 의존하여 노즐 외경 원런아웃, 단면 기울기, 그리고 건 본체 축에서 인후 축이 이탈하는 현상을 유발하기 때문에 발생합니다. 이는 제트 편향과 반동력 불균형으로 이어져 건 본체 피로와 인후 마모를 빠르게 악화시킵니다. 밀봉 불량은 종종 잘못된 밀봉 링 재질 선택, 설치 중 비틀림 또는 누락, 압출 방지 링 누락, 밀봉 표면의 이물질 또는 긁힘, 그리고 토크 부족 또는 과도한 토크로 인한 불균일한 사전 조임력으로 인해 발생합니다. 고압 상태에서 밀봉 표면을 따라 매체가 누출되면 흐름이 제어되지 않거나, 심각한 경우 순간적인 고압 제트가 발생하여 인명 피해를 입히거나 주변 장비를 손상시킬 수 있습니다.

#### 8.3.2 부적절한 디버깅으로 인해 발생하는 문제: 부정확한 유량 및 압력 보정

시운전 과정에서의 부주의는 완벽한 노즐을 망칠 수 있는 지름길입니다. 가장 흔한 문제는 저압 길들이기 기간을 무시하고 정격 압력에서 바로 기계를 시동하는 것입니다. 이로 인해 잔류 조립 응력과 미세 결함이 첫 번째 고압 충격 시 즉시 확장됩니다. 또 다른 일반적인 오류는 노즐의 배압과 유량을 실제로 측정하지 않고 펌프 스테이션의 게이지 압력에만 의존하는 것입니다. 이로 인해 매개변수는 정상으로 보이지만 실제 유량은 크게 차이가 납니다. 매체 온도와 실제 작동 조건 간의 불일치, 시운전 및 생산 교대 기준의 불일치, 그리고 필요에 따라 분할된 압력 증가를 수행하지 않고 완전한 곡선을 기록하지 않는 것 또한 시운전 단계에서 노즐의 형상과 표면 상태에 숨겨진 문제로 이어질 수 있습니다. 부적절한 시운전의 핵심은 "2 차 제조"로 간주되어야 하는 정밀 교정 프로세스를 "전원이 켜졌을 때 분사할 수 있는 한"으로 단순화하여 노즐이 첫 순간부터 설계 작업 범위를 벗어나게 하는 것입니다.

#### 8.3.3 작동 조건 적응 문제: 극한 환경에서는 성능이 너무 빨리 저하됩니다.

많은 사용자들이 극한의 작동 조건에서 노즐 수명이 예상보다 훨씬 짧다는 사실을 인지하지 못하고 있습니다. 이는 선정 과정에서 남겨진 "운영 여유"가 과도한 현장 작업으로 완전히 소모되기 때문입니다. 혼합 비율의 허용 한계를 초과하는 갑작스러운 온도 충격, 설계 공차를 초과하는 압력 맥동, 미확인 고부식성 성분의 매체 내 갑작스러운

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



유입, 그리고 원래 검증 범위를 초과하는 연마 정도 또는 입자 크기는 원래 수만 시간의 작동을 위해 설계된 노즐이 단기간에 급격한 연화, 캐비테이션 박리 또는 선택적 부식을 경험하게 할 수 있습니다. 이러한 급격한 성능 저하의 근본 원인은 사용자들이 텅스텐 합금 노즐을 명확하게 정의된 온도-압력-매체 경계 내에서만 우수한 성능을 발휘하는 정밀 부품으로 인식하기보다는 "극한 조건에 무조건적으로 강한" 재료로 취급하기 때문입니다.

#### 8.3.4 협업 운영 문제: 지원 장비와의 호환성 부족

텅스텐 합금 노즐은 결코 고립된 독립체가 아닙니다. 펌프, 밸브, 파이프라인, 노즐 본체, 여과 시스템 및 냉각 회로와 고도로 결합된 전체를 형성합니다. 호환성 부족은 일반적으로 다음과 같은 형태로 나타납니다. 과도한 상류 압력 맥동으로 인한 지속적인 수격 현상, 여과 정확도 부족으로 인한 단단한 이물질의 목 부분 도달, 제어되지 않는 냉각수 유량 또는 온도로 인한 국부적인 과열, 노즐 강성 부족으로 인한 노즐 밀봉 표면의 프레팅 마모, 그리고 병렬 파이프라인의 불균일한 저항으로 인한 노즐 간 실제 유량 차이. 이러한 문제는 종종 "노즐 품질 문제"로 잘못 해석되지만, 실제로는 노즐을 시스템 설계에서 가장 취약하고 까다로운 구성 요소로 고려하지 않아 지원 장비에 역제약 조건을 적용하지 못한 데서 비롯됩니다. 펌프 내 압력 안정화 어큐뮬레이터 부족, 등급 구분 없는 여과, 노즐 강성 부족, 냉각 시스템의 독립적인 온도 제어 부족과 같은 시스템 결합은 노즐의 수명을 지속적이고 미묘하게 단축시킵니다. 협업 작업에서 호환성이 부족한 이유는 텅스텐 합금 노즐을 "자유롭게 매칭할 수 있는 소모품"으로 취급하고, 전체 시스템을 구성하는 핵심 원칙으로 해당 요구 사항을 우선시하지 않기 때문입니다.

설치 및 사용 중 발생하는 모든 문제는 최고급 텅스텐 합금 노즐조차도 순식간에 값비싼 고철로 전락시킬 수 있습니다. 진정으로 긴 수명을 달성하는 사용자들은 이미 설치 및 시운전을 제조만큼이나 엄격한 폐쇄 루프 프로세스로 만들었습니다. 대부분의 초기 고장 뒤에는 현장에서의 무심한 말 한마디가 숨어 있습니다. "저희는 항상 이렇게 설치합니다." 또는 "충분히 괜찮으면 괜찮습니다." 텅스텐 합금 노즐의 진정한 수명은 공장에서 결정되는 것이 아니라 현장의 규칙에 따라 결정됩니다.

### 8.4 텅스텐 합금 노즐의 유지 관리 및 문제 해결에서 흔히 발생하는 문제

유지보수와 문제 해결은 텅스텐 합금 노즐의 수명 주기에서 최후의 방어선이지만, 동시에 가장 쉽게 간과되는 가장 취약한 부분이기도 합니다. "제어 가능한 성능 저하"를 "치명적인 고장"으로 악화시킬 가능성이 가장 높습니다. 많은 사용자가 수명 주기 전반부에는 최고급 노즐을 구매하기 위해 막대한 비용을 지출하지만, 후반부에는 부주의한 유지보수, 성급한 진단, 문제 해결에 대한 주저함으로 인해 수만 시간 동안 사용할 수 있었던 노즐을 수백 시간밖에 사용하지 못하는 고물처럼 만들어버립니다.

#### 8.4.1 부적절한 유지관리로 인한 문제: 불완전한 청소 및 검사상의 실수

불완전한 세척과 검사 부주의는 유지보수에서 가장 흔하고 심각한 문제입니다. 가장

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전형적인 예는 가동 중단 후 일반 압축 공기로 기계를 불어내는 것입니다. 잔류 연마 입자, 결정질 염, 반응용 분말은 시간이 지남에 따라 내벽에 부착되어 점차 단단한 껍질을 형성하고, 결국 스로트를 막거나 캐비테이션의 시작점이 됩니다. 또 다른 흔한 부주의는 눈에 보이는 스로트와 단면만 세척하고 팽창부의 깊은 부분과 밀봉 표면의 뒷면은 무시하는 것입니다. 이로 인해 점점 더 두꺼운 국부 스케일이 축적되고 유량이 설명할 수 없이 느리게 감소합니다. 검사 부주의는 훨씬 더 치명적입니다. 스로트 직경을 측정하지 않고 매일 외관만 점검하고, 과거 곡선을 기록하지 않고 일주일에 한 번만 측정하고, "생산이 붐빈다"는 이유로 매달 전체 크기 재검사를 건너뛸 것입니다. 그 결과 스로트가 느리게 확장되고 표면 미세 균열이 점진적으로 확대됩니다. 이러한 균열이 발견될 때는 이미 수리 기간이 초과되어 기계 전체를 폐기해야 합니다. 이러한 문제는 본질적으로 유지보수를 "수명을 결정하는 정밀 작업"이 아닌 "필요 없는 청소"로 취급하는 데서 비롯됩니다. 적절한 유지보수는 의무적이고 문서화되며 추적 가능한 폐쇄 루프 프로세스를 통해 수행되어야 합니다. "충분히 좋다"거나 "다음에 하겠다"는 식의 사고방식은 궁극적으로 작업 환경에 의해 무자비하게 처벌받게 될 것입니다.

#### 8.4.2 마모 및 부식 문제: 비정상적인 마모 및 심각한 국부 부식.

비정상적인 마모와 국부 부식은 재료 자체의 문제가 아니라, 관리되지 않은 유지보수와 운영 상태 관리의 복합적인 결과입니다. 일반적인 비정상적인 마모는 스로트(throat) 한쪽에 초승달 모양의 깊은 홈이 생기거나 팽창부 일부에 비정상적인 거칠기가 나타나는 형태로 나타납니다. 근본 원인은 일반적으로 상류 필터 고장으로 인해 큰 입자가 직접 유입되고, 분사 각도 편차로 인해 불균일한 마모가 발생하며, 냉각 불균일로 인해 국부적인 캐비테이션이 발생합니다. 국부 부식은 더욱 심각합니다. 밀봉 표면 근처에 환형 부식 홈이 생기고, 단면에 공식 부식이 발생하며, 스로트 입구에서 선택적 용해가 발생합니다. 원인은 밀봉 링의 노화와 누출로 인한 매체 잔류, 잔류 세척액으로 인한 갈바닉 부식, 가동 중단 시 적시에 건조되지 않아 농축된 수분 부식이 발생하는 것입니다. 또 다른 심각한 사고 유형은 표면 코팅의 국부적인 박리로 인해 기관 부식이 가속화되는 것입니다. DLC 또는 붕소 화층이 박리되면 노출된 결합재 상이 며칠 내에 선택적으로 용해되고, 부식 피트는 빠르게 확장되어 천공을 형성합니다. 이러한 문제는 "노즐 오작동"으로 보이지만, 실제로는 유지보수 및 모니터링의 완전한 실패를 의미합니다. 비정상적인 마모와 국부 부식을 "노즐 문제"가 아닌 "시스템적 사고"로 처리해야만 재발을 진정으로 예방할 수 있습니다.

#### 8.4.3 고장 진단 문제: 비정상 흐름 및 누출 원인에 대한 잘못된 판단

오진은 사소한 문제를 심각한 문제로 악화시키는 주범입니다. 대표적인 예로 유량 감소 후 노즐 마모 및 팽창을 의심하지만, 실제 원인은 상류 필터 막힘이나 펌프 출력 감소입니다. 또는 누출을 발견한 직후 노즐을 교체했는데, 노후된 셸이 진짜 원인으로 밝혀져 값비싼 노즐을 낭비하는 경우도 있습니다. 또 다른 흔한 오진은 캐비테이션 피팅을 일반적인 마모로 간주하고 표면 연마 수리만 하는 것입니다. 그러나 캐비테이션의 근본 원인(압력 맥동, 과도한 가스 함량)은 그대로 남아 있으며, 수리된 층은 며칠 후 다시 벗겨집니다. 더 심각한 것은 바인더 상의 선택적 부식을 "표면 긁힘"으로 오진하고,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

문제가 있는 노즐을 계속 사용하여 결국 노즐 전체의 부식과 천공으로 이어지는 것입니다. 오진의 핵심은 체계적인 사고와 전문적인 도구의 부족이며, 경험, 직관, 또는 "항상 그랬다"는 가정에 의존하는 것입니다. 정확한 진단에는 "현상 기록 → 다중 계측기 측정 → 단계별 제거 → 금속 조직 검증"이라는 완전한 단계가 필요합니다. 생략된 단계나 가정은 수리 가능한 사소한 문제를 노즐 전체를 사용할 수 없게 만드는 중대한 사고로 만들 수 있습니다.

#### 8.4.4 교체 및 업그레이드 문제: 취약한 부품의 시기적절하지 않은 교체 및 모델 불일치

취약한 부품의 교체 지연과 부품 불일치는 가장 골치 아프고 기본적인 유지보수 실수 중 하나입니다. 일반적인 실수는 다음과 같습니다. 씰링 링이 노후화되고 균열이 생겼지만 "아직 사용 가능"하다는 이유로 계속 사용하다가 결국 노즐과 건 본체를 파손시키는 고압 누출을 초래합니다. 가이드 슬리브가 마모되어 과도한 동축성을 유발 하지만 교체하지 않아 수개월간의 고르지 않은 마모 후 스포트가 갑자기 파손되는 경우가 있습니다. 부품 불일치는 훨씬 더 치명적입니다. 고온 조건에서 불소 고무 링을 설치하면 즉각적인 탄화가 발생하고, 일반 산업용 노즐을 의료용 노즐로 사용하면 과도한 이온 방출이 발생합니다. 오래된 킥 체인지 노즐을 새 건 본체에 강제로 설치하면 걸림 현상이 발생하고 제거가 불가능해집니다. 또 다른 유형의 숨겨진 실수는 업그레이드 과정에서 씰과 가이드 슬리브를 교체하지 않고 노즐만 교체하는 것입니다. 새로운 고정밀 노즐은 노후되고 정밀도가 낮은 취약 부품과 함께 사용되어 이전보다 수명이 단축됩니다. 이러한 문제는 근본적으로 텅스텐 합금 노즐을 "시스템 구성 요소"가 아닌 "독립적인 구성 요소"로 취급하고, 씰링 링, 가이드 슬리브, 킥 체인지 베이어닛, 냉각 재킷과 같은 주변 취약 부품이 노즐 수명에 미치는 결정적인 영향을 무시하는 데서 비롯됩니다. 올바른 교체 및 업그레이드는 "교체 시 모두 교체, 업그레이드 시 모두 업그레이드"라는 철칙을 따라야 합니다. 노즐을 교체할 때는 모든 접촉 부품, 씰, 가이드 부품을 동시에 최신 버전으로 업데이트해야 합니다. 오래된 와인을 새 병에 담는 것은 절대 안 됩니다.

유지 보수 및 문제 해결 과정에서 발생하는 모든 문제는 "사소한 문제"가 아니라, 이론적으로 매우 긴 수명을 가진 텅스텐 합금 노즐을 수명이 짧은 소모품으로 만드는 "느린 자살 행위"에 가깝습니다. 진정한 장수명 사용자는 오랫동안 유지 보수를 생산만큼이나 중요한 핵심 프로세스로 여겨 왔습니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 노즐

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD

High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

Core advantages: 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

Precision customization: support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

Quality cost: optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

Advanced capabilities: advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

Service commitment

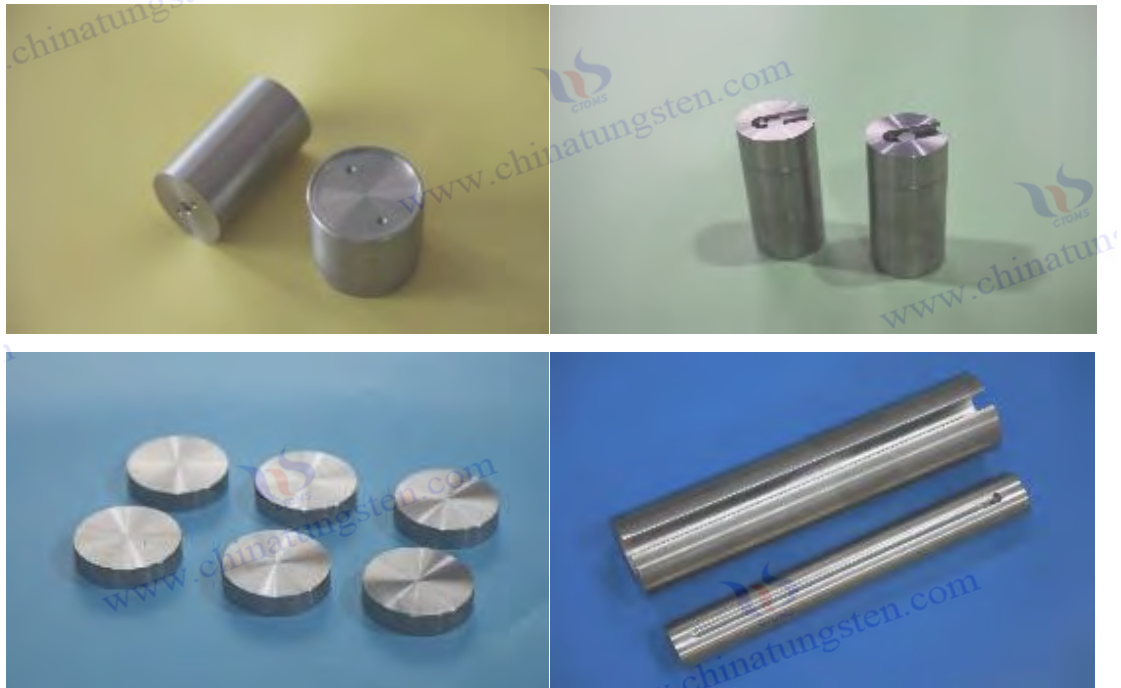
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Tel: +86 592 5129696

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## 부록 A: 중국 텅스텐 합금 노즐 표준

중국의 텅스텐 합금 노즐 표준 체계는 국가 표준(GB/T 시리즈)을 기반으로 하고 산업 표준(HG/T, JB/T, YY/T 시리즈)을 보완하여 재료 구성, 제조 공정, 성능 요건, 시험 방법, 품질 관리 및 환경 규정 준수를 포함한 모든 측면을 포괄하는 완전한 체계를 구축했습니다. 이러한 표준은 국가시장감독관리총국(SAMR)과 관련 산업 협회가 공동으로 제정했으며, 용사, 워터젯 절단, 레이저 클래딩 및 산업 세척 등의 분야에서 텅스텐 합금 노즐의 안전하고 효율적인 적용을 보장하기 위한 목표를 가지고 있습니다.

GB/T 3458-2016 "텅스텐 기반 고밀도 합금"은 노즐에 사용되는 텅스텐 합금의 화학 조성 범위, 밀도 균일성, 기계적 특성 및 미세 구조 요건을 명시하는 기본 표준입니다. 이 표준은 용사 및 고압 세척에 사용되는 노즐의 재료 선정에 적용됩니다. GB/T 4185-2017 "경질 합금용 텅스텐 분말"은 노즐용 텅스텐 분말에 대한 사양을 확장하여, 노즐 스포트 밀도를 확보하기 위해 환원 공정 중 순도 및 입자 크기 분포 제어를 강조합니다. HG/T 2077-2017 "텅스텐 합금 낚시 싱크의 기술 조건"은 민간용으로 제작되었지만, 내식성 및 표면 처리 조항은 산업용 노즐 표준에 채택되었습니다. JB/T 12778-2017 "고밀도 합금 내마모성 볼의 기술 조건"과 같은 산업별 표준은 노즐의 내마모성 검증에 적용되며, YY/T 1636-2019 "의료용 텅스텐 합금 콜리메이터의 기술 요건"은 의료용 노즐의 생체 적합성 및 방사선 차폐 성능을 명시합니다. 환경 보호 측면에서는 GB/T 33357-2016 "텅스텐 합금 제품의 중금속 이동 측정"이 식품 및 제약 세척 시 노즐의 오염 위험을 완전히 제거합니다.

이러한 표준은 중단 간 추적성과 제 3 자 인증을 강조합니다. 제조업체는 ISO 9001 품질 시스템 감사를 통과해야 하며, 노즐은 공장 출고 시 배치 보고서와 성능 곡선을 첨부해야 합니다. 중국 표준 시스템의 엄격함과 미래 지향적인 특성은 텅스텐 합금 노즐이 유럽 및 미국 시장으로 수출될 때 상당한 경쟁 우위를 확보할 수 있도록 합니다.

## 부록 B 텅스텐 합금 노즐에 대한 국제 표준

텅스텐 합금 노즐에 대한 국제 표준은 ASTM International 과 ISO 가 주도하며, 재료 사양, 시험 방법 및 적용 지침에 중점을 두고 전 세계적으로 통합된 벤치마크 프레임워크를 형성하여 열 분무, 워터제팅 및 레이저 가공과 같은 국경 간 공정에서 노즐의 상호 운용성과 신뢰성을 보장합니다.

ASTM B777-20 "텅스텐 기반 고밀도 합금에 대한 표준 규격"은 노즐에 사용되는 텅스텐 합금의 조성 범위, 밀도 일관성, 인장 강도, 경도 및 고온 성능을 자세히 설명하는 핵심 표준입니다. 이 규격은 산업용 분무 및 절단 노즐에 적용됩니다. ASTM F3049-14 "텅스텐 합금의 적층 제조 공정에 대한 규격"은 3D 프린팅 노즐까지 확장되어 분말 순도와 소결 밀도를 강조합니다. ISO 9001:2015 "품질 관리 시스템"은 노즐 제조의 전체 공정 관리를 보장하는 일반적인 프레임워크 역할을 합니다. ISO 13485:2016 "의료기기 품질 관리 시스템"은 의료용 세척 및 약물 분무 노즐에 적용되며 생체 적합성 및 청결 요건을 강조합니다. ISO 683-17 "고밀도 합금 베어링 및 공구 구성품에 대한 사양"은 노즐 마모

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

저항성 검증에 맞춰 조정되었습니다.

국제표준화기구(ISO)와 미국재료시험학회(ASTM)에서 관리하는 이러한 표준은 UL, TÜV 등 제 3 자 인증을 강조하고 RoHS 및 REACH 환경 규정을 준수하여 글로벌 공급망에서 노즐의 규정 준수를 보장합니다. 이러한 국제 표준의 미래 지향적인 특성은 레이저 클래딩 및 콜드 스프레이와 같은 새로운 공정에서 텅스텐 합금 노즐의 표준화된 적용을 촉진했습니다.

### 부록 C: 유럽, 미국, 일본, 한국 및 기타 국가의 텅스텐 합금 노즐 표준

유럽, 미국, 일본, 한국 등의 국가에서는 텅스텐 합금 노즐에 대한 규격을 안전, 환경 보호, 높은 신뢰성을 중시하고 지역별 규정을 통합하여 EU CE 마크, 미국 ASME 규격, 일본 JIS 규격, 한국 KS 규격을 기반으로 다각화된 시스템을 형성하고 있습니다.

유럽에서는 CEN/CENELEC 이 주도하고 있습니다. EN 10025-6 "텅스텐 합금 구조용 강재 규격"은 노즐 재질까지 확대되어 고온 강도와 내식성을 강조합니다. EN ISO 15614-1 "용접 절차 규격"은 노즐 브레이징 및 연결 요건을 다룹니다. 압력 장비 지침(PED) 2014/68/EU 에 따른 EN 13445 는 고압 용기 내 노즐의 압력 시험을 규정합니다. CE 마크는 용사 및 워터젯 장비 노즐의 안전성과 적합성을 보장합니다.

미국에서는 ASME 가 주요 표준입니다. ASME BPVC 섹션 IX "텅스텐 합금 용접 사양"에는 노즐 무결성이 포함되어 있으며, ASME B31.3 "공정 배관 사양"은 화학 세척 시 노즐의 내식성 요건을 다룹니다. SAE AMS 7816 "텅스텐 합금 항공우주 재료"는 고온 안정성에 중점을 둔 항공우주 등급 노즐에 적용됩니다.

일본 JIS Z 2241 "금속 재료 시험 방법"은 노즐 경도 및 피로 검증을 포함하도록 확장되었습니다. JIS B 8363 "공압 시스템 사양"은 산업용 분야에서 노즐의 흐름 일관성을 표준화합니다. 일본 용접 협회(JWES)의 지침은 레이저 가공에서 노즐의 정밀도를 강조합니다.

한국표준협회(KS D 3562)의 "텅스텐 합금 산업용 공구 규격"은 노즐 내마모성 요건을 다루며, 에너지 세척 시 노즐의 신뢰성을 보장하기 위해 KGS 가스 안전 규정을 준수합니다. 한국시험인증원(KTC)은 노즐이 ISO 등 국제 규격을 준수함을 인증합니다.

이러한 지역 표준은 글로벌 규범과 상호 높은 상호 인정을 받고 있으며, 추적성과 환경 보호를 강조하고 국제 무역에서 텅스텐 합금 노즐의 표준화된 적용을 촉진합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 부록 D 텅스텐 합금 노즐 용어표

중국어 용어	설명
텅스텐 합금 노즐	텅스텐을 주요 골격으로 하고 Ni, Fe, Cu, Co 및 기타 바인더 상을 사용하여 만든 초고밀도, 내마모성 및 고온 내성 정밀 분사 구성 요소입니다.
텅스텐 기반 고밀도 합금	텅스텐 함량이 $\geq 90\%$ 인 경우 일반적인 등급은 93W, 95W, 97W입니다.
라발 노즐	수축부, 목부, 팽창부를 갖춘 초음속 유동 채널 구조를 특징으로 하며, 열 분무 및 물 분사에 사용됩니다.
후두/후두	노즐 흐름 채널의 가장 좁은 지점은 제트 속도와 유량을 직접적으로 결정합니다.
바인더 단계	Ni, Fe, Cu, Co 와 같은 낮은 녹는점 상은 텅스텐 입자를 결합하고 인성을 제공하는 데 사용됩니다.
냉간 등방압 가압	균일한 고압 성형 공정을 통해 일관된 겉보기 밀도가 보장됩니다.
액상소결	소결 과정에서 바인더상이 녹아 텅스텐 입자를 적셔 이론에 가까운 밀도를 달성합니다.
이론 밀도	텅스텐 합금은 조성을 기준으로 계산하면 일반적으로 $\geq 17.0 \text{ g/cm}^3$ 입니다.
불소 화 처리	표면 불소화는 초경도 텅스텐 분화물 층을 형성하여 내마모성을 크게 향상시킵니다.
DLC 코팅	다이아몬드 유사 탄소 코팅은 표면 경도를 더욱 향상시키고 마찰을 감소시킵니다.
캐비테이션	고압 분사기에서 기포 붕괴로 인한 인후의 박리 손상
제트 발산각	노즐을 떠난 후 점차 넓어지는 원뿔 각도가 적용 범위와 초점을 결정합니다.
동축 분말 공급 노즐	레이저 클래딩/3D 프린팅, 분말은 노즐을 통해 레이저와 동축으로 통과합니다.
퀵 체인지 총검	몇 초 내 노즐 교체가 가능한 잠금 구조
역압	노즐 입구의 실제 압력은 제트 속도에 직접적인 영향을 미칩니다.
유량계수	실제 유량과 이론 유량의 비율은 노즐 흐름 채널 효율을 나타냅니다.
거울 등급 내벽	내벽 거칠기 $Ra \leq 0.05 \mu\text{m}$ 는 접착과 캐비테이션을 크게 줄입니다.



CTIA GROUP LTD 텅스텐 합금 노즐

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 참고문헌

### 중국어 참조

- [1] 장리더, 무지 메이. 나노물질 및 나노구조 [M]. 베이징: 과학출판사, 2001.
- [2] Pan Fusheng, Zhang Dingfei. 텅스텐 및 텅스텐 합금[M]. 베이징: 야금 산업 출판사, 2018.
- [3] Yong Deguo, Boyun Huang. 텅스텐 기반 고밀도 합금에 대한 연구 진행 상황 [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2008, 37(9): 1505-1511.
- [4] Fan Jinglian, Liu Tao, Cheng Huaichun. 초미립/나노 텅스텐 합금의 연구 현황 및 전망 [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2015, 44(6): 1511-1517.
- [5] Qu Xuanhui, Qin Mingli. 고밀도 텅스텐 합금 제조 기술 [M]. 베이징: 야금 산업 출판사, 2013.
- [6] GB/T 3458-2016 텅스텐 기반 고밀도 합금 [S]. 베이징: 중국 표준 출판사, 2016.
- [7] GB/T 4185-2017 시멘트 카바이드용 텅스텐 분말 [S]. 베이징: 중국 표준 출판사, 2017.
- [8] Luo Xiyu, Yang Guang. 초음속 화염 분사용 텅스텐 합금 노즐의 파손 분석 및 수명 예측 [J]. Surface Technology, 2020, 49(8): 112-119.
- [9] Wang Fazhan, Wang Cailiang. 고압 물 분사 노즐에 텅스텐 합금을 적용하는 연구 진행 상황 [J]. 중국 텅스텐 산업, 2022, 37(4): 56-62.
- [10] Li Yimin, Yin Fucheng. 텅스텐 합금 노즐 정밀 가공 기술의 현황 및 발전 동향 [J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(2): 98-105.

### 영어 참조

- [1] German R M. Sintering Theory and Practice[M]. New York: Wiley- Interscience, 1996.
- [2] Upadhyaya G S. 시멘트 텅스텐 카바이드: 생산, 특성 및 테스트[M]. William Andrew Publishing, 1998.
- [3] Bose A, German R M. 텅스텐 중합금의 고밀도 가공[J]. Powder Metallurgy International, 1990, 22(4): 18-22.
- [4] 텅스텐 기반 고밀도 금속에 대한 ASTM B777-20 표준 사양[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2020.
- [5] Lassner E, Schubert W D. 텅스텐: 원소, 합금 및 화합물의 특성, 화학, 기술[M]. 뉴욕: Springer, 1999.
- [6] Yih SWH, Wang C T. 텅스텐: 출처, 야금, 특성 및 응용 분야[M]. 보스톤: Springer, 1979.
- [7] Srikanth V, Laik A, Dey G K. 텅스텐 중합금: 가공, 특성 및 응용 분야에 대한 검토[J]. 인도 금속 연구소 논문집, 2021, 74(6): 1375-1395.
- [8] Chen W, Wang YM, Yu L. 초미립 텅스텐 중합금의 미세구조 및 기계적 특성[J]. 재료과학 및 공학 A, 2020, 789: 139-148.
- [9] ISO 13485:2016 의료기기 - 품질 관리 시스템 - 규제 목적 요구 사항[S]. 제네바: 국제 표준화 기구, 2016.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT