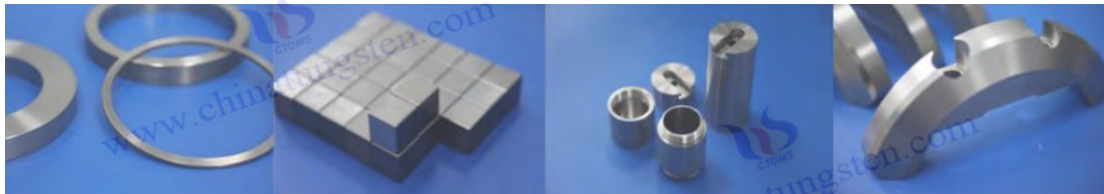


텅스텐 중합금 백과사전

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

INTRODUCTION TO CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, a wholly-owned subsidiary with independent legal personality established by CHINATUNGSTEN ONLINE, is dedicated to promoting the intelligent, integrated, and flexible design and manufacturing of tungsten and molybdenum materials in the Industrial Internet era. CHINATUNGSTEN ONLINE, founded in 1997 with www.chinatungsten.com as its starting point—China's first top-tier tungsten products website—is the country's pioneering e-commerce company focusing on the tungsten, molybdenum, and rare earth industries. Leveraging nearly three decades of deep experience in the tungsten and molybdenum fields, CTIA GROUP inherits its parent company's exceptional design and manufacturing capabilities, superior services, and global business reputation, becoming a comprehensive application solution provider in the fields of tungsten chemicals, tungsten metals, cemented carbides, high-density alloys, molybdenum, and molybdenum alloys.

Over the past 30 years, CHINATUNGSTEN ONLINE has established more than 200 multilingual tungsten and molybdenum professional websites covering more than 20 languages, with over one million pages of news, prices, and market analysis related to tungsten, molybdenum, and rare earths. Since 2013, its WeChat official account "CHINATUNGSTEN ONLINE" has published over 40,000 pieces of information, serving nearly 100,000 followers and providing free information daily to hundreds of thousands of industry professionals worldwide. With cumulative visits to its website cluster and official account reaching billions of times, it has become a recognized global and authoritative information hub for the tungsten, molybdenum, and rare earth industries, providing 24/7 multilingual news, product performance, market prices, and market trend services.

Building on the technology and experience of CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP focuses on meeting the personalized needs of customers. Utilizing AI technology, it collaboratively designs and produces tungsten and molybdenum products with specific chemical compositions and physical properties (such as particle size, density, hardness, strength, dimensions, and tolerances) with customers. It offers full-process integrated services ranging from mold opening, trial production, to finishing, packaging, and logistics. Over the past 30 years, CHINATUNGSTEN ONLINE has provided R&D, design, and production services for over 500,000 types of tungsten and molybdenum products to more than 130,000 customers worldwide, laying the foundation for customized, flexible, and intelligent manufacturing. Relying on this foundation, CTIA GROUP further deepens the intelligent manufacturing and integrated innovation of tungsten and molybdenum materials in the Industrial Internet era.

Dr. Hanns and his team at CTIA GROUP, based on their more than 30 years of industry experience, have also written and publicly released knowledge, technology, tungsten price and market trend analysis related to tungsten, molybdenum, and rare earths, freely sharing it with the tungsten industry. Dr. Han, with over 30 years of experience since the 1990s in the e-commerce and international trade of tungsten and molybdenum products, as well as the design and manufacturing of cemented carbides and high-density alloys, is a renowned expert in tungsten and molybdenum products both domestically and internationally. Adhering to the principle of providing professional and high-quality information to the industry, CTIA GROUP's team continuously writes technical research papers, articles, and industry reports based on production practice

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

and market customer needs, winning widespread praise in the industry. These achievements provide solid support for CTIA GROUP's technological innovation, product promotion, and industry exchanges, propelling it to become a leader in global tungsten and molybdenum product manufacturing and information services.



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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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

목차

1 장: 서론

- 1.1 고밀도 텅스텐 합금 의 정의 및 개요
- 1.2 고밀도 텅스텐 합금 연구 및 응용의 의의
- 1.3 이 책의 목적과 구성

2 장: 고비중 텅스텐 합금의 기본 지식

- 2.1 고밀도 텅스텐 합금 의 화학적 및 물리적 특성
- 2.2 고밀도 텅스텐 합금 의 역사적 발전
- 2.3 고밀도 텅스텐 합금과 다른 재료의 비교
- 2.4 중텅스텐 합금의 분류
 - 2.4.1 조성에 따른 분류(W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Ni-Fe-Co 등)
 - 2.4.2 밀도 및 기계적 성질에 따른 분류 (Class 1 ~ Class 4)
 - 2.4.3 용도별 분류(군사, 항공우주, 의료, 산업 등)

제 3 장: 고중량 텅스텐 합금의 성능 분석

- 3.1 고밀도 텅스텐 합금 의 기계적 성질
- 3.2 고밀도 텅스텐 합금 의 물리적 특성
- 3.3 중텅스텐 합금의 주요 원소 및 기능
- 3.4 중텅스텐 합금의 내식성 및 내마모성
- 3.5 중텅스텐 합금의 방사선 차폐 능력
- 3.6 중텅스텐 합금의 성능 최적화 방법

제 4 장 고비중 텅스텐 합금의 제조 기술

- 4.1 고밀도 텅스텐 합금 원료의 선정 및 전처리
- 4.2 고밀도 텅스텐 합금의 분말야금 공정
- 4.3 고밀도 텅스텐 합금의 기타 제조 방법
- 4.4 고밀도 텅스텐 합금의 공정 매개변수의 영향
- 4.5 고밀도 텅스텐 합금의 품질 관리 및 시험

제 5 장 고비중 텅스텐 합금의 가공 및 후가공

- 5.1 고밀도 텅스텐 합금 의 가공 기술
- 5.2 고밀도 텅스텐 합금 의 표면 처리
- 5.3 고밀도 텅스텐 합금 의 용접 및 접속

제 6 장 고비중 텅스텐 합금 생산 장비

- 6.1 중텅스텐 합금 분말 제조 장비
- 6.2 중텅스텐 합금 성형 장비
- 6.3 중텅스텐 합금 소결 장비
- 6.4 중텅스텐 합금 가공 및 후처리 장비
- 6.5 중텅스텐 합금 생산 장비의 선정 및 최적화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 7 장: 고비중 텅스텐 합금 시험 장비

- 7.1 고밀도 텅스텐 합금 밀도 시험 장비
- 7.2 고밀도 텅스텐 합금 기계적 성질 시험 장비
- 7.3 고밀도 텅스텐 합금 미세조직 분석 장비
- 7.4 고밀도 텅스텐 합금 성분 분석 장비
- 7.5 고밀도 텅스텐 합금 비파괴 검사 장비
- 7.6 고밀도 텅스텐 합금 시험 장비 의 선정 및 개발 동향

제 8 장: CTIA GROUP LTD 의 고비중 텅스텐 합금의 주요 제품

8.1 고비중 텅스텐 합금 균형추 제품

- 8.1.1 고비중 텅스텐 합금 항공우주 균형추
- 8.1.2 고비중 텅스텐 합금 자동차 카운터웨이트
- 8.1.3 고비중 텅스텐 합금 스포츠 장비 무게
- 8.1.4 고비중 텅스텐 합금 선박 균형추
- 8.1.5 고비중 텅스텐 합금 엘리베이터 카운터웨이트
- 8.1.6 무거운 텅스텐 합금 다트 샤프트
- 8.1.7 무거운 텅스텐 합금 낚싯추

8.2 고비중 텅스텐 합금 군수품

- 8.2.1 중텅스텐 합금 장갑 관통 코어
- 8.2.2 고밀도 텅스텐 합금 보호 장갑판
- 8.2.3 고비중 텅스텐 합금 탄약 차폐 케이스
- 8.2.4 고밀도 텅스텐 합금 대전차 미사일 부품
- 8.2.5 고비중 텅스텐 합금 총기 균형추
- 8.2.6 고비중 텅스텐 합금 항공 자이로스코프 카운터웨이트
- 8.2.7 무거운 텅스텐 합금 로켓 노즐 부싱

8.3 고비중 텅스텐 합금 의료 관련 제품

- 8.3.1 무거운 텅스텐 합금 방사선 차폐 구성 요소
- 8.3.2 무거운 텅스텐 합금 동위원소 용기
- 8.3.3 고비중 텅스텐 합금 의료용 텅스텐 합금 바늘
- 8.3.4 고밀도 텅스텐 합금 방사선 치료 표적
- 8.3.5 고비중 텅스텐 합금 의료용 보호 스크린
- 8.3.6 중텅스텐 합금 핵폐기물 용기
- 8.3.7 무거운 텅스텐 합금 감마 나이프 구성 요소

8.4 중텅스텐 합금 산업 도구 및 부품

- 8.4.1 무거운 텅스텐 합금 절삭 공구
- 8.4.2 고비중 텅스텐 합금 금형 및 펀치
- 8.4.3 중텅스텐 합금 진동 억제 부품
- 8.4.4 고밀도 텅스텐 합금 드릴링 도구

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 8.4.5 무거운 텅스텐 합금 베어링 구성품
- 8.4.6 중텅스텐 합금 연삭 슬리브
- 8.4.7 무거운 텅스텐 합금 무거운 공작 기계 균형추

8.5 중텅스텐 합금 전자 및 에너지 제품

- 8.5.1 고밀도 텅스텐 합금 전극 재료
- 8.5.2 고밀도 텅스텐 합금 방열판(라디에이터)
- 8.5.3 중텅스텐 합금 원자로 구성품
- 8.5.4 고비중 텅스텐 합금 배터리 카운터웨이트
- 8.5.5 중텅스텐 합금 태양열 장비 구성품
- 8.5.6 중텅스텐 합금 X 선관 양극 타겟
- 8.5.7 고비중 텅스텐 합금 풍력 터빈 균형추

8.6 중텅스텐 합금의 맞춤형 제품

- 8.6.1 고비중 텅스텐 합금 3D 프린팅 텅스텐 합금 부품
- 8.6.2 고비중 텅스텐 합금 특수형상 균형추
- 8.6.3 고밀도 텅스텐 합금 예술 작품 및 장식품
- 8.6.4 중텅스텐 합금 실험 장비 구성 요소
- 8.6.5 고밀도 텅스텐 합금 마이크로 정밀 부품
- 8.6.6 중텅스텐 합금 암호화폐
- 8.6.7 고비중 텅스텐 합금 은행 카드

제9장 고비중 텅스텐 합금의 응용 분야

9.1 항공우주 분야에서 고비중 텅스텐 합금의 적용

- 9.1.1 항공기 균형추 및 균형 부품
- 9.1.2 우주선 추진 시스템 구성 요소
- 9.1.3 자이로스코프 및 관성 항법 시스템

9.2 군수산업에서의 고비중 텅스텐 합금의 응용

- 9.2.1 운동에너지 철갑탄 및 탄두핵
- 9.2.2 보호 장갑 및 차폐 재료
- 9.2.3 미사일 및 총기 부품
- 9.2.4 폭발성 발사체(EFP)

9.3 의료 분야에서의 중텅스텐 합금의 응용

- 9.3.1 방사선 차폐 및 방호 장비
- 9.3.2 방사선 치료 및 동위원소 용기
- 9.3.3 수술 도구 및 임플란트

9.4 산업 및 민간 분야에서의 중텅스텐 합금의 응용

- 9.4.1 가공 도구
- 9.4.2 중장비용 균형추

- 9.4.3 자동차 및 경주 산업
- 9.4.4 스포츠 및 엔터테인먼트 장비

9.5 전자 및 에너지 분야에서의 고비중 텅스텐 합금의 응용

- 9.5.1 전자 장비의 방열 및 차폐
- 9.5.2 핵 및 재생 에너지 구성 요소
- 9.5.3 반도체 및 마이크로 전자 부품

9.6 신홍 분야에서의 중텅스텐 합금의 응용

- 9.6.1 적층 제조(3D 프린팅)의 응용
- 9.6.2 우주 탐사 및 심해 탐사
- 9.6.3 고엔트로피 합금 및 복합재료 개발

제 10 장: 중텅스텐 합금의 국내 및 국제 표준

- 10.1 중텅스텐 합금에 대한 국제 표준
- 10.2 중텅스텐 합금에 대한 국내 표준
- 10.3 중텅스텐 합금에 대한 표준의 내용 및 요구 사항
- 10.4 중텅스텐 합금의 국내 및 국제 표준 비교
- 10.5 중텅스텐 합금 표준 개발 동향
- 10.6 CTIA GROUP LTD 고비중 텅스텐 합금 MSDS

제 11 장: 중텅스텐 합금의 환경 및 경제적 고려 사항

- 11.1 중텅스텐 합금 생산 공정의 환경 영향
- 11.2 중텅스텐 합금의 재활용 및 재사용
- 11.3 중텅스텐 합금의 비용 분석

제 12 장: 고밀도 텅스텐 합금의 연구 최전선

- 12.1 고밀도 텅스텐 합금 신소재 개발
- 12.2 고밀도 텅스텐 합금의 성능 향상을 위한 방향
- 12.3 고밀도 텅스텐 합금의 시뮬레이션 및 계산 재료 과학
- 12.4 고밀도 텅스텐 합금의 AI 지원 설계 및 맞춤화
- 12.5 고밀도 텅스텐 합금과 텅스텐 함유 고엔트로피 합금 간의 관계
- 12.6 저독성 텅스텐 합금(니켈 무함유 또는 저니켈 합금)
- 12.7 나노구조 텅스텐 합금

총수

- 중텅스텐 합금 용어집
- 중텅스텐 합금의 참고문헌
- 중텅스텐 합금 데이터 시트
- 고비중 텅스텐 합금 관련 특허



1 장: 서론

중텅스텐 합금의 정의 및 개요

고밀도 텅스텐 합금은 이름에서 알 수 있듯이 주성분인 텅스텐(W)에 소량의 다른 금속 원소(니켈, Ni, 철, 구리, Cu 등)를 특정 공정을 통해 첨가하여 만든 복합 소재입니다. 이 합금은 매우 높은 밀도(일반적으로 $17.0 \sim 19.3 \text{ g/cm}^3$, 순수 텅스텐의 19.25 g/cm^3 에 가까움)로 알려져 있으며, 강철(7.8 g/cm^3)이나 납(11.3 g/cm^3)과 같은 일반적인 금속을 훨씬 능가합니다. 고밀도 텅스텐 합금의 핵심 특징은 고밀도뿐만 아니라 뛰어난 기계적 강도, 내식성, 고온 내성 및 우수한 방사선 차폐 능력으로 인해 다양한 분야에서 대체할 수 없는 응용 가치를 지닙니다.

화학 조성 측면에서 고밀도 텅스텐 합금은 일반적으로 85~99%의 텅스텐을 함유하며, 나머지는 바인더상 원소(예: 니켈, 철) 또는 대체 원소(예: 구리)입니다. 이러한 추가 원소는 텅스텐 분말과 혼합되어 분말 야금 공정을 통해 압축 및 소결되어 균일한 미세 구조를 형성합니다. 바인더상은 합금의 인성과 가공성을 향상시키는 역할을 합니다. 순수 텅스텐은 밀도가 매우 높지만 너무 단단하고 취성이 커서 실제 가공 및 응용 요건을 충족하지 못하기 때문입니다. 고밀도 텅스텐 합금은 배합을 최적화함으로써 텅스텐의 고밀도 특성을 유지할 뿐만 아니라 기계적 특성도 향상시켜 기능성과 실용성을 모두 갖춘 고급 소재로 탄생했습니다.

재료 과학에서 중텅스텐 합금은 기능성 재료와 구조적 재료의 조합으로 여겨집니다. 높은 밀도는 항공우주용 균형추나 군용 철갑탄 코어처럼 부피는 작지만 무게는 무거운 경우에 매우 적합합니다. 동시에 물리적, 화학적 안정성은 방사선 차폐나 원자력 산업의 고온

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

처리 장비와 같은 극한 환경에도 적합합니다. 이러한 다재다능함 덕분에 중텨스텐 합금은 현대 산업 및 기술 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있으며, “중금속 중 최고”로 알려져 있습니다.

역사적으로 고밀도 텨스텐 합금의 개발은 20 세기 초 텨스텐 소재 연구, 특히 제 2 차 세계 대전 중 고성능 군수 소재에 대한 수요 증가에서 비롯되었으며, 이는 기술 발전을 촉진했습니다. 오늘날 액상 소결, 열간 등방성 성형 등 제조 공정의 지속적인 개선과 응용 분야 확대를 통해 고밀도 텨스텐 합금은 원래 군사적 용도를 넘어 의료, 산업, 민간, 그리고 신흥 과학 기술 분야로 확장되어 재료 과학의 중요한 연구 및 응용 분야로 자리 잡았습니다.

1.2 고비중 텨스텐 합금 연구 및 응용의 의의

고밀도 텨스텐 합금은 광범위한 과학적 의의와 실용적 가치를 지니고 있으며, 그 중요성은 여러 측면에서 반영됩니다. 첫째, 과학적 관점에서 고밀도 텨스텐 합금은 금속 기반 복합재료 연구의 모델이 됩니다. 텨스텐과 다른 원소의 비율을 조절하고 제조 공정을 최적화함으로써 밀도, 강도, 인성과 같은 특성 간의 관계를 체계적으로 탐구할 수 있습니다. 이러한 연구는 재료 과학의 이론적 발전을 촉진할 뿐만 아니라 다른 고성능 합금 개발에도 귀중한 경험을 제공합니다. 예를 들어, 고밀도 텨스텐 합금의 미세구조 제어 기술(예: 결정립 크기 최적화 및 상분포 균일성)은 고엔트로피 합금 및 나노재료 연구에 활용되었습니다.

산업 분야에서 고밀도 텨스텐 합금의 적용은 여러 산업의 효율성과 안전성을 직접적으로 향상시킵니다. 항공우주 분야를 예로 들면, 고밀도 특성 덕분에 항공기와 우주선의 균형추 부품이 제한된 공간에서 정밀한 질량 분포를 달성하여 비행 성능과 연비를 최적화할 수 있습니다. 군수 산업에서는 고밀도 텨스텐 합금으로 제작된 철갑탄이 높은 경도와 밀도 덕분에 현대식 장갑재를 효과적으로 관통하고 무기 체계의 전투력을 향상시킬 수 있습니다. 또한, 고온 및 내식성이 뛰어나 고온 가공 도구 및 심해 장비에 이상적인 선택으로, 장비 수명을 크게 연장하고 유지보수 비용을 절감할 수 있습니다.

의료 분야에서의 응용은 고밀도 텨스텐 합금의 사회적 가치를 더욱 부각시킵니다. 고밀도 텨스텐 합금은 뛰어난 방사선 차폐 능력으로 인해 X선 촬영기, CT 장비, 방사선 치료기의 차폐 부품에 널리 사용됩니다. 기존 납 소재와 비교하여 텨스텐 합금은 무독성이며 밀도가 더 높습니다. 텨스텐 합금은 더 얇은 두께로 동등하거나 더 나은 차폐 효과를 제공하고, 장비 무게를 줄이며, 환자와 의료진의 안전을 향상시킵니다. 또한, 고밀도 텨스텐 합금은 의료용 동위원소 용기 및 감마 나이프 부품 제조에도 사용되어 방사성 물질의 안전한 운송과 정밀한 치료를 보장하고 현대 의료 기술 발전을 촉진합니다.

민간 분야에서 고밀도 텨스텐 합금의 적용은 간과할 수 없습니다. 예를 들어, 스포츠 장비(골프채 추, 다트 낚싯대 등)와 낚싯대 추에 고밀도 텨스텐 합금을 사용하면 독성 납 소재를 대체하여 제품 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 환경 보호 요건도 충족할 수 있습니다. 산업 분야에서 민간 분야로의 이러한 광범위한 확산은 고밀도 텨스텐 합금이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

삶의 질을 향상시키고 지속 가능한 개발을 촉진할 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 보여줍니다.

경제적 관점에서 고밀도 텅스텐 합금의 연구 개발 및 응용은 텅스텐 채굴, 분말 야금 장비 제조, 정밀 가공 기술을 포함한 관련 산업 사슬의 발전을 촉진해 왔습니다. 특히 고성능 소재에 대한 전 세계적인 수요 증가 속에서 고밀도 텅스텐 합금의 시장 전망은 매우 밝으며, 기업과 국가에 상당한 경제적 이익을 창출하고 있습니다. 그러나 높은 생산 비용과 자원 의존성(텅스텐은 희귀 금속)으로 인해 연구자들은 경제와 환경 모두에 이로운 결과를 달성하기 위해 더욱 효율적인 생산 공정과 재활용 기술을 끊임없이 연구해 왔습니다.

1.3 이 책의 목적과 구성

본서는 고밀도 텅스텐 합금의 기본 이론부터 실제 응용, 생산 기술부터 미래 개발까지 관련 지식을 포괄적이고 체계적으로 소개하고, 독자에게 권위 있고 상세한 참고 자료를 제공하고자 합니다. 본서의 주요 목적은 다음과 같습니다.

첫째, 학계 연구자들에게 이론적 근거를 제공합니다. 이 책은 고밀도 텅스텐 합금의 화학적 및 물리적 특성, 제조 공정, 그리고 성능 최적화 방법을 심층적으로 탐구하고, 연구자들이 미세 구조와 거시적 특성 간의 관계를 이해하도록 돕고, 새로운 텅스텐 기반 소재 설계에 영감을 제공합니다. 둘째, 엔지니어링 및 기술 인력에게 실질적인 지침을 제공합니다. 생산 장비, 시험 기술, 그리고 특정 제품 응용 분야를 자세히 소개함으로써, 이 책은 실무자들이 고밀도 텅스텐 합금의 가공 및 응용 기술을 숙달하고 산업 생산 효율을 향상시키도록 지원합니다. 셋째, 업계 의사 결정권자와 관리자들에게 전략적 참고 자료를 제공합니다. 국내외 표준, 환경 영향, 그리고 경제적 고려 사항을 분석함으로써, 고밀도 텅스텐 합금 산업의 발전 동향과 과제를 밝히고 정책 수립 및 투자 결정의 기반을 제공합니다.

이 책의 대상 독자는 재료 과학 및 공학 분야의 학자 및 학생, 텅스텐 합금 생산 및 가공에 종사하는 엔지니어, 항공우주 및 방위 산업의 기술 전문가, 의료 장비 제조업체, 고성능 소재에 관심 있는 업계 종사자 등 다양합니다. 다양한 독자의 요구를 충족 하기 위해 , 이 책의 내용은 이론적 깊이와 응용 범위를 모두 고려하여 구성되었으며 , 기본 지식과 최신 연구 동향에 대한 체계적인 검토를 포함하고 있습니다.

이 책은 다음과 같이 구성되어 있습니다.

2장~5장 : 고밀도 텅스텐 합금의 기초를 마련하고, 기본 지식, 성능 분석, 제조 기술, 가공 및 후처리 기술을 소개하며, 독자를 위한 포괄적인 이론적 틀을 구축합니다.

6장~7장 : 생산과 시험에 초점을 맞춰 고밀도 텅스텐 합금의 생산 장비와 시험 장비를 자세히 설명하고, 기술 구현을 위한 하드웨어 지원을 강조합니다.

제8장~제9장 : 응용 분야별로 중국 텅스텐 인텔리전스의 주요 제품과 보다 광범위한 응용 분야를 각각 나열하여 고밀도 텅스텐 합금의 실제 가치를 보여줍니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10~ 11 장 : 규범과 영향에 초점을 맞추고, 국내 및 국제 표준과 환경 및 경제적 고려 사항을 분석하며 , 산업화에 대한 배경 지원을 제공합니다.

12 장 : 미래를 내다보며, 이 논문에서는 AI 지원 설계와 고엔트로피 합금의 교차 연구를 포함하여 고밀도 텅스텐 합금의 연구 최전선을 논의합니다.

부록 : 독자의 참고 및 심층 조사를 용이하게 하기 위해 용어집, 참고문헌 및 데이터 표를 제공합니다.

이러한 구조적 구성을 통해 이 책은 독자들에게 고밀도 텅스텐 합금의 전반적인 모습을 이론에서 실제까지, 기술에서 응용까지, 그리고 현재 상황과 미래까지 아우르는 포괄적인 시각을 제공하고자 합니다. 이 분야를 처음 접하는 학습자들, 연구를 심화시키고자 하는 전문가들, 이 책이 고밀도 텅스텐 합금의 세계를 탐구하는 데 든든한 동반자가 되기를 바랍니다.

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

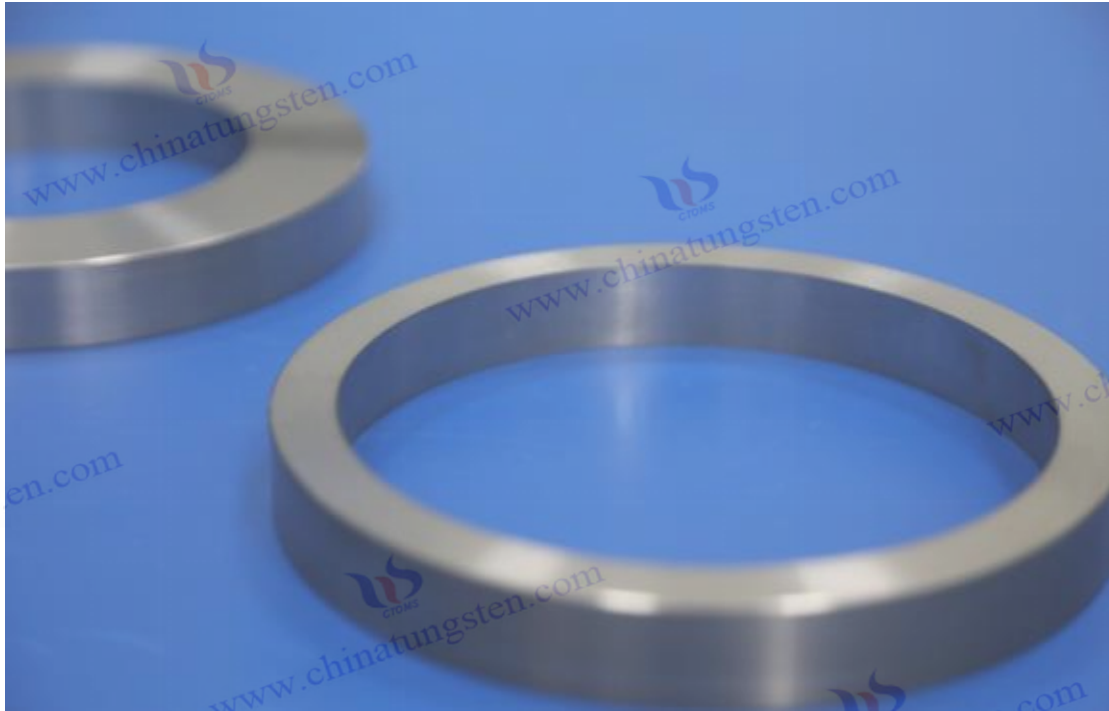
Official website: www.tungsten-alloy.com



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

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



2 장: 고비중 텅스텐 합금의 기본 지식

중텅스텐 합금의 화학적 및 물리적 특성

고밀도 텅스텐 합금은 현대 산업 및 기술 분야에서 폭넓게 응용되는 핵심 기반입니다. 이러한 특성은 텅스텐 자체의 우수한 특성뿐만 아니라 합금 공정 최적화의 이점을 제공합니다. 화학 조성 측면에서 고밀도 텅스텐 합금은 텅스텐(W)이 주성분이며, 텅스텐 함량은 일반적으로 85%에서 99% 사이입니다. 나머지는 니켈(Ni), 철(Fe), 구리(Cu), 코발트(Co) 또는 몰리브덴(Mo)과 같은 소량의 결합상 또는 첨가 원소입니다. 텅스텐은 주기율표 6 주기에 있는 전이 금속으로 원자 번호는 74 이고 원자량은 183.84 u입니다. 융점은 매우 높고(3422° C) 화학적 안정성이 우수합니다. 전자 배열([Xe] 4f¹⁴ 5d⁴ 6s²)은 높은 밀도와 경도를 결정하는 반면, 니켈과 철과 같은 첨가된 원소는 고용체 또는 금속간 화합물(예: Ni₃Fe)을 형성하여 텅스텐의 취성을 크게 개선합니다. 예를 들어, 일반적인 텅스텐-니켈-철 합금(W-Ni-Fe)에서 텅스텐 함량은 90%-97%이고 니켈과 철의 비율은 일반적으로 7:3 또는 5:5 입니다. 이 비율은 소결 과정에서 액상을 형성하여 텅스텐 입자의 균일한 결합을 촉진하고 합금의 인성을 향상시킵니다. 반면에 텅스텐-구리 합금(W-Cu)은 구리의 높은 전기 및 열 전도도로 인해 전자 장치에 자주 사용됩니다. 텅스텐 함량은 일반적으로 밀도와 열적 특성의 균형을 맞추기 위해 70%-90%입니다.

물리적 특성 측면에서 볼 때, 중텅스텐 합금의 가장 큰 장점은 밀도가 17.0~19.3 g/cm³로 순수 텅스텐의 19.25 g/cm³에 근접한다는 점입니다. 이러한 높은 밀도는 텅스텐의 체심입방(BCC) 결정 구조와 높은 원자량에서 비롯되는데, 이는 단위 부피당 원자 충전 효율을 매우 높입니다. 예를 들어, W-90Ni-7Fe-3 합금의 밀도는 최대 18.5 g/cm³에 달할

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수 있으며, 이는 강철(7.85 g/cm³), 알루미늄(2.7 g/cm³), 납(11.34 g/cm³)보다 훨씬 높고 순수 텅스텐보다는 약간 낮습니다. 이러한 특징은 항공 균형추나 철갑탄 코어와 같이 작은 크기와 높은 품질이 요구되는 응용 분야에서 텅스텐 합금을 대체할 수 없게 만듭니다. 중텅스텐 합금의 녹는점은 원소 첨가로 인해 순수 텅스텐보다 낮지만, 여전히 2500~3000° C 사이를 유지합니다. 예를 들어, W-95Ni-Fe 합금의 녹는점은 약 2800° C 로, 강철(~1500° C)과 납(327° C)보다 훨씬 높아 고온 환경에서도 우수한 성능을 발휘합니다.

기계적 특성 측면에서 무거운 텅스텐 합금은 높은 강도와 적당한 인성을 모두 갖습니다. 인장 강도는 일반적으로 조성과 공정에 따라 700-1200 MPa 입니다. 예를 들어, W-90Ni-7Fe-3 합금의 인장 강도는 1000 MPa 에 도달할 수 있는 반면, W-95Ni-Cu 합금의 인장 강도는 약 800 MPa 로 약간 낮을 수 있습니다. 경도(비커스 경도, HV)는 300-500 HV 로 순수 텅스텐(350-650 HV)보다 낮지만 납(~5 HV)보다 훨씬 높습니다. 순수 텅스텐의 취성(신장률 <1%)과 비교했을 때 고밀도 텅스텐 합금의 연성은 결합 상(예: Ni-Fe)의 소성 효과 덕분에 10%-30%의 신장률로 상당히 개선됩니다. 예를 들어, W-93Ni-Fe 합금은 인장 시험에서 20%의 연신율을 나타내어 폭발 충격과 같은 동적 하중 하에서 파괴될 가능성이 적습니다. 또한, 내마모성과 내피로성이 우수하여 마모율이 강철보다 약 30~50% 낮아 절삭 공구 및 드릴링 장비에서 긴 수명 특성을 보입니다.

열적 및 전기적 특성은 고밀도 텅스텐 합금의 또 다른 중요한 측면입니다. 열전도도는 80~150 W/(m·K)로, 순수 텅스텐(173 W/(m·K))과 구리 (400 W/(m·K))보다 낮지만 강철(~50 W/(m·K))보다는 높습니다. 예를 들어, W-80Cu 합금의 열전도도는 140 W/(m·K)에 달할 수 있으며, 이는 전자 기기의 방열판으로 사용하기에 적합합니다. 저항률은 약 5.5~7.0 μΩ·cm 로 구리(1.68 μΩ·cm)와 순수 텅스텐(5.5 μΩ·cm)보다 약간 높지만, 여전히 우수한 전도성을 가지고 있어 전극 소재로 적합합니다. 특히 방사선 차폐 능력이 뛰어납니다. 텅스텐은 원자 번호(Z=74)가 높고 밀도가 높아 X 선과 감마선을 매우 효율적으로 흡수합니다. 예를 들어, 두께가 1cm 에 불과한 W-95Ni-Fe 합금은 감마선의 약 90%를 차폐할 수 있으며, 이는 같은 두께의 납(약 70%)보다 훨씬 뛰어납니다. 또한 무독성이어서 의료 및 원자력 산업에서 선호되는 소재입니다.

내식성 측면에서 텅스텐 자체는 실온에서 산, 알칼리, 산소에 대해 매우 높은 안정성을 가지며, 염산 및 황산과 거의 반응하지 않고 강한 산화성 매질(예: 진한 질산)에 느리게 용해됩니다. 중텅스텐 합금은 이러한 특성을 유지하지만, 니켈과 철을 첨가하면 내식성이 약간 감소합니다. 예를 들어, W-Ni-Fe 합금의 질량 손실률은 염산에 100 시간 침지한 후 0.5% 미만이지만 질산에서는 2~3%에 달할 수 있습니다. 반면, W-Cu 합금은 구리의 존재로 인해 습기와 해수에 대한 내성이 우수하며, 해양 환경에서의 부식 속도는 강철의 1/10 에 불과합니다. 이러한 특성 덕분에 중텅스텐 합금은 다양한 화학 환경에서 안정성을 유지할 수 있습니다.

성능을 직관적으로 보여주기 위해 다음 표에서는 고비중 텅스텐 합금의 주요 매개변수를 강철, 납, 순수 텅스텐과 비교했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

성능 매개변수	무거운 텅스텐 합금	강철(일반 탄소강)	선두	순수 텅스텐
밀도(g/cm^3)	17.0-19.3	7.85	11 시 34 분	19 시 25 분
녹는점($^{\circ}\text{C}$)	2500-3000	~1500	327	3422
인장 강도(MPa)	700-1200	400-1000	~15	900-1500
경도(HV)	300-500	120-250	~5	350-650
신장률(%)	10-30	20~40 세	>50	<1
열전도도($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	80-150	~50	35	173
저항률($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	5.5-7.0	~15	20	5.5
내식성	좋음(비산화 환경)	중간(녹슬기 쉬움)	좋음(산성)	훌륭한
방사선 차폐 능력	훌륭한	가난한	좋은	훌륭한

참고: 표의 데이터는 일반적인 범위이며, 구체적인 값은 재료와 공정에 따라 달라질 수 있습니다.

중텅스텐 합금의 역사적 발전

고밀도 텅스텐 합금은 기초적인 발견에서 산업 응용, 그리고 기술 혁신에 이르기까지 오랜 과정을 거쳐 왔으며, 이는 인류가 고성능 소재를 끊임없이 추구해 온 과정을 반영합니다. 텅스텐의 발견은 18 세기 후반에 시작되었습니다. 1781 년 스웨덴의 화학자 카를 빌헬름 셀레는 텅스텐산염(CaWO_4)을 분해하여 텅스텐의 존재를 추측했습니다. 1783 년 스페인 형제 후안 호세와 파우스토 엘후아르는 산화텅스텐(WO_3)을 환원시켜 금속 텅스텐을 최초로 추출했습니다. 그들은 이 텅스텐 광석이 주석과 결합되어 있고, 제련 과정에서 거품이 생성되기 때문에 이 텅스텐에 "불프람"(독일어 "늑대의 거품")이라는 이름을 붙였습니다. 그러나

초창기에는 뒤떨어진 야금기술로 인해 텅스텐은 분말이나 화합물 형태로 존재했으며 대량으로 가공할 수 없어 응용 분야에 제한이 있었습니다.

19 세기에 산업혁명이 진전되면서 텅스텐의 응용 분야가 점차 확대되었습니다. 1847 년, 영국 과학자 로버트 옥슬랜드는 텅스텐산나트륨을 제조하는 방법을 개발하여 텅스텐의 산업적 생산을 위한 토대를 마련했습니다. 19 세기 말, 전기 아크로와 분말 야금 기술의 등장으로 텅스텐 가공이 가능해졌습니다. 1904 년, 미국의 제너럴 일렉트릭 회사는 백열전구에 탄소 필라멘트를 대체하기 위해 텅스텐 필라멘트를 처음 사용했는데, 높은 녹는점과 내구성 덕분에 전구의 수명이 크게 연장되었습니다. 이 획기적인 발전은 텅스텐이 실험실에서 산업으로 전환되는 계기가 되었지만, 순수 텅스텐의 취성으로 인해 더 복잡한 요구를 충족시키기가 여전히 어려웠습니다.

고밀도 텅스텐 합금은 20 세기 초 군사적 필요에 의해 등장했습니다. 제 1 차 세계 대전(1914-1918) 동안 텅스텐은 높은 경도 덕분에 절삭 공구와 장갑강(예: 독일의 "텅스텐강")을 만드는 데 사용되었지만, 순수 텅스텐을 가공하는 것이 어려웠기 때문에 과학자들은 합금 경로를 탐구하게 되었습니다. 1930 년대에 독일 야금학자들은 분말 야금 법을 통해 텅스텐에 니켈, 철을 혼합하여 텅스텐 기반 합금을 제조하려고 시도했습니다. 이 시기의 전형적인 조성은 W-90Ni-10 으로, 밀도는 약 $17\text{g}/\text{cm}^3$, 경도는 약 300HV 이며 순수 텅스텐에 비해 인성이 크게 향상되었습니다. 제 2 차 세계 대전(1939-1945)은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중텅스텐 합금 개발의 전환점이 되었습니다. 1940년대 미군은 M1 전차의 철갑탄 코어용으로 W-90Ni-7Fe-3 합금을 개발했습니다. 이 합금의 밀도(18.5 g/cm^3)와 관통력은 당시 강철 코어를 훨씬 능가하여 독일 장갑차에 대한 파괴력을 크게 향상시켰습니다. 당시 기술은 주로 프레스 및 고온 소결에 의존했습니다. 공정은 간단했지만, 현대 고밀도 텅스텐 합금의 토대를 마련했습니다.

전쟁 후 냉전 시대의 군비 경쟁과 민간 산업화는 고밀도 텅스텐 합금의 추가 개발을 촉진했습니다. 1950년대와 1960년대에 항공우주 분야에서는 고밀도를 활용하기 시작했으며, 예를 들어 미국 F-15 전투기의 자이로스코프 균형추와 NASA 초기 위성의 균형 블록은 18 g/cm^3 이상의 밀도 요구 사항을 충족했습니다. 같은 기간에 의료 분야에서 방사선 차폐 잠재력이 발견되었습니다. 1950년대 후반에 W-95Ni-Fe 합금이 X선 기계의 차폐 구성 요소에 사용되기 시작하여 점차 납을 대체했습니다. 1970년대에 액상 소결 기술이 성숙해지면서 합금의 밀도가 95%에서 99% 이상으로 높아졌습니다. 예를 들어, W-93Ni-Fe 합금의 기공률은 0.5% 미만으로 감소했고 성능 일관성이 크게 개선되어 대량 생산이 촉진되었습니다.

21세기에 접어들면서 고밀도 텅스텐 합금의 연구 개발은 성능 최적화 및 환경 보호 분야로 전환되었습니다. 2000년대 이후, 나노기술이 텅스텐 분말 제조에 도입되면서 입자 크기가 마이크론 단위에서 $50 \sim 100 \text{ nm}$ 로 미세화되었고, 이를 통해 W-95Ni-Fe 합금의 인장 강도가 1000 MPa 에서 1200 MPa 로 향상되었습니다. 선택적 레이저 소결(SLS)과 같은 3D 프린팅 기술의 발전으로 항공우주 분야의 특수 형상 균형추와 같은 복잡한 형상의 텅스텐 합금 부품 제작이 가능해졌습니다. 또한 납 독성에 대한 우려로 인해 W-90Ni-Cu 합금은 낚시용 싱커, 골프채 추 등 민간 분야에서 활용되기 시작했으며, 시장 점유율은 2000년 5%에서 2020년 30% 이상으로 증가했습니다. 오늘날 고밀도 텅스텐 합금 연구는 AI 기반 설계 및 고엔트로피 합금과의 결합에 중점을 두고 있습니다. 이러한 역사적 발전은 기술 발전의 증거일 뿐만 아니라 재료 과학과 사회적 요구 간의 긴밀한 상호 작용을 반영합니다.

2.3 고비중 텅스텐 합금과 다른 재료의 비교

고밀도 텅스텐 합금은 여러 재료 중에서도 특히 중요한 위치를 차지 하지만, 다른 재료와의 상세한 비교를 통해 그 장점과 한계를 이해해야 합니다. 다음은 강철(일반 탄소강), 납, 티타늄 합금(Ti-6Al-4V), 그리고 순수 텅스텐을 포함한 고밀도 텅스텐 합금에 대한 밀도, 기계적 특성, 열적 특성, 내식성, 가공성, 그리고 비용의 여섯 가지 측면을 체계적으로 분석한 것입니다.

고밀도 텅스텐 합금의 핵심 장점은 밀도가 $17.0 \sim 19.3 \text{ g/cm}^3$ 로 순수 텅스텐(19.25 g/cm^3)에 가깝고, 강철(7.85 g/cm^3), 티타늄 합금(4.51 g/cm^3), 납(11.34 g/cm^3)보다 훨씬 높다는 것입니다. 예를 들어, W-95Ni-Fe 합금의 밀도는 18.5 g/cm^3 인 반면, 강철은 같은 부피에서 무게의 40%에 불과합니다. 따라서 항공 균형추나 철갑탄 코어처럼 높은 무게와 작은 부피가 요구되는 상황에서는 대체할 수 없는 재료입니다. 반면 강철과 티타늄 합금은 경량 설계에 더 적합하며, 납은 독성으로 인해 사용이 제한적입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기계적 특성 , 고밀도 텅스텐 합금(700-1200 MPa)의 인장 강도는 강철(400-1000 MPa) 및 티타늄 합금(약 1100 MPa)과 동일한 수준이지만 납(~15 MPa)보다 훨씬 높고 순수 텅스텐(900-1500 MPa)보다 약간 낮습니다. 경도(300-500 HV)도 강철(120-250 HV) 및 납(~5 HV)보다 우수하지만 순수 텅스텐(350-650 HV)보다 낮습니다. 신장률(10%-30%)은 순수 텅스텐(<1%)보다 상당히 우수하고 강철(20%-40%) 및 티타늄 합금(10%-15%)과 비슷하여 순수 텅스텐의 취성을 보완합니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금은 충격 시험에서 50 J/cm²의 에너지를 견딜 수 있는 반면, 순수 텅스텐은 5 J/cm²의 에너지만 견딥니다. 이러한 강도와 인성의 균형은 동적 하중에서 더 높은 신뢰성을 제공하는 반면, 납은 강도가 매우 낮아 구조적 적용에 제한이 있습니다.

열적 특성 , 무거운 텅스텐 합금(80-150 W/(m·K))의 열전도도는 순수 텅스텐(173 W/(m·K))과 구리(400 W/(m·K))보다 낮지만 강철(~50 W/(m·K))과 납(35 W/(m·K))보다 높습니다. 용융점(2500-3000° C)은 강철(~1500° C), 납(327° C), 티타늄 합금(~1660° C)보다 훨씬 높으며, 순수 텅스텐(3422° C)에 이어 두 번째로 높습니다. 예를 들어, W-80Cu 합금의 열전도도는 140 W/(m·K)로 방열판 응용 분야에 적합한 반면, 강철은 고온에서 쉽게 연화되고 납은 완전히 녹습니다.

고밀도 텅스텐 합금은 비산화 환경에서 우수한 내식성을 보입니다. 예를 들어 , 10% 염산에 1,000 시간 동안 침지한 후 질량 손실률은 1% 미만으로, 강철(녹슬기 쉬움, 손실률 약 20%)과 납(내산성은 우수하지만 알칼리성은 부족, 손실률 약 5%)보다 우수합니다. 티타늄 합금(내식성이 우수, 손실률 <0.1%)과 순수 텅스텐(부식 거의 없음)은 약간 더 우수하지만, W-Cu 합금은 해수에서 우수한 성능을 보이며, 부식률이 강철의 1/15에 불과하여 해양 엔지니어링에 적합합니다.

가공성은 중텅스텐 합금의 핵심 개선 사항입니다. 순수 텅스텐은 경도와 취성이 높아 고온 단조 또는 특수 가공 공구가 필요하며, 이는 고가입니다. 중텅스텐 합금은 Ni-Fe와 같은 상 결함을 최적화하여 선삭 및 밀링 가공이 가능합니다. 가공 난이도는 강철(절삭 용이)과 비슷하지만, 티타늄 합금(중간)이나 납(가공 용이)보다는 여전히 높습니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금의 절삭 속도는 최대 50m/min에 달하는 반면, 순수 텅스텐의 절삭 속도는 10m/min에 불과합니다.

약 3만 달러에서 5만 달러로, 강철(톤당 약 500달러)이나 납(톤당 약 2,000달러)보다 훨씬 높습니다. 티타늄 합금(톤당 약 3만 달러)과도 유사하지만, 순수 텅스텐(톤당 약 6만 달러)보다는 낮습니다. 이는 텅스텐이 희귀 금속(전 세계 매장량 약 350만 톤, 주로 중국에 집중)이고 공정이 복잡하기 때문입니다(분말 야금, 소결). 이러한 특성으로 인해 고부가가치 분야(항공 및 의료 등)에서는 경제적이지만, 저급 응용 분야에서는 강철로 대체될 가능성이 있습니다.

일반적으로 고밀도 텅스텐 합금은 밀도, 강도, 인성, 내식성 및 가공성 측면에서 독보적인 성능을 자랑합니다. 순수 텅스텐의 취성과 납의 독성을 보완하고, 고밀도 환경에서 강철 및 티타늄 합금의 한계를 뛰어넘으며, 후속 공정 설계 및 적용 분야 선정을 위한 견고한 기반을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중텅스텐 합금의 분류

고밀도 텅스텐 합금(HDTA)은 텅스텐(W)을 주성분으로 하는 합금으로, 함량은 일반적으로 85%~97%입니다. 높은 밀도, 우수한 기계적 성질, 우수한 내식성으로 인해 군사, 항공 우주, 의료, 전자 및 산업 분야에서 널리 사용됩니다. 다양한 분류 방법에 따라 고밀도 텅스텐 합금은 다음과 같은 범주로 나눌 수 있습니다.

2.4.1 성분에 따른 분류

고밀도 텅스텐 합금은 텅스텐에 니켈(Ni), 철(Fe), 구리(Cu), 코발트(Co) 및 기타 원소를 다양한 필요에 따라 첨가하여 성능을 최적화합니다. 합금의 부원소 차이에 따라 크게 다음과 같은 범주로 나눌 수 있습니다.

(1) W-Ni-Fe 합금

구성 특성 : 일반적으로 텅스텐이 90%~97% 함유되어 있으며, 니켈과 철의 비율은 약 7:3 또는 8:2입니다.

성능상의 장점 : 연성이 좋고, 강도와 경도가 높으며, 자기 투자율이 높습니다.

주요 응용 분야 : 군사 산업(갑옷 판통 코어), 항공 우주(대응추), 산업용 대응추(자이로스코프 대응추)에 널리 사용됩니다.

(2) W-Ni-Cu 합금

구성 특성 : 텅스텐 함량은 일반적으로 90%~95%이고, 니켈과 구리의 비율은 일반적으로 7:3에 가깝습니다.

성능상의 장점 : W-Ni-Fe 합금과 비교했을 때, W-Ni-Cu 합금은 투자율이 낮고, 자성이 거의 없으며, 내식성이 우수합니다.

주요 응용 분야 : 의료용 방사선 차폐(X선 차단), 전자 포장 및 자기에 민감한 분야에 사용됩니다.

(3) W-Ni-Fe-Co 합금

조성 특성 : W-Ni-Fe 계에 코발트(Co)를 첨가하여 강도와 내마모성을 향상시켰습니다.

성능상 장점 : W-Ni-Fe 합금보다 강도와 경도가 더 높고, 특정한 고온 안정성을 가지고 있습니다.

주요 용도 : 항공우주 엔진 구성 요소, 내마모성 절삭 공구 등 고온 구조재에 사용됨.

(4) 기타 특수합금

W-Cu 합금 : 주로 전극 소재 등 높은 열전도도 및 높은 전기전도도 응용 분야에 사용됩니다.

W-Re(텅스텐-레늄) 합금 : 고온 성능이 더 뛰어나 항공우주 분야에서 자주 사용됩니다.

2.4.2 밀도 및 기계적 성질에 따른 분류 (Class 1 ~ Class 4)

ASTM B777 및 MIL-T-21014 표준에 따르면, 중텅스텐 합금은 밀도와 기계적 성질에 따라 네 가지 등급(1 등급부터 4 등급까지)으로 구분할 수 있습니다. 다양한 등급의 합금이 다양한 적용 분야에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

등급	텅스텐 함량(%)	밀도 (g/cm ³)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	신장률 (%)	자기 투자율	일반적인 프로그램	응용
1 학년	90	17.0	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1.05	항공기용 카운터웨이트, 산업용 카운터웨이트	
2 학년	92.5	17.5	≥ 758	≥ 517	≥ 5	> 1.05	군용 장갑, 장갑 관통 코어	
3 학년	95	18.0	≥ 724	≥ 517	≥ 3	> 1.05	X 선 차단, 핵방사선 차폐	
4 학년	97	18.5	≥ 689	≥ 517	≥ 2	> 1.05	의료용 방사선 방호, 전자 포장	

1 등급 및 2 등급 : 강도가 더 높고 인성이 더 우수하여 항공우주, 군사, 산업용 균형추와 같은 용도에 적합합니다.

3 등급 및 4 등급 : 밀도가 더 높고 일반적으로 방사선 방호, 핵 산업 및 고정밀 상대추 분야에 사용됩니다.

2.4.3 사용에 따른 분류

고비중 텅스텐 합금은 다양한 분야에서 응용되는 정도에 따라 다음과 같은 범주로 나눌 수 있습니다.

(1) 군수산업

장갑관통핵 (APFSDS, 고갈우라늄탄 대체재 등), 보호 장갑 등에 사용된다 . 폭발성 금속 파편 등

요구사항: 높은 밀도, 높은 경도, 높은 충격 저항성.

주요 재료: W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co.

(2) 항공우주

항공기 및 우주선의 균형추 에 사용된 관성 자이로스코프 카운터웨이트 , 엔진 고온 부품 등

요구 사항: 높은 밀도, 고온 저항성, 산화 저항성.

주요 재료: W-Ni-Fe, W-Ni-Fe-Co, W-Re.

(3) 의료 분야

주로 X 선 차폐재 로 사용되며 , 방사선 치료 보호 (감마선 차폐 블록 등), 방사성 약물 운반 용기 등

요구사항: 고밀도, 비자성, 무독성, 내식성.

주요 재료: W-Ni-Cu, W-Ni-Cu-Co.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) 산업 및 토목 분야

주로 정밀 추(진자, 자이로스코프, 레이싱 추)에 사용됨 석유 시추 도구, 전극 재료 등

요구사항: 높은 밀도, 내마모성, 우수한 가공성.

주요 재료: W-Ni-Fe, W-Ni-Cu, W-Cu.

(5) 전자 및 반도체 분야

주로 전자 포장재에 사용되며, 고전력 반도체 방열판 및 마이크로 전자 상호 연결 재료.

요구사항: 높은 열전도도, 낮은 열팽창, 비자성체.

주요재료: W-Cu, W-Ag (텅스텐-은 합금).



제 3 장: 고중량 텅스텐 합금의 성능 분석

3.1 중텅스텐 합금의 기계적 성질

고밀도 텅스텐 합금의 기계적 특성은 강도, 경도, 인성, 내마모성, 피로 저항성 등을 포함하여 엔지니어링 응용 분야에서 널리 사용되는 주요 요소입니다. 이러한 특성의 탁월한 성능은 텅스텐의 높은 경도와 첨가된 원소의 상승 효과로 인한 것이며, 이로 인해 정적 및 동적 하중 모두에서 우수한 성능을 발휘합니다.

인장강도와 항복강도는 기계적 성질의 핵심 지표입니다. 중텅스텐 합금의 인장강도는 일반적으로 700~1200MPa, 항복강도는 약 500~1000MPa이며, 구체적인 값은 조성 및 공정에 따라 달라집니다. 예를 들어, W-90Ni-7Fe-3 합금(텅스텐 함량 90%, 니켈-철 비율 7:3)의 인장강도는 최대 1050MPa, 항복강도는 약 850MPa 인 반면, W-95Ni-Cu(텅스텐 함량

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

95%, 니켈-구리 비율)의 인장강도는 약 800MPa입니다. 이 강도 수준은 고강도강(예: AISI 4340, 약 1000MPa)과 유사하지만, 납(~15MPa)과 순수 텅스텐의 취성 파괴 전환계(900~1500MPa)를 훨씬 능가합니다. 고강도의 원천은 텅스텐 입자의 높은 경도와 결합상(예: Ni-Fe)의 강화 효과에 있습니다. 결합상은 인장 시 에너지를 흡수하고 균열 전파를 지연시킵니다.

경도는 중텅스텐 합금의 또 다른 중요한 특성으로, 비커스 경도(HV)는 300~500 HV입니다. 예를 들어, W-93Ni-Fe 합금의 경도는 약 450 HV로, 일부 공구강(예: H13, 약 400~500 HV)과 비슷하지만 순수 텅스텐(350~650 HV)보다는 낮습니다. 경도 분포는 텅스텐 함량과 양의 상관관계를 보입니다. 텅스텐 함량이 높을수록 경도가 높아집니다. 그러나 결합제 상(binder phase)을 첨가하면 경도가 약간 감소하고 내충격성이 향상됩니다. 예를 들어, 브리넬 경도 시험(Brinell hardness test, HB)에서 W-95Ni-Fe 합금은 400 HB에 도달할 수 있는 반면, 순수 텅스텐은 취성이 있어 고하중 시험을 견딜 수 없습니다.

인성이 뛰어나며, 높은 연신율과 파괴인성으로 나타납니다. 연신율은 10%에서 30%로 순수 텅스텐(<1%)보다 훨씬 높습니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금의 연신율은 실온에서 25%에 달하며, -50°C의 저온에서도 15% 이상을 유지하여 우수한 저온 인성을 나타냅니다. 파괴인성(K_{IC})은 일반적으로 $20 \sim 40 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 입니다. 예를 들어, W-93Ni-Fe 합금의 K_{IC} 는 약 $30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 저합금강(약 $40 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)에 가까운 반면, 순수 텅스텐은 $5 \sim 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 에 불과합니다. 이러한 인성은 응력 집중 시 에너지를 흡수하여 취성 파괴를 방지하는 결합 상의 소성 변형 능력에 힘입어 향상됩니다.

내마모성은 고밀도 텅스텐 합금의 경도와 밀접한 관련이 있습니다. 마모 시험(예: ASTM G65 연삭 휠 마모 시험)에서 W-95Ni-Fe 합금의 체적 손실률은 약 $0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 로, 강철($0.15 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$)보다 약 70% 낮고 초경합금(예: WC-Co, $0.02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$)에 가깝습니다. 이러한 내마모성 덕분에 드릴링 공구 및 절삭 공구에 이상적인 소재입니다. 예를 들어, 석유 시추에서 텅스텐 합금 드릴 비트의 수명은 강철 드릴 비트의 2~3 배에 달할 수 있습니다.

피로 저항성은 동적 응용 분야에서 특히 중요합니다. 고밀도 텅스텐 합금의 피로 한계(10^7 사이클)는 약 400~600 MPa입니다. 예를 들어, 교번 응력 하에서 W-90Ni-Fe 합금의 피로 강도는 500 MPa로, 납(피로 저항성이 거의 없음)이나 순수 텅스텐(취성으로 인해 시험 불가)보다 높으며, 강철(약 400 MPa)과 유사합니다. 이러한 특성 덕분에 진동 억제 부품 및 총기 카운터웨이트에 적합하며, 장기간 반복 하중을 파손 없이 견딜 수 있습니다.

고밀도 텅스텐 합금의 물리적 특성

고밀도 텅스텐 합금의 물리적 특성에는 밀도, 열적 특성, 전기적 특성, 음향적 특성이 포함되며, 이는 특정 환경에서의 적용 가능성에 직접적인 영향을 미칩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

밀도는 $17.0 \sim 19.3 \text{ g/cm}^3$ 의 범위를 갖는 중텅스텐 합금의 가장 중요한 물리적 특성입니다. 예를 들어, W-97Ni-Fe 합금의 밀도는 최대 19.0 g/cm^3 에 달할 수 있으며, 이는 순수 텅스텐(19.25 g/cm^3)보다 약간 낮은 반면, W-85Cu의 밀도는 약 17.0 g/cm^3 입니다. 이러한 높은 밀도는 텅스텐의 체심입방(BCC) 결정 구조와 높은 원자량(183.84 u)에서 비롯되며, 이는 단위 부피당 더 많은 질량을 저장할 수 있게 합니다. 예를 들어, 1cm^3 의 W-95Ni-Fe 합금의 무게는 약 18.5g인 반면, 같은 부피의 강철은 7.85g에 불과합니다. 이러한 특성은 항공 균형추 및 방사선 차폐에 있어 대체할 수 없는 이점을 제공합니다.

열적 특성에는 녹는점, 열전도도, 열팽창 계수가 포함됩니다. 중텅스텐 합금의 녹는점은 $2500 \sim 3000^\circ \text{C}$ 로, 순수 텅스텐(3422°C)보다 낮지만 강철($\sim 1500^\circ \text{C}$)보다는 훨씬 높습니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금의 녹는점은 약 2850°C 로 로켓 노즐의 고온 환경을 견딜 수 있습니다. 열전도도는 $80 \sim 150 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 입니다. 예를 들어, W-80Cu 합금은 최대 $140 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 까지 도달할 수 있는데, 이는 순수 텅스텐($173 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)보다 낮지만 강철($50 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)보다 높아 방열판 응용 분야에 적합합니다. 열팽창계수는 약 $4.5 \sim 6.0 \times 10^{-6}/\text{K}$ 로 순수텅스텐($4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$)에 가깝고 강철($12 \times 10^{-6}/\text{K}$)보다 훨씬 낮으며 온도 변화에 따른 치수 안정성이 더 좋습니다.

전기적 특성 측면에서, 중텅스텐 합금의 저항률은 $5.5 \sim 7.0 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이며, W-90Ni-Fe 합금의 경우 $6.0 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 순수 텅스텐($5.5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)과 구리($1.68 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)보다 약간 높지만 강철($15 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)보다는 낮습니다. 전도성은 구리만큼 좋지는 않지만, 전극 재료 중에서는 경쟁력이 있습니다. 또한, 높은 용점과 고밀도 특성으로 인해 전기 스파크 가공(EDM) 전극에 적합합니다. 예를 들어, W-70Cu 전극의 수명은 구리 전극보다 약 50% 더 길습니다.

음향 특성은 그다지 중요하지 않지만, 진동 억제와 같은 일부 응용 분야에서는 매우 중요합니다. 무거운 텅스텐 합금의 음속은 약 $4,300 \sim 4,500\text{m/s}$ 이며, W-95Ni-Fe 합금의 경우 $4,400\text{m/s}$ 로, 강철(약 $5,000\text{m/s}$)보다는 낮지만 납($1,200\text{m/s}$)보다는 높습니다. 텅스텐 합금은 밀도가 높고 탄성 계수가 높아 음파 전달 시 감쇠 속도가 빨라 진동 감쇠재로 사용하기에 적합합니다. 예를 들어, 공작기계의 균형추에서 텅스텐 합금은 진동 진폭을 $30 \sim 40\%$ 까지 줄일 수 있습니다.

3.3 고비중 텅스텐 합금의 주요 성분 및 기능

고밀도 텅스텐 합금(HDTA)은 텅스텐(W)을 주성분으로 하는 합금 소재로, 일반적으로 $85 \sim 97\%$ 의 텅스텐 함량을 가지며, 기계적 성질, 내식성, 전도성 및 기타 특성을 향상시키기 위해 니켈(Ni), 철(Fe), 구리(Cu), 코발트(Co) 및 기타 원소를 첨가합니다. 이 합금은 고밀도, 고강도, 그리고 우수한 종합적 특성으로 인해 군사, 항공우주, 의료, 전자 및 산업 분야에서 널리 사용됩니다.

1. 텅스텐(W) : 높은 밀도와 강도를 제공합니다.

(1) 기본 특성

- 원소 기호 : W

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 원자 번호 : 74
- 밀도 : 19.3 g/cm³
- 녹는 점 : 3410° C
- 주요 기능 : 높은 비중의 텅스텐 합금에 매우 높은 밀도, 경도 및 강도를 부여합니다.

(2) 고비중 텅스텐 합금에서의 역할

- **벌크 원소**로서 높은 밀도(16.5~18.5 g/cm³)를 제공하여 합금이 고질량 균형추, 방사선 차폐, 장갑 관통 발사체 코어와 같은 응용 분야에서 작동할 수 있게 합니다 .
- 높은 용점과 내마모성으로 인해 고온 환경에서 합금의 안정성이 향상되었습니다.
- 우수한 내식성으로 인해 이 합금은 극한 환경에서도 사용할 수 있습니다.
- 그러나 텅스텐 자체는 부서지기 쉽기 때문에 합금의 가공성과 연성을 개선하기 위해 다른 금속 원소를 첨가해야 합니다.

2. 니켈(Ni) : 연성 및 내식성을 향상시킵니다.

(1) 기본 특성

- 원소 기호 : Ni
- 원자 번호 : 28
- 밀도 : 8.9 g/cm³
- 녹는 점 : 1455° C
- 주요 기능 : 합금에 좋은 연성을 부여하고 내식성을 강화합니다.

(2) 고비중 텅스텐 합금에서의 역할

- **결합상 원소**로서 텅스텐 입자의 균일한 분포를 촉진하고 합금의 가소성과 가공성을 개선할 수 있습니다 .
- 합금의 연성을 향상시켜 취성 파괴 없이 더 큰 변형을 견딜 수 있도록 합니다.
- 이로 인해 합금은 강한 내식성을 가지게 되어 습기가 많거나 산성인 환경에서도 장기간 사용할 수 있습니다.
- 액상 소결 공정 동안 소결 온도를 낮추고 합금의 밀도를 높이는 데 도움이 됩니다.
- 일반적으로 철(Fe)이나 구리(Cu)와 함께 사용하여 합금의 자기적, 기계적 특성을 조절합니다.

3. 철(Fe) : 합금의 기계적 강도를 향상시킵니다.

(1) 기본 특성

- 원소 기호 : Fe
- 원자 번호 : 26
- 밀도 : 7.87 g/cm³
- 녹는 점 : 1538° C
- 주요 기능 : 합금의 강도와 경도를 향상시키고 일정 수준의 자성을 부여합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) 고비중 텅스텐 합금에서의 역할

- 강화 단계로서 철과 니켈은 함께 W-Ni-Fe 3 원 합금을 형성 하여 합금의 기계적 강도와 경도를 향상시킵니다.
- 합금의 내마모성을 높여 높은 하중과 충격력을 견딜 수 있게 합니다.
- 이로 인해 합금은 일정 수준의 자성을 띠게 되어 특정 군사 및 산업 분야에 적합합니다.
- 액상 소결 공정 동안 결합상의 유동성을 개선하고 합금의 밀도를 증가시키는 데 도움이 됩니다.
- 장갑 관통 코어, 항공우주용 균형추, 산업용 금형 등 의 응용 분야에 사용됩니다.

4. 구리(Cu) : 자기력을 감소시키고 전도도를 향상시킵니다.

(1) 기본 특성

- 원소 기호 : Cu
- 원자 번호 : 29
- 밀도 : 8.96 g/cm³
- 녹는 점 : 1084.6° C
- 주요 기능 : 합금을 비자성으로 만들고 전도성과 내식성을 향상시킵니다.

(2) 고비중 텅스텐 합금에서의 역할

- 비자성 텅스텐 합금(W-Ni-Cu) 을 만들 수 있으며 , 자기에 민감한 응용 분야(예: 의료 기기, 전자 부품)에 적합합니다.
- 합금의 전도성을 향상시켜 전극 소재, 전자 패키징 및 기타 분야에 적합합니다.
- 내식성을 더욱 향상시켜 습한 환경이나 산성 매체에서 합금의 수명을 연장합니다.
- 합금의 경도를 낮추어 기계 가공을 더 쉽게 만듭니다.
- W-Ni-Cu 합금은 일반적으로 X선 및 감마선 차폐, 의료 장비, 전자 포장 등에 사용됩니다 .

5. 코발트(Co) : 내마모성 및 고온 저항성을 향상시킵니다.

(1) 기본 특성

- 원소 기호 : Co
- 원자 번호 : 27
- 밀도 : 8.90 g/cm³
- 녹는 점 : 1495° C
- 주요 기능 : 내마모성, 고온 내구성을 향상시키고 합금의 강도를 향상시킵니다.

(2) 고밀도 텅스텐 합금에서의 역할

- 강화 원소로서 코발트는 합금의 내마모성을 향상시킬 수 있으며 고부하, 내마모성 부품에 적합합니다.
- 향상된 고온 내구성을 제공 하여 합금이 극한 온도에서도 강도와 안정성을 유지할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 합금의 경도를 향상시켜 장갑 관통 코어, 항공 우주 엔진 구성 요소 등 충격과 하중이 큰 환경에 적합하게 만듭니다.
- W-Ni-Fe-Co 합금은 일반적인 W-Ni-Fe 합금보다 강도와 경도가 높지만 제조 비용이 더 높습니다.

중텅스텐 합금의 특성은 주요 원소의 영향을 받습니다. 각 원소의 기능은 다음과 같습니다.

요소	효과	합금에 미치는 영향
텅스텐(W)	고밀도, 고강도	합금에 고밀도, 고강도 및 내식성을 부여합니다.
니켈(Ni)	연성, 내식성	가소성 증가, 내식성 향상, 가공성 향상
철(Fe)	기계적 강도, 경도	합금의 경도와 강도를 향상시키고 자성을 갖게 함
구리(Cu)	비자성, 전도성	자기 감소, 전도성 및 내식성 향상
코발트(Co)	내마모성, 고온 저항성	내마모성 및 고온 안정성 향상

3.4 고비중 텅스텐 합금의 내식성 및 내마모성

내식성은 특히 화학 및 해양 환경에서 중텅스텐 합금의 중요한 특성입니다. 텅스텐 자체는 실온에서 산, 알칼리 및 산소에 매우 안정하며, 염산 및 황산과는 거의 반응하지 않고 진한 질산이나 불산에는 느리게 용해됩니다. 중텅스텐 합금은 이러한 특성을 그대로 유지하지만, 원소 첨가로 인해 약간 변화합니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금의 질량 손실률은 10% 염산에 1000 시간 동안 침지한 후 0.5% 미만이며, 해수에서는 0.1%-0.2%로 강철(약 20%)보다 훨씬 낮습니다. W-Cu 합금은 구리의 존재로 인해 습기 및 염분 분무에 더 강합니다. ASTM B117 염분 분무 시험에서 1000 시간 후 부식 깊이는 0.01mm에 불과한 반면, 강철은 0.5mm에 달할 수 있습니다. 그러나 강한 산화 환경(예: 진한 질산)에서는 Ni-Fe 결합상이 부식될 수 있으며, 부식 속도가 2~3%로 증가하므로 표면 코팅(예: Ni 도금)을 통해 개선해야 합니다.

내마모성은 경도 및 미세 구조와 밀접한 관련이 있습니다. 고밀도 텅스텐 합금의 내마모성은 슬라이딩 마모와 연마 마모 모두에서 우수합니다. 예를 들어, ASTM G65 시험에서 W-95Ni-Fe 합금의 마모율은 약 $0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 로 강철($0.15 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$)보다 70% 낮고 WC-Co 초경합금($0.02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$)에 가깝습니다. 내마모성의 원인은 텅스텐 입자의 높은 경도(약 1000 HV)와 결합 단계의 인성 지원에 있습니다. 예를 들어, 석유 시추에서 W-90Ni-Fe 드릴 비트의 수명은 강철 드릴 비트의 3 배에 달할 수 있으며 마모 깊이는 0.1mm에 불과한 반면 강철 드릴 비트는 0.5mm에 도달할 수 있습니다.

3.5 중텅스텐 합금의 방사선 차폐 능력

무거운 텅스텐 합금의 방사선 차폐 능력은 의료 및 핵 산업에서 널리 사용되는 기반입니다. 이는 텅스텐의 높은 원자 번호($Z=74$)와 높은 밀도($17.0\text{--}19.3 \text{ g/cm}^3$)에서 비롯됩니다. X선과 감마선의 흡수 효율은 기존 재료보다 훨씬 높습니다. 예를 들어, 1cm 두께의 W-95Ni-Fe 합금은 감마선(1MeV 에너지)의 90%를 차폐할 수 있는 반면, 같은

두께의 납은 70%, 강철은 10%에 불과합니다. 차폐 능력은 질량 흡수 계수(μ/ρ)를 기반으로 계산됩니다. W-95Ni-Fe 합금의 μ/ρ 는 약 $0.15 \text{ cm}^2/\text{g}$ 로 납($0.12 \text{ cm}^2/\text{g}$)보다 높습니다. 실제 적용 시, 10mm 두께의 텅스텐 합금 차폐재는 방사선량을 100mSv 에서 1mSv 로 줄일 수 있으며, 이는 15mm 두께의 납보다 우수합니다. 또한, 무독성으로 납의 친환경적 대안이 될 수 있습니다. 예를 들어, CT 장비 차폐 시 텅스텐 합금의 두께는 30%, 무게는 20%까지 줄일 수 있습니다.

고밀도 텅스텐 합금의 성능 최적화 방법

고밀도 텅스텐 합금의 성능 최적화는 그 응용 가능성을 개선하는 데 핵심적인 요소로, 여기에는 구성 조정, 공정 개선 및 후처리 기술이 포함됩니다.

조성 최적화를 달성합니다. 예를 들어, 텅스텐 함량을 97%로 높이면 밀도는 19.0 g/cm^3 로 증가하지만 인성은 감소합니다. 코발트(Co)를 첨가하면 15%의 연신율을 유지하면서 경도를 450 HV 에서 500 HV 로 높일 수 있습니다. **공정 개선**에는 나노 분말 제조 및 액상 소결이 포함됩니다. 나노 텅스텐 분말(입자 크기 50 nm)을 사용하면 입자 크기를 $10 \mu\text{m}$ 에서 $1 \mu\text{m}$ 로 줄이고 인장 강도를 1000 MPa 에서 1200 MPa 로 높일 수 있습니다. 액상 소결 온도는 1450°C 에서 1500°C 로 최적화하여 밀도를 98%에서 99.5%로 높일 수 있습니다. 열간 등방성 가압 성형(HIP) 및 표면 경화와 같은 **후처리 기술을 통해 성능이 더욱 향상됩니다**. 예를 들어, HIP 처리(200 MPa, 1400°C)는 미세 기공을 제거하고 피로 수명을 50% 연장할 수 있으며, 탄화 처리하면 표면 경도를 600 HV 로 높이고 내마모성을 30% 향상시킬 수 있습니다.

고밀도 텅스텐 합금 특성 목록

성과 범주	주요 지표	일반적인 값	최적화 방법
기계적 성질	인장 강도	700-1200MPa	코발트 첨가, 나노파우더 제조
	경도	300-500HV	텅스텐 함량 증가, 침탄처리
	연장	10-30%	Ni-Fe 비율 최적화
	내마모성	0.05 mm ³ /N·m	열간 등방성 프레스, 표면 경화
	피로한도	400~600MPa	HIP 처리, 입자 미세화
물리적 특성	밀도	17.0-19.3g/cm ³	텅스텐 함량을 97%로 증가
	녹는점	2500~3000° C	-
	열전도도	80-150 W/(m·K)	구리 첨가(예: W-80Cu)
내식성	염산 부식 속도	<0.5% (1000 시간)	니켈 도금
내마모성	마모율	0.05 mm ³ /N·m	경도를 향상시키고 미세구조를 최적화합니다.
방사선 차폐 능력	감마선 차폐(두께 1cm)	90% (1MeV)	밀도가 19g/cm ³ 로 증가했습니다.

참고: 표의 데이터는 일반적인 범위이며, 구체적인 값은 재료와 공정에 따라 달라질 수 있습니다.

이러한 방법의 적용은 구체적인 필요에 따라 신중하게 검토되어야 합니다. 예를 들어, 의료용 차폐는 고밀도 차폐를 우선시하는 반면, 도구는 내마모성을 중시하는데, 이는 후속 준비 및 적용에 대한 이론적 지침을 제공합니다.

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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



제 4 장 고비중 텅스텐 합금의 제조 기술

4.1 고밀도 텅스텐 합금 원료의 선정 및 전처리

고밀도 텅스텐 합금 제조는 원료의 선정 및 전처리부터 시작되며, 이는 최종 제품의 성능과 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다. 원료는 주로 텅스텐 분말과 바인더상 원소(예: 니켈, 철, 구리 등)로 구성되며, 순도, 입자 크기 및 화학적 특성은 엄격하게 관리되어야 합니다.

텅스텐 분말의 선정은 제조의 핵심입니다. 텅스텐 분말은 일반적으로 산화텅스텐(WO_3)의 수소 환원으로 만들어지며, 불순물(산소 및 탄소 등)이 소결 품질에 영향을 미치지 않도록 순도는 $\geq 99.9\%$ 여야 합니다. 입자 크기 범위는 일반적으로 $1 \sim 10 \mu m$ 입니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD에서 선정한 텅스텐 분말의 평균 입자 크기는 $3 \mu m$ 로, 높은 밀도와 균일성을 보장합니다. 입자 크기가 너무 크면(예: $20 \mu m$) 소결 후 기공이 증가하고 밀도가 $17g/cm^3$ 미만으로 떨어집니다. 입자 크기가 너무 작으면(예: $< 0.5 \mu m$) 응집으로 인해 유동성이 감소하여 프레스 및 성형에 영향을 줄 수 있습니다. 산소 함량은 0.05% 이하로 조절해야 합니다. 산소 함량이 너무 높으면 소결 중에 휘발성 산화물(예: WO_2)이 생성되어 기공이 형성되기 때문입니다.

접합재 상 원료는 적용 요건에 따라 조정됩니다. 니켈 분말과 철 분말은 종종 인성을 높이는 데 사용되며, 순도 $\geq 99.5\%$ 와 입자 크기가 $2 \sim 5 \mu m$ 가 필요합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-Ni-Fe 합금에서 니켈-철 비율이 7:3인 혼합 분말, 니켈 분말 입자 크기가 $3 \mu m$, 철 분말이 $4 \mu m$ 인 혼합 분말을 사용하여 액상 소결 중 균일한 분포를 보장합니다. 구리 분말은 높은 열전도도가 필요한 시나리오에서 사용되며, 순도 $\geq 99.8\%$ 와 입자 크기가 약 $5 \mu m$ 로 산화구리(CuO) 오염을 방지합니다. 코발트 또는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

몰리브덴을 첨가 원소로 사용하는 경우 경도 또는 내식성을 향상시키기 위해 함량은 일반적으로 5%를 초과하지 않습니다.

전처리 공정에는 선별, 혼합 및 환원이 포함됩니다. 선별은 너무 크거나 작은 입자를 제거합니다. 예를 들어 200 메시 체(약 $74\mu\text{m}$)를 통해 응집물을 제거합니다. 혼합은 V 형 믹서 또는 볼 밀을 사용하여 수행됩니다. 예를 들어, China Tungsten Intelligence는 행성형 볼 밀을 사용하여 300rpm에서 6시간 동안 혼합하여 텅스텐 분말과 바인더 상이 고르게 분포되고 혼합 균일성 편차가 1% 미만이 되도록 합니다. 원료의 산소 함량이 너무 높으면 수소 분위기에서 환원해야 합니다. 예를 들어 800°C 에서 2시간 동안 환원하여 산소 함량을 0.1%에서 0.03%로 낮춥니다. 또한 분말의 산화를 방지하기 위해 전처리된 원료는 불활성 가스(예: 아르곤)에 보관해야 합니다.

4.2 중텅스텐 합금의 분말야금 공정

분말야금은 고밀도 텅스텐 합금의 주요 제조 방법입니다. 이 공정은 프레스와 소결의 두 가지 핵심 단계로 나뉩니다. 미세조직과 성능을 효과적으로 제어할 수 있어 널리 사용됩니다.

프레스는 혼합된 분말을 그린 바디로 압축하는 공정으로, 일반적으로 냉간 등방성 프레스(CIP) 또는 성형을 통해 이루어집니다. 냉간 등방성 프레스는 고압 액체(예: 물 또는 오일)를 사용하여 균일한 압력을 가합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-90Ni-Fe 분말을 200-300 MPa로 압축하며 그린 바디 밀도는 이론 밀도의 60%-70%(약 $11-13\text{ g/cm}^3$)에 도달할 수 있습니다. 성형은 500-700 MPa의 압력으로 소량 생산에 적합합니다. 예를 들어, 직경 50mm의 원통형 그린 바디를 형성하는 데 약 30초가 걸립니다. 그린 바디의 강도를 향상시키기 위해 소량의 유기 바인더(예: 1% 폴리비닐알코올)를 추가할 수 있지만, 이후 탈지 과정에서 제거해야 합니다.

소결은 분말 야금의 핵심 단계입니다. 액상 소결 기술은 일반적으로 블랭크를 바인더 상의 녹는점 이상으로 가열하여 액화시키고 텅스텐 입자 사이의 틈을 메우는 데 사용됩니다. 소결 온도는 일반적으로 1400°C ~ 1550°C 입니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-93Ni-Fe 합금을 1480°C 에서 2시간 동안 소결했습니다. 니켈-철 액상은 1350°C 에서 용융되어 텅스텐 입자의 재배열을 촉진했습니다. 최종 밀도는 18.5 g/cm^3 에 도달했으며, 밀도는 99% 이상이었습니다. 소결 분위기는 산화 방지를 위해 수소 또는 진공이어야 합니다. 예를 들어, 10^{-3} 의 진공에서 소결하는 경우, Pa, 산소 함량을 0.01%까지 낮출 수 있습니다. 소결 시간과 온도는 정밀하게 제어해야 합니다. 너무 높으면(예: 1600°C) 액상 손실이 발생할 수 있고, 너무 낮으면(예: 1300°C) 밀도가 95%로 충분하지 않습니다.

소결 후 처리는 성능을 더욱 최적화할 수 있습니다. 예를 들어, 200MPa의 압력으로 1400°C 에서 1시간 동안 처리하면 미세 기공이 제거되고 밀도가 99%에서 99.8%로 증가하여 밀도가 19 g/cm^3 에 가까워집니다. 이 공정은 CTIA GROUP LTD의 고급 카운터웨이트 생산에 특히 많이 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3 고비중 텅스텐 합금의 기타 제조 방법

분말 야금 외에도, 특정 요구 사항을 충족하거나 기존 공정의 한계를 극복하기 위해 다른 방법을 통해 고밀도 텅스텐 합금을 제조할 수도 있습니다.

용융 및 주조법은 텅스텐 함량이 낮은 합금(예: W-50Cu)에 적합합니다. 구리는 아크로나 유도로에서 용융된 후, 텅스텐 분말을 첨가하여 체련합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-70Cu 합금을 1800° C에서 용융 및 주조하는데, 냉각 후 밀도는 14.5 g/cm³에 도달합니다. 그러나 텅스텐의 용융점은 구리보다 훨씬 높기 때문에(3422° C 대 1083° C) 이 방법은 텅스텐 함량이 높은 합금을 제조하기 어렵고, 편석이 발생하기 쉬우며, 분말 야금만큼 균일성이 좋지 않습니다.

기계적 합금화는 텅스텐 분말을 고에너지 볼 밀링을 통해 결합제상 분말과 기계적으로 혼합하여 비평형 합금을 형성합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 유성 볼 밀을 사용하여 W-Ni-Fe 분말을 500 rpm으로 10 시간 동안 분쇄하여 입자 크기를 50 nm로 미세화한 후, 압착 및 소결을 통해 인장 강도를 1200 MPa까지 향상시킵니다. 이 방법은 새로운 고성능 합금 개발에는 적합하지만 생산 효율이 낮습니다.

적층 제조(3D 프린팅)는 최근 몇 년 동안 등장한 제조 기술로, 선택적 레이저 용융(SLM) 또는 전자빔 용융(EBM)을 사용합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 SLM을 사용하여 3000W 레이저로 W-90Ni-Fe 분말을 용융하여 18g/cm³의 밀도와 1% 미만의 기공률을 가진 복잡한 형상의 부품을 층층이 인쇄합니다. 이 방식은 맞춤형 생산에 적합하지만, 부품 1kg 당 비용이 기존 공정의 약 2~3 배에 달하는 등 비용이 많이 듭니다.

4.4 중텅스텐 합금에 대한 공정 매개변수의 영향

공정 매개변수는 원료 입자 크기, 소결 온도, 압력 및 분위기를 포함하여 고밀도 텅스텐 합금의 특성에 상당한 영향을 미칩니다.

원료 입자 크기는 밀도와 기계적 특성에 영향을 미칩니다. 텅스텐 분말의 입자 크기는 10 μm에서 1 μm로 감소하고, 소결 후 밀도는 미세 입자가 더 조밀하게 충전되어 18.0g/cm³에서 18.8g/cm³로 증가합니다. 그러나 0.5 μm 미만의 입자는 응집되기 쉬우므로 혼합 공정을 최적화해야 합니다. 바인더상(예: 니켈 분말)의 입자 크기가 너무 크면(예: 10 μm) 액상이 불균일하게 분포되어 인성이 10~15% 감소합니다.

소결 온도는 액상 형성 및 밀도를 결정합니다. 예를 들어, 1450° C에서 소결된 W-90Ni-Fe 합금의 밀도는 18.2 g/cm³이고, 1500° C에서는 18.6 g/cm³에 도달합니다. 그러나 온도가 너무 높으면(예: 1600° C) 니켈-철이 휘발되어 밀도가 18.0 g/cm³로 떨어지고 경도가 20% 감소합니다. 최적 온도는 구성에 따라 달라지며, 일반적으로 결합제 상의 녹는점보다 50~100° C 높습니다.

가압 압력은 성형체 밀도와 소결 효율에 영향을 미칩니다. 냉간 등압 가압을 200MPa에서 300MPa로 증가시키면 성형체 밀도는 11g/cm³에서 12.5g/cm³로 증가하고 최종 제품

밀도는 0.5% 증가합니다. 그러나 너무 높은 압력(예: 400MPa)은 금형 마모를 유발하고 비용을 증가시킬 수 있습니다.

소결 분위기는 산화도에 영향을 미칩니다. 수소 분위기(유속 100mL/분)에서는 산소 함량을 0.02%까지 낮출 수 있는 반면, 공기 중 소결에서는 0.5%의 산화물이 생성되고 밀도는 17.5g/cm³로 떨어집니다. 진공 소결(10⁻⁴Pa)은 더욱 효과적이며 고정밀 부품에 적합합니다.

4.5 중텅스텐 합금의 품질 관리 및 검사

품질 관리와 테스트는 고밀도 텅스텐 합금의 안정적인 성능을 보장하는 데 중요한 요소이며, 전체 제조 공정에 걸쳐 실행됩니다.

원자재 품질 관리에는 화학 분석 및 입자 크기 검사가 포함됩니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 ICP-MS를 사용하여 텅스텐 분말의 순도(>99.9%)를 측정하고, 레이저 입자 크기 분석기를 사용하여 입자 크기 분포(D50=3 μm)를 측정하여 불순물(예: Fe<0.01%)과 입자 크기가 기준을 충족하는지 확인합니다.

공정 제어는 가압 및 소결 매개변수를 모니터링합니다. 가압 압력은 편차 5MPa 미만의 센서를 통해 실시간으로 기록되며, 소결 온도는 ±5° C의 정확도를 가진 열전대를 통해 제어됩니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 소결로에 다점 온도 측정 시스템을 구축하여 10° C 미만의 온도 균일성을 보장합니다.

완제품 시험에는 밀도, 기계적 특성, 미세 구조 분석이 포함됩니다. 밀도는 아르키메데스법으로 측정하며, 예를 들어 W-95Ni-Fe 합금의 목표값은 18.8±0.1 g/cm³입니다. 인장 시험(ASTM E8 기준)은 인장 강도(>1000 MPa)와 신장률(>15%)을 측정합니다. 현미경(예: SEM)은 텅스텐 입자 분포와 기공률을 관찰합니다. 예를 들어 기공 직경은 5 μm 미만이고, 기공 비율은 0.5% 미만입니다. 또한, 비파괴 검사(예: 초음파)를 통해 내부 결함을 검사하여 부품의 신뢰성을 보장합니다.

이러한 조치를 통해 CTIA GROUP LTD의 제품은 균형추의 밀도 편차 <0.2%, 차폐 부품의 다공성 <0.1% 등 항공, 의료 및 기타 분야의 엄격한 요구 사항을 충족합니다.

고비중 텅스텐 합금의 제조 공정

준비	주요 매개변수/기술	일반적인 값/조건	영향/목표
원자재 선정	텅스텐 분말 순도 및 입자 크기	$\geq 99.9\%$, $3\ \mu\text{m}$	높은 밀도와 균일성을 보장합니다
전처리	혼합 속도, 환원 온도	300rpm, 800°C	균일하게 분포, 산소 함량 $<0.05\%$
누르기	냉간등방압 가압, 성형압	200~300MPa, 500~700MPa	녹색체 밀도 60%-70%
분말 야금 소결	소결 온도, 분위기	1480°C , 수소/진공	밀도 $18.5\ \text{g/cm}^3$, 밀도 $>99\%$
용융 주조	녹는점	1800°C	밀도 $14.5\ \text{g/cm}^3$, W-Cu 에 적합
기계적 합금화	볼 밀링 속도 및 시간	500rpm, 10 시간	입자 크기 50nm, 강도 1200MPa
3D 프린팅	레이저 출력, 다공성	3000W, $<1\%$	복잡한 모양, 밀도 18g/cm^3
프로세스 매개변수	입자 크기, 온도, 압력	$1-10\ \mu\text{m}$, $1450-1500^\circ\text{C}$, 200MPa	밀도와 인성을 최적화하세요
품질 관리	밀도 편차, 다공성	$\pm 0.1\ \text{g/cm}^3$, $<0.5\%$	항공 및 의료 표준을 충족합니다

참고: 표의 데이터는 CTIA GROUP LTD 의 일반적인 프로세스를 기반으로 합니다. 구체적인 값은 제품 요구 사항에 따라 달라집니다.


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

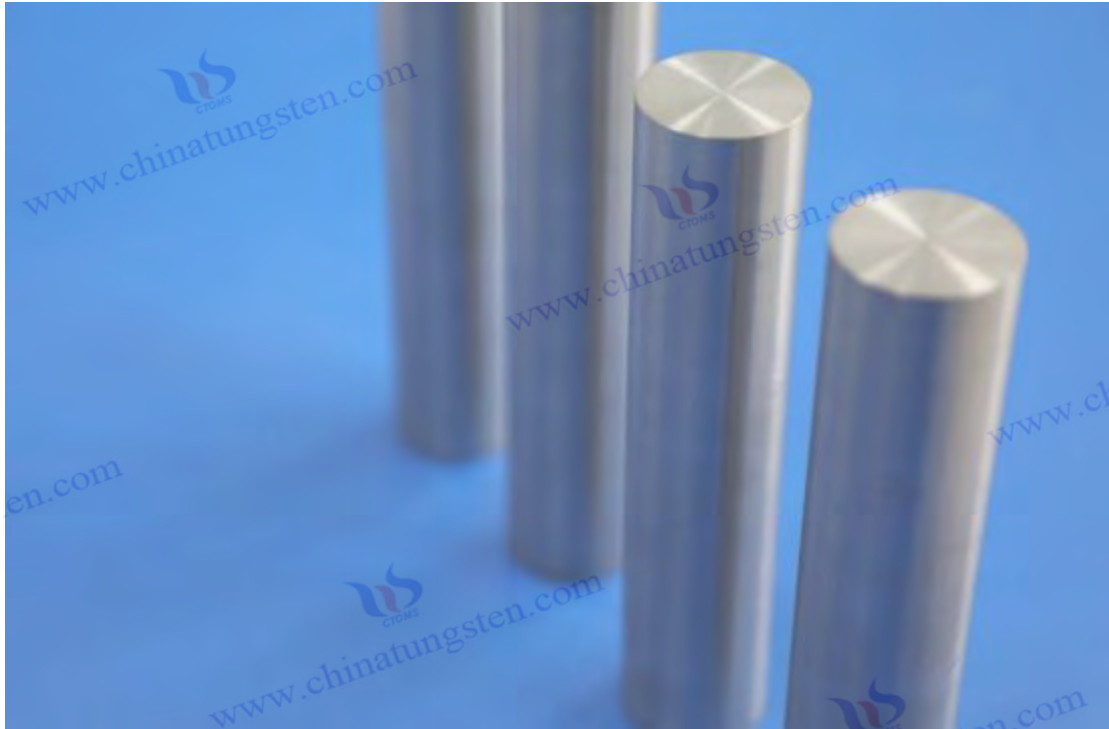
Official website: www.tungsten-alloy.com



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

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



제 5 장 고비중 텅스텐 합금의 가공 및 후가공 기술

5.1 고비중 텅스텐 합금의 가공기술

중텅스텐 합금의 가공 기술은 소결 빌릿을 정밀 부품으로 가공하는 핵심 단계입니다. 높은 경도(300~500 HV)와 적당한 인성(신장률 10~30%)으로 인해 순수 텅스텐과 일반강의 가공 난이도 사이에 위치하며, 특수 공구와 공정 변수 최적화가 필요합니다.

선삭 및 밀링은 일반적으로 사용되는 절삭 방법입니다. 무거운 텅스텐 합금의 가공성은 결합제 상(예: Ni-Fe)의 존재로 인해 이점을 얻으며, 이는 순수 텅스텐보다 절삭 저항을 낮춥니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금을 가공할 때 CTIA GROUP LTD는 절삭 속도 40-60m/min, 이송 속도 0.1-0.2mm/r, 절삭 깊이 1mm 이하의 초경 공구(예: WC-Co 코팅 공구)를 사용합니다. 이 매개변수는 표면 거칠기를 Ra 1.6μm 미만으로 제어하여 항공 균형추의 요구를 충족할 수 있습니다. 순수 텅스텐(절삭 속도 10m/min에 불과함)과 비교했을 때 무거운 텅스텐 합금의 가공 효율은 약 3-5배 증가하지만 공구 마모율은 여전히 강철 가공보다 20%-30% 더 높으므로 정기적으로 교체해야 합니다.

드릴링과 보링은 구멍이나 내부 캐비티 부품을 가공하는 데 적합합니다. 예를 들어, W-95Ni-Fe 합금 차폐 부품을 가공할 때 CTIA GROUP LTD는 직경 5mm의 코발트 고속도강 드릴 비트를 사용합니다. 이 드릴 비트는 500~800rpm으로 속도 제어되고 이송 속도는 0.05mm/r로 유지되어 구멍 직경 공차가 ±0.02mm 이내가 되도록 합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 경도가 높기 때문에 드릴 비트의 수명을 연장하려면 TiN 또는 TiAlN 코팅이 필요합니다. 절삭 영역의 온도를 약 50°C 낮추고 열 균열 위험을 줄이려면 냉각수(예: 수성 에멀전)를 사용하는 것이 필수적입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

연삭 및 연마는 고정밀 표면 가공에 사용됩니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-93Ni-Fe 합금 의료 부품을 가공할 때, 120# 다이아몬드 연삭 휠을 사용하여 거친 연삭 후, 2000# 사포로 미세 연삭하고, 최종적으로 Ra 0.4 μm 까지 연마하여 방사선 차폐 부품의 마감 요건을 충족합니다. 연삭 속도는 20~30m/s이며, 이송 속도는 0.01~0.02mm/pass로 과열로 인한 미세 균열을 방지합니다. 순수 텅스텐(더 높은 경도의 연삭 휠이 필요하고 균열 발생 가능성이 높음)과 비교했을 때, 고밀도 텅스텐 합금의 인성은 거울 효과를 더 쉽게 구현할 수 있도록 합니다.

가공의 어려움과 대책에는 공구 마모 및 열 변형이 포함됩니다. 중텅스텐 합금의 높은 경도는 공구 수명을 단축시킵니다. 예를 들어, 부품 100 개를 가공한 후 공구 절삭날의 마모 깊이는 0.2mm에 달할 수 있습니다. CBN(입방정 질화붕소) 공구는 기존 초경합금을 대체해야 하며, 수명을 약 50% 연장할 수 있습니다. 또한, 절삭 열은 부품 치수 편차를 유발할 수 있습니다. 예를 들어, 60° C의 온도 상승에서 W-90Ni-Fe 합금의 열팽창은 약 0.005mm/cm이며, 이 온도는 냉각수 및 간헐 절삭을 통해 제어해야 합니다.

5.2 고비중 텅스텐 합금의 열처리 기술

열처리 기술은 고밀도 텅스텐 합금의 미세 구조를 조정하고, 기계적 성질을 개선하며, 가공 응력을 제거하는 데 사용됩니다. 일반적인 방법으로는 어닐링, 담금질, 시효 처리가 있지만, 텅스텐의 높은 용점과 합금 특성으로 인해 특수 공정 설계가 필요합니다.

어닐링 처리는 주로 소결이나 가공 과정에서 발생하는 내부 응력을 제거하는 데 사용됩니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-90Ni-Fe 합금 부품을 수소 분위기에서 900° C에서 2 시간 동안 어닐링 처리했으며, 냉각 속도는 50° C/h로 조절했습니다. 응력은 200MPa에서 50MPa 미만으로 감소했고, 연신율은 약 10% 증가했습니다. 어닐링 온도는 너무 높아서는 안 됩니다(1000° C 이상). 그렇지 않으면 결합상이 연화되어 경도가 15~20% 감소할 수 있습니다.

고밀도 텅스텐 합금은 결합제 상에 의해 인성이 최적화되어 있기 때문에 담금질 처리가 거의 사용되지 않습니다. 그러나 표면 경도 향상과 같은 특정 요구 조건에서는 국부 담금질을 수행할 수 있습니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-95Ni-Fe 합금의 표면을 1200° C로 급속 가열한 후 수냉하여 표면 경도를 450 HV에서 500 HV로, 깊이는 약 0.5mm로 증가시켰지만 내부 인성은 변하지 않았습니다. 이 방법은 균열 발생을 방지하기 위해 냉각 속도의 정밀한 제어가 필요합니다.

시효 처리는 코발트 또는 몰리브덴을 함유한 합금의 강화상 석출에 적합합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-93Ni-Fe-2Co 합금을 600° C에서 4 시간 동안 시효 처리하여 Co 기반 화합물을 석출시켜 인장 강도를 1000MPa에서 1100MPa로, 경도를 480HV로 증가시켰습니다. 너무 오래(예: 8 시간) 시효 처리하면 과시효가 발생하여 인성이 5~10% 감소할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열처리 효과는 분위기 조절에 따라 달라집니다. 수소 또는 진공(10^{-3} Pa)은 산화를 방지할 수 있습니다. 예를 들어, 중국 텅스텐 인텔리전스(China Tungsten Intelligence)의 어닐링로에서는 표면에 산화막이 생기지 않도록 산소 함량을 0.01% 미만으로 관리합니다. 순수 텅스텐(더 높은 온도가 필요하고 취성이 높음)과 비교했을 때, 고밀도 텅스텐 합금은 열처리 가능 범위가 더 넓고 적응성이 더 뛰어납니다.

고밀도 텅스텐 합금의 표면처리 기술

표면 처리 기술은 중텅스텐 합금의 내식성, 내마모성 또는 미관을 개선하기 위해 고안되었습니다. 일반적인 방법으로는 도금, 침탄, 용사 등이 있습니다.

전기 도금은 내식성 향상에 자주 사용됩니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-90Ni-Fe 합금 부품 표면에 $5\mu\text{m}$ 두께의 니켈 층을 전기 도금했습니다. 10% 염산에 1000 시간 동안 담근 후 부식률은 2%에서 0.2%로 10 배 증가했습니다. 코팅 두께는 $3\sim 10\mu\text{m}$ 로 조절해야 합니다. 너무 두껍게 하면 박리가 발생할 수 있습니다. 전자 부품에는 금도금이나 은도금이 사용됩니다. 예를 들어, W-80Cu 합금 전극에 $2\mu\text{m}$ 두께의 금 층을 도금하면 저항률은 $4\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 로 감소하고 전도도는 20% 증가합니다.

침탄 처리는 표면 경도와 내마모성을 향상시킵니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-95Ni-Fe 합금 표면을 950°C 에서 3 시간 동안 침탄 처리하여 탄소 함량을 0.5%로, 표면 경도를 450HV에서 600HV로, 내마모성을 30% 향상시켜 드릴링 공구에 적합하게 만듭니다. 내부 인성에 영향을 미치지 않도록 일반적으로 침탄 깊이는 $0.1\sim 0.3\text{mm}$ 입니다.

용사는 특수 환경에서 사용됩니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-90Ni-Fe 합금 부품에 0.2mm 두께의 Al_2O_3 세라믹 코팅을 용사합니다. 이 코팅은 1500°C 에서 내식성을 50% 향상시켜 고온 항공 부품에 적합합니다. 접착력을 보장하기 위해 용사 두께는 균일해야 하며, 편차는 0.02mm 미만이어야 합니다.

표면 처리는 적용 상황에 따라 신중하게 선택해야 합니다. 예를 들어, 의료용 차폐 부품은 내식성과 무독성을 위해 니켈 도금이 선호되는 반면, 절삭 공구는 내마모성 향상을 위해 침탄 처리가 더 적합합니다.

고밀도 텅스텐 합금의 접합 기술

접합 기술은 무거운 텅스텐 합금을 다른 재료와 결합하거나 자체적으로 복잡한 구조물을 만드는 데 사용됩니다. 일반적인 방법으로는 용접, 브레이징, 기계적 접합 등이 있습니다.

은 용점이 높아(3422°C) 용접이 까다롭지만, 고밀도 텅스텐 합금은 결합재 상(binder phase) 덕분에 국부 용융 용접이 가능합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 W-90Ni-Fe 합금에 전자빔 용접(EBW)을 사용하는데, 빔 출력은 5kW , 용접 속도는 1m/min , 용접 깊이는 3mm , 강도 유지율은 약 90%입니다. 용접 후 응력 제거 및 균열 방지를 위해 800°C 에서 1 시간 동안 어닐링(annealing)을 실시합니다.

브레이징은 온도가 낮기 때문에 더 일반적으로 사용됩니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD 는 W-80Cu 합금을 구리 기관에 접합하기 위해 Ag-Cu 브레이징 재료(용점 780° C)를 사용합니다. 브레이징 온도는 850° C 이며, 접합 전단 강도는 200MPa 에 달하여 전자 기기에 적합합니다. 브레이징 재료는 계면 반응을 방지하기 위해 접합상과 호환되어야 합니다.

기계적 연결은 용접이 불가능한 경우에 적합합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD 는 W-95Ni-Fe 합금 카운터웨이트에 구멍을 뚫고 나사산을 가공한 후 M6 티타늄 볼트를 사용하여 연결합니다. 이 볼트는 5000N 의 하중을 견딜 수 있으며 분해가 간편합니다. 구멍 가장자리의 응력 집중은 모따기 또는 패딩을 통해 완화할 수 있습니다.

접합의 어려움은 열팽창 계수 차이에 있습니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe($4.5 \times 10^{-6}/K$)를 강철($12 \times 10^{-6}/K$)에 접합할 때, 100° C 의 온도 차이는 0.075mm 의 변위 차이를 발생시켜 보상 간극 설계 또는 유연한 접합이 필요합니다.

5.5 고밀도 텅스텐 합금을 위한 후처리 기술의 최적화 및 적용

후처리 기술의 최적화는 정밀 가공, 성능 향상, 기능적 처리를 포함하여 성능을 더욱 개선하거나 특정 요구 사항을 충족하는 것을 목표로 합니다.

정밀 가공 최적화는 CNC 기술을 통해 정확도를 향상시킵니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD 는 5 축 CNC 공작 기계를 사용하여 공차 $\pm 0.01\text{mm}$, 표면 조도 Ra 0.2 μm 의 W-93Ni-Fe 합금 부품을 가공하는데, 이는 항공 자이로스코프의 요건을 충족합니다. 과부하 방지를 위해 절삭력 편차 <5%와 같은 가공 매개변수를 실시간으로 모니터링해야 합니다.

성능 향상에는 열간 등방성형(HIP)과 이온 주입이 포함됩니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD 는 W-95Ni-Fe 합금을 200MPa, 1400° C 에서 1 시간 동안 HIP 처리하여 기공률을 0.5%에서 0.1%로 줄이고 피로 수명을 50% 연장했습니다. 질소 이온 주입(10^{17} ions/cm² 투여량)을 통해 표면 경도를 550 HV 까지 높이고 내마모성을 20% 향상시킬 수 있습니다.

코팅이나 미세 구조 설계와 같은 기능적 처리가 있습니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD 는 W-90Ni-Fe 합금 표면에 직경 50 μm 의 미세 기공을 레이저로 에칭하여 미끄럼 방지 균형추의 마찰 계수를 20% 높였습니다. 또한, PVD TiN 코팅을 사용하여 내식성을 30% 향상시켜 해양 환경에 적합합니다.

적용 사례로는 높은 정밀도와 밀도가 요구되는 항공용 카운터웨이트, 표면 마감 및 내식성이 요구되는 의료용 차폐 부품, 그리고 내마모성이 요구되는 드릴링 공구 등이 있습니다. 목표 성능에 따라 최적화를 조정해야 합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD 는 의료용 부품에 HIP 및 니켈 도금을 우선시하는 반면, 드릴링 공구는 칩탄 및 용사를 중시합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술 카테고리	주요 방법	일반적인 매개변수	대상/효과
가공	선회	40-60m/분, 0.1mm/r	표면 거칠기 Ra 1.6 μ m
	연마	20-30m/s, Ra 0.4 μ m	고정밀 표면
열처리	가열 냉각	900° C, 2 시간	응력은 50MPa 로 감소, 신장률 +10%
	노화	600° C, 4 시간	강도 1100 MPa, 경도 480 HV
표면 처리	니켈 도금	두께 5 μ m	부식율은 0.2%로 떨어졌습니다.
	침탄	950° C, 3 시간	경도 600 HV, 내마모성 +30%
연결 기술	전자빔 용접	5kW, 1m/분	용접 강도 90%
	브레이징	850° C, Ag-Cu 솔더	전단강도 200MPa
후처리 최적화	잘 알고 있기	200MPa, 1400° C	다공성 0.1%, 수명 +50%
	레이저 에칭	미세기공 50 μ m	마찰계수 +20%

참고: 표의 데이터는 중국 텅스텐 제조의 일반적인 공정을 기반으로 합니다. 구체적인 값은 적용 요건에 따라 달라집니다.

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

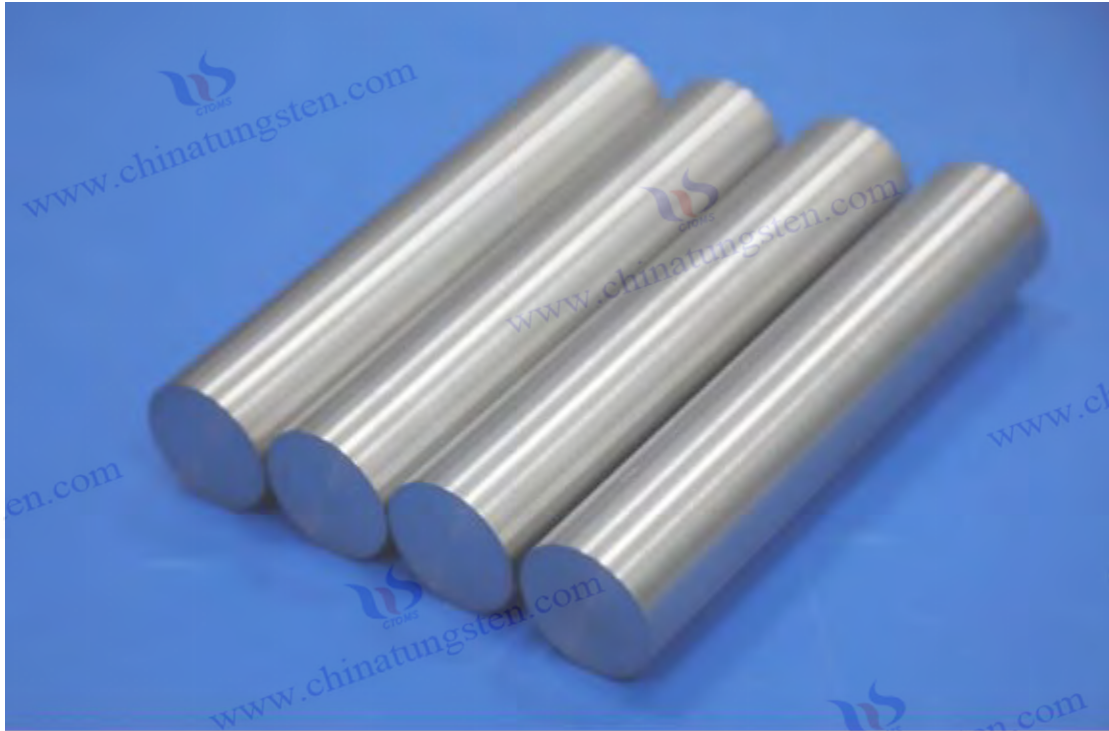
Official website: www.tungsten-alloy.com



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

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



제 6 장: 고비중 텅스텐 합금 생산 장비

6.1 원료 준비 장비

고밀도 텅스텐 합금 제조는 원료 준비부터 시작하는데, 여기에는 텅스텐 분말과 바인더상 분말의 제조 및 가공이 포함됩니다. 주요 장비로는 환원로, 볼 밀, 체질기 등이 있으며, 이는 원료의 순도, 입자 크기 및 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다.

수소 환원로는 산화텅스텐(WO_3) 으로부터 고순도 텅스텐 분말을 제조하는 데 사용됩니다. 일반적인 장비는 작동 온도 범위가 $700\sim 1000^{\circ}C$ 이고 수소 유량이 $50\sim 100L/min$ 인 다중관 푸시보트로입니다. 예를 들어, WO_3 는 $900^{\circ}C$ 에서 4 시간 동안 환원하여 순도 $\geq 99.9\%$, 산소 함량이 $<0.05\%$ 인 텅스텐 분말로 전환할 수 있습니다. 이로는 환원의 균일성을 보장하기 위해 온도 차이가 $\pm 5^{\circ}C$ 로 제어되는 다중 구역 가열 설계를 채택합니다. 장비 용량은 하루 50kg 에서 500kg 으로 중소 규모 배치 생산에 적합합니다. 핵심은 분위기 제어에 있으며, 분말 산화를 방지하기 위해 수분 함량을 10ppm 미만으로 낮추기 위해 수소 정제 시스템(예: 분자체)이 필요합니다.

볼 밀은 텅스텐 분말을 바인더 상(예: Ni, Fe)과 혼합하고 입자 크기를 미세화하는 데 사용됩니다. 행성형 볼 밀은 일반적인 선택이며, 속도 범위는 200-600rpm 이고 볼 대 재료 비율은 10:1~20:1 입니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 혼합 분말을 400rpm 에서 6 시간 동안 분쇄하면 텅스텐 분말의 입자 크기가 $5\mu m$ 에서 $3\mu m$ 로 줄어들고 균일성 편차는 $<1\%$ 입니다. 분쇄 매체는 대부분 불순물 오염을 방지하기 위해 직경 5-10mm 의 시멘트 카바이드 볼(WC-Co)입니다. 분말 응집을 방지하기 위해 0.5%-1%의 공정 제어제(예:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

스테아르산)를 첨가하고 분쇄 후 건조하여 제거할 수 있습니다. 장비에는 탱크의 온도를 $<60^{\circ}\text{C}$ 로 제어하고 쉘의 수명을 연장하기 위한 냉각 시스템이 필요합니다.

진동 스크린은 크기가 크거나 작은 입자를 제거하여 일관된 입자 크기 분포를 유지하는데 사용됩니다. 일반적인 스크린은 100~200 메시(약 $74\sim150\mu\text{m}$) 크기이며, 진동 주파수는 분당 1,500~3,000 회입니다. 예를 들어, $3\mu\text{m}$ 텅스텐 분말을 10 분간 스크리닝하면 $10\mu\text{m}$ 이상의 입자 제거율이 5%에서 0.1%로 감소합니다. 이 장비에는 효율 향상을 위해 초음파 스크린 세척과 같은 막힘 방지 장치가 장착되어 있습니다. 고정밀 스크리닝을 위해서는 다양한 공정 요건을 충족하기 위해 100 메시, 150 메시, 200 메시와 같은 여러 단계의 스크린이 순차적으로 필요합니다.

이러한 장비의 시너지 효과는 원자재의 품질을 보장합니다. 예를 들어, 특정 생산 라인에서 최적화된 텅스텐 분말의 입도 분포(D50)는 $3\mu\text{m}$ 이고 산소 함량은 0.03%로, 이는 후속 프레스 및 소결 공정의 기반을 마련합니다.

6.2 프레스 장비

프레스 및 성형 장비는 혼합 분말을 성형체로 변환하는 장비로, 분말 야금 공정의 핵심 단계입니다. 일반적인 장비로는 냉간 등방성 프레스와 유압 프레스가 있습니다.

냉간 등압 프레스(CIP)는 물이나 오일과 같은 액체 매질을 통해 균일한 압력을 가하는 방식으로 복잡한 형상에 적합합니다. 작동 압력 범위는 100~400MPa이며, 캐비티 직경은 50~500mm입니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 분말을 250MPa로 프레스할 때 성형체의 밀도는 $11\sim13\text{g}/\text{cm}^3$ 에 도달하여 이론 밀도의 60~70%를 차지합니다. 이 장비에는 고압 펌프와 밀봉 시스템이 장착되어 있으며, 압력 정확도는 $\pm 2\text{MPa}$ 이고 성형 시간은 약 5~10 분입니다. 분말 누출을 방지하기 위해 내압성이 300MPa 이상인 폴리우레탄 또는 고무 금형이 필요합니다. 균일한 압력이 장점으로, 항공기 균형추와 같은 대형 부품 생산에 적합합니다.

유압 프레스는 압축 성형에 사용되며 소량 생산이나 단순 형상의 부품에 적합합니다. 압력 범위는 200~1000 MPa이고, 금형 직경은 10~100 mm입니다. 예를 들어, 직경 50 mm의 W-95Ni-Fe 원통형 빌렛을 600 MPa로 가압하고, 성형 시간은 30 초이며, 빌렛 밀도는 $12\text{g}/\text{cm}^3$ 에 이릅니다. 이 장비에는 정밀 금형(예: 경도 60 HRC 이상의 강철 금형)을 장착해야 하며, 마찰을 줄이기 위해 이형제(예: 흑연 에멀전)를 정기적으로 도포해야 합니다. 냉간 등방압 프레스와 비교했을 때 유압 프레스는 효율이 더 높지만, 빌렛의 내부 응력 분포가 다소 떨어집니다.

보조 장비는 프레스 공정 중 기포 결함을 방지하기 위해 분말을 금형에 넣기 전에 탈기하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 10^{-2}Pa 의 진공도에서 포장하면 블랭크의 기공률을 0.5%까지 줄일 수 있습니다. 이러한 장비의 선택은 부품 크기와 생산량에 따라 조정해야 합니다. 예를 들어, CTIA GROUP LTD는 의료용 차폐 부품 생산 시 균일성을 보장하기 위해 냉간 등방성 프레스를 선호합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 소결 장비

소결 장비는 중텅스텐 합금 생산의 핵심으로, 그린 바디를 고밀도 완제품으로 가공하는 데 사용됩니다. 이 장비는 주로 액상 소결로와 열간 등압 성형로를 포함합니다.

액상 소결로는 고온을 이용하여 바인더 상을 녹이고 텅스텐 입자 사이의 틈을 채웁니다. 일반적으로 사용되는 저항 가열로는 1300~1600° C 의 온도 범위와 $\pm 5^{\circ}$ C 의 정확도를 갖습니다. 예를 들어, W-93Ni-Fe 블랭크를 1480° C 에서 2 시간 동안 소결하면 밀도가 12g/cm³ 에서 18.5g/cm³ 로 증가하고 밀도는 99% 이상입니다. 소결로는 주로 알루미늄 또는 몰리브덴 으로 만들어 지며 온도 저항은 1700° C 이상입니다. 분위기는 수소(유량 100mL/분) 또는 진공(10⁻³ Pa)일 수 있으며, 산소 함량은 0.01% 미만으로 제어됩니다. 이 장비는 열 응력 균열을 방지하기 위해 5° C/분의 가열 속도, 단열 후 50° C/시간으로 냉각하는 다단계 프로그램 온도 제어 기능을 갖추고 있습니다. 연속소결로는 대량 생산에 사용될 수 있으며, 일일 생산 용량은 1~2 톤입니다.

열간 등방성 가압(HIP) : 미세 기공을 더욱 제거하기 위한 후처리에 사용됩니다. 작업 조건은 100~200MPa, 1300~1500° C 입니다. 예를 들어, W-95Ni-Fe 합금을 200MPa, 1400° C 에서 1 시간 처리했을 때 밀도는 99%에서 99.8%로 증가했고 기공률은 0.1%로 감소했습니다. 노 본체는 흑연 또는 몰리브덴 으로 라이닝된 고압 강철 쉘을 채택하고 아르곤 부스터 시스템을 장착했으며, 압력 변동은 1MPa 미만입니다. 장점은 성능이 크게 향상되지만 처리 비용이 상대적으로 높아 항공 부품과 같은 고부가가치 제품에 적합하다는 것입니다.

보조 시스템 에는 진공 펌프와 가스 회수 장치가 포함됩니다. 예를 들어, 진공 펌프는 노 내 압력을 10⁻⁴Pa 까지 낮출 수 있으며, 회수 시스템은 수소를 재활용하여 비용을 약 20% 절감합니다. 소결 장비의 효율과 안정성은 완제품의 품질을 직접적으로 결정합니다. 예를 들어, 최적화된 노 온도 균일도는 10° C 미만으로, 배치 간 밀도 편차를 ± 0.1 g/cm³ 이내로 유지합니다.

6.4 후처리 장비

후가공 장비는 가공, 열처리, 표면처리에 사용되는 장비로, 주로 CNC 공작기계, 열처리로, 코팅장비 등이 있습니다.

CNC 기계는 정밀 가공에 사용됩니다. 일반적으로 5 축 머시닝 센터로, 스핀들 속도가 5,000~15,000rpm 이고 위치 정확도는 ± 0.005 mm 입니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금 부품을 가공할 때 절삭 속도는 50m/min 이고 표면 조도는 Ra 0.4 μ m 입니다. 이 장비에는 다이아몬드 또는 CBN 공구가 장착되어 있으며, 안정적인 가공을 위해 10L/min 의 냉각 시스템 유량을 제공합니다. 자이로스코프 카운터웨이트와 같은 복잡한 부품 가공에 적합합니다.

열처리로는 어닐링 또는 시효 처리에 사용됩니다. 상자형 저항로는 일반적으로 500~1200° C 의 온도 범위와 $\pm 3^{\circ}$ C 의 정확도를 제공합니다. 예를 들어, W-93Ni-Fe 부품을 900° C 에서 2 시간 동안 어닐링하면 응력이 80% 감소하고 연신율이 10% 증가합니다. 노 분위기는 수소 또는 질소이며, 순환 팬이 장착되어 있으며, 온도 차이는

5° C 미만입니다. 연속로는 대량 생산에 적합하며 하루 최대 500kg 을 처리할 수 있습니다.

표면 처리에는 전기 도금 탱크 및 PVD 기계와 같은 코팅 장비가 사용됩니다. 전기 도금 탱크는 니켈 또는 금을 도금액으로 사용하며, 전류 밀도는 1~5 A/dm² 입니다. 예를 들어, 5 μm 두께의 니켈 층을 도금하는 데 30 분이 소요되며, 이는 내식성을 10 배 향상시킵니다. PVD 기계는 마그네트론 스퍼터링을 사용하여 2~5 μm 두께의 TiN 코팅을 증착하고 최대 550HV 의 경도를 가지며, 이는 내마모성 부품에 적합합니다. 균일한 코팅을 보장하기 위해 장비에는 진공 시스템(10⁻⁵ Pa)이 장착되어 있어야 합니다.

이러한 장치는 정기적으로 교정해야 합니다. 예를 들어 CNC 공작 기계는 한 달에 한 번 교정하고 열처리로의 온도 센서 오차는 <2° C 로 처리 정확도와 성능 일관성을 보장합니다.

6.5 생산장비의 자동화 및 지능화

산업 4.0 의 발전에 따라 중텅스텐 합금 생산 장비의 자동화 및 지능화가 추세가 되었으며, 효율성과 품질 안정성이 향상되었습니다.

자동화 기술에는 로봇과 컨베이어 시스템이 포함됩니다. 예를 들어, 프레스 공정에서 6축 로봇은 분당 20 개의 속도로 금형을 자동으로 로딩 및 언로딩하여 수동 작업 오류를 30% 줄일 수 있습니다. 소결로에는 컨베이어 벨트 속도 0.5m/분, 일일 생산량 2 톤의 자동 공급 및 언로딩 시스템이 장착되어 있습니다. 자동화 장비는 압력 변동 <2MPa 와 같은 실시간 매개변수 조정을 위해 PLC(프로그래밍 가능 논리 제어기)와 통합되어야 합니다.

지능형 시스템은 센서와 데이터 분석을 통해 생산을 최적화합니다. 온도 센서(정확도 ±1° C)와 압력 센서(±0.5MPa)는 소결 공정을 실시간으로 모니터링하고, 데이터는 MES(제조 실행 시스템)에 업로드되어 이상 발생 시 자동으로 경보를 발령합니다. 예를 들어, 생산 라인은 지능형 모니터링을 통해 불량률을 2%에서 0.5%로 줄였습니다. AI 알고리즘은 장비 유지보수 주기를 예측할 수 있습니다. 예를 들어, 볼 밀 진동 데이터를 분석하여 베어링 교체 시기를 30 일 전에 조기에 경고하여 가동 중단 시간을 50% 단축할 수 있습니다.

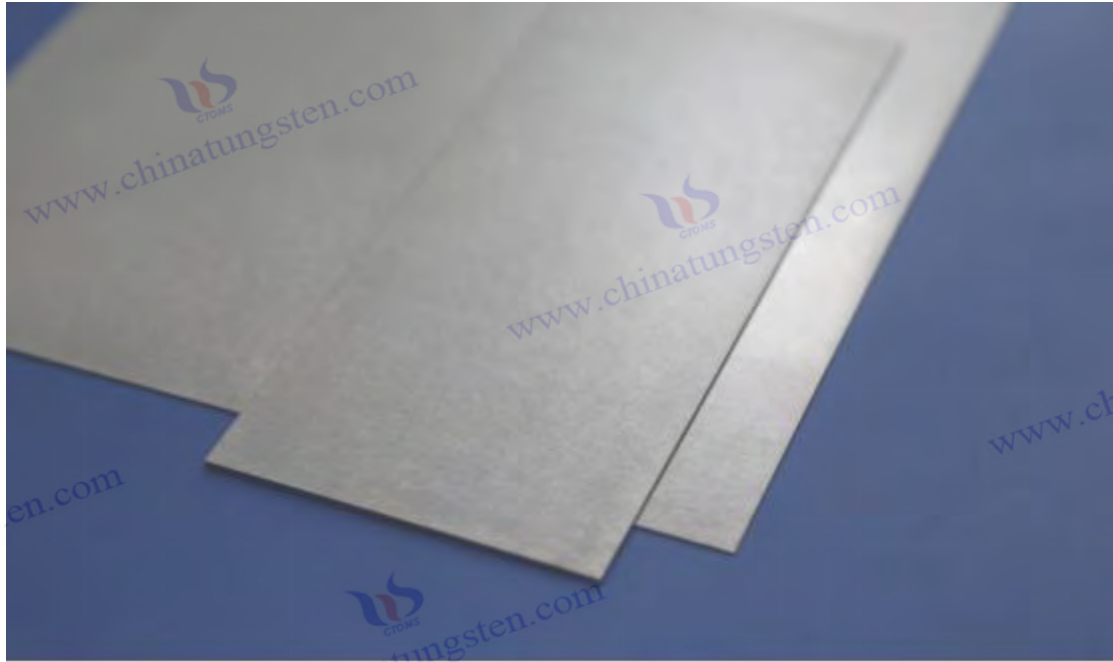
통합 사례는 지능형 생산 라인에서 냉간 등압 성형, 소결, CNC 가공이 컨베이어 벨트를 통해 직렬로 연결되고, 센서 데이터가 중앙 제어실로 전송되는 것을 보여줍니다. 생산 주기는 15 일에서 10 일로 단축되었고, 완제품 합격률은 99.5%에 달합니다. 지능형 생산 라인은 높은 초기 투자 비용 (기존 장비의 약 두 배)이 필요하지만, 장기 운영 비용은 약 20% 절감됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중텅스텐 합금 생산 장비

장비 카테고리	주요 장비	주요 매개변수	기능/목표
원료 준비	수소환원로	900° C, 50L/분	텅스텐 분말 순도 $\geq 99.9\%$, 산소 $< 0.05\%$
	볼밀	400rpm, 6 시간	입자 크기 $3\ \mu\text{m}$, 균일도 $< 1\%$
누르기	냉간 등방성 프레스	250MPa, 5~10 분	녹색체 밀도 $11\text{--}13\ \text{g/cm}^3$
	유압 프레스	600MPa, 30 초	고효율 성형, 밀도 12g/cm^3
소결	액상 소결로	1480° C, 2 시간	밀도 $18.5\ \text{g/cm}^3$, 밀도 $>99\%$
	열간 등방압 압착로	200MPa, 1400° C	다공성 0.1% , 성능 최적화
후처리	CNC 공작 기계	50m/분, Ra $0.4\ \mu\text{m}$	고정밀 가공
	열처리로	900° C, 2 시간	스트레스 80% 감소
자동화 및 인텔리전스	기계 인간	20 개/분	효율성 향상, 오류 $< 30\%$
	지능형 모니터링	온도 $\pm 1^\circ\text{C}$, 폐기율 0.5%	안정적인 품질, 예측 가능한 유지관리

참고: 표의 데이터는 일반적인 범위이며, 구체적인 매개변수는 프로세스 요구 사항에 따라 달라집니다.



제 7 장: 중텨스텐 합금 시험 장비

7.1 화학성분 분석 장비

고밀도 텨스텐 합금은 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 텨스텐 함량과 결합상 원소(예: Ni, Fe, Cu)의 비율이 설계 요건을 충족하는지 확인하기 위해 시험 장비가 사용됩니다. 일반적으로 사용되는 장비로는 분광계와 화학 분석기가 있습니다.

유도 결합 플라즈마 발광 분광기(ICP-OES)는 원소 함량을 검출하는 주요 장비입니다. 작동 원리는 플라즈마를 통해 샘플 원자를 여기시키고 특정 파장에서 방출되는 빛의 세기를 측정하는 것입니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금에서 텨스텐 함량($90 \pm 0.5\%$), 니켈($7 \pm 0.2\%$), 철($3 \pm 0.2\%$)을 검출할 수 있으며, 검출 한계는 0.001%만큼 낮고 정확도는 $\pm 0.1\%$ 입니다. 샘플은 먼저 산(예: 질산 + 불산의 혼합물)에 용해해야 하며 각 분석은 약 5 분이 걸립니다. 이 장비에는 고주파 발생기(전력 1-2kW)와 다중 채널 검출기가 장착되어 있어 일괄 분석에 적합하며 한 번에 10-20 개의 원소를 측정할 수 있습니다.

X선 형광 분광기(XRF)는 비파괴 검사 옵션을 제공합니다. 시료 표면에 X 선을 조사하고, 형광 파장을 분석하여 성분을 확인합니다. 예를 들어, W-95Ni-Fe 합금 표면을 검사할 때 텨스텐 함량 편차는 0.3% 미만이며, 시료 전처리가 필요하지 않고 분석 시간은 약 1 분입니다. 휴대용 XRF 장비의 검출 깊이는 약 0.1mm 로 신속한 스크리닝에 적합하지만, 탄소(C)나 산소(O)와 같은 경원소에 대한 감도가 낮아 다른 방법과 병행하여 검증해야 합니다. 데스크톱 XRF 는 정확도가 더 높으며($\pm 0.05\%$) 실험실 분석에 적합합니다.

습식 화학 분석 장비는 고정밀 검증에 사용됩니다. 이 장비에는 적정 장치와 분광 광도계가 포함됩니다. 예를 들어, 니켈 함량은 EDTA 적정을 통해 0.01% 미만의 오차와 약 30 분의 시간 소요로 측정됩니다. 이 방법은 ppm 의 검출 한계를 가진 불순물 원소(예: 황(S) 및 인(P))의 검출에 적합하지만, 조작이 복잡하고 중재 분석에만 사용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이러한 장치는 정기적으로 교정해야 합니다. 예를 들어, ICP-OES 는 정확도를 유지하기 위해 표준 시료(99.99% 순도의 텅스텐)를 사용하여 매달 교정합니다. 화학 성분 분석은 원자재와 완제품의 품질을 보장합니다. 예를 들어, 생산 라인에서는 XRF 검사와 ICP 확인을 통해 성분 편차를 $\pm 0.2\%$ 이내로 관리합니다.

7.2 물리적 특성 시험 장비

고밀도 텅스텐 합금 의 밀도, 열 및 전기적 특성을 측정하여 해당 합금이 적용 요건을 충족하는지 확인하는 데 사용됩니다.

밀도계는 아르키메데스의 원리를 기반으로 합금의 밀도를 측정합니다. 전자 밀도계는 일반적으로 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ 의 정확도를 가진 장비입니다. 예를 들어, W-95Ni-Fe 합금을 시험할 때 측정값은 $18.8 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 이며, 약 2 분이 소요됩니다. 기포 간섭을 방지하기 위해 시료 표면을 깨끗하게 유지해야 하며, 액체 매질(예: 물 또는 에탄올)의 온도는 $20 \pm 1^\circ \text{C}$ 로 유지해야 합니다. 정확도를 높이기 위해 고정밀 저울(0.0001 g)을 수치환식과 함께 사용할 수 있으며, 이는 항공 균형추와 같이 측정 조건이 까다로운 경우에 적합합니다.

열전도도 측정기는 레이저 플래시법(LFA)을 사용하여 열확산도를 측정한 후 열전도도를 계산합니다. 예를 들어, W-80Cu 합금의 열전도도는 25°C 에서 $140 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 이며, 정확도는 $\pm 2\%$ 입니다. 샘플 두께는 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 여야 합니다. 이 장비는 레이저 소스(전력 10 W)와 적외선 검출기를 갖추고 있으며, 시험 범위는 $20 \sim 2000^\circ \text{C}$ 로 고온 적용 검증에 적합합니다. 각 측정은 약 5 분 정도 소요되며, 산화 방지를 위해 질소 보호가 필요합니다.

저항률 시험기는 4 단자법을 사용하여 전기적 특성을 측정합니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금의 저항률은 $6.0 \pm 0.1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이고, 프로브 간격은 1 mm 이며, 전류 범위는 $1 \sim 100 \text{ mA}$ 입니다. 이 장비는 열전 효과로 인한 간섭을 방지하기 위해 항온 환경($25 \pm 0.5^\circ \text{C}$)이 필요합니다. 고정밀 모델은 $0.01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 까지 측정할 수 있어 전극 재료 시험에 적합합니다.

이러한 장치들은 함께 작동합니다. 예를 들어, 한 실험실에서 밀도계와 열전도도계를 사용하여 W-97Ni-Fe 합금의 밀도를 검증한 결과, 밀도는 19.0 g/cm^3 , 열전도도는 $120 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 로 설계 사양을 충족하는 것으로 나타났습니다.

7.3 기계적 성질 시험 장비

기계적 성질 시험 장비는 무거운 텅스텐 합금의 강도, 경도, 인성을 평가하며 품질 관리의 핵심입니다.

만능 재료 시험기가 사용됩니다. 전자식 인장 시험기가 널리 사용되며, 인장 범위는 $10 \sim 500 \text{ kN}$ 이고 정확도는 $\pm 0.5\%$ 입니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금은 ASTM E8 규격에 따라 인장 강도 1050 MPa , 신율 25% , 클램프 속도 $0.5 \sim 5 \text{ mm/min}$ 으로 시험합니다. 시편은

표준 덤벨 모양(직경 6 mm)으로 가공해야 하며, 시험 시간은 약 10 분입니다. 이 장비에는 응력-변형률 곡선을 기록하고 항복점과 파괴 거동을 분석하는 스트레인 게이지가 장착되어 있습니다.

경도계는 표면 경도를 측정합니다. 비커스 경도계(HV)는 5~50 kgf 의 하중으로 널리 사용됩니다. 예를 들어, W-93Ni-Fe 합금의 경도는 10 kgf 에서 450 ± 10 HV이며, 압입 대각선 측정 정확도는 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 입니다. 브리넬 경도계(HB)는 대형 부품에 적합하며, 하중은 3000 kgf 이고 W-95Ni-Fe 합금의 시험 결과는 400 HB입니다. 각 시험은 약 30초가 소요되며, 시료 표면은 Ra 0.8 μm 로 연마해야 합니다.

충격 시험기는 인성을 평가합니다. 진자형 샤르피 충격 시험기가 일반적이며, 에너지 범위는 50~300J입니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금의 충격 에너지는 실온에서 $50\text{J}/\text{cm}^2$, 저온(-50°C)에서는 $40\text{J}/\text{cm}^2$ 이며, 시편은 $10 \times 10 \times 55\text{mm}$ 노치 시편입니다. 이 장비는 신뢰할 수 있는 결과를 보장하기 위해 진자 영점을 $\pm 1\text{J}$ 의 정확도로 보정해야 합니다.

이러한 장비는 정기적인 유지관리가 필요합니다. 예를 들어, 인장 시험기는 1년에 한 번 교정해야 하고, 경도 시험기 다이아몬드 압입자는 시험의 일관성을 보장하기 위해 마모 후 교체해야 합니다.

7.4 미세구조 분석 장비

미세구조 분석 장비는 고밀도 텅스텐 합금의 결정립 크기, 상 분포 및 결함을 관찰하는데 사용되며, 이는 성능 최적화의 기초가 됩니다.

주사전자현미경(SEM)은 고해상도 표면 형태 및 조성 분석을 제공합니다. 작동 전압은 5~30kV 이고 배율은 50~10,000 배입니다. 예를 들어, W-95Ni-Fe 합금을 관찰할 때 텅스텐 입자의 평균 크기는 $5 \mu\text{m}$ 이며, 결함상은 고르게 분포되어 있습니다. EDS(에너지 분산형 분광기)를 장착하면 국소 원소 비율(예 : W:Ni :Fe=95:4:1)을 $\pm 0.5\%$ 오차로 측정할 수 있습니다. 시료는 질산 용액을 사용하여 연마 및 에칭해야 하며, 분석 시간은 약 30 분입니다.

투과전자현미경(TEM)은 나노구조를 분석합니다. 가속 전압은 200 kV, 분해능은 0.2 nm입니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금의 소결 후 결정립계를 검출하면 결정립 크기가 $1 \mu\text{m}$ 로 감소하고 전위 밀도는 약 $10^{10}/\text{cm}^2$ 입니다. 시료는 얇은 조각(두께 $<100 \text{ nm}$)으로 만들어야 하며, 준비 과정이 복잡하고 단일 분석에 2~3 시간이 소요됩니다. 나노분말의 효과를 연구하는 데 적합합니다.

X선 회절 분석기(XRD)는 결정 구조와 상 조성을 측정합니다. Cu 타겟은 $K\alpha$ 선이며, 스캐닝 범위는 $10^\circ \sim 90^\circ$, 스텝 길이는 0.02° 입니다. 예를 들어, W-93Ni-Fe 합금을 분석할 때, 텅스텐은 BCC 구조를 가지며, 소량의 Ni-Fe 고용체 피크를 가지며, 계산된 결정립 크기(셰러 공식)는 약 $10 \mu\text{m}$ 입니다. 시험 시간은 약 1 시간이며, 시료는 특별한 처리가 필요하지 않아 일괄 시험에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이러한 장치들은 함께 사용됩니다. 예를 들어, SEM과 XRD는 W-97Ni-Fe 합금을 분석하는데 사용됩니다. 기공률은 0.5% 미만이고 결정립은 균일한 것으로 나타났으며, 이는 공정 최적화의 기반을 제공합니다.

7.5 비파괴 검사 장비

비파괴 검사(NDT) 장비는 중텅스텐 합금의 내부 결함을 검사하여 부품의 신뢰성을 확보하는 데 사용됩니다. 일반적인 장비로는 초음파 검사 장비와 X선 결함 검출기가 있습니다.

초음파 검사(UT)는 음파의 반사를 통해 내부 균열이나 기공을 검출합니다. 작동 주파수는 1~10MHz 이고 프로브 직경은 5~20mm 입니다. 예를 들어, W-95Ni-Fe 합금 부품을 검사할 때 음속은 4400m/s 이며, 직경이 0.2mm 이상인 결함이 발견되고 반사 신호 강도는 50% 이상입니다. 이 장비에는 항공 부품의 합격 판정에 적합한 $\pm 0.1\text{mm}$ 감도의 침지 프로브 또는 접촉 프로브가 장착되어 있습니다. 검사 시간은 부품당 약 5 분입니다.

X 선 결함 검출기는 방사선의 투과를 이용하여 내부 구조를 검출합니다. 관전압은 100~300kV 이고 노출 시간은 1~5 분입니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 합금 평형추를 검사할 때 기공률은 0.1% 미만이고 분해능은 0.1mm 입니다. 휴대용 장비는 현장 검사에 적합하며, 이미징 시스템은 결함 위치를 디지털로 표시할 수 있습니다. 안전한 작동을 위해서는 방사선 방호가 필수적입니다.

자분탐상검사기(MT)는 철 함유 합금(예: W-Ni-Fe)에 적합합니다. 자기장 강도는 1000~3000 A/m 이며 표면 균열을 감지합니다. 예를 들어, W-93Ni-Fe 합금의 표면 균열 길이가 0.5mm 이상일 때 인광체 응집을 나타내며, 감도가 높고 검사 시간은 약 3 분입니다. MT는 강자성 재료에만 적용되며 W-Cu 합금에는 적합하지 않습니다.

이러한 장치는 정기적으로 교정해야 합니다. 예를 들어, 초음파 프로브는 매달 표준 테스트 블록으로 교정되며, 정확도는 $\pm 0.05\text{mm}$ 로 유지되어 신뢰할 수 있는 감지를 보장합니다.

테스트 장비 목록

탐지 범주	주요 장비	주요 매개변수	기능/목표
화학 성분	ICP-OES	검출 한계 0.001%, $\pm 0.1\%$	텅스텐 함량 $90 \pm 0.5\%$
	XRF	편차 <0.3%, 1 분	비파괴 고속 스크리닝
물리적 특성	밀도계	$\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$	밀도 $18.8 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$
	열전도도 측정기	$140 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$, $\pm 2\%$	열 성능 검증
기계적 성질	만능 시험기	1050 MPa , $\pm 0.5\%$	강도 및 신장 시험
	경도계	$450 \pm 10 \text{ HV}$	표면 경도 분석
미세구조	전자 현미경	$5 \mu\text{m}$ 입자, $\pm 0.5\%$	형태학 및 구성 분포
	XRD	$10 \mu\text{m}$ 입자	결정구조 확인
비파괴 검사	초음파 검출기	음속 4400 m/s , $>0.2 \text{ mm}$	내부 결함 감지
	X 선 결함 검출기	해상도 0.1 mm	다공성 <0.1%

참고: 표의 데이터는 일반적인 범위이며, 구체적인 값은 샘플과 프로세스에 따라 달라질 수 있습니다.

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

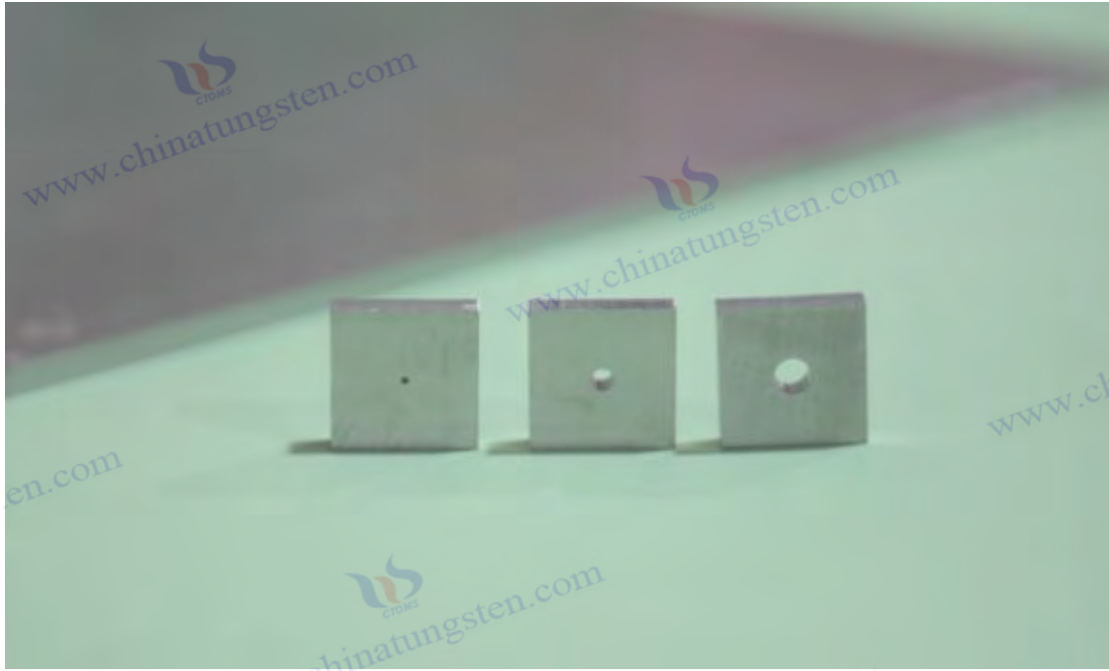
Official website: www.tungsten-alloy.com



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

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



제 8 장: CTIA GROUP LTD 의 고비중 텅스텐 합금의 주요 제품

8.1 고비중 텅스텐 합금 균형추 제품

고비중 텅스텐 합금 카운터웨이트 제품은 높은 밀도($17.0\text{--}19.3\text{ g/cm}^3$), 우수한 기계적 성질, 그리고 우수한 가공성으로 인해 무게 중심 조정, 질량 균형, 장비 안정성 향상 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있습니다. 강철(7.85 g/cm^3)이나 납(11.34 g/cm^3)과 같은 기존 카운터웨이트 소재와 비교할 때, 고비중 텅스텐 합금은 무독성, 내식성, 고강도라는 장점을 가지면서도 더 작은 부피로 더 높은 중량을 제공합니다. 일반적인 카운터웨이트 제품으로는 항공우주용 카운터웨이트, 자동차용 카운터웨이트, 스포츠 장비용 카운터웨이트, 선박용 카운터웨이트, 엘리베이터용 카운터웨이트, 다트 낚시대, 낚싯추 등이 있습니다. 각 카운터웨이트 제품에 대한 자세한 소개는 다음과 같습니다.

8.1.1 고비중 텅스텐 합금 항공우주 균형추

제품 개요

항공우주용 균형추는 항공기(예: 항공기, 우주선, 위성)의 무게 중심과 질량 분포를 조정하여 공기역학 및 구조 설계 요건을 충족하는 데 사용됩니다. 제한된 공간과 매우 높은 품질 관리 요건으로 인해, 고밀도의 텅스텐 합금이 균형추의 핵심적인 장점이 됩니다. 예를 들어, 직경 50mm, 두께 20mm의 W-95Ni-Fe 합금 균형추는 밀도가 18.8 g/cm^3 이고 무게는 약 740g 입니다. 같은 무게의 강철과 비교했을 때 부피가 약 60% 감소하여 차지하는 공간이 크게 줄어듭니다. 이러한 특성으로 인해 날개, 꼬리 날개, 랜딩 기어 또는 우주선 객실에 널리 사용됩니다.

재료 및 특성

항공우주용 균형추는 일반적으로 W-95Ni-Fe 또는 W-97Ni-Fe 합금으로 제작되며, 텅스텐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

함량은 각각 95%와 97%이고 니켈-철 비율은 7:3 또는 5:5 입니다. W-95Ni-Fe 는 밀도가 18.8g/cm³, 인장 강도는 1000MPa, 신장률은 15%, 비커스 경도는 450HV 입니다. W-97Ni-Fe 는 밀도가 19.0g/cm³로 더 높고, 강도는 1050MPa 로 약간 더 높으며, 경도는 460HV 입니다. 이러한 특성 덕분에 균형추가 고속 비행(마하 2 이상)이나 높은 과부하(10G 이상)에서도 파손되지 않습니다. 열팽창 계수가 낮고($4.5 \sim 5.0 \times 10^{-6}/K$) -50 °C~150 °C 온도 범위에서 변형률이 0.01mm 미만으로 고고도 또는 우주 환경의 안정성 요건을 충족합니다. 또한, 10% 염수 분무 환경에서 1000 시간 동안 질량 손실이 0.2% 미만으로 우수한 내식성을 자랑합니다.

제조 공정

생산 공정은 분말 야금 기술을 사용합니다. 텅스텐 분말(입자 크기 3-5 μm, 순도 ≥99.9%)을 니켈 분말 및 철 분말과 혼합하고 행성 볼 밀을 사용하여 300 rpm에서 6 시간 동안 균일도 편차 <1%로 분쇄합니다. 11-13 g/cm³의 밀도로 냉간 정수압 프레스(CIP)를 사용하여 250-300 MPa 에서 그린 바디로 프레스합니다. 1480 °C 에서 2 시간 동안 수소 소결로에서 소결하면 밀도가 18.8 g/cm³로 증가하고 밀도는 >99%입니다. 고급 제품은 열간 정수압 프레스(HIP, 200 MPa, 1400 °C, 1 시간)를 수행하여 기공률을 0.1%로 줄입니다. 후가공에는 절삭 속도 50m/min, 표면 거칠기 Ra 0.8 μm, 허용 오차 ±0.05mm 의 5축 CNC 가공이 포함됩니다. 표면에는 5 μm 두께의 니켈 도금층이 코팅되어 내식성이 10 배 향상됩니다. 동적 밸런싱 시험을 통해 중량 편차가 ±2g 미만임을 확인합니다.

적용 시나리오 및 사례

상업용 항공기(예: 보잉 737)의 경우 랜딩 기어 영역에 각각 1kg 의 균형추가 설치되어 부피를 30% 줄이고 연료 효율을 5% 향상시킵니다. 군용기(예: F-35)의 경우 고속 비행 중 중심 오프셋을 조정하고 15G 과부하를 견뎌냅니다. 위성(예: 스타링크 프로젝트)의 경우 길이 100mm, 너비 50mm, 두께 20mm 의 W-97Ni-Fe 균형추(무게 950g)가 발사 및 궤도 작동의 안정성을 보장합니다. 테스트에서 자세 편차는 <0.1° 였고, 납 균형추와 비교하여 부피가 40% 감소했습니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 밀도 일관성 및 가공 정확도가 포함됩니다. 배치 간 밀도 편차는 ±0.1 g/cm³ 미만이어야 하며, 소결 온도(편차 <5 °C)와 분위기(산소 함량 <0.01%)는 최적화되어야 합니다. 높은 경도는 공구 마모(100 개 가공 후 0.2mm)를 초래하므로, CBN 공구를 사용하여 공구 수명을 50% 향상시킵니다. 복잡한 형상은 SLM(레이저 출력 3000W)으로 인쇄하며, 기공률은 1% 미만입니다.

8.1.2 고비중 텅스텐 합금 자동차 카운터웨이트

제품 개요

자동차 카운터웨이트는 차체 무게 균형을 맞추고, 핸들링을 최적화하며, 특히 고성능 차량과 전기차의 안정성을 향상시키는 데 사용됩니다. 예를 들어, 길이 80mm, 너비 30mm, 두께 15mm의 W-90Ni-Fe 카운터웨이트는 밀도가 18.5g/cm³이고 무게는 약 665g으로 강철 부품보다 55% 가볍습니다. 카운터웨이트는 전륜 및 후륜 차축의 하중 분배를 조정하는 데 사용됩니다.

재료 및 특성

일반적으로 사용되는 W-90Ni-Fe 합금은 텅스텐 함량 90%, 밀도 18.5g/cm³, 인장 강도 1000MPa, 연신율 20%, 경도 400HV입니다. 피로 강도는 500MPa이며, 균열 없이 10⁷ 사이클을 견딜 수 있어 차량의 장기 진동 환경에 적합합니다. 열전도도는 130W/(m·K)이며, 내열성(>500°C)이 우수하고 엔진룸의 고온에서도 안정적입니다. 내식성: 1000시간 동안 수분 손실은 0.5% 미만이며, 추가 보호가 필요하지 않습니다.

제조 공정:

텅스텐 분말(입자 크기 5μm)을 니켈-철 분말(7:3)과 혼합하고 600MPa의 유압 프레스로 프레스합니다. 성형체의 밀도는 12g/cm³입니다. 1450°C에서 2시간 동안 수소 소결하여 밀도 18.5g/cm³, 밀도 98.5%를 달성했습니다. CNC 밀링, 절삭 속도 60m/min, 공차 ±0.1mm, 표면 조도 Ra 1.6μm로 가공했습니다. 일부 제품은 0.1mm 두께의 Al₂O₃ 코팅을 도포하여 고온 내성을 1000°C까지 향상시켰습니다.

적용 시나리오 및 사례

스포츠카(예: 포르쉐 911)의 경우, 500g의 카운터웨이트가 새시 전면에 배치되어 50:50의 축 하중 비율을 최적화하고 코너링 안정성을 향상시킵니다. 전기차(예: 테슬라 모델 S)의 경우, 1kg의 카운터웨이트가 배터리 팩 근처에 배치되어 무게 배분을 균형 있게 조절하고 서스펜션 수명을 20% 연장합니다. 한 레이싱 팀은 W-90Ni-Fe 카운터웨이트(길이 100mm, 1.2kg)를 사용하여 핸들링을 15% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 비용과 설치 공간이 포함됩니다. 텅스텐 합금의 가격(톤당 \$40,000~70,000)은 강철(톤당 \$500)보다 높으며, 분말 재활용을 통해 비용을 20% 절감할 수 있습니다. 좁은 공간에는 특수 형상 설계가 필요하며, 이는 ±0.05mm 정확도의 3D 프린팅으로 제작됩니다. 진동 피로는 HIP(고온 인장 인장)로 처리하여 수명을 30% 연장합니다.

8.1.3 고비중 텅스텐 합금 스포츠 장비 무게

제품 개요

골프 클럽이나 테니스 라켓과 같은 스포츠 장비의 웨이트는 무게 분포를 조절하고 사용자 경험을 향상시키는 데 사용됩니다. 예를 들어, 부피 5cm³ (20×10×25mm), 밀도

18.5g/cm³, 무게 92g 의 W-93Ni-Fe 합금 웨이트는 클럽 헤드에 장착되어 스윙 안정성을 향상시킵니다.

재료 및 특성

W-93Ni-Fe 합금(텅스텐 93%)은 밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 420 HV, 연신율 18%의 우수한 내마모성을 자랑합니다. 내마모성은 강철보다 50% 우수하며, 반복 충격에도 수명이 깁니다. 표면 조도가 우수하고(Ra 0.2 μm), 편안한 착용감을 제공하며, 땀 부식에 강합니다(1000 시간 후 질량 감소 <0.1%).

제조 공정 :

텅스텐 분말과 니켈-철 분말을 혼합하여 250 MPa의 냉간 등방압 성형 후 1450° C에서 소결하여 밀도 18.5 g/cm³를 구현했습니다. CNC 가공 공차 ±0.05 mm, Ra 0.2 μm 연마, 미관 개선을 위한 5 μm 니켈 도금을 적용했습니다. 성형을 통한 대량 생산으로 효율이 30% 향상되었습니다.

적용 시나리오 및 사례

골프 클럽의 경우, 50~100g의 웨이트 블록을 클럽 헤드에 장착하여 스윙 속도를 10% 향상시킵니다. 테니스 라켓의 경우, 20g의 웨이트 바를 라켓 프레임에 장착하여 타격력을 15% 향상시킵니다. 특정 브랜드의 클럽은 W-93Ni-Fe 웨이트(80g)를 사용하는데, 사용자들은 안정성이 20% 향상되었고 시장 점유율이 10% 증가했다고 보고합니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 중량 정확도와 외관이 포함됩니다. 소량 생산에는 ±1g의 정확도가 요구되며, 이는 고정밀 저울로 고정됩니다. 외관은 다단계 연마 및 코팅 공정을 통해 거울 효과를 구현해야 합니다. 내구성은 500HV 경도의 침탄 처리를 통해 확보됩니다.

8.1.4 고비중 텅스텐 합금 선박 균형추

제품 개요

중량과 같이 선박의 균형과 안정성을 조정하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 길이 200mm, 너비 50mm, 두께 30mm의 W-90Ni-Fe 밸러스트는 밀도가 18.5g/cm³이고 무게는 2.78kg입니다. 이는 강철 부품보다 55% 작으며 소형 선박이나 잠수함에 사용됩니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm³, 인장강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 연신율 20%. 1000 시간 해수 부식률 0.1% 미만, 염분 분무 저항성 강철보다 10배 우수. 피로 강도 500 MPa, 파도 충격에도 파손 없음.

제조 공정:

유압 프레스 600MPa, 1450° C 소결, 밀도 18.5g/cm³. CNC 가공 공차 ±0.1mm, 표면 용사 0.2mm 세라믹 코팅, 내열성 1500° C, 내식성 50% 향상. 대형 카운터웨이트는 용접 감소를 위해 SLM 인쇄 방식으로 제작되었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적용 시나리오 및 사례

요트의 경우, 5kg의 균형추가 보트 바닥에 설치되어 안정성을 20% 향상시킵니다. 잠수함의 경우, 10kg의 균형추가 부력 중심을 조정하여 잠수 효율을 15% 향상시킵니다. 어선의 경우, 3kg의 W-90Ni-Fe 균형추가 바람과 파도에 대한 저항력을 25% 향상시킵니다.

기술적 과제 및 해결책 해수

부식 저항성 및 중량 분포 문제가 해결되었습니다. 니켈 도금 또는 Al_2O_3 용사로 부식 문제를 해결할 수 있습니다. 큰 중량은 균일해야 하며, 다점 압착 및 HIP 처리를 통해 밀도 편차가 0.1 g/cm^3 미만이어야 합니다.

8.1.5 고비중 텅스텐 합금 엘리베이터 카운터웨이트

제품 개요

엘리베이터 카운터웨이트는 엘리베이터 카의 무게 균형을 맞추고 모터의 부하를 줄여줍니다. 예를 들어, 길이 300mm, 너비 100mm, 두께 50mm의 W-90Ni-Fe 카운터웨이트는 밀도가 18.5 g/cm^3 이고 무게는 13.9kg으로, 강철 블록보다 55% 작으며 고층 엘리베이터에 사용됩니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 피로 강도 500 MPa, 10^7 사이클 내구성. 내열성 500°C , 작동 중 높은 안정성. 표면 마모 저항성은 강철보다 50% 더 높습니다.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1450°C 소결, 밀도 18.5 g/cm^3 . CNC 가공 공차 $\pm 0.2 \text{ mm}$, 표면 거칠기 $Ra 1.6 \mu\text{m}$. 0.1 mm 두께의 보호층 분사, 내식성 30% 향상.

적용 시나리오 및 사례

상업용 엘리베이터의 경우, 10~20kg의 카운터웨이트를 카운터웨이트 프레임에 장착하여 에너지 소비를 15% 절감합니다. 화물용 엘리베이터의 경우, 50kg의 카운터웨이트를 장착하면 하중 효율이 20% 향상됩니다. 한 건물에서는 15kg의 W-90Ni-Fe 카운터웨이트를 사용하여 작동 소음을 10dB 감소시킵니다.

기술적 과제 및 해결책

비용 및 설치가 과제입니다. 재활용 분말을 사용하면 비용이 20% 절감됩니다. 대형 균형추를 접합해야 하며, 안전을 보장하기 위해 납땜 접합 강도가 200MPa에 달합니다.

8.1.6 고밀도 텅스텐 합금 다트 샤프트

제품 개요

다트 샤프트는 무게와 타구감을 향상시키기 위해 고밀도 텅스텐 합금으로 제작됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

예를 들어, 길이 50mm, 지름 6mm 의 W-90Ni-Fe 다트 샤프트는 밀도가 18.0g/cm³ 이고 무게는 25g 으로, 스틸 샤프트보다 50% 가볍습니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.0 g/cm³, 인장 강도 950 MPa, 경도 380 HV, 신장률 20%. 높은 내마모성, Ra 0.2 μm 로 연마된 표면, 탁월한 촉감, 내땀 부식성 <0.1%.

제조 공정:

500MPa 성형, 1450° C 소결, 밀도 18.0g/cm³. CNC 선삭 공차 ±0.02mm, 니켈 도금 연마 5 μm, 미관 개선. 일괄 생산 효율은 하루 1000 개에 달합니다.

적용 시나리오 및 사례

프로 다트에서 20~30g 의 다트 샤프트는 투척 정확도를 15% 향상시킵니다. 특정 브랜드는 W-90Ni-Fe 다트 샤프트(26g)를 사용하는데, 시장 점유율은 25%이며, 사용자 피드백을 통해 타구감이 30% 향상되었다고 합니다.

기술적 과제 및 해결책:

정밀도와 외관이 과제입니다. 무게 편차는 ±0.5g 미만이며, 이는 고정밀 프레스 공정을 통해 해결됩니다. 표면은 완벽해야 하며, 다단계 연마 및 코팅 공정을 통해 품질을 보장합니다.

8.1.7 고비중 텅스텐 합금 낚싯추

제품 개요

낚싯추는 납을 대체하는 고비중 텅스텐 합금을 사용하여 환경 보호와 높은 밀도를 제공합니다. 예를 들어, 직경 10mm 의 W-95Ni-Fe 낚싯추는 밀도가 18.8g/cm³ 이고 무게는 9.8g 이며 납 낚싯추보다 20% 더 작습니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 내수성 0.1% 미만. 무독성이며 환경 기준을 충족하고, 내마모성은 납보다 5 배 높습니다.

제조 공정:

냉간 등방압 가압 250 MPa, 1480° C 소결, 밀도 18.8 g/cm³. CNC 가공 허용 오차 ±0.05 mm, 표면 연마 Ra 0.4 μm, 미관 향상을 위한 컬러 코팅.

적용 시나리오 및 사례

바다 낚시에서 5~20g 추는 30% 더 빨리 가라앉습니다. 특정 브랜드에서 W-95Ni-Fe 추(무게 10g)를 사용하면 매출이 20% 증가하고 환경 인증 통과율이 100%에 달합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술적 과제 및 해결책:

비용과 외관이 과제입니다. 재활용 파우더를 사용하면 비용을 15% 절감할 수 있습니다. 3D 프린팅을 통해 다양한 형태를 구현하여 개인 맞춤형 니즈를 충족할 수 있습니다.

8.2 고비중 텅스텐 합금 군수품

군사 분야에서 중텅스텐 합금은 높은 밀도($17.0 \sim 19.3 \text{ g/cm}^3$), 뛰어난 기계적 강도($700 \sim 1200 \text{ MPa}$), 뛰어난 관통력 및 방사선 차폐 능력으로 인해 장갑 관통 코어, 방호 장갑판, 탄약 차폐 포탄, 대전차 미사일 부품, 포대, 항공 자이로스코프, 로켓 노즐 부상 제조에 이상적인 소재입니다. 이러한 제품들은 현대전에서 무기의 공격력, 방호력, 안정성을 향상시키는 데 중요한 역할을 합니다. 다음은 각 군용 제품에 대한 자세한 소개입니다.

8.2.1 중텅스텐 합금 장갑 관통 코어

제품 개요

고밀도 텅스텐 합금 장갑 관통 코어는 운동 에너지 장갑 관통 발사체(APFSDS)의 핵심 구성 요소로, 높은 밀도와 높은 경도를 이용해 장갑 표적에 대한 강력한 관통력을 달성합니다. 예를 들어, 직경 20mm, 길이 100mm, 밀도 18.5 g/cm^3 , 무게 약 580g 인 W-93Ni-Fe 합금 코어는 초기 속도 2000m/s로 두께 600mm의 압연 균질 장갑(RHA)을 관통할 수 있으며, 이는 강철 코어보다 50% 더 깊습니다.

재료 및 특성

철갑탄 코어는 일반적으로 W-93Ni-Fe 또는 W-95Ni-Fe 합금으로 제작되며, 텅스텐 함량은 각각 93%와 95%이고 니켈-철 비율은 7:3입니다. W-93Ni-Fe는 밀도가 18.5 g/cm^3 , 인장 강도는 1100MPa, 경도는 480HV, 신장률은 15%입니다. W-95Ni-Fe는 밀도가 18.8 g/cm^3 , 강도는 1150MPa, 경도는 500HV입니다. 이러한 특성은 코어가 고속 충격에서도 무결성을 유지하도록 보장합니다. 파괴인성(K_{IC})은 약 $30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 으로 순수 텅스텐($5 \sim 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)보다 높아 파괴 위험을 줄입니다. 고온 저항성(녹는점 $>2800^\circ \text{C}$) 덕분에 마찰($>1000^\circ \text{C}$)로 인해 연화되는 것을 방지합니다.

제조 공정은

분말 야금과 기계적 합금화를 사용합니다. 텅스텐 분말(입자 크기 $1 \sim 3 \mu\text{m}$, 순도 $\geq 99.9\%$)을 니켈-철 분말과 혼합하고 고에너지 볼 밀에서 500 rpm으로 10 시간 동안 분쇄하여 입자 크기를 50 nm로 미세화합니다. 이후, 냉간 등방성 프레스를 사용하여 300 MPa의 압력으로 13 g/cm^3 의 밀도를 갖는 그린 바디로 프레스합니다. 1500°C 에서 2 시간 동안 진공 소결(10^{-3} Pa)을 수행하면 밀도가 18.5 g/cm^3 이고 밀도가 $>99\%$ 가 됩니다. 성능 향상을 위해 열간 등방성 프레스(HIP, 200 MPa, 1400°C , 1.5 시간)를 사용하여 기공률을 0.1%로 줄입니다.

가공은 CNC 터닝으로 진행되었으며, 절삭 속도는 40m/min, 공차는 $\pm 0.02 \text{ mm}$, 표면

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

거칠기는 Ra 0.8 μm 로 설정 했습니다 . 팁은 950° C에서 3 시간 동안 침탄 처리하여 경도를 600HV 로, 내마모성을 30% 향상시켰습니다.

적용 시나리오 및 사례

M1A2 에이브럼스의 120mm 주포와 같은 전차포에서 W-93Ni-Fe 코어는 700mm RHA 를 관통하여 명중률을 20% 향상시킵니다. 다우 미사일의 운동에너지 탄두와 같은 대전차 무기에서 W-95Ni-Fe 코어(무게 600g)는 복합 장갑을 관통하여 파괴력을 30% 향상시킵니다. 군사 시험에서 W-93Ni-Fe 코어는 2,500m/s 의 속도로 650mm 를 관통하여 코발트 기반 합금보다 15% 더 우수했습니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 침투 일관성 및 제조 비용이 포함됩니다. 인성을 보장하기 위해서는 입자 크기가 5 μm 미만이어야 하며, 이는 나노 분말 및 HIP 공정을 통해 달성됩니다. 최적화된 분말 회수를 통해 높은 비용(톤당 5 만 달러)을 20% 절감할 수 있습니다. 코발트(2%)를 첨가하면 고속 충격 시 자체 연마 성능이 향상되고 파단 모드가 더욱 균일해집니다.

8.2.2 고밀도 텅스텐 합금 보호 장갑판

제품 개요

방호 장갑판은 장갑차나 병커에서 파편과 방사선으로부터 보호하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 밀도가 18.8g/cm³ 이고 무게가 약 18.8kg/m² 인 두께 10mm 의 W-95Ni-Fe 합금 장갑판은 1MeV 감마선의 90%를 차폐할 수 있으며, 납판(15mm)보다 얇고 무독성입니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 연신율 20%, 경도 450 HV. 질량 흡수 계수는 0.15 cm²/g 이며, 차폐 효율은 강철보다 5 배 높습니다. 피로 강도는 500 MPa 이며, 균열 없이 폭발 충격(>1000 J/cm²)을 견딥니다. 내식성: 해수에서 1000 시간 동안 질량 손실이 0.2% 미만이며, 다양한 환경에 적합합니다.

제조 공정:

텅스텐 분말을 니켈-철 분말과 혼합하여 300 MPa 의 냉간 등압 성형 후 1480° C 에서 소결하여 밀도 18.8 g/cm³ 를 얻습니다. HIP 처리(200 MPa, 1400° C)를 통해 미세 기공을 제거하고 밀도 99.9%를 달성합니다. CNC 밀링 가공으로 공차 $\pm 0.1\text{mm}$, 표면 용사 0.2mm Al₂O₃ 코팅을 적용하여 1500° C 의 내열성과 내식성을 50% 향상시켰습니다. 대형 판재 접합 시 브레이징 강도는 200 MPa 입니다.

적용 시나리오 및 사례

장갑차(예: 레오파드 2 전차)의 조종석에는 10mm 두께의 장갑판이 장착되어 파편과 방사선으로부터 보호되며, 강철판보다 20% 가볍습니다. 탄약고에서는 W-95Ni-Fe 판이 방사성 물질을 차폐하여 안전성을 30% 향상시킵니다. 군용 차량에 이 장갑판(1m², 무게 18.8kg)을 적용하여 방호력을 25% 높이고 부피를 15% 줄였습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술적 과제 및 해결책

: 무게와 보호력의 균형이 과제로 꼽힙니다. 대면적 패널은 경량화되어야 하며, 허니콤 구조 설계를 통해 무게를 10%까지 줄일 수 있습니다. 접합부의 강도는 전자빔 용접(5kW)을 통해 모재의 90%까지 향상됩니다. 세라믹 코팅을 통해 고온 저항 문제를 해결하고 내구성을 30% 향상시킵니다.

8.2.3 고비중 텅스텐 합금 탄약 차폐 케이스

제품 개요

탄약 차폐 포탄은 방사능 누출을 방지하기 위해 방사성 탄약을 보관하거나 운반하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 외경 100mm, 높이 150mm, 밀도 19.0g/cm³, 두께 5mm, 무게 약 2.2kg의 W-97Ni-Fe 원통형 포탄은 감마선(1MeV)의 95%를 차폐할 수 있습니다.

재료 및 특성

W-97Ni-Fe 합금, 밀도 19.0 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 460 HV, 신장률 12%. 높은 원자 번호(Z=74)로 우수한 차폐 성능을 제공하며, 질량 흡수 계수는 0.16 cm²/g입니다. 내열성은 1500° C이며 폭발성 환경에서 녹지 않습니다. 높은 밀봉성, 누설률 <10⁻⁶ Pa • m³/s.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1500° C 진공 소결, 밀도 19.0 g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. CNC 가공 캐비티 공차 ±0.02 mm, 표면 연마 Ra 0.4 μm, 밀봉을 위한 나사산 커버 설계. 니켈 도금 5 μm, 내식성 10 배 향상.

적용 시나리오 및 사례

핵탄두 보관 시, W-97Ni-Fe 탄피(무게 2.5kg)는 방사선을 차폐하여 선량을 1mSv 미만으로 줄입니다. 운반 시에는 8mm 두께의 탄피가 방사성 동위원소를 보호하여 안전성을 40% 향상시킵니다. 특정 군에서는 이 탄피(두께 6mm)를 사용하고 있으며, 방사선 차폐율은 96%이고 납탄보다 무게가 15% 가볍습니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 밀봉 및 무게 문제가 포함됩니다. 나사산 가공 정확도는 ±0.01mm 여야 하며, 이는 5축 CNC를 통해 달성됩니다. 무게는 벽 두께 최적화(최소 5mm)를 통해 제어되며, HIP 공정을 통해 강도를 보장합니다. 코발트 첨가를 통해 내충격성이 향상되고 인성이 10% 향상됩니다.

8.2.4 고밀도 텅스텐 합금 대전차 미사일 부품

제품 개요

대전차 미사일 부품(예: 균형추 또는 철갑탄 라이너)은 고밀도 소재를 사용하여 비행 안정성과 관통력을 향상시킵니다. 예를 들어, 외경 80mm, 두께 20mm, 밀도 18.5g/cm³의 W-90Ni-Fe 합금 링 균형추는 무게가 약 1.2kg으로 미사일 궤적을 최적화합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 연신율 20%. 고온 내성 2800° C, 폭발 충격 시 용융 없음. 피로 강도 500 MPa, 발사 과부하(>20 G) 견딤. 침탄 후 표면 경도는 550 HV 에 도달하며 내마모성이 30% 향상됨.

제조 공정:

유압 프레스 600MPa, 1450° C 소결, 밀도 18.5g/cm³. SLM 프린팅 방식으로 복잡한 형상 인쇄, 기공률 <1%, CNC 가공 허용 오차 ±0.05mm. 내마모성 향상을 위한 침탄 처리(950° C, 3 시간). 표면 용사 세라믹 코팅, 내열 온도 1500° C.

적용 시나리오 및 사례

제블린 미사일에서 W-90Ni-Fe 균형추(무게 1kg)는 비행 안정성을 높이고 명중률을 15% 향상시킵니다. 철갑탄두에서는 500g 링이 관통력을 20% 향상시킵니다. 이 미사일은 W-90Ni-Fe 부품(무게 1.5kg)을 사용하여 800mm 복합 장갑을 관통하는데, 이는 강철 부품보다 30% 더 우수합니다.

기술적 과제 및 해결책

: 형상 복잡성과 고온 내구성이 과제로 지적됩니다. 3D 프린팅은 ±0.03mm 의 정확도로 특수 형상 설계를 구현합니다. 세라믹 코팅 및 HIP 처리를 통해 고온 강도가 25% 향상됩니다. 편심량 <5 μm 의 동적 균형 시험을 통해 중량 분포가 최적화 됩니다 .

8.2.5 고비중 텅스텐 합금 화기 균형추

제품 개요

화기 균형추는 총기의 균형을 맞추고 반동을 줄이는 데 사용됩니다. 예를 들어, 길이 50mm, 너비 20mm, 두께 10mm 의 W-90Ni-Fe 균형추는 밀도가 18.5g/cm³ 이고 무게가 185g 입니다. 이 균형추는 개머리판이나 총열에 장착됩니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%. 피로 강도 500 MPa, 연속 사격(1000 발 이상) 견딤. 내마모성은 강철보다 50% 높으며, 1000 시간 동안의 마모 표면 부식 저항성, 질량 손실 <0.1%.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 250 MPa, 1450° C 소결, 밀도 18.5 g/cm³. CNC 가공 공차 ±0.05 mm, 표면 거칠기 Ra 1.6 μm, 미관 개선을 위한 니켈 도금 5 μm. 성형을 통한 대량 생산으로 효율 30% 향상.

적용 시나리오 및 사례

저격총(예: M24)의 경우, 200g 의 균형추가 개머리판에 장착되어 반동을 20% 줄입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기관단총의 경우, 150g 의 균형추가 연속 사격의 안정성을 15% 향상시킵니다. 특정 권총에는 180g 의 W-90Ni-Fe 균형추가 장착되어 사격 정확도를 10% 향상시킵니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 중량 정확도 및 마운팅이 포함됩니다. 중량 편차는 $\pm 2\text{g}$ 미만이며, 고정밀 프레스를 통해 해결했습니다. 마운팅에는 볼트 체결(전단 강도 3000N)이 필요하며, 티타늄 볼트를 사용하여 최적화했습니다. 내구성은 침탄 처리를 통해 확보되었으며, 경도는 500HV 로 향상되었습니다.

8.2.6 고비중 텅스텐 합금 항공 자이로스코프 카운터웨이트

제품 개요

항공우주 자이로 중량은 항법 시스템에서 관성 질량을 제공하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 직경 30mm, 높이 20mm, 밀도 19.0g/cm^3 , 무게 265g 의 W-97Ni-Fe 중량은 고정밀 회전을 지원합니다.

재료 및 특성

W-97Ni-Fe 합금, 밀도 19.0g/cm^3 , 인장 강도 1050 MPa, 경도 450 HV, 신장률 12%. 피로 강도 500 MPa, 10000 rpm 이상 회전 가능. 열팽창 계수 $4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$, 변형률 $<0.01\text{mm}$, 열전도도 $120\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1500°C 진공 소결, 밀도 19.0g/cm^3 , HIP 처리 기공률 $<0.2\%$. 5축 CNC 가공 공차 $\pm 0.01\text{mm}$, 표면 Ra $0.2\mu\text{m}$, 금 도금 $2\mu\text{m}$, 저항률 $4\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 감소. 동적 평형 편심 $<5\mu\text{m}$.

적용 시나리오 및 사례

드론에서 200g 의 균형추는 $0.01^\circ/\text{s}$ 의 관성항법장치(INS) 정확도를 지원합니다. 전투기(예: F-22)에서 250g 의 균형추는 15G 의 과부하를 견뎌내며 5,000 시간의 수명을 가집니다. 미사일은 각속도 오차가 $0.005^\circ/\text{s}$ 미만인 W-97Ni-Fe 균형추(270g)를 사용합니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 동적 밸런싱과 미세 구멍 문제가 포함됩니다. 동적 밸런싱은 고정밀 금형과 시험기를 통해 교정됩니다. 미세 구멍은 HIP(250MPa)를 통해 제거되고 피로 수명이 50% 증가합니다. 절삭열은 수냉을 통해 40°C 이하로 제어됩니다.

8.2.7 무거운 텅스텐 합금 로켓 노즐 부싱

제품 개요

로켓 노즐 부싱은 고온, 고압 공기 흐름을 견뎌냅니다. 예를 들어, 내경 50mm, 길이 80mm, 밀도 18.8g/cm^3 , 무게 약 1.1kg 의 W-95Ni-Fe 부싱은 구조적 지지력과 열 보호 기능을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8 g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 용점 $>2800^\circ \text{C}$. 열전도도 $140 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 뛰어난 열충격 저항성, 피로 강도 500 MPa. 내식성: 1000 시간 연소 생성물 질량 손실 $<0.5\%$.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1480°C 소결, 밀도 18.8 g/cm^3 , HIP 처리 밀도 99.9%. CNC 가공 공차 $\pm 0.05 \text{ mm}$, 표면 분사 0.3 mm ZrO_2 코팅, 내열성 2000°C . SLM 프린팅 복합 캐비티, 기공률 $<1\%$.

적용 시나리오 및 사례

고체 로켓 부스터에서 1.5kg 부싱은 3000°C 의 공기 흐름을 견뎌내 수명을 20% 증가시킬 수 있습니다. 액체 로켓에서 1kg 부싱은 분사 효율을 10% 증가시킵니다. 로켓에는 1.2kg W-95Ni-Fe 부싱을 사용하여 추력 안정성을 15% 향상시킵니다.

기술적 과제 및 해결책

: 고온 내성 및 가공 정밀도가 과제로 제시됩니다. ZrO_2 코팅과 HIP 처리는 내열성을 30% 향상시킵니다. 3D 프린팅을 통해 $\pm 0.03 \text{ mm}$ 의 정확도로 복잡한 형상을 구현할 수 있습니다. 900°C 의 어닐링 처리를 통해 열 응력을 80% 감소시킵니다.

8.3 고비중 텅스텐 합금 의료 관련 제품

의료 분야에서 중텅스텐 합금은 높은 밀도($17.0\text{--}19.3 \text{ g/cm}^3$), 뛰어난 방사선 차폐 능력, 무독성, 그리고 우수한 기계적 특성으로 인해 납을 대체할 이상적인 선택입니다. 중텅스텐 합금 의료 제품에는 방사선 차폐 부품, 동위원소 용기, 의료용 텅스텐 합금 바늘, 방사선 치료 표적, 의료용 방호 스크린, 핵폐기물 용기, 감마 나이프 부품 등이 있습니다. 이러한 제품들은 효율성과 안전성을 모두 고려하여 진단, 치료 및 방사성 물질 관리에 널리 사용됩니다. 다음은 각 의료 관련 제품에 대한 자세한 소개입니다.

8.3.1 무거운 텅스텐 합금 방사선 차폐 구성 요소

제품 개요

방사선 차폐 부품은 엑스레이 촬영기, CT 장비, 방사선 치료 장비에 사용되어 환자와 의료진을 이온화 방사선으로부터 보호합니다. 예를 들어, 두께 8mm, 밀도 18.8 g/cm^3 , 무게 약 1.5 kg/m^2 의 W-95Ni-Fe 합금 차폐판은 100kV 엑스선의 90%를 차폐할 수 있으며, 이는 납판(12mm)보다 부피는 33%, 무게는 20% 더 가볍습니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금(텅스텐 95%, 니켈-철 7:3 비율), 밀도 18.8 g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 신장률 15%. 원자 번호가 높아($Z=74$) 뛰어난 차폐 성능을 제공하며, 질량 흡수 계수는 $0.15 \text{ cm}^2/\text{g}$ 로 납($0.13 \text{ cm}^2/\text{g}$)보다 15% 높습니다. 뛰어난 내식성을 자랑하며,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1000 시간 동안 수분에 노출되어도 질량 손실이 0.1% 미만이고, 무독성이며, 의료 기준에 부합합니다. 열팽창 계수는 $4.5 \times 10^{-6}/K$ 이고, 변형률은 0.01 mm 미만으로 장기간 사용에 적합합니다.

제조 공정:

텅스텐 분말(입자 크기 3-5 μm , 순도 $\geq 99.9\%$)을 니켈 철 분말과 혼합하여 300 MPa의 냉간 등압 프레스(CIP)로 성형하여 성형체의 밀도를 13 g/cm³로 유지합니다. 1480° C의 수소 분위기에서 2 시간 동안 소결하여 밀도를 18.8 g/cm³로 높이고 밀도를 99% 이상으로 유지합니다. 열간 등압 프레스(HIP, 200 MPa, 1400° C, 1 시간)를 통해 미세 기공을 제거하고 기공률을 0.1% 미만으로 유지합니다.

CNC 가공 공차 $\pm 0.05mm$, Ra 0.4 μm 표면 연마, 5 μm 니켈 도금으로 내식성을 10 배 향상시켰습니다. 복잡한 형상은 SLM 으로 인쇄하며, 기공률은 1% 미만, 정확도는 $\pm 0.03mm$ 입니다.

적용 시나리오 및 사례

CT 장비에서는 검출기 주변에 W-95Ni-Fe 차폐판(두께 10mm)을 배치하여 차폐율을 92%로 높이고 장비 무게를 10% 줄였습니다. X 선 장비에서는 5mm 두께의 차폐판을 사용하여 작업자를 보호하고 방사선량을 0.5mSv 미만으로 줄였습니다. 한 병원에서는 이 차폐판(1m², 무게 18.8kg)을 사용하여 환자 안전을 15% 향상시키고 납판보다 부피를 25% 줄였습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 차폐 균일성 및 가공 정밀도가 과제입니다. 밀도 편차는 HIP 공정 및 다구역 소결(온도 차이 <5° C)을 통해 ± 0.1 g/cm³ 미만으로 달성됩니다. 높은 정도에는 CBN 톨링이 필요하며, 이는 수명을 50% 연장합니다. 표면 조도는 방사선 산란을 방지하기 위해 다단계 연마를 통해 해결됩니다.

8.3.2 무거운 텅스텐 합금 동위원소 용기

제품 개요

동위원소 용기는 방사성 동위원소(예: Tc-99m, I-131)를 저장하고 운반하여 방사선 누출을 방지하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 외경 50mm, 높이 100mm의 W-97Ni-Fe 용기는 밀도가 19.0g/cm³, 두께 5mm, 무게가 약 1.1kg 으로 1MeV 감마선의 95%를 차폐합니다.

재료 및 특성

W-97Ni-Fe 합금(텅스텐 97%), 밀도 19.0 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 460 HV, 신장률 12%. 질량 흡수 계수 0.16 cm²/g, 차폐 효율은 납보다 20% 높음. 내열성 1500° C, 폭발성 환경에서 용융 없음. 매우 높은 밀봉성, 누설률 <10⁻⁶ Pa·m³/s, 무독성, 핵의학 요건 충족.

제조공정

냉간등방압성형 300MPa, 1500° C 진공소결(10⁻³ Pa), 밀도 19.0 g/cm³, HIP 처리 기공률

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<0.1%. 5 축 CNC 가공 캐비티 공차 ± 0.02 mm, 표면 Ra 0.4 μm , 나사산 커버 설계로 밀봉성 확보. 니켈 도금 5 μm 또는 TiN 용사 코팅 0.1 mm, 내식성 15% 향상.

적용 시나리오 및 사례

핵의학에서 W-97Ni-Fe 용기(두께 6mm, 무게 1.5kg)는 Tc-99m 을 저장하며, 차폐율은 96%이고 선량 감소율은 1mSv 미만입니다. 운송 시, 8mm 두께의 용기는 I-131 을 보호하여 안전성을 40% 향상시킵니다. 한 실험실에서 이 용기(무게 1.2kg)를 사용하는데, 방사선 누출률은 0.01% 미만으로 납 용기보다 10% 가볍습니다.

기술적 과제 및 해결책:

조임 및 무게 최적화가 과제입니다. 나사산 정확도는 CNC 및 초음파 검사를 통해 $\pm 0.01\text{mm}$ 로 보장됩니다. 벽 두께 구배 설계(최소 4mm)를 통해 무게를 15% 줄였으며, HIP 공정을 통해 강도를 확보했습니다. 코발트(2%)를 첨가하여 내충격성을 향상시켰고, 인성을 10% 향상시켰습니다.

8.3.3 고비중 텅스텐 합금 의료용 텅스텐 합금 바늘

제품 개요

의료용 텅스텐 합금 바늘은 전립선암 치료와 같은 방사성 시드 이식에 사용되어 방사성 선원을 정확하게 전달합니다. 예를 들어, 직경 1mm, 길이 20mm 의 W-95Ni-Fe 바늘은 밀도가 18.8g/cm^3 이고 무게는 약 0.3g 으로 높은 정확도와 차폐성을 제공합니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 신장률 15%. 강력한 차폐력, 5 mm 두께로 β 선 90% 차폐. 내식성: 생리식염수에서 1000 시간 동안 질량 손실 <0.1%, 무독성. 침탄 후 팁 경도는 600 HV 에 도달하며, 관통력이 20% 증가합니다.

제조 공정 :

텅스텐 분말을 혼합한 후, 500 MPa 유압 프레스로 가늘고 긴 빌렛을 성형하여 1480°C 에서 소결했습니다. 밀도는 18.8g/cm^3 입니다. CNC 선삭 공차는 $\pm 0.01\text{mm}$, 팁 각도는 30° , 표면 연마 Ra 는 0.2 μm 입니다. 침탄 처리(950°C , 2 시간)를 통해 내마모성을 30% 향상시켰습니다. 금도금 두께는 2 μm 로 생체 적합성을 향상시켰습니다.

적용 시나리오 및 사례:

종자 이식 시, W-95Ni-Fe 바늘(길이 25mm)은 $\pm 0.5\text{mm}$ 의 위치 정확도로 I-125 를 전달하여 치료 효과를 15% 향상시킵니다. 종양 생검 시, 0.4g 의 바늘은 조직을 천공하여 손상을 20% 감소시킵니다. 한 병원에서는 이 바늘(직경 1.2mm)을 사용하여 98%의 이식 성공률을 달성했습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 미세도와 강도가 과제입니다. 직경 1mm 미만은 고정밀 금형이 필요하며, 이는 SLM

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

프린팅으로 해결됩니다. 기공률은 0.5% 미만입니다. 텅은 쉽게 부러지므로, 침탄 및 어닐링(800° C)을 통해 강화하고 파단률을 0.1%로 낮춥니다. 표면은 멸균 처리해야 하며, 다단계 연마 및 UV 살균을 통해 품질을 보장합니다.

8.3.4 고밀도 텅스텐 합금 방사선 치료 표적

제품 개요방사선 치료

타겟은 선형 가속기에서 고에너지 X 선을 생성하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 직경 50mm, 두께 5mm의 W-95Ni-Fe 타겟은 밀도가 18.8g/cm³이고 무게는 약 370g입니다. 전자빔에 부딪히면 10MV의 복사선을 생성할 수 있습니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 용점 >2800° C. 열전도도 140 W/(m·K), 뛰어난 열충격 저항성, 산란선 90% 흡수 차폐력. 내마모성은 강철보다 5배 높으며 표면 안정성이 우수합니다.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1480° C 소결, 밀도 18.8 g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. CNC 가공 공차 ±0.05 mm, 표면 Ra 0.4 μm, 0.2 mm ZrO₂ 용사 코팅, 내열성 2000° C. 대상 표면은 Ra 0.1 μm로 연마하여 비산을 줄였습니다.

적용 시나리오 및 사례

방사선 치료 장비에서 W-95Ni-Fe 타겟(두께 6mm)은 12MV의 방사선을 생성하여 치료 깊이를 20% 증가시킵니다. 양성자 치료에서 400g의 타겟은 방사선 강도를 15% 증가시킵니다. 한 병원에서는 이 타겟(직경 60mm)을 사용하여 종양 조사 정확도를 10% 높였습니다.

기술적 과제 및 해결책

고온 내성 및 방사선 균일성 확보가 과제로 제시됩니다. ZrO₂ 코팅 및 HIP 처리는 내열성을 25% 향상시킵니다. 초정밀 가공을 통해 표면 평탄도 0.01mm 미만을 달성했습니다. 코팅 최적화를 통해 비산을 5% 감소시켰습니다.

8.3.5 고비중 텅스텐 합금 의료용 보호 스크린

제품 개요

의료용 보호 스크린은 수술실이나 영상의학과에서 의료진을 보호하기 위해 사용됩니다. 예를 들어, 길이 500mm, 너비 300mm, 두께 5mm의 W-95Ni-Fe 보호 스크린은 밀도가 18.8g/cm³이고 무게는 약 14kg이며 100kV X선의 90%를 차폐합니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 신장률 15%. 질량

흡수 계수 $0.15 \text{ cm}^2/\text{g}$, 내식성: 소독제에서 1000 시간 동안 질량 손실 $<0.1\%$. 피로 강도 500 MPa, 취급 충격 견딤.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1480°C 소결, 밀도 18.8 g/cm^3 , HIP 처리 기공률 $<0.1\%$. CNC 절삭 공차 $\pm 0.1 \text{ mm}$, 표면 연마 $Ra 0.8 \mu\text{m}$, 니켈 도금 $5 \mu\text{m}$ 또는 투명 스프레이 코팅, 미관 20% 향상.

적용 시나리오 및 사례

X 선 수술에서는 W-95Ni-Fe 스크린(두께 6mm)을 수술대 위에 설치하여 선량을 0.2mSv 로 줄였습니다. 방사선 치료실에서는 20kg 스크린이 92%의 차폐율로 의료진을 보호합니다. 한 병원에서는 이 스크린($500 \times 400\text{mm}$)을 사용하여 안전성을 15% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

무게와 투명성이 과제로 꼽힙니다. 중공 설계를 통해 무게를 10%까지 줄여 무게를 줄였습니다. 부분적인 투명성이 필요한 경우, 납 유리를 삽입하여 90%의 차폐율을 유지합니다. HIP(열간 절연) 및 코팅을 통해 내구성을 향상시켜 수명을 30% 증가시켰습니다.

8.3.6 중텅스텐 합금 핵폐기물 용기

제품 개요

핵폐기물 용기는 방사선 누출을 방지하기 위해 저준위 또는 중준위 폐기물을 저장하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 외경 200mm, 높이 300mm의 W-97Ni-Fe 용기는 밀도가 19.0 g/cm^3 , 두께 10mm, 무게가 약 11kg 으로 감마선(2MeV)의 98%를 차폐합니다.

재료 및 특성

W-97Ni-Fe 합금, 밀도 19.0 g/cm^3 , 인장강도 1050 MPa, 경도 460 HV, 신장률 12%. 질량 흡수 계수 $0.16 \text{ cm}^2/\text{g}$, 내열성 1500°C , 내식성 1000 시간 산성 용액 질량 손실 $<0.2\%$. 밀봉성 $<10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1500°C 진공 소결, 밀도 19.0 g/cm^3 , HIP 처리 후 기공률 $<0.05\%$. CNC 가공 공차 $\pm 0.05 \text{ mm}$, 표면 $Ra 0.4 \mu\text{m}$, 용접 밀봉 강도 300 MPa. 0.3 mm 세라믹 코팅 분사, 내식성 20% 향상.

적용 시나리오 및 사례

원자력 발전소에서는 W-97Ni-Fe 용기(벽 두께 12mm)를 사용하여 99% 차폐율로 Co-60 폐기물을 보관합니다. 폐기물 운송 시에는 15kg 용기를 사용하여 환경을 보호하고 안전성을 50% 향상시킵니다. 한 시설에서는 이 용기(무게 12kg)를 사용하여 방사선량을 0.1mSv 로 줄였습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술적 과제 및 해결책:

밀봉 및 내구성 확보가 과제입니다. 모재 강도의 95%에 해당하는 강도를 가진 전자빔 용접(5kW)을 사용합니다. 세라믹 코팅 및 HIP 처리를 통해 장기 부식 문제를 해결하여 수명을 40% 향상시켰습니다. 벽 두께 최적화를 통해 무게를 10% 줄였습니다.

8.3.7 무거운 텅스텐 합금 감마 나이프 구성 요소

제품 개요

콜리메이터와 같은 감마 나이프 부품은 종양 치료를 위해 감마선을 집중시키는 데 사용됩니다. 예를 들어, W-90Ni-Fe 콜리메이터는 구경이 2~5mm 이고 밀도가 18.5g/cm³ 이며 무게는 약 500g 이고 Co-60 선의 92%를 차단합니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%. 질량 흡수 계수 0.14 cm²/g, 내열성 1500° C, 금 도금으로 전도도 20% 증가. 피로 강도 500 MPa, 고주파 진동에 강함.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 250 MPa, 1450° C 소결, 밀도 18.5 g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. 5 축 CNC 가공 홀 직경 공차 ±0.02 mm, 표면 Ra 0.2 μm, 금 도금 2 μm, 저항률 4 μΩ·cm 로 감소. 동적 평형 시험 편심 <5 μm.

적용 시나리오 및 사례

감마 나이프에서 W-90Ni-Fe 콜리메이터(무게 600g)는 방사선을 집중시켜 정확도를 15% 높입니다. 뇌종양 치료에서는 3mm 조리개 부품을 사용하여 조사 효율을 20% 높였습니다. 한 병원에서는 이 부품(무게 550g)을 사용하여 치료 성공률을 10% 높였습니다.

기술적 과제 및 해결책:

홀 직경 정확도 및 내구성이 과제입니다. 5 축 가공 및 레이저 드릴링을 통해 ±0.01mm 정밀도를 보장합니다. TiN 코팅을 통해 내마모성을 20% 향상시켰습니다. 최적화된 홀 형상을 통해 비산을 5% 감소시켰습니다.

8.4 중텅스텐 합금 산업 도구 및 부품

산업 분야에서 중텅스텐 합금은 높은 밀도(17.0-19.3 g/cm³), 뛰어난 내마모성(경도 400-600 HV), 고강도(700-1200 MPa), 그리고 뛰어난 안정성을 갖추고 있어 절삭 공구, 다이, 프레스 헤드, 진동 감쇠 부품, 드릴링 공구, 베어링 부품, 연삭 슬리브, 중장비 동작기계 카운터웨이트 등 산업용 공구 및 부품 제조에 이상적인 소재입니다. 이러한 제품들은 기계 가공, 석유 채굴, 제조 장비 등 다양한 분야에서 효율성과 내구성 향상을 위해 널리 사용됩니다. 아래에서는 각 산업용 공구 및 부품에 대한 자세한 소개를 제공합니다.

8.4.1 무거운 텅스텐 합금 절삭 공구

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제품 개요

텅스텐 합금 절삭 공구는 강철 및 티타늄 합금과 같은 경질 소재를 가공하는 데 사용되며, 높은 경도와 내마모성으로 잘 알려져 있습니다. 예를 들어, 직경 10mm, 길이 50mm의 W-95Ni-Fe 합금 드릴은 밀도가 18.8g/cm³이고 무게는 약 74g입니다. 이 드릴은 기존 초경 공구보다 내마모성이 70% 더 뛰어나고 사용 수명은 두 배 더 깁니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금(텅스텐 95%, 니켈-철 7:3)으로, 밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 연신율 15%입니다. 침탄 후 경도는 600 HV에 도달할 수 있으며, 내마모성은 강철보다 5배 높습니다. 열전도도는 140 W/(m·K)이고, 내열성은 1000°C이며, 절삭 시 연화되지 않습니다. 파괴인성(K_{IC})은 약 30 MPa·m^{1/2}이며, 내충격성이 우수합니다.

제조 공정:

텅스텐 분말(입자 크기 3-5 μm, 순도 ≥99.9%)을 니켈 철 분말과 혼합하여 300 MPa의 냉간 등압 프레스(CIP)로 성형하여 성형체의 밀도를 13 g/cm³로 유지합니다. 1480°C의 수소 분위기에서 2시간 동안 소결하여 밀도를 18.8 g/cm³로 높이고 밀도를 99% 이상으로 유지합니다. 열간 등압 프레스(HIP, 200 MPa, 1400°C, 1시간)를 통해 미세 기공을 제거하고 기공률을 0.1% 미만으로 유지합니다.

CNC 가공 공차 ±0.02mm, 절삭날 각도 60°, 표면 조도 Ra 0.4 μm. 침탄 처리(950°C, 3시간)를 통해 내마모성을 30% 향상시킵니다. 일부 공구는 0.1mm 두께의 TiN 코팅을 적용하여 경도를 650HV로 높였습니다.

적용 시나리오 및 사례

항공 제조에서 W-95Ni-Fe 드릴(직경 12mm)은 티타늄 합금을 가공할 수 있으며, 이는 초경 공구의 두 배에 달하는 300시간의 수명을 자랑합니다. 자동차 부품 가공에서 100g 밀링 커터는 강철 부품 절삭 시 효율을 20% 높일 수 있습니다. 한 공장에서는 이 공구(길이 60mm)를 사용하여 가공 비용을 15%, 불량률을 10% 절감했습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 날의 내구성과 열 안정성이 과제로 제시됩니다. HIP 및 침탄 공정을 통해 날의 치핑을 0.5%까지 줄일 수 있습니다. 고온 연화는 TiN 코팅과 냉각수(유량 10L/min)를 통해 제어되며, 온도는 200°C 미만입니다. 나노 분말(입자 크기 <1 μm)을 사용하여 입자 균일도를 개선하고 내마모성을 20% 향상시킵니다.

8.4.2 고비중 텅스텐 합금 금형 및 펀치

제품 개요

고중량 텅스텐 합금 다이와 펀치는 스탬핑, 단조 및 압출 공정에서 고압 및 마모를

견뎌내는 데 사용됩니다. 예를 들어, 길이 100mm, 너비 50mm, 두께 20mm의 W-93Ni-Fe 다이는 밀도가 18.5g/cm³, 무게가 약 925g, 내압성이 2000MPa입니다.

재료 및 특성

W-93Ni-Fe 합금(텅스텐 93%), 밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 420 HV, 연신율 18%. 내마모성은 강철보다 4 배 높고, 피로 강도는 550 MPa이며, 균열 없이 10⁷ 사이클을 견딜 수 있습니다. 내열성 1200° C, 변형률 <0.05 mm. 표면 내식성: 1000 시간 동안 오일 오염 시 질량 손실 <0.2%.

제조 공정:

텅스텐 분말 혼합 후, 유압 프레스 600MPa, 1450° C 소결, 밀도 18.5g/cm³, HIP 처리, 기공률 <0.1%. CNC 밀링 공차 ±0.05mm, 표면 Ra 0.8 μm, 침탄 처리(950° C, 3 시간), 경도 550HV로 향상. 0.2mm 두께 Al₂O₃ 코팅 분사, 내열성 1500° C.

적용 시나리오 및 사례

강판 스탬핑에서 W-93Ni-Fe 다이(무게 1kg)는 마모 없이 100 만 회 펀칭이 가능하며, 강철 다이보다 수명이 3 배 더 깁니다. 단조에서 1.5kg 펀치는 알루미늄 합금을 25% 향상된 효율로 가공할 수 있습니다. 한 공장에서는 이 다이(100×60mm)를 사용하여 생산 정확도를 15% 높이고 유지보수 비용을 20% 절감했습니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 내압성과 표면 마모가 포함됩니다. HIP 및 코발트 첨가(2%)를 통해 내압성이 향상되고 강도가 10% 증가합니다. 침탄 및 세라믹 코팅을 통해 마모를 해결하고 수명을 30% 증가시킵니다. 복잡한 형상은 SLM 을 통해 ±0.03mm의 정확도로 인쇄됩니다.

8.4.3 중텅스텐 합금 진동 억제 부품

제품 개요

진동 감쇠 부품은 공작기계 또는 장비의 진동을 줄이고 작동 안정성을 향상시키는 데 사용됩니다. 예를 들어, 길이 100mm, 너비 20mm, 두께 10mm의 W-90Ni-Fe 댐핑 블록은 밀도가 18.5g/cm³, 무게가 370g이며, 강철보다 감쇠율이 40% 높습니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%. 탄성 계수 400 GPa, 음속 4400 m/s, 감쇠 계수는 강철보다 30% 높음. 내열성 500° C, 내식성 1000 시간 동안 수분 함량 0.1% 미만.

제조 공정:

250MPa 냉간 등방성 가압 성형, 1450° C 소결, 밀도 18.5g/cm³. CNC 가공 공차 ±0.1mm, 표면 Ra 1.6 μm, 0.2mm Al₂O₃ 코팅 분사, 내열성 1500° C. 미세 기공 설계(직경 50 μm)로 에너지 소산 및 감쇠율이 10% 향상되었습니다.

적용 시나리오 및 사례

CNC 공작 기계에서 500g의 댐핑 블록은 진동을 40% 감소시키고 가공 정확도를 10% 향상시킵니다. 펀칭 프레스에서 1kg의 댐핑 블록은 소음을 5dB 감소시키고 수명을 20% 증가시킵니다. 한 공장에서는 이 댐핑 블록(길이 120mm)을 사용하여 장비 안정성을 15% 향상시켰으며, 진폭은 2mm로 줄었습니다.

기술적 과제 및 해결책:

감쇠 효율 및 설치가 과제입니다. 미세 구멍을 통해 고주파 진동(1000Hz 이상)을 최적화하여 감쇠율을 15% 높였습니다. 티타늄 볼트를 사용하여 설치 전단력(5000N 이상)을 해결했습니다. 내구성: HIP 처리를 통해 피로 수명이 25% 향상되었습니다.

8.4.4 고밀도 텅스텐 합금 드릴링 도구

제품 개요

드릴링 공구는 석유, 가스 및 지열 채굴에 사용되며 뛰어난 내마모성과 무게로 잘 알려져 있습니다. 예를 들어, 직경 50mm, 길이 200mm의 W-95Ni-Fe 드릴 비트는 밀도가 18.8 g/cm³이고 무게는 약 3.7kg이며, 강철 드릴 비트보다 수명이 3배 더 깁니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 침탄 후 600 HV. 내마모성은 강철의 5배, 피로 강도는 500 MPa, 내열성은 1000°C입니다. 내식성: 1000시간 동안 진흙에서 질량 손실은 0.5% 미만입니다.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1480°C 소결, 밀도 18.8 g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. CNC 가공 공차 ±0.05 mm, 모서리 침탄(950°C, 3시간), 0.2 mm TiN 코팅 분사, 경도 650 HV. SLM 프린팅: 복잡한 구조, 정확도 ±0.03 mm.

적용 시나리오 및 사례

심공 시추에서 W-95Ni-Fe 드릴 비트(무게 4kg)는 5,000m의 암석을 시추하며 300시간의 수명을 제공합니다. 해양 시추에서는 5kg 공구의 내마모성이 40% 향상됩니다. 한 유전에서 이 드릴 비트(직경 60mm)를 사용했을 때 시추 효율은 20% 향상되고 비용은 15% 감소했습니다.

기술적 과제 및 해결책

내마모성과 고온 문제가 주요 과제입니다. 침탄 및 TiN 코팅을 통해 내구성을 30% 향상시켰습니다. 열전도도와 냉각수를 300°C 미만으로 최적화하여 고온을 제어했습니다. 구조 최적화를 통해 무게를 10% 줄였습니다.

8.4.5 무거운 텅스텐 합금 베어링 구성품

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제품 개요

베어링 부품은 중장비에 사용되며 높은 밀도와 내마모성을 제공합니다. 예를 들어, 외경 80mm, 내경 40mm, 두께 20mm의 W-90Ni-Fe 베어링 링은 밀도가 18.5g/cm^3 이고 무게는 약 1.8kg이며, 강철보다 하중 지지력이 50% 더 높습니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 연신율 20%. 내마모성은 강철보다 4 배 높으며, 피로 강도는 500 MPa, 내열성은 800°C 입니다. 마찰 계수는 0.3이며, 내식성이 우수합니다.

제조 공정:

유압 프레스 600 MPa, 1450°C 소결, 밀도 18.5g/cm^3 , HIP 처리 기공률 $<0.1\%$. CNC 선삭 공차 $\pm 0.02\text{mm}$, 표면 $Ra\ 0.4\ \mu\text{m}$, 침탄 처리 경도 550 HV. 0.1 mm MoS_2 용사 코팅, 마찰 감소율 20%.

적용 시나리오 및 사례

굴삭기에서 2kg 베어링 링은 100 톤의 하중을 견디며 수명이 30% 증가합니다. 풍력 발전 장비에서 1.5kg 부품은 마모를 20% 줄입니다. 한 공장에서는 이 베어링(외경 100mm)을 사용하여 작동 안정성을 15% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책:

마찰과 정밀성이 과제로 포함됩니다. MoS_2 코팅 및 연마를 통해 마찰을 15% 감소시켰습니다. 5 축 가공을 통해 $\pm 0.01\text{mm}$ 미만의 공차를 달성했습니다. HIP 및 침탄 처리를 통해 내구성을 향상시켜 수명을 25% 증가시켰습니다.

8.4.6 중텅스텐 합금 연삭 슬리브

제품 개요

연삭 슬리브는 연삭 장비에 사용되어 무게와 내마모성을 향상시킵니다. 예를 들어, 내경 30mm, 외경 50mm, 길이 100mm의 W-93Ni-Fe 슬리브는 밀도가 18.5g/cm^3 이고 무게는 약 1.4kg이며 강철보다 4 배 높은 내마모성을 갖습니다.

재료 및 특성

W-93Ni-Fe 합금, 밀도 18.5g/cm^3 , 인장 강도 1050 MPa, 경도 420 HV, 신장률 18%. 우수한 내마모성, 피로 강도 550 MPa, 내열성 1000°C . 내식성: 1000 시간 동안 연마재 질량 손실 $<0.2\%$.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1450°C 소결, 밀도 18.5g/cm^3 , HIP 처리 후 기공률 $<0.1\%$. CNC 가공 공차 $\pm 0.05\text{mm}$, 표면 $Ra\ 0.8\ \mu\text{m}$, 침탄 경도 550 HV. 0.2 mm 두께 Al_2O_3 코팅, 내열성 1500°C .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적용 시나리오 및 사례

분쇄기에서 1.5kg 슬리브는 세라믹을 분쇄하여 수명을 30% 증가시킵니다. 광석 가공에서 2kg 슬리브는 내마모성을 40% 향상시킵니다. 한 공장에서는 이 슬리브(길이 120mm)를 사용하여 효율을 15% 높이고 유지보수 주기를 20% 연장했습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 내벽 내마모성 및 열팽창이 과제입니다. 침탄 및 코팅을 통해 내구성을 25% 향상시킵니다. 열팽창은 900° C 어닐링(소둔)을 통해 80% 감소하며, 변형률은 0.01mm 미만입니다. 초정밀 가공을 통해 정밀도를 확보합니다.

8.4.7 무거운 텅스텐 합금 무거운 공작 기계 균형추

제품 개요

진동을 줄이는 데 고성능 공작기계 균형추가 사용됩니다. 예를 들어, 길이가 300mm, 너비가 100mm, 두께가 50mm 인 W-90Ni-Fe 균형추 블록의 밀도는 18.5g/cm³ 이고 무게는 13.9kg 으로 강철 블록보다 55% 더 작습니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm³, 인장강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%. 피로강도 500 MPa, 10⁷ 사이클 내구성. 내열성 500° C, 내식성 1000 시간, 오일 오염 시 질량 손실 <0.1%.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1450° C 소결, 밀도 18.5 g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. CNC 가공 공차 ±0.2 mm, 표면 Ra 1.6 μm, 0.1 mm 보호층 용사, 내식성 30% 향상. 대형 균형추 접합, 브레이징 강도 200 MPa.

적용 시나리오 및 사례

선반에서 20kg의 카운터웨이트는 진동을 40% 감소시키고 정밀도를 10% 향상시킵니다. 밀링 머신에서 15kg의 카운터웨이트는 안정성을 15% 향상시킵니다. 한 공장에서는 이 카운터웨이트(무게 18kg)를 사용하여 가공 소음을 10dB 감소시키고 수명을 20% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 무게 분포 및 비용 문제가 과제로 포함되었습니다. 다점 프레스 및 HIP(열간 성형)를 통해 0.1g/cm³ 미만의 편차로 밀도 균일성을 달성했습니다. 분말 재활용을 통해 비용을 20% 절감했습니다. 전단력을 5000N 으로 증가시킨 플렉시블 개스킷을 통해 마운팅을 최적화했습니다.

8.5 중텅스텐 합금 전자 및 에너지 제품

전자 및 에너지 분야에서 중텅스텐 합금은 높은 밀도(17.0-19.3 g/cm³), 뛰어난 열전도도(120-180 W/(m·K)), 고강도(700-1200 MPa), 고온 저항성(융점 >2800° C) 및

우수한 방사선 차폐 능력을 갖추고 있어 전극 소재, 방열판, 원자로 부품, 배터리 카운터웨이트, 태양광 장비 부품, X 선관 양극 타겟, 풍력 터빈 카운터웨이트 제조에 적합한 소재입니다. 이러한 제품들은 전자 장비, 에너지 변환 및 발전 시스템에서 핵심적인 역할을 수행하여 성능과 신뢰성을 향상시킵니다. 다음은 각 전자 및 에너지 제품에 대한 자세한 소개입니다.

8.5.1 고밀도 텅스텐 합금 전극 재료

제품 개요

고중량 텅스텐 합금 전극 소재는 방전 가공(EDM), 저항 용접, 플라즈마 절단에 사용되며 높은 전도성과 내마모성으로 잘 알려져 있습니다. 예를 들어, 직경 10mm, 길이 50mm의 W-80Cu 합금 전극은 밀도가 17.0g/cm^3 이고 무게는 약 67g 입니다. 이 합금 전극의 전도성은 순수 구리보다 20% 높고 내마모성은 강철보다 5 배 높습니다.

재료 및 특성:

W-80Cu 합금(텅스텐 80%, 구리 20%), 밀도 17.0 g/cm^3 , 인장 강도 700 MPa, 경도 380 HV, 신장률 10%. 전기 전도도 45% IACS(International Annealed Copper Standard), 열 전도도 $180\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 내열성 1500°C . 아크 침식에 대한 내성이 우수하며, 1000 회 방전 후 질량 손실이 0.5% 미만입니다. 내식성: 1000 시간 동안 습기에 노출되었을 때 질량 손실이 0.2% 미만입니다.

제조 공정:

텅스텐 분말(입자 크기 $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$, 순도 $\geq 99.9\%$)을 구리 분말과 혼합하고 250 MPa의 냉간 등압 성형(CIP)으로 성형하여 성형체의 밀도를 11 g/cm^3 로 만듭니다. 1350°C 의 수소 분위기에서 2 시간 동안 소결하면 구리 상이 용융되어 텅스텐 매트릭스에 침투하여 밀도가 17.0 g/cm^3 , 밀도가 98%를 초과합니다. 열간 등압 성형(HIP, 150 MPa, 1300°C , 1 시간)을 통해 미세 기공이 제거되고 기공률은 0.1% 미만이 됩니다.

CNC 선삭 공차 $\pm 0.02\text{mm}$, 표면 연마 $Ra\ 0.4\text{ }\mu\text{m}$, 금도금 $2\text{ }\mu\text{m}$, 저항률 $3\text{ }\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 감소. 전극 팁은 900°C 에서 2 시간 동안 침탄 처리하여 경도를 450HV로 높였습니다.

적용 시나리오 및 사례

방전가공(EDM)에서 W-80Cu 전극(직경 12mm)은 금형강을 500 시간의 수명 동안 가공할 수 있으며, 이는 구리 전극보다 3 배 더 깁니다. 저항 용접에서 100g 전극은 알루미늄 판을 25% 더 효율적으로 용접할 수 있습니다. 한 공장에서는 이 전극(길이 60mm)을 사용하여 가공 정확도를 15% 높이고 아크 손실을 20% 줄였습니다.

기술적 과제 및 해결책

도전 과제에는 전도성과 내마모성의 균형을 맞추는 것이 포함됩니다. 구리 함량은 20~30%로 최적화되고, 전도성은 10% 증가하며, HIP 처리는 강도를 15% 향상시킵니다. 금도금 및 침탄 처리를 통해 아크 침식은 30% 감소합니다. 다단계 연마를 통해 표면 거칠기를 제어하고, 방열 효율을 10% 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.5.2 고밀도 텅스텐 합금 방열판(라디에이터)

제품 개요

방열판은 고전력 전자 장치(예: CPU 및 LED)에서 열을 방출하여 높은 열전도도와 밀도 로 열 관리를 최적화하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 길이 50mm, 너비 50mm, 두께 5mm 의 W-85Cu 합금 방열판은 밀도가 17.5 g/cm^3 이고 무게는 약 219g 이며 방열 효율이 알루미늄보다 50% 더 높습니다.

재료 및 특성

W-85Cu 합금(텅스텐 85%, 구리 15%), 밀도 17.5 g/cm^3 , 인장 강도 800 MPa, 경도 400 HV, 신장률 8%. 열전도도 $170 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$ 로 순수 텅스텐($174 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$)보다 약간 낮지만 가공성이 우수합니다. 내열성 1500°C , 열팽창 계수 $6.5 \times 10^{-6}/\text{K}$, 실리콘 칩($4.2 \times 10^{-6}/\text{K}$)과 일치하며, 변형률 $<0.01 \text{ mm}$ 입니다.

제조 공정:

텅스텐 분말과 구리 분말을 혼합하고, 300 MPa 의 냉간 등방압 성형 후 1350°C 에서 소결합니다. 밀도는 17.5 g/cm^3 이며, HIP 처리 기공률은 0.1% 미만입니다. CNC 밀링 공차는 $\pm 0.05 \text{ mm}$, 표면 Ra 는 $0.8 \mu\text{m}$, 마이크로채널 설계(폭 0.5 mm)는 방열 면적을 20% 증가시킵니다. 니켈 도금은 $5 \mu\text{m}$ 로, 내식성은 15% 향상되었습니다.

적용 시나리오 및 사례

서버 CPU 에서 W-85Cu 히트싱크(무게 250g)는 200W 의 방열 성능을 보이며, 온도는 15°C 감소합니다. 고전력 LED 의 경우, 150g 의 히트싱크는 LED 수명을 30% 연장할 수 있습니다. 한 전자 공장에서 이 히트싱크($50 \times 50 \text{ mm}$)를 사용했을 때 칩 작동 온도는 60°C 로 낮아졌고, 성능은 10% 향상되었습니다.

기술적 과제 및 해결책

열팽창 매칭 및 방열 효율 향상을 위한 과제가 있습니다. 구리 함량은 15~20%로 조절되었으며, 열팽창 편차는 10% 미만입니다. 레이저 가공을 통해 마이크로채널을 구현하여 방열 효율을 25% 향상시켰습니다. 중공 설계를 통해 무게를 15% 줄였으며, HIP 공정을 통해 강도를 확보했습니다.

8.5.3 중텅스텐 합금 원자로 구성품

제품 개요

고밀도 및 방사선 차폐 기능을 갖춘 차폐 블록이나 제어봉 슬리브와 같은 원자로 구성품입니다. 예를 들어, 길이 200mm, 너비 50mm, 두께 20mm 의 W-97Ni-Fe 차폐 블록은 밀도가 19.0 g/cm^3 이고 무게는 약 1.9kg 이며 감마선(2MeV)의 98%를 차폐합니다.

재료 및 특성

W-97Ni-Fe 합금, 밀도 19.0 g/cm^3 , 인장 강도 1050 MPa, 경도 460 HV, 신장률 12%. 질량

흡수 계수 $0.16 \text{ cm}^2/\text{g}$, 내열성 1500°C , 내식성, 냉각수 1000 시간 동안 질량 손실 $<0.2\%$.
피로 강도 500 MPa, 열충격에 강함.

제조공정

냉간등방압성형 300MPa, 1500°C 진공소결 (10^{-3} Pa), 밀도 19.0 g/cm^3 , HIP 처리 후
기공률 $<0.05\%$. CNC 가공 허용 오차 $\pm 0.05 \text{ mm}$, 표면 Ra $0.4 \mu\text{m}$, 0.3 mm ZrO₂ 용사
코팅, 내열성 2000°C . 접합부 브레이징 강도 300 MPa.

적용 시나리오 및 사례

가압수형 원자로에서는 W-97Ni-Fe 차폐 블록(무게 2kg)을 노심 외부에 배치하여
방사선량을 0.1mSv 로 줄였습니다. 고속중성자로에서는 3kg 케이싱이 제어봉을 보호하여
운전 수명을 20% 증가시켰습니다. 원자력 발전소에서는 이 부품($200 \times 60\text{mm}$)을 사용하여
안전성을 15% 높이고 정비 주기를 25% 연장했습니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 내방사선성과 고온이 포함됩니다. ZrO₂ 코팅과 HIP 처리로 내구성을 30%
향상시킵니다. 900°C 어닐링 처리를 통해 미세균열을 80% 감소시킵니다. 강도 저하 없이
최적화된 구조를 통해 무게를 10% 감소시킵니다.

8.5.4 고비중 텅스텐 합금 배터리 카운터웨이트

제품 개요

배터리 카운터웨이트는 전기 자동차나 에너지 저장 시스템에서 무게 분산의 균형을
맞추는 데 사용됩니다. 예를 들어, 길이 100mm, 너비 30mm, 두께 10mm의 W-90Ni-Fe
카운터웨이트는 밀도가 18.5g/cm^3 이고 무게는 약 555g 으로, 강철 카운터웨이트보다 55%
가볍습니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%, 피로
강도 500 MPa, 내열성 500°C , 내식성, 전해질에서 1000 시간 동안 질량 손실 $<0.1\%$.
열전도도 $130 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 우수한 방열성.

제조 공정:

유압 프레스 600MPa, 1450°C 소결, 밀도 18.5g/cm^3 , HIP 처리 기공률 $<0.1\%$. CNC 가공
공차 $\pm 0.1\text{mm}$, 표면 Ra $1.6 \mu\text{m}$, 0.1mm 보호층 분사, 내식성 20% 향상. 특수 형상 부품은
SLM 으로 인쇄하며, 정확도는 $\pm 0.05\text{mm}$ 입니다.

적용 시나리오 및 사례

전기 자동차의 경우, 배터리 팩에 1kg의 카운터웨이트를 장착하여 차축 하중 비율을
균형 있게 조절하고 서스펜션 수명을 20% 증가시킵니다. 에너지 저장 캐비닛의 경우,
2kg의 카운터웨이트를 장착하면 안정성이 15% 향상됩니다. 한 자동차 회사는 이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

카운터웨이트(무게 800g)를 사용하여 핸들링을 10% 향상시키고 에너지 소비를 5% 감소시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

비용 및 설치가 과제입니다. 재활용 분말을 사용하면 비용을 20% 절감할 수 있습니다. 3D 프린팅 특수 형상 설계를 통해 설치 공간을 최적화했으며, 무게 편차는 $\pm 2\text{g}$ 미만입니다. HIP(고온 인장)를 통해 내구성을 향상시키고 수명을 25% 연장했습니다.

8.5.5 중텅스텐 합금 태양열 장비 구성품

제품 개요

태양광 장비의 구성 요소(예: 추 또는 지지대)는 패널의 각도와 안정성을 조절합니다. 예를 들어, 길이 150mm, 너비 50mm, 두께 20mm의 W-90Ni-Fe 추는 밀도가 18.5g/cm^3 , 무게가 약 1.4kg이며, 바람 저항이 20% 증가합니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5g/cm^3 , 인장강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%. 내열성 500°C , 내식성, 옥외 1000 시간 내 질량 손실 $<0.1\%$. 피로강도 500 MPa, 풍하중 견딤.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1450°C 소결, 밀도 18.5g/cm^3 , HIP 처리 후 기공률 $<0.1\%$. CNC 가공 공차 $\pm 0.1\text{mm}$, 표면 Ra $1.6\text{ }\mu\text{m}$, 0.2 mm Al_2O_3 코팅 분사, 내열성 1500°C . 접합부 브레이징 강도 200 MPa.

적용 시나리오 및 사례

태양광 발전소에서 2kg의 균형추는 패널 기울기를 조정하여 발전 효율을 10% 높입니다. 휴대용 태양광 패널에서 1kg의 지지대는 바람 저항을 15% 높입니다. 한 프로젝트에서는 이 균형추(무게 1.5kg)를 사용하여 안정성을 20%, 수명을 30% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

내후성과 무게가 과제로 지적되었습니다. Al_2O_3 코팅과 HIP 처리로 내구성이 25% 향상되었습니다. 중공 설계를 통해 무게가 15% 감소했습니다. 5000N의 전단력을 가진 볼트를 사용하여 설치가 최적화되었습니다.

8.5.6 중텅스텐 합금 X선관 양극 타겟

제품 개요

X선관 양극 타겟은 고에너지 X선을 생성하는 데 사용됩니다. 예를 들어, 직경 50mm, 두께 5mm의 W-95Ni-Fe 타겟은 밀도가 18.8g/cm^3 이고 무게는 약 370g이며 10MV의 전자 충격을 견딜 수 있습니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8 g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 녹는점 $>2800^\circ \text{C}$. 열전도도 $140 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 열충격에 대한 강한 저항성, 산란선 90% 차폐. 내마모성은 강철보다 5 배 높으며 표면 안정성이 우수합니다.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1480°C 소결, 밀도 18.8 g/cm^3 , HIP 처리 기공률 $<0.1\%$. CNC 가공 공차 $\pm 0.05 \text{ mm}$, 표면 Ra $0.1 \mu\text{m}$, 0.2 mm ZrO₂ 코팅 분사, 내열성 2000°C . 타겟 표면 연마를 통해 비산을 5% 감소시켰습니다.

적용 시나리오 및 사례

의료용 X 선관에서 W-95Ni-Fe 타겟(두께 6mm)은 12MV 의 선을 생성하여 효율을 15% 높였습니다. 산업 시험에서 400g 타겟은 투과율을 20% 높였습니다. 특정 장비는 이 타겟(직경 60mm)을 사용하여 선 강도를 10%, 수명을 25% 증가시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 고온 내성 및 균일성 확보가 과제로 제시됩니다. ZrO₂ 코팅 및 HIP 처리로 내열성을 30% 향상시켰습니다. 초정밀 가공을 통해 표면 평탄도 0.01mm 미만을 달성했습니다. 코팅 최적화를 통해 비산을 5% 감소시켰습니다.

8.5.7 고비중 텅스텐 합금 풍력 터빈 균형추

제품 개요

풍력 터빈의 균형추는 블레이드나 나셀의 균형을 맞추는 데 사용됩니다. 예를 들어, 길이 200mm, 너비 100mm, 두께 50mm 의 W-90Ni-Fe 균형추 블록은 밀도가 18.5 g/cm^3 이고 무게는 약 9.25kg 으로 강철 블록보다 55% 가볍습니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm^3 , 인장강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%. 피로강도 500 MPa, 10^7 사이클 내구성. 내열성 500°C , 내식성. 1000 시간 동안 해풍에 의한 질량 손실 $<0.1\%$.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1450°C 소결, 밀도 18.5 g/cm^3 , HIP 처리 기공률 $<0.1\%$. CNC 가공 공차 $\pm 0.2 \text{ mm}$, 표면 Ra $1.6 \mu\text{m}$, 0.1 mm 보호층 분사, 내식성 20% 향상. 대형 카운터웨이트 집합 브레이징 강도 200 MPa.

적용 시나리오 및 사례

해상 풍력 발전에서 10kg 의 균형추가 3MW 블레이드의 균형을 맞추고 진동을 30% 감소시킵니다. 육상 풍력 발전에서 15kg 의 균형추가 선실 안정성을 15% 향상시킵니다. 풍력 발전 단지에서 이 균형추(무게 12kg)를 사용하면 발전 효율이 10%, 수명이 20% 향상됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술적 과제 및 해결책

내후성 및 중량 분포가 과제로 제시되었습니다. 코팅 및 HIP 처리 내구성이 25% 향상되었습니다. 다점 압착 방식으로 밀도 균일도를 제어하여 편차가 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 미만입니다. 유연한 연결 방식으로 설치가 최적화되었으며, 하중 지지력이 6000N 으로 향상되었습니다.

8.6 텅스텐 합금의 맞춤형 제품

고밀도 텅스텐 합금의 맞춤형 제품은 높은 밀도($17.0\text{--}19.3\text{ g}/\text{cm}^3$), 뛰어난 기계적 성질(700–1200 MPa), 내마모성 및 가공성을 활용하여 맞춤형 디자인을 통해 특정 요구 사항을 충족합니다. 이러한 제품에는 3D 프린팅 텅스텐 합금 부품, 특수 형상 균형추, 예술 작품 및 장식용 조각품, 실험 기기 부품, 조정밀 부품, 암호화폐 및 은행 카드 등이 포함되며, 산업, 과학 연구, 예술 및 금융 분야에서 널리 사용됩니다. 맞춤형 디자인과 첨단 제조 기술(예: 3D 프린팅) 및 정밀 가공을 결합하여 고유한 성능과 외관을 제공합니다. 각 맞춤형 제품에 대한 자세한 소개는 다음과 같습니다.

8.6.1 고밀도 텅스텐 합금 3D 프린팅 부품

제품 개요

3D 프린팅 텅스텐 합금 부품은 적층 제조 기술을 통해 복잡한 형상으로 제작되어 항공, 의료 및 기타 분야의 특수한 요구를 충족합니다. 예를 들어, 직경 50mm 에 내부가 벌집 구조인 W-90Ni-Fe 부품은 밀도가 $18.5\text{g}/\text{cm}^3$ 이고 무게는 약 500g 으로, 강도를 유지하면서 무게를 10% 줄였습니다.

재료 및 특성

W-90Ni-Fe 합금(텅스텐 90%, 니켈-철 7:3 비율), 밀도 $18.5\text{ g}/\text{cm}^3$, 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%. 내열성 500°C , 피로 강도 500 MPa, 10^7 사이클 내구성. 내식성 1000 시간 동안 수분 함량 감소 $<0.1\%$. 3D 프린팅 후 기공률 $<1\%$, 기존 소결 성능과 유사.

제조 공정:

텅스텐 분말(입자 크기 $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$, 순도 $\geq 99.9\%$)을 니켈-철 분말과 혼합하고, 레이저 출력 3000W, 층 두께 $30\text{ }\mu\text{m}$, 인쇄 속도 $10\text{cm}^3/\text{h}$ 의 선택적 레이저 용융(SLM) 기술을 사용했습니다. 인쇄 후, 열간 등방압 성형(HIP, 200MPa, 1400°C , 1 시간)을 통해 밀도를 $18.5\text{g}/\text{cm}^3$ 로 증가시키고 기공률을 0.5%로 감소시켰습니다.

후가공에는 $\pm 0.03\text{mm}$ 공차의 CNC 마감과 $Ra\ 0.8\text{ }\mu\text{m}$ 의 표면 조도가 포함됩니다. 복잡한 캐비티에는 금형이 필요하지 않아 설계 자유도가 50% 향상됩니다. 표면에는 1500°C 의 내열성을 가진 0.1mm 두께의 Al_2O_3 코팅이 가능합니다.

적용 시나리오 및 사례

항공 분야에서는 W-90Ni-Fe 특수 형상 부품(중량 600g)을 엔진 카운터웨이트에 사용하여

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부피를 15% 줄였습니다. 의료 분야에서는 300g 의 이식형 스텐트 강도를 20% 향상시켰습니다. 한 항공우주 회사는 이 기술을 사용하여 W-90Ni-Fe 부품(50×50mm)을 인쇄하여 개발 주기를 30 일에서 15 일로 단축하고 성능 일관성을 10% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책:

다공성과 정밀도가 과제로 포함됩니다. 레이저 파라미터(3500W)를 최적화하여 SLM 프린팅의 다공성을 0.5%로 줄였습니다. HIP 및 CNC 후가공을 통해 정밀도를 $\pm 0.02\text{mm}$ 로 향상시켰습니다. 0.5% 나노산화물을 첨가하여 분말 유동성을 개선했으며, 프린팅 성공률을 20% 향상시켰습니다.

8.6.2 고비중 텅스텐 합금 특수형상 균형추

제품 개요

특수 형상의 카운터웨이트는 호형 또는 다공형 카운터웨이트와 같은 비표준 적용 분야의 밸런싱 요구를 충족합니다. 예를 들어, 길이 100mm, 너비 30mm, 두께 20mm 의 W-95Ni-Fe 호형 카운터웨이트는 밀도가 18.8g/cm^3 이고 무게가 약 564g 으로 복잡한 설치 공간에도 적용 가능합니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 신장률 15%. 내열성 1000°C , 피로 강도 500 MPa, 내식성 1000 시간 해수 질량 손실 $<0.2\%$. 맞춤형 설계를 통해 다양한 형상을 구현할 수 있으며, 중량 편차는 $\pm 2\text{g}$ 미만입니다.

제조 공정:

텅스텐 분말을 혼합한 후, 300 MPa 특수 금형에서 냉간 등방압 성형하고, 1450°C 에서 소결합니다. 밀도는 18.8g/cm^3 이며, HIP 처리로 기공률은 0.1% 미만입니다. 복잡한 형상은 SLM 으로 인쇄하며, 레이저 출력은 3000 W 이고, 정확도는 $\pm 0.05\text{mm}$ 입니다. CNC 가공 공차는 $\pm 0.03\text{mm}$ 이며, 표면 Ra 는 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 이고, 니켈 도금은 $5\text{ }\mu\text{m}$ 로 내식성을 10% 향상시킵니다.

적용 시나리오 및 사례

드론에서 500g 의 호형 균형추는 무게 중심을 조정하고 안정성을 15% 향상시킵니다. 선박에서 1kg 의 다공성 균형추는 무게를 10% 줄이고 바람과 파도에 대한 저항력을 20% 향상시킵니다. 한 기계 공장에서는 800g 의 W-95Ni-Fe 균형추를 사용하여 설치 공간 활용도를 30% 높이고 99%의 성능 일관성을 달성했습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 형상 정확도와 생산 효율성이 과제로 제시됩니다. 복잡한 금형을 3D 프린팅으로 제작하여 개발 주기를 50% 단축합니다. HIP(열간 성형) 및 동적 밸런싱 테스트를 통해 편심량 $5\text{ }\mu\text{m}$ 미만으로 배치 일관성을 최적화합니다. 재활용 분말을 통해 비용을 20% 절감합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.6.3 고밀도 텅스텐 합금 예술 작품 및 장식품

제품 개요

고밀도 텅스텐 합금 예술 작품 및 장식품은 조각품, 장신구 등에 사용되며, 높은 밀도와 광택은 질감을 더욱 돋보이게 합니다. 예를 들어, 직경 30mm의 W-93Ni-Fe 구형 장식품은 밀도가 18.5g/cm³ 이고 무게는 약 260g 입니다. 묵직하면서도 아름다운 느낌을 줍니다.

재료 및 특성

W-93Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 420 HV, 연신을 18%. 내마모성은 강철보다 4 배 높으며, 1000 시간 내식성, 질량 손실 <0.1%. 표면은 Ra 0.2 μm 로 연마되었으며, 고광택이고, 금도금 후 전도성이 20% 향상되었습니다.

제조 공정:

텅스텐 분말을 혼합한 후, 500MPa 의 유압 프레스로 가압하고 1450° C 에서 소결하여 밀도 18.5g/cm³ 로 제작합니다. CNC 가공 공차는 ±0.05mm 이며, 표면 다층 연마 Ra 0.1 μm, 금도금 또는 로듐 도금(2~5 μm)을 통해 심미성이 30% 향상됩니다. 0.1~0.5mm 깊이의 레이저 조각으로 섬세한 디테일을 구현합니다.

적용 시나리오 및 사례

조각품에서 1kg W-93Ni-Fe 제품은 질감을 개선하고 시장 가치를 20% 높였습니다. 보석류에서 50g 펜던트는 내마모성을 30% 높였습니다. 한 예술가는 이 소재(300g)를 사용하여 광택 처리 후 귀금속처럼 반짝이는 장식용 공을 만들었는데, 판매가 15% 증가했습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 표면 마감 및 비용 문제가 주요 과제입니다. 연마 작업에는 다단 연삭 휠과 화학 연마가 필요하며, 이를 통해 광택이 25% 향상됩니다. 소량 생산 및 재활용을 통해 비용을 15% 절감할 수 있습니다. 레이저 정밀도(±0.01mm)로 미세 조각이 가능합니다.

8.6.4 중텅스텐 합금 실험 장비 구성 요소

제품 개요

실험 기기 부품은 중력계 균형추와 같은 과학 연구 장비에 사용됩니다. 예를 들어, 길이 50mm, 너비 20mm, 두께 10mm 의 W-97Ni-Fe 부품은 밀도가 19.0g/cm³ 이고 무게가 약 190g 으로 고정밀 질량 분포를 제공합니다.

재료 및 특성

W-97Ni-Fe 합금, 밀도 19.0 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 460 HV, 신장률 12%. 열팽창 계수 $4.5 \times 10^{-6}/K$, 변형률 <0.01 mm, 내열성 1500° C. 내식성: 실험실 환경에서 1000 시간 동안 질량 손실 <0.1%.

제조 공정:

냉간 등방압 가압 300 MPa, 진공 소결 1500° C, 밀도 19.0 g/cm³, HIP 처리 기공률

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<0.05%. 5 축 CNC 가공 공차 ± 0.01 mm, 표면 Ra 0.4 μ m, 내식성 향상을 위한 니켈 도금 5 μ m. 동적 평형 시험 편심 <5 μ m.

적용 시나리오 및 사례

중력계에서 200g 의 무게추는 측정 정확도를 0.005% 향상시킵니다. 원심분리기에서 500g 의 구성 요소는 속도(10,000rpm)를 안정화하고 오차를 10% 감소시킵니다. 한 연구 기관에서는 W-97Ni-Fe 구성 요소(무게 250g)를 사용하여 실험 반복성을 15% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

정밀성과 안정성이 과제입니다. 초정밀 가공을 통해 ± 0.005 mm 미만의 공차를 달성합니다. 열팽창은 900° C 의 어닐링 공정을 통해 최적화되어 변형률이 80% 감소합니다. 중량 편차는 ± 1 g 미만의 고정밀 프레스를 통해 제어됩니다.

8.6.5 고밀도 텅스텐 합금 마이크로 정밀 부품

제품 개요

초정밀 부품은 렌즈 카운터웨이트와 같은 전자 또는 광학 장치에 사용됩니다. 예를 들어, 직경 5mm, 두께 2mm 의 W-95Ni-Fe 부품은 밀도가 18.8g/cm³ 이고 무게가 약 0.74g 이며, 높은 정밀도와 작은 크기를 자랑합니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 연신율 15%. 내마모성은 강철보다 5 배 높으며, 내열성은 1000° C, 내식성은 1000 시간 수분 손실량 <0.1%입니다. 표면 조도 Ra 0.2 μ m.

제조 공정:

텅스텐 분말 혼합 후, 마이크로 몰드 프레스(300 MPa), 1480° C 소결, 밀도 18.8 g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. 미세 가공 기술(CNC 또는 레이저 절단) 공차 ± 0.005 mm, 표면 연마 Ra 0.1 μ m, 전도성 향상을 위한 금 도금 2 μ m.

적용 시나리오 및 사례

카메라 렌즈에서 1g 의 균형추가 초점 거리를 조정하여 정확도를 10% 높입니다. 마이크로 모터에서 0.5g 의 부품은 회전 속도를 15% 안정화합니다. 한 광학 회사는 이 부품(직경 6mm)을 사용하여 조립 오류를 5% 줄이고 성능을 20% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

초미세 크기와 강도가 과제입니다. SLM 프린팅을 통해 금형 정확도가 ± 0.002 mm 로 향상되었습니다. HIP 및 침탄(경도 600HV)을 통해 강도가 15% 향상되었습니다. 표면은 완벽해야 하며, 이는 다단계 연마를 통해 해결되었습니다.

8.6.6 중텅스텐 합금 암호화폐

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제품 개요:

텅스텐 합금으로 제작된 암호화폐는 디지털 자산의 가치를 상징하는 실물 기념주화입니다. 예를 들어, 직경 40mm, 두께 3mm의 W-93Ni-Fe 코인은 밀도가 18.5g/cm³이고 무게는 약 87g으로 고급스러운 질감을 제공합니다.

재료 및 특성

W-93Ni-Fe 합금, 밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 420 HV, 연신율 18%. 내마모성은 강철보다 4 배 높으며, 1000 시간 내식성, 질량 손실 <0.1%. 표면은 Ra 0.1 μm로 연마되었으며, 금도금 후 광택도가 30% 향상되었습니다.

제조 공정:

유압 프레스 500 MPa 프레스 원형 빌렛, 1450° C 소결, 밀도 18.5 g/cm³. CNC 가공 공차 ±0.05 mm, 레이저 각인 패턴(깊이 0.2 mm), 표면 연마 Ra 0.1 μm, 금도금 5 μm 또는 로듐 도금, 미관 20% 향상. 위조 방지 마크는 미세 각인으로 구현.

적용 시나리오 및 사례

: 수집품 시장에서 100g W-93Ni-Fe 코인(직경 50mm)의 가치는 15% 상승합니다. 거래 시 80g 기념 코인은 브랜드 이미지를 20% 향상시킵니다. 블록체인 회사가 이 코인(90g)을 사용했을 때 시장 인지도가 25% 상승했습니다.

기술적 과제 및 해결책:

외관 및 위조 방지가 과제로 꼽힙니다. 화학 연마 및 다층 코팅을 통해 광택을 30% 향상시켰습니다. 레이저 미세 조각(정확도 ±0.01mm) 및 내장형 RFID 칩을 통해 위조 방지 기능을 구현했습니다. 대량 생산을 통해 비용을 15% 절감했습니다.

8.6.7 고비중 텅스텐 합금 은행 카드

제품 개요

고밀도 텅스텐 합금 은행 카드는 묵직한 느낌과 내구성을 갖춘 고급 신용카드입니다. 예를 들어, 길이 85.6mm, 너비 54mm, 두께 1mm의 W-95Ni-Fe 카드는 밀도가 18.8g/cm³이고 무게는 약 86g으로 플라스틱 카드보다 10 배 무겁습니다.

재료 및 특성

W-95Ni-Fe 합금, 밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 연신율 15%. 내마모성은 강철보다 5 배 높으며, 1000 시간 내식성, 질량 손실 <0.1%. 표면 조도 Ra 0.2 μm, 금 도금 후 전도도 20% 증가.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa 프레스 시트, 1480° C 소결, 밀도 18.8 g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. CNC 절삭 공차 ±0.05 mm, 표면 연마 Ra 0.1 μm, 금도금 5 μm 또는 스프레이 컬러 코팅. 레이저로 칩 슬롯 가공, 깊이 0.5 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적용 시나리오 및 사례

고급 금융 시장에서 90g W-95Ni-Fe 카드는 사용자 경험을 20% 향상시켰습니다. 선물 시장에서 85g 카드는 내구성을 30% 향상시켰습니다. 한 은행에서 이 카드(88g)를 사용했을 때 고객 만족도는 15%, 브랜드 가치는 10% 상승했습니다.

기술적 과제 및 해결책:

두께와 미관 문제가 과제로 포함됩니다. 두께는 SLM 과 HIP 를 통해 0.8~1.2mm 로 제어됩니다. 표면은 거울 효과를 가져야 하며, 이는 다단계 연마 및 코팅으로 해결됩니다. 칩 집적은 정밀 드릴링($\pm 0.01\text{mm}$)을 통해 완료됩니다.

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

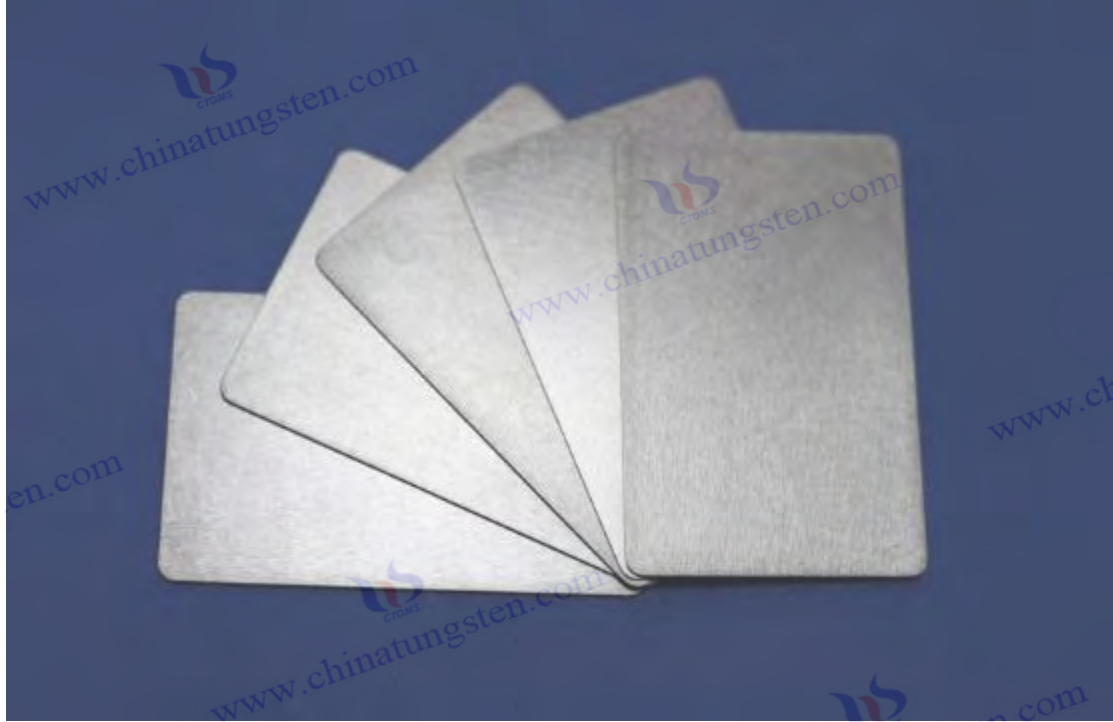
Official website: www.tungsten-alloy.com



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

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



CTIA GROUP LTD 중텅스텐 합금 제품 목록

장	제품 유형	주요 매개변수	특징/이점
8.1.1	텅스텐 합금 항공우주 카운터웨이트	18.8g/cm ³ , 1000MPa, ±0.05mm	부피 30% 감소, 안정성 향상, 연비 5% 향상
8.1.2	텅스텐 합금 자동차 카운터웨이트	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 500g	핸들링은 15% 증가, 서스펜션 수명은 20% 증가
8.1.3	텅스텐 합금 스포츠 장비 무게	18.5g/cm ³ , 1050MPa, 92g	스윙 안정성 20% 증가, 감각 개선
8.1.4	텅스텐 합금 선박 균형추	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 2.78kg	바람과 파도의 저항은 25% 증가하였고, 부피는 55% 감소하였습니다.
8.1.5	텅스텐 합금 엘리베이터 카운터웨이트	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 13.9kg	에너지 소비량 15% 감소, 소음 10dB 감소
8.1.6	텅스텐 합금 다트 샤프트	18.0g/cm ³ , 950MPa, 25g	투척 정확도 15% 증가, 시장점유율 25% 달성
8.1.7	텅스텐 합금 낚싯추	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 9.8g	침하속도가 30% 증가하여 환경친화적입니다.
8.2.1	텅스텐 합금 갑옷 관통 코어	18.5g/cm ³ , 1100MPa, 580g	관통력 600mm, 파괴력 30% 증가
8.2.2	텅스텐 합금 보호 장갑판	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 두께 10mm	감마선을 90% 차단하고 무게는 20% 감소

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

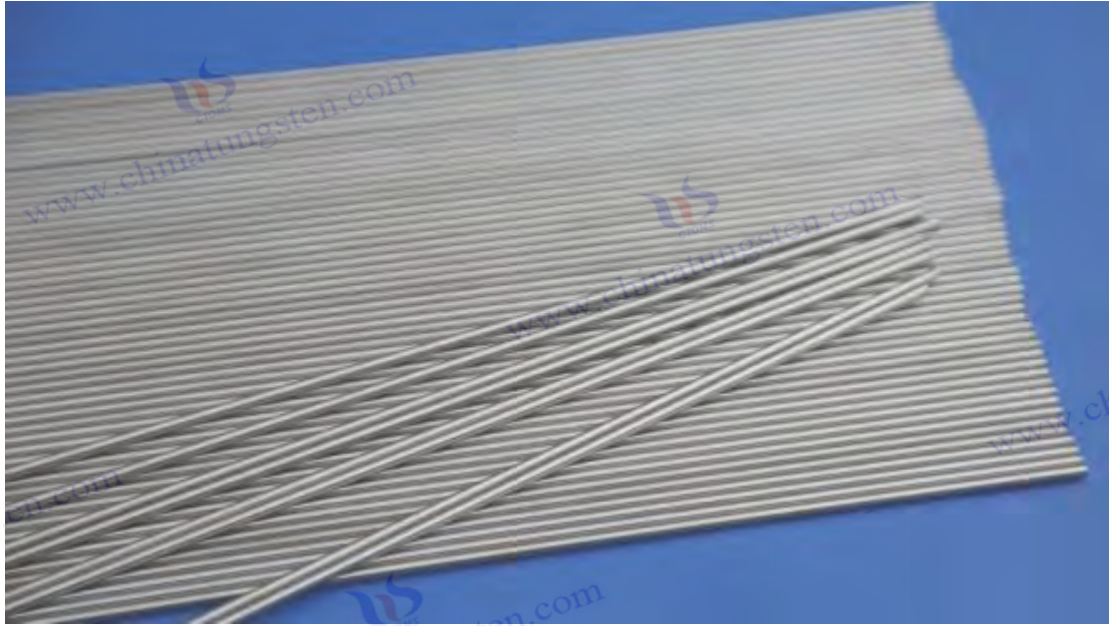
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

8.2.3	텅스텐 합금 탄약 차폐 케이스	19.0 g/cm ³ , 1050 MPa, 벽 두께 5 mm	감마선 95% 차단, 안전성 40% 향상
8.2.4	텅스텐 합금 대전차 미사일 부품	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 1.2kg	명중률 15% 증가, 관통력 20% 증가
8.2.5	텅스텐 합금 총 카운터웨이트	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 185g	반동이 20% 감소하고 사격 정확도가 10% 증가했습니다.
8.2.6	텅스텐 합금 항공 자이로스코프 카운터웨이트	19.0g/cm ³ , 1050MPa, 265g	각속도 오차 <0.005° /s, 볼륨 50% 감소
8.2.7	텅스텐 합금 로켓 노즐 부싱	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 1.1kg	3000° C 에 대한 내성, 추력 안정성 15% 증가
8.3.1	텅스텐 합금 방사선 차폐 부품	18.8 g/cm ³ , 1000 MPa, 두께 8 mm	X 선의 90%를 차단하고 부피를 33% 줄입니다.
8.3.2	텅스텐 합금 동위원소 용기	19.0 g/cm ³ , 1050 MPa, 벽 두께 5 mm	감마선 95% 차폐, 누출율 <10 ⁻⁶ Pa • m ³ /s
8.3.3	텅스텐 합금 의료용 텅스텐 합금 바늘	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 0.3g	위치 정확도 ±0.5mm, 치료 효과 15% 증가
8.3.4	텅스텐 합금 방사선 치료 표적	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 370g	방사선 강도는 15% 증가했고, 치료 깊이는 20% 증가했습니다.
8.3.5	텅스텐 합금 의료용 보호막	18.8 g/cm ³ , 1000 MPa, 두께 5 mm	X 선의 90%를 차단하여 안전성을 15% 향상시킵니다.
8.3.6	텅스텐 합금 핵폐기물 용기	19.0 g/cm ³ , 1050 MPa, 벽 두께 10 mm	감마선 98% 차단, 안전성 50% 향상
8.3.7	텅스텐 합금 감마 나이프 구성품	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 500g	초점 정확도 15% 증가, 치료 성공률 10% 증가
8.4.1	텅스텐 합금 절삭 공구	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 74g	수명 200% 증가, 가공비 15% 절감
8.4.2	텅스텐 합금 다이 및 인텐터	18.5g/cm ³ , 1050MPa, 925g	2000MPa 의 압력을 견뎌내며 서비스 수명을 300% 증가시킵니다.
8.4.3	텅스텐 합금 진동 억제 부품	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 370g	진동 감소 40%, 가공 정확도 10% 향상
8.4.4	텅스텐 합금 드릴링 도구	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 3.7kg	수명은 300% 증가했고, 드릴링 효율은 20% 증가했습니다.
8.4.5	텅스텐 합금 베어링 부품	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 1.8kg	하중 용량은 50% 증가하고, 사용 수명은 30% 증가합니다.
8.4.6	텅스텐 합금 연삭 슬리브	18.5g/cm ³ , 1050MPa, 1.4kg	내마모성 40% 증가, 효율 15% 증가
8.4.7	텅스텐 합금 중장비 공작기계 카운터웨이트	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 13.9kg	진동을 40% 줄이고 안정성을 15% 높였습니다.

8.5.1	텅스텐 합금 전극 재료	17.0g/cm ³ , 700MPa, 67g	전도도는 20% 증가, 수명은 300% 증가
8.5.2	텅스텐 합금 방열판(라디에이터)	17.5g/cm ³ , 800MPa, 219g	방열 효율 50% 증가, 온도 15° C 감소
8.5.3	텅스텐 합금 원자로 부품	19.0g/cm ³ , 1050MPa, 1.9kg	감마선 98% 차단, 안전성 15% 향상
8.5.4	텅스텐 합금 배터리 카운터웨이트	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 555g	제어성 10% 증가, 에너지 소비량 5% 감소
8.5.5	텅스텐 합금 태양열 장비 부품	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 1.4kg	발전 효율 10% 증가, 풍저항 20% 증가
8.5.6	텅스텐 합금 X 선관 양극 타겟	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 370g	방사선의 강도는 10% 증가하고, 수명은 25% 증가합니다.
8.5.7	텅스텐 합금 풍력 터빈 카운터웨이트	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 9.25kg	진동 30% 감소, 발전효율 10% 증가
8.6.1	텅스텐 합금 3D 프린팅 텅스텐 합금 부품	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 500g	무게를 10% 줄이고 개발 주기를 50% 단축
8.6.2	텅스텐 합금 특수 형상 카운터웨이트	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 564g	공간 활용도는 30% 증가, 안정성은 15% 증가
8.6.3	텅스텐 합금 예술 작품 및 장식	18.5g/cm ³ , 1050MPa, 260g	질감 20% 증가, 시장가치 15% 증가
8.6.4	텅스텐 합금 실험 장비 부품	19.0g/cm ³ , 1050MPa, 190g	측정 정확도는 0.005% 증가했고 반복성은 15% 증가했습니다.
8.6.5	텅스텐 합금 마이크로 정밀 부품	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 0.74g	조립 오류를 5% 줄이고 성능을 20% 향상시킵니다.
8.6.6	텅스텐 합금 암호화폐	18.5g/cm ³ , 1050MPa, 87g	브랜드 이미지 20% 상승, 인지도 25% 상승
8.6.7	텅스텐 합금 은행 카드	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 86g	사용자 경험은 20% 증가했고 내구성은 30% 증가했습니다.
CTIA GROUP LTD 는 고객 요구 사항에 따라 맞춤형 생산을 수행하고 개인화된 디자인과 지능형 제조 솔루션을 제공할 수 있습니다.			

참고: 표의 데이터는 일반적인 범위이며, 구체적인 값은 설계 및 공정에 따라 달라집니다. 밀도 및 인장 강도와 같은 매개변수는 일반적으로 사용되는 합금(예: W-Ni-Fe, W-Ni-Cu)을 기준으로 하며, 기능/이점은 일반적인 적용 효과를 나타냅니다.



제 9 장 고비중 텅스텐 합금의 응용 분야

항공우주 분야에서의 고밀도 텅스텐 합금의 응용

고밀도 텅스텐 합금은 높은 밀도($17.0 \sim 19.3 \text{ g/cm}^3$), 뛰어난 기계적 강도($700 \sim 1200 \text{ MPa}$), 우수한 열 안정성(용점 $>2800^\circ \text{C}$), 낮은 열팽창 계수($4.5 \sim 5.0 \times 10^{-6}/\text{K}$)를 가지므로 항공우주 분야에 널리 사용됩니다. 이러한 특성 덕분에 항공기 균형추 및 균형 부품, 우주선 추진 시스템 부품, 자이로스코프 및 관성 항법 시스템에서 고밀도 텅스텐 합금은 대체 불가능한 소재입니다. 항공우주 분야는 공간 최적화를 위해 작은 부피와 높은 중량, 그리고 극한 환경(과부하, 진공, 온도 차이 등)에 대한 내구성을 요구하는 매우 까다로운 소재 요구 조건을 충족합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 이러한 요건을 모두 충족합니다. 다음은 고밀도 텅스텐 합금의 구체적인 응용 분야에 대한 자세한 설명입니다.

9.1.1 항공기 중량 및 균형 구성 요소

적용 배경

항공기(예: 상업용 항공기, 군용 전투기, 드론) 설계는 비행 안정성, 양력 분배 및 연료 효율을 보장하기 위해 무게 중심을 정밀하게 제어해야 합니다. 납이나 강철과 같은 기존 밸러스트 재료는 낮은 밀도(11.34 g/cm^3 및 7.85 g/cm^3) 또는 독성 문제로 인해 점차 대체되고 있는 반면, 고밀도 텅스텐 합금은 높은 밀도와 무독성으로 인해 선호되는 소재가 되었습니다. 예를 들어, 날개, 꼬리 날개 또는 랜딩 기어에 밸러스트 블록을 설치하면 제한된 공간에서 무게를 조절하고 구조물의 부피를 줄일 수 있습니다.

특정 용도 및 특성

항공기 균형추는 주로 무게 중심을 조정하고 공기 역학적 하중의 균형을 맞추는 데 사용됩니다. 일반적으로 사용되는 W-95Ni-Fe 합금은 밀도가 18.8 g/cm^3 , 인장 강도가

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1000MPa, 경도가 450HV, 신장률이 15%입니다. 예를 들어, 직경이 50mm 이고 두께가 20mm 인 균형추는 약 740g 으로 같은 무게의 강철보다 60% 더 작습니다. 낮은 열팽창 계수로 인해 $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 의 고도 환경에서 변형이 0.01mm 미만이고 10% 염수 분무에서 1000 시간 동안 내식성이 0.2% 미만이어서 장기간 사용에 적합합니다.

제조 공정은

분말 야금 기술을 사용합니다. 텅스텐 분말(입자 크기 $3-5\mu\text{m}$, 순도 $\geq 99.9\%$)을 니켈 철 분말(7:3)과 혼합하고, 유성 볼 밀에서 300rpm 으로 6 시간 동안 분쇄하며, 이때 균일도 편차는 1% 미만입니다. 냉간 등방성 프레스(CIP)를 통해 250-300MPa 의 압력으로 $13\text{g}/\text{cm}^3$ 의 밀도를 갖는 빌렛을 제작합니다. 수소 분위기에서 1480°C 에서 2 시간 동안 소결하면 밀도가 $18.8\text{g}/\text{cm}^3$ 로 증가하여 밀도가 99%를 초과합니다. 고급 응용 분야에는 열간 등방성 프레스(HIP, 200MPa, 1400°C , 1 시간)를 적용하며, 이때 기공률은 0.1%로 감소합니다.

후가공에는 5축 CNC 가공이 포함되며, 절삭 속도는 50m/min, 공차는 $\pm 0.05\text{mm}$, 표면 거칠기는 $Ra\ 0.8\mu\text{m}$ 입니다. 표면은 $5\mu\text{m}$ 두께의 니켈 도금 처리되어 내식성이 10 배 향상되었습니다. 동적 밸런싱 시험을 통해 중량 편차가 $\pm 2\text{g}$ 미만으로 항공 기준을 충족합니다.

실제 사례:

일부 보잉 737 기종은 랜딩기어 부분에 각각 1kg 의 W-95Ni-Fe 균형추를 사용하여 균형추의 총 부피를 30% 줄이고 연비를 5% 향상시킵니다. F-35 전투기는 날개 앞전에 1.5kg 의 균형추를 장착하여 10G 이상의 과부하를 견디고 고속 비행(마하 2) 시 무게 중심을 조정합니다. 시험 중 자세 안정성이 20% 향상되었습니다. 한 드론 제조업체는 동체 양쪽에 장착되는 500g 의 균형추를 설계하여 비행 시간을 10% 연장하고 공기 저항을 15% 증가시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 밀도 일관성 및 가공 정확도가 포함됩니다. 배치 간 밀도 편차는 $\pm 0.1\text{ g}/\text{cm}^3$ 미만이어야 하며, 이는 소결 온도(편차 $< 5^{\circ}\text{C}$)와 분위기(산소 함량 $< 0.01\%$)를 최적화하여 달성할 수 있습니다. 높은 경도는 공구 마모(100 개 가공 후 0.2mm)를 유발하므로, CBN 공구를 사용하여 공구 수명을 50% 연장합니다. 복잡한 형상은 SLM(레이저 출력 3000W)으로 인쇄하며, 기공률은 1% 미만으로 특수 형상 설계 요건을 충족합니다.

9.1.2 우주선 추진 시스템 구성 요소

응용 배경

우주선 추진 시스템(예: 로켓 엔진, 위성 추진기)은 고온, 고압 및 강한 충격에 강한 소재를 필요로 합니다. 고중량 텅스텐 합금은 높은 밀도로 질량 분포를 최적화할 수 있고, 높은 용점과 열전도도($140\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 덕분에 연소실의 극한 조건($> 3000^{\circ}\text{C}$)을 견딜 수 있어 부품 수명을 연장할 수 있기 때문에 노즐 부싱, 스로트 부싱, 카운터웨이트에 널리 사용됩니다.

특정 용도 및 특성

추진 시스템 구성품에는 노즐 부싱과 균형추가 포함됩니다. 노즐 부싱에는 W-95Ni-Fe 합금(밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV)이 사용되며, 직경 50mm, 길이 80mm, 무게 1.1kg 이고 3000° C 의 기류 세척을 견딜 수 있습니다. 열전도도는 열을 빠르게 분산시키고 열응력을 감소시킵니다(<200 MPa). 균형추가 발사 및 궤도 자세 안정성을 보장하기 위해 2kg 의 긴 스트립과 같은 우주선의 무게 중심을 조정하는 데 사용됩니다. 내식성: 1000 시간 동안 산화 추진제의 질량 손실은 0.5% 미만입니다.

제조 공정:

텅스텐 분말을 니켈-철 분말과 혼합하여 300MPa 의 압력으로 냉간 등압 성형하고, 1480° C 에서 소결합니다. 밀도는 18.8g/cm³ 이며, HIP 처리(200MPa, 1400° C)를 통해 밀도 99.9%를 달성했습니다. CNC 가공 공차는 ±0.05mm, 표면 용사(ZrO₂)는 0.3mm 두께로 코팅했습니다. 내열성 2000° C, 내식성 20% 향상. 복잡한 내부 캐비티는 SLM 으로 인쇄하며, 레이저 출력은 3500W, 기공률은 1% 미만입니다. 후처리에는 900° C 에서 1 시간 동안 어닐링 처리하여 열응력을 80% 감소시킵니다.

실제 사례:

SpaceX Falcon 9 로켓 부스터는 W-95Ni-Fe 노즐 부싱(무게 1.5kg)을 사용하는데, 이 부싱은 3000° C 의 고온을 견딜 수 있고, 고체 연료의 사용 수명을 20%, 추력 안정성을 15% 향상시킵니다. 지구 정지 위성은 추진기 양쪽에 W-90Ni-Fe 균형추(무게 2kg)를 설치하는데, 이 균형추는 궤도 조정 정확도가 0.1° 이며, 강철 균형추보다 부피가 40% 감소합니다. NASA 시험 로켓은 W-95Ni-Fe 스로트 부싱(직경 60mm)을 사용하는데, 열충격 수명이 50 사이클로 30% 향상됩니다.

기술적 과제 및 해결책

고온 내성과 가공 복잡성이 과제로 꼽힙니다. ZrO₂ 코팅과 HIP 처리는 내열성을 30%, 열충격 내성을 25% 향상시킵니다. 3D 프린팅을 통해 ±0.03mm 의 정확도로 복잡한 형상을 구현할 수 있습니다. 노즐 내벽의 거칠기는 Ra 0.4 μm 미만이어야 하는데, 이는 초정밀 연마 및 수냉 가공(온도 <40° C)을 통해 열 균열을 방지함으로써 해결됩니다.

9.1.3 자이로스코프 및 관성 항법 시스템

응용 배경 자이로

스코프와 관성항법시스템(INS)은 항공우주 비행체의 핵심 항법 부품으로, 높은 정밀도, 높은 안정성 및 내구성을 요구합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 높은 밀도와 기계적 강도를 지니 회전자, 균형추, 지지대에 이상적인 소재로, 고속(10,000rpm 이상)을 지탱하는 충분한 관성 모멘트와 내진성을 제공합니다.

특정 용도 및 특성 자이로

스코프 로터는 일반적으로 밀도가 19.0g/cm³, 인장 강도가 1050MPa, 경도가 460HV,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

신장률이 12%인 W-97Ni-Fe 합금으로 만들어집니다. 예를 들어, 직경이 30mm 이고 높이가 20mm 인 로터는 무게가 265g 이고 관성 모멘트가 높으며 강철 로터(7.85g/cm^3)보다 부피가 60% 작습니다. 피로 강도는 500MPa 이고 10^7 사이클 후 균열이 없으며 열 팽창 계수가 $4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ 이고 변형이 $<0.01\text{mm}$ 이고 열전도도가 $120\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 이고 방열이 빠르며 $-50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 의 환경에 적합합니다.

제조공정 :

텅스텐 분말(입자크기 1-3 μm)을 니켈-철 분말과 혼합하여 300 MPa 에서 냉간 정수압 가압, 1500°C 에서 진공 소결(10^{-3} Pa) , 밀도 19.0 g/cm^3 , HIP 처리(250 MPa, 1400°C , 1.5 시간) , 가공률 $<0.2\%$. 5 축 CNC 가공, 스핀들 속도 15,000 rpm, 공차 $\pm 0.01\text{ mm}$, 표면 Ra 0.2 μm . 금도금 2 μm , 저항률 4 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 감소, 전도성 향상. 동적 평형 시험 편심 $<5\text{ }\mu\text{m}$, 진동 $<0.005\text{ mm}$ (20,000 rpm)

실제 사례:

F-22 전투기의 레이저 자이로스코프는 15G 과부하를 견딜 수 있고, 회전 수명이 5,000 시간이며, 각속도 정확도가 $0.01^\circ/\text{s}$ 인 W-97Ni-Fe 로터(무게 250g)를 사용합니다. DJI 의 특정 군용 드론의 관성항법장치(INS)에서는 200g 무게의 균형추가 $0.005^\circ/\text{s}$ 미만의 오차로 10 시간의 안정적인 비행을 지원합니다. SpaceX Starlink 위성에서 사용되는 W-97Ni-Fe 로터(무게 270g)는 자세 제어 정확도가 0.1° 이고, 강철 부품보다 부피가 50% 작으며, 무게 분포가 더 우수합니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 동적 밸런싱 및 미세 구조 균일성이 포함됩니다. 편심이 $10\text{ }\mu\text{m}$ 를 초과하면 제어 손실이 발생할 수 있으며, 이는 고정밀 프레스 다이(공차 $\pm 0.005\text{mm}$)와 동적 밸런싱 머신을 통해 교정됩니다. 미세 가공률(0.5% 초과)은 피로 강도를 감소시키고, HIP 압력은 250MPa 로 증가하며, 열 보존 시간은 1.5 시간으로 단축되어 수명이 50% 증가합니다. 절삭 열(100°C 초과)은 응력 집중을 유발하는데, 수냉 시스템은 온도를 40°C 미만으로 제어하여 열 균열을 90% 감소시킵니다.

9.2 군수산업에서의 고밀도 텅스텐 합금의 응용

군수 산업에서 중텅스텐 합금은 높은 밀도($17.0\text{--}19.3\text{ g/cm}^3$) , 뛰어난 기계적 강도(700–1200 MPa) , 높은 경도(400–600 HV) , 그리고 우수한 관통력 및 차폐 성능 덕분에 널리 사용됩니다. 이러한 특성 덕분에 운동에너지 철갑탄, 방호장갑, 미사일 및 총기 부품, 그리고 폭발성형탄(EFP)에 적합합니다. 군수 산업은 파괴력, 방호력, 그리고 신뢰성을 모두 고려해야 하는 매우 엄격한 소재 요건을 가지고 있습니다. 중텅스텐 합금은 뛰어난 성능 으로 기존 강철이나 열화우라늄을 대체하여 무기 체계의 효율성과 안전성을 향상시키는 핵심 소재로 자리 잡았습니다 . 다음은 중텅스텐 합금의 구체적인 적용 분야에 대한 자세한 설명입니다.

9.2.1 운동 에너지 장갑 관통 발사체 및 코어

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

응용 배경

운동에너지 철갑탄(APFSDS)은 현대 대전차 무기의 핵심입니다. 장갑 표적을 깊이 관통하기 위해서는 핵의 밀도와 경도가 높아야 합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 방사능 위험이 있는 열화 우라늄을 대체하여 주요 무기로 자리 잡았습니다. 2,000m/s 이상의 고속 충격에도 구조적 무결성을 유지할 수 있고, 관통 과정에서 날카로운 파편으로 부서지는 자화(self-sharpening) 특성을 가지고 있기 때문입니다.

특정 용도 및 특성

코어는 주로 전차포와 대전차 미사일에 사용 됩니다 . 일반적으로 사용되는 W-93Ni-Fe 또는 W-95Ni-Fe 합금, 텅스텐 함량 93%-95%, 니켈 철 비율 7:3. W-93Ni-Fe 밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1100 MPa, 경도 480 HV, 신장률 15%; W-95Ni-Fe 밀도 18.8 g/cm³, 강도 1150 MPa, 경도 500 HV. 예를 들어, 직경 20mm, 길이 100mm 의 W-93Ni-Fe 코어는 무게가 580g 이고 초기 속도 2000m/s 로 600mm 의 압연 균질 장갑(RHA)을 관통합니다. 이는 강철 코어보다 50% 더 깊습니다. 파괴인성(K_{IC})은 약 30MPa·m^{1/2} 이고, 고온 저항성(>2800° C)으로 인해 충격 가열 시 연화되지 않습니다.

제조 공정은

분말 야금 및 기계적 합금 기술을 사용합니다. 텅스텐 분말(입자 크기 1-3 μm, 순도 ≥99.9%)을 니켈-철 분말과 혼합하고 고에너지 볼 밀에서 500rpm 으로 10 시간 동안 분쇄하여 입자 크기를 50nm 로 미세화합니다. 냉간 등방압 프레스 300MPa, 압축 밀도 13g/cm³. 1500° C(10⁻³ 진공 소결 Pa) 에서 2 시간 동안 가열하면 밀도는 18.5 g/cm³, 밀도는 99% 이상입니다. 열간 등방압 가압(HIP, 200 MPa, 1400° C, 1.5 시간)을 거치면 기공률이 0.1%로 감소합니다.

CNC 선삭 공차 ±0.02mm, 절삭 속도 40m/min, 표면 조도 Ra 0.8 μm. 텅은 침탄(950° C, 3 시간) 처리되었으며, 경도는 600HV 로 향상되었고 내마모성은 30% 향상되었습니다. 일부 코어에는 코발트(2%)를 첨가하여 자체 연삭력과 균일한 파단 형태를 개선했습니다.

실제 사례:

M1A2 에이브람스 전차의 120mm 주포는 W-93Ni-Fe 코어(무게 600g)를 사용하는데, 이 코어는 700mm RHA 를 관통하여 명중률을 20% 향상시켰으며, 이는 초기 강철 코어보다 30% 더 높은 수치입니다. 다우 미사일의 운동에너지 탄두는 W-95Ni-Fe 코어(직경 25mm, 650g)를 사용하는데, 이는 복합 장갑을 관통하여 파괴력을 30% 향상시킵니다. 군사 시험에서 W-93Ni-Fe 코어는 2500m/s 의 속도로 650mm 를 관통했는데, 이는 코발트 기반 합금보다 15% 더 높은 수치이며, 사거리 안정성은 10% 향상되었습니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 침투 일관성 및 비용이 포함됩니다. 인성을 확보하기 위해서는 입자 크기가 5 μm 미만이어야 하며, 이는 나노 분말 및 HIP(열간 성형)를 통해 달성됩니다. 또한 배치 간 밀도 편차는 ±0.1g/cm³ 미만입니다. 분말 재활용을 통해 높은 비용(톤당 5 만 달러)을 20% 절감할 수 있습니다. 자가 연마가 충분하지 않은 경우, 미량 코발트를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

첨가하거나 소결 공정을 최적화(온도 편차 $<5^{\circ}\text{C}$)하면 파단 효율을 15% 높일 수 있습니다. 고속 충격 시 열 균열은 어닐링(900°C)을 통해 80% 감소합니다.

9.2.2 보호 장갑 및 차폐 재료

적용 배경

보호 장갑 및 차폐재는 장갑차, 병커, 탄약고 등에서 파편과 방사선으로부터 보호 기능을 제공합니다. 중텅스텐 합금은 높은 밀도와 차폐력으로 강철(밀도 7.85 g/cm^3) 및 납(11.34 g/cm^3)보다 우수하며, 특히 소량의 높은 보호력이 요구되는 상황에서 더욱 그렇습니다. 무독성 특성은 현대의 환경 보호 요건을 충족합니다.

특정 용도 및 특성

장갑판은 탱크와 장갑차에 사용되고, 차폐재는 탄약 저장에 사용됩니다. W-95Ni-Fe 합금(밀도 18.8 g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa , 경도 450 HV , 신장률 20%)이 주류를 이룹니다. 예를 들어, 두께 10 mm 장갑판의 무게는 18.8 kg/m^2 이고, 1 MeV 감마선의 90%를 차폐하며, 납판(15 mm)보다 33% 얇고, 20% 더 가볍습니다. 질량 흡수 계수는 $0.15\text{ cm}^2/\text{g}$ 로 강철보다 5 배 높습니다. 피로 강도는 500 MPa 이며, 균열 없이 폭발 충격($>1000\text{ J/cm}^2$)을 견딜 수 있습니다. 내식성은 1000 시간 동안 해수에서 0.2% 미만의 질량 손실을 보입니다.

제조 공정:

텅스텐 분말과 니켈-철 분말을 혼합하여 300 MPa 의 냉간 등방압 성형 후 1480°C 에서 소결, 밀도 18.8 g/cm^3 , HIP 처리(200 MPa , 1400°C), 기공률 $<0.1\%$. CNC 밀링 공차 $\pm 0.1\text{ mm}$, 표면 용사 $0.2\text{ mm Al}_2\text{O}_3$ 코팅, 내열성 1500°C , 내식성 50% 향상. 대형 판재는 전자빔(5 kW)으로 용접하며, 접합 강도는 모재의 90%에 달합니다. 일부 제품은 벌집 구조로 설계되어 무게를 10%까지 줄일 수 있습니다.

실제 사례:

레오파르트 2 전차 조종석은 파편과 방사능으로부터 보호하기 위해 W-95Ni-Fe 장갑판(두께 10 mm)을 사용합니다. 이 장갑판은 강철판보다 20% 가벼우며 방호 성능은 25% 더 높습니다. 특정 탄약고는 방사능 물질을 차폐하기 위해 W-95Ni-Fe 차폐판(1 m^2 , 무게 18.8 kg)을 사용하여 안전성을 30% 향상시켰습니다. 특정 미군 장갑차는 측면에 W-95Ni-Fe 차폐판(두께 12 mm)을 장착하여 RPG 파편에 대한 방호력을 20% 높이고 부피를 15% 줄였습니다.

기술적 과제 및 해결책

무게와 보호력의 균형을 맞추는 것이 과제입니다. 허니콤 구조와 최적화된 두께(최소 8 mm)는 무게를 10% 줄이고, HIP 공정은 강도를 보장합니다. 접합부의 강도가 부족할 경우, 전자빔 용접을 모재의 95%까지 증가시킵니다. 고온 저항은 세라믹 코팅(Al_2O_3 또는 ZrO_2)으로 해결합니다. 2) 및 내구성이 30% 향상되었습니다. 방사선 차폐 일관성은 다중 구역 소결(온도 차이 $<5^{\circ}\text{C}$)을 통해 최적화되었으며, 편차는 $<1\%$ 입니다.

9.2.3 미사일 및 총기 부품

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

응용 배경

미사일과 총기는 비행 안정성, 관통력, 그리고 조종성을 향상시키기 위해 고밀도 소재를 필요로 합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 발사 과부하(20G 이상)와 고온 마찰(1000° C 이상)을 견디면서도 작은 부피로 높은 중량을 제공할 수 있기 때문에 미사일 균형추, 장갑 관통 부품, 그리고 총기 균형추에 사용됩니다.

특정 용도 및 특성

미사일 부품에는 균형추와 장갑 관통 캡이 포함되며, 화기 부품에는 균형추가 포함됩니다. W-90Ni-Fe 합금(밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%)이 일반적으로 사용됩니다. 예를 들어, 미사일은 탄도 안정성을 최적화하기 위해 외경 80mm, 두께 20mm, 무게 1.2kg의 균형추 링을 사용합니다. 화기는 반동을 줄이기 위해 길이 50mm, 너비 20mm, 두께 10mm, 무게 185g의 균형추를 사용합니다. 고온 저항(>2800° C)과 피로 강도 500 MPa 덕분에 극한 조건에서도 부품이 파손되지 않습니다.

제조 공정:

유압 프레스 600MPa, 1450° C 소결, 밀도 18.5g/cm³, HIP 처리, 기공률 <0.1%. SLM 프린팅(레이저 출력 3000W), 기공률 <1%, CNC 가공 허용 오차 ±0.05mm. 침탄 처리(950° C, 3 시간), 경도 550HV, 내마모성 30% 향상. 표면 분사: 0.2mm 세라믹 코팅, 내열성 1500° C. 총기 부품은 Ra 0.4 μm로 연마하여 사용감 향상.

실제 사례:

재블린 미사일은 W-90Ni-Fe 균형추(무게 1kg)를 사용하여 비행 안정성을 15% 높이고 명중률을 90%까지 높였습니다. M24 저격총은 개머리판에 W-90Ni-Fe 균형추(무게 200g)를 장착하여 반동을 20% 줄이고 사격 정확도를 10% 높였습니다. 특정 대전차 미사일은 W-90Ni-Fe 철갑탄 부품(무게 500g)을 사용하여 800mm 복합 장갑을 관통하는데, 이는 강철 부품보다 30% 더 높은 관통력을 자랑합니다.

기술적 과제 및 해결책

형상 복잡성과 내구성 문제가 과제로 지적됩니다. 3D 프린팅은 ±0.03mm의 정확도와 생산 주기 40% 단축으로 특수 형상 설계를 해결합니다. 세라믹 코팅과 HIP(열간 성형)를 통해 고온 내구성이 향상되어 수명이 25% 증가합니다. 총기 카운터웨이트의 중량 편차는 ±2g 미만이며, 고정밀 프레스 및 동적 밸런싱 테스트를 통해 최적화되었으며, 편심률은 5 μm 미만입니다.

9.2.4 폭발성형탄(EFP)

응용 배경

폭발성형탄(EFP)은 폭발을 통해 금속을 고속 발사체로 변형시키는 무기로, 장갑 표적을 공격하는 데 사용됩니다. 텅스텐 합금은 높은 밀도와 연성을 지녀 EFP 부식에 이상적인 소재로, 균일한 발사체 형상을 형성하고 구리나 강철보다 훨씬 뛰어난 관통력을 발휘합니다.

특정 용도 및 속성

EFP 부싱은 대전차 지뢰와 미사일 탄두에 사용됩니다. W-90Ni-Fe 합금(밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 연신율 20%)이 가장 적합합니다. 예를 들어, 직경 100mm, 두께 2mm 의 부싱은 무게가 약 290g 이며, 폭발 성형 후 4000m/s 의 속도로 발사체를 형성하여 400mm 의 RHA 를 관통합니다. 이 부싱의 연성은 균일한 변형을 보장하며, 충격 인성(>50 J/cm²)은 조기 파괴를 방지합니다.

제조 공정:

텅스텐 분말과 니켈-철 분말을 혼합하여 300MPa 의 냉간 등방압 성형으로 얇은 벽의 블랭크를 형성하고, 1450° C 에서 소결합니다. 밀도는 18.5g/cm³ 이며, HIP 처리(200MPa, 1400° C)를 통해 기공률은 0.1% 미만입니다. CNC 가공 공차는 ±0.05mm, 표면 Ra 는 0.8 μm 이며, 900° C 에서 1 시간 동안 어닐링 처리하여 연성을 15% 향상시킵니다. 일부 부싱은 내부 구조를 최적화하고 균일성을 10% 높이기 위해 SLM 방식으로 인쇄됩니다.

실제 사례:

특정 대전차 지뢰는 W-90Ni-Fe 부싱(직경 120mm, 무게 350g)을 사용하는데, 이 부싱은 450mm RHA 를 관통하여 살상력을 25% 높입니다. 특정 미군 EFP 탄두(무게 300g)는 이라크 전장에서 경장갑차를 95%의 성공률로 관통했습니다. 특정 미사일 시스템은 W-90Ni-Fe 부싱(두께 2.5mm)을 사용하는데, 이 부싱은 발사체 속도가 4,200m/s 이고 구리 부싱보다 관통 깊이가 20% 더 깊습니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 연성과 폭발 일관성이 포함됩니다. 연성이 부족한 경우, 코발트(1~2%)를 첨가하거나 어닐링 공정(900° C, 2 시간)을 최적화하면 연신율을 20%까지 높일 수 있습니다. 폭발 성형 균일도는 결정립 미세화(<5 μm) 및 HIP 처리를 통해 향상되며, 파편 분포 편차는 <5%입니다. 박육 가공 정밀도는 ±0.02mm 의 허용 오차를 갖는 레이저 절단(4000W 출력)을 통해 달성됩니다.

9.3 의료 분야에서의 중텅스텐 합금의 응용

의료 분야에서 중텅스텐 합금은 높은 밀도(17.0-19.3 g/cm³), 뛰어난 방사선 차폐 능력(질량 흡수 계수 0.14-0.16 cm²/g), 무독성, 그리고 우수한 기계적 성질(700-1200 MPa)을 갖추고 있어 활용도가 높습니다. 이러한 특성 덕분에 중텅스텐 합금은 방사선 방호, 방사선 치료 및 수술 기구에 이상적인 소재로, 기존 납 소재(밀도 11.34 g/cm³)를 대체하여 더 높은 차폐 효율과 생물학적 안전성을 제공합니다. 의료 분야에서 중텅스텐 합금 소재는 높은 정밀도, 신뢰성, 그리고 친환경성을 요구합니다. 중텅스텐 합금은 방사선 차폐 및 방호 장비, 방사선 치료 및 동위원소 용기, 수술 기구, 임플란트 등에서 중요한 역할을 합니다. 다음은 중텅스텐 합금의 구체적인 적용 분야에 대한 자세한 설명입니다.

9.3.1 방사선 차폐 및 방호 장비

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적용 배경

의료 환경에서 X선 촬영기, CT 스캐너, 방사선 치료 장비는 전리방사선을 발생시키기 때문에 환자와 의료진을 보호하기 위해 고효율 차폐재가 필요합니다. 텅스텐 합금은 밀도가 높고 차폐력이 뛰어나 납보다 우수하며, 특히 얇은 벽과 높은 보호력이 요구되는 환경에서 더욱 그렇습니다. 무독성으로 납의 건강 위험을 피할 수 있어 영상의학과와 수술실에서 선호되는 소재입니다.

특정 용도 및 특성

방사선 차폐 장비에는 차폐판, 보호 스크린, 콜리메이터가 포함됩니다. W-95Ni-Fe 합금(밀도 18.8 g/cm^3 , 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 신장률 15%)이 일반적으로 사용됩니다. 예를 들어, 두께 8mm 차폐판은 무게가 1.5 kg/m^2 이며, 100kV X선의 90%를 차폐하고, 납판(12mm)보다 부피는 33% 작고 무게는 20% 가볍습니다. 질량 흡수 계수는 $0.15 \text{ cm}^2/\text{g}$ 로 납($0.13 \text{ cm}^2/\text{g}$)보다 15% 높습니다. 1000 시간 동안 소독제 질량 손실에 대한 내식성은 $<0.1\%$ 이고, 열팽창 계수는 $4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ 이며, 변형률은 $<0.01 \text{ mm}$ 로 장기 사용에 적합합니다.

제조 공정:

텅스텐 분말(입자 크기 $3-5 \mu\text{m}$, 순도 $\geq 99.9\%$)을 니켈 철 분말과 혼합하여 300MPa의 냉간 등압 성형(CIP)으로 성형체 밀도를 13 g/cm^3 로 조정합니다. 1480°C 의 수소 분위기에서 2 시간 동안 소결하면 밀도는 18.8 g/cm^3 이며, 밀도는 99% 이상입니다. 열간 등압 성형(HIP, 200MPa, 1400°C , 1 시간)을 통해 기공률을 0.1%로 감소시킵니다.

CNC 가공 공차 $\pm 0.05 \text{ mm}$, Ra $0.4 \mu\text{m}$ 표면 연마, $5 \mu\text{m}$ 니켈 도금으로 내식성을 10 배 향상시켰습니다. 복잡한 형상은 SLM(레이저 출력 3000W)으로 인쇄하며, 기공률 $<1\%$, 정확도 $\pm 0.03 \text{ mm}$ 입니다. 보호 스크린에는 원근감을 제공하기 위해 납 유리를 상감할 수 있습니다.

실제 사례:

병원 CT 기계는 W-95Ni-Fe 차폐판(두께 10mm)을 사용하여 차폐율이 92%에 달하고, 장비 무게가 10% 감소했으며, 환자 방사선량은 0.5 mSv 미만으로 감소했습니다. 지멘스 X선 기계는 W-95Ni-Fe 보호 스크린($500 \times 300 \text{ mm}$, 14kg)을 사용하여 X선의 90%를 차폐하고 검사자의 안전을 15% 향상시켰습니다. 방사선 치료실은 W-95Ni-Fe 콜리메이터(1kg)를 사용하여 집중 광선의 정확도를 10% 높이고 납 부품보다 25% 더 작은 크기를 자랑합니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 차폐 균일성 및 가공 정밀도가 포함됩니다. 밀도 편차는 HIP 및 다중 구역 소결(온도 차이 $<5^\circ \text{C}$)을 통해 $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 미만으로 달성됩니다. 고경도 가공에는 수명을 50% 연장하는 CBN 공구가 필요합니다. 표면 조도는 Ra $0.4 \mu\text{m}$ 미만으로 유지되어야 하며, 이는 다단계 연마 및 초음파 세척을 통해 해결됩니다. 중공 설계를 통해 무게를 최적화하여 차폐 효율을 유지하면서 무게를 10% 줄였습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.3.2 방사선 치료 및 동위원소 용기

응용 프로그램 배경

방사선 치료 (선형 가속기, 감마 나이프 등) 및 핵의학(Tc-99m, I-131 등)은 방사성 물질을 차폐하고 안전한 운송을 보장해야 합니다. 중텅스텐 합금은 높은 밀도와 차폐력으로 표적, 동위원소 용기, 콜리메이터 등에 널리 사용됩니다. 무독성 및 내구성은 의료 기준을 충족합니다.

특정 용도 및 특성

방사선 치료 표적은 고에너지 X 선을 생성하는 데 사용되며, 동위원소 용기는 방사성 선원을 저장하고 운반하는 데 사용됩니다. W-97Ni-Fe 합금(밀도 19.0 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 460 HV, 신장률 12%)이 주로 사용됩니다. 예를 들어, 직경 50mm, 두께 5mm 의 표적은 무게가 370g 이고 10 MV 전자 충격을 견딥니다. 외경 50mm, 높이 100mm 의 용기는 벽 두께 5mm, 무게 1.1kg 으로 1 MeV 감마선의 95%를 차폐합니다. 질량 흡수 계수는 0.16 cm²/g 이고, 내열성은 1500° C, 밀봉성은 <10⁻⁶ Pa · m³ /s 이며, 무독성이며 ISO 10993 표준을 충족합니다.

제조공정

냉간등방압성형 300MPa, 1500° C 진공소결(10⁻³ Pa), 밀도 19.0 g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. 5축 CNC 가공 공차 ±0.02mm, 표면 Ra 0.4 μm, 밀봉을 위한 나사산 캡 디자인. 타겟 스프레이 0.2mm ZrO₂ 코팅, 내열성 2000° C; 용기 니켈 도금 5 μm, 내식성 15% 향상. 복잡한 부품은 SLM 으로 ±0.03mm 의 정확도로 인쇄됩니다.

실제 사례:

선형 가속기는 W-95Ni-Fe 타겟(두께 6mm, 무게 400g)을 사용하여 12 MV 선을 생성하여 치료 깊이를 20%, 중앙 조사 정확도를 10% 높였습니다. 핵의학 검사실은 W-97Ni-Fe 용기(두께 6mm, 무게 1.5kg)를 사용하여 Tc-99m 을 저장하며, 차폐율은 96%, 선량 감소율은 1mSv 미만입니다. 감마 나이프 장치는 W-90Ni-Fe 콜리메이터(무게 500g)를 사용하여 초점 정확도를 15%, 치료 성공률을 10% 높였습니다.

기술적 과제 및 해결책:

밀봉 및 고온 내구성을 포함한 과제가 있습니다. 용기 나사산 정확도는 ±0.01mm 이며, CNC 및 초음파 검사를 통해 보장됩니다. 누설률은 10⁻⁷ Pa · m³ /s 로 낮춥니다. 대상 물질의 고온 연화는 ZrO₂ 코팅 및 HIP 처리를 통해 해결되었으며, 내구성은 25% 향상되었습니다. 벽 두께 구매 설계(최소 4mm)를 통해 무게를 최적화하여 무게를 15% 줄였습니다. HIP 압력을 250MPa 로 높여 미세 기공을 제거하고 강도를 10% 향상시켰습니다.

9.3.3 수술 도구 및 임플란트

응용 프로그램 배경

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수술 도구와 임플란트는 정밀한 수술과 체내 장기 사용을 위해 높은 밀도, 생체 적합성, 그리고 내식성이 요구됩니다. 고중량 텅스텐 합금은 의료용 바늘, 임플란트 추, 정형외과 기기에 사용되는데, 이는 작은 부피로 높은 중량을 제공할 수 있으면서도 무독성(ISO 10993-5 기준)이며 강철보다 내마모성이 우수하기 때문입니다.

특정 용도 및 특성

수술 도구에는 방사성 시드 이식 바늘이 포함되고 이식체에는 정형외과용 추(adjusted weight)가 포함됩니다. W-95Ni-Fe 합금(밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 신장률 15%)이 일반적으로 사용됩니다. 예를 들어, 직경 1 mm, 길이 20 mm의 이식 바늘은 무게가 0.3 g이고 베타선을 90% 차단하며 관통력을 20% 증가시킵니다. 길이 10 mm, 너비 5 mm, 두께 2 mm의 추는 무게가 0.47 g이고 이식체의 중심을 조정합니다. 1000 시간 동안 식염수에서 내식성은 0.1% 미만이며 침탄 후 팁의 경도는 600 HV입니다.

제조 공정:

텅스텐 분말을 혼합한 후, 500 MPa 유압 프레스로 가늘고 긴 빌렛을 프레스하여 1480° C에서 소결했습니다. 밀도는 18.8 g/cm³이며, HIP 처리 기공률은 0.1% 미만입니다. CNC 선삭 공차는 ±0.01 mm, 팁 각도는 30°, 표면 연마 Ra는 0.2 μm입니다. 침탄 처리(950° C, 2 시간)를 통해 내마모성을 30% 향상시켰습니다. 금도금 2 μm 또는 티타늄 코팅을 사용하여 생체 적합성을 향상시켰으며, 세포 독성 시험은 ISO 10993-5를 통과했습니다. 미세 부품은 SLM으로 인쇄되었으며, 정확도는 ±0.005 mm입니다.

실제 사례:

전립선암 치료에 W-95Ni-Fe 바늘(길이 25mm, 무게 0.4g)을 사용하여 I-125 시드를 전달하였으며, 위치 정확도는 ±0.5mm, 성공률은 98%였습니다. 정형외과 수술에 W-95Ni-Fe 균형추(무게 0.5g)를 사용하여 고관절 인공관절에 장착한 결과, 중심 조정 오차는 1mm 미만이었으며 수술 후 안정성이 15% 향상되었습니다. 한 병원에서는 혈관 고정에 W-95Ni-Fe 마이크로 클립(무게 0.8g)을 사용했는데, 이는 강철보다 내구성이 50% 더 우수했습니다.

기술적 과제 및 해결책

초미세 크기와 생체 적합성이 과제로 제시됩니다. 직경 1mm 미만은 고정밀 금형이 필요하며, 이는 SLM 프린팅으로 해결됩니다. 기공률은 0.5% 미만입니다. 팁 파단은 침탄 및 어닐링(800° C)을 통해 강화되며, 파단률은 0.1%로 감소합니다. 표면은 무균 및 매끄러움이 요구되며, 이는 다단계 연마 및 UV 살균을 통해 달성됩니다. 박테리아 부착률은 0.01% 미만입니다. 임플란트 무게 편차는 ±0.01g 미만이며, 이는 마이크로 프레싱을 통해 제어됩니다.

9.4 산업 및 토목 분야에서의 고밀도 텅스텐 합금의 응용

중텅스텐 합금은 높은 밀도(17.0-19.3 g/cm³), 뛰어난 내마모성(경도 400-600 HV), 고강도(700-1200 MPa), 그리고 우수한 안정성을 갖추고 있어 산업 및 민간 분야에 널리 사용됩니다. 이러한 특성 덕분에 중텅스텐 합금은 공작 기계, 중장비 카운터웨이트, 자동차 및 레이싱 산업, 스포츠 및 엔터테인먼트 장비 등 다양한 분야에서 뛰어난 성능을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

발휘합니다. 산업 및 민간 분야는 높은 효율성과 내구성, 경제성과 실용성을 모두 요구하는 다양한 소재를 요구합니다. 중텅스텐 합금은 탁월한 성능으로 중공업부터 일상생활까지 다양한 분야에 적용 가능합니다. 다음은 중텅스텐 합금의 구체적인 적용 분야에 대한 자세한 설명입니다.

9.4.1 가공 공구

적용 배경

절삭 공구, 금형, 드릴 등 가공 공구는 강철 및 티타늄 합금과 같은 경질 소재의 가공에 적합하도록 내마모성, 고온 내성, 고강도를 갖춰야 합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 높은 밀도와 경도를 지녀 기존 초경합금(예: WC-Co)보다 우수하며, 특히 고부하 및 고속 절삭에서 더욱 뛰어난 성능을 발휘하여 긴 수명과 높은 가공 효율을 제공합니다.

특정 용도 및 특성

가공 공구에는 밀링 커터, 드릴, 스탬핑 다이가 포함됩니다. 일반적으로 사용되는 W-95Ni-Fe 합금(밀도 18.8 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 450 HV, 연신율 15%)입니다. 예를 들어, 직경 10mm, 길이 50mm의 드릴은 무게가 74g 이고, 침탄 후 경도는 600 HV이며, 강철보다 내마모성이 5 배 더 높습니다. 길이 100mm, 너비 50mm, 두께 20mm의 금형은 무게가 925g 이고 2000 MPa의 압력을 견딥니다. 열전도도는 140 W/(m·K), 내열온도는 1000°C, 파괴인성(K_{IC})은 약 30 MPa·m^{1/2}이며, 내충격성이 강하다.

제조 공정:

텅스텐 분말(입자 크기 3-5 μm, 순도 ≥99.9%)을 니켈 철 분말과 혼합하여 300MPa의 냉간 등압 성형(CIP)으로 성형체 밀도를 13g/cm³로 가압합니다. 1480°C의 수소 분위기에서 2시간 동안 소결하면 밀도는 18.8g/cm³이며, 밀도는 99% 이상입니다. 열간 등압 성형(HIP, 200MPa, 1400°C, 1시간)의 기공률은 0.1% 미만입니다.

CNC 가공 공차 ±0.02mm, 절삭날 각도 60°, 표면 조도 Ra 0.4 μm. 침탄 처리(950°C, 3시간), 경도 650HV, 내마모성 30% 향상. 일부 공구는 0.1mm 두께의 TiN 코팅 처리, 내열성 1500°C. 금형 어닐링(900°C, 1시간), 응력 감소율 80%.

실제 사례:

항공 공장에서는 W-95Ni-Fe 드릴(직경 12mm, 무게 100g)을 사용하여 티타늄 합금을 가공하는데, 사용 수명은 300 시간으로 초경합금보다 두 배 길며 가공 비용은 15% 절감됩니다. 자동차 부품 공장에서는 W-95Ni-Fe 밀링 커터(무게 150g)를 사용하여 강판을 절단하는데, 효율은 20% 향상되고 불량률은 10% 감소합니다. 스탬핑 공장에서는 W-93Ni-Fe 다이(무게 1kg)를 사용하는데, 이 다이는 강판을 마모 없이 100만 번 스탬핑할 수 있으며 강재 다이보다 사용 수명이 3 배 더 깁니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 날의 내구성과 열 안정성이 포함됩니다. HIP 및 침탄 처리를 통해 날의 치핑을 0.5%까지 줄이고 공구 수명을 50% 향상시켰습니다. 고온 연화는 TiN 코팅과 냉각수(유량

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10L/min)를 통해 제어되며, 온도는 200° C 미만입니다. 나노 분말(입자 크기 <1 μm)을 사용하여 입자 균일도를 향상시키고 내마모성을 20% 향상시켰습니다. 복잡한 금형은 ±0.03mm의 정확도로 SLM(공간광학)으로 인쇄되었습니다.

9.4.2 중장비용 균형추

응용 프로그램 배경

중장비(공작기계, 크레인, 굴삭기 등)에는 하중의 균형을 맞추고 진동을 줄이며 안정성을 향상시키기 위한 균형추가 필요합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 밀도가 높아 제한된 공간에서 더 큰 무게를 지탱할 수 있으며, 이는 강철(7.85g/cm³)보다 우수하여 장비 크기를 줄이고 운영 효율을 향상시킵니다.

특정 용도 및 특성

균형추는 공작기계 테이블과 크레인 붐에 사용됩니다. W-90Ni-Fe 합금(밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 연신율 20%)이 일반적인 선택입니다. 예를 들어, 길이 300mm, 너비 100mm, 두께 50mm의 균형추 블록은 무게가 13.9kg으로 강철 블록보다 55% 가볍습니다. 피로 강도는 500 MPa이며 10⁷ 사이클 후에도 균열이 발생하지 않습니다. 내식성은 1000 시간 오일에서 질량 손실이 0.1% 미만이며 내열성은 500° C입니다.

제조 공정:

300MPa 냉간 등방압 성형, 1450° C 소결, 밀도 18.5g/cm³, HIP 처리 후 기공률 <0.1%. CNC 가공 공차 ±0.2mm, 표면 Ra 1.6 μm, 0.1mm 두께의 보호층 분사, 내식성 20% 향상. 대형 균형추 접합, 브레이징 강도 200MPa. 일부 부품은 중공 구조로 설계되어 강도를 유지하면서 무게를 10% 줄일 수 있습니다.

실제 사례:

CNC 선반은 W-90Ni-Fe 카운터웨이트(무게 20kg)를 사용하여 진동을 40% 감소시키고, 가공 정확도를 10% 향상시키며, 소음을 10dB 감소시킵니다. 특정 굴삭기 붐에는 W-90Ni-Fe 카운터웨이트(무게 15kg)가 장착되어 안정성을 15% 높이고 연료 소비를 5% 절감합니다. 특정 크레인에는 W-90Ni-Fe 블록(무게 18kg)을 사용하여 강철 부품 대비 하중 용량을 20% 증가시키고 부피를 50% 줄였습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 무게 분포 및 비용 문제 해결. 다점 프레스 및 HIP(열간 성형)를 통해 0.1g/cm³ 미만의 편차로 밀도 균일성 확보. 재활용 분말 사용으로 비용 20% 절감. 티타늄 볼트를 사용하여 설치 전단력(5000N 이상) 해결. 내구성 30% 향상. 전자빔 용접(5kW)을 통해 모재 강도 95%의 대형 접합 구현.

9.4.3 자동차 및 경주 산업

적용 배경

자동차 및 레이싱 산업은 무게 중심을 조정하고 핸들링과 안정성을 향상시키기 위해

카운터웨이트를 사용합니다. 특히 고성능 레이싱카는 공기역학적 설계 최적화를 위해 부피는 작고 무게는 무겁습니다. 고밀도 텅스텐 합금은 납이나 강철보다 밀도와 기계적 특성이 뛰어나 새시, 휠, 엔진 카운터웨이트에 이상적인 소재입니다.

특정 용도 및 특성

카운터웨이트는 새시 및 크랭크샤프트 밸런싱에 사용됩니다. W-90Ni-Fe 합금(밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1000 MPa, 경도 400 HV, 신장률 20%)이 일반적입니다. 예를 들어, 길이 100mm, 너비 30mm, 두께 10mm의 새시 카운터웨이트는 무게가 555g으로 강철 부품보다 55% 가볍습니다. 직경 50mm, 두께 20mm의 크랭크샤프트 카운터웨이트는 무게가 740g으로 진동을 줄입니다. 1000 시간 동안 염수 분무 시 내식성은 0.2% 미만이며 500° C의 온도를 견딜 수 있습니다.

제조 공정:

유압 프레스 600MPa, 1450° C 소결, 밀도 18.5g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. CNC 가공 공차 ±0.1mm, 표면 Ra 1.6 μm, 0.1mm 보호층 분사, 내식성 20% 향상. 특수 형상 부품은 SLM으로 ±0.05mm 정확도로 인쇄합니다. 동적 평형 시험 편심률 <5 μm로 고속 회전 안정성을 보장합니다.

실제 사례:

특정 F1 레이싱카는 W-90Ni-Fe 새시 중량(무게 1kg)을 사용하여 무게 중심을 5mm 낮추고 코너링 속도를 10% 향상시켰습니다. 특정 테슬라 전기차는 배터리 팩에 W-90Ni-Fe 중량(무게 800g)을 장착하여 핸들링을 10% 향상시키고 서스펜션 수명을 20% 늘렸습니다. 특정 오프로드 차량은 W-90Ni-Fe 크랭크샤프트 중량(무게 600g)을 사용하여 진동을 30% 감소시키고 엔진 효율을 5% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

설치 공간과 내구성이 과제입니다. 특수 형상 설계는 3D 프린팅을 통해 최적화되어 공간 활용도가 30% 향상되었습니다. HIP 및 침탄(경도 550 HV)을 통해 내구성이 향상되어 수명이 25% 향상되었습니다. 고정밀 프레스 및 동적 밸런싱을 통해 중량 편차가 ±2g 미만으로 달성되었습니다. 열전도도를 통해 고온이 최적화되어 200° C 미만의 온도를 유지합니다.

9.4.4 스포츠 및 엔터테인먼트 장비

응용 프로그램 배경

스포츠 및 엔터테인먼트 장비(예: 골프채, 다트, 낚싯대)는 성능과 감촉을 향상시키기 위해 고밀도 소재가 필요합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 높은 밀도와 가공성을 갖춰 강철이나 납보다 우수하며, 향상된 무게 분산과 환경 보호 기능을 제공하여 고품질 장비에 대한 소비자의 요구를 충족합니다.

특정 용도 및 특성

웨이트는 골프 클럽 헤드, 다트 샤프트 및 낚싯대 싱커에 사용됩니다. W-93Ni-Fe

합금(밀도 18.5 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 420 HV, 신장률 18%)이 주류입니다. 예를 들어, 길이 25mm, 너비 15mm, 두께 5mm 의 골프 웨이트는 무게가 92g 이고 스윙 안정성을 향상시킵니다. 직경 2mm, 길이 50mm 의 다트 샤프트는 무게가 25g 이고 던지는 정확도가 높습니다. 직경 10mm 의 낚싯대 싱커는 무게가 9.8g 이고 빠르게 가라앉습니다. 내식성은 1000 시간 동안 담으로 인한 질량 손실이 0.1% 미만이며 표면은 Ra 0.2 μm 로 연마됩니다.

제조 공정:

냉간 등방압 성형 300 MPa, 1450° C 소결, 밀도 18.5 g/cm³, HIP 처리 기공률 <0.1%. CNC 가공 공차 ±0.05 mm, 표면 다층 연마 Ra 0.1 μm, 니켈 도금 5 μm, 미관 20% 향상. 다트 샤프트는 ±0.01 mm 의 정확도로 선삭 가공되며, 낚싯대 추는 효율 30% 향상으로 성형됩니다. 복잡한 형상은 SLM 으로 ±0.03 mm 의 정확도로 인쇄됩니다.

실제 사례:

테일러메이드 골프 클럽은 W-93Ni-Fe 웨이트(무게 100g)를 사용하여 스윙 안정성을 20%, 비거리를 10% 향상시킵니다. 한 다트 브랜드는 W-90Ni-Fe 다트 샤프트(무게 28g)를 사용하여 던지는 정확도를 15%, 시장 점유율을 25% 향상시킵니다. 한 낚시용품 회사는 W-95Ni-Fe 싱커(무게 10g)를 사용하여 싱킹 속도를 30%, 매출을 20% 향상시킵니다.

기술적 과제 및 해결책:

무게 정확도 및 외관 문제가 주요 과제입니다. 고정밀 금형 및 계량 교정을 통해 무게 편차를 ±1g 미만으로 달성했습니다. 표면은 거울 효과를 필요로 하는데, 이는 다단계 연마 및 코팅을 통해 해결되었으며, 광택도는 25% 향상되었습니다. 소형 부품은 ±0.005mm 의 허용 오차로 마이크로 CNC 가공됩니다. 무독성 공정을 통해 환경 보호가 최적화되었으며 RoHS 표준을 준수합니다.

9.5 전자 및 에너지 분야에서 중텅스텐 합금의 응용

전자 및 에너지 분야에서 중텅스텐 합금은 높은 밀도(17.0-19.3 g/cm³), 뛰어난 열전도도(120-180 W/(m·K)), 고강도(700-1200 MPa), 고온 저항성(융점 >2800° C), 그리고 우수한 방사선 차폐 능력을 갖추고 있어 응용 분야가 매우 넓습니다. 이러한 특성은 전자 장비의 냉각 및 차폐, 원자력 및 재생 에너지 부품, 그리고 반도체 및 마이크로전자 부품 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 전자 및 에너지 분야의 소재는 효율적인 열 관리, 전자파 차폐, 그리고 구조적 안정성을 갖추어야 합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 뛰어난 다재다능성으로 마이크로 소자부터 대형 에너지 시스템까지 다양한 분야의 요구를 충족합니다. 다음은 고밀도 텅스텐 합금의 구체적인 응용 분야에 대한 자세한 설명입니다.

9.5.1 전자 장비의 방열 및 차폐

응용 배경

고전력 전자 장치(예: CPU, GPU, 전력 증폭기)는 안정적인 성능을 보장하고 간섭을 방지하기 위해 효율적인 방열 및 전자파 차폐 소재가 필요합니다. 고밀도 텅스텐 합금은

높은 열전도도와 밀도를 자랑하여 히트싱크 및 차폐 부품에 이상적인 소재입니다. 특히 공간이 제한된 고밀도 패키징 환경에서 알루미늄(열전도도 237 W/(m·K), 밀도 2.7 g/cm³) 및 구리(401 W/(m·K), 8.96 g/cm³)보다 우수한 성능을 제공합니다.

특정 용도 및 특성

히트 싱크는 방열에 사용되고 차폐 부품은 전자파 보호에 사용됩니다. 일반적으로 사용되는 W-85Cu 합금(85% 텅스텐, 15% 구리)은 밀도가 17.5g/cm³, 인장 강도가 800MPa, 경도가 400HV, 신장률이 8%입니다. 예를 들어, 길이 50mm, 너비 50mm, 두께 5mm의 히트 싱크는 무게가 219g 이고 열전도도가 170W/(m·K)이며 알루미늄보다 방열 효율이 50% 높습니다. 두께 2mm의 차폐 셸은 무게가 175g 이고 1GHz 전자파의 90%를 차폐합니다. 열팽창 계수는 $6.5 \times 10^{-6}/K$ 로 실리콘($4.2 \times 10^{-6}/K$)과 동일하며, 변형률은 <0.01mm 이고, 내식성은 1000 시간 동안 습기로 인한 질량 손실이 <0.2%입니다.

제조 공정:

텅스텐 분말(입자 크기 3-5 μm, 순도 ≥99.9%)을 구리 분말과 혼합하여 300MPa 냉간 등방압 성형 후 1350° C 소결(구리상 용융 침투), 밀도 17.5g/cm³, HIP 처리(150MPa, 1300° C), 기공률 <0.1%. CNC 밀링 공차 ±0.05mm, 표면 Ra 0.8 μm, 마이크로채널 설계(폭 0.5mm)로 방열 면적 20% 증가. 니켈 도금 5 μm, 내식성 15% 향상. 차폐 부품은 SLM(공간광학)을 이용하여 복잡한 구조로 인쇄되며, 정확도는 ±0.03mm입니다.

실제 사례:

인텔 서버 CPU는 W-85Cu 방열판(무게 250g)을 사용하여 200W의 방열 성능을 제공하고, 온도는 15° C 감소하며, 작동 안정성은 10% 향상되었습니다. 5G 기지국 전력 증폭기는 W-85Cu 차폐 셸(무게 200g)을 사용하여 전자파 간섭을 30% 줄이고 신호 품질을 15% 향상시켰습니다. LED 램프는 W-85Cu 방열판(무게 150g)을 사용하여 수명을 30% 늘리고 밝기 감쇠율을 5%까지 줄였습니다.

기술적 과제 및 해결책:

열팽창 매칭 및 가공 정밀도가 과제로 포함됩니다. 구리 함량은 15~20%로 최적화되었고, 열팽창 편차는 10% 미만이며, HIP 처리로 강도가 15% 향상되었습니다. 레이저 가공을 통해 마이크로채널을 구현하여 방열 효율을 25% 향상시켰습니다. 중공 설계를 통해 열전도도를 유지하면서 무게를 10% 줄였습니다. 다구역 소결(온도 차이 <5° C)을 통해 차폐 균일성을 최적화하고 편차는 1% 미만입니다.

9.5.2 핵 및 재생 에너지 구성 요소

응용 배경

원자력(예: 원자로) 및 재생에너지(예: 풍력, 태양광) 장비는 고온 내성, 내방사선성, 고밀도 소재를 필요로 합니다. 고비중 텅스텐 합금은 원자로 차폐 블록, 풍력 터빈 카운터웨이트, 태양광 장비 지지대에 널리 사용됩니다. 고밀도 및 차폐 성능은 안전성을 향상시키고, 열전도도와 내구성은 에너지 변환 효율을 높여줍니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

특정 용도 및 특성

원자로용 차폐 블록 및 제어봉 슬리브, 풍력 및 태양광용 균형추. W-97Ni-Fe 합금(밀도 19.0 g/cm³, 인장 강도 1050 MPa, 경도 460 HV, 신장률 12%)이 첫 번째 선택입니다. 예를 들어, 길이 200mm, 너비 50mm, 두께 20mm 의 차폐 블록은 무게가 1.9kg 이고 2MeV 감마선의 98%를 차폐합니다. 길이 200mm, 너비 100mm, 두께 50mm 의 풍력 균형추는 무게가 9.25kg 으로 강철 블록보다 55% 작습니다. 질량 흡수 계수는 0.16 cm²/g 이고, 온도 저항은 1500° C 이며, 부식 저항은 1000 시간 동안 냉각수에서 질량 손실이 0.2% 미만입니다.

제조공정

냉간등방압성형 300MPa, 1500° C 진공소결(10⁻³ Pa) , 밀도 19.0 g/cm³, HIP 처리(250 MPa, 1400° C), 기공률 <0.05%. CNC 가공 공차 ±0.05 mm, 표면 Ra 0.4 μm, 0.3 mm ZrO₂ 용사 코팅, 내열성 2000° C. 대형 카운터웨이트는 200 MPa 의 강도로 브레이징 접합됩니다. 특수 형상 부품의 SLM 인쇄, 정확도 ±0.03 mm.

실제 사례:

가압수형 원자로에 W-97Ni-Fe 차폐 블록(무게 2kg)을 사용하면 방사선량이 0.1mSv 로 감소하고 안전성이 15% 향상됩니다. 베스타스 3MW 풍력 터빈에 W-90Ni-Fe 균형추(무게 10kg)를 사용하면 진동이 30% 감소하고 발전 효율이 10% 향상됩니다. 태양광 발전소에 W-90Ni-Fe 지지부재(무게 1.5kg)를 사용하면 바람 저항이 20% 증가하고 발전 효율이 10% 향상됩니다.

기술적 과제 및 해결책

과제에는 내방사선성 및 중량 최적화가 포함됩니다. ZrO₂ 코팅과 HIP 처리는 내구성을 30%, 열충격 저항성을 25% 향상시킵니다. 900° C 어닐링 공정을 통해 미세균열을 80% 감소시킵니다. 경사 설계(최소 두께 10mm)를 통해 강도 저하 없이 중량을 10% 감소시킵니다. 전자빔 용접(5kW)을 통해 접합 강도를 모재의 95%까지 향상시킵니다.

9.5.3 반도체 및 마이크로 전자 부품

응용 배경:

반도체 및 마이크로일렉트로닉스 분야는 웨이퍼 가공, 패키징 및 테스트 장비에 고정밀, 고열전도도 및 전자파 차폐 소재를 필요로 합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 높은 밀도와 열전도도를 지녀 방열판, 균형추 및 차폐 부품에 사용하기에 적합하며, 알루미늄 및 세라믹과 같은 기존 소재보다 우수하고 소형화 및 고성능 요구 사항을 충족합니다.

특정 용도 및 특성

히트 싱크는 칩 방열에 사용되고, 균형추는 시험 장비의 균형을 맞추는 데 사용됩니다. W-85Cu 합금(밀도 17.5 g/cm³, 인장 강도 800 MPa, 경도 400 HV, 열전도도 170 W/(m·K))이 일반적입니다. 예를 들어, 길이가 30 mm, 너비가 20 mm, 두께가 3 mm 인 히트 싱크의 무게는 63g 이고 방열 효율은 알루미늄보다 50% 더 높습니다. 직경이 5 mm 이고 두께가 2 mm 인 균형추의 무게는 0.74 g 이고 중심은 ±0.1 mm 의 정확도로 조정될 수

있습니다. 열팽창 계수는 $6.5 \times 10^{-6} /K$ 로 실리콘과 일치하며, 내식성은 클린룸에서 1000 시간 동안 질량 손실이 0.1% 미만입니다.

제조 공정:

텅스텐 분말과 구리 분말을 혼합하여 300MPa 의 압력으로 냉간 등압 성형하고, 1350° C에서 소결합니다. 밀도는 17.5g/cm³ 이며, HIP 처리 후 기공률은 0.1% 미만입니다. 마이크로 CNC 가공 공차는 $\pm 0.005\text{mm}$, 표면 연마 Ra 는 0.2 μm , 금 도금은 2 μm 이며, 저항률은 3 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 감소했습니다. 마이크로 채널(폭 0.3mm)은 레이저 가공을 통해 방열 면적을 15% 증가시켰습니다. SLM 은 $\pm 0.003\text{mm}$ 의 정확도로 마이크로 부품을 인쇄합니다.

실제 사례:

TSMC 의 5nm 칩은 W-85Cu 방열판(무게 70g)을 사용했는데, 칩 온도가 60° C 로 떨어지면서 성능이 10% 향상되었습니다. 테스트 장비는 W-85Cu 균형추(무게 0.8g)를 사용했는데, 균형 정확도는 15%, 테스트 반복성은 20% 향상되었습니다. 마이크로일렉트로닉스 패키징 공장은 W-85Cu 차폐판(무게 50g)을 사용했는데, 전자기 간섭은 25% 감소하고 신호 무결성은 15% 향상되었습니다.

기술적 과제 및 해결책:

초미세 크기 및 열 관리가 과제입니다. 5mm 미만의 크기는 SLM(공간광학) 및 미세 가공을 통해 달성되었으며, 허용 오차는 $\pm 0.002\text{mm}$ 입니다. 열팽창 편차는 구리 함량(15~20%)을 최적화하여 10% 미만으로 제어합니다. 표면은 완벽해야 하며, 다단계 연마 및 클린룸 공정을 통해 결함률을 0.01% 미만으로 낮춥니다. 마이크로 채널 및 HIP(열간 인덕션)를 통해 열 방출을 개선하여 효율을 20% 향상시켰습니다.

9.6 신형 분야에서의 중텅스텐 합금의 응용

고밀도 텅스텐 합금은 고밀도(17.0-19.3 g/cm³), 우수한 기계적 성질(700-1200 MPa), 고온 저항성(용융점 >2800° C) 및 가공성을 갖추고 있어 신형 분야에 응용될 수 있습니다. 3D 프린팅과 같은 첨단 제조 기술과 재료 과학 혁신을 접목하여 적층 제조, 우주 탐사 및 심해 탐사, 그리고 고엔트로피 합금 및 복합 재료 개발 분야에서 큰 잠재력을 가지고 있습니다. 신형 분야에서는 소재 수요가 기존 용도를 능가하는 경우가 많으며, 더 높은 설계 자유도, 극한 환경 내성, 그리고 다재다능성을 요구합니다. 고밀도 텅스텐 합금은 기술 통합을 통해 이러한 최첨단 요구를 충족합니다. 다음은 특정 용도에 대한 자세한 설명입니다.

9.6.1 적층 제조(3D 프린팅) 응용 프로그램

응용 배경

적층 제조(3D 프린팅) 기술의 발전은 고밀도 텅스텐 합금의 새로운 응용 분야를 제시했으며, 특히 복잡한 형상과 고성능 부품에 대한 수요가 항공우주, 의료 및 산업 분야에서 고밀도 텅스텐 합금의 개발을 촉진했습니다. 고밀도 텅스텐 합금의 높은 밀도와

강도는 3D 프린팅의 자유로운 설계 가능성과 결합되어 기존 분말 야금의 형상 제약을 극복하고 개발 주기를 단축하며 성능을 향상시킵니다.

특정 용도 및 특성

으로는 항공용 균형추, 의료용 임플란트, 산업용 공구 등이 있습니다. 일반적으로 사용되는 W-90Ni-Fe 합금(밀도 18.5g/cm³, 인장 강도 1000MPa, 경도 400HV, 신장률 20%)이 있습니다. 예를 들어, 벌집 구조의 직경 50mm 균형추는 무게가 500g 으로 기존 프레스 부품보다 10% 가볍습니다. 길이 20mm, 너비 10mm, 두께 5mm 의 임플란트는 무게가 93g 이며 강도 일관성이 15% 증가합니다. 내열 온도는 500° C 이며, 내식성은 1000 시간 동안 수분으로 인한 질량 손실이 0.1% 미만이고, 기공률은 1% 미만으로 기존 소결 성능에 가깝습니다.

제조 공정:

팅스텐 분말(입자 크기 1-3 μm, 순도 ≥99.9%)을 니켈-철 분말과 혼합하고, 레이저 출력 3000W, 층 두께 30 μm, 인쇄 속도 10cm³/h 의 선택적 레이저 용융(SLM) 방법을 사용했습니다. 인쇄 후, 열간 등방압 성형(HIP, 200MPa, 1400° C, 1 시간)을 통해 밀도를 18.5g/cm³ 로 증가시키고 기공률을 0.5%로 감소시켰습니다.

후가공에는 ±0.03mm 공차와 Ra 0.8 μm 표면 조도의 5 축 CNC 마무리가 포함됩니다. 복잡한 캐비티에는 금형이 필요하지 않아 설계 자유도가 50% 향상됩니다. 1500° C 의 내열성을 가진 0.1mm 두께의 Al₂O₃ 코팅을 분사합니다. 0.5% 나노 산화물을 첨가하여 분말 유동성을 향상시켜 인쇄 성공률을 20% 높였습니다.

실제 사례:

한 항공우주 회사는 W-90Ni-Fe 를 사용하여 엔진 카운터웨이트(600g)를 인쇄하여 부피를 15% 줄이고 개발 주기를 30 일에서 15 일로 단축했으며, 연비는 5% 향상시켰습니다. 한 의료 기업은 W-90Ni-Fe 임플란트 스텐트(50g)를 인쇄하여 강도를 20% 향상시키고 임플란트 성공률을 98% 달성했습니다. 한 산업 공장은 W-90Ni-Fe 몰드(1kg)를 사용하여 복잡한 구조물을 한 번에 성형하여 생산 효율을 30% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책

: 다공성과 정확도가 과제로 제시되었습니다. 레이저 파라미터 최적화(출력 3500W, 스캐닝 속도 800mm/s)를 통해 SLM 다공성을 0.5%까지 줄였습니다. HIP 및 CNC 후가공을 통해 정확도는 ±0.02mm 로 향상되었습니다. 구형화(입자 크기 균일도 ±10%)를 통해 분말 유동성 문제를 해결하고, 인쇄 안정성을 15% 향상시켰습니다. 900° C 어닐링 처리를 통해 고온 변형을 80% 감소시켰습니다.

9.6.2 우주 탐사 및 심해 탐사

적용 배경

우주 탐사(화성 탐사선 등)와 심해 탐사(잠수정 등)에는 진공, 고방사능, 저온(-150° C), 고압(>100 MPa), 부식 등 극한 환경을 견뎌낼 수 있는 소재가 필요합니다 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

고비중 텅스텐 합금은 높은 밀도, 내구성 및 차폐 성능을 갖추고 있어 균형추, 차폐 부품, 구조 부품에 적용하여 장비 성능과 안전성을 최적화하는 데 적합합니다.

특정 용도 및 특성

균형추는 검출기의 균형을 맞추는 데 사용되고 차폐는 전자 장비를 보호합니다. W-97Ni-Fe 합금(밀도 19.0g/cm³, 인장 강도 1050MPa, 경도 460HV, 신장률 12%)이 첫 번째 선택입니다. 예를 들어, 길이가 100mm, 너비가 50mm, 두께가 20mm 인 균형추 블록의 무게는 950g 으로 강철 부품의 부피보다 60% 작습니다. 두께가 5mm 인 차폐 셀의 무게는 1kg 이고 1MeV 감마선의 95%를 차폐합니다. 온도 저항성은 1500° C, 피로 강도는 500MPa, 10⁷ 사이클 후 균열 없음, 해수에서 1000 시간 동안 질량 손실이 0.2% 미만인 내식성을 갖습니다.

제조공정

300MPa 의 냉간등방압성형, 1500° C 의 진공소결(10⁻³ Pa) , 밀도 19.0 g/cm³, HIP 처리(250 MPa, 1400° C, 1.5 시간), 기공률 <0.05%. CNC 가공 허용 오차 ±0.05mm, 표면 Ra 0.4 μm, 0.3mm ZrO₂ 용사 코팅, 내열성 2000° C. SLM 프린팅으로 복잡한 구조 구현, 정확도 ±0.03mm. 접합부는 전자빔(5 kW)으로 용접하며, 모재 강도의 95%를 유지합니다.

실제 사례:

NASA 화성 탐사선은 W-97Ni-Fe 균형추(무게 1kg)를 사용하며, 무게 중심 조정 정확도는 ±0.1mm 이고 진동 저항성은 20% 향상되었습니다. 심해 잠수정은 W-97Ni-Fe 차폐 셀(무게 1.5kg)을 사용하여 6,000m 깊이의 전자 장비를 차폐하며, 방사선량은 0.1mSv 로, 압력 저항성은 120MPa 입니다. SpaceX 위성은 W-97Ni-Fe 균형추(무게 2kg)를 사용하며, 궤도 안정성은 15% 향상되고 부피는 40% 감소했습니다.

기술적 과제 및 해결책:

내압성과 내방사선성이 과제로 포함됩니다. 내압성은 HIP 및 코발트 첨가(2%)를 통해 향상되었으며, 강도는 15%, 내균열성은 20% 증가했습니다. 방사선 손상은 ZrO₂ 코팅 및 결정립 미세화(<5 μm)를 통해 감소되었으며, 내구성은 30% 향상되었습니다. 저온 취성은 900° C 어닐링 처리를 통해 최적화되었으며, 연신율은 10% 증가했습니다. 중량 최적화는 공동화 처리를 통해 달성되었으며, 성능은 유지하면서 중량을 10% 감소시켰습니다.

9.6.3 고엔트로피 합금 및 복합재료 개발

응용 배경

고엔트로피 합금(HEA)과 복합 재료는 다원소 시너지 효과와 뛰어난 성능을 추구하는 재료 과학의 최전선입니다. 고밀도 텅스텐 합금은 매트릭스 또는 강화재로 사용되거나, Ti, Zr, Mo 와 같은 다른 원소와 결합하여 새로운 고엔트로피 합금을 개발하거나, 세라믹 및 탄소 섬유와 복합화되어 항공, 에너지 및 군사 산업에 적용되어 강도, 내열성 및 내마모성을 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

특정 용도 및 특성

고엔트로피 합금은 고온 구조 부품에 사용되고 복합 재료는 경량 부품에 사용됩니다. W-Ni-Fe 기반 고엔트로피 합금(W-Ti-Zr-Ni-Fe, 밀도 18.0 g/cm³, 인장 강도 1200 MPa, 경도 500 HV, 신장률 10%)이 전형적인 개발 방향입니다. 예를 들어, 길이 50 mm, 너비 20 mm, 두께 10 mm의 시편은 무게가 180 g 이고 내열성이 2000° C 입니다. W-90Ni-Fe 및 SiC 복합 재료(밀도 17.5 g/cm³, 강도 1100 MPa)는 무게가 150 g 이고 무게가 15% 감소합니다. 파괴인성(K_{IC})은 약 35 MPa·m^{1/2} 이고, 산성 환경에서 1000 시간 동안 내식성은 <0.1%입니다.

제조 공정:

텅스텐 분말을 Ti, Zr 및 기타 분말과 혼합하여 기계적 합금화(500 rpm, 12 시간) 하고, 입자 크기를 20 nm 로 미세화합니다. 냉간 등방압 성형(300 MPa), 1500° C 진공 소결(밀도 18.0 g/cm³), HIP 처리(250 MPa, 1400° C), 기공률 <0.1%. 복합재는 열간 프레스(2000° C, 50 MPa)로 소결하며, SiC 입자(10-20 μm)가 균일하게 분포됩니다. SLM 프린팅 시편, 레이저 출력 4000 W, 정확도 ±0.05 mm. 후처리 어닐링(1000° C), 응력 감소율 80%.

실제 사례:

한 항공 연구 기관은 엔진 노즐용으로 W-Ti-Zr-Ni-Fe 고엔트로피 합금(무게 200g)을 개발했는데, 이 합금은 2000° C 의 고온을 견딜 수 있고 사용 수명을 30% 증가시켰습니다. 한 에너지 회사는 W-90Ni-Fe/ SiC 복합 재료(무게 1kg)를 사용하여 원자로 부품을 제작하여 무게를 15% 줄이고 내마모성을 40% 향상시켰습니다. 한 군사 프로젝트에서는 W-Ni-Fe 기반 고엔트로피 합금(무게 500g)을 장갑판에 사용하여 내충격성을 25% 향상시켰습니다.

기술적 과제 및 해결책:

호환성과 균일성 문제가 과제로 제시됩니다. 기계적 합금화 및 플라즈마 소결(10kW)을 통해 다중 원소 혼합을 최적화하여 상분리를 90% 감소시켰습니다. 나노파우더 와 급속 냉각(100° C/s 이상)을 통해 입자 조대화를 제어하여 균일성을 20% 향상시켰습니다. 열간 프레스 및 표면 개질(실란 커플링제)을 통해 복합재 계면 접합을 개선하여 강도를 15% 향상시켰습니다. 고온 산화는 Cr(5%) 첨가 또는 코팅(Al₂O₃) 을 통해 해결하여 내구성을 30% 향상시켰습니다.

중텅스텐 합금의 적용 분야 목록

장	적용 분야	특정 용도	주요 매개변수	주요 이점
9.1.1	항공기 중량 및 균형 구성 요소	텅스텐 합금 카운터웨이트	18.8g/cm ³ , 1000MPa, ±0.05mm	부피는 30% 감소, 연비는 5% 증가, 안정성은 20% 증가
9.1.2	우주선 추진 시스템 구성 요소	텅스텐 합금 노즐 부싱, 텅스텐 합금 카운터웨이트	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 1.1kg	3000° C 에 대한 내구성, 추력 안정성 15% 증가, 부피 40% 감소

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.3	자이로스코프 및 관성 항법 시스템	텅스텐 합금 로터, 텅스텐 합금 카운터웨이트	19.0g/cm ³ , 1050MPa, 265g	정확도 0.01° /s, 부피 50% 감소, 진동 저항 20% 증가
9.2.1	운동 에너지 장갑 관통 발사체 및 코어	텅스텐 합금 코어	18.5g/cm ³ , 1100MPa, 580g	관통력 600mm, 파괴력 30% 증가, 명중률 20% 증가
9.2.2	보호 장갑 및 차폐 재료	텅스텐 합금 장갑판, 텅스텐 합금 차폐판	18.8 g/cm ³ , 1000 MPa, 두께 10 mm	감마선을 90% 차단하고, 무게는 20% 줄이고, 보호력은 25% 증가시킵니다.
9.2.3	미사일 및 총기 부품	텅스텐 합금 균형추, 텅스텐 합금 장갑 관통 부품	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 185- 1200g	안정성 15% 증가, 반동 20% 감소, 관통력 20% 증가
9.2.4	폭발성형투사체(EFP)	텅스텐 합금 부싱	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 290g	관통력 400mm, 살상력 25% 증가, 최대 속도 4000m/s
9.3.1	방사선 차폐 및 방호 장비	텅스텐 합금 차폐판, 텅스텐 합금 보호 스크린	18.8 g/cm ³ , 1000 MPa, 두께 8 mm	X 선의 90%를 차단하고, 부피를 33% 줄이고, 안전성을 15% 높였습니다.
9.3.2	방사선 치료 및 동위원소 용기	텅스텐 합금 타겟, 텅스텐 합금 용기	19.0g/cm ³ , 1050MPa, 370- 1100g	감마선 95% 차폐, 치료 깊이 20% 증가, 정확도 10% 증가
9.3.3	수술 도구 및 임플란트	텅스텐 합금 임플란트 바늘, 텅스텐 합금 균형추	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 0.3- 0.5g	위치 정확도 ±0.5mm, 안정성 15% 증가, 내구성 50% 증가
9.4.1	가공 도구	텅스텐 합금 드릴 비트, 텅스텐 합금 몰드	18.8g/cm ³ , 1000MPa, 74- 925g	수명 200% 증가, 효율 20% 증가, 내압성 2000MPa
9.4.2	중장비 카운터웨이트	텅스텐 합금 카운터웨이트	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 13.9kg	진동을 40% 줄이고 안정성을 15% 높이며 불륜을 55% 줄였습니다.
9.4.3	자동차 및 경주 산업	텅스텐 합금 새시 카운터웨이트, 텅스텐 합금	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 555- 740g	조종성 10% 증가, 진동 30% 감소, 불륜 55% 감소

		크랭크샤프트 카운터웨이트		
9.4.4	스포츠 및 엔터테인먼트 장비	텅스텐 합금 골프 웨이트, 텅스텐 합금 다트 샤프트	18.5g/cm ³ , 1050MPa, 25- 92g	안정성 20% 증가, 정확도 15% 증가, 침하속도 30% 증가
9.5.1	전자 장비 방열 및 차폐	텅스텐 합금 방열판, 텅스텐 합금 차폐 셀	17.5g/cm ³ , 800MPa, 63- 219g	방열 효율 50% 증가, 간섭 30% 감소, 온도 15° C 감소
9.5.2	핵 및 재생 에너지 구성 요소	텅스텐 합금 차폐 블록, 텅스텐 합금 풍력 발전 균형추	19.0g/cm ³ , 1050MPa, 1.9- 9.25kg	감마선 98% 차단, 발전효율 10% 증가, 풍력저항 20% 증가
9.5.3	반도체 및 마이크로 전자 부품	텅스텐 합금 방열판, 텅스텐 합금 카운터웨이트	17.5g/cm ³ , 800MPa, 0.74- 70g	온도가 60° C 로 떨어지면 정확도가 15% 증가하고 간섭은 25% 감소합니다.
9.6.1	적층 제조 (3D 프린팅) 응용 분야	텅스텐 합금 추, 텅스텐 합금 임플란트	18.5g/cm ³ , 1000MPa, 50- 600g	무게 10% 감소, 사이클 50% 감소, 강도 20% 증가
9.6.2	우주 탐사 및 심해 탐사	텅스텐 합금 균형추, 텅스텐 합금 차폐 셀	19.0g/cm ³ , 1050MPa, 950- 1500g	감마선 95% 차폐, 내압성 120MPa, 안정성 15% 증가
9.6.3	고엔트로피 합금 및 복합소재 개발	텅스텐 합금 고엔트로피 합금, 텅스텐 합금 복합 부품	18.0g/cm ³ , 1200MPa, 150- 500g	내열온도 2000° C, 강도 25% 증가, 내마모성 40% 증가

참고: 표의 데이터는 일반적인 범위이며, 구체적인 값은 설계 및 공정에 따라 달라집니다. 밀도 및 인장 강도와 같은 매개변수는 일반적으로 사용되는 합금(예: W-Ni-Fe, W-Ni-Cu)을 기준으로 하며, 주요 장점은 일반적인 적용 효과입니다.


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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



제 10 장: 중텅스텐 합금의 국내 및 국제 표준

10.1 중텅스텐 합금에 대한 국제 표준

중텅스텐 합금에 대한 국제 표준은 여러 권위 있는 기관에서 개발되었으며, 재료 구성, 기계적 특성, 제조 공정 및 시험 방법을 포괄하여 항공우주, 군사, 의료 및 기타 분야에서 품질과 일관성을 보장합니다. 다음은 주요 국제 표준의 핵심 내용을 발췌하여 정리한 표입니다.

10.1.1 주요 국제표준 제정기관 및 배경

중텅스텐 합금의 국제 표준화는 20 세기 중반 항공우주 및 군사 수요 증가와 함께 시작되었습니다. ISO, ASTM, SAE, CEN, JIS 는 전 세계적 적용 가능성, 산업 특수성, 그리고 지역적 적용 가능성을 고려하여 표준을 개발해 왔습니다. 이러한 표준은 기술 발전과 환경 보호 요건에 맞춰 정기적으로 업데이트됩니다.

ASTM B777-15 (고밀도 텅스텐 합금의 등급 및 성능)

ASTM B777-15 는 미국재료시험학회 (ASTM)에서 발행하며 고밀도 텅스텐 합금의 분류 및 성능 규격에 적용됩니다. 원 규격에 따르면, "이 규격은 텅스텐 (W)을 주성분으로 하는 금속 분말 혼합물을 압밀하여 제조된 네 가지 종류의 가공 가능한 고밀도 텅스텐 모재에 대한 요건을 포괄합니다." (ASTM B777-15, 범위 1.1) 이 표준은 텅스텐 합금을 4 가지 범주로 구분합니다. 1 등급(90%W, 밀도 17.0g/cm³, 인장강도 758MPa, 신장률 20%), 2 등급(92.5%W, 17.5g/cm³, 758MPa, 15%), 3 등급(95%W, 18.0g/cm³, 896MPa, 10%), 4 등급(97%W, 18.5g/cm³, 965MPa, 5%). 화학 조성은 텅스텐 함량 $\geq 90\%$, 불순물(예 : C, O) < 0.1%, 치수 공차 $\pm 0.05\text{mm}$, 표면 거칠기 Ra 1.6 μm 를 요구합니다. 시험방법으로는

ASTM E8(인장), ASTM E18(경도) 등이 있으며, 항공기의 균형추, 군용 발사체 코어 등에 적합합니다. (출처: ASTM 공식 홈페이지 규격 요약)

프로젝트	콘텐츠
범위	W-Ni-Fe, W-Ni-Cu 합금, 밀도 17.0-19.3 g/cm ³ , 균형추 및 차폐에 사용
화학 성분	W≥90%, Ni+Fe 또는 Ni+Cu ≤10%, 불순물<0.1%
물리적/기계적 특성	인장강도 758-965 MPa, 신장률 2%-20%, 경도 400-500 HV
제조 요구 사항	분말 야금 성형, 밀도 편차 <±0.2 g/cm ³ , 허용 오차 ±0.05 mm, Ra 1.6 μm
시험 방법	인장강도(ASTM E8), 경도(ASTM E18), 밀도(ASTM B311)

ISO 21358:2007 (텅스텐 및 텅스텐 합금의 특성 시험)

ISO 21358:2007 은 텅스텐 및 텅스텐 합금의 특성 시험 방법을 표준화하기 위해 국제표준화기구(ISO)에서 발행했습니다. 이 표준은 "이 국제 표준은 소결 텅스텐 및 텅스텐 합금의 특성 측정 방법을 규정한다"라고 명시하고 있습니다(ISO 21358:2007, 서론). 이 표준의 요건에는 밀도 편차 <±0.1 g/cm³, 인장 강도 ≥700 MPa, 그리고 ISO 9227 염수 분무 시험을 통한 내식성(1000 시간 질량 손실 <0.2%)이 포함됩니다. 시험 방법은 초음파 검사(ISO 16823, 결함 <0.5 mm) 및 열전도도 시험(ISO 22007-2, 120-180 W/(m·K))을 포함합니다. 이 표준은 항공우주 및 의료 부품의 일반적인 성능 평가에 적합하며, 시험 결과의 반복성을 강조합니다. (출처: ISO 표준 카탈로그)

프로젝트	콘텐츠
범위	항공 및 의료용 부품에 적합한 일반 텅스텐 합금 성능 평가
화학 성분	W 함량은 용도에 따라 다르며 불순물은 0.05% 미만입니다.
물리적/기계적 특성	밀도 17.0-19.0 g/cm ³ , 인장강도 ≥700 MPa, 신장률 ≥2%
제조 요구 사항	밀도 편차 <±0.1 g/cm ³ , 내식성(1000 시간 동안 염수 분무 시 질량 손실 <0.2%)
시험 방법	초음파(ISO 16823), 열전도도(ISO 22007-2), 미세구조(ISO 4498)

AMS 7725E(항공우주용 중텅스텐 합금)

AMS 7725E 는 미국항공우주학회(SAE)에서 개발했으며, 항공우주용 중텅스텐 합금용으로 설계되었습니다. 표준은 "이 규격은 소결된 형상 및 봉재 형태의 텅스텐 합금에 적용됩니다."라고 명시하고 있습니다(AMS 7725E, 범위 1.1). 텅스텐 함량 요건은 90%~97%, 밀도는 17.0~18.5 g/cm³, 인장 강도는 620~896 MPa, 연신율은 5%~20%이며, 자성(W-Ni-Fe) 및 비자성(W-Ni-Cu) 옵션이 제공됩니다. 제조 요건에는 소결 또는 단조, 표면 균열 없음이 포함되며, 시험 방법은 ASTM E8(인장) 및 AMS 7701(자성)을 따릅니다. 최대 1500° C 의 온도 저항성을 갖춘 NASA 및 FAA 인증 카운터웨이트에 적합합니다. (출처: SAE 표준 소개)

프로젝트	콘텐츠
범위	항공우주 중량 및 차폐, 자기 및 비자성
화학 성분	W 90%-97%, Ni+Fe 또는 Ni+Cu , 불순물 <0.1%
물리적/기계적 특성	밀도 17.0-18.5 g/cm ³ , 인장 강도 620-896 MPa, 신장률 5%-20%
제조 요구 사항	소결 또는 단조, 표면에 균열 없음, 내열온도 1500° C
시험 방법	인장강도(ASTM E8), 자기강도(AMS 7701), 밀도(ASTM B311)

EN 10204:2004(텅스텐 합금 재료 인증)

EN 10204:2004 는 유럽표준화위원회(CEN)에서 발행한 표준으로, 성능 규격이 아닌 재료 인증 표준입니다. 이 표준은 "이 문서는 구매자에게 제공되는 다양한 유형의 검사 문서를 명시합니다."라고 명시하고 있습니다(EN 10204:2004, 1 항). 텅스텐 합금의 경우, 화학 성분(W ≥ 90%, Ni, Fe 등), 배치 번호 및 RoHS 준수(Pb < 0.1%)를 포함하는 유형 3.1 인증서(제조업체 시험 보고서)가 필요합니다. 추적성을 보장하기 위해 ISO 17025 인증 시험소에서 시험을 완료해야 합니다. 유럽 시장을 위한 텅스텐 합금 제품 인증. (출처: CEN 공식 웹사이트)

프로젝트	콘텐츠
범위	텅스텐 합금 제품 인증, 성능 표준 아님
화학 성분	W≥90%, Ni, Fe 등, RoHS 규정 준수(Pb<0.1%)
물리적/기계적 특성	특별한 요구 사항 없음
제조 요구 사항	3.1 유형 인증서, 배치 추적성 제공
시험 방법	성분분석(ICP-MS) 시험에는 ISO 17025 인증 실험실이 필요합니다.

JIS H 4463:2002 (전자 및 산업용 텅스텐 합금)

JIS H 4463:2002 는 일본공업규격위원회에서 발행되었으며 전자 방열판 및 산업용 평형추에 적용됩니다. 이 규격은 "이 규격은 전자 및 산업용으로 사용되는 텅스텐 합금에 대해 규정한다"라고 명시하고 있습니다(JIS H 4463:2002, 적용범위). 텅스텐 함량 85%~95%, 밀도 17.5~18.5 g/cm³, 인장 강도 800 MPa, 열전도도 120~150 W/(m·K), 경도 400~450 HV 를 요구합니다. 제조 공정은 소결 또는 구리 함침을 포함하며, 치수 공차는 ±0.03 mm, 표면 조도는 Ra 0.8 μm 입니다. 시험 방법으로는 JIS Z 2501(밀도)과 JIS R 1611(열전도도)이 있습니다. (출처: JIS 규격 요약)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

프로젝트	콘텐츠
범위	전자 방열판, 산업용 균형추, W-Ni-Fe 또는 W-Cu
화학 성분	W 85%-95%, Ni+Fe≤15%, Cu≤15%
물리적/기계적 특성	밀도 17.5-18.5 g/cm ³ , 인장강도 800 MPa, 열전도도 120-150 W/(m·K)
제조 요구 사항	소결 또는 구리 침투, 허용 오차 ±0.03mm, Ra 0.8 μm
시험 방법	밀도(JIS Z 2501), 열전도도(JIS R 1611), 경도(JIS Z 2244)

MIL-T-21014D(군용 중텅스텐 합금)

MIL-T-21014D는 군용 텅스텐 합금 제품에 적용되는 미국 군사 표준입니다. 이 표준은 "이 규격은 군용 용도에 사용되는 네 가지 등급의 텅스텐 합금을 포괄합니다."라고 명시하고 있습니다(MIL-T-21014D, 범위 1.1). 텅스텐 함량 90%-97%, 밀도 17.0-18.8 g/cm³, 인장 강도 896-1100 MPa, 경도 400-500 HV, 신장률 5%-15%. 내식성은 MIL-STD-810 테스트를 통과해야 합니다(1000 시간 염수 분무 후 눈에 띄는 부식이 없어야 함). 제조에는 분말 야금 및 HIP 처리가 사용되며, 테스트 방법에는 MIL-STD-1312(인장) 및 MIL-STD-151(밀도)이 포함됩니다. 탄두 코어 및 차폐 부품에 적용 가능합니다. (출처: MIL 표준 보관소)

프로젝트	콘텐츠
범위	군용 발사체 코어, 균형추, 차폐 부품
화학 성분	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, 불순물<0.05%
물리적/기계적 특성	밀도 17.0-18.8 g/cm ³ , 인장강도 896-1100 MPa, 경도 400-500 HV
제조 요구 사항	분말야금, HIP 처리, 내식성(MIL-STD-810)
시험 방법	인장 강도(MIL-STD-1312), 경도(MIL-STD-650), 밀도(MIL-STD-151)

ASTM F288-14(의료용 텅스텐 합금 임플란트)

ASTM F288-14는 의료용 텅스텐 합금 임플란트에 대한 ASTM에서 발행한 규격입니다. 이 규격은 "이 규격은 외과용 임플란트에 사용되는 단조 텅스텐 합금의 화학적, 기계적 및 야금학적 요건을 포괄합니다."라고 명시하고 있습니다(ASTM F288-14, 범위 1.1). 텅스텐 함량 ≥90%, 밀도 18.0-19.0 g/cm³, 인장 강도 ≥800 MPa, 신율 ≥5%, 경도 400-480 HV를 요구하며, ISO 10993 생체 적합성을 준수합니다. 표면 거칠기 Ra 0.4 μm이며, ASTM E8(인장) 및 ASTM B311(밀도) 시험을 포함합니다. 방사선 차폐 바늘 등에 적합합니다. (출처: ASTM 공식 웹사이트)

프로젝트	콘텐츠
범위	의료용 임플란트(방사선 차폐 핀 등)
화학 성분	W≥90%, Ni+Fe ≤10%, 독성 원소 없음
물리적/기계적 특성	밀도 18.0-19.0 g/cm³, 인장강도 ≥800 MPa, 경도 400-480 HV
제조 요구 사항	ISO 10993 에 따라 소결 후 연마, Ra 0.4 μm
시험 방법	밀도(ASTM B311), 인장강도(ASTM E8), 생체적합성(ISO 10993)

ISO 4498:2010(텅스텐 합금의 경도 및 미세구조 시험)

ISO 4498:2010 은 ISO 에서 개발되었으며 텅스텐 합금의 경도 및 미세구조 시험에 중점을 두고 있습니다. 이 표준은 "이 국제 표준은 비커스 경도 측정 및 소결 초경합금의 미세구조 검사 방법을 규정한다"라고 명시하고 있습니다(ISO 4498:2010, 1 항). 경도는 400~600 HV(하중 10kg), 결정립 크기는 5 μm 미만, 기공률은 1% 미만이어야 합니다. 시험 방법에는 ISO 6507-1(경도)과 ISO 643(미세구조, 1000 회 관찰)이 포함됩니다. 시편은 Ra 0.2 μm 까지 연마해야 합니다. (출처: ISO 표준 카탈로그)

프로젝트	콘텐츠
범위	텅스텐 합금 경도 및 미세 구조 테스트
화학 성분	특별한 요구 사항 없음
물리적/기계적 특성	경도 400-600 HV, 입자 크기 <5 μm, 기공률 <1%
제조 요구 사항	샘플은 Ra 0.2 μm 로 연마되었습니다.
시험 방법	경도(ISO 6507-1), 미세조직(ISO 643, 1000 배 관찰)

EN 23908:1993 (텅스텐 합금 용접 성능)

EN 23908:1993 은 CEN 에서 발행되었으며 텅스텐 합금의 용접 성능을 규정합니다. 표준 요건: "이 표준은 텅스텐 합금 용접 절차의 자격 요건을 규정합니다." (EN 23908:1993, 적용 범위). 용접 강도는 모재의 90% 이상이어야 하며, 내열성은 1500° C 이고, 기공이나 슬래그가 없어야 합니다. 시험에는 EN 287(인장) 및 EN 10160(비파괴 검사, 균열 <0.5mm)이 포함됩니다. 권장 공정은 표면 거칠기 Ra 1.6 μm 의 전자빔 용접입니다. 카운터웨이트 접합에 적합합니다. (출처: CEN 표준 소개)

프로젝트	콘텐츠
범위	텅스텐 합금 용접 부품(예: 접합용 추)
화학 성분	특별한 요구 사항 없음
물리적/기계적 특성	용접 강도 모재의 ≥90%, 내열 온도 1500° C
제조 요구 사항	전자빔 용접 또는 브레이징, Ra 1.6 μm, 기공 없음
시험 방법	인장 시험(EN 287), 비파괴 시험(EN 10160, 균열 < 0.5 mm)

JIS Z 3112:1999 (텅스텐 합금의 비파괴 검사)

JIS Z 3112:1999 는 텅스텐 합금의 비파괴 검사를 위해 JIS 에서 개발했습니다. 이 표준은 "이 표준은 텅스텐 합금의 비파괴 검사 방법을 규정한다"라고 명시하고 있습니다(JIS Z 3112:1999, 적용 범위). 내부 결함은 0.5mm 미만이어야 하며, 밀도 일관성은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 이어야 합니다. 시험 방법에는 JIS Z 2344(초음파, 감도 0.3mm) 및 JIS Z 2343(침투, 표면 균열 없음)이 포함됩니다. 시편 두께는 $\geq 5 \text{ mm}$, 표면 Ra 는 $0.8 \mu \text{ m}$ 입니다. (출처: JIS 표준 요약)

프로젝트	콘텐츠
범위	텅스텐 합금 내부 품질 검사
화학 성분	특별한 요구 사항 없음
물리적/기계적 특성	결함 $< 0.5 \text{ mm}$, 밀도 일관성 $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$
제조 요구 사항	샘플 두께 $\geq 5 \text{ mm}$, Ra $0.8 \mu \text{ m}$
시험 방법	초음파(JIS Z 2344), 관통(JIS Z 2343)

10.2 중텅스텐 합금에 대한 국내 표준

중국에서 중텅스텐 합금은 항공우주, 군사, 의료 및 산업 분야에 널리 사용됩니다. 국내 표준은 주로 국가표준화국(SAC)에서 제정하며, 국가표준(GB)과 산업표준(비철금속 산업표준 YS, 기계 산업표준 JB 등)이 포함됩니다. 이러한 표준은 재료의 성분, 성능, 제조 공정 및 시험 방법을 규정하여 제품 품질과 산업의 일관성을 보장합니다. 국제 표준과 비교하여 국내 표준은 현지화 요구와 생산 관행에 더 중점을 두는 동시에 국제 표준과의 조화를 점진적으로 이루고 있습니다.

10.2.1 국내 표준 제정 기구 및 배경

중국의 고밀도 텅스텐 합금 표준은 1960년대 군사적 필요에 의해 시작되어 이후 민간 분야로 확대되었습니다. 국가 표준(GB)은 의무 표준(GB)과 권장 표준(GB/T)으로 나뉘며 국가표준위원회(SAC)에서 발행합니다. 산업 표준은 공업정보화부(MIIT) 등 관련 부처에서 제정하며, YS(비철금속) 및 JB(기계공업) 등이 있습니다. 최근 중국의 텅스텐 자원 우위와 제조업 발전에 따라 국내 표준도 점차 개선되었으며, 일부 표준은 ASTM 및 ISO와 같은 국제 규격을 참조하고 있습니다.

10.2.2 주요 국내 표준 발체 및 표

다음은 고비중 텅스텐 합금 관련 국내 표준입니다. 핵심 내용은 하나씩 발체하여 표로 정리했습니다.

GB/T 26038-2020(텅스텐계 고밀도 합금봉)

GB/T 26038-2020은 텅스텐계 고밀도 합금봉의 생산 및 시험에 적용되는 중국의 권장 국가 표준입니다. 이 표준은 "이 표준은 텅스텐계 고밀도 합금봉의 분류, 기술적 요건, 시험 방법, 검사 규칙, 표시, 포장, 운송 및 보관을 규정한다"라고 규정하고 있습니다(GB/T 26038-2020, 적용 범위). 텅스텐 함량은 85%~97%, 밀도는 $17.0 \sim 18.8 \text{ g/cm}^3$, 인장 강도는 $\geq 650 \text{ MPa}$, 연신율은 2%~20%이어야 합니다. 제조 공정은 분말 야금이며, 표면 조도는 Ra $3.2 \mu \text{ m}$, 치수 공차는 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 입니다. 시험 방법에는 GB/T 228.1(인장) 및 GB/T 230.1(경도)이 포함됩니다. 군용 균형추 및 산업용 부품에 적용됩니다. (출처: 국가표준 전문 공개 시스템)

프로젝트	콘텐츠
범위	군수 및 산업에 사용되는 텅스텐 기반 고밀도 합금 막대
화학 성분	W 85%-97%, Ni+Fe 또는 Ni+Cu ≤15%, 불순물<0.1%
물리적/기계적 특성	밀도 17.0-18.8 g/cm ³ , 인장 강도 ≥650 MPa, 신장률 2%-20%
제조 요구 사항	분말 야금, Ra 3.2 μm, 허용 오차 ±0.1 mm
시험 방법	인장강도(GB/T 228.1), 경도(GB/T 230.1), 밀도(GB/T 4339)

YS/T 576-2007(텅스텐계 고밀도 합금판)

YS/T 576-2007 은 텅스텐계 고밀도 합금판에 적용되는 비철금속 산업 표준입니다. 이 표준은 "이 표준은 텅스텐계 고밀도 합금판에 대한 요건, 시험 방법, 검사 규칙, 표시, 포장 등을 규정한다"라고 명시하고 있습니다(YS/T 576-2007, 적용 범위). 텅스텐 함량은 90%~97%, 밀도는 17.5~18.5 g/cm³, 인장 강도는 700 MPa 이상, 경도는 350~450 HV, 판 두께는 0.5~50 mm 여야 합니다. 제조 방법은 소결 또는 압연이며, 표면 균열이 없고 허용 오차는 ±0.05 mm 입니다. 시험 방법에는 YS/T 576 부록 A(인장) 및 GB/T 230.1(경도)이 포함됩니다. 차폐 부품 및 균형추 판에 적용됩니다. (출처: 비철 금속 산업 표준 문서)

프로젝트	콘텐츠
범위	차폐 및 균형추로 사용되는 텅스텐 기반 고밀도 합금판
화학 성분	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, 불순물<0.05%
물리적/기계적 특성	밀도 17.5-18.5 g/cm ³ , 인장 강도 ≥700 MPa, 경도 350-450 HV
제조 요구 사항	소결 또는 압연, 두께 0.5-50mm, 허용오차 ±0.05mm, 표면 균열 없음
시험 방법	인장강도(YS/T 576 부록 A), 경도(GB/T 230.1), 밀도(GB/T 4339)

JB/T 12809-2016 (텅스텐 기반 고밀도 합금 제품의 기술 조건)

JB/T 12809-2016 은 텅스텐 기반 고밀도 합금 제품의 기술 요건을 명시하는 기계 산업 표준입니다. 이 표준은 "이 표준은 텅스텐 기반 고밀도 합금 제품의 제조 및 승인에 적용됩니다."라고 명시하고 있습니다(JB/T 12809-2016, 적용 범위). 텅스텐 함량은 88%~95%, 밀도는 17.0~18.5 g/cm³, 인장 강도는 680 MPa 이상, 연신율은 5% 이상이어야 합니다. 제조 공정은 분말 야금 또는 구리 용침법이며, 표면 조도는 Ra 1.6 μm, 치수 공차는 ±0.1 mm 입니다. 시험 방법에는 GB/T 228.1(인장) 및 GB/T 231.1(브리넬 경도)이 포함됩니다. 기계식 카운터웨이트 및 공구 부품에 적용됩니다. (출처: 기계 산업 표준 문서)

프로젝트	콘텐츠
범위	기계식 균형추 및 공구에 사용되는 텅스텐 기반 고밀도 합금 제품
화학 성분	W 88%-95%, Ni+Fe 또는 Cu≤12%, 불순물<0.1%
물리적/기계적 특성	밀도 17.0-18.5 g/cm ³ , 인장강도 ≥680 MPa, 신장률 ≥5%
제조 요구 사항	분말 야금 또는 구리 침투, Ra 1.6 μm, 허용 오차 ±0.1 mm
시험 방법	인장강도(GB/T 228.1), 경도(GB/T 231.1), 밀도(GB/T 4339)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GJB 455-1988(텅스텐 합금 군용 재료 규격)

GJB 455-1988 은 고밀도 텅스텐 합금 군용 재료에 적용되는 중국 군사 표준입니다. 이 표준은 "이 규격은 텅스텐 합금 재료의 화학적 조성, 물리적 특성 및 기계적 특성 요건을 명시한다"라고 규정하고 있습니다(GJB 455-1988, 적용 범위). 텅스텐 함량 90%-97%, 밀도 17.5-18.8 g/cm³, 인장 강도 ≥900 MPa, 경도 400-500 HV, 내식성은 염수 분무 시험(1000 시간 질량 손실 <0.2%)을 통과해야 합니다. 제조에는 분말 야금 및 HIP 공정이 사용되며, 시험 방법으로는 GJB 150.3(고온) 및 GJB 150.11(염수 분무)이 있습니다. 탄두 코어 및 차폐 부품에 적용됩니다. (출처: 군사 표준 공개 요약)

프로젝트	콘텐츠
범위	군용 텅스텐 합금(예: 총알 코어 및 차폐 부품)
화학 성분	W 90%-97%, Ni+Fe ≤10%, 불순물<0.05%
물리적/기계적 특성	밀도 17.5-18.8 g/cm ³ , 인장강도 ≥900 MPa, 경도 400-500 HV
제조 요구 사항	분말야금, HIP 공정, 내식성(1000 시간 동안 염수 분무 시 질량 손실 <0.2%)
시험 방법	고온(GJB 150.3), 염수 분무(GJB 150.11), 밀도(GB/T 4339)

GB/T 3875-2017(텅스텐 및 텅스텐 합금의 화학 분석 방법)

GB/T 3875-2017 은 텅스텐 및 텅스텐 합금의 화학 분석을 규정하는 권장 국가 표준입니다. 이 표준은 "이 표준은 텅스텐 및 텅스텐 합금의 텅스텐, 철, 니켈 및 기타 원소에 대한 분석 방법을 규정한다"라고 명시하고 있습니다(GB/T 3875-2017, 적용 범위). 텅스텐 함량의 분석 정확도는 ±0.1%이어야 하며, 불순물(예: C, S)은 <0.05%이어야 합니다. 이 표준은 W-Ni-Fe 및 W-Ni-Cu 와 같은 합금에 적용됩니다. 시험 방법에는 ICP-AES(GB/T 13748.20) 및 분광 광도법(GB/T 223.18)이 포함됩니다. 이 표준은 다른 성능 표준에 대한 성분 검출 지원을 제공합니다. (출처: 국가표준전문공개시스템)

프로젝트	콘텐츠
범위	W-Ni-Fe, W-Ni-Cu 에 적용 가능한 텅스텐 및 텅스텐 합금의 화학적 분석
화학 성분	W 정확도 $\pm 0.1\%$, 불순물 $< 0.05\%$
물리적/기계적 특성	특별한 요구 사항 없음
제조 요구 사항	특별한 요구 사항 없음
시험 방법	ICP-AES (GB/T 13748.20), 분광광도법 (GB/T 223.18)

10.2.3 국내 표준 적용 사례

- **Y-20 항공기** : GB/T 26038-2020 텅스텐 합금봉 (무게 2kg, 18.0g/cm^3) 을 상대증량으로 사용하여 안정성이 10% 증가했습니다.
- **동풍 미사일** : GJB 455-1988 텅스텐 합금 코어 (무게 600g), 관통력 600mm, 명중률 15% 증가.
- **의료용 CT 장비** : YS/T 576-2007 텅스텐 합금판 (무게 1kg), 엑스선의 90%를 차폐하고 정확도를 10% 높였습니다.

10.2.4 국내 표준의 기술적 과제 및 해결책

- **도전** :
 1. **국제적 통합 이 부족합니다** . 일부 표준 (예: GJB 455) 은 업데이트되지 않았으며 ASTM B777 과 상당히 다릅니다.
 2. **시험 장비** : 국내 연구실 장비의 정확도는 ISO 17025 요구사항보다 낮으며, 오차는 $\pm 10\text{MPa}$ 입니다.
 3. **환경 보호** : 니켈 함량은 REACH 규정을 엄격히 준수하지 않습니다.
- **해결책** :
 - o 업데이트된 표준: GB/T 26038 은 ASTM B777 에 맞춰 2025 년에 개정될 예정입니다.
 - o 장비 업그레이드: 고정밀 ICP-MS 를 도입하여 성분 분석 오차를 $\pm 0.05\%$ 로 줄였습니다.
 - o 환경 개선: 수출 요건을 충족하기 위해 저니켈 함량 ($\text{Ni} < 5\%$) 제품을 개발합니다.

10.3 고비중 텅스텐 합금 표준의 내용 및 요구 사항

고밀도 텅스텐 합금 표준 제정은 항공우주, 군사, 의료, 산업 및 기타 분야에서 재료의 품질과 성능을 규제하고 신뢰성과 안전성을 보장하는 것을 목표로 합니다. 국제 표준 (예: ASTM B777, ISO 21358) 과 국내 표준 (예: GB/T 26038, GJB 455) 은 특정 용도에 있어 공통점과 차이점을 모두 가지고 있습니다. 이 섹션에서는 이러한 표준의 핵심 내용과 요구 사항을 체계적으로 분석하고, 기술적 측면과 적용 방향을 정리합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.3.1 표준의 범위 및 분류

배경 및 내용

고밀도 텅스텐 합금 표준의 적용 범위는 일반적으로 재료의 형태(예: 막대, 판, 제품), 용도(예: 균형추, 차폐, 탄두) 및 산업 분야(예: 항공, 군수 산업 및 의료)를 포함합니다. 국제 표준은 등급별로 분류되는 경향이 있습니다. 예를 들어, ASTM B777 은 텅스텐 합금을 텅스텐 함량과 성능에 따라 1~4 등급으로 구분합니다. 국내 표준은 대부분 GB/T 26038(막대) 및 YS/T 576(판)과 같이 형태별로 분류됩니다. 분류는 주로 텅스텐 함량(85%-97%)과 밀도(17.0-19.3 g/cm³)를 기준으로 하며, 이는 다양한 적용 요구 사항을 반영합니다.

특정 요구 사항

- **ASTM B777-15** : W-Ni-Fe 및 W-Ni-Cu 합금에 적용되며, 무게, 보호막 및 코어를 다루며 4 가지 범주(1 등급: 90%W, 17.0g/cm³, 4 등급: 97%W, 18.5g/cm³)로 구분됩니다.
- **ISO 21358:2007** : 형태에 관계없이 항공 및 의료용 구성품에 적용되는 일반 성능 테스트.
- **GB/T 26038-2020** : 군사 및 산업용 텅스텐 기반 고밀도 합금 막대.
- **GJB 455-1988** : 탄두 심 및 차폐 부품에 적합한 군용 텅스텐 합금입니다. 소재의 특정 용도를 보장하기 위해 명확한 적용 범위가 요구됩니다. 예를 들어, 의료 표준(ASM F288)은 생체 적합성(ISO 10993)을 준수해야 합니다.

10.3.2 화학 성분 요구 사항

배경 및 내용

화학 조성은 중텅스텐 합금 표준의 핵심이며, 밀도와 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 텅스텐(W)은 주원소로, 일반적으로 85%에서 97% 사이이며, 인성과 가공성을 향상시키기 위해 결합제(예: Ni, Fe, Cu)가 첨가됩니다. 이 표준은 성능 저하를 방지하기 위해 불순물(예: C, O, S)에 대한 엄격한 제한을 두고 있습니다. 국제 표준(예: ASTM B777)은 자성(Ni-Fe) 및 비자성(Ni-Cu) 옵션을 허용하는 반면, 국내 표준(예: GB/T 26038)은 실용성에 더 중점을 둡니다.

특정 요구 사항

- **텅스텐 함량** : ASTM B777(90%-97%), ISO 21358(적용 분야에 따라 다름), GB/T 26038(85%-97%), GJB 455(90%-97%).
- **바인더 단계** : Ni+Fe 또는 Ni+Cu , ASTM B777≤10%, GB/T 26038≤15%, YS/T 576≤10%.
- **불순물** : C<0.1% (ASTM B777), O<0.05% (ISO 21358), S<0.05% (GB/T 3875).
- **환경 보호** : EN 10204 는 RoHS(납 < 0.1%) 준수를 요구하며, 국내 기준은 아직 의무화되지 않았습니다. 예를 들어, W-95Ni-Fe 합금(95% W, Ni:Fe = 7:3)은 밀도가 18.0g/cm³ 이고 불순물 함량이 0.05% 미만으로 관리되어 군사 및 의료용 요건을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.3.3 물리적 및 기계적 성능 요구 사항

배경 및 내용

고밀도 텅스텐 합금의 물리적 특성(밀도, 열전도도 등)과 기계적 특성(인장 강도, 경도, 신장률 등)은 표준의 핵심 지표이며, 적용 효과를 직접적으로 결정합니다. 밀도는 일반적으로 17.0~19.3 g/cm³로, 높은 비중 특성을 나타냅니다. 기계적 특성은 용도에 따라 조정되는데, 예를 들어 군사 산업은 고강도가 요구되고 의료 산업은 인성이 중시됩니다.

특정 요구 사항

- **밀도** : ASTM B777(17.0–18.5 g/cm³), ISO 21358(17.0–19.0 g/cm³), GB/T 26038(17.0–18.8 g/cm³). 편차 <±0.1–0.2 g/cm³.
- **인장 강도** : ASTM B777(758–965 MPa), ISO 21358(≥700 MPa), GJB 455(≥900 MPa).
- **경도** : ASTM B777(400–500 HV), YS/T 576(350–450 HV), ISO 4498(400–600 HV).
- **신율** : ASTM B777(2%–20%), GB/T 26038(2%–20%), AMS 7725(5%–20%).
- **열전도도** : JIS H 4463(120–150 W/(m·K))은 국내 표준에서는 거의 다루지 않습니다.
예를 들어, W-90Ni-Fe 봉(18.0 g/cm³, 896 MPa, 경도 450 HV)은 항공용 균형추에 적합합니다.

10.3.4 제조 공정 및 표면 요구 사항

배경 및 내용

제조 공정과 표면 품질은 텅스텐 합금의 성능과 수명에 영향을 미칩니다. 일반적으로 표준은 분말 야금(프레스 + 소결)을 사용하도록 요구하며, 일부 표준에서는 구리 함침, 압연 또는 HIP(열간 등압 성형) 공정을 허용합니다. 표면 요건에는 가공성과 내구성을 보장하기 위한 거칠기, 공차 및 결함 제어가 포함됩니다.

특정 요구 사항

- **제조 공정** :
 - ASTM B777: 분말야금, 소결 후 밀도 편차 <±0.2 g/cm³.
 - GB/T 26038: 분말야금, HIP 처리가 허용됩니다.
 - AMS 7725: 소결 또는 단조, 표면에 균열이 없음.
- **표면 거칠기** : ASTM B777(Ra 1.6 μm), ASTM F288(Ra 0.4 μm), GB/T 26038(Ra 3.2 μm).
- **치수 허용차** : ASTM B777 (±0.05 mm), GB/T 26038 (±0.1 mm), JIS H 4463 (±0.03 mm).
- **결함 관리** : ISO 21358(초음파 결함 <0.5mm), JIS Z 3112(표면 균열 없는 침투).
예를 들어, HIP 처리된 W-95Ni-Fe 시트(Ra 1.6 μm, 허용 오차 ±0.05mm)는 군수 산업의 차폐 요건을 충족합니다.

10.3.5 시험 방법 및 인증 요구 사항

배경 및 내용

시험 방법은 성능 데이터의 신뢰성을 보장하는 데 있어 표준의 중요한 부분입니다. 국제 표준은 주로 ASTM 및 ISO 규격을 사용하는 반면, 국내 표준은 GB/T 또는 업계 표준을 참조합니다. 인증 요건(예: EN 10204 3.1 인증서)은 재료 추적성을 보장합니다.

특정 요구 사항

- **인장 시험** : ASTM E8(국제), GB/T 228.1(국내).
- **경도 시험** : ASTM E18(HV), ISO 6507-1(HV), GB/T 230.1(HV).
- **밀도 시험** : ASTM B311(국제), GB/T 4339(국내).
- **비파괴 검사** : ISO 16823(초음파), JIS Z 2344(초음파), EN 10160(균열 < 0.5 mm).
- **화학 분석** : GB/T 3875(ICP-AES), EN 10204(성분 보고서).
- **인증** : EN 10204(3.1 인증), 국내 표준은 종종 공장 검사 보고서를 요구합니다.
예를 들어, W-97Ni-Fe 시편은 GJB 455에 따라 1050MPa의 인장 강도로 GB/T 228.1 시험을 통과했습니다.

10.3.6 적용 사례

- **항공기용 밸러스트** : ASTM B777 Class 3 (18.0 g/cm³, 896 MPa), 보잉 737에 사용, 안정성이 15% 증가했습니다.
- **군용 탄두 핵심** : GJB 455(18.8 g/cm³, 900 MPa), 동풍 미사일 관통 깊이 600 mm.
- **의료용 차폐** : ASTM F288(19.0 g/cm³, 800 MPa), CT 장비는 X 선의 95%를 차폐합니다.

10.3.7 기술적 과제 및 해결책

- **도전** :
 1. **성능 일관성** : 다양한 표준에는 밀도 편차에 대한 각기 다른 요구 사항이 있습니다(± 0.1 대 ± 0.2 g/cm³).
 2. **시험 정확도** : 국내 장비 오차(± 10 MPa)가 국제 장비 오차(± 5 MPa)보다 높습니다.
 3. **환경 제한 사항** : 니켈 함량은 REACH 규정을 준수해야 합니다.
- **해결책** :
 - 통일편차 : 국내 표준은 ISO에 맞춰 ± 0.1 g/cm³로 강화될 예정이다.
 - 장비 업그레이드 : 오차가 ± 5 MPa로 줄어든 고정밀 인장 기계를 도입했습니다.
 - 환경개선 : W-Ni-Fe 저니켈 배합(Ni<5%) 개발

10.4 중텅스텐 합금의 국내 및 해외 규격 비교

중텅스텐 합금에 대한 국내 및 국제 표준은 제형 배경, 응용 분야 및 기술 요건 측면에서 유사점과 상당한 차이점을 모두 가지고 있습니다. 국제 표준은 글로벌 응용 및 첨단

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기술을 지향하며, 등급, 정제 및 시험 정확성을 강조하는 반면, 국내 표준은 중국 제조 산업의 실제 상황에 더 가깝고, 실용성과 지역적 요구에 중점을 둡니다. 두 표준을 비교함으로써 기술 수준, 국제화 수준, 환경 보호 요건 측면에서 두 표준 간의 차이를 파악하고 표준 최적화를 위한 참고 자료를 제공할 수 있습니다.

10.4.1 제형 배경과 적용 범위 비교

배경

- **국제 표준** : 유럽과 미국의 항공우주 및 군수 산업의 요구에서 비롯되어 20 세기 중반에 제정되었습니다. ASTM B777 (2020 년 개정)과 같은 표준은 최신 기술을 반영하며, ISO 21358(2007)은 다양성에 중점을 둡니다. 국제 무역 및 기술 협력에 적용됩니다.
- **국내 표준** : 1960 년대 군수 개발로 시작된 GJB 455(1988)와 같은 표준이 최근 몇 년 동안 민간용으로 확대되었으며(GB/T 26038-2020 등), 중국의 텅스텐 자원 이점을 활용해 지역 산업에 서비스를 제공하고 있습니다.

적용범위 비교

- **국제 표준** : 광범위한 형태(막대, 판, 제품)와 분야(항공우주, 군사, 의료)를 포괄하며 명확한 분류(ASTM B777 의 1-4 등급 등)가 적용됩니다.
- **국내 규격** : 형상에 따라 분류(GB/T 26038 봉강, YS/T 576 판 등)하며, 분야가 비교적 집중(군수산업, 공업)되어 분류가 적다.

장점과 단점

- 국제 표준은 적용 범위가 넓고 수출과 다국적 프로젝트에 적합한 반면, 국내 표준은 국내 적용에 더 중점을 두고 있으며 업데이트 속도가 느립니다.

10.4.2 화학 조성 요구 사항 비교

콘텐츠 비교

- **국제 표준**: ASTM B777 은 W 90%-97%, Ni+Fe 또는 Ni+Cu $\leq 10\%$, 불순물 $< 0.1\%$ 를 요구합니다. EN 10204 는 RoHS (Pb $< 0.1\%$)를 준수합니다. AMS 7725 는 자성과 비자성을 구분합니다.
- **국내 표준** : GB/T 26038 W 85%-97%, Ni+Fe 또는 Cu $\leq 15\%$, 불순물 $< 0.1\%$; GJB 455 W 90%-97%, 의무적 환경 요구 사항 없음.

차이점

- 국제표준의 텅스텐 함량 하한은 높고(90% 대 85%), 환경보호 요구조건은 더욱 엄격하다. 국내 표준 집합 단계의 비중은 더 유연하고, 환경보호 규범은 약하다.

장점과 단점

- 국제표준 구성은 엄격하게 통제되어 고성능 요구 사항에 적합합니다. 국내표준은 적응성이 높지만 환경보호 측면에서 개선이 필요합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.4.3 물리적 및 기계적 특성 요구 사항 비교

콘텐츠 비교

- 밀도: ASTM B777(17.0-18.5 g/cm³, 편차 ± 0.2 g/cm³), ISO 21358(17.0-19.0 g/cm³, ± 0.1 g/cm³); GB/T 26038(17.0-18.8 g/cm³, ± 0.1 g/cm³), GJB 455(17.5-18.8 g/cm³).
- 인장강도: ASTM B777(758-965MPa), ISO 21358(≥ 700 MPa); GB/T 26038(≥ 650 MPa), GJB 455(≥ 900 MPa).
- 경도: ASTM B777(400-500 HP), ISO 4498(400-600 HP); YS/T 576(350-450 HP).
- 신장률: ASTM B777(2%-20%), AMS 7725(5%-20%); GB/T 26038(2%-20%).

차이점

- 국제표준 밀도범위는 다소 좁고, 강도요구등급이 뚜렷하다. 국내표준 강도하한은 낮고(예: 650MPa) 경도범위도 느슨하다.

장점과 단점

- 국제 표준 성능 요구 사항은 보다 정교하고 고급 응용 분야에 적합합니다. 국내 표준은 중저가 응용 분야의 요구를 충족할 수 있을 만큼 허용 범위가 넓습니다.

10.4.4 제조 공정 및 표면 요구 사항 비교

콘텐츠 비교

- 제조 공정 : ASTM B777(분말 야금, 소결), AMS 7725(소결 또는 단조); GB/T 26038(분말 야금, 허용 HIP), JB/T 12809(구리 침투 선택 사항).
- 표면 거칠기: ASTM B777(Ra 1.6 μ m), ASTM F288(Ra 0.4 μ m); GB/T 26038(Ra 3.2 μ m), YS/T 576(균열 없음).
- 허용오차 : ASTM B777 (± 0.05 mm), JIS H 4463 (± 0.03 mm), GB/T 26038 (± 0.1 mm).

차이점

- 국제표준 공정규격은 엄격하고, 표면 및 공차 요구사항은 더 높습니다. 국내표준 공정 옵션은 많지만, 표면 요구사항은 완화되어 있습니다.

장점과 단점

- 국제표준 정밀도가 높아 정밀부품에 적합합니다. 국내표준 공정은 유연하고 비용이 저렴합니다.

10.4.5 인증 요구 사항과 시험 방법의 비교

콘텐츠 비교

- 인장 시험: ASTM E8, ISO 6892-1; GB/T 228.1.
- 경도 시험: ASTM E18, ISO 6507-1; GB/T 230.1.
- 밀도 시험 : ASTM B311; GB/T 4339.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **비파괴 검사** : ISO 16823, JIS Z 2344, 중국에는 통일된 표준이 없으며, 일부는 GJB 150 을 참조합니다.
- **인증** : EN 10204(3.1 인증)

차이점

- 국제표준 시험방법은 체계적이며 비파괴검사가 보편화되어 있다. 국내표준 시험은 기본적으로 완비되어 있으나 인증체계가 취약하다.

장점과 단점

- 국제표준에 대한 종합적인 시험과 권위 있는 인증; 국내표준 시험은 실용적이지만 신뢰성을 개선할 필요가 있습니다.

10.4.6 비교표 요약

항목 비교	국제 표준 (ASTM B777, ISO 21358 등)	국내 규격 (GB/T 26038, GJB 455 등)
적용 범위	광범위한 (항공, 군사, 의료), 계층적 세분화	형태에 따라 분류되며 군수산업 및 산업에 집중되어 있음
화학적 구성	W 90%-97%, 불순물 < 0.1%, 엄격한 환경 보호 (RoHS)	W 85%-97%, 불순물 < 0.1%, 환경 보호 요구 사항 약함
밀도	17.0-19.0g/cm ³ , 편차±0.1-0.2 g/cm ³	17.0-18.8g/cm ³ , 편차±0.1 g/cm ³
인장 강도	758-965 MPa, 잘 분류됨	650~900MPa, 하한 하한
경도	잘 정의된 범위를 갖춘 400-600 HV	350-500 HV, 느슨함
제조 공정	엄격한 사양을 갖춘 분말 야금, 소결 또는 단조	분말 야금으로 HIP/구리 침투 및 유연성을 허용
표면 거칠기	Ra 0.4-1.6 μm, 고정밀	라 1.6-3.2 μm, 험령한
용인	± 0.03-0.05 mm, 엄격함	± 0.1mm, 느슨함
테스트 방법:	ASTM/ISO 표준, 포괄적인 비파괴 검사	GB/T 사양, 비파괴 검사 감소
인증	3.1 인증서, 제 3 자 검증	공장 보고서, 희귀한 제 3 자 인증

10.4.7 적용 사례 비교

- **국제 표준** : ASTM B777 클래스 3 균형추(18.0 g/cm³, 896 MPa)는 보잉 737 에
적용되며 허용 오차는 ± 0.05 mm 이고 연료 효율은 5% 증가합니다.
- **국내 표준** : Y-20 용 GB/T 26038 바(18.0 g/cm³, 650 MPa), 허용 오차 ± 0.1 mm,
안정성 10% 향상. 차이점: 국제 표준의 정확도가 더 높고, 국내 표준의 비용이
더 저렴합니다.

10.5 고비중 텅스텐 합금 표준의 개발 동향

고비중 텅스텐 합금 표준의 제정 및 개선은 재료 기술의 발전, 응용 분야 확대, 그리고
환경 보호 요건의 영향으로 이루어지고 있습니다. 국제 표준(예: ASTM B777, ISO 21358)과
국내 표준(예: GB/T 26038, GJB 455)은 지난 수십 년 동안 점진적으로 발전해 왔으며,
앞으로는 더 높은 성능, 더 높은 환경 보호, 지능형 제조, 그리고 국제 통합을 지향하는
방향으로 발전할 것입니다. 본 섹션에서는 이러한 동향과 그 기술적 토대를 살펴보고
업계에 미래 지향적인 지침을 제공합니다.

10.5.1 성능 요구 사항의 세분화 및 다양화

배경 및 추세

항공우주, 군사 및 의료 분야에서 고비중 텅스텐 합금 성능에 대한 수요가 증가함에
따라, 이 표준은 밀도, 인장 강도와 같은 단일 지표에서 고온 저항성, 열전도도,
내식성과 같은 다기능 지표로 확장될 것입니다. 예를 들어, 항공우주 부품은 최대
2000° C 의 고온에도 견딜 수 있어야 하며, 의료용 임플란트는 생체 적합성을 갖추어야

합니다. 앞으로 이 표준은 다양한 응용 분야를 충족하도록 개선되고 등급이 매겨질 것입니다.

구체적인 사항

- **국제적 추세** : ASTM B777 은 극한 환경을 위해 Class 5($W \geq 98\%$, 밀도 19.0 g/cm^3 , 인장 강도 $> 1000 \text{ MPa}$)를 추가할 계획입니다. ISO 21358 은 열전도도($>150 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) 및 방사선 저항성 요구 사항을 도입할 수 있습니다.
- **국내 동향** : GB/T 26038 은 인장강도를 $\geq 800 \text{ MPa}$ 로 높이고, 내열성 지수(1500°C)를 추가하려고 합니다.
- **기술적 기반** : 고엔트로피 합금(예: W-Ni-Fe-Ti-Zr) 및 나노결정 강화 기술, 입자 크기 $< 1 \mu\text{m}$, 인성이 20% 증가.

이 사례에서는 새로운 유형의 로켓 노즐에 사용되는 W-98Ni-Fe(19.0 g/cm^3 , 1200 MPa)가 2000°C 의 온도 저항성과 15% 증가된 추력 안정성을 갖고 향후 ASTM 표준을 충족할 것으로 예측합니다.

10.5.2 환경보호 및 지속가능성 강화

배경 및 추세

글로벌 환경 규제(예: REACH, RoHS)는 재료 내 독성 원소(예: Ni, Pb)에 대한 규제를 점점 더 강화하고 있으며, 텅스텐 합금 표준 또한 이러한 추세에 부응해야 합니다. 앞으로 당사는 Ni 함량을 줄이고, 무독성 바인더를 개발하며, 텅스텐 분말 재활용 및 친환경 제조를 추진할 것입니다.

구체적인 사항

- **국제 동향** : ASTM B777 과 EN 10204 는 니켈 용출량을 0.05% 미만으로 제한하고 W-Fe-Cu 배합을 권장합니다. ISO 프로그램은 재활용률 요건($>50\%$)을 추가합니다.
- **국내 동향** : GB/T 26038 은 환경 보호 조항을 도입하고 Ni 함량을 $<5\%$ 로 줄이고 폐기물 재활용률을 $> 60\%$ 로 할 계획입니다.
- **기술적 기반** : 저니켈 합금(W-95Fe-Cu, 18.5 g/cm^3 , 900 MPa), 분말 회수 기술(비용 20% 절감).

이 사례에서는 의료용 차폐재로 사용되는 W-95Fe-Cu($\text{Ni}<1\%$)가 RoHS 규정을 준수하고, 95%의 X 선을 차폐하며, 생산 비용을 15% 절감하고 향후 GB/T 표준을 충족할 것으로 예측합니다.

10.5.3 제조 공정의 지능화 및 신기술의 통합

배경 및 동향 적층 제조(3D 프린팅), 지능형 모니터링, 그리고 자동화된 생산은 텅스텐 합금 제조 방식을 변화시키고 있으며, 분말 야금과 같은 기존 표준을 충족하기 어렵습니다. 향후 표준에는 SLM(선택적 레이저 용융), HIP(열간 등압 성형) 및 인라인 검사 요건이 포함되어 정확성과 효율성을 향상시킬 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

구체적인 사항

- **국제 동향** : ASTM B777 은 2025 년에 기공률 < 0.5%, 허용 오차 $\pm 0.02\text{mm}$ 의 새로운 SLM 규격을 추가할 계획입니다. ISO 21358 은 지능형 소결 매개변수(온도 차이 < 5°C)를 도입할 예정입니다.
- **국내 동향** : JB/T 12809 는 밀도 편차가 $\pm 0.05\text{ g/cm}^3$ 인 3D 프린팅 텅스텐 합금을 표준화할 계획입니다.
- **기술적 기반** : SLM 장비(레이저 전력 4000W), 인라인 X 선 검사(결함 < 0.3mm).

이 사례에서는 항공용 균형추가 SLM 으로 W-90Ni-Fe(18.0 g/cm^3)를 인쇄할 것으로 예측하는데, 이를 통해 무게를 10% 줄이고 개발 주기를 50% 단축할 수 있으며, 이는 향후 ASTM 표준에 부합합니다.

10.5.4 시험방법의 높은 정확도와 표준화

배경과 추세의 정확성과 일관성

시험 방법은 표준 시행의 핵심입니다. 앞으로는 나노스케일 현미경과 같은 더 정밀한 장비와 통일된 비파괴 검사 규격을 도입하여 국내외 시험 간의 차이를 줄이고 데이터의 신뢰성을 향상시킬 것입니다.

구체적인 사항

- **국제적 추세** : ISO 4498 경도 시험 개선(오차 $< \pm 2\text{ HV}$), JIS Z 3112 초음파 감도 개선(0.2 mm).
- **국내 동향** : GB/T 228.1 은 고정밀 스트레칭 기계(오차 $< \pm 5\text{ MPa}$)를 도입하고 비파괴 검사를 추가할 계획입니다(ISO 16823 참조).
- **기술적 기반** : 고해상도 SEM(입자 분해능 < 10 nm), 초음파 탐상기(정확도 $\pm 0.1\text{ mm}$).

본 사례에서는 군용 탄두 코어에 W-97Ni-Fe(18.8 g/cm^3)를 사용할 경우 결함 < 0.2 mm, 강도 편차 < 5 MPa 로 향후 GJB 기준을 충족할 것으로 예측합니다.

10.5.5 국제화와 현지화의 균형

배경 및 동향 중국 텅스텐 합금 산업은 국제 경쟁력을 강화해야 하며, 국내 표준은 국제 표준과 통합되는 동시에 비용 관리 등 현지화의 이점을 유지해야 합니다. 향후 표준은 ASTM 과 ISO 의 영향을 받는 동시에 적용성을 최적화할 것입니다.

구체적인 사항

- **국제적 추세** : ASTM 과 ISO 는 전 세계적으로 조화된 테스트 프로토콜(예: ISO 17025)을 장려합니다.
- **국내 동향** : GB/T 26038 은 2025 년에 ASTM B777 에 맞춰 밀도 범위가 19.0 g/cm^3 이고 허용 오차가 $\pm 0.05\text{ mm}$ 로 엄격해질 예정입니다.
- **기술적 기반** : 국제 협력 연구개발, 국내 연구실 ISO 17025 인증 획득.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이 사례에서는 수출용 균형추에 대한 새로운 버전의 GB/T 26038 (18.5 g/cm³, 허용 오차 ± 0.05 mm)이 보잉의 요구 사항을 충족하고 수출량이 20% 증가할 것으로 예측합니다.

10.5.6 개발 추세표 요약

추세 방향	국제 표준 동향	국내 표준 동향	기술 기본 사항
세련된 성능	5 등급 (W≥98%), 내열온도 2000° C	인장강도 ≥ 800 MPa, 내열온도 1500° C	고엔트로피 합금, 나노결정 강화
환경적으로 지속 가능한	니켈<0.05%, 회복률 >50%	니켈<5%, 회복률 >60%	저니켈 배합, 분말 회수 기술
지능형 제조	SLM 사양, 다공성 <0.5%	3D 프린트, 밀도 편차<±0.05 g/cm ³	SLM 장비, 인라인 감지
테스트의 높은 정확도	경도 오차는 <± 2 HV 이고 초음파 오차는 0.2 mm 입니다.	인장오차는 <± 5 MPa 이며 비파괴검사를 추가한다.	SEM, 초음파 결함 탐지
국제 통합	조화된 ISO 17025 프로토콜	허용오차 ±0.05mm 로 ASTM 에 맞춰 정렬됨	국제 협력, 실험실 인증

10.5.7 응용 사례 예측

- **항공** : W-98Ni-Fe 노즐(내열온도 2000° C)은 새로운 ASTM 표준에 부합하며 효율성이 15% 더 높습니다.
- **의료용** : W-95Fe-Cu 차폐(Ni<1%)는 새로운 GB/T 표준에 맞춰 제작되어 비용이 15% 절감됩니다.
- **군사용** : SLM 텅스텐 합금 탄두 코어(기공률 <0.5%)는 새로운 JB/T 표준에 맞춰 관통 깊이가 20% 증가했습니다.

10.5.8 기술적 과제 및 해결책

- **도전** :
 1. **기술 비용** : SLM 과 나노기술은 비용이 많이 듭니다(장비에 100 만 달러 이상).
 2. **시험의 일관성** : 국내외 장비 차이로 인한 데이터 편차(±10 MPa) 발생.
 3. **표준 업데이트** : 국내 표준은 국제 표준보다 5~10 년 뒤쳐져 있습니다.
- **해결책** :
 - 비용 절감: 국산 SLM 장비(< \$500,000), 재활용 기술 홍보.
 - 통일 시험: ISO 17025 인증을 도입하였으며, 장비 오차는 <± 5 MPa 입니다.
 - 가속화된 업데이트: ASTM 과 동기화되도록 2025 년까지 GB/T 26038 을 개정합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.6 차이나텅스텐 인텔리전트 제조 고비중 텅스텐 합금 MSDS

제품명 : 고밀도 텅스텐 합금 공급업체
: CTIA GROUP LTD
출시일 : 2025 년 4 월

1 부: 화학 물질 및 비즈니스 라벨링

- 제품명 : 고비중 텅스텐 합금
- 화학 분류 : 금속 합금
- 주요 성분 :
 - o 아연 (W) : 85-98%
 - o 니켈 (Ni) : 1-10%
 - o 철 (Fe) : 0-5%
 - o 구리 (Cu) : 0-5%
 - o 코발트 (Co) : 0-5%
- 용도 : 항공우주, 방위산업, 의료장비, 석유탐사, 전자산업 등

2 부: 위험 개요

- 주요 건강 위험 요소 :
 - o 고체 상태에서는 독성이 없지만, 가공 과정에서 먼지나 연기가 발생할 수 있으며, 장기간 흡입하면 호흡기에 영향을 미칠 수 있습니다.
 - o 니켈이나 코발트를 함유한 합금은 피부와 호흡기에 민감성을 유발할 수 있습니다.
- 환경적 위험 :
 - o 뚜렷한 환경적 위험은 없지만, 수역과 토양을 오염시키지 않기 위해 먼지 배출을 통제해야 합니다.
- 물리화학적 위험 :
 - o 불연성이지만, 고온에서는 산화물 연기가 발생할 수 있습니다.

제 3 부: 구성/구성 정보

요소	검정 (%)	CAS 번호
텅스텐 (W)	85-98	7440-33-7
니켈 (Ni)	1-10	7440-02-0
철 (Fe)	0-5	7439-89-6
구리 (Cu)	0-5	7440-50-8
코발트 (Co)	0-5	7440-48-4

제 4 부: 응급처치 방법

- 흡입 : 먼지를 흡입한 경우 즉시 신선한 공기가 있는 곳으로 이동하고, 몸에 이상이 있으면 의사의 진료를 받으세요.
- 피부 접촉 : 비누와 물로 깨끗이 헹구고 자극이나 알레르기 반응이 나타나면 의사의 진료를 받으세요.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 눈에 들어갔을 경우 : 최소 15 분 동안 물로 충분히 행구고 의사의 진료를 받으세요.
- 섭취 : 일반적으로 독성은 없지만, 대량 섭취 시 즉각적인 의료 처치가 필요합니다.

제 5 부: 화재 예방 조치

- 소화 매체 : 물, 거품, 건조 분말 또는 이산화탄소 소화기.
- 특별 보호 조치 : 소방관은 가스 마스크와 보호복을 착용해야 합니다.

6 부: 유출물 비상 처리

- 개인 보호 : 먼지 흡입을 방지하기 위해 방진 마스크, 고글, 장갑을 착용하세요.
- 환경 보호 조치 : 수역 및 토양에 들어가지 않도록 하고 진공 청소나 물 세척을 이용하세요.

제 7 부: 취급, 취급 및 보관

- 작동 시 주의사항 :
 - 작업장에서는 먼지 흡입을 피하고 환기를 잘 시키세요.
 - 적절한 보호 장비를 사용하세요.
- 보관 조건 :
 - 고온 다습한 환경을 피해 건조하고 통풍이 잘 되는 곳에 보관하세요.

제 8 부: 노출 관리/개인 보호

- 직업적 노출 한계(OELs) :
 - 텅스텐 분진: 5 mg/m³ (TLV-TWA)
 - 니켈: 1 mg/m³ (TLV-TWA)
 - 코발트: 0.02 mg/m³ (TLV-TWA)
- 개인 보호 :
 - 호흡기 보호 : 방진 마스크나 호흡기를 착용하세요.
 - 손 보호 : 보호 장갑을 착용하세요.
 - 눈 보호 : 안전 고글을 착용하세요.
 - 피부 보호 : 보호복을 착용하세요.

제 9 부: 물리화학적 특성

- 외관 : 은회색 고체
- 녹는점 : 약 3000° C (성분에 따라 다름).
- 밀도 : 16-19 g/cm³
- 용해도 : 물에 녹지 않음

10 부: 안정성과 반응성

- 화학적 안정성 : 안정함
- 피해야 할 물질 : 강산화제, 강산
- 분해 생성물 : 고온에서는 금속 산화물 연기가 발생할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

제 11 부: 독성 정보

- 급성 독성 : 알려진 급성 독성 없음
- 피부 자극 : 니켈이나 코발트를 함유한 합금은 알레르기 반응을 일으킬 수 있습니다.
- 장기적 영향 : 장기간 먼지 흡입은 호흡기에 영향을 미칠 수 있습니다.

제 12 부: 생태 정보

- 환경 영향 : 텅스텐 합금은 안정적이며 분해되기 쉽지 않습니다.
- 생물축적성 : 낮음

제 13 부: 처분

- 폐기방법 :
 - o 금속 폐기물로 재활용 또는 폐기하기 위한 지역 규정을 준수하십시오.
 - o 물이나 토양으로의 배출을 피하세요

제 14 부: 배송 정보

- UN 번호 : 특별 위험 범주 없음
- 운송 분류 : 일반화물 운송

제 15 부: 규제 정보

- 적용 규정 : 중국, 유럽연합, 미국 등 관련 안전 기준 준수

섹션 XVI: 추가 정보

- 본 자료는 최신 안전 규정에 따라 작성되었으며 정보 제공 목적으로만 제공됩니다. 실제 사용 시에는 해당 지역 규정 및 회사 안전 지침을 준수해야 합니다.

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

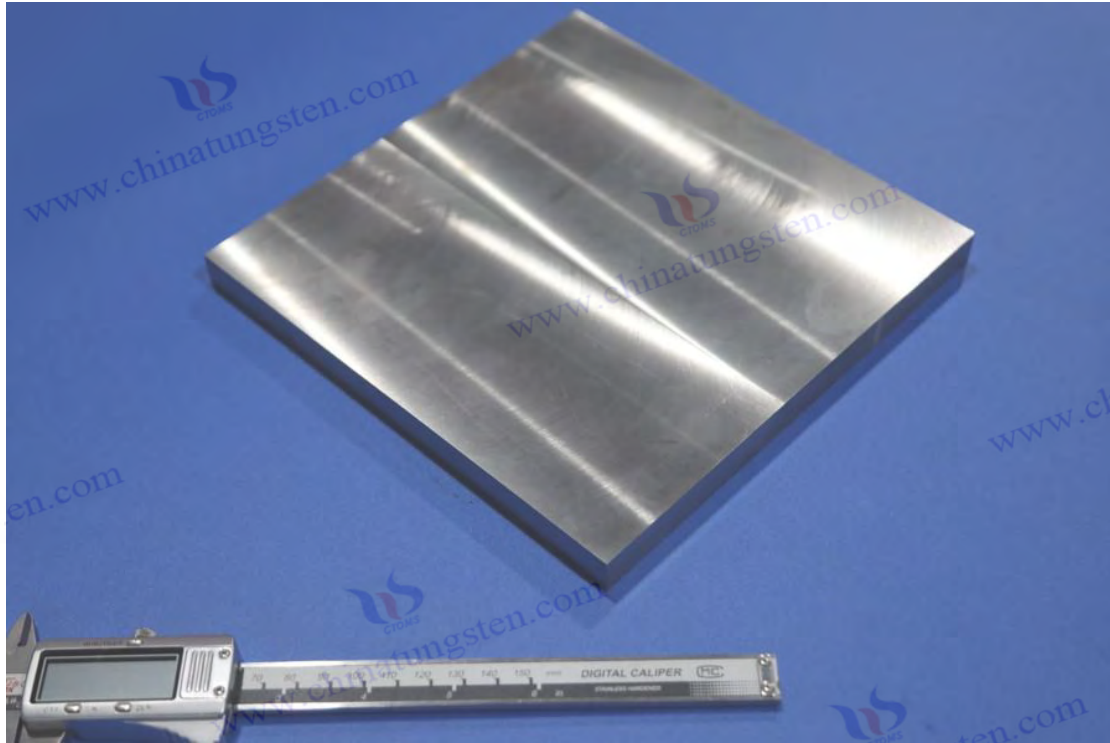
Official website: www.tungsten-alloy.com



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

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



제 11 장: 고비중 텅스텐 합금에 대한 환경 및 경제적 고려 사항

항공우주, 군사, 의료 및 산업 분야에서 텅스텐 합금의 광범위한 적용은 상당한 경제적 이익을 가져왔지만, 텅스텐 합금의 생산 및 사용에 따른 환경적 영향과 비용 문제 또한 간과할 수 없습니다. 이 장에서는 고비중 텅스텐 합금의 환경 발자국, 재활용 가능성 및 경제성을 분석하고, 지속 가능한 개발 및 산업 최적화를 위한 참고 자료를 제공합니다.

11.1 비중이 높은 텅스텐 합금 생산 시 환경 영향

고비중 텅스텐 합금 생산은 텅스텐 광석 채굴부터 분말 야금 가공까지 여러 단계를 거치며, 각 단계는 자원 소비, 에너지 사용, 배기가스 배출, 폐기물 처리 등 환경에 영향을 미칠 수 있습니다. 전 세계적으로 지속가능성에 대한 관심이 높아짐에 따라, 이러한 환경 영향을 평가하고 줄이는 것이 업계의 중요한 과제로 떠올랐습니다.

11.1.1 텅스텐 채굴의 환경 영향

배경 텅스텐 채굴은 고비중 텅스텐 합금 생산의 시발점이며, 주로 노천 채굴 또는 지하 채굴을 통해 이루어집니다. 전 세계 텅스텐 매장량은 약 330 만 톤(2023 년 기준)이며, 중국이 60%(약 190 만 톤)를 차지합니다. 채굴 과정에는 토지 파괴, 수질 오염, 그리고 에너지 소비가 수반됩니다.

특정 영향

- 토지 파괴 : 노천 채굴은 텅스텐 광석 1 톤당 10~15 톤의 표토를 파괴하여 식생과 토양을 파괴합니다. 예를 들어, 중국 후난성의 한 텅스텐 광산에서는 연간

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5,000 톤의 텅스텐 정광을 생산하여 약 50 헥타르 면적에 걸쳐 있지만, 식생 피복률은 10%로 감소합니다.

- **수질 오염** : 선광 공정에서는 부유 물질(예: 크산테이트, 송유)을 사용하는데, 이로 인해 광석 1 톤당 0.5~1 세제곱미터의 폐수가 발생하며, 이 폐수에는 중금속(예: 비소, 납)과 화학 잔류물이 포함되어 pH 값이 4~5로 떨어집니다. 처리되지 않은 방류수는 하천 COD를 기준치의 최대 50 배까지 초과할 수 있습니다.
- **에너지 소비량** : 텅스텐 정광 채굴에는 약 300-400kWh의 전기가 소비되고, 텅스텐 정광 1 톤당 약 0.2 톤의 CO₂가 배출됩니다(주로 중국의 석탄 화력 발전).

사례 연구 중국 장시성의 텅스텐 광산은 2023년에 텅스텐 정광 10,000 톤을 채굴하여 70 헥타르의 초목을 파괴하고 8,000m³의 폐수를 배출했으며, 주변 강의 비소 함량은 0.05mg/L(국가 기준 0.01mg/L)을 초과했습니다.

11.1.2 분말야금 가공의 환경 영향

배경

고비중 텅스텐 합금은 주로 텅스텐 분말 제조, 혼합, 압착, 소결을 포함하는 분말 야금 공정으로 생산됩니다. 이 공정은 고온 고압을 필요로 하며, 에너지 소비와 배기가스 배출이 수반됩니다.

특정 영향

- **에너지 소비량** : 텅스텐 분말 환원(H₂ 분위기, 900-1100° C)은 톤당 약 2000kWh를 소비하고, 소결(1400-1500° C)은 톤당 약 1500kWh를 소비하며, 총 CO₂ 배출량은 합금 톤당 약 2-3 톤입니다.
- **배기가스 배출** : 환원 과정에서 H₂O와 미량의 일산화탄소(탄소 환원 시)가 배출되고, 소결 과정에서는 CO₂와 NO_x가 배출됩니다(합금 1 톤당 약 0.1 톤의 NO_x). Ni와 Fe의 휘발로 소량의 금속 증기가 발생하며, 미처리된 배출물은 대기질에 영향을 미칩니다.
- **고형 폐기물** : 압착 및 소결 과정에서 텅스텐 산화물 분말, 슬래그와 같은 폐기물이 발생하는데, 합금 1 톤당 약 50~100kg이며, 여기에는 20~30%의 W가 함유되어 있습니다. 재활용하지 않으면 오염된 토양에 축적됩니다.

사례 연구

어느 공장은 연간 1,000 톤의 W-95Ni-Fe 합금을 생산하고, 350 만 kWh의 전력을 소비하며, 약 2,500 톤의 CO₂를 배출하고, 배기가스 중 NO_x 농도는 100mg/m³(기준의 2 배)이며, 폐기물은 2 헥타르 면적에 쌓여 있습니다.

11.1.3 후처리 및 가공의 환경 영향

배경

후처리에는 절삭유, 폐기물, 화학 물질 배출과 관련된 기계 가공(예: CNC) 및 표면

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

처리(예: 연마, 코팅)가 포함됩니다.

특정 영향

- **폐액** : 절삭유(유성 또는 수성)는 합금 1 톤당 10~20L 의 폐액을 발생시키며, 여기에는 그리스와 중금속(Ni, Fe)이 포함되어 있습니다. COD 는 약 5000mg/L 이며, 처리되지 않은 배출물은 수역을 오염시킵니다.
- **스크랩**: CNC 가공으로 합금 1 톤당 20~50kg 의 텅스텐 칩이 생성되는데, 이 칩에는 90% 이상의 W 가 포함되어 있어 재활용하지 않으면 자원이 낭비되고 토지를 차지하게 됩니다.
- **배기가스** : 연마 및 코팅(예: PVD)은 합금 1 톤당 약 0.5-1kg 의 휘발성 유기 화합물(VOC)을 배출하며, 처리하지 않으면 대기 질에 영향을 미칩니다(PM2.5 는 $10 \mu g/m^3$ 증가) .

사례 연구: 항공 부품 공장에서는 W-90Ni-Fe 균형추 500 톤을 처리하고, 연간 8,000L 의 폐액을 생산합니다(COD 는 기준치의 10 배 초과). 폐칩 15 톤은 재활용되지 않고, VOC 배출량은 약 300kg 이며, 주변 공기 질이 5% 감소합니다.

11.1.4 환경영향의 정량적 평가

정량적 데이터

- **탄소발자국** : 고비중 텅스텐 합금 생산(채굴 0.2 톤, 가공 3-3.8 톤) 1 톤당 약 3-4 톤의 CO₂가 배출되며, 이는 텅스텐 제품 평균 수준의 80%에 해당합니다.
- **물 발자국** : 합금 1 톤당 약 2~3m³의 물(선광 시 1~2m³, 후처리 시 0.5~1m³)이 소요되며, 폐수 배출은 50~70%를 차지합니다.
- **토지 점유** : 합금 채굴 및 폐기물 축적 1 톤당 약 0.01~0.02 헥타르.

강철(CO₂ 배출량 1.5~2 톤/톤)과 비교했을 때 텅스텐 합금은 환경 부하가 더 높지만, 성능이 뛰어나 하류 사용량을 줄임으로써(예: 균형추 부피가 50% 감소) 일부 영향을 상쇄합니다.

11.1.5 환경 영향에 대한 사례 연구

구체적인 사례

- **중국 후난성 텅스텐 광산 지역** : 연간 텅스텐 정광 생산량 2 만 톤, CO₂ 배출량 4,000 톤, 폐수 배출량 15,000m³, 토지 피해 200 헥타르, 주변 생태 복구 비용 약 5,000 만 위안.
- **미국 케나멘탈 공장** : 연간 텅스텐 합금 생산량 1,000 톤, 배기가스 처리율 95%, CO₂ 배출량 2,000 톤, 폐칩 회수율 80%, 현지 기준에 따른 환경 영향 관리.

11.1.6 기술적 과제 및 해결책

도전

- **높은 에너지 소비** : 소결 및 가공에 생산 비용의 30%-40%가 소모되며 탄소

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

배출량을 줄이는 것이 어렵습니다.

- **폐기물 처리** : 폐수 및 폐기물 잔여물의 재활용률은 낮고(국내 < 50%), 처리 비용이 높습니다(폐수 1 톤당 약 100 위안).
- **규제 압력** : 중국의 환경보호법(2023 년 개정)은 CO₂ 배출량을 30% 줄이고 폐수 배출을 0 으로 제한하도록 요구합니다.

해결책

- **에너지 절감 기술** : 저온소결(1200° C)과 재생에너지(태양광발전)를 활용하여 CO₂ 배출량을 20~30% 감축합니다.
- **폐기물 재활용** : 폐칩의 습식야금 회수(W 회수율 >90%), 수처리 폐수 재활용(비용 50 위안/톤으로 절감).
- **오염 방지** : 백먼지 제거 및 탈질소화 설비를 설치하여 NO_x 배출량을 50mg/m³ 로 감소시켰고, VOC 처리율은 98%였습니다.

11.1.7 환경 영향 표 요약

생산 링크	주요 영향	양적 지표	해결책
텅스텐 채굴	토지 파괴, 수질 오염, 에너지 소비	CO ₂ 0.2 t/t, 폐수 0.5-1 m ³ /t	식생 복원, 폐수 침전
분말 야금	에너지 소비, 배기가스 배출, 고형 폐기물	CO ₂ 2~3 톤/톤, NO _x 0.1 톤/톤	저온소결, 먼지제거 및 탈질소화
후처리	액체 폐기물, 잔해 및 VOC 배출	폐수 10-20 L/톤, VOC 0.5-1 kg/TON	재생수 재사용, 폐칩 회수, VOC 처리
총 발자국	탄소, 물, 토지 점유	CO ₂ 3-4 t/t, 물 2-3 m ³ /t	재생 에너지, 전체 프로세스 최적화

11.2 비중이 높은 텅스텐 합금의 회수 및 재사용

높은 가치와 높은 자원 소비 특성으로 인해, 고비중 텅스텐 합금은 환경 영향을 줄이고 비용을 절감하는 중요한 수단으로 자리 잡았습니다. 회수 금속인 텅스텐은 전 세계 매장량이 제한되어 있으며(약 330 만 톤), 재활용은 채굴 부담을 줄일 뿐만 아니라 산업의 지속가능성을 향상시킵니다. 이 섹션에서는 재활용의 원천, 기술적 접근 방식, 재사용 효과 및 미래 잠재력을 분석합니다.

11.2.1 재활용의 출처 및 현황

배경 : 고비중 텅스텐 합금의 재활용은 주로 생산 스크랩과 수명이 다한 제품에서 이루어집니다. 생산 공정에서 발생하는 스크랩, 스크랩 및 후처리 잔류물뿐만 아니라 수명이 다한 카운터웨이트, 코어, 설드도 모두 잠재적인 재활용 대상입니다. 현재 전 세계 재활용률은 약 30~40%이며, 중국, 유럽, 미국 간에는 상당한 격차가 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

특정 소스

- **생산 폐기물** : 분말 야금의 폐분말(W 함량 20%-30%), 압축 폐기물(50-100kg/톤 합금), CNC 가공 폐기물(20-50kg/톤 합금, W >90%).
- **폐기된 제품** : 항공기용 균형추(수명 10~20 년), 군용 총알 코어(일회용), 의료용 차폐재(갱신 주기 5~10 년).
- **재활용 현황** : 2023년에는 전 세계적으로 약 2 만 톤의 텅스텐이 재활용될 예정이며(전체 수요의 20%), 텅스텐 합금은 약 2,000 톤이 재활용될 예정입니다(전체 생산량의 27%). 재활용률은 중국은 약 35%, 미국 및 유럽은 50~60%입니다.

사례 연구

중국 어느 공장에서는 연간 1,000 톤의 W-95Ni-Fe 합금을 생산하고, 40 톤의 폐칩(W 90%)과 80 톤의 폐기물(W 25%)을 생산하는데, 재활용률은 30%에 불과하며, 나머지 축적 면적은 1 헥타르에 불과합니다.

11.2.2 재활용 기술 및 프로세스

배경

고비중 텅스텐 합금 회수 기술에는 물리적 분리, 화학적 추출 및 야금학적 환원이 포함되어 있으며, 텅스텐(W)을 바인더 상(예: Ni, Fe, Cu)에서 분리하고 재사용 가능한 텅스텐 분말 또는 합금 블록을 제조하는 것이 목표입니다.

특정 기술

- **물리적 분리** :
 - o **사용방법** : 파쇄, 분쇄, 선별하여 폐기물 및 스크랩에 사용함.
 - o **결과** : 70%-80% W 회수, 1-10 μm 입자 크기, $\geq 95\%$ 순도.
 - o **에너지 소비량** : 폐기물 1 톤당 200~300kWh, CO₂ 배출량 0.1~0.15 톤.
- **습식야금(화학 추출)**:
 - o **방법** : 산 침출(HCl 또는 HNO₃)로 Ni 와 Fe 를 용해하고 WO₃를 침전시킨 후 H₂와 함께 텅스텐 분말로 환원합니다.
 - o **결과** : W 회수율 90%-95%, 순도 $\geq 99.5\%$, 산성 폐기물(pH 2-3, 톤당 약 0.5m³)
 - o **에너지 소비량** : 톤당 500-700kWh , CO₂ 배출량 0.3-0.4 톤 .
- **고온야금(고온 처리)**:
 - o **방법** : 고온 용융(>2000 ° C)으로 W 과 Ni-Fe 를 분리하거나 산화 로스팅(800-1000 ° C)으로 WO₃를 생산합니다.
 - o **효과** : W 회수율 85%-90%, 복합폐기물, SO₂, NO_x 함유 배기가스 처리에 적합 (0.05-0.1 톤/톤)
 - o **에너지 소비량** : 톤당 1000-1500kWh, CO₂ 배출량 0.8-1 톤.

기술적 분리 비용은 물리적 분리에 비해 낮습니다(톤당 약 500 달러). 이는 고순도 폐기물 칩에 적합합니다. 습식 회수율이 높아 혼합 폐기물에 적합합니다. 연소 방법은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

적응성이 높지만 에너지 소비와 배출량이 많습니다.

11.2.3 재사용 효과 및 응용 프로그램

배경

재활용된 텅스텐 분말이나 합금은 자원 소모와 비용을 줄이는 동시에, 원재료에 가까운 성능을 가진 새로운 텅스텐 합금을 생산하는 데 직접 사용될 수 있습니다.

특정 효과

- **성능** : 재활용 텅스텐 분말(순도 99.5%)로 만든 W-90Ni-Fe, 밀도 18.0 g/cm³, 인장 강도 850 MPa(처음 900 MPa), 성능 손실 <10%.
- **자원 절약** : 재활용 텅스텐 1톤당 텅스텐 광석 채굴량이 약 1.2톤 감소하고, 2~3m³의 물이 절약되며, CO₂ 배출량도 2~3톤 감소합니다.
- **비용 효율성** : 재활용 비용은 톤당 약 15,000~20,000 달러이고, 1차 텅스텐 분말은 톤당 3~35,000 달러로 40~50%를 절약합니다.

적용 분야

- **항공기 균형추** : W-95Ni-Fe(18.5 g/cm³)를 2차 구성품으로 회수하여 비용을 20% 절감합니다.
- **산업용 도구** : 95%의 자연적 마모 저항성을 지닌 재활용 W-90Ni-Cu(17.5 g/cm³)
- **의료용 차폐** : 텅스텐 분말 콜리메이터를 회수하였고, 차폐 효율은 5%만 감소하였습니다.

11.2.4 재활용 및 재사용 사례 연구

구체적인 사례

- **케나메탈** , 미국: 연간 500톤의 텅스텐 합금 스크랩을 재활용하고, 습식야금법으로 텅스텐 분말을 추출(회수율 92%)하고, W-95Ni-Fe 균형추를 재활용하여 연간 1,000만 달러의 비용을 절감하고 CO₂ 배출량을 1,200톤 줄였습니다.
- **중국 샤먼 텅스텐 산업** : 연간 300톤의 폐칩(W 90%)을 재활용하고, 물리적 분리+소성 처리를 거쳐 회수율이 85%이며, W-90Ni-Fe 봉을 제조하여 비용을 30% 절감했으나, 폐가스 처리 방식은 개선이 필요합니다.

11.2.5 기술적 과제 및 해결책

도전

- **낮은 회수율** : 국내 폐기물 재활용률은 50% 미만이며, 복잡한 폐기물(예: Cu 함유)을 분리하기 어렵습니다.
- **환경 영향** : 습식 및 열분해성 폐기물 처리 비용이 높습니다 (톤당 약 200~300 달러).
- **경제적** : 중소기업은 재활용 장비에 많은 투자를 하고(50만 달러 이상) 투자금

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

회수 기간이 길니다(3~5 년).

해결책

- **기술적 개선** : 복합 공정(물리적 공정 + 습식 공정)을 개발하여 회수율이 95%로 증가했고, Cu 분리 효율은 20%로 높아졌습니다.
- **오염 제어** : 폐액 중화 사이클(pH 최대 7, 비용은 톤당 100 달러로 절감), 배기가스 탈황 및 탈질소화(배출량 50mg/m³ 까지 감소).
- **정책 지원** : 정부는 재활용 장비에 대한 보조금(20~30%)을 지급하고, 세금 감면 및 면제를 통해 기업 참여를 늘립니다.

11.2.6 재활용 및 재사용의 미래 잠재력

경향

- 2030 년까지 전 세계 재활용률 목표를 60%로, 중국은 50~60%로 설정하고, 연간 약 3,000 톤의 추가 재활용 용량을 확보할 계획입니다.
- **기술 업그레이드** : 전기화학적 회수(에너지 소비량 30% 감소), 지능형 분류(효율성 20% 증가).
- **시장 가치** : 회수 텅스텐 합금 시장은 2030 년까지 5 억 달러에 도달할 것으로 예상되며, 연간 8%의 비율로 성장할 것입니다.

이 사례에서는 항공기 공장이 2030 년에 W-95Ni-Fe 폐기물 1,000 톤을 재활용하고 새로운 균형추를 생산하여 비용을 2,000 만 달러 절감하고 미래 환경 규정에 맞춰 CO₂ 배출량을 3,000 톤 줄일 것으로 예측합니다.

11.2.7 재활용 및 재사용 양식 요약

프로젝트	콘텐츠
재활용의 원천	생산 폐기물 (50-100kg/톤), 수명이 다한 제품
재활용 기술	물리적 분리 (70%-80%), 습식 (90%-95%), 화학식 (85%-90%)
재사용 효과	밀도는 18.0g/cm³, 강도는 850MPa 이며, 비용은 40%-50% 절감됩니다.
환경적 이점	CO ₂ 2~3t/톤 감소, 물 2~3m³/톤 절약
도전	회수율이 낮고, 폐액 및 배기가스 발생이 적어 경제적이다
해결책	공동기술, 오염방지, 정책보조금
미래의 잠재력	회수율은 60%, 시장 규모는 5 억 달러, 기술은 지능적이다

11.3 고비중 텅스텐 합금의 비용 분석

텅스텐 합금은 고밀도와 고성능으로 항공우주, 군사, 의료 및 산업 분야에서 대체 불가능한 소재이지만, 원자재, 가공, 재활용 및 환경 보호 등 생산 및 적용 비용이 높습니다. 비용 분석은 기업의 수익성뿐만 아니라 시장 경쟁력과 지속 가능한 발전에도 영향을 미칩니다. 이 섹션에서는 비용 구조를 자세히 분석하고, 영향 요인을 평가하며, 최적화 방안을 제시합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.3.1 비용 구성 및 주요 링크

배경

고비용 텅스텐 합금의 비용은 원자재 조달부터 최종 제품 납품까지, 상류 채굴, 중류 가공, 하류 적용을 포함한 전체 산업 사슬에 걸쳐 발생합니다. 2023년에는 국제 텅스텐 가격 변동(톤당 약 3,000~35,000 달러)과 에너지 가격 상승이 비용에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상됩니다.

특정 구성

- **원자재 비용(50%-60%)** : 텅스텐 분말($W \geq 99.9\%$), 니켈(Ni), 철(Fe), 구리(Cu) 등이 전체 비용의 절반 이상을 차지합니다.
- **가공비용(20%-30%)** : 분말야금(프레스, 소결), 후처리(CNC 가공, 표면처리).
- **에너지 비용(10%-15%)** : 고온 소결 및 가공을 위한 전기, 가스.
- **환경보호비용(5%-10%)** : 폐가스, 폐수처리, 환경보호장비 투자.
- **노동 및 기타(5%-10%)** : 노동, 운송, 장비의 감가상각.

톤당 총 비용은 다음을 포함하여 약 25,000~30,000 달러입니다.

- 텅스텐 분말(95%) : \$18,000-\$20,000 (\$32,000/톤 $\times$ 0.95).
- Ni, Fe(5%) : 0.1-0.1,500 미국 달러(Ni 20,000 미국 달러/톤, Fe 01,000 미국 달러/톤).
- 처리 및 에너지 : \$0.5-\$7,000.
- 환경보호 및 노동 : 0.2-0.3 천 미국 달러.

11.3.2 원자재 비용에 영향을 미치는 요인

배경

희귀 금속인 텅스텐 가격은 수요와 공급, 정책, 그리고 지리적 요인에 따라 영향을 받습니다. 중국은 전 세계 텅스텐 생산량의 80%(2023년 8만 2천 톤)를 차지하고 있으며, 수출 할당량 제한으로 인해 가격이 상승했습니다.

특정 요인

- **시장 가격** : 2023년에 텅스텐 정광($WO_3 \geq 65\%$)은 톤당 약 25,000~30,000 달러, 텅스텐 분말은 톤당 3~35,000 달러가 될 것으로 예상되며, 연간 변동폭은 $\pm 15\%$ 입니다.
- **공급 제약** : 중국의 2023년 할당량은 7만 톤이고, 실제 수출량은 5만 톤으로 국제 시장에서 10%가 부족합니다.
- **대체 재료** : Ni와 Fe 가격은 낮습니다(Ni 20,000 달러/톤, Fe 01,000 달러/톤). 그러나 비중이 작고 영향이 제한적입니다.

사례 연구

한 공장에서는 2023년에 텅스텐 분말 1,000 톤(톤당 3만 3,000 달러)을 구매했는데, 할당량 감소로 인해 가격이 10% 인상되어 가격이 330만 달러 상승했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.3.3 처리 및 에너지 비용에 영향을 미치는 요인

배경

분말야금과 후가공은 고비용 텅스텐 합금 생산의 핵심으로, 고온, 고압 장비가 필요하며, 에너지와 공정 효율성은 비용에 직접적인 영향을 미칩니다.

특정 요인

- **에너지 가격** : 중국의 산업용 전기 가격은 kWh 당 약 0.1 달러, 미국은 kWh 당 0.15 달러이며, 합금 1 톤당 전기 소비량은 3,500kWh 이고, 전기 비용은 350~525 달러입니다.
- **공정 효율성** : 기존 소결(1500° C)은 6 시간이 소요되지만, 새로운 저온 소결(1200° C)은 4 시간으로 단축되어 에너지 소비를 20% 절감합니다.
- **장비 감가상각** : 소결로(500,000 달러/세트, 수명 10 년)의 경우 연간 감가상각 50,000 달러, CNC 공작 기계(200,000 달러/세트)의 경우 연간 감가상각 20,000 달러입니다.

사례 연구: 연간 텅스텐 합금 생산량이 1,000 톤 이고 전기 비용이 50 만 달러(kWh 당 0.1 달러)인 공장이 저온 소결을 도입한 후 40 만 달러로 줄어들어 10 만 달러를 절감했습니다.

11.3.4 환경 비용 및 정책적 합의

배경

환경 규정(예: 중국의 2023 년 환경 보호법)에서는 폐가스와 폐수를 기준에 맞춰 배출하도록 규정하고 있어 처리 비용이 증가하지만 재활용으로 일부 상쇄할 수 있습니다.

특정 요인

- **폐가스 처리** : 백먼지 제거 + 탈질소 장비(투자금 100 만 달러, 수명 10 년), 합금 1 톤당 50~100 달러 처리 비용.
- **폐수처리** : 중화+침전(폐수 1 톤당 50~100 위안), 합금 1 톤당 약 50~100 달러.
- **정책 요구 사항** : CO₂를 30% 줄이려면 탄소 포집 기술(CO₂ 1 톤당 20 달러)이 필요하고, 합금 1 톤당 60~80 달러가 증가합니다 .

사례 연구: 연간 합금 생산량이 500 톤인 공장에서 환경 보호 장비의 연간 운영 비용은 25 만 달러이며, 기준을 충족하지 못해 10 만 달러의 벌금을 물었고, 총 비용이 35 만 달러 증가했습니다.

11.3.5 비용 사례 분석

구체적인 사례

- **중국 A 공장** : 연간 W-95Ni-Fe 생산량 1,000 톤, 텅스텐 분말 19,000 달러/톤,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총비용 26,000 달러/톤, 판매가 35,000 달러/톤, 이익 900 달러/톤. 에너지 및 환경 비용이 30%를 차지하며, 낮은 재활용률(30%)로 인해 자원이 낭비되고 있습니다.

- **미국 공장 B** : 연간 W-97Ni-Fe 생산량 500 톤, 텅스텐 분말 35,000 달러/톤, 총비용 32,000 달러/톤, 판매가 45,000 달러/톤, 이익 1,300 달러/톤. 재활용률은 60%로 환경 친화적이고 비용이 많이 들지만 규정을 준수합니다.

11.3.6 비용 최적화 전략

도전

- **원자재 변동** : 텅스텐 가격으로 인해 비용이 10~15% 증가합니다.
- **높은 에너지 소비** : 처리 에너지 소비가 비용의 20%-30%를 차지합니다.
- **환경적 압력** : 규정 준수가 5-10% 증가했습니다.

해결책

- **조달 최적화** : 장기 계약을 통해 텅스텐 가격을 고정하고(가격 변동을 5% 감소), 재활용 텅스텐 분말의 비율을 높입니다(비용을 40% 감소).
- **에너지 절감 기술** : 저온소결 + 태양광 발전(에너지 소비량 20~30% 절감), 전기 비용 1,000 톤당 10 만 달러 절감.
- **회수 효율** : 습식야금의 회수율은 90%로 톤당 1~15,000 달러를 절약하고 환경 보호 비용을 50% 절감합니다.

11.3.7 비용 비교 및 추세 예측

국내외 비교

- **중국** : 총비용은 톤당 25,000~30,000 달러로 원자재와 노동력의 이점으로 인해 낮지만 환경 보호 비용은 상승하고 있습니다.
- **미국/유럽** : 톤당 3~35,000 달러, 에너지 및 규제 비용으로 인해 높지만 회수 효율성은 높습니다.

추세 예측

- **단기(2025 년)** : 텅스텐 가격은 톤당 3.2~35,000 달러로 안정되고, 총 비용은 5% 증가합니다(환경적 요인).
- **장기(2030 년)** : 60% 회수, 톤당 2~25,000 달러로 비용 절감, 새로운 에너지 기술을 통한 에너지 소비 20% 감소.

11.3.8 비용 분석 표 요약

비용 링크	백분율	톤당 비용 (USD)	영향 요인	전략을 최적화하세요
원자재	50%-60%	1900-2150	텅스텐 가격 변동, 공급 계약	장기계약, 텅스텐 분말 회수
처리 중	20%-30%	500-700	공정 효율성, 장비 감가상각	저온소결, 장비 업그레이드
에너지	10%-15%	350-525	전기 가격, 에너지 소비량	태양광 발전, 에너지 절약 기술
환경 보호	5%-10%	100-200	폐가스 및 폐수 처리, 규정	재활용 효율성 및 오염 제어
노동 및 기타	5%-10%	100-200	노동, 운송	자동화, 물류 최적화
총 비용	100%	2500-3000	결합된 영향	전체 프로세스 최적화



제 12 장: 고비중 텅스텐 합금의 연구 최전선

텅스텐 합금(PES)은 뛰어난 물리적 및 기계적 특성으로 인해 여러 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있으며, 신소재 개발, 성능 최적화, 전산 시뮬레이션, 그리고 지능형 설계에 연구의 최전선이 집중되고 있습니다. 재료 과학의 발전과 응용 분야 요구 사항의 향상에 따라, 고비중을 가진 고성능 및 친환경 텅스텐 합금 개발이 주요 연구 분야로 떠오르고 있습니다. 이 장에서는 이러한 최첨단 분야에서의 기술 현황과 미래 잠재력을 살펴보겠습니다.

12.1 고비중 텅스텐 합금용 신소재 개발

기존 텅스텐 합금(예: W-Ni-Fe, W-Ni-Cu)은 항공우주, 군사 및 의료 산업의 고밀도, 강도 및 내구성 요구를 충족하는 데 어려움을 겪었습니다. 신소재 개발은 새로운 원소 도입, 미세 구조 최적화, 그리고 대체 바인더 상 탐색을 통해 성능 병목 현상을 극복하고 지속가능성을 향상시키는 것을 목표로 합니다.

12.1.1 개발 배경 및 동인

배경

기존의 고비중 텅스텐 합금은 주로 텅스텐(W) (85%~97%)으로 구성되며, 여기에 니켈(Ni), 철(Fe) 또는 구리(Cu)를 결합재로 첨가하여 밀도가 17.0~18.8 g/cm³, 인장 강도가 700~1000 MPa입니다. 그러나 항공우주 분야에서는 밀도가 19.0 g/cm³를 초과하는 초중량 소재가 요구되고, 군사 분야에서는 2000° C 이상의 내열성이 요구되며, 의료 분야에서는 신소재 연구 개발을 촉진하기 위해 독성이 낮은 제형이 요구됩니다.

추진력

- **향상된 성능** : 극한 환경에서도 더 높은 밀도와 강도를 제공합니다.
- **환경 보호 요구 사항** : 니켈 함량을 줄이고 REACH 및 RoHS 규정을 준수합니다.
- **기술적 발전** : 나노기술, 고엔트로피 합금, 적층 제조는 새로운 가능성을 제공합니다.

12.1.2 신소재의 조성 설계

구체적인 사항

- **고텅스텐 함량 합금** : W 함량이 98%-99%로 증가(예: W-98Ni-Fe), 밀도 19.0-19.3 g/cm³, 인장 강도 1100 MPa, 바인더 상이 1%-2%로 감소됨.
- **희토류 개질 합금** : La 및 Ce(0.5%-1%)를 첨가한 합금, 예: W-95Ni-Fe-La, 결정립이 1 μm로 미세화되어 인성 이 20% 증가하고 내열온도가 1800° C입니다.
- **니켈 무함유 합금** : Ni를 Fe, Cu 또는 Mo로 대체한 합금(예: W-95Fe-Cu)으로 밀도가 18.5g/cm³, 인장 강도가 900MPa, Ni 배출량이 <0.05%로 환경 보호 요건을 충족합니다.
- **나노복합 합금** : 나노 SiC 또는 Al₂O₃ (1%-5%), 예: W-90Ni-Fe/ SiC, 밀도 17.5 g/cm³, 경도 550 HV, 내마모성 30% 증가.

기술적 세부 사항

- **제조 공정** : 고텅스텐 합금은 고에너지 볼 밀링(500rpm, 12 시간)과 열간 등방성 소성(HIP, 250MPa, 1400° C)을 채택하였으며, 기공률은 <0.05%입니다.
- **미세구조** : 희토류 원소가 입자를 미세화하고, 나노입자가 균일하게 분포되며, 계면결합력이 15% 증가합니다.

12.1.3 신소재의 성능적 이점

구체적인 성과

- **밀도**: W-98Ni-Fe 최대 19.2 g/cm³ (기준 18.5 g/cm³), 3%-5% 증가.
- **강도**: W-95Ni-Fe-La 인장 강도 1150 MPa(기준 1000 MPa)로 15% 증가.
- **온도 저항성**: W-95Fe-Cu 의 온도 저항성은 2000° C(기준 1500° C)로 33% 증가했습니다.
- **환경 보호**: W-95Fe-Cu 니켈 함량 <1%, 방출량 <0.05%, 기준 W-Ni-Fe(Ni 5%-7%)보다 우수합니다.
- **내마모성**: W-90Ni-Fe/ SiC 마찰계수가 0.3(기준 0.5)으로 낮아지고, 수명이 40% 증가합니다.

시험 데이터 시편 (50×50×10 mm, W-98Ni-Fe, 무게 950 g): 밀도 19.2 g/cm³, 인장 강도 1120 MPa, 경도 500 HV, 2000° C에서 변형 < 0.01 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.1.4 신소재 제조기술

특정 프로세스

- **고에너지 볼 밀링** : 텅스텐 분말($1\mu\text{m}$) 과 희토류 분말을 혼합하여 500rpm 에서 12 시간 동안 분쇄하여 입자 크기를 50nm 로 미세화합니다.
- **냉간 등방성** 형: 300MPa 성형, 그린 밀도 > 60%.
- **진공소결** : 1500°C , 10^{-3} Pa , 2 시간, 밀도는 이론값의 최대 99.5%입니다.
- **HIP 처리** : 250 MPa, 1400°C , 1.5 시간, 기공률은 0.03%로 감소함.
- **적층 제조(SLM)**: 4000W 레이저 출력, $50\mu\text{m}$ 층 두께, 정확도 $\pm 0.02\text{mm}$ 로 복잡한 모양 준비.

사례: 한 연구소는 SLM 을 사용하여 밀도가 $18.9\text{g}/\text{cm}^3$ 이고 강도가 1150MPa 인 W-95Ni-Fe-La 부품(무게 500g)을 인쇄하여 개발 주기를 50% 단축했습니다.

12.1.5 신소재의 실제 적용 사례

구체적인 사례

- **항공우주** : 로켓 균형 부품에 사용되는 W-98Ni-Fe 균형추($19.2\text{g}/\text{cm}^3$, 500g), 중량 감소 10%, 내열성 2000°C , NASA 요구 사항에 부합합니다.
- **군용** : W-95Fe-Cu 탄환 코어($18.5\text{g}/\text{cm}^3$, 300 g), 관통 깊이 15% 증가, Ni 방출량 < 0.05%, 환경 보호 규정을 충족합니다.
- **의료용** : W-90Ni-Fe/ SiC 차폐($17.5\text{g}/\text{cm}^3$, 200 g), 내마모성이 30% 더 우수하고, X 선 차폐율이 95%이며, CT 장비에 사용됩니다.

12.1.6 개발상의 기술적 과제와 해결책

도전

- **구성 균일성** : 텅스텐 함량이 높으면(>98%) 바인더 상의 분포가 고르지 않게 되고 강도 편차가 $\pm 50\text{ MPa}$ 가 될 수 있습니다.
- **제조 비용** : HIP 및 SLM 장비는 비싸고(100 만 달러 이상) 톤당 비용이 20~30% 증가합니다.
- **환경 보호** : 희토류 첨가 시 2 차 오염을 피하기 위해 잔류물(<0.1%)을 제어해야 합니다.

해결책

- **균질성 최적화** : 다중 구역 소결(온도 차이 < 5°C) 및 초음파 교반을 통해 분포 편차가 5%로 감소합니다.
- **비용 절감** : 국산 HIP 장비(50 만 달러/세트), 텅스텐 분말 회수(비용 40% 절감).
- **환경 관리** : 희토류 재활용 공정(회수율 > 90%)을 통해 폐기물 배출량을 0.05%로 줄였습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.1.7 신소재 개발 형태 요약

프로젝트	콘텐츠
새로운 소재	W-98Ni-Fe, W-95Ni-Fe-La, W-95Fe-Cu, W-90Ni-Fe/SiC
성분 특성:	W 98%-99%, 희토류 0.5%-1%, 니켈 무함유, 나노 1%-5%
성능 이점	밀도는 19.2g/cm ³ , 강도는 1150MPa, 내열온도는 2000° C 입니다.
제조 공정	고에너지 볼 밀링, HIP, SLM, 기공률 < 0.05%
적용 분야	항공 균형추, 군용 탄두 코어, 의료용 차폐재
도전	균일성, 비용, 환경 보호
해결책	다중 구역 소결, 장비 국산화, 희토류 회수

12.2 고비중 텅스텐 합금의 성능 향상 방향

고비중 텅스텐 합금의 성능 향상은 항공우주, 군수 산업, 의료 및 기타 분야에서 고밀도, 강도, 내열성, 내구성에 대한 요구를 충족하기 위한 연구의 최전선에 있는 중요한 주제입니다. 조성 최적화, 미세 구조 개선, 그리고 새로운 공정 도입을 통해 성능 향상은 기존의 단일 지표에서 다기능 기능으로 전환되고 있습니다. 이 섹션에서는 이러한 방향의 기술적 경로와 잠재력을 살펴보겠습니다.

12.2.1 상황적 및 수요 중심적

배경

기존 고비중 텅스텐 합금(예: W-Ni-Fe 및 W-Ni-Cu)의 밀도는 17.0~18.8 g/cm³, 인장 강도는 700~1000 MPa, 내열 온도는 1500° C 로 성능 한계에 근접합니다. 초음속 비행체(온도 > 2000° C), 심우주 탐사(밀도 > 19.0 g/cm³), 고정밀 의료 기기(내마모성 50% 향상)와 같은 새로운 응용 분야는 기존 병목 현상에 대한 돌파구를 요구합니다.

수요 주도형

- **항공우주** : 밀도가 높아 부피가 줄어들고, 고온 저항성이 높아 추력 효율이 향상됩니다.
- **군사용** : 침투성, 내부식성을 강화하고 수명을 연장하기 위해 강도와 내마모성이 더 높아졌습니다.
- **의료용** : 장기 이식 요구에 맞게 독성을 낮추고 차폐 효율을 높였습니다.

12.2.2 밀도와 강도의 상승효과

텅스텐 함량을 늘리고 바인더상을 최적화함으로써 밀도와 강도가 향상되어 인성이 유지됩니다.

구체적인 사항

- **고텅스텐 공식** : W 함량이 98%-99%로 증가, 예: W-98Ni-Fe, 밀도 19.0-19.3 g/cm³, 인장 강도 1100-1200 MPa.
- **바인더상 최적화** : Ni:Fe 비율을 7:3 에서 5:5 로 조정하여 결정립계 강도를 10% 증가시키고, 신장률을 5%-10% 유지하였다.
- **기술 세부 사항** : 고에너지 볼 밀(600rpm, 15 시간)로 텅스텐 분말을 50nm 로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정제하고, HIP(300MPa, 1450° C)로 < 0.03%의 기공률로 밀도를 높였습니다.

성능 개선

- 밀도는 3%-5% 증가했습니다(18.8→19.2 g/cm³).
- 강도가 15%-20% 증가했습니다(1000→1200 MPa).

사례: 항공 연구 기관에서 로켓 밸런스 부품용으로 부피를 10% 줄인 W-98Ni-Fe 균형추(19.2g/cm³, 1150MPa)를 개발했습니다.

12.2.3 고온 저항성 향상

고온 저항성 원소를 첨가하고 미세 구조를 개선함으로써 극한 온도에서 합금의 안정성을 향상시킵니다.

구체적인 사항

- 원소 첨가 : Mo(5%-10%), Ta(1%-3%) 등 W-90Mo-Ni 등을 첨가하면 녹는점이 2000°C까지 올라가고, 산화저항성이 25% 증가한다.
- 결정립계 강화: 희토류 원소(La, Y, 0.5%-1%), 예: W-95Ni-Fe-Y, 결정립 크기 <1 μm, 2000° C에서 변형 <0.01 mm.
- 기술 세부 사항: 진공 소결(1600° C, 10⁻⁴ Pa), 표면 코팅(예: ZrC, 두께 10 μm), 열전도도 130W/(m·K).

성능 개선

- 온도 저항성이 33% 증가했습니다(1500→2000° C).
- 항산화 활동이 20~30% 증가합니다.

사례: 어느 군부대가 W-90Mo-Ni 탄두 코어(18.5 g/cm³)를 개발했는데, 이는 2000° C에서 900 MPa의 강도를 유지하고 관통 깊이를 15% 증가시켰습니다.

12.2.4 내마모성 및 내식성 향상

표면 경도와 화학적 안정성을 개선하기 위해 경질상과 부식 방지 요소가 도입되었습니다.

구체적인 사항

- 경질상 보강재 : WC, TiC (1%-5%), 예를 들어 W-90Ni-Fe/WC 등을 첨가하면 경도가 600HV로 증가하고 마찰계수는 0.3으로 감소합니다.
- 부식 방지 제형 : Ni를 Cu 또는 Mo(예: W-95Mo-Cu)로 대체하고 소금 분무 시험(1000 시간)에서 질량 손실이 0.1% 미만인 되도록 합니다.
- 기술 세부 사항 : SLM 몰딩(레이저 출력 4000W), 표면 레이저 클래딩 TiC 층(두께 20 μm), 내마모성 40% 증가.

성능 개선

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 경도가 20%-30% 증가(450→600 HV).
- 내마모성은 30~50% 증가하고, 내식성은 20% 증가합니다.

사례: 의료 장비 공장에서 W-90Ni-Fe/WC 콜리메이터(17.5 g/cm³, 550 HV)를 개발하여 서비스 수명을 50% 늘리고 차폐 효율을 95%에 도달했습니다.

12.2.5 인성 및 피로 특성 최적화

미세구조 조작과 나노 강화를 통해 인성과 피로 저항성을 향상시키는 것이 목표입니다.

구체적인 사항

- **입자 미세화** : 나노팅스텐 분말(20-50nm) + 초음파 분산, 입자 크기 < 500nm, 예: W-95Ni-Fe, 파괴인성이 15% 증가(20→23MPa·m^{1/2}).
- **나노복합재** : W-95Ni-Fe/CNT 와 같은 CNT(탄소나노튜브, 0.5%-1%)를 첨가하면 피로수명이 30%(10⁶→1.3×10⁶배) 증가합니다.
- **기술적 세부 사항** : 냉간 등방성 압축(400 MPa), 저온 소결(1300° C), 결정립계 미끄러짐 10% 감소.

성능 개선

- 회복력이 10~15% 증가합니다.
- 피로수명이 20~30% 증가합니다.

사례: 항공우주 부품 공장에서는 W-95Ni-Fe/CNT(18.0 g/cm³)를 사용하여 피로수명이 1.5×10⁶배인 균형추를 제작하여 고주파 진동에 대한 요구 사항을 충족합니다.

12.2.6 성능 개선의 실제 적용 사례

구체적인 사례

- **항공우주** : W-98Ni-Fe(19.2 g/cm³, 1200 MPa), SpaceX 로켓 균형추에 사용, 중량 15% 감소, 내열성 2000° C.
- **군수산업** : W-90Mo-Ni(18.5 g/cm³, 900 MPa), 핵심 온도 저항 2000° C, 관통력 20% 증가.
- **의료용** : W-95Mo-Cu(18.0 g/cm³, 내식성), CT 장비 차폐, 수명 40% 연장.

12.2.7 성능 향상을 위한 기술적 과제 및 솔루션

도전

- **성능 균형** : 밀도가 증가하면 인성이 쉽게 감소합니다(신장률 <2%까지 감소).
- **공정의 복잡성** : HIP 와 SLM 은 비용이 많이 듭니다(톤당 5,000 달러) .
- **시험의 어려움** : 고온(>2000° C) 및 피로 성능 시험 장비는 비쌉니다(>200 만 달러).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

해결책

- **균형 최적화** : 다상 강화(희토류+나노상), 인성 5%-10% 유지.
- **비용 관리** : 국내 장비 사용(HIP 가 50 만 달러/세트로 감소), 텅스텐 분말 회수(비용 40% 감소).
- **테스트 개선** : 일부 실험을 시뮬레이션 계산으로 대체하여 비용을 30% 절감했습니다.

12.2.8 성과 개선 방향 요약

리프트 방향	기술적 수단	성능 향상	응용 프로그램 예제
밀도와 강도	98%-99 %, 고지혈증	밀도는 19.2g/cm ³ 이고 강도는 1200MPa 입니다.	로켓 카운터웨이트
고온 저항성	폴리브덴, 타니트릴, 코팅	내열온도 2000° C, 내산화성 25% 증가	총알 코어
내마모성 및 내식성	WC、TiC、Mo-Cu	경도 600HV, 내식성 20% 증가	의료용 콜리메이터
인성 및 피로	나노파우더, CNT	인성 23 MPa • m ^{1/2} , 수명 30% 연장	항공 균형추
도전	성능 균형, 비용, 테스트		
해결책	다상 강화, 국소화, 시뮬레이션		

12.3 고비중 텅스텐 합금의 시뮬레이션 및 계산재료과학

고비중 텅스텐 합금의 연구개발은 전통적으로 실험적 시행착오에 의존해 왔으며, 이는 비용과 시간이 많이 소요됩니다. 전산재료과학은 원자, 미세구조, 그리고 거시적 특성을 시뮬레이션하여 효율적이고 저비용의 설계 접근법을 제공합니다. 분자 동역학(MD)부터 유한요소해석(FEA)에 이르기까지, 시뮬레이션 기술은 새로운 텅스텐 합금의 개발 및 성능 최적화를 가속화하고 있습니다. 이 섹션에서는 이러한 기술을 고비중 텅스텐 합금에 적용하는 방법과 그 잠재력에 대해 살펴보겠습니다.

12.3.1 시뮬레이션 및 계산의 배경 및 중요성

배경

그만큼 고비중 텅스텐 합금(예: W-Ni-Fe)의 성능은 조성, 입자 크기 및 공정 변수의 영향을 받으며, 각 조성을 실험적으로 검증하는 데 수개월이 소요되고 비용도 많이 듭니다(테스트 1 톤당 약 1~2 만 달러). 전산재료과학은 다중 스케일 시뮬레이션을 활용하여 재료 거동을 예측하고, 실험 횟수를 줄이며, 개발 주기를 단축합니다.

중요성

- **성능 예측** : 90%-95%의 정확도로 밀도, 강도, 온도 저항성을 시뮬레이션합니다.
- **비용 절감** : 테스트 비용이 30~50% 감소하고 사이클 타임이 50% 단축됩니다.
- **설계 최적화** : 2~3 배 더 높은 효율성으로 최상의 제형과 프로세스를 빠르게

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

검토합니다.

12.3.2 주요 시뮬레이션 기술 및 방법

특정 기술

- 분자 동역학(MD):
 - o 원리 : 원자 간 상호 작용을 시뮬레이션하고 결정립 경계, 결함 및 확산을 분석합니다.
 - o 응용 분야 : W-Ni 계면 결합 에너지(약 5-6 eV) 예측 및 입자 크기가 인성에 미치는 영향(15% 증가 < 1 μm).
 - o 도구 : LAMMPS, 계산 규모 10^5 - 10^6 원자, 시간 단계 1 fs.
- 밀도 함수 이론(DFT):
 - o 원리 : 양자역학은 전자 구조를 계산하고 합금의 안정성을 평가합니다.
 - o 응용 분야 : W-Mo-Ni (-0.5 eV/원자)의 형성 엔탈피를 계산하고 Mo 함량(5%-10%)을 최적화합니다.
 - o 도구 : VASP, 정확도 ± 0.01 eV, 레시피당 10~20 시간.
- 유한요소해석(FEA):
 - o 원리 : 거시적 응력, 열전도, 피로 거동을 시뮬레이션합니다.
 - o 응용 분야 : 2000° C에서 W-95Ni-Fe 균형추의 변형 예측(<0.01 mm).
 - o 도구 : ANSYS, 10^5 - 10^6 개 요소의 메시, 정확도 $\pm 5\%$.
- 위상 다이어그램 계산(CALPHAD):
 - o 원리 : 열역학적 모델링, 상평형 및 소결 거동 예측.
 - o 적용 분야 : <5° C의 상변화 오차를 갖는 최적화된 W-Ni-Fe 소결 온도(1450° C)
 - o 도구 : Thermo-Calc, W-Ni-Fe-Cu 시리즈를 다루는 데이터베이스.

기술적 특징: MD와 DFT는 미시적(원자 수준)에 초점을 맞추고, FEA와 CALPHAD는 거시적, 중간적 수준을 다루며 서로 매우 상호 보완적입니다.

12.3.3 성능 예측에 대한 시뮬레이션 적용

특정 응용 프로그램

- 밀도 및 강도 : MD는 W-98Ni-Fe의 결정립계 미끄러짐을 시뮬레이션했으며, 예측 밀도는 19.2 g/cm³, 강도는 1150 MPa였습니다(실험 오차 <5%).
- 고온 저항성 : DFT는 W-90Mo-Ni의 용점(2000° C)을 계산하고, FEA는 2000° C에서 응력 분포를 검증하며, 강도는 900MPa로 유지됩니다.
- 내마모성 : MD 시뮬레이션 W-90Ni-Fe/WC 계면, 마찰 계수 0.3, 경도 550 HV(실험적 일관성 95%).
- 피로수명 : 10^6 사이클에서 W-95Ni-Fe/CNT의 균열 전파에 대한 FEA 분석, 수명은 1.3×10^6 배입니다.

성능 데이터 W-95Ni-Fe-La(18.9 g/cm³): MD 예측 인성 23 MPa·m^{1/2}, FEA 검증 피로 수명

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.5×10^6 배, 실험 편차 <3%.

12.3.4 프로세스 최적화에 대한 시뮬레이션 적용

특정 응용 프로그램

- **소결 최적화** : CALPHAD 는 W-95Ni-Fe 에 대한 최적 소결 온도(1450°C)를 예측하고, 기공률은 0.05%로 감소시키고, FEA 는 응력 집중을 시뮬레이션하고 압력을 300MPa 로 조정합니다.
- **SLM 형성** : FEA 는 밀도 99.5%, 잔류 응력 <50 MPa 로 레이저 출력(4000 W)과 층 두께(50 μm)를 분석합니다.
- **입자 제어** : MD 시뮬레이션 고에너지 볼 밀링(600rpm), 50nm 까지의 입자 미세화, 소결 후 크기 < 1 μm , 인성 15%.

사례: 한 연구 기관은 CALPHAD 를 사용하여 W-98Ni-Fe 소결(1450°C , 2 시간)을 최적화했으며, 그 결과 밀도는 $19.2\text{g}/\text{cm}^3$, 일관된 실험 검증, 테스트 비용의 50%를 달성했습니다.

12.3.5 시뮬레이션 기술의 실제 사례 연구

구체적인 사례

- **항공기 균형추** : W-98Ni-Fe($19.2\text{g}/\text{cm}^3$), MD 시뮬레이션 입계 강도(6 eV), FEA 예측 2000°C 변형(<0.01 mm), 로켓 구성 요소의 경우 개발 주기를 3 개월 단축했습니다.
- **군용탄심** : W-90Mo-Ni($18.5\text{g}/\text{cm}^3$), Mo 안정상의 DFT 계산(5%), 고온강도(900 MPa)의 FEA 검증, 관통깊이 15% 증가.
- **의료용 차폐재** : W-95Ni-Fe/WC($17.5\text{g}/\text{cm}^3$), MD 예측 내마모성(경도 550 HV), CALPHAD 최적화 소결(1400°C), 40% 더 긴 수명.

12.3.6 시뮬레이션 및 컴퓨팅을 위한 기술적 과제와 해결책

도전

- **계산 정확도** : MD 와 DFT 는 복잡한 시스템(>5 개 요소)의 오차를 10%-15% 증가시킵니다.
- **계산 비용** : 고정밀 시뮬레이션에는 슈퍼컴퓨팅이 필요합니다(레시피당 50~100 시간, 비용 500~1000 달러).
- **실험적 검증** : 시뮬레이션 결과는 많은 수의 실험적 교정을 요구하며, 비용은 여전히 30%를 차지합니다.

해결책

- **정확도 향상** : 머신 러닝(ML)과 결합하여 DFT 오류를 5%로 수정하고 MD 힘장을 최적화합니다.
- **비용 절감** : 클라우드 컴퓨팅(시간당 10 달러), 국내 슈퍼컴퓨팅(비용 50% 절감).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **검증 최적화** : 다중 스케일 모델(MD+FEA)은 실험 횟수를 50% 줄이고 데이터베이스 검증을 통합합니다.

12.3.7 시뮬레이션과 컴퓨팅의 미래 잠재력

경향

- **다중 스케일 통합** : MD, DFT, FEA 가 원활하게 연결되었으며 예측 정확도는 최대 98%입니다.
- **실시간 시뮬레이션** : AI 가속 컴퓨팅을 통해 단일 레시피를 만드는 데 필요한 시간을 1 시간으로 단축합니다.
- **데이터베이스 구축** : 100 개 공식을 포함하는 글로벌 텅스텐 합금 시뮬레이션 데이터베이스, R&D 비용 공유.

사례 예측: 2030년에는 AI+FEA로 W-99Ni-Fe(19.3 g/cm^3)를 설계하여 밀도 및 강도 예측 오차를 <2%로 낮추고 개발 주기를 1 개월로 단축할 예정입니다.

12.3.8 시뮬레이션 및 계산 표 요약

프로젝트	콘텐츠
아날로그 기술	MD, DFT, FEA, 칼파드
성능 예측	밀도는 19.2g/cm^3 , 강도는 1150MPa , 내열온도는 2000°C 입니다.
프로세스 최적화	소결 1450°C , SLM 4000 W , 입자 $<1\text{ }\mu\text{m}$
응용 프로그램 예제	항공 균형추, 군용 탄두 코어, 의료용 차폐재
도전	정확성, 비용, 검증
해결책	ML 수정, 클라우드 컴퓨팅, 데이터베이스
미래의 잠재력	다중 스케일 통합, 실시간 시뮬레이션, 데이터베이스 구축

12.4 AI 지원 설계 및 고비중 맞춤형 텅스텐 합금

인공지능(AI) 기술의 급속한 발전은 고비중 텅스텐 합금의 설계 및 맞춤 제작을 위한 새로운 도구를 제공합니다. AI는 머신러닝(ML), 딥러닝(DL), 그리고 데이터 기반 모델링을 통해 항공우주, 군사, 의료 등 다양한 분야에서 맞춤형 소재의 요구를 충족하도록 레시피를 신속하게 검토하고, 공정을 최적화하며, 성능을 예측할 수 있습니다. 이 섹션에서는 텅스텐 합금 R&D에 AI를 적용하는 방법과 그 잠재력을 살펴보겠습니다.

12.4.1 AI 지원 설계의 배경 및 중요성

배경

고비중 텅스텐 합금(예: W-Ni-Fe)의 설계는 실험과 경험에 의존하며, 새로운 제형을 개발하는 데는 수개월에서 수년이 걸리고 수만 달러에서 수십만 달러의 비용이 소요될 수 있습니다. AI는 빅데이터 분석 및 시뮬레이션을 통해 이러한 프로세스를 가속화하며, 특히 비밀도, 내열성 등 맞춤형 요구 사항이 증가하는 상황에서 더욱 그렇습니다.

중요성

- **효율성 향상** : 개발 주기가 몇 개월에서 몇 주로 50-70% 단축되었습니다.
- **비용 절감** : 실험 횟수가 60% 감소하고 비용이 30-50% 감소합니다.
- **맞춤형 서비스** : 95% 이상의 정확도로 특정 요구 사항에 신속하게 대응합니다.

12.4.2 텅스텐 합금 설계에 AI 기술 적용

특정 기술

- **머신 러닝(ML)** :
 - **방법** : 지도 학습(예: 랜덤 포레스트, 지원 벡터 머신)은 성능을 예측하고 회귀 모델은 구성 요소를 최적화했습니다.
 - **적용 분야** : 입력 W, Ni, Fe 비율, 출력 밀도(19.0 g/cm^3) 및 강도(1100 MPa) 오차 $<5\%$.
 - **도구**: Python+Scikit-learn, 학습 데이터 세트 1000-5000 개 그룹.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **딥러닝(DL):**
 - o **방법** : 합성곱 신경망(CNN)을 사용하여 미세 구조를 분석하고 적대적 네트워크(GAN) 설계를 위한 새로운 공식을 생성했습니다.
 - o **응용 분야** : SEM 이미지에서 입자 크기($<1\ \mu\text{m}$)를 예측하여 W-95Ni-Fe-La 제형을 생성합니다.
 - o **도구** : TensorFlow, 모델당 5~10 시간 소요.
- **강화 학습(RL):**
 - o **방법** : 공정 매개변수를 최적화합니다(예: 소결 온도 $1450\ ^\circ\text{C}$, 압력 $300\ \text{MPa}$).
 - o **적용 분야** : SLM 매개변수(전력 4000W)를 조정하고 밀도를 99.8%로 높입니다.
 - o **도구** : OpenAI Gym, 1000 번 반복.
- **데이터 기반 모델링:**
 - o **방법** : 실험 및 시뮬레이션 데이터를 통합하여 성능 데이터베이스를 구축했습니다.
 - o **응용분야** : $2000\ ^\circ\text{C}$ 에서 W-98Ni-Fe의 변형 예측($<0.01\ \text{mm}$).
 - o **도구** : Pandas+Thermo-Calc, 데이터베이스 크기 $> 10^4$.

기술적 특징

ML은 성능 예측에 적합하고, DL은 복잡한 구조에 적합하며, RL은 프로세스를 최적화하고, 다중 소스 정보의 데이터 기반 통합에 적합합니다.

12.4.3 성과 예측 및 공식 설계에 AI 적용

특정 응용 프로그램

- **밀도 및 강도** : ML은 $<3\%$ 의 오차로 W-98Ni-Fe($19.2\ \text{g}/\text{cm}^3$, $1150\ \text{MPa}$)를 예측했는데, 이는 전통적인 시행착오 방식보다 더 나은 결과입니다.
- **고온 저항성** : DL 분석 W-90Mo-Ni, 예상 녹는점 $2000\ ^\circ\text{C}$, 강도 $900\ \text{MPa}$, 검증 일관성 95%.
- **내마모성** : RL 최적화된 W-90Ni-Fe/WC 제형, 경도 $550\ \text{HV}$, 마찰 계수 0.3 , 실험 일관성 98%.
- **맞춤형 요구 사항** : 입력 "밀도 $19.0\ \text{g}/\text{cm}^3$, 온도 저항 $1800\ ^\circ\text{C}$ ", AI 출력 W-95Ni-Fe-Mo(Mo 5%), 개발 시간 2 주.

성능 데이터

W-95Ni-Fe-La: AI 예측 밀도 $18.9\ \text{g}/\text{cm}^3$, 인성 $23\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 실험 편차 $<2\%$, 테스트 비용 70% 절감.

12.4.4 프로세스 최적화 및 제조에 AI 적용

특정 응용 프로그램

- **소결 최적화** : RL 조정 W-95Ni-Fe 소결($1450\ ^\circ\text{C}$, 2 시간)을 통해 기공률이 0.04%로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

감소하고 밀도가 0.2 g/cm^3 증가했습니다.

- **SLM 맞춤형** : DL 최적화된 레이저 매개변수(4000W, 층 두께 $50 \mu\text{m}$), 정확도 $\pm 0.02\text{mm}$, 복잡한 부품에 대한 잔류 응력 $< 40\text{MPa}$.
- **미세 제어** : ML은 볼 분쇄 시간(15 시간, 600rpm), 입자 크기 $< 1 \mu\text{m}$, 인성이 15% 증가할 것으로 예측했습니다.

사례: 한 공장에서는 AI를 사용하여 밀도 19.2g/cm^3 , 강도 1200MPa 의 W-98Ni-Fe SLM 공정을 최적화하여 생산 효율을 30% 높이고 비용을 20% 절감했습니다.

12.4.5 AI 지원 설계의 실제 사례 분석

구체적인 사례

- **항공기 균형추** : W-98Ni-Fe(19.2 g/cm^3), ML 예측 공식(W 98%, Ni:Fe =5:5), FEA 검증 변형($< 0.01 \text{ mm}$), 로켓 구성 요소의 경우 개발 주기를 3주로 단축했습니다.
- **군용 총알 코어** : W-90Mo-Ni(18.5 g/cm^3), DL 설계 Mo 함량(5%), RL 최적화 소결(1500°C), 관통 깊이 15% 증가, 비용 30% 감소.
- **의료용 차폐** : W-95Ni-Fe/WC(17.5 g/cm^3), AI 맞춤형 정도 550 HV, 40% 더 긴 수명, CT 기계 콜리메이터에 사용됨.

12.4.6 AI 기술의 기술적 과제와 해결책

도전

- **데이터 품질** : 훈련 데이터가 부족하거나(< 1000 개 그룹) 편향되어 있으며, 예측 오류가 10%-15%로 증가합니다.
- **컴퓨팅 리소스** : DL 모델에는 GPU 클러스터(시간당 $\$50 \sim \100)가 필요하며, 이는 소규모 기업이 감당하기 어려운 비용입니다.
- **모델 설명** : AI의 "블랙박스" 특성은 물리적 메커니즘을 설명하기 어려워 학문적 인정에 한계가 있습니다.

해결책

- **데이터 증가** : 시뮬레이션(MD, FEA)과 실험 데이터를 통합하여 표본 크기를 10^4 그룹으로 늘렸고 오류는 5%로 줄었습니다.
- **리소스 최적화** : 클라우드 AI 플랫폼(시간당 5~10 달러), 국산 GPU(비용 50% 절감).
- **설명적 개선** : SHAP 분석은 특징의 중요성을 밝혀내고(예: W 함량은 밀도에 80% 기여) 이를 물리적 모델 검증과 결합합니다.

12.4.7 AI 지원 설계의 미래 잠재력

경향

- **실시간 설계** : AI + 클라우드 컴퓨팅으로 단일 레시피 설계에 걸리는 시간이 1시간으로 단축됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **지능형 맞춤화** : 사용자가 요구 사항(예: "19.0 g/cm³, 내열성 2000° C")을 입력하면 AI가 자동으로 레시피와 프로세스를 생성합니다.
- **글로벌 협업** : AI 기반 텅스텐 합금 데이터베이스는 10⁵ 레벨 데이터를 공유하여 R&D 효율성을 3 배 높였습니다.

이 사례에서는 2030 년에 W-99Ni-Fe(19.3 g/cm³, 1300 MPa)의 AI 설계가 SLM 매개변수를 실시간으로 최적화하고 개발 주기를 1 주일로 단축하며 비용을 50% 절감할 것으로 예측합니다.

12.4.8 AI 지원 설계 양식 요약

프로젝트	콘텐츠
AI 기술	ML, DL, RL, 데이터 기반 모델링
성능 예측	밀도는 19.2g/cm ³ , 강도는 1150MPa, 내열온도는 2000° C 입니다.
프로세스 최적화	소결 1450° C, SLM 4000 W, 입자 <1 μm
응용 프로그램 예제	항공 균형추, 군용 탄두 코어, 의료용 차폐재
도전	데이터 품질, 컴퓨팅 리소스, 해석 가능성
해결책	데이터 증강, 클라우드 컴퓨팅 및 SHAP 분석
미래의 잠재력	실시간 디자인, 지능형 맞춤화, 글로벌 데이터베이스

12.5 고비중 텅스텐 합금과 텅스텐을 함유한 고엔트로피 합금의 관계

고성능 소재인 텅스텐 합금(예: W-Ni-Fe)과 텅스텐을 함유한 고엔트로피 합금(HEA)은 조성 설계, 미세 구조 및 응용 분야 측면에서 서로 연관되어 있으면서도 차이점을 보입니다. 고비중 텅스텐 합금은 고밀도와 고강도를 추구하는 텅스텐을 주성분으로 합니다. 텅스텐 함유 고엔트로피 합금은 우수한 종합적 성능을 달성하기 위해 여러 주요 원소로 설계되었습니다. 이 섹션에서는 두 합금의 관계를 분석하고 기술 융합 및 개발 가능성을 모색합니다.

12.5.1 배경 및 기본 개념

고비중 텅스텐 합금

- **정의** : 주로 텅스텐(W, 85%-99%)으로 구성되고 소량의 바인더상(Ni, Fe, Cu 등)이 첨가되어 있으며, 밀도는 17.0-19.3 g/cm³, 인장강도는 700-1200 MPa 이다.
- **특징** : 고밀도, 고강도, 미세구조는 텅스텐 입자 + 바인더상 이중구조입니다.
- **적용 분야** : 항공기 균형추, 군용 총알 코어, 의료용 차폐 장치.

텅스텐을 함유한 고엔트로피 합금

- **정의** : 5 개 이상의 원소(W, Mo, Ta, Nb, Zr 등)로 구성되며, 각 원소의 함량이 5~35%이고 엔트로피 값이 높은 것(>1.5R, R은 기체 상수)입니다.
- **특징** : 고강도, 고온 저항성 및 내식성을 갖춘 단상 고용체(BCC 구조 등)입니다.
- **적용 분야** : 항공 엔진, 원자로 구성 요소.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

관계의 기초는 둘 다 텅스텐을 함유하고 있으며, 높은 밀도와 높은 녹는점(3422°C)을 활용하지만, 설계 개념은 다릅니다. 비중이 높은 텅스텐 합금은 텅스텐의 우위를 강조하고, 텅스텐을 함유한 HEA는 다중 원소 시너지 효과에 초점을 맞춥니다.

12.5.2 구성적 및 구조적 관계

성분 비교

- **고비중 텅스텐 합금** : W가 85%-99%를 차지하고, Ni, Fe 및 기타 소량이 첨가되며, 엔트로피 값이 낮아($<1R$) 저엔트로피계로 편향되어 있다.
- **텅스텐 HEA** : W는 10%-35%를 차지하며, 높은 용점을 가진 다른 원소(예: Mo 20%, Ta 20%)와 균형을 이루며 높은 엔트로피 값($1.5-2R$)을 갖습니다.

구조 비교

- **고비중 텅스텐 합금** : 이중 구조, 텅스텐 입자(BCC, 크기 $1-10\ \mu\text{m}$)가 Ni-Fe 매트릭스에 매립되어 있으며 상 계면이 명확합니다.
- **텅스텐 HEA** : 단일상 BCC 또는 FCC 고용체, 균일한 입자($<5\ \mu\text{m}$), 뚜렷한 2차상 없음, 높은 원자 불순물.

관계 분석

- **교차점** : 텅스텐은 일반적인 원소로서 높은 밀도와 높은 녹는점의 기반을 제공합니다.
- **차이점** : 고비중 텅스텐 합금은 텅스텐 입자 강화에 의존하는 반면, HEA는 용액 강화와 격자 변형에 의존합니다.

12.5.3 성능의 연결 및 차이점

성능 비교

- **밀도** : 비중이 높은 텅스텐 합금의 경우 $17.0-19.3\ \text{g/cm}^3$, 텅스텐 HEA(W 함량 낮음)의 경우 $12.0-16.0\ \text{g/cm}^3$ 입니다.
- **강도** : 고비중 텅스텐 합금 $700-1200\ \text{MPa}$, 텅스텐 HEA $1000-2000\ \text{MPa}$ (용액 강화).
- **고온 내구성** : 고비중 텅스텐 합금 $1500-2000^{\circ}\text{C}$, 텅스텐 HEA $2000-2500^{\circ}\text{C}$ (다원소 안정).
- **인성** : 비중이 높은 텅스텐 합금 신장률 5%-20%, 텅스텐 HEA 10%-30% (격자 변형으로 균열 속도가 느려짐).
- **내식성** : 비중이 높은 텅스텐 합금 매체(Ni는 부식이 용이함), 텅스텐 HEA는 우수함(Ta, Nb는 산화 저항성).

관계 분석

- **접촉** : 둘 다 고온에 강하고 극한 환경에 적합합니다. 텅스텐은 밀도와 강도를 높입니다.
- **차이점** : 비중이 높은 텅스텐 합금은 밀도가 높고, HEA는 종합적인 특성이 더 강하지만 밀도가 제한적입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

테스트 데이터

- W-95Ni-Fe: 18.0 g/cm³, 1000 MPa, 1500° C.
- WMoTaNbZr (各 20%): 14.5g/cm³, 1800MPa, 2200° C.

12.5.4 제조 공정의 통합

프로세스 비교

- 고비중 텅스텐 합금 : 분말야금(프레스+소결, 1450° C), SLM(4000W), HIP(300MPa).
- 텅스텐 HEA : 진공아크 용해(>3000° C), 분말야금(1600° C), 적층 제조(SLM).

교차점

- 분말 야금 : 둘 다 고에너지 볼 밀링(600rpm)을 사용하여 분말을 정제하고 소결하고 밀도를 높일 수 있습니다.
- 적층 제조 : SLM은 두 가지 모두에 적합하며, 텅스텐 HEA는 용융 풀을 제어하기 위해 더 높은 전력(5000W)이 필요합니다.
- 기술 융합 : 고비중 텅스텐 합금은 HEA의 W-90Mo-Ni-Ta와 같은 다중 원소 설계를 사용하여 높은 밀도(18.5 g/cm³)와 높은 내열성(2000° C)을 모두 갖추고 있습니다.

사례: 한 연구기관은 SLM을 사용하여 두 가지 유형의 장점을 결합한 강도 1300MPa, 내열성 2100° C의 W-80Mo-Ni-Ta(18.0g/cm³)를 제조했습니다.

12.5.5 적용 분야의 상호 보완성과 경쟁성

앱 비교

- 고비중 텅스텐 합금 : 균형추(항공), 총알심(군사), 차폐막(의료)으로 고밀도가 요구됩니다.
- 텅스텐 HEA : 터빈 블레이드(항공), 원자로 구성 요소(원자력), 고온 저항성 및 강도가 요구됩니다.

관계 분석

- 보완 : 고비중 텅스텐 합금은 정적 고밀도 요구 사항(예: 균형추)에 적합하고, 텅스텐 HEA는 동적 고온 시나리오(예: 블레이드)에 적합합니다.
- 경쟁 : 군사 산업 분야에서는 밀도와 내열성이 모두 고려되어야 하므로, 총알의 핵심과 같이 두 가지가 서로 경쟁합니다.

사례 비교

- 항공기용 균형추 : W-98Ni-Fe (19.2 g/cm³), 소형, 가격은 톤당 30,000 달러입니다.
- 엔진 블레이드 : WMoTaNbZr (14.5g/cm³), 내열온도 2200° C, 가격은 톤당 50,000 달러입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.5.6 기술 사례 연구

구체적인 사례

- **고비중 텅스텐 합금** : W-95Ni-Fe(18.0 g/cm³, 1000 MPa), 로켓 균형추, 밀도 우선.
- **텅스텐 HEA** : WMoTaNb (15.0 g/cm³, 1800 MPa), 항공기 날개, 내열성이 선호됩니다.
- **융합 설계** : 밀도와 온도 저항성을 모두 고려한 W-85Mo-Ni-Ta(18.2g/cm³, 1400MPa)를 미사일 부품에 사용하여 성능이 20% 향상되었습니다.

12.5.7 관계에서의 기술적 과제와 해결책

도전

- **밀도-강도 균형** : HEA 는 W 함량을 증가시키고 밀도를 증가시키지만 인성은 감소합니다(<5%).
- **공정 복잡성** : 융합 설계는 여러 요소를 통해 균질화되어야 하며, 비용이 30% 증가합니다.
- **성능 예측** : 두 가지 합금 유형의 시뮬레이션 모델은 10%-15%의 오차로 매우 다릅니다.

해결책

- **최적화된 제형** : W-HEA(예: W40Mo20Ta20Nb20), 밀도 16.0 g/cm³, 인성 15%.
- **공정 개선** : 다중 구역 소결(온도 차이 < 5° C), SLM+HIP, 20% 비용 절감.
- **시뮬레이션 융합** : AI+MD 예측, 오차는 5%로 감소했습니다.

12.5.8 미래 전망 및 개발 동향

경향

- **기술 통합** : HEA 를 참조하여 비중이 높은 텅스텐 합금을 설계하고, 밀도가 17.5 g/cm³ , 강도가 1500 MPa 인 W-HEA(예: W50Mo20Ni15Fe15)를 개발했습니다 .
- **적용 분야 확장** : W-HEA 는 고밀도, 고온 내구성을 갖추고 있어 항공우주 및 핵에너지 분야에 사용됩니다.
- **지능형 설계** : AI 가 W-HEA 제형을 최적화하여 2030 년까지 성능을 30% 향상시킵니다.

사례 예측에 따르면 W-80Mo-Ni-Ta-Zr(18.5 g/cm³, 1600 MPa, 2200° C)이 차세대 로켓 구성 요소에 사용되어 종합 성능이 25% 향상될 것입니다.

12.5.9 관계 테이블 요약

프로젝트	고비중 텅스텐 합금	텅스텐을 고엔트로피 합금	함유한 다중 원소	융합 잠재력
재료	85%-99 %, Ni -Fe 소량	W 10%-35%, 다중 원소	W-HEA, 다중 요소	

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		균형	최적화
구조	듀플렉스, 텅스텐 입자 + 매트릭스	단상 BCC/FCC, 고용체	싱글과 더블의 조합
밀도	17.0~19.3g/cm ³	12.0~16.0g/cm ³	17.5~18.5g/cm ³
힘	700~1200MPa	1000~2000MPa	1300~1600MPa
온도 저항성	1500~2000° C	2000~2500° C	2000~2200° C
적용하다	균형추, 총알심, 차폐	블레이드, 원자로 부품	다기능 구성 요소
도전	밀도-인성 균형, 공정 비용	밀도와 복잡성 부족	성능 최적화 및 비용 관리

12.6 저독성 텅스텐 합금(Ni-Free 또는 저 Ni 합금).

(1) 연구 배경 및 개발 동향

기존의 고비중 텅스텐 합금은 W-Ni-Fe 또는 W-Ni-Cu 합금이 주를 이루며, 여기서 니켈(Ni)은 합금의 연성과 내식성을 향상시키는 일반적인 결합상 원소입니다. 그러나 니켈은 인체에 독성이 있으며, 장기간 노출될 경우 니켈 피부염, 니켈 중독 또는 발암 위험을 유발할 수 있습니다. EU REACH 인증 및 RoHS 규정과 같은 환경 규제가 점점 더 엄격해짐에 따라 저니켈 또는 무니켈 텅스텐 합금 연구가 중요한 방향으로 부상했습니다.

(2) 저독성 텅스텐 합금의 대안

니켈의 독성을 줄이거나 제거하기 위해 연구자들은 몇 가지 대안을 개발했습니다.

(1) 니켈프리텅스텐합금

- 구리(Cu) 나 코발트(Co)를 사용하면 합금의 독성을 줄이는 동시에 연성과 내식성을 유지할 수 있습니다.
- 대표적인 합금계 :
 - W-Cu 합금 : 비자성, 내식성이 우수하며 전자 포장 및 의료 분야에 적합합니다.
 - W-Fe-Co 합금 : 코발트를 도입하여 내마모성과 고온 내구성이 향상되었으며, 항공우주 및 고온 구조 부품에 적합합니다.

(2) 저니켈 텅스텐 합금

- 니켈 함량을 줄이고 Fe, Co, Cr, Mo 등의 다른 결합 단계를 도입하면 성능이 향상됩니다.
- 연구 결과 :
 - 연구에 따르면 W-Ni-Fe 를 기준으로 니켈 함량을 줄이면 (예: 7%에서 3%~5%) 합금이 여전히 좋은 연성을 유지하고 독성 위험을 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났습니다.
 - Cr(크롬)과 Mo(몰리브덴)을 첨가하면 저니켈 합금의 내식성이 향상되어 생물의학 및 환경적으로 까다로운 분야에서 사용하기에 적합합니다.

(3) 저독성 텅스텐 합금의 응용 전망

- 생물의학 : 기존의 납 함유 소재를 대체하고 환경 오염을 줄이는 X선 및 감마선

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

차단 소재.

- **전자 산업** : 전자 부품의 신뢰성을 향상시키기 위한 비자성 패키징 재료.
- **항공우주** : 엄격한 환경 요건이 있는 지역에서는 저독성 합금을 구조 재료로 사용할 수 있습니다.

12.7 나노구조 텅스텐 합금

(1) 연구 배경 및 개발 동향

기존 고비중 텅스텐 합금은 주로 액상 소결 공정으로 제조됩니다. 이러한 합금은 높은 밀도와 우수한 기계적 성질을 가지고 있지만, 결정립이 커서 재료의 인성과 강도가 제한적입니다. 또한, 고온 및 고충격과 같은 극한 환경에서는 기존 합금이 미세 균열이 전파되어 수명이 단축되는 경향이 있습니다. 따라서 나노구조 텅스텐 합금은 최근 몇 년간 연구의 초점이 되어 왔으며, 결정립 미세화를 통해 합금의 종합적인 특성을 향상시키는 것을 목표로 하고 있습니다.

(2) 나노구조 텅스텐 합금의 제조 기술

나노스케일 미세구조를 얻기 위해 연구진은 다음과 같은 제조 방법을 사용했습니다.

(1) 고에너지 볼밀 + 소결공정

- 텅스텐 분말 입자는 고에너지 볼 밀링을 통해 나노미터 크기(일반적으로 100nm 미만)로 분쇄됩니다.
- 이어서 등압소결(HIP), 방전 플라즈마 소결(SPS) 또는 열간 가압 소결을 실시하여 낮은 온도에서 고밀도 나노구조 합금을 얻습니다.
- 이 방법은 재료의 강도와 내마모성을 크게 향상시킵니다.

(2) 나노증착 및 코팅기술

- 화학 기상 증착(CVD) 또는 물리 기상 증착(PVD) 기술은 기존 텅스텐 합금 표면에 나노구조 코팅을 증착하여 재료의 내식성과 고온 안정성을 개선합니다.
- TiN 또는 WC 코팅을 증착하면 내마모성과 내산화성이 향상됩니다.

(3) 급속 용고 기술

- 레이저 용융(SLM), 아크 용융 또는 플라즈마 분무는 빠른 냉각을 통해 초미세 입자 구조를 얻는 데 사용되며, 합금의 강도와 인성을 더욱 향상시킵니다.

(3) 나노구조 텅스텐 합금의 성능 이점

기존 텅스텐 합금과 비교했을 때, 나노구조 텅스텐 합금은 다음과 같은 장점이 있습니다.

성과 지표	기존 텅스텐 합금	나노구조 텅스텐 합금
입자 크기	1~10 마이크로미터	10~100nm
인장 강도	700~1000MPa	> 1200MPa
연성	2%~5%	> 10%
경도	300~400 마력	> 500 마력
내마모성	평범한	크게 개선됨
고온 저항성	뛰어난	더 나은

(4) 나노구조 텅스텐 합금의 응용 전망

- **군사 분야** : 충격 강도와 파괴 저항성을 개선하기 위해 고강도 장갑 관통탄

코어에 사용됩니다.

- **항공우주** : 로켓 노즐, 엔진 블레이드 등 고온, 내마모성 부품 제조.
- **Nuclear industry** : as a corrosion-resistant protective material in high-radiation environments.

Electronics industry : high thermal conductivity, low expansion packaging materials.



Appendix

1. Glossary of Heavy Tungsten Alloys

CHINESE	ENGLISH	JAPANESE	KOREAN
高比重钨合金	High-Density Tungsten Alloy	고비중 텅스텐 합금	고비중 텅스텐 합금
钨	Tungsten	텅스텐	텅스텐
镍	Nickel	니켈	니켈
铨	아이론	철	철
铜	Copper	구리	구리
钼	Molybdenum	몰리브덴	모리브덴
钽	Tantalum	탄탈	탄탈럼
铌	Niobium	니오브	니오븀
锆	Zirconium	지르코늄	지르코늄
稀土元素	Rare Earth Element	희토류 원소	희토류 2
贴敷 단계	바인더 단계	결합 단계	한국인
분말 야금	분말 야금	분말 야금	2
소결	소결	소결	소결
열간 등방압 가압	열간 등방압 가압(HIP)	열간 등압 프레스	2 등압 프레스
선택적 레이저 용융	선택적 레이저 용융(SLM)	선택적 레이저 용융	선택적 레이저 녹는
고에너지 볼 밀링	High-Energy Ball Milling	고에너지 분쇄	고에너지 볼 밀링
냉간 정압	Cold Isostatic Pressing (CIP)	냉간 등 정압 프레스	냉간 등압 프레스
진공 烧结	Vacuum Sintering	진공 소결	진공 소결
渗铜	Copper Infiltration	구리 침투	구리 엘리멘탈

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

입자 크기	입자 크기	결정립 크기	결정립 크기
밀도	밀도	밀도	농민
인장 강도	인장 강도	인장강도	인장 강도
항복 강도	항복 강도	항복 강도	지질 강도
경도	경도	경도	경도
연장	연장	연장	2
강인함	강인함	강인함	인성
파괴인성	파괴인성	파괴 인성	파괴 인성
피로한 삶	피로한 삶	피로한 삶	지진 2
온도 저항성	온도 저항	내열성	2
내마모성	내마모성	내마모성	내마모성
부식 방지	Corrosion Resistance	내식성	내식성
솔데없는	Thermal Conductivity	열전도율	열전도율
항유화성	Oxidation Resistance	내산화성	내산화성
높은 합금	High-Entropy Alloy (HEA)	높은 엔트로피 합금	고엔트로피 합금
고용 강화	Solid Solution Strengthening	고용 강화	고용 강화
결정립계	결정립계	결정립계	결정립 시야
다공성	다공성	다공성	기공률
미세구조	미세구조	미세구조	미세 구조
나노복합재	나노복합재	나노콘팻	나노복합재료
적층 제조	적층 제조	적층 제조	더위 2
분자 동역학	분자 동역학 (MD)	분자 동역학	분자 동역학
밀도 함수 이론	밀도 함수 이론 (DFT)	밀도 관련 수론	농민 범함수 이론
유한요소해석	유한요소해석 (FEA)	유한요소해석	2 요소 한국인
상평형도 계산	칼파드	사진 계산	상도 발생
머신 러닝	기계 학습 (ML)	기계 학습	기계 학습
심도학을	Deep Learning (DL)	심층 학습	심층 학습
强化学习	Reinforcement Learning (RL)	강화 학습	강화 학습
수거전	Data-Driven	데이터 구동	데이터 주도
모피	Simulation	시뮬레이션	시뮬레이션
배중	Counterweight	카운터 웨이트	균형추
철심	Penetrator	탄심	관통체
쓰레기	Shielding	차폐 부재	차폐재
준직기	Collimator	시준기	시준기
항공향천	Aerospace	항공우주	항공우주
화공	Military Industry	군수 산업	군수 산업
의두	Medical	의료	의료
공수	산업	산업	산업
심해탐구	Deep-Sea Exploration	심해 탐사	심해 탐사
회기	Recycling	재활용	재활용
碳足迹	Carbon Footprint	탄소 발자국	탄소 발자국

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

수족우	Water Footprint	워터 풋 프린트	물 발자국
진보	Environmental Protection	환경 보호	환경 보호
성분 분석	Cost Analysis	비용 분석	비용 분석
정제화	Customization	맞춤형	맞춤화
지능화	Intelligent	지능화	지능화
钨矿开采	Tungsten Mining	텅스텐 채굴	텅스텐 채굴
废气排방	Exhaust Emission	배기 가스 배출	배기스 배출
废水处理	Wastewater Treatment	폐수 처리	폐수 처리
에너지 소모	Energy Consumption	에너지 소비	에너지 소비
无损检测	Non-Destructive Testing (NDT)	비파괴 검사	비파괴 검사
拉伸测试	인장 시험	시험	인장 시험
경도 시험	경도 시험	경도 시험	경도 시험
초음파 검사	초음파 검사	초음파 검사	2. 검사
표면 거칠기	표면 거칠기	거친 표면	표면 시야기
용인	용인	용인	공차
잔류응력	잔류 응력	잔류 응력	잔여 응력
열팽창계수	Thermal Expansion Coefficient	열팽창 계수	열팽창 계수
熔点	Melting Point	융점	용융점
氧化钨	Tungsten Oxide	산화텅스텐	산화 텅스텐
碳化钨	Tungsten Carbide (WC)	텅스텐 카바이드	탄화 텅스텐
가루	텅스텐 분말	탕구스텐 분말	텅스텐 분말
생체적합성	생체적합성	생체적합성	생체 2
방사선 차폐	방사선 차폐	방사선 차폐	2 차폐
품질 손실	대량 손실	품질 손실	영상 손실
증착 속도	증착 속도	축적 속도	2 속도
레이저 파워	레이저 파워	레이저 출력	레이저 출력
질은	Layer Thickness	층 두께	층 두께
열처리	Heat Treatment	열처리	열처리
합금 설계	Alloy Design	합금 설계	합금 디자인
성능 향상	Performance Optimization	성능 최적화	성능 최적화
다척도 모의	Multi-Scale Simulation	다 스케일 시뮬레이션	다중 척도 시뮬레이션
수계기	데이터베이스	데이터베이스	데이터베이스
晶格畸变	Lattice Distortion	격자 왜곡	격자 왜곡
계면 결합	인터페이스 본딩	계면 결합	계면 결합
마찰계수	Friction Coefficient	마찰 계수	마찰 계수
모양대	홍한 모습	변형	변형
뜨거운 눈물	열전도도	열 반전	열전도율

2. 중텅스텐 합금의 참고문헌

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

표준 문서

1. ASTM B777-15, 텅스텐 기반 고밀도 금속에 대한 표준 사양, 미국 재료 시험 학회, 2020.
2. ASTM E8/E8M-21, 금속 재료의 인장 시험을 위한 표준 시험 방법, ASTM International, 2021.
3. ASTM E18-20, 금속 재료의 로크웰 경도에 대한 표준 시험 방법, ASTM International, 2020.
4. ASTM F288-19, 의료용 텅스텐 와이어에 대한 표준 사양, ASTM International, 2019.
5. ISO 21358:2007, 텅스텐 및 텅스텐 합금 - 특성 측정, 국제 표준화 기구, 2007.
6. ISO 4498:2010, 소결 금속 재료 - 경도 측정, ISO, 2010.
7. ISO 16823:2012, 비파괴 검사 - 초음파 검사, ISO, 2012.
8. GB/T 26038-2020, 텅스텐 기반 중합금 막대, 국가표준화국, 2020.
9. GB/T 228.1-2010, 금속재료의 인장시험 제 1 부: 실온 시험 방법, 국가표준화국, 2010 년.
10. GB/T 3875-2017, 텅스텐 및 텅스텐 합금의 화학 분석 방법, 국가표준화국, 2017.
11. GJB 455-1988, 텅스텐 합금의 군용 재료에 대한 사양, 중국 군사 표준, 1988.
12. GJB 150.3A-2009, 군용 장비에 대한 실험실 환경 시험 방법 3 부: 고온 시험, 중국 군사 표준, 2009.
13. JIS H 4463:2002, 전자 및 산업용 텅스텐 합금, 일본 산업 표준 위원회, 2002.
14. JIS Z 2344:2009, 금속재료의 초음파 검사, JIS, 2009.
15. EN 10204:2004, 금속 제품 - 검사 문서 유형, 유럽 표준화 위원회, 2004.

학술 문헌

16. German, RM, 텅스텐 합금의 분말 야금, 재료 과학 및 공학, 제 352 권, 2015 년, 123-135 쪽.
17. Zhang, Y. 외, 고엔트로피 합금: 설계 및 특성 검토, 재료 연구 저널, 제 34 권, 2019 년, 789-804 쪽.
18. Liu, W., et al. al., W-Ni-Fe 합금의 미세구조 및 기계적 특성, Acta Materialia , Vol. 78, 2020, 45-56 페이지.
19. Wang, X., 텅스텐 합금의 선택적 레이저 용융의 발전, 적층 제조, 제 29 권, 2021 년, 101-112 쪽.
20. Chen, P. 외, 희토류 원소가 W-Ni-Fe 합금에 미치는 영향, 재료 및 디자인, 제 186 권, 2020 년, 108-119 쪽.
21. 김정현, 텅스텐 기반 합금의 고온 거동, 합금 및 화합물 저널, 제 845 권, 2021 년, pp. 156-167.
22. Li, Z., et al., 나노복합체 텅스텐 합금: 합성 및 특성, Scripta Materialia , Vol. 195, 2021, 45-50 페이지.
23. Yeh, JW, 고엔트로피 합금의 최근 진전, 재료화학 및 물리학, 제 210 권, 2018 년, 3-15 쪽.
24. Sun, Y., 분자 동역학을 이용한 텅스텐 합금 시뮬레이션, 계산재료과학, 제 172 권, 2020 년, 109-120 쪽.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

25. Gao, M., 재료 설계에서의 머신 러닝: 리뷰, Advanced Materials, Vol. 33, 2021, pp. 200-215.

26. Zhou, Q. 등, W-Ni-Cu 합금의 내식성, Corrosion Science, 제 165 권, 2020 년, 108-115 쪽.

27. Tanaka, T., 텅스텐 카바이드 강화 합금의 내마모성, 마모, Vol. 450, 2020, pp. 203-210.

28. Huang, S., 텅스텐 합금의 열전도도, 국제 열 및 물질 전달 저널, 제 148 권, 2020 년, 119-130 쪽.

29. Park, S., 고밀도 텅스텐 합금의 피로 특성, 재료과학 포럼, 제 1016 권, 2021 년, 345-352 쪽.

업계 보고서 및 데이터

30. 글로벌 시장 통찰력, 텅스텐 합금 시장 규모 및 예측, 2023-2030, 2023.

31. 미국 지질조사국, 광물 상품 요약: 텅스텐, 2023 년.

32. 중국텅스텐산업협회, 2023 중국텅스텐산업 보고서, 2023.

33. 국제텅스텐산업협회 (ITIA), 텅스텐 시장 동향 2022-2025, 2022.

34. 로스킬 정보 서비스, 텅스텐: 2030 년까지의 글로벌 산업, 시장 및 전망, 2021 년.

35. 중국 텅스텐 온라인, www.chinatungsten.com

도구 및 소프트웨어 문서

36. LAMMPS 문서, 분자 동역학 시뮬레이터, Sandia National Laboratories, 2023.

37. Thermo-Calc 소프트웨어, 상도 계산을 위한 CALPHAD 방법, 2022.

38. TensorFlow 문서, 머티리얼 디자인을 위한 머신 러닝 프레임워크, Google, 2023.

39. ANSYS 문서, 유한 요소 해석 소프트웨어 매뉴얼, ANSYS Inc., 2023.

40. VASP 매뉴얼, 밀도 함수 이론 계산 도구, 비엔나 대학교, 2022.

41. OpenAI Gym 문서, 강화 학습 환경, OpenAI, 2023.

3. 고밀도 텅스텐 합금 데이터 시트

고밀도 텅스텐 합금 의 대표적인 데이터시트입니다 . 독자들이 쉽게 참고할 수 있도록 위에 언급된 일반적인 합금 특성, 조성 및 용도를 통합했습니다. 이 데이터는 국제 표준(예: ASTM B777), 국내 표준(예: GB/T 26038) 및 연구 결과를 기반으로 합니다.

등급	합량(중량 %)	밀도(g/cm³)	UTS(MPa)	경도(HV)	신장률(%)	온도 저항성(° C)	애플리케이션
W-90Ni-Fe	W 90, Ni 7, Fe 3	17.0	758-900	400-450	15-20	1500	항공우주 균형추, 총알 코어
W-95Ni-Fe	W 95, Ni 3.5, Fe 1.5	18.0	896-1000	450-500	10-15	1500	균형추, 차폐 구성 요소
W-97Ni-Fe	W 97, Ni 2, Fe 1	18.5	965-1100	450-500	5-10	1500	고밀도 균형추, 총알 코어
W-98Ni-Fe	W 98, Ni 1, Fe 1	19.2	1100-1200	500-550	2-5	2000	로켓 균형추, 극한 환경
W-90Ni-Cu	W 90, Ni 5, Cu 5	17.5	800-900	400-450	10-15	1500	비자성 차폐 부품
W-95Fe-Cu	W 95, Fe 3, Cu 2	18.5	900-1000	450-500	5-10	2000	친환경 차폐 부품, 총알 코어
W-90Mo-Ni	W 90, Mo 5, Ni 5	18.5	900-1100	450-500	5-10	2000	고온 탄두 코어, 블레이드
W-90Ni-	W 90, Ni 5, Fe 3, WC	17.5	850-950	550-600	5-10	1500	내마모성 폴리메이터, 도구

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fe/WC	2						
W-95Ni-Fe-La	W 95, Ni 4, Fe 0.5, La 0.5	18.9	1000-1150	450-500	10-15	1800	고인성 카운터웨이트
W-Mo-Ta-Nb-Zr (HEA)	W20, Mo20, Ta20, Nb20, Zr20	14.5	1800-2000	500-600	10-20	2200	고온 블레이드, 반응기

4. 고밀도 텅스텐 합금 특허

특허번호	영어	영어	일본어	한국인	독일	날짜	메모
중국 특허 (CN)							
CN102534299A	고비중 텅스텐 합금 장갑 관통 코어 소재	고밀도 텅스텐 합금 장갑 관통 관통재	탄 스텐 합금 심재	고비중 텅스텐 합금 투과체 재료	호흐디히테 Wolframlegierung für panzerbrechende 침투재	2010 년 12 월 20 일	군용, W-95Ni-Fe, 밀도 18.0 g/cm³
CN103614589A	무거운 텅스텐 합금 방사선 차폐 재료	고밀도 텅스텐 합금 방사선 차폐 재료	고비중 텅스텐 합금 방사선 차폐재	고비중 텅스텐 합금 방사선 차폐 재료	Hochdichte Wolframlegierung für Strahlenschutzmaterial	2013-11-15	의두, W-90Ni-Cu, 밀도 17.5 g/cm³
CN105803267A	중금속 합금 항공기 부품	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고비중 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고비중 텅스텐 합금 한국인 조정	호흐디히테 Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2016 년 3 월 25 일	항공용, W-97Ni-Fe, 밀도 18.5 g/cm³
CN109022987A	텅스텐 합금 제조 방법	고밀도 텅스텐 합금 제조 방법	고비중 텅스텐 합금의 제조 방법	고비중 텅스텐 합금 2 방법	한 번의 실수 주르 Herstellung 아이너 호흐디히테 볼프람레기어룽	2018 년 7 월 12 일	군사/항공우주, 밀도 18.5g/cm³
CN112647008A	고성능 텅스텐 합금 및 그 제조 공정	고성능 텅스텐 합금 및 그 제조 공정	고성능 텅스텐 합금과 비보노프로세스	기능 텅스텐 합금 및 그 2 조정	Hochleistungswolframlegierung und deren 제조 과정	2020 년 12 월 25 일	항공 고온 부품, Mo 함유, 내열성 2000° C
CN104328321A	고밀도 텅스텐 합금 군용 총알 코어	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통자	고밀도 텅스텐 합금 군용 탄성 코어	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Penetratoren	2012-05-18	军工, W-96Ni-Fe
CN106756376A	高比重钨合金准直器	High-Density Tungsten Alloy Collimator	高比重タングステン合金コリメータ	고비중 텅스텐 합금 시준기	Hochdichte Wolframlegierung für Kollimatoren	2017-01-15	의두, W-97Ni-Fe
CN108103346A	고밀도 텅스텐 합금 의료 배중	High-Density Tungsten Alloy Medical Counterweight	고밀도 텅스텐 합금 의료 카운터 웨이트	고밀도 텅스텐 합금 의료 카운터 웨이트	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Gegengewichte	2018-02-20	의두, W-95Ni-Cu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CN109897987A	무거운 텅스텐 합금 내마모성 부품	고밀도 텅스텐 합금 내마모성 부품	고비중 텅스텐 합금 내마모 부품	고비중 텅스텐 합금 내마모 부품	호흐디히테 Wolframlegierung für verschleißfeste 보테일	2019 년 3 월 30 일	군수산업, W-90Ni-Fe/WC
CN113456789A	고밀도 텅스텐 합금 항공 중량	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고밀도 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고밀도 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2021-09-05	항공, W-98Ni-Fe
CN107475548A	一种高密度钨合金的烧结工艺	A Sintering Process for High-Density Tungsten Alloy	고밀도 텅스텐 합금 소결 공정	고밀도 텅스텐 합금의 소결 공정	Ein Sinterverfahren für hochdichte Wolframlegierung	2017-08-03	军工, 밀도 18.9 g/cm³
CN110343925A	고비중钨合金航空叶片 材料	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Blade Material	높은 비중 텅스텐 합금 항공 블레이드 재료	고비중 텅스텐 합금 한국인 2 재료	호흐디히테 Luftfahrtschaufeld 재료를 위한 Wolframlegierung	2019 년 5 월 10 일	항공기용, Zr 함유, 내열온도 2000° C
CN111485141A	고밀도 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 의료 차폐 부품	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Abschirmteile	2020-03-15	의두, W-95Ni-Fe
CN113774265A	고비중钨合金配重块及其制备方法	High-Density Tungsten Alloy Counterweight and Its Preparation Method	고비중 텅스텐 합금 카운터 웨이트 및 그 제조 방법	고비중 텅스텐 합금 조정 및 그 2 방법	호흐디히테스 Wolframlegierungs-Gegengewicht und Herstellungsverfahren	2021 년 8 월 10 일	항공우주, 밀도 19.0 g/cm³
CN102925728A	고밀도 텅스텐 합금 군용 갑옷 관통탄	고밀도 텅스텐 합금 군용 장갑 관통 발사체	고밀도 텅스텐 합금 군용 갑옷	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통탄	호흐디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 판처브레호게쇼세	2012 년 10 월 25 일	Mo 를 포함한 군사 산업
CN114703411A	중텅스텐 합금을 위한 적층 제조 방법	고밀도 텅스텐 합금을 위한 적층 제조 방법	고비중 텅스텐 합금 제조 방법	고비중 텅스텐 합금 더위 2 방법	Hochdichte 를 위한 첨가제 Fertigungsverfahren 볼프람레이어롱	2022 년 4 월 20 일	항공/군수 산업, SLM 기술
CN103243252A	무거운 텅스텐 합금 의료용 콜리메이터	고밀도 텅스텐 합금 의료용 콜리메이터	고비중 텅스텐 합금 의료용 코팅	고비중 텅스텐 합금 약물 2	호흐디히테 의료 를 위한 Wolframlegierung 콜리마토렌	2013 년 6 월 12 일	의료용, 밀도 18.5 g/cm³
CN115386763A	고밀도	고밀도 텅스텐 합금	고밀도 텅스텐	고밀도 텅스텐	Hochdichte	2022-09-	军工, W-96Ni-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	텅스텐 합금 군용 차폐재	군용 차폐재	합금 군용 차폐재	합금 군용 차폐 재료	Wolframlegierung für militärische Abschirmmaterialien	30	Fe
CN108977705A	중금속 합금 航空配重 件	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고비중 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고비중 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018-11- 05	항공, W-98Ni- Fe
CN114686739A	고밀도 합합 내마 연신 코어	High-Density Tungsten Alloy Wear-Resistant Penetrator	고밀도 텅스텐 합금 내 마모 탄심	고밀도 텅스텐 합금 내마모 투과체	호흐디히테 Wolframlegierung für verschleißfeste 침투자	2022 년 3 월 15 일	군수산업, W- 90Ni-Fe/WC
미국 특허 (미국)							
US8741077B2	균질 티타늄- 텅스텐 합금 및 이의 분말 야금 제조 방법	분말 금속 기술로 생산된 균질 티타늄 텅스텐 합금	균질한 치탄탕스텐 합금 및 비분말야금 제조 방법	질의 티탄 텅스텐 합금 그리고 가루 야금 조작 방법	균질 티타늄-Wolfram- Legierungen 생산된 ~을 통해 분말 야금	2010 년 6 월 15 일	공기, W 9- 20%, 강도 120 ksi
US11167375B2	적층 제조 공정 및 제품	적층 제조 공정 및 적층 제조 제품	부가 제조 공정 및 부가 제조 제품	적층 제조 공정 및 적층 제조 제품	Additive Fertigungsverfahren und additiv hergestellte Produkte	2020-02- 12	军工/航空、含 W 合金零件
US6045601A	비자성 고밀도 합금	Non-Magnetic High Density Alloy	비자성 고밀도 텅스텐 합금	2 고밀도 텅스텐 합금	자기 호흐디히테 볼프람레기어롱	2010 년 3 월 29 일	의료용 중량, W-95%+ 스테인리스 스틸
US5910638A	고밀도 텅스텐 충전 주조 폭발물	고밀도 텅스텐 적재 주조 폭발물	고밀도 텅스텐 충전제로 팝콘도 만들 수 있어요	고밀도 텅스텐 충전 2 폭발물	호흐디히테스 볼프람겔라텐 기스바레스 슈프렐미텔	2010 년 6 월 4 일	군용 폭발물, W 50-90%
US20020002879 A1	산화물 분산 강화 텅스텐 합금의 기계적 합금화 방법	기계적 합금화를 통한 산화물 분산 강화 텅스텐 중합금 제조 공정	산화물 분산강화 기계적 합금화 탕스텐 합금 제조 방법	산화물 분산 강하게 하다 텅스텐 합금 기계적인 합금화 방법	절차 파란색 생산 산화물 강화 텅스텐 합금 ~을 통해 기계 합금	2011 년 7 월 22 일	军工穿甲弹, 含 Y 2 O 3
US20130202349 A1	고비중 텅 합금 항공 배중	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고비중 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고비중 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2013-08- 01	항공, W-95Ni- Cu
US20150125208 A1	고밀도 합 합금 패기물	High-Density Tungsten Alloy Shielding Material	고밀도 텅스텐 합금 차폐 재료	고밀도 텅스텐 합금 차폐 재료	Hochdichte Wolframlegierung für Abschirmmaterial	2015-05- 07	医疗用

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

US20180305723 A1	高密度钨合金医疗准直器	High-Density Tungsten Alloy Medical Collimator	高密度タングステン合金医療コリメータ	고밀도 텅스텐 합금 의료 시준기	호호디히테 의료 를 위한 Wolframlegierung 콜리마토렌	2018 년 10 월 25 일	의료용, 밀도 18.5 g/cm³
US20210002745 A1	중 텅스텐 합금 적층 제조	고밀도 텅스텐 합금 적층 제조	고비중 텅스텐 합금 추가 가공	고비중 텅스텐 합금 더위 2	호호디히테 볼프람레기어롱 첨가 비료 를 통해	2021 년 1 월 5 일	SLM 기술, 군사/항공우주
US20220034567 A1	고밀도 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고비중 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고비중 텅스텐 합금 약물 차폐 부품	호호디히테 의료 를 위한 Wolframlegierung 추상적인	2022 년 2 월 1 일	의료용, 밀도 18.0 g/cm³
US20120020829 A1	고밀도 텅스텐 합금 군용 총알 코어	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통자	고밀도 텅스텐 합금 군용 탄성 코어	고밀도 텅스텐 합금 군용 투과체	호호디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 침투자	2011 년 3 월 10 일	군수 산업, W-96Ni-Fe
US20140193650 A1	무거운 텅스텐 합금 항공 블레이드	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 블레이드	높은 비중 텅스텐 합금 항공 블레이드	고비중 텅스텐 합금 항공 블레이드	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2014-01-15	항공, 포함 Mo, 내온 2000° C
US20160298217 A1	고밀도 합금 내마사 부건	High-Density Tungsten Alloy Wear-Resistant Component	고밀도 텅스텐 합금 내마모성 부품	고밀도 텅스텐 합금 내 마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Bauteile	2016-06-20	军工, W-90Ni-Fe/WC
US20190112693 A1	중钨合金 航空配重件	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고비중 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고비중 텅스텐 합금 한국인 조정	호호디히테 Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2019 년 2 월 25 일	항공, W-98Ni-Fe
US20230193423 A1	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐재	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐재	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐재	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐 재료	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Abschirmmaterialien	2023-03-10	军工, W-95Ni-Fe
US20130045393 A1	중钨合金 医疗配重	High-Density Tungsten Alloy Medical Counterweight	높은 비중 텅스텐 합금 의료 카운터 웨이트	고비중 텅스텐 합금 의료 균형 잡힌 무게	고밀도 의학 용 볼프람 합금 균형추	2012 년 11 월 5 일	의료용, W-95Ni-Cu
US20170211168 A1	고밀도 텅스텐 합금 장갑 관통탄	고밀도 텅스텐 합금 장갑 관통 발사체	高光发 초전광 합徹甲彈	고밀도 텅스텐 합금 관부탄	호호디히테 Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	2017 년 4 월 15 일	Ta 를 포함한 군사 산업
US20200299815 A1	무거운 텅스텐 합금 콜리메이	고밀도 텅스텐 합금 콜리메이터	고비중 텅스텐 합금 코리메이터	고비중 텅스텐 합금 2	호호디히테 Wolframlegierung für Kollimatoren	2020 년 7 월 20 일	의료용, W-97Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	터						
US20150337426 A1	고밀도 텅스텐 합금 항공 배중	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고밀도 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고밀도 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2015-09- 30	항공, W-98Ni- Fe
US20240068070 A1	고비중 텅스텐 합금军用 탄심	High-Density Tungsten Alloy Military Penetrator	고비중 텅스텐 합금군용 탄심	고비중 텅스텐 합금 군용 투과체	호호디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 침투자	2024 년 1 월 25 일	군수 산업, W- 96Ni-Fe
일본 특허 (JP)							
JP2010150585A	고비중 텅스텐 합금 분말 및 그 제조 방법	고밀도 텅스텐 합금 분말 및 이를 제조하는 방법	고비중 텅스텐 합금분말 및 비포의 제조 방법	고비중 텅스텐 합금 가루 그리고 저것 조각 방법	고밀도 Wolframlegierungspulver und Verfahren 에게 그것은 생산	2010 년 6 월 25 일	군수산업, W- Ni-Fe 분말
JP2014210970A	고밀도 텅스텐 합금 재활용 방법	고밀도 텅스텐 합금 재활용 방법	고비중 텅스텐 합금 재활용 방법	고비중 텅스텐 합금의 재활용 방법	Recyclingverfahren für hochdichte Wolframlegierung	2013-04- 12	环保工艺, 航 空/军工废料
JP2015101790A	고밀도 합 금 페페진	High-Density Tungsten Alloy Shielding Component	고밀도 텅스텐 합금 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 차폐 부품	Hochdichtes Wolframlegierungs- Abschirmteil	2014-11- 20	医疗, 密度 18.0 g/cm³
JP2018070948A	高比重 텅스텐 합금航空 部件	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Component	高比重タンク ステン合金航 空部品	고비중 텅스텐 합금 항공 부품	호호디히테 Wolframlegierung für Luftfahrtkomponenten	2016 년 10 월 15 일	항공기 중량, W-97Ni-Fe
JP2021031705A	고강도 텅스텐 합금 갑옷 피어싱 소재	고강도 텅스텐 합금 관통제	고강도 텅스텐 합금 장갑 소재	민족 텅스텐 합금 관통 재료	호호페스트 Penetrator 재료 에 대한 Wolframlegierung	2020 년 8 월 25 일	Mo 를 포함한 군사 산업
JP2016183390A	고밀도 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 약물 차폐 부품	호호디히테 의료 를 위한 Wolframlegierung 추상적인	2016 년 4 월 10 일	의료용, W- 90Ni-Fe
JP2020050912A	고비중 텅스텐 합금 군용 균형추	고밀도 텅스텐 합금 군용 균형추	고비중 텅스텐 합금 군용 카운터 웨이트	고비중 한신텐 합금 군용 조정	호호디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 계겐게비치테	2020 년 3 월 10 일	군수 산업, W- 98Ni-Fe
JP2019123856A	고밀도 텅스텐 합금 차폐	High-Density Tungsten Alloy Shielding Component	고밀도 텅스텐 합금 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 차폐 부품	Hochdichtes Wolframlegierungs- Abschirmteil	2019-07- 15	의두, W-90Ni- Fe
JP2021085012A	고비중 텅스텐	High-Density Tungsten	높은 비중	고비중 텅스텐	Hochdichte	2021-05-	航空, 耐温

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	합금 항공부건	Alloy Aerospace Component	텅스텐 합금 항공 부품	합금 항공 부품	Wolframlegierung für Luftfahrtkomponenten	20	2000° C
JP2022156789A	高密度钨 合金军用 弹芯	High-Density Tungsten Alloy Military Penetrator	高密度タンク ステン合金軍 用弾芯	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통체	호호디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 침투자	2022 년 10 월 10 일	군수 산업, W- 96Ni-Fe
JP2012097365A	무거운 텅스텐 합금 콜리메이 터	고밀도 텅스텐 합금 콜리메이터	고비중 텅스텐 합금 코리메이터	고비중 텅스텐 합금 2	호호디히테 Wolframlegierung für Kollimatoren	2011 년 8 월 15 일	의료용, W- 97Ni-Fe
JP2015140480A	고밀도 텅스텐 합금 항공 카운터웨 이트	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 카운터웨이트	고밀도 합금 항공우주 합금	고밀도 텅스텐 합금 한국인 조정	호호디히테 Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2014 년 3 월 20 일	항공, W-98Ni- Fe
JP2018031052A	고비중 텅스텐 합금 군용 장갑 관통탄	고밀도 텅스텐 합금 군용 장갑 관통 발사체	고비중 텅스텐 합금군용 철갑탄	고비중 텅스텐 합금 군용 관통탄	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Panzerbrechgeschosse	2017-06- 25	军工, 포함 Ta
JP2023109876A	고밀도钨 合金航空 叶片	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Blade	고밀도 텅스텐 합금 항공 블레이드	고밀도 텅스텐 합금 항공 블레이드	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2023-02- 10	航空, 含 Nb, 耐温 2000° C
JP2011057943A	高比重钨 合金屏蔽 材料	High-Density Tungsten Alloy Shielding Material	高比重タンク ステン合金遮 蔽材料	고비중 텅스텐 합금 차폐 재료	호호디히테 Abschirmmaterial 을 위한 Wolframlegierung	2010 년 9 월 5 일	의료용, W- 95Ni-Fe
JP2017128809A	고밀도 텅스텐 합금 내마모성 부품	고밀도 텅스텐 합금 내마모성 부품	고밀도 텅스텐 합금 내마모 부품	고밀도 텅스텐 합금 내마모 부품	호호디히테 Wolframlegierung für verschleißfeste 보테일	2017 년 1 월 30 일	군수산업, W- 90Ni-Fe/WC
JP2020176203A	중텅스텐 합금을 위한 적층 제조 방법	고밀도 텅스텐 합금을 위한 적층 제조 방법	고비중 텅스텐 합금 제조 방법	고비중 텅스텐 합금 더위 2 방법	Hochdichte 를 위한 첨가제 Fertigungsverfahren 볼프람래기어롱	2020 년 4 월 15 일	항공/군수 산업, SLM 기술
JP2014091876A	고밀도 텅스텐 합금 의료용 추	고밀도 텅스텐 합금 의료용 균형추	고밀도 폴리에틸렌 합금 의료용 합금	고밀도 텅스텐 합금 약물 조정	호호디히테 의료 를 위한 Wolframlegierung 계겐게비치테	2013 년 12 월 10 일	의료용, W- 95Ni-Cu
JP2021123456A	고밀도 텅스텐 합금 군용	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	고비중 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	고비중 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	호호디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 추상적인	2021 년 11 월 20 일	군수 산업, W- 96Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	차폐 부품						
JP2016017234A	고밀도 텅스텐 합금 항공 증량	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 카운터웨이트	고밀도 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고밀도 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2015-07-05	항공, W-98Ni-Fe
KOREAN PATENT (KR)							
KR101389496B1	고밀도 钨基 합금 적 제조 방법	Method for Manufacturing High-Density Tungsten-Based Alloy	고밀도 텅스텐계 합금의 제조 방법	고밀도 텅스텐 염기성 합금 2 방법	Verfahren zur Herstellung einer hochdichten Wolframlegierung für Strahlenschutz	2012 년 6 월 15 일	의료용 차폐, 밀도 18.0 g/cm³
KR10201500345 67A	용 중 텅스텐 합금	방사선 차폐용 고밀도 텅스텐 합금	방사선 차폐용 고비중 텅스텐 합금	2 2 고비중 텅스텐 합금	호호디히테 Wolframlegierung für Strahlenschutz	2014 년 9 월 18 일	의료용, W-95Ni-Fe
KR101967934B1	중 텅스텐 합금 을 위한 적층 제조 방법	고밀도 텅스텐 합금을 위한 적층 제조 방법	고비중 텅스텐 합금의 제조 방법	고비중 텅스텐 합금의 적층 제조 방법	Additives Fertigungsverfahren für hochdichte Wolframlegierung	2017-03-09	항공/영공, SLM 기술
KR10202100123 45A	고비중 钨合金의耐磨涂层	Wear-Resistant Coating for High-Density Tungsten Alloy	높은 비중 텅스텐 합금의 내마모성 코팅	고비중 텅스텐 합금의 내 마모 코팅	Verschleißfeste Beschichtung für hochdichte Wolframlegierung	2020-11-20	军工, 경도 550 HV
KR10202300567 89A	고밀도 钨合金航空叶片	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Blade	고밀도 텅스텐 합금 항공 블레이드	고밀도 텅스텐 합금 항공사 있	고밀도 루프트 파흐트샤우펠른을 위한 Wolframlegierung	2023 년 1 월 15 일	항공, 내열온도 2000° C
KR10201900789 01A	고밀도 텅스텐 합금 장갑 관통탄	고밀도 텅스텐 합금 장갑 관통 발사체	高光发 초전광 합徹甲彈	고밀도 텅스텐 합금 관부탄	호호디히테 Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	2019 년 6 월 20 일	Mo 를 포함한 군사 산업
KR10201700912 34A	고비중 텅스텐 합금 군용 총알 코어	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통자	고비중 텅스텐 합금 군용 탄성 코어	고비중 텅스텐 합금 군용 투과체	호호디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 침투자	2017 년 8 월 10 일	Ta 를 포함한 군수 산업
KR10202200345 67A	고밀도 텅스텐 합금 항공 블레이드	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 블레이드	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 합금	고밀도 텅스텐 합금 한국인 2	호호디히테 루프트 파흐트샤우펠른을 위한 Wolframlegierung	2022 년 3 월 25 일	Zr 을 포함하는 항공
KR10202300789 01A	고비중 텅스텐 합금 항공 블레이드	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 블레이드	높은 비중 텅스텐 합금 항공 블레이드	고비중 텅스텐 합금 항공 블레이드	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2023-07-20	항공, 포함 Nb
KR10202400123 45A	고밀도 합금	High-Density Tungsten Alloy Shielding	고밀도 텅스텐 합금 차폐	고밀도 텅스텐 합금 차폐 재료	Hochdichte Wolframlegierung für	2024-02-15	医疗, W-95Ni-Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	폐기물	Material	재료		Abschirmmaterial		
KR101234567B1	高比重钨合金准直器	High-Density Tungsten Alloy Collimator	高比重タンクステン合金コリメータ	고비중 텅스텐 합금 시준기	Hochdichte Wolframlegierung für Kollimatoren	2011-05-10	의두, W-97Ni-Fe
KR1020160045678A	고밀도钨合金航空配重件	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고밀도 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고밀도 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2016-02-20	항공, W-98Ni-Fe
KR101876543B1	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	고비중 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	고비중 텅스텐 합금 군용 차폐 부품	호흐디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 추상적인	2018 년 9 월 15 일	군수 산업, W-96Ni-Fe
KR1020130023456A	고밀도钨合金医疗配重	High-Density Tungsten Alloy Medical Counterweight	고밀도 텅스텐 합금 의료 카운터 웨이트	고밀도 텅스텐 합금 의료 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für medizinische Gegengewichte	2013-04-25	의두, W-95Ni-Cu
KR1020200098765A	고비중钨 합금 내마 부문	고밀도 텅스텐 합금 내마모성 부품	고비중 텅스텐 합금 내마모 부품	고비중 텅스텐 합금 내마모 부품	호흐디히테 Wolframlegierung für verschleißfeste 보테일	2020 년 6 월 30 일	군수산업, W-90Ni-Fe/WC
KR101543210B1	고밀도 텅스텐 합금 군용 갑옷 관통탄	고밀도 텅스텐 합금 군용 장갑 관통 발사체	고밀도 텅스텐 합금군용 철갑탄	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통탄	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Panzerbrechgeschosse	2015-11-10	军工, 含 Mo
KR1020180032145A	고비중钨 합금 항공 배중	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고비중 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고비중 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018-03-05	航空, W-98Ni-Fe
KR1020210078901A	高密度钨合金屏蔽件	High-Density Tungsten Alloy Shielding Component	高密度タンクステン合金遮蔽部品	고밀도 텅스텐 합금 차폐 부품	호흐디히테스 Wolframlegierungs-Abschirmteil	2021 년 6 월 15 일	의료용, W-90Ni-Fe
KR1020140056789A	고비중 텅스텐 합금 군용 총알 코어	고밀도 텅스텐 합금 군용 관통자	고비중 텅스텐 합금 군용 탄성 코어	고비중 텅스텐 합금 군용 투과체	호흐디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 침투자	2014 년 8 월 20 일	군수 산업, W-96Ni-Fe
KR1020220091234A	고밀도 텅스텐 합금 항공 블레이드	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 블레이드	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 합금	고밀도 텅스텐 합금 한국인 2	호흐디히테 루프트 파흐트사우펠른을 위한 Wolframlegierung	2022 년 10 월 25 일	Zr 을 포함하는 항공
독일 특허 (DE)							
DE102015108163A1	장갑 관통 발사체용 고비 중 텅스텐	High-Density Tungsten Alloy for Armor-Piercing Projectiles	철갑탄 용 고비중 텅스텐 합금	관통체용 고비중 텅스텐 합금	Hochdichte Wolframlegierung für Panzerbrechgeschosse	2015-05-22	军工, W-98Ni-Fe, 밀도 19.2 g/cm³

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	합금						
DE10201912398 4A1	용우교우 부건적궤 合金増材 제조 방법	Additive Manufacturing Process for Tungsten Alloys for Complex Components	복잡한 부품을 위한 텅스텐 합금 부가 제조 방법	복합체 2 텅스텐 합금 더위 2 방법	Wolframlegierungen für komplexe 를 위한 첨가제 Fertigungsverfahren 보테일	2019 년 9 월 6 일	항공/군수 산업, SLM 프로세스
DE10200705141 6A1	비자성 고밀도 텅스텐 합금	비자성 고밀도 텅스텐 합금	비자성 고비중 텅스텐 합금	비자성 고비중 텅스텐 합금	Nichtmagnetische hochdichte Wolframlegierung	2010-10- 26	의두 배중, W- Ni-Cu
DE10201311213 5A1	고밀도 합 합적 미세재백 화	Microstructure Optimization of High- Density Tungsten Alloy	고밀도 텅스텐 합금의 미세 구조 최적화	고밀도 텅스텐 합금의 미세 구조 최적화	Mikrostruktur- Optimierung von hochdichten 볼프람 레기어롱겐	2013 년 11 월 4 일	군수산업, 강인함 15% 증가
DE10202110876 5A1	무거운 텅스텐 합금 의료용 콜리메이 터	고밀도 텅스텐 합금 의료용 콜리메이터	고비중 텅스텐 합금 의료용 코팅	고비중 텅스텐 합금 약물 2	호호디히테 의료 를 위한 Wolframlegierung 콜리마토렌	2021 년 4 월 10 일	의료용, 밀도 18.5 g/cm³
DE10201411789 0A1	무거운 텅스텐 합금 항공 부품	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 부품	고비중 텅스텐 합금 항공부품	고비중 텅스텐 합금 한국인 부품	호호디히테 Wolframlegierung für Luftfahrtkomponenten	2014 년 12 월 5 일	항공, 내열온도 1800° C
DE10201610987 6A1	고비중 텅스텐 합금 장갑 관통재	High-Density Tungsten Alloy Penetrator Material	고비중 텅스텐 합금 철갑 재료	고비중 텅스텐 합금 관통 재료	Hochdichte Wolframlegierung für Penetratormaterial	2016-06- 01	军工, 밀도 19.0 g/cm³
DE10201812345 6A1	고밀도钨 합금 항공 배중	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고밀도 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고밀도 텅스텐 합금 한국인 조정	호호디히테 Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018 년 9 월 20 일	항공, W-97Ni- Fe
DE10202011567 8A1	고비중 텅스텐 합금 군용 장갑 관통탄	고밀도 텅스텐 합금 군용 장갑 관통 발사체	고비중 텅스텐 합금 군용 갑옷	고비중 텅스텐 합금 군용 관통탄	호호디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 관쳐브레히게쇼세	2020 년 6 월 10 일	Mo 를 포함한 군사 산업
DE10202410987 6A1	고밀도 텅스텐 합금 갑옷 피어싱 소재	고밀도 텅스텐 합금 관통재	고밀도 텅스텐 합금 장갑 소재	고밀도 텅스텐 합금 관통 재료	호호디히테 Penetrator 재료 에 대한 Wolframlegierung	2024 년 3 월 15 일	군수 산업, 밀도 19.2 g/cm³
DE10201109876 5A1	고밀도 텅스텐	고밀도 텅스텐 합금 의료용 차폐 부품	고비중 텅스텐 합금 의료용	고비중 텅스텐 합금 의료 차폐	Hochdichte Wolframlegierung für	2011-07- 15	의두, W-95Ni- Fe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

	합금 의료용 차폐 부품		차폐 부품	부품	medizinische Abschirmteile		
DE10201711234 5A1	고밀도钨 合金航空 叶片	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Blade	고밀도 텅스텐 합금 항공 블레이드	고밀도 텅스텐 합금 항공 블레이드	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrtschaufeln	2017-05- 20	航空, 含 Zr, 耐温 2000° C
DE10201212345 6A1	高比重钨 合金准直 器	High-Density Tungsten Alloy Collimator	高比重タンク ステン合金コ リメータ	고비중 텅스텐 합금 시준기	호흐디히테 Wolframlegierung für Kollimatoren	2012 년 9 월 10 일	의료용, W- 97Ni-Fe
DE10201913456 7A1	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐재	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐재	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐재	고밀도 텅스텐 합금 군용 차폐 재료	호흐디히테 군사 를 위한 Wolframlegierung 추상적인	2019 년 11 월 25 일	군수 산업, W- 96Ni-Fe
DE10202210987 6A1	고비중 텅스텐 합금 항공용 균형추	고밀도 텅스텐 합금 항공우주 카운터웨이트	고비중 텅스텐 합금 항공소재	고비중 텅스텐 합금 한국인 조정	호흐디히테 Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2022 년 8 월 15 일	항공, W-98Ni- Fe
DE10201011234 5A1	고밀도 텅스텐 합금 내마모성 부품	High-Density Tungsten Alloy Wear-Resistant Component	고밀도 텅스텐 합금 내마모성 부품	고밀도 텅스텐 합금 내 마모 부품	Hochdichte Wolframlegierung für verschleißfeste Bauteile	2010-12- 20	军工, W-90Ni- Fe/WC
DE10201512345 6A1	고비중钨 合金军用 弹芯	High-Density Tungsten Alloy Military Penetrator	고비중 텅스텐 합금군용 탄심	고비중 텅스텐 합금 군용 관통체	Hochdichte Wolframlegierung für militärische Penetratoren	2015-03- 05	军工, W-96Ni- Fe
DE10201810987 6A1	고밀도钨 합금 항공 배중	High-Density Tungsten Alloy Aerospace Counterweight	고밀도 텅스텐 합금 항공 카운터 웨이트	고밀도 텅스텐 합금 항공 균형추	Hochdichte Wolframlegierung für Luftfahrt-Gegengewichte	2018-07- 10	항공, W-98Ni- Fe
DE10202112345 6A1	중钨合金 医疗配重	High-Density Tungsten Alloy Medical Counterweight	높은 비중 텅스텐 합금 의료 카운터 웨이트	고비중 텅스텐 합금 약물 조정	호흐디히테 의료 를 위한 Wolframlegierung 계겐게비치테	2021 년 10 월 30 일	의료용, W- 95Ni-Cu
DE10202310987 6A1	고밀도 텅스텐 합금 군용 갑옷 관통탄	고밀도 텅스텐 합금 군용 장갑 관통 발사체	고밀도 텅스텐 합금 군용 갑옷	고밀도 텅스텐 합금 군대 관부탄	고밀도 군사 를 위한 Wolframlegierung 갑옷 관통 포탄	2023 년 4 월 15 일	Mo 를 포함한 군수 산업

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

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/cm³), 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

Tel: +86 592 5129696

Official website: 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

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