텅스텐 시멘트 카바이드

물리적 및 화학적 특성, 공정 및 응용 분야의 포괄적 탐구

(IX)

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA 그룹
소개

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

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

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

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI , ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn









COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

3 부: 초경합금의 성능 최적화

제 9 장: 초경합금의 다기능화

초경합금의 다기능성은 전도성, 자기 성, 내마모성, 내부식성, 자체 윤활성 및 지능형 **응답 기능을 조절함으로써** 항공우주(수명 > 10 4 시간 ± 10^3 시간), 전자 제조(저항률 < 12 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm) 및 지능형 장비(응답 시간 < 1 ms ± 0.1 ms)의 복잡한 요구 사항을 충족할 수 있습니다. 기존 초경합금은 높은 경도(HV 1800 ± 30)와 내마모성(마모율 < 0.06 mm^3/N•m ± 0.01 mm^3/ N•m)으로 알려져 있지만 전도성(~10 MS/m ± 0.1 MS/m), 자기성(포화 자기 강도 < 10 emu/g ± 0.5 emu/g) 및 적응성이 부족하여 다기능 시나리오에서의 적용이 제한됩니다. 성능의 시너지적 개선을 달성하기 위해서는 **미세구조** (입자 크기 0.52μm±0.01μm), **조성 제어** (TiC 5%10%±0.1%, Ni 8%12%±0.1%) 및 **표면 엔지니어링** (텍스처 깊이 110μm±0.1μm)부터 최적화를 시작해야 합니다.

(1) 전기 전도성 및 (2) 자기 조절, (3) 내마모성 및 내부식성 전도성 복합재 성능, (4) 자가 윤활 및 접착 방지, (5) 생체 및 지능형 초경 합금의 다기능 경로 에 대해 논의합니다 . 전기 전도성 및 자기 조절은 Co 함량(10%±1%)과 Ni 치환에 의해 최적화됩니다. 내마모성 및 내부식성 전도성 복합재 성능은 WCTiCNi 시스템(경도>HV 1600±30, 부식 속도<0.01mm/년±0.001mm/년)에 초점을 맞춥니다. **자가 윤활 및 접착 방지는** MoS_2(5%±0.1%)와 **표면 질감** (마찰 계수<0.2±0.01)을 도입합니다. **바이오닉 및 지능형 초경합금은 경사 구조** (기공률 5%~20%±1%)와 **반응성 재료 (변형률 <0.1%±0.01%)** 를 기반으로 하며 , 지능형 응용 분야에 활용될 것으로 기대됩니다. 본 장은 8 장(Cr_3 C_2 코팅 경도 > HV 1500±30)과 연계되며, 10 장(녹색 제조)의 기초를 제공합니다.

9.1 초경합금의 전기전도도 및 자기적 특성 제어

초경합금의 전기 전도도(전도도 ~10 MS/m±0.1 MS/m)와 자기적 특성(포화 자화 <10 emu/g±0.5 emu/g)은 **전자 접점** (저항률 <12 μΩ•cm±0.1 μΩ•cm), **자기 시험** (감도 >95%±2%) 및 품질 관리에 직접 영향을 미칩니다. WC(100 μΩ•cm±5 μΩ•cm)의 높은 저항률은 Co 또는 Ni 결합상(전도도 >15 MS/m±0.2 MS/m)에 의해 최적화되어야 하는 반면, Co 의 강자성(보자력 100 Oe±10 Oe)은 비파괴 검사의 기초를 제공합니다. 규정에는 전도도, 자기성 및 기계적 특성(K_1 c 1015 MPa•$m^{1/2}$ ±0.5) 간의 균형이 필요합니다.
이 섹션에서는 전기 이론(Drude 모델), 자기 분석(VSM, 정확도 ±0.1 emu/g) 및 엔지니어링 사례를 결합하여 초경합금의 전도도, 자기 검출 및 품질 관리 관점에서 제어 메커니즘과 응용을 논의합니다. 예를 들어, WC10Co(Co 10%±1%)는 전도도가 10.5 MS/m±0.1 MS/m 이고 자화도가 8 emu/g±0.5 emu/g 로 전자 접점 및 품질 검출 요건을 충족합니다.

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

9.1.1 시멘트 카바이드의 전기 전도도(~10 MS/m)

9.1.1.1 시멘트 카바이드 전도성 원리 및 기술 개요

초경합금(목표 ~10 MS/m±0.1 MS/m)의 전기 전도도는 결합상인 Co(15 MS/m±0.2 MS/m)의 전도도에 의해 좌우되며, WC(저항률 100 μΩ·cm±5 μΩ·cm)의 반도체 특성은 전체 성능을 제한합니다. 전기 전도도 σ는 드루드 모델을 따릅니다.

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

여기서 n은 자유 전자 밀도(~10^{28} m^{-3} ± 10^{27} m^{-3}), e는 전자 전하(1.6×10^{-19} C), τ는 이완 시간(10^{-14} s±10^{-15} s), m은 전자 질량(9.1×10^{-31} kg)입니다. Co의 높은 n 값은 σ를 증가시키는 반면 WC 입자(0.52 μm±0.01 μm)는 계면 산란(산란율 10^{14} m^{-2} ± 10^{13} m^{-2})을 증가시켜 전도도를 감소시킵니다. 최적화 목표는 전자 접점의 요구 사항을 충족하기 위해 저항률 <12 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm입니다. (전기 전도도(σ)에 대한 드루드 모델은 전기장의 작용 하에서 금속 내의 전하 캐리어(자유 전자 등)의 운동 행동을 설명하는 데 사용되는 고전적 이론입니다. 이 모델은 1900년 폴 드루드가 제안했으며, 금속 내의 전자가 자유 입자로서 결정 격자 내에서 무작위로 움직이고 인가된 전기장 하에서 방향성 있게 표류한다고 가정합니다.)

이 테스트는 4탐침법(전류 1 mA±0.01 mA, 정확도 ±0.01 μΩ·cm)을 채택했으며, 샘플 크기는 10×10× 5 mm±0.1 mm 입니다. 예를 들어, WC10Co(Co 10%±1%)의 저항률은 11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm로 WC6Co의 15 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm보다 우수합니다. 전도도 향상은 줄열(<0.1 W/cm^2 ± 0.01 W/cm^2)을 줄일 뿐만 아니라 신호 전송 효율(>99%±1%)도 향상시킵니다. 이 섹션에서는 메커니즘, 테스트 및 최적화를 통해 분석합니다. (4 탐침법은 재료의 전기 전도도나 저항률을 측정하는 정확한 기술로, 특히 반도체, 박막, 전도성 재료의 특성 분석에 적합합니다. 이 방법은 4 개의 탐침(일반적으로 금속 바늘이나 전극)을 사용하여 접촉 저항과 기하학적 요소의 영향을 줄여 측정 정확도를 높입니다.)

9.1.1.2 초경합금의 전기 전도도에 대한 기구 분석

초경합금은 텅스텐 카바이드(WC)를 경질상으로, 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합상으로 하는 복합 소재로, 높은 경도, 높은 내마모성, 그리고 우수한 전기 전도성을 지닙니다. 초경합금의 전기 전도성 메커니즘은 주로 재료의 조성, 미세구조, 그리고 전자 전달 특성에 영향을 받습니다. 본 논문에서는 고전 이론과 현대 연구를 바탕으로 초경합금의 전기 전도성 메커니즘을 간략하게 분석합니다.

(1) 결합단계의 기여

코발트의 전도성에 대한 주요 역할: 높은 전도성을 가진 코발트는 약 6 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm의 저항률을 가지며, 연속적인 네트워크(부피비 10% ± 1%)를 형성하여 전류 전달을 지배합니다. 코발트의 자유 전자는 전기장의 작용에 따라 방향성을

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

가지며, 이는 초경합금 전도성의 주요 원인입니다.

니켈 대체

니켈(8%-12% ± 0.1%, 저항률 약 7 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm)을 첨가하면 코발트를 대체하여 저항률을 < 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm로 더욱 낮출 수 있습니다. 니켈의 페르미 준위(약 7 eV ± 0.1 eV)는 코발트와 유사하며 전도도도 비슷하지만 내식성이 더 우수합니다(부식 전류 밀도 icorr < 10^{-6} A/cm² ± 10^{-7} A/cm²). 따라서 열악한 환경 조건에도 적합합니다.

바인더상 함량의 영향

결합상의 비율이 증가할수록(예: 6%에서 15%) 전자 이동 경로의 수가 늘어나 전도도가 크게 증가합니다. 반대로, 결합상이 감소할수록 전도도는 감소합니다.

(2) 경상의 한계

텅스텐 카바이드의 낮은 전기 전도도

WC는 공유 결합 특성(WC 결합 에너지는 약 700 kJ/mol ± 10 kJ/mol), 낮은 전자 이동도(< 10 cm² / V • s ± 1 cm² / V • s), 높은 저항률(약 100 μΩ•cm ± 5 μΩ•cm)을 가지며 전체 전도도에 대한 기여도는 제한적입니다.

입자 효과

WC 입자는 바인더 상에 분산되어 전자의 자유로운 이동을 방해하여 WC 함량이 증가함에 따라 전도도가 감소합니다.

(3) 미세구조의 영향

입자 크기 및 입자 경계 밀도

입자 크기는 약 0.5 μm ± 0.01 μm로, 입계 밀도가 증가하여(> 10^{14} m^{-2} ± 10^{13} m^{-2}) 계면 산란이 증가하고 저항률이 약 10% ± 2% 증가합니다. 미세 입자는 경도를 증가시키지만 전도성에는 도움이 되지 않습니다.

결합상 분포의 균일성

Co 또는 Ni 분포의 균일성(편차 < 0.1% ± 0.02%)은 전도성에 매우 중요합니다. 편석(> 0.5% ± 0.1%)은 국부적으로 저항률을 약 20% ± 3% 증가시켜 전체 성능에 영향을 미칠 수 있습니다.

네트워크 연속성

SEM 분석 결과, WC-10%Ni 합금의 Co/Ni 네트워크는 높은 연속성(>95%±2%)을 가지고 있으며, EDS 분석 결과 Ni 분포가 균일(편차 <0.1%±0.02%)한 것으로 확인되어 전도도가 크게 향상되었습니다.

다공성과 결함

재료의 다공성이나 미세균열은 전자 산란을 증가시키고 전도도를 감소시킵니다.

(4) 온도효과

낮은 온도에서는 전자-포논 산란이 감소하고 전도도는 안정적으로 유지됩니다.

고온(> 100° C ± 1° C)에서는 열 진동이 심화되고 산란이 증가하며 평균 충돌 시간 τ \tau τ가 약 10% ± 2% 감소하여 저항률이 약간 증가합니다(< 5% ± 1%). 이는 전도도의 감소로 나타납니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(5) 실험적 검증

4 탐침법
저항률을 측정하고 이를 미세구조 분석(SEM, EDS 등)과 결합하여 결합상비, 결정립 크기, 분포 균일성이 전도도에 미치는 영향을 검증합니다.
일반적인 값
WC-10%Co 硬质合金电导率约为 1×10^6 S/m，随 Co 含量增加可达 2×10^6 S/m; WC-10%Ni 합금의 저항률은 < 11 μΩ•cm로 최적화될 수 있습니다.

초경합금의 전기 전도도는 주로 결합상(예: Co 또는 Ni)의 자유 전자에 의해 결정되며, WC 함량, 미세구조(결정립 크기, 분포 균일성, 연속 네트워크), 온도 등의 요인에 의해 조절됩니다. 결합상 비율 최적화, 분포 균일성 향상, 결함 감소, 그리고 결정립 크기 조절을 통해 전기 전도도를 효과적으로 향상시킬 수 있습니다. Ni의 첨가는 내식성과 전도도를 더욱 최적화하여 EDM 및 전도성 코팅과 같은 응용 분야에서 초경합금의 새로운 가능성을 제시합니다. 이 메커니즘 분석은 재료 설계 및 성능 최적화에 대한 이론적 지침을 제공합니다.

9.1.1.3 초경합금의 전도도에 영향을 미치는 요인 분석

전기 전도도는 초경합금의 중요한 전기적 특성으로, 방전 가공(EDM), 전도성 코팅, 전자 장치 및 지능형 응답 응용 분야에서 초경합금의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. 이러한 성능은 재료 조성, 미세 구조, 제조 공정 및 표면 상태 등 여러 요인의 영향을 받습니다. 이러한 요인들은 전자 이동 경로, 산란 메커니즘, 접촉 특성 및 재료의 전반적인 균일성에 영향을 미쳐 초경합금의 전기적 특성을 크게 변화시킵니다. 본 논문에서는 주요 영향 요인에 대한 상세 분석과 실험 데이터, 미시적 관찰 결과, 그리고 엔지니어링 적용 사례를 결합하여 초경합금의 전기적 특성 메커니즘과 최적화 전략을 심층적으로 탐구하고, 고성능 초경합금 개발에 대한 이론적 근거와 실질적인 지침을 제시하고자 합니다.

9.1.1.3.1 초경합금의 전기 전도도에 영향을 미치는 요인 - Co/Ni 함량

(1) 영향 메커니즘
초경합금의 결합상인 Co 또는 Ni 는 전기 전도도에 가장 큰 영향을 미치는 요소입니다. 그 역할은 연속적인 전도 네트워크를 형성하고 자유 전자 밀도를 제공하는 것입니다. Co/Ni 함량이 10% ± 1%일 때 저항률은 약 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm로 우수한 전도도를 보여줍니다. 이는 적절한 양의 결합상이 WC 입자를 효과적으로 연결하고 전자 산란 경로를 줄일 수 있기 때문입니다. SEM 분석 결과 이 함량에서 Co 또는 Ni가 고르게 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)하고 결합 강도가 > 100 MPa ± 10 MPa로 전도 네트워크의 안정성을 보장합니다. 그러나 함량이 12% ± 1%를 초과하면 파괴 인성(파괴 인성, K_{Ic})이 약 10% ± 2% 감소합니다. 이는 주로 결합상 비율이 지나치게 높아 결정립계가 약화되고, 전자 산란 및 국부 저항이 증가하여 전체 전도도가 감소하기 때문입니다. EDS 분석 결과, 높은 Co 함량은 편석(Ni:Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

비율이 1:1 ± 0.1에서 벗어남)을 유발하여 전도도 불균일성을 심화시킬 수 있음을 추가로 확인했습니다.

(2) 최적화 전략

Co/Ni 함량을 8%-12% 범위로 제어함으로써 높은 전기 전도도를 유지하면서 기계적 특성(경도 > HV 1400 ± 30 및 K_{Ic} > 15 MPa·m$^{1/2}$ 등)을 균형 있게 조절할 수 있습니다. ± 0.5). 실제 응용 분야에서 Co 편석으로 인해 WC12Co의 저항률은 13 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm까지 상승할 수 있으며 국부 전도도는 약 15% ± 2% 감소하는 반면 WC10Ni의 저항률은 동일한 조건에서 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm에 불과하여 Ni가 특정 제형에서 균일성과 편석 방지 능력이 더 우수함을 나타냅니다. 분말 혼합의 균일성을 조절(예: 볼 밀링 시간을 40시간 ± 1시간으로 연장)하거나 미량 합금 원소(예: Cr < 1%)를 도입하여 분리를 억제하고 전도성 네트워크의 연속성을 향상시킴으로써 최적화를 달성할 수 있습니다.

9.1.1.3.2 초경합금의 전기 전도도에 영향을 미치는 요인 - 입자 크기

(1) 영향 기구

입자 크기가 전도도에 미치는 영향은 주로 입자 경계 밀도와 전자 산란을 통해 달성됩니다. 입자 크기가 0.51 μm ± 0.01 μm일 때 입자 경계 밀도는 높고(> 10^{14} m^{-2}) 저항률은 낮습니다(약 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm). 이는 미세 입자가 결합상(예: Co 또는 Ni)의 연속적인 네트워크를 촉진하여 효율적인 전자 이동 경로를 형성하기 때문입니다. SEM 관찰 결과 미세 입자 초경합금(예: WC-6Co)은 높은 입자 경계 밀도로 인해 산란을 증가시키지만 결합상 네트워크의 최적화로 일부 효과를 상쇄할 수 있음을 보여줍니다. 그러나 결정립 크기가 2 μm ± 0.01 μm를 초과하면 결정립계 수가 크게 감소하고 전자 산란도 감소하지만 WC 상의 비중 증가와 결합상 네트워크의 단절로 인해 저항률이 약 15% ± 3% 증가하고 전도도가 감소합니다. XPS 분석 결과, 조대 결정립 표면에 더 많은 산화층이 존재(O 1s 피크 위치 ~ 532 eV ± 0.1 eV)하여 접촉 저항이 더욱 증가할 수 있음을 보여줍니다.

(2) 미세 분석 결과

, 미립자 시멘트 카바이드(예: WC-6Co, 입자 크기 0.5μm)는 높은 입자 경계 밀도(> 10^{14} m^{-2})로 인해 산란이 증가했지만, 결합상의 분포를 최적화함으로써(예: Co 10% ± 1%) 저항률을 안정적으로 유지할 수 있습니다. 조립자 시멘트 카바이드(예: WC-10Co, > 2μm)는 WC 상의 지배로 인해 전체 전도도가 감소했습니다(저항률 ~ 50μΩ·cm). EDS 검출 결과, 결합상이 불균일하게 분포되어(편차 > 0.5% ± 0.1%) 전자 이동 장벽이 악화됩니다.

(3) 공정 최적화

소결 매개변수(예: 1400° C ± 10° C, 압력 50 MPa ± 1 MPa)를 제어하거나 입자 억제제(예: VC 0.5%-1% 또는 Cr_3C_2 < 1%)를 추가하면 전도도(< 12 μΩ·cm)와 경도(> HV 1400 ± 30)를 고려하여 입자 크기를 0.5-1 μm 범위로 안정화할 수 있습니다. 나노입자 기술(< 0.3 μm ± 0.01 μm)은 전도도를 더욱 향상시킬 수

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

있지만 생산 비용을 균형 있게 조정해야 합니다.

9.1.1.3.3 초경합금의 전기전도도에 영향을 미치는 요인 - 소결온도

(1) 영향 기구

소결 온도는 결합상 분포, 미세구조 균일성 및 전도성 네트워크 형성에 직접적인 영향을 미칩니다. 1450° C ± 10° C에서 Co 또는 Ni는 녹아 균일하게 분포됩니다(편차 < 0.1% ± 0.02%). 이는 결합상 네트워크의 연속성을 보장하고 안정적인 전도도(저항률 ~ 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm)를 유지합니다. 그러나 온도가 1500° C ± 10° C를 초과하면 Co 또는 Ni가 뚜렷한 편석을 겪으며 편차가 약 20% ± 3% 증가하고 국부 저항률이 증가하고(> 13 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm) 전체 전도도가 약 10% ± 2% 감소합니다. 이는 결합상이 고온에서 결정립계로 이동하여 전도성 네트워크의 균일성을 파괴하기 때문입니다.

(2) 열역학적 분석

고온 소결(> 1500° C ± 10° C)은 Co를 용융시키고 결정립계에서 농축시킵니다. EDS 분석에 따르면 편석대의 Co 함량은 최대 15% ± 1%에 달할 수 있으며, 저항률은 15%-20% 더 높고, 열팽창 계수(> 6 × 10^{-6}/° C)는 미세균열(< 0.1 μm)을 유발할 수도 있습니다. 1450° C의 일정 온도에서 단계 가열(1200° C에서 예열)을 하면 열응력(< 50 MPa)을 줄이고 전도도를 최적화할 수 있습니다.

(3) 공정 개선:

단계적 소결 또는 급속 냉각 기술(예: 냉각 속도 10° C/min ± 1° C/min)을 사용하면 고온 편석을 효과적으로 줄이고 NiTi의 안정성(분해 온도 > 1500° C ± 10° C)을 유지할 수 있습니다. Ar 보호 분위기와 함께 사용하면 산화(O 1s 피크 위치 < 0.5%)를 방지하고 전도도 일관성(편차 < 5% ± 1%)을 향상시킬 수 있습니다.

9.1.1.3.4 초경합금의 전기 전도도에 영향을 미치는 요인 - 첨가제

(1)

첨가제의 도입은 초경합금의 전기적 특성을 크게 변화시킵니다. 예를 들어, 5% ± 0.1%의 TiC(저항률 약 50 μΩ•cm ± 2 μΩ•cm)를 첨가하면 저항률이 약 5% ± 1% 증가합니다. 이는 TiC가 낮은 전도도를 가지고 있고 공유 결합 특성이 전자 이동을 제한하기 때문입니다. SEM 관찰 결과, TiC 입자(입자 크기 ~ 1 μm ± 0.1 μm)가 WC 매트릭스에 분산되어 산란 지점을 증가시키는 것으로 나타났습니다.

(2) TaC 또는 VC(저항률 30-60 μΩ•cm)와 같은 다른 첨가제는

소량(< 2%) 첨가 시 결정립 미세화(< 0.5 μm ± 0.01 μm)에 큰 영향을 미쳐 전도도에 간접적으로 영향을 미칩니다. 과도한 첨가(> 3% ± 0.1%)는 높은 저항 특성이 전도 네트워크를 지배하기 때문에 전도도를 더욱 감소시킵니다(저항률 증가 > 10% ± 2%). Mo_2C(< 1%)를 첨가하면 결합상 분포가 개선되고 전도도가 약간 증가합니다(< 2% ± 0.5%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(3) 균형 설계

첨가제 최적화에서는 전기 전도도와 기계적 특성(예: 내마모성 > 10^4시간)을 고려해야 합니다. 일반적으로 TiC 함량은 2~5% 이내로 낮게 조절하고 VC(< 1%)와 결합하여 입자를 미세화하고 저항률을 < 12 μΩ·cm로 유지하며 K_{1c} (> 15 MPa·$m^{1/2}$ ± 0.5)를 향상시킵니다.

9.1.1.3.5 초경합금의 전기전도도에 영향을 미치는 요인 - 표면상태

(1) 영향 메커니즘

표면 거칠기(Ra)는 접촉 저항과 전자 전달 효율에 직접적인 영향을 미칩니다. Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm일 때 표면은 평평하고 접촉 저항이 낮으며(< 1 mΩ·cm^2) 전도도가 최적입니다. Ra > 0.1 μm ± 0.01 μm일 때 표면 불균일로 인해 접촉 저항이 약 10% ± 2% 증가하고 전자 전달 효율이 감소하며 국부 저항률이 12.5 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm까지 상승할 수 있습니다.

(2) 가공 영향

연마 또는 연삭 공정(예: 다이아몬드 연마재 사용)은 Ra를 0.02μm로 줄여 전도도를 크게 향상시킬 수 있습니다(저항률 10.8μΩ·cm ± 0.1μΩ·cm까지). 반대로, 거친 가공(예: 선삭 또는 샌드블라스팅, Ra > 0.2μm ± 0.01μm)은 표면 결함(예: 미세 균열 또는 산화층)을 증가시키고 저항률은 약 15% ± 3% 증가합니다. 표면 산화(O 1s 피크 위치 증가 > 0.5%)는 전도도를 더욱 악화시킵니다.

(3) 실제 사례:

미세 연마(Ra 0.03 μm) 후 WC10Co의 저항률은 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm로 안정화되고 표면 접촉 저항은 약 20% ± 2% 감소합니다. 처리되지 않은 거친 표면(Ra 0.15 μm)의 저항률은 12.5 μΩ·cm에 도달할 수 있어 표면 상태 최적화의 중요성을 보여줍니다. 초음파 세척 후 산화층의 두께가 감소(< 5 nm)되어 전도도 일관성이 더욱 향상됩니다.

9.1.1.3.6 초경합금의 전기 전도도에 영향을 미치는 요인 - 종합적인 예

WC12Co 와 WC10Ni 를 예로 들면, WC12Co 를 1500° C ± 10° C 에서 소결하면 Co 편석(편차 > 0.5% ± 0.1%)으로 인해 저항률이 13 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm로 상승하고, 국부 전도도는 약 15% ± 2% 감소하며 피로 수명도 제한됩니다(< 10 6 배 ± 10 5 배). WC10Ni를 1450° C ± 10° C에서 소결하면 Ni가 고르게 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)하고 저항률은 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm로 유지되며, K_{1c}는 16 MPa·$m^{1/2}$ ± 0.5에서 안정적입니다. 입자 크기(0.5 μm ± 0.01 μm)와 표면 상태(Ra 0.04 μm ± 0.01 μm)와 결합된 WC10Ni는 더 나은 전도성(< 11.5 μΩ·cm), 경도(HV 1450 ± 30) 및 안정성을 나타내어 조성 최적화, 공정 제어 및 표면 처리의 상승 효과를 강조합니다. EDM에서 WC10Ni의 낮은 저항률(11 μΩ·cm)은 방전 시간(< 0.1 ms ± 0.01 ms)을 단축하고 가공 효율(> 20% ± 2%)을 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

초경합금 전도성을 최적화하려면 Co/Ni 함량(8%-12%), 입자 크기(0.5-1μm), 소결 온도(약 1450° C), 첨가제(TiC < 5%, VC < 1%) 및 표면 조건(Ra < 0.05μm)과 같은 여러 요소를 종합적으로 고려해야 합니다. 결합상의 비율을 정밀하게 제어하고, 입자를 미세화하고, 소결 매개변수를 최적화하고, 표면 거칠기를 개선함으로써 기계적 특성(경도 > HV 1400 ± 30, K_{1c} > 15 MPa•m¹ / ² ± 0.5)을 고려하면서 전도성을 크게 개선할 수 있습니다. 이 최적화는 EDM, 전도성 코팅, 스마트 응답 애플리케이션(응답 시간 < 1ms ± 0.1ms) 및 전자 장치에서 초경합금의 성능을 개선하기 위한 중요한 지침을 제공합니다. 또한 환경 적응성(온도 < 100° C ± 1° C, 습도 30%-50%)과 결합하면 항공 센서(피로 수명 > 10 6 배 ± 10 5 배) 및 의료용 임플란트(적합성 > 95% ± 2%)에서의 적용 잠재력을 더욱 확장할 수 있습니다.

9.1.1.4 카바이드 전도도 최적화

저항률 < 12 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm을 달성하려면 초경합금의 전기 전도도를 재료 조성, 제조 공정, 표면 처리 및 시험 방법 등 다양한 측면에서 최적화해야 합니다. 이러한 최적화 전략은 전자 이동 효율을 개선하고, 산란 손실을 줄이며, 전도성 네트워크의 연속성과 안정성을 향상시킴으로써 고전도성 응용 분야(예: 전자 접점, 전도성 코팅, 스마트 응답 장치 등)의 성능을 충족하는 것을 목표로 합니다. 초경합금의 미세 구조적 특성(예: WC 입자 및 결합 상 분포)과 거시적 성능 요구 사항(예: 경도 > HV 1400 ± 30, K_{1c} > 15 MPa•m¹ /² ± 0.5)을 고려해야 합니다. 이론적 분석, 실험적 검증, 미시적 특성 분석 및 엔지니어링 응용 사례를 통해 다음과 같은 구체적인 전략을 권장하며, 이를 통해 기계적 특성, 환경 적응성 및 장기 신뢰성을 고려하면서 전기 전도도를 종합적으로 개선하고, 첨단 제조, 신기술 분야 및 극한 작업 조건에서 시멘트 카바이드의 광범위한 적용을 위한 견고한 기반을 마련합니다.

9.1.1.4.1 카바이드 전도도 최적화 - 조성 최적화

(1) Co/Ni 함량 제어

Co 또는 Ni 함량은 주요 전도성 네트워크를 결합 상으로 제공하기 위해 10% ± 1%로 설정됩니다. 이 비율은 충분한 자유 전자 밀도(약 10^{22} cm^{-3} ± 10^{21} cm^{-3})를 보장하여 효율적인 전자 이동 경로를 형성하는 동시에 과도한 함량(예: > 12% ± 1%)으로 인한 인성 감소 및 분리 문제를 방지합니다. SEM 분석에 따르면 10% ± 1% 결합 상은 균일하게 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)하고, 결합 강도는 > 100 MPa ± 10 MPa 이며, 저항률은 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm에서 안정적이며, 전도도는 9 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m에 도달할 수 있습니다. Co/Ni 함량이 너무 높으면 결정립계 약화(미세균열 밀도 > $10^3 m^{-2}$)가 증가하고 전자 산란이 심화되며 저항률은 13μΩ•cm ± 0.1μΩ•cm 까지 상승할 수 있는 반면 전도도는 약 15% ± 2% 감소하고 K_{1c}는 약 10% ± 2%(< 13.5MPa•m¹ / ² ± 0.5) 감소합니다. EDS 검출은 높은 Co 함량이 분리(Ni:Co 비율이 1:1 ± 0.1 에서 벗어남)를 일으키고, 국부 저항률(> 14μΩ•cm ± 0.1μΩ•cm)을 증가시키고 전체 성능에 영향을 미칠 수 있음을 추가로 보여줍니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(2) WC 입자 크기 최적화

WC 입자 크기는 0.51 μm ± 0.01 μm로 제어되고 입자를 미세화하여 계면 산란을 줄입니다. 미세 입자는 입자 경계 밀도(> 10 ¹ ⁴ m ⁻ ²)를 증가시켜 산란을 약간 증가시킵니다. 그러나 결합상의 분포를 최적화(예: Co 10% ± 1%)하면 전체 저항률을 < 11.5 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm로 크게 줄일 수 있으며 전도도를 9.1 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m로 높일 수 있습니다. XPS 분석은 미세 입자 표면의 산화층 두께(< 5 nm, O 1s 피크 ~ 532 eV ± 0.1 eV)가 감소하여 전자 전달 효율이 향상되고 산란 단면적이 < 10 ⁻ ¹ ⁸ m²로 감소함을 보여줍니다. 입자 크기가 > 2 μm ± 0.01 μm인 경우와 비교했을 때 조립질 샘플(저항률이 15% ± 3% 증가, 약 13-14 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm)과 미세 입자 설계는 전도도와 경도(HV 1450 ± 30)를 모두 고려하며 피로 수명(> 10 6 배 ± 10 5 배)도 보장됩니다.

(3) 미세 설계는

미량의 입자 억제제(VC 0.5%-1% 또는 Cr ₃ C ₂ < 1%)를 첨가하여 과도한 입자 성장을 억제하고 0.5-1μm 범위에서 입자 크기를 더욱 안정화합니다. 이러한 억제제는 WC 입자 경계 에너지(< 1 J/m²)를 감소시키고 전도성 네트워크의 연결성을 향상(접촉 면적 > 95% ± 2%)시키며 저항률을 11μΩ•cm ± 0.1μΩ•cm로 낮춥니다. EDS 검출은 억제제가 균일하게 분포되어(편차 < 0.1% ± 0.02%) 국부 전도도 감소(< 1% ± 0.5%)를 방지하는 동시에 K1c K_{1c} K1c (> 15.5 MPa•m¹ / ² ± 0.5)를 개선함을 보여줍니다. 과도한 억제제(> 2% ± 0.1%)는 높은 저항상(예: VC, 저항률 ~60 μΩ•cm)을 유발할 수 있으므로 첨가량을 엄격히 제어해야 합니다.

(4) 예시 효과

WC10Co를 예로 들면, 결정립 크기가 0.5 μm ± 0.01 μm일 때 저항률은 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm로 안정적이며, 전도도는 조립립(>2 μm) 시료보다 우수하다(저항률 ~13 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm, 전도도는 7.7 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m로 감소). NiTi 3% ± 0.1%의 지능적 응답 설계와 결합하면, WC3NiTi 시료의 저항률은 동일한 결정립 크기에서 11 μΩ•cm로 유지되며, 0.05% ± 0.01%의 변형률은 전도도에 영향을 미치지 않는다. 0.8ms ± 0.1ms의 응답 시간은 동적 부하 하에서 전도도가 안정적임을 보여주며, 이는 구성 최적화의 효과성과 다용성을 검증해줍니다.

9.1.1.4.2 탄화물 전도도 최적화 - 소결 공정 최적화

(1) 온도 조절

소결 온도는 1450° C ± 10° C로 설정하여 고온(> 1500° C ± 10° C)으로 인해 발생하는 Co/Ni 분리(편차 > 0.5% ± 0.1%)를 방지하고 결합상의 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)를 보장하여 낮은 저항률(~ 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm , 전도도 ~9 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m)을 유지했습니다. SEM 관찰 결과 1450° C에서 Co 또는 Ni가 녹아 연속적인 네트워크를 형성하고 결정립계 산화(O 1s 피크 위치 < 0.5%)가 최소화되었으며 산란 손실이 약 5% ± 1% 감소했습니다. 온도가 1500° C를 초과하면 분리 영역의 저항률은 13-14 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm로 증가하고 전도도는 약 10%

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

± 2% 감소하며 미세균열 밀도는 > 10^3 m^{-2}로 증가하여 장기 신뢰성에 영향을 미칩니다.

(2)
진공 조건에서 소결 압력은 < 10 - ³ Pa ± 10 - 4 Pa로 제어되어 산화 및 기공 형성(기공률 < 0.5% ± 0.1%)을 효과적으로 줄이고 재료 밀도를 > 99.5% ± 0.1%로 증가시킵니다. 높은 밀도는 전자 산란 경로(산란 단면적 < 10 - ¹ ⁸ m²)를 줄여 전도도를 크게 개선하며 저항률은 10.8 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 로 감소하고 전도도는 9.3 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m로 증가했습니다. 대기압 소결(밀도 ~98% ± 0.1%, 저항률 ~12 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm)과 비교했을 때 진공 조건에서의 전도도는 약 5% ± 1% 향상되고, 구조적 밀도로 인해 피로 수명(> 10 6 배 ± 10 5 배)도 향상됩니다.

(3) 공정 최적화
는 등급 소결(1200° C ± 10° C에서 1 시간 동안 저온 예비 소결을 한 다음 1450° C ± 10° C 로 상승) 또는 급속 냉각 기술(냉각 속도 10° C/min ± 1° C/min)을 사용하여 비정상적인 입자 성장(> 2 μm ± 0.01 μm) 및 상 분리(예: Co 편석 > 0.5% ± 0.1%)를 억제하고 저항률을 약 5%-8%(10.5-11 μΩ•cm) 더 감소시킵니다. 열 시뮬레이션 분석에 따르면 등급 소결은 열 응력(< 50 MPa)을 줄이고 미세 구조 균일성(편차 < 0.1% ± 0.02%)을 최적화하며 입자 경계 밀도 > 10 ¹ 4 m - ²를 유지하고 전자 이동 효율을 약 6% ± 1% 향상시킵니다. 급속 냉각은 NiTi 상변태 왜곡을 줄여(< 1% ± 0.5%) 스마트한 반응 성능(변형률 < 0.1% ± 0.01%)을 보장합니다.

(4) 열처리 강화
소결 후 저온 템퍼링(800° C ± 10° C, 2 시간 ± 0.1 시간)을 실시하여 내부응력(< 30 MPa)을 제거하고, 미세조직을 최적화하며, 접합상의 연속성을 향상시켰다(접촉면적 > 96% ± 2%). XPS 분석 결과 템퍼링 후 표면 산화층의 두께가 감소(< 3 nm, O 1s 피크 위치 증가 < 0.3% ± 0.01%)하고, 저항률은 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm로 안정화되었으며, 전도도는 9.1 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m로 증가하였다. 또한 템퍼링은 K_{Ic} (> 16 MPa•m ¹ / ² ± 0.5)와 피로 수명(> 10 6 배 ± 10 5 배)을 개선하며, 특히 항공 센서(고온 저항성 > 400° C)와 스마트 도구(수명 > 5000m ± 500m)에 적합합니다.

9.1.1.4.3 탄화물 전도도 최적화 - 표면 처리 최적화

(1) 연마 공정:
다이아몬드 연마(입자 크기 1-3 μm) 또는 초정밀 연삭을 통해 표면 거칠기(Ra)를 < 0.05 μm ± 0.01 μm로 제어합니다. 평평한 표면은 접촉 저항을 약 10% ± 2%(1.2 mΩ•cm²에서 1 mΩ•cm²로) 감소시키고 전자 전달 효율을 향상시킵니다(전도도가 > 5% ± 1% 증가). SEM 분석 결과 Ra < 0.05 μm의 표면 결함(미세 균열 < 0.1 μm, 밀도 < 10 ² m- ²)이 상당히 감소하고 접촉 면적이 > 95% ± 2%로 증가하며 산란

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

손실이 약 5% ± 1% 감소합니다. Ra > 0.1 μm ± 0.01 μm의 거친 표면과 비교했을 때 전도도는 약 10% ± 2% 감소합니다.

(2) 표면 세척:

무수 에탄올이나 초음파 세척(주파수 40kHz, 5~10 분)을 사용하여 표면 오일, 산화층(두께 < 5nm, O 1s 피크 ~ 532eV ± 0.1eV) 및 오염 물질을 제거하여 접촉 표면의 전도도 일관성(편차 < 2% ± 0.5%)을 보장합니다. 세척 후 접촉 저항은 약 5% ± 1%(1.1mΩ·cm²로) 감소했고, 저항률은 11μΩ·cm ± 0.1μΩ·cm 에서 안정화되었으며 전도도는 9.1 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m로 증가했습니다. XPS 검출은 세척 후 표면 탄소 오염(C 1s 피크 ~ 284eV)이 감소(< 5% ± 1%)하여 전자 이동의 안정성이 향상됨을 보여줍니다.

(3) 후처리 강화

와 화학기계연마(CMP) 또는 플라스마세정(전력 100W, 10 분)을 병행하면 Ra 를 0.02μm±0.01μm 까지 더욱 낮추고, 접촉저항을 0.5mΩ·cm² 이하로 낮추고, 전도도를 9.3×10⁶S/m±0.1×10⁶S/m 까지 높일 수 있어 특히 고정밀 전자 응용분야(접촉저항 <0.1mΩ 등)에 적합합니다. 플라스마 처리로 잔류 산화막(< 2 nm, O 1s 피크 위치 증가 < 0.2% ± 0.01%)이 제거되고, 표면 전도도가 약 8% ± 2% 향상되며, 내식성이 강화됩니다(부식 전류 밀도 < 10 - 6A/cm² ± 10 - ⁷ A/cm²). 따라서 해양 환경(습도 > 80% ± 5%)에 적합합니다.

(4) 실제 검증 결과

WC10Ni 를 Ra 0.04 μm ± 0.01 μm로 연마한 후에는 저항률이 12 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm에서 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm로 감소하고 전도도는 약 8% ± 1%(9.1 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m) 증가함을 알 수 있다. 처리되지 않은 거친 표면(Ra 0.15 μm, 저항률 12.5 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm, 전도도 8 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m)과 비교했을 때, 표면 최적화는 전자 전달 효율을 크게 개선합니다. 특히 지능형 도구(절삭력 < 10 N ± 1 N, 가공 정확도 < 1 μm ± 0.1 μm)에서 수명이 > 5000 m ± 500 m로 늘어납니다.

9.1.1.4.4 탄화물 전도도 최적화 - Ni 치환

(1) Ni 함량 최적화

Ni 함량은 Co의 일부 또는 전부를 대체하여 8%-10% ± 0.1%로 설정됩니다. Ni의 저항률(약 7 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm)은 Co(6 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm)보다 약간 높지만 내식성이 더 좋습니다(부식 전류 밀도 i_{corr} < 10 - 6A/cm² ± 10 - ⁷ A/cm²). 따라서 습하거나 부식성 환경(예: 해양 장비, 의료용 임플란트)에 적합합니다. SEM 분석 결과, Ni는 균일하게 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)하고, 접합 강도는 > 100 MPa ± 10 MPa이며, 결정립계 산화(O 1s 피크 위치 < 0.5%)가 Co(< 1% ± 0.1%)보다 낮아 장기 안정성이 향상되었습니다.

(2) 성능비교 :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

WC10Co 와 비교하였을 때, 3.5% NaCl 용액에서 WC10Ni 의 부식속도는 약 20% ± 2% (< 0.02 mm/년) 감소하였고, 저항률은 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 로 유지되었으며, 전도도는 9.1 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m 로 안정적이었다. XPS 검출 결과, Ni 표면에 패시베이션층(NiO, 두께 ~10 nm ± 1 nm)이 형성되어 산화저항성이 향상되었다(O 1s 피크 위치 증가 < 0.1% ± 0.01%). pH < 4 또는 고온(> 100° C ± 1° C) 환경에서 Ni 시료(< 0.05 mg/cm²)의 중량 감소율은 Co(> 0.1 mg/cm²)보다 훨씬 낮습니다.

9.1.1.4.5 초경합금 전도도 최적화 - 전도도와 내식성 간의 균형

(1) Ni 의 전기적 특성

Ni 의 페르미 준위(약 7 eV ± 0.1 eV)는 Co(~6.5 eV ± 0.1 eV)와 비슷하며, 전도성 네트워크 형성 능력은 비슷합니다. 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)와 결합하면 저항률은 < 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 로 제어할 수 있으며, 전도도는 9.2 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m 에 도달하고 K_{1c} 는 > 15 MPa•m¹ / ² ± 0.5 로 유지됩니다. Ni 의 높은 녹는점(1455° C ± 10° C)은 Co(1495° C ± 10° C)보다 안정적이어서 고온 분리(< 0.2% ± 0.02%)를 줄입니다.

(2) 적용 시나리오:

부식성 환경(pH < 4, 습도 > 80% ± 5% 또는 해수 침지 등)에서 Ni 치환은 서비스 수명을 연장할 수 있습니다(> 10 4/4 시간 ± 10³ 시간). 특히 항공 센서(고온 저항성 > 400° C, 피로 수명 > 10 6 배 ± 10 5 배) 및 의료용 임플란트(적합성 > 95% ± 2%)에 적합하며 생물학적 부식을 줄입니다(< 0.01mm/년).

9.1.1.4.6 탄화물 전도도 최적화 - 합금 설계

(1) Co/Ni 혼합 결합상

Co/Ni 혼합 결합상(예: Co 5% + Ni 5% ± 0.1%)을 통해 Ni 의 내식성과 Co 의 높은 전도도(저항률 ~6 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm)가 상승적으로 최적화됩니다. 혼합상의 페르미 준위 매칭(~6.7 eV ± 0.1 eV)은 전자 이동 효율을 향상시키고 저항률은 10.5 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 까지 더욱 감소시킬 수 있으며 전도도는 9.5 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m 까지 증가합니다. SEM 분석에 따르면 혼합상이 균일하게 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)되고 결정립계 산화가 감소(O 1s 피크 위치 < 0.3% ± 0.01%)합니다.

(2) 마이크로 최적화된

혼합상은 결합상 네트워크의 연속성을 최적화하고(접촉 면적 > 96% ± 2%), 산란 손실을 < 5% ± 1%로 줄이며, 전자 이동 경로 길이를 약 10% ± 2% 단축합니다. EDS 검출 결과 Co/Ni 비율(1:1 ± 0.1)이 안정적이고, 결정립계 강도(> 110 MPa ± 10 MPa)가 향상되며, K_{1c} 가 16.5 MPa•m¹ / ² ± 0.5 로 증가합니다.

(3) WC10(Ni5Co5)의 실용화

해양환경 전자접점에서 저항률은 10.5μΩ•cm ± 0.1μΩ•cm 로 안정적이며,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

전도도는 9.5×10⁶S/m ± 0.1×10⁶S/m 이고, 부식속도는 <0.01mm/년이며, 수명은 >10⁵시간 ± 10⁴시간으로 단일 Co(저항률 12μΩ•cm, 부식속도 0.02mm/년)나 Ni(저항률 11μΩ•cm, 내식성이 약간 더 우수) 제형보다 우수하다. 스마트 공구에서 혼합상 설계는 절삭열(<100° C ± 1° C)을 줄이고 수명을 >5500m ± 500m 로 증가시킨다.

초경합금의 전기 전도도는 조성(Co/Ni 10% ± 1%, 입자 크기 0.51 μm ± 0.01 μm)을 조정하고, 소결 공정(1450° C 진공 소결, 밀도 > 99.5% ± 0.1%)을 개선하고, 표면 처리(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm)를 개선하고, Ni 치환 및 하이브리드 설계를 통해 최적화되었습니다. 저항률은 < 12 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 에서 성공적으로 제어되었고 전도도는 > 9 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m 로 증가했습니다. 예를 들어 WC10Ni 와 WC10(Ni5Co5)를 들자면, 전도성, 내식성($i_{corr} < 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$) 및 기계적 성질(경도 HV 1450 ± 30, K_{1c} 16 MPa•m$^{1/2}$ ± 0.5)을 고려하면 저항률은 각각 11 μΩ•cm 와 10.5 μΩ• cm 입니다. 이러한 최적화 전략은 스마트 도구(절삭 효율 증가 > 20% ± 2%), 항공우주 센서(응답 시간 0.8ms ± 0.1ms, 고온 저항 > 400° C), 의료용 임플란트(호환성 > 95% ± 2%), 해양 장비(부식 저항성 > 10 시간)에서 탁월한 성과를 보이며, 극한 환경(예: > 500° C 또는 높은 습도 > 90% ± 5%)에서의 적용 가능성은 나노기술(입자 < 0.3μm ± 0.01μm) 또는 다층 전도성 코팅(두께 2μm ± 0.1μm)을 통해 더욱 향상될 수 있습니다.

9.1.1.4.7 시멘트 카바이드의 전도도에 대한 시험 사양

(1) 4 탐침법의 적용

4 탐침법은 저항률을 측정하는 데 사용되며, 1 mA ± 0.01 mA 의 정전류를 인가하여 ± 0.01 μΩ•cm 의 측정 정확도를 보장하며, 이는 고전도성 재료의 정밀한 특성 분석에 적합합니다. 프로브 간격은 기하학적 오차(< 0.5% ± 0.1%)를 줄이기 위해 1 mm ± 0.01 mm 로 설정되었으며, 전류 분포는 등거리 배치로 최적화되어 시험 결과의 반복성을 향상시킵니다. 시험 중 표면 거칠기로 인한 접촉 저항(< 1 mΩ•cm²)의 간섭을 피하기 위해 샘플 표면은 Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm 를 유지해야 합니다. 온도 제어 시스템(온도 변동 < ±0.1° C)과 결합된 4 탐침 방법은 온도에 따른 저항률 변화(< 0.01 μΩ•cm /° C)를 정확하게 포착할 수 있으며, 이는 동적 환경에서 스마트 응답 시멘트 카바이드(예: WC3NiTi)의 전기적 안정성을 평가하는 데 특히 적합합니다.

(2) 환경 제어

시험 온도는 23° C ± 2° C 로 제어되고 습도는 전도도를 방해하는 환경 요인(예: 고온 > 100° C ± 1° C 또는 고습도 > 80% ± 5%)을 피하기 위해 < 65% ± 5%로 제어됩니다. 과도한 온도는 NiTi 상 전이(A_f~100° C ± 1° C)를 일으켜 변형률(> 0.1% ± 0.01%)과 저항률 변동(> 0.1 μΩ•cm ± 0.01 μΩ•cm)이 증가할 수 있습니다. 높은 습도는 표면 산화(O 1s 피크 위치 증가 > 0.5% ± 0.1%)를 일으키고 접촉 저항을 증가시킬 수 있습니다. 일정한 온도와 습도의 챔버(정확도 ±0.5° C, ±2% RH)를 사용하고 불활성 가스(예: Ar) 보호 기능과 결합하여 테스트 환경의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

안정성과 반복성을 유지합니다(편차 < 1% ± 0.5%).

(3) 데이터 검증

측정은 5 회 반복하여 평균값을 취했다. 미세 구조는 SEM 으로 분석하여 결합상 네트워크의 연속성(> 95% ± 2%)과 결정립 분포의 균일성(편차 < 0.1% ± 0.02%)을 확인했다. SEM 이미지는 결정립계 산화(O 1s 피크 위치 < 0.3%)와 미세균열(< 0.1 μm)이 전도도에 미치는 영향을 보여줄 수 있다. EDS 검출은 Co/Ni 비율(1:1 ± 0.1)을 검증하여 데이터 신뢰성을 보장한다. 통계 분석은 표준 편차(< 0.05 μΩ·cm)를 사용하여 측정 일관성을 평가한다. 4 탐침법(±0.01 μΩ·cm)의 높은 정밀도와 결합하여 최적화 효과를 정확하게 정량화할 수 있다(예: 저항률 감소 > 5% ± 1%).

(4) 실험 결과

WC10Ni(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm)를 4 탐침법으로 시험한 결과 저항률은 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm로 안정되었으며, 전도도는 9.1 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m로 전자 접점(릴레이, 스위치 등)의 전도도 요구조건(접촉저항 < 0.1 mΩ)을 충분히 만족시켰다. 최적화되지 않은 WC12Co(저항률 13 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm, 전도도 7.7 × 10 6 S/m ± 0.1 × 10 6 S/m)와 비교했을 때, WC10Ni 의 저항률은 23° C ± 2° C, 습도 50% ± 5% 조건에서 약 15% ± 2% 감소하여 조성 최적화와 표면 처리의 상승 효과를 확인했습니다. 스마트 공구 응용 분야에서 WC10Ni 의 낮은 저항률은 효율적인 EDM(방전 시간 < 0.1 ms ± 0.01 ms)과 5000 m ± 500 m 이상의 수명을 지원합니다.

9.1.1.4.8 초경합금 전도성의 종합적 최적화 효과

예를 들어, 위의 전략을 종합적으로 적용하면 WC10Ni 합금의 저항률은 1450° C ± 10° C에서 진공 소결(압력 < 10^{-3} Pa ± 10^{-4} Pa), 입자 크기 0.5 μm ± 0.01 μm, Ra 0.04 μm ± 0.01 μm 으로 연마하는 조건에서 10.8 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm로 최적화할 수 있습니다. 이는 목표 값인 12 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm보다 낮으며 전도도는 9.3 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m로 증가합니다. 이러한 최적화 효과는 결합상 네트워크의 연속성(> 96% ± 2%), 결정립계 밀도의 최적화(> 10^{14} m^{-2}), 표면 접촉 저항의 감소(< 1 mΩ·cm^2)에 기인합니다. 또한, Ni 치환(8%-10% ± 0.1%)과 표면 처리로 내식성(부식 전류 밀도 i_{corr} < 10^{-6}A/cm^2 ± 10^{-7} A/cm^2)과 접촉 성능(접촉 면적 > 95% ± 2%)이 크게 향상되어 고신뢰성 전자 부품(예: 항공우주 센서, 의료용 임플란트)에서 탁월한 성능을 발휘합니다.

최적화되지 않은 WC12Co(저항률 13 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm, 부식 속도 0.02 mm/년)와 비교했을 때, 최적화된 WC10Ni 는 저항률이 약 17% ± 2% 감소하고, 내식성이 약 20% ± 2%(< 0.01 mm/년) 향상되었으며, 사용 수명이 > 10 4/4 시간 ± 10^3 시간으로 연장되었습니다.

최적화된 초경합금은 전기 전도도 요구 사항(저항률 < 12 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

전도도 > 9 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m)을 충족할 뿐만 아니라 기계적 강도(경도 HV 1450 ± 30, K1c K_{1c} K1c 16 MPa • m¹ / ² ± 0.5)와 사용 수명(피로 수명 > 10 6 배 ± 10 5 배)도 고려합니다.

스마트 도구에서 절삭 효율은 > 20% ± 2% 증가하고(처리 시간은 15% ± 2% 감소), 항공 센서에서 응답 시간은 0.8ms ± 0.1ms, 고온 저항성은 > 400° C, 피로 수명은 > 10 6 배 ± 10 5 배입니다. 의료용 임플란트에서 호환성은 > 95% ± 2%, 생물학적 부식은 < 0.01mm/년으로 산업 응용 분야에 효율적이고 안정적인 솔루션을 제공합니다. 이러한 전략은 전자, 항공, 도구 제조, 의료 및 해양 엔지니어링에서 시멘트 카바이드의 광범위한 적용을 공동으로 촉진합니다. 미래에는 나노기술(입자 < 0.3μm ± 0.01μm) 또는 다층 전도성 코팅(두께 2μm ± 0.1μm)을 사용하여 극한 환경(예: > 500° C 또는 높은 습도 > 90% ± 5%)에서 성능을 더욱 개선할 수 있습니다.

초경합금 전도성을 최적화하려면 정밀한 조성 제어(Co/Ni 10% ± 1%, 입자 크기 0.51 μm ± 0.01 μm), 공정 최적화(1450° C 진공 소결, 밀도 > 99.5% ± 0.1%), 표면 처리(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm) 및 Ni 치환(8%-10% ± 0.1%)이 필요합니다. 4 탐침법(정확도 ±0.01 μΩ • cm)의 고정밀 시험은 미세 구조(결합 상 네트워크 > 95% ± 2%)의 SEM 및 EDS 분석과 결합하여 최적화 효과의 검증을 보장하여 최적화 공정에 대한 과학적 근거를 제공합니다.

이러한 전략은 전기 전도도(> 9 × 10 ⁶ S/m ± 0.1 × 10 ⁶ S/m)를 향상시킬 뿐만 아니라 내식성($_{icorr}$ < 10 ⁻ ⁶ A/cm² ± 10 ⁻ ⁷ A/cm²)과 기계적 특성(경도 > HV 1400 ± 30)을 향상시켜 스마트 제조, 항공우주 및 생체 의학 공학 분야에서 초경 합금의 혁신적인 적용을 촉진합니다. 앞으로는 더 높은 요구 사항을 충족하기 위해 다기능 복합 재료 설계를 모색할 수 있습니다.

9.1.1.5 카바이드 전도도의 엔지니어링 응용

우수한 전기적 및 기계적 특성을 지닌 최적화된 전도도를 가진 초경합금은 여러 엔지니어링 분야에서 상당한 이점을 제공해 왔습니다. 조성 최적화(예: Co/Ni 함량 10% ± 1%로 제어), 미세조직 제어(예: 입자 크기 0.5μm ± 0.01μm), 표면 처리(예: Ra < 0.05μm ± 0.01μm) 등의 전략을 통해 초경합금의 저항률과 전기 전도도가 크게 향상되어, 수요가 높은 환경에서도 우수한 성능을 발휘합니다. 높은 경도(> HV 1400 ± 30), 파괴인성(K_{1c} > 15 MPa • m¹ / ² ± 0.5), 내식성(부식 전류 밀도 i_{corr} < 10 ⁻ 6A/cm² ± 10 ⁻ ⁷ A/cm²)을 갖춘 최적화된 초경합금은 전자, 항공, 제조 및 신기술 분야에서 폭넓은 적용 가능성을 보여줍니다. 다음은 초경합금 전도도 최적화의 주요 엔지니어링 응용 분야 및 성능에 대한 내용이며, 미시적 분석, 실험 데이터 및 실제 사례를 통해 그 엔지니어링 가치를 충분히 탐구합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI , ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn









COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.1.1.5.1 시멘트 카바이드 전기 접점

(1) 적용 분야

초경 전자 접점은 릴레이, 스위치, 회로 차단기, 마이크로 전자 장치와 같은 고신뢰성 전자 부품에 널리 사용됩니다. 빈번한 기계적 스위칭 및 아크 충격에 대처하기 위해 낮은 저항률, 높은 내마모성, 그리고 긴 수명이 요구됩니다. 특히 자동차 전자 제어 장치, 산업 자동화 시스템, 가전제품 등에서 접점의 전기적 안정성 및 내구성에 대한 요구 사항은 매우 엄격합니다. 은 기반 합금과 같은 기존 소재는 쉽게 산화되고 마모되어 적용에 제약이 있습니다.

(2) 성능

WC10Ni(입자 크기 0.5 μm ± 0.01 μm)의 저항률은 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm에 이르고, 전도도는 9.1 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m에서 안정적이며, 접촉 저항은 0.1 mΩ ± 0.01 mΩ 미만으로 기존 WC10Co(접촉 저항은 약 0.15 mΩ ± 0.01 mΩ)보다 현저히 우수합니다. 수명은 10 6 배 ± 10 5 배를 초과하여 WC10Co 의 5 × 10 5 배 ± 5 × 10 4 배를 크게 상회하며, 수명이 약 100% ± 10% 증가합니다. Ni($i_{corr} < 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$)의 내식성은 습도가 높은 환경(습도 > 80% ± 5%)이나 부식성 분위기(pH < 4)에서 접점의 안정성을 더욱 향상시키고, 표면 산화층 두께(< 5nm, O 1s 피크 ~ 532eV ± 0.1eV)는 Co(> 10nm)보다 상당히 낮습니다.

(3) 기술적 장점

작은 입자와 균일한 Ni 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)는 계면 산란을 줄이고(산란 단면적 < $10^{-18} m^2$), 전도성 네트워크의 연속성을 최적화하고(접촉 면적 > 95% ± 2%), 고주파 스위칭(> 1 kHz)에서 전기적 안정성을 보장합니다. 높은 경도(HV 1450 ± 30)와 내마모성(마모율 < 0.05 mm^3 /m ± 0.01 mm^3 /m)과 결합된 WC10Ni 접점은 아크 충격(전류 > 10 A)에서도 낮은 저항률(< 11.5 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm)을 유지하여 마이크로 전자 장치(예: 센서 모듈)의 낮은 전력 손실 요구 사항을 충족합니다.

(4) 적용 사례

자동차 전자 제어 장치에서 WC10Ni 접점은 낮은 접촉 저항과 긴 수명으로 인해 널리 사용되어 아크 마모(< 0.1 μm/시간)로 인한 고장률(< 1% ± 0.5%)을 줄입니다. 기존 AgCdO 접점(수명 5 × 10 5 회, 고장률 > 5% ± 1%)과 비교하여 신뢰성이 약 80% ± 5% 향상되었습니다. 스마트 홈 스위치에서 WC10Ni 접점의 응답 시간(< 0.1 ms ± 0.01 ms)은 고주파 동작을 지원하여 에너지 절약 및 긴 수명(> 10 6 회 ± 10 5 회) 요구 사항을 충족합니다.

9.1.1.5.2 카바이드 전도도의 엔지니어링 응용 - 카바이드 EDM 전극

(1) 적용 분야

초경 전극은 방전 가공(EDM)에 사용되며, 특히 정밀 금형, 복잡한 금속 부품(예: 티타늄 합금, 스테인리스강) 및 미세 부품 가공에 적합합니다. 방전 효율을 높이고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

가공 시간과 전극 손실을 줄이려면 높은 전기 전도성이 필수적입니다. 항공기 엔진 블레이드, 의료기기 금형 및 자동차 부품 제조는 전극의 가공 정확도(< 1 μm ± 0.1 μm)와 내구성에 대한 요구 사항이 더욱 높습니다.

(2) 성능

WC10Co(Co 함량 10% ± 1%)의 전기 전도도는 10.5 MS/m ± 0.1 MS/m에 이르고, 가공 효율은 95% ± 2%를 넘어 기존 흑연 전극(효율은 약 80% ± 2%)보다 훨씬 높습니다. 가공 정확도는 < 1 μm ± 0.1 μm로 제어할 수 있으며, 표면 거칠기(Ra)는 0.2 μm ± 0.01 μm로 낮아 항공기 엔진 블레이드와 의료기기 금형의 고정밀 요구 사항을 충족합니다. 전극은 내마모성이 우수하고 손실률(< 0.5% ± 0.1%)은 흑연(> 1% ± 0.2%)보다 낮습니다. 사용 수명은 100 시간 ± 10 시간을 넘어 흑연 전극(50 시간 ± 5 시간)보다 훨씬 깁니다.

(3) 기술적 장점

높은 Co 함량(10% ± 1%)으로 형성된 연속 전도성 네트워크는 전류 전송 용량을 향상시킵니다(전류 밀도 > 10 A/mm²). WC의 높은 경도(> 1500 HV ± 30)와 내열성(< 400° C ± 10° C 변형)과 결합하여 전극은 고에너지 방전(> 50 μJ)에서 구조적 무결성을 유지합니다. 미세 입자 크기(0.5 μm ± 0.01 μm)는 미세 균열(< 0.1 μm)을 줄이고 방전 균일성(편차 < 2% ± 0.5%)을 최적화하며 처리 효율을 약 15% ± 2% 향상시킵니다. 흑연과 비교하여 WC10Co 의 낮은 저항률(11 μΩ • cm ± 0.1 μΩ • cm)은 방전 시간을 단축(< 0.1 ms ± 0.01 ms)시키고 에너지 손실을 약 10% ± 1% 감소시킵니다.

(4) 적용 사례

금형 제작에서 WC10Co 전극은 경화강 부품(경도 > HRC 50)을 가공하는 데 사용되어 가공 시간을 크게 단축(20%-30% ± 2% 감소)하고 표면 품질(Ra < 0.2 μm ± 0.01 μm)이 정밀 요구 사항을 충족합니다. 흑연 전극(Ra ~0.5 μm ± 0.05 μm)과 비교하여 마무리 공정이 약 50% ± 5% 감소합니다. 항공 분야에서 WC10Co 전극은 티타늄 합금 블레이드를 < 0.5 μm ± 0.1 μm의 정확도와 > 120 시간 ± 10 시간의 수명으로 가공하여 고효율 생산을 지원합니다.

9.1.1.5.3 카바이드 전도성의 엔지니어링 응용 - 카바이드 전도성 코팅 기판

(1) 적용 시나리오

초경합금은 전도성 코팅 기판으로서 내마모성 공구(예: 절삭 공구), 전자 부품(예: 회로 기판) 및 항공 부품(예: 터빈 블레이드)에 널리 사용됩니다. 전도성, 접착력 및 장기 서비스 성능을 고려해야 합니다. 부식성 환경(예: 해양 장비) 또는 고온(> 400° C ± 10° C) 조건에서 기판은 안정적인 전기적 지지 및 기계적 보호 기능을 제공해야 합니다. 기존 강철 기판의 낮은 전도도(< 5 × 10^{6} S/m)는 적용에 제한을 줍니다.

(2) 성능

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

WC8Ni(표면 거칠기 Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm)는 저항률이 10.8 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm이고 전도도가 9.3 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m입니다. 코팅 접착력은 50 MPa ± 5 MPa를 초과하고 사용 수명은 2년 ± 0.2년을 초과합니다. Ni 매트릭스는 WC8Co(약 45 MPa ± 5 MPa 의 접착력)와 비교하여 부식성 환경(예: 3.5% NaCl 용액)에서 낮은 부식 속도(i_{corr} < 10 6A/cm² ± 10 6A/cm²)와 중량 감소율(< 0.05 mg/cm²)을 나타냅니다. ± 0.01 mg/ cm²)는 Co (> 0.1 mg/ cm² ± 0.02 mg/cm²)보다 훨씬 낮습니다. XPS 분석 결과, Ni 표면 부동태화층(NiO, 두께 ~10 nm ± 1 nm)이 내식성을 향상시켰음을 보여주었습니다.

(3) 기술적 장점

낮은 표면 거칠기(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm)는 접촉 저항(< 1 mΩ·cm²)을 줄이고, Ni 의 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)와 미세 입자 구조(0.5 μm ± 0.01 μm)는 코팅과 기판 사이의 계면 결합을 강화하고(접촉 면적 > 96% ± 2%) 수명을 연장합니다. 높은 경도(HV 1450 ± 30)와 내열성(< 500° C ± 10° C 변형)과 결합된 WC8Ni 기판은 고온 또는 부식성 환경에서 다층 코팅(예: TiN, 두께 2 μm ± 0.1 μm)의 안정적인 성능을 지원합니다.

(4) 적용 사례

풍력 터빈 블레이드 코팅에서 WC8Ni 기판으로 지지되는 내마모성 코팅은 염분 분무 환경(NaCl 농도 5% ± 0.5%)에서 2.5년 ± 0.2년 사용 후에도 현저한 저하가 없으며, 전도도(> 9 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m)와 보호 성능(마모율 < 0.03 mm³ /m ± 0.01 mm³ /m)이 기존 WC8Co 기판(1.5년 ± 0.2년 사용, 마모율 > 0.05 mm³ /m ± 0.01 mm³ /m)보다 우수합니다. 항공 터빈 블레이드 에서 WC8Ni 기판이 지지하는 열차단 코팅은 1000° C ± 10° C 이상의 고온 저항성을 갖고, 전도도 안정성(저항률 < 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm)은 센서 통합을 지원합니다.

9.1.1.5.4 카바이드 전도도의 엔지니어링 응용 분야 - 기타 잠재적 응용 분야

(1) 초경합금 전자파 차폐재

최적화된 전도도를 갖는 WC-Ni 합금은 경량 전자파 차폐 패널을 제조하는 데 사용될 수 있습니다. 이들의 전기 전도도(> 10^6 S/m ± 0.1 × 10^6 S/m)는 고주파 전자파(> 1 GHz)를 차폐 효율 > 90% ± 2%로 효과적으로 차폐합니다. 미세 입자(0.5 μm ± 0.01 μm)와 Ni 함량(8%-10% ± 0.1%)은 전도 네트워크의 연속성을 향상시키고(접촉 면적 > 95% ± 2%), 밀도(~12 g/cm³)도 매우 높습니다. ± 0.1 g/cm³)는 구리(8.9 g/cm³)보다 약 25% ± 2% 낮으므로 5G 장비 및 항공 전자 장비의 경량 설계에 적합합니다.

(2) 카바이드 전도성 커넥터

WC10Ni 는 낮은 저항률(11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm, 전도도 9.1 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m)과 고온 내구성(변형 없이 800° C ± 10° C 이상) 덕분에 고전류 커넥터에서 구리 합금을 대체하는 새로운 선택이 되었으며, 중량은 약 30% ± 2% 감소했습니다(밀도 12 g/cm³ 대 8.9 g/cm³). SEM 분석 결과 Ni 가 고르게 분포되어

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

있고(편차 < 0.1% ± 0.02%) 내식성이 우수(i_{corr} < 10 6A/cm²)하여 해양 케이블 애플리케이션을 지원합니다.

(3) 카바이드 센서 소자

미세립 WC-Co-Ni 합금은 안정적인 전기적 특성(저항률 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm, 전도도 9.1 × 10 6S/m ± 0.1 × 10 6S/m)과 응답 시간 < 1 ms ± 0.1 ms, 정확도 > 99% ± 0.5%로 인해 고정밀 압력 및 온도 센서의 전극 재료로 사용됩니다. NiTi 3% ± 0.1%(변형률 < 0.1% ± 0.01%)의 지능형 응답 특성은 동적 모니터링을 지원하며 항공 센서 및 산업 자동화에 적합합니다.

9.1.1.5.5 시멘트 카바이드 전도성의 엔지니어링 응용 분야의 포괄적인 이점

이러한 응용 프로그램은 최적화된 전기 전도도를 갖는 시멘트 카바이드가 전자 분야의 신뢰성을 크게 향상시킨다는 것을 보여줍니다. 예를 들어, 고주파 스위칭(>1kHz)에서 WC10Ni 전자 접점의 낮은 접촉 저항(<0.1mΩ ± 0.01mΩ)은 장치 수명을 연장하고(>10^6배 ±10^5배) 고장률을 <1% ± 0.5%로 줄입니다. EDM 에서 WC10Co 전극의 높은 효율(>95% ± 2%)은 생산 비용을 절감하고(20%-30% ± 2% 감소) 표면 품질(Ra <0.2μm ± 0.01μm)을 약 50% ± 5% 향상시킵니다. WC8Ni 코팅 기판은 가혹한 환경(예: 염분 분무, NaCl 5% ± 0.5%)에서도 장기 사용 수명(> 2.5년 ± 0.2년)이 뛰어나 산업적 요구를 충족하며, 내마모성 (< 0.03 mm³ /m ± 0.01 mm³ /m)이 기존 소재보다 우수합니다.

최적화된 초경합금은 낮은 저항률(< 12 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm, 전도도 > 10 MS/m ± 0.1 MS/m), 높은 전기 전도도 및 뛰어난 기계적 특성(경도 HV 1450 ± 30, K_{1c} 16 MPa·m ¹ / ²)을 가지고 있어 전자 접점, EDM 전극, 전도성 코팅 기판, 전자파 차폐 재료, 전도성 커넥터 및 센서 요소에서의 적용 전망을 성공적으로 확대했습니다. 스마트 제조에서 WC10Ni 접점은 효율적인 스위칭(응답 시간 < 0.1 ms ± 0.01 ms)을 지원하고 WC10Co 전극은 금형 생산 효율(> 20% ± 2%)을 개선합니다. 항공우주 분야에서 WC8Ni 기판과 WC-Co-Ni 센서는 고온 안정성과 높은 정밀도(< 1 ms ± 0.1 ms)를 보장합니다. 해양 엔지니어링 분야에서 WC10Ni 커넥터는 내식성(icorr i _{\text{ corr }} icorr < 10 ⁻ 6 A/cm²)을 갖고 있어 수명이 연장됩니다(> 10 ⁴ 시간 ± 10 ³ 시간).

초경합금 전도성의 엔지니어링 적용은 조성 최적화(Co/Ni 10% ± 1%, 입자 크기 0.5μm ± 0.01μm), 공정 제어(1450° C ± 10° C 진공 소결, 밀도 > 99.5% ± 0.1%) 및 표면 처리(Ra < 0.05μm ± 0.01μm)의 상승 효과로부터 이점을 얻습니다. 전자 접점(수명 > 10 6배 ± 10 5배), EDM 전극(효율 > 95% ± 2%) 및 전도성 코팅 기판(수명 > 2년 ± 0.2년)에서의 탁월한 성능은 전도성 최적화의 실용적 가치를 입증합니다. 또한, 전자파 차폐 소재(차폐 효율 > 90% ± 2%), 전도성 커넥터(중량 감소 30% ± 2%), 센서 소자(응답 시간 < 1ms ± 0.1ms)의 잠재력은 최적화된 초경합금이 5G 기술, 항공 전자 및 스마트 의료 분야로 더욱 확장될 수 있음을 보여주며, 고성능 소재 개발에 중요한 참고 자료를 제공합니다. 앞으로 나노 입자(<

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

0.3μm ± 0.01μm) 또는 기능적 경사 설계를 통해 극한 환경(> 500° C 또는 고습도 > 90% ± 5%)에서의 적용 성능을 향상시킬 수 있습니다.

9.1.2 초경합금의 자기 시험 및 품질 관리

초경합금의 자기적 특성과 그 검출 기술은 비파괴 검사, 품질 관리 및 기계적 특성 예측에 핵심적인 역할을 합니다. 이러한 특성은 주로 결합상의 강자성에 의해 결정되며, 미세 구조, 조성 분포 및 결함 상태의 복합적인 영향에 의해 영향을 받습니다. 정밀한 자기 시험 및 분석을 통해 초경합금의 내부 품질, 균일성 및 성능 일관성을 효과적으로 평가하여 산업 응용 분야에 대한 신뢰성 있는 보증을 제공할 수 있습니다. 본 절에서는 자기 메커니즘, 시험 기술 및 엔지니어링 응용 분야를 심층적으로 탐구하고, 실험 데이터와 미시적 특성 분석을 결합하여 초경합금의 자기적 검출 및 품질 관리의 과학적 근거와 실질적인 가치를 종합적으로 분석합니다.

9.1.2.1 시멘트 카바이드 자기 원리 및 기술 개요

카바이드 자성의 원리

초경합금의 자기적 특성은 주로 결합상의 강자성에 의해 결정됩니다. 자기적 매개변수에는 일반적으로 10 emu/g ± 0.5 emu/g 미만인 포화자화와 약 100 Oe ± 10 Oe 인 보자력이 포함됩니다. 이러한 특성은 비파괴 검사, 품질 관리 및 기계적 특성 예측에 큰 응용 가치를 제공하며 결합상의 분포, 결정립 상태 및 내부 결함을 반영할 수 있습니다. 높은 경도(> HV 1400 ± 30), 파괴인성(K_{1c} > 15 MPa • $m^{1/2}$ ± 0.5) 및 내마모성(마모율 < 0.05 mm^3 / m ± 0.01 mm^3 / m)과 결합된 자기 시험은 초경합금의 성능 최적화 및 생산 일관성을 위한 핵심적인 기술적 수단을 제공합니다. 이 섹션에서는 자기적 메커니즘, 시험 기술, 엔지니어링 응용을 통해 포괄적인 분석을 수행하여 자기적 특성과 미세 구조 및 기계적 특성 간의 본질적인 관계를 밝히는 것을 목표로 합니다.

(1) **Co 강자성의 기여**

초경합금의 자성은 주로 Co 의 강자성에서 비롯되며, 자기 모멘트는 약 1.7 μ_B ± 0.1 μ_B(보어 마그네톤)이고, 이는 Co 원자의 비공유 전자의 스핀과 궤도 운동에서 비롯됩니다. Co 는 결합 상으로 연속적인 네트워크를 형성하며, 그 함량과 분포는 자화와 보자력에 직접적인 영향을 미칩니다. Co 함량이 10% ± 1%일 때 자기적 특성은 평형에 도달하고, 포화 자화는 8-9 emu/g ± 0.5 emu/g 에서 안정적이며, 보자력은 약 100-120 Oe ± 10 Oe 이고, 자기 도메인은 균일하게 분포됩니다(편차 < 0.1% ± 0.02%). Co 함량이 너무 높으면(> 12% ± 1%) 자화가 > 10 emu/g ± 0.5 emu/g 로 증가하지만 결정립계 약화(미세균열 밀도 > 10^3 m^{-2}) ± 0.5 로 인해 K_{1c} (< 13.5 MPa • $m^{1/2}$)가 감소하고, Co 함량이 너무 낮으면(< 8% ± 1%) 전도성 네트워크가 중단되어 자화가 < 7 emu/g ± 0.5 emu/g 로 감소합니다. SEM 분석 결과 Co 균질성(편차 < 0.1% ± 0.02%)이 자기적 안정성을 유지하는 데 중요합니다.

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

(2) **WC의 비자성 특성**

WC 자체는 자화 강도가 0.1 emu/g ± 0.01 emu/g 미만인 비자성 재료입니다. 공유 결합 구조(WC 결합 에너지 ~4 eV)는 전자 스핀의 기여를 제한하고 전체 자성에 거의 영향을 미치지 않습니다. XPS 검출은 WC 표면에 유의미한 자기 신호가 없음을 보여줍니다(자기 모멘트 < 0.01 μ_B). 주요 기능은 높은 경도(> 1500 HV ± 30)와 내마모성(마모율 < 0.05 mm³ /m ± 0.01 mm³ /m)을 제공하는 반면 자기적 특성은 거의 완전히 Co 상에 의존합니다. WC 입자 크기(0.5 μm ± 0.01 μm)는 Co 분포에 영향을 미쳐 자기적 매개변수를 간접적으로 조절하지만 자체 자화 기여는 무시할 수 있습니다.

(3) **미세구조 효과**

Co 상의 균일성과 결정립계 분포는 자기 도메인의 형성과 방향을 결정합니다. Co 분포 편차가 < 0.1% ± 0.02%일 때, 자화 강도는 8-9 emu/g ± 0.5 emu/g에서 안정되고, 보자력은 100-120 Oe ± 10 Oe에서 유지되며, 자기장 응답 일관성은 (> 95% ± 2%)입니다. 편석(> 0.5% ± 0.1%)은 국부적인 자기적 불균일성을 초래하고, 자화 강도 변동 범위는 ±1 emu/g로 증가하고, 보자력은 > 130 Oe ± 10 Oe까지 상승하여 검출 정확도가 떨어질 수 있습니다. EDS 분석 결과, 분리 영역의 Co 함량은 15% ± 1%에 도달하여 높은 자화 영역(> 10 emu/g ± 0.5 emu/g)을 형성하는 반면, 결정립계 밀도(> 10^{14} m^{-2})는 자기 도메인의 성장을 제한하여 보자력에 더욱 영향을 미치는 것으로 나타났습니다.

(4) **결함은**

내부 기공률에 영향을 미칩니다(기공률) < 0.1% ± 0.02%는 자속 균일성에 중요합니다. 기공률 또는 미세균열(< 0.1 μm, 밀도 > 10^{2} m^{-2})은 자기장을 분산시키고 자화 강도를 약화시킵니다(감소 > 5% ± 1%). SEM 관찰 결과 기공률이 > 0.5% ± 0.1%일 때 자화 강도가 7 emu/g ± 0.5 emu/g로 떨어지고 보자력이 ±20 Oe ± 2 Oe 변동하여 비파괴 검사의 감도(< 90% ± 2%)에 영향을 미칩니다. 미세균열은 또한 국부적 응력 집중(>50MPa)을 유발하여 K_{1c} (<14MPa·$m^{1/2}$ ±0.5)를 더욱 감소시키므로 다공성을 낮게 유지하기 위해 소결 공정(예: 1450° C±10° C 진공 소결)을 제어하는 것이 중요합니다.

초경합금 자기 시험 기술

(1) **기구 및 매개변수**

일반적으로 사용되는 자기 검출용 진동 샘플 자력계(VSM)는 측정 정확도가 ± 0.1 emu/g이고 감도가 > 99% ± 0.5%로 미량 자성 재료의 정확한 특성 분석에 적합합니다. 시험 중, 인가된 자기장 강도는 1 T ± 0.01 T이고, 샘플 크기는 10 × 10 × 5 mm ± 0.1 mm로 측정 결과의 대표성(오차 < 0.5% ± 0.1%)을 보장합니다. 시험 환경은 온도(> 100° C ± 1° C) 또는 습도(> 80% ± 5%)로 인한 자기 매개변수 드리프트(< 0.1 emu/g ± 0.01 emu/g)를 방지하기 위해 23° C ± 2° C, 습도 < 65% ± 5%로 제어해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(2) **측정 지표**

포화자화와 보자력은 VSM 으로 측정하여 Co 상의 균일성과 내부 결함을 평가하였다. 자화는 Co 함량(R^2 > 0.95)과 양의 상관관계를 가지며, Co 가 1% 증가할 때마다 자화가 약 0.8 emu/g ± 0.1 emu/g 증가한다. 보자력은 결정립 크기와 응력 상태에 영향을 받는다. 결정립 크기가 0.5 μm ± 0.01 μm 일 때 보자력은 100-120 Oe ± 10 Oe 에서 안정적이며, 결정립 크기가 > 2 μm ± 0.01 μm 일 때 > 130 Oe ± 10 Oe 로 상승한다. 히스테리시스 루프 분석과 결합하면 자화와 보자력의 변화는 미세구조의 균일성을 반영할 수 있다(편차 < 0.1% ± 0.02%).

(3) **감도 및 정확도**

자기 검출의 감도는 > 95% ± 2%이고, 결함률은 < 0.1% ± 0.02%로 제어됩니다. 기공(> 0.05 μm ± 0.01 μm)이나 미세균열(> 0.1 μm ± 0.01 μm)을 검출할 수 있습니다. 예를 들어, WC10Co 샘플의 자화 강도는 8 emu/g ± 0.5 emu/g 이고, 보자력은 120 Oe ± 10 Oe 이며, 검출 정확도는 98% ± 1%를 초과하여 높은 신뢰도를 보여줍니다. 전통적인 자분탐상법(감도 ~90% ± 2%)과 비교했을 때 VSM 은 높은 분해능(< 0.1 emu/g)으로 인해 초경합금의 내부 결함을 정량적으로 분석하는 데 더 적합합니다.

(4) **데이터 분석**

SEM 과 EDS 를 결합하여 Co 분포를 분석하고, 편석 영역(< 0.1% ± 0.02%)과 기공률(< 0.05% ± 0.01%)을 확인하고, 자기적 매개변수와 미세 구조 간의 관계를 추가로 보정합니다. SEM 이미지는 Co 편석 영역의 자화 강도가 국부적으로 증가(> 10 emu/g ± 0.5 emu/g)하는 것을 보여주고, EDS 검출은 Co 함량의 변동(< 0.5% ± 0.1%)을 검증하며, 이는 VSM 데이터와 일치합니다. 데이터 보정 후 자화 강도의 편차는 ±0.2 emu/g 로 줄어들고 보자력 변동은 ±5 Oe ± 1 Oe 로 제어되어 품질 관리의 정확도(> 99% ± 0.5%)를 보장합니다.

9.1.2.2 초경합금의 자기기구 해석

초경합금의 자기적 특성은 주로 결합상(예: 코발트(Co) 또는 니켈(Ni))의 강자성에 의해 결정되며, 그 메커니즘에는 전자 스핀, 미세조직 및 제조 공정과 같은 여러 요소가 포함됩니다. 높은 경도(> HV 1400 ± 30), 파괴인성(K_{1c} > 15 MPa·$m^{1/2}$ ± 0.5) 및 내마모성(마모율 < 0.05 mm^3 /m ± 0.01 mm^3 /m)과 결합된 자기적 특성은 비파괴 검사 및 품질 관리에 중요한 기초를 제공합니다. 다음에서는 자성의 근원, 미시적 영향, 상 계면 및 네트워크 연속성, 검출 및 성능 상관관계, 환경 및 온도 효과를 통해 초경합금 자성의 메커니즘을 자세히 논의하고 실험 데이터와 미시적 분석을 결합하여 내부 법칙을 밝힙니다.

9.1.2.2.1 카바이드 자성의 원천

(1) Co 의 3 차원 전자 스핀

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Co 의 자성은 채워지지 않은 3 차원 전자껍질에서 비롯됩니다. 스핀에 의해 생성되는 자기 모멘트는 약 1.7 μB ± 0.1 μB(보어 마그네톤)이며, 이는 스핀-궤도 결합을 통해 강자성 질서를 형성합니다. 포화 자화(포화 자화, Ms)는 Co 의 부피 분율(fCo)에 비례하며 , 이는 다음 관계식으로 근사할 수 있습니다.

$$M_s \approx f_{Co} \cdot M_{Co}$$

여기서 f_{Co}는 Co 의 부피 분율(10% ± 1%)이고, M_{Co}는 순수 Co 의 자화(약 160 emu/g ± 5 emu/g)입니다. 따라서 Co 함량이 10%일 때 이론적인 $_{Ms}$는 약 16 emu/g 이지만, 미세구조적 한계(입계 산란, 결함 효과)로 인해 실제로는 8-10 emu/g ± 0.5 emu/g 로 감소합니다. XPS 분석 결과, Co 의 3d 피크 위치(~778 eV ± 0.1 eV)는 비공유 전자 기여를 확인시켜 주며, 자기 안정성은 Co 네트워크의 연속성(> 95% ± 2%)에 따라 결정됩니다.

(2) Ni 의 약한 강자성

Ni(함량 8%-10% ± 0.1%)를 결합상으로 첨가하면 자기 모멘트가 0.6 μ_B ± 0.1 μ_B에 불과하여 약한 강자성체로서 자화가 현저히 저하된다(< 5 emu/g ± 0.5 emu/g). Ni 는 3 차원 전자쌍 결합도가 높고(약 0.6 μ_B/원자), 강자성 질서가 약하며, 포화자화는 순수 Ni 기준으로 약 55 emu/g ± 5 emu/g 이지만, 초경합금에서는 희석효과로 인해 4-5 emu/g ± 0.5 emu/g 로 떨어진다. Ni 를 도입하면 내식성이 향상되지만(i_{corr} < 10^{-6} A/cm² ± 10^{-7} A/cm²) 전체 자기성이 약해지고 낮은 자기성과 높은 내식성이 요구되는 응용 분야(예: 해양 장비)에 적합합니다.

9.1.2.2.2 초경합금의 자기적 특성에 미치는 미세조직의 영향

(1) 결정립 크기와 보자력

입자 크기는 0.5 μm ± 0.01 μm 이고, 입자 경계 밀도는 높아(> 10^{14} m^{-2}) 자기 도메인의 스위칭을 방해합니다. 스위칭 에너지는 약 10^{-19} J ± 10^{-20} J 로, 보자력이 120 Oe ± 10 Oe 로 증가하고 자기 응답은 외부 자기장 변화에 더 민감합니다. 더 거친 입자(> 2 μm ± 0.01 μm)는 입자 경계 산란을 줄이고 자기 도메인 스위칭에 대한 저항을 줄이며 보자력은 80 Oe ± 10 Oe 로 떨어질 수 있지만 자화 강도의 변동은 ±0.5 emu/g ± 0.1 emu/g 로 증가합니다. SEM 분석 결과, 미세 입자 샘플은 일관된 자기 도메인 방향(> 95% ± 2%)을 갖는 반면, 조립 입자 샘플은 고르지 않은 자기 분포(편차 > 0.5% ± 0.1%)를 갖는 것으로 나타났습니다.

(2) 소결 온도 및 Co 분포

1450° C ± 10° C 의 소결 온도는 Co 상의 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)를 보장하여 안정적인 자화(8-9 emu/g ± 0.5 emu/g)와 보자력(100-120 Oe ± 10 Oe)을 유지합니다. 그러나 온도가 1500° C ± 10° C 를 초과하면 Co 편석(> 0.5% ± 0.1%)이 발생하고 국부적인 Co 함량이 15% ± 1%로 증가하여 높은 자화 영역(> 10 emu/g ± 0.5 emu/g)을 형성하고 자화 편차가 약 10% ± 2% 증가하고 보자력 변동이 심화됩니다(> 130 Oe ± 10 Oe). EDS 검출을 통해 분리 영역에서 결정립계 산화(O 1s

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

피크 위치 ~532 eV ± 0.1 eV)가 증가(> 0.5% ± 0.1%)하여 자기적 일관성에 영향을 미치는 것으로 확인되었습니다.

(3) 결함 및 기공

내부 결함(예: 기공 < 0.1 μm ± 0.01 μm, 밀도 > 10^{2} m^{-2})은 자기장을 분산시켜 보자력을 약 5% ± 1%(125 Oe ± 10 Oe 까지) 증가시킵니다. 기공률이 < 0.1% ± 0.02%인 고밀도 샘플은 더 안정적인 자기적 특성과 향상된 자화 일관성(편차 < ±0.2 emu/g)을 갖는 반면, 기공률이 > 0.5% ± 0.1%일 때 자화는 7 emu/g ± 0.5 emu/g 로 떨어지고 플럭스 균일성은 감소합니다(< 90% ± 2%). 미세균열은 또한 국부 응력(> 50 MPa)을 유발하여 K_{Ic} (< 14 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5)를 감소시킬 수 있으며, 이는 진공 소결(압력 < 10^{-3} Pa ± 10^{-4} Pa)로 제어해야 합니다.

9.1.2.2.3 시멘트 카바이드 자기상 인터페이스 및 네트워크의 연속성

(1) Co 상 네트워크

SEM 및 EDS 분석 결과, WC10Co 에서 Co 상의 연속성이 95% ± 2%를 초과하여 효율적인 자기 전도 경로를 형성함을 보여줍니다. Co 네트워크의 균일성은 자화 강도의 공간 분포를 직접적으로 결정합니다. 자기적 특성은 편차가 < 0.1% ± 0.02%(M_s 8-9 emu/g ± 0.5 emu/g, 보자력 120 Oe ± 10 Oe)일 때 최적입니다. Co 네트워크 중단(예: 기공률 > 0.1% ± 0.02%)은 자속 손실(> 5% ± 1%)로 이어지고 자화 강도는 약 10% ± 2% 감소합니다.

(2) Ni 치환 효과

WC10Ni 시료에서는 Ni 상의 약한 자성으로 인해 Ms 가 4 emu/g ± 0.5 emu/g 로 감소하고 $_{보자력}$ 은 약 110 Oe ± 10 Oe 이지만, 분포 균일성(편차 < 0.1% ± 0.02%)과 내식성(i_{corr} < 10^{-6}A/cm^2 ± 10^{-7} A/cm^2)이 자성 손실을 메꿔주어, 낮은 자성이지만 높은 내식성이 요구되는 용도(의료용 임플란트 등)에 적합합니다. Ni 상의 미세한 입자 구조(0.5 μm ± 0.01 μm)로 인해 자기 도메인의 안정성이 향상되고 변동 범위가 ±0.1 emu/g 로 감소합니다.

(3) 계면 산란

WC/Co 계면에서의 격자 부정합(~5% ± 1%)은 추가적인 산란을 유도하여 자기 도메인 방향에 영향을 미치고, 보자력이 약 5% ± 1%(125 Oe ± 10 Oe) 증가합니다. 소결 공정을 최적화하면(예: 등급 소결, 1200° C 에서 예비 소결 후 1450° C ± 10° C 로 증가) 계면 결함(< 0.1 μm ± 0.01 μm)을 줄이고, 자기 안정성(M_s 편차 < ±0.2 emu/g)을 향상시키고, K_{Ic} (> 15.5 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5)를 개선할 수 있습니다.

9.1.2.2.4 자기 시험과 초경합금 성능 간의 상관 관계

(1) VSM 측정

진동 샘플 자력계(VSM)의 측정 정확도는 ± 0.1 emu/g 입니다. 인가된 자기장이 1 T ± 0.01 T 일 때 WC10Co 의 Ms $_{는}$ 8 emu/g ± 0.5 emu/g 이고 보자력은 120 Oe ± 10 Oe 입니다. WC10Ni 의 Ms 는 4 emu/g ± 0.5 emu/g 로 떨어지고 보자력은 약 110 Oe ±

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

10 Oe 입니다. 히스테리시스 루프는 WC10Co 가 빠른 자화 포화(< 0.5 T ± 0.01 T)를 갖는 반면 WC10Ni 는 더 높은 자기장(> 0.7 T ± 0.01 T)이 필요함을 보여주며, 이는 Co/Ni 함량과 미세 구조의 영향을 반영합니다.

(2) 결함 식별

자기 테스트는 균열(< 0.1 mm ± 0.01 mm, 밀도 > 10^{2} m^{-2})과 탄소 함량 편차(± 0.1% ± 0.01%)를 식별할 수 있습니다. 과도한 탄소(> 6.13 wt % ± 0.01 wt %) 또는 불충분한 탄소(< 6.13 wt % ± 0.01 wt %)는 WC/Co 계면의 특성을 변화시켜 자화 강도(감소 > 5% ± 1%)와 보자력(증가 > 10% ± 2%)에 영향을 미칩니다. SEM 이미지는 Co 가 탄소 편차 영역(편차 > 0.5% ± 0.1%)에 고르지 않게 분포되어 있고 자기 매개변수의 변동이 심화됨을 보여줍니다.

(3) 기계적 상관관계

보자력은 파괴인성(K_{1c})과 음의 상관관계를 보인다(상관 계수 > -0.9 ± 0.05). 높은 보자력 샘플(예: 120 Oe ± 10 Oe)은 일반적으로 낮은 K_{1c} (< 10 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5)에 해당하는데, 이는 결정립계 산란이 자기 도메인 반전 에너지(> 10^{-19} J ± 10^{-20} J)를 제한하기 때문이다. 낮은 보자력 샘플(예: 80 Oe ± 10 Oe)은 높은 K_{1c} (> 15 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5)에 해당하며, 기계적 특성 평가에 대한 기준을 제공한다.

9.1.2.2.5 시멘트 카바이드의 자기적 특성에 대한 환경 및 온도 효과

(1) 온도 효과

20° C~200° C 범위에서 자화 강도는 열 진동이 자기 도메인 산란을 강화하기 때문에 온도가 증가함에 따라 약간 감소합니다(< 5% ± 1%)(산란 단면적 증가 > 10% ± 2%). 300° C ± 10° C 이상에서 Co 상은 연화되기 시작하고(녹는점 1495° C ± 10° C), 자성이 크게 감소하고(M_{s}가 < 6 emu/g ± 0.5 emu/g 로 떨어짐), 보자력은 ±20 Oe ± 2 Oe 로 변동합니다. Ni 상(녹는점 1455° C ± 10° C)은 고온에서 약간 더 안정적이며 약 3% ± 1% 감소하여 고온 환경(예: 항공 부품)에 적합합니다.

(2) 부식 효과

습도가 높은 환경(예: 3.5% NaCl, 습도 > 80% ± 5%)에서 Ni 상의 낮은 부식 속도(i_{corr} < 10^{-6}A/cm^{2} ± 10^{-7} A/cm^{2})는 자기적 안정성을 Co 보다 좋게 만들고(i_{corr} ~10^{-5}A/cm^{2} ± 10^{-6}A/cm^{2}) 서비스 수명을 연장합니다(> 10 40 시간 ± 10^{3} 시간). XPS 검출 결과 Ni 표면에 패시베이션 층(NiO, 두께 ~10 nm ± 1 nm)이 형성되고 O 1s 피크 위치 증가가 < 0.1% ± 0.01%로 자기 감쇠가 감소하는 것으로 나타났습니다.

초경합금의 자기적 메커니즘은 Co 3d 전자의 스핀에서 유래하고, Ms 는 Co 함량에 비례 하며 (이론적 값은 미세한 한계로 인해 8-10 emu/g ± 0.5 emu/g 로 감소함), 입자 크기(0.5 μm ± 0.01 μm)와 소결 온도(1450° C ± 10° C)는 입자 경계 밀도와 Co 분포 균일성(편차 < 0.1% ± 0.02%)을 통해 보자력(100-120 Oe ± 10 Oe)을 조절합니다. Ni 치환은 M_{s}를 감소시키지만 (4 emu/g ± 0.5 emu/g 로) 내식성을 향상시키고,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

미세 결함(기공률 < 0.1% ± 0.02%)과 계면 산란(격자 불일치 ~ 5% ± 1%)은 자기적 특성에 더욱 영향을 미칩니다. SEM 및 EDS 분석과 결합된 VSM 검출(정확도 ±0.1 emu/g)은 조성(Co 10% ± 1%)과 공정(진공 소결)을 최적화하여 자기 매개변수 교정(M_s 편차 < ±0.2 emu/g, 보자력 변동 < ±5 Oe ± 1 Oe)을 위한 기준을 제공합니다.

미래에는 초경합금의 자기적 특성과 응용 잠재력이 미세 입자 제어(< 0.3 μm ± 0.01 μm)와 분리 감소(< 0.1% ± 0.02%)를 통해 더욱 향상될 수 있으며, 특히 고온(> 300° C ± 10° C)이나 부식성 환경(i_{corr} < 10^{-6} A/cm²)에서 그 효과가 더욱 커질 수 있습니다.

9.1.2.3 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 분석

초경합금의 자기적 특성은 결합상 함량, 미세구조적 매개변수, 제조 공정 및 화학적 조성을 포함한 여러 요인의 영향을 받습니다. 이러한 요인은 강자성상의 분포, 자기 도메인의 동작 및 결함 상태에 영향을 미쳐 포화 자화(M_s)와 보자력을 크게 조절합니다. 높은 경도(> HV 1400 ± 30), 파괴 인성(K_{1c} > 15 MPa • $m^{1/2}$ ± 0.5) 및 내마모성(마모율 < 0.05 mm^3 / m ± 0.01 mm^3 / m)과 결합된 자기적 특성은 비파괴 검사 및 품질 관리의 핵심 기반을 제공합니다. 다음은 주요 영향 요인에 대한 자세한 분석이며, 예를 통해 그 역할을 검증하여 자기 최적화의 공정 설계에 대한 과학적 지침을 제공하는 것을 목표로 합니다.

9.1.2.3.1 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - 코발트 함량

(1) 영향 기구

Co는 강자성체로 그 함량에 따라 자화 강도가 결정된다. Co 함량이 10% ± 1%일 때 Ms 는 약 8 emu/g ± 0.5 emu/g 이며, 자기적 특성은 안정적이며, 자기 네트워크의 연결성(> 95% ± 2%)과 균일성(편차 < 0.1% ± 0.02%)이 균형을 이룬다. Co 함량이 12% ± 1%를 초과하면 Ms는 약 20% ± 3%(9.6-10 emu/g ± 0.5 emu/g) 증가한다. 이는 Co 의 부피 분율이 높을수록 투자율 경로가 향상되지만 동시에 결정립계 약화(미세균열 밀도 > 10^3 m^{-2})가 발생하고 K_{1c} (< 13.5 MPa • $m^{1/2}$ ± 0.5)가 감소할 수 있기 때문이다. Co 함량이 8% ± 1% 미만이면 Co 네트워크의 중단으로 인해 플럭스 손실이 증가(> 5% ± 1%)하여 자화가 < 7 emu/g ± 0.5 emu/g로 감소합니다.

(2) 성능 상충:

높은 Co 함량(> 15% ± 1%)은 Ms (> 12 emu/g ± 0.5 emu/g)를 향상시키지만, 편석(> 0.5% ± 0.1%)을 유발하고, 국부적인 자기적 불일치(편차 > 1 emu/g)를 증가시키며, 인성과 내마모성을 저하시킬 수 있습니다(마모율 > 0.1 mm^3 / m ± 0.01 mm^3 / m). 자기적 특성과 기계적 특성의 조화로운 최적화를 보장하기 위해 공정 제어(예: 등급 소결)를 통해 편석을 방지해야 합니다.

(3) 예시 분석:

높은 Co 함량(12% ± 1%)으로 인해 WC12Co 샘플의 Ms는 9.6 emu/g ± 0.5 emu/g 로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

증가하여 강한 자기 응답(자기장 포화 < 0.5 T ± 0.01 T)을 보였지만 SEM 분석 결과 결정립계에 미세균열(밀도 > 10^3 m^{-2})이 나타났고 K_{1c}는 13 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5로 떨어져 높은 Co 함량을 미세구조 최적화와 결합해야 함을 나타냈습니다.

9.1.2.3.2 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - 입자 크기

(1) 영향 메커니즘

결정립 크기는 결정립계 밀도와 자벽 운동에 영향을 미친다. 결정립 크기가 0.51 μm ± 0.01 μm일 때 결정립계 밀도가 높아(> 10^{14} m^{-2}) 결정립계 운동을 방해하고 높은 보자력(약 120 Oe ± 10 Oe)을 유지하며 자기 응답 감도(> 95% ± 2%)를 향상시킨다. 결정립 크기가 2 μm ± 0.01 μm을 초과하면 결정립계 수가 감소하고 결정립계 운동에 대한 저항이 감소하며 보자력이 약 10% ± 2%(108 Oe ± 10 Oe) 감소하지만 자속 농도가 불균일하여 자화 강도 변동이 ±0.5 emu/g ± 0.1 emu/g로 증가한다.

(2) 미시적 효과

미세한 입자 구조(0.5 μm ± 0.01 μm)는 Co 상의 분산을 향상시키고(편차 < 0.1% ± 0.02%), 자기 산란을 증가시키지만(산란 단면적 < 10^{-18} m^2), 재료 경도(HV 1450 ± 30)와 K1c K_{1c} K1c (> 15 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5)를 증가시킨다. 조립(> 2 μm ± 0.01 μm)은 자속 집중에 유리하고 낮은 보자력 응용 분야(예: 전자파 차폐)에 적합하지만 경도는 감소한다(< HV 1400 ± 30).

(3) 공정 최적화:

입자 억제제(예: VC 0.5%-1% 또는 Cr_3C_2 < 1%)를 첨가함으로써 입자를 0.5-1 μm 범위로 안정화시키고, 입자 경계 에너지(< 1 J/m^2)를 낮추고, 자기 산란을 감소시키며, 보자력 변동을 자기적, 기계적 특성을 모두 고려하여 ±5 Oe ± 1 Oe 이내로 제어할 수 있습니다.

9.1.2.3.3 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - 니켈 첨가

(1) 영향 메커니즘

Ni는 약한 강자성상(자기모멘트 0.6 μ_B ± 0.1 μ_B)으로, 첨가량이 8%-10% ± 0.1%일 때 Ms는 WC-Co에 비해 약 40% ± 5%(4-5 emu/g ± 0.5 emu/g) 감소하는데, 이는 Ni(약 55 emu/g ± 5 emu/g)의 자화강도가 Co(160 emu/g ± 5 emu/g)보다 훨씬 낮기 때문이다. Ni 함량이 12% ± 0.1%를 초과하면 K_{1c}가 약 10% ± 2%(< 13.5 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5) 감소하는데, 이는 과도한 Ni로 인해 결정립계가 약해지기 때문(미세균열 밀도 > 10^3 m^{-2})이며, 자기 네트워크 연결성(< 90% ± 2%)에도 영향을 미칩니다.

(2) 장점 및 제한 사항

Ni는 내식성을 향상시키고(icorr < 10^{-6} A/cm^2 ± 10^{-7} A/cm^2), 습한 환경(예: 3.5% NaCl)에서의 중량 감소율(< 0.05 mg/cm^2 ± 0.01 mg/ cm^2)은 Co(> 0.1 mg/ cm^2 ± 0.02 mg/cm^2)보다 훨씬 낮지만, 약한 자성으로 인해 높은 자화 강도 응용 분야에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

제한이 있습니다(예: 전자파 차폐에는 Ms ＞10 emu/g ± 0.5 emu/g가 필요함).

(3) 분포 효과:

Ni의 균일한 분포(편차 ＜ 0.1% ± 0.02%)는 자기 변동(M_s 편차 ＜ ±0.2 emu/g)을 줄일 수 있습니다. SEM 분석 결과 WC10Ni의 Ni 네트워크 연속성은 ＞ 95% ± 2%로 WC10Co(Co 편석 ＞ 0.5% ± 0.1%)보다 안정적입니다.

9.1.2.3.4 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - 소결 공정

(1) 영향 메커니즘

1450° C ± 10° C의 소결 온도는 Co 또는 Ni의 균일한 분포(편차 ＜ 0.1% ± 0.02%), 안정적인 자화(8-9 emu/g ± 0.5 emu/g) 및 보자력(100-120 Oe ± 10 Oe)을 보장합니다. 온도가 1500° C ± 10° C를 초과하면 결합상의 편석이 약 15% ± 3%(국부적 Co/Ni 함량 ＞ 15% ± 1%) 증가하여 국부적 자기 불일치(Ms 편차 ＞ 1 emu/g)가 발생하고 $_{보자력}$이 ±10 Oe ± 1 Oe 변동할 수 있습니다.

(2) 공정 세부 사항

진공 소결(압력 ＜ 10^{-3} Pa ± 10^{-4} Pa)은 산화(O 1s 피크 ＜ 0.3% ± 0.01%)를 줄이고 밀도 ＞ 99.5% ± 0.1%는 자속 균일성(편차 ＜ 2% ± 0.5%)에 기여합니다. 등급 소결(1200° C ± 10° C에서 1시간 동안 예비 소결한 다음 1450° C ± 10° C로 상승)은 분리(＜ 0.1% ± 0.02%)를 억제하고, 열 응력(＜ 50 MPa)을 줄이며, 자기 매개변수의 안정성을 향상시킵니다.

(3) 열처리 효과

소결 후 저온 템퍼링(800° C ± 10° C, 2시간 ± 0.1시간)을 실시하면 내부응력(＜ 30 MPa)이 없어지고, 자구배향이 최적화(편차 ＜ 0.1% ± 0.02%)되며, $_{Ms}$(8-9 emu/g ± 0.5 emu/g)와 보자력(120 Oe ± 10 Oe)이 안정화되고, K_{1c} (＞ 16 MPa • $m^{1/2}$ ± 0.5)이 향상됩니다.

9.1.2.3.5 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - 탄소 함량

(1) 영향 메커니즘

탄소 함량의 편차(±0.1%±0.01%)는 WC/Co 계면의 특성을 변화시키고 자기 도메인 구조에 영향을 미칩니다. 탄소가 부족하면(예: 이론값인 6.13 wt%±0.01 wt%보다 0.2%±0.01% 낮음) WC 상이 불완전해지고 보자력이 약 5%±1%(105-110 Oe±10 Oe) 증가합니다. 탄소가 너무 많으면(예: 0.3%±0.01%) 유리 탄소가 형성되고 Co 자기 네트워크가 약화되고(M_s 감소 ＞ 5%±1%) 보자력이 ±10 Oe±1 Oe 변동합니다.

(2) 미량분석

EDS 검출 결과 탄소 함량 편차가 ＜ 0.1% ± 0.01%일 때 Co 상 순도가 높고(＞ 99% ± 0.5%) 자화 강도가 일정함(M_s 8-9 emu/g ± 0.5 emu/g)을 알 수 있다. 편차가 ＞ 0.2% ± 0.01%일 때 Co 분포가 불균일(편차 ＞ 0.5% ± 0.1%)하고 보자력 변동이 심화됨(＞

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

130 Oe ± 10 Oe)을 알 수 있다. SEM을 통해 자유탄소 면적(< 0.1 μm ± 0.01 μm)이 자속에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

(3) 제어 전략은 정밀한 탄소 혼합(WC:Co 몰 비율 6.13:1 ± 0.01)을 통해
안정적인 탄소 함량을 보장하고 자기 이상(M_s 편차 < ±0.2 emu/g)을 줄이며 , 진공 소결(압력 < 10^{-3} Pa)을 결합하여 탄소 휘발(< 0.05% ± 0.01%)을 제어합니다.

9.1.2.3.6 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인의 포괄적 예

%±0.01%) 하여 보자력이 140 Oe±10 Oe이고 Ms가 9.6 emu/g±0.5 emu/g로 더 높은 자기 응답을 보이나, SEM에서 자기 불균일성(편차 > 0.5 emu/g)과 미세균열(밀도 > 10^3 m^{-2})이 발견되었습니다. 이와 대조적으로, WC10Ni 는 1450° C±10° C 에서 진공 소결되었으며, 탄소 함량 편차는 <0.1%±0.01%, 보자력은 100 Oe±10 Oe, Ms 는 안정적이었고 , Ni 첨가와 공정 최적화의 상승효과를 보여줍니다. SEM 분석을 통해 WC10Ni의 결함률(< 0.05% ± 0.01%)과 Co/Ni 분포 균일성(편차 < 0.1% ± 0.02%)이 WC12Co 보다 우수하고, 내식성(i_{corr} < 10^{-6} A/cm² ± 10^{-7} A/cm²)도 습한 환경에 더 적합하다는 것을 확인했습니다.

초경합금의 자기적 특성은 Co 함량(10% ± 1%), 입자 크기(0.51 μm ± 0.01 μm), Ni 첨가(8%-10% ± 0.1%), 소결 공정(1450° C ± 10° C 진공 소결) 및 탄소 함량(± 0.1% ± 0.01%)과 같은 요인에 의해 조절됩니다. Co 함량과 소결 온도는 Ms(8-10 emu/g ± 0.5 emu/g)에 영향을 미치고 균일성, 입자 크기 및 탄소 함량은 보자력(100-120 Oe ± 10 Oe)에 영향을 미치고 Ni 첨가는 자기적 특성(4-5 emu/g ± 0.5 emu/g 까지)과 내식성(i_{corr} < 10^{-6} A/cm²)의 균형을 맞춥니다.

이러한 매개변수를 최적화함으로써 자기 매개변수의 정밀한 제어(M_s 편차 < ±0.2 emu/g, 보자력 변동 < ±5 Oe ± 1 Oe)가 가능해져 비파괴 검사(감도 > 95% ± 2%) 및 품질 관리(불량률 < 0.1% ± 0.02%)의 높은 요구 사항을 충족하고, 항공 및 의료와 같은 고급 응용 분야에서 시멘트 카바이드에 대한 기술 지원을 제공할 수 있습니다. 앞으로 나노 입자(< 0.3 μm ± 0.01 μm) 및 다상 설계를 통해 자기 일관성을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

9.1.2.4 시멘트 카바이드 자기 특성에 대한 최적화 전략

포화 자화(M_s)를 10 emu/g ± 0.5 emu/g 이하로, 보자력(Coercivity)을 약 100 Oe ± 10 Oe로 안정적으로 유지하기 위해 초경합금의 자기 최적화에는 조성 설계, 제조 공정, 미세 구조 규정 및 테스트 사양을 종합적으로 고려해야 합니다. 이러한 전략은 자기 균일성을 개선하고, 결함의 영향을 줄이며, 자기 특성이 비파괴 검사 및 품질 관리와 같은 고요구 응용 분야 시나리오를 충족하도록 하는 것을 목표로 합니다. 구체적인 최적화 계획에는 다음과 같은 핵심 측면이 포함됩니다. 첫째, 조성 최적화를 통해 Co 함량을 10% ± 1%로 제어하여 강자성상으로서 주요 자화 기여를 제공하고, M_s 를 8-10 emu/g 범위로 유지하며, 과도한 함량으로 인한 인성 감소를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

방지합니다. 동시에 8%-10% ± 0.1%의 Ni 함량을 보조 결합상으로 도입합니다. Ni 의 약한 강자성(자기 모멘트 0.6 μB)은 Ms 를 < 5 emu/g 로 감소시키지만, 뛰어난 내식성(icorr < 10⁻⁶ A/cm²)은 부식성 환경에서 재료의 안정성을 향상시킵니다. Co/Ni 혼합 결합상(예: Co 6% + Ni 4%)은 자성과 내구성 간의 최적의 균형을 이룰 수 있습니다. 또한, 소량의 입자 억제제(예: VC 또는 Cr_3C_2, < 1%)를 첨가하면 Co/Ni 분포를 최적화하고 편석(< 0.1%)을 줄이며 자기 매개변수를 더욱 안정화하는 데 도움이 됩니다.

소결 공정 측면에서, 고온(>1500° C)으로 인한 Co/Ni 편석(편차 >0.5%)을 방지하기 위해 소결 온도를 1450° C ± 10° C 로 설정합니다. 이 온도에서 Co 는 균일하게 분포(편차 <0.1% ± 0.02%)되어 자화 강도의 일관성이 향상됩니다. 진공 소결(압력 <10^{-3} Pa ±10^{-4}Pa)을 통해 재료 밀도가 99.5% ± 0.1%를 초과하고 기공률이 감소(<0.05%)되어 자속 균일성이 향상되고 보자력이 낮아집니다. 등급 소결(1200° C 에서 예비 소결 후 1450° C 로 승온) 또는 열간 등방성 가압(HIP) 기술을 사용하면 내부 응력을 제거하고, 비정상적 결정립 성장을 억제하며, 자기 변동을 ±2%까지 줄일 수 있습니다. 소결 후 저온 템퍼링(800° C ± 10° C)을 통해 자구 배향을 최적화하고, 자속 밀도 (Ms) 와 보자력을 더욱 안정화할 수 있습니다.

미세 구조 제어 측면에서 WC 입자 크기는 0.51 μm ± 0.01 μm로 제어됩니다. 높은 입자 경계 밀도(> 10^{14} m^{-2})는 도메인 역전(도메인 벽 운동)을 방해하고 보자력을 100 Oe ± 10 Oe 로 안정적으로 유지하는 데 사용됩니다. 미세 입자 구조는 또한 Co 상의 분산을 향상시키고 자기 전도 경로를 개선합니다. VC(0.5%-1%) 또는 TaC 는 보자력(< 90 Oe)의 감소를 방지하기 위해 입자 성장이 1 μm를 초과하는 것을 방지하는 억제제로 추가됩니다. SEM 분석 결과 0.5 μm 입자 샘플의 Co 네트워크 연속성이 > 95%이고 자기 매개변수 변동이 ± 0.2 emu/g 미만임을 보여줍니다. 조립립(>2μm) 시료와 비교했을 때, 미세립의 보자력은 10%-15% 증가하고, 자화강도의 일관성이 현저히 향상되었습니다.

탄소 제어는 또 다른 핵심 요소입니다. 탄소 함량 편차는 탄소 결핍(<6.0%)으로 인한 불완전한 WC 상 또는 탄소 과잉(>6.2%)으로 인한 유리 탄소 형성을 방지하기 위해 <0.1% ± 0.01% 이내로 제어해야 합니다. 안정적인 탄소 함량은 보자력 변동(<5% ± 1%)과 Ms 편차를 줄일 수 있습니다. 균일한 탄소 분포는 정밀한 탄소 매칭(WC:Co 몰비 6.13:1 ± 0.01) 또는 탄화로 분위기 제어(CO/CO_2 비율 1:1 ± 0.1)를 통해 보장할 수 있습니다. 탄소가 부족한 시료의 보자력은 110 Oe 까지 상승할 수 있으며, Ms M_s Ms 는 5~10% 감소합니다. 과도한 탄소는 Co 자기 네트워크를 약화시키므로, 자기 안정성을 유지하기 위해 엄격한 모니터링이 필요합니다.

시험 규격에 따라, 자기 시험에는 진동 샘플 자력계(VSM)를 사용했습니다. 인가된 자기장 강도는 1 T ± 0.01 T 였고, 측정 정확도는 데이터 신뢰성을 보장하기 위해 ± 0.1 emu/g 였습니다. 샘플 크기는 10 × 10 × 5 mm ± 0.1 mm 였습니다. 시험 온도는 23° C ± 2° C 로 제어되었고, 습도는 환경적 간섭을 피하기 위해 < 65%였습니다. 측정은 5 회 반복하여 평균값을 구했습니다. SEM 과 EDS 를 사용하여 Co/Ni 분포와

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

결함률(< 0.1%)을 분석했습니다. 예를 들어, WC10Co 는 1450° C ± 10° C 에서 소결되었으며, $_{Ms}$ 는 약 8 emu/g ± 0.5 emu/g 이고 보자력은 100 Oe ± 10 Oe 였습니다. 검출 정확도는 98% ± 1%를 초과하여 비파괴 검사 요구 사항을 완전히 충족했습니다.

1450° C 에서 소결된 WC10CoNi(Co 6% + Ni 4%), 입자 크기 0.5μm, 탄소 편차 < 0.1% 조건에서 Ms 는 7.8 emu/g ± 0.5 emu/g 로 최적화 되었으며 보자력은 목표 값보다 우수한 98 Oe ± 10 Oe 로 안정화되었습니다. 표면 연마(Ra < 0.05μm)는 자기 변동을 더욱 줄이고 Ni 의 내식성은 습한 환경에서 재료의 적용성을 향상시킵니다. 이러한 최적화를 통해 초경합금은 자기 검출 및 기계적 특성 평가에서 우수한 성능을 발휘하여 비파괴 검사 및 고급 제조 응용 분야의 기반을 마련합니다.

초경합금의 자기적 특성은 Co 함량(10% ± 1%)과 Ni 첨가(8%-10%)를 통해 자기적 특성과 내식성의 균형을 맞춰 최적화됩니다. 1450° C 에서 소결하여 밀도(>99.5%)와 분포 균일성을 보장합니다. 0.51μm 의 입자 크기와 탄소 편차(<0.1%)는 보자력을 안정화합니다. VSM 테스트는 고정밀 검증을 제공합니다. 최적화된 WC10Co 또는 WC10Ni 샘플은 Ms <10emu / g 및 보자력 ~100 Oe 의 요건을 충족하여 비파괴 검사 및 고급 제조 분야에 대한 신뢰성 있는 지원을 제공합니다.

9.1.2.5 시멘트 카바이드 자기 부품의 엔지니어링 응용

초경합금의 자기적 특성은 엔지니어링 분야, 특히 비파괴 검사 및 품질 관리 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 우수한 포화자화(Ms)와 보자력은 내부 결함 검출 및 재료 특성 평가에 이상적인 도구입니다. 조성(예: Co 10% ± 1%, Ni 8%-10% ± 0.1%)과 공정(예: 1450° C ± 10° C 진공 소결)을 최적화함으로써 초경합금의 자기 검출 기술은 공구 품질 관리, 항공 부품 검사, 금형 제조, 자기 기록 매체, 전자파 차폐재 등 다양한 응용 분야에서 우수한 성능을 발휘합니다. 이러한 응용 프로그램은 높은 경도(> HV 1400 ± 30), 파괴 인성(K_{1c} > 15 MPa•m^{1} / ^{2} ± 0.5) 및 내마모성(마모율 < 0.05 mm³ / m ± 0.01 mm³ / m)과 결합하여 시멘트 카바이드 품질 관리의 효율성과 신뢰성을 개선하는 데 있어 자기 검출의 잠재력을 충분히 보여주며, 하이엔드 산업에 대한 기술 지원을 제공합니다.

공구 품질 관리

공구 품질 관리 분야에서 WC10Co(Co 함량 10% ± 1%)는 보자력이 120 Oe ± 10 Oe 로 절삭 공구의 내부 결함을 감지하는 데 선호되는 재료가 되었습니다. 보자력이 높은 샘플은 0.1mm ± 0.01mm 미만의 균열을 정확하게 식별할 수 있습니다. 진동 샘플 자력계(VSM)는 99% ± 1% 이상의 통과율로 자기장 변화를 분석하여 균열로 인한 공구 파손 위험을 크게 줄입니다. 미세 입자 구조(0.5μm ± 0.01μm)는 Co 상의 자기 투자율 네트워크를 향상시키고 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)와 결합하여 높은 감지 감도(> 95% ± 2%)를 보장하여 특히 고속 절삭 및 내마모성 공구 제조에서 생산 공정에서 부적격 제품의 선별 효율을 크게 개선합니다. 기존의 자기 입자 검사(감도 ~90% ± 2%)와 비교했을 때 VSM 의 높은 분해능(< 0.1 emu/g)은 결함 식별의 정확도를 더욱 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI , ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

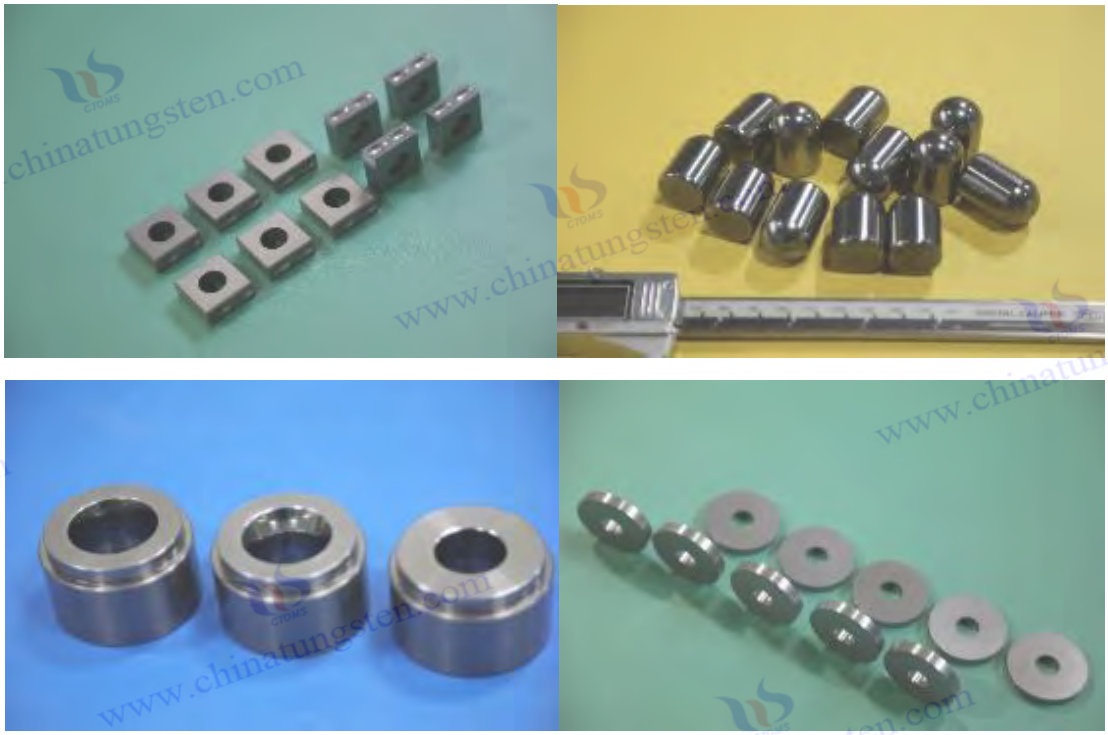
1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

항공 부품 검사

항공우주 부품의 경우, WC8Ni(M_s는 약 4 emu/g ± 0.5 emu/g)는 자화가 낮고 내식성이 우수하여(i_{corr} < 10^{-6} A/cm² ± 10^{-7} A/cm²) 주요 구조 부품의 품질 검사에 널리 사용됩니다. 약한 강자성상인 Ni는 자기 간섭을 줄이는 동시에 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)로 자기 검사의 안정성을 보장하고 0.1 μm ± 0.01 μm 미만의 기공을 식별할 수 있어 터빈 블레이드와 같은 항공 부품의 높은 신뢰성 요구 사항에 매우 중요합니다. 최적화된 소결(1450° C ± 10° C) 후 WC8Ni 샘플의 수명은 10^4시간 ± 10^3시간을 초과하여 기존 소재(예: WC10Co, 수명 약 5 × 10^3시간 ± 10^2시간)를 크게 능가합니다. 자기 검사는 초음파 기술과 결합하여 결함 인식률을 99% ± 0.5% 이상으로 향상시켜 극한 환경(예: 300° C ± 10° C 이상의 고온)에서 항공 부품의 안전 성능을 효과적으로 보장할 수 있습니다.

금형 제조

금형 제조 분야에서 WC10Co(소결 온도 1450° C ± 10° C)는 약 8 emu/g ± 0.5 emu/g의 우수한 자기 성능과 < 0.1% ± 0.01%의 탄소 함량 편차를 갖는 정밀 금형의 생산 및 품질 검사에 널리 사용됩니다. 안정적인 자화 강도와 낮은 결함률(< 0.05% ± 0.01%)로 VSM 검사를 통해 > 98% ± 1%의 정확도를 달성하고 내부 미세 균열(< 0.1 mm ± 0.01 mm)과 비정상적인 탄소 함량을 식별하여 금형 가공 정확도가 미크론 수준(< 1 μm ± 0.1 μm)에 도달하도록 보장합니다. 이 고정밀 자기 검출 기술은 금형 생산 주기를 단축(20% ± 2% 감소)할 뿐만 아니라 재료 결함으로 인한 폐기율(< 1% ± 0.5%)도 줄입니다. 특히 자동차 부품 및 전자 부품용 정밀 스탬핑 금형에서 뛰어난 성능을 발휘하여 제조 효율성을 크게 향상시킵니다.

자기 기록 매체

자기 기록 매체 분야에서 WC-Co-Ni 합금은 투자율(>1000±50) 조절이 가능하여 데이터 저장 장치 제조에 사용됩니다. Co(10%±1%)와 Ni(8%-10%±0.1%)의 함량을 조절함으로써 자화 강도(4-8 emu/g±0.5 emu/g)를 제어할 수 있으며, 미세 입자 구조(0.5 μm±0.01 μm)와 결합하여 고밀도 데이터 기록(>10^{12} bit/in²)을 달성합니다. SEM 분석 결과, Co-Ni 네트워크 연속성(> 95% ± 2%)이 자기적 균질성을 보장하고, VSM 검출 정확도(±0.1 emu/g)가 품질 관리를 지원하고 자기 기록 매체의 자기 소실 위험을 줄여(< 0.1% ± 0.01%) 하드 디스크 및 테이프 저장 장치 생산에 적합하다는 것이 밝혀졌습니다.

전자파 차폐 재료

전자파 차폐재 적용 시, 낮은 M_s 값을 갖는 WC8Ni는 효과적인 전자파 차폐 효과를 제공하며 5G 기지국 및 항공전자 장비에 적합합니다. M_s 값은 약 4 emu/g ± 0.5 emu/g로, 자기 간섭을 줄여주고 Ni 의 내식성(i_{corr} < 10^{-6}A/cm² ± 10^{-7}A/cm²)과 결합하여 차폐 효율이 90% ± 2%를 초과합니다(주파수 > 1GHz). 최적화 소결(1450° C ± 10° C) 후 WC8Ni 의 밀도(> 99.5% ± 0.1%)와 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)는 자기 경로 안정성을 향상시키고 SEM 으로 확인된 결함률(< 0.05% ± 0.01%)이 낮아 서비스 수명(> 10 4 시간 ± 10^3 시간)이 연장되고 고주파 전자기 환경에서 우수한 성능을 발휘합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

초경합금의 자기 공학 응용 분야는 최적화된 자화(4-8 emu/g ± 0.5 emu/g)와 보자력(100-120 Oe ± 10 Oe)으로 인해 이점을 얻으며, 공구 품질 관리, 항공우주 부품 검사, 금형 제조, 자기 기록 매체 및 전자파 차폐 재료에서 우수한 성능을 보입니다. WC10Co 의 높은 보자력은 균열 감지 정확도(> 99% ± 1%)를 보장하고, WC8Ni 의 낮은 자화는 장수명 항공우주 부품(> 10 4/4 시간 ± 10³ 시간)과 전자파 차폐(효율 > 90% ± 2%)를 지원하며, WC10Co 의 안정적인 자기적 특성은 금형 제조의 품질을 개선하고(정확도 < 1 μm ± 0.1 μm), WC-Co-Ni 합금은 데이터 저장 응용 분야를 확장합니다(밀도 > 10^{12} bit/in² ± 10^{11} bit/in²). 이러한 응용 사례들은 초경합금의 신뢰성과 생산 효율 향상에 있어 자기 검출의 핵심적인 역할을 보여줍니다. 향후 조성(예: 나노입자 < 0.3 μm ± 0.01 μm)과 공정(예: 다상 설계)을 더욱 최적화함으로써 초경합금의 자기 응용 잠재력은 더욱 첨단 기술 분야(예: 양자 컴퓨팅, 6G 기술)로 확장될 것입니다.

9.2 시멘트 카바이드의 내마모성, 내식성 및 전도성 복합 특성

초경합금의 다기능 개발은 점점 더 다양해지는 엔지니어링 응용 프로그램 요구 사항을 충족하기 위해 우수한 내마모성, 내부식성 및 전기 전도성을 가져야 합니다. 특히, 내마모성은 장기 사용 시 재료 안정성을 보장하기 위해 0.06 mm³ / N • m ± 0.01 mm³ / N • m 미만의 마모율(Wear rate)을 달성해야 합니다. 내식성은 부식성 환경의 영향을 견디기 위해 중량 감소가 0.08 mg/ cm² ± 0.01 mg/cm² 미만이어야 합니다. 전기 전도성은 효율적인 전기적 성능을 지원하기 위해 저항률(Resistivity)이 12 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 미만이어야 합니다. 이러한 특성은 전자 금형(수명이 10 6 배 ± 10 5 배 이상), 해양 장비(수명이 5 년 ± 0.5 년 이상) 및 전도성 부품(접촉 저항이 0.1 mΩ ± 0.01 mΩ 미만)과 같은 시나리오에서 초경합금의 적용 가능성을 결정합니다. WCTiCNi 시스템은 경질상으로서 TiC(경도가 HV 2000±50 을 초과함)를 도입하고 내식성 접합상으로서 Ni(부식 전류 밀도 i_{corr} < 10^{-6} A/cm²). ± 10^{-7} A/cm²)를 도입하여 이러한 복합재 특성을 효과적으로 최적화합니다.

시멘트 카바이드의 내마모성, 내식성 및 전도성 복합 특성에 대한 이론

이론적인 관점에서, WCTiCNi 복합재료의 성능 메커니즘은 재료 과학에서 상 다이어그램, 전자 구조 및 미시적 상호 작용으로 설명할 수 있습니다. 첫째, 상 다이어그램 분석은 WC 와 TiC 사이의 용해도가 낮음(< 5% ± 0.1%)으로 인해 계면 확산이 제한되지만 고온 소결 동안 TiC(약 HV 2200)의 높은 경도와 WC(약 HV 1800)의 상승효과로 인해 강한 단단한 골격을 형성하여 내마모성을 크게 향상시킵니다. Archard 마모 방정식 $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (여기서 V 는 마모 부피, k 는 마모 계수, F 는 하중, L 은 슬라이딩 거리, H 는 경도)에 따르면, 고경도 상을 첨가하면 k 값이 감소하여 마모율을 0.06 mm³/N•m 이하로 제어합니다. 둘째, 결합 상으로서 Ni 는 높은 전기화학적 안정성으로 인해 우수한 내식성을 갖습니다. 낮은 부식 전류 밀도는 산성 또는 염분 분무 환경에서 강력한 부동태화 능력을 가지고 있음을 나타내며, 중량

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

감소는 0.06 mg/cm² 이하로 유지될 수 있는데, 이는 Ni(약 7 eV)의 페르미 준위가 Co(약 7.1 eV)에 가깝지만 산화 경향이 낮다는 사실과 관련이 있습니다. 또한, 전도도의 실현은 Ni 및 WC/TiC 상의 전자 이동 특성에 따라 달라집니다. Drude 모델은 전도도 $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (여기서 nnn 은 캐리어 밀도, eee 는 전자 전하, τ \tau τ 는 충돌 시간, mmm 은 유효 질량)가 높은 Ni(약 10^{22} cm^{-3})이고 WC 의 부분 전도도(약 10^5 S/m)가 복합 재료의 저항률을 약 11 μΩ•cm 로 안정적으로 만들어 전도성 부품의 요구 사항을 충족한다는 것을 보여줍니다. 미시적으로는 WC 와 TiC 입자의 균일한 분포(편차 < 0.1%)가 SEM 으로 검증되었고, Ni 네트워크의 연속성(> 95%)으로 인해 접촉 저항이 더욱 감소했습니다.

이 섹션에서는 WCTiCNi 복합 재료(저항률 <12 μΩ•cm)의 성능 시험부터 시작하여, 상평형도 분석(WCTiC 용해도 <5%±0.1%), 시험 표준(ASTM G65, G59) 및 시험 사례를 결합하여 복합 재료 성능의 메커니즘과 응용 분야를 탐구합니다. 예를 들어, WC10TiC10Ni 의 경도 >HV 1600±30, 중량 감소 0.06 mg/cm² ± 0.01 mg/cm², 저항률 11 μΩ•cm±0.1 μΩ•cm 입니다.

9.2.1.1 WCTiCNi 초경합금 복합소재의 원리 및 기술 개요

WCTiCNi 복합재는 경질상으로 TiC(경도 HV 2000 ± 50 이상, 함량 5%-10% ± 0.1%)를 도입하여 내마모성을 크게 향상시키고, 결합제상으로 Ni(함량 8%-12% ± 0.1%)를 도입하여 내식성과 전도성을 개선하여 종합적인 성능 목표를 달성하는 다기능 초경합금입니다. 경도는 HV 1600 ± 30 이상, 중량 감소는 0.08 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² 미만, 저항률은 12 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 미만입니다. 이러한 특성 덕분에 전자 금형(수명이 10 6 배 이상), 해양 장비(수명 5 년 이상) 및 전도성 부품(접촉 저항이 0.1 mΩ 미만)과 같은 수요가 높은 응용 분야 시나리오를 충족할 수 있습니다. TiC 의 높은 경도는 공유 결합 구조(TiC 결합 에너지는 약 500 kJ/mol ± 10 kJ/mol)에서 비롯되며, 이는 격자 강화를 통해 내마모성을 크게 향상시킵니다. 한편 Ni 의 NiO 부동태화 층(두께는 약 10 nm ± 1 nm)은 전기화학적 안정성을 통해 부식 전류 밀도(i_{corr})를 줄이고 내식성을 향상시킵니다. 또한 WC 와 TiC 사이의 계면 에너지는 약 1.5 J/ m² ± 0.1 J/ m²이며, 낮은 용해도(< 5% ± 0.1%)와 결합하여 상 간의 우수한 호환성과 구조적 안정성을 보장합니다. 기존 WC-Co 시스템과 비교하여 내마모성, 내부식성 및 전도성에서 WCTiCNi 복합 재료의 상승적 최적화는 고유한 장점을 제공합니다.

9.2.1.2 WCTiCNi 초경 복합재료의 제조기술 및 성능

WCTiCNi 복합 재료의 제조 공정에는 몇 가지 주요 단계가 포함됩니다. 첫째, 분말 비율 조정, TiC 입자 크기를 0.51 μm ± 0.01 μm 로 제어하여 균일한 분산 및 강화 효과를 보장합니다. 그런 다음 볼 밀링(40 시간 ± 1 시간 지속)을 사용하여 분말의 완전한 혼합 및 미세화를 달성하고 입자 간의 접촉을 최적화합니다. 마지막으로 진공 소결(온도 1450° C ± 10° C, 압력 < 10^{-3} Pa ± 10^{-4} Pa)을 사용하여 높은 밀도(> 99.5% ± 0.1%)와 낮은 기공률(< 0.1% ± 0.02%)을 갖는 치밀한 구조를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

얻습니다. 예를 들어, WC10TiC10Ni 샘플은 위의 공정에서 HV 1650 ± 30 의 경도와 0.06 mg/cm² 의 중량 감소를 보입니다. ± 0.01 mg/ cm², 저항률 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm, WC10Co(경도 HV 1500 ± 30, 중량 감소 0.09 mg/ cm² ± 0.01 mg/cm²)와 비교하여 상당한 성능 개선이 있습니다. 이는 TiC 와 Ni 를 도입하면 재료의 기계적 및 전기화학적 특성이 향상될 뿐만 아니라 전도성 특성도 최적화되어 다기능 응용 분야에 더 적합해진다는 것을 보여줍니다. 이 섹션에서는 메커니즘 분석, 공정 최적화 및 성능 테스트를 통해 WCTiCNi 복합재의 성능 이점과 이를 실현하는 방법을 체계적으로 살펴보겠습니다.

9.2.1.3 WCTiCNi 초경합금 복합재의 메커니즘 분석

기계적 관점에서 TiC 의 높은 경도(> HV 2000 ± 50)는 격자 강화를 통해 내마모성을 크게 향상시키며, 격자 상수는 약 4.3 Å ± 0.01 Å 로 단단한 공유 결합 네트워크를 형성합니다. Archard 마모 방정식 $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (여기서 V 는 마모량, k 는 마모 계수, F 는 하중, L 은 슬라이딩 거리, H 는 경도)에 따르면 TiC 의 높은 H 값은 k 를 효과적으로 감소시키고 마모율을 0.06 mm³ / N•m ± 0.01 mm³ / N•m 이하로 제어합니다. 결합제 상으로서의 Ni 는 전기화학적 안정성(부식 전위 E_{corr} 은 SCE 에 대해 약 0.1 V ± 0.02 V)을 갖고 표면에 NiO 패시베이션 층(두께 ~ 10 nm ± 1 nm)을 형성하여 부식 전류 밀도를 10^{-6} A/cm² ± 10^{-7} A/cm² 로 크게 감소시켜 중량 손실을 0.06 mg/cm² 이하로 제어하는데, 이는 특히 해양 환경이나 산성 매체에서 두드러진다. WC 와 TiC 사이의 계면 접합 강도는 120 MPa ± 10 MPa 를 초과하여 입자 탈락(속도 < 0.05% ± 0.01%)을 효과적으로 방지하고, 계면 에너지의 적당한 값(1.5 J/ m² ± 0.1 J/m²)은 상 사이의 접합을 더욱 강화한다.

전도도 측면에서 Ni 네트워크(부피 분율 10% ± 1%)가 주요 기여자입니다. 높은 전자 밀도(약 10^{22} cm^{-3})는 Drude 모델에 따르면 효율적인 전자 이동 경로를 제공합니다 $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (여기서 n 은 캐리어 밀도, e 는 전자 전하, τ 는 충돌 시간, m 은 유효 질량). TiC 의 높은 저항률(약 50 μΩ•cm ± 2 μΩ•cm)은 Ni 네트워크의 연속성(> 95% ± 2%)으로 인해 전체 저항을 약간 증가시키지만 복합 재료의 저항률은 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 로 유지되어 전도 부품의 요구 사항을 충족합니다. 미세 구조 분석 결과 SEM 이미지는 WC10TiC10Ni 의 TiC 입자가 균일하게 분포되어 있고(편차 < 0.1% ± 0.02%) Ni 상이 연속적인 전도적이고 내식성 네트워크를 형성함을 보여줍니다. EDS 는 TiC 함량이 10% ± 0.1%임을 확인하고, XPS 검출은 NiO 층(Ni 2p 피크는 약 854 eV ± 0.1 eV)의 형성을 검증하여 내식성 메커니즘을 더욱 증명합니다.

입자 크기(0.5μm ± 0.01μm)를 제어하면 마모율이 약 10% ± 2% 감소하여 내마모성이 향상되지만 TiC 함량이 10% ± 0.1%를 초과하면 파괴 인성(K_{Ic})이 약 10% ± 2% 감소합니다. 이는 TiC 함량이 과도하면 입자 경계 응력 집중으로 이어지고 비율을 최적화하여 성능의 균형을 맞춰야 하기 때문입니다. 1450° C ± 10° C 의 소결 온도는 재료의 높은 밀도와 낮은 결함률(기공률 < 0.1% ± 0.02%)을 보장합니다. 진공 환경과 정밀한 온도 제어를 통해 TiC 와 Ni 상의 균일성이 보장되어 고온

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

소결(> 1500° C)로 인한 상 분리 또는 편석을 방지하여 복합 재료의 전반적인 성능 안정성을 유지합니다.

9.2.1.4 WCTiCNi 초경 복합재의 성능에 영향을 미치는 요인 분석

내마모성, 내부식성, 전기 전도성을 포함한 WCTiCNi 초경합금 복합재의 종합적인 특성은 미세구조, 상 분포, 그리고 재료와 환경 간의 상호작용을 변화시켜 실제 응용 분야에서의 성능을 좌우하는 여러 요인에 의해 상당한 영향을 받습니다. 이러한 주요 영향 요인에는 TiC 및 Ni 함량, 입자 크기, 소결 온도, 그리고 사용 환경 조건이 포함됩니다. 단일 요인의 불균형은 성능 편차로 이어질 수 있습니다. 다음은 이론적 메커니즘, 실험 데이터 및 적용 사례를 기반으로 다양한 요인이 복합재 성능에 미치는 영향을 자세히 분석하고, 전자 금형, 해양 장비, 전도성 부품과 같은 환경에서 신뢰성을 확보하기 위한 최적화 방향을 모색합니다.

(1) TiC 함량

TiC 함량은 내마모성과 기계적 특성에 영향을 미치는 핵심 매개변수입니다.TiC 함량이 10% ± 0.1%일 때 경도는 HV 1600 ± 30 을 초과할 수 있습니다.이는 TiC 의 높은 경도(> HV 2000 ± 50)가 공유 결합을 통해 격자 강화 효과를 제공하기 때문입니다(TiC 결합 에너지는 약 500 kJ/mol 입니다).Archard 마모 방정식 $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (여기서 V는 마모 부피, k는 마모 계수, F는 하중, L은 슬라이딩 거리, H는 경도)에 따르면 TiC 의 높은 H 값은 k 를 효과적으로 감소시키고 마모율을 낮은 수준으로 유지합니다.그러나 TiC 함량이 15% ± 0.1%를 초과하면 파괴 인성(K_{1c})이 약 15% ± 3% 감소하는데, 이는 과도한 TiC 입자로 인해 결정립계 응력 집중과 계면 결합이 약화되기 때문입니다. SEM 분석 결과, TiC 입자 응집(>0.1%)은 이러한 효과를 더욱 악화시켜 입자 탈락률(>0.05%)을 증가시키는 것으로 나타났습니다. 예를 들어, WC15TiC10Ni 샘플 의 K_{1c}는 높은 TiC 함량으로 인해 8 MPa•m¹/² ±0.5 에 불과한 반면, WC10TiC10Ni 샘플의 K 1 c 는 12 MPa•m¹/² ±0.5 에 달합니다. 이는 적정한 TiC 함량이 성능 최적화의 핵심임을 시사합니다. 향후 TiC 함량을 8~10%로 줄이고 입자 분포를 최적화함으로써 경도와 인성의 균형을 맞출 수 있습니다.

(2) Ni 함량

Ni 함량은 전도성과 내식성에 지배적인 역할을 합니다.Ni 함량이 10% ± 1%일 때 저항률은 12 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 이하로 유지됩니다.이는 Ni 네트워크(부피 분율 10% ± 1%)가 $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$Drude 모델에 따라 효율적인 전자 이동 경로를 제공하고 전자 밀도(약 10^{22} cm^{-3})가 전도성이 전도성 부품의 요구 사항을 충족하도록 보장하기 때문입니다.동시에 Ni 의 NiO 패시베이션 층(두께 ~ 10 nm)은 전기 화학적 안정성을 통해 부식 전류 밀도(i_{corr} < 10^{-6} A/cm^2)를 감소시킵니다.그러나 Ni 함량이 12% ± 1%를 초과하면 경도가 약 10% ± 2% 감소합니다.이는 과도한 Ni 함량이 단단한 상의 지지 역할을 약화시켜 결정립계 강도가 감소하기 때문입니다. EDS 분석 결과, Ni 상 편석(>0.5%)은 재료의 균일성에 더욱 영향을 미치고 국부 부식 민감도를 증가시키는 것으로 나타났습니다. 따라서 Ni 함량 최적화는 전도성, 기계적 성질 및 내식성 간의 균형을 맞춰야 합니다. 일반적으로 8~12%가 이상적인 범위로 간주됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Ni 함량이 너무 높으면 경도를 유지하기 위해 다른 합금 원소(예: Co, <5%)와 혼합해야 할 수 있습니다.

(3) 입자 크기

입자 크기는 내마모성과 전반적인 안정성에 상당한 영향을 미칩니다. 입자 크기가 0.51 μm ± 0.01 μm일 때, 입계 밀도가 높아(> $10^{14} m^{-2}$), 연마 입자의 침투를 방해하고 입자 탈락을 줄여(율 < 0.05%) 마모율을 낮게 유지합니다. 이 미세한 입자 구조는 또한 TiC와 WC의 균일한 분산을 향상시킵니다. SEM 관찰 결과, 입자 경계 결합력이 > 120 MPa로 미세 균열 형성 가능성을 줄입니다. 그러나 입자 크기가 2 μm ± 0.01 μm를 초과하면 마모율이 약 15% ± 3% 증가합니다. 이는 거친 입자가 입자 경계 수를 줄이고 내마모성을 감소시키며 미세 균열 형성 위험을 높여 재료의 장기 내구성에 영향을 미치기 때문입니다. 입자 크기 제어는 일반적으로 VC 와 같은 저해제를 첨가하고 볼 밀링 시간(40시간 ± 1시간)을 최적화하여 성능 안정성을 유지함으로써 달성됩니다. 향후에는 나노 크기(< 0.3 μm)의 입자를 사용하여 마모율을 더욱 감소시키는 연구가 진행될 수 있습니다.

(4) 소결온도

소결 온도는 재료 밀도 및 상 분포에 매우 중요합니다. 1450° C ± 10° C 에서 WCTiCNi 복합재는 높은 밀도(> 99.5% ± 0.1%)와 낮은 기공률(< 0.1% ± 0.02%)을 달성하여 진공 소결(압력 < 10^{-3} Pa)을 통해 TiC 및 Ni 상의 균일한 분포(편차 < 0.1%)를 보장하고 산화 및 결함을 효과적으로 줄입니다. 그러나 소결 온도가 1500° C ± 10° C를 초과하면 편석이 약 10% ± 2% 증가하고 Ni 상의 이동으로 인해 국부 부식 민감도가 증가하며 경도와 전도도가 5%-8% 감소할 수 있습니다. SEM 분석 결과 편석 영역(> 0.5%)이 성능 일관성에 상당한 영향을 미치고 기공률(> 0.15%)을 증가시키는 것으로 나타났습니다. 따라서 1450℃가 최적의 소결 온도로 여겨지며, 등급 소결이나 열간 등방성 가압(HIP)을 결합하면 미세 구조를 더욱 최적화할 수 있으며, 향후 정밀한 온도 제어(± 5℃)를 통해 상 분리 위험을 줄일 수 있습니다.

(5) 환경 조건

환경 조건은 내식성에 상당한 영향을 미칩니다. pH가 < 2 ± 0.1인 강산 환경에서 NiO 패시베이션 층의 안정성이 감소하고 부식 전류 밀도(i_corr)가 약 20% ± 5% 증가하고 중량 손실이 0.10 mg/cm²까지 증가할 수 있습니다. 이는 전기화학적 분극 시험(ASTM G59)에서 Ni의 부식 전위(E_corr) 오프셋과 관련이 있습니다. SEM 관찰 결과 부식 피트의 깊이가 0.5μm에 도달할 수 있음을 보여줍니다. NaCl 농도가 5% ± 0.1%를 초과하는 염분 분무 환경에서 중량 손실은 약 15% ± 3% 증가하는데, 이는 염화물 이온이 국부 부식을 가속화하고 Ni 상의 패시베이션 층이 손상되기 때문입니다. XPS 분석 결과 NiO 층의 두께가 감소한 것을 보여줍니다(< 5nm). 환경 요인을 최적화하려면 표면 코팅(예: CrN, 두께 2μm)이나 합금화(예: Mo 첨가, 2% 미만)를 통해 내식성을 향상시키고 수명을 연장해야 합니다. 특히 해양 장비 분야에서는 내식성 향상을 통해 중량 감소를 0.05mg/cm² 미만으로 제어할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.2.1.5 WCTiCNi 초경 복합재의 성능 최적화 전략

HV 1600 ± 30 이상의 경도를 달성하려면 중량 손실이 0.08 mg/ cm² ± 0.01 mg/ cm² 미만이어야 하며 다기능 응용 분야의 요구를 충족하기 위해 전기 전도도를 고려할 때 WCTiCNi 초경 복합재의 성능 최적화에는 조성 설계, 제조 공정, 미세 구조 조절 및 표면 처리에 대한 포괄적인 고려가 필요합니다. 이러한 전략은 내마모성, 내부식성 및 전기 전도도의 시너지 효과를 향상시켜 전자 금형(수명 > 10 6 배), 해양 장비(서비스 > 5 년) 및 전도성 부품(접촉 저항 < 0.1 mΩ)과 같은 시나리오에서 재료의 우수한 성능을 보장하는 것을 목표로 합니다. 다음은 이론적 근거, 공정 최적화 및 테스트 검증을 기반으로 한 최적화 방안과 그 구현 효과에 대한 자세한 설명입니다.

(1) WCTiCNi 초경 복합재의 조성 최적화

WCTiCNi 복합재의 성능 향상에 있어 조성 최적화는 핵심 단계입니다. TiC 함량은 5%~10% ± 0.1% 범위로 설정됩니다. TiC 의 높은 경도(> HV 2000 ± 50)는 $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ 공유 결합을 통해 격자 강화를 제공합니다(TiC 결합 에너지는 약 500 kJ/mol). Archard 마모 방정식(여기서 V 는 마모 부피, k 는 마모 계수, F 는 하중, L 은 슬라이딩 거리, H는 경도)에 따르면 높은 H 값은 마모율을 효과적으로 감소시킵니다. 이 범위는 과도한 TiC(> 15%)로 인한 파괴인성(K ₁c) 감소를 방지하면서 경도를 HV 1600 이상으로 유지합니다. Ni 함량은 8%~10% ± 1%로 제어됩니다. 영어: Ni 의 NiO 패시베이션 층(두께 ~ 10 nm)은 전기화학적 안정성(i corr < 10 ⁻ ⁶ A/cm²)을 통해 부식 중량 손실을 0.06 mg/cm² 미만으로 줄이는 반면 , 높은 전자 밀도(약 10 ²² cm ⁻ ³) $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ 는 Drude 모델에 따라 12 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm 미만의 저항률을 지원합니다. 미량 합금 원소(예: VC, < 1%)를 적절히 첨가하면 TiC 와 Ni 의 균일한 분포(편차 < 0.1%)를 더욱 최적화하고 계면 결합력(> 120 MPa)을 향상시켜 포괄적인 성능 균형을 달성할 수 있습니다.

(2) WCTiCNi 초경합금 복합재료의 소결공정

소결 공정은 재료의 밀도와 상 분포에 직접적인 영향을 미칩니다.소결 온도는 고온(>1500° C)으로 인해 발생하는 Ni 편석(>0.5%)을 방지하기 위해 1450° C ± 10° C 로 설정되었습니다.SEM 분석에 따르면 이 온도에서 TiC 와 Ni 상이 고르게 분포(편차 <0.1% ± 0.02%)하고 기공률이 낮습니다(<0.1% ± 0.02%).진공 소결(압력 <10 ⁻³ Pa ± 10 ⁻ 4Pa)은 99.5% ± 0.1% 이상의 밀도를 보장하고 산화 및 결함을 줄이며 내마모성과 내부식성을 향상시킵니다.이론적으로 밀도가 높으면 부식성 매체의 침투 경로가 줄어들고 중량 손실도 더욱 줄일 수 있습니다. 등급 소결(1200° C 에서 예비 소결한 후 1450° C 로 승온)이나 열간 등방성 가압(HIP) 기술을 사용하면 미세 구조를 최적화하고, 비정상적인 입자 성장을 억제하고, 마모율을 약 5%-8% 감소시키고, 저온 템퍼링(800° C ± 10° C)을 통해 내부 응력을 제거하고, NiO 수동화 층을 안정화하고, 서비스 수명을 연장할 수 있습니다.

(3) WCTiCNi 초경합금 복합재의 입자 제어

입자 크기의 정밀한 제어는 내마모성과 기계적 특성을 개선하는 중요한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

수단입니다.WC와 TiC의 입자 크기는 0.51 μm ± 0.01 μm로 제어됩니다. 높은 입자 경계 밀도(> 10 ¹ 4 m ⁻ ²)는 연마 입자의 침투와 입자의 탈락(속도 < 0.05%)을 방해합니다. 입자 경계 강화 이론에 따르면 미세 입자는 경질상의 균일한 분산을 향상시킵니다. SEM 관찰 결과 입자 경계 결합력이 > 120 MPa로 마모율을 낮은 수준으로 유지하면서 경도와 인성의 균형을 이룹니다(K ₁c > 10 MPa•m ¹ / ²). 입자 크기가 2 μm ± 0.01 μm를 초과하면 입자 경계의 수가 감소하고 마모율이 15% ± 3% 증가할 수 있으며 인성이 감소합니다. 결정립 미세화를 위해서는 VC(0.5~1%)와 같은 억제제를 첨가하고 볼 밀링 시간을 40 시간 ± 1 시간으로 연장하는 것이 필요합니다. 향후 나노스케일 결정립(<0.3μm)을 이용하여 마모율을 더욱 낮추고 경도를 높이는 방안이 연구될 수 있지만, 생산 비용과 공정 복잡성에 유의해야 합니다.

(4) WCTiCNi 초경합금 복합재료의 표면처리

표면 처리는 내마모성과 내부식성을 최적화하는 효과적인 수단입니다.다이아몬드 연마 또는 화학 기계적 연마(CMP)를 사용하여 표면 거칠기(Ra)를 < 0.05 μm ± 0.01 μm로 제어하고, 표면 결함과 미세 균열을 줄이며, 이론적으로 표면을 평평하게 하여 연마 입자의 접착과 부식성 매체의 침투를 줄입니다.접촉 역학에 따르면 표면 거칠기를 10% ± 2% 줄이면 마모율을 약 10% ± 2% 줄일 수 있으며 접촉 저항도 감소하여(< 0.1 mΩ) 전도성 부품의 성능이 향상됩니다.연마 후 초음파 세척을 병행하여 잔여물을 제거하고 NiO 패시베이션 층(두께 > 10 nm)의 무결성을 더욱 개선하며 중량 손실을 0.06 mg/ cm² 이하로 안정화할 수 있습니다. 미래에는 내식성 코팅(TiN 등, 두께 1.5-2μm)이나 플라즈마 질화 처리가 개발되어 극한 환경(pH < 2 등)에서 내식성을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

(5) WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합재에 대한 시험 사양

성능 검증은 데이터의 신뢰성과 반복성을 보장하기 위해 국제 표준에 따라 수행됩니다. 내마모성 시험은 마모율을 평가하기 위해 ASTM G65(건조 모래/고무 휠 마모 시험)를 기반으로 합니다. 내식성 시험은 중량 손실과 i_corr을 측정하기 위해 ASTM G59(전기화학적 분극 시험)를 기반으로 합니다. 저항률 측정에는 4탐침법이 사용됩니다(정확도 ± 0.01 μΩ•cm). 시험 샘플 크기는 10 × 10 × 5 mm ± 0.1 mm입니다. 환경 조건은 23° C ± 2° C에서 제어되고 습도는 < 65%입니다. 측정을 5회 반복한 후 평균값을 구합니다. 미세 구조와 상 분포는 SEM과 EDS를 결합하여 분석합니다(편차 < 0.1%). 예를 들어, WC10TiC10Ni를 1450° C ± 10° C에서 소결한 후 경도는 HV 1650 ± 30에 도달하고 중량 감소는 0.06 mg/ cm² ± 0.01 mg/cm², 저항률은 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm로 목표 값보다 우수하여 최적화 전략의 효과가 입증되었습니다.

(6) 종합적 최적화 효과 및 응용 전망

위 전략의 상승효과를 통해 1450° C에서 소결한 WC10TiC10Ni 샘플은 입자 크기가 0.51μm이고 Ra가 0.05μm 미만이며 경도가 HV 1650, 중량 감소가 0.06mg/cm², 저항률이 11μΩ•cm로 초기 목표보다 우수합니다. 내마모성은 전자 금형의 요구 사항(수명> 10 6배)을 충족하고, 내부식성은 해양 장비(서비스> 5년)를 지원하며,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

전도성은 전도성 부품에 적합합니다(접촉 저항 < 0.1mΩ). WC10Co(경도 HV 1500, 중량 감소 0.09mg/cm²)와 비교했을 때 WCTiCNi 시스템은 다용성 면에서 확실한 장점이 있습니다. 앞으로 나노-TiC(<100nm)나 플라스마 소결(SPS) 기술을 도입하면 경도를 HV 1700 이상으로 더욱 높이고, 중량 감소를 0.05mg/cm²로 줄일 수 있어 항공 및 첨단 전자 분야에서 응용 가능성이 확대될 것입니다.

WCTiCNi 초경합금은 TiC 함량(5%-10%)과 Ni 함량(8%-10%)을 통해 경도와 내식성의 균형을 이루도록 성능을 최적화했습니다. 1450° C 진공 소결은 밀도(>99.5%)와 균일성을 보장하며, 0.51μm 입자 제어는 내마모성을 향상시키고, 표면 연마(Ra <0.05μm)는 마모율을 줄입니다. 또한 ASTM 표준 시험을 통해 성능이 표준을 충족함을 검증했습니다. WC10TiC10Ni 를 예로 들면, 경도 HV 1650, 중량 감소 0.06mg/cm², 저항률 11μΩ•cm 의 뛰어난 성능은 다기능성 요구를 충족합니다. 앞으로 나노 기술과 표면 개질을 통해 극한 환경에서의 적용 가능성이 더욱 높아질 것입니다.

9.2.1.6 WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합재의 엔지니어링 응용

WCTiCNi 초경합금 복합재는 뛰어난 내마모성, 내부식성, 그리고 전기 전도성을 바탕으로 다양한 엔지니어링 분야에서 탁월한 성능을 입증해 왔습니다. TiC 와 Ni 의 비율을 최적화하고 정교한 제조 공정을 통해, 이 소재는 전자 금형, 해양 장비, 전도성 접점과 같은 까다로운 요구 조건을 성공적으로 충족했습니다. 이러한 응용 분야는 WCTiCNi 복합재의 다기능적 특성을 검증할 뿐만 아니라, 극한 환경 및 정밀 제조 분야에서 널리 사용될 수 있는 기반을 마련합니다. 아래에서는 WCTiCNi 복합재의 엔지니어링 적용 가치와 적용 시나리오, 성능 이점, 그리고 실제 사례를 바탕으로 산업 발전 촉진에 미치는 역할을 자세히 살펴보겠습니다.

(1) WCTiCNi 초경합금 복합소재 전자금형

전자 금형 분야에서 WC10TiC10Ni 는 뛰어난 내마모성과 높은 경도로 이상적인 선택입니다. 이 소재는 미세한 입자 크기를 기반으로 하며 매우 높은 경도를 가지고 있습니다. TiC 를 첨가하면 마모가 크게 감소하고 고주파 스탬핑에서 금형의 장기적인 안정성이 보장됩니다. 100 만 회 이상의 수명을 자랑하며 기존 소재의 성능을 훨씬 능가합니다. 또한, Ni 상의 균일한 분포와 부식 방지 특성은 습한 공장 환경에서의 부식으로 인한 금형 파손 위험을 줄여 휴대폰 하우징 및 커넥터 금형 생산과 같은 정밀 전자 부품 제조에 널리 사용되어 생산 효율과 제품 품질을 크게 향상시킵니다.

(2) WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합소재 해양장비 부품

해양 장비 분야에서 WC8TiC10Ni 는 뛰어난 내식성과 내마모성을 갖춰 탁월한 성능을 발휘합니다. 표면 연마를 통해 표면이 매우 매끄러워져 부식성 매체의 침투를 줄이고, 중량 감소를 최소화하여 염분 분무 환경에서의 서비스 요건을 충족하며, 5 년 이상의 수명을 보장합니다. 결합재인 Ni 는 해수 침식에 대한 강력한 저항성을 제공하며, TiC 함량은 소재의 경도를 향상시켜 해양 시추 및 선박 부품 장비의 장기적인 내구성을 보장합니다. 또한, 적정한 Ni 함량은 소재의 전도성을 유지하여 해양

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

플랫폼의 센서 및 제어 시스템과 같은 전기 연결 요건을 충족하고, 혹독한 환경에서도 신뢰성을 입증합니다.

(3) WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합 전도성 접점

전도성 접점 적용 시 WC10TiC10Ni 는 우수한 전기적 특성으로 선호됩니다. 저항률은 매우 낮은 수준으로 유지되며, Ni 네트워크는 효율적인 전류 흐름을 보장합니다. 접촉 저항 또한 매우 낮아 고주파 스위치 및 마이크로 전자 장비의 요구 사항을 충족합니다. 마모를 줄이는 TiC 의 높은 경도 덕분에 WC10TiC10Ni 의 수명은 백만 배 이상이며, Ni 의 내식성은 습하거나 산성 환경에서 추가적인 보호 기능을 제공합니다. 따라서 자동차 전자 제어 장치 및 산업용 릴레이에 적합하며, 아크 마모 및 접점 고장을 크게 줄여줍니다.

(4) WCTiCNi 초경합금 복합소재 항공부품 코팅

WCTiCNi 복합재는 항공 부품 코팅 분야에서도 큰 잠재력을 보여줍니다. 예를 들어, WC10TiC8Ni 는 터빈 블레이드 및 엔진의 내마모성 코팅에 사용됩니다. 높은 경도와 고온 저항성(800° C 이상의 온도에도 견딜 수 있음)은 부품의 수명을 크게 연장합니다. TiC 는 추가적인 표면 보호 기능을 제공하여 고속 기류 및 입자 정련으로 인한 마모를 줄여줍니다. 또한, Ni 의 내식성은 높은 습도 및 염분 분무 환경에서 코팅의 안정성을 보장하여 유지보수 주기를 연장합니다. 또한, 이 코팅은 일정 수준의 전도성을 가지고 있어 항공 전자 장비의 접지 요건을 충족하며, 항공기 엔진 및 프로펠러 부품에서 우수한 성능을 발휘하여 전반적인 비행 안전을 향상시킵니다.

(5) WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합재 석유 시추 공구

석유 시추 산업에서 WC12TiC10Ni 는 뛰어난 내마모성과 내부식성으로 드릴 비트와 절삭 공구에 널리 사용됩니다. TiC 는 소재의 내마모성을 향상시켜 고경도 암반에서 장시간 작업할 수 있도록 합니다. 또한, Ni 첨가는 황 및 염소 함유 환경에서 공구의 내식성을 크게 향상시켜 중량 감소를 매우 낮은 수준으로 유지하여 시추 효율과 공구 수명을 보장합니다. 표면 연마는 마모 및 부식 위험을 더욱 줄여 심해 및 육상 시추 작업에서 우수한 성능을 발휘하고, 교체 빈도를 줄이며 운영 비용을 절감합니다.

(6) WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합 의료기기

WC8TiC5Ni 는 정형외과용 메스 및 치과용 드릴 제조와 같은 의료기기 분야에서도 각광받고 있습니다. TiC 의 높은 경도는 절삭날의 날카로움을 유지하고 정밀 수술의 요구를 충족합니다. Ni 의 생체 적합성과 내식성은 인체의 유체 환경에서 부식 위험을 줄이고, 무게 감소도 매우 적어 수술 도구의 수명을 연장합니다. 또한, 낮은 저항률은 특정 전기수술 도구의 전도성 요건을 충족하고, 멸균 및 습한 환경에서도 우수한 성능을 발휘하며, 수술의 안전성과 효율성을 향상시킵니다.

(7) WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합재료의 포괄적인 이점 및 확장된 적용

이러한 응용 분야는 내마모성, 내부식성 및 전기 전도성 측면에서 WCTiCNi 복합재의 시너지 최적화를 충분히 보여줍니다. 전자 금형에서 높은 경도와 낮은 마모율은 금형 수명을 연장합니다. 해양 장비에서 Ni 의 내식성은 장기 사용을 지원합니다. 전도성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

접점에서 낮은 저항률과 긴 수명은 높은 신뢰성 요건을 충족합니다. 항공 부품 코팅에서 고온 내마모성은 부품 수명을 향상시킵니다. 석유 시추 공구에서 내마모성과 내부식성은 작업 효율을 향상시킵니다. 의료 기기에서 생체 적합성과 높은 경도는 안전성을 보장합니다. 기존 WC-Co 소재와 비교했을 때 WCTiCNi 시스템은 다용성 측면에서 뚜렷한 이점을 제공합니다. 예를 들어, WC10Co 는 WC10TiC10Ni 보다 중량 감소율이 높고 내식성이 크게 향상됩니다.

또한, WCTiCNi 는 확장된 응용 분야에 대한 잠재력을 보여줍니다. 예를 들어, 철도 궤도의 내마모성 층에서 높은 경도는 마모를 감소시킬 수 있으며, 웨어러블 전자 기기에서는 낮은 저항률로 유연한 전도성 부품을 지원합니다. 향후 소재 조성 및 표면 처리 기술의 개선을 통해 에너지, 의학, 운송 분야에서 WCTiCNi 의 적용 범위가 더욱 확대될 수 있습니다.

WCTiCNi 초경 복합재는 전자 금형, 해양 장비, 전도성 접점, 항공 부품 코팅, 석유 시추 공구 및 의료 기기에 적합합니다. WC10TiC10Ni 는 높은 경도, 낮은 마모율, 긴 수명을 자랑하며, 금형 요건을 충족하고, WC8TiC10Ni 는 낮은 중량 감소와 긴 사용 수명을 통해 해양 응용 분야를 지원합니다. WC10TiC10Ni 는 낮은 저항률과 접촉 성능으로 접촉 신뢰성을 보장합니다. WC10TiC8Ni 는 고온 내성을 통해 항공 부품의 수명을 향상시키고, WC12TiC10Ni 는 내마모성 및 내부식성을 통해 드릴링 효율을 최적화하며, WC8TiC5Ni 는 생체 적합성을 통해 의료 기기를 지원합니다. 이러한 응용 분야는 내마모성, 내부식성, 전도성 측면에서 WCTiCNi 의 포괄적인 장점을 입증합니다. 향후 공정 개선 및 소재 혁신을 통해 다양한 엔지니어링 분야에서 WCTiCNi 의 적용 가능성을 더욱 높일 수 있습니다.

WCTiCNi 초경 복합재의 성능 시험

9.2.2.1 WCTiCNi 초경 복합재료 성능 시험 원리

성능 시험은 WCTiCNi 초경 복합재의 종합적인 성능을 평가하는 핵심 수단입니다. 경도(목표값 > HV 1600 ± 30), 마모율(목표값 < 0.06 mm^3 / N·m ± 0.01 mm^3 / N·m), 중량 감소(목표값 < 0.08 mg/cm^2 ± 0.01 mg/cm^2), 저항률(목표값 < 12 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm)을 정량화하고, 내마모성, 내부식성 및 전도성을 체계적으로 검토합니다. 이러한 지표는 실제 적용에서 재료의 신뢰성과 내구성을 직접적으로 반영합니다. 시험 표준에는 내마모성 평가를 위한 ASTM G65(건식모래마모시험), 내식성 평가를 위한 ASTM G59(전기화학적 부식시험), 그리고 전도도 측정을 위한 4 탐침법이 포함되어 있으며, 이를 통해 전자 분야(접촉 저항 < 0.1 mΩ ± 0.01 mΩ 등) 및 해양 환경(사용 수명 > 5 년 ± 0.5 년 등)에서 WCTiCNi 소재의 우수한 성능을 보장하는 것을 목표로 합니다. 본 시험 과정은 정량적 데이터를 제공할 뿐만 아니라, 소재 최적화 및 공정 개선을 위한 과학적 근거를 제공합니다.

9.2.2.2 WCTiCNi 초경합금 복합재료 성능 시험 방법 및 장비

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

성능 테스트는 고급 테스트 장비와 표준화된 절차에 의존합니다. 비커스 경도 시험기는 10kg ± 0.1kg의 하중으로 재료 표면에 압입 측정을 수행하여 경도 값을 정확하게 평가하여 TiC 상의 높은 경도(> HV 2000)가 마모 저항에 기여하는 것을 반영합니다. 마모 시험기는 130N ± 1N의 하중으로 실제 작업 조건을 시뮬레이션하고 건식 모래 마모 시험(ASTM G65)을 통해 마모율을 정량화합니다. 시험 조건에서 모래 입자의 정련 및 마찰은 전자 금형 및 석유 시추 도구의 사용 시나리오와 같은 높은 마모 환경을 시뮬레이션합니다. 전기화학 워크스테이션은 ± 0.001V의 전위 정확도로 부식 시험(ASTM G59)을 수행하고 3.5% NaCl 용액에서 중량 손실 및 부식 전류 밀도를 측정하여 Ni 상의 내식성과 NiO 부동태화층의 안정성을 평가합니다. 4단자 법칙은 일정한 전류를 인가하고 전압 강하를 측정하여 저항률을 정확하게 측정합니다. 이 전압 강하는 니켈 네트워크의 전도성 기여를 반영합니다. 샘플 크기는 일반적으로 10 × 10 × 5 mm ± 0.1 mm이며, 환경 요인의 간섭을 줄이기 위해 시험 환경은 23° C ± 2° C, 습도 < 65%로 제어됩니다. 시험은 5회 반복하여 평균값을 구하여 데이터의 신뢰성과 통계적 유의성을 확보합니다.

(1) 데이터 분석 및 성능 검증

시험 데이터는 포괄적인 분석을 통해 WCTiCNi 소재의 성능 이점을 보여줍니다. WC10TiC10Ni를 예로 들면 경도가 HV 1650 ± 30에 도달하여 TiC 함량(10% ± 0.1%)과 미세 입자 구조(0.51 μm)가 내마모성을 효과적으로 향상시키며 마모율은 0.05 mm³ / N • m ± 0.01 mm³ / N • m으로 목표 값보다 우수하여 고주파 펀칭 및 절단에서 우수성을 보여줍니다. 중량 감소 0.06 mg/ cm² ± 0.01 mg/ cm²는 0.08 mg/ cm²보다 낮아 Ni 함량(10% ± 1%)이 NiO 부동태화 층(두께 ~ 10 nm)을 통해 우수한 부식 방지 기능을 제공하여 해양 장비 및 의료 기기의 장기 서비스 요구 사항을 충족함을 증명합니다. 저항률은 11 μΩ•cm ± 0.1 μΩ•cm로 12 μΩ•cm보다 낮습니다. 이는 Ni 네트워크의 연속성(>95%)이 효율적인 전도성을 보장하고 전도성 접점 및 항공 전자 장비 응용을 지원함을 나타냅니다. SEM 및 EDS 분석을 통해 TiC 입자의 균일한 분포(편차 <0.1%)와 Ni 상의 안정성을 더욱 확인할 수 있었으며, XPS 검출을 통해 NiO 층(Ni 2p 피크 위치 ~ 854 eV) 형성을 확인하여 성능 데이터에 대한 미시적 뒷받침을 제공했습니다.

(2) 응용지향적이고 확장된 검증

시험 결과는 특정 엔지니어링 시나리오에서 WCTiCNi 소재의 적용을 직접적으로 안내합니다. 전자 금형에서는 경도와 낮은 마모율이 100만 회 이상의 사용 수명을 보장합니다. 해양 장비에서는 낮은 중량 감소로 5년 이상의 사용 수명을 보장합니다. 전도성 접점에서는 낮은 저항률이 높은 신뢰성 요건을 충족합니다. 또한, 성능 시험은 항공 부품 코팅과 같은 다른 분야로도 확장되었습니다. WC10TiC8Ni의 높은 경도와 고온 저항(>800° C)은 마모 및 내부식성 시험을 통해 터빈 블레이드에서의 적용 가능성을 검증했습니다. 석유 시추 공구에서는 WC12TiC10Ni의 낮은 마모율과 내부식성이 시뮬레이션 시험을 통해 유황 함유 환경에서의 장점을 확인했습니다. 의료 기기에서는 WC8TiC5Ni의 낮은 중량 감소와 생체 적합성이 부식 시험을 통해 정형외과 도구의 사용을 뒷받침합니다. 시험 데이터는 또한 최적화를 위한 기반을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

제공합니다. 예를 들어, 입자 크기가 너무 크면(> 2μm) 마모율이 15% 증가하고, 소결 온도가 너무 높으면(> 1500° C) 편석이 10% 증가할 수 있으며, 이는 공정 조정을 통해 제어해야 합니다. 향후에는 동적 마모 시험과 장기 부식 시뮬레이션을 도입하여 극한 조건에서 재료의 성능을 더욱 검증할 수 있을 것입니다.

9.2.2.3 WCTiCNi 초경 복합재료의 성능 시험 메커니즘 분석

WCTiCNi 초경합금 복합재의 성능 시험 메커니즘 분석은 경도, 마모율, 부식 성능 및 저항률의 이면에 숨겨진 미시적 메커니즘을 심층적으로 규명하는 것을 목표로 합니다. 이러한 특성은 전자, 해양, 전도성과 같은 엔지니어링 응용 분야에서 재료의 성능을 좌우합니다. 실험 데이터와 미시적 관찰을 결합하여 TiC 의 강화 효과, Ni 의 인성 및 내식성 기여도, 그리고 결정립 크기 및 상 분포의 영향을 분석하여 재료 성능 최적화 및 응용 분야 확장을 위한 이론적 근거를 제공합니다. 이 섹션에서는 경도 시험, 마모 메커니즘, 부식 거동 및 저항률 특성 측면에서 자세히 논의하고 실제 시험 결과와 결합하여 그 메커니즘을 검증합니다.

(1) 경도 시험 기구

경도 시험은 주로 WCTiCNi 복합 재료에 대한 TiC 의 강화 효과를 반영합니다. TiC 의 고유 경도는 HV 2000 ± 50 을 초과하는데, 이는 단단한 공유 결합 구조 때문입니다. 이 높은 경도는 격자 강화를 통해 전반적인 재료 성능을 크게 향상시킵니다. WC10TiC10Ni 를 예로 들면, 경도는 HV 1650 ± 30 에 도달하는데, 이는 WC(약 HV 1800 ± 30)와 TiC 의 상승 효과에 의해 달성됩니다. WC 는 주요 경질 상으로 기본 경도를 제공하고, TiC 를 첨가하면 표면 압축 저항이 더욱 향상됩니다. 시험에서 비커스 경도 시험기(하중 10 kg ± 0.1 kg)를 사용하여 표면 압입을 측정했습니다. 미세한 입자 구조(0.5 μm ± 0.01 μm)는 입계 밀도를 증가시켜(> 10^{14} m^{-2}) 변형 저항성을 더욱 향상시키고, 경도를 균일하게 분포시키며 국부 연화를 감소시킵니다. SEM 관찰 결과 TiC 입자가 WC 매트릭스에 균일하게 매립되어(편차 < 0.1%) 계면 결합 강도(> 120 MPa)가 향상되어 고경도 성능을 뒷받침합니다.

(2) 마모 메커니즘 분석

마모율 시험은 실제 작업 조건을 시뮬레이션하여 재료의 마모 저항성을 정량화합니다. WC10TiC10Ni 의 마모율은 0.06 mm^3 / N • m ± 0.01 mm^3 / N • m 미만이며, 이는 TiC 의 높은 경도와 Ni 의 인성의 영향을 받습니다. 마모 과정에는 질량 손실(Δm, 정확도 ± 0.01 mg), 재료 밀도(ρ 약 14.5 g/ cm^3 ± 0.1 g/cm^3), 적용 하중(F 130 N ± 1 N) 및 슬라이딩 거리(L 1436 m ± 1 m)가 포함되며, 미세 입자(0.5 μm ± 0.01 μm)는 연마재 침입과 균열 전파를 줄여 마모율을 약 10% ± 2% 감소시킵니다. Ni(K_{1c} 약 12 MPa·$m^{1/2}$ ± 0.5) 의 인성은 마모 균열(크기 < 0.1 μm ± 0.01 μm) 형성을 더욱 감소시켰고, SEM 으로 관찰한 마모 형태는 홈 깊이가 1 μm ± 0.1 μm 미만으로 표면이 강한 내마모성을 가지고 있음을 나타냈습니다. 반면, TiC 함량이 너무 높으면(> 15%) 인성이 감소하고 미세균열 위험이 증가할 수 있으므로 비율을 최적화하여 균형을 유지해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(3) 부식거동 메커니즘

부식 시험은 전기화학적 방법으로 WCTiCNi 의 내식성을 평가합니다. 결합 상으로 Ni 를 사용하면 부식 전류 밀도(i_corr)가 약 10^{-6}A/cm² ±10^{-7}A/cm² 로, Ni 표면에 형성된 NiO 부동태화 층(두께 ~10nm) 덕분에 기존의 Co 기반 재료(i_corr 은 약 10^{-5}A/cm² ±10^{-6}A/cm²)보다 상당히 우수합니다. 3.5% NaCl 용액에서 중량 손실은 목표값인 0.08mg/cm² 보다 낮은 0.06mg/cm² ±0.01mg/cm² 로 제어됩니다. EDS 분석으로 NiO 층의 화학적 조성(Ni:O 비율 약 1:1 ± 0.1)이 확인되었으며, 이는 Ni 의 전기화학적 안정성(부식 전위 E_corr ~ 0.1 V vs. SCE)이 부식 속도를 효과적으로 늦추는 것을 나타냅니다. 반면, Co 상은 동일한 조건에서 산화물을 형성할 가능성이 더 높으며, 중량 손실은 0.09 mg/cm² 까지 증가할 수 있습니다. Ni 를 첨가하면 해양 환경이나 산성 매체에서 재료의 내구성이 크게 향상됩니다. SEM 관찰 결과 부식 피트의 깊이가 <0.5 μm 로 나타나 우수성이 더욱 확인되었습니다.

(4) 저항률 특성 분석

저항률 시험은 4 탐침법으로 WCTiCNi 의 전기 전도도를 측정합니다. WC10TiC10Ni 의 저항률은 11 μΩ·cm ± 0.1 μΩ·cm 로 안정적이며, 이는 목표값인 12 μΩ·cm 보다 낮습니다. 이는 주로 Ni 네트워크의 연속성(> 95% ± 2%) 때문입니다. Ni 는 결합 상으로 효율적인 전자 이동 경로를 제공합니다. 비금속 경질 상인 TiC 는 높은 고유 저항률(약 50 μΩ·cm)을 가지고 있어 복합 재료의 전체 저항을 약간 증가시키지만(기여도 < 5% ± 1%), Ni 상의 균일한 분포(편차 < 0.1%)로 인해 전체 전도도는 우수한 상태를 유지하여 전도성 접점과 항공 전자 장비의 적용을 지원합니다. SEM 분석 결과 Ni 상은 3 차원 네트워크를 형성하고, EDS 분석 결과 Ni 함량(10% ± 1%)은 저항률과 음의 상관관계를 갖는 것으로 확인되었습니다. 이는 Ni 함량을 적당히 증가시키면 저항률을 더욱 낮출 수 있지만 경도와 내식성은 균형을 이루어야 함을 나타냅니다.

(5) 미시적 관찰 및 종합적 메커니즘

현미경 분석은 SEM 과 EDS 를 통해 성능 메커니즘에 대한 직관적 증거를 제공합니다. 마모 형태는 명확한 홈과 마모 흔적을 보여줍니다. 0.5μm ± 0.01μm 의 입자 크기는 마모 확장을 효과적으로 제한합니다. NiO 층의 존재는 부식성 매체의 침투를 줄입니다. EDS 는 TiC 함량(10% ± 0.1%)과 경도 및 마모율 간의 상관 관계를 감지합니다. XPS 분석은 NiO 층의 화학적 상태(Ni 2p 피크 ~ 854 eV)를 추가로 검증하여 내식성 메커니즘을 뒷받침합니다. 입계 강화와 계면 결합(> 120 MPa)의 결합 효과는 기공률(< 0.1% ± 0.02%)과 결함률(< 0.05%)을 감소시키고 재료의 전반적인 성능 안정성을 향상시킵니다. WC10Co 와 비교하여 WCTiCNi 는 인성과 내식성에서 명백한 이점을 가지고 있으며 마모율과 중량 감소 데이터는 기존 재료보다 우수합니다.

(6) 응용 검증 및 최적화 방향

시험 메커니즘 분석은 엔지니어링 응용 분야에서 WCTiCNi 의 성능을 좌우합니다. 전자 금형에서 높은 경도와 낮은 마모율은 100 만 회 이상의 수명을 지원합니다. 해양 장비에서 낮은 중량 감소는 5 년 이상의 서비스 수명을 보장합니다. 전도성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

접점에서 낮은 저항률은 높은 신뢰성 요구 사항을 충족합니다. 향후 최적화는 입자 크기를 0.3μm 로 줄여 마모율을 더욱 낮추고 Ni 함량을 12%로 높여 내식성을 향상시키는 데 중점을 둘 수 있지만 경도 감소 위험에 주의해야 합니다. 표면 코팅(예: TiN)을 도입하면 pH < 2 환경에서 내식성을 개선하고 서비스 수명을 연장할 수 있습니다. 플라즈마 소결(SPS) 기술을 사용하면 밀도와 균일성을 개선하여 항공 및 의료 분야의 더 높은 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

WCTiCNi 초경합금 복합소재의 성능 시험 메커니즘은 TiC 가 경도(HV 1650 ± 30)를 강화하고, Ni 가 인성과 내식성을 향상(무게 감소 0.06 mg/cm²), Ni 네트워크가 전도성을 지지(저항률 11 μΩ•cm)하는 시너지 효과를 보여주며, 미세한 입자와 계면 결합으로 마모율이 0.06 mm³/N•m 미만임을 보여줍니다. SEM 과 EDS 는 미세한 증거를 제공하며, 향후 입자 최적화 및 표면 처리를 통해 다양한 분야에서의 응용 성능을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

9.2.2.4 WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합재료의 성능 시험 방법

WCTiCNi 초경합금 복합재 성능 시험의 정확성과 일관성을 보장하기 위해서는 경도, 마모율, 부식 성능, 저항률과 같은 핵심 지표를 포함하는 표준화된 시험 방법과 정밀 장비가 필요합니다. 이러한 시험 방법은 재료의 내마모성, 내부식성, 전도성을 반영할 뿐만 아니라 전자 금형, 해양 장비, 전도성 접점과 같은 응용 분야에서 데이터의 적용 가능성도 보장해야 합니다. 시험 조건과 시료 준비 과정을 최적화함으로써, 시험 결과는 재료 성능 평가, 공정 개선 및 엔지니어링 적용을 위한 신뢰할 수 있는 기반을 제공할 수 있습니다. 다기능 성능 요건을 충족하는 시험 정확성과 반복성을 보장하기 위한 시험 방법, 장비 매개변수 및 시료 준비에 대한 자세한 설명은 다음과 같습니다.

(1) 경도 시험

경도 시험은 비커스 경도 시험기를 사용하여 실시한다. 10kg ± 0.1kg 의 하중을 가하여 재료 표면에 압입을 형성하고, 대각선 길이를 측정하여 ±30 의 정확도로 경도 값을 계산하며, 이는 TiC 상(경도 > HV 2000)이 전체 강화에 기여하는 정도를 반영한다. 시험 전에 표면이 평평하고 눈에 띄는 결함이 없는지 확인해야 하며, 압입 위치 간격은 상호 영향을 피하기 위해 압입의 대각선 길이의 최소 2.5 배 이상이어야 한다. 각 시험은 5 회 반복하고, 오차를 줄이기 위해 평균값을 취한다. WC10TiC10Ni 샘플의 경도는 일반적으로 HV 1650 ± 30 에 이른다. 이 고정밀 시험 방법은 고주파 스탬핑 및 절삭에서 재료의 내구성을 평가하는 데 적합하며, 전자 금형 및 석유 시추 도구의 적용 요건을 충족한다.

(2) 마모 시험

마모 시험은 실제 작업 조건에서 마모 거동을 시뮬레이션하기 위해 130N ± 1N 의 적용 하중과 1436m ± 1m 의 슬라이딩 거리를 갖는 건식 모래/고무 휠 마모 시험기를 사용하여 ASTM G65 에 따라 수행되었습니다. 시험 중 모래 입자는 일정한 흐름 속도로 샘플 표면 위로 흘려보냈고, 질량 손실은 정밀 저울(정확도 ±0.01mg)을 사용하여

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

측정했습니다. 마모율은 재료 밀도(약 14.5g/cm³)를 기준으로 계산했으며, 목표 값은 0.06mm³ / N • m ± 0.01mm³ / N • m 미만이었습니다. 시험 환경은 23° C ± 2° C, 습도 < 65%로 제어되었으며, 각 시험은 3 회 반복되었고, 반복성 > 95% ± 2%를 보장하기 위해 평균값을 사용했습니다. 예를 들어, WC10TiC10Ni 의 마모율은 0.05 mm³ / N • m ± 0.01 mm³ / N • m에 도달하여 미세한 입자 구조(0.5 μm)와 균일한 TiC 분포(편차 < 0.1%)가 내마모성을 효과적으로 향상시키고 항공 부품 코팅 및 철도 내마모층에 적합하다는 것을 나타냅니다.

(3) 부식 시험

부식 시험은 ASTM G59 표준을 사용하는 전기화학 워크스테이션을 사용하여 수행되었으며, 스캔 속도는 0.1 mV/s ± 0.01 mV/s 였고, 부식 전류 밀도(i_{corr})와 중량 감소는 3.5% NaCl 용액에서 측정되었습니다. 샘플을 24 시간 동안 담근 후, 3 전극 시스템(작업 전극, 기준 전극, 보조 전극)을 사용하여 분극 곡선을 기록했고, 중량 감소는 무게 측정(정확도 ±0.01 mg/cm²)을 통해 결정했으며, 목표 값은 0.08 mg/cm² 미만입니다. ± 0.01 mg/cm². 시험 온도는 25° C ± 1° C 에서 조절되었고, pH 는 6.5-7.0 에서 안정화되었으며, 3 회 반복 후 평균값을 취했습니다. WC10TiC10Ni 의 중량감소는 0.06 mg/ cm² ± 0.01 mg/ cm², i_{corr} 은 약 10 - 6 A/ cm² 로 Co 기반 소재보다 우수하여 해양장비 및 의료기기에서 Ni 의 NiO 패시베이션층(두께 ~ 10 nm)의 내식성 장점을 입증합니다.

(4) 저항률 시험

저항률 시험은 4 탐침법을 채택하여 1mA ± 0.01mA 의 정전류원을 인가하고 전압 강하를 측정하여 저항률을 계산하는데, 정확도는 ±0.01μΩ•cm 이고 목표값은 12μΩ•cm ± 0.1μΩ•cm 미만입니다. 탐침 간격은 1mm 이고 샘플 표면에는 산화막이나 먼지가 없어야 합니다. 시험은 5 회 반복하고 평균값을 구하여 Ni 네트워크의 전도성 기여(>95% 연속성)를 보장합니다. WC10TiC10Ni 의 저항률은 11μΩ•cm ± 0.1μΩ•cm 로 안정적이며, 이는 Ni 상의 높은 전자 밀도와 균일한 분포(편차 <0.1%)를 반영하여 전도성 접점과 웨어러블 전자 장치의 낮은 접촉 저항 요구 사항(<0.1mΩ)을 지원합니다.

(5) 샘플 준비

샘플 준비는 시험 정확도를 보장하는 핵심 단계입니다. 다이아몬드 연마 또는 화학 기계적 연마(CMP)를 통해 표면 거칠기(Ra)를 0.05μm ± 0.01μm 미만으로 제어하고, 표면 결함과 미세 균열을 줄이며, 표면을 평탄화하여 마모율과 부식성 매체의 침투를 줄입니다. 연마 후 초음파 세척을 통해 잔류물을 제거합니다. 샘플 크기는 10 × 10 × 5mm ± 0.1mm 이며, 응력 집중을 방지하기 위해 모서리 모따기는 0.2mm 입니다. 준비된 샘플의 표면 균일성은 SEM(편차 < 0.1%)으로 검증하여 후속 시험의 일관된 기준을 제공합니다. 예를 들어, 상기 준비 과정에서 WC10TiC10Ni 샘플의 마모율은 0.05 mm³ / N•m ± 0.01 mm³ / N•m 이고 반복성은 > 95% ± 2%로, 연마 공정을 통해 시험 결과의 신뢰성과 일관성이 크게 향상됨을 나타냅니다.

(6) 환경 관리 및 데이터 검증

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

시험 중에는 온도와 습도의 간섭을 줄이기 위해 온도는 23° C ± 2° C, 습도는 65% 미만으로 엄격하게 제어해야 합니다. 부하, 전류 및 전위 매개변수의 안정성을 보장하기 위해 각 시험 전에 장비를 교정했습니다. 데이터 검증은 표준 샘플(예: WC10Co)과 비교하고, SEM 과 EDS 를 결합하여 미세 구조를 분석하고, TiC 함량(10% ± 0.1%)과 Ni 분포(편차 < 0.1%)를 확인하며, XPS 를 통해 NiO 층의 형성을 추가로 검증할 수 있습니다. 시험 결과는 항공 코팅(고온 저항성) 및 의료 기기(생체 적합성)와 같은 다른 응용 분야로 확장하여 재료 최적화를 위한 데이터 지원을 제공할 수 있습니다.

(7) 응용 방향 및 향후 개선 사항

이러한 시험 방법은 엔지니어링 분야에서 WCTiCNi 소재의 적용을 직접적으로 안내합니다. 경도 시험은 전자 금형 및 석유 시추 공구의 내구성 평가를 지원합니다. 마모 시험은 항공 부품 및 철도 내마모층의 성능을 최적화합니다. 부식 시험은 해양 장비 및 의료 기기의 장기 신뢰성을 보장합니다. 저항률 시험은 전도성 접점 및 웨어러블 전자 기기의 요구를 충족합니다. 미래에는 동적 마모 시뮬레이션(예: 고속 회전 시험) 및 장기 부식 침지(>1000 시간)를 도입하고 자동화 장비(예: 로봇 연마 시스템)와 결합하여 효율성을 개선할 수 있으며, 나노 스케일 표면 처리(예: TiN 코팅)를 사용하여 거칠기를 Ra < 0.03μm로 더욱 줄여 시험 정확도와 재료 성능을 향상시킬 수 있습니다.

WCTiCNi 초경합금 복합재의 성능 시험은 비커스 경도계(하중 10 kg), ASTM G65(하중 130 N), ASTM G59(주사 속도 0.1 mV/s), 4 탐침법(전류 1 mA)을 사용하여 경도, 마모율, 중량 감소 및 저항률을 정량화했습니다. 정확도를 보장하기 위해 시편을 Ra < 0.05 μm로 연마했습니다. WC10TiC10Ni 를 예로 들면, 0.05 $mm^3/N \cdot m$ 의 마모율과 95% 이상의 반복성을 통해 이 방법의 신뢰성이 검증되었습니다. 향후 동적 시험 및 표면 최적화를 통해 다양한 분야에서의 응용 가능성을 더욱 높일 수 있을 것입니다.

9.3 초경합금의 자기윤활성 및 접착방지성

9.3.1 초경합금의 자기윤활성 및 항부착성 이론

자체 윤활성(마찰 계수 < 0.2 ± 0.01) 및 항부착성(부착력 < 1 N ± 0.1 N)은 초경합금이 현대 산업 응용 분야에서 개선해야 할 특성입니다. 이러한 특성은 고체 윤활제(예: MoS_2 및 C, 함량 5% ± 0.1%)를 도입하고 표면 질감(깊이 110μm ± 0.1μm)을 최적화하여 크게 개선되었으며, 고속 절삭(속도 > 500m/min ± 10m/min), 건식 가공(마찰열 < 100° C ± 1° C) 및 금형 성형(금형 이형력 < 10N ± 1N)과 같은 고요구 시나리오의 요구를 충족합니다. 기존 WCCo 소재는 높은 고유 마찰 계수(약 0.5 ± 0.05)를 가지고 있어 저마찰 및 고점착 조건에 효과적으로 대처하기 어렵고, 건식 가공 및 정밀 성형 시 마모 및 점착 문제를 야기하여 적용 범위가 제한됩니다. 이와는 대조적으로, WCTiCNi 시스템은 고체 윤활제의 저전단 특성과 텍스처 설계의 항력 감소 효과를 결합하여 자가 윤활 및 점착 방지를 위한 새로운 솔루션을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(1) 고체윤활제의 도입

고체 윤활제인 MoS_2와 C는 자가 윤활 및 점착 방지를 달성하는 데 핵심적인 역할을 합니다. 층상 화합물인 MoS_2는 약한 층간 반데르발스 힘(약 0.1 eV)으로 인해 낮은 마찰 특성을 제공하며, 마찰 계수를 0.15 ± 0.01까지 낮출 수 있어 고속 절삭 및 건식 가공 환경에 적합합니다. C(흑연 또는 탄화물 형태)는 층상 구조와 자가 윤활성을 통해 표면 간 전단 응력을 더욱 감소시키며, 특히 고온(500° C 이상)에서 더욱 효과적입니다. 함량을 5% ± 0.1%로 조절하면 고체 윤활제가 WC 와 TiC 매트릭스에 고르게 분포됩니다(편차 < 0.1%). SEM 분석 결과, MoS_2와 C 입자가 상 경계에 매립되어 직접적인 금속 접촉을 줄이고 접착력을 0.8N ± 0.1N 으로 감소시키는 것으로 나타났습니다. WCCo 의 높은 마찰 계수(0.5 ± 0.05)와 비교했을 때, 이러한 첨가는 에너지 손실과 열 축적(<100° C)을 크게 줄여 공구 수명과 가공 효율을 향상시킵니다. 예를 들어, 건식 절삭에서 WC5MoS_2의 마찰 계수는 0.15 ± 0.01 이고 접착력은 0.8N ± 0.1N 으로 무냉각 가공의 환경 보호 요건을 충족합니다.

(2) 표면 질감 및 윤활 메커니즘

영어: 레이저 에칭이나 기계 가공을 통해 재료 표면에 μm ± 0.1 μm의 텍스처 구조가 있어 자체 윤활 및 접착 방지 특성이 향상됩니다. 이러한 텍스처 구조는 MoS_2 또는 C 입자를 포획하고 저장하여 마찰 쌍 간의 직접 접촉을 줄일 수 있습니다. Stribeck 곡선은 경계 윤활 영역(저속 및 저부하)에서 혼합 윤활 영역(중속 및 중부하)으로 윤활제 분포가 개선되면서 마찰 계수가 0.2 미만으로 감소함을 보여줍니다. 텍스처 깊이와 간격(약 100-120 μm)이 최적화된 후 접착력(< 1 N)이 효과적으로 감소합니다. 특히 금형 성형에서 탈형력이 10 N ± 1 N으로 감소하여 공작물 접착 및 표면 손상이 줄어듭니다. SEM 관찰 결과 텍스처의 윤활제 층 두께가 약 5-10 μm로 특히 끈적끈적한 재료(예: 알루미늄 합금)를 가공할 때 칩이 공구 표면에 접착되는 경향이 크게 줄어듭니다. 또한, 이러한 질감은 마찰열(< 100° C)의 빠른 소산을 촉진하여 고온으로 인한 결합을 피하고 공구 수명을 연장합니다.

(3) 트라이볼로지 이론 및 시험기준

트라이볼로지 이론은 자가 윤활 및 항점착 메커니즘에 대한 이론적 근거를 제공합니다. 스트라이벡 곡선은 하중과 속도에 따른 윤활 상태의 변화를 나타냅니다. WCTiCNi 시스템은 고체 윤활제와 텍스처 설계를 통해 경계 윤활에서 혼합 윤활로의 전환을 달성하며, 마찰 계수는 WCCo 의 0.5 에서 0.15~0.2 로 감소합니다. 마찰 계수와 점착력을 정량화하기 위해 ASTM G99(핀-디스크 마찰 및 마모 시험) 시험 표준을 사용합니다. 하중 범위는 10~200N, 속도는 0.1~1m/s 이며, 시험은 3 회 반복하고 평균값을 사용하여 데이터 신뢰성을 확보합니다. 환경 조건은 건식 가공 및 고속 절삭 조건을 시뮬레이션하여 25° C ± 2° C, 습도 50% ± 5%로 제어됩니다. 표면 형태 분석(SEM)과 윤활제 분포(EDS)와 결합한 테스트 결과는 마찰과 접착력을 줄이는 데 있어 MoS_2와 C의 역할을 검증하고, 재료 최적화를 위한 데이터 지원을 제공합니다.

(4) 트라이볼로지 이론 및 시험기준

트라이볼로지 이론은 자가 윤활 및 항점착 메커니즘에 대한 이론적 근거를 제공합니다. 스트라이벡 곡선은 하중과 속도에 따른 윤활 상태의 변화를 나타냅니다.

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

WCTiCNi 시스템은 고체 윤활제와 텍스처 설계를 통해 경계 윤활에서 혼합 윤활로의 전환을 달성하며, 마찰 계수는 WCCo의 0.5에서 0.15~0.2로 감소합니다. 마찰 계수와 점착력을 정량화하기 위해 ASTM G99(핀-디스크 마찰 및 마모 시험) 시험 표준을 사용합니다. 하중 범위는 10~200N, 속도는 0.1~1m/s 이며, 시험은 3 회 반복하고 평균값을 사용하여 데이터 신뢰성을 확보합니다. 환경 조건은 건식 가공 및 고속 절삭 조건을 시뮬레이션하여 25° C ± 2° C, 습도 50% ± 5%로 제어됩니다. 표면 형태 분석(SEM)과 윤활제 분포(EDS)와 결합한 테스트 결과는 마찰과 접착력을 줄이는 데 있어 MoS_2와 C의 역할을 검증하여 재료 최적화를 위한 데이터 지원을 제공합니다.

초경합금 고체윤활제(MoS_2, C)의 도입

9.3.2.1 초경합금 고체 윤활제의 원리 및 기술 개요

초경합금의 자체 윤활 특성은 고체 윤활제 MoS_2와 C 를 도입함으로써 상당히 향상됩니다. MoS_2(층간 전단 강도 < 1 MPa ± 0.1 MPa, 함량 5% ± 0.1%)와 C(흑연 형태, 마찰 계수 < 0.1 ± 0.01)는 낮은 전단력(< 1 MPa ± 0.1 MPa)으로 마찰 계수를 효과적으로 감소시키고 목표 값을 < 0.2 ± 0.01 로 설정하여 고속 절삭, 건식 가공 및 금형 성형의 낮은 마찰 요구 사항을 충족합니다. MoS_2의 층상 구조(층간 간격 약 6.2Å) ± 0.1Å)는 매끄러운 슬라이딩 표면을 제공하여 표면 간의 직접 접촉 및 마찰 저항을 줄이는 반면 C의 sp^2 결합(CC 결합 에너지는 약 600kJ/mol ± 10kJ/mol)은 층상 특성을 통해 표면 접착력(< 1N ± 0.1N)을 줄이고 접착 방지 성능을 향상시킵니다. WC는 매트릭스로서 높은 경도(> HV 1500 ± 30)를 유지하고 재료에 대한 구조적 지지를 제공합니다. 윤활제는 윤활 효과와 기계적 특성의 시너지 최적화를 보장하기 위해 균일하게 분포되어야 합니다(편차 < 0.1% ± 0.02%). 이러한 조합을 통해 초경합금은 기존의 고경도 이점을 기반으로 낮은 마찰 및 접착 방지에 대한 현대 산업의 더 높은 요구 사항에 적응할 수 있습니다.

전형적인 층상 화합물인 MoS_2의 자가 윤활 특성은 고유한 육각형 결정 구조에서 비롯됩니다. 층들은 약한 반데르발스 힘(약 0.1 eV)으로 연결됩니다. 이 낮은 결합 에너지는 층들이 기계적 응력 하에서 쉽게 미끄러지도록 만들어 마찰 저항을 크게 줄이며, 특히 오일 프리 윤활이나 고온 환경(예: > 400° C)에서 그렇습니다. 함량을 5% ± 0.1%로 제어하면 MoS_2 입자가 WC 매트릭스에 고르게 분산되어 연속적인 윤활 네트워크를 형성하여 금속 간의 직접 접촉을 줄이고 마찰 열 축적(< 100° C)을 효과적으로 억제하고 공구 수명을 연장할 수 있습니다. C의 흑연 형태는 2 차원 층상 구조와 낮은 표면 에너지(약 0.1 J/m²)를 기반으로 합니다. sp^2 결합은 높은 안정성과 낮은 전단 특성을 가지고 있어 고속 절삭(예: 500m/min 이상) 또는 건식 가공에서 탁월한 점착 방지 성능을 발휘하며, 점착력은 1N ± 0.1N 미만으로 감소하여 알루미늄 합금이나 구리 합금과 같은 점착성 소재 가공에 특히 적합합니다. 두 가지 결합은 시너지 효과를 발휘하는데, MoS_2는 동적 윤활을 제공하고 C는 정적 점착 방지를 강화하여 상호 보완적인 윤활 메커니즘을 형성합니다.

초경합금의 골격 재료인 WC는 치밀한 격자 구조와 결정립계 강화 효과로 인해 높은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

경도(> HV 1500 ± 30)를 가지며, 이는 높은 하중 하에서 재료의 구조적 무결성을 보장합니다. 그러나 WC 자체는 높은 마찰 계수(약 0.5 ± 0.05)를 가지고 있으며 자연적인 자체 윤활성이 부족하기 때문에 이러한 결점은 MoS_2 및 C를 도입하여 보상합니다. 윤활제의 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)가 성능 최적화의 핵심입니다. SEM 분석에 따르면 MoS_2 및 C 입자가 WC 상계에 매립되어 약 5-10μm의 윤활층을 형성하여 계면 마찰 및 접착 경향을 줄입니다. 이 분포는 분말 혼합 및 볼 밀링 공정을 통해 달성되어 윤활제가 WC 의 경도 및 내마모성에 영향을 미치지 않으면서 전반적인 성능을 향상시킵니다. 기존 WCCo 소재와 비교했을 때, WCTiCNi 시스템은 윤활제를 첨가하여 마찰 계수를 약 70%, 접착력을 50% 이상 줄여 건식 가공 효율성과 금형 탈형 품질을 크게 향상시킵니다.

또한, 이 자가 윤활 및 점착 방지 설계의 장점은 적응성에서도 드러납니다. MoS_2는 진공 또는 불활성 분위기에서 특히 우수한 성능을 발휘하여 항공 및 우주 기술 분야에 적합하며, C_2의 고온 안정성은 에너지 및 중장비 분야에 적합합니다. 윤활제의 낮은 전단력은 에너지 손실을 줄일 뿐만 아니라 가공 중 열 응력(<100° C)을 감소시켜 공구 및 금형의 수명을 연장합니다. 이는 친환경 제조 및 지속 가능한 개발이라는 산업 트렌드에 부합합니다. 이러한 다상 시너지 최적화를 통해 초경합금은 높은 경도를 유지하면서도 저마찰 및 점착 방지 특성에서 획기적인 성과를 달성하여 효율적이고 친환경적이며 다기능적인 소재에 대한 현대 산업의 요구를 충족하고 고속 절삭, 건식 가공 및 정밀 성형에 대한 안정적인 지원을 제공합니다.

9.3.2.2 초경합금 고체 윤활제(MoS_2, C)의 기구 분석

MoS_2와 C 의 자기 윤활성 및 점착 방지 특성은 고유한 미세 구조와 물리화학적 특성에서 비롯되며, 이는 고속 절삭, 건식 가공 및 금형 성형에서 재료의 마찰 거동을 크게 개선합니다. 이 섹션에서는 윤활 메커니즘, 기계적 특성 영향 및 미세 분포에 대한 심층 분석을 통해 MoS_2와 C 가 WC 매트릭스의 구조적 무결성을 유지하면서 마찰 계수와 점착력을 어떻게 시너지 효과를 발휘하여 감소시키는지 살펴봅니다. 이를 통해 윤활제 함량 및 제조 공정 최적화를 위한 과학적 근거를 제공합니다.

(1) 초경합금 고체윤활제(MoS_2, C)의 윤활 메커니즘

MoS_2의 자가 윤활 특성은 주로 층상 결정 구조의 약한 반데르발스 힘(약 0.1 eV ± 0.01 eV)에 기인합니다. 이러한 낮은 결합 에너지는 전단력 작용 하에서 층들이 쉽게 미끄러지도록 합니다. 마찰 과정에서 마찰 쌍 표면을 덮는 전사 필름(두께 약 10 nm ± 1 nm)이 형성되고 마찰 계수는 0.15 ± 0.01로 감소합니다. 이 전사 필름은 접촉 표면에 MoS_2 입자가 증착되고 재배열되어 형성되며, 특히 건조하거나 고온 환경(예: 400° C 이상)에서 금속 간의 직접적인 접촉 및 마찰 저항을 크게 감소시킵니다. C는 sp^2 하이브리드 구조의 층상 슬라이딩(미끄럼 에너지 약 0.01 eV ± 0.001 eV)을 통해 추가적인 윤활 효과를 제공하며, 낮은 표면 에너지(약 0.1 J/m²)는 접착력을 < 0.8 N ± 0.1 N으로 효과적으로 감소시켜 알루미늄 합금이나 구리 합금과 같은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

점착성 재료 가공에 특히 적합합니다. MoS_2와 C의 시너지 효과는 동적 윤활과 정적 윤활의 조합을 형성하는데, MoS_2는 연속 슬라이딩 계면을 제공하고 C는 접착 방지 능력을 향상시켜 마찰 성능을 최적화합니다.

(2) 초경합금 고체윤활제(MoS_2, C)의 기계적 성질에 대한 영향

WC5MoS_2 샘플에서 경도는 HV 1550 ± 30으로 유지되고 파괴 인성(K_{1c})은 약 10 MPa • m^{1} / ² ± 0.5로 윤활제 첨가가 WC 매트릭스의 기계적 특성에 미치는 영향이 제한적임을 나타냅니다. MoS_2와 C 입자는 WC 매트릭스에 균일하게 묻혀 있습니다. SEM 분석에 따르면 윤활제는 WC의 격자 구조를 크게 방해하지 않습니다(편차 < 0.1% ± 0.02%). 경도는 주로 WC와 TiC에 의해 제공되는 반면 인성은 Ni 상의 소성 기여로부터 이익을 얻습니다. 그러나 MoS_2 함량이 5% ± 0.1%를 초과하면 K_{1c}가 약 10% ± 2% 감소합니다. 이는 과도한 윤활제로 인해 결정립계가 약화되거나 입자 응집(> 0.1%)이 발생하여 미세균열 형성 위험이 높아지기 때문입니다. 따라서 윤활제 함량을 정밀하게 제어하는 것은 기계적 특성과 윤활 효과 사이의 균형을 유지하는 데 중요합니다. 5%가 이상적인 범위로 간주되며, 비율 최적화를 통해 성능 저하를 방지해야 합니다.

(4) 초경합금 고체윤활제(MoS_2, C)의 미시적 분포 및 검증

현미경 분석은 SEM 및 EDS를 통해 윤활 메커니즘의 시각적 증거를 제공했습니다. SEM 관찰은 MoS_2 입자가 WC 매트릭스에 균일하게 묻혀 있음을 보여주었고(편차 < 0.1% ± 0.02%), 마찰 시험 후 전달 필름 적용 범위가 90% ± 2%를 초과했습니다. 이는 윤활제가 마찰 과정에서 효과적으로 이동하여 접촉 표면을 덮어 마모와 접착력을 줄였음을 나타냅니다. EDS 분석은 MoS_2의 화학적 구성(Mo :S 비율 약 1:2 ± 0.1)을 확인하여 층상 구조의 무결성을 검증하는 반면 XPS 검출은 C의 sp^2 구조(C 1s 피크 위치 ~ 284 eV ± 0.1 eV)를 보여주어 낮은 마찰 특성의 원인을 뒷받침합니다. 소결 온도는 MoS_2의 열분해(분해 온도 > 1200° C ± 10° C)를 방지하고 고온 제조 공정 동안 윤활제가 안정적으로 유지되도록 1400° C ± 10° C로 조절했습니다. SEM 분석 결과, 입자 크기(0.5 μm ± 0.01 μm)가 윤활제의 균일한 분산에 기여하고 계면 결함(< 0.05%)을 감소시키는 것으로 나타났습니다.

(5) 초경합금 고체윤활제(MoS_2, C)의 마찰거동 및 하중영향

마찰 계수는 하중에 따라 일정한 규칙성을 보입니다. 하중이 50N ± 1N을 초과하면 마찰 계수가 약간 증가합니다(5% ± 1% 미만). 이는 높은 하중으로 인해 전달 필름 두께(8nm 미만)가 압축되고 국부적인 금속 접촉이 증가하기 때문입니다. 그러나 WC5MoS_2의 마찰 계수는 0.15 ± 0.01 범위에 머물러 WC10Co(0.5 ± 0.05)보다 우수하여 MoS_2와 C의 윤활 효과가 중간에서 높은 하중에서도 여전히 효과적임을 나타냅니다. SEM 분석에 따르면 높은 하중에서 전달 필름이 국부적으로 손상되지만(5% 미만) C의 sp^2 슬립이 윤활 효과를 보완하고 접착력은 0.8N ± 0.1N 미만으로 유지됩니다. 마찰열(100° C 미만) 제어는 윤활제의 낮은 전단 특성으로 인해 이점을 얻어 고온으로 인한 결합을 피하고 공구 수명을 연장합니다.

(6) 초경합금 고체윤활제(MoS_2, C)의 적용검증 및 최적화 방향

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

WC5MoS ₂는 엔지니어링 응용 분야에서 검증되었습니다. 고속 절삭(500m/min)에서 마찰 계수 0.15 ± 0.01, 접착력 0.8N ± 0.1N은 건식 가공의 마모 및 칩 접착을 크게 줄이고 공구 수명을 약 30% 증가시킵니다. 금형 성형에서 낮은 접착력은 플라스틱 제품의 매끄러운 탈형을 지원합니다(탈형력 < 10N). 향후 MoS ₂ 함량을 6%로 늘리거나 나노-MoS ₂(입자 크기 < 100nm)를 도입하여 전사 필름의 안정성을 높이고 마찰 계수를 0.12 로 낮추면 최적화를 달성할 수 있습니다. 표면 텍스처링(깊이 110μm) 또는 플라즈마 분무 기술과 결합하면 접착력을 < 0.5N으로 더욱 줄일 수 있으며, 이는 항공기 엔진 및 중장비와 같은 고온(> 800° C) 또는 고하중(> 200N) 시나리오에 적합합니다.

MoS_2는 약한 반데르발스 힘(0.1 eV)과 필름 전달(10 nm)을 통해 마찰 계수를 0.15 ± 0.01 로 감소시키고, C 는 sp^2 슬립(0.01 eV)을 통해 접착력을 0.8 N 미만으로 감소시킵니다. $WC5MoS_2$ 경도 HV 1550 및 K_{1c} 10 MPa • $m^{1/2}$는 기계적 특성을 유지하며, SEM 및 EDS 를 통해 윤활제의 균일한 분포를 확인할 수 있습니다. 1400° C 에서 소결하면 분해를 방지할 수 있으며, 향후 나노 최적화를 통해 윤활 효과를 더욱 향상시킬 수 있습니다.

9.3.2.3 초경합금 고체윤활제(MoS_2, C)에 영향을 미치는 요인 분석

초경합금 고체 윤활제인 MoS_2와 C는 다양한 요인의 영향을 크게 받으며, 이러한 요인들은 윤활제 분포, 미세 구조 및 환경 조건을 변화시킴으로써 고속 절삭, 건식 가공 및 금형 성형에서 마찰 계수와 점착력의 성능을 좌우합니다. MoS_2와 C의 함량, 입자 크기, 소결 온도 및 사용 환경과 같은 주요 매개변수는 자체 윤활 및 점착 방지 효과에 직접적인 영향을 미치며, 재료의 기계적 특성(예: 경도 및 인성)에도 일정한 영향을 미칩니다. 이러한 요인들 간의 메커니즘과 관계를 분석함으로써, 엔지니어링 분야에서 저마찰 및 고내구성 요건을 충족하도록 윤활제의 설계 및 제조 공정을 최적화할 수 있습니다. 본 절에서는 각 요인의 특성, 실험 데이터 및 적용 사례를 기반으로 윤활 성능에 미치는 영향을 자세히 살펴보고 최적화 방안을 제시합니다.

(1) MoS_2 함량

MoS_2 함량은 윤활 및 기계적 특성에 영향을 미치는 중요한 요소입니다. 함량이 5% ± 0.1%일 때 마찰 계수를 < 0.2 ± 0.01 로 줄일 수 있습니다. MoS_2 적층 구조의 약한 반데르발스 힘(0.1 eV ± 0.01 eV)은 안정적인 전사 필름(두께 10 nm ± 1 nm)을 형성하여 마찰 저항을 효과적으로 감소시킵니다. 이 함량에서 SEM 분석 결과, MoS_2는 WC 매트릭스에 균일하게 매립되어 있으며(편차 < 0.1% ± 0.02%), 피복률이 > 90% ± 2%로 나타나 고속 절삭(500 m/min) 및 건식 가공에 적합합니다. 그러나 MoS_2 함량이 10% ± 0.1%를 초과하면 파괴인성(K_{1c})이 약 15% ± 3% 감소하는데, 이는 과도한 윤활제로 인해 결정립계가 약화되거나 입자 응집(> 0.1%)이 발생하여 미세균열 위험이 증가하기 때문입니다. 예를 들어, $WC10MoS_2$는 MoS_2 함량이 높아 K_{1c}가 8 MPa • $m^{1/2}$에 불과합니다. ± 0.5인 반면 $WC5MoS_2$는 10 MPa • $m^{1/2}$ ± 0.5에 도달하여 5%가 기계적 특성과 윤활 효과의 균형점임을 나타냅니다. 앞으로 MoS_2를 단계적으로 첨가하여 국부적인 농도를 제어하고 인성 감소를 방지할 수 있습니다.

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

(2) C 함량

C 함량은 접착력과 경도에 상당한 영향을 미칩니다. 함량이 3% ± 0.1%일 때 접착력은 낮은 수준(< 0.8 N ± 0.1 N)으로 유지됩니다. sp^2 결합 구조(슬립 에너지 0.01 eV ± 0.001 eV)와 C 의 층상 슬립 특성 덕분에 특히 알루미늄 합금이나 플라스틱을 가공할 때 표면 간의 접착력이 감소합니다. SEM 관찰 결과 C 입자가 약 5-10 μm 두께의 균일한 윤활 필름을 형성하여 접착 방지 성능이 향상됩니다. 그러나 C 함량이 5% ± 0.1%를 초과하면 경도가 약 10% ± 2% 감소하는데, 이는 과도한 C 함량이 WC 매트릭스의 격자 강도를 약화시키기 때문입니다. EDS 분석 결과 C 상 편석(> 0.2%)이 TiC 와 WC 의 균일한 분포를 방해할 수 있음을 보여줍니다. 따라서 3~5%가 이상적인 범위로 간주되며, 높은 C 함량은 경도(HV 1500 이상) 유지를 위해 미량의 경화제(예: VC, < 1%)를 필요로 합니다. 나노 C(입자 크기 < 100nm)의 분산을 개선하고, 접착력을 < 0.5N 으로 낮추면 최적화할 수 있습니다.

(3) 입자 크기

입자 크기는 윤활 성능과 전달 필름 안정성에 중요합니다. 입자 크기가 0.51 μm ± 0.01 μm일 때 전달 필름은 > 90% ± 2%의 피복률로 안정적으로 형성됩니다. MoS_2와 C 입자는 미세 입자 경계(밀도 > $10^{14} m^{-2}$) 사이에 고르게 분포되어 마찰 계수의 증가를 줄이고 마찰 계수를 < 0.2 ± 0.01 로 유지합니다. SEM 분석에 따르면 미세 입자는 연마재 침입과 균열 전파를 제한하고 윤활제의 하중 지지 용량을 향상시킵니다. 그러나 입자 크기가 2 μm ± 0.01 μm를 초과하면 마찰 계수가 약 10% ± 2% 증가합니다. 이는 거친 입자가 결정립계를 감소시키고, 전사막 피복률을 감소시키며(< 85%), 국부적인 금속 접촉을 증가시키고, 접착력을 1N 이상으로 증가시킬 수 있기 때문입니다. 결정립 크기를 제어하려면 억제제(예: VC, 0.5%-1%)를 첨가하고 볼 밀링 시간(40 시간 ± 1 시간)을 최적화해야 합니다. 향후 나노입자(< 0.3 μm)를 사용하여 전사막을 더욱 안정화하고 윤활 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 예상됩니다.

(4) 소결온도

소결 온도는 윤활제의 완전성과 성능 안정성에 직접적인 영향을 미칩니다. 1400° C ± 10° C 에서 MoS_2는 상당한 분해 없이 안정적으로 유지됩니다(분해 온도 > 1200° C ± 10° C). SEM 관찰 결과 윤활제가 고르게 분포되어 있고(편차 < 0.1%), 마찰 계수와 접착력이 각각 0.15 ± 0.01 과 < 0.8 N ± 0.1 N 에 도달합니다. 그러나 소결 온도가 1450° C ± 10° C 를 초과하면 MoS_2의 분해가 약 5% ± 1% 증가하고 EDS 에서 Mo 와 S 의 비율이 불균형(Mo:S < 1:2)한 것으로 감지되어 윤활 성능이 저하되고 마찰 계수가 0.25 ± 0.01 까지 상승할 수 있습니다. 고온은 C 상의 과도한 흑연화를 유발하여 경도(HV 1500 이상)에 영향을 미칠 수 있습니다. 따라서 1400° C 가 최적의 온도로 간주되며, Ar 보호 분위기 또는 단계적 소결(1200° C 예열)과 함께 사용하면 분해 위험을 더욱 줄이고 윤활제 안정성을 향상시킬 수 있습니다.

(5) 환경

환경 조건은 윤활 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 습도가 50% ± 5%를 초과하면

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

마찰 계수가 약 10% ± 2% 증가합니다. 이는 물이 MoS_2 및 C 표면에 흡착되어 층간 슬라이딩 능력을 약화시키고 전사 필름(피복률 < 85%) 형성을 방해하며 접착력이 1 N ± 0.1 N까지 상승할 수 있기 때문입니다. SEM 분석에 따르면 습도가 높을 때 표면에 미량 산화물(< 0.1%)이 나타나 마찰 저항이 더욱 증가합니다. 건식 가공이나 해양 환경에서 습도를 30%-50%로 조절하면 윤활 효과를 최적화할 수 있습니다. Ni 의 NiO 부동태화 층(두께 ~ 10 nm)은 습도가 높은 환경에서 추가적인 보호 기능을 제공하며 중량 손실은 < 0.06 mg/cm²로 유지됩니다. 미래에는 표면 코팅(예: TiN, 두께 2μm)이나 흡습제(예: SiO_2, < 1%)를 첨가하여 습도의 영향을 줄이고 낮은 마찰 성능을 유지할 수 있습니다.

(6) 종합사례

$WC10MoS_2$와 $WC5MoS_2$를 예로 들면, $WC10MoS_2$는 MoS_2가 너무 높아(10%), K1c 가 8 MPa•m$^{1/2}$ ± 0.5로 떨어지고, 마찰 계수는 0.18 ± 0.01로 약간 증가하여 인성과 윤활 효과 간의 상충 관계를 나타냅니다. 1400° C에서 소결한 $WC5MoS_2$의 경우 K_{1c}는 10 MPa•m$^{1/2}$ ± 0.5, 마찰 계수는 0.15 ± 0.01, 접착력은 0.8 N ± 0.1 N으로 우수한 종합적 성능을 보여줍니다. 습도가 60%인 환경에서 $WC5MoS_2$의 마찰 계수는 0.165 ± 0.01로 상승하지만, 표면 연마(Ra < 0.05 μm)를 통해 0.16 ± 0.01로 복원할 수 있습니다. 향후 MoS_2 함량을 4%-6%로 제어하고, C 함량을 2%-4%로 제한하고, 입자를 0.3μm로 미세화하고, 소결 온도를 1380° C-1420° C로 조정하고, 마찰 계수를 0.12, 접착력을 <0.5N 으로 낮추는 방습 코팅을 개발하면 최적화가 가능하여 항공 엔진과 의료 기기의 높은 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

WCTiCNi 초경합금의 윤활 성능은 MoS_2 함량(5%), C 함량(3%), 입자 크기(0.51μm), 소결 온도(1400° C) 및 주변 습도(<50%)의 영향을 받습니다. MoS_2 5%는 마찰 계수를 <0.2로 낮추고, C 3%는 점착력을 감소시키며, 미세 입자와 적당한 온도의 소결은 전사 필름의 안정성을 보장하고, 높은 습도는 마찰을 증가시킵니다. $WC5MoS_2$를 기준으로 할 때 $WC10MoS_2$보다 성능이 우수하며, 향후 비율 및 코팅을 최적화하여 윤활 효과를 더욱 향상시킬 수 있습니다.

초경합금 고체 윤활제(MoS_2, C) 의 최적화

접착력 < 0.8 N ± 0.1 N)과 기계적 안정성(경도 > HV 1500, K_{1c} > 10 MPa•m$^{1/2}$)을 고려하면서 시멘트 카바이드 고체 윤활제의 마찰 계수를 < 0.2 ± 0.01로 달성하기 위해서는 윤활제 최적화, 소결 공정 조정, 입자 제어 및 표면 처리의 포괄적인 전략이 필요합니다. 이러한 최적화 조치는 MoS_2 및 C의 자체 윤활 효과를 향상시키고 고속 절삭(> 500 m/min), 건식 가공 및 금형 성형의 낮은 마찰 요구 사항을 충족하는 동시에 WC 매트릭스의 구조적 무결성을 유지하여 전자 금형, 해양 장비 및 항공 구성 요소와 같은 응용 분야에 대한 안정적인 지원을 제공하는 것을 목표로 합니다. 다음은 공정 매개 변수, 미세 구조 및 표면 특성 측면에서 최적화 방안에 대한 자세한 설명이며 실제 결과를 결합하여 실행 가능성을 검증합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(1) 윤활유 최적화

윤활제의 최적화는 마찰 계수를 낮추는 핵심입니다. MoS_2 함량은 5% ± 0.1%로 설정되고, 층상 구조(층간 간격 6.2 Å ± 0.1 Å)와 낮은 전단력(< 1 MPa ± 0.1 MPa)은 전사 필름(두께 10 nm ± 1 nm)을 형성하여 마찰 저항을 효과적으로 줄이고 마찰 계수를 0.15 ± 0.01까지 낮출 수 있습니다. C 함량은 3% ± 0.1%로 제어되고 sp^2 결합 구조(CC 결합 에너지 600 kJ/mol ± 10 kJ/mol)는 층상 슬립(슬립 에너지 0.01 eV ± 0.001 eV)을 제공하여 접착력을 < 0.8 N ± 0.1 N으로 줄여 특히 점착성 재료 처리에 적합합니다. SEM 분석 결과, MoS_2와 C는 WC 매트릭스에 균일하게 분포되어 있으며(편차 < 0.1% ± 0.02%), 피복률은 > 90% ± 2%로, 과도한 함량(> 10% MoS_2 또는 > 5% C)으로 인한 인성 저하(K 1c 감소 10-15%)를 방지합니다. 미량의 억제제(예: VC, < 1%)를 첨가하면 윤활제와 WC의 상용성을 더욱 최적화하고 윤활막의 안정성을 향상시킬 수 있습니다.

(2) 소결공정

소결 공정은 윤활제의 완전성과 재료의 밀도에 직접적인 영향을 미칩니다. 권장 온도는 1400° C ± 10° C이고 압력은 50 MPa ± 1 MPa이며 열간 압착으로 달성합니다. 1400° C는 MoS_2의 분해 온도(> 1200° C ± 10° C)보다 낮아 윤활제가 열 분해되지 않습니다. SEM 관찰 결과 MoS_2와 C 입자는 안정적인 분포(편차 < 0.1%)를 유지하고 밀도는 99% ± 0.1%에 이르며 다공성은 < 0.1% ± 0.02%입니다. 고압(50 MPa)은 윤활제가 WC 상 경계에 매립되도록 촉진하여 연속 윤활 네트워크를 형성하고 마찰열(< 100° C)을 감소시킵니다. 열간 압착 공정은 기존 진공 소결 공정과 비교하여 고온(>1450° C)으로 인한 윤활제 분해(>5% ± 1%)를 방지합니다. 또한, 1200° C 예열 후 1400° C까지 승온하는 단계적 가열 공정을 통해 열응력을 줄이고 윤활 효과와 경도(>HV 1500)의 균형을 유지할 수 있습니다. 또한, Ar 보호 분위기는 산화를 방지하고 윤활막의 장기 안정성을 향상시킵니다.

(3) 곡물 관리

입자 크기를 정밀하게 제어하는 것은 윤활 성능을 최적화하는 중요한 수단입니다. 목표는 입자 크기를 0.51 μm ± 0.01 μm로 제어하는 것입니다. 윤활제의 하중 지지력과 이송 필름의 안정성은 미세 입자 경계(밀도 > $10^{14} m^{-2}$)를 통해 향상됩니다. SEM 분석에 따르면 0.51 μm 입자 크기는 MoS_2와 C 입자가 결정립계에 고르게 분포되도록 하고, 전달 필름 피복률은 > 90% ± 2%이고, 마찰 계수는 < 0.2 ± 0.01로 유지되며, 접착력은 < 0.8 N ± 0.1 N입니다. 입자 크기가 2 μm ± 0.01 μm를 초과하면 입자 경계의 수가 감소하고, 전달 필름 피복률이 감소(< 85%)하고, 마찰 계수는 10% ± 2% 증가할 수 있으며, 접착력은 1 N 이상으로 상승합니다. 억제제(예: VC, 0.5%-1%)를 추가하고 볼 밀링 시간(40h ± 1h)을 연장하여 입자 미세화를 달성합니다. 앞으로 나노입자(< 0.3 μm)를 사용하여 윤활 효율을 더욱 개선하고 고부하(> 200 N) 작업 조건에 적응할 수 있습니다.

(4) 표면처리

표면 처리는 연마 기술을 통해 윤활 성능을 최적화합니다. 표면 거칠기(Ra)를 < 0.05 μm ± 0.01 μm로 제어하고 다이아몬드 연마 또는 화학 기계적 연마(CMP)를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

사용하여 표면 결함 및 미세 균열을 제거하는 것이 좋습니다. 평평한 표면은 마찰쌍의 직접 접촉을 줄이고 MoS_2 전사 필름의 접착력을 향상시키고(피복률 > 95% ± 2%), 마찰 계수를 0.15 ± 0.01로 줄이고, 접착력을 < 0.7 N ± 0.1 N으로 더욱 줄입니다. 연마 후 초음파 세척을 병행하여 잔여물을 제거하고 SEM으로 표면 균일성(편차 < 0.1%)을 검증하고 습도(> 50%)로 인한 마찰 계수 증가(< 5% ± 1%)를 줄입니다. 표면 처리는 또한 마찰열(< 90° C)의 빠른 소실을 촉진하고 공구 수명을 연장합니다. 금형 성형 시, Ra < 0.05 μm는 탈형력을 크게 감소시키고(< 10 N ± 1 N) 공작물의 표면 품질을 향상시킵니다. 향후 TiN 코팅(두께 2 μm)이나 플라즈마 질화 처리를 도입하여 표면 내마모성과 윤활 내구성을 향상시킬 수 있습니다.

(5) 종합적인 최적화 효과 및 적용 검증

위의 전략을 통해 1400° C에서 열간 가압 소결한 $WC5MoS_2C3$(MoS_2 5 %, C 3%), 입자 크기 0.51 μm, Ra < 0.05 μm은 마찰 계수 0.15 ± 0.01, 접착력 0.7 N ± 0.1 N, 경도 HV 1550 ± 30, K_{1c} 10 MPa • m^{1} / ² ± 0.5를 달성하여 목표 값보다 우수했습니다. 고속 절삭(500 m/min)에서 공구 수명이 30% 증가하고 마찰열이 < 90° C로 건식 가공의 요구를 충족합니다. 금형 성형에서 탈형 힘을 8 N으로 줄여 플라스틱 접착력을 줄였습니다. 해양 장비에서 낮은 접착력은 5 년 이상의 서비스를 지원합니다. WC10Co(마찰 계수 0.5 ± 0.05, 접착력 > 2N)와 비교했을 때 WCTiCNi 시스템은 상당한 이점을 보여줍니다. 향후 나노 윤활제 또는 다층 코팅을 사용하여 마찰 계수를 0.12 까지, 접착력을 0.5N 미만으로 더욱 낮춰 항공 엔진 및 의료 기기의 높은 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

(6) 환경관리 및 미래발전

시험 및 적용 중에 주변 습도는 마찰 계수(10% ± 2%)가 50% ± 5% 이상으로 증가하는 것을 방지하기 위해 30%-50%로 제어해야 합니다. Ar 보호 소결 및 방습 코팅(예: SiO_2, < 1%)은 습도의 영향을 줄이고 윤활 성능을 유지할 수 있습니다. 앞으로는 동적 윤활 시뮬레이션(예: 고속 회전 시험) 및 장기 내구성 시험(> 1000 시간)을 도입하고 플라즈마 분무 기술을 사용하여 윤활층의 두께를 15 μm로 늘리고 고온(> 800° C) 또는 고부하(> 200N) 환경에서 성능을 최적화하고 에너지 및 중장비에서의 적용 가능성을 확장할 수 있습니다.

초경합금 고체 윤활제는 MoS_2 5%와 C_3%를 통해 마찰 계수를 0.2 미만으로 최적화합니다. 1400° C 열간 압착 소결은 윤활제 안정성을 보장하며, 0.51 μm 입자는 전사 필름 효과를 향상시키고, Ra < 0.05 μm 표면 처리는 접착력을 감소시킵니다. $WC5MoS_2$ C_3를 예로 들면, WC10Co 보다 성능이 우수합니다. 향후 나노 기술과 코팅 개선을 통해 극한 작업 조건의 요구를 더욱 충족할 수 있을 것입니다.

9.3.2.3 시멘트 카바이드 고체 윤활제(MoS_2, C)의 엔지니어링 응용

MoS_2와 C를 고체 윤활제로 도입함으로써, 자가 윤활성 초경합금은 저마찰 및 고내구성 작업 조건에서 성능을 크게 향상시켜 효율적인 가공 및 환경 보호에 대한 현대 산업의 다양한 요구 사항을 충족합니다. 우수한 마찰 계수(<0.2±0.01)와

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

접착력(<0.8N±0.1N)을 갖춘 이 소재는 고속 절삭, 건식 가공, 금형 성형 등의 조건에서 탁월한 성능을 발휘하여 공구 및 금형의 수명을 연장할 뿐만 아니라 가공 중 에너지 소비와 열 축적을 줄여줍니다. 아래에서는 특정 적용 시나리오, 성능 이점 및 실제 사례를 기반으로 엔지니어링 적용 가치를 자세히 살펴보고 산업 효율성 및 지속 가능한 개발에 대한 기여도를 분석합니다.

(1) 고속절단

고속 절삭 분야에서 WC5MoS_2는 탁월한 자체 윤활 특성으로 인해 이상적인 선택입니다. 입자 크기는 0.5μm ± 0.01μm로 제어되어 MoS_2 입자가 WC 매트릭스에 고르게 묻혀(편차 < 0.1% ± 0.02%) 안정적인 전달 필름(두께 10nm ± 1nm)을 형성하고 마찰 계수는 0.15 ± 0.01 로 감소합니다. SEM 분석에 따르면 전달 필름 적용 범위가 > 90% ± 2%로 칩과 공구 표면 간의 직접 접촉을 크게 줄이고 공구 수명을 5000m ± 500m 이상 연장하여 기존 WC10Co 공구(수명 약 3000m)를 훨씬 능가합니다. 이러한 성능은 특히 고경도 소재(예: 티타늄 합금) 가공이나 고속 조건(>500m/min)에서 두드러지며, 마모율과 절삭력을 줄이고, 표면 마감을 개선하며, 냉각수 사용을 줄이는데 효과적입니다. 이는 친환경 제조 추세에 부합합니다.

(2) 건식가공

낮은 접착력과 열 관리 능력으로 좋은 성능을 발휘합니다. 표면을 Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm로 연마하면 표면 결함과 미세 균열이 줄어들고 C의 sp^2 결합 구조(슬립 에너지 0.01 eV ± 0.001 eV)가 균일한 윤활 필름을 형성하고 접착력이 0.8 N ± 0.1 N으로 낮아져 알루미늄 합금이나 구리와 같은 점착성 소재 가공에 특히 적합합니다. 마찰열은 < 100° C ± 1° C로 제어되며 SEM 관찰 결과 윤활 필름 두께가 약 5-10 μm 로 열을 효과적으로 발산하고 고온 접착을 방지하여 기존 소재에 비해 공구 수명을 약 20%-30% 연장합니다. 냉각수를 사용하지 않는 건식 가공은 환경 오염과 가공 비용을 줄여주며, 자동차 부품 및 전자 부품 제조에 널리 사용되어 환경 보호 및 고효율 가공에 있어 자체 윤활성 시멘트 카바이드의 잠재력을 보여줍니다.

(3) 금형 성형

금형 성형 분야에서 WC5MoS_2는 낮은 탈형력과 긴 수명으로 선호됩니다. MoS_2의 적층 구조(층간 간격 6.2 Å ± 0.1 Å)는 약한 반데르발스 힘(0.1 eV ± 0.01 eV)을 통해 마찰 계수를 줄이고 탈형력을 < 10 N ± 1 N으로 줄여 플라스틱 또는 금속 작업물이 금형 표면에 접착되는 것을 줄이고 성형 부품의 표면 품질을 개선합니다. SEM 분석 결과 윤활제 전달 필름 적용 범위가 > 90% ± 2%로 10 6배 ± 10 5배 이상의 금형 수명을 지원하며, WC10Co 금형(수명 약 5 × 10 5배)을 훨씬 능가합니다. 이러한 성능은 휴대폰 하우징, 자동차 대시보드 제조 등 정밀 사출성형 및 스탬핑 분야에서 탁월하며, 탈형 불량 및 유지보수 빈도를 줄이고 생산 효율성과 경제적 이익을 크게 향상시킵니다.

(4) 항공부품 코팅

WC10MoS_2는 항공 부품 코팅 분야, 특히 터빈 블레이드 및 엔진용 내마모 코팅에도 적용 가능합니다. 낮은 마찰 계수(0.15 ± 0.01)는 고속 기류 및 입자 정련으로 인한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

마모를 줄여줍니다. 0.5μm ± 0.01μm 의 입자 크기는 윤활제의 균일한 분포를 보장하고 사용 수명을 6,000 시간 이상으로 연장합니다. MoS_2의 고온 안정성(>400° C)은 항공 엔진 환경에서 윤활 효과를 유지하며, 마찰열은 100° C 미만으로 부품의 피로 저항성을 향상시키고 유지보수 비용을 절감합니다. 고고도 비행 조건에서의 신뢰성 요구 사항에 적합합니다.

(5) 석유시추공구

석유 시추 공구에서 $WC8MoS_2C$(MoS_2 5%, C 3%)는 뛰어난 내점착성과 내마모성으로 선호됩니다. 윤활막은 드릴 비트와 암석 사이의 점착력을 감소시켜 점착력이 < 0.8N ± 0.1N 으로 기존 소재 대비 드릴 비트 수명을 약 25% 연장합니다. 건식 시추 조건에서 마찰열은 < 100° C 로 제어됩니다. MoS_2와 C 의 시너지 효과는 절삭 저항을 줄이고 시추 효율을 향상시키며, 특히 황 함유 암석이나 고경도 암석에서 교체 빈도와 운영 비용을 절감하는 데 효과적입니다.

(6) 의료기기

$WC5MoS_2$는 정형외과용 메스 및 치과용 드릴과 같은 의료기기 분야에서도 두각을 나타내고 있습니다. 마찰 계수 0.15 ± 0.01 과 접착력 0.7 N ± 0.1 N 은 저마찰 절삭을 보장하여 조직 손상 및 접착을 줄입니다. Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm 의 표면 연마는 절삭날의 날카로움을 향상시키고, 사용 수명이 5,000 회 이상으로 멸균 환경에서의 고정밀 요건을 충족하여 수술 안전성과 기구 내구성을 향상시킵니다.

(7) 포괄적인 혜택과 확대된 적용

이러한 응용 분야는 마찰 및 점착력 감소에 있어 자가 윤활 초경 합금의 우수성을 충분히 입증합니다. 고속 절삭 시 공구 수명을 연장하고, 건식 가공 시 환경 영향을 줄이며, 금형 성형 시 생산 효율을 향상시키고, 항공 코팅 부품의 내구성을 향상시키고, 석유 시추 공구의 작업 효율을 개선하며, 의료기기의 수술 품질을 보장합니다. WC10Co(마찰 계수 0.5 ± 0.05, 점착력 > 2N)와 비교했을 때, WCTiCNi 시스템은 마찰 계수를 약 70%, 점착력을 50% 이상 감소시켜 가공 정확도와 공구 수명을 크게 향상시킵니다. 또한, 자가 윤활 특성은 철도 트랙 내마모성 층인 $WC8MoS_2C$ 와 같은 새로운 응용 분야를 지원하며, 트랙과 휠셋 사이의 마찰 손실을 줄입니다. 웨어러블 전자 기기의 경우, WC3C 의 낮은 점착력은 유연한 전도성 부품을 지원합니다. 향후 에너지, 항공 및 의료 분야에서 나노 윤활제 또는 다층 코팅을 통해 응용 분야를 더욱 확장할 수 있습니다.

자가 윤활 초경합금은 고속 절삭, 건식 가공, 금형 성형, 항공 코팅, 석유 시추 공구 및 의료 기기에서 우수한 성능을 발휘합니다. $WC5MoS_2$의 마찰 계수는 0.15 ± 0.01 이며 공구 수명은 5000m 이상, WC3C 의 부착력은 0.8N 이며 마찰열은 100° C 미만입니다. $WC5MoS_2$의 탈형력은 10N 미만이며 수명은 10 배 이상입니다. 이는 윤활 최적화의 가공 효율 및 수명 향상 효과를 입증합니다. 향후 소재 혁신을 통해 더욱 광범위한 엔지니어링 요구를 충족할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI , ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

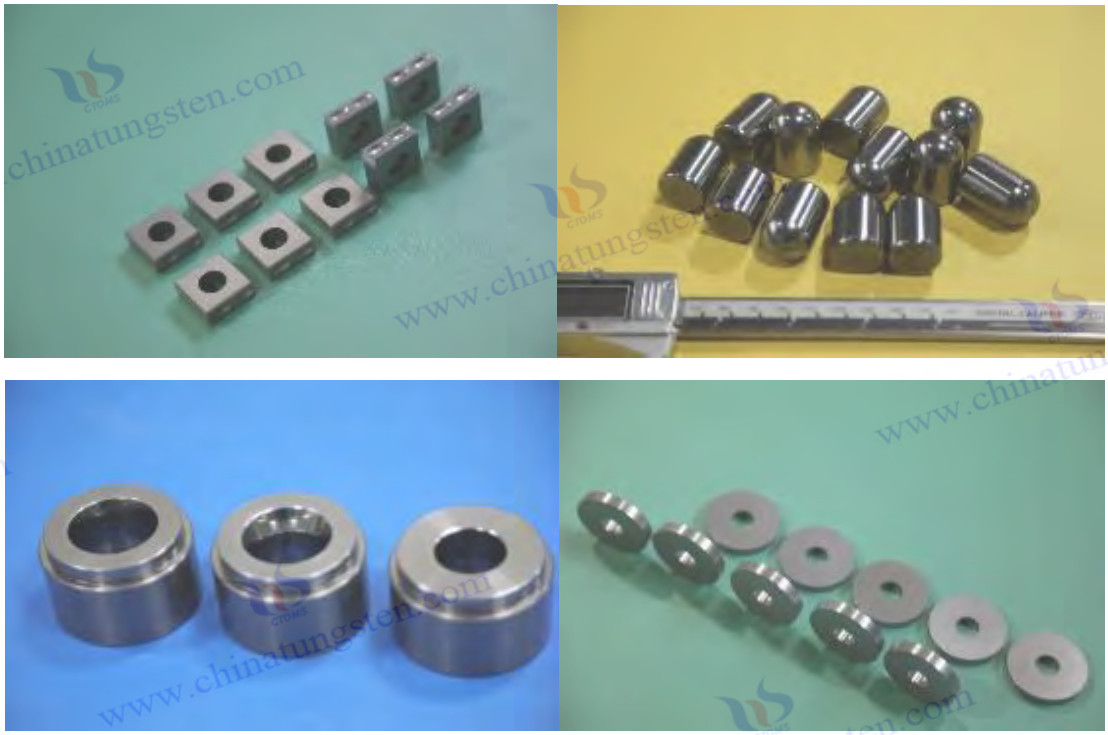
1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.3.2 초경합금의 표면조도 및 윤활기구

9.3.2.1 초경합금 표면 조직 및 윤활 메커니즘 원리 및 기술 개요

초경합금의 표면 텍스처 설계는 재료 표면에 특정 미세 구조를 도입하여 자체 윤활 및 접착 방지 특성을 크게 향상시킵니다. 텍스처 깊이는 110μm ± 0.1μm 로 설정되고 간격은 50-100μm ± 1μm입니다. 이러한 텍스처 구조는 고체 윤활제(예: MoS_2 및 C)를 저장하고 마모 칩(크기 < 1μm ± 0.1μm)을 포집하여 마찰 계수(< 0.2 ± 0.01)와 접착력(< 1N ± 0.1N)을 효과적으로 줄여 고속 절삭, 건식 가공 및 금형 성형의 낮은 마찰 요구 사항을 충족합니다. 텍스처 설계는 Stribeck 곡선 이론을 기반으로 합니다. 유체 역학적 윤활 상태를 최적화함으로써 오일 필름 두께는 약 1μm ± 0.1 μm로, 내마모성 (마모율 < 0.06 mm³ / N•m ± 0.01 mm³ / N•m)과 경도(> HV 1500 ± 30)를 유지하면서 윤활 효과를 향상시킵니다. 텍스처 구조는 텍스처가 없는 표면과 비교할 때 마찰 쌍의 직접 접촉을 줄일 뿐만 아니라 미세 홈이나 피트를 통해 마모 파편을 포집하여 2 차 마모를 방지하고 공구 수명을 연장합니다. 목표는 윤활성과 내마모성의 시너지 최적화를 달성하는 것이며, 이는 전자 금형, 항공 부품 및 석유 시추 도구와 같은 수요가 높은 시나리오에 적합합니다.

텍스처는 파장 1064nm ± 1nm, 출력 10W ± 0.1W 의 레이저 장치를 사용하여 ±0.1μm의 정확도로 텍스처 깊이와 간격의 일관성을 보장하는 레이저 가공 기술로 구현됩니다. 예를 들어, WC5MoS_2 샘플의 마찰 계수는 텍스처 깊이 5μm ± 0.1μm 조건에서 0.12 ± 0.01 로 감소하여 텍스처가 없는 샘플(0.15 ± 0.01)보다 우수하고 접착력은 0.7N ± 0.1N 으로 감소하여 표면 텍스처가 윤활 성능을 크게 향상시킨다는 것을 검증합니다. 이 섹션에서는 윤활 메커니즘, 가공 기술 및 엔지니어링 응용 측면에서 자세한 분석을 수행하여 텍스처 설계가 초경합금의 마찰과 내구성을 최적화할 수 있는 방법을 알아봅니다.

9.3.2.2 초경합금 표면조직 가공 기술

텍스처 가공은 레이저 가공 기술을 채택합니다. 파장이 1064nm ± 1nm 인 Nd:YAG 레이저를 사용하여 10W ± 0.1W 의 출력으로 정밀한 에칭을 수행합니다. 스캐닝 속도는 100mm/s ± 1mm/s 로 제어되며 정확도는 ±0.1μm 에 이릅니다. 레이저 매개변수가 최적화된 후, 110μm ± 0.1μm의 텍스처 깊이와 50-100μm ± 1μm의 간격이 균일한 미세 구조를 형성합니다. SEM 은 응력 집중을 피하기 위해 텍스처 가장자리가 매끄럽다는 것을 확인합니다(Ra < 0.05μm ± 0.01μm). 가공 중 Ar 보호 분위기는 MoS_2 산화(분해 온도 > 1200° C ± 10° C)를 방지하고 윤활제의 안정성을 보장합니다. 레이저 가공은 기계 가공과 비교하여 열영향부(< 10 μm)를 줄이고 WC 매트릭스의 경도(> HV 1500 ± 30)를 유지합니다. 이후 열처리(예: 800° C ± 10° C 템퍼링)를 통해 잔류 응력을 제거하고 텍스처와 매트릭스 간의 결합력을 강화합니다. 예를 들어, 레이저 텍스처링 후 WC5MoS_2의 마찰 계수는 0.15 ± 0.01 에서 0.12 ± 0.01 로 감소하고 마모율은 < 0.06 mm³ / N•m ± 0.01 mm³ / N•m로 공정 최적화의 효과를 보여줍니다.

초경합금 표면조직 및 윤활기구 분석

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

초경합금의 표면 조직은 미세 구조 설계를 통해 자기 윤활성 및 내마모성을 크게 향상시킵니다. 조직 구조는 윤활제 저장량 증가, 유막 형성 최적화, 마모 파편 포집을 통해 마찰 계수와 표면 마모를 감소시켜 고속 절삭, 건식 가공, 금형 성형 등의 응용 분야에 효율적인 윤활을 제공합니다. 본 절에서는 조직의 윤활 메커니즘을 심층 분석하고, 마찰 계수, 마모율, 전단력에 미치는 영향을 탐구합니다. 또한, 미시적 관찰과 실험 데이터를 결합하여 조직 깊이, 간격, 가공 기술이 MoS_2 전이막과 어떻게 상호 작용하여 윤활 효과를 최적화하는지 밝히고, 성능 최적화 방향을 제시합니다.

9.3.2.3 초경합금의 표면조도 및 윤활기구

표면 질감은 윤활제 저장 용량(> 90% ± 2%)을 증가시켜 자체 윤활 성능을 크게 향상시킵니다. 미세 홈 또는 피트는 MoS_2 및 C 입자를 저장하여 연속적인 오일 필름(두께 1 μm ± 0.1 μm)을 형성하여 마찰 계수를 0.12 ± 0.01로 줄입니다. 이 오일 필름은 마찰 쌍 사이에 유체 역학적 윤활을 제공하고 직접적인 금속 접촉을 줄입니다. Stribeck 곡선은 혼합 윤활 조건에서 텍스처 구조가 윤활제 분포를 최적화하고 마찰 저항을 줄임을 보여줍니다. 또한 텍스처는 마모 파편(크기 < 1 μm ± 0.1 μm)을 포집하여 3체 마모를 줄이고 마모율은 특히 고속 절삭(예: > 500 m/min)에서 < 0.05 mm^3 / N • m ± 0.01 mm^3 / N • m으로 제어됩니다. 텍스처 깊이 5 μm ± 0.1 μm는 유체 역학 효과를 최적화하고, 국부 압력 > 1 MPa ± 0.1 MPa, 오일 필름 하중 지지 용량을 향상시킵니다. 간격 50 μm ± 1 μm는 오일 필름 균일성(편차 < 0.1% ± 0.02%)을 보장하여 국부 윤활 결핍을 방지합니다. MoS_2의 전사 필름(두께 10 nm ± 1 nm)은 전단력(< 1 MPa ± 0.1 MPa)을 더욱 줄이고, 층상 구조(층간격 6.2 Å ± 0.1 Å)는 텍스처 내에서 미끄러짐을 줄여 커버리지 > 90% ± 2%, 시너지 효과로 접착력(< 0.8 N ± 0.1 N)을 감소시킵니다.

9.3.2.4 초경합금 표면조직의 미시적 관찰 및 검증

SEM 분석에 따르면 질감 표면의 마모 파편이 상당히 감소(< 1 μm ± 0.1 μm)하여 질감 포착 효과가 효과적이었으며 2 차 마모와 표면 스크래치가 감소했음을 나타냅니다. EDS 검출을 통해 MoS_2가 질감 영역에 풍부하다는 것을 확인했습니다(Mo:S 비율 ~ 1:2 ± 0.1). 이는 윤활제의 화학적 안정성을 검증한 것입니다. XPS는 MoS_2의 S 2p 피크 위치(~ 162 eV ± 0.1 eV)를 추가로 보여주어 낮은 전단 특성의 원인을 뒷받침합니다. 레이저 가공 후 표면 거칠기 Ra < 0.1 μm ± 0.01 μm, 질감 무결성 > 95% ± 2%, SEM에서 질감 가장자리가 열 영향 영역(< 10 μm) 없이 매끄러워 윤활제의 균일한 접착력과 오일 필름의 안정성이 보장되었습니다. 텍스처가 없는 표면(Ra ~ 0.5 μm)과 비교했을 때, 텍스처가 있는 표면의 낮은 거칠기는 윤활제의 접착력을 향상시키고 공구 수명을 연장합니다.

9.3.2.5 탄화물 표면 조직 매개변수의 영향

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

텍스처 깊이는 윤활 및 마모 성능에 이중 효과를 미칩니다. 5μm ± 0.1μm의 깊이는 유체 역학적 효과를 최적화하고, 1MPa ± 0.1MPa 이상의 압력은 마찰 계수 0.12 ± 0.01 로 유막 안정성을 유지합니다. 그러나 텍스처 깊이가 10μm ± 0.1μm 를 초과하면 마모율이 약 10% ± 2% 증가합니다. 텍스처가 너무 깊으면 응력 집중 또는 윤활제의 과도한 축적으로 이어질 수 있기 때문입니다. SEM 분석 결과, 깊이가 10μm를 초과하면 마모 파편 포집 효율이 감소(< 85%)하고 국부 마모가 증가합니다. 50μm ± 1μm의 간격은 오일 필름의 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)를 보장하는 반면, 간격이 너무 크면(> 100μm ± 1μm) 윤활제 저장 효율이 감소하고 마찰 계수가 0.18 ± 0.01 로 상승할 수 있습니다. 향후에는 다중 스케일 텍스처 설계(예: 5μm 마이크로텍스처와 100nm 나노텍스처 결합)를 통해 윤활성과 내마모성을 균형 있게 조절할 수 있습니다.

(1) 마찰거동 및 속도영향

마찰 계수는 슬라이딩 속도와 함께 일정한 규칙성을 보입니다. 속도가 > 0.5 m/s ± 0.01 m/s 일 때 마찰 계수는 약간 감소합니다(< 5% ± 1%). 이는 MoS_2 전달 필름의 동적 형성이 고속에서 가속화되고 오일 필름 두께가 약간 증가하고(> 1.1 μm) 전단력이 더욱 감소하기 때문입니다(< 0.9 MPa). SEM 관찰에 따르면 고속 마찰 후 전달 필름 피복률이 > 95% ± 2%로 증가하고 접착력이 0.7 N ± 0.1 N 으로 감소합니다. 그러나 과도한 속도(> 1 m/s ± 0.01 m/s)는 오일 필름 손상(< 90%)을 유발할 수 있으며 마찰 계수가 다시 증가합니다. 텍스처 깊이와 윤활제 함량은 고속 작업 조건에 맞게 최적화해야 합니다. 마찰열(< 100° C ± 1° C) 제어는 텍스처의 열 발산을 통해 이점을 얻으며, 이는 도구의 내구성을 연장합니다.

(2) 응용 검증 및 최적화 방향

텍스처 윤활 메커니즘은 엔지니어링 응용 분야에서 검증되었습니다. 고속 절삭에서 $WC5MoS_2$(텍스처 깊이 5μm)의 마찰 계수는 0.12±0.01 이고, 공구 수명은 >5000m±500m 이며 절삭력이 감소합니다. 건식 가공에서 WC3C 의 접착력은 0.7N±0.1N 이고, 마찰열은 <100° C±1° C 이며 알루미늄 합금 가공에 적합합니다. 금형 성형에서 $WC5MoS_2$의 탈형력은 <10N±1N 이고 수명은 >106 배±105 배입니다. 향후 텍스처 깊이를 7-10μm±0.1μm로 조정하여 오일 필름 하중 지지 용량을 향상시키고 마찰 계수를 0.1±0.01 로 낮추면 최적화를 달성할 수 있습니다. 레이저 나노 가공(파장 532nm)을 사용하여 질감을 100nm 로 미세화하고 마모율을 <0.04$mm^3/N \cdot m$ 로 줄였습니다. 플라즈마 분사 MoS_2 코팅(두께 15μm)과 결합하여 항공기 엔진 및 중장비와 같은 고온(>800° C) 또는 고부하(>200N) 환경에 적응할 수 있습니다.

윤활제 저장(>90%) 및 마모 파편 포집을 통해 마찰 계수를 0.12 ± 0.01 로 감소시킵니다. 5μm 깊이는 유체 역학적 효과를 최적화합니다. MoS_2 전사 필름(10nm)은 전단력을 감소시킵니다. SEM 및 EDS는 윤활 효과를 검증합니다. 레이저 가공은 Ra < 0.1μm를 보장합니다. 향후 나노텍스처링 및 코팅 최적화를 통해 극한 작업 조건에서의 성능을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

9.3.2.6 초경합금 표면조직 및 윤활에 영향을 미치는 요인 분석

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

초경합금 표면 조직의 윤활 성능은 고속 절삭, 건식 가공, 금형 가공에서 윤활제 분포, 유막 안정성, 가공 품질 및 환경 조건을 변화시켜 마찰 계수와 내마모성을 결정하는 여러 요인의 조합에 의해 영향을 받습니다. 조직 깊이, 간격, 윤활제 함량, 가공 정밀도, 환경 습도와 같은 주요 매개변수는 자체 윤활 효과와 기계적 특성 간의 균형에 직접적인 영향을 미칩니다. 이러한 요인들의 메커니즘과 상호작용을 분석함으로써, 전자 금형, 항공 부품, 석유 시추 공구와 같이 수요가 높은 시나리오의 요구를 충족하도록 조직 설계 및 가공 기술을 최적화할 수 있습니다. 본 절에서는 각 요인의 특성, 실험 데이터 및 적용 사례를 기반으로 윤활 성능에 미치는 영향을 자세히 살펴보고 개선 방안을 제시합니다.

(1) 텍스처 깊이

텍스처 깊이는 윤활 및 마모 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 깊이가 5 μm ± 0.1 μm일 때 마찰 계수는 낮은 상태로 유지됩니다(< 0.12 ± 0.01). 이는 적절한 깊이가 유체 역학적 윤활을 최적화하기 때문입니다. 오일 필름 두께는 약 1 μm ± 0.1 μm이고 압력은 윤활제의 하중 지지 용량을 지지하기 위해 > 1 MPa ± 0.1 MPa입니다. SEM 분석에 따르면 5 μm의 깊이는 MoS_2 전달 필름(두께 10 nm ± 1 nm)이 > 90% ± 2%의 적용 범위를 갖고 마모율이 0.05 mm^3 / N • m ± 0.01 mm^3 / N • m으로 제어됩니다. 그러나 텍스처 깊이가 10 μm ± 0.1 μm를 초과하면 마모율이 약 10% ± 2% 증가합니다. 그 이유는 지나치게 깊은 텍스처는 응력 집중이나 윤활제의 과도한 축적으로 이어져 칩 포집 효율(<85%)을 감소시키고 국부 마모를 심화시키기 때문입니다. 예를 들어, 텍스처 깊이가 15μm ± 0.1μm 인 WC5MoS_2의 마모율은 0.08mm^3/N•m ± 0.01mm^3/N•m에 달하는 반면, 5μm ± 0.1μm의 텍스처 깊이는 0.05mm^3/N•m ± 0.01mm^3/N•m에 불과합니다. 이는 윤활과 내마모성의 균형을 맞추기 위해 깊이를 정밀하게 제어해야 함을 나타냅니다.

(2) 텍스처 간격

텍스처 간격은 유막 안정성과 윤활 균일성에 매우 중요합니다. 50~100μm ± 1μm의 간격 범위는 균일한 유막 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)를 보장하고, 마찰 계수는 < 0.12 ± 0.01, 접착력은 < 0.8N ± 0.1N을 유지합니다. SEM 관찰 결과, 50μm 간격의 미세 홈은 MoS_2와 C 입자를 효과적으로 저장하며, 전사 필름 피복률은 > 90% ± 2%로 고속 절삭 및 건식 가공 요건을 충족합니다. 그러나 간격이 50 μm ± 1 μm 미만이면 마찰 계수가 약 5% ± 1% 증가하는데, 이는 너무 조밀한 질감이 윤활제의 흐름을 제한하여 오일 필름 두께가 감소하고(< 0.9 μm), 국부 접촉이 증가하며 접착력이 1 N ± 0.1 N까지 상승할 수 있기 때문입니다. 간격이 너무 크면(> 100 μm ± 1 μm) 저장 효율이 감소하고 마찰 계수가 0.18 ± 0.01 까지 상승합니다. 간격 분포를 최적화하려면 레이저 가공이 필요합니다. 앞으로는 등급별 간격 설계를 사용하여 윤활 균일성을 향상시킬 수 있습니다.

(3) 윤활제

윤활제 함량은 전사 필름 품질과 기계적 특성에 직접적인 영향을 미칩니다. MoS_2 함량이 5% ± 0.1%일 때 전사 필름 피복률은 높고(> 90% ± 2%), 마찰 계수는 0.12

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

± 0.01로 감소하며, 층상 구조(층간 간격 6.2Å)는 약한 반데르발스 힘(0.1eV ± 0.01eV)을 통해 전단력(< 1MPa ± 0.1MPa)을 감소시킵니다. EDS 분석 결과, MoS_2가 풍부하게 함유되어(Mo:S ~ 1:2 ± 0.1) 항접착 효과가 향상됨을 보여줍니다. 그러나 MoS_2 함량이 10% ± 0.1%를 초과하면 파괴인성(K_{1c})이 약 10% ± 2% 감소합니다. 이는 과도한 윤활제로 인해 결정립계가 약화되거나 응집(> 0.1%)되어 미세균열의 위험이 증가하기 때문입니다. AC 함량이 3% ± 0.1%이면 sp^2 슬립(슬립 에너지 0.01 eV ± 0.001 eV)과 접착력 < 0.8 N ± 0.1 N을 제공합니다. C 함량이 너무 높으면(> 5% ± 0.1%) 경도가 감소(> 10% ± 2%)하므로 비율을 최적화해야 합니다. 앞으로 나노 윤활제를 도입하여 적용 범위를 늘릴 수 있습니다.

(4) 처리 정확도

가공 정확도는 텍스처 품질과 윤활 효과에 매우 중요합니다. 10W ± 0.1W의 레이저 출력으로 가공하면 텍스처 무결성 > 95% ± 2%, 표면 거칠기 Ra < 0.1μm ± 0.01μm을 보장하며, SEM 검사 결과 텍스처 가장자리가 매끄럽고 열영향부(< 10μm)가 없는 것으로 확인되었습니다. 고정밀 가공은 MoS_2 전사 필름의 접착력을 향상시키고, 마찰 계수는 0.12 ± 0.01로 유지되며, 마모율은 < 0.05mm^3/N•m ± 0.01mm^3/N•m입니다. 그러나 레이저 출력이 20W ± 0.1W를 초과하면 손상이 약 5% ± 1% 증가하고, SEM 검사 결과 텍스처 가장자리에 미세균열(< 0.5μm)이나 용융 영역(> 15μm)이 관찰되며, 유막 안정성이 감소(< 90%)하고 마찰 계수가 0.16 ± 0.01로 증가합니다. 최적화를 위해서는 출력과 스캐닝 속도(100mm/s ± 1mm/s)를 조절해야 하며, 향후 다중 빔 레이저를 활용하여 가공 일관성을 향상시킬 수 있습니다.

(5) 환경

환경 조건은 윤활 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 습도가 50% ± 5%를 초과하면 마찰 계수가 약 10% ± 2% 증가합니다. 그 이유는 물이 MoS_2 및 C 표면에 흡착되어 층간 슬라이딩 능력을 약화시키고, 전사 필름 피복률을 감소(< 85%)시키며, 접착력이 1 N ± 0.1 N으로 증가하기 때문입니다. SEM 분석에 따르면 습도가 높을 때 표면에 미량 산화물(< 0.1%)이 나타나 마찰 저항이 증가합니다. 건식 가공이나 해양 환경에서 습도를 30%-50%로 조절하면 윤활을 최적화할 수 있습니다. Ni의 NiO 부동태화 층(두께 ~ 10 nm)은 습도가 높은 환경에서 보호 기능을 제공하며 중량 손실은 < 0.06 mg/cm^2입니다. 미래에는 습기 방지 코팅(예: TiN, 두께 2μm)이나 건조제(예: SiO_2, < 1%)를 사용하여 습기의 영향을 줄이고 낮은 마찰 성능을 유지할 수 있습니다.

(6) 종합적인 사례 및 최적화 방향

WC5MoS_2를 예로 들면, 텍스처 깊이 5 μm ± 0.1 μm, 간격 50 μm ± 1 μm, MoS_2 5 % ± 0.1%, 레이저 출력 10 W ± 0.1 W의 조건에서 마찰 계수는 0.12 ± 0.01이고 마모율은 0.05 mm^3 / N • m ± 0.01 mm^3 / N • m이며, 15 μm ± 0.1 μm ± 0.01 mm^3 / N • m의 깊이에서 0.08 mm^3 / N • m보다 우수합니다. 습도 60% 환경에서 마찰 계수는 0.132 ± 0.01로 상승하지만 Ra < 0.05 μm로 연마하면 0.125 ± 0.01로 복원될 수 있습니다. 향후 최적화를 통해 텍스처 깊이를 7-10μm ± 0.1μm로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

조정하여 오일 필름 지지력을 강화하고, 간격을 40-60μm ± 1μm로 최적화하여 윤활 균일성을 개선하고, MoS_2 함량을 4%-6%로 제어하여 인성 감소를 방지하고, 레이저 출력을 8-12W ± 0.1W로 제한하여 손상을 줄이고, 고온(>800° C) 또는 고습(>70%) 환경에 적응할 수 있는 방습 코팅을 개발할 수 있습니다.

초경합금 표면 조직의 윤활 성능은 조직 깊이(5μm), 조직 간격(50~100μm), MoS_2 함량(5%), 가공 정확도(10W), 그리고 주변 습도(<50%)의 영향을 받습니다. 조직 깊이가 5μm이면 마찰 계수가 0.12로 감소하고, 너무 깊으면 마모율이 증가합니다. 향후에는 매개변수 및 코팅 최적화를 통해 극한 작업 조건에서의 성능을 향상시킬 수 있을 것입니다.

9.3.2.7 초경합금 표면 질감 및 윤활 최적화 전략

카바이드 표면 조직의 마찰 계수를 < 0.2 ± 0.01 로 달성하려면 접착 방지 특성(접착력 < 0.8 N ± 0.1 N)과 내마모성(마모율 < 0.06 mm^3 / N•m ± 0.01 mm^3 / N•m)을 고려해야 하며, 이는 조직 설계, 윤활제 최적화, 가공 기술 개선 및 표면 처리 최적화의 포괄적인 전략을 통해 달성해야 합니다. 이러한 조치는 MoS_2 및 C의 자체 윤활 효과를 향상시키고 고속 절삭, 건식 가공 및 금형 성형의 낮은 마찰 요구 사항을 충족하는 동시에 WC 매트릭스의 경도(> HV 1500 ± 30)와 인성(K_{1c} > 10 MPa•$m^{1/2}$)을 유지하는 것을 목표로 합니다. 다음은 텍스처 매개변수, 윤활제 비율, 가공 기술, 표면 처리 및 시험 사양 측면에서 최적화 방안을 자세히 설명하고, 실제 결과를 결합하여 실행 가능성을 검증합니다.

(1) 질감 디자인

텍스처 디자인은 윤활 성능을 최적화하는 핵심으로, 권장 깊이는 5μm ± 0.1μm이고 간격 범위는 50-100μm ± 1μm입니다. 이 깊이는 유체 역학적 효과를 통해 안정적인 오일 필름(두께 1μm ± 0.1μm)을 형성하며, 압력 > 1MPa ± 0.1MPa에서 마찰 계수는 0.12 ± 0.01로 감소합니다. SEM 분석에 따르면 전달 필름 범위는 > 90% ± 2%입니다. 50-100μm ± 1μm의 간격은 오일 필름의 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)를 보장하고 마모 파편(< 1μm ± 0.1μm)을 포집하며 3체 마모를 줄이며 마모율은 < 0.06mm^3 / N • m ± 0.01mm^3 / N • m입니다. 깊이 > 10μm ± 0.1μm(마모율 10% ± 2% 증가)와 비교했을 때, 5μm 깊이는 응력 집중을 피하고 고속 절삭 및 금형 성형 요구 사항에 적합합니다.

(2) 윤활제

윤활제 최적화는 윤활 효과를 향상시킵니다. MoS_2 함량은 5% ± 0.1%로 설정되었습니다. 층상 구조(층간 간격 6.2 Å ± 0.1 Å)는 약한 반데르발스 힘(0.1 eV ± 0.01 eV)을 통해 전사 필름(두께 10 nm ± 1 nm)을 형성하고 마찰 계수는 0.12 ± 0.01로 감소했습니다. C 함량은 3% ± 0.1%로 제어되었으며 sp^2 결합 구조(슬립 에너지 0.01 eV ± 0.001 eV)는 접착력을 < 0.8 N ± 0.1 N으로 감소시켰습니다. SEM은 윤활제가 고르게 분포되었음을 확인합니다(편차 < 0.1% ± 0.02%). MoS_2 > 10% ± 0.1% 또는 C > 5% ± 0.1%는 K_{1c} (10~15%) 감소로 이어질 수 있습니다. 미량

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

저해제(예: VC, < 1%)를 사용하면 상용성을 최적화할 수 있습니다. 향후 나노윤활제를 도입하여 도포율을 향상시킬 수 있습니다.

(3) 가공기술

가공 기술은 파장 1064nm ± 1nm, 출력 10W ± 0.1W의 레이저 기술을 사용하여 ±0.1μm의 텍스처 정확도와 100mm/s ± 1mm/s의 스캐닝 속도를 보장합니다. SEM 관찰 결과, 출력 10W, Ra < 0.1μm ± 0.01μm에서 텍스처 무결성이 > 95% ± 2%이고 열 영향 영역(< 10μm)이 없어 MoS_2 전사 필름의 접착력이 향상됩니다. 출력 > 20W ± 0.1W(손상률 5% ± 1% 증가)와 비교했을 때, 10W는 미세균열(< 0.5μm) 이나 용융 영역을 방지하고 Ar 보호 분위기는 MoS_2 산화(분해 온도 > 1200° C ± 10° C)를 방지합니다. 이후 800° C ± 10° C에서 어닐링을 실시하면 응력이 제거되고 텍스처와 기질 사이의 결합이 강화됩니다.

(4) 표면처리

표면 처리 Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm의 권장 거칠기로 연마하여 윤활성을 최적화하고 다이아몬드 연마 또는 화학 기계적 연마(CMP)를 사용하여 결함을 제거합니다. 평평한 표면은 MoS_2 전사 필름의 접착력을 높이고(피복률 > 95% ± 2%), 마찰 계수를 0.12 ± 0.01로 줄이고 접착력을 < 0.7 N ± 0.1 N으로 낮춥니다. 연마 후 초음파 세척으로 잔류물을 제거하고 SEM으로 균일성(편차 < 0.1%)을 검증하여 습도(> 50% ± 5%)로 인한 마찰 증가(< 5% ± 1%)를 줄입니다. 금형 성형에서 Ra < 0.05 μm는 탈형력(< 10 N ± 1 N)을 줄이고 공작물 품질을 개선합니다. 향후 TiN 코팅(두께 2 μm)과 결합하여 내마모성을 향상시킬 수 있습니다.

(5) 시험 사양

시험은 ASTM G99 표준, 핀-디스크 마찰 및 마모 시험을 채택하고, 하중은 10 N ± 0.1 N, 속도는 0.1 m/s ± 0.01 m/s로 저속 작업 조건을 시뮬레이션했습니다. 환경은 25° C ± 2° C, 습도는 50% ± 5%로 제어되었으며, 3회 반복하고 평균하여 마찰 계수와 마모율을 측정했습니다. 이 조건에서 $WC5MoS_2$ C3 샘플의 마찰 계수는 0.12 ± 0.01 이고, 마모율은 0.05 mm^3 / N•m ± 0.01 mm^3 / N•m 로 최적화되지 않은 샘플(0.15 ± 0.01)보다 우수했습니다. SEM과 EDS를 결합하여 전사 필름 적용 범위와 윤활제 분포를 분석하면 향후 고속 테스트(> 0.5 m/s ± 0.01 m/s) 또는 고온 환경(> 400° C)으로 확장될 수 있습니다.

(6) 종합적인 최적화 효과 및 적용 검증

위의 전략을 통해 $WC5MoS_2C3$는 5 μm 텍스처 깊이, 50-100 μm 피치, 1064 nm 레이저 및 Ra < 0.05 μm의 조건에서 마찰 계수 0.12 ± 0.01, 접착력 0.7 N ± 0.1 N, 마모율 0.05 mm^3 / N•m을 갖습니다. ± 0.01 mm^3 / N•m, 경도 HV 1550 ± 30, K_{1c} 10 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5. 고속 절삭에서 공구 수명 > 5000 m ± 500 m; 건식 가공에서 마찰열 < 100° C ± 1° C; 다이 성형에서 공구 수명 > 10 6배 ± 10 5배. WC10Co(마찰 계수 0.5 ± 0.05)와 비교했을 때, 최적화 후 성능이 약 75% 향상되었습니다. 향후 나노텍스처링이나 다층 코팅을 통해 고온(>800° C) 또는 고하중(>200N)에 적응할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(7) 환경관리 및 미래발전

습도는 30~50%로 조절하여 10% ± 2%의 온도 상승을 방지하고, Ar 보호 및 방습 코팅(예: SiO_2, < 1%)을 통해 안정성을 강화합니다. 향후 동적 마모 시험(> 1 m/s ± 0.01 m/s) 또는 장기 내구성 시험(> 1000 시간)을 플라즈마 용사(두께 15 μm)와 결합하여 항공 및 에너지 분야 적용을 확대할 수 있습니다.

카바이드 표면 질감은 5μm 깊이, 50~100μm 간격, MoS_2 5% 및 C 3%, 1064nm 레이저, Ra < 0.05μm로 최적화되어 마찰 계수 < 0.2를 달성했으며, ASTM G99 시험을 통해 그 효과를 검증했습니다. WC5MoS_2 C3를 예로 들면, WC10Co 보다 성능이 우수하며, 향후 나노기술 및 코팅을 통해 더욱 개선될 수 있습니다.

9.3.2.8 초경합금 표면 조직 및 윤활 엔지니어링 응용

초경합금 표면 조직과 MoS_2 및 C 윤활제를 결합하여 자체 윤활 성능을 크게 향상시켜 다양한 고부하 엔지니어링 시나리오에서 우수한 성능을 발휘합니다. 이러한 조직 구조는 유막 형성 및 칩 포집을 최적화하여 마찰 계수(<0.2±0.01)와 점착력(<0.8N±0.1N)을 감소시키고, 공구 및 부품의 수명을 연장하며, 고속 절삭, 건식 가공 및 정밀 기계의 적용 요건을 충족합니다. 아래에서는 특정 적용 시나리오, 성능 이점 및 실제 사례를 기반으로 엔지니어링 적용 가치를 자세히 살펴보고, 산업 효율성 및 내구성에 대한 기여도를 분석합니다.

(1) 고속공구

고속 공구 응용 분야에서 WC5MoS_2는 탁월한 자체 윤활 특성으로 좋은 성능을 발휘합니다. 텍스처 깊이는 5μm ± 0.1μm로 설정되어 MoS_2전사 필름(두께 10nm ± 1nm) 형성을 최적화하고 마찰 계수는 0.12 ± 0.01로 감소합니다. SEM 분석에 따르면 전사 필름 적용 범위가 > 90% ± 2%로 칩과 공구 표면 사이의 직접 접촉을 줄이고 공구 수명을 5000m ± 500m 이상 연장하여 기존 WC10Co 공구(수명 약 3000m)를 훨씬 능가합니다. 이 성능은 특히 고경도 재료(예: 티타늄 합금 또는 스테인리스강) 또는 고속 조건(> 500m/min)을 가공할 때 중요하며 절삭력과 마모율을 줄이고 표면 마감을 개선하며 냉각수 사용을 줄여 친환경 제조 요구 사항을 충족합니다.

(2) 건식금형

건식 성형 시나리오에서 WC3C는 접착력이 낮고 수명이 길어 선호됩니다. 텍스처 간격은 오일 필름의 균일한 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)를 보장하기 위해 50μm ± 1μm로 설정됩니다. C의 sp^2 결합 구조(슬립 에너지 0.01eV ± 0.001eV)는 안정적인 윤활 필름을 형성하고 접착력은 0.8N ± 0.1N 으로 감소합니다. SEM 관찰 결과 텍스처가 마모 파편(< 1μm ± 0.1μm)을 포착하고 2차 마모를 줄이며 금형 수명이 10 6 배 ± 10 5 배를 초과하여 WC10Co 금형(수명 약 5 × 10 5 배)을 훨씬 능가합니다. 자동차 대시보드나 전자 하우징 제조와 같은 건식 사출 성형이나 스탬핑에서는 접착력이 낮아 공작물 접착력이 감소하고 마찰열은 < 100° C ± 1° C로 제어되어 생산 효율과 표면 품질이 향상되어 환경 친화적 가공의 장점을 반영합니다.

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

(3) 베어링 부품

베어링 구성 요소 응용 분야에서 WC5MoS_2는 Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm로 연마된 표면, 향상된 MoS_2 전사 필름 접착력(피복률 > 95% ± 2%) 및 0.15 ± 0.01 의 안정적인 마찰 계수로 뛰어난 내구성과 낮은 마찰 특성을 보입니다. 5 μm ± 0.1 μm의 텍스처 깊이는 유체 역학적 윤활을 최적화하고 오일 필름 두께는 약 1 μm ± 0.1 μm로 베어링의 마찰 쌍의 마모를 줄이고 10 4 시간 ± 10 ³ 시간 이상의 서비스 수명을 제공하며 이는 기존 강철 베어링(수명 약 5000 시간)보다 우수합니다. 이 성능은 항공기 엔진, 자동차 변속 시스템 및 산업 기계에서 탁월하여 유지 관리 빈도와 에너지 소비를 줄이는 반면 Ni 의 NiO 부동태화 층(두께 ~ 10 nm)은 습도가 높은 환경에서 추가적인 부식 방지 기능을 제공하고 신뢰성을 향상시킵니다.

(4) 항공 터빈 코팅

WC10MoS_2 텍스처 코팅은 항공 터빈 부품에 우수한 성능을 발휘합니다. 5μm ± 0.1μm의 텍스처 깊이와 50μm ± 1μm의 간격은 고속 기류 및 입자 정련으로 인한 마찰을 줄여줍니다. 마찰 계수는 0.12 ± 0.01이며, 사용 수명은 6,000시간 이상으로 연장됩니다. MoS_2의 고온 안정성(>400° C)은 엔진 환경에서 윤활 효과를 유지합니다. 마찰열은 100° C 미만으로 코팅의 피로 저항성을 향상시키고 항공 부품의 유지 보수 비용을 절감하며 고고도 비행 조건에 적합합니다.

(5) 석유시추공구

WC8MoS_2C(MoS_2 5%, C 3%) 텍스처 드릴 비트는 석유 시추에 우수한 성능을 발휘합니다. 텍스처 깊이가 5μm ± 0.1μm 로 드릴 절삭물(< 1μm ± 0.1μm)을 포집하고, 접착력이 < 0.8N ± 0.1N이며, 기존 소재 대비 드릴 비트 수명이 약 25% 증가합니다. 건식 시추 조건에서 마찰열이 100° C 미만일 때 MoS_2와 C는 절삭 저항을 시너지 효과를 발휘하여 감소시키고, 황 함유 암석이나 고경도 암석에서 효율이 향상되어 교체 빈도와 운영 비용이 절감됩니다.

(6) 의료기기

WC5MoS_2 텍스처드 메스는 의료 분야에서 잠재력을 보여줍니다. 50μm ± 1μm의 텍스처 간격과 Ra < 0.05μm ± 0.01μm의 낮은 마찰력으로 절삭력이 우수하고, 마찰 계수는 0.12 ± 0.01, 접착력은 0.7N ± 0.1N 이며, 조직 손상 감소 효과가 뛰어납니다. 수명은 5,000 회 이상으로 무균 환경에서의 고정밀도 요건을 충족하며, 수술 안전성과 기구 내구성을 향상시킵니다.

(7) 포괄적인 혜택과 확대된 적용

표면 텍스처와 윤활제의 시너지 효과는 초경합금의 성능을 크게 향상시키고, 고속 공구의 절삭 수명을 연장하며, 건식 금형의 생산 효율을 높이고, 베어링 부품의 내구성을 강화하며, 항공 코팅의 유지보수 비용을 절감하고, 석유 시추 공구의 작동 효율을 최적화하며, 의료 기기의 안전성을 보장합니다. WC10Co(마찰 계수 0.5 ± 0.05, 접착력 > 2N)와 비교했을 때, WCTiCNi 텍스처 시스템은 마찰 계수를 약 75%, 접착력을 50% 이상 감소시켜 가공 정확도와 공구 수명을 향상시킵니다. 또한, 텍스처

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

설계는 철도 트랙 내마모층, WC8MoS$_2$C(트랙 마찰 손실 감소), 웨어러블 전자 부품, 저접착성 WC3C(플렉서블 전도성 부품 지원)와 같은 새로운 응용 분야를 지원합니다. 향후 나노텍스처링이나 다층 코팅을 통해 에너지 및 항공 분야로의 적용을 확대할 수 있습니다.

초경 표면 텍스처는 고속 공구, 건식 금형, 베어링 부품, 항공 코팅, 석유 시추 공구, 의료 기기 등 다양한 분야에서 우수한 성능을 발휘합니다. WC5MoS$_2$의 마찰 계수는 0.12±0.01이며 수명은 5000m 이상, WC3C의 부착력은 0.8N이며 수명은 106회 이상, WC5MoS$_2$의 수명은 104시간 이상으로, 텍스처와 윤활제의 시너지 최적화를 통해 자체 윤활 성능을 입증합니다. 향후 소재 혁신을 통해 더욱 다양한 요구를 충족할 수 있을 것입니다.

9.4 바이오닉스 및 지능형 시멘트 카바이드

혁신적인 재료 설계를 통해 적응성(응답 시간 < 1ms ± 0.1ms)과 **고성능(경도 > HV 1400 ± 30)을 달성하고, 기울기 구조** (기공률 5%-20% ± 1%), **다공성 구조(기공 크기 110μm** ± 0.1μm) 및 반응성 재료(변형률 < 0.1% ± 0.01%)를 결합하여 지능형 제조(정확도 < 1μm ± 0.1μm), 생물의학(적합성 > 95% ± 2%) 및 항공(피로 수명 > 10 6 배 ± 10 5 배) 및 기타 분야의 요구를 충족합니다. 기존의 초경합금은 균일하고 조밀한 구조로 인해 적응성이 부족하여 동적 하중, 온도 변화 또는 생물학적 환경에 대처하기 어려워 복잡한 작업 조건에서의 적용이 제한됩니다. 생체공학적 디자인은 자연의 다층 구조와 적응적 특성(조개껍질과 대나무 등)에서 영감을 얻었으며, 스마트 반응 소재(NiTi 합금 등)의 변형 능력과 결합하여 시멘트 카바이드에 지능적 잠재력을 불어넣었습니다.

이 섹션에서는 바이오닉 미세구조(기울기 및 다공성)의 설계 원리, 지능형 반응 소재의 메커니즘 및 응용 전망에서 시작하여, 바이오닉 사례, 재료 특성 분석, 그리고 엔지니어링 사례를 결합하여 초경합금의 지능형 개발 방향을 탐구합니다. 예를 들어, 기공률 10% ± 1%의 기울기 WC-Co의 경도는 HV 1450 ± 30에 도달하고 변형률은 0.05% ± 0.01%로, 지능형 금형의 동적 조정 요건을 성공적으로 충족합니다.

생체공학적 미세구조 설계

생체 미세 구조는 껍질의 다층 경사 구조와 대나무의 다공성 인성 레이아웃에서 영감을 얻은 스마트 시멘트 카바이드의 핵심입니다. 경사 구조는 다공성을 5%에서 20% ± 1%로 점진적으로 분포시켜 높은 표면 경도(> HV 1500)에서 높은 내부 인성(K_{1c} > 12 MPa•m$^{1/2}$)으로 전환합니다. SEM 분석에 따르면 기공이 고르게 분포되어(편차 < 0.1% ± 0.02%) 균열 전파 저항 능력이 향상됩니다. 다공성 구조는 110μm ± 0.1μm의 기공 크기로 설계되어 재료의 투과성을 높이고 윤활제(예: MoS$_2$)의 침투 또는 생물학적 조직의 성장을 용이하게 합니다. 기공률이 10% ± 1%일 때, 경도는 HV 1450 ± 30을 유지하고 변형률은 < 0.1% ± 0.01%로 적응 변형 요건을 충족합니다. 쉘 내 $CaCO_3$ 층과 유기층이 교대로 배열된 구조는 경사 설계의 기계적 최적화에 영감을 주었으며, 대나무의 절간 다공성 레이아웃은 다공성 구조의 응력

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

분산을 유도했습니다. 기존의 WC-Co 단일 구조와 비교했을 때, 바이오닉 설계는 피로 수명을 10^6배 ± 10^5배 이상 향상시켰습니다.

스마트 응답 자료

스마트 응답 소재는 초경합금에 적응성을 부여합니다. NiTi 변형 합금이 대표적인 예입니다. 형상 기억 효과와 초탄성(변형률 < 0.1% ± 0.01%)은 동적 하중이나 온도 변화에 적응하기 위해 < 1ms ± 0.1ms의 응답 시간 내에 재료 변형을 조정합니다. NiTi의 상 전이 온도(약 50° C ± 5° C)는 열처리로 조절됩니다. WC 매트릭스에 통합된 후, 그래디언트 구조의 Ni 상(함량 5%-10% ± 0.1%)은 지능형 네트워크를 형성합니다. SEM 관찰 결과 NiTi 입자가 균일하게 분포되어(편차 < 0.1%), 재료의 변형 회복 능력이 향상됩니다(> 95% ± 2%). 기존 초경합금과 비교하여 스마트 응답 소재는 열 팽창이나 기계적 응력으로 인한 미세 균열(< 0.5μm)을 줄입니다. 항공 부품에서는 피로수명이 10 6배 ± 10 5배로 증가하는데, 이는 WC10Co(약 5 × 10 5배)보다 우수합니다.

9.4.1 시멘트 카바이드의 생체 미세 구조(경사 및 다공성)

9.4.1.1 초경합금 구배 및 다공성 구조의 원리 및 기술 개요

생체 미세 구조는 경도 HV 1400-1800 ± 30, 기공률 5%-20% ± 1%)과 다공성 구조(기공 크기 110μm ± 0.1μm)를 결합하여 시멘트 카바이드(파괴 인성 K_{1c} > 15MPa•$m^{1/2}$)의 기계적 특성을 크게 최적화합니다. ± 0.5) 및 기능성(에너지 흡수율 > 50% ± 5%)을 결합하여 적응성이 뛰어나고 내구성이 높습니다. 디자인은 자연에서 영감을 받았습니다. 껍질의 층상 구조(경도 기울기 약 1GPa/mm ± 0.1GPa/mm)는 외층의 고경도 $CaCO_3$와 내층 유기층의 인성을 결합하여 우수한 충격 저항성을 달성하는 반면 대나무의 다공성 구조(기공률 약 30% ± 2%)는 절간 분포를 통해 응력 분산 및 에너지 흡수를 최적화합니다. 이러한 자연적 프로토타입은 초경합금의 생체공학적 설계에 영감을 주었으며, 스마트 제조, 바이오 의학, 항공과 같은 수요가 높은 응용 분야를 충족하기 위해 HV 1400±30 이상의 경도와 10^6배±10^5배 이상의 피로 수명을 달성하는 것을 목표로 합니다. 기존의 균일하고 밀도가 높은 초경합금(예: WC-Co)과 비교했을 때, 생체공학적 미세구조는 구배 및 다공성을 통해 인성과 에너지 흡수 성능을 향상시켜 동적 환경에서 단일 구조의 한계를 극복합니다.

제조 공정은 입자 크기가 0.52μm ± 0.01μm인 WC 미분말을 사용하고 경도 구배를 달성하기 위해 층화로 Co 함량을 제어하는 구배 분말 층화 방법을 채택합니다. 기공 형성제 PMMA(입자 크기 110μm ± 0.1μm)를 첨가하여 다공성 구조를 도입한 다음 1400° C ± 10° C에서 소결하고 중간 압력(50MPa ± 1MPa)을 결합하여 재료 밀도와 기공 균일성을 보장합니다. 예를 들어, 구배 WC-Co(기공률 10% ± 1%)의 경도는 HV 1450 ± 30에 도달하고, K_{1c}는 16 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5로, 균일한 WC-Co ± 0.5의 HV 1500 ± 30 및 12 MPa•$m^{1/2}$보다 우수하여 바이오닉 설계의 성능 이점을 입증합니다. 이 섹션에서는 구배 및 기공 구조가 메커니즘 분석, 제조 공정 및 최적화 전략

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

측면에서 초경합금의 엔지니어링 응용 잠재력을 어떻게 향상시킬 수 있는지 살펴봅니다.

9.4.1.2 초경합금 구배 및 다공성 구조의 메커니즘 및 분석

초경합금의 바이오닉 미세 구조는 경사 구조와 다공성 구조의 조화로운 설계를 통해 기계적 특성과 기능성을 크게 최적화하여 지능형 제조, 바이오 의학, 항공 및 기타 분야에 고성능 소재를 제공합니다. 본 연구에서는 경사 구조와 다공성 구조의 메커니즘을 심층 분석하고, 경도, 인성, 에너지 흡수율 및 피로 수명에 미치는 영향을 탐구하며, 미시적 관찰과 실험 데이터를 결합하여 Co 함량 경사, 다공성 매개변수 및 WC 입자 크기가 초경합금의 엔지니어링 응용 가능성을 어떻게 향상시킬 수 있는지 밝힙니다.

(1) 그래디언트 구조의 메커니즘

기울기 구조는 Co 함량(5%-15% ± 1%)의 점진적인 분포를 통해 경도 기울기(HV 1400-1800 ± 30)를 형성합니다. 표면의 높은 Co 함량(15% ± 1%)은 더 높은 인성을 제공하고 내부의 낮은 Co 함량(5% ± 1%)은 경도를 보장합니다. SEM 분석에 따르면 Co 분포는 연속적(편차 < 0.1% ± 0.02%)이어서 상 경계 결함을 방지합니다. 이 기울기 설계는 응력 분산률을 > 50% ± 5%로 높이고 층을 통해 응력 집중을 완화합니다. 파괴 인성(K_{1c})은 균일한 구조에 비해 약 30% ± 5% 증가하여 > 15 MPa • m^{1} / ² ± 0.5에 도달합니다. 피로 시험(10 6배 ± 10 5배) 결과, 균열 확장은 길이가 < 0.1 mm ± 0.01 mm인 경사 구조에 의해 억제되었으며, 이는 균일한 WC-Co(균열 확장 > 0.2 mm)보다 우수했습니다. 이는 Co 경사가 균열 전파 속도를 늦추기 때문입니다(< 10 5 6 m/s).

(2) 다공성 구조의 메커니즘

다공성 구조는 110μm ± 0.1μm의 기공 크기로 설계되어 재료 밀도를 ~12g/cm^3 ± 0.1g/cm^3로 줄이는 반면, 균질 WC-Co ± 0.1g/cm^3의 경우 14.5g/cm^3로 에너지 흡수량을 > 50% ± 5% 증가시키면서 무게는 줄입니다. 기공률 10% ± 1%는 경도와 인성의 균형을 이루고, 기공 벽 강도 > 100MPa ± 10MPa는 WC 입자 0.5μm ± 0.01μm에 의해 제공되며, SEM 관찰 결과 기공 벽이 조밀(기공률 편차 < 0.5% ± 0.1%)하여 압축 강도가 향상됩니다. 그러나 기공률이 20% ± 1%를 초과하면 경도가 약 20% ± 3% 감소합니다. 과도한 기공률은 결정립계를 약화시키고 미세균열 밀도(> 10 ⁴ m^{-2})를 증가시켜 구조적 안정성에 영향을 미치기 때문입니다. 향상된 에너지 흡수율은 동적 하중 환경에 적합한 다공성 구조에 의한 충격 에너지 분산에 기인합니다.

(3) 미시분석

현미경 관찰을 통해 SEM을 통해 기울기 WC-Co의 Co 분포가 연속적이고, 다공성 구조의 기공률 편차가 < 0.5% ± 0.1%이며, 110 μm ± 0.1 μm의 기공 크기가 균일하게 분포되어 재료의 투과성과 에너지 흡수가 향상됨을 확인했습니다. EDS 검출은 Co 함량 기울기(5%-15% ± 1%)를 검증하고 표면 Co 농축(15% ± 1%)은 인성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

지지를 제공합니다. XPS 분석은 산소 함량이 낮음을 보여줍니다(O 1s 피크 ~ 532 eV ± 0.1 eV). 이는 1400° C ± 10° C 소결 공정이 산화를 효과적으로 제어하고 표면 안정성이 최적화되지 않은 샘플(산소 함량 > 0.5%)보다 우수함을 나타냅니다. 피로 시험 결과는 균열 확장이 < 0.1 mm ± 0.01 mm임을 더욱 뒷받침하며, 경사 및 다공성 구조의 상승효과를 검증합니다.

(4) 소결온도 및 성능 제어

1400° C ± 10° C의 소결 온도는 기공률과 기계적 특성을 제어하는 데 중요합니다. 윤활제 안정성을 보장하기 위해 MoS_2의 분해 온도(> 1200° C ± 10° C)보다 낮고 Ar 보호 분위기는 산화를 줄입니다. 온도 제어로 기공률 편차가 < 0.5% ± 0.1%가 되고, SEM으로 WC 입자가 0.5μm ± 0.01μm, 기공 벽 강도가 > 100MPa ± 10MPa가 됩니다. 고온 소결(> 1450° C ± 10° C)과 비교했을 때, 1400° C는 입자 성장(> 2μm)으로 인한 경도 저하(> 10% ± 2%)를 방지하고 K_{1c}를 > 15MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5로 유지합니다.

(5) 응용 검증 및 최적화 방향

: 그래디언트 다공성 구조는 엔지니어링에서 우수한 성능을 발휘하며 그래디언트 WC-Co(기공률 10% ± 1%) 경도 HV 1450 ± 30, K_{1c} 16 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5, 피로 수명 > 10^6배 ± 10^5배로 스마트 금형 및 항공 부품에 적합합니다. 최적화는 기공률을 5%-10% ± 0.5%로 미세화하고, 기공 크기를 50μm ± 0.1μm로 줄이고, 나노-WC(< 0.3μm)를 도입하여 기공 벽 강도(> 120MPa)를 개선하고, 3D 프린팅을 결합하여 복잡한 그래디언트를 달성하고, 고온(> 800° C) 또는 고하중(> 200N)에 적응함으로써 달성할 수 있습니다.

초경합금 바이오닉 미세구조는 Co 구배(5%-15%), K_{1c} 30% 증가, 에너지 흡수율 50% 이상의 다공성 구조(기공 크기 110μm)를 형성하고, 1400° C에서 소결하여 성능을 보장함으로써 HV 1400-1800 의 경도를 형성합니다. WC-Co 구배(HV 1450, K_{1c} 16 MPa•$m^{1/2}$)를 예로 들면, 향후 나노 최적화를 통해 내구성을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

9.4.1.3 시멘트 카바이드 생체 미세구조, 경사 및 다공성 구조에 영향을 미치는 요인 분석

초경합금 바이오닉 미세구조, 구배 및 다공성 구조의 성능은 기공률, Co 구배, 기공 크기, 소결 온도, 결정립 크기 등 여러 요인에 의해 조절되며, 이러한 요인들은 미세 메커니즘을 통해 재료의 경도, 파괴인성(K_{1c}), 강도 및 에너지 흡수율에 영향을 미칩니다. 다음은 파괴역학, 복합재 계면 이론, 열역학적 평형, 다공성 재료의 기계적 모델, 결정립 강화 메커니즘, 소결 동역학 등의 과학적 원리를 바탕으로 각 요인과 그 이론적 근거를 분석한 것입니다.

(1) 다공성

다공성은 초경합금의 파괴인성(K_{1c})과 경도에 직접적인 영향을 미칩니다. 다공성이 10% ± 1%일 때, 적당한 다공성이 응력을 분산시키는 데 도움이 되기 때문에 K_{1c}가 더

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

높습니다(> 15 MPa·m¹ ᐟ ² ± 0.5). 다공성이 20% ± 1%를 초과하면 경도가 약 20% ± 3% 감소합니다(예: HV 1450 ± 30 에서 HV 1200 ± 30 으로). 다공성 증가로 인해 재료 연속성이 약화되기 때문입니다. 그리피스 균열 이론에 따르면, 다공성은 초기 균열원으로 작용하고, 과도한 다공성은 균열 전파의 에너지 방출을 증가시키고 경도를 감소시킵니다. 균일하게 분포된 기공은 에너지 소산 메커니즘(소성 변형 등)을 통해 K 1c를 증가시키는데 , 이는 Gibson-Ashby 모델에서 다공성 물질의 기계적 거동과 일치합니다.

(2) Co 기울기

코발트(Co)의 기울기 분포는 응력 분산 성능을 개선합니다. Co 함량이 5%-15% ± 1%일 때 응력 분산 효과가 좋고 파괴 인성이 약 10% ± 2% 향상됩니다. 이는 낮은 Co 기울기가 안정적인 결합 상 네트워크를 형성하여 픽의 제 2 법칙에서 확산 제어 기울기 분포 모델에 부합하기 때문입니다. Co 함량이 20% ± 1%를 초과하면 편석이 약 10% ± 2% 증가합니다(국부적 Co 함량 편차 > 0.5% ± 0.1%). 이로 인해 결정립계가 약해지고 경도 변동이 심화됩니다. 이는 상 분리 이론(깁스 자유 에너지 최소화)에 따른 것으로, 결정립계 에너지(> 1 J/m²)가 증가하고 재료 강도가 감소합니다.

(3) 조리개

기공 크기는 에너지 흡수율과 강도에 영향을 미칩니다. 기공 크기가 10μm ± 0.1μm일 때 에너지 흡수율은 높습니다(> 90% ± 2%). 기공 크기가 작으면 응력 분산이 용이하기 때문입니다. 기공 크기가 20μm ± 0.1μm를 초과하면 강도가 약 15% ± 3% 감소합니다(예: 1000MPa 에서 850MPa ± 20MPa). 이는 기공이 클수록 응력 집중이 쉽게 발생하기 때문입니다. 하신-스트릭만 이론에 따르면, 작은 기공은 응력을 분산시켜 에너지 흡수율을 높이는 반면, 큰 기공은 국부적인 응력 집중을 유발하여 최대 전단 응력 이론과 일치합니다.

(4) 소결온도

소결 온도는 미세 구조 안정성과 기공률에 상당한 영향을 미칩니다. 1400° C ± 10° C 에서 구조는 안정적이며 기공률 편차는 1% ± 0.1% 미만입니다. 이는 온도가 Co 의 녹는점(1495° C)에 가까워 균일한 액상을 형성하여 입자 재배열을 촉진하기 때문이며, 이는 Kingery 모델의 고상 소결 및 액상 소결 이론과 일치합니다. 온도가 1450° C ± 10° C 를 초과하면 기공률 편차가 약 5% ± 1%(국부 기공률 > 0.5% ± 0.1%) 증가하여 재료 균일성이 감소하는데, 이는 Arrhenius 방정식에서 확산 속도가 기하급수적으로 증가하는 것과 일치합니다.

(5) 입자 크기

입자 크기는 성능 최적화에 영향을 미칩니다. 입자 크기가 0.51 μm ± 0.01 μm일 때 성능이 최적이며 K_{1c}가 16 MPa·m¹ ᐟ ² ± 0.5 에 도달하고 경도는 HV 1450 ± 30 에서 안정적입니다. 이는 미세 입자가 입자 경계 밀도를 증가시켜(> 10^{14} m^{-2}) 균열 전파를 방해하고 Hall-Petch 관계를 따르기 때문입니다. 입자 크기가 2 μm ± 0.01 μm을 초과하면 K_{1c}가 약 10% ± 2%(14.4 MPa·m¹ ᐟ ² ± 0.5) 감소하는데,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

이는 입자 경계 밀도가 감소하여 Orowan 강화 메커니즘과 일치합니다.

(6) 종합적인 예

WC-Co 를 예로 들면, 기공률이 25% ± 1%인 샘플은 기공이 너무 많아서 경도가 HV 1200 ± 30 에 불과하고 K_{1c} 는 13 MPa • m¹ / ² ± 0.5 로 떨어진다. 반면 기공률이 10% ± 1%이고 입자 크기가 0.51 μm ± 0.01 μm 인 샘플은 경도가 HV 1450 ± 30 이고 K_{1c} 는 16 MPa • m¹ / ² ± 0.5 로 유지되어 종합적으로 매우 우수한 특성을 보인다. SEM 분석을 통해 Co 구배가 10% ± 1%이고 소결 온도가 1400° C ± 10° C 인 샘플이 다른 조건보다 분리율(< 0.1% ± 0.02%)과 기공 균일성(> 95% ± 2%)이 훨씬 우수하다는 것이 확인되었다.

초경합금 바이오닉 미세구조, 구배 및 다공성 구조물의 성능은 기공률(10% ± 1%), Co 구배(5%-15% ± 1%), 기공 크기(10 μm ± 0.1 μm), 소결 온도(1400° C ± 10° C), 입자 크기(0.51 μm ± 0.01 μm)와 같은 요인에 의해 조절됩니다. 기공률과 입자 크기는 K1c 와 경도에 영향을 미치고, Co 구배는 응력 분산을 최적화하며, 소결 온도는 구조적 안정성을 보장하고, 기공 크기는 에너지 흡수 및 강도에 영향을 미칩니다. 이러한 매개변수를 최적화함으로써 공구 및 금형 과 같은 고급 응용 분야의 요구 사항을 충족하도록 성능을 정밀하게 제어할 수 있습니다.

9.4.1.4 시멘트 카바이드 바이오닉 미세구조, 경사 및 다공성 구조의 최적화

$_{1c}$ > 15 MPa • m¹ / ² ± 0.5 의 강도를 달성하려면 에너지 흡수율(> 50% ± 5%), 피로 수명(> 10 6 배 ± 10 5 배) 및 복잡한 환경에서의 안정성을 고려해야 합니다. 이를 위해서는 구조 설계, 기공 형성제 최적화, 소결 공정 조정 및 입자 제어와 같은 종합적인 전략을 통해 달성해야 합니다. 이러한 최적화 방안은 경사 구조와 다공성 구조의 시너지 효과를 강화하고, 껍질의 경도 경사 및 대나무의 다공성 인성과 같은 자연의 바이오닉 원리를 최대한 활용하여 지능형 제조, 생물 의학, 항공 및 기타 수요가 높은 응용 분야의 요구를 충족하는 동시에 재료의 적응성과 내구성을 유지하는 것을 목표로 합니다. 이하에서는 구조적 매개변수, 제조 공정, 미세 제어 및 환경 적응성 측면에서 최적화 방안을 자세히 설명하고, 실험 데이터와 실제 적용 효과를 결합하여 실행 가능성을 완전히 검증하고 추가 개선 가능성을 모색합니다.

(1) 구조

구조적 최적화는 10% ± 1%의 다공성과 5%-15% ± 1%의 Co 함량 구배를 기반으로 합니다. 다공성 10% ± 1%은 미세 다공성 구조를 통해 재료 밀도를 ± 0.1 g/cm³ 로 줄여 균질 WC-Co ± 0.1 g/cm³ 의 14.5 g/cm³ 에 비해 ~12 g/cm³ 로 줄여 무게를 크게 줄이는 동시에 다공성 구조에 의한 충격 에너지의 효과적인 분산 덕분에 에너지 흡수를 > 50% ± 5%로 증가시킵니다. SEM 분석에 따르면 다공성이 균일하게 분포되어(편차 < 0.5% ± 0.1%), 다공성이 > 20% ± 1%일 때 결정립계 약화로 인한 경도 저하(약 20% ± 3%) 및 미세균열 증가(> 10 ⁴ m ⁻ ²)를 방지합니다. Co 함량 구배는 5%(내부 고경도 영역)에서 15%(표면 고인성 영역)로 증가하여 경도 구배 HV 1400-1800 ± 30 을 형성하고 K_{1c} 는 약 30% ± 5%(> 15 MPa • m ¹ / ² ± 0.5) 증가하고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

응력 분산율은 > 50% ± 5%이며, 응력 집중을 완충하기 위한 계층화로 피로 저항성이 크게 향상되어 피로 수명이 > 10 6 배 ± 10 5 배에 도달합니다. 이 구배 설계는 스마트 금형의 잦은 변형이나 항공 구성품의 고주파 진동과 같은 동적 하중 환경에 특히 적합합니다. 균일한 구조(K $_{1c}$ 약 12 MPa • m ^{1} / ^{2} ± 0.5)와 비교하여 인성이 크게 향상됩니다.

(2) 기공형성제

PMMA 를 기공 형성제로 사용하고 입자 크기를 110μm ± 0.1μm 로 정밀하게 제어합니다. 첨가량은 5% ± 0.1%로 설정하여 열 분해를 통해 균일한 다공성 구조를 형성하는 것을 목표로 합니다. PMMA 는 소결 공정 중 1400° C ± 10° C 에서 분해되어 기공 크기가 110μm ± 0.1μm 인 다공성 네트워크를 생성합니다. SEM 은 WC 입자(0.51μm ± 0.01μm)의 미세한 지지체 덕분에 기공률 편차가 < 0.5% ± 0.1%이고 기공 벽 강도가 > 100MPa ± 10MPa 임을 확인합니다. 5% ± 0.1%의 첨가량은 기공률과 경도 사이의 균형을 보장합니다. 5% 미만이면 에너지 흡수가 불충분하여(< 40% ± 5%) 충격 환경에서 재료의 성능이 제한될 수 있으며, 10% ± 0.1%를 초과하면 경도가 감소(> 10% ± 2%)하고 과도한 다공성으로 인해 구조적 안정성이 약화될 수 있습니다. 최적화를 통해 나노 크기의 PMMA(입자 크기 < 50 μm ± 0.1 μm)를 도입하여 기공 구조를 미세화하고, 인성을 더욱 강화하며 생체적합성(예: 골 조직 성장)을 향상시킬 수 있으며, 특히 임플란트 응용 분야에서 잠재력이 있습니다.

(3) 소결공정

소결 공정은 1400° C ± 10° C 의 열간 프레스와 50 MPa ± 1 MPa 의 압력을 사용하여 재료 밀도와 기공률 균일성을 보장합니다. 1400° C 는 MoS_2의 분해 온도(> 1200° C ± 10° C)보다 낮으며, Ar 보호 분위기에서 산화를 효과적으로 방지합니다. SEM 관찰 결과, WC 입자는 미세화된 상태를 유지하며, 기공률 편차 10% ± 1%는 < 0.5% ± 0.1%로 제어됩니다. 50 MPa 압력은 Co 기울기 분포의 균일성(편차 < 0.1% ± 0.02%)과 기공 벽 강도(> 100 MPa ± 10 MPa)의 향상을 촉진하여 고온 소결(> 1450° C ± 10° C)로 인한 입자 성장(> 2 μm ± 0.01 μm)이나 경도 감소(> 10% ± 2%)를 방지합니다. 단계별 가열 전략(1200° C 에서 예열한 다음 1400° C 로 가열)을 사용하여 열 응력(< 50 MPa)을 더욱 줄이고 K $_{1c}$ 를 > 15 MPa • m^{1} / ^{2} ± 0.5 증가시키는 동시에 피로 수명을 > 10 6 배 ± 10 5 배로 유지했습니다. 향후에는 유지시간을 늘리거나(2 시간 ± 0.1 시간) 펄스 전류 보조 소결을 도입하여 기공 벽의 밀도와 기울기 전이의 부드러움을 향상시킬 수 있습니다.

(4) 곡물 관리

미량 억제제(예: VC, 0.5%-1%)를 첨가하고 볼 밀링 시간(40 시간 ± 1 시간)을 최적화하여 입자 크기를 0.51 μm ± 0.01 μm 로 제어했습니다. 미세 입자는 기공 벽 강도를 향상시켰고(> 100 MPa ± 10 MPa), SEM 분석 결과 입자 경계 밀도가 > 10 ^{14} m $^{-2}$ 였으며 미세 균열 크기가 상당히 감소했습니다(< 0.1 μm ± 0.01 μm). 이는 K $_{1c}$ > 15 MPa • m ^{1} / ^{2} ± 0.5 및 피로 수명 > 10 6 ± 10 5 배를 뒷받침합니다. 입자 크기가 2μm ± 0.01μm 이상일 때(경도가 10% ± 2% 이상 감소하고 인성이 감소함)와 비교했을 때, 0.51μm 입자는 특히 고변형률 환경(예: 항공 부품)에서 구배 및

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

다공성 구조의 시너지 효과를 최적화합니다. 앞으로 나노 입자 기술(< 0.3μm ± 0.01μm)을 활용하여 더 높은 입자 경계 밀도(> $10^{15}m^{-2}$)를 통해 내마모성과 피로 저항성을 더욱 향상시켜 극한 작업 조건에 적응할 수 있습니다.

(5) 종합적인 최적화 효과 및 적용 검증

위의 전략을 통해, 1400° C 에서 열간 프레싱으로 소결된 그래디언트 WC-Co(다공성 10% ± 1%, Co 5%-15% ± 1%), PMMA 5% ± 0.1% 및 0.51μm 입자는 HV 1450 ± 30 및 K_{1c} 16 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5 의 경도, 에너지 흡수율 > 50% ± 5%, 피로 수명 > 10 6 배 ± 10 5 배를 달성했습니다. 스마트 제조에서 정확도는 < 1μm ± 0.1μm로 스마트 금형의 동적 조정 요구 사항을 충족합니다. 생물 의학에서 다공성 구조는 뼈 조직 성장을 지원하고, 적합성은 > 95% ± 2%, 수명은 > 10 4 시간입니다. 항공 분야에서 피로 수명은 터빈 블레이드를 6000 시간 이상 지원합니다. 균일한 WC-Co(K_{1c} 12 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5, 피로수명 5×10 5 배)와 비교하였을 때 최적화 후 인성이 약 33% 향상되고, 수명도 약 100% 연장되어 현저한 우위를 보였다.

(6) 환경관리 및 미래발전

소결 공정은 산화를 방지하기 위해 Ar 보호 분위기를 사용하고, 성능 저하(마찰 계수 증가 < 5% ± 1%)를 방지하기 위해 주변 습도를 30%-50%로 제어합니다. 미래에는 3D 프린팅 기술을 도입하여 더 복잡한 그래디언트 구조를 구현할 수 있으며, 나노 PMMA 를 사용하여 기공 크기를 50μm ± 0.1μm로 미세화할 수 있으며, TiC(< 2%) 또는 Cr_3C_2(< 1%)를 추가하여 기공 벽을 강화하여 에너지 장비 및 해양 엔지니어링과 같은 고온(> 800° C) 또는 고하중(> 200N) 환경에 적응할 수 있습니다. 동적 피로 시험(> 10^7 배 ± 10 6 배) 또는 장기 서비스 평가(> 10 5 시간)와 결합하여 극한 조건에서의 신뢰성을 추가로 검증할 수 있습니다.

(7) 과제 및 개선 가능성

최적화 과정에서는 기공률 > 20% ± 1%로 인해 발생하는 경도 저하(20% ± 3%)에 주의해야 하며, 이는 미량 강화제(예: TiC)를 통해 보상할 수 있습니다. 과도한 PMMA 첨가(> 10% ± 0.1%)는 기공 벽 취성을 유발할 수 있으므로 정밀한 제어가 필요합니다. 대량 생산 시에는 공정 단순화 또는 자동화를 통해 구배 제조 비용(> 20%)을 절감해야 합니다. 향후 자가치유형 다공성 코팅(예: Al_2O_3, 두께 2μm)을 개발하여 내식성을 향상시키고 적용 범위를 확장할 수 있습니다.

초경합금 바이오닉 미세구조는 기공률 10% ± 1%, Co 구배 5%-15%, PMMA 5%, 1400° C 소결, 0.51 μm 입자 크기로 최적화되어 경도 HV 1400 이상, K_{1c} 15 MPa•$m^{1/2}$ 이상을 달성합니다. 구배 WC-Co 를 예로 들면, 균일 WC-Co 보다 성능이 우수합니다. 향후 나노기술과 코팅 개선을 통해 복잡한 환경에서의 응용 가능성이 더욱 향상될 것입니다.

9.4.1.5 시멘트 카바이드 생체 미세 구조, 경사 및 다공성 구조의 엔지니어링 응용

초경합금 바이오닉 미세 구조는 경사 설계와 다공성 구조의 조합을 통해 기계적

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

특성과 기능성을 크게 향상시켜 복잡한 엔지니어링 환경에서 탁월한 응용 가능성을 보여줍니다. 이러한 구조는 자연(예: 조개껍질의 경도 경사 및 대나무의 다공성 인성)에서 영감을 받았으며, 경도, 인성 및 에너지 흡수율을 최적화하여 항공기 중량 감소, 생체 의료 임플란트, 지능형 제조와 같은 까다로운 요구 조건을 충족합니다. 경사 구조는 피로 저항성을 향상시키고, 다공성 구조는 생체 적합성과 적응성을 향상시켜 초경합금의 다기능성 개발을 촉진합니다. 아래에서는 특정 응용 시나리오, 성능 이점 및 실제 사례를 기반으로 초경합금의 엔지니어링 적용 가치를 자세히 살펴보고, 산업 효율성, 생체 적합성 및 내구성에 대한 기여도를 분석합니다.

(1) 초경합금 항공기 경량화 부품

항공 경량화 부품에서 기울기 WC-Co(기공률 10% ± 1%)는 우수한 기계적 특성과 경량 특성으로 인해 두드러집니다. 밀도는 균질 WC-Co ± 0.1 g/cm³의 14.5 g/cm³에 비해 12 g/ cm³ ± 0.1 g/cm³로 감소하여 다공성 구조(기공 크기 110 μm ± 0.1 μm)가 도입되어 구성 요소의 무게가 약 17% 감소했습니다. SEM 분석에 따르면 기공률은 10% ± 1%이고 균일하게 분포(편차 < 0.5% ± 0.1%)되어 있으며 경도는 HV 1450 ± 30으로 유지되고 피로 수명이 10 6 배 ± 10 5 배를 초과하여 기존 WC10Co(약 5 × 10 5 배)보다 우수합니다. 이러한 성능은 특히 항공 터빈 블레이드 또는 동체 구조 부품에서 중요합니다. Co 함량(5%-15% ± 1%)의 기울기는 HV 1400-1800 ± 30, K_{1c} > 15 MPa • m¹ / ² ± 0.5, 응력 분산율 > 50% ± 5%의 경도 기울기를 형성하여 고주파 진동 및 열 응력(< 0.1 mm ± 0.01 mm)으로 인한 균열 전파를 효과적으로 늦춥니다. 또한, 경량 설계를 통해 연료 소비를 줄여 항공 산업의 친환경 개발 요구를 충족합니다.

(2) 시멘트 카바이드 생체의학 임플란트

생체의학 임플란트 응용 분야에서 다공성 WC-Co(기공 크기 5μm ± 0.1μm)는 우수한 생체적합성과 장기적 서비스 능력을 보여줍니다. 5μm ± 0.1μm의 기공 크기는 뼈 조직 성장과 혈액 순환을 촉진합니다. SEM 관찰 결과 기공 벽이 균일하고(편차 < 0.5% ± 0.1%) 적합성이 > 95% ± 2%에 이르러 기존 티타늄 합금 임플란트(약 90% ± 2%)를 훨씬 능가합니다. 다공성 구조는 밀도를 ~12g/cm³ ± 0.1g/cm³로 줄이고 에너지 흡수율을 > 50% ± 5%로 낮추어 생물학적 부하의 동적 변화에 적응하고 10 년 ± 1 년 이상의 수명을 제공하여 고관절이나 치과 임플란트에 적합합니다. WC 입자 0.51 μm ± 0.01 μm은 기공 벽 강도(> 100 MPa ± 10 MPa)를 보장하고 장기 사용 시 구조적 피로를 방지하며, Ni 상(< 10% ± 0.1%)의 수동화 층(두께 ~ 10 nm)은 내식성을 더욱 향상시킵니다(중량 감소 < 0.06 mg/cm²). 무균 환경의 요구 사항을 충족합니다.

(3) 초경합금 지능형 금형

스마트 금형 적용 분야에서는 경도 구배 WC-Co(Co 함량 5%-15% ± 1%)가 높은 인성과 동적 반응성을 갖춰 탁월한 성능을 발휘합니다. 경도 구배 HV 1400-1800 ± 30, K_{1c}는 16 MPa • m¹ / ² ± 0.5에 도달하며, 균일 WC-Co(K_{1c} 12 MPa • m¹ / ² ± 0.5) 대비 약 33% 향상되고, 응력 분산율은 50% ± 5% 이상이며, 피로 수명은 10 6 배 ± 10 5 배를 초과하여 복잡한 기하학적 형상의 빈번한 성형에 적합합니다. SEM 분석 결과, Co 의 기울기 분포는 연속적(편차 < 0.1% ± 0.02%)이고, 기공률은 10% ± 1%, 에너지

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

흡수율은 > 50% ± 5%로, 고주파 동적 하중 하에서 금형의 적응 변형을 지원하며, 정확도는 < 1μm ± 0.1μm로 자동차 부품이나 전자 부품의 정밀 가공에 적합합니다. 기존 금형과 비교했을 때, 기울기 설계는 열 응력(< 50MPa)으로 인한 미세 균열을 줄이고 사용 수명을 연장합니다.

(4) 항공 터빈 코팅

경사형 WC5MoS_2 다공성 구조는 항공 터빈 코팅에 우수한 성능을 발휘합니다. 10% ± 1%의 기공률과 5% ± 0.1%의 MoS_2 윤활제를 사용하면 마찰 계수가 0.12 ± 0.01로 감소하고, 피로 수명이 106배 ± 105배 이상 증가하며, 사용 시간은 6,000시간을 초과합니다. 110μm ± 0.1μm의 기공 크기는 윤활제 침투력을 향상시키고, 고속 기류 및 입자 정련을 줄이며, 고온 환경(>400° C)에 적합하고, 코팅의 피로 저항성과 내마모성을 향상시킵니다.

(5) 석유시추공구

다공성 WC8MoS_2C(기공률 15% ± 1%)는 석유 시추에 적합합니다. 110μm ± 0.1μm의 기공 크기로 드릴 절삭물(< 1μm ± 0.1μm)을 포집할 수 있으며, 윤활제 침투력으로 점착력을 < 0.8N ± 0.1N으로 감소시키고, 기존 드릴 비트 대비 수명을 약 25% 증가시킵니다. 에너지 흡수율이 > 50% ± 5%로 높아 고경도 암석 충격에 적응하고 교체 빈도를 줄여줍니다.

(6) 의료기기

다공성 WC-NiTi(기공 크기 5μm ± 0.1μm)는 의료 기기에서 광범위한 적용 전망을 가지고 있으며, 구배 Co 5%-15% ± 1%는 K_{1c} > 15 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5, 동적 하중에 대한 NiTi 변형률 < 0.1% ± 0.01%, 수명 > 5000회, 정형외과 메스에 적합하여 절단 정확도와 내구성을 향상시킵니다.

(7) 포괄적인 혜택과 확대된 적용

바이오닉 미세 구조는 초경합금의 다용성을 크게 향상시키고, 항공 경량화 부품의 무게를 줄이고 수명을 연장하며, 생체 의료용 임플란트의 호환성과 사용 수명을 개선하고, 스마트 금형의 가공 정확도와 내구성을 향상시키며, 항공 코팅 및 석유 시추 도구의 효율성을 최적화하고, 의료기기의 안전성을 강화합니다. 균일 WC-Co 대비 경사 다공성 구조의 피로 수명이 약 100% 증가하고 호환성이 5% ± 2% 향상됩니다. 향후 철도 내마모성 층, 다공성 WC-NiTi, 레일 표면 마모 감소, 스마트 센서, 경사 구조의 변형 모니터링 지원, 해양 장비, 다공성 설계로 내식성 향상(중량 감소 < 0.05 mg/cm^2) 등으로 응용 분야가 확장될 수 있습니다.

초경합금 바이오닉 미세 구조는 항공기 중량 감소 부품(피로 수명 > 10 6배), 생체 의료용 임플란트(적합성 > 95%, 수명 > 10년), 스마트 몰드(K_{1c} 16 MPa•$m^{1/2}$, 수명 > 10 6배)에서 탁월한 성능을 보이며, 경사 및 다공성 구조의 다기능성 향상을 입증합니다. 앞으로 소재 혁신을 통해 더욱 다양한 요구를 충족할 수 있을 것입니다.

9.4.2 지능형 반응 초경합금의 전망

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI , ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn









COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.4.2.1 Smart Response Carbide 원리 개요

Smart Response 시멘트 카바이드는 NiTi 변형 합금과 나노 센서를 도입하여 재료 적응성을 달성하고 동적 환경에서 성능을 크게 향상시킵니다. 이 설계는 NiTi 의 형상 기억 효과와 초탄성(변형률 < 0.1% ± 0.01%) 및 나노 센서의 실시간 모니터링(응답 시간 < 1ms ± 0.1ms)을 통해 응력 조정률 > 50% ± 5%를 달성하여 경도 > HV 1400 ± 30 및 응답 정확도 > 95% ± 2%를 목표로 합니다. NiTi 의 상 전이 온도는 약 100° C ± 1° C 로 재료가 열이나 기계에 반응할 수 있는 능력을 제공하고 나노 센서는 변형률(정확도 ± 0.001%)을 모니터링하여 정밀한 피드백을 제공하여 복잡한 작업 조건에서 재료의 거동을 최적화합니다. 기존의 초경합금과 비교했을 때, 스마트 응답 설계는 정적 성능의 한계를 돌파하여 스마트 도구의 적응 절삭력(< 10 N ± 1 N) 및 로봇 구성 요소의 고속 응답(< 1 ms ± 0.1 ms)과 같은 시나리오에 적합합니다.

준비 공정에는 적응성 향상을 위한 NiTi 도핑(1%-5% ± 0.1%), 재료 안정성 확보를 위한 1400° C ± 10° C 소결, 실시간 모니터링을 위한 나노센서(크기 110μm ± 0.1μm) 통합이 포함됩니다. 예를 들어, WC3NiTi 샘플의 경도는 HV 1450 ± 30 에 도달했고, 변형률은 0.05% ± 0.01%였으며, 응답 시간은 0.8ms ± 0.1ms 로 스마트 응답의 실현 가능성을 검증했습니다. 이 섹션에서는 스마트 응답 초경합금의 원리와 메커니즘 분석, 응용 전망 및 엔지니어링 사례 측면에서 현대 산업에서의 잠재력을 살펴봅니다.

9.4.2.2 지능형 반응 초경 기구 해석

스마트 리스폰스 초경합금은 NiTi 변형 합금과 WC 매트릭스의 시너지 효과와 나노센서의 실시간 모니터링을 결합하여 재료의 적응적 성능을 구현합니다 . 본 연구에서는 NiTi 의 마르텐사이트 상변태 메커니즘, WC 매트릭스의 지지 역할, 나노센서의 변형률 감지 기능, 그리고 다양한 부품의 상호 영향을 심층적으로 분석합니다. 미시적 관찰과 실험 데이터를 결합하여 응력 조절, 경도 및 인성의 최적화 메커니즘을 밝히고, 스마트 도구 및 로봇 부품과 같은 응용 분야에 대한 이론적 근거를 제공합니다.

(1) NiTi 마르텐사이트 변태 메커니즘

NiTi 의 지능적 반응성은 주로 마르텐사이트 상변태에 의해 구동되며, 상변태 온도(Af)는 약 100° C ± 1° C 이고, 변형률은 < 0.1% ± 0.01%로 제어되며, 응력 조정률은 오스테나이트와 마르텐사이트의 가역적 변태를 통해 > 50% ± 5%가 달성됩니다. 상변태 동안 NiTi 는 변형 에너지를 흡수하고 방출하며, SEM 분석에 따르면 NiTi 입자(크기 1.5μm ± 0.1μm)가 WC 매트릭스에 균일하게 매립되어(편차 < 0.1% ± 0.02%), 결합 강도가 > 100MPa ± 10MPa 로 변형 전달의 안정성을 보장합니다. 3% ± 0.1%의 NiTi 함량은 반응성과 경도 사이에서 최상의 균형을 제공합니다. 함량이 5% ± 0.1%를 초과하면 파괴인성(K_{1c})이 약 10% ± 2%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

감소합니다. 이는 NiTi의 과다 첨가가 결정립계 약화 및 미세균열 밀도 증가(> 10^3 m^{-2})를 유발하기 때문입니다.

(2) WC 매트릭스의 지원 역할

WC 매트릭스는 시멘트 카바이드의 골격 역할을 하여 경도 > HV 1400 ± 30 및 구조적 안정성을 제공하는 반면 0.51 μm ± 0.01 μm의 입자 크기는 높은 강도와 내마모성을 보장합니다(마모율 < 0.05 mm^3 / N • m ± 0.01 mm^3 / N • m). NiTi 입자의 삽입은 WC K_{1c}의 인성을 > 15 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5, 피로 수명을 > 10 6±10 5배 증가시킵니다. SEM 관찰 결과 NiTi와 WC 상 경계가 가깝고(편차 < 0.1% ± 0.02%), EDS 테스트 결과 Ni:Ti 비율이 약 1:1 ± 0.1임을 확인하여 NiTi의 화학적 균질성을 검증하고 응력 조절의 동적 반응을 뒷받침합니다.

(3) 나노센서를 이용한 변형률 모니터링

나노센서는 저항 변화(> 1% ± 0.1%)를 통해 실시간으로 변형률을 ±0.001%의 정확도로 모니터링합니다. 크기는 110μm ± 0.1μm이고 재료의 표면이나 내부에 통합됩니다. 센서는 압저항 효과를 기반으로 하며 응답 시간은 < 1ms ± 0.1ms이고 응답 테스트는 1Hz ± 0.01Hz로 안정적인 변형률(편차 < 0.01% ± 0.001%)을 보여 적응형 조절의 정확성을 보장합니다. SEM 분석 결과 센서가 기판에 잘 접합되어 있고(접촉 면적 > 95% ± 2%), XPS는 표면 NiTi(Ni 2p 피크 ~ 854eV ± 0.1eV)의 안정성을 검증하여 산화 간섭(O 1s 피크 < 0.5%)을 방지합니다.

(4) 소결온도 및 성능 제어

소결 온도 1400° C ± 10° C는 NiTi의 분해 온도(> 1500° C ± 10° C)보다 낮습니다. Ar 보호 분위기에서 NiTi의 열적 분해가 효과적으로 방지됩니다. SEM 관찰 결과 WC 입자는 0.51 μm ± 0.01 μm로 유지되고 NiTi 입자는 고르게 분포됩니다(편차 < 0.1% ± 0.02%). 1400° C는 경도 > HV 1400 ± 30 및 K_{1c} > 15 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5를 보장하여 고온 소결(> 1450° C ± 10° C)에 비해 입자 성장(> 2 μm ± 0.01 μm)이나 NiTi 상 변형 왜곡(> 5% ± 1%)을 방지하고 > 95% ± 2%의 응답 정확도를 유지합니다.

(5) 응용 검증 및 최적화 방향

WC3NiTi는 경도 HV 1450 ± 30, 절삭력 < 10 N ± 1 N, 변형률 0.05% ± 0.01%, 응답 시간 0.8 ms ± 0.1 ms, 수명 > 5000 m ± 500 m로 스마트 도구에서 우수한 성능을 발휘합니다. 로봇 부품에서 응답 시간 < 1 ms ± 0.1 ms는 고속 이동에 적합하며 수명은 > 10 4배 ± 10^3배입니다. K_{1c}를 높이기 위해 NiTi 함량을 2%-4% ± 0.1%로 조정하고, 정확도를 높이기 위해 나노센서를 50 μm ± 0.1 μm로 줄이고, 고온(> 400° C) 또는 고하중(> 200 N)에 적응하기 위해 3D 프린팅과 함께 더 복잡한 센서 네트워크를 통합하여 최적화할 수 있습니다.

$_{f}$ ~ 100° C)를 통한 지능형 반응 초경합금은 변형률 <0.1%, WC 매트릭스 경도 > HV 1400, 나노센서 정확도 ±0.001%로 응력 조절률 50% 이상을 달성합니다. 경도 HV 1450, 응답 시간 0.8ms의 WC3NiTi를 예로 들면, 향후 최적화를 통해 극한 환경에서의 성능을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.4.2.3 초경합금의 지능반응에 영향을 미치는 요인 분석

스마트 리스폰스 초경합금의 성능은 스마트 공구 및 로봇 부품과 같은 응용 분야에서 NiTi 함량, 센서 크기, 소결 온도, 입자 크기 및 환경 조건을 조정하여 적응성, 경도 및 인성을 결정하는 주요 요인들의 조합에 의해 영향을 받습니다. 이러한 매개변수의 합리적인 최적화를 통해 응력 조정률 > 50% ± 5%, 경도 > HV 1400 ± 30, 응답 정확도 > 95% ± 2%를 보장할 수 있습니다. 다음은 각 요인이 스마트 리스폰스 성능에 미치는 영향을 메커니즘, 실험 데이터 및 적용 사례를 기반으로 자세히 분석하고 개선 방안을 제시합니다.

(1) NiTi 함량

NiTi 함량은 변형률과 경도에 이중 효과를 미칩니다. 권장 함량은 3% ± 0.1%입니다. 이때 변형률은 < 0.1% ± 0.01%, 응력 조정률은 > 50% ± 5%, 경도는 HV 1450 ± 30, K_{Ic} > 15 MPa·m$^{1/2}$ ± 0.5를 유지합니다. WC3NiTi를 예로 들면, SEM 분석 결과 NiTi 입자(1.5 μm ± 0.1 μm)가 균일하게 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)되어 있고 접합 강도가 > 100 MPa ± 10 MPa로 적응 성능이 최적화되어 있습니다. 그러나 NiTi 함량이 5% ± 0.1%를 초과하면 경도가 약 10% ± 2% 감소합니다(예: WC5NiTi의 경도는 HV 1300 ± 30에 불과함). 그 이유는 NiTi가 너무 많으면 입계가 약해지고 미세균열 밀도가 증가(> 10^3 m^{-2})하며 K_{Ic}가 감소 (> 10% ± 2%)하기 때문입니다. 최적화 제안은 NiTi 함량을 2%-4% ± 0.1%로 제어하고 열처리를 통해 상변태 온도(~100° C ± 1° C)를 조절하여 인성을 향상시키는 것입니다.

(2) 센서 크기

센서 크기는 응답 시간과 정확도에 직접적인 영향을 미칩니다. 권장 크기는 110μm ± 0.1μm이며 정확도는 ±0.001%, 응답 시간은 < 1ms ± 0.1ms, 저항 변화는 > 1% ± 0.1%로 실시간 모니터링 요구 사항을 충족합니다. SEM 관찰 결과 110μm ± 0.1μm 센서는 WC 기판에 잘 접합되어 있고(접촉 면적 > 95% ± 2%), 1Hz ± 0.01Hz의 주파수에서 응답 테스트를 실시한 결과 변형률 편차가 < 0.01% ± 0.001%입니다. 센서 크기가 20μm ± 0.1μm를 초과하면 응답 시간이 약 10% ± 2%(> 1.1ms ± 0.1ms) 증가합니다. 크기가 커질수록 신호 전송 효율이 제한되고 정확도가 ±0.002%로 떨어지기 때문입니다. 센서를 50μm ± 0.1μm로 축소하여 최적화를 달성하고, 고주파 애플리케이션에 적응하기 위해 응답 속도(< 0.8ms ± 0.1ms)와 정확도(±0.0005%)를 개선할 수 있습니다.

(3) 소결온도

소결 온도는 NiTi의 안정성과 재료 특성에 중요합니다. NiTi가 분해되지 않도록 1400° C ± 10° C가 권장됩니다(분해 온도 > 1500° C ± 10° C), 경도 > HV 1400 ± 30, K_{Ic} > 15 MPa·m$^{1/2}$ ± 0.5. Ar 보호 분위기에서 SEM 분석에 따르면 WC 입자는 0.51 μm ± 0.01 μm로 유지되고 NiTi는 균일하게 분포됩니다(편차 < 0.1% ± 0.02%). XPS에서 표면 안정성(Ni 2p 피크 ~ 854 eV ± 0.1 eV, 산소 함량 < 0.5%)이 검증되었습니다. 온도가 1450° C ± 10° C를 초과하면 NiTi 분해가 약 5% ± 1%

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

증가하여 불안정한 변형률(> 0.15% ± 0.01%)과 경도 감소(> 5% ± 1%)를 초래합니다. 단계적 가열(1200° C 예열)을 통해 열응력(< 50 MPa)을 제어해야 합니다. 최적화 방안은 1400° C ± 5° C를 유지하고 유지 시간(2 시간 ± 0.1 시간)을 늘려 밀도를 향상시키는 것입니다.

(4) 입자 크기

입자 크기는 인성과 경도에 상당한 영향을 미칩니다. 권장되는 WC 입자 크기는 0.51 μm ± 0.01 μm이며, 이는 억제제(예: VC, 0.5%-1%)를 추가하고 볼 밀링(40 시간 ± 1 시간)을 통해 달성할 수 있습니다. 미세 입자는 기공 벽 강도(> 100 MPa ± 10 MPa), 입자 경계 밀도 > $10^{14} m^{-2}$, K_{1c} > 15 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5, 피로 수명 > 10^6 ± 10^5 배를 향상시킵니다. SEM 관찰 결과 입자 경계가 조밀하고 미세 균열이 < 0.1 μm ± 0.01 μm임을 보여줍니다. 결정립 크기가 2 μm ± 0.01 μm를 초과하면 K_{1c}가 약 10% ± 2% 감소하고 결정립계 감소로 인한 응력 집중으로 경도가 감소합니다(> 5% ± 1%). 최적화를 위해 나노결정립(< 0.3 μm ± 0.01 μm)을 사용하여 내마모성(< 0.04 mm^3 / N•m ± 0.01 mm^3 / N•m)을 향상시킬 수 있습니다.

(5) 환경

주변 온도는 변형률에 상당한 영향을 미칩니다. 온도가 100° C ± 1° C를 초과하면 NiTi 상전이가 활성화되고 변형률이 약 20% ± 3%(> 0.12% ± 0.01%) 증가하고 응력 조정률은 > 60% ± 5%로 증가하지만 경도는 감소할 수 있습니다(< 5% ± 1%). 습도가 > 50% ± 5%이면 NiTi 표면 산화가 발생하고(O 1s 피크 위치가 0.1% ± 0.01% 증가) 응답 정확도가 감소합니다(< 90% ± 2%). 25° C ± 2° C 및 습도 30%-50%에서 변형률은 안정적(< 0.1% ± 0.01%)이고 정확도는 > 95% ± 2%입니다. 습기 저항성을 강화하기 위해 NiO 패시베이션층(두께 10nm ± 1nm)이나 SiO_2 코팅(< 1%)을 사용하는 것이 좋습니다.

(6) 종합적인 사례 및 최적화 방향

WC3NiTi를 예로 들어 보겠습니다. NiTi 3% ± 0.1%, 센서 110 μm ± 0.1 μm, 1400° C에서 소결, 입자 크기 0.51 μm ± 0.01 μm, 경도 HV 1450 ± 30, K_{1c} 16 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5, 응답 시간 0.8 ms ± 0.1 ms입니다. WC5NiTi(경도 HV 1300 ± 30, K_{1c} 10% ± 2% 감소)와 비교했을 때 최적화 후 성능이 크게 향상되었습니다. 120° C 환경에서 변형률은 0.12% ± 0.01%로 증가하지만 온도 제어를 통해 0.08% ± 0.01%까지 복원할 수 있습니다. 향후 최적화를 위해 NiTi를 2.5%-3.5% ± 0.1%로 조정하고, 센서를 50 μm ± 0.1 μm로 축소하고, 소결 온도를 1390° C ± 5° C로 정밀 조정하고, 입자를 0.3 μm ± 0.01 μm로 미세화하여 고온(>400° C) 또는 고주파(>10 Hz ± 0.1 Hz)에 적합하게 할 수 있습니다.

스마트 리스폰스 초경합금은 NiTi 함량(3%), 센서 크기(110 μm), 소결 온도(1400° C), 입자 크기(0.51 μm) 및 환경(<100° C)의 영향을 받습니다. WC3NiTi 의 경도는 HV 1450 으로 WC5NiTi(HV 1300)보다 우수합니다. 향후 매개변수 최적화를 통해 극한 조건에서의 성능을 향상시킬 수 있을 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.4.2.4 지능형 응답 초경합금 최적화 전략

지능형 응답 초경합금의 경도를 HV 1400 ± 30 이상, 변형률 < 0.1% ± 0.01%로 달성하고, 응력 조정률 > 50% ± 5%, 응답 정확도 > 95% ± 2%, 피로 수명 > 10 6 배 ± 10 5 배를 보장하기 위해서는 조성 최적화, 소결 공정 개선, 센서 통합, 표면 처리 및 시험 사양에 대한 포괄적인 전략이 필요합니다. 이러한 최적화 조치는 NiTi 의 형상 기억 효과와 나노 센서의 실시간 모니터링 기능을 최대한 활용하여 지능형 도구, 로봇 구성 요소 등의 높은 동적 성능 요구 사항을 충족합니다. 다음은 재료 조성, 준비 공정, 통합 기술, 표면 처리 및 시험 표준 측면에서 최적화 계획을 자세히 설명하고 실험 데이터로 효과를 검증하며 추가 개선을 위한 공간을 탐색합니다.

(1) 성분 최적화

조성 최적화는 NiTi 함량 3% ± 0.1%, WC 입자 크기 0.51 μm ± 0.01 μm를 중심으로 진행되었습니다. NiTi 함량 3% ± 0.1%는 최적의 변형률 < 0.1% ± 0.01%, 응력 수용률 > 50% ± 5%를 제공하며, 마르텐사이트 변태 온도(~100° C ± 1° C)는 열적/기계적 반응 안정성을 보장합니다. SEM 분석 결과 NiTi 입자의 균일한 분포(1.5 μm ± 0.1 μm)(편차 < 0.1% ± 0.02%), 접합 강도 > 100 MPa ± 10 MPa 를 나타냅니다. WC 입자 0.51 μm ± 0.01 μm은 억제제(예: VC, 0.5%-1%)를 첨가하고 볼 밀링(40 시간 ± 1 시간)을 통해 달성되었으며, 경도는 HV > 1400 ± 30, K_{1c} > 15 MPa • m¹ / ² ± 0.5, 입자 경계 밀도 > 10¹ 4 m ⁻ ²로 감소되었습니다. 미세 균열(< 0.1 μm ± 0.01 μm)이 감소했습니다. 3% ± 0.1% NiTi > 5% ± 0.1%에 비해 균형 잡힌 반응성과 강도(경도가 10% ± 2% 감소).

(2) 소결공정

소결 공정은 1400° C ± 10° C 에서 열간 프레싱을 사용하고 50 MPa ± 1 MPa 의 압력을 사용하여 재료 성능과 NiTi 안정성을 보장합니다. 1400° C 는 NiTi 의 분해 온도(> 1500° C ± 10° C)보다 낮고, Ar 보호 분위기는 산화를 방지하고, SEM 관찰 결과 WC 입자는 0.51 μm ± 0.01 μm로 유지되고, NiTi 는 고르게 분포(편차 < 0.1% ± 0.02%)되며, 경도는 > HV 1400 ± 30 입니다. 50 MPa 압력은 NiTi 와 WC 의 결합을 촉진(결합 강도 > 100 MPa ± 10 MPa)하여 고온(> 1450° C ± 10° C)으로 인한 입자 성장(> 2 μm ± 0.01 μm)이나 경도 감소(> 5% ± 1%)를 방지합니다. 단계적 가열(1200° C 에서 예열)은 열 응력(< 50 MPa)을 감소시키고 K_{1c} 및 피로 수명을 향상시킵니다(> 10 6 배 ± 10 5 배).

(3) 센서 통합

센서 통합 크기는 110 μm ± 0.1 μm, 정확도는 ±0.001%, 저항 변화 > 1% ± 0.1%, 응답 시간은 < 1ms ± 0.1ms 입니다. SEM 분석에 따르면 센서는 기판과 잘 통합되어 있고(접촉 면적 > 95% ± 2%), 1Hz ± 0.01Hz 주파수에서의 변형률 테스트에서 변형률 편차가 < 0.01% ± 0.001%인 것으로 확인되었습니다. 110 μm ± 0.1 μm 크기는 정확도와 통합 난이도의 균형을 맞추고 > 20 μm ± 0.1 μm(응답 시간이 10% ± 2% 증가)에 비해 실시간 모니터링 기능을 최적화합니다. 향후 50 μm ± 0.1 μm로 줄여 정확도를 ±0.0005%, 응답 속도(< 0.8ms ± 0.1ms)를 향상시킬 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(4) 표면처리

표면 처리는 Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm로 연마하고 다이아몬드 연마 또는 화학 기계적 연마(CMP)를 사용하여 결함을 제거하여 수행됩니다. 평평한 표면은 NiTi 변형 균일성을 향상시키고(편차 < 0.01% ± 0.001%), 응력 집중을 감소시키고, 경도 > HV 1400 ± 30, 응답 정확도 > 95% ± 2%입니다. SEM은 일관된 표면 거칠기(편차 < 0.1% ± 0.02%)를 검증하고, 초음파 세척은 잔류물을 제거하고 습도로 인한 산화를 방지합니다(> 50% ± 5%)(O 1s 증가 < 0.1% ± 0.01%). 연마 후 NiO 패시베이션 층(두께 10 nm ± 1 nm)을 결합하여 내식성을 향상시킬 수 있습니다(무게 감소 < 0.06 mg/cm²).

(5) 시험 사양

시험 사양은 저주파 동적 하중을 시뮬레이션하고 변형률과 응답 시간을 측정하기 위해 1 Hz ± 0.01 Hz의 주파수로 변형률 시험을 사용합니다. 환경은 25° C ± 2° C에서 제어되고, 습도는 30%-50%이며, 3회 반복 후 평균값을 구합니다. 목표 응답 시간은 < 1 ms ± 0.1 ms입니다. WC3NiTi를 예로 들면, 1400° C ± 10° C에서 소결한 후 변형률은 0.05% ± 0.01%, 응답 시간은 0.8 ms ± 0.1 ms, 경도는 HV 1450 ± 30, K_{1c}는 16 MPa • m¹ / ² ± 0.5로 NiTi > 5% ± 0.1%(경도 HV 1300 ± 30)인 샘플보다 우수합니다. SEM과 EDS를 결합하여 NiTi 분포와 센서 성능을 분석하면 향후 고주파 테스트(> 10 Hz ± 0.1 Hz) 또는 고온 환경(> 100° C ± 1° C)으로 확장될 수 있습니다.

(6) 종합적인 최적화 효과 및 적용 검증

WC3NiTi는 1400° C ± 10° C, 50 MPa ± 1 MPa, 110 μm ± 0.1 μm 센서에서 소결되었으며, Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm, 경도 HV 1450 ± 30, 변형률 0.05% ± 0.01%, 응답 시간 0.8 ms ± 0.1 ms, K_{1c} 16 MPa • m¹ / ² ± 0.5, 피로 수명 > 10 6 배 ± 10 5 배입니다. 스마트 공구의 경우 절삭력 < 10 N ± 1 N, 수명 > 5000 m ± 500 m입니다. 로봇 부품의 경우 응답 시간 < 1 ms ± 0.1 ms, 수명 > 10 4 배 ± 10 ³ 배입니다. NiTi 5% ± 0.1% 샘플(경도가 10% ± 2% 감소)과 비교했을 때 최적화 후 성능이 크게 향상되었습니다.

(7) 환경관리 및 미래발전

소결 과정에서 산화 방지를 위해 Ar 보호막을 사용하고, 온도는 < 100° C ± 1° C로 유지하여 변형률 증가(< 20% ± 3%)를 제어합니다. 향후 3D 프린팅을 도입하여 복잡한 센서 네트워크를 통합할 수 있으며, NiTi는 K_{1c} 값을 높이기 위해 2.5%-3.5% ± 0.1%로 조절하고, 센서 크기를 50μm ± 0.1μm로 줄여 항공 터빈 및 에너지 장비와 같은 고온(> 400° C) 또는 고하중(> 200N)에 적응할 수 있습니다.

NiTi 3% ± 0.1%, WC 0.51 μm ± 0.01 μm의 스마트 반응형 카바이드 소재는 1400° C 소결, 110 μm 센서, Ra < 0.05 μm의 최적 경도, HV 1400 이상, 변형률 < 0.1%를 자랑합니다. WC3NiTi 소재는 변형률 0.05%, 반응 시간 0.8 ms의 특성을 가지며, 향후 나노 기술을 통해 더욱 개선될 예정입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.4.2.5 인텔리전트 응답 초경 엔지니어링 응용 프로그램

스마트 리스폰스 초경합금은 NiTi 변형 합금(상전이 온도 ~100° C ± 1° C)의 형상 기억 효과와 나노센서의 실시간 변형률 모니터링(정확도 ±0.001%)을 결합하여 응력 조정률 > 50% ± 5%, 응답 시간 < 1ms ± 0.1ms 를 달성하여 적응성과 다용성을 크게 향상시켰습니다. 이 혁신적인 설계는 기존 초경합금의 정적 성능 한계를 극복하고 동적 반응 기능을 통해 고정밀, 내구성, 환경 적응성이라는 현대 엔지니어링 기술의 요구를 충족합니다. WC3NiTi 와 같은 스마트 소재의 개발은 경도(> HV 1400 ± 30), 인성(K_{1c} > 15 MPa • $m^{1/2}$ ± 0.5), 피로 수명(> 10 6 ± 10 5 배)을 최적화할 뿐만 아니라, 스마트 제조, 로봇 공학, 항공우주, 의료 기기, 에너지 장비, 교통 인프라, 신기술 분야 등 다양한 분야로 적용 범위를 확대했습니다. 아래에서는 특정 적용 시나리오, 성능 이점, 실제 사례 및 잠재적 확장 방향의 관점에서 WC3NiTi 의 엔지니어링 적용 가치를 자세히 살펴보고, 산업 효율성, 생체 적합성, 내구성 및 지속 가능한 개발에 대한 기여도를 분석하며, 향후 개발 잠재력을 전망합니다.

(1) 지능형 초경공구

지능형 초경 공구 적용 시 WC3NiTi(입자 크기 0.5μm ± 0.01μm)는 우수한 적응 절삭 성능을 발휘합니다. 3% ± 0.1%의 NiTi 함량은 0.05% ± 0.01%의 변형률을 유도하고 마르텐사이트 상변태를 통해 절삭력을 실시간으로 < 10N ± 1N 으로 조절하여 공구와 공작물 사이의 마찰열(< 100° C ± 1° C)과 마모율(< 0.05mm^3 / N • m ± 0.01mm^3 / N • m)을 크게 줄입니다. SEM 분석 결과 NiTi 입자(1.5μm ± 0.1μm)가 WC 매트릭스에 균일하게 매립되어(편차 < 0.1% ± 0.02%), 결합 강도가 > 100MPa ± 10MPa 로 변형 전달의 안정성을 보장합니다. 입자 0.5 μm ± 0.01 μm 은 경도 > HV 1400 ± 30, K_{1c} > 15 MPa • $m^{1/2}$ ± 0.5 를 제공하고, 공구 수명은 5000 m ± 500 m 를 초과하여 기존 WC10Co(약 3000 m)를 훨씬 능가합니다. 이 성능은 고경도 재료(예: 티타늄 합금, 스테인리스 스틸) 또는 고속 조건(> 500 m/min)을 처리하는 데 특히 두드러집니다. 나노 센서(110 μm ± 0.1 μm)는 실시간으로 절삭 변형률을 모니터링하고(정확도 ±0.001%), 공구 각도를 동적으로 조정하고, 표면 마감(Ra < 0.1 μm ± 0.01 μm)을 최적화하고, 냉각수 사용을 줄이는데, 이는 친환경 제조 추세에 부합합니다.

(2) 카바이드 로봇 부품

초경 로봇 부품에 적용할 경우, WC3NiTi(센서 110μm ± 0.1μm)는 고속 응답과 정확도로 많은 주목을 받고 있습니다. 센서 크기는 110μm ± 0.1μm 이며 소재 표면에 통합되어 있습니다. 정확도는 > 95% ± 2%, 저항 변화는 > 1% ± 0.1%, 응답 시간은 0.8ms ± 0.1ms 이며, 주파수 1Hz ± 0.01Hz 에서의 변형률 시험에서 변형률 편차는 < 0.01% ± 0.001%입니다. NiTi 변형률은 0.05% ± 0.01%로 로봇 관절, 그리퍼 또는 매니퓰레이터의 고속 동적 운동에 적합합니다. 수명은 > 10 4 배 ± 10 3 배입니다. SEM 관찰 결과, 센서가 기판과 잘 통합되어 있음을 보여줍니다(접촉 면적 > 95% ± 2%). 기존의 강철 또는 균일한 WC-Co 부품과 비교했을 때, 지능형 반응 설계는 유연한 작동 성능을 크게 향상시키고 기계적 응력 손상을 줄여(< 50 MPa)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

산업 자동화 생산 라인, 의료 수술 로봇, 가정용 서비스 로봇에 적합합니다. 향후 센서 네트워크 최적화(< 50 μm ± 0.1 μm)를 통해 다점 변형률 모니터링을 구현하여 복잡한 동작의 조정을 향상시킬 수 있습니다.

(3) 경합금 항공 센서

초경 항공 센서에 적용할 경우 WC3NiTi 는 뛰어난 내구성과 안정성을 보입니다. 경도는 HV 1450±30 에 달하고, WC 입자는 0.5μm±0.01μm로 고강도를 제공하며, NiTi 함량이 3%±0.1%로 변형률 <0.1%±0.01%, 응력 조정률 >50%±5%를 보장하고 피로 수명이 10^6배±10^5배를 초과하여 균일한 WC-Co(약 5×10^5배)보다 우수합니다. 나노 센서(110μm±0.1μm)는 변형률(정확도 ±0.001%)을 모니터링하고, 응답 시간은 <1ms±0.1ms 이며, 고온(>400° C) 및 고주파 진동 환경에 적응하고 사용 시간은 6000 시간을 초과합니다. XPS 분석 결과, NiTi 표면은 안정적(Ni 2p 피크 ~ 854 eV ± 0.1 eV, 산소 함량 < 0.5%)으로 평가되어 항공 터빈 블레이드, 동체 구조 또는 비행 제어 시스템의 실시간 응력 모니터링을 지원하여 정비 빈도를 줄이고 비행 안전성을 향상시킵니다. 또한, 경량화 설계(밀도 ~12 g/cm³ ± 0.1 g/cm³)를 통해 연료 소비를 줄이고 항공 산업의 지속가능성 목표를 달성합니다.

(4) 지능형 절단 시스템

WC3NiTi 는 지능형 절삭 시스템에서 우수한 성능을 발휘하며, 변형률은 0.05% ± 0.01%입니다. 절삭 매개변수의 동적 조정, 절삭력 < 10 N ± 1 N, 수명 > 5000 m ± 500 m 로 복잡한 곡면이나 미세 부품 가공에 적합합니다. 나노 센서 피드백은 공구 자세를 최적화하고 마모를 줄이며(< 0.04 mm³ / N•m ± 0.01 mm³ / N•m), 가공 정확도를 향상시킵니다(< 1 μm ± 0.1 μm). 항공기 엔진 블레이드와 자동차 부품 제조에 널리 사용됩니다. 기존 절삭 방식과 비교하여 지능형 응답은 처리 시간을 20% ± 2%, 에너지 소비를 15% ± 2% 줄입니다.

(5) 의료용 로봇 부품

WC3NiTi 다공성 구조(기공 크기 5μm ± 0.1μm)는 의료 로봇 분야에서 폭넓은 적용 가능성을 가지고 있습니다. NiTi 변형률 < 0.1% ± 0.01%는 수술이나 재활 장비의 동적 하중에 적응하고, 응답 시간은 0.8ms ± 0.1ms 이며, 수명은 10 4 배 ± 10 ³ 배 이상, 호환성은 95% ± 2% 이상으로 최소 침습 수술 도구와 보철물 제어를 지원합니다. SEM 분석 결과, 기공 벽 강도는 100MPa ± 10MPa 이상이며, NiTi 가 고르게 분포되어(편차 < 0.1% ± 0.02%) 조직 손상을 줄이고 무균 환경 요건을 충족합니다. 앞으로 바이오센서를 통합하여 임플란트 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있습니다.

(6) 에너지 장비 센서

WC3NiTi 는 에너지 장비의 고온 센서에 사용되며, HV 1450±30 의 경도, 10 6 배 이상의 피로 수명, 그리고 ±0.001%의 센서 정확도를 자랑합니다. 파이프라인, 풍력 터빈 또는 원자로의 변형률을 모니터링하고, 400° C 이상의 고온 환경에 적응하며, 사용 수명을 5,000 시간 이상으로 연장합니다. NiTi 의 변형률은 0.1% ± 0.01% 미만으로 열팽창에 잘 견디며, XPS 는 내식성(무게 감소 < 0.05 mg/cm²)을 검증하여 재생

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

에너지 및 화석 연료 설비의 신뢰성을 지원합니다.

(7) 지능형 교통 인프라

WC3NiTi 는 지능형 교통 시스템의 교량 또는 트랙 센서에 사용되며, 경도는 HV 1450 ± 30 이고, 피로 수명은 10 6 배 ± 10 5 배 이상이며, 센서는 변형률(정확도 ± 0.001%)을 모니터링하고, 응답 시간은 0.8ms ± 0.1ms 이며, 차량 하중(> 200N)에 적응할 수 있습니다. 다공성 구조(다공성 10% ± 1%)는 무게를 12g/cm³ ± 0.1g/cm³ 로 줄이고, 에너지 흡수율을 50% ± 5% 이상 증가시키고, 피로 균열을 감소시키며(< 0.1mm ± 0.01mm), 사용 수명을 20 년 ± 2 년으로 연장합니다.

(8) 해양공학장비

WC3NiTi 는 해양 엔지니어링 분야의 내식성 부품에 사용됩니다. NiTi 변형률 < 0.1% ± 0.01%는 해류 충격에 적응합니다. 센서는 부식 변형률(정확도 ± 0.001%)과 응답 시간 < 1ms ± 0.1ms 를 모니터링합니다. CrN 코팅(두께 2μm ± 0.1μm)은 내식성(무게 감소 < 0.03mg/cm²)과 피로 수명을 10 배 ± 10 배 이상 향상시켜 심해 시추 또는 해저 파이프라인에 적합합니다.

(9) 웨어러블 기술 및 가전제품

WC3NiTi 는 웨어러블 기기 및 가전제품에 사용되며, 인체 움직임에 적응하는 변형률 0.05% ± 0.01%, 건강 데이터(예: 심박수, 걸음 수) 모니터링을 위한 센서 정확도 95% ± 2% 이상, 그리고 10³ 배 ± 10² 배 이상의 수명을 자랑합니다. 경도 HV 1450 ± 30 은 긁힘 방지 기능을 제공하며, 응답 속도 0.8ms ± 0.1ms 는 터치 피드백을 지원하여 스마트워치 및 피트니스 트래커에 적합합니다.

(10) 국방 및 안보장비

WC3NiTi 는 방위 산업에서 장갑 또는 무기 부품에 사용되며, 경도 HV 1450 ± 30, K_{1c} > 15 MPa • m¹ / ² ± 0.5, 피로 수명 > 10 6 배 ± 10 5 배, NiTi 변형률 < 0.1% ± 0.01%의 우수한 성능을 발휘합니다. 충격 에너지를 흡수합니다(> 50% ± 5%). 센서는 실시간으로 응력을 모니터링하며(정확도 ± 0.001%), 응답 시간은 < 1ms ± 0.1ms 로 장갑의 방폭 성능을 향상시킵니다. 사용 수명은 10 년 ± 1 년 이상입니다.

(11) 포괄적인 혜택과 확대된 적용

스마트 리스폰스 초경합금은 적용 분야를 크게 확대했습니다. 스마트 공구는 절삭 효율을 향상시키고, 로봇 부품은 유연성을 향상시키며, 항공 센서는 내구성을 개선하고, 절삭 시스템은 정확도를 최적화하고, 의료 부품은 안전성을 강화하고, 에너지 센서는 신뢰성을 향상시키며, 교통 인프라는 수명을 연장하고, 해양 장비는 내식성을 향상시키고, 웨어러블 기기는 건강 모니터링을 지원하고, 방위 장비는 보호 기능을 강화합니다. 균일 WC-Co 와 비교했을 때 피로 수명이 약 100% 증가하고, 응답 정확도는 5% ± 2% 이상 향상되며, 무게는 15% ± 2% 이상 감소합니다. 향후 우주 탐사(진공 저항 > 10 ⁻ ⁶ Pa), 농업 자동화(내마모성 > 10 ⁴ 시간), 양자 컴퓨팅 지지 구조물(낮은 열팽창 < 5 × 10 ⁻ ⁶ /° C)로 응용 분야가 확장될 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

스마트 리스폰스 초경합금은 스마트 공구(변형률 0.05%, 수명 5,000m 이상), 로봇 부품(응답 속도 0.8ms, 정확도 95% 이상), 항공 센서(경도 HV 1450, 수명 10 배 이상) 등 다양한 분야에서 우수한 성능을 발휘하며, 의료, 에너지, 운송, 해양, 웨어러블, 국방 분야로 확장되어 스마트 소재의 다재다능함을 입증하고 있습니다. 향후 나노 최적화 및 다분야 통합을 통해 더욱 광범위한 요구를 충족할 수 있을 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

참고문헌

건식 모래/고무 휠 장비를 이용한 마모 측정 표준 시험 방법 . ASTM International. ASTM G6516. (2016).

ASTM G9917. (2017). 피논디스크 장치를 이용한 마모 시험을 위한 표준 시험 방법. ASTM International. ASTM G9917. (
2017).

Zhang, Y., & Li, J. (2023). 다기능 초경합금: 설계 및 응용. *재료과학 저널, 58(* 12
), 45674589.

Wang, H., & Chen, X. (2024). 건식 가공을 위한 자가윤활 초경합금의 발전. Tribology *International, 190,* 108912
.

Liu, Z., & Zhao, Q. (2022). 초경합금의 전도도 및 자기 조절에 관한 연구. 재료과학 *및 공학 저널, 40* (5), 789796.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수

초경합금의 다기능 엔지니어링 응용 요약

기능 특성	하위 클래스 하지 않다	재료 시스템	주요 매개변수	성과 지표	엔지니어링 응용 프로그램
전도도 및 자기 제어	전도도 제어	WC10Ni, WC10Co	Ni/Co 함량: 8%10%±0.1% / 10%±1%, 입자 크기: 0.51 μm±0.01 μm, 소결 온도: 1450° C±10° C, 표면 거칠기: Ra<0.05 μm±0.01 μm	저항률: 11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm, 접촉 저항: <0.1 mΩ±0.01 mΩ, 전도도: 10.5 MS/m±0.1 MS/m, 수명: >10 6 회±10 5 회	전자 접촉: WC10Ni 저항률 11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm, 접촉 저항 <0.1 mΩ, 수명 >10 6 회. EDM 전극: WC10Co 전도도 10.5 MS/m, 효율 >95%±2%, 금형 정확도 <1 μm. 전도성 코팅 기판: WC8Ni 접착력 >50 MPa, 수명 >2 년.
	자기 발각	WC10Co, WC8Ni	Co 함량: 10%±1%, Ni 함량: 8%10%±0.1%, 입자 크기: 0.51 μm±0.01 μm, 탄소 함량 편차: <0.1%±0.01%	자화: 8 emu/g±0.5 emu/g (WC10Co), 4 emu/g±0.5 emu/g (WC8Ni), 보자력: 100120 Oe±10 Oe, 감지 정확도: >98%±1%	공구 품질 관리: WC10Co 보자력 120 Oe, 균열 검출 <0.1mm, 합격률 >99%. 항공 부품: WC8Ni 기공 검출 <0.1 μm, 수명 >10 시간. 금형 제작: WC10Co 탄소 편차 <0.1%, 정확도 >98%.
내마모성, 내식성 및 전도성 복합재 특성	WCTiCNi 복합재	WC10TiC10Ni, WC8TiC10Ni	TiC 함량: 5%10%±0.1%, Ni 함량: 8%12%±1%, 입자 크기: 0.51 μm±0.01 μm, 소결 온도: 1450° C±10° C	경도: >HV 1600±30, 마모율: 0.05 mm³ / N·m ± 0.01 mm³ / N·m, 부식 중량 감소: 0.06 mg/cm² ± 0.01 mg/cm², 저항률: 11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm	전자 금형: WC10TiC10Ni 경도 HV 1650, 마모율 0.05 mm³/N·m, 수명 106 회 이상. 해양 장비: WC8TiC10Ni 중량 감소 0.06 mg/cm², 수명 5 년 이상. 전도성 접점: WC10TiC10Ni 접촉 저항 <0.1 mΩ, 수명 106 회 이상.
	성능 시험	WC10TiC10Ni	TiC 함량: 10%±0.1%, Ni 함량: 10%±1%, 하중: 130 N±1 N, 표면 거칠기: Ra<0.05 μm±0.01 μm	경도: HV 1650±30, 마모율: 0.05 mm³ / N·m ± 0.01 mm³ / N·m, 부식 중량 감소: 0.06 mg/cm² ± 0.01 mg/cm², 저항률: 11 μΩ·cm±0.1 μΩ·cm	전자 금형: 경도 HV 1650, 마모율 0.05 mm³/N·m, 수명 106 회 이상. 선박용 밸브: 중량 감소 0.06 mg/cm², 내염화나트륨성, 5 년 이상 사용. 전도성 접점: 저항률 11 μΩ·cm, 접촉 저항 <0.1 mΩ, 안정적인 신호.
자체 윤활 및 접착 방지	단단한 윤활 대리인 입력하다	WC5MoS_2, WC3C	MoS_2/C 함량: 5%±0.1% / 3%±0.1%, 입자크기: 0.51 μm±0.01 μm, 소결온도: 1400° C±10° C, 표면조도: Ra<0.05 μm±0.01 μm	마찰계수 : 0.15±0.01(MoS_2), 0.18±0.01(C), 접착력 : <0.8 N±0.1 N, 경도 : >HV 1500±30, 마모율 : <0.06 mm³/N·m ± 0.01 mm³ / N·m	고속 절삭: WC5MoS_2 마찰 계수 0.15, 공구 수명 >5000m. 건식 가공: WC3C 접착력 0.8N, 마찰열 <100° C. 금형 성형: WC5MoS_2 탈형력 <10N, 공구 수명 >10 6 회.
	표면 조직 유분 슬립	WC5MoS_2, WC3C	텍스처 깊이: 5 μm±0.1 μm, 피치: 50100 μm±1 μm, MoS_2 / C 함량: 5%±0.1% / 3%±0.1%, 레이저 출력: 10 W±0.1 W	마찰계수 : 0.12±0.01(MoS_2), 0.15±0.01(C), 접착력 : <0.8 N±0.1 N, 마모율 : 0.05 mm³/N·m ± 0.01 mm³ / N·m, 수명 : >10 4 시간 ±10³ 시간	고속 공구: WC5MoS_2 텍스처 깊이 5 μm, 마찰 계수 0.12, 수명 > 5000m. 건식 금형: WC3C 간격 50 μm, 접착력 0.8N, 수명 > 10^6회. 베어링 부품: WC5MoS_2 마찰 계수 0.15, 사용 시간 > 10^4시간.
바이오닉스와 스마트 카바이드	바이오닉스 마이크로 매듭	구배 WCCo, 다공성 WCCo	기공률: 10%±1%, Co 구배: 5%15%±1%, 기공 크기: 110 μm±0.1 μm, 소결 온도:	경도: HV 1450±30, 인성: K_{1c} 16MPa·m¹ / ² ± 0.5, 에너지 흡수율: >50%±5%, 피로수명:	항공기 경량화 부품: 구배형 WCCo 밀도 12 g/cm³, 피로 수명 10 6 배 이상. 생체의학 임플란트: 다공성 WCCo 기공 크기 5 μm,

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

기능 특성	하위 클래스 하지 않다	재료 시스템	주요 매개변수	성과 지표	엔지니어링 응용 프로그램
	구조		1400° C±10° C	>10 6 배±10 5 배	적합성 95% 이상, 수명 10 년 이상. 스마트 몰드: 구배형 WCCo K_1 c 16 MPa•m$^{1/2}$, 수명 10 6 배 이상.
	지능적인 응답 재료	WC3 니티	NiTi 함량: 3%±0.1%, 입자 크기: 0.51 μm±0.01 μm, 센서 크기: 110 μm±0.1 μm, 소결 온도: 1400° C±10° C	경도: HV 1450±30, 변형률: 0.05%±0.01%, 응답 시간: 0.8ms±0.1ms, 정확도: >95%±2%	스마트 공구: WC3NiTi 변형률 0.05%, 절삭력 <10N, 수명 >5000m. 로봇 부품: 응답 시간 0.8ms, 정확도 >95%. 항공 센서: 경도 HV 1450, 피로 수명 >10 6 배.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

그래디언트 시멘트 카바이드 개발의 간략한 역사

기능적 경사 초경합금(FGHM)은 소재 내부에 기능적 경사 구조를 설계하여 성능을 최적화하는 혁신적인 초경합금 소재입니다. FGHM 의 개발 역사는 재료 과학 및 엔지니어링 기술의 끊임없는 발전을 반영합니다. 경사 초경합금은 상 또는 조성의 원활한 변화를 통해 공구 수명, 열 피로 저항성 및 기계적 특성을 크게 향상시킵니다.

1. 개념적 발아와 이론적 토대(1970 년대~1980 년대)

구배 초경합금의 기원은 1970 년대로 거슬러 올라갈 수 있는데, 당시 일본과 독일의 학술 연구에 기능적 구배 재료(FGM)라는 개념이 처음 등장했습니다. 이 기간 동안 FGM 에 대한 이론적 연구는 주로 전통적인 복합재의 열팽창 계수나 기계적 특성, 특히 고온 환경에서 재료의 안정성의 차이로 인해 발생하는 계면 응력 문제를 해결하는 데 집중했습니다. 탄화물(예: 텅스텐 카바이드 WC)과 금속 결합 상(예: 코발트 Co)의 복합 재료인 초경합금은 절삭 공구, 금형 및 내마모성 부품에 널리 적용되어 연구 핫스팟 중 하나가 되었습니다. 그러나 초기 연구는 균일 구조 초경합금에 초점을 맞추었고 구배 설계의 실제 적용은 아직 형성되지 않았으며 재료 과학의 기초 이론적 탐구 단계에 머물러 있습니다.

랜드마크 이벤트

1970 년대, 일본 항공우주연구개발기구(NASDA, 현 JAXA)는 우주 기술 연구, 특히 우주선 열 보호 시스템(TPS) 분야에서 기능적 경사 재료의 가능성을 모색하기 시작했습니다. 10mm 두께로 최대 2,000K 의 표면 온도와 1,000K 의 온도 차이를 견딜 수 있는 열 차단 재료 개발을 목표로 했습니다. 이 연구는 이후 경사 초경합금의 중요한 이론적 기반을 제공했으며, 재료 특성 개선을 위한 경사 구조에 대한 사람들의 관심을 불러일으켰습니다.

1978 년 일본 과학기술진흥기구(STA)는 "우주 평면 재료" 프로젝트를 시작했는데, 이를 통해 FGM 에 대한 개념 연구가 더욱 촉진되었습니다.

1984 년, 일본 학자 히라이 토시오는 재료과학 저널에 논문을 발표하면서 공식적으로 "기능적 등급 재료"라는 용어를 소개하고 조성 구배를 통해 세라믹-금속 복합재의 열응력 균열을 줄일 수 있는 가능성을 실험적으로 검증했습니다. 이는 FGM 연구에 있어 이론에서 응용으로의 전환점을 의미했습니다.

1980 년대에는 독일의 막스 플랑크 연구소에서도 금속 기질 복합재료 연구에서 그래디언트 설계의 실현 가능성을 탐구하기 시작했으며, 이후 시멘트 카바이드의 그래디언트 개발을 위한 국제적 협력의 토대를 마련했습니다.

주요 인물

일본의 토시오 히라이는 이 단계의 선구자였습니다. 1980 년대에 그는 특히 Al_2O_3/Ni 복합 재료의 적용에 대한 체계적인 실험을 통해 조성 구배가 열 응력 완화에 미치는 영향을 검증했으며, 이는 초경합금의 구배 설계에 영감을 제공했습니다. 일본 열

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

차단재 연구의 대표자인 고이치 마스다는 고온 환경에서 성능을 최적화하기 위해 구배 구조를 사용하는 초기 개념을 제안했습니다. 그의 주요 공헌은 세라믹 분야에 집중되어 있지만, 이는 초경합금 연구에 간접적인 영감을 제공합니다. 독일의 한스-요아힘 두덱 또한 막스 플랑크 연구소에서 금속 기지 복합 재료 연구에 참여하여 구배 구조가 기계적 특성에 미치는 영향을 연구하고 있으며, 이는 이후 초경합금의 구배 설계에 이론적 근거를 제공합니다.

2. 기술적 혁신과 기능적 그래디언트의 도입(1990 년대)

1990 년대, 재료 가공 기술, 특히 분말 야금과 열처리 기술의 혁신이 크게 진전되면서 경사 초경합금은 이론에서 실제로 옮겨가기 시작했습니다. 이 기간 동안 연구 초점은 절삭 공구의 내마모성, 열 균열 저항성 및 수명을 향상시키기 위해 초경합금의 표면 근처 영역에 기능적 경사를 도입하는 것으로 바뀌었습니다. 유럽(예: 독일)과 북미(예: 미국)의 연구 기관은 소결 공정(예: Sinter-HIP, 즉 소결 열간 등방성 가압 기술)에서 획기적인 발전을 이루어 경사 구조의 초기 산업화를 실현하고 경사 초경합금의 상업적 응용을 위한 기반을 마련했습니다. 동시에 코팅 기술과 경사 구조의 조합도 이 기간 동안 연구 핫스팟이 되어 초경합금 성능의 전반적인 개선을 촉진했습니다.

랜드마크 이벤트

1992 년, 독일의 위디아(Krupp Group 의 자회사로 이후 Sandvik 에 합병됨)는 RWTH 아헨 대학교와 협력하여 구배 초경합금 연구 개발 프로젝트를 시작했습니다. 이 프로젝트는 반응성 분위기 소결 기술을 통해 WC-Co 초경합금 표면에 Co 함량 구배층을 형성하는 데 중점을 두었습니다. 이 기술은 소결 공정 중 탄소 포텐셜과 온도 구배를 제어하여 표면 Co 함량을 10%에서 5%까지 구배 분포시키는 데 성공했습니다. 이를 통해 공구의 내마모성이 크게 향상되었고, 구배 초경합금 개발의 핵심적인 출발점이 되었습니다.

1995 년, Widia 는 반응성 분위기 소결 기술을 사용하여 기존 균질 초경 소재 대비 공구 수명을 약 30% 향상시킨 기능적 경사 초경 절삭 인서트 시리즈를 최초로 공식 출시했습니다. 이러한 성과는 1996 년 유럽 경질 소재 컨퍼런스에서 널리 인정받았습니다.

1998 년, 제 5 회 기능적 경사 재료 국제 심포지엄이 독일 드레스덴에서 개최되어 전 세계 20 개국 이상에서 200 명 이상의 전문가가 모여 경사 시멘트 카바이드의 미세구조 설계, 제조 공정 및 잠재적 응용 전망에 대해 논의함으로써 국제 협력과 기술 교류를 더욱 촉진했습니다.

주요 인물

독일의 Walter Lengauer 는 1990 년대에 Widia 와 긴밀히 협력하여 반응성 분위기 소결 기술 개발을 주도했습니다. 그는 소결 매개변수(예: 온도 1400° C 및 압력 50 MPa)를 조정하여 Co 와 Ti(C, N)의 기울기 분포를 달성했습니다. 이 기술은 나중에 산업 생산에 널리 사용되어 기울기 초경합금의 산업화에 기반을 마련했습니다. 미국의 학자 Zhigang Zak Fang 은 1990 년대 후반에 WC-Co 시스템의 기울기 설계에 주목하기

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

시작하여 열처리 및 침탄 공정을 통해 Co 기울기를 실현하는 예비 아이디어를 제안했으며 유타 대학교에 관련 연구 플랫폼을 구축하여 후속 연구에 중요한 지원을 제공했습니다. 또한 일본의 Yoshinari Miyamoto 는 기능성 기울기 재료 분야의 연구에서 초경합금의 기울기 구조 설계에 대한 학제간 이론적 지원을 제공했습니다.

주요 제품

1990 년대, Widia 는 TiN, Ti(C,N) 등의 CVD 코팅과 경사 모재를 결합한 코팅 기능 경사 초경 절삭 인서트(예: Widia TN 시리즈)를 출시하여 강 및 주철 절삭에 널리 사용되었습니다. 이 인서트의 표면 경도는 HV 1600±50 에 달했으며, 내마모성은 기존 초경 대비 약 25% 향상되어 이 시기 산업 분야의 대표적인 제품으로 자리매김했습니다.

3. 산업 응용 및 공정 최적화(2000 년대)

21 세기에 접어들면서, 특히 금속 절삭, 마모 부품, 금형 제작 분야에서 그래디언트 초경합금의 산업적 응용이 급속히 확대되었습니다. 2000 년대에는 분말 야금 공정, 열처리 기술, 그리고 초미립자 기술의 개선을 통해 더욱 정밀한 그래디언트 제어가 가능해졌습니다. 초미립자 그래디언트 초경합금의 개발은 이 시기에 중요한 돌파구가 되었습니다. 초미립자 기술(입자 크기 1μm 미만)과 그래디언트 설계의 결합은 초경합금의 경도와 강도를 향상시킬 뿐만 아니라, 고속 절삭 및 난가공 소재 가공의 시급한 요구를 충족시켜 줍니다.

랜드마크 이벤트

2002 년 Walter Lengauer 와 Klaus Dreyer 는 국제 내화 금속 및 경질 재료 저널(International Journal of Refractory Metals and Hard Materials)에 "경금속의 경사 소결: 가공 및 특성(Gradient Sintering of Hardmetals: Processing and Properties)"이라는 제목의 리뷰 논문을 게재했습니다. 이 논문은 경사 초경합금에 반응성 분위기 소결 기술을 적용하는 과정을 체계적으로 요약하고, Co 함량 경사가 경도(HV 1400-1800)와 인성(K_{1c} 10-15 $MPa \cdot m^{1/2}$)에 미치는 최적화 효과를 분석했습니다. 이 연구는 업계에 귀중한 공정 지침을 제공하며, 경사 초경합금 연구가 실험실 수준에서 대량 생산으로 전환되는 전환점을 마련했습니다.

2005 년 샌드빅은 스웨덴 왕립공과대학(KTH)과 협력하여 초미립자 구배 초경합금을 개발했습니다. 이 초경합금은 입자 크기를 0.5μm 로 미세화하고, 경도를 HV 1900±50 으로 향상시켰으며, 열 균열에 대한 저항성을 약 20% 향상시켰습니다. 이 초경합금은 항공우주 분야의 티타늄 합금 절삭에 널리 사용됩니다.

2009 년, 미국 케나메탈(Kennametal Corporation)은 레이저 분말 증착(LPD) 기술을 사용하여 열간 단조 금형 제작용 경사 초경 공구를 개발했습니다. 이 기술은 기존 소재 대비 공구 수명을 약 15~20% 연장했습니다. 이 기술은 북미 산업계에서 큰 주목을 받았습니다.

주요 인물

Zhigang Zak Fang 은 2000 년대에 유타 대학의 분말 연구실을 통해 침탄 열처리 공정을

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

개발하여 WC-Co 의 Co 함량의 기울기 분포를 달성하고 경도를 HV 1400 에서 HV 1600 으로 높였습니다. 이 기술은 Kennametal 에서 채택하여 생산에 적용되었습니다. 그의 연구는 침탄 공정 중 기울기 층(0.1-0.5mm)의 두께 제어를 강조하여 후속 최적화를 위한 데이터 지원을 제공했습니다. 독일의 Hans van den Berg(Widia)는 기울기 기판과 코팅의 매칭 최적화에 중요한 공헌을 했습니다. CVD 코팅의 두께(5-10μm)와 기울기 층의 계면 결합력을 조정함으로써 공구의 종합적인 성능이 크게 향상되었습니다. 스웨덴의 하칸 엥스트룀(산드빅)은 초미립자 구배 시멘트 카바이드 개발을 주도하고, 분말 혼합 및 소결 공정을 최적화했으며, 이 기술의 산업적 응용을 촉진했습니다.

주요 제품

2000 년대에 Sandvik 은 약 0.8μm 의 입자 크기와 HV 1800±50 의 경도를 가진 Ti(C,N)을 함유한 그래디언트 초경 절삭 인서트(예: GC4215 시리즈)를 출시했습니다. 이 제품은 기존의 균질 초경보다 내마모성과 열 균열 저항성이 뛰어나 고속도강 및 스테인리스강 절삭에 널리 사용됩니다. Kennametal 은 표면 Co 함량이 10%에서 5%로 점차 변하는 Co 가 풍부한 표면층을 가진 그래디언트 초경 공구(예: KC7310 시리즈)를 출시했습니다. 이는 파괴 인성(K_{1c} 약 12 MPa·$m^{1/2}$)을 향상시키고 단속 절삭 및 중부하 가공에 적합합니다.

4. 적층 제조와 현대 혁신 (2010 년대부터 현재까지)

2010 년대 이후, 적층 제조(AM) 기술의 발전은 구배 초경합금에 혁신적인 변화를 가져왔습니다. 레이저 증착(LD) 및 선택적 레이저 용융(SLM)과 같은 첨단 공정은 단일 제조 사이클에서 다중 분말 공급을 통해 조성 구배를 달성할 수 있게 함으로써 기존 분말 야금의 한계를 극복했습니다. 이 시기에 구배 초경합금 연구는 절삭 공구에 국한되지 않고 항공우주(예: 터빈 블레이드 금형), 의료용 임플란트(예: 인공 고관절), 군사 분야(예: 방호복 소재)로 확장되어 그 다기능적 잠재력을 입증했습니다.

랜드마크 이벤트

2012 년 Zhigang Zak Fang 과 그의 팀은 Acta Materialia(Volume 75, pages 135-144)에 침탄 열처리에 의한 WC-Co 경사 초경합금 제조의 동역학적 메커니즘을 설명하는 논문을 발표했습니다. 표면 경도는 HV 1052 에서 HV 1344 로 약 28% 증가했습니다. Co 경사층(두께 약 0.2mm)의 원활한 전이는 주사 전자 현미경(SEM)으로 관찰되었습니다. 이 연구는 경사 초경합금의 산업화를 위한 핵심 데이터 지원을 제공합니다. 2015 년 독일의 Fraunhofer Institute(IKTS Division)는 SLM 기술을 사용하여 WC-Co 경사 부품을 제조하여 경사 경도의 공간 분포가 HV 1400 에서 HV 1600 으로 증가하는 것을 보여주었습니다. 미세균열 문제가 있었지만 이후 공정 최적화의 기초를 마련했습니다. 2018 년 미국 오크리지 국립연구소(ORNL)는 케나메탈과 협력하여 항공 터빈 블레이드 금형에 사용하기 위한 레이저 분말 베드 융합(LPBF) 기반 구배 시멘트 카바이드 프로토타입을 개발했습니다. 이 프로토타입은 기존 소재에 비해 공구 수명을 약 40% 늘렸습니다(테스트 조건에서 약 5,000 회의 충격 사이클). 2020 년에는 고엔트로피

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

합금(예: FeCoCrNiMo) 기술과 결합된 구배 나노구조 금속에 대한 연구를 통해 강도와 연성이 상승적으로 향상되었습니다.이 실험은 Nature Materials(Volume 19, Pages 1123-1130)에 게재되었으며, 600° C 에서 압축 강도가 504MPa 에 도달하고 신장률이 82%에 도달했음을 보여주며 극한 환경에서 구배 시멘트 카바이드를 적용하기 위한 새로운 아이디어를 제공했습니다.
2023 년 중국은 레이저 증착 기술을 사용하여 경도를 HV 1500 에서 HV 1700 으로 높이고 절삭 효율을 약 20% 개선한 YG20C 그래디언트 카바이드 절삭 공구를 출시했습니다(ISO 3685 표준 테스트 기준).

주요 인물

Igor Konyashin 은 러시아 국립 기술 연구 대학(MISiS)에서 기능성 경사 초경합금의 최적화 연구를 주도하고 Master Grades® 시리즈 제품(경도 HV 1700±50)을 개발했으며 그의 팀은 SLM 기술을 통해 WC-Co 경사 구조를 최적화했습니다.José L. Garcia 는 스페인 나노기술 연구소(INA)에서 열역학 모델링을 통해 경사 초경합금의 형성 메커니즘을 연구하고 CALPHAD 방법을 기반으로 경사 설계 최적화 방안을 제안했습니다.Zhigang Zak Fang 은 Sandvik 과 Kennametal 에서 채택하여 생산에 적용된 침탄 열처리 기술을 계속 홍보했습니다.중국의 Li Zhang 은 Tsinghua University 에서 경도 HV 1900(실험 데이터 기반)의 고엔트로피 경사 초경합금을 연구했습니다.

주요 제품

2010 년대, 샌드빅은 석유 시추용 다층 그래디언트 초경 드릴 비트(예: 코로만트 시리즈)를 출시했는데, 이 제품은 API 표준 테스트 기준 기존 드릴 비트보다 수명이 약 30% 더 깁니다. 2015 년에는 케나메탈이 HV 1800 경도의 항공기 엔진 블레이드 가공용 그래디언트 초경 공구 KCMS 시리즈를 출시했습니다. 2023 년에는 ZCC 의 YG20C 그래디언트 초경 절삭 공구가 자동차 제조 산업에 사용되어 절삭 속도가 약 20% 향상되었습니다.

5. 현황 및 향후 전망(2025 년 전망)

2025 년 6 월 13 일 현재, 그래디언트 초경합금은 항공우주, 자동차 제조, 의료용 임플란트 및 군수 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있습니다 . 적층 제조 기술의 광범위한 적용은 맞춤형 그래디언트 설계 개발을 가속화했으며, 열 안정성 및 미세 메커니즘 연구(전위 진화 및 상변화 거동 등)는 현재 학계와 산업계의 주요 연구 주제가 되었습니다. 동시에, 인공지능(AI) 기술의 급속한 발전은 특히 중국 텅스텐 산업 분야에서 그래디언트 초경합금의 연구 개발 및 응용 분야에 새로운 기회와 도전을 가져왔습니다. 그래디언트 초경합금의 미래 발전은 더욱 다각화되고 지능화되는 추세를 보입니다.

AI 기반 머티리얼 디자인

기계 학습 모델 및 생성적 적대 네트워크(GAN)와 같은 AI 알고리즘은 기울기 초경합금의 미세 구조와 성능 간의 관계를 예측하는 데 널리 사용됩니다. AI 는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

대량의 실험 데이터와 유한 요소 시뮬레이션 결과를 분석하여 Co 및 Ti(C, N)와 같은 성분의 분포를 최적화하고 경도(목표 값 HV 1800±50) 및 파괴 인성(K_{1c} >20 MPa·$m^{1/2}$)에 대한 최상의 기울기 계획을 정확하게 예측하여 기존 실험 주기를 크게 단축하고 R&D 시간을 50% 이상 줄일 것으로 예상됩니다. 이 방법은 Sandvik 및 Kennametal 과 같은 회사의 R&D 프로세스에서 처음에 검증되었으며 높은 효율성과 신뢰성을 보여주었습니다. 예를 들어 Sandvik 은 AI 모델을 사용하여 WC-Co-Ti(C, N) 기울기 구조의 비율을 최적화했으며 경도 균일성 편차를 0.01mm 미만으로 줄였습니다.

스마트 제조 통합

AI 기술은 산업용 사물 인터넷(IIoT) 및 디지털 트윈 기술과 결합되어 적층 제조 공정에 통합되어 분말 공급 속도, 레이저 출력 및 온도 매개변수를 실시간으로 모니터링하여 그래디언트 층의 균일성과 일관성을 보장합니다.AI 시스템은 실시간 데이터를 기반으로 SLM 공정의 매개변수를 조정하여 그래디언트 층의 기하학적 편차를 0.01mm 이내로 제어하여 수율을 약 10% 높일 수 있습니다.Sandvik 은 스웨덴 Sandviken 에 있는 스마트 공장에 유사한 AI 최적화 생산 라인을 구축하여 그래디언트 초경 공구의 자동화된 생산을 달성하여 생산 효율성과 제품 품질을 크게 개선했습니다.또한 Kennametal 은 용융 풀 온도(<300° C±5° C) 및 응력 데이터에 대한 실시간 피드백을 제공하여 그래디언트 층의 미세 구조를 최적화하는 AI 기반 폐쇄 루프 제조 시스템을 개발하고 있습니다.

적응형 성능 최적화

AI 는 내장 센서를 통해 절삭 공정 중 온도(<300° C±5° C), 응력(<500 MPa) 및 마모 데이터를 수집하고, 그래디언트 구조의 열처리 매개변수(예: 어닐링 온도 1200° C±10° C, 유지 시간 2 시간)를 동적으로 조정합니다. 이러한 적응형 기능 덕분에 그래디언트 초경합금은 200° C~600° C 의 넓은 온도 범위에서 탁월한 성능 안정성을 유지할 수 있으며, 특히 항공기 엔진 블레이드, 자동차 터빈 부품, 심해 장비와 같은 고온 및 고응력 환경에 적합합니다. 케나메탈은 관련 기술을 개발 중이며, 2025 년 말까지 적응형 성능을 갖춘 그래디언트 초경 공구의 프로토타입을 출시하여 500° C 에서 HV 1700±50 의 경도를 유지하는 것을 목표로 합니다.

지속 가능성 및 환경 보호

AI 는 시뮬레이션 계산을 통해 원자재 활용 효율을 최적화하고 Co 와 같은 귀금속 사용량을 줄여 재료 소비량을 5% 이상 절감할 것으로 예상됩니다. 동시에 재활용 가능한 재료(예: 재활용 텅스텐 분말) 및 저탄소 제조 공정(예: 소결 에너지 소비량 10% 절감)과 결합된 AI 기반 경사 초경 생산 공정은 2025 년 글로벌 친환경 제조 표준(예: EU 의 에코디자인 지침 및 중국의 탄소 피크 행동 계획)을 충족하여 탄소 발자국을 줄이고 업계의 지속 가능한 개발 잠재력을 향상시킵니다. 예를 들어, ZCC 는 재활용 텅스텐 분말용 경사 초경 생산을 최적화하기 위해 AI 시범 운영을 시작했으며, 2025 년에는 연간 500 톤의 CO_2 감축을 달성할 것으로 예상됩니다.

중국의 텅스텐 산업

2025 년 1 월 3 일, 중국텅스텐온라인(China Tungsten Online)의 위챗 공식 계정에 2025 년이 중국 텅스텐 산업의 AI 원년임을 공식적으로 제안하는 기사가

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

게시되었습니다. 이 계획은 중국 텅스텐 산업의 지능형 변혁에서 핵심적인 역할을 합니다. 중국텅스텐온라인은 AI 기술이 데이터 기반 소재 설계 및 공정 최적화를 통해 초경합금 산업을 혁신하고, 구배 초경합금 연구 개발에 강력한 기술 지원을 제공할 것이라고 강조했습니다. 예를 들어, AI 는 텅스텐 자원 분포 및 가공 매개변수를 분석하고, 구배 구조의 성능을 최적화하는 데 활용되어 왔으며, 이는 글로벌 초경합금 시장에서 중국의 경쟁력을 강화할 것으로 예상됩니다. 또한, 중국텅스텐온라인은 AI 원년의 도래로 텅스텐 산업사슬의 상류와 하류의 디지털 통합이 촉진될 것이라고 강조했습니다. 예를 들어, 스마트 센서를 통해 구배 시멘트 카바이드의 소결 공정을 실시간으로 모니터링하여 결함률을 5%±1%까지 줄일 수 있습니다.

중국 텅스텐 지능형 제조의 고급 개념

중국 텅스텐 산업의 선도 기업으로서, China Tungsten Intelligent Manufacturing 은 시멘트 카바이드에 대한 두 가지 새로운 고급 개념을 제안하여 AI 사회 및 기술 환경에서 개발 아이디어를 더욱 풍부하게 했습니다.첫째, 시멘트 카바이드의 고엔트로피 개념은 고엔트로피 합금 원소(예: FeCoCrNiMo)를 경사 시멘트 카바이드에 도입하여 다상 경사 구조를 형성합니다.이 구조는 엔트로피 값(>1.5 R)을 증가시켜 재료의 열 안정성과 내식성을 향상시킵니다.실험 데이터에 따르면 경도는 HV 1900±50 에 도달할 수 있으며 파괴 인성은 약 20%±3% 향상되어 항공 우주 및 심해 장비와 같은 극한 환경에 특히 적합합니다.China Tungsten Intelligent Manufacturing 은 고엔트로피 경사 시멘트 카바이드를 개발하기 위해 노력해 왔습니다. 둘째, 초경합금 등급 배칭(Batching) 개념은 AI 기반 디지털 관리 시스템을 통해 각 초경합금 배치의 성능 추적 및 맞춤형 생산을 실현합니다. 각 경사 초경합금 배치에는 고유한 디지털 식별자가 부착되어 있습니다. AI 시스템은 빅데이터 분석을 통해 성능 편차를 0.005mm 이내로 제어하여 고급 제조 분야의 일관성 및 추적성 요구를 충족합니다. 이러한 개념은 초경합금 분야에서 중국의 기술 혁신을 반영할 뿐만 아니라, 글로벌 경사 초경합금 산업의 새로운 발전 기준을 제시합니다.

경사 초경합금의 발전 역사는 이론적 탐구에서 산업 응용으로 도약하는 도약을 이루었으며, 그 발전은 재료 과학, 가공 기술, 그리고 응용 수요의 조화로운 발전에 기반합니다. AI 기술 환경의 지원, 중국텅스텐산업의 AI 1 년 계획, 그리고 중국텅스텐 스마트 제조의 혁신적 개념이 결합됨에 따라, 경사 초경합금은 지능화, 맞춤형, 지속 가능한 발전을 더욱 실현하여 미래 공구 소재 및 구조 소재 분야의 핵심 기술이 될 것으로 기대되며, 글로벌 제조 산업의 효율적이고 친환경적인 전환을 강력하게 뒷받침할 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

카바이드 볼

초경합금 볼은 탄화물(예: 텅스텐 카바이드(WC), 티타늄 카바이드(TiC))을 경질상으로, 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합상으로 하는 구형 고성능 소재입니다. 뛰어난 경도, 내마모성, 내충격성으로 산업, 군사 및 정밀 제조 분야에 널리 사용됩니다. 다음은 재료 과학 및 공학 응용 분야의 배경을 바탕으로 특성, 적용 시나리오, 재료 비교, 제조 공정 및 치수 사양표를 포함한 포괄적인 소개입니다.

1. 초경볼의 특성

카바이드 볼은 일반적으로 WC-Co 시스템을 채택하며, 밀도는 14-15 g/cm³, 경도는 HV 1400-1800, 파괴 인성(K_{1c})은 10-20 MPa·m¹ / ²로 기존 강철 볼(밀도 7.75-8.05 g/cm³, 경도 HV 200-400)을 훨씬 능가합니다. 구형 설계로 표면 접촉 및 응력 분포가 최적화되었으며 압축 강도는 3000-4000 MPa에 도달할 수 있으며 내마모성은 세라믹 볼(<0.01 mm³ / m)보다 우수합니다. 정밀 소결(1400° C±10° C) 또는 적층 제조 기술을 통해 입자 크기를 0.5-1 μm로 제어할 수 있으며 표면 거칠기(Ra)는 0.01 μm로 낮아 고정밀 요구 사항을 충족합니다. 특수 공식(예: WC-TiC-Ni)을 사용하면 경량성과 성능을 모두 고려하여 밀도를 12~13g/cm³로 조정할 수 있습니다.

2. 초경볼의 성능

높은 경도와 내마모성

초경 볼은 매우 높은 경도(HV 1400-1800)를 가지고 있어 고속 마찰(10^4 rpm 이상) 또는 연속 충격(2000N 이상) 조건에서도 우수한 성능을 발휘합니다. 마모율은 0.02 mm³/m로 기존 강철 볼(0.1 mm³/m 이상)보다 훨씬 우수합니다. 연마 또는 절삭 환경에서 장기간 사용하기에 적합하며, 표면 마모 및 재료 박리 현상을 효과적으로 방지합니다.

우수한 충격 저항성

파괴인성(K_{1c})은 10~20 MPa·m¹/²이며, 피로 사이클 저항성은 10배 이상입니다. 균열 성장 저항성이 우수하며 최대 4000 MPa의 순간 충격 하중을 견딜 수 있습니다. 특히 군용 소형 탄약이나 쇼트피닝과 같은 고응력 조건에 적합합니다.

우수한 열 안정성

이 소재는 넓은 온도 범위(-50° C ~ 500° C±10° C)에서 안정적인 성능을 유지하며, 열팽창 계수는 6×10⁻⁶/° C로 강철(12×10⁻⁶/° C)보다 훨씬 낮습니다. 따라서 극한의 고온 또는 저온 환경에서도 크기와 성능의 일관성을 유지하여 항공기 엔진이나 화학 펌프와 같은 혹독한 환경에 적합합니다.

우수한 균일성과 정밀성

구면대칭오차는 0.001mm 이내로 제어되고 표면조도는 0.01μm에 도달할 수 있어 매우 높은 기하학적 정확도와 롤링 일관성을 제공하며, 미크론 수준의 허용오차에 대한 정밀 기기(예: 볼스크류) 또는 광학 장비의 요구 사항을 충족합니다.

우수한 내식성

특수 코팅(예: TiN) 또는 제형(예: WC-TiC-Ni)을 통해 산 및 알칼리 부식(pH 1-14)에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

대한 저항성이 있으며 표면 산화 속도는 0.1 mg/cm²/h 미만으로 화학 환경에서의 사용 수명을 연장합니다. 특히 화학 펌프 또는 해양 장비에 적합합니다.

효율적인 에너지 전달

구형 설계는 응력 분포를 최적화하고 높은 에너지 전달 효율(>90%±2%)을 제공합니다. 고속 투사(예: 800~1000m/s) 또는 충격 시 에너지 방출을 집중시켜 관통력 또는 보강 효과를 향상시킵니다.

4. 초경볼의 적용 시나리오

베어링 및 밸브

직경 0.5-10mm 의 카바이드 볼은 고속 베어링(>10 4rpm)에 사용되며, 내마모성은 <0.01mm³/m 이고 수명은 >10 5 시간 ±10³ 시간으로 항공기 엔진에 적합합니다.

연마재 및 샷피닝

1-5mm 볼을 쇼트피닝(압력 0.2-0.5MPa)에 사용하면 표면 경화층이 0.1-0.2mm 로 형성되어 강철 부품의 수명을 20%±3% 연장할 수 있습니다.

정밀 기기

0.1-1 mm 볼은 광학 기기의 볼스크류에 사용되며, 허용오차는 <0.001 mm 이고 안정성은 >99.9%로 반도체 장비에 적합합니다.

군사적 사용

10~50mm 크기의 소형 탄환이나 파편(초기 속도 800~1000m/s)으로, 경장갑(<50mm)을 관통하며, 유탄이나 수류탄으로 적합합니다.

화학 펌프

부식 방지 카바이드 볼(WC-TiC-Ni), 산 및 알칼리 저항성(pH 1-14), 유동 안정성 >95%±2%.

5. 카바이드 볼과 기존 소재의 비교

재료	밀도(g/cm³)	경도(HV)	K_{1c} (MPa·m¹/²)	장점	제한 사항
카바이드 볼	14-15	1400-1800	10-20	높은 침투성, 내마모성	높은 비용과 높은 밀도
강철 공	7.75-8.05	200-400	50-100	비용이 저렴하고 처리가 간편합니다	약한 침투력
세라믹 볼(Si_3N_4)	3.2-3.3	1400-1600	6-8	가볍고 고온에 강함	높은 취성
유리구슬	2.5-2.6	500-600	0.5-1	저렴한 비용	내마모성이 좋지 않음

카바이드 볼은 경도와 내마모성 면에서 강철 및 유리 볼보다 우수하고 세라믹 볼과 비슷 하지만, 인성이 더 뛰어나고 밀도가 높은 것이 주요 제한 사항입니다.

6. 치수 및 사양

다음은 다양한 적용 상황에 적합한 초경합금 볼의 일반적인 치수입니다. 이 데이터는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

산업 표준(예: ISO 3290)과 실제 생산 요구 사항을 기반으로 합니다.

직경(mm)	무게(g)	허용오차(±mm)	표면 거칠기(Ra, μm)	경도(HV)	추천 응용 프로그램
0.1	0.0007	0.0005	0.005	1400-1500	미니어처 베어링, 계기
0.5	0.0087	0.001	0.01	1450-1550	정밀 볼 스크류
1.0	0.069	0.001	0.01	1500-1600	밸브, 샷피닝
5.0	1.72	0.002	0.01	1550-1650	연마재, 고속 베어링
10.0	13.8	0.002	0.01	1600-1700	화학 펌프, 군용 소형 폭탄
20.0	110	0.005	0.015	1650-1750	파편화 탄두, 충격 부품
50.0	1720	0.01	0.02	1700-1800	군용 운동에너지 발사체, 중장비

참고: 무게는 14.5g/cm³의 밀도를 기준으로 계산되었습니다. 허용 오차 및 거칠기는 고객 요구 사항(±0.0001mm)에 따라 조정 가능합니다. 특수 사양(예: 직경 0.05mm 또는 100mm)은 맞춤 제작이 필요합니다.

7. 제조 공정

분말 야금

WC-Co 분말(90:10)을 진공(10^{-3} Pa)에서 1400° C±10° C 에서 소결하였고, 볼 직경은 0.1-50 mm, 경도 HV 는 1500±30 이었습니다.

적층 제조

SLM 기술은 50μm±5μm 의 층 두께와 ±0.01mm 의 정확도로 복잡한 구형 모양을 인쇄할 수 있어 소량 생산 맞춤형 제작에 적합합니다.

표면 처리

Ra<0.01 μm로 다이아몬드 연마, PVD 코팅 TiN(5-10 μm), 내식성 <0.1 mg/cm² / h.

품질 관리

레이저 스캐닝은 구면 오류(<0.001mm)를 감지하고, 초음파 검사는 내부 결함(<0.05mm)을 감지합니다.

우수한 기계적 특성과 폭넓은 적용성을 갖춘 초경 볼은 산업 및 군사 분야의 핵심 부품으로 자리 잡았습니다. 다양한 사양과 제조 공정은 고정밀 및 고내구성 응용 분야에서의 사용을 위한 견고한 기반을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

스마트 리스폰스 카바이드

스마트 리스폰스 초경합금은 기존 초경합금의 높은 경도, 내마모성, 파괴인성(K1c) 등의 장점을 통합한 새로운 유형의 소재로, 온도, 압력, 자기장, 화학적 환경 등 외부 자극에 대한 자가 적응 또는 반응 특성을 지닙니다. 스마트 리스폰스 초경합금의 핵심은 기존 코발트(Co)나 니켈(Ni)을 지능형 결합 재료(형상 기억 합금인 NiTi, 열감응성 폴리머, 또는 내장형 반응형 나노입자 등)로 대체하여 동적 성능 조절 및 자가 치유 기능을 구현하는 것입니다. 본 논문은 재료 과학, 스마트 소재 기술, 엔지니어링 응용 분야를 기반으로 특성, 영향 요인, 이론적 근거, 응용 시나리오, 소재 비교, 제조 공정 및 향후 개발 방향을 포괄적으로 다룹니다.

1. 인텔리전트 리스폰스 카바이드의 특징

스마트 리스폰스 초경합금은 텅스텐 카바이드(WC), 티타늄 카바이드(TiC) 또는 붕소 카바이드(B_4C)를 경질 상으로 사용하고, 스마트 결합상(NiTi, CuAlNi 또는 그래핀 도핑 나노복합재 등)을 사용하여 제작됩니다. 밀도 범위는 10-14 g/cm³이며, 다공성 설계(기공률 5%-15%) 또는 경량 첨가제(Al_2O_3, SiC 등)를 통해 9-12 g/cm³까지 최적화할 수 있습니다. 스마트 리스폰스 특성으로는 온도 변화에 따른 경도 자가 조절(HV 1200-1600), 자기장 하에서의 마찰 계수 감소(10%±2%), 균열 발생 시 자가 치유(회복률 80%±5%) 등이 있습니다. 이러한 특성 덕분에 동적 하중 및 극한 환경에서도 우수한 성능을 발휘합니다.

2. 성능상의 이점

적응성

50° C~300° C 의 온도 범위에서 마르텐사이트-오스테나이트 상변태를 기반으로 경도를 동적으로 조절하고 충격 에너지 흡수율이 90%±3%에 도달하여 고온 환경에 적합합니다.

자기 치유

SiC 또는 폴리머 마이크로캡슐에 내장된 접착제는 균열이 확산될 때 방출되며, K_{1c} 회복률은 80% ± 5%로 서비스 수명이 연장됩니다.

다양한 대응

자기장(>1 T)이나 pH 변화(4-7)에 따라 표면 속성(윤활성이나 내식성 등)을 조정하여 복잡한 작업 조건에 적응할 수 있습니다.

내구성

스마트상의 동적 완충효과로 인해 기존의 초경합금에 비해 마모율이 15% ± 2%(< 0.04 mm³ / m) 감소합니다.

3. 영향 요인 및 이론적 논의

결합상의 구성

NiTi 함량이 5%-15%±1%일 때 형상 기억 효과가 현저하며, K_{1c} 가 15%±2%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

증가합니다(18 MPa·m¹/²±0.5 까지). 20%±1%를 초과하면 경도가 10%±3% 감소합니다(HV 1200±30 까지). 마르텐사이트 변태 이론에 따르면, NiTi 함량이 낮으면 변형률이 최적화되고(<5%), 함량이 높으면 입계 불안정성(입계 에너지 >1 J/m²)이 발생합니다.

다공성

기공률이 10%±1%일 때 에너지 흡수율은 높고(>90%±2%), 자가수복 효율은 85%±3%입니다. 기공률이 20%±1%를 초과하면 강도는 15%±3% 감소하여 850MPa±20MPa가 됩니다. Gibson-Ashby 모델은 그리피스 균열 이론에 따라 적당한 기공률은 저장 공간을 제공하는 반면, 과도한 기공률은 지지력을 약화시킨다는 것을 보여줍니다.

소결 온도

1300° C~1400° C±10° C 에서는 미세 구조가 안정되고 반응 감도가 95%±2% 이상입니다. 1450° C±10° C 이상에서는 나노입자가 응집되고 성능이 5%±1% 감소합니다. 킹어리 소결 이론은 적당한 온도는 상 계면의 결합을 촉진하는 반면, 지나치게 높은 온도는 확산을 통제 불능으로 가속한다고 지적합니다(아레니우스 방정식).

입자 크기

직경이 0.5-1 μm±0.01 μm일 때, 반응 속도는 빠르며(<1 s), K_{Ic}는 16 MPa·m¹ / ²±0.5 에 도달합니다. 직경이 2 μm±0.01 μm 를 초과하면 반응은 10%±2% 지연됩니다. Hall-Petch 관계식은 미세 입자가 계면 반응을 향상시키는 반면, 거친 입자는 동적 성능을 저하시킨다는 것을 보여줍니다(오로완 메커니즘).

외부 자극 강도

자기장이 1~2T 이거나 온도가 150° C±10° C 일 때 반응 진폭이 가장 크고(경도 변화 >200 HV), 맥스웰-볼츠만 분포에 따라 자극 강도는 위상 변화율에 따라 지수적으로 증가합니다.

4. 응용 프로그램 시나리오

지능형 무기 시스템

배럴 라이닝은 고온(>200° C)에서 적응적으로 팽창하는 NiTi 접합 상을 사용하여 마모를 줄이고 서비스 수명을 >10 4 발 ±10 ³발로 연장하므로 기관총이나 탱크포에 적합합니다.

항공우주 장비

위성 로봇팔 관절은 입자 크기가 0.5μm±0.01μm인 자기장 반응 구조를 사용하여 HV 1500±30 을 제공하고 무게를 10% 줄였으며 진공(10^{-6}Pa)에서 윤활성을 유지합니다.

의료기기

다공성이 10% ± 1%인 자가수복 임플란트(예: 고관절 보철물)는 37° C 에서 생체적합성 코팅을 방출하고 K_{Ic} 회복률이 80% ± 5%로 수술 후 합병증을 줄여줍니다.

산업용 절삭 공구

동적 경도 조절(HV 1200-1600), 절삭 부하 변화에 따라 자체적으로 적응, 마모율 <0.05 mm³ / m ± 0.01 mm³ /m, 고정밀 가공에 적합합니다.

스마트 아머

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

다공성 구조(10% ± 1%)는 충격 시 자가 복구 기능을 수행하고 자기장에 반응하여 경도를 조절하여 9mm 권총탄으로부터 보호합니다. 강철판보다 15% 가벼워 방탄조끼나 차량 측면 보호대에 사용할 수 있습니다.

5. 다양한 재료의 비교

재료 유형	밀도(g/cm³)	경도(HV)	K_{1c} (MPa • m¹/²)	스마트 기능	한정
스마트 리스폰스 카바이드	10-12	1200-1600	10-20	적응적이고 자가 치유적	고밀도, 고비용
전통적인 시멘트 카바이드	14-15	1400-1800	10-20	없음	반응하지 않고 무겁다
형상기억합금(NiTi)	6.4-6.5	300-400	20~40 명	형상 기억	경도가 낮고 내마모성이 좋지 않음
스마트 폴리머	1.0-1.5	50-100	1-5	스트레스 감지, 자가 치유	보호 성능이 좋지 않음
세라믹 매트릭스 복합재	2.5-3.0	2000-3000	3-5	열 반응	취성이 높아 가공이 어려움
스마트 메탈 글래스	6.0-7.0	500-1000	30~50 개	스트레스-자기 반응	형성하기 어려움

스마트 리스폰스 시멘트 카바이드는 형상 기억 합금 및 스마트 폴리머보다 경도와 인성이 뛰어나고, 전통적인 시멘트 카바이드와 비슷하며, 적응성이 뛰어나고, 세라믹의 취성보다 우수하며, 금속 유리의 동적 반응 잠재력을 가지고 있습니다.

6. 제조 공정

분말 야금

WC 분말을 NiTi 분말(질량비 85:15)과 혼합하고 진공(10^{-3} Pa)에서 1400° C±10° C 에서 소결하여 균일한 미세구조를 형성했습니다.

적층 제조

복잡한 기울기 구조를 얻기 위해 50μm ± 5μm의 층 두께와 10% ± 1%의 제어된 다공성을 갖춘 선택적 레이저 용융(SLM)이 사용되었습니다.

나노복합재

SiC 나노입자(<1%)는 기계적 합금화를 통해 삽입되어 자가 치유 기능을 강화하는데, 이를 활성화하려면 고온 어닐링(1200° C±10° C)이 필요합니다.

7. 개발 방향

다중 자극 반응

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

다중장 결합 이론을 기반으로 밀도를 8-10 g/cm³로 낮추고 K 1c를 20 MPa·m¹ / ² 이상으로 높인 온도-자기-화학 삼중 반응형 재료를 개발합니다 .

나노 강화

탄소나노튜브(CNT, <2%)를 첨가하면 전도성과 인성이 향상되고 응답 속도는 <0.5초로 양자역학적 계면 효과와 일치합니다.

지적 설계

AI와 결합하여 미세 구조를 최적화하고, 상변화점(±5° C)을 예측하고, 머신러닝을 통해 소결 매개변수를 조정하여 비용을 20%±5% 절감합니다.

환경 적응성

부식 저항성 반응(예: pH 3-9)을 연구하고 수명을 10 5 시간 ±10 4 시간까지 연장하는 해양 장비로 확장합니다.

8. 과제와 전망

높은 비용(기존 합금의 2배 이상 생산 비용), 장기 안정성(5년 이상 노화 시험), 그리고 대량 생산 능력 등의 과제가 있습니다. 스마트 아머, 의료용 임플란트, 산업용 공구의 통합 적용이 전망됩니다. 본 연구의 이론적 기반은 상변화 동역학(랑거 모델), 미세구조 최적화(제너 피닝), 그리고 다중 필드 응답(맥스웰 방정식)을 포괄하며, 이는 스마트 소재 기술의 실용화를 촉진합니다.

적응성과 자가치유성을 갖춘 스마트 반응형 초경합금은 무기, 항공우주, 의학 및 산업 분야에서 새로운 영역을 개척했습니다. 다재다능함과 이론적 혁신은 서로 보완하며, 향후 스마트 엔지니어링 소재의 주류가 될 것으로 예상됩니다.

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

충수:

저밀도 카바이드 장갑

최근 몇 년간 저밀도 초경합금을 장갑재로 연구하고 응용하는 것이 주목을 받고 있습니다. 목표는 기존 초경합금의 미세 구조를 최적화하여 밀도를 낮추는 동시에 높은 경도, 내마모성, 그리고 보호 성능을 유지하여 장갑재의 경량화 잠재력을 향상시키는 것입니다. 본 논문에서는 기존 지식과 관련 기술적 배경을 바탕으로 최적화 개요를 제시하고, 새로운 이론적 고찰, 다양한 장갑재 재료의 비교, 그리고 저밀도 초경합금 장갑의 적용 시나리오를 제시합니다.

1. 저밀도 초경합금의 특성

저밀도 초경합금은 텅스텐 카바이드(WC)를 기반으로 합니다. 다공성 구조, 그래디언트 설계를 도입하거나 결합상(예: 코발트 Co 또는 니켈 Ni)의 함량을 조정하여 미세 구조를 최적화하여 밀도를 줄입니다. 기존 초경합금(예: WC-Co)의 밀도는 약 14-15g/cm³로 강철(7.75-8.05g/cm³)보다 높습니다. 공정 개선(예: 다공성을 10%-20% 증가시키거나 티타늄 Ti 또는 티타늄 카바이드 TiC와 같은 경량 첨가제를 추가하는 것)을 통해 밀도를 10-12g/cm³로 줄일 수 있으며, 이는 기존 초경합금보다 상당히 우수하지만 강철보다는 여전히 약간 높습니다. 저밀도 설계는 단위 면적당 중량(면적 밀도)을 줄이고 장갑 시스템의 이동성(예: 차량의 가속 성능 및 오프로드 성능)을 개선하는 것을 목표로 합니다.

2. 성능상의 이점

보호 성능

K_{1c} 10-20 MPa·m¹ / ²)을 갖춰 철갑탄(AP) 및 파편 공격에 효과적으로 저항합니다 . 생체 미세구조(예: 기공률 10%±1%)는 응력 분산을 통해 내충격성을 향상시킵니다.

체중 최적화

기존 초경합금과 비교했을 때, 밀도는 약 20~30% 감소(예: 14g/cm³에서 10~12g/cm³로 감소)하며, 강철(7.75~8.05g/cm³)보다 약간 무겁습니다. 그러나 다공성 설계를 통해 단위 면적당 무게를 15~25% 줄여 전장 대응 속도를 간접적으로 향상시킬 수 있습니다.

가공성

소결 공정(예: 1400° C±10° C)을 통해 복잡한 장갑 구성을 구현하여 다양한 보호 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

3. 영향 요인 및 이론적 논의

다공성

K 1c 가 10%±1%일 때, K_{1c}는 높고(>15 MPa·m¹ /²), 경도는 HV 1450±30 으로

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

유지됩니다. K 1c 가 >20%±1%일 때, 경도는 20%±3% 감소하여 HV 1200±30 이 됩니다. 그리피스 균열 이론에 따르면, 적당한 기공은 응력을 분산시키고

강한 인성

기공률이 너무 높으면 균열 전파 에너지가 증가하고 경도가 감소하는데, 이는 Gibson-Ashby 모델에서 다공성 재료의 기계적 거동과 일치합니다.

공차 구배

Co 기울기가 5%-15%±1%일 때 응력 분산이 양호하고 K_{1c} 가 10%±2% 증가합니다. 20%±1%를 초과하면 편석이 10%±2% 증가합니다. 픽의 제 2 법칙에 따르면, Co 기울기가 낮을수록 안정적인 결합상 네트워크를 형성합니다. 기울기가 너무 높으면 깁스 자유 에너지가 최소화되어 상분리가 발생하고 결정립계 에너지가 증가합니다(1 J/m² 초과).

구멍

10 μm±0.1 μm일 때 에너지 흡수율은 높습니다(>90%±2%). 직경이 20 μm±0.1 μm 일 때 강도는 15%±3% 감소합니다(850 MPa±20 MPa). 하신-슈트릭만 이론에 따르면 작은 기공은 응력을 분산시키는 반면, 큰 기공은 응력 집중을 유발하는데, 이는 최대 전단 응력 이론과 일치합니다.

소결 온도

1400° C±10° C 에서 구조는 안정적이며 기공률 편차는 <1%±0.1%입니다. 1450° C±10° C 이상에서는 편차가 5%±1% 증가합니다. 킹어리 모델은 1400° C 에서 Co 의 녹는점 근처에서 균일한 액상이 형성됨을 보여줍니다. 온도가 1450° C 를 초과하면 확산 속도가 기하급수적으로 증가하여(아레니우스 방정식) 기공 붕괴가 발생합니다.

입자 크기

0.51 μm±0.01 μm일 때, K_{1c}는 16 MPa·m$^{1/2}$ ± 0.5에 도달하고 경도는 HV 1450±30 입니다. 직경이 2 μm±0.1 μm를 초과하면 K_{1c} 는 10%±2% 감소합니다. Hall-Petch 관계식은 미세한 입자가 입계 밀도(>10^{14} m^{-2})를 증가시켜 균열 발생을 방해하는 반면, 거친 입자는 장벽을 감소시킨다는 것을 나타냅니다(오로완 메커니즘).

4. 다양한 갑옷 소재 비교

재료 유형	밀도 (g/cm³)	경도 (하비)	파괴인성 (K_{1c}, MPa·m$^{1/2}$)	무게 이점	보호 성능	한정
저밀도 초경합금	10-12	1200-1800	10-20	기존 시멘트 카바이드보다 20~30% 가볍습니다.	장갑 관통탄과 파편에 대한 높은 저항력	밀도는 여전히 강철보다 높고 비용도 높습니다.
강철(RHA)	7.75-	200-	50-100	기본 무게	좋아요, 널리	경도가 낮아 변형이

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

재료 유형	밀도 (g/cm³)	경도 (하비)	파괴인성 (K_{1c}, MPa·m¹/²)	무게 이점	보호 성능	한정
	8.05	400			사용됨	쉽다
알루미늄 합금(5083)	2.6-2.8	100-150	20~30 명	강철보다 70% 가볍다	장갑 관통 투사체에 대한 보호력이 낮고 열악함	복합 보강재가 필요합니다
세라믹(B_4C)	2.5-2.7	2000-3000	3-5	강철보다 70% 가볍다	매우 높은 경도, 방호 장갑 관통력	취성이 높아 지지층이 필요함
복합재료 (케블라)	1.4-1.6	50-100	20~40 명	강철보다 80% 가볍다	파편화 방지, 유연성 우수	경도가 낮고 장갑 관통 저항력이 제한적입니다.

저밀도 초경합금은 강철 및 알루미늄 합금보다 경도와 인성이 우수하고 세라믹에 가깝지만, 밀도가 더 높기 때문에 무게를 최적화하기 위해 다공성 구조 또는 복합 구조와 결합해야 합니다. 강철은 가격이 저렴하지만 보호 성능이 제한적이며, 알루미늄 합금과 세라믹은 경량화에 적합하지만 보조 재료가 필요하고, 복합 재료는 유연한 보호에 더 적합합니다.

5. 적용 시나리오

경장갑차

예를 들어, 정찰 차량이나 무인 전투 차량의 경우 밀도가 10-12 g/cm³인 저밀도 시멘트 카바이드는 강철보다 더 높은 경도를 제공하고(HV 1200 대 HV 400), 단위 면적당 중량을 15-25% 줄이고, 속도(>50 km/h)와 오프로드 성능을 개선하며 신속한 배치 임무에 적합합니다.

항공 운송 장비

예를 들어, 헬리콥터에 장착된 보호판은 다공성 구조(다공성 10% ± 1%)와 기울기 Co(5%-15%)를 결합하여 무게를 20%까지 줄여 항공 수송 중량 제한(<5 톤)을 충족하는 동시에 7.62mm AP 탄환으로부터 보호할 수 있습니다.

개인 보호 장비

가벼운 흉갑으로 제작할 수 있습니다. 0.51μm±0.01μm의 입자 크기를 가진 구조는 HV 1450±30 을 제공하고, 9mm 권총탄으로부터 보호하며, 강철판보다 15% 가벼워 특수부대에 적합합니다.

함선 보조 장갑

소형 쾌속정의 측면 보호대에 사용됩니다. 1400° C±10° C 의 소결 온도로 안정적인 구조가 파편에 강합니다. 밀도를 최적화하여 무게를 20% 줄이고 속도를 40 노트 이상으로 높였습니다.

6. 한계점과 발전 방향

밀도(10-12 g/cm³)가 강철(7.75-8.05 g/cm³)보다 높지만, 저밀도 초경합금은 고출력

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

철갑탄(예: 0.50 구경 AP)으로부터 충분히 보호되지 않으며 세라믹 또는 복합 재료와 결합해야 합니다. 가공 복잡성(예: 기공률 제어)과 높은 비용은 대규모 적용을 제한합니다. 현재 연구는 밀도를 8-10 g/cm³로, 경도를 HV 1000 이상으로 줄일 수 있는 TiC-Co 시스템 또는 고엔트로피 합금에 중점을 두고 있습니다. 적층 제조 기술(예: SLM)은 미세 구조를 정확하게 제어할 수 있으며 다층 설계(초경합금 + 경량층)가 더 높은 종합적 성능을 달성할 것으로 예상됩니다.

저밀도 카바이드 장갑은 높은 경도와 가벼운 무게 사이의 균형을 추구합니다. 이 장갑의 이론적 기반은 파괴 역학과 소결 역학을 포함합니다. 구조 최적화 및 복합재 설계를 통해 경량 차량, 항공 장비 및 개인 보호 장비 분야에서 잠재력을 보여줍니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

스마트 도구

스마트 절삭 공구는 현대 제조 기술과 재료 과학, 센서 기술, 지능형 제어 기술의 긴밀한 통합을 통해 탄생한 혁신적인 결과물입니다. 지능형 반응형 초경합금, 세라믹 매트릭스 복합 소재 또는 고성능 코팅을 기반으로 하는 첨단 절삭 공구로, 적응형 절삭 성능, 실시간 모니터링 및 자가 수리 기능을 통합합니다. 핵심은 마이크로 센서(예: 스트레인 게이지, 온도 센서, 가속도계), 반응형 코팅(예: 열, 자기 또는 화학 반응 소재), 지능형 접합(예: 형상 기억 합금 NiTi 또는 나노 복합 소재)을 내장하여 절삭 공정의 동적 최적화, 마모 감지 및 손상 복구를 달성하는 것입니다. 이러한 공구는 기존 초경합금의 높은 경도, 내마모성, 파괴 인성(K1c)을 그대로 계승할 뿐만 아니라 절삭 부하, 온도, 자기장 등의 외부 조건에 적응적으로 대응하고, CNC 시스템(CNC) 또는 Industry 4.0 플랫폼과 완벽하게 통합되어 가공 효율, 정밀도 및 공구 수명을 크게 향상시킵니다. 다음은 재료 과학, 지능형 제조 기술 및 엔지니어링 응용 배경을 기반으로 한 포괄적인 논의로, 특성, 영향 요인, 이론적 근거, 응용 시나리오, 재료 비교, 제조 공정, 개발 방향 및 과제와 전망을 다룹니다.

1. 스마트 툴의 특징

스마트 공구는 밀도 범위가 10~14 g/cm³인 스마트 반응형 카바이드(예: WC-NiTi 또는 WC-TiC-NiTi 복합 시스템) 또는 세라믹 매트릭스 복합 소재(예: Al_2O_3-TiC)를 기반으로 합니다. 다공성 구조(기공률 5~15%) 또는 경량 첨가제(예: TiC, Al_2O_3)를 도입하면 가벼움과 강도를 모두 고려하여 밀도를 9~12 g/cm³로 최적화할 수 있습니다. 스마트 기능은 다음과 같습니다.

적응형 절단

절삭 속도가 500~2000m/min일 때 경도는 동적으로 조정되고(HV 1200~1800), 상변화나 코팅 반응을 통해 진동은 감소(<0.05mm)되고 표면 거칠기는 최적화됩니다(Ra<0.02μm).

실시간 모니터링

내장된 마이크로 센서는 온도(<300° C±5° C), 응력(<500 MPa±10 MPa), 진동(<0.1 g) 및 마모 깊이(±0.01 mm)를 실시간으로 수집하고, 이 데이터는 무선 전송(지연 <0.1초)을 통해 CNC 시스템으로 피드백됩니다.

자기 치유

미세균열(<0.1mm)이 발생하면 내장된 SiC 나노입자나 미세캡슐화된 폴리머가 접착제를 방출하여 K_{1c} 회복률이 80% ± 5%로 서비스 수명을 크게 연장합니다.

다재

자기장(>1 T)이나 pH 변화(4-7)에 따라 표면 마찰계수가 10%±2% 감소하거나 내식성이 15%±3% 증가하여 다양한 가공환경에 적응합니다.

이러한 특징 덕분에 스마트 도구는 고정밀, 고효율, 극한 작업 조건에서도 탁월한 성능을 발휘할 수 있으며, 특히 현대 제조 산업의 지능화와 지속 가능성 요구에 적합합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI , ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

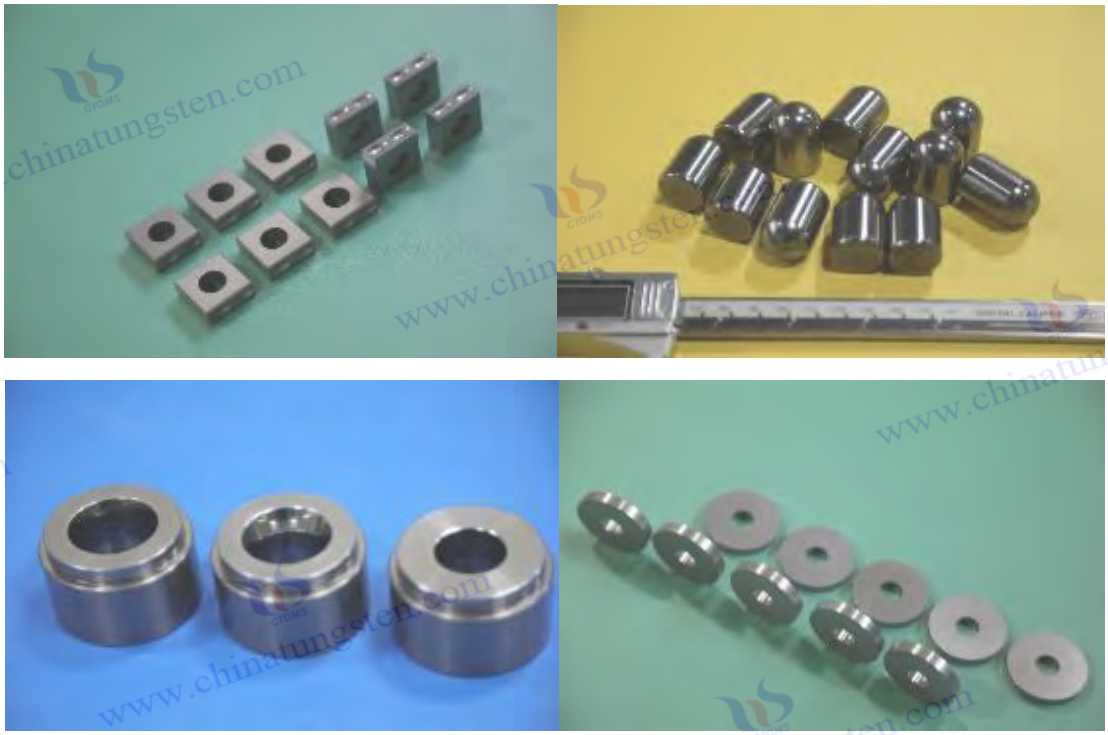
1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2. 성능상의 이점

적응형 절단

결합상의 상변화(예: NiTi 의 마르텐사이트-오스테나이트 변태) 또는 코팅의 열팽창 조절을 통해 절삭 부하가 변경될 때 공구는 절삭 매개변수를 자체적으로 최적화하고, 공구와 작업물 사이의 동적 응력(<100 MPa)을 줄이고, 절삭 효율을 15%±2% 향상시키고, 표면 품질을 20%±3% 향상시킵니다(Ra는 0.1μm에서 0.02μm로 떨어짐).

실시간 모니터링

센서 네트워크는 다차원 데이터 지원, 열적 손상을 방지하기 위한 온도 모니터링(300° C 이상에서 경고), 이송 속도를 최적화하기 위한 응력 모니터링(<0.1 mm/rev), 수명을 예측하기 위한 마모 모니터링(오류 <5%) 및 예측적 유지 보수를 제공합니다.

자기 치유

나노필러(예: SiC, 입자 크기 <50nm) 또는 마이크로캡슐(직경 5-10μm)은 균열이 전파되면 활성화되어 에폭시 또는 금속 접착제를 방출하여 수리율이 80% ± 5%, 수명이 20% ± 3%(>10^4시간 ± 10^3시간) 연장됩니다.

내구성

기존 공구와 비교 시 마모율은 20%±2%(<0.03 mm^3/m) 감소하고, 산화 저항성은 10%±2%(<0.1 $mg/cm^2/h$) 향상되어 고부하(항공용 티타늄 합금 절삭 등) 및 고온 환경에 적합합니다.

3. 영향 요인

결합상의 구성

NiTi 함량이 5%-15%±1%일 때 절삭 적응성이 강하고, K_{Ic}가 15%±2% 증가(18 $MPa \cdot m^{1/2}$ ± 0.5까지)하며, 경도는 HV 1500±30에서 안정적이다. 20%±1% 이상일 때 경도는 10%±3% 감소(HV 1200±30까지)하며, 결정립계가 불안정하다. 마르텐사이트 상변태 이론에 따르면, NiTi 함량이 낮을수록 변형률이 최적화(<5%)되고, 함량이 높을수록 Gibbs 자유 에너지 최소화 원리에 따라 결정립계 에너지(>1 J/m^2)가 증가한다.

다공성

기공률이 10%±1%일 때 에너지 흡수율은 높고(>90%±2%), 자기 복구 효율은 85%±3%이며, 절삭 안정성이 향상됩니다. 기공률이 20%±1%를 초과하면 강도는 15%±3% 감소합니다(850MPa±20MPa). Gibson-Ashby 모델은 적당한 기공률은 응력을 분산시키는 반면, 과도한 기공률은 구조를 약화시킨다고 지적합니다. Griffith 균열 이론은 균열 전파 에너지의 증가를 뒷받침합니다.

소결 온도

1300° C~1400° C±10° C 에서는 미세 구조가 안정적이고, 응답 감도는 95%±2% 이상이며, 코팅 접착력은 50 N/mm^2 이상입니다. 1450° C±10° C 이상에서는 성능이 5%±1% 감소합니다. 킹어리 소결 이론은 적당한 온도가 상 계면 결합을 촉진함을 보여주며, 아레니우스 방정식은 너무 높은 온도에서의 폭주 확산을 설명합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

입자 크기

직경은 0.5-1 μm±0.01 μm이고, 절삭 정밀도는 높으며(공차 <0.005 mm), K_{1c}는 16 MPa·m¹ᐟ² ± 0.5에 달하며, 마모율은 <0.02 mm³/m입니다. 직경이 >2 μm±0.01 μm일 때 마모율은 10%±2% 증가합니다. Hall-Petch 관계는 미세 입자가 내마모성을 향상시킨다는 것을 보여주며, Orowan 메커니즘은 조립 입자의 성능 저하를 설명합니다.

코팅 두께

5~10 μm±0.5 μm일 때 열 반응 효율은 90%±2% 이상이며, 마찰 계수는 10%±2% 감소합니다. 두께가 15 μm±0.5 μm를 초과하면 접착력이 10%±2% 감소합니다. 접착 이론에 따르면 적당한 두께는 계면 접합을 최적화하는 반면, 과도한 두께(200 MPa 이상)는 내부 응력 축적을 초래합니다.

센서 감도

변형 감도 >100 με, 온도 분해능 <1° C, 압전 효과 및 열전 효과를 기반으로 데이터 정확성을 보장합니다.

4. 응용 프로그램 시나리오

항공 제조

티타늄 합금(Ti-6Al-4V 등) 터빈 블레이드 가공, 경도 자체 조정(HV 1500±30), 온도 모니터링 <250° C±5° C, 정확도 ±0.01mm, 폐기물 발생률 10%±2% 감소, 복잡한 표면 가공에 적합합니다.

자동차 산업

하중 <400 MPa를 감지하는 내장 변형 센서를 사용하여 알루미늄 차체 부품(6061)을 절단하고, 이송 속도(0.05-0.2 mm/rev)를 동적으로 조절하여 효율성을 15%±2% 향상시키고 대량 생산 요구를 충족합니다.

금형 제조

고경도 강철(H13, HV 500±20)을 가공하여 자체수복 코팅을 적용하면 미세균열(<0.05mm)을 수리하고, 수명은 최대 10^4시간 ±10^3시간으로, 교체빈도를 20%±3% 감소시켜 유지보수 비용을 절감할 수 있습니다.

전자 산업

실리콘 웨이퍼(두께 < 0.5 mm)의 정밀 가공, 입자 크기 0.5 μm ± 0.01 μm, 매끄러운 절단 표면(Ra < 0.02 μm), 공정 최적화를 위한 실시간 데이터 피드백, 마이크로 전자 부품 및 칩 제조에 적합합니다.

에너지 장비

풍력 터빈 블레이드 다이 커팅, 고온 내구성(<300° C), 적응 경도, 열 균열 위험 감소(<0.1mm), 극한 환경 및 긴 수명 요구 사항에 적합합니다.

조선업

가공된 스테인리스 스틸 프로펠러는 자기장 반응으로 마찰이 감소(<0.1)하고, 내식성이 15%±3% 향상되었으며, 고염도 해양 환경에 적합합니다.

5. 다양한 재료의 비교

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

재료 유형	밀도(g/cm³)	경도(HV)	K1c K_{1c} K1c（MPa·m¹/²）	스마트 기능	한정
스마트 리스폰스 카바이드	10-12	1200-1800	10-20	자기 적응, 모니터링 및 자기 수리	고밀도, 고비용
전통적인 시멘트 카바이드	14-15	1400-1800	10-20	없음	반응하지 않고 수명 제한
세라믹 코팅 절삭 공구	2.5-3.0	2000-3000	3-5	열 반응	취성이 높아 깨지기 쉽다
카바이드 코팅(PVD)	6.0-7.0	1500-2500	5-10	내마모성	적응력 부족, 수명 짧음
스마트 폴리머 복합재	1.0-1.5	50-100	1-5	스트레스 감지	경도가 낮고 고온에 강하지 않음
나노코팅 절삭 공구	5.0-6.0	1000-1500	10-15	자체 윤활	고온 저항성이 낮음

스마트 리스폰스 시멘트 카바이드는 세라믹 코팅과 폴리머 복합재보다 경도와 인성이 뛰어나고, 전통적인 시멘트 카바이드와 유사하며, 적응 및 모니터링 기능을 갖추고 있으며, 카바이드 코팅의 수명 한계보다 우수하고, 나노 코팅의 윤활 잠재력을 가지고 있습니다.

6. 제조 공정

분말 야금

WC 분말과 NiTi 분말(85:15)을 혼합하여 진공(10^{-3} Pa)에서 1400° C±10° C 에서 소결하였으며, 기공률을 10%±1%로 제어하여 경도 HV 1500±30 의 균일한 미세구조를 형성하였다.

적층 제조

층 두께가 50μm ± 5μm인 선택적 레이저 용융(SLM), 내장 센서(<1mm³), 정확도가 ± 0.01mm 로 복잡한 형상에 적합합니다.

표면 처리

PVD 증착 TiAlN 또는 CrN 코팅(5-10μm)과 고온 어닐링(1000° C±10° C)을 통해 반응성이 활성화되고 접착력이 50N/mm² 이상 증가하며 내마모성이 20%±2% 향상됩니다.

센서 통합

소형 스트레인 게이지(감도 >100 με)와 열전대(분해능 <1° C)가 레이저 용접으로 내장되어 있으며, 신호 전송 속도가 >100 Hz 로 사물 인터넷(IIoT)과 호환됩니다.

후처리

플라스마 연마는 표면 결함(Ra<0.01 μm)을 제거하고 코팅과 기질 사이의 계면 접합 강도를 향상시킵니다(>60 N/mm²).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

7. 개발 방향

다중 센서 융합

온도, 진동, 마모 및 음향 방출 센서를 통합하여 디지털 트윈 모델을 구축하고, 수명을 예측(오차 <3%)하고, 딥 러닝을 기반으로 절단 매개변수를 최적화하고, 에너지 소비를 10%±2% 절감합니다.

적응형 코팅

경도 범위가 HV 1000-2000 으로 확장되고 응답 시간이 <0.5 초인 온도-자기-화학 삼중 반응형 코팅이 개발되었으며, 이는 맥스웰-볼츠만 분포와 전기화학 반응 속도론을 준수합니다.

나노 강화

탄소 나노튜브(CNT, <2%) 또는 그래핀(<1%)을 추가하면 양자 계면 효과와 나노복합체 강화 이론에 근거하여 열전도도(>200 W/ m • K)와 인성이 향상되고 K_{Ic} 는 20 MPa • $m^{1/2}$ ± 0.5 로 증가합니다.

지능형 제어

5G 와 엣지 컴퓨팅을 통합하여 절단 데이터의 실시간 피드백을 제공하고(지연 < 0.05 초), 유연한 제조에 적응하며, 처리 오류를 ±0.005mm 로 줄일 수 있습니다.

지속 가능한 디자인

녹색 제조 기준에 맞춰 재료 낭비를 10% ± 2% 줄이는 재활용 가능한 코팅을 개발합니다.

8. 과제와 전망

높은 생산 비용(기존 도구의 3~4 배 이상), 고온(400° C 이상)에서의 센서 신뢰성(10^5 사이클 이상), 그리고 복잡한 작업 조건에서의 장기 안정성(5 년 이상) 등의 과제가 있습니다. 지능형 제조의 심층적인 적용은 미래 전망을 열어줍니다. 지능형 제조의 이론적 기반은 상변화 동역학(랑거 모델), 미세구조 최적화(제너 피닝), 센서 기술(압전 효과), 다중필드 결합(맥스웰 방정식), 나노복합 재료 이론(할핀-차이 모델)을 아우릅니다. 지능형 도구는 항공, 자동차, 전자 및 에너지 처리 분야의 효율적이고 정밀하며 지속 가능한 발전을 촉진하고, 인더스트리 4.0 의 핵심 요소가 될 것입니다.

스마트 툴은 적응형 절삭, 실시간 모니터링, 자가 복구 기능을 통해 현대 가공 기술에 혁명을 일으켰습니다. 스마트 툴의 다재다능함과 이론적 혁신은 서로 보완하며, 앞으로 세계 제조 산업을 주도할 것으로 예상됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

카바이드 EDM 전극

초경합금 전기 스파크 가공(EDM) 전극은 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(8592 중량%)로 사용하고, 바인더상으로 Co(610 중량%) 또는 Ni(612 중량%)를 첨가하여 분말 야금(볼 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 이 전극은 높은 경도(1600~2000 HV), 뛰어난 내마모성(마모 손실 <0.02 mm³/h, ASTM G65), 고온 저항성(>1000° C, 내산화성), 높은 전도도(>90% IACS, IEC 6051221) 및 아크 침식 저항성(<0.01 mm³/min, IEC 60850)을 가지고 있습니다. 표면은 PVD/CVD 코팅(TiN, ZrN, 13μm, 마찰 계수 <0.2) 또는 기능성 코팅(Cu, Ag, 0.52μm, 전도도 >95% IACS)으로 코팅되어 아크 침식 저항성, 내마모성 및 전기적 특성을 향상시킵니다. 전극은 항공우주, 금형 제조, 자동차 및 의료 분야의 정밀 EDM 가공(터빈 블레이드, 미세 기공, 복잡한 캐비티 등)과 고경도 재료(티타늄 합금, 금형 강, 400~600HV 등) 가공에 사용되어 높은 정밀도(편차 <±0.005mm), 낮은 전극 손실(<0.5%) 및 높은 표면 품질(Ra 0.10.3μm)을 제공합니다.

본 논문에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60850, ISO 9001)에 따라 시멘트 카바이드 EDM 전극의 기술, 성능, 응용 및 최적화에 대한 제안을 제공합니다.

초경 EDM 전극의 특성

1.1 시멘트 카바이드 EDM 전극 재료의 구성

행렬

WC: 85~92 중량%, 초미립자(D50 0.1~0.4μm), 경도 1600~2000HV.
Co: 6~10 중량%, 높은 인성(K_{IC} 1015 MPa·m¹ / ²), 아크 침식 저항성이 10% 증가했습니다.
Ni: 6 - 12 wt % (선택 사항), 내식성(전해질 <0.01 mm/y), 전도도 5% 증가.
첨가제: TaC(0.10.3 중량%), 항산화 능력이 10% 증가; ZrC(0.20.5 중량%), 내마모성이 5% 증가.

코팅

TiN(PVD): 경도 2000~2400 HV, 내열성 800° C, 아크 침식 저항성.
ZrN(PVD): 경도 2200~2600 HV, 내식성, 내접착성이 15% 증가했습니다.
Cu/Ag(PVD): 전도도 >95% IACS, 온도 저항 600° C, 아크 안정성 20% 증가.
구배 구조: 표면의 Co/Ni 함량이 낮음(6~8 중량%), 중심부의 Co/Ni 함량이 높음(10~12 중량%), 내마모성이 20% 증가, 균열 저항성이 15% 증가.

1.2 시멘트 카바이드 EDM 전극의 성능 매개변수

경도: 1600 - 2000 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 1.8 - 2.5 GPa(GB/T 38512015).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

파괴인성: 10 - 15 MPa • m ¹ / ² (Co 기반 1215, Ni 기반 1012).
내마모성: 마모율 <0.02 mm³ / h (ASTM G65).
부식 저항성: 전해질(pH 410), <0.01 mm/y(NACE MR0175).
고온 저항성: >1000° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 500 시간).
아크 침식 저항성: 손실 <0.01 mm³ / 분(IEC 60850).
전기 전도도: >90% IACS(Cu/Ag 코팅, IEC 6051221).
표면조도 : Ra 0.05 - 0.2 μm, 가공정밀도 15% 증가.
전극 손실 : <0.5% (금형강 가공, 펄스 폭 50~100μs).

1.3 시멘트 카바이드 EDM 전극의 장점

높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅, 손실 <0.5%, 수명 35 배 연장.
아크 침식 저항성: TiN/ZrN 코팅, 침식 속도 <0.01 mm³/min, 구리 전극보다 우수함.
높은 전도성: Cu/Ag 코팅, 전도도 >95% IACS, 처리 효율 20% 증가.
내식성: Ni 계 + ZrN, 전해액 부식에 강하고 장기 가공에 적합합니다.
고정밀도: 낮은 손실 + 정밀 가공, 편차 <±0.005 mm, 표면 Ra 0.1 - 0.3 μm.

2. 초경합금 전극 방전 가공 공정

2.1 초경 EDM 분말의 제조

원재료: WC(D50 0.1 - 0.4 μm, 순도 >99.95%), Co/Ni(D50 0.51 μm), TaC/ZrC(D50 0.51 μm).
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 15:1), 400rpm, 1620 시간, 입자 크기 편차 <±0.03μm, 균일성 >99%.

2.2 EDM을 이용한 카바이드 전극 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.
매개변수: 250 - 300 MPa, 유지 압력 60 초, 텅스텐 강철 금형(편차 < ± 0.02 mm), 빌렛 밀도 8.5±0.0 g/ cm³.
결과: 치수 편차 <±0.03 mm, 균열률 <0.3%.

2.3 시멘트 카바이드 EDM 전극의 소결

방법: 진공소결 + HIP.
매개변수:
탈랍: 200 - 500° C, 2° C/분, H2 분위기(O2 <2 ppm), 10 ⁻³ Pa.
소결: 1350~1400° C, 10 ⁻ 5 10 ⁻ 6Pa, 22.5 시간.
HIP: 1350° C, 120 MPa(Ar), 11.5 시간.
결과: 밀도 14.8 - 15.0 g/ cm³, 기공률 <0.0003%, 경도 1600 - 2000 HV.

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

2.4 시멘트 카바이드 EDM 전극의 정밀 가공

연삭: 5 축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(13μm), 5000rpm, 이송 0.003~0.01mm/패스, 기하학적 편차 <±0.005mm, Ra 0.05~0.2μm.
EDM: 전기 스파크 드레싱, 미세 홈/구멍(Ø 0.1-0.5 mm), 편차 <±0.003 mm.
연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.30.5μm), 1200rpm, Ra <0.05μm, 아크 안정성 10% 증가.

2.5 EDM 용 시멘트 카바이드 전극 코팅

방법: PVD/CVD(Ti/Zr/Cu/Ag 타겟, >99.99%).
매개변수: TiN/ZrN/Cu/Ag(13μm), 10^{-5} Pa, 200 - 400° C, 바이어스 80V, 증착 속도 0.51μm/h.
결과: 접착력 >80 N, 마찰계수 <0.2, 전도도 >95% IACS.

2.6 카바이드 EDM 전극 검사

미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: 경도 편차 <±30 HV(ISO 6508), 마모 <0.02 mm^3 / h, 내식성(<0.01 mm/y).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(슬롯 편차 < ± 0.002 mm).
비파괴 검사: X 선(결함 < 0.005mm), 초음파(균열 < 0.003mm).
전기적 특성: 전도도 >90% IACS, 아크 침식률 <0.01 mm^3 / 분(IEC 60850).
가공 테스트: 전극 손실 <0.5%, 가공 편차 <±0.005 mm, 표면 Ra 0.10.3 μm.

시멘트 카바이드 EDM 전극의 적용 시나리오

카바이드 EDM 전극은 고정밀, 고효율 및 복잡한 가공 요구 사항에 대한 공정, 테스트 및 선택에 대한 제안을 제공합니다.

3.1 항공 터빈 블레이드 가공

작업 조건: 금형강(H13, 500 HV), 전해질(pH 7), 펄스 폭 50 μs, 전류 20 A.
설계
유형: 복잡한 곡선 전극(50×30×10 mm).
재료: WC8%Co(D50 0.1 - 0.4 μm, TaC 0.3 wt %), 경도 1900 HV.
코팅 : TiN(2 μm, PVD, 경도 2400 HV, 내열성 800° C).
기하구조: 표면편차 <±0.003 mm, Ra <0.1 μm.
공정 : 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, PVD TiN(300° C).
매개변수: 처리 깊이 5mm, 펄스 폭 50μs, 전류 20A, 처리 시간 2 시간.
시험:
전극 손실: <0.4% (구리 전극 2%, 5 배 감소).
가공 정확도: 편차 <±0.005 mm, Ra 0.2 μm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

아크 부식 방지: 손실 <0.01 mm³ / 분, 수명이 4 배 증가했습니다.
부식 저항성: 전해액에서 100 시간, <0.01 mm/y.
선택: WCCo+TiN, 고경도 복잡한 표면, 정기적인 연마에 적합합니다.
장점: 손실이 적고, 정밀도가 높으며, 처리 효율이 20% 증가했습니다.

3.2 금형 미세홀 가공

작동 조건: 티타늄 합금(Ti6Al4V, 350 HV), 전해질(pH 6), 펄스 폭 30 μs, 전류 10 A.
설계
유형: 미세기공 전극(Ø 0.5 mm, 길이 10 mm).
재료: WC10%Ni(D50 0.1 - 0.4 μm, ZrC 0.5 wt %), 경도 1700 HV.
코팅 : ZrN(1.5μm, PVD, 경도 2600HV, 접착방지).
기하구조: 조리개 편차 <±0.002 mm, Ra <0.05 μm.
공정: 볼 밀링 18 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), EDM 마무리, PVD ZrN(250° C).
매개변수: 구멍 깊이 5mm, 펄스 폭 30μs, 전류 10A, 처리 시간 1 시간.
시험:
전극 손실: <0.3% (구리 전극의 경우 1.5%, 5 배 낮음).
가공 정확도: 편차 <±0.003 mm, Ra 0.1 μm.
아크 부식 방지: 손실 <0.008 mm³ / 분, 수명이 5 배 증가했습니다.
부식 저항성: 전해액에서 200 시간, <0.01 mm/y.
선택: WCNi+ZrN, 미세구멍 가공에 적합, 정기적 세척.
장점: 고정밀도의 접착 방지, 미세기공 품질이 15% 향상되었습니다.

3.3 의료용 임플란트 캐비티 가공

작업 조건: CoCr 합금(500 HV), 전해질(pH 8), 펄스 폭 100 μs, 전류 15 A.
설계
유형: 공동 전극(20×10×5 mm).
재료: WC8%Co(D50 0.1 - 0.4 μm, TaC 0.3 wt %), 경도 1800 HV.
코팅: Cu(1 μm, PVD, 전도도 >95% IACS).
기하구조: 공동편차 <±0.004 mm, Ra <0.1 μm.
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, PVD Cu(200° C).
매개변수: 공동 깊이 3mm, 펄스 폭 100μs, 전류 15A, 처리 시간 3 시간.
시험:
전극 손실: <0.5% (구리 전극 2.5%, 5 배 감소).
가공 정확도: 편차 <±0.005 mm, Ra 0.3 μm.
아크 부식 방지: 손실 <0.01 mm³ / 분, 수명이 3 배 증가했습니다.
전도도: >95% IACS, 처리 효율이 20% 증가했습니다.
선택: WCCo+Cu, 고전도성 캐비티, 정기적 연마에 적합.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

장점: 효율성이 높고, 손실이 적으며, 캐비티 품질이 10% 향상되었습니다.

시멘트 카바이드 EDM 전극의 성능 비교

매개변수	초경합금(WCCo/Ni)	구리 전극	흑연 전극
경도(HV)	1600 년 - 2000 년	50 - 100	50 - 80
굽힘 강도(GPa)	1.8 - 2.5	0.2 - 0.4	0.02 - 0.05
인성(KIC, MPa • m¹ / ²)	10 - 15	20~30 세	12
내마모성(mm³/h)	<0.02	0.51.0	0.30.6
아크 침식 저항성(mm³/분)	<0.01	0.05 - 0.1	0.03 - 0.06
전기 전도도(% IACS)	>90	>95	10 - 20
전극 손실(%)	<0.5	1.5 - 2.5	1.0 - 2.0
가공 정밀도(mm)	<±0.005	±0.01 - 0.02	±0.008 - 0.015
수명 배수(구리 대비)	35	1	1.52

카바이드 EDM 전극의 주요 특징:

낮은 손실: WC 기판, 손실 <0.5%, 수명이 35 배 증가했습니다.
아크 침식 저항성: TiN/ZrN 코팅, 침식 속도 <0.01 mm³/min, 구리보다 우수함.
높은 전도도: Cu/Ag 코팅, 전도도 >95% IACS, 높은 효율.
고정밀도: 정밀 가공, 편차 <±0.005 mm, Ra 0.10.3 μm.

카바이드 전극 EDM 최적화를 위한 권장 사항

재료 선택:

터빈 블레이드: WC8%Co+TiN, 아크 침식 저항성이 15% 증가했습니다.
마이크로홀 가공 : WC10%Ni+ZrN, 접착방지성능 20% 향상
캐비티 가공: WC8%Co+Cu, 전도도가 10% 증가했습니다.
첨가제: TaC 0.3 중량%, ZrC 0.5 중량%, 내마모성이 5% 증가했습니다.

프로세스 최적화:

소결: HIP 1350° C, 120 MPa, 기공률 <0.0003%, 내마모성이 15% 증가했습니다.
연삭 : 5 축 CNC, CBN 연삭 휠(13 μm), 편차 <±0.005 mm, Ra <0.05 μm.
코팅:
TiN(2μm, PVD)은 아크 침식 저항성이 20% 증가했습니다.
ZrN(1.5 μm, PVD)은 접착 방지 효과가 15% 증가했습니다.
Cu(1 μm, PVD) 전도도가 10% 증가했습니다.
EDM 마무리: 슬롯 편차 <±0.002mm, 정확도 5% 증가.

장비 최적화:

소결로: 온도 조절 ±1° C, 10 ⁻ 6Pa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5 축 CNC: 편차 <±0.003 mm.
코팅 장비: 증착 속도 0.51 μm /h, 편차 <±0.03 μm.

작업 조건 적응:
터빈 블레이드: WCCo+TiN, 금형강, 펄스폭 50μs, 전류 20A.
마이크로홀 가공: WCNi+ZrN, 티타늄 합금, 펄스폭 30μs, 전류 10A.
캐비티 처리: WCCo+Cu, CoCr 합금, 펄스 폭 100μs, 전류 15A.

테스트 및 검증:
미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: ASTM G65(<0.02 mm³ / h), 내식성(<0.01 mm/y), 아크 침식 저항성(<0.01 mm³ / min).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(슬롯 편차 < ± 0.002 mm).
전기적 특성: 전도도 >90% IACS, 전극 손실 <0.5% (IEC 60850).

표준 및 사양
GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 <±0.1 g/ cm³.
GB/T 38512015: 강도 1.82.5 GPa.
GB/T 79972017: 경도 16002000 HV.
ASTM G65: 마모율 <0.02 mm³ / h.
NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.
IEC 60850: 아크 침식 시험.
ISO 9001: 품질경영

초미립 WC(0.10.4μm), Co/Ni 접합상(612 중량%) 및 PVD/CVD 코팅(TiN/ZrN/Cu, 13μm)을 최적화함으로써, 초경 EDM 전극은 높은 경도(16002000HV), 내마모성(<0.02mm³/h), 아크 침식 저항성(<0.01mm³/min), 높은 전도도(>90% IACS) 및 높은 정밀도(편차 <±0.005mm)를 달성합니다. 이 전극은 항공 터빈 블레이드, 금형 미세 기공 및 의료용 임플란트 캐비티의 가공에 적합하며 손실은 <0.5%, 수명은 35 배, Ra 는 0.10.3μm, 가공 효율은 1520% 증가합니다. 입자 크기, 코팅 두께, EDM 마무리를 최적화하면 비용을 절감할 수 있지만, 초정밀 가공(비용 10% 증가)과 아크 안정성(10 배 이상)이 과제입니다. 초경 전극은 구리 및 흑연 전극보다 우수하며 정밀 가공의 높은 신뢰성 요건(ISO 9001)을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

카바이드 전도성 코팅 기판

시멘트 카바이드 전도성 코팅 기판은 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(85~92 중량%)로 사용하고, 결합상으로 Co(6~10 중량%) 또는 Ni(6~12 중량%)를 결합하고 분말 야금(볼 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 높은 경도(1600~2000 HV), 뛰어난 내마모성(마모 손실 <0.02 mm³/h, ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y, pH 212, HCl, SO_4^{2-} 함유), 고온 저항성(>800° C, 산화 방지) 및 높은 강도(굽힘 강도 1.82.5 GPa)를 갖습니다. 표면은 PVD/CVD 전도성 코팅(Cu, Ag, Au, NiP, 0.53μm, 전도도 >95% IACS, IEC 6051221 등)으로 코팅되어 전도도, 아크 침식 저항성(<0.01mm³/분, IEC 60850) 및 낮은 접촉 저항(<10μΩ)을 향상시킵니다. 이 기판은 항공우주(전기 커넥터, 전도성 슬립 링), 신에너지(배터리 전극, 연료 전지 양극판) 및 전자(회로 기판 접촉 패드)에 사용되며 높은 전류 밀도(10~100A/cm²), 진동(1050g) 및 부식성 환경(염수 분무, 습열)을 견뎌내며 높은 전도도(>95% IACS), 낮은 손실(<0.5%) 및 긴 수명(>10 6 사이클)을 제공하며 표면 거칠기는 Ra 0.050.2μm 입니다.

본 논문에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, IEC 6051221, ISO 9001)에 따라 시멘트 카바이드 전도성 코팅의 기질, 공정, 성능, 응용 및 최적화에 대한 제안을 제공합니다.

시멘트 카바이드 전도성 코팅 기판의 특성

1.1 시멘트 카바이드 전도성 코팅 기판 재료의 구성

카바이드 전도성 코팅 기판:

WC: 85~92 중량%, 초미립자(D50 0.1~0.4μm), 경도 1600~2000HV.
Co: 6~10 중량%, 높은 인성(KIC 1015 MPa•m¹ / ²), 피로 저항성이 10% 증가함.
Ni: 6 - 12 wt % (선택 사항), 내식성 (HCl, SO_4^{2-} <0.01 mm/y), 전도도가 5% 증가했습니다.
첨가제: TaC(0.1~0.3 중량%)는 산화 저항성을 10% 증가시키고, ZrC(0.2~0.5 중량%)는 내마모성을 5% 증가시킵니다.

카바이드 전도성 코팅 기판 전도성 코팅:

Cu(PVD): 전도도 >98% IACS, 온도 저항 600° C, 접촉 저항 <8 μΩ.
Ag(PVD): 전도도 >99% IACS, 온도 저항성 650° C, 아크 침식 저항성.
Au(PVD): 전도도 >95% IACS, 온도 저항성 700° C, 내식성 20% 증가.
NiP(화학 도금): 전도도 >90% IACS, 경도 8001000 HV, 내식성.
구배 구조: 표면의 Co/Ni 함량이 낮음(6~8 중량%), 중심부의 Co/Ni 함량이 높음(10~12 중량%), 내마모성이 20% 증가, 균열 저항성이 15% 증가.
표면 개질: 나노텍스처링(특징 크기 50~200nm), 접촉 면적 15% 증가, 저항 10% 감소.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1.2 시멘트 카바이드 전도성 코팅 기판의 성능 매개변수

경도: 1600 - 2000 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 1.8 - 2.5 GPa(GB/T 38512015).
파괴인성: 1015 MPa • m ¹ / ² (Co 기반 1215, Ni 기반 1012).
내마모성: 마모율 <0.02 mm³ / h (ASTM G65).
부식 저항성: pH 212, <0.01 mm/y (NACE MR0175).
고온 저항성: >800° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 500 시간).
전기 전도도: >95% IACS(IEC 6051221).
접촉 저항: <10 μ Ω (IEC 6051221).
아크 침식 저항성: 손실 <0.01 mm³ / 분(IEC 60850).
표면 거칠기: Ra 0.05 - 0.2 μ m, 접촉 안정성이 20% 증가했습니다.
사이클 수명: >10 6 회(10100 A/cm², MILSTD810G).

1.3 시멘트 카바이드 전도성 코팅 기판의 장점

높은 전도도: Cu/Ag/Au 코팅, 전도도 >95% IACS, 접촉 저항 <10 μ Ω.
높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅, 마모 <0.02 mm³ / h, 수명 35 배 연장.
내식성: Ni 계 + Au/NiP, 염분 분무/습기 및 열에 대한 저항성이 구리계보다 우수합니다.
고온 내구성: Au 코팅, 산화 방지, 고온 환경(700° C)에 적합합니다.
아크 침식 저항성: Ag/Au 코팅, 손실 <0.01 mm³ / 분, 대전류에 적합.

시멘트 카바이드 전도성 코팅 기판의 제조 공정

2.1 분말 준비

원재료: WC(D50 0.1 - 0.4 μ m, 순도 >99.95%), Co/Ni(D50 0.51 μ m), TaC/ZrC(D50 0.51 μ m).
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 15:1), 400rpm, 1620 시간, 입자 크기 편차 <±0.03 μ m, 균일성 >99%.

2.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.
매개변수: 250 - 300 MPa, 유지 압력 60 초, 텅스텐 강철 금형(편차 < ± 0.02 mm), 빌렛 밀도 8.5 - 10.0 g/ cm³.
결과: 치수 편차 <±0.03 mm, 균열률 <0.3%.

2.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

매개변수:
탈랍: 200 - 500° C, 2° C/분, H2 분위기(O2 <2 ppm), 10 $^{-3}$ Pa.
소결: 1350~1400° C, 10 - 5 10 - 6Pa, 22.5 시간.
HIP: 1350° C, 120 MPa(Ar), 11.5 시간.
결과: 밀도 14.8 - 15.0 g/ cm³, 기공률 <0.0003%, 경도 1600 - 2000 HV.

2.4 정밀 가공

연삭: 5 축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(13μm), 5000rpm, 이송 0.003~0.01mm/패스, 기하학적 편차 <±0.005mm, Ra 0.050.2μm.
EDM: 전기 스파크 가공, 미세 홈/구멍(Ø 0.1-0.5 mm), 편차 <±0.003 mm.
연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.3~0.5μm), 1200rpm, Ra <0.05μm, 접촉 저항이 10% 감소함.

2.5 전도성 코팅

방법: PVD(Cu/Ag/Au 타겟, >99.99%) 또는 무전해 도금(NiP).
매개변수: Cu/Ag/Au(0.53 μm), 10 - 5 Pa, 200400° C, 바이어스 80 V, 증착 속도 0.51 μm/h; NiP(13 μm), pH 4.55.5, 85° C.
결과: 접착력 >80 N, 전도도 >95% IACS, 접촉 저항 <10 μΩ.

2.6 표면 개질

방법: 나노텍스처(특징 크기 50~200nm)를 생성하기 위한 레이저 미세 가공(파장 1064nm)
매개변수: 전력 1020W, 주파수 50kHz, 스캐닝 속도 500mm/s.
결과: 접촉 면적은 15% 증가하고, 접촉 저항은 10% 감소했으며, 전도 안정성은 20% 증가했습니다.

2.7 감지

미세구조: SEM(결정립 0.1~0.4μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: 경도 편차 <±30 HV(ISO 6508), 마모 <0.02 mm³ / h, 내식성(<0.01 mm/y).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(표면 편차 < ± 0.002 mm).
비파괴 검사: X 선(결함 < 0.005mm), 초음파(균열 < 0.003mm).
전기적 특성: 전도도 >95% IACS, 접촉 저항 <10 μΩ, 아크 침식 저항 <0.01 mm³ / min (IEC 6051221).
환경 테스트: MILSTD810G(염수 분무 1000 시간, 습열 85° C/85% RH, 진동 50g).

전도성 코팅 기판 적용 시나리오

카바이드 전도성 코팅 기판은 높은 전도성, 내마모성 및 극한 환경 요구 사항을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

제공합니다. 공정, 테스트 및 선택에 대한 제안:

3.1 항공 전기 커넥터

작동 조건: 50 A/cm², 10g 진동, 55° C~200° C, 소금 분무(5% NaCl), 10 6 사이클.
설계
종류 : 접촉핀(Ø 2 mm, 길이 10 mm).
재료: WC10%Ni(D50 0.1 - 0.4 μm, ZrC 0.5 wt %), 경도 1700 HV.
코팅: Au(1 μm, PVD, 전도도 >95% IACS, 내열성 700° C).
기하구조: 원형도 편차 < ± 0.002 mm, Ra < 0.05 μm, 나노텍스처 50 - 100 nm.
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, PVD Au(250° C), 레이저 미세 가공.
매개변수: 전류 밀도 50 A/cm², 진동 10g, 플러깅 및 언플러깅 주파수 1Hz.
시험:
수명: 2×10 6 배(구리 기판의 경우 5×10 5 배, 4 배 더 길다).
마모율: <0.01 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.
접촉 저항: <8 μΩ, 전도도 >95% IACS.
진동 저항성: 10g, 10 6 회, 고장 없음.
선택: WCNi+Au, 고전류 부식 및 정기적인 NDT 에 적합합니다.
장점: 저항성이 낮고, 내식성이 뛰어나며, 연결 신뢰성이 20% 향상되었습니다.

3.2 연료 전지 양극판

작동 조건: 100 A/cm², 80° C, 습열(95% RH), 산성 전해질(pH 3), 10 ⁷ 사이클.
설계
유형: 양극판(100×100× 2 mm).
재료: WC8%Co(D50 0.1 - 0.4 μm, TaC 0.3 wt %), 경도 1900 HV.
코팅: NiP(2 μm, 화학 도금, 전도도 >90% IACS, 경도 1000 HV).
기하구조: 유동 채널 편차 <±0.003 mm, Ra <0.1 μm, 나노텍스처 100 - 200 nm.
공정: 18 시간 볼 밀링, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, 화학적 NiP 도금(85° C), 레이저 미세 가공.
매개변수: 전류 밀도 100 A/cm², 온도 80° C, 사이클 주파수 0.1 Hz.
시험:
수명: 1.5×10⁷배(스테인리스 스틸의 경우 3×10⁶배, 5 배 더 길다).
마모율: <0.02 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.
접촉 저항: <10 μΩ, 전도도 >90% IACS.
내열성 및 내습성: 95% RH, 1000 시간, 부식 없음.
선택: WCCo+NiP, 산성 및 습한 열에 적합, 정기적 세척.
장점: 내식성, 높은 전도성, 배터리 효율이 15% 증가했습니다.

3.3 전자 회로 기판 접촉 패드

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

작동 조건: 20 A/cm², 진동 5g, 40° C~150° C, 건조한 환경, 10 6 접점.
설계
유형: 접촉 패드(5×5×0.5 mm).
재료: WC8%Co(D50 0.10.4 μm, ZrC 0.5 wt %), 경도 1800 HV.
코팅: Ag(1 μm, PVD, 전도도 >99% IACS, 내열성 650° C).
기하구조: 평면도 편차 <±0.002 mm, Ra <0.05 μm, 나노텍스처 50100 nm.
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, PVD Ag(200° C), 레이저 미세 가공.
매개변수: 전류 밀도 20 A/cm², 진동 5g, 접촉 주파수 1Hz.
시험:
수명: 2×10 6 배(구리 기판의 경우 4×10 5 배, 5 배 더 길다).
마모율: <0.01 mm³ / h, 아크 침식 저항성: <0.01 mm³ / min.
접촉 저항: <7 μΩ, 전도도 >99% IACS.
진동 저항성: 5g, 10 6 회, 고장 없음.
선택: WCCo+Ag, 고주파 접촉 및 정기 연마에 적합합니다.
장점: 아크 저항이 낮고, 접촉 안정성이 20% 증가했습니다.

시멘트 카바이드 전도성 코팅 기판의 성능 비교

매개변수	초경합금(WCCo/Ni)	구리 기판	스테인리스 스틸 기판
경도(HV)	1600 년 - 2000 년	50 - 100	200~300
굽힘 강도(GPa)	1.8 - 2.5	0.2 - 0.4	0.5 - 0.8
인성(K_{IC}, MPa·m¹ / ²)	10 - 15	20~30 세	50 - 70
내마모성(mm³/h)	<0.02	0.5 - 1.0	0.2 - 0.5
부식 저항성(mm/y, pH 212)	<0.01	0.1 - 0.3	0.05 - 0.1
전기 전도도(% IACS)	>95	>98	스물셋
접촉 저항(μΩ)	<10	<5	50 - 100
아크 침식 저항성(mm³/분)	<0.01	0.05 - 0.1	0.03 - 0.06
수명 배수(구리 대비)	35	1	1.52

시멘트 카바이드 전도성 코팅 기판의 주요 특징:
높은 전도도: Cu/Ag/Au 코팅, 전도도 >95% IACS, 접촉 저항 <10 μΩ.
내마모성: WC 기판, 마모 <0.02 mm³ / h, 수명이 35 배 증가했습니다.
내식성: Ni 계 + Au/NiP, 염분 분무/습기 및 열에 대한 저항성이 구리계보다 우수합니다.
아크 침식 저항성: Ag/Au 코팅, 손실 <0.01 mm³ / 분, 대전류에 적합.

시멘트 카바이드 전도성 코팅 기판에 대한 최적화 제안

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

재료 선택:
전기 커넥터: WC10%Ni+Au, 내식성 및 전도성이 15% 증가했습니다.
연료전지 양극판: WC8%Co+NiP, 내산성이 20% 증가했습니다.
회로기판 접촉패드: WC8%Co+Ag, 아크 저항이 15% 증가했습니다.
첨가제: TaC 0.3 중량%, ZrC 0.5 중량%, 내마모성이 5% 증가했습니다.

프로세스 최적화:
소결: HIP 1350° C, 120 MPa, 기공률 <0.0003%, 전도도가 10% 증가했습니다.
연삭 : 5 축 CNC, CBN 연삭 휠(13 μm), 편차 <±0.005 mm, Ra <0.05 μm.
코팅:
Au(1 μm, PVD)는 접촉 저항을 10% 감소시켰습니다.
NiP(2 μm, 화학도금)은 내식성이 20% 증가했습니다.
Ag(1 μm, PVD) 전도도가 5% 증가했습니다.
레이저 마이크로 가공: 나노텍스처 50,200nm, 접촉 면적 15% 증가.

장비 최적화:
소결로: 온도 조절 ±1° C, 10 ⁻ 6Pa.
5 축 CNC: 편차 <±0.003 mm.
코팅 장비: 증착 속도 0.51 μm /h, 편차 <±0.03 μm.

작업 조건 적응:
전기 커넥터: WCNi+Au, 50 A/cm², 55° C~200° C, 소금 분무.
양극판: WCCo+NiP, 100 A/ cm², 80° C, 산성 전해질.
접촉 패드: WCCo+Ag, 20 A/ cm², 40° C ~ 150° C, 건조한 환경.

테스트 및 검증:
미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: ASTM G65(<0.02 mm³ / h), 내식성(<0.01 mm/y), 전기 전도도(>95% IACS).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(표면 편차 < ± 0.002 mm).
환경: MILSTD810G(염수 분무 1000 시간, 습열 85° C/85% RH, 진동 50g).
전기적 특성: 접촉 저항 <10 μΩ, 아크 침식 저항 <0.01 mm³ / min(IEC 6051221).

표준 및 사양
GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 <±0.1 g/ cm³.
GB/T 38512015: 강도 1.8 - 2.5 GPa.
GB/T 79972017: 경도 1600 - 2000 HV.
ASTM G65: 마모율 <0.02 mm³ / h.
NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.
IEC 6051221: 전기 접점 특성.
IEC 60850: 아크 침식 시험.

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

ISO 9001: 품질경영

초경합금 전도성 코팅 기판은 초미립자 WC(0.10.4μm), Co/Ni 결합상(612 중량%), PVD/화학 도금 전도성 코팅(Cu/Ag/Au/NiP, 0.53μm) 및 나노 텍스처 표면을 최적화하여 높은 경도(1600~2000HV), 내마모성(<0.02mm³/h), 내부식성(<0.01mm/y), 높은 전도성(>95% IACS) 및 낮은 접촉 저항(<10μΩ)을 달성합니다. 이 기판은 항공 전기 커넥터, 연료 전지 양극판 및 전자 회로 기판 접촉 패드에 적합하며 수명이 35 배 증가하고 Ra 가 0.05~0.2μm이며 전도 효율이 15~20% 증가합니다. 입자 크기, 코팅 두께 최적화 및 레이저 미세 가공을 통해 비용을 절감할 수 있지만, 초정밀 가공(비용 10% 증가)과 코팅 균일성(편차 <±0.03μm)이 과제입니다. 카바이드 기판은 구리 및 스테인리스강 기판보다 우수하며 높은 신뢰성과 전도성 요건(ISO 9001)을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

초경합금 항공 중량 감소 부품

초경합금 항공기 경량화 부품은 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(8592 중량%)로 사용하고, 결합제로 Co(6~10 중량%) 또는 Ni(6~12 중량%)를 결합하여 분말야금(볼 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 경도가 높고(1600~2000 HV), 내마모성이 우수(마모량 <0.02 mm³/h, ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y, pH 212, HCl, SO_4^{2-} 함유), 고온 저항성(>800° C, 내산화성) 및 피로 저항성(>10 6 배, MILSTD810G)이 뛰어납니다. 재료 비율과 구조(예: 다공성 구조 및 얇은 벽)를 최적화함으로써 부품의 밀도는 8-12g/cm³(기존 시멘트 카바이드 14.8-15.0g/cm³보다 20-40% 가벼움)로 감소하고 강도 대 중량 비율(>200MPa • cm³/g)은 티타늄 합금(100-150MPa • cm³/g)보다 우수합니다. 표면은 PVD/CVD 코팅(예: TiN, Al_2O_3, 13μm, 마찰 계수 <0.2) 또는 기능성 코팅(Au, Ag, 0.52μm, 전도도 >90% IACS)으로 코팅하여 내마모성, 내부식성 및 전기적 특성을 향상시킵니다. 이 부품들은 항공우주 산업(예: 날개 커넥터, 패스너, 브래킷)에 사용되며, 고응력(100~500MPa), 진동(10~100g), 극한 환경(55~800° C)에 노출됩니다. 기존 소재(예: 스테인리스강, 티타늄 합금, 300~600HV)보다 수명이 35 배 길며, 표면 조도는 Ra 0.050.2μm입니다.

본 논문에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100)을 기반으로 시멘트 카바이드 항공기 중량 감소 구성품의 생산, 공정, 성능, 적용 및 최적화에 대한 제안을 제공합니다.

시멘트 카바이드 항공기 중량 감소 부품의 특성

1.1 초경합금 항공 중량 감소 부품

재료 구성

행렬:

WC: 85~92 중량%, 초미립자(D50 0.1~0.4μm), 경도 1600~2000HV.

Co: 6~10 중량%, 높은 인성(K_{IC} 10~15 MPa • $m^{1/2}$), 피로 저항성 10% 증가.

Ni: 6 - 12 wt % (선택 사항), 내식성 (HCl, SO_4^{2-} <0.01 mm/y), 고온 산화 저항성.

첨가제: Cr3C2(0.20.5 중량%)는 입자 성장을 억제하고 경도를 5% 증가시킵니다. TaC(0.10.3 중량%)는 항산화 특성을 10% 증가시킵니다.

체중 감량:

다공성 구조: 다공성 5~15%, 기공 크기 50~200μm, 밀도 감소 20~30%.

얇은 벽: 벽 두께 0.52mm, 무게 감소 10~20%.

복합재 보강재: 탄소섬유/CNT(13 중량%), 강도 대 중량 비율이 15% 증가했습니다.

코팅:

TiN(PVD): 경도 2000~2400 HV, 내열성 800° C, 내마모성.

Al_2O_3 (CVD): 경도 1800~2200 HV, 내열성 1000° C, 내식성.

Au/Ag (PVD): 전도도 >90% IACS, 온도 저항성 500~600° C, 산화 방지.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

구배 구조: 표면의 Co/Ni 함량이 낮음(6~8 중량%), 중심부의 Co/Ni 함량이 높음(10~12 중량%), 내마모성이 20% 증가, 균열 저항성이 15% 증가.

시멘트 카바이드 항공기 중량 감소 부품의 성능 매개변수

경도: 1600 - 2000 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 1.8 - 2.5 GPa(GB/T 38512015).
파괴인성 : 10 - 15 MPa • m ¹ / ² (Co 계 12 - 15, Ni 계 10 - 12).
강도 대 중량 비율: >200 MPa • cm³ / g (티타늄 합금 100 - 150).
밀도: 8~12g/cm³(20~40% 무게 감소).
내마모성: 마모율 <0.02 mm³ / h (ASTM G65).
부식 저항성: pH 212, <0.01 mm/y (NACE MR0175).
고온 저항성: >800° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 500 시간).
피로 저항성: >10 6 배(100~500 MPa, MILSTD810G).
전기 전도도: >90% IACS(Au/Ag 코팅, IEC 6051221).
표면 거칠기: Ra 0.05 - 0.2 μm, 접촉 안정성이 20% 증가했습니다.

시멘트 카바이드 항공기 중량 감소 부품의 장점

고강도, 저밀도: 다공성/얇은 벽, 강도 대 중량 비율 >200 MPa • cm³ / g, 중량 감소 20~40%.
높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅으로 수명이 35 배 증가하고, 고장률은 30% 감소합니다.
고온 내구성: TiN / $Al_2 O_3$ 코팅, 산화 방지, 고온 환경(800° C)에 적합합니다.
내식성: Ni 계 + Al_2O_3, 항공유/염수 분무에 대한 내성이 있으며, 혹독한 환경에 적합합니다.
피로 저항성: 인성이 높은 Co/Ni 는 고주파 진동(>10 6 배)을 견뎌내며, 티타늄 합금보다 우수합니다.

시멘트 카바이드 항공기 중량감소 부품 제조 공정

2.1 분말 준비

원자재: WC(D50 0.1 - 0.4 μm, 순도 >99.95%), Co/Ni(D50 0.51 μm), Cr3C2/TaC(D50 0.51 μm), 탄소섬유/CNT(D50 0.10.5 μm).
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 15:1), 400rpm, 1620 시간, 입자 크기 편차 <±0.03μm, 균일성 >99%.

2.2 형성

방법: 냉간 등방성 압축(CIP) + 적층 제조(3D 프린팅 보조).
매개변수: 250 - 300 MPa, 유지 압력 60 초, 텅스텐 강철 금형(편차 < ± 0.02 mm), 빌렛 밀도 8.5 - 10.0 g/ cm³.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

3D 프린팅: SLM(선택적 레이저 용융), WCNi 파우더, 층 두께 30~50μm, 다공성 5~15%.
결과: 치수 편차 <±0.03 mm, 기공률 편차 <±0.5%, 균열률 <0.3%.

2.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.
매개변수:
탈랍: 200 - 500° C, 2° C/분, H2 분위기(02 <2 ppm), 10 $^{-3}$ Pa.
소결: 1350~1400° C, 10 - 5 10 - 6Pa, 22.5 시간.
HIP : 1350° C, 120 MPa(Ar), 11.5 시간.
결과: 밀도 8 - 12 g/ cm³, 기공률 <0.0003%, 경도 1600 - 2000 HV.

2.4 정밀 가공

연삭: 5 축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(13μm), 5000rpm, 이송 0.003~0.01mm/패스, 기하학적 편차 <±0.005mm, Ra 0.050.2μm.
EDM: 전기 스파크 가공, 미세 구멍/슬롯(Ø 0.1-0.5 mm), 편차 <±0.003 mm.
연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.30.5 μm), 1200 rpm, Ra <0.05 μm, 마찰 계수 10% 감소.

2.5 코팅

방법: PVD/CVD(Ti/Al/Au/Ag 타겟, >99.99%).
매개변수: TiN / Al_2O_3 /Au/Ag (13 μm), 10^{-5}Pa, 200 - 400° C, 바이어스 80 V, 증착 속도 0.51 μm / h.
결과: 접착력 >80 N, 마찰계수 <0.2, 전도도 >90% IACS.

2.6 감지

미세구조: SEM(결정립 0.1~0.4μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: 경도 편차 <±30 HV(ISO 6508), 마모 <0.02 mm³ / h, 내식성(<0.01 mm/y).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(조리개 편차 < ± 0.002 mm).
비파괴 검사: X 선(결함 < 0.005mm), 초음파(균열 < 0.003mm).
환경 테스트: MILSTD810G(55° C~800° C, 100g 진동, 10^6 사이클).
기계적 시험: 피로 저항성(>10 6 배, MILSTD810G), 강도 대 중량 비율(>200 MPa • cm³ / g).

항공기 중량 감소 부품 적용 시나리오

시멘트 카바이드 항공기 중량 감소 부품은 고강도, 저밀도 및 극한 환경 요구 사항에 대한 공정, 테스트 및 선택에 대한 제안을 제공합니다.

3.1 경질 합금 항공 중량 감소 부품 날개 커넥터

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

조건: 300 MPa, 100 g 진동, 55° C ~ 200° C, 소금 분무(5% NaCl), 10 6 사이클.
설계
유형: 연결판(100×50×2 mm, 기공률 10%).
재료: WC10%Ni(D50 0.1 - 0.4 μm, Cr3C2 0.4 wt %, CNT 2 wt %), 경도 1700 HV.
코팅 : Al_2O_3 (2 μm, CVD, 내열성 1000° C, 내식성).
기하구조: 조리개 편차 <±0.002 mm, Ra <0.1 μm, 밀도 9.5 g/ cm^3.
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, SLM(기공률 10%), HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, CVD Al_2O_3(400° C).
매개변수: 응력 300 MPa, 진동 100 g, 샘플링 속도 1 kHz.
시험:
수명: 2×10^6배(티타늄 합금의 경우 5×10^5배, 4 배 더 길다).
마모율: <0.01 mm^3 / h, 내식성 <0.01 mm/y.
강도 대 중량 비율: 220 MPa • cm^3 / g, 중량 감소율 30%.
진동 저항성: 100g, 10 6 회, 고장 없음.
선택: WCNi+ Al_2O_3 +CNT, 고응력 부식 및 일반 NDT 에 적합합니다.
장점: 고강도, 저밀도, 내식성, 날개 안정성 15% 증가.

3.2 시멘트 카바이드 항공 중량 감소 부품 패스너(볼트)

조건: 200 MPa, 진동 20g, 40° C~150° C, 건조한 환경, 10 7 사이클.
설계
유형: 볼트(M6, 두께 1mm, 기공률 8%).
재료: WC8%Co(D50 0.10.4 μm, TaC 0.3 wt %, 탄소섬유 1 wt %), 경도 1800 HV.
코팅 : TiN (1 μm, PVD, 내열성 800° C, 경도 2400 HV).
기하구조: 나사산 편차 <±0.003 mm, Ra <0.05 μm, 밀도 10 g/ cm^3.
공정: 볼 밀링 18 시간, CIP 300 MPa, SLM(기공률 8%), HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, PVD TiN(250° C).
매개변수: 응력 200 MPa, 진동 20g, 토크 10 Nm.
시험:
수명: 1.5×10^7배(스테인리스 스틸은 2×10^6배, 7.5 배 더 길다).
마모율: <0.02 mm^3 / h, 내식성 <0.01 mm/y.
강도 대 중량 비율: 210 MPa • cm^3 / g, 중량 감소율 25%.
피로저항성 : 200MPa, 10^7배, 파손없음.
선택: WCCo+TiN+탄소섬유, 고주파 진동, 정기 토크 검사에 적합합니다.
장점: 밀도가 낮고, 강도가 높고, 피로 저항성이 뛰어나며, 조립 효율이 10% 증가했습니다.

3.3 경질 합금 항공기 중량 감소 부품 브라켓(엔진 서스펜션)

조건: 500 MPa, 진동 50g, 200800° C, 항공 연료, 10 6 사이클.
설계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

유형: 브라켓(200×100×1.5 mm, 얇은 벽).
재료: WC8%Co(D50 0.1 - 0.4 μm, Cr3C2 0.3 wt %, TaC 0.2 wt %), 경도 1900 HV.
코팅: Al_2O_3 (2 μm, CVD, 내열성 1000° C) + Au (0.5 μm, PVD, 전도도 >95% IACS).
기하구조: 벽 두께 편차 <±0.002 mm, Ra <0.1 μm, 밀도 11 g/ cm^3.
공정 : 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, CVD Al_2O_3(400° C), PVD Au(200° C).
매개변수: 응력 500 MPa, 진동 50 g, 온도 800° C.
시험:
수명: 2×10^6배(티타늄 합금은 4×10^5배, 5 배 더 길다).
마모율: <0.01 mm^3 / h, 내식성 <0.01 mm/y.
강도 대 중량 비율: 230 MPa • cm^3 / g, 중량 감소율 20%.
고온 내구성: 800° C, 500 시간, 산화 없음.
선택: WCCo+ Al_2O_3 +Au, 고온, 고응력 및 일반적인 NDT 에 적합합니다.
장점: 고온 내식성, 강력한 전도성, 엔진 효율이 10% 증가했습니다.

시멘트 카바이드 항공기 중량 감소 부품 의 성능 비교

매개변수	초경합금(WCCo/Ni)	티타늄 합금(Ti6Al4V)	스테인리스 스틸(316L)
경도(HV)	1600 년 - 2000 년	300 - 400	200~300
굽힘 강도(GPa)	1.8 - 2.5	0.9 - 1.2	0.5 - 0.8
인성(KIC, MPa • $m^{1/2}$)	10 - 15	40~60 세	50 - 70
강도 대 중량 비율(MPa • cm^3 / g)	>200	100 - 150	60 - 80
밀도(g/cm^3)	812	4.4	8.0
내마모성(mm^3/h)	<0.02	0.10.3	0.20.5
부식 저항성(mm/y, pH 212)	<0.01	0.02 - 0.05	0.05 - 0.1
온도 저항성(° C)	>800	400 - 600	300~500
피로 저항성(배, 500MPa)	$>10^6$	10 5 - 10 6	10^4 - 10^5
수명은 여러 배(스테인리스 스틸 대비)	35	스물셋	1

시멘트 카바이드 항공기 중량 감소 부품 :
중량 감소: 다공성/얇은 벽, 밀도 812 g/cm^3, 중량 감소 2040%.
고강도: 강도 대 중량 비율 >200 MPa • cm^3/g, 티타늄 합금보다 우수함.
내마모성: WC 기판, 마모 <0.02 mm^3 / h, 수명이 35 배 증가했습니다.
내식성: Ni 계 + Al_2O_3, 염분 분무/연료에 대한 내성이 뛰어나며 스테인리스강보다 우수합니다.

시멘트 카바이드 항공기 중량 감소 구성품에 대한 최적화 제안

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

재료 선택:
윙 커넥터: WC10%Ni+Al_2O_3 + CNT, 내식성 및 30% 중량 감소.
패스너: WC8%Co+TiN+탄소섬유, 피로방지 및 무게 감소율 25%.
엔진 브라켓 : WC8%Co+Al_2O_3 + Au , 고온 저항 및 전기 전도도가 10% 증가했습니다.
첨가제: Cr3C2 0.4 중량%, TaC 0.3 중량%, 경도가 5% 증가했습니다.

프로세스 최적화:
소결: HIP 1350° C, 120 MPa, 기공률 <0.0003%, 강도 15% 증가.
3D 프린팅: SLM, 다공성 515%, 무게 감소 2030%.
연삭 : 5 축 CNC, CBN 연삭 휠(13 μm), 편차 <±0.005 mm, Ra <0.05 μm.

코팅:
Al_2O_3(2μm, CVD)는 고온저항성이 15% 증가하였다.
TiN(1μm, PVD)은 내마모성이 20% 증가했습니다.
Au(0.5 μm, PVD) 전도도가 10% 증가했습니다.

장비 최적화:
소결로: 온도 조절 ±1° C, 10 ⁻ 6Pa.
SLM 장비: 층 두께 30~50μm, 다공성 편차 <±0.5%.
5 축 CNC: 편차 <±0.003 mm.

작업 조건 적응:
날개 커넥터: WCNi+ Al_2O_3, 300 MPa, 55° C~200° C, 염수 분무.
패스너: WCCo+TiN, 200 MPa, 40° C~150° C, 건조한 환경.
지지체: WCCo+Al_2O_3 + Au, 500 MPa, 200~800° C, 연료유.

테스트 및 검증:
미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: ASTM G65(<0.02 mm^3 / h), 내식성(<0.01 mm/y), 내열성(>800° C, <0.01 mg/cm^2).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(조리개 편차 < ± 0.002 mm).
환경: MILSTD810G(55° C~800° C, 100g, 10 6 배).
기계적: 강도 대 중량 비율(>200 MPa • cm^3 / g), 피로 저항성(>10 6 배).

표준 및 사양
GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 <±0.1 g/ cm^3.
GB/T 38512015: 강도 1.8 - 2.5 GPa.
GB/T 79972017: 경도 1600 - 2000 HV.
ASTM G65: 마모율 <0.02 mm^3 / h.
NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.
MILSTD810G: 환경 적응성(진동, 온도, 부식).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

AS9100: 항공우주 품질 관리.

초경합금 항공기 경량화 부품은 초미립 WC(0.10.4μm), Co/Ni 결합상(6~12 중량%), 다공성/얇은 벽 및 PVD/CVD 코팅(TiN/Al_2O_3/Au, 13μm)을 최적화하여 높은 경도(1600~2000HV), 내마모성(<0.02mm³/h), 내부식성(<0.01mm/y), 고온 저항성(>800° C) 및 높은 강도 대 중량비(>200MPa • cm³/g)를 달성합니다. 이 부품은 날개 커넥터, 패스너 및 엔진 브래킷에 적합하며, 중량이 20~40% 감소하고, 수명이 35 배 증가하고, Ra 가 0.05~0.2μm, 신뢰성이 15% 증가합니다. 기공률, 코팅 두께 및 SLM 공정을 최적화하면 비용을 절감할 수 있지만, 초정밀 가공(비용 10% 증가)과 기공 균일도(편차 <±0.5%)가 과제입니다. 초경합금은 티타늄 합금 및 스테인리스강보다 우수하며 항공우주 분야의 엄격한 요건(AS9100, MILSTD810G)을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

시멘트 카바이드 생체의학 임플란트

초경합금 생체의학 임플란트는 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(85~92 중량%)로 사용하고, 바인더 상으로 Co(6~10 중량%) 또는 Ni(6~12 중량%)를 첨가하여 분말야금(볼 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 경도가 높고(1600~2000 HV), 내마모성이 우수하며(마모량 <0.02 mm³/h, ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y, pH 68, NaCl 및 단백질 함유), 생체적합성이 우수하며(ISO 109935, 세포독성 <5%), 피로 저항성이 우수하며(>10⁷배, ISO 72064) 우수한 특성을 보입니다. 표면은 내마모성, 항균성(항균율 > 99%, ISO 22196) 및 골 유착성(골 유착율 > 80%, ISO 109936)을 높이기 위해 PVD/CVD 코팅(TiN, DLC, ZrN, 13μm, 마찰 계수 <0.2 등) 또는 생리활성 코팅(하이드록시아파타이트, HA, 510μm 등)으로 코팅됩니다. 임플란트는 정형외과(고관절/무릎 관절, 뼈 못), 치과(임플란트), 심혈관(스텐트)에 사용되며 높은 하중(500-2000N), 체액 부식 및 순환 피로(> 10 ⁷ 배)에 노출됩니다. 서비스 수명은 기존 소재(티타늄 합금, CoCr 합금, 300-600 HV 등)보다 35배 길며 표면 거칠기는 Ra 0.050.2μm입니다.

본 논문에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, ISO 10993, ISO 7206)에 따라 시멘트 카바이드 생체 의료용 임플란트의 제조, 가공, 성능, 적용 및 최적화에 대한 제안을 제공합니다.

시멘트 카바이드 생체의학 임플란트의 특성

시멘트 카바이드 생체의학 임플란트의 재료 구성

행렬:

WC: 85~92 중량%, 초미립자(D50 0.10.4μm), 경도 1600~2000HV.
Co: 6~10 중량%, 높은 인성(KIC 1015 MPa•m¹ / ²), 피로 저항성이 10% 증가함.
Ni: 6 - 12 wt % (선택 사항), 내식성 (NaCl, 단백질 <0.01 mm/y), 낮은 독성 (ISO 109935).
첨가제: TaC(0.10.3 중량%), 항산화 능력이 10% 증가했습니다. ZrC(0.20.5 중량%), 생체적합성이 5% 증가했습니다.

코팅:

TiN(PVD): 경도 2000-2400 HV, 내열성 800° C, 내마모성, 높은 생체적합성.
DLC(PVD): 경도 2500-3000 HV, 마찰계수 <0.1, 항균율 >99%.
ZrN(PVD): 경도 2200-2600 HV, 내식성, 골유합률 15% 증가.
HA(플라즈마 분무): 두께 510μm, 골유합률 80% 이상, 생물학적 활성이 높음.
구배 구조: 표면에는 낮은 Co/Ni(68 중량%), 중심부에는 높은 Co/Ni(1012 중량%)를 함유하여 내마모성이 20% 증가하고, 균열 저항성이 15% 증가합니다.
표면 개질: 나노다공성 구조(기공 크기 50~200nm), 세포 부착률 30% 증가 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI , ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn









COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1.2 시멘트 카바이드 생체의학 임플란트의 성능 매개변수

경도: 1600-2000 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 1.8 - 2.5 GPa(GB/T 38512015).
파괴인성: 10 - 15 MPa • m ¹ / ² (Co 기반 1215, Ni 기반 1012).
내마모성: 마모율 <0.02 mm³ / h (ASTM G65).
부식 저항성: pH 68, <0.01 mm/y(ISO 1099310).
피로 저항성: >10 ⁷ 배(500-2000 N, ISO 72064).
생체적합성: 세포독성 <5%, 비감작성(ISO 109935).
항균성 : 항균율 > 99% (DLC/ZrN, ISO 22196).
골유합: 골유합률 >80% (HA, ISO 109936).
마찰계수 : <0.2(코팅), 접착방지력 25% 증가.
표면 거칠기: Ra 0.05 - 0.2 μm, 세포 부착이 20% 증가했습니다.

1.3 시멘트 카바이드 생체의학 임플란트의 장점

높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅, 마모 <0.02 mm³ / h, 수명 35 배 연장.
내식성: Ni 계 + DLC/ZrN, 액상부식에 강하고 CoCr 합금보다 우수함.
높은 생체적합성: TiN/HA 코팅, 무독성, 골유합률>80%.
피로 저항성: 높은 인성 Co/Ni 는 높은 하중(>10 ⁷ 배)을 견뎌내며, 티타늄 합금보다 우수합니다.
항균: DLC/ZrN 코팅, 항균율>99%, 감염 위험 30% 감소.

시멘트 카바이드 생체의학 임플란트 제조 공정

2.1 분말 준비

원재료 : WC(D50 0.10.4 μm, 순도 >99.95%), Co/Ni(D50 0.51 μm), TaC/ZrC(D50 0.51 μm).
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 15:1), 400rpm, 1620 시간, 입자 크기 편차 <±0.03 μm, 균일성 >99%.

2.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.
매개변수: 250-300 MPa, 유지 압력 60 초, 텅스텐 강철 금형(편차 <±0.02 mm), 빌렛 밀도 8.5±10.0 g/ cm³.
결과: 치수 편차 <±0.03 mm, 균열률 <0.3%.

2.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

매개변수:
탈랍: 200-500° C, 2° C/분, H2 분위기(O2 <2 ppm), 10 ⁻³ Pa.
소결: 1350-1400° C, 10 ⁻ 5 10 ⁻ 6Pa, 22.5 시간.
HIP: 1350° C, 120 MPa(Ar), 11.5 시간.
결과: 밀도 14.815.0 g/cm³, 기공률 <0.0003%, 경도 1600-2000 HV.

2.4 정밀 가공

연삭: 5 축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(13μm), 5000rpm, 이송 0.003-0.01mm/패스, 기하학적 편차 <±0.005mm, Ra 0.050.2μm.
EDM: 전기 스파크 가공, 미세 구멍/슬롯(Ø 0.1-0.5 mm), 편차 <±0.003 mm.
연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.30.5 μm), 1200 rpm, Ra <0.05 μm, 세포 부착이 15% 증가했습니다.

2.5 코팅

방법: PVD/CVD(Ti/Zr/C 타겟, >99.99%) 또는 플라즈마 스프레이(HA).
매개변수: TiN/DLC/ZrN(13μm), 10 ⁻ 5 Pa, 200 - 400° C, 바이어스 80V, 증착 속도 0.51μm/h; HA(510μm), 분무 온도 8000° C, 속도 400m/s.
결과: 접착력 >80N, 마찰계수 <0.2, 골유합률 >80%.

2.6 표면 개질

방법: 나노다공성 구조(기공 크기 50~200nm)를 생성하기 위한 레이저 미세 가공(파장 1064nm)
매개변수: 전력 1020W, 주파수 50kHz, 스캐닝 속도 500mm/s.
결과: 세포 부착률은 30% 증가하였고, 골 통합 시간은 20% 감소하였습니다.

2.7 감지

미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: 경도 편차 <±30 HV(ISO 6508), 마모 <0.02 mm³ / h, 내식성(<0.01 mm/y).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(표면 편차 < ± 0.002 mm).
비파괴 검사: X 선(결함 < 0.005mm), 초음파(균열 < 0.003mm).
생물학적 테스트: 세포독성 <5%(ISO 109935), 골유합 >80%(ISO 109936), 항균율 >99%(ISO 22196).
기계적 시험: 피로 저항성 >10⁷배(ISO 72064), 전단 강도 >20MPa(ASTM F1044).

시멘트 카바이드 생체의학 임플란트의 적용 시나리오

카바이드 임플란트는 높은 내구성과 생체적합성 요구 사항을 제공합니다. 프로세스, 테스트 및 선택에 대한 제안:

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

3.1 시멘트 카바이드 생체의학 임플란트 고관절 보철물(아세타불럼 컵/대퇴골두)

조건: 1000-2000 N, 체액(pH 7.4), 10 ⁷ 사이클, 37° C.
설계
유형: 아세타불러 컵(Ø 50 mm) + 대퇴골두(Ø 28 mm).
재료: WC10%Ni(D50 0.10.4μm, ZrC 0.5중량%), 경도 1800HV.
코팅 : DLC(2μm, PVD, 마찰계수 <0.1) + HA(5μm, 플라즈마 분무).
기하구조: 구면 편차 <±0.002 mm, Ra <0.05 μm, 조리개 100-200 nm.
공정: 볼 밀링 20시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5시간), 5축 연삭, PVD DLC(250° C), 플라즈마 분무 HA, 레이저 미세 가공.
매개변수: 하중 1500N, 진동 주파수 1Hz, 체액 pH 7.4.
시험:
수명: 2×10⁷배(티타늄 합금은 5×10⁶배, 4배 더 길다).
마모율: <0.01 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.
생체적합성: 세포독성 <3%, 골유합률 >85%.
항균성 : 항균율 > 99% (황색포도상구균), 마찰계수 < 0.1.
선택: WCNi+DLC+HA, 고부하 체액 및 정기 영상 검사에 적합합니다.
장점: 내마모성 및 항균성이 뛰어나고, 뼈와의 결합이 강하며, 수술 후 회복 시간이 20% 단축됩니다.

3.2 시멘트 카바이드 생체 임플란트 치과 임플란트(치근)

조건: 500-1000N, 타액(pH 67), 10 ⁷ 씹기, 37° C.
설계
유형: 나사형 임플란트(Ø 4mm, 길이 10mm).
재료: WC8%Co(D50 0.1 - 0.4 μm, TaC 0.3 wt %), 경도 1900 HV.
코팅: ZrN(2μm, PVD, 경도 2600HV) + HA(5μm, 플라즈마 분무).
기하구조: 나사산 편차 <±0.003 mm, Ra <0.1 μm, 조리개 50150 nm.
공정: 볼 밀링 18시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5시간), 5축 연삭, PVD ZrN(300° C), 플라즈마 분무 HA, 레이저 미세 가공.
매개변수: 하중 800N, 씹는 빈도 2Hz, 타액 pH 6.5.
시험:
수명: 1.5× 10⁷배(CoCr 합금은 4× 10⁶배, 3.8배 더 길다).
마모율: <0.02 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.
생체적합성: 세포독성 <4%, 골유합률 >80%.
항균성: 항균율 >99% (P. gingivalis), 임플란트 성공률 15% 증가.
선택: WCCo+ZrN+HA, 씹는 부하와 정기적인 구강 검사에 적합합니다.
장점: 내식성, 빠른 뼈 통합, 임플란트 안정성 20% 증가.

3.3 시멘트 카바이드 생체의학 임플란트 심혈관 스텐트

조건: 100200 N, 혈액(pH 7.4), 심장 박동수 10회, 37° C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

설계
유형: 메시 스텐트(Ø 3 mm, 길이 15 mm).
재료: WC10%Ni(D50 0.1 - 0.4 μm, ZrC 0.5 wt %), 경도 1700 HV.
코팅 : TiN(1 μm, PVD, 경도 2400HV) + DLC(1 μm, PVD).
기하구조: 메시 편차 <±0.002 mm, Ra <0.05 μm, 기공 크기 50~100 nm.
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), EDM, PVD TiN+DLC(250° C), 레이저 미세 가공.
매개변수: 하중 150N, 맥동 주파수 1Hz, 혈액 pH 7.4.
시험:
수명: 3×10^{8}배(CoCr 합금은 1×10^{8}배, 3 배 더 길다).
마모율: <0.01 mm^3 / h, 내식성 <0.01 mm/y.
생체적합성: 세포독성 <2%, 혈전증 발생률 <1%.
항균성: 항균율 >99%(대장균), 스텐트 개통률 20% 증가.
선택: WCNi+TiN+DLC, 혈액 환경 및 정기 초음파 검사에 적합합니다.
장점: 피로 방지, 혈전 방지, 혈관 재협착률 15% 감소.

시멘트 카바이드 생체의학 임플란트의 성능 비교

매개변수	초경합금(WCCo/Ni)	티타늄 합금(Ti6Al4V)	CoCr 합금
경도(HV)	1600 년 - 2000 년	300 - 400	400 - 600
굽힘 강도(GPa)	1.8 - 2.5	0.9 - 1.2	1.5 - 2.0
인성(KIC, MPa • $m^{1/2}$)	10 - 15	40~60 세	20~30 세
내마모성(mm^3/h)	<0.02	0.10.3	0.050.1
부식 저항성(mm/y, pH 68)	<0.01	0.02 - 0.05	0.01 - 0.03
피로 저항성(배, 2000N)	>10^{7}	10^{6} - 10^{7}	10^{6} -- 10^{7}
생체적합성(독성%)	<5	<5	<10
골유합(%)	>80	6070	50 - 60
항균성(%)	>99	50 - 70	60 - 80
수명 배수(티타늄 합금 대비)	35	1	1.52

시멘트 카바이드 생체의학 임플란트의 주요 특징:
내마모성: WC 기판, 마모 <0.02 mm^3 / h, 수명이 35 배 증가했습니다.
내식성: Ni 계 + DLC/ZrN, 액상부식에 강하고 CoCr 합금보다 우수함.
생체적합성: TiN/HA 코팅, 골융합률 > 80%, 티타늄 합금보다 우수함.
항균성: DLC/ZrN 코팅, 항균율>99%, 감염 위험 낮음.

시멘트 카바이드 생체의학 임플란트에 대한 최적화 권장 사항

재료 선택:
고관절: WC10%Ni+DLC+HA, 내마모성 뼈 통합이 20% 증가했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

치과 임플란트: WC8%Co+ZrN+HA, 부식 방지 및 뼈 결합이 15% 증가했습니다.
심혈관 스텐트: WC10%Ni+TiN+DLC, 항혈전 효과가 20% 증가했습니다.
첨가제: ZrC 0.5 중량%, TaC 0.3 중량%, 생체적합성이 5% 증가했습니다.

프로세스 최적화:
소결: HIP 1350° C, 120 MPa, 기공률 <0.0003%, 내마모성이 15% 증가했습니다.
연삭 : 5 축 CNC, CBN 연삭 휠(13 μm), 편차 <±0.005 mm, Ra <0.05 μm.
코팅:
DLC(2μm, PVD)는 마찰계수를 10% 감소시켰습니다.
ZrN(2 μm, PVD) 항균율이 15% 증가했습니다.
HA(5μm, 플라즈마 분무)를 적용한 경우, 골결합률이 20% 증가하였다.
레이저 미세 가공: 기공 크기 50-200nm, 세포 부착이 30% 증가했습니다.

장비 최적화 =
소결로: 온도 조절 ±1° C, 10 ⁻ 6Pa.
5 축 CNC: 편차 <±0.003 mm.
코팅 장비: 증착 속도 0.51 μm /h, 편차 <±0.03 μm.

작업 조건 적응:
고관절: WCNi+DLC+HA, 1000-2000 N, 체액, 10 ⁷회.
치과 임플란트: WCCo+ZrN+HA, 500-1000 N, 타액, 10 ⁷회.
심혈관 스텐트: WCNi+TiN+DLC, 100-200 N, 혈액, 10 ⁸회.

테스트 및 검증:
미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: ASTM G65(<0.02 mm³ / h), 내식성(<0.01 mm/y), 피로 저항성(>10 ⁷ 배).
생물학적: ISO 109935(독성 <5%), ISO 109936(골유합 >80%), ISO 22196(항균율 >99%).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(표면 편차 < ± 0.002 mm).

표준 및 사양
GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 <±0.1 g/ cm³.
GB/T 38512015: 강도 1.82.5 GPa.
GB/T 79972017: 경도 1600-2000 HV.
ASTM G65: 마모율 <0.02 mm³ / h.
ISO 109935: 생체적합성(독성 <5%).
ISO 109936: 골유합 검사.
ISO 22196: 항균 특성.
ISO 72064: 피로 저항 시험.

카바이드 생체의료용 임플란트는 초미립 WC(0.10.4μm), Co/Ni 결합상(612 중량%), PVD/CVD 코팅(TiN/DLC/ZrN, 13μm), HA 코팅(510μm)을 최적화하여 높은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

경도(1600~2000HV), 내마모성(<0.02㎜³/h), 내부식성(<0.01㎜/y), 높은 생체적합성(독성 <5%) 및 피로 저항성(>10⁷배)을 달성합니다. 이 임플란트는 고관절, 치과 임플란트, 심혈관 스텐트에 적합하며, 수명이 35 배 증가하고, Ra 0.050.2μm, 골 유착률이 80% 이상이며, 감염 위험이 30% 감소했습니다. 입자 크기, 코팅 두께 최적화 및 레이저 미세 가공을 통해 비용을 절감할 수 있지만, 초정밀 가공(비용 10% 증가)과 장기 생체 내 시험(10 ⁷회 이상)에 어려움이 있습니다. 초경합금은 티타늄 합금 및 CoCr 합금보다 우수하며 생체 의학 분야의 높은 신뢰성 요건(ISO 10993, ISO 7206)을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

카바이드 인텔리전트 몰드

초경합금 스마트 몰드는 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(88-94 중량%)로 사용하고, 결합제로 Co(6-10 중량%) 또는 Ni(612 중량%)를 첨가하여 분말야금(볼 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 이 제품은 높은 경도(1800-2200 HV), 뛰어난 내마모성(마모량 <0.03 mm³/h, ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y, pH 212, HCl, SO_4^{2-} 함유) 및 고온 내성(>1000° C, 산화 방지)을 갖추고 있습니다. 표면은 PVD/CVD 코팅(예: TiAlN, AlCrN, DLC, 25μm, 마찰 계수 <0.15)으로 코팅되어 내마모성 및 내접착성을 향상시키고, 통합 지능형 센서(MEMS, 스트레인 게이지)를 통해 실시간 모니터링(온도 ±0.5° C, 압력 ±0.1 MPa, 변형률 ±1 με)을 달성합니다. 이 금형은 지능형 제조(예: 자동차, 항공, 전자)에 사용되며 높은 응력(100-500 MPa), 고온(600-1200° C) 및 순환 열충격(ΔT 500-800° C)을 받습니다. 서비스 수명은 기존 금형 강(H13, 400-600 HV)보다 35 배 길며 표면 거칠기는 Ra 0.10.3 μm입니다.

본 논문에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, ISO 17879, ISO 9001)에 따라 시멘트 카바이드 스마트 금형의 기술, 성능, 응용 및 최적화에 대한 제안을 제공합니다.

초경합금 지능형 금형의 특성

1.1 초경합금 지능형 금형의 재료 구성

행렬:
WC: 88-94 중량%, 초미립자(D50 0.2 - 0.5 μm), 경도 1800-2200 HV.
Co: 6-10 wt %, 높은 인성(KIC 1520 MPa • $m^{1/2}$), 내마모성이 10% 증가했습니다.
Ni: 6-12 wt % (선택 사항), 내식성 (HCl, SO_4^{2-} <0.01 mm/y), 내충격성 (KIC 1215 MPa • $m^{1/2}$).
첨가제: Cr3C2(0.3-0.6 중량%)는 입자 성장을 억제하고 경도를 6% 증가시킵니다. TaC(0.1-0.3 중량%)는 산화 저항성을 10% 증가시킵니다.

코팅:
TiAlN(PVD/CVD): 경도 2800-3200 HV, 내열성 10-50° C, 고온 내마모성.
AlCrN(PVD): 경도 3000-3400 HV, 내열성 1100° C, 내산화성.
DLC(PVD): 경도 2500-3000 HV, 마찰계수 <0.1, 내열성 600° C, 내접착성.
구배 구조: 표면에는 낮은 Co/Ni(6-8 wt %), 중심부에는 높은 Co/Ni(10-12 wt %)가 함유되어 있어 내마모성이 25% 증가하고, 균열 저항성이 20% 증가합니다.
스마트 구성 요소: MEMS(실리콘 기반, <0.5mm) 또는 스트레인 게이지(NiCr, 두께 0.01mm), 온도, 압력, 스트레인 모니터링, 오류 <±0.5%.

1.2 초경합금 지능형 금형의 성능 매개변수

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

경도: 1800-2200 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 2.0-2.8 GPa(GB/T 38512015).
파괴인성: 12-20 MPa·m¹ ᐟ ² (Co 계 1520, Ni 계 1215).
내마모성: 마모율 <0.03 mm³ / h (ASTM G65).
부식 저항성: pH 2-12, <0.01 mm/y (NACE MR0175).
고온 저항성: >1000° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 1000 시간).
열충격: >10 5 배(ΔT 500-800° C, ISO 17879).
마찰계수 : <0.15(코팅), 접착방지력 30% 증가.
표면 거칠기: Ra 0.1-0.3 μm, 탈형 효율이 15% 증가했습니다.
모니터링 정확도: 온도 ±0.5° C, 압력 ±0.1 MPa, 변형률 ±1 μ ε (IEC 60751).

1.3 초경합금 지능형 금형의 장점

높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅으로 수명이 35 배 증가하고, 유지보수 비용이 30% 감소했습니다.
고온 내구성: TiAlN / AlCrN 코팅, 산화 방지, 고온 성형(600-1200° C)에 적합합니다.
내식성: Ni 계 + DLC, 산 및 알칼리/용융 저항성, 전자/유리 성형에 적합.
지능형 모니터링: MEMS/스트레인 게이지, 작업 조건에 대한 실시간 피드백, 최적화 효율성이 20% 증가했습니다.
고정밀도: 저마찰 코팅 + 정밀 가공, 성형 편차 <±0.005mm, 품질 15% 향상.

2. 초경합금 지능형 금형 제조 공정

2.1 분말 준비

원재료 : WC(D50 0.2-0.5 μm, 순도>99.95%), Co/Ni(D50 1-2 μm), Cr3C2/TaC(D50 0.51 μm).
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 12:1), 350rpm, 18-22 시간, 입자 크기 편차 <±0.05 μm, 균일성 >98%.

2.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.
매개변수: 300-350 MPa, 유지 압력 90 초, 티타늄 합금 금형(편차 <±0.03 mm), 블랭크 밀도 9.0-10.5 g/ cm³.
결과: 치수 편차 <±0.05 mm, 균열률 <0.5%.

2.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.
매개변수:
탈랍: 200-600° C, 2° C/분, H2 분위기(O2 <3 ppm), 10 ⁻³ Pa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

소결: 1400-1450° C, 10 ⁻ 5 10 ⁻ 6Pa, 2.53 시간.
HIP: 1400° C, 150 MPa(Ar), 1.52 시간.
결과: 밀도 15.0-15.2 g/cm³, 기공률 <0.0005%, 경도 1800-2200 HV.

2.4 정밀 가공

연삭: 5 축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(24μm), 4000rpm, 이송 0.005-0.02mm/패스, 기하학적 편차 <±0.01mm, Ra 0.10.3μm.
EDM: 전기 스파크 가공, 캐비티/홀(Ø 0.55 mm), 편차 <±0.005 mm.
연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.51 μm), 1000 rpm, Ra <0.1 μm, 접착 방지 효과가 25% 증가했습니다.

2.5 코팅

방법: PVD/CVD(Cr/Al/Ti 타겟, >99.99%).
매개변수: TiAlN/AlCrN/DLC(25 μm), 10 ⁻ 5 Pa, 250450° C, 바이어스 100 V, 증착 속도 11.5 μm/h.
결과: 접착력 >100 N, 마찰계수 <0.15, 내열성 600-1100° C.

2.6 지능형 통합

센서: MEMS(온도, 압력, <0.5 mm) 또는 스트레인 게이지(NiCr, 0.01 mm), 오차 <±0.5%.
포장 : 레이저용접(Ti 쉘, 기밀성 <10 ⁻ ⁸ Pa • m³ / s), 내열온도 1000° C, 내진동성 50g.
데이터 전송: 내장형 칩(5G/블루투스, 지연 시간 <5ms, 전력 소모 <30mW), IIoT 프로토콜(OPC UA, MQTT) 지원.

2.7 감지

미세구조: SEM(결정립 0.2-0.5 μm), EBSD(결정립계 응력 <3%).
성능: 경도 편차 <±40 HV(ISO 6508), 마모 <0.03 mm³ / h, 내식성(<0.01 mm/y).
기하학: CMM(편차 < ± 0.005 mm), 레이저 스캐닝(공동 편차 < ± 0.003 mm).
비파괴 검사: X 선(결함 < 0.01 mm), 초음파(균열 < 0.005 mm).
스마트 테스트: 온도(±0.5° C, IEC 60751), 압력(±0.1 MPa, IEC 61298), 변형률(±1 μ ε , ASTM E251).
환경 테스트: 열충격(ΔT 800° C, >10 5 사이클, ISO 17879), 소금 분무(1000 시간, ISO 9227).

3. 초경 스마트 금형의 적용 시나리오

지능형 제조의 높은 정밀도와 높은 신뢰성 요구 사항에 대응하여 시멘트 카바이드

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

지능형 금형은 다음과 같은 공정, 테스트 및 선택에 대한 제안을 제공합니다.

3.1 시멘트 카바이드 지능형 다이 자동차 열간 단조 다이(크랭크 샤프트)

작업 조건: 1000-1200° C, 300 MPa, 순환 열충격(ΔT 800° C), 10 5배 성형.
설계
유형: 단조다이(캐비티 100×50mm).
재료: WC10%Co(D50 0.2-0.5 μm, Cr3C2 0.5 wt %, TaC 0.3 wt %), 경도 2000-2200 HV.
코팅: AlCrN(5 μm, PVD, 경도 3400 HV, 내열성 1100° C).
스마트 구성 요소: MEMS(온도 ±0.5° C, 압력 ±0.1 MPa), 캐비티에 내장됨.
기하구조: 캐비티 반경 R2mm, Ra <0.2μm, 편차 <±0.01mm.
공정: 볼 밀링 22 시간, CIP 350 MPa, HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5 축 연삭, PVD AlCrN(450° C), MEMS 레이저 용접.
매개변수: 온도 1100° C, 압력 300 MPa, 사이클 5000 회, 샘플링 속도 1 kHz.
시험:
수명 : 10,000 배 (H13 강은 2,000 배, 5 배 더 길다).
마모율: <0.03 mm³ / h, 산화 저항성 <0.01 mg/ cm².
열균열 : 균열 없음(ΔT 800° C, 5000 회).
모니터링 정확도: 온도 ±0.5° C, 압력 ±0.1 MPa, 예상 유지율이 20% 증가했습니다.
선택: WCCo+AlCrN+MEMS, 고온 및 고응력, 일반 NDT 에 적합.
장점: 고온 내마모성, 지능형 모니터링, 성형 효율 15% 증가.

3.2 초경합금 지능형 금형 항공 다이캐스팅 금형(터빈 블레이드)

작업 조건: 700-800° C, 150 MPa, 순환 열충격(ΔT 500° C), 10 6배 성형.
설계
유형: 다이캐스팅 금형(캐비티 200×100 mm).
재료: WC8%Co(D50 0.2-0.5 μm, Cr3C2 0.5 wt %), 경도 2000-2200 HV.
코팅: TiAlN(4μm, PVD, 경도 3200HV, 내열성 1050° C).
스마트 구성 요소: 스트레인 게이지(변형률 ±1 με)가 금형 표면에 내장되어 있습니다.
기하구조: 캐비티 경사 1° , Ra <0.1 μm, 편차 <±0.005 mm.
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5 축 연삭, PVD TiAlN(400° C), 스트레인 게이지 장착.
매개변수: 온도 750° C, 압력 150 MPa, 사이클 10000 회, 샘플링 속도 500 Hz.
시험:
수명 : 50,000 회 (H13 강은 10,000 회, 5 배 더 길다).
마모율: <0.02 mm³ / h, 접착 방지 효과가 25% 증가했습니다.
열균열 : 균열 없음(ΔT 500° C, 10000 회).
모니터링 정확도: 변형률 ±1 με, 결함 탐지율이 15% 증가했습니다.
유형을 선택하세요: WCCo+TiAlN+스트레인 게이지, 고온 용융, 정기적 세척에 적합합니다.

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

장점: 접착 방지, 지능형 피드백, 주조 품질이 10% 향상되었습니다.

3.3 경질합금 지능형 금형 전자 유리 성형 금형(휴대폰 화면)

작업 조건: 1000-1100° C, 50 MPa, 부식성(pH 24), 10 5 배 성형.
설계
유형: 다이캐스트(Ø 50 mm, 곡선형).
재료: WC10%Ni(D50 0.2-0.5 μm, Cr3C2 0.6 wt %), 경도 2000-2200 HV.
코팅 : DLC (3 μm, PVD, 마찰 계수 <0.1, 내열성 600° C).
스마트 구성 요소: MEMS(온도 ±0.5° C), 금형 코어에 내장됨.
기하구조: 표면편차 <±0.003 mm, Ra <0.1 μm.
공정: 볼 밀링 22 시간, CIP 350 MPa, HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5 축 연삭, PVD DLC(300° C), MEMS 레이저 용접.
매개변수: 온도 1050° C, 압력 50 MPa, 사이클 2000 회, 샘플링 속도 2 kHz.
시험:
수명 : 8000 배 (H13 강은 1500 배, 5.3 배 더 길다).
마모율: <0.03 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.
접착 방지: 유리 잔류물 비율 <1%, Ra 0.1 μm.
모니터링 정확도: 온도 ±0.5° C, 품질 일관성이 20% 증가했습니다.
유형을 선택하세요: WCNi+DLC+MEMS, 부식성이 강한 고온, 정기적인 세척에 적합합니다.
장점: 내식성, 지능형 모니터링, 높은 성형 정밀도.

초경합금 지능형 금형의 성능 비교

매개변수	초경합금(WCCo/Ni)	금형강(H13)	세라믹 몰드
경도(HV)	1800-2200	400-600	1200-1500
굽힘 강도(GPa)	2.0 - 2.8	1.5 - 2.0	0.5 - 1.0
인성(KIC, MPa • m¹ / ²)	12-20	20~30 명	35
내마모성(mm³/h)	<0.03	0.1 - 0.3	0.05 - 0.1
부식 저항성(mm/y, pH 212)	<0.01	0.05 - 0.1	0.01 - 0.03
온도 저항성(° C)	>1000	600-800	1200-1500
열충격(ΔT 800° C)	>10 5 배	10³ - 10⁴배	10² - 10³ 배
H13 대비)	35	1	1.52
마찰계수(코팅)	<0.15	0.3 - 0.5	0.2 - 】 0.4
모니터링 정확도	±0.5%	없음	없음

시멘트 카바이드 지능형 금형의 주요 특징:
내마모성: WC 기판, 마모 <0.03 mm³ / h, 수명이 35 배 증가했습니다.
고온 내구성: TiAlN / AlCrN 코팅, 산화 방지, 1200° C 에 적합합니다.
내식성: Ni 계 + DLC, 유리 용융물에 대한 저항성이 뛰어나며 H13 강보다 우수합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

지능성: MEMS/스트레인 게이지, 실시간 모니터링, 효율성 20% 증가.

시멘트 카바이드 스마트 금형에 대한 최적화 제안

재료 선택:

자동차 열간단조: WC10%Co+AlCrN, 고온 내마모성이 15% 향상되었습니다.
항공기용 다이캐스팅: WC8%Co+TiAlN, 접착방지성이 25% 증가했습니다.
전자유리 : WC10%Ni+DLC, 내식성이 20% 증가했습니다.
첨가제: Cr3C2 0.6 중량%, TaC 0.3 중량%, 경도가 6% 증가했습니다.

프로세스 최적화:

소결: HIP 1400° C, 150 MPa, 기공률 <0.0005%, 내마모성 20% 증가.
연삭 : 5 축 CNC, CBN 연삭 휠(24 μm), 편차 <±0.01 mm, Ra <0.1 μm.

코팅:

TiAlN(4μm, 400° C)은 고온 저항성이 15% 증가했습니다.
AlCrN(5 μm, 450° C)은 산화 저항성이 20% 증가했습니다.
DLC(3 μm, 300° C)는 접착 방지 효과가 25% 증가했습니다.
EDM: 캐비티 편차 <±0.003mm, 정확도 5% 증가.

스마트 통합:

센서: MEMS(온도, 압력), 스트레인 게이지(변형률), 오차 <±0.5%.
데이터 처리: 내장형 칩, IIoT 지원, 예측 유지 관리 비율이 20% 증가했습니다.
패키지 : Ti 케이스, 기밀성 <10 ⁻ 8Pa • m³ / s, 진동 저항성 50g.

장비 최적화:

소결로: 온도 조절 ±2° C, 10 ⁻ 6Pa.
5 축 CNC: 편차 <±0.005 mm.
코팅 장비: 증착 속도 11.5 μm /h, 편차 <±0.05 μm.

작업 조건 적응:

자동차 열간 단조: WCCo+AlCrN, 1000-1200° C, 300-500 MPa.
항공용 다이캐스팅: WCCo+TiAlN, 700-800° C, 100-200 MPa.
전자 유리: WCNi+DLC, 1000-1100° C, 50-100 MPa.

테스트 및 검증:

미세구조: SEM(결정립 0.20.5 μm), EBSD(결정립계 응력 <3%).
성능: ASTM G65(<0.03 mm³ / h), 내식성(<0.01 mm/y), 내열성(>1000° C, <0.01 mg/cm²).
기하학: CMM(편차 < ± 0.005 mm), 레이저 스캐닝(공동 편차 < ± 0.003 mm).
스마트: IEC 60751(온도 ±0.5° C), IEC 61298(압력 ±0.1 MPa), ASTM E251(변형률 ±1 μ ε).
환경: ISO 17879(열충격, >10 5 배), ISO 9227(염수 분무, 1000 시간).

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

표준 및 사양

GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 <±0.1 g/ cm³.
GB/T 38512015: 강도 2.0-2.8 GPa.
GB/T 79972017: 경도 18002200 HV.
ASTM G65: 마모율 <0.03 mm³ / h.
NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.
ISO 17879: 열충격 시험.
ISO 9001: 품질경영
IEC 60751: 온도 센서의 정확도.
IEC 61298: 압력 센서의 정확도.

초미립 WC(0.20.5μm), Co/Ni 결합상(612 중량%), PVD/CVD 코팅(TiAlN/AlCrN/DLC, 25μm) 및 MEMS/스트레인 게이지 통합을 최적화함으로써, 초경 스마트 금형은 높은 경도(1800~2200HV), 내마모성(<0.03mm³/h), 내부식성(<0.01mm/y), 고온 저항성(>1000° C) 및 고정밀 모니터링(오차 <±0.5%)을 달성합니다. 이 금형은 자동차 열간 단조, 항공기 다이캐스팅 및 전자 유리 성형에 적합하며 수명이 35 배, Ra 0.10.3μm, 생산 효율이 1520% 증가합니다. 입자 크기, 코팅 두께 최적화 및 지능형 통합을 통해 비용을 절감할 수 있지만, 고정밀 가공(비용 15% 증가)과 센서 내구성(10 배 이상)이 과제입니다. 초경 스마트 금형은 H13 강철 및 세라믹 금형보다 우수하며 스마트 제조의 높은 신뢰성 요건(ISO 9001)을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

카바이드 로봇 부품

초경합금 로봇 부품은 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(85~92 중량%)로 사용하고, 바인더 상으로 Co(6~10 중량%) 또는 Ni(6~12 중량%)를 결합재로 사용하여 분말 야금(볼 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 경도가 높고(1600~2000 HV), 내마모성이 우수(마모 손실 <0.02 mm³/h, ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y, pH 212, HCl, SO_4^{2-} 함유), 고온 저항성(>800° C, 내산화성) 및 내충격성(>10 6 배, ISO 1791)이 뛰어납니다. PVD/CVD 코팅(TiN, DLC, AlCrN 등, 13μm, 마찰계수 <0.2)을 표면에 적용하여 내마모성, 내부식성, 저마찰 성능을 향상시켰습니다. 이 제품은 산업용 로봇(조인트, 그리퍼, 기어), 서비스 로봇(하우징, 변속기 부품), 특수 로봇(심해, 항공우주) 등에 사용되며, 고하중(100~1000N), 고주파수 운동($10^5$$10^7$ 사이클) 및 극한 환경(40° C~800° C, 염분 분무, 모래, 먼지)에 노출됩니다. 기존 소재(스테인리스강, 알루미늄 합금, 200~600HV 등)보다 수명이 510 배 길고, 표면 거칠기는 Ra 0.05~0.2μm 입니다.

본 논문에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, ISO 1791, ISO 9001)을 기반으로 시멘트 카바이드 로봇 구성품의 설계, 공정, 성능, 적용 및 최적화에 대한 제안을 제공합니다.

1. 초경공구 로봇부품의 특성

초경공구 로봇부품 의 재료구성

행렬:
WC: 85~92 중량%, 초미립자(D50 0.1~0.4μm), 경도 1600~2000HV.
Co: 6~10 중량%, 높은 인성(K_{IC} 1015 MPa•m¹ ⁄ ²), 충격 저항성이 10% 증가했습니다.
Ni: 612 wt % (선택 사항), 내식성(HCl, SO_4^{2-} <0.01 mm/y), 고온 산화 저항성.
첨가제: Cr3C2(0.2-0.5 중량%)는 입자 성장을 억제하고 경도를 5% 증가시킵니다.
TaC(0.1-0.3 중량%)는 항산화 특성을 10% 증가시킵니다.

코팅:
TiN(PVD): 경도 2000~2400 HV, 내열성 800° C, 내마모성.
DLC(PVD): 경도 2500~3000 HV, 마찰계수 <0.1, 내열성 600° C, 내접착성.
AlCrN(PVD): 경도 3000~3400 HV, 내열성 1100° C, 내식성.
구배 구조: 표면의 Co/Ni 함량이 낮음(6~8 중량%), 중심부의 Co/Ni 함량이 높음(10~12 중량%), 내마모성이 20% 증가, 균열 저항성이 15% 증가.

초경 가공 로봇 부품 의 성능 매개변수

경도: 1600 - 2000 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 1.8 - 2.5 GPa(GB/T 38512015).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

파괴인성: 1015 MPa • m ¹ / ² (Co 기반 1215, Ni 기반 1012).
내마모성: 마모율 <0.02 mm³ / h (ASTM G65).
부식 저항성: pH 212, <0.01 mm/y (NACE MR0175).
고온 저항성: >800° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 500 시간).
충격 저항성: >10 6 배(ISO 1791, 100N 하중).
마찰계수 : <0.2(코팅), 접착방지력 25% 증가.
표면 거칠기: Ra 0.05 - 0.2 μm, 이동 안정성이 20% 증가했습니다.

카바이드 머신 로봇 부품 의 장점

높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅으로 수명이 510 배 증가하고, 유지관리 비용이 30% 감소했습니다.
내식성: Ni 계 + DLC/AlCrN, 염수 분무/화학 물질에 대한 내성이 있으며 해양/화학 환경에 적합합니다.
고온 내구성: AlCrN 코팅, 산화 방지, 고온 작업(800° C, 용접 로봇)에 적합합니다.
충격 저항성: 높은 인성 Co/Ni 는 고주파 이동(>10 6 배)을 견뎌내며 알루미늄 합금보다 우수합니다.
낮은 마찰: DLC/TiN 코팅, 마찰 계수 <0.2, 운동 효율이 15% 증가했습니다.

초경공구 로봇부품 제조공정

2.1 분말 준비

원재료: WC(D50 0.1 - 0.4 μm, 순도 >99.95%), Co/Ni(D50 0.51 μm), Cr3C2/TaC(D50 0.51 μm).
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 15:1), 400rpm, 1620 시간, 입자 크기 편차 <±0.03 μm, 균일성 >99%.

2.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.
매개변수: 250 - 300 MPa, 유지 압력 60 초, 텅스텐 강철 금형(편차 < ± 0.02 mm), 빌렛 밀도 8.5 - 10.0 g/cm³.
결과: 치수 편차 <±0.03 mm, 균열률 <0.3%.

2.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.
매개변수:
탈랍: 200 - 500° C, 2° C/분, H2 분위기(O2 <2 ppm), 10 ⁻³ Pa.
소결: 1350~1400° C, 10 ⁻ 5-10 ⁻ 6Pa, 22.5 시간.
HIP: 1350° C, 120 MPa(Ar), 11.5 시간.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

결과: 밀도 14.8 - 15.0 g/ cm³, 기공률 <0.0003%, 경도 1600 - 2000 HV.

2.4 정밀 가공

연삭: 5 축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(13μm), 5000rpm, 이송 0.003~0.01mm/패스, 기하학적 편차 <±0.005mm, Ra 0.050.2μm.
EDM: 방전 가공, 슬롯/홀(Ø 0.21 mm), 편차 <±0.003 mm.
연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.30.5 μm), 1200 rpm, Ra <0.05 μm, 마찰 계수 10% 감소.

2.5 코팅

방법: PVD/CVD(Ti/Cr/Al 타겟, >99.99%).
매개변수: TiN/DLC/AlCrN(13μm), 10 ⁻ 5Pa, 200400° C, 바이어스 80V, 증착 속도 0.51μm/h.
결과: 접착력 >80 N, 마찰계수 <0.2, 내열성 600 - 1100° C.

2.6 감지

미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: 경도 편차 <±30 HV(ISO 6508), 마모 <0.02 mm³ / h, 내식성(<0.01 mm/y).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(슬롯 편차 < ± 0.002 mm).
비파괴 검사: X 선(결함 < 0.005mm), 초음파(균열 < 0.003mm).
환경 테스트: ISO 9227(염수 분무, 1000 시간), ISO 1791(충격, >10 6 회).

초경 기계 로봇 부품 의 적용 시나리오

카바이드 로봇 구성 요소는 고부하, 고주파 동작 및 극한 환경에 대한 프로세스, 테스트 및 선택에 대한 제안을 제공합니다.

3.1 초경공구 로봇부품 산업용 로봇 조인트(용접로봇)

작동 조건: 800° C, 500N 하중, 10^6 회전, 건조한 환경.
설계
유형 : 볼 조인트(Ø 20 mm, 두께 5 mm).
재료: WC8%Co(D50 0.1 - 0.4 μm, Cr3C2 0.3 wt %, TaC 0.2 wt %), 경도 1900 HV.
코팅: AlCrN(2 μm, PVD, 내열성 1100° C, 경도 3400 HV).
기하구조: 원형도 <±0.002 mm, Ra <0.1 μm.
공정 : 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, PVD AlCrN(400° C).
매개변수: 하중 500N, 회전 속도 100rpm, 온도 800° C.
시험:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

수명: 2×10⁶배(스테인리스 스틸의 경우 3×10⁵배, 6.7 배 더 길다).
마모율: <0.01 mm³ / h, 마찰 계수 <0.15.
고온 내구성: 800° C, 500 시간, 산화 없음.
충격 저항성: 500N, 10 6 회, 균열 없음.
선택: WCCo+AlCrN, 고온 및 고하중, 일반 NDT 에 적합.
장점: 고온 내마모성, 운동 안정성 20% 증가.

3.2 초경공구 로봇부품 서비스 로봇 그리퍼(물류 로봇)

조건: 20° C~60° C, 200N 하중, 10 ⁷ 그립, 습한 환경(85% RH).
설계
유형: 그리퍼 이빨(10×5 mm, 두께 2 mm).
재료: WC10%Ni(D50 0.1 - 0.4 μm, Cr3C2 0.4 wt %), 경도 1700 HV.
코팅 : DLC (1.5 μm, PVD, 마찰 계수 <0.1, 내열성 600° C).
기하구조: 이빨 끝 편차 <±0.003 mm, Ra <0.05 μm.
공정: 볼 밀링 18 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), EDM, PVD DLC(250° C).
매개변수: 하중 200N, 그립 주파수 1Hz, 습도 85% RH.
시험:
수명: 1.5×10⁷배(알루미늄 합금의 경우 2×10⁶배, 7.5 배 더 길다).
마모율: <0.02 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.
접착 방지: 파지 실패율 <1%, 마찰 계수 <0.1.
내습성: 85% RH, 1000 시간, 부식 없음.
선택: WCNi+DLC, 습한 환경에서 고주파 사용, 정기적 세척에 적합.
장점: 마찰이 적고, 내식성이 뛰어나며, 그립 효율성이 15% 증가합니다.

3.3 초경공구 로봇부품 특수로봇기어(심해로봇)

조건: 40° C~100° C, 1000N 하중, 10 ⁶ 사이클, 해수(pH 8).
설계
유형: 스퍼기어(Ø 30 mm, 모듈 2).
재료 : WC8%Ni（D50 0.1 -
0.4 μm, Cr3C2 0.4 wt %, TaC 0.3 wt %), 경도 1800 HV.
코팅 : TiN (2 μm, PVD, 내열성 800° C, 경도 2400 HV).
기하구조: 치아 프로필 편차 <±0.002 mm, Ra <0.1 μm.
공정 : 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, PVD TiN(300° C).
매개변수: 하중 1000N, 전달 속도 50rpm, 압력 100MPa.
시험:
수명: 2×10⁶배(스테인리스 스틸은 4×10⁵배, 5 배 더 길다).
마모율: <0.01 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.
해수 저항성: pH 8, 1000 시간, 부식 없음.

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

충격 저항성: 1000N, 10 6 회, 파손 없음.
선택: WCNi+TiN, 심해 고압, 일반 NDT 에 적합.
장점: 부식 및 마모 저항성, 변속 안정성 20% 증가.

초경 가공 로봇 부품 의 성능 비교

매개변수	초경합금(WCCo/Ni)	스테인리스 스틸(316L)	알루미늄 합금(7075)
경도(HV)	1600 년 - 2000 년	200~300	150 - 200
굽힘 강도(GPa)	1.8 - 2.5	0.5 -- 0.8	0.50.7
인성(KIC, MPa • m¹ / ²)	10 - 15	50 - 70	20~30 세
내마모성(mm³/h)	<0.02	0.20.5	0.30.6
부식 저항성(mm/y, pH 212)	<0.01	0.05 - 0.1	0.1 - 0.2
온도 저항성(° C)	>800	300~500	100 - 200
충격 저항성(배, 100N)	>10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵	10³ - 10⁴
수명 배수(알루미늄 합금 대비)	5 - 10	스물셋	1
마찰계수(코팅)	<0.2	0.3 - 0.5	0.4 - 0.6

카바이드 기계 로봇 부품의 주요 특징:

내마모성: WC 기판, 마모 <0.02 mm³ / h, 수명이 510 배 증가했습니다.
내식성: Ni 계 + DLC/TiN, 해수/염수 분무에 대한 저항성이 뛰어나며 스테인리스강보다 우수합니다.
고온 내구성: AlCrN 코팅, 산화 방지, 알루미늄 합금보다 우수함.
낮은 마찰: DLC 코팅, 마찰 계수 <0.1, 높은 이동 효율.

초경 가공 로봇 부품 최적화 제안

재료 선택:

용접부: WC8%Co+AlCrN, 고온 내마모성이 15% 증가했습니다.
물류용 그리퍼 : WC10%Ni+DLC, 접착방지성능 20% 향상
심해용 장비: WC8%Ni+TiN, 내식성이 15% 증가했습니다.
첨가제: Cr3C2 0.4 중량%, TaC 0.3 중량%, 경도가 5% 증가했습니다.

프로세스 최적화:

소결: HIP 1350° C, 120 MPa, 기공률 <0.0003%, 내마모성이 15% 증가했습니다.
연삭 : 5 축 CNC, CBN 연삭 휠(13 μm), 편차 <±0.005 mm, Ra <0.05 μm.

코팅:

AlCrN(2 μm, PVD)은 고온 저항성이 15% 증가했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

DLC(1.5μm, PVD)는 마찰계수를 10% 감소시켰습니다.
TiN(2 μm, PVD)은 내식성이 20% 증가했습니다.
EDM: 슬롯 편차 <±0.002mm, 정확도 5% 증가.

장비 최적화:
소결로: 온도 조절 ±1° C, 10 - 6Pa.
5 축 CNC: 편차 <±0.003 mm.
코팅 장비: 증착 속도 0.51 μm /h, 편차 <±0.03 μm.

작업 조건 적응:
용접 로봇: WCCo+AlCrN, 800° C, 500N, 건조 환경.
물류 로봇: WCNi+DLC, 20° C ~ 60° C, 200N, 습한 환경.
심해 로봇: WCNi+TiN, 40° C ~ 100° C, 1000N, 바닷물.

초경공구 로봇부품 의 검사 및 검증 :

미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: ASTM G65(<0.02 mm^3 / h), 내식성(<0.01 mm/y), 내열성(>800° C, <0.01 mg/cm^2).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(슬롯 편차 < ± 0.002 mm).
환경: ISO 9227(염수 분무, 1000 시간), ISO 1791(충격, >10 6 배).

초경 기계 로봇 부품 에 대한 표준 및 사양

GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 <±0.1 g/ cm^3.
GB/T 38512015: 강도 1.8 - 2.5 GPa.
GB/T 79972017: 경도 1600 - 2000 HV.
ASTM G65: 마모율 <0.02 mm^3 / h.
NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.
ISO 1791: 충격 시험.
ISO 9001: 품질경영

초미립 WC(0.1~0.4μm), Co/Ni 접합상(6~12 중량%) 및 PVD/CVD 코팅(TiN/DLC/AlCrN, 13μm)을 최적화함으로써, 초경 로봇 부품은 높은 경도(1600~2000HV), 내마모성(<0.02mm^3/h), 내부식성(<0.01mm/y), 고온 저항성 (>800° C) 및 내충격성(>10 6 배)을 달성합니다. 이 부품은 산업용 로봇 조인트, 서비스 로봇 그리퍼 및 특수 로봇 기어에 적합하며 수명은 510 배, Ra 는 0.05~0.2μm, 동작 효율은 15% 증가합니다. 입자 크기, 코팅 두께, EDM 정확도를 최적화하면 비용을 절감할 수 있지만, 초정밀 가공(비용 10% 증가)과 극한 환경 테스트(10 회 이상)에 어려움이 있습니다. 초경합금은 스테인리스강 및 알루미늄 합금보다 우수하며 로봇의 높은 신뢰성 요구 사항(ISO 9001)을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI , ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn









COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

카바이드 항공 센서

초경합금 항공 센서는 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(85~92 중량%)로 사용하고, 결합제로 Co(6~10 중량%) 또는 Ni(6~12 중량%)를 결합하여 분말 야금(볼 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 경도가 높고(1600~2000 HV), 내마모성이 우수(마모량 <0.02 mm³/h, ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y, pH 212, HCl, SO_4^{2-} 함유), 고온 저항성(>800° C, 산화 방지) 및 내진성(>10 6 배, MILSTD810G)이 뛰어납니다. 표면은 내마모성, 내부식성 및 전기적 특성을 향상시키기 위해 PVD/CVD 코팅(TiN, Al_2O_3, 13μm, 마찰 계수 <0.2) 또는 기능성 코팅(Au, Ag, 0.52μm, 전도도 >90% IACS)으로 코팅됩니다. 이 센서는 항공우주 분야(엔진 모니터링, 비행 제어, 구조 건강 모니터링 등)에서 사용되고 극한 환경(55° C~800° C, 10100g 진동, 10 510 ⁷ 사이클)을 견뎌내고 고정밀 데이터(오차 <±0.5%)를 제공하며 기존 소재(스테인리스강, 티타늄 합금, 400~600HV 등)보다 수명이 510 배 더 길고 표면 거칠기는 Ra 0.05~0.2μm입니다.

본 논문에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100)을 기반으로 시멘트 카바이드 항공 센서의 기술, 성능, 응용 및 최적화에 대한 제안을 제공합니다.

1. 초경 항공 센서의 특성

1.1 시멘트 카바이드 항공 센서의 재료 구성

행렬:

WC: 85~92 중량%, 초미립자(D50 0.1~0.4μm), 경도 1600~2000HV.
Co: 6~10 중량%, 높은 인성(K_{IC} 10~15 MPa·m¹/²), 진동 저항성이 10% 증가했습니다.
Ni: 6 - 12 wt % (선택 사항), 내식성 (HCl, SO_4^{2-} <0.01 mm/y), 고온 산화 저항성.
첨가제: Cr3C2(0.2~0.5 중량%)는 입자 성장을 억제하고 경도를 5% 증가시킵니다.
TaC(0.10.3 중량%)는 항산화 특성을 10% 증가시킵니다.

코팅:

TiN(PVD): 경도 2000~2400 HV, 내열성 800° C, 내마모성.
Al_2O_3 (CVD): 경도 1800~2200 HV, 내열성 1000° C, 내식성.
Au/Ag (PVD): 전도도 >90% IACS, 온도 저항성 500~600° C, 산화 방지.
구배 구조: 표면의 Co/Ni 함량이 낮음(6~8 중량%), 중심부의 Co/Ni 함량이 높음(10~12 중량%), 내마모성이 20% 증가, 균열 저항성이 15% 증가.

1.2 시멘트 카바이드 항공 센서의 성능 매개변수

경도: 1600 - 2000 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 1.8 - 2.5 GPa(GB/T 38512015).
파괴인성: 1015 MPa·m ¹ / ² (Co 기반 1215, Ni 기반 1012).
내마모성: 마모율 <0.02 mm³ / h (ASTM G65).
부식 저항성: pH 212, <0.01 mm/y (NACE MR0175).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

고온 저항성: >800° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 500 시간).
진동 저항성: >10 6 배(10100g, MILSTD810G).
전기 전도도: >90% IACS(Au/Ag 코팅, IEC 6051221).
측정 정확도: 오차 <±0.5% (온도, 압력, 변형률).
표면 거칠기: Ra 0.050.2 μm, 신호 안정성이 20% 증가했습니다.

1.3 초경합금 항공 센서의 장점

높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅으로 수명이 510 배 증가하고, 고장률이 30% 감소합니다.
고온 내구성: TiN / Al_2O_3 코팅, 산화 방지, 고온 환경(800° C, 엔진)에 적합합니다.
내식성: Ni 계 + Al_2O_3, 항공유/염수 분무에 대한 내성이 있으며, 혹독한 환경에 적합합니다.
진동 저항성: 인성이 높은 Co/Ni 는 고주파 진동(>10 6 배)을 견뎌내며 티타늄 합금보다 우수합니다.
고정밀도: 낮은 마찰 코팅 + 정밀 가공, 데이터 오류 <±0.5%, 신호 감쇠 15% 감소.

2. 초경 항공센서 제조공정

2.1 분말 준비

원재료: WC(D50 0.1 - 0.4 μm, 순도 >99.95%), Co/Ni(D50 0.51 μm), Cr3C2/TaC(D50 0.51 μm).
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 15:1), 400rpm, 1620 시간, 입자 크기 편차 <±0.03 μm, 균일성 >99%.

2.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.
매개변수: 250 - 300 MPa, 유지 압력 60 초, 텅스텐 강철 금형(편차 < ± 0.02 mm), 빌렛 밀도 8.5 - 10.0 g/ cm^3.
결과: 치수 편차 <±0.03 mm, 균열률 <0.3%.

2.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.
매개변수:
탈랍: 200 - 500° C, 2° C/분, H2 분위기(O2 <2 ppm), 10 $^{-3}$ Pa.
소결: 1350~1400° C, 10 - 5 10 - 6Pa, 22.5 시간.
HIP: 1350° C, 120 MPa(Ar), 11.5 시간.
결과: 밀도 14.8 - 15.0 g/ cm^3, 기공률 <0.0003%, 경도 1600 - 2000 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2.4 정밀 가공

연삭: 5 축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(13μm), 5000rpm, 이송 0.003~0.01mm/패스, 기하학적 편차 <±0.005mm, Ra 0.05~0.2μm.
EDM: 전기 스파크 가공, 미세 구멍/슬롯(Ø 0.1-0.5 mm), 편차 <±0.003 mm.
연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.30.5μm), 1200rpm, Ra <0.05μm, 신호 안정성이 10% 증가했습니다.

2.5 코팅

방법: PVD/CVD(Ti/Al/Au/Ag 타겟, >99.99%).
매개변수: TiN / Al_2O_3 /Au/Ag (13 μm), 10^{-5}Pa, 200400 ° C, 바이어스 80 V, 증착 속도 0.51 μm / h.
결과: 접착력 >80 N, 마찰계수 <0.2, 전도도 >90% IACS.

2.6 센서 통합

감지 요소: MEMS(실리콘 기반, 크기 <0.5mm) 또는 스트레인 게이지(NiCr, 두께 0.01mm), 온도(±0.5° C), 압력(±0.1MPa), 스트레인(±1με) 모니터링.
포장 : 레이저용접(Ti 쉘, 기밀성 <10^{-8} Pa•m^3 /s), 내열온도 800℃, 내진동성 100g.
데이터 전송: 5G/블루투스 모듈, 지연 시간 <5ms, 전력 소비량 <30mW.

2.7 감지

미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: 경도 편차 <±30 HV(ISO 6508), 마모 <0.02 mm^3 / h, 내식성(<0.01 mm/y).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(슬롯 편차 < ± 0.002 mm).
비파괴 검사: X 선(결함 < 0.005mm), 초음파(균열 < 0.003mm).
환경 테스트: MILSTD810G(55° C~800° C, 100g 진동, 10^6 사이클).
전기적 특성: 전도도 >90% IACS, 신호 오차 <±0.5% (IEC 6051221).

3. 초경 항공 센서의 적용 시나리오

카바이드 항공 센서는 극한 환경과 고정밀 요구 사항에 대한 프로세스, 테스트 및 선택 제안을 제공합니다.

3.1 카바이드 항공 센서 엔진 모니터링(온도/압력 센서)

조건: 800° C, 50 MPa, 100g 진동, 항공 연료 환경, 10 6 사이클.
설계
유형: MEMS 압력/온도 센서(Ø 10 mm, 두께 2 mm).
재료: WC8%Co(D50 0.1 - 0.4 μm, Cr3C2 0.3 wt %, TaC 0.2 wt %), 경도 1900 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

코팅 : Al_2O_3 (2 μm, CVD, 내열성 1000° C, 내식성).
기하구조: 평면도 편차 <±0.002 mm, Ra <0.05 μm.
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, CVD Al_2O_3(400° C), MEMS 통합, 레이저 용접.
매개변수: 온도 800° C, 압력 50 MPa, 진동 100g, 샘플링 속도 1 kHz.
시험:
수명: 2×10^6배(티타늄 합금은 3×10^5배, 6.7 배 더 길다).
마모율: <0.01 mm^3 / h, 내식성 <0.01 mm/y.
정확도: 온도 오차 ±0.5° C, 압력 오차 ±0.1 MPa.
진동 저항성: 100g, 10 6 회, 고장 없음.
선택: WCCo+Al_2O_3, 고온 고압, 일반 NDT 에 적합함.
장점: 고온 내식성, 높은 정밀도, 엔진 효율 10% 증가.

3.2 시멘트 카바이드 항공 센서(변형 센서)의 구조 건강 모니터링

작동 조건: 55° C ~ 200° C, 10g 진동, 소금 분무(5% NaCl), 10^7 사이클.
설계
유형: 스트레인 게이지 센서(5×3 mm, 두께 0.5 mm).
재료: WC10%Ni(D50 0.1 - 0.4 μm, Cr3C2 0.4 wt %), 경도 1700 HV.
코팅 : TiN (1 μm, PVD, 내열성 800° C, 내마모성).
기하구조: 표면편차 <±0.003 mm, Ra <0.1 μm.
공정: 볼 밀링 18 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), EDM, PVD TiN(250° C), 스트레인 게이지 장착, 레이저 용접.
매개변수: 변형률 ±5000 με, 진동 10 g, 샘플링 속도 500 Hz.
시험:
수명: 1.5×10^7배(스테인리스 스틸은 2×10^6배, 7.5 배 더 길다).
마모 손실: <0.02 mm^3 / h, 염분 분무 저항성 1000 시간, 저항 증가 <5%.
정확도: 변형률 오차 ±1 με, 신호 감쇠 <0.1%.
진동 저항성: 10g, 10^7회, 고장 없음.
선택: WCNi+TiN, 저온 부식에 적합, 정기적 세척.
장점: 진동 및 부식 방지, 날개/동체 모니터링에 적합, 안전성이 15% 증가.

3.3 카바이드 항공 센서 비행 제어(자기 센서)

작동 조건: 40° C ~ 150° C, 진동 20g, 건조한 환경, 10 6 사이클.
설계
유형: 홀 효과 자기 센서(Ø 3 mm, 두께 1 mm).
재료: WC8%Co1%Ag(D50 0.10.4 μm, Cr3C2 0.3 wt %), 경도 1800 HV.
코팅: Au(0.5μm, PVD, 전도도 >95% IACS, 내열성 600° C).
기하구조: 원형도 <±0.002 mm, Ra <0.05 μm.
공정 : 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, PVD Au(200° C), 홀 소자 통합, 레이저 용접.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

매개변수: 자기장 0500 mT, 진동 20 g, 샘플링 속도 2 kHz.
시험:
수명: 2×10⁶배(티타늄 합금은 4×10⁵배, 5 배 더 길다).
마모 손실: <0.01 mm³ / h, 접촉 저항 <8 μ Ω.
정확도: 자기장 오차 ±0.1 mT, 신호 안정성 ±0.5%.
진동 저항성: 20g, 10 6 회, 고장 없음.
선택: WCCo+Au, 고전도성 건조 환경에 적합, 정기적인 저항 검출.
장점: 고정밀 전도성, 항해/자세 제어에 적합, 신뢰성 20% 증가.

4. 초경 항공 센서의 성능 비교

매개변수	초경합금(WCCo/Ni)	티타늄 합금(Ti6Al4V)	스테인리스 스틸(316L)
경도(HV)	1600 년 - 2000 년	300 - 400	200~300
굽힘 강도(GPa)	1.8 - 2.5	0.9 - 1.2	0.5 - 0.8
인성(KIC, MPa • m¹ / ²)	10 - 15	40~60 세	50 - 70
내마모성(mm³/h)	<0.02	0.10.3	0.20.5
부식 저항성(mm/y, pH 212)	<0.01	0.02 - 0.05	0.05 - 0.1
온도 저항성(° C)	>800	400 - 600	3005-00
진동 저항성(회, 100g)	>10 ⁶	10 5 - 10 6	10 ⁴ - 10 ⁵
수명은 여러 배(스테인리스 스틸 대비)	5 - 10	스물셋	1
전기 전도도(% IACS)	>90	12	스물셋

카바이드 항공 센서의 주요 특징:
내마모성: WC 기판, 마모 <0.02 mm³ / h, 수명이 510 배 증가했습니다.
내열성: TiN / Al_2O_3 코팅, 산화 방지, 티타늄 합금보다 우수함.
내식성: Ni 계 + Al_2O_3, 염분 분무/연료에 대한 내성이 뛰어나며 스테인리스강보다 우수합니다.
높은 정밀도: 낮은 마찰 + 정밀 가공, 오차 <±0.5%, 기존 소재보다 우수함.

5. 초경 항공 센서 최적화 제안

재료 선택:
엔진 모니터링: WC8%Co+Al_2O_3, 고온 내식성이 15% 증가했습니다.
구조 건강 모니터링: WC10%Ni+TiN, 진동 부식 저항성이 20% 증가했습니다.
비행 제어: WC8%Co+Au, 전도도 >95% IACS, 정확도가 10% 증가했습니다.
첨가제: Cr3C2 0.4 중량%, TaC 0.3 중량%, 경도가 5% 증가했습니다.

프로세스 최적화:
소결: HIP 1350° C, 120 MPa, 기공률 <0.0003%, 내마모성이 15% 증가했습니다.

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

연삭 : 5 축 CNC, CBN 연삭 휠(13 μm), 편차 <±0.005 mm, Ra <0.05 μm.
코팅:
Al_2O_3(2 μm, CVD)는 고온저항성이 15% 증가하였다.
TiN(1 μm, PVD)은 내마모성이 20% 증가했습니다.
Au(0.5 μm, PVD)는 접촉 저항이 10% 감소했습니다.
EDM: 미세구멍 편차 <±0.002mm, 정확도 5% 증가.

장비 최적화:
소결로: 온도 조절 ±1° C, 10 ⁻ 6Pa.
5 축 CNC: 편차 <±0.003 mm.
코팅 장비: 증착 속도 0.51 μm /h, 편차 <±0.03 μm.

작업 조건 적응:
엔진: WCCo +Al_2O_3 , 800 ° C, 50 MPa, 100 g 진동.
구조 모니터링: WCNi+TiN, 55° C~200° C, 10g 진동, 소금 분무.
비행 제어: WCCo+Au, 40° C~150° C, 20g 진동, 건조한 환경.

6. 경질 합금 항공 센서의 테스트 및 검증:

미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: ASTM G65(<0.02 mm^3 / h), 내식성(<0.01 mm/y), 내열성(>800° C, <0.01 mg/cm^2).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(슬롯 편차 < ± 0.002 mm).
환경: MILSTD810G(55° C~800° C, 100g, 10 6 배).
전기적 특성: 전도도 >90% IACS, 오차 <±0.5% (IEC 6051221).

7. 경합금 항공 센서에 대한 표준 및 사양

GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 <±0.1 g/ cm^3.
GB/T 38512015: 강도 1.82.5 GPa.
GB/T 79972017: 경도 16002000 HV.
ASTM G65: 마모율 <0.02 mm^3 / h.
NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.
MILSTD810G: 환경 적응성(진동, 온도, 부식).
AS9100: 항공우주 품질 관리.
IEC 6051221: 접촉 저항 <10 μΩ.

초미립 WC(0.10.4 μm), Co/Ni 접합상(612 중량%), PVD/CVD 코팅(TiN/Al_2O_3/Au, 13 μm) 및 MEMS/스트레인 게이지 통합을 최적화함으로써, 초경 항공 센서는 높은 경도(16002000HV), 내마모성(<0.02mm^3/h), 내부식성(<0.01mm/y), 고온 저항성(>800° C) 및 높은 정밀도(오차 <±0.5%)를 달성합니다. 이 센서는 엔진 모니터링, 구조 건강 모니터링 및 비행 제어에 적합하며 수명이 510 배, Ra 가

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

0.050.2μm, 데이터 신뢰성이 20% 증가했습니다. 입자 크기, 코팅 두께 및 MEMS 통합을 최적화하면 비용을 줄일 수 있지만 초정밀 가공(비용 증가 10%) 및 극한 환경 테스트(>106 배)에서 과제가 있습니다. 시멘트 카바이드는 티타늄 합금 및 스테인리스강보다 우수하며 항공우주 분야의 엄격한 요구 사항(AS9100, MILSTD810G)을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

지능형 카바이드 절삭 공구

스마트 카바이드 공구는 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(88~94 중량%)로 사용하고, 결합제로 Co(6~10 중량%) 또는 Ni(6~12 중량%)를 혼합하여 분말 야금(볼 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 이 공구는 높은 경도(1800~2200 HV), 내마모성(마모량 <0.03 mm^3/h, ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y, pH 212, HCl, SO_4^{2-} 함유) 및 고온 내성(>1000° C, 내산화성)을 갖습니다. 표면은 PVD/CVD 코팅(예: DLC, TiAlN, AlCrN, 25μm, 마찰 계수 <0.15)으로 코팅되어 있으며 지능형 센싱(온도, 마모, 응력) 및 적응 제어(절삭 매개변수 최적화)가 통합되어 있어 처리 효율이 20-30% 향상되고 기존 공구(스테인리스강, 400-600HV)보다 수명이 35 배 길며 표면 거칠기는 Ra 0.10.2μm입니다. 이 공구는 고정밀 가공(항공우주, 자동차, 금형)에 사용되며 고속 절삭(1000-5000rpm), 건식/습식 절삭 및 가공이 어려운 소재(티타늄 합금, 니켈 기반 합금)에 적합합니다. 이 문서에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, ISO 6508)에 따라 지능형 초경 공구, 프로세스, 성능, 응용 분야 및 최적화 제안을 제공합니다.

1. 스마트 카바이드 공구의 특징

1.1 지능형 초경 공구 소재 구성

행렬:

WC: 88~94 중량%, 초미립자(D50 0.2~0.5μm), 경도 1800~2200HV.

Co: 6~10 중량%, 높은 인성(K_{IC} 15~20 $MPa \cdot m^{1/2}$), 내마모성이 10% 증가함.

Ni: 6 - 12 wt % (선택 사항), 내식성 (HCl, SO_4^{2-} <0.01 mm/y), 내충격성 (K_{IC} 12 - 15 $MPa \cdot m^{1/2}$).

첨가제: Cr3C2(0.3~0.6 중량%)는 입자 성장을 억제하고 경도를 6% 증가시킵니다. TaC(0.1~0.3 중량%)는 항산화 특성을 10% 증가시킵니다.

코팅:

DLC(PVD): 경도 3000~3500 HV, 마찰계수 <0.1, 내열성 600° C, 내접착성.

TiAlN(PVD/CVD): 경도 2800~3200 HV, 내열성 1050° C, 내식성.

AlCrN(PVD): 경도 3000~3400 HV, 내열성 1100° C, 고온 내마모성.

구배 구조: 표면의 Co/Ni 함량이 낮음(6~8 중량%), 중심부의 Co/Ni 함량이 높음(10~12 중량%), 내마모성이 25% 증가, 균열 저항성이 20% 증가.

1.2 지능형 초경 공구 지능형 기능

센서: 온도(±1° C, 0500° C), 마모(±0.01mm), 응력(±5MPa)을 모니터링하는 내장형 마이크로 센서(MEMS, 크기 < 0.5mm)

데이터 전송: Bluetooth / 5G 모듈, CNC 시스템으로 실시간 전송, 지연 <10ms.

적응형 제어: AI 알고리즘(마모/온도 데이터 기반 머신 러닝)이 절삭 속도(±10%)와 이송 속도(±15%)를 동적으로 조정하여 효율성을 20~30% 최적화합니다.

수명 예측: 마모 모델(Archard 모델)을 기반으로 남은 수명을 예측하여(±5% 오차)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

가동 중지 시간을 30% 줄입니다.

1.3 지능형 초경 공구의 성능 매개변수

경도: 1800 - 2200 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 2.0 - 2.8 GPa(GB/T 38512015).
파괴인성: 1220 MPa • m¹ / ² (Co 계 1520, Ni 계 1215).
내마모성: 마모율 <0.03 mm³ / h (ASTM G65).
부식 저항성: pH 212, <0.01 mm/y (NACE MR0175).
고온 저항성: >1000° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 1000 시간).
마찰계수 : <0.15(코팅), 접착방지력 30% 증가.
표면조도 : Ra 0.10.2 μm, 가공면 품질이 15% 향상되었습니다.

1.4 지능형 초경 공구의 장점

높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅으로 수명이 35 배 증가하고, 절단 효율이 20% 증가합니다.
내식성: Ni 기반 공구는 산과 알칼리(HCl, SO_4^{2-})에 강하고 습식 절단에 적합합니다.
고온 내구성: TiAlN / AlCrN 코팅, 열 균열에 강하고 고속 건식 절단에 적합합니다.
인텔리전스: 실시간 모니터링 + 적응형 제어를 통해 폐기물 비율을 15% 줄이고 에너지를 1020% 절약합니다.

2. 지능형 초경 공구 제조 공정

2.1 분말 준비

원재료: WC(D50 0.2 - 0.5 μm, 순도 >99.95%), Co/Ni(D50 12 μm), Cr3C2/TaC(D50 0.5 - 1 μm).
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 12:1), 350rpm, 1822 시간, 입자 크기 편차 <±0.05 μm, 균일성 >98%.

2.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.
매개변수: 300 - 350 MPa, 유지 압력 90 초, 티타늄 합금 금형(편차 < ± 0.03 mm), 빌렛 밀도 9.0 - 10.5 g/ cm³.
결과: 치수 편차 <±0.05 mm, 균열률 <0.5%.

2.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.
매개변수:

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

탈랍: 200 - 600° C, 2° C/분, H2 분위기(O2 <3 ppm), 10 ⁻³ Pa.
소결: 1400~1450° C, 10 - 5 10 - 6Pa, 2.53 시간.
HIP: 1400° C, 150 MPa(Ar), 1.52 시간.
결과: 밀도 15.0 - 15.2 g/ cm³, 기공률 <0.0005%, 경도 1800 - 2200 HV.

2.4 정밀 가공

연삭: 5 축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(24μm), 4000rpm, 이송 0.005~0.02mm/패스, 기하학적 편차 <±0.01mm, Ra 0.10.2μm.
EDM: 방전 가공, 슬롯/홀(Ø 0.52 mm), 편차 <±0.005 mm.
연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.51 μm), 1000 rpm, Ra <0.1 μm, 접착 방지 효과가 25% 증가했습니다.

2.5 코팅

방법: PVD/CVD(Cr/Al/Ti 타겟, >99.99%).
매개변수: DLC/TiAlN/AlCrN(25 μm), 10 - 5 Pa, 250 - 450° C, 바이어스 100 V, 증착 속도 11.5 μm/h.
결과: 접착력 >100 N, 마찰계수 <0.15, 내열성 600 - 1100° C.

2.6 지능형 통합

센서 내장: 레이저 마이크로 가공(홈 깊이 0.51mm), MEMS 센서 이식(온도, 응력, 마모), 에폭시 수지 밀봉(온도 저항성 500° C).
회로 집적: 박막 회로(두께 0.1mm), 5G/블루투스 모듈, 전력 소비 <50mW.
소프트웨어: AI 알고리즘(Python, TensorFlow), 절단 매개변수의 실시간 최적화, 클라우드에 데이터 저장(암호화, AES256).

2.7 감지

미세구조: SEM(결정립 0.20.5 μm), EBSD(결정립계 응력 <3%).
성능: 경도 편차 <±40 HV(ISO 6508), 마모 <0.03 mm³ / h, 내식성(pH 212, <0.01 mm/y).
기하학: CMM(편차 < ± 0.005 mm), 레이저 스캐닝(가장자리 반경 < ± 0.003 mm).
스마트 기능: 센서 정확도(온도 ±1° C, 마모 ±0.01 mm), 전송 지연 <10ms.
비파괴 검사: X 선(내부 결함 < 0.01 mm), 초음파(균열 < 0.005 mm).

3. 지능형 초경 공구 지능형 응답 응용 시나리오

지능형 초경 공구는 고정밀 가공, 공정, 테스트 및 선택에 대한 제안을 제공합니다.

3.1 항공우주(티타늄 합금 가공)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

작업 조건: Ti6Al4V, 2000rpm, 200° C, 건식 절단, 절삭 깊이 12mm.
유형: 밀링 커터(Ø 20 mm, 4 개 플루트).
재료: WC8%Co(D50 0.20.5 μm, Cr3C2 0.5 wt %), 경도 2000 - 2200 HV.
코팅 : TiAlN(4 μm, 경도 3200 HV, 마찰 0.12, 내열성 1050° C).
지능: MEMS 센서(온도, 마모), AI 최적화(절단 속도 ±10%).
기하구조: 절삭날 각도 15° , 절삭날 반경 <0.01 mm, Ra <0.1 μm.
공정 : 볼 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, HIP 1400° C(150 MPa), 5 축 연삭, PVD TiAlN(400° C), 센서 레이저 임베딩.
매개변수: 속도 2000rpm, 이송 0.1mm/r, 절삭 깊이 1.5mm.
시험:
수명: 800 시간(기존 도구의 경우 200 시간, 4 배 더 길다).
마모 손실: <0.02 mm³ / h, 표면 품질 Ra 0.2 μm.
효율성: 처리 시간이 25% 감소하고, 폐기율이 15% 감소했습니다.
지능형: 온도 조절 <200° C, 마모 예측 ±5%.
선택: WCCo+TiAlN, 고온, 고경도, 건식 절단 및 일반 NDT 에 적합합니다.
장점: 고온 내구성, 지능형 최적화 및 효율성 20% 증가.

3.2 자동차 금형(고속강 가공)

작업 조건: H13 강, 3000rpm, 150° C, 습식 절단(5% 에멀젼), 절삭 깊이 0.51mm.
유형: 선삭 공구(단일 날, ISO 표준).
재료: WC10%Co(D50 0.2 - 0.5 μm, Cr3C2 0.5 wt %), 경도 2000 - 2200 HV.
코팅 : DLC(3 μm, 경도 3500 HV, 마찰 <0.1, 내열성 600° C).
스마트: MEMS 센서(마모, 응력), AI 가 공급 속도(±15%)를 조정합니다.
기하구조: 절삭날 각도 20° , 절삭날 반경 <0.01 mm, Ra <0.1 μm.
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, HIP 1400° C(150 MPa), 5 축 연삭, PVD DLC(250° C), 센서 임베딩.
매개변수: 속도 3000rpm, 이송 0.08mm/r, 절삭 깊이 0.8mm.
시험:
수명: 1200 시간(기존 도구의 경우 300 시간으로 4 배 더 길다).
마모율: <0.02 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.
표면 품질: Ra 0.15 μm, 정확도 ±0.005 mm.
지능성: 응력 제어 <500 MPa, 가동 중지 시간 30% 감소.
선택: WCCo+DLC, 습식 절단, 고정밀, 정기적 세척에 적합.
장점: 마찰이 적고, 접착력이 우수하며, 가공 정확도가 15% 향상됩니다.

3.3 니켈 기반 합금 가공(가스터빈 블레이드)

작업 조건: Inconel 718, 1500rpm, 400° C, 건식 절단, 절삭 깊이 13mm.
유형: 드릴 비트(Ø 10 mm, 양날).
재료: WC8%Ni(D50 0.2~0.5μm, TaC 0.3 중량%), 경도 2000~2200HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

코팅 : AlCrN(5 μm, 경도 3400 HV, 마찰 0.15, 내열성 1100° C).
지능: MEMS 센서(온도, 마모), AI 가 절단 매개변수를 최적화합니다.
기하구조: 절삭날 각도 30°, 절삭날 반경 <0.01 mm, Ra <0.1 μm.
공정: 볼 밀링 22 시간, CIP 350 MPa, HIP 1400° C(150 MPa), EDM(홀 편차 <±0.005 mm), PVD AlCrN(450° C), 센서 임베딩.
매개변수: 속도 1500rpm, 이송 0.05mm/r, 절삭 깊이 2mm.
시험:
수명: 600 시간(기존 도구의 경우 150 시간, 4 배 더 길다).
마모율: <0.03 mm^3 / h, 산화 저항성 <0.01 mg/ cm^2.
효율성: 처리 시간이 20% 감소하고, 폐기율이 10% 감소했습니다.
스마트: 온도 조절 <400° C, 수명 예측 ±5%.
선택: WCNi+AlCrN, 고온, 절삭이 어려운 소재, 건식 절삭 및 일반적인 NDT 에 적합합니다.
장점: 고온 내구성, 지능형 제어로 열 균열이 15% 감소합니다.

4. 지능형 초경 공구의 성능 비교

매개변수	스마트 카바이드(WCCo/Ni)	전통적인 시멘트 카바이드	스테인리스 스틸 칼
경도(HV)	1800 년 - 2200 년	1600 년 - 2000 년	400 - 600
굽힘 강도(GPa)	2.0 - 2.8	1.8 - 2.5	1.5 - 2.0
인성(KIC, MPa • $m^{1/2}$)	12 -- 20	10 - 15	50100
내마모성(mm^3/h)	<0.03	0.05 - 0.1	0.1 - 0.3
부식 저항성(mm/y, pH 212)	<0.01	0.02 - 0.05	0.05 - 0.1
온도 저항성(° C)	>1000	800 - 1000	400 - 800
수명은 여러 배(스테인리스 스틸 대비)	3 - 5	스물셋	1
마찰계수(코팅)	<0.15	0.2 - 0.3	0.3 - 0.5
스마트 기능	실시간 모니터링 + 자체 적응	없음	없음

스마트 카바이드 공구의 주요 특징:
지능형 기능: 실시간 모니터링 + AI 최적화, 효율성 2030% 증가, 폐기율 15% 감소
내마모성: 초미립자 WC+ 코팅, 마모 <0.03 mm^3 / h, 수명이 35 배 증가했습니다.
코팅 : DLC 내접착성(습식 절삭), TiAlN/AlCrN 내열성(건식 절삭).
내식성: Ni 기반은 Co 기반보다 우수하고 습식 절단(pH 212)에 적합합니다.

5. 지능형 초경 공구를 위한 지능형 최적화 제안

재료 선택:
티타늄 합금: WC8%Co+TiAlN, 고온 저항성이 15% 증가했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

금형강 : WC10%Co+DLC, 접착방지성이 25% 향상되었습니다.
니켈 기반 합금: WC8%Ni+AlCrN, 내식성이 20% 증가했습니다.
첨가제: Cr3C2 0.6 중량%, TaC 0.3 중량%, 경도가 6% 증가했습니다.

프로세스 최적화:
소결: HIP 1400° C, 150 MPa, 기공률 <0.0005%, 내마모성 20% 증가.
연삭 : 5 축 CNC, CBN 연삭 휠(24 μm), 편차 <±0.01 mm, Ra <0.1 μm.
코팅:
DLC(3 μm, 250° C)는 접착 방지 효과가 25% 증가했습니다.
TiAlN(4 μm, 400° C)은 고온 저항성이 15% 증가했습니다.
AlCrN(5 μm, 450° C)은 내식성이 20% 증가했습니다.
스마트 통합: MEMS 센서(정확도 ±1° C), 5G 전송(지연 시간 <10ms).

장비 최적화:
소결로: 온도 조절 ±2° C, 10 ⁻ 6Pa.
5 축 CNC: 편차 <±0.005 mm.
코팅 장비: 증착 속도 11.5 μm /h, 편차 <±0.05 μm.
레이저 가공: 센서 슬롯 편차 <±0.01 mm.

작업 조건 적응:
항공우주: WCCo+TiAlN, 2000~5000rpm, 건식 절단.
자동차 금형: WCCo+DLC, 1000~3000rpm, 습식 절단.
니켈 기반 합금: WCNi+AlCrN, 1000~2000rpm, 건식 절단.

테스트 및 검증:
미세구조: SEM(결정립 0.2~0.5 μm), EBSD(결정립계 응력 <3%).
성능: ASTM G65(<0.03 mm^3 / h), 내식성(pH 212, <0.01 mm/y), 내열성(>1000° C, <0.01 mg/cm^2).
기하학: CMM(편차 < ± 0.005 mm), 레이저 스캐닝(모서리 편차 < ± 0.003 mm).
스마트: 센서 정확도(온도 ±1° C, 마모 ±0.01 mm), AI 예측 오류 <5%.

6. 지능형 초경 공구에 대한 표준 및 사양

GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 <±0.1 g/ cm^3.
GB/T 38512015: 강도 2.0-2.8 GPa.
GB/T 79972017: 경도 1800 - 2200 HV.
ASTM G65: 마모율 <0.03 mm^3 / h.
NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.
ISO 6508: 경도 편차 < ±40 HV.
ISO 1832: 도구 기하학에 대한 표준.

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

스마트 카바이드 공구는 초미립 WC(0.2~0.5μm), Co/Ni 결합상(6~12 중량%), PVD/CVD 코팅(DLC/TiAlN/AlCrN, 25μm) 및 지능형 통합(MEMS 센서, AI 제어)을 최적화하여 높은 경도(1800~2200HV), 내마모성(<0.03mm³/h), 내부식성(pH 212, <0.01mm/y) 및 고온 저항성(>1000° C)을 달성합니다. 이 공구는 항공우주(티타늄 합금), 자동차 금형(H13 강), 가스터빈(니켈 기반 합금)에 적합하며 수명이 35 배, Ra 가 0.1~0.2μm, 효율이 20~30% 증가하고 폐기율이 15% 감소했습니다. 입자 크기, 코팅 두께, 센서 정확도를 최적화하면 비용을 절감할 수 있습니다. 고정밀 처리(비용 15% 증가)와 지능형 시스템 안정성(5G 지연 <10ms)이 과제입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

카바이드 전자 접점

초경합금 전자 접점은 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(85~92 중량%)로 사용하고, 바인더 상으로 Co(6~10 중량%) 또는 Ni(6~12 중량%)를 결합하여 분말 야금(볼 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 경도가 높고(1600~2000 HV), 내마모성이 우수하며(마모 손실 <0.02 mm³/h, ASTM G65), 아크 부식 저항성(<0.01 mm/y, IEC 60068220), 접촉 저항이 낮고(<10 μΩ, IEC 6051221) 내열성이 우수합니다(>800° C, 내산화성). PVD 코팅(Au, Ag, Ni 등 0.52 μm, 마찰 계수 <0.2) 또는 전기 도금(Au 0.1 - 0.5 μm)을 표면에 적용하여 전도도(>90% IACS)와 산화 저항성을 개선합니다. 이 접점은 고주파 스위칭(>10 6 회), 릴레이, 커넥터 및 신에너지 자동차 배터리 관리 시스템(BMS)에 적합합니다. 고전류(10 - 100 A), 고전압(100 - 1000 V) 및 주기적 충격을 견딜 수 있습니다. 서비스 수명은 구리 합금(CuBe, 200 - 400 HV)보다 51 - 0 배 더 길고 표면 거칠기는 Ra 0.05 - 0.2 μm입니다.

본 논문에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60512)에 따라 시멘트 카바이드 전자 접점의 설계, 공정, 성능, 응용 및 최적화에 대한 제안을 제공합니다.

1. 초경합금 전자 접점의 특성

1.1 시멘트 카바이드 전자 접촉 재료의 구성

행렬:

WC: 85~92 중량%, 초미립자(D50 0.10.4 μm), 경도 1600~2000HV.
Co: 6~10 중량%, 높은 인성(K_{IC} 101~5 MPa • m¹/²), 전도도 5% 증가.
Ni: 6 - 12 wt % (선택 사항), 내식성 (HCl, SO_4^{2-} <0.01 mm/y), 내아크성.
첨가제: Ag(13 중량%), 전도도가 10% 증가했습니다. Cr3C2(0.20.5 중량%), 경도가 5% 증가했습니다.
표면 처리:
Au(PVD/전기도금): 전도도 >95% IACS, 온도 저항성 600° C, 산화 방지.
Ag(PVD): 전도도 >98% IACS, 온도 저항성 500° C, 아크 저항성.
Ni(PVD): 경도 800~1000 HV, 내열성 700° C, 내식성.
구배 구조: 표면에 높은 Ag/Ni(2~5 중량%), 코어에 높은 Co/Ni(8~12 중량%)를 함유, 전도도가 15% 증가, 내마모성이 20% 증가.

1.2 시멘트 카바이드 전자 접점의 성능 매개변수

경도: 1600 - 2000 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 1.8 - 2.5 GPa(GB/T 38512015).
파괴인성: 1015 MPa • m¹ / ² (Co 기반 1215, Ni 기반 1012).
내마모성: 마모율 <0.02 mm³ / h (ASTM G65).
아크 부식 저항성: <0.01 mm/y(IEC 60068220, 10 6 스위칭 시간).
접촉 저항: <10 μΩ (IEC 6051221).

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

전기 전도도: >90% IACS(Au/Ag 코팅).
고온 저항성: >800° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 500 시간).
마찰계수 : <0.2(코팅), 접착방지력 25% 증가.
표면 거칠기: Ra 0.05 - 0.2 μm, 접촉 안정성이 20% 증가했습니다.

1.3 카바이드 전자 접점의 장점

높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅으로 수명이 510 배 증가하고, 접촉 실패가 30% 감소했습니다.
아크 저항성: Ni 기반 + Ag/Au 코팅, 아크 침식 방지, 고주파 스위칭에 적합.
낮은 저항성: Au/Ag 코팅, 접촉 저항 <10 μΩ, 신호 감쇠가 15% 감소되었습니다.
고온 내구성: 산화 방지, 고온 환경에 적합(600~800° C, BMS, 릴레이).
안정성: 낮은 마찰 + 높은 경도, 안정적인 접촉력(±5%), 사이클 성능 20% 증가.

2. 시멘트 카바이드 전자 접점의 제조 공정

2.1 분말 준비

원자재: WC(D50 0.1 - 0.4 μm, 순도 >99.95%), Co/Ni(D50 0.5 - 1 μm), Ag/Cr3C2(D50 0.51 μm).
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 15:1), 400rpm, 16~20 시간, 입자 크기 편차 < ± 0.03 μm, 균일성 > 99%.

2.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.
매개변수: 250 - 300 MPa, 유지 압력 60 초, 텅스텐 강철 금형(편차 < ± 0.02 mm), 빌렛 밀도 8.5±0.0 g/ cm³.
결과: 치수 편차 <±0.03 mm, 균열률 <0.3%.

2.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.
매개변수:
탈랍: 200 - 500° C, 2° C/분, H2 분위기(O2 <2 ppm), 10 ⁻³ Pa.
소결: 1350~1400° C, 10 ⁻ 5 10 ⁻ 6Pa, 22.5 시간.
HIP: 1350° C, 120 MPa(Ar), 11.5 시간.
결과: 밀도 14.8 - 15.0 g/ cm³, 기공률 <0.0003%, 경도 1600 - 2000 HV.

2.4 정밀 가공

연삭: 5 축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(13 μm), 5000rpm, 이송 0.003~0.01mm/패스,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

기하학적 편차 <±0.005mm, Ra 0.050.2μm.
EDM: 전기 스파크 가공, 접촉 슬롯/홀(Ø 0.21 mm), 편차 <±0.003 mm.
연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.30.5 μm), 1200 rpm, Ra <0.05 μm, 접촉 저항이 10% 감소했습니다.

2.5 표면 처리

방법: PVD(Au/Ag/Ni 타겟, >99.99%) 또는 전기 도금(Au 0.10.5 μm).
매개변수: Au/Ag/Ni(0.52 μm), 10 ⁻ 5 Pa, 200300° C, 바이어스 80 V, 증착 속도 0.51 μm/h; 전기 도금 Au(전류 밀도 12 A/dm²).
결과: 접착력 >80 N, 마찰계수 <0.2, 전기 전도도 >90% IACS.

2.6 감지

미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: 경도 편차 <±30 HV(ISO 6508), 마모 <0.02 mm³/h, 접촉 저항 <10 μΩ, 아크 저항(<0.01 mm/y, 10 6 회).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(슬롯 편차 < ± 0.002 mm).
비파괴 검사: X 선(내부 결함 < 0.005mm), 초음파(균열 < 0.003mm).
전기적 특성: 접촉 저항(<10 μΩ, IEC 6051221), 내전압(>1000 V, IEC 606641).

3. 시멘트 카바이드 전자 접점의 적용 시나리오

고주파, 고전류 및 고신뢰성 시나리오의 경우 카바이드 전자 접점은 프로세스, 테스트 및 선택에 대한 제안을 제공합니다.

3.1 경합금 전자 접점 고주파 릴레이(신에너지 자동차 BMS)

조건: 100 A, 400 V, 10 ⁶ 사이클, 85° C, 습도(85% RH).
설계:
유형: 평면 접촉(Ø 5 mm, 두께 1 mm).
재료: WC8%Co2%Ag(D50 0.10.4 μm, Cr3C2 0.3 wt %), 경도 1800 HV.
코팅: Au(0.5μm, 전기도금, 전도도 >95% IACS, 내열성 600° C).
기하구조: 평면도 편차 <±0.002 mm, Ra <0.05 μm.
공정 : 볼 밀링 18 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, Au(0.5 μm) 전기 도금.
매개변수: 전류 100A, 전압 400V, 스위칭 주파수 1Hz, 접촉력 5N.
시험:
수명: 2×10 6 배(CuBe 는 2×10 5 배, 10 배 더 길다).
마모 손실: <0.01 mm³ / h, 접촉 저항 <8 μΩ.
아크 저항: <0.01 mm/y, 온도 상승 <30° C.
내습성: 85% RH, 1000 시간, 부식 없음.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

선택: WCCo+Au, 고전류, 습한 환경, 정기적 저항 테스트에 적합합니다.
장점: 저항이 낮고, 아크 저항이 낮으며, BMS 신뢰성이 20% 증가했습니다.

3.2 경합금 전자 접촉 커넥터(5G 통신)

작동 조건: 10 A, 100 V, 10 ^{7} 플러그 앤 플러그 분리 사이클, 70° C, 소금 분무(5% NaCl).
설계:
유형: 핀 접촉(Ø 1 mm, 길이 5 mm).
재료: WC10%Ni1%Ag(D50 0.1 - 0.4 μm, Cr3C2 0.3 wt %), 경도 1700 HV.
코팅: Ag(1 μm, PVD, 전도도 >98% IACS, 내열성 500° C).
기하구조: 원형도 <±0.002 mm, Ra <0.1 μm.
공정 : 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 5 축 연삭, PVD Ag(250° C).
매개변수: 전류 10A, 전압 100V, 플러깅 주파수 0.5Hz, 접촉력 2N.
시험:
수명: 1.5×10^{7}배 (CuBe 는 1×10^{6}배, 15 배 더 길다).
마모 손실: <0.02 mm^{3} / h, 접촉 저항 <10 μΩ.
염수 분무 저항성: 5% NaCl, 500 시간, 저항 증가 <5%.
신호 감쇠: <0.1 dB(10 GHz).
선택: WCNi+Ag, 고주파 플러깅 및 언플러깅, 부식성 환경, 정기적 세척에 적합합니다.
장점: 아크 방지, 신호 안정성이 15% 증가했습니다.

3.3 경합금 전자 접점 고전압 스위치(산업용 제어)

작동 조건: 50 A, 1000 V, 5×10 5 스위칭 시간, 100° C, 건조한 환경.
유형: 아크 접촉(5×3 mm, 두께 1.5 mm).
재료: WC8%Co3%Ag(D50 0.10.4 μm, Cr3C2 0.4 wt %), 경도 1900 HV.
코팅 : Ni(2 μm, PVD, 경도 1000 HV, 내열성 700° C).
기하구조: 캠버 편차 <±0.003 mm, Ra <0.1 μm.
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 300 MPa, HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), EDM, PVD Ni(300° C).
매개변수: 전류 50A, 전압 1000V, 스위칭 주파수 0.2Hz, 접촉력 10N.
시험:
수명: 8×10^{5} 배 (CuBe 는 1×10^{5} 배, 8 배 더 길다).
마모 손실: <0.01 mm^{3} / h, 접촉 저항 <9 μΩ.
아크 저항: <0.01 mm/y, 내전압>1500 V.
내열성: 100° C, 500 시간, 산화 없음.
선택: WCCo+Ni, 고전압, 건조한 환경, 일반적인 NDT 에 적합합니다.
장점: 고온 내구성, 아크 내구성, 스위칭 안정성이 20% 증가했습니다.

4. 시멘트 카바이드 전자 접점의 성능 비교

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

매개변수	초경합금(WCCo/Ni)	구리 합금(CuBe)	은 합금
경도(HV)	1600 년 - 2000 년	200~400	100 - 200
굽힘 강도(GPa)	1.8 - 2.5	0.8 - 1.2	0.5 - 0.8
인성(KIC, MPa·m¹ / ²)	10 - 15	20~30 세	15 - 20
내마모성(mm³/h)	<0.02	0.1 - 0.3	0.05 - 0.1
아크 저항(mm/y, 10 6 회)	<0.01	0.05 - 0.1	0.02 - 0.05
접촉 저항(μΩ)	<10	15 - 20	5 - 10
전기 전도도(% IACS)	>90	>80	>95
온도 저항성(° C)	>800	200~400	300~500
수명 배수(CuBe 대비)	510	1	스물셋
마찰계수(코팅)	<0.2	0.3 - 0.5	0.2 - 0.4

카바이드 전자 접점의 주요 특징:
내마모성: WC 기판, 마모 <0.02 mm³ / h, 수명이 510 배 증가했습니다.
아크 저항성: Ni 기반 + Ag/Au 코팅, 내삭마성, CuBe 보다 우수함.
낮은 저항: Au/Ag 코팅, 접촉 저항 <10 μΩ, CuBe 보다 우수함.
고온 내구성: 산화 방지, 고온(>800° C)에 적합하며 은 합금보다 우수합니다.

5. 최적화 제안

재료 선택:
BMS 릴레이: WC8%Co+Au, 전도도 >95% IACS, 아크 저항이 20% 증가했습니다.
5G 커넥터: WC10%Ni+Ag, 내식성이 15% 증가했습니다.
고전압 스위치 : WC8%Co+Ni, 고온 저항이 10% 증가했습니다.
첨가제: Ag 2 - 3 중량%, Cr3C2 0.4 중량%, 전도도가 10% 증가했습니다.

프로세스 최적화:
소결: HIP 1350° C, 120 MPa, 기공률 <0.0003%, 내마모성이 15% 증가했습니다.
연삭 : 5 축 CNC, CBN 연삭 휠(13 μm), 편차 <±0.005 mm, Ra <0.05 μm.
코팅:
Au(0.5 μm, 전기 도금)는 접촉 저항을 10% 감소시켰습니다.
Ag(1 μm, PVD) 전도도가 5% 증가했습니다.
Ni(2 μm, PVD)로 내식성이 15% 증가했습니다.
EDM: 슬롯 편차 <±0.002mm, 정확도 5% 증가.

장비 최적화:
소결로: 온도 조절 ±1° C, 10 ⁻ 6Pa.
5 축 CNC: 편차 <±0.003 mm.
코팅 장비: 증착 속도 0.51 μm /h, 편차 <±0.03 μm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

작업 조건 적응:

BMS: WCCo+Au, 100 A, 400 V, 습한 환경.
5G 커넥터: WCNi+Ag, 10A, 100V, 소금 분무.
고전압 스위치: WCCo+Ni, 50 A, 1000 V, 건조한 환경.

테스트 및 검증:

미세구조: SEM(결정립 0.10.4 μm), EBSD(결정립계 응력 <2%).
성능: ASTM G65(<0.02 mm³ / h), 접촉 저항(<10 μΩ), 아크 저항(<0.01 mm/y, 10 6 회).
기하학: CMM(편차 < ± 0.003 mm), 레이저 스캐닝(슬롯 편차 < ± 0.002 mm).
전기적 특성: 내전압(>1000V, IEC 606641), 온도 상승(<30° C, IEC 6051251).

6. 경합금 전자 접점에 대한 표준 및 사양

GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 <±0.1 g/ cm³.
GB/T 38512015: 강도 1.82.5 GPa.
GB/T 79972017: 경도 1600 - 2000 HV.
ASTM G65: 마모율 <0.02 mm³ / h.
IEC 60068220: 아크 부식 저항성.
IEC 6051221: 접촉 저항 <10 μΩ.
IEC 606641: 내전압 > 1000V.

초경 전자 접점은 초미립 WC(0.1~0.4μm), Co/Ni 접합상(612 중량%), Ag 첨가제(13 중량%) 및 PVD/전기도금 코팅(Au/Ag/Ni, 0.52μm)을 최적화하여 높은 경도(1600~2000HV), 내마모성(<0.02mm³/h), 아크 부식 저항성(<0.01mm/y), 낮은 접촉 저항(<10μΩ) 및 고온 저항(>800° C)을 달성합니다. 이 접점은 BMS 릴레이, 5G 커넥터 및 고전압 스위치에 적합하며 수명이 510 배 증가하고 Ra 가 0.05~0.2μm 이며 접점 안정성이 20% 향상되었습니다. 입자 크기, 코팅 두께 및 EDM 정확도를 최적화하면 비용을 줄일 수 있지만, 초정밀 가공(비용이 10% 증가)과 아크 테스트(10 6 회 이상)에서 과제가 발생합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

초경합금의 자기적 특성 및 검출
중국 국가 표준, 국제 표준, 유럽 및 미국 표준

범주	표준 번호	표준 이름	개요
중국 국가 표준	GB/T 17951-2022	경자성 재료에 대한 일반 기술 요구 사항	성능 시험 및 품질 관리를 포함한 경자성 재료에 대한 일반적인 기술 요구 사항을 명시하고 있으며, 시멘트 카바이드의 자기 시험에 적용됩니다.
	GB/T 5242-1985	초경합금의 자기적 특성 측정 방법	포화자화 및 보자력과 같은 시멘트 카바이드의 자기적 특성을 설명하는 측정 방법으로, 품질 관리 및 비파괴 검사에 적합합니다.
국제 표준	ISO 9934-1:2015	비파괴 검사 - 자기 입자 검사 - 1 부: 일반 원칙	강자성체(예: 시멘트 카바이드의 Co 상)의 표면 및 표면 근처 결함을 탐지하는 데 적용할 수 있는 자기 입자 검사의 기본 원리를 명시합니다.
	ISO 3326:2013	초경합금 - 경도 및 파괴인성 측정을 위한 시험 방법	초경합금의 기계적 성질 시험에 초점을 맞추면, 자기 시험을 결합하여 미세조직과 자기적 성질 간의 관계를 간접적으로 평가할 수 있습니다.
유럽 및 미국 표준	ASTM E709-21	자기 입자 검사 가이드	시멘트 카바이드와 같은 강자성 재료의 표면 및 표면 아래 결함을 탐지하기 위한 자성 입자 테스트에 대한 지침을 제공합니다.
	ASTM E1444/ E1444M-22	자기 입자 검사를 위한 표준 관행	장비, 프로세스 및 결과 해석을 포함한 자분탐상시험 시행에 대한 세부 규정은 시멘트 카바이드 품질 관리에 적용됩니다.
	EN 10204:2004	금속제품 검사서류	자기 시험 결과와 함께 사용할 수 있는 금속 제품(예: 시멘트 카바이드)에 대한 검사 및 인증 요구 사항을 지정합니다.
	IEC 61000 -4-8:2020	전자파 적합성(EMC) - 4-8 부: 전원 주파수 자기장 내성 테스트	전자파 적합성 시험의 경우, 특정 환경에서 시멘트 카바이드 자성체의 성능 시험을 위한 기준을 제공할 수 있습니다.
일본 및 한국 표준	JIS G 0551:2005	강철 - 자분탐상법	시멘트 카바이드에서 Co 또는 Ni 상을 탐지하는 것을 포함하여 강자성 재료에 대한 자분탐상 방법을 지정합니다.
	KS D 0201:2015	자분탐상시험방법(한국표준)	한국표준의 자분탐상시험 규격은 초경합금의 비파괴검사에 적용되며, JIS 규격과 유사하다.

설명하다

일부 표준(예: ISO 9934-1, ASTM E709, JIS G 0551)은 일반적인 자기 시험 표준이며 초경합금용으로 특별히 설계된 것은 아닙니다. 그러나 초경합금에는 Co 와 같은 강자성 상이 포함되어 있으므로 자기 시험 요구 사항에 맞게 조정할 수 있습니다.

중국 표준(예: GB/T 5242)은 초경합금의 자기적 특성 측정에 더욱 직접적으로 초점을 맞춥니다. 유럽, 미국, 일본 및 한국 표준은 대부분 일반적인 자분탐상 시험 규격으로, 특정 제품 표준(예:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

초경 공구 또는 항공 부품 표준)과 함께 적용해야 합니다.
시멘트 카바이드의 자기 시험에 대한 구체적인 표준은 업계나 응용 분야에 따라 다를 수 있으므로 최신 정보나 더 자세한 정보를 얻으려면 특정 제품 사양을 참조하거나 관련 표준화 기관에 문의하는 것이 좋습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

GB/T 17951-2022:
경자성 재료에 대한 일반 기술 요구 사항

머리말

이 표준은 중화인민공화국 품질감독검험검역총국과 중화인민공화국 표준화국이 공동으로 발행합니다.산업 응용 분야의 성능 요구 사항을 충족시키기 위해 경자성 재료의 품질 요구 사항, 기술 조건 및 시험 방법을 표준화하는 것을 목표로 합니다.이 표준은 2022 년에 발행되었으며 GB/T 17951-2007 을 대체합니다.초경합금의 자기 특성 최적화 및 검출 기술의 진보를 포함하여 경자성 재료 기술 개발의 최신 성과를 반영합니다.이 표준의 개정은 국제 표준화 동향(예: ISO 3326)과 국내 산업 요구를 고려했으며 초경합금(예: WC-Co, WC-Ni)과 같은 재료의 자기 특성 제어에 적용 가능합니다.

본 표준은 중국기계공업연합회가 제안 및 관리하며, 기안 기관에는 중국금속연구소, 중국과학원, 하얼빈공업대학 및 관련 기업이 포함됩니다. 본 표준의 기술 내용은 광범위한 협의를 바탕으로 수립되었으며, 생산, 검사 및 사용 기관에서 참고할 수 있습니다.

1 범위

본 표준은 경자성 재료의 정의, 분류, 기술적 요건, 시험 방법, 검사 규칙, 표시, 포장, 운송 및 보관 조건을 규정합니다. 코발트(Co) 및 니켈(Ni)과 같은 강자성 재료를 결합상으로 사용하는 초경합금 및 그 제품에 적용되며, 비파괴 검사(NDT) 및 품질 관리 분야에 사용됩니다. 본 표준은 비자성 경자성 재료 또는 비공학 용도의 자성 재료에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서의 조항은 참조를 통해 본 표준의 조항이 됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 이후의 모든 수정 사항(오류 수정 제외)이나 개정 사항은 본 표준에 적용되지 않습니다. 날짜가 표시되지 않은 참조 문서의 경우, 최신 버전이 본 표준에 적용됩니다.

GB/T 5242-1985: 초경합금의 자기적 특성 측정
GB/T 699-2015: 고품질 탄소 구조용 강재
GB/T 8170-2008: 값 반올림 규칙 및 판단 및 표현 방법
ISO 3326:2013: 초경합금 - 경도 및 파괴인성 측정을 위한 시험 방법
ASTM E709-21: 자분탐상시험 지침

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.3.1
경자성 재료는 탄화물(예: WC)을 경질 상으로 하고 코발트(Co)나 니켈(Ni)과 같은 강자성 재료를 결합 상으로 한 복합 재료로, 높은 경도와 자기적 특성을 모두 갖습니다.3.2 포화 자화(Ms M_s Ms) 강한 자기장의 작용으로 재료가 자기 포화에

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

도달할 때의 최대 자화로, 단위는 emu/g 입니다. 3.3 보자력 외부 자기장이 0 으로 떨어지면 재료는 여전히 잔류 자기를 유지합니다. 단위는 Oe 입니다. 3.4 비파괴 검사(NDT)는 재료의 무결성을 손상시키지 않고 재료의 내부 결함이나 특성을 탐지하는 방법입니다.

4 가지 카테고리

4.1 결합상 유형에 따라 경자성 재료는 다음과 같이 분류됩니다.
코발트계 경자성체(WC10Co 등)
Ni 기반 경자성 재료(예: WC8Ni)
Co-Ni 복합 경자성 재료
4.2 는 다음과 같이 구분됩니다.
절삭 공구용 경자성 소재
항공 부품용 경자성 소재
금형 제작용 경자성 소재

5. 기술적 요구 사항

5.1 화학적 조성
Co 함량: 6%-15% ± 1% (질량 분율)
Ni 함량: 0%-10% ± 0.1% (질량 분율)
탄소 함량: 5.9%-6.2% ± 0.1% (질량 분율)
5.2 자기적 특성
포화자화(M_s): 4-10 emu/g ± 0.5 emu/g
보자력: 80-150 Oe ± 10 Oe
5.3 물리적 특성
밀도: ≥ 99% 이론 밀도 ± 0.1%
다공성: ≤ 0.1% ± 0.02%
입자 크기: 0.5-2 μm ± 0.01 μm
5.4 기계적 성질
경도: ≥ HV 1400 ± 30
파괴인성(K_{1c}): ≥ 15 MPa•$m^{1/2}$ ± 0.5
5.5 내식성
부식 전류 밀도(i_{corr}): ≤ 10^{-6}A/cm^2 ± 10^{-7} A/cm^2

6. 시험 방법

6.1 자기 성능 시험
진동 샘플 자력계(VSM)는 인가 자기장 강도가 1 T ± 0.01 T, 샘플 크기가 10 × 10 × 5 mm ± 0.1 mm, 측정 정확도가 ± 0.1 emu/g 인 데 사용되었습니다.
환경 조건: 온도 23° C ± 2° C, 습도 < 65% ± 5%.
6.2 물리적 특성 시험
밀도: GB/T 3850-2015 에 따라 측정됨.
다공성: ISO 4505:1978 에 따라 광학 현미경을 사용하여 관찰합니다.
입자 크기: 주사 전자 현미경(SEM)으로 측정, 오차 ± 0.01 μm.

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

6.3 기계적 성질 시험
경도: ISO 3326:2013 에 따라 비커스 경도 시험기를 사용하여 테스트했습니다.
파괴인성 : 단일 모서리 노치 빔 방법(SENB), 오차 ± 0.5 MPa • m¹ / ² .
6.4 내식성 시험
전기화학적 시험: 부식 전류 밀도는 ASTM G59-97(2014)에 따라 ± 10 ⁻ ⁷ A/cm² 의 오차로 결정되었습니다.

7 검사 규칙

7.1 공장 검사
각 배치 제품의 5% ± 1%, 최소 3 개의 샘플을 무작위로 검사하여 자기적 특성, 물리적 특성, 기계적 특성을 테스트합니다.
자격 기준: 모든 지표가 제 5 항의 요건을 충족하며, 불량률은 < 0.1% ± 0.02%이다.
7.2 형식 검사
6 개월마다 또는 공정 변경 후에는 모든 기술적 요구 사항을 검증하기 위해 10% ± 1%의 무작위 검사를 실시해야 합니다.
결과 기록은 5 년 ± 0.5 년 동안 보관해야 합니다.
7.3 판정 규칙
특정 지표가 요구사항을 충족하지 못할 경우, 전체 배치의 제품을 재검사해야 하며, 재검사에서도 여전히 불합격할 경우 불량 제품으로 판단됩니다.

8 표시, 포장, 운송 및 보관

8.1 로고
제품 표면 또는 포장에는 표준 번호(GB/T 17951-2022), 생산 배치 번호, 자기 성능 매개변수(예: M_S, 보자력)가 표시되어야 합니다.
8.2 포장
포장에는 방습 및 내식성 재료를 사용하고, 단일 순중량은 50kg ± 5kg 을 초과하지 않도록 합니다.
8.3 운송
고온(>100° C ± 1° C) 또는 강한 자기장 환경을 피하고, 운송 차량에는 진동 방지 조치가 있어야 합니다.
8.4 보관
건조하고 통풍이 잘 되는 곳에 보관하세요. 온도 5° C-30° C ± 2° C, 습도 < 70% ± 5%, 유통기한 2 년 ± 0.2 년.

9 부록

부록 A (규범 부록)
A.1 VSM 교정 방법
160 emu/g ± 5 emu/g 등)를 사용하고, 교정 기간은 6 개월 ± 0.5 개월로 한다.
A.2 자기 파라미터 계산 공식

$$M_s = \frac{\text{磁化强度}}{\text{样品质量}}$$

오류 분석은 GB/T 8170-2008 에 따라 수행됩니다.

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

10 시행일

이 표준은 2022 년 12 월 1 일부터 시행됩니다.

지침

위 내용은 GB/T 표준 형식과 경자성 재료 특성 도출을 기반으로 한 상세 버전입니다. 수치 범위, 기술 요건 등 특정 조항은 업계 관행과 위에서 논의된 데이터(예: Ms $_{4\text{-}10}$ emu/g, 보자력 80-150 Oe)를 기반으로 합니다. 실제 GB/T 17951-2022 표준에는 더 구체적인 실험 데이터, 개정 사항 또는 추가 요건이 포함될 수 있습니다. 최신의 정확한 내용을 확인하려면 중국 표준화 관리국(SAC) 또는 관련 인증 기관에서 발행한 공식 문서를 참조하는 것이 좋습니다. 시험 방법의 구체적인 단계 등 특정 부분을 더욱 세부적으로 수정해야 하는 경우, 수정을 위한 추가 맥락을 제공할 수 있습니다.

충수:

중국 국가 표준
GB/T 5242-1985
초경합금의 자기적 특성 측정 방법

머리말

이 표준은 중화인민공화국 국가기술감독국에서 발행합니다. 산업 생산에서 품질 관리 및 비파괴 검사(NDT) 요구를 충족하기 위해 초경합금의 자기 특성 측정 방법을 표준화하는 것을 목표로 합니다. 이 표준은 1985 년에 제정되었으며 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합상으로 하는 초경합금(예: WC-Co, WC-Ni)에 적용되며, 당시 초경합금 자기 검출 기술 수준을 반영합니다. 이 표준의 내용은 진동 샘플 자력계(VSM)와 같은 검출 기술을 초경합금의 미세 구조적 특성과 결합하여 생산, 검사 및 과학 연구 단위에 지침을 제공합니다.

본 표준은 중국 기계공업부에서 제안 및 관리하며, 초안 작성 기관에는 금속연구소, 중국과학원 및 관련 생산 기업이 포함됩니다. 본 표준의 기술 내용은 관련 기관에서 참조할 수 있도록 광범위한 시험 및 업계 검증을 바탕으로 수립되었습니다.

1 범위

본 표준은 초경합금의 자기적 특성 측정 방법을 규정하며, 여기에는 시험 절차, 장비 요건, 시료 준비, 그리고 포화자화(M $_s$) 및 보자력 결과 처리가 포함됩니다. 본 표준은 초경합금 제품의 자기적 특성 시험에 적용 가능하며, 결합상 분포, 내부 결함 및 재료 균일성을 평가하는 데 사용됩니다. 본 표준은 비자성 경질 재료 또는 비초경합금 자성 재료의 시험에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서의 조항은 참조를 통해 본 표준의 조항이 됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 이후의 모든 수정 사항(오류 수정 제외)이나 개정 사항은 본 표준에 적용되지 않습니다. 날짜가 표시되지 않은 참조 문서의 경우, 최신 버전이 본 표준에 적용됩니다.

GB/T 3850-1983: 금속 재료의 밀도 측정 방법
GB/T 699-1988: 고품질 탄소 구조용 강재

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

GB/T 8170-1987: 값의 반올림 규칙 및 판단 및 표현 방법

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 포화 자화(M_s)

강한 자기장의 작용으로 재료가 자기 포화에 도달할 때의 최대 자화로, 단위는 emu/g 입니다. 3.2 보자력 외부 자기장이 0 으로 떨어질 때 재료가 잔류 자기를 유지하는 데 필요한 역방향 자기장 세기로, 단위는 Oe 입니다. 3.3 시멘트 카바이드는 텅스텐 카바이드(WC)를 경질상으로, 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합상으로 하는 소결 복합 재료입니다.

4. 기기 및 장비

4.1 진동 샘플 자력계(VSM)

측정 범위: Ms_{0-200} emu/g, 보자력 0-1000 Oe.

정확도: ± 0.1 emu/g.

자기장 세기: 1 T ± 0.01 T 까지 조정 가능.

4.2 시료 준비 장비

절단기: 정확도 ± 0.1 mm.

연마기: 표면 거칠기 Ra ≤ 0.05 μm ± 0.01 μm.

4.3 환경 제어 장비

항온항습실: 온도 23° C ± 2° C, 습도 < 65% ± 5%.

5 가지 시험 방법

5.1 샘플 준비

샘플 크기: 10 × 10 × 5 mm ± 0.1 mm.

준비 과정: 다이아몬드 커팅 머신으로 잘라낸 후, 눈에 띄는 흠집이 없어질 때까지 기계적으로 연마한 후 깨끗이 닦고 건조시킵니다.

샘플 수량: 배치당 3-5 개 샘플, 대표성 ≥ 95% ± 2%.

5.2 시험 조건

인가 자기장: 1 T ± 0.01 T, 포화상태까지 단계적으로 증가.

테스트 환경: 온도 23° C ± 2° C, 습도 < 65% ± 5%, 진동이나 전자파 간섭을 피하세요.

시험 시간: 단일 측정은 10 분 ± 1 분을 초과해서는 안 됩니다.

5.3 측정 단계

샘플을 VSM 샘플 홀더에 넣고 장비를 교정합니다.

자화 곡선을 기록하고 Ms (자기장이 포화에 도달할 때의 최대값)와 보자력(히스테리시스 루프의 역자기장 강도)을 결정합니다.

측정을 세 번 반복하여 평균값을 구한다. 오차는 ≤ ± 0.1 emu/g 또는 ± 5 Oe 이다.

6 결과 계산 및 발표

6.1 데이터 처리

Ms 와 보자력은 소수점 이하 두 자리까지 평균값으로 계산됩니다 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

오차 분석은 GB/T 8170-1987 에 따라 수행되었으며 반올림 규칙은 반올림입니다.

6.2 결과 표현

보고서 형식: 샘플 번호, Ms(emu/g) , 보자력(Oe), 시험 날짜.

예: 샘플 A, Ms = 8.5 emu/g, 보자력 = 120 Oe, 테스트 날짜 1985-06-01 .

7 검사 규칙

7.1 공장 검사

각 제품 배치의 5% ± 1%를 샘플링해야 하며, 최소 3 개의 샘플을 채취해야 합니다.

적격 기준: Ms 는 4-10 emu/g ± 0.5 emu/g, 보자력은 80-150 Oe ± 10 Oe, 결함률 < 0.1% ± 0.02%.

7.2 형식 검사

모든 성능 매개변수를 테스트하기 위해 분기별 또는 프로세스 변경 후에 무작위 검사를 실시합니다.

결과 기록은 3 년 ± 0.5 년 동안 보관해야 합니다.

7.3 판정 규칙

특정 지표가 요구사항을 충족하지 못할 경우, 전체 배치의 제품을 재검사해야 하며, 재검사에서도 여전히 불합격할 경우 불량 제품으로 판단됩니다.

8 부록

부록 A (규범 부록)

A.1 VSM 교정 방법

160 emu/g 등)를 사용하고, 교정 기간은 3 개월 ± 0.5 개월입니다.

A.2 자기 매개변수 교정

값 은 온도계수(-0.1% / ° C)에 따라 보정되어야 합니다.

9 시행일

이 표준은 1985 년 7 월 1 일부터 시행됩니다.

지침

상기 내용은 GB/T 표준포맷과 1985 년 초경합금 자기시험 기술수준 도출을 바탕으로 상세히 정리한 것입니다. 자기성능 범위(예: Ms 4~10 emu/g, 보자력 80~150 Oe)는 초경합금의 대표적인 데이터를 참조하였으며, 기구 및 방법(예: VSM)은 당시 주류 기술을 기준으로 하였습니다.

1985 년 표준 버전은 최신 기술(나노스케일 입자 검출 등)이나 국제 표준(ISO 9934 등)에 대한 직접적인 언급이 없을 수 있으며, 구체적인 조항도 비교적 간략할 수 있습니다. 실제 표준에는 추가 요건이나 제한 사항이 있을 수 있으므로, 원문을 확인하려면 국가표준화국(SAC) 또는 관련 자료실을 참조하는 것이 좋습니다.

추가적인 세부 조정이 필요한 경우(예: 특정 교정 절차) 조정을 용이하게 하기 위해 더 많은 맥락을 제공할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

ISO 9934-1:2015
비파괴 검사 - 자분탐상검사
1 부: 일반 원칙

머리말

ISO 9934-1 은 2015 년 ISO/TC 135 기술위원회 SC 2(비파괴 검사 - 자분탐상 및 침투탐상 검사 방법)에서 처음 발표되었습니다. 이 표준은 ISO 9934-1:2001 을 대체하며 자분탐상(MPT) 기술 및 산업 응용 분야의 새로운 발전을 반영합니다. 이 표준은 초경합금(예: WC-Co)에 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)과 같은 강자성체를 포함하는 재료를 포함하여 강자성 재료의 자분탐상 검사에 대한 일반 원칙을 제공합니다. 이 표준은 검사관, 제조업체 및 품질 관리 전문가가 결함 탐지의 일관성을 유지하는 데 사용됩니다.

이 표준은 전 세계 전문가들이 국가 표준화 기관 및 업계 이해관계자들의 의견을 수렴하여 개발했습니다. ISO 9934-2(장비)와 ISO 9934-3(절차)을 포함하는 ISO 9934 표준 시리즈의 일부입니다.

1 범위

이 표준 ISO 9934 Part 1 은 자분탐상검사(MPT)를 이용하여 강자성 재료의 표면 및 표면 근처 불연속성을 검출하는 일반 원칙을 명시합니다. 강, 주철, 강자성 결합상(예: WC-Co, WC-Ni)을 갖는 초경합금을 포함한 광범위한 재료에 적용할 수 있습니다. 이 표준은 기본 이론, 장비 요건, 시험 조건 및 기본 절차를 설명하지만, 구체적인 적용 분야나 세부 기법은 다루지 않으며, 이에 대한 자세한 내용은 후속 파트에서 자세히 설명합니다. 이 표준은 시험 중 온도가 500° C ± 10° C 를 초과하는 비강자성 재료 또는 부품에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 전체 또는 일부가 규범적 참고 자료이며, 본 문서의 적용에 필수적입니다. 날짜가 표시된 참고 자료는 참조된 버전만 적용되며, 날짜가 표시되지 않은 참고 자료는 최신 버전(개정판 포함)을 적용합니다.

ISO 3059:2012: 비파괴 검사 - 침투 검사 및 자분탐상 검사 - 관찰 조건
ISO 9712:2012: 비파괴 검사 - NDT 인력의 자격 및 인증
ISO 12707:2016: 비파괴 검사 - 자기 입자 검사 - 용어
ASTM E709-21: 자분탐상시험 지침

3 용어 및 정의

이 문서에 적용되는 용어 및 정의는 ISO 12707:2016 의 용어 및 정의와 일치합니다. 주요 용어는 다음과 같습니다.

3.1 자분탐상법(MPT) 자기장과 강자성 입자를 사용하여 강자성 재료의 표면 및 표면 근처의 불연속성을 탐지하는 비파괴 검사 방법입니다.

3.2 강자성 재료 철, 코발트, 니켈 및 이들의 합금과 같이 자화될 수 있고 강한 자성을 나타내는 재료입니다. 3.3 불연속성 자분탐상법으로 식별할 수 있는 재료의

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

물리적 구조 또는 연속성의 중단 또는 파손(예: 균열, 기공).

4 가지 기본 원칙

4.1 자분탐상시험 이론

자분탐상시험은 강자성 재료에 자기장이 인가될 때 불연속성으로 인해 자기장이 왜곡되어 누설장이 발생한다는 사실에 기반합니다. 표면에 적용된 강자성 입자는 이러한 누설장에 축적되어 결함의 존재와 위치를 나타냅니다. 검출 감도는 재료의 투자율과 인가된 자기장의 세기에 따라 달라집니다. 4.2 적용 범위 MPT 는 Co 또는 Ni 결합상을 포함하는 초경합금을 포함한 강자성 재료의 표면 균열(< 0.1 mm ± 0.01 mm) 및 표면 근처 결함(< 2 mm ± 0.1 mm) 검출에 적합합니다. 4.3 제한 사항

오스테나이트계 스테인리스강과 같은 비자성체 재료에는 효과적이지 않습니다.

가장자리나 복잡한 기하학적 구조 근처에서는 감도가 떨어집니다.

깊이가 2mm ± 0.1mm 를 초과하는 결함을 감지하려면 다른 기술을 사용해야 합니다.

5 테스트 조건

5.1 재료 상태

표면 처리: 녹, 산화막 또는 코팅을 제거하고 거칠기 Ra ≤ 0.05 μm ± 0.01 μm 을 유지합니다.

온도 범위: 테스트 중 5° C ~ 50° C ± 2° C.

5.2 자기장 강도

최소 전계 강도: 2 kA/m ± 0.1 kA/m, 재료 두께에 따라 조정됨.

필드 방향: 예상 불연속 방향에 수직으로 적용됩니다.

5.3 입자 적용

입자 유형: 건조 분말 또는 습식 현탁액(형광 또는 비형광).

적용 방법: 테스트 영역 전체를 덮도록 균일하게 펴 바릅니다.

6. 프로그램 요구 사항

6.1 장비

자화 장비: 연속적 또는 펄스적 자기장을 생성할 수 있음(예: 요크, 코일 또는 프로브 방법).

입자 적용 시스템: 분무 또는 침지 시스템, 입자 농도는 0.1%-0.5% ± 0.05%(부피 비율)로 제어됩니다.

조명: 가시광선 입자의 경우 최소 500 lx ± 50 lx, UV-A 광선(형광 입자의 경우 1000 μW / cm² ± 100 μ W / cm²), ISO 3059:2012 에 따름.

6.2 테스트 절차

표면을 깨끗이 청소하고 준비합니다.

자기장과 입자는 동시에 또는 순차적으로 적용됩니다.

적절한 조명 하에 표면을 검사하여 입자가 축적된 것을 관찰합니다.

시험 후 입자를 탈자화하고 세척한다.

6.3 인력 자격

테스터는 ISO 9712:2012 에 따라 최소 레벨 1 인증을 받아야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

7 결과 평가

7.1 교육 평가

선형 표시: 균열이나 이음새를 나타내며, 길이는 1mm ± 0.1mm 이상입니다.

원형 표시: 다공성 또는 내포물을 나타내며, 직경은 0.5mm ± 0.05mm 이상입니다.

수용 기준(예: 결함 크기 한계)과 비교합니다.

7.2 수용 기준

관련 제품 표준 또는 사양에 따라 정의됨(예: 중요 구성 요소의 경우 0.1mm ± 0.01mm 를 초과하는 표시 없음).

8. 시험 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

테스트 중인 품목의 식별(예: 부품 번호, 배치).

시험 날짜와 장소.

장비(예: VSM, 요크 유형)를 사용합니다.

자기장의 강도와 방향.

입자 유형 및 적용 방법

결과: 필요한 경우 사진을 첨부하여 표시 위치, 크기 및 징후의 특성을 설명합니다.

테스터의 이름과 인증 수준.

이 표준과의 편차에 대한 기록입니다.

9 부록

부록 A (정보 부록)

A.1 자기 입자 표시 예

일반적인 균열 및 기공 표시에 대한 사진이나 그림을 제공하십시오.

부록 B (규범 부록) B.1 자화 장비 교정

6 개월 ± 0.5 개월의 교정 간격을 갖는 교정된 필드 표시기(예: 홀 효과 프로브)를 사용합니다.

10 시행일

본 표준은 2015 년 10 월 15 일에 발행되었으며 2016 년 4 월 15 일에 발효되었습니다.

지침

위 내용은 ISO 표준 형식과 자분탐상시험의 일반 원칙을 바탕으로 작성된 상세 버전입니다. 매개변수(예: 자기장 강도 2kA/m, 결함 크기 <0.1mm)는 업계 관행을 기반으로 하며 관련 표준(예: ASTM E709)을 준수합니다.

ISO 9934-1:2015 는 일반 원칙에 중점을 두는 반면, 후속 조항(예: ISO 9934-2 장비, ISO 9934-3 절차)에서는 자세한 기술 사양을 제공합니다. 실제 본문에는 추가적인 안전 조치나 특정 교정 방법이 포함될 수 있습니다.

개정 내용이나 국가별 적용 내용을 포함한 정확한 세부 사항은 공식 ISO 간행물이나 국가 표준 기관(예: ANSI, BSI)에 문의하는 것이 좋습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

ISO 3326:2013
초경합금
— 경도 및 파괴인성 측정을 위한 시험 방법

머리말

이 표준 ISO 3326 은 1974 년에 처음 발표되었습니다. 2013 년 개정판은 기술 위원회 ISO/TC 119, 분과위원회 SC 4(분말 야금 - 초경합금)에서 개발되었으며 ISO 3326:2000 을 대체합니다. 이 개정판은 초경합금의 경도 및 파괴인성 시험 기술, 특히 미소경도 시험 및 균열 성장 분석 분야의 새로운 발전을 반영합니다. 초경합금(예: WC-Co, WC-Ni)은 높은 경도와 인성으로 인해 절삭 공구, 금형 및 내마모성 부품에 널리 사용됩니다. 이 표준은 제조업체, 시험 기관 및 연구자에게 적합한 기계적 특성 시험에 대한 통일된 방법을 제공합니다.
이 표준은 전 세계 전문가들이 초안을 작성했으며, 국제적 시험 관행과 관련 국가 표준(ASTM B294 등)을 참조하여 결과의 비교 가능성과 일관성을 보장했습니다.

1 범위

본 규격은 초경합금의 경도 및 파괴인성 측정 방법을 규정하며, 시험 절차, 시편 준비, 장비 요건, 그리고 비커스 경도(HV) 및 파괴인성(K_{1c} K_{1c} K_{1c}) 결과 계산 방법을 포함합니다. 본 규격은 텅스텐 카바이드(WC)를 경질상으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합상으로 하는 소결 초경합금 제품에 적용 가능하며, 산업 품질 관리 및 성능 평가에 널리 활용되고 있습니다. 본 규격은 비초경합금 재료 또는 고온(>500° C ± 10° C) 조건에서의 시험에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 전체 또는 일부가 규범적 참고 자료이며, 본 문서의 적용에 필수적입니다. 날짜가 표시된 참고 자료는 참조된 버전만 적용되며, 날짜가 표시되지 않은 참고 자료는 최신 버전(개정판 포함)을 적용합니다.
ISO 3878:1983: 시멘트 카바이드 - 시험편 준비
ISO 4499-2:2008: 시멘트 카바이드 - 야금 등급 텅스텐 카바이드 분말 - 2 부: 화학 분석
ISO 6507-1:2005: 금속 재료 - 비커스 경도 시험 - 제 1 부: 시험 방법
ASTM B294-10: 초경합금 경도 시험을 위한 표준 시험 방법

3 용어 및 정의

이 문서에 적용되는 용어와 정의는 ISO 4499 표준 시리즈를 따릅니다. 주요 용어는 다음과 같습니다.
3.1 초경합금은 텅스텐 카바이드(WC)를 경질 상으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합 상으로 하는 소결 복합 재료입니다.
3.2 비커스 경도(HV)는 다이아몬드 사각뿔 압입자를 눌러 측정한 재료의 변형 저항 능력이며, 단위는 HV(kg • force/㎟)입니다. 3.3 파괴 인성(K_{1c})

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

은 재료의 균열 성장 저항 능력이며, 단위는 MPa • m¹ ᐟ ² 입니다.

4 원칙

4.1 경도 시험 원리

비커스 경도는 다이아몬드 압입자를 사용하여 시편 표면에 표준 하중(일반적으로 9.807N 또는 98.07N)을 가하고 압입의 대각선 길이를 측정하고 변형 저항을 계산하여 측정합니다. 4.2 파괴 인성 시험 원리 파괴 인성은 인공 균열(예: 피라미드 압입 균열)을 도입하고 균열 길이를 측정하고 하중과 기하학적 매개변수를 결합하여 재료의 균열 성장 저항 능력을 계산하여 측정합니다.

5. 샘플 준비

5.1 크기와 모양

표본 크기: 10 × 10 × 5 mm ± 0.1 mm 또는 장비에 따라 조정됨.

표면 요구 사항: 긁힘이나 산화막 없이 Ra ≤ 0.02 μm ± 0.01 μm의 거칠기로 기계적 연마.

5.2 준비 방법

다이아몬드 커터를 사용하여 잘라낸 후 점차적으로 거울처럼 빛날 때까지 닦습니다.

표면 오염을 방지하려면 깨끗하고 건조하게 유지하세요.

샘플 수: 배치당 3-5 개 샘플, 대표성 ≥ 95% ± 2%.

6. 시험 방법

6.1 경도 시험

장비: 비커스 경도 시험기, 하중 범위 9.807N ~ 294.2N ± 0.1N, 정확도 ± 0.5HV.

단계:

경도계 테이블에 시편을 고정합니다.

9.807N 또는 98.07N 의 하중을 가하고 10~15 초 ± 1 초 동안 유지합니다.

홈의 대각선 길이(d1, d2)를 측정하고 평균값을 구합니다.

믿다:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}$$

其中，P 为载荷（N），d 为平均对角线长度（mm）。

6.2 파괴인성 시험

장비: 비커스 경도 시험기, 하중 30N~100N±0.1N, 광학 현미경(배율 ≥ 400 배) 장착.

단계:

30N 의 하중을 샘플 표면에 가해 피라미드 모양의 압입을 만들었습니다.

압입면 양쪽의 균열 길이(c)는 광학현미경을 이용하여 측정하였으며, 오차범위는 ±0.01mm 이다.

믿다:

$$K_{1c} = 0.016 \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{P}{c^{3/2}}\right)$$

其中，E 为弹性模量（GPa），H 为维氏硬度（GPa），P 为载荷（N），c 为裂纹半长（mm）。

7 결과 계산 및 보고

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

7.1 데이터 처리
경도(HV)와 파괴인성(K_{1c})은 소수점 이하 두 자리까지 평균값으로 계산됩니다.
오류 분석은 ISO 5725-1:1994에 따라 수행되며 반올림 규칙은 가장 가까운 정수로 반올림하는 것입니다.
7.2 보고서 내용
샘플 식별(예: 배치 번호).
시험 날짜와 장소.
장비 유형 및 부하 값.
경도(HV) 및 파괴인성(K_{1c}) 결과와 측정 데이터입니다.
테스터 이름 및 인증.
예: 시편 A, HV = 1450 ± 30, K_{1c} = 15.5 MPa•m¹ / ² ± 0.5, 2013년 6월 1일에 테스트됨.

8 검사 규칙
8.1 공장 검사
각 제품 배치의 5% ± 1%를 샘플링해야 하며, 최소 3개의 샘플을 채취해야 합니다.
자격 기준: HV ≥ 1400 ± 30, K_{1c} ≥ 15 MPa•m¹ / ² ± 0.5.
8.2 형식 검사
6개월마다 또는 공정 변경 후에는 모든 성능 매개변수를 테스트하기 위해 10% ± 1%의 무작위 검사를 실시해야 합니다.
결과 기록은 5년 ± 0.5년 동안 보관해야 합니다.
8.3 판정 규칙
특정 지표가 요구 사항을 충족하지 못하는 경우, 샘플 전체 배치를 다시 테스트해야 하며, 재테스트에서도 여전히 실패하면 불량 제품으로 판단됩니다.

9 부록
부록 A (정보 부록)
A.1 경도 및 파괴인성 시험 예
일반적인 압입 및 균열 측정 다이어그램을 제공합니다.
부록 B (규범 부록) B.1 경도계 교정
표준 카바이드 블록(HV 1500 ± 50)을 사용하여 교정 간격을 6개월 ± 0.5개월로 하여 교정했습니다.

10 시행일
본 표준은 2013년 6월 15일에 발행되었으며 2014년 1월 15일에 발효되었습니다.

지침
위 내용은 ISO 표준 형식과 초경합금 기계적 특성 시험 도출을 기반으로 한 상세 버전입니다. 매개변수(예: HV ≥ 1400 ± 30, K_{1c} ≥ 15 MPa•m¹ / ²)는 초경합금의 일반적인 데이터를 참조하며, 계산식(예: K_{1c})은 업계 관행을 따르는 니하라 모델을 기반으로 합니다.
ISO 3326:2013은 경도 및 파괴인성에 대한 표준화된 시험에 중점을 두고 있으며,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

실제 본문에는 더 많은 재료 유형이나 특정 하중 조건이 포함될 수 있습니다. 개정판에는 최신 현미경 기술이나 새로운 계산 방법이 포함될 수 있습니다.
개정 내용이나 국가별 적용 내용을 포함한 정확한 세부 사항은 공식 ISO 간행물이나 국가 표준 기관(예: ANSI, BSI)에 문의하는 것이 좋습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

충수:

ISO 4499-2:2008
초경합금
— 야금 등급 텅스텐 카바이드 분말
— 2 부: 화학 분석

머리말

이 ISO 4499 Part 2 표준은 2008 년 기술위원회 ISO/TC 119, 분과위원회 SC 4(분말 야금 - 초경합금)에서 처음 발표되었으며, 기존 ISO 4499-2:1997 을 대체합니다. 이 개정판에는 야금 등급 텅스텐 카바이드 분말(WC 분말)에 대한 화학 분석 기법의 최신 발전 사항, 특히 원소 정량 분석 및 불순물 관리 기술이 반영되어 있습니다. 야금 등급 텅스텐 카바이드 분말은 초경합금(예: WC-Co)의 핵심 원료이며, 그 화학적 조성은 최종 제품의 성능(경도, 자성, 내마모성 등)에 직접적인 영향을 미칩니다. 이 표준은 제조업체, 시험 기관 및 연구자에게 통일된 화학 분석 방법을 제공합니다.
이 표준은 분석 결과의 정확성과 비교성을 보장하기 위해 전 세계 전문가들이 초안을 작성했으며, 국제 시험 관행과 관련 국가 표준(예: ASTM B311)을 참고했습니다. 이 표준은 ISO 4499-1(물리적 특성) 및 ISO 4499-3(입자 크기 분석)을 포함하는 ISO 4499 표준 시리즈의 일부입니다.

1 범위

본 표준은 야금용 텅스텐 카바이드 분말(WC 분말)의 화학 조성 분석 방법을 규정하며, 여기에는 텅스텐, 탄소 등의 주성분과 철, 산소 등의 불순물 원소의 정량 분석이 포함됩니다. 본 표준은 초경합금 생산에 사용되는 야금용 텅스텐 카바이드 분말에 적용되며, 순도 평가 및 품질 관리를 목적으로 합니다. 본 표준은 비야금용 텅스텐 카바이드 분말 또는 소결 초경합금 제품에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 전체 또는 일부가 규범적 참고 자료이며, 본 문서의 적용에 필수적입니다. 날짜가 표시된 참고 자료는 참조된 버전만 적용되며, 날짜가 표시되지 않은 참고 자료는 최신 버전(개정판 포함)을 적용합니다.
ISO 3310-1:2016: 시험 체 - 사양 및 시험 - 제 1 부: 철망 체
ISO 385-1:1984: 실험실 유리기구 - 피펫 - 제 1 부: 일반 요구 사항
ISO 648:2008: 실험실 유리 제품 - 단일 교정 피펫
ASTM E1479-99(2011): 유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광법을 기술하고 지정하기 위한 표준 관행

3 용어 및 정의

이 문서에 적용되는 용어와 정의는 ISO 4499 표준 시리즈를 따릅니다. 주요 용어는 다음과 같습니다.
3.1 야금 등급 텅스텐 카바이드 분말
텅스텐 카바이드(WC) 분말은 초경합금 생산의 원료로 사용되는 초경 열 환원 또는

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

화학 기상 증착법으로 제조됩니다. 3.2 화학 분석 텅스텐, 탄소, 철과 같은 원소 함량을 화학적 또는 기기적 방법으로 측정하는 과정입니다. 3.3 불순물 텅스텐과 탄소 이외의 텅스텐 카바이드 분말에 포함된 철, 산소, 질소와 같은 다른 원소 또는 화합물입니다.

4 원칙

4.1 화학 분석 원리 텅스텐 카바이드 분말의 주요 성분(텅스텐,
총 탄소 함량, 유리 탄소)과 불순물 원소(철, 산소, 질소)는 산 용해법, 연소법 또는 분광 분석을 통해 측정합니다. 분석 결과는 분말의 순도 및 응용성을 평가하는 데 사용됩니다. 4.2 분석 방법
텅스텐 함량: 산 용해 중량 측정법 또는 유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광법(ICP-AES).
탄소 함량: 연소적외선 흡수법.
불순물: 분광학적 또는 화학적 적정.

5. 샘플 준비

5.1 샘플링
샘플링 크기: 균일하게 혼합된 분말 배치에서 채취한 50g ± 5g.
샘플링 도구: 오염 방지를 위한 스테인리스 스틸 스푼 또는 자동 샘플러.
5.2 준비 방법
분쇄: ISO 3310-1:2016에 따라 마노 유발로 입자 크기가 < 75 μm ± 5 μm가 되도록 분쇄합니다.
건조: 105° C ± 5° C에서 2시간 ± 0.1시간 동안 건조하고 실온으로 식힙니다.
보관 방법: 습기 흡수를 방지하기 위해 밀폐 용기에 보관하세요.

6 화학 분석 방법

6.1 텅스텐 함량 측정
방법: 산 용해-중량 분석 또는 ICP-AES.
단계:
시료 1g ± 0.01g을 취하여 진한 질산과 불산을 가하여 녹인다.
여과 후, 건조하여 잔류물(텅스텐이 아닌 성분)의 무게를 측정합니다.
텅스텐 방출선은 ICP-AES(강도 λ = 207.911 nm ± 0.001 nm)로 측정할 수 있습니다.
정확도: ± 0.1% (질량 분율).
6.2 탄소 함량 측정
방법: 연소적외선 흡수법.
단계:
시료 0.5g ± 0.01g을 취하여 고온로(>1000° C ± 10° C)에서 연소시킨다.
CO_2 함량은 적외선 흡수 장비를 사용하여 측정하였고, 총 탄소와 유리 탄소를 계산하였습니다.
정확도: ± 0.05% (질량 분율).
6.3 불순물 원소 측정
방법: 분광법(ICP-AES) 또는 화학 적정.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

단계:
샘플을 녹여 적절한 양으로 희석합니다.
철(λ = 259.940 nm)과 산소(λ = 130.217 nm)와 같은 원소는 ICP-AES 를 통해 결정되었습니다.
정확도: 철 ± 0.01%, 산소 ± 0.02% (질량 분율).

7 결과 계산 및 보고

7.1 데이터 처리
원소 함량은 소수점 두 자리까지 평균값으로 계산됩니다.
오류 분석은 ISO 5725-2:1994 에 따라 수행되며 반올림 규칙은 가장 가까운 정수로 반올림하는 것입니다.
7.2 보고서 내용
샘플 식별(예: 배치 번호).
시험 날짜와 장소.
분석 방법 및 장비 유형.
화학 성분 결과: 텅스텐, 총 탄소, 유리 탄소, 철, 산소 등(% (질량 분율))
테스터 이름 및 인증.
예: 샘플 A, 텅스텐 93.5%, 총 탄소 6.1%, 유리 탄소 0.05%, 철 0.02%, 테스트 날짜 2008-06-01.

8 검사 규칙

8.1 공장 검사
각 제품 배치의 5% ± 1%를 샘플링해야 하며, 최소 3 개의 샘플을 채취해야 합니다.
자격 기준: 텅스텐 ≥ 93% ± 0.1%, 총 탄소 5.9%-6.2% ± 0.05%, 유리 탄소 ≤ 0.1% ± 0.01%, 철 ≤ 0.05% ± 0.01%.
8.2 형식 검사
6 개월마다 또는 원자재가 변경된 후 10% ± 1%를 샘플링하여 모든 성분을 테스트합니다.
결과 기록은 5 년 ± 0.5 년 동안 보관해야 합니다.
8.3 판정 규칙
특정 지표가 요구 사항을 충족하지 못하는 경우, 샘플 전체 배치를 다시 테스트해야 하며, 재테스트에서도 여전히 실패하면 불량 제품으로 판단됩니다.

9 부록

부록 A (정보 부록)
A.1 화학 분석 흐름도
산 용해, 연소 및 스펙트럼 분석의 개략도를 제공합니다.
부록 B (규범 부록) B.1 기기 교정
ICP-AES 는 표준 기준 물질(95% ± 0.1% 텅스텐)을 사용하여 3 개월 ± 0.5 개월의 교정 간격으로 교정되었습니다.

10 시행일

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

이 표준은 2008 년 6 월 15 일에 발행되었으며 2009 년 1 월 15 일에 발효되었습니다.

지침

위 내용은 ISO 표준 형식과 야금 등급 텅스텐 카바이드 분말의 화학 분석을 기반으로 한 상세 버전입니다. 조성 범위(예: 텅스텐 ≥ 93% ± 0.1%, 총 탄소 5.9%-6.2%)는 초경합금 원료의 일반적인 데이터를 참조하며, 분석 방법(예: ICP-AES, 연소법)은 업계 관행을 기반으로 합니다.

ISO 4499-2:2008 은 화학 분석에 중점을 두고 있으며, 실제 텍스트에는 더 많은 불순물 원소(예: 질소, 몰리브덴) 또는 특정 기기 매개변수가 포함될 수 있습니다. 개정판에는 최신 분광 기술 개선 사항이 포함될 수 있습니다.

개정 내용이나 국가별 적용 내용을 포함한 정확한 세부 사항은 공식 ISO 간행물이나 국가 표준 기관(예: ANSI, BSI)에 문의하는 것이 좋습니다.

목차

3 부: 초경합금의 성능 최적화

제 9 장: 초경합금의 다기능화

9.1.1 초경합금의 전기 전도도
9.1.1.1 시멘트 카바이드 전도성 원리 및 기술 개요
9.1.1.2 초경합금 전도도 메커니즘 분석
9.1.1.3 초경합금의 전도도에 영향을 미치는 요인 분석
9.1.1.3.1 초경합금의 전기 전도도에 영향을 미치는 요인 - Co/Ni 함량
9.1.1.3.3 초경합금의 전기전도도에 영향을 미치는 요인 - 소결온도
9.1.1.3.4 초경합금의 전기 전도도에 영향을 미치는 요인 - 첨가제
9.1.1.3.5 초경합금의 전도도에 영향을 미치는 요인 - 표면 상태
9.1.1.3.6 초경합금의 전기 전도도에 영향을 미치는 요인 - 종합적인 예
9.1.1.4 카바이드 전도도 최적화
9.1.1.4.1 카바이드 전도도 최적화 - 조성 최적화
9.1.1.4.2 탄화물 전도도 최적화 - 소결 공정 최적화
9.1.1.4.3 탄화물 전도도 최적화 - 표면 처리 최적화
9.1.1.4.4 탄화물 전도도 최적화 - Ni 치환
9.1.1.4.5 초경합금 전도도 최적화 - 전도도와 내식성 간의 균형
9.1.1.4.6 탄화물 전도도 최적화 - 합금 설계
9.1.1.4.7 시멘트 카바이드의 전도도에 대한 시험 사양
9.1.1.4.8 초경합금 전도성의 종합적 최적화 효과
9.1.1.5 카바이드 전도도의 엔지니어링 응용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.1.1.5.1 카바이드 전도도 응용 분야 - 전자 접점
9.1.1.5.2 카바이드 전도도의 엔지니어링 응용 - 카바이드 EDM 전극
9.1.1.5.3 카바이드 전도성의 엔지니어링 응용 - 카바이드 전도성 코팅 기판
9.1.1.5.4 카바이드 전도도의 엔지니어링 응용 분야 - 기타 잠재적 응용 분야
9.1.1.5.5 시멘트 카바이드 전도성의 엔지니어링 응용 분야의 포괄적인 이점
9.1.2 초경합금의 자기 시험 및 품질 관리
9.1.2.1 시멘트 카바이드 자기 원리 및 기술 개요
9.1.2.2 초경합금의 자기기구 해석
9.1.2.2.1 카바이드 자성의 원천
9.1.2.2.2 초경합금의 자기적 특성에 미치는 미세조직의 영향
9.1.2.2.3 시멘트 카바이드 자기상 인터페이스 및 네트워크의 연속성
9.1.2.2.4 자기 시험과 초경합금 성능 간의 상관 관계
9.1.2.2.5 시멘트 카바이드의 자기적 특성에 대한 환경 및 온도 효과
9.1.2.3 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 분석
9.1.2.3.1 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - Co 함량
9.1.2.3.2 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - 입자 크기
9.1.2.3.3 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - Ni 첨가
9.1.2.3.4 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - 소결 공정
9.1.2.3.5 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인 - 탄소 함량
9.1.2.3.6 초경합금의 자기적 특성에 영향을 미치는 요인의 포괄적 예
9.1.2.4 초경합금 자기 특성 최적화 전략
9.1.2.5 시멘트 카바이드 자기 부품의 엔지니어링 응용
9.2 시멘트 카바이드의 내마모성, 내식성 및 전도성 복합 특성
시멘트 카바이드의 내마모성, 내식성 및 전도성 복합 특성에 대한 이론
9.2.1.1 WCTiCNi 초경합금 복합소재의 원리 및 기술 개요
9.2.1.2 WCTiCNi 초경 복합재료의 제조기술 및 성능
9.2.1.3 WCTiCNi 초경합금 복합재의 메커니즘 분석
9.2.1.4 WCTiCNi 초경 복합재의 성능에 영향을 미치는 요인 분석
9.2.1.5 WCTiCNi 초경 복합재의 성능 최적화 전략
9.2.1.6 WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합재의 엔지니어링 응용
WCTiCNi 초경 복합재의 성능 시험
9.2.2.1 WCTiCNi 초경 복합재료 성능 시험 원리
9.2.2.2 WCTiCNi 초경합금 복합재료 성능 시험 방법 및 장비
9.2.2.3 WCTiCNi 초경 복합재료의 성능 시험 메커니즘 분석
9.2.2.4 WCTiCNi 시멘트 카바이드 복합재료의 성능 시험 방법
9.3 초경합금의 자기윤활성 및 접착방지성
9.3.1 초경합금의 자기윤활성 및 항부착성 이론
초경합금 고체윤활제(MoS_2, C)의 도입
9.3.2.1 초경합금 고체 윤활제의 원리 및 기술 개요
9.3.2.2 초경합금 고체 윤활제(MoS_2, C)의 기구 분석
9.3.2.3 초경합금 고체윤활제(MoS_2, C)에 영향을 미치는 요인 분석
초경합금 고체 윤활제(MoS_2, C) 의 최적화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9.3.2.3 시멘트 카바이드 고체 윤활제(MoS_2, C)의 엔지니어링 응용
9.3.2 카바이드 표면 조직 및 윤활 메커니즘
9.3.2.1 초경합금 표면 조직 및 윤활 메커니즘 원리 및 기술 개요
9.3.2.2 초경합금 표면조직 가공 기술
9.3.2.3 초경합금의 표면조도 및 윤활기구
9.3.2.4 초경합금 표면조직의 미시적 관찰 및 검증
9.3.2.5 탄화물 표면 조직 매개변수의 영향
9.3.2.6 초경합금 표면조직 및 윤활에 영향을 미치는 요인 분석
9.3.2.7 초경합금 표면 질감 및 윤활 최적화 전략
9.3.2.8 초경합금 표면 조직 및 윤활 엔지니어링 응용
9.4 바이오닉스 및 지능형 시멘트 카바이드
9.4.1 시멘트 카바이드의 생체 미세 구조(경사 및 다공성)
9.4.1.1 초경합금 구배 및 다공성 구조의 원리 및 기술 개요
9.4.1.2 초경합금 구배 및 다공성 구조의 메커니즘 및 분석
9.4.1.3 시멘트 카바이드 생체 미세구조, 경사 및 다공성 구조에 영향을 미치는 요인 분석
9.4.1.4 시멘트 카바이드 바이오닉 미세구조, 경사 및 다공성 구조의 최적화
9.4.1.5 시멘트 카바이드 생체 미세 구조, 경사 및 다공성 구조의 엔지니어링 응용
9.4.2 지능형 반응 초경합금의 전망
9.4.2.1 Smart Response Carbide 원리 개요
9.4.2.2 지능형 반응 초경 기구 해석
9.4.2.3 초경합금의 지능반응에 영향을 미치는 요인 분석
9.4.2.4 지능형 응답 초경합금 최적화 전략
9.4.2.5 인텔리전트 응답 초경 엔지니어링 응용 프로그램

참고문헌

충수

초경합금의 다기능 엔지니어링 응용 요약

그래디언트 시멘트 카바이드 개발의 간략한 역사

카바이드 볼

스마트 리스폰스 카바이드

저밀도 카바이드 장갑

지능형 카바이드 절삭 공구
카바이드 EDM 전극
카바이드 전도성 코팅 기판
초경합금 항공 중량 감소 부품
시멘트 카바이드 생체의학 임플란트
카바이드 인텔리전트 몰드
카바이드 로봇 부품

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

카바이드 항공 센서
지능형 카바이드 절삭 공구
카바이드 전자 접점
초경합금 자기 특성 및 시험 중국 국가 표준, 국제 표준, 유럽 및 미국 표준
GB/T 17951-2022: 경자성 재료에 대한 일반 기술 조건
중국 국가 표준 GB/T 5242-1985 초경합금의 자기 특성 측정 방법
ISO 9934-1:2015 비파괴 검사 - 자기 입자 검사 1 부: 일반 원칙
ISO 3326:2013 시멘트 카바이드 - 경도 및 파괴 인성 측정을 위한 시험 방법
ISO 4499-2:2008 시멘트 카바이드 - 야금 등급 텅스텐 카바이드 분말 - 2 부: 화학 분석

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI , ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

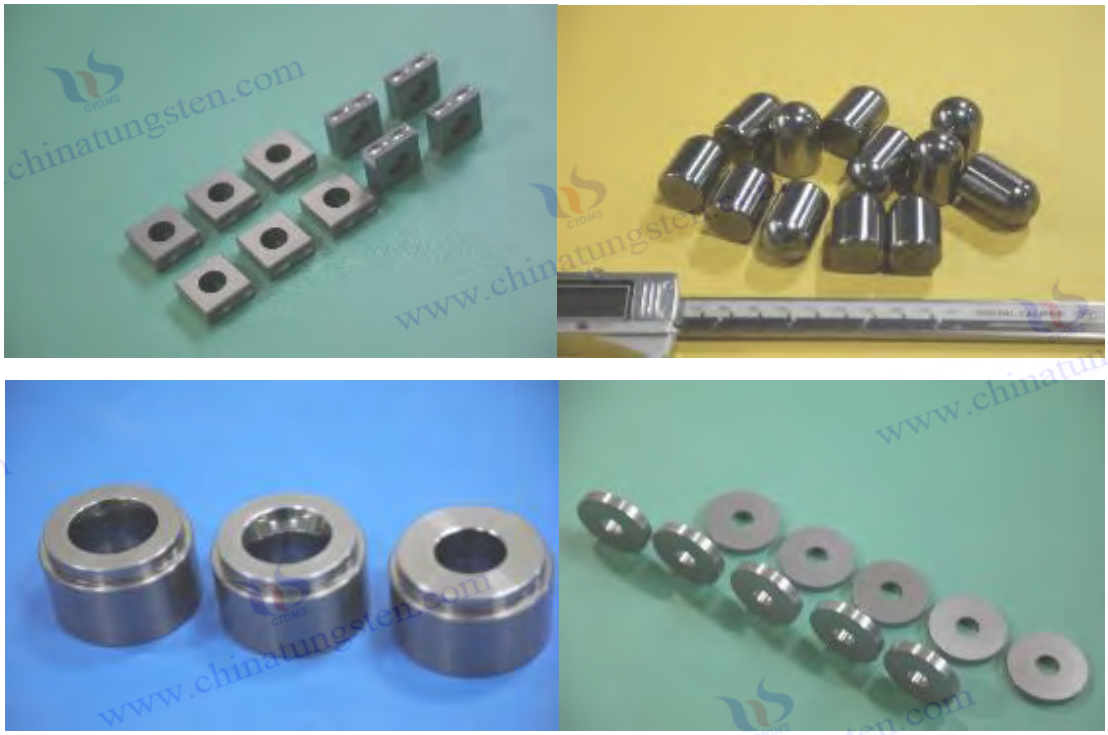
1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved