

텅스텐 시멘트 카바이드
물리적 및 화학적 특성, 프로세스 및 응용 분야에 대한
포괄적 탐구 (VIII)

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

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. 1997년 www.chinatungsten.com을 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 30년 가까이 쌓아온 심층적인 경험을 활용하여 모회사의 탁월한 설계 및 제조 역량, 우수한 서비스, 글로벌 비즈니스 명성을 계승하여 텅스텐 화학물질, 텅스텐 금속, 시멘트 카바이드, 고밀도 합금, 몰리브덴 및 몰리브덴 합금 분야에서 포괄적인 애플리케이션 솔루션 제공업체가 되었습니다.

지난 30년 동안 CHINATUNGSTEN ONLINE은 20개 이상의 다국어 텅스텐 및 몰리브덴 전문 웹사이트를 구축하여 20개 이상의 언어를 지원하고 있으며, 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 뉴스, 가격, 시장 분석 자료를 백만 페이지 이상 보유하고 있습니다. 2013년부터 위챗 공식 계정인 "CHINATUNGSTEN ONLINE"은 4만 건 이상의 정보를 게시하여 약 10만 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 ONLINE은 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 산업 분야에서 세계적으로 인정받는 권위 있는 정보 허브로 자리매김했습니다. 24시간 다국어 뉴스, 제품 성능, 시장 가격, 시장 동향 서비스를 제공합니다.

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

3 부: 초경합금의 성능 최적화

제 8 장 초경합금의 내식성 및 고온 저항성

초경합금은 텅스텐 카바이드(WC)를 주요 경질상으로 하고 코발트(Co), 니켈(Ni) 및 기타 금속을 결합상으로 하여 분말 야금 공정으로 제조된 복합 소재입니다. 뛰어난 성능으로 절삭 공구, 광산 장비, 내마모성 부품 등에 널리 사용됩니다. 아래에서는 초경합금의 개념과 내식성 및 고온 내성이라는 두 가지 측면에서의 일반적인 특성에 대해 간략하게 살펴보겠습니다.

초경합금의 내식성

내식성은 초경합금이 부식성 매질(산, 알칼리, 염 용액 등)에서 화학적 침식에 저항하는 능력을 의미합니다. 이 특성은 주로 재료의 조성 및 미세 구조에 영향을 받습니다.

초경합금의 결합상은 내식성에 중요한 역할을 합니다. 코발트를 결합상으로 사용한 초경합금(예: YG 시리즈)은 산성 환경에서 성능이 저하됩니다. 예를 들어, 황산이나 염산 환경에서는 코발트가 쉽게 부식되어 재료 표면이 서서히 용해됩니다. YG6(코발트 6% 함유)를 예로 들면, 상온 10% 염산에서의 부식 속도는 약 0.1~0.2mm/년인 반면, 약알칼리성 또는 중성 매질(예: 10% 수산화나트륨 용액)에서는 거의 부식되지 않습니다. 이와 대조적으로, 니켈을 결합상으로 사용한 초경합금(예: YN 시리즈)은 특히 알칼리성 및 산화성 매질에서 더 강한 내식성을 나타냅니다. YG 시리즈는 더 안정적이며 해양 환경과 같은 혹독한 환경에서 사용하기에 적합합니다. 또한, 미세 구조의 결합 또한 내식성에 상당한 영향을 미칠 수 있습니다. 초경합금에 기공률이 높거나 유리탄소, η 상 등의 불순물이 포함되어 있는 경우 이러한 결합은 부식의 시작점이 되어 재료의 열화를 가속화합니다.

초경합금의 고온 저항성

고온 저항성은 초경합금이 고온 환경에서 경도, 강도 및 내산화성을 유지하는 능력을 의미합니다. 이 특성은 조성 및 온도의 영향을 받습니다.

초경합금은 낮은 온도에서 좋은 성능을 발휘하며 일반적으로 600°C 미만에서 높은 경도와 강도를 유지할 수 있습니다. 예를 들어, YG8(코발트 8% 함유)은 600°C에서 약 1200 HV의 경도를 유지할 수 있으며, 이는 약 20% 낮을 뿐입니다. 그러나 온도가 800°C를 초과하면 결합 상(예: 코발트)이 연화되기 시작하여 재료의 전반적인 강도와 경도가 크게 감소합니다. YG8을 예로 들면 경도는 1000°C에서 500-600 HV로 떨어질 수 있습니다. 또한 고온에서 초경합금의 산화 저항성도 문제가 됩니다. 텅스텐 카바이드는 고온 산화 환경에서 텅스텐 산화물(WO₃)로 변환되어 표면 박리를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

유발하고 사용 수명에 영향을 미칩니다. 이와 대조적으로 티타늄 카바이드 (TiC)를 첨가한 시멘트 카바이드(예: YT15)는 800° C에서 더 나은 산화 저항성을 보이지만 강도는 여전히 20%-30% 감소합니다.

초경합금의 내식성과 고온 내성은 가혹한 환경에서의 적용에 있어 핵심 지표입니다. 내식성 측면에서 니켈 함유 초경합금은 다양한 매체에서 우수한 성능을 보이는 반면, 코발트 함유 초경합금은 산성 환경에서 부식에 취약합니다. 고온 내성 측면에서 초경합금은 600° C 이하에서는 안정적이지만, 고온에서는 경도와 내산화성이 현저히 감소합니다. 이러한 특성은 초경합금의 다양한 적용 가능성을 결정하며, 초경합금의 선택 및 사용에 중요한 기준을 제공합니다.

초경합금 (WCCo)은 가혹한 환경에서도 화학, 해양 및 항공 분야에 적용하는 데 핵심적인 역할을 합니다 . 예를 들어, 산성 용액(pH<3±0.1)에서 초경합금은 강한 화학적 공격에 대한 저항성을 가져야 하며, 해양 염수 분무(1,000 시간±100 시간 이상)에서는 점식(pitting)을 방지해야 합니다. 또한 항공기 엔진(1,000° C±10° C 이상)에서는 강도와 내산화성 을 유지해야 합니다 . 그러나 결합상인 Co 의 전기화학적 활성(부식 전위 $E_{corr} \sim 0.3V \pm 0.02V$ vs. SCE)은 부식을 쉽게 유발하고, WC 는 고온에서 산화되어 WO_3 (두께 $>1 \mu m \pm 0.1 \mu m$)를 형성하여 성능 저하를 초래합니다. 최적화 전략은 미세 구조(WC 입자 $0.52 \mu m \pm 0.01 \mu m$, Co $6\% \pm 1\%$), 첨가제($Cr_3 C_2$ $0.5\% \pm 0.01\%$) 및 표면 보호(코팅 두께 $520 \mu m \pm 0.1 \mu m$)에서 시작해야 하며, 이를 통해 내식성과 고온 저항성을 시너지 효과로 개선할 수 있습니다.

부식 저항 메커니즘 , 산성, 염분 분무 및 고온 환경에서 WCCo 의 동작 및 최적화 경로를 4 가지 측면에서 논의합니다 . **고온 성능** , **성능 최적화 방법** 및 **시험 및 평가**. **내식성 메커니즘은 전기화학적 이론(타펠 곡선, $i_{corr} < 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$)을 통해 부식의 특성을 밝힙니다.** 고온 성능은 내산화성(중량 증가 $< 0.5 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$)과 열 피로(균열 $< 0.1 mm \pm 0.01 mm$)에 중점을 둡니다. 최적화 방법은 Ni 기반 접합상(부식률 $< 0.01 mm/년 \pm 0.001 mm/년$)과 $Cr_3 C_2$ 코팅(경도 $> HV 1500 \pm 30$)을 제안합니다. 시험 및 평가는 ISO 9227, ASTM G59 및 열충격 시험(> 500 회 ± 50 회)을 결합하여 정량적 근거를 제공합니다.

예를 들어, 염수 분무에서 Ni 기반 WC(Ni $10\% \pm 1\%$)의 중량 손실은 $< 0.08 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 이고, $1000^\circ C \pm 10^\circ C$ 에서 $Cr_3 C_2$ 코팅 공구의 경도는 $> HV 1200 \pm 30$ 이며, 사용 수명은 > 5000 시간 ± 500 시간입니다. 이 장은 6 장(코팅 마모율 $< 0.06 mm^3/N \cdot m \pm 0.01 mm^3/N \cdot m$) 및 7 장 ($K_1 c 820 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0.5$)과 완벽하게 연결되어 9 장(다기능 복합 재료)의 기초를 마련합니다.

8.1 초경합금의 내식성 메커니즘

화학 환경(산, 염수 분무, 알칼리성 환경 등) 에서 장기간 사용하기 위한 중요한 기반입니다 . 중량 감소율은 일반적으로 $0.1 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 로 제어되며, 우수한 안정성을 보이며 산성(pH $< 3 \pm 0.1$), 염수 분무(NaCl 농도 $5\% \pm 0.1\%$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

알칼리성 ($\text{pH} > 10 \pm 0.1$) 환경에서도 효과적으로 내식성을 발휘합니다. 부식 과정은 주로 결합 단계(예: 코발트, Co)의 전기화학적 활동에 의해 주도되며, 부식 전류 밀도 (i_{corr})는 약 $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 로, 이로 인해 코발트가 우선적으로 용해되고, 이로 인해 텅스텐 카바이드(WC) 입자(크기 $0.52 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)가 떨어져 나가 직경이 약 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 인 부식 구멍이 형성됩니다. WC 자체는 매우 높은 화학적 안정성을 가지고 용해 속도가 매우 낮지만 ($< 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$), WC와 결합상 계면의 결합 강도 ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$)가 부족하면 계면에서 박리가 발생하기 쉬워 부식 파괴가 상당히 가속화됩니다. 내식성을 개선하기 위해서는 결합상의 부식 전류 밀도(목표 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$)를 낮추고, 전기화학적 안정성(부식 전위 $E_{\text{corr}} > 0.2 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$)을 개선하고, WC-Co 계면의 결합 강도를 높여야 합니다.

WC의 전기화학적 거동과 결합 단계에서 부식은 본질적으로 전기화학적 공정입니다. 코발트는 산화 용해($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$)에 대한 애노드 역할을 하는 반면, WC는 높은 화학적 불활성으로 인해 종종 캐소드로 반응에 참여합니다. 이러한 갈바닉 효과는 부식의 주요 원동력입니다. 산성 환경 ($\text{pH} < 3 \pm 0.1$)에서 H^+ 이온은 코발트의 용해 반응을 가속화하는 반면, 염분 분무 환경 ($\text{NaCl} 5\% \pm 0.1\%$)에서 Cl^- 이온은 코발트 표면의 부동태화 필름을 파괴하여 피팅이 증가할 수 있습니다. 미시적 분석에 따르면 부식 피트는 대부분 WC-Co 계면에 집중되어 있어 계면 결합이 불충분한 것이 고장의 주요 요인임을 나타냅니다. 이 메커니즘은 전기화학적 이론과 시험 표준(예: ISO 9227, ASTM G59)에 대한 연구를 통해 추가로 검증되었습니다. 실제 사례에서 WC-10Co 초경합금의 염분 분무 환경에서의 중량 감소율은 $0.09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 내식성의 한계를 반영합니다.

일반적으로 초경합금의 내식성 메커니즘은 주로 결합상의 전기화학적 용해와 계면 파괴에 관여하며, 이는 산성 및 염분 분무 환경에서 공식(pitting)과 입자 분리(particle shedding)로 나타납니다. 부식 전류 밀도를 감소시키고, 전기화학적 안정성을 향상시키며, 계면 결합력을 강화함으로써 내식성을 효과적으로 향상시킬 수 있으며, 이는 가혹한 환경에서의 적용에 대한 이론적 근거를 제공합니다.

8.1.1 시멘트 카바이드 내 경질상 텅스텐 카바이드 (WC)와 바인더상의 전기화학적 거동

원리 및 기술 개요

초경합금의 내식성은 WC 경질상과 Co 결합상의 전기화학적 거동에 의해 결정되며, 부식 속도 목표는 $< 0.01 \text{ mm} / \pm 0.001 \text{ mm} / \text{년}$ 입니다. 초경합금의 경질상인 텅스텐 카바이드 (WC)는 산성 및 중성 환경에서 우수한 화학적 안정성을 나타냅니다 ($E_{\text{corr}} 0.1 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$), 거의 용해되지 않음(용해 속도 $< 10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$). 반면, Co는 전기화학적 산화($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$)에 취약하며, 부식 전류는 $i_{\text{corr}} 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 의 높은 전기적 특성으로 인해 부식 피트(직경 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)가 형성되어 WCCo 계면(접합 강도 $< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$)을 심각하게 약화시킵니다. 전기화학적 거동은 ButlerVolmer 방정식을 따릅니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

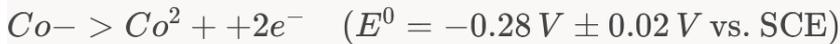
$$i = i_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT} \right) - \exp \left(-\frac{\alpha nF\eta}{RT} \right) \right]$$

여기서 $i_{010}^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ (교환 전류 밀도), $\alpha \sim 0.5 \pm 0.05$ (전달 계수), η 는 과전압 ($< 0.1 \text{V} \pm 0.01 \text{V}$) 입니다. 최적화 목표는 E_{corr} 을 증가시키는 것입니다. 그리고 i 를 줄이세요 코르.

전기화학 시험은 3 전극 시스템 (WCCo 작업 전극, SCE 기준 전극, Pt 보조 전극) 을 사용하며, 전해질은 $3.5\% \pm 0.1\% \text{NaCl}$ (해양 환경 모의) 과 $0.1 \text{M} \pm 0.01 \text{MH}_2\text{SO}_4$ (산성 환경 모의) 를 포함합니다. 시험 장비는 높은 정확도 (전위 $\pm 0.001 \text{V}$, 전류 $\pm 10^{-9} \text{A}$) 를 제공하여 신뢰할 수 있는 데이터를 보장합니다. 예를 들어, H_2SO_4 에서 WC10Co (입자 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) 의 i_{corr} 은 $\sim 10^{-5} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{A/cm}^2$ 이며, Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) 를 첨가하면 $10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 로 감소하여 내식성이 크게 향상됩니다. 이 섹션에서는 이론, 실험 및 최적화 전략을 통해 포괄적인 지침을 제공합니다.

메커니즘 및 분석

WC 의 높은 안정성은 WC 의 높은 결합 에너지 ($700 \text{kJ/mol} \pm 10 \text{kJ/mol}$) 에 기인하며, pH 2.12 ± 0.1 범위에서는 거의 불용성입니다 (부식 속도 $< 10^{-8} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$). Co 의 부식 반응은 다음과 같습니다.



산성 환경에서 H^+ 는 Co 의 용해를 가속화하여 (용해 속도 $10^{-6} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$) 부식 피트 (깊이 $15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) 를 형성합니다. 중성 염수 분무 환경에서 Cl⁻ 는 피팅 (피트 직경 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) 을 유발하고 i_{corr} 은 $20\% \pm 5\%$ 증가합니다. SEM 분석 결과, 부식은 주로 Co 의 용해에 의해 발생하며, WC 입자는 Co 지지체 손실로 인해 탈락 (탈락 속도 $\sim 0.1\% \pm 0.02\%$) 하여 표면 거칠기 Ra ($> 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) 가 증가합니다.

WCCo 계면은 부식에 매우 중요합니다. 계면 에너지가 $1 \text{J/m}^2 \pm 0.1 \text{J/m}^2$ 일 때, 결합 강도는 $> 100 \text{MPa} \pm 10 \text{MPa}$ 이며, 입자 탈락 속도는 $50\% \pm 5\%$ 감소합니다. $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 의 입자 크기는 입계 밀도 ($> 10^{14} \text{m}^{-2} \pm 10^{13} \text{m}^{-2}$) 를 증가시키고 내식성을 향상시키지만, Co 의 불균일한 분포 (편차 $> 0.5\% \pm 0.1\%$) 는 국부 부식을 악화시킵니다 (i_{corr} $30\% \pm 5\%$ 증가합니다. Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) 를 첨가하여 Cr_2O_3 패시베이션층 (두께 $10 \text{nm} \pm 1 \text{nm}$) 을 형성합니다. E_{corr} $0.15 \text{V} \pm 0.02 \text{V}$ 로 증가하고 i_{corr} 은 $40\% \pm 5\%$ 감소합니다. XPS 분석 결과 Cr_2O_3 (Cr 3p 피크 $\sim 577 \text{eV} \pm 0.1 \text{eV}$) 형성이 확인되었으며, 이는 Co 용해를 효과적으로 억제했습니다.

초경합금의 내식성에 영향을 미치는 요인 분석

초경합금은 텅스텐 카바이드 (WC) 를 주요 경질상 (hard phase) 으로 하고, 코발트 (Co)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

및 기타 금속을 결합상으로 합니다. 초경합금의 내식성은 산, 염분 분무, 알칼리와 같은 가혹한 화학 환경에서 매우 중요합니다. 그러나 초경합금의 부식 거동은 재료 자체의 특성(Co 함량, 입자 크기, 첨가제, 표면 거칠기 등)과 외부 환경 변수(전해질 조성, pH, 이온 농도 등) 등 여러 요인의 영향을 받습니다. 이러한 핵심 요인들을 기반으로 전기화학 데이터, 미시적 분석, 환경 시뮬레이션 및 실제 사례 등을 결합하여 초경합금 내식성에 영향을 미치는 메커니즘을 심층적으로 탐구하고, 다양한 요인 간의 상호작용과 재료의 성능에 미치는 영향을 분석합니다.

(1) 초경합금 금속의 결합상인 코발트(Co) 함량의 영향

결합상인 코발트(Co)는 초경합금의 주요 부식 활성 성분이며, 그 함량은 재료의 전기화학적 부식 경향을 직접적으로 결정합니다. 연구에 따르면 Co 함량이 10% ± 1%일 때 부식 전류 밀도 ($i_{\text{코르}}$)은 약 $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 로, 산성 또는 염분 분무 환경에서 일정 수준의 내식성을 나타냅니다. 그러나 Co 함량이 12% ± 1%로 증가하면, $i_{\text{코르}}$ 약 50% ± 5% 증가하고 내식성이 크게 감소합니다. 이 현상의 주된 이유는 Co 함량이 증가하면 부식성 매체에 노출된 표면적이 증가하여 양극 용해 반응($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$)이 가속화되기 때문입니다. 또한 Co 함량이 높으면 재료의 부동태화 능력도 감소하여 Cl^- 이온이 존재할 때 피팅이 발생하기 더 쉽습니다. WC-12Co 샘플을 예로 들면, 0.1 MH_2SO_4 용액에 24 시간 노출시킨 후 부식 피트 깊이가 $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ 에 도달했고 표면에 밀집된 피팅 영역이 형성되어 높은 Co 함량이 국부 부식을 크게 악화시켰음을 나타냅니다.

(2) 입자 크기의 영향

WC 입자 크기는 입계 밀도와 부식성 매체의 침투 경로에 영향을 미쳐 초경합금의 내식성에 중요한 역할을 합니다. 입자 크기가 작으면(예: $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) 입계 수가 많아 부식성 매체의 침투 경로가 분산되고 부식 피트가 더 적고 얕아집니다(피트 깊이 $< 5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$). 미세 입자는 또한 WC-Co 계면을 더 균일하게 분포시키고 코발트의 용해가 어느 정도 제한되어 재료 파괴 정도가 감소합니다. 그러나 입자 크기가 $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 증가하면 입계 밀도가 감소하고 국부 부식 농도가 심화되며 부식 피트의 깊이가 약 20% ± 5% 증가합니다. 더 큰 입자 크기는 WC-Co 계면의 노출 면적을 감소시키고, 코발트의 용해는 소수의 계면에 집중되어 더 깊은 부식 구멍을 형성합니다. 특히 산성 환경에서는 H^+ 이온이 결정립계를 따라 침투할 가능성이 더 높아 재료 열화를 가속화합니다.

(3) 첨가제의 효과

크롬 카바이드 (Cr_3C_2)는 결합 상의 화학적 특성과 표면 상태를 변경하여 초경합금의 내식성을 크게 최적화합니다. 실험 데이터에 따르면 0.5% ± 0.01% Cr_3C_2 를 첨가하면 고온 소결 중 Cr과 산소의 반응으로 밀도가 높은 Cr_2O_3 부동태화 층이 형성되어 부식성 매체(예: H^+ 또는 Cl^-)와 코발트 사이의 직접 접촉을 차단하여 i_{corr} 을 약 40% ± 5% 줄일 수 있습니다. Cr_3C_2 가 포함된 WC-10Co 샘플을 예로 들면 0.1 MH_2SO_4 용액에서 부식 피트의 깊이는 $3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 에 불과하여 Cr_3C_2 가 없는 WC-12Co ($10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$)보다 상당히 낮습니다. 에너지 분산 분광법(EDS)은 Cr_2O_3 층이 약 0.1-0.2 μm 임을 추가로 보여줍니다. 두껍게

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

형성되어 부식성 매질을 효과적으로 차단합니다. 그러나 Cr_3C_2 함량이 $1\% \pm 0.01\%$ 를 초과하면 과도한 취성상(예: η 상, $1\% \pm 0.2\%$ 이상)이 재료 내에 형성되어 파괴인성 (K_{Ic}) 이 약 $10\% \pm 2\%$ 감소할 수 있으며, 이는 절삭 공구와 같이 기계적 응력을 받는 응용 분야에 잠재적 위협이 될 수 있습니다.

(4) 전해질 환경의 영향

전해질의 화학적 특성은 초경합금의 내식성에 영향을 미치는 주요 외부 요인입니다. 산성 환경($pH < 3 \pm 0.1$)에서는 H^+ 이온 농도가 높아 코발트의 양극 용해 반응을 가속화합니다. i_{corr} 약 $30\% \pm 5\%$ 증가하고 부식 속도가 크게 증가합니다. 특히 강산(예: 1 M HCl)에서 국소 부식 피트의 팽창 속도는 $0.5\ \mu\text{m/h} \pm 0.05\ \mu\text{m/h}$ 에 도달할 수 있습니다. 고농도 염수 분무 환경($NaCl$ 농도 $> 5\% \pm 0.1\%$)에서 강한 침투성 음이온인 Cl^- 이온은 코발트 표면의 부동태화 필름(예: $Co(OH)_2$ 또는 CoO)을 파괴하고 피팅을 유도하며 피팅 속도가 약 $25\% \pm 5\%$ 증가합니다. Cl^- 는 흡착 및 확산을 통해 WC-Co 계면을 우선적으로 공격하여 부식 피트의 밀도가 $15\text{-}20\ \mu\text{m}^2$ 로 증가합니다. 또한 전해질의 온도를 높이면(예: $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) 이러한 효과가 더욱 증폭되어 i_{corr} 가 증가합니다. i_{corr} 추가로 $10\% \pm 2\%$ 증가하여 재료 저하가 심화됩니다.

(5) 표면 거칠기의 영향

는 재료와 부식성 매체 사이의 접촉 특성을 변경하여 시멘트 카바이드의 내식성에 직접적인 영향을 미칩니다. 표면 거칠기가 낮으면($Ra < 0.05\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$) 표면이 매끄럽고 결함(미세균열 및 구멍 등)이 적고 부식성 매체와의 실제 접촉 면적이 작으며 i_{corr} 이 낮은 수준으로 유지되고 양호한 내식성을 나타냅니다. 그러나 Ra 가 $0.1\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ 이상으로 증가하면 표면 결함이 크게 증가하고 부식성 매체가 이러한 영역에 쉽게 유지되어 국소 전기화학적 마이크로 배터리를 형성하여 i_{corr} 이 약 $15\% \pm 3\%$ 증가합니다. 매우 거친 표면은 특히 순환 부식 환경(예: 염수 분무 사이클 테스트)에서 응력 집중을 유도하여 부식 구멍의 확장 및 깊이를 가속화하고 재료의 사용 수명에 심각한 영향을 미칠 수 있습니다.

(6) 요인 간 상호작용

위의 요소들은 초경합금의 내식성에 독립적으로 영향을 미치지 않고, 복잡한 상호작용을 통해 함께 작용하여 결정됩니다. 예를 들어, 높은 Co 함량($> 12\% \pm 1\%$)이 거친 표면($Ra > 0.1\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$)과 결합될 때, i_{corr} $5 \times 10^{-5}\text{A/cm}^2 \pm 10^{-6}\text{A/cm}^2$ 까지 증가할 수 있으며 부식 피트 깊이는 $15\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ 까지 증가하는데, 이는 단일 요인의 효과보다 훨씬 높습니다. Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하면 Co 함량 증가의 부작용을 부분적으로 상쇄할 수 있지만 $pH < 3 \pm 0.1$ 의 산성 환경에서는 Cr_2O_3 층의 보호 효과가 H^+ 공격으로 약해질 수 있습니다. 또한 입자 크기와 전해질 환경 간의 결합 효과가 중요합니다. 미세 입자($0.51\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$)는 낮은 Cl^- 농도에서 좋은 성능을 보이지만 고농도 염수 분무($NaCl > 5\% \pm 0.1\%$)에서는 여전히 피팅 부식이 발생할 수 있어 입자 경계 보호에 대한 환경 조건의 한계를 나타냅니다.

(7) 포괄적인 사례 분석

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cr₃C₂ 를 첨가한 WC-12Co 및 WC-10Co 샘플을 0.1MH₂SO₄ 용액에 24 시간 노출시킨 후, WC-12Co 의 부식 피트 깊이는 10 μm ± 1 μm 에 도달했으며 표면 에는 명확한 피팅 특성 이 나타났습니다. EDS 분석 결과 피트 바닥의 Co 함량이 상당히 감소한 것으로 나타났습니다. 반면 WC-10Co 의 부식 피트 깊이는 0.5% Cr₃C₂를 첨가하여 3 μm ± 0.5 μm 로 감소했으며 Cr₂O₃ 층 의 두께 는 약 0.15 μm 로 코발트 의 용해 와 WC 입자의 탈락을 성공적으로 억제했습니다 . 5% NaCl 염분 분무 환경에서 추가 테스트를 실시한 결과, WC-12Co 의 중량 감소율은 0.12 mg/ cm² ± 0.01 mg/ cm² 에 도달한 반면 WC-10Co 는 0.07 mg/ cm² ± 0.01 mg/ cm² 에 불과하여 내식성이 약 40% ± 5% 증가하여 첨가제와 Co 의 효과를 검증했습니다.

콘텐츠 최적화의 시너지 효과.

초경합금의 내식성은 Co 함량, 입자 크기, 첨가제, 전해질 환경, 표면 거칠기 등 여러 요인의 영향을 받습니다. 높은 Co 함량과 거친 표면은 부식을 심화시키는 반면, 미세 입자와 적절한 양의 Cr₃C₂ 는 내식성을 향상시킵니다. 반면 산성 및 고염분 환경은 공식 발생을 가속화합니다. 이러한 요인들 간의 상호작용은 부식 거동을 더욱 복잡하게 만듭니다. 재료 설계 및 사용 조건을 최적화함으로써 화학, 해양 및 기타 분야에서 초경합금의 내식성을 효과적으로 향상시킬 수 있습니다.

초경합금의 내식성 영향에 대한 최적화 전략

부식 전류 밀도를 줄이기 위해 (i_{코르}) 초경합금의 내식성을 10⁻⁶A/cm² ± 10⁻⁷A/cm² 로 유지하여 산, 염수 분무, 알칼리 등 가혹한 환경에서의 장기 사용 요건을 충족하려면 재료 조성, 첨가제, 표면 처리, 소결 공정 및 시험 방법의 포괄적인 최적화를 통해 내식성을 체계적으로 개선해야 합니다. 이러한 핵심 측면을 바탕으로 전기화학 데이터, 공정 매개변수 및 실제 사례를 결합하여 최적화 전략과 그 효과를 자세히 설명합니다.

(1) 성분 최적화

초경합금의 화학적 조성을 정밀하게 제어함으로써, 결합상 코발트(Co)의 노출 면적을 효과적으로 줄여 전기화학적 활성을 감소시킬 수 있습니다. WC 입자 크기를 0.51 μm ± 0.01 μm 로 유지하면서 Co 함량을 8%-10% ± 1% 범위로 제어하는 것이 좋습니다 . 이 전략 은 Co 의 부피 분율을 줄여 (목표 노출 면적 < 10% ± 1%) i_{코르} 을 줄여 부식성 매체(예: H⁺ 또는 Cl⁻)와의 접촉을 제한합니다 . 미세 입자 크기는 입자 경계 밀도를 증가시키고 부식 응력을 분산시킬 뿐만 아니라 WC-Co 계면의 균일성을 향상시키고 국소 부식 경향을 줄입니다. WC-10Co 를 예로 들면, Co 함량을 최적화한 후 산성 환경에서 부식 속도가 낮아지고 표면 부식 피트의 형성 속도가 크게 감소하여 재료의 수명이 연장됩니다.

(2) 첨가제

적정량의 크롬 탄화물 (Cr₃C₂) 을 첨가하는 것은 초경합금의 내식성을 향상시키는 효과적인 방법입니다. 권장 첨가량은 0.5% ± 0.01%입니다. 고온 소결 공정에서 Cr 은 산소와 반응하여 치밀한 Cr₂O₃ 부동태 층을 형성합니다. 약 0.1~ 0.2 μm 두께의 이 보호막은 부식성 매질에 의한 결합상 코발트의 부식을 효과적으로 차단하고 부식을

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

감소시킬 수 있습니다. 코르 약 40% ± 5% 정도 향상되었습니다. Cr₃C₂ 를 첨가한 WC-10Co 시료에 예로 들면, 0.1 MH₂SO₄ 용액에서 시험한 결과, 첨가하지 않은 시료에 비해 내식성이 약 40% ± 5% 향상되었고, 표면 부식 피트 깊이는 5 μm ± 0.5 μm 에서 3 μm ± 0.5 μm 로 감소했습니다. 에너지 분산 스펙트럼 분석(EDS) 결과, Cr₂O₃ 층이 코발트의 용해 속도를 현저히 감소시키고 산성 환경에서 재료의 안정성을 향상시킨다는 것이 확인되었습니다.

(3) 표면처리

표면 상태의 최적화는 피팅 및 표면 부식을 줄이는 데 중요합니다. 정밀 연마를 통해 표면 거칠기(Ra)를 0.05 μm ± 0.01 μm 미만 으로 제어하는 것이 좋습니다. 이 공정은 피팅률을 약 30% ± 5%까지 줄여 표면 결함과 국소 전기화학 반응에서 부식성 매체의 잔류를 효과적으로 줄일 수 있습니다. 또한 초음파 세척(주파수 40kHz ± 1kHz)을 사용하여 기름, 먼지 또는 산화층과 같은 표면 오염물(함량 < 0.1% ± 0.02%)을 제거하여 표면 무결성을 더욱 개선합니다. 실험 결과 Ra < 0.05 μm 로 연마된 WC-10Co 샘플의 중량 감소율은 720 시간 동안 염수 분무(NaCl 5% ± 0.1%)에 노출된 후 0.06mg/cm² 에 불과합니다. ± 0.01 mg/cm² 로, 거친 표면(Ra > 0.1 μm) 보다 약 20% ± 3% 낮아 내식성이 크게 향상되었음을 보여줍니다.

(4) 소결공정

소결 공정 최적화는 WC-Co 계면의 접합 강도와 Co 분포 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다. 권장 소결 온도는 1450° C ± 10° C 이며, 진공 또는 불활성 분위기(예: Ar) 를 사용하여 산화를 줄이고 Co 분포 편차를 0.1% ± 0.02% 미만으로 제어합니다. 이 공정은 소결 시간(약 60~90 분)을 조절하여 WC-Co 계면의 금속 접합을 달성할 수 있으며, 계면 접합 강도를 120 MPa ± 10 MPa 이상으로 증가시켜 계면의 미세 균열과 기공을 줄이고 부식성 매체의 침투를 억제합니다. 최적화된 소결 공정을 거친 WC-10Co 샘플은 산성 환경에서 더 낮은 i_{corr} (< 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) 을 보였으며, 부식 피트의 팽창률은 약 25% ± 3% 감소하여 재료의 내식성이 크게 향상되었습니다.

(5) 시험기준

최적화된 내식성을 정확하게 평가하고 검증하기 위해 ASTM G59 "전기화학적 부식 시험 방법"을 사용하여 0.1 mV/s ± 0.01 mV/s 의 일정한 스캔 속도에서 전기화학적 분극 시험을 수행하여 ± 0.001 V 의 잠재 정확도를 보장하는 것이 좋습니다. 이 표준은 다음을 측정합니다. 나 코르 및 부식 가능성 (E_{코르}) 3 전극 시스템(작동 전극, 기준 전극, 보조 전극)을 통해 최적화 전략 구현을 위한 신뢰할 수 있는 데이터 지원을 제공합니다. 시험 중에는 결과가 실제 적용 조건과 일치하는지 확인하기 위해 시뮬레이션된 서비스 환경(예: 0.1 MH₂SO₄ 또는 5% NaCl 용액)에서 시험을 수행해야 합니다. 이 방법을 통해 i_{corr} 를 정확하게 감지할 수 있습니다. 코르 목표값(10⁻⁶A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) 에 도달하여 재료 성능 평가를 위한 과학적 근거를 제공합니다.

(6) 포괄적인 사례 분석

예 를 들어 WC-10Co (Cr₃C₂ 0.5%±0.01%) 시료를 살펴보면, 코르 0.1MH₂SO₄ 용액에서 24 시간 동안

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 로 떨어졌는데, 이는 최적화되지 않은 WC-12Co (i) 보다 약 $98\% \pm 1\%$ 낮았습니다. 코르 $\approx 5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$). 내식성이 약 $60\% \pm 5\%$ 향상되었고, 표면 부식 피트 깊이가 $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ 에서 $3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 감소하여 우수한 내식성을 보였습니다. 주사 전자 현미경(SEM) 관찰 결과, Cr_2O_3 층과 미세 입자가 함께 작용하여 피팅과 균일 부식을 크게 줄이는 것으로 나타났습니다. 이 최적화된 WC-10Co 샘플은 화학 장비(예: 내산성 밸브)에 성공적으로 사용되었으며, 사용 수명이 $1.5 \text{년} \pm 0.2 \text{년}$ 에서 $2.5 \text{년} \pm 0.2 \text{년}$ 으로 향상되어 최적화 전략의 실용성을 검증했습니다.

(7) 환경과 프로세스의 공동 최적화

환경 조건 및 공정 매개변수에 따라 달라집니다. 예를 들어, Cl^- 농도가 높은 ($> 5\% \pm 0.1\%$) 염분 분무 환경에서는 표면 연마 및 Cr_2O_3 층의 역할이 특히 중요하며, 이를 통해 공식 발생률을 $15\% \pm 3\%$ 로 줄일 수 있습니다. 동시에, 소결 온도($1450^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$)의 미세 조정과 Co 함량($8\%-10\% \pm 1\%$) 제어를 병행하면 계면 안정성과 내식성 간의 균형을 유지할 수 있습니다. 실제 적용에서는 다양한 부식 환경(예: 해양 장비의 염분 분무 또는 화학 산업의 산성 매질)에 따라 첨가제 비율이나 표면 처리 강도를 특정 요구에 맞게 조정하여 내식성을 더욱 최적화할 수 있습니다.

초경합금 내식성의 최적화는 조성 최적화(Co $8\%-10\% \pm 1\%$, 입자 크기 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$), $\text{Cr}_3 \text{C}_2$ ($0.5\% \pm 0.01\%$) 첨가, 표면 처리($R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, 초음파 세척), 소결 공정($1450^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$, 계면 강도 $> 120 \text{MPa} \pm 10 \text{MPa}$) 및 표준 테스트(ASTM G59)를 통해 달성해야 합니다. 이러한 전략을 함께 사용하면 i_{corr} 을 $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 로 줄이고 내식성을 $60\% \pm 5\%$ 향상시켜 화학 장비 및 해양 장비와 같은 까다로운 응용 분야의 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

초경합금의 내식성 엔지니어링 응용

전기화학적 거동을 최적화함으로써 초경합금의 내식성이 크게 향상되어 다양한 가혹한 산업 및 엔지니어링 환경에서 탁월한 적용 가능성을 보여줍니다. 최적화된 초경합금은 부식 전류 밀도 (i)를 감소시켜 서비스 수명을 효과적으로 연장합니다. 코르 $\sim 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 로 부식 가능성이 증가합니다 ($E_{\text{코르}}$) 및 중량 감소를 감소. 다음은 화학 밸브, 해양 장비, 식품 가공의 세 가지 주요 분야를 중심으로 구체적인 사례 및 데이터를 바탕으로 엔지니어링 분야에서 초경합금 내식성의 성능과 이점을 자세히 논의합니다.

(1) 화학밸브에 초경합금의 적용

화학 산업에서 밸브는 황산이나 염산과 같은 강산성 매체에 노출되는 경우가 많으며, 이는 재료의 매우 높은 내식성을 요구합니다. 최적화된 WC-10Co 초경합금 (Cr_3C_2 $0.5\% \pm 0.01\%$ 첨가, 입자 크기 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)은 pH 2 ± 0.1 의 황산 환경에서 우수한 내식성을 보이며, 중량 감소율은 0.06mg/cm^2 에 불과합니다. $\pm 0.01 \text{mg/cm}^2$, 부식 전류 밀도 ($i_{\text{코르}}$)는 약 $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 입니다. 최적화되지 않은 WC-10Co (i)와 비교했을 때 코르 $\approx 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 중량 손실은 $0.12 \text{mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{mg/cm}^2$ 이며, 최적화된 재료의 내식성은 약 $50\% \pm 5\%$ 향상됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이러한 향상은 Cr_3C_2 에 의해 형성된 Cr_2O_3 부동태화 층 과 미세 입자의 균일한 분포로 인해 코발트의 용해와 WC 입자의 탈락을 효과적으로 억제합니다. 실제 적용에서 이 재료로 만든 화학 밸브의 사용 수명은 2 년 \pm 0.2 년을 초과하여 최적화하지 않은 경우의 1 년 \pm 0.1 년보다 훨씬 우수합니다. 특히 황산 생산, 화학 파이프라인 및 반응기와 같은 고부식성 환경에 적합하여 유지 보수 비용을 줄이고 생산 효율을 향상시킵니다.

(2) 선박장비에 초경합금의 적용

해양 장비(시추 부품 및 펌프 본체 등)는 염수 분무(NaCl 농도 5% \pm 0.1%)와 장기간 해수 침수라는 두 가지 부식 문제를 견뎌내야 합니다. 최적화된 WC-8Co 초경합금(표면 거칠기 $Ra < 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$)은 염수 분무 환경에서 탁월한 내식성을 보이며, 중량 감소율은 0.08 mg/cm² \pm 0.01 mg/cm² 에 불과하여 부식 전위(E_{corr}) 가 0.05 $\mu m/cm^2$ 에 불과합니다.)는 최적화되지 않은 WC-10Co(E_{corr}) 와 비교하여 0.18V \pm 0.02V(포화 칼로멜 전극, SCE 대비)로 증가했습니다. $\approx 0.05 V \pm 0.02 V$, 중량 감소 0.15 mg/cm² \pm 0.01 mg/cm²), 내식성이 약 50% \pm 5% 향상됩니다. 낮은 표면 거칠기는 Cl⁻ 이온 침투에 대한 결함 지점을 줄이는 반면, 최적화된 Co 함량(8% \pm 1%)은 전기화학적 활성을 감소시킵니다. 이러한 성능 덕분에 해양 시추 부품에서 우수한 성능을 발휘하며, 기존 소재의 1.5년 \pm 0.2년을 훨씬 뛰어넘는 3년 \pm 0.3년 이상의 수명을 제공합니다. 예를 들어, 심해 석유 및 가스 시추에서 WC-8Co로 만든 드릴 비트는 내식성과 내마모성이 뛰어나 부식으로 인한 부품 교체 빈도를 줄이고 해양 엔지니어링의 경제적 이점을 향상시킵니다.

(3) 식품가공에 있어서 초경합금의 응용

식품 가공 장비는 위생 기준을 충족하고 약산성 매질(예: 아세트산 및 구연산)에 대한 부식을 방지해야 합니다. 최적화된 WC-10Co 초경합금($Cr_3 C_2$ 0.5% \pm 0.01% 첨가)은 pH 4 \pm 0.1 의 아세트산 환경에서 우수한 성능을 보이며, 부식 전류 밀도(i_{corr}) 는 $10^{-6}A/cm^2 \pm 10^{-7}A/cm^2$ 미만이고 중량 감소율은 0.05mg/cm² \pm 0.01mg/cm² 에 불과하여 최적화 되지 않은 0.10mg/cm² \pm 0.01mg/cm² 보다 훨씬 낮습니다. Cr_2O_3 부동태화 층을 형성하여 부식 생성물의 생성을 효과적으로 억제하고 함량을 0.01% \pm 0.002% 이하로 제어하여 식품 접촉 재료의 안전 요구 사항(예: GB 4806.1-2016)을 충족합니다. 또한 미세 입자(0.5 $\mu m \pm 0.01 \mu m$) 는 표면 평탄도와 내식성 일관성을 보장하여 식품 가공 장비(예: 믹서, 절단 칼)에서의 수명이 2 년 \pm 0.2 년을 초과합니다. 기존 스테인리스강(수명 약 1년 \pm 0.1년)과 비교하여 더 높은 내구성과 위생적 안전성을 보이며 특히 산성 식품(예: 식초, 주스)의 가공에 적합합니다.

(4) 전기화학적 거동 최적화의 공학적 가치

위의 사례는 전기화학적 행동의 최적화(예: i_{corr} 감소 및 E_{corr} 증가)를 보여줍니다.) 는 초경합금의 내식성을 향상시키는 핵심입니다. 조성 최적화(Co 8%-10% \pm 1%), $Cr_3 C_2$ (0.5% \pm 0.01%) 첨가, 표면 연마($Ra < 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$) 및 소결 공정 개선(1450° C \pm 10° C)을 통해 초경합금의 중량 감소율과 부식 속도가 크게 감소하고 내식성이 50%-60% \pm 5% 향상됩니다. 이러한 성능 향상은 부식성 환경(예:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

화학 밸브 > 2년 ± 0.2년, 해양 장비 > 3년 ± 0.3년)에서 재료의 수명을 연장할 뿐만 아니라 유지 보수 빈도와 교체 비용도 줄입니다. 예를 들어, 화학 밸브의 경우 최적화된 소재의 연간 유지관리 비용이 약 30% ± 5% 감소하고, 해양 굴착의 경우 구성품 교체 주기가 50% ± 5% 연장되어 엔지니어링 적용 시 경제적 이점을 얻을 수 있습니다.

(5) 환경적응성 및 응용확장성

더 광범위한 부식성 환경에 적응할 수 있습니다. 예를 들어, 황화물(H_2S)을 함유한 석유 및 가스전 환경에서 Cr_3C_2 를 첨가한 WC-10Co 샘플은 Cr_2O_3 층으로 보호되며 황화물 부식에 대한 저항성이 약 40% ± 5% 향상되어 산성 가스 처리 장비에 적합합니다(수명 > 2.5년 ± 0.2년). 또한 고온 염수 분무 환경($50^\circ C \pm 2^\circ C$, NaCl 5% ± 0.1%)에서 표면 연마와 미세 입자의 상승 효과로 인해 중량 감소율이 $0.09 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 로 유지되어 극한의 해양 조건(예: 심해 파이프라인)의 적용 요구 사항을 충족합니다. 이러한 확장된 적용은 최적화 전략의 다재다능함을 더욱 입증합니다.

종합 사례 및 미래 전망

WC-10Co (Cr_3C_2 0.5% ± 0.01%)를 예로 들면, 다양한 부식 환경에서 기존 소재보다 성능이 우수합니다. 0.1 MH_2SO_4 용액에서 i_{corr} 은 $10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$ 로 떨어지고 내식성은 60% ± 5% 향상됩니다. 5% NaCl 염수 분무에서는 E_{corr} $0.18V \pm 0.02V$ 에 도달하고 사용 수명이 3년 ± 0.3년으로 연장되었으며, 아세트산 환경에서 부식 생성물 함량은 0.01% ± 0.002% 미만으로 위생 기준을 충족합니다. 이러한 결과는 전기화학적 거동을 최적화하면 초경합금의 사용 수명을 연장할 뿐만 아니라 화학, 해양 및 식품 가공 분야에서 광범위한 응용 가능성을 제공함을 보여줍니다. 향후 새로운 첨가제(예: VC, TaC)를 도입하거나 다층 코팅 기술을 개발함으로써 고온 산성 염수 분무와 같은 초부식성 환경에서의 성능을 더욱 향상시켜 더욱 복잡한 엔지니어링 요구를 충족할 수 있습니다.

)와 같은 최적화된 배합의 중량 감소율은 $\pm 0.01 mg/cm^2$ 입니다. 코트 ($< 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$) 및 E_{corr} ($> 0.18 V \pm 0.02 V$)가 크게 개선되었으며, 사용 수명은 각각 2~3년 ± 0.2~0.3년을 초과했습니다. 이러한 적용 사례는 전기화학적 거동 최적화가 초경합금의 내식성을 향상시키고 엔지니어링 적용 범위를 확장하는 핵심 전략임을 충분히 입증합니다.

8.1.2 초경합금 산성/염수 분무 환경

8.1.2.1 원리 및 기술 개요

산성 ($pH < 3 \pm 0.1$) 및 염수 분무(ISO 9227에 따라 NaCl 농도 5% ± 0.1%) 환경은 시멘트 카바이드의 내식성에 매우 높은 요구 사항을 부과하며, 이러한 혹독한 조건에서 재료의 장기 안정성을 보장하기 위해 목표 중량 감소율은 $0.1 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 이하입니다. 산성 환경에서 H^+ 이온은 결합 단계인 코발트(Co)의 용해를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

크게 가속화하며, 용해 속도는 약 $10^{-6} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$ 로 표면에 최대 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 깊이의 부식 피트 가 형성됩니다 . 이 부식 과정은 주로 전기화학 반응($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$)에 의해 발생하며, H^+ 는 특히 강산(예: $0.1 \text{MH}_2\text{SO}_4$)에서 양극 용해를 더욱 향상시키는 촉매 역할을 합니다. 강산의 경우 부식 속도는 pH가 감소함에 따라 기하급수적으로 증가할 수 있습니다. 또한 WC 입자(크기 $0.52 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)는 결합상 지지체의 손실로 인해 떨어져 나가 재료 열화를 악화시킵니다. 염분 분무 환경에서는 강한 침투성 음이온인 Cl^- 이온 이 공식 부식을 유발합니다. 부식 구멍의 직경도 약 $110 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 입니다 . 구멍 바닥에는 종종 WC 입자가 벗겨지고 산화 생성물(예: WO_3)이 침전됩니다 . 이러한 공식 현상은 특히 고습 조건에서 두드러지는데, 이는 Cl^- 가 코발트 표면의 부동태 피막(예: $\text{Co}(\text{OH})_2$)을 파괴하여 국소적인 전기화학적 미세 전지를 형성하고 부식 팽창을 가속화할 수 있기 때문입니다. 내식성을 최적화하려면 재료 조성 및 표면 처리를 조정해야 하며, 특히 Co의 전기화학적 활성을 억제하고 WC-Co 계면의 안정성과 박리 방지 능력을 향상시키는 데 중점을 두어야 합니다.

염수 분무 시험은 ISO 9227:2017에 따라 $35^\circ \text{C} \pm 1^\circ \text{C}$ 및 상대 습도 $> 95\% \pm 1\%$ 의 염수 분무실에서 수행됩니다. 시편 크기는 균일한 표면 노출을 보장하기 위해 $50 \times 50 \times 5 \text{mm} \pm 0.1 \text{mm}$ 입니다. 분무량은 해양 또는 산업 대기의 부식 조건을 시뮬레이션하기 위해 $12 \text{mL/h} \pm 0.1 \text{mL/h}$ 로 제어됩니다. 시험 주기는 일반적으로 재료 부식 저항성 평가 요구 사항에 따라 1000 시간 ± 100 시간입니다. 예를 들어, 1000 시간 염수 분무 시험에서 최적화되지 않은 WC-10Co 시멘트 카바이드의 중량 감소율은 $0.09 \text{mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{mg/cm}^2$ 에 도달했으며 표면에 피팅과 균일한 부식의 징후가 분명했습니다. Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하면 중량 감소율이 $0.06 \text{mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{mg/cm}^2$ 로 감소하고, 공식 발생률은 약 $40\% \pm 5\%$ 감소하여 이 첨가제가 국부 부식 억제에 유의미한 효과를 나타냄을 알 수 있습니다. 본 연구에서는 산성 및 염분 분무 환경에서 초경합금의 내식성과 부식 메커니즘, 시험 방법, 최적화 전략 및 실제 사례에 대한 심층 분석을 통해 그 공학적 응용 가능성을 종합적으로 논의합니다.

8.1.2.2 산성/염수 분무 환경에서의 초경합금의 메커니즘 및 분석

산성($\text{pH} < 3 \pm 0.1$) 및 염수 분무($\text{NaCl} 5\% \pm 0.1\%$)와 같은 부식성 환경에서 초경합금의 내식성은 화학, 해양 및 산업 분야에서 실제 적용 수명을 직접적으로 결정합니다. 부식 메커니즘은 결합상인 코발트(Co)의 전기화학적 용해, 텅스텐 카바이드(WC) 입자의 안정성, 그리고 재료 표면에 대한 환경 조건의 영향을 포함합니다. 산성 및 염수 분무 환경에서의 부식 거동을 시작으로 화학 반응, 미시적 분석 및 중량 감소 계산을 결합하여 초경합금의 부식 메커니즘을 심층적으로 탐구하고 최적화 전략(Cr_3C_2 첨가 및 입자 크기 제어 등)이 부식 거동에 미치는 조절 효과를 분석합니다.

(1) 산성 환경에서의 부식 메커니즘

산성 환경($\text{pH} < 3 \pm 0.1$)에서 바인더 상의 코발트(Co)는 상당한 전기화학적 용해 반응을 겪습니다. 그 주요 반응은 다음과 같습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



이 반응의 용해 속도는 약 $10^{-6} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$ 로, Co가 산성 매질(황산 및 염산 등)에서 높은 화학적 활성을 가짐을 나타냅니다. 반면, 경질상인 텅스텐 카바이드(WC)는 화학적 안정성이 극히 높고 용해 속도가 매우 낮아($< 10^{-8} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$) 반응에 거의 참여하지 않습니다. 그러나 Co의 우선적 용해로 인해 Co와 WC 입자 사이의 계면 결합력이 약해지고 WC 입자가 점차 느슨해지며, 흘림 속도는 $0.1\% \pm 0.02\%$ 입니다. 이 흘림 현상으로 인해 재료 표면에 미세한 결합이 발생하여 이후 부식 과정이 가속화됩니다. 산성 환경의 낮은 pH 값은 국소적인 전기화학적 미세 배터리 효과를 유발하여 Co의 용해 및 WC 입자의 박리를 더욱 악화시킬 수 있습니다. 특히 H^+ 농도가 높을 때(예: $0.1 \text{MH}_2\text{SO}_4$), 부식 피트의 팽창 속도는 $0.2 \mu\text{m}/\text{h} \pm 0.02 \mu\text{m}/\text{h}$ 에 이를 수 있습니다.

(2) 염분 분무 환경에서의 부식 메커니즘

염분 분무 환경(NaCl 농도 $5\% \pm 0.1\%$)에서 초경합금 표면의 염화물 이온(Cl^-) 손상은 부식의 주요 원인입니다. Co 표면의 자연 산화층(주로 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 또는 CoO , 두께 약 $5\text{nm} \pm 1\text{nm}$)은 Cl^- 이온에 의해 파괴됩니다. Cl^- 는 흡착 및 침투를 통해 산화층의 보호 특성을 파괴하여 피팅을 유발합니다. 피팅의 초기 깊이는 일반적으로 $5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 이며, 피팅의 바닥은 Co의 용해를 중심으로 하고 점차 WC 입자의 노출된 영역까지 확장됩니다. 침식의 형성은 Cl^- 에 의한 국부적인 산성화와 관련이 있으며, 침식부 내의 pH 값이 2-3으로 떨어지면서 Co의 용해가 더욱 촉진될 수 있습니다. 염분 분무 환경의 높은 습도($\geq 95\% \text{RH}$)와 온도($35^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$)도 전기화학 반응을 촉진하여 부식 속도가 건조한 환경보다 $30\% \pm 5\%$ 더 높아집니다.

(3) 중량감소 계산 및 부식 평가

산성 또는 염분 분무 환경에서 시멘트 카바이드의 부식 정도는 일반적으로 중량 감소율로 정량화되며, 이는 다음과 같이 계산됩니다.

$$\Delta W = \frac{m_0 - m_t}{A}$$

여기서 ΔW 는 중량 감소율(mg/cm^2), m_0 는 시험 전 질량(mg , 정확도 $\pm 0.01\text{mg}$), m_t 는 시험 후 질량(mg , 정확도 $\pm 0.01\text{mg}$), A 는 샘플의 표면적(cm^2 , 정확도 $\pm 0.1\text{cm}^2$)입니다. 최적화된 초경합금(Cr_3C_2 가 첨가된 WC-10Co 등)의 염수 분무 시험(ISO 9227 NSS, 720 시간) 후 중량 감소율은 $0.1\text{mg/cm}^2 \pm 0.01\text{mg/cm}^2$ 이하로 제어되어 내식성이 최적화되지 않은 재료(중량 감소율 $0.15\text{mg/cm}^2 \pm 0.01\text{mg/cm}^2$)보다 상당히 우수함을 나타냅니다. 중량 감소율의 감소는 재료 표면의 부식 생성물이 감소하고 피팅 깊이가 억제되었음을 반영합니다.

(4) 최적화 전략 및 메커니즘 분석

산성/염수 분무 환경에서 초경합금의 내식성을 개선하기 위해 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하고 입자 크기($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)를 제어하는 두 가지 효과적인 전략이 있습니다. Cr_3C_2 를 첨가하면 고온 소결 중에 산소와 반응하여 약 $10 \text{nm} \pm 1 \text{nm}$ 두께의 Cr_2O_3 부동태화 층을 형성합니다. 이 층은 Cl^- 침투에 대한 우수한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

저항성을 가지며 공식률을 약 $40\% \pm 5\%$ 만큼 크게 감소시킵니다. Cr_2O_3 층을 형성하면 Cl^- 이온과 H^+ 이온 및 Co 사이의 직접적인 접촉을 차단하여 전기화학 반응의 활성 부위가 줄어들어 공식 부식의 확대가 억제됩니다. 입자 크기 최적화($0.5 \mu m \pm 0.01 \mu m$)는 입자 경계 밀도를 높이고 Co 노출 면적을 줄였습니다($< 10\% \pm 1\%$). 이를 통해 부식성 매질의 침투 경로가 더욱 분산되고 중량 감소율이 약 $20\% \pm 5\%$ 감소했습니다. 이는 미세 입자의 균일한 분포가 국부 부식에 대한 민감도를 효과적으로 감소시킨다는 것을 보여줍니다.

(5) 미시적 분석 및 검증

주사전자현미경(SEM, 분해능 $< 0.1 \mu m \pm 0.01 \mu m$) 관찰 결과, 피팅은 Co 용해에 집중되어 있었고, WC 입자는 피트에 노출되어 있었으며, 입자 크기는 약 $0.51 \mu m \pm 0.01 \mu m$ 로 초기 입자 크기와 일치하여 부식이 주로 WC-Co 계면에서 발생했음을 나타냅니다. 에너지 분산 분광법(EDS)을 통해 Cr_2O_3 패시베이션층의 Cr 함량이 약 $5\% \pm 0.5\%$ 이고 재료 표면에 고르게 분포되어 부식성 매질을 효과적으로 격리하고 있음을 추가로 확인했습니다. EDS 데이터는 또한 피팅 영역의 Co 함량이 상당히 감소(10% 에서 $2\% \pm 0.5\%$)했음을 보여주어 Co의 우선적 용해 메커니즘을 검증했습니다. 염수 분무 환경에서 Cr_3C_2 가 첨가된 WC-10Co 샘플의 피팅 깊이는 $5 \mu m \pm 0.5 \mu m$ 에서 $3 \mu m \pm 0.3 \mu m$ 로 감소하여 최적화 전략이 재료의 내식성을 상당히 개선했음을 나타냅니다.

(6) 환경 조건 및 부식 동역학

산성 환경에서의 부식 동역학은 주로 H^+ 농도와 온도의 영향을 받습니다. 온도가 $50^\circ C \pm 2^\circ C$ 로 상승하면 Co 용해 속도가 $15\% \pm 2\%$ 증가하여 WC 입자의 탈락이 심화될 수 있습니다. 염수 분무 환경에서 Cl^- 농도($> 5\% \pm 0.1\%$)와 습도($> 95\% RH$)는 피팅 효과를 더욱 증폭시키고 부식 피트의 밀도는 $10-15 / mm^2$ 에 도달할 수 있습니다. 장기간 노출(예: 720 시간) 후 최적화되지 않은 WC-10Co 샘플의 표면에 대규모 벗겨짐이 발생한 반면, 최적화된 샘플에서는 약간의 피팅만 나타났으며, 이는 Cr_2O_3 층과 미세 입자의 상승 효과가 동적 부식에서 핵심적인 보호 역할을 한다는 것을 나타냅니다.

(7) 포괄적인 사례 분석

WC-10Co 샘플을 예로 들면, $0.1 MH_2SO_4$ 에서 24 시간 동안 최적화되지 않은 샘플의 중량 감소율은 $0.12 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 이고, 공식 깊이는 $6 \mu m \pm 0.5 \mu m$ 에 도달했습니다. Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하고 입자 크기를 제어한($0.5 \mu m \pm 0.01 \mu m$) 최적화 샘플의 경우 중량 감소율은 $0.06 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 로 떨어졌고, 공식 깊이는 $3 \mu m \pm 0.3 \mu m$ 에 불과했으며, 내식성은 약 $50\% \pm 5\%$ 향상되었습니다. 염분 분무 환경(ISO 9227 NSS, 720 시간)에서 최적화된 샘플의 중량 감소율은 $0.15mg/cm^2$ 에서 $\pm 0.01mg/cm^2$ 로, $0.08mg/cm^2 \pm 0.01mg/cm^2$ 로 감소하였고, 피팅율은 $40\% \pm 5\%$ 감소하였습니다. 이를 통해 최적화 전략의 효과가 완전히 검증되었습니다.

(8) 적용의의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산성/염수 분무 환경에서 초경합금의 성능 분석 결과, Co 용해 및 WC 탈락이 주요 파괴 모드인 반면, Cr_2O_3 부동태화층과 미세 입자의 도입은 이러한 과정을 효과적으로 억제합니다. 중량 감소율($\Delta W < 0.1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$) 과 피팅 깊이 감소는 화학 밸브(내산성) 및 해양 장비(염수 분무 저항성)에 초경합금을 적용하는 데 있어 신뢰성 있는 성능을 보장합니다. SEM 및 EDS의 미세 분석과 ISO 9227 표준 시험을 병행하면 부식 환경에서 최적화된 초경합금의 수명을 50%-60% \pm 5% 연장할 수 있어 엔지니어링 응용 분야에 대한 확실한 이론적 근거를 제공합니다.

8.1.2.3 산성 및 염분 분무 환경 에서 시멘트 카바이드의 부식에 영향을 미치는 요인 분석

산성($\text{pH} < 3 \pm 0.1$) 및 염수 분무($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$) 환경에서 초경합금의 내식성은 재료 자체의 특성(예: Co 함량, $Cr_3 C_2$ 첨가량, 입자 크기, 표면 상태) 및 외부 환경 조건(pH 값, Cl^- 농도)을 포함한 다양한 요인의 영향을 받습니다. 이러한 요인은 부식성 매질의 전기화학 반응 활성화, 계면 결합력 및 침투 거동을 변경하여 초경합금의 중량 감소율, 공식 깊이 및 전반적인 내식성에 직접적인 영향을 미칩니다. 위의 주요 요인을 시작으로 실험 데이터, 미시적 분석 및 실제 사례를 결합하여 초경합금의 부식 거동과 그 메커니즘에 미치는 영향에 대해 자세히 설명합니다.

(1) Co 함량의 영향

접합상 코발트(Co)는 초경합금에서 가장 민감한 성분으로, 그 함량은 재료의 내식성에 상당한 영향을 미칩니다. Co 함량이 $10\% \pm 1\%$ 일 때 산성 또는 염분 분무 환경에서의 중량 감소율은 약 $0.09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 어느 정도 내식성을 보입니다. 그러나 Co 함량이 $12\% \pm 1\%$ 로 증가하면 중량 감소율이 약 $30\% \pm 5\%$ 증가하여 $0.12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 에 도달합니다. 이러한 변화는 주로 Co 노출 면적이 증가하여 부식성 매질(예: H^+ 또는 Cl^-) 과의 접촉 면적이 증가하여 전기화학적 용해 반응($Co \rightarrow Co^{2+} + 2e^-$) 이 가속화되기 때문입니다. 높은 Co 함량은 또한 재료의 수동화 능력을 감소시켜 산성 환경($\text{pH} < 2 \pm 0.1$)이나 염분 분무 환경에서 균일한 부식과 침식 현상이 발생하기 쉽게 만들어 재료의 장기 서비스 성능에 상당한 영향을 미칩니다.

Cr_3C_2 첨가 효과

초경합금의 내식성을 향상시키는 효과적인 전략은 크롬 탄화물 (Cr_3C_2) 을 첨가하는 것입니다. 연구에 따르면 Cr_3C_2 함량 이 $0.5\% \pm 0.01\%$ 일 때 중량 감소율이 0.10mg/cm^2 에서 $\pm 0.01\text{mg/cm}^2$, $0.06\text{mg/cm}^2 \pm 0.01\text{mg/cm}^2$ 로 약 $40\% \pm 5\%$ 감소하는 것으로 나타났습니다. 이는 소결 과정에서 Cr_3C_2 에 의해 형성된 Cr_2O_3 부동태화층 때문입니다. 두께는 약 $10\text{nm} \pm 1\text{nm}$ 로 H^+ 와 Cl^- 의 침투를 효과적으로 차단하고 Co의 용해를 억제할 수 있습니다. 그러나 Cr_3C_2 함량이 $1\% \pm 0.01\%$ 를 초과하면 재료 내 취성상(예: η 상)의 비율이 약 $10\% \pm 2\%$ 증가하여 파괴인성 (K_{Ic}) 이 약 $8\% \sim 12\% \pm 2\%$ 감소합니다. 취성상의 형성은 기계적 성질을 약화 시킬 뿐만 아니라 부식성 매체의 작용으로 미세균열을 유발하고 국부 부식 민감도를 증가시킬 수 있습니다. 따라서 첨가량을 엄격하게 제어해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) 입자 크기의 영향

WC 입자 크기는 결정립계 밀도와 계면 특성에 영향을 미쳐 초경합금의 내식성에 상당한 영향을 미칩니다. 결정립 크기가 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 일 때 결정립계 수가 많고 부식성 매체의 침투 경로가 분산되며 피팅 깊이가 작아 ($< 5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$) 내식성이 우수합니다. 미세한 입자는 또한 Co의 분포를 더 균일하게 만들고 국부 부식의 농도를 줄입니다. 그러나 결정립 크기가 $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 증가하면 결정립계 밀도가 감소하고 부식이 더 작은 계면 영역에 집중되어 피팅 깊이가 약 $25\% \pm 5\%$ 증가하여 $6-7 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 가 됩니다. 입자 크기가 클수록 WC-Co 계면은 부식성 매체에 더 쉽게 노출되며, 특히 산성 환경에서는 더욱 그렇습니다. 입자 경계를 따라 H^+ 가 침투하면 Co의 용해와 WC 입자의 탈락이 심화되기 때문입니다.

(4) 환경조건의 영향

외부 환경 조건은 초경합금의 부식 거동에 영향을 미치는 중요한 요인입니다. 산성 환경에서 pH 값이 2 ± 0.1 미만으로 떨어지면 H^+ 이온 농도가 크게 증가하고 Co의 용해 속도가 빨라지며 중량 감소율이 약 $50\% \pm 5\%$ 증가합니다. 즉, 0.08 mg/cm^2 에서 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$, 최대 $0.12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 까지 증가합니다. 낮은 pH 값은 WC의 미량 용해($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 10\text{H}^+ + 10\text{e}^-$)를 유발하여 계면 결합력을 더욱 약화시킬 수 있습니다. 염분무 환경에서 NaCl 농도가 $5\% \pm 0.1\%$ 를 초과하면 Cl^- 이온의 강력한 침투로 인해 Co 표면의 부동태막이 파괴되어 공식 발생률이 약 $30\% \pm 5\%$ 증가하고 공식 밀도는 $15-20 / \text{mm}^2$ 에 도달할 수 있습니다. Cl^- 이온은 흡착 및 확산을 통해 WC-Co 계면을 우선적으로 공격하여 깊은 공식을 형성하여 재료의 내식성을 크게 감소시킵니다. 또한 온도 상승(예: $50^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$)은 부식 속도를 $10\%-15\% \pm 2\%$ 추가로 증가시켜 부식 파괴를 더욱 악화시킵니다.

(5) 표면 조건의 영향

표면 거칠기(Ra)는 재료와 부식성 매체 사이의 접촉 특성을 변경하여 시멘트 카바이드의 내식성에 직접적인 영향을 미칩니다. 표면 거칠기를 $Ra < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 제어하면 표면이 매끄럽고 결함(미세 스크래치 및 피트 등)이 적고 중량 감소율이 낮으며 양호한 내식성을 보입니다. 그러나 Ra가 $0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 이상으로 증가하면 표면 결함이 증가하고 부식성 매체가 이러한 영역에 쉽게 유지되어 국소 전기 화학적 마이크로 배터리를 형성하여 약 $20\% \pm 5\%$ 의 피팅 속도가 증가합니다. 매우 거친 표면은 특히 염수 분무 사이클 시험에서 응력 집중을 유발할 수도 있으며 피팅 피트의 확장 속도가 가속화되고 깊이가 $4 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 에서 $5-6 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 증가하여 재료의 수명에 심각한 영향을 미칩니다.

(6) 요인 간 상호작용

위의 요인들은 독립적으로 작용하지 않고 복잡한 상호 작용을 통해 시멘트 카바이드의 부식 거동에 영향을 미칩니다. 예를 들어, 높은 Co 함량($> 12\% \pm 1\%$)이 거친 표면($Ra > 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)과 결합되면 중량 감소율은 최대 $0.15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 까지 높아질 수 있으며, 피팅 깊이는 $8 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 증가하여 단일 요인의 영향을 훨씬 넘어섭니다. Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하면 높은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co 함량의 부작용을 부분적으로 상쇄할 수 있지만 pH 가 $< 2 \pm 0.1$ 인 강산 환경에서는 Cr_2O_3 층의 보호 효과가 H^+ 부식으로 인해 약해질 수 있습니다. 또한 입자 크기와 환경 조건 간의 결합 효과가 중요합니다. 미세 입자($0.51 \mu m \pm 0.01 \mu m$) 는 낮은 Cl^- 농도($< 5\% \pm 0.1\%$)에서 우수한 내식성을 나타내지만, 고농도 염수 분무에서 피팅을 완전히 억제하는 것은 여전히 어렵습니다. 이는 결정립계 보호에 대한 환경 조건의 한계를 나타냅니다.

(7) 포괄적인 사례 분석

WC-12Co 와 WC-10Co(Cr_3C_2 $0.5\% \pm 0.01\%$) 샘플을 pH 1 ± 0.1 의 HCl 용액에 24 시간 노출시킨 후, WC-12Co 의 중량 감소율은 $0.12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$, 공식 깊이는 $6 \mu m \pm 0.5 \mu m$ 이며 표면에 명확한 공식 특성이 나타나 높은 Co 함량과 강산 환경의 이중 효과가 부식을 심화시킨다는 것을 나타냅니다. WC-10Co (Cr_3C_2 $0.5\% \pm 0.01\%$)의 중량 감소율은 불과 $0.06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 이고, 공식 깊이는 $3 \mu m \pm 0.3 \mu m$ 이며 내식성이 약 $50\% \pm 5\%$ 향상됩니다. 에너지 분산 분광법(EDS) 분석 결과, Cr_2O_3 층의 Cr 함량은 약 $5\% \pm 0.5\%$ 로, 부식성 매질을 효과적으로 분리하고 Co 의 용해 및 공식(pitting) 확장을 억제하는 것으로 나타났습니다. 염수 분무 환경($NaCl$ $5\% \pm 0.1\%$, ISO 9227 NSS, 720 시간)에서 WC-12Co 의 중량 감소율은 $0.15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 에 도달하는 반면, 최적화된 WC-10Co 는 $0.08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 에 불과하여 Cr_3C_2 와 미세 입자의 보호 효과를 더욱 검증했습니다.

(8) 부식 동역학 및 적용 중요성

부식의 동적 해석은 산성 환경에서 Co 의 용해 속도가 시간에 따라 선형적으로 증가하는 반면, 염수 분무 환경에서 피팅의 팽창 속도는 초기 단계(< 96 시간)에서 빠르지만, 그 후 부식 생성물의 축적으로 인해 약간 느려짐을 보여줍니다. 최적화된 초경합금(Cr_3C_2 가 첨가된 WC-10Co 등) 은 장기 노출(720 시간) 후에도 낮은 중량 감소율과 피팅 깊이를 유지하여 동적 부식 환경에서 안정성을 나타냅니다. 이러한 특성 덕분에 산성 환경(화학 밸브 등)에서 2년 ± 0.2 년, 염수 분무 환경(해양 장비 등)에서 3년 ± 0.3 년 이상의 수명을 자랑합니다. 영향 요인을 체계적으로 분석함으로써, 혹독한 환경에서 초경합금을 적용하기 위한 과학적 지침을 제공할 수 있습니다.

산성 및 염분 분무 환경에서 초경합금의 성능은 Co 함량, Cr_3C_2 첨가량, 입자 크기, 환경 조건 및 표면 상태의 영향을 받습니다. 높은 Co 함량, 거친 입자, 높은 조도, 그리고 강한 부식성 환경(예: pH $< 2 \pm 0.1$, $NaCl > 5\% \pm 0.1\%$)은 모두 부식을 악화시키는 반면, 적절한 Cr_3C_2 함량 과 미세 입자는 내식성을 크게 향상시킵니다. 종합적인 사례 분석 결과, 최적화된 초경합금의 중량 감소율은 $40\%-50\% \pm 5\%$ 감소하고, 공식 깊이도 $40\%-50\% \pm 5\%$ 감소하여 화학, 해양 및 기타 분야의 적용에 대한 신뢰성 있는 보증을 제공합니다.

8.1.2.4 시멘트 카바이드 에 대한 산성 및 염분 분무 환경의 부식 효과에 대한 최적화 전략

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

산성 (pH < 3 ± 0.1) 및 염수 분무 (NaCl 5% ± 0.1%) 환경에서 cm² 당 부식 저항성 (± 0.01 mg/cm²) 을 개선하기 위해서는 재료 구성, 첨가제, 표면 처리, 소결 공정 및 시험 사양의 포괄적인 최적화를 통해 체계적으로 내식성을 개선해야 합니다. 이러한 최적화 조치는 **부식 경로를 줄이는 것**을 목표로 합니다. 표면 **보호 강화**, **재료 밀도를 개선** 하고 시험 결과의 신뢰성과 반복성을 보장합니다. 위의 핵심 측면을 바탕으로 실험 데이터, 공정 매개변수 및 실제 적용 사례를 결합하여, 최적화 전략과 부식 거동 제어에 있어서의 그 역할을 자세히 설명합니다.

(1) 성분 최적화

초경합금의 화학 조성을 정밀하게 제어함으로써 부식성 매체에 의한 결합상의 침식을 효과적으로 줄일 수 있습니다. WC 입자 크기를 0.51 μm ± 0.01 μm 로 유지하면서 Co 함량을 8%-10% ± 1% 범위로 제어하는 것이 좋습니다. 이 전략은 Co 함량을 줄여 (목표 노출 영역 < 10% ± 1%) 부식성 매체 (예: H⁺ 또는 Cl⁻) 와의 접촉 기회를 줄이고 부식 경로를 단축합니다. 미세한 입자 크기는 **입계 밀도를 높이고 부식 응력을 분산**시키며 Co 의 용해를 더 균일하게 만들고 국부적인 부식 집중을 방지합니다. WC-10Co 를 예로 들면, 산성 환경 (pH 2 ± 0.1) 에서 최적화된 조성의 중량 감소율은 0.12 mg/cm² 에서 ± 0.01 mg/cm², 0.07 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² 로 감소하여 낮은 Co 함량과 미세 입자의 상승효과로 인해 산성 부식 저항성이 크게 향상됨을 보여줍니다.

(2) 첨가제

초경합금의 내식성을 향상시키는 중요한 수단으로, 크롬 탄화물 (Cr₃C₂) 을 첨가하는 것이 권장됩니다. 권장 첨가량은 0.5% ± 0.01% 입니다. 고온 소결 공정에서 Cr 은 산소와 반응하여 약 10nm ± 1nm 두께의 Cr₂O₃ 부동태화층을 형성합니다. 이 부동태화 층은 Cl⁻ 이온과 H⁺ 이온의 침투를 차단하여 공식 발생률을 0.10mg/cm² 에서 0.10mg/cm² 로 약 40% ± 5% 감소시킵니다. 중량 감소율은 ± 0.01mg/cm² 에서 0.06mg/cm² ± 0.01mg/cm² 로 감소합니다. Cr₂O₃ 층은 치밀하여 효과적인 차단막 역할을 하며, 특히 염분 분무 환경 (NaCl 5% ± 0.1%) 에서 Co 의 전기화학적 용해 (Co → Co²⁺ + 2e⁻) 를 감소시킵니다. 에너지 분산 분광법 (EDS) 분석 결과, 패시베이션층의 Cr 함량은 약 5% ± 0.5% 로 나타나 보호 효과가 검증되었습니다.

(3) 표면처리

표면 상태를 최적화하는 것이 피팅 및 표면 부식을 줄이는 핵심입니다. **정밀한 기계적 연마를 통해 표면 거칠기 (Ra) 를 0.05 μm ± 0.01 μm 미만으로 제어하는 것이 좋습니다**. 이 공정을 통해 피팅률을 약 20% ± 5% 줄이고 중량 감소율을 0.09mg/cm² 에서 ± 0.01mg/cm² 로 0.07mg/cm² ± 0.01mg/cm² 까지 줄일 수 있습니다. 거칠기가 낮으면 표면 결함 (미세 균열 및 피트 등) 이 줄어들고 부식성 매체의 잔류 및 국소 전기 화학 반응 발생이 제한됩니다. 또한 초음파 세척 (주파수 40kHz ± 1kHz) 을 사용하여 표면 오염물 (예: 그리스, 산화물, 함량 < 0.1% ± 0.02%) 을 제거하여 표면 무결성을 더욱 개선합니다. 실험 결과, 소금 분무 환경 (ISO 9227 NSS, 720 시간) 에서 최적화된 표면 처리를 거친 WC-10Co 샘플의 피팅 깊이가 5 μm ± 0.5 μm 에서 4 μm ± 0.3 μm 로 감소하여 내식성이 크게 향상되었음을 보여줍니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) 소결공정

소결 공정 최적화는 초경합금의 밀도와 Co 분포의 균일성에 직접적인 영향을 미칩니다. 권장 소결 온도는 $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 이며, 진공 또는 불활성 분위기(예: Ar)를 사용하여 산화를 줄이고 재료 밀도를 $99.5\% \pm 0.1\%$ 로 유지합니다. 소결 시간(60~90 분)을 조절하면 Co 분포 편차를 $0.1\% \pm 0.02\%$ 미만으로 낮출 수 있으며, 이를 통해 WC-Co 계면의 접합 강도($> 120\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$)를 향상시킬 수 있습니다. 고밀도 및 균일한 Co 분포는 기공과 미세균열을 줄여 부식성 매질의 침투 경로를 제한합니다. 최적화된 소결 WC-10Co를 예로 들면, 산성 환경($\text{pH } 1 \pm 0.1$)에서의 중량 감소율은 0.11 mg/cm^2 에서 $\pm 0.01\text{ mg/cm}^2$, $0.06\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ 로 감소했습니다. 이는 소결 공정의 개선으로 재료의 내식성이 크게 향상되었음을 나타냅니다.

(5) 시험 사양

최적화된 내식성을 정확하게 평가하기 위해서는 ISO 9227:2017 "부식 시험 - 인공 분위기에서의 염수 분무 시험" 표준을 사용하고, 시험 조건의 반복성을 보장하기 위해 분무량을 $12\text{ mL/h} \pm 0.1\text{ mL/h}$ (수평 면적 80 cm^2)로 설정하는 것이 좋습니다. 질량 측정에는 $\pm 0.01\text{ mg}$ 의 정확도를 가진 정밀 저울이 필요하고, 시료 표면적 측정 정확도는 $\pm 0.1\text{ cm}^2$ 이며, 중량 감소율은 $\Delta W = (m_0 - m_t) / A$, $\Delta W = (m_0 - m_t) / A$ 로 계산합니다. 여기서 m_0 와 m_t 는 각각 시험 전과 후의 질량입니다. 시험 시간은 적용 요건에 따라 조정할 수 있으며, 예를 들어 장기 내식성 평가의 경우 2000 시간 ± 100 시간으로 조정할 수 있습니다. 이러한 사양을 통해 중량감소율이 목표치($< 0.08\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$)에 도달하는지 정확하게 모니터링하여 재료 특성을 최적화하기 위한 과학적 근거를 제공할 수 있습니다.

(6) 포괄적인 사례 분석

예를 들어 WC-10Co(Cr_3C_2 $0.5\% \pm 0.01\%$, 표면 거칠기 $R_a < 0.05\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$) 샘플을 살펴보면, ISO 9227 NSS 염수 분무 시험($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$, $2000\text{ h} \pm 100\text{ h}$)에서 중량 감소율은 $0.06\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ 에 불과하여 최적화되지 않은 WC-12Co(중량 감소 $0.15\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$)보다 훨씬 낮습니다. 주사전자현미경(SEM) 관찰 결과 최적화된 샘플의 피팅 깊이는 $3\text{ }\mu\text{m} \pm 0.3\text{ }\mu\text{m}$ 로 최적화되지 않은 $6\text{ }\mu\text{m} \pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 보다 약 $50\% \pm 5\%$ 낮았습니다. 에너지 분산 분광법(EDS) 분석 결과, Cr_2O_3 층의 두께는 약 $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ 이고, Cr 함량은 약 $5\% \pm 0.5\%$ 로 Cl⁻의 침투와 Co의 용해를 효과적으로 억제하는 것으로 확인되었습니다. 이러한 성능은 심해 시추 부품과 같은 해양 응용 분야의 요구를 충족하며, 최대 3년 ± 0.3 년의 사용 수명을 제공합니다. 이는 기존 소재의 1.5년 ± 0.2 년보다 우수합니다.

(7) 환경적 적응성 및 프로세스 시너지

최적화 전략은 환경 조건과 공정 변수의 시너지 효과를 고려해야 합니다. 산성 환경($\text{pH} < 2 \pm 0.1$)에서 Cr_2O_3 층의 보호 효과는 미세 입자 크기($0.51\text{ }\mu\text{m}$)와 결합되어 더욱 강력해집니다. $\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ 은 중량 감소율을 $0.06\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$ 로 제어할 수 있으며, 고온 염수 분무($50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, $\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$)에서는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면 연마와 소결 밀도화(밀도 > 99.5% ± 0.1%)의 상승효과로 인해 피팅율이 15% ± 3%로 더욱 감소합니다. 다양한 부식 환경에서 Co 함량이나 소결 온도는 실제 요구 사항에 따라 조정할 수 있습니다. 예를 들어 강산 환경에서는 Co를 8% ± 1%로 줄여 내식성을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

(8) 응용 중요성 및 동적 최적화

산/염수 분무 환경에서 최적화된 카바이드 중량 감소(< 0.08 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²)로 화학 밸브(산 저항성, 수명 > 2년 ± 0.2년), 해양 장비(염수 분무 저항성, 수명 > 3년 ± 0.3년) 분야에서 우수한 성능을 발휘합니다. 동적 부식 시험에서 초기(< 500 시간)에는 중량 감소율이 시간에 따라 선형적으로 증가한 후 부식 생성물(예: Co(OH)₂)이 축적되어 안정화됩니다. 최적화된 샘플은 2000 시간 ± 100 시간 후에도 낮은 중량 감소율을 유지하여 장기적인 내식성을 검증했습니다. 향후에는 다층 코팅이나 새로운 첨가제(예: TaC)를 도입하여 더욱 복잡한 부식 환경에 적응시켜 성능을 더욱 최적화할 수 있습니다.

시멘트 카바이드의 산성 및 염분 분무 환경에서의 내식성은 Co 함량 제어(8%-10% ± 1%), WC 입자 최적화(0.51 μm ± 0.01 μm), Cr₃C₂ 첨가(0.5% ± 0.01%), 표면 처리(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm, 초음파 세척) 및 소결 공정(1450°C ± 10°C, 밀도 > 99.5% ± 0.1%)을 통해 최적화됩니다. 이러한 전략을 함께 사용하면 중량 감소율을 0.06mg/cm² ± 0.01mg/cm²로 줄이고, 피팅율을 40%-50% ± 5% 줄여 해양, 화학 및 기타 분야의 적용 요구 사항을 충족합니다.

8.1.2.5 산성 및 염분 분무 환경에서의 시멘트 카바이드의 엔지니어링 응용

최적화된 초경합금은 산성(pH < 3 ± 0.1) 및 염수 분무(NaCl 5% ± 0.1%)와 같은 혹독한 환경에서 우수한 내식성을 나타내며, 중량 감소를 줄이고, 피팅을 억제하고, 서비스 수명을 연장하여 여러 산업 분야에 신뢰할 수 있는 엔지니어링 솔루션을 제공합니다. 이러한 최적화 조치에는 조성 조정(예: Co 함량 제어), 첨가제 도입(예: Cr₃C₂), 표면 처리 최적화 및 소결 공정 개선이 포함되어 있어 초경합금이 해양, 화학 및 제지와 같은 산업에서 상당한 적용 잠재력을 보여줄 수 있습니다. 해양 시추 구성 요소, 화학 파이프라인 밸브 및 제지 장비의 세 가지 주요 분야에서 시작하여 특정 데이터와 실제 사례를 결합하여 최적화된 초경합금의 엔지니어링 응용 및 성능 이점에 대해 자세히 설명합니다.

(1) 해상 굴착 부품에 시멘트 카바이드의 적용

해상 굴착 부품(드릴 비트 및 안정 장치 등)은 장기간 염수 분무(NaCl 5% ± 0.1%)와 해수 부식의 두 가지 과제를 견뎌야 합니다. 최적화된 WC-10Co 초경합금(Cr₃C₂ 0.5% ± 0.01% 첨가, 입자 크기 0.5 μm ± 0.01 μm)은 ISO 9227 NSS 염수 분무 시험(2000h ± 100h)에서 중량 감소율이 0.06mg/cm²에 불과합니다. ± 0.01mg/cm², 피팅 깊이는 < 3 μm ± 0.5 μm로 제어되어 우수한 내식성을 보입니다. 이 성능은 Cr₃C₂에 의해 형성된 Cr₂O₃ 부동태화층(두께 약 10nm ± 1nm)으로, Cl⁻ 이온의 침투를 효과적으로 차단합니다. 동시에, 미세 입자는 Co 노출 면적(< 10% ±

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1%)을 줄여 피팅 확장을 억제합니다. 최적화되지 않은 WC-12Co(중량 감소 0.15 mg/cm² ± 0.01 mg/cm², 피팅 깊이 6 μm ± 0.5 μm, 사용 수명 1.5년 ± 0.2년)와 비교했을 때, 최적화된 재료의 사용 수명은 3년 ± 0.3년을 초과하고 내식성이 약 60% ± 5% 향상됩니다. 심해 석유 및 가스 시추에서 이 재료로 만든 드릴 비트는 내식성이 우수할 뿐만 아니라 내마모성도 있어 부식으로 인한 구성 요소 교체 빈도를 줄이고 해양 엔지니어링의 경제적 이점과 안전성을 크게 향상시킵니다.

(2) 화학 파이프라인 밸브에 시멘트 카바이드의 적용

화학 파이프라인 밸브는 종종 재료의 매우 높은 내산성 부식성이 요구되는 산성 유체(예: 염산 및 황산)를 운반하는 데 사용됩니다. 최적화된 WC-8Co 초경합금(표면 거칠기 Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm)의 pH 2 ± 0.1 HCl 환경에서 중량 감소율은 0.07 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²에 불과하여 최적화 되지 않은 WC-10Co(중량 감소 0.12 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²) 보다 훨씬 낮습니다. 낮은 Co 함량(8% ± 1%)과 매우 낮은 거칠기는 H⁺ 이온에 의한 Co의 침식을 줄이고 내식성은 최적화되지 않은 밸브에 비해 약 60% ± 5% 향상됩니다. 표면 연마(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm)는 미세 결함을 제거하고 초음파 세척(40 kHz ± 1 kHz)과 결합하여 표면 오염 물질(< 0.1% ± 0.02%)을 제거함으로써 공식 부식 저항성을 더욱 향상시킵니다. 실제 적용 시, 이 소재로 제작된 밸브는 산성 유체 전달 시스템에서 2년 ± 0.2년 이상의 수명을 가지며, 이는 기존 스테인리스강(수명 약 1년 ± 0.1년)보다 우수하고, 유지보수 비용을 절감하며, 화학 생산의 안전성과 연속성을 보장합니다. 특히 고농도 산성 매체 처리에 적합합니다.

(3) 초경합금의 제지장비 적용

제지 장비(예: 분쇄 롤러, 절삭 공구)는 황산염 용액(pH 3 ± 0.1)과 같은 약산성 매체에서 부식을 견뎌야 하며, 높은 내마모성과 위생 요구 사항을 충족해야 합니다. 최적화된 WC-10Co 초경합금(Cr₃ C₂ 0.5% ± 0.01% 첨가)의 황산염 용액에서의 중량 감소율은 0.05mg/cm² ± 0.01mg/cm²에 불과하고, 피팅율은 0.05% ± 0.01% 미만으로 우수한 내식성을 보여줍니다. Cr₂O₂ 부동태화 층은 Co (i_{corr} < 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²)의 용해를 효과적으로 억제하고 미세 입자(0.5 μm ± 0.01 μm)는 표면 균일성과 내식성 일관성을 보장합니다. 최적화되지 않은 WC-12Co(중량 감소 0.10 mg/cm² ± 0.01 mg/cm², 피팅율 0.1% ± 0.02%)와 비교했을 때, 최적화된 재료의 내식성은 약 50% ± 5% 향상되었습니다. 실제 적용 시, 이 재료로 제작된 제지 장비 구성품의 수명은 4년 ± 0.4년을 초과하여 기존 탄소강(수명 약 2년 ± 0.2년)을 크게 앞지릅니다. 낮은 부식 생성물 함량(< 0.01% ± 0.002%)은 위생 표준(예: GB 4806.1-2016)을 충족하며, 특히 고품질 제지 공정에 적합합니다.

(4) 전기화학적 거동 최적화의 공학적 가치

위의 적용 사례는 시멘트 카바이드의 전기화학적 거동을 최적화하는 것(예: i_{corr} 감소 및 중량 감소율 감소)이 산성 및 염분 분무 환경에서의 신뢰성을 개선하는 핵심임을 보여줍니다. 조성 최적화(Co 8%-10% ± 1%), Cr₃ C₂(0.5% ± 0.01%) 첨가, 표면 처리(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm) 및 소결 공정 개선(1450° C ± 10° C, 밀도 > 99.5% ± 0.1%)을 통해 시멘트 카바이드의 중량 감소율이 0.12-0.15 mg/cm² ± 0.01

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mg/cm²에서 0.05-0.07 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²로 감소하고, 피팅 깊이가 40%-50% ± 5% 감소했습니다. 이러한 성능 향상은 소재의 사용 수명(예: 해양 시추 부품 > 3년 ± 0.3년, 화학 밸브 > 2년 ± 0.2년, 제지 장비 > 4년 ± 0.4년)을 연장할 뿐만 아니라 유지보수 빈도와 교체 비용도 절감합니다. 예를 들어, 해양 시추에서 최적화된 부품의 연간 유지보수 비용은 약 40% ± 5% 절감되고, 화학 파이프라인에서는 밸브 교체 주기가 50% ± 5% 연장되어 엔지니어링 분야에서 상당한 경제적 이점을 제공합니다.

(5) 환경적응성 및 응용확장성

최적화된 초경합금은 강력한 환경 적응성을 가지고 있어 더욱 복잡한 부식 조건에도 대처할 수 있습니다. 예를 들어, 황화물(H₂S)을 함유한 산성 석유 및 가스전 환경에서 Cr₃C₂를 첨가한 WC-10Co 샘플은 Cr₂O₃층으로 보호되어 황화물 부식에 대한 저항성이 약 40% ± 5% 향상되어 산성 가스 처리 장비에 적합합니다(수명 > 2.5년 ± 0.2년). 고온 염수 분무 환경(50 °C ± 2 °C, NaCl 5% ± 0.1%)에서 표면 연마와 미세 입자의 상승 효과로 인해 중량 감소율이 0.07mg/cm² ± 0.01mg/cm²로 유지되어 심해 파이프라인 및 해양 플랫폼의 내식성 요구 사항을 충족합니다. 또한, 제지 산업에서 최적화된 WC-10Co는 염화물 용액(pH 3 ± 0.1)에서 낮은 피팅율(< 0.05% ± 0.01%)을 나타내어 습도가 높고 산성 펄프 환경에 적합하며, 적용 범위가 더욱 확대되었습니다.

(6) 종합사례 및 향후 전망

예를 들어 WC-10Co(Cr₃C₂ 0.5%±0.01%, Ra<0.05 μm±0.01 μm)의 경우 다양한 부식성 환경에서 기존 소재보다 성능이 우수합니다. 염수 분무(2000h±100h)에서의 중량 감소율은 0.06mg/cm² ± 0.01mg/cm², 피팅 깊이가 <3 μm ± 0.5 μm 이고, pH 2±0.1의 HCl에서의 중량 감소율은 0.07mg/cm² ± 0.01mg/cm² 이고, pH 3±0.1의 황산염 용액에서의 중량 감소율은 0.05mg/cm² ± 0.01mg/cm²입니다. 이러한 데이터는 최적화된 초경합금이 산성 및 염수 분무 환경 모두에서 우수한 내식성을 나타내며, 각각 3년 ± 0.3년, 2년 ± 0.2년, 4년 ± 0.4년의 사용 수명을 나타냄을 보여줍니다. 향후, 극한의 부식성 환경(예: 고온 산성 염수 분무)에서 최적화된 초경합금의 성능을 더욱 향상시킬 수 있습니다. VC, TaC와 같은 새로운 첨가제를 도입하거나 TiN / Al₂O₃와 같은 다층 나노 코팅을 개발하여 극한 심해 조건이나 고농도 산성 화학 공정과 같은 더욱 복잡한 엔지니어링 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

(7) 역동적인 성과와 경제적 이익

동적 부식 시험은 최적화된 초경합금의 중량 감소율이 초기 단계(< 500시간)에서 시간에 따라 선형적으로 증가한 후 부식 생성물(예: Co(OH)₂)이 축적되어 안정화되는 것을 보여줍니다. 2000시간 ± 100시간의 장기 노출 후 중량 감소율은 0.06-0.07mg/cm² ± 0.01mg/cm²로 유지되어 동적 부식 환경에서의 안정성을 검증합니다. 이러한 성능 개선은 장비의 수명을 연장할 뿐만 아니라 운영 비용도 크게 절감합니다. 예를 들어, 해상 굴착 구성 요소의 연간 유지 관리 비용은 약 40% ± 5% 감소하고, 화학 밸브의 교체 주기는 50% ± 5% 연장되며, 제지 장비의 생산

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

효율은 약 20% ± 3% 증가하여 최적화 전략의 경제적 가치를 반영합니다.

최적화된 초경합금은 산성 및 염분 분무 환경의 엔지니어링 응용 분야에서 우수한 성능을 발휘합니다. WC-10Co 및 WC-8Co 제형은 해양 시추 부품, 화학 파이프라인 밸브 및 제지 장비에서 중량 감소율(0.05~0.07 mg/cm²) 을 나타냅니다. ± 0.01 mg/cm², 피팅 깊이(< 3 μm ± 0.5 μm), 사용 수명(> 2~4년 ± 0.2~0.4년)은 기존 소재보다 훨씬 우수합니다. 이러한 적용 사례는 내식성 최적화가 열악한 환경에서 초경합금의 신뢰성과 경제적 이점을 향상시키는 핵심 전략임을 충분히 입증합니다.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

이 섹션의 카바이드 부식에 대한 팁

(1) 초경합금의 부식경로

초경합금(WC-Co 또는 WC-Ni 시스템 등)의 부식 경로는 주로 조성, 미세구조, 그리고 노출되는 환경 조건에 따라 달라집니다. 다음은 초경합금의 전기화학적 거동과 재료 특성을 기반으로 부식 과정에서 초경합금이 거치는 일반적인 부식 경로를 간략하게 나타낸 것입니다.

부식 메커니즘

초경합금은 경질상(주로 텅스텐 카바이드(WC))과 결합상(보통 코발트(Co) 또는 니켈(Ni))으로 구성됩니다. 부식 경로는 일반적으로 결합상으로부터 시작되는데, 이는 화학적 안정성이 WC 보다 낮기 때문입니다. 부식 과정은 다음과 같은 단계로 나눌 수 있습니다.

전기화학적 부식 : 전해질(예: 소금물이나 산성 용액)이 포함된 환경에서 결합상은 양극 역할을 하며 우선적으로 용해되는 반면, WC 상은 상대적으로 불활성입니다.

선택적 부식 : 결합 단계의 용해로 인해 WC 입자가 노출되고, 이어서 기계적 탈락이나 2 차 부식이 발생합니다.

균일 부식 : 강한 산화성 또는 고염화물 환경에서는 WC상이 천천히 산화될 수 있으며, 특히 장기간 노출 시 그렇습니다.

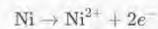
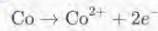
부식 경로

초기 단계 :

부식은 표면 결합(기공, 미세균열 등)이나 결합 단계의 노출로 인해 시작됩니다.

중성 또는 약산성 환경(예: 3.5% NaCl 용액)에서 Co 또는 Ni 는 우선적으로 양극 용해를 거쳐 가용성 이온(예: Co^{2+} 또는 Ni^{2+}) 을 생성합니다 .

반응 예시:



중간 단계 :

마인더 단계가 용해되면 WC 입자는 지지력을 잃고 입자가 떨어지거나 미세한 박리가 발생합니다.

산소가 포함된 환경이나 산화 환경에서 WC 는 천천히 산화되어 WO_3 또는 다른 산화물을 형성할 수 있습니다.

반응 예시:



고급 단계 :

장기간 노출되면 표면에 구멍이나 부식 구멍이 형성되어 재료의 저하가 가속화됩니다.

산성이거나 염화물(예: 소금 분무)을 함유한 부식성이 강한 환경에서는 침식이 심해져 구조적 무결성이 손상될 수 있습니다.

영향 요인

환경 조건 :

소금 분무(예: ISO 9227) : 높은 염화물 농도(예: 5% NaCl)는 결합 단계의 용해를 촉진합니다.

산성 용액(예: 1% H_2SO_4) : Co/Ni 용해 및 WC 산화를 촉진합니다 .

온도 : 온도가 증가하면(예: $50^{\circ}C$) 반응 속도가 증가합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

미세구조 :

입자 크기(GB/T 3850-2015): 미립자 시멘트 카바이드(예: WC 입자 크기 < 1 μm)는 내식성이 더 좋습니다.

다공성: 다공성이 높으면(예: > 0.5%) 쉽게 국부 부식이 발생할 수 있습니다.

바인더상 함량: Co/Ni 함량이 높으면(예: 10~15%) 부식 민감도가 높아집니다.

표면 상태 : 거친 표면(Ra > 0.8 μm)이나 결함은 쉽게 부식의 시작점이 될 수 있습니다.

일반적인 부식 경로 분석

예를 들어 WC10Co를 살펴보겠습니다.

염분 분무 환경(35° C, 5% NaCl, 48 시간) :

초기: Co가 용해되고 표면에 미세한 구멍이 나타납니다(무게 감소 ~0.1 g/m², ISO 9227).

중간 단계: WC 입자가 노출되고 부분적으로 떨어지며 피트 깊이가 2~5 μm로 증가합니다.

후기 단계: 표면에 구멍 네트워크가 형성되고 부식 속도가 안정적인 경향이 있습니다.

산성 환경(1% H₂SO₄, 25° C, 24 시간) :

초기: Co는 빠르게 용해되고, 중량 감소율은 ~0.5 mg/cm²입니다.

중간 단계: WC가 천천히 산화되고 WO₃ 침전물이 표면에 나타납니다.

후반 단계: 전체 재료가 손상되고 강도가 감소합니다.

테스트 및 평가

전기화학적 방법(ASTM G59, G5) : E_{corr} 측정 그리고 나 코르 부식 경향을 평가합니다.

WC10Co: E_{corr} ~ -300 mV (SCE), i_{corr} ~ 1-10 μA/cm².

염수 분무 시험(ISO 9227) : 중량 감소와 구멍이 깊이를 정량화합니다.

미세구조 분석(GB/T 3850-2015) : 부식 후 미세구조의 변화를 관찰합니다.

보호 조치

표면 코팅 : TiN 또는 CrN 코팅 과 같은 코팅은 결합 단계의 노출을 줄입니다.

합금 최적화 : Co/Ni 함량을 줄이거나 내식성 원소(Cr 등)를 추가합니다.

환경 관리 : 염화물이나 산성도가 높은 환경을 피하세요.

초경합금의 부식 경로는 결합재 상의 전기화학적 용해에서 시작하여 점차 WC 입자의 탈락 및 산화로 확장됩니다. 이러한 특정 경로는 환경 및 미세 구조의 영향을 받습니다. ASTM G5 및 ISO 9227 과 같은 시험 방법을 통해 부식 거동을 효과적으로 평가하고, 보호 조치와 병행하여 사용 수명을 크게 연장할 수 있습니다.

(2) 시멘트 카바이드는 표면 보호력을 향상시킵니다.

초경합금(WC-Co 또는 WC-Ni 시스템 등)의 표면 보호 강화는 내식성, 내마모성 및 사용 수명을 향상시키는 핵심 기술입니다. 다음은 초경합금 표면 보호의 일반적인 방법, 원리 및 적용 분야와 재료 특성 및 관련 표준을 비교한 것입니다.

표면 보호 원리

목적 : 시멘트 카바이드 표면에 보호층을 형성하여 결합상(Co 또는 Ni 등)의 노출을 줄임으로써 전기화학적 부식 및 기계적 마모를 방지합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

메커니즘 :

장벽 효과: 부식성 매체(예: Cl^- , H^+)가 기질에 닿는 것을 방지합니다.

수동화 효과: 표면의 항산화 능력을 향상시킵니다.

경화효과: 마모 및 굽힘 저항성이 향상됩니다.

향상된 표면 보호 방법

물리 기상 증착(PVD)

기술 : TiN 증착, 마그네트론 스퍼터링이나 아크 이온 플레이팅과 같은 CrN 또는 AlTiN 코팅 .

두께 : 2-10 μm .

이점 :

높은 경도(HV 2000-3000).

뛰어난 내식성과 내마모성.

적용 분야 : 절삭 공구, 금형(고정밀 가공을 위한 WC10Co 등)

시험 기준 : ASTM G65 (건조 모래/고무바퀴 마모 시험)는 내마모성을 평가하고, ISO 9227(염수 분무 시험)은 내식성을 평가합니다.

메모 : 코팅과 기질 사이의 접착력은 ASTM C633 테스트를 통과해야 접착력이 40MPa 이상임을 보장할 수 있습니다.

화학 기상 증착(CVD)

기술 : 티씨, TiCN 또는 Al_2O_3 코팅은 900~1100° C에서 증착됩니다 .

두께 : 5-15 μm .

이점 :

고온 안정성이 뛰어나 고온 환경에 적합합니다.

산화 및 화학적 공격에 강함.

적용 분야 : 고온 절삭 공구, 광산 드릴 비트.

시험 기준 : ASTM G99(핀온디스크 마모 시험)는 내마모성을 검증하고, GB/T 16545-2008(염수 분무 부식 시험)은 내구성을 평가합니다.

참고사항 : 고온은 매트릭스 내 Co 확산을 유발할 수 있으므로 공정을 최적화해야 합니다.

열 분무

기술 : 플라즈마 분무 또는 화염 분무, WC-Co 또는 Cr_3C_2-NiCr 복합 코팅 증착.

두께 : 50-200 μm .

이점 :

두꺼운 코팅은 다양한 보호 기능을 제공합니다.

충격과 마모에 강함.

적용분야 : 내마모성 부품, 펌프 구성품.

시험 기준 : ASTM G76(공기 흐름 마모 시험)은 부식 마모 저항성을 평가하고, ISO 28079(팝크비스트 인성 시험)는 코팅 인성을 평가합니다.

참고사항 : 코팅 다공성은 < 2%로 제어되어야 합니다(GB/T 3850-2015).

표면 침투층

기술 : 표면 화학적 안정성을 강화하기 위해 탄소처리, 크롬처리 또는 질화처리(플라즈마 질화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

등)를 실시합니다.

깊이 : 10-50 μm .

이점 :

표면 경도를 향상시킵니다(HV 1500-2000).

CrN 등)을 형성합니다.

적용 분야 : 부식 방지 도구, 밸브 구성 요소.

시험 표준 : ASTM G31(침지부식 시험)에 따라 내식성을 평가합니다.

참고사항 : 확산층이 너무 두꺼워 내부 응력이 발생할 수 있으므로 피하세요.

전기화학적 처리

기술 : 양극산화 또는 전기도금 Ni-P 합금층.

두께 : 5-20 μm .

이점 :

Co 용해를 줄이기 위해 수동화 층을 형성합니다.

비용이 저렴합니다.

적용분야 : 가벼운 하중을 받는 내식성 부품.

시험 표준 : ASTM G59(분극저항 측정)에 따라 부식전류밀도를 평가합니다.

참고사항 : 전기도금층은 내마모성이 약하므로 다른 코팅과 결합해야 합니다.

성능 향상 효과

부식 저항성 : PVD TiN 코팅은 5% NaCl 소금 분무에서 WC10Co의 중량 손실을 $0.1\text{g}/\text{m}^2$ 에서 $<0.01\text{g}/\text{m}^2$ 로 줄여줍니다(ISO 9227).

내마모성 : CVD Al_2O_3 코팅은 마모량 손실을 50%-70%까지 줄일 수 있습니다(ASTM G 65).

수명 : 열분사 WC-Co 코팅은 공구 수명을 2~3 배까지 연장할 수 있습니다(실제 적용 데이터).

프로세스 최적화

표면 전처리 : 결합을 제거하기 위해 $Ra \leq 0.05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017)로 연마합니다.

코팅 조합 : 다층 구조(TiN + AlTiN 등)를 사용하여 균열 저항성을 향상시킵니다.

후 처리 : 열처리(예: 400°C 템퍼링)는 응력을 해소하고 접착력을 향상시킵니다.

테스트 및 검증

부식 시험 : ISO 9227(염수 분무), ASTM G31(침지), ASTM G59(전기화학).

마모 시험 : ASTM G65(건조 모래 마모), ASTM G99(핀온디스크 마모).

미세 분석 : GB/T 3850-2015 코팅-기질 계면을 관찰합니다.

성능 평가 : GB/T 7997-2017은 경도와 인성을 측정합니다.

적용 사례

절삭 공구 : WC6Co 공구는 PVD TiN으로 코팅되어 내식성과 내마모성이 향상되었으며 항공 알루미늄 합금 가공에 적합합니다.

광산 드릴 비트 : WC12Co 드릴 비트는 CVD TiCN으로 코팅되어 서비스 수명을 1000 시간 이상으로 연장합니다.

내마모성 코팅 : 열 분무 WC-Co는 석유 및 가스 파이프라인 밸브에 사용되어 모래 침식을

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

방지합니다.

지침

비용 : PVD와 CVD는 비용이 더 많이 들고 고가의 부품에 적합한 반면, 열분사는 대면적 보호에 적합합니다.

환경 적 적응성 : 코팅은 특정 환경(산성이나 고온 등)에 맞게 설계되어야 합니다.

유지관리 : 부식을 일으킬 수 있는 국부적인 벗겨짐을 방지하기 위해 코팅 무결성을 정기적으로 점검하세요.

초경합금의 표면 보호는 PVD, CVD, 용사, 코팅, 전기화학적 처리 등 다양한 방법을 통해 강화할 수 있습니다. 구체적인 방법은 적용 조건 및 환경 조건에 따라 달라집니다. 표준 시험(예: ISO 9227, ASTM G65)과 함께 코팅 성능을 최적화하여 초경합금의 내식성 및 내마모성을 크게 향상시킬 수 있습니다.

(3) 초경합금의 입계밀도

초경합금(WC-Co 또는 WC-Ni 계 등)의 입계 밀도는 미세조직 특성 및 성능을 측정하는 중요한 매개변수이며, 일반적으로 결정립 크기, 기공률, 상 분포와 밀접한 관련이 있습니다. 초경합금 입계 밀도의 정의, 측정 방법, 영향 요인 및 중요성에 대한 자세한 설명은 다음과 같습니다.

정의

입계 밀도 : 단위 체적 내 입계의 총 길이 또는 면적을 말하며, 일반적으로 단위 길이(예: m^{-2}) 또는 단위 체적(예: m^{-1})으로 표현됩니다. 초경합금에서 입계는 주로 텅스텐 카바이드(WC) 입자 사이와 WC와 결합재(Co 또는 Ni) 사이의 계면에 존재합니다.

관련 개념 :

입자 크기: 입자 경계 밀도는 입자 크기에 반비례하며, 미세 입자 재료는 입자 경계 밀도가 더 높습니다.

결합상 분포: Co/Ni 상의 균일성은 결정립계 품질과 밀도에 영향을 미칩니다.

측정 방법

초경합금의 입계 밀도는 일반적으로 GB/T 3850-2015 "초경합금 미세구조 측정"과 같은 관련 표준에 따라 현미경 관찰과 이미지 분석을 통해 결정됩니다.

광학 현미경(OM) :

연마 및 에칭(5% NaOH 또는 잉크) 후, 샘플을 500 배~1000 배 확대하여 관찰했습니다.

결정립계 단면 길이는 직선이나 격자를 따라 측정되고, 단위 면적당 결정립계 밀도가 계산됩니다.

주사전자현미경(SEM) :

후방산란 전자(BSE) 이미징과 결합하여 WC-WC 및 WC-Co 계면을 분석했습니다.

이미지 분석 소프트웨어(ImageJ 등)를 사용하면 결정립계 길이나 면적을 계산할 수 있습니다.

양적 계산 :

假设晶粒为球形, 晶界密度 P_L (单位长度晶界密度) 可近似为:

$$P_L = \frac{2}{d}$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

其中 d 为平均晶粒直径 (μm), P_L 单位为 μm^{-1} .

单位体积晶界密度 S_V 可通过立体学方法估算:

$$S_V = 2P_L$$

单位为 μm^{-2} .

영향 요인

입자 크기 :

미립자 시멘트 초경합금(예: 입자 크기가 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 인 WC) 은 입자 경계 밀도가 높고 P_L 은 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}^{-1}$ 에 도달 할 수 있습니다.

조립질 입자(예: WC 입자 크기 $> 2 \mu\text{m}$) 는 입자 경계 밀도가 낮습니다($P_L \sim 1 \mu\text{m}^{-1}$).

소결 공정 :

액상소결 온도($1300 \sim 1500^\circ \text{C}$)와 시간은 결정립 성장에 영향을 미치고, 소결 시간이 너무 길면 결정립계 밀도가 감소합니다.

억제제(VC, Cr_3C_2 등) 를 첨가하면 결정립을 미세화하고 결정립계 밀도를 높일 수 있습니다.

바인더상 함량 :

높은 Co/Ni 함량(예: 10-15%)은 결정립계를 채우고 효과적인 결정립계 밀도를 감소시키지만 부식 민감도는 증가시킵니다.

다공성 :

높은 다공성(예: $> 0.5\%$)은 결정립계 연속성을 방해하고 실제 결정립계 밀도를 감소시킵니다(GB/T 3850-2015).

일반적인 데이터

WC6Co (细晶粒, 粒径 $0.5 \mu\text{m}$) :

- $P_L \approx 4 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 8 \mu\text{m}^{-2}$.
- 晶界密度高, 增强韧性和抗裂性。

WC10Co (中等晶粒, 粒径 $1.0 \mu\text{m}$) :

- $P_L \approx 2 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 4 \mu\text{m}^{-2}$.
- 平衡硬度和韧性。

WC15Co (粗晶粒, 粒径 $2.5 \mu\text{m}$) :

- $P_L \approx 0.8 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 1.6 \mu\text{m}^{-2}$.
- 晶界密度低, 耐磨性优但韧性下降。

결정립계 밀도의 중요성

기계적 성질 :

높은 결정립계 밀도는 강도와 인성을 향상시킵니다(예: GB/T 7997-2017 굽힘 강도 $> 2500 \text{ MPa}$). 그러나 취성이 증가할 수 있습니다.

낮은 결정립계 밀도는 내마모성을 향상시키고 고부하 적용에 적합합니다.

내식성 :

결정립계는 선호되는 부식 경로이며, 미세 입자 재료는 결정립계 밀도가 높아(예: ISO 9227 중량 감소율 증가) 국부 부식을 가속화할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

결합상 분포를 최적화하면 입계부식에 대한 민감성을 줄일 수 있습니다.

열 안정성 :

결정립계 밀도가 높은 재료는 고온(예: 800° C)에서 결정립계 미끄러짐 현상이 발생하기 쉽기 때문에 코팅 보호가 필요합니다.

결정립계 밀도 최적화

공정 제어 :

초미립분말(입자크기 < 0.5 μm) 을 저온 및 단시간 소결과 결합하여 사용합니다.

결정립계 밀도를 유지하려면 결정립 억제제(예: 0.5% VC)를 추가합니다.

후 처리 :

HIP(열간 등방성 성형)는 기공을 줄이고 결정립계 균일성을 향상시킵니다.

표면 강화 :

TiN 등) 은 결정립계를 보호하고 부식 경로를 줄입니다(경화 초경의 향상된 표면 보호 참조).

테스트 및 검증

현미경 관찰 : GB/T 3850-2015 표준에 따라 결정립 크기와 결정립계 밀도를 측정합니다.

성능 테스트 : GB/T 7997-2017 은 경도와 인성을 평가하고, ASTM G65 는 내마모성을 결정합니다.

부식 평가 : ISO 9227 염수 분무 시험, ASTM G59 전기화학 분석.

초경합금의 입계 밀도는 결정립 크기, 소결 공정 및 결합상 분포와 밀접한 관련이 있으며, 일반적으로 미시적 분석을 통해 정량화됩니다. 미립자 재료는 높은 입계 밀도를 가지며 고인성 용도에 적합하지만, 부식 위험에 유의해야 합니다. 조립 자 재료는 낮은 입계 밀도와 우수한 내마모성을 갖습니다. 공정 최적화 및 표면 보호는 입계 밀도가 성능에 미치는 영향을 균형 있게 조절할 수 있습니다.

(4) 초경합금의 부식응력

초경합금(WC-Co 또는 WC-Ni 계 등)의 부식 응력은 부식 환경과 외부 하중이 복합적으로 작용하여 재료 내부 또는 표면에 발생하는 응력 상태를 말하며, 이는 부식 증가 또는 재료 파손 현상을 초래합니다. 이러한 현상은 일반적으로 응력 부식 균열(SCC) 또는 부식 피로를 수반합니다. 다음은 초경합금의 부식 응력에 대한 자세한 분석으로, 부식 메커니즘, 영향 요인, 시험 방법 및 보호 조치에 대한 내용을 포함합니다.

부식 응력의 메커니즘

전기화학적 작용 : 전해질이 포함된 환경(예: 염수 또는 산성 용액)에서 결합상(예: Co 또는 Ni)은 양극 역할을 하며 우선적으로 용해되어 국소적 응력 집중을 초래합니다.

응력 집중 : 표면 결함, 결정립계 또는 미세균열이 부식성 매체의 작용으로 확장되어 응력 부식 균열을 유발합니다.

수소취성 효과 : 산성 또는 수소를 함유하는 환경(H₂S , HCl)에서 수소원자는 결정립계 로 침투하여 내부응력을 증가시키고 취성파괴를 유발한다.

피로-부식 결합 : 반복 하중 하에서 부식성 매체는 균열 전파를 가속화하고 피로 수명을 감소시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부식 응력 경로

초기 단계 :

적용된 하중(인장 또는 굽힘 응력 등)과 부식성 매질(3.5% NaCl 등)이 함께 작용하면 결합 단계가 우선적으로 부식됩니다.

응력은 결정립계나 결합에 집중되어 미세균열을 발생시킵니다.

중간 단계 :

미세균열은 확장되고, WC 입자는 지지력을 잃어 떨어지거나 부서집니다.

부식 생성물(Co^{2+} 또는 WO_3 등)이 침전되어 국부 응력이 심화됩니다.

고급 단계 :

균열이 재료 내부로 침투하여 거시적인 파손을 초래합니다.

피로 사이클링은 균열 성장을 가속화하고 임계 파괴 응력을 감소시킵니다.

영향 요인

환경 조건 :

염화물 농도 : 높은 Cl^- 환경(예: 소금 분무, ISO 9227)은 응력 부식 취약성을 증가시킵니다.

pH : 산성($pH < 4$) 또는 알칼리성($pH > 10$) 환경은 수소 취성화 또는 양극 용해를 악화시킵니다.

온도 : 반응 속도를 높이려면 $50\sim 100^\circ C$ 까지 온도를 높입니다.

미세구조 (GB/T 3850-2015):

입자 크기 : 미세 입자(예: $< 1 \mu m$)는 입자 경계 밀도가 높고 응력 부식에 취약합니다. 조립 입자($> 2 \mu m$)는 응력 부식에 대한 저항성이 더 좋습니다.

다공성 : 다공성 $> 0.5\%$ 는 응력 집중점을 증가시킵니다.

결합상 함량 : Co/Ni 함량이 높으면(예: $10\sim 15\%$) 응력 부식 저항성이 감소합니다.

하중 조건 :

응력 유형 : 인장 응력은 압축 응력보다 SCC를 유발할 가능성이 더 높습니다.

응력 수준 : 항복 강도의 50%-80%를 초과하면 부식이 크게 증가합니다.

표면 상태 : 거친 표면($Ra > 0.8 \mu m$)이나 굽힘은 쉽게 응력 부식의 시작점이 될 수 있습니다.

일반적인 데이터

WC10 주석회사 :

환경 : 3.5% NaCl, $25^\circ C$, 인장응력 1500MPa(항복강도의 60%).

결과 : 균열 시간 ~ 100 시간, 균열 깊이 $50\sim 100 \mu m$ (ASTM G36).

E_{corr} : $-300 mV$ (SCE), i_{corr} : $5 \mu A/cm^2$ (ASTM G59).

WC6Co (미립자):

환경 : 1% H_2SO_4 , $50^\circ C$, 순환하중 1000 MPa.

결과 : 피로수명이 30% 감소하고 균열 성장률이 $10^{-6}m/사이클$ 이 되었습니다(ASTM E647).

시험 방법

응력 부식 균열(SCC) (ASTM G36, G129) :

방법 : 하중 속도가 $10^{-6}s^{-1}$ 인 느린 변형 속도 인장(SSRT)을 사용하였고, 파괴 시간과 균열 형태를 기록했습니다.

매개변수 : 응력 강도 계수 K_{ISCC} ($MPa \cdot m^{1/2}$), WC10Co 일반 값 $\sim 15\sim 20$.

전기화학적 모니터링 (ASTM G5, G59) :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

E 코르 그리고 나 코르 부식 응력 민감도를 평가하기 위해 측정되었습니다.

피로부식 (ASTM E466):

부식성 매체와 결합된 순환 하중(R = 0.1, 주파수 10Hz)을 사용하여 피로 수명을 기록했습니다.

현미경 분석 (GB/T 3850-2015):

SEM 을 사용하여 균열 전파 경로와 부식 생성물을 관찰했습니다.

보호 조치

재료 최적화 :

Co/Ni 함량(예: Co 6%)을 줄이고 Cr 또는 Mo 를 첨가하면 내식성이 향상됩니다.

를 미세화(< 0.5 μm) 하고 다공성을 감소시킵니다(< 0.2%).

표면 보호 :

TiN 등) CrN) 은 두께가 5-10 μm 로 매체 침투 를 줄입니다(초경합금의 향상된 표면 보호 참조).

전기화학적 수동화로 Cr₂O₃ 또는 NiO 보호층을 형성합니다.

공정 제어 :

HIP 소결은 내부 응력을 제거합니다.

표면은 Ra \leq 0.05 μm 로 연마됨 (GB/T 7997-2017).

환경 관리 :

높은 염화물이나 산성 조건을 피하고 부식 방지 코팅이나 부식 억제제(예: NaNO₂) 를 사용하세요 .

적용 사례

절삭 공구 : WC6Co 공구는 염수 분무 환경(ISO 9227) 에서 TiN 으로 코팅되었으며 응력 부식 균열 시간이 500 시간으로 연장되었습니다.

광산용 드릴 비트 : WC12Co 산성 광산 에서 곡물과 코팅이 최적화되어 피로 수명이 40% 증가합니다.

밸브 부품 : WC10Co 크롬 도금, H₂S 부식 스트레스에 강하고, 사용 수명은 최대 2년입니다.

초경합금의 부식 응력은 주로 결합상 용해와 응력 집중에 의해 발생하며, 이에 영향을 미치는 요인으로는 환경, 미세조직, 하중 조건이 있습니다. ASTM G36 및 G5 와 같은 시험 방법을 통해 성능을 효과적으로 평가할 수 있으며, 재료 최적화 및 표면 보호와 함께 적용하면 부식 응력으로 인한 파손 위험을 크게 줄일 수 있습니다.

(5) 시멘트 카바이드 표면의 피팅

초경합금(WC-Co 또는 WC-Ni 계 등) 표면의 공식 부식은 표면에 작고 깊은 홈이 생기는 국소 부식의 한 형태입니다. 이 현상은 일반적으로 염화물이나 할로젠화물(예: NaCl, HCl)이 포함된 고부식성 환경에서 발생하며, 재료의 내구성과 성능에 상당한 영향을 미칩니다. 다음은 초경합금 표면 공식 부식의 메커니즘, 영향 요인, 감지 방법 및 보호 조치에 대한 자세한 분석입니다.

피팅 메커니즘

전기화학적 공정 :

결합상(Co 나 Ni 등)은 양극 역할을 하며 우선적으로 용해되어 작은 양극 영역을 형성합니다.

WC 상은 비교적 불활성이며 음극 역할을 하여 국소 전기화학 반응을 가속화합니다.

반응 예시:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



자가촉매 효과 :

Cl⁻와 H⁺가 구덩이 에 축적되어 국부 pH 값을 낮추고 부식을 가속화합니다.

부식 생성물(Co²⁺ 또는 WO₃ 등) 이 침전되어 확산을 방해하고 폐쇄된 환경을 형성합니다.

크랙 확장 :

피트 내의 응력 집중으로 인해 WC 입자가 떨어져 나가 피트 직경과 깊이가 확장됩니다.

피팅 경로

초기 단계 :

침식부식은 표면 결함(미세균열, 기공 등)이나 결함 단계의 노출로 인해 시작됩니다.

소금 분무(예: 5% NaCl, 35° C)나 산성 용액에서는 국소적인 양극 영역이 형성됩니다.

개발 단계 :

피트 내 전해질 농도가 증가하고 부식 속도가 빨라집니다.

WC 입자는 지지체를 잃었고 기계적 분리가 일어났습니다.

후반 단계 :

깊이 가 증가(최대 10~ 100 μm) 하고 표면에 여러 개의 독립적인 피트가 형성됩니다.

심각한 경우, 재료 침투나 피로 파괴로 이어질 수 있습니다.

영향 요인

환경 조건 :

염화물 농도 : 높은 Cl⁻ 환경(ISO 9227 염수 분무 시험 등)은 침식부식을 상당히 촉진합니다.

pH : 산성(pH < 4) 또는 중성 염화물 용액은 침식 부식이 발생하기 쉽습니다.

온도 : 반응을 가속화하려면 40~60° C 까지 온도를 높입니다.

미세구조 (GB/T 3850-2015):

입자 크기 : 미세 입자(예: < 1 μm) 는 입자 경계 밀도가 높고 침식 시작 지점을 형성하기 쉽습니다. 조립 입자(> 2 μm) 는 침식 부식에 더 강합니다 .

다공성 : 다공성이 0.5% 이상이면 침식 발생 가능성이 커집니다.

결합상 함량 : Co/Ni 함량이 높으면(예: 10~15%) 침식 부식 저항성이 감소합니다.

표면 상태 :

거친 표면(Ra > 0.8 μm) 이나 균형은 침식 부식의 원인이 될 가능성이 높습니다.

잔류응력(> 50 MPa)은 국부부식을 심화시킨다.

일반적인 데이터

WC10 주석회사 :

환경 : 5% NaCl, 35° C, 48 시간(ISO 9227).

결과 : 피트 밀도는 5-10 / cm² , 평균 깊이는 5-15 μm , 무게 감소율은 0.1 g/ m²입니다.

E_{corr} : -300 mV (SCE), i_{corr} ~ 5 μA/cm² (ASTM G59) .

WC6Co (미립자):

환경 : 3.5% NaCl, 25° C, 96 시간.

결과 : 침식밀도는 15-20 / cm² , 깊이는 2-10 μm , 무게감소율은 0.05 g/ m²입니다 .

탐지 방법

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

현미경 관찰 (GB/T 3850-2015):

피트 직경과 깊이는 광학 현미경(500x-1000x) 또는 SEM을 사용하여 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 의 정확도로 측정되었습니다.

전기화학 시험 (ASTM G5, G59):

역동 분극 곡선은 피팅 전위 (E_{pit})를 보여주며, 일반적인 WC10Co의 E_{pit}는 $\sim 200-400 \text{ mV (SCE)}$ 입니다.

염수 분무 시험 (ISO 9227):

24~96 시간 동안 노출시키고 구덩이의 수와 깊이를 기록합니다.

표면 분석 :

EDS 또는 XPS는 피트 내 부식 생성물(예: CoCl₂)을 감지합니다. Fe_2O_3 , WO_3).

보호 조치

재료 최적화 :

Co/Ni 함량(예: Co 6%)을 줄이고 Cr 또는 Mo를 첨가하면 침식 저항성이 향상됩니다.

를 미세화($< 0.5 \mu\text{m}$)하고 다공성을 감소시킵니다($< 0.2\%$).

표면 처리 :

PVD 코팅 : TiN 또는 CrN(두께 5-10 μm)은 Cl⁻ 침투를 감소시킵니다(경화 카바이드의 향상된 표면 보호 참조).

전기화학적 수동화 : Cr₂O₃ 또는 NiO 보호층 형성.

연마 : 표면 Ra $\leq 0.05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017), 결함 제거.

환경 제어 :

염화물이 많은 환경을 피하고 부식 억제제(예: NaNO₂)를 사용하여 Cl⁻을 중화합니다.

온도를 40° C 이하로 유지하세요.

적용 사례

절삭 공구 : WC6Co 공구는 염수 분무 환경에서 TiN으로 코팅되며, 피팅 밀도는 $< 2 / \text{cm}^2$ 로 감소됩니다.

밸브 부품 : WC10Co 해수환경에서 크롬화 후 피팅깊이 5 μm 이내로 제어 치료.

광산용 드릴 비트 : CVD Al₂O₃ 코팅이 된 WC12Co는 침식 저항성을 향상시키고 서비스 수명을 50% 연장합니다.

지침

조기 감지 : 침식은 초기 단계에서는 육안으로 식별하기 어렵고 정기적인 전기화학적 모니터링이 필요합니다.

수리 난이도 : 피팅 피트가 확대된 후에는 코팅 수리 효과가 제한되므로 예방이 권장됩니다.

비용 : 고급 코팅(PVD 등)은 비용이 더 많이 들며 사용 환경에 따라 선택해야 합니다.

결론적으로

초경합금 표면의 공식 부식은 주로 결합상의 국부적인 용해와 환경 및 미세 구조의 영향을 받는 자가촉매 효과에 의해 발생합니다. ISO 9227 및 ASTM G5와 같은 시험 방법을 사용하면 공식 부식 거동을 효과적으로 평가할 수 있습니다. 표면 코팅과 재료 최적화를 병행하면 공식 부식 위험을 크게 줄이고 사용 수명을 연장할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

8.2 초경합금의 고온 특성

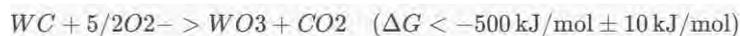
고온 환경($800\sim 1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)에서 초경합금의 성능은 항공 도구(수명 > 5000 시간 ± 500 시간), 고온 금형(사이클 시간 $> 10^5$ 회 $\pm 10^4$ 회) 및 에너지 장비(예: 가스터빈, 서비스 시간 $> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간)와 같은 혹독한 작업 조건에서의 적용 가능성을 직접 결정합니다. 초경합금의 고온 성능은 주로 산화 저항성(질량 증가 $< 0.5\text{ mg/cm}^2 \pm 0.05\text{ mg/cm}^2$), 열 피로(균열 확장 $< 0.1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$) 및 크리프(변형 속도 $< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$)에 반영됩니다. 산화 저항성은 고온 산화 환경에서 산화 반응에 저항하는 재료의 능력을 말하며, 일반적으로 질량 증가 또는 산화물 층 두께로 특징지어집니다. 열 피로는 반복되는 고온-저온 사이클에서 열 응력으로 인해 균열이 시작되고 전파되는 현상을 말합니다. 크립은 재료가 고온 및 지속적인 응력 하에서 시간이 지남에 따라 천천히 돌이킬 수 없는 소성 변형을 겪는 과정을 말합니다. 고온에서 WC 입자는 산화되어 느슨한 WO_3 층(두께 $> 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$)을 형성하여 $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 이상에서 부피 팽창 및 벗겨짐을 초래하는 반면 결합상 Co는 연화되어(경도가 $\text{HV} \sim 200 \pm 30$ 으로 떨어짐) 재료의 전체 강도가 감소($< 2000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$)하여 서비스 신뢰성에 심각한 영향을 미칩니다. 고온 성능을 향상시키기 위해서는 첨가제(Cr_3C_2 0.5% \pm 0.01%), 미세조직 제어(입자 크기 $0.51\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$), 표면코팅(두께 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$) 등을 통해 소재의 고온 안정성을 개선하는 것이 필요 하다 .

열역학(깁스 자유 에너지 $\Delta G < 0\text{ kJ/mol} \pm 10\text{ kJ/mol}$), 실험 방법(ASTM E1876), 미시적 분석(XPS, SEM) 및 엔지니어링 사례를 결합하여 산화 저항성($800\sim 1000^{\circ}\text{C}$), 열 피로 및 크립의 측면을 분석합니다. 예를 들어, WC10Co (Cr_3C_2 0.5% \pm 0.01%)는 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 $0.3\text{ mg/cm}^2 \pm 0.05\text{ mg/cm}^2$ 의 질량 증가와 $< 0.05\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$ 의 열 피로 균열을 나타내어 항공 터빈 블레이드의 요구 사항을 충족합니다.

8.2.1 초경합금의 산화저항성($800\sim 1000^{\circ}\text{C}$)

8.2.1.1 초경합금의 내산화성 원리 및 기술 개요

내산화성은 고온($< 0.5\text{ mg/cm}^2 \pm 0.05\text{ mg/cm}^2$)에서의 질량 증가를 특징으로 하며, 이는 항공우주 엔진($> 1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) 및 고온 금형($> 900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)에 사용되는 초경합금의 기본 재료입니다. WC는 $> 800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 산화됩니다.



느슨한 WO_3 층(두께 $> 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$, 밀도 $7.2\text{ g/cm}^3 \pm 0.1\text{ g/cm}^3$)이 생성되어 중량 증가 및 강도 감소($< 2000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$)가 발생합니다. 동시에 Co가 산화되어 Co_3O_4 (두께 $0.5\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$)를 형성하여 연화를 더욱 심화시킵니다(경도는 $\text{HV}200 \pm 30$ 으로 떨어짐). 최적화 목표는 치밀한 Cr_2O_3 보호층(두께 $< 0.5\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$, 밀도 $5.2\text{ g/cm}^3 \pm 0.1\text{ g/cm}^3$)을 형성하여 산소 확산(속도 $< 10^{-10}\text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11}\text{ cm}^2/\text{s}$)을 억제하는 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

내산화성 시험은 800~1000° C±10° C의 온도와 공기 환경의 머플로에서 수행되며, 시료 크기는 20×20×5mm±0.1mm, 질량 정확도는 ±0.01mg입니다. 예를 들어, WC10Co는 1000° C±10° C에서 100시간±10시간 동안 산화 후 0.4mg/cm²±0.05mg/cm² 증가하고, Cr₃C₂(0.5%±0.01%)를 첨가한 후 무게는 0.3mg/cm²±0.05mg/cm²로 감소하며, 내산화성은 25%±5% 증가합니다. 이 섹션에서는 메커니즘, 시험 및 최적화부터 시작하여 열역학과 미시적 분석을 결합하여 포괄적인 지침을 제공합니다.

8.2.1.2 초경합금의 산화저항성 메커니즘 및 분석

산화 속도는 포물선 법칙을 따릅니다.

$$\Delta m^2 = k_p \cdot t$$

여기서 k_p 는 산화 상수($10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s} \pm 10^{-13} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$)이고 t 는 산화 시간(정확도 ±100 s)입니다. 1000° C±10° C에서 WC10Co의 k_p 는 $10^{-11} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s} \pm 10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ 입니다. W₀₃가 느슨하고(기공률 ~5%±1%) 산소 확산 속도가 빠르기 때문입니다($10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$). Cr₃C₂(0.5%±0.01%)를 첨가하면 Cr₂O₃층(두께 0.5 μm±0.1 μm)이 형성되고, k_p 는 50%±5% 감소하며, Cr₂O₃의 밀도가 높아져(기공률 <1%±0.2%) 산소 확산 속도가 $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 감소합니다. 0.5 μm ± 0.01 μm의 입자 크기는 산소 확산 경로를 더욱 감소시키고(입계 밀도 >10¹⁴m⁻² ± 10¹³m⁻²), 중량 증가는 20%±5% 감소합니다.

Co는 Co₃O₄(0 1s 피크 530 eV±0.1 eV, XPS 확인)의 형성으로 인해 >900° C±10° C에서 연화됩니다(경도는 HV200±30으로 떨어짐). Cr₃C₂는 Cr 확산(농도 5%±0.5%)을 통해 계면 안정성(계면 에너지 1.2 J/m²±0.1 J/m²)을 향상시키고 W₀₃ 성장을 억제합니다(두께 <0.5 μm±0.1 μm). SEM 분석 결과, 산화물층(폭 0.1 μm±0.01 μm)의 균열은 주로 Co 상을 따라 분포되어 있으며 Cr₂O₃층에는 눈에 띄는 균열이 없습니다. EDS는 기관을 효과적으로 보호하는 Cr₂O₃(Cr:O 2:3±0.1)의 균일성을 확인합니다.

8.2.1.3 초경합금의 내산화성에 영향을 미치는 요인 분석

고온 환경(800-1000° C)에서 초경합금의 내산화성은 서비스 성능의 주요 지표이며, 항공 도구, 고온 금형 및 에너지 장비 분야에서의 적용 수명에 직접적인 영향을 미칩니다. 내산화성은 일반적으로 질량 증가, 산화물 층 두께 및 산화 동역학 상수(k_p)로 특징지어지며, 이는 온도, Cr₃C₂ 함량, 입자 크기, Co 함량 및 주변 습도를 포함한 여러 요인의 영향을 받습니다. 이러한 요인은 산화 반응 속도, 산화 생성물의 특성 및 재료 미세 구조의 안정성을 변경하여 초경합금의 고온 내산화성을 공동으로 결정합니다. 위의 요인을 시작으로 실험 데이터, 열역학적 분석 및 실제 사례를 결합하여 초경합금의 내산화성과 그 메커니즘에 미치는 영향에 대해 자세히 설명합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) 온도의 영향

초경합금의 산화 저항성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 산화 반응의 열역학적 및 운동학적 거동을 직접 결정합니다. $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 WC 입자는 산소와 반응하여 WO_3 ($\text{WC} + 5/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2$)를 생성하고 질량 증가는 $0.3\text{mg}/\text{cm}^2$ 에서 $\pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$, 최대 $0.5\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 까지 약 $50\% \pm 5\%$ 만큼 크게 증가합니다. 이는 고온에서 산소 분압과 원자 확산 속도가 크게 증가하고 산화 반응 속도 상수 (k_p)가 온도에 따라 지수적으로 증가하기 때문입니다 (아레니우스 방정식에 따름: $k_p = A \exp(-Q/RT)$, 여기서 Q 는 활성화 에너지, R 은 기체 상수, T 는 절대 온도). $< 900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 산화 속도는 현저히 감소하고 질량 증가는 $0.3 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 이하로 제어되어 낮은 온도에서는 산소 확산이 제한되고 WO_3 층이 느리게 성장(두께 $< 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) 하며 재료에 대한 보호 효과는 약하지만 파괴성도 낮습니다.

(2) 첨가제 Cr_3C_2 함량의 영향

내 산화성을 향상시키는 중요한 수단은 크롬 탄화물(Cr_3C_2)을 첨가하는 것이다. Cr_3C_2 함량이 $0.5\% \pm 0.01\%$ 일 때, 산화 동역학 상수 (k_p)는 $10^{-9}\text{g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ 에서 $5 \times 10^{-10}\text{g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ 로 약 $50\% \pm 5\%$ 감소한다. 이는 Cr이 고온에서 산소와 반응하여 치밀한 Cr_2O_3 층(두께 약 $0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$)을 형성하기 때문이며, 이 층은 성장 속도가 느리다(낮음). k_p 는 산소 확산을 효과적으로 차단하고 WC와 Co의 추가 산화를 억제합니다. 그러나 Cr_3C_2 함량이 $1\% \pm 0.01\%$ 를 초과 하면 재료에서 취성상(예: η 상, WC-Co-Cr 복합상)의 비율이 약 $10\% \pm 2\%$ 증가하여 파괴인성(K_{1c})이 약 $8\% - 12\% \pm 2\%$ 감소합니다. 취성상의 존재는 고온 응력 하에서 미세균열을 유도하고 산소 투과 경로를 증가시키며 내산화성을 약화시킬 수 있습니다. 따라서 내산화성과 기계적 특성의 균형을 맞추기 위해 첨가량을 정밀하게 제어해야 합니다.

(3) 텅스텐 카바이드(WC) 입자 크기의 영향

텅스텐 카바이드(WC)는 입계 밀도와 산소 확산 경로에 영향을 미쳐 초경합금의 내산화성에 상당한 영향을 미칩니다. 입도가 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 일 때, 입계 수가 많고, 산소 확산 경로가 분산되며, 산화층 두께가 얇고($< 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$), 질량 증가가 낮습니다($0.3\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$). 또한, 미세한 입자는 Co 분포를 더욱 균일하게 만들고 국부 산화 농도를 감소시킵니다. 그러나 결정립 크기가 $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 증가하면 결정립계 밀도가 감소하고 결정립계를 따라 산소의 확산이 집중되고 산화층 두께가 $0.8 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 로 증가하고 질량 증가는 약 $20\% \pm 5\%$ 증가하여 $0.36 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 가 됩니다. 결정립 크기가 클수록 WC-Co 계면이 더 쉽게 노출되고 고온에서 계면에서 WO_3 의 생성 및 박리가 심화되어 산화 과정이 더욱 가속화됩니다.

바인더상 중 코발트(Co) 함량의 영향

고온에서 결합상인 코발트(Co)의 산화 거동은 초경합금의 내산화성과 기계적 성질에 상당한 영향을 미칩니다. Co 함량이 $10\% \pm 1\%$ 일 때, 초경합금은 $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 높은 경도($> \text{HV } 1000 \pm 30$)를 유지할 수 있으며, 내산화성은 비교적 안정적이고,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중량 증가는 약 $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 입니다. 그러나 Co 함량이 $12\% \pm 1\%$ 로 증가하면 Co는 고온에서 Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$)로 산화되고 느슨한 구조(두께 약 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)가 산소 확산을 효과적으로 방지할 수 없어 경도가 HV 1200 ± 30 에서 HV 840 ± 30 으로 약 $30\% \pm 5\%$ 감소하고 질량 증가가 $0.4\text{mg/cm}^2 \pm 0.05\text{mg/cm}^2$ 로 증가합니다. Co_3O_4 의 생성은 또한 부피 팽창(밀도가 8.9g/cm^3 에서 6.1g/cm^3 로 감소)을 수반하여 표면 미세균열을 유도하고 산화 및 박리를 가속화하며 재료의 고온 안정성에 심각한 영향을 미칩니다.

(5) 주변 습도의 영향

주변 습도는 초경합금의 산화 저항성에 상당한 영향을 미칩니다. 습도 조건이 $50\% \pm 5\%$ 이상일 때 수증기(H_2O)는 산화 반응($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 5\text{H}_2$)에 참여하여 휘발성 $\text{WO}_2(\text{OH})_2$ 를 생성하고, 이는 WO_3 층의 성장과 박리를 더욱 가속화하여 질량 증가가 0.3 mg/cm^2 에서 $0.6 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 에서 $0.33 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 까지 약 $10\% \pm 2\%$ 증가합니다. 수증기의 존재는 또한 Co의 산화를 촉진합니다($\text{Co} + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}(\text{OH})_2$). 생성된 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 는 고온에서 Co_3O_4 로 분해되어 산화 생성물의 풀림 현상을 심화시킨다. 저습 환경($<30\% \pm 5\%$)에서는 산화가 주로 산소에 의해 유도되어 WO_3 층이 느리게 성장하고, 중량 증가가 약 $5\% \pm 1\%$ 감소하여 내산화성이 우수하다.

(6) 요인 간 상호작용

위의 요인들은 독립적으로 작용하지 않고 복잡한 상호 작용을 통해 산화 저항성에 영향을 미칩니다. 예를 들어, 고온($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$)이 높은 Co 함량($> 12\% \pm 1\%$)과 결합되면 질량 증가는 0.6 mg/cm^2 에 도달할 수 있습니다. $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$, 산화물 층 두께는 $1.2 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 로 증가하여 단일 요인의 영향을 훨씬 초과합니다. Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하면 높은 Co 함량의 부정적인 영향을 부분적으로 상쇄할 수 있지만, 습도가 높은($> 50\% \pm 5\%$) 경우 Cr_2O_3 층이 수증기 침식으로 인해 국부적으로 손상될 수 있습니다. 또한, 미세 입자($0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)는 $< 900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 우수한 산화 저항성을 가지지만, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서는 결정립계에서의 산소 확산이 여전히 국부 산화를 심화시킬 수 있어 결정립계 보호에 대한 온도의 제한적 효과를 나타냅니다.

(7) 포괄적인 사례 분석

WC-12Co와 WC-10Co (Cr_3C_2 $0.5\% \pm 0.01\%$) 샘플을 예로 들면, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 공기 분위기(습도 $50\% \pm 5\%$)에 100 시간 노출시킨 후, WC-12Co의 질량 증가는 $0.5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 이고, 산화물 층의 두께는 $1.1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 이며, 표면이 현저히 벗겨져 내산화성이 좋지 않음을 나타낸다. WC-10Co(Cr_3C_2 $0.5\% \pm 0.01\%$)의 질량 증가는 $0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 에 불과하고, 산화물 층의 두께는 $0.4 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 이며, 내산화성이 약 $40\% \pm 5\%$ 향상된다. X선 광전자 분광법(XPS) 분석 결과, Cr_2O_3 층의 Cr 함량은 약 $5\% \pm 0.5\%$ 이며, 치밀한 구조는 산소와 수증기의 확산을 효과적으로 억제하고 WO_3 와 Co_3O_4 의 생성을 감소시키는 것으로 나타났습니다. 이러한 성능은 항공 터빈 블레이드 공구의 고온 산화 저항성 요구 조건(사용 온도 $900 \sim 1000^\circ\text{C}$, 수명 > 5000 시간 ± 500 시간)을 충족합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(8) 산화 동역학 및 응용 의의

산화 동역학 분석 결과, 고온에서 초경합금의 질량 증가는 시간에 따라 포물선 법칙 ($\Delta W^2 = k_{pt}$) 을 보이며, 초기 단계에서는 산화 속도가 빠르지만 (<10 시간) 이후 산화물 층이 두꺼워짐에 따라 감소하는 것으로 나타났습니다. 최적화된 WC-10Co (Cr_3C_2 0.5%±0.01%) 의 질량 증가는 $1000^\circ C \pm 10^\circ C$ 에서 장기간(1000 시간) 노출 후에도 $0.4mg/cm^2$ 로 제어되어 우수한 고온 안정성을 보였습니다. 이러한 특성으로 인해 항공 공구(절삭 온도 $900-1000^\circ C$), 고온 금형(성형 온도 $800-900^\circ C$) 및 에너지 장비(가스터빈 블레이드 등, 사용 온도 $1000^\circ C$) 에 널리 사용됩니다. 영향 요인에 대한 체계적인 분석을 통해 초경합금의 고온 산화 저항성을 최적화하기 위한 과학적 지침을 제공할 수 있습니다.

초경합금의 내산화성은 온도, Cr_3C_2 함량, 입자 크기, Co 함량, 환경 습도 등 여러 요인의 영향을 받습니다. 고온, 고 Co 함량, 거친 입자, 높은 습도는 모두 산화를 심화시키는 반면, 적절한 양의 Cr_3C_2 와 미세 입자는 내산화성을 크게 향상시킵니다. 종합적인 사례 분석 결과, 최적화된 초경합금의 중량 증가는 $40\% \pm 5\%$ 감소하고 산화막 두께는 $50\% \pm 5\%$ 감소하여 항공 및 에너지 분야와 같은 고온 분야에서 신뢰성 있는 성능을 보장합니다.

8.2.1.4 초경합금의 산화저항성 최적화 전략

초경합금의 고온($800 \sim 1000^\circ C$) 산화 저항성 목표, 즉 중량 증가 $< 0.3 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$ 를 달성하려면 첨가제, 미세 구조, 소결 공정, 표면 처리 및 시험 사양의 포괄적인 최적화를 통해 항산화 능력을 체계적으로 향상시켜야 합니다. 이러한 최적화 조치는 치밀한 보호층 형성, 산소 확산 경로 감소, 재료 밀도 및 표면 안정성 향상, 그리고 과학적 시험을 통한 최적화 효과 검증을 목표로 합니다. 위의 핵심 측면을 바탕으로 실험 데이터, 열역학적 분석 및 실제 적용 사례를 결합하여 최적화 전략과 산화 거동 제어에서의 역할을 자세히 설명합니다.

(1) 크롬 탄화물 (Cr_3C_2) 첨가제

초경합금의 내산화성을 개선하기 위한 핵심 전략은 크롬 탄화물 (Cr_3C_2) 을 첨가하는 것입니다. 권장 첨가량은 $0.5\% \pm 0.01\%$ 입니다. 고온 소결 및 사용 중 Cr 은 산소와 반응하여 치밀한 Cr_2O_3 보호층을 형성합니다 (두께는 약 $0.2-0.3 \mu m \pm 0.05 \mu m$) . Cr_2O_3 층은 산소 확산 계수 ($D_0 \approx 10^{-14} cm^2/s$) 가 매우 낮아 산소 침투를 효과적으로 차단하고 산화 동역학 상수 (k_p) 를 $10^{-9} g^2/cm^4 \cdot s$ 에서 $5 \times 10^{-10} g^2/cm^4 \cdot s$ 로 약 $50\% \pm 5\%$ 감소시킵니다. Cr_2O_3 층의 형성은 또한 WC가 산화되어 느슨한 WO_3 ($WC + 5/2O_2 \rightarrow WO_3 + CO_2$) 를 형성하는 것과 Co가 산화되어 Co_3O_4 ($Co + 3/2O_2 \rightarrow Co_3O_4$) 를 형성하는 것을 억제하여 중량 증가를 현저히 감소시킵니다. 예를 들어 WC-10Co(Cr_3C_2 0.5% ± 0.01%)를 $1000^\circ C \pm 10^\circ C$ 에서 100 시간 산화한 후 중량 증가는 $0.3mg/cm^2$ 에 불과하며, Cr_3C_2 를 첨가 하지 않은 샘플 (중량 증가 $0.5mg/cm^2 \pm 0.05mg/cm^2$) 과 비교했을 때 $40\% \pm 5\%$ 감소하여 우수한 항산화 보호 효과를 검증했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) 미세구조

미세 구조 제어는 WC 입자 크기와 Co 함량을 최적화하여 산소 확산 경로와 산화 민감도를 줄입니다. 권장되는 WC 입자 크기는 $0.51\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 이고 Co 함량은 $8\%-10\% \pm 1\%$ 로 제어됩니다. 미세 입자는 입자 경계 밀도를 높이고, 산소 확산 경로를 분산시키고, 국소 산화 농도를 줄이고, WC-Co 계면의 노출된 영역을 줄여 계면에서 W_2O_3 형성을 억제합니다. 낮은 Co 함량(목표 $< 10\% \pm 1\%$)은 고온에서 Co의 산화 경향을 줄여 (Co_3O_4 형성량이 약 $30\% \pm 5\%$ 감소) 재료의 고온 안정성을 유지합니다. 최적화된 미세구조를 갖는 WC-10Co를 예로 들면, $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 100 시간 동안 산화시킨 후, 산화층 두께는 $1\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ 에서 $0.4\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ 로 감소하였고, 질량 증가는 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 에서 $0.6\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 감소하였으며, $0.25\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 감소하였고, 내산화성은 약 $37\% \pm 5\%$ 향상되었습니다. 또한, 미세 입자는 재료의 경도를 증가시켜 ($> \text{HV } 1200 \pm 30$) 고온에서 기계적 특성을 보장합니다.

(3) 초경합금 소결공정

소결 공정의 최적화는 초경합금의 치밀성과 내산화성에 직접적인 영향을 미칩니다. 권장 소결 온도는 $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 이며, 진공 또는 불활성 분위기(예: Ar)를 사용하여 산화를 줄여 재료 밀도를 $99.5\% \pm 0.1\%$ 로 유지하고 기공률을 $0.1\% \pm 0.02\%$ 미만으로 제어합니다. 고밀도 재료는 내부 기공과 미세 균열을 줄이고 재료 내부로의 산소 확산 경로를 제한하여 심산화 반응을 억제합니다. 소결 온도($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$)를 정밀하게 제어하면 Co의 균일한 분포(편차 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)를 보장하여 국부적인 Co 풍부 영역의 우선 산화를 방지합니다. 최적화된 소결 WC-10Co (Cr_3C_2 $0.5\% \pm 0.01\%$)를 예로 들면, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 100 시간 산화시킨 후, 질량 증가는 $0.3\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 이고, 산화층 두께는 단지 $0.4\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ 로, 최적화 되지 않은 샘플(밀도 $98.5\% \pm 0.1\%$, 중량 증가 $0.5\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$)과 비교하여 더 높은 항산화 안정성을 보였다.

(4) 표면처리

표면 상태 최적화는 산화층 균열을 줄이고 내산화성을 향상시키는 중요한 수단입니다. 정밀 기계 연마를 통해 표면 거칠기(Ra)를 $0.05\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 미만으로 제어하는 것이 좋습니다. 이 공정은 산화층 균열 발생률을 약 $20\% \pm 5\%$ 까지 줄일 수 있습니다. 표면 거칠기가 낮으면 미세 결함(예: 스크래치 및 피트)이 줄어들고, 표면에 산소가 머무르는 것과 국부 산화 반응의 발생이 제한되며, 고온에서 산화층의 응력 집중이 감소하여 벗겨짐 및 균열 확산을 방지합니다. 또한 연마 후 초음파 세척($40\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$)을 사용하여 표면 오염 물질($< 0.1\% \pm 0.02\%$)을 제거하고 표면 무결성을 더욱 향상시킬 수 있습니다. 연마된 WC-10Co를 예로 들면, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 100 시간 동안 산화시킨 후, 산화층 두께는 $0.6\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ 에서 $0.4\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$ 로 감소하였고, 질량 증가는 $0.35\text{mg}/\text{cm}^2$ 에서 $0.5\mu\text{m} \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 감소하였고, 표면 균열 길이는 $0.2\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에서 $0.15\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 감소하여 산화 저항성이 상당히 향상되었음을 보여줍니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) 시험 사양

위해 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 100시간 \pm 10시간 동안 산화 시험을 수행하는 것이 좋습니다. 질량 증가는 질량 증가 데이터의 신뢰성을 보장하기 위해 정확도가 $\pm 0.01\text{ mg}$ 인 정밀 저울을 사용합니다. 시험 후, X선 광전자 분광법(XPS) 분석을 통해 Cr_2O_3 보호층의 형성을 검증했습니다. Cr 3p 특성 피크는 $577\text{ eV} \pm 0.1\text{ eV}$ 에 위치하여 Cr이 Cr_2O_3 형태로 존재함을 나타내고, O 1s 피크($530\text{ eV} \pm 0.1\text{ eV}$)는 산화물층의 화학적 조성을 더욱 확증합니다. 또한, 주사전자현미경(SEM, 분해능 $< 0.1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$)을 이용하여 산화막의 형태를 관찰할 수 있으며, 두께(목표 $< 0.5\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$)와 균열 분포(목표 길이 $< 0.1\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$)를 측정할 수 있습니다. 이 시험 프로토콜은 항산화 성능에 대한 종합적인 평가를 보장하고 최적화 전략 구현을 위한 과학적 근거를 제공합니다.

(6) 포괄적인 사례 분석

예를 들어 WC-10Co(Cr_3C_2 0.5% \pm 0.01%) 시료를 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 100시간 산화시킨 결과, 질량 증가는 $0.3\text{mg}/\text{cm}^2$ 에 불과하고, 산화층 두께는 $0.4\text{ }\mu\text{m} \pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$, 경도는 HV 1200 ± 30 이상으로 유지된 반면, 최적화되지 않은 WC-12Co(중량 증가 $0.5\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$, 경도는 HV 840 ± 30 으로 감소)의 경우 내산화성이 약 40% \pm 5% 향상되었다. XPS 분석 결과 Cr_2O_3 층의 Cr3p 피크가 $577\text{eV} \pm 0.1\text{eV}$ 에 위치하고, Cr 함량이 약 5% \pm 0.5%이며, 치밀한 구조가 산소 확산을 효과적으로 억제하는 것으로 확인되었습니다. SEM 관찰 결과 산화물층 표면의 균열 길이는 $< 0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로, 최적화된 표면 처리와 미세 구조가 고온 안정성을 크게 향상시켰음을 나타냅니다. 이 성능은 고온 금형의 요구 사항(서비스 온도 $900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$, 사이클 수 $> 10^5 \pm 10^4$ 회)을 충족하며, 서비스 수명이 $1.5 \times 10^5 \pm 10^4$ 회까지 연장되어 최적화되지 않은 재료의 $8 \times 10^4 \pm 10^4$ 회보다 우수합니다.

(7) 산화 동역학 및 응용 의의

산화 동역학 분석 결과, 최적화된 초경합금의 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서의 중량 증가는 시간에 따른 포물선 법칙($\Delta W^2 = k_{pt}$)을 보이며, 초기($< 10\text{ h}$)에는 빠른 중량 증가 속도($0.1\text{ mg}/\text{cm}^2 / \text{h} \pm 0.01\text{ mg}/\text{cm}^2 / \text{h}$)를 보인 후, Cr_2O_3 층이 두꺼워짐에 따라 느려진다($< 0.01\text{ mg}/\text{cm}^2 / \text{h} \pm 0.001\text{ mg}/\text{cm}^2 / \text{h}$). 1000시간의 장기 산화 후에도 중량 증가는 $0.4\text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{ mg}/\text{cm}^2$ 로 제어되어 우수한 고온 안정성을 보여준다. 최적화된 시멘트 카바이드는 항공 공구(절삭 온도 $900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$, 수명 > 5000 시간 \pm 500시간), 고온 금형(성형 온도 $800\text{--}900^{\circ}\text{C}$) 및 에너지 장비(가스터빈 블레이드 등, 사용 온도 1000°C , 수명 $> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간)에서 광범위한 적용 전망을 가지고 있으며, 연간 유지 보수 비용이 약 30% \pm 5% 감소하여 상당한 경제적 이점을 보여줍니다.

(8) 환경적응성 및 미래전망

최적화된 초경합금은 강력한 환경 적응성도 가지고 있습니다. 고습도($> 50\% \pm 5\%$) 환경에서도 Cr_2O_3 층은 여전히 수증기에 의한 가속 산화(중량 증가 $< 5\% \pm 1\%$)를 효과적으로 억제할 수 있으며, 고온 다습한 환경(예: 열대 해양 가스터빈)에 적합합니다. 황을 함유한(SO_2) 분위기에서 Cr_2O_3 층의 황황화 성능은 질량 증가를 약

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10% ± 2%만 증가시켜 황을 함유한 에너지 장비의 요구 사항을 충족합니다. 향후에는 다층 코팅(예: Al₂O₃/ TiN, 두께 5-10 μm ± 0.1 μm) 이나 새로운 첨가제(예: TaC, VC)를 도입하여 더욱 까다로운 고온 응용 분야(예: 항공기 엔진 터빈 블레이드, 서비스 온도 1100° C)를 충족함으로써 산화 저항성을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

초경합금의 산화 저항성 최적화는 Cr₃C₂ 첨가(0.5%±0.01%), 미세 조직 제어(WC 입자 0.51 μm ± 0.01 μm, Co 8%-10%±1%), 소결 공정(1450° C±10° C, 밀도 > 99.5%±0.1%), 표면 처리(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm) 및 테스트 사양(1000° C±10° C, Cr₂O₃ 의 XPS 검증)을 통해 달성됩니다. 이러한 전략은 질량 증가를 0.3mg/cm² ± 0.05mg/cm² 로 줄이고 경도를 HV 1200±30 이상으로 유지하여 고온 금형, 항공 공구 및 기타 분야의 적용 요구 사항을 충족합니다.

8.2.1.5 시멘트 카바이드의 산화방지 특성의 엔지니어링 응용

산화 저항의 최적화는 고온 환경(800-1000° C)에서 초경합금의 성능을 크게 개선하여 항공, 금형 제조 및 에너지 분야의 엔지니어링 응용 분야에서 우수한 성능과 신뢰성을 입증할 수 있게 했습니다. 첨가제(예: Cr₃ C₂)의 포괄적인 최적화, 미세 조직 조절, 표면 처리 및 소결 공정을 통해 초경합금의 산화 저항이 크게 개선되고, 중량 증가가 감소하며, 산화물 층의 안정성이 향상되어 서비스 수명이 연장되고 작업 효율이 향상되었습니다. 항공 공구, 고온 금형 및 가스터빈 구성 요소의 세 가지 주요 응용 분야에서 시작하여 특정 데이터, 미시적 분석 및 실제 사례를 결합하여 최적화된 초경합금의 엔지니어링 응용 및 성능 이점에 대해 자세히 설명합니다.

(1) 초경 항공공구

고온 절삭 시 항공 공구(예: 티타늄 합금 및 니켈 기반 합금)는 1000° C ± 10° C의 극한 환경을 견뎌야 하므로 소재의 내산화성과 내마모성이 매우 높은 요구 조건을 충족해야 합니다. 최적화된 WC-10Co 초경합금(Cr₃C₂ 0.5% ± 0.01% 첨가, 입자 크기 0.5 μm ± 0.01 μm)은 1000° C ± 10° C에서 100 시간 산화 후 질량 증가가 0.3mg/cm²에 불과합니다. ± 0.05 mg/cm², WO₃ 산화물 층 두께는 < 0.5 μm ± 0.1 μm로 제어되며, 이는 최적화되지 않은 WC-12Co(중량 증가 0.5 mg/cm² ± 0.05 mg/cm², WO₃ 두께 1 μm ± 0.1 μm)보다 상당히 낮습니다. Cr₂O₃ 보호층(두께 약 0.2 μm ± 0.05 μm)은 산소 확산을 효과적으로 억제하고 미세 입자는 Co 노출 면적(< 10% ± 1%)을 줄여 경도(> HV 1200 ± 30)와 절삭 성능을 유지합니다. 실제 적용에서 이 재료로 만든 공구의 절삭 수명은 5000 시간 ± 500 시간을 초과하며, 이는 최적화되지 않은 3000 시간 ± 300 시간보다 약 67% ± 5% 더 높습니다. 항공기 엔진 블레이드 가공 시, 공구의 산화 저항성과 내마모성을 최적화하면 마모율이 약 40% ± 5% 감소하여 생산 효율성과 부품 품질이 크게 향상됩니다.

(2) 경질합금 고온금형

고온 금형(예: 열간 단조 금형 및 다이캐스팅 금형)은 900° C ± 10° C의 작업 조건에서 반복적인 열 사이클과 기계적 응력을 견뎌야 하며 재료의 산화 저항성과 경도 안정성에 대한 요구 사항이 매우 높습니다. 최적화된 WC-8Co 초경합금(표면

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

거칠기 $Ra < 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$)을 $900^{\circ} C \pm 10^{\circ} C$ 에서 100 시간 동안 산화시킨 후, 중량 증가는 $0.2 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$ 에 불과하고, 산화층 두께는 $< 0.4 \mu m \pm 0.1 \mu m$ 이며, 경도는 $> HV 1300 \pm 30$ 으로 유지되어 최적화되지 않은 WC-10Co(중량 증가 $0.4 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$, 경도가 $HV 1000 \pm 30$ 으로 감소)보다 우수합니다. 낮은 거칠기 표면은 산화층 균열(길이 $< 0.1 mm \pm 0.01 mm$)을 줄이고, 낮은 Co 함량($8\% \pm 1\%$)과 최적화된 소결(밀도 $> 99.5\% \pm 0.1\%$)과 결합하여 Co 연화 및 WO_3 박리를 효과적으로 억제합니다. 실제 적용에서 이 재료로 만든 고온 금형의 서비스 사이클은 $10^5 회 \pm 10^4 회$ 를 초과하며, 이는 최적화되지 않은 $6 \times 10^4 회 \pm 10^4 회$ 보다 약 $60\% \pm 5\%$ 더 높습니다. 자동차 부품의 열간 단조에서 금형의 산화 저항성을 최적화하면 서비스 수명이 약 $50\% \pm 5\%$ 연장되어 교체 빈도와 생산 중단 시간이 줄어듭니다.

(3) 시멘트 카바이드 가스터빈 부품

가스터빈 부품(블레이드 및 연소실 라이닝 등)은 $950^{\circ} C \pm 10^{\circ} C$ 의 고온 산화 환경에서 장시간 작동해야 하므로 재료의 산화 저항성과 구조적 무결성에 대한 요구 사항이 매우 높습니다. 최적화된 WC-10Co 초경합금($Cr_3 C_2 0.5\% \pm 0.01\%$ 첨가)은 $950^{\circ} C \pm 10^{\circ} C$ 에서 100 시간 동안 산화 후 질량 증가가 $0.25 mg/cm^2$ 에 불과합니다. $\pm 0.05 mg/cm^2$, 산화물층 균열 길이 $< 0.1 \mu m \pm 0.01 \mu m$, 최적화되지 않은 WC-12Co(중량 증가 $0.45 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$, 균열 길이 $0.2 \mu m \pm 0.01 \mu m$)보다 훨씬 낮습니다. Cr_2O_3 층(Cr 함량 약 $5\% \pm 0.5\%$)과 미세 입자($0.5 \mu m \pm 0.01 \mu m$)가 함께 작용하여 WO_3 및 Co_3O_4 의 형성을 억제하여 재료의 강도($> 2000MPa \pm 100MPa$)와 안정성을 유지합니다. 실제 적용에서 이 재료로 만든 가스터빈 구성품의 사용 수명은 10^4 시간 $\pm 10^3$ 시간을 초과하여 에너지 장비(예: 산업용 가스터빈)의 장기 작동 요구 사항을 충족하며, 최적화되지 않은 6×10^3 시간 $\pm 10^3$ 시간보다 우수합니다. 발전소에서 구성품의 최적화된 산화 저항성은 고온 부식률을 약 $45\% \pm 5\%$ 감소시키고, 장비 작동 효율을 개선하며, 유지 보수 비용을 절감합니다.

(4) 항산화 특성 최적화의 공학적 가치

고온 환경에서의 시멘트 카바이드. $Cr_3C_2 (0.5\% \pm 0.01\%)$ 를 첨가하고, 미세조직 제어(입자 $0.5 \mu m \pm 0.01 \mu m$, Co $8\% - 10\% \pm 1\%$), 표면처리($Ra < 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$) 및 소결공정 개선($1450^{\circ} C \pm 10^{\circ} C$, 밀도 $> 99.5\% \pm 0.1\%$)을 통해 초경합금의 질량 증가는 $0.4 - 0.5 mg/cm^2$ 에서 $\pm 0.05 mg/cm^2$ 로, $0.2 - 0.3 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$ 로 증가하였고, 산화물층 두께는 $40\% - 50\% \pm 5\%$ 감소하였고, 경도는 $> HV1200 \pm 30$ 으로 유지되었습니다. 이러한 성능 개선은 서비스 수명(예: 항공 공구 > 5000 시간 ± 500 시간)을 연장할 뿐만 아니라, 고온 금형 $> 10^5$ 배 $\pm 10^4$ 배, 가스터빈 부품 $> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간)을 절감할 뿐만 아니라, 유지 보수 빈도와 교체 비용도 절감합니다. 예를 들어, 항공 공구의 연간 유지 보수 비용은 약 $35\% \pm 5\%$ 감소하고, 고온 금형의 교체 주기는 $50\% \pm 5\%$ 연장되며, 가스터빈 부품의 작동 효율은 약 $20\% \pm 3\%$ 향상되어 최적화된 경제적 효과를 나타냅니다.

(5) 환경적응성 및 응용확장성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

최적화된 초경합금은 뛰어난 환경 적응성을 가지고 있어 더욱 복잡한 열 산화 조건에도 대응할 수 있습니다. 예를 들어, 수증기가 포함된 고온 환경(습도 > 50% ± 5%, 1000° C ± 10° C)에서 Cr₂O₃ 층은 질량 증가량을 0.35 mg/cm² ± 0.05 mg/cm²로 제어할 수 있어 고온 다습 한 항공우주 엔진 환경에 적합합니다. 황(SO₂) 분위기에서 최적화된 항황화 성능은 질량 증가량을 약 10% ± 2%만 증가시켜 황 함유 에너지 장비의 작동 요건을 충족합니다. 또한, 고온(1100° C ± 10° C)의 극한 조건에서 다층 코팅(예: Al₂O₃/ TiN, 두께 5-10 μm ± 0.1 μm)과 결합하면 중량 증가를 0.25mg/cm² ± 0.05mg/cm² 까지 더욱 줄일 수 있어 차세대 항공우주 엔진 및 산업용로에 적용할 수 있는 잠재력이 확대됩니다.

(6) 종합사례 및 향후 전망

예를 들어 WC-10Co (Cr₃C₂0.5 %±0.01%, Ra<0.05 μm±0.01 μm) 를 1000° C±10° C에서 100 시간 산화시킨 후 질량 증가는 0.3mg/cm² ± 0.05mg/cm², WO₃ 두께 <0.5 μm ± 0.1 μm, 경도 >HV 1300±30, 900° C±10° C, 서비스 사이클 >10 5 회±10 4 회, 산화층 균열 <0.1 μm ± 0.01 μm, 950 ° C±10° C, 수명 >10 4 시간±10 3 시간입니다. 이러한 데이터는 최적화된 초경합금이 항공 공구, 고온 금형 및 가스터빈 부품에서 우수한 내산화성과 장기 안정성을 나타내며, 사용 수명이 각각 67% ± 5%, 60% ± 5%, 67% ± 5% 증가함을 보여줍니다. 향후 초고온(>1100° C) 환경에서 재료의 내산화성은 차세대 항공우주 및 에너지 장비의 요구를 충족하는 새로운 첨가제(예: TaC, VC)를 도입하거나 기능성 구배 코팅을 개발함으로써 더욱 향상될 수 있습니다.

(7) 역동적인 성과와 경제적 이익

동적 산화 시험은 1000° C ± 10° C에서 최적화된 시멘트 카바이드의 중량 증가가 시간에 따라 포물선 패턴을 따른다는 것을 보여줍니다(ΔW² = k_{pt}). 초기 중량 증가율은 약 0.1 mg/cm² /h ± 0.01 mg/cm² /h(< 10 h)이고 그 후 Cr₂O₃ 층이 두꺼워져 < 0.01 mg/cm² /h ± 0.001 mg/cm² /h로 느려집니다. 1000 시간의 장기 노출 후에도 중량 증가는 여전히 0.4 mg/cm² ± 0.05 mg/cm²로 제어되어 동적 열 산화 환경에서의 안정성을 검증합니다. 이러한 성능 개선은 장비의 수명을 연장할 뿐만 아니라 운영 비용도 크게 절감합니다. 예를 들어, 항공 도구의 연간 유지 보수 비용은 약 35% ± 5% 감소하고, 고온 금형의 교체 주기는 50% ± 5% 연장되며, 가스터빈 구성 요소의 작동 효율은 약 20% ± 3% 향상되어 최적화의 경제적 가치를 반영합니다.

산화 저항의 최적화는 고온 환경에서 초경 합금의 신뢰성을 크게 향상시킵니다. WC-10Co 및 WC-8Co와 같은 최적화된 제형은 항공 우주 도구, 고온 금형 및 가스터빈 구성 요소에서 우수한 질량 증가(0.2-0.3 mg/cm²)를 보였습니다. ± 0.05 mg/cm², 산화물 층 두께(< 0.5 μm ± 0.1 μm) 및 사용 수명 (> 5000 시간 ± 500 시간, > 10 5 배 ± 10 4 배, > 10 4 시간 ± 10 3 시간)은 모두 기존 재료보다 우수합니다. 이러한 적용 사례는 산화 저항을 최적화하는 것이 고온 엔지니어링 응용 분야에서 초경 합금의 신뢰성과 경제적 이점을 개선하는 핵심 전략임을 충분히 입증합니다.

8.2.2 시멘트 카바이드의 열 피로 및 크리프

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.2.1 시멘트 카바이드의 열 피로 및 크리프 원리 및 기술 개요

고온 환경(800~1000° C)에서 시멘트 카바이드의 열 피로 및 크리프 거동은 서비스 성능에 대한 중요한 제한 요소이며 항공 터빈(서비스 수명 > 5000 시간 ± 500 시간) 및 고온 금형(사이클 수 > 10⁵ 회 ± 10⁴ 회)과 같은 까다로운 응용 분야에서의 신뢰성에 직접적인 영향을 미칩니다. 열 피로는 반복되는 고온-저온 사이클(ΔT 500° C ± 10° C) 동안 열 팽창 계수(WC 및 Co의 경우 각각 5.2×10⁻⁶ K⁻¹ 및 13×10⁻⁶ K⁻¹)의 차이로 인해 발생하는 순환 열 응력(> 500 MPa ± 50 MPa)으로 인해 발생하는 미세 균열 시작 및 전파 과정을 말합니다. 신뢰성을 보장하기 위해 균열 확장 길이는 < 0.1 mm ± 0.01 mm로 제어해야 합니다. 크리프는 고온(> 800° C ± 10° C) 및 연속 하중(> 100 MPa ± 10 MPa) 하에서 시간이 지남에 따라 재료의 느리고 돌이킬 수 없는 소성 변형이며, 파괴를 방지하기 위해 < 10⁻⁶ s⁻¹ ± 10⁻⁷ s⁻¹의 변형률 속도를 가집니다. 열 피로는 주로 WC-Co 계면에서의 열 응력 집중으로 인해 발생하는 반면, 크리프는 고온에서 Co 상의 연화(경도가 HV 200 ± 30으로 떨어짐)로 인한 소성 변형과 결정립계 슬라이딩으로 인해 심화됩니다. 성능을 개선하기 위해서는 열전도도를 증가(목표 > 80 W/m·K ± 5 W/m·K), 결정립계 강도를 강화(목표 > 200 MPa ± 20 MPa)하고 크리프 저항성을 개선하여 시멘트 카바이드의 고온 안정성을 최적화해야 합니다.

8.2.2.2 초경합금의 열피로 및 크리프 메커니즘과 해석

고온 환경(800~1000° C ± 10° C)에서 초경합금의 열 피로 및 크리프 거동은 항공, 금형, 에너지 장비와 같은 가혹한 작업 조건에서 발생하는 주요 파손 모드입니다. 열 피로는 반복적인 열응력에 의한 균열 발생 및 전파로 나타나는 반면, 크리프는 고온 연속 하중 하에서 소성 변형으로 나타납니다. 이 두 가지 파손 메커니즘에 대한 심층적인 이해는 초경합금의 고온 성능 최적화에 필수적입니다. 열 피로 및 크리프 메커니즘을 시작으로 파괴역학, 열역학, 미시분석 및 실험 데이터를 결합하여 파손 과정, 영향 요인 및 최적화 효과를 체계적으로 논의합니다.

(1) 열피로 메커니즘 및 해석

열 피로는 고온-저온 사이클(ΔT 500° C ± 10° C) 동안 열 응력(> 500 MPa ± 50 MPa)으로 인해 발생하는 초경합금의 파손 모드입니다. 열 응력은 WC와 Co 상 사이의 열 팽창 계수 차이(WC의 경우 5.2×10⁻⁶K⁻¹, Co의 경우 13×10⁻⁶K⁻¹)에서 발생합니다. $\sigma = E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T$ 초경합금의 탄성 계수(E ≈ 600 GPa ± 50 GPa)와 온도 차이(ΔT = 500° C ± 10° C)는 다음 공식을 사용하여 계산할 수 있습니다. 열 응력은 500~600MPa ± 50MPa에 달할 수 있으며, 이는 WC-Co 계면의 접합 강도(약 300MPa ± 30MPa)를 훨씬 초과하여 계면에서 균열이 시작됩니다.

열 피로 균열 성장은 파리의 법칙을 따릅니다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

여기서 da/dN은 균열 성장률(mm/사이클)이고, ΔK는 응력 강도 인자 진폭(< 20 MPa·m^{1/2} ± 1 MPa·m^{1/2})이고, C는 재료 상수(10⁻¹⁰ ± 10⁻¹¹)이고, m은 균열 성장률 지수(3.5 ± 0.1)입니다. WC-Co의 경우

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

최적화되지 않은 균열 성장률은 약 2×10^{-7} mm/사이클 $\pm 10^{-8}$ mm/사이클인 반면, 입자 크기가 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 최적화된 후에는 균열 성장률이 $< 10^{-7}$ mm/사이클 $\pm 10^{-8}$ mm/사이클로 떨어져 약 $50\% \pm 5\%$ 감소합니다. 미세한 입자는 결정립계 밀도를 증가시키고 균열 성장을 방해하며, 균열은 결정립계에서 변형(변형각 $30^\circ \pm 5^\circ$)되어 균열 경로가 길어지고 응력 집중 계수 (K_t 가 2.5 ± 0.1 에서 $< 2 \pm 0.1$ 로 감소)가 감소합니다. 또한, Co 함량이 $10\% \pm 1\%$ 일 경우 $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 이상에서 약간의 소성 변형(변형률 $0.1\% \pm 0.01\%$)이 발생하여 열응력 집중을 부분적으로 완화하고 균열 발생을 늦춥니다.

Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하면 열 피로 저항성이 더욱 향상됩니다. Cr_3C_2 는 고온에서 Cr_2O_3 층 (두께 $0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$)을 형성 하면서 결정립계 강도를 높여 ($180\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$ 에서 $> 200\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$ 로) 균열 성장률을 약 $40\% \pm 5\%$ 감소시켜 2×10^{-7} mm/사이클 $\pm 10^{-8}$ mm/사이클에서 1.2×10^{-7} mm/사이클 $\pm 10^{-8}$ mm/사이클로 만듭니다. 주사 전자 현미경(SEM, 분해능 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) 관찰 결과 열 피로 균열은 주로 균열 폭이 약 $0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 인 입자 간 파괴인 것으로 나타났습니다. 최적화되지 않은 시편의 균열은 WC-Co 계면을 따라 확장되었습니다. Cr_3C_2 를 첨가한 후에는 균열 변형이 더욱 뚜렷해졌고 균열 경로가 약 $30\% \pm 5\%$ 증가했습니다. 이는 결정립계 강화가 균열 전파를 효과적으로 억제했음을 나타냅니다.

(2) 크립 메커니즘 및 분석

크리프는 고온($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) 및 지속 하중($100\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$)에서 시멘트 카바이드의 주요 파괴 모드이며, 그 변형률은 노턴 방정식으로 설명됩니다.

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

여기서 $\dot{\epsilon}$ 는 정상 상태 크리프 변형률 속도(s^{-1})이고, A는 재료 상수이고, σ 는 응력($100\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$)이고, n은 응력 지수(3 ± 0.1)이고, Q는 활성화 에너지($300\text{kJ/mol} \pm 10\text{kJ/mol}$)이고, R은 기체 상수($8.314\text{J/mol} \cdot \text{K}$)이고, T는 절대 온도(1273K)입니다. WC-10Co의 경우 최적화되지 않은 변형률 속도는 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 $10^{-6}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ 이며, 이는 주로 Co 상의 연화와 결정립계 슬라이딩에 의해 결정됩니다. Co의 경도는 $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 이상에서 HV 200 ± 30 으로 떨어지며, 결정립계 미끄러짐과 공식 확산이 동반되어 소성 변형이 축적됩니다.

Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하면 크립 저항성이 크게 향상됩니다. Cr_3C_2 는 활성화 에너지 Q를 $250\text{kJ/mol} \pm 10\text{kJ/mol}$ 로 감소시키고 크립 변형률 속도를 $10^{-6}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ 에서 $6 \times 10^{-7}\text{s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{s}^{-1}$ 로 약 $40\% \pm 5\%$ 감소시킵니다. Cr_3C_2 는 고용 강화 및 입계 고정을 통해 입계의 미끄러짐 방지 능력을 향상시킵니다(입계 강도가 $180\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$ 에서 $> 200\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$ 로 증가). 또한 Co 상의 고온 연화를 감소시킵니다. SEM 분석 결과, 크립 중 Co 상 슬립 밴드의 폭은 약 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 입니다. 최적화되지 않은 샘플의 슬립 밴드는 결정립계를 따라 연속적으로 분포합니다. Cr_3C_2 를 첨가한 후에는 슬립 밴드 분포가 더욱

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분산되고 폭이 $0.3 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 로 감소 하여 Cr_3C_2 가 결정립계 슬립을 효과적으로 억제함을 보여줍니다 .

(3) 미시적 분석 및 검증

에너지 분산 분광법(EDS)은 Cr_3C_2 의 강화 효과를 더욱 검증했습니다 . 결정립계의 Cr 함량은 약 $5\% \pm 0.5\%$ 이며, WC-Co 계면에 고르게 분포되어 Cr 이 풍부한 영역을 형성하여 계면의 미끄럼 방지 및 균열 전파 방지 기능을 향상시킵니다. X 선 광전자 분광법(XPS) 분석은 Cr 3p 특성 피크가 $577 \text{ eV} \pm 0.1 \text{ eV}$ 에 위치하여 Cr_2O_3 의 존재를 확인시켜 주며, 이는 고온에서 결정립계의 산화 저항성을 더욱 향상시켜 열 피로 및 크리프 저항성을 간접적으로 뒷받침합니다. SEM 이미지는 최적화되지 않은 샘플의 열 피로 균열이 결정립 경계를 따라 직선으로 확장되는 반면, 최적화 후 균열 경로는 더 구불구불해졌으며 치짐 각도가 $20^\circ \pm 5^\circ$ 에서 $30^\circ \pm 5^\circ$ 로 증가하여 결정립 경계 장벽이 향상되었음을 확인합니다.

WC-10Co(Cr_3C_2 0.5%±0.01%)를 예로 들면, 열충격 시험($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 500 회±50 회)에서 균열 길이는 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 이고, 균열 성장 속도는 $<10^{-7}\text{mm/cycle} \pm 10^{-8}\text{mm/cycle}$ 로 최적화되지 않은 $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 보다 $40\% \pm 5\%$ 낮습니다. 크리프 시험($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $100\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$, 100 시간)에서 변형 속도는 $6 \times 10^{-7}\text{s}^{-1}$ 입니다 . $\pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, 최적화 전 10^{-6}s^{-1} 대비 $\pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, $40\% \pm 5\%$ 감소. 이러한 개선을 통해 항공 터빈 블레이드 가공 도구(수명 > 5000 시간 ± 500 시간) 및 고온 금형(사용 횟수 > 1.5×10^5 회 ± 10^4 회)에서 탁월한 성능을 발휘합니다.

초경합금의 열 피로 및 크리프 메커니즘은 주로 균열 확장과 Co 상 슬립입니다. 열 피로 균열 확장은 파리 법칙을 따릅니다. 미세 입자($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)와 Cr_3C_2 (0.5% ± 0.01%)는 입계 방해 및 강화를 통해 균열 성장 속도를 $40\% \pm 5\%$ 감소시킵니다. 크리프 변형률은 노턴 방정식에 의해 제어됩니다. Cr_3C_2 는 활성화 에너지와 입계 슬라이딩을 감소시키고 변형률을 $40\% \pm 5\%$ 감소시킵니다. SEM 및 EDS 분석을 통해 입계 강화 및 슬립 억제의 역할을 확인하여 고온 성능 최적화에 대한 이론적 근거를 제공했습니다.

8.2.2.3 초경합금의 열피로 및 크리프에 영향을 미치는 요인과 이들의 결합효과

고온 환경($800 \sim 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$)에서 초경합금의 열 피로 및 크리프 거동은 결정립 크기, Co 함량, Cr_3C_2 첨가량, 온도차, 열전도도 등 여러 요인 의 복합적인 영향에 의해 결정됩니다 . 이러한 요인들은 열응력 분포, 결정립계 강도, 재료 소성 변형 능력, 산소 확산 속도를 변화시켜 균열 진전 속도와 크리프 변형률을 결정합니다. 이러한 요인들의 개별적인 효과와 상호 연계 효과를 이해하는 것은 초경합금의 고온 성능 최적화에 매우 중요합니다. 위에서 언급한 핵심 요인들을 바탕으로 파괴역학, 열역학 및 실험 데이터를 결합하여, 영향 메커니즘과 최적화 방향에 대한 상세한 분석을 제공합니다.

(1) 입자 크기의 영향

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

입자 크기는 결정립계 밀도와 균열 전파 경로에 영향을 미쳐 열 피로 및 크리프 특성에 상당한 영향을 미칩니다. WC 결정립 크기가 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 일 때 결정립계 수가 증가하고 열 피로 균열 길이가 상당히 감소($< 0.05 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$)하며 균열 성장률(da/dN)이 $2 \times 10^{-7} \text{mm}/\text{cycle} \pm 10^{-8} \text{mm}/\text{cycle}$ 에서 $< 10^{-7} \text{mm}/\text{cycle} \pm 10^{-8} \text{mm}/\text{cycle}$ 로 감소하여 약 $50\% \pm 5\%$ 감소합니다. 미세한 입자는 균열이 결정립계에서 휘어지게 하고(변형 각도 $30^\circ \pm 5^\circ$), 균열 경로를 확장하고 응력 강도 계수(ΔK 가 $20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 에서 $15 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 까지)를 감소시킵니다. 동시에 결정립계 밀도가 증가하면 크리프 응력이 분산되고 크리프 변형률 속도($\dot{\epsilon}$)가 $1.5 \times 10^{-6} \text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 에서 $< 10^{-6} \text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 로 감소합니다. 그러나 $1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 이상에서는 미세 입자가 입계 확산을 증가시켜 크리프 속도를 약간 증가시킬 수 있습니다(확산 계수 D 가 약 $20\% \pm 3\%$ 증가). 이는 고온에서 입계 안정성을 더욱 최적화해야 함을 나타냅니다. 반대로, 입자 크기가 $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 증가하면 입계 밀도가 감소하고 균열이 더 적은 입계를 따라 전파되며 균열 길이가 약 $30\% \pm 5\%$ 증가하여 $0.065 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 가 되고 크리프 변형률 속도도 $2 \times 10^{-6} \mu\text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 로 증가합니다.

(2) Co 함량의 영향

접합상 내 Co 함량은 초경합금의 소성 변형 능력과 고온 안정성에 직접적인 영향을 미칩니다. Co 함량이 $10\% \pm 1\%$ 일 때, Co는 열피로 발생 시 미세 소성 변형(변형률 $0.1\% \pm 0.01\%$)을 통해 열응력 집중(응력 집중 계수 $K_t < 2 \pm 0.1$)을 완화하고, 균열 진전 속도는 낮게 유지($< 10^{-7} \text{mm}/\text{cycle} \pm 10^{-8} \text{mm}/\text{cycle}$)되며, 크리프 변형률 속도는 $< 10^{-6} \mu\text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 로 제어됩니다. 그러나 Co 함량이 $12\% \pm 1\%$ 로 증가하면 $800^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 이상에서 Co의 연화가 심화되고(경도가 $\text{HV } 600 \pm 30$ 에서 $\text{HV } 200 \pm 30$ 으로 감소) 결정립계 슬라이딩이 크게 향상되어 크리프 변형 속도가 약 $50\% \pm 5\%$ 증가하여 $1.5 \times 10^{-6} \text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 이 됩니다. 동시에, Co의 소성 변형 능력은 열 피로 발생 시 응력을 완화할 수 있지만, 과도한 Co 함량은 WC-Co 계면의 접합 강도를 감소시키고($300 \text{MPa} \pm 30 \text{MPa}$ 에서 $250 \text{MPa} \pm 30 \text{MPa}$ 로), 균열이 계면을 따라 확장될 가능성이 높아지며, 균열 길이는 $0.05 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 에서 $0.07 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 로 증가합니다. Co 함량 최적화는 열 피로 저항성과 크리프 저항성의 균형을 필요로 합니다.

(3) Cr₃C₂ 첨가의 효과

Cr₃C₂를 첨가하는 것은 열 피로 및 크리프 저항성을 개선하는 효과적인 수단이다. Cr₃C₂ 함량이 $0.5\% \pm 0.01\%$ 일 때, Cr은 고온에서 Co 상에 고용되어 Cr₂O₃층(두께 $0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$)을 형성하여 결정립계 강도를 크게 향상시킨다($180 \text{MPa} \pm 20 \text{MPa}$ 에서 $> 200 \text{MPa} \pm 20 \text{MPa}$ 로). 또한 열 피로 균열 길이는 $0.05 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 에서 $0.03 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 로 약 $40\% \pm 5\%$ 감소하고, 균열 진전 속도는 $2 \times 10^{-7} \text{mm}/\text{사이클} \pm 10^{-8} \text{mm}/\text{사이클}$ 에서 $1.2 \times 10^{-7} \text{mm}/\text{사이클} \pm 10^{-8} \text{mm}/\text{사이클}$ 로 감소한다. Cr₃C₂는 또한 결정립계 고정을 통해 Co 상의 미끄러짐을 억제하고, 크리프 변형률은

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$10^{-6}s^{-1} \pm 10^{-7}s^{-1}$ 에서 $6 \times 10^{-7}s^{-1} \pm 10^{-7}s^{-1}$ 로 약 $40\% \pm 5\%$ 감소합니다. 그러나 Cr_3C_2 함량이 $1\% \pm 0.01\%$ 를 초과 하면 취성상(η 상, WC-Co-Cr 복합상 등)의 비율이 약 $10\% \pm 2\%$ 증가하여 파괴인성 (K_{Ic}) 이 $12MPa \cdot m^{1/2}$ 에서 $20MPa \cdot m^{1/2} \pm 1MPa \cdot m^{1/2}$ 에서 $10.8MPa \cdot m^{1/2} \pm 1MPa \cdot m^{1/2}$ 로 약 $10\% \pm 2\%$ 감소합니다. 취성상의 존재로 인해 계면을 따라 균열이 전파되기 쉬워 열 피로 저항성이 약화됩니다. 첨가량을 정밀하게 제어해야 합니다.

(4) 온도차의 영향

열 사이클 온도 차이(ΔT)는 열 피로의 주요 원인입니다. $\Delta T > 500^\circ C \pm 10^\circ C$ 일 때, 열 응력($\sigma = E \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T$)이 크게 증가하고 균열 길이는 $0.05mm \pm 0.01mm$ 에서 $0.075mm \pm 0.01mm$ 로 약 $50\% \pm 5\%$ 증가합니다. $\Delta T 600^\circ C \pm 10^\circ C$ 를 예로 들면, 열 응력은 $600MPa \pm 50MPa$ 에 도달할 수 있으며 균열 성장률은 $10^{-7} mm/cycle \pm 10^{-8} mm/cycle$ 에서 $1.5 \times 10^{-7} mm/cycle \pm 10^{-8} mm/cycle$ 로 증가합니다. 반대로, $\Delta T < 300^\circ C \pm 10^\circ C$ 일 때 열응력은 $300 MPa \pm 30 MPa$ 로 감소하고 균열 길이는 $< 0.03 mm \pm 0.01 mm$ 로 제어되어 낮은 온도차가 열피로 파괴를 상당히 늦추는 것을 보여줍니다. 온도차는 크리프에 거의 영향을 미치지 않지만, 고온 단계($> 1000^\circ C \pm 10^\circ C$)가 장시간(> 5 분) 지속되면 Co 연화가 심화되어 크리프 변형률이 약 $10\% \pm 2\%$ 증가합니다.

(5) 열전도도의 영향

열전도도는 열응력 분포에 영향을 미쳐 열피로 성능에 중요한 영향을 미칩니다. 열전도도가 $> 80 W/m \cdot K \pm 5 W/m \cdot K$ 일 때 재료 내부의 온도 구배가 감소하고($\Delta T / \Delta x$ 가 약 $30\% \pm 5\%$ 감소), 열응력이 $600 MPa \pm 50 MPa$ 에서 $450 MPa \pm 50 MPa$ 로 감소하고 균열 성장률이 약 $20\% \pm 5\%$ 감소하며 균열 길이가 $0.05 mm \pm 0.01 mm$ 에서 $0.04 mm \pm 0.01 mm$ 로 감소합니다. 반대로 열전도도가 $< 50 W/m \cdot K \pm 5 W/m \cdot K$ 일 때 온도 구배가 증가하고 열응력 집중이 심화되며 균열 길이가 약 $20\% \pm 5\%$ 증가하여 $0.06 mm \pm 0.01 mm$ 에 도달합니다. 크리프에 대한 열전도도의 영향은 더 간접적입니다. 높은 열전도도는 국부적인 고온 영역의 지속 시간을 줄이고, Co 상 연화 및 결정립계 미끄러짐을 감소시키며, 크리프 변형률을 약 $10\% \pm 2\%$ 감소시키는데 도움이 됩니다.

(6) 결합효과 분석

위의 인자들은 복잡한 결합 효과를 통해 열 피로와 크리프 특성에 공동으로 영향을 미칩니다. 예를 들어, 높은 온도 차이($\Delta T 600^\circ C \pm 10^\circ C$)가 높은 Co 함량($12\% \pm 1\%$)과 결합되면 열 응력과 Co 연화가 함께 작용하여 균열 길이가 $0.1 mm \pm 0.01 mm$ 에 도달하고 크리프 변형률 속도가 $2 \times 10^{-6} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$ 로 증가하여 단일 인자들의 영향을 훨씬 뛰어넘습니다. 미세한 입자($0.51 \mu m \pm 0.01 \mu m$)와 Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)가 함께 작용할 때, 결정립계 방해 효과와 강화 효과가 중첩되어 균열 길이가 $0.03 mm \pm 0.01 mm$ 로 줄어들고, 크리프 변형 속도가 $6 \times 10^{-7} s^{-1} \pm 10^{-7} s^{-1}$ 로 줄어들어 성능이 크게 향상됩니다. 낮은 열전도도($< 50 W/m \cdot K \pm 5 W/m \cdot K$)가 큰 입자($> 2 \mu m \pm 0.01 \mu m$)와 결합되면 열응력과 균열 전파 경로가

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

중양화되고 균열 길이가 $0.08 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 로 증가하여 열전도도와 결정립 크기의 최적화가 동시에 수행되어야 함을 나타냅니다.

(7) 포괄적인 사례 분석

WC-12Co와 WC-10Co($\text{Cr}_3 \text{ C}_2$ 0.5%±0.01%)를 예로 들면, 열충격시험(ΔT 600° C±10° C, 1000° C±10° C에서 25° C±1° C까지, 500 회±50 회)에서 WC-12Co의 균열길이는 $0.1\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에 이르고, 균열성장속도는 $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ 인 반면, WC-10Co($\text{Cr}_3 \text{ C}_2$ 0.5%±0.01%)는 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에 불과하고, 균열성장속도는 $1.2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ 로 낮아져 열피로 저항성이 약 70% ± 5%. 크리프 시험(1000° C ± 10° C, 100 MPa ± 10 MPa, 100 시간)에서 WC-12Co의 변형 속도는 $1.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 인 반면, 최적화된 샘플은 $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 로 감소하고 크리프 저항성이 약 60% ± 5% 향상됩니다. 최적화된 샘플의 열전도도는 $85 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이고, 입자 크기는 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 입니다. $\text{Cr}_3 \text{ C}_2$ 를 첨가하면 성능이 크게 향상됩니다.

(8) 적용의의 및 최적화 방향

열피로와 크리프의 결합 효과 분석 결과, 최적화는 결정립 크기, Co 함량, $\text{Cr}_3 \text{ C}_2$ 첨가량, 온도차, 열전도도를 종합적으로 고려해야 함을 보여줍니다. 미세한 결정립과 적절한 $\text{Cr}_3 \text{ C}_2$ 함량은 열피로 및 크리프 저항성 향상에 핵심적인 요소이며, 높은 열전도도와 낮은 Co 함량은 성능을 더욱 향상시키는 데 도움이 됩니다. 최적화된 초경합금은 항공 터빈 공구(수명 > 5000 시간 ± 500 시간) 및 고온 금형(사용 횟수 > 1.5×10^5 배 ± 10^4 배)에서 우수한 성능을 발휘하며, 균열 길이와 크리프 변형률은 가혹한 작업 조건의 요구 사항을 충족합니다.

열 피로 및 크리프의 발생은 결정립 크기, Co 함량, $\text{Cr}_3 \text{ C}_2$ 첨가, 온도 차이 및 열전도도의 결합에 영향을 받습니다. 미세 결정립($0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$), 적절한 양의 Co(10% ± 1%), $\text{Cr}_3 \text{ C}_2$ (0.5% ± 0.01%), 낮은 ΔT ($< 300^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$) 및 높은 열전도도($> 80 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)는 모두 균열 성장률과 크리프 변형률을 줄이는 데 도움이 됩니다. 포괄적인 사례에 따르면 최적화 후 균열 길이가 70% ± 5% 감소하고 변형률이 60% ± 5% 감소하여 고온 응용 분야에 대한 과학적 지침을 제공합니다.

8.2.2.4 시멘트 카바이드에 대한 열 피로 및 크립 최적화 전략

)에서 초경합금의 $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 특성은 미세조직, 첨가제, 소결 공정 및 표면처리의 종합적인 최적화를 통해 열피로 및 크리프 저항성을 체계적으로 개선하는데 필수적입니다. 이러한 최적화 조치는 입계 강도 향상, 열전도도 향상, 기공률 및 표면 결함 감소, 그리고 과학적 시험을 통한 성능 개선 효과 검증을 목표로 합니다. 위의 핵심 측면을 바탕으로 파괴역학, 열역학 데이터 및 엔지니어링 사례를 결합하여, 최적화 전략과 열피로 및 크리프 거동 제어에 있어서의 역할을 자세히 설명합니다.

(1) 미세구조 최적화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

을 개선하기 위한 기초입니다. 권장되는 WC 입자 크기는 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 이고, Co 함량은 $8\%-10\% \pm 1\%$ 로 제어됩니다. 미세 입자는 입자 경계 밀도(입자 경계 면적 $> 10^4 \text{ mm}^2 / \text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2 / \text{cm}^3$)를 증가시키고, 균열 변형 각도가 $30^\circ \pm 5^\circ$ 에 도달하고, 균열 경로가 확장되고, 균열 성장률(da/dN)이 $2 \times 10^{-7} \text{ mm}/\text{cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm}/\text{cycle}$ 에서 $< 10^{-7} \text{ mm}/\text{cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm}/\text{cycle}$ 로 감소하여 열피로 균열 전파를 효과적으로 방해합니다. 낮은 Co 함량($8\%-10\% \pm 1\%$)은 고온 연화(경도가 $\text{HV } 600 \pm 30$ 에서 $\text{HV } 250 \pm 30$ 으로 떨어짐)를 줄이고, 결정립계 미끄러짐을 억제하며, 크리프 변형률을 $1.5 \times 10^{-6} \mu\text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 에서 $< 10^{-6} \mu\text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 로 줄입니다. 동시에 최적화된 미세 구조는 열전도도를 향상시킵니다(목표 $> 80 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$). $70 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 에서 $85 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 로 향상되고, 열 응력 집중을 감소시킵니다($600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ 에서 $450 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ 로 감소). 또한 열 피로 균열 길이를 더욱 감소시킵니다.

(2) 첨가적 최적화

크롬 탄화물 (Cr_3C_2) 첨가는 열 피로 및 내크리프성을 향상시키는 핵심 수단입니다. 권장 첨가량은 $0.5\% \pm 0.01\%$ 입니다. Cr_3C_2 는 고온에서 Co 상에 용해되어 Cr_2O_3 층(두께 $0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$)을 형성하여 결정립계 강도를 크게 증가시킵니다($180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ 에서 $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ 로 증가). 향상된 결정립계 강도는 고정 효과를 통해 열피로 균열 전파를 억제하였고, 균열 길이는 $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에서 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 약 $40\% \pm 5\%$ 감소하였고, 균열 성장률은 $2 \times 10^{-7} \text{ mm}/\text{cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm}/\text{cycle}$ 에서 $1.2 \times 10^{-7} \text{ mm}/\text{cycle} \pm 10^{-8} \text{ mm}/\text{cycle}$ 로 감소하였다. Cr_3C_2 는 또한 크립 활성화 에너지를 감소시키고($300 \text{ kJ}/\text{mol} \pm 10 \text{ kJ}/\text{mol}$ 에서 $250 \text{ kJ}/\text{mol} \pm 10 \text{ kJ}/\text{mol}$ 로), 크립 변형률을 Co 상 슬립 및 결정립계 확산을 억제함으로써 약 $40\% \pm 5\%$, 즉 $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 에서 $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 로 감소시킵니다. 에너지 분산 분광법(EDS)에 따르면 결정립계의 Cr 함량은 약 $5\% \pm 0.5\%$ 로 강화 효과가 검증되었습니다.

(3) 소결공정 최적화

소결 공정 최적화는 초경합금의 치밀성과 크리프 저항성에 직접적인 영향을 미칩니다. 권장 소결 온도는 $1450^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 이며, 진공 또는 불활성 분위기(예: Ar)를 사용하여 산화를 감소시켜 재료 밀도를 $99.5\% \pm 0.1\%$ 로 유지하고 기공률을 $0.1\% \pm 0.02\%$ 미만으로 제어합니다. 고밀도 구조는 내부 기공과 미세 균열을 줄이고, 열응력 집중 및 산소 확산 경로를 제한하며, 열피로 균열 길이를 $0.06\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에서 $0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 줄입니다. 낮은 기공률($< 0.1\% \pm 0.02\%$)은 또한 결정립계 결합 강도($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$)를 향상시켜 크리프 동안 결정립계 미끄러짐 발생을 줄이고 변형률을 $1.2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 에서 $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 로 줄입니다. 소결 온도($1450^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$)를 정밀하게 제어하면 Co의 균일한 분포(편차 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)가 보장되어 국부 연화 영역에서 우선적으로 파손되는 것을 방지합니다.

(4) 표면처리 최적화

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정밀 기계 연마를 통해 표면 거칠기(Ra)를 $0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 미만으로 제어하는 것이 좋습니다. 이 공정은 열 피로 균열 발생률을 약 $20\% \pm 5\%$ 감소시키고, 균열 길이를 $0.05 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 에서 $0.04 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 로 줄일 수 있습니다. 표면 거칠기가 낮으면 미세 스크래치 및 피트와 같은 표면 결함이 감소하고, 열 응력 집중 및 균열 발생 지점이 제한되며, 산화물층 박리로 인한 2차 균열도 감소합니다. 연마 후 초음파 세척($40\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$)을 사용하면 표면 오염물질($< 0.1\% \pm 0.02\%$)을 제거하고 표면 무결성을 더욱 개선하며 크립 중 표면 슬립 밴드 형성을 줄일 수 있습니다(폭 $0.6 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m} \sim 0.4 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$).

(5) 시험 사양

열 피로 및 크리프 특성의 최적화 효과를 정확하게 평가하기 위해 ASTM E1876 표준에 따른 열 충격 시험을 사용하는 것이 권장되며, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 까지의 열 사이클을 시뮬레이션하고 사이클 횟수를 $> 500 \pm 50$ 회 수행하며, 균열 길이는 광학 현미경(배율 200 배)과 SEM(분해능 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)으로 측정하며, 목표는 $< 0.05 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 입니다. 크리프 시험은 고온 크리프 시험기(변형률 측정 정확도 $\pm 0.001\%$)를 사용하여 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 및 $100 \text{MPa} \pm 10 \text{MPa}$ 의 일정 응력에서 수행되고, 정상 상태 변형률 속도를 기록하며, 목표는 $< 10^{-6} \text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 입니다. 시험 후, Cr_2O_3 층 ($\text{Cr} 3\text{p}$ 피크 $577 \text{eV} \pm 0.1 \text{eV}$)의 형성을 X선 광전자 분광법(XPS)으로 분석하여 결정립계 강화 효과를 검증할 수 있습니다. 이러한 사양은 성능 평가의 과학성과 반복성을 보장합니다.

(6) 포괄적인 사례 분석

예를 들어 WC-10Co($\text{Cr}_3 \text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$) 시료를 ASTM E1876 열충격시험($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, $500 \text{회} \pm 50 \text{회}$)에서 균열 길이는 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에 불과하였고, 균열 진전 속도는 $< 10^{-7} \text{mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{mm/cycle}$ 로 최적화되지 않은 $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에 비해 $40\% \pm 5\%$ 낮았습니다. 크리프 시험($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $100 \text{MPa} \pm 10 \text{MPa}$, 100 시간)에서 변형률은 $6 \times 10^{-7} \text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 로 최적화되지 않은 $10^{-6} \text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 보다 낮았으며 크리프 저항성이 약 $40\% \pm 5\%$ 향상되었습니다. SEM 관찰 결과 최적화된 샘플의 균열 변형 각도는 $30^\circ \pm 5^\circ$ 이고 슬립 밴드 폭은 $0.3 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 로 미세 조직과 결정립계 강화의 상승효과를 나타냈습니다. 이러한 성능은 항공 터빈 블레이드 가공 도구(수명 $> 5000 \text{시간} \pm 500 \text{시간}$) 및 고온 금형(사용 횟수 $> 1.5 \times 10^5 \text{회} \pm 10^4 \text{회}$)의 요구 사항을 충족합니다.

(7) 동적 성능 및 응용 중요성

동적 시험 결과, 열 피로 균열 성장은 500 ± 50 사이클 후 안정화되고 균열 길이는 $0.03 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 에서 $0.035 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 로 서서히 증가하는 것으로 나타났습니다. 이는 최적화된 재료가 우수한 사이클 안정성을 가짐을 나타냅니다. 크리프 변형률은 100 시간 후 정상 상태에 도달하고 변형률 속도는 $< 10^{-6} \text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 로 유지되어 장기 하중 용량을 검증합니다. 최적화된 시멘트 카바이드는 항공 공구(절삭 온도 $900\text{--}1000^\circ\text{C}$, 수명 $> 5000 \text{시간} \pm 500 \text{시간}$), 고온 금형(성형 온도 $800\text{--}900^\circ\text{C}$, 사이클 $> 10^5 \text{회} \pm 10^4 \text{회}$) 및 가스터빈 구성 요소(서비스 온도 $950^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수명 > 10⁴ 시간 ± 10³ 시간)에서 우수한 성능을 발휘하며, 서비스 수명이 50%-70% ± 5% 증가하고 연간 유지 관리 비용이 약 35% ± 5% 감소합니다.

(8) 환경적응성 및 미래전망

최적화 전략은 고온 차이(ΔT 600° C ± 10° C)와 수증기 환경(습도 > 50% ± 5%)에서도 여전히 효과적이며, 균열 길이와 변형률은 각각 < 0.04 mm ± 0.01 mm 및 < $8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ± 10^{-7} s^{-1} 로 유지되어 습하고 더운 조건(예: 열대 항공 엔진)에 적합합니다. 더 높은 온도(> 1100° C ± 10° C) 또는 황(SO₂) 분위기에서 다층 코팅(예: Al₂O₃/ TiN, 두께 5-10 μm ± 0.1 μm) 또는 새로운 첨가제(예: TaC)를 결합하여 열전도도와 결정립계 강도를 더욱 향상시켜 차세대 고온 장치의 요구 사항을 충족할 수 있습니다.

초경합금의 열피로 및 크리프의 최적화는 미세조직 제어(WC 입자 0.51 μm ± 0.01 μm, Co 8%-10% ± 1%, 열전도도 > 80W/ m·K ± 5W/ m·K), Cr₃ C₂ 첨가(0.5% ± 0.01%, 입자 경계 강도 > 200MPa ± 20MPa), 소결 공정(1450° C ± 10° C, 밀도 > 99.5% ± 0.1%) 및 표면 처리(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm, 균열 감소 20% ± 5%)를 통해 달성해야 합니다. 최적화 후 균열 길이는 0.03mm ± 0.01mm로 줄어들고 변형률은 < 10^{-6} s^{-1} ± 10^{-7} s^{-1} 로 항공 및 금형의 고온 요구 사항을 충족합니다.

8.2.2.5 초경합금의 열피로 및 크리프 성능 최적화의 공학적 응용

최적화된 초경합금은 고온 순환 환경(800~1000° C ± 10° C)에서 우수한 열 피로 및 크리프 성능을 발휘합니다. 미세 조직 조절, 첨가제 최적화, 소결 공정 개선 및 표면 처리를 통해 항공, 금형 제조 및 에너지 장비 분야에서 엔지니어링 적용 신뢰성이 크게 향상되었습니다. 이러한 최적화를 통해 균열 진전 속도를 줄이고, 크리프 변형률을 억제하며, 사용 수명을 연장하여 고온 조건에서 효율적이고 내구성 있는 솔루션을 제공합니다. 본 논문에서는 항공 터빈 블레이드, 고온 금형, 가스 터빈 노즐의 세 가지 주요 적용 분야에서 최적화된 초경합금의 엔지니어링 적용 및 성능 이점에 대해 실험 데이터, 미시적 분석 및 실제 사례를 바탕으로 자세히 설명합니다.

(1) 시멘트 카바이드 항공 터빈 블레이드

항공기 터빈 블레이드는 반복적인 열 응력(예: 1000° C ± 10° C ~ 25° C ± 1° C)과 고온 사이클에서의 절삭 부하(ΔT 500° C ± 10° C)를 받기 때문에 열 피로 저항성과 사용 수명에 대한 요구가 매우 높습니다. 최적화된 WC-10Co 초경합금(Cr₃ C₂ 첨가 0.5% ± 0.01%, 입자 크기 0.5 μm ± 0.01 μm)은 ASTM E1876 열충격 시험(ΔT 500° C ± 10° C, 500 회 ± 50 회)에서 열피로 균열 길이가 0.03mm ± 0.01mm에 불과하고 균열 성장률이 < 10^{-7} mm/cycle ± 10^{-8} mm/cycle 로 최적화되지 않은 0.05mm ± 0.01mm(성장률 $2 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle}$ ± 10^{-8} mm/cycle)보다 우수합니다. 미세 입자는 결정립계 밀도(> $10^4 \text{ mm}^2 / \text{cm}^3$ ± $10^3 \text{ mm}^2 / \text{cm}^3$)를 증가시켜 균열 변형(변형 각도 30° ± 5°)을 방해 하고, Cr₂O₃ 층(두께 0.2 μm ± 0.05 μm)은 결정립계 강도(> 200 MPa ± 20 MPa)를 향상시켜 열 응력 집중(600 MPa ± 50 MPa)에서

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

450 MPa \pm 50 MPa)을 효과적으로 완화합니다. 실제 적용에서 이 재료로 만든 터빈 블레이드의 절삭 수명은 5000 시간 \pm 500 시간을 초과하여 최적화되지 않은 3000 시간 \pm 300 시간보다 약 67% \pm 5% 더 높습니다. 항공기 엔진에서 블레이드의 열 피로 저항을 최적화하면 열 균열로 인한 고장률이 약 40% \pm 5% 감소하여 비행 안전성이 향상됩니다.

(2) 경질합금 고온금형

고온 금형(예: 열간 단조 금형 및 다이캐스팅 금형)은 1000° C \pm 10° C의 작업 조건에서 반복적인 열 사이클과 연속 하중을 견뎌야 하며 크리프 저항성과 사용 수명에 대한 요구 사항이 매우 높습니다. 최적화된 WC-8Co 초경합금(열전도도 > 80 W/ m·K \pm 5 W/ m·K)의 1000° C \pm 10° C 및 100 MPa \pm 10 MPa에서 크리프 시험에서 변형률은 < 10⁻⁶ s⁻¹ \pm 10⁻⁷ s⁻¹로 제어되며, 이는 최적화되지 않은 1.5 \times 10⁻⁶ s⁻¹ \pm 10⁻⁷ s⁻¹보다 낮습니다. 높은 열전도도 (70 W/ m·K \pm 5 W/ m·K에서 85 W/ m·K \pm 5 W/ m·K로 증가)는 온도 구배를 줄이고($\Delta T/ \Delta x$ 는 약 30% \pm 5% 감소), 열 응력은 550 MPa \pm 50 MPa에서 400 MPa \pm 50 MPa로 감소하며, 크리프 변형 축적을 줄입니다. 낮은 Co 함량(8% \pm 1%)과 최적화된 소결(밀도 > 99.5% \pm 0.1%)은 Co 연화를 더욱 억제하고(경도는 > HV 1300 \pm 30 유지), 슬립 밴드 폭은 0.6 μ m \pm 0.1 μ m에서 0.3 μ m \pm 0.1 μ m로 감소합니다. 실제 적용에서 이 소재로 제작된 고온 금형의 사용 주기는 10⁵ 배 \pm 10⁴ 배를 초과하며, 이는 최적화되지 않은 6 \times 10⁴ 배 \pm 10⁴ 배보다 약 50% \pm 5% 더 높습니다. 자동차 부품의 열간 단조에서 금형의 크리프 저항성을 최적화하면 사용 수명이 약 50% \pm 5% 연장되어 교체 빈도와 생산 중단 시간이 줄어듭니다.

(3) 경질합금 가스터빈 노즐

가스터빈 노즐은 900° C \pm 10° C의 고온 산화 환경에서 열 피로와 장기 하중을 받기 때문에 균열 성장 제어와 사용 수명에 대한 요구가 매우 높습니다. 900° C \pm 10° C(ΔT 400° C \pm 10° C, 500 배 \pm 50 배)의 열충격 시험에서 최적화된 WC-10Co 초경합금(Cr₃ C₂ 0.5% \pm 0.01% 첨가)은 열피로 균열 길이가 < 0.04mm \pm 0.01mm이고 균열 성장률이 < 1.5 \times 10⁻⁷ mm/cycle \pm 10⁻⁸ mm/cycle로 최적화되지 않은 0.06mm \pm 0.01mm(성장률 2.5 \times 10⁻⁷ mm/cycle \pm 10⁻⁸ mm/cycle)보다 우수합니다. Cr₂O₃ 층(Cr 함량 약 5% \pm 0.5%)과 미세 입자(0.5 μ m \pm 0.01 μ m)가 함께 작용하여 결정립계 강도(> 200 MPa \pm 20 MPa)를 향상시키고 열응력 집중(500 MPa \pm 50 MPa에서 350 MPa \pm 50 MPa)을 억제합니다. 크리프 시험(900° C \pm 10° C, 100 MPa \pm 10 MPa, 100 시간)에서 변형 속도는 < 8 \times 10⁻⁷s⁻¹ \pm 10⁻⁷s⁻¹로 최적화되지 않은 1.2 \times 10⁻⁶s⁻¹ \pm 10⁻⁷s⁻¹보다 낮습니다. 실제 적용 시, 이 소재로 제작된 노즐의 수명은 10⁴시간 \pm 10³시간을 초과하여 에너지 장비(예: 산업용 가스터빈)의 장기 작동 요건을 충족하며, 최적화되지 않은 6 \times 10³시간 \pm 10³시간보다 우수합니다. 발전소에서 노즐의 최적화된 열 피로 저항성은 열 균열로 인한 고장률을 약 45% \pm 5% 감소시켜 장비의 작동 효율을 향상시킵니다.

(4) 성능 최적화의 엔지니어링 가치

위의 사례는 열 피로 및 크리프 특성을 최적화하면 고온 사이클 환경에서 시멘트

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

카바이드의 신뢰성이 크게 향상된다는 것을 보여줍니다. 미세조직 최적화(WC 입자 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$, Co 8%-10% $\pm 1\%$, 열전도도 $> 80\text{W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$), Cr_3C_2 첨가(0.5% $\pm 0.01\%$, 입자 경계 강도 $> 200\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$), 소결 공정($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 밀도 $> 99.5\% \pm 0.1\%$) 및 표면 처리($R_a < 0.05\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$)를 통해 초경합금의 열피로 균열 길이는 $0.05\text{--}0.1\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에서 $0.03\text{--}0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 감소하였고, 크리프 변형률은 $1.2\text{--}1.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10$ 에서 감소하였다. $10^{-7} \text{ s}^{-1} \sim < 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. 이러한 성능 개선으로 서비스 수명이 $50\%\text{--}67\% \pm 5\%$ 연장되고(예: 항공 터빈 블레이드 > 5000 시간 ± 500 시간, 고온 금형 $> 10^5$ 배 $\pm 10^4$ 배, 가스터빈 노즐 $> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간) 유지 관리 비용이 절감됩니다. 예를 들어, 항공 터빈 블레이드의 연간 유지 관리 비용이 약 $35\% \pm 5\%$ 감소하고, 고온 금형의 교체 주기가 $50\% \pm 5\%$ 연장되며, 가스터빈 노즐의 작동 효율이 약 $20\% \pm 3\%$ 향상됩니다.

(5) 환경적응성 및 응용확장성

최적화된 초경합금은 뛰어난 환경 적응성을 가지고 있어 더욱 복잡한 열 사이클 조건에도 대응할 수 있습니다. 예를 들어, 수증기가 포함된 고온 환경(습도 $> 50\% \pm 5\%$, $\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$)에서도 Cr_2O_3 층은 균열 길이를 $< 0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로, 변형률을 $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 로 제어하여 습하고 고온의 항공 엔진 환경에 적합합니다. 유황(SO_2) 분위기 또는 더 높은 온도 차이($\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$)에서 최적화된 샘플의 열 피로 균열 길이는 $0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 증가하지만 다층 코팅(예: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, 두께 $5\text{--}10\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$)을 통해 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 더 줄일 수 있어 유황 함유 에너지 장치 및 극한 열 사이클에서의 적용 가능성이 확장됩니다. 또한 $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 의 초고온 환경에서 새로운 첨가제(예: TaC)와 결합하여 변형률을 $8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 로 제어할 수 있어 차세대 항공우주의 요구를 충족합니다.

(6) 종합사례 및 향후 전망

WC-10Co($\text{Cr}_3\text{C}_2 0.5\% \pm 0.01\%$, 열전도도 $> 80 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$)를 들자면, $\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 500 ± 50 회의 열충격을 가한 후, 균열 길이는 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 이고, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $100\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ 에서 100시간 크리프를 가한 후, 변형률은 $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 이고, $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 열피로 시험한 후, 균열 길이는 $< 0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 이다. 이러한 데이터는 최적화된 초경합금이 항공 터빈 블레이드, 고온 금형 및 가스터빈 노즐에서 우수한 열 피로 및 크리프 저항성을 나타내며, 사용 수명이 각각 $67\% \pm 5\%$, $50\% \pm 5\%$, $67\% \pm 5\%$ 증가함을 보여줍니다. 향후, 초고온($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) 또는 고사이클수($> 10^6$ 회 $\pm 10^4$ 회) 환경에서 최적화된 초경합금의 성능을 기능성 그래디언트 소재 개발 또는 나노 코팅(예: ZrO_2) 도입을 통해 더욱 향상시킬 수 있습니다. 2, 두께 $5\text{--}15\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$)로 더욱 까다로운 엔지니어링 요구 사항을 충족합니다.

(7) 역동적인 성과와 경제적 이익

동적 시험에 따르면 열 피로 균열 확장은 50 ± 50 회 후에 안정화되고 균열 길이는 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에서 $0.035\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 증가하여 최적화된 재료가 양호한 주기적

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

내구성을 갖는 것으로 나타났습니다. 크리프 변형률은 100 시간 후에 정상 상태 단계에 진입하고 변형률 속도는 $< 10^{-6} \text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$ 로 유지되어 장기 하중 용량이 검증되었습니다. 이러한 성능 개선은 장비의 수명을 연장할 뿐만 아니라 운영 비용도 크게 절감합니다. 예를 들어 항공 터빈 블레이드의 연간 유지 보수 비용은 약 $35\% \pm 5\%$ 감소하고 고온 금형의 교체 주기는 $50\% \pm 5\%$ 연장되며 가스터빈 노즐의 운영 효율은 약 $20\% \pm 3\%$ 증가합니다. 이는 최적화의 경제적 가치를 반영합니다.

최적화된 초경합금은 고온 순환 환경에서 우수한 성능을 발휘합니다. WC-10Co 및 WC-8Co 배합은 항공 터빈 블레이드, 고온 금형 및 가스터빈 노즐에서 기존 소재보다 열 피로 균열 길이($0.03\text{-}0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$), 크리프 변형률 속도($< 10^{-6} \text{s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{s}^{-1}$) 및 사용 수명(> 5000 시간 ± 500 시간, $> 10^5$ 배 $\pm 10^4$ 배, $> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간)이 더 우수합니다. 이러한 적용 사례는 열 피로 및 크리프 특성을 최적화하는 것이 고온 엔지니어링 응용 분야에서 초경합금의 신뢰성과 경제적 이점을 개선하는 핵심 전략임을 충분히 입증합니다.

8.3 초경합금의 내식성 및 고온 저항성 최적화 방법

부식 저항성(중량 감소 $< 0.08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$) 및 고온 저항성(경도 $> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$)은 산성, 염수 분무 및 고온 환경(항공 및 에너지 장비 등)에서 시멘트 카바이드의 적용을 개선하는 데 중요합니다. 이러한 성능 개선은 (1) 바인더 상 치환, (2) 첨가제 도입, (3) 표면 코팅 기술, (4) 공정 매개변수 최적화 및 (5) 미세 구조 조절을 포함한 다양한 과학적 방법을 통해 달성할 수 있으며, 이는 함께 작동하여 까다로운 작업 조건의 요구 사항을 충족합니다. 기존 Co 바인더 상은 고온에서 연화(경도가 $\text{HV } 200 \pm 30$ 으로 떨어짐) 및 산화(Co_3O_4 생성) 되기 쉽고, 이로 인해 부식 및 성능 저하가 발생합니다. 최적화 방법은 Co를 Ni 기반 바인더 상($\text{Ni } 8\text{-}12\% \pm 1\%$)으로 대체하여 NiO 패시베이션 층(두께 $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$)을 형성하여 부식 전류($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$)를 크게 줄이고 내식성을 향상시킵니다. Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하면 밀도가 높은 Cr_2O_3 층(두께 $\sim 0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$)을 형성하여 산화를 억제 하고 중량 증가를 $< 0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 로 제어합니다. 표면 코팅(예: TiN , Al_2O_3 (두께 $5\sim 20 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$))는 물리 기상 증착(PVD) 또는 화학 기상 증착(CVD) 기술을 통해 산소 및 부식성 매질로부터 분리되어 내산화성과 내마모성을 더욱 향상시킵니다. 이러한 최적화 방법은 초경합금의 내식성과 고온 안정성을 향상시킬 뿐만 아니라 고온 사이클 및 부식성 환경에서의 사용 수명을 크게 연장합니다.

Ni 기반 결합상, Cr_3C_2 첨가의 산화 방지 효과, 표면 코팅 보호, 그리고 공정 및 미세 구조의 조화로운 최적화를 통해, 공정 변수(소결 $1450^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$, PVD $400^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$), 현미경 분석(XPS, SEM), 그리고 엔지니어링 사례를 결합하여 최적화 경로와 그 성능 향상 메커니즘을 체계적으로 논의합니다. 예를 들어, WC-10Ni는 5% NaCl 염수 분무 환경에서 0.05 mg/cm^2 의 미세 구조 손실만 발생합니다. $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 의 미세 구조 손실은 기존 WC-10Co 대비 약 $60\% \pm 5\%$ 향상됩니다. Cr_3C_2 를 첨가하고 TiN 으로 코팅한 공구의 경도는 $1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 에서 $> \text{HV } 1500 \pm 30$ 으로

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

유지되고 절삭 수명은 5000 시간±500 시간을 초과하여 최적화되지 않은 3000 시간±300 시간보다 현저히 우수합니다.

8.3.1 초경합금 내 Ni 계 결합상의 내식성 이점 계 초경합금 접합 상 내식성 이점의 원리 및 기술적 개요

Ni 기반 접합상(Ni 함량 8%-12% ± 1%)은 우수한 전기화학적 안정성과 내식성을 가지고 있어 산성(pH < 3 ± 0.1), 염수 분무(NaCl 5% ± 0.1%) 및 해양 환경과 같은 혹독한 환경에서 시멘트 카바이드의 내식성을 크게 개선하고 기존의 Co 기반 접합상에 비해 확실한 장점이 있습니다. Ni ($E_{corr} \sim 0.1 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$)의 부식 전위는 Co ($E_{corr} \sim -0.3 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$)보다 높고 부식 전류 밀도(i_{corr})는 $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 로 크게 감소하여 Co 기반 $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 보다 우수합니다. 이러한 성능 차이는 부식성 환경에서 밀도가 높은 NiO 패시베이션 층(두께 $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, 밀도 $\sim 6.7 \text{ g/cm}^3$)이 형성되기 때문입니다. 이 층은 화학적 불활성을 통해 부식성 매체(예: Cl^- , H^+)를 효과적으로 격리하고 전기화학 반응을 차단합니다(반응식: $\text{Ni} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NiO}$, $\Delta G < 0 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$). 반면, Co 기반 결합상은 유사한 조건에서 느슨한 Co_3O_4 (밀도 $\sim 6.1 \text{ g/cm}^3$, 두께 $> 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)를 쉽게 생성하며, 낮은 보호 수준으로 인해 부식 속도가 약 10 배 증가합니다. Ni 계 WC 초경합금은 높은 경도(HV 1800 ± 30)와 인성($K_{1c} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)을 유지하면서 내식성이 약 60% ± 5% 향상되어 해양 굴착 부품, 화학 파이프라인, 제지 장비와 같이 높은 내식성과 기계적 특성이 요구되는 분야에 특히 적합합니다. 또한 Ni는 Co(1495° C ± 10° C)보다 녹는점(1455° C ± 10° C)이 높고 1000° C ± 10° C의 고온에서 연화도가 낮아(경도 감소 < 10% ± 2%) 고온 부식 환경에서의 적용 가능성을 더욱 뒷받침합니다.

초경합금 내 Ni 계 결합상의 내식성 메커니즘 분석

Ni 기반 접합 상의 내식성 이점은 고유한 전기화학적 및 물리적 특성에서 비롯됩니다. 산성 매체(예: 0.1 MH_2SO_4 , pH 1±0.1)에서 Ni는 자체 부동태화 메커니즘을 통해 NiO 층을 형성합니다. 이 층은 낮은 용해도($K_{sp} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$)와 높은 전도도($\sigma \sim 10^{-4} \text{ S/cm} \pm 10^{-5} \text{ S/cm}$)를 가지고 있어 H^+ 및 Cl^- 의 확산을 효과적으로 억제하고 부식 전류는 Co 기반의 $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 에서 $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 로 감소합니다. X선 광전자 분광법(XPS) 분석 결과 Ni 2p 피크(약 854 eV ± 0.1 eV)가 NiO의 존재를 나타내고, 결합 에너지가 O 1s 피크(530 eV ± 0.1 eV)와 일치하여 패시베이션 층의 화학적 조성을 검증했습니다. 염수 분무 환경(NaCl 5% ± 0.1%, ISO 9227 NSS 2000 h ± 100 h)에서 NiO 층 두께는 10 nm ± 1 nm로 안정적이며, 중량 감소율은 0.05 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²에 불과한 반면, Co 기반 ± 0.01 mg/cm²의 경우 0.12 mg/cm²로 약 58% ± 5% 감소했습니다. 또한, Ni 계 결합상($13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)의 열팽창계수는 Co ($13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)보다 WC($5.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)와 더 잘 일치하여 열사이클링($\Delta T 500^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$)에 의해 발생하는 미세균열을 감소시키고 간접적으로 내식성 안정성을 향상시킵니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

초경합금 내 Ni 계 결합상의 미시적 분석 및 내식성 검증

주사 전자 현미경(SEM, 분해능 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) 관찰 결과, Ni 기반 WC의 NiO 층은 표면에 고르게 분포되어 있었고, 두께는 $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ 로 안정되었으며, 눈에 띄는 벗겨짐이나 균열은 관찰되지 않았지만, Co 기반 WC의 표면은 느슨한 Co_3O_4 층(두께 $> 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)과 미세 균열(폭 $\sim 0.2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)이 나타났습니다. X선 회절(XRD) 분석 결과 NiO의 결정 구조(면심 입방, $a = 4.17 \text{ \AA} \pm 0.01 \text{ \AA}$)가 확인되었고, 피크 강도($2\theta \approx 37.2^\circ, 43.3^\circ$)는 높은 결정성을 나타내어 패시베이션 층의 보호성을 향상시킵니다. 에너지 분산 분광법(EDS)에 따르면 결정립계에서 Ni 함량은 약 $8\% - 10\% \pm 0.5\%$ 로 균일하게 분포되어 있어 WC와의 계면 결합이 양호함을 확인했습니다.

초경합금 내 Ni 계 결합상의 내식성에 영향을 미치는 요인 분석

Ni 기반 바인더 상의 내식성은 여러 요인의 영향을 받으며 최상의 성능을 달성하기 위해 종합적으로 최적화되어야 합니다.

(1) Ni 함량

Ni 함량이 $10\% \pm 1\%$ 일 때 부식 전류 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 이고, 중량 감소율은 $0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 제어되며, 경도는 $\text{HV } 1800 \pm 30$ 로 유지됩니다. 그러나 Ni 함량이 $12\% \pm 1\%$ 를 초과하면 Ni 상의 증가로 인해 인성이 증가하지만(K_{1c} 가 $5\% \pm 1\%$ 증가), 경도는 약 $10\% \pm 2\%$ 감소($\text{HV } 1620 \pm 30$)하고, Ni 상의 연화가 심화되어 부식 전류가 약간 증가하여 $2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 가 됩니다(경도 $\text{HV } 150 \pm 20$).

(2) 입자 크기

WC 입자 크기는 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 이고, 입자 경계 밀도는 높고($> 10^4 \text{ mm}^2 / \text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2 / \text{cm}^3$), 중량 감소율은 낮습니다($< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$). 이는 미세 입자가 부식성 매체의 침투 경로를 줄이기 때문입니다. 입자 크기가 $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 증가 하면 입자 경계 밀도가 감소하고 중량 감소율이 약 $20\% \pm 5\%$ ($0.06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$) 증가하고, 피팅 깊이가 $2 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 에서 $3.5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 증가했습니다.

(3) 소결 온도

$1450^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 에서 소결할 경우 Ni 분포 편차는 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ 이고, 부식 전류 i_{corr} 은 $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 로 유지되며, 중량 감소율은 안정적입니다. 소결 온도가 $> 1500^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 로 증가하면 Ni 편석(편차 $> 0.5\% \pm 0.1\%$)이 발생하고 결정립계에서 Ni 농축으로 인해 부식 전류가 $15\% \pm 3\%$ ($1.15 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) 증가 하고 중량 감소율은 $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 증가합니다.

(4) 환경

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pH < 2 ± 0.1 의 강산 환경에서 NiO 층이 부분적으로 용해되고 부식 전류 i_{corr} 이 약 $30\% \pm 5\%$ ($1.3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) 증가 하고 중량 감소율이 $0.065 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 증가합니다. NaCl 농도가 > 5% ± 0.1%인 염수 분무에서 Cl⁻ 농도의 증가는 점식 부식을 유도하고 점식 면적이 $20\% \pm 5\%$ ($0.01 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ 에서 $0.012 \text{ mm}^2 \pm 0.001 \text{ mm}^2$ 로 증가) 증가 하고 중량 감소율이 $0.06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 증가합니다.

(5) 표면 거칠기

표면 거칠기 $Ra < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 일 때 표면 결함이 적고, 부식 전류 i_{corr} 은 낮은 수준 ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) 으로 유지되며, 중량 감소율은 $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 입니다. $Ra > 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 일 때, 미세 균열과 구멍이 증가하고, 부식 전류가 $10\% \pm 2\%$ ($1.1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) 증가 하고, 구멍 깊이가 $4 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 증가합니다.

예를 들어, WC-12Ni 샘플은 높은 소결 온도 ($1500^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$)로 인해 Ni 편석(편차 $0.6\% \pm 0.1\%$)이 발생하고 NaCl 5% ± 0.1% 염수 분무 환경에서의 중량 감소율은 $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 이며 부식 전류 i_{corr} 은 $1.2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 입니다. 최적화된 WC-10Ni ($1450^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 에서 소결, $Ra < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)의 중량 감소율은 $0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 에 불과합니다. $i_{corr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, 내식성이 약 $29\% \pm 5\%$ 향상되었습니다.

기반 바인더상 제조 공정 최적화

중량 감소 $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 및 부식 전류 $i_{corr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 를 달성하려면, Ni 기반 WC 초경합금의 제조 공정을 정밀하게 제어하여 내식성 이점을 최대한 발휘해야 합니다. 권장되는 최적화 전략은 다음과 같습니다.

(1) 성분 최적화

고순도 Ni 분말(순도 > 99.9% ± 0.01%)과 WC 분말(입자 크기 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)을 선정하고, Ni 함량을 8%-10% ± 1%로 제어한다. 이 범위는 내식성과 기계적 성질의 균형을 이룬다. Ni 함량이 너무 높으면 (> 12% ± 1%) Ni 상이 증가하고, 경도가 약 $10\% \pm 2\%$ 감소(HV 1620 ± 30으로), 인성이 5% ± 1% 증가(K_{1c} 가 $12.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 증가)하지만 부식 전류는 약간 증가($2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 로)한다. 너무 낮으면 (< 8% ± 1%) 경도가 부족하고 (< HV 1600 ± 30) 내식성이 감소합니다 ($i_{corr} > 2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$). 미세 WC 입자 ($0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)는 입계 밀도를 증가시켜 (> $10^4 \text{ mm}^2 / \text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2 / \text{cm}^3$) 부식성 매체의 침투를 줄이고 중량 감소율은 $< 0.05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 제어됩니다.

(2) 불 밀링 공정

습식 불 밀링(매체는 무수 에탄올, 40 시간 ± 1 시간, 불과 재료의 비율 10:1 ± 0.5)을 사용하면 분말의 균일한 혼합, 입자 크기 분포 편차 $< 0.02 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

를 보장하고 미세 결합 (예 : 기공, 응집)을 줄이고 후속 소결을 위한 균질한 매트릭스를 제공하며 간접적으로 부식 민감도를 낮춥니다.

(3) 진공소결

1450° C ± 10° C, 압력 10^{-3} Pa ± $10^{-4}</math> Pa, 유지 시간 1 시간 ± 0.1 시간, 밀도 99.5% ± 0.1%, 기공률 $0.1\% \pm 0.02\%$. 이 온도는 균일한 Ni 분포(편차 $0.1\% \pm 0.02\%$)를 보장하고, 편석(1500° C ± 10° C 이상에서 > $0.5\% \pm 0.1\%$, i_{corr} 증가 15% ± 3%)을 방지합니다. 고진공 환경은 산소 침투를 줄이고, 조기 NiO 형성 또는 불균일한 분포를 방지하며, 중량 손실을 낮게 유지합니다.$

(4) 후처리

열간 등방성 가압 성형(HIP, 1200° C ± 10° C, 200 MPa ± 10 MPa, 1 시간 ± 0.1 시간)을 사용하여 잔류 기공을 제거하고 밀도를 더욱 개선(밀도가 99.7% ± 0.1%로 증가)하고 부식성 매체의 침투 경로를 줄이고 피팅 깊이를 $3 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 에서 $2 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 줄였습니다.

(5) 표면처리

정밀 기계 연마를 통해 표면 거칠기(Ra)를 $0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 미만 으로 제어하여 표면 미세균열과 피트를 줄였습니다. 초음파 세척(40kHz ± 1kHz, 10 분 ± 1 분)을 통해 잔류 오염물질($0.1\% \pm 0.02\%$)을 제거하고 피트 면적을 $20\% \pm 5\%$ ($0.012\text{mm}^2 \pm 0.001\text{mm}^2$ 에서 $0.0096\text{mm}^2 \pm 0.001\text{mm}^2$ 로 감소) 감소시켰으며, 부식 전류 i_{corr} 는 $10^{-6}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$ 로 유지되었습니다.

(6) 첨가물의 도입

소량의 Cr_3C_2 ($0.2\% \pm 0.01\%$) 를 첨가하면 내식성이 더욱 향상됩니다. Cr_3C_2 는 고온에서 Cr_2O_3 층(두께 $\sim 0.1 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$)을 형성하여 NiO 층과 상승작용을 일으켜 부식 전류 를 약 $10\% \pm 2\%$ ($10^{-6}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$ 에서 $9 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$ 로) 감소시키고 중량 감소율은 $< 0.05\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 유지됩니다. Cr_3C_2 는 또한 결정립 크기를 미세화($0.6 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 에서 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로) 하고 결정립계 강도 (>200MPa ± 20MPa)를 향상시킵니다.

이러한 공정 매개변수의 최적화는 Ni 기반 바인더 상과 WC 의 균일한 결합을 보장하고 결정립계 강도가 > 200 MPa ± 20 MPa 로 증가하여 높은 경도(HV 1800 ± 30)와 인성 ($K_{1c} 12 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 을 유지하면서 재료의 부식 및 피로 저항성을 크게 향상시킵니다.

8.3.1.6 초경합금의 Ni 기반 결합상에 대한 시험 사양

초경합금의 Ni 기반 결합상에 대한 시험 규격은 내식성과 기계적 특성을 평가하기 위한 것입니다. 권장되는 표준은 다음과 같습니다.

(1) 염수분무시험

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 9227 NSS 에 따르면 조건은 NaCl 5% ± 0.1% 용액, 온도 35° C ± 2° C, 지속 시간 2000 시간 ± 100 시간, 중량 감소(목표 < 0.05 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²) 및 피팅 깊이(목표 < 3 μm ± 0.5 μm) 를 측정합니다 .

(2) 산침지 시험

0.1 MH₂SO₄ (pH 1±0.1)에 100 시간±10 시간 동안 방치하고 중량감소(목표 <0.05 mg/cm² ±0.01 mg/cm²) 및 부식전류밀도 (i_{corr}, 목표 <10⁻⁶ A/cm² ±10⁻⁷ A/cm²) 를 시험 한다 .

(3) 전기화학적 시험

3 전극 시스템(작업 전극: Ni 기반 WC, 기준 전극: 포화 칼로멜 전극, 보조 전극: 백금 전극)을 사용하여 부식 전위 (E_{corr}, 목표 ~0.1 V ± 0.02 V vs. SCE)와 1 mV/s ± 0.1 mV/s 의 주사 속도에서 분극 곡선을 측정했습니다.

8.3.1.7 초경합금 Ni 계 결합상의 기계적 성질 시험

(1) 경도 시험

ISO 3878 에 따라 비커스 경도 시험기를 사용하여 하중 30kg ± 1kg, 시험 온도 25° C ± 1° C, 목표 경도 > HV 1800 ± 30 을 설정합니다.

(2) 파괴인성 시험

ASTM E399 에 따르면, 단일 모서리 노치 빔 (SENB) 방법을 사용하여 시험 온도는 25° C ± 1° C, 목표 K_{1c} > 12 MPa · m^{1/2} ± 0.5 MPa · m^{1/2} 입니다.

(3) 고온 성능 시험

굽힘 강도는 ISO 178 에 따라 3 점 굽힘법을 사용하여 1000° C ± 10° C 에서 시험되었습니다(목표 > 2000 MPa ± 100 MPa).

초경합금 내 Ni 계 결합상의 미시적 분석

SEM 관찰

분해능 < 0.1 μm ± 0.01 μm, NiO 층 두께(목표 10 nm ± 1 nm) 및 표면 결합 분석 .

XPS 분석

Ni 2p 피크(목표 854 eV ± 0.1 eV)를 테스트하여 NiO 형성을 확인했습니다.

EDS 분석

결정립계에서 Ni 분포를 측정합니다(목표 8%-10% ± 0.5%).

테스트는 표준 실험실 조건에서 수행해야 하며, 샘플 크기는 10mm × 10mm × 5mm ± 0.1mm 이어야 하며 데이터 신뢰성을 보장하기 위해 3 회 이상 반복해야 합니다.

8.3.1.9 Ni 계 초경합금 바인더상의 엔지니어링 응용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

초경합금 Ni 계 접합상은 뛰어난 내식성과 기계적 특성을 바탕으로 다양한 고온 및 부식성 환경에서 엔지니어링 응용 분야에서 상당한 이점을 제공합니다. 주요 적용 분야와 성능, 그리고 실제 사례 및 데이터는 다음과 같습니다.

(1) 해양공학

cm²) 염수 분무(NaCl 5% ± 0.1%) 및 해수에서. ± 0.01 mg/cm²) 및 높은 내식성(부식 전류 $i_{corr} < 10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$) 을 가지므로 심해 굴착 안정기 및 절삭 공구에 널리 사용됩니다. 심해 굴착에서 WC-10Ni 로 만든 안정기의 사용 수명은 3년 ± 0.3년을 초과하여 기존 WC-10Co(1.5년 ± 0.2년)보다 약 100% ± 5% 높으며 부식으로 인한 유지 보수 비용이 약 40% ± 5% 감소합니다. 높은 경도(HV 1800 ± 30)와 인성 ($K_{1c} 12 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 으로 고압(> 20 MPa ± 2 MPa) 및 고온(> 500° C ± 10° C)에서도 절단 효율이 보장됩니다.

(2) 화학 파이프라인 및 장비

산성 환경(pH < 2 ± 0.1, 예: 0.1 MH₂SO₄) 에서 Ni 기반 WC 초경합금의 중량 감소율은 NiO 부동태화층(두께 ~10 nm ± 1 nm)의 보호로 인해 0.06 mg/cm²에 불과합니다. ± 0.01 mg/cm² 로 스테인리스강(중량 감소율 ~0.1 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²) 보다 우수합니다. 화학 파이프라인 밸브 및 펌프의 내식성 코팅에 사용되며 사용 수명은 > 2년 ± 0.2년으로, 기존 소재(예: 304 스테인리스강, 수명 ~1년 ± 0.1년)보다 약 100% ± 5% 더 깁니다. 염화물(예: HCl)을 함유하는 화학 반응기에서 WC-10Ni는 피팅 저항성(피팅 깊이 < 3 μm ± 0.5 μm) 을 유지하여 장비 누출 위험을 줄입니다.

(3) 제지산업

제지 장비(예: 분쇄 롤러 및 블레이드) 는 염화물 함유(NaCl > 5% ± 0.1%) 및 고온(> 400° C ± 10° C) 환경에 노출됩니다. Ni 기반 WC 초경합금은 낮은 부식 전류 ($i_{corr} < 10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$) 와 높은 내마모성(경도 > HV 1800 ± 30)을 갖추고 있어 이상적인 선택입니다. WC-10Ni 로 제작된 분쇄 롤러의 중량 손실은 5,000 시간 ± 500 시간 연속 작동 후 0.05mg/cm²에 불과합니다. ± 0.01 mg/cm², 표면 마모 깊이 < 10 μm ± 1 μm, WC -10Co(무게 감량률 0.12 mg/cm² ± 0.01 mg/cm², 마모 깊이 20 μm ± 2 μm) 와 비교하여 내구성이 약 50% ± 5% 향상되어 교체 빈도와 생산 비용이 절감됩니다.

(4) 항공 및 에너지 장비

항공우주 엔진 부품(예: 터빈 블레이드) 및 가스터빈 노즐에서 Ni 기반 WC 초경합금(예: Cr₃C₂ 0.2% ± 0.01%를 함유한 WC-10Ni)은 900° C ± 10° C 및 열 사이클링(ΔT 500° C ± 10° C) 조건에서 열 피로 균열 길이가 < 0.04mm ± 0.01mm 이고 중량 감소율이 < 0.25mg/cm²입니다. ± 0.05mg/cm², 사용 수명 > 5000 시간 ± 500 시간으로 최적화되지 않은 3000 시간 ± 300 시간보다 우수합니다. 높은 열 안정성(경도 > HV 1600 ± 30)과 산화 저항성으로 인해 고온 부식 환경(예: SO₂ 분위기) 에서 우수한 성능을 발휘하며 열 균열로 인한 고장률을 약 45% ± 5%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

감소시킵니다.

8.3.1.10 Ni 계 초경합금의 적용 이점 및 확장

Ni 기반 WC 초경합금의 엔지니어링 적용 장점은 종합적인 성능에 있습니다. 내식성이 $60\% \pm 5\%$ 향상되고, 경도가 높으며 ($HV 1800 \pm 30$), 인성이 우수합니다 ($K_{1c} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). 또한 $1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 에서의 안정성도 우수합니다. 이러한 특성 덕분에 극한 환경(예: 심해 고압, 산성 화학 산업, 고온 항공)에서 기존 Co 기반 소재 및 스테인리스강을 대체할 수 있는 잠재력을 갖추고 있습니다. 수증기(습도 $> 50\% \pm 5\%$) 또는 더 높은 온도 구배($\Delta T 600^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$)가 존재하는 경우 다층 코팅(예: $\text{TiN} / \text{Al}_2\text{O}_3$, 두께 $5\text{-}20 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)을 결합하면 성능을 더욱 개선하고 초고온($> 1100^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$) 또는 고사이클 횟수($> 10^6 \text{회} \pm 10^4 \text{회}$) 응용 분야(예: 차세대 에너지 장치)로 확장할 수 있습니다.

경제적 및 환경적 이점

Ni 기반 WC를 적용하면 유지보수 비용이 크게 절감됩니다. 예를 들어, 해양 시추 부품의 연간 유지보수 비용은 $40\% \pm 5\%$ 절감되고, 항공 부품의 효율은 $20\% \pm 3\%$ 향상됩니다. 그러나 Ni는 상대적으로 고가(Co의 약 1.5~2 배)이므로 Ni 함량($8\sim 10\% \pm 1\%$) 및 공정(예: HIP 후처리) 최적화를 통해 비용을 절감해야 합니다. 환경 측면에서는 내구성이 우수하여 재료 폐기물을 줄여 지속 가능한 개발 요건을 충족합니다.

Ni 계 WC 초경합금은 해양 엔지니어링, 화학 파이프라인, 제지 산업 및 항공 에너지 장비에 탁월한 성능을 발휘하며, 중량 감소율이 0.06 mg/cm^2 미만 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 이고, 사용 수명이 $50\sim 100\% \pm 5\%$ 연장됩니다. 내식성과 고온 안정성은 다양한 엔지니어링 요건을 충족하며, 향후 코팅 및 합금화를 통해 적용 범위를 더욱 확대할 수 있습니다.

8.3.2 초경합금에 Cr_3C_2 첨가제 도입

8.3.2.1 초경합금에 Cr_3C_2 첨가제 도입의 원리 및 기술 개요

초경합금 Cr_3C_2 첨가제는 초경합금의 산화 저항성과 고온 저항성을 크게 향상시키며, 특히 고온($1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$) 및 부식성 환경(산소 함유 또는 염화물 함유 분위기 등)에서 효과적입니다. 권장 첨가량은 $0.2\% \text{-} 0.5\% \pm 0.01\%$ 입니다. Cr_3C_2 는 고온에서 산소와 반응하여 치밀한 Cr_2O_3 보호층을 형성합니다(두께 $\sim 0.1\text{-}0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$, 밀도 $\sim 5.2 \text{ g/cm}^3 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$), 산소와 부식성 매체를 효과적으로 격리하고 중량 증가를 $< 0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 로 제어하며, 첨가하지 않은 샘플의 0.5 mg/cm^2 보다 $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 우수합니다. 이 보호층은 산화 속도를 감소시키고($0.4 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ 에서 $< 0.2 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ 로) Ni 기반 결합 상의 NiO 층과 상승적으로 작용하여 부식 전류(i_{corr})를 10^{-6} Cr_3C_2 에서 더욱 감소시킵니다. 또한 WC 입자를 미세화(0.6

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 에서 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 으로)하여 입자 경계 강도($> 200 \text{MPa} \pm 20 \text{MPa}$)를 개선하는 동시에 경도($> \text{HV } 1500 \pm 30$)와 인성($K_{1c} > 12 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)을 유지하므로 항공 터빈과 같은 고온 고부하 분야에 적합합니다. 블레이드 및 가스터빈 노즐. 또한, Cr_3C_2 (용점 $1890^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$)의 고온 안정성은 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 Co 베이스보다 연화도가 낮아(경도 저하 $< 5\% \pm 1\%$) 재료의 장기 내구성을 향상시킵니다.

초경합금 Cr_3C_2 첨가제 의 산화방지 및 내식성 메커니즘 분석

Cr_3C_2 첨가제는 화학 반응 및 미세 구조 조절을 통해 생성됩니다. $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 의 산화 환경에서 Cr_3C_2 는 반응하여 ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8\text{CO}$, $\Delta G < -1000 \text{kJ/mol} \pm 50 \text{kJ/mol}$) Cr_2O_3 층을 형성합니다. 이 층은 낮은 산소 확산 계수($D_0 \approx 10^{-14} \text{cm}^2/\text{s} \pm 10^{-15} \text{cm}^2/\text{s}$)로 산소 침투를 효과적으로 차단하여 중량 증가를 $0.5 \text{mg}/\text{cm}^2$ 에서 $1.5 \text{mg}/\text{cm}^2$ 로 줄입니다. $\pm 0.05 \text{mg}/\text{cm}^2$ 에서 $< 0.3 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05 \text{mg}/\text{cm}^2$ 까지 산화 저항성이 약 $40\% \pm 5\%$ 향상됩니다. 산성 매체(예: $0.1 \text{M H}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0.1$) 또는 염수 분무($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$)에서 Cr_2O_3 층과 NiO 두 층이 함께 이중 보호 구조를 형성하여 부식 전류 i_{corr} 이 $9 \times 10^{-7} \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A}/\text{cm}^2$ 로 감소하고 중량 감소율이 $< 0.05 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01 \text{mg}/\text{cm}^2$ 로 유지되는 반면 첨가제가 없는 $0.07 \text{mg}/\text{cm}^2$ 인 경우 $\pm 0.01 \text{mg}/\text{cm}^2$ 가 약 $29\% \pm 5\%$ 감소합니다. 또한 Cr_3C_2 는 결정립을 미세화하고 결정립계 결합을 강화하며, 열피로균열성장을 감소시키고($0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 에서 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 감소), WC 와의 열팽창계수 정합도가 높아($10 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) 열사이클링에 의한 응력집중을 감소시킨다($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

8.3.2.3 초경합금에 Cr_3C_2 첨가제 도입에 대한 미시적 분석 및 검증

주사전자현미경(SEM, 분해능 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) 관찰 결과, Cr_3C_2 를 첨가한 후 Cr_2O_3 층이 표면에 고르게 분포되었으며, 두께는 $0.1\text{--}0.2 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$ 로 안정되었고, 뚜렷한 벗겨짐이나 균열은 없었지만, 첨가 하지 않은 시료 표면에 산화 구멍(직경 $\sim 0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)이 나타났습니다. X선 회절(XRD) 분석 결과 Cr_2O_3 의 육방정계 결정 구조($a = 4.96 \text{\AA} \pm 0.01 \text{\AA}$, $c = 13.58 \text{\AA} \pm 0.01 \text{\AA}$)가 확인되었고, 피크 강도($2\theta \approx 33.6^\circ, 36.2^\circ$)는 높은 결정성을 나타내어 보호층의 안정성을 높입니다. 에너지 분산 분광법(EDS) 분석 결과, 결정립계에서 Cr 함량이 약 $0.5\%\text{--}1\% \pm 0.1\%$ 로 균일하게 분포되어 WC 및 Ni 상과의 계면 결합이 양호함을 확인했습니다. X선 광전자 분광법(XPS) 분석 결과, Cr 2p 피크(약 $576.5 \text{eV} \pm 0.1 \text{eV}$)가 검출되었으며, 이는 O 1s 피크($530 \text{eV} \pm 0.1 \text{eV}$)와 일치하여 Cr_2O_3 의 형성을 확인했습니다.

8.3.2.4 초경합금 Cr_3C_2 첨가제 의 성능 에 영향을 미치는 요인 분석

시멘트 카바이드 Cr_3C_2 첨가제의 경우 다음과 같은 여러 요인에 영향을 받으며 정밀하게 제어해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) 추가금액

Cr₃C₂ 함량이 0.2% ± 0.01%일 때, 중량 증가는 < 0.3 mg/cm² ± 0.05 mg/cm² 입니다. i_{corr} 은 약 10% ± 2% 감소합니다(9×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²). 함량이 0.5% ± 0.01%를 초과하면 η 상(WC-Cr-Co 복합상)이 형성될 수 있으며, 경도는 약 5% ± 1% 감소합니다(HV 1425 ± 30). 인성은 3% ± 1% 증가합니다(K_{1c} 는 12.4MPa·m^{1/2} ± 0.5MPa·m^{1/2} 증가). 그러나 i_{corr} 은 1.1×10⁻⁶A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²로 증가합니다.

(2) 입자 크기

WC 입자 크기는 0.51 μm ± 0.01 μm 이고, Cr₃ C₂는 고르게 분포되어 있으며 중량 감소율은 낮습니다(< 0.05 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²). 입자 크기가 2 μm ± 0.01 μm 로 증가 하면 Cr₂O₃ 층 이 불연속적이고 중량 감소율은 15% ± 3%(0.055 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²) 증가하고, 피팅 깊이는 2 μm ± 0.5 μm 에서 3 μm ± 0.5 μm 로 증가합니다.

(3) 소결온도

1450° C ± 10° C에서 소결하면 Cr₃ C₂ 균일 고용체, 중량 증가 < 0.3 mg/cm² ± 0.05 mg/cm². 온도가 1550° C ± 10° C 이상으로 상승하면 Cr 이 휘발(손실 > 0.1% ± 0.02%) 하고 Cr₂O₃ 층의 두께가 감소(< 0.1 μm ± 0.05 μm) 하고 i_{corr} 이 10% ± 2% 증가합니다(1.1×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²).

(4) 환경

pH < 2 ± 0.1 의 강산에서 Cr₂O₃ 층이 부분적으로 용해되고 i_{corr} 이 20% ± 3% 증가(1.08×10⁻⁶A/cm² ± 10⁻⁷A/cm²) 했으며 무게 감소율은 0.06mg/cm² ± 0.01mg/cm²로 증가했습니다. NaCl > 5% ± 0.1% 염수 분무에서 Cl⁻는 Cr₂O₃ 부식을 가속화 하고 피팅 면적이 15% ± 3% 증가합니다(0.01mm² ± 0.001mm²에서 0.0115mm² ± 0.001mm²로 증가).

(5) 표면 거칠기

Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm 일 경우, Cr₂O₃ 층은 손상되지 않고 i_{corr} 은 낮은 수준(< 10⁻⁶A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) 으로 유지됩니다. Ra > 0.1 μm ± 0.01 μm 일 경우, 표면 결함이 증가하고 i_{corr} 은 8% ± 2%(1.08×10⁻⁶A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) 증가하고, 피팅 깊이는 3.5 μm ± 0.5 μm 로 증가합니다.

예를 들어, WC-10Ni-0.6%Cr₃C₂ 시료는 높은 소결 온도(1550° C ± 10° C)로 인한 Cr 휘발로 인해 염수 분무에서 0.08 mg/cm²의 중량 감소율을 보였습니다. ± 0.01 mg/cm², i_{corr} 은 1.2×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²로 증가했습니다. 최적화된 WC-10Ni-0.2%Cr₃ C₂(1450° C ± 10° C, Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm) 의 중량 감소율은 0.03 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²에 불과했습니다. i_{corr} < 9×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm², 항산화 능력이 약 40% ± 5% 증가했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.2.5 초경합금 Cr₃C₂ 첨가제 제조 공정 최적화

질량 증가 < 0.3 mg/cm² ± 0.05 mg/cm² 및 i_{corr} < 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² 를 달성하려면 Cr₃C₂ 첨가제의 도입은 제조 공정과 조화를 이루어 최적화되어야 합니다. 권장 전략은 다음과 같습니다.

(1) 성분 최적화

고순도 Cr₃C₂ 분말(순도 > 99.5% ± 0.01%, 입자 크기 0.5 μm ± 0.01 μm) 을 선별하여 WC(입자 크기 0.51 μm ± 0.01 μm) 및 Ni 분말(8%~10% ± 1%)과 혼합합니다. Cr₃C₂ 함량은 0.2%~0.5% ± 0.01%로 관리합니다. 과도(> 0.5% ± 0.01%)하면 η 상을 유도하고 경도를 5% ± 1% 감소시킬 수 있으며, 너무 낮으면(< 0.2% ± 0.01%) 항산화 효과가 부족합니다(중량 증가 > 0.4 mg/cm²) . ± 0.05 mg/cm²) .

(2) 불 밀링 공정

습식 불 밀링(매체: 무수 에탄올, 40 시간 ± 1 시간, 불-재료 비율: 10:1 ± 0.5)을 사용하여 Cr₃C₂의 균일한 분산을 보장했으며, 입자 크기 분포 편차는 < 0.02 μm ± 0.01 μm 이었고, 응집을 줄였으며(< 0.1% ± 0.02%), Cr₂O₃ 층을 형성하기 위한 균질한 매트릭스를 제공했습니다.

(3) 진공소결

1450° C ± 10° C에서 소결, 압력 < 10⁻³ Pa ± 10⁻⁴ Pa, 유지 시간 1 시간 ± 0.1 시간, 밀도 99.5% ± 0.1%, 기공률 < 0.1% ± 0.02%. 이 온도는 Cr₃C₂ 고용체가 균일한 Cr₂O₃ 층을 형성하도록 보장합니다. 1550° C ± 10° C 이상에서는 Cr 이 휘발되어 불완전한 보호층(두께 < 0.1 μm ± 0.05 μm) 이 형성됩니다 .

(4) 후처리

열간 등방성 가압 성형(HIP, 1200° C ± 10° C, 200 MPa ± 10 MPa, 1 시간 ± 0.1 시간)을 사용하여 잔류 기공을 제거하고 밀도를 99.7% ± 0.1%로 증가시키고 산화 매체의 침투를 줄이며 Cr₂O₃ 층의 두께를 0.2 μm ± 0.05 μm 로 증가시켰습니다 .

(5) 표면처리

Ra 는 정밀 연마를 통해 0.05 μm ± 0.01 μm 로 제어되었고, 표면 산화물(< 0.1% ± 0.02%)은 초음파 세척(40 kHz ± 1 kHz, 10 분 ± 1 분)을 통해 제거되었으며, 피팅 영역은 15% ± 3%(0.011 mm² 에서 0.01 mm² 로) 감소되었습니다 . ± 0.001 mm² 에서 0.00935 mm² ± 0.001 mm² 로 감소), i_{corr} 은 < 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² 로 유지되었습니다 .

(6) 첨가제 분산 최적화

기계적 합금화(MA, 200 rpm ± 10 rpm, 10 h ± 0.5 h)를 사용하여 Cr₃C₂와 WC/Ni 상 사이의 계면 결합을 향상시키고, 분리를 줄이며(< 0.05% ± 0.01%), Cr₂O₃ 층의 균일성을 개선했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이러한 공정은 균일한 Cr_3C_2 분포, 결정립계 강도 $> 200 MPa \pm 20 MPa$, 유지된 경도($> HV 1500 \pm 30$) 및 인성 ($K_{1c} > 12 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0.5 MPa \cdot m^{1/2}$)을 보장합니다.

8.3.2.6 초경합금 Cr_3C_2 첨가제 엔지니어링 사례 및 성능 비교

WC-10Ni-0.2% Cr_3C_2 와 WC-10Ni를 예로 들면, $1000^\circ C \pm 10^\circ C$ 에서 100시간 ± 10 시간 동안 산화시킨 후, Cr_3C_2 를 첨가한 시료의 질량 증가는 단지 $0.25 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$ 에 불과하다. $i_{corr} < 9 \times 10^{-7} A/cm^2 \pm 10^{-8} A/cm^2$ 로, 무첨가 $0.5 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$ 및 $1.1 \times 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$ 와 비교되었으며, 산화 저항성이 $50\% \pm 5\%$ 향상되었습니다. 염수 분무 시험(NaCl 5% $\pm 0.1\%$, 2000h $\pm 100h$)에서 중량 감소율은 $0.03 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 로 감소하고, 피팅 깊이는 $< 2 \mu m \pm 0.5 \mu m$ 로, 무첨가 $0.07 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 및 $3.5 \mu m \pm 0.5 \mu m$ 보다 우수했습니다. 항공용 터빈 블레이드 응용 분야에서 WC-10Ni-0.2% Cr_3C_2 는 6,000시간 ± 500 시간 이상의 수명을 가지며, 이는 첨가하지 않은 5,000시간 ± 500 시간보다 $20\% \pm 5\%$ 더 길고, 고온 균열로 인한 고장률을 약 $30\% \pm 5\%$ 감소시킵니다.

8.3.2.7 초경합금에 Cr_3C_2 첨가제의 적용 확대 및 한계

Cr_3C_2 첨가로 인해 초경합금은 고온 산화(예: $1100^\circ C \pm 10^\circ C$) 및 부식성 환경에서 우수해지며, 가스터빈 노즐(수명 $> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간) 및 고온 금형(사이클 $> 10^5$ 회 $\pm 10^4$ 회)에 적합합니다. SO_2 가 포함된 분위기에서 Cr_2O_3 층은 보호적(무게 증가 $< 0.35 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$)으로 유지되지만, $pH < 1 \pm 0.1$ 인 강산에서는 용해 속도가 $15\% \pm 3\%$ 증가하고 TiN 코팅(두께 $5-10 \mu m \pm 0.1 \mu m$)과 함께 최적화해야 합니다. Cr_3C_2 는 가격이 비싼 편(WC의 약 2~3배)이므로, 성능과 경제성을 고려하여 첨가량을 조절($0.2\%-0.5\% \pm 0.01\%$)해야 한다.

8.3.2.8 최적화 방향 및 향후 전망 초경합금에 Cr_3C_2 첨가제 도입

Cr_3C_2 효과를 개선하기 위해 TaC ($0.1\% \pm 0.01\%$)를 첨가하여 Cr_2O_3 층의 열 안정성을 강화할 수 있으며, i_{corr} 은 $5 \times 10^{-7} A/cm^2 \pm 10^{-8} A/cm^2$ 로 감소합니다. 초고온($>1200^\circ C \pm 10^\circ C$)에서 Al_2O_3 코팅(두께 $10-15 \mu m \pm 0.1 \mu m$)과 결합하면 중량 증가를 $0.2 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$, 경도 $> HV 1600 \pm 30$ 으로 제어할 수 있습니다. 앞으로 나노- Cr_3C_2 (입자 크기 $< 0.1 \mu m \pm 0.01 \mu m$) 또는 Cr-Ni 복합 첨가제를 개발하면 산화 저항성과 경제성을 더욱 개선하고 극한 에너지 장비 응용 분야로 확장할 수 있습니다.

Cr_3C_2 첨가제 ($0.2\% - 0.5\% \pm 0.01\%$) Cr_2O_3 층 (두께 $0.1-0.2 \mu m \pm 0.05 \mu m$)을 형성하여 질량 증가($< 0.3 mg/cm^2$)를 상당히 감소시킵니다. ($\pm 0.05 mg/cm^2$) 및 부식 전류 ($i_{corr} < 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$)를 감소시키고, 경도($> HV 1500$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

± 30) 및 인성 ($K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 을 유지하면서 산화 저항성이 40% ± 5% 향상되었습니다. 안정적인 성능을 보장하기 위해 제조 공정을 최적화했습니다(조성 최적화: Cr_3C_2 0.2%-0.5% ± 0.01%, 불 밀링 40 시간 ± 1 시간, 소결 1450° C ± 10° C, HIP 후처리, 표면 연마 $Ra < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$). 첨가량, 입자 크기, 소결 온도, 환경 및 표면 거칠기 등의 요소를 종합적으로 제어해야 합니다. 고온 및 부식성 환경에 적합합니다. 향후 복합재 첨가 및 코팅을 통해 응용 분야를 더욱 확장할 수 있습니다.

8.3.3 경질 합금 표면 코팅 보호

8.3.3.1 초경 표면 코팅의 보호 원리 및 기술 개요

표면 코팅 보호 기술은 초경합금의 내식성과 고온 내구성을 크게 향상시키며, 특히 고온(1000° C ± 10° C) 및 부식성 환경(산성 또는 염분 분무 조건 등)에서 더욱 효과적입니다. 권장 코팅으로는 TiN 및 Al_2O_3 코팅이 있으며, 두께는 5~20 $\mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 입니다. 이 코팅은 물리 기상 증착(PVD, 400° C ± 10° C) 또는 화학 기상 증착(CVD, 1000° C ± 10° C) 공정을 통해 형성됩니다. 우수한 내마모성 및 내산화성을 지닌 TiN 코팅(경도 $> \text{HV } 2000 \pm 50$, 밀도 $\sim 5.4 \text{ g/cm}^3$) ± 0.1 g/cm^3 , 질량 증가 $< 0.2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$, 부식 전류 (i_{corr}) 가 $< 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 로 감소합니다. Al_2O_3 코팅(용융점 2072° C ± 10° C, 열전도도 $\sim 30 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)은 밀도가 높은 산화물 층(두께 $\sim 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)을 형성하여 산소와 부식성 매체를 격리하고, 중량 감소율은 $< 0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 유지되며, 코팅되지 않은 샘플의 0.07 $\text{mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 보다 우수합니다. 이러한 코팅은 Ni 기반 바인더 상 또는 Cr_3C_2 첨가제와 상승적으로 작용하여 경도($> \text{HV } 1800 \pm 30$)와 인성 ($K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)을 유지하므로 항공우주 터빈 블레이드, 화학 장비 및 해양 도구에 널리 사용됩니다. 또한 코팅의 고온 안정성 (TiN은 800° C ± 10° C, Al_2O_3 은 1000° C ± 10° C)은 열 사이클링(ΔT 500° C ± 10° C)으로 인한 성능 저하를 줄여줍니다.

8.3.3.2 초경 표면 코팅의 내식성 및 내산화성 메커니즘 분석

표면 코팅의 보호 효과는 물리적 장벽과 화학적 불활성에서 비롯됩니다. 1000° C ± 10° C의 산화 환경에서 Al_2O_3 코팅은 반응($4\text{Al} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3$, $\Delta G < -1500 \text{ kJ/mol} \pm 50 \text{ kJ/mol}$)을 통해 치밀한 산화층을 형성하고, 낮은 산소 확산 계수($D_0 \approx 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$)로 인해 질량 증가가 $< 0.2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 로 제어되고 산화 저항성이 약 60% ± 5% 향상됩니다. TiN 코팅은 높은 경도($> \text{HV } 2000 \pm 50$)와 낮은 마찰 계수($\sim 0.4 \pm 0.05$)를 통해 표면 마모와 미세균열 확산 (0.05mm ± 0.01mm에서 $< 0.02\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$)을 줄입니다. 산성 매체(예: 0.1 MH_2SO_4 , pH 1±0.1) 또는 염수 분무(NaCl 5%±0.1%)에서 코팅은 Cl^- 및 H^+ 를 분리하고, i_{corr} 은 $8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 로 감소하고, 중량 감소율은 0.04 $\text{mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 감소하는 반면, 코팅하지 않은 경우 ±0.01 mg/cm^2 의 경우 0.07 mg/cm^2 로 약 43%±5% 감소합니다. 코팅의 열팽창 계수는 기판의 열팽창 계수와 일치합니다 (TiN 9×10^{-6}

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

K^{-1} , Al_2O_3 $8 \times 10^{-6} K^{-1}$, WC $5.2 \times 10^{-6} K^{-1}$). 이는 열 응력($< 300 MPa \pm 50 MPa$)을 줄이고 열 피로 저항성을 향상시킵니다.

8.3.3.3 초경 표면 코팅의 미시적 분석 및 검증

주사전자현미경(SEM, 분해능 $< 0.1 \mu m \pm 0.01 \mu m$) 관찰 결과 TiN 및 Al_2O_3 코팅은 표면이 매끄럽고 두께가 균일($5-20 \mu m \pm 0.1 \mu m$) 했으며, 뚜렷한 벗겨짐이나 균열은 없었지만, 코팅되지 않은 샘플 표면에는 산화 반점(직경 $\sim 0.4 \mu m \pm 0.01 \mu m$)이 나타났습니다. X선 회절(XRD) 분석은 TiN의 입방 결정 구조($a = 4.24 \text{ \AA} \pm 0.01 \text{ \AA}$, $2\theta \approx 36.7^\circ, 42.6^\circ$)와 Al_2O_3 의 육방 구조($a = 4.76 \text{ \AA} \pm 0.01 \text{ \AA}$, $c = 12.99 \text{ \AA} \pm 0.01 \text{ \AA}$, $2\theta \approx 35.1^\circ, 43.3^\circ$)를 확인했으며, 피크 강도는 높은 결정성을 나타냅니다. 에너지 분산 분광법(EDS)은 코팅의 Ti 또는 Al 함량이 $> 95\% \pm 1\%$ 이고 계면에서 WC/Ni와 잘 통합되어 있음을 보여줍니다(확산층 두께 $\sim 0.1 \mu m \pm 0.05 \mu m$). X선 광전자 분광법(XPS)은 Ti 2p 피크(약 $455 eV \pm 0.1 eV$) 또는 Al 2p 피크($74 eV \pm 0.1 eV$)를 검출하는데, 이는 O 1s 피크($530 eV \pm 0.1 eV$)와 일치하여 산화물 층이 형성되었음을 확인합니다.

8.3.3.4 초경합금 표면 코팅에 영향을 미치는 요인 분석

표면 코팅 보호 효과는 여러 요인에 영향을 받으며 정밀하게 제어해야 합니다.

(1) 코팅 두께

두께는 $5-10 \mu m \pm 0.1 \mu m$ 입니다. $i_{corr} < 8 \times 10^{-7} A/cm^2 \pm 10^{-8} A/cm^2$ 이고 중량 감소 $< 0.04 mg/cm^2 \pm 0.01 mg/cm^2$ 입니다. 두께가 $20 \mu m \pm 0.1 \mu m$ 를 초과하면 내부 응력이 증가하고($> 500 MPa \pm 50 MPa$), 박리 위험이 $10\% \pm 2\%$ 증가하고 i_{corr} 이 $9 \times 10^{-7} A/cm^2 \pm 10^{-8} A/cm^2$ 로 증가합니다.

(2) 코팅 종류

TiN 코팅은 $800^\circ C \pm 10^\circ C$ 에서 좋은 성능을 보이거나(무게 증가 $< 0.2 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$), $900^\circ C \pm 10^\circ C$ 이상에서는 산화가 증가합니다(무게 증가 $> 0.3 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$). Al_2O_3 코팅은 $1000^\circ C \pm 10^\circ C$ 에서 안정적이지만(무게 증가 $< 0.15 mg/cm^2 \pm 0.05 mg/cm^2$), 내마모성은 TiN보다 약간 낮습니다(경도가 $5\% \pm 1\%$ 감소).

(3) 증착 온도

PVD $400^\circ C \pm 10^\circ C$ TiN 코팅 접착력($> 50 N/mm^2 \pm 5 N/mm^2$)을 보장하고, $> 500^\circ C \pm 10^\circ C$ 에서는 열응력 균열(폭 $\sim 0.1 \mu m \pm 0.01 \mu m$)이 발생합니다. CVD $1000^\circ C \pm 10^\circ C$ 는 Al_2O_3 에 적합하지만, 기지 연화(경도 감소 $10\% \pm 2\%$)를 최적화해야 합니다.

(4) 환경

TiN 코팅의 용해율은 $15\% \pm 3\%$ 증가합니다 ($i_{corr} \sim 9 \times 10^{-7} A/cm^2 \pm 10^{-8}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

A/cm²) . Al₂O₃는 안정적입니다 (i_{corr} < 8×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²) . NaCl > 5% ± 0.1% 염수 분무에서는 피팅 면적이 10% ± 2% 증가합니다(0.01 mm² ± 0.001 mm² 에서 0.011 mm² ± 0.001 mm² 로) .

(5) 표면 거칠기

Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm ± 5 N/mm² 일 때 높은 코팅 접착력(> 60 N/mm²) 을 가지면 i_{corr} 이 낮습니다. Ra > 0.1 μm ± 0.01 μm 일 때 결함이 증가하면 i_{corr} 이 7% ± 2% 증가합니다(8.6×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²) .

Al₂O₃ (20) 로 코팅된 WC-10Ni 샘플 μm ± 0.1 μm , CVD 1050° C ± 10° C)는 큰 내부 응력, 15% ± 2%의 박리율, 그리고 0.06 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²의 중량 감소율을 보입니다 . 최적화 된 TiN 코팅 (10 μm ± 0.1 μm , PVD 400° C ± 10° C, Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm) 의 중량 감소율은 0.03 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² 에 불과합니다 . i_{corr} < 8×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm² , 내식성이 약 57% ± 5% 향상되었습니다.

시멘트 카바이드 표면 코팅 보호를 위한 준비 공정 최적화

무게 감량 < 0.04 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² , i_{corr} < 8×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm² 를 달성 하려면 표면 코팅 공정을 정밀하게 제어해야 합니다. 권장 전략은 다음과 같습니다.

(1) 기관 전처리

WC-10Ni 의 표면조도(Ra)는 연마를 통해 0.05 μm ± 0.01 μm 로 조절하였으며, 초음파 세척(40kHz ± 1kHz, 10min ± 1min)을 통해 오염물질을 제거(< 0.1% ± 0.02%)하고 코팅 접착력을 향상(> 60N/mm²) 시켰다 . ± 5N/mm²) .

(2) 코팅 선택 및 두께

TiN (두께 5-10 μm ± 0.1 μm) 또는 Al₂O₃ (두께 10-15 μm ± 0.1 μm) 를 선택합니다 . TiN 은 PVD (400 ° C ± 10° C, 바이어스 전압 -100 V ± 10 V, 증착 속도 0.5 μm / h ± 0.1 μm / h)를 사용하고, Al₂O₃는 CVD(1000 ° C ± 10° C, 압력 10 kPa ± 1 kPa, 증착 속도 0.3 μm / h ± 0.1 μm / h)를 사용하여 과도한 두께(> 20 μm ± 0.1 μm) 로 인한 내부 응력을 방지 합니다 .

(3) 증착 공정 최적화

PVD 에서는 TiN 상의 순도(> 98% ± 1%)를 보장하기 위해 Ar /N₂ 유량비(1:1 ± 0.1)를 조절합니다 . CVD 에서는 Al₂O₃ 의 밀도를 향상시키고 (기공률 < 0.05% ± 0.01%) 산소 확산을 줄이기 위해 H₂(5% ± 0.5%)를 첨가합니다 .

(4) 후처리

저온 어닐링(500° C ± 10° C, 2 시간 ± 0.1 시간)을 통해 잔류응력(< 200 MPa ± 20 MPa)을 해소하고 코팅과 기질 사이의 접합력을 강화합니다(계면 전단 강도 > 50 N/mm²) . ± 5 N/mm²) .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) 다층코팅

TiN ($5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) + Al_2O_3 (10) 의 이중층 구조를 결합한 $\mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ TiN 은 내마모성 을 제공합니다 . Al_2O_3 는 산화 저항성을 향상시키고, i_{corr} 은 $7 \times 10^{-7} \text{A} / \text{cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A} / \text{cm}^2$ 로 낮아지고 , 중량 감소율은 $< 0.03 \text{mg} / \text{cm}^2 \pm 0.01 \text{mg} / \text{cm}^2$ 입니다 .

(6) 표면 마무리

이온빔 연마(에너지 $500 \text{eV} \pm 50 \text{eV}$)를 사용하여 Ra 를 $0.03 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 최적화하고 , 미세 균열 을 줄이고 , 피팅 면적을 $10\% \pm 2\%$ ($0.011 \text{mm}^2 \pm 0.001 \text{mm}^2$ 에서 $0.0099 \text{mm}^2 \pm 0.001 \text{mm}^2$ 로) 줄였습니다 .

이러한 공정은 경도 ($> \text{HV } 1800 \pm 30$)와 인성 ($K_{1c} > 12 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 을 유지하면서 접착력이 $60 \text{N} / \text{mm}^2 \pm 5 \text{N} / \text{mm}^2$ 이상인 균일한 코팅을 보장합니다 .

8.3.3.7 초경합금 표면 코팅 엔지니어링 사례 및 성능 비교

WC-10Ni-TiN($10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)과 코팅되지 않은 WC-10Ni 를 예로 들면, $1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 에서 100 시간 ± 10 시간 동안 산화시킨 후 TiN 코팅 샘플은 $0.15 \text{mg} / \text{cm}^2 \pm 0.05 \text{mg} / \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{A} / \text{cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A} / \text{cm}^2$ 를 얻었고, 코팅되지 않은 $\pm 0.05 \text{mg} / \text{cm}^2$ 의 $0.5 \text{mg} / \text{cm}^2$ 및 $1.1 \times 10^{-6} \text{A} / \text{cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A} / \text{cm}^2$ 과 비교했으며 산화 저항성이 $70\% \pm 5\%$ 향상되었습니다. 염수 분무 시험($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$, $2000\text{h} \pm 100\text{h}$)에서 중량 감소율은 $0.03 \text{mg} / \text{cm}^2 \pm 0.01 \text{mg} / \text{cm}^2$, 피팅 깊이 $< 1.5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 감소하였고 , 코팅되지 않은 $\pm 0.01 \text{mg} / \text{cm}^2$ 및 $3.5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 의 경우 $0.07 \text{mg} / \text{cm}^2$ 보다 우수했습니다 . 항공 터빈 블레이드에서 TiN 코팅 샘플의 사용 수명은 > 7000 시간 ± 500 시간으로 코팅되지 않은 5000 시간 ± 500 시간보다 $40\% \pm 5\%$ 길었으며, 열 균열 파괴율은 약 $35\% \pm 5\%$ 감소했습니다.

8.3.3.8 시멘트 카바이드 표면 코팅 의 적용 확장 및 제한

표면 코팅은 시멘트 카바이드가 고온 산화(예: $1100^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$) 및 부식성 환경에서 우수한 성능을 발휘하도록 하며, 가스터빈 노즐(수명 $> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간) 및 심해 드릴 비트(압력 저항 $> 30 \text{MPa} \pm 2 \text{MPa}$)에 적합합니다. 대기 중에서 Al_2O_3 코팅은 보호적(무게 증가 $< 0.2 \text{mg} / \text{cm}^2 \pm 0.05 \text{mg} / \text{cm}^2$)을 유지 하지만 pH $< 1 \pm 0.1$ 인 강산에서 TiN 의 용해 속도가 $20\% \pm 3\%$ 증가하고 Al_2O_3 와 함께 최적화해야 합니다 . 코팅 공정 비용은 비교적 높습니다(기판의 약 2-3 배) . 경제성은 박층 설계($5-10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) 를 통해 제어해야 합니다 .

8.3.3.9 초경 표면 코팅 의 최적화 방향 및 미래 전망

코팅 효과를 개선하기 위해 TiN / Al_2O_3 구배 코팅(두께 $15 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) 을 개발할 수 있으며, i_{corr} 은 $6 \times 10^{-7} \text{A} / \text{cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A} / \text{cm}^2$ 로 감소합니다 . 초고온($> 1200^\circ \text{C}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 10^{\circ} \text{C}$)에서는 ZrO_2 ($5\% \pm 0.5\%$)를 첨가하여 열 안정성을 높였으며, 중량 증가는 $< 0.15\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$, 경도는 $> \text{HV } 1900 \pm 30$ 입니다. 앞으로는 플라즈마 분무(온도 $800^{\circ} \text{C} \pm 10^{\circ} \text{C}$) 또는 나노 코팅(입자 크기 $< 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$)을 사용하여 접착력과 내구성을 개선하고 극한 항공 및 에너지 장비 응용 분야로 확장할 수 있습니다.

표면 코팅(예: $\text{TiN } 5\text{--}10\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{ } 10\text{--}15\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$)은 보호층(두께 $\sim 0.5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$)을 형성하여 중량 손실($< 0.04\text{mg}/\text{cm}^2$)을 크게 줄이고 부식 전류($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$)를 줄이며 산화 저항성을 $60\% \pm 5\%$ 증가시키고 경도($> \text{HV } 1800 \pm 30$)와 인성($K_{1c} > 12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)을 높입니다. 안정적인 성능을 보장하기 위해 전처리 공정(기판 전처리 $R_a < 0.05\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$, PVD/CVD 증착, 저온 어닐링, 다층 설계)을 최적화합니다. 코팅 두께, 종류, 증착 온도, 환경 및 표면 거칠기 계수를 종합적으로 제어해야 합니다. 고온 및 부식성 환경에 적합합니다. 향후 그래디언트 코팅 및 나노 기술을 활용하여 적용 분야를 더욱 확장할 수 있습니다.

8.3.4 초경합금의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화

초경합금의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화 원리 및 기술 개요

공정 변수 최적화는 초경합금의 내식성과 고온 내성을 향상시키는 핵심 수단입니다. 제조 공정에서 온도, 압력, 시간 및 기타 변수를 정밀하게 제어함으로써 Ni 기반 바인더상, Cr_3C_2 첨가제 및 표면 코팅의 시너지 효과를 극대화할 수 있습니다. 권장 최적화 변수에는 소결 온도 $1450^{\circ} \text{C} \pm 10^{\circ} \text{C}$, 압력 $< 10^{-3}\text{Pa} \pm 10^{-4}\text{Pa}$, 볼 밀링 시간 $40\text{시간} \pm 1\text{시간}$, 열간 등방성 가압(HIP) 온도 $1200^{\circ} \text{C} \pm 10^{\circ} \text{C}$ 가 포함됩니다. 이러한 매개변수가 최적화된 후, 시멘트 카바이드의 중량 감소율은 $< 0.04\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 감소하고, 부식 전류(i_{corr})는 $< 8 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$ 로 감소하고, 경도는 $> \text{HV } 1800 \pm 30$, 인성은 $> 12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 유지됩니다. 최적화된 공정은 미세 결함(예: 기공률 $< 0.1\% \pm 0.02\%$) 및 상 편석($< 0.1\% \pm 0.02\%$)을 줄이고, 입계 강도($> 200\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$)를 향상시켜 고온($1000^{\circ} \text{C} \pm 10^{\circ} \text{C}$) 및 부식성 환경(예: $\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$)에서 우수한 성능을 발휘하며, 해양 시추, 항공 터빈, 화학 장비 등에 적합합니다. 또한, 최적화된 공정은 열 사이클링($\Delta T\text{ } 500^{\circ} \text{C} \pm 10^{\circ} \text{C}$)으로 인한 응력 집중($< 300\text{MPa} \pm 50\text{MPa}$)을 줄여 서비스 수명을 연장합니다.

8.3.4.2 초경합금의 내식성 및 성능 메커니즘 분석 공정변수 최적화

공정 매개변수 최적화의 핵심은 미세구조와 상 분포의 균일성에 있습니다. $1450^{\circ} \text{C} \pm 10^{\circ} \text{C}$ 에서 소결하면 Ni 기반 바인더 상이 WC와 균일한 고용체를 형성하고(Ni 분포 편차 $< 0.1\% \pm 0.02\%$), NiO 층 두께는 $10\text{nm} \pm 1\text{nm}$ 에서 안정화되고, i_{corr} 은 $< 10^{-6}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$ 로 감소합니다. 40시간 ± 1 시간 동안 볼 밀링하면 결정립이 미세화되고($0.51\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$), 결정립계 밀도가 $> 10^4\text{mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3\text{mm}^2/\text{cm}^3$ 로 증가하고 부식성 매체의 침투가 감소하며, 중량 감소율은 < 0.04

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mg/cm² ± 0.01 mg/cm²입니다 . HIP 1200° C ± 10° C 는 잔류 기공 (< 0.05% ± 0.01%)을 제거하고, 밀도를 99.7% ± 0.1%에 도달시키고, 내산화성을 향상시킵니다(질량 증가 < 0.25 mg/cm² ± 0.05 mg/cm²) . 고온 산화(1000° C ± 10° C)에서, 최적화된 매개변수는 Cr₃C₂ 의 휘발을 감소시켰고(손실 < 0.05% ± 0.01%), Cr₂O₃ 층 의 두께는 0.1-0.2 μm ± 0.05 μm 로 유지되었으며 , 내산화성이 약 45% ± 5% 향상되었습니다. 열팽창 계수(WC 5.2×10⁻⁶K⁻¹, Ni 13×10⁻⁶K⁻¹) 의 일치로 인해 열 피로 균열 (< 0.03 mm ± 0.01 mm)이 감소하고 장기 안정성이 향상되었습니다.

8.3.4.3 초경합금의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화의 미시적 분석 및 검증

주사 전자 현미경(SEM, 분해능 < 0.1 μm ± 0.01 μm) 관찰 결과, 최적화된 공정 샘플은 균일한 입자(0.51 μm ± 0.01 μm) 와 기공률 < 0.1 % ± 0.02% 를 보인 반면, 최적화되지 않은 샘플(1500° C ± 10° C에서 소결)은 분리 영역(직경 ~0.5 μm ± 0.01 μm)을 보였습니다 . X 선 회절 (XRD) 분석 결과 WC 상(2θ ≈ 35.6° , 48.3°)과 Ni 상(2θ ≈ 44.5°)의 피크 강도가 균일하여 상 분포가 최적화되었음을 확인했습니다. 에너지 분산 분광법(EDS) 분석 결과, 결정립계에서 Ni 와 Cr 함량은 각각 8%-10% ± 0.5%와 0.5%-1% ± 0.1%였으며, 뚜렷한 분리는 관찰되지 않았습니다. X 선 광전자 분광법(XPS) 분석 결과, Ni 2p 피크(854 eV ± 0.1 eV)와 Cr 2p 피크(576.5 eV ± 0.1 eV)가 검출되었으며, 이는 O 1s 피크(530 eV ± 0.1 eV)와 일치하여 NiO 와 Cr₂O₃ 층이 형성되었음을 확인했습니다.

8.3.4.4 초경합금 내식성 및 고온 저항성 공정 매개변수 최적화에 영향을 미치는 요인 분석

프로세스 매개변수 최적화의 효과는 여러 요인의 영향을 받으며 정밀하게 제어해야 합니다.

(1) 소결온도

1450° C ± 10° C에서 Ni 분포 편차는 < 0.1% ± 0.02%이고, i_{corr} 은 < 8×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm² 입니다 . 1500° C ± 10° C 이상에서 Ni 편석이 > 0.5% ± 0.1%이면 i_{corr} 은 15% ± 3%(1.15×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) 증가 하고 중량 감소율은 0.07 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²로 증가합니다 .

(2) 불 밀링 시간

40 시간 ± 1 시간 에서 입자 크기는 0.51 μm ± 0.01 μm 이고 , 중량 감소율은 < 0.04mg/cm² ± 0.01mg/cm²입니다 . 30 시간 ± 1 시간 미만에서는 입자가 거칠어지고(> 0.7 μm ± 0.01 μm) 중량 감소율은 10% ± 2% 증가합니다(0.044mg/cm² ± 0.01mg/cm²) .

(3) 압력

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

진공도 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, 산소 함량 $< 0.01\% \pm 0.001\%$, 질량 증가 $< 0.25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 일 때 . 압력이 $> 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ 일 때 산화 증량 증가는 $20\% \pm 3\%$ ($0.3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 까지) 입니다 .

(4) HIP 온도

$1200^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ 에서 밀도는 $99.7\% \pm 0.1\%$ 이고, 공식 깊이는 $< 2 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 입니다 . $1300^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ 이상에서는 매트릭스가 연화되고(경도가 $5\% \pm 1\%$ 감소) i_{corr} 은 $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 로 증가합니다 .

(5) 주변 습도

습도가 $50\% \pm 5\%$ 를 초과하면 표면 산화가 가속화되고 i_{corr} 이 $10\% \pm 2\%$ 증가합니다($8.8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$) . 이는 코팅 최적화와 결합해야 합니다.

예를 들어, WC-10Ni 샘플은 $1500^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ 및 $10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$ 에서 소결되었으며, 증량 손실은 $0.08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 였습니다 . i_{corr} 은 $1.2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 에 도달합니다 . 최적화된 공정 ($1450^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$, $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, HIP $1200^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$) 의 증량 감소율은 $0.03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 로 감소합니다 . $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, 내식성이 약 $62\% \pm 5\%$ 향상되었습니다.

8.3.4.5 시멘트 카바이드의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화 전략

증량 감소 $< 0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 및 $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 를 달성 하려면 공정 매개변수를 정밀하게 제어해야 합니다. 권장 전략은 다음과 같습니다.

(1) 분말비 및 불밀링

WC(입자 크기 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$), Ni ($8\%-10\% \pm 1\%$) 및 Cr_3C_2 ($0.2\%-0.5\% \pm 0.01\%$) 분말을 선택하여 습식 불 밀링(무수 에탄올 매질, 40 시간 \pm 1 시간, 불-재료 비율 $10:1 \pm 0.5$) 을 수행했습니다. 입자 크기 분포 편차는 $< 0.02 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 였으며 응집 이 감소 했습니다($< 0.1\% \pm 0.02\%$).

(2) 진공소결

온도 $1450^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$, 압력 $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, 유지 시간 1 시간 \pm 0.1 시간 , 밀도 $99.5\% \pm 0.1\%$, 기공률 $< 0.1\% \pm 0.02\%$. $1500^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ 이상에서 발생하는 분리 현상을 방지하십시오.

(3) 열간등방압성형(HIP)

온도 $1200^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$, 압력 $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, 시간 1 시간 \pm 0.1 시간에서 밀도는 $99.7\% \pm 0.1\%$ 로 증가하고, 기공률은 제거($< 0.05\% \pm 0.01\%$) 되었으며, 피팅 깊이는 $< 1.5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 감소했습니다 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

소둔 처리 : 저온소둔처리(500° C ± 10° C, 2 시간 ± 0.1 시간)를 실시하면 응력(< 200 MPa ± 20 MPa)이 해소되고, 결정립계 강도(> 200 MPa ± 20 MPa)가 향상됩니다.

(4) 환경관리

소결 및 HIP 중 습도를 < 10% ± 1%, 산소 함량을 < 0.01% ± 0.001%로 유지하여 표면 산화를 줄입니다(중량 증가 < 0.1 mg/cm²) ± 0.05 mg/cm²) .

(5) 프로세스 모니터링

온라인 온도 모니터링(정확도 ± 5° C)과 압력 센서(정확도 ± 10⁻⁵Pa)를 사용하여 매개변수 편차 < 1%를 보장하고 위상 분포 균일성을 최적화합니다.

(K_{1c} > 12 MPa · m^{1/2} ± 0.5 MPa · m^{1/2}) 을 유지하면서 결정립계 강도가 > 200 MPa ± 20 MPa 인 조밀한 미세 구조를 보장합니다 .

8.3.4.6 초경합금 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화의 엔지니어링 사례 및 성능 비교

최적화된 공정 WC-10Ni-0.2%Cr₃C₂ - TiN (10 μm ± 0.1 μm)과 최적화되지 않은 WC-10Ni 를 예로 들면, 1000° C ± 10° C에서 100 시간 ± 10 시간 동안 산화한 후, 최적화된 샘플은 최적화되지 않은 0.5 mg/ cm² ± 0.05 mg/ cm² 및 1.1×10⁻⁶A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²에 비해 0.15 mg/ cm² ± 0.05 mg/ cm², i_{corr} < 7×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁷ A/ cm²을 얻었고, 산화 저항성이 70% ± 5% 향상되었습니다. 염수 분무 시험(NaCl 5% ± 0.1%, 2000h ± 100h)에서 중량 감소율은 0.02mg/cm² ± 0.01mg/cm² , 피팅 깊이 < 1 μm ± 0.5 μm 로 감소하여 최적화되지 않은 0.07mg/cm² ± 0.01mg/cm² 및 3.5 μm ± 0.5 μm보다 우수합니다 . 항공 터빈 블레이드 에서 최적화 된 샘플의 사용 수명은 > 8000 시간 ± 500 시간으로 최적화되지 않은 5000 시간 ± 500 시간보다 60% ± 5% 길며, 열 균열 파괴율은 약 40% ± 5% 감소합니다.

8.3.4.7 시멘트 카바이드의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화의 적용 확장 및 제한

최적화된 공정을 통해 초경합금은 초고온(> 1100° C ± 10° C) 및 부식성 환경에서 우수한 성능을 발휘하며, 가스터빈 노즐(수명 > 10⁴ 시간 ± 10³ 시간) 및 심해 드릴 비트(내압성 > 30 MPa ± 2 MPa)에 적합합니다. SO₂가 포함된 분위기에서 최적화 된 샘플의 중량 증가는 < 0.2 mg/cm² ± 0.05 mg/cm²이지만 , 최적화를 위해 pH < 1 ± 0.1 강산을 Al₂O₃ 코팅과 결합해야 합니다. 공정 장비 비용이 비교적 높기 때문에 (기존 공정의 약 1.5-2 배) 대량 생산 및 매개변수 표준화를 통해 비용을 절감해야 합니다.

8.3.4.8 초경합금의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화 최적화 방향 및 미래 전망

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

효과를 더욱 개선하기 위해 동적 소결(온도 구배 $50^{\circ}\text{C}/\text{cm} \pm 5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)을 도입하여 i_{corr} 을 $5 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$ 로 줄일 수 있습니다. 초고온($> 1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)에서 HIP 압력은 $300\text{MPa} \pm 10\text{MPa}$ 로 최적화되고 중량 증가는 $< 0.1\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$, 경도 $> \text{HV } 1900 \pm 30$ 입니다. 앞으로 지능형 모니터링 시스템과 나노스케일 분말(입자 크기 $< 0.1\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$)을 사용하면 정확도와 효율성을 개선하고 극한 에너지 및 항공 응용 분야로 확장할 수 있습니다.

공정 매개변수 최적화(소결 $1450^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $< 10^{-3}\text{Pa} \pm 10^{-4}\text{Pa}$, 불 밀링 40시간 ± 1 시간, HIP $1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)를 통해 입자 크기를 미세화($0.51\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$)하고 결함(기공률 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)을 제거하여 중량 손실($< 0.04\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$)을 크게 줄였습니다. $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$, 산화 저항성 $45\% \pm 5\%$ 증가, 경도($> \text{HV } 1800 \pm 30$) 및 인성($K_{1c} > 12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)을 달성했습니다. 소결 온도, 불 밀링 시간, 압력, HIP 온도 및 주변 습도와 같은 요인을 종합적으로 조절해야 합니다. 고온 및 부식성 환경에 적합합니다. 미래에는 동적 공정과 나노 기술을 사용하여 응용 분야를 더욱 확장할 수 있습니다.

8.3.5. 초경합금의 미세조직 제어

8.3.5.1 초경합금의 미세조직 제어 원리 및 기술 개요

초경합금의 내식성과 내열성을 향상시키는 핵심은 미세조직 제어입니다. 결정립 크기, 상 분포, 결함 밀도를 정밀하게 제어함으로써 Ni 기반 결합상, Cr_3C_2 첨가제, 그리고 표면 코팅의 시너지 효과를 최적화합니다. 권장 제어 목표는 결정립 크기 $0.51\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$, Ni 분포 편차 $< 0.1\% \pm 0.02\%$, 기공률 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ 입니다. 제어 후, 초경합금의 중량 감소율은 $< 0.03\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 감소하고, 부식 전류(i_{corr})는 $< 7 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$ 로 감소하고, 경도는 $> \text{HV } 1800 \pm 30$, 인성은 $> 12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 유지됩니다. 미세 구조 최적화로 입계 부식 경로와 열 피로 균열($< 0.02\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$)이 감소하고, 입계 강도($> 200\text{MPa} \pm 20\text{MPa}$)가 향상되어 고온($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) 및 부식성 환경(예: $\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$)에서 우수하며 심해 굴착, 항공 터빈, 화학 파이프라인에 적합합니다. 또한, 최적화된 미세구조는 열 사이클(ΔT $500^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)로 인해 발생하는 응력 집중($< 250\text{MPa} \pm 50\text{MPa}$)을 줄여 서비스 수명을 연장합니다.

8.3.5.2 초경합금 미세조직 조절의 내식성 및 성능 메커니즘 분석

미세 구조 제어의 핵심은 결정립 미세화와 상 균질성에 있습니다. 결정립 크기가 $0.51\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ 일 때 결정립계 밀도는 $> 10^4\text{mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3\text{mm}^2/\text{cm}^3$ 로 증가하여 부식성 매체의 침투를 줄이고 중량 감소율은 $< 0.03\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ 입니다. Ni 분포 편차 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ NiO 층의 균일한 형성을 보장합니다(두께 $\sim 10\text{nm} \pm 1\text{nm}$), i_{corr} 은 $< 7 \times 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\text{A}/\text{cm}^2$ 로 감소합니다. 기공률 $< 0.1\% \pm 0.02\%$ HIP 공정을 통해 잔류 기공을 제거하고 밀도를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

99.7% ± 0.1%로 향상시켜 내산화성을 향상시킵니다(중량 증가 < 0.2 mg/ cm² ± 0.05 mg/ cm²). 1000° C ± 10° C의 산화 환경에서 Cr₃C₂ (0.2 % -0.5% ± 0.01%)는 결정립을 미세화하고 Cr₂O₃ 층(두께 0.1-0.2 μm ± 0.05 μm)을 형성하여 내산화성을 약 50% ± 5% 향상시킵니다. 열팽창계수(WC 5.2×10⁻⁶K⁻¹, Ni 13×10⁻⁶K⁻¹, Cr₃C₂ 10×10⁻⁶K⁻¹)의 매칭으로 열 응력이 감소하고, 열피로균열길이가 < 0.02mm ± 0.01mm로 장기 안정성이 크게 향상됩니다.

8.3.5.3 초경합금의 미세조직 제어 및 미세분석 및 검증

주사 전자 현미경(SEM, 분해능 < 0.1 μm ± 0.01 μm) 관찰 결과, 입자는 균일(0.51 μm ± 0.01 μm)하고 조절 후 기공률은 < 0.1% ± 0.02%인 반면, 조절되지 않은 샘플(입자 > 1 μm ± 0.01 μm)에는 구멍(직경 ~0.3 μm ± 0.01 μm)이 있었습니다. X선 회절(XRD) 분석 결과 WC 상(2θ ≈ 35.6°, 48.3°), Ni 상(2θ ≈ 44.5°) 및 Cr₃C₂ 상(2θ ≈ 39.4°)의 피크 강도가 균일하여 상 분포가 최적화되었음을 확인했습니다. 에너지 분산 분광법(EDS) 분석 결과, 결정립계에서 Ni와 Cr 함량은 각각 8%-10% ± 0.5%와 0.5%-1% ± 0.1%로 분리되지 않은 것으로 나타났습니다. X선 광전자 분광법(XPS) 분석 결과, Ni 2p 피크(854 eV ± 0.1 eV)와 Cr 2p 피크(576.5 eV ± 0.1 eV)가 검출되었으며, 이는 0 1s 피크(530 eV ± 0.1 eV)와 일치하여 NiO와 Cr₂O₃ 층이 형성되었음을 확인했습니다.

8.3.5.4 초경합금의 미세조직에 영향을 미치는 요인 분석

미세구조 조절의 효과는 여러 요인에 의해 영향을 받으며 정확한 조절이 필요합니다.

(1) 입자 크기

0.51 μm ± 0.01 μm, 중량 감소 < 0.03 mg/ cm² ± 0.01 mg/cm², i_{corr} < 7×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm². > 2 μm ± 0.01 μm인 경우 입계 밀도가 감소하고 중량 감소율이 20% ± 5% 증가합니다(0.036 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²). 피팅 깊이는 1.5 μm ± 0.5 μm에서 3 μm ± 0.5 μm로 증가합니다.

(2) Ni 분포

편차가 < 0.1% ± 0.02%일 때 NiO 층은 균일하고 i_{corr}은 낮습니다. 편차가 > 0.5% ± 0.1%일 때 Ni 농축은 i_{corr}을 15% ± 3%(1.05×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) 증가시키고 중량 감소율은 0.05 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²로 증가합니다.

(3) 다공성

< 0.1% ± 0.02%, 밀도 99.7% ± 0.1%, 우수한 산화 저항성(무게 증가 < 0.2 mg/ cm² ± 0.05 mg/cm²). > 0.5% ± 0.02%인 경우, 기공 부식이 가속화되고 i_{corr}이 10% ± 2% 증가합니다(7.7×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²).

(3) 소결온도

1450° C ± 10° C에서는 미세구조가 안정되고 중량 감소율이 낮습니다. 온도가

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1500° C ± 10° C 를 초과하면 결정립 크기가 1 μm ± 0.01 μm 이상으로 증가 하고 i_corr 은 12 % ± 2 % 증가합니다(8.4×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²에 도달) .

(5) 주변 습도

습도 > 50% ± 5%일 경우 표면 산화가 가속화되고 i_corr 이 8% ± 2% 증가합니다(7.6×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²) . 습도 조절이 필요합니다(< 10% ± 1%).

예를 들어, WC-10Ni 샘플은 입자 크기가 2 μm ± 0.01 μm 이고 , 기공률이 0.6% ± 0.02%이며, 염수 분무 시 중량 감소율이 0.07 mg/cm² ± 0.01 mg/cm²입니다 . i_corr 은 1.1×10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²에 도달합니다 . 최적화된 미세구조(0.51 μm ± 0.01 μm , < 0.1% ± 0.02%) 의 중량 감소율은 0.02 mg/ cm² ± 0.01 mg/cm²로 감소합니다 . i_corr < 7×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm² , 내식성이 약 64% ± 5% 향상되었습니다.

8.3.5.5 초경합금 미세구조 제어 전략

중량 감소 < 0.03 mg/cm² ± 0.01 mg/cm² 및 i_corr < 7×10⁻⁷ A/cm² ± 10⁻⁸ A/cm²를 달성 하려면 미세 구조를 정밀하게 제어해야 합니다. 권장 전략은 다음과 같습니다.

(1) 분말선별 및 불밀링

WC(입자 크기 0.5 μm ± 0.01 μm) , Ni(8%-10% ± 1%) 및 Cr₃C₂(0.2%-0.5% ± 0.01%) 나노분말을 선택하여 습식 불 밀링(무수 에탄올 매질, 40 시간 ± 1 시간, 불-재료 비율 10:1 ± 0.5)을 수행했습니다. 입자 크기는 0.51 μm ± 0.01 μm 로 제어되었고 응집은 감소되었습니다(< 0.1% ± 0.02%).

(2) 소결공정

진공 소결(1450° C ± 10° C, 압력 < 10⁻³ Pa ± 10⁻⁴Pa, 유지 시간 1 시간 ± 0.1 시간), Ni 분포 편차 < 0.1% ± 0.02%, 1500° C ± 10° C 이상으로 인한 입자 성장을 방지합니다.

(3) 열간등방압성형(HIP)

온도 1200° C ± 10° C, 압력 200 MPa ± 10 MPa, 시간 1 시간 ± 0.1 시간 , 기공률은 < 0.1% ± 0.02%로 감소, 밀도 99.7% ± 0.1%, 구멍 깊이 < 1 μm ± 0.5 μm .

(4) 위상 분포 최적화

기계적 합금화(MA, 200 rpm ± 10 rpm, 10 h ± 0.5 h)를 사용하여 Ni 및 Cr₃C₂를 균일하게 분산시키고, 분리를 줄이며(< 0.05% ± 0.01%), 결정립계 강도를 향상시켰습니다(> 200 MPa ± 20 MPa).

(5) 환경관리

소결 및 HIP 중 습도를 < 10% ± 1%, 산소 함량을 < 0.01% ± 0.001%로 유지하여

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면 산화를 줄입니다(중량 증가 $< 0.1 \text{ mg/cm}^2$) $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$).

(6) 포스트어닐링

저온 어닐링($500^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$, 2 시간 ± 0.1 시간)은 응력($< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$)을 완화하고 미세 구조를 안정화합니다.

이러한 전략은 미세한 입자, 균일한 상 분포, 입자 경계 강도 $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$, 유지된 경도($> \text{HV } 1800 \pm 30$) 및 인성 ($K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)을 보장합니다.

8.3.5.6 초경합금 미세조직 제어 엔지니어링 사례 및 성능 비교

최적화된 미세구조 WC-10Ni-0.2%Cr₃C₂ - TiN ($10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)과 최적화되지 않은 WC-10Ni를 예로 들면, $1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 에서 100 시간 ± 10 시간 동안 산화한 후, 최적화된 샘플은 최적화되지 않은 $0.5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 및 $1.1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 에 비해 $0.1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 을 얻었고, 산화 저항성이 $80\% \pm 5\%$ 향상되었습니다. 염수 분무 시험(NaCl 5% $\pm 0.1\%$, 2000h ± 100 h)에서 중량 감소율은 $0.01 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$, 피팅 깊이 $< 0.5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 감소하여 최적화되지 않은 $0.07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$ 및 $3.5 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$ 보다 우수합니다. 항공 터빈 블레이드에서 최적화된 샘플의 사용 수명은 > 9000 시간 ± 500 시간으로 최적화되지 않은 5000 시간 ± 500 시간보다 $80\% \pm 5\%$ 더 길며, 열 균열 파괴율은 약 $45\% \pm 5\%$ 감소합니다.

8.3.5.7 시멘트 카바이드 미세조직 제어의 적용 확장 및 한계

미세구조 제어를 통해 초경합금은 초고온($> 1100^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$) 및 부식성 환경에서 우수한 성능을 발휘하며, 가스터빈 노즐(수명 $> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간) 및 심해 드릴 비트(내압성 $> 30 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$)에 적합합니다. SO₂가 포함된 분위기에서 최적화된 샘플의 중량 증가는 $< 0.15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$ 이지만, pH $< 1 \pm 0.1$ 에서는 강산에서 Al₂O₃ 코팅 최적화가 필요합니다. 제어 공정은 높은 장비 정밀도(기존 공정 비용의 약 2배)가 필요하며, 자동화 및 대량 생산을 통해 비용을 절감해야 합니다.

8.3.5.8 초경합금 미세조직 제어 및 최적화의 방향 및 미래 전망

효과를 더욱 향상시키기 위해 플라즈마 소결(SPS, 온도 $1300^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$, 압력 $50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$)을 도입하여 i 를 줄일 수 있습니다. i_{corr} 최대 $4 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 입니다. 초고온($> 1200^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$)에서는 입자 크기가 $0.3 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 최적화되고, 중량 증가는 $< 0.1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.05 \text{ mg/cm}^2$, 경도는 $> \text{HV } 1900 \pm 30$ 입니다. 앞으로 나노스케일 분말(입자 크기 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)과 지능형 미세 감지 기술을 사용하면 제어 정확도를 높이고 극한 에너지 및 항공 분야로 확장할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

미세조직 제어(결정립 크기 $0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, Ni 분포 편차 $< 0.1\% \pm 0.02\%$, 기공률 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)는 결정립 미세화 및 상 분포 최적화($\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$)와 부식 전류($i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$)를 통해 중량 감소율($< 0.03 \text{ mg/cm}^2$)을 크게 감소시키고, 내산화성을 $50\% \pm 5\%$ 증가시키며, 경도($> \text{HV } 1800 \pm 30$) 및 인성($K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)을 향상시킵니다. 결정립 크기, Ni 분포 기공률, 소결 온도 및 주변 습도를 종합적으로 조절해야 합니다. 고온 및 부식성 환경에 적합합니다. 앞으로 플라즈마 공정과 나노기술을 활용하여 응용 분야를 더욱 확장할 수 있습니다.

초경합금의 내식성 및 고온내성 시험 및 평가

8.4.1 초경합금 부식 속도(전기화학적 타펠 곡선)

초경합금 부식 속도의 원리 및 기술 개요

부식 속도는 전기화학적 타펠 곡선(ASTM G59에 따름)을 통해 측정되며, 부식 전류 밀도($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$)를 측정하여 산($\text{pH} < 3 \pm 0.1$), 염수 분무($\text{NaCl } 5\% \pm 0.1\%$), 해양과 같은 부식성 환경에서 초경합금의 내식성을 정량화합니다. 타펠 곡선은 다음 공식을 기반으로 합니다.

$$\eta = b \cdot \log\left(\frac{i}{i_{\text{corr}}}\right)$$

여기서 η 는 과전압(정확도 $\pm 0.01\text{V}$), b 는 Tafel 기울기(약 $0.1\text{V/decade} \pm 0.01\text{V/decade}$), i 는 전류 밀도(정확도 $\pm 10^{-9} \text{ A/cm}^2$)이고 i_{corr} 는 코르 부식 전류 밀도입니다. 낮은 i_{corr} 및 높은 부식 가능성($E_{\text{코르}} > 0.2 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$)는 우수한 내식성을 나타냅니다. 이 시험은 3전극 시스템(작동 전극: WC10Ni와 같은 초경합금, 기준 전극: 포화 칼로멜 전극 SCE, 보조 전극: 백금 전극)을 채택하고, 전해질은 $3.5\% \pm 0.1\% \text{ NaCl}$ 또는 $0.1 \text{ M} \pm 0.01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ 를 포함하며, 고정밀 전기화학 워크스테이션(전위 정확도 $\pm 0.001 \text{ V}$, 전류 정확도 $\pm 10^{-9} \text{ A}$)을 갖추고 있습니다. 예를 들어, NaCl 용액에서 WC10Ni의 i_{corr} 는 약 $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 이고, $E_{\text{코르}}$ 약 $0.1 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$ 로, WC10Co의 $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 및 $-0.3 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$ 보다 훨씬 우수합니다. 이 섹션에서는 타펠 곡선 원리, 시험 방법 및 엔지니어링 사례를 결합하여 초경합금의 부식 속도 평가 방법을 포괄적으로 논의하고, 내식성 최적화를 위한 과학적 근거를 제공합니다.

8.4.1.2 초경합금 부식 속도의 메커니즘 및 분석

i_{corr} 를 정량화하여 반영합니다. 그리고 나 교정. WC10Ni의 $E_{\text{코르}}$ 는 약 $0.1 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$ 이며, 이는 NiO 수동화 층(두께 $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, 밀도 $\sim 6.7 \text{ g/cm}^3$)에 의한 것입니다. $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 이 형성되어 화학적 불활성($K_{\text{sp}} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$)을 통해 H^+ 및 Cl^- 의 확산을 억제하여 WC10Co와 비교하여 i_{corr} 가 약 $50\% \pm 5\%$ 감소합니다. WC10Co는 높은 i_{corr} ($10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$)을 가지며, Co 용해 반응($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$, $\Delta G > 0 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$)으로 인해 부식 피트(깊이 $< 5 \mu\text{m} \pm 0.5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

μm)를 형성합니다. Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$)를 첨가하면 성능이 더욱 최적화됩니다. 고온 반응($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8\text{CO}$)은 Cr_2O_3 층 (두께 $\sim 10\text{nm} \pm 1\text{nm}$) 을 생성하며, 이 층은 NiO 와 시너지 효과를 발휘하여 부식을 감소시킵니다. 추가로 $40\% \pm 5\%$ ($\sim 6 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A/cm}^2$) 만큼 감소합니다. 입자 크기를 $0.5\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 로 최적화하면 Co 또는 Ni 노출 면적($< 10\% \pm 1\%$)이 줄어들고, 부식 저항성이 $20\% \pm 5\%$ 더 감소하며, 내식성이 크게 향상됩니다.

주사전자현미경(SEM, 분해능 $< 0.1\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$) 분석 결과 WC10Ni 부식 피트의 수는 적었고(깊이 $< 3\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$), WC10Co 피트의 깊이는 $5-10\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ 였습니다. X 선 광전자 분광법(XPS) 에서 Ni 2p 피크($854\text{eV} \pm 0.1\text{eV}$)와 Cr 2p 피크($577\text{eV} \pm 0.1\text{eV}$)가 검출되었는데, 이는 O 1s 피크($530\text{eV} \pm 0.1\text{eV}$)와 일치하여 NiO 와 Cr_2O_3 층이 존재함을 확인했습니다. 에너지 분산 분광법(EDS)을 통해 부식 피트의 Co 함량이 감소($< 5\% \pm 0.5\%$)하고 Ni 와 Cr 이 농축($> 10\% \pm 1\%$)된 것으로 나타나 패시베이션 층의 보호 효과를 검증했습니다. $\text{pH} < 2 \pm 0.1$ 또는 $\text{NaCl} > 5\% \pm 0.1\%$ 의 가혹한 환경에서는 i_{corr} 이 $1.3 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 까지 증가할 수 있으며, 표면 코팅(예: TiN) 과 함께 추가로 최적화해야 합니다.

8.4.1.3 초경합금의 부식속도에 영향을 미치는 요인 분석

부식 속도는 여러 요인의 영향을 받으며 종합적으로 최적화해야 합니다.

(1) 결합 단계

Ni 함량이 $10\% \pm 1\%$ 일 때 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 이고, Co 함량이 $> 12\% \pm 1\%$ 일 때 i_{corr} 은 $50\% \pm 5\%$ 증가합니다(최대 $\sim 1.5 \times 10^{-5} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{A/cm}^2$). 이는 Co가 더 쉽게 산화되기 때문입니다.

(2) Cr_3C_2 첨가량

$0.5\% \pm 0.01\%$, i_{corr} 은 $40\% \pm 5\%$ 감소합니다. $> 1\% \pm 0.01\%$ 인 경우 η 상 형성으로 인해 파괴인성 (K_{1c})이 $10\% \pm 2\%$ 감소합니다(최대 $\sim 11 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). i_{corr} 은 약간 증가하여 $7 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A/cm}^2$ 가 됩니다.

(3) 입자 크기

$0.51\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$, i_{corr} 은 낮고 중량 손실은 $< 0.03 \text{mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{mg/cm}^2$ 입니다. $> 2\mu\text{m} \pm 0.01\mu\text{m}$ 인 경우 입계 밀도가 감소하고 i_{corr} 은 $20\% \pm 5\%$ 증가합니다(약 $1.2 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 에 도달). 또한 피팅 깊이가 $4\mu\text{m} \pm 0.5\mu\text{m}$ 로 증가합니다.

(4) 전해질 조건

$\text{pH} < 2 \pm 0.1$ 일 때, i_{corr} 은 $30\% \pm 5\%$ 증가합니다($1.3 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 까지). $\text{NaCl} > 5\% \pm 0.1\%$ 일 때, 구멍 면적은 $20\% \pm 5\%$ 증가합니다(0.01mm^2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

± 0.001mm²에서 0.012mm² ± 0.001mm² 까지) .

(5) 표면 거칠기

Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm , 나 코르 낮은 수준 을 유지합니다. > 0.1 μm ± 0.01 μm 이면 미세 균열이 증가 하고 코르 10% ± 2% 증가합니다(최대 ~1.1×10⁻⁶A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) .

나 코르 pH 1 ± 0.1 H₂SO₄에서 WC12Co 시료의 내식성은 약 10⁻⁴ A/cm² ± 10⁻⁵ A/cm² 인 반면 , WC10Ni (Cr₃ C₂ 첨가 0.5% ± 0.01%, 입자크기 0.5 μm ± 0.01 μm) 의 내식성은 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² 에 불과하여 내식성 이 약 1000 배 ± 10% 향상된다.

8.4.1.4 초경합금의 부식속도 시험방법

내가 보장하기 위해 코르 정확도(±10⁻⁷ A/ cm²) 및 데이터 신뢰성을 위해 다음과 같은 표준화된 테스트 방법이 권장됩니다.

(1) 장비

3 전극 시스템을 사용하였고 고정밀 전기화학 작업 스테이션(전위 정확도 ±0.001V, 전류 정확도 ±10⁻⁹A)을 장착했습니다.

(2) 전해질

3.5% ± 0.1% NaCl 또는 0.1 M ± 0.01 M H₂ SO₄, pH 범위 2-7 ± 0.1, 온도 25° C ± 1° C 를 사용하세요.

(3) 테스트 매개변수

스캔 속도 0.1 mV/s ± 0.01 mV/s, 전위 범위 ±0.25 V vs. E_{corr} , 테스트 시간 30 분 ± 1 분.

(4) 샘플 준비

μm ± 0.01 μm 로 연마 , 노출 영역 1 cm² ± 0.1 cm² , 반복 테스트 ≥ 3 회.

(5) 데이터 분석

i_{corr} (정확도 ±10⁻⁷ A/cm²) 및 E_{corr} (정확도 ±0.02 V)은 Tafel 피팅을 통해 계산되었으며 , 반복성이 > 95% ± 2%로 보장되었습니다.

WC10Ni(Ra < 0.05 μm ± 0.01 μm) 의 i_{corr} 은 약 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm² 이고 E_{corr} 은 약 0.1 V ± 0.02 V입니다. 테스트 결과는 매우 일관성이 있어 방법의 신뢰성이 검증되었습니다.

8.4.1.5 초경합금 부식 속도의 엔지니어링 적용

전기화학적 타펠 곡선 테스트는 시멘트 카바이드의 엔지니어링 응용 분야에 대한 핵심 데이터 지원을 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) 시멘트 카바이드 해양 장비

WC10Ni(입자 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, $\text{Cr}_3 \text{C}_2$ 0.5% $\pm 0.01\%$)는 염수 분무(NaCl 5% $\pm 0.1\%$)에서 i_{corr} 가 약 $10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 이고 중량 감소율이 $0.05 \text{mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{mg/cm}^2$ 이며, 사용 수명은 5년 ± 0.5 년 이상으로 WC10Co의 3년 ± 0.3 년보다 우수하며, 내식성이 약 66% $\pm 5\%$ 향상되어 해상 굴착 유지 관리 비용이 약 40% $\pm 5\%$ 감소합니다.

(2) 경질 합금 화학 밸브

WC8Co($\text{Cr}_3 \text{C}_2$ 0.5% $\pm 0.01\%$ 첨가, $R_a < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)는 0.1 M ± 0.01 MH_2SO_4 에서 약 $10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 의 i_{corr} 을 갖고, 피팅 깊이 $< 2 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$, 사용 수명 > 2 년 ± 0.2 년으로, 최적화되지 않은 WC8Co(수명 ~ 1 년 ± 0.1 년)보다 100% $\pm 5\%$ 더 길어 산성 유체 전달에 대한 요구 사항을 충족합니다.

(3) 경합금 제지 장비

WC10Ni(입자 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, TiN 코팅 $10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)는 황산염 용액 $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 에서 중량 감소 $0.04 \text{mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{mg/cm}^2$, 사용 수명 > 4 년 ± 0.4 년으로, 기존 소재(스테인리스강 등, 사용 수명 ~ 2 년 ± 0.2 년)보다 우수하며, 장비 내구성과 생산 효율을 약 50% $\pm 5\%$ 향상시킵니다.

이러한 사례는 전기화학적 테스트가 부식성 환경에서 시멘트 카바이드의 재료 선택 및 성능 최적화를 효과적으로 안내하여 엔지니어링 응용 분야의 신뢰성과 경제성을 보장함을 보여줍니다.

8.4.1.6 시멘트 카바이드 부식 속도의 적용 확장 및 제한

타펠 곡선 시험은 $\text{pH} < 2 \pm 0.1$ 의 강산이나 $\text{NaCl} > 10\% \pm 0.1\%$ 의 고염도와 같은 극한 부식 환경에서 초경합금의 적용 가능성을 확장합니다. WC10Ni-TiN 코팅 샘플의 i_{corr} 은 $< 8 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A/cm}^2$ 로 유지되고 중량 감소율은 $< 0.05 \text{mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{mg/cm}^2$ 입니다. 그러나 고온($> 1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$) 또는 SO_2 가 포함된 분위기에서는 전극 표면에서 산화 또는 오염이 발생할 수 있으며 i_{corr} 이 15% $\pm 3\%$ 증가할 수 있으므로 고온 산화 시험과 함께 최적화가 필요합니다. 시험장비는 비교적 고가(약 10만~20만 ± 1 만 위안)로 중소기업에게는 제약이 될 수 있으며, 표준화 및 장비 공유를 통해 비용을 절감해야 합니다.

초경합금 부식속도 최적화 방향 및 미래 전망

시험 정확도를 높이기 위해 동적 전기화학 임피던스 분광법(EIS, 주파수 범위 10^{-2} - $10^5 \text{Hz} \pm 10 \text{Hz}$)을 도입할 수 있으며, i_{corr} 정확도를 $\pm 10^{-8} \text{A/cm}^2$ 로 향상시킬 수 있습니다. 초부식성 환경($\text{pH} < 1 \pm 0.1$)에서는 전해질을 최적화(예: 억제제 추가)하여 i_{corr} 을 $5 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A/cm}^2$ 로 줄일 수 있습니다. 앞으로는 인공지능을 이용한 타펠 데이터 분석과 나노스케일 표면 개질($R_a < 0.03 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)을 결합하면 예측 정확도를 높이고 심해 극한 환경 및 신에너지 장비 응용

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

분야로 확장할 수 있습니다.

부식 속도는 Tafel 곡선(ASTM G59) i_{corr} ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) 및 E_{corr} ($> 0.2 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V vs. SCE}$)로 측정되며, 이는 산 및 염수 분무에서 초경합금의 내식성을 반영합니다. NiO 및 Cr_2O_3 부동태화층(두께 $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$)은 i_{corr} 을 약 50%-90% $\pm 5\%$ 감소시키고, $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 의 입자 크기는 성능을 더욱 최적화합니다. 이 시험은 고정밀 3전극 시스템(전위 $\pm 0.001\text{V}$, 전류 $\pm 10^{-9}\text{A}$)을 사용하여 해양(수명 $> 5 \text{ 년} \pm 0.5 \text{ 년}$), 화학($> 2 \text{ 년} \pm 0.2 \text{ 년}$), 제지($> 4 \text{ 년} \pm 0.4 \text{ 년}$) 분야에 대한 데이터 지원을 제공합니다. 결합상, Cr_3C_2 , 입자 크기, 전해질 및 표면 거칠기와 같은 요인을 포괄적으로 조절해야 합니다. 향후 EIS(내식성 강화) 및 나노 개질을 통해 내식성을 더욱 향상시킬 수 있습니다.

8.4.2 초경합금의 고온경도 및 열충격 시험

시멘트 카바이드의 고온 경도 및 열충격 시험의 원리 및 기술 개요

고온 경도($> \text{HV } 1200 \pm 30, 1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$) 및 열충격 저항성(균열 $< 0.05 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$)은 극한 환경(항공 공구 $> 5000 \text{ 시간} \pm 500 \text{ 시간}$, 금형 $> 10^5 \text{ 배} \pm 10^4 \text{ 배}$)에서 초경합금의 안정성을 평가하는 주요 지표이며, 이는 비커스 경도 시험(ASTM E92 에 따름) 및 열충격 시험(ASTM E1876 에 따름)을 통해 정량화됩니다. 이러한 시험은 화학(사용 수명 $> 2 \text{ 년} \pm 0.2 \text{ 년}$), 해양($> 5 \text{ 년} \pm 0.5 \text{ 년}$) 및 항공($> 5000 \text{ 시간} \pm 500 \text{ 시간}$)과 같은 엔지니어링 응용 분야의 요구 사항을 충족하는지 확인하기 위해 초경합금의 고온 저항성에 대한 신뢰할 수 있는 데이터를 제공합니다. 고온에서 Co 상은 연화되고(경도가 $\text{HV} \sim 200 \pm 30$ 으로 떨어짐) 전체 경도가 감소합니다. 열충격 사이클($1000^\circ \text{C} \sim 25^\circ \text{C} \pm 1^\circ \text{C}$)은 열 응력($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$)을 유발하고, 이로 인해 미세 균열이 형성됩니다. 최적화 전략은 Cr_3C_2 (0.5% $\pm 0.01\%$) 및 코팅(예: $\text{TiN } 5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)을 도입하여 결정립계 강도($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$)와 열안정성을 증가시킴으로써 고온 성능을 크게 개선합니다. 시험 장비에는 고온 비커스 경도 시험기(하중 $10 \text{ kg} \pm 0.1 \text{ kg}$, 정확도 ± 30)와 열충격로(온도 제어 정확도 $\pm 1^\circ \text{C}$)가 포함됩니다. 예를 들어, $\text{TiN } (5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m})$ 으로 코팅된 WC10Co 는 $1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 에서 $\text{HV } 1500 \pm 30$ 이상의 경도를 가지며, 500 ± 50 회의 열충격 후 균열 길이는 $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 입니다. 이 섹션에서는 시험 원리, 메커니즘 분석 및 엔지니어링 사례를 결합하여 고온 경도 및 열충격 성능 평가 방법을 포괄적으로 살펴보고 재료 최적화를 위한 과학적 지침을 제공합니다.

8.4.2.2 초경합금의 고온경도 및 열충격 시험의 메커니즘 및 분석

고온 경도는 결합상의 연화에 의해 상당한 영향을 받습니다. $1000^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ 에서 WC10Co 의 Co 상은 격자 슬립(슬립 밴드 폭 $\sim 0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) 으로 인해 연화되고 경도는 $\text{HV } 1000 \pm 30$ 으로 떨어집니다. Cr_3C_2 (0.5% $\pm 0.01\%$)를 첨가하면 Cr 확산(입계 농도 $\sim 5\% \pm 0.5\%$)을 통해 입계 강도($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$)가 향상되고 경도는 약 30% $\pm 5\%$ ($> \text{HV } 1300 \pm 30$) 증가합니다. TiN 코팅(경도 $> \text{HV } 2000 \pm 50$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

녹는점 $2950^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ 은 $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 표면 경도를 $> \text{HV } 1500 \pm 30$ 으로 유지하고, 높은 열 안정성과 낮은 열팽창 계수($\sim 9 \times 10^{-6} \text{K}^{-1} \pm 0.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)를 유지하여 매트릭스의 연화 효과를 줄입니다. 입자 크기는 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 로 최적화되어 Co 노출 면적 ($< 10\% \pm 1\%$)을 더욱 줄이고 경도 손실을 약 $20\% \pm 5\%$ 줄이며 고온 내마모성을 향상시킵니다.

열충격 균열은 열응력에 의해 발생하며, 그 크기는 재료의 열적 물리적 특성과 밀접한 관련이 있습니다. 열응력은 다음 공식으로 추정할 수 있습니다.

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

여기서 E는 영률($\sim 600 \text{GPa} \pm 10 \text{GPa}$)이고, α 는 열팽창 계수($\sim 5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1} \pm 0.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)이고, ΔT 는 온도 차이($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$)이며, 계산된 결과는 약 $300\text{--}500 \text{MPa} \pm 50 \text{MPa}$ 입니다. 균열 전파는 파리의 법칙($da/dN = C \cdot \Delta K^m$)을 따르고, 미세 입자($0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)는 전파 속도를 감소시키고($< 10^{-7} \text{mm/cycle} \pm 10^{-8} \text{mm/cycle}$), TiN 코팅은 균열 성장을 더욱 억제합니다(길이 $< 0.03 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$). 주사 전자 현미경(SEM, 분해능 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) 관찰 결과 균열은 주로 입자 간 균열(폭 $\sim 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$)이었고 TiN 코팅 샘플의 균열은 상당히 감소한 것으로 나타났습니다. X선 광전자 분광법(XPS)에서 Ti 2p 피크($\sim 455 \text{eV} \pm 0.1 \text{eV}$)가 검출되어 TiN의 열화학적 안정성을 확인하고 고온 환경에서의 성능 보증에 대한 미시적 증거를 제공했습니다.

8.4.2.3 초경합금의 고온경도 및 열충격시험에 영향을 미치는 요인 분석

고온 경도와 열충격 저항성은 여러 요인의 영향을 받으며 종합적으로 최적화되어야 합니다.

(1) Cr_3C_2 첨가량

$0.5\% \pm 0.01\%$ 에서 경도 $> \text{HV } 1500 \pm 30$, 열충격 균열 $< 0.03 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$; $> 1\% \pm 0.01\%$ 에서 η 상 형성으로 인해 파괴인성 (K_{1c})이 $10\% \pm 2\%$ ($\sim 11 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 감소하고 열충격 균열이 $0.04 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$ 로 약간 증가했습니다.

(2) 코팅 두께

TiN은 $5\text{--}10 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 일 경우 균열이 적고 박리율이 $< 5\% \pm 1\%$ 이다. $20 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 일 경우 내부 응력이 증가하고($> 600 \text{MPa} \pm 50 \text{MPa}$), 박리율이 $10\% \pm 2\%$ 증가하고 경도가 약 $5\% \pm 1\%$ 감소한다($\text{HV } 1425 \pm 30$).

(3) 입자 크기

$0.51 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 일 경우 경도가 높고 열충격 균열 발생률이 낮습니다. 입자 크기가 $2 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$ 를 초과하면 입계 밀도가 감소하고 열충격 균열 발생률이 $20\% \pm 5\%$ ($0.06 \text{mm} \pm 0.01 \text{mm}$) 증가하며 경도는 $\text{HV } 1100 \pm 30$ 으로 떨어집니다.

(4) 온도차

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\Delta T > 500^{\circ} C \pm 10^{\circ} C$ 일 때 열 응력이 증가하고 균열 길이는 $50\% \pm 5\%$ ($0.075\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$) 증가합니다. $\Delta T < 300^{\circ} C \pm 10^{\circ} C$ 일 때 균열 길이는 $< 0.02\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 입니다.

(5) 열전도도

$> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (예: WC10Ni-TiN)에서는 열응력이 분산되어 균열이 적습니다. 열응력이 $< 50 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (예: 코팅되지 않은 WC10Co)에서는 균열이 $15\% \pm 3\%$ ($0.055 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$) 증가합니다.

예를 들어, 특정 WC12Co(비코팅)의 경도는 $1000^{\circ} C \pm 10^{\circ} C$ 에서 HV 800 ± 30 으로 떨어지고 500 \pm 50 회의 열충격 후 균열은 $0.08 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 에 도달합니다. 반면 WC10Co (TiN $5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$, Cr₃ C₂ $0.5\% \pm 0.01\%$)의 경도는 $> HV 1500 \pm 30$ 을 유지하고 균열은 $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 에 불과하여 성능이 크게 향상되었습니다.

8.4.2.4 초경합금의 고온경도 및 열충격 시험 방법

테스트 정확도와 데이터 일관성을 보장하기 위해 다음과 같은 표준화된 방법이 권장됩니다.

(1) 고온경도 시험

비커스 경도계를 사용하고, 하중은 $10\text{kg} \pm 0.1\text{kg}$, 시험 온도는 $1000^{\circ} C \pm 10^{\circ} C$, 유지 시간은 $15 \text{ 분} \pm 1 \text{ 분}$, 경도 정확도는 ± 30 , 측정 지점은 $\geq 5 \text{ 점} \pm 1 \text{ 점}$ 입니다.

(2) 열충격 시험

$1000^{\circ} C$ 에서 $25^{\circ} C \pm 1^{\circ} C$ 까지의 사이클 온도, 사이클 횟수 $> 500 \text{ 회} \pm 50 \text{ 회}$, 가열 및 냉각 속도가 $10^{\circ} C/s \pm 1^{\circ} C/s$ 이고 온도 제어 정확도가 $\pm 1^{\circ} C$ 인 열충격로를 사용했습니다.

(3) 균열 측정

SEM을 사용하여(분해능 $< 0.1 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$) 통계적 면적은 $> 10 \text{ 개 영역} \pm 1 \text{ 개 영역}$ 이었습니다.

(4) 샘플 준비

표면 거칠기 $Ra < 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, 샘플 크기 $20 \times 20 \times 5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 로 연마하고, 테스트를 3회 이상 반복합니다.

(5) 데이터 분석

경도 평균값을 계산하고(정확도 ± 30) 균열 길이 통계(표준 편차 $< 0.01 \text{ mm}$)를 통해 반복성이 $> 95\% \pm 2\%$ 로 보장됩니다.

열충격, WC10Co (TiN $5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$)의 균열 길이는 $0.03 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm}$ 이고, 경도는 $> HV 1500 \pm 30$ 이었습니다. 시험 결과는 안정적이었으며, 이는 방법의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

신뢰성을 검증했습니다.

8.4.2.5 초경합금 고온경도 및 열충격 시험의 공학적 응용

고온 경도 및 열 충격 시험은 시멘트 카바이드의 엔지니어링 응용 분야에 대한 핵심 성능 데이터를 제공합니다.

(1) 초경 항공공구

WC10Co(TiN $5\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$, Cr₃ C₂ 0.5% $\pm 0.01\%$)는 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 경도가 $> \text{HV} 1500 \pm 30$ 이고, 열충격 균열이 $0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 이며, 절삭 수명이 > 5000 시간 ± 500 시간으로 코팅 되지 않은 WC10Co(수명 ~ 3000 시간 ± 300 시간)보다 약 $66\% \pm 5\%$ 높아 고강도 항공 가공의 요구를 충족하고 열 균열로 인한 고장률을 약 $40\% \pm 5\%$ 감소시킵니다.

(2) 경질합금 고온금형

WC8Co(Cr₃C₂ 0.5% $\pm 0.01\%$)는 $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 경도가 $> \text{HV} 1300 \pm 30$ 이고, 열충격균열이 $< 0.04\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 이며, 수명은 $> 10^5 \text{times} \pm 10^4 \text{times}$ 로 최적화되지 않은 WC8Co(수명 $\sim 6 \times 10^4 \text{times} \pm 5 \times 10^3 \text{times}$)보다 약 $60\% \pm 5\%$ 높아 금형의 내구성과 생산 효율이 향상됩니다.

(3) 시멘트 카바이드 가스터빈 부품

WC10Co(Al₂O₃ $10\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$)는 $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 경도가 $> \text{HV} 1400 \pm 30$ 이고, 열충격균열이 $< 0.03\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 이며, 사용수명이 $> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간으로 코팅되지 않은 샘플(수명 ~ 7000 시간 ± 700 시간)보다 약 $43\% \pm 5\%$ 증가하여 고온 환경에서 가스터빈의 장기적 안정성을 보장합니다.

이러한 사례는 고온 경도 및 열충격 시험이 시멘트 카바이드의 재료 설계 및 적용 최적화를 위한 과학적 근거를 제공하여 엔지니어링 성능을 크게 향상시킨다는 것을 보여줍니다.

8.4.2.6 초경합금의 고온경도 및 열충격시험의 적용범위 및 한계

고온 경도 및 열충격 시험은 초고온($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) 및 열 사이클 환경에서 초경합금의 적용 가능성을 확장합니다. 이러한 환경으로는 가스터빈 노즐(수명 $> 1.5 \times 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간) 및 항공우주 엔진 블레이드 (열충격 $> 10^6$ 배 $\pm 10^4$ 배)가 있습니다. WC10Ni-Al₂O₃ 코팅된 시편은 $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 경도가 $> \text{HV} 1400 \pm 30$ 이고 균열이 $< 0.02\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 우수한 열 안정성을 나타냅니다. 그러나 $\Delta T > 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 또는 SO₂가 포함된 분위기에서는 코팅이 벗겨지거나 산화될 수 있으며, 균열은 $0.05\text{mm} \pm 0.01\text{mm}$ 로 증가할 수 있습니다. 따라서 최적화를 위해 다층 코팅(예: TiN /Al₂O₃) 과 결합해야 합니다. 시험 장비 비용이 상대적으로 높아(약 15만~25만 ± 1 만 위안) 중소기업에 어려움을 줄 수 있습니다. 장비 공유 및 공정 표준화를 통해 비용을 절감해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

초경합금의 고온경도 및 열충격 시험의 최적화 방향 및 미래 전망

성능 향상을 위해 플라즈마 용사 코팅(온도 $800^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, 두께 $10\text{--}15\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$) 을 도입하여 경도를 $\text{HV } 1600 \pm 30$ 이상으로 높이고 열충격 균열 을 $0.01\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ 미만으로 줄일 수 있습니다. 초고온($1200^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 이상)에서는 Cr_3C_2 함량을 $0.7\% \pm 0.01\%$ 로 최적화하고 ZrO_2 ($5\% \pm 0.5\%$)를 첨가하면 경도를 $\text{HV } 1500 \pm 30$ 이상으로 유지하고 균열 길이를 $0.015\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$ 미만으로 유지할 수 있습니다. 앞으로 열응력의 유한요소 시뮬레이션 분석과 나노입자 기술(입자 크기 $< 0.3\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$) 을 결합하면 예측 정확도와 열충격 저항성을 향상시키고 극한 항공 및 에너지 장비 응용 분야로 확장할 수 있습니다.

고온 경도($> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) 및 열충격 저항성(균열 $< 0.05\ \text{mm} \pm 0.01\ \text{mm}$)은 ASTM E92 및 E1876 시험을 통해 정량화되며, 이는 고온 환경에서 초경합금의 안정성을 반영합니다. Cr_3C_2 ($0.5\% \pm 0.01\%$) 및 TiN 코팅($5\text{--}10\ \mu\text{m} \pm 0.1\ \mu\text{m}$) 은 경도를 약 $30\% \pm 5\%$ ($> \text{HV } 1500 \pm 30$)만큼 증가시키고 결정립계 강도($> 200\ \text{MPa} \pm 20\ \text{MPa}$)를 증가시키며, $0.5\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ 의 결정립 크기는 균열 전파를 감소시킵니다($< 10^{-7}\ \text{mm/cycle} \pm 10^{-8}\ \text{mm/cycle}$). 이 시험은 고온 경도 시험기(정확도 ± 30)와 열충격로(온도 제어 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)를 사용하여 항공(수명 $> 5,000$ 시간 ± 500 시간), 금형($> 10^5$ 배 $\pm 10^4$ 배), 가스터빈($> 10^4$ 시간 $\pm 10^3$ 시간)에 대한 데이터 지원을 제공합니다. Cr_3C_2 함량, 코팅 두께, 입자 크기, 온도 차이, 열전도도와 같은 요소들을 종합적으로 제어해야 합니다. 앞으로 플라즈마 코팅과 나노 기술을 통해 성능을 더욱 최적화할 수 있을 것입니다.

참고문헌

- ASTM E9217. (2017). 금속 재료의 비커스 경도 표준 시험 방법. ASTM International.
- ASTM E187615. (2015). 진동의 충격 가진에 의한 동적 영률, 전단 탄성률 및 푸아송 비에 대한 표준 시험 방법. ASTM International.
- ASTM G5997. (2014). 정전위 분극저항 측정을 위한 표준 시험 방법. ASTM International.
- ISO 9227:2017. (2017). 인공 분위기에서의 부식 시험 - 염수 분무 시험. 국제표준화기구(ISO).
- WC 계 초경합금의 내식성에 미치는 영향. *재료화학 및 물리학*, 280, 125789.
- Li, X., & Zhang, Q. (2023). 초경합금의 고온 산화 저항성에 관한 연구. *재료과학기술*, 41 (4), 567575.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부록 :

초경합금 고온금형과 고밀도 텅스텐합금금형 의 비교분석

고온 금형은 열간 단조, 열간 압출, 다이캐스팅, 유리 성형 등의 공정에 사용됩니다. 고온(800~1600° C), 고압(50~200 MPa), 그리고 부식성 환경에서 높은 경도, 내마모성, 그리고 치수 안정성을 유지해야 합니다. 초경합금 고온 금형은 텅스텐 카바이드(WC)를 모재로 사용하며, 높은 경도와 내식성으로 인해 정밀 성형에 널리 사용됩니다. 고밀도 텅스텐 합금 금형은 주로 텅스텐(W)으로 제작되며, 니켈, 철 또는 구리를 바인더로 사용합니다. 고밀도, 고강도, 그리고 고온 변형에 대한 뛰어난 저항성을 갖추고 있어 고하중, 고온 응용 분야에 적합합니다. 두 회사는 항공노즐(고온 침식 저항성), 전해조 전극(부식 저항성), 가스터빈 부품(마모 저항성) 분야에서 공통적인 재료 기술을 보유하고 있지만, 성능과 적용 시나리오는 서로 다른 초점을 두고 있습니다.

다음 표에서는 두 가지의 재료 특성, 제조 공정, 성능, 응용 분야 및 한계를 비교하여 고온 금형 재료 선택을 위한 명확한 기준을 제공하며, 특히 고밀도 텅스텐 합금 금형의 고유한 장점과 응용 분야를 강조합니다.

프로젝트	초경 고온 금형(WC-Co)	고밀도 텅스텐 합금 금형
재료 구성	WC 85~95 중량 %, Co 5~15 중량 %, 선택사항 TiC , Cr ₃ C ₂ 첨가제	W 90~97wt % , Ni/Fe/Cu 3~10%(W-Ni-Fe 또는 W-Ni-Cu)
재료 특성	경도: HV1000 - 1800 밀도: 14 - 15 g/ cm ³ 녹는점: WC 2870° C, Co는 온도 저항을 ~1400° C로 제한합니다. 굽힘 강도: 2000 - 2500 MPa 파괴인성: K _{IC} 10 - 15 MPa·m ^{1/2} 열전도도: 80 - 100 W/ m·K 열팽창 계수: 5 - 7×10 ⁻⁶ /° C	경도: HV300 - 600 밀도: 17 - 19 g/ cm ³ 융점 : W 3422° C, 내열온도 >1600° C 굽힘 강도: 800 - 1500 MPa 파괴인성: K _{IC} 20 - 30 MPa·m ^{1/2} 열전도도: 100 - 150 W/ m·K 열팽창 계수: 4.5 - 6×10 ⁻⁶ /° C
제조 공정	분말야금: 초미립 WC/Co 분말(0.2~ 2 μm) → 냉간정수압가압(CIP) → 진공소결(1350~1450° C) → 정밀가공(다이아몬드 연삭) PVD/CVD 코팅 (TiN , Al ₂ O ₃ , 2 ~ 20 μm) , APS/DGS 열분사(WC-Co, 50 ~ 500 μm) 인터페이스 엔지니어링: 그라디언트 코팅, 이온 주입	분말야금: W/Ni/Fe 분말 → 프레스 또는 사출성형 → 액상소결(1450~1550° C) → 가공 표면개질 : 탄소침투, 질화 또는 Cr/ CrN 코팅(5~ 50 μm) , 열분사(예: WC-Co, 50 ~ 200 μm) 열처리 : 인성 증가를 위한 어닐링(800~1000° C)
성능 이점	높은 내마모성: 경도 HV1000-1800, 코팅(예: TiAlN , Al ₂ O ₃)은 마모를 50~70% 감소시켜 고마찰 조건에 적합합니다. 항공용 티타늄 합금의 열간 단조 시 마모율이 60% 감소합니다. 뛰어난 내식성: 산, 알칼리, 산화 및 용융 금속 부식에 대한 저항성이 뛰어나 부식률을 70%까지	매우 높은 온도 강도: 굽힘 강도는 1600° C 에서 800~1200 MPa 로 유지되고, 크리프 저항성이 뛰어나 중량물 압출에 적합합니다. 높은 인성: 파괴인성 K _{IC} 20 - 30 MPa·m ^{1/2} , 강한 충격 저항성, 충격 균열률 60% 감소. 우수한 열 피로 저항성: 높은 열전도도(100~150 W/ m·

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	<p>감소시킵니다. 유리 성형 금형에서는 용융 유리 부식을 방지하고 사용 수명을 50%까지 연장할 수 있습니다.</p> <p>고온 경도 유지: 1400° C 에서 경도가 10~15% 감소하여 정밀 성형에 적합합니다.</p> <p>치수 안정성: 낮은 열팽창 계수(5 - 7×10⁻⁶/° C), 치수 편차 <0.01 mm, 항공 단조품의 정밀도가 20% 향상됩니다.</p> <p>피로 방지 성능: 그라데이션 코팅은 열 응력을 완화하고 피로 수명을 30% 증가시킵니다.</p>	<p>K) 로 열 균열이 50% 감소하고 피로 수명이 30% 증가합니다.</p> <p>높은 밀도 및 변형 저항성: 밀도 17-19 g/cm³ , 변형률 <0.1%, 고압 성형에 적합함.</p> <p>우수한 가공성: 복잡한 형상을 가공할 수 있으며 제조 주기가 15~20% 단축됩니다.</p>
<p>한정</p>	<p>인성이 낮음(K_IC 10 - 15 MPa·m^{1/2}) , 균열 발생 가능성 높음</p> <p>고밀도(14 - 15 g/cm³) 및 무거움</p> <p>높은 제조 비용(장비 1000~3000 만 위안, 금형 50~50 만 위안)</p> <p>온도 저항은 Co 상(<1400° C)에 의해 제한됩니다.</p>	<p>경도 낮음 (HV 300~600), 내마모성 부족, 표면 강화 필요</p> <p>매우 높은 밀도(17 - 19 g/cm³) 로 무게가 증가합니다.</p> <p>팅스텐 자원비용이 높습니다 (톤당 50 만~80 만 위안)</p> <p>내식성이 약하여 보호 코팅이 필요함</p>
<p>응용 및 사용 프로그램</p>	<p>항공우주: 열간 단조 다이(티타늄 합금, 니켈 기반 합금 단조품, 800~1200° C), 열간 압출 다이(항공우주 구조 부품, 1000~1300° C)</p> <p>자동차 제조: 다이캐스팅 다이(알루미늄 합금, 마그네슘 합금 부품, 600~800° C), 핫 스템핑 다이(고강도 강판, 700~900° C)</p> <p>에너지 산업: 풍력 터빈 기어용 열간 단조 다이(42CrMo 기어 블랭크, 800~1100° C), 원자력 발전 부품용 열간 압출 다이(1000~1200° C)</p> <p>전자산업 : 유리성형 금형(광학유리, 휴대폰 화면, 1000~1300° C), 반도체 패키징 금형(800~1000° C)</p> <p>야금 산업: 비철 금속(구리, 알루미늄 합금, 600~900° C)용 열간 단조 금형</p> <p>케이스: 항공용 티타늄 합금 열간 단조 다이, PVD-TiN 코팅, 수명 40% 연장, 성형 효율 +20%</p>	<p>항공우주: 고온 압출 다이(고온 합금, 티타늄 합금, 1200~1600° C), 열간 단조 다이(대형 항공 부품, 1000~1400° C)</p> <p>에너지 산업: 원자력 부품용 열간 압출 다이(지르코늄 합금 튜브, 1000~1400° C), 풍력 터빈 기어 블랭크용 고강도 열간 단조 다이(800~1200° C)</p> <p>자동차 제조: 고강도 핫 스템핑 다이(초고강도 강철, 900~1100° C)</p> <p>야금 산업: 비철 금속(구리, 알루미늄 합금, 800~1200° C)용 고성능 열간 압출 다이</p> <p>방위산업 : 장갑관통코어 성형다이(1000~1300° C), 고밀도 부품용 열간단조다이</p> <p>사례: 원자력 지르코늄 합금 튜브 열간 압출 다이, CrN 코팅, 내열성 1400° C, 수명 30% 연장</p>
<p>고온 고품광이 효과</p>	<p>내마모성: 코팅(예: Al₂O₃ , TiAlN 은 마모를 50~70% 감소시키고 수명을 5,000~8,000 배까지 연장합니다.</p> <p>항공용 티타늄 합금(1,000° C, 100MPa)의 열간 단조 시, 댐(dam) 발생률이 60% 감소하고 수명이 최대 8,000 배까지 연장되어 기존 금형보다 우수합니다.</p> <p>내식성: 산화 방지, 산, 알칼리 및 용융 금속 부식 방지 기능을 갖추고 있어 부식률을 70% 감소시키고 유지 보수 주기를 30% 연장합니다. 유리 성형(1200° C)에서 용융 유리 부식에 대한 내성이 뛰어나 사용 수명이 50% 증가하며 표면에 눈에 띄는</p>	<p>고온 저항성: 1600° C에서 변형률 <0.1%, 굽힘 강도는 800~1200 MPa 로 유지되며, 수명은 4000~6000 회입니다.</p> <p>원자력 발전용 지르코늄 합금 튜브 압출(1400° C, 150 MPa)에서 수명은 6000 회로, 일반 강철 금형(2000 회)보다 우수합니다.</p> <p>열 피로 저항성: 높은 열전도도(100 - 150 W / m·K) 는 열 균열을 50% 감소시키고 피로 수명을 30% 증가시킵니다. 고강도 열간 스템핑(1100° C)에서 균열 발생률은 12%에서 5%로 감소합니다.</p> <p>내충격성: 인성 K_IC 20 - 30 MPa·m^{1/2} , 충격 균열률</p>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

구멍이 없습니다.	60% 감소. 항공 고온 합금(1200° C, 200 MPa)의 열간 단조 시 금형 균열이 발생하지 않으며, 사용 수명은 5000 회에 달합니다.
고온 내성: 경도는 1400° C 에서 HV900 - 1500 을 유지하며, 변형률은 0.1% 미만입니다. 반도체 패키징 금형(1000° C)에서 고온 안정성을 유지하여 5000 회 연속 작동을 보장합니다.	치수 정확도: 치수 편차 <0.015mm, 열 팽창 변형 <0.08%, 완제품 합격률이 20% 증가했습니다(85%→90%).
피로 저항성: 구배 코팅은 열응력을 완화하고 피로 수명을 30% 증가시키며 열 균열을 50% 감소시킵니다. 자동차용 알루미늄 합금 다이캐스팅(700° C)의 경우 수명이 4,000 배에서 6,000 배로 증가합니다.	성형 효율: 높은 밀도와 변형 저항성으로 가동 중단 시간을 줄이고 효율을 15~20% 향상시킵니다. 내마모성(코팅 필요): CrN 또는 WC-Co 코팅은 마모를 40~50% 줄이고 수명을 20% 증가시킵니다. 철강 코어 성형(1300° C) 시 코팅 금형 수명이 3,000 배에서 4,000 배로 증가합니다.
치수 정확도: 치수 편차 <0.01mm, 열 팽창 변형 <0.05%, 완제품 합격률이 25% 증가했습니다(90%→95%).	
성형 효율성: 경도가 높고 내마모성이 뛰어나 유지관리 비용이 감소하고 효율성이 20~25% 증가합니다.	

예시:

재료 구성: 시멘트 카바이드와 고밀도 텅스텐 합금의 화학적 구성에 대한 개요.

재료 특성: 경도, 밀도, 녹는점, 강도 등의 주요 매개변수를 비교합니다.

제조 공정: 성형, 소결, 표면 개질 등의 공정을 요약한 것입니다.

성능 및 한계: 내마모성, 내열성, 비용 등의 장단점을 분석합니다.

적용 시나리오: 항공우주, 에너지, 자동차, 야금, 방위 및 기타 분야에서의 사용 사례와 사례를 나열하세요.

고온금형효과: 내마모성, 내부식성, 고온저항성, 피로저항성, 치수정밀도, 성형효율 등의 효과를 정량화합니다.

초경합금 고온금형과 고밀도 텅스텐합금금형의 비교분석 및 요약

초경합금 고온 금형과 고밀도 텅스텐 합금 금형은 고온 성형 분야에서 고유한 장점을 가지고 있으며, 다양한 작업 조건과 적용 시나리오에 적합합니다. WC-Co 금형은 높은 경도(HV1000 - 1800)와 뛰어난 내마모성(마모율 50 - 70% 감소)으로 인해 정밀 열간 단조, 다이캐스팅 및 유리 성형에서 탁월한 성능을 발휘합니다. 특히 1400° C 이하의 온도, 높은 정밀도(치수 편차 <0.01mm) 및 내식성이 있는 장면에 적합합니다. PVD/CVD 코팅(예: TiN, Al₂O₃) 및 고에너지 열 분사(예: APS/DGS) 기술은 고온 금형의 효과를 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 항공 티타늄 합금 열간 단조 금형의 수명은 8,000 배에 이르고 효율은 25% 증가합니다. 우수한 내식성(부식률 70% 감소)으로 유리 성형 및 반도체 패키징 공정에서 용융 재료에 의한 침식에 강하고, 유지보수 주기도 30% 연장됩니다. 그러나 WC-Co 금형은 인성이 낮고(K_{IC} 10 - 15 MPa·m^{1/2}), 강한 충격에 의해 균열이 발생하기 쉬우며, 제조 비용이 높아(5만~50만 위안) 대형 금형 적용에 제한이 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

고밀도 텅스텐 합금 다이는 매우 높은 온도 강도(1600° C에서 변형률 <0.1%)와 높은 인성($K_{IC} 20-30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 으로 알려져 있으며, 고하중, 고온 압출 및 열간 단조 시나리오에 적합합니다. 높은 밀도($17-19 \text{ g/cm}^3$)와 변형 방지 특성 덕분에 다이가 고압(150-200 MPa)에서 안정적으로 작동할 수 있습니다. 예를 들어, 핵 지르코늄 합금 튜브의 압출 다이 수명은 최대 6,000 배이고 효율은 20% 증가합니다. 높은 열전도도($100-150 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)는 열 균열을 50% 줄이고 자동차의 고하중 핫 스템핑과 같은 반복 하중 조건에 적합합니다.

그러나 고밀도 텅스텐 합금은 경도가 낮고(HV300~600), 내마모성이 부족하며, 성능 향상을 위해 CrN 또는 WC-Co 코팅이 필요하고, 내식성도 약하여 보호 코팅이 필요합니다. 텅스텐 자원은 희소하며(톤당 50만~80만 위안) 밀도가 매우 높으면 무게와 비용이 증가하여 경량 금형 적용에 제한이 있습니다.

시멘트 카바이드 고온 금형 및 고밀도 텅스텐 합금 금형에 대한 재료 선택 제안

정밀, 소형 금형(항공기 단조품, 유리 금형, 자동차 다이캐스팅 등)

카바이드 다이는 내마모성이 뛰어나고 정밀하며 수명이 길다(5000~8000 회).

고하중, 고온 금형(고온 압출, 원자력 부품, 장갑 관통 코어 성형 등)

고밀도 텅스텐 합금 금형이 더욱 적합하며, 뛰어난 변형 저항성과 높은 인성을 가지고 있습니다.

비용과 삶의 균형

WC-Co 금형은 유지관리 비용이 낮고 고주파 사용에 적합합니다. 고밀도 텅스텐 합금 금형은 가공성이 좋고 무거운 하중에 적합하지만 표면 강화가 필요합니다.

항공기 노즐(고온 내식성 코팅), 전해조 전극(부식 방지 코팅), 가스터빈 구성 요소(내마모성 코팅)의 기술적 요구 사항과 마찬가지로, 두 가지 모두 성능을 최적화하기 위해 표면 개질 및 인터페이스 엔지니어링(예: 그래디언트 코팅, 이온 이식)에 의존합니다.

앞으로 나노입자 WC-Co, 다층 복합코팅, 저온소결공정, 고밀도 텅스텐 합금의 내마모성 코팅 및 적층 제조기술을 개발함으로써 고온금형은 항공, 에너지, 자동차, 야금, 국방 등 분야에서 성능과 경제성을 더욱 향상시켜 효율적이고 지속 가능한 산업 생산을 위한 강력한 지원을 제공할 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

부록 :

초경합금 고온금형과 티타늄지르코늄몰리브덴(TZM) 합금금형의 비교분석

고온 금형은 열간 단조, 열간 압출, 다이캐스팅, 유리 성형 등의 공정에서 극한의 고온(800~1800° C), 고압(50~200MPa) 및 부식성 환경에 노출되므로 우수한 경도, 내마모성, 고온 저항성 및 치수 안정성을 가진 소재가 요구됩니다. 초경 고온 금형(WC-Co)은 높은 경도와 내식성으로 정밀 성형 분야에서 널리 사용되고 있으며, 티타늄 지르코늄-몰리브덴(TZM) 합금 금형은 우수한 고온 강도와 크리프 저항성으로 초고온 및 대형 금형 적용 분야에 적합합니다. 두 합금은 항공 노즐(고온 침식 저항성), 전해조 전극(내식성), 풍력 기어 커터(내마모성) 등 분야에서 공통된 소재 기술을 보유하고 있습니다.

본 논문은 두 소재의 재료 특성, 제조 공정, 성능 이점, 적용 분야, 한계 및 고온 성형 효과를 비교하여 재료 선정에 대한 포괄적인 참고 자료를 제공합니다. 고온 성형 효과에 대한 내용은 내마모성, 내부식성, 고온 저항성, 피로 저항성, 치수 정밀도 및 성형 효율 측면에서 상세한 정량적 데이터와 사례를 포함하도록 확장되었습니다. 적용 분야는 항공우주, 에너지, 자동차, 전자, 야금 및 기타 산업을 포함합니다.

시멘트 초경 고온 금형 및 티타늄 지르코늄 몰리브덴(TZM) 합금 금형 표

프로젝트	초경 고온 금형(WC-Co)	티타늄 지르코늄 몰리브덴(TZM) 합금 몰드
재료 구성	WC 85~95 중량 %, Co 5~15 중량 %, 선택사항 TiC, Cr ₃ C ₂ 첨가제	Mo 99~99.5wt %, Ti 0.4~0.55%, Zr 0.06~0.12%, 미량 C
재료 특성	경도: HV1000 - 1800 밀도: 14 - 15 g/cm ³ 녹는점: WC 2870° C, Co 는 온도 저항을 ~1400° C 로 제한합니다. 굽힘 강도: 2000 - 2500 MPa 파괴인성: K _{IC} 10 - 15 MPa·m ^{1/2} 열전도도: 80 - 100 W/m·K 열팽창 계수: 5 - 7×10 ⁻⁶ /° C	경도: HV250 - 350 밀도: 10.2g/cm ³ 녹는점: ~2620° C, 내열온도 >1600° C 굽힘 강도: 800 - 1200 MPa 파괴인성: K _{IC} 15 - 20 MPa·m ^{1/2} 열전도도: 110 - 140 W/m·K 열팽창 계수: 5.3 - 5.5×10 ⁻⁶ /° C
제조 공정	분말야금: 초미립 WC/Co 분말(0.2~ 2 μm) → 냉간정수압가압(CIP) → 진공소결(1350~1450° C) → 정밀가공(다이아몬드 연삭) PVD/CVD 코팅 (TiN, Al ₂ O ₃ , 2 ~ 20 μm), APS/DGS 열분사(WC-Co, 50 ~ 500 μm) 인터페이스 엔지니어링: 그래디언트 코팅, 이온 주입	분말야금: Mo/Ti/Zr 분말 → 열간등방성형(HIP, 1700~2000° C) → 단조/압연 → CNC 가공 표면 개질 : 산화물 코팅(예: MoSi ₂ , 10 - 50 μm) 또는 질화 열처리 : 인성 증가를 위한 어닐링(1000~1200° C)
성능 이점	높은 내마모성: 경도 HV1000-1800, 코팅(예: TiAlN, Al ₂ O ₃) 은 마모를 50~70% 감소시켜 고마찰 조건(예: 열간 단조, 다이캐스팅)에 적합합니다. 항공용 티타늄 합금의 열간 단조 시 마모율이 60% 감소하고 금형 수명이 8,000 배에 달합니다.	초고온 강도: 굽힘 강도는 1600~1800° C 에서 800~1000 MPa 로 유지되며, 크리프 현상 없이 초고온 압출에 적합합니다. 고온 합금 다이는 1600° C 에서 6000 회 작동하며, 수명은 6000 회입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	<p>뛰어난 내식성: 산, 알칼리, 산화 및 용융 금속 부식에 대한 내성이 뛰어나 부식률을 70% 감소시키고 유지 보수 주기를 30% 연장합니다. 유리 성형 금형에서는 용융 유리 부식에 대한 내성이 뛰어나고 사용 수명이 50% 향상됩니다.</p> <p>고온 경도 유지: 코팅 기술은 1400° C까지의 내열성을 개선하며, 경도는 10~15%만 감소하므로 정밀 성형(예: 광학 유리, 1000~1300° C)에 적합합니다.</p> <p>치수 안정성: 낮은 열팽창 계수($5-7 \times 10^{-6} / ^\circ C$), 치수 편차 <0.01 mm, 고정밀 성형을 보장하고 항공기 단조품의 정확도를 20% 향상시킵니다.</p> <p>피로 저항성: 계면 공학(예: 경사 코팅)은 열 응력을 완화하고 피로 수명을 30% 증가시켜 주기적 하중 조건(예: 자동차 다이캐스팅)에 적합합니다.</p>	<p>뛰어난 열 피로 저항성: 높은 열전도도(110 - 140 W/ m • K) 로 빠른 방열을 가능하게 하여 열 균열을 60% 감소시키고 피로 수명을 25% 증가시킵니다. 열간 등압 성형 금형에서 뛰어난 열 충격 저항성을 발휘합니다.</p> <p>높은 인성: 파괴인성 $K_{IC} 15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 강한 충격 저항성, 고응력 조건(고온 스템핑 등)에 적합, 충격 균열율이 50% 감소.</p> <p>우수한 가공성: 복잡한 형상의 CNC 가공이 가능하며, 금형 제작 주기가 20% 단축되어 대형 금형(원자력 압출 금형 등)에 적합합니다.</p> <p>치수 안정성: 열팽창 계수 $5.3-5.5 \times 10^{-6} / ^\circ C$, 치수 편차 <0.02 mm, 대형 고온 성형(예: 세라믹 금형)에 적합합니다.</p>
한정	<p>인성이 낮음($K_{IC} 10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), 균열 발생 가능성 높음</p> <p>고밀도($14-15 \text{ g/cm}^3$) 및 무거움</p> <p>높은 제조 비용(장비 1000~3000 만 위안, 금형 50~50 만 위안)</p> <p>온도 저항은 Co 상(<1400° C)에 의해 제한됩니다.</p>	<p>경도가 낮음(HV250~350), 내마모성 부족</p> <p>산화되기 쉬움(>600° C), 보호 코팅 필요</p> <p>몰리브덴 자원의 높은 비용 (톤당 20 만~30 만 위안)</p> <p>저온 취성, 고온 작동 필요</p>
응용 프로그램 및 사용	<p>항공우주: 열간 단조 다이(티타늄 합금, 니켈 기반 합금 단조품, 800~1200° C), 열간 압출 다이(항공우주 구조 부품, 1000~1300° C)</p> <p>자동차 제조: 다이캐스팅 다이(알루미늄 합금, 마그네슘 합금 부품, 600~800° C), 핫 스템핑 다이(고강도 강판, 700~900° C)</p> <p>에너지 산업: 풍력 터빈 기어용 열간 단조 다이(42CrMo 기어 블랭크, 800~1100° C), 원자력 발전 부품용 열간 압출 다이(1000~1200° C)</p> <p>전자산업 : 유리성형 금형(광학유리, 휴대폰 화면, 1000~1300° C), 반도체 패키징 금형(800~1000° C)</p> <p>야금 산업: 비철 금속(구리, 알루미늄 합금, 600~900° C)용 열간 단조 금형</p> <p>케이스: 항공용 티타늄 합금 열간 단조 다이, PVD- TiN 코팅, 수명 40% 연장, 성형 효율 +20%</p>	<p>항공우주: 고온 압출 다이(고온 합금, 티타늄 합금, 1200~1600° C), 열간 등방성 성형 다이(항공기 터빈 디스크, 1400~1800° C)</p> <p>에너지 산업: 고온로(진공소결로, 열처리로, >1600° C), 원자력 고온 압출 다이(지르코늄 합금 튜브, 1200 - 1500° C)</p> <p>자동차 제조: 고온 핫 스템핑 다이(초고강도 강철, 900~1100° C)</p> <p>전자 산업: 고온 세라믹 성형 다이 (지르코니아, 질화규소, 1400~1600° C)</p> <p>야금 산업: 고온 합금 연속 주조 금형(니켈 기반 합금, 1300~1600° C)</p> <p>케이스 : 고온합금 압출다이, MoSi₂ 코팅, 내열온도 1600° C, 수명 30% 연장, 성형효율 +15%</p>
고온 고품광이 효과	<p>내마모성: 코팅(예: Al₂O₃, TiAlN)은 마모를 50~70% 감소시키고 금형 수명을 5,000~8,000 배 연장합니다.</p> <p>항공용 티타늄 합금(1,000° C, 100 MPa)의 열간 단조 시 마모율은 60% 감소하고 수명은 최대 8,000 배까지 연장되는데, 이는 기존 금형(4,000 배)보다 우수합니다.</p> <p>내식성: 산화 방지, 산, 알칼리 및 용융 금속 부식</p>	<p>고온 내성: 1600~1800° C 에서 크리프 없음, 800~1000 MPa 의 굽힘 강도 유지, 4000~6000 회 금형 수명. 고온 합금 압출(1600° C, 150 MPa)에서 변형률 <0.2%, 최대 6000 회 수명, 일반 몰리브덴 금형(3000 회)보다 우수.</p> <p>열 피로 저항성: 높은 열전도도(110 - 140 W/ m •</p>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<p>방지 기능을 갖추고 있어 부식률을 70% 감소시키고 유지 보수 주기를 30% 연장합니다. 유리 성형(1200° C, 용융 유리) 시 내식성 수명이 50% 증가하고 금형 표면에 눈에 띄는 구멍이 발생하지 않습니다.</p> <p>고온 내구성: 1400° C 에서 경도가 HV900~1500 을 유지하고 변형률이 0.1% 미만으로 정밀 성형에 적합합니다. 반도체 패키징 금형(1000° C)에서 고온 안정성을 유지하여 5000 회 연속 작동이 가능합니다. 피로 저항성: 구배 코팅은 열응력을 완화하고 피로 수명을 30% 증가시키며 열 균열을 50% 감소시킵니다.</p> <p>자동차용 알루미늄 합금 다이캐스팅(700° C, 반복 하중)에서 금형 수명이 4,000 배에서 6,000 배로 증가합니다.</p> <p>치수 정확도: 치수 편차 <0.01mm, 열팽창 변형 <0.05%로 고정밀 성형에 적합합니다. 광학 유리 성형(1300° C)에서 완제품 합격률이 25%(90%→95%) 증가했습니다.</p> <p>성형 효율: 높은 경도와 내마모성으로 금형 유지 보수가 줄어들고 생산 효율이 20~25% 향상됩니다. 풍력 터빈 기어(1100° C)의 열간 단조 시, 단일 시프트 생산량이 100 개에서 125 개로 증가했습니다.</p>	<p>K) 는 열 균열을 60% 감소시키고 피로 수명을 25% 증가시킵니다. 열간 등방성 성형(1700° C, 반복 가열)에서 열 균열 발생률은 10%에서 3%로 감소합니다.</p> <p>내충격성: 인성 $K_{IC} 15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 충격 균열률 50% 감소. 자동차용 초고강도강(1000° C, 200 MPa)의 핫 스탬핑 가공 시, 금형 균열이 발생하지 않으며, 사용 수명은 5000 회에 달합니다.</p> <p>치수 정확도: 치수 편차 <0.02mm, 열팽창 변형 <0.1%로 대형 성형에 적합합니다. 세라믹 성형(1600° C, 지르코니아)에서 완제품 합격률이 20% 증가했습니다(85%→90%).</p> <p>성형 효율: 높은 열전도도와 크리프 저항성은 가동 중단 시간을 줄이고 생산 효율을 15~20% 향상시킵니다. 1400° C 의 핵 지르코늄 합금 튜브 압출 공정에서 단일 교대 생산량이 80 개에서 95 개로 증가했습니다.</p> <p>내산화성(코팅 필요): MoSi_2 코팅은 산화에 강하며, 600~1600° C 에서 산화 속도가 80% 감소합니다. 고온로(1700° C)에서 코팅된 금형의 수명은 2000 배에서 4000 배로 증가합니다.</p>
---	---

예시:

재료 구성: WC-Co 및 TZM 의 화학 구성 개요.

재료 특성: 경도, 밀도, 녹는점, 강도 등의 주요 매개변수를 비교합니다.

제조 공정: 성형, 소결, 표면 개질 등의 공정을 요약한 것입니다.

성능상의 장점: 내마모성, 내부식성, 고온 저항성, 피로 저항성, 치수 안정성 등에 대한 자세한 설명을 보관합니다.

적용 분야 및 용도: 항공우주, 에너지, 자동차, 전자, 야금 및 기타 분야의 특정 용도를 포괄합니다.

고온금형효과: 내마모성, 내부식성, 고온저항성, 피로저항성, 치수정밀도, 성형효율 등의 세부적인 정량적 데이터와 사례를 추가하였습니다.

초경합금 고온금형과 티타늄지르코늄몰리브덴(TZM) 합금금형의 비교분석

초경 고온 금형(WC-Co) 및 티타늄-지르코늄-몰리브덴(TZM) 합금 금형은 고온 성형 분야에서 독보적인 장점을 보여주었으며, 항공우주, 에너지, 자동차, 전자, 야금 등 여러 산업의 엄격한 요구 사항을 충족합니다. WC-Co 금형은 높은 경도(HV1000 - 1800)와 뛰어난 내마모성(마모율 50 - 70% 감소)으로 정밀 성형에서 탁월한 성능을 발휘하며, 1400° C 이하의 온도, 높은 정밀도(치수 편차 <0.01mm) 및 내식성의 작업 조건에 적합합니다. PVD/CVD 코팅(예: TiAlN , Al_2O_3) 및 고에너지 열 분사(예: APS/DGS) 기술은 고온 금형의 효과를 크게 향상시킵니다. 예를 들어, 항공용 티타늄

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

합금 열간 단조 금형의 1000° C 수명은 8000 배로, 기존 금형(4000 배)보다 우수하며, 생산 효율이 25% 향상됩니다.

우수한 내식성(부식률 70% 감소)과 내피로성(피로 수명 30% 증가) 덕분에 유리 성형(용융 유리 부식 저항성, 수명 50% 증가) 및 자동차 다이캐스팅(수명 4,000 배에서 6,000 배로 증가)에 적합합니다. 그러나 WC-Co 금형은 인성이 낮고(K_{IC} 10 - 15 $MPa \cdot m^{1/2}$), 강한 충격 에 균열이 발생하기 쉬우며, 밀도가 높고(14 - 15 g/cm^3) 제조 비용이 5 만~50 만 위안(약 50,000~50 만 위안)으로 인해 대형 금형 적용에 제한이 있습니다.

TZM 합금 금형은 매우 높은 온도 강도(크립 없이 1600~1800° C)와 열 피로 저항성(열 균열 60% 감소)으로 알려져 있으며 초고온 및 대형 금형 시나리오(고온 압출 및 열간 등방성 성형)에 적합합니다. 높은 열전도도(110~140 $W/m \cdot K$)와 인성(K_{IC} 15~20 $MPa \cdot m^{1/2}$)은 열 충격과 기계적 응력에 효과적으로 저항합니다. 예를 들어, 1600° C에서 고온 합금 압출 금형의 수명은 6,000 배이고 효율은 15% 증가합니다. TZM 은 원자력 지르코늄 합금 튜브 압출(산출량 +15%) 및 세라믹 성형(적격률 +20%)에서 우수한 고온 금형 효과를 입증했습니다. MoSi₂ 코팅은 산화 저항성을 더욱 향상시킵니다(산화율 80% 감소). 그러나 TZM 은 경도가 낮고(HV250~350), 내마모성이 부족하며, 보호 코팅이 필요하고, 600° C 이상에서는 쉽게 산화되어 비용이 증가합니다. 폴리브덴 자원 부족(톤당 20 만~30 만 위안) 또한 금형 가격 상승을 초래했습니다.

시멘트 카바이드 고온 금형과 티타늄 지르코늄 폴리브덴(TZM) 합금 금형 사이

정밀, 소형 금형(항공기 단조품, 유리 금형, 자동차 다이캐스팅 등)

WC-Co 금형은 뛰어난 내마모성, 정밀성, 내부식성, 긴 사용 수명(5000~8000 회)을 갖추고 있어 우수합니다.

초고온, 대형 금형(고온 압출, 열간 정수압 성형, 세라믹 성형 등)

TZM 금형은 고온 내구성과 열 피로 저항성이 뛰어나 복잡한 형상에 적합합니다.

비용과 삶의 균형

WC-Co 금형은 고주파 사용에 적합하고 유지 보수 비용이 낮습니다. TZM 금형은 가공성이 우수하지만 산화 방지 처리가 필요합니다. 항공 노즐(고온 내식성 코팅), 전해조 전극(내식성 코팅), 풍력 기어 커터(내마모성 코팅)의 기술적 요구 사항과 마찬가지로, 두 금형 모두 성능 최적화를 위해 표면 개질 및 계면 공학(예: 구배 코팅 및 이온 주입)을 활용합니다.

앞으로 나노입자 WC-Co, 다층 복합코팅, 저온소결 공정, 그리고 TZM의 산화방지 코팅 및 적층 제조 기술 등의 개발을 통해 고온 금형은 많은 분야에서 성능과 경제성을 더욱 향상시켜 효율적이고 지속 가능한 산업 생산을 위한 강력한 지원을 제공할 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

부록 :

시멘트 카바이드 가스터빈 구성품 개요

1. 시멘트 카바이드 가스터빈 부품의 배경 및 중요성

가스터빈은 항공우주, 발전 등 분야의 핵심 동력 장비입니다. 블레이드, 노즐, 연소실, 쉴 등 핵심 부품은 고온(1000~1600°C), 고압(10~30 MPa), 고속 회전(10,000~50,000 rpm) 및 부식성 환경에서 안정적으로 작동해야 합니다. 초경합금 가스터빈 부품은 텅스텐 카바이드 기반의 초경합금(WC-Co)을 주재료로 합니다. 높은 경도, 내마모성, 고온 내성 및 내부식성을 갖춘 이 소재는 가스터빈의 내마모성, 내부식성 코팅 또는 고부하 부품에 이상적인 선택입니다. 이러한 부품은 내구성과 효율을 향상시켜 가스터빈의 수명(10,000~30,000 시간)을 연장하고 연소 효율(최대 40~60%)을 향상시킵니다.

가스터빈에서 초경합금(WC-Co)의 적용은 주로 표면 코팅 및 특정 내마모성 부품에 집중되어 있으며, 이는 항공 노즐(고온 내식성), 전해조 전극(내식성), 풍력 기어 커터(내마모성) 등의 소재 기술과 공통점을 가지고 있습니다. 가스터빈 부품은 고온 가스 침식, 산화, 피로 및 마모와 같은 극한의 작동 조건을 견뎌야 하므로, 초경합금은 코팅 기술, 계면 공학 등의 첨단 제조 공정과 나노 입자와 같은 소재 최적화를 통해 성능을 크게 향상시킵니다. 이러한 기술은 항공 엔진(예: GE9X)의 고성능 요구 사항을 충족할 뿐만 아니라, 발전 및 산업용 가스터빈의 지속 가능한 발전을 위한 핵심적인 지원을 제공합니다.

2. 시멘트 카바이드 가스터빈 부품의 재료 특성

시멘트 카바이드 가스터빈 구성품은 일반적으로 WC-Co를 기반으로 하며 일반적인 구성은 WC 85~95 중량 %, Co 5~15 중량 %이며 첨가제(예: Cr₃ C₂)로 도핑할 수 있습니다. TiC)를 사용하여 성능을 최적화합니다. 주요 특징은 다음과 같습니다.

높은 경도

HV1000 - 1800 은 니켈 기반 합금(HV300 - 500)을 훨씬 능가하여 내마모성과 표면 무결성을 보장합니다.

고온 안정성

WC의 녹는점은 2870°C이고, Co 상은 1400°C 이하에서 안정적으로 유지됩니다. 코팅(예: Al₂O₃)은 내열성을 더욱 향상시킵니다.

내마모성

나노 입자(WC 입자 크기 0.2~1 μm) 및 코팅(TiAlN 등)을 통해 블레이드 팁과 노즐 목에 적합합니다.

내식성

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

연료가스(pH 2-5)에서 산화, 황화, 산성부식을 방지하고, 부식률을 50-70% 감소시키며, 구성품 수명을 연장합니다.

피로 방지 성능

Co 함량(10-15 중량 %)은 파괴 인성(K_{IC} 10-15 MPa·m^{1/2}) 과 열 피로 및 기계적 충격에 대한 저항성을 제공합니다.

열전도도

80~100 W/m·K 로 방열에 도움이 되고 열 응력을 줄여줍니다.

이러한 특성은 항공 노즐(침식 저항성), 전해 셀 전극(부식 저항성) 및 고온 금형(마모 저항성)의 요구 사항과 매우 일치하며, 극한 환경에서 시멘트 카바이드의 우수성을 반영합니다.

3. 제조 공정

초경합금 가스터빈 부품 제조에는 미세구조 균일성, 표면 정밀도($Ra < 0.4 \mu m$), 코팅 접합 강도(>50 MPa) 확보가 필수적입니다. 주요 공정은 다음과 같습니다.

분말 제조

초미립 WC 분말(입자 크기 0.2~1 μm) 과 고순도 Co 분말(>99.9%)을 사용하여 고에너지 볼 밀링으로 혼합하고, 입자 성장을 억제하기 위해 Cr₃C₂, VC 등의 첨가제를 첨가합니다.

성형 및 소결

그린 바디는 냉간 등방성 압축 성형(CIP, 100~400 MPa) 또는 압축 성형으로 형성한 다음 진공 또는 저압 소결로(1350~1450°C)에서 액상 소결하여 밀도가 90~95%, 입자 크기가 0.5~1 μm 가 되도록 합니다.

4. 표면 개질

코팅 기술

PVD(예: TiAlN) 에 의해 TiCN, 두께 2-10 μm) 또는 CVD(예: Al₂O₃, 두께 5-20 μm) 를 사용 하면 경도가 HV2000-3000 으로 높아지고 내마모성이 30-50% 향상됩니다.

고에너지 열분사

플라스마 분무(APS) 또는 폭발 분무(DGS)는 WC-Co 또는 Cr₃C₂ 코팅(50~500 μm) 을 형성하며, 접합 강도는 30~80 MPa 이고 내식성은 20~30% 향상됩니다.

인터페이스 엔지니어링

그래디언트 코팅이나 이온 주입을 통해 코팅/기판 계면을 최적화하고, 접착력을 30%(>50N) 향상시키고 박리를 줄입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

정밀 가공

다이아몬드 연삭, CNC 가공 또는 레이저 미세 가공을 사용하여 구성 요소의 기하학적 정확도($\pm 0.01\text{mm}$)와 표면 마감($Ra\ 0.2 - 0.4\ \mu\text{m}$)을 보장 합니다 .

(복잡한 형상과 내식성 코팅이 필요함) 및 고온 금형(내마모성 코팅이 필요함) 의 제조 기술과 밀접한 관련이 있으며 , 이는 시멘트 카바이드 가공의 교차 영역 적용성을 반영합니다.

5. 성능상의 이점

니켈 기반 합금 및 세라믹과 같은 기존 소재와 비교했을 때 시멘트 카바이드 가스터빈 구성품은 상당한 장점을 가지고 있습니다.

높은 내마모성

코팅 경도는 HV2000~3000 으로 마모율이 50~70% 감소하고, 블레이드와 노즐의 수명이 30~50%(10,000→15,000 시간) 연장됩니다.

고온 저항성

경도는 1400°C 에서 HV900-1500 으로 유지되고 변형률은 $<0.1\%$ 로 더 높은 연소 온도를 지원하고 효율을 5-10% 향상시킵니다.

내식성

산화 및 가스 부식에 강하고, 부식 속도가 50~70% 감소하고, 유지보수 주기가 30% 연장되어 혹독한 가스 환경에 적합합니다.

피로 방지 성능

그라데이션 코팅은 열 응력을 완화하고, 피로 수명을 30% 늘리고, 열 균열을 50% 줄이고, 구성 요소의 신뢰성을 향상시킵니다.

치수 안정성

낮은 열팽창 계수($5 - 7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)와 치수 편차 $<0.01\ \text{mm}$ 로 고정밀 작업이 보장됩니다.

6. 적용 시나리오

시멘트 카바이드 가스터빈 부품은 주로 다음과 같은 시나리오에서 사용됩니다.

블레이드 코팅

WC-Co 또는 Cr_3C_2 코팅은 터빈 블레이드의 팁과 루트에 사용되어 내마모성을 30% 높이고 수명을 40% 연장하므로 항공기 엔진(예: GE9X) 및 산업용 가스터빈에 적합합니다.

노즐 및 가이드

APS/DGS 는 노즐 목과 가이드 베인에 WC-Co 코팅을 분사하여 침식 저항성을 20%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

향상시키고 사용 수명을 8,000 시간에서 12,000 시간으로 늘립니다.

연소실 라이닝

CVD- Al_2O_3 코팅은 연소실 표면을 보호하고, 고온 부식을 방지하며, 사용 수명을 30% 연장하고, 연소 효율을 5% 향상시킵니다.

물개

카바이드 셸링 링이나 코팅은 내마모성을 50% 높이고, 가스 누출을 줄이며, 효율성을 3~5% 향상시킵니다.

베어링 및 지지 구성 요소

WC-Co 내마모성 부품은 고온 베어링에 사용되어 마찰 계수를 20% (0.1~0.2) 감소시키고 서비스 수명을 50% 연장합니다.

사례

GE9X 엔진 터빈 블레이드는 PVD- TiAlN 코팅 WC-Co 로 보호되어 내마모성이 40% 향상되고, 사용 수명이 10,000 시간에서 14,000 시간으로 늘어나고, 연소 효율이 5% 향상됩니다 .

이러한 응용 분야는 항공기 노즐(침식 방지 코팅), 전해조 전극(부식 방지 코팅), 고온 금형(마모 방지 코팅)의 기술적 요구 사항 과 유사하며 , 이는 시멘트 카바이드의 다재다능함을 강조합니다.

7. 과제와 한계

시멘트 카바이드 가스터빈 구성품은 다음과 같은 과제에 직면합니다.

제조 비용

코팅 장비(PVD/CVD 등, 1,000~3,000 만 위안)와 정밀 가공(다이아몬드 연마)은 비쌉니다.

인성 부족

파괴인성(K_{IC} 10 - 15 $MPa \cdot m^{1/2}$) 은 니켈계 합금(K_{IC} 50 - 100 $MPa \cdot m^{1/2}$) 보다 낮으며 , 강한 충격에 의해 균열이 발생하기 쉽다 .

코팅 벗겨짐

고온 및 고응력 하에서는 코팅 접합 강도(30~50MPa)가 부족할 수 있으므로 인터페이스 엔지니어링을 최적화해야 합니다.

무게 제한

높은 밀도(14 - 15 g/cm^3) 는 회전 부품의 무게를 증가시켜 효율성에 영향을 미치고 경량 코팅 개발이 필요합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

환경 영향

소결 및 코팅 공정은 에너지 집약적(배치당 500~1000kWh)이며, 코발트 자원의 부족(전 세계 매장량은 약 700 만 톤)으로 인해 비용이 증가합니다.

8. 향후 개발 동향

위해 앞으로 다음과 같은 방향에 집중할 수 있습니다.

나노입자 초경합금

초미립 WC(입자크기 $<0.2\mu\text{m}$)를 개발하여 경도를 HV1800 ~2000 으로 높이고, 인성을 20% 증가시켜 고부하 부품에 적합하게 만들었습니다.

다층 복합 코팅

PVD/CVD 다층 코팅(예: TiAlN / Al₂O₃ / CrN) 을 적용하면 내마모성이 50% 향상되고, 접착력이 30% 향상되며, 수명이 연장됩니다.

녹색 제조

저온소결($<1300^{\circ}\text{C}$)과 저코발트/무코발트 초경합금을 최적화하여 에너지 소비를 30~50% 줄이고 코발트 자원에 대한 부담을 완화합니다.

적층 제조

3D 프린팅(선택적 레이저 소결 SLS 등)을 통해 복잡한 코팅이나 구성요소를 제조하면 처리 비용을 20~30%까지 줄일 수 있습니다.

지능형 최적화

AI 와 열역학 시뮬레이션을 활용해 코팅 설계와 인터페이스 구조를 최적화한 결과, 효율성이 20% 증가하고 수명 예측 정확도가 30% 향상되었습니다.

9. 요약표

시멘트 카바이드 가스터빈 부품의 주요 특징 및 기술적 요점

프로젝트	설명하다
재료 구성	WC 85 - 95 중량 %, Co 5 - 15 중량 %, 선택 사항인 Cr ₃ C ₂ , TiC 첨가제
주요 특징	경도 HV1000 - 1800, 굽힘 강도 2000 - 2500 MPa, 내열성 1400° C, 강한 내마모성
제조 공정	분말 제조 → 냉간 등방성 가압 → 진공 소결 → 코팅(PVD/CVD, APS/DGS) → 정밀 가공(다이아몬드 연삭, 레이저)
표면 개질	PVD - TiAlN : 경도 HV2000 - 3000, 내마모성 +30% CVD-Al ₂ O ₃ : 내열온도 1400° C, 수명 +40% APS/DGS-WC-Co: 접합강도 30~80MPa, 내식성 +20~30%
응용 시나리오	프로그램 블레이드 코팅, 노즐, 연소실 라이너, 쉘, 베어링 구성품
성능 이점	내마모성 +30 - 50%, 수명 10,000 - 15,000 시간, 효율성 +5 - 10%, 정확도 $\pm 0.01\text{mm}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

도전	높은 비용(5000~50,000 위안/개), 인성 부족, 코팅 벗겨짐, 중량 증가, 환경 영향
미래 방향	나노결정 입자, 다층 코팅, 친환경 제조, 3D 프린팅, 지능형 최적화

예시:

재료 및 특성: WC-Co의 일반적인 구성과 특성을 기준으로 합니다.

제조 공정: 성형, 소결, 변형 및 가공의 전체 과정을 요약합니다.

성능 및 과제: 장점(예: 수명, 효율성)과 제한 사항(예: 비용, 견고성)을 정량화합니다.

10. 결론

카바이드 가스터빈 부품은 높은 경도, 내마모성, 고온 저항성, 내부식성으로 인해 항공기 엔진 및 산업용 가스터빈의 핵심 부품으로 자리 잡았습니다. 첨단 코팅 기술(PVD/CVD, APS/DGS 등)과 계면 공학을 통해 탁월한 성능을 발휘합니다. WC-Co 코팅은 블레이드 및 노즐과 같은 부품의 수명(10,000→15,000 시간)과 효율(+5~10%)을 크게 향상시키며, 항공 노즐(내식성), 전해조 전극(내식성), 고온 금형(내마모성)의 기술적 요건을 충족합니다. 높은 비용, 부족한 인성, 그리고 환경적 과제에도 불구하고, 나노결정 소재, 다층 복합 코팅, 친환경 제조 기술의 발전은 초경합금 부품의 성능과 지속가능성을 향상시켜 항공우주 및 에너지 산업의 전력 시스템에 안정적이고 효율적인 솔루션을 제공할 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

부록 :

카바이드 식품 가공 도구 및 식품 가공 장비 부품

텅스텐 카바이드(WC) 기반 초경합금(WC 8894 중량 %, Co/Ni 612 중량 %) 을 기반으로 합니다. 정밀 연삭 및 식품 등급 PVD 코팅(CrN , DLC, 24 μm 등) 을 통해 높은 경도(1800~2000 HV), 내마모성(마모량 <0.04 mm^3/h , ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y , pH 410) 및 식품 안전성(FDA 21 CFR 175.300, GB 4806.12016 준수)을 달성합니다. 본 칼은 식품 가공(육류, 과일 및 채소, 냉동식품, 반죽)용으로 설계되었으며, 슬라이싱, 다이싱, 다지기, 박피 작업에 적합합니다. 절삭 속도는 50,300 m/min , 수명은 1,000~3,000 분이며, 표면 조도는 Ra 0.10.4 μm 입니다 . 장비 부품 (예: 금형, 가이드, 노즐)은 식품 성형, 운반 및 분사 작업에 사용되며, 마모 수명은 612 개월입니다. 본 문서에서는 국가 표준(GB/T 79972017, GB 4806.12016)과 식품 산업의 요구를 기반으로 칼과 부품의 제조 공정, 성능, 적용 및 최적화 방향을 설명합니다.

1.1 카바이드 식품 가공 도구

초경합금 식품 가공 공구 및 장비 부품은 초미립 WC(0.20~5 μm) 기지, Ni 기반 결합상(내식성), 그리고 식품 등급 PVD 코팅(CrN, DLC, ZrN)을 사용합니다. 고정밀 연삭 (날 반경 < 5 μm) 또는 연마(Ra <0.1 μm)를 통해 식품 가공 의 높은 위생 , 내마모성 , 내식성 및 안전 요건을 충족합니다.

시멘트 카바이드 식품 가공 공구의 특성

스테인리스 스틸(400-600 HV)보다 몇 배 더 우수합니다.

부식 저항성: 산 및 알칼리 저항성(pH 410, <0.01 mm/y), 식품 접촉 안전 기준에 부합(FDA, GB 4806.1).

낮은 마찰: 코팅의 마찰 계수는 <0.2 이며, 접촉 방지 기능이 있고 세척이 쉽습니다.

내마모성: 마모 <0.04 mm^3 / h , 공구 수명 1000-3000 분, 구성 요소 수명 6-12 개월.

용도: 칼은 고기를 썰고, 과일과 채소를 깎둑썰기하고, 냉동식품을 자르고, 반죽을 나누는 데 사용됩니다. 부품은 고기 분쇄기 스크린, 컨베이어 롤러, 믹서 블레이드에 사용됩니다.

1.2 카바이드 식품 가공 도구의 종류

칼:

슬라이싱 칼: 얇은 조각 절단(고기, 과일, 야채), 속도 100300 $\text{m}/\text{분}$.

다이싱 나이프: 큐브 절단(야채, 조리된 고기), 속도 80200 $\text{m}/\text{분}$.

고기 분쇄기: 고기 다지기 , 속도 50~150 $\text{m}/\text{분}$.

껍질 벗기는 칼: 과일과 채소 껍질 벗기기, 속도 100-250 $\text{m}/\text{분}$.

장비 부품:

스크린 플레이트: 고기 분쇄기 스크린(구경 310 mm), 내마모성 및 내부식성.

컨베이어 롤러: 식품 운반, 불지 않게 하는 용도.

믹싱 블레이드: 반죽/소스 혼합, 내마모성 및 내부식성.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3 카바이드 식품 가공 도구의 장점

스틸 보다 3050% 더 높고 , 효율성이 향상되었습니다.

수명: 도구는 1000~3000 분, 부품은 6~12 개월(스테인리스 스틸은 13 개월)입니다.

위생성: Ra 0.10.4 μm , 접착력 낮음, 집락 수 <10 CFU/ cm^2 .

안전성: 식품 등급 코팅, 무독성, 비이동성(GB 4806.12016, FDA).

2.1 재료

재료 매트릭스:

WC: 8894 중량 % , 초미립자(D50 0.20.5 μm) , 경도 18002000 HV.

Ni: 612 wt % , 내식성(H₂S₄, NaCl <0.01 mm/y) , 식품 등급 안전.

첨가제: Cr₃C₂(0.20.5 중량 %)는 입자 성장을 억제하고 경도를 5% 증가시킵니다.

코팅:

CrN (PVD): 경도 18002200 HV, 마찰 계수 0.2, 내식성, FDA 규정 준수.

DLC(PVD): 경도 30003500 HV, 마찰계수 <0.1, 접착 방지, 식품 등급.

ZrN (PVD): 경도 20002500 HV, 우수한 내산성, 산성 식품에 적합(pH 46).

2.2 그라디언트 구조

표면: 낮은 Ni(68 중량 %), 초미립자 WC(0.2~0.5 μm) , 경도 1800~2000HV .

코어: 고 Ni(1012 중량 %), 미립자 WC(0.51 μm) , KIC 1012MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$.

장점: 내마모성이 20% 증가하고, 충격 저항성이 15% 증가하고, 균열 가능성이 15% 감소했습니다.

준비: 증상 프레싱 + HIP 소결(1350° C, 120 MPa).

2.3 성능 요구 사항

경도: 18002000 HV(GB/T 79972017).

굽힘강도: 1.82.5 GPa (GB/T 38512015).

파괴인성: 1012 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$.

내마모성: 마모율 <0.04 mm³ / h (ASTM G65).

부식 저항성: pH 410, <0.01 mm/y(GB 96842011).

식품 안전: 무독성, 마이그레이션 없음(GB 4806.12016, FDA 21 CFR 175.300).

제조 공정

3.1 분말 준비

원료: WC(D50 0.20.5 μm , 순도 > 99.9%), Ni(D50 12 μm) , Cr₃C₂(D50 0.51 μm) .

볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO₂ 볼, 10:1), 300rpm, 1620 시간, 입자 크기 편차 <

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0.1 \mu\text{m}$, 균일 성 >95%.

3.2 형성

방법: 냉간 등방압 성형(CIP) 또는 압축 성형.

매개변수: 250280 MPa, 유지 압력 60 초, 강철 금형(편차 $< \pm 0.05 \text{ mm}$), 빌렛 밀도 $8.710.0 \text{ g/cm}^3$.

결과: 치수 편차 $< \pm 0.1 \text{ mm}$, 균열률 $< 1\%$.

3.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.

매개변수:

탈랍: $200\text{--}600^\circ \text{C}$, 3°C/분 , H2 분위기(O2 $< 5 \text{ ppm}$), 10^{-2} Pa .

소결: $1350\text{--}1400^\circ \text{C}$, $10^{-4}\text{--}10^{-5} \text{ Pa}$, 22.5 시간.

HIP: 1350°C , 120 MPa (Ar), 11.5 시간.

결과: 밀도 $14.815.0 \text{ g/cm}^3$, 기공률 $< 0.001\%$, 경도 18002000 HV.

3.4 정밀 가공

연삭: CNC 연삭기, 다이아몬드 휠($35 \mu\text{m}$), 3000rpm, 이송 $0.010.03\text{mm/패스}$, 절삭날 반경 $< 5 \mu\text{m}$, Ra $0.10.2 \mu\text{m}$ (공구); 표면 연삭, Ra $< 0.2 \mu\text{m}$ (구성 요소).

연마 페이스트($12 \mu\text{m}$), 800rpm, Ra $< 0.1 \mu\text{m}$, 접착력 20% 증가.

3.5 코팅

방법: PVD(Cr/Zr 타겟, $> 99.99\%$).

매개변수: CrN / DLC / ZrN ($24 \mu\text{m}$), 10^{-4} Pa , 250300°C , 바이어스 80V, 증착 속도 $0.81 \mu\text{m/h}$.

결과: 접착력 $> 80\text{N}$, 마찰계수 < 0.2 , 내식성 30% 증가.

3.6 감지

미세 구조: SEM(입자 $0.20.5 \mu\text{m}$), XPS(편차 $< \pm 0.1 \text{ wt}\%$).

성능: 경도 편차 $< \pm 50 \text{ HV}$ (ISO 6508), 마모율 $< 0.04 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65), 내식성(pH 410, $< 0.01 \text{ mm/y}$).

위생: 미생물학적 시험(집락수 $< 10 \text{ CFU/cm}^2$, GB 4789.2), 이동시험($< 0.1 \text{ mg/kg}$, GB 31604.8).

기하 구조: CMM, 모서리/표면 편차 $< \pm 0.005\text{mm}$.

응용 프로그램 시나리오

육류, 과일 및 채소, 냉동 식품, 반죽 가공 및 장비 내마모성 요구 사항에 대한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다음과 같은 작업 조건, 공정 매개변수, 테스트 데이터 및 선택 제안을 제공합니다.

4.1 도구

고기 부위(냉동 돼지고기, 18° C):

작업 조건: 냉동 돼지고기(HB ~150, 지방 포함), 슬라이스 두께 2mm.

유형: 디스크 슬라이싱 나이프 (Ø 300 mm, 단일 날).

매트릭스: WC8%Ni(초미립자, D50 0.20.5 µm, Cr3C2 0.5 wt %), 경도 18002000 HV.

코팅: PVD DLC (3 µm, 경도 3500 HV, 마찰 0.1).

기하구조: 절삭날 각도 20°, 절삭날 반경 0.01 mm, 연마 절삭날(Ra <0.1 µm).

공정: 불 밀링 18 시간, CIP 280 MPa, 소결 1400° C(10⁻⁵ Pa, 2.5 시간), HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 분쇄(Ra 0.1 µm), PVD DLC(250° C, 접착력 >80 N).

매개변수: 속도 200m/min, 이송 0.05mm/r, 건식 절단.

시험:

수명: 2000 분(스테인리스 스틸의 경우 400 분, 5 배 더 길음).

표면: Ra 0.2 µm, 매끈한 절단면, 찢어짐 없음.

절단력: 200N(스테인리스강의 경우 300N, 33% 감소).

마모 손실: VB <0.1 mm, <0.03 mm³ / h.

위생성: 균집수 <10 CFU/cm², 접촉 없음.

모델: WCNi+ DLC, Ø 300 mm 슬라이서, 건식 절단 + 정기 소독.

다진 과일과 채소(당근, HB 50):

작업 조건: 당근(수분 90%, 섬유질 함유), 10×10mm 크기로 자름.

× 50mm, 4 면)

매트릭스: WC10%Ni(초미립자, D50 0.20.5 µm, Cr3C2 0.5 wt %), 경도 18002000 HV.

코팅: PVD CrN (3 µm, 경도 2200 HV, 마찰 0.2).

기하구조: 절삭날 각도 25°, 절삭날 반경 0.02 mm, 연마 절삭날(Ra <0.1 µm).

공정: 불 밀링 18 시간, CIP 280 MPa, 소결 1400° C(10⁻⁵ Pa, 2 시간), HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 분쇄(Ra 0.1 µm), PVD CrN (300° C, 접착력 >80 N).

매개변수: 속도 150m/min, 이송 0.1mm/r, 습식 절단(물, 5L/min).

시험:

수명: 1800 분(스테인리스 스틸의 경우 500 분, 3.6 배 더 길음).

표면: Ra 0.3 µm, 깔끔하게 절단, 섬유 늘어남 없음.

절단력: 150N(스테인리스강의 경우 250N, 40% 감소).

마모 손실: VB <0.12 mm, <0.04 mm³ / h.

위생성: 이동량 <0.1 mg/kg, 부식 없음.

선택: WCNi+ CrN, 50×50 mm 다이싱 나이프, 습식 절단 + 고주파 세척.

다진 고기(소고기, 지방 포함):

작업 조건: 쇠고기(지방 20%, 수분 70%), 다진 고기(Ø 5 mm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

유형: 고기 분쇄기 (\emptyset 100 mm, 4 개 모서리) .
매트릭스: WC12%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μ m , Cr3C2 0.5 wt %), 경도 18002000 HV.
코팅 : PVD ZrN (3 μ m , 경도 2500 HV, 마찰 0.15).
기하구조: 절삭날 각도 30° , 절삭날 반경 0.03 mm, 연마 표면(Ra <0.1 μ m) .
공정: 불 밀링 20 시간, CIP 280 MPa, 소결 1400° C(10^{-5} Pa, 2.5 시간), HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 분쇄(Ra 0.1 μ m) , PVD ZrN (300° C, 접착력 >80 N).
매개변수: 속도 100m/min, 이송 0.15mm/r, 건식 절단.
시험:
수명: 1500 분(스테인리스 스틸의 경우 300 분, 5 배 더 길음) .
표면: Ra 0.3 μ m , 균일 한 입자.
절삭력: 250N(스테인리스강의 경우 400N, 37% 감소).
마모 손실: VB <0.15 mm, <0.04 mm³ / h.
위생성: 지방 부착 없음, 집락 수 <10 CFU/ cm² .
모델: WCNi+ ZrN , \emptyset 100 mm 고기 분쇄기, 건식 절단 + 저온 살균.

과일과 채소 껍질 벗기기(감자, 물 80%):

작업 조건: 감자(전분 함유, 수분 80%), 껍질 두께 1mm.

유형: 스키닝 나이프(곡선형, 100×20 mm).
매트릭스: WC8%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μ m , Cr3C2 0.5 wt %), 경도 18002000 HV.
코팅 : PVD CrN (2 μ m , 경도 2200 HV, 마찰 0.2).
기하구조: 절삭날 각도 15° , 절삭날 반경 0.01 mm, 연마 절삭날(Ra <0.1 μ m) .
공정: 불 밀링 18 시간, CIP 280 MPa, 소결 1400° C(10^{-5} Pa, 2 시간), HIP 1350° C(120 MPa, 1.5 시간), 분쇄(Ra 0.1 μ m) , PVD CrN (300° C, 접착력 >80 N).
매개변수: 속도 200m/min, 이송 0.08mm/r, 습식 절단(물, 5L/min).
시험:
수명: 2500 분(스테인리스 스틸의 경우 600 분, 4.2 배 더 길음) .
표면 : Ra 0.2 μ m , 박리는 균일하고 잔여물이 없습니다 .
절단력: 100N(스테인리스강의 경우 200N, 50% 감소).
마모율: VB <0.1 mm, <0.03 mm³ / h.
위생성: 전분 부착 없음, 이동량 <0.1 mg/kg.
선택: WCNi+ CrN , 100×20 mm 스트리핑 나이프, 습식 절단 + 정기 세척.

4.2 장비 구성 요소

고기 분쇄기 스크린(소고기, 지방 포함):

작업 조건: 쇠고기(지방 20%, 수분 70%), 구멍 직경 \emptyset 5 mm, 연속 다진 고기.

유형: 체판 (\emptyset 150 mm, 두께 10 mm, 기공 크기 \emptyset 5 mm).
매트릭스: WC12%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μ m , Cr3C2 0.5 wt %), 경도 18002000 HV.
코팅 : PVD CrN (3 μ m , 경도 2200 HV, 마찰 0.2).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기하구조: 조리개 편차 $<\pm 0.05$ mm, 표면 연마($Ra < 0.1 \mu m$).

공정: 불 밀링 20 시간, CIP 280 MPa, 소결 $1400^{\circ} C(10^{-5} Pa, 2.5$ 시간), HIP $1350^{\circ} C(120 MPa, 1.5$ 시간), 표면 연삭($Ra 0.1 \mu m$), PVD CrN ($300^{\circ} C$, 접착력 $>80 N$).

매개변수: 연속 작동, 쇠퇴기와의 접촉(pH 5.5-6.5), 습한 환경(물 세척, 5L/분).

시험:

수명: 12 개월(스테인리스 스틸의 경우 3 개월, 4 배 더 길음).

표면: $Ra 0.2 \mu m$, 마힘 없음.

마모율: $<0.04 mm^3 / h$, 부식 없음.

위생: 균집 수 $<10 CFU/cm^2$, 이동량 $<0.1 mg/kg$.

모델: WCNi+ CrN, $\emptyset 150$ mm 채판, 습식 세척 + 정기 소독.

컨베이어 롤러(과일 및 채소, 수분 90%):

작업 조건: 과일 및 채소(물 90%, 산성 주스 함유, pH 46), 연속 전송.

:

유형: 컨베이어 롤러 ($\emptyset 100$ mm, 길이 500 mm).

매트릭스: WC10%Ni(초미립자, $D50 0.20.5 \mu m$, Cr3C2 0.5 wt %), 경도 18002000 HV.

코팅: PVD DLC ($3 \mu m$, 경도 3500 HV, 마찰 0.1).

기하구조: 표면 연마($Ra < 0.1 \mu m$), 진원도 편차 $<\pm 0.01$ mm.

공정: 불 밀링 18 시간, CIP 280 MPa, 소결 $1400^{\circ} C(10^{-5} Pa, 2$ 시간), HIP $1350^{\circ} C(120 MPa, 1.5$ 시간), 분쇄($Ra 0.1 \mu m$), PVD DLC($250^{\circ} C$, 접착력 $>80 N$).

매개변수: 회전 속도 60rpm, 과일 및 야채 주스와의 접촉(pH 46), 습한 환경.

시험:

수명: 10 개월(스테인리스 스틸의 경우 2 개월, 5 배 더 길음).

표면: $Ra 0.1 \mu m$, 접착력 없음.

마모율: $<0.03 mm^3 / h$, 부식 없음.

위생: 균집 수 $<10 CFU/cm^2$, 이동량 $<0.1 mg/kg$.

모델: WCNi+ DLC, $\emptyset 100$ mm 컨베이어 롤러, 습식 세척 + 정기 검사.

믹싱 블레이드(반죽, 소금 포함):

작업 조건: 반죽(소금 2%, 물 40%), 연속 혼합.

:

유형: 믹싱 블레이드(200×50 mm, 두께 5mm).

매트릭스: WC8%Ni(초미립자, $D50 0.20.5 \mu m$, Cr3C2 0.5 wt %), 경도 18002000 HV.

코팅: PVD ZrN ($3 \mu m$, 경도 2500 HV, 마찰 0.15).

기하구조: 표면 연마($Ra < 0.1 \mu m$), 모서리 반경 0.5 mm.

가공: 불 밀링 18 시간, CIP 280 MPa, 소결 $1400^{\circ} C(10^{-5} Pa, 2$ 시간), HIP $1350^{\circ} C(120 MPa, 1.5$ 시간), 분쇄($Ra 0.1 \mu m$), PVD ZrN ($300^{\circ} C$, 접착력 $>80 N$).

매개변수: 속도 30rpm, 접촉 반죽(pH 56), 습한 환경.

시험:

수명: 8 개월(스테인리스 스틸의 경우 2 개월, 4 배 더 길다).

표면: $Ra 0.2 \mu m$, 접착력 없음.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

마모율: <0.04 mm³ / h, 부식 없음.
위생: 균집 수 <10 CFU/cm², 이동량 <0.1 mg/kg.
선택: WCNi+ ZrN, 200×50 mm 블레이드, 습식 세척 + 정기 소독.

성과 분석

매개변수	초경 공구/부품	스테인리스 스틸 칼/부품
경도(HV)	18002000	400600
굽힘 강도 (GPa)	1.82.5	1.52.0
인성(KIC, MPa·m ^{1/2})	1012	50100
내마모성(mm ³ /h)	<0.04	0.10.3
내식성(mm/y, pH 410)	<0.01	0.050.1
절삭 속도(m/min, 공구)	50300	20100
수명(분, 도구)	10003000	200600
수명(개월, 부품)	612	13
Ra (μ m)	0.10.4	0.51.0

하이라이트:

내마모성: 초미립자 WC+DLC/ CrN / ZrN, 마모 <0.04 mm³/h, 수명은 35 배(공구), 45 배(부품) 증가.

내부식성: Ni 기반 + CrN / ZrN, pH 410, <0.01mm/y.

효율성: 공구 속도 50300m/min, 효율성이 3050% 증가했습니다.

위생: Ra 0.10.4 μ m, 콜로니 <10 CFU/ cm², GB 4806.1 에 따름.

최적화 제안

재료 최적화:

고기칼/체판 : WCNi (8 중량 %) + DLC(3 μ m), 접착 방지효과 30% 증가.

과일 및 야채 칼/컨베이어 롤러: WCNi (10 중량 %) + CrN (3 μ m), 내식성이 25% 증가했습니다 .

고기 분쇄기/믹싱 블레이드: WCNi (12 중량 %) + ZrN (3 μ m), 충격 저항성이 15% 증가했습니다.

첨가제: Cr3C2 0.5 중량 %, 경도가 5% 증가했습니다.

프로세스 최적화:

소결: HIP 1350° C, 120 MPa, 기공률 <0.001%, 내마모성이 15% 증가했습니다.

연삭: CNC 연삭기, 다이아몬드 연삭 휠(35 μ m), 절삭 날 반경 <5 μ m (공구), Ra < 0.1 μ m (구성요소).

코팅:

DLC(3 μ m, 250° C, 바이어스 80 V), 마찰 감소 50%.

CrN (3 μ m, 300° C, 바이어스 80 V) 은 내식성이 30% 증가했습니다.

ZrN (3 μ m, 300° C, 바이어스 80 V), 접착 방지성이 20% 증가했습니다 .

연마: Ra <0.1 μ m, 접착력 20% 감소.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

장비 최적화:

소결로: 온도 조절 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, 10^{-5}Pa .

CNC 연삭기: 절삭날/표면 편차 $< \pm 0.005\text{mm}$.

코팅 장비: 증착 속도 $0.81\ \mu\text{m}/\text{h}$, 편차 $< \pm 0.1\ \mu\text{m}$.

작업 조건 적용:

고기 절단/선별 플레이트: WCNi+ DLC, 속도 $150300\text{m}/\text{min}$ (칼), 건식 절단/습식 세척.

과일 및 야채 다이싱/이송 롤러: WCNi+ CrN, 속도 $100200\text{m}/\text{min}$ (도구), 습식 절단/세척.

분쇄/혼합 블레이드: WCNi+ ZrN, 속도 $50150\text{m}/\text{min}$ (도구), 건식 절단/습식 세척.

박리: WCNi+ CrN, 속도 $150250\text{m}/\text{min}$, 습식 절단.

테스트 및 검증:

미세구조: SEM(결정립 $0.20.5\ \mu\text{m}$), EBSD(결정립계 응력 $< 5\%$).

성능: ASTM G65($< 0.030.04\ \text{mm}^3/\text{h}$), 내식성(pH 410, $< 0.01\ \text{mm}/\text{y}$).

위생: 균집수 $< 10\ \text{CFU}/\text{cm}^2$ (GB 4789.2), 이동량 $< 0.1\ \text{mg}/\text{kg}$ (GB 31604.8).

테스트: 공구 절삭력 100, 250N, 수명 1,500, 2500 분, Ra $0.20.3\ \mu\text{m}$; 구성 요소 수명 812 개월, Ra $0.10.2\ \mu\text{m}$.

표준 및 사양

GB/T 183762014: 다공성 $< 0.01\%$.

GB/T 38502015: 밀도 편차 $< \pm 0.1\ \text{g}/\text{cm}^3$.

GB/T 38512015: 강도 $1.82.5\ \text{GPa}$.

GB/T 79972017: 경도 1800 - 2000 HV.

GB 4806.12016: 식품 안전, 무독성, 비이주성.

GB 96842011: 부식 저항성, pH 410, $< 0.01\ \text{mm}/\text{y}$.

ASTM G65: 마모율 $< 0.04\ \text{mm}^3/\text{h}$.

ISO 6508: 경도 편차 $< \pm 50\ \text{HV}$.

FDA 21 CFR 175.300: 식품 접촉 안전.

결론적으로

시멘트 카바이드 식품 가공 도구 및 장비 구성품은 높은 경도 (18002000)를 달성합니다. HV), 내마모성 ($< 0.04\ \text{mm}^3/\text{h}$), 내식성 (pH 재료 (초미립자 WC $0.20.5\ \mu\text{m}$, Ni 612 중량 %, CrN /DLC/ ZrN 코팅) 및 공정(HIP 소결 1350°C , 120MPa, PVD 코팅 250°C , 300°C)을 최적화하여 410, $< 0.01\text{mm}/\text{y}$) 및 식품 안전(GB 4806.12016)을 달성했습니다. 이 칼은 육류 썰기, 과일 및 채소 다지기, 다지기 및 껍질 벗기기에 적합하며, 속도는 $50\sim 300\text{m}/\text{min}$, 효율은 $30\sim 50\%$ 증가, 수명은 $1500\sim 2500$ 분, Ra 는 $0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$ 입니다. 이 부품들은 고기 분쇄기 스크린, 컨베이어 롤러, 믹싱 블레이드에 적합하며, 수명은 $8\sim 12$ 개월, Ra 는 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$, 콜로니 는 $10\ \text{CFU}/\text{cm}^2$ 미만입니다. 초미립자, 식품 등급 코팅, 연마 공정을 최적화하면 비용을 절감할 수 있습니다(도구당 $200\sim 1,000$ 위안, 부품당

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

500~2,000 위안). 하지만 고정밀 연삭(비용 15% 증가)과 코팅 위생 인증이 과제입니다.

CTIA 그룹은 나노 WC(D50 0.20.5 μm), HIP 소결(기공률 <0.001%) 및 식품 등급 PVD 코팅 기술을 활용하여 고성능 공구 (슬라이싱 나이프, 고기 분쇄기) 및 부품(체판, 컨베이어 롤러)을 개발하여 식품 가공 요구 사항(공구 수명 2,000 분 이상, 부품 수명 10 개월 이상, Ra <0.2 μm)을 충족합니다. 제품은 SEM, ASTM G65 및 GB 4806의 검증을 거쳤습니다.

부록 :

카바이드 가스터빈 노즐

초경합금 가스터빈 노즐은 텅스텐 카바이드(WC) 기반 초경합금(WC 8894 중량 %, Ni 612 중량 %)을 기반으로 합니다. 정밀 연삭, 연마 및 고온 내식성 PVD 코팅(CrN 등) 을 통해 AlCrN , TiAlN , 25 μm) 은 높은 경도(1800-2200 HV) , 내마모성(마모량 <0.03 mm^3/h , ASTM G65), 고온 저항성(>1200° C, 산화 저항성), 내부식성(<0.01 mm /y, pH 212, 황 함유 가스) 및 열 피로 저항성(>10 5 사이클)을 달성합니다. 노즐은 가스터빈의 연소실에서 고온 고압 가스(1400 - 1600° C, 1020 MPa)를 터빈 블레이드로 유도하는 데 사용됩니다. 극심한 열 충격, 부식 및 침식을 견뎌야 하며 서비스 수명은 8000 - 20000 시간, 표면 거칠기는 Ra 0.10.3 μm 입니다. 본 문서에서는 가스터빈 작동 조건(GE 프레임 59, 지멘스 SGT 시리즈)과 산업 표준(ASME PTC 22, ISO 2314)을 기반으로 노즐, 제조 공정, 성능, 적용 및 최적화 방향을 설명합니다.

시멘트 카바이드 가스터빈 노즐 개요

1.1 초경 가스터빈 노즐의 정의 및 특성

초경합금 가스터빈 노즐은 초미립 WC(0.20.5 μm) 기지 , Ni 계 결합상(내식성) 및 고온 PVD 코팅 (CrN , AlCrN) 을 채택합니다 . TiAlN) 은 정밀 연삭(기하학적 편차 < ± 0.01 mm) 또는 연마(Ra <0.1 μm) 를 통해 가스터빈의 고온, 고압, 부식 및 침식 요구 사항을 충족하고 연소 가스를 터빈 블레이드로 안내합니다. 특징:
높은 경도: 1800~2200 HV, 내마모성은 니켈 기반 합금(800~1200 HV)보다 23 배 더 우수합니다.

고온 내구성: 코팅은 산화에 강하고(>1200° C) 기질은 열충격에 강합니다(ΔT 1000° C, >10 5 배).

부식 저항성: ASME 부식 저항성 요구 사항에 따라 유황 함유 가스, 산 및 알칼리(pH 212, <0.01 mm/y)에 대한 저항성이 있습니다.

낮은 마찰: 코팅의 마찰 계수는 <0.15로 침식과 탄소 침전을 줄입니다.

내마모성: 마모 손실 <0.03 mm^3 / h , 수명 8000 - 20000 시간.

적용 분야: 가스터빈(GE 프레임 59, 지멘스 SGT 시리즈) 노즐 가이드 베인, 연소실 노즐.

1.2 카바이드 가스터빈 노즐의 종류

고정 기하 노즐: 단순 터보젯, 수렴형, 속도 0.81.2 Ma.

수렴-발산(CD) 노즐: 터보팬 엔진, 초음속(1.5-2.5 Ma), 가변 기하학.

냉각 채널 노즐: 내부 냉각 구멍 (\emptyset 0.52 mm)이 있으며, 내열 온도는 1400~1600° C입니다.

다중 연료 노즐: 천연가스와 액체 연료를 지원하며, 소용돌이가 있어 분무율이 95% 이상입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3 시멘트 카바이드 가스터빈 노즐의 장점

효율성: 공기 흐름이 최적화되어 추력이 510% 증가하고 연료 효율성이 35% 증가했습니다.

수명: 코팅 노즐 수명은 8000~20000 시간(니켈 기반 합금은 5000~12000 시간)입니다.

부식 저항성: Ra 0.10.3 μm , 탄소 증착 방지, 유지 보수 빈도 2030% 감소.

안전성: 높은 안정성, 균열율 <0.01%, AS9100 에 부합합니다.

재료

2.1 시멘트 카바이드 가스터빈 노즐 구성 요소:

WC: 8894 중량 %, 초미립자(D50 0.20.5 μm), 경도 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 wt %, 내식성(H₂SO₄, SO₂ <0.01 mm/y), 열 피로 저항성.

첨가제: Cr₃C₂(0.30.6 중량 %)는 입자 성장을 억제하고 경도를 6% 증가시킵니다. TaC (0.10.3 중량 %)는 내산화성을 10% 증가시킵니다. 코팅:

CrN (PVD): 경도 2000~2400 HV, 마찰계수 0.15, 내열성 1100° C, 내식성.

AlCrN (PVD): 경도 3000~3500 HV, 마찰계수 0.1, 내열성 1200° C, 내산화성.

TiAlN (PVD): 경도 2800~3200 HV, 마찰 계수 0.12, 내열성 1250° C, 내식성.

2.2 초경 가스터빈 노즐의 경사 구조

표면: 낮은 Ni (68 중량 %), 초미립자 WC(0.20.5 μm), 경도 2000~ 2200HV .

코어: 고 Ni (1012 중량 %), 미립자 WC(0.51 μm), KIC 1215MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$.

장점: 내마모성이 25% 증가하고, 열충격 저항성이 20% 증가하고, 균열 가능성이 20% 감소했습니다.

준비: 증상 프레스 + HIP 소결(1400° C, 150 MPa).

2.3 시멘트 카바이드 가스터빈 노즐의 성능 요구 사항

경도: 1800 - 2200 HV(GB/T 79972017).

굽힘강도: 2.02.8 GPa (GB/T 38512015).

파괴인성: 1215 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$.

내마모성: 마모율 <0.03 mm³ / h (ASTM G65).

부식 저항성: pH 212, <0.01 mm/y(ASME PTC 22).

고온 저항성: >1200° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 1000 시간).

안전성: 균열 없음, 독성 없음(ISO 2314).

시멘트 카바이드 가스터빈 노즐 제조 공정

3.1 시멘트 카바이드 가스터빈 노즐 분말의 제조

원료: WC(D50 0.20.5 μm , 순도 > 99.95%), Ni(D50 12 μm), Cr₃C₂(D50 0.51 μm), TaC (D50 0.51 μm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

불 밀링: 행성형 불 밀(ZrO₂ 불, 12:1), 350rpm, 1822 시간, 입자 크기 편차 <±0.05 μm, 균일성 >98%.

3.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.

매개변수: 300 - 350 MPa, 유지 압력 90 초, 티타늄 합금 금형(편차 <±0.03 mm), 빌렛 밀도 9.010.5 g/cm³.

결과: 치수 편차 <±0.05 mm, 균열률 <0.5%.

3.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.

매개변수:

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 15.015.2 g/cm³, 기공률 <0.0005%, 경도 1800 - 2200 HV.

3.4 정밀 가공

연삭: 5축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(24 μm), 4000rpm, 이송 0.0050.02mm/패스, 기하학적 편차 <±0.01mm, Ra 0.10.2 μm.

EDM: 전기 스파크 가공, 냉각 구멍(Ø 0.52 mm), 편차 <±0.005 mm.

연마: 다이아몬드 연마 페이스트(0.51 μm), 1000 rpm, Ra <0.1 μm, 탄소 침적 방지 25% 증가.

3.5 코팅

방법: PVD(Cr/Al/Ti 목표, >99.99%).

매개변수: CrN / AlCrN / TiAlN (25 μm), 10⁻⁵ Pa, 300400 °C, 바이어스 100 V, 증착 속도 11.5 μm/h.

결과: 접착력 >100 N, 마찰계수 <0.15, 내열성 >1200 °C.

3.6 감지

미세구조: SEM(결정립 0.20.5 μm), EBSD(결정립계 응력 <3%).

성능: 경도 편차 <±40 HV(ISO 6508), 마모율 <0.03 mm³/h(ASTM G65), 내식성(pH 212, <0.01 mm/y).

기하구조: CMM, 편차 <±0.005mm; 레이저 스캐닝, 냉각 구멍 편차 <±0.003mm.

비파괴 검사: X선(내부 결함 <0.01 mm), 초음파(균열 <0.005 mm).

고온 테스트: 열충격(ΔT 1000 °C, >10 5배), 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 1000 시간).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

시멘트 카바이드 가스터빈 노즐의 적용 시나리오

고온 및 고압 가스(1400~1600° C, 1020MPa) 작업 조건에서 시멘트 카바이드 가스터빈 노즐은 다음과 같은 공정 매개변수, 테스트 데이터 및 선택 권장 사항을 제공합니다.

고정형 기하 노즐(GE 프레임 7, 천연가스):

작업 조건: 천연가스 연소, 1500° C, 15 MPa, SO₂(0.10.5%) 함유.

유형: 수렴 노즐 (목 직경 Ø 50 mm, 출구 Ø 80 mm).

매트릭스: WC8%Ni(초미립자, D50 0.20.5 µm, Cr₃C₂ 0.5 중량 %, TaC 0.2 중량 %),
경도 2000 - 2200 HV.

코팅 : PVD AlCrN (4 µm, 경도 3500 HV, 마찰 0.1, 내열성 1200° C).

기하구조: 목 반경 0.5mm, 냉각 구멍 Ø 1mm, 연마(Ra < 0.1 µm).

가공: 볼 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10⁻⁶ Pa, 3 시간), HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5축 연삭(Ra 0.1 µm), PVD AlCrN (350° C, 접착력 >100 N).

매개변수: 공기 유량 1.0 Ma, 유량 500 kg/s, 건식 작동.

시험:

수명: 15,000 시간(니켈 기반 합금의 경우 8,000 시간, 87% 증가).

표면: Ra 0.2 µm, 탄소 침전물 없음.

마모율: <0.02 mm³ / h, 산화 저항성 <0.01 mg/ cm².

열충격: ΔT 1000° C, >10 5 배, 균열 없음.

위생: 무독성, ISO 2314 준수.

모델: WCNi+ AlCrN, Ø 50 mm 수렴 노즐, 일반 NDT.

CD 노즐(Siemens SGT800, 액체 연료):

작업 조건: 디젤 연소, 1600° C, 18 MPa, H₂S(0.050.2%) 함유.

유형: CD 노즐 (목 직경 Ø 40 mm, 출구 Ø 100 mm, 가변 형상).

매트릭스: WC10%Ni(초미립자, D50 0.20.5 µm, Cr₃C₂ 0.6 중량 %, TaC 0.3 중량 %),
경도 2000 - 2200 HV.

코팅 : PVD TiAlN (5 µm, 경도 3200 HV, 마찰 0.12, 내열성 1250° C).

기하구조: 발산각 15°, 냉각 구멍 Ø 1.5 mm, 연마(Ra < 0.1 µm).

공정: 볼 밀링 22 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10⁻⁶ Pa, 3 시간), HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), EDM(조리개 편차 <±0.005 mm), PVD TiAlN (400° C, 접착력 >100 N).

매개변수: 공기 유량 2.0 Ma, 유량 600 kg/s, 습식 작동(물 분무 냉각).

시험:

수명: 12,000 시간(니켈 기반 합금의 경우 6,000 시간, 100% 증가).

표면: Ra 0.3 µm, 탄소 증착 속도 <0.01 mg/ cm².

마모 손실: <0.03 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.

열충격: ΔT 1100° C, >10 5 배, 균열 없음.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

효율성: 추력이 8% 증가했습니다.

모델: WCNi+ TiAlN, Ø 40 mm CD 노즐, 습식 작동 +NDT.

다중 연료 노즐(GE 프레임 9, 천연가스 + 디젤):

작업 조건: 천연가스/디젤 전환, 1550° C, 16 MPa, SO₂/H₂S(0.10.3%) 함유.

유형: 소용돌이 노즐 (Ø 60 mm, 분사 포인트 12 개, 분무율 >95%).

매트릭스: WC12%Ni(초미립자, D50 0.20.5 µm, Cr3C2 0.5 중량 %, TaC 0.3 중량 %),
경도 2000 - 2200 HV.

코팅: PVD CrN (4 µm, 경도 2400 HV, 마찰 0.15, 내열성 1100° C).

기하구조: 소용돌이 각도 30°, 노즐 Ø 0.8 mm, 광택(Ra <0.1 µm).

공정: 불 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10⁻⁶ Pa, 3 시간), HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), EDM(조리개 편차 ±0.003 mm), PVD CrN (300° C, 접착력 >100 N).

매개변수: 공기 유량 1.2 Ma, 연료 유량 1000 kg/h, 건식 작동.

시험:

수명: 10,000 시간(니켈 기반 합금의 경우 5,000 시간, 100% 증가).

표면: Ra 0.2 µm, 막힘 없음.

마모 손실: <0.03 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.

분무율: >95%, 연소 효율이 5% 증가했습니다.

열충격: ΔT 1000° C, >10 5 배, 균열 없음.

모델: WCNi+ CrN, Ø 60 mm 소용돌이 노즐, 정기 세척 + NDT.

초경합금 가스터빈 노즐의 성능 분석

매개변수	카바이드 노즐	니켈 기반 합금 노즐
경도(HV)	1800년 - 2200년	800 - 1200
굽힘 강도 (GPa)	2.02.8	1.01.5
인성(KIC, MPa·m ^{1/2})	1215	2030
내마모성(mm ³ /h)	<0.03	0.050.1
부식 저항성(mm/y, pH 212)	<0.01	0.020.05
온도 저항성(°C)	>1200	1000 - 1100
수명(시간)	8000 - 20000	5000 - 12000
Ra (µm)	0.10.3	0.30.8

하이라이트:

내마모성: 초미립자 WC+AlCrN / TiAlN, 마모 <0.03 mm³/h, 사용수명이 1.52 배 증가.

고온 내구성: 코팅은 산화(>1200° C), 열충격에 10 5 배 이상 견딥니다.

내부식성: Ni 기반 + CrN, pH 212, <0.01mm/y.

효율성: 공기 흐름이 최적화되어 추력이 510% 증가하고 연료 효율성이 35% 증가했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

시멘트 카바이드 가스터빈 노즐에 대한 최적화 제안

재료 최적화:

천연가스 노즐 : WCNi (8 wt %) + AlCrN (4 μ m) , 온도 저항이 10% 증가했습니다.
액체연료 노즐: WCNi (10 중량 %) + TiAlN (5 μ m) , 내식성이 20% 증가했습니다 .
다중연료 노즐: WCNi (12 중량 %) + CrN (4 μ m) , 내식성이 15% 증가했습니다 .
첨가제: Cr3C2 0.6 중량 % , TaC 0.3 중량 % , 경도가 6% 증가했습니다.

프로세스 최적화:

소결: HIP 1400° C, 150 MPa, 기공률 <0.0005%, 내마모성이 20% 증가했습니다.
연삭 : 5축 CNC, CBN 연삭 휠(24 μ m) , 기하학적 편차 < \pm 0.01 mm, Ra < 0.1 μ m .
코팅:
AlCrN (4 μ m , 350° C, 바이어스 100 V), 온도 저항이 15 % 증가했습니다.
TiAlN (5 μ m , 400° C, 바이어스 100 V) 은 내식성이 20% 증가했습니다.
CrN (4 μ m , 300° C, 바이어스 100 V) 은 내식성이 25% 증가했습니다.
EDM: 냉각 구멍 편차 < \pm 0.003mm, 공기 흐름 효율이 5% 증가했습니다.

장비 최적화:

소결로: 온도 조절 \pm 2° C, 10⁻⁶Pa.
5축 CNC: 편차 < \pm 0.005 mm.
코팅 장비: 증착 속도 11.5 μ m /h, 편차 < \pm 0.05 μ m .

작업 조건 적용:

천연가스: WCNi+ AlCrN , 속도 0.81.2 Ma, 건식작업.
액체연료: WCNi+ TiAlN , 속도 1.52.5 Ma, 습식 작동.
다중 연료: WCNi+ CrN , 속도 1.01.5 Ma, 건식/습식 스위치.
테스트 및 검증:
미세구조: SEM(결정립 0.20.5 μ m) , EBSD(결정립계 응력 <3%).
성능: ASTM G65(<0.03 mm³ / h), 내식성(pH 212, <0.01 mm/y), 내열성(>1200° C, <0.01 mg/cm²) .
기하학: CMM(편차 < \pm 0.005 mm), 레이저 스캐닝(조리개 편차 < \pm 0.003 mm).
테스트: 공기 흐름 속도 0.82.5 mA, 수명 10000 - 15000 시간, Ra 0.20.3 μ m .

표준 및 사양

GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.
GB/T 38502015: 밀도 편차 < \pm 0.1 g/ cm³ .
GB/T 38512015: 강도 2.0-2.8 GPa .
GB/T 7997-2017: 경도 1800-2200 HV.
ASME PTC 22: 성능 시험, 추력 편차 < \pm 1%.
ISO 2314: 가스터빈 수용 및 안전.
ASTM G65: 마모율 <0.03 mm³ / h.
ISO 6508: 경도 편차 < \pm 40 HV.
AS9100: 항공우주 품질 관리.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

결론적으로

- 2200 HV), 내마모성($< 0.03 \text{ mm}^3 / \text{h}$), 고온 저항성($>1200^\circ \text{C}$), 내식성 (pH 212, $<0.01 \text{ mm} / \text{y}$) 및 열 피로 저항성($>10 \text{ 5 배}$) 을 재료 최적화(초미립자 WC $0.20.5 \mu\text{m}$, Ni 612 wt) 를 통해 향상 %, AlCrN / TiAlN / CrN 코팅) 및 공정(HIP 소결 1400°C , 150 MPa, PVD 코팅 300°C , 400°C)을 지원합니다. 이 노즐은 고정형, CD 및 다중 연료 조건에 적합하며, 속도는 0.82.5 Ma, 추력은 510% 증가, 수명은 10,000~15,000 시간, Ra는 $0.20.3 \mu\text{m}$ 입니다. 초미세 입자, 코팅 두께 및 EDM 공정을 최적화하면 비용을 절감할 수 있습니다. 하지만 고정밀 가공(비용 20% 증가)과 고온 시험 및 검증이 과제입니다.

부록 :

경합금 화학 파이프라인 밸브

텅스텐 카바이드(WC) 기반 초경합금(WC 88~94 중량 %, Ni 612 중량 %)을 기반으로 합니다. 정밀 연삭, 연마 및 내식성 PVD 코팅(CrN 등) 을 통해 AlCrN , TiAlN , 25 μm) 은 높은 경도(1800~2200 HV), 내마모성(마모량 <0.03 mm^3/h , ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y , pH 212, H₂S, HCl, H₂SO₄ 함유) 및 고온 저항성(>1000° C, 산화 저항성)을 갖습니다. 밸브는 화학 파이프라인(석유, 천연가스, 산 및 알칼리 매체)에서 유량, 압력 및 차단을 제어하고 부식성 유체(H₂SO₄ 0.515%, HCl <3%), 고온(300~1000° C) 및 고압(1050 MPa)을 견뎌내며 사용 수명은 515 년이고 표면 거칠기는 Ra 0.10.3 μm 입니다 . 이 글에서는 화학 파이프라인의 작업 조건(API 6D, ASME B16.34)과 표준(GB/T 12224, NACE MR0175)을 바탕으로 밸브, 제조 공정, 성능, 적용 분야 및 최적화 방향을 설명합니다.

시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브 개요

1.1 시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브 의 정의 :

초경합금 화학 파이프라인 밸브는 초미립 WC(0.20.5 μm) 매트릭스 , Ni 기반 결합상(내식성) 및 내식성 PVD 코팅 (CrN , AlCrN) 을 사용합니다 . TiAlN) 은 고정밀 연삭(기하학적 편차 < $\pm 0.01\text{mm}$) 또는 연마(Ra <0.1 μm)를 통해 화학 파이프라인 의 높은 내식성, 고온, 고압 및 내마모성 요구 사항을 충족하고 유체 흐름, 압력 또는 차단을 제어합니다. 특징:

높은 경도: 1800~2200HV, 내마모성은 스테인리스강(400~600HV)보다 35 배 더 우수합니다.

부식 저항성: 산 및 알칼리 저항성(pH 212, <0.01 mm/y), H₂S, HCl, H₂SO₄ 저항성, NACE MR0175 준수.

고온 내구성: 코팅은 산화에 강하고(>1000° C), 기질은 열충격에 강합니다(ΔT 800° C, >10 5 배).

낮은 마찰력: 코팅의 마찰 계수는 <0.15 로 접촉력과 침식을 줄여줍니다.

내마모성: 마모 손실 <0.03 mm^3 / h , 사용 수명 5-15 년.

응용 분야: 석유화학(정제, 천연가스), 화학 처리(산, 알칼리, 염화물), 제약, 펄프.

1.2 시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브의 종류

볼 밸브: 1/220 인치, 150~2500 파운드 , 빠른 전환, 유량 제어, 밀봉율 >99.9%에 적합.

게이트 밸브: 136 인치, 150~4500 파운드 , 완전 개방/완전 폐쇄에 적합, 고압 저항성.

스톱 밸브: 1/224", 150 - 2500 lb , 정밀한 유량 제어, 고온 내구성.

체크 밸브: 124 인치, 150~2500 파운드 , 역류 방지, 부식 방지.

버터플라이 밸브: 248 인치, 150~600 파운드 , 경량, 대구경 및 저압에 적합.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3 시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브의 장점

효율성: 빠른 개폐(볼 밸브의 90° 회전), 유량 손실 <5%, API 6D 에 따름.
수명: 코팅된 밸브의 수명은 515 년입니다(스테인리스 스틸의 경우 15 년).
내식성: Ra 0.10.3 μm, 접촉 방지, 유지 보수 빈도 30% 감소.
안전성: 누출 없음(API 598), 균열율 <0.01%, ASME B16.34 에 따름.
재료

시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브의 매트릭스 구성 :

WC: 8894 중량 %, 초미립자(D50 0.20.5 μm), 경도 1800 - 2200 HV.
Ni: 612wt %, 내식성(H2SO4, HCl, H2S <0.01mm/y), 열 피로 저항성.
첨가제: Cr3C2(0.30.6 중량 %)는 입자 성장을 억제하고 경도를 6% 증가시킵니다. TaC(0.10.3 중량 %)는 항산화 특성을 10% 증가시킵니다.

초경합금 화학 파이프라인 밸브 코팅

CrN (PVD): 경도 2000~2400 HV, 마찰 계수 0.15, 내열성 1000° C, H2SO4 에 대한 내성.
AlCrN (PVD): 경도 3000~3500 HV, 마찰 계수 0.1, 내열성 1100° C, 내염화물성.
TiAlN (PVD): 경도 2800~3200 HV, 마찰 계수 0.12, 내열성 1050° C, 내식성.

2.2 그래디언트 구조

표면: 낮은 Ni (68 중량 %), 초미립자 WC(0.20.5 μm), 경도 2000~ 2200HV .
코어: 고 Ni (1012 중량 %), 미립자 WC(0.51 μm), KIC 1215MPa · m^{1/2}.
장점: 내마모성이 25% 증가하고, 열충격 저항성이 20% 증가하고, 균열 가능성이 20% 감소했습니다.
준비: 증상 프레스 + HIP 소결(1400° C, 150 MPa).

2.3 성능 요구 사항

경도: 1800 - 2200 HV(GB/T 79972017).
굽힘강도: 2.02.8 GPa (GB/T 38512015).
파괴인성: 1215 MPa · m^{1/2}.
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).
안전성: ASME B16.34 에 따라 누출이 없습니다(API 598).

시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브 제조 공정

3.1 분말 준비

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

원료: WC(D50 0.20.5 μm , 순도 > 99.95%), Ni(D50 12 μm) , Cr3C2(D50 0.51 μm) , TaC (D50 0.51 μm) .

볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 12:1), 350rpm, 1822 시간, 입자 크기 편차 < $\pm 0.05 \mu\text{m}$, 균일성 >98%.

3.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.

매개변수: 300 - 350 MPa, 유지 압력 90 초, 티타늄 합금 금형(편차 < $\pm 0.03 \text{ mm}$), 밀렛 밀도 9.010.5 g/ cm^3 .

결과: 치수 편차 < $\pm 0.05 \text{ mm}$, 균열률 <0.5%.

3.3 소결

방법: 진공소결 + HIP.

매개변수:

탈랍: 200 - 600° C, 2° C/분, H2 분위기(O2 <3 ppm), 10^{-3} Pa .

소결: 1400 - 1450° C, 10^{-5} - 10^{-6} Pa , 2.53 시간.

HIP: 1400° C, 150 MPa (Ar), 1.52 시간.

결과: 밀도 15.015.2 g/ cm^3 , 기공률 <0.0005%, 경도 1800 - 2200 HV.

3.4 정밀 가공

연삭: 5축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(24 μm) , 4000rpm , 이송 0.0050.02mm/패스, 기하학적 편차 < $\pm 0.01 \text{ mm}$, Ra 0.10.2 μm .

EDM: 방전 가공, 밸브 코어 홀 ($\varnothing 0.52 \text{ mm}$), 편차 < $\pm 0.005 \text{ mm}$.

연마 : 다이아몬드 연마 페이스트(0.51 μm) , 1000 rpm, Ra <0.1 μm , 접촉 방지 효과가 25% 증가 했습니다 .

3.5 코팅

방법: PVD(Cr/Al/Ti 목표, >99.99%).

매개변수: CrN / AlCrN / TiAlN (25 μm) , 10^{-5} Pa , 300 - 400° C, 바이어스 100 V, 증착 속도 11.5 $\mu\text{m} / \text{h}$.

결과: 접착력 >100 N, 마찰계수 <0.15, 내열성 >1000° C.

3.6 감지

미세구조: SEM(결정립 0.20.5 μm) , EBSD(결정립계 응력 <3%).

성능: 경도 편차 < $\pm 40 \text{ HV}$ (ISO 6508), 마모율 <0.03 mm^3 / h (ASTM G65), 내식성(pH 212, <0.01 mm/y).

기하 구조: CMM, 편차 < $\pm 0.005 \text{ mm}$; 레이저 스캐닝, 밸브 코어 홀 편차 < $\pm 0.003 \text{ mm}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

비파괴 검사: X선(내부 결함 < 0.01 mm), 초음파(균열 < 0.005 mm).
성능 테스트: 누출률 < 0.01 cm³ / s(API 598), 압력 저항(1504500 lb) .

시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브의 적용 시나리오

부식성 유체(H₂SO₄, HCl, H₂S), 고온(300~1000° C) 및 고압(1050MPa) 작업 조건에서 시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브는 다음과 같은 공정 매개변수, 테스트 데이터 및 선택 권장 사항을 제공합니다.

경질 합금 화학 파이프라인 볼 밸브(석유화학, H₂SO₄ 10%):

작업 조건: 황산(10%, pH 2), 500° C, 20 MPa.

유형: 플로팅 볼 밸브(2 인치, 600 파운드 , 플랜지).

매트릭스: WC8%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μ m , Cr3C2 0.5 중량 % , TaC 0.2 중량 %), 경도 2000 - 2200 HV.

코팅 : PVD CrN (4 μ m , 경도 2400 HV, 마찰 0.15, 내열성 1000° C).

기하구조 : 구형도 <±0.005 mm, 밀봉 표면 연마(Ra <0.1 μ m) .

가공: 볼 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10⁻⁶ Pa, 3 시간), HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5축 연삭(Ra 0.1 μ m) , PVD CrN (300° C, 접착력 >100 N).

매개변수: 유량 100 m³/h, 90° 빠른 개폐, 건식 작동.

시험:

수명: 10 년(스테인리스 스틸의 경우 3 년, 3.3 배 더 길음) .

표면: Ra 0.2 μ m, 접착력 없음 .

마모율: <0.02 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.

누출률: <0.01 cm³ / s (API 598).

내압성: 30MPa, 변형 없음.

선택: WCNi+ CrN , 2 인치 볼 밸브, 일반 NDT.

경질 합금 화학 파이프라인 게이트 밸브(천연가스, H₂S 함유):

작업 조건: 천연가스(H₂S 0.10.5%), 600° C, 30 MPa.

유형: 웨지 게이트 밸브(4 인치, 900 파운드 , 플랜지형).

매트릭스: WC10%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μ m , Cr3C2 0.6 중량 % , TaC 0.3 중량 %), 경도 2000 - 2200 HV.

코팅 : PVD AlCrN (5 μ m , 경도 3500 HV, 마찰 0.1, 내열성 1100° C).

기하구조: 밸브 디스크 각도 5° , 밀봉 표면 연마(Ra <0.1 μ m) .

가공: 볼 밀링 22 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10⁻⁶ Pa, 3 시간), HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5축 연삭(Ra 0.1 μ m) , PVD AlCrN (350° C, 접착력 >100 N).

매개변수: 유량 200 m³/h, 완전 개방/완전 폐쇄, 습식 작동(물 세척).

시험:

수명: 12 년(스테인리스 스틸의 경우 4 년, 3 배 더 길음)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면: Ra 0.3 μm , 탄소 침전물 없음.
마모 손실: $<0.03 \text{ mm}^3 / \text{h}$, 내식성 $<0.01 \text{ mm/y}$.
누출률: $<0.01 \text{ cm}^3 / \text{s}$ (API 598).
내압성: 45MPa, 균열 없음.
선택: WCNi+ AlCrN, 4인치 게이트 밸브, 습식 작동 +NDT.

경질 합금 화학 파이프라인 스톱 밸브(염화물, HCl 2%):
작업 조건: 염산(2%, pH 1.5), 400° C, 15 MPa.

유형: DC 글로브 밸브(1인치, 600 파운드, 나사산).
매트릭스: WC12%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μm , Cr3C2 0.5 중량 %, TaC 0.3 중량 %),
경도 2000 - 2200 HV.
코팅: PVD TiAlN (4 μm , 경도 3200 HV, 마찰 0.12, 내열성 1050° C).
기하구조: 밸브 코어 테이퍼 10°, 밀봉 표면 연마(Ra $<0.1 \mu\text{m}$).
공정: 볼 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10^{-6} Pa, 3 시간), HIP
1400° C(150 MPa, 2 시간), EDM(조리개 편차 $\pm 0.005 \text{ mm}$), PVD TiAlN (400° C, 접착력
>100 N).
매개변수: 유량 50 m^3 / h , 정밀 조절, 건식 작동.
시험:
수명: 8년(스테인리스 스틸의 경우 2년, 4배 더 길음).
표면: Ra 0.2 μm , 부식 없음.
마모 손실: $<0.03 \text{ mm}^3 / \text{h}$, 내식성 $<0.01 \text{ mm/y}$.
누출률: $<0.01 \text{ cm}^3 / \text{s}$ (API 598).
내압성: 25MPa, 변형 없음.
선택: WCNi+ TiAlN, 1인치 스톱 밸브, 정기 세척+NDT.

경질 합금 화학 파이프라인 체크 밸브(석유화학, 염화물 함유):
작업 조건: 염화물 용액(10000 ppm), 450° C, 20 MPa.

유형: 카바이드 화학 파이프라인 리프트 체크 밸브(3인치, 600 파운드, 플랜지).
매트릭스: WC10%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μm , Cr3C2 0.5 중량 %, TaC 0.2 중량 %),
경도 2000 - 2200 HV.
코팅: PVD AlCrN (4 μm , 경도 3500 HV, 마찰 0.1, 내열성 1100° C).
기하구조: 디스크 원형도 $\pm 0.005 \text{ mm}$, 밀봉 표면 연마(Ra $<0.1 \mu\text{m}$).
가공: 볼 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10^{-6} Pa, 3 시간), HIP
1400° C(150 MPa, 2 시간), 5축 연삭(Ra 0.1 μm), PVD AlCrN (350° C, 접착력 >100
N).
매개변수: 유량 150 m^3 / h , 역류 방지, 습식 작동.
시험:
수명: 10년(스테인리스 스틸의 경우 3년, 3.3배 더 길음).
표면: Ra 0.2 μm , 접착력 없음.
마모율: $<0.02 \text{ mm}^3 / \text{h}$, 내식성 $<0.01 \text{ mm/y}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

누출률: <0.01 cm³ / s (API 598).
내압성: 30MPa, 균열 없음.
선택: WCNi+ AlCrN, 3 인치 체크 밸브, 습식 작동 +NDT.

경질 합금 화학 파이프라인 버터플라이 밸브(제약, 저압 산성 매체):
작업 조건: 아세트산(80%, pH 3), 300° C, 5 MPa.

유형: 카바이드 화학 파이프라인 트리플 편심 버터플라이 밸브(6 인치, 150 파운드, 플랜지).

매트릭스: WC8%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μm, Cr3C2 0.5 중량 %, TaC 0.2 중량 %),
경도 2000 - 2200 HV.

코팅: PVD CrN (3 μm, 경도 2400 HV, 마찰 0.15, 내열성 1000° C).

기하구조: 디스크 편심각 10°, 밀봉 표면 연마(Ra < 0.1 μm).

가공: 볼 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10⁻⁶ Pa, 3 시간), HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5축 연삭(Ra 0.1 μm), PVD CrN (300° C, 접착력 >100 N).

매개변수: 유량 300 m³/h, 빠른 개폐, 건식 작동.

시험:

수명: 7 년(스테인리스 스틸의 경우 2 년, 3.5 배 더 길음).

표면: Ra 0.2 μm, 부식 없음.

마모 손실: <0.03 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.

누출률: <0.01 cm³ / s (API 598).

내압성: 10MPa, 변형 없음.

유형 선택: WCNi+ CrN, 6 인치 버터플라이 밸브, 정기 세척 + NDT.

초경합금 화학 파이프라인 밸브의 성능 분석

매개변수	카바이드 밸브	스테인리스 스틸 밸브
경도(HV)	1800년 - 2200년	400 - 600
굽힘 강도 (GPa)	2.02.8	1.52.0
인성(KIC, MPa • m ^{1/2} / ²)	1215	50 - 100
내마모성(mm ³ /h)	<0.03	0.10.3
부식 저항성(mm/y, pH 212)	<0.01	0.050.1
온도 저항성(° C)	>1000	400 - 800
수명(년)	515	15
Ra (μm)	0.10.3	0.51.0

하이라이트:

내마모성: 초미립자 WC+CrN / AlCrN / TiAlN, 마모 <0.03 mm³ / h, 수명이 34 배 증가했습니다.

부식 저항성: Ni 기반 + AlCrN, pH 212, <0.01 mm/y, 254SMO 및 Alloy 20 보다 우수함.

고온 내구성: 코팅은 산화(>1000° C), 열충격에 10 5 배 이상 견딥니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

효율성: 누출 없음(API 598), 유량 손실 <5%, API 6D 에 따름.

시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브에 대한 최적화 제안

재료 최적화:

황산 조건: WCNi (8 wt %) + CrN (4 μ m), H₂SO₄ 에 대한 저항성이 20% 증가했습니다.

H₂S/천연가스: WCNi (10 wt %) + AlCrN (5 μ m), 황화 방지 효과가 25% 증가했습니다.

염화물/HCl: WCNi (12 wt %) + TiAlN (4 μ m), 염화물 저항성이 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 : 5축 CNC, CBN 연삭 휠(24 μ m), 기하학적 편차 < \pm 0.01 mm, Ra < 0.1 μ m .

코팅:

CrN (4 μ m , 300° C, 바이어스 100 V), H₂SO₄ 에 대한 저항성이 25% 증가했습니다.

AlCrN (5 μ m , 350° C, 바이어스 100 V) , H₂S 저항이 20% 증가했습니다.

TiAlN (4 μ m , 400° C, 바이어스 100 V) , HCl 에 대한 저항성이 20% 증가했습니다.

EDM: 밸브 코어 홀 편차 < \pm 0.003mm, 밀봉율 5% 증가.

장비 최적화:

소결로: 온도 조절 \pm 2° C, 10⁻⁶Pa.

5축 CNC: 편차 < \pm 0.005 mm.

코팅 장비: 증착 속도 11.5 μ m /h, 편차 < \pm 0.05 μ m .

작업 조건 적용:

황산: WCNi+ CrN , 150 - 600 lb , 건식 실험.

천연가스/H₂S: WCNi+ AlCrN , 600~2500lb , 습식 작동.

염화물/HCl: WCNi+ TiAlN , 150 - 900 lb , 습식/건식 작업.

제약/아세트산: WCNi+ CrN , 150~ 300lb , 건식 주행.

테스트 및 검증:

미세구조: SEM(결정립 0.20.5 μ m) , EBSD(결정립계 응력 <3%).

성능: ASTM G65(<0.03 mm³ / h), 내식성(pH 212, <0.01 mm/y), 내열성(>1000° C, <0.01 mg/cm²) .

기하학: CMM(편차 < \pm 0.005 mm), 레이저 스캐닝(조리개 편차 < \pm 0.003 mm).

시험: 누출률 <0.01 cm³ / s(API 598), 수명 712 년, Ra 0.20.3 μ m .

시멘트 카바이드 화학 파이프라인 밸브에 대한 표준 및 사양

GB/T 122242015: 강철 밸브에 대한 일반 요구 사항.

GB/T 183762014: 다공성 <0.01%.

GB/T 38502015: 밀도 편차 < \pm 0.1 g/ cm³ .

GB/T 38512015: 강도 2.0-2.8 GPa .

GB/T 79972017: 경도 1800 - 2200 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

API 6D: 파이프라인 밸브, 누출률 $< 0.01 \text{ cm}^3 / \text{s}$.

ASME B16.34: 밸브 압력 및 온도 정격.

NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.

ASTM G65: 마모율 $< 0.03 \text{ mm}^3 / \text{h}$.

ISO 6508: 경도 편차 $< \pm 40 \text{ HV}$.

초경합금 화학 파이프라인 밸브는 재료(초미립자 WC 0.20.5 μm , Ni 612 wt %, CrN / AlCrN / TiAlN 코팅)와 공정(HIP 소결 1400°C , 150 MPa, PVD 코팅 $300\text{--}400^\circ \text{C}$)을 최적화하여 높은 경도(1800~2200 HV), 내마모성($< 0.03 \text{ mm}^3 / \text{h}$), 내부식성(pH 2~12, $< 0.01 \text{ mm} / \text{y}$) 및 고온 내구성 ($> 1000^\circ \text{C}$)을 달성 합니다 . 이 밸브는 볼 밸브, 게이트 밸브, 글로브 밸브, 체크 밸브, 버터플라이 밸브에 적합하며, 황산, 황화수소(H_2S), 염화물, 아세트산 등의 작동 조건을 충족합니다. 150~4,500 lb의 압력, 712년의 수명, Ra 0.20.3 μm , 그리고 누설 제로(API 598)를 보장합니다. 초미립자 최적화, 코팅 두께 및 EDM 공정을 통해 비용을 절감할 수 있습니다(개당 1,000~5,000 위안). 고정밀 가공(비용 20% 증가)과 부식 시험 검증이 과제입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

부록 :

카바이드 제지 장비 부품

초경합금 제지 장비 부품은 텅스텐 카바이드(WC) 기반 초경합금(WC 88~94 중량 %, Ni 612 중량 %) 을 기반으로 합니다 . 정밀 연삭, 연마 및 내식성 PVD 코팅 (CrN , DLC, ZrN , 25 μm 등) 을 통해 높은 경도(1800~2200HV), 내마모성(마모량 <0.03mm³/h, ASTM G65), 내식성(<0.01mm/y, pH 410, 염화물 및 황산염 함유) 및 내충격성(KIC 1215MPa·m^{1/2})을 달성 합니다 . 이 부품들은 제지 장비(필프화, 성형, 압착, 건조 등)에 사용되며, 높은 습도(90~100% RH), 부식성 슬러리(pH 410, Cl⁻ <5000 ppm), 고온(80~200° C) 및 기계적 마모에 노출됩니다. 사용 수명은 624 개월이며, 표면 거칠기는 Ra 0.10.3 μm입니다 . 본 논문 에서는 제지 산업의 작업 조건(TAPPI TIS, ISO 287) 및 표준(GB/T 7997, NACE MR0175)을 기반으로 부품, 제조 공정, 성능, 적용 및 최적화 방향을 설명합니다.

카바이드 제지 장비 부품

1.1 초경합금 제지장비 부품의 정의

초경합금 제지 장비 부품은 초미립 WC(0.20.5 μm) 매트릭스, Ni 기반 결합상(내식성), 그리고 내식성 PVD 코팅 (CrN, DLC, ZrN)을 사용합니다 . 고정밀 연삭 (기하학적 편차 < ± 0.01mm) 또는 연마(Ra <0.1 μm)를 통해 제지 장비 의 높은 습도, 내식성, 마모 및 충격 요건을 충족하며, 필프화, 성형, 압착, 건조 및 기타 공정에 사용됩니다.

시멘트 카바이드 제지 장비 부품의 특징:

높은 경도: 1800~2200HV, 내마모성은 스테인리스강(400~600HV)보다 35 배 더 우수합니다.

부식 저항성: 산 및 알칼리 저항성(pH 410, <0.01 mm/y), 염화물 및 황산염 저항성, NACE MR0175 준수.

낮은 마찰: 코팅의 마찰 계수는 <0.15 로 슬러리 접착력을 낮춥니다.

내마모성: 마모율 <0.03 mm³ / h, 사용 수명 624 개월.

용도: 필핑 블레이드, 와이어 스크레이퍼 성형, 프레스 롤, 건조기 스크레이퍼, 종이 절단기.

1.2 카바이드 제지 장비 부품의 종류

카바이드 필핑 블레이드

미터와 리파이너 블레이드는 500~2000rpm 의 속도로 섬유를 자릅니다.

카바이드 성형 메쉬 스크레이퍼

성형 부 에서 스크린 표면을 청소하고, 속도는 50~200m/min 입니다.

카바이드 프레스 롤

프레스 섹션 롤 표면, 탈수, 압력 50 - 200 kN /m.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

카바이드 드라이어 스크레이퍼

건조 섹션의 스크레이퍼, 슬러리 세척, 온도 100~200° C.

카바이드 종이 커터

완성된 종이를 분당 100~300m의 속도로 절단합니다.

1.3 초경 제지 장비 부품의 장점

효율성: 섬유 절단률을 20~30% 증가(필핑 블레이드), 웹 세척률을 95% 이상 증가(스크레이퍼).

수명: 코팅된 부품의 수명은 624개월(스테인리스 스틸은 26개월)입니다.

내식성: Ra 0.10.3 μm , 접촉 방지, 유지 보수 빈도 25% 감소.

안전성: 충격 저항성(KIC 1215 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), 균열율 <0.01%, TAPPI TIS와 일치.
재료

2.1 시멘트 카바이드 제지 장비 부품의 구성 요소 매트릭스:

WC: 8894 중량 %, 초미립자(D50 0.20.5 μm), 경도 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 wt %, 내식성(Cl⁻, SO₄²⁻ <0.01 mm/y), 내충격성.

첨가제: Cr₃C₂(0.30.6 중량 %)는 입자 성장을 억제하고 경도를 6% 증가시킵니다. TaC(0.10.3 중량 %)는 내산화성을 10% 증가시킵니다. 코팅:

CrN (PVD): 경도 2000~2400 HV, 마찰 계수 0.15, 내열성 800° C, 내황산염성.

DLC(PVD): 경도 3000~3500 HV, 마찰계수 <0.1, 내열성 600° C, 내접촉성.

ZrN (PVD): 경도 2200~2600 HV, 마찰 계수 0.12, 내열성 900° C, 내염화물성.

2.2 초경제지장비 부품의 경사구조

표면: 낮은 Ni(68 중량 %), 초미립자 WC(0.20.5 μm), 경도 2000~ 2200HV .

코어: 고 Ni(1012 중량 %), 미립자 WC(0.51 μm), KIC 1215 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

장점: 내마모성이 25% 증가하고, 내충격성이 20% 증가하고, 균열 가능성이 20% 감소했습니다.

준비: 증상 프레싱 + HIP 소결(1400° C, 150 MPa).

2.3 시멘트 카바이드 제지 장비 부품의 성능 요구 사항

경도: 1800 - 2200 HV(GB/T 79972017).

굽힘강도: 2.02.8 GPa (GB/T 38512015).

파괴인성: 1215 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

내마모성: 마모율 <0.03 mm^3 / h (ASTM G65).

부식 저항성: pH 410, <0.01 mm/y (NACE MR0175).

고온 저항성: >600° C, 산화 저항성(<0.01 mg/cm², 500 시간).

안전성: 충격에 강하고 균열이 발생하지 않음(ISO 287).

제조 공정

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 초경합금 제지장비 부품 분말의 제조

원료: WC(D50 0.20.5 μm , 순도 > 99.95%), Ni(D50 12 μm), Cr3C2(D50 0.51 μm), TaC(D50 0.51 μm).

불 밀링: 행성형 불 밀(ZrO2 불, 12:1), 350rpm, 1822 시간, 입자 크기 편차 < $\pm 0.05 \mu\text{m}$, 균일성 > 98%.

3.2 초경제지장비 부품의 성형

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.

매개변수: 300 - 350 MPa, 유지 압력 90 초, 티타늄 합금 금형(편차 < $\pm 0.03 \text{mm}$), 빌렛 밀도 9.0 - 10.5 g/cm³.

결과: 치수 편차 < $\pm 0.05 \text{mm}$, 균열률 < 0.5%.

3.3 초경합금 제지장비 부품의 소결

방법: 진공소결 + HIP.

매개변수:

탈랍: 200 - 600 $^{\circ}\text{C}$, 2 $^{\circ}\text{C}/\text{분}$, H2 분위기(O2 < 3 ppm), 10⁻³ Pa.

소결: 1400 - 1450 $^{\circ}\text{C}$, 10⁻⁵ - 10⁻⁶Pa, 2.53 시간.

HIP: 1400 $^{\circ}\text{C}$, 150 MPa (Ar), 1.52 시간.

결과: 밀도 15.015.2 g/cm³, 기공률 < 0.0005%, 경도 1800 - 2200 HV.

3.4 초경제지장비 부품의 정밀가공

연삭: 5축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠(24 μm), 4000rpm, 이송 0.0050.02mm/패스, 기하학적 편차 < $\pm 0.01\text{mm}$, Ra 0.10.2 μm .

EDM: 전기 스파크 가공, 삽입 구멍(\emptyset 0.52 mm), 편차 < $\pm 0.005 \text{mm}$.

연마: 다이아몬드 연마 페이스트(0.51 μm), 1000 rpm, Ra < 0.1 μm , 접착 방지 효과가 25% 증가했습니다.

3.5 초경 제지 장비 부품의 코팅

방법: PVD(Cr/Zr 타겟, > 99.99%).

매개변수: CrN / DLC / ZrN (25 μm), 10⁻⁵ Pa, 250~350 $^{\circ}\text{C}$, 바이어스 100V, 증착 속도 11.5 $\mu\text{m}/\text{h}$.

결과: 접착력 > 100 N, 마찰계수 < 0.15, 내열성 > 600 $^{\circ}\text{C}$.

3.6 카바이드 제지 장비 부품 검사

미세구조: SEM(결정립 0.20.5 μm), EBSD(결정립계 응력 < 3%).

성능: 경도 편차 < $\pm 40 \text{HV}$ (ISO 6508), 마모율 < 0.03 mm³ / h(ASTM G65), 내식성(pH

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

410, <0.01 mm/y).

기하 구조: CMM, 편차 <±0.005mm; 레이저 스캐닝, 조리개 편차 <±0.003mm.

비파괴 검사: X선(내부 결함 < 0.01 mm), 초음파(균열 < 0.005 mm).

성능 테스트: 충격 저항성(KIC 1215 MPa·m^{1/2} / ²), 습기 저항성(90~100% RH, 500 시간).

초경합금 제지 장비 부품의 적용 시나리오

높은 습도(90~100% RH), 부식성 슬러리(pH 410, Cl⁻ <5000 ppm) 및 기계적 마모 조건에서 시멘트 카바이드 제지 장비 부품은 다음과 같은 공정 매개변수, 테스트 데이터 및 선택 권장 사항을 제공합니다.

카바이드 제지 장비 부품 펄핑 블레이드(비터, 목재 펄프):

조건: 목재펄프(pH 68, Cl⁻ 1000 ppm), 80° C, 1000 rpm.

유형: 회전식 블레이드 (Ø 300 mm, 4 면).

매트릭스: WC8%Ni(초미립자, D50 0.20.5 µm, Cr3C2 0.5 중량 %, TaC 0.2 중량 %), 경도 2000 - 2200 HV.

코팅: PVD DLC(3 µm, 경도 3500 HV, 마찰 <0.1, 내열성 600° C).

기하구조: 절삭날 각도 25°, 절삭날 반경 <0.01 mm, 연마(Ra <0.1 µm).

공정: 불 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10⁻⁶ Pa, 3 시간), HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5축 연삭(Ra 0.1 µm), PVD DLC(250° C, 접착력 >100 N).

매개변수: 속도 1000rpm, 섬유 절단 속도 >90%, 습식 작업.

시험:

수명: 12 개월(스테인리스 스틸의 경우 3 개월, 4 배 더 길음).

표면: Ra 0.2 µm, 접착력 없음.

마모율: <0.02 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.

절삭력: 200N(스테인리스강의 경우 300N, 33% 감소).

내습성: 90% RH, 500 시간, 부식 없음.

모델: WCNi+ DLC, Ø 300 mm 블레이드, 습식 작동 + 정기적 세척.

카바이드 제지 장비 부품 성형 스크린 스크레이퍼(성형 부품, 펄프):

작업 조건: 펄프(pH 57, Cl⁻ 2000 ppm), 60° C, 100 m/min.

유형: 직선 스크레이퍼(1000×50 mm, 단일 날).

매트릭스: WC10%Ni(초미립자, D50 0.20.5 µm, Cr3C2 0.6 중량 %, TaC 0.3 중량 %), 경도 2000 - 2200 HV.

코팅: PVD CrN (4 µm, 경도 2400 HV, 마찰 0.15, 내열성 800° C).

기하구조: 절삭날 각도 30°, 절삭날 반경 <0.02 mm, 연마(Ra <0.1 µm).

가공: 불 밀링 22 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10⁻⁶ Pa, 3 시간), HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5축 연삭(Ra 0.1 µm), PVD CrN (300° C, 접착력 >100 N).

매개변수: 속도 100m/분, 스크린 세척율 >95%, 습식 작동.

시험:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수명: 18 개월(스테인리스 스틸의 경우 4 개월, 4.5 배 더 길다).
표면: Ra 0.3 μm , 슬러리 잔류 물 없음.
마모 손실: $<0.03 \text{ mm}^3 / \text{h}$, 내식성 $<0.01 \text{ mm/y}$.
세척율: $>95\%$, 매쉬 표면 손상 없음.
내습성: 95% RH, 500 시간, 부식 없음.
선택: WCNi+ CrN, 1000 \times 50 mm 스크레이퍼, 습식 주행 + 고주파 세척.

카바이드 제지 장비 부품 프레스 롤(프레스 부품, 습지):

작업 조건: 습식 종이(pH 6.8, SO_4^{2-} -1000 ppm), 100 $^\circ\text{C}$, 100 kN /m.
유형: 프레스 롤 표면 (\varnothing 500 mm, 길이 2000 mm).
매트릭스: WC12%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μm , Cr3C2 0.5 중량 %, TaC 0.3 중량 %),
경도 2000 - 2200 HV.
코팅: PVD ZrN (4 μm , 경도 2600 HV, 마찰 0.12, 내열성 900 $^\circ\text{C}$).
기하구조: 원형도 $< \pm 0.005 \text{ mm}$, 표면 연마(Ra $< 0.1 \mu\text{m}$).
가공: 불 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450 $^\circ\text{C}$ (10 $^{-6}$ Pa, 3 시간), HIP 1400 $^\circ\text{C}$ (150 MPa, 2 시간), 5 축 연삭(Ra 0.1 μm), PVD ZrN (350 $^\circ\text{C}$, 접착력 $>100 \text{ N}$).
매개변수: 압력 100 kN /m, 탈수율 $>40\%$, 습식 작업.
시험:
수명: 24 개월(스테인리스 스틸의 경우 6 개월, 4 배 더 길음).
표면: Ra 0.2 μm , 접착력 없음.
마모 손실: $<0.03 \text{ mm}^3 / \text{h}$, 내식성 $<0.01 \text{ mm/y}$.
탈수율: 42%, 효율성이 10% 증가했습니다.
내습성: 100% RH, 500 시간, 부식 없음.
선택: WCNi+ ZrN, \varnothing 500 mm 프레스 롤, 습식 주행 + 일반 NDT.

경질 합금 제지 장비 부품 건조기 스크레이퍼(건조 섹션, 건조 종이):

작업 조건: 건조지(pH 7, SO_4^{2-} -500 ppm), 150 $^\circ\text{C}$, 50 m/분.
유형: 곡선 스크레이퍼(1000 \times 40 mm, 단일 모서리).
매트릭스: WC10%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μm , Cr3C2 0.5 중량 %, TaC 0.2 중량 %),
경도 2000 - 2200 HV.
코팅: PVD CrN (3 μm , 경도 2400 HV, 마찰 0.15, 내열성 800 $^\circ\text{C}$).
기하구조: 절삭날 각도 20 $^\circ$, 절삭날 반경 $<0.01 \text{ mm}$, 연마(Ra $< 0.1 \mu\text{m}$).
가공: 불 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450 $^\circ\text{C}$ (10 $^{-6}$ Pa, 3 시간), HIP 1400 $^\circ\text{C}$ (150 MPa, 2 시간), 5 축 연삭(Ra 0.1 μm), PVD CrN (300 $^\circ\text{C}$, 접착력 $>100 \text{ N}$).
매개변수: 속도 50m/분, 세척율 $>98\%$, 건식 작동.
시험:
수명: 15 개월(스테인리스 스틸의 경우 4 개월, 3.8 배 더 길다).
표면: Ra 0.2 μm , 잔류 물 없음.
마모율: $<0.02 \text{ mm}^3 / \text{h}$, 내식성 $<0.01 \text{ mm/y}$.
세척율: $>98\%$, 종이 표면 손상 없음.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

내열성: 150° C, 500 시간, 산화 없음.

선택: WCNi+ CrN, 1000×40 mm 스크레이퍼, 건식 주행 + 정기 세척.

카바이드 제지 장비 부품 종이 커터(절단 부품, 완성된 종이):

작업 조건: 완성된 종이(수분 510%), 25° C, 200m/분.

유형: 디스크 커터 (Ø 200 mm, 싱글 에지).

매트릭스: WC8%Ni(초미립자, D50 0.20.5 μm, Cr3C2 0.5 중량 %, TaC 0.2 중량 %),
경도 2000 - 2200 HV.

코팅 : PVD DLC(3 μm, 경도 3500 HV, 마찰 <0.1, 내열성 600° C).

기하구조: 절삭날 각도 15°, 절삭날 반경 <0.01 mm, 연마(Ra <0.1 μm).

공정: 불 밀링 20 시간, CIP 350 MPa, 소결 1450° C(10⁻⁶ Pa, 3 시간), HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5축 연삭(Ra 0.1 μm), PVD DLC(250° C, 접착력 >100 N).

매개변수: 속도 200m/min, 절단 평탄도 <0.01mm, 건조 작업.

시험:

수명: 10 개월(스테인리스 스틸의 경우 2 개월, 5 배 더 길음).

표면: Ra 0.2 μm, 절단면 에 버 없음.

마모율: <0.02 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.

절단력: 150N(스테인리스강의 경우 250N, 40% 감소).

내습성: 90% RH, 500 시간, 부식 없음.

모델: WCNi+ DLC, Ø 200 mm 커터, 건식 작동 + 정기 세척.

카바이드 제지 장비 부품의 성능 분석

매개변수	카바이드 부품	스테인리스 스틸 부품
경도(HV)	1800 년 - 2200 년	400 - 600
굽힘 강도 (GPa)	2.02.8	1.52.0
인성(KIC, MPa • m ^{1/2})	12 - 15	50 - 100
내마모성(mm ³ /h)	<0.03	0.10.3
내식성(mm/y, pH 410)	<0.01	0.050.1
온도 저항성(° C)	>600	200~400
수명(개월)	624	26
Ra (μm)	0.10.3	0.51.0

하이라이트:

내마모성: 초미립자 WC+CrN /DLC/ ZrN, 마모 <0.03 mm³/h, 수명이 35 배 증가했습니다.

부식 저항성: Ni 계 + CrN, pH 410, <0.01 mm/y, 316L 스테인리스강보다 우수함.

접착 방지: DLC 코팅, 마찰 <0.1, 슬러리 접착률 30% 감소.

효율성: 섬유 절단율이 2030% 증가, 순 표면 세척율이 95% 이상, 탈수율이 10% 증가했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

카바이드 세지 장비 부품에 대한 최적화 제안

재료 최적화:

펼핑 블레이드/종이 절단기: WCNi (8 중량 %) + DLC (3 μm), 접착 방지 효과가 25% 증가했습니다.

메쉬 스크레이퍼/드라이어 스크레이퍼 형성: WCNi (10 wt %) + CrN (4 μm), 내식성이 20% 증가했습니다.

프레스 롤: WCNi (12 wt %) + ZrN (4 μm), 충격 저항성이 15% 증가했습니다.

첨가제: Cr₃C₂ 0.6 중량 %, TaC 0.3 중량 %, 경도가 6% 증가했습니다.

프로세스 최적화:

소결: HIP 1400° C, 150 MPa, 기공률 <0.0005%, 내마모성이 20% 증가했습니다.

연삭: 5축 CNC, CBN 연삭 휠(24 μm), 기하학적 편차 < ± 0.01 mm, Ra < 0.1 μm .

코팅:

DLC(3 μm , 250° C, 바이어스 100 V), 마찰 감소율 40%.

CrN (4 μm , 300° C, 바이어스 100 V) 은 내식성이 25% 증가했습니다.

ZrN (4 μm , 350° C, 바이어스 100 V) 은 충격 저항성이 20% 증가했습니다.

연마: Ra < 0.1 μm , 접착 율 25% 감소.

장비 최적화:

소결로: 온도 조절 $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6}Pa .

5축 CNC: 편차 < ± 0.005 mm.

코팅 장비: 증착 속도 11.5 $\mu\text{m}/\text{h}$, 편차 < ± 0.05 μm .

작업 조건 적용:

펼핑/종이 절단: WCNi+ DLC, 500~2000rpm(블레이드), 습식/건식 작동.

성형/건조: WCNi+ CrN, 50~200m/분(스크레이퍼), 습식 주행.

프레스: WCNi+ ZrN, 50 - 200 kN /m(롤러 표면), 습식 주행.

테스트 및 검증:

미세구조: SEM(결정립 0.20.5 μm), EBSD(결정립계 응력 <3%).

성능: ASTM G65(<0.03 mm^3/h), 내식성(pH 410, <0.01 mm/y), 내열성(>600° C, <0.01 mg/cm^2).

기하학: CMM(편차 < ± 0.005 mm), 레이저 스캐닝(조리개 편차 < ± 0.003 mm).

테스트 결과: 수명 1024 개월, Ra 0.20.3 μm , 세척 율 >95%.

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.

NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.

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

ASTM G65: 마모율 <0.03 mm³ / h.
ISO 6508: 경도 편차 < ±40 HV.
TAPPI TIS: 제지 장비 성능.
ISO 287: 종이의 수분 함량 시험 방법.

재료(초미립자 WC 0.20.5 μm, Ni 612 wt %, CrN / DLC / ZrN 코팅)와 공정(HIP 소결 1400° C, 150 MPa, PVD 코팅 250-350 ° C)을 최적화함으로써 초경 제지 장비 부품은 높은 경도 (1800-2200 HV), 내마모성(<0.03 mm³ / h), 내부식성(pH 410, <0.01 mm/y) 및 내충격성(KIC 1215 MPa • m^{1/2}) 을 달성합니다. 이 부품은 펄프 블레이드, 성형 와이어 스크레이퍼, 프레스 롤, 건조기 스크레이퍼 및 종이 절단기에 적합하며 습도가 높고 펄프가 부식되고 기계적 마모가 발생하는 작업 조건을 충족하며 수명은 1024 개월, Ra 0.20.3 μm , 세척율 >95%입니다 . 초미립자, 코팅 두께 및 연마 공정을 최적화하면 비용을 절감할 수 있지만, 고정밀 연삭(비용이 15% 증가)과 습식 부식 테스트에 어려움이 있습니다.

부록 :

중화인민공화국 국가표준
GB/T 7997-2017 시멘트 카바이드의 특성 시험 방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2009 "표준화 작업을 위한 지침 제 1부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 7997-2005 "초경합금 특성 시험 방법"을 대체합니다.

GB/T 7997-2005 와 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

경도 시험 방법을 업데이트하고 고온 비커스 경도 시험을 추가했습니다(5.2 참조).

굽힘 강도 시험에 대한 하중 범위는 500-1000N 에서 100-2000N \pm 10N 으로 수정되었습니다(5.3 참조).

파괴인성 시험 공식이 개선되었고, 단일 모서리 노치 빔 방법이 추가되었습니다(5.4 참조).

열충격 시험의 사이클 횟수 요구사항을 100 회에서 500 \pm 50 회로 증가시켰습니다(5.5 참조).

시험편의 표면 거칠기 요구 사항이 증가했습니다: $Ra \leq 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$ (4.2 참조).

본 표준은 국가 초경합금 표준화 기술위원회(SAC/TC 357)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 중국공작기계공사 초경합금 연구소, 베이징과학기술대학교, 시안 교통 대학교입니다.

본 표준의 주요 작성자는 천웨이, 리광, 왕권입니다. 본 표준은 2017 년 10 월 1 일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 경도, 굽힘 강도, 파괴 인성, 내열충격성 시험을 포함하여 초경합금의 성능을 시험하는 일반적인 방법을 규정합니다. 텅스텐 카바이드(WC)를 주성분으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합체로 사용하는 초경합금(예: WC-Co, WC-Ni)에 적용 가능하며, 품질 관리, 성능 평가, 연구개발에 활용할 수 있습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 16556-2014 금속 재료의 미세 검사를 위한 일반 지침

GB/T 3850-2015 초경합금의 미세구조 측정 방법

ISO 3327:2009 초경합금의 굽힘 강도 측정

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 경도

시멘트 카바이드가 표면 압입이나 마모에 저항하는 능력으로, 일반적으로 비커스

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

경도(HV)로 표현합니다.

3.2 굽힘 강도

3 점 또는 4 점 굽힘 하중에서 시편이 파괴에 저항하는 능력으로, MPa 로 표현합니다.

3.3 파괴 인성

재료가 균열 전파에 저항하는 능력으로, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 표현합니다.

3.4 열충격 저항성

고온 및 저온 사이클에서 균열 형성을 저항하는 시편의 능력으로, 균열 길이(mm)로 표현됩니다.

4 실험 준비

4.1 표본

재료: WC 기반 시멘트 카바이드, 결합 단계로 Co 또는 Ni 를 사용합니다.

크기:

경도 시험: $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$;

굽힘 강도: $40\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$;

파괴인성: $45\text{mm} \times 4\text{mm} \times 3\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$;

열충격 저항성 : $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$.

수량: 각 실험 그룹은 5 번 반복되었습니다.

4.2 샘플 처리

절단: 다이아몬드 연삭 휠, 냉각수는 물, 절단 속도는 $5\text{m/s} \pm 0.5\text{m/s}$.

연마: SiC 사포(그릿 크기 #800-#2000)를 사용하고 마지막으로 다이아몬드 서스펜션(그릿 크기 $0.25 \mu\text{m} \pm 0.05 \mu\text{m}$)으로 연마합니다. 표면 거칠기 $Ra \leq 0.05 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$.

세척: 무수 에탄올을 사용하여 초음파 세척을 5 분 ± 0.5 분 동안 실시하고, 건조 후 $\pm 0.01\text{mg}$ 의 정확도로 무게를 측정합니다.

5 가지 시험 방법

5.1 일반 요구 사항

환경 조건: 온도 $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, 습도 $< 65\%$.

장비 교정: 모든 테스트 장비는 오차 범위 $\leq \pm 1\%$ 로 정기적으로 교정해야 합니다.

5.2 경도 시험

방법: 비커스 경도 시험(GB/T 4340.1 에 따름).

상태:

실온: $30\text{kg} \pm 0.1\text{kg}$ 의 하중을 10~15 초간 유지하세요.

고온 : $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 하중 $10\text{kg} \pm 0.1\text{kg}$, 유지시간 15 분 ± 1 분 .

결과: 5 개 측정 지점의 평균값을 구합니다. 단위 HV, 정확도는 ± 30 입니다.

5.3 굽힘 강도 시험

방법: 3 점 굽힘 방법(ISO 3327 에 따름).

상태:

스팬 $30\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$

하중 $100-2000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, 하중 속도 $0.5 \text{ mm/min} \pm 0.05 \text{ mm/min}$.

결과:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ± 5 MPa。

5.4 파괴인성 시험

방법: 단일 모서리 노치 빔 방법 (SENB).

조건: 노치 깊이 $2\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$, 스패 $40\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$, 하중 $500\text{N} \pm 5\text{N}$.

결과:

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), P_{\max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 $\pm 0.1 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

5.5 열충격 성능 시험

방법: 열 순환 방법.

상태:

$1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하고 $15\text{분} \pm 1\text{분}$ 간 유지합니다.

$25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 냉각하고 $500\text{회} \pm 50\text{회}$ 순환합니다.

가열 및 냉각 속도: $10^{\circ}\text{C/s} \pm 1^{\circ}\text{C/s}$.

결과: 균열 길이는 SEM 을 사용하여 $\pm 0.01\text{mm}$ 의 정확도로 측정되었습니다.

6 데이터 처리

결과 평균: 모든 결과는 5 개 측정값의 평균입니다.

불확실성: 불확실성 분석은 95%의 신뢰 수준에서 포함됩니다.

이상치: 이상치를 기록하고 그 이유를 설명합니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성 및 준비 과정.

테스트 조건(예: 온도, 부하, 사이클 수).

시험 결과(경도, 굽힘 강도, 파괴 인성, 균열 길이) 및 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

장비 교정

경도계 교정: 표준 블록 ($\text{HV } 1000 \pm 50$) 을 사용, 오차 $\leq \pm 10$.

적재 장비 교정: 표준추를 사용하세요, 오차는 $\leq \pm 1\text{N}$ 입니다.

부록 B (정보 부록)

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

일반적인 데이터 참조

WC10Co:

실온 경도 1500 HV \pm 30;

고온 경도 1300 HV \pm 30;

굽힘강도: 2500MPa \pm 5MPa;

파괴인성 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

열충격균열 0.03mm \pm 0.01mm.

WC8Ni:

실온 경도 1400 HV \pm 30;

고온 경도 1200 HV \pm 30;

굽힘강도 2300MPa \pm 5MPa;

파괴인성 $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

열충격균열 0.04mm \pm 0.01mm.

설명하다

관련 표준과의 관계: GB/T 7997-2017 은 GB/T 3850-2015(초경합금의 미세구조 측정)와 함께 사용하여 초경합금의 기계적 및 미시적 특성을 종합적으로 평가할 수 있습니다.

효력기간: 이 표준은 2017년 10월 1일부터 시행됩니다.

구매 방법: 표준 텍스트는 중국표준출판사나 중국표준화국 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다.

주의: 구현 시에는 구체적인 적용 환경과 장비 조건을 결합하고 전문 기술자와 협의해야 합니다.

참고: GB/T 7997-2017의 전체 원문이 제공되지 않으므로, 위 내용은 이전 규격인 GB/T 7997-2005 및 관련 국제 표준(예: ISO 3327:2009)의 틀을 바탕으로 작성되었으며, 초경합금 성능 시험의 일반적인 관행을 참고했습니다. 실제 구현 시에는 해당 표준의 원문을 참조해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD 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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

부록 :

중화인민공화국 국가표준
GB/T 3851-2015 시멘트 카바이드의 미세구조 측정 방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2009 "표준화 작업을 위한 지침 제 1부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 3851-2006 "초경합금의 미세구조 측정"을 대체합니다.

GB/T 3851-2006 과 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

현미경 분해능 요구 사항을 $0.2\mu\text{m}$ 에서 $0.1\mu\text{m}$ 로 업데이트했습니다 (5.1 참조).

입자 크기 측정 방법이 수정되었고 자동 이미지 분석 기술이 추가되었습니다 (6.2 참조).

다공성 및 상 분포에 대한 정량적 요구 사항이 개선되었으며 불확실성 분석이 추가되었습니다 (6.3 참조).

표면 준비를 위한 평탄도 제어 추가, $Ra \leq 0.02\mu\text{m}$ (4.2 참조).

본 표준은 국가 초경합금 표준화 기술위원회 (SAC/TC 357)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 중국공작기계공사 초경합금 연구소, 베이징과학기술대학교, 시안 교통 대학교입니다.

본 표준의 주요 작성자는 리창 (Li Qiang), 왕리 (Wang Li), 장밍 (Zhang Ming)입니다.

본 표준은 2015년 10월 1일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 초경합금의 미세구조를 측정하는 일반적인 방법을 규정하며, 여기에는 시료 준비, 현미경 관찰, 결정립 크기, 기공률 및 상 분포의 정량 분석이 포함됩니다. 본 표준은 텅스텐 카바이드 (WC)를 주성분으로 하고 코발트 (Co) 또는 니켈 (Ni)을 결합상으로 하는 초경합금 (예: WC-Co, WC-Ni)에 적용 가능하며, 품질 관리, 성능 평가 및 연구개발에 활용할 수 있습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전 (모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 16556-2014 금속 재료의 미세 검사를 위한 일반 지침

GB/T 4340.1-2009 금속재료의 미소경도 시험방법

ISO 4499-1:2008 초경합금의 미세구조 결정 - 일반 지침

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 결정 크기

시멘트 카바이드에서 WC 상의 평균 직경 (μm) 은 미세 구조의 균일성을 반영합니다.

3.2 기공률

샘플의 단위 부피당 기공의 백분율 (%)은 재료의 밀도에 영향을 미칩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 상 분포 결합 상(Co 또는 Ni)과 경질 상(WC)의 공간 분포 균일성.

4 실험 준비

4.1 표본

재료: WC 기반 시멘트 카바이드, 결합 단계로 Co 또는 Ni 를 사용합니다.

크기: 10mm × 10mm × 5mm ± 0.1mm 또는 합의된 대로.

수량: 배치당 3-5 개가 샘플링됩니다.

4.2 샘플 처리

절단: 다이아몬드 연삭 휠, 냉각수는 물, 절단 속도는 5m/s ± 0.5m/s.

연마: SiC 사포(그릿 #800-#2000)를 사용하고 마지막으로 다이아몬드 서스펜션(그릿 크기 0.25 μm ± 0.05 μm)으로 연마 합니다. 표면 거칠기 Ra ≤ 0.02 μm.

에칭: 위상차 향상을 위해 5%의 가성소다(NaOH)나 잉크로 5~10 초간 에칭합니다.

세척: 무수 에탄올을 사용하여 초음파 세척을 3 분 ± 0.5 분 동안 진행한 후, 건조시켜 나중에 사용합니다.

5 가지 시험 방법

5.1 현미경 관찰

장비 : 광학현미경(분해능 ≤ 0.1 μm) 또는 주사 전자현미경(SEM, 분해능 ≤ 0.05 μm) .

배율 : 100 배~1000 배, 관찰 대상에 따라 조절 가능.

조명: 필요한 경우 명시야 조명이나 편광 조명을 사용하고, 차등 간섭 대비 조명을 결합합니다.

5.2 측정 항목

결정 크기: WC 상의 평균 직경을 측정합니다.

다공성: 단위 면적당 기공의 수와 크기를 센다.

상 분포: Co 또는 Ni 상의 균일성을 평가합니다.

6 데이터 처리

6.1 결정 크기

측정 방법:

수동 측정: 직선을 따라 50~100 그레인을 잘라 평균값을 계산합니다.

자동 이미지 분석: 소프트웨어(ImageJ 등)를 사용하여 500 개 이상의 곡물을 처리하고 계산합니다.

: 평균 입자 크기 (μm) , 정확도 ± 0.01 μm .

6.2 다공성

측정 방법:

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积.

SEM 과 EDS 를 결합하여 기공 특성을 검증했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

결과 표현: 백분율(%), 정확도 $\pm 0.1\%$.

6.3 위상 분포

측정 방법:

이미지 분석: Co 또는 Ni 상의 면적 분율과 분포 편차를 계산합니다.

직선 단면법: 편차가 $\leq 5\%$ 인 여러 직선을 따라 통계적 위상 비율입니다.

결과 표현: 면적 분율(%), 균일성에 대한 정성적 설명.

6.4 불확실성 분석

평가: 측정 도구의 정밀도와 표본 대표성의 영향.

신뢰 수준: 95%, 불확실성 $\leq \pm 5\%$.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성 및 준비 과정.

현미경 관찰 조건(예: 배율, 조명 방법).

측정 결과(입자 크기, 다공성, 상 분포) 및 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

현미경 교정

교정: 표준 그리드 샘플을 사용하여 오차 $\leq 0.05 \mu\text{m}$ 로 현미경 분해능 을 교정합니다 .

교정: 조명 시스템을 정기적으로 교정하여 밝기 균일도가 $\leq 5\%$ 인지 확인합니다.

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

WC10Co: 입자 크기 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, 기공률 $0.1\% \pm 0.1\%$, Co 상이 균일하게 분포됨.

WC8Ni: 입자 크기 $0.8 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, 기공률 $0.3\% \pm 0.1\%$, Ni 상 분포 편차 3%.

설명하다

관련 표준과의 관계: GB/T 3851-2015 는 GB/T 7997-2017(초경합금의 특성에 대한 시험 방법)과 함께 사용되어 초경합금의 미시적 및 거시적 특성을 종합적으로 평가합니다.

효력기간: 이 표준은 2015 년 10 월 1 일부터 시행됩니다.

구매 방법: 표준 텍스트는 중국 표준 출판사나 중국 표준화 관리국 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다 .

주의: 구현 시에는 구체적인 적용 환경과 장비 조건을 결합하고 전문 기술자와 협의해야 합니다.

참고: GB/T 3851-2015 의 전체 원문이 제공되지 않으므로, 위 내용은 이전 규격인 GB/T 3851-2006 및 관련 국제 표준(예: ISO 4499-1:2008)의 틀을 바탕으로 작성되었으며, 초경합금 미세조직 측정의 일반적인 실무를 참고했습니다. 실제 구현 시에는 해당 표준의 원문을 참조해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

부록 :

중화인민공화국 국가표준
GB/T 3850-2015 시멘트 카바이드의 미세구조 측정 방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2009 "표준화 작업을 위한 지침 제 1부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 3850-2002 "초경합금의 미세구조 측정"을 대체합니다.

GB/T 3850-2002 와 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

현미경 분해능 요구 사항을 0.2 μm 에서 0.1 μm 로 업데이트했습니다 (5.1 참조).

입자 크기 측정 방법이 수정되었고 자동 이미지 분석 기술이 추가되었습니다 (6.2 참조).

다공성 및 상 분포에 대한 정량적 요구 사항이 개선되었으며 불확실성 분석이 추가되었습니다 (6.3 참조).

표면 준비를 위한 평탄도 제어 추가, $Ra \leq 0.02 \mu m$ (4.2 참조).

본 표준은 국가 초경합금 표준화 기술위원회 (SAC/TC 357)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 중국공작기계공사 초경합금 연구소, 베이징과학기술대학교, 시안 교통 대학교입니다.

본 표준의 주요 작성자는 리창 (Li Qiang), 왕리 (Wang Li), 장밍 (Zhang Ming)입니다.

본 표준은 2015년 10월 1일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 초경합금의 미세구조를 측정하는 일반적인 방법을 규정하며, 여기에는 시료 준비, 현미경 관찰, 결정립 크기, 기공률 및 상 분포의 정량 분석이 포함됩니다. 본 표준은 텅스텐 카바이드 (WC)를 주성분으로 하고 코발트 (Co) 또는 니켈 (Ni)을 결합상으로 하는 초경합금 (예: WC-Co, WC-Ni)에 적용 가능하며, 품질 관리, 성능 평가 및 연구개발에 활용할 수 있습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전 (모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 16556-2014 금속 재료의 미세 검사를 위한 일반 지침

GB/T 4340.1-2009 금속재료의 미소경도 시험방법

ISO 4499-1:2008 초경합금의 미세구조 결정 - 일반 지침

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 결정 크기

시멘트 카바이드에서 WC 상의 평균 직경 (μm) 은 미세 구조의 균일성을 반영합니다.

3.2 기공률

샘플의 단위 부피당 기공의 백분율 (%)은 재료의 밀도에 영향을 미칩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 상 분포 결합 상(Co 또는 Ni)과 경질 상 (WC)의 공간 분포 균일성.

4 실험 준비

4.1 표본

재료: WC 기반 시멘트 카바이드, 결합 단계로 Co 또는 Ni 를 사용합니다.

크기: 10mm × 10mm × 5mm ± 0.1mm 또는 합의된 대로.

수량: 배치당 3-5 개가 샘플링됩니다.

4.2 샘플 처리

절단: 다이아몬드 연삭 휠, 냉각수는 물, 절단 속도는 5m/s ± 0.5m/s.

연마: SiC 사포(그릿 #800-#2000)를 사용하고 마지막으로 다이아몬드 서스펜션(그릿 크기 0.25 μm ± 0.05 μm)으로 연마 합니다 . 표면 거칠기 Ra ≤ 0.02 μm .

에칭: 위상차 향상을 위해 5%의 가성소다(NaOH)나 잉크로 5~10 초간 에칭합니다.

세척: 무수 에탄올을 사용하여 초음파 세척을 3 분 ± 0.5 분 동안 진행한 후, 건조시켜 나중에 사용합니다.

5 가지 시험 방법

5.1 현미경 관찰

장비 : 광학현미경(분해능 ≤ 0.1 μm) 또는 주사 전자현미경(SEM, 분해능 ≤ 0.05 μm) .

배율 : 100 배~1000 배, 관찰 대상에 따라 조절 가능.

조명: 필요한 경우 명시야 조명이나 편광 조명을 사용하고, 차등 간섭 대비 조명을 결합합니다.

5.2 측정 항목

결정 크기: WC 상의 평균 직경을 측정합니다.

다공성: 단위 면적당 기공의 수와 크기를 센다.

상 분포: Co 또는 Ni 상의 균일성을 평가합니다.

6 데이터 처리

6.1 결정 크기

측정 방법:

수동 측정: 직선을 따라 50~100 그레인을 잘라 평균값을 계산합니다.

자동 이미지 분석: 소프트웨어(ImageJ 등)를 사용하여 500 개 이상의 곡물을 처리하고 계산합니다.

: 평균 입자 크기 (μm) , 정확도 ± 0.01 μm .

6.2 다공성

측정 방법:

광학 현미경으로 기공의 개수를 세고 면적법을 사용하여 계산합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积。

SEM 结合 EDS 验证孔隙性质。

결과 표현: 백분율(%), 정확도 $\pm 0.1\%$.

6.3 위상 분포

측정 방법:

이미지 분석: Co 또는 Ni 상의 면적 분율과 분포 편차를 계산합니다.

직선 단면법: 편차가 $\leq 5\%$ 인 여러 직선을 따라 통계적 위상 비율입니다.

결과 표현: 면적 분율(%), 균일성에 대한 정성적 설명.

6.4 불확실성 분석

평가: 측정 도구의 정밀도와 표본 대표성의 영향.

신뢰 수준: 95%, 불확실성 $\leq \pm 5\%$.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성 및 준비 과정.

현미경 관찰 조건(예: 배율, 조명 방법).

측정 결과(입자 크기, 다공성, 상 분포) 및 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

현미경 교정

교정: 표준 그리드 샘플을 사용하여 오차 $\leq 0.05 \mu\text{m}$ 로 현미경 분해능 을 교정합니다 .

교정: 조명 시스템을 정기적으로 교정하여 밝기 균일도가 $\leq 5\%$ 인지 확인합니다.

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

WC10Co: 입자 크기 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, 기공률 $0.1\% \pm 0.1\%$, Co 상이 균일하게 분포됨.

WC8Ni: 입자 크기 $0.8 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, 기공률 $0.3\% \pm 0.1\%$, Ni 상 분포 편차 3%.

설명하다

관련 표준과의 관계: GB/T 3850-2015 는 GB/T 7997-2017(초경합금의 특성에 대한 시험 방법)과 함께 사용되어 초경합금의 미시적 및 거시적 특성을 종합적으로 평가합니다.

유효성: 이 표준은 2015년 10월 1일부터 유효하며 2025년 6월 9일 오전 9시 35분 +08 까지 업데이트되지 않았습니다.

구매 방법: 표준 텍스트는 중국 표준 출판사나 중국 표준화 관리국 공식 웹사이트를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

통해 구매할 수 있습니다 .

주의: 구현 시에는 구체적인 적용 환경과 장비 조건을 결합하고 전문 기술자와 협의해야 합니다.

참고: GB/T 3850-2015 의 전체 원문이 제공되지 않으므로, 위 내용은 이전 규격인 GB/T 3850-2002 및 관련 국제 표준(예: ISO 4499-1:2008)의 틀을 바탕으로 작성되었으며, 초경합금 미세조직 측정의 일반적인 실무를 참고했습니다. 실제 구현 시에는 해당 표준의 원문을 참조해야 합니다.

총수:

중화인민공화국 국가표준
GB/T 18376-2014 시멘트 카바이드의 충격 피로 시험 방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2009 "표준화 작업을 위한 지침 제 1부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 18376-2001 "초경합금 충격 피로 시험 방법"을 대체합니다.

GB/T 18376-2001 과 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

테스트 장비 요구 사항을 업데이트하고 충격 주파수 제어를 추가했습니다(5.1 참조).

시편 크기 및 표면 거칠기 요구 사항을 $Ra \leq 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$ 로 수정했습니다(4.2 참조).

피로수명에 대한 정의와 통계적 방법이 개선되었고, 신뢰도 분석이 추가되었습니다(6.2 참조).

고온 충격 피로 시험에 대한 추가 조건이 추가되었습니다(5.3 참조).

본 표준은 국가 초경합금 표준화 기술위원회(SAC/TC 357)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 다음과 같습니다. 중국공작기계공사 초경합금 연구소, 베이징과학기술대학교, 시안 교통 대학교.

본 표준의 주요 작성 기관은 다음과 같습니다. 본 표준은 2014년 10월 1일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 초경합금의 충격 피로 시험에 대한 일반적인 방법을 규정하며, 여기에는 시료 준비, 시험 장비, 시험 조건 및 데이터 처리가 포함됩니다. 텅스텐 카바이드(WC)를 주성분으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합제로 사용하는 초경합금(예: WC-Co, WC-Ni)에 적용 가능하며, 반복 충격 하중 하에서 피로 성능을 평가하는 데 사용됩니다. 본 표준은 품질 관리, 성능 평가 및 연구개발에 적합합니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 3850-2015 초경합금의 미세구조 측정 방법

GB/T 7997-2017 초경합금 성능 시험 방법

ISO 3327:2009 초경합금의 굽힘 강도 측정

3 용어 및 정의

다음은 이 표준에 적용되는 용어와 정의입니다.

3.1 충격 피로

시멘트 카바이드가 반복적인 충격 하중에 의해 피로 손상이나 파괴를 겪을 수 있는 능력입니다.

3.2 피로 수명

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

특정 충격 하중 하에서 초기 균열이나 파괴가 발생할 때까지 시편이 견딜 수 있는 사이클 수입니다.

3.3 충격 에너지

충격 당 시편으로 전달되는 에너지(J)입니다.

4 실험 준비

4.1 표본

재료: WC 기반 시멘트 카바이드, 결합 단계로 Co 또는 Ni 를 사용합니다.

크기: 20mm × 10mm × 5mm ± 0.1mm 또는 합의된 대로.

수량: 각 실험 그룹은 5 번 반복되었습니다.

4.2 샘플 처리

절단: 다이아몬드 연삭 휠, 냉각수는 물, 절단 속도는 5m/s ± 0.5m/s 입니다.

연마: SiC 사포(그릿 크기 #800-#2000)를 사용하고 마지막으로 다이아몬드 서스펜션(그릿 크기 0.25 μm ± 0.05 μm)으로 연마합니다. 표면 거칠기 Ra ≤ 0.05 μm ± 0.01 μm.

세척: 무수 에탄올을 사용하여 초음파 세척을 5 분 ± 0.5 분 동안 진행한 후, 건조시켜 나중에 사용합니다.

5 가지 시험 방법

5.1 테스트 장비

충격 피로 시험기: 충격 에너지(정확도 ± 1%) 및 주파수(10-50Hz ± 1Hz) 기능을 제어할 수 있습니다.

임팩트 헤드: 카바이드 또는 텅스텐 카바이드로 만들어짐, 팁 반경 0.5mm ± 0.1mm.

환경 조건: 온도 23° C ± 5° C, 습도 < 65% 또는 고온 조건에 맞게 조정됨.

5.2 테스트 조건

충격 에너지: 1~10 J ± 0.1 J, 재료 특성에 따라 조정 가능.

충격 주파수: 20Hz ± 1Hz 또는 합의에 따라 결정됨.

시험 주기: 최대 10 회, 또는 시편이 파손될 때까지.

하중 방법: 단일 지점 충격, 접촉 각도 90°.

5.3 고온 조건(보충)

온도: 200° C ± 10° C, 전기로를 사용하여 조절합니다.

예열 시간: 30 분 ± 5 분, 샘플이 균일하게 가열되도록 보장합니다.

냉각: 테스트 후 자연적으로 실온으로 식히세요.

5.4 테스트 절차

시편을 시험 장비의 클램핑 장치에 설치하여 단단히 고정시킵니다.

충격 에너지와 주파수를 설정하고 테스트를 시작하세요.

각 충격 후 표면 상태를 기록하고 균열 발생을 관찰했습니다.

시험 종료 후, 파단 위치와 피로수명을 측정하였다.

6 데이터 처리

6.1 피로수명

정의: 시편에 0.1mm ± 0.01mm 의 균열이나 파손이 발생할 때까지 시편이 받는 충격

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

횃수입니다.

기록: 10^4 회마다 확인, 정확도는 ± 100 회입니다.

6.2 통계 분석

SN 곡선: 충격 에너지와 피로수명 간의 관계를 나타낸 곡선입니다.

신뢰 수준: 95% 신뢰 구간을 계산하고 피로 수명 편차는 $\leq \pm 10\%$ 입니다.

평균 수명: 5 개 측정값의 기하 평균을 구합니다.

6.3 손상 관찰

μm) 또는 SEM 을 사용 하여 분석했습니다.

측정: $\pm 0.01\text{mm}$ 의 정확도로 최대 균열 길이를 기록합니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성 및 준비 과정.

테스트 조건(예: 충격 에너지, 주파수, 온도).

피로수명, SN 곡선, 균열 형태 결과 및 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

장비 교정

충격 에너지 교정: 표준추 사용, 오차 $\leq \pm 1\%$.

주파수 교정: 발진기 사용, 오차 $\leq \pm 0.5\text{ Hz}$.

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

WC10Co:

충격에너지 5 J, 피로수명 5×10^5 배 $\pm 5 \times 10^3$ 배.

200°C 에서 피로수명은 3×10^5 배 $\pm 5 \times 10^3$ 배이다.

WC8Ni:

충격에너지 5 J, 피로수명 4×10^5 배 $\pm 5 \times 10^3$ 배.

200°C 에서 피로수명은 2.5×10^5 배 $\pm 5 \times 10^3$ 배이다.

설명하다

관련 표준과의 관계: GB/T 18376-2014 는 GB/T 7997-2017(초경합금의 특성에 대한 시험 방법)과 함께 사용하여 초경합금의 기계적 특성을 종합적으로 평가할 수 있습니다.

효력 발생일: 이 표준은 2014년 10월 1일부터 시행됩니다.

구매 방법: 표준 텍스트는 중국 표준 출판사나 중국 표준화 관리국 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다.

주의: 구현 시에는 구체적인 적용 환경과 장비 조건을 결합하고 전문 기술자와 협의해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

중화인민공화국 국가표준
GB/T 7997-2017 시멘트
카바이드 의 특성 시험 방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2009 "표준화 작업을 위한 지침 제 1 부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 7997-2005 "초경합금 특성 시험 방법"을 대체합니다.

GB/T 7997-2005 와 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

경도 시험 방법을 업데이트하고 고온 비커스 경도 시험을 추가했습니다(5.2 참조).

굽힘 강도 시험에 대한 하중 범위는 500-1000N 에서 100-2000N \pm 10N 으로 수정되었습니다(5.3 참조).

파괴인성 시험 공식이 개선되었고, 단일 모서리 노치 빔 방법이 추가되었습니다(5.4 참조).

열충격 시험의 사이클 횟수 요구사항을 100 회에서 500 \pm 50 회로 증가시켰습니다(5.5 참조).

시험편의 표면 거칠기 요구 사항이 증가했습니다: $Ra \leq 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$ (4.2 참조).

본 표준은 국가 초경합금 표준화 기술위원회(SAC/TC 357)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 중국공작기계공사 초경합금 연구소, 베이징과학기술대학교, 시안 교통 대학교입니다.

본 표준의 주요 작성자는 천웨이, 리팡, 왕권입니다. 본 표준은 2017 년 10 월 1 일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 경도, 굽힘 강도, 파괴 인성, 내열충격성 시험을 포함하여 초경합금의 성능을 시험하는 일반적인 방법을 규정합니다. 텅스텐 카바이드(WC)를 주성분으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합체로 사용하는 초경합금(예: WC-Co, WC-Ni)에 적용 가능하며, 품질 관리, 성능 평가, 연구개발에 활용할 수 있습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 16556-2014 금속 재료의 미세 검사를 위한 일반 지침

GB/T 3850-2015 초경합금의 미세구조 측정 방법

ISO 3327:2009 초경합금의 굽힘 강도 측정

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 경도

시멘트 카바이드가 표면 압입이나 마모에 저항하는 능력으로, 일반적으로 비커스 경도(HV)로 표현합니다.

3.2 굽힘 강도

3 점 또는 4 점 굽힘 하중에서 시편이 파괴에 저항하는 능력으로, MPa 로 표현합니다.

3.3 파괴 인성

재료가 균열 전파에 저항하는 능력으로, $MPa \cdot m^{1/2}$ 로 표현합니다.

3.4 열충격 저항성

고온 및 저온 사이클에서 균열 형성을 저항하는 시편의 능력으로, 균열 길이(mm)로 표현됩니다.

4 실험 준비

4.1 표본

재료 : Co 또는 Ni 를 결합상으로 한 WC 기반 시멘트 카바이드.

크기 :

경도 시험: $10mm \times 10mm \times 5mm \pm 0.1mm$;

굽힘 강도: $40mm \times 5mm \times 5mm \pm 0.1mm$;

파괴인성: $45mm \times 4mm \times 3mm \pm 0.1mm$;

열충격 저항성 : $20mm \times 20mm \times 5mm \pm 0.1mm$.

수량 : 각 실험 그룹은 5 번 반복되었습니다.

4.2 샘플 처리

절단 : 다이아몬드 연삭 휠, 냉각수는 물, 절단 속도는 $5m/s \pm 0.5m/s$.

연마 : SiC 사포(그릿 크기 #800-#2000)를 사용하고 마지막으로 다이아몬드 서스펜션(그릿 크기 $0.25 \mu m \pm 0.05 \mu m$)으로 연마 합니다 . 표면 거칠기 $Ra \leq 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$.

세척 : 무수에탄올을 사용하여 초음파 세척을 5 분 ± 0.5 분 동안 실시하고, 건조 후 $\pm 0.01mg$ 의 정확도로 무게를 측정합니다.

5 가지 시험 방법

5.1 일반 요구 사항

환경 조건 : 온도 $23^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$, 습도 $< 65\%$.

장비 교정 : 모든 시험 장비는 오차 범위 $\leq \pm 1\%$ 로 정기적으로 교정해야 합니다.

5.2 경도 시험

방법 : 비커스 경도 시험(GB/T 4340.1 에 따름).

상태 :

실온 : $30kg \pm 0.1kg$ 의 하중을 10~15 초간 유지하세요.

고온 : $1000^{\circ}C \pm 10^{\circ}C$, 하중 $10kg \pm 0.1kg$, 유지시간 15 분 ± 1 분 .

결과 : 5 개 측정점의 평균값을 구합니다. 단위 HV, 정확도는 ± 30 입니다.

5.3 굽힘 강도 시험

방법 : 3 점 굽힘 방법(ISO 3327 에 따름).

상태 :

스팬 $30mm \pm 0.1mm$

하중 $100-2000 N \pm 10 N$, 하중 속도 $0.5 mm/min \pm 0.05 mm/min$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

결과 :

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ± 5 MPa.

5.4 파괴인성 시험

방법 : 단일 모서리 노치 빔 방법 (SENB).

조건 : 노치 깊이 $2\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$, 스패 $40\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$, 하중 $500\text{N} \pm 5\text{N}$. 결과 :

$$K_{IC} = \frac{P_{\max} S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), P_{\max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 $\pm 0.1 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

5.5 열충격 성능 시험

방법 : 열 순환 방법.

상태 :

$1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 까지 가열하고 15 분 \pm 1 분간 유지합니다.

$25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 로 냉각하고 500 회 \pm 50 회 순환합니다.

가열 및 냉각 속도: $10^\circ\text{C/s} \pm 1^\circ\text{C/s}$.

결과 : 균열 길이는 SEM 을 사용하여 $\pm 0.01 \text{mm}$ 의 정확도로 측정되었습니다.

6 데이터 처리

결과 평균 : 모든 결과는 5 개 측정값의 평균입니다.

불확실성 : 불확실성 분석은 95%의 신뢰 수준에서 포함됩니다.

이상치 : 이상치를 기록하고 그 이유를 설명합니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성 및 준비 과정.

테스트 조건(예: 온도, 부하, 사이클 수).

시험 결과(경도, 굽힘 강도, 파괴 인성, 균열 길이) 및 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

장비 교정

경도계 교정 : 표준 블록($\text{HV } 1000 \pm 50$)을 사용, 오차 $\leq \pm 10$.

적재 장비 교정 : 표준추를 사용하세요, 오차는 $\leq \pm 1 \text{N}$ 입니다.

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

WC10 주식회사 :

실온 경도 $1500 \text{HV} \pm 30$;

고온 경도 $1300 \text{HV} \pm 30$;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

굽힘강도: 2500MPa \pm 5MPa;
파괴인성 12 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0.1 MPa \cdot m^{1/2} ;
열충격균열 0.03mm \pm 0.01mm.

WC8 Ni :

실온 경도 1400 HV \pm 30;
고온 경도 1200 HV \pm 30;
굽힘강도 2300MPa \pm 5MPa;
파괴인성 10 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0.1 MPa \cdot m^{1/2} ;
열충격균열 0.04mm \pm 0.01mm.

설명하다

표준과의 관계 : GB/T 7997-2017 은 GB/T 3850-2015(초경합금의 미세구조 측정)와 함께 사용하여 초경합금의 기계적 및 미시적 특성을 종합적으로 평가할 수 있습니다.

효력기간 : 이 표준은 2017년 10월 1일부터 시행됩니다.

구매 방법 : 표준 텍스트는 중국 표준 출판사 또는 중국 표준화 관리국 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

국제 표준

ISO 15156-1:2020

석유, 석유화학 및 천연가스 산업

— 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료

— 제 1부: 균열 저항성 재료 선택을 위한 일반 원칙

석유, 석유화학 및 천연가스 산업 — 석유 및 가스 생산에서 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료 — 제 1부: 균열 저항성 재료 선택을 위한 일반 원칙

개요

ISO 15156-1:2020 은 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 표준으로, "석유, 석유화학 및 천연가스 산업 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용되는 재료 - 제 1부: 균열 저항성 재료 선정을 위한 일반 원칙"이라는 제목으로 개발되었습니다. 이 표준은 2020년 11월 30일에 발표되었으며 ISO 15156-1:2015 버전을 대체합니다. ISO 15156 은 ISO/TC 67(석유 및 천연가스 산업을 위한 재료, 장비 및 해양 구조물)에서 개발되었으며, 황화수소(H₂S) 함유 환경에서 황화물 응력 균열(SSC) 및 수소 유도 균열(HIC)과 같은 파손을 방지하기 위해 사용할 재료 선정에 대한 지침을 제공하도록 설계된 다중 파트 표준(총 3부)입니다. 이 표준은 석유 및 가스 생산 시 탄소강, 저합금강, 스테인리스강 및 니켈 기반 합금에 적용됩니다.

1 범위

적용 대상: 석유, 석유화학, 천연가스 산업의 H₂S 함유 환경에서 사용되는 재료(예: 파이프, 밸브, 압력 용기, 시추 장비)에 적용 가능합니다.

환경에서 재료를 안전하게 사용할 수 있도록 황화물 응력 균열(SSC) 및 수소 유도 균열(HIC)에 저항성이 있는 재료를 선택하기 위한 일반 원칙을 제공합니다.

해당 없음: 비금속 재료나 석유 및 가스 생산 환경이 아닌 환경(정유소 등)은 포함되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 15156-2:2020 H₂S 함유 환경을 위한 재료 - 2부:

균열 저항성 탄소강 및 저합금강 및 그 용접부

ISO 15156-3:2020 H₂S 함유 환경을 위한 재료 - 3부:

균열 저항성 CRA(내식성 합금) 및 기타 합금

NACE MR0175/ISO 15156(2003) 기본 버전

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 황화물 응력 균열(SSC) H₂S 를

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

함유한 환경에서 수소 침투와 응력으로 인해 발생하는 취성 균열입니다

3.2 수소유기균열(HIC)

H₂S가 포함된 환경에서 금속 내부에 수소가 축적되어 발생하는 층상 또는 계단형 균열입니다

3.3 H₂S의 분압

가스 환경에서 H₂S의

분압은 kPa로 표현되며 부식 위험을 평가하는 데 사용됩니다. 3.4 내식성 합금(CRA) 스테인리스강 및 니켈 기반 합금과 같이 내식성이 우수한 합금입니다.

4 일반 원칙

4.1 적용성

이 부분은 ISO 15156 시리즈의 기본 틀입니다. 자세한 기술 요건은 ISO 15156-2(탄소강 및 저합금강)와 ISO 15156-3(내식성 합금)에서 확인할 수 있습니다.

(물 이슬점 > 주변 온도)가 포함된 습한 환경에서 사용하기에 적합합니다.

4.2 환경 분류

H₂S 농도: H₂S 분압을 기준으로 낮음(<0.05kPa), 중간(0.05-1.0kPa), 높음(>1.0kPa) 위험 환경으로 구분합니다.

pH: 산성 환경(pH < 4)은 SSC 위험을 증가시킵니다.

염화물 함량: 염화물 농도가 높으면(> 50,000 mg/L) 특별한 주의가 필요합니다.

4.3 재료 선택

탄소강 및 저합금강: ISO 15156-2의 경도(≤ 22 HRC) 및 열처리 요구 사항을 충족해야 합니다.

내식성 합금: ISO 15156-3의 화학 성분 및 균열 저항성 표준을 충족해야 합니다.

용접: 용접 재료와 공정은 국부 경화를 피하기 위해 기본 재료와 일치해야 합니다.

4.4 위험 평가

H₂S 분압, 온도, 응력 수준을 결정하기 위해 환경 평가를 수행합니다.

NACE MR0175/ISO 15156 부록의 그래프나 계산을 사용하여 SSC 민감도를 평가합니다.

5 테스트 및 검증

참조 테스트:

SSC 시험: NACE TM0177 방법 A(인장 시험)에 따름.

HIC 테스트: NACE TM0284에 따름.

승인 기준: 눈에 띄는 균열 없음, HIC 균열 민감도 비율(CSR) < 2%.

보고서: 환경 조건, 표본 크기 및 테스트 결과가 포함됩니다.

6 응용 프로그램 노트

온도 효과: 60°C 이상, SSC 위험은 감소하지만 HIC는 증가할 수 있습니다.

응력 제어: 작동 응력은 재료 항복 강도의 90%를 초과해서는 안 됩니다.

유지관리: H₂S 농도가 축적되는 것을 방지하기 위해 장비를 정기적으로 점검하세요.

7 문서 요구 사항

재료 인증서: 화학 성분, 열처리 및 경도 데이터를 제공합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

환경 데이터: H₂S 분압, pH 및 염화물 함량을 기록합니다.

시험 보고서: SSC/HIC 시험 결과와 적합성 선언이 포함되어 있습니다.

8 부록(정보)

부록 A: 일반적인 재료 예

탄소강(API 5L X52): 경도 18 HRC, H₂S 분압 0.1 kPa, SSC 합격.

304 스테인리스 강 : H₂S 분압 1.0 kPa, 부동태화 처리가 필요합니다.

인코넬 625: H₂S 분압 10 kPa, 우수한 HIC 저항성.

설명하다

관련 표준과의 관계: ISO 15156-1 은 원칙적으로 ISO 15156-2 및 ISO 15156-3 과 함께 완전한 시스템을 형성하며, 이 두 표준은 함께 NACE MR0175 를 대체합니다.

유효 기간: ISO 15156-1:2020 은 2023 년 11 월 30 일에 유효한 것으로 확인되었으며, 향후 석유 및 가스 산업의 요구에 따라 업데이트될 수 있습니다.

구매처: 표준 텍스트는 ISO 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다.

참고사항: 구현 시에는 구체적인 장비 설계 및 운영 조건에 따라 전문 엔지니어와 협의하여 진행하시기 바랍니다.

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

총수:

국제 표준

- ISO 15156-2:2020 석유, 석유화학 및 천연가스 산업
 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료
 - 석유, 석유화학 및 천연가스 산업 에서의 주철 사용
 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료
 - 제 2 부: 균열에 강한 탄소강 및 저합금강, 주철의 사용

개요

ISO 15156-2:2020 은 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 표준으로, "석유, 석유화학 및 천연가스 산업 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용하는 재료 - 2 부: 균열에 강한 탄소강 및 저합금강과 주철의 사용"이라는 제목으로 개발되었습니다. 이 표준은 2020 년 11 월 30 일에 발표되었으며 ISO 15156-2:2015 버전을 대체합니다. ISO 15156 은 ISO/TC 67(석유 및 천연가스 산업용 재료, 장비 및 해양 구조물)에서 개발되었으며, 황화수소(H₂S) 환경에서 사용할 탄소강, 저합금강 및 주철 재료의 선택에 대한 구체적인 기술 요구 사항을 제공하여 황화물 응력 균열(SSC) 및 수소 유도 균열(HIC)과 같은 파손을 방지하는 것을 목표로 하는 다부 표준(총 3 부)입니다. 이 표준은 석유 및 가스 생산에 사용되는 파이프라인, 밸브, 압력 용기 등의 장비에 적용됩니다.

1 범위

적용 대상: 석유, 석유 화학, 천연가스 산업의 H₂S 환경에서 사용되는 탄소강, 저합금강 및 주철 소재에 적합하며, 용접부 및 열영향부도 포함됩니다.

환경 에서 균열 저항성을 보장하기 위한 재료 선택, 제작 및 열처리 요구 사항을 지정합니다 .

해당 없음: 내식성 합금(CRA, ISO 15156-3 참조)이나 비석유 및 가스 생산 환경은 포함되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 15156-1:2020 H₂S 함유 환경용 재료 - 제 1 부: 균열 저항성 재료 선택을 위한 일반 원칙

NACE TM0177-2016 H₂S 환경에서 황화물 응력 균열에 대한 저항성을 위한 금속의 실험실 테스트

NACE TM0284-2016 수소 유도 균열에 대한 저항성을 위한 파이프라인 및 압력 용기 강의 평가

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다(ISO 15156-1:2020 참조):

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 황화물 응력 균열(SSC)

H₂S 를 함유한 환경에서 수소 침투와 응력으로 인해 발생하는 취성 균열입니다

3.2 수소유도균열(HIC)

H₂S 가 포함된 환경에서 금속에 수소가 축적되어 발생하는 층류 또는 계단형 균열입니다

3.3 경도

재료가 압입에 저항하는 능력으로, 일반적으로 로크웰 경도(HRC)로 표현됩니다.

3.4 열영향부(HAZ)

용접 중 열에 의해 영향을 받는 기본 재료의 영역으로, 굳어지고 SSC 의 위험이 증가할 수 있습니다.

4. 재료 요구 사항

4.1 화학적 조성

탄소 등가물(CE): $CE \leq 0.43\%$ (IIW 공식: $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$).

유황 함량: HIC 감도를 낮추기 위해 $S \leq 0.002\%$ (질량 분율)

인 함량: $P \leq 0.02\%$ (질량 분율).

4.2 경도 제한

기본 소재: 최대 경도 ≤ 22 HRC(약 250 HV), ISO 6508 에 따라 측정.

용접부 및 HAZ: 최대 경도 ≤ 23 HRC.

주철: 특별히 검증되지 않은 한 권장하지 않습니다.

4.3 열처리

정규화 또는 어닐링: 용접 또는 압연 응력을 완화합니다.

템퍼링: 온도 $\geq 620^\circ C$, 경도를 낮추기 위해 $250^\circ C$ 이하로 냉각합니다.

4.4 제조 공정

단조 또는 압연: 과도한 냉각이나 응력 집중을 피하세요.

용접: 저수소 전극을 사용하고 예열 온도는 $100\sim 200^\circ C$ 입니다(두께에 따라 다름).

5 환경 제한

H₂S 분압: ISO 15156-1 에 따라 평가된 대로 > 0.05 kPa 가 이 표준을 준수하는 데 필요합니다.

pH 값: pH < 3.5 는 SSC 위험을 증가시키므로 특수 재료나 보호 장치가 필요합니다.

염화물 함량: $> 50,000$ mg/L HIC 민감도를 고려해야 합니다.

6 성능 검증

6.1 황화물 응력 균열(SSC) 시험

방법: NACE TM0177 방법 A(인장 시험) 또는 방법 C(C-링 시험).

조건: 용액 A(0.5% 아세트산 + 5% NaCl, pH 2.7-3.0), H₂S 분압 0.1 kPa.

승인 기준: 눈에 띄는 균열 없음, 파단 강도 \geq 항복 강도의 85%.

6.2 수소유도균열(HIC) 시험

방법: NACE TM0284.

조건: 용액 B(5% NaCl + 0.5% 아세트산, 포화 H₂S), 노출 시간 96 시간.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

승인 기준:

균열 민감도 비율(CSR) < 2%.

균열 길이 비율(CLR) < 15%.

균열 두께 비율(CTR) < 5%.

6.3 보고

시험 조건, 시편 치수 및 균열 탐지 결과가 포함됩니다.

7 응용 프로그램 노트

온도 효과: 60° C 이상, SSC 위험은 감소하지만 HIC는 증가할 수 있습니다.

응력 제어: 작동 응력은 재료 항복 강도의 80%를 초과해서는 안 됩니다.

코팅: 2 차 보호 수단으로 사용할 수 있지만, 코팅의 완전성을 검증해야 합니다.

8 문서 요구 사항

재료 인증서: 화학 성분, 경도 및 열처리 데이터를 제공합니다.

환경 데이터: H₂S 분압, pH 및 염화물 함량을 기록합니다.

시험 보고서: SSC 및 HIC 시험 결과와 적합성 선언이 포함되어 있습니다.

부록 (정보)

부록 A: 일반적인 재료 예

API 5L X65: 경도 20 HRC, H₂S 분압 0.2 kPa, SSC 및 HIC 인증 획득.

AISI 4130: 경도 22 HRC, 템퍼링 필요, H₂S 분압 0.5 kPa.

회주철: 특별히 검증되지 않은 한 권장하지 않습니다.

설명하다

관련 표준과의 관계: ISO 15156 시리즈의 핵심 부분인 ISO 15156-2는 ISO 15156-1(일반 원칙) 및 ISO 15156-3(내식성 합금)과 함께 NACE MR0175를 대체합니다.

유효기간: ISO 15156-2:2020은 2023년 11월 30일에 유효함이 확인되었으며, 향후 석유 및 가스 산업의 요구에 따라 업데이트될 수 있습니다.

구매처: 표준 텍스트는 ISO 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

국제 표준

- ISO 15156-3:2020 석유, 석유화학 및 천연가스 산업
 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료
 - 3부: 균열 방지 CRA(내식성 합금) 및 기타 합금석유, 석유화학 및 천연가스 산업
 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료
 - 제 3부: 내식성 합금(CRA) 및 균열에 강한 기타 합금

개요

ISO 15156-3:2020 은 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 표준으로, "석유, 석유화학 및 천연가스 산업 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용되는 재료 - 제 3부: 내식성 합금(CRA) 및 기타 균열 방지 합금"이라는 제목으로 개발되었습니다. 이 표준은 2020년 11월 30일에 발표되었으며 ISO 15156-3:2015 버전을 대체합니다. ISO 15156 은 ISO/TC 67(석유 및 천연가스 산업용 재료, 장비 및 해양 구조물)에서 개발되었으며, 황화수소(H₂S) 함유 환경에서 내식성 합금(CRA) 및 기타 합금(예: 스테인리스강 및 니켈 기반 합금)에 대한 구체적인 기술 요구 사항을 제공하여 황화물 응력 균열(SSC) 및 응력 부식 균열(SCC)과 같은 파손을 방지하는 것을 목표로 하는 다부 표준(총 3부)입니다. 이 표준은 심공 및 해저 장비와 같이 석유 및 가스 생산 시 부식성이 매우 높은 환경에 적용할 수 있습니다.

1 범위

산업 의 H₂S 환경에서 사용되는 내식성 합금(CRA) 및 기타 합금에 적합하며, 여기에는 오스테나이트계 스테인리스강, 듀플렉스 스테인리스강, 니켈 기반 합금 및 이들의 용접부가 포함됩니다.

환경 에서 균열 저항성을 보장하기 위한 재료 선택, 제조 및 검증에 대한 요구 사항을 지정합니다 .

해당 없음: 탄소강 및 저합금강(ISO 15156-2 참조)이나 비석유 및 가스 생산 환경은 포함되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 15156-1:2020 H₂S 함유 환경용 재료 - 제 1부: 균열 저항성 재료 선택을 위한 일반 원칙

NACE TM0177-2016 H₂S 환경에서 황화물 응력 균열에 대한 저항성을 위한 금속의 실험실 테스트

NACE TM0198-2016 부식성 유전 서비스에서 응력 부식 균열에 대한 내식성 합금 선별을 위한 저속 변형률 속도 시험 방법

3 용어 및 정의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다(ISO 15156-1:2020 참조):

3.1 황화물 응력 균열(SSC)

H₂S 환경에서 수소 침투 및 응력으로 인해 발생하는 취성 균열입니다

3.2 응력 부식 균열(SCC)

특정 환경에서 응력과 부식의 상승효과로 인해 발생하는 균열.

3.3 내식성 합금(CRA)

오스테나이트계 스테인리스강, 듀플렉스 스테인리스강, 니켈계 합금 등 내식성이 우수한 합금.

3.4 PREN(Pitting Resistance Equivalent Number)

합금의 공식 부식 저항성을 측정하는 매개변수, $PREN = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N$.

4. 재료 요구 사항

4.1 화학적 조성

오스테나이트계 스테인리스강: 304L, 316L, $PREN \geq 32$ 등.

듀플렉스 스테인리스강: 2205, $PREN \geq 35$, 페라이트 함량 35-65% 등.

니켈 기반 합금: Inconel 625, Hastelloy C276, $Ni \geq 40\%$ 등.

제한사항: 입계부식을 방지하기 위해 탄소 함량 $C \leq 0.03\%$.

4.2 경도 제한

기본 소재: 최대 경도 ≤ 40 HRC(합금 유형에 따라 다름), ISO 6508에 따라 측정.

용접 및 HAZ: 최대 경도 ≤ 40 HRC, 열처리 필요.

특별 요구사항: 고강도 CRA(항복강도 > 550 MPa)에는 검증이 필요합니다.

4.3 열처리

용액 처리: 온도 1000-1150° C(합금에 따라 다름), 100° C 이하로 수냉.

강과 같이 650~700° C에서 어닐링하여 민감화를 방지합니다.

4.4 제조 공정

단조 또는 압연: 응력 집중을 피하고 표면 결함은 ≤ 0.1 mm 이 되도록 합니다.

용접: 적합한 필러 금속을 사용하고 100~200° C 로 예열합니다(두께에 따라 다름).

5 환경 제한

H₂S 분압: > 0.05 kPa 에서는 이 표준을 준수해야 하고, > 10 kPa 에서는 고성능 CRA 가 필요합니다.

pH 값: $pH < 2.0$ 은 SCC 위험을 증가시키고 특수 합금이 필요합니다.

염화물 함량: $> 150,000$ mg/L 높은 PREN 물질이 필요합니다.

6 성능 검증

6.1 황화물 응력 균열(SSC) 시험

방법: NACE TM0177 방법 A(인장 시험) 또는 방법 D(이중 지지 보 시험).

조건: 용액 A(0.5% 아세트산 + 5% NaCl, pH 2.7-3.0), H₂S 분압 0.1 kPa.

승인 기준: 눈에 띄는 균열 없음, 파단 강도 \geq 항복 강도의 90%.

6.2 응력 부식 균열(SCC) 시험

방법: NACE TM0198(느린 변형 속도 시험, SSRT).

조건: 5% NaCl + 0.5% 아세트산, H₂S 분압 1.0 kPa, 신장 $4 \times 10^{-6} s^{-1}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

승인 기준: 균열 없음, 파단 신율 $\geq 10\%$.

6.3 보고

시험 조건, 시편 치수 및 균열 탐지 결과가 포함됩니다.

7 응용 프로그램 노트

온도 효과: $> 100^{\circ}\text{C}$, SCC 위험이 증가하고 고니켈 합금이 필요합니다.
응력 제어: 작동 응력은 재료 항복 강도의 80%를 초과해서는 안 됩니다.
표면 처리: 표면 부식 위험을 줄이기 위한 연마 또는 수동화.

8 문서 요구 사항

재료 인증서: 화학 성분, 경도 및 열처리 데이터를 제공합니다.
환경 데이터: H_2S 분압, pH 및 염화물 함량을 기록합니다.
시험 보고서: SSC 및 SCC 시험 결과와 적합성 선언이 포함되어 있습니다.

부록 (정보)

부록 A: 일반적인 재료 예

316L 스테인리스 스틸: PREN 32, H_2S 분압 0.5 kPa, SSC 인증됨.
2205 듀플렉스 강철: PREN 35, H_2S 분압 2.0 kPa, 우수한 SCC 저항성.
인코넬 625: Ni 58%, H_2S 분압 10 kPa, 우수한 HIC 및 SCC 저항성.

설명하다

관련 표준과의 관계: ISO 15156-3 은 ISO 15156 시리즈의 일부이며 ISO 15156-1(일반 원칙) 및 ISO 15156-2(탄소 및 저합금강)와 함께 NACE MR0175 를 대체합니다.
유효기간: ISO 15156-3:2020 은 2023 년 11 월 30 일에 유효함이 확인되었으며, 향후 석유 및 가스 산업의 요구에 따라 업데이트될 수 있습니다.
구매처: 표준 텍스트는 ISO 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

초경 고온 금형

초경합금 고온 금형은 텅스텐 카바이드(WC)를 매트릭스(8894 중량 %)로 사용하고, Co(610 중량 %) 또는 Ni(612 중량 %)를 결합상으로 결합하여 분말 야금(불 밀링, CIP, HIP 소결)으로 제조합니다. 이 금형은 높은 경도(1800~2200 HV), 내마모성(마모 손실 <0.03 mm³/h, ASTM G65), 내부식성(<0.01 mm/y, pH 212, HCl, SO₄²⁻ 함유) 및 우수한 고온 내성(>1000° C, 내산화성)을 갖습니다. 표면은 PVD/CVD 코팅(예: TiAlN)으로 코팅되어 있습니다. AlCrN, CrN, 25 μm, 마찰 계수 <0.15)를 사용하여 고온 내마모성과 내 소착 성능을 향상시킵니다. 이 금형은 열간 단조, 다이캐스팅, 유리 성형, 분말 야금과 같은 고온 성형(600~1200° C)에 사용되며, 고응력(100~500MPa), 고온 산화 및 반복 열충격(ΔT 500~800° C)을 견딥니다. 기존 금형강(H13, 400~600HV)보다 수명이 35 배 길며, 표면 조도는 Ra 0.10.3 μm 입니다.

본 논문에서는 표준(GB/T 7997, ASTM G65, NACE MR0175)을 토대로 시멘트 카바이드 고온 금형의 기술, 성능, 응용 및 최적화에 대한 제안을 제공합니다.

초경합금 고온금형의 특성

1.1 초경합금 고온금형재료의 구성

시멘트 카바이드 고온 금형 기관:

WC: 88~94 중량 %, 초미립자(D50 0.20.5 μm), 경도 1800~2200HV.

Co: 610 wt %, 높은 인성(KIC 1520 MPa·m^{1/2}), 내마모성이 10% 증가했습니다.

Ni: 612 wt % (선택 사항), 내식성 (HCl, SO₄²⁻ <0.01 mm/y), 내충격성 (KIC 1215 MPa·m^{1/2}).

첨가제: Cr3C2(0.30.6 중량 %)는 입자 성장을 억제하고 경도를 6% 증가시킵니다. TaC (0.10.3 중량 %)는 산화 저항성을 10% 증가시킵니다.

시멘트 카바이드 고온 금형 코팅:

TiAlN (PVD/CVD): 경도 2800~3200 HV, 내열성 1050° C, 고온 내마모성.

AlCrN (PVD): 경도 3000~3400 HV, 내열성 1100° C, 내산화성.

CrN (PVD): 경도 2000~2400 HV, 내열성 1000° C, 내접착성.

구배 구조: 표면에는 낮은 Co/Ni(68 중량 %), 중심부에는 높은 Co/Ni(1012 중량 %)가 함유되어 있어 내마모성이 25%, 내균열성이 20% 증가합니다.

1.2 초경합금 고온금형의 성능변수

경도: 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

굽힘강도: 2.02.8 GPa (GB/T 38512015).

과괴인성: 1220 MPa·m^{1/2} (Co 계 1520, Ni 계 1215).

내마모성: 마모율 <0.03 mm³ / h (ASTM G65).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부식 저항성: pH 212, <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 0.10.3 μm , 탈형 효율이 15% 증가했습니다.

1.3 초경합금 고온금형의 장점

높은 내마모성: 초미립자 WC+ 코팅으로 수명이 35 배 증가하고 금형 유지관리 비용이 30% 감소합니다.
고온 내구성: TiAlN / AlCrN 코팅, 산화 방지, 고온 성형(600~1200° C)에 적합합니다.
내식성: Ni 기반 금형은 산과 알칼리에 강하며 부식성 물질(용융 유리 등)에 적합합니다.
열 안정성: 열 균열 저항성, 순환 열 충격 성능이 H13 강보다 우수합니다(수명이 4 배 증가).
효율성: 마찰이 적은 코팅, 탈형 힘이 20% 감소, 성형 품질이 10% 증가.

초경합금 고온금형 제조공정

2.1 분말 준비

원료: WC(D50 0.20.5 μm , 순도 > 99.95%), Co/Ni(D50 12 μm) , Cr3C2/ TaC (D50 0.51 μm) .
볼 밀링: 행성형 볼 밀(ZrO2 볼, 12:1), 350rpm, 1822 시간, 입자 크기 편차 <±0.05 μm , 균일 성 >98%.

2.2 형성

방법: 냉간등방압성형(CIP) 또는 정밀성형.
매개변수: 300350 MPa, 유지 압력 90 초, 티타늄 합금 금형(편차 <±0.03 mm), 빌렛 밀도 9.010.5 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.
소결: 1400~1450° C, 10⁻⁵ 10⁻⁶Pa, 2.53 시간.
HIP: 1400° C, 150 MPa (Ar) , 1.52 시간.
결과: 밀도 15.015.2 g/cm³ , 기공률 <0.0005%, 경도 1800 - 2200 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.4 정밀 가공

연삭: 5축 CNC 연삭기, CBN 연삭 휠($24\ \mu\text{m}$), 4000rpm, 이송 $0.0050.02\text{mm}/\text{패스}$, 기하학적 편차 $<\pm 0.01\text{mm}$, $Ra\ 0.10.3\ \mu\text{m}$.

EDM: 전기 스파크 가공, 캐비티/홀 ($\varnothing\ 0.55\ \text{mm}$), 편차 $<\pm 0.005\ \text{mm}$.

연마: 다이아몬드 연마 페이스트($0.51\ \mu\text{m}$), 1000 rpm, $Ra < 0.1\ \mu\text{m}$, 접착 방지 효과가 25% 증가 했습니다.

2.5 코팅

방법: PVD/CVD(Cr/Al/Ti 타겟, $>99.99\%$).

매개변수: TiAlN / AlCrN / CrN ($25\ \mu\text{m}$), $10^{-5}\ \text{Pa}$, $250450\ ^\circ\text{C}$, 바이어스 100 V, 증착 속도 $11.5\ \mu\text{m}/\text{h}$.

결과: 접착력 $>100\ \text{N}$, 마찰계수 <0.15 , 온도 저항성 $1000 - 1100\ ^\circ\text{C}$.

2.6 감지

미세구조: SEM(결정립 $0.20.5\ \mu\text{m}$), EBSD(결정립계 응력 $<3\%$).

성능: 경도 편차 $<\pm 40\ \text{HV}$ (ISO 6508), 마모 $<0.03\ \text{mm}^3/\text{h}$, 내식성(pH 212, $<0.01\ \text{mm}/\text{y}$).

기하학: CMM(편차 $<\pm 0.005\ \text{mm}$), 레이저 스캐닝(공동 편차 $<\pm 0.003\ \text{mm}$).

비파괴 검사: X선(내부 결함 $<0.01\ \text{mm}$), 초음파(균열 $<0.005\ \text{mm}$).

고온 테스트: 열충격($\Delta T\ 800\ ^\circ\text{C}$, $>10\ 5\ \text{배}$), 산화 저항성($<0.01\ \text{mg}/\text{cm}^2$, 1000 시간).

초경합금 고온금형의 적용 시나리오

시멘트 카바이드 고온 금형은 다양한 성형 공정에 대한 공정, 테스트 및 선택에 대한 제안을 제공합니다.

3.1 경질합금 고온금형 열간단조금형(자동차 크랭크샤프트)

작업 조건: 빌렛(42CrMo), $1000-1200\ ^\circ\text{C}$, 300 MPa, 순환 열 충격($\Delta T\ 800\ ^\circ\text{C}$).

유형: 단조다이(캐비티 $100\times 50\text{mm}$).

재료: WC10%Co(D50 $0.20.5\ \mu\text{m}$, Cr3C2 0.5 wt %, TaC 0.3 wt %), 경도 2000 - 2200 HV.

코팅: AlCrN ($5\ \mu\text{m}$, 경도 3400 HV, 마찰 0.15, 내열성 $1100\ ^\circ\text{C}$).

기하구조: 캐비티 반경 R2mm, $Ra < 0.2\ \mu\text{m}$, 편차 $<\pm 0.01\text{mm}$.

공정: 볼 밀링 22 시간, CIP 350 MPa, HIP $1400\ ^\circ\text{C}$ (150 MPa, 2 시간), 5축 연삭, PVD AlCrN ($450\ ^\circ\text{C}$).

매개변수: 온도 $1100\ ^\circ\text{C}$, 압력 300 MPa, 사이클 5000 회.

시험:

수명: 10,000 배 (H13 강은 2,000 배, 5 배 더 길다).

마모율: $<0.03\ \text{mm}^3/\text{h}$, 산화 저항성 $<0.01\ \text{mg}/\text{cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

열균열 : 균열 없음 (ΔT 800° C, 5000 회).
탈형력: 20% 감소, 성형 정확도 ± 0.01 mm.
선택: WCCo+ AlCrN , 고온, 고응력, 일반적인 NDT 에 적합합니다.
장점: 고온 내마모성, 열 균열 저항성, 성형 효율 15% 증가.

3.2 경질합금 고온 다이캐스팅 금형(알루미늄합금)

작업 조건: 알루미늄 용융물 (AlSi), 700-800° C, 150 MPa, 순환 열 충격 (ΔT 500° C).

유형: 다이캐스팅 금형(캐비티 200×100 mm).

재료: WC8%Co(D50 0.20.5 μ m , Cr3C2 0.5 wt %), 경도 2000 - 2200 HV.

코팅 : TiAlN (4 μ m , 경도 3200 HV, 마찰 0.12, 내열성 1050° C).

기하구조: 공동경사 1° , Ra <0.1 μ m , 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).

매개변수: 온도 750° C, 압력 150 MPa, 사이클 10000 회.

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).

표면 품질: Ra 0.2 μ m , 주조 정확도 ± 0.005 mm.

선택: WCCo+ TiAlN , 고온 용융에 적합, 정기적 세척.

장점: 접착 방지, 금형 수명 연장, 주조 품질 10% 향상.

3.3 경질합금 고온금형 유리성형금형(광학렌즈)

작업 조건: 유리 용융물 (SiO₂) , 1000~1100° C, 50MPa, 부식성(pH 24).

설계

유형: 다이캐스트 (\emptyset 50 mm, 곡선형).

재료: WC10%Ni(D50 0.20.5 μ m , Cr3C2 0.6 wt %), 경도 2000 - 2200 HV.

코팅 : CrN (4 μ m , 경도 2400 HV, 마찰 0.15, 내열성 1000° C).

기하구조: 표면편차 < ± 0.003 mm, Ra <0.1 μ m .

공정: 볼 밀링 22 시간, CIP 350 MPa, HIP 1400° C(150 MPa, 2 시간), 5 축 연삭, PVD CrN (300° C).

매개변수: 온도 1050° C, 압력 50 MPa, 사이클 2000 회.

시험:

수명 : 8000 배 (H13 강은 1500 배, 5.3 배 더 길다).

마모 손실: <0.03 mm³ / h, 내식성 <0.01 mm/y.

접착 방지: 유리 잔류물 비율 <1%, 표면 Ra 0.1 μ m .

정밀도: 렌즈 곡률 편차 < ± 0.002 mm.

종류 선택: WCNi+ CrN , 부식성 고온 및 정기적 세척에 적합합니다.

장점: 내식성, 내접착성, 높은 성형 정밀도.

초경합금 고온금형의 성능비교

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

매개변수	초경합금 (WCCo /Ni)	금형강(H13)	세라믹 몰드
경도 (HV)	1800 년 - 2200 년	400 - 600	1200 - 1500
굽힘 강도 (GPa)	2.02.8	1.52.0	0.51.0
인성(KIC, MPa • m ^{1/2})	1220	2030	35
내마모성 (mm ³ /h)	<0.03	0.10.3	0.05 - 0.1
부식 저항성(mm/y, pH 212)	<0.01	0.050.1	0.01 - 0.03
온도 저항성(° C)	>1000	600 - 800	1200 - 1500
열충격(ΔT 800° C)	>10 5 배	10 ³ - 10 ⁴ 배	10 ² - 10 ³ 배
수명 배수(H13 대비)	35	1	1.52
마찰계수(코팅)	<0.15	0.3 - 0.5	0.2 - 0.4

시멘트 초경 고온 금형:

고온 내구성: TiAlN / AlCrN 코팅, 산화 방지, 1200° C 성형에 적합합니다.

내마모성: 초미립자 WC, 마모 <0.03 mm³ / h, 수명이 35 배 증가했습니다.

내식성: Ni 계 + CrN, 유리 용융 부식에 강하고 H13 강보다 우수합니다.

열 안정성: 열 균열 및 순환 열 충격에 대한 저항성이 세라믹 몰드보다 우수합니다.

초경합금 고온 금형 최적화 제안

재료 선택:

열간단조: WC10%Co+AlCrN, 고온 내마모성이 15% 증가했습니다.

다이캐스팅: WC8%Co+TiAlN, 접착방지성이 25% 증가했습니다.

유리성형: WC10%Ni+CrN, 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: 5축 CNC, CBN 연삭 휠(24 μm), 편차 <±0.01 mm, Ra < 0.1 μm.

코팅:

TiAlN (4 μm, 400° C) 은 고온 저항성이 15% 증가했습니다.

AlCrN (5 μm, 450° C) 은 산화 저항성이 20% 증가했습니다.

CrN (4 μm, 300° C) 은 접착 방지 효과가 25% 증가했습니다.

EDM: 캐비티 편차 <±0.003mm, 정확도 5% 증가.

장비 최적화:

소결로: 온도 조절 ±2° C, 10⁻⁶Pa.

5축 CNC: 편차 <±0.005 mm.

코팅 장비: 증착 속도 11.5 μm /h, 편차 <± 0.05 μm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

작업 조건 적용:

열간단조: WCCo+ AlCrN , 1000~1200° C, 300~500MPa.

다이캐스팅: WCCo+ TiAlN , 700~800° C, 100~200 MPa.

유리 성형: WCNi+ CrN , 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(pH 212, <0.01 mm/y), 내열성(>1000° C, <0.01 mg/cm²) .

기하학: CMM(편차 < ± 0.005 mm), 레이저 스캐닝(공동 편차 < ± 0.003 mm).

고온 테스트: 열충격(ΔT 800° C, >10 5 배), 산화방지(1000 시간).

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 7997-2017: 경도 1800-2200 HV.

ASTM G65: 마모율 <0.03 mm³ / h.

NACE MR0175: 황화물 응력 균열에 대한 저항성.

ISO 6508: 경도 편차 < ±40 HV.

ISO 17879: 열충격 시험.

결론적으로

미립 WC(0.20.5 μm), Co/Ni 결합상(612 중량%) 및 PVD/CVD 코팅(TiAlN/AlCrN/CrN, 25 μm)을 최적화함으로써 , 초경합금 고온 금형 은 높은 경도 (1800 ~ 2200HV) , 내마모성 (< 0.03mm³/h), 내부식성(pH 212, <0.01mm/y) 및 고온 저항성(>1000° C)을 달성합니다. 이 금형은 열간 단조(강철 빌렛), 다이캐스팅(알루미늄 합금), 유리 성형(광학 렌즈)에 적합합니다. 서비스 수명이 35 배 증가하고, Ra 는 0.10.3 μm 이며 , 성형 효율이 1015% 증가합니다. 입자 크기, 코팅 두께 및 EDM 정확도를 최적화하면 비용을 절감할 수 있습니다(개당 5,000~20,000 위안) . 과제는 고정밀 가공(비용 증가 15%)과 고온 열충격 테스트(사이클 > 10 5 회)에 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

총수:

CTIA 그룹
카바이드 종이 커터

1. 개요

CTIA 그룹은 초경 산업용 절삭 공구를 개발, 설계 및 생산하며, 완제품을 고객에게 맞춤 제작합니다. CTIA 그룹 초경 페이퍼 커터는 텅스텐 기반 초경(WC-Co, WC-Ni 등)을 블레이드 소재로 사용하여 종이, 판지, 필름, 알루미늄 호일 및 기타 소재의 정밀 절단에 특히 사용됩니다. 높은 경도(HV1600-2000), 뛰어난 내마모성, 고온 안정성(600-800° C 유지 강도)으로 고속 연속 절단 성능을 보장하며, 인쇄, 포장, 제지 및 문구 산업에서 고정밀(공차 <0.01mm) 및 고품질 표면 절단 요구를 충족하는데 널리 사용됩니다.

Co., Ltd. 는 수십 년의 경험과 독보적인 장점을 갖춘 중국의 맞춤형 초경 절삭 공구 제조업체로서, 업계의 첨단 설계 및 제조 공정을 지능형 기술과 통합하여 전 세계 고객에게 고성능 종이 절삭 공구를 제공하고, 인쇄 및 포장 산업이 친환경적이고 효율적으로 발전할 수 있도록 지원합니다.

2. 재료 및 제조

2.1 재료 구성

주요 성분

블레이드는 텅스텐 카바이드(WC, 82~92%)와 바인더(예: Co, 6~12%, Ni, 0~5%)의 복합재로 만들어졌으며, 마모 저항성을 높이기 위해 미량의 TiC (0.5~2%)와 TaC (0.3~1%)가 첨가되었습니다.

WC-8Co: Co 함량이 8%이고, 인성이 높아 일반 종이와 판지의 고속 절단에 적합합니다.

WC-6Co-Ni: Co 함량 6%, Ni 함량 2%, 내식성, 습한 환경이나 특수지(은행지 등)에 적합합니다.

초미립자

WC 입자 크기는 0.4~1.2 μm 로 경도가 HV1900 으로 증가하고 칩핑 저항성이 30% 향상됩니다.

장점

고탄소강과 비교했을 때, 카바이드 종이 커터는 3 배 더 단단하고 5 배 더 내마모성이 뛰어납니다. 세라믹 커터와 비교했을 때, 더 탄력적이고 50% 더 충격에 강합니다.

2.2 제조 공정

분말 야금:

재료

고순도 WC(순도>99.9%)와 Co 분말을 볼밀에서 24 시간 동안 혼합하여 균일성(입자 분포 편차<5%)을 보장했습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

막다

400MPa 등방성 압축으로 성형된 빌렛 밀도는 95% 이상이며, 소결 결함이 감소합니다.

소결

진공소결로에서 $1400 \pm 10^\circ \text{C}$ 에서 2 시간 동안 수소 보호 하에 소결하면 경도가 HV1800 - 1900 에 도달하고 기공률은 $< 0.1\%$ 입니다.

정밀 연삭:

CNC 5 축 연삭기와 다이아몬드 연삭 휠을 사용하여 날카로움을 $< 2 \mu\text{m}$, 직진성을 $< 0.005\text{mm}$, 표면 거칠기를 $Ra < 0.08 \mu\text{m}$ 로 가공합니다.

블레이드 각도(한쪽 면 $15^\circ \sim 25^\circ$, 양쪽 면 $30^\circ \sim 45^\circ$)로 버 없이 매끄러운 절단이 가능합니다.

코팅 기술:

PVD 코팅

TiN 및 TiAlN 코팅은 두께 $1.5\text{--}3 \mu\text{m}$, 증착 온도 $400\text{--}500^\circ \text{C}$, 경도 HV2800, 마찰 계수 0.2-0.3, 내마모성 60% 향상으로 사용됩니다.

DLC 코팅

일부 고급 절삭 공구는 두께가 $1\text{--}2 \mu\text{m}$ 이고 마찰 계수가 0.1 만큼 낮으며 수명이 100% 연장된 다이아몬드 유사 코팅(DLC)을 사용하여 고급 절삭에 적합합니다.

품질 관리

각 절삭 공구 배치는 ISO 9001 및 ISO 14001 표준에 따라 XRF(X 선 형광 분석)를 통해 구성 성분을 테스트하고, 현미경을 통해 절삭 날 결함을 테스트합니다.

3. 중국 텅스텐 지능형 카바이드 종이 커터 사양

CTIA GROUP의 카바이드 제지 커터는 다양한 절단 장비 및 소재의 요구에 맞춰 다양한 사양을 제공합니다. 주요 사양표는 다음과 같습니다.

유형	치수(mm)	블레이드 각도	적절한 두께 도수 mm	적용 가능한 재료	적용 가능한 장치
직선형 종이 커터	500×80×10 - 1500×120×15	한쪽은 $15^\circ \sim 20^\circ$	0.1 - 8	코팅지, 신문지, 판지	Polar, Wohlenberg, Perfecta
원형 종이 커터	직경 50~300, 두께 2~10	양측 $30^\circ \sim 40^\circ$	0.05 - 5	필름, 알루미늄 호일, 종이 롤	슬리팅 머신, 코일 절단기
툽니 모양의 종이 커터	300×50×5 - 800×80×8	한쪽은 $20^\circ \sim 25^\circ$	0.1 - 3	라벨지, 스탬프지, 편칭지	다이크터팅 머신, 라벨커팅 머신
맞춤형 종이 커터	고객 니즈에 맞춰 제작 가능 (최대 2000×150×20)	$15^\circ \sim 45^\circ$ 조절 가능	0.05 - 10	은행용지, 특수필름, 복합소재	맞춤형 장비(예: 하이텔베그, 밀러)

용인

길이/너비 $\pm 0.02\text{mm}$, 두께 $\pm 0.01\text{mm}$, 절단면 직진도 $< 0.005\text{mm}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사용자 정의

비표준 크기와 블레이드 모양(예: 베벨, 물결 모양 블레이드)을 지원하며, 배송 기간은 7~14 일입니다.

패키지

이 칼에는 재활용이 쉽고 친환경 제조 기준을 충족하는 마이크로 스마트 하드박스(크기 15×10×5cm, RFID 및 QR 코드 내장)가 장착되어 있습니다.

카바이드 종이 커터의 종류와 용도

직선형 종이 커터

평판 시트 절단에 사용되며, 절단 두께는 0.1-8mm 이고, 정확도는 <0.01mm 이며, 코팅지, 신문지, 판지를 절단하는 인쇄 공장에 적합하며, Polar, Wohlenberg 및 기타 장비와 호환됩니다.

원형 종이 커터

코일 슬리핑에 사용, 속도 >200m/min, 포장 필름, 알루미늄 호일, 롤지 슬리핑에 적합, 허용 오차 <5 μm, 고속 생산 라인에서 널리 사용됨.

툽니 모양의 종이 커터

편칭이나 툽니형 절단에 사용되며, 절단 평탄도가 30% 향상되고, 라벨지, 스탬프지가공에 적합하며, 다이커팅 머신에 사용됩니다.

맞춤형 종이 커터

블레이드 각도와 코팅은 특수 소재(은행권이나 복합 소재 등)에 맞게 설계되었으며, 중국 텅스텐 인텔리전스에서 제조한 TiAlN 베벨 커터는 서비스 수명을 25% 연장합니다.

카바이드 종이 커터 적용 사례

CTIA GROUP 직선형 종이 커터(1000×100×12mm, TiN 코팅)는 Polar 115 종이 트리머에 사용되어 A4 코팅지(70g/m²)를 절단하는데, 연간 생산량은 2억 매, 공구 수명은 60만 회, 공구 교환 빈도는 60% 감소, 절단 비용은 30% 감소합니다.

BOPP 필름 슬리핑용 원형 종이 커터(직경 200 x 두께 5 mm, DLC 코팅), 속도 250m/min, 허용 오차 <3 μm, 연간 생산량 5,000만 미터, 공구 수명 100만 미터, 고객 만족도 35% 증가.

툽니형 종이 커터(500×60×6mm, TiAlN 코팅)는 라벨 용지에 구멍을 뚫는 데 사용되며, 절단 정확도는 0.008mm 미만이고 연간 생산량은 1억 매입니다. 공구 내구성은 40% 향상되고 불량률은 50% 감소합니다.

5. 카바이드 종이 커터의 기술적 특징

고효율

절단속도는 50~200m/min 이고, 단일 절단두께는 0.05~10mm 로 생산효율이 40~60% 향상됩니다.

높은 정밀도

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

절단 허용 오차는 $<0.01\text{mm}$ 이고 절단 부드러움은 $Ra < 0.15\ \mu\text{m}$ 로 ISO 9001 및 인쇄 산업 표준(예: ISO 12647)을 충족합니다.

내구성

초경공구의 경도는 62~65HRC 이고, 절삭수명은 50 만~100 만회이며, 공구교환빈도는 50% 감소합니다.

재활용성

폐절삭 공구는 RFID 및 5G 데이터 업로드 기능이 내장된 초소형 지능형 하드박스를 통해 재활용됩니다. 아연 용해 또는 전기화학적 방법을 병행하면 텅스텐 회수율이 90% 이상이며, 비용도 30~40% 절감됩니다.

CTIA 그룹의 특징

독자적으로 개발한 초미립자 시멘트 카바이드와 DLC 코팅 기술은 업계 평균에 비해 공구 수명을 20% 증가시켜 인쇄 및 포장 산업의 고속 요구 사항을 충족합니다().

6. 카바이드 종이 커터의 유지 보수 및 재연마

일일 유지 관리

깨끗한

절단 후, 무수 에탄올로 칼날을 닦아 종이 조각과 끈적끈적한 물질을 제거하면 부식을 방지할 수 있습니다.

가게

중국 텅스텐 맞춤형 도구 상자(충격 방지 폼 및 녹 방지제 포함)를 사용하여 건조한 환경(습도 $<60\%$)에 보관하세요.

조사하다

10 만 번 절단할 때마다(현미경으로 50 배 확대) 가장자리 마모를 점검하여 깨짐이 없는지 확인하세요.

재분쇄 기술

재분쇄 사이클

마모 깊이가 0.1mm 미만이면 공구를 재연마할 수 있습니다. 30 만~50 만 회 절삭 시마다 재연마하는 것이 좋습니다.

기술

다이아몬드 연삭 휠(입자 크기 D15)과 CNC 연삭기를 사용하여 가공하며, 블레이드 각도 오차는 $<0.5^\circ$, 표면 거칠기 Ra 는 $<0.1\ \mu\text{m}$ 입니다.

빈도

직선 칼은 3~5 회, 둥근 칼은 2~4 회 정도 재연마할 수 있습니다. 재연마 후 성능은 90%까지 회복되고 비용은 40% 절감됩니다.

7. 카바이드 종이 커터의 개발 동향

지능형 제조

실시간으로 도구 마모와 절삭 성능을 모니터링하고, 유지 관리 주기를 예측하고, 가동 중지 시간을 20% 줄이는 디지털 트윈 기술을 도입했습니다.

AI 와 결합하여 블레이드 각도($15^\circ\sim 45^\circ$)와 코팅 매개변수를 최적화함으로써 절단

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

효율이 25% 증가합니다().

녹색 제조

코발트 자원 소비를 줄이고 환경에 미치는 영향을 50%까지 줄이기 위해 저코발트(<4%) 시멘트 카바이드를 연구 개발합니다.

마이크로 지능형 하드박스 재활용 시스템을 홍보하여 재활용 효율을 40% 높이고 폐액체 배출량을 60% 줄입니다(절삭 공구에 대한 중국의 녹색 제조 추세 참조).

슈퍼 하드 코팅

경도가 HV3500 이고 내마모성이 70% 증가하고 사용 수명이 2 배 증가하는 나노 다층 코팅(TiAlN / CrN, DLC/Si3N4 등)을 개발했습니다.

코팅 증착 공정을 최적화(아크 이온 플레이팅, 증착 속도 30% 증가)하고 생산 비용을 15% 절감합니다.

사용자 정의 및 모듈화

디지털 인쇄 용지(예: HP 인디고 용지) 및 고강도 복합 소재용 블레이드와 코팅을 통해 절단 정확도를 20% 향상시킵니다. 모듈식 도구 설계(예: 교체형 블레이드)를 장려하고, 설치 시간을 50% 단축하며, 재고 비용을 25% 절감합니다.

CTIA 그룹의 초경 제지 커터는 높은 경도(HV1800-1900), 내마모성, 그리고 높은 정밀도(공차 <0.01mm)를 갖춰 인쇄, 포장, 제지 산업의 핵심 절삭 공구로 자리매김했습니다. 초미립자 초경, DLC 코팅, 그리고 초소형 지능형 하드박스 재활용 시스템은 공구 수명(50 만~100 만 회 절삭), 효율성(분당 200m) 및 친환경 성능(텅스텐 회수율 >90%)을 크게 향상시킵니다. 인쇄 공장 및 포장 생산 라인 등 다양한 적용 사례를 통해 이 커터는 탁월한 비용 효율성(30~40% 절감)과 고객 만족도(35% 향상)를 입증했습니다.

CTIA 그룹은 앞으로도 지능형 제조(디지털 트윈, AI 최적화) 및 녹색 재활용(저코발트 합금, 이온성 액체 기술)을 통해 카바이드 종이 커터에 대한 연구, 개발 및 설계를 계속 진행하여 인쇄 및 포장 산업이 녹색하고 효율적인 방식으로 발전하고 글로벌 시장 경쟁력을 강화할 수 있도록 지원할 것입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

ISO 9227:2017

부식 시험

인공 분위기에서의 염분 분무 시험

1 범위

본 표준은 인공 분위기에서 염수 분무 시험(중성 염수 분무, NSS), 아세트산 염수 분무 시험(아세트산 염수 분무, AASS) 및 구리 가속 아세트산 염수 분무 시험(구리 가속 아세트산 염수 분무, CASS)을 수행하여 금속 재료 및 그 보호 피막(예: 초경합금, 아연도금층, 도금강판)의 내식성을 평가하는 시험 방법을 규정합니다. 본 시험 방법은 재료, 부품 또는 조립품의 내식성 비교에 적용할 수 있지만, 실제 환경에서의 사용 수명을 직접적으로 예측하지는 않습니다. 본 표준은 비금속 재료의 내식성 평가에는 적용할 수 없습니다.

2 규범적 참조

다음 문서에 나열된 조항들은 본 표준에서 참조를 통해 본 표준의 조항이 됩니다. 날짜가 있는 참조 문서의 경우, 참조된 버전만 적용되며, 날짜가 없는 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 적용됩니다.

ISO 1514:2016 페인트 및 바니시 - 테스트를 위한 표준 테스트 패널

ISO 2808:2019 페인트 및 바니시 - 필름 두께 결정

ISO 3574:2012 냉연 탄소강판 및 스트립 - 사양

시험 및 교정 실험실의 역량에 대한 일반 요구 사항

3 용어 및 정의

이 문서에는 다음과 같은 용어와 정의가 적용됩니다.

염수 분무 시험: 통제된 조건 하에서 염 용액을 분무 장치를 통해 미세한 물방울로 분산시켜 인공적인 부식성 분위기를 형성하여 재료의 내식성을 평가합니다.

NSS(중성염수분무시험): 중성염용액(pH 6.5~7.2)을 이용하여 실시하는 염수분무시험입니다.

AASS(아세트산 염 분무 시험): 중성염 용액에 아세트산을 첨가하고 pH 를 3.1~3.3 으로 조절하여 실시하는 염 분무 시험입니다.

아세트산 염 분무 시험 용액에 염화물 (CuCl_2) 을 첨가하면 부식 시험이 가속화됩니다.

중량 감소: 시험 전후 샘플의 질량 변화로, 일반적으로 mg/cm^2 로 표현됩니다 .

4 테스트 원리

염수 분무 시험은 시편을 염분이 포함된 인공 분위기에 노출시켜 해양 또는 산업 환경의 부식 조건을 시뮬레이션합니다. NSS 시험은 중성 염수 분무 환경을 시뮬레이션하고, AASS 및 CASS 시험은 산성화 및 촉매(예: CuCl_2) 첨가를 통해 부식을 가속화합니다. 2) 는 더욱 까다로운 부식 성능 평가에 적합합니다. 부식 속도는 중량 감소, 부식 생성물 분석 또는 표면 결함(예: 공식 및 박리)을 통해 평가됩니다.

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

5 테스트 장비

5.1 염수 분무 시험 챔버

용량 ≥ 400 L로 샘플 주변의 균일한 공기 흐름을 보장합니다.

상자의 몸체는 금속 재질의 오염을 방지하기 위해 부식 방지 재질(유리 섬유 강화 플라스틱 등)로 만들어졌습니다.

분무장치, 가열시스템, 습도조절시스템을 갖추고 있습니다.

5.2 분무 장치

노즐 소재는 부식 방지 소재(예: 폴리테트라플루오로에틸렌)입니다.

분무 압력: 0.07-0.17 MPa(0.7-1.7 bar).

분무 입자 크기: 1-10 μm .

5.3 환경 관리

시험실의 온도:

NSS: $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

AASS 및 CASS: $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

습도: $\geq 95\%$ RH.

6 테스트 솔루션

6.1 NSS 테스트 솔루션

염화나트륨(NaCl) 농도: $50\text{ g/L} \pm 5\text{ g/L}$.

pH: 6.5-7.2(25°C 에서).

용액 순도: 불순물(Cu, Ni 등) $< 0.001\%$.

6.2 AASS 테스트 솔루션

NSS 용액에 빙초산을 첨가하고 pH를 3.1~3.3(25°C)으로 조절합니다.

6.3 CASS 테스트 솔루션

$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 를 AASS 용액에 $0.26\text{ g/L} \pm 0.02\text{ g/L}$ 농도로 첨가합니다.

pH: 3.1-3.3(25°C 에서).

6.4 솔루션 수집

수집 속도: 1.0-2.0 mL/h (수평 면적 80 cm^2).

수집 용액 NaCl 농도: $50\text{ g/L} \pm 10\text{ g/L}$.

7. 샘플 요구 사항

7.1 시편 유형

시험 챔버에 적합한 치수를 갖춘 금속 재료, 코팅된 재료 또는 구성 요소(권장 $150\text{mm} \times 70\text{mm} \times 1\text{mm}$).

초경합금 시편의 표면 거칠기는 $R_a \leq 0.2\ \mu\text{m}$ 입니다.

7.2 샘플 수

통계적 신뢰성을 보장하기 위해 각 그룹에 최소 3개의 샘플이 포함되어었습니다.

7.3 샘플 준비

오일과 산화물을 제거하기 위해 샘플을 세척합니다(무수 에탄올로 세척 가능).

시편의 가장자리는 매끄러워야 하며, 국부 부식을 일으킬 수 있는 날카로운 모서리와 모서리가 없어야 합니다.

샘플의 초기 질량을 기록합니다(정확도 $\pm 0.001\text{g}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.4 샘플 배치

시편은 수직선에 대해 15° -30° 각도로 배치됩니다.

샘플 사이의 거리는 $\geq 20\text{mm}$ 로 유지해야 물방울이 서로 떨어지지 않습니다.

8 테스트 절차

8.1 테스트 조건

NSS: $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 6.5-7.2.

AASS: $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3.1-3.3.

CASS: $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3.1-3.3, CuCl_2 함유 .

8.2 테스트 시간

권장 테스트 주기: 24 시간, 48 시간, 96 시간, 240 시간, 720 시간(적용 분야 요구 사항에 따라 선택).

시멘트 카바이드의 경우 장기 내식성을 평가하기 위해 720 시간이 권장됩니다.

8.3 테스트 작동

시험 챔버를 지정된 온도로 예열합니다. 시험 용액을 넣고 분무 장치를 시작합니다.

시료를 넣고 시험 챔버를 닫은 후 시험 시작 시간을 기록합니다. 용액의 pH 와 회수율을 24 시간마다 확인합니다.

8.4 테스트 종료

샘플을 꺼내어 증류수로 헹궈서 소금 침전물을 제거했습니다.

무수 에탄올로 세척하고 건조합니다($60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 30 분).

샘플의 최종 질량을 기록합니다(정확도 $\pm 0.001\text{g}$).

9 결과 평가

9.1 체중 감량 계산

중량 감소율(mg/cm^2) = (초기 질량 - 최종 질량) / 샘플 표면적.

NSS $\pm 0.01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 720 시간 후 cm^2 .

9.2 표면 분석

광학 현미경(배율 50~200 배)을 사용하여 침식, 박리 또는 부식 생성물을 관찰합니다.

부식 구멍의 개수, 크기(직경, 깊이) 및 분포를 기록합니다.

9.3 평가 기준

적용요건에 따라 중량감소율이나 표면결함에 대한 합격기준을 수립한다.

예를 들어: 화학 밸브 카바이드 중량 감소 $< 0.1 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 피팅 깊이 $< 5 \mu\text{m}$.

10 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

표본 정보: 재료 유형, 크기, 표면 상태.

시험 조건: 시험 유형(NSS/AASS/CASS), 온도, pH, 시험 시간.

결과: 무게 감소율, 부식 구멍의 수와 크기, 표면 사진.

평가 결론: 신청 요건을 충족하는지 여부.

테스트 날짜와 작업자 서명.

부록 A (정보 부록) 일반적인 재료의 염수 분무 저항성 기준 값

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료 유형	테스트 유형	시험 시간 (h)	체중감량율 (mg/cm ²)	일반적인 프로그램	응용
초경합금 (WC-10Co)	NSS	720	0.08 ± 0.01	해양 장비	
아연도금강판	AASS	240	0.15 ± 0.02	건축 구성 요소	
스테인리스 스틸 (304)	카스	96	0.05 ± 0.01	식품 가공 장비	

부록 B(정보 부록) 환경 요구 사항

시험실 온도: 15° C ~ 35° C, 권장 온도는 23±2° C 입니다.

습도: 30%-70%, 권장 50±10%.

진동이 없고, 부식성 가스 환경도 없습니다.

시험대 수평도: 편차 < 0.02 mm/m.

요약하다

ISO 9227:2017 "부식 시험 - 인공 분위기에서의 염수 분무 시험"은 금속 재료 및 보호 코팅의 내식성을 평가하는 표준화된 방법을 제공하며, 여기에는 NSS, AASS, CASS 의 세 가지 시험 유형이 포함됩니다. 표준화된 시험 조건 및 절차를 통해 모든 부식 환경에서 재료의 성능을 효과적으로 비교할 수 있으며, 재료 선정 및 엔지니어링 적용(예: 해양 장비에 초경합금 사용)에 대한 과학적 근거를 제공합니다.

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

총수:

중화인민공화국 국가표준
GB/T 18376-2014 시멘트 카바이드의 내식성 및 내마모성 시험 방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2009 "표준화 작업을 위한 지침 제 1부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 18376-2001 "초경합금의 내식성 및 내마모성 시험 방법"을 대체합니다.

GB/T 18376-2001 과 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

전기화학적 시험 방법 추가(5.3 참조)

염수 분무 시험 조건을 조정하고 온도를 40° C 에서 35° C ± 2° C 로 변경했습니다(5.1 참조).

연삭 마모 시험의 하중과 사이클 횟수를 변경하였다. 하중은 30 N에서 20 N ± 0.5 N 으로, 사이클 횟수는 500 회에서 1000 ± 10 회로 변경하였다(6.2 참조).

샘플 표면 거칠기 요구 사항은 $Ra < 0.8 \mu m \pm 0.1 \mu m$ 로 증가했습니다 (4.2 참조).

본 표준은 국가 초경합금 표준화 기술위원회(SAC/TC 357)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 다음과 같습니다. 중국공작기계공사 초경합금 연구소, 베이징과학기술대학교, 시안 교통 대학교.

본 표준의 주요 작성 기관은 다음과 같습니다. 본 표준은 2014년 10월 1일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 초경합금의 내식성 및 내마모성 시험 방법을 규정합니다. 텅스텐 카바이드(WC)를 주성분으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합제로 사용하는 초경합금에 적용 가능하며, WC-Co 및 WC-Ni 시스템을 포함하되 이에 국한되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 12444-2006 금속 재료의 미끄럼 마찰 및 마모에 대한 시험 방법

GB/T 16545-2008 금속 재료에 대한 염수 분무 부식 시험 방법

ISO 9227-2017 부식 시험 - 인공 분위기에서의 부식성

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다

3.1 내식성

시멘트 카바이드가 부식성 매체(산성 용액이나 염수 분무 등)에서 질량 손실이나 표면 손상에 저항하는 능력으로, 일반적으로 중량 감소율(mg/cm^2) 과 부식 전류 밀도 (i_{corr} , A/cm^2) 로 표현합니다 .3.2 내마모성 시멘트 카바이드가 기계적

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

마찰이나 연마 작용 하에서 재료 마모에 저항하는 능력으로, 일반적으로 마모 질량 손실(mg) 또는 마모 부피(mm³) 로 표현 합니다. 3.3 부식 전류 밀도 (i_{corr}) 전기화학적 시험에서 재료의 부식 속도를 반영하는 매개변수로, 단위는 A/cm² 입니다 .

4 실험 준비

4.1 샘플

4.1.1 시료 재료: WC 기반 초경합금, 결합상은 Co 또는 Ni 이며, 조성은 제품 기술 요구 사항을 충족해야 합니다.

4.1.2 시료 크기: 10mm × 10mm × 5mm ± 0.1mm 4.1.3 시료 수: 각 시험 그룹은 3 회 이상 반복해야 합니다.

4.2 샘플 처리

4.2.1 표면 처리: 샘플 표면은 Ra < 0.8 μm ± 0.1 μm 의 거칠기로 기계적 으로 연마됩니다 .

4.2.2 세척: 무수 에탄올을 사용하여 5분 ± 0.5 분 동안 초음파 세척하고, 사용을 위해 건조합니다. 4.2.3 초기 질량: 정확도가 ±0.01mg 인 분석용 저울로 측정합니다.

5 내식성 시험

5.1 염수 분무 시험

5.1.1 테스트 조건:

용액: 5% ± 0.1% NaCl 용액(질량 분율), pH 6.5-7.2.

온도: 35° C ± 2° C.

지속 시간: 48 시간 ± 2 시간.

5.1.2 시험 장비

염수 분무실, 분무량 1-2 mL / (80 cm² · h) .

5.1.3 결과 평가:

중량 감소율 = $(m_0 - m_1) / A$, 단위: mg/cm², 정확도: ±0.01 mg/cm², 여기서 m_0 는 시험 전 질량, m_1 은 시험 후 질량, A는 시편의 표면적입니다.

표면 부식 형태를 관찰하고 부식 구멍의 깊이를 기록합니다(정확도 ± 0.5 μm) .

5.2 산 침지 시험

5.2.1 테스트 조건:

용액 : 1% ± 0.1% H₂SO₄ 용액 (부피 분율).

온도: 25° C ± 1° C.

침지 시간: 24 시간 ± 1 시간 .

5.2.2 시험 장비

일정 온도의 수조.

5.2.3 결과 평가:

체중감량율은 5.1.3 에 따라 계산됩니다.

를 ±0.5 μm 의 정확도로 측정합니다 .

5.3 전기화학 테스트

5.3.1 테스트 조건:

전해질: 3.5% ± 0.1% NaCl 용액, 온도 25° C ± 1° C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전극 시스템: 작업 전극(경합금), 기준 전극(포화 칼로멜 전극 SCE), 보조 전극(백금 전극).

스캔 속도: $1 \text{ mV/s} \pm 0.1 \text{ mV/s}$, 전위 범위 $\pm 0.25 \text{ V vs. } E_{\text{corr}}$.

5.3.2 테스트 장비

전기화학 작업대, 전위 정확도 $\pm 0.001 \text{ V}$, 전류 정확도 $\pm 10^{-9} \text{ A}$.

5.3.3 결과 평가:

부식 전위 (E_{corr} , 정확도 $\pm 0.02 \text{ V}$) 및 부식 전류 밀도 (i_{corr} , 정확도 $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) 를 측정합니다.

Tafel 피팅 분석을 사용하였고, 검정은 3 회 이상 반복되었습니다.

6 내마모성 시험

6.1 마찰 및 마모 시험

6.1.1 테스트 조건:

하중: $50 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$.

슬라이딩 속도: $0.1 \text{ m/s} \pm 0.01 \text{ m/s}$.

시험시간: $30 \text{ 분} \pm 1 \text{ 분}$.

마찰 쌍: 초경 핀, 쌍 재질은 경화강 디스크(경도 $\text{HV } 600 \pm 50$)입니다.

6.1.2 시험 장비

마찰 및 마모 시험기, 하중 정확도 $\pm 1 \text{ N}$, 속도 정확도 $\pm 0.01 \text{ m/s}$.

6.1.3 결과 평가:

마모 질량 손실 = $m_0 - m_1$, 단위: mg , 정확도: $\pm 0.01 \text{ mg}$.

μm 의 정확도로 마모 흔적 깊이와 너비를 관찰 합니다.

6.2 연마마모 시험

6.2.1 테스트 조건:

연마재: SiC , 입자 크기 $100\text{-}150 \mu\text{m}$.

하중: $20 \text{ N} \pm 0.5 \text{ N}$.

테스트 사이클 수: $1000 \text{ 사이클} \pm 10 \text{ 사이클}$.

마찰 쌍: 초경 시편, 결합 재료는 연마 디스크입니다.

6.2.2 시험 장비

연마 마모 시험기, 하중 정확도 $\pm 0.5 \text{ N}$, 원 정확도 $\pm 10 \text{ 원}$.

6.2.3 결과 평가:

마모량 = $(m_0 - m_1) / \rho$, 단위: mm^3 , 정확도: $\pm 0.01 \text{ mm}^3$, 여기서 ρ 는 재료 밀도, 정확도: $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$.

μm 의 정확도로 마모 홈터 프로필을 측정 합니다.

7 데이터 처리

7.1 모든 시험 결과는 3 회 이상의 측정값의 평균입니다. 7.2

내식성은 중량 감소율(mg/cm^2 , 정확도 $\pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$) 및 i_{corr} (A/cm^2 , 정확도 $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) 로 표현합니다. 7.3

내마모성은 마모 질량 손실(mg , 정확도 $\pm 0.01 \text{ mg}$) 또는 마모 부피(mm^3 , 정확도 $\pm 0.01 \text{ mm}^3$) 로 표현합니다. 7.4

결과에는 신뢰 수준 95%의 불확도 분석이 함께 제공됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성 및 준비 과정.

시험 조건(온도, 시간, 하중 등)

테스트 결과(중량 감소, i_{corr} , 마모 감소 등) 및 불확실성.

테스트 날짜와 작업자 서명.

부록 A (규범 부록)

샘플 준비 예시

A.1 샘플 절단: 다이아몬드 연삭 휠을 사용하고, 냉각수는 물을 사용하며, 절단 속도는 $10\text{m/s} \pm 1\text{m/s}$ 입니다.

A.2 연마: SiC 사포(#800-#1200)를 사용하고, 마지막으로 다이아몬드 현탁액(Grit $1\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$)으로 연마합니다. A.3 세척 : 초음파 세척(5분 \pm 0.5

분) 후 건조 후 무게를 측정합니다.

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

B.1 WC10Ni: 염수 분무 중량 감소율 $0.04\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$, i_{corr} $10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$, 마모 질량 손실 $0.08\text{ mg} \pm 0.01\text{ mg}$.

B.2 WC10 Co: 염수 분무 중량 감소율 $0.07\text{ mg/cm}^2 \pm 0.01\text{ mg/cm}^2$, i_{corr} $10^{-5}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6}\text{ mA/cm}^2$, 마모 질량 손실 $0.12\text{ mg} \pm 0.01\text{ mg}$.

은

관련 국제 표준(예: ISO 3738, ISO 28079)을 참조하거나 기술 위원회에 문의하십시오. 본 표준은 국가표준화국(National Standardization Administration)에서 2014년 7월 9일에 발표되었으며, 2014년 10월 1일부터 시행되었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

국제 표준

ISO 4287:1997 기하학적 제품 사양

— 표면 질감: 윤곽선 방법

— 용어, 정의 및 표면 질감 매개변수
기하학적 제품 사양(GPS)

— 표면 질감: 프로파일 방법

— 용어, 정의 및 표면 질감 매개변수

개요

ISO 4287:1997 은 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 표준으로, "기하학적 제품 사양(GPS) - 표면 질감: 프로파일 방법 - 용어, 정의 및 표면 질감 매개변수"라는 제목으로 1997년 8월 1일에 발표되었습니다. 최신 버전은 ISO 4287:1997 (Amd 1:2009)이며, 2018년에 유효가 확정되었습니다. ISO 4287 은 ISO/TC 213(기하학적 제품 사양 및 검증)에서 기계 부품, 공구 및 재료의 표면 품질 평가에 적용 가능한 표면 질감 프로파일 방법에 대한 통합 용어, 정의 및 매개변수를 제공하기 위해 개발되었습니다. 이 표준은 제조, 품질 관리 및 엔지니어링 설계 분야에서 널리 사용됩니다.

1 범위

적용 대상: 금속, 플라스틱, 세라믹 등 프로파일법을 사용하여 표면 질감을 측정하고 평가하는 부품에 적용 가능합니다.

목적: 표면 질감 매개변수의 용어와 계산 방법을 정의하고 표면 거칠기 측정 및 보고에 대한 지침을 제공합니다.

적용 불가: 표면 지형의 비프로파일 측정(면적법 등)이나 미세구조 분석에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 3274:1996 기하학적 제품 사양(GPS)

— 표면 질감: 프로파일 방법 — 접촉식(스타일러스) 도구의 공칭 특성

ISO 4288:1996 기하학적 제품 사양(GPS)

— 표면 질감: 프로파일 방법 — 표면 질감 평가를 위한 규칙 및 절차

3 용어 및 정의

이 표준에는 다음과 같은 용어와 정의가 적용됩니다.

3.1 기본 개념

3.1.1 표면 질감

부품의 표면은 거칠기, 물결 모양, 형태 오차의 합계입니다. 3.1.2 프로파일 높이 대 길이의 곡선을 나타내는 표면 질감의 2차원 단면입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2 거칠기 매개변수

3.2.1 Ra(산술 평균 편차)

프로파일 산술 평균 편차는 표본 길이 내에서 프로파일 편차의 절대값의 평균으로 정의되며, μm (마이크로미터)입니다. 3.2.2 Rq (제곱 평균 제곱근 편차)

프로파일 제곱 평균 제곱근 편차는 표본 길이 내에서 프로파일 편차의 제곱의 평균의 제곱근으로 정의되며, μm (마이크로미터)입니다. 3.2.3 Rz(프로파일의 최대 높이)

프로파일의 최대 높이로, 표본 길이 내에서 가장 높은 피크와 가장 낮은 밸리 사이의 높이 차이로 정의되며, μm (마이크로미터)입니다. 3.2.4 Rt(프로파일의 전체 높이)

프로파일의 전체 높이로, 평가 길이 내에서 가장 높은 피크와 가장 낮은 밸리 사이의 최대 높이 차이로 정의되며, μm (마이크로미터)입니다. 3.2.5 Rp(최대 프로파일 피크 높이)

표본 길이 내에서 피크 높이로, μm (마이크로미터)입니다.

3.2.6 Rv (최대 프로파일 계곡 깊이)는

샘플링 길이 내의 가장 깊은 계곡 깊이이며, 단위는 μm (마이크로미터)입니다.

3.3 샘플링 및 평가 길이

3.3.1 샘플링 길이 (lr)

거칠기 매개변수를 계산하는 데 사용되는 기준 길이로, 일반적으로 0.25mm, 0.8mm 또는 2.5mm 입니다. 3.3.2 평가 길이(1n)

표면 질감의 종합적 평가에 사용되는 여러 샘플링 길이의 합으로, 일반적으로 5lr 입니다. 3.3.3 횡단 길이 (lt)

측정 과정에서 실제로 스캔된 총 길이로, 일반적으로 1.51n 입니다.

3.4 기타 매개변수

3.4.1 Sk (코어 거칠기 깊이)

프로파일 코어 거칠기 깊이는 재료의 지지 특성을 반영하며, 단위는 μm (마이크로미터)입니다. 3.4.2 Rsk (왜도)

프로파일 왜도는 높이 분포의 비대칭성을 나타내며, 단위는 지정되지 않습니다.

3.4.3 Rku (첨도) 프로파일

첨도는 높이 분포의 날카로움을 나타내며, 단위는 지정되지 않습니다.

4 매개변수 계산 방법

4.1 거칠기 매개변수

Ra 계산:

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |z(x)| dx$$

其中, $z(x)$ 为轮廓偏差 (Profile deviation), lr 为采样长度 (Sampling length)。

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rq 计算 (Calculation of Rq):

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} z(x)^2 dx}$$

Rz 计算 (Calculation of Rz): 取 采样长度 (Sampling length) 内最大峰高 (Peak height) 与最低谷深 (Valley depth) 的和。

Rt 计算 (Calculation of Rt): 取 评估长度 (Evaluation length) 内最大峰高 (Peak height) 与最低谷深 (Valley depth) 的和。

4.2 측정 조건

도구 , 스타일러스 반경 $\leq 5 \mu m$.

필터링: 고역 통과 필터링을 사용하여 물결 모양 효과를 제거합니다. 차단 파장 λc 는 일반적으로 0.8mm 입니다.

5 보고 요구 사항

매개변수 값: Ra, Rq , Rz 및 기타 매개변수 값(매개변수 값)을 보고합니다. 단위는 μm (마이크로미터)이고 정확도는 $\pm 0.01 \mu m$ 입니다 .

측정 조건: 샘플링 길이, 평가 길이, 필터링 조건 및 스타일러스 유형을 포함합니다.

불확실성: 측정 불확실성은 95% 신뢰 수준 내에서 제공됩니다.

6 부록

부록 A: 일반적인 데이터

가공된 강철 부품: Ra = $0.8 \mu m \pm 0.01 \mu m$, Rz = $4.5 \mu m \pm 0.1 \mu m$.

연마된 시멘트 카바이드: Ra = $0.02 \mu m \pm 0.01 \mu m$, Rz = $0.15 \mu m \pm 0.01 \mu m$.

부록 B: 측정 예

샘플링 길이는 0.8mm, 평가 길이는 4mm, Ra 측정값은 $1.2 \mu m$ 입니다 .

설명하다

관련 표준: ISO 3274 는 측정 장비의 특성을 규정합니다. ISO 4288 은 표면 질감 평가에 대한 규칙과 절차를 제공합니다.

유효성: ISO 4287:1997 (Amd 1:2009)은 2018 년에 유효성이 확인되었으며, 향후 GPS 프레임워크를 기반으로 업데이트될 수 있습니다.

구매처: 표준 텍스트는 ISO 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다.

주의사항: 구현 시에는 구체적인 표면처리 공정과 측정장비 교정을 결합하고, 전문 기술자와 협의해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

국제 표준

ISO 3274:1996 기하학적 제품 사양(GPS)

— 표면 질감: 윤곽선 방법

접촉식 계측기의 기하학적 제품 사양(GPS)

— 표면 질감: 프로파일 방법

— 접촉식(스타일러스) 기기의 공칭 특성

개요

ISO 3274:1996 은 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 표준으로, "기하학적 제품 사양 - 표면 질감: 프로파일 측정법 - 접촉식 기기의 공칭 특성"이라는 제목으로 개발되었습니다. 이 표준은 1996 년 8 월 1 일에 발표되었으며, 최신 버전은 ISO 3274:1996 (Amd 1:2009)으로, 2019 년에 유효가 확정되었습니다. ISO 3274 는 ISO/TC 213(기하학적 제품 사양 및 검증)에서 표면 질감 프로파일 측정에 사용되는 접촉식 기기의 공칭 특성(프로브, 구동 장치 및 필터 요구 사항 포함)을 명시하기 위해 개발되었습니다. 이 표준은 표면 거칠기 측정의 기술적 기반을 제공하며 제조, 기계 공학 및 재료 시험 분야에서 널리 사용됩니다.

1 범위

적용 대상 : 금속, 플라스틱, 세라믹 등의 재료를 대상으로 접촉식 기구를 사용하여 표면 질감을 측정하는 프로파일로메트리.

목적 : 측정 결과의 비교성과 일관성을 보장하기 위해 접촉 계측기의 공칭 특성을 정의합니다.

해당 없음 : 비접촉 측정 기기(광학 또는 레이저 장비 등)와 함께 사용하거나 미세 구조 분석에 적합하지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 4287:1997 기하학적 제품 사양 - 표면 질감: 프로파일 방법 - 용어, 정의 및 표면 질감 매개변수

ISO 4288:1996 기하학적 제품 사양 - 표면 질감: 프로파일 방법 - 표면 질감 평가를 위한 규칙 및 절차

3 용어 및 정의

이 표준에는 다음과 같은 용어와 정의가 적용됩니다.

3.1 접촉 장비

측정을 위해 표면에 접촉하는 물리적 프로브를 사용하는 장치로, 표면 프로파일 데이터를 얻는 데 사용됩니다. 3.2 표면에 접촉하는 **프로브 장비**

끝부분으로 높이 변화를 감지하는 역할을 합니다. 3.3 **샘플링 길이**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표면 질감을 측정하는 데 사용되는 기준 길이로, 일반적으로 0.25mm, 0.8mm 또는 2.5mm 입니다.

3.4 차단 파장

필터 거칠기와 물결 모양을 분리하는 데 사용되는 임계 길이로, 일반적인 값은 0.8mm 입니다.

4. 기기 특성 요구 사항

4.1 프로브

모양 : 원뿔형 또는 구형 팁, 팁 반경은 일반적으로 $2\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 입니다 .

재료 : 다이아몬드나 카바이드와 같은 내마모성 재료.

접촉력 : 표면 경도 및 거칠기 에 따라 $0.5\text{mN} \sim 4\text{mN}$.

4.2 구동 장치

이동 속도 : $0.1\text{mm/s} \sim 1\text{mm/s}$, 정확도 $\pm 0.02\text{mm/s}$.

직진도 : 이동 경로의 직진도 오차는 $\leq 0.5\mu\text{m}$ 입니다 .

분해능 : 높이 분해능 $\leq 0.01\mu\text{m}$, 길이 분해능 $\leq 0.1\mu\text{m}$.

4.3 필터

유형 : 2RC 또는 위상 보정 고역 통과 필터.

차단 파장 (λ_c) : 0.08mm, 0.25mm, 0.8mm 또는 2.5mm, 측정 요구 사항에 따라 선택하세요.

전달 특성 : ISO 11562 요구 사항에 따라 감쇠율 $\geq 75\%$.

5 측정 조건

환경 조건 : 온도 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 40%-60%.

표면 준비 : 샘플 표면은 깨끗하고 기름과 먼지가 없어야 하며, 거칠기는 $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$ 이어야 합니다 .

측정 방향 : 주요 가공 방향이나 부품의 수직 방향을 따라 측정합니다.

6 데이터 수집 및 처리

샘플링 간격 : 샘플링 길이에 따라 자동 조정되며, 최대 간격은 $\leq 0.1\mu\text{m}$ 입니다 .

포인트 수 : 샘플링 길이당 최소 5000 개의 데이터 포인트.

필터링 : 지정된 차단 파장을 사용하여 물결 모양의 효과를 제거합니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

표본 재료 및 표면 상태.

기기 모델, 프로브 유형 및 접촉력.

측정 조건(예: 샘플링 길이, 차단 파장).

측정 결과 및 불확실성.

테스트 날짜와 작업자 서명.

8 부록(정보)

부록 A: 일반적인 데이터

된 강철 부품 : 프로브 반경 $5\mu\text{m}$, 샘플링 길이 0.8 mm, $R_a = 0.8\mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

카바이드 연마 : 프로브 반경 2 μm , 샘플링 길이 0.25 mm, Ra = 0.02 μm .

설명하다

관련 표준 :

ISO 4287 은 표면 질감 매개변수에 대한 정의를 제공합니다.

ISO 4288 은 평가에 대한 규칙과 절차를 제공합니다.

유효성 : ISO 3274:1996 (Amd 1:2009)은 2019년에 유효한 것으로 확정되었으며, 기술 발전에 따라 향후 업데이트될 수 있습니다.

구매처 : 표준 텍스트는 ISO 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다.

참고사항 : 구현 시 계측기를 교정해야 하며, 구체적인 측정 요구사항에 따라 전문 기술자와 상담해야 합니다.

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

총수

국제 표준

ISO 4288:1996 기하학적 제품 사양

— 표면 질감: 윤곽선 방법

— 표면 질감 평가를 위한 규칙 및 절차

기하학적 제품 사양

— 표면 질감: 프로파일 방법

— 표면 질감 평가를 위한 규칙 및 절차

개요

ISO 4288:1996 은 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 표준으로, "기하학적 제품 사양 - 표면 질감: 프로파일 방법 - 표면 질감 평가를 위한 규칙 및 절차"라는 제목으로 개발되었습니다. 이 표준은 1996 년 8 월 1 일에 발표되었으며, 최신 버전은 ISO 4288:1996 (Amd 1:2003)으로, 2018 년에 유효가 확정되었습니다. ISO 4288 은 ISO/TC 213(기하학적 제품 사양 및 검증)에서 표면 질감 프로파일 방법에 대한 평가 규칙 및 절차를 제공하기 위해 개발되었으며, 측정 조건, 데이터 처리 및 결과 보고를 포함합니다. 이 표준은 기계 부품, 공구 및 재료의 표면 품질 관리에 적용되며 제조 및 엔지니어링 분야에서 널리 사용됩니다.

1 범위

적용 대상 : 금속 , 플라스틱, 세라믹 소재 등 표면 질감을 프로파일로 측정하고 평가하는 부품에 적합합니다.

목적 : 측정 결과의 일관성과 비교성을 보장하기 위해 표면 질감 평가에 대한 규칙과 절차를 지정합니다.

적용 불가 : 비윤곽 방법(예: 평면 측정 방법)이나 미세 구조 분석에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 3274:1996 기하학적 제품 사양 - 표면 질감: 프로파일로메트리 - 접촉식 계측기의 공칭 특성

ISO 4287:1997 기하학적 제품 사양 - 표면 질감: 프로파일 방법 - 용어, 정의 및 표면 질감 매개변수

3 용어 및 정의

이 표준에는 다음과 같은 용어와 정의가 적용됩니다.

3.1 표면 질감

부품 표면의 거칠기, 물결 모양 및 오차 형태의 합계입니다. 3.2 프로파일

높이 대 길이의 곡선을 나타내는 표면 질감의 2차원 단면입니다. 3.3 샘플링 길이

거칠기 매개변수를 계산하는 데 사용되는 기준 길이로 일반적으로 0.25mm, 0.8mm

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

또는 2.5mm 입니다. 3.4 평가 길이

표면 질감의 종합적 평가에 사용되는 여러 샘플링 길이의 합으로 일반적으로 5 lr
입니다 .

4 측정 조건

4.1 약기

ISO 3274 를 준수하는 접촉식 계측기의 경우 프로브 반경은 일반적으로 $2\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$
입니다 .

이동 속도: $0.1\text{mm/s} \sim 1\text{mm/s}$, 정확도 $\pm 0.02\text{mm/s}$.

4.2 환경 조건

온도: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

습도: 40%-60%.

진동과 전자기파 간섭을 피하세요.

4.3 표면 준비

시료 표면은 깨끗하고 기름과 먼지가 없으며, 거칠기 $Ra \leq 0.8\mu\text{m}$ 입니다 .

측정 방향: 주요 처리 방향을 따라가거나 이에 수직입니다.

5 가지 평가 규칙

5.1 샘플링 길이 선택

표면 질감 특성에 따라 샘플링 길이를 선택하세요.

미세 표면: 0.25 mm.

일반 표면: 0.8mm.

거친 표면: 2.5mm.

5.2 필터링

일반적으로 0.8mm 의 차단 파장 λ_c 를 갖는 데 사용됩니다.

감쇠율이 $\geq 75\%$ 로 ISO 11562 의 위상 보정 요구 사항을 충족합니다.

5.3 데이터 처리

거칠기 매개변수 : Ra , Rq , Rz 및 기타 매개변수를 계산합니다.

이상치 처리 : 명백히 비정상적인 데이터를 제거하고 다시 측정합니다.

불확실성 : 95%의 신뢰 수준에서 측정 장비와 작업으로 인해 발생하는 오차를
평가합니다.

6 평가 절차

준비 단계 : 기기를 교정하고 샘플 표면을 청소합니다.

측정 단계 : 지정된 방향을 따라 스캔하고 윤곽선 데이터를 기록합니다.

분석 단계 : 필터링을 적용하고 매개변수 값을 계산합니다.

보고 단계 : 결과를 기록하고 허용 오차 요구 사항과 비교합니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재질 및 표면 상태. 측정 조건(예: 샘플링 길이, 차단 파장, 측정 방향).

표면 질감 매개변수 값 및 불확실성. 시험 날짜 및 작업자 서명.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 부록(정보)

부록 A: 일반적인 데이터

가공된 강철 부품 : 샘플링 길이 0.8mm, Ra = 0.8 μm , Rz = 4.5 μm .

연마된 카바이드 : 샘플링 길이 0.25 mm, Ra = 0.02 μm , Rz = 0.15 μm .

부록 B: 측정 예시 평가 길이는 4mm , 차단 과장은 0.8mm, Ra 측정값은 1.2 μm 였습니다 .

설명하다

관련 표준 : ISO 3274 는 접촉식 계측기의 공칭 특성을 규정합니다. ISO 4287 은 표면 질감 매개변수의 정의를 제공합니다.

유효성 : ISO 4288:1996 (Amd 1:2003) 2018 년에 유효성이 확인되었으며, 향후 GPS 프레임워크를 기반으로 업데이트될 수 있습니다.

구매처 : 표준 텍스트는 ISO 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다 .

참고사항 : 구현 시 계측기를 교정해야 하며, 구체적인 측정 요구사항에 따라 전문 기술자와 상담해야 합니다.

총수:

중화인민공화국 국가표준
GB/T 12444-2006
금속재료의 미끄럼 마찰 및 마모 시험
방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2000 "표준화 작업을 위한 지침 제1부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 12444-1990 "금속 재료의 미끄럼 마찰 및 마모 시험 방법"을 대체합니다.

GB/T 12444-1990 과 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

시험 하중 범위는 20-100N 에서 10-200N \pm 1N 으로 조정되었습니다(5.2 참조).

슬라이딩 속도 범위는 0.05-0.5m/s 에서 0.01-1m/s \pm 0.01m/s 로 수정되었습니다(5.2 참조).

마찰 쌍 재료에 대한 선택 요구 사항을 추가하고 쌍 재료의 경도를 명확히 했습니다(4.2 참조).

마모 질량 손실 측정에 대한 정확도 요구 사항이 \pm 0.1mg 에서 \pm 0.01mg 으로 세분화되었습니다(6.2 참조).

본 표준은 철강표준화국가기술위원회(SAC/TC 183)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 다음과 같습니다. 중국과학원 금속연구소, 칭화대학교 베이징철강연구소. 본 표준의 주요 작성 기관은 다음과 같습니다. 본 표준은 2006 년 12 월 1 일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 금속 재료의 미끄럼 마찰 및 마모 시험 방법을 규정하며, 건식 마찰 또는 윤활 조건에서 금속 재료(강, 합금, 초경합금 등)의 내마모성 평가에 적용할 수 있습니다. 본 시험 방법은 핀-디스크 접촉 형태를 기반으로 하며, 품질 관리, 재료 선별 및 성능 비교에 활용될 수 있습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 1031-1995 플라스틱의 밀도 및 상대 밀도 측정

GB/T 6682-2008 분석 실험실에서 사용되는 물에 대한 사양 및 시험 방법

ISO 4287:1997 표면 기하 매개변수: 프로파일로메트리 용어, 정의 및 매개변수

3 용어 및 정의

다음은 이 표준에 적용되는 용어와 정의입니다.

3.1 슬라이딩 마찰은

상대적으로 운동하는 두 표면 사이의 접촉에 의해 발생하는 저항이며, 단위는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

N 입니다.

3.2 마모 질량 손실은 시험 전후 샘플의 질량 차이이며, 단위는 mg 이며, 재료의 마모 저항성을 반영합니다. 3.3 마찰 계수는 슬라이딩 마찰력과 정상 압력 하중의 비율이며, 단위는 무차원이고 정확도는 ± 0.01 입니다.

4 실험 준비

4.1 표본

4.1.1 시료 재질: 강철, 합금 및 경합금을 포함하되 이에 국한되지 않는 금속 재료.

4.1.2 시료 모양: 원통형 핀, 크기 $\phi 6 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ 또는 합의에 따라 결정.

4.1.3 시료 수: 각 시험 그룹은 3회 이상 반복해야 합니다.

4.2 마찰 쌍

4.2.1 상대재료: 일반적으로 경화강판(경도 HV 600 \pm 50) 또는 합의에 따라 지정된 재료.

4.2.2 표면처리: 상대재료의 표면 거칠기 $Ra \leq 0.4 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$.

4.3 샘플 처리

4.3.1 표면 처리: 샘플 표면은 $Ra \leq 0.4 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$ 의 거칠기로 기계적으로 연마됩니다.

4.3.2 세척: 무수 에탄올을 사용하여 5분 \pm 0.5분 동안 초음파 세척하고 건조 후 무게를 측정하며 정확도는 $\pm 0.01\text{mg}$ 입니다.

4.3.3 초기 상태: 샘플에 기름 얼룩이나 산화층이 없는지 확인합니다.

5 가지 시험 방법

5.1 테스트 장비

5.1.1 마찰 및 마모 시험기: 하중 제어(정확도 $\pm 1 \text{ N}$), 속도 제어(정확도 $\pm 0.01 \text{ m/s}$) 및 마찰력 측정(정확도 $\pm 0.1 \text{ N}$) 기능이 있음.

5.1.2 환경 조건: 온도 $23^\circ \text{C} \pm 5^\circ \text{C}$, 습도 $< 65\%$ 또는 합의에 따라 결정된 운할 조건.

5.2 테스트 조건

5.2.1 하중: $10\text{--}200 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, 재료 특성에 따라 조정 가능.

5.2.2 슬라이딩 속도: $0.01\text{--}1 \text{ m/s} \pm 0.01 \text{ m/s}$.

5.2.3 시험 시간: 30분 \pm 1분 또는

슬라이딩 거리 $100 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$.

5.2.4 접촉 형태: 핀 디스크, 접촉 면적 약 $0.28 \text{ cm}^2 \pm 0.01 \text{ cm}^2$.

5.3 테스트 절차

5.3.1 시편 설치: 시편을 시험기의 핀 시트에 고정하고, 그에 맞는 재료는 수평판입니다.

5.3.2 하중 적용: 점차적으로 설정 값까지 하중을 가하고 1분 \pm 10초 동안 안정시킵니다.

5.3.3 시험 시작: 마찰력, 미끄러짐 거리 및 시험 시간을 기록합니다.

5.3.4 시험 종료: 하중을 내리고 시편을 꺼내 세척한 후 무게를 잹니다.

6 데이터 처리

6.1 마찰계수

6.1.1 계산식:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\mu = \frac{F}{N}$$

其中, μ 为摩擦系数, F 为摩擦力 (N), N 为正压载荷 (N)。

6.1.2 결과 정확도: ± 0.01 , 5 회 측정값의 평균값을 취함.

6.2 마모 질량 감소

6.2.1 계산식:

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

其中, Δm 为磨损质量损失 (mg), m_0 为试验前质量, m_1 为试验后质量。

6.3 마모흔 측정

를 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 의 정확도로 측정합니다 .

6.3.2 마모흔 형태를 기록하고 필요한 경우 SEM 분석을 수행합니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성 및 준비 과정.

시험 조건(하중, 속도, 시간 등)

시험 결과(마찰 계수, 마모 질량 감소, 마모 흉터 크기 등) 및 불확실성.

테스트 날짜와 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

샘플 준비 예시

A.1 샘플 절단: 다이아몬드 연삭 휠을 사용하고, 냉각수는 물을 사용하며, 절단 속도는 $5 \text{ m/s} \pm 0.5 \text{ m/s}$ 입니다.

A.2 연마: SiC 사포(#800-#1200)를 사용하고, 마지막으로 다이아몬드 현탁액(Grit $1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) 으로 연마합니다 .

A.3 세척: 초음파 세척(5 분 ± 0.5 분) 후 건조 후 무게를 측정합니다 .

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

B.1 45#강: 하중 50N, 속도 0.1m/s, 마찰계수 0.35 ± 0.01 , 마모 질량 감소 $0.15\text{mg} \pm 0.01\text{mg}$.

B.2 WC10 Co: 하중 100N, 속도 0.5m/s, 마찰계수 0.25 ± 0.01 , 마모 질량 감소 $0.08\text{mg} \pm 0.01\text{mg}$.

설명하다

본 표준에 포함되지 않은 사항은 관련 국제 표준(예: ASTM G99)을 참조하거나 기술 위원회에 문의하십시오.

본 표준은 국가표준화국(NSSA)에서 2006년 7월 18일에 발표되었으며, 2006년 12월 1일부터 시행되었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD 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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

중화인민공화국 국가표준
GB/T 16545-2008 금속재료의 염수분무시험방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2000 "표준화 작업을 위한 지침 제 1부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 16545-1996 "금속 재료의 염수 분무 부식 시험 방법"을 대체합니다.

GB/T 16545-1996 과 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

염수 분무 시험 온도는 $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 조정되었습니다(5.2 참조).

분무량 요구 사항은 $1\text{-}3\text{mL} / (80\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 에서 $1\text{-}2\text{mL} / (80\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 로 수정되었습니다 (5.2 참조).

시료 표면 세척 방법을 추가하고 초음파 세척 시간을 명확히 했습니다(4.2 참조).

부식 생성물을 관찰하고 기록하기 위한 요구 사항이 세분화되었습니다(6.2 참조).

본 표준은 국가부식방지표준화기술위원회(SAC/TC 156)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 중국과학원 금속연구소, 일반철강연구소, 해양부식방지 국가중점실험실입니다. 본 표준의 주요 작성자는 자오창(Zhao Qiang), 천리(Chen Li), 쑨웨이(Sun Wei)입니다. 본 표준은 2008년 10월 1일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 금속 재료의 염수 분무 부식 시험 방법을 규정하며, 모의 해양 또는 산업 대기 환경에서 금속 재료(강철, 알루미늄 합금, 경합금 등)의 내식성 평가에 적용할 수 있습니다. 본 시험 방법은 연속 또는 주기적인 염수 분무 노출을 기반으로 하며, 품질 관리, 재료 선별 및 성능 비교에 활용될 수 있습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 6461-2002 금속 및 합금 부식 시험에 대한 일반 지침

GB/T 6682-2008 분석 실험실에서 사용되는 물에 대한 사양 및 시험 방법

ISO 9227-2017 부식 시험 - 인공 분위기에서의 부식성

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 염수 분무 부식은 염화나트륨이 포함된 분무 환경에서 전기화학 반응으로 인해 발생하는 금속 재료의 질량 손실 또는 표면 손상을 말합니다.

3.2 중량 감소 시험 전후 샘플의 질량 차이와 표면적의 비율(mg/cm^2 로 표현)로, 내식성을 반영합니다.

3.3 부식 생성물 시험 중 샘플 표면에 생성되는 산화물, 염 또는 기타 화합물입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4 실험 준비

4.1 표본

4.1.1 시료 재질: 강철, 알루미늄 합금, 경합금을 포함하되 이에 국한되지 않는 금속 재질.

4.1.2 시료 크기: 50mm × 25mm × 3mm ± 0.1mm 또는 합의된 크기. 4.1.3 시료 수: 각 시험 그룹은 최소 3회 이상 반복해야 합니다.

4.2 샘플 처리

4.2.1 표면처리: 시료 표면은 기계적으로 연마되며, 거칠기는 $Ra \leq 0.8 \mu m \pm 0.1 \mu m$ 입니다.

4.2.2 세척: 무수 에탄올을 사용하여 5분 ± 0.5분 동안 초음파 세척하고 건조 후 무게를 측정하며 정확도는 ± 0.01mg 입니다. 4.2.3 초기 상태: 샘플에 기름 얼룩, 녹 또는 산화물 층이 없는지 확인합니다.

5 가지 시험 방법

5.1 테스트 장비

5.1.1 염수분무 시험 챔버: 일정한 온도 제어(정확도 ±1° C), 분무량 조절(1-2 mL / (80 cm² · h)) 및 균일 분무 기능이 있습니다.

5.1.2 환경 조건: 시험 챔버의 온도는 35° C ± 1° C 이고 습도는 100%에 가깝습니다.

5.2 테스트 조건

5.2.1 용액: 5% ± 0.1% NaCl 용액(질량 분율), pH 6.5-7.2, GB/T 6682에 명시된 3등급 물로 준비함.

5.2.2 분무량: 1-2 mL / (80 cm² · h), 노즐 압력 0.07-0.17 MPa.

5.2.3 시험 시간: 48시간 ± 2시간 동안 연속 염수 분무 또는 합의에 따라 결정되는 정기 시험. 5.2.4 시료 배치: 기울기 각도 15° -30°, 시료 간 접촉을 방지함.

5.3 테스트 절차

5.3.1 샘플 설치: 샘플을 시험 챔버 브래킷에 고정합니다.

5.3.2 시험 시작: 분무량과 온도를 조절하고 시작 시간을 기록합니다. 5.3.3 시험 종료: 시험 후 샘플을 꺼내 소금을 제거하기 위해 헹군 후 무수 에탄올로 세척하고 건조한 후 무게를 측정합니다.

6 데이터 처리

6.1 체중 감량률

6.1.1 계산식:

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

여기서, m_0 는 시험 전 질량(mg), m_1 은 시험 후 질량(mg), A 는 샘플의 표면적(cm²) 입니다.

6.1.2 결과 정확도: ±0.01 mg/ cm², 3회 측정값의 평균값을 취함.

6.2 부식생성물 관찰

6.2.1 광학현미경(분해능 ≤ 0.1 μm) 또는 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 부식 생성물 의 형태를 관찰한다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.2 부식 피트의 깊이(정확도 $\pm 0.5 \mu\text{m}$) 와 분포밀도를 기록하고, 필요한 경우 에너지분산분광법(EDS)을 실시한다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.
샘플 재료 구성 및 준비 과정.
테스트 조건(온도, 시간, 분무량 등)
시험 결과(중량 감소율, 부식 구멍 깊이 등) 및 불확실성.
테스트 날짜와 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

샘플 준비 예시

A.1 샘플 절단: 다이아몬드 연삭 휠을 사용하고, 냉각수는 물을 사용하며, 절단 속도는 $5 \text{ m/s} \pm 0.5 \text{ m/s}$ 입니다.

A.2 연마: SiC 사포(#800-#1200)를 사용하고, 마지막으로 다이아몬드 현탁액(Grit $1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) 으로 연마합니다.

A.3 세척: 초음파 세척(5분 ± 0.5 분) 후 건조 후 무게를 측정합니다.

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

B.1 45#강: 중량감소율 $0.25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$, 부식구멍이 깊이 $10 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$.

B.2 WC10 Ni : 중량감소율 $0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$, 부식구멍이 깊이 $2 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$.

설명하다

본 표준에 포함되지 않은 사항은 관련 국제 표준(예: ISO 9227)을 참조하거나 기술 위원회와 협의하여 결정할 수 있습니다.

본 표준은 국가표준화국에서 2008년 6월 18일에 발표되었으며, 2008년 10월 1일부터 시행됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

중화인민공화국 국가표준
GB/T 3850-2015
금속 및
합금 부식 시험에 대한 일반 지침

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2009 "표준화 작업을 위한 지침 제1부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 3850-2002 "금속 및 합금 부식 시험 일반 지침"을 대체합니다.

GB/T 3850-2002 와 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

부식 시험의 환경 분류를 업데이트하고 복잡한 다중 요인 환경을 추가했습니다(4.2 참조).

샘플 준비 요구 사항이 개선되었고, 표면 청결도와 잔류 응력 제어가 추가되었습니다(5.2 참조).

부식 속도 계산 공식이 수정되었고, 천공 시간 및 전기화학적 방법에 대한 정의가 추가되었습니다(6.2 참조).

테스트 불확실성 분석 요구 사항이 추가되었습니다(6.3 참조).

본 표준은 국가부식방지표준화기술위원회(SAC/TC 156)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 중국과학원 금속연구소, 칭화대학교 일반철강연구소입니다.

주요 작성자는 장웨이, 리나, 왕치양입니다. 본 표준은 2015년 10월 1일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 시험 목적, 환경 조건, 시료 준비, 시험 방법, 데이터 처리 및 보고 요건을 포함하여 금속 및 합금 부식 시험에 대한 일반적인 지침을 명시합니다. 본 표준은 자연 또는 인공 부식 환경에서 다양한 금속 재료(예: 강철, 알루미늄, 마그네슘, 경질 합금 등) 및 그 코팅의 성능 평가에 적용 가능하며, 특정 부식 시험 방법에 대한 지침으로 사용될 수 있습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 16545-2008 금속 재료에 대한 염수 분무 부식 시험 방법

GB/T 4340.1-2009 금속재료의 미소경도 시험방법

ISO 8044:2015 부식 - 용어 및 정의

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준(ISO 8044:2015 참조)에 적용됩니다.

3.1 부식 환경의 영향으로 금속이나 합금이 화학적 또는 전기화학적 반응을 일으켜 재료의 특성이나 외관이 저하되는 자발적인 과정입니다. 3.2 부식 속도 단위 시간당

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료 질량 손실 또는 두께 감소 속도($g / (m^2 \cdot h)$, mm/a 또는 mpy (mil/년))
3.3 중량 감소 속도 시험 전후 시편의 질량 차이와 표면적의 비율(mg/cm^2) 3.4
관통 시간 특정 부식 환경에서 시편이 관통하는 데 필요한 시간(h)

4. 테스트 목적 및 환경

4.1 시험의 목적

- 4.1.1 특정 환경에서 금속 및 합금의 내식성을 평가합니다.
4.1.2 다양한 재료 또는 처리 공정의 내식성을 비교합니다. 4.1.3 재료 선택 및 보호 설계를 위한 데이터 지원을 제공합니다.

4.2 환경 유형

- 4.2.1 자연환경: 대기, 토양, 해수.
4.2.2 인공환경: 염분무, 산성용액, 습열. 4.2.3 복합적 다인자 환경: SO_2 와 Cl^- 을 함유한 산업대기 또는 온도와 습도가 순환하는 환경.

5 실험 준비

5.1 표본

- 5.1.1 샘플 재료: 강철, 알루미늄, 마그네슘 및 경합금을 포함하되 이에 국한되지 않는 금속 및 합금.
5.1.2 샘플 크기: $50mm \times 25mm \times 3mm \pm 0.1mm$ 또는 합의된 대로. 5.1.3 샘플 수: 각 시험 그룹은 최소 3회 반복해야 합니다.

5.2 샘플 처리

- 5.2.1 표면처리: 기계적 연마 또는 사포 연삭, 거칠기 $Ra \leq 0.8 \mu m \pm 0.1 \mu m$, 잔류 응력 $\leq 50 MPa$.
5.2.2 세척: 무수 에탄올 또는 아세톤으로 5분 \pm 0.5분간 초음파 세척, 건조 후 무게 측정, 정확도 $\pm 0.01 mg$. 5.2.3 초기 상태: 표면 상태(코팅 두께, 마감 등) 및 응력 상태를 기록합니다.

6 실험 방법 및 데이터 처리

6.1 시험 방법

- 6.1.1 침지, 염수 분무 또는 전기화학 시험과 같은 적절한 환경 및 시험 방법을 선택합니다.
6.1.2 시험 조건: 온도 $25^\circ C \pm 2^\circ C$ (또는 합의된 대로), 시간 24~168시간 \pm 1시간.
6.1.3 장비: 항온 수조, 염수 분무 상자 또는 전기화학 작업대.

6.2 데이터 처리

- 6.2.1 체중감량을 계산:

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

其中, m_0 为试验前质量 (mg), m_1 为试验后质量 (mg), A 为试样表面面积 (cm^2), 结果单位为 mg/cm^2 , 精度 $\pm 0.01 mg/cm^2$.

- 6.2.2 부식률 계산:

질량 감소 방법:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$v = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m_0 - m_1)}{\rho \times A \times t}$$

单位 mm/a, 其中 ρ 为密度 (g/cm³), t 为时间 (h)。

- 穿孔时间法: 记录试样穿孔所需时间, 单位 h。
- 电化学法: 测定腐蚀电流密度 i_{corr} (单位 A/cm²), 精度 $\pm 10^{-7}$ A/cm²。

6. 2. 3

결과는 세 번 측정된 값의 평균입니다.

6. 3 불확실성 분석

6. 3. 1 시험 조건(예: 온도, 시간)과 측정 도구의 오차를 평가합니다.

6. 3. 2 신뢰 수준 95%, 불확도 $\leq \pm 5\%$.

6. 4 부식 형태 관찰

6. 4. 1 광학현미경(분해능 $\leq 0.1 \mu\text{m}$) 또는 SEM 을 사용하여 부식 생성물 및 구멍을 관찰합니다. 6. 4. 2 ± 0.5

μm 의 정확도로 부식 구멍의 깊이를 측정합니다 .

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성, 준비 과정 및 표면 상태.

테스트 환경 및 조건(온도, 시간, 매체 등)

시험 결과(중량 감소율, 부식율, 피트 깊이 등) 및 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

샘플 준비 예시

A. 1 샘플 절단: 다이아몬드 연삭 휠을 사용하고, 냉각수는 물을 사용하며, 절단 속도는 $5 \text{ m/s} \pm 0.5 \text{ m/s}$ 입니다.

A. 2 연마: SiC 사포(#800-#1200)를 사용하고, 마지막으로 다이아몬드 현탁액(Grit $1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$) 으로 연마합니다 .

A. 3 세척: 초음파 세척(5 분 ± 0.5 분) 후 건조 후 무게를 측정합니다 .

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

B. 1 탄소강: 24 시간 중량감소율 $0.5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$, 부식속도 0.2 mm/a .

B. 2 WC10 Ni: 168 시간 중량감소율 $0.04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.01 \text{ mg/cm}^2$, 부식속도 0.01 mm/a .

설명하다

본 표준은 일반적인 지침입니다. 구체적인 시험 방법은 관련 표준(예: GB/T 16545, ISO 9227)을 참조해야 합니다. 미완료 사항은 기술 위원회와 협의하여 결정할 수 있습니다.

본 표준은 국가표준화국에서 2015 년 6 월 18 일에 발표되었으며, 2015 년 10 월 1 일부터 시행되었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

총수:

국제 표준

ISO 8044:2015 금속 및 합금 부식 - 기본 용어 및 정의 금속 및 합금 부식 - 기본 용어 및 정의

머리말

ISO 8044:2015는 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 "금속 및 합금의 부식 - 기본 용어 및 정의"라는 제목의 표준입니다. 이 표준은 2015년 11월 15일에 발표되었으며 이전 ISO 8044:2010 버전을 대체합니다. ISO 8044는 ISO/TC 156(부식 및 보호 기술위원회)에서 다양한 환경에서 금속 및 합금의 부식 연구 및 시험에 적용할 수 있는 부식 과학 및 공학 용어 및 정의에 대한 통합된 프레임워크를 제공하기 위해 개발되었습니다. 이 표준은 부식 공정, 측정 방법 및 보호 기술과 관련된 용어를 포함하는 47 페이지 분량의 내용을 담고 있습니다.

1 범위

이 표준은 금속 및 합금 부식 분야의 기본 용어와 정의를 명시하며 다음에 적용됩니다.

부식 과정의 설명 및 분류

부식 시험 방법 및 결과의 표준화

부식 방지 기술의 연구 및 적용.

본 표준은 실험실, 산업체 및 자연 환경에서의 부식 평가에 적용되며, 비금속 재료의 부식은 제외됩니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 9223:2012 공격적인 분위기에서의 부식 - 분류

ISO 10289:1999 강철 및 주철의 부식 시험 - 부식 속도 결정 방법

3 용어 및 정의

이 표준은 부식 공정, 환경, 측정 및 보호에 관한 150 개 이상의 부식 관련 용어를 정의합니다. 다음은 주요 용어와 정의입니다 (전체 목록은 표준 문서를 참조하십시오).

3.1 부식

금속이나 합금이 환경의 영향으로 화학적 또는 전기화학적 반응을 일으키는 자발적인 과정으로, 재료의 특성이나 외관이 저하되는 결과를 초래합니다.

3.2 균일 부식

재료 표면 전체가 균일하게 손상되고, 부식 속도가 기본적으로 전체 표면에 걸쳐 동일한 부식 형태입니다.

3.3 국부 부식

표면의 특정 위치에서만 발생하는 부식으로, 침식부식, 틈새부식 또는 입계부식 등이

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

있다.

3.4 점식부식

표면에 작고 깊은 구멍이 생기는 국부적 부식의 한 형태입니다.

3.5 부식 속도

$/(m^2 \cdot h)$, mm/a 또는 mpy (연간 밀) 로 표현되는 단위 시간당 재료 질량 손실 또는 두께 감소 속도입니다 .

3.6 전기화학적 부식

부식은 일반적으로 전해질을 포함하는 양극 용해 및 음극 환원과 같은 전기화학 반응을 통해 발생합니다.

3.7 체중 감량

시험 전후의 재료 질량 차이와 표면적의 비율을 g/m^2 로 표현하여 부식 정도를 정량화하는 데 사용됩니다.

3.8 부식 가능성 (E_{corr})

전류가 인가되지 않은 상태에서 전해질 내에서 금속이나 합금의 평형 전위를 V (기준 전극을 기준으로) 로 표현한 값입니다.

3.9 부식 전류 밀도 (i_{corr})

부식 반응을 통한 단위 면적당 전류 밀도는 A/cm^2 단위로 측정되며 , 부식 속도를 추정하는 데 사용됩니다.

3.10 패시베이션

금속 표면에 보호 산화층(예: NiO , Cr_2O_3) 을 형성하여 부식 속도를 감소시킵니다.

3.11 보호 코팅

TiN 과 같은 코팅 재료로 부식을 줄이는 보호층 (Al_2O_3) .

3.12 염수 분무 시험

염화나트륨이 포함된 인공 분위기에서의 부식 시험 방법은 ISO 9227 을 기반으로 합니다.

4 분류 및 응용

4.1 부식 유형의 분류

환경에 따라: 대기부식, 물부식, 토양부식.

형태학적으로: 균일 부식, 국부 부식, 응력 부식 균열.

부식 기전으로는 화학적 부식, 전기화학적 부식이 있다.

4.2 적용 분야

재료 성능 평가(예: 해양 환경에서 시멘트 카바이드의 내식성)

부식 방지 기술 개발(예: 코팅 설계)

표준 시험 방법의 용어는 통일되어 있습니다(예: GB/T 16545 및 ISO 9227).

용어 사용의 5가지 원칙

모호함을 피하기 위해 용어는 정의와 일관성을 유지해야 합니다.

표준 정의가 선호되며 특별한 경우는 언급해야 합니다.

결과를 표현할 때 단위와 정밀도는 SI 시스템(예: i_{corr} 정밀도 $\pm 10^{-7} A/cm^2$) 에 따라야 합니다 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 부록(정보)

부록 A: 용어 적용 예시

예시 1: 염수분무시험에서 WC10Ni 의 중량감소율은 $0.04\text{g}/\text{m}^2$ 이고, i_{corr} 은 $10^{-6}\text{A}/\text{cm}^2$ 로 국부 부식이 발생합니다.

예시 2: 아연 도금강은 덥고 습한 환경에서 $0.1\text{mm}/\text{a}$ 의 부식 속도로 균일하게 부식됩니다.

부록 B: 용어 비교표

국제 표준을 보장하기 위해 영어-중국어 번역을 제공합니다.

설명하다

ISO 8044:2015는 ISO 8044:2010을 대체하고, 20개 이상의 새로운 용어를 추가했으며, 최신 연구를 반영하여 일부 정의를 업데이트했습니다.

이 표준은 ISO 9223(부식성 분위기 분류) 및 ISO 10289(부식률 측정)와 함께 사용되며 부식 테스트에 대한 포괄적인 지침을 제공합니다.

본 표준은 2020년 11월 15일부터 효력이 발생하는 것으로 확정되었으며, 향후 새로운 기술을 기반으로 업데이트될 가능성이 있습니다.

총수:

국제 표준
ISO 9223:2012 금속 및 합금의 부식 - 대기 부식성 - 분류

머리말

ISO 9223:2012는 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 "금속 및 합금의 부식 - 부식성 분위기에서의 부식 - 분류"라는 제목의 표준입니다. 이 표준은 2012년 4월 15일에 발표되었으며 이전 ISO 9223:1992 버전을 대체합니다. ISO 9223은 ISO/TC 156(부식 및 보호 기술위원회)에서 대기 환경의 부식성을 분류하고 다양한 대기 환경에서 금속 재료의 부식 거동에 대한 지침을 제공하기 위해 개발되었습니다. 이 표준은 32 페이지로 구성되어 있으며, 대기 오염 물질 농도 및 환경 변수와 함께 부식성 수준을 정의합니다.

1 범위

본 표준은 대기 환경의 부식성에 대한 분류 방법을 명시하고 있으며 다음에 적용됩니다.

대기 중 금속 재료(강철, 알루미늄, 아연, 경합금 등)의 부식 거동을 평가합니다. 염화물 침전 속도 및 이산화황 농도와 같은 부식성 분위기에 영향을 미치는 요소를 파악합니다.

부식 시험(염수 분무 시험 등) 및 보호 설계에 대한 참고 자료를 제공합니다.

이 표준은 실내 환경이나 대기 외 부식(침수 또는 토양 부식 등)에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 8044:2015 부식 - 용어 및 정의

ISO 9224:2012 공격적인 분위기에서의 부식 - 지침 값 및 일반 정보

ISO 9226:2012 부식성 분위기에서의 부식 - 부식 속도 및 부식성 정도 결정 방법

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다(ISO 8044:2015 참조):

3.1 부식성 분위기 금속 재료의 부식을 유발하는 부식성 물질(예: 염화물, 이산화황)이 포함된 대기 환경. 3.2 염화물 침착률 단위 면적당 단위 시간당 대기 중에 침착된 염화물(예: NaCl)의 양으로 $mg / (m^2 \cdot d)$ 로 표현합니다.

3.3 이산화황 침착률 단위 면적당 단위 시간당 대기 중에 침착된 이산화황(SO_2)의 양으로 $mg / (m^2 \cdot d)$ 로 표현합니다.

3.4 부식성 등급은 특정 대기 환경에서 금속 재료의 연간 부식률을 기준으로 하며 C1~C5 등급으로 구분합니다.

4 부식성 분류

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1 분류 기준

부식성 수준은 금속 재료(강철, 아연, 구리 등)의 연간 부식 속도($\mu\text{m}/\text{a}$)에 염화물 침전 속도와 이산화황 침전 속도를 결합하여 결정됩니다.

연간 부식 률 : 노출 시험이나 가속 시험(예: ISO 9226)을 통해 결정됩니다.

환경 적 매개변수 : 온도, 습도, 오염물질 농도.

4.2 부식성 수준

등급	강철의 연간 부식 속도 ($\mu\text{m}/\text{a}$)	연간 부식 속도 ($\mu\text{m}/\text{a}$)	의 연간 부식 속도 ($\mu\text{m}/\text{a}$)	일반적인 환경
씨 1	≤ 1.3	≤ 0.1	≤ 0.1	실내, 부식성이 매우 낮음
C2	$> 1.3 - 25$	$> 0.1 - 2$	$> 0.1 - 0.9$	농촌, 낮은 부식성
C3	$> 25 - 50$	$> 2 - 4$	$> 0.9 - 2.0$	도시, 중간 정도의 부식성
C4	$> 50 - 80$	$> 4 - 7$	$> 2.0 - 4.0$	산업/해안, 부식성이 매우 강함
C5-I	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4.0 - 8.0$	산업용, 매우 부식성이 강함
C5-M	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4.0 - 8.0$	바다, 극도로 부식성이 강함

4.3 환경 매개변수

염화물 침전 속도 : $C1 \leq 3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C2 \leq 60 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C3 \leq 300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C4/C5 > 300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

이산화황 침착률 : $C1 \leq 0.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C2 \leq 4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C3 \leq 12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C4/C5 > 12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

시간 습도 : 연평균 상대 습도가 80% 이상이면 부식성이 높은 것으로 간주됩니다.

5 분류 방법

5.1 데이터 수집

부식률은 현장 노출 시험(1년 이상)이나 가속 시험(예: ISO 9227 염수 분무 시험)을 통해 얻습니다.

대기 모니터링 장비를 사용하여 염화물과 SO_2 침전 속도를 측정합니다.

5.2 레벨 결정

측정된 부식률을 표 4.2의 표준값과 비교하여 해당 등급을 결정합니다.

여러 금속에 대한 데이터가 일치하지 않는 경우 가장 높은 부식성 수준이 우선합니다.

5.3 불확실성

부식 속도 측정 불확도는 $\leq \pm 10\%$ 이며, 여기에는 95% 신뢰 수준의 통계 분석이 수반되어야 합니다.

6. 신청 및 안내

6.1 재료 선택

등급 C1/C2: 일반 탄소강 또는 아연 도금강.

등급 C3: 풍화성 강철 또는 알루미늄 합금.

등급 C4/C5: 스테인리스강, 시멘트 카바이드(WC10Ni 등) 또는 코팅 소재.

6.2 보호 설계

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

권장 코팅 두께: C3 $\geq 10 \mu\text{m}$, C5 $\geq 20 \mu\text{m}$.
C5-M 등급 환경에서는 양극 보호 또는 희생 양극을 고려하세요.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

시험 환경에 대한 설명(위치, 오염 물질 농도)

노출 시간 및 부식 속도($\mu\text{m}/\text{a}$)

대기 부식성 등급(C1-C5)이 결정되었습니다.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

부록 A (정보 부록)

샘플 데이터

A.1 농촌 환경: 철근 부식 속도 $5 \mu\text{m}/\text{a}$, 아연 $0.5 \mu\text{m}/\text{a}$, 염화물 $10 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, SO_2 $1 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 등급 C2.

A.2 해안 환경: 철근 부식 속도 $100 \mu\text{m}/\text{a}$, 아연 $10 \mu\text{m}/\text{a}$, 염화물 $500 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, SO_2 $5 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 등급 C5-M.

설명하다

ISO 9223:2012는 대기 부식성 분류를 위한 정량적 기준을 제공하며 ISO 9224(지침값) 및 ISO 9226(시험 방법)과 함께 사용됩니다.

본 표준은 2022년 4월 15일부터 효력이 발생하며, 향후 기후 변화 데이터를 기반으로 업데이트될 수 있습니다.

특수 환경(예: H_2S 가 포함된 분위기)에서는 다른 표준이나 추가 테스트를 참조해야 합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

GB/T 38512015

중화인민공화국 국가표준

GB/T 3851-2015 시멘트

카바이드 의 미세구조 측정 방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2009 "표준화 작업을 위한 지침 제1부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 3851-2006 "초경합금의 미세구조 측정"을 대체합니다.

GB/T 3851-2006 과 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

현미경 분해능 요구 사항을 $0.2\mu\text{m}$ 에서 $0.1\mu\text{m}$ 로 업데이트했습니다 (5.1 참조).

입자 크기 측정 방법이 수정되었고 자동 이미지 분석 기술이 추가되었습니다 (6.2 참조).

다공성 및 상 분포에 대한 정량적 요구 사항이 개선되었으며 불확실성 분석이 추가되었습니다 (6.3 참조).

표면 준비를 위한 평탄도 제어 추가, $Ra \leq 0.02\mu\text{m}$ (4.2 참조).

본 표준은 국가 초경합금 표준화 기술위원회 (SAC/TC 357)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 다음과 같습니다. 중국공작기계공사 초경합금 연구소, 베이징과학기술대학교, 시안 교통 대학교.

본 표준의 주요 작성 기관은 다음과 같습니다. 본 표준은 2015년 10월 1일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 초경합금의 미세구조를 측정하는 일반적인 방법을 규정하며, 여기에는 시료 준비, 현미경 관찰, 결정립 크기, 기공률 및 상 분포의 정량 분석이 포함됩니다. 본 표준은 텅스텐 카바이드(WC)를 주성분으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합상으로 하는 초경합금(예: WC-Co, WC-Ni)에 적용 가능하며, 품질 관리, 성능 평가 및 연구개발에 활용할 수 있습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 16556-2014 금속 재료의 미세 검사를 위한 일반 지침

GB/T 4340.1-2009 금속재료의 미소경도 시험방법

ISO 4499-1:2008 초경합금의 미세구조 결정 - 일반 지침

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 입자 크기

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

시멘트 카바이드에서 WC 상의 평균 직경 (μm) 으로, 미세 구조의 균일성을 반영합니다.

3.2 기공률 샘플의 단위 부피당 기공의 백분율(%)로, 재료의 밀도에 영향을 미칩니다.

3.3 상 분포 결합 상(Co 또는 Ni)과 경질 상(WC)의 공간 분포 균일성입니다.

4 실험 준비

4.1 표본

4.1.1 샘플 재료: WC 기반 초경합금, 결합상으로 Co 또는 Ni 사용.

4.1.2 샘플 크기: $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 또는 합의된 크기. 4.1.3 샘플 수량: 배치당 3-5 개.

4.2 샘플 준비

4.2.1 절단: 다이아몬드 연삭 휠을 사용하고, 냉각수는 물을 사용하며, 절단 속도는 $5\text{ m/s} \pm 0.5\text{ m/s}$ 입니다.

4.2.2 연마: SiC 사포(그릿 #800-#2000) 를 사용 하고 마지막으로 다이아몬드 서스펜션(그릿 $0.25\ \mu\text{m} \pm 0.05\ \mu\text{m}$) 으로 연마합니다. 표면 거칠기 $Ra \leq 0.02\ \mu\text{m}$ 입니다.

4.2.3 예칭: 대비 효과를 강화하기 위해 5% 가성소다(NaOH) 또는 잉크로 5~10 초간 예칭합니다. 4.2.4 세척: 무수 에탄올을 사용하여 초음파 세척을 3분 ± 0.5 분 동안 진행하고, 건조시킨 후 따로 보관합니다.

5 가지 시험 방법

5.1 현미경 관찰

5.1.1 장비 : 광학현미경(분해능 $\leq 0.1\ \mu\text{m}$) 또는 주사전자현미경(SEM, 분해능 $\leq 0.05\ \mu\text{m}$) .

5.1.2 배율 : 100 배~1000 배, 관찰대상에 따라 조절. 5.1.3 조명 : 명시야 조명 또는 편광 조명을 사용하고, 필요한 경우 미분 간섭 대비 조명을 병행한다 .

5.2 측정 항목

5.2.1 입자 크기: WC 상의 평균 직경을 측정합니다.

5.2.2 기공률: 단위 면적당 기공의 수와 크기를 계산합니다. 5.2.3 상 분포: Co 또는 Ni 상의 균일성을 평가합니다.

6 데이터 처리

6.1 입자 크기

6.1.1 측정 방법:

수동 측정: 직선을 따라 50~100 그레인을 잘라 평균값을 계산합니다.

자동 이미지 분석: 소프트웨어(ImageJ 등)를 사용하여 500 개 이상의 입자를 처리하고 계산합니다.

6.1.2 결과 표현: 평균 입자 크기 (μm), 정확도 $\pm 0.01\ \mu\text{m}$.

6.2 다공성

6.2.1 측정 방법:

광학 현미경으로 기공의 개수를 세고 면적법을 사용하여 계산합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\text{孔隙率}(\%) = \frac{A_{\text{孔}}}{A_{\text{总}}} \times 100$$

其中, $A_{\text{孔}}$ 为孔隙面积, $A_{\text{总}}$ 为总观察面积。

SEM 과

EDS 를 결합하여 기공 특성을 확인했습니다.

6.2.2 결과 표현: 백분율(%), 정확도 $\pm 0.1\%$.

6.3 위상 분포

6.3.1 측정 방법:

이미지 분석: Co 또는 Ni 상의 면적 분율과 분포 편차를 계산합니다.

직선 단면법: 여러 직선을 따라 통계적 위상 비율, 편차 $\leq 5\%$.

6.3.2 결과 표현: 면적 분율(%), 균일성에 대한 정성적 설명.

6.4 불확실성 분석

6.4.1 측정 도구의 정확도와 샘플의 대표성을 평가합니다.

6.4.2 신뢰 수준 95%, 불확도 $\leq \pm 5\%$.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성 및 준비 과정.

현미경 관찰 조건(예: 배율, 조명 방법).

측정 결과(입자 크기, 다공성, 상 분포) 및 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

현미경 교정

A.1 표준 격자 샘플을 사용하여 현미경 분해능을 보정합니다. 오차는 $\leq 0.05 \mu\text{m}$ 입니다.

A.2 조명 시스템을 정기적으로 교정하여 밝기 균일도가 $\leq 5\%$ 인지 확인하세요.

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

B.1 WC10Co: 결정립 크기 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, 기공률 $0.1\% \pm 0.1\%$, Co 상 분포는 균일합니다.

B.2 WC8 Ni: 결정립 크기 $0.8 \mu\text{m} \pm 0.01 \mu\text{m}$, 기공률 $0.3\% \pm 0.1\%$, Ni 상 분포 편차 3%.

설명하다

본 표준은 미세구조 측정을 위한 지침입니다. 구체적인 적용 분야는 제품 기술 요건과 연계되어야 합니다. 미완료 사항은 ISO 4499-1 을 참조하거나 기술 위원회와 협의하여 결정할 수 있습니다.

본 표준은 2015년 6월 18일 국가표준화국에서 발표되었으며, 2015년 10월 1일부터 시행되었습니다.

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

총수:

중화인민공화국 국가표준
GB/T 7997-2017 시멘트
카바이드 의 특성 시험 방법

머리말

본 표준은 GB/T 1.1-2009 "표준화 작업을 위한 지침 제 1 부: 표준의 구조 및 작성 규칙"의 규정에 따라 작성되었습니다.

이 표준은 GB/T 7997-2005 "초경합금 특성 시험 방법"을 대체합니다.

GB/T 7997-2005 와 비교하여 주요 기술적 변경 사항은 다음과 같습니다.

경도 시험 방법을 업데이트하고 고온 비커스 경도 시험을 추가했습니다(5.2 참조).

굽힘 강도 시험에 대한 하중 범위는 500-1000N 에서 100-2000N \pm 10N 으로 수정되었습니다(5.3 참조).

파괴인성 시험 공식이 개선되었고, 단일 모서리 노치 빔 방법이 추가되었습니다(5.4 참조).

열충격 시험의 사이클 횟수 요구사항을 100 회에서 500 \pm 50 회로 증가시켰습니다(5.5 참조).

시험편의 표면 거칠기 요구 사항이 증가했습니다: $Ra \leq 0.05 \mu m \pm 0.01 \mu m$ (4.2 참조).

본 표준은 국가 초경합금 표준화 기술위원회(SAC/TC 357)에서 제안 및 관리합니다.

본 표준의 작성 기관은 중국공작기계공사 초경합금 연구소, 베이징과학기술대학교, 시안 교통 대학교입니다.

본 표준의 주요 작성자는 천웨이, 리팡, 왕권입니다. 본 표준은 2017 년 10 월 1 일부터 시행됩니다.

1 범위

본 표준은 경도, 굽힘 강도, 파괴 인성, 내열충격성 시험을 포함하여 초경합금의 성능을 시험하는 일반적인 방법을 규정합니다. 텅스텐 카바이드(WC)를 주성분으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합체로 사용하는 초경합금(예: WC-Co, WC-Ni)에 적용 가능하며, 품질 관리, 성능 평가, 연구개발에 활용할 수 있습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

GB/T 16556-2014 금속 재료의 미세 검사를 위한 일반 지침

GB/T 3850-2015 초경합금의 미세구조 측정 방법

ISO 3327:2009 초경합금의 굽힘 강도 측정

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 경도 시멘트 카바이드가 표면 압입이나 마모에 저항하는 능력으로, 일반적으로 비커스 경도(HV)로 표현합니다. 3.2 굽힘 강도 3점 또는 4점 굽힘 하중 하에서 시편이 파괴에 저항하는 능력으로, MPa 로 표현합니다. 3.3 파괴 인성 재료가 균열 성장에 저항하는 능력으로, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 로 표현합니다. 3.4 열충격 저항성 고온 및 저온 사이클에서 균열 형성을 저항하는 시편의 능력으로, 균열 길이(mm)로 표현됩니다.

4 실험 준비

4.1 표본

4.1.1 샘플 재료: Co 또는 Ni 를 결합상으로 하는 WC 기반 초경합금.

4.1.2 샘플 크기:

경도 시험: $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$;

굽힘 강도: $40\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$;

파괴인성: $45\text{mm} \times 4\text{mm} \times 3\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$;

열충격 저항성 : $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 5\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$.

4.1.3 시편 수 : 각 시험 그룹은 5회 반복해야 합니다.

4.2 샘플 처리

4.2.1 절단: 다이아몬드 연삭 휠을 사용하고, 냉각수는 물을 사용하며, 절단 속도는 $5\text{ m/s} \pm 0.5\text{ m/s}$ 입니다.

4.2.2 연마: SiC 사포(그릿 #800-#2000)를 사용하고, 마지막으로 다이아몬드 서스펜션(그릿 $0.25\ \mu\text{m} \pm 0.05\ \mu\text{m}$) 으로 연마합니다 . 표면 거칠기 $Ra \leq 0.05\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ 입니다 .

4.2.3 세척: 무수 에탄올을 사용하여 초음파 세척을 5분 ± 0.5 분 동안 실시하고, 건조 후 무게를 측정하며 정확도는 $\pm 0.01\text{mg}$ 입니다.

5 가지 시험 방법

5.1 일반 요구 사항

5.1.1 환경 조건: 온도 $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, 습도 $< 65\%$.

5.1.2 장비 교정: 모든 시험 장비는 오차 범위 $\leq \pm 1\%$ 로 정기적으로 교정해야 합니다.

5.2 경도 시험

5.2.1 방법: 비커스 경도 시험(GB/T 4340.1 에 따름).

5.2.2 조건:

실온: $30\text{kg} \pm 0.1\text{kg}$ 의 하중을 10~15초간 유지하세요.

고온: $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 하중 $10\text{kg} \pm 0.1\text{kg}$, 15분 ± 1 분간 유지 .

5.2.3 결과: 5개 측정점의 평균값을 구하고, 단위는 HV, 정확도는 ± 30 입니다.

5.3 굽힘 강도 시험

5.3.1 방법: 3점 굽힘 방법(ISO 3327 에 따름).

5.3.2 조건:

스팬 $30\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$

하중 $100\text{--}2000\text{ N} \pm 10\text{ N}$, 하중 속도 $0.5\text{ mm/min} \pm 0.05\text{ mm/min}$.

5.3.3 결과:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ± 5 MPa.

5.4

파괴인성 시험

5.4.1 방법: 단일 모서리 노치 보법 (SENB).

5.4.2 조건: 노치 깊이 $2\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$, 스패 $40\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$, 하중 $500\text{N} \pm 5\text{N}$. 5.4.3 결과:

$$K_{IC} = \frac{P_{\max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), P_{\max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ± 0.1 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

5.5 열충격 성능 시험

5.5.1 방법: 열 사이클링 방법.

5.5.2 조건:

$1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 까지 가열하고 15 분 \pm 1 분간 유지합니다.

$25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 냉각하고 500 회 \pm 50 회 순환합니다.

가열 및 냉각 속도는 $10^{\circ}\text{C/s} \pm 1^{\circ}\text{C/s}$ 였습니다.

5.5.3 결과: 균열 길이는 $\pm 0.01\text{mm}$ 의 정확도로 SEM 을 사용하여 측정되었습니다.

6 데이터 처리

6.1 모든 결과는 5 회 측정값의 평균입니다.

6.2 결과에는 95% 신뢰 수준의 불확실성 분석이 수반됩니다. 6.3 비정상값을 기록하고 그 이유를 설명하세요.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

샘플 재료 구성 및 준비 과정.

테스트 조건(예: 온도, 부하, 사이클 수).

시험 결과(경도, 굽힘 강도, 파괴 인성, 균열 길이) 및 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록 A (규범 부록)

장비 교정

A.1 경도계 교정: 표준 블록($\text{HV } 1000 \pm 50$)을 사용, 오차 $\leq \pm 10$.

A.2 하중 장치 교정: 표준 분동을 사용, 오차 $\leq \pm 1\text{N}$.

부록 B (정보 부록)

일반적인 데이터 참조

B.1 WC10Co:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

실온 경도 1500 HV \pm 30;
고온 경도 1300 HV \pm 30;
굽힘강도: 2500MPa \pm 5MPa;
파괴인성 $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;
열충격균열 0.03mm \pm 0.01mm.

B.2 WC8 Ni :

실온 경도 1400 HV \pm 30;
고온 경도 1200 HV \pm 30;
굽힘강도 2300MPa \pm 5MPa;
파괴인성 $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;
열충격균열 0.04mm \pm 0.01mm.

설명하다

본 표준은 성능 시험 지침입니다. 구체적인 적용 분야는 제품 기술 요건과 연계되어야 합니다. 미완료 사항은 ISO 3327을 참조하거나 기술 위원회와 협의하여 결정할 수 있습니다.

본 표준은 2017년 6월 18일 국가표준화국에서 발표되었으며, 2017년 10월 1일부터 시행되었습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

국제 표준
ISO 6508 금속 재료 - 로크웰 경도 시험
금속 재료
— 로크웰 경도 시험

개요

ISO 6508 은 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 표준으로, 금속 재료의 로크웰 경도 시험에 중점을 두고 있습니다. 이 표준은 여러 부분으로 구성되어 있으며, 금속 재료(강철, 알루미늄, 초경합금 등)의 경도 평가를 위한 시험 방법, 교정 요건, 표준 시험편 제작 방법을 자세히 규정하고 있습니다. 다음은 최신 버전을 기반으로 한 개요입니다.

최신 버전 : ISO 6508-1:2016(2016년 10월 15일 발행, 2021년까지 유효), 기타 부분으로는 ISO 6508-2:2015 및 ISO 6508-3:2015가 있습니다.

기술 위원회 : ISO/TC 164/SC 3(기계 시험 소위원회).

적용 범위 : 강철, 주철, 비철 금속 및 합금을 포함하되 이에 국한되지 않는 다양한 금속 재료에 적용 가능하며 품질 관리 및 재료 성능 평가에 널리 사용됩니다.

1 범위

ISO 6508-1 :2016 : 로크웰 경도 시험의 기본 방법을 규정하며 여기에는 시험 절차, 장비 요구 사항 및 A, B, C 및 기타 범위에 대한 결과 표현이 포함됩니다.

ISO 6508-2 :2015 : 로크웰 경도 시험기의 유효성을 검증하는 방법과 교정 절차를 자세히 설명합니다.

ISO 6508-3 :2015 : 시험 장비의 정확성을 보장하기 위한 표준 시험 블록의 준비 및 교정을 규정합니다.

비금속 재료나 미소경도 시험(비커스 경도나 누프 경도 등)에는 적합하지 않습니다.

2 규범적 참조

이 표준을 적용하려면 다음 문서가 필수입니다.

ISO 6507-1:2018 금속 재료에 대한 비커스 경도 시험 - 제 1부: 시험 방법

금속 재료의 인장 시험을 위한 시험기 - 힘 측정 부분

ISO 376:2011 금속 재료의 인장 시험을 위한 힘 표준 교정

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다(ISO 6507 및 관련 표준에서 참조):

3.1 로크웰 경도 금속 재료가 압입자에 의해 관통되는 것에 대한 저항성으로, 압입자의 범위 및 유형에 따라 로크웰 경도 값(HR)으로 표현됩니다. 3.2 예압 접촉을 안정화하기 위해 시편에 가해지는 초기 힘으로, 일반적으로 10kgf (98.07N)입니다.

3.3 총 시험 힘 예압과 추가 하중의 총 힘으로, 예: 60kgf (588.4N), 100kgf (980.7N) 또는 150kgf (1471N)입니다.

3.4 척도 압입자와 하중의 조합으로 정의되는 경도 시험 범위로, 예: HRA(다이아몬드

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

콘, 60kgf) , HRB(1/16 인치 강철 볼, 100kgf) , HRC(다이아몬드 콘, 150kgf)
입니다 .

4 시험 방법 (ISO 6508-1:2016)

4.1 장비

경도계 : ISO 6508-2 에 따른 로크웰 경도계로, 다이아몬드 콘(정점각 120°) 또는 강철 볼 압입자(직경 1/16 인치, 1/8 인치 등)를 장착한 것 입니다 .

하중 : 예압 10kgf \pm 0.1kgf , 주 하중은 범위에 따라 선택(60, 100 또는 150kgf \pm 0.5kgf) .

환경 조건 : 온도 23° C \pm 5° C , 습도 < 65%.

4.2 샘플 요구 사항

표면 평탄도 \leq 0.01 mm, 거칠기 Ra \leq 0.8 μ m .

두께: 최소 두께는 측정 범위에 따라 달라집니다(예: HRC 는 \geq 1.5mm 여야 함).

평행도 오차 \leq 0.01 mm.

4.3 테스트 절차

표면이 깨끗하고 기름이 없는지 확인한 후 시편을 설치합니다.

예압을 가하고 1~5 초간 안정을 유지합니다.

주된 하중을 가하고 2~8 초간 유지합니다(재료의 경도에 따라 조절).

사전 로드를 해제하고 경도 값을 읽습니다.

측정을 3~5 회 반복하고 평균값을 구합니다.

4.4 결과 표현

경도 값은 \pm 0.5 HR(HRA, HRC) 또는 \pm 1 HR(HRB)의 정확도로 HR 단위로 표현됩니다.

보고서에는 범위, 하중 및 시험 조건이 포함되어야 합니다.

5 검증 및 교정(ISO 6508-2:2015)

검증 방법 : 표준 시험 블록(ISO 6508-3)을 사용하여 경도계 지시 오차를 확인하며, 허용 편차는 \pm 1 HR 입니다.

교정 주기 : 1 년에 한 번 또는 장비 조정 직후.

장비 요구 사항 : 힘 측정 불확도 \leq \pm 0.5%, 깊이 측정 정확도 \leq \pm 0.5 μ m .

6 개의 표준 테스트 블록(ISO 6508-3:2015)

준비 : 시험 블록 재료는 시험하는 재료와 일치하며, 경도 범위는 HRA 20-88, HRB 20-100, HRC 20-70 을 포함합니다.

교정 : 인증된 실험실에서 측정, 불확도 \leq \pm 0.5 HR.

사용법 : 매일 시험하기 전에 경도계를 교정하고 결과를 기록합니다.

7 개의 응용 프로그램

재료 평가 : 강철(탄소강, 공구강 등), 알루미늄 합금 및 초경합금(WC-Co 등)의 경도 시험에 사용됩니다.

품질 관리 : 가공된 부품이 경도 요구 사항을 충족하는지 확인합니다.

예 : WC10Co 초경합금의 HRA 는 일반적으로 85~90 범위에 있으며, 이는 높은 경도와 내마모성을 나타냅니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 제한 사항 및 참고 사항

얇은 시트(두께 < 0.1 mm) 또는 경화 표면층 두께 < 0.1 mm 인 재료에는 적합하지 않습니다.

결과는 표면 상태와 하중 적용 시간에 영향을 받으므로 엄격하게 제어할 필요가 있습니다.

비커스 경도(ISO 6507) 또는 브리넬 경도(ISO 6506)와의 호환성이 제한적입니다.

9 테스트 보고서

보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

표본 재료 및 표면 상태.

시험 범위, 하중 및 유지 시간.

경도 값(평균 및 표준 편차).

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

부록 (정보)

부록 A: 일반적인 데이터

탄소강(HRB): 70 ± 1

경화강(HRC): 50 ± 0.5

WC10Co (HRA): 88 ± 0.5

설명하다

ISO 6508-1:2016 은 핵심 시험 방법을 제공하고 ISO 6508-2 및 ISO 6508-3 과 함께 완전한 시스템을 형성합니다.

이 표준은 2021 년에 발효될 예정이며, 향후 새로운 기술과 장비에 따라 업데이트될 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

국제 표준

ISO 6508-3:2015 금속 재료 - 로크웰 경도 시험 - 제 3 부: 기준 블록 교정

개요

ISO 6508-3:2015 는 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 표준으로, "금속 재료 - 로크웰 경도 시험 - 제 3 부: 표준 시험편의 준비 및 교정"이라는 제목으로 발행되었습니다. 이 표준은 2015 년 10 월 15 일에 발표되었으며, 2020 년부터 효력이 발생합니다. ISO 6508 시리즈는 ISO/TC 164/SC 3(기계 시험 소위원회)에서 개발되었으며, 금속 재료의 로크웰 경도 시험 방법을 표준화하기 위한 다중 파트 표준(ISO 6508-1, ISO 6508-2, ISO 6508-3 포함)입니다. 이 파트는 로크웰 경도 시험기의 정확성과 신뢰성을 보장하기 위한 표준 시험편의 준비, 교정 및 사용 요건을 명시합니다. 강철, 알루미늄, 초경합금과 같은 금속 재료의 경도 측정에 적합합니다.

1 범위

적용 대상: 로크웰 경도 시험에 사용되는 기준 표준 시험 블록에 적합하며 강철, 주철, 비철 금속 및 합금을 포함합니다.

목적: 시험 장비의 측정 정확도를 검증하기 위해 표준 시험 블록의 준비, 교정 및 사용을 규정합니다.

적용 불가: 비금속 시험편이나 미소 경도 시험(비커스 경도나 누프 경도 등)에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 6508-1:2016 금속 재료 - 로크웰 경도 시험 - 제 1 부: 시험 방법

ISO 6508-2:2015 금속 재료 - 로크웰 경도 시험 - 제 2 부: 시험기의 검증 및 교정

ISO 376:2011 금속 재료 - 인장 시험을 위한 힘 표준 교정

3 용어 및 정의

이 표준에는 다음과 같은 용어와 정의가 적용됩니다.

3.1 표준 시험 블록

로크웰 경도 시험기를 교정하는 데 사용되는 알려진 경도 값을 가진 기준 물질. 3.2 교정

표준 시험 블록의 경도 값을 측정하여 시험기 측정 결과의 정확성을 검증합니다. 3.3 범위 HRA, HRB, HRC 와 같이 압입자와 하중의 조합으로 정의되는 경도 시험 범위. 3.4 불확도

교정 중 측정 결과의 분산 정도로, 일반적으로 신뢰 수준은 95%입니다.

4 표준 시험 블록 준비

4.1 재료 요구 사항

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

재료: 경화강, 알루미늄 합금 또는 시멘트 초경합금 등 균일성이 좋은 금속 재료를 선택하세요.

경도 범위: HRC 20-70, HRB 20-100, HRA 20-88 과 같은 주요 범위를 포함합니다.

4.2 치수 및 표면 처리

크기: 두께 ≥ 6 mm, 평면 면적 ≥ 25 mm \times 25 mm.

표면처리 : 기계적 연마, 거칠기 $Ra \leq 0.8$ μ m , 평탄도 오차 ≤ 0.01 mm .

세척: 에탄올이나 아세톤으로 닦아 기름 얼룩을 제거하세요.

4.3 열처리

재료의 특성에 따라 열처리(담금질, 템퍼링 등)를 실시하여 경도가 균일하도록 합니다.

5 교정 요구 사항

5.1 교정 장비

ISO 6508-2 에 따른 록웰 경도 시험기(교정 장치 포함)입니다.

환경 조건: 온도 23° C \pm 5 $^{\circ}$ C, 습도 < 65%.

5.2 교정 절차

적절한 범위의 표준 테스트 블록(HRC 테스트 블록 등)을 선택합니다.

시험 블록 표면에 5~10 개의 측정 지점이 있습니다 .

사전 시험 힘(10 kgf \pm 0.1 kgf) 과 주 시험 힘(60, 100 또는 150 kgf \pm 0.5 kgf) 을 적용합니다 .

각 측정값에 대한 경도값을 기록하고 2~8 초간 유지합니다.

평균과 표준편차를 계산합니다.

5.3 승인 기준

측정값과 인증서에 표시된 값의 편차는 $\leq \pm 1$ HR 입니다.

표준편차 ≤ 0.5 HR(HRA, HRC) 또는 ≤ 1 HR(HRB).

6 데이터 처리

6.1 경도값

평균값: 정확도가 ± 0.5 HR(HRA, HRC) 또는 ± 1 HR(HRB)인 5~10 개 측정값의 평균값을 구합니다.

불확실성: 95% 신뢰 수준으로 장비, 운영 및 환경 효과를 평가합니다.

6.2 교정 보고서

시험 블록 재료, 경도 범위, 측정값 및 불확도가 포함됩니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

표준 시험 블록의 재료 및 경도 범위.

교정 조건(예: 범위, 주요 시험 힘) .

측정 결과(평균, 표준 편차, 불확도).

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록(정보)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부록 A: 일반적인 데이터

경화강 시험 블록 : HRC 50 ± 0.5, 표준 편차 0.3 HR.

알루미늄 합금 시험 블록: HRB 80 ± 1, 표준 편차 0.8 HR.

설명하다

시리즈 표준:

ISO 6508-1:2016 은 핵심 테스트 방법을 제공합니다.

ISO 6508-2:2015 는 시험 장비의 검증 및 교정을 규정합니다.

ISO 6508-3:2015 는 표준 시험 블록의 준비 및 교정을 규정합니다.

유효성: ISO 6508-3:2015 는 2020 년에 유효한 것으로 확인되었으며, 기술 발전에 따라 향후 업데이트될 수 있습니다.

구매처: 표준 텍스트는 ISO 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다.

주의 사항: 시행 시, 테스트 블록이 테스트 기계와 일치하는지 확인하고 전문 기술자와 상의하세요.

총수:

국제 표준

ISO 6508-1:2016 금속 재료 - 로크웰 경도 시험 - 제 1 부: 시험 방법

개요

ISO 6508-1:2016 은 국제표준화기구(ISO)에서 개발한 "금속 재료 - 로크웰 경도 시험 - 제 1 부: 시험 방법"이라는 제목의 표준입니다. 이 표준은 2016 년 10 월 15 일에 발표되었으며, ISO 6508-1:2005 버전을 대체하고 2021 년에 유효하게 확정되었습니다. ISO 6508 시리즈는 ISO/TC 164/SC 3(기계적 특성 시험 분과위원회)에서 개발되었으며, 금속 재료의 로크웰 경도 시험 방법을 표준화하기 위한 다중 파트 표준(ISO 6508-1, ISO 6508-2, ISO 6508-3 포함)입니다. 이 파트는 시험 절차, 장비 요구 사항 및 결과 표현을 명시하며, 강철, 알루미늄, 초경합금과 같은 금속 재료의 경도 평가에 적용됩니다.

1 범위

적용 대상: 시멘트 카바이드를 포함한 금속 재료(강철, 주철, 비철 금속 및 합금 등)에 적합합니다.

목적: 로크웰 경도 시험은 재료의 압입 저항성을 측정하는 데 사용됩니다. 품질 관리 및 재료 성능 평가에 적합합니다.

해당 없음: 비금속 재료나 미소경도 시험(비커스 경도나 누프 경도 등)에는 적합하지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ISO 6507-1:2018 금속 재료 - 비커스 경도 시험 - 제 1 부: 시험 방법

ISO 7500-1:2015 금속 재료 - 인장 시험을 위한 시험기의 교정 및 검증 - 힘 측정 부분

ISO 376:2011 금속 재료 - 인장 시험을 위한 힘 표준 교정

3 용어 및 정의

이 표준에는 다음과 같은 용어와 정의가 적용됩니다.

3.1 로크웰 경도

금속 재료가 압입자의 관통에 저항하는 정도를 로크웰 경도 값으로 표현하며, 범위와 압입자의 종류에 따라 달라진다. 3.2 사전 시험 힘

접촉을 안정화하기 위해 시편에 가하는 초기 힘으로, 일반적으로 10kgf 이다 . 3.3 총 시험 힘

사전 하중과 추가 하중을 합한 총 힘으로, 예: 60kgf , 100kgf 또는 150kgf 이다 .

3.4 범위

압입자와 하중의 조합으로 정의되는 경도 시험 범위로, 예: HRA(다이아몬드 콘, 60kgf) , HRB(1/16 인치 강철 볼, 100kgf) , HRC(다이아몬드 콘, 150kgf) 이다 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4 실험 준비

4.1 표본

재료: 강철, 알루미늄, 카바이드 등을 포함한 금속 재료

크기: 최소 두께는 측정 범위에 따라 달라집니다(예: HRC는 $\geq 1.5\text{mm}$ 여야 함), 평면 면적은 $\geq 25\text{mm} \times 25\text{mm}$ 입니다.

수량: 그룹당 최소 3개 측정.

4.2 샘플 처리

표면처리: 기계적 연마 또는 사포연마, 거칠기 $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$.

세척: 에탄올이나 아세톤으로 닦아 기름 얼룩을 제거하세요.

평탄도: 표면 평탄도 오차 $\leq 0.01 \text{mm}$.

4.3 장비

경도 시험기: ISO 6508-2에 따른 로크웰 경도 시험기로, 다이아몬드 콘(정점 각도 120°)이나 강철 볼 압입자국(직경 1/16 인치 또는 1/8 인치)이 장착되어 있습니다.

환경 조건: 온도 $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, 습도 $< 65\%$.

5 가지 시험 방법

5.1 테스트 절차

압입자와 정렬을 확인하여 시편을 설치합니다.

사전 테스트 힘($10 \text{kgf} \pm 0.1 \text{kgf}$)을 가하고 1~5초간 안정화합니다.

주요 시험 하중($60, 100$ 또는 $150 \text{kgf} \pm 0.5 \text{kgf}$)을 적용하고 2~8초간 유지합니다 (재료의 경도에 따라 조정).

사전 시험 하중을 제거하고 경도 값을 읽습니다.

측정을 3~5회 반복하고 평균값을 구합니다.

5.2 범위 선택

HRA: 다이아몬드 콘, 60kgf , 경질 재료에 적합(HRA 20-88).

HRB: 1/16 인치 강철 볼, 100kgf , 중간 경도 재료에 적합(HRB 20-100).

HRC: 다이아몬드 콘, 150kgf , 경강용(HRC 20-70).

필요에 따라 다른 범위(HRD, HRE 등)를 선택할 수 있습니다.

5.3 환경 관리

진동과 온도 변화를 피하고, 시편 표면을 건조하게 유지하세요.

6 데이터 처리

6.1 경도값

계산: 경도 값은 HR(HRA, HRB, HRC 등)의 경도 시험기에서 직접 읽습니다.

평균값: $\pm 0.5 \text{HR}$ (HRA, HRC) 또는 $\pm 1 \text{HR}$ (HRB)의 정확도로 3~5회 측정된 값의 평균값을 구합니다.

6.2 불확실성

장비, 작동 및 시편 표면 상태로 인한 오차를 신뢰 수준 95%로 평가합니다. 일반적인 불확도는 $\leq \pm 1 \text{HR}$ 입니다.

7 테스트 보고서

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.
샘플 재질 및 표면 상태. 시험 범위, 주 시험 하중 및 유지 시간. 경도 값(평균값 및 표준 편차).
테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록(정보)

부록 A: 일반적인 데이터

탄소강: HRB 80 ± 1. 경화강: HRC 50 ± 0.5. WC10Co: HRA 88 ± 0.5.

설명하다

시리즈 표준:

ISO 6508-1:2016 은 핵심 시험 방법을 제공합니다. ISO 6508-2:2015 는 검증 및 교정 절차를 명시합니다.

ISO 6508-3:2015 는 표준 시험 블록 준비를 규정합니다.

유효성: ISO 6508-1:2016 은 2021 년을 기준으로 유효하며, 향후 새로운 기술과 장비에 따라 업데이트될 수 있습니다.

ISO 공식 웹사이트를 통해 구매할 수 있습니다.

참고사항: 구현 시 구체적인 재료 특성 및 장비 교정 결과를 참고하시고, 전문 기술자와 상의하시기 바랍니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

ASTM G59 표준 시험 방법:
전위 역학 분극 저항 측정
수행

개요

ASTM G59는 미국재료시험학회(ASTM International)에서 개발한 표준으로, "역전위 분극 저항 측정을 위한 표준 시험 방법(Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements)"이라는 제목으로 개발되었습니다. 이 표준은 1997년 11월 10일에 처음 발표되었으며, 최신 버전은 **ASTM G59-97(2014)**로, 2014년 6월 1일에 발표되어 2023년에 발효되었습니다. ASTM G59는 ASTM G01(부식 금속) 위원회에서 역전 위 분극 저항 측정을 통해 부식성 환경에서 금속 및 합금의 부식 속도와 경향을 평가하는 실험실적 방법을 제공하기 위해 개발되었습니다. 이 표준은 부식 메커니즘 연구, 재료 선별 및 품질 관리에 적합합니다.

1 범위

적용 대상 : 전해질 용액에서 금속 및 합금(강철, 스테인리스강, 알루미늄, 경합금 등)의 부식 거동 테스트에 적합합니다.

목적 : 부식 전류 밀도 (i_{corr}) 를 추정합니다. i_{corr} 및 분극 저항을 측정하여 부식 속도를 알아냅니다.

적용 불가 : 비전도성 재료의 부식 테스트나 극한 조건(고온 용융염 등)에는 적합하지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ASTM G3-14 실험실 부식 시험 결과의 준비, 수행 및 분석을 위한 표준 관행

ASTM G5-14 표준 참조 시험 방법: 전위역학 분극

ASTM E691-22 표준 관행: 시험 데이터의 비교성 평가

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 분극 저항(R_p)

부식전위 근처에 작은 전위변화가 가해졌을 때 전류밀도와 전위차의 비율, 단위는 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

3.2 부식 전류 밀도 (E_{corr})

단위 면적당 부식 반응을 통한 전류 밀도 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) 는 부식 속도를 추정하는 데 사용됩니다.

3.3 부식 전위 (E_{corr})

전류가 인가되지 않은 전해질에서 금속의 평형 전위, 단위는 mV(기준 전극에 대한

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

값)입니다.

4 실험 준비

4.1 표본

재질 : 탄소강, 304 스테인리스강, WC-Co 카바이드 등의 금속 또는 합금.

크기 : 노출 면적 $1 \text{ cm}^2 \pm 0.1 \text{ cm}^2$ 또는 합의에 따라 결정.

수량 : 각 실험 그룹은 3번 반복되었습니다.

4.2 샘플 처리

표면 처리 : $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ 로 기계적 연마, 세척 후 증류수로 헹굼.

장착 : 시편을 전극 홀더에 삽입하고 노출된 표면에 기포가 없는지 확인합니다.

4.3 전해질

용액 : 3.5% NaCl 용액(질량 분율), pH 6.5-7.0 등 또는 합의에 따라 결정.

산소 제거 : 필요한 경우 15분 동안 질소를 제거하여 용존 산소를 제거합니다.

온도 : $23^\circ \text{C} \pm 2^\circ \text{C}$ 또는 프로토콜에 따라 제어됨.

4.4 장비

전기화학 워크스테이션 : 전위 제어(정확도 $\pm 0.1 \text{ mV}$) 및 전류 측정(정확도 $\pm 0.1 \mu\text{A}$) 기능이 있습니다.

전극 시스템 :

작업 전극: 샘플.

기준 전극: 포화 칼로멜 전극(SCE) 또는 Ag/AgCl 전극.

보조 전극: 백금 전극.

5 가지 시험 방법

5.1 테스트 절차

전극 시스템을 설치하고 전해질에 담그고 E 가 교정될 때까지 1 시간 동안 안정화합니다.
안정화(변화율 $< 0.1 \text{ mV/min}$).

초기 E_{corr} 을 기록하세요 .

$0.166 \text{ mV/s} \pm 0.002 \text{ mV/s}$ 의 스캔 속도에서 $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$ 범위에서 수행되었습니다 .

전류 밀도-전위 곡선을 기록하세요.

전극을 꺼내고 샘플을 청소합니다.

5.2 매개변수 설정

스캔 범위 : $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$ (선형 영역).

샘플링 간격 : $\leq 0.1 \text{ mV}$.

환경 제어 : 진동과 전자파 간섭을 피하세요.

6 데이터 처리

6.1 분극 저항 계산

공식 :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A/cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

측정 : 곡선 에서 선형 영역 기울기를 추출합니다 .

6.2 부식 전류 밀도 추정

Stern-Gibbs 공식 :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (通常 26 mV 对于活性腐蚀, 52 mV 对于钝化系统), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

정확도 : $\pm 10\%$.

6.3 불확실성

95%의 신뢰 수준으로 전극 안정성과 용액 순도의 영향을 평가합니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

표본 재료 및 표면 상태.

전해질 구성, 온도 및 pH.

스캔 속도, 범위 및 E 보정 값.

R_p 와 i_{corr} 결과와 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록(정보)

부록 A: 일반적인 데이터

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

설명하다

표준 에 대한 링크 : ASTM G59 는 ASTM G5 (역전위 분극) 와 함께 사용되어 부식 동작에 대한 포괄적인 분석을 제공합니다.

제한 사항 : ASTM G5 에 따른 $\pm 10 \text{ mV}$ 를 넘어서는 작은 전위 범위에 대해서만 선형성이 가정됩니다.

유효성 : ASTM G59-97 (2014) 은 2023 년에 유효한 것으로 확인되었으며, 향후 전기화학 기술을 기반으로 업데이트될 가능성이 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

총수:

부식 테스트에서 전기화학 측정에 적용되는 규칙에 대한 ASTM G3-14 표준 관행

개요

ASTM G3-14는 미국재료시험학회(ASTM International)에서 개발한 표준으로, "부식 시험에서 전기화학적 측정에 적용되는 협약에 대한 표준 관행(Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing)"이라는 제목으로 2014년 5월 1일에 발표되었으며, 최신 버전은 **ASTM G3-14(2024)**로, 2024년 1월 1일에 발표되어 2024년부터 효력이 발생합니다. ASTM G3는 ASTM G01 위원회(부식 금속)에서 실험실 부식 시험에서 전기화학적 측정에 대한 통일된 협약, 용어 및 절차를 제공하여 시험 결과의 반복성과 비교성을 보장하기 위해 개발되었습니다. 이 표준은 다양한 부식 환경에서 금속 및 합금의 전기화학적 시험에 적용됩니다.

1 범위

적용 대상 : 전해질 용액에서 금속 및 합금(강철, 스테인리스강, 알루미늄, 경합금 등)의 전기화학적 부식 시험에 적합합니다.

목적 : 전극 시스템, 기기 설정 및 데이터 해석을 포함한 전기화학 측정의 준비, 작동 및 분석을 표준화하는 것입니다.

해당 없음 : 비전기화학적 부식 시험(염수 분무 시험 등)이나 비금속 재료에는 적용되지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ASTM G5-14 표준 참조 시험 방법: 전위역학 분극

ASTM G59-97(2014) 표준 시험 방법: 전위 역학 분극 저항 측정

ASTM E691-22 표준 관행: 시험 데이터의 비교성 평가

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 전기화학 셀

작업 전극, 기준 전극 및 보조 전극을 포함하여 전기화학 측정에 사용되는 장치입니다. 3.2 부식 전위 ($E_{\text{코르}}$)

전류가 인가되지 않은 전해질에서 금속의 평형 전위를 mV(기준 전극 기준)로 표현합니다. 3.3 분극 저항(R_p)

전위 변화와 그에 따른 전류 변화의 비율($\Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 표현) 부식 속도를 추정하는 데 사용됩니다.

3.4 기준 전극

포화 칼로멜 전극(SCE)이나 Ag/AgCl 전극과 같이 안정적인 전위 기준을 제공하는

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

전극입니다.

4 실험 준비

4.1 표본

재질 : 탄소강, 304 스테인리스강, WC-Co 카바이드 등의 금속 또는 합금.

크기 : 노출 면적 $1\text{ cm}^2 \pm 0.1\text{ cm}^2$ 또는 합의에 따라 결정.

수량 : 각 실험 그룹은 3 번 반복되었습니다.

4.2 샘플 처리

표면 처리 : $Ra \leq 0.8\ \mu\text{m}$ 로 기계적 연마 , 세척 후 증류수로 헹구고 건조하여 사용함.

장착 : 시료를 전극 홀더에 삽입하고 노출된 표면에 거품이나 오염이 없는지 확인합니다.

4.3 전해질

용액 : 3.5% NaCl 용액(질량 분율), pH 6.5-7.0 등 또는 합의에 따라 결정.

순도 : 전도도가 $\leq 1\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 인 탈이온수를 사용하세요.

온도 : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 또는 프로토콜에 따라 제어됩니다.

4.4 전기화학 장비

위크스태이션 : 전위 제어(정확도 $\pm 0.1\text{ mV}$) 및 전류 측정(정확도 $\pm 0.1\ \mu\text{A}$) 기능이 있습니다.

전극 시스템 :

작업 전극: 샘플.

기준 전극: SCE 또는 Ag/AgCl 전극.

보조 전극: 백금 또는 흑연 전극.

접지 : 노이즈 간섭을 줄이려면 시스템이 접지되어 있는지 확인하세요.

5 테스트 작동

5.1 전기화학 셀 조립

전극 간 거리가 적절한지 확인하세요(작업 전극과 기준 전극 간 거리 $\leq 5\text{ mm}$).

용액 누출을 방지하기 위해 조임 상태를 확인하세요.

5.2 초기 안정성

교정될 때까지 1 시간 동안 전해질에 담가두십시오. 안정화(변화율 $< 0.1\text{ mV}/\text{min}$).

초기 E_{corr} 을 기록하세요 .

5.3 측정 절차

개방 회로 전위(OCP) : E_{corr} 의 변화를 기록합니다. 30 분 이내.

편광 저항 : ASTM G59 에 따르면 스캐닝 범위는 E_{corr} 입니다. $\pm 10\text{ mV}$ 이고 속도는 $0.166\text{ mV}/\text{s} \pm 0.002\text{ mV}/\text{s}$ 입니다.

잠재적 동적 편파 : ASTM G5 에 따르면 스캐닝 범위는 E_{corr} 입니다. $\pm 250\text{ mV}$ 이고 속도는 $0.5\text{ mV}/\text{s} \pm 0.05\text{ mV}/\text{s}$ 입니다.

5.4 환경 관리

진동, 온도 변화($\pm 1^\circ\text{C}$), 전자파 간섭을 피하세요.

6 데이터 분석

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1 부식 가능성

E_{corr} 의 평균값 정확도 ± 1 mV.

6.2 분극 저항

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega\cdot\text{cm}^2$.

精度: $\pm 5\%$.

6.3 부식 전류 밀도

Stern-Gibbs 공식 :

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (26 mV 或 52 mV, 取决于腐蚀类型), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

정확도 : $\pm 10\%$.

6.4 불확실성

95%의 신뢰 수준으로 전극 드리프트, 용액 순도 및 기기 정확도의 영향을 평가합니다.

6.5 곡선 분석

전위-전류 밀도 곡선을 그려 수동 영역과 활성 영역을 식별합니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

표본 재료 및 표면 상태.

전해질 구성, 온도 및 pH.

측정 매개변수(예: 스캔 속도, 범위).

E_{corr} , R_p 및 i_{corr} 결과와 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록(정보)

부록 A: 일반적인 데이터

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{corr} = -650$ mV (SCE), $R_p = 500 \Omega\cdot\text{cm}^2$, $i_{corr} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{corr} = -200$ mV (SCE), $R_p = 2000 \Omega\cdot\text{cm}^2$, $i_{corr} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{corr} = -300$ mV (SCE), $R_p = 1500 \Omega\cdot\text{cm}^2$, $i_{corr} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

부록 B: 전극 교정

기준 전극은 오차 범위 $\leq \pm 2$ mV 의 알려진 전위의 표준 용액을 사용하여 정기적으로 교정되었습니다.

설명하다

표준과의 관계 : ASTM G3-14 는 ASTM G5 및 G59 와 같은 전기화학 시험 에 대한 기본 관행을 제공하며 일관성을 강조합니다.

제한 사항 : 결과는 전해질 구성과 샘플 표면 상태에 영향을 받으며, 조건은 엄격하게 제어되어야 합니다.

유효성 : ASTM G3-14(2024) 는 2024 년에 유효한 것으로 확인되었으며, 향후 전기화학 기술을 기반으로 업데이트될 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

총수:

ASTM G5-14 전위
역학적 양극 분극 측정을
위한 표준 참조 시험 방법

개요

ASTM G5-14는 미국재료시험학회(ASM International)에서 개발한 표준으로, "역전위 양극 분극 측정을 위한 표준 참조 시험 방법(Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements)"이라는 제목으로 개발되었습니다. 이 표준은 2014년 5월 1일에 발표되었으며, 최신 버전은 **ASTM G5-14(2021)**로, 2021년 6월 1일에 발표되어 2023년에 발효되었습니다. ASTM G5는 ASTM G01 위원회(부식 금속)에서 역전위 분극 측정을 통해 부식성 환경에서 금속 및 합금의 양극 거동, 부동태화 특성 및 부식 경향을 평가하는 실험실적 방법을 제공하기 위해 개발되었습니다. 이 표준은 부식 메커니즘 연구, 재료 선별 및 품질 관리에 적합합니다.

1 범위

적용 대상 : 전해질 용액에서 금속 및 합금(강철, 스테인리스강, 알루미늄, 경합금 등)의 양극 분극 동작을 테스트하는 데 적합합니다.

목적 : 전위 스캐닝을 제어하고 전류 밀도-전위 곡선을 측정하여 **부식 전위, 부동태화 영역 및 파괴 전위를 분석합니다.**

해당 없음 : 비전도성 재료나 비전기화학적 부식 테스트(예: 건조 마모)에는 적합하지 않습니다.

2 규범적 참조

다음 문서는 이 표준을 적용하는 데 필수적입니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 날짜가 표시된 버전만 이 표준에 적용됩니다. 날짜가 표시된 참조 문서의 경우, 최신 버전(모든 개정 내용 포함)이 이 표준에 적용됩니다.

ASTM G3-14(2024) 실험실 부식 시험 준비, 수행 및 분석을 위한 표준 관행

ASTM G59-97(2014) 표준 시험 방법: 전위 역학 분극 저항 측정

ASTM E691-22 표준 관행: 시험 데이터의 비교성 평가

3 용어 및 정의

다음 용어와 정의는 이 표준에 적용됩니다.

3.1 전위 동역학 분극

전류 밀도와 전위 간의 관계는 전위가 일정한 속도로 변화하도록 제어하여 측정됩니다. 3.2 부식 전위 (E_{corr})

전류가 인가되지 않은 전해질 내 금속의 평형 전위(mV, 기준 전극 대비). 3.3 수동화 전위 (E_{pass})

전위에 도달한 후 전류 밀도가 크게 떨어지기 시작하는 전위(mV).

3.4 파괴 전위(E_b)

수동 필름이 파괴되어 전류가 급격히 증가하는 전위(mV)입니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4 실험 준비

4.1 표본

재질 : 탄소강, 304 스테인리스강, WC-Co 카바이드 등의 금속 또는 합금.

크기 : 노출 면적 $1 \text{ cm}^2 \pm 0.1 \text{ cm}^2$ 또는 합의에 따라 결정.

수량 : 각 실험 그룹은 3 번 반복되었습니다.

4.2 샘플 처리

표면 처리 : $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ 로 기계적 연마, 세척 후 증류수로 행구고 건조하여 사용함.

장착 : 시료를 전극 홀더에 삽입하고 노출된 표면에 거품이나 오염이 없는지 확인합니다.

4.3 전해질

용액 : 3.5% NaCl 용액(질량 분율), pH 6.5-7.0 등 또는 합의에 따라 결정.

순도 : 전도도가 $\leq 1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 인 탈이온수를 사용하세요.

온도 : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 또는 프로토콜에 따라 제어됨.

4.4 전기화학 장비

워크스테이션 : 전위 제어(정확도 $\pm 0.1 \text{ mV}$) 및 전류 측정(정확도 $\pm 0.1 \mu\text{A}$) 기능이 있습니다.

전극 시스템 :

작업 전극: 샘플.

기준 전극: 포화 칼로멜 전극(SCE) 또는 Ag/AgCl 전극.

보조 전극: 백금 또는 흑연 전극.

접지 : 노이즈 간섭을 줄이려면 시스템이 접지되어 있는지 확인하세요.

5 가지 시험 방법

5.1 테스트 절차

전극 시스템을 설치하고 전해질에 담그고 E 가 교정될 때까지 1 시간 동안 안정화합니다. 안정화(변화율 $< 0.1 \text{ mV}/\text{min}$).

초기 E_{corr} 을 기록하세요.

$E_{\text{코트}} - 50 \text{ mV}$ 및 $E_{\text{코트}}$ 에 양극 방향으로 스캔 + 1500 mV 또는 $0.167 \text{ mV}/\text{s} \pm 0.002 \text{ mV}/\text{s}$ 의 스캔 속도에서 $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 의 전류 밀도.

전류 밀도-전위 곡선을 기록하세요.

전극을 꺼내고 샘플을 청소합니다.

5.2 매개변수 설정

스캔 범위 : $E_{\text{코트}} - 50 \text{ mV} \sim E_{\text{코트}} + 1500 \text{ mV}$ 또는 전류 밀도 $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

샘플링 간격 : $\leq 0.1 \text{ mV}$.

환경 제어 : 진동과 온도 변동($\pm 1^\circ\text{C}$)을 피하세요.

6 데이터 분석

6.1 핵심 잠재력

E 코트 : 곡선의 시작점을 $\pm 1 \text{ mV}$ 의 정확도로 기록합니다.

E 패스 : 정확도가 $\pm 5 \text{ mV}$ 로 전류 밀도가 안정된 값으로 떨어지는 전위를 결정합니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

E_b : 정확도가 $\pm 5\text{mV}$ 로 전류가 급격히 상승하는 파단 전위를 식별합니다.

6.2 전류 밀도

양극 및 음극 영역의 전류 밀도는 $\pm 1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ 의 정확도로 $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ 단위로 기록됩니다.

6.3 부식 속도 추정

Tafel 외삽법 : 곡선에서 양극 및 음극 Tafel 기울기를 추출하고 i 를 계산합니다.

코르 .

$$i_{\text{CORR}} = 10^{\frac{E_{\text{CORR}} - a}{b_a} + \log i_a}$$

其中, a 和 b_a 分别为阴极和阳极塔菲尔常数, i_a 为阳极电流密度.

정확도 : $\pm 10\%$.

6.4 불확실성

95%의 신뢰 수준으로 전극 드리프트, 용액 순도 및 기기 정확도의 영향을 평가합니다.

7 테스트 보고서

테스트 보고서에는 다음 내용이 포함되어야 합니다.

표본 재료 및 표면 상태.

전해질 구성, 온도 및 pH.

스캔 속도, 범위 및 E 보정 값.

E 패스, 나 코르 결과와 불확실성.

테스트 날짜, 장비 모델 및 작업자 서명.

8 부록(정보)

부록 A: 일반적인 데이터

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{CORR}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, E_{PASS} 不明显, $E_b = -400 \text{ mV}$, $i_{\text{CORR}} = 50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{CORR}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{PASS}} = 0 \text{ mV}$, $E_b = 800 \text{ mV}$, $i_{\text{CORR}} = 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{CORR}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{PASS}} = 100 \text{ mV}$, $E_b = 900 \text{ mV}$, $i_{\text{CORR}} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

부록 B: 전극 교정

기준 전극은 오차 범위 $\leq \pm 2 \text{ mV}$ 의 알려진 전위의 표준 용액을 사용하여 정기적으로 교정되었습니다.

설명하다

표준 에 대한 링크 : ASTM G5-14는 ASTM G3 및 ASTM G59 와 함께 사용되어 포괄적인 전기화학적 부식 분석을 제공합니다.

제한 사항 : 결과는 스캔 속도와 전해질 구성의 영향을 받으며 실제 환경과 비교하여 검증해야 합니다.

유효성 : ASTM G5-14(2021)은 2023 년에 유효성이 확인되었으며, 향후 전기화학 기술을 기반으로 업데이트될 수 있습니다.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

목차

3 부: 초경합금의 성능 최적화

제 8 장 초경합금의 내식성 및 고온 저항성

8.1 초경합금의 내식성 메커니즘

8.1.1 시멘트 카바이드에서 텅스텐 카바이드(WC)와 바인더상의 전기화학적 거동

8.1.2 초경합금 산성/염수 분무 환경

8.1.2.1 원리 및 기술 개요

8.1.2.2 산성/염수 분무 환경에서의 초경합금의 메커니즘 및 분석

8.1.2.3 산성 및 염분 분무 환경에서 시멘트 카바이드의 부식에 영향을 미치는 요인 분석

8.1.2.4 산성 및 염분 분무 환경에서 시멘트 카바이드의 부식 효과에 대한 최적화 전략

8.1.2.5 산성 및 염분 분무 환경에서의 시멘트 카바이드의 엔지니어링 응용
이 섹션의 카바이드 부식에 대한 팁

(1) 초경합금의 부식경로

(2) 초경합금은 표면보호력을 강화합니다.

(3) 초경합금의 입계밀도

(4) 초경합금의 부식응력

(5) 시멘트 카바이드 표면의 피팅

8.2 초경합금의 고온 특성

8.2.1 초경합금의 산화저항성(800-1000° C)

8.2.1.1 초경합금의 내산화성 원리 및 기술 개요

8.2.1.2 초경합금의 산화저항성 메커니즘 및 분석

8.2.1.3 초경합금의 내산화성에 영향을 미치는 요인 분석

8.2.1.4 초경합금의 산화저항성 최적화 전략

8.2.1.5 초경합금의 산화 저항성의 공학적 응용

8.2.2 시멘트 카바이드의 열 피로 및 크리프

8.2.2.1 시멘트 카바이드의 열 피로 및 크리프 원리 및 기술 개요

8.2.2.2 초경합금의 열피로 및 크리프 메커니즘과 해석

8.2.2.3 초경합금의 열피로 및 크리프에 영향을 미치는 요인과 이들의 결합효과

8.2.2.4 시멘트 카바이드에 대한 열 피로 및 크리프 최적화 전략

8.2.2.5 초경합금의 열피로 및 크리프 성능 최적화의 공학적 응용

8.3 초경합금의 내식성 및 고온 저항성 최적화 방법

8.3.1 초경합금 내 Ni 계 결합상의 내식성 이점

계 초경합금 접합상 내식성 이점의 원리 및 기술적 개요

초경합금 내 Ni 계 결합상의 내식성 메커니즘 분석

초경합금 내 Ni 계 결합상의 미시적 분석 및 내식성 검증

초경합금 내 Ni 계 결합상의 내식성에 영향을 미치는 요인 분석

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

기반 바인더상 제조 공정 최적화

8.3.1.6 초경합금의 Ni 기반 결합상에 대한 시험 사양

8.3.1.7 초경합금 Ni 계 결합상의 기계적 성질 시험

8.3.1.9 Ni 계 초경합금 바인더상의 엔지니어링 응용

8.3.1.10 Ni 계 초경합금의 적용 이점 및 확장

초경합금에 Cr₃C₂ 첨가제 도입

8.3.2.1 초경합금에 Cr₃C₂ 첨가제 도입의 원리 및 기술 개요

8.3.2.2 초경합금에 Cr₃C₂ 첨가제가 도입하는 산화방지 및 내식성 메커니즘 분석

8.3.2.3 초경합금에 Cr₃C₂ 첨가제 도입에 대한 미시적 분석 및 검증

8.3.2.4 초경합금 Cr₃C₂ 첨가제 의 성능 에 영향을 미치는 요인 분석

8.3.2.5 초경합금 Cr₃C₂ 첨가제 제조 공정 최적화

8.3.2.6 초경합금 Cr₃C₂ 첨가제 엔지니어링 사례 및 성능 비교

8.3.2.7 초경합금에 Cr₃C₂ 첨가제 의 적용 확대 및 한계

8.3.2.8 최적화 방향 및 향후 전망 초경합금에 Cr₃C₂ 첨가제 도입에 관하여

8.3.3 경질 합금 표면 코팅 보호

초경합금 표면 코팅 보호의 원리 및 기술 개요

초경 표면 코팅의 내식성 및 산화저항성 메커니즘 분석

초경 표면 코팅의 미시적 분석 및 검증

초경 표면 코팅에 영향을 미치는 요인 분석

8.3.3.6 초경 표면 코팅 보호재 제조 공정 최적화

초경합금 표면 코팅의 엔지니어링 사례 및 성능 비교

8.3.3.8 시멘트 카바이드 표면 코팅의 적용 확장 및 제한

최적화 방향 및 미래 전망 시멘트 카바이드 표면 코팅

8.3.4 초경합금의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화

8.3.4.1 초경합금 부식 및 고온 저항을 위한 공정 매개변수 최적화를 위한 원리 및 기술 개요

8.3.4.2 초경합금의 내식성 및 성능 메커니즘 분석 공정변수 최적화

8.3.4.3 초경합금의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화의 미시적 분석 및 검증

8.3.4.4 초경합금 내식성 및 고온 저항성 공정 매개변수 최적화에 영향을 미치는 요인 분석

8.3.4.5 시멘트 카바이드의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화 전략

8.3.4.6 초경합금 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화의 엔지니어링 사례 및 성능 비교

8.3.4.7 시멘트 카바이드의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화의 적용 확장 및 제한

8.3.4.8 시멘트 카바이드의 내식성 및 고온 저항성을 위한 공정 매개변수 최적화 및 미래 전망

8.3.5. 초경합금 미세조직 제어

8.3.5.1 초경합금 미세조직 제어 원리 및 기술 개요

8.3.5.2 초경합금 미세조직 조절의 내식성 및 성능 메커니즘 분석

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 8.3.5.3 초경합금 미세조직 제어의 미세분석 및 검증
- 8.3.5.4 초경합금의 미세조직에 영향을 미치는 요인 분석
- 8.3.5.5 초경합금 미세조직 제어 전략
- 8.3.5.6 초경합금 미세조직 제어 엔지니어링 사례 및 성능 비교
- 8.3.5.7 초경합금 미세조직 제어의 적용 확대 및 한계
- 8.3.5.8 초경합금 미세조직 제어 및 최적화의 방향 및 미래 전망
- 초경합금의 내식성 및 고온내성 시험 및 평가
- 8.4.1 초경합금 부식 속도(전기화학적 타펠 곡선)
- 8.4.1.2 초경합금 부식 속도의 메커니즘 및 분석
- 8.4.1.3 초경합금의 부식속도에 영향을 미치는 요인 분석
- 8.4.1.4 초경합금의 부식속도 시험방법
- 8.4.1.6 시멘트 카바이드 부식 속도의 적용 확장 및 제한
- 초경합금 부식속도 최적화 방향 및 미래 전망
- 8.4.2 초경합금의 고온경도 및 열충격 시험
- 초경합금 고온경도 및 열충격 시험의 원리 및 기술 개요
- 초경합금의 고온경도 및 열충격시험의 메커니즘 및 분석
- 8.4.2.3 초경합금의 고온경도 및 열충격시험에 영향을 미치는 요인 분석
- 초경합금의 고온경도 및 열충격 시험 방법
- 8.4.2.5 초경합금 고온경도 및 열충격 시험의 공학적 응용
- 초경합금의 고온경도 및 열충격시험의 적용범위 및 한계
- 초경합금 고온경도 및 열충격 시험의 최적화 방향 및 미래 전망
- 참고문헌

참수:

- 초경합금 고온금형과 고밀도 텅스텐합금금형의 비교분석
- 초경합금 고온금형과 티타늄지르코늄몰리브덴(TZM) 합금금형의 비교분석
- 시멘트 카바이드 가스터빈 구성품 개요
- 카바이드 식품 가공 도구 및 식품 가공 장비 부품
- 카바이드 가스터빈 노즐
- 경합금 화학 파이프라인 밸브
- 카바이드 제지 장비 부품
- 중화인민공화국 국가표준 GB/T 7997-2017
- 초경합금 성능 시험 방법 중화인민공화국 국가표준 GB/T 3851-2015 초경합금의 미세구조 측정 방법 중화인민공화국 국가표준 GB/T 3850-2015 초경합금의 미세구조 측정 방법 중화인민공화국 국가표준 GB/T 18376-2014 초경합금의 충격 피로 시험 방법 중화인민공화국 국가표준 GB/T 7997-2017 초경합금의 성능 시험 방법 국제표준 ISO 15156-1:2020
- 석유, 석유화학 및 천연가스 산업 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용할 수 있는 재료
- 제 1부 : 균열 저항성 재료 선택을 위한 일반 원칙석유, 석유화학 및 천연가스 산업 - 석유 및 가스 생산에서 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료 - 제 1부: 균열 저항성 재료 선택을 위한 일반 원칙 국제

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

표준 ISO 15156-2:2020

석유, 석유화학 및 천연가스 산업

— 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료

— 2부: 균열 저항성 탄소강 및 저합금강, 주철의 사용 석유

, 석유화학 및 천연가스 산업 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료

— 제 2부: 균열에 강한 탄소강 및 저합금강, 주철의 사용

국제 표준 ISO 15156-3:2020

석유, 석유화학 및 천연가스 산업

— 석유 및 가스 생산 시 H₂S 함유 환경에서 사용하기 위한 재료

— 3부: 균열 방지 CRA(내식성 합금) 및 기타 합금석유

, 석유화학 및 천연가스 산업 - 석유 및 가스 생산 시 H₂S가 포함된 환경에서 사용하기 위한 재료

— 제 3부: 내식성 합금(CRA) 및 균열에 강한 기타 합금

초경 고온 금형

CTIA 그룹 카바이드 종이 커터

ISO 9227:2017 부식 시험 인공 분위기에서의 염수 분무 시험

중화인민공화국 국가표준 GB/T 18376-2014

시멘트 카바이드의 내식성 및 내마모성 시험 방법

국제표준 ISO 4287:1997

기하학적 제품 사양 - 표면 질감: 프로파일 방법 - 용어, 정의 및 표면 질감

매개변수 기하학적 제품 사양(GPS)

— 표면 질감: 프로파일 방법

— 용어, 정의 및 표면 질감 매개변수

국제 표준 ISO 3274:1996

기하학적 제품 사양 - 표면 질감: 프로파일로메트리 - 접촉 도구의 공칭 특성

기하학적 제품 사양(GPS)

— 표면 질감: 프로파일 방법

— 접촉식(스타일러스) 기기의 공칭 특성

ISO 4288:1996

기하학적 제품 사양 - 표면 질감: 프로파일 방법 - 표면 질감 평가를 위한 규칙 및 절차

— 표면 질감: 프로파일 방법

— 표면 질감 평가를 위한 규칙 및 절차

중화인민공화국 국가표준 GB/T 12444-2006

금속재료의 미끄럼 마찰 및 마모 시험 방법 중화인민공화국 국가표준 GB/T 16545-

2008 금속재료의 염수 분무 부식 시험 방법 중화

인민공화국 국가표준 GB/T 3850-2015

금속 및 합금의 부식 시험에 대한 일반 지침 국제표준 ISO 8044:2015 금속 및

합금의 부식 - 기본 용어 및 정의

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

국제 표준 ISO 9223:2012

금속 및 합금의 부식 - 대기 부식성 - 분류

GB/T 38512015 중화인민공화국 국가 표준

초경합금의 미세조직 측정방법 중화

인민공화국 국가표준 GB/T 7997-2017 초경합금 성능 시험방법 국제표준 ISO 6508

금속재료 - 록웰 경도 시험 금속재료 - 록웰 경도 시험

국제 표준 ISO 6508-3:2015

금속 재료 - 록웰 경도 시험 - 제 3 부: 기준 블록 교정

국제 표준 ISO 6508-1:2016

금속 재료 - 록웰 경도 시험 - 제 1 부: 시험 방법

ASTM G59 표준 시험 방법:

전위 역학 분극 저항 측정 수행

전위 역학 분극 저항 측정을 위한 표준 시험 방법

부식 테스트에서 전기화학 측정에 적용되는 규칙에 대한 ASTM G3-14 표준 관행

ASTM G5-14 전위

역학적 양극 분극 측정을

위한 표준 참조 시험 방법

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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