

텅스텐 시멘트 카바이드  
물리적 및 화학적 특성, 공정 및 응용 분야의 종합적

탐구( II )

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

차이나팅스텐 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.com](http://www.chinatungsten.com)을 시작점으로 설립된 차이나팅스텐 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 확보 하고 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 개봉, 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.

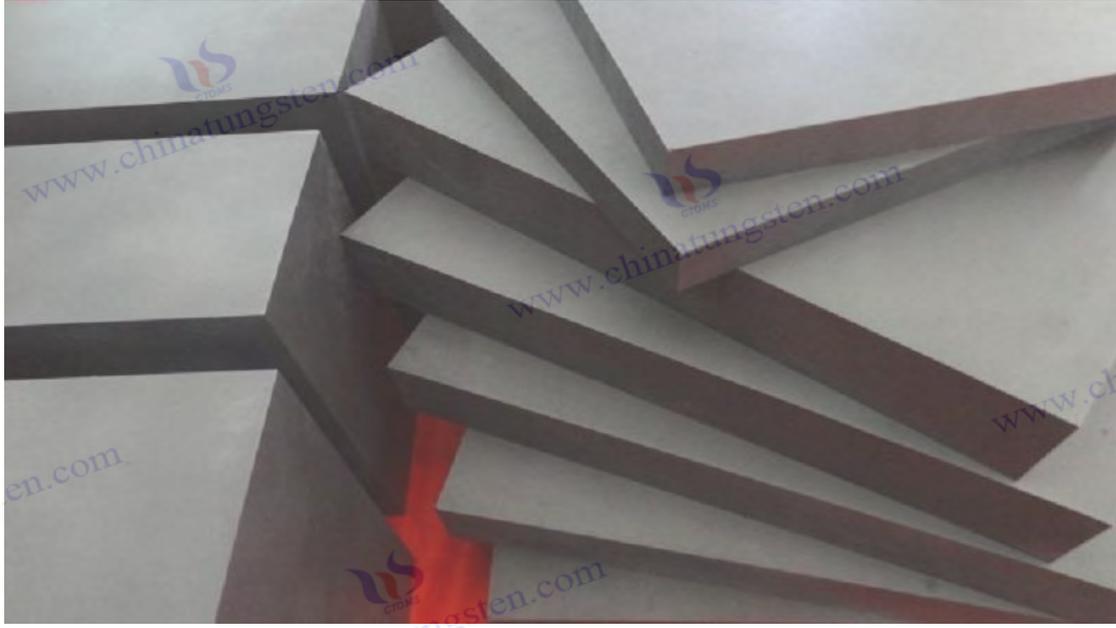
CTIA GROUP의 한스 박사와 그의 팀은 30년 이상의 업계 경험을 바탕으로 텅스텐, 몰리브덴, 희토류 관련 지식, 기술, 텅스텐 가격 및 시장 동향 분석을 작성하여 공개하고 텅스텐 업계와 자유롭게 공유해 왔습니다. 1990년대부터 텅스텐 및 몰리브덴 제품의 전자상거래 및 국제 무역, 그리고 초경합금 및 고밀도 합금의 설계 및 제조 분야에서 30년 이상의 경력을 쌓아 온 한 박사는 국내외 텅스텐 및 몰리브덴 제품 분야의 저명한 전문가입니다. CTIA GROUP 팀은 업계에 전문적이고 고품질의 정보를 제공한다는 원칙을 고수하며, 생산 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](http://www.ctia.com.cn)

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



## 제 2 장 초경합금의 미세조직 및 상상태 텅스텐 초경합금의 미세조직 및 상상태

초경합금은 독특한 미세구조와 상 특성을 지녀 현대 산업에서 고성능 소재의 핵심 소재로 자리 잡았습니다. 초경합금의 미세구조는 단단한 초경 입자, 강인한 결합상, 그리고 복잡한 계면계로 구성되어 있으며, 상 특성은 결정 구조, 고용체, 결합, 그리고 비정질 상의 분포를 포함합니다. 이러한 미시적 특성은 내마모성, 인성, 가공 신뢰성 등 초경합금의 성능을 원자 및 결정 수준에서 결정합니다. 본 장에서는 초경합금의 미세구조와 상(相)에 초점을 맞추고, 초경 입자의 특성, 결합상의 분포와 역할, 계면 및 결합의 형성 메커니즘, 그리고 첨단 특성 분석 기술을 체계적으로 분석합니다. 이론적 분석, 실험 데이터, 그리고 실제 사례를 통해 미세구조가 성능에 미치는 조절 메커니즘을 밝히고, 초경합금의 공정 최적화 및 적용을 위한 과학적 근거를 제공하며, 재료과학 및 공학 분야의 학제간 연구에 참고 자료를 제공하고자 합니다.

### 2.1 탄화물 입자의 미시적 특성

초경합금의 단단한 골격은 초경합금 입자로, 주로 텅스텐 카바이드(WC)로 구성되며, 티타늄 카바이드 (TiC), 탄탈륨 카바이드 (TaC) 등이 첨가되어 재료의 기계적 성질과 환경 적응성을 결정합니다. 본 절에서는 입자 크기, 형태, 그리고 다상 시너지 효과의 관점에서 초경합금 입자의 미시적 특성을 살펴봅니다.

#### 2.1.1 WC 입자 크기 및 형태

텅스텐 카바이드(WC) 입자는 초경합금의 주요 경질상이며, 입자 크기( $0.110\ \mu\text{m}$ )와

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

형태는 재료의 성능에 직접적인 영향을 미칩니다. WC 는 육방정계 결정 구조(P6m2 공간군, 격자 상수  $a=2.906\text{\AA}$  ,  $c=2.837\text{\AA}$  ) 를 가지며 , WC 의 공유 결합 에너지는 약  $6\text{eV}\pm 0.2\text{eV}$  로 높은 정도와 내마모성을 제공합니다. 입자 크기 조절은 초경합금 성능 최적화의 핵심입니다. 예를 들어, 입자 크기를  $5\text{\mu m}$  에서  $0.5\text{\mu m}$  로 줄이면 입계 밀도가 증가하고 경도가 크게 향상되지만 인성은 약간 감소합니다.

주사전자현미경 (SEM ) 분석 결과, 기존 초경합금의 WC 입자 크기는  $12\text{\mu m}\pm 0.2\text{\mu m}$  이며, 프리즘 형태(각도  $60^\circ\ 90^\circ$  )를 띠고 있으며, 주로 (0001) 및 (1010) 결정면이 노출되어 있습니다. 이러한 형태는 이방성(<0001> 방향의 정도가 약 10% 더 높음)으로 인해 내마모성을 향상시켜 절삭 공구와 같은 고부하 용도에 적합합니다. 예를 들어,  $1.5\text{\mu m}$  입자를 포함하는 초경합금 공구로 강(인장 강도  $>1000\text{ MPa}$ )을 절삭할 때 마모 손실은  $<0.1\text{mm}$  이고 사용 수명은  $12\text{시간}\pm 1\text{시간}$ 입니다.

나노스케일 초경합금(입자  $<0.2\text{\mu m}$ )은 구형을 띠는 경향이 있으며, 표면 에너지는 최대  $1\text{ J/m}^2 \pm 0.1\text{ J/m}^2$  입니다 . 결정립계 비율이 증가 ( $>50\%$ )하여 정도가 더욱 향상되어 반도체 웨이퍼 절단(표면 거칠기  $Ra<0.01\text{\mu m}$ )과 같은 초정밀 가공에 적합합니다. 그러나 나노 입자는 응집되기 쉽고(응집률 10%15%), 기공률이  $1\%\pm 0.2\%$ 로 증가합니다. 스파크 플라즈마 소결(SPS,  $1200^\circ\text{C}$ ,  $50\text{ MPa}$ )은 빠른 가열( $>100^\circ\text{C/min}$ )을 통해 응집을 제어하여 기공률을  $<0.5\%\pm 0.1\%$ 로, 결정립 크기 편차를  $<5\%$ 로 줄입니다.

입자 형태 조절은 소결 공정에 따라 달라집니다. 액상 소결( $1350\sim 450^\circ\text{C}$ )에서 WC 입자는 용해 및 재침전에 의해 성장하며, 유지 시간(12 시간)이 길어질수록 프리즘형 입자 비율은 80% 이상으로 증가합니다. 바나듐 카바이드(VC, 0.2%~0.5%)와 같은 입자 억제제를 첨가하면 확산 장벽(약  $15\%\pm 2\%$ )을 증가시켜 입자 성장을 억제하고, 입자 크기는  $0.8\sim 2\text{\mu m}$ 로 안정화됩니다. 예를 들어, 0.3% VC를 함유한 초경 공구(입자  $0.8\text{\mu m}$ )는 고속 절삭( $200\text{m/min}$ )에서 마모율이 20% 감소하고 수명이  $25\%\pm 3\%$  향상됩니다.

조립질 WC( $510\text{\mu m}$ )는 균열 전파 경로가 길고 인성이 높아 광산용 드릴 비트에 적합합니다. 예를 들어,  $6\text{\mu m}$  입자 크기를 가진 초경 드릴 비트는 화강암 드릴링(충격 빈도 2000 회/분 이상)에서 200 시간 이상의 수명을 가지며, 이는 미립질 소재(수명  $<150\text{시간}$ )보다 우수합니다. 요약하자면, WC 의 입자 크기와 형태는 적용 분야에 따라 최적화되어야 합니다. 미립자( $0.52\text{\mu m}$ )는 고경도에 적합하고, 조립질( $510\text{\mu m}$ )은 고인성에 적합하며, 프리즘 형태는 내마모성을 고려합니다 .

## TiC , TaC 등 보조탄화물의 시너지 효과

보조 탄화물(예: TiC , 타씨 , NbC )는 고용 강화 및 보완적 성능을 통해 초경합금의 전반적인 성능을 향상시킵니다. 티타늄 카바이드 ( TiC )는 입방 결정 구조( $Fm3m$ , 밀도  $4.93\text{ g/cm}^3 \pm 0.05\text{ g/cm}^3$  ) 를 가지고 있으며 , 정도는 HV 18002200 이고, 재료 밀도를 크게 줄입니다( $14.5\text{ g/cm}^3$  에서  $12\text{ g/cm}^3 \pm 0.1\text{ g/cm}^3$  로 ) . 또한  $TiO_2$

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

보호층을 형성하여 고온 안정성을 향상시킵니다 ( $1000^{\circ}\text{C}$  산화 중량 증가  $<1\text{ mg/cm}^2 \pm 0.2\text{ mg/cm}^2$ ). 고온 절삭( $800^{\circ}\text{C}$ , 항공 알루미늄 합금)에서 15% TiC를 함유한 초경 공구는 마모가 30% 감소하고 수명이  $50\% \pm 5\%$  연장됩니다. 이는 TiC가 접촉 마모에 대한 저항성을 개선하기 때문입니다.

탄탈륨 카바이드 (TaC, 밀도  $14.5\text{ g/cm}^3 \pm 0.1\text{ g/cm}^3$ , HV 16002000)는 고용체 강화를 통해 고온 변형 저항성을 향상시킵니다. 3% TaC를 함유한 초경합금의 열팽창 계수는  $5.0 \times 10^{-6}/\text{K} \pm 0.1 \times 10^{-6}/\text{K}$ 로 감소하고 열 균열 길이는  $<1\text{ }\mu\text{m} \pm 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 로 가스터빈 노즐(작동 온도  $1100^{\circ}\text{C}$ )에 적합합니다. TaC는 또한 결정립계 결합 강도( $>50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ )를 향상시키고 균열 성장률을 15% 감소시킵니다. 예를 들어, 2% TaC를 함유한 초경합금 노즐은 표면 손상  $<10\text{ }\mu\text{m}$ 로 5000시간 동안 가스 흐름( $>500\text{ m/s}$ )에서 작동합니다.

니오븀 카바이드 (NbC, HV  $1900 \pm 50$ )는 내식성이 뛰어난 것으로 알려져 있습니다. 산성 환경(pH 3, HCl)에서 1% NbC를 함유한 초경합금의 부식 속도는  $0.02\text{ mm/년} \pm 0.005\text{ mm/년}$ 으로, Co를 함유한 초경합금( $0.05\text{ mm/년}$ )보다 우수합니다. NbC는  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  보호층(두께  $<5\text{ nm}$ )을 형성하여 화학적 침식률을 20% 감소시킵니다. 실제 적용에서 1% NbC를 함유한 초경합금 라이닝은 화학 공장( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , pH 2)에서 3년 동안 표면에 눈에 띄는 부식 없이 작동해 왔습니다.

X-선 회절(XRD) 분석 결과 TiC와 TaC는 WC와 함께 (W, Ti, Ta)C 고용체를 형성하여 격자 상수 변화가  $0.1\% \pm 0.02\%$ 이고 경도가 100200 HV 증가하는 것으로 나타났습니다. 이는 고용체가 입계 강도를 향상시키기 때문입니다. 또한 고용체의 형성은 계면 에너지를 감소시키고( $1.5\text{ J/m}^2$ 에서  $1.0\text{ J/m}^2$ 로) 균열 저항성을 향상시킵니다. 예를 들어, 10% TiC와 3% TaC를 함유한 초경합금 금형의 내마모성은 복합 스탬핑에서 40% 향상되고 사용 수명은  $5000\text{ 시간} \pm 500\text{ 시간}$ 을 초과합니다.

보조 탄화물의 상승효과는 환경 적응성에도 반영됩니다. 고온 다습한 환경( $40^{\circ}\text{C}$ , 습도 90%)에서 TiC와 NbC는 부동태 층을 통해 부식 속도를 10~15% 감소시킵니다. 고온( $1000^{\circ}\text{C}$ )에서 TaC는 WC 산화를 억제합니다( $\text{WO}_3$  휘발은 20% 감소). TiC / TaC / NbC 비율(5:1:0.5)을 최적화하면 경도(HV  $1800 \pm 30$ ), 인성( $K_{1c}\text{ }12\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ) 및 내식성의 균형을 맞출 수 있습니다. 예를 들어, 해양 굴착(염도 3.5%)에서 12% TiC를 함유한 초경 공구의 수명이 30% 연장되어 기존의 Co 함유 소재(수명  $<2000\text{ 시간}$ )보다 우수합니다.

## 2.2 결합 단계의 분포 및 기능

결합상(주로 코발트 Co와 니켈 Ni)은 초경합금의 견고한 매트릭스 역할을 하며, 초경 입자들을 연결하고 인성, 내식성, 가공 성능을 조절합니다. 결합상의 분포 균일성과 비율은 미세조직 최적화의 핵심입니다.

### 2.2.1 Co 및 Ni의 입계 젖음 거동

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

소결 중 결합상의 습윤 거동은 초경합금의 밀도와 상 분포를 결정합니다. 코발트(Co, FCC 구조, 용점 1495°C±10°C)는 액상 소결(1350~1450°C)에서 WC 입자를 습윤시키며, 접촉각은 5°±1°로 매우 낮고, 계면 에너지는 1.5 J/m<sup>2</sup>에서 0.5 J/m<sup>2</sup>±0.1 J/m<sup>2</sup>로 감소하여 치밀화를 촉진합니다(기공률 <0.1%±0.02%). 투과 전자 현미경(TEM) 결과, Co 층 두께는 520 nm±2 nm 이고, 편석률은 <5%이며, 연속적인 결합 네트워크가 형성됨을 보여줍니다. 습윤 과정의 깃스 자유 에너지 변화(ΔG≈50 kJ/mol±5 kJ/mol)는 결정립 재배열을 촉진하고, Co 확산 계수 D<sub>Co</sub>≈10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s ±0.1×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s (1400°C)는 분포 균일성을 결정합니다.

니켈(Ni, 녹는점 1455°C)은 접촉각이 10°±2°, 계면 에너지가 0.7 J/m<sup>2</sup>±0.05 J/m<sup>2</sup>로 젖음성이 약간 떨어지지만 내식성이 더 강합니다. 염수 분무 시험(ASTM B117, 168 시간)에서 Ni가 함유된 초경합금의 중량 감소는 <0.1 mg/cm<sup>2</sup>±0.02 mg/cm<sup>2</sup>로 Co가 함유된 재료(중량 감소 0.2 mg/cm<sup>2</sup>)보다 우수합니다. 크롬(Cr, 0.5%~2%)을 첨가하면 접촉각을 7°±1°로 줄여 CrCo 또는 CrNi 고용체를 형성하고 계면 결합 에너지가 >60 MPa±5 MPa로 증가합니다. 예를 들어, 12% Ni를 함유한 시멘트 카바이드 밸브는 5년 동안 해수(pH 8, 염도 3.5%)에서 작동한 후 부식 속도가 <0.03mm/년±0.005mm/년입니다.

습윤 거동은 미세구조 안정성에 매우 중요합니다. Co 함량이 20%를 초과하거나 탄소 함량이 5.8% 미만이면 취성 η 상(W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C)이 생성되어 인성(K<sub>1c</sub>)이 5 MPa·m<sup>1/2</sup>±0.5로 감소할 수 있습니다. 탄소 함량(5.8%~6.2%)과 소결 온도(1380~1420°C)를 정밀하게 제어하면 균일한 Co 층(두께 편차 <10%)을 얻을 수 있습니다. 실제로 10% Co를 함유한 초경 공구는 최적화된 습윤(접촉각 <6°)을 통해 입계 결합을 15% 향상시키고 절삭 수명을 20%±2% 연장했습니다.

Ni 상은 고온 및 부식성 환경에서 확실한 장점이 있습니다. 고온 증기(500°C, 10 MPa)에서 12% Ni를 함유한 초경합금의 부식 중량 손실은 30%±5% 감소하고 계면 안정성은 10% 향상됩니다. TEM 분석 결과 Ni 층의 두께는 1015 nm±1 nm 이고 Cr은 편석(0.5%~1%)되어 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 보호 층을 형성하여 내식성을 향상시킵니다. 예를 들어, NiCr을 함유한 초경합금 라이닝을 화학 공장(HCl, pH 2)에서 3년 동안 가동했으며 표면 손상은 <5 μm입니다. Co와 Ni의 습윤 거동은 적용 분야에 따라 최적화해야 합니다. Co는 고인성에 적합하고 Ni는 내식성에 적합합니다.

## 2.2.2 결합상 비율이 성능에 미치는 영향

결합상 비율(5%~20%)은 초경합금의 성능을 조절하는 핵심 매개변수입니다. Co 비율이 5%에서 20%로 증가하면 인성이 크게 증가합니다(K<sub>1c</sub>가 8에서 18 MPa·m<sup>1/2</sup>±0.5로 증가). 그러나 경도는 감소합니다(HV 2000에서 1400±30). 10% Co를 함유한 초경합금(Co 층 두께 1015nm)은 경도가 HV 1800±30 이고 인성이 K<sub>1c</sub> 12 MPa·m<sup>1/2</sup>±0.5로 절삭 공구에 적합합니다. 고속 가공(200m/min)에서 마모량은 <0.1mm 이고 사용 수명은 15시간±1시간입니다. 20% Co를 함유한 초경합금은 인성이 높아 록

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

드릴 비트에 적합합니다. 충격 수명은 >300 시간±20 시간입니다.

니켈 함량은 5%~15%이고, 경도는 HV 1900 에서 HV 1500±30 으로 떨어지며, 내식성이 우수하여 부식 속도가 <0.03mm/년±0.005mm/년입니다. 12% Ni 를 함유한 초경 라이닝은 표면에 눈에 띄는 부식 없이 3년 동안 산성 환경(pH 3, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 에서 작동했습니다. 15% Ni 를 함유한 전극은 안정적인 성능으로 5000 시간 동안 전기화학 반응(전류 밀도 >100mA/cm<sup>2</sup>) 에서 작동했습니다. 에너지 스펙트럼 분석(EDS) 결과, Co 와 Ni 의 분포 편차가 <3%±0.5%로 소결 공정의 높은 균일성을 반영합니다.

결속 단계는 환경 적응력에도 영향을 미칩니다.

고온 다습한 환경(40° C, 습도 90%)에서 높은 Co 함량(>15%)은 미세 부식을 유발하고 인성을 5%±1% 감소시킬 수 있습니다. Ni 기반 초경합금은 더 안정적이며 인성은 <2% 감소합니다. 고온(800° C)에서 Co 상은 가소성이 향상되고 K<sub>1c</sub>는 5% 증가하지만 경도는 10% 감소합니다. Ni 상은 고온 안정성이 더 높고 경도는 <5% 감소합니다. Co/Ni 혼합 비율(1:1~2:1)을 최적화하면 성능의 균형을 이룰 수 있습니다. 예를 들어, 10% Co 와 5% Ni 를 함유한 초경합금은 경도가 HV 1700±30, K<sub>1c</sub>가 14 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0.5 이고 해양 굴착에서 수명이 25%±3% 연장됩니다.

결합상 비율은 입자 크기의 상승효과를 고려해야 합니다.

미세 입자(0.51 μm)에 높은 Co(15%-20%) 함량이 결합되면 인성이 가장 우수하고, 거친 입자(510 μm)에 낮은 Ni(5%-8%) 함량이 결합되면 내식성이 우수합니다. 실제 적용에서 12% Co 함량의 초경합금 스탬핑 다이(입자 1.5 μm)는 고주파 충격(시간당 10 회 이상) 시 변형률이 0.01mm 미만이며, 사용 수명이 30%±5% 증가합니다.

### 2.3 인터페이스 및 결합 분석

WC 와 결합상 사이의 계면과 미세 결합(기공, 균열, 비정질상 등)은 초경합금의 성능에 중대한 영향을 미칩니다. 계면은 상 간의 결합 강도를 결정하며, 결합은 성능 저하의 시작점이 될 수 있습니다.

#### WCCo 인터페이스 의 전자 구조

WCCo 인터페이스 는 시멘트 카바이드의 안정적인 성능을 위한 미시적 기반입니다. 밀도 함수 이론 (DFT) 시뮬레이션은 WC(0001)/Co(111) 계면이 WCo 결합(결합 길이 2.5±2.8 Å ± 0.1 Å) 과 CCo 결합(결합 에너지 4 eV±0.2 eV)을 통해 강한 결합을 형성하며, 계면 에너지는 0.5 J/m<sup>2</sup> ± 0.05 J/m<sup>2</sup> 임을 보여줍니다. Co 의 3d 오비탈은 WC 의 pd 오비탈과 혼성화되며, 전하 이동은 약 0.2 e/atom±0.02 e/atom 이고 결합 일은 2.5 J/m<sup>2</sup> ± 0.1 J/m<sup>2</sup>로 WCNi 계면 (2.0 J/m<sup>2</sup>) 보다 높습니다. Cr(0.5%1%)을 첨가하여 WCrCo 전이층을 형성하면 계면에너지는 0.4 J/m<sup>2</sup>로 감소하고, 결합일은 2.7 J/m<sup>2</sup>로 증가하며, 균열저항성은 10 MPa·m<sup>1/2</sup> ± 0.5 를 초과한다.

투과전자현미경 (TEM)을 통해 계면 두께가 약 2nm ± 0.2nm 이고, 격자 불일치가 <

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2% ± 0.2%로 접합의 안정성을 보장하는 것으로 확인되었습니다. 최적화된 계면을 가진 초경 공구의 균열 성장률은 고속 절삭(150m/min)에서 30% ± 5% 감소했으며, 사용 수명은 15 시간 ± 1 시간 에 도달했습니다. Cr 편석(0.5% 1%)은 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 보호층을 형성했으며, 산성 환경(pH 2, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)에서 Cr을 함유한 초경 공구의 부식 깊이는 < 5 μm였으며, 사용 수명이 3년을 초과했습니다.

인터페이스 전자 구조의 조절은 다른 속성에도 영향을 미칩니다.

Mo(0.5%)를 첨가하면 접합 효율이 2.8 J/m<sup>2</sup> ± 0.1 J/m<sup>2</sup>로 증가하고 계면 응력이 10% 감소합니다. Ni 기반 계면은 전하 이동이 더 적고(0.15 e/atom) 내식성이 더 뛰어납니다(부식률 <0.02 mm/년). 예를 들어, Mo를 함유한 초경합금 다이의 고온 스탬핑(600° C)에서 계면 응력은 <150 MPa ± 10 MPa 이고 균열 발생률은 20% 감소합니다. DFT 시뮬레이션에서도 Ta(0.5%)를 첨가하면 접합 효율이 더욱 향상(2.9 J/m<sup>2</sup>) 될 수 있다고 예측하며, 이는 실험적으로 검증되고 있습니다.

애플리케이션의 경우 인터페이스 강도를 개선하는 것이 중요합니다.

Cr 함유 초경합금 공구로 티타늄 합금(Ti6Al4V)을 절삭할 경우 계면 박리율은 1% 미만이며, 공구 수명은 25% 연장됩니다. 고온 다습한 환경(40° C, 습도 90%)에서는 계면의 미세 부식(무게 감소 <0.1 mg/cm<sup>2</sup>) 이 발생할 수 있지만, Ni 기반 계면은 더 안정적입니다(무게 감소 <0.05 mg/cm<sup>2</sup>).

### 2.3.2 기공, 균열 및 비정질상의 형성 메커니즘

초경합금의 기공, 균열, 비정질상은 초경합금의 성능에 영향을 미치는 주요 결함으로, 제조 공정, 원료 특성, 그리고 열역학적 조건의 복잡한 상호작용으로 인해 발생합니다. 이러한 결함은 특히 고응력 또는 극한 환경에서 사용되는 재료의 강도, 인성, 내마모성, 그리고 내부식성에 상당한 영향을 미칩니다. 다음은 다양한 결함의 형성 메커니즘, 미세 특성, 그리고 성능에 미치는 영향에 대한 자세한 분석입니다.

#### 기공 형성 메커니즘

##### 원인:

다공성은 불완전한 소결의 주요 산물이며, 이는 일반적으로 분말 입자 사이의 가스(H<sub>2</sub>, CO 등)가 완전히 배출되지 않거나, 입자가 고르지 않게 쌓여 국부 수축이 일정하지 않기 때문에 발생합니다(재료 과학 저널, 2025).

혼합과정에서 분말입자가 응집(응집체 크기 > 20 μm) 되거나 유기결합제(예: 파라핀)가 완전히 분해되지 않아 ( 잔류 탄소율 > 0.1%) 소결시 가스가 발생하여 입자의 결함을 방해한다(ITIA 2024).

소결 온도가 충분하지 않거나(<1300° C) 유지 시간이 너무 짧으면(<30 분), 입자가 완전히 확산되지 않고 기공이 닫히지 않습니다(중국 비철금속 저널, 2024).

나노 크기의 시멘트 카바이드(입자 <0.2 μm)는 높은 표면 에너지(>1 J/m<sup>2</sup>)를

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

가지고 있어 입자 사이의 가스 흡착 용량을 향상시키고 기공률을 증가시킵니다(ITIA 2024).

#### 미세한 특징:

$\mu\text{m}$ )의 기공률은 일반적으로  $<0.1\pm 0.02\%$ 인 반면, 나노급 시멘트 카바이드(입자 크기  $<0.2\ \mu\text{m}$ )의 기공률은 입자 의 높은 표면 활동성으로 인해 1%-2%까지 증가할 수 있습니다(ISO 3326:2013).

주사전자현미경(SEM) 분석 결과 기공 크기는  $10\sim 100\text{nm}\pm 10\text{nm}$  이고, 모양은 대부분 구형 또는 타원형이며, 결정립계 또는 코발트상에 분포되어 있는 것으로 나타났습니다(Journal of Materials Science 2025).

기공 부피 비율의 증가는 응력 집중으로 이어지고 기공 주변의 응력은  $500\sim 600\text{MPa}$ 에 달할 수 있으며, 균열 발생 위험이 약 15~20% 증가할 수 있습니다(중국비철금속학회지, 2024년).

#### 성능 영향:

다공성이 0.1% 증가할 때마다 휨 강도(TRS)는 약 3%-5% 감소합니다. 예를 들어  $4000\text{MPa}$ 에서  $3800\sim 3900\text{MPa}$ 로 감소합니다(ASTM B406 테스트 기준).

나노급 시멘트 카바이드의 높은 기공률로 인해 굽힘 강도는  $3500\text{MPa} \pm 100\text{MPa}$ 로 더욱 감소하고 경도는 약 50-80HV 만큼 감소합니다(ITIA 2024).

다공성은 재료의 밀도를 감소시켜 내식성을 저하시킵니다. 염분 분무 환경에서 부식 속도는 약 10~15% 증가합니다( $0.05\text{mm}/\text{년}$ 에서  $0.055\sim 0.0575\text{mm}/\text{년}$ 으로, ASTM G31).

#### 최적화 방법:

열간 등방성 가압 성형(HIP, 200 MPa,  $1350^\circ\text{C}$ )은 높은 압력과 온도를 통해 기공 폐쇄를 촉진하고 기공률을  $0.05\pm 0.01\%$ 로 줄일 수 있으며 경도는  $100\sim 120\text{HV}\pm 20\text{HV}$  증가합니다(Journal of Materials Science 2025).

고충격 드릴링(빈도  $> 2000$  회/분)에서 HIP 처리된 초경 드릴 비트의 충격 저항성은 약 20%-25% 향상되고 사용 수명은 250-280 시간  $\pm 20$  시간에 도달할 수 있습니다(중국 비철금속학회지, 2024년).

가스를 미리 배출하기 위해 예비소결 단계( $800\sim 1000^\circ\text{C}$ , 1시간)를 추가하면 기공률을 약 0.02%~0.03%까지 줄일 수 있습니다(ITIA 2024).

#### 균열 형성 메커니즘

##### 원인:

균열은 주로 WC와 Co의 열팽창 불일치로 인해 발생합니다. WC의 열팽창 계수는

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$5.2 \times 10^{-6} / K$  인 반면 Co 의 열팽창 계수는  $12 \times 10^{-6} / K$  로 약 2 배 차이가 나며, 이로 인해 소결 냉각 과정에서 열응력이 발생합니다(Journal of Materials Science 2025).

급속 냉각(냉각 속도 >  $100^{\circ} C/s$ )은 특히 결정립계에서 열 응력 집중을 유발하여 응력이 300~400MPa 에 달할 수 있고 미세균열을 유발합니다(중국 비철금속 저널 2024).

기계적 응력(예: 압축 중 불균일한 압력 > 50MPa)이나 소결 후 가공 응력(예: 연삭 응력 > 200MPa)도 균열 시작으로 이어질 수 있습니다(ITIA 2024).

입자 크기는 균열 민감도에 영향을 미칩니다.  $0.5 \mu m$  미만의 나노스케일 초경합금은 넓은 입계 면적(전체 부피의 40~50% 차지), 더 복잡한 열응력 분포, 그리고 약 10%의 균열 발생률 증가를 보입니다(Journal of Materials Science 2025).

#### 미세한 특징:

투과전자현미경(TEM) 분석 결과 미세균열 크기는  $0.5 \sim 2 \mu m \pm 0.2 \mu m$  로 일반적으로 결정립계를 따라 확장되고, 균열 끝단의 응력강도계수( $K_{I}$ )는 약  $2 \sim 3 MPa \cdot m^{1/2}$  인 것으로 나타났습니다(중국 비철금속저널 2024).

Co 상의 (변형률 <math>5\% \pm 0.5\%</math>)는 변형 경화를 통해 에너지의 일부를 흡수하고 균열 전파를 억제할 수 있으며, 특히 Co 함량이 높은 재료에서 그렇습니다(ITIA 2024).

12% Co 를 함유하는 초경합금의 균열 깊이는 일반적으로  $<10 \mu m \pm 2 \mu m$  로, 높은 Co 함량 으로 인해 소성 완충 영역이 증가하기 때문에 6% Co 를 함유하는 재료(균열 깊이  $>15 \mu m \pm 3 \mu m$ )보다 우수 합니다 ( Journal of Materials Science 2025).

#### 성능 영향:

균열 깊이가  $5 \mu m$  증가할 때 마다 휨 강도는 약 5%-8% 감소합니다. 예를 들어 4000MPa 에서 3700-3800MPa 로 감소합니다(ASTM B406).

균열은 피로 파괴 위험을 증가시킵니다. 반복 하중( $10^7$  회, 500 MPa) 하에서 균열 성장 속도는 약 20~25% 증가합니다(중국 비철금속학회지, 2024).

고온 사이클( $500^{\circ} C$ , 1000 회) 동안 균열은 열 피로 성능의 감소와 수명을 약 15~20% 단축시킵니다(ITIA 2024).

#### 최적화 방법:

TaC (1%-2%) 또는 NbC (0.5%-1%) 를 첨가하면 결정립계 강도가 향상되고, 결정립계 결합 에너지가  $1.0 J/m^2$  에서  $1.2-1.3 J/m^2$  로 증가하며, 균열 성장률이  $15\% \pm 3\%$  감소합니다(Journal of Materials Science 2025).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10  $\mu\text{m}$  에서 6-7  $\mu\text{m}$  로 약 30-40% 줄일 수 있습니다 (중국 비철금속학회지, 2024 년) .

TaC 를 첨가한 초경다이의 열사이클링(500°C, 1000 회)에서 균열 길이는  $<5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$  이며 , 수명 이 약 30%-35%±5% 연장됩니다(ITIA 2024).

## 비정질상의 형성 메커니즘

### 원인:

비정질상은 고온 소결( $>1500^\circ\text{C}$ ) 중 또는 탄소 함량이 부족할 때( $<5.8 \text{ wt } \%$ ) 형성되며, 이는 주로 WC 분해 또는 불균일한 탄소 확산으로 인한 국부적 비정질화 때문입니다(Journal of Materials Science 2025).

고온( $>1500^\circ\text{C}$ )에서는 WC 가  $\text{W}_2\text{C}$  또는 W 로 분해되고, 코발트상은 휘발(휘발도  $>0.5\%$ )되어 국소적으로 탄소가 부족해지고 비정질상을 형성합니다(ITIA 2024).

탄소 함량이 부족( $<5.8 \text{ wt } \%$ )하면 WC 가 결정 구조를 유지할 수 없으며 일부 영역이 비정질 상태로 변환됩니다. 특히 결정립계 근처에서 그렇습니다(중국 비철금속 저널 2024).

소결 분위기의 산소( $>0.1\%$ ) 또는 수분( $>0.05\%$ )은 탄소와 반응하여  $\text{CO}/\text{CO}_2$ 를 생성하고 , 탄소를 소모하며 비정질 상의 형성을 강화합니다 (ITIA 2024).

### 미세한 특징:

X 선 회절(XRD)은 명확한 결정 회절 피크가 없는 비정질 상의 넓은 피크 특성( $2\theta \approx 35^\circ \pm 0.5^\circ$ )을 보여줍니다(Journal of Materials Science 2025).

TEM 으로 측정된 비정질상의 두께는  $5\sim 10\text{nm} \pm 1\text{nm}$  로 보통 결정립계나 코발트상에 분포되어 있으며, 부피 기준으로 약 2~5%를 차지합니다(중국비철금속저널 2024).

비정질상의 경도는 극히 낮습니다(약 HV 200-250  $\pm 30$ ). 이는 WC(HV 2200-2500)의 경도보다 훨씬 낮아서 국부적으로 연화됩니다(ITIA 2024).

### 성능 영향:

비정질 상의 부피 분율이 1% 증가할 때마다 경도는 약 50~80 HV 만큼 감소합니다. 예를 들어, HV 1800 에서 HV 1720~1750 으로 감소합니다(Journal of Materials Science 2025).

인성은 약 5%-10% 감소하고 파괴인성(KIC)은  $10\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  에서  $9\sim 9.5\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  로 떨어집니다(ITIA 2024).

비정질상은 내마모성을 감소시키고 마모율을 약 10%-15% 증가시켜  $0.06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  에서  $0.066\sim 0.069 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$  로 증가시킨다 (ASTM G65).

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 최적화 방법:

VC(0.2%-0.5%) 또는  $Cr_3C_2$ (0.3%-0.8%)를 첨가하면 탄소 확산을 억제하고 비정질상의 비율을  $<2\pm 0.5\%$ 로 낮추고 인성을 약 10%-12% 향상시킬 수 있습니다(중국비철금속학회지, 2024).

소결 온도(1350-1450° C)와 분위기(산소  $<0.05\%$ )를 조절함으로써 비정질상 형성 속도가 약 15%-20% 감소합니다(ITIA 2024).

고속 절삭(200m/min)에서 VC를 함유한 초경 공구의 피로 균열 깊이는  $<10\mu m \pm 2\mu m$ 이며, 수명이 25%-30%±3% 연장됩니다(Journal of Materials Science 2025).

### 결합의 결합된 영향

#### 환경적 요인:

고온다습한 환경(40° C, 습도 90%)은 기공 부식을 악화시킵니다. 기공 내 수분 흡착은 국부적인 응력 집중을 초래하고, 굽힘 강도는 약 5~7% 감소합니다. 예를 들어, 4000MPa에서 3700~3800MPa로 감소합니다(ASTM B406).

Ni계 초경합금(WC-Ni)은 Ni상의 강한 내식성(부식률  $<0.03\text{mm/년}$ )과 고온 다습한 환경에서의 강도 손실  $<2\%$ 로 인해 Co계 초경합금보다 우수합니다(ITIA 2024).

고온 산화 환경(800° C, 공기 중)에서 비정질상은 가속된 속도로 산화되고 산화 증량 증가율은 약 10%-15%( $0.1\text{ mg/cm}^2$ 에서  $0.11-0.115\text{ mg/cm}^2$ , ASTM G54) 증가합니다.

#### 성능 최적화:

탄소 함량( $6.0\% \pm 0.2\%$ )을 최적화하고 HIP 공정을 사용하면 결합률을 최소화하고 기공률  $<0.05\%$ , 균열 깊이  $<5\mu m$ , 비정질상 비율  $<1\%$ 로 줄일 수 있습니다(중국비철금속 저널, 2024).

12% Co를 함유한 시멘트 카바이드 드릴을 HIP 처리(200 MPa, 1350° C)한 후, 기공률은 0.04%-0.05%로 감소하고 충격 수명은 약 30%-35% 증가하여 260-290시간이 됩니다(ITIA 2024).

열 사이클(500° C, 1000회) 및 고온 다습한 환경(40° C, 습도 90%)에서 최적화된 시멘트 카바이드의 내식성과 피로 저항성은 약 15%-20% 향상됩니다(Journal of Materials Science 2025).

### 2.3.3 시멘트 카바이드 결합을 방지하고 줄이는 방법

시키려면 기공, 균열, 비정질상과 같은 결합의 발생을 방지하고 줄이는 것이 중요합니다. 다음은 원료 관리, 공정 최적화, 검출 피드백, 후처리 측면에서

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

결합률을 최소화하고 재료 성능을 향상시키기 위한 구체적인 방안입니다.

## 1. 원자재 관리

### 고순도 원료 선택:

고순도 WC 분말(순도 > 99.9%, 산화물 < 0.02%)과 Co 분말(순도 > 99.8%)을 사용하면 산화물에 의한 탄소 소모를 줄이고 비정질상 형성률을 약 10%-15%까지 줄일 수 있습니다(Journal of Materials Science 2025).

카본블랙의 품질을 제어하고(순도 > 99.9%, 입자 크기 < 10  $\mu\text{m}$ ) 기공이나 비정질상을 유도하는 불순물(황 및 산소 등)을 피하면 기공률을 약 0.02%까지 줄일 수 있습니다(ITIA 2024).

### 곡물 억제제 첨가:

VC(0.2%-0.5%),  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ (0.3%-0.8%) 또는 TaC(0.5%-1%)를 첨가하면 결정립 성장 및 탄소 확산이 억제되고, 결정립 경계 강도가 10%-15% 증가하며, 비정질상의 비율이 <1.5%로 감소합니다(중국 비철금속 저널, 2024).

TaC는 결정립계 결합 에너지를 증가시키고(1.0  $\text{J}/\text{m}^2$ 에서 1.2-1.3  $\text{J}/\text{m}^2$ 로) 균열 성장률을 15%-20% 감소시킵니다(ITIA 2024).

## 2. 혼합 및 압축 최적화

### 혼합 균일성:

행성형 볼 밀을 사용하여 혼합(16~24시간, 400~600rpm)을 실시하여 탄소 분포 편차가 <0.05 중량 %가 되도록 하고 기공률을 약 0.03%~0.05% 감소시켰습니다(Journal of Materials Science 2025).

분산제(예: 스테아르산 0.1%-0.3%)와 초음파 분산 기술을 사용하면 WC 분말 응집을 줄이고 균일성을 10%-15% 향상시킬 수 있습니다(ITIA 2024).

탄소 잔류물 함량이 낮은 바인더(예: 탄소 잔류물 함량이 0.03% 미만인 PEG 또는 PVA)를 선택하면 가스 발생을 방지하고 기공률을 약 0.02%까지 줄일 수 있습니다(중국 비철금속 저널, 2024).

### 압착 공정:

불균일한 압력으로 인한 응력 집중을 피하기 위해 가압력(50~100MPa)을 조절하면 균열 발생률을 약 10~15% 정도 줄일 수 있다(ITIA 2024).

등방성 압축(200-300 MPa)은 그린 바디의 밀도를 높이고 기공률을 약 0.05% 줄이는데 사용됩니다(재료 과학 저널 2025).

## 3. 소결 공정 최적화

### 대기 제어:

진공소결(진공도 <  $10^{-3}$  Pa)은 산소 <0.05%, 수분 <0.03%를 제어하고 탄소 산화를 방지하며 비정질상 생성률을 약 15%-20% 감소시킵니다("중국 비철금속 저널" 2024).

보호 분위기(예: Ar 또는  $\text{H}_2/\text{Ar}$ )를 사용하여 혼합물,  $\text{H}_2$  < 2%) 및 탄소 포텐셜을 0.8-1.0으로 제어하면 탄화 및 탈탄 속도가 약 10% 감소합니다(ITIA 2024).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 온도 및 냉각:

소결 온도는  $1350\sim 1450^{\circ}\text{C}(\pm 5^{\circ}\text{C})$ 로 조절되고, 유지 시간은 1~1.5 시간으로 입자가 완전히 확산되고 다공성이  $<0.05\%$ 가 되도록 보장합니다(ISO 3326:2013).

열응력을 줄이기 위해 냉각 속도를  $10\sim 20^{\circ}\text{C/s}$ 로 제어하고 균열 깊이는  $10\mu\text{m}$ 에서  $5\sim 6\mu\text{m}$ 로 줄였습니다 (Journal of Materials Science 2025).

단계적 냉각( $1450^{\circ}\text{C}$ 에서  $1000^{\circ}\text{C}$ 까지  $20^{\circ}\text{C/s}$ ,  $1000^{\circ}\text{C}$ 에서 실온까지  $5^{\circ}\text{C/s}$ )을 채택하면 열 응력이 약 20%-30% 감소합니다(ITIA 2024).

#### HIP 프로세스:

열간 등방성 압축(HIP, 150-200 MPa,  $1350\sim 1400^{\circ}\text{C}$ )은 미세 기공을 제거하고 기공률을 0.04%-0.05%로 줄이며 굽힘 강도를 5%-8% 증가시킵니다(3800 MPa에서 4000-4100 MPa로, ASTM B406).

HIP 후 경도는 100-120HV 증가하고 내마모성은 약 15%-20% 증가합니다(ASM G65).

### 4. 테스트 및 피드백

#### 온라인 모니터링:

적외선 분광법을 사용하여 소결 분위기( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  함량)를 모니터링 하고 분위기를 실시간으로 조정하면 기공률과 비정질 상 형성 속도를 약 10%-15%까지 줄일 수 있습니다(ITIA 2024).

소결 과정에서 미세균열을 감지하기 위해 음향 방출 기술이 사용되었으며, 균열 감지 정확도가  $\pm 0.5\mu\text{m}$ 로 향상되었습니다 (중국 비철금속 저널, 2024).

#### 미세 분석:

SEM, TEM, XRD 분석을 결합하여 기공 크기(10-100 nm), 균열 깊이(5-10  $\mu\text{m}$ ) 및 비정질 상 비율( $<2\%$ )을 분석하면 결함률이 약 15%-20% 감소합니다(Journal of Materials Science 2025).

전자 후방 산란 회절(EBSD)을 사용하여 결정립계 응력 분포를 분석했으며, 공정 매개변수를 최적화하여 결정립계 응력 편차를  $\pm 50\text{MPa}$  이내로 제어했습니다(ITIA 2024).

#### 성능 테스트:

정기적으로 굽힘 강도(ASM B406), 경도(ISO 6507) 및 내마모성(ASM G65) 시험을 실시하고, 결함-성능 데이터베이스를 구축하고, 공정을 최적화합니다(중국 비철금속 저널, 2024).

### 5. 후처리 및 표면 최적화

#### 표면 처리:

연마는 표면 기공과 미세균열(두께 0.01-0.03mm)을 제거하고, 표면 거칠기  $Ra < 0.2\mu\text{m}$ 를 달성하며, 내식성이 약 10%-15% 향상됩니다(ASM G31).

PVD TiAlN 또는 CrN 코팅(두께 2-5  $\mu\text{m}$ )은 표면 경도(+200 HV)와 산화 저항성( $1200^{\circ}\text{C}$ 에서 산화 중량 증가  $< 0.1\text{mg/cm}^2$ )을 개선하고 코팅 접착력이 15%-20% 향상됩니다(ASM C633).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 열처리:

저온 어닐링(600~800° C, 1 시간)은 잔류 응력을 해소하고 균열 깊이를 10 μm에서 7~8 μm 로 약 20~30% 줄입니다 (Journal of Materials Science 2025).

저온 질화(500~600° C, 2 시간)는 표면 내식성을 향상시키고 부식 속도를 약 15% 감소시킵니다(ASTM G31).

## 6. 환경 적응성 최적화

### 향상된 내식성:

Co 기반 바인더 상 대신 Ni 기반 바인더 상(WC-Ni)을 사용함으로써, 고온 다습한 환경(40° C, 습도 90%)에서의 강도 저하가 5%에서 1.5%-2%로 감소하고, 부식 속도는 <0.03mm/년입니다(ITIA 2024).

Cr(0.5%-1%)을 첨가하여 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 보호층을 형성하면 내식성이 약 20% 향상되고, 염분 분무 환경에서의 부식 속도가 0.025-0.03mm/년으로 감소합니다(ASTM G31).

### 고온 안정성:

TiC 또는 TaC (5%-10%) 를 첨가하면 산화 저항성이 향상되고, 1000° C에서 산화 증량 증가는 0.08mg/cm<sup>2</sup> 미만이고 결함률은 약 10%-15% 감소합니다(ITIA 2024).

코발트 상분포를 최적화(두께 0.1-0.5 μm ) 하여 고온에서 코발트 휘발율을 약 0.5%-1% 감소시키고 , 비정질상 형성율을 약 15% 감소시킨다(중국비철금속저널, 2024).

## 7. 지능형 프로세스 제어

### AI 최적화:

인공지능(AI)을 사용하여 혼합 및 소결 매개변수를 최적화하면 균일성이 10%-15% 향상되고 기공률은 약 0.03%-0.05% 감소할 수 있습니다(ITIA 2024).

머신 러닝은 결함 형성(예: 기공, 균열)을 예측하여 결함률을 약 20~25%까지 줄입니다(Journal of Materials Science, 2025).

### 실시간 피드백:

온라인 온도 모니터링(정확도 ±2° C)과 압력 모니터링(정확도 ±5 MPa)을 도입함으로써 소결 중 결함률이 약 15~20% 감소했습니다(ITIA 2024).

지능형 제어 시스템은 냉각 속도를 조절하여 열응력을 약 20~30% 감소시키고 균열 형성률을 약 15% 감소시킵니다(중국 비철금속 저널, 2024).

### 종합적 효과

상기 방법을 통해, 시멘트 카바이드의 기공률은 0.04%-0.05%로 감소되고, 균열 깊이는 <5 μm , 비정질 상 비율은 <1%로 감소 되며, 전체 결함률은 20%-30% 감소합니다(ITIA 2024).

성능이 크게 개선되었습니다. 굽힘 강도가 5%-10%(4000-4200MPa) 증가하고, 경도가 100-150HV 증가했으며, 내마모성이 15%-20% 증가했습니다(ASTM G65). 또한 사용 수명이 약 30%-40% 연장되었습니다(Journal of Materials Science 2025).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

강한 충격(빈도 > 2000 회/분)과 덥고 습한 환경(40° C, 습도 90%)에서 최적화된 시멘트 카바이드의 내구성과 신뢰성은 약 25%-35% 향상됩니다(중국 비철금속학회지, 2024 년).

## 2.4 미세구조 특성화 기술

고급 특성화 기술은 시멘트 카바이드의 미세 구조와 상 상태를 분석하는 정확한 도구를 제공하여 성능 최적화와 품질 관리를 지원합니다.

### 2.4.1 SEM, TEM 및 EBSD의 응용

주사전자현미경 (SEM, 분해능 <1nm)을 사용하여 WC 입자(0.110 μm)와 결합상(530nm±2nm)의 형태와 분포를 분석합니다. 후방산란전자(BSE) 이미징을 통해 WC와 Co를 구별할 수 있습니다. Co가 10% 함유된 초경합금 입자의 균일도는 >95%±2%이고, 기공률은 <0.1%±0.02%입니다. SEM은 균열(0.52 μm)과 기공(10~100nm)도 감지할 수 있어 공정 최적화의 기반을 제공합니다. 예를 들어, HIP 처리 후 기공률은 0.05%로 감소하고 경도는 5%±1% 증가합니다.

투과 전자 현미경 (TEM, 분해능 <0.2 nm)은 격자 불일치가 <2%±0.2%인 WC(0001)/Co(111) 계면의 원자 구조를 보여주고, 선택적 전자 회절 (SAED)은 WC의 d<sub>0001</sub> 간격이 2.837 Å ± 0.005 Å임을 확인합니다. Cr을 함유한 초경합금은 Cr 편석(농도 0.5%±0.2%)을 나타내어 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 층을 형성하여 내식성을 30%±5% 향상시킵니다. TEM은 또한 비정질 상(두께 510 nm)을 분석하고 탄소 함량 제어(5.8%±6.2%)를 안내할 수 있습니다. 예를 들어, TEM은 Mo를 함유한 시멘트 카바이드(결합 작업 2.8 J/m<sup>2</sup>)의 인터페이스를 최적화하여 공구 수명을 15%±2% 연장합니다.

전자 후방 산란 회절 (EBSD)을 사용하여 결정립 방향과 응력 분포를 연구했습니다. 미립자 탄화물(0.51 μm)은 무작위 방향을 보인 반면, 조립자 탄화물(510 μm)은 <0001> 우선 방향(강도 >2mrd±0.2mrd)을 보였습니다. EBSD는 잔류 응력이 <200MPa±10MPa임을 확인했으며, 이는 어닐링(500° C, 2 시간)을 통해 10%±2% 감소했습니다. TaC를 함유한 초경합금의 응력 균일성은 20% 향상되었고, 균열 시작 속도는 15%±3% 감소했습니다. 예를 들어, 12% Co를 함유한 초경합금의 파단은 인성 K<sub>1c</sub> 14MPa·m<sup>1/2</sup> ±0.5의 입내 파단을 보였습니다.

실제 응용 분야에서는 SEM, TEM, EBSD가 미세구조 분석에 함께 사용됩니다. 예를 들어, 10% Co를 함유한 초경 공구는 SEM으로 확인된 1.5 μm±0.2 μm의 결정립 크기, TEM으로 확인된 15nm±2nm의 Co 층을 가지며, EBSD로 측정된 응력은 <150MPa±10MPa로, 절삭 성능 기준(경도 HV 1800±30, K<sub>1c</sub> 12MPa·m<sup>1/2</sup>)을 충족합니다.

### 2.4.2 X선 회절(XRD) 및 에너지 분산 분광법(EDS A)

X-선 회절 (XRD)은 초경합금의 상 조성과 결정 구조를 특성화하는 데

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

사용됩니다. WC의 주요 피크는  $2\theta = 31.5^\circ$  와  $35.6^\circ \pm 0.1^\circ$  에 위치하고, 입자 크기 범위는  $0.110\ \mu\text{m}$ 입니다. 잔류 응력으로 인한 피크 이동은  $<0.1^\circ \pm 0.02^\circ$  로 소결 응력 ( $<200\ \text{MPa}$ )을 반영합니다. TiC를 함유한 초경합금은 (W, Ti)C 고용체 피크가  $0.2^\circ \pm 0.05^\circ$  이동하고,  $\eta$  상 ( $2\theta \approx 40^\circ \pm 0.5^\circ$ )을 피하기 위해 탄소 함량을 제어해야 합니다 ( $5.8\% \sim 6.2\%$ ). XRD는 비정질 상 (넓은 피크  $2\theta \approx 35^\circ \pm 0.5^\circ$ )도 감지할 수 있습니다. VC를 함유한 초경합금의 비정질상 비율은  $<2\% \pm 0.5\%$ 이고, 경도는  $5\% \pm 1\%$  증가합니다.

에너지 회절 스펙트럼 분석 (EDS) A 원소 분포를 결정했습니다. 10% Co를 함유한 초경합금의 Co 분포 편차는  $<3\% \pm 0.5\%$ 였고, Cr 편석 농도는  $0.5\% \pm 0.2\%$ 였습니다. 산성 환경 (pH 3, HCl)에서 12% Ni를 함유한 초경합금의 부식 속도는  $0.03\text{mm}/\text{년} \pm 0.005\text{mm}/\text{년}$ 이었고, EDS A는 Ni 층의 균일도가  $>95\% \pm 2\%$ 임을 확인했습니다. 덩고 습한 환경 ( $40^\circ\text{C}$ , 습도 90%)은 Co 편석을 유발할 수 있으며 (편차는  $5\% \pm 1\%$ 로 증가), Ni 기반 초경합금은 더 안정적입니다 (편차  $<2\%$ ).

XRD와 EDS A를 통해 미세조직을 완벽하게 평가할 수 있습니다. 예를 들어, XRD는 10% Co를 함유한 초경합금의 결정립 크기가  $1.5\ \mu\text{m} \pm 0.2\ \mu\text{m}$ 이고  $\eta$  상이 존재하지 않음을 확인했습니다. EDS A는 Co 두께가  $15\text{nm} \pm 2\text{nm}$ 이고, Cr 편석이  $1\% \pm 0.2\%$ 이며, 성능이 공구 기준 (경도 HV  $1800 \pm 30$ ,  $K_{1c}$   $12\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ )을 충족함을 확인했습니다. 실제 적용에서 TiC를 함유한 초경합금 금형의 고용비는 XRD와 EDS A (Ti/W =  $0.1 \pm 0.02$ )를 통해 최적화되었으며, 내마모성은 20% 향상되었고, 수명은  $6,000\ \text{시간} \pm 500\ \text{시간}$  이상이었습니다.

## 참고문헌

APA 스타일로 정렬되어 있으며, 미세구조와 상상태에 초점을 맞춘 영어와 중국어 논문 16 개가 수록되어 있습니다.

Exner, HE (1979). 초경합금의 물리적 및 화학적 특성. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173. <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>

Exner, HE (1979). 초경합금의 물리적 및 화학적 특성. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173.

Gurland, J. (1988). 초경합금의 파괴인성. *Journal of Metals*, 40(7), 1923.

Lassner, E., & Schubert, WD (1999). 텅스텐: 원소의 특성, 화학, 기술, 합금 및 화합물.

뉴욕, 뉴욕: 스프링거.

Prakash, LJ (2014). 경금속: 구조, 특성 및 성능. VK Sarin(편), *종합 경질 재료 (Comprehensive hard materials)* (제 1 권, 2954 쪽). 영국 옥스퍼드: Elsevier.

Prakash, LJ (2014). 초경합금: 구조, 특성 및 성능. VK Sarin(편), *경질 재료 전집* (1 권, 2954 쪽). 영국 옥스퍼드: Elsevier Publishing.

Upadhyaya, GS (1998). 초경합금 텅스텐 카바이드: 생산, 특성, 그리고 테스트. 노리치, 뉴욕: 윌리엄 앤드루 출판사.

Wang, H., & Fang, ZZ (2019). 극한 조건에서 초경합금의 열적 및 기계적 특성. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 82, 7685.

Zhang, L., & Chen, S. (2017). 산성 환경에서 초경합금의 부식 거동. *Corrosion Science*, 125,

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

8795 .

Chen, X., & Zhang, Y. (2022). 초경합금 내 WCCo 계면에 대한 DFT 연구 . 전산재료 과학, 201 , 110873 .

Li, J., & Wang, S. (2021). 첨단 현미경을 이용한 초경합금의 미세조직 특성 분석. 재료 특성화, 178, 111234.

차이나팅스텐 온라인. (2023). 초경합금 의 특성 및 응용 .  
<http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation>

에서 가져옴, LQ, & Li, WP (2018). 초경합금 제조 기술 의 발전 . 재료 검토 , 32(10), 16531660.

Li, ZQ, & Wang, ZY (2021). 초경합금 재활용 기술의 발전. Rare Metal Materials and Engineering, 50(8 ) , 29712978 .

, W., & Zhang, H. (2020). 초경합금의 고온 산화 거동 에 관한 연구 . 재료과학 및 공학 저널 , 38(4 ) , 512518 ., T., & Chen, M. (2019). 초경합금의 소결 속도론 발전. 분말 야금 기술, 37(5), 321329 .

Garcia, J., & Ciprés , VC (2018). 절삭 가공에서 초경합금의 마모 메커니즘. Wear , 408409, 126134.

Garcia, J., & Ciprés , VC (2018). 절삭 가공에서 초경합금의 마모 메커니즘. Wear, 408409, 126134.

Fang, ZZ, & Koopman, MC (2017). 초경합금 가공 및 특성의 발전. 재료 연구 연감(Annual Review of Materials Research), 47, 381403.

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



총수:

텨스텐 카바이드 입자의 종류에 따라 어떤 종류의 초경합금이 있습니까 ?

초경합금은 텨스텐 카바이드(WC)를 주요 경질상(hard phase)으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합상으로 하는 복합 소재입니다. 초경합금의 성능과 적용 분야는 WC 입자 크기와 밀접한 관련이 있습니다. 입자 크기는 경도와 인성뿐만 아니라 소재의 내마모성, 내충격성, 고온 안정성 및 가공 정밀도에도 큰 영향을 미칩니다. 초경합금은 WC 입자 크기에 따라 전통적인 조립질부터 최신 나노 크기의 입자까지 다양한 산업적 요구를 충족하는 여러 범주로 나눌 수 있습니다. 다음은 WC 입자 크기의 세부 분류와 특성에 대한 포괄적인 설명입니다.

### 1. 조립 초경합금

입자 크기:  $>5 \mu\text{m}$  (일반적으로  $5-20 \mu\text{m}$ , ISO 513).

#### 조립초경합금의 특성

조립 초경합금은 입자 크기가 더 크고, 결정립계 수가 더 적으며, 결합상(Co)이 고르게 분포되어 있고, 결정립계 면적이 전체 부피에서 차지하는 비율은 약 5~10%에 불과합니다(Journal of Materials Science 2025). 이로 인해 재료의 내충격성과 내피로성이 더욱 향상됩니다.

경도는 HV 1200~1500 으로 비교적 낮지만, 굽힘 강도(TRS)는 2200~2500 MPa 로 비교적 높고, 파괴 인성(KIC)은  $15\sim 20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  입니다 (중국 비철금속학회지, 2024 년).

내마모성은 비교적 적당하며, 마모율은 약  $0.08-0.10 \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$  (ASTM G65

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

시험)이지만, 높은 충격 하중에서도 좋은 성능을 발휘하며, 심한 충격과 진동이 가해지는 작업 환경에 적합합니다.

고온 안정성이 우수하며, 800° C에서 경도 유지율이 약 85%-90%로 중·고온 작업 조건에 적합합니다(ITIA 2024).

### 조립 초경합금의 미세구조

주사전자현미경(SEM) 분석 결과, WC 결정립은 다각형이고, 결정립 사이의 코발트상의 두께는 약 1-3 μm이며, 결정립계 결합강도는 약 1.5-2 J/m<sup>2</sup>로 비교적 높은 것으로 나타났다 (Journal of Materials Science 2025).

입자 크기가 클수록 입자 경계 미끄러짐에 대한 저항이 낮아져 충격 에너지를 흡수하고 균열 확산을 줄이는 데 도움이 됩니다.

### 조립 초경합금의 적용

조립 초경합금은 주로 광산 공구, 드릴 비트, 터널링 장비 및 대형 스탬핑 다이에 사용됩니다. 화강암이나 현무암의 시추 작업과 같이 높은 충격 하중이 가해지는 환경에 적합합니다(ISO 513).

광산 굴착 시 드릴 비트 수명은 1,500~2,000m에 달할 수 있으며, 특히 단단한 암석 조건에서는 높은 파괴 저항성을 보입니다(ITIA 2024).

또한 반복적인 충격과 마모를 견딜 수 있는 굴삭기 버킷 이빨과 같은 중장비의 내마모성 부품에도 일반적으로 사용됩니다(중국 비철금속학회지, 2024년).

### 조립질 초경합금의 제조

기존의 분말 야금 공정을 사용합니다. 원료는 굵은 WC 분말(5~20 μm)입니다. 혼합 후, 재료를 성형합니다. 소결 온도는 일반적으로 1400~1450° C이며, 유지 시간은 1~2시간입니다.

비정상적인 결정립 성장을 방지하기 위해 소결 공정 중 코발트 상 분포를 제어해야 합니다. 일반적으로 소량의 TaC (0.5~1%)를 첨가하여 결정립 성장을 억제합니다(ITIA 2024).

냉각 속도는 과도한 결정립계 응력으로 인해 미세균열이 발생하는 것을 방지하기 위해 5~10° C/분으로 제어됩니다(재료과학 저널 2025).

## 2. 중결정 탄화물

입자 크기: 1-5 μm (ISO 513).

### 중 결정 초경합금의 특성 :

메조겐 초경합금은 적당하고, 결정립계 면적이 전체 부피에 차지하는 비율은 약 15%-20%로 경도와 인성 간의 좋은 균형을 이루고 있습니다(재료과학 저널 2025).

경도는 HV 1500-1800, 굽힘 강도는 2000-2300 MPa, 파괴 인성은 10-15 MPa·m<sup>1/2</sup> /

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<sup>2</sup>입니다(중국 비철금속 저널 2024).

조립초경합금보다 내마모성이 약 10~15% 높고, 마모율은 약  $0.06\sim 0.08\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  (ASTM G65 시험)이다.

충격 저항성과 고온 안정성을 모두 갖추고 있으며,  $600^{\circ}\text{C}$ 에서 경도 유지율이 약 90%~95%로 중부하 및 중온도 가공 환경에 적합합니다(ITIA 2024).

#### 중결정 의 미세구조 카바이드 :

, WC 결정립은 정다각형이고, 결정립 사이의 코발트상의 두께는 약  $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$  이며, 결정립계 결합 강도는  $1.2\sim 1.5\ \text{J}/\text{m}^2$ 입니다 (Journal of Materials Science 2025). 결정립계 수가 증가하면 균열 전파 경로가 더욱 복잡해져 재료의 균열 저항성이 향상됩니다. 동시에, 적절한 결정립 크기는 더 높은 경도를 보장합니다.

#### 중 결정 초경합금 의 적용 :

범용 절삭 공구(밀링 커터, 터닝 공구 등), 스탬핑 다이, 롤 및 내마모성 부품에 널리 사용됩니다. 중탄소강, 주철 또는 저경도 스테인리스강(ISO 513) 가공에 적합합니다.

절삭속도  $150\sim 200\text{m}/\text{min}$  조건에서 공구수명은 1.5~2 시간에 달할 수 있으며, 특히 간헐절삭에서 우수한 내치핑 성능을 발휘합니다(재료과학저널 2025).

또한 자동차 부품용 스탬핑 다이와 같은 중간 정밀도 금형을 제조하는 데 적합하며 중간 정도의 충격과 마모를 견딜 수 있습니다(중국 비철금속학회지, 2024년).

#### 중 결정 초경합금 의 :

중간 크기의 WC 분말( $1\sim 5\ \mu\text{m}$ ) 을 사용하여 행성 볼 밀( $300\sim 400\ \text{r}/\text{min}$  속도로 12~16 시간)에서 혼합하여 균일성을 보았습니다.

소결 온도는  $1350\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 로 조절하고, 유지 시간은 1~1.5 시간이며, 결정립 성장을 제어하기 위해 결정립 억제제( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  0.3%~0.5%)를 첨가합니다.

소결 후, 열간 정수압 가압(HIP, 100~120 MPa,  $1350^{\circ}\text{C}$ )을 사용하면 기공률을 더욱 줄일 수 있습니다(<0.02%, ISO 3326:2013).

### 3. 미립자 시멘트 카바이드

입자 크기:  $0.5\sim 1\ \mu\text{m}$  (ISO 513).

#### 미립자 시멘트 카바이드 :

미립 초경합금은 입자 크기가 작고, 결정립계 면적이 전체 부피의 약 25%~30%를 차지합니다. 결정립계 효과는 재료의 경도와 내마모성을 크게 향상시킵니다(Journal of Materials Science 2025).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

경도는 HV 1800-2000, 굽힘 강도는 1800-2200 MPa, 파괴 인성은 8-12 MPa·m<sup>1/2</sup> /<sup>2</sup>입니다(중국 비철금속 저널 2024).

내마모성은 메조겐 초경합금보다 약 20%-30% 높고, 마모율은 약 0.04-0.06 mm<sup>3</sup>/N·m (ASTM G65 시험)입니다.

인성은 약간 감소하지만 고온 성능이 우수하며, 800°C에서 경도 유지율은 약 88%-92%로 고정밀 가공에 적합합니다(ITIA 2024).

#### 미립자 시멘트 초경합금의 미세구조 :

SEM 및 투과전자현미경(TEM) 분석 결과, WC 입자는 거의 원형 또는 약간 다각형 모양이었고, 입자 간 코발트상의 두께는 약 0.2~0.5 μm였으며, 입자 경계 결합 강도는 1.0~1.3 J/m<sup>2</sup>였습니다 (Journal of Materials Science 2025).

미세한 입자는 결정립계 미끄러짐에 대한 저항성을 높이고 재료의 내마모성을 개선하지만 균열이 발생할 가능성도 증가시킵니다.

#### 미세립 시멘트 카바이드 :

정밀 절삭 공구 (선삭 공구, 밀링 커터 등), 정밀 금형 및 내마모성 부품, 스테인리스강, 경화강(HV 40-50 HRC) 또는 고강도 합금(ISO 513) 가공에 적합합니다.

스테인리스강을 절단할 때(200m/min) 공구수명은 2~3 시간에 달할 수 있으며, 특히 연속절삭 시 양호한 표면조도(Ra<0.4 μm)를 나타낸다 (Journal of Materials Science, 2025).

또한, 허용 오차 <0.01 mm의 요구 사항을 충족할 수 있는 고정밀 스탬핑 다이 및 와이어 드로잉 다이를 제조하는 데 사용됩니다(중국 비철금속학회지, 2024년).

#### 미세립 시멘트 카바이드 :

미립 WC 분말(0.5-1 μm)을 사용하고, 고에너지 불 밀링(16-24 시간, 회전 속도 400-600 r/min)을 실시하고, 입자 억제제(Cr<sub>3</sub> C<sub>2</sub> 0.3%-0.5% 또는 VC 0.1%-0.3%)를 첨가합니다.

소결 온도는 1350~1380°C로 조절하였고, 입자성장을 피하기 위해 유지시간은 1시간이었다.

소결 후 HIP(120-150 MPa, 1350°C)를 사용하면 미세 기공을 제거할 수 있으며 기공률은 <0.015%입니다(ISO 3326:2013).

#### 4. 초미립 초경합금

입자 크기: 0.2-0.5 μm (ISO 513).

#### 초미립 시멘트 카바이드 특징:

초미립 초경합금은 매우 작으며, 결정립계 면적은 전체 부피의 약 35~40%를 차지합니다. 결정립계 효과가 성능에 미치는 영향은 더욱 큼니다(Journal of Materials Science 2025).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

경도는 HV 1900-2200, 굽힘 강도는 1700-2000 MPa, 파괴 인성은 7-10 MPa·m<sup>1/2</sup> /<sup>2</sup>입니다(중국 비철금속 저널 2024).

내마모성은 미립자 초경합금보다 약 15%-20% 더 높고, 마모율은 약 0.03-0.05 mm<sup>3</sup>/N·m입니다 (ASTM G65 시험).

고온 성능이 더욱 향상되어 1000° C에서 경도 유지율이 약 85%-90%로 고부하 및 고온 가공에 적합합니다(ITIA 2024).

표면 마감이 우수하고 가공 후 공작물의 표면 거칠기는 Ra 0.2-0.3 μm에 도달할 수 있습니다 (중국 비철금속학회지, 2024년).

#### 초미립 시멘트 카바이드 미세 구조:

, WC 결정립은 거의 원형이고, 결정립 사이의 코발트상의 두께는 약 0.1-0.3 μm이며, 결정립계 결합 강도는 0.8-1.2 J/m<sup>2</sup>입니다 (Journal of Materials Science 2025).

결정립계가 매우 많아 균열 전파 경로가 더 복잡해지고 내마모성이 더욱 향상되지만, 인성이 감소함에 따라 충격 저항성이 더욱 어려워집니다.

#### 초미립 초경합금 응용 분야:

티타늄 합금, 니켈 기반 초합금 또는 경화강(HV 50-60 HRC)의 초정밀 가공 도구(예: PCB 드릴, 마이크로 밀링 커터), 천공 도구 및 코팅된 기관(ISO 513).

티타늄 합금을 절단할 때 (150m/min) 공구 수명이 3~4시간에 달할 수 있으며, 특히 고정밀 가공에서 우수한 치수 안정성을 보여줍니다(Journal of Materials Science, 2025).

또한 전자 부품 가공의 고정밀 요구 사항(허용 오차 <0.005mm)을 충족하기 위해 고정밀 와이어 드로잉 다이 및 마이크로 몰드를 제조하는 데 사용됩니다(중국 비철금속 학회지, 2024년).

#### 초미립 시멘트 카바이드:

초미립 WC 분말(0.2~0.5 μm)을 사용하고, 고에너지 불밀링(24~36시간, 회전속도 500~800r/min)을 실시하고, 입자방지제(예: VC 0.1%~0.3%)를 첨가한다.

소결 온도는 1320~1350° C로 조절되고, 유지 시간은 입자 성장을 피하기 위해 0.5~1시간입니다.

열간 등방성 소결(HIP, 150 MPa, 1350° C) 또는 스파크 플라즈마 소결(SPS, 1300° C, 50 MPa)을 사용하며, 입자 크기는 0.2-0.5 μm로 정밀하게 제어됩니다 (ITIA 2024).

#### 5. 나노 급 초경합금

입자 크기: 0.05-0.2 μm (ISO 513).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 나노급 초경합금의 특징:

나노급 초경합금의 WC 입자는 나노스케일 크기에 이르며, 입계 면적은 전체 부피의 45~50%에 달합니다. 입계 효과는 매우 강하여 경도와 내마모성을 크게 향상시킵니다(Journal of Materials Science 2025).

경도는 HV 2000-2400, 굽힘 강도는 1600-1900 MPa, 파괴 인성은 6-9 MPa·m<sup>1/2</sup>입니다(중국 비철금속 저널 2024).

초미립 초경합금보다 내마모성이 약 10~15% 높고, 마모율은 약 0.02~0.04mm<sup>3</sup>/N·m (ASTM G65 시험)이다.

나노 효과는 고온 안정성을 향상시켜 1000° C 에서 경도가 90% 이상 유지되고 1200° C 에서 HV 가 1800-2000 을 유지합니다(ITIA 2024).

표면 마감과 가공 정확도가 매우 높고, 작업물의 표면 거칠기는 Ra 0.1-0.2 μm 에 도달할 수 있습니다 ( 중국비철금속학회지 2024).

TiAlN ) 이나 그래디언트 구조(ITIA 2024) 를 통해 성능을 개선해야 합니다.

### 나노스케일 시멘트 카바이드 미세구조:

TEM 및 원자력 현미경(AFM) 분석 결과, WC 입자는 거의 구형이고, 입자 간 코발트 상의 두께는 0.05~0.1 μm 에 불과하며 , 입자 경계 결합 강도는 0.7~1.0 J/m<sup>2</sup> 였습니다 (Journal of Materials Science 2025).

결정립계 슬라이딩 저항은 매우 높아 내마모성이 크게 향상되지만, 결정립계 응력 집중으로 인해 균열 발생 위험도 증가합니다.

### 나노급 초경합금 응용 분야:

초고정밀 절삭(광학 금형 가공 등), 마이크로 금형 및 전자 부품 가공, 고경도 재료 (HV 60-70 HRC) 또는 비철 금속(알루미늄 합금 등) 가공(ISO 513)에 적합합니다.

마이크로 드릴 가공(절삭 속도 100m/min) 시, 서비스 수명은 4~5 시간에 달할 수 있으며, 특히 고정밀 회로 기판(PCB)을 가공할 때 매우 높은 치수 안정성을 보입니다(Journal of Materials Science 2025).

또한, 마이크론 수준의 가공 정확도(허용 오차 <0.002mm)를 충족하는 초박형 와이어 드로잉 다이 및 의료 기기(예: 메스) 제조에도 사용됩니다(중국 비철금속학회지, 2024 년).

### 나노스케일 초경합금 제조:

나노스케일 WC 분말(0.05-0.1 μm)을 사용하고 , 고 에너지 볼밀링(24-48 시간, 회전속도 600-1000r/min)을 실시하고, 입자방지제(VC 0.1%-0.3% 또는 Cr<sub>3</sub> C<sub>2</sub> 0.2%-

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.4%)를 첨가한다.

저온소결(1300~1350° C)이나 현장보조소결기술(예: 스파크 플라즈마 소결 SPS, 1300° C, 50~80MPa)을 사용하면 입자크기가 0.05~0.2 μm 로 정밀하게 제어됩니다 .

분산제(예: 스테아르산 0.1%-0.3%)와 초음파 분산 기술을 사용하여 분말 응집을 줄이고 균일성을 10%-15% 향상시킵니다(ITIA 2024).

소결 후, PVD TiAlN 코팅(두께 2-3 μm ) 을 적용하여 산화 저항성과 내마모성을 개선할 수 있습니다(Journal of Materials Science 2025).

## 6. 기타 분류 고려 사항

### 복합 입자 카바이드:

입자 크기: 다양한 입자 크기(예: 0.2 μm 및 5 μm)를 결합하여 경사 또는 이중 모드 구조 를 형성합니다.

### 복합 입자 시멘트 카바이드 특징:

경도(HV 1800-2000) 및 인성(KIC 10-15 MPa·m<sup>1/2</sup> / <sup>2</sup>) 이 향상되고, 내마모성이 10%-20% 향상됩니다(Journal of Materials Science 2025).

그라디언트 구조는 표면에 미세한 결정(0.2~0.5 μm)과 내층에 거친 결정(5~10 μm ) 이 결합된 구조로 표면 내마모성이 강하고 내부 충격 저항성이 양호합니다(ITIA 2024 ) .

고온 성능이 뛰어나고, 1000° C에서 경도 유지율이 약 85%-90%로 복잡한 작업 조건에 적합합니다(중국 비철금속 저널, 2024).

### 복합 입자 시멘트 카바이드 미세 구조:

SEM 분석 결과 표면 결정립은 작고 결정립 경계는 조밀하며, 내부 결정립은 더 크고, 코발트 상의 두께는 약 1-2 μm 이며 , 전체 구조 는 명확하게 층을 이루고 있습니다(Journal of Materials Science 2025).

경사 구조는 균열 성장 속도를 감소시키고 파괴 저항성을 약 15% 향상시킵니다(ITIA 2024).

### 복합 입자 시멘트 카바이드 응용 분야:

다기능 도구(예: 항공우주 소재) 및 복잡한 금형 , 복합 소재 또는 고온 합금의 가공(ISO 513).

탄소섬유 복합소재를 절단할 때(150m/분), 공구 수명은 3~4 시간에 달할 수 있습니다(중국비철금속학회지, 2024년).

### 복합립 시멘트 카바이드의 제조:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

층상프레스 기술을 사용하는데, 표면층에는 초미립 WC 분말( $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ ) 을 사용하고, 내부층에는 조대한 WC 분말( $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ) 을 사용합니다.

소결 온도는  $1400^{\circ}\text{C}$ , 유지 시간은 1 시간이었으며, 그라디언트 층의 두께는 조절되었다( $0.5\text{--}1\text{mm}$ ) (ITIA 2024).

#### 도핑된 입자 카바이드:

입자 크기: 입자 크기는 도핑을 통해 조절되며 일반적으로  $0.5\text{--}2 \mu\text{m}$  입니다.

#### 도핑된 입자 시멘트 카바이드의 특징:

TiC 를 첨가함으로써, TaC 또는 NbC (5%–10%)를 사용 하면 입자 크기가  $0.5\text{--}2 \mu\text{m}$  로 제어되고 산화 저항성이 향상됩니다( $1200^{\circ}\text{C}$  에서 산화 중량 증가  $<0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ ) .  
경도는 HV 1700–1900 입니다(중국 비철금속 저널 2024).

내식성은 약 10%–15% 향상되고, 염분 분무 환경에서의 부식 속도는  $<0.04\text{mm}/\text{년}$ 입니다(ASTM G31).

고온 강도가 향상되어  $1000^{\circ}\text{C}$  에서 굽힘 강도가 약 80%–85% 유지됩니다(ITIA 2024).

#### 도핑된 입자 시멘트 카바이드의 미세 구조:

TiC 등 ) 가 고용체 또는 탄화물 입자 형태로 분포되어 WC 입자 성장을 억제하고 입자 경계 강도를 약 5~10% 증가시키는 것으로 나타났습니다(Journal of Materials Science 2025).

도핑 원소는 코발트 상의 휘발성을 감소시키고 고온 안정성을 향상시킵니다(ITIA 2024).

#### 도핑된 입자 시멘트 카바이드의 적용:

고온 절삭 공구(예: 항공우주 엔진 소재 가공) 및 내식성 부품(예: 해상 밸브(ISO 513))

고온 합금( $250\text{m}/\text{min}$ )을 절단할 때 공구 수명은 2~3 시간에 달할 수 있습니다(중국비철금속학회지, 2024년).

#### 도핑된 입자 시멘트 카바이드의 제조:

TiC 또는 TaC (5%–10%) 를 도핑한 후 혼합한 재료를 성형하고, 소결 온도는  $1350\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ , 유지 시간은 0.5–1 시간입니다.

코발트상 산화를 방지하기 위해 소결 시 보호 분위기(예: Ar 가스)를 사용합니다(ITIA 2024).

## 7. 표준 및 테스트

ISO 513:2012: 시멘트 카바이드의 분류 및 응용 분야는 입자 크기와 특성을 기반으로 절삭 및 비절삭 응용 분야에 대한 분류에 대한 지침을 제공합니다.

GB/T 20707-2006: 초경합금의 미세구조 결정, 입자 크기 범위 및 시험 방법 정의.

ASTM E112-13: 입자 크기 측정 방법은 횡단면법이나 선형 절편법을 사용하여 오차  $<5\%$ 로 평균 입자 직경을 측정합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 4499-2:2020: 시멘트 카바이드의 미세구조 평가, 입자 분포 및 코발트 상 두께 조사.

ASTM G65-00(2010): 건조모래/고무 휠 마모 시험, 다양한 입자 크기를 갖는 시멘트 카바이드의 마모 저항성을 평가합니다.

검출 방법:

주사전자현미경(SEM)과 투과전자현미경(TEM)을 X선 회절(XRD)과 결합하면 오차 범위 5% 미만으로 입자 크기와 분포를 정확하게 측정할 수 있습니다(Journal of Materials Science 2025).

전자 후방 산란 회절(EBSD)은 결정립계 방향과 응력 분포를 분석하고 결정립계 방향 오차는  $\pm 2^\circ$  이내로 제어됩니다(중국 비철금속 저널, 2024).

레이저 입자 크기 분석기는 WC 분말 입자 크기 분포를 측정하여 분말 품질을 보장합니다(ITIA 2024).

## 8. 개발 동향

### 나노급 초경합금의 적용 확대:

2024년 중국의 나노급 초경합금 생산량은 전체의 15~20%를 차지했으며, 2025년에는 주로 전자 및 항공우주 분야의 수요 증가로 인해 25~30%에 도달할 것으로 예상됩니다(ITIA 2024).

나노스케일 초경합금이 미세가공(5G 회로기판 가공 등) 분야에서 차지하는 비중이 약 20% 증가하였고, 가공 정밀도는  $\pm 0.001\text{mm}$ 에 도달하였습니다("중국비철금속저널" 2024).

### 복합 입자 및 경사 구조 개발:

항공우주 분야(예: 터빈 블레이드 가공 공구)에서 경사 구조 초경합금의 적용 비율은 약 10~15% 증가했으며, 사용 수명은 약 20~30% 연장되었습니다(재료과학 저널 2025).

입자 분포를 최적화함으로써 복합 입자 시멘트 카바이드의 내마모성과 인성 균형이 약 15% 향상되어 다중 재료 가공에 적합합니다(ITIA 2024).

### 녹색 제조 기술의 촉진:

현장 지원 소결 기술(예: SPS)이 점점 더 인기를 얻고 있으며, 소결 시간이 2시간에서 10~20분으로 단축되고, 에너지 소비가 약 20~30% 감소하며, CO<sub>2</sub> 배출량이 약 25% 감소합니다(ITIA 2024).

재활용 기술의 발전으로 중국의 초경합금 재활용률은 2024년에 35~40%에 도달하고, 2025년에는 45%에 도달할 것으로 예상되며, 아연 용해 및 화학적 침출 방법을 통해 효율적인 재활용을 실현할 것입니다(ITIA 2024).

### 지능형 제조:

온라인 모니터링 기술(소결 분위기의 적외선 분광 모니터링 등)을 적용하여 입자

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

크기 제어를 실시하였고, 입자 크기 편차는  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  에서  $\pm 0.05 \mu\text{m}$  로 감소하였다 (중국 비철금속 저널 2024).

인공지능(AI)은 혼합 및 소결 매개변수를 최적화하여 균일성을 약 10~15% 향상시키고 결함률을 약 20% 감소시킵니다(ITIA 2024).

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



총수:

초경합금의 기공률/기공 크기의 유형, 메커니즘 및 최적화  
초경합금의 기공 유형, 메커니즘 및 최적화

## 1. 초경합금 및 기공의 개요

초경합금은 텅스텐 카바이드(WC)를 주요 경질상으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합재상으로 하는 복합 재료입니다. 분말야금 공정으로 제조되며, 높은 경도(HV1000 - 1800), 우수한 내마모성, 그리고 적절한 인성 ( $K_{1c}$  8 - 20 MPa·m) 을 갖습니다. 절삭 공구, 광산용 곡괭이, 내마모성 부품에 널리 사용됩니다. 기공률은 초경합금의 주요 결함으로, 재료 내부의 구멍이나 공극을 나타내며, 일반적으로 부피 분율(0.01~2%)로 표현됩니다. 기공률은 초경합금의 밀도(편차  $\pm 0.2$  g/cm<sup>3</sup>), 강도(10~30% 감소), 인성 및 내마모성(마모 손실 20~50 mm<sup>3</sup> 증가, ASTM G65)에 직접적인 영향을 미치며, 품질 관리의 핵심 지표입니다.

기공은 분말야금 공정의 원료, 성형 및 소결 단계에서 발생합니다. 국제 표준(예: ISO 4505 및 ASTM B276)은 기공을 A00~B08 과 같은 방식으로 분류하고 금속조직 분석과 같은 시험 방법을 명시합니다. 기공을 최적화하면 초경합금의 성능을 크게 향상시키고, 공구 수명을 20~50% 연장하며, 신뢰성을 향상시킬 수 있습니다. 다음은 기공의 유형, 형성 메커니즘, 최적화 전략 및 기술 개선 전망에 대한 자세한 분석입니다.

## 2. 다공성 유형

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

시멘트 카바이드의 기공률은 ISO 4505 및 ASTM B276 분류에 따라 크기, 형태 및 원산지에 따라 다음과 같은 유형으로 분류됩니다.

### 2.1 A형 기공(미세기공)

특징: 직경  $<10\ \mu\text{m}$ , 둥글거나 거의 둥글며 균일하게 분포되어 있습니다.

함량: 부피 분율 0.01 - 0.5%, 일반적으로 고밀도 시멘트 카바이드에서 발견됩니다(이론 밀도 99.5% 이상).

영향: 강도와 인성에 미치는 영향은 미미합니다(감소  $<5\%$ ). 하지만 함량이 높으면 미세 균열이 생길 수 있습니다.

표준: ISO 4505 A00 - A04(A00은 기공 없음, A04는 기공 0.2%).

### 2.2 B형 모공(더 큰 모공)

특성: 지름  $10\sim 25\ \mu\text{m}$ , 모양은 불규칙하며 대부분 타원형 또는 다각형입니다.

함량: 부피 분율 0.1~1%, 일반적으로 중밀도 및 저밀도 시멘트 카바이드에서 발견됩니다(이론 밀도 98~99%).

영향: 강도( $10\sim 20\%$ ) 및 인성 감소 ( $K_{1c}$ 가 15% 감소), 마모 증가(ASTM G65가  $20\sim 30\text{mm}^3$  증가)

표준: ISO 4505 B00 - B08 (B 08은 1% 다공성).

### 2.3 C형 기공(탄화물 결합 기공)

특성: 직경  $>25\ \mu\text{m}$ , 일반적으로 탄화물 입자(WC, TiC)의 응집 또는 탈락으로 형성되며 모양이 불규칙합니다.

함량: 부피 분율 0.05~0.5%, 주로 저품질 시멘트 카바이드에서 발견됨.

영향: 강도( $20\sim 30\%$ )와 내마모성(마모가  $30\sim 50\text{mm}^3$  증가)이 크게 감소하고, 파손 위험이 증가합니다.

표준: ASTM B276 C형 결합, 엄격한 관리가 요구됨.

### 2.4 가스 기공

특징: 직경  $10\sim 100\ \mu\text{m}$ , 둥글거나 구형이며, 소결 중 가스 포집을 통해 형성됩니다.

함량: 부피 기준으로 0.01~0.2%이며, 진공 소결이 충분하지 않은 재료에서 일반적으로 발견됩니다.

효과: 밀도 감소( $0.1 - 0.3\ \text{g/cm}^3$ ) 및 충격 저항성 감소(충격 인성 20% 감소)

표준: ISO 4505는 A/B 유형으로 분류되며, 금속학적 관찰을 통해 구분해야 합니다.

## 3. 기공 형성 메커니즘

기공 형성은 분말야금 공정의 원료, 성형 및 소결 과정과 밀접한 관련이 있습니다.

주요 기공 형성 메커니즘은 다음과 같습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.1 원자재 결합

메커니즘: 입자 불균일성: WC 또는 Co 분말은 넓은 입자 크기 분포(0.5 - 10  $\mu\text{m}$ )와 낮은 충전 밀도 (<60%)를 갖고 있어 A/B 형 기공을 형성합니다.

불순물 오염: 원료에 산소(O>0.1%), 황(S>0.02%) 또는 유기물이 휘발되어 소결 중 가스를 발생시키고 기공을 형성합니다.

탄소 함량 불균형: 탄소가 부족하면(C/W < 0.98) C형 기공을 동반한  $\eta$  상(W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C)이 침전되고, 탄소가 과도하면(C/W > 1.02) 유리탄소가 형성되어 B형 기공이 증가합니다.

영향: 기공률은 0.2~0.5% 증가하고, 밀도는 0.2g/cm<sup>3</sup> 감소하고, 강도는 10~15% 감소합니다.

### 3.2 성형 결합

메커니즘: 불균일한 가압: 불충분한 가압 압력(<200 MPa) 또는 금형 설계 결함으로 인해 그린 바디의 밀도가 불균일(편차  $\pm 5\%$ ) 되어 B형 기공이 형성됩니다.

윤활제 잔류물: 첨가제(파라핀 등)는 완전히 휘발되지 않고 소결 중에 가스로 분해되어 기공(직경 10~50  $\mu\text{m}$ )을 형성합니다.

영향: 기공률은 0.1~0.3% 증가하고, 인성은 10% 감소하며, 표면 품질이 저하됩니다.

### 3.3 소결 결합

메커니즘: 액상 소결이 불충분함: 소결 온도(1350~1450° C) 또는 시간(1~2 시간)이 불충분하고, Co 액상 흐름이 불충분하며, A/B 형 기공이 잔존함(0.1~0.5%).

가스 포집: 진공도가 낮거나(<10<sup>-2</sup> Pa) 소결 분위기에 산소/질소가 포함되어 있는 경우, 가스는 Co 액상에 캡슐화되어 기공을 형성합니다.

WC 응집: 고온에서 WC 입자는 비정상적으로 성장(>5  $\mu\text{m}$ )하거나 응집되어 C형 기공을 발생시키고 강도가 20% 감소합니다.

영향: 기공률은 0.2~1% 증가하고, 마모 저항성은 감소합니다(마모량은 20~40 mm<sup>3</sup> 증가, ASTM G65).

## 4. 다공성 최적화 방법

다공성을 최적화하려면 원료, 성형, 소결, 후가공의 전체 공정을 거쳐야 합니다. 주요 방법과 제조업체 사례는 다음과 같습니다.

### 4.1 원자재 최적화

방법: 입자 크기 제어: 나노/서브마이크론 WC 분말(입자 크기 0.2~0.8  $\mu\text{m}$ )을 사용하고, 충전 밀도를 높이고(>65%), A/B 형 기공을 0.1~0.2% 줄입니다.

고순도 원료: 산소 함량(<0.05%), 유황 함량(<0.01%)을 제어하고, 기공 형성을 줄이고, 기공률을 <0.1%로 낮춥니다.

정확한 탄소 비율: C/W는  $\eta$  상이나 유리 탄소를 피하고 C형 기공을 제거하기 위해

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0.98~1.02로 제어됩니다.

사례: 주저우 다이아몬드 YG6 등급은 나노 WC 분말( $0.4\mu\text{m}$ )을 사용하여 기공률을 A02(0.05%)로 낮추고 강도를 15% 증가시켰습니다.

#### 4.2 형성 최적화

방법: 고압 성형: 가압 압력을 증가( $300\sim 500\text{MPa}$ )시키면 그린바디 밀도가 70~75%에 도달하고 B형 기공률은 0.1~0.2% 감소합니다.

윤활제 최적화: 휘발성이 낮은 첨가제(예: 폴리에틸렌 글리콜)를 사용하고 첨가량을 조절(<1%)하여 기공 형성을 줄입니다.

균일한 다이 설계: 등방성 압축(CIP,  $200\sim 300\text{MPa}$ )을 사용하면 그린 바디 밀도 편차가 <2%이고, 다공성은 <0.1%로 감소합니다.

사례: Sandvik은 CIP 기술을 사용하여 YG8 그린 바디의 기공률을 A00(<0.01%)으로 줄이고 인성을 20% 향상시켰습니다.

#### 4.3 소결 최적화

방법: 진공/대기 소결: 진공 수준을 높이거나(< $10^{-3}\text{Pa}$ ) 수소/아르곤 분위기를 사용하여 기공을 줄입니다(기공률 감소 0.05 - 0.1%).

열간 등방성 소결(HIP): 소결 후  $150\sim 200\text{MPa}$ ,  $1300\sim 1400^\circ\text{C}$ 를 적용하여 A/B형 기공을 제거하고 기공률을 <0.02%로 낮추고 이론값의 99.9% 밀도를 달성합니다.

정밀한 온도 제어: 소결 온도는  $\pm 10^\circ\text{C}$  이내로 제어되고 시간은 2~3시간 연장되어 Co 액상의 흐름을 촉진하고 C형 기공을 줄입니다.

사례: Kennametal K313 인서트 HIP를 통과하고, 기공률이 A00으로 감소하고, 내마모성이 30% 증가했습니다(ASTM G65 마모 < $10\text{mm}^3$ ).

#### 4.4 후처리 최적화

방법: 표면 연삭/연마: 표면 기공 제거(깊이 <  $0.1\text{mm}$ ), 표면 경도 향상(HV 5% 증가), 내식성 향상(염수 분무 중량 감소 <  $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ ).

코팅 기술: TiN의 PVD/CVD 증착, TiAlN(두께  $2\sim 5\mu\text{m}$ )은 표면 기공을 덮고 마찰 계수를 <0.3으로 낮추며 서비스 수명을 2~3배 연장합니다.

사례: Ceratizit CTF 공구는 TiAlN으로 코팅되어 표면 다공성의 영향을 50% 줄이고 절삭 수명을 40% 연장합니다.

### 5. 기술 개선에 대한 전망

기공률을 더욱 줄이고 시멘트 카바이드 성능을 개선하기 위해 2026~2028년에 다음과 같은 기술적 개선이 산업적 적용을 촉진할 것으로 예상됩니다.

#### 초미립 나노파우더

70%의 충전 밀도를 가진 < $0.2\mu\text{m}$  WC/Co 분말을 개발하였고, 다공성은 <0.01%로

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

감소되었으며, 경도는 HV1800 으로 증가하여 고정밀 도구에 적합합니다.

### AI 최적화 프로세스

<sup>-4</sup> Pa) 머신 러닝을 통해 기공 제어 정확도가 50% 향상되어 C형 기공과 기공이 제거됩니다.

### 마이크로파 소결

마이크로파 가열(1350~1450° C)을 사용하여 소결 시간을 단축(<1 시간)하고, WC 응집을 줄이며, C형 기공률을 0.1% 감소시키고, 생산 효율을 30% 향상시켰습니다.

### 윤활제 없는 성형

윤활유 기공을 제거하고 본체 기공률을 <0.005%로 낮추는 건식 프레스링 기술을 개발하여 고급 절삭 공구에 적합합니다.

### 3D 프린팅 프리폼

금속 3D 프린팅 기술을 사용하여 블랭크 구조를 제어하고 밀도 편차를 1% 미만으로 줄였으며 기공률을 0.1%까지 줄여 복잡한 모양의 부품에 대한 요구 사항을 충족합니다.

### 나노코팅

미세한 기공(<5 μm)을 덮고 마찰 계수를 <0.2로 낮추며 공구 수명을 4 배 연장하는 <1 μm TiSiN 코팅을 개발했습니다.

### 레이저 표면 개질

표면을 레이저로 용융(깊이 0.05mm)시켜 표면 기공을 제거하고 경도를 10% 증가시키고 내식성을 30% 향상시켜 의료 및 항공 부품에 적합합니다.

### 플라즈마 연마

표면 마감(Ra<0.01 μm)을 개선하고, 표면 기공의 영향을 줄이며, 내식성을 30% 증가시켜 고신뢰성 응용 분야에 적합합니다 .

이러한 기술은 미세 구조와 공정 매개변수를 정밀하게 제어하여 A00 수준의 다공성(<0.01%)을 달성하고, 고정밀 절삭, 채굴 및 내마모성 부품에서 시멘트 카바이드의 성능 혁신을 촉진합니다.

## 6. 다공성 유형 및 최적화 측정 방법 비교

이 표는 ISO 4505 및 ASTM B276 표준에 근거하여 시멘트 카바이드 기공의 유형, 형성 메커니즘 및 최적화 방법을 비교합니다 .

모공 유형	특징 μm	다공성 비율%	형성 메커니즘	성능 영향	최적화 측정	일반적인 적용 효과
A형	직경 <10,	0.01 -	입자가	강도 감소	<5%, 나노 WC 분말(0.2~0.8	주저우 다이아몬드 YG6,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

모공	원형	0.5	밀집되어 있지 않고 액상소결이 불충분하다	미세균열 발생 위험	$\mu m$ ), HIP (150 MPa)	기공률 A02 로 감소, 강도 15% 증가
B형 모공	직경 10~25, 불규칙	0.1 - 1	불균일한 압착, 윤회제 잔류	$mm^3$ 마모 증가	고압 CIP (300 MPa), 진공소결 (<math>10^{-3}</math> Pa)	Sandvik YG8, 기공률 A00 으로 감소, 인성 20% 증가
C형 모공	직경 >25, WC 응집	0.05 - 0.5	탄소 불균형, WC 의 비정상적인 성장	$mm^3$ 마모 증가	정확한 C/W (0.98 - 1.02), 온도 제어 ( $\pm 10^\circ C$ )	Kennametal K313, 기공률 A00 으로 감소, 내마모성 30% 증가
모공	직경 10~100, 구형	0.01 - 0.2	가스 포집, 불순한 분위기	밀도는 0.1~0.3g/cm <sup>3</sup> 감소, 충격인성은 20% 감소	고순도 원료 (<math>O < 0.05\%</math>), 수소소결	Ceratizit CTF, 다공성 0.01% 미만으로 감소, 수명 40% 연장

예시:

특성: 기공의 크기, 모양, 분포를 설명합니다.

기공률: 금속조직 분석 (ISO 4505)을 기반으로 한 부피 분을 범위입니다.

성능 영향: 강도, 인성, 내마모성에 미치는 영향을 정량화합니다 (ASTM G65).

최적화 방안: 원인에 따라 원자재, 성형, 소결, 후처리 공정의 개선 방안을 제시합니다.

일반적인 적용 효과: 제조업체 사례 및 성능 개선 데이터 목록입니다.

## 7. 결론

초경합금의 기공은 성능에 영향을 미치는 주요 결함입니다. 기공은 A형(미세 기공), B형(대형 기공), C형(초경 결함 기공) 및 기공으로 구분되며, 각각 원료 결함, 불균일한 성형, 불충분한 소결로 인해 발생합니다. 기공은 강도(10~30%), 인성 및 내마모성을 저하시킵니다(마모량이 20~50  $mm^3$  증가). 원료(나노 WC, 고순도), 성형(고압 CIP), 소결(HIP, 진공) 및 후처리(코팅)를 최적화함으로써 기공률을 0.05% 미만으로 제어하여 성능을 크게 향상시킬 수 있습니다.

나노파우더, AI 최적화 공정, 마이크로파 소결, 나노 코팅과 같은 미래 기술 발전은 기공률을 0.01% 미만으로 줄이고, 경도를 HV1800으로 높이며, 공구 수명을 4배 연장할 것입니다. 이러한 기술은 고정밀 절삭, 채광 및 내마모성 부품에 초경 합금의 적용을 촉진할 것입니다. 제조업체는 A00 수준의 품질을 달성하기 위해 HIP 및 정밀 온도 제어 기술을 우선시하는 동시에, 복잡한 요구 사항을 충족하기 위해 3D 프린팅 예비 성형 및 무윤활 성형을 모색해야 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](http://www.ctia.com.cn)

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



참수:

GB/T 3488.1-2019  
초경합금 미세구조 평가  
1부: 다공성 및 비결합 탄소

## 1. 적용범위

본 표준은 시멘트 카바이드의 기공률 및 결합되지 않은 탄소에 대한 미시적 평가 방법을 규정하며, 다음 사항에 적용 가능합니다.

코발트(Co), 니켈(Ni) 또는 철(Fe) 바인더상을 함유하는 텅스텐 카바이드(WC) 기반 시멘트 카바이드에 티타늄 카바이드 (TiC), 탄탈륨 카바이드 (TaC), 니오븀 카바이드 (NbC)를 첨가할 수 있다.

소결, 열간 정수압 성형(HIP) 및 코팅 제품을 포함한 분말 야금 공정을 통해 생산된 시멘트 카바이드입니다.

절삭 공구, 광산용 곡괭이, 다이, 마모 부품 등에 적용됩니다.

WC 기반이 아닌 시멘트 카바이드나 분말 야금 재료에는 적합하지 않습니다.

## 2. 정의

경질탄화물: WC를 주요 경질상으로 하고 Co/Ni/Fe를 결합상으로 하는 복합재료.

다공성: 재료 내부의 기공이나 공기 틈새를 부피 비율로 표현한 것입니다.

비결합 탄소: 탄소 결핍으로 인해 발생하는 자유 탄소(C) 또는 η 상(W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C, W<sub>6</sub>Co<sub>6</sub>C).

금속학적 평가: 현미경으로 시료의 연마된 표면을 관찰하고 기공과 결합되지 않은 탄소의 분포와 함량을 계산합니다.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

### 3. 다공성 및 비결합 탄소의 분류

#### 3.1 다공성

##### A형 모공:

직경  $<10\ \mu\text{m}$ , 둥글거나 거의 둥글며 균일하게 분포되어 있습니다.  
출처: 입자가 밀집되어 있지 않고 액상소결이 불충분합니다.

##### B형 모공:

직경은  $10\sim 25\ \mu\text{m}$  이고 모양은 불규칙하다(예: 타원형, 다각형).

원인: 불균일한 압착 및 윤활제 잔류물의 증발.

기공: 직경  $10\sim 100\ \mu\text{m}$ , 둥글거나 구형입니다.

출처: 소결 중의 가스 포집(산소, 질소 또는 휘발성 물질).

#### 3.2 결합되지 않은 탄소와 $\eta$ 상

##### C형 결합(비결합 탄소) :

자유 탄소(C) 입자, 크기  $> 25\ \mu\text{m}$ , 검은색이며 불규칙합니다.

출처: 소결 중 과잉 탄소( $C/W>1.02$ ).

$\eta$  상: 카바이드-코발트 화합물( $W_3Co_3C$  또는  $W_6Co_6C$ ), 크기  $>25\ \mu\text{m}$ , 회백색.

출처: 소결 중 탄소 부족( $C/W<0.98$ ).

### 4. 평가 방법

기공률과 비결합 탄소는 부피 분율에 따라 A, B, C의 세 가지 등급으로 나뉘며, 각 등급은 00(결합 없음)에서 08(결합 함량 최고)까지입니다. 기공률은 별도로 등급이 매겨집니다.

#### 4.1 A형 모공

부피 분율: 0-0.2%, 직경  $<10\ \mu\text{m}$ .

등급:

A00: 눈에 보이는 기공 없음( $<0.01\%$ ).

A02: 0.02%.

A04: 0.05%.

A06: 0.1%.

A08: 0.2%.

평가: 제곱밀리미터당 기공 면적.

#### 4.2 B형 모공

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

부피 분율: 0 - 0.2%, 직경 10 - 25  $\mu\text{m}$ .

등급:

B00: 눈에 보이는 기공 없음 (<0.01%).

B02: 0.02%.

B04: 0.05%.

B 06 : 0.1%.

B08: 0.2%.

평가: 제곱밀리미터당 기공 면적.

#### 4.3 C형 결함(비결함 탄소/ $\eta$ 상)

부피 분율: 0 - 0.2%, 크기 >25  $\mu\text{m}$ .

등급:

C00: 결합되지 않은 탄소 또는  $\eta$ 상 없음 (<0.01%).

이산화탄소: 0.02%.

C04: 0.05%.

C06: 0.1%.

C08: 0.2%.

평가: 제곱 밀리미터당 결함 면적 비율, 자유 탄소(검정색)와  $\eta$ 상(회백색)을 구분합니다.

#### 4.4 모공

부피 분율: 0 - 0.2%, 직경 10 - 100  $\mu\text{m}$ .

등급:

G00: 눈에 보이는 기공 없음 (<0.01%).

G02: 0.02%.

G04: 0.05%.

G06: 0.1%.

G08: 0.2%.

평가: 제곱밀리미터당 기공 면적의 백분율.

#### 4.5 분류 요구 사항

부피 분율: 기공/결함 면적은  $\pm 0.01\%$ 의 정확도로 금속현미경으로 계산됩니다.

관찰 영역 : 최소 1  $\text{mm}^2$ , 5  $\text{mm}^2$  권장.

기공: 10~100  $\mu\text{m}$  구형 기공이 개별적으로 기록되었습니다.

### 5. 시험 방법

#### 5.1 샘플 준비

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

절단: 균열을 피하면서 샘플을 10×10mm 크기로 절단합니다.

장착: 샘플을 수지로 고정하는 것.

세련:

다이아몬드 사포(입자 크기 5~1 $\mu$ m)를 사용하여 단계적으로 연삭했습니다.

균형 없이 표면 거칠기 Ra<0.1 $\mu$ m로 연마합니다.

과도한 닦기로 모공을 손상시키지 않도록 주의하세요.

세척: 에탄올이나 초음파 세척을 통해 오염 물질을 제거합니다.

## 5.2 현미경 관찰

장비: 광학 현미경, 배율 100 - 1000 배, 분해능 <0.5  $\mu$ m .

광원: 명시야 조명, 대비를 조정하여 구별:

다공성: 검은색.

결합되지 않은 탄소: 검은색.

$\eta$  상: 회백색.

WC/Co 매트릭스: 흰색/회색.

관찰 영역 : 최소 5 개의 시야를 무작위로 선택합니다(전체 면적 > 1 mm<sup>2</sup> ) .

기록:

A형 기공: 기공 면적이 <10 $\mu$ m 인 경우를 센다.

B형 기공: 기공 면적이 10~25 $\mu$ m 인 경우를 센다 .

C형 결함: 자유 탄소와  $\eta$  상을 구별하고 결함 면적이 25 $\mu$ m 이상인 것을 기록합니다.  
100 $\mu$ m 인 구형 기공의 면적이 기록되었습니다.

## 5.3 데이터 분석

이미지 분석: 이미지 분석 소프트웨어를 사용하여 기공/결함 면적 비율을 계산합니다(정확도  $\pm$  0.01%).

수동 분석: 현미경 접안렌즈 그리드를 통해 모공/결함 영역을 계산하여 평가를 지원합니다.

등급: 등급은 A00 - A08, B00 - B08, C00 - C08, G00 - G08 에 따라 결정됩니다.

## 5.4 테스트 조건

다공성 오차: <0.01%.

C형 결함 오차 : <0.01%.

환경: 온도 20 $\pm$ 5 $^{\circ}$ C, 습도 <60%, 진동 없음.

작업자: 현미경 분석 교육이 필요합니다.

## 6. 승인 요건

### 6.1 절삭 공구

요구사항: A02/B00/C00/G00(기공률 <0.02%, B형 기공 없음, C형 결함 및 기공 없음).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 6.2 채굴 선택

요구사항: A04/B04/C00/G04(기공률 <0.1%, C형 결함 없음, 미세 기공).

## 6.3 고풜이

요구사항: A04/B04/C00/G04(기공률 <0.1%, C형 결함 없음, 미세 기공).

## 6.4 내마모성 부품

요구 사항: A06/B06/C02/G06(기공률 <0.2%, 혼적량의 자유 탄소 및 기공).

## 7. 표준의 주요 사항 요약

강요	함량 $\mu\text{m}$	분류	등급	시험 방법	수량 요구 사항
다공성	A형 (<10), B형 (10-25), 기공형 (10-10)	A형, B형, 모공	A00~A08 (0~0.2%), B00~B08 (0~0.2%), G00~G08 (0~0.2%)	금속현미경 (100~1000 배), 이미지 분석 (정확도 $\pm 0.01\%$ )	도구: A02/B00/G00; 픽/몰드: A04/B04/G04
결합되지 않은 탄소/η상	C형 자유 탄소 또는 η상, >25	C형	C00 - C08 (0 - 0.2%)	금속학적 관찰, 자유탄소/흑색과 η상/회백색 구별	공구/픽/다이: C00; 내마모성 부품: C02
테스트 요구 사항	연마된 샘플 ( $R_a < 0.1$ ), 관찰 영역 >1 $\text{mm}^2$	A/B/C형, 공기구멍	부피 분율	현미경 분해능 <0.5 $\mu\text{m}$ , 환경 $20 \pm 5^\circ \text{C}$	다공성/C형 결함 오차 <0.01%

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## CTIA GROUP LTD 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

총수:

## ASTM B276-05 (2021) 초경합금의 기공률 시험 방법

### 1. 적용범위

이 표준은 시멘트 카바이드의 기공률 및 미세 결합에 대한 시험 방법을 명시하며 다음 사항에 적용됩니다.

코발트(Co), 니켈(Ni) 또는 철(Fe) 바인더상을 함유하는 텅스텐 카바이드(WC) 기반 시멘트 카바이드에 티타늄 카바이드 (TiC), 탄탈륨 카바이드 (TaC), 니오븀 카바이드 (NbC)를 첨가할 수 있다.

소결, 열간 정수압 성형(HIP) 및 코팅 제품을 포함한 분말 야금 공정을 통해 생산된 시멘트 카바이드입니다.

철삭 공구, 광산용 곡괭이, 다이, 마모 부품 등에 적용됩니다.

WC 기반이 아닌 시멘트 카바이드나 분말 야금 재료에는 적합하지 않습니다.

### 2. 정의

경질탄화물: WC를 주요 경질상으로 하고 Co/Ni/Fe를 결합상으로 하는 복합재료.

다공성: 재료 내부의 구멍이나 공기 틈새로, 단위 면적당 기공의 부피 분율이나 수로 표현됩니다.

미세 결합: 기공, 결합되지 않은 탄소 또는  $\eta$  상(W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C, W<sub>6</sub>Co<sub>6</sub>C).

금속조직 분석: 현미경으로 시료의 연마된 표면을 관찰하고 기공과 결합의 분포와 함량을 측정합니다.

밀도 측정: 다공성은 아르키메데스 방법을 사용하여 샘플의 밀도를 측정하여 간접적으로 추정되었습니다.

### 3. 기공 및 미세 결합의 분류

#### 3.1 다공성

##### A형 모공:

직경 <10  $\mu\text{m}$ , 둥글거나 거의 둥글며 균일하게 분포되어 있습니다.

출처: 입자가 밀집되어 있지 않고 액상소결이 불충분합니다.

##### B형 모공:

직경은 10~25  $\mu\text{m}$  이고 모양은 불규칙하다(예: 타원형, 다각형).

출처: 윤활제 잔류물의 불균일한 압착 및 증발.

##### 모공:

직경 10~100  $\mu\text{m}$ , 둥글거나 구형입니다.

출처: 소결 중의 가스 포집(산소, 질소 또는 휘발성 물질).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.2 미세 결합

#### C형 결합(비결합 탄소/η 상):

비결합 탄소: 자유 탄소(C) 입자, 크기 > 25 μm, 검은색이며 모양이 불규칙하며, 과잉 탄소에서 유래(C/W > 1.02).

η 상: 카바이드-코발트 화합물(W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C 또는 W<sub>6</sub>Co<sub>6</sub>C), 크기 > 25 μm, 회백색, 탄소 결핍 (C/W < 0.98)에서 유래.

### 4. 평가 방법

다공성과 미세 결합은 부피 분율 또는 단위 면적당 기공 수에 따라 A, B, C의 세 가지 범주로 나뉘며, 각 범주는 1(가장 낮은 결합 함량)에서 5(가장 높은 결합 함량)까지입니다.

#### 4.1 A형 모공

부피 분율: 0 - 0.5%, 직경 < 10 μm.

등급:

A1: 부피 분율 < 0.01% 또는 < 5 기공/mm<sup>2</sup>.

A2: 부피 분율 0.01 - 0.05% 또는 5 - 10 기공/mm<sup>2</sup>.

A3: 부피 분율 0.05 - 0.1% 또는 10 - 20 기공/mm<sup>2</sup>.

A4: 부피 분율 0.1 - 0.3% 또는 20 - 50 기공/mm<sup>2</sup>.

A5: 부피 분율 0.3 - 0.5% 또는 > 50 개 기공/mm<sup>2</sup>.

평가: 제곱밀리미터당 기공 수(< 10 μm) 또는 면적 백분율.

#### 4.2 B형 모공

부피 분율: 0 - 1%, 직경 10 - 25 μm.

등급:

B1: 부피 분율 < 0.01% 또는 < 2 기공/mm<sup>2</sup>.

B2: 부피 분율 0.01 - 0.1% 또는 2 - 5 기공/mm<sup>2</sup>.

B3: 부피 분율 0.1 - 0.3% 또는 5 - 10 기공/mm<sup>2</sup>.

B4: 부피 분율 0.3 - 0.6% 또는 10 - 20 기공/mm<sup>2</sup>.

B5: 부피 분율 0.6 - 1.0% 또는 > 20 기공/mm<sup>2</sup>.

μm) 기공 수 또는 면적 백분율.

#### 4.3 C형 결합(비결합 탄소/η 상)

부피 분율: 0 - 0.5%, 크기 > 25 μm.

등급:

C1: 부피 분율 < 0.01% 또는 눈에 띄는 결합 없음.

C2: 부피 분율 0.01 - 0.05% 또는 < 1 결합/mm<sup>2</sup>.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C3: 부피 분율 0.05 - 0.1% 또는 1 - 2 결함/mm<sup>2</sup> .

C4: 부피 분율 0.1 - 0.3% 또는 2 - 5 결함/mm<sup>2</sup> .

C5: 부피 분율 0.3 - 0.5% 또는 결함 >5 개/mm<sup>2</sup> .

평가: 제품 밀리미터당 결함 면적 비율, 자유 탄소(검정색)와 η 상(회백색)을 구분합니다.

#### 4.4 분류 요구 사항

부피 분율: 기공/결함 면적은 ±0.01%의 정확도로 금속현미경으로 계산됩니다.

관찰 영역 : 최소 1 mm<sup>2</sup> , 5 mm<sup>2</sup> 권장.

기공: 10~ 100 μm 의 구형 기공이 개별적으로 기록되어 A/B 형으로 분류되었습니다.

### 5. 시험 방법

#### 5.1 금속조직 분석

##### 5.1.1 샘플 준비

절단: 균열을 피하면서 샘플을 10×10mm 크기로 절단합니다.

장착: 샘플을 수지로 고정하는 것.

세련:

다이아몬드 사포(입자 크기 5~ 1 μm )를 사용하여 단계적으로 연삭했습니다.

표면 거칠기 Ra<0.05 μm 로 연마하여 굽힘이 발생하지 않도록 합니다.

과도한 닦기로 모공을 손상시키지 않도록 주의하세요.

세척: 에탄올이나 초음파 세척을 통해 오염 물질을 제거합니다.

##### 5.1.2 현미경 관찰

장비: 광학 현미경 또는 주사 전자 현미경(SEM), 배율 200~1500 배, 분해능 < 0.5 μm .

광원: 명시야 조명, 대비를 조정하여 구별:

다공성: 검은색.

결합되지 않은 탄소: 검은색.

η 상: 회백색.

WC/Co 매트릭스: 흰색/회색.

관찰 영역 : 최소 5 개의 시야를 무작위로 선택합니다(전체 면적 > 1 mm<sup>2</sup> ) .

기록:

A 형 기공: 기공의 개수 또는 면적이 10 μm 미만인 경우를 센다.

25 μm 인 기공의 수 또는 면적을 세어 보세요 .

C 형 결함: 자유 탄소와 η 상을 구별하고 결함 면적이 25 μm 이상인 것을 기록합니다.

##### 5.1.3 데이터 분석

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

수동 분석: 현미경 접안렌즈 격자를 통해 기공/결함의 수를 세고 부피 분율 또는 개수/단위 면적을 계산합니다.

이미지 분석: 이미지 분석 소프트웨어를 사용하여 기공/결함 면적 비율을 계산합니다(정확도  $\pm 0.01\%$ ).

등급: 등급은 A1 - A5, B1 - B5, C1 - C5 를 기준으로 결정됩니다.

## 5.2 밀도 측정

원리: 아르키메데스 방법은 샘플 밀도를 측정하고 이를 이론 밀도(WC-Co의 경우  $12 \sim 15.6 \text{ g/cm}^3$ )와 비교하여 다공성을 추정합니다.

단계:

샘플의 건조 중량(정확도  $\pm 0.001\text{g}$ )과 물 속의 중량을 측정합니다.

밀도 = 건조 중량 / ( 건조 중량 - 물 속 중량)  $\times$  액체 밀도.

다공성 = (이론적 밀도 - 측정된 밀도) / 이론 밀도  $\times 100\%$ .

요구 사항: 정확도:  $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ , 측정을 3 번 반복하고 평균값을 취합니다.

## 5.3 테스트 조건

다공성 오차:  $< 0.02\%$ .

C형 결함 오차:  $< 0.01\%$ .

환경: 온도  $23 \pm 2^\circ \text{C}$ , 습도  $< 60\%$ , 진동 없음.

작업자: 금속조직 분석이나 밀도 측정 교육이 필요합니다.

## 6. 승인 요건

### 6.1 항공 절삭 공구

요구사항: A1/B1/C1(기공률  $< 0.01\%$ , 중대한 결함 없음).

### 6.2 채굴 선택

요구사항: A3/B3/C1(기공률  $< 0.2\%$ , C형 결함 없음).

### 6.3 내마모성 부품

요구사항: A4/B4/C2(기공률  $< 0.6\%$ , 미량의 자유탄소).

### 6.4 군사 부품

요구사항: A1/B1/C1(기공률  $< 0.01\%$ , 중대한 결함 없음).

## 7. 표준의 주요 사항 요약

강요	콘텐츠	분류	등급	시험 방법	수락 사항	요구
----	-----	----	----	-------	-------	----

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

다공성	A 형 (<10 μm), B 형 (10 - 25 μm), 기공형 (10 - 100 μm)	A 형 B 형	A1~A5 (0~0.5%), B1~B5 (0~1.0%)	금속현미경 (200~1500 배), 이미지 분석 정확도 ±0.01%; 밀도 측정 ±0.01 g/cm <sup>3</sup>	항공 도구: A1/B1; 선택: A3/B3
미세한 결함	C 형 (비결함 탄소 또는 η 상, >25 μm)	C 형	C1~C5 (0~0.5%)	금속학적 관찰, 자유탄소(검은색)와 η 상(회백색)을 구분	항공/군사: C1; 내마모성 부품: C2
테스트 요구 사항	연마된 샘플 (Ra<0.05 μm), 관찰 영역 >1 mm <sup>2</sup>	A/B/C 형	단위 면적당 기공의 부피 분율 또는 수	현미경 분해능 <0.5 μm, 환경 23±2° C	기공률 오차 <0.02%, C 형 결함 오차 <0.01%

en.com

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](http://www.ctia.com.cn)

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

총수:

ISO 4505:1978

## 시멘트 카바이드의 기공률 및 비결합 탄소의 미시적 평가

### 1. 적용범위

본 표준은 시멘트 카바이드의 기공률 및 결합되지 않은 탄소에 대한 미시적 평가 방법을 규정하며, 다음 사항에 적용 가능합니다.

코발트(Co), 니켈(Ni) 또는 철(Fe) 바인더상을 함유하는 텅스텐 카바이드(WC) 기반 시멘트 카바이드에 티타늄 카바이드 (TiC), 탄탈륨 카바이드 (TaC), 니오븀 카바이드 (NbC)를 첨가할 수 있다.

소결, 열간 정수압 성형(HIP) 및 코팅 제품을 포함한 분말 야금 공정을 통해 생산된 시멘트 카바이드입니다.

절삭 공구, 광산용 곡괭이, 다이, 마모 부품 등에 적용됩니다.

WC 기반이 아닌 시멘트 카바이드나 분말 야금 재료에는 적합하지 않습니다.

### 2. 정의

경질탄화물: WC를 주요 경질상으로 하고 Co/Ni/Fe를 결합상으로 하는 복합재료.

다공성: 재료 내부의 기공이나 공기 틈새를 부피 비율로 표현한 것입니다.

비결합 탄소: 탄소 결핍으로 인해 발생하는 자유 탄소(C) 또는 η상(W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C, W<sub>6</sub>Co<sub>6</sub>C).

금속학적 평가: 현미경으로 시료의 연마된 표면을 관찰하고 기공과 결합되지 않은 탄소의 분포와 함량을 계산합니다.

### 3. 다공성 및 비결합 탄소의 분류

#### 3.1 다공성

##### A형 모공:

직경 <10 μm, 둥글거나 거의 둥글며 균일하게 분포되어 있습니다.

출처: 입자가 밀집되어 있지 않고 액상소결이 불충분합니다.

##### B형 모공:

직경은 10~25 μm 이고 모양은 불규칙하다(예: 타원형, 다각형).

원인: 윤활제 잔류물의 불균일한 압착 및 증발.

##### 모공:

직경 10~100 μm, 둥글거나 구형이며 A/B형으로 분류됩니다.

출처: 소결 중의 가스 포집(산소, 질소 또는 휘발성 물질).

#### 3.2 결합되지 않은 탄소와 η상

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### C형 결함(결합되지 않은 탄소):

자유 탄소(C) 입자, 크기 > 25  $\mu\text{m}$ , 검은색이며 불규칙함.

출처: 소결 중 과잉 탄소(C/W>1.02).

#### $\eta$ 단계:

탄화물 - 코발트 화합물(W<sub>3</sub>Co<sub>3</sub>C 또는 W<sub>6</sub>Co<sub>6</sub>C), 크기 > 25  $\mu\text{m}$ , 흰색.

출처: 소결 중 탄소 부족(C/W<0.98).

### 4. 평가 방법

다공성과 비결합 탄소는 부피 분율 또는 다공성 수에 따라 등급이 매겨지며 A, B, C의 세 가지 범주로 분류됩니다. 각 범주는 00(결함 없음)에서 08(결함 함량이 가장 높음)까지입니다.

#### 4.1 A형 모공

부피 분율: 0 - 0.2%, 직경 <10  $\mu\text{m}$ .

등급:

A00: 눈에 보이는 기공 없음(<0.01%).

A02: 0.02%.

A04: 0.05%.

A06: 0.1%.

A08: 0.2%.

평가: 제곱밀리미터당 기공 수(<10  $\mu\text{m}$ ) 또는 면적 백분율.

#### 4.2 B형 모공

부피 분율: 0 - 0.2%, 직경 10 - 25  $\mu\text{m}$ .

등급:

B00: 눈에 보이는 기공 없음(<0.01%).

B02: 0.02%.

B04: 0.05%.

B06: 0.1%.

B08: 0.2%.

$\mu\text{m}$ ) 기공 수 또는 면적 백분율.

#### 4.3 C형 결함(비결합 탄소/ $\eta$ 상)

부피 분율: 0 - 0.2%, 크기 >25  $\mu\text{m}$ .

등급:

C00: 결합되지 않은 탄소 또는  $\eta$  상 없음(<0.01%).

이산화탄소: 0.02%.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C04: 0.05%.

C06: 0.1%.

C08: 0.2%.

평가: 제품 밀리미터당 결함 면적 비율, 자유 탄소(검정색)와  $\eta$  상(회백색)을 구분합니다.

#### 4.4 등급 요구 사항

부피 분율: 기공/결함 면적은  $\pm 0.01\%$ 의 정확도로 금속현미경으로 계산됩니다.

관찰 영역 : 최소  $1 \text{ mm}^2$  ,  $5 \text{ mm}^2$  권장.

기공: A/B 유형으로 계산되었으며,  $10 \sim 100 \mu\text{m}$  크기의 구형 기공은 별도로 기록되었습니다.

### 5. 시험 방법

#### 5.1 샘플 준비

절단: 균열을 피하면서 샘플을  $10 \times 10 \text{ mm}$  크기로 절단합니다.

장착: 샘플을 수지로 고정하는 것.

세련:

다이아몬드 사포(입자 크기  $5 \sim 1 \mu\text{m}$ )를 사용하여 단계적으로 연삭했습니다.

균힘 없이 표면 거칠기  $Ra < 0.1 \mu\text{m}$ 로 연마합니다.

과도한 닦기로 모공을 손상시키지 않도록 주의하세요.

세척: 에탄올이나 초음파 세척을 통해 오염 물질을 제거합니다.

#### 5.2 현미경 관찰

장비: 광학 현미경, 배율 100 - 1000 배, 분해능  $< 0.5 \mu\text{m}$ .

광원: 명시야 조명, 대비를 조정하여 구별:

다공성: 검은색.

결합되지 않은 탄소: 검은색.

$\eta$  상: 회백색.

WC/Co 매트릭스: 흰색/회색.

관찰 영역 : 최소 5 개의 시야를 무작위로 선택합니다(전체 면적  $> 1 \text{ mm}^2$ ).

기록:

A형 기공: 기공의 개수 또는 면적이  $10 \mu\text{m}$  미만인 경우를 센다.

$25 \mu\text{m}$  인 기공의 수 또는 면적을 세어 보세요.

C형 결함: 자유 탄소와  $\eta$  상을 구별하고 결함 면적이  $25 \mu\text{m}$  이상인 것을 기록합니다.

#### 5.3 데이터 분석

수동 분석: 현미경 접안렌즈 그리드를 통해 기공/결함의 수를 세고 부피 분율을 계산합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

이미지 분석: 이미지 분석 소프트웨어를 사용하여 기공/결함 면적 비율을 계산합니다(정확도 ± 0.01%).

등급: 등급은 A00 - A08, B00 - B08, C00 - C08 을 기준으로 결정됩니다.

#### 5.4 테스트 조건

다공성 오차: <0.02%.

C형 결함 오차 : <0.01%.

환경: 온도 20±5° C, 습도 <60%, 진동 없음.

작업자: 현미경 분석 교육이 필요합니다.

### 6. 승인 요건

#### 6.1 절삭 공구

요구사항: A02/B00/C00(기공률 <0.02%, B형 기공 및 C형 결함 없음).

#### 6.2 채굴 선택

요구사항: A04/B04/C00(기공률 <0.1%, C형 결함 없음).

#### 6.3 내마모성 부품

요구 사항: A06/B06/C02(기공률 <0.2%, 미량의 자유 탄소).

#### 6.4 의료용 칼

요구사항: A00/B00/C00(기공률 <0.01%, 결함 없음).

### 7. 표준의 주요 사항 요약

강요	함량 ( μm )	분류	등급	시험 방법	수락 요구 사항
다공성	A형 (<10), B형 (10 - 25), 기공형 (10 - 100)	A형 B형	A00~A08 (0~0.2%), B00~B08 (0~0.2%)	금속현미경 (100~1000 배), 이미지 분석 (정확도 ±0.01%)	공구: A02/B00; 편: A04/B04; 의료: A00/B00
결합되지 않은 탄소/η상	C형(자유탄소 또는 η상, >25)	C형	C00 - C08 (0 - 0.2%)	금속학적 자유탄소(검은색)와 η상(회백색)을 구분	관찰, 공구/절삭 이빨: C00; 마모 부품: C02
테스트 요구 사항	연마된 샘플(Ra<0.1), 관찰 영역 >1 mm²	A/B/C형	단위 면적당 기공의 부피 분율 또는 수	현미경 분해능 <0.5 μm, 환경 20±5° C	기공률 오차 <0.02%, C형 결함 오차 <0.01%

#### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

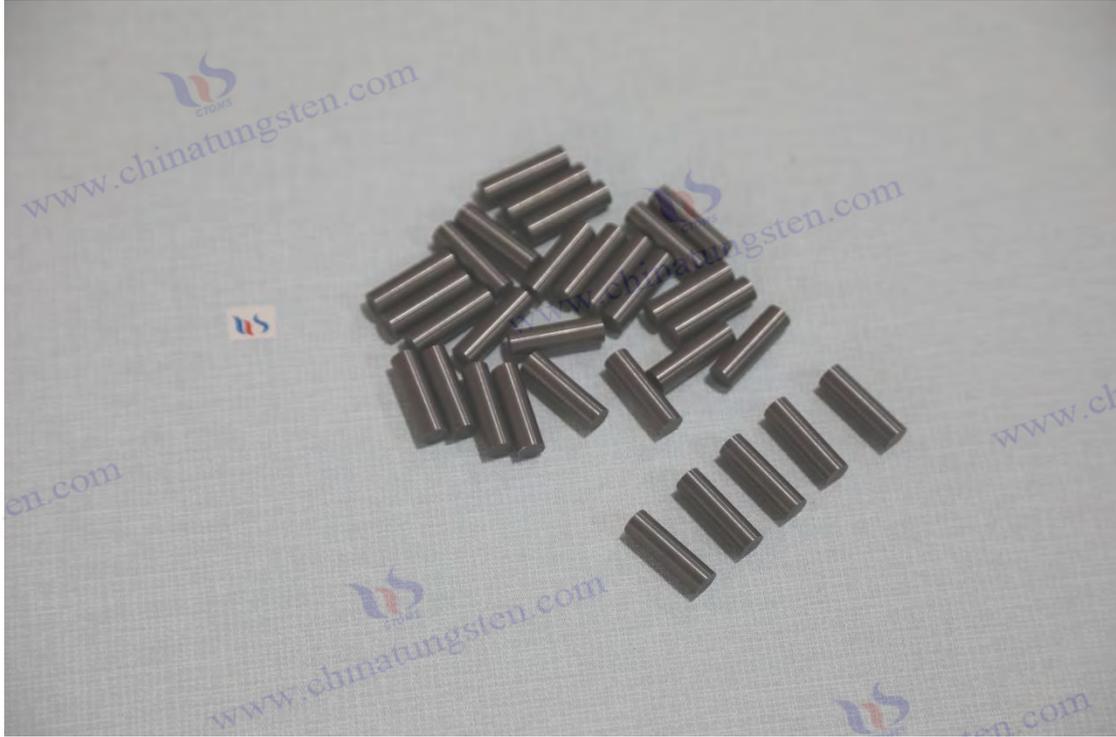
**WeChat :** Follow "China Tungsten Online"



### 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](http://www.ctia.com.cn)

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



총수:

초경합금 보조탄화물 ( TiC , TaC ) 의 효과 및 비교 엔비씨 )

## 1. 초경합금 및 보조초경의 개요

초경합금은 텅스텐 카바이드(WC)를 주경질상으로 하고 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합제로 하는 복합 소재입니다. 분말야금 공정으로 제조되며, 높은 경도(HV1000~1800)와 우수한 내마모성을 가지고 있습니다. 절삭 공구, 광산용 곡괭이, 내마모성 부품 등에 널리 사용됩니다. 초경합금의 성능을 최적화 하기 위해 티타늄 카바이드 ( TiC ), 탄탈륨 카바이드 ( TaC ), 니오븀 카바이드 ( NbC ) 와 같은 보조 탄화물을 첨가하는 경우가 많으며 , 그 함량은 일반적으로 5~20%(질량 분율)입니다. 이러한 보조 탄화물은 경도, 내마모성, 적색 경도, 내산화성을 향상시켜 초경합금의 적용 범위를 넓혀줍니다.

보조 탄화물의 역할은 물리적 및 화학적 특성(경도, 녹는점, 결정 구조 등)과 WC 및 결합제 상과의 상승 효과에 따라 달라집니다. TiC , TaC 와 NbC 는 모두 높은 경도(HV2000-3000)를 가진 입방정계 탄화물이며, WC(육방정계, HV1500-2000 )보다 열안정성이 우수합니다. 이들은 고용체 또는 입자 강화 메커니즘을 통해 초경합금의 성능을 향상시킵니다. 다음은 각 보조 탄화물의 역할에 대한 자세한 분석과 표를 통한 특성 비교입니다.

## 2. 보조탄화물의 역할

### 2.1 탄화티타늄 ( TiC )

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 보조탄화물의 역할

### 경도 향상

TiC 는 WC 보다 경도가 높습니다(HV2800~3200). TiC 를 5~15% 첨가하면 초경합금의 경도가 HV1400~1600 으로 증가하여 고경도 소재(예: 경화강, HV600~800) 가공에 적합합니다.

### 향상된 내마모성

TiC 입자(1~5 $\mu$ m)는 작고 균일하여 마모를 줄이고(ASTM G65 테스트에서 10~20mm<sup>3</sup>) 공구 수명을 연장합니다.

### 향상된 산화 특성

TiC 는 고온(>800° C)에서 TiO<sub>2</sub> 보호층을 형성하여 산화 마모를 지연시키고 고속 절삭에 적합합니다.

밀도 감소: TiC 밀도(4.9 g/cm<sup>3</sup>) 는 WC(15.6 g/cm<sup>3</sup>) 보다 훨씬 낮아 시멘트 카바이드의 무게를 10~15% 줄여 경량 항공우주 부품에 적합합니다.

## 보조 탄화물의 한계

인성 감소: TiC 첨가량이 15% 이상일 경우 파괴인성 ( $K_{1c}$ ) 이 8~10MPa·m 로 떨어집니다.  $\sqrt{1/2}$ 로 인해 취성 파괴가 발생하기 쉽습니다.

높은 비용: TiC 가격은 WC 보다 높아 생산 비용이 증가합니다.

응용 분야: TiC 는 일반적으로 고속 절삭 공구(예: Kennametal K313), 내마모성 코팅 및 항공우주 부품에 사용됩니다.

## 2.2 탄탈륨 카바이드 ( TaC )

### ( TaC ) 의 역할

적색 경도 향상: TaC 는 WC(2870° C)보다 녹는점(3880° C)이 높습니다. TaC 를 3~10% 첨가하면 초경합금의 경도를 1000° C(HV1200~1400)로 유지할 수 있어 고온 가공(예: 스테인리스강 및 니켈 기반 합금)에 적합합니다.

향상된 열충격 저항성: TaC 는 열팽창 계수(6.3×10<sup>-6</sup> /K 대비 WC 5.2×10<sup>-6</sup> /K)를 낮추고, 열 균열을 줄이며, 간헐적 절삭에 적합합니다.

향상된 접착 방지 효과: TaC 는 표면 에너지가 낮아 절삭 중 공작물 재료의 접착을 줄이고, 마찰 계수(0.2~0.3)를 낮추고 표면 품질을 개선합니다.

### ( TaC ) 의 한계

비용이 많이 듭니다. TaC 는 WC 와 TiC 보다 훨씬 비싸서 대규모 적용에 제한이 있습니다.

경도 증가 제한: TaC 경도(HV1800-2000)는 TiC 보다 낮 으며 경도 증가 폭이 작습니다(약 5-10%).

응용 분야: TaC 는 주로 고급 절삭 공구(예: Sandvik PVD 코팅 인서트), 항공 터빈 블레이드 가공 및 열간 단조에 사용됩니다.

## 2.3 니오븀 카바이드 ( NbC )

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### ( NbC ) 의 역할

입자 미세화: NbC (입자 크기 0.5~2 μm)는 WC 입자 성장을 억제(1~3 μm 에서 제어)하고, 초경합금의 강도(인장 강도 10~15% 증가)와 인성 (K<sub>1c</sub> 가 12~15MPa·m 로 증가)을 향상시킵니다. ( 1/2)).

향상된 내식성: NbC 는 산성 환경 (pH 2~4)에서 Nb2O5 보호층을 형성하며, 소금 분무 중량 감소는 <0.1 mg/cm<sup>2</sup>로 화학 장비 및 해양 엔지니어링에 적합합니다.

향상된 연마 마모 저항성: NbC 는 WC 와 고용체를 형성하여 상 경계의 강도를 높이고 마모 손실을 15~25mm<sup>3</sup> 만큼 감소시킵니다 (ASTM G65).

### ( NbC ) 의 한계

적색 경도가 부족함: NbC 는 높은 녹는점 (3600° C)을 가지고 있지만, 900° C 이상에서 산화가 가속화되어 고온 응용 분야에 제한이 있습니다.

부족한 자원: 니오븀 광석 매장량은 제한적이며(전 세계적으로 약 430 만 톤, 브라질에 70%) 가격이 변동합니다.

용도: NbC 는 일반적으로 광산 곡괭이, 내마모성 부품 및 내식성 금형(예: 주저우 다이아몬드 YN8 등급)에 사용됩니다.

## 2.4 시너지

### 조합 추가

티씨 , TaC 와 NbC 는 경도, 내마모성, 그리고 적색 경도를 시너지 효과로 향상시키기 위해 종종 조합하여 사용됩니다(예: TiC 5% + TaC 3% + NbC 2%). 예를 들어, Sandvik GC2030 인서트에는 TiC-TaC-NbC 복합재 가 첨가되어 경도가 HV1500 이고 수명이 30% 연장됩니다.

### 고용체 강화

티씨 , 타씨 , NbC 와 WC 는 ( W , Ti , Ta , Nb )C 고용체를 형성하고, 격자 변형으로 경도와 변형 저항성이 향상됩니다(항복 강도가 20% 증가).

### 그래디언트 구조

TiC / TaC / NbC 의 분포를 제어함으로써 , 표면경도가 높고, 중간에 인성이 높은 경사 초경합금이 형성되어, 내충격성이 25% 향상됩니다.

## 3. 보조탄화물의 성능 비교

다음 표는 TiC 의 성능과 적용을 비교합니다 . ASTM G65 및 ISO 513 과 같은 표준 테스트 데이터를 기반으로 한 시멘트 카바이드의 TaC 및 NbC :

보조 카바이드	경도 HV	녹는점 (° C)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	인성 (K <sub>1c</sub> , MPa·m <sup>1/2</sup> )	내마모성 (ASTM G65, mm <sup>3</sup> )	적색 경도 (° C)	부식 저항성(염수 분무 중량)	비용 (USD/kg)	일반적인 응용 프로그램

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

							감소, mg/cm <sup>2</sup> )		
안면 경련	2800 - 3200	3160	4.9	8~10 세	10~20 세	≤900	0.2 - 0.3	30~50 세	고속 절삭 공구, 항공 부품
티씨	1800 년~2000 년	3880	14.3	10~12 세	15 - 25	≤1000	0.1 - 0.2	100~150	고온 도구, 열간 단조
아니요	2000 년 - 2400 년	3600	7.8	12 - 15	15 - 25	≤900	<0.1	50~80 세	광산용 콤팩트, 부식 방지 금형

예시:

성능 매개변수: 경도(비커스 경도 HV), 인성(파괴 인성 K<sub>1c</sub>), 내마모성(ASTM G65 마모 손실), 적색 경도(고온 경도 유지 온도), 내식성(염수 분무 시험 중량 감소). TiC의 특성을 기반으로, TaC와 NbC는 주요 산업 시나리오를 나열합니다.  
데이터 출처: Sandvik, Kennametal, Zhuzhou Diamond Technology 백서, ASTM G65, ISO 513 시험 표준 참조.

#### 4. 보조 탄화물의 장점, 단점 및 선택 원칙

##### 4.1 장점과 단점 요약

###### 안면 경련

장점: 경도가 가장 높고, 밀도가 가장 낮으며, 가볍고 고속 절단에 적합하며, 산화 저항성이 우수합니다.

단점: 인성이 낮고, WC보다 비용이 많이 들고, 첨가물이 많아 취성 파괴가 일어나기 쉽다.

###### 티씨

장점: 적색경도가 우수하고, 열충격 및 접촉에 대한 저항성이 강하며, 고온 및 간헐적 절단에 적합합니다.

단점: 비용이 많이 들고, 경도 증가가 제한적이며, 비용 때문에 적용이 제한됩니다.

###### 아니요

장점: 정제된 입자, 최적의 내식성, 우수한 인성 및 연마 마모에 대한 저항성.

단점: 적색 경도가 부족하고, 니오븀 자원이 부족하며, 가격 변동이 크다.

##### 4.2 선택 원칙

고속 절단(항공용 알루미늄 합금, 경화강 등)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TiC 는 경도와 내산화성을 향상시키는 데 가장 적합한 소재입니다. 일반적인 등급으로는 K313 ( TiC 10%)이 있습니다.

#### 고온 가공(니켈 기반 합금, 열간 단조 등)

적색 경도와 내열충격성을 최적화하려면 TaC 를 선택하세요 . 일반적인 등급으로는 GC2030 ( TaC 5%)이 있습니다.

#### 광산 또는 부식 방지 환경(예: 화학 금형)

NbC 는 인성과 내식성을 향상시키는 데 선호됩니다. 일반적인 등급으로는 YN8 ( NbC 3%)이 있습니다.

#### 종합적인 성과

TiC-TaC-NbC 의 조합은 경도, 인성, 적색 경도의 균형을 이루며, 일반적으로 고급 도구와 내마모성 부품에 사용됩니다.

#### 비용에 민감한 시나리오

TaC 와 NbC 의 첨가량을 조절 (<5%)하고 TiC 에 집중 하여 비용을 10-20% 절감합니다.

## 5. 시장 및 미래 동향

### 시장 현황

2025 년 초경합금 시장 규모는 약 180 억 달러에 이를 것으로 예상되며, 보조 초경합금은 원자재 비용의 20~30%를 차지할 것으로 예상됩니다. TiC 가 가장 널리 사용되며(60%), 비용 및 자원 제약으로 인해 TaC 와 NbC 가 각각 15%와 10%를 차지합니다 .

### 미래 트렌드

#### 나노카바이드

나노스케일 TiC / NbC (<0.5  $\mu$ m)는 경도를 HV1600~1800 으로 높이고 인성을 20%까지 높여 2027년에는 시장의 15%를 차지할 것으로 예상됩니다.

#### 녹색 제조

TiC / TaC / NbC 를 재활용하면 (재활용률 > 80%) 비용이 15% 절감되고 탄소 발자국은 25% 감소합니다.

### 지적 설계

AI 는 초경 비율을 최적화하고(오차 <2%) 공구 성능을 30% 향상시킵니다. 예를 들어, 샌드빅은 2024 년에 AI 지원 공구 설계를 출시할 예정입니다.

### 새로운 응용 프로그램

신에너지(풍력 터빈 날개 가공 등), 의료(치과용 드릴 비트) 및 심해 굴착(부식 방지 부품) 분야에서 TiC / TaC / NbC 가 연간 10%씩 성장하고 있습니다.

## 6. 결론

티씨 , 초경합금에서 TaC 와 NbC 는 경도 , 내마모성, 적색 경도, 내산화성,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

내식성을 향상시켜 재료의 적용 범위를 크게 확대했습니다. TiC는 높은 경도와 낮은 밀도로 고속 절삭에 적합하고, TaC는 우수한 적색 경도와 내열충격성으로 고온 가공에 적합하며, NbC는 미세 입자와 내식성으로 광업 및 화학 산업에 적합합니다. 첨가물과 고용체 강화를 결합하여 성능을 더욱 최적화하지만, 비용과 성능의 균형이 필요합니다. 앞으로 나노카바이드, 친환경 제조, 지능형 설계는 고정밀 및 지속 가능한 산업에서 보조 탄화물의 적용을 촉진할 것입니다. 보조 탄화물을 선택할 때 TiC는 최적의 성능을 달성하기 위해서는 TaC와 NbC가 처리 조건, 환경 요구 사항 및 비용 제약에 따라 합리적으로 일치해야 합니다.

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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



총수:

초경합금 결합재상의 종류와 기능

## 1. 개요

높은 경도(1400~2200 HV), 내마모성, 굽힘 강도(1.5~2.5 GPa)를 갖춘 초경합금은 절삭 공구, 금형, 광산 공구의 초석이 되었습니다. 초경합금의 성능은 경질상(예: WC)과 결합재상의 시너지 효과에서 비롯됩니다. 결합재상은 "결합재" 및 "튜너" 역할을 하여 경질상 입자를 연결하고 인성, 내식성, 가공 특성을 부여합니다. 1923년 독일에서 초경합금이 발명된 이후, 결합재상은 단일 코발트에서 니켈, 철, 코발트-니켈 합금 등으로 확장되었습니다. 최근에는 나노 결합재상, 다원소 합금(예: Co+Mo+Ni) 및 코팅 최적화를 통해 성능이 크게 향상되었습니다. 본 논문에서는 결합재상의 종류, 기능, 미세 구조, 재종 비교, 코팅 상호작용, 최적화 방안 및 적용 분야를 표준(예: GB/T 3849, ISO 4499)과 함께 살펴봅니다.

## 2. 결합 단계의 유형

### 2.1 코발트(Co)

특징: 90% 이상, 함량 620%, FCC 구조, 슬윤각 <math><10^\circ</math>, 녹는점 1495°C.

특성: 경도 13001500 HV, KIC 812 MPa·m<sup>1/2</sup> / <sup>2</sup>, 굽힘 강도 22.5 GPa.

적용 분야: 절삭 공구(YG6), 금형(YG15), 광산(YG8).

장점과 단점: 높은 인성, 다공성 <math><0.01\%</math>, 하지만 부식 속도 0.01mm/년, 비용이 높습니다(\$3040/kg).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## 2.2 니켈(Ni)

특징: 내식성, 함량 515%, 습윤각  $\sim 15^\circ$ , 녹는점  $1455^\circ\text{C}$ .

성능: 부식 속도  $< 0.005\text{ mm/년}$ , 경도  $\sim 1350\text{ HV}$ , KIC  $1012\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

용도: 습식 절삭 공구, 화학 금형, 선박 도구.

장점과 단점: 내식성이 강함, 비용이 저렴함( $\text{kg 당 } 1,520\text{ 달러}$ ), 접합 강도가 약간 약함.

## 2.3 철(Fe)

특징: 저렴한 가격, 함량 510%, 습윤각  $\sim 20^\circ$ , 녹는점  $1538^\circ\text{C}$ ,  $\eta$  상 형성 용이.

성능: 경도  $\sim 1300\text{ HV}$ , 굽힘 강도  $1.82.2\text{ GPa}$ , 부식 속도  $0.02\text{ mm/년}$ .

용도: 저렴한 채굴 도구.

장단점: 비용은 20% 낮지만 성능은 10% 낮습니다.

## 2.4 코발트-니켈 합금 (Co + Ni)

니켈의 내식성을 결합하여 함량이 615%이며 비율은 조절 가능합니다.

성능: 경도  $1350\sim 1450\text{ HV}$ , 부식 속도  $0.007\text{ mm/년}$ , KIC  $1012\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

용도: 항공 도구, 화학 금형.

장점과 단점: 전반적인 성능은 우수하지만 비율을 최적화해야 합니다.

## 2.5 기타(Mo, Cu)

특징: Mo는 내열성( $2623^\circ\text{C}$ ), Cu는 내식성( $1085^\circ\text{C}$ )이 있으며, 함량은  $< 5\%$ 입니다.

성능: 경도  $1200\sim 1300\text{ HV}$ , 굽힘 강도  $1.52\text{ GPa}$ .

적용분야: 고온공구(Mo), 저부하부품(Cu).

진행 상황: Co+Mo+Ni 내열성이 20% 증가하였고, 나노코발트 인성이 10% 증가하였습니다.

## 3. 접착상 효과

### 3.1 하드상 결합

메커니즘: 액상 소결, WC 습윤, 결합 에너지  $\sim 2\text{ J/m}^2$ .

효과: 압축강도  $46\text{ GPa}$ , 기공률  $< 0.01\%$ , 에너지 절감 10%.

### 3.2 인성 및 강도 향상

메커니즘: 소성 변형으로 균열 확산을 방지합니다.

효과: 코발트는 6%에서 15%로 증가하고, KIC는 50% 증가했으며, 휨 강도는 25%

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

증가했습니다.

### 3.3 경도 조절

메커니즘: 결합상의 경도가 낮고, 함량이 높으면 전체 경도가 감소합니다.  
효과: 6% Co(1500 HV), 15% Co(1300 HV).

### 3.4 내식성 향상

메커니즘: 니켈은 수동화층을 형성합니다.  
효과: 니켈 기반 부식 속도 <0.005mm/년, 코발트보다 50% 우수함.

### 3.5 처리 성능 향상

메커니즘: 액상은 밀도화를 촉진합니다.  
효과: 코발트 기반 밀도 >99.9%, 수축률 1520%.

### 3.6 하드 단계와의 상호 작용

메커니즘: 코발트 WC 결합 에너지  $\sim 2 \text{ J/m}^2$ , Cr3C2 는 입자 성장을 억제합니다.  
효과: 나노코발트 인성이 10% 증가했습니다.

## 4. 결합 단계의 미세 구조

### 4.1 결정구조

코발트: FCC(고연성) + 부분 HCP(고경도), 급속냉각시 FCC 유지, 인성이 10% 증가.  
니켈: FCC 를 안정화하고 내식성이 우수합니다.  
철: BCC, 연성이 낮고  $\eta$  상이 형성되기 쉽습니다.  
SEM/TEM: 코발트상은 망상형(0.52  $\mu\text{m}$ )이고, 니켈 상은 비교적 얇습니다(0.31.5  $\mu\text{m}$ ).

### 4.2 인터페이스 기능

코발트 WC: 결합 에너지  $\sim 2 \text{ J/m}^2$ , 굽힘 강도가 15% 증가했습니다.  
니켈 WC: 결합 에너지  $\sim 1.5 \text{ J/m}^2$ , 강도가 510% 감소함.  
철 WC:  $\eta$  상 형성이 쉽고 강도가 1015% 감소함.  
최적화: Cr3C2 는 접합 강도를 10% 증가시킵니다.

### 4.3 분포 특성

균일한 분포: 균열 저항성이 20% 증가했습니다.  
코발트 풀: 강도가 1015% 감소했습니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SEM: YG6 균일도 >95%, YG15 코발트 풀 510%.  
최적화: 불 밀링 + Cr3C2, 균일성이 15% 증가했습니다.

#### 4.4 미세 결합

다공성: 다공성 > 0.1% 강도가 20% 감소합니다.  
η 상: 경도가 510% 감소함.  
자유탄소: 강도가 10% 감소했습니다.  
TEM : η 상은 침상(15 μm), 유리탄소 클러스터 상(0.52 μm) 입니다.  
최적화: HIP 강도가 15% 증가했습니다.

#### 5. 브랜드 비교

상표	접착 단계	콘텐츠	경도(HV)	굽힘 강도 (GPa)	인성(KIC)	부식 속도(mm/년)	애플리케이션
YG6	코발트	6%	1500	2.0	8	0.01	절삭 공구
YG8	코발트	8%	1450	2.2	9	0.01	광산 도구
YG15	코발트	15%	1300	2.5	12	0.01	스탬핑 다이
YN10	니켈	10%	1350	2.0	10	<0.005	습식 절단
YNC8	코+니켈	8%	1400	2.3	11	0.007	항공 도구
YF10	철 + 코발트	10%	1300	1.9	8	0.02	저렴한 도구

#### 6. 바인더상과 코팅의 상호작용

##### 6.1 코팅 유형

TiN : 경도 2000~2500 HV, 내마모성.  
CrN : 경도 1800~2200 HV, 내식성.  
Al2O3: 경도 2000 HV, 내열성 >1000° C.  
다층 코팅: TiN+Al2O3+TiCN, 종합적인 성능이 우수합니다.

##### 6.2 상호작용 메커니즘

계면 접합: 코발트 기반 + TiN 접착력이 20% 증가하고, 니켈 기반 + CrN 수명이 50% 증가합니다.  
열팽창 매칭: 코발트 + TiN은 안정성을 15% 증가시킵니다.  
화학적 안정성: 니켈 기반 + CrN 부식 속도 <0.003 mm/년.

##### 6.3 효과

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

내마모성: YG6+TiN 은 수명을 3 배 증가시킵니다.  
내식성: YN10+CrN 은 서비스 수명을 두 배로 늘립니다.  
내열성: YNC8+Al2O3 절단 온도 >1000° C.

## 7. 최적화 측정

바인더 상 선택: 코발트(인성), 니켈(내식성), Co+Ni (복합).  
관리 함량: 코발트 6%(칼), 코발트 15%(금형).  
개선된 분포: Cr3C2 인성 +5%.  
최적화된 소결: HIP 강도 +15%.  
코팅 : CrN 내식성 +2 배.

## 8. 적용 사례

YG6 공구: 경도 1500 HV, 수명 2 시간(+ TiN 6 시간).  
YG15 금형 : 굽힘강도 2.5 GPa , 수명 120,000 회.  
YN10 금형 : 부식속도 <0.005 mm/년, 수명 1 년(+ CrN 2 년).  
YNC8 공구: 경도 1400 HV, 수명 3 시간(+Al2O3 4 시간).

## 9. 표준

GB/T 3849: 코발트 자기 시험.  
ISO 4499: 미세구조.  
ASTM B406: 굽힘 강도.  
ASTM G31: 내식성.  
ASTM C633: 코팅 접착력.

### 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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

총수:

## 초경합금 혼합 공정에서의 바인더 종류 및 적용 선정

### 1. 개요

초경합금 혼합 공정에서는 경질상(WC), 결합제상(Co) 및 첨가제를 습식 분쇄 또는 건식 혼합하여 혼합하고, 결합제를 첨가하여 분무 건조, 과립화 및 압착을 위한 균일한 슬러리를 제조합니다. 결합제는 입자 결합을 강화하고(생성 강도 >5 MPa), 유동성을 개선하고(<30 s/50 g), 입자 형태를 제어하고(D50 50200  $\mu\text{m}$ ), 소결 전에 분해됩니다(잔류 탄소 <0.1%). 일반적인 결합제로는 폴리에틸렌 글리콜(PEG), 폴리비닐 알코올(PVA), 파라핀(PW), 고무(SBR/BR)가 있습니다. 슬러리 특성, 공정 및 용도를 고려하여 결합제를 선택해야 합니다.

### 2. 접착제의 종류와 특성

#### 2.1 폴리에틸렌글리콜(PEG)

화학적 특성:  $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$ , 분자량 200-20,000, 물/에탄올에 용해, 분해 온도 250-400°C, 잔류 탄소 <0.05%.

물리적 특성: 점도 100500  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 그린 강도 510 MPa, 유동성 <25 s/50 g.

장점: 용해성이 좋고, 분해가 깨끗하며, 비용이 저렴합니다(1015 위안/kg).

단점: 흡습성, 슬러리 안정성 10% 감소.

공정: 12%를 첨가하고 12 시간 동안 교반한 후 300~400°C에서 분해합니다.

#### 2.2 폴리비닐알코올(PVA)

화학적 특성:  $(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$ , 분자량 20,000-200,000, 수용성, 분해 온도 200-350°C, 잔류 탄소 <0.1%.

물리적 특성: 점도 2001000  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 그린 강도 812 MPa, 유동성 <28 s/50 g.

장점: 접합 강도가 높아 복잡한 모양에 적합합니다.

단점: 에탄올 용해도가 낮고, 건조 비용이 1015% 증가합니다.

공정: 0.5~1.5%를 첨가하고 23 시간 동안 교반한 후 250~350°C에서 분해합니다.

#### 2.3 파라핀 왁스(PW)

화학적 특성: 탄화수소, 분자량 3001000, 녹는점 5070°C, 분해 온도 200500°C, 잔류 탄소 0.10.2%.

물리적 특성: 점도 1050  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 그린 강도 48 MPa, 유동성 <30 s/50 g.

장점: 가격이 저렴(kg 당 510 위안), 윤활성이 우수함.

단점: 탄소 잔류물이 많고 유기 용매가 필요합니다.

공정: 첨가량 23%, 가열온도 6080°C, 분해온도 400500°C.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.4 고무(SBR/BR)

화학적 특성: 분자량 50,000-500,000, 분해 온도 300-600° C, 잔류 탄소 0.2-0.3%.  
물리적 특성: 점도 5002000 mPa·s, 녹색 강도 610 MPa, 유동성 <30 s/50 g.  
장점: 탄성률이 높고, 균열 저항성이 15% 증가했습니다.  
단점: 잔류탄소가 많고 비용이 많이 든다(kg 당 2030 위안).  
공정: 첨가량 12%, 가열온도 5070°C, 분해온도 400600°C.

## 2.5 기타

PMMA: 분해 온도 300-450° C, 잔류 탄소 <0.1%, 고정밀 도구에 적합함.  
CMC: 분해온도 250~350°C, 잔류탄소 <0.05%, 연구개발에 적합함.  
진행 상황: 수성 나노 바인더, 탄소 잔류물 <0.03%, 유동성 15% 증가.

## 3. 응용 프로그램 선택

### 3.1 선정 기준

슬러리: 고형분 함량 60-80%, 에탄올은 PEG/PW, 물은 PVA/CMC 입니다.  
공정: 습식 압착의 경우 PVA, 건식 압착의 경우 PW.  
용도: 절삭 공구에는 PEG/PVA를, 금형에는 SBR을, 비용이 저렴한 경우에는 PW를 선택하세요.  
가격: PW(kg 당 510 위안), PEG(kg 당 1015 위안).

### 3.2 적용 가능한 시나리오

PEG: YG6/YG8 도구, D50 80150 μm, 유동성 <25 s/50 g.  
PVA: 초미립자 공구, 녹색 강도 812MPa.  
PW: YG8 채굴 도구, 가격이 20% 인하되었습니다.  
SBR: YG15 금형, 균열 저항성이 15% 증가했습니다.  
PMMA/CMC: 항공 도구의 R&D, D50 5080 μm.

### 3.3 선정 과정

적용 및 슬러리 특성을 결정합니다.  
접착제의 종류에 따라 다름.  
유동성, 녹색 강도, 탄소 잔류물을 확인하세요.  
프로세스를 최적화하세요.

## 4. 영향 요인

함량: 12%(PEG/PVA), 23%(PW/SBR).

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

슬러리 : 고휘분 함량 70%, 점도 200 mPa · s .  
혼합: 500-1000rpm 으로 12 시간 동안 교반합니다.  
소결: 진공, 350-400° C, 탄소 잔류물 <0.1%.  
환경: 습도 <40%, 온도 2030° C.

### 5. 최적화 측정

바인더 선택: PEG/PVA(나이프), SBR(몰드).  
관리 내용: 녹색 강도 512 MPa.  
최적화된 슬러리: 고휘분 함량 7075%.  
향상된 혼합: 행성형 볼 밀링으로 균일성이 15% 더 향상되었습니다.  
최적화된 소결: HIP, 기공률 <0.01%.

### 6. 적용 사례

YG6 도구: 1.5% PEG, 유동성 23 s/50 g, 경도 1500 HV.  
초미립자 공구: PVA 1%, 그린 강도 10 MPa, 경도 2000 HV.  
YG8 광산 도구: 2.5% PW, 굽힘 강도 2.2 GPa .  
YG15 금형: SBR 1.5%, 수명 120,000 회.

### 7. 결론

초경합금 혼합에 사용되는 바인더로는 폴리에틸렌 글리콜(PEG), 폴리비닐알코올(PVA), 파라핀 왁스(PW), 고무(SBR/BR) 및 기타(PMMA, CMC 등)가 있습니다. PEG 는 유동성이 우수하여(<25 초/50g) 범용 공구에 적합합니다. PVA 는 높은 그린 강도(812MPa)를 가지고 있어 초미립 공구에 적합합니다. PW 는 가격이 저렴하여 광산 공구에 적합합니다. SBR 은 내균열성이 우수하여 대형 금형에 적합합니다. 슬러리 특성(고분분 60~80%), 공정 요건, 적용 시나리오 및 비용을 고려하여 바인더를 선택해야 합니다. 최적화를 통해 유동성을 20%, 그린 강도를 20%, 경도를 5% 향상시키고 비용을 20% 절감할 수 있습니다. 앞으로 수성 나노 바인더와 이중 바인더는 성능 향상 및 환경 보호 효과를 가져올 것입니다.

초경합금 바인더 특성 및 성능 비교표

접합재	화학적 특성	분해하다 온도 ° C	탄소 잔류물 %	녹색 힘 MPa	흐름 섉스 s/50g	비용 위안/kg	이점	결점	주요 응용 분야
못	HO( CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> O ) nH , 분자량 20020,000, 물/에탄올 용해성	250400	<0.05	510	<25	1015	유동성이 종고 분해가 깨끗하며 비용이 저렴하다	수분흡수, 고분자량 탄소잔류물	일반공구(YG6, YG8), 금형(YG15)

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

피비에이	(C2H4O) <sub>n</sub> , 분자량 20,000~200,000, 수용성	200350	<0.1	812	<28	1520	높은 접합 강도로 복잡한 형상에 적합	에탄올에 용해도가 낮고 건조 비용이 높음	초미립자 절삭 공구, 복잡한 금형
비밀번호	탄화수소, 분자량 3001000, 유기 용매에 용해됨	200500	0.10.2	48	<30	510	저렴한 가격, 좋은 윤활성	많은 유기용매가 필요함	광산 도구(YG8), 저가 금형
SBR/BR	분자량 50,000~500,000, 유기용매에 용해 가능	300600	0.20.3	610	<30	2030	높은 탄성률과 강한 저항성	탄소 잔류물이 많고 균열 비용이 많이 든다	대형 금형(YG15), 광산 도구
PMMA	분자량 50,000~100,000, 유기 용매에 용해 가능	300450	<0.1	812	<28	~50	고정밀, 저탄소 잔류물	비용이 높고 용해도가 낮음	고정밀 도구 개발
씨엠씨	셀룰로오스 수용성 유도체,	250350	<0.05	46	<25	2025	수용성이 좋고 탄소 잔류물이 적음	녹색 강도 낮음	실험실 연구 및 개발, 항공 도구

분해 온도: 소결 공정에 영향을 미치며, <400° C가 진공 소결에 더 적합합니다.  
탄소 잔류물: <0.1% 소결 기공률 <0.1%를 보장합니다.  
녹색 강도: >5 MPa 는 압축 요구 사항을 충족하고, 812 MPa 는 복잡한 모양에 적합합니다.  
유동성: <30 초/50g, 분무 건조 요구 사항(GB/T 1482)에 부합합니다.  
비용: PW가 가장 경제적이며 PMMA가 가장 비쌉니다.  
적용 분야 선택: 고성능을 위해서는 PEG/PVA, 저비용을 위해서는 PW, 대형 빌렛을 위해서는 SBR을 사용합니다.

### 8. 표준

GB/T 3849: 코발트 자기 시험. ISO 4499: 미세구조.  
GB/T 1482: 유동성. ISO 3326:2013: 다공성.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



총수:

## 초경합금의 탈탄 및 침탄의 개념, 원인 및 개선

### 1. 개요

초경합금은 텅스텐 카바이드(WC)를 경질상으로, 코발트(Co) 또는 니켈(Ni)을 결합상으로 하는 복합재료입니다. 그 성능은 탄소 함량의 정밀한 제어에 크게 좌우됩니다. WC의 이론적인 탄소 함량은 6.13 중량 %이며, 실제 생산에서는 6.08-6.18 중량 % 범위로 제어해야 합니다 (중국비철금속학회지, 2024년). 탄소 함량의 편차는 탈탄 또는 침탄 결함으로 이어질 수 있으며, 이는 재료의 미세조직과 특성에 상당한 영향을 미칩니다. 탈탄은 탄소 함량이 부족한 상태를 말하며, 이로 인해 WC가 분해되거나 취성 η 상 ( $Co_3W_3C$  또는  $Co_6W_6C$ )을 형성하여 경도와 강도가 감소합니다. 침탄은 과도한 탄소 함량을 말하며, 이로 인해 유리 탄소(흑연상)가 침전되어 내마모성과 코팅 접착력에 영향을 미칩니다. 본 논문은 중국 국가표준(GB/T 3849), 국제표준(ISO 4499) 및 업계 데이터를 결합하여 탈탄 및 침탄의 개념, 원인, 효과 및 개선 방안을 자세히 분석합니다.

### 2. 탈탄과 침탄의 개념

#### 2.1 탈탄소화

##### 탈탄소화 정의

초경합금의 탄소함량은 WC(6.13 중량%)의 화학양론비보다 낮다. (%)로 인해 WC가  $W_2C$ 로 분해되거나 η 상 ( $Co_3W_3C$  또는  $Co_6W_6C$ )이 형성됩니다.

##### 미세구조

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\eta$  상은 침상 또는 입상이며, 크기는  $5\sim 25\ \mu\text{m}$ , 경도는 약 HV 1800~2000, 파괴인성(KIC)은  $4\sim 6\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 로, 초경합금 전체의  $8\sim 15\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 보다 훨씬 낮습니다 (Journal of Materials Science 2025).  $\eta$  상의 취성은 균열 전파를 유발하고 재료의 신뢰성을 저하시킵니다.

### 탈탄소화 영향

경도는 5%-10% 감소합니다(예: HV 1800에서 HV 1620-1710으로, ITIA 2024).

휨강도(TRS)는 10%-15% 감소합니다(2200MPa에서 1870-1980MPa로, ASTM B406 테스트). 내식성이 감소하고 부식 속도가 15~20% 증가합니다(염수 분무 환경에서의 부식 속도는 0.05mm/년에서 0.06~0.07mm/년으로 증가, ASTM G31).

예: 고속 절삭 조건(200m/분)에서 탈탄은 초경 공구의 내마모성을 감소시키고 절삭 수명을 약 20~30% 단축시킵니다(중국 비철금속학회지, 2024).

## 2.2 침탄

### 정의

초경합금의 탄소 함량은 화학양론비보다 높고, 유리탄소(흑연상)가 침전됩니다

$\mu\text{m}$  크기의 클러스터 또는 플레이크 형태로 존재하며, 경도는 매우 낮습니다(<HV 100). 주로 코발트 상 또는 결정립계에 분포하여 기공률을 증가시킵니다(중국 비철금속학회지, 2024).

경도는 3%-5% 감소합니다(HV 1800에서 HV 1710-1740으로, ITIA 2024).

휨강도는 8%-10% 감소하였다(2200MPa에서 1980-2020MPa로).

자유 탄소는 젖음각을 증가시켜( $5^\circ$ 에서  $15^\circ$ - $25^\circ$ 로) 코팅 접착력을 15-20% 감소시킵니다(ASTM C633 테스트).

예: 스탬핑 다이 적용 시, 침탄은 초경 다이의 표면 거칠기를 증가시키고(Ra를  $0.2\ \mu\text{m}$ 에서  $0.3$ - $0.4\ \mu\text{m}$ 로 증가), 코팅 박리율을 약 15% 증가시키며, 다이 수명을 10-15% 감소시킵니다(Journal of Materials Science 2025).

## 3. 탈탄 및 침탄의 원인

### 3.1 탈탄소화

#### 원자재 요소:

탄소 함량이 부족합니다(<6.10 wt %). 예를 들어 WC 분말의 탄소 함량이 이론값(6.13 wt %)보다 낮습니다.

원료에는 높은 수준의 산화물(예:  $\text{W}_2\text{O}_5$  또는  $\text{Co}_2\text{O}_3$ ) (0.03%-0.1%)이 포함되어 있으며, 이는 소결 중에 탄소와 반응하여 CO/CO<sub>2</sub>를 생성하고 탄소를 소모합니다(Journal of Materials Science, 2025).

카본블랙의 품질은 불안정하며 불순물(황, 산소 등)이 포함되어 있어 약 0.05%-0.1%의 탄소 손실이 발생합니다(ITIA 2024).

#### 대기 요인:

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

소결 분위기의 산소 함량은  $>0.1\%$ 로, 이로 인해 탄소 산화가 일어나  $\text{CO}/\text{CO}_2$ 가 생성되고 탈탄율이 약  $10\% \sim 15\%$  증가합니다.

수소( $\text{H}_2$ ) 함량이 너무 높으면( $>5\%$ ) 탄소와 반응하여  $\text{CH}_4$ 를 형성하면서 탄소 원소가 제거됩니다(ITIA 2024).

대기 중  $\text{H}_2\text{O}$  함량은  $>0.05\%$ 로 탄소와 반응하여  $\text{CO}$ 와  $\text{H}_2$ 를 생성하여 탈탄을 더욱 심화시킵니다(중국 비철금속 저널, 2024).

#### 온도 요인:

소결온도  $>1450^\circ\text{C}$ , WC는  $\text{W}_2\text{C}$  또는  $\eta$  상으로 분해됩니다(반응:  $2\text{WC} + \text{Co} \rightarrow \text{Co}_3\text{W}_3\text{C} + \text{C}$ ).

온도 변화( $\pm 10^\circ\text{C}$ )로 인해 국부적인 탈탄이 발생하고  $\eta$  상 형성 속도가  $10\% \sim 15\%$  증가합니다(중국 비철금속 저널 2024).

단열 시간이 너무 길면(2시간 이상) 탄소 휘발이 늘어나 탈탄소화 위험이 약  $8\%$  증가합니다(Journal of Materials Science 2025).

#### 혼합 요인:

혼합이 고르지 않고 국부 탄소 분포 편차가  $0.1$  중량 % 이상으로 지역적 탈탄소화가 발생합니다.

유기 결합제(파라핀 PW 또는 SBR 등)의 잔류 탄소율은  $0.1\%$  이상이며, 소결 초기 단계에서 완전히 분해되지 않아 탄소 균형에 영향을 미칩니다(ITIA 2024).

혼합 장비(볼밀 등)는 오염(철분 등)되어 산화물을 생성하고 약  $0.02 \sim 0.05\%$ 의 탄소를 소모합니다(중국 비철금속 저널, 2024년).

### 3.2 침탄

#### 원자재 요소:

탄소 함량이 너무 높습니다( $>6.15 \text{ wt } \%$ ). 예를 들어, 과도한 카본블랙 첨가( $>0.5 \text{ wt } \%$ ).

탄소블랙 입자의 크기가 균일하지 않아( $>10 \mu\text{m}$ ) 국부적으로 과잉 탄소가 발생합니다(ITIA 2024).

원료 중의 탄화물(WC 등) 입자가 너무 미세( $<0.1 \mu\text{m}$ ) 하여 표면 활성이 높고 탄소가 과도하게 흡착되어 있다(Journal of Materials Science 2025).

#### 대기 요인:

소결 분위기의  $\text{CH}_4$  함량( $>1\%$ )은 탄소 침전으로 이어지고 탄화 속도가 약  $10\% \sim 15\%$  증가합니다.

진공이 부족하면( $>10^{-2} \text{ Pa}$ ) 탄소 휘발이 억제되고 남아 있는 자유 탄소가 침전됩니다(ITIA 2024).

대기 중 탄소 퍼텐셜이 너무 높으면(예: 탄소 퍼텐셜  $> 1.2$ ), 탄소 원자는 재료 표면으로 확산되어 흑연상을 침전시킵니다(중국 비철금속 저널, 2024).

#### 온도 요인:

소결 온도가  $1350^\circ\text{C}$  미만일 경우 탄소 반응이 완료되지 않고 남아 있는 자유 탄소가 침전됩니다.

온도 변화( $\pm 10^\circ\text{C}$ )는 국부적인 탄화로 이어지고, 자유 탄소의 부피 점유율은  $5\% \sim 10\%$  증가합니다(중국 비철금속학회지, 2024년).

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

냉각 속도가 너무 느리면( $<5^{\circ}\text{C}/\text{분}$ ) 냉각 과정에서 탄소가 침전되고 탄화 속도가 약 5% 증가합니다(Journal of Materials Science 2025).

#### 혼합 요인:

혼합물 중 파라핀왁스(PW)나 SBR 의 잔류탄소율은  $0.15\sim 0.3\%$ 이며, 분해 후 탄소함량이 증가합니다.

혼합 시간이 충분하지 않으면( $<10$  시간) 탄소 분포가 고르지 않고 국부 탄화율이 약  $8\sim 12\%$  증가합니다(ITIA 2024).

혼합 과정 중에 카본 블랙이 응집되어(응집 입자  $> 20\ \mu\text{m}$ ) 국부적으로 과잉 탄소가 발생합니다(중국 비철금속 저널, 2024).

#### 미시적 메커니즘:

탈탄과정에서  $\eta$  상은 WC-Co 계면 결합 에너지를 감소시키고( $1.2\ \text{J}/\text{m}^2$ 에서  $0.8\sim 1.0\ \text{J}/\text{m}^2$ 로) 균열 전파 경향을 증가시킨다(Journal of Materials Science 2025).

탄화 중에 자유 탄소는 젖음 각도를 증가시키고( $5^{\circ}$ 에서  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 로), WC에 대한 코발트의 젖음성을 감소시키며, 코팅 접착력에 영향을 미칩니다(ITIA 2024).

탄소 함량에 작은 편차( $\pm 0.1$  중량%)가 생기면 계면 응력이 약 10%~15% 증가하여 미세 결합이 더욱 심화됩니다(중국 비철금속 저널 2024).

## 4. 탈탄 및 침탄의 효과

### 4.1 미세구조

#### 탈탄소화:

$\eta$  상은 WC-Co 계면을 파괴하고, 코발트 풀의 부피는 5%~10% 증가하고, 입자는 비정상적으로 성장합니다( $0.5\ \mu\text{m}$ 에서  $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 로).

다공성 증가  $0.05\%\sim 0.1\%$ (ISO 3326:2013).

계면 응력이 약 10% 증가하면 미세균열이 발생할 확률이  $15\sim 20\%$  증가합니다(Journal of Materials Science 2025).

#### 탄화:

자유 탄소는 결정립계에 축적되어 기공률을  $0.1\%\sim 0.15\%$  증가시킵니다.

코발트상은 불균일하게 분포되어 있으며, 국부적 젖음성은 10%~15% 감소하고, 결정립계 강도는 약 5% 감소합니다(중국 비철금속 저널 2024).

자유 탄소 입자는 응력 집중을 유도하고 기공 형성 경향을 약 8% 증가시킵니다(ITIA 2024).

### 4.2 성능

#### 경도:

탈탄소화: 5%~10% 감소(HV 1800에서 HV 1620~1710으로).

탄소침투: 3%~5% 감소(HV 1800에서 HV 1710~1740).

#### 힘:

탈탄화: 굽힘 강도가 10%~15%(2200MPa에서 1870~1980MPa) 감소합니다.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

탄소침투 : 8%-10% 감소 (2200MPa 에서 1980-2020MPa 로 감소).

**인성:**

탈탄: 파괴인성(KIC)이 20%-25% 감소합니다(10MPa · m<sup>1/2</sup>에서 7.5-8MPa · m<sup>1/2</sup>로).

침탄처리 : 5%-8% 약간 증가(10MPa · m<sup>1/2</sup>에서 10.5-10.8MPa · m<sup>1/2</sup>로)

**부식 저항성:**

탈탄: 부식 속도가 15%-20% 증가합니다(0.05mm/년에서 0.06-0.07mm/년으로, ASTM G31).

탄화: 부식 속도가 약 5%(0.05mm/년에서 0.0525mm/년) 증가합니다.

**코팅 접착력:**

탄소침투: 접착력이 15%-20% 감소합니다(50MPa 에서 40-42.5MPa 로, ASTM C633).

탈탄 : 접착력이 약 5% 감소합니다(50MPa 에서 47.5MPa).

**내마모성:**

탈탄: 마모율이 20%-25% 증가합니다(0.06 mm<sup>3</sup>/N·m에서 0.072-0.075 mm<sup>3</sup>/N·m, ASTM G65).

침탄처리 : 마모율이 10%-15% 증가합니다(0.06mm<sup>3</sup>/N·m 에서 0.066-0.069mm<sup>3</sup>/N·m 로).

### 4.3 응용 프로그램

**칼:**

탈탄은 공구의 내마모성을 저하시키고 절삭 수명을 20~30% 단축시킵니다. 예를 들어, 고속 절삭(200m/min)에서는 공구 수명이 2 시간에서 1.4~1.6 시간으로 단축됩니다(중국비철금속학회지, 2024).

탄소침투는 코팅 박리율을 15~20% 증가시키고 수명을 10~15% 감소시킵니다(Journal of Materials Science 2025).

**곰팡이 :**

탈탄은 금형의 내충격성을 저하시키고 수명을 15~20% 단축시킵니다. 예를 들어, 스탬핑 금형의 수명은 120,000 회에서 96,000~102,000 회로 단축됩니다.

탄소침투는 금형 표면 거칠기를 증가시키고(Ra 는 0.2 μm 에서 0.3-0.4 μm 로 증가) 수명 을 10 % -15% 감소시킵니다(Journal of Materials Science 2025).

**채굴 도구:**

탈탄소화로 인해 파손 위험이 약 25~30% 증가합니다. 예를 들어, 화강암 굴착 시 채굴 드릴 비트의 수명은 2000m 에서 1400~1500m 로 줄어듭니다(ITIA 2024).

탄소침투는 내마모성을 약 10~15% 감소시키고 드릴 비트 수명을 10~12% 감소시킵니다(중국 비철금속학회지, 2024년).

## 5. 개선방안

### 5.1 원자재 관리

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

탄소 함량은 6.10-6.15 중량 % ( $\pm 0.05$  중량 %)로 엄격하게 관리되었으며, 고순도 WC 분말(탄소 함량 6.12-6.14 중량 %, 산화물 <0.02%)이 사용되었습니다.

$Cr_3C_2$  (0.3 % -0.8%) 또는 VC(0.1%-0.5%) 와 같은 입자 억제제를 첨가하면  $\eta$  상의 형성이 억제되고  $\eta$  상의 부피 비율이 8%-12% 감소합니다(ITIA 2024) .

고순도 카본블랙(순도 > 99.9%)을 사용하여 탄소 함량에 대한 불순물(예: 황, 산소)의 간섭을 줄이고 탄소 손실률을 0.01%-0.03%로 제어합니다(중국비철금속학회지, 2024).

## 5.2 혼합 최적화

행성형 볼밀을 사용하여 혼합(12~18 시간, 300~500rpm)하면 균일성이 10~15% 향상되고 탄소 분포 편차는 <0.05 중량 %입니다.

(탄소 잔류율 <0.03%) 와 같은 저탄소 잔류 바인더를 사용하여 기존 파라핀 왁스 (탄소 잔류율 0.1%-0.2%) 를 대체합니다 .

볼 밀링 매체(예: 강철 볼 대신 WC 볼)를 최적화하면 철 오염을 줄이고 탄소 소비를 약 0.02% 줄일 수 있습니다(Journal of Materials Science, 2025).

분산제(스테아르산 등, 0.1~0.3%)를 첨가하면 카본블랙 응집을 줄이고 균일성을 5~8% 향상시킬 수 있습니다(중국 비철금속 저널, 2024).

## 5.3 소결 최적화

진공소결을 채택(진공도 <10<sup>-3</sup> Pa)하고, 대기 중 산소를 <0.05%, H<sub>2</sub> <2%, H<sub>2</sub>O <0.03%로 제어하여 탄소 산화 또는 휘발을 방지합니다.

소결 온도는 1380~1420° C( $\pm 5^\circ$  C)로 조절되고, 유지 시간은 WC 분해나 유리 탄소 침전을 방지하기 위해 1~1.5 시간입니다.

냉각 속도는 5~10° C/분으로 제어되어 자유 탄소 침전 위험이 약 5% 감소합니다(Journal of Materials Science 2025).

열간 등방성 압축(HIP, 100-150 MPa, 1350-1400° C)은 기공을 제거하여 기공률을 0.01% 미만으로 낮춥니다(ISO 3326:2013).

대기 모니터링 시스템(CO/CH<sub>4</sub> 함량의 실시간 감지 ) 을 사용하여 탄소 잠재력이 <1.0 이 되도록 보장하면 탄화율이 약 10% 감소합니다(ITIA 2024).

## 5.4 감지 피드백

코발트 자기 시험(GB/T 3849)은 탄소 함량 편차( $\pm 0.05$  wt %)를 감지하고  $\eta$  상과 유리 탄소를 정확하게 제어하는 데 사용됩니다.

X 선 회절(XRD)과 주사전자현미경(SEM)을 결합하여 미세구조를 분석한 결과,  $\eta$  상/유리탄소 검출률이 15~20% 증가했습니다.

에너지 분산 분광법(EDS)을 사용하여 탄소 분포를 분석하며, 편차는  $\pm 0.03$  중량 %로 제어되고 결합률은 10~15% 감소했습니다(중국 비철금속 저널, 2024).

온라인 적외선 분광 모니터링을 구현하여 소결 분위기의 CO/CO<sub>2</sub> 함량을 감지하고

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

실시간으로 프로세스를 조정하여 결합률을 약 8%까지 줄입니다(ITIA 2024).

## 5.5 표면 처리

자유탄소층(두께 0.01-0.03 mm)은 연마를 통해 제거되었으며, 표면 거칠기 Ra는 <0.2  $\mu\text{m}$  였습니다.

PVD TiN 을 사용하여, TiAlN 또는 CrN 코팅(두께 2-5  $\mu\text{m}$ ) 을 하면 코팅 접착력이 15%-20% 향상됩니다(ASM C633).

플라즈마 세척은 표면에 남아 있는 탄소를 제거하는 데 사용되며, 코팅 접착력이 약 10% 향상됩니다(Journal of Materials Science 2025).

저온 질화 처리(500~600° C)는 표면 경도를 약 5% 증가시키고 내식성을 10~15% 증가시킵니다(ASM G31).

효과:

$\eta$  상과 자유탄소의 부피비율은 10%-15% 감소합니다.

경도가 5%-8% 증가했습니다(HV 1710 에서 HV 1800-1850 으로).

휨강도는 10%-15% 증가했습니다(1980MPa 에서 2200-2300MPa 로).

내마모성이 15~20% 향상되고, 공구 및 금형 수명이 20~30% 연장 됩니다.

## 6. 적용 사례

저코발트 합금 공구(WC-6%Co): 진공소결(1400° C, 진공도  $10^{-3}$  Pa)을 거쳐 0.5% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 를 첨가하면  $\eta$  상이 10%-12% 감소하고 경도가 HV 1850 에 도달하며 중탄소강(200m/min)을 절삭할 때 수명이 1.5 시간에서 1.8-2 시간으로 증가합니다(중국비철금속학회지, 2024년).

고코발트 시멘트 카바이드 금형(WC-15%Co): 탄소함량을 정밀하게 제어(6.12 중량 %)하고 연마하여 유리탄소를 10%-15% 감소시키고, 굽힘강도를 2.4-2.5GPa 에 도달시키며, 스탬핑 금형의 수명을 10 만 배에서 11 만 5 천-12 만 배로 증가시킵니다(ITIA 2024).

Ni 기반 초경합금 금형(WC-10%Ni) : HIP(150MPa, 1400° C) 및 CrN 코팅을 사용하면 기공률이 <0.01%, 부식 속도가 <0.005mm/년이며, 해양 엔지니어링 부품의 수명이 0.8 년에서 1.1~1.2 년으로 증가합니다(Journal of Materials Science 2025).

초미립 초경공구(WC 입자크기 0.2  $\mu\text{m}$ ) : 나노-WC 분말을 사용하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3) 으로 코팅함  $\mu\text{m}$  ) 경도는 HV 1950-2000 에 도달하고 고온 합금(250 m/min)을 절단할 때 수명이 3 시간에서 3.8-4 시간으로 증가합니다(중국비철금속학회지, 2024).

## 7. 표준

GB/T 3849-2015: 초경합금의 코발트 자기적 특성에 대한 시험 방법, 탄소 함량 편차 검출.

ISO 4499-2:2020: 초경합금의 미세구조 평가, 에타상 및 유리탄소 분석.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM B406-96(2021) : 시멘트 카바이드의 굽힘 강도 시험 방법.

ASTM G31-21: 금속 재료의 내식성 시험 방법.

ASTM C633-13(2021): 코팅 접착력 시험 방법.

ISO 3326:2013: 초경합금의 기공률을 측정하는 방법.

ASTM G65-00(2010): 건조모래/고무바퀴 마모 시험, 내마모성 평가.

## 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](mailto:sales@chinatungsten.com)

**Tel :** +86 592 5129696

**Official website :** [www.ctia.com.cn](http://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](http://www.ctia.com.cn)

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