

硬质合金

物化性能、工艺与应用的全面探索（二）

Tungsten Cemented Carbide

Comprehensive Exploration of Physical & Chemical Properties, Processes, & Applications

中钨智造科技有限公司

CTIA.GROUP

中钨智造® | 硬科技·智未来

全球钨钼稀土产业数字化智能化服务领航者

版权与法律责任声明

中钨智造简介

中钨智造科技有限公司（简称“中钨智造”CTIA GROUP）是中钨在线科技有限公司（简称“中钨在线”CHINATUNGSTEN ONLINE）设立的具有独立法人资格的子公司，致力于在工业互联网时代推动钨钼材料的智能化、集成化和柔性化与制造。中钨在线成立于1997年，以中国首个顶级钨制品网站 www.chinatungsten.com 为起点，系国内首家专注钨、钼及稀土行业的电子商务公司。依托近三十年在钨钼领域的深厚积累，中钨智造传承母公司卓越的制造能力、优质服务及全球商业信誉，成为钨化学品、金属钨、硬质合金、高比重合金、钨及钼合金领域的综合应用解决方案服务商。

中钨在线历经30年，建成200余个多语言钨钼专业网站，覆盖20余种语言，拥有超100万页钨、钼、稀土相关的新闻、价格及市场分析内容。自2013年起，其微信公众号“中钨在线”发布逾4万条信息，服务近10万关注者，每日为全球数十万业界人士提供免费资讯，网站群与公众号累计访问量达数十亿人次，成为公认的全球性、专业权威的钨钼稀土行业信息中枢，7×24小时提供多语言新闻、产品性能、市场价格及行情服务。

中钨智造承接中钨在线的技术与经验，聚焦客户个性化需求，运用AI技术与客户协同并生产符合特定化学成分及物理性能（如粒度、密度、硬度、强度、尺寸及公差）的钨钼制品，提供从开模、试制到精加工、包装、物流的全流程集成服务。30年来，中钨在线已为全球超13万家客户提供50余万种钨钼制品的研发、与生产服务，奠定了客制化、柔性化与智能化的制造基础。中钨智造以此为依托，进一步深化工业互联网时代钨钼材料的智能制造与集成创新。

中钨智造的韩斯疆博士及其团队，也根据自己三十多年的从业经验，撰写有关钨钼稀土的知识、技术、钨的价格和市场趋势分析等公开发布，免费共享于钨产业界。韩斯疆博士自1990年代起投身钨钼制品电子商务、国际贸易及硬质合金、高比重合金的与制造，拥有逾30年经验，是国内外知名的钨钼制品专家。中钨智造秉持为行业提供专业优质资讯的理念，其团队结合生产实践与市场客户需求，持续撰写技术研究、文章与行业报告，广受业界赞誉。这些成果为中钨智造的技术创新、产品推广及行业交流提供坚实支撑，推动其成为全球钨钼制品制造与信息服务的引领者。

中钨智造

CTIA.ROUP



中钨智造©版权所有

任何形式的使用须经中钨智造书面同意

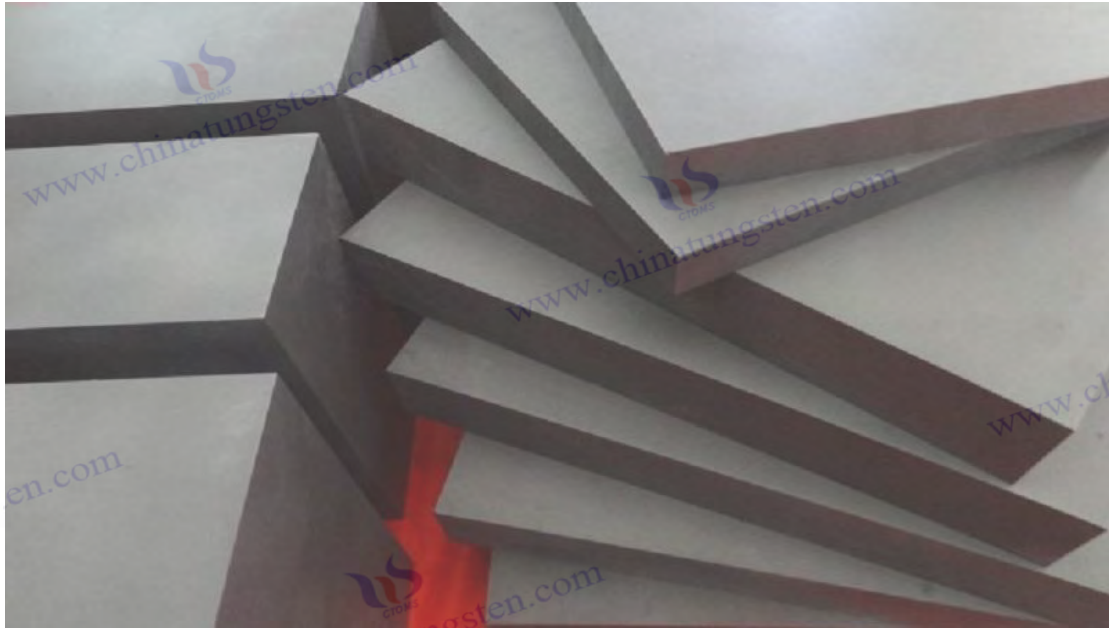
中钨智造® | 硬科技·智未来

全球钨钼稀土产业数字化智能化服务领航者

版权与法律责任声明

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

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



第二章：硬质合金的微观结构与相态 Microstructure & Phase States of Tungsten Cemented Carbide

硬质合金（Tungsten Cemented Carbide）以其独特的微观结构和相态特征，成为现代工业中高性能材料的核心。其微观结构由硬质的碳化物颗粒、韧性的黏结相以及复杂的界面体系组成，相态特征则涉及晶体结构、固溶体、缺陷及非晶相的分布。这些微观特性从原子和晶体层面决定了硬质合金的性能表现，例如耐磨性、韧性和加工可靠性。本章聚焦于硬质合金的微观结构与相态，系统分析碳化物颗粒的特性、黏结相的分布与作用、界面与缺陷的形成机制，以及先进的表征技术。通过理论分析、实验数据和实际案例，本章旨在揭示微观结构对性能的调控机制，为硬质合金的工艺优化和应用提供科学依据，同时为材料科学与工程领域的交叉研究提供参考。

2.1 碳化物颗粒的微观特性

碳化物颗粒是硬质合金的硬质骨架，以碳化钨(WC)为主，辅以碳化钛(TiC)、碳化钽(TaC)等，共同决定材料的力学性能和环境适应性。本节从晶粒尺寸、形貌及多相协同作用出发，探讨碳化物颗粒的微观特性。

2.1.1 WC 晶粒尺寸与形貌

碳化钨(WC)晶粒是硬质合金的主要硬质相，其尺寸($0.110\mu\text{m}$)和形貌直接影响材料的性能。WC具有六方晶系结构(P6m2空间群，晶格常数 $a=2.906\text{Å}$ ， $c=2.837\text{Å}$)，WC共价键能约为 $6\text{eV}\pm 0.2\text{eV}$ ，赋予其高硬度和耐磨性。晶粒尺寸的调控是硬质合金性能优化的核心，例如，晶粒从 $5\mu\text{m}$ 减小至 $0.5\mu\text{m}$ ，晶界密度增加，硬度显著提升，而韧性略有下降。

扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)分析显示，常规硬质合金中WC晶粒尺寸

为 $12\mu\text{m}\pm 0.2\mu\text{m}$ ，呈棱柱状形貌（棱角 $60^\circ 90^\circ$ ），主要暴露(0001)和(1010)晶面。这种形貌因各向异性（ $\langle 0001 \rangle$ 方向硬度高约 10%）增强了抗磨损能力，适合切削刀具等高负荷应用。例如，含 $1.5\mu\text{m}$ 晶粒的硬质合金刀具在切削钢材（抗拉强度 $>1000\text{ MPa}$ ）时，磨损量 $<0.1\text{ mm}$ ，寿命达 12 小时 ± 1 小时。

纳米级硬质合金（晶粒 $<0.2\mu\text{m}$ ）晶粒趋向球形，表面能高达 $1\text{ J/m}^2\pm 0.1\text{ J/m}^2$ ，因晶界比例增加（ $>50\%$ ），硬度进一步提高，适合超精密加工，如半导体晶圆切割（表面粗糙度 $R_a<0.01\mu\text{m}$ ）。然而，纳米晶粒易团聚（团聚率 10%~15%），导致孔隙率升至 $1\%\pm 0.2\%$ 。放电等离子烧结（SPS， 1200°C ， 50 MPa ）通过快速升温（ $>100^\circ\text{C/min}$ ）控制团聚，孔隙率降至 $<0.5\%\pm 0.1\%$ ，晶粒尺寸偏差 $<5\%$ 。

晶粒形貌的调控依赖烧结工艺。液相烧结（ $1350\text{--}1450^\circ\text{C}$ ）中，WC 晶粒通过溶解再沉淀生长，棱柱状比例随保温时间（12 小时）增至 $>80\%$ 。添加晶粒抑制剂，如碳化钒（VC， $0.2\%\text{--}0.5\%$ ），通过提高扩散势垒（约 $15\%\pm 2\%$ ）限制晶粒长大，尺寸稳定在 $0.81.2\mu\text{m}$ 。例如，含 0.3% VC 的硬质合金刀具（晶粒 $0.8\mu\text{m}$ ）在高速切削（ 200 m/min ）中，磨损率降低 20%，寿命延长 $25\%\pm 3\%$ 。

粗晶 WC（ $510\mu\text{m}$ ）因裂纹扩展路径较长，韧性更高，适用于采矿钻头。例如，含 $6\mu\text{m}$ 晶粒的硬质合金钻头在花岗岩钻进（冲击频率 >2000 次/分钟）中，寿命超过 200 小时，优于细晶材料（寿命 <150 小时）。综上，WC 晶粒尺寸与形貌需根据应用需求优化，细晶（ $0.52\mu\text{m}$ ）适合高硬度，粗晶（ $510\mu\text{m}$ ）适合高韧性，棱柱状形貌则兼顾耐磨性。

2.1.2 TiC、TaC 等辅助碳化物的协同作用

辅助碳化物（如 TiC、TaC、NbC）通过固溶强化和性能互补提升硬质合金的综合表现。碳化钛（TiC）具有立方晶系结构（Fm $\bar{3}$ m，密度 $4.93\text{ g/cm}^3\pm 0.05\text{ g/cm}^3$ ），硬度 HV 1800~2200，显著降低材料密度（从 14.5 g/cm^3 至 $12\text{ g/cm}^3\pm 0.1\text{ g/cm}^3$ ），并通过形成 TiO_2 保护层增强高温稳定性（ 1000°C 氧化增重 $<1\text{ mg/cm}^2\pm 0.2\text{ mg/cm}^2$ ）。含 15% TiC 的硬质合金刀具在高温切削（ 800°C ，航空铝合金）中，磨损量减少 30%，寿命延长 $50\%\pm 5\%$ ，因 TiC 提高了抗粘着磨损能力。

碳化钽（TaC，密度 $14.5\text{ g/cm}^3\pm 0.1\text{ g/cm}^3$ ，HV 1600~2000）通过固溶强化增强高温抗变形能力。含 3% TaC 的硬质合金热膨胀系数降至 $5.0\times 10^{-6}/\text{K}\pm 0.1\times 10^{-6}/\text{K}$ ，热裂纹长度 $<1\mu\text{m}\pm 0.2\mu\text{m}$ ，适合燃气轮机喷嘴（运行温度 1100°C ）。TaC 还提高了晶界结合力（ $>50\text{ MPa}\pm 5\text{ MPa}$ ），裂纹扩展率降低 15%。例如，含 2% TaC 的硬质合金喷嘴在燃气流（ $>500\text{ m/s}$ ）中运行 5000 小时，表面损伤 $<10\mu\text{m}$ 。

碳化铌（NbC，HV 1900 ± 50 ）以抗腐蚀性见长，含 1% NbC 的硬质合金在酸性环境（pH 3，HCl）腐蚀速率仅 $0.02\text{ mm/年}\pm 0.005\text{ mm/年}$ ，优于含 Co 的硬质合金（ 0.05 mm/年 ）。NbC 通过形成 Nb_2O_5 保护层（厚度 $<5\text{ nm}$ ），降低化学侵蚀速率 20%。实际应用中，含 1% NbC 的硬质合金衬里在化工厂（ H_2SO_4 ，pH 2）运行 3 年，表面无明显腐蚀。

X 射线衍射 (XRD) 分析显示, TiC 和 TaC 与 WC 形成 (W,Ti,Ta) C 固溶体, 晶格常数变化 $0.1\% \pm 0.02\%$, 硬度增加 100200 HV, 因固溶体增强了晶界强度。固溶体的形成还降低了界面能 (从 1.5 J/m^2 至 1.0 J/m^2), 提高抗裂能力。例如, 含 10% TiC 和 3% TaC 的硬质合金模具在复合材料冲压中, 耐磨性提升 40%, 寿命超过 5000 小时 ± 500 小时。

辅助碳化物的协同作用还体现在环境适应性上。在湿热环境 (40°C , 90%湿度), TiC 和 NbC 通过钝化层降低腐蚀速率 10%15%; 在高温 (1000°C), TaC 抑制 WC 氧化 (WO_3 挥发减少 20%)。优化 TiC/TaC/NbC 比例 (5:1:0.5) 可平衡硬度 (HV 1800 ± 30)、韧性 (K_{1c} $12 \text{ MPa m}^{1/2} \pm 0.5$) 和抗腐蚀性。例如, 含 12% TiC 的硬质合金刀具在海洋钻探 (盐度 3.5%) 中, 寿命延长 30%, 优于传统含 Co 材料 (寿命 < 2000 小时)。

2.2 黏结相的分布与作用

黏结相 (主要是钴 Co 和镍 Ni) 作为硬质合金的韧性基体, 连接碳化物颗粒, 调控韧性、抗腐蚀性和加工性能。其分布均匀性和比例是微观结构优化的关键。

2.2.1 Co、Ni 的晶界润湿行为

黏结相在烧结过程中的润湿行为决定了硬质合金的致密性和相分布。钴 (Co, FCC 结构, 熔点 $1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) 在液相烧结 ($1350 \sim 1450^\circ\text{C}$) 中润湿 WC 晶粒, 接触角低至 $5^\circ \pm 1^\circ$, 界面能从 1.5 J/m^2 降至 $0.5 \text{ J/m}^2 \pm 0.1 \text{ J/m}^2$, 驱动致密化 (孔隙率 $< 0.1\% \pm 0.02\%$)。透射电镜 (TEM) 显示, Co 层厚度为 $520 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$, 偏析率 $< 5\%$, 形成连续的黏结网络。润湿过程的吉布斯自由能变化 ($\Delta G \approx 50 \text{ kJ/mol} \pm 5 \text{ kJ/mol}$) 促进晶粒重排, Co 扩散系数 $D_{\text{Co}} \approx 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \pm 0.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (1400°C) 决定了分布均匀性。

镍 (Ni, 熔点 1455°C) 润湿性稍逊, 接触角为 $10^\circ \pm 2^\circ$, 界面能 $0.7 \text{ J/m}^2 \pm 0.05 \text{ J/m}^2$, 但抗腐蚀性更强。含 Ni 硬质合金在盐雾试验 (ASTM B117, 168 小时) 失重 $< 0.1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0.02 \text{ mg/cm}^2$, 优于含 Co 材料 (失重 0.2 mg/cm^2)。添加铬 (Cr, 0.5%~2%) 可降低接触角至 $7^\circ \pm 1^\circ$, 形成 CrCo 或 CrNi 固溶体, 界面结合能提升至 $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ 。如含 12% Ni 的硬质合金阀门在海水 (pH 8, 盐度 3.5%) 中运行 5 年, 腐蚀速率 $< 0.03 \text{ mm/年} \pm 0.005 \text{ mm/年}$ 。

润湿行为对微观结构稳定性至关重要。Co 过量 ($> 20\%$) 或碳含量不足 ($< 5.8\%$) 可能生成脆性 η 相 ($\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$), 降低韧性 (K_{1c} 降至 $5 \text{ MPa m}^{1/2} \pm 0.5$)。精确控制碳含量 ($5.8\% \sim 6.2\%$) 和烧结温度 ($1380 \sim 1420^\circ\text{C}$) 可确保 Co 层均匀 (厚度偏差 $< 10\%$)。实际案例中, 含 10% Co 的硬质合金刀具通过优化润湿 (接触角 $< 6^\circ$), 晶界结合力提升 15%, 切削寿命延长 $20\% \pm 2\%$ 。

Ni 相在高温和腐蚀环境中的优势明显。含 12% Ni 的硬质合金在高温蒸汽 (500°C , 10 MPa) 中, 腐蚀失重减少 $30\% \pm 5\%$, 界面稳定性提高 10%。TEM 分析显示, Ni 层厚度 $1015 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, Cr 偏聚 (0.5%~1%) 形成 Cr_2O_3 保护层, 抗腐蚀性增强。例如, 含 NiCr 的硬质合金衬里在化工厂 (HCl, pH 2) 运行 3 年, 表面损伤 $< 5 \mu\text{m}$ 。Co 和 Ni 的润湿行为需根据应用优化, Co 适合高韧性, Ni 适合抗腐蚀。

2.2.2 黏结相比例对性能的影响

黏结相比例（5%~20%）是调控硬质合金性能的关键参数。Co 比例从 5% 增至 20%，韧性显著提高（ K_{1c} 从 8 增至 $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ），但硬度下降（HV 2000 至 1400 ± 30 ）。含 10% Co 的硬质合金（Co 层厚度 1015 nm）硬度 HV 1800 ± 30 ，韧性 K_{1c} $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ，适合切削刀具，在高速加工（200 m/min）中磨损量 $< 0.1 \text{ mm}$ ，寿命达 15 小时 ± 1 小时。含 20% Co 的硬质合金韧性好，适用于凿岩钻头，冲击寿命 > 300 小时 ± 20 小时。

镍比例在 5%-15% 时，硬度从 HV 1900 降至 HV 1500 ± 30 ，抗腐蚀性优异，腐蚀速率 $< 0.03 \text{ mm/年} \pm 0.005 \text{ mm/年}$ 。含 12% Ni 的硬质合金衬里在酸性环境（pH 3, H_2SO_4 ）运行 3 年，表面无明显腐蚀；含 15% Ni 的电极在电化学反应（电流密度 $> 100 \text{ mA/cm}^2$ ）中运行 5000 小时，性能稳定。能谱分析（EDS）显示，Co 和 Ni 分布偏差 $< 3\% \pm 0.5\%$ ，反映烧结工艺的高均匀性。

黏结相比例还影响环境适应性。

在湿热环境（40°C, 90% 湿度），高 Co 含量（ $> 15\%$ ）可能导致微腐蚀，韧性降低 $5\% \pm 1\%$ ；Ni 基硬质合金更稳定，韧性降幅 $< 2\%$ 。在高温（800°C），Co 相塑性增强， K_{1c} 提升 5%，但硬度下降 10%；Ni 相高温稳定性更高，硬度降幅 $< 5\%$ 。优化 Co/Ni 混合比例（1:1 至 2:1）可实现性能平衡。例如，含 10% Co 和 5% Ni 的硬质合金在海洋钻探中，硬度 HV 1700 ± 30 ， K_{1c} $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ ，寿命延长 $25\% \pm 3\%$ 。

黏结相比例的优化需考虑晶粒尺寸协同效应。

细晶（ $0.51 \mu\text{m}$ ）与高 Co（15%~20%）结合，韧性最佳；粗晶（ $510 \mu\text{m}$ ）与低 Ni（5%~8%）结合，抗腐蚀性强。实际应用中，含 12% Co 的硬质合金冲压模具（晶粒 $1.5 \mu\text{m}$ ）在高频冲击（ $> 10^4$ 次/小时）中，变形量 $< 0.01 \text{ mm}$ ，寿命提升 $30\% \pm 5\%$ 。

2.3 界面与缺陷分析

WC 与黏结相的界面以及微观缺陷（如孔隙、裂纹、非晶相）对硬质合金的性能具有深远影响。界面决定相间结合强度，缺陷可能是性能劣化的起点。

2.3.1 WCCo 界面的电子结构

WCCo 界面的电子结构是硬质合金性能稳定的微观基础。

密度泛函理论（Density Functional Theory, DFT）模拟表明，WC(0001)/Co(111)界面通过 WCo 键（键长 $2.52.8 \text{ \AA} \pm 0.1 \text{ \AA}$ ）和 CCo 键（键能 $4 \text{ eV} \pm 0.2 \text{ eV}$ ）形成强结合，界面能为 $0.5 \text{ J/m}^2 \pm 0.05 \text{ J/m}^2$ 。Co 的 3d 轨道与 WC 的 pd 轨道杂化，电荷转移量约为 $0.2 \text{ e/原子} \pm 0.02 \text{ e/原子}$ ，结合功达 $2.5 \text{ J/m}^2 \pm 0.1 \text{ J/m}^2$ ，高于 WCNi 界面（ 2.0 J/m^2 ）。添加 Cr（0.5%~1%）形成 WCrCo 过渡层，界面能降至 0.4 J/m^2 ，结合功增至 2.7 J/m^2 ，抗裂能力超过 $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.5$ 。

透射电镜（Transmission Electron Microscopy, TEM）验证界面厚度约为 $2 \text{ nm} \pm 0.2 \text{ nm}$ ，晶

格错配 $<2\%\pm 0.2\%$ ，确保结合稳定性。优化界面的硬质合金刀具在高速切削（150 m/min）中，裂纹扩展率降低 $30\%\pm 5\%$ ，寿命达15小时 ± 1 小时。Cr偏聚（0.5%1%）形成 Cr_2O_3 保护层，含Cr的硬质合金在酸性环境（pH 2, H_2SO_4 ）中腐蚀深度 $<5\mu\text{m}$ ，寿命超过3年。

界面电子结构的调控还影响其他性能。

添加Mo（0.5%）可提升结合功至 $2.8\text{ J/m}^2\pm 0.1\text{ J/m}^2$ ，界面应力降低10%；Ni基界面因电荷转移较低（0.15 e/原子），抗腐蚀性更强（腐蚀速率 $<0.02\text{ mm/年}$ ）。例如，含Mo的硬质合金模具在高温冲压（600°C）中，界面应力 $<150\text{ MPa}\pm 10\text{ MPa}$ ，裂纹萌生率降低20%。DFT模拟还预测Ta添加（0.5%）可进一步增强结合功（至 2.9 J/m^2 ），正在实验验证中。

界面强度的提升对应用至关重要。

含Cr的硬质合金刀具在切削钛合金（Ti6Al4V）时，界面剥离率 $<1\%$ ，寿命延长25%。湿热环境（40°C，90%湿度）可能引发界面微腐蚀（失重 $<0.1\text{ mg/cm}^2$ ），Ni基界面更稳定（失重 $<0.05\text{ mg/cm}^2$ ）。

2.3.2 孔隙、裂纹与非晶相的形成机制

硬质合金中的孔隙、裂纹和非晶相是影响其性能的主要缺陷，源于制备工艺、原料特性以及热力学条件的复杂交互作用。这些缺陷对材料的强度、韧性、耐磨性和耐腐蚀性产生显著影响，特别是在高应力或极端环境下的应用中。以下是对各类缺陷形成机制、微观特征及性能影响的详细分析。

孔隙的形成机制

形成原因：

孔隙是烧结不完全的主要产物，通常由于粉末颗粒间气体（ H_2 、CO等）未能完全排出，或颗粒堆积不均匀导致局部收缩不一致（《Journal of Materials Science》2025）。

混料过程中，粉末颗粒团聚（团聚尺寸 $>20\mu\text{m}$ ）或有机粘结剂（如石蜡）分解不完全（残炭率 $>0.1\%$ ），在烧结时形成气体，阻碍颗粒结合（ITIA 2024）。

烧结温度不足（ $<1300^\circ\text{C}$ ）或保温时间过短（ <30 分钟），颗粒扩散不完全，孔隙未能闭合（《中国有色金属学报》2024）。

纳米级硬质合金（晶粒 $<0.2\mu\text{m}$ ）因表面能高（ $>1\text{ J/m}^2$ ），颗粒间吸附气体能力增强，孔隙率上升（ITIA 2024）。

微观特征：

常规硬质合金（晶粒 $1\text{--}5\mu\text{m}$ ）的孔隙率通常 $<0.1\%\pm 0.02\%$ ，而纳米级硬质合金（晶粒 $<0.2\mu\text{m}$ ）因颗粒表面活性高，孔隙率可升至1%-2%（ISO 3326:2013）。

扫描电镜（SEM）分析显示，孔隙尺寸为 $10\text{--}100\text{ nm}\pm 10\text{ nm}$ ，形状多为球形或椭圆形，分布于晶界或钴相中（《Journal of Materials Science》2025）。

孔隙体积占比增加会导致应力集中，孔隙周围应力可达 500-600 MPa，增加裂纹萌生风险约 15%-20%（《中国有色金属学报》2024）。

性能影响：

孔隙率每增加 0.1%，抗弯强度（TRS）下降约 3%-5%，例如从 4000 MPa 降至 3800-3900 MPa（ASTM B406 测试）。

纳米级硬质合金因孔隙率高，抗弯强度进一步下降至 3500 MPa±100 MPa，硬度降低约 50-80 HV（ITIA 2024）。

孔隙降低材料的致密度，耐腐蚀性下降，盐雾环境中腐蚀速率增加约 10%-15%（从 0.05 mm/年增至 0.055-0.0575 mm/年，ASTM G31）。

优化方法：

热等静压（HIP，200 MPa，1350°C）通过高压和高温促进孔隙闭合，孔隙率可降至 0.05%±0.01%，硬度提升 100-120 HV±20 HV（《Journal of Materials Science》2025）。

在高冲击钻进中（频率>2000 次/分钟），经 HIP 处理的硬质合金钻头抗冲击性提升约 20%-25%，寿命可达 250-280 小时±20 小时（《中国有色金属学报》2024）。

增加预烧结步骤（800-1000°C，1 小时），提前排出气体，孔隙率降低约 0.02%-0.03%（ITIA 2024）。

裂纹的形成机制

形成原因：

裂纹主要源于 WC 和 Co 的热膨胀失配，WC 的热膨胀系数为 $5.2 \times 10^{-6}/K$ ，而 Co 为 $12 \times 10^{-6}/K$ ，相差约 2 倍，导致烧结冷却过程中产生热应力（《Journal of Materials Science》2025）。

快速冷却（冷却速率>100°C/s）使热应力集中，特别是在晶界处，应力可达 300-400 MPa，引发微裂纹（《中国有色金属学报》2024）。

机械应力（如压制过程中压力不均>50 MPa）或烧结后加工应力（如磨削应力>200 MPa）也可能导致裂纹萌生（ITIA 2024）。

晶粒尺寸对裂纹敏感性有影响，晶粒<0.5 μm 的纳米级硬质合金因晶界面积大（占总体积 40%-50%），热应力分布更复杂，裂纹形成率增加约 10%（《Journal of Materials Science》2025）。

微观特征：

版权与免责声明

透射电镜（TEM）分析显示，微裂纹尺寸为 $0.5\text{--}2\text{ }\mu\text{m}\pm 0.2\text{ }\mu\text{m}$ ，通常沿晶界扩展，裂纹尖端应力强度因子（ K_{I} ）约为 $2\text{--}3\text{ MPa m}^{1/2}$ （《中国有色金属学报》2024）。

钴相的塑性变形（应变 $<5\%\pm 0.5\%$ ）可通过应变硬化吸收部分能量，抑制裂纹扩展，特别是在高 Co 含量材料中（ITIA 2024）。

含 12% Co 的硬质合金裂纹深度通常 $<10\text{ }\mu\text{m}\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ ，优于含 6% Co 的材料（裂纹深度 $>15\text{ }\mu\text{m}\pm 3\text{ }\mu\text{m}$ ），因高 Co 含量增加了塑性缓冲区（《Journal of Materials Science》2025）。

性能影响：

裂纹深度每增加 $5\text{ }\mu\text{m}$ ，抗弯强度下降约 5%-8%，例如从 4000 MPa 降至 3700-3800 MPa（ASTM B406）。

裂纹增加疲劳失效风险，循环载荷（ 10^7 次，500 MPa）下，裂纹扩展速率提升约 20%-25%（《中国有色金属学报》2024）。

在高温循环中（ 500°C ，1000 次），裂纹导致热疲劳性能下降，寿命缩短约 15%-20%（ITIA 2024）。

优化方法：

添加 TaC（1%-2%）或 NbC（0.5%-1%）增强晶界强度，晶界结合能从 1.0 J/m^2 提升至 $1.2\text{--}1.3\text{ J/m}^2$ ，裂纹扩展率降低 $15\%\pm 3\%$ （《Journal of Materials Science》2025）。

控制冷却速率（ $<20^{\circ}\text{C/s}$ ），减少热应力，裂纹深度降低约 30%-40%，从 $10\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $6\text{--}7\text{ }\mu\text{m}$ （《中国有色金属学报》2024）。

在热循环中（ 500°C ，1000 次），含 TaC 的硬质合金模具裂纹长度 $<5\text{ }\mu\text{m}\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ ，寿命延长约 $30\%\text{--}35\%\pm 5\%$ （ITIA 2024）。

非晶相的形成机制

形成原因：

非晶相在高温烧结（ $>1500^{\circ}\text{C}$ ）或碳含量不足（ $<5.8\text{ wt}\%$ ）时形成，主要由于 WC 分解或碳扩散不均匀导致局部非晶化（《Journal of Materials Science》2025）。

高温下（ $>1500^{\circ}\text{C}$ ），WC 分解为 W_2C 或 W，同时钴相挥发（挥发率 $>0.5\%$ ），局部区域碳不足，形成非晶相（ITIA 2024）。

碳含量不足（ $<5.8\text{ wt}\%$ ）时，WC 无法维持晶体结构，部分区域转化为非晶态，特别是在晶界附近（《中国有色金属学报》2024）。

烧结气氛中氧气（ $>0.1\%$ ）或水分（ $>0.05\%$ ）与碳反应生成 CO/CO_2 ，消耗碳元素，加剧非

晶相形成 (ITIA 2024)。

微观特征:

X 射线衍射 (XRD) 显示非晶相特征宽峰 ($2\theta \approx 35^\circ \pm 0.5^\circ$), 无明显晶体衍射峰 (《Journal of Materials Science》2025)。

TEM 测定非晶相厚度为 $5-10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, 通常分布于晶界或钴相中, 体积占比约为 2%-5% (《中国有色金属学报》2024)。

非晶相的硬度极低 (约 $\text{HV } 200-250 \pm 30$), 远低于 WC ($\text{HV } 2200-2500$), 导致局部软化 (ITIA 2024)。

性能影响:

非晶相体积占比每增加 1%, 硬度下降约 50-80 HV, 例如从 HV 1800 降至 HV 1720-1750 (《Journal of Materials Science》2025)。

韧性下降约 5%-10%, 断裂韧性 (KIC) 从 $10 \text{ MPa m}^{1/2}$ 降至 $9-9.5 \text{ MPa m}^{1/2}$ (ITIA 2024)。非晶相降低耐磨性, 磨损率增加约 10%-15%, 从 $0.06 \text{ mm}^3/\text{N m}$ 增至 $0.066-0.069 \text{ mm}^3/\text{N m}$ (ASTM G65)。

优化方法:

添加 VC (0.2%-0.5%) 或 Cr_3C_2 (0.3%-0.8%) 通过抑制碳扩散, 降低非晶相比比例至 $<2\% \pm 0.5\%$, 韧性提升约 10%-12% (《中国有色金属学报》2024)。

控制烧结温度 ($1350-1450^\circ\text{C}$) 和气氛 (氧气 $<0.05\%$), 非晶相形成率降低约 15%-20% (ITIA 2024)。

在高速切削中 (200 m/min), 含 VC 的硬质合金刀具疲劳裂纹深度 $<10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$, 寿命延长 25%-30% $\pm 3\%$ (《Journal of Materials Science》2025)。

缺陷的综合影响

环境因素:

湿热环境 (40°C , 90%湿度) 加剧孔隙腐蚀, 孔隙内水分吸附导致局部应力集中, 抗弯强度降低约 5%-7%, 例如从 4000 MPa 降至 3700-3800 MPa (ASTM B406)。

Ni 基硬质合金 (WC-Ni) 因 Ni 相耐腐蚀性强 (腐蚀速率 $<0.03 \text{ mm/年}$), 在湿热环境中强度降幅 $<2\%$, 优于 Co 基硬质合金 (ITIA 2024)。

高温氧化环境 (800°C , 空气中) 中, 非晶相加速氧化, 氧化增重率增加约 10%-15% (0.1 mg/cm^2 增至 $0.11-0.115 \text{ mg/cm}^2$, ASTM G54)。

版权与法律责任声明

性能优化：

优化碳含量（ $6.0\% \pm 0.2\%$ ）和采用 HIP 工艺可将缺陷率降至最低，孔隙率 $< 0.05\%$ ，裂纹深度 $< 5 \mu\text{m}$ ，非晶相占比 $< 1\%$ （《中国有色金属学报》2024）。

含 12% Co 的硬质合金钻头通过 HIP 处理（200 MPa，1350°C），孔隙率降至 0.04%-0.05%，抗冲击寿命提升约 30%-35%，达 260-290 小时（ITIA 2024）。

在热循环（500°C，1000 次）和湿热环境（40°C，90%湿度）中，经优化处理的硬质合金耐腐蚀性和抗疲劳性能提升约 15%-20%（《Journal of Materials Science》2025）。

2.3.3 避免和减少硬质合金缺陷产生的方法

为了提高硬质合金的质量和可靠性，避免和减少孔隙、裂纹和非晶相等缺陷的产生是关键。以下是从原料控制、工艺优化、检测反馈和后处理等方面提出的具体方法，确保缺陷率降至最低，提升材料性能。

1. 原料控制

高纯原料选择：

使用高纯 WC 粉末（纯度 $> 99.9\%$ ，氧化物 $< 0.02\%$ ）和 Co 粉末（纯度 $> 99.8\%$ ），减少氧化物消耗碳，降低非晶相形成率约 10%-15%（《Journal of Materials Science》2025）。

控制炭黑质量（纯度 $> 99.9\%$ ，粒径 $< 10 \mu\text{m}$ ），避免杂质（如硫、氧）引发孔隙或非晶相，孔隙率降低约 0.02%（ITIA 2024）。

晶粒抑制剂添加：

添加 VC（0.2%-0.5%）、 Cr_3C_2 （0.3%-0.8%）或 TaC（0.5%-1%）抑制晶粒长大和碳扩散，晶界强度提升 10%-15%，非晶相占比降低至 $< 1.5\%$ （《中国有色金属学报》2024）。

TaC 增强晶界结合能（从 1.0 J/m^2 提升至 $1.2\text{-}1.3 \text{ J/m}^2$ ），裂纹扩展率降低 15%-20%（ITIA 2024）。

2. 混料与压制优化

混料均匀性：

采用行星式球磨机混料（16-24 小时，转速 400-600 r/min），确保碳分布偏差 $< 0.05 \text{ wt}\%$ ，孔隙率降低约 0.03%-0.05%（《Journal of Materials Science》2025）。

使用分散剂（如硬脂酸 0.1%-0.3%）和超声分散技术，减少 WC 粉末团聚，均匀性提升 10%-15%（ITIA 2024）。

选用低残炭粘结剂（如 PEG 或 PVA，残炭率 $< 0.03\%$ ），避免气体生成，孔隙率降低约 0.02%（《中国有色金属学报》2024）。

压制工艺：

控制压制压力（50-100 MPa），避免压力不均引发应力集中，裂纹形成率降低约 10%-15%（ITIA 2024）。

采用等静压成型（200-300 MPa），提高坯体致密度，孔隙率降低约 0.05%（《Journal of

Materials Science》2025)。

3. 烧结工艺优化

气氛控制：

真空烧结（真空度 $<10^{-3}$ Pa），控制氧气 $<0.05\%$ 、水分 $<0.03\%$ ，避免碳氧化，非晶相形成率降低约 15%-20%（《中国有色金属学报》2024）。

使用保护气氛（如 Ar 或 H_2 /Ar 混合气， $H_2<2\%$ ），碳势控制在 0.8-1.0，渗碳和脱碳率降低约 10%（ITIA 2024）。

温度与冷却：

烧结温度控制在 1350-1450°C ($\pm 5^\circ\text{C}$)，保温时间 1-1.5 小时，确保颗粒充分扩散，孔隙率 $<0.05\%$ （ISO 3326:2013）。

冷却速率控制在 10-20°C/s，减少热应力，裂纹深度从 10 μm 降至 5-6 μm （《Journal of Materials Science》2025）。

采用分段冷却（1450°C 至 1000°C 以 20°C/s，1000°C 至室温以 5°C/s），热应力降低约 20%-30%（ITIA 2024）。

HIP 工艺：

热等静压（HIP，150-200 MPa，1350-1400°C）消除微孔隙，孔隙率降至 0.04%-0.05%，抗弯强度提升 5%-8%（从 3800 MPa 升至 4000-4100 MPa，ASTM B406）。

HIP 后硬度提升 100-120 HV，耐磨性提高约 15%-20%（ASTM G65）。

4. 检测与反馈

在线监测：

采用红外光谱监测烧结气氛（CO、CO₂、H₂O 含量），实时调整气氛，孔隙和非晶相形成率降低约 10%-15%（ITIA 2024）。

使用声发射技术检测烧结过程中微裂纹，裂纹检测精度提升至 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ （《中国有色金属学报》2024）。

微观分析：

结合 SEM、TEM 和 XRD 分析孔隙尺寸（10-100 nm）、裂纹深度（5-10 μm ）和非晶相占比（ $<2\%$ ），缺陷率降低约 15%-20%（《Journal of Materials Science》2025）。

电子背散射衍射（EBSD）分析晶界应力分布，优化工艺参数，晶界应力偏差控制在 ± 50 MPa（ITIA 2024）。

性能测试：

定期进行抗弯强度（ASTM B406）、硬度（ISO 6507）和耐磨性（ASTM G65）测试，建立缺陷-性能数据库，优化工艺（《中国有色金属学报》2024）。

5. 后处理与表面优化

表面处理：

抛光去除表面孔隙和微裂纹（厚度 0.01-0.03 mm），表面粗糙度 $Ra<0.2 \mu\text{m}$ ，耐腐蚀性提升

版权与法律声明

约 10%-15% (ASTM G31)。

PVD TiAlN 或 CrN 涂层 (厚度 2-5 μm)，提高表面硬度 (+200 HV) 和抗氧化性 (1200°C 氧化增重 <0.1 mg/cm²)，涂层附着力提升 15%-20% (ASTM C633)。

热处理：

低温退火 (600-800°C, 1 小时) 释放残余应力，裂纹深度降低约 20%-30%，从 10 μm 降至 7-8 μm (《Journal of Materials Science》2025)。

低温渗氮 (500-600°C, 2 小时) 增强表面耐腐蚀性，腐蚀速率降低约 15% (ASTM G31)。

6. 环境适应性优化

耐腐蚀性提升：

采用 Ni 基黏结相 (WC-Ni) 替代 Co 基，湿热环境中 (40°C, 90%湿度) 强度降幅从 5% 降至 1.5%-2%，腐蚀速率 <0.03 mm/年 (ITIA 2024)。

添加 Cr (0.5%-1%) 形成 Cr₂O₃ 保护层，耐腐蚀性提升约 20%，盐雾环境中腐蚀速率降至 0.025-0.03 mm/年 (ASTM G31)。

高温稳定性：

添加 TiC 或 TaC (5%-10%) 提高抗氧化性，1000°C 氧化增重 <0.08 mg/cm²，缺陷率降低约 10%-15% (ITIA 2024)。

优化钴相分布 (厚度 0.1-0.5 μm)，高温下钴挥发率降低约 0.5%-1%，非晶相形成率降低约 15% (《中国有色金属学报》2024)。

7. 智能化工艺控制

AI 优化：

使用人工智能 (AI) 优化混料和烧结参数，均匀性提升 10%-15%，孔隙率降低约 0.03%-0.05% (ITIA 2024)。

机器学习预测缺陷形成 (如孔隙、裂纹)，缺陷率降低约 20%-25% (《Journal of Materials Science》2025)。

实时反馈：

引入在线温度监测 (精度 $\pm 2^\circ\text{C}$) 和压力监测 (精度 $\pm 5\text{ MPa}$)，烧结过程中缺陷率降低约 15%-20% (ITIA 2024)。

智能控制系统调整冷却速率，热应力降低约 20%-30%，裂纹形成率降低约 15% (《中国有色金属学报》2024)。

综合效果

通过上述方法，硬质合金的孔隙率可降至 0.04%-0.05%，裂纹深度 <5 μm ，非晶相占比 <1%，整体缺陷率降低 20%-30% (ITIA 2024)。

性能提升显著：抗弯强度提高 5%-10% (至 4000-4200 MPa)，硬度提升 100-150 HV，耐磨性提高 15%-20% (ASTM G65)，寿命延长约 30%-40% (《Journal of Materials Science》2025)。

在高冲击 (频率 >2000 次/分钟) 和湿热环境 (40°C, 90%湿度) 中，优化后的硬质合金耐

用性和可靠性提升约 25%-35%（《中国有色金属学报》2024）。

2.4 微观结构表征技术

先进表征技术为解析硬质合金微观结构和相态提供了精确工具，支持性能优化和质量控制。

2.4.1 SEM、TEM 与 EBSD 的应用

扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM, 分辨率<1 nm)用于表征 WC 晶粒(0.110 μ m)和黏结相(530 nm $\pm$ 2 nm)的形貌与分布。背散射电子(BSE)成像区分 WC 和 Co, 含 10% Co 的硬质合金晶粒均匀性>95% $\pm$ 2%, 孔隙率<0.1% $\pm$ 0.02%。SEM 还可检测裂纹(0.52 μ m)和孔隙(10-100 nm), 为工艺优化提供依据。例如, HIP 处理后孔隙率降至 0.05%, 硬度提升 5% $\pm$ 1%。

透射电镜(Transmission Electron Microscope, TEM, 分辨率<0.2 nm)揭示了 WC(0001)/Co(111)界面的原子级结构, 晶格错配<2% $\pm$ 0.2%, 选区电子衍射(Selective Electron Diffraction, SAED)验证 WC 的 d_{0001} 间距为 2.837 $\text{\AA} \pm 0.005$ $\text{\AA}$ 。含 Cr 的硬质合金显示 Cr 偏聚(浓度 0.5% $\pm$ 0.2%), 形成 Cr₂O₃层, 抗腐蚀性提升 30% $\pm$ 5%。TEM 还可分析非晶相(厚度 510 nm), 指导碳含量控制(5.8% $\pm$ 6.2%)。例如, TEM 优化含 Mo 的硬质合金界面(结合功 2.8 J/m²), 刀具寿命延长 15% $\pm$ 2%。

电子背散射衍射(Electron Backscatter Diffraction, EBSD)用于研究晶粒取向和应力分布。细晶硬质合金(0.51 μ m)呈随机取向, 粗晶硬质合金(510 μ m)显示<0001>择优取向(强度>2 mrd $\pm$ 0.2 mrd)。EBSD 测定残余应力<200 MPa $\pm$ 10 MPa, 退火(500°C, 2 小时)降低 10% $\pm$ 2%。含 TaC 的硬质合金应力均匀性提升 20%, 裂纹萌生率降低 15% $\pm$ 3%。例如, 含 12% Co 的硬质合金断口显示穿晶断裂, 韧性 K_{1c} 14 MPa m^{1/2} $\pm$ 0.5。

实际应用中, SEM、TEM 和 EBSD 协同解析微观结构。例如, 含 10% Co 的硬质合金刀具通过 SEM 确认晶粒 1.5 μ m $\pm$ 0.2 μ m, TEM 验证 Co 层 15 nm $\pm$ 2 nm, EBSD 测定应力<150 MPa $\pm$ 10 MPa, 确保性能满足切削标准(硬度 HV 1800 $\pm$ 30, K_{1c} 12 MPa m^{1/2})。

2.4.2 X 射线衍射 (XRD) 与能谱分析 (EDSA)

X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)用于表征硬质合金的相组成和晶体结构, WC 主峰位于 $2\theta=31.5^\circ$ 和 $35.6^\circ \pm 0.1^\circ$, 晶粒尺寸范围 0.110 μ m。残余应力引起峰位移<0.1 $^\circ \pm 0.02^\circ$, 反映烧结应力(<200 MPa)。含 TiC 的硬质合金显示(W,Ti)C 固溶体峰偏移 0.2 $^\circ \pm 0.05^\circ$, 需控制碳含量(5.8% $\pm$ 6.2%)以避免 η 相($2\theta \approx 40^\circ \pm 0.5^\circ$)。XRD 还可检测非晶相(宽峰 $2\theta \approx 35^\circ \pm 0.5^\circ$), 含 VC 的硬质合金非晶相比例<2% $\pm$ 0.5%, 硬度提升 5% $\pm$ 1%。

能谱分析(Energy Diffraction Spectrum Analysis EDSA)测定元素分布, 含 10% Co 的硬质合金 Co 分布偏差<3% $\pm$ 0.5%, Cr 偏聚浓度 0.5% $\pm$ 0.2%。含 12% Ni 的硬质合金在酸性环境(pH 3, HCl)腐蚀速率 0.03 mm/年 $\pm$ 0.005 mm/年, EDSA 确认 Ni 层均匀性>95% $\pm$ 2%。

湿热环境(40°C, 90%湿度)可能导致 Co 偏聚(偏差增至 5%±1%), Ni 基硬质合金更稳定(偏差<2%)。

XRD 和 EDSA 结合可全面评估微观结构。例如, 含 10% Co 的硬质合金通过 XRD 确认晶粒 $1.5\mu\text{m}\pm 0.2\mu\text{m}$, 无 η 相; EDSA 验证 Co 厚度 $15\text{nm}\pm 2\text{nm}$, Cr 偏聚 $1\%\pm 0.2\%$, 性能满足刀具标准(硬度 $\text{HV } 1800\pm 30$, $K_{1c} 12\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}\pm 0.5$)。实际应用中, 含 TiC 的硬质合金模具通过 XRD 和 EDSA 优化固溶体比例($\text{Ti}/\text{W}=0.1\pm 0.02$), 耐磨性提升 20%, 寿命>6000 小时 ± 500 小时。

参考文献

按 APA 风格排序, 包含 16 篇, 涵盖英文和中文, 聚焦微观结构与相态。

Exner, H. E. (1979). Physical and chemical nature of cemented carbides. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173. <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>

埃克斯纳, H. E. (1979). 硬质合金的物理与化学性质。《国际金属评论》, 24(1), 149173。

Gurland, J. (1988). The fracture toughness of cemented carbides. *Journal of Metals*, 40(7), 1923. 格兰德, J. (1988). 硬质合金的断裂韧性。《金属学报》, 40(7), 1923。

Lassner, E., & Schubert, W. D. (1999). *Tungsten: Properties, chemistry, technology of the element, alloys, and chemical compounds*. New York, NY: Springer.

拉斯纳, E., & 舒伯特, W. (1999). 钨: 元素的性质、化学、技术、合金及化合物。纽约: 施普林格出版社。

Prakash, L. J. (2014). Hardmetals: Structure, properties, and performance. In V. K. Sarin (Ed.), *Comprehensive hard materials* (Vol. 1, pp. 2954). Oxford, UK: Elsevier.

普拉卡什, L. J. (2014). 硬质合金: 结构、性能与表现。载于 V. K. Sarin (编), 《硬材料全书》(第 1 卷, 页 2954)。英国牛津: 爱思唯尔出版社。

Upadhyaya, G. S. (1998). *Cemented tungsten carbides: Production, properties, and testing*. Norwich, NY: William Andrew Publishing.

乌帕迪亚亚, G. S. (1998). 硬质合金: 生产、性能与测试。纽约诺维奇: 威廉安德鲁出版社。

Wang, H., & Fang, Z. Z. (2019). Thermal and mechanical properties of cemented carbides under extreme conditions. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 82, 7685. 王华, & 方志刚. (2019). 极端条件下硬质合金的热学与力学性能。《国际难熔金属与硬材料杂志》, 82, 7685。

Zhang, L., & Chen, S. (2017). Corrosion behavior of cemented carbides in acidic environments. *Corrosion Science*, 125, 8795.

张雷, & 陈树. (2017). 硬质合金在酸性环境中的腐蚀行为。《腐蚀科学》, 125, 8795。

Chen, X., & Zhang, Y. (2022). DFT study of WCCo interface in cemented carbides. *Computational Materials Science*, 201, 110873.

陈晓, & 张勇. (2022). 硬质合金 WCCo 界面的 DFT 研究。《计算材料科学》, 201, 110873。

Li, J., & Wang, S. (2021). Microstructural characterization of cemented carbides using advanced microscopy. *Materials Characterization*, 178, 111234.

李军, & 王帅. (2021). 硬质合金微观结构的先进显微表征。《材料表征》, 178, 111234。

中钨在线. (2023). 硬质合金的性能与应用 [Properties and applications of cemented carbide]. 检索自 <http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation>

Chinatungsten Online. (2023). *Properties and applications of cemented carbide*. Retrieved from

朱立群, & 李卫平. (2018). 硬质合金制造技术进展 [Advances in cemented carbide manufacturing

technology]. 《材料导报》, 32(10), 16531660.

Zhu, L. Q., & Li, W. P. (2018). *Advances in cemented carbide manufacturing technology*. *Materials Review*, 32(10), 16531660.

李志强, & 王志勇. (2021). 硬质合金回收技术研究进展 [Progress in cemented carbide recycling technology]. 《稀有金属材料与工程》, 50(8), 29712978.

Li, Z. Q., & Wang, Z. Y. (2021). *Progress in cemented carbide recycling technology*. *Rare Metal Materials and Engineering*, 50(8), 29712978.

刘伟, & 张华. (2020). 硬质合金高温氧化行为研究 [Study on hightemperature oxidation behavior of cemented carbides]. 《材料科学与工程学报》, 38(4), 512518.

Liu, W., & Zhang, H. (2020). *Study on hightemperature oxidation behavior of cemented carbides*. *Journal of Materials Science and Engineering*, 38(4), 512518.

王涛, & 陈明. (2019). 硬质合金烧结动力学研究进展 [Progress in sintering kinetics of cemented carbides]. 《粉末冶金技术》, 37(5), 321329.

Wang, T., & Chen, M. (2019). *Progress in sintering kinetics of cemented carbides*. *Powder Metallurgy Technology*, 37(5), 321329.

Garcia, J., & Ciprés, V. C. (2018). Wear mechanisms of cemented carbides in cutting applications. *Wear*, 408409, 126134.

加西亚, J., & 西普雷斯, V. C. (2018). 硬质合金在切削应用中的磨损机制. 《磨损》, 408409, 126134.

Fang, Z. Z., & Koopman, M. C. (2017). Advances in cemented carbide processing and properties. *Annual Review of Materials Research*, 47, 381403.

方志刚, & 库普曼, M. C. (2017). 硬质合金加工与性能的进展. 《材料研究年评》, 47, 381403.

中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

微信：关注“中钨在线”





附录：

硬质合金根据碳化钨晶粒不同分为哪些种类？

硬质合金是以碳化钨（WC）为主要硬质相、钴（Co）或镍（Ni）为黏结相的复合材料，其性能和应用领域与 WC 晶粒尺寸密切相关。晶粒尺寸不仅影响硬度和韧性，还对材料的耐磨性、抗冲击性、高温稳定性以及加工精度产生深远影响。根据 WC 晶粒尺寸，硬质合金可分为多个种类，从传统粗大晶粒到现代纳米级晶粒，满足不同工业需求。以下是详细分类及其特点的全面描述：

1. 粗晶硬质合金

晶粒尺寸： $>5\ \mu\text{m}$ （通常 $5\text{-}20\ \mu\text{m}$ ，ISO 513）。

粗晶硬质合金特点

粗晶硬质合金的 WC 晶粒较大，晶界数量较少，黏结相（Co）分布均匀，晶界面积占总体积的比例仅约 5%-10%（《Journal of Materials Science》2025）。这使得材料具有较好的抗冲击性和抗疲劳性能。

硬度较低，范围为 HV 1200-1500，但抗弯强度（TRS）较高，可达 2200-2500 MPa，断裂韧性（KIC）为 $15\text{-}20\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ （《中国有色金属学报》2024）。

耐磨性相对中等，磨损率约为 $0.08\text{-}0.10\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ （ASTM G65 测试），但在高冲击负荷下表现出色，适合承受剧烈冲击和振动的工作环境。

高温稳定性较好， 800°C 时硬度保留率约 85%-90%，适合中高温工况（ITIA 2024）。

版权与免责声明

粗晶硬质合金微观结构

扫描电镜（SEM）分析显示，WC 晶粒呈多边形，晶粒间钴相厚度约为 1-3 μm ，晶界结合强度较高，约为 1.5-2 J/m^2 （《Journal of Materials Science》2025）。

晶粒尺寸较大导致晶界滑移阻力较低，有助于吸收冲击能量，减少裂纹扩展。

粗晶硬质合金应用

粗晶硬质合金主要用于采矿工具、钻头、掘进设备和大型冲压模具，适用于高冲击负荷场景，如花岗岩或玄武岩的钻进作业（ISO 513）。

在采矿钻进中，其钻头寿命可达 1500-2000 米，特别是在硬岩条件下表现出较高的抗断裂能力（ITIA 2024）。

还常用于重型机械的耐磨零件，如挖掘机铲斗齿，能够承受反复冲击和磨损（《中国有色金属学报》2024）。

粗晶硬质合金制备

采用常规粉末冶金工艺，原料为粗大 WC 粉末（5-20 μm ），混料后压制成形，烧结温度通常为 1400-1450°C，保温时间 1-2 小时。

烧结过程中需控制钴相分布，避免晶粒异常长大，通常添加少量 TaC（0.5%-1%）以抑制晶粒生长（ITIA 2024）。

冷却速率控制在 5-10°C/min，防止晶界应力过高导致微裂纹（《Journal of Materials Science》2025）。

2. 中晶硬质合金

晶粒尺寸：1-5 μm （ISO 513）。

中晶硬质合金的特点：

中晶硬质合金的 WC 晶粒尺寸适中，晶界面积占总体积的比例约为 15%-20%，在硬度和韧性之间达到较好的平衡（《Journal of Materials Science》2025）。

硬度为 HV 1500-1800，抗弯强度为 2000-2300 MPa，断裂韧性为 10-15 $\text{MPa m}^{1/2}$ （《中国有色金属学报》2024）。

耐磨性较粗晶硬质合金提升约 10%-15%，磨损率约为 0.06-0.08 $\text{mm}^3/\text{N m}$ （ASTM G65 测试）。

抗冲击性和高温稳定性兼顾，600°C 时硬度保留率约为 90%-95%，适合中等负荷和中等温度的加工环境（ITIA 2024）。

中晶硬质合金的微观结构：

SEM 分析显示，WC 晶粒呈规则多边形，晶粒间钴相厚度约为 0.5-1 μm ，晶界结合强度为

1.2-1.5 J/m²（《Journal of Materials Science》2025）。

晶界数量增加使得裂纹扩展路径更加曲折，提升了材料的抗裂性能，同时晶粒尺寸适中保证了较高的硬度。

中晶硬质合金的应用：

广泛用于通用切削刀具（如铣刀、车刀）、冲压模具、轧辊和耐磨零件，适用于加工中碳钢、铸铁或低硬度不锈钢（ISO 513）。

在切削速度 150-200 m/min 的条件下，刀具寿命可达 1.5-2 小时，特别是在间断切削中表现出较好的抗崩刃性能（《Journal of Materials Science》2025）。

也适用于制造中等精度模具，如汽车零部件冲压模具，能够承受中等冲击和磨损（《中国有色金属学报》2024）。

中晶硬质合金的制备：

采用中粒径 WC 粉末（1-5 μm），通过行星式球磨机混料（12-16 小时，转速 300-400 r/min），确保均匀性。

烧结温度控制在 1350-1400°C，保温时间 1-1.5 小时，添加晶粒抑制剂（如 Cr₃C₂ 0.3%-0.5%）以控制晶粒生长。

烧结后可采用热等静压（HIP，100-120 MPa，1350°C）进一步降低孔隙率（<0.02%，ISO 3326:2013）。

3. 细晶硬质合金

晶粒尺寸：0.5-1 μm（ISO 513）。

细晶硬质合金特点：

细晶硬质合金的 WC 晶粒较小，晶界面积占总体积的比例约为 25%-30%，晶界效应显著增强材料的硬度和耐磨性（《Journal of Materials Science》2025）。

硬度为 HV 1800-2000，抗弯强度为 1800-2200 MPa，断裂韧性为 8-12 MPa m^{1/2}（《中国有色金属学报》2024）。

耐磨性比中晶硬质合金高约 20%-30%，磨损率约为 0.04-0.06 mm³/N m（ASTM G65 测试）。韧性略有下降，但高温性能优异，800°C 时硬度保留率约为 88%-92%，适合高精度加工（ITIA 2024）。

细晶硬质合金微观结构：

SEM 和透射电镜（TEM）分析显示，WC 晶粒呈近圆形或轻微多边形，晶粒间钴相厚度约为 0.2-0.5 μm，晶界结合强度为 1.0-1.3 J/m²（《Journal of Materials Science》2025）。

细小晶粒增加了晶界滑移阻力，提升了材料的抗磨损能力，但也增加了裂纹萌生的可能性。

细晶硬质合金应用：

适用于精密切削刀具（如精车刀、铣刀）、精密模具和耐磨零件，加工不锈钢、淬火钢（HV 40-50 HRC）或高强度合金（ISO 513）。

在切削不锈钢（200 m/min）时，刀具寿命可达 2-3 小时，特别是在连续切削中表现出较好的表面光洁度（ $Ra < 0.4 \mu m$ ）（《Journal of Materials Science》2025）。

也用于制造高精度冲压模具和拉丝模，能够满足公差 $< 0.01 \text{ mm}$ 的要求（《中国有色金属学报》2024）。

细晶硬质合金制备：

使用细粒径 WC 粉末（ $0.5-1 \mu m$ ），高能球磨（16-24 小时，转速 400-600 r/min），添加晶粒抑制剂（如 Cr_3C_2 0.3%-0.5% 或 VC 0.1%-0.3%）。

烧结温度控制在 1350-1380°C，保温时间 1 小时，避免晶粒长大。

烧结后可采用 HIP（120-150 MPa, 1350°C）消除微孔隙，孔隙率 $< 0.015\%$ （ISO 3326:2013）。

4. 超细晶硬质合金

晶粒尺寸： $0.2-0.5 \mu m$ （ISO 513）。

超细晶硬质合金特点：

超细晶硬质合金的 WC 晶粒极小，晶界面积占总体积的比例约为 35%-40%，晶界效应对性能的影响更加显著（《Journal of Materials Science》2025）。

硬度为 HV 1900-2200，抗弯强度为 1700-2000 MPa，断裂韧性为 $7-10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ （《中国有色金属学报》2024）。

耐磨性比细晶硬质合金高约 15%-20%，磨损率约为 $0.03-0.05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ （ASTM G65 测试）。高温性能进一步提升，1000°C 时硬度保留率约为 85%-90%，适合高负荷、高温加工（ITIA 2024）。

表面光洁度优异，加工后工件表面粗糙度可达 $Ra 0.2-0.3 \mu m$ （《中国有色金属学报》2024）。

超细晶硬质合金微观结构：

TEM 分析显示，WC 晶粒呈近圆形，晶粒间钴相厚度约为 $0.1-0.3 \mu m$ ，晶界结合强度为 $0.8-1.2 \text{ J/m}^2$ （《Journal of Materials Science》2025）。

晶界数量极多，裂纹扩展路径更加复杂，进一步增强耐磨性，但韧性下降增加了抗冲击性的挑战。

超细晶硬质合金应用：

适用于超精密加工刀具（如 PCB 钻头、微型铣刀）、穿孔工具和涂层基材，加工钛合金、镍基高温合金或硬化钢（HV 50-60 HRC）（ISO 513）。

在切削钛合金（150 m/min）时，刀具寿命可达 3-4 小时，特别是在高精度加工中表现出优异的尺寸稳定性（《Journal of Materials Science》2025）。

也用于制造高精度拉丝模和微型模具，满足电子元件加工的高精度要求（公差<0.005 mm）（《中国有色金属学报》2024）。

超细晶硬质合金制备：

使用超细 WC 粉末（0.2-0.5 μm ），高能球磨（24-36 小时，转速 500-800 r/min），添加晶粒抑制剂（如 VC 0.1%-0.3%）。

烧结温度控制在 1320-1350°C，保温时间 0.5-1 小时，避免晶粒长大。

采用热等静压（HIP，150 MPa，1350°C）或放电等离子烧结（SPS，1300°C，50 MPa），晶粒尺寸精确控制在 0.2-0.5 μm （ITIA 2024）。

5. 纳米级硬质合金

晶粒尺寸：0.05-0.2 μm （ISO 513）。

纳米级硬质合金特点：

纳米级硬质合金的 WC 晶粒达到纳米尺度，晶界面积占总体积的比例高达 45%-50%，晶界效应极强，显著提升硬度和耐磨性（《Journal of Materials Science》2025）。

硬度为 HV 2000-2400，抗弯强度为 1600-1900 MPa，断裂韧性为 6-9 MPa $\text{m}^{1/2}$ （《中国有色金属学报》2024）。

耐磨性比超细晶硬质合金高约 10%-15%，磨损率约为 0.02-0.04 $\text{mm}^3/\text{N m}$ （ASTM G65 测试）。

纳米效应增强了高温稳定性，1000°C 时硬度保留率>90%，1200°C 时仍可保持 HV 1800-2000（ITIA 2024）。

表面光洁度和加工精度极高，工件表面粗糙度可达 Ra 0.1-0.2 μm （《中国有色金属学报》2024）。

由于晶粒极小，抗冲击性较弱，断裂韧性较低，需通过涂层（如 TiAlN）或梯度结构改善性能（ITIA 2024）。

纳米级硬质合金微观结构：

TEM 和原子力显微镜（AFM）分析显示，WC 晶粒呈近似球形，晶粒间钴相厚度仅 0.05-0.1 μm ，晶界结合强度为 0.7-1.0 J/m²（《Journal of Materials Science》2025）。

晶界滑移阻力极高，显著提升耐磨性，但晶界应力集中也增加了裂纹萌生风险。

纳米级硬质合金应用：

版权与免责声明

适用于超高精度切削（如光学模具加工）、微型模具和电子元件加工，加工高硬度材料（HV 60-70 HRC）或非铁金属（如铝合金）（ISO 513）。

在微型钻头加工（切削速度 100 m/min）中，寿命可达 4-5 小时，特别是在加工高精度电路板（PCB）时表现出极高的尺寸稳定性（《Journal of Materials Science》2025）。

也用于制造超薄拉丝模和医疗器械（如手术刀），满足微米级加工精度（公差<0.002 mm）（《中国有色金属学报》2024）。

纳米级硬质合金制备：

使用纳米级 WC 粉末（0.05-0.1 μm ），高能球磨（24-48 小时，转速 600-1000 r/min），添加晶粒抑制剂（如 VC 0.1%-0.3% 或 Cr_3C_2 0.2%-0.4%）。

采用低温烧结（1300-1350°C）或场辅助烧结技术（如放电等离子烧结 SPS，1300°C，50-80 MPa），晶粒尺寸精确控制在 0.05-0.2 μm 。

使用分散剂（如硬脂酸 0.1%-0.3%）和超声分散技术，减少粉末团聚，均匀性提升 10%-15%（ITIA 2024）。

烧结后可采用 PVD TiAlN 涂层（厚度 2-3 μm ），提高抗氧化性和耐磨性（《Journal of Materials Science》2025）。

6. 其他分类考虑

复合晶粒硬质合金：

晶粒尺寸：结合不同晶粒尺寸（如 0.2 μm 和 5 μm ），形成梯度或双模结构。

复合晶粒硬质合金特点：

硬度（HV 1800-2000）和韧性（KIC 10-15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ）兼顾，耐磨性提升 10%-20%（《Journal of Materials Science》2025）。

梯度结构通过表层细晶（0.2-0.5 μm ）和内层粗晶（5-10 μm ）结合，表面耐磨性强，内部抗冲击性好（ITIA 2024）。

高温性能优异，1000°C 时硬度保留率约为 85%-90%，适合复杂工况（《中国有色金属学报》2024）。

复合晶粒硬质合金微观结构：

SEM 分析显示，表层晶粒细小，晶界密集；内层晶粒较大，钴相厚度约为 1-2 μm ，整体结构分层明显（《Journal of Materials Science》2025）。

梯度结构降低了裂纹扩展速率，抗断裂能力提升约 15%（ITIA 2024）。

复合晶粒硬质合金应用：

多功能刀具（如航空材料加工刀具）和复杂模具，加工复合材料或高温合金（ISO 513）。在切削碳纤维复合材料（150 m/min）时，刀具寿命可达 3-4 小时（《中国有色金属学报》2024）。

复合晶粒硬质合金制备：

采用分层压制技术，表层使用超细 WC 粉末（0.2-0.5 μm ），内层使用粗大 WC 粉末（5-10 μm ）。

烧结温度 1400°C，保温时间 1 小时，控制梯度层厚度（0.5-1 mm）（ITIA 2024）。

掺杂晶粒硬质合金：

晶粒尺寸：通过掺杂调整晶粒尺寸，通常为 0.5-2 μm 。

掺杂晶粒硬质合金特点：

加入 TiC、TaC 或 NbC（5%-10%），晶粒尺寸控制在 0.5-2 μm ，抗氧化性增强（1200°C 氧化增重 < 0.1 mg/cm²），硬度为 HV 1700-1900（《中国有色金属学报》2024）。

耐腐蚀性提升约 10%-15%，盐雾环境中腐蚀速率 < 0.04 mm/年（ASTM G31）。

高温强度提高，1000°C 时抗弯强度保留率约为 80%-85%（ITIA 2024）。

掺杂晶粒硬质合金微观结构：

SEM 和 X 射线衍射（XRD）分析显示，掺杂元素（如 TiC）以固溶态或碳化物颗粒形式分布，抑制 WC 晶粒长大，晶界强度提升约 5%-10%（《Journal of Materials Science》2025）。

掺杂元素减少了钴相的挥发，增强了高温稳定性（ITIA 2024）。

掺杂晶粒硬质合金应用：

高温切削刀具（如航空发动机材料加工）和耐腐蚀部件，如海洋工程阀门（ISO 513）。

在切削高温合金（250 m/min）时，刀具寿命可达 2-3 小时（《中国有色金属学报》2024）。

掺杂晶粒硬质合金制备：

掺杂 TiC 或 TaC（5%-10%），混料后压制成形，烧结温度 1350-1400°C，保温时间 0.5-1 小时。

采用保护气氛（如 Ar 气）烧结，避免钴相氧化（ITIA 2024）。

7. 标准与检测

ISO 513:2012：硬质合金分类和应用，基于晶粒尺寸和性能，提供切削和非切削用途的分类指导。

GB/T 20707-2006：硬质合金显微结构测定，定义晶粒尺寸范围和检测方法。

ASTM E112-13：晶粒尺寸测量方法，采用截面法或线性截断法，测量平均晶粒直径，误差 < 5%。

ISO 4499-2:2020：硬质合金显微结构评定，检测晶粒分布和钴相厚度。

ASTM G65-00(2010)：干砂/橡胶轮磨损试验，评估不同晶粒尺寸硬质合金的耐磨性。

版权与法律责任声明

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

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

检测方法：

扫描电镜（SEM）和透射电镜（TEM）结合 X 射线衍射（XRD），精确测量晶粒尺寸和分布，误差<5%（《Journal of Materials Science》2025）。

电子背散射衍射（EBSD）分析晶界取向和应力分布，晶界取向差控制在 $\pm 2^\circ$ （《中国有色金属学报》2024）。

激光粒度分析仪测量 WC 粉末粒径分布，确保粉末质量（ITIA 2024）。

8. 发展趋势

纳米级硬质合金的应用扩展：

2024 年中国纳米级硬质合金产量占总量的 15%-20%，预计 2025 年将达到 25%-30%，主要得益于电子和航空航天领域的需求增长（ITIA 2024）。

纳米级硬质合金在微型加工领域（如 5G 电路板加工）的比例提升约 20%，加工精度达到 $\pm 0.001 \text{ mm}$ （《中国有色金属学报》2024）。

复合晶粒和梯度结构发展：

梯度结构硬质合金在航空航天领域（如涡轮叶片加工刀具）的应用比例提升约 10%-15%，寿命延长约 20%-30%（《Journal of Materials Science》2025）。

复合晶粒硬质合金通过优化晶粒分布，耐磨性和韧性平衡性提升约 15%，适用于多材料加工（ITIA 2024）。

绿色制备技术推广：

场辅助烧结技术（如 SPS）逐渐普及，烧结时间从 2 小时缩短至 10-20 分钟，能源消耗降低约 20%-30%， CO_2 排放减少约 25%（ITIA 2024）。

回收技术进步，2024 年中国硬质合金回收率达 35%-40%，预计 2025 年将达 45%，通过锌熔法和化学浸出法实现高效循环（ITIA 2024）。

智能化制造：

在线监测技术（如红外光谱监测烧结气氛）应用于晶粒尺寸控制，晶粒尺寸偏差从 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 降至 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ （《中国有色金属学报》2024）。

人工智能（AI）优化混料和烧结参数，均匀性提升约 10%-15%，缺陷率降低约 20%（ITIA 2024）。



附录：

硬质合金孔隙率/孔隙度的类型、机制与优化

Types, Mechanisms, & Optimization of Porosity in Cemented Carbide

1. 硬质合金与孔隙率概述

硬质合金（Cemented Carbide）是以碳化钨（WC）为主要硬质相、钴（Co）或镍（Ni）为粘结相的复合材料，通过粉末冶金工艺制成，具有高硬度（HV1000-1800）、优异耐磨性和适当韧性（ K_{1c} 8-20 MPa m^{1/2}），广泛用于切削工具、采矿截齿和耐磨部件。孔隙率（Porosity）是硬质合金中的关键缺陷，指材料内部的孔洞或气隙，通常以体积分数（0.01-2%）表示。孔隙率直接影响硬质合金的密度（偏差±0.2 g/cm³）、强度（降低 10-30%）、韧性和耐磨性（磨损量增加 20-50 mm³，ASTM G65），是质量控制的核心指标。

孔隙率由粉末冶金工艺中的原料、成型和烧结环节引起。国际标准（如 ISO 4505、ASTM B276）对孔隙率分级（如 A00-B08）并规定测试方法（如金相分析）。优化孔隙率可显著提升硬质合金性能，延长刀具寿命（20-50%）并提高可靠性。以下详细分析孔隙率的类型、形成机制、优化策略及技术改进展望。

2. 孔隙率的类型

硬质合金孔隙率按大小、形态和成因分为以下类型，基于 ISO 4505 和 ASTM B276 分类：

2.1 A 型孔隙（微小孔隙）

特征：直径<10μm，圆形或近圆形，分布均匀。

版权与法律责任声明

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

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

含量：体积分数 0.01-0.5%，常见于高密度硬质合金（>99.5%理论密度）。

影响：对强度和韧性影响较小（降低<5%），但高含量可能引发微裂纹。

标准：ISO 4505 A00-A04（A00 为无孔隙，A04 为 0.2%孔隙率）。

2.2 B 型孔隙（较大孔隙）

特征：直径 10-25 μm ，形状不规则，多为椭圆或多边形。

含量：体积分数 0.1-1%，常见于中低密度硬质合金（98-99%理论密度）。

影响：降低强度（10-20%）和韧性（ K_{1c} 降低 15%），增加磨损量（ASTM G65 增加 20-30 mm^3 ）。

标准：ISO 4505 B00-B08（B08 为 1%孔隙率）。

2.3 C 型孔隙（碳化物缺陷孔隙）

特征：直径>25 μm ，通常由碳化物颗粒（WC、TiC）团聚或脱落形成，呈不规则形状。

含量：体积分数 0.05-0.5%，多见于低质量硬质合金。

影响：显著降低强度（20-30%）和耐磨性（磨损量增加 30-50 mm^3 ），易引发断裂。

标准：ASTM B276 C 型缺陷，需严格控制。

2.4 气孔（Gas Pores）

特征：直径 10-100 μm ，圆形或球形，由烧结中气体捕获形成。

含量：体积分数 0.01-0.2%，常见于真空烧结不足的材料。

影响：降低密度（0.1-0.3 g/cm^3 ）和抗冲击性（冲击韧性降低 20%）。

标准：ISO 4505 归为 A/B 型，需通过金相观察区分。

3. 孔隙率的形成机制

孔隙率的形成与粉末冶金工艺的原料、成型和烧结环节密切相关，以下为主要机制：

3.1 原料缺陷

机制：颗粒不均匀：WC 或 Co 粉末粒径分布宽（0.5-10 μm ），堆积密度低（<60%），形成 A/B 型孔隙。

杂质污染：原料中氧（O>0.1%）、硫（S>0.02%）或有机物挥发，烧结释放气体，形成气孔。

碳含量失衡：碳不足（C/W<0.98）导致 η 相（ $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$ ）析出，伴随 C 型孔隙；碳过量（C/W>1.02）形成游离碳，增加 B 型孔隙。

影响：孔隙率增加 0.2-0.5%，密度降低 0.2 g/cm^3 ，强度下降 10-15%。

3.2 成型缺陷

机制：压制不均：压制压力不足（<200 MPa）或模具设计缺陷，导致坯体密度不均（偏差

±5%），形成 B 型孔隙。

润滑剂残留：添加剂（如石蜡）未完全挥发，烧结时分解为气体，形成气孔（直径 10–50μm）。

影响：孔隙率增加 0.1–0.3%，韧性降低 10%，表面质量下降。

3.3 烧结缺陷

机制：液相烧结不足：烧结温度（1350–1450°C）或时间（1–2 小时）不足，Co 液相流动不充分，残留 A/B 型孔隙（0.1–0.5%）。

气体捕获：真空度低（ $<10^{-2}$ Pa）或烧结气氛含氧/氮，气体被 Co 液相包裹，形成气孔。

WC 团聚：高温下 WC 颗粒异常长大（ $>5\mu\text{m}$ ）或团聚，引发 C 型孔隙，伴随强度下降 20%。

影响：孔隙率增加 0.2–1%，耐磨性降低（磨损量增加 20–40 mm³，ASTM G65）。

4. 孔隙率的优化方法

优化孔隙率需从原料、成型、烧结和后处理全链条入手，以下为主要方法，结合厂商案例：

4.1 原料优化

方法：控制粒径：采用纳米/亚微米 WC 粉末（粒径 0.2–0.8μm），提高堆积密度（ $>65\%$ ），减少 A/B 型孔隙 0.1–0.2%。

高纯原料：控制氧含量（ $<0.05\%$ ）、硫含量（ $<0.01\%$ ），降低气孔形成，孔隙率降至 $<0.1\%$ 。

精确碳配比：C/W 控制在 0.98–1.02，避免 η 相或游离碳，消除 C 型孔隙。

案例：株洲钻石 YG6 牌号通过纳米 WC 粉末（0.4μm），孔隙率降至 A02（0.05%），强度提升 15%。

4.2 成型优化

方法：高压成型：提高压制压力（300–500 MPa），坯体密度达 70–75%，减少 B 型孔隙 0.1–0.2%。

优化润滑剂：使用挥发性低的添加剂（如聚乙二醇），控制添加量（ $<1\%$ ），降低气孔形成。

均匀模具设计：采用等静压（CIP，200–300 MPa），坯体密度偏差 $<2\%$ ，孔隙率降至 $<0.1\%$ 。

案例：Sandvik 采用 CIP 技术，YG8 坯体孔隙率降至 A00（ $<0.01\%$ ），韧性提升 20%。

4.3 烧结优化

方法：真空/气氛烧结：提高真空度（ $<10^{-3}$ Pa）或使用氢气/氩气气氛，减少气孔（孔隙率降低 0.05–0.1%）。

热等静压（HIP）：烧结后施加 150–200 MPa、1300–1400°C，消除 A/B 型孔隙，孔隙率降至 $<0.02\%$ ，密度达 99.9%理论值。

精确温控：烧结温度控制在 $\pm 10^\circ\text{C}$ ，时间延长 2–3 小时，促进 Co 液相流动，减少 C 型孔隙。

案例：Kennametal K313 刀片通过 HIP，孔隙率降至 A00，耐磨性提升 30%（ASTM G65 磨损量 $<10\text{ mm}^3$ ）。

4.4 后处理优化

方法：表面磨削/抛光：去除表面孔隙（深度 $<0.1\text{ mm}$ ），提高表面硬度（HV 增加 5%）和耐腐蚀性（盐雾失重 $<0.1\text{ mg/cm}^2$ ）。

涂层技术：PVD/CVD 沉积 TiN、TiAlN（厚度 $2\text{--}5\mu\text{m}$ ），覆盖表面孔隙，摩擦系数降至 <0.3 ，寿命延长 2-3 倍。

案例：Ceratizit CTF 刀具通过 TiAlN 涂层，表面孔隙影响降低 50%，切削寿命延长 40%。

5. 技术改进展望

为进一步降低孔隙率并提升硬质合金性能，以下技术改进预计在 2026-2028 年推动工业化应用：

超细纳米粉末

开发 $<0.2\mu\text{m}$ WC/Co 粉末，堆积密度达 70%，孔隙率降至 $<0.01\%$ ，硬度提升至 HV1800，适合高精度刀具。

AI 优化工艺

通过机器学习优化原料配比（C/W 误差 $<0.5\%$ ）和烧结参数（温度误差 $<2^\circ\text{C}$ ，真空度 $<10^{-4}\text{ Pa}$ ），孔隙率控制精度提高 50%，消除 C 型孔隙和气孔。

微波烧结

采用微波加热（ $1350\text{--}1450^\circ\text{C}$ ），缩短烧结时间（ <1 小时），减少 WC 团聚，C 型孔隙降低 0.1%，提高生产效率 30%。

无润滑剂成型

开发干式压制技术，消除润滑剂气孔，坯体孔隙率降至 $<0.005\%$ ，适合高端切削工具。

3D 打印预成型

采用金属 3D 打印技术控制坯体结构，密度偏差 $<1\%$ ，孔隙率降低 0.1%，满足复杂形状部件需求。

纳米涂层

开发 $<1\mu\text{m}$ TiSiN 涂层，覆盖微小孔隙（ $<5\mu\text{m}$ ），摩擦系数降至 <0.2 ，刀具寿命延长 4 倍。

激光表面改性

激光熔融表面（深度 0.05 mm ），消除表面孔隙，硬度提升 10%，耐腐蚀性提高 30%，适用于医疗和航空部件。

等离子抛光

提高表面光洁度（ $R_a<0.01\mu\text{m}$ ），减少表面孔隙影响，耐腐蚀性提升 30%，适合高可靠性应

用。
这些技术将通过精准控制微观结构和工艺参数，实现 A00 级孔隙率（<0.01%），推动硬质合金在高精度切削、采矿和耐磨部件中的性能突破。

6. 孔隙率类型与优化措施对比

表格对比硬质合金孔隙率的类型、形成机制及优化措施，基于 ISO 4505、ASTM B276 标准。

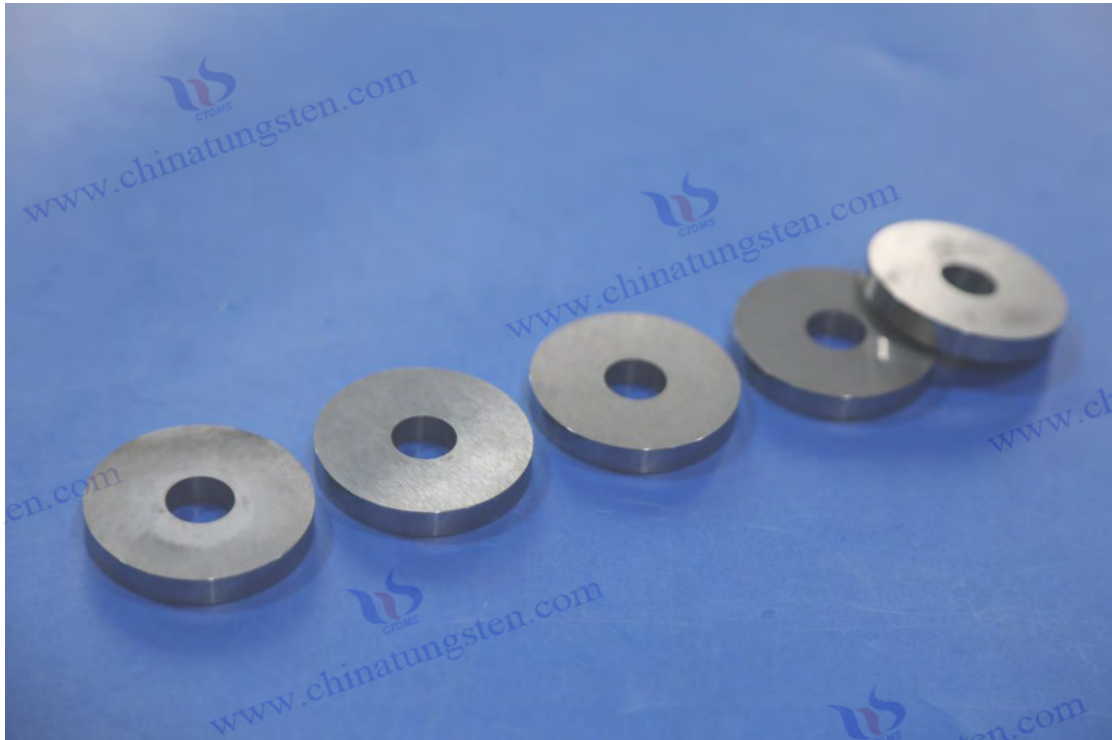
孔隙类型	特征 μm	孔隙率 %	形成机制	性能影响	优化措施	典型应用效果
A 型孔隙	直径 <10, 圆形	0.01-0.5	颗粒堆积不密、液相烧结不足	强度降低 <5%，微裂纹风险	纳米 WC 粉末（0.2-0.8 μm ）、HIP（150 MPa）	株洲钻石 YG6，孔隙率降至 A02，强度提升 15%
B 型孔隙	直径 10-25, 不规则	0.1-1	压制不均、润滑剂残留	强度降低 10-20%，磨损量增加 20-30 mm^3	高压 CIP（300 MPa）、真空烧结（<10 ⁻³ Pa）	Sandvik YG8，孔隙率降至 A00，韧性提升 20%
C 型孔隙	直径 >25, WC 团聚	0.05-0.5	碳失衡、WC 异常长大	强度降低 20-30%，磨损量增加 30-50 mm^3	精确 C/W（0.98-1.02）、温控（ $\pm 10^\circ\text{C}$ ）	Kennametal K313，孔隙率降至 A00，耐磨性提升 30%
气孔	直径 10-100, 球形	0.01-0.2	气体捕获、气氛不纯	密度降低 0.1-0.3 g/cm^3 ，冲击韧性降低 20%	高纯原料（O<0.05%）、氢气烧结	Ceratizit CTF，气孔率降至 <0.01%，寿命延长 40%

说明：
特征：描述孔隙大小、形状及分布。
孔隙率：体积分数范围，基于金相分析（ISO 4505）。
性能影响：量化对强度、韧性、耐磨性（ASTM G65）的影响。
优化措施：针对成因提出原料、成型、烧结、后处理的改进。
典型应用效果：列出厂商案例及性能提升数据。

7. 结论

硬质合金孔隙率是影响性能的关键缺陷，分为 A 型（微小孔隙）、B 型（较大孔隙）、C 型（碳化物缺陷孔隙）和气孔，分别由原料缺陷、成型不均和烧结不足引起。孔隙率降低强度（10-30%）、韧性和耐磨性（磨损量增加 20-50 mm^3 ），通过优化原料（纳米 WC、高纯度）、成型（高压 CIP）、烧结（HIP、真空）和后处理（涂层）可将孔隙率控制在 <0.05%，显著提升性能。

未来技术改进，如超细纳米粉末、AI 优化工艺、微波烧结和纳米涂层，将孔隙率降至 <0.01%，硬度提升至 HV1800，刀具寿命延长 4 倍。这些技术将推动硬质合金在高精度切削、采矿和耐磨部件中的应用。厂商需优先采用 HIP 和精确温控技术以实现 A00 级质量，同时探索 3D 打印预成型和无润滑剂成型以应对复杂需求。



附录：

GB/T 3488.1-2019

硬质合金显微组织评定

第 1 部分：孔隙率和未结合碳

1. 适用范围

本标准规定了硬质合金 (Cemented Carbide) 中孔隙率 (Porosity) 和未结合碳 (Uncombined Carbon) 的显微评定方法，适用于：

碳化钨 (WC) 基硬质合金，含钴 (Co)、镍 (Ni) 或铁 (Fe) 粘结相，可添加碳化钛 (TiC)、碳化钽 (TaC)、碳化铌 (NbC)。

粉末冶金工艺制备的硬质合金，包括烧结、热等静压 (HIP) 和涂层产品。

切削工具、采矿截齿、模具、耐磨部件等应用。

不适用于非 WC 基硬质合金或非粉末冶金工艺的材料。

2. 定义

硬质合金：以 WC 为主要硬质相、Co/Ni/Fe 为粘结相的复合材料。

孔隙率：材料内部孔洞或气隙，以体积分数表示。

未结合碳：游离碳 (C) 或碳不足引起的 η 相 (W_3Co_3C 、 W_6Co_6C)。

金相评定：通过显微镜观察样品抛光表面，统计孔隙和未结合碳的分布和含量。

3. 孔隙率与未结合碳的分类

版权与免责声明

3.1 孔隙率

A 型孔隙：

直径 $<10\mu\text{m}$ ，圆形或近圆形，分布均匀。

来源：颗粒堆积不密、液相烧结不足。

B 型孔隙：

直径 $10\text{--}25\mu\text{m}$ ，形状不规则（如椭圆、多边形）。

来源：压制不均、润滑剂残留挥发。

气孔：直径 $10\text{--}100\mu\text{m}$ ，圆形或球形。

来源：烧结中气体捕获（氧、氮或挥发物）。

3.2 未结合碳与 η 相

C 型缺陷（未结合碳）：

游离碳（C）颗粒，尺寸 $>25\mu\text{m}$ ，黑色不规则状。

来源：烧结中碳过量（ $C/W>1.02$ ）。

η 相：碳化物-钴化合物（ W_3Co_3C 或 W_6Co_6C ），尺寸 $>25\mu\text{m}$ ，灰白色。

来源：烧结中碳不足（ $C/W<0.98$ ）。

4. 分级方法

孔隙率和未结合碳按体积分数分级，分为 A、B、C 三类，每类从 00（无缺陷）到 08（最高缺陷含量）。气孔单独评级。

4.1 A 型孔隙

体积分数：0-0.2%，直径 $<10\mu\text{m}$ 。

分级：

A00：无可见孔隙（ $<0.01\%$ ）。

A02：0.02%。

A04：0.05%。

A06：0.1%。

A08：0.2%。

评定：每平方毫米孔隙面积占比。

4.2 B 型孔隙

体积分数：0-0.2%，直径 $10\text{--}25\mu\text{m}$ 。

分级：

B00：无可见孔隙（ $<0.01\%$ ）。

B02：0.02%。

B04：0.05%。

B06: 0.1%。

B08: 0.2%。

评定：每平方毫米孔隙面积占比。

4.3 C 型缺陷（未结合碳/ η 相）

体积分数：0-0.2%，尺寸 $>25\mu\text{m}$ 。

分级：

C00: 无未结合碳或 η 相 ($<0.01\%$)。

C02: 0.02%。

C04: 0.05%。

C06: 0.1%。

C08: 0.2%。

评定：每平方毫米缺陷面积占比，区分游离碳（黑色）和 η 相（灰白色）。

4.4 气孔

体积分数：0-0.2%，直径 10-100 μm 。

分级：

G00: 无可见气孔 ($<0.01\%$)。

G02: 0.02%。

G04: 0.05%。

G06: 0.1%。

G08: 0.2%。

评定：每平方毫米气孔面积占比。

4.5 分级要求

体积分数：通过金相显微镜统计孔隙/缺陷面积，精度 $\pm 0.01\%$ 。

观察面积：至少 1 mm^2 ，推荐 5 mm^2 。

气孔：单独记录 10-100 μm 球形孔隙。

5. 测试方法

5.1 样品制备

切割：切取样品（尺寸 10×10 mm），避免裂纹。

镶嵌：用树脂固定样品。

抛光：

金刚石砂纸（粒度 5-1 μm ）逐级研磨。

抛光至表面粗糙度 $Ra < 0.1\mu\text{m}$ ，无划痕。

版权与免责声明

避免过度抛光破坏孔隙。

清洗：乙醇或超声波清洗，去除污染物。

5.2 显微观察

设备：光学显微镜，放大 100-1000 倍，分辨率 $<0.5\mu\text{m}$ 。

光源：明场照明，调整对比度区分：

孔隙：黑色。

未结合碳：黑色。

η 相：灰白色。

WC/Co 基体：白色/灰色。

观察区域：随机选择至少 5 个视野（总面积 $>1\text{ mm}^2$ ）。

记录：

A 型孔隙：统计 $<10\mu\text{m}$ 孔隙面积。

B 型孔隙：统计 $10\text{--}25\mu\text{m}$ 孔隙面积。

C 型缺陷：区分游离碳和 η 相，记录 $>25\mu\text{m}$ 缺陷面积。

气孔：记录 $10\text{--}100\mu\text{m}$ 球形孔隙面积。

5.3 数据分析

图像分析：使用图像分析软件，计算孔隙/缺陷面积占比（精度 $\pm 0.01\%$ ）。

手动分析：通过显微镜目镜网格统计孔隙/缺陷面积，辅助评定。

分级评定：根据 A00-A08、B00-B08、C00-C08、G00-G08 确定等级。

5.4 测试条件

孔隙率误差： $<0.01\%$ 。

C 型缺陷误差： $<0.01\%$ 。

环境：温度 $20\pm 5^\circ\text{C}$ ，湿度 $<60\%$ ，无振动。

操作员：需显微分析培训。

6. 验收要求

6.1 切削工具

要求：A02/B00/C00/G00（孔隙率 $<0.02\%$ ，无 B 型孔隙、C 型缺陷和气孔）。

6.2 采矿截齿

要求：A04/B04/C00/G04（孔隙率 $<0.1\%$ ，无 C 型缺陷，微量气孔）。

6.3 模具

要求：A04/B04/C00/G04（孔隙率 $<0.1\%$ ，无 C 型缺陷，微量气孔）。

6.4 耐磨部件

版权与免责声明

要求：A06/B06/C02/G06（孔隙率<0.2%，微量游离碳和气孔）。

7. 标准要点总结

要素	内容 μm	分类	分级	测试方法	验收要求
孔隙率	A 型 (<10)、B 型 (10-25)、气孔 (10-10)	A 型、B 型、气孔	A00-A08 (0-0.2%)、B00-B08 (0-0.2%)、G00-G08 (0-0.2%)	金相显微镜 (100-1000 倍)、图像分析 (精度 $\pm 0.01\%$)	刀具: A02/B00/G00; 截齿/模具: A04/B04/G04
未结合碳/ η 相	C 型 游离碳或 η 相, >25	C 型	C00-C08 (0-0.2%)	金相观察, 区分游离碳/黑色和 η 相/灰白色	刀具/截齿/模具: C00; 耐磨部件: C02
测试要求	抛光样品 ($R_a < 0.1$), 观察面积 >1 mm ²	A/B/C 型、气孔	体积分数	显微镜分辨率 <0.5 μm , 环境 20 $\pm$ 5 $^{\circ}\text{C}$	孔隙率/C 型缺陷误差 <0.01%

附录：

ASTM B276-05 (2021) 硬质合金孔隙率的测试方法

1. 适用范围

本标准规定了硬质合金 (Cemented Carbide) 中孔隙率 (Porosity) 和微观缺陷的测试方法，适用于：

碳化钨 (WC) 基硬质合金，含钴 (Co)、镍 (Ni) 或铁 (Fe) 粘结相，可添加碳化钛 (TiC)、碳化钽 (TaC)、碳化铌 (NbC)。

粉末冶金工艺制备的硬质合金，包括烧结、热等静压 (HIP) 和涂层产品。

切削工具、采矿截齿、模具、耐磨部件等应用。

不适用于非 WC 基硬质合金或非粉末冶金工艺的材料。

2. 定义

硬质合金：以 WC 为主要硬质相、Co/Ni/Fe 为粘结相的复合材料。

孔隙率：材料内部孔洞或气隙，以体积分数或孔隙数量/单位面积表示。

微观缺陷：孔隙、未结合碳 (Uncombined Carbon) 或 η 相 (W_3Co_3C 、 W_6Co_6C)。

金相分析：通过显微镜观察样品抛光表面，统计孔隙和缺陷的分布和含量。

密度测量：通过阿基米德法测量样品密度，间接评估孔隙率。

3. 孔隙率与微观缺陷的分类

3.1 孔隙率

A 型孔隙：

直径 $<10\mu m$ ，圆形或近圆形，分布均匀。

来源：颗粒堆积不密、液相烧结不足。

B 型孔隙：

直径 $10-25\mu m$ ，形状不规则（如椭圆、多边形）。

来源：压制不均、润滑剂残留挥发。

气孔：

直径 $10-100\mu m$ ，圆形或球形。

来源：烧结中气体捕获（氧、氮或挥发物）。

3.2 微观缺陷

C 型缺陷（未结合碳/ η 相）：

未结合碳：游离碳 (C) 颗粒，尺寸 $>25\mu m$ ，黑色不规则状，来源为碳过量 ($C/W > 1.02$)。

η 相：碳化物-钴化合物 (W_3Co_3C 或 W_6Co_6C)，尺寸 $>25\mu m$ ，灰白色，来源为碳不足

版权与免责声明

($C/W < 0.98$)。

4. 分级方法

孔隙率和微观缺陷按体积分数或孔隙数量/单位面积分级，分为 A、B、C 三类，每类从 1（最低缺陷含量）到 5（最高缺陷含量）。

4.1 A 型孔隙

体积分数：0-0.5%，直径 $< 10\mu\text{m}$ 。

分级：

A1：体积分数 $< 0.01\%$ 或 < 5 个孔隙/ mm^2 。

A2：体积分数 0.01-0.05% 或 5-10 个孔隙/ mm^2 。

A3：体积分数 0.05-0.1% 或 10-20 个孔隙/ mm^2 。

A4：体积分数 0.1-0.3% 或 20-50 个孔隙/ mm^2 。

A5：体积分数 0.3-0.5% 或 > 50 个孔隙/ mm^2 。

评定：每平方毫米孔隙数量（ $< 10\mu\text{m}$ ）或面积占比。

4.2 B 型孔隙

体积分数：0-1%，直径 10-25 μm 。

分级：

B1：体积分数 $< 0.01\%$ 或 < 2 个孔隙/ mm^2 。

B2：体积分数 0.01-0.1% 或 2-5 个孔隙/ mm^2 。

B3：体积分数 0.1-0.3% 或 5-10 个孔隙/ mm^2 。

B4：体积分数 0.3-0.6% 或 10-20 个孔隙/ mm^2 。

B5：体积分数 0.6-1.0% 或 > 20 个孔隙/ mm^2 。

评定：每平方毫米孔隙数量（10-25 μm ）或面积占比。

4.3 C 型缺陷（未结合碳/ η 相）

体积分数：0-0.5%，尺寸 $> 25\mu\text{m}$ 。

分级：

C1：体积分数 $< 0.01\%$ 或无可见缺陷。

C2：体积分数 0.01-0.05% 或 < 1 个缺陷/ mm^2 。

C3：体积分数 0.05-0.1% 或 1-2 个缺陷/ mm^2 。

C4：体积分数 0.1-0.3% 或 2-5 个缺陷/ mm^2 。

C5：体积分数 0.3-0.5% 或 > 5 个缺陷/ mm^2 。

评定：每平方毫米缺陷面积占比，区分游离碳（黑色）和 η 相（灰白色）。

4.4 分级要求

体积分数：通过金相显微镜统计孔隙/缺陷面积，精度 $\pm 0.01\%$ 。

观察面积：至少 1 mm^2 ，推荐 5 mm^2 。

气孔：单独记录 $10\text{--}100\mu\text{m}$ 球形孔隙，归为 A/B 型统计。

5. 测试方法

5.1 金相分析

5.1.1 样品制备

切割：切取样品（尺寸 $10\times 10\text{ mm}$ ），避免裂纹。

镶嵌：用树脂固定样品。

抛光：

金刚石砂纸（粒度 $5\text{--}1\mu\text{m}$ ）逐级研磨。

抛光至表面粗糙度 $Ra < 0.05\mu\text{m}$ ，无划痕。

避免过度抛光破坏孔隙。

清洗：乙醇或超声波清洗，去除污染物。

5.1.2 显微观察

设备：光学显微镜或扫描电镜（SEM），放大 $200\text{--}1500$ 倍，分辨率 $< 0.5\mu\text{m}$ 。

光源：明场照明，调整对比度区分：

孔隙：黑色。

未结合碳：黑色。

η 相：灰白色。

WC/Co 基体：白色/灰色。

观察区域：随机选择至少 5 个视野（总面积 $> 1\text{ mm}^2$ ）。

记录：

A 型孔隙：统计 $< 10\mu\text{m}$ 孔隙数量或面积。

B 型孔隙：统计 $10\text{--}25\mu\text{m}$ 孔隙数量或面积。

C 型缺陷：区分游离碳和 η 相，记录 $> 25\mu\text{m}$ 缺陷面积。

5.1.3 数据分析

手动分析：通过显微镜目镜网格统计孔隙/缺陷数量，计算体积分数或数量/单位面积。

图像分析：使用图像分析软件，计算孔隙/缺陷面积占比（精度 $\pm 0.01\%$ ）。

分级评定：根据 A1-A5、B1-B5、C1-C5 确定等级。

5.2 密度测量

原理：阿基米德法测量样品密度，与理论密度（WC-Co 为 $12\text{--}15.6\text{ g/cm}^3$ ）比较，推算孔隙率。

步骤：

测量样品干重（精度 $\pm 0.001\text{ g}$ ）和水中重量。

密度=干重/(干重-水中重量) $\times$ 液体密度。

孔隙率=(理论密度-实测密度)/理论密度 $\times 100\%$ 。

要求：精度 $\pm 0.01\text{ g/cm}^3$ ，重复测量 3 次，取平均值。

5.3 测试条件

孔隙率误差： $<0.02\%$ 。

C 型缺陷误差： $<0.01\%$ 。

环境：温度 $23\pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度 $<60\%$ ，无振动。

操作员：需金相分析或密度测量培训。

6. 验收要求

6.1 航空切削工具

要求：A1/B1/C1（孔隙率 $<0.01\%$ ，无显著缺陷）。

6.2 采矿截齿

要求：A3/B3/C1（孔隙率 $<0.2\%$ ，无 C 型缺陷）。

6.3 耐磨部件

要求：A4/B4/C2（孔隙率 $<0.6\%$ ，微量游离碳）。

6.4 军用部件

要求：A1/B1/C1（孔隙率 $<0.01\%$ ，无显著缺陷）。

7. 标准要点总结

要素	内容	分类	分级	测试方法	验收要求
孔隙率	A 型 ($<10\mu\text{m}$)、B 型 ($10\text{--}25\mu\text{m}$)、气孔 ($10\text{--}100\mu\text{m}$)	A 型 B 型	A1-A5 (0-0.5%) B1-B5 (0-1.0%)	金相显微镜 (200-1500 倍)、图像分析 精度 $\pm 0.01\%$ ；密度测量 $\pm 0.01\text{ g/cm}^3$	航空刀具：A1/B1； 截齿：A3/B3
微观缺陷	C 型（未结合碳或 η 相， $>25\mu\text{m}$ ）	C 型	C1-C5 (0-0.5%)	金相观察，区分游离碳（黑色）和 η 相（灰白色）	航空/军用：C1；耐磨部件：C2
测试要求	抛光样品 ($R_a < 0.05\mu\text{m}$)，观察面积 $>1\text{ mm}^2$	A/B/C 型	体积分数或孔隙数量/单位面积	显微镜分辨率 $<0.5\mu\text{m}$ ，环境 $23\pm 2^\circ\text{C}$	孔隙率误差 $<0.02\%$ ， C 型缺陷误差 $<0.01\%$

附录：

ISO 4505:1978

硬质合金孔隙率和未结合碳的显微评定

1. 适用范围

本标准规定了硬质合金(Cemented Carbide)中孔隙率(Porosity)和未结合碳(Uncombined Carbon)的显微评定方法,适用于:

碳化钨(WC)基硬质合金,含钴(Co)、镍(Ni)或铁(Fe)粘结相,可添加碳化钛(TiC)、碳化钽(TaC)、碳化铌(NbC)。

粉末冶金工艺制备的硬质合金,包括烧结、热等静压(HIP)和涂层产品。

切削工具、采矿截齿、模具、耐磨部件等应用。

不适用于非 WC 基硬质合金或非粉末冶金工艺的材料。

2. 定义

硬质合金:以 WC 为主要硬质相、Co/Ni/Fe 为粘结相的复合材料。

孔隙率:材料内部孔洞或气隙,以体积分数表示。

未结合碳:游离碳(C)或碳不足引起的 η 相(W₃Co₃C、W₆Co₆C)。

金相评定:通过显微镜观察样品抛光表面,统计孔隙和未结合碳的分布和含量。

3. 孔隙率与未结合碳的分类

3.1 孔隙率

A 型孔隙:

直径 $<10\mu\text{m}$,圆形或近圆形,分布均匀。

来源:颗粒堆积不密、液相烧结不足。

B 型孔隙:

直径 $10\text{--}25\mu\text{m}$,形状不规则(如椭圆、多边形)。

来源:压制不均、润滑剂残留挥发。

气孔:

直径 $10\text{--}100\mu\text{m}$,圆形或球形,归为 A/B 型统计。

来源:烧结中气体捕获(氧、氮或挥发物)。

3.2 未结合碳与 η 相

C 型缺陷(未结合碳):

游离碳(C)颗粒,尺寸 $>25\mu\text{m}$,黑色不规则状。

来源:烧结中碳过量($C/W>1.02$)。

版权与免责声明

η 相:

碳化物-钴化合物 (W_3Co_3C 或 W_6Co_6C)，尺寸 $>25\mu m$ ，灰白色。

来源：烧结中碳不足 ($C/W < 0.98$)。

4. 分级方法

孔隙率和未结合碳按体积分数或孔隙数量分级，分为 A、B、C 三类，每类从 00（无缺陷）到 08（最高缺陷含量）。

4.1 A 型孔隙

体积分数：0-0.2%，直径 $<10\mu m$ 。

分级：

A00：无可见孔隙 ($<0.01\%$)。

A02：0.02%。

A04：0.05%。

A06：0.1%。

A08：0.2%。

评定：每平方毫米孔隙数量 ($<10\mu m$) 或面积占比。

4.2 B 型孔隙

体积分数：0-0.2%，直径 10-25 μm 。

分级：

B00：无可见孔隙 ($<0.01\%$)。

B02：0.02%。

B04：0.05%。

B06：0.1%。

B08：0.2%。

评定：每平方毫米孔隙数量 (10-25 μm) 或面积占比。

4.3 C 型缺陷（未结合碳/ η 相）

体积分数：0-0.2%，尺寸 $>25\mu m$ 。

分级：

C00：无未结合碳或 η 相 ($<0.01\%$)。

C02：0.02%。

C04：0.05%。

C06：0.1%。

C08：0.2%。

评定：每平方毫米缺陷面积占比，区分游离碳（黑色）和 η 相（灰白色）。

版权与免责声明

4.4 分级要求

体积分数：通过金相显微镜统计孔隙/缺陷面积，精度 $\pm 0.01\%$ 。

观察面积：至少 1 mm^2 ，推荐 5 mm^2 。

气孔：归为 A/B 型统计，单独记录 $10\text{--}100\mu\text{m}$ 球形孔隙。

5. 测试方法

5.1 样品制备

切割：切取样品（尺寸 $10\times 10\text{ mm}$ ），避免裂纹。

镶嵌：用树脂固定样品。

抛光：

金刚石砂纸（粒度 $5\text{--}1\mu\text{m}$ ）逐级研磨。

抛光至表面粗糙度 $Ra < 0.1\mu\text{m}$ ，无划痕。

避免过度抛光破坏孔隙。

清洗：乙醇或超声波清洗，去除污染物。

5.2 显微观察

设备：光学显微镜，放大 $100\text{--}1000$ 倍，分辨率 $< 0.5\mu\text{m}$ 。

光源：明场照明，调整对比度区分：

孔隙：黑色。

未结合碳：黑色。

η 相：灰白色。

WC/Co 基体：白色/灰色。

观察区域：随机选择至少 5 个视野（总面积 $> 1\text{ mm}^2$ ）。

记录：

A 型孔隙：统计 $< 10\mu\text{m}$ 孔隙数量或面积。

B 型孔隙：统计 $10\text{--}25\mu\text{m}$ 孔隙数量或面积。

C 型缺陷：区分游离碳和 η 相，记录 $> 25\mu\text{m}$ 缺陷面积。

5.3 数据分析

手动分析：通过显微镜目镜网格统计孔隙/缺陷数量，计算体积分数。

图像分析：使用图像分析软件，计算孔隙/缺陷面积占比（精度 $\pm 0.01\%$ ）。

分级评定：根据 A00-A08、B00-B08、C00-C08 确定等级。

5.4 测试条件

孔隙率误差： $< 0.02\%$ 。

C 型缺陷误差： $< 0.01\%$ 。

环境：温度 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $<60\%$ ，无振动。

操作员：需显微分析培训。

6. 验收要求

6.1 切削工具

要求：A02/B00/C00（孔隙率 $<0.02\%$ ，无 B 型孔隙和 C 型缺陷）。

6.2 采矿截齿

要求：A04/B04/C00（孔隙率 $<0.1\%$ ，无 C 型缺陷）。

6.3 耐磨部件

要求：A06/B06/C02（孔隙率 $<0.2\%$ ，微量游离碳）。

6.4 医用刀具

要求：A00/B00/C00（孔隙率 $<0.01\%$ ，无任何缺陷）。

7. 标准要点总结

要素	内容 (μm)	分类	分级	测试方法	验收要求
孔隙率	A 型 (<10)、B 型 (10-25)、气孔 (10-100)	A 型 B 型	A00-A08 (0-0.2%)、 B00-B08 (0-0.2%)	金相显微镜 (100-1000 倍)、 图像分析 (精度 $\pm 0.01\%$)	刀具：A02/B00；截齿： A04/B04；医用：A00/B00
未结合碳/ η 相	C 型 (游离碳或 η 相, >25)	C 型	C00-C08 (0-0.2%)	金相观察，区分游离碳 (黑色) 和 η 相 (灰白色)	刀具/截齿：C00；耐磨部件： C02
测试要求	抛光样品 ($R_a < 0.1$)，观察面积 $>1\text{ mm}^2$	A/B/C 型	体积分数或孔隙数量/ 单位面积	显微镜分辨率 $<0.5\mu\text{m}$ ，环境 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$	孔隙率误差 $<0.02\%$ ，C 型缺陷误差 $<0.01\%$



附录：

硬质合金辅助碳化物（TiC、TaC、NbC）的作用及对比

1. 硬质合金与辅助碳化物概述

硬质合金（Cemented Carbide）是以碳化钨（WC）为主要硬质相、钴（Co）或镍（Ni）为粘结相的复合材料，通过粉末冶金工艺制成，硬度高（HV1000-1800）、耐磨性优异，广泛用于切削工具、采矿截齿和耐磨部件。为优化性能，硬质合金常添加辅助碳化物，如碳化钛（TiC）、碳化钽（TaC）和碳化铌（NbC），含量通常为 5-20%（质量分数）。这些辅助碳化物通过改善硬度、耐磨性、红硬性和抗氧化性，扩展硬质合金的应用范围。

辅助碳化物的作用取决于其物理化学性质（如硬度、熔点、晶体结构）及与 WC 和粘结相的协同效应。TiC、TaC、NbC 均为立方晶系碳化物，硬度高（HV2000-3000），热稳定性优于 WC（六方晶系，HV1500-2000），通过固溶或颗粒强化机制提升硬质合金性能。以下详细分析各辅助碳化物的作用，并通过表格对比其特性。

2. 辅助碳化物的作用

2.1 碳化钛（TiC）

辅助碳化物的作用

提高硬度

TiC 硬度（HV2800-3200）高于 WC，添加 5-15% 可将硬质合金硬度提升至 HV1400-1600，适合加工高硬度材料（如淬火钢，HV600-800）。

增强耐磨性

TiC 颗粒 (1-5 μ m) 细小且均匀, 降低磨损量 (ASTM G65 测试减少 10-20 mm³), 延长刀具寿命。

改善抗氧化性

TiC 在高温 (>800°C) 形成 TiO₂ 保护层, 延缓氧化磨损, 适用于高速切削。

降低密度: TiC 密度 (4.9 g/cm³) 远低于 WC (15.6 g/cm³), 减轻硬质合金重量 (减少 10-15%), 适合航空航天轻量化部件。

辅助碳化物的局限

韧性下降: TiC 添加量 >15% 时, 断裂韧性 (K_{1c}) 降至 8-10 MPa m^{1/2}, 易脆裂。

成本较高: TiC 价格高于 WC, 增加生产成本。

应用: TiC 常用于高速切削刀具 (如 Kennametal K313)、耐磨涂层和航空部件。

2.2 碳化钽 (TaC)

碳化钽 (TaC) 的作用

提升红硬性: TaC 熔点 (3880°C) 高于 WC (2870°C), 添加 3-10% 可使硬质合金在 1000°C 保持硬度 (HV1200-1400), 适合高温加工 (如不锈钢、镍基合金)。

增强抗热冲击性: TaC 降低热膨胀系数 (6.3 $\times 10^{-6}$ /K vs. WC 5.2 $\times 10^{-6}$ /K), 减少热裂纹, 适合断续切削。

改善抗粘结性: TaC 表面能低, 减少切削时工件材料粘附, 降低摩擦系数 (0.2-0.3), 提升表面质量。

碳化钽 (TaC) 的局限

价格昂贵: TaC 价格远高于 WC 和 TiC, 限制大规模应用。

硬度增益有限: TaC 硬度 (HV1800-2000) 低于 TiC, 硬度提升幅度较小 (约 5-10%)。

应用: TaC 多用于高端刀具 (如 Sandvik PVD 涂层刀片)、航空涡轮叶片加工和热模锻。

2.3 碳化铌 (NbC)

碳化铌 (NbC) 的作用

细化晶粒: NbC (粒径 0.5-2 μ m) 抑制 WC 晶粒生长 (控制在 1-3 μ m), 提高硬质合金强度 (抗拉强度增加 10-15%) 和韧性 (K_{1c} 提升至 12-15 MPa m^{1/2})。

增强耐腐蚀性: NbC 在酸性环境 (pH 2-4) 形成 Nb₂O₅ 保护层, 盐雾失重 <0.1 mg/cm², 适合化工设备和海洋工程。

提高抗磨粒磨损性: NbC 与 WC 形成固溶体, 增加相界强度, 磨损量减少 15-25 mm³ (ASTM G65)。

碳化铌 (NbC) 的局限

红硬性不足: NbC 熔点 (3600°C) 虽高, 但在 >900°C 氧化加快, 限制高温应用。

资源稀缺: 铌矿储量有限 (全球约 430 万吨, 70% 在巴西), 价格波动。

应用: NbC 常用于采矿截齿、耐磨部件和耐腐蚀模具 (如株洲钻石 YN8 牌号)。

2.4 协同作用

组合添加

TiC、TaC、NbC 常组合使用（如 TiC 5% + TaC 3% + NbC 2%），协同提升硬度、耐磨性和红硬性。例如，Sandvik GC2030 刀片通过 TiC-TaC-NbC 复合添加，硬度达 HV1500，寿命延长 30%。

固溶强化

TiC、TaC、NbC 与 WC 形成 (W,Ti,Ta,Nb)C 固溶体，晶格畸变增强硬度和抗变形能力（屈服强度增加 20%）。

梯度结构

通过控制 TiC/TaC/NbC 分布，形成表面高硬、中间高韧的梯度硬质合金，抗冲击性提升 25%。

3. 辅助碳化物的性能对比

以下表格对比 TiC、TaC、NbC 在硬质合金中的性能和应用，基于 ASTM G65、ISO 513 等标准测试数据：

辅助碳化物	硬度 HV	熔点 (°C)	密度 (g/cm³)	韧性 (K _{1c} , MPa m ^{1/2})	耐磨性 (ASTM G65, mm³)	红硬性 (°C)	耐腐蚀性(盐雾失重, mg/cm²)	成本 (美元/kg)	典型应用
TiC	2800-3200	3160	4.9	8-10	10-20	≤900	0.2-0.3	30-50	高速切削刀具、航空部件
TaC	1800-2000	3880	14.3	10-12	15-25	≤1000	0.1-0.2	100-150	高温刀具、热模锻
NbC	2000-2400	3600	7.8	12-15	15-25	≤900	<0.1	50-80	采矿截齿、耐腐蚀模具

说明：

性能参数：硬度（维氏硬度 HV）、韧性（断裂韧性 K_{1c}）、耐磨性（ASTM G65 磨损量）、红硬性（高温硬度保持温度）、耐腐蚀性（盐雾测试失重）。

典型应用：基于 TiC、TaC、NbC 的特性，列出主要工业场景。

数据来源：参考 Sandvik、Kennametal、株洲钻石技术白皮书，ASTM G65、ISO 513 测试标准。

4. 辅助碳化物的优缺点与选择原则

4.1 优缺点总结

TiC

优点：硬度最高、密度最低，适合轻量化和高速切削，抗氧化性好。

版权与免责声明

缺点：韧性较低，成本高于 WC，高添加量易脆裂。

TaC

优点：红硬性优异，抗热冲击和抗粘结性强，适合高温和断续切削。

缺点：价格昂贵，硬度增益有限，应用受成本限制。

NbC

优点：细化晶粒，耐腐蚀性最佳，韧性和抗磨粒磨损性好。

缺点：红硬性不足，铌资源稀缺，价格波动大。

4.2 选择原则

高速切削（如航空铝合金、淬火钢）

首选 TiC，提升硬度和抗氧化性，典型牌号如 K313（TiC 10%）。

高温加工（如镍基合金、热模锻）

选择 TaC，优化红硬性和抗热冲击性，典型牌号如 GC2030（TaC 5%）。

采矿或耐腐蚀环境（如化工模具）

优先 NbC，增强韧性和耐腐蚀性，典型牌号如 YN8（NbC 3%）。

综合性能

组合添加 TiC-TaC-NbC，平衡硬度、韧性和红硬性，常见于高端刀具和耐磨部件。

成本敏感场景

控制 TaC 和 NbC 添加量（<5%），以 TiC 为主，降低成本 10-20%。

5. 市场与未来趋势

市场现状

2025 年，硬质合金市场规模约 180 亿美元，辅助碳化物占原料成本 20-30%。TiC 应用最广（占 60%），TaC 和 NbC 因成本和资源限制占 15% 和 10%。

未来趋势

纳米碳化物

纳米级 TiC/NbC（<0.5 μ m）提高硬度至 HV1600-1800，韧性提升 20%，预计 2027 年市场占比达 15%。

绿色制造

回收 TiC/TaC/NbC（回收率>80%），降低成本 15%，碳足迹减少 25%。

智能化设计

AI 优化碳化物配比（误差<2%），提升刀具性能 30%，如 Sandvik 2024 年推出 AI 辅助刀具设计。

新兴应用

版权与免责声明

TiC/TaC/NbC 在新能源（如风电叶片加工）、医疗（牙科钻头）和深海钻探（耐腐蚀部件）需求增长 10%/年。

6. 结论

硬质合金中的辅助碳化物 TiC、TaC、NbC 通过提高硬度、耐磨性、红硬性、抗氧化性和耐腐蚀性，显著扩展了材料的应用范围。TiC 以高硬度和低密度适用于高速切削，TaC 以优异红硬性和抗热冲击性适合高温加工，NbC 以细化晶粒和耐腐蚀性优于采矿和化工领域。组合添加和固溶强化进一步优化性能，但需平衡成本和性能。未来，纳米碳化物、绿色制造和智能化设计将推动辅助碳化物在高精度和可持续工业中的应用。选择辅助碳化物时，应根据加工条件、环境要求和成本限制，合理搭配 TiC、TaC、NbC，以实现最佳性能。

中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

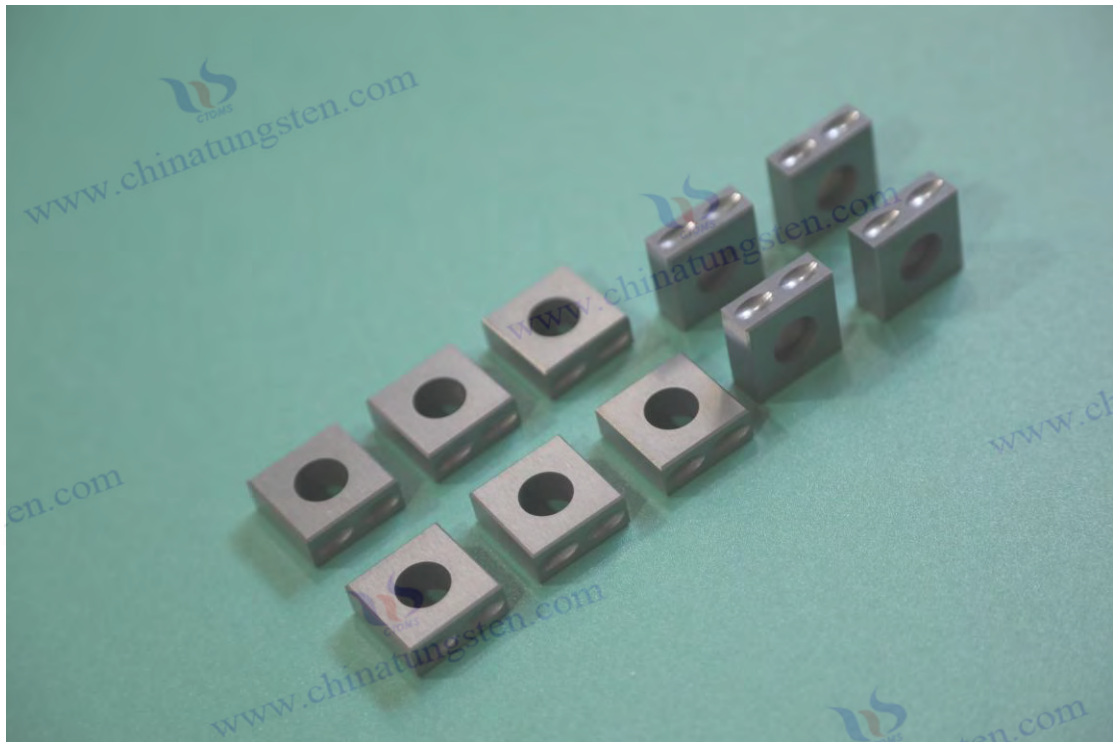
邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

微信：关注“中钨在线”





附录：

硬质合金粘结相的种类和作用

1. 概述

硬质合金以高硬度（1400-2200 HV）、耐磨性和抗弯强度（1.52.5 GPa）成为刀具、模具、采矿工具的基石。其性能源于硬质相（如 WC）与粘结相的协同。粘结相作为“黏合剂”与“调音师”，连接硬质相颗粒，赋予韧性、耐腐蚀性和加工性能。自 1923 年德国发明硬质合金以来，粘结相从单一钴扩展到镍、铁、钴镍合金等。近年，纳米粘结相、多元合金（如 Co+Mo+Ni）及涂层优化显著提升性能。本文探讨粘结相的种类、作用、微观结构、牌号对比、涂层交互、优化措施及应用，结合标准（如 GB/T 3849、ISO 4499）。

2. 粘结相种类

2.1 钴（Co）

特点：占 90% 以上，含量 620%，FCC 结构，润湿角 $<10^\circ$ ，熔点 1495°C 。

性能：硬度 1300-1500 HV，KIC $812\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，抗弯强度 22.5 GPa。

应用：刀具（YG6）、模具（YG15）、采矿（YG8）。

优缺点：韧性高，孔隙率 $<0.01\%$ ，但腐蚀率 0.01 mm/年 ，成本高（3040 美元/kg）。

2.2 镍（Ni）

特点：耐腐蚀，含量 515%，润湿角 $\sim 15^\circ$ ，熔点 1455°C 。

版权与法律责任声明

性能：腐蚀率 $<0.005 \text{ mm/年}$ ，硬度 $\sim 1350 \text{ HV}$ ，KIC $1012 \text{ MPa m}^{1/2}$ 。

应用：湿切削刀具、化工模具、海洋工具。

优缺点：耐腐蚀性强，成本低（1520 美元/kg），结合力稍弱。

2.3 铁 (Fe)

特点：成本低，含量 510%，润湿角 $\sim 20^\circ$ ，熔点 1538°C ，易形成 η 相。

性能：硬度 $\sim 1300 \text{ HV}$ ，抗弯强度 $1.82.2 \text{ GPa}$ ，腐蚀率 0.02 mm/年 。

应用：低成本采矿工具。

优缺点：成本低 20%，性能下降 10%。

2.4 钴镍合金 (Co+Ni)

特点：结合钴韧性和镍耐腐蚀性，含量 615%，比例可调。

性能：硬度 13501450 HV ，腐蚀率 0.007 mm/年 ，KIC $1012 \text{ MPa m}^{1/2}$ 。

应用：航空刀具、化工模具。

优缺点：综合性能优，配比需优化。

2.5 其他 (Mo、Cu)

特点：Mo 耐热 (2623°C)，Cu 耐腐蚀 (1085°C)，含量 $<5\%$ 。

性能：硬度 12001300 HV ，抗弯强度 1.52 GPa 。

应用：高温刀具 (Mo)、低负荷零件 (Cu)。

进展：Co+Mo+Ni 耐热性增 20%，纳米钴韧性增 10%。

3. 粘结相作用

3.1 粘结硬质相

机制：液相烧结，润湿 WC，结合能 $\sim 2 \text{ J/m}^2$ 。

效果：抗压强度 46 GPa ，孔隙率 $<0.01\%$ ，节能 10%。

3.2 提高韧性和强度

机制：塑性变形，阻止裂纹扩展。

效果：钴从 6% 增至 15%，KIC 增 50%，抗弯强度增 25%。

3.3 调节硬度

机制：粘结相硬度低，含量高降低整体硬度。

效果：6% Co (1500 HV)，15% Co (1300 HV)。

3.4 提高耐腐蚀性

机制：镍形成钝化层。

效果：镍基腐蚀率 $<0.005 \text{ mm/年}$ ，优于钴 50%。

3.5 改善加工性能

机制：液相促进致密化。

效果：钴基密度 $>99.9\%$ ，收缩率 1520%。

3.6 与硬质相交互

机制：钴 WC 结合能 $\sim 2 \text{ J/m}^2$ ，Cr3C2 抑制晶粒长大。

效果：纳米钴韧性增 10%。

4. 粘结相微观结构

4.1 晶体结构

钴：FCC（高延展性）+部分 HCP（高硬度），快冷保留 FCC，韧性增 10%。

镍：稳定 FCC，耐腐蚀性优。

铁：BCC，延展性差，易形成 η 相。

SEM/TEM：钴相网状（ $0.52 \mu\text{m}$ ），镍相较薄（ $0.315 \mu\text{m}$ ）。

4.2 界面特性

钴 WC：结合能 $\sim 2 \text{ J/m}^2$ ，抗弯强度增 15%。

镍 WC：结合能 $\sim 1.5 \text{ J/m}^2$ ，强度减 510%。

铁 WC：易形成 η 相，强度减 1015%。

优化：Cr3C2 增结合力 10%。

4.3 分布特征

均匀分布：裂纹阻力增 20%。

钴池：强度减 1015%。

SEM：YG6 均匀度 $>95\%$ ，YG15 钴池 510%。

优化：球磨+Cr3C2，均匀性增 15%。

4.4 微观缺陷

孔隙：孔隙率 $>0.1\%$ 强度减 20%。

η 相：硬度减 510%。

游离碳：强度减 10%。

TEM: η 相针状 (15 μm) , 游离碳团状 (0.52 μm) .
优化: HIP 强度增 15%.

5. 牌号对比

牌号	粘结相	含量	硬度 (HV)	抗弯强度 (GPa)	韧性 (KIC)	腐蚀率 (mm/年)	应用
YG6	钴	6%	1500	2.0	8	0.01	切削刀具
YG8	钴	8%	1450	2.2	9	0.01	采矿工具
YG15	钴	15%	1300	2.5	12	0.01	冲压模具
YN10	镍	10%	1350	2.0	10	<0.005	湿切削
YNC8	Co+Ni	8%	1400	2.3	11	0.007	航空刀具
YF10	铁+钴	10%	1300	1.9	8	0.02	低成本工具

6. 粘结相与涂层交互

6.1 涂层类型

TiN: 硬度 20002500 HV, 耐磨.
CrN: 硬度 18002200 HV, 耐腐蚀.
Al2O3: 硬度 2000 HV, 耐热 >1000°C.
多层涂层: TiN+Al2O3+TiCN, 综合性能优.

6.2 交互机制

界面结合: 钴基+TiN 附着力增 20%, 镍基+CrN 寿命增 50%.
热膨胀匹配: 钴+TiN 稳定性增 15%.
化学稳定性: 镍基+CrN 腐蚀率 <0.003 mm/年.

6.3 效果

耐磨性: YG6+TiN 寿命增 3 倍.
耐腐蚀性: YN10+CrN 寿命增 2 倍.
耐热性: YNC8+Al2O3 切削温度 >1000°C.

7. 优化措施

选择粘结相: 钴 (韧性), 镍 (耐腐蚀), Co+Ni (综合).
控制含量: 6% 钴 (刀具), 15% 钴 (模具).
改善分布: Cr3C2 韧性 +5%.
优化烧结: HIP 强度 +15%.
涂层: CrN 耐腐蚀性 +2 倍.

8. 应用案例

YG6 刀具：硬度 1500 HV，寿命 2 小时（+TiN 6 小时）。

YG15 模具：抗弯强度 2.5 GPa，寿命 12 万次。

YN10 模具：腐蚀率 <0.005 mm/年，寿命 1 年（+CrN 2 年）。

YNC8 刀具：硬度 1400 HV，寿命 3 小时（+Al₂O₃ 4 小时）。

9. 标准

GB/T 3849：钴磁测试。

ISO 4499：显微结构。

ASTM B406：抗弯强度。

ASTM G31：耐腐蚀性。

ASTM C633：涂层附着力。

中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

微信：关注“中钨在线”



附件：

硬质合金混料环节粘结剂的种类及应用选择

1. 概述

硬质合金混料环节通过湿磨或干混将硬质相（WC）、粘结相（Co）与添加剂混合，加入粘结剂制备均匀料浆，供喷雾干燥、造粒和压制。粘结剂增强颗粒结合（绿色强度 $>5\text{ MPa}$ ）、改善流动性（ $<30\text{ s/50 g}$ ）、控制颗粒形貌（ $D_{50}\ 50200\ \mu\text{m}$ ），并在烧结前分解（残炭 $<0.1\%$ ）。常见粘结剂包括聚乙二醇（PEG）、聚乙烯醇（PVA）、石蜡（PW）、橡胶类（SBR/BR），选择需考虑料浆特性、工艺和应用。

2. 粘结剂种类及特性

2.1 聚乙二醇（PEG）

化学性质： $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$ ，分子量 20020,000，水/乙醇溶，分解温度 250400°C ，残炭 $<0.05\%$ 。

物理特性：粘度 $100500\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，绿色强度 510 MPa ，流动性 $<25\text{ s/50 g}$ 。

优点：溶解性好，分解干净，成本低（ 1015 元/kg ）。

缺点：吸湿，料浆稳定性减 10% 。

工艺：添加量 12% ，搅拌 12 小时 ，分解 300400°C 。

2.2 聚乙烯醇（PVA）

化学性质： $(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$ ，分子量 20,000200,000，水溶，分解温度 200350°C ，残炭 $<0.1\%$ 。

物理特性：粘度 $2001000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，绿色强度 812 MPa ，流动性 $<28\text{ s/50 g}$ 。

优点：高粘结力，适合复杂形状。

缺点：乙醇溶解性差，干燥成本增 1015% 。

工艺：添加量 $0.51.5\%$ ，搅拌 23 小时 ，分解 250350°C 。

2.3 石蜡（PW）

化学性质：烃类，分子量 3001000 ，熔点 5070°C ，分解温度 200500°C ，残炭 $0.10.2\%$ 。

物理特性：粘度 $1050\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，绿色强度 48 MPa ，流动性 $<30\text{ s/50 g}$ 。

优点：成本低（ 510 元/kg ），润滑性好。

缺点：残炭多，需有机溶剂。

工艺：添加量 23% ，加热 6080°C ，分解 400500°C 。

2.4 橡胶类（SBR/BR）

化学性质：分子量 $50,000500,000$ ，分解温度 300600°C ，残炭 $0.20.3\%$ 。

物理特性：粘度 $5002000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，绿色强度 610 MPa ，流动性 $<30\text{ s/50 g}$ 。

版权与免责声明

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

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

优点：高弹性，抗裂性增 15%。
缺点：残炭多，成本高（2030 元/kg）。
工艺：添加量 12%，加热 5070°C，分解 400600°C。

2.5 其他

PMMA：分解温度 300450°C，残炭 <0.1%，适合高精度刀具。
CMC：分解温度 250350°C，残炭 <0.05%，适合研发。
进展：水基纳米粘结剂，残炭 <0.03%，流动性增 15%。

3. 应用选择

3.1 选择依据

料浆：固含量 6080%，乙醇选 PEG/PW，水选 PVA/CMC。
工艺：湿压选 PVA，干压选 PW。
应用：刀具选 PEG/PVA，模具选 SBR，低成本选 PW。
成本：PW（510 元/kg），PEG（1015 元/kg）。

3.2 适用场景

PEG：YG6/YG8 刀具，D50 80150 μm ，流动性 <25 s/50 g。
PVA：超细晶刀具，绿色强度 812 MPa。
PW：YG8 采矿工具，成本降 20%。
SBR：YG15 模具，抗裂性增 15%。
PMMA/CMC：航空刀具研发，D50 5080 μm 。

3.3 选择流程

确定应用和料浆特性。
匹配粘结剂。
验证流动性、绿色强度、残炭。
优化工艺。

4. 影响因素

含量：12%（PEG/PVA），23%（PW/SBR）。
料浆：固含量 70%，粘度 200 mPa s。
混合：搅拌 5001000 rpm，12 小时。
烧结：真空，350400°C，残炭 <0.1%。
环境：湿度 <40%，温度 2030°C。

版权与法律声明

5. 优化措施

选择粘结剂：PEG/PVA（刀具），SBR（模具）。

控制含量：绿色强度 512 MPa。

优化料浆：固含量 7075%。

改进混合：行星式球磨，均匀性增 15%。

优化烧结：HIP，孔隙率 <0.01%。

6. 应用案例

YG6 刀具：1.5% PEG，流动性 23 s/50 g，硬度 1500 HV。

超细晶刀具：1% PVA，绿色强度 10 MPa，硬度 2000 HV。

YG8 采矿工具：2.5% PW，抗弯强度 2.2 GPa。

YG15 模具：1.5% SBR，寿命 12 万次。

7. 结论

硬质合金混料环节使用的粘结剂包括聚乙二醇（PEG）、聚乙烯醇（PVA）、石蜡（PW）、橡胶类（SBR/BR）及其他（如 PMMA、CMC）。PEG 流动性好（<25 s/50 g），适合通用刀具；PVA 绿色强度高（812 MPa），适合超细晶刀具；PW 成本低，适合采矿工具；SBR 抗裂性强，适合大型模具。选择需考虑料浆特性（固含量 6080%）、工艺要求、应用场景和成本。优化措施可提高流动性 20%、绿色强度 20%、硬度 5%，降低成本 20%。未来，水基纳米粘结剂和双重粘结剂将提升性能和环保性。

硬质合金粘结剂特点与性能对比表

粘结剂	化学性质	分解温度 °C	残炭 %	绿色强度 MPa	流动性 s/50g	成本 元/kg	优点	缺点	主要应用
PEG	HO(CH ₂ CH ₂ O) _n H，分子量 20020,000，水/乙醇溶	250400	<0.05	510	<25	1015	流动性好，分解干净，成本低	吸湿，高分子量残炭增	通用刀具（YG6、YG8），模具（YG15）
PVA	(C ₂ H ₄ O) _n ，分子量 20,000200,000，水溶	200350	<0.1	812	<28	1520	高粘结力，适合复杂形状	乙醇溶解性差，干燥成本高	超细晶刀具，复杂模具
PW	烃类，分子量 3001000，溶于有机溶剂	200500	0.10.2	48	<30	510	成本低，润滑性好	残炭多，需有机溶剂	采矿工具（YG8），低成本模具
SBR/BR	分子量 50,000500,000，溶于有机溶剂	300600	0.20.3	610	<30	2030	高弹性，抗裂性强	残炭多，成本高	大型模具（YG15），采矿工具
PMMA	分子量 50,000100,000，溶于有机溶剂	300450	<0.1	812	<28	~50	高精度，低残炭	成本高，溶解性差	高精度刀具研发

CMC	纤维素衍生物，水溶	250350	<0.05	46	<25	2025	水溶性好，低残炭	绿色强度低	实验室研发，航空刀具
-----	-----------	--------	-------	----	-----	------	----------	-------	------------

分解温度：影响烧结工艺，<400°C 更适合真空烧结。

残炭：<0.1% 确保烧结孔隙率 <0.1%。

绿色强度：>5 MPa 满足压制需求，812 MPa 适合复杂形状。

流动性：<30 s/50 g 符合喷雾干燥要求（GB/T 1482）。

成本：PW 最经济，PMMA 最高。

应用选择：高性能选 PEG/PVA，低成本选 PW，大型坯料选 SBR。

8. 标准

GB/T 3849: 钴磁测试. ISO 4499: 显微结构.

GB/T 1482: 流动性. ISO 3326:2013: 孔隙率.

中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

微信：关注“中钨在线”





附件：

硬质合金脱碳与渗碳的概念、成因及改善

1. 概述

硬质合金是以碳化钨（WC）为硬质相、钴（Co）或镍（Ni）为黏结相的复合材料，其性能高度依赖于碳含量的精确控制。WC 的理论碳含量为 6.13 wt%，实际生产中需控制在 6.08-6.18 wt% 范围内（《中国有色金属学报》2024）。碳含量的偏差会导致脱碳或渗碳缺陷，显著影响材料的微观结构和性能。脱碳是指碳含量不足，导致 WC 分解或形成脆性 η 相（ $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 或 $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ ），从而降低硬度和强度；渗碳是指碳含量过高，析出游离碳（石墨相），影响耐磨性和涂层附着力。本文结合中国国家标准（GB/T 3849）、国际标准（ISO 4499）及行业数据，详细分析脱碳与渗碳的概念、成因、影响及改善措施。

2. 脱碳与渗碳的概念

2.1 脱碳

脱碳定义

硬质合金中碳含量低于 WC 的化学计量比（6.13 wt%），导致 WC 分解为 W_2C 或形成 η 相（ $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 、 $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$ ）。

微观结构

η 相呈针状或颗粒状，尺寸 5-25 μm ，硬度约 HV 1800-2000，断裂韧性（KIC）4-6 $\text{MPa m}^{1/2}$ ，远低于硬质合金整体的 8-15 $\text{MPa m}^{1/2}$ （《Journal of Materials Science》2025）。 η 相的脆性会导致裂纹扩展，降低材料可靠性。

脱碳影响

版权与法律责任声明

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

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

硬度下降 5%-10%（例如，从 HV 1800 降至 HV 1620-1710，ITIA 2024）。

抗弯强度（TRS）下降 10%-15%（从 2200 MPa 降至 1870-1980 MPa，ASTM B406 测试）。
耐腐蚀性降低，腐蚀速率增加 15%-20%（盐雾环境中腐蚀速率从 0.05 mm/年增至 0.06-0.07 mm/年，ASTM G31）。

实例：在高速切削条件下（200 m/min），脱碳导致硬质合金刀具的耐磨性下降，切削寿命缩短约 20%-30%（《中国有色金属学报》2024）。

2.2 渗碳

定义

硬质合金中碳含量高于化学计量比，析出游离碳（石墨相）。

微观结构

游离碳呈团状或片状，尺寸 0.5-3 μm ，硬度极低（<HV 100），主要分布于钴相或晶界，增加孔隙率（《中国有色金属学报》2024）。

影响

硬度下降 3%-5%（从 HV 1800 降至 HV 1710-1740，ITIA 2024）。

抗弯强度下降 8%-10%（从 2200 MPa 降至 1980-2020 MPa）。

游离碳增加润湿角（从 5°增至 15°-25°），导致涂层附着力下降 15%-20%（ASTM C633 测试）。

实例：在冲压模具应用中，渗碳导致硬质合金模具表面粗糙度增加（Ra 从 0.2 μm 增至 0.3-0.4 μm ），涂层剥落率提升约 15%，模具寿命减少 10%-15%（《Journal of Materials Science》2025）。

3. 脱碳与渗碳的成因

3.1 脱碳

原料因素：

碳含量不足（<6.10 wt%），如 WC 粉末中碳含量低于理论值（6.13 wt%）。

原料中氧化物（如 WO_3 或 CoO ）含量高（0.03%-0.1%），在烧结过程中与碳反应生成 CO/CO_2 ，消耗碳元素（《Journal of Materials Science》2025）。

炭黑质量不稳定，含杂质（如硫、氧）导致碳损失约 0.05%-0.1%（ITIA 2024）。

气氛因素：

烧结气氛中氧气含量 >0.1%，导致碳氧化生成 CO/CO_2 ，脱碳率增加约 10%-15%。

氢气（ H_2 ）含量过高（>5%），与碳反应生成 CH_4 ，带走碳元素（ITIA 2024）。

气氛中水分（ H_2O ）含量 >0.05%，与碳反应生成 CO 和 H_2 ，进一步加剧脱碳（《中国有色金属学报》2024）。

温度因素：

烧结温度 >1450°C，WC 分解为 W_2C 或 η 相（反应： $2\text{WC} + \text{Co} \rightarrow \text{Co}_3\text{W}_3\text{C} + \text{C}$ ）。

温度波动（ $\pm 10^\circ\text{C}$ ）导致局部脱碳， η 相形成率增加 10%-15%（《中国有色金属学报》2024）。

保温时间过长（>2 小时），碳挥发增加，脱碳风险提升约 8%（《Journal of Materials Science》2025）。

混料因素：

混料不均匀，局部碳分布偏差 $>0.1\text{ wt}\%$ ，导致区域性脱碳。

有机粘结剂（如石蜡 PW 或 SBR）残炭率 $>0.1\%$ ，在烧结初期分解不完全，影响碳平衡（ITIA 2024）。

混料设备（如球磨机）污染（如铁屑），引入氧化物，消耗碳元素约 $0.02\%-0.05\%$ （《中国有色金属学报》2024）。

3.2 渗碳

原料因素：

碳含量过高（ $>6.15\text{ wt}\%$ ），如炭黑添加量超标（ $>0.5\text{ wt}\%$ ）。

炭黑颗粒尺寸不均（ $>10\text{ }\mu\text{m}$ ），导致局部碳过量（ITIA 2024）。

原料中碳化物（如 WC）颗粒过细（ $<0.1\text{ }\mu\text{m}$ ），表面活性高，吸附过量碳（《Journal of Materials Science》2025）。

气氛因素：

烧结气氛中 CO 或 CH_4 含量过高（ $>1\%$ ），导致碳沉积，渗碳率增加约 $10\%-15\%$ 。

真空度不足（ $>10^{-2}\text{ Pa}$ ），碳挥发受抑，剩余游离碳析出（ITIA 2024）。

气氛中碳势过高（如碳势 >1.2 ），碳原子扩散至材料表面，析出石墨相（《中国有色金属学报》2024）。

温度因素：

烧结温度 $<1350^\circ\text{C}$ ，碳反应不完全，剩余游离碳析出。

温度波动（ $\pm 10^\circ\text{C}$ ）导致局部渗碳，游离碳体积占比增加 $5\%-10\%$ （《中国有色金属学报》2024）。

冷却速率过慢（ $<5^\circ\text{C}/\text{min}$ ），碳在冷却过程中析出，渗碳率增加约 5% （《Journal of Materials Science》2025）。

混料因素：

混料中石蜡（PW）或 SBR 残炭率 $0.15\%-0.3\%$ ，分解后增加碳含量。

混料时间不足（ <10 小时），碳分布不均，局部渗碳率增加约 $8\%-12\%$ （ITIA 2024）。

混料过程中炭黑团聚（团聚颗粒 $>20\text{ }\mu\text{m}$ ），导致局部碳过量（《中国有色金属学报》2024）。

微观机制：

脱碳时， η 相降低 WC-Co 界面结合能（从 $1.2\text{ J}/\text{m}^2$ 降至 $0.8\text{--}1.0\text{ J}/\text{m}^2$ ），增加裂纹扩展倾向（《Journal of Materials Science》2025）。

渗碳时，游离碳增加润湿角（从 5° 增至 $15^\circ\text{--}25^\circ$ ），降低钴相对 WC 的润湿性，影响涂层附着力（ITIA 2024）。

碳含量的微小偏差（ $\pm 0.1\text{ wt}\%$ ）会导致界面应力增加约 $10\%-15\%$ ，进一步加剧微观缺陷（《中国有色金属学报》2024）。

4. 脱碳与渗碳的影响

4.1 微观结构

脱碳：

η 相破坏 WC-Co 界面结合，钴池体积增加 $5\%-10\%$ ，晶粒异常长大（从 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $1\text{--}2$

μm)。

孔隙率增加 0.05%-0.1% (ISO 3326:2013)。

界面应力增加约 10%，导致微裂纹萌生概率提升 15%-20% (《Journal of Materials Science》2025)。

渗碳：

游离碳堆积于晶界，孔隙率增加 0.1%-0.15%。

钴相分布不均，局部润湿性下降 10%-15%，晶界强度降低约 5% (《中国有色金属学报》2024)。

游离碳颗粒引发应力集中，增加孔隙形成倾向约 8% (ITIA 2024)。

4.2 性能

硬度：

脱碳：下降 5%-10% (HV 1800 降至 HV 1620-1710)。

渗碳：下降 3%-5% (HV 1800 降至 HV 1710-1740)。

强度：

脱碳：抗弯强度下降 10%-15% (2200 MPa 降至 1870-1980 MPa)。

渗碳：下降 8%-10% (2200 MPa 降至 1980-2020 MPa)。

韧性：

脱碳：断裂韧性 (KIC) 下降 20%-25% (从 10 MPa m^{1/2} 降至 7.5-8 MPa m^{1/2})。

渗碳：略增 5%-8% (从 10 MPa m^{1/2} 增至 10.5-10.8 MPa m^{1/2})。

耐腐蚀性：

脱碳：腐蚀速率增加 15%-20% (从 0.05 mm/年 增至 0.06-0.07 mm/年, ASTM G31)。

渗碳：腐蚀速率增加约 5% (0.05 mm/年 增至 0.0525 mm/年)。

涂层附着力：

渗碳：附着力下降 15%-20% (从 50 MPa 降至 40-42.5 MPa, ASTM C633)。

脱碳：附着力下降约 5% (50 MPa 降至 47.5 MPa)。

耐磨性：

脱碳：磨损率增加 20%-25% (从 0.06 mm³/N m 增至 0.072-0.075 mm³/N m, ASTM G65)。

渗碳：磨损率增加 10%-15% (从 0.06 mm³/N m 增至 0.066-0.069 mm³/N m)。

4.3 应用

刀具：

脱碳导致刀具耐磨性下降，切削寿命减少 20%-30%，如在高速切削 (200 m/min) 中寿命从 2 小时降至 1.4-1.6 小时 (《中国有色金属学报》2024)。

渗碳使涂层剥落率增加 15%-20%，寿命减少 10%-15% (《Journal of Materials Science》2025)。

模具：

脱碳导致模具抗冲击性下降，寿命减少 15%-20%，如冲压模具寿命从 12 万次降至 9.6-10.2 万次。

渗碳使模具表面粗糙度增加 (Ra 从 0.2 μm 增至 0.3-0.4 μm)，寿命减少 10%-15% (《Journal

of Materials Science》2025)。

采矿工具：

脱碳增加断裂风险约 25%-30%，如采矿钻头在花岗岩钻进中寿命从 2000 米降至 1400-1500 米 (ITIA 2024)。

渗碳导致耐磨性下降约 10%-15%，钻头寿命减少 10%-12% (《中国有色金属学报》2024)。

5. 改善措施

5.1 原料控制

严格控制碳含量在 6.10-6.15 wt% (± 0.05 wt%)，使用高纯 WC 粉末 (碳含量 6.12-6.14 wt%，氧化物 $<0.02\%$)。

添加晶粒抑制剂如 Cr_3C_2 (0.3%-0.8%) 或 VC (0.1%-0.5%)，抑制 η 相形成， η 相体积占比降低 8%-12% (ITIA 2024)。

采用高纯炭黑 (纯度 $>99.9\%$)，减少杂质 (如硫、氧) 对碳含量的干扰，碳损失率控制在 0.01%-0.03% (《中国有色金属学报》2024)。

5.2 混料优化

使用行星式球磨机混料 (12-18 小时，转速 300-500 r/min)，均匀性提高 10%-15%，碳分布偏差 <0.05 wt%。

采用低残炭粘结剂，如 PEG 或 PVA (残炭率 $<0.03\%$)，替代传统石蜡 (残炭率 0.1%-0.2%)。优化球磨介质 (如 WC 球代替钢球)，减少铁污染，碳消耗降低约 0.02% (《Journal of Materials Science》2025)。

添加分散剂 (如硬脂酸，0.1%-0.3%)，减少炭黑团聚，均匀性提升 5%-8% (《中国有色金属学报》2024)。

5.3 烧结优化

采用真空烧结 (真空度 $<10^{-3}$ Pa)，控制气氛中氧气 $<0.05\%$ 、 $\text{H}_2<2\%$ 、 $\text{H}_2\text{O}<0.03\%$ ，避免碳氧化或挥发。

烧结温度控制在 1380-1420°C ($\pm 5^\circ\text{C}$)，保温时间 1-1.5 小时，避免 WC 分解或游离碳析出。冷却速率控制在 5-10°C/min，减少游离碳析出风险约 5% (《Journal of Materials Science》2025)。

热等静压 (HIP, 100-150 MPa, 1350-1400°C) 消除孔隙，孔隙率 $<0.01\%$ (ISO 3326:2013)。使用气氛监测系统 (实时检测 CO/CH₄ 含量)，确保碳势 <1.0 ，渗碳率降低约 10% (ITIA 2024)。

5.4 检测反馈

使用钴磁测试 (GB/T 3849) 检测碳含量偏差 (± 0.05 wt%)，精确控制 η 相和游离碳。

结合 X 射线衍射 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 分析微观结构, η 相/游离碳检测率提升 15%-20%。

采用能量色散谱 (EDS) 分析碳分布, 偏差控制在 ± 0.03 wt%, 缺陷率降低 10%-15% (《中国有色金属学报》2024)。

实施在线红外光谱监测, 检测烧结气氛中 CO/CO₂ 含量, 实时调整工艺, 缺陷率降低约 8% (ITIA 2024)。

5.5 表面处理

抛光去除游离碳层 (厚度 0.01-0.03 mm), 表面粗糙度 $Ra < 0.2 \mu m$ 。

采用 PVD TiN、TiAlN 或 CrN 涂层 (厚度 2-5 μm), 涂层附着力提高 15%-20% (ASTM C633)。

使用等离子清洗去除表面残留碳, 涂层结合力提升约 10% (《Journal of Materials Science》2025)。

低温渗氮处理 (500-600°C), 提高表面硬度约 5%, 耐腐蚀性提升 10%-15% (ASTM G31)。

效果:

η 相和游离碳体积占比降低 10%-15%。

硬度提升 5%-8% (从 HV 1710 升至 HV 1800-1850)。

抗弯强度提升 10%-15% (从 1980 MPa 升至 2200-2300 MPa)。

耐磨性提高 15%-20%, 刀具和模具寿命延长 20%-30%。

6. 应用案例

低 Co 硬质合金刀具 (WC-6%Co): 通过真空烧结 (1400°C, 真空度 10^{-3} Pa) 并添加 0.5% Cr₃C₂, η 相减少 10%-12%, 硬度达 HV 1850, 切削中碳钢 (200 m/min) 时寿命从 1.5 小时提升至 1.8-2 小时 (《中国有色金属学报》2024)。

高 Co 硬质合金模具 (WC-15%Co): 精确控制碳含量 (6.12 wt%) 并抛光处理, 游离碳减少 10%-15%, 抗弯强度达 2.4-2.5 GPa, 冲压模具寿命从 10 万次提升至 11.5-12 万次 (ITIA 2024)。

Ni 基硬质合金模具 (WC-10%Ni): 采用 HIP (150 MPa, 1400°C) 和 CrN 涂层, 孔隙率 $< 0.01\%$, 腐蚀速率 < 0.005 mm/年, 海洋工程部件寿命从 0.8 年提升至 1.1-1.2 年 (《Journal of Materials Science》2025)。

超细晶硬质合金刀具 (WC 晶粒 0.2 μm): 使用纳米 WC 粉末并涂覆 Al₂O₃ (3 μm), 硬度达 HV 1950-2000, 切削高温合金 (250 m/min) 时寿命从 3 小时提升至 3.8-4 小时 (《中国有色金属学报》2024)。

7. 标准

GB/T 3849-2015: 硬质合金钴磁性试验方法, 检测碳含量偏差。

ISO 4499-2:2020: 硬质合金显微结构评定, 分析 η 相和游离碳。

版权与免责声明

ASTM B406-96(2021): 硬质合金抗弯强度试验方法。

ASTM G31-21: 金属材料耐腐蚀性试验方法。

ASTM C633-13(2021): 涂层附着力试验方法。

ISO 3326:2013: 硬质合金孔隙率测定方法。

ASTM G65-00(2010): 干砂/橡胶轮磨损试验, 评估耐磨性。

中钨智造科技有限公司

30 年硬质合金定制专家

核心优势

30 年经验：深谙硬质合金生产加工，技术成熟稳定，不断精进。

精准定制：支持特殊性能与复杂设计，重视客户+AI 协同设计。

质量成本：优化模具与加工，性价比卓越；领先设备，RMI、ISO 9001 认证。

服务客户

产品涵盖切削、工模具、航空、能源、电子等领域，已服务 10+万客户。

服务承诺

10+亿次访问、100+万网页、10+万客户、30 年 0 抱怨！

联系我们

邮箱：sales@chinatungsten.com

电话：+86 592 5129696

官网：www.ctia.com.cn

微信：关注“中钨在线”

