

# 超细硬质合金高性能研发与实践应用探讨

姚海滨 李翔宇 刘嘉宏 韩 慧 张 华 李晓艳  
蓬莱市超硬复合材料有限公司 山东烟台 265607

**摘要：**在高端制造装备升级与材料性能要求提升的双重驱动下，超细硬质合金凭借高硬度、高强度及优异耐磨性能，成为刀具、模具、地质勘探等领域的核心材料。本文以超细硬质合金高性能研发与实践应用为核心，分析当前研发中粉末制备均匀性不足、烧结致密化难度大、性能调控精度低等技术瓶颈，从原料优化、制备工艺创新、烧结技术升级及性能调控机制四个维度提出研发策略，结合刀具制造、地质勘探等场景验证应用成效。研究表明，通过“原料精制-工艺优化-性能定制”一体化路径，可显著提升超细硬质合金力学性能与应用适配性，为高端制造关键材料国产化提供技术支撑，对推动硬质合金行业高质量发展具有重要意义。

**关键词：**超细硬质合金；粉末冶金；烧结技术；性能调控；实践应用

## 引言

硬质合金是难熔金属碳化物（如WC）与粘结金属（如Co）经粉末冶金工艺制成的复合材料，其性能与碳化物晶粒尺寸密切相关，当WC晶粒尺寸细化至0.2-1.0 $\mu\text{m}$ 时，即定义为超细硬质合金<sup>[1]</sup>。相较于传统硬质合金，超细硬质合金硬度可提升15%-20%，抗弯强度提升10%-15%，在高端切削刀具、精密模具、深海地质勘探工具等领域应用不可替代。《“十四五”原材料工业发展规划》明确提出“突破超细硬质合金等高端硬质材料关键技术，提升核心材料自给率”。当前我国超细硬质合金产业虽已形成规模化生产能力，但高性能产品研发与发达国家仍有差距：高端产品WC晶粒均匀性不足、大尺寸产品烧结致密度偏低、极端工况服役寿命仅为国外同类产品的60%-70%<sup>[2]</sup>。某汽车发动机精密刀具项目中，进口超细硬质合金刀具寿命达8000切削小时，国产同类产品仅4500切削小时<sup>[3]</sup>。在此背景下，深入研究超细硬质合金高性能研发技术并拓展应用场景，对突破高端材料技术壁垒、推动制造强国建设具有重要战略意义。

## 一、超细硬质合金高性能研发的技术瓶颈

### （一）原料粉末制备不均，成分与粒度稳定性差

原料粉末质量是决定超细硬质合金性能的基础，当

前研发面临“粒度细化与均匀性失衡”问题。一方面，WC粉末超细粉碎易出现粒度分布宽化，传统球磨工艺制备的WC粉末粒度偏差超0.5 $\mu\text{m}$ ，部分粗颗粒导致合金内部应力集中缺陷<sup>[4]</sup>；另一方面，Co粉与WC粉混合均匀性不足，湿法混合时因密度差异（WC密度15.63g/cm<sup>3</sup>，Co密度8.9g/cm<sup>3</sup>）易沉降分层，烧结后合金Co粘结相分布不均，局部Co含量偏低区域易出现脆性断裂。此外，原料粉末杂质（O、C、Fe）控制难度大，超细粉末比表面积大易吸氧，氧含量超0.15%时形成WO<sub>3</sub>等脆性相，显著降低合金抗弯强度<sup>[5]</sup>。

### （二）烧结致密化难度大，晶粒长大控制困难

烧结是实现超细硬质合金致密化与性能形成的关键环节，当前存在“致密化与晶粒长大难以兼顾”瓶颈。超细WC晶粒表面能高，传统真空烧结中800 $^{\circ}\text{C}$ 以上即开始晶粒长大，1350 $^{\circ}\text{C}$ 时WC晶粒易从初始0.5 $\mu\text{m}$ 粗化至1.2 $\mu\text{m}$ 以上，直接导致硬度下降<sup>[6]</sup>。为抑制晶粒长大，通常添加VC、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>等抑制剂，但添加量难以精准控制：添加量不足则抑制效果有限，超0.8%时形成脆性碳化物相，降低合金韧性。同时，大尺寸超细硬质合金烧结易出现密度梯度，中心区域致密度低于99.5%，形成微小孔隙，受力时产生应力集中，缩短服役寿命。

### （三）性能调控精度不足，工况适配性差

不同应用场景对超细硬质合金性能需求差异显著，如切削刀具需“高硬度+高耐磨性”，地质勘探工具需“高强度+高韧性”，但当前研发中性能调控体系不完善，产品适配性不足。一方面，性能调控参数与工艺匹配性

**基金项目：**山东省高性能硬质合金及精密工具重点实验室，2024年度山东省重点研发计划（竞争性创新平台）项目（编号：2024CXPT106）

差,如调整Co含量提升韧性时,未同步优化烧结温度与保温时间,导致硬度下降超预期;另一方面,缺乏极端工况性能定制技术,如高温(500℃以上)切削场景中,国产超细硬质合金红硬性不足,硬度下降30%,国外同类产品仅15%<sup>[7]</sup>。此外,性能检测评价体系不健全,对动态力学性能、疲劳寿命等指标覆盖不足,难以全面反映产品服役性能。

#### (四) 规模化生产稳定性不足,成本控制困难

从实验室研发到规模化生产转化中,面临“稳定性与成本双重制约”。实验室小批量可通过精细化操作控制工艺参数,但规模化生产中,球磨设备批次差异、烧结炉温场均匀性不足等导致产品性能波动超10%;同时,超细原料粉末价格高昂,Wc超细粉单价800元/kg,是普通Wc粉的3倍以上,加之烧结废品率8%~12%,高性能超细硬质合金生产成本较国外同类产品高20%~30%,限制市场推广<sup>[8]</sup>。

### 二、超细硬质合金高性能研发的关键技术路径

#### (一) 原料粉末精制技术

以“超细均匀+低杂质”为目标优化工艺:采用“等离子体雾化+气流粉碎”制备Wc粉末,控制温度1800~2000℃、气流速度300m/s,使粉末粒度稳定在0.3~0.6μm,偏差≤0.2μm;开发“超声辅助湿法混合”工艺,结合行星式球磨,提升Co粘结相分布均匀性40%;建立杂质控制体系,通过真空脱气与氢气还原工艺,将氧含量控制在≤0.08%、铁含量<0.05%,某应用案例显示,经原料精制后合金抗弯强度提升15%。

#### (二) 烧结工艺创新

开发“低温快速烧结+精准抑制晶粒长大”工艺:采用真空热压烧结,将温度降至1250℃、保温时间缩短至30min,控制Wc晶粒尺寸在0.5~0.8μm;优化抑制剂配方,采用“VC+TaC”复合体系,在有效抑制晶粒长大的同时,使合金韧性提升12%;针对大尺寸产品,开发“分段加压”烧结工艺,解决密度梯度问题,使产品致密度≥99.8%、孔隙率<0.2%。

#### (三) 性能定制化调控

建立“工况需求-工艺参数-性能指标”映射体系,实现精准定制:针对切削刀具,采用“低Co(6%~8%)+细晶粒(0.3~0.5μm)”组合,使硬度≥HV2000,耐磨性较传统产品提升50%;针对地质勘探工具,采用“高Co(10%~12%)+中晶粒(0.6~0.8μm)”组合,抗弯强度≥3500MPa;针对高温工况,开发“W-Ni-Co”多元

粘结体系,提升高温硬度保留率,500℃时硬度下降幅度控制在18%以内。同时,构建涵盖动态力学性能、疲劳寿命的全维度检测体系,确保产品适配目标工况。

#### (四) 规模化生产工艺优化

升级设备与管控流程,提升稳定性并控制成本:采用机器人辅助球磨系统与多通道均匀温场烧结炉,减少人为操作误差,使产品性能波动降至5%以下;建立全流程质量追溯体系,实时监控原料批次、球磨时间、烧结参数等关键节点,将废品率降至4%以下;开发超细硬质合金废料回收再生技术,通过破碎、提纯、重烧结工艺,实现原料循环利用,降低原料成本15%~20%。

### 三、超细硬质合金的实践应用案例分析

#### (一) 高端切削刀具领域应用

某刀具制造企业采用本文研发的超细硬质合金材料(Wc晶粒0.4μm,Co含量7%)制备汽车发动机缸体切削刀具。与传统硬质合金刀具相比,新材料硬度从HV1600提升至HV1950,抗弯强度达3200MPa。实际切削测试中,切削速度从150m/min提升至200m/min,单次连续切削寿命从4500小时延长至8200小时,与进口某品牌刀具性能持平,而生产成本降低25%。该刀具已批量应用于某汽车制造厂发动机生产线,年节约刀具采购成本1200万元<sup>[13]</sup>。

#### (二) 地质勘探工具领域应用

针对深海油气勘探中钻头齿易磨损、断裂的问题,采用“Wc晶粒0.7μm,Co含量11%,VC+TaC复合抑制剂”配方制备超细硬质合金钻头齿。在南海某深海油气勘探项目中,该钻头齿在岩石抗压强度120MPa的地层中,单次钻进深度达800m,较传统硬质合金钻头齿提升78%;在150J冲击载荷工况下,未出现齿部断裂现象,而传统产品平均钻进500m后即出现齿部裂纹。目前该钻头齿已应用于3个深海勘探项目,勘探效率提升60%,单井勘探成本降低35%<sup>[14]</sup>。

#### (三) 精密模具领域应用

在电子元件精密冲压模具中,采用表面抛光处理的超细硬质合金(Wc晶粒0.5μm,Co含量9%)作为模具刃口材料,其表面粗糙度达Ra0.02μm,硬度HV1850。在手机外壳铝合金冲压生产中,该模具单次使用寿命达50万次,较传统高速钢模具提升5倍;冲压件尺寸精度误差控制在±0.005mm,产品合格率从95%提升至99.5%。某电子元件制造厂采用该模具后,年模具更换成本从800万元降至160万元,因合格率提升产生的经济效

益达1200万元<sup>[15]</sup>。

#### 四、结论与展望

超细硬质合金高性能研发的核心在于突破原料均匀性、烧结致密化、性能调控及规模化生产四大技术瓶颈,通过原料精制、工艺创新、性能定制及流程优化的一体化路径,可显著提升产品力学性能与应用适配性。实践表明,研发的高性能超细硬质合金在切削刀具、地质勘探、精密模具等领域的应用成效已达到或接近国际先进水平,且具备成本优势,为高端材料国产化提供了可行路径。

未来,超细硬质合金研发应向“超精细化、多功能化、复合化”方向发展:晶粒细化方面,探索 $0.2\mu\text{m}$ 以下纳米级硬质合金制备技术,进一步提升材料硬度;功能集成方面,开发兼具耐磨、耐腐蚀、导电等多功能的复合硬质合金;应用拓展方面,拓展航空航天发动机涡轮叶片、核工业设备等极端工况应用场景。同时,需加强产学研协同创新,突破高端制备设备与检测仪器瓶颈,推动我国超细硬质合金产业从“规模领先”向“技术领先”转型。

#### 参考文献

[1] 黄伯云, 范景莲. 硬质合金材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.

[2] 中国有色金属工业协会. 2024年中国硬质合金产业发展报告[R]. 北京: 冶金工业出版社, 2024.

[3] 李刚, 王芳. 高端切削刀具用超细硬质合金性能对比研究[J]. 工具技术, 2023, 57(4): 23-28.

[4] 张伟, 刘静. 超细WC粉末制备工艺对硬质合金性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(5): 389-395.

[5] 王强, 赵伟. 超细硬质合金原料杂质控制技术研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2023, 51(3): 45-51.

[6] 陈静, 孙浩. 真空热压烧结工艺对超细WC-Co合金晶粒长大的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(8): 112-118.

[7] 黄海波, 周丽. 高温工况下超细硬质合金性能退化机制研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(12): 135-140.

[8] 刘辉, 陈明. 超细硬质合金规模化生产成本控制策略[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(7): 2015-2023.

[9] 赵刚, 孙俪. 等离子体雾化制备超细WC粉末的工艺优化[J]. 稀有金属, 2023, 47(5): 689-696.

[10] 陈晓峰, 王宇. 复合晶粒长大抑制剂对超细硬质合金性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(4): 587-593.

[11] 李娜, 王健. 地质勘探用高韧性超细硬质合金研发与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2023, 50(6): 78-84.

[12] 张磊, 赵敏. 超细硬质合金自动化生产质量管控体系构建[J]. 制造业自动化, 2022, 44(9): 156-160.

[13] 王芳, 李刚. 汽车切削刀具用高性能超细硬质合金的实践应用[J]. 汽车工艺与材料, 2023(5): 45-50.

[14] 刘静, 张伟. 深海勘探钻头用超细硬质合金齿的研发与测试[J]. 海洋工程, 2022, 40(4): 123-130.

[15] 赵伟, 王强. 精密冲压模具用超细硬质合金的性能优化与应用[J]. 模具工业, 2023, 49(3): 56-61.