

碳化硼陶瓷在轻质装甲与防弹头盔中的应用现状与挑战

赵 强

宁夏机械研究院股份有限公司 宁夏 银川 750001

摘要：碳化硼陶瓷凭借超硬低密、化学稳定及中子吸收等特性，成为轻质装甲与防弹头盔的理想材料。在轻质装甲领域，其已应用于武装直升机、装甲车辆及单兵防弹插板，显著提升防护性能并减轻重量。然而，碳化硼陶瓷仍面临烧结工艺复杂、成本高昂、韧性不足及界面粘接等挑战，限制了其大规模应用。未来需通过技术创新与工艺优化，推动其产业化发展。

关键词：碳化硼陶瓷；轻质装甲；防弹头盔；应用现状；挑战

引言：在现代军事与安防领域，轻量化、高防护性能装备的研发已成为核心需求。碳化硼陶瓷凭借其超硬低密、耐化学腐蚀及中子吸收等特性，成为轻质装甲与防弹头盔的理想材料。自20世纪60年代首次应用于美军武装直升机装甲以来，碳化硼陶瓷在单兵防护、车辆装甲及航空航天领域持续拓展。然而，其产业化进程仍面临烧结工艺复杂、断裂韧性不足、界面粘接不稳定及成本高昂等多重挑战，制约了大规模推广。

1 碳化硼陶瓷的物理特性与防弹机理

1.1 材料特性分析

(1) 超硬低密：碳化硼陶瓷是目前已知硬度最高的材料之一，维氏硬度可达3000kg/mm²，仅次于金刚石和立方氮化硼，能有效抵御弹丸的切削与冲击；同时其密度仅为2.52g/cm³，远低于钢铁（7.85g/cm³）和钛合金（4.51g/cm³），在保障防护性能的同时，可大幅降低装备重量，是轻质装甲的理想材料。(2) 化学稳定性：该材料具备优异的化学稳定性，在常温下不与强酸、强碱发生反应，即使在高温环境中（≤800℃）也能保持结构稳定，且不与熔融金属（如铝、铁合金）发生浸润反应，避免在极端工况下因化学腐蚀导致防护性能衰减，延长装甲使用寿命。(3) 中子吸收能力：碳化硼陶瓷中的硼元素（尤其是¹⁰B同位素）对中子具有极强的吸收能力，吸收截面高达3840靶恩，除防弹领域外，还可延伸应用于核反应堆控制棒、核废料处理等核工业场景，实现“一材多用”，拓展材料应用价值^[1]。

1.2 防弹机理解析

(1) 能量耗散机制：当弹丸冲击碳化硼陶瓷时，陶瓷表面因超高硬度阻止弹丸侵入，同时冲击力引发陶瓷内部产生大量微观裂纹。这些裂纹沿晶界快速扩展，形成“碎裂区”，过程中会分散并吸收弹丸的动能—据微观裂纹扩展路径分析，单块10mm厚碳化硼陶瓷可通过裂纹扩展耗

散弹丸70%以上的初始能量，大幅削弱弹丸穿透力。(2) 复合装甲协同效应：实际防弹应用中，碳化硼陶瓷常与纤维复合材料（如芳纶、超高分子量聚乙烯纤维）组成复合装甲。其中碳化硼层负责碎裂弹丸、初步耗散能量，纤维背板则通过形变承接碎裂的陶瓷颗粒与残余弹体，进一步吸收剩余能量。引用HAZOP（危险与可操作性分析）数据显示，该多级吸能模型的防护效率较单一陶瓷装甲提升45%，可有效抵御高动能穿甲弹冲击。

2 碳化硼陶瓷在轻质装甲中的应用现状与技术创新

2.1 军用领域应用

(1) 单兵防护系统：在单兵防弹装备中，碳化硼陶瓷凭借轻量化优势成为防弹插板核心材料。某型号碳化硼防弹插板厚度仅18mm，重量较传统氧化铝陶瓷插板减轻30%，却能成功抵御AK-47步枪发射的7.62mm穿甲弹直射，在保持防护性能的同时，大幅降低士兵负重，提升机动能力，已广泛应用于特种部队、边防部队的单兵防护装备中。(2) 装甲车辆改造：在装甲车辆轻量化升级中，碳化硼陶瓷成效显著。武直-10武装直升机座舱采用碳化硼陶瓷装甲后，整体装甲重量较原金属装甲减重40%，不仅降低了机身负荷、提升了续航能力，还增强了空中机动灵活性，在实战演练中，该装甲可有效抵御12.7mm机枪弹的射击，保障机组人员安全。(3) 航空航天防护：鱼鹰运输机的座舱装甲选用碳化硼陶瓷复合材料，经过实弹测试，能成功抵御12.7mm穿甲弹的冲击，且装甲重量较传统钛合金装甲降低28%，减少了飞机起飞油耗，提升了运载效率，满足了航空航天领域对防护性能与轻量化的双重严苛要求。

2.2 民用领域拓展

(1) 警用装备升级：在警用装备领域，碳化硼陶瓷推动运钞车、反恐车辆防护升级。某厂家为运钞车加装碳化硼陶瓷地板装甲后，防弹等级从抵御9mm手枪弹提

升至可抵御7.62mm步枪弹，同时车辆整体重量增加控制在5%以内，不影响车辆正常行驶速度与续航里程，大幅提升了押运安全系数。（2）高端安保市场：针对高端安保需求，碳化硼陶瓷可定制化应用于VIP车辆、金融机构押运车。例如为某VIP车辆设计的碳化硼侧装甲，厚度仅25mm，可抵御10mm手枪弹连续射击，且装甲表面可贴合车辆原有外观设计，兼顾防护性与美观性，满足高端用户个性化需求^[2]。

2.3 技术创新方向

（1）纳米复合陶瓷：通过纳米粒子弥散强化机制，将纳米碳化硅、氧化铝粒子引入碳化硼陶瓷基体，实现晶粒细化增韧。实验数据显示，纳米复合碳化硼陶瓷的断裂韧性较传统碳化硼陶瓷提升25%，同时保持高硬度特性，有效解决了陶瓷易脆裂的问题，为装甲材料性能提升提供新路径。（2）3D打印技术：利用3D打印技术可实现碳化硼陶瓷复杂曲面成型，例如针对单兵防弹衣设计的弧形碳化硼装甲板，能更好贴合人体躯干曲线，提升穿戴舒适性；同时可根据不同防护需求，精准控制装甲不同区域的厚度，实现“按需防护”，减少材料浪费^[3]。（3）模块化组件：研发可快速更换的碳化硼陶瓷插板组件，通过标准化接口设计，使插板可适配不同型号的防弹衣、装甲车辆。市场调研显示，该模块化组件的市场接受度达78%，其优势在于当插板受损时，无需更换整个防护装备，仅替换受损插板即可，降低维护成本，同时便于根据任务需求灵活调整防护等级。

3 碳化硼陶瓷在防弹头盔中的应用瓶颈与突破路径

3.1 现有技术局限

（1）成型工艺挑战：防弹头盔需适配头部曲线，存在复杂曲面与变厚度设计，而当前主流的热等静压烧结工艺，在成型过程中难以精准控制陶瓷的曲率一致性。当烧结温度超过2200℃时，陶瓷坯体易出现收缩不均，导致头盔边缘厚度偏差达±1.5mm，无法满足头部贴合性要求，且成品率仅为65%左右，大幅增加生产成本。（2）防护性能矛盾：头盔对轻量化要求极高（通常需控制在1.5kg以内），但碳化硼陶瓷若要达到NIJIV级防护标准（抵御7.62mm穿甲弹），需增加陶瓷厚度至15mm以上，此时头盔重量会超过2.0kg，超出单兵承载上限；若缩减厚度至10mm以下，虽能实现轻量化，却只能达到NIJIII级标准，无法抵御高威力弹药，形成性能与重量的突出矛盾。（3）界面粘接问题：碳化硼陶瓷与纤维复合材料（如芳纶纤维）的界面相容性较差，实际应用中脱粘率较高。据实战损伤案例统计，在遭受12.7mm机枪弹近距离冲击时，陶瓷与纤维背板的脱粘率达38%，脱粘后

陶瓷碎片易飞溅，不仅丧失后续防护能力，还可能对佩戴者造成二次伤害，严重影响头盔防护可靠性。

3.2 增韧技术进展

（1）第二相复合增韧：通过在碳化硼陶瓷基体中引入SiC纤维形成复合结构，SiC纤维以三维交错方式分布，当陶瓷产生裂纹时，纤维可发挥“桥联作用”——裂纹扩展至纤维处时，纤维会承受拉力并阻碍裂纹进一步延伸，同时纤维与基体的界面摩擦还能消耗能量。微观结构分析显示，该技术可使陶瓷断裂韧性提升35%，且不显著增加重量，为头盔防护性能提升提供支撑。（2）层状结构设计：借鉴自然界贝壳的“硬壳+软层”结构，在碳化硼陶瓷层间引入柔性树脂软层。当头盔受冲击时，软层可通过形变吸收部分能量，同时引导陶瓷裂纹沿层间方向偏转，避免裂纹贯穿整个陶瓷层。实验数据表明，该结构使头盔抗多次冲击能力提升40%，有效延长使用寿命。（3）表面改性技术：采用等离子体处理技术对碳化硼陶瓷表面进行改性，在陶瓷表面形成羟基活性基团，增强与纤维复合材料的化学键结合力。经改性后，陶瓷与纤维的界面剥离强度提升55%，实战中脱粘率降至8%以下，大幅提升头盔防护可靠性，解决界面粘接难题^[4]。

4 碳化硼陶瓷产业化挑战与应对策略

4.1 成本与规模化矛盾

（1）原料依赖：碳化硼陶瓷生产核心原料高纯度硼粉（纯度≥99.5%）国产化率不足60%，国内企业需大量进口，受国际供应链波动影响，近三年硼粉价格涨幅达32%，直接导致碳化硼陶瓷生产成本增加18%，削弱产品市场竞争力。（2）能耗瓶颈：传统热压烧结工艺单吨能耗高达8500kWh，远超普通陶瓷材料（约3000kWh/吨），在“双碳”目标下，高能耗不仅推高环保成本，还面临产能管控风险，亟需低能耗工艺突破。（3）规模效应缺失：全球碳化硼陶瓷市场集中度高，前五大供应商（含美国Ceradyne、日本住友）市场份额合计58%，具备成熟规模化生产线；而国内企业多为中小型厂商，单厂年产能普遍低于500吨，难以形成规模效应，单位生产成本比国际巨头高25%。

4.2 生产工艺瓶颈

（1）烧结均匀性控制：大型碳化硼陶瓷板（如1.2m×1.5m装甲板）烧结时，炉内温度梯度易达±20℃，导致板材不同区域致密度差异超8%，某企业生产的装甲板局部抗冲击性能较核心区域衰减30%，无法满足批量应用需求。（2）残余应力管理：热等静压后处理工艺参数不当易产生残余应力，某批次产品经X射线衍射测试，残余应力值达120MPa，远超安全阈值（≤80MPa），

导致产品在后续加工中开裂率提升至15%；优化压力（180MPa→200MPa）与保温时间（2h→3h）后，残余应力降至75MPa，开裂率降至3%。（3）自动化程度不足：国内碳化硼陶瓷生产线人工干预环节占比超40%，如坯体成型、表面抛光等依赖人工操作，生产效率低且产品一致性差；而德国DMGMORI全自动化产线人工干预占比仅5%，生产效率较国内线提升2倍，不良率控制在2%以下。

4.3 标准化与认证体系

（1）国际标准滞后：现行NIJ防弹标准制定于2018年，未充分考虑新型碳化硼复合陶瓷的特性，其规定的冲击速度测试方法（300m/s→800m/s）无法准确反映材料实际防护性能，导致部分高性能产品因测试不匹配无法进入国际市场。（2）军民融合障碍：军用GJB标准与民用ASTM标准存在参数差异，如弹道极限速度定义，GJB以“50%穿透概率”为标准，ASTM以“完全穿透”为标准，同一产品按两类标准测试结果偏差达15%，增加军民两用产品研发成本。（3）第三方认证成本：单款碳化硼防弹头盔的国际第三方认证（如美国UL、欧盟CE）费用超50万元，且认证周期长达6-8个月，中小企业因资金与时间成本压力，难以获取认证，面临市场准入困境。

4.4 应对策略建议

（1）材料创新降本：开发硼铁矿直接提纯技术，跳过传统“硼砂→硼酸→硼粉”流程，原料成本降低40%；推广微波烧结工艺，在1600℃下保温时间从传统工艺的5h缩短至2h，节能35%，单吨生产成本降低12%。（2）智能制造升级：构建烧结过程数字孪生系统，实时监测炉内温度、压力等参数并动态调控，某企业试点后产品

合格率从75%提升至92%；推广机器人喷涂技术，解决复杂曲面陶瓷涂层均匀性难题，涂层厚度偏差从±0.5mm降至±0.1mm。（3）标准体系重构：参考ISO17225-2014生物质颗粒标准“基础要求+分类细则”模式，推动制定军民通用的碳化硼陶瓷防弹标准，统一测试方法与参数定义；联合东盟国家建立区域性认证联盟，实现认证结果互认，认证成本降低30%，周期缩短至3个月。

结束语

碳化硼陶瓷在轻质装甲与防弹头盔领域已展现出不可替代的优势，其卓越的防护性能与轻量化特性为现代军事及安防装备提供了关键支撑。然而，从材料制备到产业化应用，仍需突破烧结工艺瓶颈、解决韧性不足与界面粘接难题，并应对成本与规模化生产的矛盾。未来，随着纳米复合、3D打印等技术的深度融合，以及标准化体系的完善，碳化硼陶瓷有望实现性能与成本的双重优化，推动其在防弹领域的全面升级，为全球安全防护事业注入新动能。

参考文献

- [1]尹志勇.碳化硼陶瓷的烧结与应用新进展[J].建筑技术科学,2021,(06):52-53.
- [2]魏汝斌,董彬,王小伟,等.人体防护装备用碳化硼抗弹陶瓷应用探析[J].兵工学报,2022,43(09):221-222.
- [3]史彦民,徐正平,龙成勇,等.炭黑添加量对无压烧结碳化硼陶瓷烧结的影响[J].耐火材料,2022,56(05):116-119.
- [4]黄明,曹峰,彭志航,等.防弹装甲用碳化硼陶瓷材料的研究进展[J].现代技术陶瓷,2021,42(04):213-214.