

碳化硼防弹陶瓷的配方改良与防护性能研究

孟文宇

上海效宇机电设备研究院, 上海

收稿日期: 2026年9月8日; 录用日期: 2026年10月1日; 发布日期: 2026年10月9日

摘要

针对极端工况下装甲防护系统对轻量化与高性能的迫切需求, 传统纯相碳化硼陶瓷受制于加工壁垒与较高的制造成本, 其大规模工程化应用仍面临较大挑战。本研究提出一种基于碳化硼-碳化硅复合体系的配方改良方案, 系统探究了其在极端热力学环境下的微观力学演变与宏观抗弹吸能机制。研究表明, 改良后的复合陶瓷在保持 2.72 g/cm^3 低密度与 25 GPa 高硬度的同时, 抗压强度显著提升至 2900 MPa 以上。将该复合陶瓷面板与超高分子量聚乙烯背板相耦合, 制备出重量低于3千克的轻量化防弹插板。在对标国际高等级防护标准的弹道极限靶试中, 经负 40°C 深冷与 55°C 高温预处理的受试靶板, 均成功拦截初速约 870 m/s 的 7.62 mm 穿甲燃烧弹, 未发生穿透现象, 且背衬最大凹陷深度仅为 29.2 mm 。本研究验证了该复合配方在极端交变环境下卓越的抗侵彻效能, 为高性能防弹装甲的工程化研制提供了初步的实验依据。

关键词

碳化硼复合陶瓷, 极端工况, 抗侵彻机制

Study on Formula Improvement and Protective Properties of Boron Carbide Bulletproof Ceramics

Wenyu Meng

Shanghai Xiaoyu Mechanical and Electrical Equipment Research Institute, Shanghai

Received: September 8, 2026; accepted: October 1, 2026; published: October 9, 2026

Abstract

In view of the urgent demand for lightweight and high performance of armored protection system under extreme working conditions, the traditional pure phase boron carbide ceramics are subject

to processing barriers and high manufacturing costs, and its largescale engineering application still faces great challenges. In this study, a formula improvement scheme based on boron carbidesilicon carbide composite system is proposed, and its micromechanical evolution and macroscopic energy absorption mechanism under extreme thermodynamic environment are systematically explored. The results show that the compressive strength of the improved composite ceramics is significantly improved to over 2900 MPa while maintaining the low density of 2.72 g/cm³ and the high hardness of 25 GPa. The composite ceramic panel is coupled with the ultrahigh molecular weight polyethylene backboard, and a lightweight bulletproof board with a weight of less than 3 kg is prepared. In the ballistic limit target test against the international highgrade protection standard, the target plates pretreated at 40 degrees Celsius and 55 degrees Celsius successfully intercepted the 7.62 mm armor-piercing incendiary bomb with an initial velocity of about 870 m/s, and no penetration occurred, and the maximum depression depth of the backing was only 29.2 mm. This study verifies the excellent antipenetration efficiency of the composite formula in extreme alternating environment, and provides a preliminary experimental basis for the engineering development of high-performance bulletproof armor.

Keywords

Boron Carbide Composite Ceramics, Extreme Working Conditions, Antipenetration Mechanism

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与工程需求

现代极端工况装备与防护领域对材料的综合性能提出了极为严苛的要求。在单兵、车辆以及飞行器防护体系中,面临高冲击等极端工况,传统单一防护材料的性能已逐渐触及理论极限。近年来,陶瓷加高分子材料复合而成的防弹装甲凭借其轻便和优良的防弹性能,已成为行业内创新性的主流防护方案。在满足基础防护标准的前提下,装备的轻量化已日趋成为各级用户的首要考量指标。当超高分子量聚乙烯和芳纶等常规复合背衬材料的减重空间愈发有限时,减重的边际成本呈现出显著的高企态势。因此,作为复合装甲核心迎弹面的防弹陶瓷,自然成为突破轻量化瓶颈与提升整体系统防护效能的关键攻坚目标。本研究针对此类高冲击极端工况的终端防护需求,致力于从系统工程的视角出发,探寻核心防护材料配方的创新与工艺优化路径[1]。

1.2. 碳化硼基防弹陶瓷的性能优势与应用瓶颈

在众多可用于生产硬质防弹插板的陶瓷体系中,材料的本征力学属性直接决定了其宏观防护效能与应用广度。常规氧化铝陶瓷虽然成本低廉,但其密度偏大,且决定抗弹能力的关键指标如维氏硬度、抗弯强度及抗压强度均处于较低水平,这意味着其抗弹能力相对最差,目前已逐渐被欧美等高标准防护体系所放弃。相比之下,碳化硅陶瓷的综合性能优于氧化铝,而碳化硼陶瓷则凭借极高的硬度、极低的密度以及卓越的轻量化特性,代表了当前防护陶瓷的最佳性能基准。碳化硼不仅能有效应对高速步枪弹体的侵彻,更是高端防护装备不可或缺的核心材料[2]。

然而,碳化硼陶瓷的大规模工程化应用仍面临显著的技术与经济瓶颈。纯碳化硼的高端制造长期存在极高的技术壁垒,苛刻的粉体合成与烧结工艺导致合格供应商稀少。同时,作为一种耗材类的大宗防

护用品，纯碳化硼陶瓷较高的制造成本也给使用群体的财政预算带来了较大压力。这种极限力学性能与高昂制造成本之间的尖锐矛盾，严重制约了高性能防护装备的普及与应用。因此，亟需通过创造性的材料配方改良与工程工艺协同优化，在保留碳化硼优异抗弹击性能的同时，改善其烧结致密性与可加工性。这一痛点不仅是当前防护装备系统升级的迫切需求，更是材料科学领域亟待突破的研究空白，构成了本课题切入的核心科学与工程问题。

2. 碳化硼 - 碳化硅复合陶瓷的配方设计与制备工艺

2.1. 复合陶瓷体系的选择与界面设计原则

针对纯相材料在实际工程应用中暴露出的局限性，本研究确立了以碳化硼为主体、引入碳化硅作为第二相的复合改性策略。复合体系的选择基于极端工况驱动的需求导向，旨在通过多相材料的协同效应克服单一组分的性能短板。在装甲防护领域，碳化硅同样具备较好的物理机械性能，将其与碳化硼进行复合，能够在微观结构层面形成复杂的晶界与相界，从而阻碍裂纹的快速扩展并提升断裂韧性。这种新型的碳化硼 - 碳化硅复合材料体系(BCS01)不仅能够维持防弹所需的极高本征硬度，并改善了材料的烧结工艺适应性[3]。

2.2. 碳化硼 - 碳化硅复合陶瓷的制备流程与工艺优化

为实现复合材料宏观性能的稳定输出，制备工艺的优化与配方设计同等重要。研究中通过协同控制粉体混合均匀度、烧结助剂的选择以及热处理温度曲线，对复合陶瓷的致密化过程进行了深度改良。这种基于专有工程工艺技术的优化，使得烧结后的复合陶瓷内部缺陷显著减少，微观结构更加致密均匀。工艺上的突破有效解决了传统防弹陶瓷在烧结过程中易产生的内应力集中和晶粒异常长大问题，确保最终成型的刚性防弹面板能够稳定且可靠地满足类似美国司法研究所 NIJ 标准的严格防护要求。

原料选用工业级碳化硼粉体(纯度不低于 98.5%，中位粒径 D50 约 3 μm)与碳化硅粉体(纯度不低于 99%，中位粒径 D50 约 1 μm)，按质量分数 85%碳化硼与 15%碳化硅配制。复合粉体经湿法球磨混合均匀、干燥造粒后，采用热压烧结致密化，烧结温度 1950 $^{\circ}\text{C}$ ，保温压力 30 MPa，保温时间 60 min。对比样品 SB01 采用同批次碳化硼粉体，在未添加碳化硅的条件下按相同热压工艺制备，以排除制备工艺差异对性能对比的影响。

2.3. 微观力学性能表征与对比分析

为直观验证配方改良的有效性，对研制出的碳化硼 - 碳化硅复合材料(BCS01)与传统纯碳化硼(SB01)的各项本征力学参数进行了系统性地对比表征。具体的测试结果如表 1 所示。

Table 1. Comparison of micro-mechanical properties between boron carbide-silicon carbide composite ceramics (BCS01) and pure boron carbide (SB01)

表 1. 碳化硼 - 碳化硅复合陶瓷(BCS01)与纯碳化硼(SB01)微观力学性能对比

性能参数	检测标准	单位	碳化硼 - 碳化硅复合(BCS01)	纯碳化硼(SB01)
密度	DIN EN623-2	g/cm^3	2.72	2.45
维氏硬度	DIN EN 843-4	GPa	25	26
抗弯强度	DIN EN 843-1	MPa	380	400
抗压强度	DIN 51104	MPa	>2900	2800

注：BCS01 与 SB01 的密度、硬度、抗弯强度与抗压强度数据均由本实验室按表列 DIN 标准实测获得；SB01 为同批次碳化硼粉体经相同热压工艺制备的纯碳化硼对照样品。

表 1 中的对比数据揭示了配方改良带来的微观力学演变机制：

- (1) 在引入碳化硅相后，复合材料的密度略微上升至 2.72 g/cm^3 ，但仍属于优异的轻量化范畴。
- (2) 复合材料的维氏硬度达到 25 GPa，抗弯强度保持在 380 MPa，这两项核心指标与纯碳化硼的性能(硬度 26 GPa，抗弯强度 400 MPa)相差无几，保持了在同类防弹陶瓷中的顶尖水准。
- (3) 碳化硼 - 碳化硅复合陶瓷的抗压强度突破了 2900 MPa，成功实现了对传统纯碳化硼(2800 MPa)的超越。这一力学指标的逆势提升，意味着材料在遭受高速弹体强力挤压时具备更强的抗碎裂能力，为抵御高动能冲击提供了极其关键的微观力学支撑。

采用扫描电子显微镜(SEM)观察 BCSO1 复合陶瓷的抛光断面，碳化硼基体中均匀弥散分布着细小的碳化硅第二相颗粒，晶粒尺寸约 $2\sim5 \mu\text{m}$ ，碳化硼与碳化硅晶界结合紧密，未见明显的孔隙与微裂纹。碳化硅第二相在晶界处形成复杂的相界结构，有利于裂纹偏转并延长其扩展路径。

3. 极端热力学工况下的弹道防护性能与吸能机制

3.1. 复合防弹靶板的结构耦合设计

为验证配方改良后陶瓷材料的宏观防护效能，本研究基于系统工程理念，设计了刚性陶瓷面板与柔韧高分子背板强耦合的复合装甲体系。实验中制备的硬质防弹插板，其迎弹面采用厚度为 9.5 mm 的碳化硼 - 碳化硅复合材料，背衬层则贴合厚度为 11 mm 的超高分子量聚乙烯(UHMPE)层。该宏观结构设计的核心机理在于：利用陶瓷面板极高的硬度与抗压强度，在撞击瞬间破碎并钝化高速侵彻的弹头；随后，利用高分子背板卓越的拉伸韧性，捕获飞溅的陶瓷与金属破片，并通过自身的塑性变形吸收残余动能，靶板横截面的具体结构层级关系如图 1 所示。该复合插板单体重量被严格控制在 3 kg 以内，在保障顶级防护要求的基础上，实现了单兵负荷的极大轻量化[4]。

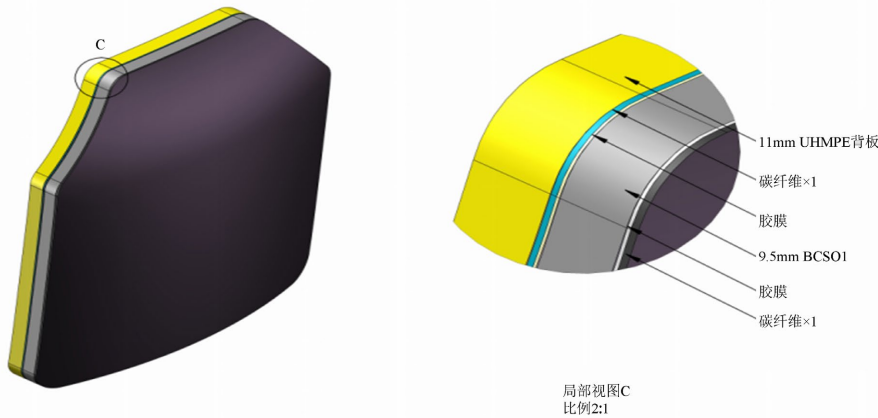


Figure 1. Structural hierarchy of target cross section
图 1. 靶板横截面的结构层级关系

3.2. 极端高低温环境下的穿甲弹抗侵彻实验方案

真实的战术对抗与极端工况往往伴随着剧烈的环境温度波动，这对复合装甲内部各层级的热膨胀匹配度及界面结合强度提出了严苛考验。为此，本研究设计了模拟 NIJ 0106.04 Level IV 高等级标准的弹道极限测试方案。

- (1) 侵彻威胁设定：选用中国产 53 式 7.62 mm 穿甲燃烧弹作为测试弹种，其初速被严格标定在 870.3 m/s 至 875.7 m/s 的高动能区间内。

(2) 极端热力学预处理：受试靶板在实弹射击前被分为两个极端工况对照组。第一组置于 -40°C 的极寒环境箱中进行 3 小时的深冷处理；第二组则置于 55°C 的高温环境箱中进行 3 小时的热化处理。该方案旨在全方位检验极端物理条件对陶瓷相界及复合材料宏观力学稳定性的影响。

3.3. 靶板破坏形貌与复合装甲抗弹吸能机制探讨

综合靶试实测数据表明，在极寒与高温双重极端热力学工况下，碳化硼 - 碳化硅复合防弹装甲均展现出极高且稳定的抗侵彻效能。面对弹速约 870 m/s 以上的穿甲燃烧弹的直接射击，所有经过高低温预处理的受试插板全部成功拦截弹体，未出现任何物理穿透现象，实验前后的宏观形貌如图 2 与图 3 所示。



Figure 2. Large plug-in board JC251108 (before experiment)
图 2. 大号插板 JC251108 (实验前)



Figure 3. JC251108 (after the experiment)
图 3. 大号插板 JC251108 (实验后)

通过深度解析表征背面钝性伤严重程度的核心指标——背衬材料凹陷深度，可进一步探讨其微观至宏观的能量耗散机制。在 -40°C 工况组别中，靶板的背凸凹陷深度最大值为 28.2 mm 。在 55°C 工况组别

中,靶板的背凸凹陷深度最大值为 29.2 mm。上述所有凹陷数据均显著低于国际通用标准中 40 mm 的优秀防护临界值。这一优异表现从物理力学层面验证了改良型陶瓷配方的吸能逻辑:当高速弹体侵入引发极高瞬态应力时,凭借超过 2900 MPa 的抗压强度,碳化硅晶界有效迟滞了碳化硼主相中宏观裂纹的失稳扩展。这种强化机制不仅在第一阶段彻底粉碎了高硬度穿甲弹芯,更重要的是,极端的环境温度并未诱发陶瓷脆化或层间胶膜失效,保证了后续超高分子量聚乙烯背板能够均匀受力并产生受控的弹性形变,最终将致命的局部动能转化为整体的结构内能,实现了高效的复合吸能与人员保护[5]。

对弹道测试后回收的陶瓷碎片及靶板剖面进行 SEM 观察,主裂纹主要沿碳化硼晶界与碳化硅相界面偏转扩展,碳化硅第二相颗粒对裂纹扩展起到明显的钉扎与桥接作用,陶瓷层与背板界面未见大面积层间剥离。上述微观形貌证据直接支持了碳化硅第二相的增韧机制及其对弹体动能耗散的贡献。

4. 结论

4.1. 研究成果总结

本研究立足于高冲击极端工况下的装甲防护需求,成功设计并制备了碳化硼-碳化硅复合防弹陶瓷体系。基于微观相界工程的配方改良策略,该复合材料在维持极低密度(2.72 g/cm^3)与极高硬度(25 GPa)的同时,其抗压强度实现了显著突破,达到 2900 MPa 以上。系统的弹道极限靶试结果表明,该新型复合材料在 -40°C 至 55°C 的极端热力学交变环境下,均能完全抵御初速约 870 m/s 的 7.62 mm 穿甲燃烧弹的高动能侵入。这一系列数据充分验证了多相复合配方设计在抑制宏观裂纹扩展与提升动态抗压能力方面的科学性与有效性。

4.2. 性能与工程化潜力的综合评价

在宏观防护系统层面,采用该复合陶瓷面板与超高分子量聚乙烯背板强耦合而成的复合装甲,展现出了极高的能量耗散效率。实验测得的背凸凹陷深度最大值仅为 29.2 mm,远低于 40 mm 的国际安全临界阈值,证实了其卓越的防钝性伤能力。更为重要的是,该防护体系在达成高等级防弹效能的基础上,单板重量被严格控制在 3 kg 以内,完美契合了现代单兵防护系统对轻量化的核心诉求。相较于制备工艺苛刻的传统纯相碳化硼陶瓷,新型复合配方在保留本征防护优势的前提下,在可加工性方面展现出改善潜力,为后续的工程化验证提供了初步技术基础。

4.3. 对未来研究的展望

尽管碳化硼-碳化硅复合防护陶瓷已在单次极端冲击下展现出优异的综合防护性能,但在更为严苛的战场环境中,针对多发连续弹击(Multi-hit)工况的防护机理仍存在进一步的探索空间。未来的研究重心应逐步向多尺度动态本构模型的构建方向延伸,深入揭示高速冲击下复合相界的应力波传播与损伤累积演化规律。此外,探索引入纳米级碳纳米管或石墨烯等新型增韧相,以期在不增加密度的前提下进一步提升材料的断裂韧性,并将材料服役寿命的数字化监测评估纳入考量,这将是推动防弹装甲材料体系持续向超轻量化、高韧化与智能化演进的关键研究节点。需要指出的是,本研究的实验结论基于实验室小批量样品,尚未开展系统的成本核算与多批次工艺稳定性验证,该复合配方的经济性、生产效率与规模化制造能力仍有待后续工程化试验进一步评估。

参考文献

- [1] 杨金华,吕晓旭,焦健.碳化硅陶瓷基复合材料界面层技术研究进展[J].航空制造技术,2018,61(11):79-87.
- [2] 代春泉,矫维成,金浩正,等.拼接式陶瓷复合装甲的研究现状及发展趋势[J].复合材料学报,2026,43(4):1927-1957.

-
- [3] 顾业劲, 周兆鹏, 张潇涵, 等. 碳纤维增强复合材料层合板临界抗侵彻厚度及抗侵彻机制研究[J]. 防护工程, 2025, 47(5): 47-53.
 - [4] 贾楠, 焦亚男, 周庆, 等. 碳化硼陶瓷/超高分子量聚乙烯复合装甲板抗 12.7 mm 穿甲弹侵彻过程中陶瓷的碎裂行为[J]. 复合材料学报, 2023, 40(6): 3571-3582.
 - [5] 黄桥平, 赵桂平, 卢天健. 考虑应变率效应的复合材料层合板冲击动态响应[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 72-76.