碳化硼陶瓷防弹插板抗多发弹性能研究

苗义高1,苏勇君1,徐利利1,丁治洪2,黄由顺2

¹丽水学院工学院,浙江 丽水 ²浙江领崎科技有限责任公司,浙江 丽水

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

采用无压烧结工艺碳化硼陶瓷制造防弹插板,在高温条件下采用95式5.8 mm钢芯弹对其进行了打靶试验,结果表明防弹插板能够防住8发5.8 mm钢芯弹的连续打击,具有良好的抗多发弹打击性能。采用X射线无损探伤、扫描电镜、能谱面扫描对弹击区陶瓷的微观组织进行分析,碳化硼陶瓷具有由B4C、SiC两相构成的空间网络结构,陶瓷存在宏观和微观裂纹的扩展偏转现象,微观裂纹以穿晶断裂为主要扩展模式并在B4C-SiC相界面及碳化硅内发生偏转,提高了陶瓷能量耗散性能。

关键词

碳化硼陶瓷,无压烧结,防弹插板

Multi-Hit Performance of B₄C Ceramic Bulletproof Insert Plates

Yigao Miao¹, Yongjun Su¹, Lili Xu¹, Zhihong Ding², Youshun Huang²

¹College of Engineering, Lishui University, Lishui Zhejiang ²Zhejiang Lingqi Technology Co., Ltd., Lishui Zhejiang

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

Pressureless sintered boron carbide bulletproof insert plates were tested by 95 type 5.8 mm steel core bullets under high temperature conditions. The results show that the bulletproof insert plates can withstand 8 rounds hit of 5.8 mm steel core bullets, exhibiting good multi-hit ballistic performance. The microstructure of the ceramic in the bullet impact area was analyzed using X-ray flaw detector, scanning electron microscope and EDS mapping. The boron carbide ceramic has a spatial network structure composed of B₄C and SiC phases. Macroscopic and microscopic crack deflection were

observed in ceramics. Microscopic crack is mainly propagated by transcrystalline fracture and deflected at the B₄C/SiC phase interface and in silicon carbide area, which improves the energy dissipation performance of ceramics.

Keywords

Boron Carbide Ceramic, Pressureless Sinter, Bulletproof Insert Plate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC O Open Access

1. 引言

防弹插板是防弹衣的重要构件,为了防护高等级威胁的步枪弹,防弹插板主要结构由防弹陶瓷+高性能纤维复合材料组成。防弹陶瓷作为迎弹面,目前市场上使用的防弹陶瓷主要是氧化铝(Al₂O₃)、碳化硅(SiC)、碳化硼(B₄C)三种陶瓷。防弹陶瓷通过自身损伤断裂来耗散能量,在弹击过程中破碎弹体与磨蚀弹头,耗散弹头动能并降低弹头的侵彻能力,在防护结构中陶瓷对子弹动能的耗散占比约 80%。背板主要采用超高分子量聚乙烯复合材料作为背板,承受破碎陶瓷、破碎弹头的冲击并吸收剩余动能,降低弹击后防弹插板瞬间凹陷值(BFS)。

防弹插板轻量化、高防护性是提高士兵战场机动性、安全性的保障,防弹陶瓷在防弹插板具有重量 占比大、吸能占比高的特点,选用低密度、高性能的防弹陶瓷是现代防弹插板的发展趋势。碳化硼(B₄C) 陶瓷因其硬度高、密度低、耐磨性高的优点,在防弹插板、车辆装甲、直升机防护领域具有广泛的应用 前景。但是纯 B₄C 陶瓷致密度低、韧性差,不能满足复杂工况,尤其是实战环境下对防护装甲的抗多发 弹打击需求[1]。提升碳化硼陶瓷抗弹性能途径之一是对陶瓷增韧,如在碳化硼中添加 SiC、TiB₂、TiC、 碳纳米管等第二相[2]-[10],通过第二相对裂纹产生钉扎、裂纹分叉和裂纹偏转的作用,吸收裂纹扩展能 进而提高陶瓷韧性。

本文采用无压烧结工艺制备的 SiC 增韧碳化硼陶瓷,制作陶瓷防弹插板,通过增加防弹陶瓷中的具 有韧性的 SiC 相及 SiC/B4C 相界面数量,增强陶瓷对裂纹偏转的能力[11]。在高温环境下对防弹插板进行 多发实弹连续打击靶试试验,通过分析胶泥凹陷、弹着点周围微观和宏观裂纹特征,探讨陶瓷微观组织 结构对防弹插板抗多发打击的影响规律。

2. 实验方法

2.1. 材料

将碳化硅增韧的无压烧结制备的碳化硼陶瓷与一定厚度的超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)层压板 进行热压复合并表面喷漆,防弹插板尺寸为 325 mm × 260 mm × 17 mm,其中陶瓷板厚度 5.3 mm, UHMWPE 板厚度 10 mm,靶板样品面密度为 24.9 kg/m²。

2.2. 实弹靶试试验

采用 95 式 5.8 mm 钢芯弹评估防弹插板样品抗弹性能,打靶距离 15 m,弹击着靶速度为 920 ± 10 m/s,每个靶板测试 8 发。测试前,靶板置于烘箱内 55℃保温 3 h,取出后固定在胶泥上,整个测试过程 中靶板保持 55 ± 2℃。

2.3. 组织观察及裂纹分析

采用扫描电子显微镜二次电子(SEM)、背散射电子(BSE)成像和能谱面扫描对弹坑附近的陶瓷碎片进 行微观组织与成分分析,并利用 X 射线探伤机对打击后的陶瓷板进行无损探伤分析。

3. 结果与讨论

图 1(a)~(c)分别为面密度 24.9 kg/m²的三块样品,在 55℃高温条件下经 8 发 5.8 mm 钢芯弹射击后的 状态,弹击顺序如图 1(a)上标示数字,插板正面弹击孔较小,无明显破坏。表 1 为防弹插板多发打击的 试验结果,三块样品经8次射击后均未穿透,前四发胶泥凹陷深度分布较为均匀,后四发凹陷增大。后 续射击第5发弹坑位于前四发位置的交叉中心,弹击后陶瓷裂纹尽管发生扩展,但是第5发依然可以起 到防护作用。6、7、8 三发弹击位置距边缘距离 ≤40 mm,从图 1(c)~(d)可以看出,由于弹击位置距边缘 位置近,插板顶部和底部位置层压板出现明显分层现象,插板依然未被穿透。综合上述分析可以看出, 碳化硼陶瓷防弹插板具有良好的抗多发弹打击性能,有利于减少小口径子弹对士兵的损伤。



Figure 1. Photos of shot samples: (a), (b), (c) corresponding to the front of No.1, 2, 3 samples respectively; (d) corresponding to the top of No.1 sample; (e) corresponding to the bottom of No.1 sample 图 1. 弹击后样品的照片: (a)、(b)、(c)对应 1、2、3 号样品的正面照片; (d)弹击后样品 1 顶部; (e)弹击后样品 1 底 部照片

<mark>表</mark> 1. 碳化硼陶瓷防弹插板抗弹性能试验结果										
编号	射距/m	入射角	胶泥凹陷深度/mm							
1	15	0°	22.8	18.5	17.8	17.4	29.9	27.6	28.1	20
2	15	0°	22.3	21.8	22.5	23.4	22.3	27.9	24.2	22.7
3	15	0°	21.6	21	19.2	22.1	28	34	26.4	24.5

Table 1. Ballistic results of B₄C ceramic bulletproof

为进一步分析防弹插板弹击后陶瓷内部结构状态,采用 SEM 和 X 射线探伤分析弹孔处的陶瓷碎片。

弹击后破碎的陶瓷微观组织结构上产生了裂纹扩展,图 2(a)上可以看到箭头标示处裂纹发生了偏转。对 弹击后的陶瓷板进行 X 射线探伤拍照,如图 2(b)所示,可以看出陶瓷板上弹孔处形成了多条放射状和环 状裂纹,同时在箭头标示位置裂纹发生了明显的宏观偏转,这不仅延长了裂纹的扩展路径,还使得裂纹 之间的陶瓷完整度增大,提高了弹击点附近位置陶瓷的抗弹能力。



Figure 2. (a) SEM photo of B₄C ceramic fragment in shot point;(b) X-ray flaw detection photo of ceramic in shot position 图 2. (a) 弹着点碳化硼陶瓷碎片的扫描电镜照片; (b) 弹着点位置陶瓷的 X 射线探伤照片

本试验所用的碳化硼陶瓷由 SiC、B₄C 两相构成,如图 3 所示,从能谱面扫描照片上看,组织分为两 个区域,一个区域是细小的 SiC 分布在 B₄C 上,另一个区域是大块的 SiC 聚集区,前一个区域被 SiC 所 包裹,形成了空间网络结构。B₄C 比 SiC 硬度高,但是韧性相对 SiC 低,因此这种网络结构存在大量的 韧/脆结合的相界面结构。



Figure 3. Microstructure of B4C ceramic fracture: (a) SEM photo; (b) EDS mapping photo 图 3. 碳化硼陶瓷断口的显微组织: (a) SEM 照片; (b)能谱面扫描照片

进一步对碳化硼陶瓷弹击后的微观裂纹扩展特征进行分析,如图 4 所示,采用背散射电子成像可以

区分出 B₄C、SiC 两相, 白色部分为 SiC 相, 黑色为 B₄C 相。从图中可以看出,裂纹表现为穿晶断裂为 主的扩展趋势,反映出 B₄C-SiC 的相界面结合强度高[12]。裂纹发生偏转的位置为碳化硅聚集区内和 B₄C-SiC 的相界面附近,图中标示 1、2、4、5 位置裂纹在 B₄C-SiC 相界面位置附近偏转,位置 3 处为碳化硅 聚集区内偏转。从图 3(b)能谱照片可知,碳化硼区域实际是弥散的碳化硅细小颗粒分布在碳化硼相中, 这些区域存在残余压应力,裂纹容易发生偏转[13][14];而碳化硅聚集区内尽管也有少量的碳化硼,但是 碳化硅在这些区域生长为粗晶粒,残余应力少[13],因此表现为在碳化硅相内穿晶断裂,少量区域内观察 到裂纹在聚集区内偏转。裂纹偏转提高了陶瓷的韧性,有利于对子弹冲击动能的耗散。



Figure 4. BSE photo of ceramic fragment in shot point 图 4. 弹着点陶瓷碎片的背散射照片

4. 结论

1) 本文采用无压烧结碳化硼陶瓷制造防弹插板,对碳化硼陶瓷插板进行了打靶试验,结果表明插板 在高温条件下可以防住 8 发 95 式 5.8 mm 钢芯弹的连续打击,抗多发弹打击性能优良。

2) 通过对弹击后的陶瓷微观组织和 X 射线探伤分析,发现陶瓷在弹击时存在微观和宏观裂纹偏转现象,裂纹扩展以穿晶断裂为主,微观裂纹在 B₄C-SiC 相界面位置附近和碳化硅聚集区内发生偏转。

基金项目

丽水市重点研发计划项目(2022ZDYF05)。

参考文献

- [1] 崔凤单,马天,李伟萍,等. SiC 和 B₄C 防弹插板抗多发弹打击损伤特性研究[J]. 无机材料学报, 2017, 32(9): 967-972.
- [2] 许森,林文松,张虹,等. TiB2、CNT 双相增韧碳化硼陶瓷及其性能研究[J].人工晶体学报, 2022, 51(4): 716-722.
- [3] 叶腾钶, 徐豫新, 武岳, 等. 添加 TiB₂ 对石墨烯改性 B₄C 陶瓷基复合材料抗弹性能的影响[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1471-1481.
- [4] Bogomol, I., Borodianska, H., Zhao, T., Nishimura, T., Sakka, Y., Loboda, P., et al. (2014) A Dense and Tough (B₄C-TiB₂)-B₄C "Composite within a Composite" Produced by Spark Plasma Sintering. Scripta Materialia, 71, 17-20. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.09.022

- [5] Turnage, S.A., Clayton, J.D., Rodriguez, J., Scharf, T.W. and Williams, C.L. (2024) Planar Shock Compression of Spark Plasma Sintered B4C and B4C-TiB2 Ceramic Composites. *AIP Advances*, 14, Article ID: 015053. <u>https://doi.org/10.1063/5.0181329</u>
- [6] Tan, D., Lao, Z., Zhang, Z., Guo, W., Sun, S. and Lin, H. (2021) Dense and Core-Rim Structured B₄C-TiB₂ Ceramics with Mo-Co-WC Additive. *Journal of the American Ceramic Society*, **104**, 2860-2867. <u>https://doi.org/10.1111/jace.17657</u>
- [7] Zhao, J., Fang, Z., Jin, X., Wang, D., Ding, X. and Ran, S. (2023) B₄C-TiB₂ Composite with Modified Microstructure and Enhanced Properties from Optimal Size Coupling of Raw Powders. *Journal of the American Ceramic Society*, 106, 4911-4920. <u>https://doi.org/10.1111/jace.19127</u>
- [8] Yin, Z., Yuan, J., Chen, M., Si, D. and Xu, C. (2019) Mechanical Property and Ballistic Resistance of Graphene Platelets/B₄C Ceramic Armor Prepared by Spark Plasma Sintering. *Ceramics International*, 45, 23781-23787. <u>https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.095</u>
- [9] Chen, M., Yin, Z., Yuan, J., Xu, W., Ye, J. and Yan, S. (2018) Microstructure and Properties of a Graphene Platelets Toughened Boron Carbide Composite Ceramic by Spark Plasma Sintering. *Ceramics International*, 44, 15370-15377. <u>https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.05.188</u>
- [10] Da Rocha, R.M. and de Melo, F.C.L. (2009) Pressureless Sintering of B₄C-SiC Composites for Armor Applications. In: Swab, J.J., Singh, D. and Salem, J., Eds., Advances in Ceramic Armor V, John Wiley & Sons, Inc., 113-119.
- [11] 方光武, 高希光, 宋迎东. 多层界面相陶瓷基复合材料裂纹偏转机制模拟[J]. 航空动力学报, 2019, 34(8): 1805-1812.
- [12] Hwang, C., Yang, Q., Xiang, S., Domnich, V., Khan, A.U., Xie, K.Y., et al. (2019) Fabrication of Dense B₄C-Preceramic Polymer Derived SiC Composite. Journal of the European Ceramic Society, **39**, 718-725. <u>https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.12.029</u>
- [13] Shoulders, W.T., Guziewski, M. and Swab, J.J. (2023) Microstructural and Thermal Stress Effects on Mechanical Properties of Boron Carbide Particle-reinforced Silicon Carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, **107**, 1249-1261. <u>https://doi.org/10.1111/jace.19535</u>
- [14] Ye, K. and Wang, Z. (2023) Residual Stress Effects on Toughening of Ultrafine-Grained B₄C-SiC Ceramics. *Materials Today Communications*, 36, Article ID: 106649. <u>https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106649</u>