

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.11.020

碳化硼陶瓷复合结构抗弹性能

段婷婷¹, 张岩², 郭雁¹, 徐兴亚¹, 李林², 黄玉松¹, 王汝江³, 左玉柱², 闫少谦¹, 王玲玲¹, 王吉辉¹

(1. 山东非金属材料研究所, 济南 250031; 2. 中国人民解放军32128部队, 济南 250000; 3. 山东金鸿新材料股份有限公司, 山东潍坊 261000)

摘要: 碳化硼抗弹陶瓷是航空用复合装甲的主要组分, 是影响复合装甲抗弹性能的主要因素, 采用3个不同厂家热压烧结的碳化硼陶瓷与自制的混杂纤维增强复合板进行复合, 探究不同厂家碳化硼陶瓷及其复合装甲的性能, 利用密度和硬度等物理性能、抗弹性能测试等手段进行分析对比。研究结果表明, 陶瓷A和陶瓷B的平均密度比陶瓷C的平均密度大; 陶瓷A和陶瓷B的硬度均较高, 比陶瓷C的硬度高, 但陶瓷B的硬度出现较大的波动, 离散度较大; 陶瓷A复合装甲的抗弹性能最好, 3块复合装甲板均实现有效防护, 陶瓷C复合装甲均穿透, 不能实现有效防护, 而陶瓷B复合装甲抗弹性能不稳定。结合陶瓷的微观形貌可知, 陶瓷A的内部致密、密度均匀, 且其硬度值最高, 对应的陶瓷复合装甲板抗弹性能优异, 可以实现有效防护, 且背凸值较低; 陶瓷C内部存在大量的孔洞, 致密度较低, 进而导致硬度值降低, 对应的抗弹性能最差, 均出现穿透现象; 陶瓷B的内部层状结构出现分层现象, 硬度值出现波动较大, 进而影响抗弹性能, 存在穿透的可能。因此, 陶瓷的致密度高、密度均匀, 间接影响陶瓷的硬度, 而陶瓷的密度和硬度对陶瓷复合装甲的抗弹性能有重要的影响。

关键词: 碳化硼陶瓷; 复合装甲; 物理性能; 防护; 抗弹

中图分类号: E926.396 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)11-0136-05

Anti ballistic performance of boron carbide ceramic composite structure

DUAN Tingting¹, ZHANG Yan², GUO Yan¹, XU Xingya¹, LI Lin², HUANG Yusong¹, WANG Rujiang³, ZUO Yuzhu²,YAN Shaoqian¹, WANG Lingling¹, WANG Jihui¹

(1. Shandong Institute of Non-metal Materials, Jinan 250031, China; 2. Unit 32128 of the People's Liberation Army, Jinan 250000, China; 3. Shandong Jinhong New Material Co., Ltd., Weifang 261000, China)

Abstract : Boron carbide ceramics are the main components of composite armor used in aerospace, it is the main factor affecting the elastic resistance of composite armor. Three different manufacturers' hot pressed sintered boron carbide ceramics were used and combined with hybride fiber-reinforced composite, the performance of boron carbide ceramics and their composite armor were investigated. Physical performance tests such as density and hardness, as well as ballistic performance tests were used to analyze and compare. The results indicate that the average density of ceramic A and ceramic B is higher than that of ceramic C. The hardness of ceramic A and ceramic B is relatively high, higher than that of ceramic C, but the hardness of ceramic B shows significant fluctuations and large dispersion. Ceramic A composite armor has the best anti ballistic performance and achieves effective protection. Ceramic C composite armor is penetrated through, is unable to achieve effective protection, and the anti elastic performance of ceramic B composite armor is unstable. The microstructure of ceramics shows that ceramic A has a dense and uniform interior, with the highest hardness value. The corresponding ceramic composite armor has excellent ballistic resistance and can achieve effective protection, with a low back convexity value. There are a large number of pores inside ceramic C, resulting in a low density and a decrease in its hardness value, corresponding to the worst anti ballistic performance, all of which exhibit penetration phenomena. The internal layered structure of ceramic B exhibits layering phenomenon, and the hardness value fluctuates greatly, which in turn affects the ballistic performance and may lead to penetration. Therefore, the high density and uniform density of ceramics indirectly affect their hardness, and the density and hardness of ceramics have an important impact on the ballistic performance of ceramic composite armor.

Keywords : boron carbide ceramics ; composite armor ; physical property ; protection ; anti ballistic

基金项目: 山东省重点研发计划项目(科技军民融合)(2022JMRH0204)

通信作者: 段婷婷, 工程师, 研究方向为复合材料制备

收稿日期: 2024-09-06

引用格式: 段婷婷, 张岩, 郭雁, 等. 碳化硼陶瓷复合结构抗弹性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(11): 136-140.

DUAN Tingting, ZHANG Yan, GUO Yan, et al. Anti ballistic performance of boron carbide ceramic composite structure[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(11): 136-140.

与陆基机动平台装甲相比,空中机动平台装甲的研究起步稍晚,但轻量化起点高、难度大。随着战争模式的发展变换,空中战场人机防护的需求日益迫切,对军用直升机和大型运输机用轻质复合装甲的研制成为当代空中平台防护系统研究的热点。碳化硼陶瓷复合装甲成为航空器装甲的不二选择。

碳化硼陶瓷具有熔点高、硬度高、强度高和密度低的特征,作为一种性能优异的特种陶瓷,在以减重与防护能力为首的轻型装甲中,成为优先选择的装甲陶瓷材料^[1-4]。国内外对于轻质装甲材料均已有所研究,但就国外而言,军用武装直升机和运输直升机都已安装了轻质装甲材料,如碳化硼陶瓷复合装甲。相比之下,对于航空用轻质复合装甲的研究国内起步较晚。

目前,国内对碳化硼陶瓷复合装甲仅进行了系统研究,并对陶瓷及其复合装甲进行了测试分析,作为直升机驾驶员座椅的防护设计^[6],国内的直升机型号上同样多采用碳化硼陶瓷防弹复合材料装甲板。武岳等^[5]对直升机用复合防弹装甲未来的发展需求进行了总结,如梯度功能材料、微叠层材料、石墨烯改性陶瓷等新材料制备的复合装甲在军用直升机上的应用前景进行了系统的总结和展望。对于陶瓷复合装甲的防护能力研究较多的主要集中在7.62 mm和12.7 mm小口径穿燃弹,武一丁^[7]、Zhang等^[8]分别进行了陶瓷/背板复合靶板抗12.7 mm口径穿燃弹试验研究,张林等^[9]对层叠复合装甲防7.62 mm和12.7 mm穿燃弹的能力进行了系统分析,结果表明一定范围内弹体入侵倾角越大,偏转越明显,残余侵彻能力越弱,复合装甲的防护能力越强。

陶瓷作为影响复合装甲抗弹性能的主要因素,笔者将3种碳化硼陶瓷的密度和硬度等物理性能进行分析对比,将3种陶瓷与混杂纤维增强复合板黏接复合成装甲板,对复合装甲抗12.7 mm穿燃弹防护能力进行分析研究,探索陶瓷的结构、物理性能对其复合装甲抗弹性能的影响及规律。

1 实验部分

1.1 主要原材料

3个厂家热压碳化硼陶瓷:300 mm×300 mm×10 mm,市售;

碳纤维/超高分子量聚乙烯(CF/PE-UHMW)纤维混编织物预浸料(面密度400 g/m²)、聚氨酯胶黏

剂、涤纶布:市售。

1.2 仪器及设备

真空泵:WIN048,艾思拓真空技术有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SEM300,德国蔡司公司;

液压成型机:XLB250-D,浙江双力集团湖州星力橡胶机械制造有限公司;

高压水射流加工系统:NCG 3545 S,南京大地水刀股份有限公司;

靶试试验平台:12.7 mm穿甲燃烧弹道枪;

显微压痕测试系统、洛氏硬度计:ZHV2.0,北京时代锐达科技有限公司。

1.3 试样制备

陶瓷密度和硬度制样:3种不同的陶瓷切取大小为15 mm×15 mm的样件;

CF/PE-UHMW纤维混编织物复合板制样:裁取320 mm×320 mm织物及胶膜,通过液压成型机进行压制成型,温度为125 ℃,模压为8 MPa,保温、保压30 min。成型后利用高压水射流加工成300 mm×300 mm的复合板;

黏接复合制样:3种不同的陶瓷和复合板采用胶黏剂进行黏接复合,外层用涤纶布进行包覆作为止裂层。陶瓷复合装甲板结构示意图如图1所示。

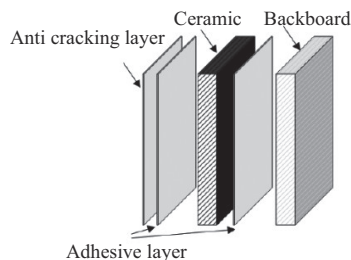


图1 陶瓷复合装甲板结构

Fig. 1 Ceramic composite armor structure

1.4 测试与表征

陶瓷密度测试参照GB/T 4472-2011;陶瓷硬度测试参照GB/T 230.1-2018;抗弹性能测试参照GJB59.18-1988。

2 结果与讨论

2.1 碳化硼陶瓷密度表征

取不同的陶瓷,制备成小块样品,每种陶瓷取5块进行制样,每块测试3个数据,进行陶瓷密度的检测,按照GB/T4472-2011进行检测,见表1。

从表1可以看出,不同的碳化硼陶瓷密度有所不同,其中陶瓷A和陶瓷B密度相差不大,陶瓷C密

表 1 陶瓷密度测试结果
Tab. 1 The results of density of ceramics

Samples	Density/(g·cm ⁻³)			Average density/ (g·cm ⁻³)	Dispersion degree
Cramic A	2.510	2.512	2.509	2.511	0.000 837
	2.512	2.511	2.514		
	2.511	2.510	2.511		
	2.512	2.513	2.512		
	2.511	2.508	2.513		
Cramic B	2.520	2.520	2.521	2.521	0.001 225
	2.521	2.522	2.520		
	2.523	2.522	2.524		
	2.521	2.520	2.521		
	2.520	2.518	2.522		
Cramic C	2.472	2.471	2.473	2.473	0.001 225
	2.475	2.476	2.474		
	2.473	2.472	2.474		
	2.472	2.471	2.473		
	2.473	2.471	2.475		

表 2 陶瓷硬度测试结果
Tab. 2 Test results of hardness of ceramics

Samples	Hardness(HRA)					Average hardness(HRA)	Dispersion degree
Cramic A	100.4	100	100.1	100	100.2	100.14	0.167 332
	99.8	100	99.9	99.7	99.7	99.82	0.130 384
	100	100.5	100.1	100.2	100.6	100.28	0.258 844
Cramic B	99.8	99.9	100.3	100.3	100.4	100.14	0.270 185
	97.9	99.3	98	99.8	100.4	99.08	1.103 177
	100.5	100.6	99.8	100.7	100.4	100.4	0.353 553
Cramic C	96.9	98.4	96	98.4	97.5	97.44	1.026 158
	98	97.2	97	98.2	96.8	97.44	0.622 896
	97.9	98.5	98.4	96.7	97	97.7	0.815 475

2.3 碳化硼陶瓷复合装甲板抗弹性能表征

不同厂家的陶瓷各选取 3 块与压制的碳纤维/PE-UHMW 复合板用胶黏剂进行黏接复合,保证不同陶瓷复合装甲板的面密度相同,陶瓷复合装甲板采用抽真空辅助工艺进行固化,固化后的复合装甲

度最小;陶瓷 B 和陶瓷 C 的离散度相同,陶瓷 A 的离散度最小,比陶瓷 B 和陶瓷 C 的离散度降低 31.7%,说明陶瓷 A 的密度均匀性比较好,密度均匀说明其压制和烧结等工艺成熟、稳定性较高。

2.2 碳化硼陶瓷硬度表征

取不同的陶瓷,采用硬度计进行硬度检测,每种陶瓷各取 3 块陶瓷,每块陶瓷检测 5 个点,求平均值,检验结果见表 2。

从表 2 可以看出 3 种陶瓷的硬度分布及硬度的离散程度,3 种陶瓷的硬度均较高,其中陶瓷 A 的平均硬度值和标准偏差值最小,说明其硬度较高且硬度分布比较集中且稳定,陶瓷 B 和陶瓷 C 的硬度出现离散程度大的情况,陶瓷 C 的标准偏差值比陶瓷 B 的标准偏差值大,说明其硬度离散程度大,硬度值不稳定。

板经过修整包覆涤纶布,最后进行称量,得出复合装甲板的面密度。将复合装甲板进行抗弹性能的测试,参照 GJB59.18-1988,速度为 488~503 m/s,防护 54 式 12.7 mm 穿甲燃烧弹。陶瓷复合装甲板的抗弹性能见表 3。

表 3 陶瓷复合装甲的参数及抗弹性能
Tab. 3 Parameters and anti ballistic performance of ceramic composite armor

Samples	Areal density/(kg·m ⁻²)	Speed/(m·s ⁻¹)	Damage situation
Ceramic composite armor plate A	42.55	489.7	Not wearing it,back convex 38 mm
	42.50	492.2	Not wearing it,back convex 39.2 mm
	42.50	490.1	Not wearing it,back convex 39.5 mm
Ceramic composite armor plate B	42.52	493	Pierce through
	42.50	492.2	Not wearing it,back convex 39 mm
	42.52	492.5	Pierce through
Ceramic composite armor plate C	42.52	492.6	Pierce through
	42.51	491	Pierce through
	42.50	489.9	Pierce through

从表 3 和图 2 可以看出,不同陶瓷复合材料的防护能力不同,其中陶瓷 A 复合装甲板的防弹性能最优异,全部实现有效防护,背凸分别为 38,39.2

mm 和 39.5 mm;陶瓷 B 复合装甲板有效防护一发,且背凸为 39 mm;陶瓷 C 复合装甲板出现全部穿透现象。从 3 种陶瓷正面图可以看出,陶瓷表面比较

完整,没有完全解体,仅背板存在差异。

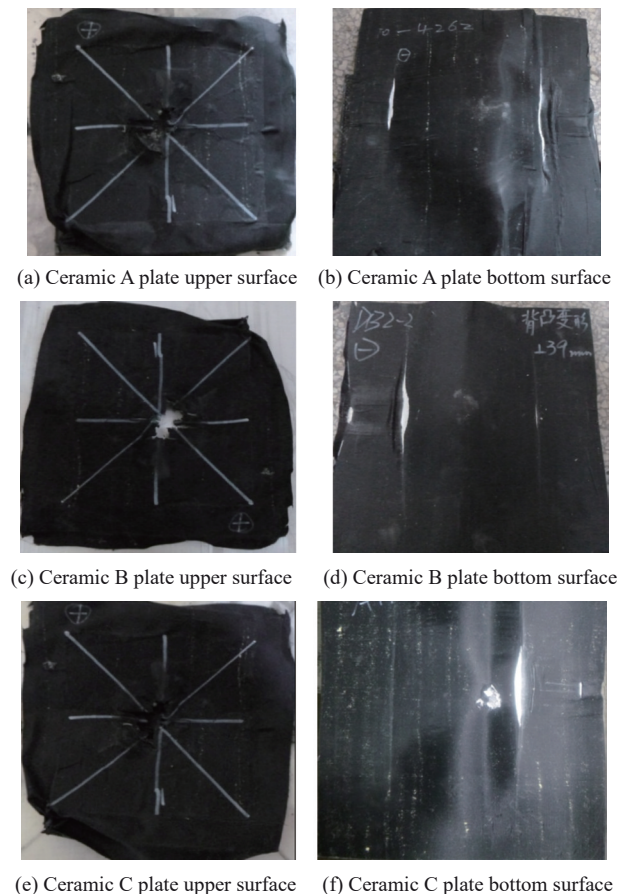


图2 3种陶瓷复合装甲板靶试后损坏情况

Fig. 2 Damage situation after target test of three ceramic composite armor plate

2.4 碳化硼陶瓷性能与复合装甲板抗弹性能关系

陶瓷复合装甲主要的抗弹机理是利用陶瓷的高硬度对弹体产生侵蚀、钝化和碎裂,从而降低弹体的侵彻性能,以及利用陶瓷材料碎裂后形成的陶瓷断裂锥吸收弹体的冲击动能、传递冲击载荷,进而改变背板的破坏形式,增大背板的破坏程度^[10],最终达到优异的抗弹性能。

图3为陶瓷A、陶瓷B、陶瓷C损伤情况对比。从图3可以看出,3种陶瓷弹孔周围出现许多交叉分布的环向和径向裂纹,并形成沿环向近似均匀分布的类扇形碎块,此现象主要是由于子弹的冲击,这种冲击会导致陶瓷迅速发生断裂破坏,从而产生一定体积的破碎块,随着进一步的侵蚀,陶瓷充分破碎成细小碎块及粉末从而形成陶瓷破碎锥即断裂锥,通过形成一定的断裂锥能有效地抵挡子弹的冲击,并侵蚀子弹质量^[11-12],断裂锥的大小可有效反映其抗弹性能的优劣。从3种陶瓷的破碎程度来看,

陶瓷A的破碎程度最严重,说明陶瓷起到了有效抵挡子弹的冲击并侵蚀子弹质量的作用,而陶瓷C破碎程度最小,说明其抗弹性能不及陶瓷A和陶瓷B。综合陶瓷密度和硬度的结果来看,陶瓷A的密度均匀性、硬度及硬度稳定性均比较优异,而其抗弹性能靶试试验结果同样也是3种陶瓷中最优异的,因此可知陶瓷的密度和硬度会影响复合装甲板的抗弹性能,其抗弹性能的优劣顺序依次为陶瓷A>陶瓷B>陶瓷C。

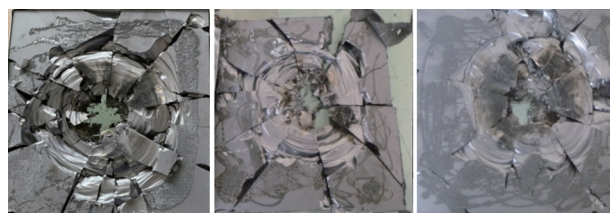


图3 陶瓷A、陶瓷B、陶瓷C损伤情况对比

Fig. 3 Comparison of damage of Ceramic A, B, C

2.5 碳化硼陶瓷微观结构与复合装甲板抗弹性能关系

将靶试后的陶瓷用丙酮清洗干净后,取小块进行断面和表面的SEM表征,见图4所示。从图4可知,陶瓷A和陶瓷B均为层状结构,而陶瓷A的层状结构更为紧实,陶瓷B片层之间出现分层现象,陶瓷A的层状结构表明其自身压制比较密实,且层状结构对于抗弹性能来说,能更好吸收能量,在弹丸侵彻过程中,由于层状结构能损耗更多的能量进而达到更好的抗弹性能。陶瓷C内部有很多孔,陶瓷内部存在孔隙,有助于降低陶瓷的密度,因此陶瓷C的密度低。一般来说,陶瓷内部若有孔隙代表该陶瓷压制不实,可能影响陶瓷的硬度和性能,从该陶瓷的硬度和抗弹性能可以看出,其内部的孔隙影响该陶瓷的硬度和性能,使其防护性能下降,靶试试验全穿透,比陶瓷A和陶瓷B的抗弹性能差。

影响陶瓷硬度的最重要因素之一是致密度,致密度越高,则成型烧结后的陶瓷硬度值越高;相反,若致密度低,陶瓷的硬度越低。致密度低表明陶瓷的气孔率高,而气孔不能抵抗载荷的压力,导致了陶瓷硬度的下降^[13-15]。从图4陶瓷C放大500倍的微观结构中可以看出,陶瓷内部有气孔,表2显示陶瓷C的硬度较其他两种陶瓷低,因此,陶瓷C的致密度低导致硬度低,从而影响抗弹性能。而陶瓷A和陶瓷B的微观结构显示为致密的片层结构,因此陶瓷A和陶瓷B的硬度值均较高,但平均值差距不大,

由于陶瓷B的硬度出现波动,其离散较大,导致抗弹性能不稳定,存在穿透的可能。

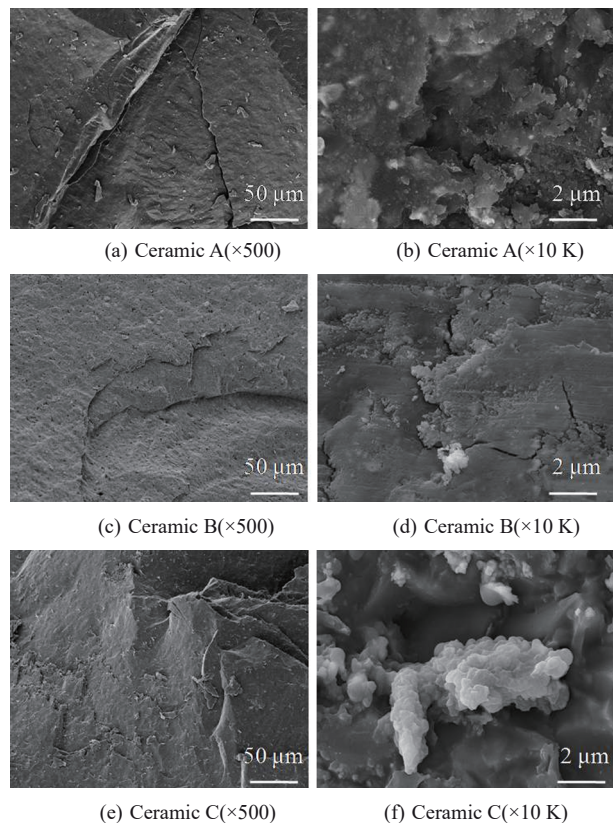


图4 3种陶瓷的微观结构

Fig. 4 Microstructure of three ceramics

3 结论

碳化硼陶瓷作为优选的装甲陶瓷材料,表现出密度低、硬度高等特点,密度偏差小、硬度值离散小的陶瓷,同等条件下抗弹性能优异。3种陶瓷的微观结构表现出均为层状结构,但陶瓷C中有气孔,结合陶瓷密度偏差值、硬度离散情况以及瓷微观结构,验证了陶瓷中有气孔,说明致密度低导致硬度值低,从而影响抗弹性能,实弹射击的结果中陶瓷C复合装甲均出现穿透,同样验证了此结果。

因此碳化硼陶瓷的性能,如密度和硬度对陶瓷复合装甲的抗弹性能有重要的影响。

参考文献

- [1] 蒋招绣,高光发.碳化硼陶瓷的力学特性和破坏行为研究进展[J].材料导报,2020,34(12):23 064–23 073.
JIANG Zhaoxiu, GAO Guangfa. Research progress on mechanical properties and failure behavior of boron carbide ceramics[J]. Materials Reports, 2020, 34(12):23 064–23 073.
- [2] 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(4):213–224.
HUANG Ming, CAO Feng, PENG Zhihang, et al. Progress on boron carbide ceramic materials for ballistic armor[J]. Advanced Ceramics, 2021, 42(4):213–224.
- [3] MEDVEDOVSKI E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1[J]. Ceramics International, 2010, 36(7):2 103–2 115.
- [4] 龙亮,刘炳刚,罗昊,等.碳化硼的研究进展[J].材料导报,2019(1):184–190.
LONG Liang, LIU Binggang, LUO Hao, et al. Research progress in boron carbide[J]. Materials Reports, 2019(1):184–190.
- [5] 武岳,王旭东,刘迪,等.直升机陶瓷复合装甲发展现状及新型材料应用前景[J].航空材料学报,2019,39(5):34–44.
WU Yue, WANG Xudong, LIU Di, et al. Development status of ceramic composite armor for helicopters and application prospect of new materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(5):34–44.
- [6] 杨彬.军用直升机装甲防护现状与展望[J].中国设备工程,2021(1):179–182.
YANG Bin. Current situation and prospect of armored protection for military helicopters[J]. China Plant Engineering, 2021(1):179–182.
- [7] 武一丁,王晓东,余毅磊,等.纤维背板结构对B₄C陶瓷复合装甲抗侵彻破碎特性的影响[J].爆炸与冲击,2023,43(9). DOI: 10.11883/bzycj-2023-0133.
WU Yiding, WANG Xiaodong, YU Yilei, et al. Affection of fiber backboard structure on the penetration and crushing resistance of B₄C ceramic composite armor[J]. Explosion and shock waves, 2023, 43(9). DOI:10.11883/bzycj-2023-0133.
- [8] ZHANG Y J, CUI B, DONG H, et al. Analysis of the influence of different constraints on the ballistic performance of B₄C/C/UHMWPE composite armor[J]. Ceramics International, 2022, 48(18):26 758–26 771.
- [9] 张林,陈斌,谭清华,等.陶瓷复合装甲抗14.5 mm穿燃弹侵彻性能[J].兵工学报,2022,43(4):758–767.
ZHANG Lin, CHEN Bin, TAN Qinghua, et al. Bullet-proof performance of ceramics composite armors against 14.5 mm armor-piercing projectiles[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(4):758–767.
- [10] 侯海量,朱锡,李伟.轻型陶瓷/金属复合装甲抗弹机理研究[J].兵工学报,2013,34(1):105–114.
HOU Hailiang, ZHU Xi, LI Wei. Investigation on bullet proof mechanism of light ceramic/steel composite armor[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1):105–114.
- [11] 李永池,王道荣,姚磊,等.陶瓷材料的抗侵彻机理和陶瓷锥演化的数值模拟[J].弹道学报,2004,16(4):11–17.
LI Yongchi, WANG Daorong, YAO Lei, et al. The penetration resistance mechanism of ceramic materials and the numerical simulation of ceramic cone evolution[J]. Journal of Ballistics, 2004, 16(4):11–17.