

碳化硼陶瓷复合靶板抗侵彻性能实验研究

任文科¹, 高光发¹, 朴春华², 张 扬², 徐同昆², 赵 斌³

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094;

2. 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157013;

3. 中国兵器工业第五二研究所烟台分所, 山东 烟台 264001)

摘要:为研究碳化硼陶瓷的抗侵彻性能,开展了 $\phi 12.7$ mm钢球侵彻碳化硼陶瓷及复合靶板、12.7 mm长杆弹侵彻超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)约束碳化硼陶瓷复合靶板实验,讨论了碳化硼陶瓷的破坏模式,研究了约束方式对碳化硼陶瓷抗侵彻性能的影响。结果表明:在钛合金/UHMWPE背板约束作用下,弹丸与陶瓷的相互作用时间更长,产生更细的陶瓷粉末,大尺寸碎片含量减少,吸收的能量更多,陶瓷的抗侵彻性能进一步提高;背板在弹体和陶瓷锥的共同冲击下,造成钛合金的花瓣形卷边破坏,UHMWPE层合板伴随着较大范围的层间分层,形成“X”形隆起现象;采用纤维约束陶瓷,使碳化硼陶瓷板在子弹侵彻时能够保持完整,增强了对弹体的磨蚀作用,提高了抗弹性能,具有一定的抗多次打击能力。通过分析碳化硼陶瓷复合装甲的抗侵彻机理,为今后复合装甲的优化设计提供了参考依据。

关键词:碳化硼陶瓷;侵彻;陶瓷复合靶板;超高分子量聚乙烯纤维;三维约束

中图分类号:O385

文献标识码:A

陶瓷材料的广泛应用使装甲防护能力得到了进一步提升,适合作为装甲材料的陶瓷应该具有高硬度、高强度、低密度的特点^[1-4]。与氧化铝陶瓷、碳化硅陶瓷等相比,碳化硼陶瓷的硬度最高,密度最低,具有更优异的抗侵彻性能和更高的吸能效率^[5-6]。武装直升机防弹装甲要求能够抵御12.7 mm穿燃弹的攻击,并且对防护装甲的面密度要求非常严格,因此碳化硼陶瓷是理想的轻型装甲防护材料。

目前我国对碳化硼陶瓷装甲的抗侵彻性能研究较少。本研究采用 $\phi 12.7$ mm钢球和12.7 mm长杆弹对碳化硼陶瓷及碳化硼复合装甲进行侵彻实验,设计不同的碳化硼靶板结构,分析碳化硼陶瓷复合靶板的抗侵彻机理,为今后碳化硼复合装甲设计提供基础。

1 实 验

1.1 $\phi 12.7$ mm钢球侵彻碳化硼陶瓷及复合靶板实验

实验发射装置为 $\phi 25$ mm轨道炮。实验用弹为 $\phi 12.7$ mm钢球(见图1),撞击安放在靶架上的碳化硼陶瓷靶板,钢球材料为GCr15轴承钢,质量8.3 g。采用高速摄影技术测量弹丸入射速度及靶后速度,在炮口与靶架之间放置一个标尺,通过高速摄影技术获得弹丸飞过标尺的时间,以此求得弹丸速度(见图2)。

为研究碳化硼陶瓷的抗侵彻性能,设计3种靶板(见图3): (1)碳化硼陶瓷靶板,陶瓷尺寸为100 mm×100 mm,厚度为10 mm; (2)钛合金/超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)复合靶板,其结构为2 mm钛合金/5 mm UHMWPE/2 mm钛合金/5 mm UHMWPE; (3)碳化硼/钛合金/UHMWPE/钛合金复合靶板,面板采用碳化硼陶瓷,尺寸为100 mm×100 mm×10 mm,靶板结构为10 mm碳化硼/2 mm钛合金/5 mm UHMWPE/2 mm钛合金。

* 收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2019-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(11472008, 11772160, 11202206); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18_0463)

作者简介: 任文科(1992—),男,博士研究生,主要从事冲击动力学研究。E-mail: wenkeren@live.com

通信作者: 高光发(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事冲击动力学研究。E-mail: gfgao@ustc.edu.cn

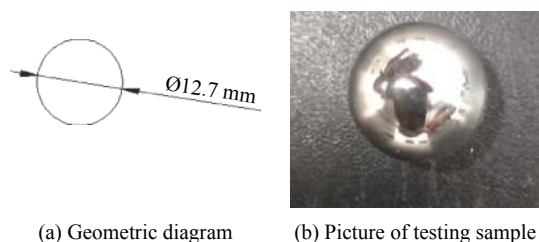


图 1 实验弹体
Fig. 1 Experimental projectile

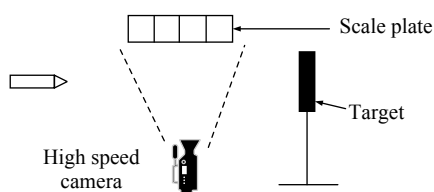


图 2 高速摄影测量系统
Fig. 2 High speed photography system



(a) B₄C ceramics target



(b) B₄C/titanium alloy/UHMWPE composite target



(c) Titanium alloy/UHMWPE composite target

图 3 3 种碳化硼陶瓷靶板

Fig. 3 Three kinds of B₄C ceramics targets

弹头和靶板材料的性能参数见表 1。其中, ρ 、 E 分别为材料密度和弹性模量。

表 1 弹头及靶板材料的性能参数

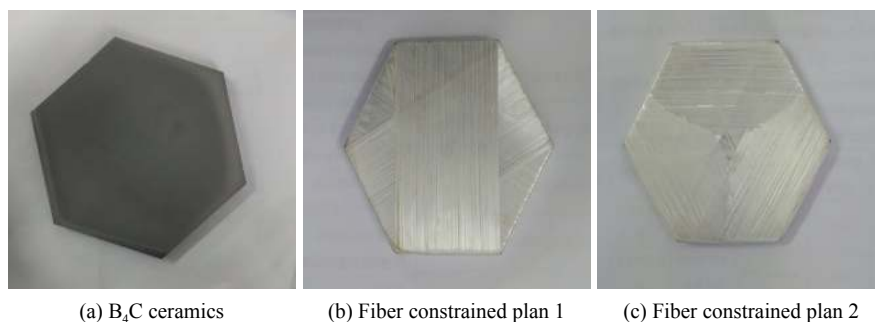
Table 1 Mechanical properties of projectiles and targets

Material	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	Poisson's ratio	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa
GCr15 steel	7.83	217	0.3	861.3	518.4
TC ₄	4.45	114	0.3	1000±50	
UHMWPE fibers	0.97	124		3340	

Material	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	Compressive strength/GPa	Fracture toughness/(MPa·m ^{1/2})	Vickers hardness/GPa
B ₄ C	2.51	450	1.96	2.6 ± 0.15	24.5±1.0

1.2 $\varnothing 12.7 \text{ mm}$ 长杆弹侵彻 UHMWPE 约束碳化硼陶瓷复合靶板实验

采用 UHMWPE 对六边形碳化硼陶瓷进行三维约束, 设计两种约束方式: (1) 纤维先侧边缠绕, 然后对边缠绕, 如图 4(b) 所示; (2) 先对边缠绕, 然后侧边缠绕, 如图 4(c) 所示。背板为铝合金与 45 钢板, 厚度均为 20 mm, 盖板为 2 mm 碳纤维层合板, 目的是防止陶瓷飞溅。采用自行设计的 25 mm 穿甲弹(见图 5), 按照 12.7 mm 穿燃弹设计, 弹芯直径 10 mm、长度 54 mm, 质量约 25 g, 材料为 45 钢。



(a) B₄C ceramics

(b) Fiber constrained plan 1

(c) Fiber constrained plan 2

图 4 陶瓷试件与约束方案

Fig. 4 B₄C ceramics and two different designs of constrains

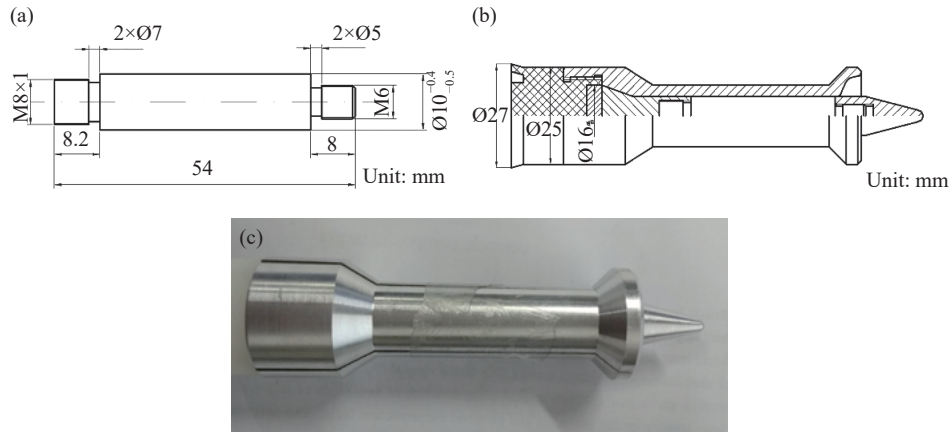


图 5 12.7 mm 长杆弹

Fig. 5 12.7 mm long-rod projectile

碳化硼陶瓷为六边形, 外径 10 mm, 厚度 7 mm, 由中国兵器工业第 52 所提供。弹丸速度通过如图 6 所示装置进行测量, 两个测速靶(铝箔)距离 2 m, 弹丸通过每组测速靶时会产生一个电信号, 根据两个电信号的时间间隔可求得弹丸速度。

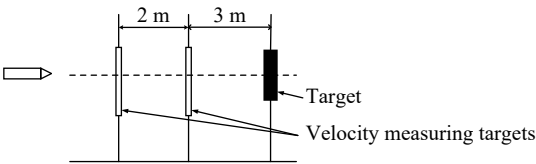


图 6 弹丸测速装置

Fig. 6 Projectile speed measuring instruments

2 实验结果与分析

2.1 Ø12.7 mm 钢球侵彻碳化硼陶瓷及复合靶板实验结果与分析

进行了 12 发实验, 靶板结构及主要实验结果见表 2, 侵彻过程中碳化硼陶瓷完全粉碎。图 7、图 8 分别是弹体侵彻碳化硼/钛合金/UHMWPE 复合靶板、碳化硼陶瓷过程的高速摄影图像。高速摄影图像表明: 弹体的碰靶姿态控制较好, 均为正撞击; 弹体撞击碳化硼陶瓷后向靶后喷射大量陶瓷碎片, 靶后

表 2 靶板结构和实验结果(Ø12.7 mm 钢球)

Table 2 Targets construction and experimental results (Ø12.7 mm projectile)

Target No.	Target structure	Area density/ (kg·m ⁻²)	Thickness/ mm	Mass/ g	Initial velocity/(m·s ⁻¹)	Residual velocity/(m·s ⁻¹)	Damage
A1	B ₄ C/TC ₄ /UHMWPE/TC ₄	47.6	18.54	8.36	1194.2		Unpenetrated
A2	B ₄ C/TC ₄ /UHMWPE/TC ₄	47.9	18.55	8.36	1044.5		Unpenetrated
A3	B ₄ C/TC ₄ /UHMWPE/TC ₄	47.2	18.63	8.36	947.4		Unpenetrated
A4	B ₄ C/TC ₄ /UHMWPE/TC ₄	47.6	18.82	8.36	890.0		Unpenetrated
B1	TC ₄ /UHMWPE	31.5	17.91	8.36	1284.8	805.3	Penetrated
B2	TC ₄ /UHMWPE	32.6	17.84	8.36	1061.8	716.7	Penetrated
B3	TC ₄ /UHMWPE	30.7	17.91	8.36	958.1	574.5	Penetrated
B4	TC ₄ /UHMWPE	32.7	17.85	8.36	940.5	478.3	Penetrated
C1	B ₄ C ceramics	32.0	10.06	8.36	1244.0	840.0	Penetrated
C2	B ₄ C ceramics	32.0	10.06	8.36	1136.6	520.2	Penetrated
C3	B ₄ C ceramics	32.0	10.05	8.36	1050.0	507.7	Penetrated
C4	B ₄ C ceramics	31.9	10.03	8.36	1139.6	570.0	Penetrated

陶瓷碎片云的最大速度与弹体剩余速度相当。在加入钛合金/UHMWPE 复合板之后, 抗侵彻性能明显提升, 碳化硼复合靶板成功抗住了 $\phi 12.7$ mm 钢球的侵彻。

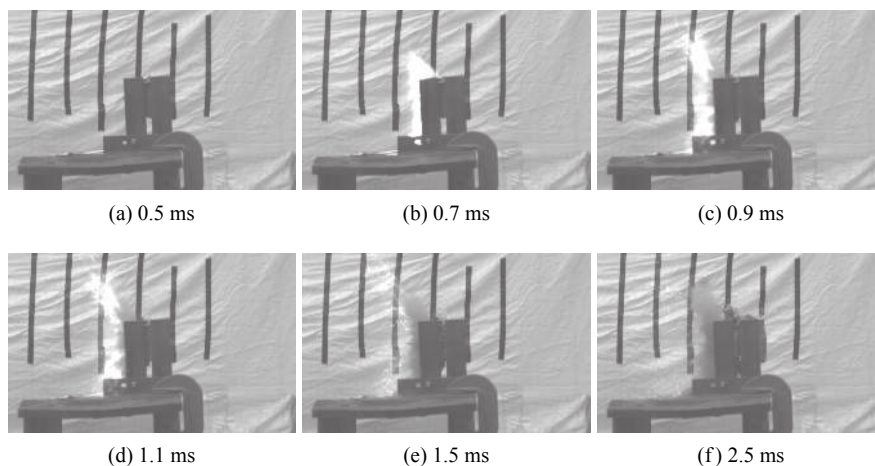


图 7 钢球撞击碳化硼/钛合金/UHMWPE 复合靶板过程 (2×10^4 fps)

Fig. 7 Penetration process of steel ball to B_4C /titanium alloy/UHMWPE composite target (2×10^4 frames/s)

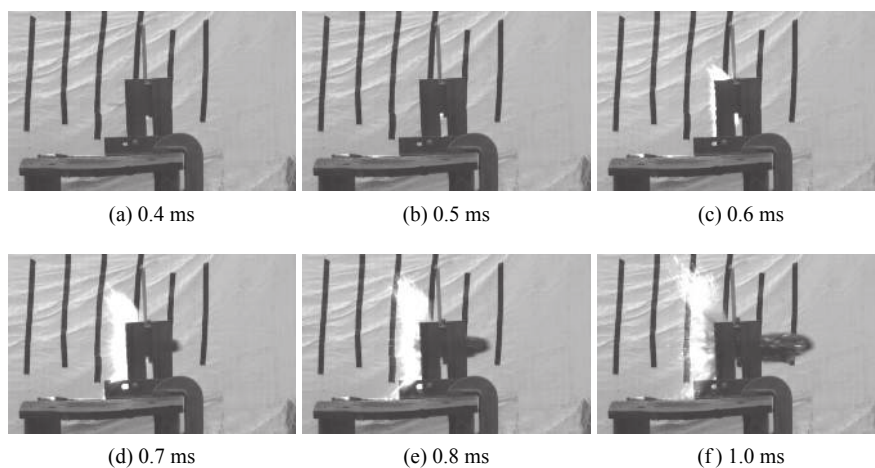
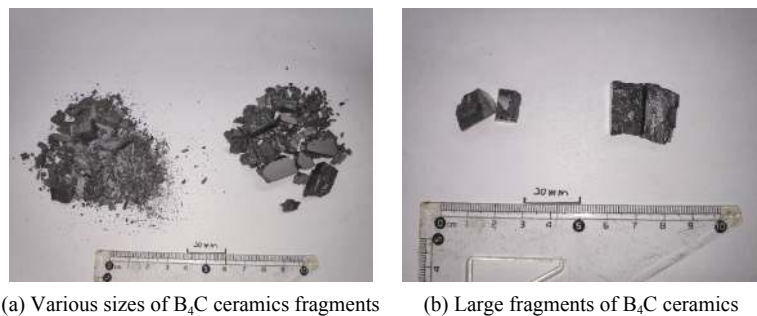


图 8 钢球撞击碳化硼陶瓷靶板过程 (2×10^4 幅/秒)

Fig. 8 Penetration process of steel ball to B_4C ceramics (2×10^4 frames/s)

对比分析碳化硼靶板与碳化硼/钛合金/UHMWPE 复合靶板, 收集陶瓷碎片进行下一步分析。不同约束条件下产生的典型碎片如图 9 所示, 其中图 9(b) 为实验产生的最大陶瓷碎片。图 9(a) 和图 9(b)



(a) Various sizes of B_4C ceramics fragments (b) Large fragments of B_4C ceramics

图 9 侵彻实验产生的碳化硼陶瓷碎片

Fig. 9 Fragments of B_4C ceramics in penetration experiments

中, 右边为弹丸侵彻碳化硼陶瓷板留下的碎片, 左边是加入钛合金/UHMWPE 背板之后的陶瓷碎片。可以看出, 在背板约束作用下陶瓷粉碎得更彻底, 较小的碎片含量增加, 大碎片的尺寸减小, 因此陶瓷吸收的能量更多, 陶瓷的抗侵彻性能进一步提高。此外, 由于背板的作用, 弹丸与陶瓷的相互作用时间更长, 在高速摄像图像中, 从弹丸触碰陶瓷直到侵彻结束弹丸远离陶瓷靶板的时间为弹丸与陶瓷的相互作用时间。图 7 中弹丸与陶瓷的相互作用时间只有 0.5 ms 左右, 而图 8 中弹丸与陶瓷的相互作用时间超过了 2 ms, 更长的相互作用时间会产生更细的陶瓷粉末。

图 10 为剩余速度与入射速度的关系曲线。相同面密度条件下, 纯碳化硼陶瓷与钛合金/UHMWPE 复合靶板均未能有效阻挡 $\phi 12.7$ mm 钢球的侵彻, 随着弹丸速度的提升, 靶后剩余速度均不断提高。

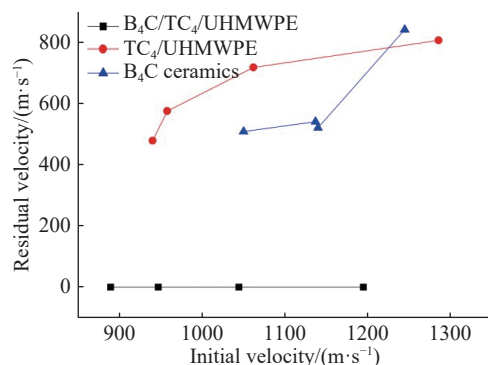


图 10 剩余速度与入射速度的关系

Fig. 10 Relationship between residual velocity and initial velocity

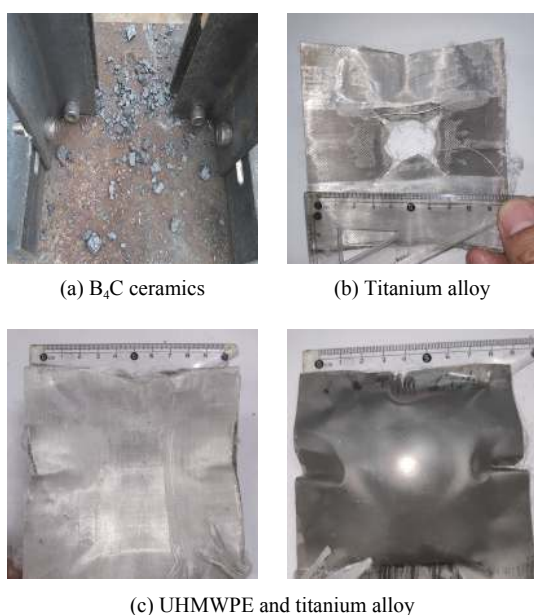


图 11 碳化硼/钛合金/UHMWPE 复合靶板破坏形貌

Fig. 11 Damage view of B₄C/titanium alloy/UHMWPE composite target

图 11 是钢球侵彻碳化硼/钛合金/UHMWPE 复合靶板的破坏形貌。可以看出, 陶瓷完全粉碎, 当钢球开始撞击碳化硼陶瓷的时候, 在反射拉伸波作用下, 陶瓷的微裂纹发生扩展, 形成宏观裂纹从而发生失效^[7]。撞击后压缩波传播到钛合金/UHMWPE 背板后面, 背板即开始运动。陶瓷锥在弹体的侵彻和推动下作用于背板, 背板获得一定初速度。在弹体和陶瓷锥的共同冲击作用下, 钛合金/UHMWPE 背板弯曲隆起, 由于钢球的撞击速度较大, 钛合金隆起部分进一步受到钢球和陶瓷锥的共同推动, 造成钛合金的花瓣形卷边破坏^[8-9](见图 11(b))。UHMWPE 层合板伴随着较大范围的层间分层, 纤维方向的拉伸变形延伸至靶板边界处, 纤维向以弹丸为中心的十字范围收缩, 从而形成“X”形隆起现象(见图 11(c))。

图 12 显示了钢球侵彻钛合金/UHMWPE 复合靶板的破坏形貌。可见, UHMWPE 的主要破坏模式为剪切破坏, 并伴随着层间分层破坏。

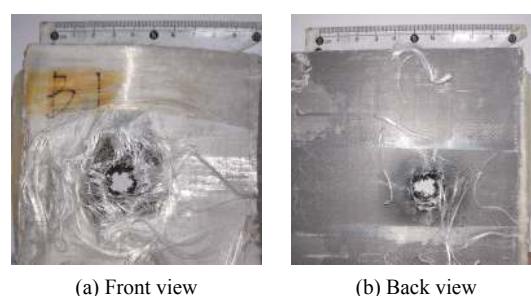


图 12 钛合金/UHMWPE 复合靶板破坏形貌

Fig. 12 Damage morphology of titanium alloy/UHMWPE composites plate

2.2 12.7 mm 长杆弹侵彻 UHMWPE 约束碳化硼陶瓷复合靶板实验结果分析

共进行 6 发实验, 1~4 号实验采用铝板为背板, 5、6 号实验采用钢板为背板。靶板结构及主要实验结果见表 3。其中: 1 号实验弹丸垂直着靶, 弹着点位于靶板正中心, 陶瓷完全粉碎; 2 号实验弹丸斜

表3 靶板结构和实验结果(12.7 mm 长杆弹)

Table 3 Targets construction and experimental results (12.7 mm long-rod projectile)

Target No.	Target structure	Projectile mass/g	Projectile velocity/(m·s ⁻¹)	Damage
1	B ₄ C/20 mm aluminum plate	24.90	618.1	Unpenetrated
2	Fiber constrained plan 1/20 mm aluminum plate	24.85	643.5	Penetrated
3	Fiber constrained plan 2/20 mm aluminum plate	24.99	630.2	Penetrated
4	Fiber constrained plan 1/20 mm aluminum plate	24.96	658.2	Penetrated
5	B ₄ C/20 mm steel place	24.97	641.4	Unpenetrated
6	Fiber constrained plan 1/20 mm steel place	24.96	622.8	Unpenetrated

着靶,陶瓷并没有全部碎掉,完整性较好,靶板弹坑与法线方向夹角大约为60°;3号、4号实验弹丸斜着靶,靶板弹坑与法线方向夹角大约为60°;5号、6号实验弹丸垂直着靶,陶瓷完全粉碎。

1号、5号实验均采用未约束的碳化硼陶瓷,侵彻过程中碳化硼陶瓷完全粉碎,铝板和钢板均未穿透。1号实验中回收到剩余弹丸,如图13所示,可见弹头墩粗,变形磨损严重,表面粗糙不平,有烧蚀的痕迹,由原长52 mm变为32 mm,杆弹有轻微弯曲,这是由于碳化硼陶瓷非常硬,弹丸在侵彻过程中遭到碳化硼陶瓷的磨蚀作用;此外图13中弹丸红圈部分有明显的剪切破坏。1号实验中铝板弹坑深度为5 mm,5号实验中钢板弹坑深度为2.5 mm。

2~4号实验中,由于弹丸速度较低,弹道稳定性不好,导致弹丸斜着靶,没有打到陶瓷中心,由于纤维的约束作用,陶瓷并没有完全碎掉,但是铝板均被穿透。6号实验垂直着靶,弹着点位于靶板正中心,弹着点附近陶瓷破损严重,但是陶瓷的完整性较好,钢板上弹坑很浅,深度只有0.6 mm,而5号实验中钢板弹坑深度达2.5 mm(见图14),因此在纤维约束作用下陶瓷具有更好的抗弹性能。

图15为纤维约束陶瓷破坏形貌。在未约束的条件下,碳化硼陶瓷直接全部破碎,而采用纤维约束的陶瓷在弹丸侵彻后完整性较好,并没有完全碎掉,具有一定的抗多次打击能力。从图15(d)可以看出,碳化硼陶瓷具有从碰撞点向外发散的径向裂纹和向外扩展的锥形裂纹(Hertzian 锥形裂纹),陶瓷碎粒沿环向近似均匀分布,距离碰撞中心越远,陶瓷碎粒尺寸越大^[10-12]。

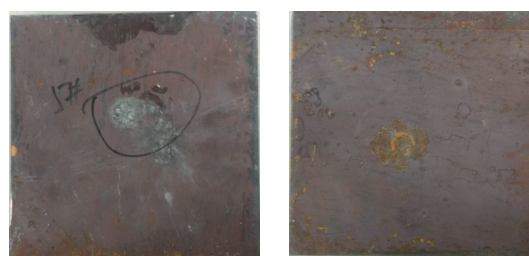
使用纤维对陶瓷进行三维约束,使陶瓷板能够在子弹侵彻时保持完整,粉碎的陶瓷碎片只能沿弹体侵彻形成的狭小通道反向运动,从而增强了对弹体的磨蚀作用,有利于提高抗弹性能;此外,由于纤维的约束作用,还可以有效防止碎裂陶瓷的飞溅,减少二次伤害。



(a) Before experiment (b) After experiment

图13 实验前、后弹丸对比

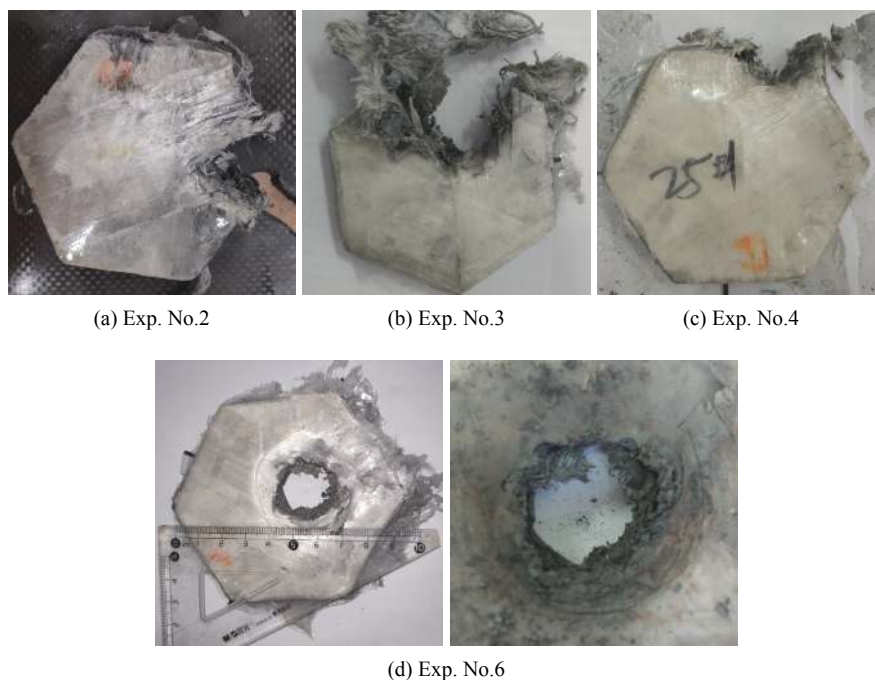
Fig. 13 Pictures of projectiles before and after experiment



(a) Exp. No.5 (b) Exp. No.6

图14 弹坑深度

Fig. 14 Depth of craters

图 15 纤维约束 B_4C 陶瓷破坏形貌Fig. 15 Damage morphology of fiber constrained B_4C ceramics

3 结 论

开展了 $\phi 12.7$ mm 钢球侵彻碳化硼陶瓷及复合靶板、12.7 mm 长杆弹侵彻 UHMWPE 约束碳化硼陶瓷复合靶板实验,分析了在弹丸中/高速冲击作用下碳化硼陶瓷复合靶板的抗侵彻过程,得到了以下主要结论。

(1)在钛合金/UHMWPE 背板约束作用下,弹丸与陶瓷的相互作用时间更长,产生更细的陶瓷粉末,大尺寸碎片含量减少,吸收的能量更多,陶瓷的抗侵彻性能进一步提高。

(2)背板在弹体和陶瓷锥的共同冲击下,造成钛合金的花瓣形卷边破坏,UHMWPE 层合板伴随着较大范围的层间分层,形成“X”形隆起现象。

(3)采用纤维约束陶瓷,使碳化硼陶瓷板能够在子弹侵彻时保持完整,粉碎的陶瓷碎片只能沿弹体侵彻形成的狭小通道反向运动,从而增强了对弹体的磨蚀作用,有利于提高抗弹性能,具有一定的抗多次打击能力;纤维的约束作用还可以有效防止碎裂陶瓷的飞溅,减少二次伤害。

参考文献:

- [1] SAVIO S G, RAMANJANEYULU K, MADHU V, et al. An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(7): 535–541.
- [2] 孙川. B_4C 基复相陶瓷材料的制备、性能研究及抗弹能力测试 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 17–45.
SUN C. Preparation, properties and ballistic performance test of B_4C matrix composite ceramic [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 17–45.
- [3] 苏罗川, 宜晨虹, 刘文杰, 等. 轻质抗侵彻材料及结构研究现状 [J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(1): 157–167.
SU L C, YI C H, LIU W J, et al. Development of lightweight ballistic armor materials and structures [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(1): 157–167.
- [4] 马丽. TiB_2 基复相陶瓷制备及抗侵彻性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018: 15–36.
- [5] 任彦. 抗弹陶瓷在复合装甲中的应用 [J]. *新材料产业*, 2016(1): 17–20.

- [6] 曾毅, 赵宝荣. 装甲防护材料技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 75–110.
- [7] 钱伟长. 穿甲力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 6–18.
- [8] ROSENBERG Z, DEKEL E. 终点弹道学 [M]. 钟方平, 译. 北京: 国防工业出版社, 2014: 193–235.
- [9] MADHU V, RAMANJANEYULU K, BALAKRISHNA B, et al. An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1): 337–350.
- [10] 孙娟, 黄小忠, 杜作娟, 等. 约束机制对陶瓷复合靶抗弹性能的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(11): 3331–3335.
- SUN J, HUANG X Z, DU Z J, et al. Effect of confinement mechanism on performance of ceramic composite targets [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(11): 3331–3335.
- [11] 宜晨虹, 胡美娥, 谷岩. 93 钨破片高速侵彻陶瓷/铝合金复合结构实验研究 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2013, 36(3): 17–19.
- YI C H, HU M E, GU Y. High velocity penetration of ceramic/aluminum composite structure by 93 tungsten fragment [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 36(3): 17–19.
- [12] 罗通. 纤维约束陶瓷复合靶板的制备及抗弹性能研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 12–55.
- LUO T. Study on preparation process and anti-ballistic properties of ceramic composite targets confined by fiber [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 12–55.

Experimental Study of Ballistic Performance for Boron Carbide Ceramic Composite Targets

REN Wenke¹, GAO Guangfa¹, PIAO Chunhua², ZHANG Yang², XU Tongkun², ZHAO Bin³

(1. *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;*

2. *Heilongjiang North Tool Co., Ltd, Mudanjiang 157013, China;*

3. *No.52 Institute of China, North Industries Group Yantai Branch, Yantai 264001, China)*

Abstract: In order to investigate the ballistic performance of boron carbide ceramics, we carried out experiments of a $\varnothing 12.7$ mm steel ball penetrating the boron carbide ceramic and composite target, and a 12.7 mm long-rod projectile penetrating the boron carbide ceramic composite target constrained by the ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers. In the experiments, the failure mode of boron carbide ceramics was discussed, and the influence of the constraint mode of ballistic performance on boron carbide ceramics was studied. The results show that under the constraint of titanium alloy/UHMWPE backing plate, the interaction time between projectile and ceramic is longer, which could create finer ceramic powder and decrease the size of fragments. Hence, as the carbide ceramics absorb more energy, it could achieve better ballistic performance. As the result of the combination of the projectile and the ceramic cone, the titanium alloy back plate was damaged, forming the petal shape. And the UHMWPE laminate is accompanied by a large-scale interlayer delamination, forming an “X”-shaped bulging phenomenon. The fiber-constrained ceramics enable the boron carbide ceramic plate to remain intact when the bullet penetrates, enhance the abrasive effect on the projectile, improve the elastic resistance, and have a certain resistance against multiple impacts. Besides, the anti-penetration mechanism of boron carbide ceramic composite armor has also been analyzed, and we hope this paper can help with the optimization design of composite armor in the future.

Keywords: boron carbide ceramic; penetration; ceramic composite target; ultra high molecular weight polyethylene fiber; three-dimensional constraint