

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0425

12.7 mm 动能弹斜侵彻复合装甲的数值模拟研究*

王维占^{1,2}, 赵太勇², 冯顺山³, 杨宝良⁴, 李小军⁵, 陈智刚²

- (1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051;
2. 中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室, 山西 太原 030051;
3. 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081;
4. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065;
5. 军事科学院防化研究院, 北京 102205)

摘要: 通过弹道枪实验对斜置角度为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的陶瓷复合装甲进行了弹道极限测试, 分析了靶板斜置角度对穿燃弹的弹道极限和钢芯质量变化、破坏形态的影响。利用数值模拟的方法对上述实验结果进行验证计算, 鉴于数值计算结果与实验结果较好的一致性, 进一步研究了陶瓷复合靶板斜置角度对穿燃弹钢芯穿靶偏移角和等效 Q235 钢靶厚度的影响。结果表明, 随陶瓷复合靶板斜置角度的增大: 弹道极限近似指数型提高; 在相同弹道极限速度下, 穿燃弹对 Q235 钢靶板的极限穿深和对斜置陶瓷复合靶板的极限穿深的等效厚度的比也随之增大; 同时, 钢芯完整度逐渐降低, 穿靶偏移角反向增大。

关键词: 斜置; 弹道极限; 破坏; 侵彻

中图分类号: O382; TJ55 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

随着高新技术在军事领域的广泛应用发展, 反装甲武器与装甲防护技术的冲突愈加激烈, 同时相互促进、共同发展、交替上升^[1]。其中, 陶瓷复合装甲的出现往往使现役轻武器弹药束手无策, 因而对陶瓷复合装甲的毁伤效能研究成为轻武器弹药发展的重中之重, 针对弹靶作用过程, 已开展了大量的实验与理论研究。Rosenberg 等^[2]通过开展正侵彻两种大块体氧化铝陶瓷靶实验, 发现铜、钢和钨合金杆弹撞击 AD95 陶瓷靶的开始侵彻阈值速度分别为 1.15、0.99、0.66 km/s^[3]。李继承等^[4]、Anderson 等^[5]通过长杆弹冲击陶瓷复合装甲的实验研究、理论分析与数值模拟等研究工作, 较好地解释了金属弹与陶瓷复合装甲之间界面的击溃原理。Chi 等^[6-7]利用数值模拟的方法得知提高约束预应力效应可明显提高陶瓷复合装甲的抗侵彻能力。李继承等^[8]、Li 等^[9-10]以不同弹丸头部形状为实验变量, 获知了在界面击溃条件下弹丸速度、长度、动量的演变规律, 并给出界面击溃/侵彻转变速度和时间的理论表达式。谈梦婷等^[11]利用数值模拟的方法研究了弹丸头部形状、陶瓷复合装甲的盖板厚度、陶瓷靶预应力效应对界面击溃效应的影响。汪建锋等^[12]根据陶瓷复合靶板受力情况将金属弹侵彻陶瓷复合靶板的过程分为 3 个阶段: 初始撞击阶段、烧蚀变形阶段、裂纹成型和断裂阶段。丁华东等^[13-16]发现提高 Al_2O_3 基陶瓷的剪切模量可提高其抗侵彻性能。陈斌等^[17]通过研究穿甲弹对陶瓷复合装甲的毁伤效应, 发现弹着角是影响穿甲弹毁伤效能的重要因素。郭英男^[18]通过 12.7 mm 制式穿甲弹冲击陶瓷复合装甲的实验研究与数值模拟, 发现弹丸弹着点接近陶瓷靶边缘时, 弹体侵彻姿态转变为斜侵彻。以上研究大多是对正侵彻陶瓷/钢复合靶板的实验与数值模拟研究, 而对于斜侵彻下 12.7 mm 穿燃弹对陶瓷/凯夫拉复合靶板的毁伤效能研究鲜有报道, 因此开展此项研究对于较好地反映战场真实作战条件具有现实意义。

本文中拟开展 12.7 mm 穿燃弹斜侵彻陶瓷复合装甲实验, 获取靶板在不同斜置角度下的弹道极限范围, 利用 LS-DYNA 软件对上述穿甲过程中制式穿燃弹的质量、弹道极限及破坏形态等参数进行较好的验证计算, 并进一步对穿燃弹穿靶偏移角、陶瓷复合靶板等效 Q235 钢靶厚度进行预测。

* 收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2019-03-12

第一作者: 王维占(1990—), 男, 博士研究生, 530056679@qq.com;

通信作者: 赵太勇(1971—), 男, 博士, 副教授, 1043414401@qq.com。

1 实验准备

1.1 实验器材

实验在中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室的靶道内进行。主要进行 12.7 mm 穿燃弹对不同斜置角度下的陶瓷复合靶板的冲击实验。实验背面靶采用尺寸为 500 mm×500 mm×10 mm 的凯夫拉面板, 表面靶采用尺寸为 50 mm×50 mm×8 mm 的 Al_2O_3 陶瓷面板, 中间层采用尺寸为 500 mm×500 mm×2 mm 的 Q235 钢板, 陶瓷面板、Q235 钢靶及凯夫拉背靶之间采用玻璃纤维层粘接和包覆。实验用器材如图 1 所示。

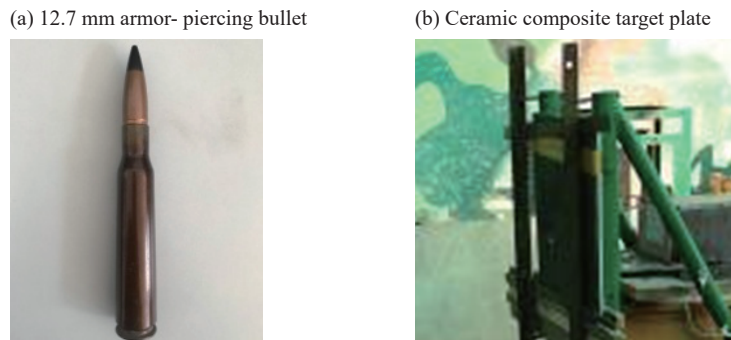


图 1 实验用 12.7 mm 穿燃弹及陶瓷复合靶板

Fig. 1 A 12.7 mm armor-piercing bullet and a ceramic composite target plate used in experiments

1.2 弹道实验

进行了多发 12.7 mm 动能弹侵彻陶瓷复合靶板实验, 采用 12.7 mm 口径实验弹道枪, 通过调节火药装填量, 控制发射速度在 521~1 213 m/s, 测速设备采用中北大学自主开发的激光测速仪, 测速误差为 $\pm 1.7\%$, 同时使用高速摄影设备对实验宏观现象进行记录。实验装置及场地布置见图 2。

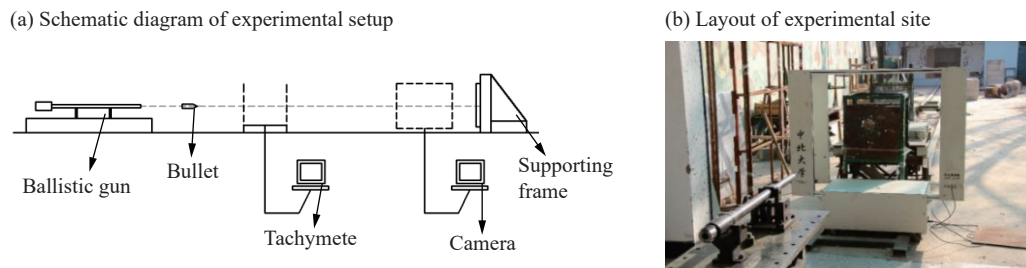


图 2 实验装置及场地布置

Fig. 2 Experimental setup and site layout

2 数值模拟

2.1 模型建立与参数选取

基于上述实验研究, 数值模拟中 12.7 mm 制式穿燃弹的结构参考文献 [19], 与本文实验用 12.7 mm 穿燃弹的质量、结构均一致。在陶瓷面板周向边界节点上施加应力流出边界条件, 避免应力在边界上反射, 影响计算结果。穿燃弹轴线方向与靶板法线方向的夹角 θ 为靶板的斜置角度。利用 TUREGRID 软件建立 1/2 结构三维有限元模型, 计算网格选用 Solid164 八节点六面体单元, 并在 1/2 模型的对称面上设置对称约束条件。弹靶作用过程采用 Lagrange 算法, 接触作用采用侵蚀接触算法 [20], 有限元模型见图 3。

数值计算中玻璃纤维层通过设置接触面为固连失效接触方式, 陶瓷面板节点与 Q235 钢靶及凯夫拉背板单元间的法向失效力及剪切失效力分别取为 21 和 12 N^[19]。

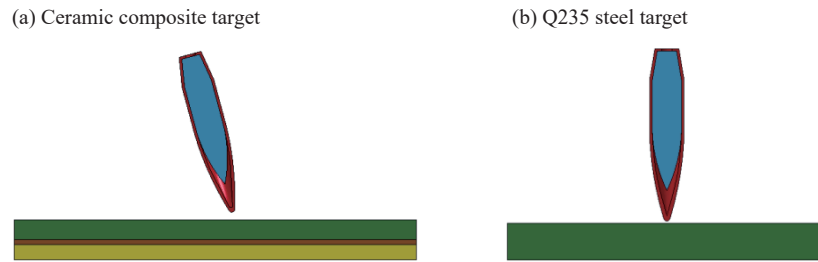


图 3 弹靶有限元模型

Fig. 3 Finite element models for bullet and target

2.2 材料参数

本文算例中, 穿燃弹弹芯采用高碳钢材料, 采用 *MAT_ADD_EROSION 裂纹控制附加失效模型, 12.7 mm 穿燃弹及 Q235 钢靶材料模型选用 JOHNSON-COOK 材料模型和 GRÜNEISEN 状态方程, Al_2O_3 陶瓷面板采用 MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS 材料模型, 陶瓷面板材料参数和金属材料参数见文献 [20], 凯夫拉材料使用 COMPOSITE_DAMAGE 模型, 材料参数见文献 [1]。通过 LS-DYNA 软件对 12.7 mm 穿燃弹侵彻陶瓷复合装甲及 Q235 钢靶的过程进行数值模拟。

3 结果分析

3.1 符合计算分析

进行多发 12.7 mm 穿燃弹侵彻陶瓷复合靶板的实验, 得到了部分有效实验数据, 如表 1 所示, 复合装甲表面靶、背靶及回收残余钢芯式样分别如图 4、5 所示。

表 1 12.7 mm 穿燃弹侵彻陶瓷复合靶板实验的部分有效数据

Table 1 Part of effective experimental data for penetration of 12.7 mm piercing incendiary bullets into ceramic composite targets

实验编号	靶板斜置角度/(°)	着靶速度/($m \cdot s^{-1}$)	穿透情况	背靶穿孔尺寸/mm	钢芯剩余质量/g
1#	0	576	穿透	13.2	28.4
		593	穿透	14.7	30.1
		521	嵌入	5.9	26.8
2#	15	637	穿透	13.9	23.6
		593	嵌入	14.3	22.1
		579	嵌入	7.6	20.7
3#	30	693	穿透	13.1	17.6
		645	嵌入	7.1	13.9
		713	穿透	15.1	15.1
4#	45	789	嵌入	8.3	11.0
		765	未嵌入	—	15.6
		833	穿透	14.3	14.4
5#	60	1 086	嵌入	4.9	8.1
		1 213	穿透	13.3	6.0
		1 179	穿透	14.7	9.3

由表 1 可知, 陶瓷复合靶斜置角度在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围时, 12.7 mm 制式穿燃弹对其斜侵彻的弹道极限小于 $1\,300\text{ m/s}$, 其中陶瓷复合靶板斜置角度为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 时, 穿燃弹的弹道极限范围见表 2。在极限穿透的情况下, 靶板正面纤维层撕裂, 陶瓷破碎, 背靶凯夫拉层呈瓣裂式穿孔破坏, 见图 4。随着靶

板斜置角度的增大,靶板背面鼓包越来越明显,且出现鼓包和穿孔偏移的现象,见图 4(c)~(e)。穿燃弹钢芯以头部和圆柱部断裂破坏为主,在靶板存在斜置角度的情况下,钢芯头部呈现斜侧方断裂的现象,穿燃弹弹头壳发生倾斜翻卷断裂破坏,且愈发明显,如图 5 所示。

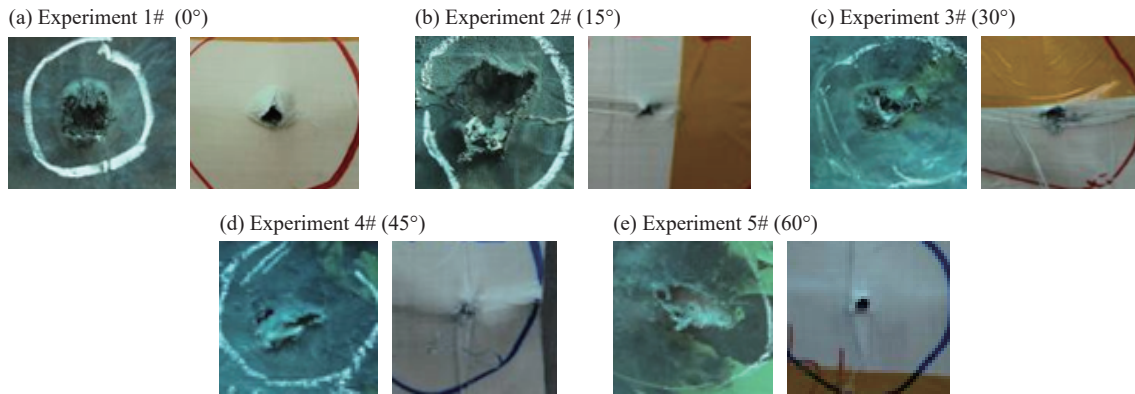


图 4 部分回收钢芯式样及对应靶入、出孔图

Fig. 4 Part of recovery steel core styles and corresponding into- and out-of-target holes

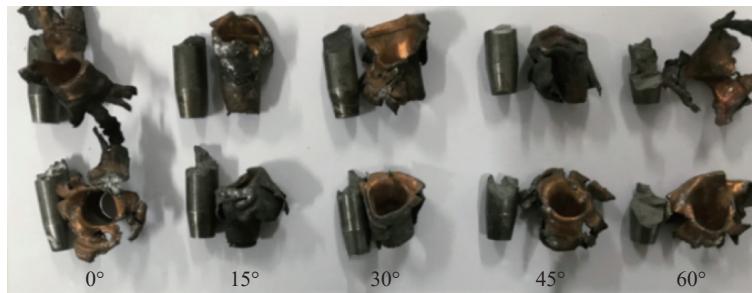


图 5 部分钢芯及弹头壳的破坏形态

Fig. 5 Failure modes of some steel cores and warhead shells

表 2 不同斜置角度下穿燃弹的弹道极限范围

Table 2 Ballistic limit range of piercing incendiary bullets at different oblique angles

靶板斜置角度/(°)	弹道极限/(m·s ⁻¹)	靶板斜置角度/(°)	弹道极限/(m·s ⁻¹)
0	521~576	45	789~833
15	579~637	60	1 086~1 179
30	645~693		

调整复合装甲的斜置角度依次为 0°、15°、30°、45°、60°,展开穿燃弹侵彻复合装甲过程的数值模拟,对钢芯剩余质量、弹道极限(嵌入靶板的最大速度与穿透靶板的最小速度的平均值^[21])等性能参数进行分析。陶瓷复合靶及穿燃弹钢芯的破坏形态如图 6 所示。

从图 6 可以看到,随着斜置角度的增大,穿燃弹钢芯发生不同程度的断裂破坏,钢芯圆弧头部断裂及质量侵蚀现象越来越明显。凯夫拉背靶出现不同程度的鼓包及穿孔现象,结合图 5 可知,这与实验现象基本一致。

由表 3 和图 7 可知,在弹道极限条件下,随着陶瓷复合靶板斜置角度的增大,穿燃弹钢芯的剩余质量逐渐减小。因为靶板斜置角度的增大,导致在碰撞点处弹丸头部所受应力随着弹丸冲击速度的升高而升高,因此钢芯所受应力过载逐渐增大,发生断裂侵蚀现象越来越严重,钢芯的剩余质量逐渐减小。

从图 8 可以看出,随复合装甲斜置角度的增大,穿燃弹对复合靶板的弹道极限近似指数型升高。这是因为复合装甲斜置角度的增大,导致子弹侵彻靶板的等效厚度的增大,穿燃弹对靶板的冲击应力在垂

直弹丸轴线轴方向发生分解, 穿燃弹整体相对于质心所受偏转力矩增大, 有发生跳弹的趋势, 同时子弹用于垂直侵彻靶板的冲击应力减小。要保证子弹贯穿靶板, 穿燃弹速度必然需随着靶板斜置角度的增大而提高。

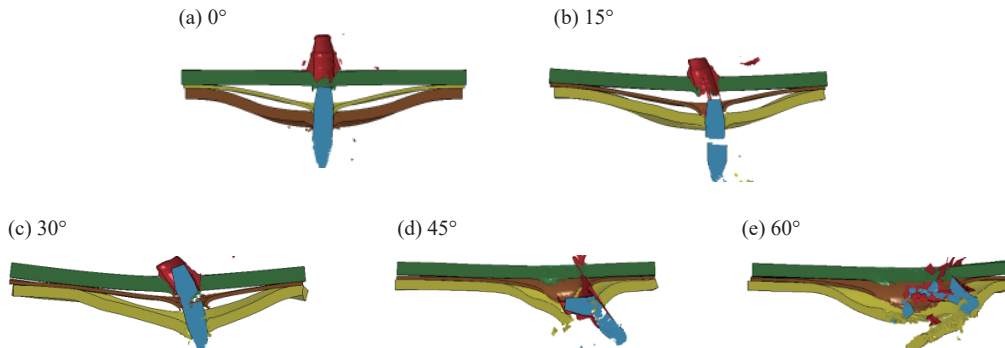


图 6 陶瓷复合靶及穿燃弹钢芯的破坏形态

Fig. 6 Failure modes of ceramic composite targets and steel cores of piercing incendiary bullets

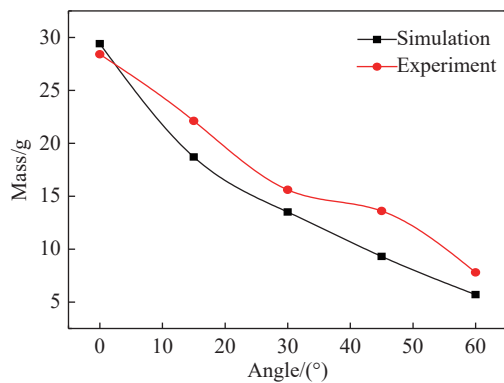


图 7 钢芯剩余质量与靶板斜置角度的关系

Fig. 7 Residual mass of steel core varied with oblique angle of target plate

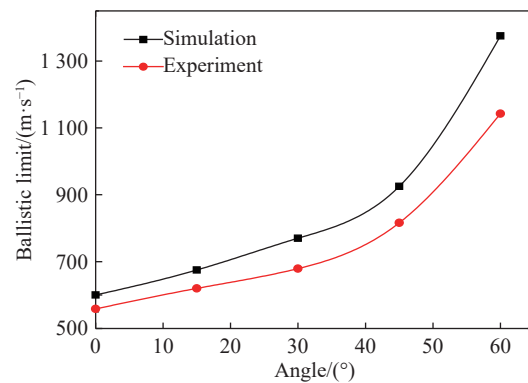


图 8 弹道极限与靶板斜置角度的关系

Fig. 8 Ballistic limit varied with oblique angle of target plate

表 3 12.7 mm 穿燃弹侵彻陶瓷复合靶板的结果

Table 3 Results of 12.7 mm piercing incendiary bullets penetrating into ceramic composite target plates

靶板斜置角度/(°)	弹道极限/(m·s ⁻¹)	剩余质量/g	靶板斜置角度/(°)	弹道极限/(m·s ⁻¹)	剩余质量/g
0	600	26.4	45	925	9.3
15	675	18.1	60	1375	6.7
30	770	12.5			

对于以上分析, 实验结果与数值计算结果虽然具有一定的偏差, 但钢芯剩余质量、弹道极限的变化规律相同, 说明本文选用的 LS-DYNA 软件及选取的材料参数具有一定的可靠性。

鉴于 12.7 mm 穿燃弹对陶瓷复合装甲的穿甲过程中, 穿燃弹钢芯的破坏过程对于弹丸结构设计具有重要意义, 通过数值模拟研究了靶板斜置角度对穿燃弹钢芯穿甲过程中的破坏特性的影响。图 9 给出了靶板斜置角度在 0°~60° 范围内实验钢芯试样破坏形态和数值模拟得到的钢芯应力云图。

由图 9 可知: 随靶板斜置角度的增大, 穿燃弹钢芯的穿靶偏移角逐渐近似反向线性增大; 钢芯在侵彻过程中发生断裂, 因为转动力矩的存在, 其姿态发生不同程度的偏转。从 0°~60° 范围内数值模拟钢芯应力云图与实验钢芯断裂形态的对比可以发现, 穿燃弹钢芯以圆弧头部断裂侵蚀和圆柱部断裂破坏为主, 破坏形态较一致。在靶板存在斜置角度的情况下, 钢芯头部呈现斜侧方断裂的现象, 断裂截面位

于迎弹面一侧,且断裂侵蚀区域与钢芯侵彻靶板过程中所受应力过载区域基本相同,数值模拟中钢芯受应力区与未受应力区分界面与实验钢芯的迎弹面断裂方向基本一致。随靶板斜置角度的增大,迎弹面方向断裂截面角度增大。靶板斜置角度的增大导致穿燃弹的弹道极限提高,进而钢芯微元所受应力升高,应力峰值超过钢芯材料的弹性极限导致钢芯发生断裂破坏。斜置角度的增大改变了弹靶作用面,进而改变了钢芯微元的受力方向,其应力波主要作用区域位于背弹面一侧,随着斜置角度的增大,应力波作用区域增大,钢芯迎弹面一侧断裂侵蚀质量增大,剩余质量减小。由上分析可知,高碳钢材质弹芯在斜侵彻陶瓷复合靶板时其主要破坏形式为背弹面脆性断裂,在弹道极限提升的同时,对于保证弹芯完整性具有消极作用,因此在设计弹丸弹芯时应考虑根据靶板目标特性及弹芯结构材质进行合理匹配设计。

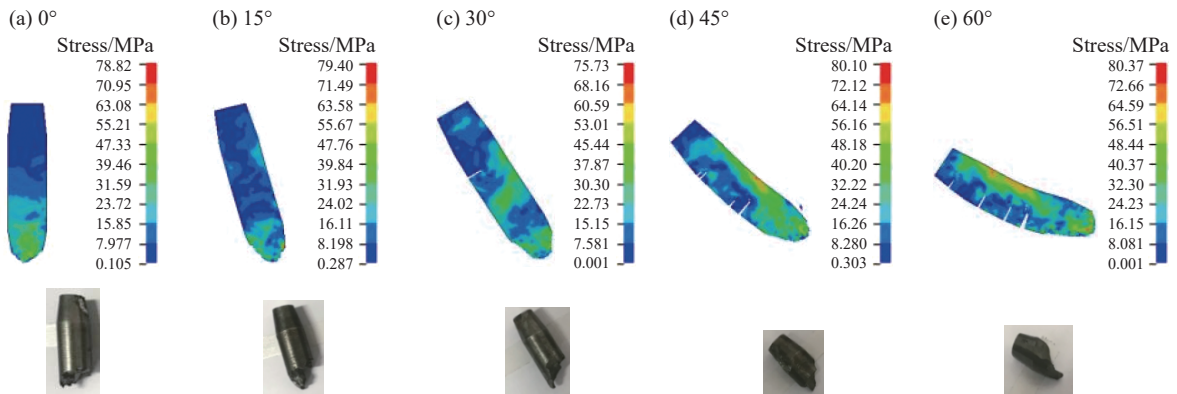


图 9 不同靶板斜置角度下实验钢芯试样破坏形态与数值模拟得到的钢芯应力云图

Fig. 9 Failure patterns of steel core specimens used in experiments and stress distribution in ones by numerical simulation at different oblique angles of target plates

3.2 等效威力分析

鉴于 3.1 节中陶瓷复合靶板斜置角度对 12.7 mm 穿燃弹剩余质量、弹道极限及破坏区域的影响规律的一致性,进一步研究靶板斜置角度对穿燃弹钢芯穿靶偏移角、等效 Q235 钢靶厚度的影响,等效斜侵彻复合靶厚度 H 、等效 Q235 钢靶厚度 h 、钢芯偏移角 $\Delta\theta$ 的示意图见图 10~12,表 4 为 12.7 mm 穿燃弹对陶瓷复合靶板的侵彻结果。

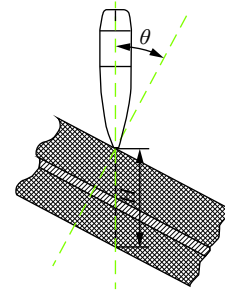


图 10 斜侵彻复合靶等效厚度 H

Fig. 10 Equivalent thickness H of an obliquely-penetrated composite target

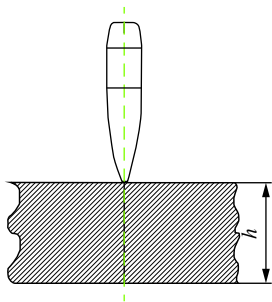


图 11 正侵彻等效 Q235 钢靶厚度 h

Fig. 11 Thickness h of an equivalent normally-penetrated Q235 steel target

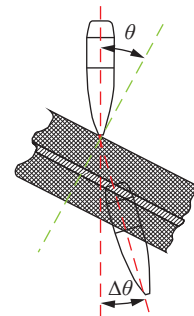


图 12 子弹钢芯穿靶偏移角 $\Delta\theta$

Fig. 12 Deflection angle $\Delta\theta$ of bullet steel core penetrating through target plate

表 4 12.7 mm 穿燃弹对复合靶和 Q235 钢靶的侵彻参数

Table 4 Penetration parameters of 12.7 mm armor-piercing incendiary on composite target and Q235 steel

靶板斜置角度 $\theta/(\circ)$	钢芯偏移角 $\Delta\theta/(\circ)$	等效复合靶厚度 H/mm	等效Q235钢靶厚度 h/mm	H/h
0	-0.8	16.0	10	0.63
15	-2.8	16.6	12	0.72
30	-4.2	18.5	15	0.81
45	-7.6	22.6	19	0.83
60	-11.5	32.0	28	0.88

图 13 给出了靶板斜置角度为 $0^\circ\sim 60^\circ$ 时, 等效正侵彻 Q235 钢靶极限穿深条件下的弹靶破坏形态。由图 13 可以看出: 随着 Q235 靶板厚度的增大, 穿燃弹钢芯破碎程度增大, 完整性降低; 等效 Q235 钢靶厚度为 10、12 mm 的条件下, 穿靶后的钢芯完整性较好; 当 Q235 钢靶厚为 15 mm 时, 钢芯头部开始发生断裂; Q235 靶厚增大至 19、28 mm 时, 钢芯头部至圆柱部发生断裂破坏, 钢芯呈现出整体断裂的趋势。

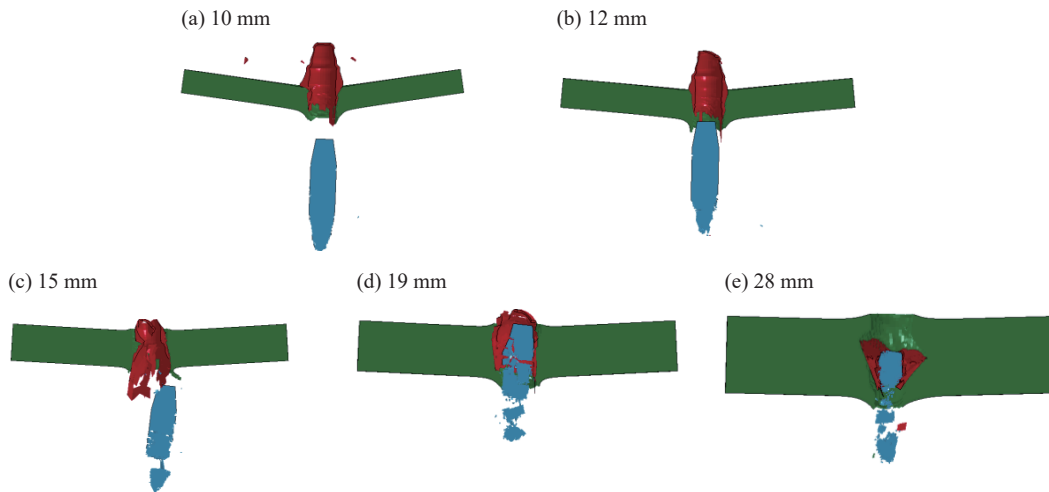


图 13 等效正侵彻 Q235 钢靶极限穿深条件下的弹靶破坏形态

Fig. 13 Failure patterns of bullet and target under the limit penetration depth of equivalent Q235 steel target

由图 14 可以看出, 靶板斜置角度的增大导致弹丸钢芯向背弹面偏转, 其穿靶偏转角度近似线性变化, 负向增大。这是因为穿靶过程中, 钢芯穿透陶瓷面板后, 当侵彻 Q235 钢薄靶时, 姿态进行反向调整, 导致穿靶偏移角负向增大。

图 15 为陶瓷复合靶及 Q235 钢靶等效厚度与靶板斜置角度的关系, 结合图 10~12, 可明显看出: 随着靶板斜置角度的增大, 陶瓷复合靶的等效厚度呈近似指数型增大; 穿燃弹侵彻陶瓷复合靶和 Q235 钢靶时, 在相同弹道极限情况下, 靶板斜置角度的增大导致在弹丸轴线方向等效 Q235 钢靶厚度与陶瓷复合靶板的等效厚度均呈指数型增大^[19], 且等效 Q235 钢靶厚度的增大速率大于复合靶板的等效厚度的增大速率。可见, 陶瓷复合靶板斜置角度的增大, 有利于提高 Q235 钢靶与陶瓷复合靶板的等效厚度比(见图 16), 可有效提高其对 12.7 mm 穿燃弹的防御能力。

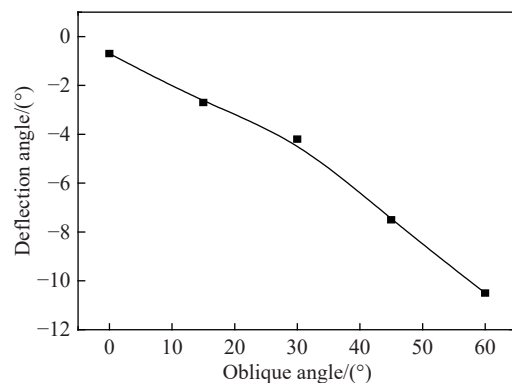


图 14 靶板斜置角度与钢芯穿靶偏移角的关系

Fig. 14 Deflection angle of bullet steel core penetrating through target varied with oblique angle of target plate

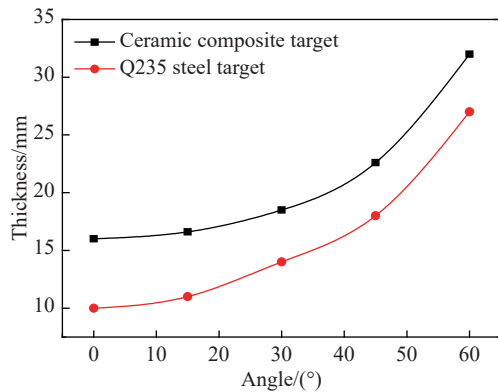


图 15 靶板等效厚度与靶板斜置角度的关系

Fig. 15 Relation between equivalent thickness of target plate and its oblique angle

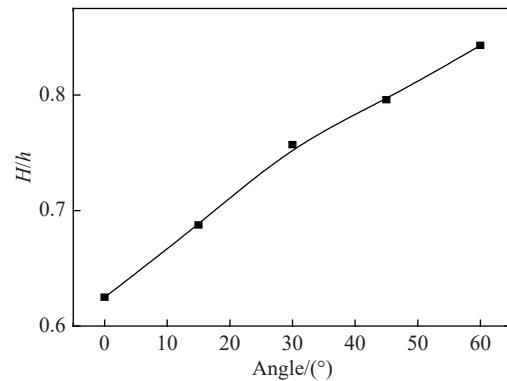


图 16 陶瓷复合靶板和 Q235 钢靶的等效厚度比与靶板斜置角度的关系

Fig. 16 Equivalent-thickness ratio of ceramic composite target to Q235 steel target varied with their oblique angle

4 结 论

(1) 通过弹道枪实验测试了 12.7 mm 穿燃弹对实验选定的陶瓷复合靶板的弹道极限范围, 发现随陶瓷复合靶板斜置角度的增大, 弹道极限近似指数型提高, 且穿燃弹钢芯背弹面斜侧方发生脆性断裂破坏, 断裂倾角逐渐增大。

(2) 基于数值模拟结果与实验结果的一致性, 发现随靶板斜置角度的增大, 穿燃弹钢芯穿靶偏移角反向增大, 陶瓷复合靶板与 Q235 钢靶的等效厚度比也随之增大, 同时由应力波引起的迎弹面应力响应区变大, 弹芯剩余质量逐渐减小, 完整度降低。

参考文献:

- [1] 孙英. 枪弹对陶瓷/凯芙拉复合靶板的侵彻机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010: 66–68. DOI: 10.766/d.y1697767.
- [2] ROSEBERG Z, TSALIAH J. Applying Tate's model for the interaction of long rod projectiles with ceramic targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 9(2): 247–251. DOI: 10.1016/0734-743X(90)90016-O.
- [3] ROSENBERG Z, DEKEL E. 终点弹道学 [M]. 钟方平, 译. 北京: 国防工业出版社, 2014: 123–134.
- [4] 李继承, 陈小伟. 柱形长杆弹侵彻的界面击溃分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2011, 31(2): 141–147.
LI Jicheng, CHEN Xiaowei. Theoretical analysis on the interface defeat of a long rod penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(2): 141–147.
- [5] ANDERSON C E Jr, HOLMQUIST T J, ORPHAL D L, et al. Dwell and interface defeat on borosilicate glass [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2010, 7(6): 776–786. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02478.x.
- [6] CHI R Q, SERJOUEI A, SRIDHAR I, et al. Pre-stress effect on confined ceramic armor ballistic performance [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 84: 159–170. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.05.011.
- [7] CHI R Q, SERJOUEI A, SRIDHAR I, et al. Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminum armor: a semi-analytical approach [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 52: 37–46. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.10.001.
- [8] 李继承, 陈小伟. 尖锥头长杆弹侵彻的界面击溃分析 [J]. *力学学报*, 2011, 43(1): 63–70. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-1-lxxb2009-782.
LI Jicheng, CHEN Xiaowei. Theoretical analysis on the interface defeat of a conical-nosed projectile penetration [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(1): 63–70. DOI: 10.6052/0459-1879-2011-1-lxxb2009-782.
- [9] LI J C, CHEN X W, NING F. Comparative analysis on the interface defeat between the cylindrical and conical-nosed long rods [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2014, 5(1): 21–46. DOI: 10.1260/2041-4196.5.1.21.
- [10] LI J C, CHEN X W, NING F, et al. On the transition from interface defeat to penetration in the impact of long rod onto

- ceramic targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 83: 37–46. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.04.003.
- [11] 谈梦婷, 张先锋, 何勇, 等. 长杆弹撞击装甲陶瓷的界面击溃效应数值模拟 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(4): 627–634. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.04.008.
- TAN Mengting, ZHANG Xianfeng, HE Yong, et al. Numerical simulation on interface defeat of ceramic armor impacted by long-rod projectile [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(4): 627–634. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.04.008.
- [12] 汪建锋, 傅苏黎, 丁华东. 陶瓷基装甲抗枪弹机理研究现状 [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2004, 18(3): 62–65; 72. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1497.2004.03.018.
- WANG Jianfeng, FU Suli, DING Huadong. Current situation in anti-ballistic mechanism about ceramic matrix armor [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2004, 18(3): 62–65; 72. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1497.2004.03.018.
- [13] 丁华东, 许艺, 巴国召, 等. 陶瓷基复合装甲防 12.7 mm 穿甲燃烧弹的靶试研究: IV [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2013, 27(2): 75–79. DOI: 10.11732/j.issn.1672-1497.2013.02.016.
- DING Huadong, XU Yi, BA Guozhao, et al. Ceramic matrix composite armour against the 12.7 mm wear incendiary target test research: IV [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2013, 27(2): 75–79. DOI: 10.11732/j.issn.1672-1497.2013.02.016.
- [14] 丁华东, 方宁象, 王玉湘, 等. 陶瓷基复合装甲防 12.7 mm 穿甲燃烧弹的靶试研究: III [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2013, 27(1): 86–89. DOI: 10.11732/j.issn.1672-1497.2013.01.018.
- DING Huadong, FANG Ningxiang, WANG Yuxiang, et al. Target experiment about ceramics-based composite armour against 12.7 mm armor piercing incendiary: III [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2013, 27(1): 86–89. DOI: 10.11732/j.issn.1672-1497.2013.01.018.
- [15] 丁华东, 方宁象, 刘云峰, 等. 陶瓷基复合装甲防 12.7 mm 穿甲燃烧弹的靶试研究: II [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2012, 26(2): 77–79. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1497.2012.02.017.
- DING Huadong, FANG Ningxiang, LIU Yunfeng, et al. Ceramic matrix composite armour against the 12.7 mm wear incendiary target test research: II [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2012, 26(2): 77–79. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1497.2012.02.017.
- [16] 丁华东, 方宁象, 刘云峰, 等. 陶瓷基复合装甲防 12.7 mm 穿甲燃烧弹的靶试研究: I [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2012, 26(1): 78–81. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1497.2012.01.017.
- DING Huadong, FANG Ningxiang, LIU Yunfeng, et al. Ceramic matrix composite armour against the 12.7 mm wear incendiary target test research: I [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2012, 26(1): 78–81. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1497.2012.01.017.
- [17] 陈斌, 于起峰, 杨跃能, 等. 30 mm 半穿甲弹斜侵彻陶瓷/钢复合装甲的弹着角效应研究 [J]. *国防科技大学学报*, 2009, 31(6): 139–143. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2009.06.026.
- CHEN Bin, YU Qifeng, YANG Yueneng, et al. Effect of impact angle of 30 mm semi-AP projectile obliquely penetrating ceramic/steel targets [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, 31(6): 139–143. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2009.06.026.
- [18] 郭英男. 陶瓷面板复合装甲抗冲击性能及其构型设计研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016: 124–126.
- GUO Yingnan. Research on the ballistic impact behavior and configuration of ceramic faced composite armour [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016: 124–126.
- [19] 侯二永. 陶瓷间隙靶抗 12.7 mm 穿甲燃烧弹机理及性能研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 56–61.
- HOU Eryong. Investigation of mechanism and performance of spaced ceramic target under impact of 12.7 mm armor piercing projectile [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 56–61.
- [20] 李小军, 王维占, 张银, 等. 7.62 mm 穿甲子弹斜侵彻复合装甲仿真研究 [J]. *装甲兵工程学院学报*, 2018, 32(5): 71–75. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1497.2018.05.013.
- LI Xiaojun, WANG Weizhan, ZHANG Yin, et al. Simulation study on oblique penetration of 7.62 mm armour-piercing projectile into composite armour [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2018, 32(5): 71–75. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1497.2018.05.013.

[21] 张国伟. 终点效应及其应用技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 33-56.

Numerical simulation study on penetration of a 12.7 mm kinetic energy bullet into a composite armor

WANG Weizhan^{1,2}, ZHAO Taiyong², FENG Shunshan³, YANG Baoliang⁴, LI Xiaojun⁵, CHEN Zhigang²

(1. *College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;*

2. *National Defense Key Discipline Laboratory of Underground Target Damage Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;*

3. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

4. *Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, Shaanxi, China;*

5. *Institute of Defense Research, Academy of Military Science, Beijing 102205, China)*

Abstract: Ballistic limit tests were carried out by using a ballistic gun system for the ceramic composite armors obliquely placed with the angles of $0^\circ - 60^\circ$. The influences of the oblique angles were analyzed on the ballistic limits, steel core mass change and damage forms of armor-piercing bullets. The numerical simulations were performed to verify the above experimental results. Based on the fact that the calculated results were in agreement with the experimental ones, the influences of the oblique angles were further explored on the deflection angles of the bullet steel cores penetrating through the target plates, and the thicknesses of the equivalent Q235 steel target plates. Results show that with increasing the oblique angles of the ceramic composite targets: (1) the ballistic limit obeys an exponential increase law; (2) at the same ballistic limit, the ratio of the limit penetration depth of the Q235 steel target plate by the armor-piercing bullet to the equivalent thickness of the limit penetration depth of the obliquely-placed ceramic composite target by the armor-piercing bullet increases; (3) the integrity of the bullet steel core decreases gradually, its deflection angle increases reversely.

Keywords: oblique; ballistic limit; damage; penetration

(责任编辑 张凌云)