

文章编号:1001-2486(2007)06-0034-05

穿甲子弹偏心入射陶瓷/钢复合靶板试验*

申志强, 蒋志刚, 曾首义, 谭清华

(国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410072)

摘要:设计并进行了7.62mm穿甲子弹侵彻陶瓷/低碳钢复合靶板的弹道试验,得到了极限速度及陶瓷锥底部半径等数据。分析了锥底半径与入射速度、面板及背板厚度的关系,着重分析了偏心入射时靶板的抗弹机理。结果表明:陶瓷锥可分为破碎区和粉碎区,粉碎区半径约为面板厚度与弹丸半径之和;当弹着点距离陶瓷面板边缘大于5mm时,靶板的抗弹性能变化不大,而弹着点位于距陶瓷面板边缘小于5mm的板边区时,抗弹性能明显降低,靶板的有效防护面积应扣除板边区。

关键词:固体力学;侵彻/贯穿;弹道试验;复合装甲;穿甲子弹;偏心入射

中图分类号:TJ012.4 **文献标识码:**A

An Experimental of Ceramic/Mild Steel Composite Targets under Noncentral Impact of Armor Piercing Projectile

SHEN Zhi-qiang, JIANG Zhi-gang, ZENG Shou-yi, Tan Qing-hua

(College of Basic Education for Commanding Officers, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Ballistic experiments of ceramic/mild steel composite target against 7.62mm armor-piercing projectile (APP) were designed and carried out. Limit velocities and the base radiuses of ceramic cone were obtained. The influence of projectiles initial velocity, the thickness of front and rear plate on the base radius of ceramic cone and the impact point to the resistant mechanism of target were analyzed. The results show that the ceramic cone can be separated into fragmentation and smash region, the base radius of which approximates the thickness of front plate plus projectile radius. The ballistic performance of composite target area is in a similar case except for an edge area (5mm to the edge of the target), in which the ballistic performance declines obviously. The edge area has to be discarded from the effective protective area.

Key words: solid mechanics; penetration/perforation; ballistic experiment; composite armor; armour-piercing projectile; noncentral impact

抗弹陶瓷具有高强度、高硬度、高耐磨性和重量轻等特点,与其他塑性好的材料复合构成重量轻、抗弹性能优良的复合装甲,可有效抵抗穿甲子弹和爆炸破片的打击,在航空、装甲车辆的防护领域得到了广泛应用^[1-3]。自20世纪60年代Wilkins等进行试验研究以来,许多学者对陶瓷复合靶板抗穿甲子弹的性能和机理进行了大量的试验研究^[4-5],结果表明,侵彻过程中弹丸破碎和面板内形成陶瓷锥,从而扩大背板冲击作用范围,是提高靶板的抗弹性能的主要机理。由于轻型装甲车辆对子弹或爆炸破片多次打击的防护要求,陶瓷复合装甲常常采用小尺寸陶瓷板^[6-7],弹着点接近陶瓷面板边缘的概率较大。但是,现有的研究主要集中在子弹撞击陶瓷面板中心区域的情况,尚未见到弹着点为非中心区域的试验研究。

1 试验概况

试验参数和相应的极限速度结果^[8]如表1所示。陶瓷板为上海建杰陶瓷有限公司生产的 Al_2O_3 陶瓷,正方形,边长80mm,平均密度 $3500kg/m^3$;背板为Q235钢,正方形,边长200mm;陶瓷面板与钢背板之

* 收稿日期:2007-03-20

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:申志强(1981—),男,助教,硕士。

间为“玻璃纤维/环氧树脂”粘结层,厚度约 1mm。靶板边界为单向支承。表 1 中,“中心区”的偏心距小于 10mm,“偏心区 I”的偏心距为 10~25mm,“偏心区 II”的偏心距为 25~35mm。此外,弹着点距离陶瓷面板边缘小于 5mm(偏心距大于 35mm)时称为“板边区”。试件分为 10 组(G1~G10),其中,G1~G3 主要研究弹着点对极限速度的影响。G4~G6 试验中,面板厚度为 10mm,没有得到极限速度。

采用步枪发射 7.62mm 穿甲子弹,弹丸质量为 7.9g,垂直入射靶板;通过调整装药量改变着靶速度,采用锡箔靶和电子测时仪测速。射击后,回收钢背板和粘结层,测量背板变形、穿孔和粘结层上陶瓷锥底部尺寸等。根据美陆军标准^[9],由“两弹法”^[10]或背板破裂情况确定极限速度。

表 1 陶瓷/低碳钢靶板试验参数及极限速度(7.62mm APP)

Tab.1 The experiment parameters and limit velocities of ceramic/steel targets(7.62mm APP)

序号	靶板厚度/mm		面密度/kg/m ³	弹着点	着靶速度	极限速度	试件分组
	陶瓷板	钢背板			v_0 /m/s	v_{50} /m/s	
1	6	2.3	38.94	中心区	491~545	498.0	G7
2	7	1.6	36.98	中心区	470~523	475.0	G9
3	7	1.8	38.54	中心区	503~542	511.5	G8
4	7	2.8	46.34	中心区	682~761	695.0	G1~G3
				偏心区 I		707.0	
5	8	1.6	40.48	偏心区 II	515~565	688.0	G10
				中心区		557.5	

2 陶瓷锥底半径

实验表明,陶瓷面板受弹丸撞击后破碎飞溅,弹、靶作用过程中,面板内形成了陶瓷破碎锥,如图 1~3 所示。



图 1 面板内形成破碎锥

Fig.1 The ceramic cone in the front plate



图 2 面板一侧的锥形剥裂区

Fig.2 Ceramic cone area in the front plate

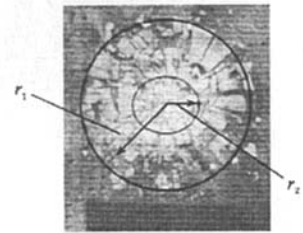


图 3 粘结层上的陶瓷碎片

Fig.3 The ceramic fragment on adhesive layer

根据残留在粘结层上陶瓷碎片的分布,可将陶瓷锥分为粉碎区和破碎区两个区域,如图 3、4 所示。粉碎区为撞击中心附近区域,其半径为 r_2 ,残余陶瓷呈粉末状;破碎区为陶瓷锥粉碎区以外部分,残余陶瓷成碎片状,距离撞击中心越远,碎片尺寸越大。据此特征可测量 r_1 、 r_2 。

由于测量得到的 r_1 、 r_2 数据具有一定的离散性,故采用数理统计方法进行数据处理。图 5 为 r_1 、 r_2 分布的“箱丝图”^[11]。图中,盒状区域用以描述数值变量的五个百分位点, P_0 为最小值、 P_{25} 为四分之一百分位点、 P_{50} 为中位数、 P_{75} 为四分之三百分位点、 P_{100} 为最大值; $P_{25} \sim P_{75}$ 构成“箱”,“箱”内包含 50% 的数据; $P_0 \sim P_{25}$ 和 $P_{75} \sim P_{100}$ 两条“丝”分别代表两端 50% 的数据;“箱”中黑色区域表示中位数(均值)。

图 5 表明,破碎锥半径 r_1 比粉碎区半径 r_2 离散性稍大,但各组数据离散程度均较小,可划分为两个速度范围:高速(G1~G6)672~733m/s、低速(G7~G10)470~565m/s,在给定的速度范围内, r_1 、 r_2 均随面板厚度的增加或背板厚度的减小而增大。

为进一步分析入射速度 v_0 、面板厚度 h_c 、背板厚度 h_b 等因素对 r_1 、 r_2 的影响程度,运用单因素显著性方差分析方法对数据进行处理分析,判断各因素对 r_1 、 r_2 影响的显著程度。弹着点为中心区时, r_1 、 r_2

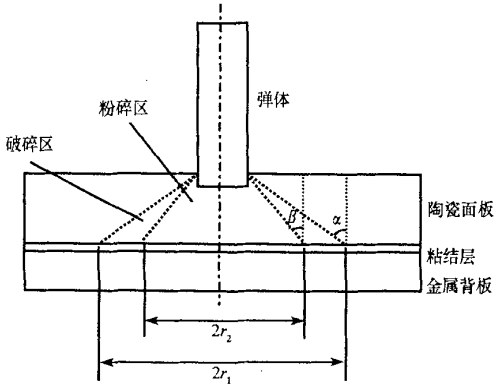


图4 陶瓷破碎锥分区示意图
Fig.4 Region of the ceramic cone

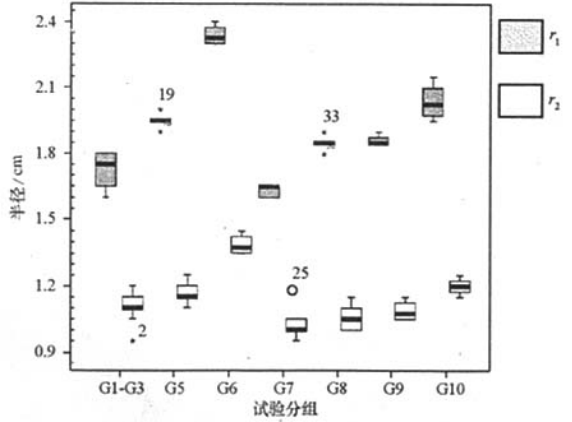


图5 r_1 、 r_2 分布箱线图
Fig.5 The distribution of r_1 、 r_2

数据的数理统计分析结果如表 2 所示,其中显著性水平取为 0.05,某影响因素的重要程度依文献[12]提供的 P 值与因素影响程度关系判定; r_1 、 r_2 的参考值分别为 $r_p + 2h_c$ 和 $r_p + h_c$, r_p 为弹丸半径。

表 2 影响 r_1 、 r_2 各因素方差分析结果

Tab.2 The variance analysis of factors which influence r_1 、 r_2

影响因素	水平	样本数	样本均值		参考值		P 值		影响程度	
			r_1	r_2	r_1	r_2	r_1	r_2	r_1	r_2
入射速度 v_0 /m/s	672 ~ 733	23	1.88	1.17	—	—	0.499911	0.024134	无影响	无影响
	470 ~ 565	18	1.83	1.09						
面板厚度 h_c /mm	6	5	1.63	1.03	1.58	0.98	5.13e-16	4.43e-11	十分显著	十分显著
	7	23	1.77	1.09	1.78	1.08				
	8	9	1.99	1.18	1.98	1.18				
	10	4	2.34	1.39	2.38	1.38				
背板厚度 h_b /mm	1.6	12	2.08	1.2	—	—	5.42e-06	0.003844	显著	显著
	1.8	5	1.85	1.06						
	2.3	10	1.79	1.10						
	2.8	14	1.72	1.10						

分析表 2 可见:(1)在本文试验范围内, r_1 、 r_2 的样本均值在不同速度段的均值十分接近,按单因素方差分析,可忽略 v_0 的影响。(2) r_1 、 r_2 随面板厚度的增大而显著提高,随背板厚度的增大而减小。按单因素方差分析,面板厚度 h_c 对 r_1 、 r_2 的影响十分显著。背板厚度 h_b 对 r_1 、 r_2 的影响较为显著。(3)面板厚度 h_c 对于 r_1 、 r_2 的影响远大于背板厚度 h_b 和入射速度 v_0 ,故可仅考虑面板厚度 h_c 的影响。且与参考标准值比较可知,该因素各水平条件下的样本均值均与标准值十分接近。故对于本文试验,有 $r_1 \approx r_p + 2h_c$, $r_2 \approx r_p + h_c$ 。 r_1 与现有研究^[13]较为一致。

须指出,虽少数试验数据偏差较大,但按平均值分析,上述结论仍然成立。

3 弹着点对靶板抗弹机理的影响

3.1 弹着点对陶瓷锥的影响

图 6 所示为弹着点变化时面板的破坏现象。由图可知:弹丸入射复合靶板中心区(G1-1)和偏心区 I(G2-2)时,残留在粘结层上的锥底压痕为较完整的圆形,说明在侵彻作用过程中形成了完整的陶瓷破碎锥;穿甲子弹入射复合靶板偏心区 II(G2-5)时,也形成了陶瓷锥,但陶瓷锥底部不完整,被截去了靠近板边缘的弓形部分,且破碎区范围不明显;弹着点为板边区(G3-2)时,没有形成陶瓷锥,而发生了

“滑弹”现象。此外,弹着点偏心距较大时,陶瓷面板破碎程度较小,且随着偏心距的增加,粘结层上残留的陶瓷面板尺寸逐步增大。

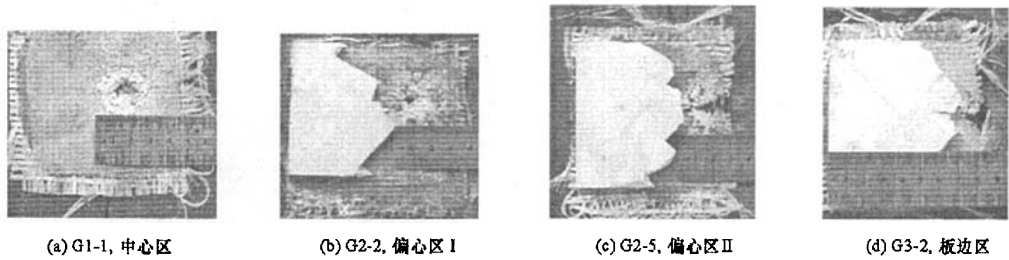


图6 弹着点变化时面板的破坏现象

Fig.6 The damage of front plate when impact point varies

3.2 弹着点对背板变形和穿孔的影响

弹着点位于中心区、偏心区 I、偏心区 II 和板边区时背板的变形和穿孔情况如图 7~10 所示,其中,照片下方为基于数字图像处理技术^[14]提取的背板变形轮廓曲线。

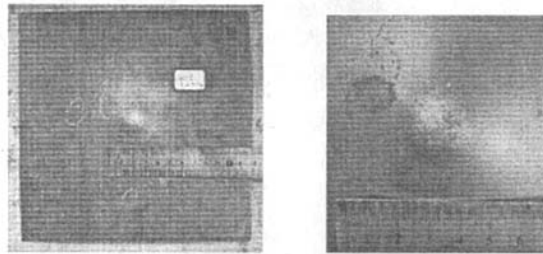


图7 弹着点为中心区时背板变形特点

Fig.7 The damage characteristic of back plate when impact point in the central area

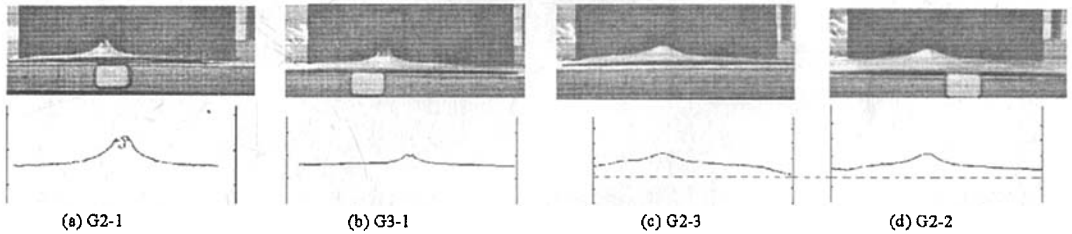


图8 弹着点为偏心区 I 时背板变形特点(虚线为水平线)

Fig.8 The damage characteristic of back plate when impact point in the noncentral area I (dashed is the horizontal line)

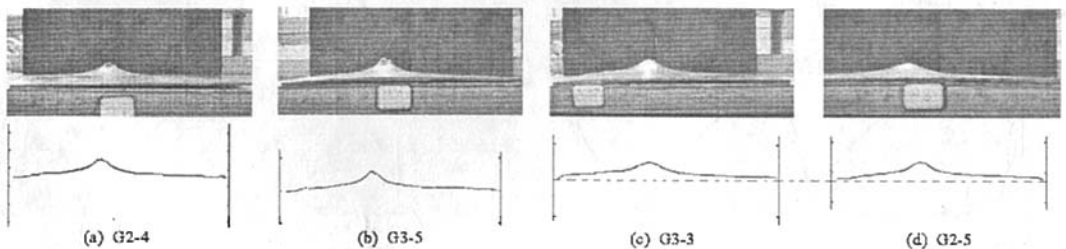


图9 弹着点为偏心区 II 时背板变形特点(虚线为水平线)

Fig.9 The damage characteristic of back plate when impact point in the noncentral area II (dashed is the horizontal line)

当弹丸速度较高时,背板撕裂,如图 9(d);或产生花瓣状穿孔,如图 8(a),(b)和图 9(a),(b)。其整体变形不明显,变形基本局限于弹着点附近,且变形区形貌基本对称。这是由于弹丸速度较高时,背板以局部变形耗能为主,整体变形幅度较小,故背板撕裂或穿孔区域形貌基本对称。

当弹丸速度较低时,背板未能被弹丸穿透。背板除产生局部鼓包变形外,还产生了较大范围的整体变形;局部变形区域基本对称,但整体变形形貌是否对称与弹着点有关。当弹着点为中心区时,背板整体变形基本对称,如图7;弹着点为偏心区 I、II 时,背板边缘靠近弹着点一侧整体变形较大,另一侧整体变形较小,整体变形区域形貌呈非对称性,如图8(c),(d)和图9(c)。这是由于弹丸速度较低时,背板除局部变形耗能以外,同时产生整体变形耗能,整体变形形貌则与弹着点的非对称性相关,侵入后期弹丸偏转造成背板整体变形区域形貌呈非对称性。

当弹着点位于板边区时,背板穿孔,局部变形很小,如图10。

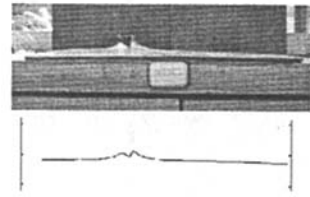


图10 弹着点为板边区时背板变形特点
Fig.10 The damage characteristic of back plate when impact point in the edge area

3.3 面板的有效防护面积

由表1,对于试件G1~G3, v_{50} 与弹着点的关系为:偏心区 I 最大(707m/s),中心区居中(695m/s),偏心区 II 最小(688m/s);但与中心区相比,偏心区 I、II 的提高或降低幅度均小于2%,而板边区抗弹性能急剧下降。这是由于弹着点为偏心区 I 时,陶瓷破碎锥完整,陶瓷面板的抗弹效能与中心区入射时相近;由于后期背板受到非对称荷载作用,从而产生较大的非对称整体变形,塑性耗能和弹道极限有所提高,弹道极限略高于中心区。弹着点为偏心区 II 时,陶瓷破碎锥不完整,锥底破碎区较小;由于后期背板受力较为集中,因而更易发生穿孔,弹道极限略低于中心区。弹着点为“板边区”时,距离陶瓷面板边缘小于5mm(约0.65倍弹径),不能形成陶瓷锥,弹体直接侵入背板,因而靶板的抗弹性能急剧下降。因此, v_{50} 可能于偏心区 I 内存在极大值,但与中心区相比,提高幅度不大。

试验结果表明,对于本文所研究的弹丸和靶板,弹着点不为板边区时,可以忽略弹着点对 v_{50} 的影响,按弹着点为中心区考虑,靶板的有效防护面积应扣除板边区(距离面板边缘小于5mm的区域)。限于试验采用的弹种,当弹丸半径变化时,“板边区”的确定尚需进一步研究。

综上所述,弹着点对陶瓷锥和背板变形均有影响。当弹着点在有效防护区域内时,面板内可以形成陶瓷锥,粉碎区完整,背板局部变形明显且基本对称。因此,极限速度随弹着点变化不大;而当弹着点位于板边区时,面板内不能形成陶瓷锥,背板局部变形很小,抗弹性能明显下降。

4 结论

(1)完整的陶瓷锥可分为破碎区和粉碎区,粉碎区半径 $r_2 \approx r_p + h_c$, $r_1 \approx r_p + 2h_c$ 。

(2)弹着点为中心区及偏心区时,能够形成陶瓷锥,而弹着点为板边区时,不能形成陶瓷锥。弹着点为偏心区时,背板局部鼓包变形基本对称,整体变形非对称。

(3)就极限速度而言,在面板有效防护面积内,抗弹性能与弹道极限变化不大,可按弹着点为中心区考虑。而板边区抗弹性能明显降低,靶板的有效防护面积应扣除板边区。

参考文献:

- [1] 陈炯.陶瓷金属复合材料装甲技术研究[D].成都:西南交通大学,2000.
- [2] 孙志杰,吴燕,张佐光,等.防弹陶瓷的研究现状与发展趋势[J].宇航材料工艺,2000(5):10-14.
- [3] 李超,刘建超.复合材料装甲技术的发展及应用[J].化工新型材料,2004,32(6):46-48.
- [4] Holmquist T J, Rajendran A M, Templeton D W, et al. A Ceramic Armor Material Database[R]. U. S. Army Tank Automotive Research Development and Engineering Center, MI 48397-5000, 1999.
- [5] 杜忠华,赵国志,王晓鸣,等.双层陶瓷复合靶板抗弹性能的研究[J].航空学报,2002,23(2):147-150.
- [6] Rosset W S. Patterned Armor Performance Evaluation[J]. Int. J. Impact Engng., 2005, 31(10): 1223-1234.
- [7] Zaera R, Sanchez-Saez S, Perez-Castellanos J L, et al. Modelling of the Adhesive Layer in Mixed Ceramic/metal Armour Subjected to Impact[J]. Composite: Part A, 2000, 31:823-833.
- [8] 申志强.穿甲子弹偏心入射陶瓷复合靶板的侵入机理研究[D].长沙:国防科技大学,2006.
- [9] 张自强,赵宝荣,张锐生,等.装甲防护技术基础[M].北京:兵器工业出版社,2000.
- [10] 隋树元,王树山.终点效应学[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [11] 陈平雁,黄浙明.SPSS10.0统计软件应用教程[M].北京:人民军医出版社,2002.
- [12] 刘文卿.试验设计[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [13] Florence A L. Interaction of Projectiles and Composites Armour, Part II[R]. Stanford Research Institute, California, U.S.A., 1969.
- [14] 易俊理,陈斌,曾首义.射弹作用后靶板形状的全场测量研究[J].防护工程,2005(6):17-20.

