

文章编号: 1001-1455(2013)03-0263-06

叠层顺序对双层 A3 钢薄板抗侵彻性能的影响^{*}

邓云飞, 张伟, 曹宗胜, 叶楠, 王洋

(哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 在轻气炮上进行了卵形头、平头及半球形头杆弹正撞击等厚接触式双层靶的实验, 得到了这几种结构的剩余速度-初始速度曲线及弹道极限速度, 研究了叠层顺序对靶体抗侵彻性能的影响。实验表明: 叠层顺序对双层靶体抗侵彻性能的影响与弹体头部形状密切相关。对于平头和半球形头弹, 厚板在前、薄板在后的靶体的弹道极限速度高于相反叠层顺序的靶体的弹道极限速度; 但是对于卵形头弹, 薄板在前、厚板在后的靶体的弹道极限速度高于相反叠层顺序的靶体的弹道极限速度。叠层顺序对靶体弹道极限速度的影响主要通过改变靶板的失效形式和靶板间的作用力实现。

关键词: 爆炸力学; 弹道极限速度; 叠层顺序; 金属靶; 侵彻; 弹体

中图分类号: O385 **国标学科代码:** 1303530 **文献标志码:** A

弹靶撞击问题一直是工程防护、武器设计中的重要问题, 靶板的变形和穿透研究在轻型结构对弹丸爆炸破片的抗弹防护及甲板结构抗重物坠落冲击能力等研究中, 具有重要的指导意义^[1]。弹道极限速度是反映靶体抗弹能力的主要指标, 与靶板的失效形式密切相关, 而靶板的失效形式与弹靶的形状、几何尺寸、材料性能、支撑条件、弹体头部形状、撞击方式等因素有关, R. L. Woodward^[2]、R. S. Corran 等^[3]、G. G. Corbett 等^[4]和 M. E. Backman 等^[5]进行了综合讨论。

钢板结构分为单层板和多层板, 多层板的应用范围越来越广泛, 一方面是制造特定大厚度的钢板比较困难, 另一方面是多层板组合可以达到某些复杂结构设计的要求。多层板的抗侵彻问题比单层板更复杂, 抗侵彻特性通常与靶板分层数目、弹靶材料性能、弹体头部形状、靶板的几何尺寸、层间间隙及叠层顺序等因素相关。目前, 关于叠层顺序对靶体抗侵彻性能影响的研究比较少, 并且结论往往不一致^[3, 6-8], 这是由于关注的影响因素不同。

本文中, 将结合弹头形状, 系统地研究叠层顺序对双层金属板防护性能的影响, 同时分析靶体结构对靶体失效形式的影响。

1 实验系统与方法

实验在哈尔滨工业大学高速撞击研究中心的一级气炮上进行。测试设备主要包括: 气室; 口径 12.7 mm、长 2 m 的发射管; 靶舱; 激光测速系统; 高速摄像机系统等^[9]。

靶体为 A3 钢, 正方形靶板尺寸为 250 mm×250 mm, 靶板四周加工有螺栓孔, 通过 8 个 M8 螺栓与靶架固定, 靶板的自由跨度为 210 mm×210 mm。弹体由经特殊热处理的 38CrSi 钢加工而成, 硬度 $H_{RC}=53.1$, 直径为 12.62 mm, 质量为 34.8 g, 其中卵形头弹弹形因数 $\varphi=3.0$, 半球形头弹 $\varphi=0.5$ 。

靶板结构形式有 3 种: T2T2 表示 2 层 1 mm 厚 A3 钢板叠放在一起, T3T1 表示 1.5 mm 厚板在前而 0.5 mm 厚板在后叠放在一起, T1T3 表示 0.5 mm 厚板在前而 1.5 mm 厚板在后叠放在一起。

2 实验结果及讨论

2.1 侵彻过程

* 收稿日期: 2012-01-13; 修回日期: 2012-04-21

作者简介: 邓云飞(1982—), 男, 博士研究生。

利用高速摄像机追踪侵彻过程,获取撞击侵彻过程的图像,同时获得弹体的速度等信息。图 1 给出了弹体侵彻靶体的典型过程,图中靶板为 T3T1,弹体初始速度 $v_i = 146.44 \text{ m/s}$,剩余速度 $v_r = 92.98 \text{ m/s}$ 。

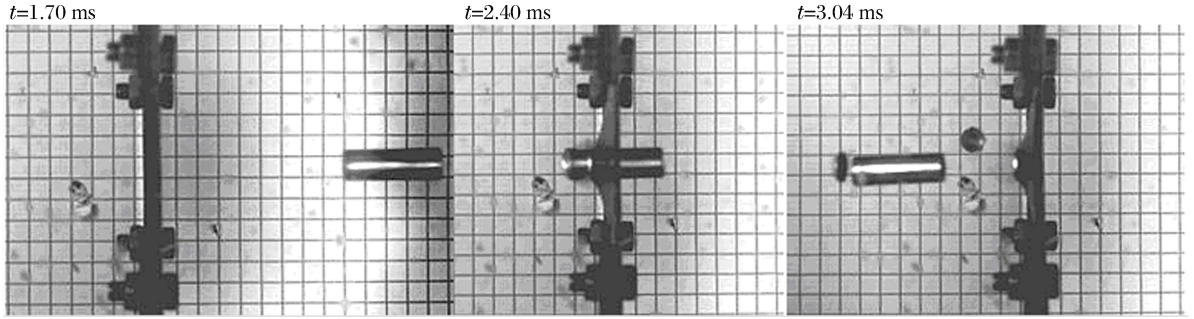


图 1 典型的撞击过程

Fig. 1 The high-speed camera images of impacting process

2.2 弹道极限速度

使用 R. F. Recht 等^[10]提出的公式(R-I 公式)处理弹体的剩余速度-初始速度关系,得到弹靶系统的弹道极限速度。该公式利用能量和动量守恒得到,为

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{1/p} \tag{1}$$

式中: v_i 为弹体初始撞击速度, v_r 为弹体贯穿靶板后的剩余速度, v_{bl} 为弹道极限速度, a 和 p 为待定常数, $a = m_p / (m_p + m_{pl})$, m_p 和 m_{pl} 分别为子弹质量和充塞质量, a 和 p 可以通过对实验得到的弹体的剩余速度-初始速度数据进行最小二乘拟合得到。表 1 给出了依据公式(1)拟合得到的模型参数。

表 1 弹道极限速度及模型参数

Table 1 Ballistic limit velocities and model constants

靶板	平头弹			卵形头弹			半球形头弹		
	a	$v_{bl}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p	a	$v_{bl}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p	a	$v_{bl}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p
T1T3	0.97	110.3	2.31	1.00	108.1	2.00	0.95	123.5	2.53
T2T2	0.95	115.9	2.39	1.00	105.8	2.18	0.96	127.8	2.56
T3T1	0.94	118.8	2.60	1.00	101.3	1.84	0.96	124.8	2.29

图 2 给出了平头、半球形头和卵形头弹体侵彻靶板的剩余速度-初始速度曲线,结合表 1,可以看出:(1)对于平头弹,T3T1 的弹道极限速度最高,其次是 T2T2,最后是 T1T3,这也就是说,在靶体厚度相同的情况下,前板越厚,靶体的抗侵彻性能越高。(2)对于半球形头弹,T2T2 的弹道极限速度最高,其次是 T3T1,最后是 T1T3。(3)对于卵形头弹,T1T3 的弹道极限速度最高,其次是 T2T2,最后是 T3T1,此时,叠层顺序对靶体抗侵彻性的影响和平头弹体的情况完全相反,这主要是因为靶体的失效形式的不同所导致。对于这 3 种弹体,双层靶叠层顺序对靶体抗侵彻性能的影响随着速度的增加而减小,同时卵形弹的侵彻性能最好,其次是平头弹,最后是半球形弹。

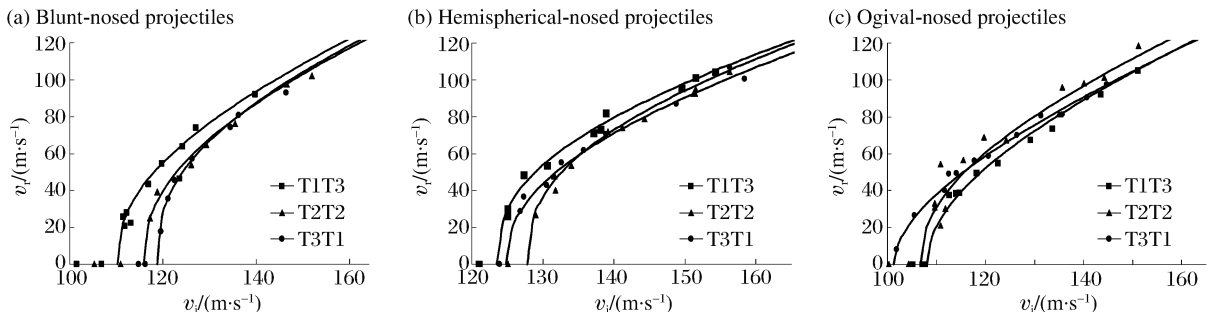


图 2 弹体贯穿靶体的初始-剩余速度

Fig. 2 Residual velocities vs initial velocities for targets impacted by projectiles

2.3 靶板失效形式

刚性弹贯穿延性板的时候,涉及整体的结构响应和局部响应,主要是弯曲应力和膜力起作用。它们对贯穿的影响极大地取决于靶体尺寸、撞击速度及弹头形状。膜力随着靶厚的增加而降低^[11],当靶板厚度达到某值时弯曲应力达到最大^[3]。图 3 给出了典型工况中回收到的靶体及靶体的冲塞。平头杆弹撞击靶体时,伴随着比较大的结构变形(冲碟),板件产生一个直径接近于弹体直径的圆形帽状塞块。

伴随着比较大的结构变形(冲碟),半球形头杆弹撞击靶板时使靶板材料变薄,并产生一个直径远小于弹体直径的圆形帽状塞块,靶体弹孔呈现接近于 90°的圆盘凸起,凸起圆盘顶部具有轻微拉伸撕裂。此外,在双层靶中,发现第 1 层靶凸起圆盘从底部到顶部呈变薄趋势,这是由弹体在撞击靶件时,第 1 层板和第 2 层板相互接触挤压造成(见图 4),第 1 层板的结构变形大于第 2 层板。此外,当弹体撞击速度较低时,在第 2 层薄板中冲塞容易和靶件连接。

尖头弹在延性较好的薄板中产生花瓣型破坏,花瓣型破坏是由高的径向和环向拉伸应力造成的。伴随着较小的结构变形,靶体弹孔呈现接近于 90°的弯曲花瓣开裂,并且材料从花瓣根部到顶部呈现变薄趋势。尤其是在接触式靶中,由于第 1 层板和第 2 层板相互挤压,造成第 1 层板弹孔周围材料严重变薄,并且第 1 层板的花瓣开裂较小但数目较多。同时发现了一个有意思的现象,在 T1T3 中的第 1 层板的弹孔花瓣开裂很不明显,此时的弹孔和半球形弹撞击的弹孔相似,如图 5(a)所示。此外,在 T2T2 中发现相类似的现象,只是弹孔花瓣开裂较为严重,如图 5(b)所示。

(a) T3T1, $v_i=134.49$ m/s, $v_r=74.38$ m/s

(b) T1T3, $v_i=119.80$ m/s, $v_r=54.69$ m/s

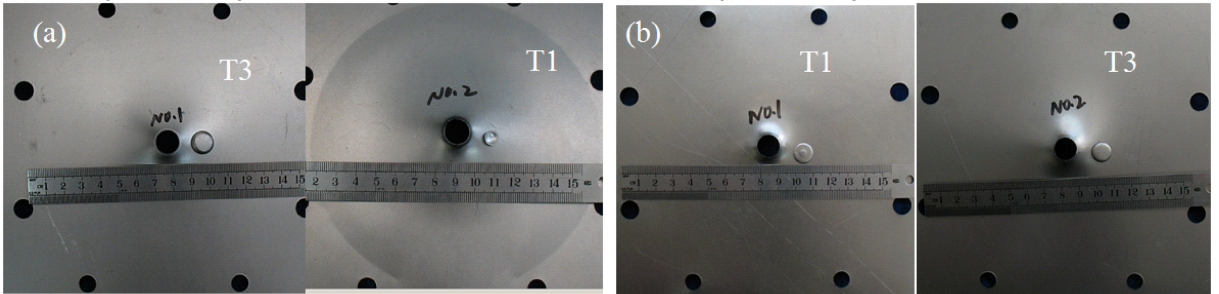


图 3 平头弹撞击回收的靶体

Fig. 3 Targets impacted by blunt-nosed projectiles

T2T2, $v_i=139.13$ m/s, $v_r=71.76$ m/s

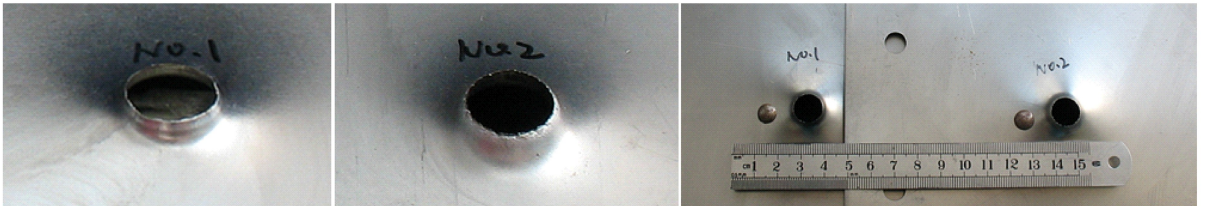


图 4 半球形头弹撞击回收的靶体

Fig. 4 Targets impacted by hemispherical-nosed projectiles

(a) T3T1, $v_i=117.75$ m/s, $v_r=56.26$ m/s

(b) T2T2, $v_i=179.35$ m/s, $v_r=144.93$ m/s

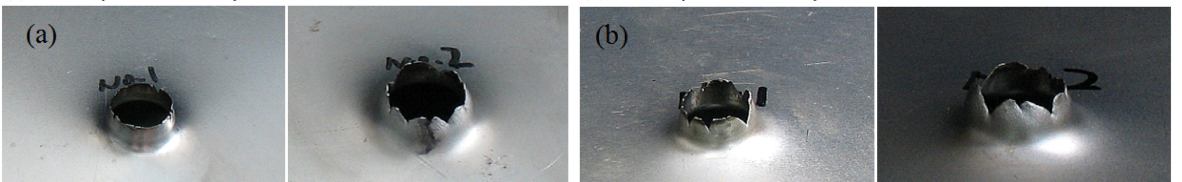


图 5 卵形头弹撞击回收的靶体

Fig. 5 Targets impacted by ogival-nosed projectiles

2.4 靶板的变形

弹道极限速度与靶板的损伤形式密切相关,而靶板的损伤形式又与撞击条件、弹体头部形状、靶体结构及尺寸等相关。平头弹撞击不同叠层顺序的双层金属薄板的挠度对比如图 6 所示,其中 d 为冲击表面位移, w_b 为前靶板挠度, w_a 为后靶板挠度。在接触式双层靶中,板之间存在相互作用力,这种相互作用力可能会阻止第 1 层板的变形而增加第 2 层板的变形。板件的结构变形受板的刚度影响,刚度 $K = ET^3/[12(1-\nu^2)]$,其中 E 是弹性模量, T 是板厚, ν 为波松比^[12]。可以得到 T3 的刚度是 T1 的 9 倍,因此 T1 提供的接触作用力对 T3 的变形影响较小,但是 T3 提供的接触作用力对 T1 的变形影响较大。在 T1T3 中, T3 极大地阻止了 T1 的变形, T3 可以自由变形,而在 T3T1 中, T1 可以自由的变形,且 T3 的变形受 T1 的阻止影响很小。从图 6(a)也可以发现,不同撞击条件下 T3 的挠度比较接近,这也就是说 T3 的结构变形与撞击速度和叠层顺序无关。但是从图 6(b)可以发现,在 T1T3 靶中, T1 的挠度与撞击速度相关,这主要是因为存在 T3 极大地阻止了 T1 的变形。在 T3T1 靶中, T1 的挠度与撞击速度无关,随着撞击速度的减小而增加,这也就是说 T1 的结构变形与叠层顺序和撞击速度有关。为了更清楚地说明叠层顺序对靶板结构变形的影响,对 T1 和 T3 的变形做了进一步地对比分析。对比 T3T1($v_i = 116.23$ m/s)和 T1T3($v_i = 116.95$ m/s),初始撞击速度特别相近,只是靶中板件叠层顺序不同,在 T3T1 中 T1 的最大挠度是 T3 的约 3 倍,而在 T1T3 中 T3 的最大挠度是 T1 的约 2 倍。其实, T1T3 和 T3T1 中 T3 的最大挠度比较接近,因此, T3T1 中 T1 的最大挠度是 T1T3 中 T1 的约 6 倍。从图 3 也可以发现, T3T1 中 T1 的全局结构变形远大于 T1T3 中 T1 的,这是 T3T1 的弹道极限速度高于 T1T3 的一个原因。

当然,可能存在另外一个原因,造成 T3T1 的弹道极限速度高于 T1T3。当平头弹撞击 T3T1 时,弹体穿过 T3 后,然后和第 1 层板 T3 的冲塞同时撞击第 2 层板 T1,此时的弹体头部形状转变为冲塞的头部形状。从图 3(a)可以发现,冲塞的头部形状类似于半球形弹体头部形状。但是在 T1T3 中,由于 T1 较薄,冲塞很扁平,因此弹体穿过第 1 板后头部形状改变很小。从前面实验可以发现,半球形头弹体的弹道极限速度高于平头弹的弹道极限速度,因此, T3T1 的弹道极限速度高于 T1T3 的弹道极限速度。

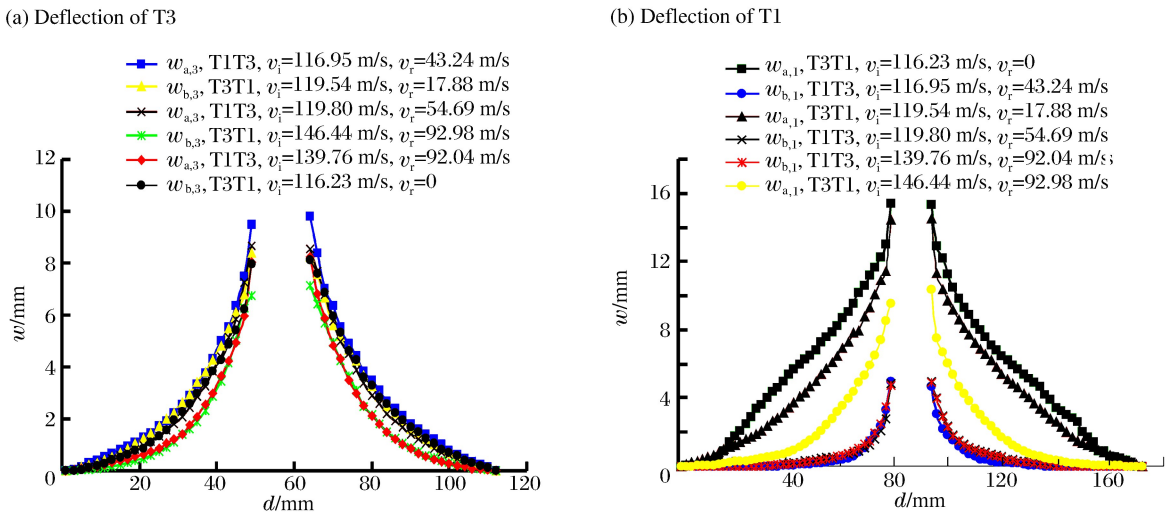


图 6 平头弹撞击靶件的变形线

Fig. 6 The deformation profiles of layered plates impacted by blunt-nosed projectiles

半球形头弹撞击不同叠层顺序的双层金属薄板的挠度对比,如图 7(a)所示,其中弹体初始撞击速度比较接近,观察到不同靶体的变形也比较接近。T1T3 和 T3T1 中 T3 的变形比较接近,但是 T1T3 中 T1 的变形略小于 T3T1 中 T1 的变形, T3T1 的弹道极限速度比 T1T3 的弹道极限速度增加 1.05%,实验现象和实验数据比较吻合。T2T2 的变形略小于 T3T1 的变形, T2T2 的弹道极限速度比 T3T1 的弹道极限速度增加 3.48%。当弹体头部为球形时,弹体头部的改变可以忽略不计,一方面是因为弹体

头部本身是半球形,另外一方面是第 1 层板的冲塞小于弹体头部。因此,T3T1 的弹道极限速度高于 T1T3 的弹道极限速度,主要是因为板间作用力,如平头弹时所述。因此推测,当弹体头部为平头时,T3T1 的弹道极限速度比 T1T3 的弹道极限速度增加了 7.71%,其中弹体头部形状改变和板间作用力的贡献各占一半左右。

卵形头弹撞击不同叠层顺序的双层金属薄板的挠度对比,如图 7(b)所示,发现不同靶体的变形比较接近。T1T3 的弹道极限速度比 T3T1 的弹道极限速度增加 6.71%,T1T3 的弹道极限速度比 T2T2 的弹道极限速度增加 2.17%。因为没有冲塞的产生,所以卵形弹不涉及到弹体头部形状的转变。不同结构靶体间弹道极限速度的差异,主要是因为靶板失效形式和板间作用力的不同。

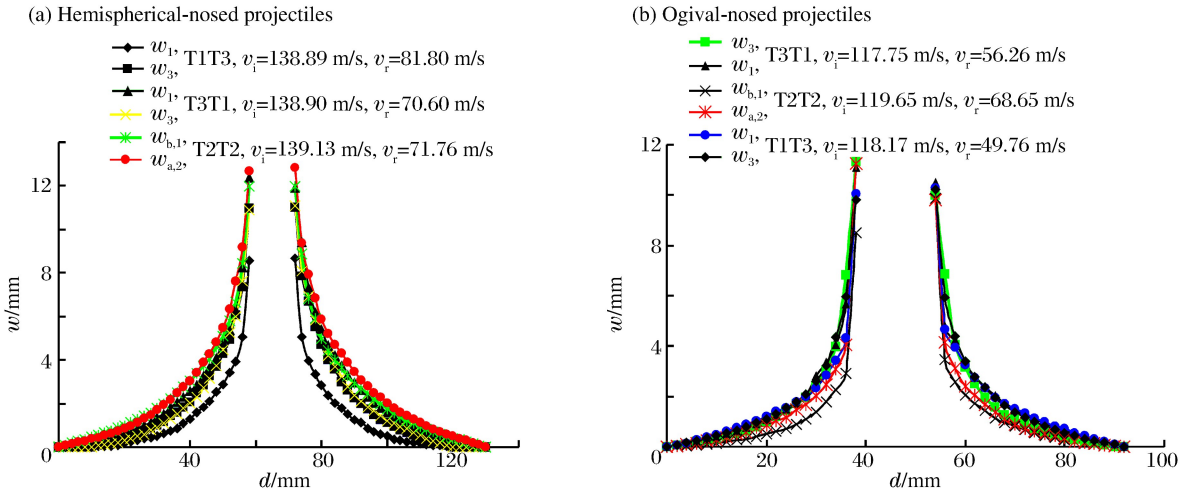


图 7 半球形和卵形头弹撞击靶件的变形线

Fig. 7 The deformation profiles of layered plates impacted by hemispherical-nosed and ogival-nosed projectiles

从图 6~7 可以发现,结构变形最大的是半球形头弹撞击的靶体,其次是平头弹撞击的靶体,最后是卵形头弹撞击的靶体,这与弹体撞击靶体时耗能的顺序相同。因此,卵形头弹的侵彻效率最高,其次是平头弹,最后是半球形头弹。

3 结 论

研究了叠层顺序对等厚接触式双层靶抗卵形头、平头和半球形头杆弹的弹道极限速度和失效形式的影响。实验结果表明:(1)叠层顺序对双层靶体防护性能的影响与弹体头部形状相关,当弹体头部为平头时,叠层顺序影响最大,其次是卵形头弹,最后是球形头弹。此外,叠层顺序对平头弹的影响与卵形头弹完全相反。(2)当弹体头部为平头时,弹道极限速度与前板板厚成正比。(3)当弹体头部为卵形时,弹道极限速度与后板板厚成正比。(4)当弹体头部为半球形时,前后板等厚时靶体的弹道极限速度最高,其次是前板厚后板薄的靶体,最后是前板薄后板厚的靶体。

参考文献:

[1] 孙炜海,文鹤鸣. 锥头弹丸低速撞击下薄金属靶板的穿透[J]. 固体力学学报,2009,30(4):361-367.
Sun Wei-hai, Wen He-ming. Perforation of thin metal plates struck by conical-nosed projectiles at relatively low velocity[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2009,30(4):361-367.

[2] Woodward R L. The interrelation of failure modes observed in the penetration of metallic targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1984,2(2):121-129.

[3] Corran R S J, Shadbolt P J, Ruiz C. Impact loading of plates: An experimental investigation[J]. International Journal of Impact Engineering, 1983,1(1):3-22.

[4] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free flying projectiles: A review[J]. In-

ternational Journal of Impact Engineering, 1996,18(2):141-230.

- [5] Backman M E, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets[J]. International Journal of Engineering Science, 1978,16(1):1-99.
- [6] Flores-Johnson E A, Saleh M, Edwards L. Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011,38(12):1022-1032.
- [7] Almohandes A A, Abdel-Kader M S, Eleiche A. M. Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates[J]. Composites Part B: Engineering, 1996,27(5):447-458.
- [8] Alavi Nia A, Hoseini G R. Experimental study of perforation of multi-layered targets by hemispherical-nosed projectiles[J]. Materials & Design, 2011,32(2):1057-1065.
- [9] 张伟,邓云飞,曹宗胜,等. 间隙对 A3 钢薄板抗半球形头弹侵彻性能影响[J]. 兵工学报,2011,32(增刊 2):325-329. Zhang Wei, Deng Yun-fei, Cao Zong-sheng, et al. Effect of air gap on the ballistic properties of double-layered A3 steel shields against hemispherical-nosed rigid projectiles[J]. Acta Armamentarii, 2011,32(suppl 2):325-329.
- [10] Recht R F, Ipson T W. Ballistic perforation dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1963,30(3):384-90.
- [11] Gupta N K, Iqbal M A, Sekhon G S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007,44(10):3411-3439.
- [12] Zukas J A, Schffler D R. Impact effects in multilayered plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001,38(19):3321-3328.

Influences of layer order on ballistic resistance of double-layered thin A3 steel plates *

Deng Yun-fei, Zhang Wei, Cao Zong-sheng, Ye Nan, Wang Yang
(*Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

Abstract: The double-layered thin A3 steel plates were normally impacted by the ogival-, blunt- and hemispherical-nosed projectiles with the help of a gas gun to investigate the influences of layer order on the ballistic resistance and failure mode of the targets. And the residual and initial velocities of the projectiles were measured and the corresponding ballistic limit velocities were obtained by least square fitting the Recht-Ipson formula to the measured residual and initial velocities. The experimental data reveal that the effects of layer order on the ballistic resistance are dependent on the projectile nose shapes. For the blunt- and hemispherical-nosed projectiles, the double-layered plates with a thick front plate and a thin back plate can give greater resistance than the ones with the opposite layering order. However, for the ogival-nosed projectiles, the double-layered plates with a thin front plate and a thick back plate exhibit greater resistance than the ones with the opposite layer order. The influences of layer order on the ballistic resistance result from the transition of the failure modes and the interference force between different configuration targets.

Key words: mechanics of explosion; ballistic limit velocity; layer order; metallic target; perforation; projectile

* Received 13 January 2012; Revised 21 April 2012

Corresponding author: Zhang Wei, zhdawei@hit.edu.cn