文章编号：1000-5773(2013)04-0549-07

分层数对 Q235 钢薄板抗侵彻性能的影响*

邓云飞[1,2]，张 伟[2]，曹宗胜[2]，宋 健[2]，王清林[2]

(1. 中国民航大学航空工程学院，天津 300300；
2. 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：利用轻气炮进行卵形头、平头以及半球形头杆弹正撞击等厚接触式叠层靶实验，得到这 3 种结构的初始速度-剩余速度曲线以及弹道极限，对回收靶体进行分析，研究分层数对叠层靶抗侵彻性能和失效模式的影响。结果表明：对于延性金属薄板，分层结构降低靶体的弹道极限，单层板的抗侵彻性能高于叠层板的抗侵彻性能。对于平头弹和卵形头弹，弹道极限随分层数的增加而降低；对于半球形头弹，弹道极限随分层数的增加先降低后升高；分层数对弹道极限的影响随弹体初始撞击速度的增加而减小。

关键词：侵彻；弹体；叠层靶；弹道极限；叠层数

中图分类号：O347.1；O385 **文献标识码**：A

1 引 言

弹体侵彻贯穿金属靶板问题在军事和民用方面都具有重要意义，如空间飞行器对空间碎片撞击的防护、核反应堆保护外壳对外来抛射物体碰撞的防护、化学剧毒物品集装箱或储藏罐的防护等。弹道极限速度是反映靶板抵抗弹体侵彻贯穿能力的综合性指标，在设计、评估防护结构和装甲防护等方面都至关重要[1]。目前，确定弹道极限的途径有 3 种：(1) 实验研究及其经验公式；(2) 简化理论分析模型(工程模型)；(3) 数值模拟。由于固体侵彻贯穿问题十分复杂，涉及因素较多，尽管最近几十年来在工程模型和数值模拟方面取得了重要进展，但基于大量实验建立的经验性实用计算公式仍然是确定弹道极限的重要方法之一[2]。穿甲问题本质上属于实验范畴。弹道侵彻实验研究是认识穿甲现象的主要和基本研究手段和方法，人们往往从实验中发现问题，总结规律，并为分析模型提供支持和验证，同时也可对数值模拟结果加以验证。

弹道极限速度是反映靶体抗弹能力的主要指标，与靶板的破坏模式密切相关，而靶板的破坏模式与弹靶的形状、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，Woodward[3]、Corran[4]，Corbett[5]以及 Goldsmith[6]等人对此进行了综合讨论。Corran 等人[4]通过钝头弹侵彻多层接触式软钢板实验，发现当多层靶的总厚度大于一定值后，多层靶的抗侵彻能力才比具有相同厚度的单层靶高，或者说当失效方式以拉伸而非弯曲或剪切为主时，抗侵彻能力才增强。Almohandes 等人[7]进行了一系列针对卵形头标准子弹侵彻单层和多层软钢的实验。他们首先研究了单层(1、2、4、6、8 mm 厚)钢板的机械性能，然后进行弹道实验，研究了多层接触靶和多层间隙靶的抗侵彻性能，其中包括靶板层数、厚度以及组合方式的影响。结果证明，单层靶对子弹的抗侵彻能力高于具有相同总厚度的多层靶，并且多层靶的抗侵彻能力与总层数成反比，与后板厚度成正比。Børvik[8]、Dey[9]等人研究了双层钢靶和相同总厚度的单层钢靶抵抗钝头和卵形头杆弹侵彻的性能。实验结果表明：平头弹侵彻接触式和间隙式

* **收稿日期**：2011-10-25；**修回日期**：2011-12-20
作者简介：邓云飞(1982－)，男，博士，主要从事穿甲力学及冲击动力学研究. E-mail：dengyunfei6@eyou.com
通讯作者：张 伟(1964－)，男，教授，主要从事穿甲力学及冲击动力学研究. E-mail：zhdawei@hit.edu.cn

双层靶的弹道极限均高于相同总厚度的单层靶，而接触式双层靶的弹道极限大于间隙式双层靶；卵形头弹侵彻双层靶时，包括接触式和间隙式，其弹道极限略低于相同总厚度的单层靶，而接触式和间隙式双层靶的弹道极限差别很小。他们最终认为，将单层靶分为双层靶时，弹道防御性能将得到提高。

本研究基于国内外叠层靶穿甲领域的研究现状，结合弹头形状，系统地研究分层数对叠层靶抗侵彻性能和失效模式的影响。

2 实验系统与方法

实验是在哈尔滨工业大学高速撞击研究中心的气炮上完成的。该气炮由霍普金森压杆改造而成，测试设备主要包括：气室，口径为 12.7 mm、长度为 2 m 的发射管，靶舱，激光测速系统，高速摄像系统等[10]。弹体的撞击速度由气室内氮气的充气压力决定。实验中使用的高速摄像机型号为 FASTCAM SA5，采用的帧率为 5×10^4 幅/秒。高速摄像机跟踪撞击侵彻过程，获取撞击侵彻过程的直观图像，同时辅助测量弹体的初始撞击速度，判读弹体贯穿靶板后的剩余速度。

靶体为 Q235 钢，正方形靶板尺寸为 250 mm×250 mm，靶板四周有螺栓孔，通过 8 个 M8 螺栓与靶架固定，靶板的自由跨度为 210 mm×210 mm，靶架见图 1。弹体由经特殊热处理的 38CrSi 钢加工而成，洛氏硬度(HRC)为 53.1，直径为 12.62 mm，质量为 34.8 g。弹体采用 3 种结构，即平头弹、卵形头弹和半球形头弹，其中卵形头弹的头部弧形半径与弹体直径之比(CRH)为 3，半球形头弹的 CRH 为 0.5。为了保证弹体可以正撞击靶板，将弹体的后端挖去一个直径为 6.2 mm、长度为 10 mm 的孔。

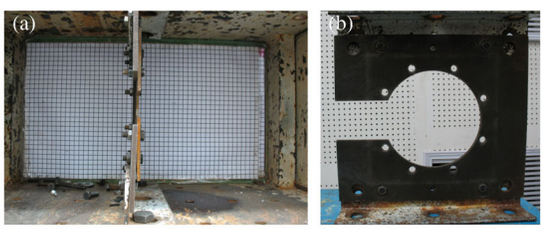


图 1 靶架

Fig. 1 Targets support

靶板结构形式包括 T4、T2T2、T1T1T1T1，其中 T4 表示厚度为 2 mm 的单层板，T2T2 表示两层 1 mm 厚的钢板叠放在一起，T1T1T1T1 表示 4 层 0.5 mm 厚的钢板叠放在一起。

3 实验结果及讨论

3.1 侵彻过程

实验时，利用高速摄像机追踪侵彻过程，观察弹体的着靶姿态，同时获得弹体的速度、加速度和撞击角度等信息。图 2 给出了平头弹、卵形头弹和半球形头弹 3 种弹体侵彻靶体的典型过程。可以发现，平头弹和半球形头弹撞击靶体时产生冲塞，并且半球形头弹撞击靶体时其结构变形最大，其次是平头弹，最后是卵形头弹。

3.2 弹道极限

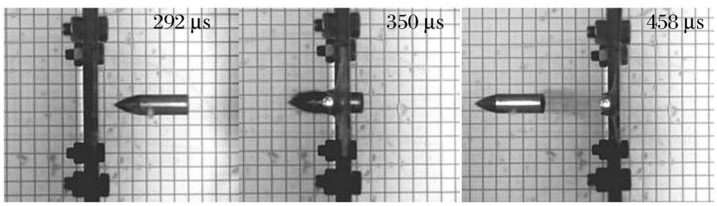
采用 Recht 和 Ipson[11] 提出的公式(R-I 公式)处理弹体的剩余速度-初始速度关系，以获得弹靶系统的弹道极限。该公式利用能量守恒和动量守恒定律，具体表达式为

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

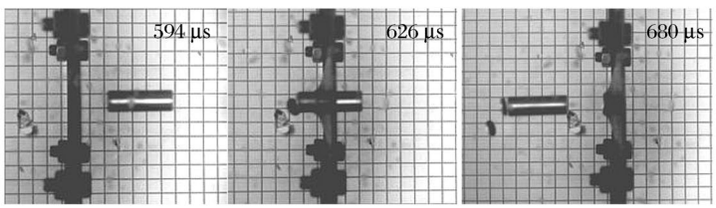
式中：v_i 为弹体初始撞击速度；v_r 为弹体贯穿靶板后的剩余速度；v_{bl} 为弹道极限速度；a 和 p 为待定常数，$a=m_p/(m_p+m_{pl})$，m_p 和 m_{pl} 分别为子弹质量和冲塞质量，a 和 p 可以通过对实验测得的弹体初始速度-剩余速度数据进行最小二乘法拟合得到。表 1 给出了由(1)式拟合得到的模型参数。

图 3、图 4 和图 5 分别给出了平头、半球形头和卵形头弹体侵彻靶板的初始速度-剩余速度数据。从图 3、图 4、图 5 和表 1 可以看出：(1) 对 3 种头部形状的弹体，单层板的弹道极限均高于叠层板的弹道极限；(2) 对于平头弹，弹道极限随分层数的增加而降低，T4 的弹道极限比 T2T2 的弹道极限高 7.2%，比 T1T1T1T1 的弹道极限高 18.5%；(3) 对卵形头弹，弹道极限随分层数的增加而降低，T4 的弹道极限比 T2T2 的弹道极限高 9.5%，比 T1T1T1T1 的弹道极限高 22.8%；(4) 对于半球形头弹，弹道极限随分

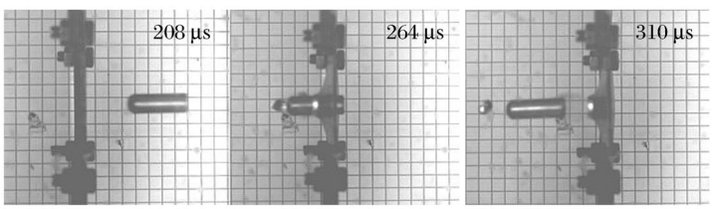
层数的增加先减小后增大,T4 的弹道极限比 T2T2 的弹道极限高 4.7%,比 T1T1T1T1 的弹道极限高 2.4%;(5) 对分层最为敏感的是卵形头弹,其次是平头弹,最后是半球形头弹,也就是说,分层对靶体抗侵彻性能的影响随弹道极限的增加而降低,并且分层数对弹道极限的影响随弹体初始撞击速度的增加而减小;(6) 侵彻效率最高的是卵形头弹,其次是平头弹,最后是半球形头弹。



(a) Ogival project, T2T2, v_i=146.4 m/s, v_r=93.0 m/s



(b) Blunt project, T2T2, v_i=154.3 m/s, v_r=104.2 m/s



(c) Hemispherical project, T2T2, v_i=141.2 m/s, v_r=74.1 m/s

图 2　弹体撞击靶板的典型高速摄影照片

Fig. 2　Selection of high-speed camera images showing perforation of the plates

表 1　靶体的弹道极限及模型参数

Table 1　Ballistic limits and model parameters of targets against projectiles

Target	Blunt projectile			Ogival projectile			Hemispherical projectile		
	a	v_{bl}/(m/s)	p	a	v_{bl}/(m/s)	p	a	v_{bl}/(m/s)	p
T4	0.94	124.2	2.58	1	115.8	2.08	0.90	133.8	2.33
T2T2	0.95	115.9	2.39	1	105.8	2.18	0.96	127.8	2.56
T1T1T1T1	0.90	104.8	2.31	1	94.3	2.01	0.97	130.7	2.33
T6							0.96	187.5	2.2
T1T1T1T1T1T1							0.98	158.5	2.3

由以上分析可知,半球形头弹的侵彻规律与平头弹及卵形头弹的侵彻规律不同,其弹道极限随分层数的增加不是单调减小,而是先增加后减小,也就是说,当分层数达到一定值时,叠层板的弹道极限可能超过单层板。为了进一步研究该问题,增加了两个靶体结构进行撞击实验,即半球形头弹撞击3 mm 厚单层靶(T6)和 6 层 0.5 mm 厚的叠层靶(T1T1T1T1T1T1)。通过实验可知,T6 的弹道极限为 187.5 m/s,T1T1T1T1T1T1 的弹道极限为 158.5 m/s,T6 的弹道极限比 T1T1T1T1T1T1 的弹道极限高 18.3%。此时,单层板的弹道极限仍高于叠层板,而且 T6 与 T1T1T1T1T1T1 的弹道极限差距比 T4 与 T1T1T1T1 的弹道极限差距更大,说明当分层数发生变化时,分层效果只是发生了量的变化,并

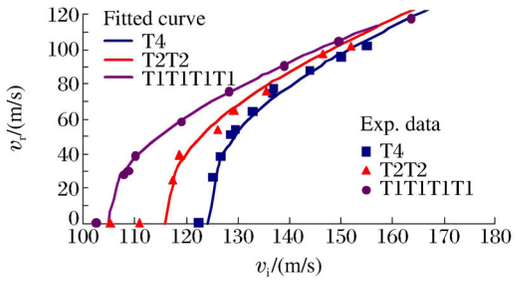


图 3 平头弹贯穿靶体的初始速度与剩余速度的关系

Fig. 3 Initial velocity vs. residual velocity for target impacted by a blunt projectile

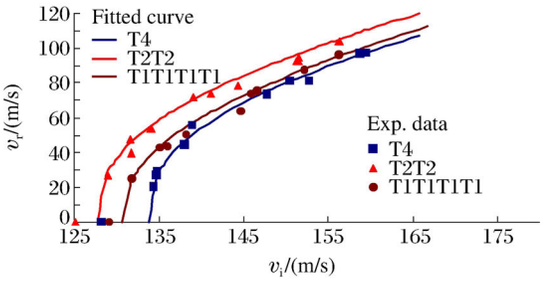


图 4 半球形头弹贯穿靶体的初始速度与剩余速度的关系

Fig. 4 Initial velocity vs. residual velocity for target impacted by a hemispherical projectile

未发生质的变化，这与侵彻机理是相关的。事实上，从 T4 到 T6，靶体的侵彻机理并没有发生变化，还是以全局结构变形为主。

3.3 靶体失效模式

塑性金属靶板常见的穿孔模式有延性扩孔、花瓣型、冲塞型、碟型等，实际穿孔模式常常以其中一种模式为主、几种模式同时发生。刚性弹对一定厚度金属靶板的侵彻/穿甲通常由侵彻过程和最终失效模式控制。一般来说，随着靶板厚度和撞击速度的增加，靶板局部响应越来越强，而靶板整体结构响应逐渐减弱。在刚性弹撞击下，当板厚弹径比(h_t/d_p)较大时，靶板的整体变形较小；当板厚弹径比较小时，靶板的整体变形较大。在本研究中，最大的板厚弹径比 h_t/d_p 为 0.16，比较小，因此，靶体的整体塑性变形是主要的耗能方式。

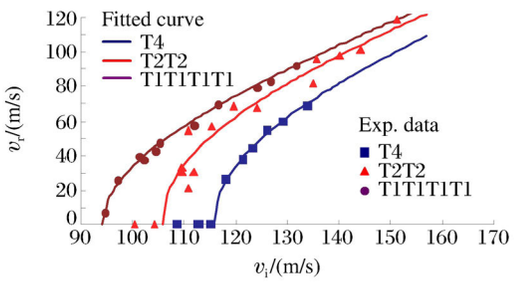


图 5 卵形头弹贯穿靶体的初始速度与剩余速度的关系

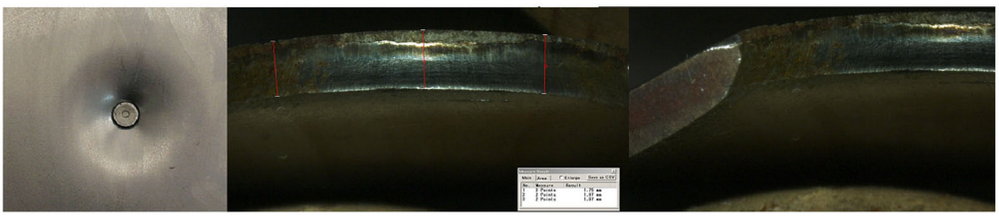
Fig. 5 Initial velocity vs. residual velocity for target impacted by an ogival projectile

靶板受到横向撞击作用时，其永久变形可分为许多力学过程。一般来说，当钝头弹撞击相对较薄(靶厚小于弹体直径)的靶时，靶体发生整体变形——碟形变形。在被弹体直接撞击的区域内，靶板材料被压缩变薄，产生拉伸撕裂或弯曲，其中张力由盘式凹陷所产生，通常称之为盘式隆起破坏，这种破坏形式是颈缩的最终阶段；但如果撞击速度远远大于弹道极限，较薄靶则发生冲塞破坏。具体的失效形式是盘式隆起还是冲塞，主要取决于失效区域内是剪切起作用还是拉伸应力起作用，当以剪切为主时发生冲塞，当以拉伸为主时发生隆起，但在发生盘式隆起破坏时往往也会形成一个塞子。

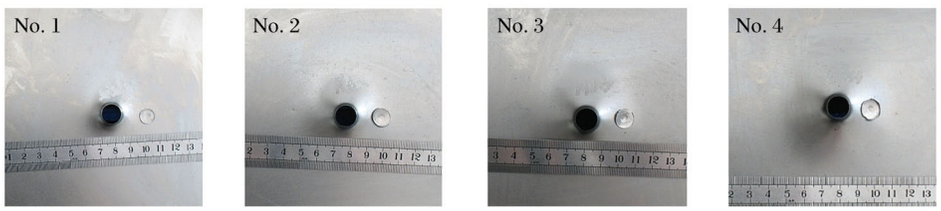
在本研究中，金属弹体在侵彻过程中保持刚性，而靶体在撞击过程中经常发生较大的结构变形以及非常大的局部化变形。图 6 给出了平头弹撞击实验中回收到的靶体及靶体冲塞，其中图 6(b)中 No. 1～No. 4 表示沿撞击方向的第 1～第 4 块靶板，即编号表示叠层顺序。图 6(a)给出了 T4 弹孔缺口剖面放大图(放大倍数为 25 倍)。可以发现，缺口为明显的拉伸破坏而非剪切破坏，最后发生颈缩，若板厚小于 T4 板厚(2 mm)，则板件更加趋向于发生拉伸破坏。由此可以得出：当钝头弹撞击薄靶时，靶体发生整体变形——碟形变形，被弹体直接撞击的靶板材料被压缩变薄，产生拉伸撕裂和弯曲，为盘式隆起破坏，并且形成一个塞子；在叠层靶中，沿着侵彻方向，靶板越靠后，靶板结构变形越大。

尖头弹在延性较好的薄板中产生花瓣型破坏，此时薄板的整体结构变形较平头弹撞击时的整体结构变形小。花瓣型破坏是由高的径向和环向拉伸应力所致，弹体推动靶板材料向前运动产生弯矩，从而引起这类独特的变形方式，同时受靶材的不均匀性和各向异性影响，当达到靶板材料的拉伸强度时，在弹体顶部的四周形成星状裂纹。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，尤

其是在接触式靶中，由于靶板相互挤压，造成靶板的弹孔周围材料发生严重变薄，材料从花瓣根部到顶部呈现变薄趋势，如图 7 所示。此外，在叠层靶中，沿撞击方向的第 1 层板开裂花瓣数最多，其次是第 2 层、第 3 层，第 4 层板的开裂花瓣数最少；并且，沿着侵彻方向，靶板越靠后，靶板结构变形越大。



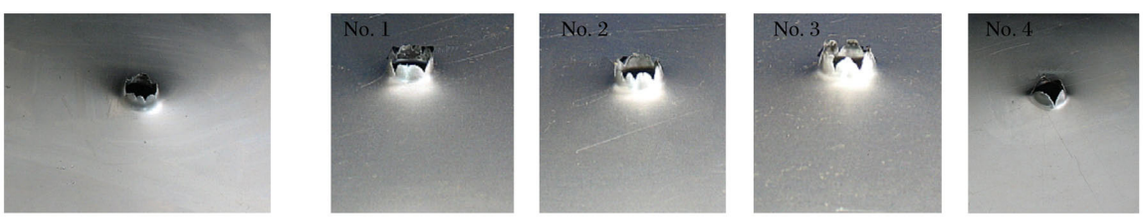
(a) T4, v_i=128.4 m/s, v_r=64.2 m/s



(b) T1T1T1T1, v_i=149.6 m/s, v_r=104.2 m/s

图 6　平头弹撞击靶体样件及冲塞

Fig. 6　Targets impacted by blunt projectiles



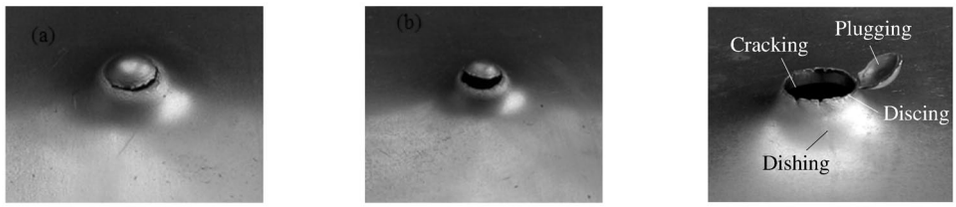
(a) T4, v_i=126.2 m/s, v_r=54.4 m/s　　(b) T1T1T1T1, v_i=101.5 m/s, v_r=39.2 m/s

图 7　卵形头弹撞击靶体样件

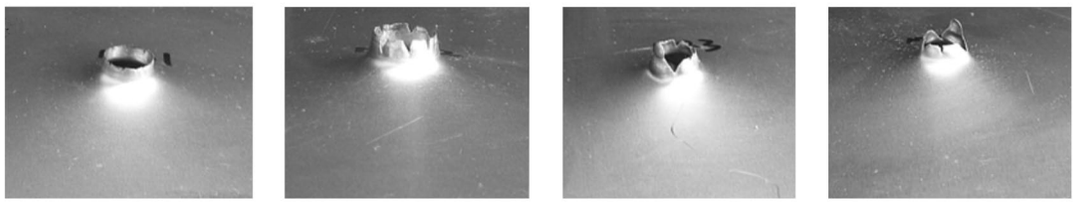
Fig. 7　Targets impacted by ogival projectiles

半球形头弹撞击单层靶时，伴随着比较大的结构变形（冲碟），靶体产生一个直径小于弹体直径的圆形帽状塞块，弹孔发生严重的盘式隆起，如图 8 所示，此时靶体发生拉伸撕裂破坏，没有剪切失效的存在。当半球形头弹撞击叠层靶板时，叠层顺序靠前的靶板材料变薄，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，并且凸起圆盘顶部有一系列轻微裂纹。随着层叠顺序的增加，越靠后的靶板，开裂情况越严重，花瓣数量越少，花瓣越大，结构变形越大，如图 8(d)所示。有意思的是，在一些实验中，靶板的冲塞仍然与靶板相连，并且靶板厚度越小，弹体撞击速度越低，靶板在叠层靶中的位置越靠后，冲塞越容易与靶板连接。在平头弹撞击薄板时，发生了同样的情形。但是，这并不影响靶体的抗侵彻性能。因此，当半球形头弹撞击薄板时，主要发生类似于平头弹撞击的情况，在损伤区以拉伸撕裂作用为主，发生盘式隆起破坏，产生圆形帽状塞块。

从以上分析可以发现，平头、卵形头和半球形头弹体从侵彻单层薄板到侵彻叠层薄板时，侵彻机理和失效形式并没有发生过渡或质的变化，主要是靶体整体刚度和板间作用力发生变化，导致靶体失效在量上发生改变，进而影响靶体抗侵彻性能。靶板弯曲刚度可表示为 $K = Ed^3/12(1-\nu^2)$，其中 E 为弹性模量，d 为靶板厚度，ν 为泊松比[12]。可见，弯曲刚度 K 与厚度 d 的三次方成正比。分层必然在很大程度上降低靶体的整体刚度，而靶体的主要失效形式为盘式隆起，在损伤区以拉伸和弯曲作用为主，塑性变形是主要耗能方式。因此，从单层靶到多层靶，刚度的大幅度降低，将造成靶板抗侵彻性能的降低。



(a) T4, v_i=116.5 m/s, v_r=0 m/s (b) T4, v_i=128.2 m/s, v_r=0 m/s (c) T4, v_i=134.5 m/s, v_r =20.3 m/s



(d) T1T1T1T1, v_i=136.0 m/s, v_r=43.6 m/s

图 8 半球形头弹撞击靶体样件及冲塞

Fig. 8 Targets impacted by hemispherical projectiles

4 结 论

实验研究了分层数对叠层靶抗侵彻性能和失效模式的影响。通过高速撞击实验发现，对于延性金属薄板，分层降低靶体的弹道极限，单层板的抗侵彻性能高于叠层板的抗侵彻性能。对于平头弹和卵形头弹，弹道极限随分层数的增加而降低；对于半球形头弹，弹道极限随分层数的增加先降低后增加。对叠层最敏感的是卵形头弹，其次是平头弹，最后是半球形头弹，并且分层数对弹道极限的影响随撞击速度的增加而减小。

References:

[1] Jiang Z G, Zeng S Y, Zhou J P. A model for ballistic limit of thick metallic targets struck by projectiles with conical or ogival nose [J]. Journal of Ballistics, 2004, 16(1): 54-59. (in Chinese)
蒋志刚，曾首义，周建平. 分析金属靶板弹道极限的延性扩孔模型 [J]. 弹道学报，2004，16(1)：54-59.

[2] Jiang Z G, Zeng S Y, Zhou J P. Analyses of critical impact energy for plugging failure of thin metallic plates [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(5): 203-208. (in Chinese)
蒋志刚，曾首义，周建平. 金属薄靶板冲塞破坏最小穿透能量分析 [J]. 工程力学，2004，21(5)：203-208.

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

[4] Corran R S J, Shadbolt P J, Ruiz C. Impact loading of plates—An experimental investigation [J]. Int J Impact Eng, 1983, 1(1): 3-22.

[5] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review [J]. Int J Impact Eng, 1996, 18(2): 141-230.

[6] Backman M E, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets [J]. Int J Eng Sci, 1978, 16(1): 1-99.

[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]. Compos B Eng, 1996, 27(6): 447-458.

[8] Børvik T, Dey S, Clausen A H. A preliminary study on the perforation resistance of high-strength steel plates [J]. J Phys Ⅳ France, 2006, 134(1): 1053-1059.

[9] Dey S, Børvik T, Teng X, et al. On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation [J]. Int J Solids Struct, 2007, 44(20): 6701-6723.

[10] Deng Y F,Zhang W,Cao Z S. Effect of gap on bevavior of a double-layered A3 steel shield against penetration of ogival rigid projectiles [J]. Journal of Vibration and Shock,2013,32(12):95-99. (in Chinese)
邓云飞,张　伟,曹宗胜. 间隙对 A3 钢薄板抗卵形头弹侵彻性能影响的实验研究 [J]. 振动与冲击,2013,32(12):95-99.

[11] Recht R F,Ipson T W. Ballistic perforation dynamics [J]. J Appl Mech,1963,30(3):384-390.

[12] Zukas J A,Scheffler D R. Impact effects in multilayered plates [J]. Int J Solids Struct,2001,38(19):3321-3328.

Influence of the Number of Layers on the Ballistic Resistance of Layered Thin Q235 Steel Plates

DENG Yun-Fei[1,2], ZHANG Wei[2], CAO Zong-Sheng[2],
SONG Jian[2], WANG Qing-Lin[2]

(1. *College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin* 300300, *China*;
2. *Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: Layered plates are normally impacted by ogival, blunt and hemispherical projectiles using a gas gun to investigate the influence of the number of layers on the ballistic resistance and target failure model. The residual velocity versus the initial velocity curves for the projectiles are constructed, and ballistic limit velocities are obtained. Based on the experimental data, the monolithic targets show greater ballistic limit velocity than multi-layered targets. For blunt and ogival projectile, the ballistic limit velocity decreases with increasing of the number of layers. However, for hemispherical projectile, the ballistic limit velocity firstly decreases and then increases with the increase of the number of layers. The influence of layering decreases as the impact velocity of projectile increases.

Key words: perforation; projectile; layered target; ballistic limit; number of layers