

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201604021

# 靶体材料叠层顺序对抗卵形头弹冲击性能影响

邓云飞<sup>1,2</sup>, 张 伟<sup>2</sup>, 贾 斌<sup>2</sup>, 胡 静<sup>1</sup>, 陈 聪<sup>1</sup>

(1.中国民航大学 航空工程学院,天津 300300; 2.哈尔滨工业大学 航天学院,哈尔滨 150080)

**摘 要:** 为研究靶体材料及结构对其抗撞击特性的影响,利用一级轻气炮系统进行卵形头弹正撞击靶体试验.通过改变靶体材料及结构,分析靶体在不同撞击条件下的弹道极限及失效模式.靶体包括单层靶、相同材料板组成的等厚双层靶,以及不同材料板组成的等厚双层靶,靶体总厚度相等.利用高速摄像机获取弹体撞击速度数据和弹道姿态图像,基于实验数据建立各种结构靶体的初始-剩余速度曲线,进而计算获取靶体的弹道极限速度.通过分析靶体的弹道极限及面密度,从抗撞击效率方面揭示靶板的叠层顺序对其抗撞击性能的影响规律及机理.试验结果表明:单层靶板的抗撞击性能高于等厚度的双层靶板;靶板的叠层顺序对混合双层靶抗撞击性能存在影响,硬板在前软板在后排列能够提高靶体的抗撞击性能,并且这种差异随弹体初始速度的增加而减小.此外,铝合金靶体单位质量的抗撞击效率高于钢靶体.

**关键词:** 撞击;弹体;靶体;弹道极限;叠层顺序

**中图分类号:** O347;O385

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2017)10-0132-06

## The effect of material layering order on the ballistic performances of targets against the impact of ogival-nosed projectiles

DENG Yunfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, JIA Bin<sup>2</sup>, HU Jing<sup>1</sup>, CHEN Cong<sup>1</sup>

(1.College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2.School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China )

**Abstract:** The plates are normally impacted by ogival-nosed projectiles on a one stage-gas gun to investigate the influence of material and configuration on the ballistic resistance of target. By changing the material and configuration of target, the ballistic limit and failure modes of the target under various impact conditions are analyzed. All the targets, including monolithic plates, double-layer plates with the same materials and double-layer plates with different materials, are of equal thickness. The velocity data and ballistic attitude image of projectile are acquired by high-speed camera, the residual velocity versus initial velocity curves and ballistic limit velocities of the projectiles are obtained based on experimental data. By analyzing the ballistic limit and surface density of target, the influence of layering order of target on its impact resistance is revealed from the impact efficiency. The experimental results indicate that the monolithic plates have a better ballistic performance than the double-layer plates with the same materials. The layering order affects the ballistic resistance of the double-plates with different materials, the configuration for anti-impact performance is the upper layer of harder material and the lower layer of softer material, and also the layering order of plate on the ballistic resistance decreases with the increase of initial velocity of projectile. Moreover, it reveals that the ballistic resistance of aluminum alloy target is higher than that of steel target under the similar areal density.

**Keywords:** impact; projectile; target; ballistic limit; layer order

在设计相关防护结构时,希望寻求一种结构在相同质量(不同材料)或相同厚度(相同材料)的情况下,其抗撞击性能最佳.国内外研究者对单层板及多层板抗撞击特性进行了研究,如 Marom 等<sup>[1]</sup>、Corran 等<sup>[2]</sup>、Almohandes 等<sup>[3]</sup>、Gupta 等<sup>[4]</sup>、Deng 等<sup>[5-9]</sup>.目前,研究主要是针对单层靶与等厚度相同

材料多层靶的抗撞击特性,分析对象为靶体分层数、弹体头部形状、靶体间隙、靶体总厚度、靶体厚度叠层顺序等.Flores-Johnson 等<sup>[10]</sup>通过数值模拟发现,Al7075-T651 铝合金在前 Weldox 700E 钢板在后双层靶对标准卵形头弹(APM2)的弹道极限高于相反叠层顺序的靶体,但是并未给出详细机理分析.7075-T651 铝合金屈服强度为 520 MPa,而 Weldox 700E 钢强度为 819 MPa.Teng 等<sup>[11]</sup>通过数值模拟发现,软板在前硬板在后双层靶的弹道极限高于相反叠层顺序的靶体,但是并没有考虑弹体破碎,而把弹体当作刚性弹,事实上弹体在撞击过程中发生了破

收稿日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(11072072); 中央高校基本科研业务费资助(3122016C001)

作者简介: 邓云飞(1982—),男,博士,讲师;

张 伟(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者: 贾 斌, jiabin@hit.edu.cn

碎及断裂。

从上述分析可以发现,目前的研究主要集中在相同材料组成的多层靶体,很少考虑不同材料叠层顺序对靶体抗撞击性能和失效模式的影响,尤其是缺乏相关实验研究.本文基于国内外研究现状,研究靶体材料及结构对其抗撞击性能及失效模式的影响,以及不同结构靶体间失效特性的转变规律和机制。

### 1 试验系统

试验是在一级气炮上进行,整个试验装置如图 1 所示。

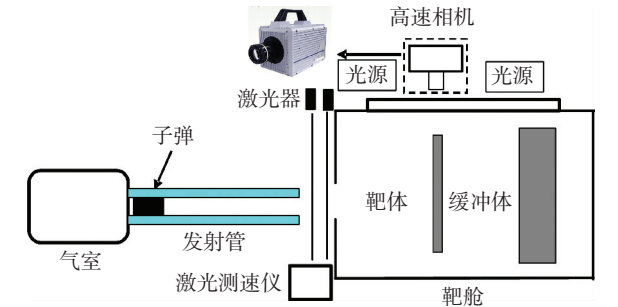


图 1 一级炮示意图  
Fig.1 Structure of one stage-gas gun

靶体材料为 2A12-T4 和 Q235 钢板,靶体总厚度为 2 mm,具体结构形式包括: A2、S2、A1A1、A1S1、S1A1 和 S1S1,其中: A1A1 为等厚度双层铝靶, A1S1 为 1 mm 铝板在前加 1 mm 钢板在后组成的双层金属靶,其他类似.卵形头弹体由高强度 38CrSi 钢加工而成,弹体头部曲率半径与弹身直径比 CRH 为 3,结构如图 2 所示.此外, 2A12-T4 铝合金屈服强度为 400 MPa、抗拉强度为 635 MPa、断裂应变为 0.23; Q235 钢屈服强度为 293 MPa、抗拉强度为 515 MPa、断裂应变为 1.04.具体弹体和靶体材料参数详见文献[ 12]。

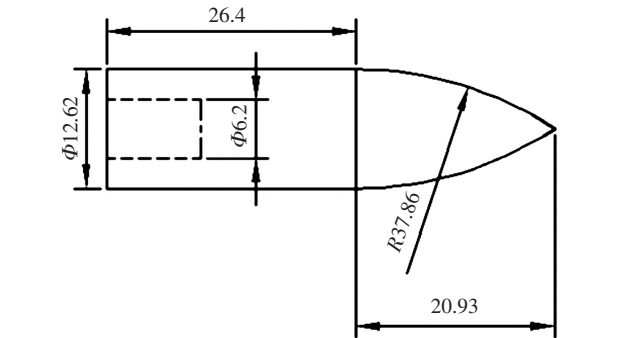


图 2 弹体形状及尺寸 (单位:mm)  
Fig.2 Geometry of the projectiles

### 2 靶体撞击失效特性影响因素分析

#### 2.1 弹道极限

表 1 给出了撞击试验结果,其中  $v_i$  为弹体初始

撞击速度,  $v_r$  为弹体贯穿靶板后的剩余速度.需要说明的是, A2、A1A1、A2 的撞击机理在文献[ 5, 9] 已经进行过描述,相关数据在本文中未给出,在此主要是为比较不同靶体的抗撞击特性。

表 1 实验结果  
Tab.1 Experimental test results (m · s<sup>-1</sup>)

| S2     |       | A1S1   |        | S1A1   |        | S1S1   |        |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $v_i$  | $v_r$ | $v_i$  | $v_r$  | $v_i$  | $v_r$  | $v_i$  | $v_r$  |
| 0      | 0     | 80     | 0      | 81.5   | 0      | 104.35 | 0      |
| 113.12 | 0     | 92.31  | 34.28  | 87.28  | 10.83  | 109.65 | 33.15  |
| 115.24 | 0     | 94.12  | 32.87  | 90.55  | 34.04  | 111.80 | 30.19  |
| 118.06 | 26.09 | 106.67 | 66.67  | 92.31  | 40.33  | 115.42 | 56.60  |
| 121.34 | 37.82 | 128.78 | 100.00 | 106.67 | 66.67  | 119.65 | 68.65  |
| 123.34 | 44.22 | 147.69 | 123.87 | 128.43 | 100.00 | 124.27 | 67.36  |
| 126.22 | 54.35 | 160    | 139.35 | 141.17 | 115.43 | 135.01 | 81.52  |
| 129.26 | 59.97 |        |        | 145.45 | 121.55 | 140.1  | 98.18  |
| 134.93 | 68.65 |        |        | 165.52 | 138.51 | 151.17 | 118.58 |

利用 R-I 公式<sup>[13]</sup> 处理弹体的速度数据,并得到弹靶系统的弹道极限.弹道极限描述了一种临界速度,当弹体以弹道极限速度撞击靶体,弹体穿过靶体后的剩余速度正好为 0 m/s.对于弹体,弹道极限越低,说明其撞击能力越强,而对于靶体,弹道极限越高,说明其抗撞击能力越强,两者之间是“矛”和“盾”的关系.表 2 给出了依据式 (1) 拟合得到的模型参数.可以看出,卵形头弹撞击靶体时,  $a$  为 1,此时  $m_{pl}$  为 0,这是由于卵形头弹体撞击靶体时不产生堵塞。

表 2 弹道极限及模型参数  
Tab.2 Ballistic limits and model constant

| 靶体代码 | $a$ | $v_{bl}$ | $p$ |
|------|-----|----------|-----|
| A2   | 1   | 71.5     | 2   |
| S2   | 1   | 115.8    | 2   |
| A1A1 | 1   | 62.5     | 2   |
| A1S1 | 1   | 87.0     | 2   |
| S1A1 | 1   | 83.0     | 2   |
| S1S1 | 1   | 103.8    | 2   |

注:  $v_{bl}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$

图 3 给出了弹体撞击靶板的初始-剩余速度数据曲线。

从图 3 和表 2 可以看出: 1) 靶体的结构及材料特性对其抗撞击性能影响很大, S2 的弹道极限最高, 其次分别为 S1S1、A1S1、S1A1、A2、A1A1; 2) 分层降低靶体的弹道极限, A2 和 A1A1 相比, 弹道极限提高 11.4%, 而 S2 和 S1S1 的弹道极限相差 11.6%, 这说明单层靶的弹道极限高于双层靶;

3) A1S1和S1A1 相比,弹道极限提高 4.8%.因此,双层混合靶的叠层顺序对其抗撞击性存在影响,铝板在前钢板在后能够提高双层靶弹道极限,并且靶体叠层顺序对其抗撞击性能的影响随弹体初始速度增加而减小,最终两种弹体的弹道性能很接近.例如,对于靶体 A1S1,弹体初始速度为 94.12 m/s,剩余速度为 32.87 m/s;对于靶体 S1A1,弹体初始速度为 94.12 m/s,剩余速度为 40.33 m/s.两种靶体的初始撞击速度相同,但是靶体 S1A1 的剩余速度高于 A1S1,这也说明了 A1S1 的弹道性能高于 S1A1.此外,2A12-T4 铝合金板的屈服强度为 400 MPa,而 Q235 钢的屈服强度为 293 MPa.因此,硬板排列在软板前面能够提高靶体抗撞击性能.不过,靶体 A1S1 和 S1A1 两者弹道性能相差不大,可能一方面由于靶板厚度小,弹体也没有发生变形;另外一方面可能是两种靶体的强度相差不明显.

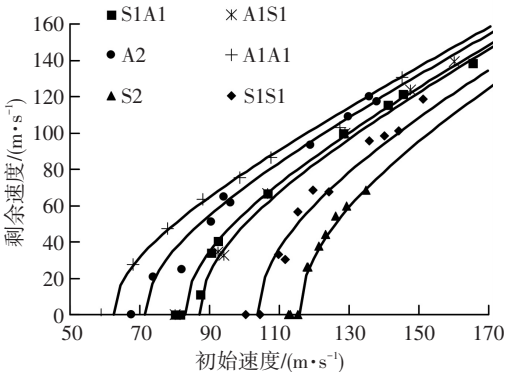


图 3 弹体撞击靶体速度数据

Fig.3 Velocity for projectiles impacting target

对于不同密度的材质靶体,表 2 的弹道极限未

考虑靶体质量的影响.为了分析靶体质量对弹道极限的影响,引入抗撞击效率,即靶体弹道极限与其面密度的比值(相同厚度),见表 3.虽然相同结构 Q235 钢靶体弹道极限高于 2A12-T4 铝合金,但是 Q235 钢密度高于 2A12-T4 铝合金.例如,对于单层板弹道极限,Q235 钢比 2A12-T4 铝合金提高 62%;对于双层板弹道极限,Q235 钢比 2A12-T4 铝合金提高 66%.但是,对于材料密度,Q235 钢比 2A12-T4 铝合金提高 189%.因此,靶体的抗撞击效率与其弹道极限有所不同,A2 的抗撞击效率最高,而 S1S1 的抗撞击效率最低,这与弹道极限的排序相反.

$$K=v_{bl}/\rho_A, \tag{1}$$

$$\rho_A=\sum_{i=1}^n\rho_i\cdot h_i. \tag{2}$$

式中: $K$  为靶体抗撞击效率; $\rho_A$  为靶体面密度; $\rho_i$  和  $h_i$  分别为靶板的密度以及厚度; $n$  为靶体层数.

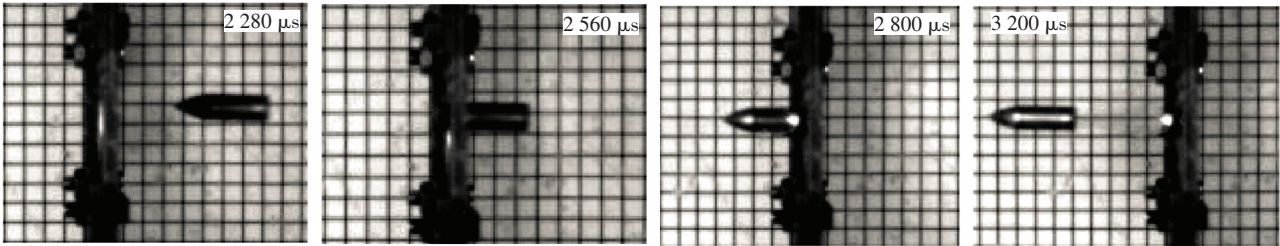
表 3 靶体面密度及抗撞击效率

Tab.3 Areal density and resistance efficiency of target

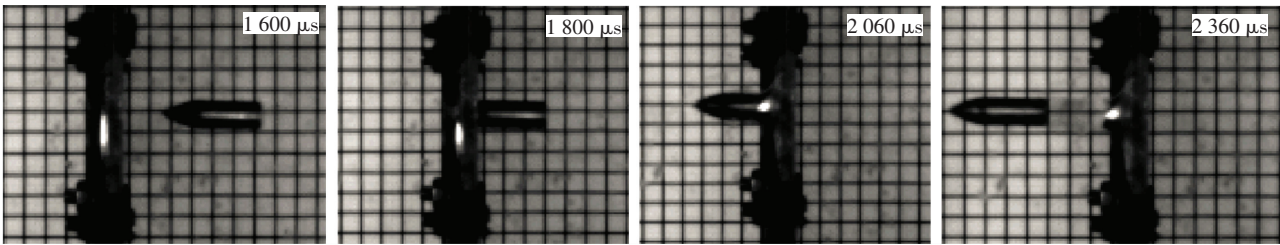
| 靶体代码 | 靶体面密度<br>$\rho_A/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$ | 靶体抗撞击效率<br>$K/(\text{m}^3\cdot(\text{kg}\cdot\text{s})^{-1})$ |
|------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| A2   | 5.5                                             | 13.0                                                          |
| S2   | 15.6                                            | 7.4                                                           |
| A1A1 | 5.5                                             | 11.4                                                          |
| A1S1 | 10.6                                            | 8.2                                                           |
| S1A1 | 10.6                                            | 7.8                                                           |
| S1S1 | 15.6                                            | 6.7                                                           |

2.2 靶板的变形和失效形式

图 4 给出弹体撞击靶体高速摄影图片,通过图片可以观测弹体的着靶姿态及弹靶动态损伤情况.



(a) A1S1,  $v_i=160.00\text{ m/s}$ ,  $v_r=139.35\text{ m/s}$



(b) A1S1,  $v_i=145.45\text{ m/s}$ ,  $v_r=121.55\text{ m/s}$

图 4 弹体撞击靶板图片

Fig.4 High-speed camera images of the target plates against projectiles



撞击试验后,回收了弹体和靶体,弹体保持刚性,而靶体发生失效变形.弹体撞击靶体,靶板在扩孔过程中,孔口有两种形状,一种是对称于板的中面,另一种是偏向板的一边,这是由弹径  $R_p$  与板厚

$h_t$  之比决定.一般来说,  $R_p/h_t \leq 3$  时,产生对称变形;  $R_p/h_t \geq 3$  时,产生偏向一边的变形<sup>[14]</sup>.在本文中,  $R_p/h_t$  为 3.155 或者 6.310,所示靶板的变形偏向一边,如图 5 所示.

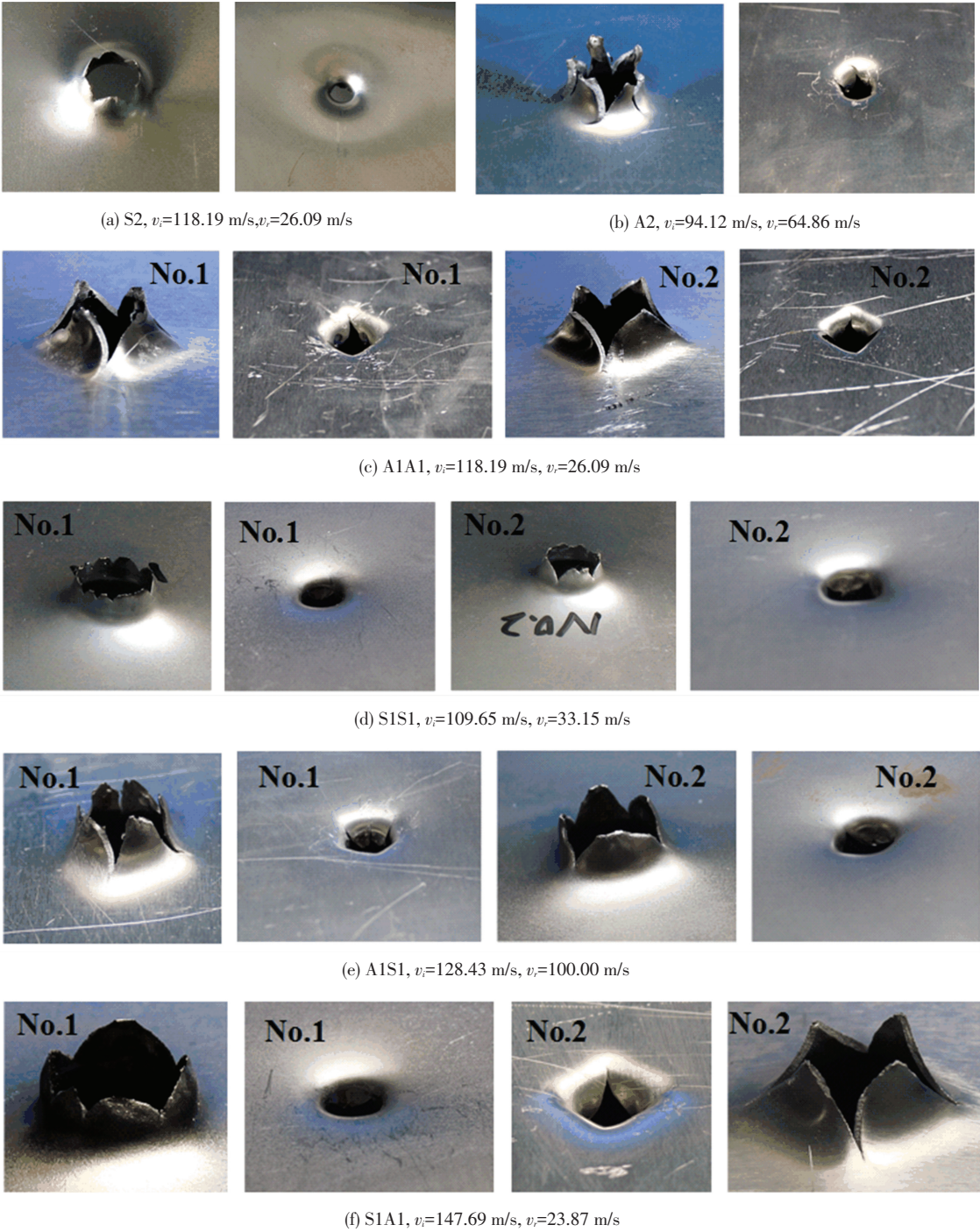


图 5 靶件失效形式

Fig.5 Failure mode of plates

图 5 给出了不同撞击条件下典型靶体失效样件的正反面,分析靶体失效机理是探究其抗撞击特性的重要组成部分,其中 No.1 和 No.2 分别表示撞击方向的第 1、2 层板.靶体的主要失效模式为局部化的花瓣开裂,弹体在撞击过程中向前运动,推动靶体材料向四周扩展,当靶体材料承受的环向力超过其

强度极限时,材料产生开裂.Q235 钢的韧性高而脆性低于 2A12-T4 铝合金,所以 2A12-T4 铝合金板表现出一定的脆性撕裂,而 Q235 钢板表现出一定的韧性颈缩.从图 5 (a)、(b) 可以清晰的看出, 2A12-T4 铝合金板的花瓣开裂特征高于 Q235 钢,并且表现出明显的脆性,而 Q235 钢板表现出一定的

韧性颈缩撕裂.此外,Q235 钢板的结构变形大于 2A12-T4 铝合金板.

对于双层板,2A12-T4 铝合金板第 1、2 层板的失效模式差别不明显,均为 4 个花瓣,整体结构变形特别小,如图 5(c) 所示.Q235 钢第 1、2 层板的花瓣开裂特征不明显,花瓣均从底部上到顶部呈现 90° 弯曲,花瓣开裂主要位于顶部.此外,两者的失效模式有所差异,第 1 层板的花瓣数量多于第 2 层板而尺寸小于第 2 层板,并且第 1 层板在弹体和第 2 层板挤压作用发生变薄,如图 5(d) 所示.当 2A12-T4 铝合金板和 Q235 钢板混合成双层板时,第 1 层板的裂纹数量均小于第 2 层板,这是因为在撞击过程中两层板之间存在作用力(包括挤压力和摩擦力).板间作用力作用在第 1 层板的背面,对第 1 层板裂纹的扩展而言是阻力,在一定程度抑制了大裂纹的产生,导致形成一些小裂纹.但是,第 2 层板后面不存在约束,不存在裂纹扩展的阻力.

基于上述分析可以发现,靶体由单层板分层到双层板,靶体主要失效及耗能形式不发生改变,只是降低了靶体整体刚度<sup>[15]</sup>.因此,靶体刚度降低必定会造成其抗侵彻性能的降低.

靶板弯曲变形所耗功为<sup>[16]</sup>

$$W_B = \frac{\pi h_0^2}{6} Y \sum_{n=1}^N R_n \Delta \theta_n.$$

(3)

式中: $R_n$ 为靶板的有效直径; $h_0$ 为靶板的厚度; $n$ 为多层靶中第  $n$  层板; $\theta_n$ 为第  $n$  层板变形前后的夹角; $\Delta \theta_n$ 为相邻两层板变形前后的夹角之差值; $Y$ 为流应力.

由式(3)可知,靶板弯曲变形耗功与其厚度二次方成正比关系,分层必然在一定程度上降低靶体的弯曲变形耗功.因此,分层降低靶体的弹道极限.

由图 5 可以发现,卵形弹撞击单层及双层薄靶时,靶体的主要模式为花瓣开裂,其主要耗能方式为拉伸和弯曲,所以靶体的强度与断裂韧性极大地影响其抗撞性能,提高靶体材料强度与断裂韧性均能增加其抗撞击性能.表 4 给出了 2A12-T4 铝合金及 Q235 钢部分材料参数.材料在拉伸和弯曲过程中的变形耗能为应力对应变的积分,2A12-T4 铝合金强度比 Q235 钢提高 23.3%,但是 Q235 钢的断裂应变比 2A12-T4 铝合金提高 352%,所以 Q235 钢在撞击过程中变形耗能高于 2A12-T4,这可能是 Q235 钢板弹道极限高于 2A12-T4 铝合金板的原因,如图 6 所示.

强度高的单层薄板(硬板),其失效模式表现出一定的脆性撕裂,而强度低的单层薄板(软板),其失效模式表现出一定的韧性颈缩.因此,硬板的结构

变形小于软板.软板叠放在硬板前面组成双层靶,由于软板的缓冲作用及双层靶间的相互作用力,减小了第 2 层硬板的脆性碎裂,增加其结构变形,这有利于提高靶体的抗撞击性能,此为第 1 种影响.但是,由于第 2 层硬板强度高,撞击过程中会限制第 1 层板软板的结构变形,不利于第 1 层板发生塑性变形而吸收弹体动能,这将降低靶体的抗撞击性能,此为第 2 种影响.但是,硬板叠放在软板前面组成的双层靶这两种影响不明显.撞击实验中靶体是采用螺栓对 8 点固定,靶体在撞击过程中会产生很大的振动,这会减小第 1 种影响.因此,第 2 种影响大于第 1 种影响,硬板安装在软板前面能够提高靶体的抗撞击性能,这与文献[10-11]数值模拟结论相反,而与文献[11]实验结果一致.文献[11]撞击实验中弹体发生变形及断裂,但是数值模拟过程并未考虑弹体的变形及失效,两者之间不相符合.

表 4 靶体材料参数

Tab.4 Target material parameters

| 靶板材料 | 参考应变率   | 屈服强度/<br>MPa | 抗拉强度/<br>MPa | 断裂应变 |
|------|---------|--------------|--------------|------|
| 2A12 | 0.001 0 | 400          | 635          | 0.23 |
| Q235 | 0.065 2 | 294          | 515          | 1.04 |

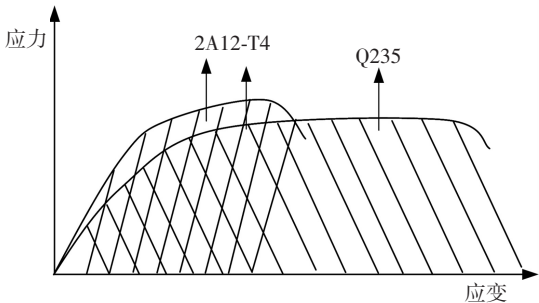


图 6 撞击过程中靶体材料变形耗能示意

Fig.6 Schematic diagram of energy dissipation of target material during impacting

3 结 论

1) 薄板在弹体撞击作用下主要发生花瓣开裂和弯曲失效破坏,靶板具体的失效模式还与其叠层顺序相关.

2) 基于本研究工况,对于中低强度的薄靶,靶体分层降低其抗撞击性能,并且双层钢靶的弹道极限高于双层铝靶.但是,如果考虑靶体质量,单层铝合金靶单位质量的抗撞击效率最高,而双层钢靶的抗撞击效率最低.

3) 靶板的材料安装顺序能够影响其抗撞击性能,硬板在前软板在后排能够提高双层靶的抗撞击性能.

参考文献

[1] MAROM I, BODNER S R. Projectile perforation of multi-layered beams[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1979, 21(8): 489-504. DOI: 10.1016/0020-7403(79)90011-0.

[2] 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. DOI: 10.1016/0734-743X(83)90010-6.

[3] ALMOHANDES A A. Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates[J]. Composites Part B: Engineering, 1996, 27(5): 447-458. DOI: 10.1016/1359-8368(96)00011-X.

[4] 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. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.09.034.

[5] 郝鹏, 卿光辉, 李建峰, 等. 2A12 铝合金薄板对卵形头弹抗冲击性能研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(17): 19-25. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.17.004.

HAO Peng, QING Guangfei, LI Jianfeng, et al. The ballistic resistance of 2A12 thin plates against ogival-nosed projectiles impact[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(17): 19-25. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.17.004.

[6] DENG Yunfei, ZHANG Wei, YANG Yonggang, et al. The ballistic performance of metal plates subjected to impact by projectiles of different strength[J]. Materials & Design, 2014, 54: 1056-1067. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.09.023.

[7] ZHANG Wei, DENG Yunfei, CAO Zongsheng, et al. Experimental investigations on the ballistic performance of monolithic and layered metal plates subjected to impact by blunt rigid projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49: 115-129. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.06.001.

[8] DENG Yunfei, ZHANG Wei, CAO Zongsheng. Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against hemispherical-nosed projectiles impact[J]. Materials and Design, 2012, 41: 266-281. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.05.021.

[9] DENG Yunfei, ZHANG Wei, CAO Zongsheng. Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against ogival-nosed rigid projectiles impact[J]. Materials and Design, 2013, 44: 228-239. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.048.

[10] FLORES-JONHNSON 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. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.08.005.

[11] TENG X, WIERZBICKI T, HUANG M. Ballistic resistance of double-layered armor plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8): 870-884. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.01.008.

[12] 魏刚. 金属动能弹变形与断裂特性及其机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

WEI Gang. Investigation of deformation and fracture behavior associated mechanisms of the metal kinetic energy projectiles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[13] 邓云飞, 李剑峰, 孟凡柱. Q235 钢单层及接触式多层板对卵形头弹抗侵彻特[J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 66-71. DOI: 10.3901/JME.2015.17.066.

DENG Yunfei, LI Jianfeng, MENG Fanzhu. Ballistic performance of Q235 metal plates subjected to impact by ogival-nosed projectiles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17): 66-71. DOI: 10.3901/JME.2015.17.066.

[14] 马晓青, 韩峰. 高速碰撞动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 240-243.

[15] ZUKASJ A, SCHFFLER D R. Impact effects in multilayered plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(19): 3321-3328. DOI: 10.1016/S0020-7683(00)00260-2.

[16] WOODWARD R L, CIMPOERU S J. A study of perforation of aluminum laminate targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(3): 117-131. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00034-1.

(编辑 张 红)