第 38 卷　第 1 期
2018 年 1 月

爆　炸　与　冲　击
EXPLOSION AND SHOCK WAVES

Vol. 38，No. 1
Jan.，2018

DOI：10.11883/bzycj-2016-0131　　文章编号：1001-1455(2018)01-0066-10

球形破片侵彻下钢/铝复合靶板的失效模式与吸能机理*

周　楠[1]，王金相[2]，张亚宁[3]，郭海涛[1]，蒋　敬[1]

（1. 南京森林警察学院刑事科学技术系，江苏 南京 210023；
2. 南京理工大学瞬态物理重点实验室，江苏 南京 210094；
3. 中国北方车辆研究院，北京 100072）

摘要：为研究复合靶板自身结构对其防护性能的影响，针对面密度相同的两层钢/铝、三层钢/铝/钢爆炸复合板以及均质钢板，采用系列弹道实验和 LS-DYNA3D 非线性有限元程序分析了复合靶板在球形破片侵彻作用下的失效模式和吸能机理，讨论了靶板层数、厚度和界面结合情况对失效模式的影响。研究结果表明：较其他因素而言，界面结合状态对靶板失效模式的影响最明显，当界面结合良好时，各层靶板均发生剪切冲塞破坏，而当结合界面发生拉伸失效时，较薄的背板以延性扩孔破坏为主；随着靶板总厚度的增大，靶板更易发生剪切冲塞破坏；当靶板的面密度和总厚度分别相等时，三层复合靶板的防护性能优于双层靶板。

关键词：失效模式；吸能机理；爆炸复合板；结合界面

中图分类号：O385　　**国标学科代码：**13035　　**文献标志码：**A

在轻质防护领域中，随着毁伤元件侵彻能力的不断提高，传统的均质金属靶板越来越多地被多层复合板所取代，以达到提高其防护性能的目的。到目前为止，学者们就多层复合板代替均质靶板的有效性已开展了诸多有益的探讨。

Almohandes 等[1]利用直径为 7.62 mm 的标准弹侵彻不同组合钢靶，实验研究发现：当靶板的总厚度相同时，均质钢板较多层钢板具有更有效的防护性能。Zukas 等[2]通过开展弹道实验研究也得到类似的结论，指出当靶板的总厚度保持不变时，随着靶板层数的增加，复合靶板的防护性能不断下降。此类观点认为，对于总厚度相同的靶板，靶板厚度对破片侵彻动能消耗的影响程度高于靶板层数，所以相较于均质靶板材料，靶板的分层设计反而降低了其防护性能。相反的，Corran 等[3]和 Dey 等[4]的研究指出：在钝头弹丸的侵彻作用下，当复合靶板的总厚度相同时，多层复合靶板的抗侵彻性能优于单层均质靶板，此类观点认为在多层靶板设计中，前列靶板对弹体侵彻动能的消耗以及靶板对弹体的损耗变形有利于复合靶板防护性能的提高。此外，Ben-Dor[5]、Dey 等[6]和 Manes 等[7]等也针对复合靶板的抗侵彻性能和侵彻理论计算模型开展了大量研究，研究了均质、双层及多层靶板在弹丸侵彻作用下的变形和吸能机理，考虑了靶板层厚和层数对其抗侵彻性能的影响。国内学者也对均质和多层复合靶板的抗侵彻性能和毁伤机理也开展了相关理论和实验研究工作[8-11]。陈小伟等[12]开展弹道实验研究了多层复合靶板的断裂准则以及弹头形状对复合靶板抗侵彻性能的影响；宋博等[13]研究了分层材料的不同排列次序对透射冲击波强度的影响，指出靶板的排列顺序直接影响其防护性能。

从上述研究中不难看出，靶板的材料、组合方式以及弹体形状、入射角等因素均影响复合靶板的毁伤模式和防护性能，且未得到一致性结论，所以深入研究复合靶板的毁伤模式和吸能机理对其防护性能

* **收稿日期：**2016-05-13；**修回日期：**2016-08-10
基金项目：国家自然科学基金项目(11602113，11272158)；
中央高校基本科研业务费专项基金项目(LGZD201603)；
江苏省自然科学基金项目(BK20161055，BK20151353)
第一作者：周　楠(1986—　)，男，博士，讲师，nudge@163.com。

提高具有重要意义。由于多层爆炸复合靶板的抗侵彻性能优于单层均质靶板[10]，因此采用爆炸焊接技术制备面密度相同的层状复合板，通过开展系列弹道侵彻实验并结合数值计算，研究该复合板在球形破片侵彻作用下的失效模式，分析不同失效模式的吸能机理，以期为多层复合板防护性能分析提供依据。

1　弹道侵彻实验

为探讨复合靶板层数 n 和厚度 H 等因素对其在球形破片侵彻作用下失效模式和吸能机理的影响，采用爆炸焊接技术制备具有相同面密度（39.2 kg/m^2）的双层钢/铝和三层钢/铝/钢复合靶板，靶板组合方式与厚度分布如表 1 所示，表中 S4Al2.9 表示厚4 mm的钢板和厚 2.9 mm 铝板的组合，共制备 4 组多层复合靶板。典型复合靶板结合界面如图 1 所示，呈现规律的波状结合界面，形成机械式咬合，所以较传统层合板而言，爆炸焊接复合靶板具有较强的面面结合强度。

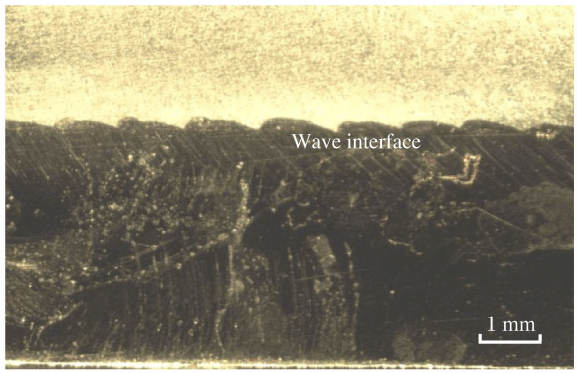

图 1　靶板结合界面体视显微形貌

Fig. 1　Stereomicroscopic images of welded surface of target

在此基础上，通过开展系列弹道实验研究复合靶板的失效模式和吸能机理。实验中采用 14.5 mm线膛枪发射直径 6 mm 的钢质球形破片垂直侵彻复合靶板；靶板用专用夹具固定在靶架上；弹托经弹托回收器回收；采用印刷电路板作为测速靶分别置于靶板前后，用于测量破片入射速度和剩余速度，印刷电路板可较好地消除速度较低的塞块对破片剩余速度测量的影响。破片贯穿靶板后，由弹体回收装置进行回收，实验装置和破片结构如图 2～3 所示。为有效分析复合靶板的失效模式和吸能机理，针对每组靶板开展 5～7 次弹击实验，破片贯穿复合靶板前后的初速 v_0 和剩余速度 v_r 如表 2 所示。

图 2　弹道实验装置

Fig. 2　Ballistic experiment equipment

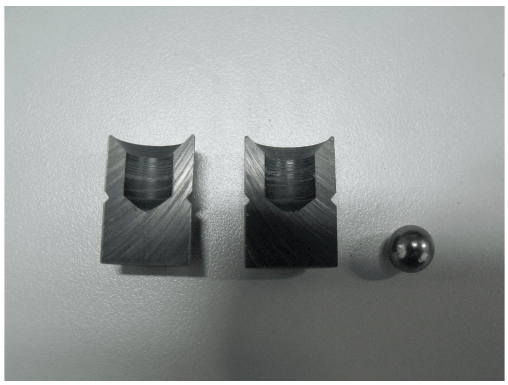

图 3　球形破片

Fig. 3　Spherical fragments

表 1　靶板的组合方式

Table 1　Plate thickness and combination

n	靶板组合	h/mm			H/mm
		Q235	LY12	Q235	
1	S5	5.0	—	—	5.0
2	S4Al2.9	4.0	2.9	—	6.9
2	S3Al5.8	3.0	5.8	—	8.8
2	S2Al8.7	2.0	8.7	—	10.7
3	S2Al2.9S2	2.0	2.9	2.0	6.9

表 2 不同组合靶板弹道侵彻实验结果

Table 2 Experimental results for different targets in ballistic experiments

单位:m/s

靶板组合	第 1 发		第 2 发		第 3 发		第 4 发		第 5 发	
	v_0	v_r	v_0	v_r	v_0	v_r	v_0	v_r	v_0	v_r
S5	717.2	85.2	775.2	154.2	816.8	—	—	—	—	—
S4Al2.9	699.9	0	713.3	0	747.7	0	769.2	20.3	902.8	204.2
S3Al5.8	845.5	0	876.9	0	888.9	0	891.8	C	905.9	62.8
S2Al8.7	695.2	0	798.2	C	937.2	65.4	979.3	86.8	1 007	89.2
S2Al2.9S2	873.9	0	876.9	0	893.5	C	920.4	215	942.0	252.7

注:“C” 表示靶板处在临界穿透状态,破片的剩余速度为零。

2 靶板失效模式分析

2.1 双层钢/铝复合板

在球形破片的侵彻作用下,复合靶板呈现不同的失效模式。对于双层钢/铝复合靶板,由于靶板各层的厚度 h 分布不同,所以当保持靶板面密度相同时(39.2 kg/m^2),靶板的总厚度 H 也会不同,如表 1 所示。复合靶板在球形破片垂直侵彻下毁伤形貌的典型实验结果如图 4 所示,图中依次给出了靶板的正面、背面和弹孔毁伤形貌。

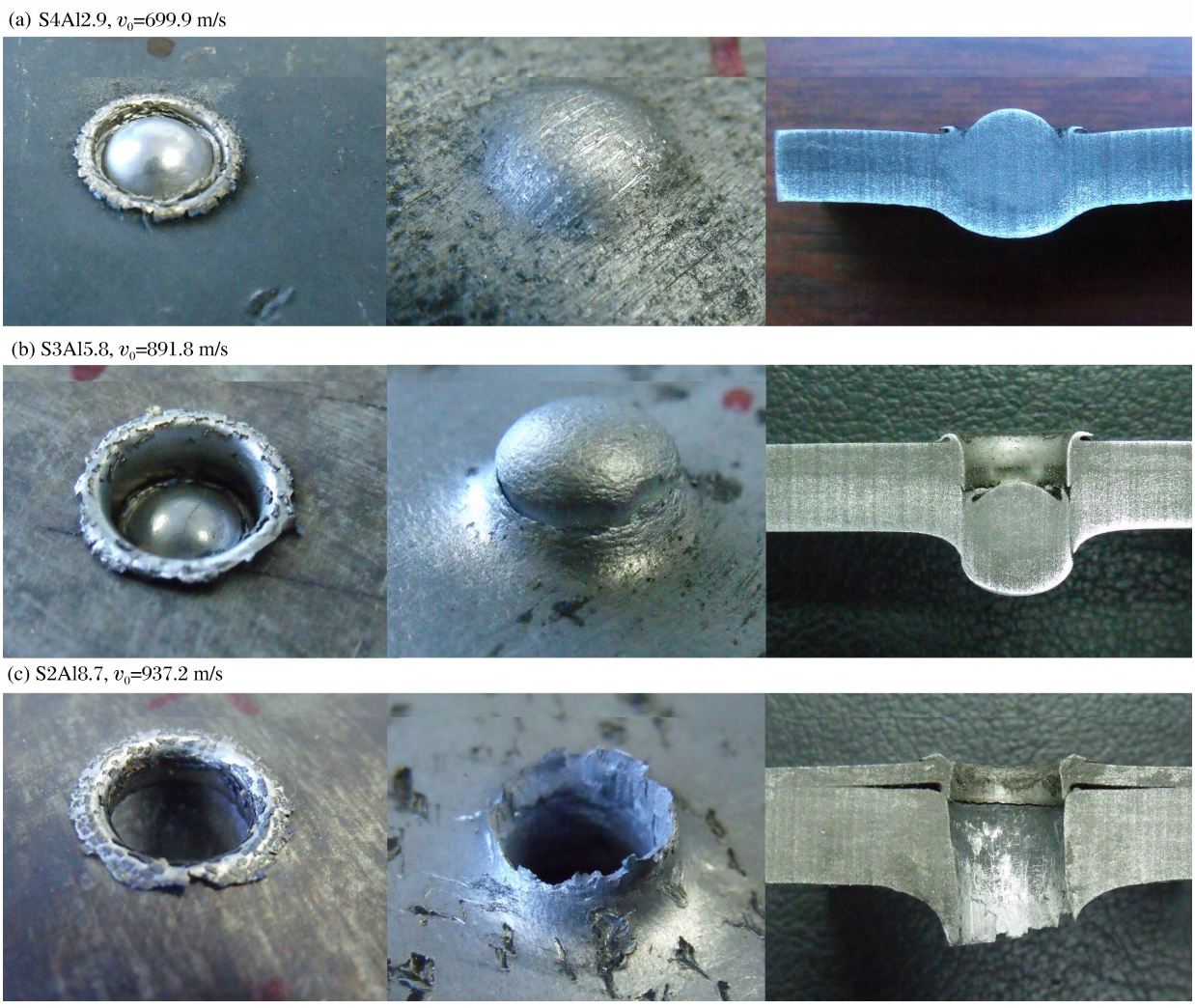

图 4 双层钢/铝复合靶板的典型失效模式

Fig. 4 Typical failure modes of two-layer steel/aluminum plates

从图 4 中可以看出，靶 S4Al2.9 处于未贯穿状态；靶 S3Al5.8 处在临界穿透状态，也就是说，当破片的入射速度再适当提高，靶板将被完全穿透；靶 S2Al8.7 处于完全贯穿状态。通过对弹道实验结果的观察可得，在球形破片的侵彻作用下，钢面板在撞击区域附近发生局部应力集中现象，形成的应力高于其最大屈服应力，钢面板发生塑形变形，靶板材料在破片的挤压下向上翻转，形成明显的唇边；与此同时，绝热剪切破坏在钢靶内部开始发生，随着破片侵彻的深入，铝背板约束了钢面板在破片侵彻方向上的材料位移，环形绝热剪切带逐渐形成；当复合靶板的结合界面未发生拉伸撕裂破坏时，铝背板在球形破片的侵彻作用下也发生剪切冲塞破坏，随着破片的继续侵彻，冲塞塞块完全形成，至此，靶板被完全贯穿。而当结合界面发生拉伸失效时，如图 4(c)所示，铝背板发生一定程度的延性变形，但由于其厚度较大，所以仍以剪切冲塞破坏为主。图 5 给出了球形破片贯穿靶板 S2Al8.7 的数值模拟结果，较好地反映了绝热剪切带的形成和发展过程，同时，靶板失效模式的数值结果与图 4(c)中的实验结果吻合良好，说明本文中所采用的数值算法可较好地再现复合靶板的失效模式。

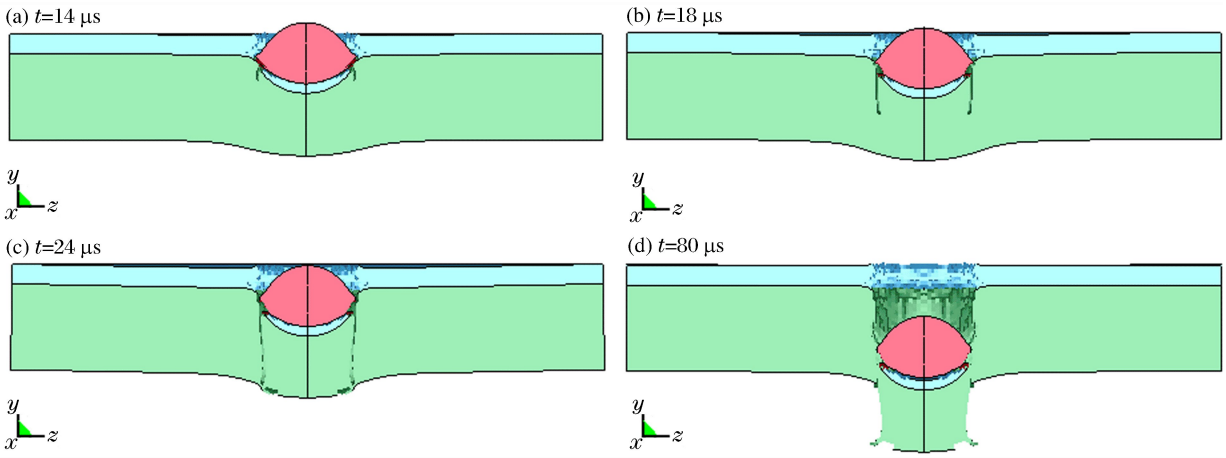

图 5　球形破片贯穿靶板数值模拟结果

Fig. 5　Simulation of spherical projectile penetrating the target

从图 4 中还可以看出，在球形破片垂直侵彻作用下，随着靶板总厚度的不断增大，剪切冲塞现象越来越明显，在此过程中，由于被侵彻的靶板较厚，球形破片也发生了一定程度的变形，实验中收集的塞块和残余破片形貌以及数值结果如图 6 所示。在侵彻过程中，破片前端与靶板直接接触，在冲击载荷的作用下，球形破片发生明显的塑性变形，呈扁平状，如图 6(a)、(b)所示，上方为破片前端，数值模拟结果和实验结果吻合良好。结合图 5 中数值模拟结果，通过观察图 6(c)中塞块的形貌可以看出，钢面板在破片的冲击过程中首先发生剪切破坏并形成塞块，与此同时，铝背板在破片和钢塞块的共同作用下也发生剪切破坏，二者之间仍保持良好的界面结合强度，且形成塞块的直径与球形破片直径相当，无明显变大。可以看出，当结合界面保持良好时，剪切冲塞破坏是双层靶板的主要失效机制。

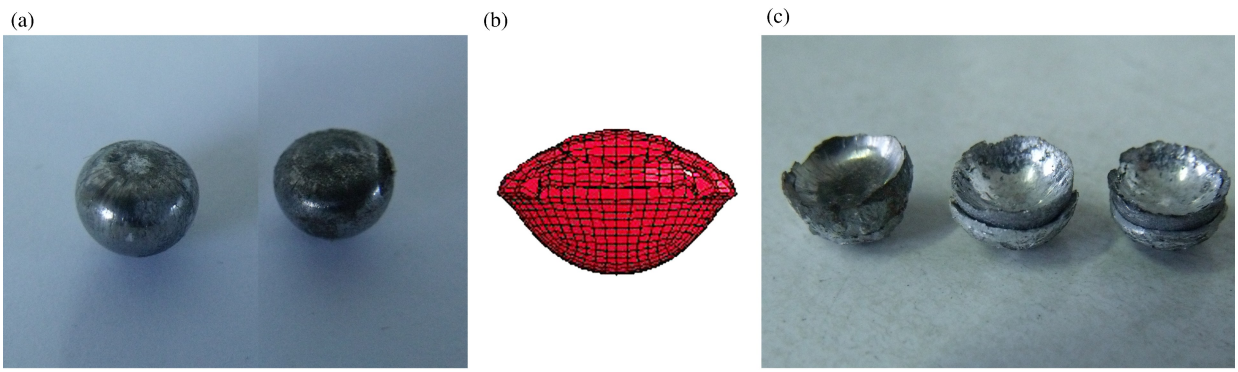

图 6　残余破片和塞块形貌

Fig. 6　Deformed fragments and shearing plugs

2.2 三层钢/铝/钢复合板

对于三层钢/铝/钢复合靶板而言，图 7 给出了靶板 S2Al2.9S2 在球形破片侵彻作用下的失效模式，分别为未贯穿状态和完全穿透状态。与双层钢/铝复合靶板相似的是：钢面板材料在破片的冲击作用下形成明显的唇边，同时发生剪切破坏；在侵彻过程中，钢面板与铝夹板之间保持良好的界面结合，所以铝夹板的失效模式也以剪切冲塞失效为主；随着破片和塞块的共同前进，铝夹板和钢背板间的结合界面发生明显的拉伸撕裂破坏，钢背板与铝夹板分离，此时由于铝夹板材料没有钢背板对其的约束存在，所以铝夹板在发生剪切破坏的同时，材料的延性拉伸变形也逐渐变大，这也将消耗更多的侵彻动能；需要指出的是，当铝夹板和钢背板间的结合界面拉伸失效时，钢背板发生明显的延性扩孔变形。所以说，靶板层间结合界面失效与否直接影响各层靶板的失效模式。

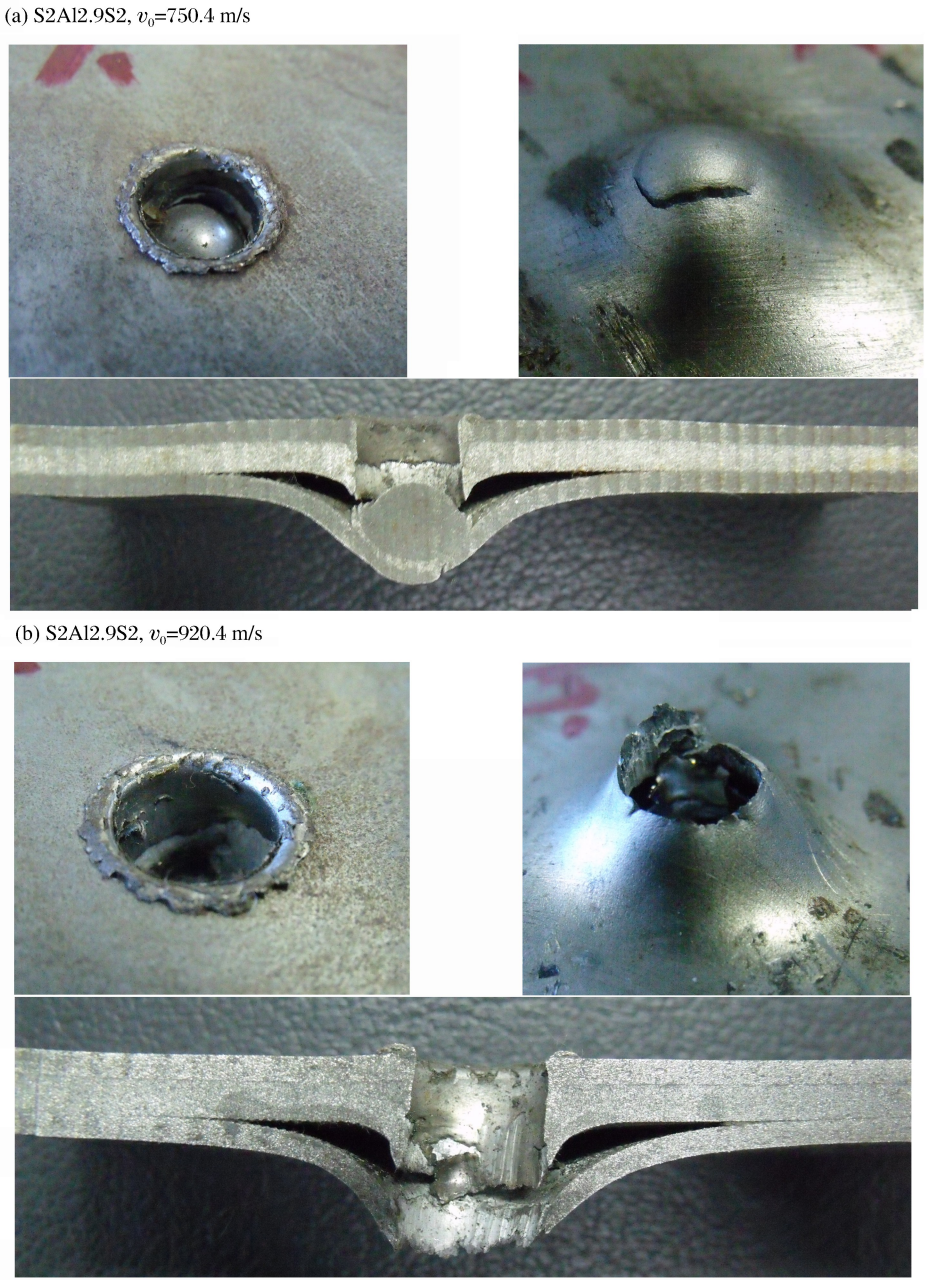

图 7 三层钢/铝/钢复合靶板的典型失效模式

Fig. 7 Typical failure modes of three-layer steel/aluminum/steel plates

相较多层复合靶板而言，均质靶板的失效模式较为单一，在球形破片的侵彻作用下，单质钢靶板主要发生剪切冲塞破坏，弹孔正反面失效模式如图 8 所示。靶板正面依然形成明显的唇边，当靶板未被穿透时，靶板背面形成一定的鼓包，如图 8(a)所示，当破片的速度进一步提高时，靶板被完全贯穿，由于钢的硬度高，且厚度较大，所以钢靶板发生剪切冲塞破坏，靶板背面无明显的延性变形，这也是与多层靶板中钢背板失效模式的不同之处。类似地，Dey 等[6] 和 Chen 等[14] 也指出钢板在平头弹丸的侵彻下多发生剪切冲塞失效，这与本文中得到的结论一致。

图 8　单层钢板的典型失效模式

Fig. 8　Typical failure modes of three-layer steel/aluminum/steel plates

3　靶板吸能机理分析

3.1　剪切冲塞耗能

通过对复合靶板失效模式的分析可以看出，靶板的层数、厚度和界面结合情况直接影响复合靶板的失效模式，进而影响其吸能机理。对于双层靶板而言，当靶板的面密度相同时，其厚度分布和总厚度均不同，且随着钢面板厚度的减小，铝背板的厚度不断增加，靶板的总厚度也随之变大。当靶板结合界面发生拉伸失效时，虽然铝背板材料的延性较好，但由于其厚度较大，仍然发生剪切冲塞破坏。所以，对于背板较厚的双层复合靶板，结合界面是否发生拉伸失效对靶板失效模式的影响较弱，双层靶板均发生剪切冲塞破坏以吸收破片的侵彻动能。

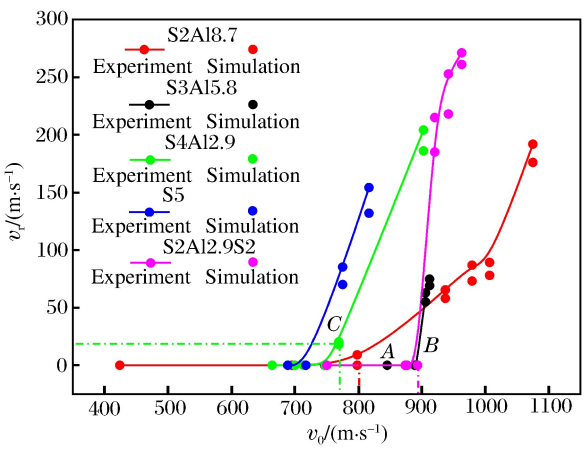

图 9　破片侵彻双层靶板初速与剩余速度关系

Fig. 9　Relation between initial velocity and residual velocity

图 9 给出了球形破片侵彻不同组合靶板速度关系曲线的实验结果和数值计算结果，二者吻合良好。

从图 9 中可以看出，当破片初速低于复合靶板的弹道极限速度时，靶板未被贯穿，此时破片的剩余速度为零，如图中水平段曲线所示。随着初速的提高，靶板被完全贯穿，图中点 A、B、C 分别为靶板 S2Al8.7、S3Al5.8、S4Al2.9 被贯穿时的最低速度的实验值，对应的初速分别为 798.2、891.8 和 769.2 m/s，其中 A、B 对应的为靶板临界贯穿状态。也就是说，对于同一破片而言（即破片质量相同），贯穿靶 S4Al2.9 需要的初始动能最小，而贯穿靶 S3Al5.8 需要的初始动能最大。所以，在 3 组双层复合靶板中，按防护性能由高到低的排序依次是 S3Al5.8、S2Al8.7、S4Al2.9，三层靶板 S2Al2.9S2 的临界穿透速度实验值稍高于双层靶板 S3Al5.8 的，且双层和三层复合靶板的防护性能均优于单层靶板。结合图 4 中靶板的失效模式分析可得，靶 S3Al5.8 的剪切失效消耗更多的侵彻动能；当考虑靶板厚度影响时，随着靶板总厚度增大，靶板的防护性能并未一直提高，所以靶板的总厚度和厚度分布共同影响其失效模式，进而影响靶板对破片动能的吸收机理，这部分工作有待在丰富实验工况的基础上深入研究。

3.2 延性扩孔耗能

三层复合靶板在球形破片的侵彻下，钢面板与铝夹板发生剪切冲塞破坏。与双层靶板不同的是，铝夹板与钢背板结合界面更易发生拉伸失效，此时钢背板以延性扩孔破坏为主。所以，三层复合靶板主要通过钢面板和铝夹板的剪切耗能、钢背板的延性扩孔耗能以及层间结合界面的拉伸撕裂耗能来吸收破片的侵彻动能。图 10(a)给出了球形破片侵彻三层靶板 S2Al2.9S2 和双层靶板 S4Al2.9 的初始动能 E_0 与剩余动能 E_r 关系，球形破片质量为 2.07 g。当 2 种组合靶板的面密度以及钢、铝板总厚度分别相等时，从图中可以看出，破片贯穿三层靶板所需的初始动能远大于双层靶板，实验值分别如图中 A、B 点所示，对应的初始动能值为 826.3 和 612.4 J，前者较后者提高了 34.9%，结合靶板的失效模式可以看出，三层靶板发生的层间拉伸撕裂破坏也将消耗破片的部分侵彻动能，但所占总耗能比例尚需深入量化研究。

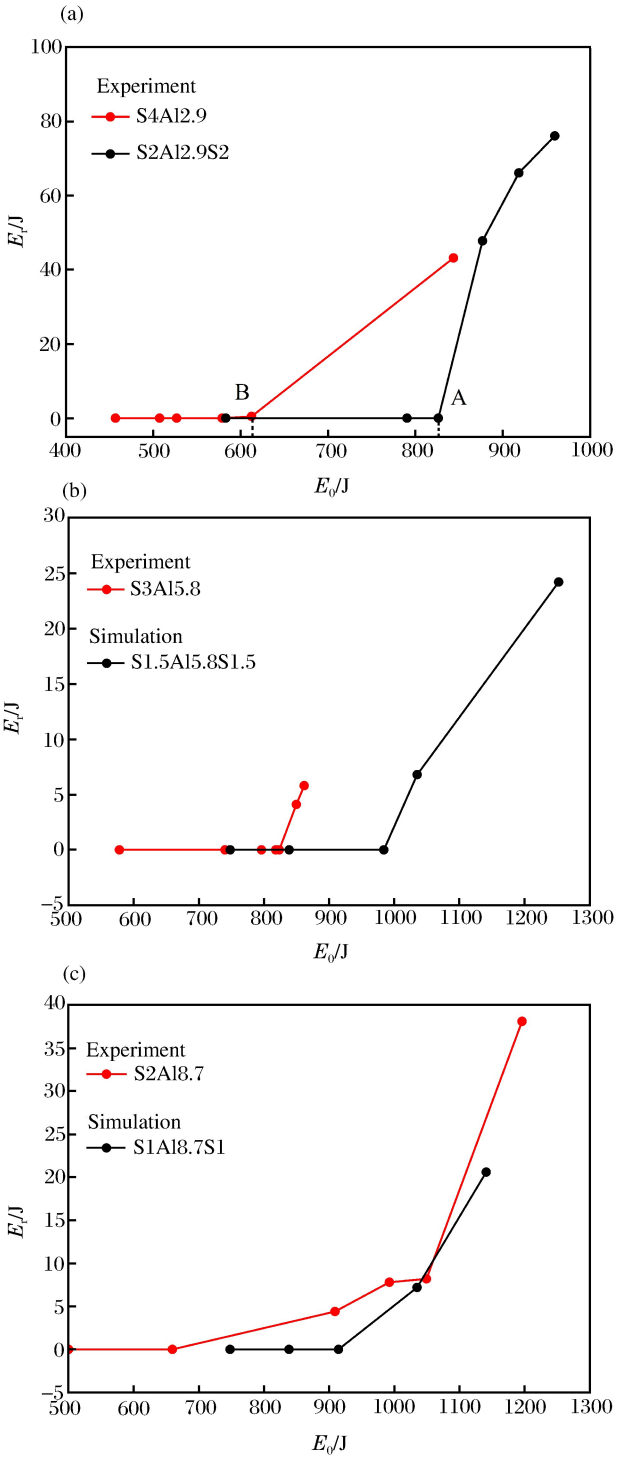

图 10 破片侵彻双层靶板初速与剩余速度的关系

Fig. 10 Relation between initial velocity and residual velocity

基于实验和数值计算结果，图 10(b)和(c)给出了球形破片侵彻三层靶板 S1.5Al5.8S1.5 和双层靶板 S3Al5.8 以及三层靶板 S1Al8.7S1 和双层靶板 S2Al8.7 的初始动能 E_0 与剩余动能 E_r 的关系曲线。可以看出，球形破片贯穿三层靶板所需的初始动能均大于双层靶板。所以说，当靶板的面密度和总厚度分别相等时，综合考虑三层靶板失效模式对吸能机理的影响，三层靶板的防护性能优于双层靶板。

3.3　耗能理论分析

在剪切冲塞过程中，由于球形破片侵彻而形成的塞块与靶板做相对运动时所受阻力主要来自于剪应力，认为剪应力为靶板材料的剪切屈服极限 τ_y[15]，并且均匀分布在塞块与靶板的接触面上，忽略破片与靶板孔壁间的摩擦，通过对收集的冲塞块直径的测量，同球形破片直径接近，因此可忽略破片形状的影响。则破片侵彻钢面板所消耗的能量 E_1 即为剪切力在此过程中所做的功，即：

$$E_1=\int_0^{h_1}2\pi R(h_1-x)\tau_y\mathrm{d}x=\pi R\tau_y h_1^2 \tag{1}$$

式中：R 为弹孔半径，根据对弹孔实验结果的测量，其值可近似为球形破片半径，τ_y 为靶板材料的剪切屈服极限，h_1 为靶板厚度，x 为破片距靶板背面距离。

由于球形破片半径 R 与靶板厚度 h 之比 $R/h\leqslant 2$，则由泰勒扩孔理论可得，在破片的侵彻作用下，钢背板的扩孔变形能[16]，即钢背板的延性扩孔耗能为：

$$E_2=\int_0^{R}2\pi rh\,|\sigma_r|\,\mathrm{d}r=\int_0^{R}2\pi r(2.66h_2)\,\frac{\sigma_y}{2}\mathrm{d}r=1.33\pi R^2\sigma_y h_2 \tag{2}$$

式中：h_2 为钢背板厚度。

在前期关于靶板毁伤耗能理论研究工作的基础上[17]，进一步分析同一靶板剪切冲塞耗能和延性扩孔耗能所占比例。结合实验结果，钢板或铝板在不同组合复合靶板中会发生剪切冲塞破坏或延性扩孔破坏，对于钢板而言，其剪切冲塞耗能和延性扩孔耗能比可表示为：

$$\frac{E_1^{(s)}}{E_2^{(s)}}=\frac{\pi R\tau_y h^2}{1.33\pi R^2\sigma_y h} \tag{3}$$

式中：$E_1^{(s)}$ 为钢板发生剪切冲塞破坏时所消耗的能量，$E_2^{(s)}$ 为钢板发生延性扩孔破坏时所消耗的能量。

类似地，对于铝板而言，其剪切冲塞耗能和延性扩孔耗能比可表示为：

$$\frac{E_1^{(a)}}{E_2^{(a)}}=\frac{\pi R\tau_y h^2}{1.33\pi R^2\sigma_y h} \tag{4}$$

式中：$E_1^{(a)}$ 为铝板发生剪切冲塞破坏时所消耗的能量，$E_2^{(a)}$ 为铝板发生延性扩孔破坏时所消耗的能量。

当钢板或铝板厚度一定时，将文献[17]中的材料性能参数代入式(3)和(4)，无量纲处理后可得：

$$\frac{E_1^{(s)}}{E_2^{(s)}}\approx\frac{h}{5} \tag{5}$$

$$\frac{E_1^{(a)}}{E_2^{(a)}}\approx\frac{h}{10} \tag{6}$$

由式(5)和(6)可以看出，靶板厚度的不同，直接影响不同耗能机理所占总耗能比例。铝板发生延性扩孔破坏所消耗的能量远大于剪切冲塞破坏所消耗的能量，在本文讨论的靶板厚度范围内，铝板厚度最大为 8.7 mm，此时靶板发生延性扩孔破坏所消耗的能量较剪切冲塞破坏所消耗的能量相差最小。相较于铝板，相同厚度的钢板发生剪切冲塞破坏所消耗的能量更大。所以，在双层靶板的结构设计中，常采用钢板作为面板、铝板作为背板，以提高靶板的防护性能。

通过上述分析可知，在球形破片的垂直侵彻下，双层靶板主要以剪切冲塞破坏为主；对于三层靶板，当靶板界面结合良好时，各层靶板材料主要以剪切破坏为主；而当结合界面发生拉伸失效时，对于厚度较薄的背板更易发生延性扩孔破坏，但当靶板厚度不断增大时，靶板则发生明显的剪切冲塞破坏。与传统复合靶板不同的是，爆炸焊接复合靶板在结合界面处形成规律的锯齿波形，进而形成牢固的结合界面，而在侵彻过程中，结合界面处也发生明显的拉伸撕裂破坏。所以，靶板的剪切冲塞耗能和延性扩孔耗能以及结合界面的拉伸撕裂耗能是靶板吸收破片侵彻动能的主要机理。靶板的强度和厚度是影响靶板防护性能的主要因素，其值的增大有利于靶板防护性能的提高。在考虑复合靶板轻质化的前提下，应综合考虑靶板的层数、厚度分布及各层材料力学性能等因素对靶板防护性能的影响，以达到轻质、高效的防护目的，这也是需要继续开展与完善的工作。

4 结 论

本文中通过开展弹道侵彻实验和数值模拟，研究了面密度相同的两层钢/铝、三层钢/铝/钢爆炸复合靶板以及均质钢板在球形破片侵彻作用下的失效模式和吸能机理，讨论了靶板层数、厚度和界面结合情况对失效模式和吸能机理的影响，得到的主要结论如下：

(1)较其他影响因素而言，靶板界面结合状态对靶板失效模式的影响最明显。当界面结合良好时，各层靶板均发生剪切冲塞破坏，而当结合界面发生拉伸失效时，较薄的背板发生延性扩孔破坏。

(2)当复合靶板的面密度相同时，随着靶板总厚度的增大，剪切冲塞破坏越来越明显；复合靶板的剪切冲塞耗能和延性扩孔耗能以及结合界面的拉伸撕裂耗能是靶板吸收破片侵彻动能的主要机理。

(3)当靶板的面密度和总厚度分别相等时，三层复合靶板的防护性能优于双层靶板。需要指出的是，多层复合靶板中界面拉伸撕裂耗能的量化分析将成为未来工作的研究重点。

参考文献：

[1] ALMOHANDES A A, ABDEL-KADER M S, ELEICHE A M. Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates[J]. Composite Part B, 1996,27(5):447-458.

[2] ZUKAS J A, SCHEFFLER D R. Impact effects in multilayered plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001,38(19):3321-3328.

[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] DEY S, BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, et al. On the influence of constitutive relation in projectile impact of steel plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34(3):464-486.

[5] BEN-DOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. Effect of air gaps on the ballistic resistance of ductile shields perforated by non-conical impactors[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2006,1(2):279-299. DOI:10.2140/jomms.2006.1.279.

[6] DEY S, BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, et al. On the influence of fracture criterion in projectile impact of steel plates [J]. Computational Materials Science, 2006,38(1):176-191.

[7] MANES A, LUMASSI D, GIUDICI L, et al. An experimental-numerical investigation on aluminum tubes subjected to ballistic impact with soft core 7.62 ball projectiles[J]. Thin Wall Structures, 2013,73(4):68-80. DOI:10.1016/j.tws.2013.07.015.

[8] 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.
DENG Yunfei, ZHANG Wei, CAO Zongsheng. Effect of gap on the ballistic performance of doublevlayered A3 steel shields against ogival rigid projectiles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(12):95-99.

[9] 杜忠华，赵国志，欧阳春. 多层陶瓷复合轻装甲结构的抗弹性分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版)，2002,26(2):147-151.
DU Zhonghua, ZHAO Guozhi, OUYANG Chun. The analysis of defensible performance against complex light multi-player armour of ceramic[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2002,26(2):147-151.

[10] ZHOU N, WANG J X, YANG R, et al. Damage mechanism and anti-penetration performance of multi-layered explosively welded plates impacted by spherical projectile[J]. Theoretical and applied fracture mechanics, 2012,60(1):23-30.

[11] 陈昕，朱锡，梅志远，等. UHMWPE 球面层合板弹道侵彻性能研究[J]. 振动与冲击，2011,30(4):119-123.
CHEN Xin, ZHU Xi, MEI Zhiyuan, et al. Research on ballistic penetration properties of UHMWPE spherical laminates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(4):119-123.

[12] 陈小伟，张方举，梁斌，等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2006,26(3):199-207.
CHEN Xiaowei, ZHANG Fangju, LIANG Bin, et al. Three modes of penetration mechanics of A3 steel cylindri-

cal peojectiles impact onto 45 steel plates[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(3):199-207.

[13] 宋博，胡时胜，王礼立. 分层材料的不同排列次序对透射冲击波强度的影响[J]. 兵工学报，2000,21(3):272-274.
SONG Bo, HU Shisheng, WANG Lili. Influence on the transmitted intensity of shock wave through different tatic orders of layered materials[J]. Acta armamentar, 2000,21(3):272-274.

[14] CHEN X W, LI Q M. Shear plugging and perforation of ductile circular plates struck by a blunt projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(5):513-536.

[15] 张国伟. 终点效应及靶场试验[M]. 北京：北京理工大学出版社，2009:72-73.

[16] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京：国防工业出版社，1984:238-287.

[17] 周楠，王金相，谢君，等. 球形弹丸作用下钢/铝爆炸复合靶的抗侵彻性能计算与分析[J]. 高压物理学报，2013,27(6):839-846.
ZHOU Nan, WANG Jinxiang, XIE Jun, et al. Calculation and analysis for the anti-penetration performance of explosively welded steel/aluminum plates target by the penetration of spherical projectile[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013,27(6):839-846.

Failure mode and energy absorption mechanism of steel/aluminum composite plates impacted by spherical fragment

ZHOU Nan[1], WANG Jinxiang[2], ZHANG Yaning[3], GUO Haitao[1], JIANG Jing[1]

(1. *Department of Criminal Science and Technology, Nanjing Forest Police College, Nanjing* 210023, *Jiangsu, China*;
2. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
3. *China North Vehicle Research Institute, Beijing* 100072, *China*)

Abstract: In order to investigate the influence of target structure on the protective performance, series of ballistic experiments and LS-DYNA 3D finite element code were adopted to research the failure mode and energy absorption mechanism of two-layer (steel/aluminum) and three-layer (steel/aluminum/steel) explosive welded targets, as well as a monolithic steel target, which were perforated by spherical fragments. The effects of the layer number, thickness and the combination of the interface on the failure mode were analyzed based on the experimental and numerical results obtained. The results show that the influence of the combination of the target interfaces on the failure mode is the most obvious as compared with the other influencing factors. The fracture mechanism of different plates were shearing and plugging when the interface was well bonded but, when the bonding interface failed due to tension, the thinner rear plate failed mainly due to ductile prolonging deformation. With the increase of the total thickness, the targets were more apt to suffer damage resulting from shearing and plugging. The protective performance of the three-layer composite target is superior to that of the two-layer one with the same areal density and total thickness.

Keywords: failure mode; energy absorption mechanism; explosive welded plate; bonding interface

（责任编辑　王易难）