

高密度活性破片碰撞双层靶毁伤效应

肖艳文,徐峰悦,余庆波,郑元枫,王海福

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081

摘要 采用弹道碰撞实验,对高密度冷压成型和烧结硬化 PTFE/Al/W 活性破片正碰撞双层间隔铝板毁伤效应问题进行研究。实验结果表明,在高速碰撞条件下,活性破片对前靶的作用主要体现为动能贯穿破坏,与前靶相比,后靶毁伤更为严重,表现为更大的穿孔尺寸和毁伤面积,并伴随有显著的隆起及裂纹等结构破坏。引入裂纹扩展理论,分析了碰撞速度及靶板厚度对活性破片动能侵彻和爆炸作用联合毁伤效应的影响,从机理上揭示了后靶结构毁伤行为和效应。

关键词 活性破片;弹道碰撞实验;毁伤效应;侵彻爆燃行为

活性材料是近 10 多年来发展起来的一类新型含能毁伤元材料^[1-2],其显著特点是既有类金属材料的力学性能,又有类含能材料的爆炸特性。因此,当其以一定速度碰撞目标时,表现为既有良好的动能侵彻能力,又能在强冲击下发生非自持爆炸反应,通过动能侵彻和爆炸化学能释放两种毁伤机理的联合作用,实现对目标更高效的结构毁伤,显著增强对燃爆类目标的引燃或引爆能力^[3-5]。

目前,国内外的相关研究工作体现在活性材料配方设计、制备工艺、力学性能、能量释放及工程化应用等方面^[6-8],特别是弹/靶碰撞条件对活性材料化学响应行为以及由此引发的侵爆毁伤效应的影响规律,迄今未见公开发表的结论性研究结果。本文采用弹道碰撞实验的方法,研究高密度活性破片碰撞双层间隔铝靶毁伤效应问题,研究结果对活性材料破片毁伤效应评估、毁伤准则确定、杀伤战斗部设计等有重要指导意义。

1 弹道碰撞实验

1.1 实验方法

为研究高密度活性破片碰撞双层间隔铝靶侵爆毁伤行为及效应,实验用圆柱形活性破片由当量配比聚四氟乙烯/铝/钨 (PTFE/Al/W) 粉体混合物,经冷压成型和烧结硬化制备而成,其中聚四氟乙烯、铝和钨 3 种粉体的初始平均粒度分别为 28、44、44 μm ,烧结后材料密度约为 7.8 g/cm^3 ,破片尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。实验装置主要由口径为 12.7 mm 的弹道枪、靶架、双层间隔铝板、测速网靶及高速运动分析仪等组成,破片速度由测速网靶测量,弹/靶作用过程由高速运动分析仪记录,测试原理见图 1。其中,双层间隔铝靶组合分别为方案 A 6 mm/6 mm、方案 B 6 mm/3 mm、方案 C 3 mm/3 mm,两层铝板之间距离均为 200 mm。活性破片、实验样弹及双层间隔铝靶布置照片如图 2 所示。

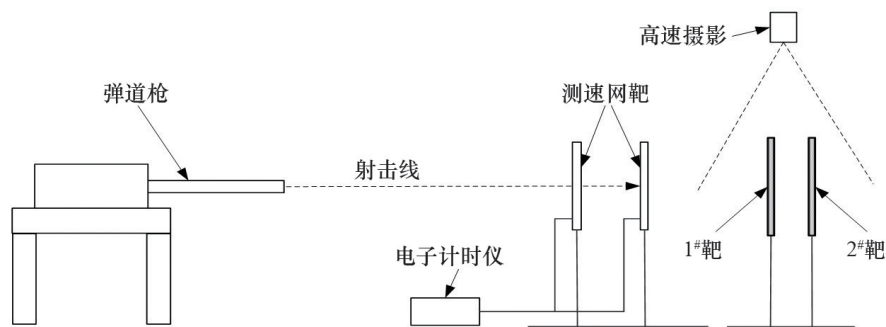


图 1 实验测试原理

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

收稿日期:2016-03-25;修回日期:2016-09-10

作者简介:肖艳文,博士研究生,研究方向为高效毁伤弹药技术,电子信箱:ieeeq-1225@163.com;王海福(通信作者),教授,研究方向为高效毁伤弹药技术,电子信箱:wanghf@bit.edu.cn

引用格式:肖艳文,徐峰悦,余庆波,等.高密度活性破片碰撞双层靶毁伤效应[J].科技导报,2017,35(10):99-103;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.10.014



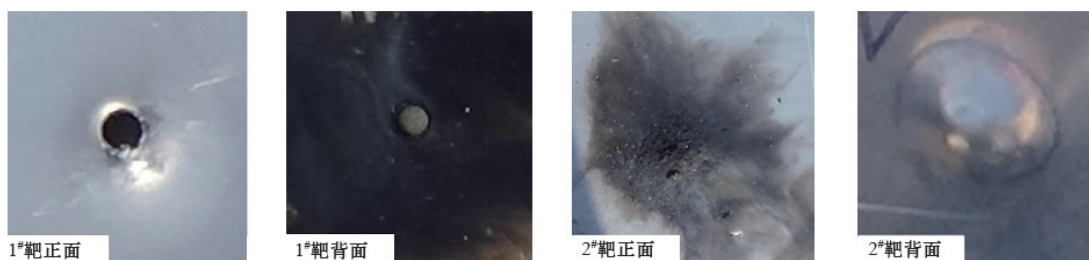
图2 活性破片、实验弹和双层间隔靶照片

Fig. 2 Photographs of reactive material fragment, bullet sample and double-spaced plates

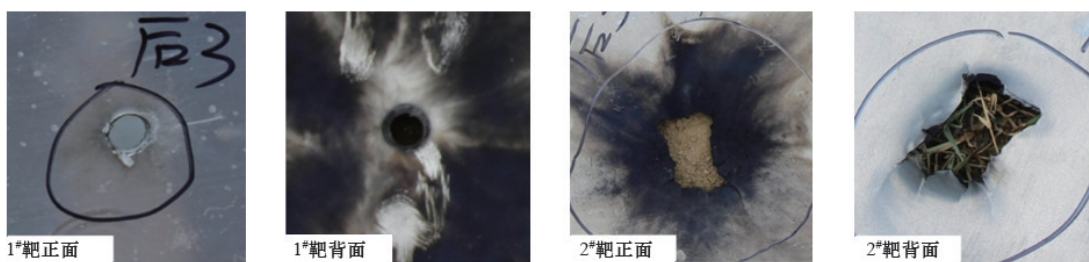
1.2 实验结果

图3为活性破片以约1000 m/s速度碰撞不同厚度组合双层间隔铝板前后,铝板的典型毁伤图,其中1#铝板为前靶,2#铝板为后靶。可以看出,1#铝板呈现冲塞型穿孔模式且穿孔形状基本为圆形;2#铝板呈现破坏模式,其穿孔尺寸及2#铝板正面和1#铝板背面烟气熏黑痕迹受前、后层铝板厚度影响显

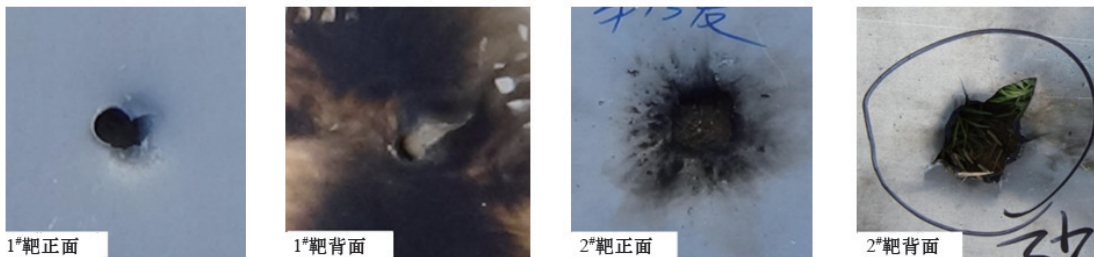
著。当靶板组合为6 mm/ 6mm时,1#铝板背面存在明显烟气熏黑痕迹,2#铝板正面碰撞区域出现大小不等的凹坑,同时存在明显的烟气熏黑痕迹,且该痕迹沿撞击区域向外熏黑程度逐渐降低,靶板背面出现局部隆起但未出现裂纹;当靶板组合为6 mm/3 mm时,1#铝板背面烟气熏黑程度较靶板组合为6 mm/6 mm时更弱,但2#铝板类矩形穿孔边缘喷射状烟气熏



(a) 方案A: 6 mm/ 6 mm, $v=1018$ m/s



(b) 方案B: 6 mm/3 mm, $v=1022$ m/s



(c) 方案C: 3 mm/3 mm, $v=1012$ m/s

图3 双层靶遭毁伤典型实验照片

Fig. 3 Typical photographs of double-spaced aluminum plates damaged

黑痕迹较靶板组合为6 mm/6 mm时更显著,此时2#铝板发生花瓣型穿孔破坏,侵孔周围分布着多条长度不等裂纹,形成向外翻卷的花瓣;当靶板组合为3 mm/3 mm时,1#铝板背面熏黑程度最弱,2#铝板正面侵孔周围烟气熏黑程度较靶板组合6 mm/3 mm和6 mm/6 mm时也更弱,且正面存在很多粒状活性材料碎片撞击形成的麻坑,同时侵孔边缘出现不同程度隆起且有多条裂纹。

表1为活性破片以不同速度碰撞不同厚度组合双层间隔铝板实验结果。可以看出,碰撞速度和铝板厚度对两层铝板毁伤效应均有影响,对2#铝板穿孔尺寸的影响尤为显著,认为穿孔的面积即为铝板毁伤面积。当1#靶和2#靶厚度均为6 mm时,活性破片在碰撞速度较低时对2#靶不足以造成贯穿毁伤,直至碰撞速度提高至1168 m/s时才贯穿2#铝板;然而当2#铝板厚度为3 mm时,速度较低时也足以贯穿2#铝板,且毁伤面积随碰撞速度提高呈增大趋势;在碰撞速度为1154 m/s的条件下,2#铝板毁伤面积最大,约为1#铝板穿孔面积的16倍;当1#铝板和2#铝板厚度均为3 mm时,活性破片贯穿1#铝板形成的穿孔尺寸较厚度为6 mm时略有减小,2#铝板毁伤面积亦随碰撞速度提高而增大;在碰撞速度为1146 m/s条件下,2#铝板最大毁伤面积约为1#铝板穿孔面积的23倍。与靶板组合为6 mm/3 mm时相比,相同碰撞速度下活性破片对后靶的毁伤面积更大、扩孔效应更加显著。

表1 双层靶遭毁伤典型实验结果

Tab 1 Typically experimental results of double-spaced aluminum plates damaged

实验方案	碰撞速度/ (m·s ⁻¹)	1#靶		2#靶	
		靶厚/ mm	穿孔尺寸/ mm	靶厚/ mm	穿孔尺寸/ mm
A	698		12.9		未贯穿
	854	6	13.4	6	未贯穿
	1018		13.7		未贯穿
	1168		13.6		10
B	712		12.8		
	850	6	13.4	3	25×20
	1022		13.6		50×28
	1154		13.7		51×48
C	708		12.0		
	847	3	12.1	3	40×35
	1012		12.2		50×45
	1146		12.4		51×55

2 毁伤行为及机理

实验结果表明,活性破片高速碰撞双层间隔铝板时,第1层靶板表现为冲塞式穿孔模式。毁伤行为与惰性金属破片相似,以破片动能贯穿为主。而活性材料对第2层铝板的毁伤则是动能侵彻和化学响应之间耦合作用的结果,毁伤效应显著受靶板厚度、碰撞速度和双层间隔靶间距等因素影响,

毁伤机理尤为复杂。本文近似将活性破片对第2层靶板的毁伤作用划分为2个阶段:第1阶段为活性破片剩余侵彻体对靶板的动能侵彻过程;第2阶段为剩余侵彻体和大尺寸活性材料碎片对已毁伤靶板的爆燃作用过程。机械贯穿和爆炸化学反应的联合作用,可产生对靶板更大的结构毁伤。

假设活性破片剩余侵彻体在第二层铝板造成图4(b)所示等效圆孔,并在圆孔周围产生多条裂纹。其中,a为从圆孔边缘测量的裂纹长度,2d₀为等效圆孔直径,2W₀为靶板初始宽度。活性破片侵入第二层靶板发生化学反应后,靶板中心在爆燃脉冲载荷作用下产生隆起变形。垂直于靶板表面的应力为^[9]

$$\sigma_1 = E\varepsilon = E \left(\sqrt{\frac{W^2 + \delta^2}{W_0^2}} - 1 \right) \approx E \frac{\delta^2}{2W_0^2} \quad (1)$$

式中,δ为变形量;E为杨氏模量,Pa。

假设隆起变形与裂纹长度同时达到最大值,在此临界状态下,应力强度因子K_{IC}可表述为^[10-11]

$$K_{IC} = \sigma_2 G \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

式中,G为常数;σ²为加为切向方向的载应力。

随着裂纹的扩展,裂纹尖端处的加载应力强度逐渐降低。假设化学反应产生的气体为理想气体,其膨胀过程为等熵膨胀,则加载应力可表述为

$$\sigma_{2a} = \frac{p_0 d_0^{3\gamma}}{a^{3\gamma}} \quad (3)$$

式中,p₀为爆炸初始时刻圆孔处的压力;d₀为反应气体初始时刻膨胀半径;a为裂纹长度;γ为比热比。隆起处介质在爆燃载荷作用下发生急剧变形,可近似看作流体,此时如果忽略切向应力,则有σ_i=p₀。

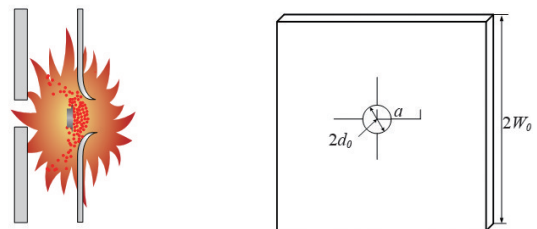
在临界条件下,联立式(1)~(3)可得靶板极限变形量对应的极限强度因子K_{IC},可表述为

$$K_{IC} = \frac{E d_0^{3\gamma} \delta_c^2}{2 W_0^2 a^{3\gamma}} G \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

式中,δ_c为临界变形量。

针对图4(b)示带孔铝板,极限变形量与爆燃载荷之间的关系可表述为^[10]

$$\delta_c = A \frac{\int p_0 dt}{\rho h} = A \frac{\bar{P}_0 \cdot \bar{t}}{\rho h} \quad (5)$$



(a) 破片爆燃 (b) 等效圆孔

图4 后靶侵爆联合毁伤行为

Fig. 4 Damage behavior of rear-target produced by a combination of penetration and blast

式中, A 为常数; \bar{P}_0 为平均载荷作用压力, Pa; \bar{t} 为载荷有效作用时间, s; ρ 靶板密度, kg/m³; h 为靶板厚度, m。利用式(4)和式(5)可求得极限变形条件下裂纹长度、载荷冲量和靶厚之间关系为

$$a = \left(\frac{G\sqrt{\pi}Ed_0^2}{2K_{Ic}} \right)^{\frac{2}{6\gamma-1}} \cdot \left(A \frac{\bar{P} \cdot \bar{t}}{\rho h W_0} \right)^{\frac{4}{6\gamma-1}} \quad (6)$$

取最长裂纹所包含的圆面积为毁伤面积, 则后层靶的毁伤面积可以表述为

$$S = \pi a^2 = \pi \left(\frac{G\sqrt{\pi}Ed_0^2}{2K_{Ic}} \right)^{\frac{4}{6\gamma-1}} \cdot \left(A \frac{\bar{P} \cdot \bar{t}}{\rho h W_0} \right)^{\frac{8}{6\gamma-1}} \quad (7)$$

碰撞速度不同, 活性破片贯穿前靶后破碎程度也不同, 造成的活性破片质量损失也存在差异。郑元枫等^[12]以一维冲击波理论为基础, 研究了活性破片碎裂程度随碰撞速度的变化规律。速度越大, 质量损失越小, 则后靶所受爆炸载荷的冲量越大。不同碰撞速度条件下后靶毁伤面积随第二层铝板厚度的变化曲线见图6, 根据 Rosenberg 等^[11]的研究结果, 铝板应力强度因子 K_{Ic} 取值可为 $4.4 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。由图5可以看出, 后层靶板产生的毁伤面积随靶板厚度的增加呈逐渐减小趋势。活性破片碰撞和侵彻 6 mm/6 mm 双层间隔铝板时, 贯穿前靶后活性材料质量损失过大, 剩余侵彻体依靠动能不足以贯穿后靶或产生裂纹, 且在活性材料碎片和爆炸化学反应作用下仍无法使后靶发生破坏。与之相比, 活性破片侵彻 6 mm/3 mm 双层间隔铝板时, 剩余侵彻体先以动能贯穿后层铝板并在边缘产生初始裂纹, 而后活性材料发生爆燃反应对其产生进一步破坏, 最终的毁伤效应如图3(b)所示。当两层铝板厚度均为 3 mm 且在碰撞速度保持不变的条件下, 活性材料剩余侵彻体速度越高、质量越大, 则作用于后层铝板的动能与爆炸载荷越强。由于靶板厚度的减小, 靶板结构强度降低, 裂纹在活性破片释放化学能的作用下迅速扩展以至形成更大的扩孔效应。当靶板厚度一定时, 碰撞速度越高, 则毁伤面积越大。这是由于碰撞速度越高, 则剩余侵彻体速度越高且质量损失越小, 致使后靶所受侵爆联合作用更强, 产生了更大的毁伤面积。

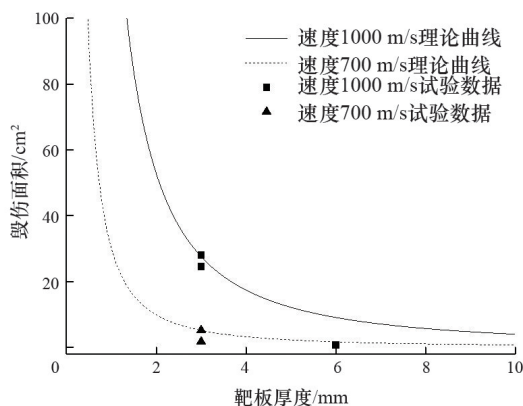


图5 毁伤面积随靶厚的变化

Fig. 5 Damage area versus target thickness

3 结论

1) 在高密度冷压成型和烧结硬化 PTFE/Al/W 活性破片正碰撞条件下, 双层间隔铝板的前后靶破坏模式存在显著不同。破片主要通过动能侵彻作用对前靶造成冲塞破坏, 并通过剩余侵彻体的动能侵彻和爆炸联合作用, 对后靶造成更为严重的毁伤, 表现为隆起及裂纹等结构性破坏。

2) 活性破片对双层靶的毁伤效应显著受碰撞速度和前、后层铝板厚度影响。在给定前、后靶厚度的条件下, 随着活性破片碰撞速度的提高, 剩余活性材料侵彻体碰撞后靶的速度和爆燃反应率随之提高, 从而产生更强的侵爆联合毁伤作用, 对后靶造成更大的结构性破坏毁伤。

3) 引入裂纹扩展理论, 分析了活性破片对后靶动能侵彻和爆炸毁伤联合作用下, 碰撞速度和靶厚对后靶毁伤面积的影响规律, 从机理上揭示了后靶隆起、裂纹扩展行为和毁伤模式。

参考文献 (References)

- [1] Nable J, Mercado A, and Sherman A. Novel energetic composite materials[J]. MRS Proceedings, 2005, 896, 0896-H01-03.
- [2] Lee R J, Willis M J, Carney J R, et al. Reactive materials studies[C]// Shock Compression of Condensed Matter. Los Angeles: American Physical Society, 2005: 92-96.
- [3] Wang H F, Zheng Y F, Yu Q B, et al. Initiation behavior of covered explosive subjected to reactive fragment [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2012, 21(2): 143-149.
- [4] Ames R G. Energy release characteristics of impact-initiated energetic materials [C]// Proceedings of Materials Research Society Symposium. Boston: Materials Research Society, 2006: 78-83.
- [5] 王海福, 郑元枫, 余庆波, 等. 活性破片引燃航空煤油实验研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1148-1152.
Wang Haifu, Zheng Yuanfeng, Yu Qingbo, et al. Experimental research on igniting the aviation kerosene by reactive fragment[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(9): 1148-1152.
- [6] Cai J, Walley S M, Hunt R J A. High-strain, high-strain-rate flow and failure in PTFE/Al/W granular composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2008(1-2): 308-315.
- [7] Ames R G. Vented chamber calorimetry for impact initiated energetic materials[R]. AIAA 2005-279. Reno, Nevada: AIAA, 2005.
- [8] Wang H, Zheng Y, Yu Q, et al. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(7): 074904.
- [9] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013, 191-195.
Li Xiangdong, Du Zhonghua. Target vulnerability[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013, 191-195.
- [10] Lloyd R. Conventional warhead systems physics and engineering design [M]//Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1998, 179.
- [11] Rosenberg Z, Bless S J, Gallagher J P. A model for hydrodynamic ram failure based on fracture mechanics analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 6(1): 51-61.
- [12] 郑元枫. 活性材料撞击起爆行为及毁伤增强效应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2012.
Zheng Yuanfeng. Research on enhanced lethality effects and mechanisms of reactive materials[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012.

Damage of double-spaced plates by reactive material fragment impact

XIAO Yanwen, XU Fengyue, YU Qingbo, ZHENG Yuanfeng, WANG Haifu

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The ballistic impact experiments are conducted to investigate the damage of double-spaced aluminum plates impacted by the pressed and sintered PTFE/Al/W reactive material projectile. The experimental results show that a typical KE perforated hole on the front plate is produced by the reactive material projectile impact, whereas the dramatically structural damage with significant deflections and cracks is found in the rear plate, with larger ruptured holes and damage areas, as compared with the front plate. Moreover, the influences of the impact velocity and the plate thickness on the damage of the rear plate are analyzed by using the crack growth theory. The structural damage mechanisms of the rear plate are discussed.

Keywords reactive material fragment; ballistic impact experiments; damage effects; penetration-induced deflagration behavior

(责任编辑 田恬)