

反应破片对中厚铝合金靶的侵彻效应研究

路中华¹, 孙文旭¹, 罗智恒¹, 黄亨建¹, 蒋道建¹, 阳世清²

1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900

2. 国防科技大学航天与材料工程学院, 长沙 410072

摘要 研究反应破片对中厚铝合金靶的侵彻效应。设计了一种单发反应破片侵彻效应研究的试验装置,研究了反应破片在不同撞击速度下对中厚铝合金靶的侵彻效应;并利用 AUTODYN-2D 软件建立了反应破片侵彻中厚铝合金靶板效应的数值模拟方法。结果表明:Al/PTFE 反应破片在高速撞击下具有动能和化学能双重毁伤效应,在 1346~1645m/s 的撞击速度下可发生点火和能量释放,在 20mm 厚铝合金靶上形成 3.41~6.51mm 的侵孔,在此基础上开展的数值模拟结果与试验结果也有较好吻合。

关键词 反应破片;侵彻效应;爆轰力学;数值模拟

中图分类号 TJ410.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.17.008

Penetration Effect of Reactive Fragment on Medium Thickness Aluminum Alloy Target Aimed at

LU Zhonghua¹, SUN Wenxu¹, LUO Zhiheng¹, HUANG Hengjian¹, JIANG Daojian¹, YANG Shiqing²

1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan Province, China

2. National University of Defense Technology, College of Astronautic and Material Engineering, Changsha 410072, China

Abstract The penetration effect of reactive fragment on medium thickness aluminum alloy target aimed at was studied. An experimental equipment was designed in order to study the penetration of single reactive fragment with different impacting speeds, and the pressure propagation process of reactive fragment penetrating aluminum target was simulated using the finite element analysis software of AUTODYN-2D. The results show that Al/PTFE reactive fragment possess the double damage effect from both kinetic energy and chemical energy under the condition of high speed impact. With the impact speed of 1346~1645m/s, the fragment could occur and ignition energy release, forming the hole of 3.41~6.51mm on the thick aluminum alloy target of 20mm. Based on the experiment, the numerical simulation results fit quite well with the experiment results.

Keywords reactive fragment; penetration effect; detonation mechanics; numerical simulation

0 引言

反应破片主要由具有“类爆轰”特性的亚稳态材料(Reactive Materials, RM)制造而成。亚稳态反应材料在高速撞击目标时能点火释放大量能量,对目标的作用效果与常规破片战斗部相比有较大幅度的提高。反应破片中的反应材料是由金属-氟聚物、金属间化合物等反应材料制成,具有稳定的物理、化学性能,在制造、加工、储藏、运输等方面都具有良好的安全性。国内外很多科研工作者从事这方面的研究,研究多以复合反应破片为主,复合反应破片由反应材料作为内核,外层由重金属壳体包覆而成,反应材料通常为铝/钛(Al/

Ti)与聚四氟乙烯(PTFE)的混合物,可以是柱形、球形、椭球形等,其优点是对目标的侵彻能力高,缺点是能量释放效率低。整体式反应破片以 Al/Ti 等金属颗粒与 PTFE 按一定比例混合后压制烧结而成,其对目标的能量释放效率更高,更具有工程应用价值^[1-10]。

本研究采用一种特制的破片发射装置,将 $\varphi 10\text{mm} \times \text{mm}$ 的圆柱破片加速至 1000m/s 以上,针对 20mm 厚的铝合金靶进行侵彻试验,采用高速摄影观察反应破片穿靶前的反应情况,试验前对其侵彻过程进行数值模拟预估,得到反应破片对中厚铝合金靶的侵彻效应规律,研究结果可对反应破片的

收稿日期:2013-01-27;修改日期:2013-03-21

基金项目:中国工程物理研究院学科发展基金项目(2012B0201019)

作者简介:路中华,副研究员,研究方向为先进常规战斗部设计,电子信箱:luzh505@163.com;孙文旭(通信作者),助理研究员,研究方向为战斗部终点效应研究,电子信箱:664729892@qq.com

应用提供基础。

1 圆柱破片侵彻深度的经验公式

Christman-Gehring (C-G) 是研究圆柱形弹体撞击靶板时得到的, 后经 A. Tate 进行调整, 其表达式为^[11]

$$\frac{p}{D_0} = 0.222 \left(\frac{\rho_p v_1^2}{\sigma_{yt}} \right) D_0 L_0 / D_c^2 \quad (1)$$

式中, p 为压力; ρ_p 为弹体密度; v_1 为弹体速度; D_0 为弹体直径; D_c 为弹坑直径; σ_{yt} 为靶板的屈服强度; L_0 为弹的长度。

2 侵彻效应试验

2.1 反应破片的制备

被试反应破片采用 Al/PTFE 体系反应材料, 将 Al 粉和 PTFE 粉按质量分数 0.265:0.735 配比混合后, 用压机压制成 $\phi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的圆柱体, 然后在真空炉中进行烧结 (烧结温度约 380°C), 得到圆柱形反应破片, 密度为 $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2.2 试验装置

反应破片单发驱动试验装置结构示意图如图 1 所示, 装置内装填 $\phi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 规格的 HMX 或 TNT 炸药药柱, 雷管引爆炸药后的爆轰波驱动反应破片在管腔内加速, 通过改变炸药药柱的数量和种类调节冲击速度。图 2 为反应破片单发发射装置。

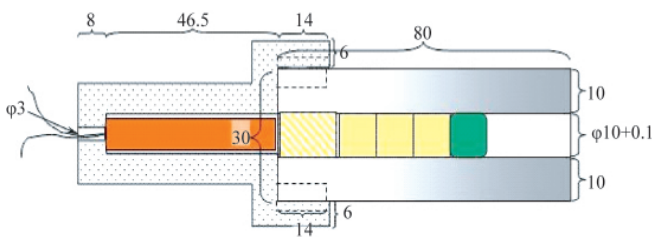


图 1 反应破片单发发射装置结构 (单位: mm)

Fig. 1 Structure diagram of reactive fragment single transmission device (unit: mm)



图 2 反应破片单发发射装置

Fig. 2 Single transmission device of reactive fragment

2.3 试验布置方式

试验布置方式如图 3 所示, 靶标采用铝合金靶。

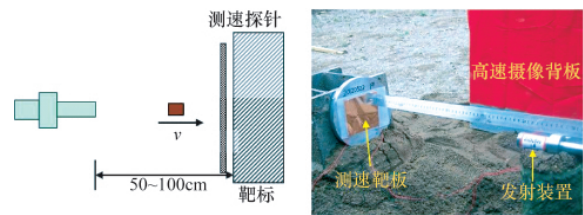


图 3 试验布局示意

Fig. 3 Scheme of test field layout

试验状态: 在距离试验件前端 50~100cm 处放置一块 $\phi 200\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的铝合金靶, 根据靶板上孔径和孔深考查不同速度的反应破片对侵彻性能的影响规律。

采用高速摄像机观察反应破片的穿靶过程, 高速摄像机在 (1280×1024) 分辨率下 2000 帧/s。

2.4 试验结果与分析

反应破片撞击靶板前后高速摄像照片如图 4 所示, 通过



(a) $t=300\mu\text{s}$



(b) $t=833\mu\text{s}$



(c) $t=876\mu\text{s}$



(d) $t=1333\mu\text{s}$

图 4 反应破片撞击靶板前后高速摄像照片

Fig. 4 Photos of the reactive fragment hitting target by high-speed camera

高速摄影照片可以看出反应破片在整个飞行过程中是“暗式”的,说明其在发射膛内承受炸药爆炸驱动过载后没有发生反应,因此其对铝合金靶形成规则侵孔,侵彻靶板效果如图 5 所示,统计试验结果如表 1 所示。

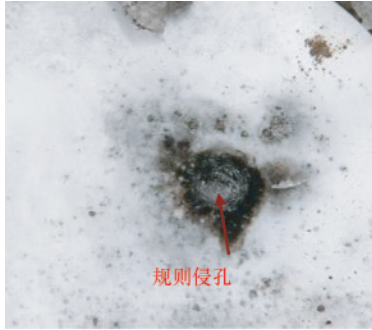


图 5 反应破片侵彻靶板效果

Fig. 5 Effect of reactive fragment penetrating target

表 1 侵彻靶板试验结果

Table 1 Experimental result of penetrating target plates

序号	反应破片质量/g	速度/(m·s ⁻¹)	孔径/mm	孔深/mm
1	1.992	1346	19.20	3.41
2	1.981	1527	19.86	5.46
3	1.925	1645	20.53	6.51

3 数值计算

3.1 材料模型

反应破片爆轰驱动加载过程属于大变形、高压和高应变率的问题,对此类问题数值模拟时,选取合理的材料本构模型是能否得到准确分析结果的关键。考虑到反应材料为高热值金属氟聚物复合材料,且在炸药爆轰加载的过程中还要呈现出高力学强度、高应变与较高密度的特征,对反应破片加载过程进行数值模拟时使用 Johnson-Cook 材料模型较符合实际。

在 JC 模型中,屈服应力 σ_y 为

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (2)$$

式中, A 、 B 、 n 、 C 和 m 均为材料常数,由实验确定; ε_p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为量纲一的等效塑性应变率($\dot{\varepsilon}_0$ 一般取 1.0/s), 约化温度为

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3)$$

式中, T_r 为参考温度(一般取为室温); T_m 为常压下材料的熔化温度。

本构方程(2)仅基于对一条压缩应力-应变曲线进行拟合,如果将多条曲线同时进行拟合,则可以获得更加优化的本构方程参数值。2010 年国防科技大学的阳世清等^[12]利用不同应变率下的多条压缩应力-应变曲线拟合,获得了优化后的本构方程,即

$$\sigma = (A + B \times \varepsilon^n) \times (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^{0.0803} \left(1 - \frac{T_i - T_r}{463 - T_r} \right) \quad (4)$$

式中, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, s⁻¹; T_i 为试验温度, K; T_r 为参考温度, K; A 、 B 、 n 分别为

$$A = A_2 \cdot (\lg \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^2 + A_1 \cdot \lg \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 + A_0 \quad (5)$$

$$B = B_2 \cdot (\lg \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^2 + B_1 \cdot \lg \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 + B_0 \quad (6)$$

$$n = n_1 \cdot \lg \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 + n_0 \quad (7)$$

式中相关的本构方程参数值列于表 2。

表 2 Al/PTFE (26.5/73.5) 反应材料的本构关系参数
Table 2 Constitutive relation parameters of Al/PTFE (26.5/73.5) reactive materials

$A_2/$ MPa	$A_1/$ MPa	$A_0/$ MPa	$B_2/$ MPa	$B_1/$ MPa	$B_0/$ MPa	n_1	n_0
-30.72	238.17	-437.90	174.41	-1093.52	1800.65	1.57	-4.15

3.2 算法及材料参数

数值模拟选用非线性有限元软件 AUTODYN-2D 进行计算。模型结构如图 6 所示,采用 Lagrange 算法;靶板采用 2A12 铝,材料模型为 Johnson-Cook 模型,状态方程为 Gruneisen 状态方程。破片的尺寸为 $\varphi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$,靶板的尺寸为 $\varphi 200\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。



图 6 计算结构有限元模型

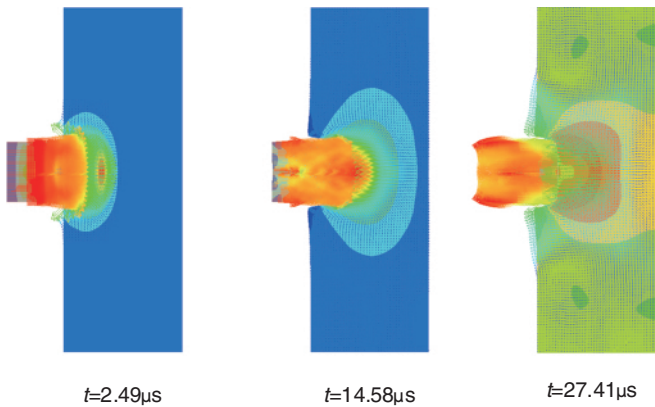
Fig. 6 Model for calculation structure finite element

3.3 计算结果及分析

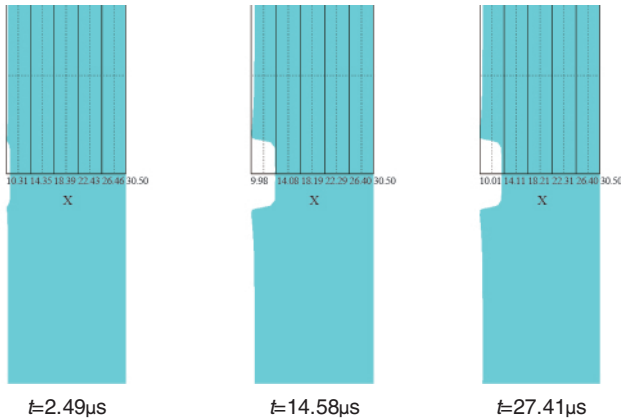
图 7 为反应破片侵彻铝合金靶不同时刻状态图,图 8、图 9 分别为反应破片的速度曲线和头部压力曲线,选取破片的撞击速度为 1346m/s, 27.41 μ s 时刻破片的速度降为 0,测得反应破片对靶板形成的侵孔孔深为 3.68mm,孔径为 18.81mm。在 2 μ s 时刻,反应破片的压力达到最大,峰值为 4.2GPa。

分别选取反应破片的撞靶速度为 1527 和 1645m/s,采用同样的有限元计算模型对其侵彻过程进行仿真计算。计算结果表明,在这两种速度下,反应破片对靶板形成的侵孔孔深分别为 5.39 和 6.42mm,孔径分别为 19.43 和 20.16mm。对比试验结果,如表 3 所示。

从表 3 可以看出,所选择的材料模型参数和计算方法比



(a) 压力云图
(a) Stress nephogram



(b) 侵孔深度
(b) Invasion depth of the hole

图 7 反应破片侵彻靶板过程不同时刻状态
Fig. 7 Status diagrams of reactive fragment penetrating target at different moments

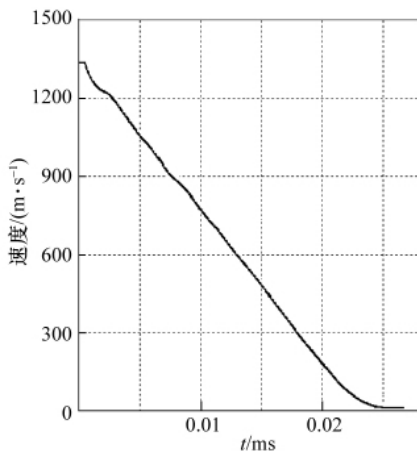


图 8 反应破片的速度曲线
Fig. 8 Velocity curve a of reactive fragment

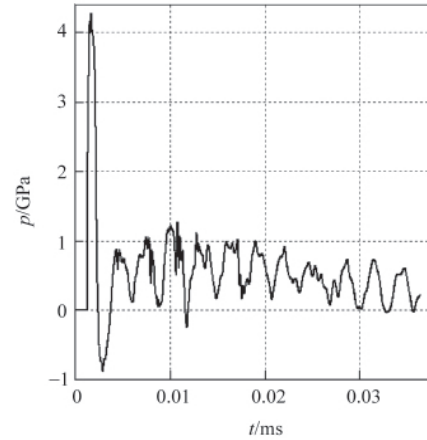


图 9 反应破片的反应破片的
Fig. 9 Head pressure curve of reactive fragment

表 3 试验结果与计算结果对比

Table 3 Comparison between test results and calculation results

序号	速度/ (m·s ⁻¹)	试验结果		数值模拟计算结果		经验式计 算孔深/ mm
		孔径/ mm	孔深/ mm	孔径/mm	孔深/mm	
1	1346	19.20	3.41	17.81	4.18	4.56
2	1527	19.86	5.46	18.43	6.31	6.63
3	1645	20.53	6.51	19.16	7.45	7.79

较合理,与试验结果非常吻合,孔深比试验结果略大,孔径略小于试验结果;采用经验公式计算所得侵孔深度也比试验结果略大。这是由于反应破片在侵彻过程中,压力达到其反应阈值后开始点火,发生放热反应,做功并对开坑周围区域形成破坏作用,增大侵彻开孔孔径。

4 结论

设计了一种单发反应破片侵彻效应研究的试验装置,研究了反应破片在不同撞击速度下对中厚铝合金靶的侵彻效应,并利用 AUTODYN-2D 软件建立了反应破片侵彻中厚铝合金靶板效应的数值模拟方法,主要结论如下。

(1) Al/PTFE 反应破片在高速撞击下具有动能和化学能双重毁伤效应,但其穿甲能力弱于密度相当的惰性破片。

(2) Al/PTFE 反应破片在 1346~1645m/s 的撞击速度下可发生点火和能量释放,在 20mm 厚铝合金靶上形成 3.41~6.51mm 的侵孔。

(3) 通过高速摄像观察反应破片的穿靶过程,表明所研制的反应破片离开爆轰区域后,能够承受该爆轰压力和爆轰温度而保持稳定,直至破片撞靶才引发反应,产生明亮火花。

(4) 有限元数值模拟可以作为一种有效手段用于反应破片对中厚铝合金靶的侵彻效应研究,由于反应破片点火后对

侵孔周围区域做功破坏,计算孔深略大于试验结果,计算孔径略小于试验结果。

此外,由于本试验中没有进行超压测试,对反应破片侵彻效应的研究还局限于宏观现象,后续改进试验方法并开展更为深入的研究是非常必要的。在此基础上开展的数值模拟研究应继续优化材料本构模型参数,通过选用点火-增长模型研究反应材料点火后的侵彻效应。

参考文献 (References)

- [1] Lee R J, Willis M J, Carney J R, et al. Reactive materials studies[C]// Proceedings of Shock Compression of Condensed Matter. Los Angeles: American Physical Society, 2005: 92-96.
- [2] Willis M J, William H H. Impact initiation of rods of pressed polytetrafluoroethylene (PTFE) and aluminum Powders[C]//Proceedings of 14th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Los Angeles: American Physical Society, 2005: 98-103.
- [3] 王树山, 李朝君, 马晓飞, 等. 钨合金破片对屏蔽装药撞击起爆的实验研究[J]. 兵工学报, 2001, 22(2): 189-191.
Wang Shushan, Li Chaojun, Ma Xiaofei, et al. Acta Armamentarii, 2001, 22(2): 189-191.
- [4] 黄亨建, 黄辉, 阳世清, 等. 毁伤增强型破片探索研究 [J]. 含能材料, 2007, 15(6): 566-569.
Huang Hengjian, Huang Hui, Yang Shiqing, et al. Energetic Materials, 2007, 15(6): 566-569.
- [5] 叶小军, 李向东. 含能破片撞击引燃屏蔽炸药的实验研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(6): 131-134.
Ye Xiaojun, Li Xiangdong. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2009, 29(6): 131-134.
- [6] Nielson D B, Tanner R L, Lund G K. High strength reactive materials and methods of making: US, 10/462437[P]. 2007-12-11.
- [7] Truitt R M, Nielson D B, Ashcroft B N, et al. Weapons and weapon components incorporating reactive materials and related methods: US, PCT/US2007/076672[P]. 2008-06-19.
- [8] Vasant S J. Process for making polytetrafluoroethylene-aluminum composite and product made: US, 6547993 B1[P]. 2003-04-15.
- [9] Douglas Darker. Reactive material enhanced warhead[C]// Proceedings of Manufacturing Defense Manufacturing Conference. Nashville TN:[s. n.], 2001: 6-9.
- [10] Wang H F, Liu Z W, Yu W M. Impact initiated characteristics of reactive material fragments [C]//Proceedings of 7th International Fall Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Xi'an: National Natural Science Foundation of China, 2007: 123-128.
- [11] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
Sui Shuyuan, Wang Shushan. Terminal effects [M]. Beijing: National Defence Press, 2007.
- [12] 阳世清, 徐松林, 张彤. PTFE/Al 反应材料制备工艺及性能[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(6): 39-42.
Yang Shiqing, Xu Songlin, Zhang Tong. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(6): 39-42.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



中国科协年会科学道德建设论坛召开

“积极有效的教育是加强科学道德建设的重要途径,对于科技工作者,特别是处于科学研究起步阶段的青年学子来说,要通过教育引导,把对真理的追求、对诚信的敬畏种植在他们心间。”中国科协书记处第一书记、党组书记申维辰强调。

2013年5月24日,由中国科协、教育部和贵州省政府共同主办的第十五届中国科协年会科学道德建设论坛在贵阳举办。中国科协书记处第一书记、党组书记申维辰出席科学道德建设论坛并致辞,中国科协书记处书记、党组成员张勤,教育部部长助理、党组成员林蕙青,贵州省副省长何力,10余位两院院士及来自中国、美国、加拿大的专家、学者出席论坛。中国科协副主席、常委会科技工作者道德与权益专门委员会主任、中国工程院院士黄伯云主持科学道德建设论坛开幕式。

2007年开始,中国科协坚持每年在高校师生中开展科学道德和学风建设宣讲教育。2011年起,中国科协、教育部联合发起,按照“全覆盖、制度化、重实效”的目标要求,共同在高校研究生新生中开展科学道德和学风建设宣讲教育,系统宣讲科学精神、科学道德、科研伦理和学术规范。2012年起,中国科协、教育部、中国科学院、中国社会科学院、中国工程院按照“两个拓展、两个结合”的原则,将科学道德和学风建设宣讲教育从研究生新生拓展到全体研究生和高年级本科生、新上岗研究生导师、新入职青年教师,从自然科学领域拓展到人文社会科学领域,并将集中宣讲教育和经常性的教育相结合,将教育和监督检查相结合。

详情见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/14731860.html>。