

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.03.009

Q235 钢板对平头弹抗侵彻特性研究

邓云飞^{1, 2}, 张 伟², 孟凡柱¹

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 300300 天津; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 150001 哈尔滨)

摘 要: 为分析靶体结构对其抗侵彻特性的影响, 利用轻气炮进行平头杆弹正撞击单层板和等厚接触式三层板的实验, 获取相关的撞击过程图片. 通过撞击实验, 得到这两种结构靶体的初始-剩余速度曲线以及弹道极限, 撞击速度为 190~450 m/s. 研究靶体结构对抗侵彻特性的影响, 包括靶板的失效模式和抗侵彻性能. 最后, 采用 ABAQUS/EXPLICIT 软件对杆弹撞击金属板的过程进行数值模拟研究, 通过对比数值模拟和实验结果, 验证了数值模拟材料模型和参数的有效性. 结果表明: 多层板的弹道极限高于等厚单层板, 并且多层板和单层板的主要失效模式之间存在差异. 对于多层板, 靶板失效模式与其在靶中位置相关.

关键词: 撞击; 弹体; 靶体; 弹道极限; 数值模拟

中图分类号: O347; O385 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2015)03-0054-06

Ballistic performance of Q235 metal plates subjected to impact by blunt-nosed projectiles

DENG Yunfei^{1, 2}, ZHANG Wei², MENG Fanzhu¹

(1. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, 300300 Tianjin, China;
2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: In order to investigate the influence of configuration of target on the ballistic performance, monolithic and three-layered targets were normally impacted by blunt-nosed projectiles in the velocity range of 190~450 m/s with the help of a gas gun, and also the photos of the impact process were obtained. Based on the tests, the residual velocity versus the initial velocity curves of the projectiles were constructed, and also ballistic limit velocities were obtained. The influence of combination configuration of target on the ballistic characteristic, including the ballistic resistance and failure models were investigated. Moreover, the penetration process of metal plates impacted by rod projectiles had been studied with numerical simulation code ABAQUS/EXPLICIT, and also the validation of models and parameters of materials had been proved by comparing the experiment results with numerical simulations. The results indicated that the ballistic limit velocity of multi-layered target was higher than that of monolithic target, and also there were differences between failure models of multi-layered targets and monolithic target. Moreover, the failure models of plates of multi-layered targets were in relation to their order.

Keywords: impact; projectile; target; ballistic resistance; numerical simulation

钢板作为使用最广泛的防护材料之一, 军事和民用的防护结构往往利用钢板构造制成, 或者说防护结构至少包含钢板. 虽然随着防护材料的发展,

越来越多的新材料应用在防护结构中, 但由于钢板在强度、弹塑性、可加工性、承载能力、材料供应、价格低廉等方面的优势, 决定了其仍是防护领域应用最广泛的材料之一. 钢板结构按照组合形式可分为单层板结构和多层板结构, 多层板结构根据各层板间是否具有间隙, 又分为接触式和间隙式多层板. 多层板在侵彻问题的工程实践和科学研究中被使用, 这不仅体现在工程中较多地采用多层同材料板叠加替代等厚度的单层板, 另一个重要的方面是在

收稿日期: 2014-03-18.
基金项目: 中央高校基本科研业务(3122014D018); 中国民航大学科研启动资金(2013QD03X).
作者简介: 邓云飞(1982—), 男, 讲师;
张 伟(1964—), 男, 教授, 博士生导师.
通信作者: 张 伟, zhdawei@hit.edu.cn.

一些领域需要采用不同性能材料的组合以期达到优于单一介质性能的目的。

单层靶的弹道侵彻和贯穿问题已经有了相当的研究,但是其中的大部分实验是用于验证所分析的模型以及所提出的理论,或者是为了指出某些模型的缺点并给出改进的^[1-2].Corran 等^[3]利用平头弹对单层低碳钢、不锈钢和铝靶进行撞击实验,获得靶体的弹道极限.实验发现,弹道极限不是随着靶体厚度增加而单调增加,而是靶体厚度增加到一定值后甚至可能降低.此外,利用平头弹对接触式多层低碳钢板进行撞击实验,实验结果表明:靶体的叠层顺序对弹道极限影响很大.薄板在前,厚板在后的双层靶的弹道极限高于相反顺序的双层靶;当总厚度大于一定值时,多层靶的抗侵彻性能高于相同总厚度的单层靶.Radin 等^[4]对单层和多层铝靶抗钝头和锥形弹进行了实验研究.研究发现分层降低靶体的抗侵彻性能,即单层靶的弹道性能高于相同总厚度的多层靶.Nurick 等^[5]进行了锥形和钝头弹侵彻多层钢靶的实验研究.结果表明,单层靶的弹道极限高于相同总厚度的多层靶.Teng 等^[6]使用 ABAQUS/EXPLICIT 建立了弹体和靶体模型,研究了单层和双层靶对平头和锥形头弹体的抗侵彻性能.结果表明,分层提高靶体对平头弹的抗侵彻性能,但稍微降低靶体对卵形头弹的抗侵彻性能,间隙大小对间隙式双层靶的弹道性能影响小.Teng 等^[7]使用 ABAQUS/EXPLICIT 建立二维轴对称模型,模拟研究了 4 种弹体对 12 mm 厚靶体的穿甲,靶体包括单层靶和双层靶,其中双层靶的材质相同或者不同.模拟结果表明,上层为高延性低强度钢板而下层为低延性高强度钢板的双强度双层靶的抗侵彻性能最高,然后依次是低延性高强度钢板的同强度双层靶、高延性低强度钢板的同强度双层靶、上层为低延性高强度钢板而下层为高延性低强度钢板的双强度双层靶.Dey 等^[8]采用修改形式的 J-C 强度模型和 J-C 断裂准则,借助 LS-DYNA 对文中的实验进行了二维数值模拟研究,仿真结果与实验结果相吻合.Gupta 等^[9]进行薄铝靶对平头、半球形头和卵形头弹的抗侵彻特性研究,靶体包括相同厚度的单层靶和多层靶.实验证明:双层靶的弹道性能和单层靶接近,但是进一步增加分层数目时,多层靶的弹道极限低于相同总厚度的单层靶.靶体对卵形头弹的弹道极限最低,依次为平头弹和半球形头弹。

从研究现状可以发现,相对于数量众多的单层金属防护结构研究,对多层防护结构的研究无

论从数量上还是从深度上都比较有限.此外,由于靶体抗侵彻特性涉及到靶板材料、弹体材料、弹体几何形状、靶体几何形状和靶体叠层结构等,影响因素较多,并且得到的结论往往不一致,这是由于不同的研究者考虑的因素不一样,也就是说目前缺乏比较系统深入地研究。

本文利用撞击实验和数值仿真研究了单层以及等厚多层金属板对平头弹的抗侵彻特性,分析靶体结构对失效模式和抗侵彻性能的影响.此外,利用撞击实验结果验证数值模拟计算的有效性,最终采用合适的弹靶数值模型和材料参数对弹靶作用过程进行描述。

1 实验系统与方法

撞击实验在哈尔滨工业大学高速撞击研究中心的一级气炮上进行,该测试设备主要包括:气室;口径 12.7 mm,长 2 m 的发射管;靶舱;激光测速系统;高速摄像机系统等^[10]。

靶体为 Q235 钢,正方形靶板尺寸为 250 mm×250 mm,靶板四周加工有螺栓孔,通过 8 个 M8 螺栓与靶架固定起来,靶板的自由跨度为 210 mm×210 mm.单层靶的厚度为 6 mm,记为 T12.三层 2 mm 厚钢板叠加为三层靶,靶板间隙为 0 mm,记为 T4T4T4。

弹体由经特殊热处理的 38CrSi 合金钢加工而成,热处理硬度大致为 53 HRC,直径为 12.62 mm,名义质量为 34.5 g,弹体形状及尺寸如图 1 所示.在实验中 38CrSi 钢弹体仅发生非常有限的变形,甚至可以认为弹体在侵彻过程中保持刚性,即不发生变形和失效。

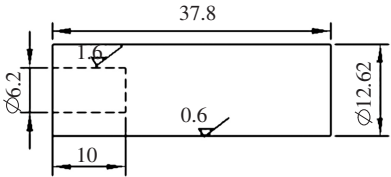


图 1 弹体形状及尺寸 (mm)

2 实验结果及讨论

2.1 侵彻过程

在实验过程中利用高速摄像机追踪侵彻过程,获取撞击侵彻过程的直观图像资料,同时可以获得弹体的速度和加速度等信息.图 2 给出了弹体贯穿靶体的典型过程,前两幅照片显示的是弹体撞击靶板前和撞击靶板中的情形,后两幅显示的是弹体穿过靶板后的情形,可见弹体的撞击姿态很好。

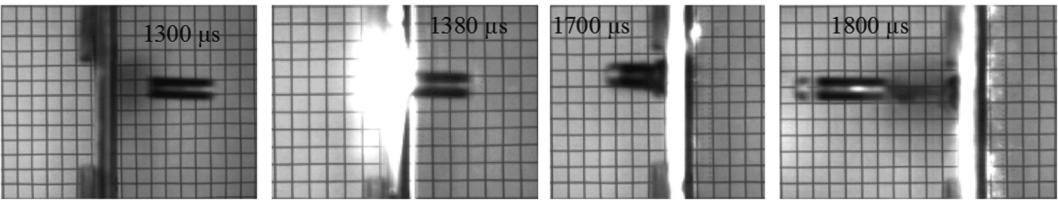


图 2 平头弹体对薄靶的典型撞击工况

2.2 弹道极限

表 1 给出了通过撞击实验得到的初始和剩余速度数据,表中 V_i 和 V_r 分别表示弹体的初始撞击速度和贯穿靶后的剩余速度,撞击速度区间为 190~450 m/s.

使用 Recht 等^[11]提出的公式(R-I 公式)处理弹体的初始-剩余速度关系,并且得到靶体的

弹道极限,可写为

$$V_r = a(V_i^p - V_{bl}^p)^{1/p} \tag{1}$$

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 可以通过对实验获得的弹体初始-剩余速度数据进行最小二乘拟合得到.

表 1 Q235 钢靶侵彻实验结果 (m·s⁻¹)

T12				T4T4T4	
V_i	V_r	V_i	V_r	V_i	V_r
198.40	0	339.8	251.8	215.3	0
227.30	107.30	355.7	259.8	224.6	64.9
250.00	133.10	422.1	311.1	263.9	146.3
265.20	166.70	446.3	327.3	287.1	181.1
273.70	170.50			303.1	204.6
287.10	181.80			305.5	198.4
314.70	218.20			311.7	202.1
327.27	200.00			315.8	209.8
332.02	227.27			428.6	327.3
337.70	230.80			449.2	340.9

图 3 给出了平头弹撞击靶板的实验数据和初始-剩余速度数据曲线,可以发现多层靶的弹道极限高于单层靶.但是,分层对靶体抗侵彻性能的影响随速度增加而减小.

定程度时,在弹体前方开始产生微裂纹,随着侵彻的进行,裂纹不断扩展,最后冲塞形成并且脱离靶板,弹体穿过靶体.靶体在撞击过程中存在裂纹扩展,造成弹体侵彻靶体的有效厚度小于实际厚度,这一现象极大地降低靶体的抗侵彻性能.

从 T12 分层成 T4T4T4,靶体的主要失效模式发生转变.图 5(a) 给出 T4T4T4 的典型失效样件,而图 5(b) 则给出了相应样件的弹孔剖面放大图,放大倍数为 25.T12 靶的失效模式在上面进行了描述,剪切是其主要耗能方式,整体变形可以忽略不计.不过,三层板的失效模式与靶板在靶中的位置相关,对于第一层板,其主要失效模式是延性孔洞扩张,弯曲和拉伸是其主要耗能方式,在弹孔前后有隆起部分;对于第二层和第三层板,其主要失效模式为盘式隆起,最终发生颈缩失效,面内膜力拉伸是其主要耗能方式.第三层板的塑性变形大于第二层板,依次类推,并且靶板塑性变形大于板厚.

图 6 给出了图 5 对应靶板的塑性变形曲线,可以发现单层靶的最大变形小于其厚度,而三层靶的塑性变形均大于其厚度,并且靶板位置离撞

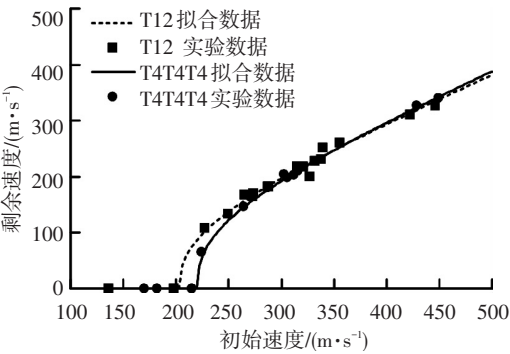


图 3 平头弹贯穿靶体的初始-剩余速度

2.3 失效模式

对于 T12,其主要失效模式是剪切冲塞,靶板结构变形特别小,如图 4(a) 所示.在靠近撞击面的前部分,弹孔内表面光滑,而在后一部分,弹孔内表面比较粗糙,如图 4(b) 所示.这说明在侵彻过程中,首先是弹体挤压靶体材料,当挤压达到一

击面越靠后,靶板变形越大.三层靶的塑性变形比单层靶大很多,所以其整体塑性变形耗能大于单层靶的局部塑性流动耗能,这就是其弹道极限高于单层靶的原因.

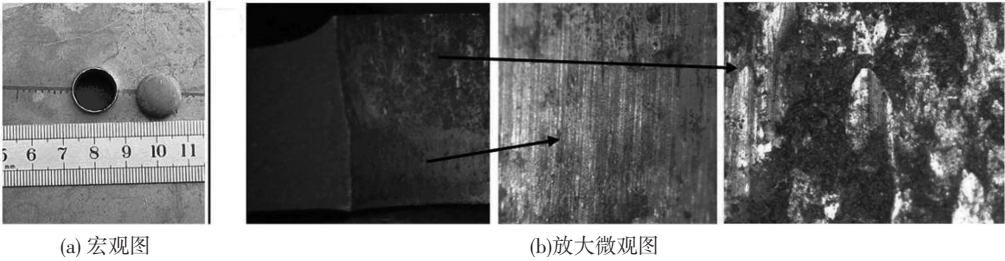


图 4 平头弹撞击单层中厚板回收样件, $v_i=314.69\text{ m/s}$, $v_r=218.18\text{ m/s}$

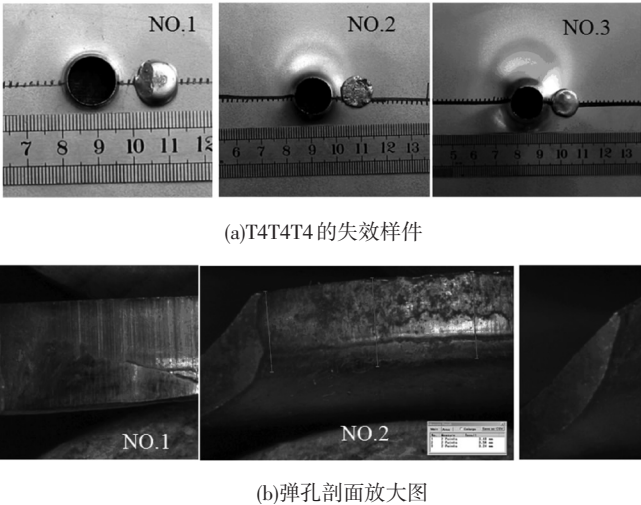


图 5 T4T4T4 靶板及其弹孔局部放大图 ($M=25$): $v_i=315.79\text{ m/s}$, $v_r=209.79\text{ m/s}$

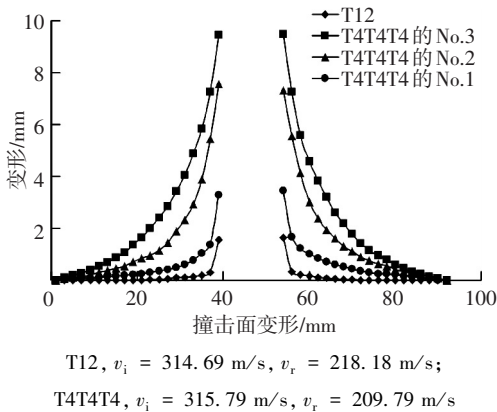
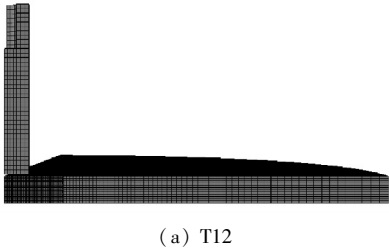
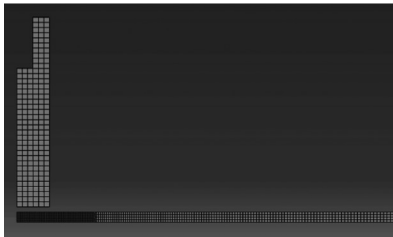


图 6 T12 和 T4T4T4 变形曲线对比

靶板自中心采用过渡网格,中心区域网格尺寸为 $0.25\text{ mm}\times0.25\text{ mm}$,离撞击中心区域越远,网格间隔越大.由于弹体在实验中保持刚性,弹体的网格尺寸为 $1.0\text{ mm}\times1.0\text{ mm}$.考虑到摩擦力对靶体抗侵彻性能的影响,弹体和靶体间滑动摩擦系数设为 0.1 .



(a) T12



(b) T4T4T4

图 7 靶体的有限元模型

3 数值模拟

3.1 数值计算模型

数值模拟计算采用有限元软件 ABAQUS/EXPLICIT 6.9 的拉格朗日求解器.对 T12 建立整体三维模型,为了探讨二维和三维模型的区别,对 T4T4T4 建立 1/2 的整体二维模型,即 Y 轴对称,如图 7 所示.在数值模拟模型中:靶板简化成直径 200 mm 的圆板,四周采用约束固定,即位移为 0.

在实验中 38CrSi 弹体仅发生非常有限的变形,由于缺少弹体的材料性质参数,本文近似认为 38CrSi 与文献[8]中的弹体材料性能相同.文献[8]中对弹体使用的是弹性线性强化材料模型,相关材料参数可从文献[8]中获取.

对于 Q235 钢,使用 Johnson-Cook (J-C) 强度和失效模型,并且对原始 J-C 强度模型和失效模型做了修改,模型和参数参考文献[12].

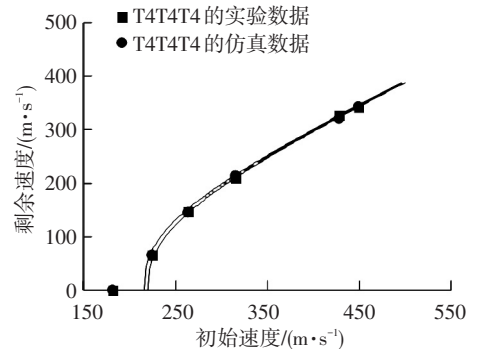
3.2 数值模拟结果分析

表 2 给出了实验和数值模拟数据依据 R-I 公式拟合得到的模型参数,由实验数据可以发现,多层板的弹道极限高于等厚单层板.

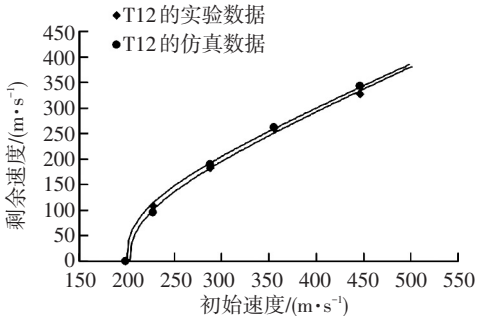
表 2 钢靶的弹道极限及模型参数

靶体	实验			数值模拟		
	A	p	V_{bl}	A	p	V_{bl}
T12	0.80	2.45	203	0.80	2.65	200
T4T4T4	0.82	2.50	220	0.82	2.60	218

图 8 给出了数值模拟得到的初始-剩余速度数据,以及由 R-I 公式得到的拟合曲线.为了说明数值模拟的有效性,图 8 同时给出了实验数据和拟合曲线.T12 数值模拟预测的弹道极限与实验值的误差分别为 1.5%,而 T4T4T4 数值模拟预测的弹道极限与实验值的误差为 0.91%.此外,可以发现实验速度曲线和数值模拟曲线之间存在很好的一致性,进一步验证了数值模拟模型和材料参数的有效性,说明数值模拟模型能够很好地描述撞击实验.



(a) 平头弹撞击 T4T4T4



(b) 平头弹撞击 T12

图 8 实验结果与数值模拟结果对比

图 9 给出了平头弹撞击单层靶的典型数值模拟撞击过程图像,可以观察到平头弹贯穿靶体时发生冲塞破坏.弹体在侵彻靶体过程中,首先挤压剪切靶体,随着侵彻的进行,在弹体前方开始产生微裂纹,裂纹不断扩展,最后冲塞形成并且脱离靶板,弹体穿过靶体,这与实验后观察到的靶体主要失效模式一致.

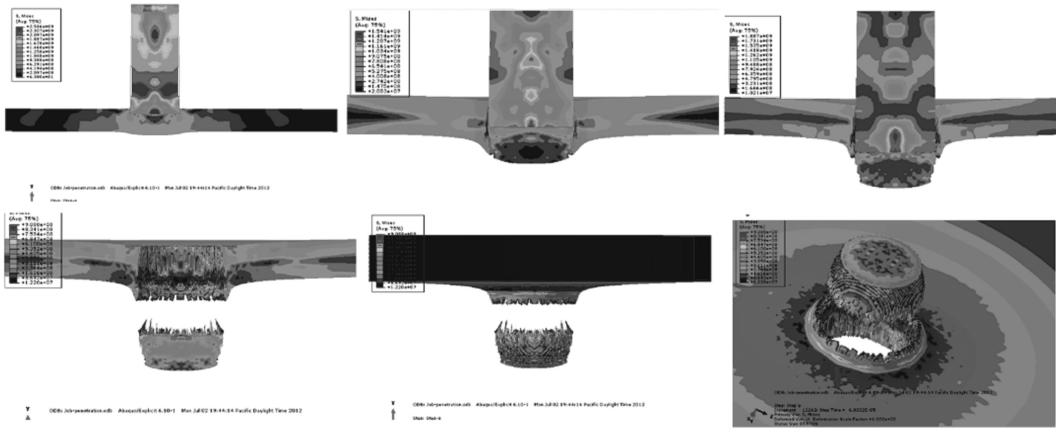


图 9 数值模拟得到的平头弹贯穿 T12 靶图像: $v_i=355.73\text{ m/s}$, $v_r=259.74\text{ m/s}$

图 10 给出了平头弹撞击三层靶典型的数值模拟撞击过程图像,可以观察到平头弹贯穿靶体时发生冲塞破坏,随着叠层顺序在侵彻方向越靠后,靶板结构变形越大.

通过上面的分析,发现数值模拟可以较好地描述平头弹对多层靶的贯穿物理过程,以及给出与实验非常接近的结果,包括弹道极限和初始-剩余速度曲线.

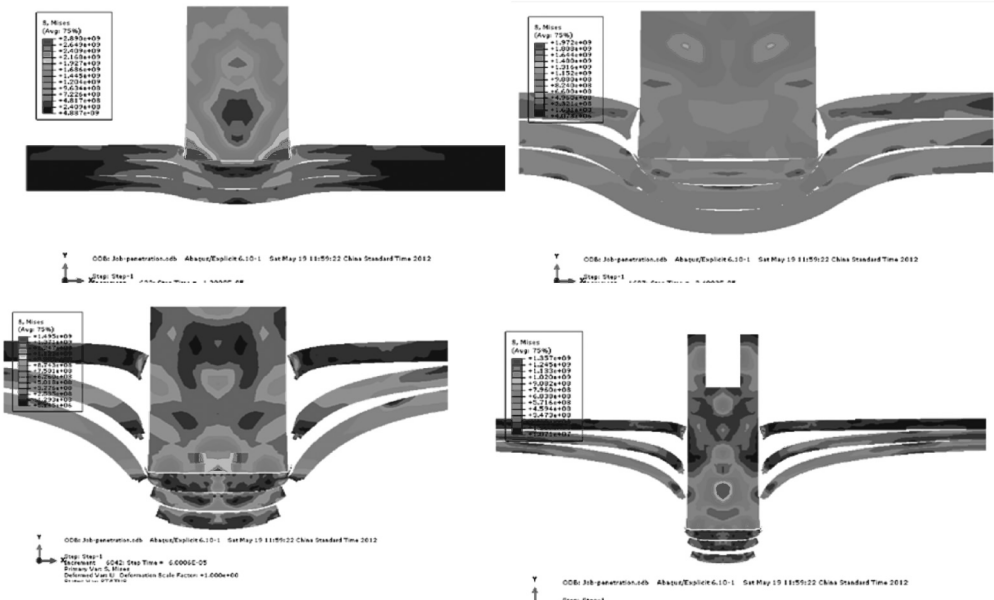


图 10 数值模拟得到的平头弹贯穿 T4T4T4 靶图像: $v_i=315.79\text{ m/s}$, $v_r=209.79\text{ m/s}$

4 结 论

本文研究了单层韧性金属板和接触式三层金属板对平头弹体的抗侵彻性能,分析了靶体结构对抗侵彻性能和失效模式的影响。

1) 实验和数值模拟结果表明,采用合适的弹体和靶板材料本构与失效模型能够有效地预测靶板在弹体撞击下的各种失效现象,通过数值模拟获得的结果和实验结果基本一致,包括弹道极限和剩余速度曲线。

2) 多层板的弹道极限高于单层板,并且多层靶板的失效模式与其在靶中位置相关。

3) 单层板主要失效模式是剪切冲塞,靶板结构变形特别小,而多层板的主要失效模式为拉伸颈缩失效,靶板结构变形明显。

此外,可以进行系统弹体头部形状、靶体总厚度、靶体分层数目、弹体材料力学性能(是否变形)对靶体抗撞击特性的影响。

参考文献

[1] CORBETT G G, REID S R, JOHNSON W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles; a review[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(2): 141-230.

[2] 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.

[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] RADIN J, GOLDSMITH W. Normal projectile penetration

and perforation of layered targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1988, 7(2): 229-259.

[5] NURICK G N, WALTERS C E. The ballistic penetration of multiple thin plates separated by an air gap [C]// Proceedings of SEM conference on experimental mechanics. The Society of Experimental Mechanics. New Mexico: [s.n.], 1990: 631-637.

[6] TENG X, DEY S, BORVIK T, et al. Protection performance of double-layered metal shields against projectile impact[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2007, 2(7): 1309-1330.

[7] TENG X, WIERZBICKI T, HUANG M. Ballistic resistance of double-layered armor plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8): 885-894.

[8] DEY S, BØRVIK T, TENG X, et al. On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44 (20): 6701-6723.

[9] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on the deformation behavior of layered plates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(1): 37-60.

[10] 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): 384-90.

[12] 郭子涛. 弹体入水特性及不同介质条件金属靶的抗侵彻性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 90-100.

(编辑 张 宏)