

文章编号: 1001-1455(2009)04-0434-05

碎片云的毁伤潜力*

崔伟峰^{1,2}, 曾新吾²

(1. 国防科技大学指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出了超高速碰撞研究的工程算法模型, 并采用该模型来模拟弹丸超高速撞击薄板形成的碎片云对后靶的破坏毁伤情况, 与超高速碰撞实验相比较, 数值模拟结果与实验结果较为一致。采用的工程算法模型很好地描述了超高速碰撞现象, 定性地给出了碎片云的毁伤潜力。

关键词: 爆炸力学; 碎片云; 工程算法模型; 超高速碰撞

中图分类号: O383

国标学科代码: 130 · 3530

文献标志码: A

1 引言

航天器的防护为超高速撞击研究的典型应用^[1], 集中体现在撞击后碎片云特征研究和寻求适当的防护结构或材料方面。

在航天器发射和运行过程中, 因遗弃、破损、碰撞和爆炸所产生的大量的空间碎片已经严重威胁着在轨运行和即将发射的航天器。这些空间碎片以超高速运动撞击到航天器, 轻者会在航天器表面留下凹坑和伤痕, 重者会造成灾难性的后果^[2-4]。鉴于空间碎片对航天器构成的潜在威胁日益严重, 迫切需要对碎片超高速撞击进行深入研究^[5]。

由于实验方法和理论分析来处理超高速碰撞问题目前都有一定的困难, 因此采用数值模拟方法来研究碎片云的毁伤潜力。在超高速碰撞数值模拟中, 有限元法和无网格方法应用较为广泛, 并已取得了一定的成果^[6-11]。但是, 这些数值方法都面临一个目前难以克服的困难: 由于实验测量手段的限制, 目前还没有关于材料在超高速碰撞过程中相变和气化的准确的状态方程。所以, 目前的有关超高速碰撞过程的模拟, 通常也不考虑相变和气化现象。本文中提出一种工程算法, 通过等效模型来置换超高速碰撞过程中的冲击相变和气化过程, 可绕过上述困难, 得到较为详细的超高速碰撞过程的数值模拟图像。

2 超高速碰撞实验研究

针对超高速碰撞实验报道较少, 研究多侧重方法和原理的分析^[12]。超高速碰撞实验是在电炮装置上进行的, Mylar 膜飞片经过电炮加速, 超高速撞击双层铝靶板结构产生毁伤破坏响应。图 1 给出了实验原理结构示意图。飞片飞出炮膛速度由 VISAR 速度干涉仪测得, 形成的碎片云变化过程由高速摄影得到。

双层铝靶板材料为 LY12 铝, 密度为 2.7 g/cm^3 , 前板厚度为 0.5 mm , 后板厚度为 3.0 mm ; 飞片材料为 Mylar 膜, 密度为 1.39 g/cm^3 , 直径为 4.0 mm , 厚度为 0.15 mm , 飞片速度为 7.0 km/s 。

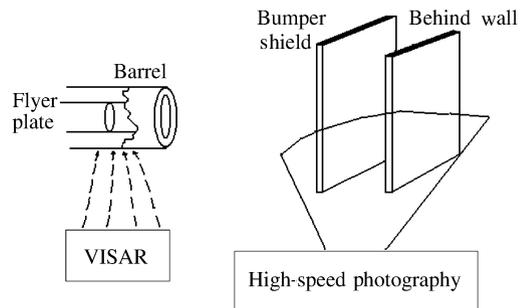


图 1 实验原理结构示意图

Fig. 1 Experimental principle structure

* 收稿日期: 2008-02-22; 修回日期: 2008-11-04

作者简介: 崔伟峰(1977—), 男, 博士, 讲师。

图 2 给出了实验得到的前后靶板的破坏效果图。可以看出,前板被飞片击穿,形成孔洞,破坏较严重。后板由于前板起到了很好的屏障缓冲作用,破坏较小,没有被击穿或形成鼓包。

图 3 给出了高速摄影得到的碎片云形成及运动过程。可以看出,碎片云不仅具有向前的轴向速度,还具有发散的径向速度。同时,因为径向速度的存在,大大分散了碎片云的冲量,减小了对后板的破坏效应。

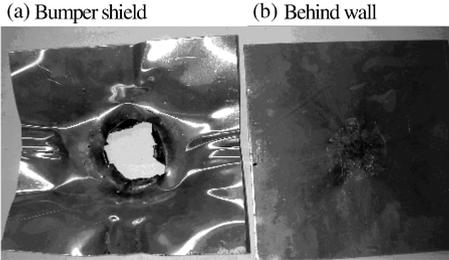


图 2 实验得到的前后板破坏效果

Fig. 2 Damage of bumper shield and behind wall

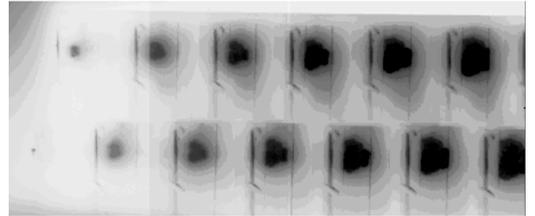


图 3 碎片云高速摄影图像

Fig. 3 High-speed photographs for debris clouds

3 工程算法模型

3.1 工程算法模型的建立

碎片云的形成是薄板超高速碰撞的明显特征。薄板在弹丸超高速碰撞下,背面喷出的碎片云形状类似于一个拉长的气囊袋,图 4 给出的是形成碎片云的简单示意图。碎片云对内部结构的毁伤潜力,主要体现在碎片云单位面积的冲量。这里设想形如气囊袋的碎片云与炸药的爆轰波有某些类似作用,希望通过爆轰波对结构的破毁过程来模拟碎片云对内部结构的毁伤作用,因此提出了数值模拟的工程算法模型。

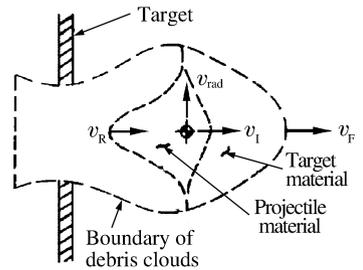


图 4 超高速碰撞形成碎片云简单示意图

Fig. 4 Debris clouds produced by hypervelocity impact

工程模型采取理论分析、经验公式和数值模拟相结合的研究方法。碎片云的产生和结构的响应破坏采取解耦的方式,碎片云的产生采用理论分析和经验公式,而后将其膨胀过程作为输入参数输入到结构的响应破坏的数值模拟中,采用有限元动力学软件 Dyna3D 进行计算。该模型避开了由于碰撞速度过高而引起的超高速碰撞实验和理论计算方面的困难,利用工程数值计算的优势,给出了超高速碰撞形成碎片云的毁伤潜力。

为了等效已设定的炸药的爆轰传播与碎片云的膨胀运动,须做到以下 4 个方面的等效:

- (1) 炸药的质量等效于形成碎片云的弹丸以及破碎屏蔽靶板的质量;
- (2) 炸药的能量等效于碎片云的剩余能量;
- (3) 结构反方向的运动等效于碎片云的质量中心向前速度;
- (4) 单位面积上炸药的动量等效于碎片云单位面积的冲量。

3.2 工程算法模型的实现

超高速碰撞形成碎片云的质量为弹丸原有质量与薄板上破碎的质量之和

$$m_d = m_p + m_s = m_p + \rho_s \pi \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 t_s = m_p (1 + kG^2) \tag{1}$$

式中: m_d 为碎片云质量, m_p 为弹丸质量, m_s 为薄板上破碎的质量, ρ_s 为碎片云密度, d_s 为形成碎片云的薄板直径, t_s 为薄板的厚度, k 为屏蔽板正面与弹丸单位面积的质量之比, G 为形成碎片云的薄板直径与弹丸直径之比,有经验公式^[13]

$$G = 0.45v_p \left(\frac{t_s}{d_p} \right)^{\frac{2}{3}} + 0.9 \quad (2)$$

式中: d_p 为弹丸直径, v_p 为弹丸碰撞速度。

为了实现质量等效, 要求炸药的质量等于超高速碰撞形成碎片云的质量, 即 $m_t = m_d$ 。同时为了使得炸药爆轰效果等效于碎片云的冲击破坏, 还需 2 者的速度、能量、动量均等效。碎片云实际上可看成 1 个薄壳空泡, 所有碎片几乎都集中在薄壳的前半部分的外圈内, 因此碎片云的运动除了具有弹丸撞击方向的轴线直线运动外, 还具有径向碰撞运动, 图 5 给出了碎片云运动的简单示意图。其中, v_p 为弹丸碰撞速度, v_c 为碎片云沿轴线方向运动速度, v_e 为碎片云径向膨胀速度, θ 为碎片云的膨胀半角, 3 个速度均可由经验公式得到^[5]。

碎片云的能量包括碎片云的动能和内能, 动能可由给出碎片云的质量和速度得到, 内能将转换为热能、材料的断裂以及熔化或气化能、碎片云的膨胀能, 可由弹丸动能 E_p 与碎片云动能 E_c 之差得到

$$E_e = E_p - E_c = \frac{kG^2}{1 + kG^2} E_p \quad (3)$$

把 E_e 作为炸药能量带入计算, 用炸药所产生的冲击波来模拟碎片云的膨胀运动, 同时为了等效碎片云轴线方向的直线运动, 需给后板 1 个方向的初速度 $v_0 = -v_c$ 。

碎片云的面积动量有

$$P_m = \frac{m_p v_p (1 + G\sqrt{Qk})^3}{4\pi h^2 QkG^2} \quad (4)$$

式中: h 为双层板结构 2 板之间的空间距离。从式(4)中可以看出, 在其他条件不变的情况下, 增大 2 板之间的距离对后板的防护是有好处的。

动量等效要求爆轰波阵面的面积冲量等于碎片云的面积动量, 即 $I_t = P_m$, 爆轰波阵面的面积冲量为^[14]

$$I_t = \frac{m_t D}{27\pi r^2} \quad (5)$$

式中: D 为炸药爆速, r 为炸药距离后板的距离。可由式(5)确定炸药放置的具体位置。以上就是工程算法模型实现的具体过程, 通过炸药的爆破毁伤来模拟碎片云的破坏效果。

3.3 数值模拟结果验证与分析

采用工程模型模拟飞片撞击双层靶板结构实验, 分析产生的碎片云对后板的毁伤破坏能力。采用 Dyna3D 软件计算炸药对双层板结构中后板的破坏响应时, 采取流固耦合的方法, 炸药和空气采用欧拉算法, 后板采用拉氏算法。

图 6 给出数值模拟得到的后板几个不同时刻的等效力分布, 反映了飞片击穿屏蔽靶板之后形成的碎片云对后板的毁伤破坏。由图可见, 中心区域受力较大, 外围环状区域受力一致, 说明数值计算模拟的碎片云的膨胀是对称的、均匀的。后板没有被击穿, 靶板背面没有鼓包或隆起, 没有崩落, 说明前靶起到了很好的防护屏蔽作用。

图 7 给出了中心点附近的单元 13 492 的等效力曲线, 图中显示该单元的最大等效力为 260.87 MPa, 小于数值模拟给出的 LY12 铝失效力, 因此后板没有破碎或被击穿, 即飞片击穿前靶所形成的碎片云对后板的毁伤潜力较小。

数值模拟得到的后板破坏毁伤情况, 与实验得到的后板破坏情况(见图 2)较为相符, 说明采用工程算法模型得到的碎片云对后板毁伤研究是较为准确的。数值模拟结果较清晰地描述了相应的超高速碰撞现象, 能定性地描述超高速碰撞的物理过程, 给出基本正确的结果。

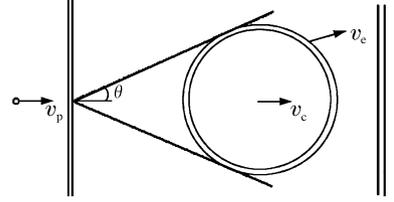


图 5 碎片云运动简单示意图
Fig. 5 Movement of debris clouds

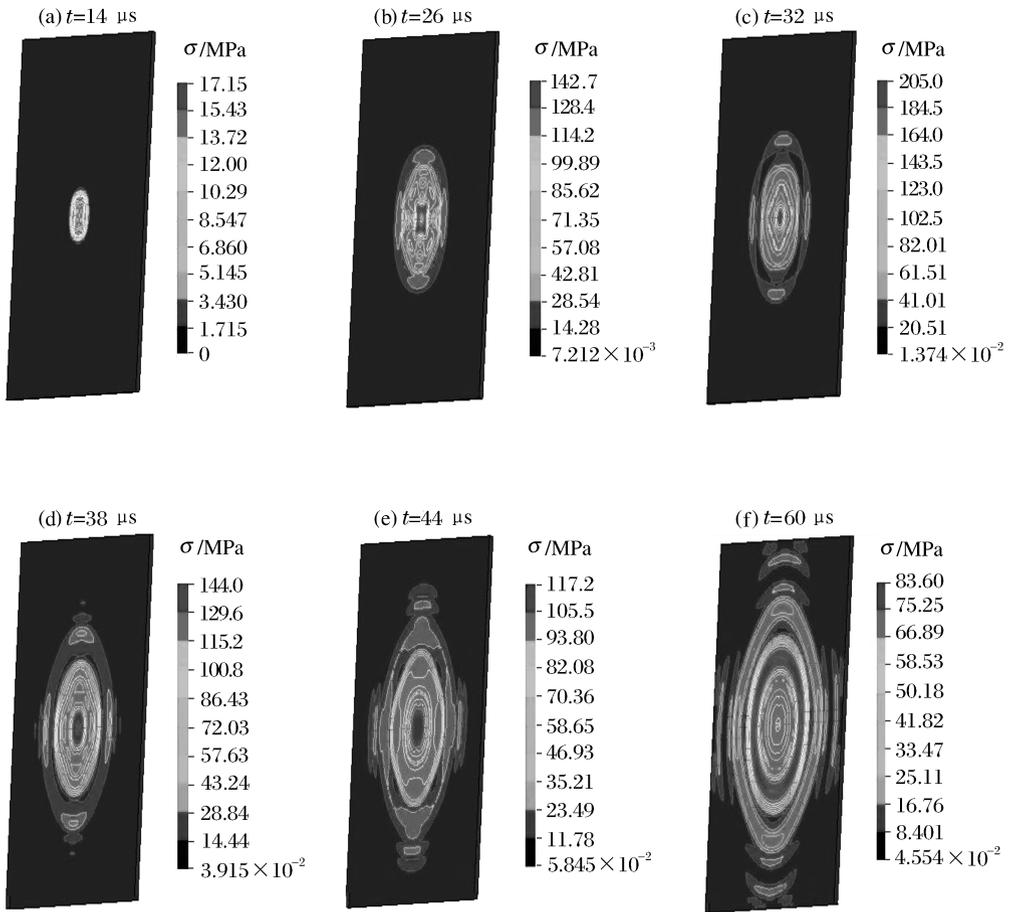


图 6 不同时刻后板等效应力分布示意图

Fig. 6 Effective stress distribution at the different moments

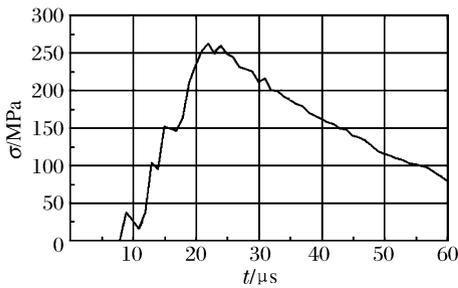


图 7 后板中心点附近某一单元的等效应力曲线

Fig. 7 Effective stress of a certain element near the center of the behind wall

4 结 论

采用工程算法模拟了飞片超高速撞击双层结构的物理过程,得到了形成的碎片云对内部结构的毁伤破坏情况,数值模拟较全面地分析了相应的超高速碰撞现象。同时,数值模拟结果与超高速碰撞实验结果相比较,验证了数值模拟的可行性及准确性。通过比较可知,数值模拟结果与实验结果较一致,能为实验和理论方面的研究提供一定的依据,为超高速碰撞动力学问题的研究提供了相应的解决方法。

参考文献:

[1] 曲广吉,韩增尧. 空间碎片超高速撞击动力学建模与数值仿真技术[J]. 中国空间科学技术,2002,22(5):26-30.
 QU Guang-ji, HAN Zeng-yao. Dynamical modeling and numerical simulation of hypervelocity space debris impact [J]. Chinese Space Science and Technology, 2002,22(5):26-30.

[2] Piekutowski A J. Holes produced in thin aluminum sheets by the hypervelocity impact of aluminum spheres[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,23:711-722.

[3] 马晓青,韩峰. 高速碰撞动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1996.

- [4] Kinslow R. High-velocity impact phenomena[M]. New York: Academic Press, 1970.
- [5] 张庆明, 黄风雷. 超高速碰撞动力学引论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [6] 马上, 张雄, 邱信明. 超高速碰撞问题的三维物质点法[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 273-278.
MA Shang, ZHANG Xiong, QIU Xin-ming. Three dimensional material point method for hypervelocity impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3): 273-278.
- [7] 阎晓军, 张玉珠, 聂景旭. 超高速碰撞下 Whipple 防护结构的数值模拟[J]. 宇航学报, 2002, 23(5): 81-84.
YAN Xiao-jun, ZHANG Yu-zhu, NIE Jing-xu. Numerical simulation of the Whipple shield under hypervelocity impact[J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(5): 81-84.
- [8] 龚祖荣, 徐兰菊. 单层及双层板的超高速碰撞试验(速度超过 10 km/s)的数值模拟[J]. 航天器环境工程, 2000, 5: 65-73.
GONG Zu-rong, XU Lan-ju. Numerical simulations of hypervelocity impact experiments at velocities in excess of 10km/s involving single and double plates[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2000, 5: 65-73.
- [9] 徐志宏, 汤文辉, 罗永. 光滑粒子模拟方法在超高速碰撞现象中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(1): 53-58.
XU Zhi-hong, TANG Wen-hui, LUO Yong. Applications of the smoothed particle hydrodynamics method to hypervelocity impact simulations[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(1): 53-58.
- [10] 王芳, 李磊, 金俊, 等. 空间碎片超高速碰撞的数值方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(5): 26-30.
WANG Fang, LI Lei, JIN Jun, et al. Study on numerical simulation of hypervelocity impact of debris in outer space[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(5): 26-30.
- [11] 阎晓军, 张玉珠. 空间碎片超高速碰撞数值模拟的 SPH 方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(3): 351-354.
YAN Xiao-jun, ZHANG Yu-zhu. Numerical simulation of space debris hypervelocity impact using SPH method [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(3): 351-354.
- [12] 王本利, 孔宪仁, 朱桂东, 等. 超高速碰撞数值模拟[J]. 宇航学报, 1995, 16(2): 41-45.
WANG Ben-li, KONG Xian-ren, ZHU Gui-dong, et al. The numerical simulation of hypervelocity impact[J]. Journal of Astronautics, 1995, 16(2): 41-45.
- [13] Maiden C J, McMillan A R. An investigation of the protection afforded a spacecraft by a thin shield[J]. AIAA Journal, 1964, 2(11): 1992-1998.
- [14] 张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.

Simulation investigations on debris cloud impact damage potential

CUI Wei-feng^{1,2}, ZENG Xin-wu^{2*}

(1. *Foundation-Educational College of Command Officer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;*

2. *College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)*

Abstract: An engineering algorithm model was proposed to simulate the damage of dual-wall structures from debris clouds generated by hypervelocity impact. The corresponding hypervelocity impact experiment was conducted on the aluminum dual-wall structure impacted by the Mylar film flyer plate driven by an electric gun. The numerical simulations are consistent with the experimental results.

Key words: mechanics of explosion; debris clouds; engineering algorithm model; hypervelocity impact

* Corresponding author: ZENG Xin-wu
Telephone: 86-731-4573775

E-mail address: x. w. zeng@139.com