

蜂窝铝的侵彻实验研究与有限元模拟

欧阳昊, 成伟

(中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

摘要:目的 研究弹体侵彻蜂窝铝的力学行为。方法 在实验中,通过轻气炮加速的尼龙弹体冲击蜂窝铝靶体。利用Ansys/LS-DYNA建立了弹体侵彻蜂窝铝的壳单元有限元模型。结果 实验给出了冲击速度为140和167 m/s时弹体的加速度曲线。运用壳单元模型对蜂窝铝的侵彻进行模拟,得到了弹体的加速度曲线以及蜂窝铝在侵彻过程中的变形图。结论 将模拟结果与实验结果进行了对比,发现模拟结果与实验结果符合较好,证明了壳单元有限元模型模拟蜂窝铝侵彻行为的可靠性。

关键词: 蜂窝铝; 侵彻; 实验研究; 有限元

中图分类号: TB484.4; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)23-0075-03

Experimental Study and Finite Element Simulation on Penetration of Aluminum Honeycomb

OUYANG Hao, CHENG Wei

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the mechanical behavior of the projectile penetration into aluminum honeycomb. The aluminum honeycomb target was impacted in the experiment by nylon projectile which was accelerated by light gas gun. The shell finite element model of the projectile penetration into aluminum honeycomb was established by Ansys/LS-DYNA. The acceleration curves of the projectile were given experimentally when the impact velocities were 140 and 167 m/s, respectively. The penetration of aluminum honeycomb was simulated using the shell element model, obtaining the acceleration curves of the projectile and the deformation graphs of aluminum honeycomb during the penetration. The simulation results coincided well with the experimental results, which proved that the shell element model was reliable to simulate the penetration of honeycomb aluminum.

KEY WORDS: aluminum honeycomb; penetration; experimental study; finite element

蜂窝铝是一种良好的缓冲吸能材料,在动态冲击过程中能够吸收大量的能量,因此被制成各种缓冲吸能构件,广泛应用于军事、交通运输、包装和建筑等领域^[1-4]。

国内外关于蜂窝铝的研究有很多,主要通过理论分析、实验以及数值模拟研究蜂窝铝力学性能。Gibson和Ashby^[5]理论分析了蜂窝材料共面和异面力学性能。于江等^[6]模拟研究了圆形蜂窝铝的共面冲击

力学性能。D. Ruan等^[7]通过有限元分析研究了蜂窝铝的面内动态压缩的变形模式和平台应力。孙德强等^[8]通过数值模拟研究了双壁厚蜂窝铝芯在共面冲击载荷作用下的变形模式、弹性模量和能量吸收。HULL等^[9]利用Ansys/LS-DYNA研究了高速冲击下蜂窝铝的面内坍塌变形机制,给出了动态载荷下蜂窝铝的平台应力公式。ZOU Z等^[10]通过数值模拟研究了在共面冲击载荷下蜂窝铝的平台应力和能量吸收情况。

收稿日期: 2015-03-31

作者简介: 欧阳昊(1989—),男,四川绵阳人,中国工程物理研究院硕士生,主攻高性能计算机与数值模拟。

通讯作者: 成伟(1972—),男,湖南湘乡人,中国工程物理研究院研究员,主要从事工程数值模拟以及冲击动力学研究。

QIU X M^[11-12]理论分析了蜂窝的面内准静态平台应力,模拟研究了蜂窝铝的面内动态响应,得到了动态载荷下的平台应力公式。T Wierzbicki等^[13]对金属蜂窝的异面压缩力学性能进行了研究,提出了静态异面坍塌应力的公式。M Yamashita^[14]采用实验和数值模拟相结合的方法,分析了蜂窝铝的异面压缩力学行为。王永宁^[15]建立了铝蜂窝大变形有限元模型,对铝蜂窝异面动态力学行为进行了模拟。

以上研究大多是关于蜂窝铝的压缩力学性能,对蜂窝铝的侵彻少有涉及。文中主要通过实验结合有限元模拟的方法研究蜂窝铝的侵彻力学行为。

1 实验

1.1 试件与实验条件

试验用蜂窝铝为厚壁蜂窝铝,由壁厚为0.8 mm的Al3003铝箔粘结自制而成。蜂窝胞元的边长为8 mm,蜂窝铝靶整体结构尺寸为500 mm × 430 mm × 400 mm。铝箔密度为2700 kg/m³,弹性模量为69 GPa,屈服应力为120 MPa。尼龙弹体质量为3.7 kg,密度为1630 kg/m³,弹性模量为8.64 GPa。由于蜂窝铝靶的制作困难,目前只进行了2发实验,弹体冲击速度分别为140和167 m/s。

1.2 数据测量

弹体侵彻蜂窝铝实验的装置见图1。尼龙弹体通过轻气炮(未在装置图中)加速获得一定的初速度,从左侧短截管道进入冲击右侧的蜂窝铝靶体。蜂窝铝靶体通过两档板固定。在左侧短截管道入口有两根通电的细铜丝,弹体冲断细铜丝,通过获得的电信号来测量弹体的初速度。在尼龙弹体的内部有加速度传感器,用以测量弹体侵彻蜂窝铝过程中的加速度曲线。

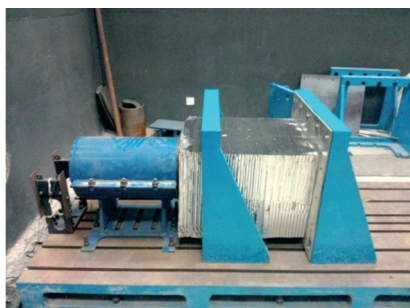


图1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

2 有限元模型

利用Ansys/LS-DYNA建立弹体侵彻蜂窝铝的壳单元有限元模型。为了减小计算规模,根据对称性,建立1/2模型,见图2。蜂窝胞元边长为8 mm,壁厚0.8 mm,面内有41 × 31个窝孔阵列,1/2模型蜂窝整体尺寸约为496 mm × 429.5 mm × 200 mm。蜂窝靶体材料选取塑性动力学本构,力学参数为:密度 $\rho=2700$ kg/m³,弹性模量 $E_s=68.97$ GPa,屈服应力 $\sigma_y=120$ MPa,泊松比 $\nu=0.35$,正切模量 $E_{tan}=689.7$ MPa,失效应变为0.5。圆柱形的尼龙弹体半径为6 mm,高为200 mm。由于实验前后弹体变形较小,在模型中视为刚体,密度 $\rho=1630$ kg/m³,泊松比 $\nu=0.3$,弹性模量 $E_s=8.64$ GPa,1/2模型弹体质量约为1.85 kg。利用5个积分点Shell 163单元划分蜂窝铝靶体,每个正六边形边划分8个单元。弹体为六面体实体单元,自动网格划分Smartsizes值为5。整个模型有927 726个节点,935 202个单元。尼龙弹体与蜂窝铝靶体之间设为侵彻面面接触,蜂窝铝铝箔之间设为自动单面接触。尼龙弹体的初速度设置与实验相同,分别为140和167 m/s。

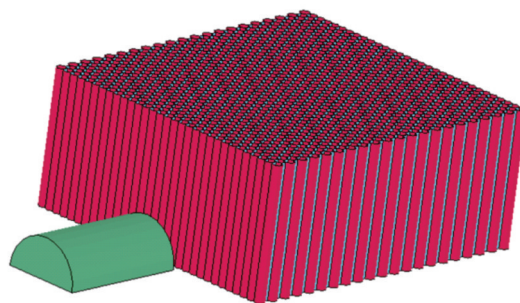


图2 弹体侵彻蜂窝铝有限元模型

Fig.2 Finite element model of the projectile penetration into aluminum honeycomb

3 结果分析与对比

实验后的蜂窝铝与有限元模拟的变形见图3。从图3可以看出,尼龙弹体侵彻蜂窝铝主要是发生局部的剪切、撕裂变形,蜂窝铝的整体结构变形较小。这是因为试验用蜂窝铝强度较低,蜂窝铝在受到弹体撞击时材料首先失效破坏,而整体的结构并未受到足够的作用力使之变形。

冲击初速度为140和167 m/s时尼龙弹体在侵彻蜂窝铝过程中实测的加速度曲线和模拟所得的弹体加速度曲线的对比见图4。

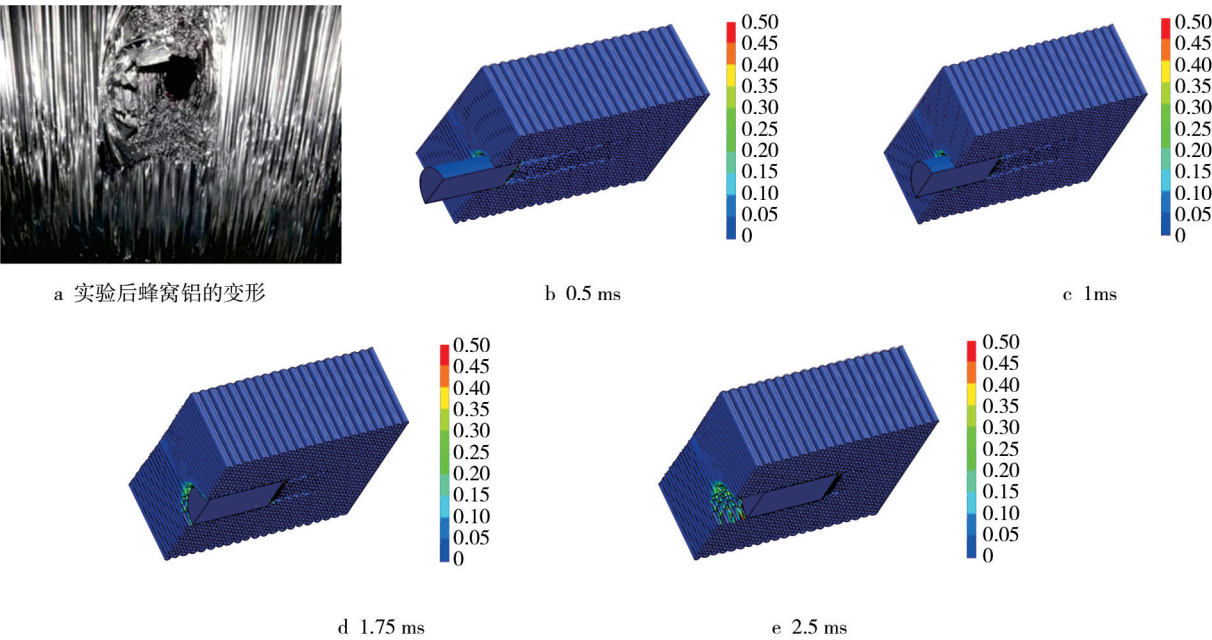


图3 实验后的蜂窝铝与有限元分析蜂窝铝的变形
Fig.3 Experimental and FE deformation of aluminum honeycomb

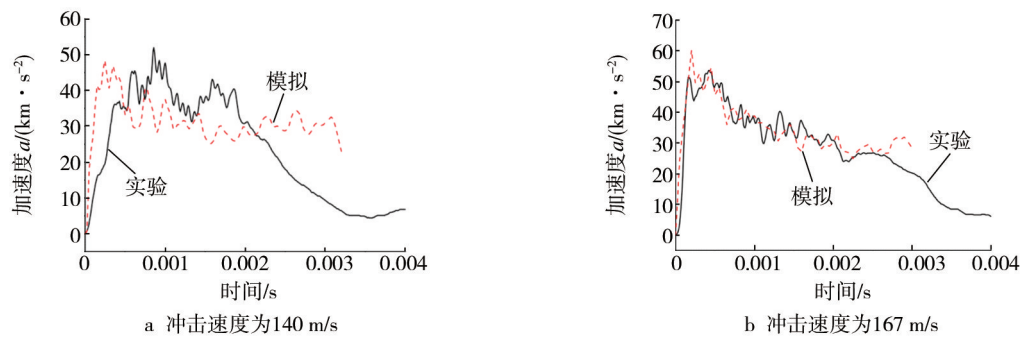


图4 弹体的加速度曲线
Fig.4 The acceleration curves of the projectile

从图4中可以看出,冲击初速度为167 m/s时的实测加速度曲线与模拟所得的加速度曲线符合得很好,而冲击初速度为140 m/s时的实测加速度曲线与模拟结果符合程度稍次。分析认为,可能是由于蜂窝铝靶制作时的差异所致。分析侵彻过程中的实验测得的弹体加速度曲线可以看出:在0~2 ms的初始侵彻过程中,加速度在30~50 km/s²左右,2 ms时加速度剧烈下降,3 ms之后的弹体的加速度相对于初始侵彻时很小。这表明,弹体在侵彻蜂窝铝的过程中,初始时由于速度较高,受到较大的作用力,蜂窝铝靶体主要受到剪切撕裂破坏;随着弹体速度的减小,加速度迅速减小,在3 ms之后蜂窝铝靶体主要是受到弹体的局部压缩作用。

4 结语

通过实验结合有限元模拟的方法研究了蜂窝铝的侵彻力学行为。利用Ansys /LS-DYNA有限元软件建立了弹体侵彻蜂窝铝的壳单元有限元模型,分析了蜂窝铝受到侵彻作用时的变形图,对比了弹体的实测加速度曲线和模拟所得的加速度曲线。模拟结果表明,蜂窝铝壳单元模型能够较为准确地反映弹体侵彻蜂窝铝的过程,为后续的实验提供了一定的参考。

参考文献:

[1] 王梅. 蜂窝纸板缓冲性能的研究及应用[J]. 包装工程, (下转第93页)

- ing Engineering, 2014, 27(5): 139—140.
- [10] 王耀庭, 马雪梅, 陈安军. 3-PPRR 平移分拣并联机器人的运动学分析[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 55—59.
WANG Yao-ting, MA Xue-mei, CHEN An-jun. Kinematics Analysis of 3-PPRR Translational Sorting Parallel Robot[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 55—59.
- [11] 王丹, 杨兰松, 郭辉. 3-RPS 型并联机器人的运动学及动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2007(3): 120—121.
WANG Dan, YANG Lan-song, GUO Hui. Kinematic and Dynamic Analysis of 3- RPS parallel robot on ADAMS[J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(3): 120—121.
- [12] 姚莉君. 三自由度平动并联机构的动力学与控制系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
YAO Li-jun. Research on Dynamics and Control System of the 3-dof Translational Parallel Mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [13] 孟飞. 极限边界搜索实现的并联机构工作空间分析[J]. 制造业自动化, 2006(12): 113—115.
MENG Fei. Limit of Search for Analysis of the Working Space of Parallel Mechanism[J]. Manufacturing Automation, 2006(12): 113—115.
- [14] LI Y, XU Q. Kinematic Analysis and Design of a New 3-DOF Translational Parallel Manipulator[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(4): 729—737.
- [15] 段鹏, 何庆中, 王浦全, 等. 白酒包装线搬运机器人轨迹曲线研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 22—24.
DUAN Peng, HE Qing-zhong, WANG Pu-quan, et al. Trajectory Curve of the Liquor Packing Line Moving Robot[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 22—24.
- [16] 刘凉, 陈超英, 赵新华. 考虑关节摩擦的并联机器人平滑轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2014(9): 41—43.
LIU Liang, CHEN Chao-ying, ZHAO Xin-hua. Considering the Smooth Trajectory Planning of Parallel Robot with Joint Friction[J]. Mechanical Engineering, 2014(9): 41—43.

(上接第 77 页)

- 2000, 21(4): 5—8.
WANG Mei. The Research of the Honeycomb Fiber-board Crushing Performance and the Application[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(4): 5—8.
- [2] 孙玉瑾, 骆光林. 六边形蜂窝芯材异面冲击性能的有限元研究[J]. 包装工程, 2012, 33(17): 60—62.
SUN Yu-jin, LUO Guang-lin. Finite Element Analysis of Hexagonal Honeycomb's Out-of-plane Impact Performance[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 60—62.
- [3] 陈永军, 左孝青, 史庆南, 等. 金属蜂窝的开发、发展和应用[J]. 材料导报, 2003, 17(12): 32—35.
CHEN Yong-jun, ZUO Xiao-qing, SHI Qing-nan, et al. Development and Application of Honeycombed Metal[J]. Materials Review, 2003, 17(12): 32—35.
- [4] 王堃, 孙勇, 彭明军, 等. 基于 ANSYS 的铝蜂窝夹芯板低速冲击仿真模拟研究[J]. 材料导报: 研究篇, 2012, 26(4): 157.
WANG Kun, SUN Yong, PENG Ming-jun, et al. Simulation of Low-velocity Impact of Aluminium Honeycomb Sandwich Panels With ANSYS[J]. Mater Rev: Res, 2012, 26(4): 157.
- [5] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure and Properties[M]. Oxford: Pergamon Press, 1988.
- [6] 于江, 李晓娟. 圆形金属蜂窝芯材冲击性能的有限元分析[J]. 包装工程, 2008, 29(11): 30—31.
YU Jiang, LI Xiao-juan. Finite Element Analysis on the Impact Performance of Circular Metal Honeycomb Core[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(11): 30—31.
- [7] RUAN D, LU G, WANG B, et al. In-plane Dynamic Crushing of Honeycombs: A finite Element Study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(3): 161—182.
- [8] 孙德强, 张卫红. 双壁厚蜂窝铝芯的共面冲击力学性能[J]. 振动与冲击, 2008, 27(7): 69—74.
SUN De-qiang, ZHANG Wei-hong. In-plane Impact Properties of Aluminum Double-walled Honeycomb Cores[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(7): 69—74.
- [9] HU L L, YU T X. Dynamic Crushing Strength of Hexagonal Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010(37): 467—474.
- [10] ZOU Z, REID S R, TAN P J, et al. Dynamic Crushing of Honeycombs and Features of Shock Fronts[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009(36): 165—176.
- [11] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of Periodic Planar Lattices under Uniaxial Compression, Part I: Quasi-static Strength Predicted by Limit Analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009(36): 1223—1230.
- [12] QIU X M, ZHANG J, YU T X. Collapse of Periodic Planar Lattices under Uniaxial Compression, Part II: Dynamic Crushing Based on Finite Element Simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009(36): 1231—1241.
- [13] WIERZBICKI T. Crushing Analysis of Metal Honeycombs[J]. International Journal of Impact Engineering, 1983, 1(2): 157—174.
- [14] YAMASHITA M, GOTOH M. Impact Behavior of Honeycomb Structures with Various Cell Specifications—numerical Simulation and Experiment[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 32(1—4): 618—630.
- [15] 王永宁, 李大永. 铝蜂窝异面变形的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2006, 17(增刊): 340—343.
WANG Yong-ning, LI Da-yong. Numerical Simulations of Aluminum Honeycomb Out-plane Deformation[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(S1): 340—343.