

# 机载设备电子芯片缓冲橡胶蜂窝夹层 抗跌落冲击性能

李学仁,张卓航,杜军,常飞

空军工程大学航空航天工程学院,西安710038

**摘要** 以飞机高速飞行环境下某机载设备电子芯片跌落为例,研究了电子芯片缓冲橡胶蜂窝夹层的抗冲击性能。对缓冲橡胶夹层采用不同的蜂窝构型,即分别纵向开孔、横向开孔和选择不同孔径,利用Abaqus有限元分析软件进行仿真实验,研究蜂窝的开孔结构及孔径大小对缓冲橡胶夹层抗冲击性能的影响。结果表明,缓冲橡胶夹层的蜂窝结构相对于实体结构能显著提高其抗跌落冲击性能(提高22%~33%),纵向开孔结构的抗冲击效果优于横向开孔结构(提高3%~6%),而在设计范围内的孔径大小对抗冲击效果的影响不明显。

**关键词** 电子芯片;缓冲橡胶蜂窝夹层;抗跌落冲击性能

**中图分类号** V214.6

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.004

## Impact Resistance of the Honeycomb Structure of Cushion Rubber in Electronic Chips on Aeroplanes

LI Xueren, ZHANG Zhuohang, DU Jun, CHANG Fei

School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

**Abstract** Impact resistance of electronic chips has been a concern in the aeroplane industry. Based on dropping of the electronic chip on a specific device on the plane, this paper studies the impact resistance of the honeycomb structure of cushion rubber in electronic chips in devices on aeroplanes. Different honeycomb structures are adopted to study the relationship between the structure and impact resistance by using the finite element analysis software Abaqus. Different trepanning directions and sizes of the honeycomb are considered. The results show that the honeycomb structure improves the impact resistance of electronic chips compared with the solid ones, increasing the performance by 22%~33%. The impact resistance of longitudinal direction of trepanning is better than that of the transverse direction of trepanning, while the effect of trepanning size in this experiment is not apparent. The honeycomb structure can be easily manufactured, which means this study has engineering values.

**Keywords** electronic chip; honeycomb structure of cushion rubber; impact resistance against dropping

随着飞机的飞行速度及高度的提高,机载设备的工作环境更加复杂,有时会发生器件跌落的突发情况,因此,对机载设备器件的抗跌落冲击缓冲设计提出了更高的要求。现有机载设备器件的缓冲夹层所用材料主要是实体橡胶,其实效已在实践中得到验证,但实体结构缓冲橡胶的抗冲击性能不足。目前圆孔形蜂窝结构因其密度小、抗压强度低、压缩形变量大、吸能多以及可设计性强等优点在减振、抗冲击等领

域得到广泛应用和研究。Liu等<sup>[1]</sup>利用数值解法对蜂窝结构在两种热传导模式下的抗冲击载荷作用进行了分析。Ooba等<sup>[2]</sup>对一类蜂窝结构的动态稳定性进行了研究。Jia等<sup>[3]</sup>将蜂窝结构推广到PDMS的结构表面并进行了分析。Drake等<sup>[4]</sup>对大型蜂窝结构的阻尼进行了分析,其主要应用背景是减振。Gibson<sup>[5]</sup>、Liew等<sup>[6]</sup>采用有限元法对蜂窝结构的振动响应进行了分析求解。Wang等<sup>[7]</sup>对蜂窝夹层结构的吸能性能进行了

收稿日期:2013-12-30;修回日期:2014-05-25

作者简介:李学仁,教授,研究方向为导航制导与控制,电子信箱:lixueren@126.com;张卓航(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为高速冲击防护,电子信箱:zhangzhuohang23@163.com

引用格式:李学仁,张卓航,杜军,等.机载设备电子芯片缓冲橡胶蜂窝夹层抗跌落冲击性能[J].科技导报,2014,32(20):33-36.

研究。Aminanda 等<sup>[8]</sup>通过实验对蜂窝基体进行了抗冲击分析。Yang<sup>[9]</sup>利用有限元法分析了具有负泊松比的蜂窝结构几何尺寸对塑性的影响。肖锋等<sup>[10]</sup>将分层架构引入蜂窝结构,分析了结构的抗冲击性能。在已有研究成果中,目前尚未见到将蜂窝结构用于机载设备抗跌落冲击的报道。本文以飞机高速飞行环境下某机载设备电子芯片发生跌落为背景,参考蜂窝结构设计思路,研究电子芯片缓冲橡胶夹层蜂窝结构的抗冲击性能。

## 1 有限元模型

以某型机载设备电子芯片的缓冲橡胶夹层为研究对象,

建立其三维有限元模型如图1所示。图1(a)为缓冲橡胶实体结构(结构1);图1(b)、图1(c)为横向开孔蜂窝结构,其中图1(b)为小直径均匀圆孔蜂窝(结构2),图1(c)为大直径均匀圆孔蜂窝(结构3);图1(d)、图1(e)为纵向开孔蜂窝结构,其中图1(d)为小直径圆孔蜂窝(结构4),图1(e)为大直径圆孔蜂窝(结构5)。小孔蜂窝的孔径设计为2.55 mm,大孔蜂窝的孔径设计为3.5 mm。蜂窝孔内表面设置为自接触,以避免跌落中因材料大变形产生自接触。缓冲夹层单元类型选用C3D8R,网格尺寸选择0.5 mm,网格生成采用扫略网格方式。以赋予电子芯片初始速度为条件模拟其跌落行为,并对地面做刚体化处理。

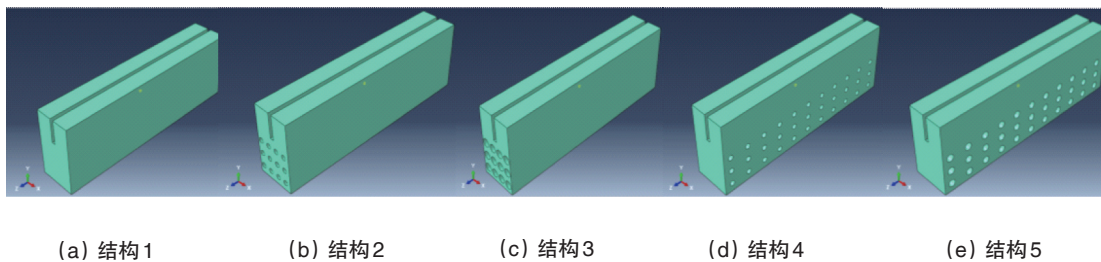


图1 不同结构橡胶蜂窝夹层的有限元模型

Fig. 1 Finite element models of various hyperplastic rubber honeycomb structures

缓冲夹层所用橡胶为非线性、可逆(弹性)响应的超弹性材料,其应力-应变关系呈现高度的非线性,同时在实际使用中常常伴随着大变形或者大应变<sup>[9]</sup>。橡胶材料的非线性可以通过不同的超弹性模型描述。根据橡胶类型和实验数据的不同,所采用的超弹性模型也不尽相同。本研究选用Abaqus自带的Arruda-Boyce、NeoHooke、Yeoh、Marlow、Mooney-Rivlin、Odgen和VanderWaals 7种超弹性模型<sup>[10-12]</sup>。

利用7种超弹性模型,分别对单轴拉伸实验、双轴拉伸实

验和平面剪切实验得到的数据进行拟合,其结果如图2~图4所示。由图2可知,对于单轴拉伸实验数据,7种超弹性模型的拟合结果相差不大,均低于实际测试数据。由图3、图4可知,对于双轴拉伸实验数据和平面剪切实验数据,在小应变条件下,7种超弹性模型中Marlow模型的拟合结果最为精确,在大应变条件下,Yeoh模型最为精确。本研究所用材料的应变较大,因此选择Yeoh超弹性模型拟合实验数据进行仿真计算。

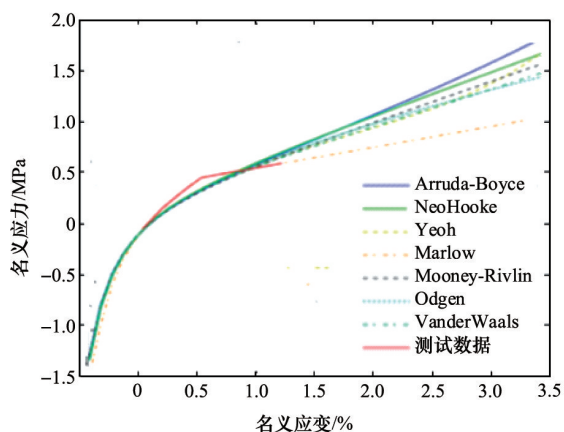


图2 单轴拉伸数据及拟合曲线

Fig. 2 Fitted curves of test data (uniaxial tension)

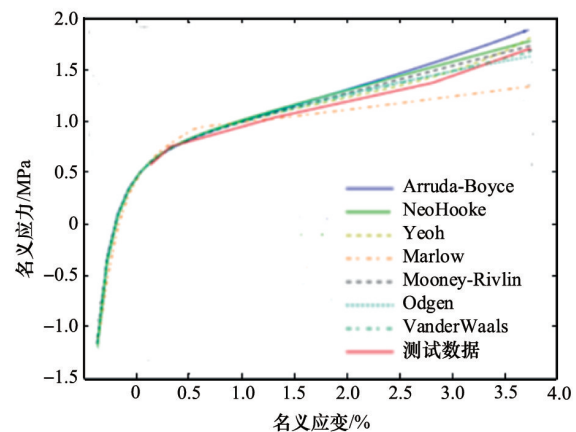


图3 双轴拉伸数据及拟合曲线

Fig. 3 Fitted curves of test data (biaxial tension)

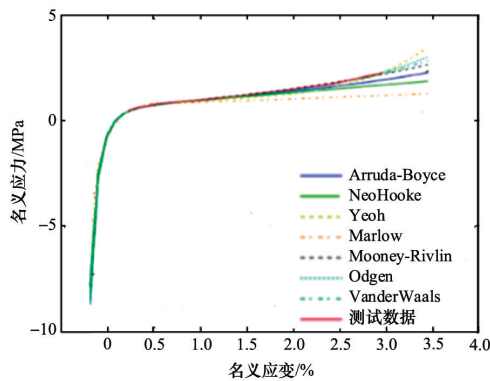


图4 平面剪切数据及拟合曲线

Fig. 4 Fitted curves of test data (planar shear)

## 2 仿真结果与分析

根据实际测试分析结果,器件在静态环境下跌落时,以 15 m/s 的速度接触地面;在飞机高速飞行环境下机载设备器件跌落时,以 35 m/s 的速度接触地面。仿真分别采用 15 m/s、35 m/s 为初始速度,以芯片的 3 个关键焊点为观测点,通过监测缓冲橡胶夹层撞击地面时芯片观测点的瞬时加速度,研究缓冲橡胶夹层的吸能抗冲击效果。缓冲橡胶夹层跌落撞击地面时受冲击载荷作用而产生瞬时加速度,缓冲橡胶夹层的吸能作用越强,产生的瞬时加速度越小,因此以缓冲橡胶夹层与地面撞击的瞬时加速度来衡量其抗冲击性能。

电子芯片以 15 m/s 的初始速度跌落时,芯片缓冲橡胶夹层实体结构(结构 1)的变形云图如图 5 所示;分别在 3 个测点监测到的芯片 5 种缓冲橡胶夹层结构(结构 1~结构 5)的瞬时加速度变化如图 6 所示。结构 2~结构 5 由于其圆孔蜂窝结构的缓冲吸能作用,所受冲击载荷作用延迟,产生瞬时速度的时间比结构 1 明显滞后,瞬时加速度比结构 1 明显减小,说明蜂窝结构的抗冲击性能明显优于实体结构。结构 4、结构 5 的瞬时加速度峰值比结构 1 减小 33%,结构 2、结构 3 的瞬时加速度峰值比结构 1 减小 27%,说明结构 4、结构 5 的缓冲吸能效果优于结构 2 和结构 3,即在本仿真条件下,纵向开孔结构的抗冲击性能优于横向开孔结构。此外,缓冲夹层采用不同孔径的蜂窝结构时,瞬时加速度曲线基本重合,因此孔径大小在本仿真条件下对缓冲性能影响不明显,可忽略不计。

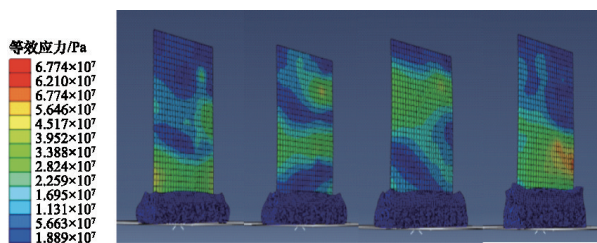
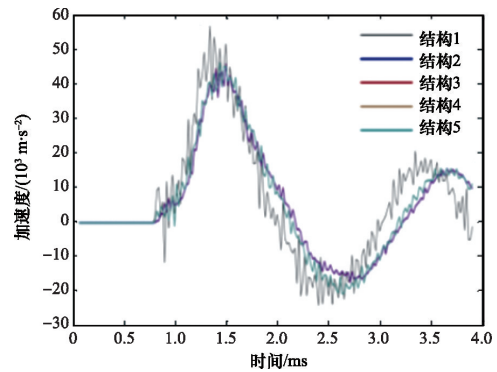
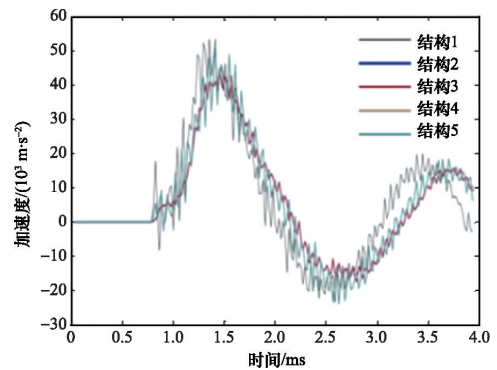


图5 跌落冲击下结构 1 的变形响应

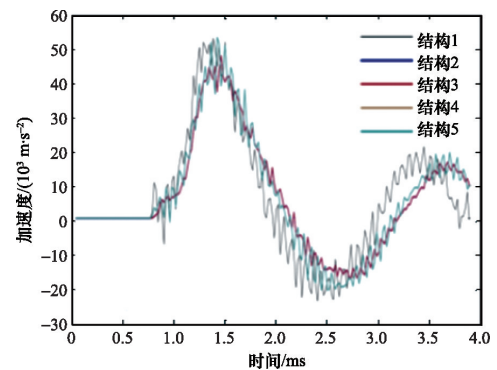
Fig. 5 Deformation response of structure 1 under dropping impact



(a) 观测点 1



(b) 观测点 2



(c) 观测点 3

图6 15 m/s 观测点瞬时加速度

Fig. 6 Instant acceleration at the observation site at 15 m/s

电子芯片以 35 m/s 的初始速度跌落时,分别在芯片 3 个测点监测到的 5 种结构缓冲橡胶夹层的瞬时加速度变化情况如图 7 所示。在高速跌落环境下,结构 2~结构 5 的瞬时加速度仍比实体结构 1 有较明显减小,其中结构 4、结构 5 的瞬时加速度峰值比结构 1 降低 25%,结构 2、结构 3 的瞬时加速度峰值比结构 1 降低 22%,因此,蜂窝结构的缓冲吸能效果优于实体结构 1,而结构 4、结构 5 的缓冲吸能效果优于结构 2 和结构 3,说明纵向开孔结构优于横向开孔结构。此外,通过对比蜂窝结构 2~结构 5 的仿真曲线可知,不同孔径蜂窝结构的加速度曲线基本重合,因此孔径大小在本仿真条件下对缓冲性能影响不明显,可以忽略不计。

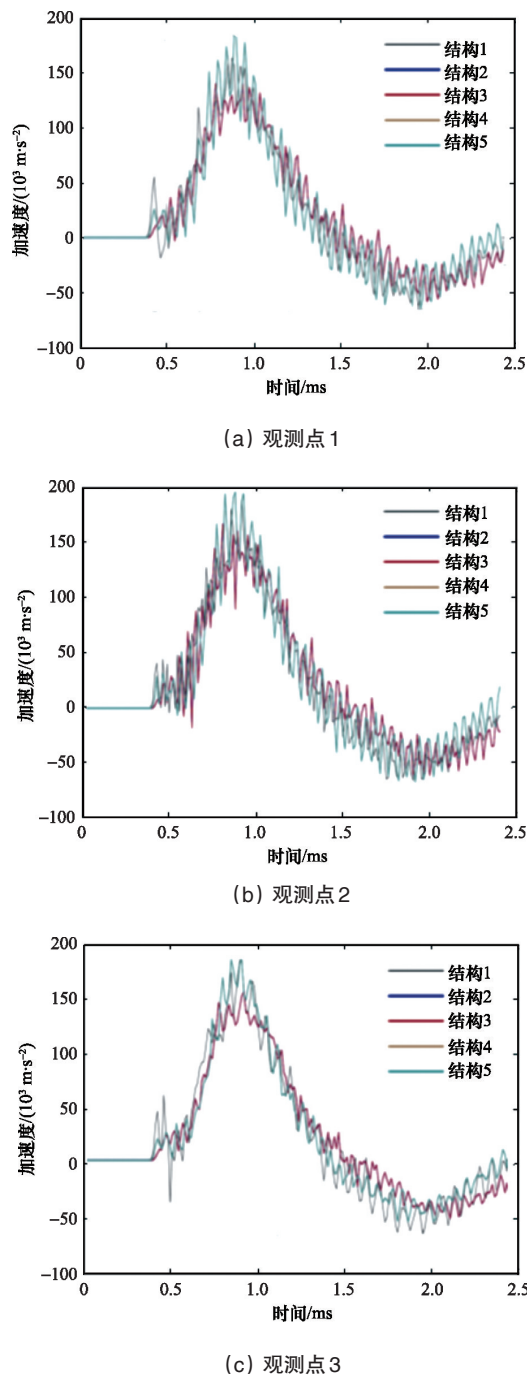


图7 35 m/s观测点瞬时加速度

Fig. 7 Instant acceleration at the observation site at 35 m/s

对比上述两种跌落速度条件下的仿真结果发现,结构2、结构3的瞬时加速度峰值在15 m/s条件下比结构1减小27%,而在35 m/s条件下比结构1减小22%;结构4、结构5的瞬时加速度峰值在15 m/s条件下比结构1减小33%,而在35 m/s条件下比结构1减小25%。该结果说明,随着初始跌落速度的增加,蜂窝结构的缓冲作用有所削弱,这是因为在高速下跌落时,缓冲夹层受到的冲击载荷增大,蜂窝结构发生明显压实现象,其吸能效果减弱,使得缓冲夹层的缓冲作用削弱。

### 3 结论

1) 在原有橡胶材料基础上,蜂窝结构削弱了观测点的加速度峰值,低速跌落条件下削弱27%~33%,高速跌落条件下削弱22%~25%,因此蜂窝结构明显提高了缓冲夹层的抗跌落冲击能力。但在高速跌落时,蜂窝结构在较大的冲击载荷下发生压实现象,缓冲时间缩短,吸能缓冲作用减弱。

2) 纵向开孔设计效果优于横向开孔,低速跌落条件下纵向开孔效能比横向高6%,高速跌落条件下纵向开孔效能比横向高3%。同时,横向开孔为深长孔,在现有工艺中加工难度较大,而纵向开孔孔深小,易于实现。

### 参考文献(References)

- [1] Liu Z Q, Liang W, Yang J. Analysis of thermal and mechanical properties of honeycomb structure of MTPS[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2009, 30(1): 10-12.
- [2] Ooba T, Funahashi Y. Stability analysis of linear shift-invariant dynamics in honeycomb structure[J]. Asian Journal of Control, 2002, 4(3): 348-353.
- [3] Jia R, Luo J, Zhen L. Copy the Super-Hydrophobic Honeycomb Structure to PDMS Surface[C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Informatics, Cybernetics and Computer Engineering. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 787-793.
- [4] Drake M L, Bouchard M P. On damping of large honeycomb structure[J]. Journal of Vibration, Acoustics Stress and Reliability in Design, 1985, 107(4): 361-366.
- [5] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. London: Cambridge university press, 1999.
- [6] Liew K M, Jiang L, Lim M K, et al. Numerical evaluation of frequency responses for delaminated honeycomb structures[J]. Computers & structures, 1995, 55(2): 191-203.
- [7] Wang D M, Wang Z W, Liao Q H. Energy absorption diagrams of paper honeycomb sandwich structures[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22(2): 63-67.
- [8] Aminanda Y, Castanie B, Barrau J J, et al. Experimental analysis and modeling of the crushing of honeycomb cores[J]. Applied Composite Materials, 2005, 12(3-4): 213-227.
- [9] Yang D U, Lee S, Huang F Y. Geometric effects on micropolar elastic honeycomb structure with negative Poisson's ratio using the finite element method[J]. Finite elements in analysis and design, 2003, 39(3): 187-205.
- [10] 肖锋, 谌勇, 孙靖雅, 等. 超弹性橡胶材料分层圆孔蜂窝防护覆盖层动态压缩行为及性能研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 13-20. Xiao Feng, Chen Yong, Sun Jingya, et al. Dynamic crush behavior and performance of layered honeycomb hyperelastic rubber claddings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 13-20.
- [11] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. ABAQUS的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 324-340. Zhuang Zhuo, You Xiaochuan, Liao Jianhui, et al. ABAQUS finite element analysis and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 324-340.
- [12] 王玉镯, 傅传国. ABAQUS结构工程分析及实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 49-62. Wang Yuzhuo, Fu Chuanguo. ABAQUS structural engineering analysis and examples explains[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 49-62.

(责任编辑 韩星明)