

蜂窝纸板振动传递特性研究进展

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2018.04.007

梁宁^{1,2} 王冬梅¹
郭彦峰² 柏子游¹
朱宏¹ 杨瑞^{1,2}

1. 深圳职业技术学院
传播工程学院
广东 深圳 518055

2. 西安理工大学
印刷包装与数字媒体学院
陕西 西安 710048

摘要: 综述了蜂窝纸板振动传递特性的研究进展,从实验研究、振动传递特性模型构建和有限元分析方法3个方面总结了国内外研究成果。重点讨论了当前研究中结构参数对蜂窝纸板共振频率和振动传递率的影响规律,指出蜂窝纸板振动传递特性的下一步研究可从以下方面开展:分析蜂窝结构参数对包装系统振动传递特性及减振特性的影响规律,从理论和仿真两方面分别建立与蜂窝结构参数相关的振动传递特性数学模型和有限元模型,进一步揭示蜂窝纸板材料振动传递规律,阐明蜂窝纸板振动变形机理。

关键词: 蜂窝纸板; 振动传递特性; 结构参数

中图分类号: TB484.1; TB485.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2018)04-0043-07

0 引言

工信部、商务部印发《关于加快我国包装产业转型发展的指导意见》中明确提出:积极采用低成本和绿色生产技术,发展低克重、高强度、功能化纸包装制品^[1]。这对纸类缓冲包装材料的发展提出了更高要求。常用的纸类包装材料主要有瓦楞纸板、蜂窝纸板和纸浆模塑制品。其中,蜂窝纸板是20世纪50年代由国外开始研制生产的一种环保型缓冲包装材料,其由上下2层面纸和中间的蜂窝状纸夹层经胶黏剂粘合而成^[2]。蜂窝纸板具有质量轻、比刚度和比强度高、吸能特性稳定、可回收利用等优点^[3-5],在家电、机电及各种工业产品的包装领域得到广泛应用^[6]。

物流过程中,当运输工具产生的激励频率与产品固有频率接近时,将会发生共振,传递至产品的加速度将会成倍甚至几十倍地增加,可能对产品造成巨大损伤^[7]。振动传递特性是评价缓冲材料防振

性能优劣的重要参数,具体表现为共振频率和振动传递率的大小。蜂窝纸板作为一种缓冲包装材料,其必须具备在运输过程中抵抗外界冲击和振动的能力^[2]。自从蜂窝纸板应用以来,其振动传递性能的研究取得了积极进展。

本文结合课题研究方向,从实验、数学模型构建和有限元分析方法等方面,对蜂窝纸板振动传递特性展开综述,重点讨论当前研究中结构参数对蜂窝纸板共振频率和振动传递率的影响规律,并基于此,指出该课题的进一步研究方向。

1 振动传递特性的实验研究

1.1 蜂窝纸板振动传递特性实验研究

国内学者对蜂窝纸板振动传递特性做出了详尽的实验分析,特别是纸板厚度对振动传递率曲线的影响规律。

收稿日期:2018-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675349)

作者简介:梁宁(1994-),女,陕西蓝田人,西安理工大学硕士生,主要研究方向为运输包装,
E-mail: eiffelning@163.com

通信作者:王冬梅(1976-),女,河北献县人,深圳职业技术学院教授,博士,主要从事包装结构设计和运输包装方面的教学与研究, E-mail: 394794521@qq.com。

郭彦峰等^[8-9]通过实验研究了4种不同厚度(20, 30, 40, 50 mm)的蜂窝纸板的缓冲特性和振动传递特性,得到了动态缓冲曲线的经验公式和特征系数、振动传递率曲线的峰值频率和振动传递率。研究结果表明:蜂窝纸板的振动传递特性具有多模态性,有主次之分,且其对高频振动有显著的阻隔性。张改梅^[10]设计实验得到蜂窝纸板在同一静应力、不同厚度(20, 40, 50 mm)下的振动传递率曲线,分析曲线得出在相同静应力和输入加速度条件下,随着纸板厚度的增加,衰减系数增加,缓冲系统共振频率减小,最大传递率减小。

张峻岭等^[11]通过对不同厚度(20, 30, 40, 50 mm)的蜂窝纸板的防振、缓冲性能进行理论及实验研究,绘制了不同厚度的蜂窝纸板的振动传递率曲线。所得纸板厚度对共振频率的影响规律与文献[10]基本相同;但是振动传递率随纸板厚度的增加先增大后减小,纸板厚度为40 mm时传递率最大,即相比厚度为30 mm和40 mm的蜂窝纸板,20 mm和50 mm厚的纸板减振效果更明显。此后,孟宪文和Wang B. Z.等^[12-13]也对不同厚度(10, 20, 30, 40 mm)的蜂窝纸板的隔振性能进行了测试,获得了振动传递率曲线并评估阻尼比,得到的结论与文献[11]一致,即纸板厚度从20 mm变化至40 mm,共振频率减小,传递率增大。这与文献[10]的结论有些差别。

张琴等^[14]从理论上推导了随机振动条件下振动传递率的计算公式,并通过实验研究了蜂窝纸板在不同加速度、频率和静应力的随机振动下的振动传递特性。研究结果表明,不同随机振动实验计算出的振动传递率几乎相同,与正弦扫频实验结果非常接近。这说明了利用随机振动实验分析蜂窝纸板的振动传递率是可行的。

国外学者J. Park等^[15]利用正弦扫频振动测试,对比了不同楞形的瓦楞纸板在不同静应力下的振动传递率和共振频率,并通过线性振动理论评估了阻尼比和最大动应力。研究结果表明,随着静应力的增加,共振频率呈线性下降趋势,而传递率峰值变化趋势不明显。Jin N. K.等^[16]利用随机振动实验对多层瓦楞纸板的共振频率、振动传递率和阻尼比进行了分析。研究结果表明,共振频率与试样厚度和静应力成反比,振动传递率和阻尼比与试样厚度和静应力无关。在此基础上,建立了含试样厚度和静应力变量的共振频率数学模型。这些研究方法方法与蜂窝纸板振动传递特

性的实验研究方法类似,对进一步进行蜂窝纸板的振动传递特性实验具有参考作用。

总结以上研究成果,主要结论有:蜂窝纸板对低频振动的衰减性能较弱,而高频时有显著的减振性能;随着蜂窝纸板厚度的增加,共振频率减小,振动传递率变化规律不一致。考虑到现有结论均是对实验结果的定性分析,蜂窝纸板振动传递特性的相关结论,未能有效地应用于蜂窝纸板包装方案的设计中,因而建立更适用于实际应用的振动传递特性数学模型,将是蜂窝纸板下一步的研究重点。

1.2 实验数据采集与处理研究

由于振动实验数据庞大,且实验过程中信号不稳定,易产生干扰等问题,一些学者对缓冲包装材料振动传递实验数据处理方法进行了研究,以寻求更好的数据处理方式。

刘乘^[17]从时域和频域两个角度分别讨论了缓冲材料传递率数据处理方案,针对信号谱分析中数据量过大、能量泄漏等问题,提出了相应的解决方案。另外,他还提出一种利用冲击实验得到材料传递特性的方法,该方法既不用振动台,又缩短了实验时间。朱大鹏^[18]研究了两种振动实验数据处理的新方法,一种是利用包装件的简易线性模型进行模拟,另一种是利用BP神经网络进行仿真,从而得到蜂窝纸板的振动传递率曲线,最后利用实例对其说明。丁劲生等^[19]采用C++编程对振动系统的激励和响应信号进行采集,经过滤波处理和数据压缩后,将两路信号的加速度在相同频率下整个周期的均方根值对应相比得出传递率。所开发的软件界面良好、精度高。刘国东等^[20]探讨了振动传递实验的数据处理方法,利用C++开发的系统得以快速、准确地处理实验数据,绘制出振动传递率曲线。邢月卿等^[21]分析处理系统的激励和响应信号,确定在各个激振频率下响应与激励的关系,即为传递率,然后绘出振动传递率曲线。

以上研究说明,适当地转变数据处理方法或开发新的界面,可以提高实验结果的精确度,缩短实验时间,为理论建模的研究与有限元分析提供有力支撑。

2 蜂窝纸板振动传递特性建模

在对蜂窝纸板振动传递特性实验研究的基础上,许多学者进一步建立了理论模型,并根据各种参数识别方法,寻求振动传递率曲线的数学公式。

朱大鹏等^[22]将蜂窝纸板建模为具有黏弹性的线弹性材料,并给出了蜂窝纸板的弹性系数 k 、黏性系数 c 及黏弹性参数的识别方法。在此基础上,构造了蜂窝纸板-质量系统的振动传递率公式,并与实际的实验结果进行对比。Zhang Z. K. 等^[23]以实验结果为基础建立唯象模型(phenomenological model),该模型中刚度系数是压缩量的三次非线性函数,阻尼系数是一个常数,利用谐波平衡法进行了理论模拟与分析讨论,最终利用该模型模拟了蜂窝纸板的振动传递率。朱大鹏和 Gao Q. F. 等^[24-25]根据迟滞回线测试结果和理论分析,将蜂窝纸板的弹性力建模为压缩量的三次多项式,阻尼表示为黏性阻尼和速度平方阻尼的组合,经过参数识别获得振动传递率曲线并用实验验证。考虑到蜂窝纸板刚度和阻尼的非线性,Zhu D. P. 等^[26]又将阻尼力和弹性力都建模为线性部分与三次非线性部分的组合,并根据谐波平衡法建立了参数识别过程,确定了蜂窝纸板-质量系统在4种不同厚度(20, 30, 40, 50 mm)下的参数,并以40 mm为例,模拟验证了3种不同质量下的振动传递率曲线。姜久红等^[27]在实验的基础上,运用分段函数和多项式拟合得到蜂窝纸板的平压力学特征,并用数值解法得到由蜂窝纸板和产品组成的包装系统的振动解,讨论了非线性系统中的阻尼比和阻尼系数对产品加速度及位移响应的影响。

综上所述,振动传递特性模型的建立大多以实验为基础,主要表现在对其弹性系数和阻尼系数的等效简化,并选择合适的方法进行参数识别。这些研究成果为蜂窝纸板的进一步科学研究,提供了重要的理论基础。但是参考实验研究结果可知,纸板厚度对振动传递性能具有一定影响,而这一结论并未在上述理论模型中体现出来,这就限制了蜂窝纸板科学设计和生产加工的工程实践。而在运输过程中的随机振动对缓冲材料提出了更高的要求,这就需要研究者做出更准确更实用的科学研究。

3 蜂窝夹层板有限元分析方法

随着科技的发展,计算机仿真模拟已成为现代工业生产中的重要研究工具,有限元分析便是广泛应用的仿真方法之一。将有限元仿真分析与实验相结合,有利于节省实验时间与成本,对蜂窝纸板的振动传递性能研究及实际应用有着重要意义。

Wang B. Z. 等^[13]建立了有限元模型,模拟不同

厚度的蜂窝纸板的振动传递率,得到的结论与文献[11]一致。但是文中并没有给出有限元模型的建立方法和过程。陈琼等^[28]建立了一系列具有不同粘接胶水长度的蜂窝纸板模型,借助有限元软件,得到了不同胶水粘接长度下的输出加速度-频率曲线,并在理论公式的基础上得到了分析模型的振动传递率和阻尼比。另外,陈琼还和 Xu W. Q. 等^[29-30]对不同蜂窝胞元边长(5, 10, 15, 20, 25, 30 mm)的蜂窝纸板的振动传递特性进行了有限元研究。结果表明,蜂窝胞元边长越大,共振频率越低;而传递率峰值随着胞元边长先减小后增大,边长为15 mm时传递率峰值最小。但是,文中并未对该结果进行合理的实验验证,结论的可靠性有待进一步研究。丁玉平^[31]为了比较几种缓冲包装材料的动态缓冲性能,将蜂窝纸板等效成正交各向异性的均质薄板,运用 ANSYS Workbench 仿真分析软件,结合实验条件,对含蜂窝纸板衬垫和产品的整体包装,建立简谐基础振动和自由跌落两种激励环境下的仿真模型,并对其动态缓冲特性进行模拟与分析。

以上研究说明,有限元法在蜂窝纸板振动传递性能分析方面具有一定的可靠性。因此,在之后的研究中,可参考其中的方法,并结合目前实验研究的成果,对蜂窝纸板在不同结构参数下的振动传递特性进行深入研究。但是,纸板类缓冲包装材料及其结构具有各向异性,在进行仿真分析时需要先将其近似处理为具有各向异性的夹层板结构或构建孔穴模型,进而进行有限元仿真与建模^[32]。限于此,国内外利用有限元分析对蜂窝纸板振动传递特性的研究并不多见,而大多集中在了以铝蜂窝为主的金属或复合材料蜂窝结构的研究上。

例如,关自强^[33]利用 MSC Nastran 对卫星结构中铝蜂窝夹层板进行频率响应分析和随机响应分析,输出各测点不同方向的加速度响应曲线和功率谱密度曲线,发现最大响应值对应频率均为铝蜂窝夹层板的固有频率。王威远等^[34]通过理论分析、模态实验和振动台实验,对复合材料蜂窝结构锥形壳的振动传递特性进行了研究,并采用有限元仿真计算与铝制蜂窝结构锥形壳的性能进行对比。王建华^[35]运用等效力学模型,对三明治夹芯板理论进行了推导,求出铝蜂窝板芯层的等效参数并输入 Patran 建立蜂窝板的有限元模型,然后在 Nastran 中求出蜂窝板的一阶频率和振型。任树伟等^[36]基于 Reissner 夹层板理论,

得到铝蜂窝夹层板的固有振动频率,应用有限元模拟验证了理论模型的准确性,随后基于理论模型,考察了蜂窝芯层厚度(夹层板除上下蒙皮之外的厚度)、蜂窝壁厚、夹层板面内尺寸等关键参数对夹层板振动的影响。结果表明,夹层板的共振频率随芯层厚度的增加而增大。R. Harish 等^[37]通过实验和有限元方法,找出了芯层厚度对铝蜂窝夹层板的固有频率的影响关系,结果表明,固有频率随芯层厚度的增加而增大。V. N. Burlayenko 等^[38]利用有限元程序 ABAQUS,研究了铝蜂窝芯和泡沫芯对面芯剥离夹层板模态参数的影响,计算了包含脱黏区的夹层板的固有频率和模态振型。结果表明,芯层材料会影响系统刚度,从而影响夹层板的固有频率和振型。

此外,有限元技术在包装领域中的应用也越来越多。例如:刘乘等^[39]采用 ANSYS Workbench 分析了计算机主机在运输过程中的振动情况。Fan X. Y. 等^[40]采用有限元法研究了蜂窝的平压强度。J. Han 等^[41]采用有限元软件分析了纸箱上的通风孔和手孔设计对纸箱抗压强度的影响。H. A. Rami 等^[42]采用有限元法分析了瓦楞纸板的力学性能。刘龙涛等^[43]对修正后的某机载产品模型进行了有限元分析,得到了随机振动下的应力响应谱。秦璐等^[44]采用 ANSYS Workbench 软件建立路由器风扇组的有限元模型,并进行随机振动分析,验证了其包装设计的可行性。

总结以上研究结果可知,有限元仿真技术在包装领域的应用较为广泛,利用有限元法对蜂窝纸板振动传递性能的研究已取得了一定成果,结论与实验基本一致,即系统共振频率随纸板厚度的增加而减小。然而,金属和复合材料蜂窝结构研究结论为,夹层板的固有频率随芯层厚度增加而增大。蜂窝纸板的研究与其最大的区别在于:蜂窝纸板作为缓冲包装材料,其振动传递特性的研究离不开附加质量块,即研究成果均是基于蜂窝纸板-质量系统。而金属和复合材料蜂窝夹层板的振动特性研究主要在于夹层板本身的固有频率,故其实验和仿真结论与蜂窝纸板有所不同,但是可以参考其中的蜂窝建模、单元属性、网格划分等有限元建模方法。

4 总结与展望

蜂窝纸板作为一种环保型缓冲包装材料,振动传递性能的研究对其推广应用具有重要价值。通过以上

综述可以发现,目前蜂窝纸板振动传递特性的研究以实验为主,且实验结论只适用于同一种参数的蜂窝纸板,不涉及蜂窝结构和材料参数的变化。另外,国内外目前对蜂窝纸板振动传递特性的仿真研究较少,且近几年相关研究也不多。相对于实验研究,有限元模拟不仅可节省研究成本与计算时间,还可为实验方案设定和结构优化设计提供理论参考。据此,未来蜂窝纸板振动传递特性的研究可以从以下方面开展:

1) 基于实验和理论研究,分析蜂窝结构参数和材料参数对蜂窝纸板缓冲包装系统振动传递特性及减振特性的影响规律,建立与蜂窝结构参数相关的振动传递特性数学模型,为蜂窝纸板生产制造与应用提供理论基础。

2) 运用有限元分析软件,建立蜂窝纸板振动传递特性数值仿真模型,对蜂窝结构缓冲包装系统进行有限元模拟,并采取适当的方法对有限元模型进行修正,使得到的有限元模型与实验结果、理论分析相吻合,最终构建适合于蜂窝纸板包装系统的减振模型。

3) 揭示蜂窝纸板在振动情况下的变形规律和减振机理。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国商务部. 工信部, 商务部, 关于加快我国包装产业转型升级发展的指导意见 [EB/OL]. (2016-12-19) [2018-05-17]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/h/redht/201612/20161202273150.shtml>. Ministry of Commerce of the People's Republic of China. Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Commerce, Guidance Opinions on Accelerating the Transformation and Development of Packaging Industry in China [EB/OL]. (2016-12-19) [2018-05-17]. <http://www.mofcom.gov.cn/article/h/redht/201612/20161202273150.shtml>.
- [2] 彭国勋. 物流运输包装设计 [M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012: 254-255.
PENG Guoxun. Packaging Design of Logistic Transportation [M]. Beijing: Graphic Communications Press, 2012: 254-255.
- [3] WANG D M, WANG Z W. Out-of-Plane Compressive Properties of Hexagonal Paper Honeycombs [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 115-119.
- [4] 鄂玉萍, 王志伟. 纸质缓冲材料能量吸收特性研究进

- 展 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 40-45.
E Yuping, WANG Zhiwei. Advance in Study on Energy-Absorbing Property of Paper-Based Cushion Packing Materials[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 40-45.
- [5] WANG D M, BAI Z Y. Mechanical Property of Paper Honeycomb Structure Under Dynamic Compression[J]. Materials & Design, 2015, 77: 59-64.
- [6] 胡亚洲. 美的蜂窝材料研究与应用 [J]. 上海包装, 2017(6): 13-15.
HU Yazhou. Research and Application of Honeycomb Materials in Midea[J]. Shanghai Packaging, 2017(6): 13-15.
- [7] FAN Z G, LU L X. Effect of Fatigue Damage on Inner-Resonance Conditions of Precompressed Honeycomb Paperboard System[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(8): 1-4.
- [8] 郭彦峰, 朱大鹏, 陈西发, 等. 蜂窝纸板振动传递特性测试分析 [J]. 包装工程, 2003, 24(1): 12-13.
GUO Yanfeng, ZHU Dapeng, CHEN Xifa, et al. Test and Analysis of Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboards[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(1): 12-13.
- [9] GUO Y F, ZHANG J H. Shock Absorbing Characteristics and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Shock & Vibration, 2004, 11(5/6): 521-531.
- [10] 张改梅. 蜂窝纸板振动传递性实验研究 [J]. 包装工程, 2002, 23(3): 18-20.
ZHANG Gaimei. Research on Vibration Transformation of Honeycomb Board[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(3): 18-20.
- [11] 张峻岭. 蜂窝纸板防振缓冲特性研究及应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
ZHANG Junling. Study and Application of Vibration Proof and Buffer Characteristics of Honeycomb Paperboard[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [12] 孟宪文, 李连进, 武斌斌. 蜂窝纸板的隔振缓冲性能测试 [J]. 包装工程, 2006, 27(5): 72-73.
MENG Xianwen, LI Lianjin, WU Binbin. Test of Vibration Isolation and Buffering Capability of Honeycomb Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 72-73.
- [13] WANG B Z, CAO L J. Different Thickness of Honeycomb Paperboard Vibration Frequency of Testing and Simulation[J]. Advanced Materials Research, 2011, 328/229/330: 1421-1424.
- [14] 张 琴, 王保升. 随机振动下蜂窝纸板振动传递特性分析 [J]. 包装工程, 2013, 34(15): 7-9.
ZHANG Qin, WANG Baosheng. Vibration Transmissibility Properties of Honeycomb Paperboard Under Random Vibration[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 7-9.
- [15] PARK J, KIM G, KIM H, et al. Characteristics of Vibration Transmissibility for Corrugated Paperboard[J]. Journal-Faculty of Agriculture Kyushu University, 2011, 56(2): 327-333.
- [16] JIN N K, SIM J M, MIN J P, et al. Analysis and Modelling of Vibration Performance for Multi-Layered Corrugated Structure[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2013, 38(4): 327-334.
- [17] 刘 乘. 包装材料振动传递特性试验数据采集及处理 [J]. 包装工程, 2002, 23(2): 9-10.
LIU Cheng. Data Acquisition and Processing for Vibration Transmissibility Test of Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(2): 9-10.
- [18] 朱大鹏. 蜂窝纸板特性的研究及应用 [D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
ZHU Dapeng. The Study on the Properties of Honeycomb Paperboard and Its Application[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003.
- [19] 丁劲生, 安化萍, 李树军. 缓冲材料振动传递特性试验的数据采集及处理系统 [J]. 陕西科技大学学报, 2005, 23(1): 41-44.
DING Jingsheng, AN Huaping, LI Shujun. Data Acquisition and Processing System for Vibration Transmissibility Test of Package Cushioning Materials[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2005, 23(1): 41-44.
- [20] 刘国东, 祝锡晶, 李 清. 缓冲材料振动传递特性实验数据的处理 [J]. 包装工程, 2006, 27(2): 52-53.
LIU Guodong, ZHU Xijing, LI Qing. Data Processing for Vibration Transmission Experiment[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 52-53.
- [21] 邢月卿, 孙德强, 方 健, 等. 缓冲材料振动传递特性测试系统数据处理 [J]. 包装工程, 2015, 36(15): 77-82.
XING Yueqing, SUN Deqiang, FANG Jian, et al. Data Processing of Vibration Transmissibility Test System for Cushion Materials[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 77-82.
- [22] 朱大鹏, 张志昆. 蜂窝纸板动态特性建模及参数识别 [J]. 兰州交通大学学报, 2009, 28(1): 101-103.
ZHU Dapeng, ZHANG Zhikun. Modeling for Dynamic Properties of Honeycomb Paperboard and

- Parameter Identification[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2009, 28(1): 101-103.
- [23] ZHANG Z K, ZHENG Q C, ZHAO Y L. Honeycomb Paperboard Vibration Transmissibility Analysis and Modeling[C/OL]//Proceedings of the 17th IAPRI World Conference on Packaging. [2018-04-23]. <http://file.scirp.org/pdf/21-1.39.pdf>.
- [24] 朱大鹏, 赵跃利. 蜂窝纸板振动传递特性的试验研究与建模[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(4): 78-81. ZHU Dapeng, ZHAO Yueli. Experimental Study and Modeling of Vibration Transmissibility Properties of Honeycomb Fibreboard[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(4): 78-81.
- [25] GAO Q F, ZHU D P, CAO X X. Experimental Study on Vibration Transmissibility Properties of Honeycomb Paperboard[J]. The Open Mechanical Engineering Journal, 2014, 8(1): 320-325.
- [26] ZHU D P, HE R C, WANG G. Experimental Investigation into Honeycomb Paperboard Vibration Transmissibility Property and Nonlinear Parameters Identification[J]. Advances in Information Sciences & Service Sciences, 2013, 5(7): 390-398.
- [27] 姜久红, 王志伟. 蜂窝型缓冲包装系统的振动特性分析[J]. 湖北工业大学学报, 2006, 21(3): 18-20. JIANG Jiuhong, WANG Zhiwei. The Research on the Vibration Characteristics for Honeycomb Paperboard Cushioning Package System[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2006, 21(3): 18-20.
- [28] 陈琼, 吕原君. 粘结胶水的长度对蜂窝纸板振动特性的影响[J]. 包装工程, 2009, 30(3): 42-43. CHEN Qiong, Lü Yuanjun. Influence the Length of Assembly Glue on Vibration Characteristic of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3): 42-43.
- [29] 陈琼, 吕原君. 基于 FEA 的蜂窝纸振动分析[J]. 包装工程, 2009, 30(2): 22-23. CHEN Qiong, Lü Yuanjun. Vibration Analysis of Honeycomb Paperboard Based on FEM[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(2): 22-23.
- [30] XU W Q, SUN Y D, LÜ Y J. Anti-Vibration Performance Analysis of Honeycomb Paper[J]. Key Engineering Materials, 2010, 426/427: 166-169.
- [31] 丁玉平. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的某缓冲包装缓冲特性分析与优化[D]. 无锡: 江南大学, 2014. DING Yuping. Cushioning Characteristics Analysis and Optimization of Some Cushioning Package Based on ANSYS/LS-DYNA[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [32] 徐卓飞, 张海燕, 柏子游, 等. 蜂窝纸板力学特性研究进展[J]. 包装学报, 2012, 4(1): 13-18. XU Zhuofei, ZHANG Haiyan, BAI Ziyu, et al. Research Progress of Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2012, 4(1): 13-18.
- [33] 关自强. 卫星结构中铝蜂窝夹层板力学性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017. GUAN Ziqiang. Research on Mechanical Property of Aluminium Honeycomb Sandwich Structure for Satellite[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [34] 王威远, 王聪, 魏英杰, 等. 复合材料蜂窝结构锥形壳振动传递特性试验研究[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 1-5. WANG Weiyuan, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. Experimental Investigation on Vibration Transmissibility of the Conical Shell with Composite Material Honeycomb Structure[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(7): 1-5.
- [35] 王建华. 基于优化的蜂窝板有限元模型修正[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. WANG Jianhua. Honeycomb Panel Finite Element Model Updating Based on Optimization[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [36] 任树伟, 辛锋先, 卢天健. 蜂窝层芯夹层板结构振动与传声特性研究[J]. 力学学报, 2013, 45(3): 349-358. REN Shuwei, XIN Fengxian, LU Tianjian. Vibroacoustic Performance of Simply Supported Honeycomb Sandwich Panels[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013, 45(3): 349-358.
- [37] HARISH R, RAMESH S S. Vibration Response Analysis of Honeycomb Sandwich Panel with Varying Core Height[J]. International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences, 2013, 5(6): 582-586.
- [38] BURLAYENKO V N, SADOWSKI T. Influence of Skin/ Core Debonding on Free Vibration Behavior of Foam and Honeycomb Cored Sandwich Plates[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2010, 45(10): 959-968.
- [39] 刘乘, 卢杰, 陈满儒. 运输包装件振动特性的计算机仿真[J]. 包装工程, 2002, 23(4): 20-22. LIU Cheng, LU Jie, CHEN Manru. Computer Simulation of Vibration Characteristics for the Product Packages in Transportation[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(4): 20-22.
- [40] FAN X Y, VERPOEST I, VANDEPITTE D. Finite

- Element Analysis of Out-of-Plane Compressive Properties of Thermoplastic Honeycomb[J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2005, 8(5): 875-884.
- [41] HAN J, PARK J M. Finite Element Analysis of Vent/Hand Hole Designs for Corrugated Fibreboard Boxes[J]. *Packaging Technology and Science*, 2007, 20(1): 39-47.
- [42] RAMI H A, CHOI J, WEI B S, et al. Refine Nonlinear Finite Element Models for Corrugated Fiberboards[J]. *Composite Structures*, 2009, 87(4): 321-333.
- [43] 刘龙涛, 李传日, 程 祺, 等. 某结构件的随机振动疲劳分析 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(21): 97-101.
- LIU Longtao, LI Chuanri, CHENG Qi, et al. Random Vibration Fatigue Analysis for a Structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(21): 97-101.
- [44] 秦 璐, 丁 毅, 苏 杰. 基于 ANSYS Workbench 的路由器风扇组包装的包装动力学应用研究 [J]. *包装工程*, 2013, 34(13): 56-58.
- QIN Lu, DING Yi, SU Jie. Applied Research of Packaging Dynamics of Router Fan Assembly Packaging Based on ANSYS Workbench[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(13): 56-58.

Research Progress on Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard

LIANG Ning^{1, 2}, WANG Dongmei¹, GUO Yanfeng², BAI Ziyou¹, ZHU Hong¹, YANG Rui^{1, 2}

(1. School of Communication, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen Guangdong 518055, China; 2. Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The research progress on vibration transmissibility of honeycomb paperboard was reviewed. Domestic and foreign research achievements were summarized from three aspects of experimental study, model construction of vibration transmissibility and finite element analysis method. The influence of structural parameters on resonance frequency and transmissibility of honeycomb paperboard was discussed in detail. The further study might focus on analysis of the influence of honeycomb structural parameters on the vibration transmissibility and damping characteristics of packaging system. Then the mathematical model and finite element model related to the honeycomb structure parameters could be established respectively both in theory and in simulation to reveal the vibration transmissibility rule and deformation mechanism.

Keywords: honeycomb paperboard; vibration transmissibility; structural parameter