

不同蜂窝结构对蜂窝纸板力学性能的影响

刘跃军, 江太君, 曾广胜, 陈挺

(湖南工业大学 包装新材料与技术重点实验室, 先进包装材料与技术湖南省普通高校重点实验室, 湖南 株洲 412008)

摘要: 在对蜂窝纸板结构进行合理化抽象和假设的基础上, 借助有限元分析软件 ANSYS 对不同尺寸结构的蜂窝纸板进行了特征值屈曲分析与谐响应分析。结果表明, 当蜂窝边长一定时, 随着蜂窝高度的增加, 屈曲强度迅速下降, 共振频率先下降后升高; 当蜂窝高度一定时, 随着蜂窝边长的增加, 屈曲强度逐渐下降, 但共振频率变化不大, 且会在其右侧出现小峰, 当蜂窝的边长与高度比在 1:1 附近时, 共振频率最低, 为 88 Hz。

关键词: 蜂窝结构; 谐响应分析; 共振频率; 临界屈曲强度

中图分类号: TB485.1; TB487

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2010)01-0021-03

Effect of the Honeycomb Structure on the Mechanical Properties of Honeycomb Paperboard

Liu Yuejun, Jiang Taijun, Zeng Gangsheng, Chen Ting

(Key Laboratory of New Materials and Technology for Packaging, Key Laboratory of Advanced Materials and Technology for Packaging of Hunan Colleges and Universities, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: In order to explore the relationship between the structures of honeycomb and its mechanical performance, eigen buckling and harmonic analysis of FEA software ANSYS were adopted. The results prove that when the edge length keeps constant, the buckling strength decreases quickly with the increasing height, while the resonant frequency rises after an initial decline. The buckling strength of honeycomb drops sharply with the decrease of edge length when the height is fixed, while the resonant frequency changes little with small peaks by the right side, and the resonant frequency fall to the bottom of 88Hz at the length-height ratio of 1:1.

Key words: honeycomb structure; harmonic analysis; resonance frequency; critical buckling strength

蜂窝纸板是由面纸、里纸与芯纸组成的夹层结构纸板, 芯纸呈蜂窝状, 通常呈正六边形, 该纸板具有质量轻、强度高、缓冲性能好等优点, 现已广泛应用于包装物流领域, 用来代替实木或金属制作托盘, 或制作重型机械的包装箱, 大大促进了绿色包装的发展。在这些应用中, 纸板的屈曲强度和抗振性能^[1]是需要重点考虑的因素, 对于蜂窝纸板的这些性能前人已经做了很多研究工作^[1-5], 但以往大都以实验研

究为主, 广泛采用经验公式, 在结构设计与应用中受到了一定的限制。目前, 采用现代先进分析技术对蜂窝纸板进行相关模拟分析^[5]还不多见。本文以通用 ANSYS 有限元分析软件为平台, 在对蜂窝纸板结构进行抽象与简化的基础上, 通过特征值屈曲分析和谐响应分析, 研究了蜂窝纸板的屈曲强度和抗振特性, 为蜂窝纸板屈曲破坏机理的研究和力学性能实验提供了理论参考。

收稿日期: 2009-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10672197), 湖南省自然科学基金杰出青年基金资助项目(07JJ1001), 湖南省自然科学基金资助项目(09JJ6083), 湖南省教育厅科研基金资助项目(08C278)

作者简介: 刘跃军(1970-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为包装工程及高聚物加工工程,

E-mail: yjliu_2005@126.com

1 有限元模拟分析

1.1 有限元模型抽象与简化

蜂窝纸板的芯纸及其蜂窝结构是平压状态下最主要的承载材料和结构,而面纸一方面是为蜂窝结构定型,另一方面是防止纸板中盛放物的泄露和保持外观的美感。所有的蜂窝结构均呈对称分布式排列,不失一般性,对纸板结构进行分析时,可提取1个蜂窝结构作为研究对象。由于芯纸很薄,对所述正六边形蜂窝结构采用4节点9自由度的shell63单元进行离散,经过多次实验确定蜂窝结构的各边被均匀离散为20份,经合并后统计得整个有限元模型生成节点总数为2 280,有限元模型如图1所示。

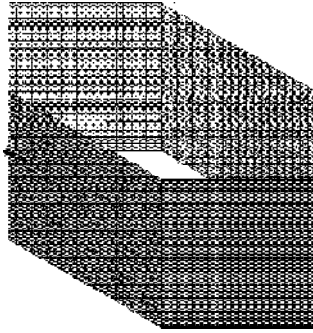


图1 芯纸蜂窝结构的有限元模型
Fig. 1 Finite element model of honeycomb structure

1.2 蜂窝纸板材料

分析所采用的蜂窝纸板芯纸为定量200 g/m²的纸板,厚度为 $t=0.269$ mm,折合密度为743.49 kg/m³,纸板原纸材料为各向异性材料,且厚度非常小,其各项力学性能参数的测量对设备要求较高,由于实验条件限制,文中所用蜂窝纸板原纸各项力学性能参数见表1中数据^[6]。

表1 蜂窝纸板原材料的力学性能参数
Table 1 Mechanical parameters of honeycomb paperboard material

弹性模量/MPa			泊松比			剪切模量/MPa		
E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy}	G_{xz}	G_{yz}
7 600	4 020	38	0.34	0.01	0.01	2 140	20	70

1.3 分析方案与方法

屈曲强度是蜂窝纸板承载能力的重要度量,而共振频率是评价纸板的另一个重要因素,本文拟从这2个方面进行分析。为了更好地探讨蜂窝结构对这2个指标的影响,将对模拟实验分为2组:一组保持蜂窝高度不变,取 $h=0.005$ m,改变蜂窝边长,分别为0.003 m、0.005 m、0.007 m、0.009 m、0.011 m;另一组保持蜂窝边长不变,取 $a=0.005$ m,改变蜂窝结构的高度,分别为0.003 m、0.004 m、0.005 m、0.006 m、0.007 m。则单个蜂窝结构平压时承载面积为:

$$S_0 = \frac{3\sqrt{3}a^2}{2} \quad (1)$$

对蜂窝纸板的屈曲强度采用传统的特征值屈曲分

析,即在预应力选项开启条件下加载一个微小载荷,求得各阶特征值,再以预加载荷与各阶特征值做积,以此作为承载点的各阶临界载荷。而对纸板,当首次发生屈曲后就会失效,故取分析结果的第一阶临界屈曲应力作为评价标准。分析过程中,在模型上端与面纸接触的节点上施加的单位载荷为 $f_0=0.001$ N,对共振频率的模拟分析采用谐响应分析,分析时施加预加载荷为0.01 N。

2 结果分析与讨论

2.1 特征值屈曲性能

将通过特征值屈曲分析得到的蜂窝结构发生第1阶段屈曲时的特征值代入下式,即可得到每个节点上的临界载荷。

$$f_{\text{cri}} = f_0 \cdot F_a \quad (2)$$

式中: f_0 为屈曲分析时施加的预加载荷,取 $f_0=0.001$ N;

f_{cri} 为单个节点的临界载荷;

F_a 为模拟所得特征值。

再将式(2)的结果代入式(3)便可得到单个蜂窝结构受力:

$$F_{\text{eig}} = 3 \times 20 f_{\text{cri}} \quad (3)$$

式中: F_{eig} 为单个蜂窝结构所受临界载荷。

将式(1)、(3)代入式(4)最终得到蜂窝纸板的临界平压屈曲强度:

$$P_{\text{ult}} = \frac{F_{\text{eig}}}{S_0} \quad (4)$$

式中: P_{ult} 为纸板的平压屈曲强度。

表2~3是通过计算整理后得到的不同条件下蜂窝结构的屈曲强度。其中表2为相同高度($h=0.005$ m),不同边长蜂窝结构的临界屈曲强度。可以看出,随着蜂窝边长增大,蜂窝结构的屈曲强度迅速下降,这主要是因为边长越大,单个蜂窝结构面积就越大,结构承受的压力上升很小就会引起蜂窝芯纸侧向压力的大幅度升高;另一方面边长越小,蜂窝芯纸的一边就可以很快地将力传递到与其相邻的边,这样就可以借助相邻芯纸的作用增强自身抵抗侧向位移的能力,提高蜂窝整体的抗屈曲能力。

表2 不同边长蜂窝结构的屈曲强度

Table 2 Buckling strength of honeycomb paperboard with different edge length

边长/m	0.003	0.005	0.007	0.009	0.011
屈曲强度/MPa	3.951	2.571	1.881	1.472	1.260

表3列出了相同边长 $a=0.005$ m,不同高度蜂窝结构的屈曲强度。从表中可以看出,随着蜂窝高度的增加,蜂窝结构的屈曲强度也迅速降低,当蜂窝高度增加2倍时,纸板屈曲强度下降率达82.5%。这主要是

因为蜂窝高度越高, 蜂窝一侧对另一侧的力矩就可能很大, 即很小的扰动(微小侧向载荷)就会产生很大的侧向转矩, 导致屈曲。

表3 不同高度蜂窝结构的屈曲强度

Table 3 Buckling strength of honeycomb paperboard with different height

高度/m	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007
屈曲强度/MPa	7.308	4.100	2.571	1.752	1.276

2.2 谐响应性能

图2、3显示了不同尺寸结构的蜂窝纸板对谐振的响应情况。图2为不同高度相同边长的蜂窝结构对谐振的响应情况, 可以看出, 随着蜂窝高度的不断增加, 蜂窝结构的共振频率并不是一直减小, 而是先减小到88 Hz后迅速回升至143 Hz, 这说明蜂窝结构在边长一定的情况下, 具有与共振频率最小临界值相适应的高度。而响应强度也有类似的规律, 这也表明在蜂窝边长一定的前提下, 可以通过改变蜂窝高度来调节蜂窝纸板的共振频率, 改善其缓冲性能。

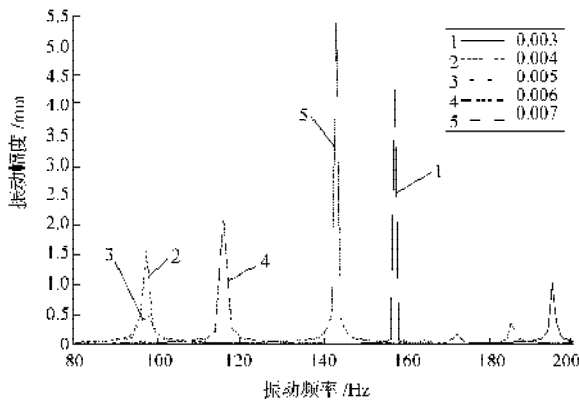


图2 不同高度蜂窝结构对谐振的响应

Fig. 2 The response of honeycomb structure with different height to resonant

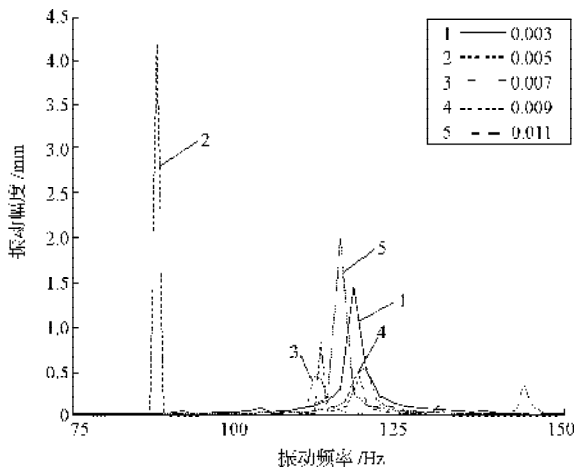


图3 不同边长蜂窝结构对谐振的响应

Fig. 3 Response of honeycomb structure with different edge length to resonant

图3是不同边长相同高度的蜂窝结构对谐振的响应曲线, 对于不同边长的蜂窝结构, 其共振频率大都集中在120 Hz左右, 变化不大, 只有在 $a=0.005$ m时, 即长高比约为1:1时共振频率最小, 振动最强烈。同时随着边长的增加, 振动响应会出现小峰, 但都大于初始振动频率。

3 结论

通过对各种不同尺寸和结构的蜂窝纸板的特征值屈曲分析和谐响应分析可知, 模拟分析结果与实际情况是一致的。经分析发现蜂窝纸板的蜂窝结构对其屈曲强度的影响很大, 蜂窝结构的高度对纸板屈曲强度的影响尤为显著, 当蜂窝高度增加2倍时, 纸板屈曲强度下降率达82.5%。虽然在一定频率范围内, 蜂窝边长对蜂窝纸板共振频率影响不大, 但蜂窝高度对蜂窝纸板共振频率的影响却非常明显, 随着蜂窝高度的增加, 蜂窝纸板共振频率先减小到88 Hz后迅速回升至143 Hz, 当蜂窝结构的长高比在1:1附近时, 其共振频率最低, 模拟分析结果为88 Hz。

参考文献:

- [1] Guo Yanfeng, Zhang Jinghui. Shock Absorbing Characteristics and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Shock and Vibration, 2004, 11(5/6): 521-531.
- [2] Sirkett D M, Hicks B J, Berry C, et al. Finite Element Simulation of Folding Carton Erection Failure[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2007, 221(7): 753-767.
- [3] 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.
- [4] Meng Xianwen, Li Lianjin, Wu Binbin. Test of Vibration Isolation and Buffering Capability of Honeycomb Cardboard [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 72-73.
- [5] 潘道津. 蜂窝纸板固有频率的研究[J]. 包装工程, 2004, 25(5): 14-15.
- [6] Pan Daojin. Research on Natural Frequency of Honeycomb Board[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(5): 14-15.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [6] 刘伯. 瓦楞纸板力学性能的有限元分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- [6] Liu Bo. Finite Element Analysis of Mechanical Performance of Corrugated Paperboard[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.

(责任编辑: 李玉珍)