

缓冲与隔振

纸蜂窝夹层板主共振频率的影响因素

杨瑞^{1,2}, 郭彦峰¹, 王冬梅², 付云岗¹, 梁宁^{1,2}

(1.西安理工大学, 西安 710048; 2.深圳职业技术学院, 深圳 518055)

摘要: **目的** 研究芯层结构因素和静应力因素对纸蜂窝夹层板-质量系统主共振频率的影响。**方法** 采用正弦振动试验测试纸蜂窝夹层板-质量系统的振动传递特性, 分析不同静应力作用下不同蜂窝芯的纸蜂窝夹层板-质量系统的主共振频率变化规律。**结果** 纸蜂窝夹层板-质量系统的主共振频率在 150~350 Hz 之间; 蜂窝芯结构及芯层材料影响纸蜂窝夹层板的刚性, 从而影响系统的主共振频率; 载荷质量变化引起静应力的变化, 也会影响系统的主共振频率。主共振频率均随蜂窝胞元边长、纸板厚度、芯纸定量及静应力的增大而降低。**结论** 可为纸蜂窝夹层板的振动传递特性研究提供基础, 有助于不同材质蜂窝夹层板的优化设计。

关键词: 纸蜂窝夹层板; 蜂窝芯结构; 静应力; 主共振频率

中图分类号: TB484.1; O327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)05-0117-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.015

Influence Factors of Main Resonance Frequency for Paper Honeycomb Sandwich Plates

YANG Rui^{1,2}, GUO Yan-feng¹, WANG Dong-mei², FU Yun-gang¹, LIANG Ning^{1,2}

(1.Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2.Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influences of the structure of honeycomb core and the static stress on the main resonance frequency of the paper honeycomb sandwich plate-block system. The vibration transmissibility of the paper honeycomb sandwich plate-block system was measured by sine vibration test, and the change rules of the main resonance frequencies of paper honeycomb sandwich plate-block system with different honeycomb cores under different static stresses were analyzed. The main resonance frequencies of the paper honeycomb sandwich plate-block system varied from 150 Hz to 350 Hz. The structure and material of honeycomb core had influence on the stiffness of paper honeycomb sandwich plate, which changed the main resonance frequency of the system. The change of block mass caused the change of static stress and affected the main resonance frequency of the system. The main resonance frequency decreased with the increase in the cell length of honeycomb, the paperboard thickness, the core paper grammage, and the static stress. A foundation is provided for the research of vibration transmissibility of paper honeycomb sandwich plate, thus promoting the optimization design of the honeycomb sandwich plates with different materials.

KEY WORDS: paper honeycomb sandwich plate; structure of honeycomb core; static stress; main resonance frequency

纸蜂窝夹层板因其质轻、环保、良好的缓冲防振特性等优点,常作为缓冲衬垫来减缓运输过程中的冲

击振动损害^[1-2],有关纸蜂窝夹层板力学特性及冲击吸能性能的研究较为深入。Wang 等^[3]分析了蜂窝芯

收稿日期: 2018-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(51675349)

作者简介: 杨瑞(1993—),女,西安理工大学硕士生,主攻新型缓冲包装材料。

通信作者: 王冬梅(1976—),女,博士,深圳职业技术学院教授,主要研究方向为包装技术与材料。

胞元厚跨比(胞壁厚度与胞元边长的比值)、相对密度和纸板厚度对纸蜂窝夹层板动态压缩屈服应力的影响。Fan 和 Bai^[4-5]用能量吸收效率曲线和能量吸收图表征了不同厚跨比和不同厚度的纸蜂窝夹层板的吸能特性。Lyu 等^[6]应用有限元软件建立了纸蜂窝夹层板包装系统的动态冲击模型。王志伟等^[7]研究了单/双层蜂窝胞壁的力学性能,发现双层蜂窝胞壁的弹性模量和屈服强度明显高于单层胞壁,说明纸蜂窝板的蜂窝胞元不能被简单看作各边厚度相同的六边形结构。E 等^[8]分析了相对湿度对不同厚跨比的纸蜂窝夹层板冲击吸能特性的影响。一般情况下,振动对产品的损伤比跌落冲击带来的损伤小,但运输过程中的振动是持续的,而且当激励频率接近包装系统共振频率时,包装系统产生共振,通过纸蜂窝夹层板衬垫传递到内装产品的振动能量会成倍增加,分析纸蜂窝夹层板-质量系统的共振频率及传递率特征很有必要。为指导瓦楞纸板结构设计, Park 等^[9]研究了不同环境湿度下不同楞型的瓦楞纸板的振动传递率、共振频率、阻尼比及最大动应力,综合评估了环境湿度及结构变化对瓦楞纸板振动传递特性的影响。目前关于不同蜂窝芯结构的纸蜂窝夹层板的共振频率及振动传递率的研究较少,不能有效指导纸蜂窝夹层板的优化设计和选择。Guo 等^[10-11]基于试验总结了纸蜂窝夹层板的动态冲击特性及振动传递特性,研究了静应力和纸板厚度对纸蜂窝夹层板共振频率和振动传递率的影响。Zhu 等^[12-13]基于纸质材料的粘弹性特征

建立了纸蜂窝夹层板振动传递特性理论模型。梁宁等^[14-15]分析了厚度等参数对纸蜂窝夹层板共振频率的影响规律。部分学者还研究了金属等其他材料的蜂窝夹层结构的振动特性。Harish 等^[16]利用脉冲试验研究了不同芯高的铝蜂窝板的振动固有频率。Ganesh 等^[17]用 Ansys 软件建立了圆形蜂窝夹层板的等效正交各向异性材料模型,分析了不同蜂窝形状和不同材料的圆形蜂窝夹层板的自由振动响应。Arunkumar 等^[18]分析了纤维增强塑料面板的铝蜂窝夹层板的自由/强迫振动频率特性和声传输损耗特性。文中考虑纸蜂窝芯层的几何特征,分析蜂窝胞元边长、纸板厚度、芯纸定量及加载静应力对纸蜂窝夹层板-质量系统的主共振频率的影响,为后期研究及蜂窝结构优化设计提供试验支撑。

1 试验

1.1 主要材料

试样共 8 种,其中包括 3 种蜂窝胞元边长(6, 8, 10 mm), 3 种厚度(20, 30, 40 mm), 2 种不同定量的芯纸(110, 140 g/m²)。试样尺寸均为 20 cm×20 cm, 具体参数见表 1。其中 K230/PA110-L10-d20 表示上、下面纸为定量 230 g/m² 的牛皮纸, 芯纸为定量 110 g/m² 的瓦楞原纸, 蜂窝胞元边长 10 mm, 纸板厚度 20 mm。不同芯纸的厚度是不同的, 因此芯纸材料不同, 蜂窝胞壁厚度不同。

表 1 纸蜂窝夹层板试样参数

Tab.1 Parameters of paper honeycomb sandwich plate specimens

试样	面纸定量/ (g·m ⁻²)	芯纸定量/ (g·m ⁻²)	芯纸弹性 模量/MPa	面纸厚度/ mm	胞壁厚度/ mm	蜂窝胞元边长/ mm	纸板厚度/ mm
K230/PA110-L6-d20	230	110	2472.33	0.28	0.17	6	20
K230/PA110-L8-d20	230	110	2472.33	0.28	0.17	8	20
K230/PA110-L10-d20	230	110	2472.33	0.28	0.17	10	20
K230/PA110-L10-d30	230	110	2472.33	0.28	0.17	10	30
K230/PA110-L10-d40	230	110	2472.33	0.28	0.17	10	40
K230/PA140-L10-d20	230	140	3122.50	0.28	0.22	10	20
K230/PA140-L10-d30	230	140	3122.50	0.28	0.22	10	30
K230/PA140-L10-d40	230	140	3122.50	0.28	0.22	10	40

1.2 方法

将试样在温度 23 ℃、相对湿度 50% 的条件下进行 24 h 预处理,参照 GB/T 8169—2008《包装用缓冲材料振动传递特性试验方法》在 DC-300-3/SV-0404 振动试验机上完成正弦扫频试验,质量块模拟的是内装产品对纸蜂窝夹层板施加的载荷,忽略产品结构的影响,纸蜂窝夹层板作为缓冲衬垫,分别置于质量块的上、下层,具体夹持方式见图 1。扫频范围为 5~500

Hz,扫频速率设为每分钟 1 倍频程,激励加速度为 0.5g,载荷质量分别为 12.85, 16, 20.85, 24 kg。

2 试验结果与分析

由于振动损伤最有可能发生在共振频率点附近,共振频率点被认为是造成产品振动破坏的潜在脆值点。纸蜂窝夹层板-质量系统的振动传递率-频率曲线见图 2,可看出纸蜂窝夹层板-质量系统的共振频率点

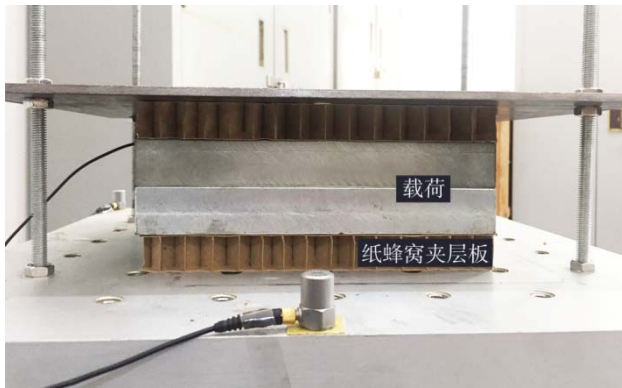


图 1 试样夹持方式
Fig.1 Clamping mode of test specimens

不止 1 个，但曲线中振动传递率最大值对应的频率，即主共振频率，是最容易造成产品振动损伤的频率点，试样在不同载荷下的主共振频率试验值见表 2。为验证试验值的准确性，将文献[15]中理论值同文中试验值进行对比，理论公式为：

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = 0.12 \sqrt{\frac{AE_s \delta}{mdL}} \quad (1)$$

式中： k 为纸板的刚度系数； m 为产品质量； A 为产品底面面积（纸蜂窝夹层板的表面积）； δ 为蜂窝胞壁厚度； L 为胞元边长； d 为纸板厚度； E_s 为纸张弹性模量。表 2 中实验值和理论值的误差低于 15%，试验结果可靠。对比试验值和理论值可发现，

表 2 试验参数及结果
Tab.2 Test parameters and results

试样	载荷质量/kg	静应力/kPa	主共振频率试验值/Hz	文献[15]理论值	误差/%
K230/PA110-L6-d20	12.85	3.15	348.85	396.23	13.58
K230/PA110-L6-d20	16.00	3.92	341.09	355.09	4.10
K230/PA110-L6-d20	20.85	5.11	314.56	311.06	1.11
K230/PA110-L6-d20	24.00	5.88	310.98	289.93	6.77
K230/PA110-L8-d20	12.85	3.15	329.78	343.14	4.06
K230/PA110-L8-d20	16.00	3.92	315.27	307.52	2.46
K230/PA110-L8-d20	20.85	5.11	283.00	269.39	4.81
K230/PA110-L8-d20	24.00	5.88	270.36	251.09	7.13
K230/PA110-L10-d20	12.85	3.15	306.18	306.92	0.24
K230/PA110-L10-d20	16.00	3.92	287.49	275.05	4.33
K230/PA110-L10-d20	20.85	5.11	261.57	240.95	7.88
K230/PA110-L10-d20	24.00	5.88	218.98	224.58	2.56
K230/PA110-L10-d30	12.85	3.15	266.32	250.60	5.90
K230/PA110-L10-d30	16.00	3.92	252.32	224.58	10.99
K230/PA110-L10-d30	20.85	5.11	225.11	196.73	12.61
K230/PA110-L10-d30	24.00	5.88	202.12	183.37	9.28
K230/PA110-L10-d40	12.85	3.15	239.33	217.02	9.32
K230/PA110-L10-d40	16.00	3.92	194.36	194.49	0.07
K230/PA110-L10-d40	20.85	5.11	179.24	170.38	4.95
K230/PA110-L10-d40	24.00	5.88	167.92	158.80	5.43
K230/PA140-L10-d20	12.85	3.15	357.59	392.38	9.73
K230/PA140-L10-d20	16.00	3.92	339.56	351.64	3.56
K230/PA140-L10-d20	20.85	5.11	317.40	308.04	2.95
K230/PA140-L10-d20	24.00	5.88	279.44	287.11	2.75
K230/PA140-L10-d30	12.85	3.15	346.51	320.38	7.54
K230/PA140-L10-d30	16.00	3.92	309.64	287.11	7.28
K230/PA140-L10-d30	20.85	5.11	284.27	251.51	11.52
K230/PA140-L10-d30	24.00	5.88	270.12	234.43	13.21
K230/PA140-L10-d40	12.85	3.15	296.02	277.45	6.27
K230/PA140-L10-d40	16.00	3.92	282.36	248.65	11.94
K230/PA140-L10-d40	20.85	5.11	251.54	217.82	13.41
K230/PA140-L10-d40	24.00	5.88	232.48	203.02	12.67

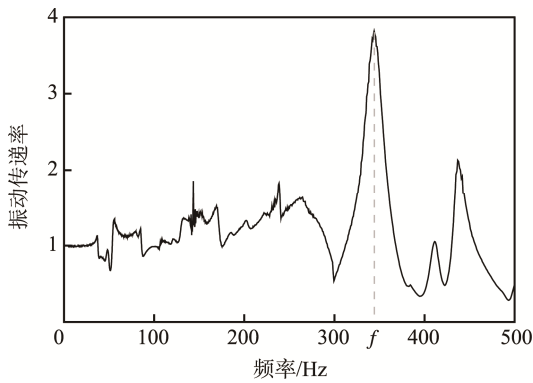


图2 纸蜂窝夹层板-质量系统振动传递率-频率曲线
Fig.2 Vibration transmissibility-frequency curve of the paper honeycomb sandwich plate-block system

主共振频率试验值大多高于其理论值,因为蜂窝芯层中粘结剂作用增大了纸蜂窝夹层板的刚度。

防振包装设计中降低产品振动损伤主要有2种方法:改变缓冲材料结构,使系统的共振频率发生变化,避免产生共振;降低振动传递率。因主共振频率对应的振动传递率最大,在远离主共振频率点振动,传递率会很小,几乎不会对产品造成破坏,改变蜂窝结构尺寸避免共振是防振包装设计的最好选择,因此这里将研究不同胞元边长、不同厚度、不同芯纸定量的纸蜂窝夹层板在多种载荷作用下的主共振频率影响情况。纸蜂窝夹层板所受静应力的大小与载荷质量和蜂窝夹层板的表面尺寸有关,静应力与载荷质量成正比,与试样表面积成反比。这里所用试样的表面尺寸保持不变,载荷质量与静应力影响情况相同,为方便分析,这里统一以静应力进行讨论。

2.1 胞元边长对主共振频率的影响

不同静应力下,芯纸相同(定量为110 g/m²)但蜂窝胞元边长不同的纸蜂窝夹层板及其质量系统的主共振频率见图3。由图3可明显看出,蜂窝芯胞元边长增大,系统的主共振频率降低,因为胞元边长越小,胞元数量就越多,蜂窝刚性越大,主共振频率较大。

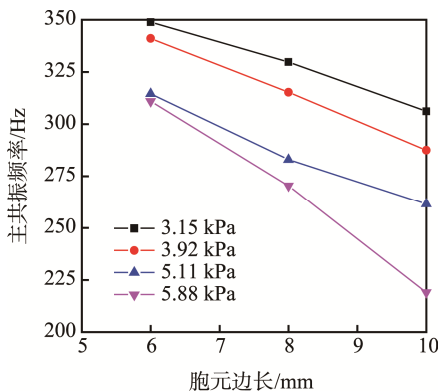


图3 胞元边长对主共振频率的影响曲线
Fig.3 Influence curves of the cell length on main resonance frequency

2.2 纸板厚度对主共振频率的影响

不同静应力下,厚度对定量分别为110和140 g/m²的纸蜂窝夹层板-质量系统的主共振频率的影响曲线见图4,可知,纸板厚度越大,系统主共振频率越低。以5.11 kPa静应力下的结果为例,纸板厚度由20 mm变为40 mm,芯纸定量为110和140 g/m²的纸蜂窝夹层板的主共振频率分别降低了82.33和65.86 Hz,因为纸板厚度由20 mm变为40 mm,纸蜂窝夹层板的结构稳定性和刚性变差,主共振频率降低。

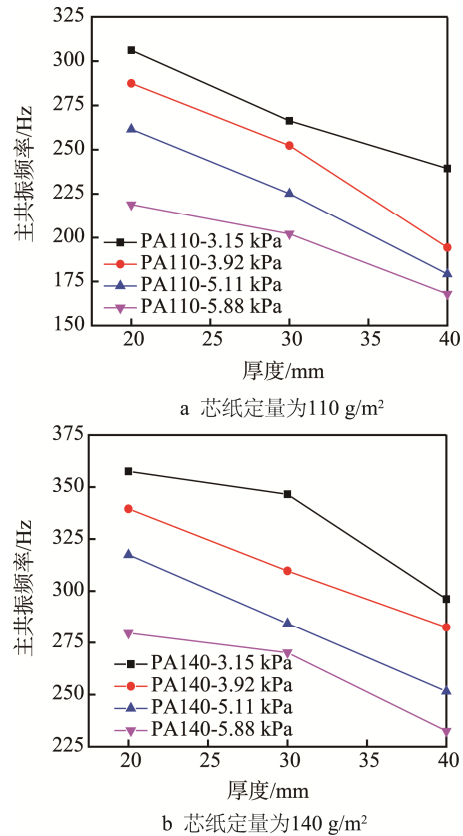


图4 厚度对主共振频率的影响曲线
Fig.4 Influence curves of the thickness on the main resonance frequency

纸板厚度不同时主共振频率试验值和理论值变化量的比较见表3,可发现,纸板厚度由20 mm变为30 mm,主共振频率试验值的变化量普遍小于厚度由30 mm变为40 mm的变化量(除载荷质量为12.85 kg外);但纸板厚度由20 mm变为30 mm的主共振频率理论值的变化量大于厚度由30 mm变为40 mm的变化量。这是因为实际情况下当纸板较厚且载荷量较大时,结构的稳定性和刚性变差,故出现厚度越厚主共振频率试验值变化越快的情况。

2.3 芯纸定量对主共振频率的影响

芯纸定量140 g/m²的纸蜂窝夹层板-质量系统的主共振频率普遍高于定量为110 g/m²的主共振频率,见图5。这是因为2种纸质的弹性模量不同,定量较

表 3 纸板厚度不同时主共振频率试验值和理论值变化量的比较
 Tab.3 Variation of the test values and the theoretical values of the main resonance frequency under different paperboard thicknesses

厚度/mm	载荷质量/kg	静应力/kPa	频率试验值/Hz	试验值变化量/Hz	频率理论值/Hz	理论值变化量/Hz
20	12.85	3.15	306.18	(39.86)	306.92	(56.32)
30	12.85	3.15	266.32	(26.99)	250.60	(33.58)
40	12.85	3.15	239.33		217.02	
20	16.00	3.92	287.49	(35.17)	275.05	(50.47)
30	16.00	3.92	252.32	(57.96)	224.58	(30.09)
40	16.00	3.92	194.36		194.49	
20	20.85	5.11	261.57	(36.46)	240.95	(44.22)
30	20.85	5.11	225.11	(45.87)	196.73	(26.35)
40	20.85	5.11	179.24		170.38	
20	24.00	5.88	218.98	(16.86)	224.58	(41.21)
30	24.00	5.88	202.12	(34.20)	183.37	(24.57)
40	24.00	5.88	167.92		158.80	

注：括号内数据为该行频率试验值（或理论值）与下一行频率试验值（或理论值）的差值

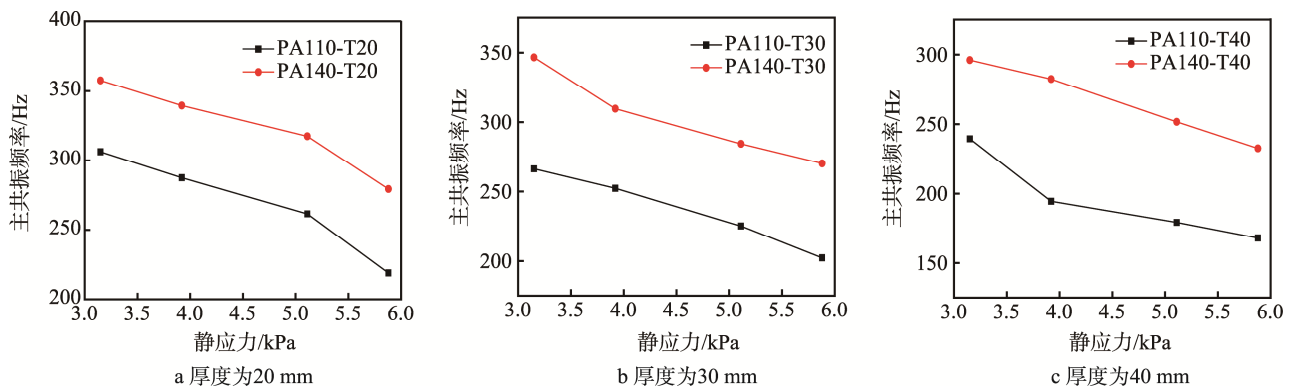


图 5 芯纸定量对主共振频率的影响曲线

Fig.5 Influence curves of the grammage of core paper on the main resonance frequency

大的芯纸其弹性模量较大。由图 5 可看出，厚度越大，PA110 和 PA140 的主共振频率相差越大，例如 3.92 kPa 静应力下，厚度为 20 mm 的 PA110 和 PA140 的主共振频率相差 52.07 Hz，而厚度为 40 mm 时的主共振频率相差 88 Hz，因此夹芯材料也会影响纸蜂窝夹层板的主共振频率。

2.4 静应力对主共振频率的影响

静应力对主共振频率的影响曲线见图 6，可知，纸蜂窝夹层板所受静应力增大，主共振频率降低，蜂窝胞元边长越大，主共振频率降得越快。因为胞元边长大的纸蜂窝夹层板的刚性差，受静应力的影响程度也更大。不同厚度的定量为 110 和 140 g/m² 的纸蜂窝夹层板-质量系统的主共振频率随静应力变化的规律曲线见图 7，可看出，静应力越大，主共振

频率越低，且 110 g/m² 定量下的主共振频率受静应力影响较大。

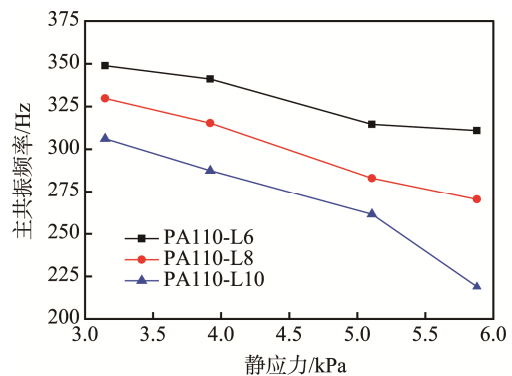


图 6 不同胞元边长下静应力对主共振频率的影响曲线
 Fig.6 Influence curves of static stress on main resonance frequency at different cell lengths

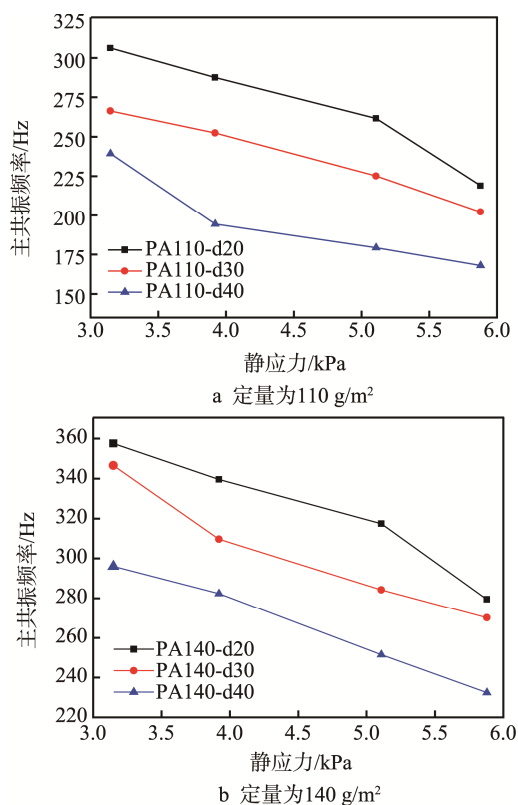


图7 不同厚度下静应力对主共振频率的影响曲线
Fig.7 Influence curves of static stress on main resonance frequency at different thicknesses

3 结语

通过正弦扫频试验分析了蜂窝胞元边长、纸板厚度、芯纸定量和静应力对主共振频率的影响规律,为纸蜂窝夹层板的振动传递特性研究提供基础。后期拟加入环境温湿度的影响,综合分析蜂窝芯结构因素、静应力因素及环境温湿度条件对纸蜂窝夹层板-质量系统的主共振频率和最大振动传递率的影响程度,找寻其中影响最大的因素,指导纸蜂窝夹层板振动防护设计,较为理想的目标是推广到不同材质的粘弹性蜂窝结构夹层板的振动分析中去。文中具体结论如下所述。

1) 纸蜂窝夹层板-质量系统的主共振频率受胞元边长、纸板厚度、芯纸定量等芯层结构因素以及外载静应力因素的影响。

2) 蜂窝芯层结构影响其整体刚性,蜂窝胞元边长和厚度的增大,均会使纸蜂窝夹层板的刚性变差,导致纸蜂窝夹层板-质量系统的主共振频率降低;同时定量较大的芯纸的弹性模量较大,则该纸蜂窝夹层板的刚性较大,系统的主共振频率也较大。

3) 蜂窝尺寸不变时,载荷质量增大,会使加载到纸蜂窝夹层板上的静应力增大,系统的主共振频率就会降低。

参考文献:

[1] SUNA Y, LI Q M. Dynamic Compressive Behaviour of

Cellular Materials: a Review of Phenomenon, Mechanism and Modeling[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 112: 74—115.

- [2] 敬霖, 王志华, 赵隆茂. 多孔金属及其夹芯结构力学性能的研究进展[J]. 力学与实践, 2015, 37(1): 1—24.
JING Lin, WANG Zhi-hua, ZHAO Long-mao. Advances in Studies of the Mechanical Performance of Cellular Metals and Related Sandwich Structures[J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(1): 1—24.
- [3] WANG Dong-mei, BAI Zi-you. Mechanical Property of Paper Honeycomb Structure under Dynamic Compression[J]. Materials & Design, 2015, 77: 59—64.
- [4] FAN Zhi-gang, LU Li-xin, WANG Jun. Effect of Fatigue Damage on Energy Absorption Properties of Honeycomb Paperboard[J]. Shock and Vibration, 2015(1): 1—7.
- [5] BAI Zi-you, WANG Dong-mei, XU Zhuo-fei. Model Creation of Strain Rate-dependent Energy Absorption for Paper Honeycomb Sandwich Structure[J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2015, 17(4): 359—375.
- [6] LYU Yuan-jun, CHEN Qiong. Drop Impact on the Packaging System Using Honeycomb Paperboard[J]. World Scientific, 2011, 10(1): 167—174.
- [7] 王志伟, 姚著. 蜂窝纸板冲击压缩的试验研究和有限元分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 49—55.
WANG Zhi-wei, YAO Zhu. Experimental Investigation and Finite Element Analysis for Impact Compression of Honeycomb Paperboards[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 49—55.
- [8] E Yu-ping, WANG Zhi-wei. Effect of Relative Humidity on Energy Absorption Properties of Honeycomb Paperboards[J]. Packaging Technology and Science, 2010, 23: 471—483.
- [9] 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.
- [10] GUO Yan-feng, ZHANG Jing-hui. Shock Absorbing Characteristics and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Shock and Vibration, 2004, 11: 521—531.
- [11] 张改梅. 蜂窝纸板振动传递性试验研究[J]. 包装工程, 2002, 23(3): 18—20.
ZHANG Gai-mei. Research on Vibration Transformation of Honeycomb Board[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(3): 18—20.
- [12] ZHU Da-peng, ZHOU Shi-sheng, HE Rui-chun. Estimation of Dynamic Properties of Honeycomb Paperboard and Parameters Identification[J]. China Me-

- chanical Engineering, 2011, 22(22): 2672—2677.
- [13] ZHANG Zhi-kun, ZHENG Quan-cheng, ZHAO Yue-li. Honeycomb Paperboard Vibration Transmissibility Analysis and Modeling[C]// Proceedings of the 17th IAPRI World Conference on Packaging, 2010.
- [14] 梁宁, 王冬梅, 郭彦峰, 等. 蜂窝纸板振动传递特性研究进展[J]. 包装学报, 2018, 10(4): 43—49.
LIANG Ning, WANG Dong-mei, GUO Yan-feng, et al. Research Progress on Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Packaging Journal, 2018, 10(4): 43—49.
- [15] LIANG Ning, WANG Dong-mei, GUO Yan-feng, et al. Analytical Model Construction of Natural Frequency for Paper Honeycomb Sandwich Plate-block System[C]// Proceedings of the 21st IAPRI World Conference on Packaging, 2018.
- [16] HARISH R, SHARMA R 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.
- [17] GANESH J G, RAMANA G V. Vibration Analysis of a Circular Honeycomb Plate and Design of Its Support Structure Using Fem[J]. International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology, 2013, 1(4): 1—4.
- [18] ARUNKUMAR M P, JAGADEESH M, PITCHAIMANI J, et al. Sound Radiation and Transmission Loss Characteristics of a Honeycomb Sandwich Panel with Composite Facings: Effect of Inherent Material Damping[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 383: 221—232.