

随机振动下蜂窝纸板振动传递特性分析

张琴, 王保升

(南京工程学院, 南京 211167)

摘要: 从理论上推导了随机振动条件下振动传递率的计算公式; 试验研究了蜂窝纸板在不同加速度、频率和应力的随机振动下的振动传递特性, 得到了振动传递率曲线和峰值频率。不同随机振动试验计算出的振动传递率几乎相同, 与正弦扫频试验结果非常接近。这表明了利用随机振动试验分析蜂窝纸板的振动传递率是可行的, 为蜂窝纸板缓冲包装设计提供了基本数据。

关键词: 蜂窝纸板; 随机振动; 振动传递率

中图分类号: TB485.3; TB484.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)15-0007-03

Vibration Transmissibility Properties of Honeycomb Paperboard under Random Vibration

ZHANG Qin, WANG Bao-sheng

(Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Vibration transmissibility formula under random vibration was derived theoretically. Vibration transmissibility properties of honeycomb paperboard under random vibration of different acceleration, frequency and stress were tested; the vibration transmissibility curves and peak frequencies were obtained. The result showed that the vibration transmissibility from different random vibration tests is much the same and very close to the result of sine sweep test. It was concluded that using random vibration test to analyze the vibration transmissibility of honeycomb paperboard is feasible.

Key words: honeycomb paperboard; random vibration; vibration transmissibility

蜂窝纸板振动传递性能是蜂窝纸板缓冲性能的重要指标之一^[1-2], 目前对振动传递性能的分析主要是建立在线性系统模型或者扫频试验的基础上^[3-6]。而实际流通中包装件是处于随机振动环境中的, 蜂窝纸板的振动传递特性比较复杂。笔者通过随机振动试验来研究蜂窝纸板的振动传递特性。

1 随机振动下振动传递率计算公式

振动传递率是产品上产生的振动加速度与振动外力加速度之比^[7-8]。功率谱密度函数的表达式为:

$$S_y(p) = \int_{-\infty}^{\infty} R_y(\tau) e^{-ip\tau} d\tau \quad (1)$$

$$\text{其中: } R_y(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \ddot{y}(t) \ddot{y}(t + \tau) dt \quad (2)$$

零件对振动的响应公式为:

$$\ddot{x}_s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{y}(t - u - u_s) h(u) h_s(u_s) du du_s \quad (3)$$

将式(3)代入(2)中得:

$$R_s(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{y}(t - u - u_s) h(u) h_s(u_s) du du_s \right] \cdot \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{y}(t + \tau - u - u_{s1}) h(u_1) h_s(u_{s1}) du_1 du_{s1} \right] dt \quad (4)$$

其中, u 取自瞬时 t , u_1 取自瞬时 $t + \tau$, 所以 u 和 u_1 互不相干, 是 2 个独立的积分变量; u_s 取自瞬时 $t - u$, u_{s1} 取自瞬时 $t + \tau - u_1$, 所以 u_s 和 u_{s1} 互不相干, 也是 2 个独立的积分变量。

将式(4)改写为:

收稿日期: 2013-04-23

作者简介: 张琴(1979-), 女, 湖北荆州人, 硕士, 南京工程学院讲师, 主要从事包装工程的教学与研究。

$$R_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \ddot{y}(t-u-u_s) \ddot{y}(t+\tau-u-u_{s1}) dt \right] \cdot h(u)h(u_1)h_s(u_s)h_s(u_{s1}) du du_1 du_s du_{s1} \quad (5)$$

为了引入振动环境自相关函数,令:

$$t + \tau - u - u_{s1} = (t - u - u_s) + (\tau + u + u_s - u_1 - u_{s1})$$

带入式(5)中,变换可得:

$$R_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_y(\tau + u + u_s - u_1 - u_{s1}) h(u)h(u_1)h_s(u_s)h_s(u_{s1}) du du_1 du_s du_{s1} \quad (6)$$

将式(6)带入式(1)中,变换可得:

$$S_s(p) = \int_{-\infty}^{\infty} R_y(\theta) e^{-j p \theta} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} h(u) e^{j p u} du \int_{-\infty}^{\infty} h(u_1) e^{-j p u_1} du_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} h_s(u_s) e^{j p u_s} du_s \int_{-\infty}^{\infty} h_s(u_{s1}) e^{-j p u_{s1}} du_{s1} \quad (7)$$

由式(7)可知,右边第一个积分是振动环境的功率谱密度函数,即:

$$\int_{-\infty}^{\infty} R_y(\theta) e^{-j p \theta} d\theta = S_y(p)$$

式(7)右边的4个积分连乘恰好等于幅频函数 $H(p)$ 的平方,即:

$$\frac{(\omega^4 + 4n^2 p^2)(\omega_s^4 + 4n_s^2 p^2)}{[(\omega^2 - p^2)^2 + 4n^2 p^2][(\omega_s^2 - p^2)^2 + 4n_s^2 p^2]} = H^2(p)$$

所以: $S_s(p) = H^2(p) S_y(p)$ 。

这样就得出了振动传递率的公式:

$$H(p) = \sqrt{\frac{S_s(p)}{S_y(p)}} \quad (8)$$

式中: $S_s(p)$ 是响应功率谱密度; $S_y(p)$ 是激励功率谱密度。

2 随机振动下蜂窝纸板的振动性能测试

2.1 实验材料

实验用的材料为蜂窝纸板,纸芯是正六边形,其内切圆半径是 10 mm,纸板厚度为 50 mm,规格为 200 mm×200 mm,共 2 块,150 mm×150 mm,共 2 块,固定铁片一块,规格为 2.9 kg,300 mm×300 mm×8 mm。按照 GB/T 4857.2 的规定,选定一种条件对试验样品进行温、湿度预处理。

2.2 随机振动下蜂窝纸板的振动性能测试

实验系统分为电动台振动实验系统(型号为 DC-

600-5)、DH-5920 动态信号测试分析系统、辅助设备系统。调试好仪器后,将蜂窝纸板固定在振动实验台上,并确保蜂窝纸板在振动过程中不在试验台上移动。将 2 个传感器放在振动台和固定铁板上,见图 1。

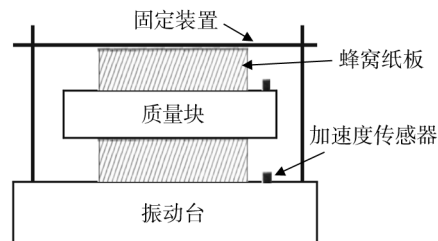


图 1 振动传递率测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vibration transmissibility test

实验共分为 5 次:第 1 次为设定一定加速度、频率的随机振动实验;第 2 次为保持频率不变,改变加速度的随机振动试验;第 3 次为改变加速度和频率的随机振动实验;第 4 次保持第一次的参数不变,改变蜂窝纸板的规格;第 5 次为正弦扫频实验。通过这 5 次实验之间的比较,来研究蜂窝纸板的振动传递率。

2.2.1 实验结果

1) 实验 1: 设定一定加速度和频率的随机振动,选用 200 mm×200 mm 规格的蜂窝纸板。

根据不同频率下的响应、激励功率谱密度计算出振动传递率,并绘制振动传递率曲线,见图 2。

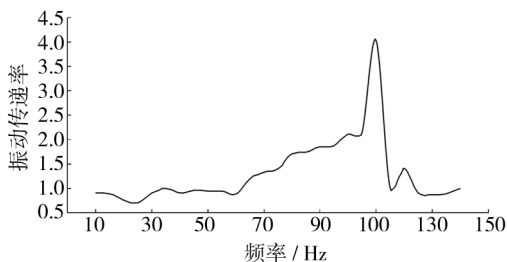


图 2 振动传递率曲线(1)

Fig. 2 Vibration transmissibility curve (1)

由图 2 可知,蜂窝纸板的振动传递率由 1 开始缓慢增大,到达 105 Hz 时,增大的速率明显增大,到 110 Hz 时,振动传递率达到峰值,峰值为 4.0345,过了 110 Hz 以后急剧减小。

2) 实验 2: 保持频率不变,改变加速度的随机振动。

根据不同频率下的响应、激励功率谱密度计算出振动传递率,并绘制振动传递率曲线,见图 3。

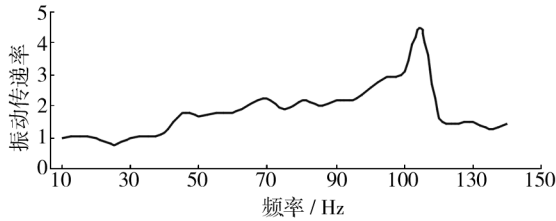


图3 振动传递率曲线(2)

Fig. 3 Vibration transmissibility curve (2)

由图3可得,蜂窝纸板的振动传递率由1开始缓慢增大,到达110 Hz时,增大速率明显增大,到115 Hz时,振动传递率达到峰值,峰值为4.4721,过了115 Hz以后急剧减小。

3) 实验3:改变加速度和频率的随机振动。

根据不同频率下的响应、激励功率谱密度计算出振动传递率,并绘制振动传递率曲线,见图4。

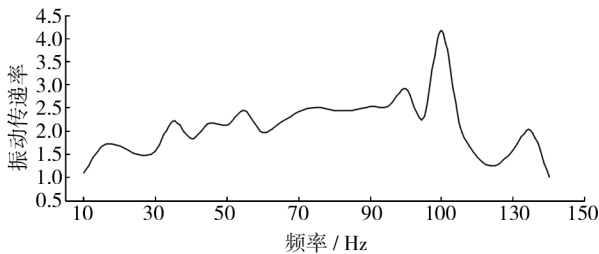


图4 振动传递率曲线(3)

Fig. 4 Vibration transmissibility curve (3)

由图4可得,蜂窝纸板的振动传递率由1开始缓慢增大,到达105 Hz时,增大的速率明显增大,到110 Hz时,振动传递率达到峰值,峰值为4.1833,过了110 Hz以后急剧减小。

4) 实验4:保持实验1的参数,改变蜂窝纸板规格,蜂窝纸板规格为150 mm×150 mm。

根据不同频率下的响应、激励功率谱密度计算出振动传递率,并绘制振动传递率曲线,见图5。

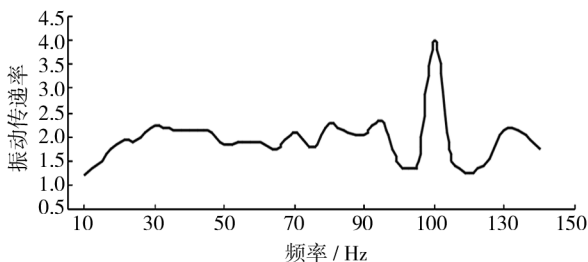


图5 振动传递率曲线(4)

Fig. 5 Vibration transmissibility curve (4)

由图5可得,蜂窝纸板的振动传递率由1开始缓慢增大,达到105 Hz时,增大的速率明显增大,达到110 Hz时,振动传递率达到峰值,峰值为4,超过110 Hz以后急剧减小。

5) 实验5:正弦扫频实验。

保持实验1的参数,选用200 mm×200 mm规格的蜂窝纸板进行实验。

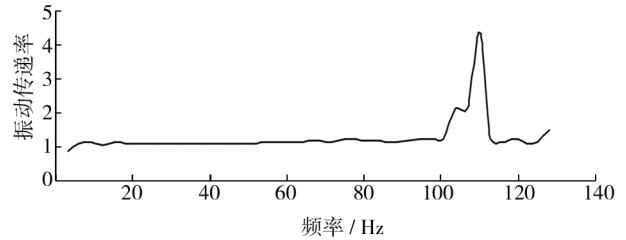


图6 振动传递率曲线(5)

Fig. 6 Vibration transmissibility curve (5)

由图6可得,蜂窝纸板的振动传递率在1~100 Hz之间,几乎为一条平稳的直线,振动传递率接近于1;100~110 Hz之间,振动传递率急剧增大,110 Hz时达到峰值,峰值为4.3572,超过110 Hz以后急剧减小。

2.2.2 结果分析

1) 根据静应力计算公式得出,蜂窝纸板规格为200 mm×200 mm时,静应力为710.5 Pa,蜂窝纸板规格为150 mm×150 mm时,静应力为1263.1 Pa。

2) 由图2-6可得,在这个振动系统中,蜂窝纸板在随机振动和正弦扫频实验的环境下,振动传递率的峰值几乎相同,都为4,而且随机振动下的振动传递率曲线和正弦扫频下的振动传递率曲线趋势基本相同,说明用随机振动的方法测蜂窝纸板的振动传递率是可行的。

3) 由图2-5可得,蜂窝纸板在随机振动条件下,加速度与频率对振动传递率几乎没有影响;比较图2和图5可得出,改变蜂窝纸板的面积对蜂窝纸板的振动传递率也几乎没有影响,说明应力的改变对蜂窝纸板的振动传递率几乎没有影响。由此可以推论:在随机振动下,蜂窝纸板的振动传递率曲线是固定的。

4) 扫频实验和前4个实验相比,振动传递率曲线在110 Hz之前较为平滑,这是因为正弦激励只是一种理想状态。而在运输过程中,几乎都是随机振动,所以在随机振动实验条件下得出的结果更加贴近实际。

- flute Corrugated Paperboard[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(1):39-41.
- [11] 高德, 卢富德. 聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J]. 振动与冲击, 2012, 31(3):69-72.
GAO De, LU Fu-de. Optimization Design of MDOF Package Cushioning System Made of Polyethylene[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(3):69-72
- [12] 卢富德, 陶伟明, 高德. 串联缓冲系统冲击响应与结构优化分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(10):1773-1777.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Impact Response of Series Cushioning System and Structure Optimization Analysis[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(10):1773-1777.
- [13] 卢富德, 高德. 考虑蜂窝纸板箱缓冲作用的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(3):335-341.
LU Fu-de, GAO De. Study on Drop Impact of Packaging System Considering the Cushioning Action of Honeycomb Paperboard Box [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3):335-341.
- [14] 卢富德, 陶伟明, 高德. 串联缓冲结构压缩响应虚拟质量分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(8):1431-1436.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Compression Responses of Series Cushioning Structures by a Virtual Mass Method[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(8):1431-1436.
- [15] 卢富德, 陶伟明, 高德. 瓦楞纸板串联缓冲系统动力学响应[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21):30-32.
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Dynamic Response of a Series Cushioning Packaging System Made of Multi-layer Corrugated Paperboard[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(21):30-32.

~~~~~  
(上接第9页)

### 3 结论

在随机振动条件下, 不同加速度、频率和应力对蜂窝纸板振动传递率的影响不大, 蜂窝纸板的振动传递率是固定不变的。利用随机振动实验得出的结论更加贴近工程实际, 这对蜂窝纸板缓冲包装的推广应用具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] 张改梅. 蜂窝纸板振动传递性能试验研究[J]. 包装工程, 2002, 23(2):18-20.  
ZHANG Gai-mei. Research on Vibration Transformation of Honeycomb Board [J]. Packaging Engineering, 2002, 23(2):18-20.
- [2] 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 Da-peng, ZHAO Yue-li. Experimental Study and Modeling of Vibration Transmissibility Properties of Honeycomb Fireboard [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(4):78-81.
- [3] GUO Yan-feng, ZHANG J H. Shock Absorbing Characteristics and Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. Shock and Vibration, 2004, 11(5):521-531.
- [4] 朱大鹏, 周世生, 张志昆. 蜂窝纸板动态特性建模与参数识别[J]. 振动与冲击, 2010, 29(4):213-217.  
ZHU Da-peng, ZHOU Shi-sheng, ZHANG Zhi-kun. Dynamic Properties Modeling and Parameter Identification for a Honeycomb Fibreboard [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(4):213-217.
- [5] WANG Dong-mei, WANG Zhi-wei. Experimental Investigation into the Cushioning Properties of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Technology and Science, 2008, 21(1):309-316.
- [6] 郭彦峰, 朱大鹏. 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 Yan-feng, ZHU Da-peng. Test and Analysis of Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2003, 24(1):12-13.
- [7] 孟宪文, 李连进. 蜂窝纸板的隔振缓冲性能测试[J]. 包装工程, 2006, 27(5):72-73.  
MENG Xian-wen, LI Lian-jin. Test of Vibration Isolation and Buffering Capability of Honercomb Cardboard [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5):72-73.
- [8] 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):42-44.  
CHEN Qiong, LYU Yuan-jun. Influence the Length of Assembly Glue on Vibration Characteristic of Honeycomb Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3):42-44.