两层堆码包装单元的随机振动响应

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.04.002

林深伟 [1,2,3,4]　王志伟 [1,2,3]

1. 暨南大学 包装工程研究所
广东　珠海　519070
2. 暨南大学 产品包装与物流
广东普通高校重点实验室
广东　珠海　519070
3. 暨南大学 珠海市产品包装
与物流重点实验室
广东　珠海　519070
4. 金山电子（深圳）有限公司
机械工程部
广东　深圳　518052

摘　要：试验研究了两层堆码包装单元在不同振动等级、不同约束方式下的随机振动响应，对固定约束方式下堆码包装单元的响应特性采用有限元法作了进一步分析。结果表明：两层堆码包装单元顶层产品的振动主要受第一共振频率控制，底层产品的振动受到第一和第二共振频率共同控制。产品加速度在共振频率附近的响应很大，在非共振频率范围的响应很小。产品加速度响应功率谱主要为产品的共振响应谱。有限元计算得到的共振频率和产品加速度 PSD 曲线趋势与试验结果较好吻合，表明有限元法是堆码包装单元随机振动响应分析的有效方法。

关键词：堆码包装单元；随机振动；功率谱；约束方式；有限元法
中图分类号：TB48；TH113.1　　**文献标志码**：A
文章编号：1674-7100(2017)04-0010-10

0　引言

在实际物流中，产品包装常以多层堆码和不同约束捆绑方式进行运输。若约束方式不当，则易造成产品损坏。因此，研究不同约束方式下堆码包装单元的动态响应规律，对产品缓冲包装设计具有重要意义。

国内外学者做了大量的产品运输包装方面的研究，主要集中在多自由度系统理论模型的建立和分析上 [1-5]。在随机振动研究方面，试验方法的研究较多 [6-10]，产品包装动态响应分析的研究较少 [11-12]。T. J. Urbanik[1] 建立了多层堆码包装系统的理论模型，并且利用其计算纸箱堆码的传递率。K. P. Thakur 等人 [2] 将每个包装件看成弹簧阻尼系统，同时考虑其非线性因素，建立了多层堆码包装的理论模型，通过 AUTOSIM 软件模拟和实验验证了理论模型的可靠性。C. Bernad 等人 [11] 模拟运输环境下的随机振动激励，研究了瓦楞纸箱堆码结构的振动力学特性。王志伟等人 [12-15] 采用压力感测片研究了两层和三层堆码包装单元接触面的动压力、力穿越分布、最大动压力分布和产品的加速度功率谱等，为堆码包装设计提供依据。

本文以产品（用水泥块代替）、乙烯－醋酸乙烯共聚物（ethylene-vinyl acetate copolymer，EVA）衬垫和瓦楞纸箱组成的两层堆码包装单元为研究对象，采用试验和有限元法（finite element method，FEM）研究两层堆码包装单元在不同振动等级、不同约束方式下的随机振动响应。

1　随机振动试验

1.1　试验

试验用和有限元分析的产品包装如图 1 所示，它

收稿日期：2017-06-14
基金项目：国家自然科学基金资助项目（50775100）
作者简介：林深伟（1989-），男，广东揭阳人，暨南大学硕士生，主要研究方向为运输包装，E-mail：773759735@qq.com
通信作者：王志伟（1963-），男，江苏无锡人，暨南大学教授，博士，博士生导师，主要从事产品包装防护工程和食品包装安全技术方面的教学与研究，E-mail：wangzw@jnu.edu.cn

是由瓦楞纸箱、EVA 衬垫和产品（水泥块）构成。瓦楞纸箱外尺寸为 350 mm × 190 mm × 230 mm，纸板厚度为 5 mm；EVA 衬垫厚度为 20 mm；产品尺寸为 300 mm × 140 mm × 170 mm；产品包装件质量为 18.0 kg。

采用美国 Lansmont 公司的 Model 7000−10 振动测试系统，对两层堆码包装单元进行随机振动试验。将加速度传感器固定在产品顶端位置，如图 2 所示。



图 1　产品包装的组成
Fig. 1　Composition of product packaging



图 2　加速度传感器的固定位置
Fig. 2　Fixed position of acceleration sensor

试验中采用 3 种约束方式，分别是无约束、弹性约束和固定约束。无约束方式是将堆码包装单元直接放置在振动台上，见图 3a。弹性约束方式是用 2 根弹性绳进行绑定，见图 3b，2 根弹性绳刚度分别为 1.374 N/mm 和 1.318 N/mm，对产品包装产生的压力均为 131.2 N。固定约束方式则是采用固定装置将产品包装固定在振动台上，限制产品包装上下跳动，见图 3c。

采用美国材料与试验协会标准 ASTM D−4169−14 中的加速度功率谱（power spectral density，PSD）[16] 和自行设定的非标准加速度功率谱 level IV 进行随机振动试验，振动的采样时间为 5 min。各试验的加速度功率谱见表 1。



a）无约束



b）弹性约束



c）固定约束

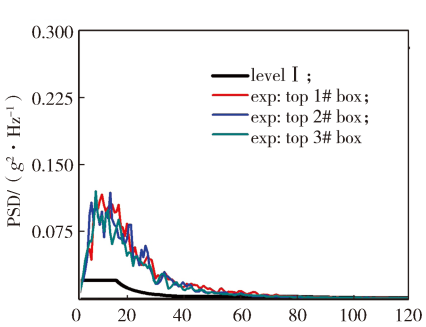
图 3　试验时两层堆码包装单元的约束方式
Fig. 3　Two layer stacked packaging units under constraint

表 1　随机振动加速度功率谱
Table 1　Acceleration PSDs of random vibration

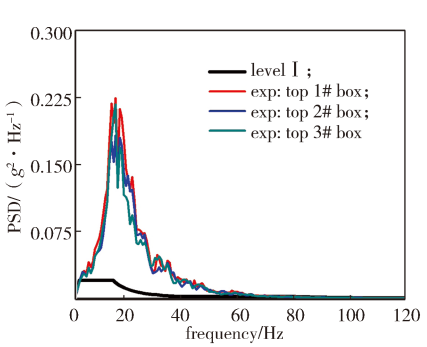
频率 /Hz	加速度功率谱 /（g^2•Hz^{-1}）			
	ASTM D−4169−14			非标准
	level I	level II	level III	level IV
1	0.000 10	0.000 05	0.000 025	0.000 012 5
4	0.020 00	0.010 00	0.005 000	0.002 500 0
16	0.020 00	0.010 00	0.005 000	0.002 500 0
40	0.002 00	0.001 00	0.000 500	0.000 250 0
80	0.002 00	0.001 00	0.000 500	0.000 250 0
200	0.000 02	0.000 01	0.000 005	0.000 002 5
加速度均方根 /g	0.731	0.516	0.365	0.258

1.2　结果与分析

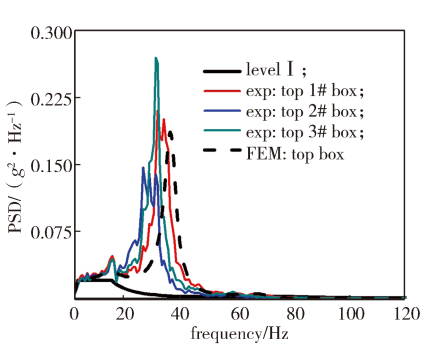
采用表 1 中的加速度功率谱对两层堆码包装单元进行激励，得到不同约束方式下产品的响应加速度功率谱，如图 4 所示。由于在 120~200 Hz 之间试验得到的产品响应加速度功率谱接近于 0，故只给出 3~120 Hz 时的试验结果。对于两层堆码包装单元，除了无约束方式下 level II 采用了 2 个平行试样之外，其余均采用了 3 个平行的试样，分别以 1#、2# 和 3# 表示。



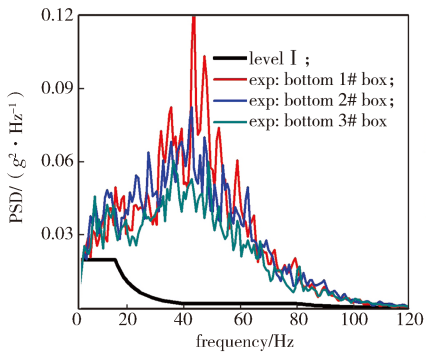
a_1）无约束，level I，top box



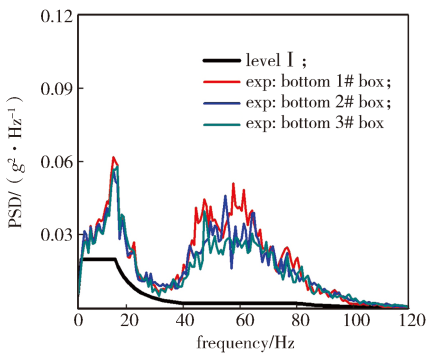
b_1）弹性约束，level I，top box



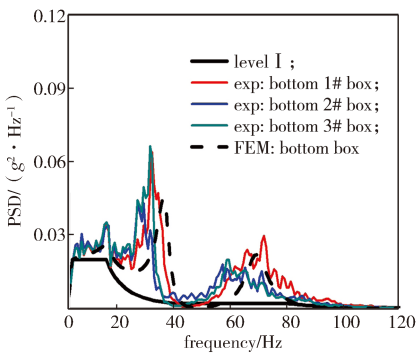
c_1）固定约束，level I，top box



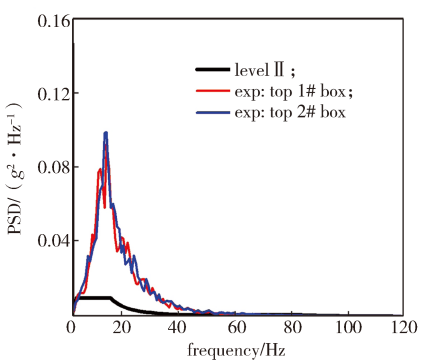
a_2）无约束，level Ⅰ，bottom box



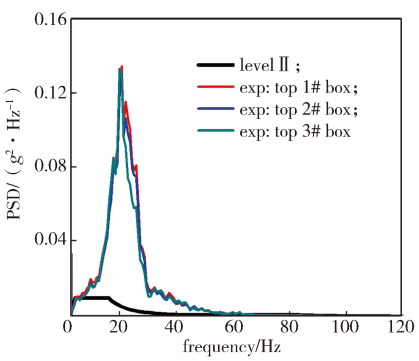
b_2）弹性约束，level Ⅰ，bottom box



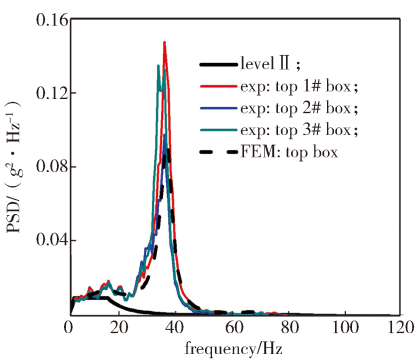
c_2）固定约束，level Ⅰ，bottom box



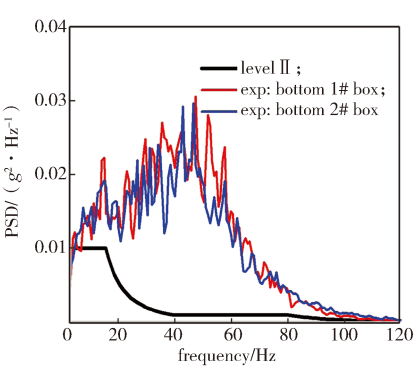
d_1）无约束，level II，top box



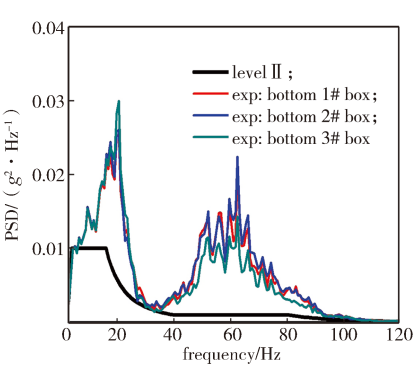
e_1）弹性约束，level II，top box



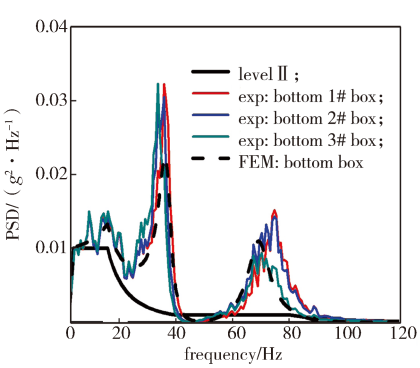
f_1）固定约束，level II，top box



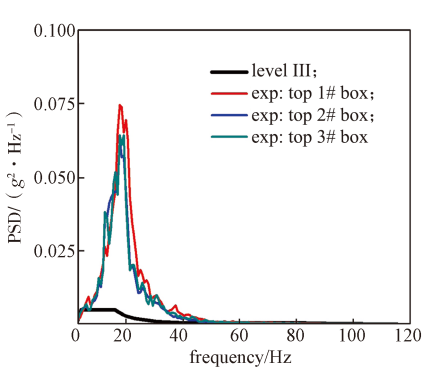
d_2）无约束，level II，bottom box



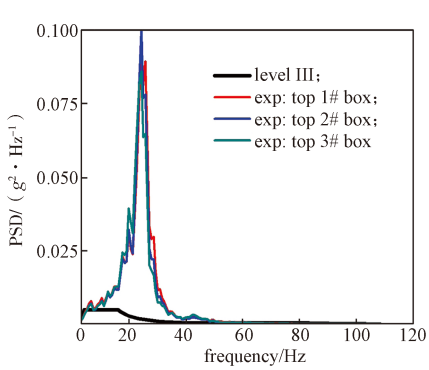
e_2）弹性约束，level II，bottom box



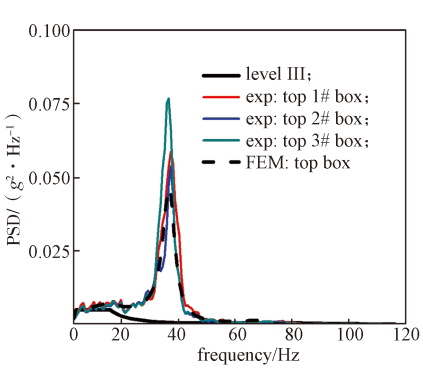
f_2）固定约束，level II，bottom box



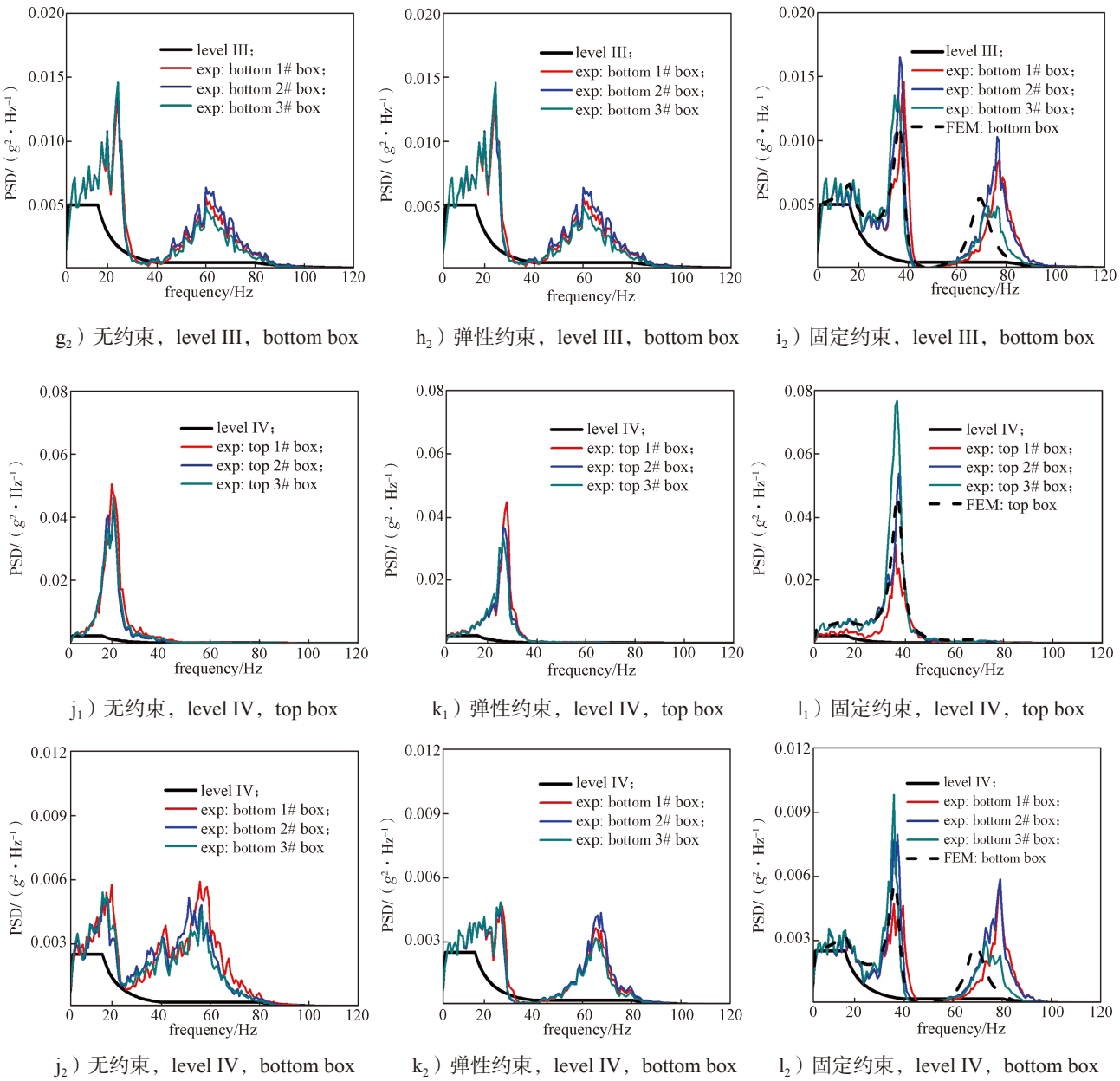
g_1）无约束，level III，top box



h_1）弹性约束，level III，top box



i_1）固定约束，level III，top box



g_2）无约束，level III，bottom box　h_2）弹性约束，level III，bottom box　i_2）固定约束，level III，bottom box

j_1）无约束，level IV，top box　k_1）弹性约束，level IV，top box　l_1）固定约束，level IV，top box

j_2）无约束，level IV，bottom box　k_2）弹性约束，level IV，bottom box　l_2）固定约束，level IV，bottom box

图 4　两层堆码包装单元中产品的响应加速度功率谱

Fig. 4　The acceleration PSDs of cement block in two layer stacked packaging unit

由图 4 可知，在同一振动等级下，随着约束方式的加强，系统第一共振频率增大。在同一约束方式下，随着振动等级（加速度均方根 G_{rms}）由 0.731g 降到 0.516g、0.365g 和 0.258g 时，第一共振频率处加速度 PSD 峰值明显下降。处于顶层产品的第一共振加速度 PSD 峰值远大于处于底层产品的第一共振加速度 PSD 峰值。

两层堆码包装单元顶层产品的振动主要受第一共振频率控制，底层产品的振动受第一和第二共振频率共同控制。

另外，产品在第一共振频率处的加速度响应基本上大于第二共振频率处的响应，主要原因是第一共振频率处的激励能量大于第二共振频率处的激励能量。即使激励能量很小，但底层产品受到第二共振频率控制时的加速度响应依然很大。换言之，产品加速度在共振频率附近的响应很大，在非共振频率范围的响应很小。这说明产品的加速度响应功率谱主要为产品的共振响应谱。

2 有限元分析

2.1 有限元模型的建立

根据产品包装的实际尺寸，用 Solidworks 软件建立三维实体模型，并将其导入 Ansys Workbench 软件中进行随机振动分析。

材料属性设定。纸箱瓦楞纸板的弹性模量是根据 GB/T 9341—2008《塑料 弯曲性能的测定》[17] 的方法进行 3 点弯曲试验和参考文献 [18-21] 计算所得，如表 2 所示，表中 E、G 为弹性模量，μ 为泊松比。EVA 衬垫的弹性模量则是参考 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》[22] 进行测试所得，其密度为 79.09 kg/m^3，弹性模量为 1.22 MPa，泊松比为 0.3。与包装材料相比，木板、产品和振动台的弹性模量很大，木板的密度为 437.47 kg/m^3，弹性模量为 2 GPa，泊松比为 0.3。产品的密度为 2 450.98 kg/m^3，弹性模量为 200 GPa，泊松比为 0.3。振动台的密度为 7 850.00 kg/m^3，弹性模量为 200 GPa，泊松比为 0.3。

表 2 瓦楞纸板的材料参数

Table 2 Material parameters of corrugated board

参数	E_x/MPa	E_y/MPa	E_z/MPa	G_{xy}/MPa	G_{yz}/MPa
取值	64.30	118.50	0.32	33.78	3.39

参数	G_{xz}/MPa	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}	密度 /(kg•m^{-3})
取值	1.17	0.34	0.01	0.01	143.40

1）接触类型设定。定义产品与前后左右 EVA 衬垫为不分离接触，产品与上下 EVA 衬垫为无摩擦接触；前后左右 EVA 衬垫与纸箱为不分离接触，上下 EVA 衬垫与纸箱为绑定接触；纸箱与纸箱之间为绑定接触；纸箱与振动台以及纸箱与木板实体均设为绑定接触。

2）单元与网格划分。将瓦楞纸板设置为壳单元 (Shell 181)；并将螺栓等效成弹簧单元，刚度取其最大值为 1.0×10^{10} N/mm；其他均设置为实体单元（Solid 186)。两层堆码包装单元的网格划分如图 5 所示，两层堆码包装单元的单元为 11 813 个，节点为 58 154 个。

在振动台竖直方向上输入表 1 的加速度功率谱。在扫频试验中测得产品包装的阻尼系数范围为 0.06~0.07，在这里统一设置系统阻尼系数为 0.07。

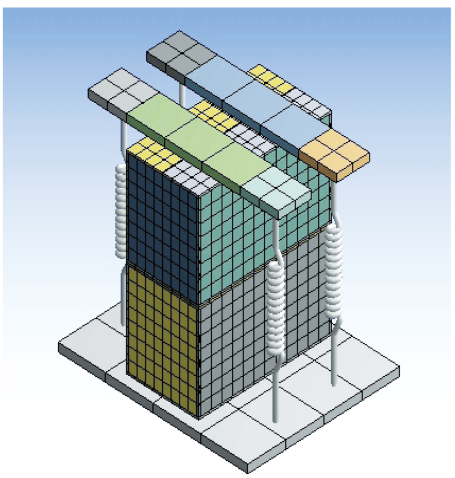


图 5 两层堆码包装单元的网格划分

Fig. 5 Mesh division of two layer stacked packaging unit

2.2 结果分析

2.2.1 产品响应加速度功率谱

通过有限元分析得到了产品竖直方向上的响应加速度功率谱，如图 4c, f, i, l 中的 FEM，并与试验结果进行对比。将有限元计算得到两层堆码包装单元的共振频率和通过扫频试验得到的共振频率进行对比，如表 3 所示。

表 3 两层堆码包装单元的共振频率

Table 3 Resonance frequencies of two layer stacked packaging unit

第一共振频率 /Hz		误差 /%	第二共振频率 /Hz		误差 /%
exp.	FEM		exp.	FEM	
33.04	36.95	11.8	71.37	69.06	2.7

从表 3 可知，通过有限元分析得到的产品共振频率与试验结果的误差不超过 11.8%。从图 4c, f, i, l 中可以看出，通过有限元分析得到的产品加速度功率谱 PSD 变化趋势与试验结果一致，能够较好地反映产品包装的振动特性。在进行有限元模态分析时，可发现第一共振的主要表现形式是顶层产品上下跳动，而第二共振的主要表现形式是底层产品上下跳动。实际上顶层产品也出现了 2 个共振峰，只是第二共振加速度 PSD 峰值远小于第一共振加速度 PSD 峰值，因而在图 4 中表现不明显。由于试验中存在几何非线性性和接触非线性性，因此在有限元分析时存在一定的误差。

2.2.2 纸箱 3σ 变形云图和 3σ 等效应力云图

两层堆码包装单元纸箱竖直方向上的 3σ 变形

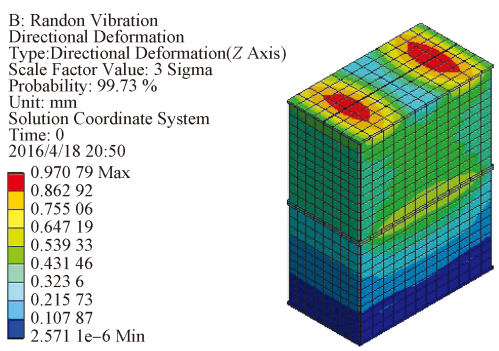
云图如图 6 所示，等效应力云图如图 7 所示。表 4 给出了纸箱 3σ 变形和 3σ 等效应力的限值（概率为 99.73%）。

表 4　纸箱的 3σ 变形和 3σ 等效应力限值

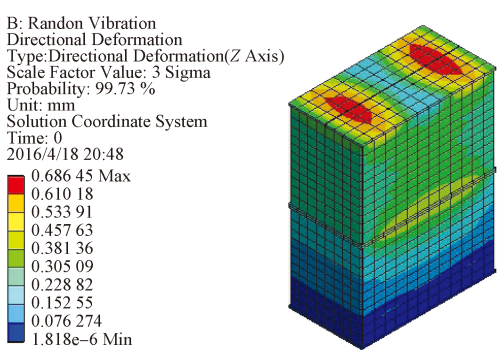
Table 4　Limit value of 3 sigma deformation and 3 sigma equivalent stress in corrugated boxes

振动等级	3σ 变形 /mm	3σ 等效应力 /MPa
level I	0.970	0.177
level II	0.686	0.125
level III	0.485	0.088
level IV	0.343	0.062

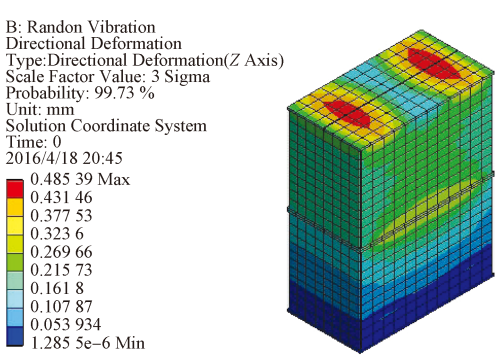
从图 6~7 可以看出，对固定约束方式下的纸箱，变形主要发生在纸箱长襟片与木板接触的区域，等效应力主要集中在底层纸箱中部区域。



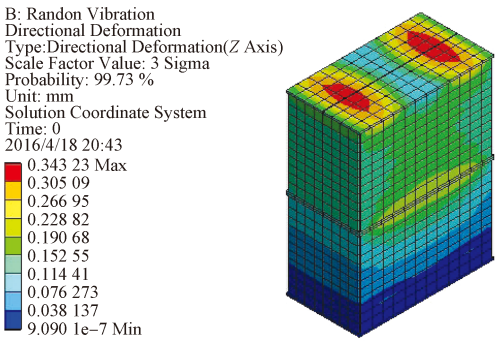
a）level I



b）level II



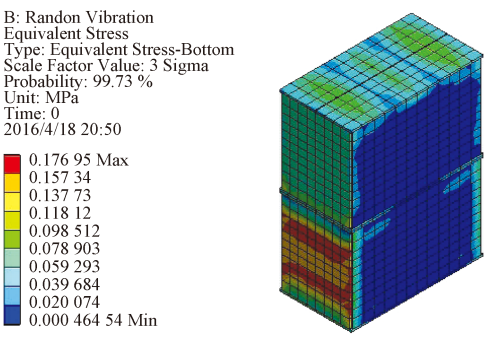
c）level III



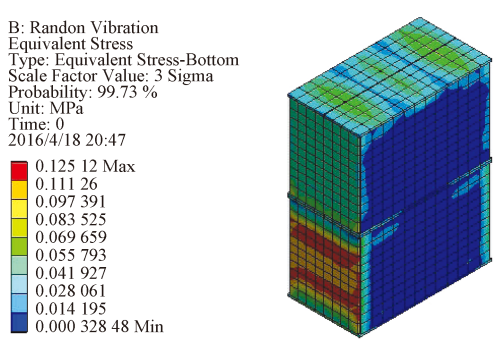
d）level IV

图 6　两层堆码包装单元中纸箱的 3σ 变形云图

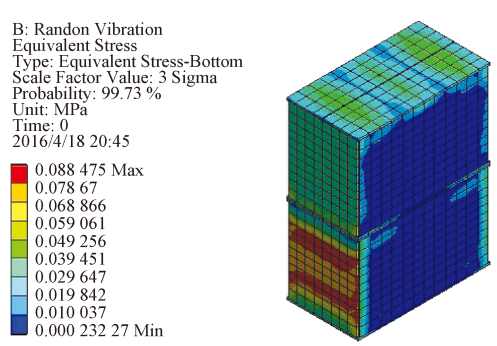
Fig. 6　3 Sigma deformation of the corrugated box



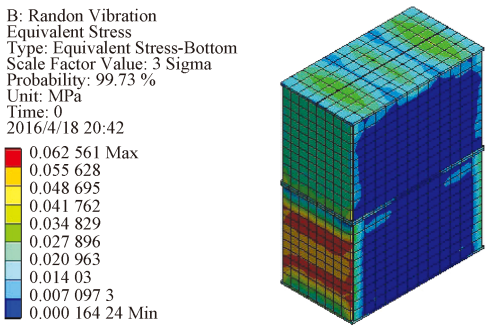
a）level I



b）level II



c）level III



d）level IV

图 7　两层堆码包装单元中纸箱的 3σ 等效应力云图

Fig. 7　3 sigma equivalent stress of the corrugated box

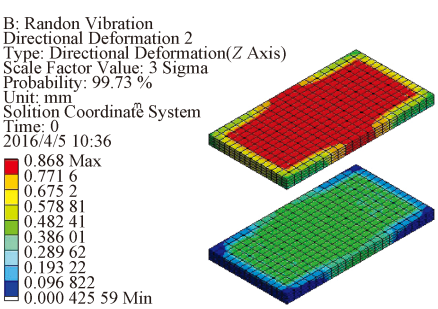
2.2.3　底衬垫 3σ 变形云图和 3σ 等效应力云图

两层堆码包装单元底衬垫的竖直方向上的 3σ 变形云图如图 8 所示，等效应力云图如图 9 所示。表 5 给出了底衬垫 3σ 变形和 3σ 等效应力的限值（概率为 99.73%）。

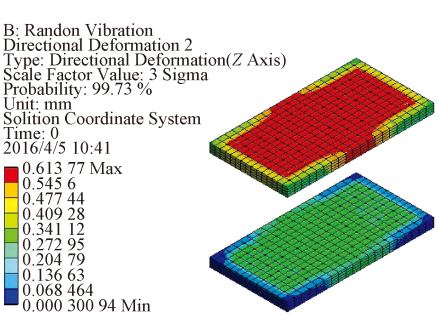
表 5　底衬垫的 3σ 变形和 3σ 等效应力限值

Table 5　Limit value of 3 sigma deformation and 3 sigma equivalent stress in pad

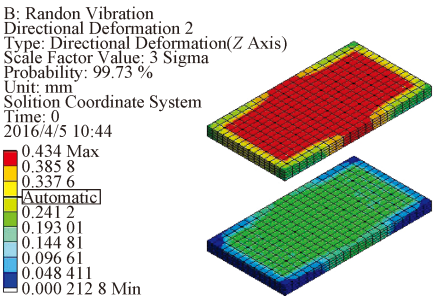
振动等级	3σ 变形 /mm	3σ 等效应力 /MPa
level I	0.868	0.039
level II	0.614	0.027
level III	0.434	0.019
level IV	0.307	0.014



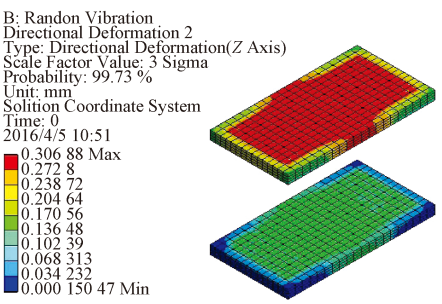
a）level I



b）level II



c）level III

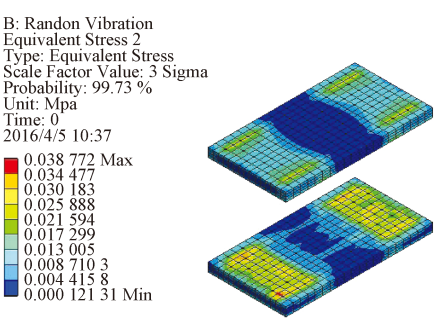


d）level IV

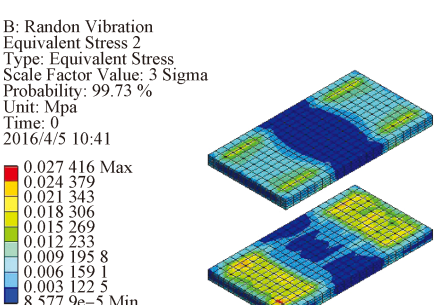
图 8　底衬垫的 3σ 变形云图

Fig. 8　3 Sigma deformation of the pad

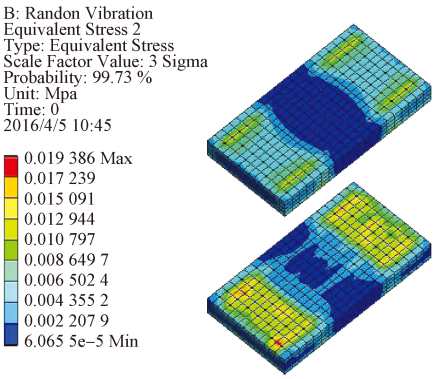
由图 8~9 可以看出，底衬垫变形主要分布在衬垫与产品接触的区域，应力主要分布在衬垫与产品接触的两端区域。最大变形发生在顶层纸箱中衬垫与产品接触区域，最大等效应力发生在底层箱子中衬垫与产品边缘接触位置。



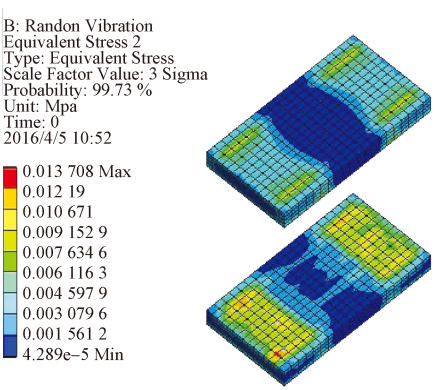
a）level I



b）level II



c）level III



d）level IV

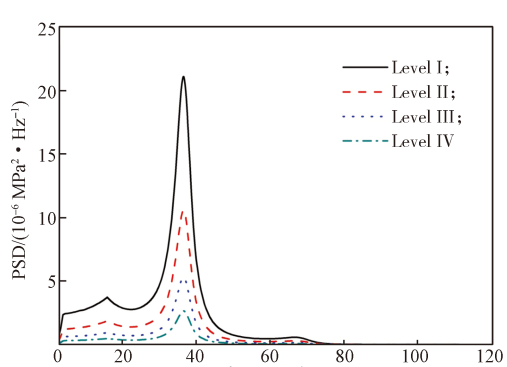
图 9　底衬垫的 3σ 等效应力云图

Fig. 9　3 sigma equivalent stress of the pad

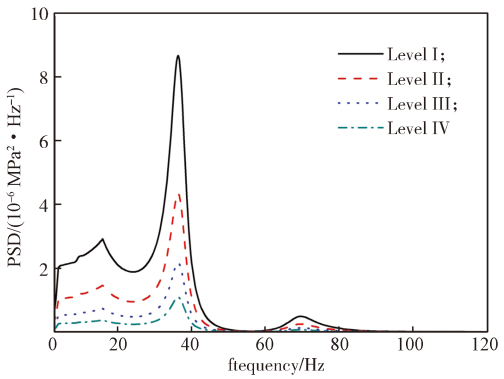
2.2.4　底衬垫最大等效应力点处应力功率谱

对两层堆码包装单元的底衬垫最大等效应力点进行响应应力功率谱分析，结果如图 10 所示。

由图 10 可知，随着振动等级的增加（从 level Ⅳ到 level Ⅰ），应力功率谱明显增大；共振区域应力功率谱变得十分陡峭。由于衬垫的应力与产品的加速度相关，图 10 中的底层 EVA 衬垫应力功率谱分别与图 4 中产品的加速度功率谱形状一致。



a）顶层纸箱中的 EVA 衬垫



b）底层纸箱中的 EVA 衬垫

图 10　两层堆码包装单元衬垫应力功率谱

Fig. 10　Stress PSDs of pad in two layer stacked packaging unit

3　结论

本文研究了两层堆码包装单元在不同随机振动等级、不同约束方式下的产品加速度振动响应特性以及纸箱和衬垫的应力和变形情况，可得以下结论：

1）同一约束方式下，随着振动强度的降低，两层堆码包装单元的产品加速度 PSD 明显下降。在同一振动等级下，随着约束方式的加强，两层堆码包装单元的第一共振频率增大。处于顶层产品的第一共振加速度 PSD 峰值远大于处于底层产品的第一共振加速度 PSD 峰值。

2）两层堆码包装单元顶层产品的振动主要受第一共振频率控制，底层产品的振动受到第一和第二共振频率共同控制。产品加速度在共振频率附近的响应很大，在非共振频率范围的响应很小。产品响应加速度功率谱主要为产品的共振响应谱。

3）利用有限元法计算得到的共振频率和产品加速度 PSD 曲线趋势与试验结果较吻合，这表明有限元法是堆码包装单元随机振动响应分析的有效方法。

参考文献：

[1]　URBANIK T J. Transportation Vibration Effects on Unitized Corrugated Contains[R]. USA：United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory，1978：1-24.

[2]　THAKUR K P，PANG D. Simulating Complex Loading Patterns in the Stack of Packages[EB/OL]. [2017-05-17].

https://www.researchgate.net/publication/237133743_Simulating_Complex_Loading_Patterns_in_the_Stack_of_Packages.

[3] WANG Z W，JIANG J H. Evaluation of Product Dropping Damage Based on Key Component[J]. Packaging Technology and Science，2010，23(4)：227-238.

[4] WANG Z W，WANG J，ZHANG Y B，et al. Application of the Inverse Substructure Method in the Investigation of Dynamic Characteristic of Product Transport System[J]. Packaging Technology and Science，2012，25(6)：351-362.

[5] WANG Z W，ZHANG Y B. Dynamic Characteristic Analysis of Refrigerator-Truck Transport System by Using Inverse Substructure Method[J]. Packaging Technology and Science，2014，27(11)：883-900.

[6] 王述成，陈章位 . 随机振动试验中时域随机化技术的研究 [J]. 机械工程学报，2005，41(5)：230-233.
WANG Shucheng，CHEN Zhangwei. Research on the Randomization of Random Test in Vibration Control System[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2005，41(5)：230-233.

[7] 关广丰，丛大成，韩俊伟，等 . 6 自由度随机振动控制算法 [J]. 机械工程学报，2008，44(9)：215-219.
GUAN Guangfeng，CONG Dacheng，HAN Junwei，et al. Algorithm of 6-DOF Random Vibration Control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2008，44(9)：215-219.

[8] 陈家焱，陈章位，贺惠农，等 . 非高斯随机振动试验并行控制策略研究 [J]. 机械工程学报，2012，48(4)：193-198.
CHEN Jiayan，CHEN Zhangwei，HE Huinong，et al. Concurrent Control Strategy Research for Non-Gaussian Random Vibration Test[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2012，48(4)：193-198.

[9] 贺旭东 . 多输入多输出振动试验控制系统的理论、算法及实现 [D]. 南京：南京航空航天大学，2006.
HE Xudong. MIMO Vibration Test Control System：Theories, Algorithms and Implementations[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2006.

[10] 陈家焱 . 多点激励振动试验系统的控制策略研究 [D]. 杭州：浙江大学，2011.
CHEN Jiayan. Control Strategy Research on Multi-Exciter Vibration Test System[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2011.

[11] BERNAD C，LASPALAS A，GONZÁLEZ D，et al. Dynamic Study of Stacked Packaging Units by Operational Model Analysis[J]. Packaging Technology and Science，2010，23(3)：121-133.

[12] WANG Z W，FANG K，WANG L J，et al. Dynamic Load Distribution of Stacked Packaging Unit Subjected to Vertical Vibration by Using a Pressure-Mapping System[EB/OL]. [2017-05-14]. http：//www.iapriweb.org/.

[13] WANG Z W，FANG K. Dynamic Performance of Stacked Packaging Units[J]. Packaging Technology and Science，2016，29(10)：491-511.

[14] 王志伟，戚德彬 . 两层计算机堆码包装动力学试验研究 [J]. 机械工程学报，2017，53(3)：90-99.
WANG Zhiwei，QI Debin. Experimental Study of Dynamic Response of Two Layers Stacked Packaging Units of Computers[J]. Journal of Mechanical Engineering，2017，53(3)：90-99.

[15] FANG K，WANG Z W. The Statistical Characteristics of Maxima of Contact Force in Stacked Packaging Units Under Random Vibration[J]. Packaging Technology and Science，2017. doi：10.1002/pts.2313.

[16] American Society for Testing and Materials. Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems：ASTM D-4169-14[S]. West Conshohocken：ASTM International，2014.

[17] 全国塑料标准化技术委员会 . 塑料　弯曲性能的测定：GB/T 9341—2008[S]. 北京：中国标准出版社 , 2008.
National Technical Committee for Standardization of Plastic. Plastics-Determination of Flexural Properties：GB/T 9341—2008[S]. Beijing：Standards Press of China，2008.

[18] PERSON K. Material Model for Paper: Experimental and Theoretical Aspects[D]. Sweden：Lund Universtity，1991.

[19] MANN R W，BAUM G A，HABEGER C C. Determination of all Nine Orthotropic Elastic Constants for Machine-Made Paper[J]. Appleton Wisconsin the Institue，1979，63(2)：163-166.

[20] BAUM G A，BRENNAN D C，HABEGER C C. Orthotropic Elastic Constants of Paper[J]. Tappi Journal，1981，64(8)：97-101.

[21] NORDSTRAND T M. Parametric Study of the Post-Buckling Strength of Structural Core Sandwich Panels[J]. Composite Structures，1995，30(4)：441-451.

[22] 全国包装标准化技术委员会 . 包装用缓冲材料静态压

缩试验方法：GB/T 8168—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008.
National Technical Committee for Standardization of Packaging. Testing Method of Static Compression for Packaging Cushioning Materials：GB/T 8168—2008[S]. Beijing：Standards Press of China，2008.

Response of Two Layer Stacked Packaging Unit in Random Vibration

LIN Shenwei[1, 2, 3, 4]，WANG Zhiwei[1, 2, 3]

（1. Packaging Engineering Institute，Jinan University，Zhuhai Guangdong 519070，China；
2. Key Laboratory of Product Packaging and Logistics of Guangdong Higher Education Institutes，
Jinan University，Zhuhai Guangdong 519070，China；3. Zhuhai Key Laboratory of
Product Packaging and Logistics，Jinan University，Zhuhai Guangdong 519070，China；
4. Mechanical Engineering Department，GP Electronics(SZ) Limited，Shenzhen Guangdong 518052，China）

Abstract：Random vibration responses of two layer stacked packaging unit in different levels of vibrations and different constraints were experimentally investigated. The finite element method was used to analyze the response of two layer stacked packaging units in the fixed constraint. The results showed that the product vibration in upper layer was mainly controlled by the first resonant frequency, and the product vibration in lower layer was controlled together by the first and second resonant frequencies. The acceleration response of product was large in the area of resonant frequencies, and small in the area of non-resonant frequencies. The power spectrum of product acceleration response was mainly the resonance response spectrum of product. The resonance frequencies and acceleration PSDs of product obtained from the finite element method were in agreement with the experimental ones, which indicated that the finite element method provided an effective tool for the analysis of stacked packaging units in random vibration.

Keywords：stacked packaging unit；random vibration；power spectrum density；constraint；finite element method