

三层啤酒瓶周转箱运输包装单元的随机振动响应

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.04.001

王志伟^{1,2,3} 孙 君^{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

摘 要:以三层啤酒瓶周转箱运输包装单元为研究对象,通过随机振动试验分析其动态响应特性。试验结果表明:顶层啤酒瓶的振动主要受一阶共振频率控制,中间层啤酒瓶的振动主要受前几阶共振频率控制,底层啤酒瓶的振动主要受高阶共振频率控制;多层堆码运输包装单元中啤酒瓶和周转箱的加速度峰值(波峰)分布为 Weibull 分布;上层周转箱和靠近周转箱中央位置的啤酒瓶经历了更宽、更大的加速度响应水平。研究结果对啤酒瓶的存储、运输具有指导意义。

关键词:啤酒瓶周转箱;运输包装单元;随机振动;峰值分布

中图分类号: TB48; TH113.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2017)04-0001-09

0 引言

啤酒瓶周转箱运输包装单元是由周转箱和啤酒瓶组成,而啤酒瓶处于散体状态。在运输过程中,路面的凹凸不平会引起运输工具振动,从而使以塑料周转箱为载体的啤酒瓶摇晃碰撞,甚至破裂。因此对多层堆码运输单元中的啤酒瓶进行随机振动特性的研究,将有利于了解啤酒瓶的破损机理并对其采取相应的保护措施。

国内外学者对啤酒瓶^[1-6]和塑料周转箱^[7]单体的力学性能研究,大多采用有限元法,试验研究甚少。樊爱珍^[1]建立了两种类型的啤酒瓶有限元模型,在瓶内施加载荷进行静力分析,通过啤酒瓶应力分布来优化瓶子的结构。袁玮等人^[2]采用有限元法分析 PET (polyethylene terephthalate) 啤酒瓶,得到了性能最优的壁厚和瓶身外径。王春霖等人^[3]对装酒的瓶子和空瓶进行平跌落和斜跌落有限元分析,得到了其应力场和应力-时间曲线。程菊等人^[4-5]采用有限元法模拟啤酒瓶的巴氏杀菌过程,发现喷淋水温度

为 61 ℃时,瓶内温度分布最均匀。齐迎春等人^[6]采用有限元法模拟啤酒瓶的灌装过程,分析了瓶子形状和灌装速度对啤酒运动状态的影响。武丽丽等人^[7]采用有限元法分析了塑料周转箱的长宽比、厚度、加强筋尺寸等对其力学性能的影响,发现应力主要集中在周转箱 4 个角上,合适的过渡圆角可减小应力集中,合理的加强筋可提高周转箱强度。

国内外学者也对产品包装及堆码运输单元随机振动进行了研究^[8-20]。K. P. Thakur 等人^[8]建立了包装件的力学模型,考虑弹簧刚度的非线性因素,对猕猴桃水果包装进行随机振动测试并利用有限元法分析该模型。V. Rouillard^[9]采用数值分析法研究堆码包装单元在随机振动下的动态响应,并通过物理模型验证该方法的有效性。李晓刚^[10]对车辆-包装件系统施加白噪声谱激励,得到产品及易损件的加速度响应和功率谱密度。C. Bernad 等人^[11]采用 6 个自由度的振动系统测试了堆码包装单元的工作模态,得到随机振动下的系统模态参数。A. Jamialahmadi 等人^[12]结合扫频和随机振动试验,利用 I-Scan 系统得到了纸箱接触面

收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50775100)

作者简介: 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

间的动压力。卢立新等人^[13]采用公路运输随机谱激励,研究三层堆码的梨损伤情况,发现处于最上层的梨损伤最严重,最下层次之,中间层损伤最小。潘道津等人^[14]对四层堆码的家电托盘货物单元的共振性能进行试验研究,探讨货箱固有频率与堆码高度的关系,发现一定振动频率范围内,多层堆码的高黏弹性货箱的底层货箱固有频率高于顶层货箱的,各层货箱堆码高度对其共振频率有影响。王志伟等人对堆码包装单元进行随机振动试验,得到了不同随机振动激励谱下纸箱接触面动压力和力穿越的分布形式以及最大动压力的分布形式^[15-18],并建立了基于部件加速度功率谱的产品/包装产品加速振动试验方法^[19-20]。

啤酒瓶周转箱运输单元的振动响应比一般的运输单元更为复杂,而关于这方面的研究至今空白。因此本文以三层堆码啤酒瓶和周转箱运输包装单元为研究对象,试验分析其在 2 种随机激励谱(限带白噪声谱和卡车公路谱)和 2 种约束方式(无约束和弹性约束)下的随机振动特性,以期为啤酒的运输包装设计提供技术依据。

1 试验设计

1.1 试验产品与仪器

试验用啤酒瓶周转箱是由 24 瓶装满啤酒的玻璃瓶和塑料周转箱组成,如图 1 所示。塑料周转箱产自上海广涵塑业有限公司,其外尺寸为 535 mm × 355 mm × 320 mm,质量为 1.85 kg。啤酒产自麒麟啤酒(珠海)有限公司,每瓶啤酒的质量为 0.98 kg。塑料周转箱和 24 瓶啤酒的总质量为 25.4 kg。振动测试系统产自美国 Lansmont 公司,型号为 Model 7000-10,频率范围为 1~300 Hz,最大负载为 9 780 N。

1.2 试验装置和试验参数

1) 试验装置

将三层啤酒瓶周转箱运输包装单元置于振动台中心位置,在每层塑料周转箱和 6 个啤酒瓶上分别固定加速度传感器,并与数据采集仪和计算机连接,以逐层对周转箱和啤酒瓶进行数据采集。为了方便阐述和分析,对每层 6 个啤酒瓶进行编号。加速度传感器的固定位置示意图如图 1 所示。

试验中采用 2 根弹性绳对啤酒瓶周转箱运输单元进行绑定约束,以模拟实际运输过程中对周转箱的上下跳动限制。弹性绳对啤酒瓶周转箱运输包装单元竖直方向的总压力为 196 N。



a) 三层啤酒周转箱运输单元



b) 啤酒瓶

图 1 加速度传感器固定位置示意图

Fig. 1 Positions of acceleration sensor

2) 试验参数

在振动测试系统中,分别输入限带白噪声谱和降低振动强度的 ASTM 卡车运输振动功率谱(修正的 ASTM 卡车运输振动功率谱)激励,2 个功率谱具有相同的振动强度,如图 2 所示。设置数据采集仪的采样率为 1 000 Hz/s,采样时间为 5 min。试验中所有数据均利用 Matlab 进行处理。

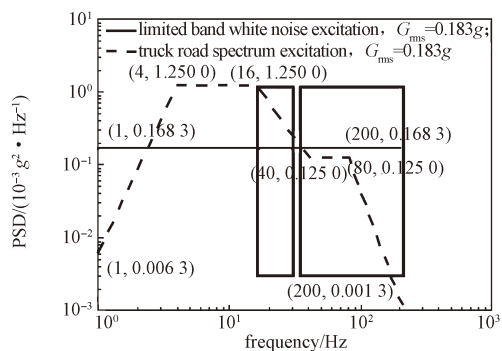


图 2 加速度功率谱图

Fig. 2 Acceleration power spectrum density

2 试验结果分析

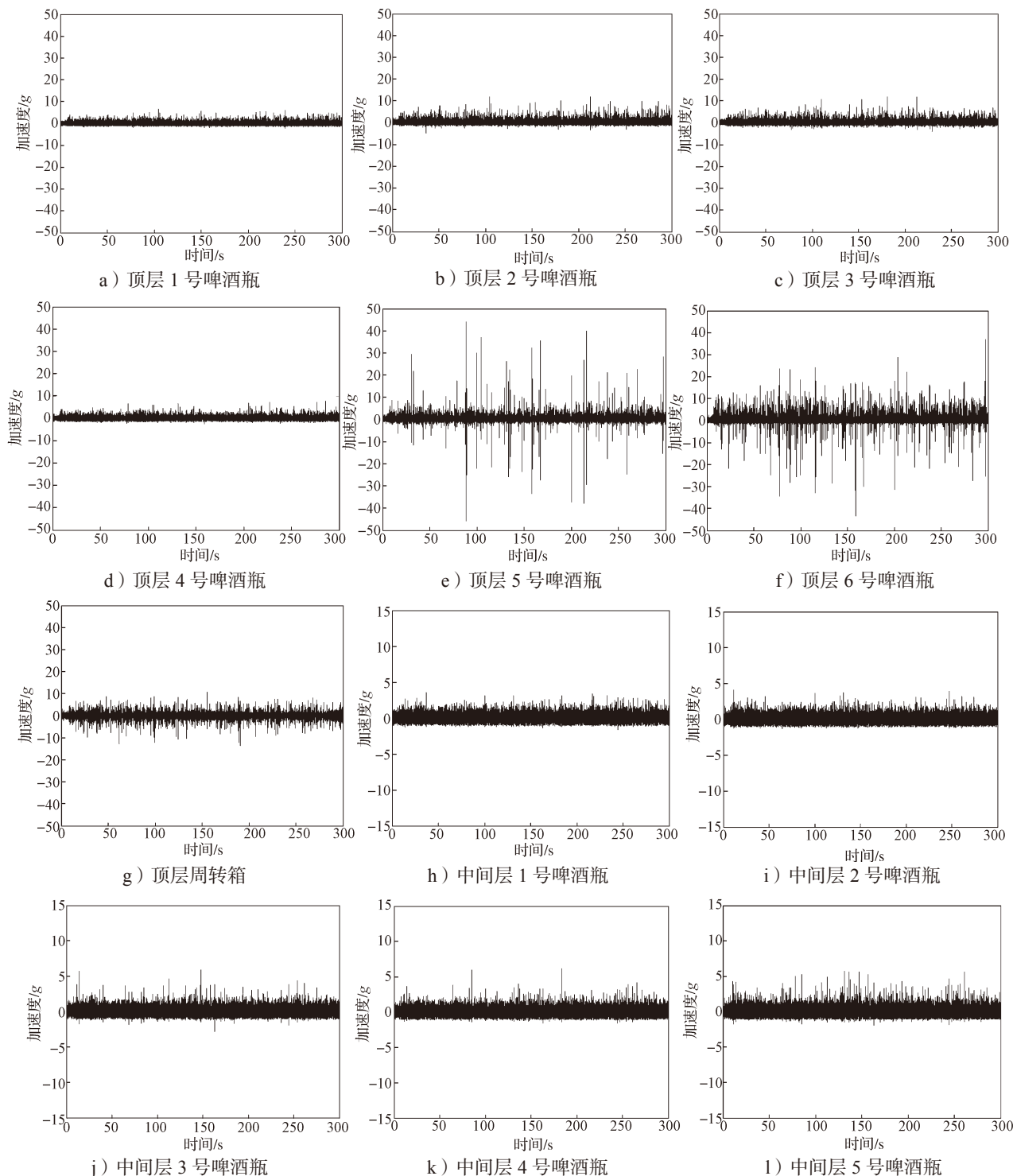
2.1 时域分析

在随机振动试验中,周转箱和啤酒瓶会产生跳动,且啤酒瓶还会出现左右晃动和碰撞现象。

通过对三层啤酒瓶周转箱运输包装单元进行随机振动试验, 得到啤酒瓶和周转箱的加速度-时间曲线。由于 2 种功率谱激励下的时间历程结果相似, 本文只给出修正的 ASTM 卡车运输振动功率谱激励下无约束方式的结果, 如图 3 所示。

由图 3 可知: 啤酒瓶的加速度-时间曲线在正

负半轴呈现非对称结构; 啤酒瓶的加速度主要分布于 $-1g \sim 5g$, 周转箱的主要分布于 $-3g \sim 3g$; 整体上, 啤酒瓶的负向加速度为 $-1g$, 说明啤酒瓶在振动过程中会发生跳动; 相较于底层啤酒瓶而言, 顶层和中间层啤酒瓶的加速度更大, 5 号和 6 号啤酒瓶的最大加速度较大, 顶层 5 号啤酒瓶甚至可达到 $50g$ 。



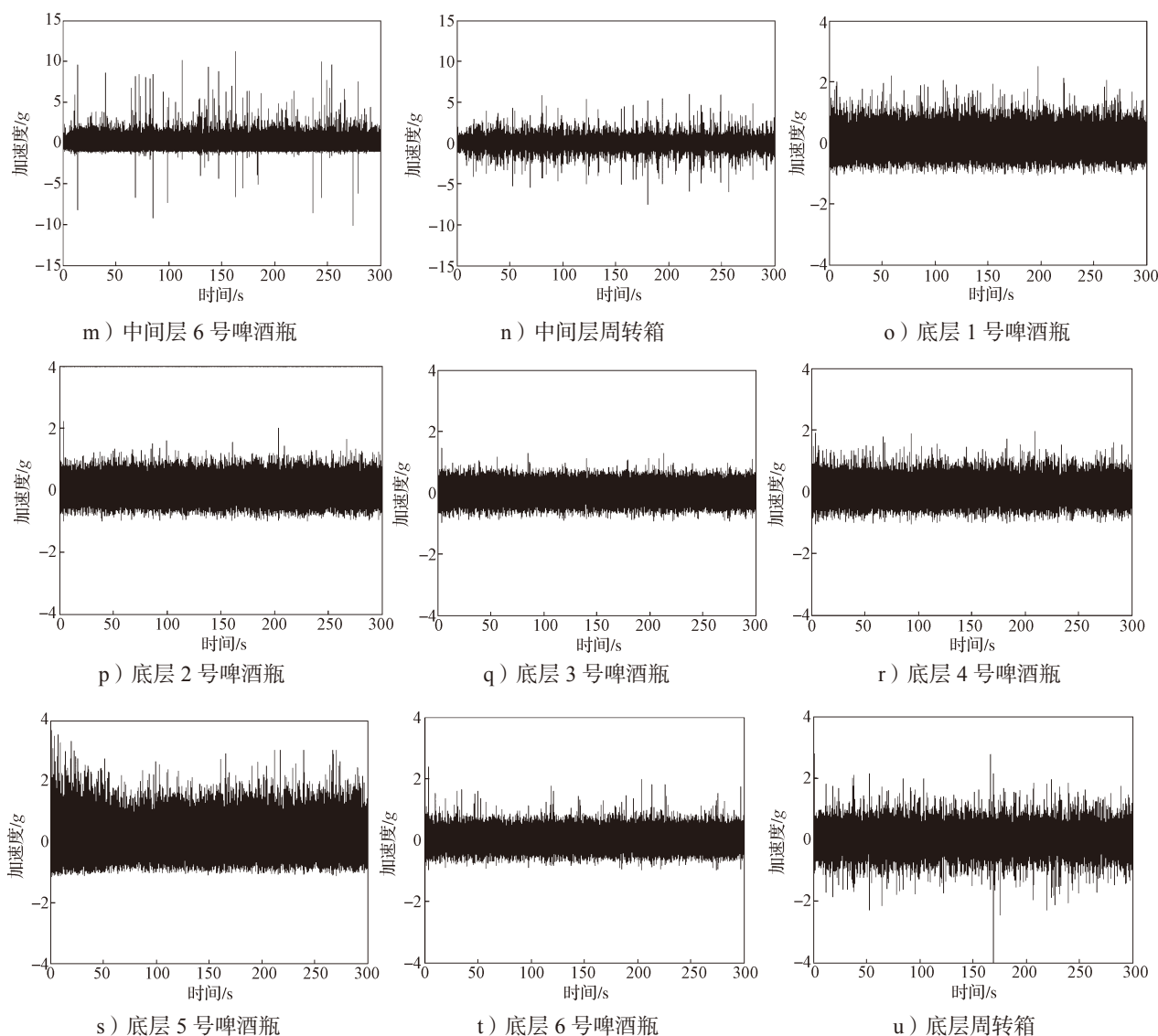


图 3 修正的 ASTM 卡车运输振动激励下无约束方式的加速度 - 时间曲线图

Fig. 3 Acceleration-time curve (unrestraint, modified ASTM truck transport vibration spectrum excitation)

结合试验中所观察到的靠近中间位置的啤酒瓶碰撞剧烈程度可知, 啤酒瓶之间的碰撞可能对其加速度有一定影响。

2.2 频域分析

分别对限带白噪声谱和修正的 ASTM 卡车运输振动激励下周转箱和啤酒瓶的时域数据进行处理, 得到相应的加速度响应功率谱, 如图 4~5 所示。

由图 4 和图 5 可以得知:

1) 顶层和中间层啤酒瓶的加速度功率谱出现多个峰值, 顶层啤酒瓶的加速度功率谱主要受一阶共振频率控制, 中间层啤酒瓶的加速度功率谱主要受前几阶共振频率控制, 底层啤酒瓶的加速度功率谱主要受

高阶共振频率控制。在第一共振区域处, 顶层啤酒瓶的加速度功率谱峰值依次大于中间层和底层啤酒瓶的加速度功率谱峰值, 顶层和中间层靠近中间位置的 6 号啤酒瓶的加速度功率谱峰值最大, 角落位置的 1 号啤酒瓶的加速度功率谱峰值最小。

2) 在修正的 ASTM 卡车运输振动激励下的啤酒瓶加速度功率谱形状与限带白噪声谱激励下的有较大不同, 特别在高阶共振频率处有明显不同。由于在一阶共振频率附近修正的 ASTM 卡车运输振动激励的能量要远大于相应的限带白噪声谱激励的能量, 而在高阶共振频率处修正的 ASTM 卡车运输振动激励的能量要远小于相应的限带白噪声谱激励的能量 (见

图 2), 因此, 修正的 ASTM 卡车运输振动激励下的啤酒瓶加速度功率谱值在一阶共振频率处明显增大, 而在高阶共振频率处大大减小。

3) 约束方式对啤酒瓶加速度功率谱形状的影响较小。这是因为啤酒瓶在周转箱中是以散体形式存在, 利用弹性绳绑定周转箱并没有限制啤酒瓶的跳动。

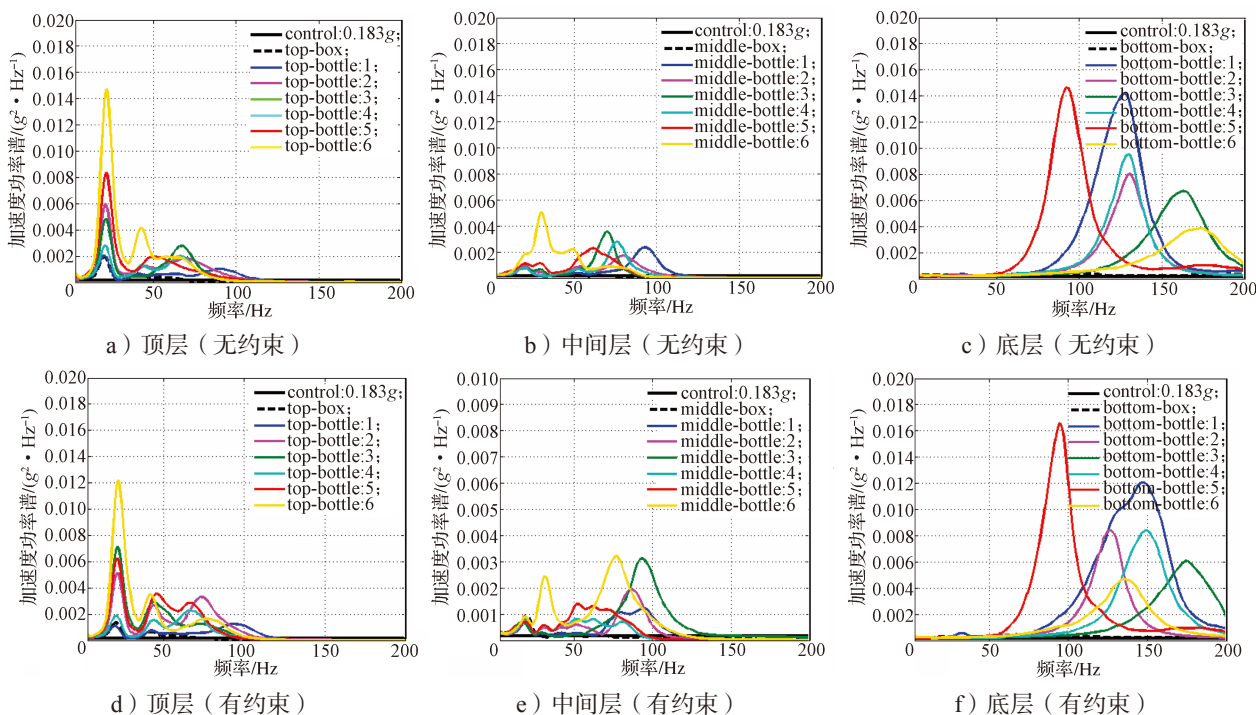


图 4 限带白噪声谱激励下加速度响应功率谱

Fig. 4 Acceleration response PSDs (limited band white noise spectrum excitation)

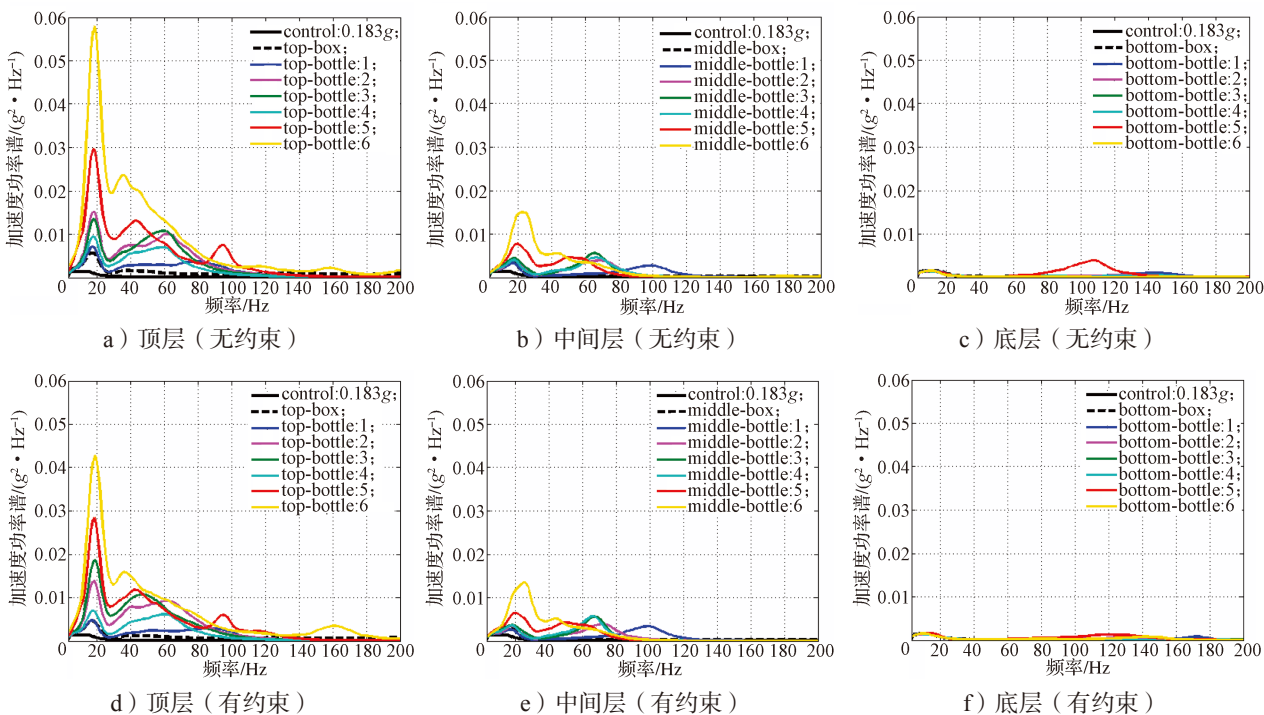


图 5 修正的 ASTM 卡车运输振动激励下加速度响应功率谱图

Fig. 5 Acceleration response PSDs (modified ASTM truck transport vibration spectrum excitation)

2.3 峰值分布分析

加速度峰值（波峰）越大，则啤酒瓶被损坏的风险越大。为了归纳啤酒瓶随机振动响应的规律，本文采用以下3种分布函数对加速度峰值分布进行拟合，相关参数在图6中一并给出。

1) Normal 分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

式中： μ 为数学期望；

σ 为标准差。

2) Rayleigh 分布

$$f(x|k) = \begin{cases} \frac{x}{k^2} e^{-\frac{x^2}{2k^2}}, & x > 0; \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中 k 为比例参数。

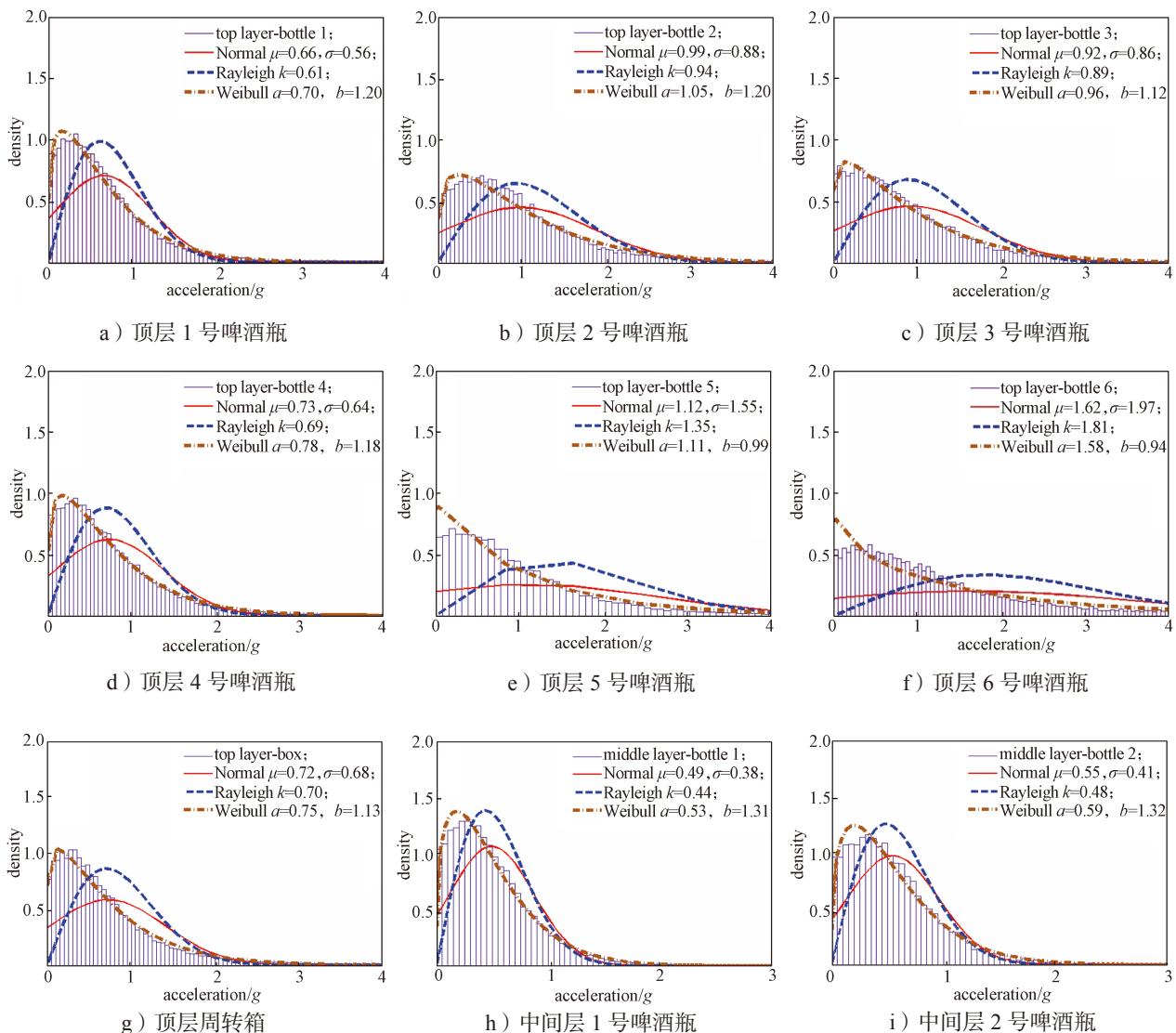
3) Weibull 分布

$$f(x|a,b) = \begin{cases} ba^{-b} x^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}, & x > 0; \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

式中： a 为比例参数；

b 为形状参数。

先对三层啤酒瓶周转箱运输包装单元中的啤酒瓶和塑料周转箱的加速度响应进行峰值统计，得到峰值概率分布图，再用上述3种分布函数对峰值概率分布图进行拟合，拟合结果如图6所示。由于2种功率谱激励下的加速度峰值分布结果相似，这里只给出修正的ASTM卡车运输振动激励下无约束的加速度响应峰值概率分布图和拟合结果。



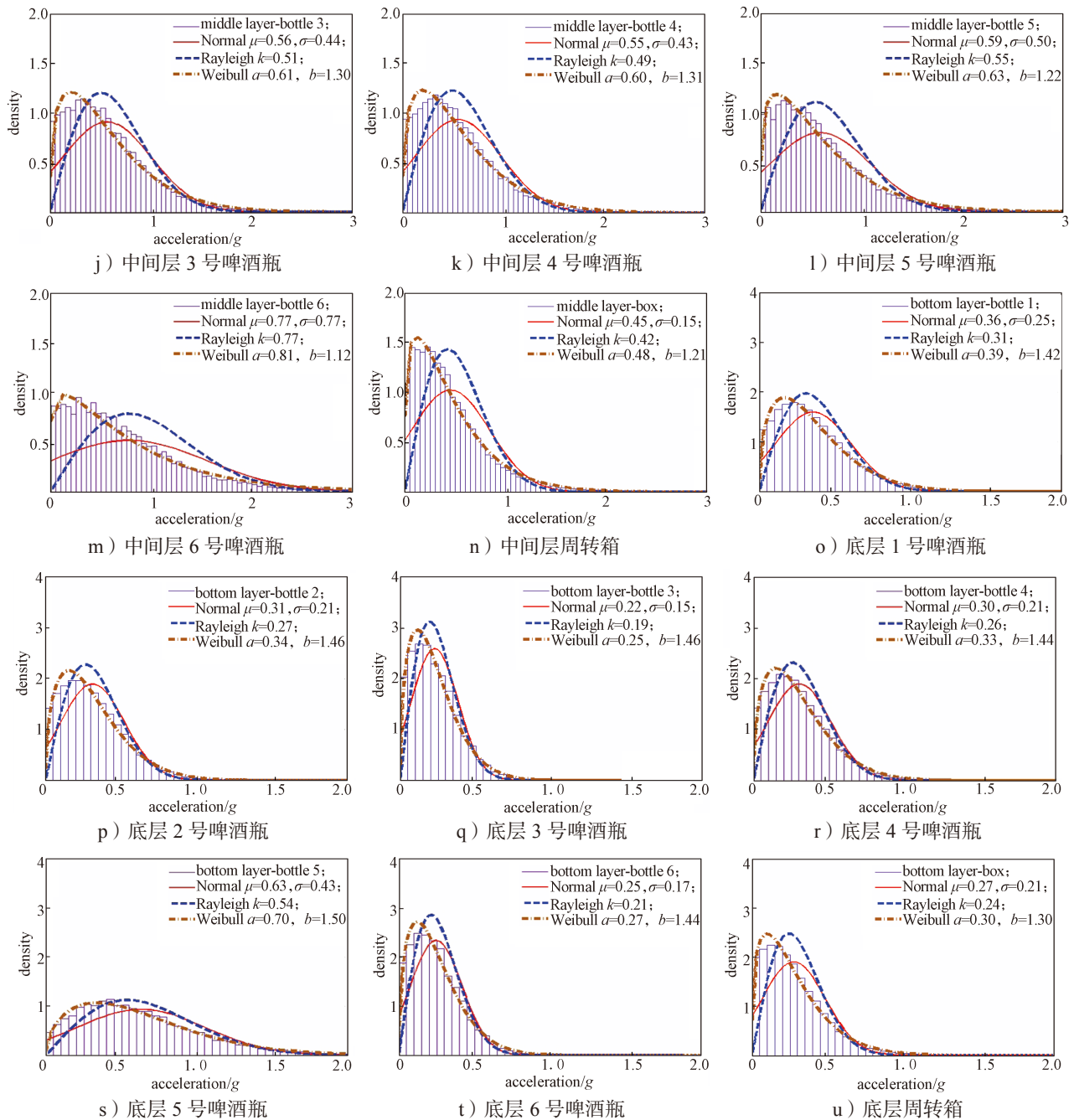


图 6 修正的 ASTM 卡车运输振动激励下无约束的加速度峰值分布图

Fig. 6 Acceleration peak distribution (unrestraint, modified ASTM truck transport vibration spectrum excitation)

由图 6 可知: 1) 2 种激励下 Weibull 分布比 Normal 分布和 Rayleigh 分布更加适合描述啤酒瓶和塑料周转箱的加速度峰值分布; 2) 在修正的 ASTM 卡车运输振动激励和相同约束下, 顶层 5 号和 6 号啤酒瓶的加速度峰值分布比其它啤酒瓶的更宽, 这说明顶层 5 号和 6 号啤酒瓶经历了更宽、更大的加速度水平; 3) 顶层啤酒瓶和周转箱的加速度峰值分布比中

间层和底层更平缓, 这说明顶层啤酒瓶和周转箱经历了更宽、更大的加速度水平。

3 结论

本文研究了三层堆码啤酒瓶和周转箱运输包装单元在 2 种随机激励谱和 2 种约束条件下的随机振动响应特性, 得到以下结论。

1) 多层啤酒瓶周转箱运输包装单元中, 顶层啤酒瓶的振动主要受一阶共振频率控制, 中间层啤酒瓶的振动主要受前几阶共振频率控制, 底层啤酒瓶的振动主要受高阶共振频率控制。在第一共振区域处, 顶层啤酒瓶的加速度功率谱峰值依次大于中间层和底层啤酒瓶的加速度功率谱峰值, 顶层和中间层靠近周转箱中央位置的啤酒瓶加速度功率谱峰值最大, 靠近周转箱角落位置的啤酒瓶加速度功率谱峰值最小。

2) 在修正的 ASTM 卡车运输振动激励下的啤酒瓶加速度功率谱形状与限带白噪声激励下的有较大不同, 特别在高阶共振频率处有明显不同。堆码包装系统的产品响应主要由系统共振频率处的激励能量所控制。

3) 由于啤酒瓶在周转箱中是以散体的形式存在, 约束方式对啤酒瓶加速度功率谱形状影响较小。

4) Weibull 分布更适合描述随机振动下多层堆码运输包装单元中啤酒瓶和周转箱的加速度峰值(波峰)分布。顶层周转箱和靠近该周转箱中央位置的啤酒瓶经历了更宽、更大的加速度响应水平。

参考文献:

- [1] 樊爱珍. 基于有限元法的玻璃啤酒瓶应力分析[J]. 陕西科技大学学报, 2010, 28(2): 114-117.
FAN Aizhen. Analyzing of Stress in Beer Bottle Based on Finite Element Method[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2010, 28(2): 114-117.
- [2] 袁 玮, 许文才. PET 啤酒瓶有限元分析及其结构参数的确定[J]. 包装工程, 2009, 30(12): 24-26.
YUAN Wei, XU Wencai. Finite Element Analysis of PET Beer Bottle and Determination of Structural Parameters[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(12): 24-26.
- [3] 王春霖, 张丽强, 王振林. 基于 ANSYS 的啤酒瓶跌落仿真应力分析[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 23-25.
WANG Chunlin, ZHANG Liqiang, WANG Zhenlin. Stress Analysis of the Glass Beer Bottle by Dropping Simulation Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 23-25.
- [4] 程 菊, 安家彦, 董文勇, 等. 瓶装啤酒隧道式巴氏杀菌的数值模拟[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(7): 86-90.
CHENG Ju, AN Jiayan, DONG Wenyong, et al. Numerical Simulation of Tunnel Pasteurization of Bottled Beer[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(7): 86-90.
- [5] 程 菊, 安家彦, 董文勇, 等. 基于 CFD 技术的瓶装啤酒隧道式巴氏杀菌过程研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(8): 98-102.
CHENG Ju, AN Jiayan, DONG Wenyong, et al. Study on Tunnel Pasteurization of Bottled Beer Based on CFD Technology[J]. Food & Machinery, 2016, 32(8): 98-102.
- [6] 齐迎春, 于庆宇, 许艳军. 啤酒灌装过程数值模拟[J]. 包装工程, 2009, 30(1): 22-25.
QI Yingchun, YU Qingyu, XU Yanjun. Numerical Simulation of Beer Filling Process[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(1): 22-25.
- [7] 武丽丽, 黄颖为. 塑料周转箱结构与力学性能研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(1): 102-106.
WU Lili, HUANG Yingwei. Research on Structural Design and Mechanics of Plastic Container[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(1): 102-106.
- [8] THAKUR K P, PANG D. Simulating Complex Loading Patterns in the Stack of Packages[C]//Proceedings of the 10th IAPRI World Conference on Packaging. Melbourne: [s. n.], 1997: 1-12.
- [9] ROUILLARD V, SEK M A, CRAWFORD S. The Dynamic Behaviour of Stacked Shipping Units During Transport. Part 1: Model Validation[J]. Packaging Technology and Science, 2004, 17(5): 237-247.
- [10] 李晓刚. 运输包装系统随机振动频域分析[J]. 包装工程, 2012, 33(15): 50-54.
LI Xiaogang. Random Vibration Frequency Domain Analysis of Transport Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 50-54.
- [11] BERNAD C, LASPALAS A, GONZÁLEZ D, et al. Dynamic Study of Stacked Packaging Units by Operational Modal Analysis[J]. Packaging Technology & Science, 2010, 23(3): 121-133.
- [12] JAMIALAHMADI A, TROST T, ÖSTLUND S. A Proposed Tool to Determine Dynamic Load Distribution Between Corrugated Boxes[J]. Packaging Technology & Science, 2011, 24(6): 317-329.
- [13] 卢立新, 黄祥飞, 华 岩. 基于模拟运输条件的梨果实包装振动损伤研究[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 110-114.
LU Lixin, HUANG Xiangfei, HUA Yan. Effect of Packaging Methods on Vibration Bruising of Pear Fruits by Simulated Transport Tests[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 110-114.
- [14] 潘道津, 计宏伟, 秦永喜, 等. 家电托盘货物单元的

- 共振性能实验研究[J]. 包装工程, 2009, 30(12): 47–49, 61.
- PAN Daojin, JI Hongwei, QIN Yongxi, et al. Experimental Research on Resonance Performance of Household Appliance Pallet Unit[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(12): 47–49, 61.
- [15] 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]. [2017-03-04]. <http://www.iapriweb.org/>.
- [16] WANG Z W, FANG K. Dynamic Performance of Stacked Packaging Units[J]. Packaging Technology & Science, 2016, 29(10): 491–511.
- [17] 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.
- [18] FANG K, WANG Z W. The Statistical Characteristics of Maxima of Contact Force in Stacked Packaging Units Under Random Vibration[J]. Packaging Technology & Science, 2017. doi: 10.1002/pts.2313.
- [19] WANG Z W, WANG L J. On Accelerated Random Vibration Testing of Product Based on Component Acceleration RMS-Life Curve[J]. Journal of Vibration & Control, 2017. doi: 10.1177/1077546317705555.
- [20] WANG Z W, WANG L J. Accelerated Random Vibration Testing of Transport Packaging System Based on Acceleration PSD[J]. Packaging Technology & Science, 2017. doi: 10.1002/pts.2306.

On Random Vibration Response of Transport Packaging Unit of Three-Layers Beer Bottle-Turnover Boxes

WANG Zhiwei^{1, 2, 3}, SUN Jun^{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)

Abstract: The random vibration characteristics of transport packaging unit of three-layers beer bottle-turnover boxes were investigated. The experimental results showed that the vibration of beer bottles in the top layer was mainly controlled by the first resonant frequency, the vibration of beer bottles in the middle layer was mainly controlled by the lower order resonant frequencies, while the vibration of beer bottles in the bottom layer was mainly controlled by the higher order resonant frequencies. The acceleration peak distributions of beer bottles and turnover boxes were of Weibull distributions. The top turnover box and beer bottles in the central position of turnover box underwent larger and broader acceleration levels. The result obtained has practical implications on the storage and transportation of beer bottles.

Keywords: beer bottle-turnover box; transport packaging unit; random vibration; peak distribution