

## 基于运输环境的包装系统疲劳损伤分析

于水源, 曾台英, 丁逸秋  
(上海理工大学, 上海 200093)

**摘要:** **目的** 针对当前物流运输环境, 研究产品在运输过程中因受到不同振动与冲击导致的包装系统疲劳损伤情况。**方法** 针对以聚苯乙烯泡沫为缓冲包装材料的包装系统进行运输环境模拟, 通过使用有限元分析软件, 对运输环境中包装系统受到的随机振动进行仿真, 发现包装系统的薄弱部分, 针对薄弱部分进行疲劳仿真, 最终得出薄弱处的损伤数据。**结果** 仿真结果表明, 包装件能够在实际运输过程中对产品起到保护作用, 为产品的运输包装方案提供了指导性意见。**结论** 该方法不仅适用于文中的包装系统, 对常见家用电器的包装方案均可进行评价。

**关键词:** 包装系统; 可靠性评价; 振动疲劳; 聚苯乙烯泡沫

中图分类号: TP485.3; TP123 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)13-0118-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.016

### Fatigue Damage of Packaging System Based on the Transportation Environment

YU Shui-yuan, ZENG Tai-ying, DING Yi-qiu

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the fatigue damage of packaging system caused by different vibration and impact during product transportation in the current logistics transportation environment. In view of the transportation environment simulation of the packaging system with polystyrene foam as the cushion packaging material, the finite element analysis software was used to simulate the random vibration of the packaging system in the transportation environment, so as to obtain the weak part of the packaging system. The fatigue simulation of the weak part was conducted to obtain its damage data. The simulation results showed that, the package could protect the product in the actual transportation process, and provide guidance for the packaging transportation scheme of the product. The proposed method is not only applicable to the packaging system herein, but also can be used to evaluate the packaging schemes of common household appliances.

**KEY WORDS:** packaging system; reliability evaluation; vibration fatigue; polystyrene foam

产品在实际物流运输中, 由于运输工具和路况的不同, 产品包装件在运输过程中会遭受不同程度的随机振动, 包装件的缓冲结构部分被反复加载, 使得缓冲材料产生塑性变形, 从而影响缓冲效果和承载能力<sup>[1]</sup>, 因此包装件在运输过程中的动力学环境特性值得深入研究, 避免因运输过程对产品带来不必要的破

坏, 从而减少损失。范志庚<sup>[2]</sup>以蜂窝纸板为研究对象, 从失效变形模式和能量守恒理论角度研究了其疲劳特性; 潘飞等<sup>[3]</sup>以瓦楞纸板为对象, 验证了包装件薄弱部分的疲劳损伤; 孙玉成<sup>[4]</sup>以瓦楞纸板为研究对象, 通过对瓦楞纸板进行疲劳试验, 对瓦楞纸箱在随机载荷下的疲劳失效进行了有限元分析。上述学者均

收稿日期: 2019-10-28

作者简介: 于水源 (1994—), 男, 上海理工大学硕士生, 主攻包装运输动力学。

通信作者: 曾台英 (1978—), 女, 博士, 上海理工大学讲师、硕导, 主要研究方向为包装运输动力学。

以纸质缓冲材料为研究对象进行深入研究,而目前物流运输行业中常以泡沫塑料作为产品包装件缓冲衬垫的材料,基于此,文中以泡沫塑料构成的缓冲衬垫为研究对象进行模拟运输的疲劳仿真。

从实际运输的角度出发,对包装系统进行静力学仿真和动力学仿真,分析包装系统的薄弱部分。针对薄弱部分进行疲劳仿真,得出薄弱部分的损伤情况,为产品包装方案的可靠性评判提供方法。

## 1 运输包装系统随机振动

### 1.1 包装件振动模型

随着运输环境应力的复杂化,单自由度线性包装系统在运输包装领域已不再具有代表性,考虑到实际的运输情况,文中将包装系统看作二自由度且具有非线性的复杂系统<sup>[5]</sup>。

以常用家用打印机包装系统为例,建立包装系统的振动模型并进行动力学分析,结合实际的运输条件,将系统视为二自由度振动系统,见图 1。图 1a 中的  $m_1$  和  $m_2$  分别对应图 1b 中的主体件和易损件的质量;图 1a 中的  $k_1, k_2$  和  $c_1, c_2$  分别对应图 1b 中聚苯乙烯泡沫的刚度系数和等效阻尼系数; $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  分别为主体件和易损件自静平衡位置起计算的位移; $y$  为由路面不平引起的车身随机振动位移激励。

由图 1a 所示模型,设位移激励为  $y=z\sin(\omega t)$ ,根据动力学基本方程:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中:  $[M]$  为产品的质量矩阵;  $[C]$  为缓冲衬垫的阻尼矩阵;  $[K]$  为缓冲衬垫的刚度矩阵;  $\{F(t)\}$  为实际运输过程中的外部激励,即:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix},$$

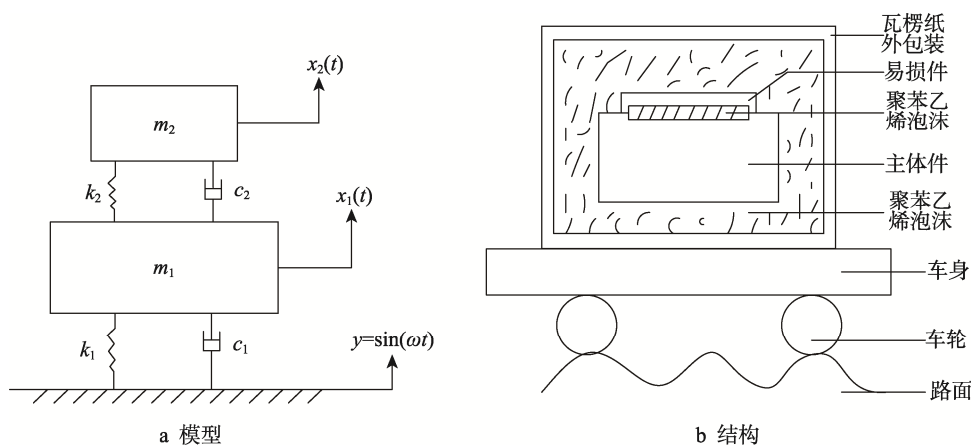


图 1 二自由度包装系统  
Fig.1 2-DOF packaging system

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}, \{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix},$$

$$\{F(t)\} = \begin{Bmatrix} c_1 \dot{y} + k_1 y \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

### 1.2 随机振动响应

在进行包装件的随机振动分析时,通常假设随机振动激励为高斯各态历经过程,根据随机振动特点,工程上一般采用  $3\sigma$  准则计算响应加速度峰值,其中广泛应用 Miles 公式法对随机振动响应加速度峰值进行估算。

Miles 公式指出,当结构不具有单一主模态时,可采取加权的 Miles 公式,即:

$$a_{\text{peak}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left( 3\sqrt{\pi} Q_i f_i A_i / 2 \right) q_i \right]^2} \quad (2)$$

式中:  $n$  为模态总阶数;  $Q_i$  为第  $i$  阶模态频率处的动态放大因子;  $f_i$  为第  $i$  阶模态频率;  $A_i$  为第  $i$  阶模态频率处的输入加速度功率谱密度;  $q_i$  为第  $i$  阶固有频率的模态有效质量比。

## 2 材料特性

文中所用的缓冲包装材料为聚苯乙烯泡沫 (EPS),这是一种热塑性材料,缓冲性能较好,经加热发泡后密度可低至  $10\sim 30 \text{ kg/m}^3$ ,材质较轻,可减轻包装系统的重量,因此 EPS 仍然是当前最热门的包装材料<sup>[11]</sup>。

聚合物材料的疲劳破坏是由于在滞后回线中做功和低导热率引起温度快速升高的联合效应,造成聚合物软化。滞后循环期间所做的功,在很大程度上依赖于频率。即频率对聚合物材料疲劳损伤有着直接的影响<sup>[12]</sup>。包装件在实际运输过程中因随机振动带来的结构疲劳,该疲劳属于低应力高周疲劳,材料主要发

生弹性变形，可采取应力范围描述疲劳破坏的循环次数<sup>[13]</sup>。

EPS 材料疲劳失效判断定义是当振动发生后 EPS 泡沫板的剩余最大应力为初始最大应力的 80%（即损伤率为 20%）时，认为出现疲劳。通过对包装材料进行疲劳振动试验，得到载荷与寿命的关系见图 2。

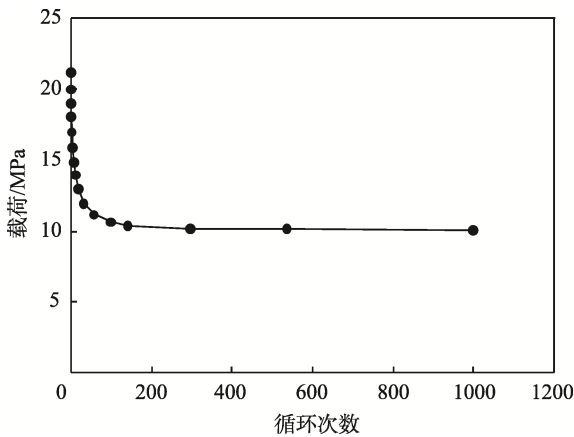


图 2 载荷与寿命的关系  
Fig.2 Relationship between load and life

### 3 疲劳损伤理论

疲劳造成的破坏是结构失效的一个常见问题，与重复加载有关。几乎所有疲劳破坏的结构组件，都会承受某种类型变化的载荷或重复载荷<sup>[6]</sup>。当结构承受多个循环载荷或者不规律载荷时，需要确定每个应力/应变循环的幅值与数量。雨流计数是最常用的循环计数运算法则，雨流计数法对载荷的时间历程进行计数的过程反映了材料的记忆特性，具有明确的力学概念，因此该方法得到普遍的认可<sup>[7]</sup>。雨流计数法规则如下所述<sup>[8]</sup>。

1) 雨流依次从每个峰（谷）的内侧流下，在下一个谷（峰）处下落，直到对面有一个比其更高的峰值（更低的谷值）停止。

2) 当雨流遇到从上面屋顶流下的雨流时就会停止。

3) 取出所有循环，分别记录各自的平均应力和应力幅度。然后利用这组雨流循环进行疲劳计算。

载荷时间历程通过雨流计数后，可以得到载荷与循环次数的关系。在循环载荷作用下，不同应力幅的循环分量都会对结构裂纹扩展做出贡献，当损伤累积到一定程度后结构就会疲劳失效破坏。计算不同应力幅下的总损伤值，定义结构破坏时的临界损伤值，称为疲劳损伤累积理论，使用最广泛的疲劳累积损伤理论为 Miner 损伤理论<sup>[9]</sup>。

若构件在某恒幅应力水平  $\sigma$  作用下，循环值破坏

寿命  $N$ ，则可以定义其在经受  $n$  次循环时的损伤为：

$$D = \frac{n}{N} \tag{3}$$

若在应力幅  $\sigma_i$  作用下，经受次循环，则该部分应力循环对结构造成的损伤为：

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \tag{4}$$

总损伤是各级应力幅的损伤和：

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} \tag{5}$$

设计中保证不发生疲劳破坏，需要：

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} \leq 1 \tag{6}$$

一般认为  $D = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ ，是损伤累积的临界值。

对于随机载荷，试验件破坏时的临界损伤值在 1 附近，即当  $D=1$  的时候开始发生疲劳，该疲劳累积损伤理论也是目前工程上应用最为广泛的理论。

文中研究的是包装件实际运输过程中受到的随机振动对包装件带来的损伤问题，在疲劳分析中属于随机载荷的疲劳分析，计算随机载荷历程的循环使用的是“雨流”循环计数和 Miner 法则进行损伤叠加，“雨流”循环计算是把随机应力历程转化为用于疲劳计算循环的技术，即先计算不同的“平均”应力和应力幅的循环，然后使用这组“雨流”循环完成疲劳计算<sup>[10]</sup>。

### 4 包装系统运输仿真

#### 4.1 有限元模型建立

利用 SolidWorks 2019 建立三维模型后，导入 Ansys Workbench 中，进行静力学分析和动力学分析。文中以家用打印机包装件为例，打印机主体材料为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物（ABS），缓冲衬垫材料为聚苯乙烯泡沫（EPS），瓦楞纸板为外包装箱的材料，各部分材料属性见表 1<sup>[14]</sup>。包装件和缓冲衬垫的接触设定为绑定接触和不分离接触。网格的划分采取自动划分，划分后得到 215 311 个单元，56 528 个节点。

表 1 材料参数  
Tab.1 Material parameters

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比
ABS	1050	200	0.394
EPS	20	5.14	0.28
瓦楞纸	149.08	156.75	0.15

### 4.2 随机振动分析

对产品整体进行随机振动分析,模拟产品在实际运输过程中的环境。产品从生产厂家到消费者的物流过程,一般采取公路运输的方式进行运送,为了更好地模拟公路运输的实际情况,采用 GB/T 4857.23—2012 随机振动试验方法,公路运输不同严酷水平随机振动 PSD 曲线中严酷水平等级 II<sup>[15]</sup>为外部激励,作为随机振动仿真的输入,见图 3。

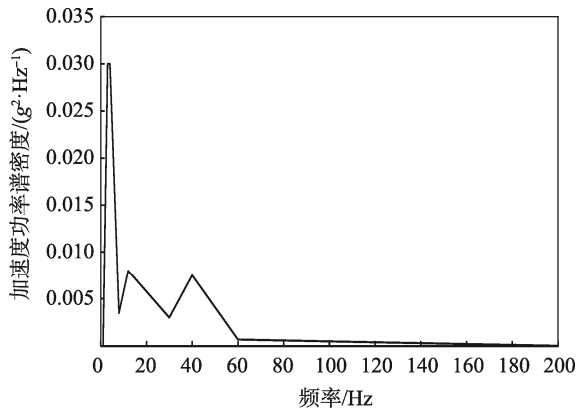


图 3 公路运输随机振动 PSD 曲线

Fig.3 Road transport random vibration PSD curve

将图 3 中的数据作为包装件随机振动的输入,进行随机振动试验,试验结果见图 4。通过随机振动试验可以得出,内装物的响应加速度功率谱密度曲线未超出测试标准的边界值,且一直处于标准值范围内,说明该随机振动试验得出的结论符合测试要求。

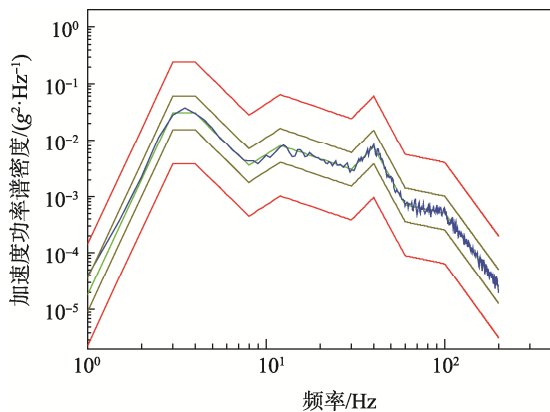
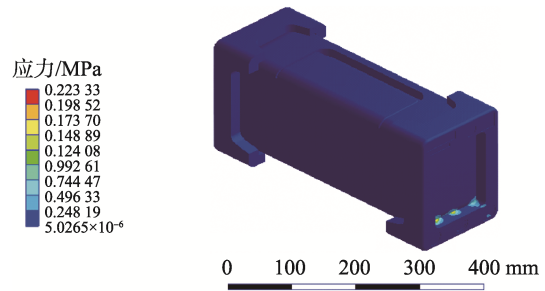


图 4 内装物响应加速度谱密度曲线

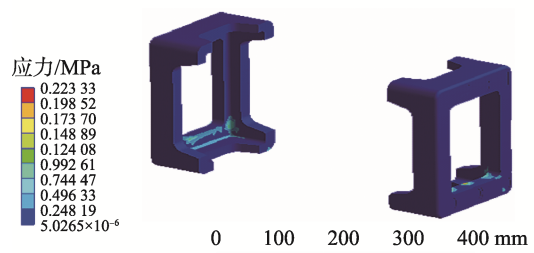
Fig.4 Curves of spectral density of contents response acceleration

经过 Ansys Workbench 计算,得出包装件整体应力最大为 0.223 33 MPa,见图 5。通过计算结果可以得出应力最大处为包装件底部衬垫,即应力最大为 0.223 33 MPa。包装件整体位移最大为 0.667 58 mm,通过仿真计算结果可以得出最大变形出现在缓冲衬垫部分,见图 6。经分析可知,在运输过程中底部衬

垫不仅需要承载产品的压力,还要起到主要的缓冲保护作用,所以底部衬垫为包装系统中的易损部分,需要对其进行疲劳分析。



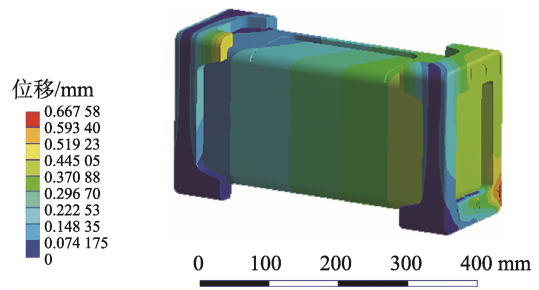
a 整体应力



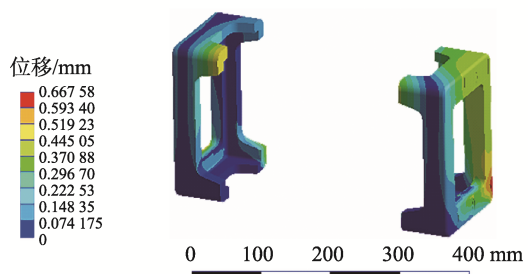
b 衬垫位移

图 5 应力云图

Fig.5 Stress nephogram



a 整体位移



b 衬垫位移

图 6 位移云图

Fig.6 Displacement nephogram

通过仿真计算后,得出内装物的响应加速度功率谱密度,与随机振动试验中内装物的响应加速度谱密度结合对比,见图 7。由图 7 可知,随机振动仿真得出的内装物响应加速度曲线与随机振动试验得出的

内装物响应加速度曲线基本一致。其中导致 2 条曲线未能完全拟合的主要原因 :在进行计算机模拟仿真时对三维模型进行了一定的简化 ;包装件各部分的接触问题 ;材料参数设置以及实验室环境等人为因素。

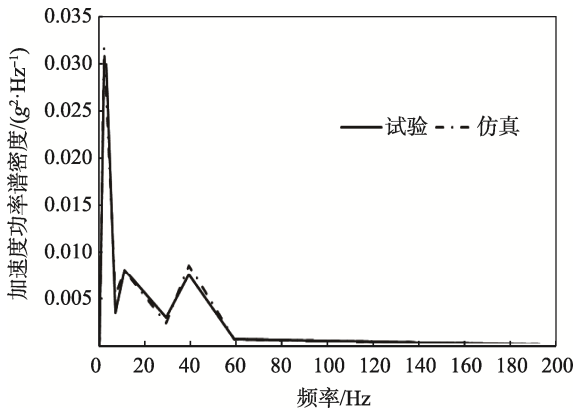


图 7 内装物响应加速度功率谱密度曲线对比  
Fig.7 Comparison of power spectral density curves of contents response acceleration

### 4.3 疲劳分析

经过随机振动分析可以得出,在实际运输过程中包装件的底部衬垫受到的压力最大,在静力学分析的基础上,使用疲劳工具 ( Fatigue Tool ) 求解结果。疲劳仿真得出下部衬垫损伤雨流图,见图 8。底部衬垫在运输过程中主要受到内装物来自 Z 方向的载荷,即该载荷会对底部衬垫进行重复的加载,由图 8 可知,在疲劳分析完成后,每个“竖条”造成的损伤量被绘出,显示的是对应所用寿命量的百分比。最大的相关损伤出现在相对较低的应力幅区,从损伤矩阵中可以看出,低应力幅值循环在危险位置造成最大的损伤,而随机振动分析中得出底部衬垫最大应力出现在

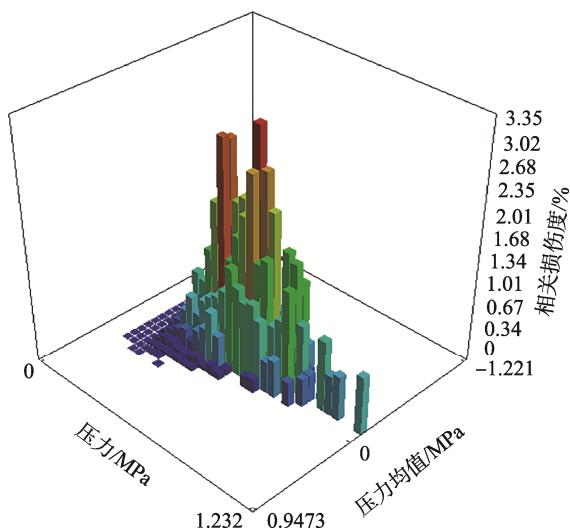


图 8 底部衬垫损伤雨流图  
Fig.8 Rain flow diagram of bottom liner damage

0.223 33 MPa,从损伤图中可以得出该应力值在造成最大损伤的应力附近,其最高损伤率为 3.35%,而 EPS 材料在损伤率为 20%时发生失效。由此可见,底部衬垫虽然为包装系统中的薄弱部分,但其损伤率较低,使产品在流通过程中经历了随机振动载荷的情况下,仍然能够对内装产品进行保护,即该包装系统的可靠性较好,可以对运输过程中的产品进行相应的保护。

选用密度为 30 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 6.25 MPa 的聚苯乙烯泡沫为包装件的缓冲材料,在其他条件不变的情况下,对包装件进行疲劳分析,得出底部衬垫的损伤雨流图,见图 9。

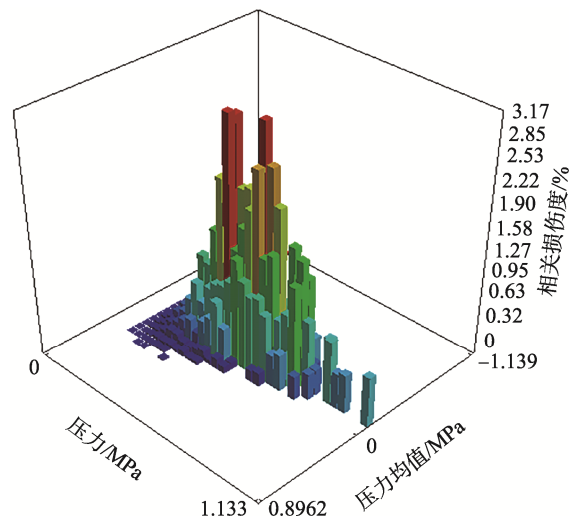


图 9 改变后底部衬垫损伤雨流图  
Fig.9 Rain flow diagram of bottom liner damage after change

由图 9 可知,改变材料密度和弹性模量后底部衬垫的疲劳损伤度为 3.17%,可以得出当选用同种缓冲材料时,密度和弹性模量的增大会影响其疲劳损伤特性,选用高密度的 EPS 材料会使其损伤度降低,从而达到更好的防护效果。

## 5 结语

以家用打印机的公路运输包装方案为例,因实际运输过程中复杂的运输路况,导致运输车辆产生不同强度的随机振动并对产品包装件带来一定程度的影响。将复杂的运输包装系统简化为二自由度系统后,对包装件的随机振动响应进行分析,通过随机振动试验和有限元分析相结合的手段,得出在运输过程中产品包装件的底部缓冲衬垫最容易受到损伤,结合缓冲材料特性对底部缓冲衬垫进行疲劳分析得出其损伤情况。该方法可以很好预测包装件在运输过程中的易损位置和疲劳损伤,为产品运输包装系统的防护性能评价提供了科学可靠的准则,可以很好地检测运输包装方案的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 米男男, 李光. 分析天平包装件随机振动仿真分析及优化设计[J]. 振动与冲击, 2019, 38(4): 206—212.  
MI Nan-nan, LI Guang. Random Vibration Simulation Analysis and an Optimization Design of Analytical Balance Packages[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(4): 206—212.
- [2] 范志庚. 疲劳损伤对蜂窝纸板能量吸收特性和内共振条件的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 109—111.  
FAN Zhi-geng. Influence of Fatigue Cumulative Damage on the Energy Absorption Properties and Inner Resonance Conditions of Honeycomb Paperboard[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 109—111.
- [3] 潘飞, 张广文. 智能坐便器包装件随机振动仿真和疲劳仿真[J]. 机械工程与自动化, 2018(2): 84—85.  
PAN Fei, ZHANG Guang-wen. Random Vibration and Fatigue Simulations on Intelligent Toilet Package[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2018(2): 84—85.
- [4] 孙玉成. 瓦楞纸板疲劳性能研究[D]. 广州: 暨南大学, 2018: 45—47.  
SUN Yu-cheng. Study on Fatigue Performance of Corrugated Paperboard[D]. Guangzhou: Jinan University, 2018: 45—47.
- [5] 高德, 计宏伟. 包装动力学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010: 2.  
GAO De, JI Hong-wei. Packaging Dynamics[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010: 2.
- [6] 江春冬, 武玉维, 杜太行, 等. 包装件在随机振动下的破损机理及相关量检测[J]. 中国测试, 2015, 41(8): 27—30.  
JIANG Chun-dong, WU Yu-wei, DU Tai-hang, et al. Damage Mechanism of the Package Under Random Vibration and the Detection of Relevant Quantities[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(8): 27—30.
- [7] 张冰, 文小鹰, 曹熙, 等. 基于小波包分析的城轨车辆受电弓实测动应力研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(8): 76—78.  
ZHANG Bing, WEN Xiao-ying, CAO Xi, et al. Study on Dynamic Stress Measurement of Pantograph of Urban Rail Vehicle Based on Wavelet Packet Analysis[J]. Modern Urban Transit, 2019(8): 76—78.
- [8] 万子诚. 钢悬链线立管疲劳损伤及疲劳可靠性研究[D]. 苏州: 江苏科技大学, 2018: 9—11.  
WAN Zi-cheng. Research on Fatigue Damage and Fatigue Reliability of Steel Catenary Riser[D]. Suzhou: Jiangsu University of Science and Technology, 2018: 9—11.
- [9] 陈南, 李哲, 吴仲鸣. 数控刀架端齿盘疲劳特性及精度退化分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3): 1—4.  
CHEN Nan, LI Zhe, WU Zhong-ming. Fatigue Characteristics and Precision Degradation Analysis of CNC Turret End-tooth-disk[J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(3): 1—4.
- [10] 王佳佳, 陈建民. 深水钻井钻柱疲劳寿命研究[J]. 石油机械, 2016, 44(4): 51—56.  
WANG Jia-jia, CHEN Jian-min. Study on Drill String Fatigue Life in Deepwater Drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(4): 51—56.
- [11] CRONIN D S, OUELLET S. Low Density Polyethylene, Expanded Polystyrene and Expanded Polypropylene: Strain Rate and Size Effects on Mechanical Properties[J]. Polymer Testing, 2016: 53—56.
- [12] CHEN Ling, JAN Ivens, PHILIP Cardiff, et al. Deformation Response of EPS Foam Under Combined Compression-shear Loading. Part I: Experimental Design and Quasi-static Tests[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018: 480—489.
- [13] 尚德广. 疲劳强度理论[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 8.  
SHANG De-guang. Fatigue Strength Theory[M]. Beijing: Science Press, 2017: 8.
- [14] 沈炜. 非金属工程材料疲劳特性研究及工程应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 34.  
SHEN Wei. Fatigue Characteristics Research and Engineering Applications of the Non-metallic Engineering Materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013: 34.
- [15] GB/T 4857.23—2012, 运输包装件基本试验 第23部分: 随机振动试验方法[S].  
GB/T 4857.23—2012, Basic Test of Shipping Package Section 23: Random Vibration Test Method[S].