

装备防护

基于实测路谱的振动环境分析与模拟方法研究

夏斯璇¹, 郭涛¹, 林康¹, 钱静^{1,2*}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 目的 开展无锡市内快递运输车辆的随机振动行为分析和缓冲衬垫损伤的实验室模拟再现, 旨在指导包装系统随机振动加速试验, 实现包装结构科学设计。方法 实地采集无锡市内中型厢式卡车运输过程中车厢不同位置的激励振动信号与包装系统响应信号; 基于实测路谱处理得到实验室等比例加速、分频段加速测试谱; 最后以多层瓦楞衬垫为研究对象, 分别采用标准谱、等比例加速谱、分频段加速谱进行实验室加速模拟试验, 对比实地运输中瓦楞衬垫损伤情况, 验证各加速模拟测试方法的损伤等效性。结果 实测路谱与标准谱在形状与量级上均存在差异; 基于实测路谱的等比例加速和分频段加速模拟试验衬垫损伤率误差分别为 20.2%、10.1%, 远小于标准谱加速模拟测试的误差 (110.1%); 相较于等比例加速试验方法, 分频段加速试验时间缩短了 19 min (29.7%)。结论 验证了基于实测路谱的分频段加速模拟测试的损伤等效性与快速性, 该方法对实现防护包装的精准设计具有指导意义。

关键词: 防护包装; 随机振动; 实测路谱; 分频段加速试验; 损伤等效

中图分类号: TB485.3; TH113 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)17-0261-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.032

Vibration Environment Analysis and Simulation Method Based on Measured Road Spectrum

XIA Si-xuan¹, GUO Tao¹, LIN Kang¹, QIAN Jing^{1,2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangsu Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to carry out random vibration behavior analysis and laboratory simulation of cushion damage of express transport vehicles in Wuxi, so as to guide the random vibration acceleration test of packaging system and realize the scientific design of packaging structure. Firstly, excitation vibration signals and packaging system response signals from different positions of medium van trucks in Wuxi were collected. The proportional acceleration spectrum and sub-band acceleration spectrum obtained in the laboratory were treated with the measured road spectrum. With multi-layer corrugated gaskets as the research object, standard road spectrum, proportional acceleration spectrum and sub-band acceleration spectrum were used to carry out the laboratory accelerated simulation test. By comparing with the damage of multi-layer corrugated gaskets in the field transportation, the damage equivalence of different acceleration simulation test method was verified. The results showed that there were differences in shape and magnitude between the measured road spectrum and the standard spectrum; the error of damage caused by proportional acceleration and sub-band acceleration simulation experiments was 20.2% and 10.1%, respectively, which was much smaller than that of the standard spectrum

acceleration simulation test (110.1%). Compared with the proportional acceleration method, the sub-band acceleration test shortened the experimental time by 19 min (29.7%). The damage equivalence and rapidity of the sub-band accelerated simulation test based on the measured road spectrum are verified. This method is of guiding significance for the accurate design of protective packaging.

KEY WORDS: protective packaging; random vibration; measured road spectrum; sub-band acceleration test; damage equivalent

产品包装在运输过程中会持续随机振动激励发生疲劳损伤,当累积到一定值时即发生疲劳失效,造成商品使用价值和商业价值的降低^[1]。适度包装可保护产品价值,过度包装会带来资源浪费^[2]。Rouillard 等^[3]指出可通过应用工程优化和风险管理原则来最大限度地减少包装的使用量,这需要平衡包装与产品的成本。因此通过实验室的模拟再现真实的配送环境,从而准确量化各种包装场景的损坏率至关重要。

王立军等^[4]指出在模拟测试高精度要求下,实验室信号模拟技术具有较大提升空间。功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)是随机振动的主要特征曲线之一,表示一定频域内功率的量值,用以描述振动信号强度在频率轴上的分布。目前,包装系统的模拟测试通常选取 ISTA3A-2018^[5]、GB/T 4857.23—2021^[6]等标准中的 PSD 曲线(统称标准谱)或实测路谱作为振动台输入信号。基于等比例加速原则,即保证激励谱形状不变,适度提高试验量级和压缩试验时间来实现在加速试验前、后的疲劳损伤等效^[7]。

其中,标准谱是由综合分析不同道路等级及载质量等条件,并经加速处理得到的,具有高度通用性,但无法准确代表某一特定运输环境。因此,基于实测路谱的模拟测试对再现长距离运输过程中可能发生的损坏非常重要。国内外学者对物流运输中的随机振动特性进行了采集和分析^[8-11]。Fernando 等^[12]采集了澳大利亚境内卡车运输振动信息,并基于实测路谱进行了加速振动模拟试验,再现了包装香蕉在长途运输过程中的损伤。Kipp^[13]认为运输包装中材料常数 k 应取 2,为避免试验件共振频率处能量过大导致结构非线性响应而提前发生破损,限制时间压缩比最大为 5。以上等比例加速试验方法只考虑了时间压缩比与频率无关的情形,Cianetti 等^[14]提出了频段分解的频域损伤计算法则。朱学旺等^[15]基于宽带随机振动疲劳损伤提出了一种分频段加权的加速振动试验方法,分频段思想为运输包装随机振动信号模拟提供新思路^[16]。

本文使用三轴向随机振动记录仪测量,并分析无锡市内某一路段快递运输车辆不同位置的振动水平,对实测路谱进行等比例加速,分频段加速处理。最终采用标准谱、等比例加速谱、分频段加速谱进行实验室加速模拟测试,旨在探究各实验室加速振动模拟测试方法的损伤等效性,指导运输包装的可靠性试验。

1 道路振动谱采集与分析

1.1 道路振动谱采集

1.1.1 试验设备与参数设置

主要仪器:SAVERTM3X90 随机振动记录仪,美国 Lansmont 公司。该记录仪可从空间三轴向记录振动信号的加速度,并拟合出随机振动 PSD 曲线。本试验同时开启信号触发数据记录和时间触发数据记录 2 种信号采集方式,振动记录仪的采样频率设置为 1 000 Hz,滤波器频率为 500 Hz,单个事件信号记录时长为 2.048 s,采样量程为 50g,信号触发阈值为 0.5g,时间触发采样间隔为 5 min。使用强力双面胶 3MTM 固定随机振动记录仪,随机振动记录仪及双面胶如图 1 所示。

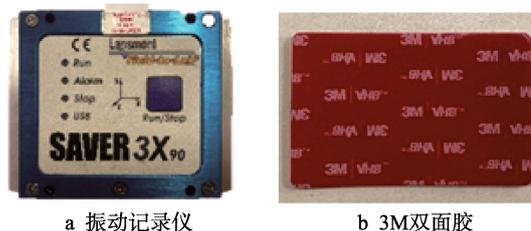


图 1 信号采集装置

Fig.1 Signal acquisition equipment

1.1.2 试验车辆信息

选取物流干线运输代表车型——中型厢式卡车进行测试。车辆外观尺寸为 5 995 mm×2 200 mm×3 100 mm,车厢尺寸为 4 180 mm×2 100 mm×2 100 mm,额定载质量为 1 495 kg,前轮间距为 1 535 mm,前后轮轴距为 3 355 mm,后轮至车尾间距为 1 445 mm,悬挂系统为钢板弹簧。



图 2 中型厢式卡车

Fig.2 Medium van truck

1.1.3 安装位置

目前, 对不同地理位置收集的道路运输信号的研究较多, 对车内不同位置的研究较少, 更多车辆不同位置运输振动数据将有助于更深入地研究运输参数的相互作用, 确定产品最大损伤发生的位置^[17]。研究表明卡车前部的振动强度小于尾部^[18-19]的, 因此, 本文测重比较车厢中部与尾部的振动水平差异。采集了车辆底板尾部 (R) 与中部 (M) 不同位置的振动激励信号及相邻位置 (r、m) 包装件内的振动响应信号。包装件由外包装、钢制支架、衬垫组成。为避免温湿度对衬垫损伤产生影响, 纸箱外套 PE 方底袋。

如图 3 所示, 记录仪三轴向分别代表车辆前进方向 (x)、水平方向 (y)、垂直地面方向 (z)。尾部记录仪 (R, r) 距车厢后门 1 m, 中部记录仪 (M、m) 距后门 2 m, 两侧记录仪距车厢侧板 150 mm。其中激励信号振动记录仪 R2 与响应信号振动记录仪 r2 沿车厢轴线呈对称分布, 间距为 300 mm, 近似等效为车辆同一位置的激励与响应信号。

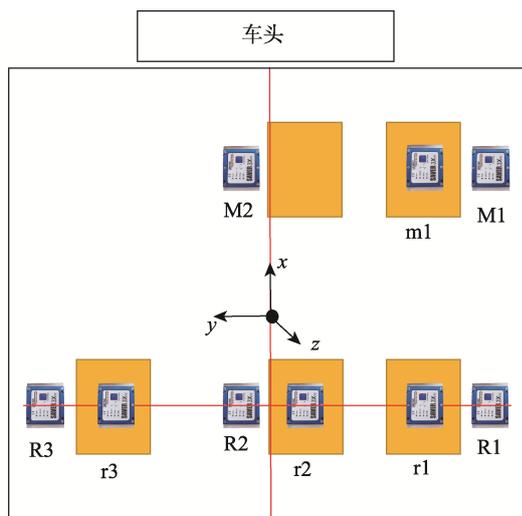


图 3 记录仪与包装件安装位置
Fig.3 Location of sensor and package installation

1.1.4 试验道路信息

对无锡市城市道路进行随机振动信号采集, 运输路线如图 4 所示。道路全长 157 km, 去除停车时间, 总运输时间为 5 h 21 min, 平均车速为 29.3 km/h。

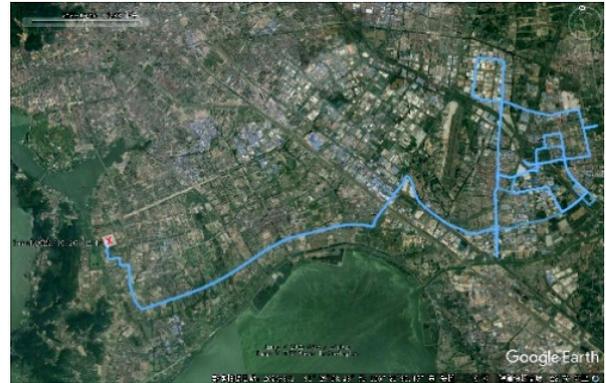


图 4 车辆行驶路线
Fig.4 Route of the medium van truck

1.2 信号谱分析与处理

1.2.1 振动水平数据分析

在本研究中, 使用 Saver Xware 软件对振动数据进行了过滤, 移除 G_{rms} 为 0.03 以下的非振动特征数据得到振动 PSD。图 5 展示了卡车底板不同位置的振动水平, 并将 z 轴向振动水平与标准谱进行比较。

z 轴方向的振动总均方根值、低频段 (1 ~ 10 Hz) 与高频段 (50 ~ 500 Hz) 的振动量级均远大于 x 轴或 y 轴方向的, 振动最为剧烈, 是道路运输中最关键的因素。在 z 轴方向上, 振动频率被划分为几个主要范围, 以分析道路状况及车辆状况。其中, 第 1 阶峰值范围为卡车悬挂响应, 第 2 阶峰值范围为轮胎响应, 第 3 阶峰值范围为车厢底板响应^[20]。 z 轴向前 2 阶峰值频率范围分别为 2 ~ 3 Hz 和 13 ~ 16 Hz, 与其他学者采集的中型卡车运输数据相似^[21-22], 车厢尾部振动量级大于中部振动量级 ($R1 > M1$ 、 $R2 > M2$), 两侧振动量级大于中央振动量级 ($R1 > R3 > R2$ 、 $M1 > M2$)。第 3 阶峰值出现在 40 ~ 70 Hz, 其振动量级在车厢底板不同位置的规律满足中部大于尾部 ($M1 > R1$ 、 $M2 > R2$), 中央大于两侧 ($R2 > R1 > R3$ 、 $M2 > M1$), 与前两阶峰值相反。

ISTA3A 标准谱曲线三阶峰值对应的频率区间 (3 ~ 4 Hz、15 ~ 24 Hz 和 70 ~ 100 Hz) 相较于实测谱曲线三阶峰值对应的频率区间均右移。GB/T 4857.23—2021 标准谱曲线的第 1 阶峰值范围 (3 ~ 4 Hz) 相较于实测谱曲线的右移, 第 2、3 阶峰值范围接近于实测谱。由此可知, 车辆运输中的振动水平受到路面不平度、车辆类型、悬挂系统、产品在车厢中位置等因素影响, 标准谱曲线无法准确代表特定运输环境。

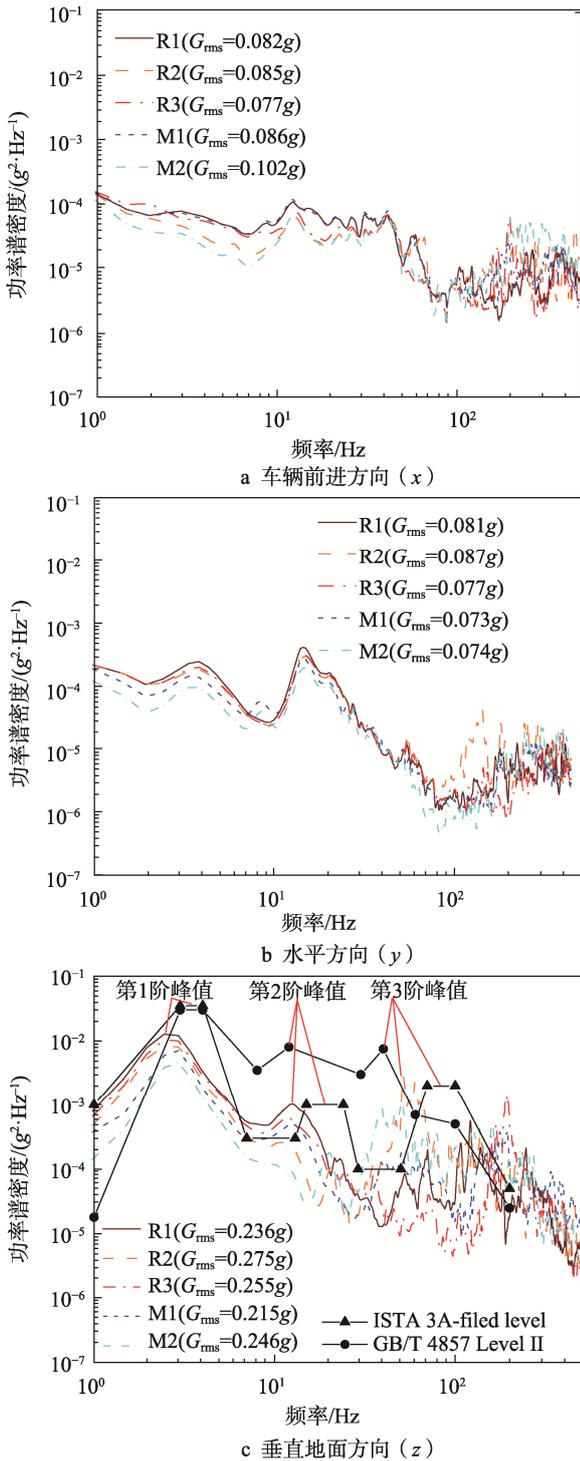


图5 车厢不同位置的三轴向功率谱密度
Fig.5 Triaxial PSD at different positions of compartments

图6为车辆不同位置包装件z轴向响应信号。由于包装材料的缓冲作用,作用到产品上的低频部分振动被放大,高频部分振动被弱化。在整个路线中,卡车底板后部位置(r)和中部位置(m)的z轴向响应加速度均方根值显著不同($P < 0.05$),车厢同一水平线上不同位置振动水平差异不显著。结合前人的研究^[18-19]可以认定,中型厢式货车振动最剧烈位置为车厢尾部,应采集

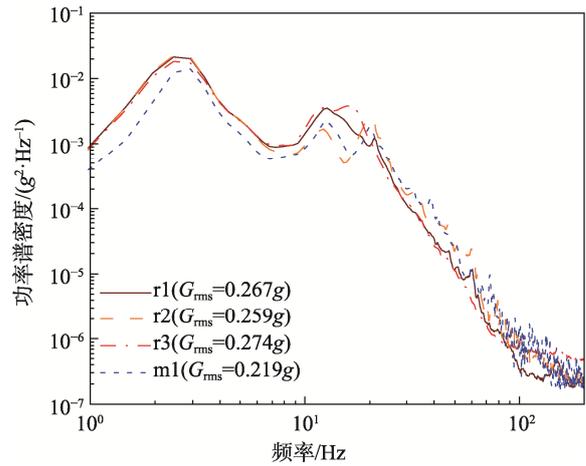


图6 垂直地面方向(z轴向)响应
功率谱密度
Fig.6 Response PSD in z axis

车厢尾部的振动水平作为实验室模拟测试输入信号。

1.2.2 信号谱降噪与简化

原始数据 PSD 在高频部分存在较多噪点与锯齿,一般的振动试验机很难输入如此复杂、锯齿较多的 PSD 曲线。以记录仪 R2 采集的振动信号为例,采用 Savitzky-Golay 算法,对高频数据采取多项式回归,实现数据降噪。进一步减少数据点,整理成针对该特定路径可供日后进行实验室模拟运输测试的定制路谱,如图7所示。经计算降噪前后 PSD 的加速度均方根值接近,分别为 0.273 5g、0.273 9g,降噪前后的 PSD 谱可以等效。

数据点提取规则如下:低频段(1~4 Hz)每5个数据提取出一个数据,中频段(4~70 Hz)每16个数据提取出一个数据,高频段(70~200 Hz)每51个数据提取出一个数据;使用 Python 中的 kneed 包获取曲线的最优拐点,保留数据中的拐点;提取出的数据点与相邻数据进行比较,保留大值。

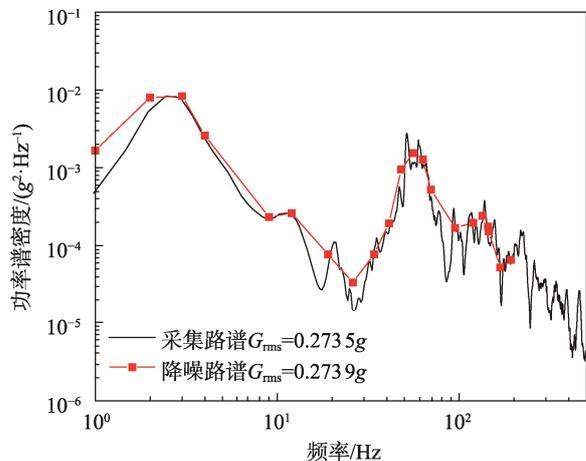


图7 实测路谱与实验室测试谱
Fig.7 Measured and laboratory test road spectrum

2 实验室加速随机振动试验

以记录仪 r2 所在包装件内衬垫损伤代表实际运输损伤, 根据记录仪 R2 实测路谱进行加速试验设计, 进行实验室加速试验与实际运输损伤的等效性比较。

2.1 试验材料与设备

六层瓦楞衬垫, 各层瓦楞平行排列, 如图 8 所示。瓦楞形状为 U 形, 楞型为 C 型; 每 300 mm 长度上瓦楞个数为 40; 六层瓦楞衬垫的长×宽×高为 100 mm×100 mm×24 mm。4 个瓦楞衬垫平行样放置在五层双瓦楞纸箱箱底, 四周及顶部采用高密度发泡聚乙烯限位, 根据瓦楞纸板常用的最小缓冲系数对应的静应力范围为 4~12 kPa, 取静应力为 5.0 kPa, 确定施加钢制支架及质量块的总质量为 20 kg。

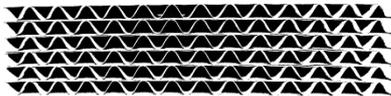


图 8 六层瓦楞衬垫
Fig.8 Six-layer corrugated gasket

加速疲劳振动试验在液压振动台上进行, 使用恒温恒湿箱进行温湿度预处理, 温度为 23 °C、相对湿度为 50%、预处理时间为 72 h 以上。用武汉优泰电子技术有限公司 Ut3408FRS-ICP24 位采集器进行数据的采集、存储与分析, 试验装置如图 9 所示。采用英国 LLOYD 公司的 LRXPLUS 5 kN 万能材料试验机, 进行材料的准静态力学性能测试。参考 GB/T 8168—2008《包装用缓冲材料静态压缩试验方法》进行试验, 压板下降速度为 (12±3) mm/min。



图 9 加速疲劳振动试验系统
Fig.9 Accelerated fatigue vibration test system

2.2 试验方法

1) 对原始试样进行准静态压缩试验, 获得瓦楞衬垫初始应力-应变性能。

2) 随机振动加速试验。测试谱如图 10 所示, 其中 $G_0(f)$ 为记录仪 R2 的实测路谱, 运输时间为 321 min。 $G_1(f)$ 为实验室通用标准谱, 国内外标准谱中, GB/T 4857.23—2021 中标准谱与本次实测路谱吻合度最

高。根据实测路况的颠簸程度、共振频段处的振动量级, 选择国标谱严酷水平 II 进行对比试验。根据经验公式推算试验时间为 26.2 min。

将实验室加速条件与实际条件的功率谱密度的比值定义为加速因子, 材料常数 k 取 2, 等比例加速谱 $G_2(f)$ 各频段加速因子取 5, 等比例加速试验模型关系式见式 (1) [23], 计算得到测试时长为 64 min。

$$\frac{T_r}{T_t} = \left(\frac{G_{\text{rms}t}}{G_{\text{rms}f}} \right)^k \quad (1)$$

式中: k 为 S-N 曲线确定的材料常数, $S^k N = C$; T_r 和 T_t 分别为实际运输时长和实验室测试时长; $G_{\text{rms}f}$ 和 $G_{\text{rms}t}$ 分别为实测 PSD 和实验室测试 PSD 的均方根值。

分频段加速谱 $G_3(f)$ 将 $G_0(f)$ 等分为 5 个频段进行分频段加速: 第 1 频段 (共振频段 1~40 Hz) 加速因子取 5, 第 2 频段 (40~80 Hz) 加速因子取 25, 第 3—5 频段 (80~200 Hz) 加速因子取 50。根据朱学旺等 [15] 提出的分频段加速试验方法计算疲劳损伤比, 实验室测试时长为 45 min。

3) 测量道路运输与实验室加速振动试验后瓦楞衬垫的厚度。

4) 对道路运输与实验室加速振动试验后的试样进行准静态压缩试验。

每种工况 4 个平行样, 取均值作为试验结果。

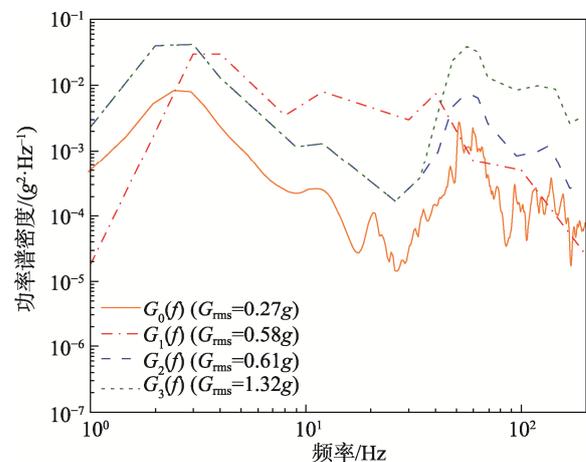


图 10 测试谱
Fig.10 Test spectrum

2.3 试验结果与分析

2.3.1 塑性变形

瓦楞纸板在随机振动过程循环力作用下损伤逐步累积, 瓦楞芯纸逐渐压塌, 塑性变形增加。图 11 为 5 组试验后纸板的塑性变形率 (变形率=试样厚度损失量/初始试样厚度×100%)。初始试样厚度为 24 mm, 卸去运输包装中载荷 30 min 后再次测量试验样品厚度, 经实地运输后衬垫塑性变形率为 4.90%。等比例加速与分频段加速试验的塑性变形率分别 4.40%、

4.42%，瓦楞无明显变形。国标谱加速工况下底层瓦楞倾斜，塑性变形率增大至 6.17%。

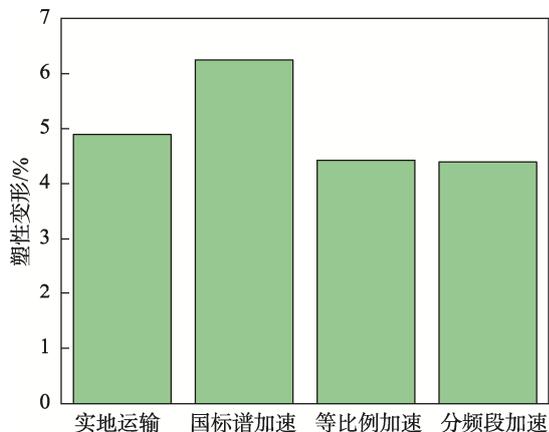


图 11 瓦楞衬垫试样塑性变形率
Fig.11 Plastic deformation rate of corrugated gasket

2.3.2 承载能力

缓冲材料的力学特性由力-变形曲线表征，可转化为相应的应力-应变曲线。如图 12 所示，本试验用到的六层型瓦楞衬垫存在六阶应力峰值，随着振动时间的增长，各层瓦楞积累损伤直至疲劳压溃。第 1 层瓦楞损伤后，衬垫高度降低，防护性能减弱，后续瓦楞加速损伤。以第 1 层瓦楞损伤作为疲劳损伤指标，以原始试样作为对照组，初始屈服应力为 101 kPa。经实地运输，试样的一阶屈服应力下降到 81 kPa，实地运输损伤率为 20%。当 k 取 2 时，等比例加速试验与分频段加速试验的一阶屈服应力损伤率分别 15%、18%，接近实际运输损伤率。国标谱加速振动试验提供了较大的损伤率（41%），远大于实际运输造成的损伤。

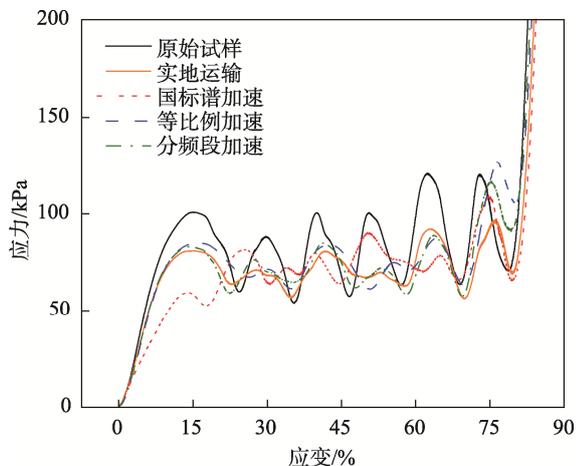


图 12 随机振动对瓦楞衬垫应力-应变曲线的影响
Fig.12 Effect of random vibration on stress-strain curve of corrugated gasket

2.3.3 缓冲性能

当缓冲材料受到冲击作用，若不考虑机械能损耗，则全部冲击能量都转化为缓冲材料的变形能，根据应力-应变曲线可计算缓冲材料的力变形能及缓冲系数，见图 13—14。经加速模拟试验后，试样变形能减小，缓冲系数曲线形状基本不变，缓冲系数变大，其中一阶缓冲系数变化最为明显。未疲劳振动试样的一阶缓冲系数为 3.3，经过实地运输，一阶缓冲系数增大至 4.5。当 k 取 2 时，等比例加速试验与分频段加速试验的结果相似，其一阶缓冲系数分别 4.0、4.3。国标谱加速振动试验后一阶缓冲系数最大，为 7.2。

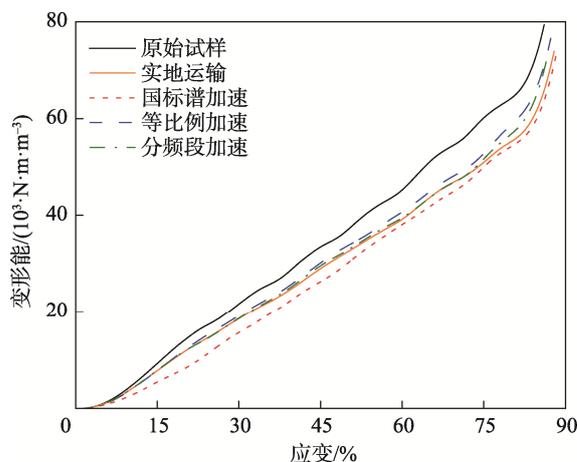


图 13 随机振动对瓦楞衬垫变形能-应变曲线的影响
Fig.13 Effect of random vibration on deformation energy-strain curve of corrugated gasket

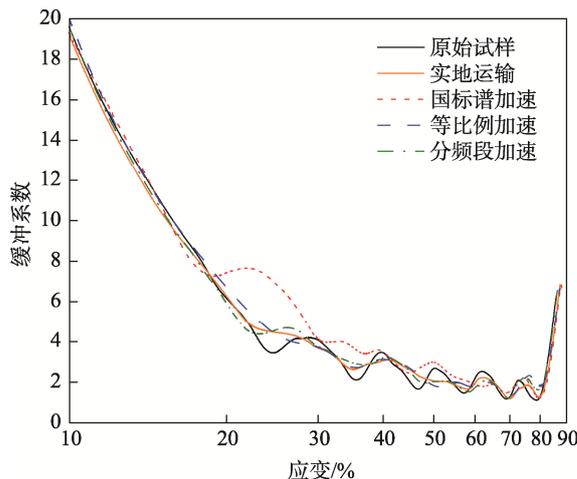


图 14 随机振动对瓦楞衬垫缓冲系数-应变曲线的影响
Fig.14 Effect of random vibration on cushioning coefficient-strain curve of corrugated gasket

2.3.4 总结与分析

随机振动试验后瓦楞衬垫发生疲劳损伤，与实际

运输相比, 国标谱加速、等比例加速与分频段加速模拟试验的塑性变形误差分别为 1.27%、0.5%、0.48%, 损伤率误差分别为 110.1%、20.2%、10.1%。国标谱加速试验造成的衬垫损伤远大于实际运输损伤, 这是由于国标谱在 3 ~ 100 Hz 频段的振动量级均大于实测路谱, 证明了国标中给出的标准路谱无法准确代表某一特定运输环境, 而是出于对商品的保护提供了较为保守的结果。

等比例加速试验与分频段加速试验基本实现了实验室与实际运输的损伤等效, 但其产生的损害略小于实际损害, 这是由于在实验室只考虑了单轴振动的影响, 而在实际运输中的振动情况往往更加复杂。建议在进行单轴随机振动加速试验时, 可适当减小 k 值, 增加试验时间以提供较为保守的测试结果。

3 结语

通过实地采集无锡地区中型厢式卡车随机振动信号, 比较了车厢不同位置的振动信号水平。以多层瓦楞衬垫为研究对象, 通过实验室的加速振动模拟测试复现实际运输瓦楞衬垫损伤水平。文中首次将分频段加速试验方法应用于包装系统的可靠性试验, 并与目前常用的加速模拟试验方法进行了比较。研究结论如下:

1) 车厢振动水平尾部大于中部, 实验室模拟测试应采集车厢尾部的振动水平作为输入信号。

2) 标准谱和实测道路谱在形状和量级上均存在较大差异。当材料常数 k 取 2, 相较于实地运输, 基于实测道路谱的等比例加速模拟的衬垫损伤率误差仅为 20.2%, 远小于标准谱加速模拟测试的衬垫损伤率误差 (110.1%)。证明了基于实测道路谱进行加速模拟测试具有更好的损伤等效性。因此, 基于实测道路谱的模拟测试对再现长距离运输过程中可能发生的损坏, 以及防护包装的精准设计非常重要。

3) 相较于等比例加速试验, 基于实测道路谱的分频段加速模拟试验具有更小的衬垫损伤率误差 (10.1%)。同时, 分频段加速模拟试验时间减少了 19 min (29.7%)。验证了分频段加速试验方法的可行性与快速性, 为分频段加速试验方法在实验室随机振动加速模拟试验的应用提供了数据支撑。在包装的减量化、精准化的要求下, 该方法对运输包装可靠性测试方法的优化具有指导意义。

参考文献:

- [1] 于水源, 曾台英, 丁逸秋. 基于运输环境的包装系统疲劳损伤分析[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 118-123.
YU Shui-yuan, ZENG Tai-ying, DING Yi-qiu. Fatigue Damage of Packaging System Based on the Transportation Environment[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 118-123.
- [2] 蔡虹, 赵玉滢, 陈柳瑾, 等. 基于 ISTA 测试的小型非易碎品包装方法的标准化研究[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 185-191.
CAI Hong, ZHAO Yu-ying, CHEN Liu-jin, et al. Standardization of Packaging Techniques for Small Non-Fragile Parcels Based on ISTA Test[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 185-191.
- [3] ROUILLARD V, LAMB M, LEPINE J, et al. The Case for Reviewing Laboratory-based Road Transport Simulations for Packaging Optimisation[J]. Packaging Technology and Science, 2021, 34(2): 339-351.
- [4] 王立军, 宋海燕, 王志伟. 运输包装加速随机振动试验研究综述[J]. 振动与冲击, 2022, 41(8): 277-286.
WANG Li-jun, SONG Hai-yan, WANG Zhi-wei. A Review on an Accelerated Random Vibration Test of Transport Packaging[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(8): 277-286.
- [5] ISTA 3A-2018, Packaged-Products for Parcel Delivery System Shipment 70 kg (150 lb) or Less[S].
- [6] GB/T 4857.23—2021, 包装 运输包装件基本试验 第 23 部分: 垂直随机振动试验方法[S].
GB/T 4857.23—2021, Packaging—Basic Tests for Transport Packages—Part 23: Vertical Random Vibration Test Method[S].
- [7] 王志伟, 刘博, 王立军. 运输包装随机振动疲劳曲线及加速振动试验技术[J]. 振动工程学报, 2022, 35(2): 297-306.
WANG Zhi-wei, LIU Bo, WANG Li-jun. Random Vibration Fatigue Curve and Accelerated Vibration Test Technology of Transport Package[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(2): 297-306.
- [8] 周浩, 谭清方, 王志伟. 快递运输包装随机振动信号采集与分析[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 199-204.
ZHOU Hao, TAN Qing-fang, WANG Zhi-wei. Measurement and Analysis of Random Vibration on Express Terminal Delivery Vehicle Based on Hilbert Huang Transform[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 199-204.
- [9] KYLE D, PURUSHOTTAM C. Measurement and Analysis of Crowdsourced Vehicle Vibration Levels during last Mile Delivery Segments for Parcel Shipments[J]. Vibration, 2022, 5(4): 792-802.
- [10] PARK J, CHOI S, JUNG H. Measurement and Analysis of Vibration Levels for Truck Transport Environment in Korea[J]. Applied Sciences, 2020, 10(19): 6754.
- [11] BÖRÖCZ P, MOLNÁR B. Measurement and Analysis

- of Vibration Levels in Stacked Small Package Shipments in Delivery Vans as a Function of Free Movement Space[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(21): 7821.
- [12] FERNANDO I, FEI J, STANLEY R, et al. Developing an Accelerated Vibration Simulation Test for Packaged Bananas[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 173(4): 111400.
- [13] KIPP W I. Vibration testing Equivalence-How Many Hours of Testing Equals How Many Miles of Transport[C]// *ISTA Conference 2000*, Orlando: ISTA, 2008.
- [14] CIANETTI F, BRACCESI C, TOMASSINI L. Random Fatigue. a New Frequency Domain Criterion for the Damage Evaluation of Mechanical Components[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 70: 417-427.
- [15] 朱学旺, 张思箭, 刘青林, 等. 基于分频段加权的加速振动试验方法[J]. *航天器环境工程*, 2017, 34(2): 115-119.
ZHU Xue-wang, ZHANG Si-jian, LIU Qing-lin, et al. An Accelerated Random Testing Procedure Based on Frequency Band Weighting Approach[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(2): 115-119.
- [16] LI Z, INCE A. A Unified Frequency Domain Fatigue Damage Modeling Approach for Random-on-Random Spectrum[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019: 123-137.
- [17] LAMB M, ROUILLARD V. On the Parameters that Influence Road Vehicles Vibration Levels[J]. *Packaging Technology and Science*, 2021, 34(2): 525-540.
- [18] SOLEIMANI B, AHMADI E. Measurement and Analysis of Truck Vibration Levels as a Function of Packages Locations in Truck Bed and Suspension[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 109: 141-147.
- [19] ZHOU Ran, SU Shu-qiang, YAN Li-ping, et al. Effect of Transport Vibration Levels on Mechanical Damage and Physiological Responses of Huanghua Pears (*Pyrus Pyrifolia* Nakai, Cv. Huanghua)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(1): 20-28.
- [20] SINGH J, SINGH S, JONESON E. Measurement and Analysis of US Truck Vibration for Leaf Spring and Air Ride Suspensions, and Development of Tests to Simulate these Conditions[J]. *Packaging Technology and Science*, 2006, 19(6): 309-323.
- [21] ZHOU H, WANG Z W. Measurement and Analysis of Vibration Levels for Express Logistics Transportation in South China[J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(10): 665-678.
- [22] BÖRÖCZ P, SINGH S. Measurement and Analysis of Vibration Levels in Rail Transport in Central Europe[J]. *Packaging Technology and Science*, 2016, 30(8): 361-371.
- [23] GE Chang-feng, PAN Liao. Vibration Damage Rate Curves for Quantifying Abrasion of Printed Packaging in Accelerated Random Vibration Test[J]. *Packaging Technology and Science*, 2018, 31(2): 71-81.

责任编辑: 曾钰婵