

发泡聚乙烯隔振性能研究

卢富德, 张绍云, 杜启祥

(浙江大学 应用力学研究所, 杭州 310027)

摘要: 为研究发泡聚乙烯的隔振性能,测试了质量块和振动台的加速度信号;运用最小二乘原理,消除了实验数据的趋势项;建立了发泡聚乙烯多项式动力学模型,识别出了一个工况下的衬垫的参数;运用 Runge-Kutta 法和重构恢复力-位移曲线,证明了模型的正确性;最后,运用相同的方法,得出了其它工况下的参数识别结果。研究的结果可直接为防震包装提供理论依据。

关键词: 发泡聚乙烯; 隔振; 趋势项

中图分类号: TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)11-0001-04

Study of Vibration Isolation Performance of EPE

LU Fu-de, ZHANG Shao-yun, DU Qi-xiang

(Institute of Applied Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Acceleration signals of mass and electro-dynamics shaker were measured. Least-squares method was applied and the trend items of the signals generated by shaker were eliminated. The polynomial dynamic model of polyethylene was established. The stiffness and damping of a load condition was identified. Runge-Kutta method was applied to reconstruct force-displacement curve and the correctness of the model was proved. The parameters of other load conditions were obtained with the same method. The computed results can be references for vibration isolation packaging.

Key words: polyethylene foam; vibration isolation; trend item

振动与冲击是包装系统最常见的外界激励,而表征振动与冲击最基本的量值是加速度。Mindlin^[1]首次提出了易损度概念,认为产品破损失效与否主要取决于其承受的峰值加速度是否超过产品所能承受的极限值,但易损度很难在实际中确定。1968年,REN^[2]以几种常用脉冲的冲击谱为基础,得出了产品破损边界曲线,这一概念是缓冲包装的重要概念。国内对包装系统的缓冲冲击研究大多基于理想的模型,例如:WANG Z-L^[3]研究了双线性非线性包装系统的破损边界曲线;卢富德^[4-5]研究了立方非线性和正切非线性包装系统在脉冲激励下的损坏边界曲线;贡晓婷^[6]研究双曲正切非线性包装系统在后峰脉冲激励下的冲击特性,分别得出了系统参数对冲击响应的影响,为缓冲包装理论奠定了基础。由于缓冲垫在受到振动与冲击时,其动态特性往往表现出复

杂的规律,上述理想的典型模型与实际不能相符。高德^[7]针对实际存在的缓冲包装结构设计,即在包装物与外包装箱内部采用棱角或侧面衬垫,研究了各参数平动与转动的耦合规律。以上研究,都是基于理想的力学模型。

笔者对常用的发泡聚乙烯塑料进行试验,研究其动态特性,然后建立发泡聚乙烯的三次多项式滞后动力学模型,用最小二乘原理识别出参数,得出的结果能有效指导电子设备、光学仪器、仪表等对包装要求较高的产品的包装设计。

1 发泡聚乙烯的动态特性试验

1.1 测试材料与测试原理

为了准确掌握聚乙烯泡沫塑料的振动特性,设计

收稿日期: 2011-04-03

作者简介: 卢富德(1982—),男,河南人,浙江大学博士生,主要研究方向为复合材料力学。

了发泡聚乙烯塑料的振动试验装置,见图 1 和 2。实

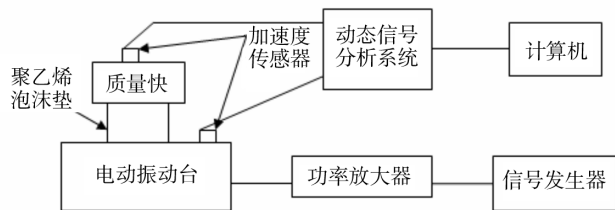


图 1 试验结构

Fig. 1 Experimental structure



图 2 试验装置

Fig. 2 Experimental instruments

验用的发泡聚乙烯密度为 0.028 g/cm^3 。泡沫塑料尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 塑料放在振动台上, 物块用圆盘模拟(质量为 5 kg), 泡沫厚度为 20 mm 。物块与振动台上分别放有一个加速度传感器。试验系统由加速度力传感器、电荷放大器、数据采集板、计算机和电动振动台组成。采用 D-100-1 型电动振动台, 能满足 5 Hz 以上的各频段试验要求, 并能做定振扫频。2 个加速度传感器型号分别为 CA-YD-103 23613 和 inv YJ9A2098, 将它们分别放在物块与振动台上, 信号输送到 DH5922 东华动态信号分析系统, 并将数据贮存于计算机中。

1.2 信号的采集与处理

采用正弦加速度周期激励对发泡聚乙烯塑料的振动特性进行测试。试验频率为 $35 \sim 75 \text{ Hz}$, 振幅采用 $10, 20, 30, 40, 50 \text{ m/s}^2$ 。频率为 45 Hz 、振幅为 30 m/s^2 的质量块加速度和振动台加速度见图 3a, b, 两者之差即可得到相对加速度, 进行一次积分就可得到两者的相对速度, 见图 3c。可以看出, 相对速度信号含有趋势项, 由于环境的干扰以及其他因素的影响, 在振动信号的采样过程中, 会产生偏离基线的情况, 甚至偏离基线的大小还会随时间变化, 这个变化的过程就称为信号的趋势项, 趋势项直接影响信号的正确

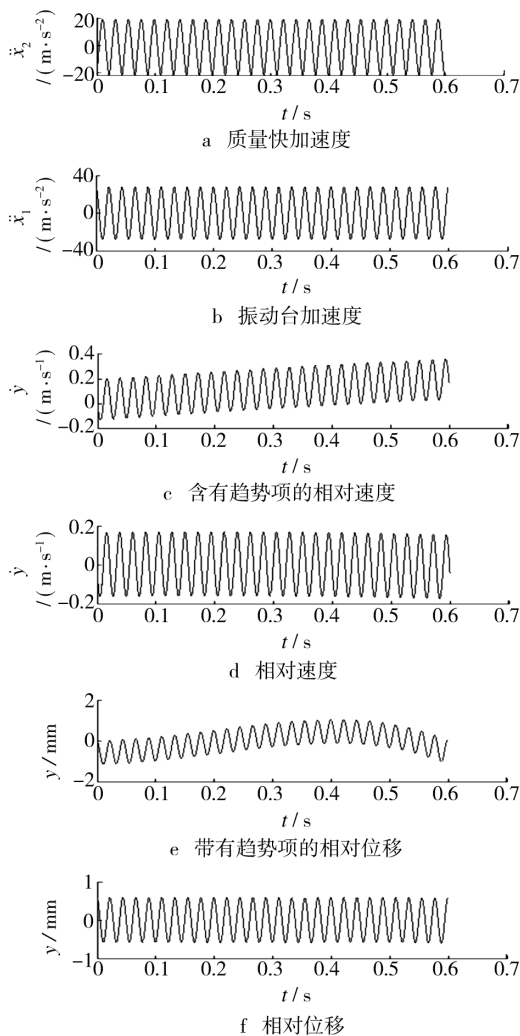


图 3 频率为 45 Hz , 振幅为 30 m/s^2 的信号时间序列

Fig. 3 Time sequence of signal at frequency

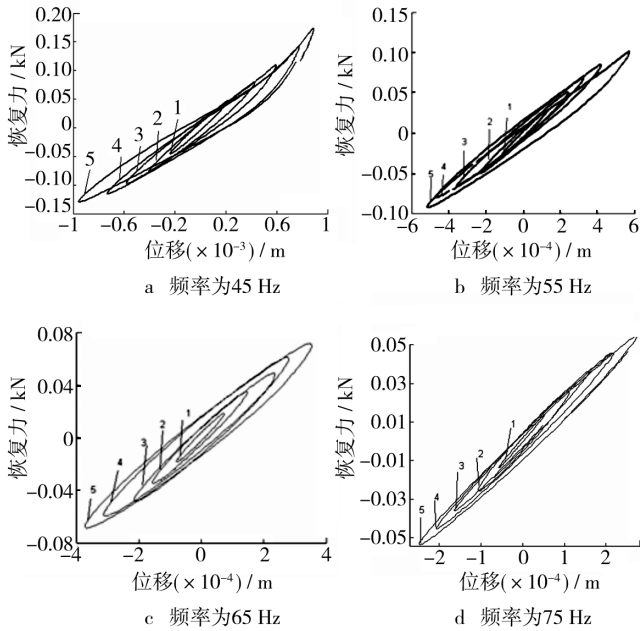
45 Hz , amplitude 30 m/s^2

性, 应该去除^[8]。运用多项式最小二乘法消去趋势项后的相对速度, 见图 3d, 再对相对速度积分, 就得到相对位移, 见图 3e。可见结果又引发了新的趋势项, 原因是在处理速度信号时, 由于没有除去高次趋势项, 经积分就得到低次趋势项, 运用同样的方法即可消除多项式趋势项, 见图 3f。

2 发泡聚乙烯缓冲垫的动力学模型

2.1 试验结果

经过变换, 可得到恢复力-位移曲线图, 见图 4。当频率为 45 Hz 时, 随着加速度幅值的增大, 衬垫的位移(质量块与基础的相对位移)随着增大, 滞后环所包围的面积也增大, 这部分能量以热能的形式被消耗



数字 1~5 分别代表加速度为 10,20,30,40,50 m/s²

图 4 同一频率下、不同振幅的滞后曲线

Fig. 4 Hysteretic curves of

different amplitude at the same frequency

掉,这是因为加速度增大,导致发泡聚乙烯变形增大,发泡聚乙烯阻尼起了主要作用。

随幅值的增大,发泡聚乙烯泡孔里的一部分气体溢出,衬垫变软,发生一阶动刚度单调减小。当频率为 65 Hz 时,加速度幅值在 10~50 m/s² 变化,衬垫的位移在 0.05~0.387 mm 变化,变形小,缓冲衬垫的力学性质可以近似为线性。

隔振示意图见图 5,其运动微分方程为:

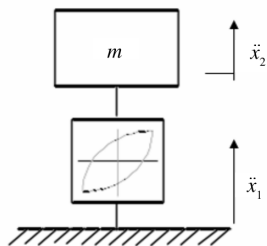


图 5 发泡聚乙烯隔振示意

Fig. 5 Vibration isolation diagram of EPE

$$m\ddot{x}_2 + f(y, \dot{y}) = 0 \quad (1)$$

式中: $y = x_2 - x_1$ 。

考虑到泡沫塑料的非线性与滞后性,取滞后力为:

$$f(y, \dot{y}) = ky + ry^3 + c\dot{y} \quad (2)$$

式中: k 为刚度系数; r 为弹性增长系数; c 为阻尼系数。

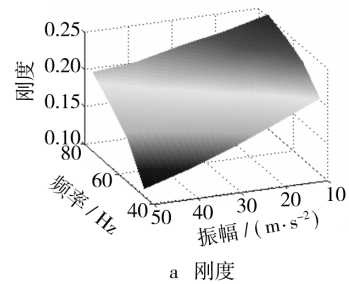
2.2 参数识别

用最小二乘优化方法对图 4 中的滞后曲线进行系统参数识别,部分识别结果见表 1。运用插值法,进行等间距插值,得到结果见图 6。

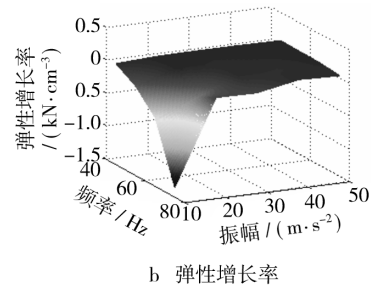
表 1 不同工况下的刚度和阻尼

Tab.1 Parameters at different load conditions

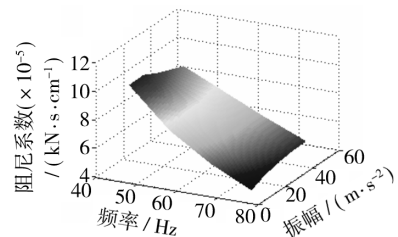
频率 ω /Hz	振幅/ $(m \cdot s^{-2})$	一阶刚度 $k /$ $(kN \cdot mm^{-1})$	三阶刚度 $r /$ $(kN \cdot mm^{-3})$	阻尼系数 $c (\times 10^{-5}) /$ $(kN \cdot s \cdot mm^{-1})$
45	30	0.1499	0.0676	9.6207
45	50	0.1115	0.06	8.8215
55	40	0.1740	0.0497	7.5782
55	50	0.1592	0.0566	7.5104
65	30	0.2117	0.0331	6.15
65	50	0.1842	0.0530	6.2121
75	50	0.2055	0.0238	5.0351



a 刚度



b 弹性增长率



c 阻尼系数

图 6 试验识别结果的三维图

Fig. 6 3-D graphs of identified results

2.3 参数识别结果验证

以频率为 45 Hz, 加速度幅值为 30 m/s^2 为例, 质量块质量为 5 kg, 用 2 种方法验证结果的正确性。一是根据识别的结果重构恢复力-位移曲线, 见图 7a, 实

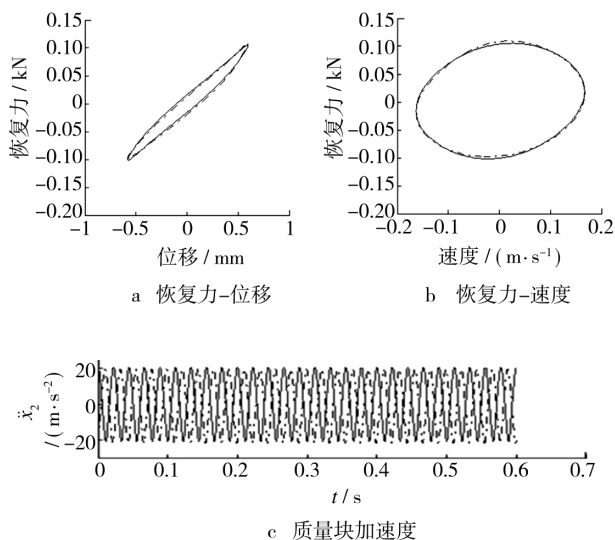


图 7 模型值与实测值的对比

Fig. 7 Contract of measured and calculated data

测值与模型值吻合较好;二是根据对应工况下的振动微分方程,对比模型值与实测值,用 Runge-Kutta 法对微分方程(1)求解,见图 7c,加速度的幅值基本相同,只是相位有些差异,这是不可避免的,因为试验中受到许多因素的干扰。

3 结论

1) 发泡聚乙烯用于隔振时,其变形很小,在 1 mm 以内。例如图 1 中,在频率为 45 Hz,激励的频率为 50 m/s^2 时,发泡聚乙烯的最大变形为 0.83 mm。

2) 随着加速度幅值的增大,衬垫的位移(质量块与基础的相对位移)随着增大,滞后环所包围的面积也增大,这部分能量以热能的形式被消耗掉,因为这

加速度增大,导致发泡聚乙烯变形增大,发泡聚乙烯阻尼起了主要作用。随幅值的增大,发泡聚乙烯泡孔里的一部分气体溢出,衬垫变软,发生一阶刚度单调减小。

参考文献:

- [1] MINDLIN R D. Dynamics of Package Cushioning[J]. Bell System Technical Journal, 1945, 24 (3, 4): 353 - 461.
- [2] NEWTON R E. Fragility Assessment Theory and Practice[R]. California; Monterey Research Laboratory, Inc Monterey, 1968.
- [3] WANG Z-L, WU C-F, XI De-chang. Damage Boundary of Packaging System Under Rectangular Pulse Excitation [J]. Packaging Techno Sci, 1998, 11: 189 - 202.
- [4] 卢富德,高德,梁爱锋.立方非线性双层包装在矩形方波冲击下破损边界曲线的研究[J].包装工程, 2009, 30(2): 7-10.
- [5] 高德,卢富德.两自由度正切非线性系统的冲击研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 748-752.
- [6] 贡晓婷,王志伟.双曲正切包装系统在后峰锯齿脉冲作用下的冲击特性[J].振动与冲击, 2000, 19(1): 43-45.
- [7] 高德,卢富德.具有转动包装系统的正切非线性模型冲击响应研究[J].振动与冲击, 2010, 29(10): 131-136.