



# 热老化对聚苯乙烯缓冲材料振动传递特性的影响

李琛<sup>1,2</sup>, 肖生苓<sup>1,2</sup>, 刘颖<sup>1</sup>

1. 东北林业大学工程技术学院, 哈尔滨 150040

2. 东北林业大学黑龙江省森林持续经营与微生物工程重点实验室, 哈尔滨 150040

**摘要** 通过正弦扫频振动实验及测试,研究了热老化后聚苯乙烯(EPS)缓冲材料振动传递特性的影响因素及变化规律。结果显示,随着热老化时间延长,EPS材料的阻尼比减小,振动传递率的峰值增加,表明热老化使EPS材料的吸振性能降低;在相同热老化时间条件下,随着载荷的增加,EPS材料的振动传递率增大,且载荷越大其振动传递率增大越快,同时振动系统固有频率呈减小趋势,表明载荷越大EPS缓冲材料传递的响应加速度越大;随着密度的增加,EPS材料的固有频率增大,振动传递率的最大值呈增大趋势,表明EPS材料密度较小时,其柔韧性较好,振动传递率较低,具有较强的隔振性能。

**关键词** 聚苯乙烯;振动传递特性;热老化

**中图分类号** TQ325.2

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.35.010

## Effects of Thermal Aging on Vibration Transmissibility of Expanded Polystyrene

LI Chen<sup>1,2</sup>, XIAO Shengling<sup>1,2</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>

1. College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2. Key Laboratory of Forest Sustainable Management and Micro-bioengineering in Heilongjiang Province, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract** Effects of thermal aging on the vibration transfer characteristics of expanded polystyrene (EPS) cushion material are studied. The purpose is to provide reference for the cushioning packaging design, and to ensure the protection in current process. The accelerated thermal aging conditions are simulated by the frequency sweep experiments to explore the change regularities of vibration transmissibility with the aging time. The results show that the vibration transmissibility was affected by many factors. Above all, the expanded polystyrene damping ratio rose as increasing the aging time and also the peak values of vibration transmissibility increased. It was found that the peak values of vibration transmissibility increased by 42.66% while load 5.0 kg and 21.96% while 2.5 kg by aging at 240h. Moreover, the transmissibility-frequency curve shift to the upper left with the load rising, and the transmissibility-frequency curve shift to the upper right as increasing the expanded polystyrene density. With due consideration of the analysis above, we may draw a conclusion that it's necessary to fully consider many factors such as the load, material density and thermal aging time, when choosing vibration-proof packaging materials.

**Keywords** expanded polystyrene; vibration transmissibility; thermal aging

### 0 引言

在包装件的流通过程中,振动是造成内装产品损坏的主要原因之一。振源来自运输工具本身的动力装置,以及公路

路面、铁轨接缝和风浪等。发泡缓冲材料除了要有优良的抵御冲击的性能以外,还应具备良好的吸振性能,以减小运输工具向内装产品传递振动。流通过程中温度和湿度等外部环

收稿日期:2013-07-25;修回日期:2013-10-30

基金项目:黑龙江省自然科学基金项目(C201005);中央高校基本科研业务费专项(DL12BB16)

作者简介:李琛,博士研究生,研究方向为包装材料及运输包装,电子信箱:lichen\_nefu@aliyun.com;肖生苓(通信作者),教授,研究方向为物流与包装、生物质材料,电子信箱:shenglingxiao@yahoo.com.cn

境的变化,会使保护产品的缓冲材料发生老化,研究缓冲材料老化后振动传递特性的变化规律,能够更好地了解材料性能,有利于材料的合理应用。

国内外学者对缓冲材料性能做了大量的研究。Marcondes 等探讨了温度变化对聚乙烯泡沫塑料(EPE)和聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)性能的影响<sup>[1]</sup>。Sek 等将反向多输入单输出识别技术应用于非线性缓冲材料振动传递率频率响应函数(FRFs)的测定,并测试了 EPS 材料的振动传递特性<sup>[2]</sup>。Gnip 等研究了不同型号的 EPS 材料在 10℃及 0~50℃的热传递率<sup>[3]</sup>。山静民等研究了缓冲系统振动特性的扫频测试方法,在三维空间描述激励信号、响应信号的瞬时功率谱与频率、时间的关系,得到缓冲系统的振动传递率曲线<sup>[4]</sup>。张家凡等采用正弦扫描动态测试方法,研究了双瓦楞纸板与薄 EPS 板材组合试样在防振缓冲包装应用中的振动传递特性<sup>[5]</sup>。郑华明等研究了 EPE 材料冲击能量的吸收及振动传递率<sup>[6]</sup>。周建等分析了 EPE 材料在不同厚度和应力下的振动传递率,并采用 BP 神经网络建立振动传递率非线性模型进行了仿真研究<sup>[7]</sup>。国外研究多集中于缓冲材料振动传递率频率响应函数的确定方法,以及将缓冲材料应用于座椅、鞋底和土木工程减震结构等的振动传递特性分析<sup>[8]</sup>。国内研究主要集中于缓冲材料振动特性测试方法和振动数据分析方法。本文通过对热老化后 EPS 材料振动传递率的测定,研究其振动传递特性的影响因素及变化规律。

## 1 实验原理及方法

### 1.1 实验原理

在运输过程中,振动是由振源(运输工具等)向振动系统(包装件)输入激励信号,振动系统产生响应的过程。包装件是被包装产品、缓冲衬垫和外包装箱的总称。实验过程中为了便于分析,假定被包装产品为均质刚体,略去外包装箱的质量和弹性,不计缓冲衬垫的质量,并视其为具有黏性和阻尼的弹性体,即将包装件简化为由载荷、EPS 材料的弹性和 EPS 材料的阻尼构成的单自由度振动系统。振动试验台采用稳态正弦激振替代运输工具作为振源,稳态正弦激励信号接近于实际运输的振动信号,且具备激振功率大、信噪比高,能保证响应测试精度的优点<sup>[9]</sup>。本研究通过振动试验台向振动系统输入振动激励信号,模拟包装件在实际运输过程中受到振动的情况,分析缓冲衬垫 EPS 材料对振动能量吸收和传递的特性。

假设在振动实验中,振动台引起位移干扰使振动系统产生强迫振动,载荷离开平衡位置在振动方向的位移为  $x$ ,载荷初始位移为  $x_s$ ,由牛顿运动定律得出振动系统的振动微分方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + k(x - x_s) + c \left( \frac{dx}{dt} - \frac{dx_s}{dt} \right) = 0 \quad (1)$$

式中,  $m$  为载荷质量;  $k$  为 EPS 材料弹性系数;  $c$  为 EPS 材料阻尼系数。

微分方程的稳态解为

$$x = A_1 \sin(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

式中,  $A_1$  为输出振幅;  $\omega$  为振动台振动的圆频率;  $\varphi$  为相位差。

求解得到

$$A_1 = A_2 \sqrt{\frac{k^2 + c^2 \omega^2}{(k - m\omega^2)^2 + c^2 \omega^2}} = A_2 \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2} \quad (4)$$

式中,  $A_2$  为输入振幅;  $\lambda$  为频率比,  $\lambda = \omega/\omega_n$ ;  $\omega_n$  为振动系统的固有圆频率,  $\omega_n = \sqrt{k/m}$ ;  $\zeta$  为阻尼比,  $\zeta = c/2m\omega_n$ 。

被包装产品受到振动的响应情况可用传递率表示,位移传递率定义为振动系统的输出振幅与输入振幅之比,用  $T_n$  表示,即

$$T_n = \frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{1 + (1 + 2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (5)$$

振动加速度可表示为

$$G = (2\pi f)^2 A_1 \quad (6)$$

式中,  $f$  为振动频率。

由于加速度与位移成正比,因此加速度传递率  $T_a$  定义为振动系统的响应加速度幅值与激励加速度幅值之比,即

$$T_a = \frac{G_1}{G_0} \quad (7)$$

式中,  $G_1$  为响应加速度幅值;  $G_0$  为激励加速度幅值。

实验过程中,记录振动系统的响应加速度值和激励加速度值,参照公式(7)将振动系统的加速度传递率作为 EPS 材料的振动传递率  $T_r$ ,并用  $T_r-f$  曲线表达 EPS 材料的振动传递特性<sup>[10]</sup>。

### 1.2 热老化实验方法

主要实验仪器为 DCS-600-6-05 电动振动试验系统(苏州苏试试验仪器股份有限公司)和 401 系列热老化试验箱(杭州蓝天化验仪器厂)。

根据 GB/T 9640—2008, EPS 材料试样面积为 200mm×200mm,放置于 70℃条件下,分为 5 组分别老化 22、72、96、168、240h,每组老化结束后,取出并在室温下放置 24h,然后进行振动传递特性测试。

### 1.3 振动传递特性测试方法

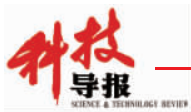
按照国家标准 GB/T 8169—2008,分别对未经过老化和老化不同时间的 6 组 EPS 材料试样进行正弦振动实验。振动参数条件设定:① 频率范围 5~100Hz;② 扫频速率 1/2 oct/min;③ 加速度 5m/s<sup>2</sup>;④ 上层试样静压力 0.7MPa;⑤ 载荷质量分别为 2.5 和 5.0kg。

测试过程中,传感器 I 采集振动系统的激励加速度幅值,传感器 II 采集振动系统的响应加速度幅值,采用上述方法计算振动传递率  $T_r$ ,绘出  $T_r-f$  曲线<sup>[11]</sup>。

## 2 结果及分析

### 2.1 老化时间对振动传递率的影响

实验中分别测试了载荷质量为  $m=2.5\text{kg}$  和  $m=5.0\text{kg}$  条件



下老化时间对 EPS 材料振动传递特性曲线的影响。 $m=5.0\text{kg}$  时  $T_r$ - $f$  曲线如图 1 所示, $m=2.5\text{kg}$  时  $T_r$ - $f$  曲线与  $m=5.0\text{kg}$  条件下相似,不再赘述。随着老化时间延长,不同载荷条件下,振动传递率峰值的变化如图 2 所示。

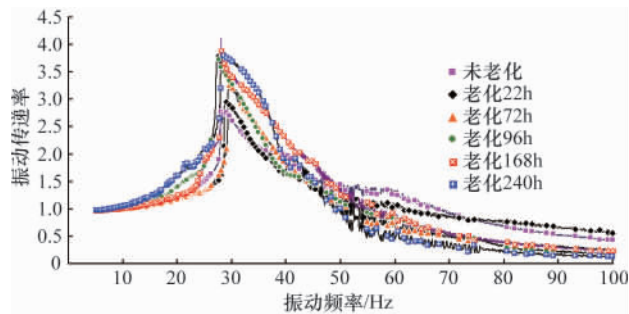


图 1 载荷为 5.0kg 时 EPS 材料的  $T_r$ - $f$  曲线  
Fig. 1  $T_r$ - $f$  curves of EPS material with a load  $m=5.0\text{kg}$

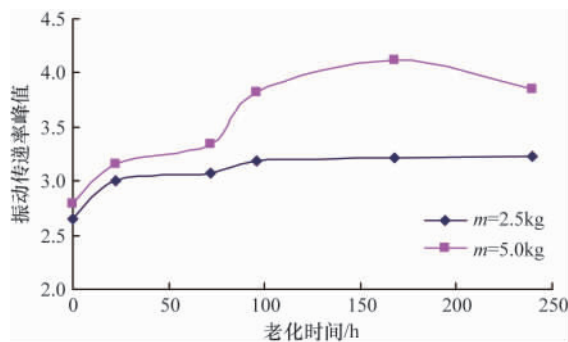


图 2 不同载荷下 EPS 材料的振动传递率峰值变化  
Fig. 2 Variations of vibration transmissibility peak value under different loads

图 1 和图 2 显示,老化时间为 240h, 载荷质量  $m=5.0\text{kg}$  条件下, EPS 材料的振动传递率增加了 42.66%, 而  $m=2.5\text{kg}$  条件下, EPS 材料振动传递率增加了 21.96%, 可见载荷质量越大, EPS 材料的振动传递率增加越快。在  $m=5.0\text{kg}$  条件下, 随着老化时间的延长振动传递率的最大值上升, 振动系统的固有频率变化趋势不明显, 但由振动传递率峰值的升高可以看出, EPS 材料的阻尼比发生了变化, 随着老化时间的延长, EPS 材料的阻尼比减小。这是由于在热老化过程中, EPS 材料会吸收氧而引发氧化反应, EPS 材料分子结构中的叔氢原子首先氧化形成氢过氧化物, 然后发生复杂的交联和分解反应最终导致分子链的断裂, 从而导致 EPS 材料随着老化时间的延长而脆性增加, 阻尼比减小, 振动传递率峰值增大, 隔振能力下降<sup>[12,13]</sup>。

### 2.2 不同载荷质量对振动传递率的影响

两种不同载荷质量条件下,  $T_r$ - $f$  曲线如图 3 和图 4 所示。在载荷质量  $m=5.0\text{kg}$  条件下, EPS 材料的振动传递率峰值均

大于  $m=2.5\text{kg}$  条件, 可见随着载荷的增加, EPS 材料的振动传递率峰值增大。在老化时间分别为 22、196h 时, 相对于  $m=2.5\text{kg}$  条件,  $m=5.0\text{kg}$  条件下的  $T_r$ - $f$  曲线向左上方偏移, 表明随着载荷的增加, EPS 材料的振动传递率增大, 振动系统的固有频率为减小趋势。

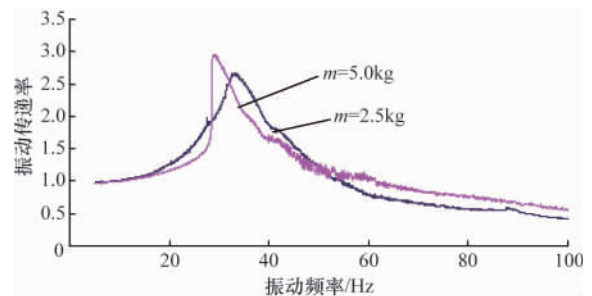


图 3 老化 22h 不同载荷下 EPS 材料的  $T_r$ - $f$  曲线  
Fig. 3  $T_r$ - $f$  curves of EPS material under different loads for aging 22 hours

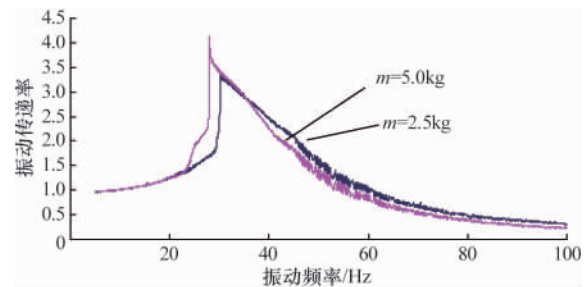


图 4 老化 196h 不同载荷下 EPS 材料的  $T_r$ - $f$  曲线  
Fig. 4  $T_r$ - $f$  curves of EPS material under different loads for aging 196 hours

### 2.3 EPS 材料密度对振动传递率的影响

老化时间为 240h, 在载荷分别为  $m=2.5\text{kg}$  和  $m=5.0\text{kg}$  条件下, 选取密度  $\rho=0.0075\text{g/cm}^3$  和  $\rho=0.0109\text{g/cm}^3$  的 EPS 材料试样, 分别进行正弦扫频振动实验得到的  $T_r$ - $f$  曲线如图 5 和图 6 所示。

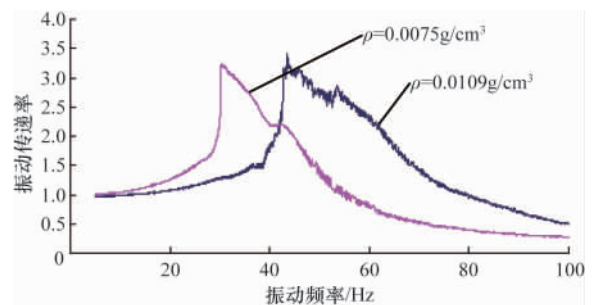


图 5 载荷为 2.5kg 时不同密度 EPS 材料的  $T_r$ - $f$  曲线  
Fig. 5  $T_r$ - $f$  curves of EPS material with two different density under a load  $m=2.5\text{kg}$

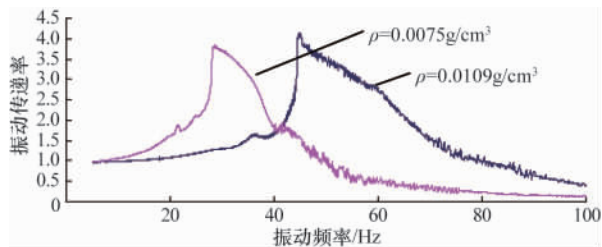


图6 荷载为5.0kg时不同密度EPS材料的 $T_f$ - $f$ 曲线  
Fig. 6  $T_f$ - $f$  curves of EPS material with two different density under a load  $m=5.0\text{kg}$

从图5和图6可以看出,相同老化时间,载荷质量分别为 $m=2.5\text{kg}$ 和 $m=5.0\text{kg}$ 条件下,相对于低密度EPS材料,高密度EPS材料的 $T_f$ - $f$ 曲线向右上方偏移,表明EPS材料随着密度的增加,其固有频率增大,振动传递率的最大值为增大趋势,也就是说,EPS材料密度较小时,其柔韧性较好,振动传递率较低,有利于降低传递到包装件上的加速度。EPS材料由于其规则排列的泡孔而具有振动衰减性和能量吸收性,在受到振动时通过泡孔壁的弯曲、屈曲和延展吸收能量,可以减少传递到包装件的能量。相对于密度大的EPS材料,密度小的EPS材料的泡孔更疏松,在振动过程中泡孔更容易发生变形而吸收能量,与测试得到的结果一致, $\rho=0.0075\text{g/cm}^3$ 的EPS材料相对而言具有更优良的隔振性能。

### 3 结论

采用正弦扫频激励模拟实际运输过程中的振动情况,分析研究了热老化后EPS缓冲材料振动传递特性的影响因素及变化规律。随着热老化时间延长,EPS材料的阻尼比降低,振动传递率峰值增大,表明热老化使EPS材料的吸振性能降低,导致传递到被包装产品上的响应加速度增加;热老化时间相同,载荷质量增加时,EPS材料的振动传递率峰值增大,可见被包装产品越重,通过EPS缓冲材料传递的响应加速度越大,而振动系统的固有频率有减小趋势;随着EPS材料密度增加其固有频率增大,振动传递率峰值增大,表明采用较高密度的EPS材料会增大传递到产品上的响应加速度。研究结果可为EPS材料合理应用和防振包装设计提供实验基础和参考依据。

### 参考文献 (References)

- [1] Marcondes J, Hatton K, Graham J, et al. Effect of temperature on the cushioning properties of some foamed plastic materials [J]. Packaging Technology and Science, 2003, 16: 69-76.
- [2] Sek M A, Rouillard V, Parker A J. A study of nonlinear effects in a cushion-product system on its vibration transmissibility estimates with the reverse multiple input-single output technique[J/OL]. Packaging Technology and Science, 2012, 26(6). [2013-05-21].<http://onlineibrary.wiley.com/doi/10.1002/pts.1970/pdf>.
- [3] Gnip I, Vejelis S, Vaitkus S. Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10°C and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50°C[J]. Energy and Buildings, 2012(52): 107-111.
- [4] 山静民, 陈满儒, 谭志明. 缓冲系统振动特性的扫频测试[J]. 包装工程, 2002, 23(4): 113-116.  
Shan Jingmin, Chen Manru, Tan Zhiming. Packaging Engineering, 2002, 23(4): 113-116.
- [5] 张家凡, 陈杰, 吴国图. 瓦楞纸板与EPS板材组合包装垫振动传递特性的实验研究[J]. 环境技术, 2006, 24(5): 22-24.  
Zhang Jiafan, Chen Jie, Wu Guotu. Environmental Technology, 2006, 24(5): 22-24.
- [6] 郑华明, 吴江渝, 曹国荣. 聚乙烯发泡塑料冲击能量的吸收及振动传递率的分析[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 30-32.  
Zheng Huaming, Wu Jiangyu, Cao Guorong. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 30-32.
- [7] 周健, 张丽, 王保升. 缓冲材料振动传递率的测试及非线性辨识[J]. 中国现代教育装备, 2010(7): 77-80.  
Zhou Jian, Zhang li, Wang Baosheng. China Modern Education Equipment, 2010(7): 77-80.
- [8] Jarvel P, Sarin J, Jarvela P, et al. A method to measure the fusion strength between expanded polystyrene (EPS) beads [J]. Journal of Materials Science, 1986(21): 3139-3142.
- [9] 彭国勋. 运输包装[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2005: 25-40.  
Peng Guoxun. Transport package[M]. Beijing: Graphic Communications Press, 2005: 25-40.
- [10] Trandafir A C, Bartlett S F, Lingwall B N. Behavior of EPS geofom in stress-controlled cyclic uniaxial tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28: 514-524.
- [11] Leo C J, Kumruzzaman M, Wong H, et al. Behavior of EPS geofom in true triaxial compression tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26: 175-180.
- [12] Ossa A, Romo M P. Dynamic characterization of EPS geofom [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29: 40-50.
- [13] Horvath J S. The Compressible inclusion function of EPS geofom [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, 15: 77-120.

(责任编辑 韩星明)



### 《科技导报》“学术争鸣”栏目征稿

“学术争鸣”栏目旨在活跃学术气氛,开展学术讨论,促进学科的深入研究。本栏目欢迎对已发表的学术观点进行质疑,也欢迎广大作者对各领域的科技问题进行开创性的学术探索。在线投稿:www.kjdb.org。