包装技术与工程

泡沫材料动刚度及阻尼系数的声阻抗管测量方法研究

冯涛,王晶,刘斌,李楠,张力,尹亦阳

(北京工商大学,北京 100048)

摘要:提出了泡沫材料动刚度和阻尼系数的声学测量分析模型,建立了相应的实验测量系统。对2种铝板泡 沫缓冲结构的动刚度和阻尼系数进行了实验测量和计算分析,结果表明:可以根据声阻抗的测量结果,分析计 算得到泡沫材料的动刚度和阻尼系数;铝板泡沫缓冲结构中铝板的质量越大,相应的共振频率越低,共振峰值 也越高;对于泡沫材料相同、铝板质量不同的铝板泡沫缓冲结构,通过声阻抗曲线得到的动刚度及阻尼系数分 别基本相同;考虑泡沫材料质量的影响,可以得到更准确的计算结果。

关键词:泡沫材料;动刚度;阻尼系数;声阻抗

中图分类号: TB485.1; O422.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2011)07-0001-04

Study of Sound Impedance Tube Method to Measure Dynamic Stiffness and Damping Coefficient of Foam Material

FENG Tao, WANG Jing, LIU Bin, LI Nan, ZHANG Li, YIN Yi-yang

(Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: The measurement analysis model of foam material dynamic stiffness and damping coefficient was put forward and the relevant experimental system was established. The dynamic stiffness and damping coefficient of two cushion structures consisting of an aluminum plate and a foam material were tested and calculated. The experimental and calculation results showed that the dynamic stiffness and damping coefficient of the foam material can be resulted from the sound impedance of the cushion structure. The more the mass of the aluminum plate, the lower the resonance frequency and the higher the value of the resonance peak. For the aluminum plate and foam cushion structures which the foam materials are identical and the mass of the aluminum are different, the dynamic stiffness and the damping coefficient are basically the same. The more accurate calculation results can be obtained by considering the mass of the foam material.

Key words: foam material; dynamic stiffness; damping coefficient; acoustic impedance

泡沫材料在产品缓冲包装领域应用广泛^[1],对于 被包装物和泡沫材料所组成的振动系统,若其只受到 小振幅外部激励时,可将泡沫材料等效成为一个阻尼 器与一个不忽略自身质量的弹簧的组合。在外激励 作用下,弹簧的动刚度即为泡沫材料的动刚度,阻尼 器的阻尼系数即为泡沫材料的阻尼系数。霍银磊等 人^[2-3]对多种泡沫材料的静态力学参数进行了实验 测量分析;王江^[4]在研究中应用振动台测量泡沫垫层 的隔振特性,并对泡沫材料的多孔弹性模型进行了研究;周文管等人^[5]描述了发泡塑料力学性能的模型, 比较了主要力学性能与材料密度的关系。

泡沫材料的动刚度和阻尼系数是缓冲包装结构 设计过程中最重要的2个参数,以它们为基础,再加 上被包装物的质量,就可以计算得到反映缓冲包装结 构隔振特性的传递比系数。对于金属结构,可采用力 激励法^[6]对这2个参数进行测量,激励方式可以是瞬

收稿日期: 2011-01-07

作者简介:冯涛(1969-),男,上海人,博士,北京工商大学副教授,主要研究方向为噪声与振动控制。

基金项目:国家自然科学基金(10974217);北京市教委科技发展面上项目(科技教委 2010-08 新);北京市属高等学校人才强教计 划资助项目(PHR201106110)

态锤击、稳态正弦激励或稳态白噪声激励。对于泡沫 材料,由于其刚度较小,可以考虑采用声激励方式,在 声阻抗管中进行测量。笔者提出一种基于声激励的 测量方法,研究如何在声学阻抗管中,通过声学测量 结果推得泡沫材料的动刚度和阻尼系数。

1 测量模型

材料表面声阻抗测量装置原理见图 1^[7],管道左



图 1 材料表面声阻抗测量装置原理

Fig. 1 Schematic diagram of the device to measure the sound impedance of material surface

端为扬声器,右端为待测试样,待测试样为泡沫铝板 缓冲结构。扬声器发出宽带白噪声信号,其频率低于 管道平面波截止频率,可在管道中形成平面波声场。 铝板与泡沫材料组成缓冲结构,声压作用在铝板上产 生动态压力,相当于施加给泡沫铝板缓冲结构的外加 激励。设铝板的面积为 A,铝板表面处的声压为 p, 铝板表面处的空气介质质点振动速度为 v,则铝板泡 沫缓冲结构在声场稳态激励下的速度阻抗为:

$$T_F = \frac{pA}{r_P} \tag{1}$$

根据管道中的声传播规律,可应用传声器 1 和 2 之间的声压传递函数求得缓冲结构的声阻抗。图 1 中传声器 1 和 2 与管道内表面平齐安装,传声器 1 到 右端缓冲结构铝板表面的距离为 D,传声器 1 与 2 之 间的距离为 S,设测量得到的时域声压信号分别为 $p_1(t), p_2(t),其相应的傅里叶变换为 <math>p_1(f), p_2(f),$ 则 1 和 2 测点间的声压传递函数可表示为:

$$H_{12}(f) = \frac{p_2(f)}{p_1(f)}$$
(2)

根据 J. Y. Chung^[s-9]的研究,由式(2)可得到测量位置 1 处的声压反射系数 $r_1(f)$:

$$r_{1}(f) = \frac{H_{12}(f) - e^{-jkS}}{e^{jkS} - H_{12}(f)}$$
(3)

由式(3)可得到泡沫铝板缓冲结构的表面声阻

抗:

 z_A

$$\frac{z_A}{oc} = \frac{1 + r_1(f) e^{2jkD}}{1 - r_1(f) e^{2jkD}}$$
(4)

其中:*pc*为空气的特征阻抗;*z*A 是铝板表面的声阻抗率。

$$=p/v \tag{5}$$

式中:f为频率; $k = 2\pi f/c_0$,为波数;c为声速; ρ 为空气密度。

对比式(1)和式(5)可以看出,声阻抗 z_A 与力阻抗 z_F 相比只是相差一个面积常数,所以,可以用铝板泡沫缓冲结构的声阻抗代替其力阻抗,通过声阻抗管测得的声阻抗曲线,计算分析得到泡沫材料的动刚度和阻尼系数。

2 动刚度和阻尼系数的计算分析方法

对于图 1 中管道右端的铝板泡沫缓冲结构,其力 阻抗曲线与其表面声阻抗曲线一致,形状一般见图 2,图 2 中曲线峰值所对应的频率 f₀ 为共振频率:



图 2 海绵-铝板振动系统品质因数的求解 Fig. 2 Schematic diagram of Q factor of foam-aluminum plate oscillator calculation

$$f_{0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_{\text{equ}}}} \tag{6}$$

式中:K 为泡沫材料的动刚度; M_{equ}为铝板泡沫 缓冲结构中振子的等效质量。设被包装物的质量为 M,泡沫材料自身质量为 M_f,当被包装物质量与泡沫 材料质量相差不大时,需要考虑泡沫材料自身质量的 影响,铝板泡沫缓冲结构的等效质量为^[10]:

$$M_{\rm equ} = M + M_f / 3 \tag{7}$$

图 2 中, f。和 f。为半功率带宽的上限和下限频率,铝板泡沫缓冲结构的品质因数可写为:

$$Q = \frac{f_0}{f_b - f_a} \tag{8}$$

对于弹簧振子系统,若已知共振频率 f_0 、振子质量 M_{equ} 及阻尼系数 R_m 等值,品质因数又可写成:

$$Q = \frac{2\pi f_0 M_{\text{equ}}}{R_{\text{m}}} = \frac{\sqrt{M_{\text{equ}}K}}{R_{\text{m}}}$$
(9)

可按照如下步骤测量泡沫材料的动刚度和阻尼系数:测量铝板泡沫缓冲结构的声阻抗特性,得到声阻抗曲线;由声阻抗曲线求出共振频率 f_0 ,应用式(8)计算出品质因数 Q;由式(7)得到铝板海绵振子的等效质量 M_{equ} ,由式(6)求出泡沫材料动刚度 K,最后由式(9)得到阻尼系数 R_m 。

3 实验系统

实验采用 BK4206 声阻抗管进行测量,使用 BK3560B 前端完成信号采集,PULSE 软件完成测量 分析。管道内径为 100 mm,阻抗管上 2 个传声器间 距 100 mm,对应的有效测量频段为 50~1 600 Hz。 传声器 1 到铝板泡沫缓冲结构表面的距离为 200 mm。白噪声激励信号为 1 600 Hz 低通信号。声阻 抗管和试样的实物照片见图 3。泡沫材料为聚乙烯



图 3 实验装置及材料 Fig. 3 The experimental system and test material

泡沫,密度为 26.27 kg/m³,泡沫的一面与铝板粘贴, 另一面与测量管道中的刚性背衬紧贴。用 2 块相同 的泡沫与 2 块不同厚度的铝板组成 2 个铝板泡沫缓 冲结构,泡沫和铝板的参数见表 1。

表 1 泡沫及铝板的几何质量参数

Tab.1 Geometric and mass parameters

of the foams and aluminum plates

材料	质量/g	直径/mm	厚度/mm
泡沫	10.4	100	50
Al 1	12.11	100	0.60
Al 2	20.11	100	0.98

4 测量结果及分析

声阻抗管测得试样的归一化声阻抗率见图 4,在



图 4 铝板-海绵缓冲结构的归一化声阻抗率特性曲线 Fig. 4 Normalization sound impedance curve of the foam-aluminum plate cushion structure

有效测量频段 50~1 600 Hz 之间只有一个峰值。2 种缓冲结构中的泡沫材料一致,意味着两者具有相同 的动刚度 K 和阻尼系数 R_m ,由于铝板 Al 2 的质量要 大于铝板 Al 1,由式(6)可知,铝板 Al 2 对应的共振 峰频率相对于 Al 1 会降低,由式(9)可知,铝板 Al 2 对应的共振峰高度相对于 Al 1 会增大,图 4 中的 2 条曲线显示出了这样的规律。根据测量得到的声阻 抗曲线,应用式(6)-(9)分别计算共振频率 f_0 、品质 因数 Q、铝板海绵振子的等效质量 M_{equ} 、泡沫材料动 刚度 K 以及阻尼系数。计算分析结果见表 2。

表 2 铝板泡沫缓冲结构动刚度及阻尼系数计算结果 Tab.2 Calculation results of dynamic stiffness and damping coefficient of the foam-aluminum plate cushion structure

材料	等效质	f_0	$f_{\rm a}$	$f_{\rm b}$	0	$R_{ m m}/$	K/	
	$\frac{1}{g}$	/Hz	$/\mathrm{Hz}$	$/\mathrm{Hz}$	Q ($(N \cdot s \cdot m^{-1})$	$(N \cdot m^{-1})$	
Al 1	+泡沫	15.57	264	244	296	5.08	5.10	42 849.42
Al 2	2+泡沫	23.57	224	210	246	6.23	5.33	46 679.54

从表 2 中阻尼系数和动刚度的计算结果来看,2 种缓冲结构的动刚度分别 42 849 N/m 和 46 680 N/m,阻尼系数分别为 5.10 和 5.33 N·s/m,从计算 结果可以看出,尽管铝板的质量不一样,但计算得到 的阻尼系数和动刚度却基本一致。其原因是 2 种缓 冲结构中泡沫材料一样,这一结果也验证了本测量方 法的正确性,计算结果存在不同的原因可能是由于安 装粘贴所致的差异造成。

下面研究 2 种缓冲结构共振频率之间的相互关系,由式(6)可知,铝板泡沫缓冲结构的共振频率应与振子系统等效质量的平方根成反比。计算结果见表3,表中 *M*_{Al1}和 *M*_{Al2}, *M*_{equ_Al1}和 *M*_{equ_Al2}以及 *f*_{0_Al1}

表 3 铝板泡沫缓冲结构振子质量比与频率比计算结果

Tab.3 Calculation results of ratio of frequency and mass

of the foam-aluminum plate cushion structure

材料	铝板质量/g	等效质量/g	f_0/Hz
Al 1+泡沫	12.11	15.57	264
Al 2+泡沫	20.11	23.57	224
比值	$\sqrt{M_{ m Al~2}/M_{ m Al~1}}$	$\sqrt{M_{ m equ_Al~2}/M_{ m equ_Al~1}}$	$\sqrt{f_{0_{\rm Al}1}/f_{0_{\rm Al}2}}$
	=1.29	=1.23	=1.18

和 f_{0_A12}分别是 2 种缓冲结构的铝板质量、等效质量 和共振频率,不考虑泡沫材料自身质量,只考虑铝板 的质量,得到的质量比的平方根为 1. 29,考虑泡沫材 料自身质量,按等效质量计算得到的质量比的平方根 为 1. 23,而测量得到的共振频率比值为 1. 18。可以 看出,考虑泡沫材料自身质量的计算结果更接近实际 值,因此,当被包装物质量较轻时,考虑泡沫材料自身 质量的影响会得到更准确的计算结果。

5 结论

对泡沫材料动刚度和阻尼系数的声学测量方法 进行了研究,提出了测量分析模型,建立了相应的实 验测量系统,对泡沫材料试样的动刚度和阻尼系数进 行了实验测量和计算分析。结果表明:可以根据声阻 抗的测量结果,分析计算得到泡沫材料的动刚度和阻 尼系数;铝板泡沫缓冲结构的组成不同,其共振频率 和品质因数也会不同,铝板的质量越大,相应的共振 频率越低,共振峰值也越高;对于泡沫材料相同,铝板 质量不同的铝板泡沫缓冲结构,尽管其共振频率和品 质因数不同,但用声阻抗曲线得到动刚度及阻尼系数 却基本相同,这一结果也验证了本测量方法的正确 性。在分析过程中,考虑泡沫材料质量的影响会得到 更准确的计算结果。

参考文献:

- [1] 耿东伟,许文才,曹国荣.环保型缓冲包装材料的现状及 发展前景[J].包装工程,2007,28(4):11-13.
- [2] 霍银磊,刘新朗,张新昌.泡沫塑料的单轴压缩力学性能(上)[J].包装工程,2007,28(6):22-24.
- [3] 霍银磊,刘新朗,张新昌.泡沫塑料的单轴压缩力学性能 (下)[J].包装工程,2007,28(12):14-16.
- [4] 王江.聚氨酯泡沫垫层隔振系统的数值模型[J].包装工程,2009,30(6):38-41.
- [5] 周文管,王喜顺.泡沫塑料主要力学性能及其力学模型 [J].塑料科技,2003(6):17-19.
- [6] 李德宝,陆秋海.工程振动试验分析[M].北京:清华大学 出版社,2004.
- [7] 王晶,冯涛,李啸尘,等.一种蜂窝纸板材料吸声及隔声 系数的实验测量[J].包装工程,2008,29(6):54-55.
- [8] CHUNG J Y, BLASER D A. Transfer Function Method of Measuring Induct Acoustic Properties. I. Theory[J].
 J Acous Soc Am, 1980,68(3):907-913.
- [9] CHUNG J Y, BLASER D A. Transfer Function Method of Measuring Induct Acoustic Properties. II. Experiment[J]. J Acous Soc Am, 1980, 68(3):914-921.
- [10] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础[M]. 第2版. 南京:南 京大学出版社,2001.