

应用传递矩阵测量中间薄层材料声特性

汪 婕, 冯 涛, 杨梦露, 王 晶

(北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048)

摘要: 将薄层材料看作三层复合材料的中间层, 通过实测得到材料的总传递矩阵和前后两层材料的传递矩阵, 中间层材料的传递矩阵可由前材料传递矩阵的逆矩阵、组合材料整体传递矩阵和后材料传递矩阵的逆矩阵相乘得到, 由传递矩阵可计算得到中间层材料的声学特性。以基毡和海绵材料为例, 通过实验研究并验证中间层材料声特性计算方法的准确性。该方法为薄层材料法向吸收系数和隔声量的测量提供了新的手段。

关键词: 声吸收系数; 薄层材料; 传递矩阵; 中间层

中图分类号: O422.8 TB53

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-03-0334-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.03.017

Acoustic characteristic measurement of intermediate thin layer materials by transfer matrix

WANG Jie, FENG Tao, YANG Meng-lu, WANG Jing

(School of Materials Science and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: By considering a thin layer material as the intermediate layer of three-layer composites and by measuring the overall transfer matrix of the three-layer composites and the transfer matrices of the front and rear layers of the composites, the transfer matrix of the intermediate layer material can be obtained by multiplying the inverse matrix of the transfer matrix of the front layer with the overall transfer matrix of the three-layer composites and again with the inverse matrix of the transfer matrix of the rear layer. Then, the acoustic properties of the intermediate layer material can be calculated from its transfer matrix. Taking the base felt and sponge material as examples, the accuracy of the calculation method for the acoustic properties of the intermediate layer material is studied and verified by experiments. This is a new method of measuring the normal acoustic absorption coefficient and sound transmission loss of thin layer materials.

Key words: acoustic absorption coefficient; thin layer material; transfer matrix; intermediate layer

算方法。

0 引 言

采用薄层材料是减少噪声污染的重要手段之一, 为了达到隔声的效果, 薄层材料在汽车和高铁上的应用十分广泛。实验室常用阻抗管测量材料的声学特性, 直接进行薄材料测量时, 材料的位置摆放比较困难。由于材料较薄, 在测量过程中材料有可能会歪倒, 使测量结果不准确; 测量薄膜类材料时, 在阻抗管中摆放更为困难。因此对薄层材料声特性测量及计算方法的研究很有必要。

本文以反映材料本身固有声学属性的声传递矩阵为基础, 构建实验与计算相结合的中间层材料传递矩阵计算混合模型, 并以海绵和基毡材料为例, 利用中间层传递矩阵方法, 计算并研究中间层材料的声特性, 以此方法来研究薄材料声特性的计

1 理论公式推导

1.1 传递矩阵法理论

当将材料样本放入阻抗管中进行研究时, 可以忽略材料的内部结构, 将其视为黑箱处理, 将其整体看作一个一维声学单元, 声波从单元前表面输入, 从后表面输出, 由于声波波动过程的因果关系, 材料前、后表面的声压和法向速度有必然的联系, 由以上分析可以将阻抗管中声波垂直入射材料表面的状态建模为线性四端网络模型, 如图 1 所示, 材料声场由声压和质点速度参数所决定, d 为材料

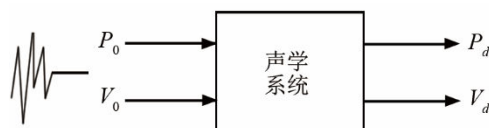


图 1 四端网络模型

Fig.1 Four-terminal network model

收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2018-11-02

作者简介: 汪婕(1995—), 女, 北京人, 研究方向为噪声与振动。

通讯作者: 冯涛, E-mail: fengt@th.btbu.edu.cn

的厚度。

根据四端网络模型可知，可以用一个二阶矩阵来描述模型内部的关系，即可获得材料前表面上的入射声压、声速和材料后表面上的透射声压、声速之间的关系表达式：

$$\begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=0} = T \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=d} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ V \end{bmatrix}_{x=d} \quad (1)$$

其中，矩阵 $T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}$ 即为所要研究的反映材料声学系统前后表面相互关系的传递矩阵。

矩阵测量原理图见图2。通过改变阻抗管管道右边端口处材料传递的声阻抗，可得到 N 组线性无关的参数：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix}_{x=0}, \begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix}_{x=d} \\ \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix}_{x=0}, \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix}_{x=d} \\ \dots \\ \begin{bmatrix} P_N \\ V_N \end{bmatrix}_{x=0}, \begin{bmatrix} P_N \\ V_N \end{bmatrix}_{x=d} \end{cases} \quad (2)$$

实际应用中只需构造出两种声场状态，就能够利用已知的两组声压、声速参数来求解出传递矩阵中的四个未知参数：

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix}_{x=d} \quad (3a)$$

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix}_{x=d} \quad (3b)$$

如图2所示，由平面声波的基本特性，可知各传感器位置处声压表达式为

$$P_1 = Ae^{-jkx_1} + Be^{jkx_1} \quad (4a)$$

$$P_2 = Ae^{-jkx_2} + Be^{jkx_2} \quad (4b)$$

$$P_3 = Ce^{-jkx_3} + De^{jkx_3} \quad (4c)$$

$$P_4 = Ce^{-jkx_4} + De^{jkx_4} \quad (4d)$$

能够计算出材料前后管道中的平面声波幅值 A 、 B 、 C 和 D ，从而求得 $x=0$ 处和 $x=d$ 出的声压声速表达式为

$$\begin{cases} P_0 = A + B \\ V_0 = \frac{A - B}{\rho_0 c_0} \end{cases} \quad (5a)$$

$$\begin{cases} P_d = Ce^{-jkd} + De^{jkd} \\ V_d = \frac{Ce^{-jkd} - De^{jkd}}{\rho_0 c_0} \end{cases} \quad (5d)$$

其中， $\rho_0 c_0$ 为空气媒质的特性阻抗。

在阻抗管一种末端状态下可以获得一组测量结果参数，改变阻抗管末端的终止状态，重新进行一次测量，便获得第二组测量结果参数，根据两次测量结果即可求解出该材料样本的传递矩阵。

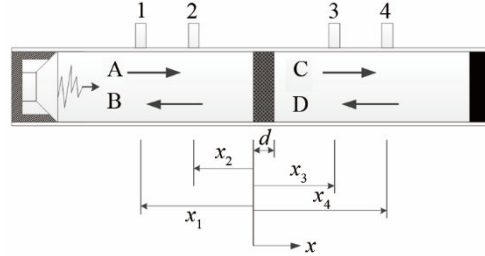


图2 材料传递矩阵测量原理图

Fig.2 Principle diagram of material transfer matrix measurement

$$T_{11} = \frac{V_2|_{x=d} P_1|_{x=0} - V_1|_{x=d} P_2|_{x=0}}{V_2|_{x=d} P_1|_{x=d} - V_1|_{x=d} P_2|_{x=d}} \quad (6a)$$

$$T_{12} = \frac{P_2|_{x=0} P_1|_{x=d} - P_1|_{x=0} P_2|_{x=d}}{V_2|_{x=d} P_1|_{x=d} - V_1|_{x=d} P_2|_{x=d}} \quad (6b)$$

$$T_{21} = \frac{V_1|_{x=0} V_2|_{x=d} - V_2|_{x=0} V_1|_{x=d}}{V_2|_{x=d} P_1|_{x=d} - V_1|_{x=d} P_2|_{x=d}} \quad (6c)$$

$$T_{22} = \frac{V_2|_{x=0} P_1|_{x=d} - V_1|_{x=0} P_2|_{x=d}}{V_2|_{x=d} P_1|_{x=d} - V_1|_{x=d} P_2|_{x=d}} \quad (6d)$$

将材料前、后表面处的声压和声速表达式(5a)、(5b)，代入到式(1)中，可以得到通常情况下的材料前、后表面各声波幅值与传递矩阵的关系式：

$$\begin{bmatrix} A+B \\ \frac{A-B}{\rho_0 c_0} \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ce^{-jkd} + De^{jkd} \\ \frac{Ce^{-jkd} - De^{jkd}}{\rho_0 c_0} \end{bmatrix}_{x=d} \quad (7)$$

1.2 中间层材料的传递矩阵

包含中间层的多层材料组成示意图可简化成如图3所示，2为中间层。

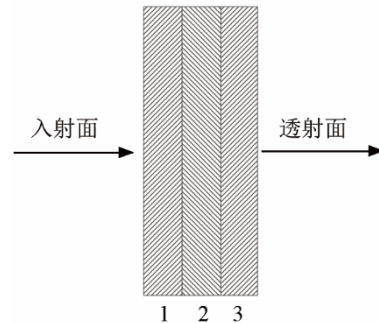


图3 包含中间层的多层材料示意图

Fig.3 Schematic diagram of the multilayer composites with an intermediate layer

对于中间层材料，材料的声特性应由整体材料以及前后两块材料的共同作用来体现，而其各层材

料的特性可由各自的传递矩阵来反映,假设图3中各个单层材料的传递矩阵为 T_1 、 T_2 、 T_3 ,整体材料的传递矩阵为 T 。因为声压和质点速度在多层材料的交界面上保持连续,上一层的透射声压和质点速度为下一层的入射声压和质点速度,则可由材料传递矩阵与材料前后表面声压、声速的关系式,推导出中间层材料的传递矩阵关系式:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} P_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix} = T_3 \begin{bmatrix} P_3 \\ V_3 \end{bmatrix} \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} P_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \begin{bmatrix} P_3 \\ V_3 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P_3 \\ V_3 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 = T \\ T_2 = T_1^{-1} \cdot T \cdot T_3^{-1} \end{matrix} \quad (8)$$

需要注意的是,当被测材料的隔声量过大时,和上游相比下游声场稍弱,对材料的声特性测量会产生小范围的误差;当材料为非局部作用材料时,弯曲振动也会影响测量结果。

1.3 计算材料声特性

(1) 吸声系数

通常所指的材料吸声系数,是建立在材料背衬有不可穿透层情况下的吸声情况。在这样的条件下,相当于材料后表面紧贴刚性壁,后表面的接触面处质点速度为0,即 $V_d=0$,则可对式(7)进行如下变换:

$$\begin{bmatrix} A+B \\ A-B \\ \rho_0 c_0 \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ce^{-jkd} + De^{jkd} \\ 0 \end{bmatrix}_{x=d} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1+r \\ 1-r \\ \rho_0 c_0 \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} te^{-jkd} + \frac{De^{jkd}}{A} \\ 0 \end{bmatrix}_{x=d} \quad (9)$$

其中, $r=\frac{B}{A}$ 为声压反射系数, $t=\frac{C}{A}$ 为声压透射系数。

求解式(9)可得 $r=\frac{T_{11}-\rho_0 c_0 T_{21}}{T_{11}+\rho_0 c_0 T_{21}}$,即刚性壁条件下材料的声压反射系数,再由吸声系数计算公式 $\alpha=1-|r|^2$,就可以得到所要求的材料吸声系数 α 。

(2) 隔声量

声波传播到材料时,从材料前表面射入,从后表面射出,可以考虑一种理想情况,声波透过材料后,传向无限远处,不会再生反射反穿回材料,材料的隔声量预测一般就是基于这种材料后无反射声波的情况,即材料处于无回声的消声末端条件

下,由上文的材料传递矩阵测量原理可知,此种情况下,阻抗管下游不会存在反射声波 De^{jkd} ,则传递矩阵关系式(7)可进行变换如下:

$$\begin{bmatrix} A+B \\ A-B \\ \rho_0 c_0 \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ce^{-jkd} \\ Ce^{-jkd} \\ \rho_0 c_0 \end{bmatrix}_{x=d} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1+r \\ 1-r \\ \rho_0 c_0 \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} te^{-jkd} \\ te^{-jkd} \\ \rho_0 c_0 \end{bmatrix}_{x=d} \quad (10)$$

式中, $r=\frac{B}{A}$ 为声压反射系数, $t=\frac{C}{A}$ 为声压透射系数,求解式(10)可得 $t=\frac{2e^{jkd}}{T_{11}+T_{12}/\rho_0 c_0+\rho_0 c_0 T_{21}+T_{22}}$ 。根据隔声量计算公式 $R=20 \lg \left| \frac{1}{t} \right|$,便可得到材料的隔声量 R 。

由此,可在理论上实现通过阻抗管测量材料前后声压信息,然后求解出材料的传递矩阵,进而通过传递矩阵的元素计算出所关心的材料吸声系数和隔声量。

2 实验过程

实验使用 B&K 公司的 4206T 型阻抗管组,选用 3560C 型智能数据采集及信号发生器系统模块,并配合 2716C 型功率放大器,完成信号的发声和采集;软件部分选用 7770 型 FFT 分析模块,使用其中的通道间互谱运算功能,为本程序计算提供数据支持,对应实验系统所使用的传感器类型为 1/4 in 的声压型 4187 传声器;配套使用 2670 型前置放大器,共使用 4 组;实验过程中还需使用 B&K4231 型声校准器,对传感器进行校准。

实验平台的各设备连接情况如图4所示。

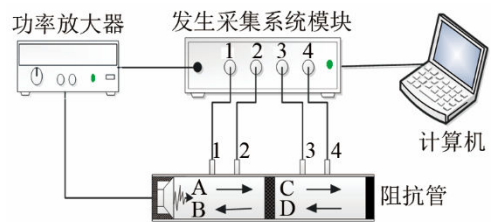


图4 实验平台设备连接示意图
Fig.4 Schematic diagram of device connection on experimental platform

对于中间层材料声特性计算的实验研究,为了获得实验结果,并对本文方法计算中间层材料声特性结果的准确性进行验证,此部分实验研究从两方面进行:

(1) 中间层材料传递矩阵计算实验

通过单层材料声特性的测量方法,先获得前材

料、组合材料和后材料的传递矩阵，通过 Matlab 软件编程，求出前材料和后材料传递矩阵的逆矩阵，再按照前材料-组合材料-后材料的顺序相乘，获得相应的中间层材料的传递矩阵，进而通过程序预测出材料声学特性。

(2) 阻抗管一般测量方法实验

使用阻抗管经典测量方法，直接测量待测材料的声学特性。实验方法主要针对的是使用传递函数法对材料吸声系数的测量以及传递矩阵法测量材料隔声系数，用于验证本文所提出的中间层材料传递矩阵算法的准确性。

选择测试的中间层材料类型为海绵和基毡，前后材料选择表面平整的海绵类和毡类材料，如图 5 所示，材料属性如表 1 所示。对所选材料进行组合，获得如表 2 中所示的两种材料组合情况，对其分别进行上文所述的两方面实验。

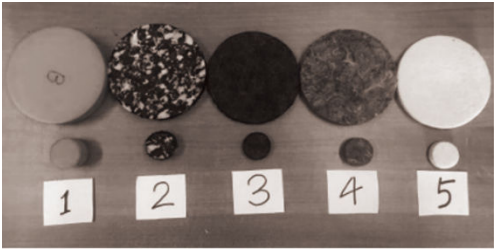


图 5 不同材料的样品实物图
Fig.5 Samples of different materials

表 1 样本材料属性表
Table 1 Material properties of samples

样本序号	材料名称	厚度/m	面密度/(kg·m ⁻²)
1	海绵	0.025	26.27
2	再生纤维毡	0.013	0.90
3	基毡	0.007	0.70
4	再生聚氨酯	0.015	1.50
5	原生纤维毡	0.010	1.50

表 2 测试的复合材料组成情况
Table 2 Composition of tested composites

样本序号	材料组合情况
组合 1	再生聚氨酯+海绵+再生纤维毡
组合 2	再生聚氨酯+2 块海绵+再生纤维毡
组合 3	海绵+基毡+海绵
组合 4	海绵+2 块基毡+海绵

3 实验结果与分析

(1) 低频段(100~1 600 Hz)结果分析

将两种方法得到的吸声系数和隔声量进行对比分析，从图 6 和图 7 的多组结果中可以发现，两种计算结果有较好的一致性，小范围的误差与材料

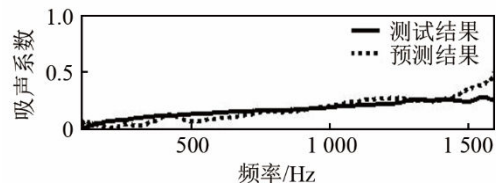
实际复合时的测量操作有关，因为每次的测量操作都稍有不同，会对每次的测量效果造成影响，计算结果存在小范围的差异，但计算结果的整体趋势都比较理想。

(2) 高频段(1 000~6 400 Hz)结果分析

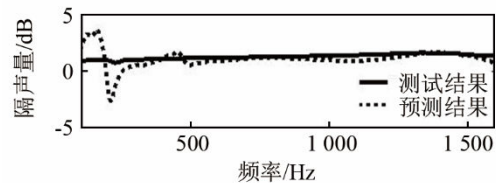
将两种方法得到的吸声系数和隔声量进行对比分析，从图 8 的两组结果中可以发现，高频测量结果的吻合度相较于低频有所降低，但计算结果的整体趋势都比较理想。小范围的误差与材料实际组合时的测量操作有关，小管测量时，管道长度较短，材料的安装容易产生较大误差，所以应选择厚度小且表面平整的材料。

(3) 前后材料互换后的结果对比

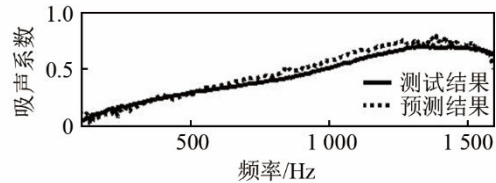
在计算海绵材料时，组合材料前中后材料按顺序为再生聚氨酯(Regeneration Polyurethane, RPU)一海绵一再生纤维毡，将前材料与后材料位置互换，即顺序为再生纤维毡一海绵一RPU，分别用中间层材料计算方法得到海绵的声特性。将两种方法得到的吸声系数和隔声量进行对比分析，结果如



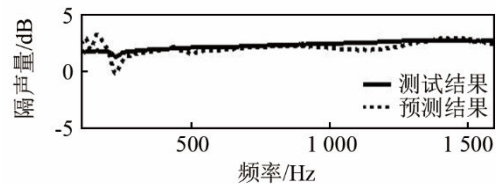
(a) 单层海绵的吸声系数



(b) 单层海绵的隔声量



(c) 双层海绵的吸声系数



(d) 双层海绵的隔声量

图 6 低频段海绵材料的测量与预测结果对比
Fig.6 Comparison between measurement and prediction results of sponge materials at low frequencies

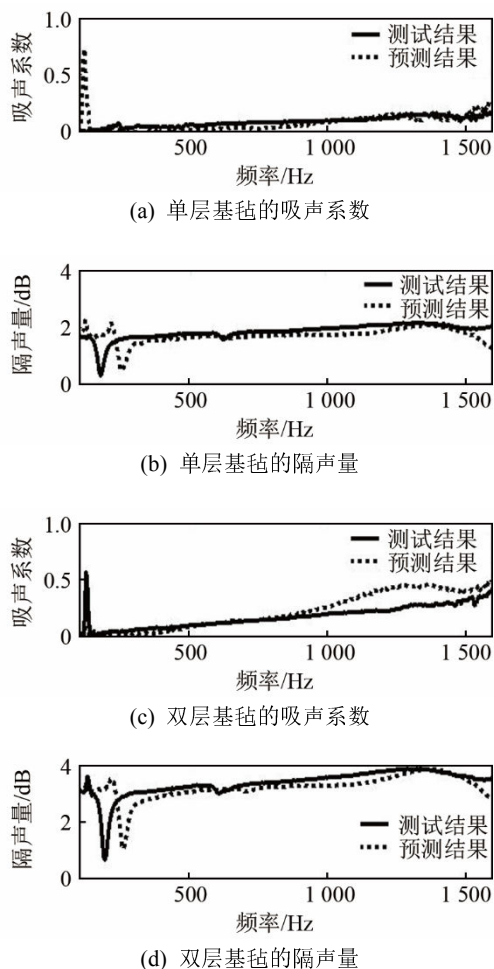


图 7 低频段基毡材料的测量与预测结果对比
Fig.7 Comparison between measurement and prediction results of base felt materials at low frequencies

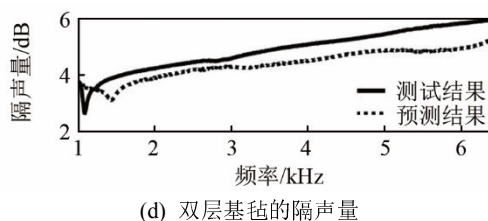
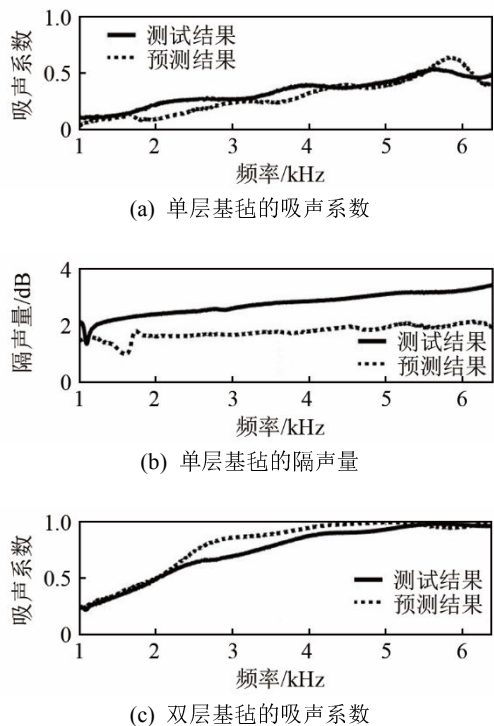


图 8 高频段基毡材料的测量与预测结果对比
Fig.8 Comparison between measurement and prediction results of base felt materials at high frequencies

图 9 所示,可以看出两种材料组合顺序计算出的海绵的声特性基本一致。由此可以说明,中间层材料算法与前后材料的类型无关,在进行中间层材料的测量计算时,前后材料可按需要以及现有的材料条件来选择。

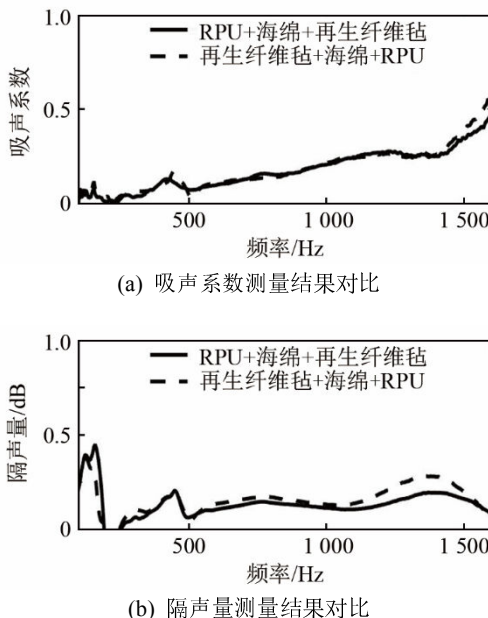


图 9 前后层材料互换的测量结果对比
Fig.9 Comparison of measurement results of material exchange between front and rear layers

4 结 语

在应用阻抗管测量薄材料的声特性时,薄材料表面难以保持平整,更难以与阻抗管轴线保持垂直,本文通过构建实验与计算相结合的中间层材料的声特性计算模型,以基毡和海绵材料为例,通过实验研究并验证中间层材料声特性计算方法的准确性。在 100~1600 Hz 频段,计算预估结果与实测结果基本一致,在 1000~6400 Hz 频段,计算预估结果与实测结果一致性有所降低,但变化趋势保持一致。该方法较好地解决了较薄材料及薄膜类材料声特性测量和计算的难题。此方法也可用来评估两个材料之间的粘接胶对组合材料声特性的影响。

对实际噪声控制工程应用有一定参考价值，也为材料吸声特性的优化设计提供了研究手段。

参 考 文 献

- [1] UTSUNO H, TANAKA T, FUJIKAWA T, et al. Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, **85**(2): 637-643.
- [2] 万翱, 吴锦武. 传递矩阵法分析复合材料层合板的传声损失[J]. 噪声与振动控制, 2013, **33**(1): 45-50.
WAN Xuan, WU Jinwu. Analysis of sound transmission loss of laminate composite plate using transfer matrix method[J]. Noise and Vibration Control, 2013, **33**(1): 45-50.
- [3] 刘新金, 刘建立, 徐伯俊, 等. 分层多孔材料吸声结构的性能分析[J]. 振动与冲击, 2012, **31**(5): 106-110.
LIU Xinjin, LIU Jianli, XU Bojun, et al. Acoustic analysis for a sound-absorbing structure with multi-layered porous material[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, **31**(5): 106-110.
- [4] 张振国, 张秀丽, 张娜, 等. 传递矩阵-驻波管法研究材料隔声性能[J]. 材料导报, 2010, **24**(10): 118-121.
ZHANG Zhenguo, ZHANG Xiuli, ZHANG Na, et al. Study on acoustic transmission loss of materials with transfer matrix - impedance tube methods[J]. Materials Review, 2010, **24**(10): 118-121.
- [5] 姜燕坡. 应用于高速列车的多层复合材料声学性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
JIANG Yanpo. An investigation on acoustical performance of multilayer composite materials used in high speed train[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [6] 冯涛, 王晶, 刘斌, 等. 用传递矩阵法计算多层泡沫材料的法向吸声系数[J]. 机械设计与制造, 2012(2): 35-37.
FENG Tao, WANG Jing, LIU Bin, et al. Calculation of the normal absorption coefficient of the multilayer foam material by transfer matrix[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(2): 35-37.
- [7] 杨梦露, 冯涛, 贾玉麒, 等. 空气背衬条件下泡沫材料法向吸声系数混合计算方法研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, **38**(2): 42-44.
YANG Menglu, FENG Tao, JIA Yuqi, et al. Mixed calculation method for normal absorption coefficient of foam material under air backing[J]. Noise and Vibration Control, 2018, **38**(2): 42-44.
- [8] CHUNG J Y, BLASER D A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, **68**(3): 914-921.

美国声学学会东亚-东南亚地区分会在香港举行成立大会

美国声学学会(Acoustical Society of America, ASA)东亚-东南亚地区分会于2019年4月11日在香港举行成立大会,这是美国声学学会在美国本土以外的第一个分会。地区分会旨在促进该地区的声学事业发展,鼓励声学各领域研究成果及经验的交流,为推动声学知识传播做贡献。它拥有中、日、韩、新加坡等国的会员600余名,约占全体7000余会员的8.6%。ASA本届会长(2018-2019)Lily M. Wang教授和ASA国际联络部主席Brightte Schulte-Fortkamp教授分别发来视频贺词。我国声学家、ASA Fellow(会士)王季卿教授被选为首任分会会长。他在大会致开幕词后,又做了“Acoustics of Traditional Chinese Xiqu-Opera Theatres(中国传统戏场音质)”的专题学术讲演。

美国声学学会ASA是充满活力和历史悠久的声学团体,成立于1929年,是世界上成立最早和规模最大的声学专业学术团体。它涵盖了物理声学、工程声学、生物声学、建筑声学、海洋声学、音乐声学、生理和心理声学、超声学等近20个分支学科。ASA每年举行两次规模在800人左右的学术报告会,会前刊发论文摘要及公布详细日程已成惯例,便于与会者(不限于会员)事先安排,对与会学生另有优惠条件或资助。这些均值得学习。ASA还常与世界其它声学组织联合举办年会,以加强国际交流。例如:2012年5月13~18日与中国声学学会第九届年会、第十一届西太平洋地区声学会议和香港声学学会年会合办了超过2000人的大型学术活动,论文报告总数逾千。ASA创办学报(月刊)90年,全年12期,加上年会增刊,总页数已达七八千之多。论文质量和数量均为该学术领域的世界翘首。学会还出版了《Acoustics Today》和《ECHOES》两种季刊。



王季卿教授致大会开幕词