复 合 材 料 学 报　　第22 卷　第5 期　10 月　2005 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 22　No. 5　October　2005

文章编号: 1000-3851(2005) 05-0094-06

玻璃纤维织物/ 聚氯乙烯复合材料隔声性能

傅雅琴[1,*]，倪庆清[2]，姚跃飞[1]，肖山宏[1]，陈文兴[1]，刘冠峰[1]

(1. 浙江理工大学 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室，杭州 310018；
2. 日本京都工艺纤维大学 先端ファイブロ科学，日本京都 606-8585)

摘　要:　采用常压浇注工艺，制备了一种超薄、轻量、柔韧的复合材料——玻璃纤维织物/ 聚氯乙烯复合材料。利用双通道声学分析仪，分析研究了其隔声性能；利用SEM、DMA 等，分析研究了该材料的结构和力学性能等。结果表明：该复合材料的隔声性能优于单一材料的隔声性能，在测试范围内，其隔声量超出了质量定律的预测效果，显示了该材料良好的隔声性能。

关键词:　隔声材料；复合材料；玻璃纤维织物；聚氯乙烯

中图分类号:　TB 332　　**文献标识码**: A

SOUND INSULATION PERFORMANCE OF A GLASS FABRIC/ PVC COMPOSITE MATERIAL

FU Yaqin[1,*], NI Qingqing[2], YAO Yuefei[1], XIAO Shanhong[1], CHEN Wenxing[1], LIU Guanfeng[1]

(1. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology of Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Division of Advision Fibro Science, Kyoto Institute of Technology, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan)

Abstract:　A glass fabric/ polyvinyl chloride (PVC) composite material with super thin thickness, light weight and toughness, was manufactured with the infusion technology under normal pressure. The sound insulation performance of this novel material was determined with a two-channel acoustic analyzer. The structure and mechanical properties were also investigated via SEM, DMA, etc. The results show that the sound insulation properties of the composite material are better than those of the materials with single components, and the loss of the sound transmission through this material exceeds that predicted by the mass law, indicating the composite's good sound insulation properties.

Keywords:　sound insulation; composite materials; glass fabric; PVC

噪声污染不仅影响人们的生活质量，也影响设备的寿命，是环境污染的要因之一。目前，防止噪声污染的主要手段之一是用隔声材料隔断噪声。而材料的隔声性能与材料本身的刚性、质量、阻尼性能及声波的频率、声源位置和声源性质等有很大的关系。为了有效隔断噪声，传统的隔声材料一般都十分笨重，对可加工性、使用范围等都有很大的影响。因此，人们迫切期待着轻量、超薄、加工性好的隔声材料，以满足不同场合的需要。但由于轻量、超薄材料的低阻尼量及低自身重量(质量)，使其很难有良好的隔声效果[1,2]。因此，如何研制轻量、超薄、柔软的隔声材料，成为各国学者共同关心的课题[3,4]。玻璃纤维织物具有良好的力学性能和柔韧性；又因其疏松结构而在织物的微孔中滞留有空气；玻璃纤维具有较大的比重和声波传播速度，使其有良好的声阻抗(材料的比重和声波在该材料中传播速度的积)。声波从声阻抗较小的物质入射到声阻抗较大的玻璃纤维表面时，因两者较大的阻抗差而发生较多的反射[5]。当声波进入玻璃纤维织物内部时，由于声场的作用，引起空隙间的空气振动，由于摩擦、空气粘滞阻力等，使一部分声能转化为热能而被吸收[6]。但由于玻璃纤维织物有较大的透

收稿日期: 2004-12-07；收修改稿日期: 2005-04-11
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50173033)
通讯作者: 傅雅琴，副教授，中国复合材料学会会员，会员编号为E23670004HY，主要从事功能性复合材料及复合材料界面的研究
E-mail: fuyaqin@hotmail.com

气性，单独作为隔声材料使用几乎是不可能的。为此，在本研究中，针对声波的传播特点，用玻璃纤维织物和E型聚氯乙烯树脂制备了具有良好隔声性能的超薄、轻量、柔韧的玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料，并对其结构等进行了分析。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

天津化工厂生产的E型聚氯乙烯树脂(EPVC) P440；杭州汇普化工厂生产的邻苯二甲酸二辛酯(DOP)；桐乡市化工有限公司生产的环氧大豆油(ESO)；杭州玻璃集团有限公司生产的EW300型玻璃纤维织物，该织物面密度为298.7 g/m^2，表观厚度为0.30 mm。

1.2 试样的制备

将EPVC、DOP、ESO按照质量比100∶130∶7的比例混合搅拌均匀，制取粘合剂待用。将粘合剂浇注到织物上后，在165 ℃恒温箱中烘燥15 min，迅速冷却即可制得。

1.3 试样隔声性能的测试

采用北京声望公司的BSWA VS302 USB双声学分析仪测试隔声性能，用Spectra LAB软件分析数据。声望VS302 USB系统、无指向性声源和功率放大系统按照图1连接。参照ISO R140-1，ISO R140-170建筑及建筑构件的隔声测量的标准进行测量。选择A计权网络，声压级为80 dB、90 dB的粉红背景噪声源。其中的静音箱体积为：1000 mm×1000 mm×1000 mm，测试样的尺寸如表1。

声音的取样频率取“48000”；抽取速率选择位取“1”；快速傅立叶变换样本数取“2048”。

数据计测采用常用的1/3倍频程。所谓1/3频程是指：把20～20000 Hz的可听声频范围分为几个段落也叫频带，使每一频带的上限频率比下限频率高一倍，即频率之比为2，这样划分的每一个频带称1倍频程，简称倍频程。为了简明，每个倍频程用其中心频率f_c来表示：$f_c=(f_uf_d)^{1/2}$(Hz)。f_u和f_d分别为该频程的上限频率和下限频率。

如果在一个倍频程的上限频率、下限频率之间再插入两个频率，使4个频率之间的比值由小到大，依次排列。这样将一个倍频程划分为3个频程，称这种频程为1/3倍频程，每一个1/3倍频程也用其中心频率来表示。

首先，测试在没有试样的情况下噪声的自由衰减量及原始声压级降；然后，把试样固定在测试孔上，测试此时的声音衰减量(总衰减量)及总声压级降。试样对声音的实际衰减量就为总衰减量减去自由衰减量；试样对声音的实际声压级降为总声压级降减去原始声压级降。

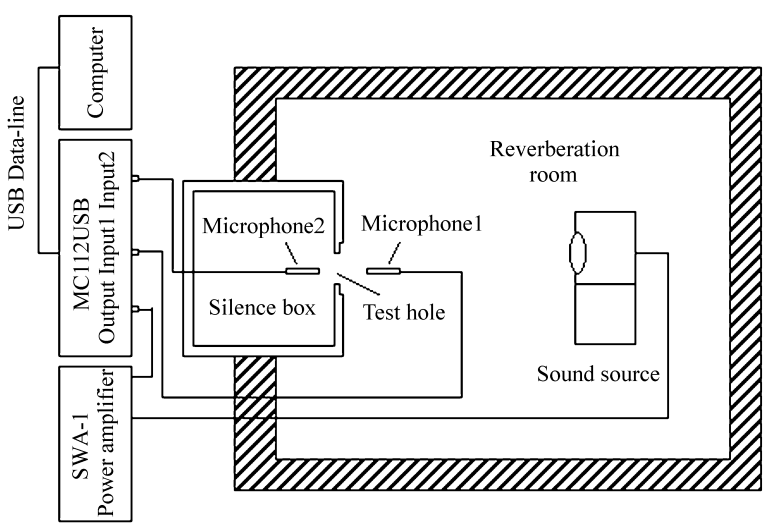


图1 隔声测试系统

Fig. 1 The measurement system of sound insulation

1.4 结构观察

用日本电子有限公司生产的JSM-5610LV扫描电子显微镜对试样的结构进行观察。电压：15 kV。

1.5 动态力学性能及柔软性测试

在美国Perkin Elmer公司生产的Pyris Diamond DMA机上进行动态力学性能测试。试样块的尺寸为20 mm×10 mm×0.35 mm。测试温度范围为-150～170 ℃，升温速率为2 ℃/min，频率为10 Hz。

参照日本工业标准JIS-L1096，8.19.3的B法测定材料的刚软度。测试示意图如图2所示。试样的尺 为150 mm×20 mm×0.5 mm，材料的刚度用下式进行计算。刚度越小，则柔韧性越好。

$$B=\frac{WL^4}{8\delta} \qquad (1)$$

式中：B为材料的刚度(N·cm^{-2})；W为试验片单位面积的重量(N/cm^2)；δ为试验片的弯曲长度(cm)；L为试验片的被测试长度(cm)。

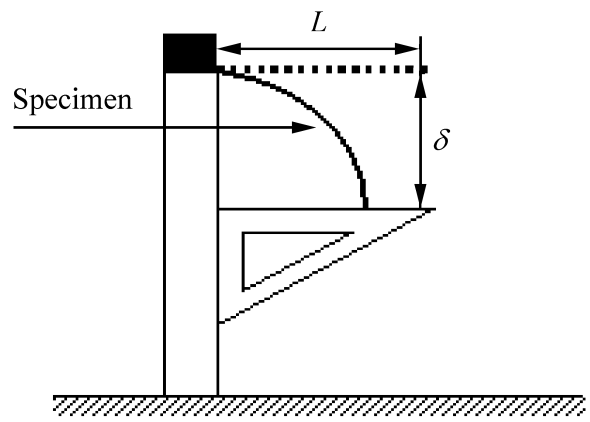


图2 柔韧性测试示意图

Fig. 2 The schematic of pliable test

2　实验结果及分析

2.1　材料的结构与力学性能

材料的面密度、厚度等参数见表1。

表1　样品的有关参数

Table 1　Parameters of samples

	Glass fabric	PVC resin	Composite
Thickness/ mm	0.30	0.77	0.50
Surface density/ (kg · m^{-2})	0.2987	0.8612	0.6774
Glass fibre volume fraction/ %	100	0	23.2

从表1 中可以看出，该复合材料中纤维体积分数为23.2%，按实验中PVC 的面密度计算，其空隙率为10% 左右。该复合材料的厚度仅为0.5 mm，面密度仅为0.6774 kg/ m^2，与一般隔声材料厚度为几厘米相比，显得非常薄，与一般隔声材料面密度为几千克～十几千克相比，显得非常轻。且由于玻璃纤维的存在而有很好的力学性能。

样品的柔韧性测试结果如表2。可以看出，其刚性仅为0.33 N ·cm^{-2}，其弯曲量达到了测试长度的80% 以上。显示了该材料良好的柔韧性。

表2　玻璃织物/聚氯乙烯复合材料的刚柔性

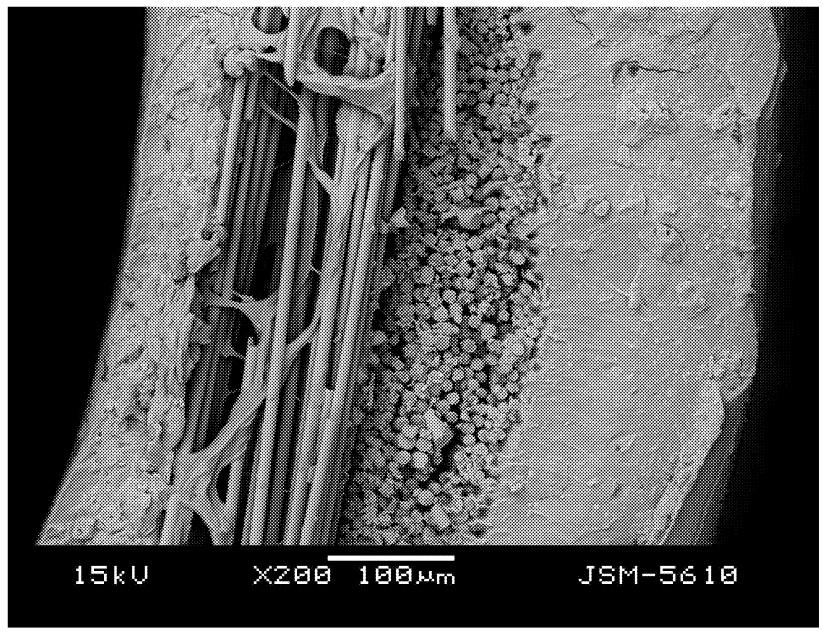
Table 2　Flexibility of the glass fabric/ PVC composite material

δ/cm	W/(kg · m^{-2})	L/cm	B/(N ·cm^{-2})
12.5	0.6774	15.0	0.33

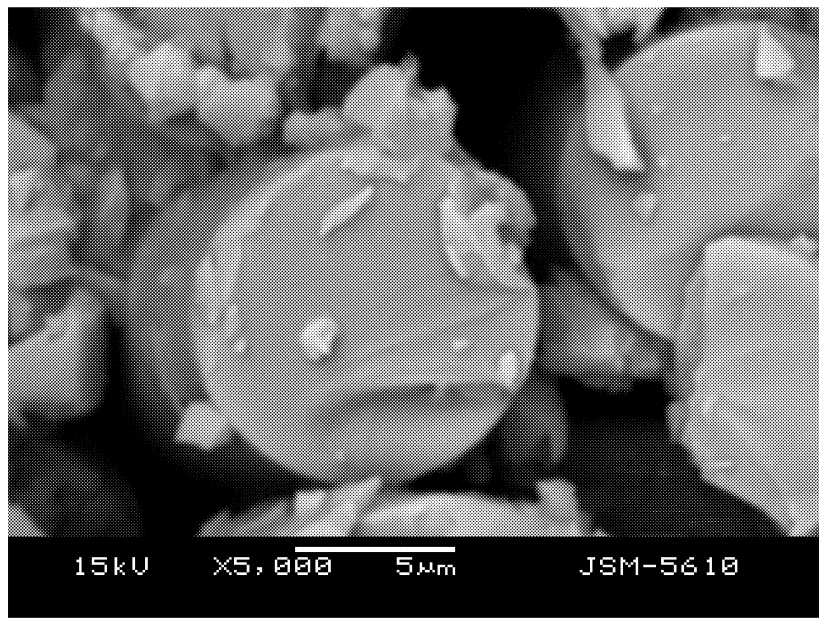
图3 为该材料的SEM 照片，其中图3(a) 为整个材料的截面图，图3(b) 为截面的局部图。从图3(a) 中可以看出，玻璃织物的两面有PVC 涂层，复合材料的厚度为0.5 mm 左右，与游标卡尺测量的厚度一致。

从图3(a) 和图3(b) 中可以看到，复合材料内部存在着很多的空隙。由于该材料是在常压下制备的，在空隙中存在的应为空气。即该材料为内部分布着空隙的玻璃纤维织物/ 聚氯乙烯复合材料。

图4(a) 和图4(b) 分别为聚氯乙烯树脂和玻璃纤维织物/ 聚氯乙烯复合材料的动态粘弹性能测试结果。E′为材料的动态储能模量，E″为材料的损耗模量。tan δ为损耗因子，也叫阻尼因子。从图4 中可以看出，玻璃纤维织物/ 聚氯乙烯复合材料的动态储能模量比聚氯乙烯树脂有了明显的提高。这与文献[8] 的结果一致。从图4 中的tan δ曲线可以看出，由于加入了玻璃纤维织物，玻璃纤维织物/ 聚氯乙烯复合材料的tan δ曲线的峰值向高温方向移动。玻璃纤维织物/ 聚氯乙烯复合材料在常温下比基体聚氯乙烯树脂有更高的tan δ值，使其在常温下保持着较好的阻尼性能，显示其作为隔声材料的可行性和稳定性。



(a) Cross section



(b) Broken-out section

图3　玻璃纤维织物/ 聚氯乙烯复合材料截面的SEM 照片

Fig. 3　SEM photographs of the glass fabric/ PVC composite material

2.2　材料的隔声性能

隔声材料的隔声性能评价，一般用声音的透过率(τ) 或声音透过衰减量(R) 来表示。即

$$\text{透过率} \qquad \tau = \frac{I_t}{I_i} \tag{2}$$

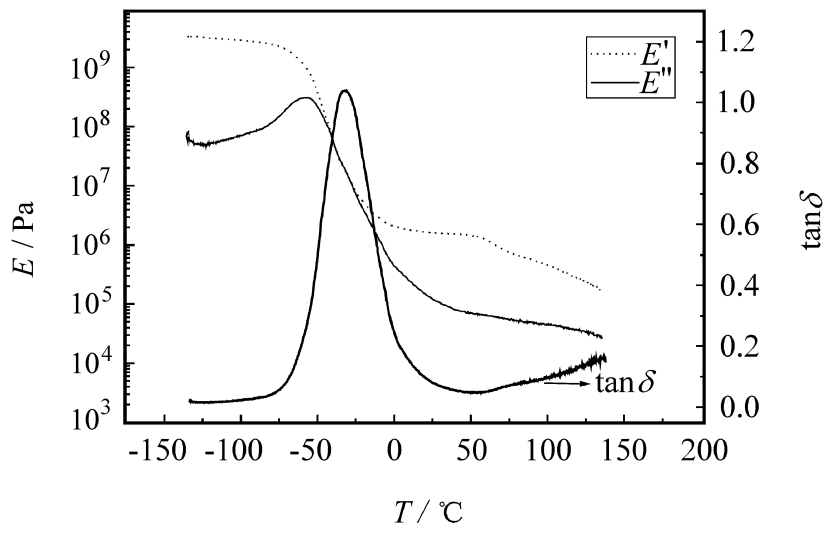
式中：I_i 为声波的入射强度；I_t 为声波透过隔音材料后的透过强度。

声音透过衰减量为

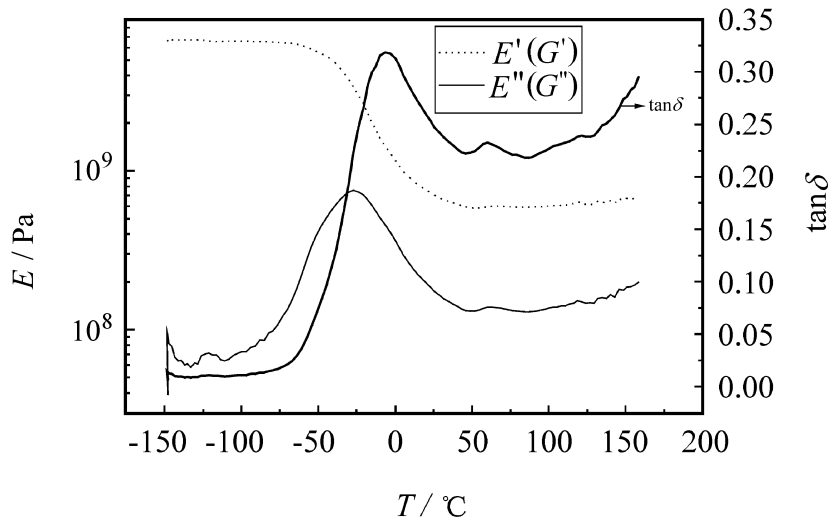
$$R = 10\lg\frac{I_i}{I_t} = 10\lg\frac{1}{\tau} = 10\lg\frac{E_i}{E_t} \tag{3}$$

式中：E_i 为声波的入射能量；E_t 为声波的透过能量。

不同频率及不同噪声量下，几种材料的声音透



(a) PVC resin



(b) Glass fabric/PVC composite material

图4 样品的DMA 曲线

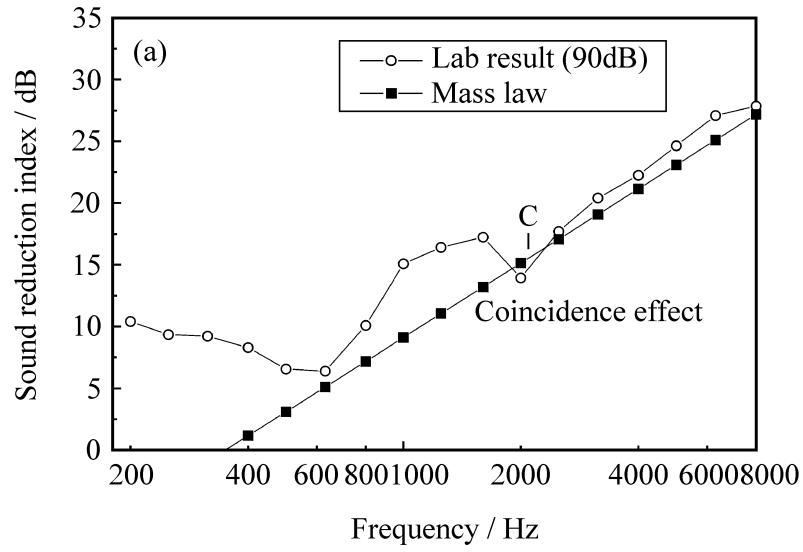
Fig. 4 Thermodynamic mechanical properties of samples

过衰减量测试结果如图5、图6 和图7。其中图5 为复合材料、图6 为玻璃纤维织物、图7 为聚氯乙烯树脂的隔声曲线。图5(a) 、图6(a) 和图7(a) 各为90dB 下噪声量的隔声量。图5(b) 、图6(b) 和图7(b) 各为80 dB 下噪声量的隔声量。图中的曲线为实际测定的声音衰减量, 直线为用质量法预测得到的结果。所谓的质量法是指声音透过量与材料的质量大小有关, 质量越大, 隔声性能越好。一般用来预测材料的隔声性能, 其声音透过衰减量可近似地由下式得到[1]:

$$R = 20\lg(mf) - 47.5 \qquad (4)$$

式中: R 为声音透过衰减量(dB) ; m 为单位面积质量(kg/ m^2) ; f 为频率(Hz) 。

从图5、图6 和图7 中可以看出, 试样隔声量(声音衰减量) 的大小几乎与噪声量的大小无关, 而与频率的大小有关, 频率越大, 其隔声量越大。其趋势与质量法的预测类似。从图5、图6 中还可以看出, 玻璃纤维织物/ EPVC 复合材料隔声性能明显高于纯玻璃纤维织物。从图5 和图7 中可以看出, 虽然PVC 树脂的厚度和面密度大于复合材料,



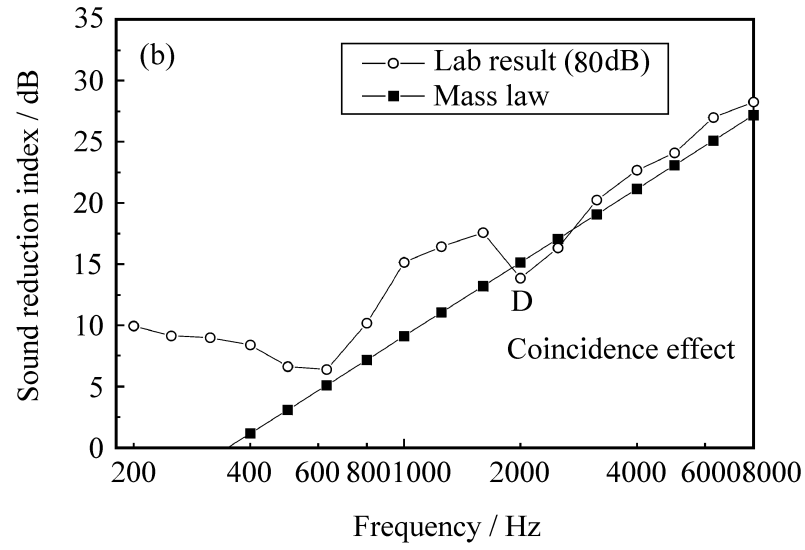


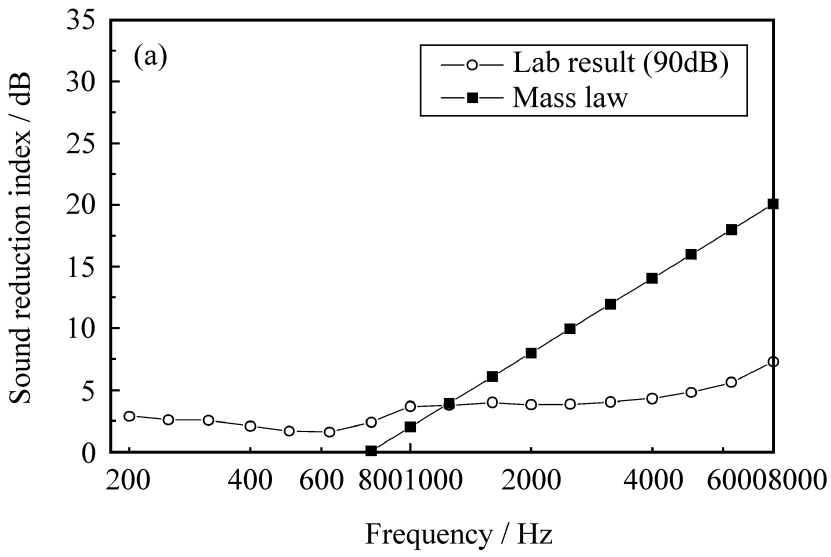
图5 1/ 3 倍频程玻璃纤维织物/ EPVC 复合材料衰减量 频率曲线

Fig. 5 The transmission loss of glass fabric/ EPVC composite material (1/ 3 octave band center frequency (Hz))

但其隔声量弱于复合材料。表明复合材料的隔声性能优于PVC 树脂。另外, 从图5、图6 和图7 中还可以看出, 在整个测试范围内, 只有复合材料的试样, 其隔声量大于质量法的预测值, 显示其优异的隔声性能。

这一方面是由于纯玻璃纤维织物有较大的透气性, 另一方面是由于聚氯乙烯是一种粘弹性材料, 具有隔声及防震的作用。一般说来, 入射的声波在复合材料的内部将发生反射、散射、折射和衍射。由于聚氯乙烯基体与玻璃纤维之间有较大的声阻抗差异, 当声波遇到玻璃纤维时将发生多次折射及散射, 使得传播路径增大、声能消耗增多[7]; 同时, 声波在聚氯乙烯基体中传播碰到这些玻璃纤维时相当于遇到障碍物, 必须绕过玻璃纤维发生衍射, 从而也使声波的传播路径加长而消耗掉声能。

另一方面, 当在E 型聚氯乙烯树脂中加入玻璃纤维后, 限制了树脂大分子链的运动, 应变、应力的增加相对滞后, 材料的模量明显地提高, 其介质损耗和玻璃化转变温度也相应地发生改变。当声波入射时, 在材料中传播要克服更大的阻力, 使得声能消耗增大, 达到隔声的效果。



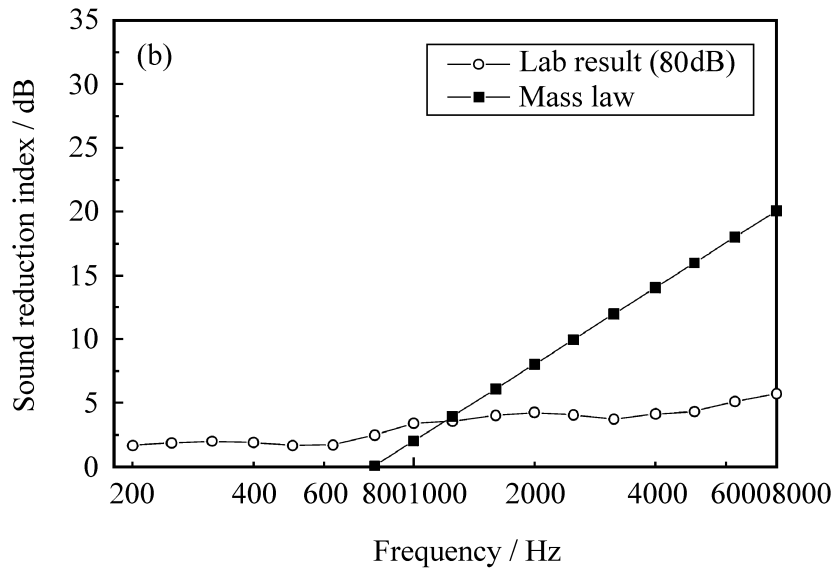


图6　1/3 倍频程玻璃纤维织物衰减量 频率曲线

Fig. 6　The transmission loss of glass fabric textile (1/3 octave band center frequency (Hz))

另外，从SEM 图(图3) 中可以看出，该复合材料内部存在着大量的空隙。研究表明[9]：粘弹性材料中的微小空洞能够显著改变声波的传播性质，因为空洞不仅能使压力波在传播过程中产生散射，还能引起变形和共振，使一部分声能转化为热能而被吸收。

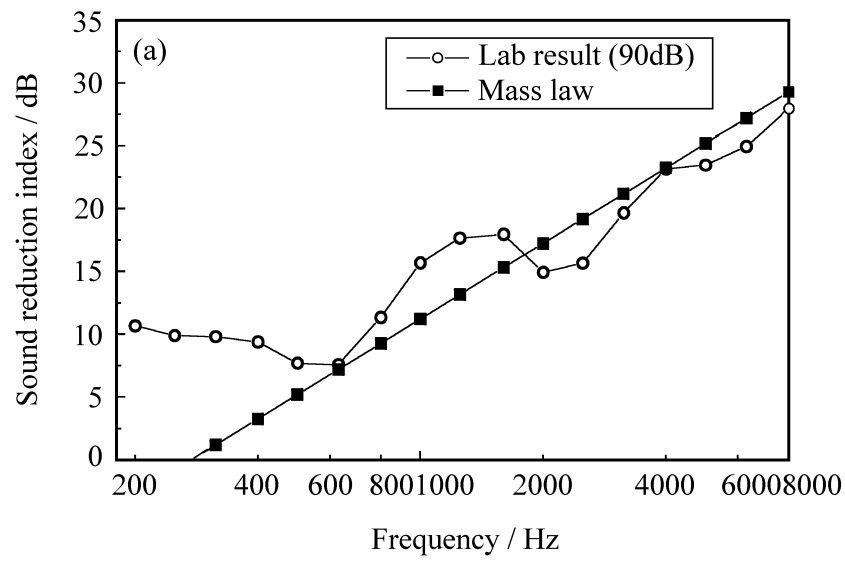
另外，由于声波在固体材料中的传播速度C 与材料的刚性E 和密度ρ有关，即

$$C = (E/\rho)^{1/2} \quad (5)$$

显然在玻璃纤维中的传播速度比在EPVC 中的传播速度大。由于固体材料的声阻抗Z 为材料密度ρ和声波传播速度C 的积，即

$$Z = \rho C \quad (6)$$

当声波从一种物质进入另一种物质时，由于声阻抗的不同，有一部分发生反射。由于玻璃纤维的声阻抗比EPVC 大，而空气的声阻抗比EPVC 小，当声波碰到玻璃纤维或内部空隙时，在界面一部分发生了透射，一部分发生了反射。由于EPVC 是高阻尼材料，反射部分的波由于运动路径的增大，而发生更多的能量消耗。也就是说，由于复合作用及



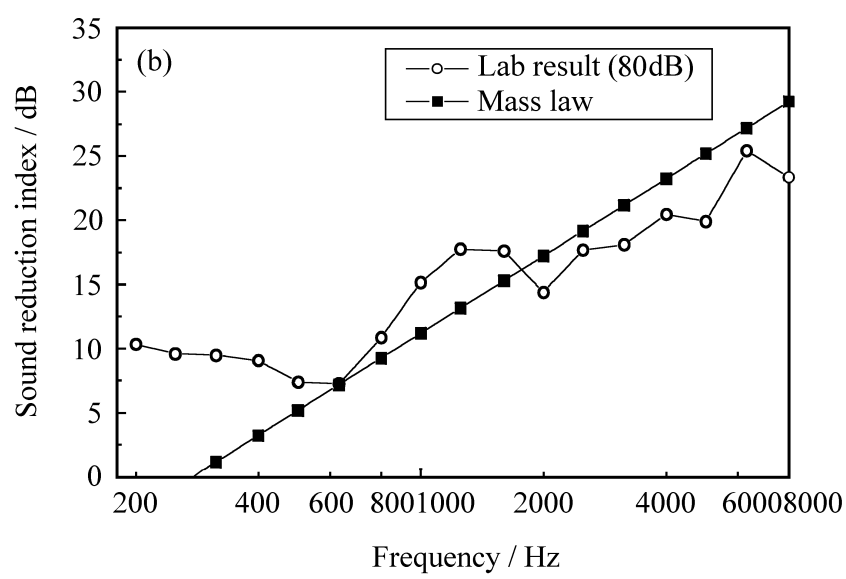


图7　1/3 倍频程PVC 树脂衰减量 频率曲线

Fig. 7　The transmission loss of PVC resin (1/3 octave band center frequency (Hz))

内部空隙的存在，使隔声性能加强了。

2　结　论

(1)　以E 型聚氯乙烯、玻璃纤维织物为原料，加入适当的其他添加剂，通过适当的复合工艺，制备了玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料。

(2)　测试表明该材料具有很好的隔声效果，厚度仅为0.5 mm、面密度为0.678 kg/m^2 的该复合材料，其隔声性能超过了10 dB。它改变了传统隔声材料以高密度、大厚度来增加隔声效果的方法。且在测试范围内其隔音性能大于质量预测值。

(3)　该材料具有轻质量、超薄厚度及高柔韧等优点，是一种具有很好发展前景的隔声材料。

参考文献:

[1]　Tadeu A, António J, Mateus D. Sound insulation provided by single and double panel walls —— A comparison of analytical solution versus experimental results [J]. Applied Acoustics, 2004, 65(1): 15-29.

[2]　Viveiros E B, Gibbs B M, Gerges S N Y. Measurement of

sound insulation of acoustic louvers by an impulse method [J]. Applied Acoustics, 2002, 63(12): 1301 - 1313.

[3] Hashimoto N, Katsura M, Nishikawa Y. Experimental study on sound insulation of membranes with small weights for application to membrane [J]. Applied Acoustics, 1996, 48(1): 71 - 84.

[4] Vaicaitis R, Slazak M. Noise transmission through stiffened panels [J]. Journal of Sound and Vibration, 1980, 70(3): 413 - 426.

[5] 赵汉中. 粘弹性材料覆盖层对于声波透射及反射的衰减作用[J]. 噪声与振动控制, 2002, 22(3): 3 - 6.
Zhao Hanzhong. The suppressing effects of viscoelastic coatings on the acoustic transmission and reflection [J]. Noise and Vibration Control, 2002, 22(3): 3 - 6.

[6] 子安勝. 音響材料[J]. 騷音制御, 1996, 20(4): 1 - 7.
Masaru K. Acoustic materials [J]. Noise Control, 1996, 20(4): 1 - 7.

[7] 梁基照, 蒋兴华. 聚合物/ 无机粒子复合材料的隔声理论模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 6 - 9.
Liang Jizhao, Jiang Xinghua. Theoretical sound-insulation model of the polymer/inorganic particle composites [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(10): 6 - 9.

[8] 张宝庆, 张 军, 丁艳芬, 等. 聚丙烯/ 热致液晶聚合物/ 玻璃纤维混杂复合材料Ⅱ: 混杂复合材料的静态及动态力学性能[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 9 - 13.
Zhang Baoqing, Zhang Jun, Ding Yanfen, et al, PP/ TLCP/ glass fiber hybrid composites Ⅱ: Tensile and dynamic mechanical properties of hybrid composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6): 9 - 13.

[9] Baird A M, Kerr F H. Wave propagation in a viscoelastic medium containing fluid-filled micro spheres [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 105(3): 1527 - 1537.

[10] e Salis M H F, Oldham D J, Sharples S. Noise control strategies for naturally ventilated buildings [J]. Building and Environment, 2002, 37(5): 471 - 484.

[11] Tadeu A, António J. Acoustic insulation of single panel walls provided by analytical expressions versus the mass law [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 257(3): 457 - 475.