

聚氯乙烯基多层介质复合材料对 低中频隔声性能的影响

俞来明,王小霞

(宏升塑胶(杭州)有限公司技术研发中心,杭州 311251)

摘要: 为了提高复合材料对低、中频噪声的隔声性能,以三维层连玻璃纤维织物为骨架,聚氯乙烯(PVC)为基体,制备中空复合材料,并对其隔声性能进行测试和分析。在此基础上,根据声学多层介质传播理论,建立了声学多层介质传播模型并进行数学分析。为了对模拟分析进行验证,在中空复合材料内部灌注不同黏性流体,制备多层介质复合材料,并对其隔声性能进行分析。结果表明:中间层的声阻抗对多层介质复合材料的隔声性能有较大的影响,该结果与模拟分析结果有较好的一致性;利用双酚A型环氧树脂作为层间介质制备的复合材料,对低、中频噪声的隔声性能有较大的改善。

关键词: 隔声性能;多层介质;聚氯乙烯;复合材料;3D玻璃纤维织物

中图分类号: TQ325.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851(2016)02-0187-05 **引用页码:** 030206

0 引言

随着现代社会的发展,噪声污染已成为世界性难题。众多研究人员根据多种隔声耗能机理^[1-2],通过使用不同原料和不同的加工方法制备泡沫型、颗粒型和粘弹型等多种隔声材料已取得很大进展:梁基照等^[3]利用中空微珠填充复合材料,通过改变材料对频率的敏感性以期达到降噪效果;姚跃飞等^[4-5]利用炼钢炉渣粉填充复合材料,通过增加材料面密度以期达到隔声效果,还利用玻璃纤维织物增强复合材料,通过对纤维束的透气性以及纱线单丝根数的调节来改变材料的隔声性能。但对于以高分子为基体的多层介质复合材料的研究相对比较薄弱。许多材料对低、中频噪声的隔声效果不佳。

本研究以隔声性能良好的聚氯乙烯(PVC)^[6-7]为基体,3D层连玻璃纤维织物为骨架,用常压浇注法制备中空复合材料,对其隔声性能进行分析,并基于前人的多层结构及多层介质隔声传播理论^[8-10],建立数学模型。为了对模型分析进行验证,在中空

复合材料内部灌注不同黏性流体,制备多层介质复合材料,并比较分析不同黏性流体对多层复合材料低中频噪声隔声性能的影响,并验证理论模型的正确性。以期能制备对低、中频噪声具有更好隔声性能的复合材料。

1 实验

1.1 主要原材料

聚氯乙烯糊(EPVC,P-450 天津渤海化工有限责任公司);柠檬酸三丁酯(TBC,江苏雷蒙化工科技有限公司);环氧大豆油(ESO,桐乡嘉澳化工有限公司);3D层连玻璃纤维织物(南京玻璃纤维研究设计院),采用玻璃纤维进行织造,夹芯结构的基础是构成表层的经、纬纱和连接两个表层并形成芯部Z向纤维,中空织物的织造高度范围为2~40 mm,空间形态设计为“8”字形的三维织物;双酚A型环氧树脂。

1.2 样品制备

PVC浇注3D层连玻璃纤维织物复合材料的

制备工艺:首先将 EPVC、TBC、ESO 按质量比 100 : 130 : 7 的比例混合并搅拌均匀,待用。然后将上述混合剂浇注到 3D 层连玻璃纤维织物(34 cm × 34 cm)表面,铺平,再把材料放到 160 °C 恒温箱中烘干 15 min,自然冷却制得中空复合材料。再将中空复合材料的 3 边密封,并灌注不同黏性的流体,密封第 4 边。并适当调节 PVC 基体的含量,使灌注不同流体后的多层介质复合材料的面密度和厚度基本相同。

1.3 测试方法

噪声测试:采用北京声望电技术有限公司生产的 BSWA VS302USB 双声学分析仪。参照标准为 ISO 140-1, ISO 140-170 建筑及建筑构件的隔声测量。试样背衬为空气。其中的静音箱体大小为 1 m × 1 m × 1 m,测试样的面积为 35 cm × 35 cm,选择 A 计权网络,选取声压级 80 dB 的粉红噪声源。数据处理 Spectra LAB 的声学软件^[6-7]。声望 VS302USB 系统、无指向性声源及功率放大系统按照图 1 连接。

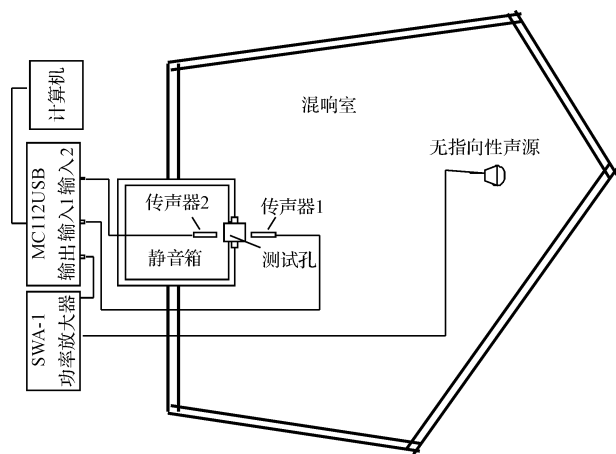


图1 隔声测试系统的连接图

2 结果及分析

本研究采用 100~3150 Hz 的 16 个 1/3 倍频程中心频率的隔声量^[10]来分析说明样品对低、中频噪声的隔声性能的影响。

2.1 三维玻璃纤维织物复合材料的材料隔声性能

由三维层连玻璃纤维织物和聚氯乙烯复合制备的中空复合材料的基本参数见表 1。从表 1 中可以看出,各样号的玻璃纤维织物量相同,但树脂浇注量不同,因而面密度也不同。

表1 材料的有关参数

样品	面密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	PVC 含 量/g	PVC 单位内含 量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
3D M-1	0.72	0	0
3D M-2	2.18	167.6	1.45
3D M-3	3.09	272.8	2.36
3D M-4	3.98	376.9	3.26
3D M-5	4.85	477.4	4.13
3D M-6	5.70	574.5	4.97

图 2 是不同 3D 层连玻璃纤维织物复合材料对(100~3150 Hz)噪声的隔声曲线。从图 2 可得,聚氯乙烯增塑糊浇注量对三维层连玻璃纤维织物复合材料的低频(100~200 Hz)隔声量有较大影响,随增塑糊浇注量的增加,其低频隔声量增加,但其增加速率在下降。聚氯乙烯增塑糊的浇注量对其复合材料中高频段的隔声性能影响不大。究其原因,由于双面浇注,3D 层连玻璃纤维织物的纱线外面全部被聚氯乙烯增塑糊浸没,且其结构疏松,呈中空状,当声波传到 3D 层连玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料时,引起该复合材料内的分子间振动,聚氯乙烯增塑糊包裹玻璃纤维,阻碍玻璃纤维的振动,而且玻璃纤维反限制增塑糊大分子链的运动,导致应力、应变相对滞后,材料的模量有明显提高,阻尼作用得到发挥,而低频段是由阻尼控制,因此该复合材料的低频隔声量有显著提高。

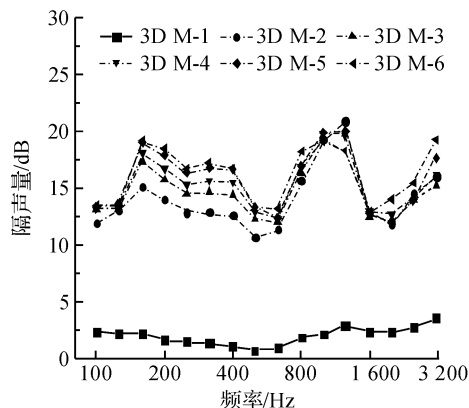


图2 不同 PVC 浇注量对 3D 层连玻璃纤维织物复合材料隔声性能的影响

图 3 是不同面密度的 3D 层连玻璃纤维织物复合材料对(100~3150 Hz)噪声的平均隔声量。由图 3 可见,未浇注 PVC 树脂的 3D 层连玻璃纤维织物(面密度为 $0.72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$),其透气性大,隔声性能较差。当与树脂复合后,其面密度一般大于 $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,且透气性为 0,其隔声性能有明显的增加。但当面密度进一步增加时,其平均隔声量提高幅度不大,与单一材料的面密度理论有较大的差异。说明这种复合材料的隔声性能主要是 3D 层连玻璃纤维织物的吸音和隔声在起作用,而聚氯乙烯增塑

糊的阻尼作用只起辅助作用。因为3D层连玻璃纤维织物的结构比较致密,刚性较大,当声波传到此复合材料时,织物的振动不明显,这样聚氯乙烯增塑糊阻碍织物的振动就少,声能的衰减也就相应的变小。同时由于多层介质材料的复合结构特点和内部3D层连玻璃纤维织物第三维纤维束的存在,当声波入射到材料上,引起声波在材料内部反射、散射、折射和衍射等情况,在多次反复的反射、散射中,直接导致声波的传播途径增加,其声能的损耗增大。因此,3D层连玻璃纤维织物复合材料的面密度为 $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,已经达到一定隔声效果,但继续增大面密度,效果且不够显著。为了改善该类复合材料的隔声性能,对该类复合材料进行数学模拟和分析,期望在理论的指导下,得到隔声效果更好的复合材料。

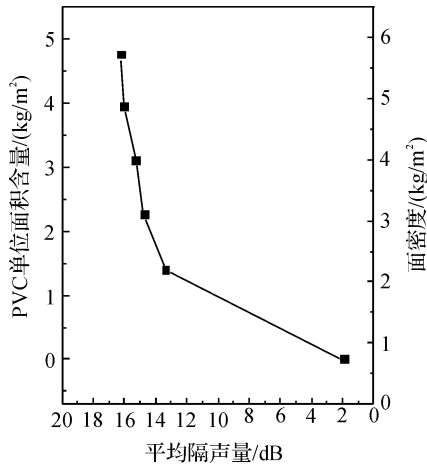


图3 不同面密度的3D层连玻璃纤维织物复合材料对(100~3150 Hz)噪声的平均隔声量

2.2 声学多层介质传播理论

图4是三维层连玻璃纤维织物和PVC复合的中空复合材料的截面图。图4中上下左右两边可以看成是一个双层薄板的隔声结构,当在内部灌注流体时,就形成一个多层介质隔声复合结构。

当平面波以某一角度 θ 入射到该介质中,声波在两界面间反复反射。根据图4,建立声波在该复合材料传播模型图(如图5),不计内部纤维束,内部视为均质材料。假设所有入射波的声压振幅为 p_a ,所有反射波的声压振幅为 p_b ,建立坐标系:第一个界面的坐标为 $x = x - d$,第二个界面的坐标为 $x = x$,视声波在无限大的均匀介质中,则有:

$$\begin{cases} p|_{x=x} = p_a e^{-jkx \cos \theta} + p_b e^{jkx \cos \theta} \\ p|_{x=x-d} = p_a e^{-jk(x-d) \cos \theta} + p_b e^{jk(x-d) \cos \theta} \end{cases} \quad (2)$$

由平面波性质,相应的法向质点速度则为:

$$\begin{cases} v|_{x=x} = (p_a e^{-jkx \cos \theta} - p_b e^{jkx \cos \theta}) / Z_m \\ v|_{x=x-d} = (p_a e^{-jk(x-d) \cos \theta} - p_b e^{jk(x-d) \cos \theta}) / Z_m \end{cases} \quad (3)$$

其中 $Z_m = \rho_m C_m / \cos \theta$ 为介质的法向声阻抗率,根据声阻抗率的定义有:

$$Z_l|_{x=x} = \frac{p}{v}|_{x=x} \quad (4)$$

联立式(1)~(3),经过代数运算,得:

$$\begin{aligned} v|_{x=x-d} &= \\ v|_{x=x} &\left[\frac{Z_l|_{x=x} + Z_m}{2Z_m} \frac{Z_l|_{x=x} - Z_m}{2Z_m} \right] \begin{bmatrix} e^{jkx \cos \theta} \\ -e^{-jkx \cos \theta} \end{bmatrix} \\ v|_{x=x} &\frac{Z_m \cos(kd \cos \theta) + jZ_l|_{x=x} \sin(kd \cos \theta)}{Z_m} \quad (5) \\ p|_{x=x-d} &= \\ p|_{x=x} &\left[\frac{Z_l|_{x=x} + Z_m}{2Z_m} \frac{Z_l|_{x=x} - Z_m}{2Z_m} \right] \begin{bmatrix} e^{jkx \cos \theta} \\ -e^{-jkx \cos \theta} \end{bmatrix} \\ &= p|_{x=x} [Z_l|_{x=x} \cos(kd \cos \theta) + jZ_m \sin(kd \cos \theta)] \quad (6) \end{aligned}$$

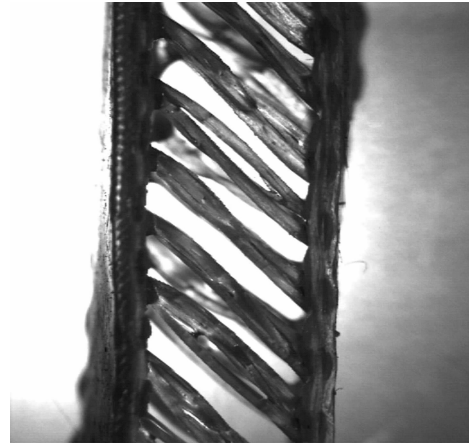


图4 中空复合材料的截面照片

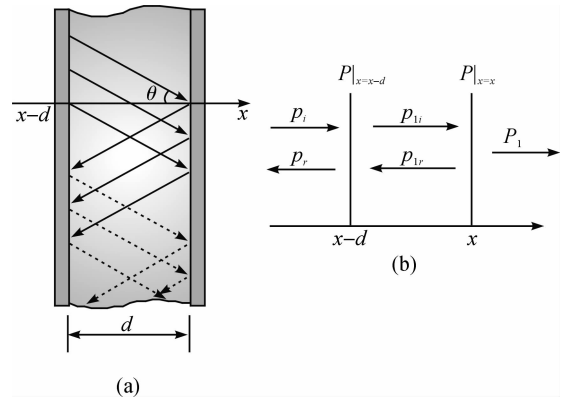


图5 声波传播模型

当入射角度和入射声强一定,材料的厚度一定时, $kd \cos \theta$ 为常数 C 。复合材料中间层可看作两面板相联的“缓冲层”。当声波入射到第一层面板透射到中间层时,中间层的弹性形变具有减振作用,传递给第二层面板的振动大为减弱。在复合材料内部灌注黏性较大的流体时,内部介质的声阻抗率 Z_l 较大,

根据式(5)和式(6),第二个界面 $x = x$ 处的波速 $v|_{x=x}$ 和声压振幅 $p|_{x=x}$ 都变小,也就是说声波在第二界面 $x = x$ 处体积元的总能量 ΔE 变小即声能损耗变大。

$$\Delta E = \frac{V_o}{2} \rho_m \left(v^2 + \frac{p^2}{\rho_m c^2} \right) \quad (7)$$

由以上推论可知,内部灌注的流体黏性越大,材料内部的声阻抗越大,材料的隔声性能越好。为验证这一推论,本研究采用空气、自来水、双酚 A 型环氧树脂三种不同的介质作为中间层进行对比试验。

2.3 不同中间层对材料隔声性能的影响

材料的灌注流体、面密度和厚度等参数见表 2。

表 2 材料的有关参数

样品	中间层	面密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	厚度/mm
M-A	空气	6.40	7.95
M-W	自来水	6.49	7.54
M-R	双酚 A 型环氧树脂	6.41	7.52

从表 2 可以看出,通过调节试样中 PVC 含量,试样 M-A、M-W、M-R 的面密度和厚度基本相同。

本研究定义 100~200 Hz 及以下为低频,200~3150 Hz 为中频。图 6 是 3 种多层介质复合材料对 100~3150 Hz 噪声的隔声曲线。由图 6 可见,灌注双酚 A 型环氧树脂的多层介质复合材料隔声性能优于其他两种材料,而灌注自来水的多层介质复合材料的隔声性能明显优于灌注空气的多层复合材料。图 7 是 3 种多层介质复合材料对低、中频段噪声隔声值的算术平均值。从图 7 可看出,在低频和中频,随着所灌注流体的黏性增大,其对低频和中频平均隔声量就越大。图 7 中双酚 A 型环氧树脂多层介质复合材料的中频段平均隔声量高达 20 dB,且每个频率段的隔声量都优于其他材料。

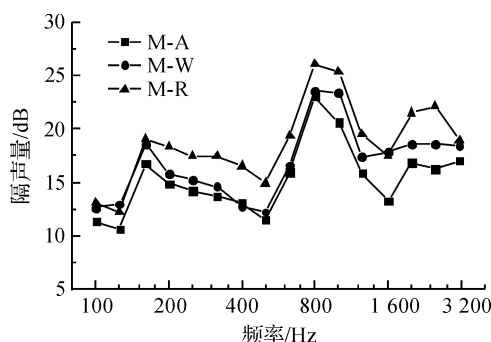


图 6 多层介质复合材料对 100~3150 Hz 噪声的隔声曲线

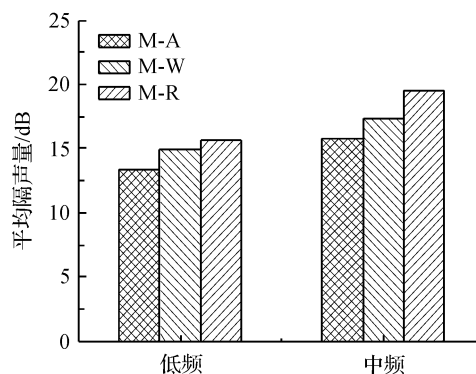


图 7 多层介质复合材料对低频段与中频段噪声的隔声性能比较

由于双酚 A 型环氧树脂黏性相对于其他两种流体大,在 20℃,标准压强下^[11], $Z_{\text{空气}} = 514 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$, $Z_{\text{自来水}} = 1.48 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$, $Z_{\text{树脂}} = 2.7 \sim 3.4 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ 。即内部介质声阻抗率 $Z_{\text{树脂}} > Z_{\text{自来水}} > Z_{\text{空气}}$,根据上述的声学多层介质传播模型可知,假设第一个界面 $x = x-d$ 处的波速 $v|_{x=x-d}$ 和声压振幅 $p|_{x=x-d}$ 是声波刚入射时的波速和声压振幅,即不同中间层情况下数值一样,根据式(5)和式(6)可知,第二个界面 $x = x$ 处的波速 $v|_{x=x} \propto Z^{-1}$,和声压振幅 $p|_{x=x} \propto Z^{-1}$ 。声阻抗率 $Z_{\text{树脂}} > Z_{\text{自来水}} > Z_{\text{空气}}$,可以得出第二个界面 $x = x$ 处的波速 $v|_{x=x}$ 和声压振幅 $p|_{x=x}$, $v_{\text{树脂}} < v_{\text{自来水}} < v_{\text{空气}}$, $p_{\text{树脂}} < p_{\text{自来水}} < p_{\text{空气}}$,结合式(7),总能量 $\Delta E \propto v|_{x=x}$, $\Delta E \propto p|_{x=x}$,可得 $\Delta E_{\text{树脂}} < \Delta E_{\text{自来水}} < \Delta E_{\text{空气}}$ 。声波在环氧树脂中传播最后的总能量 ΔE 最小即声能损耗较大,所以灌注双酚 A 型环氧树脂的多层介质复合材料隔声量优于其他两种材料(如图 6),而灌注自来水的多层介质复合材料的隔声性能明显优于灌注空气的多层复合材料。由此可见,中间层的声阻抗对多层介质复合材料的隔声性能有较大的影响。

双酚 A 型环氧树脂能作为一种良好的黏性阻尼材料,它可通过薄板运动带动内部分子间运动,使动能转化热能而减小薄板的振动。双酚 A 型环氧树脂的各种结构单元影响隔声性能:环氧基和羟基赋予树脂反应性,使树脂具有很强的内聚力和粘接力;羟基是极性基团,有助于提高材料的浸润性和黏附力,同时醚键和 C—C 键使大分子具有一定的柔顺性。正由于双酚 A 型树脂的分子结构特点,环氧树脂黏性相对于其他流体才比较大,表现出的声阻抗相对较大。利用双酚 A 型环氧树脂作为三维层连玻璃纤维织物层间介质制备的复合材料,其对中、低频噪声的隔声性能有较大的改善。

3 结 论

基于多层介质隔声传播理论构建数学模型并进行分析的基础上,利用三维层连玻璃纤维织物、聚氯乙烯、双酚 A 型环氧树脂制备多层介质复合材料。通过隔声测试分析后发现:

a) 灌注的流体黏性越大,材料内部的声阻抗越大,材料的隔声性能越好。

b) 聚氯乙烯基多层介质复合材料的隔声性能有别于常规的均一材料,其隔声量增长量与均一材料的理论计算相比有较大的差异。

c) 中间层的声阻抗对多层介质复合材料的隔声性能有较大的影响。利用双酚 A 型环氧树脂作为三维层连玻璃纤维织物层间介质制备的复合材料,其对中、低频噪声的隔声性能有较大的改善。

参考文献:

- [1] 徐宁,徐颖,邹伟仁,等. 玻璃纤维复合材料板隔声性能的研究[J]. 声学技术,2013, 32(5): 416-420.
- [2] 初丽辉,丁志荣,匡宁,等. 树脂基纺织空心结构复合材料的声学性能试验研究[J]. 产业用纺织品,2013, 279(12):13-16.
- [3] 梁基照,朱波. 聚丙烯/中空玻璃微球复合材料隔声特性分析[J]. 塑料科技,2014, 42(7):49-52.
- [4] 姚跃飞,罗勇波,高磊,等. 聚氯乙烯基隔声材料中填充炼钢炉渣粉[J]. 复合材料学报,2008, 25(2):74-79.
- [5] 姚跃飞,高磊,杨琼丽,等. 玻璃纤维织物结构参数对隔声性能的影响[J]. 纺织学报,2009, 30(2):52-55.
- [6] 傅雅琴,倪庆清,姚跃飞,等. 玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料隔声性能[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 94-99.
- [7] 朱春燕,傅雅琴,俞来明. 柔性聚氯乙烯薄膜的隔声性能[J]. 功能材料, 2007, 38(11): 1871-1873.
- [8] 何琳,朱海潮,丘小军,等. 声学理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006:1-25.
- [9] TADEU A, PEREIRA A, GODINHO L, et al. Prediction of airborne sound and impact sound insulation provided by single and multilayer systems using analytical expressions [J]. Applied Acoustics, 2007, 68(1): 17-42.
- [10] 张邦俊,翟国庆. 环境噪声学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001: 255-265.
- [11] 陈克安. 声学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007:56-85.

Influence of Multilayer Dielectric PVC-composites on Low- and Medium-Frequency Sound Insulation Property

YU Laiming, WANG Xiaoxia

(Technology Research and Development Center of Hongsheng Plastics
(Hangzhou) Co., Ltd., Hangzhou 311251, China)

Abstract: In order to improve the low- and medium-frequency sound insulation property of composite material, the hollow composite material is prepared with 3D glass fabric as the framework and the PVC as the basal body, to test and analyze its sound insulation property. The acoustic model of multilayer medium transmitting is founded and numerically analyzed based on the multilayer medium transmitting theory. For proving the simulation, the multilayer medium PVC-composites are prepared and poured interiorly with different viscous fluids. The sound insulation property was analyzed. The result indicated that the sound insulation property of the multilayer medium composites was obviously affected by sound impedance of middle medium. It was a good agreement between experimental results and the simulative analysis. The sound insulation property of composites that poured by the viscosity of biphenyl A-epoxy resin has better improvement at low and middle frequency.

Key words: acoustic insulation property; multilayer dielectric; PVC; composites; 3D glass fabric

(责任编辑: 张祖尧)