

增强材料的排列形式对复合材料隔声性能影响的实验研究

傅雅琴^{*1}, 朱春燕¹, 俞来明¹, 倪庆清²

(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. 日本信州大学纤维学部机能机械工学科, 日本上田 386-8567)

摘要: 为了探讨复合结构与隔声性能之间的关系, 探索降低低频噪声的新途径, 设计并制备了增强材料纵向排列和横向排列的玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料, 采用混响室-静音箱法对其隔声性能进行了测试分析。研究表明: 增强材料的排列形式对复合材料的隔声性能有明显的影 响, 复合材料的厚度超过 5 mm 后, 在相同厚度和面密度的条件下, 纵向排列的玻璃纤维织物增强复合材料比横向排列的玻璃纤维织物增强复合材料对低频和低中频的隔声性能好; 且随着复合材料厚度的增加其差异增大。因此, 可以通过改变增强材料的排列形式来改善复合材料对低频和低中频噪声的隔声性能。

关键词: 隔声; 增强材料; 纵向排列; 横向排列

中图分类号: TB533; TB332 **文献标志码:** A

Experimental study on effects of arrangement of reinforcements on acoustic insulation property of composites

FU Yaquin^{*1}, ZHU Chunyan¹, YU Laiming¹, NI Qingqing²

(1. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology of Ministry of Education,

Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018 China;

2. Department of Functional Machinery & Mechanics, Shinshu University, UEDA 386-8567, Japan)

Abstract In order to discuss the relationship between the composite structure and acoustic insulation property, and explore a new approach to reduce the low - middle frequency noise, the composites with two different arrangements of glass fabric - vertical structure and laminated structure, in polyvinyl chloride resin were fabricated. The experiments for acoustic insulation property were carried out in a reverberation-anechoic chambers measuring system. As a result, the arrangement of glass fabric has an obvious influence on the acoustic insulation property in the developed composites. When the thickness of the composites exceeds 5 mm under the same thickness and surface density, the composites with vertical fabric structure show the better acoustic insulation property in low frequencies and low - middle frequencies than that with laminated fabric structure. The difference due to the vertical and laminated structures will become larger with the increase of sample thickness. Therefore, it is shown that changing the arrangement of the reinforcements can improve the acoustic insulation property of low frequencies and low - middle frequencies.

Keywords: acoustic insulation; reinforcement; vertical structure; laminated structure

随着社会的迅速发展, 各种机械设备、交通运输工具快速增加, 噪声污染日趋严重, 对人们的生活造成了影响, 因此, 降低噪声, 改善环境是一个亟待解决的问题^[1-2]。常用的传统隔声材料为均质单层材料, 其隔声性能遵循质量定律, 这就需要其

有较大的面密度和厚度, 出现笨重现象^[3]。随着对声学材料研究的深入发展, 综合考虑外形的美观、结构的轻便, 研制新型降噪材料和结构成为当前关注的热点。近几年发展起来的主要有硅酸钙复合板, 褶皱芯层隔声结构和蜂窝夹层结构等^[4-6]。通

收稿日期: 2007-06-08; 收修稿日期: 2007-11-33

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50173033); 长江学者和创新团队发展计划资助 (IRT0654)

通讯作者: 傅雅琴, 博士, 教授, 主要从事功能性复合材料的研究; 会员证号: E23670004HY E-mail: fyq01@zstu.edu.cn

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

常, 这些结构材料对中高频的噪声有良好的隔声性能, 但其对低频噪声的隔声效果不佳^[7]。有效削减低频噪声是噪声控制技术中的重大难点。

由于材料对低频的隔声性能主要取决于材料的劲度^[8] (也叫弹簧弹性系数) 与阻尼性能, 如何提高材料的劲度与阻尼性能是提高材料对低频隔声性能的关键所在。为了探索降低低频噪声的新途径, 本文作者在对玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料研究的基础上, 设计并制备了纵向排列和横向排列的玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料。对其隔声性能进行研究, 并研究复合结构与隔声性能之间的关系, 希望得到在面密度和厚度相同的条件下, 比常规材料对低频隔声性能有所提高的新型复合材料。

1 实验部分

1.1 原料

聚氯乙烯糊树脂 (EPVC), P-450, 天津渤海化工有限责任公司; 柠檬酸三正丁酯 (TBC), 江苏雷蒙化工科技有限公司; 环氧大豆油 (ESO), 外商独资桐乡嘉澳化工有限公司; 玻璃纤维织物, EW100B-105, 厚度 0.08 mm, 面密度 0.1 kg/m², 杭州玻璃集团有限公司。

1.2 试样的制备

将聚氯乙烯糊树脂 (EPVC)、柠檬酸三正丁酯 (TBC)、环氧大豆油 (ESO) 按照一定质量比混合搅拌均匀, 制取混合剂; 再把此混合剂均匀浇注到玻璃纤维织物 (尺寸为 300 mm×300 mm) 上水平静置, 厚度约为 0.8 mm; 最后将其放入约 160 °C 的恒温箱中烘烤约 15 min, 自然冷却, 得到待用材料。

1.2.1 纵排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料制备

把待用材料 (如图 1 (a)) 裁成宽度一定 ($n=3、5、8、10$ mm) 的长方体小试样 (如图 1 (b)); 在这些小试样的表面涂上聚氯乙烯增塑糊混合剂, 以手工方式把小试样竖起, 贴在玻璃薄板上; 然后将涂有聚氯乙烯增塑糊的小试样依次贴上, 直至整块大成品的宽度为 250 mm, 得到的试样的厚度即为原小试样的宽度 n 。经 160 °C 恒温箱中烘烤 15 min, 自然冷却制得所需试样 (如图 1 (c))。图 1 (d) 为纵排试样的截面图。为了有效利用基体材料的阻尼性能, 玻璃纤维织物的质量含量控制在 10 %。

1.2.2 横排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料制备

将待用材料的表面都均匀地涂上聚氯乙烯增塑糊混合剂, 然后将这种试样层叠在一起, 直至所需

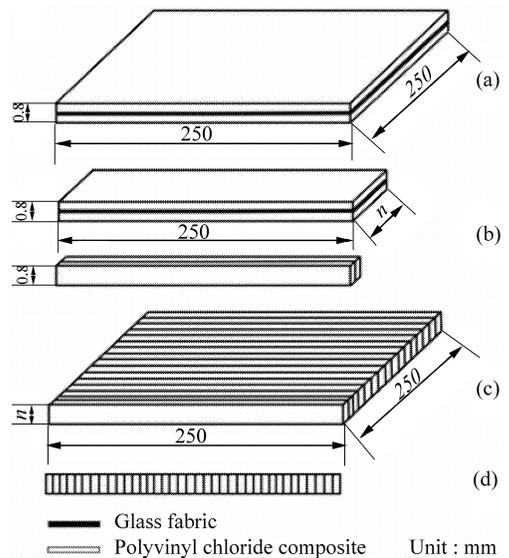


图 1 纵排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料的制备示意图
Fig. 1 Schematic of manufacture of vertical structure-glass fabric/polyvinyl chloride composites

要的厚度 (为了对比, 试样的厚度与纵排的相同, 分别为 3、5、8、10 mm); 160 °C 烘烤约 15 min, 自然冷却制得试样, 如图 2 所示。玻璃纤维织物的质量含量控制在 10 %。

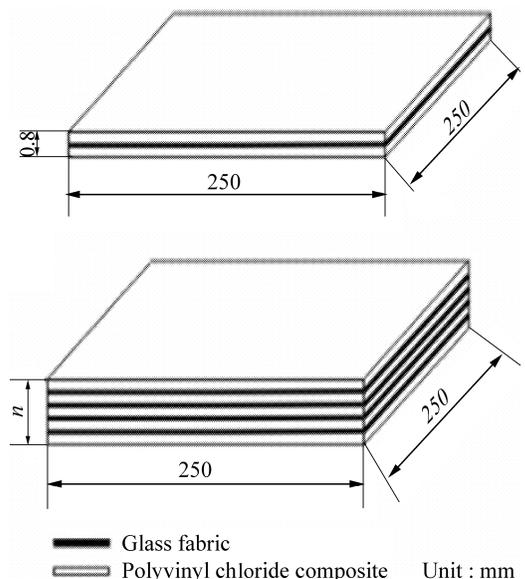


图 2 横排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料的制备示意图
Fig. 2 Schematic of manufacture of laminated structure-glass fabric/polyvinyl chloride composites

1.3 隔声测试

采用北京声望电技术有限公司生产的 BSWA VS302USB 双声道分析仪, 参照 ISOR 140—1,

ISOR 140-170 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 的粉红背景噪声源。其中的静音箱体积为: 1000 mm × 1000 mm × 1000 mm。声音的取样频率取“48000”; 抽取速率选择位取“Infinte”; 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。

材料的隔声性能一般用声音透过衰减量 R 来表示, 其大小可用下式表示^[8]:

$$R = 10 \log_{10} \frac{I_i}{I_t} = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \frac{E_i}{E_t} \quad (1)$$

式中: I_i 为声波的入射强度; I_t 为声波透过隔声材料后的透过强度; τ 为声音的透过率; E_i 为声波的入射能量; E_t 为声波的透过能量。

1.4 劲度 (弹性系数) 测试

材料的劲度可分为拉伸劲度和压缩劲度。当样品的厚度较小 (即受验的距离较短) 时, 由于界面结合强度等的影响, 所测量值具有很大的离散性。因此, 本文中选用 10 mm 厚的样品进行劲度测量。拉伸劲度测试时, 为了避免夹具对横排复合材料的剪切破坏, 采用在试样两端粘结环氧树脂复合材料, 并在夹头的两侧黏合铝片, 如图 3。夹距为试样的厚度 (分别为 8 mm 和 10 mm)。试样的截面积为 10 mm × 10 mm, 速度为 2 mm/min, 有效测试次数大于 5 次。

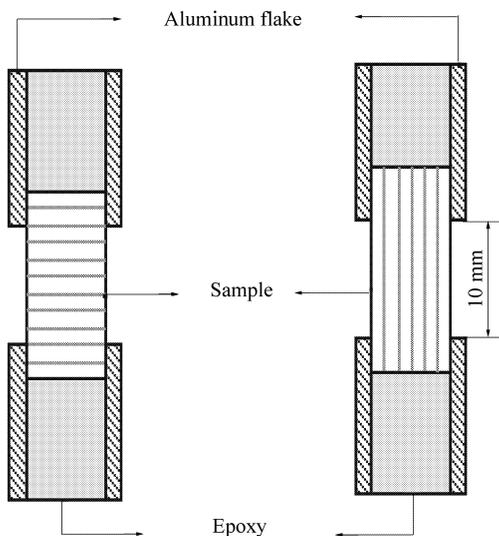


图 3 拉伸劲度测试试样的示意图

Fig. 3 Schematic of tensile-stiffness test

参照 GB/T 1448-1983^[9], 使用 RGM 200A 型电子万能材料试验机进行测试。试样的截面尺寸为 10 mm × 10 mm。测定压缩弹性模量时, 加载速

度为 2 mm/min, 施加的初始载荷约为 5% 的破坏载荷, 压缩变形不超过破坏变形的 60%, 有效测试大于 5 次。

根据胡克定律, 材料在测试面积下的压缩劲度为

$$K = P/L$$

P —载荷-形变曲线上初始直线段的载荷增量 (N);

L —与载荷增量 P 对应的形变量 (m)。

2 结果与讨论

制备得到的试样的基本参数如表 1。从表 1 中可以看出, 纵横排列的复合材料一一对应, 如 3 mm V 和 3 mm H, 它们的厚度、质量和面密度基本相同。

表 1 试样的厚度和面密度

Table 1 Thickness and surface density of samples

No.	Thickness/ mm	Mass/g	Surface density/ (kg · m ⁻²)
3 mm V	3	240.3	3.8
5 mm V	5	387.2	6.2
8 mm V	8	626.0	10.0
10 mm V	10	791.2	12.7
3 mm H	3	237.8	3.8
5 mm H	5	463.0	7.4
8 mm H	8	628.6	10.1
10 mm H	10	790.8	12.7
8 mm	8	605.3	9.7

Note: V—Vertical structure—glass fabric/polyvinyl chloride composite; H—Laminated structure—glass fabric/polyvinyl chloride composite.

2.1 复合材料的隔声性能

图 4 为代表性试样聚氯乙烯基体材料 (8 mm)、纵向排列的玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料 (8 mm V) 和横向排列的玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料 (8 mm H) 在 100~1000 Hz 频率范围下的隔声曲线。这 3 种试样的厚度相同, 都为 8 mm, 面密度基本相近。从图 4 中可以看出, 纵向排列的玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料的隔声曲线基本在横向排列的玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料和聚氯乙烯基体材料的上方, 说明增强材料纵向排列对提高复合结构材料的低-中频隔声性能更有利。而横

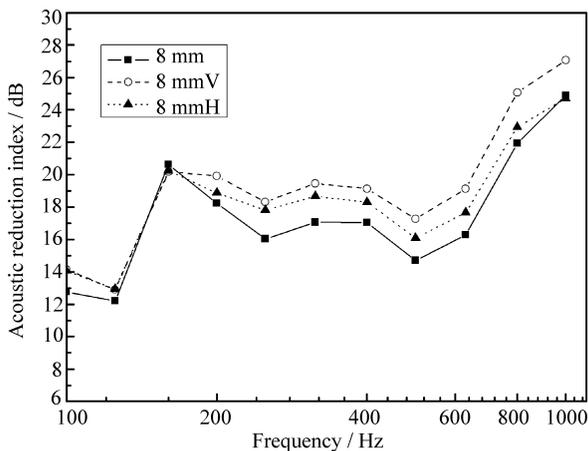


图4 代表性试样在 100~1000 Hz 的频率-隔声曲线

Fig. 4 The acoustic insulation curve of typical sample on 100~1000 Hz

向排列的玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料的低频段隔声量优于聚氯乙烯基体材料, 即在相同厚度下, 不管复合结构材料中增强材料的排列形式如何(纵排或横排), 其对低-中频的隔声性能优于基体材料。这主要是由于与基体材料相比, 复合材料中存在着界面效应^[10]等复合效应^[11-12], 从而使无论是纵向排列还是横向排列的复合材料, 对低-中频率噪音的隔声性能都比基体材料有所改善。

2.2 厚度对纵横排列复合结构材料隔声性能影响

图5(a)为不同厚度的玻璃纤维织物纵排的复合材料在100~1000 Hz的隔声曲线图。图5(b)为不同厚度的玻璃纤维织物横排的复合材料在100~1000 Hz的隔声曲线图。

从图5(a)和5(b)中可以发现, 纵排和横排的玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料在100~1000 Hz的低-中频率段的隔声量均在10 dB以上。从图5(a)中可以看出, 除了个别频率, 这些复合结构材料在测试频段内的隔声量大部分超过15 dB, 说明增强材料纵向排列的复合材料具有良好的隔声效果。

同时可见, 纵排复合材料的隔声性能随其厚度的增加而增加, 特别是在低-中频段(200~1000 Hz), 即使是厚度为3 mm的纵排复合材料, 其平均隔声量也达到了15.7 dB, 如图5(a)所示。从图5(b)中可知, 横排复合材料的隔声性能随其厚度的增加而增加, 但其增加趋势没有纵排复合材料的明显。图6为纵排和横排复合材料在低频(100~500 Hz)的平均隔声量。

从图6中可以看出, 随着厚度的增加, 无论是纵排还是横排复合材料, 其对低频的隔声性能均有

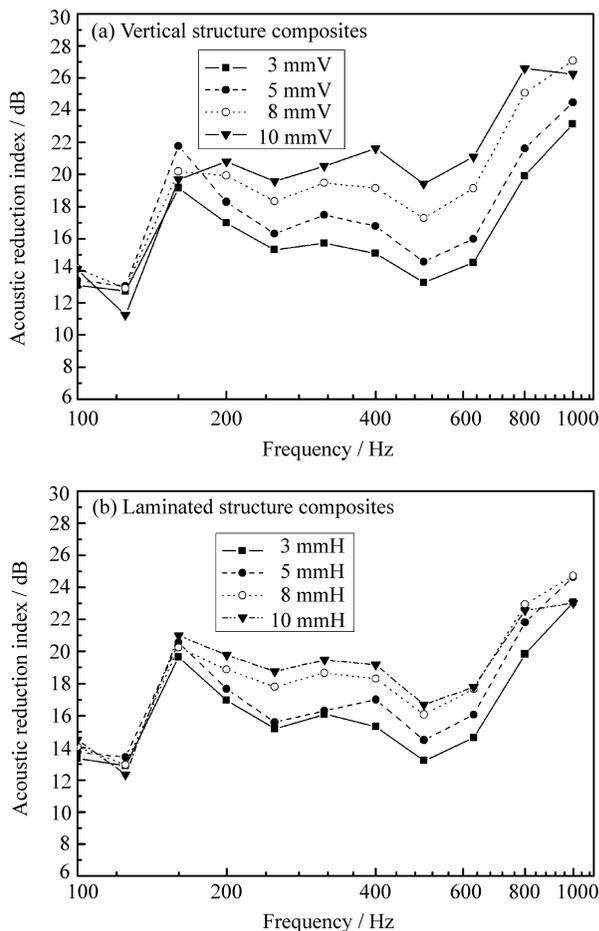


图5 不同厚度的样品在 100~1000 Hz 的隔声曲线

Fig. 5 The acoustic insulation curves of the different thickness composites at 100~1000 Hz

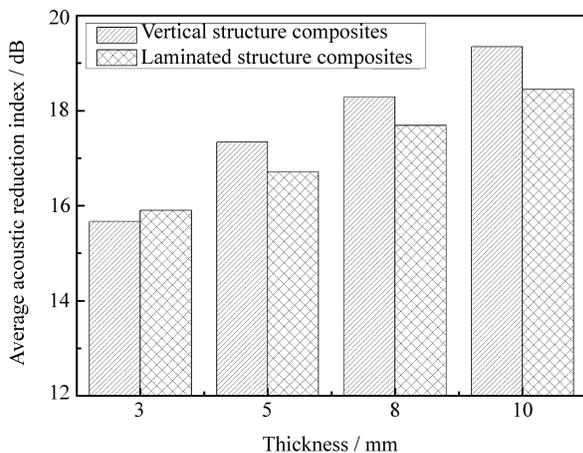


图6 不同厚度样品在 100~500 Hz 的平均隔声量

Fig. 6 The average acoustic reduction index of the samples at 100~500 Hz

所提高。虽然, 在厚度为 3 mm 时, 纵排复合材料

对低频的隔声性能稍低于横排复合材料,但随着厚度的增加,纵排复合材料的隔声量的增长幅度明显高于横排复合材料,显示了纵向排列的复合材料达到一定厚度后,在面密度和厚度相同的条件下,对低频的隔声性能可以比常规的复合材料(如横排复合材料)有所提高。

图 7 为纵排和横排复合材料在 100~1000 Hz 的低-中频范围内,不同厚度样品的隔声性能。从图 7 中可以看出,厚度(面密度)对复合材料的隔声性能影响较大,厚度(面密度)增大,隔声性能也随之增大。同时,增强材料(织物)在复合材料中的排列形式对材料的隔声性能也有较大的影响。当厚度较小时,横排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料与纵排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料的低频平均隔声量基本接近;但随着厚度的增加,纵向排列的复合材料对低-中频的隔声性能逐渐超过横向排列的复合材料,且厚度越大,差距也增大。因此,采用增强材料适当的排列形式,有助于提高材料的低-中频隔声性能。

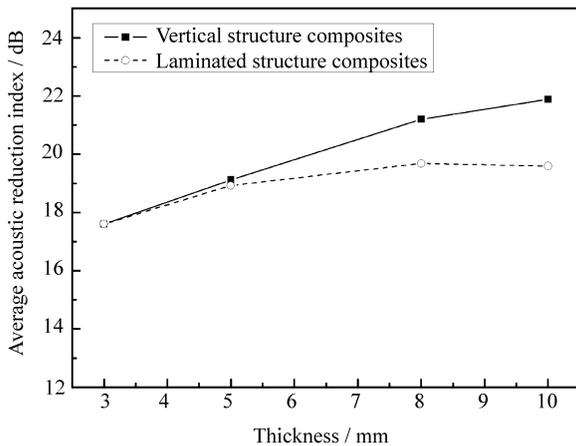


图 7 样品在 100~1000 Hz 内的平均隔声量

Fig. 7 The average acoustic reduction index of the samples at 100~1000 Hz

2.3 纵横排列复合结构材料的劲度

由于材料的劲度是表示单位形变所产生的弹力大小,因此,材料的劲度受材料本身的性质、样品大小等的影响。表 2 为材料在测试面积和厚度下的拉伸劲度和压缩劲度。

从表 2 中可以看出,对于 10 mm 厚的试样,无论是拉伸劲度还是压缩劲度,玻璃纤维织物纵排的复合材料明显高于玻璃纤维织物横排的复合材料。这有利于提高材料对低频的隔声性能。

表 2 样品的拉伸劲度和压缩劲度

Table 2 Tensile stiffness and compression stiffness of samples

No.	Thickness/ mm	Tensile- stiffness/ (N · m ⁻¹)	Compression- stiffness/ (N · m ⁻¹)
10 mm V	10	5.8 × 10 ⁷	4.70 × 10 ⁵
10 mm H	10	7.2 × 10 ⁵	1.63 × 10 ⁵

3 结论

(1) 在复合材料中,增强材料的排列方式不同对复合结构材料隔声性能有较大的影响。

(2) 厚度达到 5 mm 后,纵排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料对低频的隔声性能明显优于横排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料,且其差距随厚度的增加而增加。可以采用改变增强材料的排列形式来提高材料对低频的隔声性能。

(3) 超过一定的厚度后,在相同的厚度和面密度的条件下,纵排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料的低频-中频的隔声性能明显优于横排玻璃纤维织物/聚氯乙烯复合材料,且其差距随厚度的增加而增加。

参考文献:

- [1] Calixto Alfredo, Diniz Fabiano B, Zamin Paulo H T. The statistical modeling of road traffic noise in an urban setting [J]. Cities, 2003, 20 (1): 23-29.
- [2] Thiruchelvam M, Kumar S, Visvanathan C. Policy options to promote energy efficient and environmentally sound technologies in small and medium - scale industries [J]. Energy Policy, 2003, 31 (10): 977-987.
- [3] António Julieta, Godinho Luís, Tadeu António. Acoustic insulation provided by circular and infinite plane walls [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 273 (3): 681-691.
- [4] 张 腾. 硅酸钙-聚苯乙烯复合高温轻板与应用 [J]. 福建建材, 2005, 24 (2): 25-26.
Zhang Teng. The application of high temperature calcium silicate- polystyrene composite sheets [J]. Fujian Building Materials, 2005, 24 (2): 25-26.
- [5] 王志瑾, 徐庆华. V-型褶皱夹芯板与隔声性能实验 [J]. 振动工程学报, 2006, 19 (1): 65-69.
Wang Zhijin, Xu Qinghua. Experimental research on soundproof characteristic for the sandwich plates with folded core [J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19 (1): 65-69.
- [6] Ruzzene M. Vibration and sound radiation of sandwich beams with honeycomb truss core [J]. Journal of Sound and

- Vibration, 2004, 277 (4/5): 741-763.
- [7] Matsumoto Toshio, Uchida Masayuki, Sugaya Hiroyuki, Tachibana Hideki. Development of multiple drywall with high sound insulation performance [J]. Applied Acoustics, 2006, 67 (6): 595-608.
- [8] 潘仲麟, 金进生, 黄有兴. 隔声室的低频特性及实例验证 [J]. 浙江大学学报: 理学版, 1993, 20 (1): 34-38.
Pan Zhonglin, Jin Jinsheng, Huang Youxing. The performance of sound insulation room at low frequencies [J]. Journal of Zhejiang University: Sciences Edition, 1993, 20 (1): 34-38.
- [9] GB/T 1448—1983, 中华人民共和国国家标准. 玻璃纤维增强塑料压缩性能试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1983: 1-10.
GB/T 1448 — 1983, National Standard of the People's Republic of China. The compression property test method of the glass fiber reinforced plastics [S]. Beijing: Standards Press of China, 1983: 1-10.
- [10] 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.
Fu Yaqin, Ni Qingqing, Yao Yuefei, et al. Sound insulation performance of a glass fabric/PVC composite material [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22 (5): 94-99.
- [11] Tadeu A, Pereira A, Godinho L, António J. 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.
- [12] Tadeu António, António Julieta, Mateus Diogo. Sound insulation provided by single and double panel walls—A comparison of analytical solutions versus experimental results [J]. Applied Acoustics, 2004, 65 (1): 15-29.