

Sound Insulation Performance of the Sandwich Panel Cored with Magneto-Rheological Fluid

Lili Qi, Xiaomei Xu*, Jing Shi, Kai Liu, Anqi Lu

College of Traffic and Automobile Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu
Email: *xxm120480@126.com

Received: Aug. 18th, 2016; accepted: Sep. 9th, 2016; published: Sep. 12th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Mathematical model of the sound transmission loss (STL) of sandwich panels is firstly established based on the method of wave impedance analysis. And then, the viscoelastic moduli of magneto-rheological fluid are estimated indirectly according to the relaxation time spectrum. Finally, the simulation program of the STL of sandwich panels is coded by MATLAB and then the STL of sandwich panels is analyzed. Research results show that there are obvious effects of the field current on the STL, and semi-active control of the sound insulation performance of the sandwich panel can be realized by adjusting the field current; the core layer thickness of the sandwich panel is not the bigger the better because bigger thickness is easy to make the coincidence frequency fall into the common operating frequency range of sandwich panels and thus worsens the sound insulation performance of sandwich panel in low frequency range; selection of face sheet material should comprehensively consider the sound insulation performance of panels in both low and high frequency ranges, and the panel cost and lightweight requirements should also be considered.

Keywords

Sandwich Panels, Sound Insulation Performance, Sound Transmission Loss, Magneto-Rheological Fluid

磁流变液夹层板隔声性能研究

戚利利, 徐晓美*, 石静, 刘凯, 陆安琪

*通讯作者。

南京林业大学汽车与交通工程学院, 江苏 南京

Email: *xxm120480@126.com

收稿日期: 2016年8月18日; 录用日期: 2016年9月9日; 发布日期: 2016年9月12日

摘要

本文基于波阻抗分析法建立了夹层板的传声损失数学模型, 根据松弛时间谱间接估算了磁流变液的粘弹性模量, 基于此理论模型, 采用MATLAB编写相应的传声损失数值模拟程序, 仿真研究了磁流变液夹层板的传声损失。研究表明, 励磁电流对磁流变液夹层板的传声损失具有明显的影响, 通过调节励磁电流, 可以实现夹层板隔声能力的半主动控制; 夹层板的芯层厚度并非越大越好, 大的芯层厚度易于使吻合频率落入夹层板的常用工作频率范围, 从而恶化夹层板的低频隔声性能; 夹层板的面板材料选取要综合考虑夹层板的高、低频隔声能力, 且要注意成本和轻量化的要求。

关键词

夹层板, 隔声性能, 传声损失, 磁流变液

1. 引言

夹层板一般由两层面板和夹芯层组成, 它是一种具有高比刚度和比强度的轻质材料, 目前已在航空、船舶、车辆等领域获得了较广泛的应用[1]。但由于面板和空气腔夹芯层的共振, 使得这种空气夹层板在低频段的隔声量大大降低, 有时甚至低于单层板的隔声量。为提高夹层板的隔声量, 通常的做法是将夹芯层设计成多孔性结构, 如蜂窝结构和皱褶结构, 或在夹芯层中布置阻尼材料或填入多孔吸声材料。近年来, 研究人员探索了夹芯层媒质为液体的夹层板的隔声性能[2]-[4]。磁流变液是一种智能流体, 已有的研究表明[5], 其声阻抗和阻尼皆可控。将磁流变液引入夹层结构, 有望改善夹层板的低频隔声能力, 拓宽其隔声降噪频带, 实现夹层板声学性能的主、被动混合控制。

本文以夹芯层为磁流变液的夹层板为研究对象, 基于夹层板的传声损失模型与由松弛时间谱间接估算出的磁流变液粘弹性模量, 利用 MATLAB 软件编写相应的传声损失程序, 理论研究磁流变液夹层板的隔声性能。

2. 夹层板传声损失模型构建

图 1 为夹层板结构及其声压场。图中, x 和 z 坐标方向分别为夹层板的长度和厚度方向。 u 和 w 分别表示 x 和 z 方向的位移。假设夹层板在长度和宽度方向是无限延伸的, 且图中所示声波都是平面波。设声压以角度 θ 入射到面板 1 上, p_{inc} , p_{ref} , p_{rad} , p_{tra} 分别表示入射声压、反射声压、辐射声压和透射声压。

夹层板一般包括两种横向运动, 即对称运动和非对称运动。假定入射声压的幅值与反射声压的幅值相同, 那么作用在面层 1 与面层 2 上的总声压可分别表达为[6]。

$$p_1 = p_i + p_r + p_{rad1} = 2p_i - \frac{Z_{air}}{\cos\theta}(\dot{w}_a - \dot{w}_s) \quad (1)$$

$$p_2 = p_t = p_{rad2} = \frac{Z_{air}}{\cos\theta} \dot{w}_2 = \frac{Z_{air}}{\cos\theta}(\dot{w}_a + \dot{w}_s) \quad (2)$$

式中, Z_{air} 为空气的声阻抗; \dot{w}_a 和 \dot{w}_s 分别表示对称和非对称运动的横向速度。

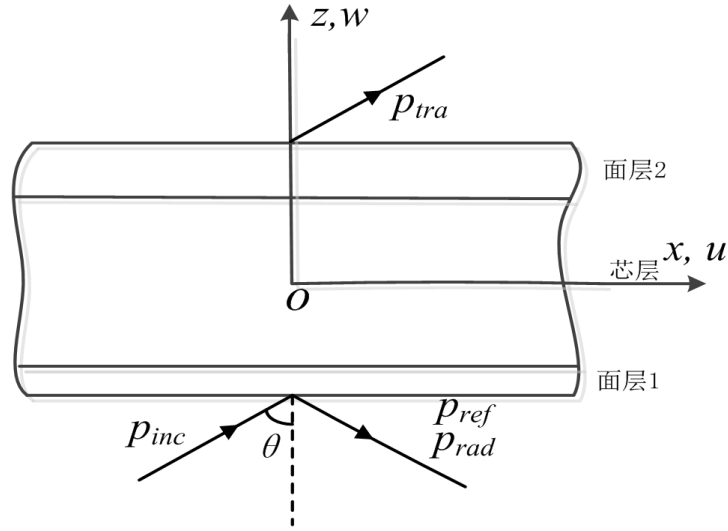


Figure 1. Sandwich panel and the sound pressure field
图 1. 夹层板结构及其声压场

夹层板的阻抗通常定义为作用在板上的声压与板的横向速度的比值。因此，对称型夹层板的对称与反对称运动阻抗可分别表示为：

$$Z_s = -\frac{p_1 + p_2}{\dot{w}_s} = -\frac{p_1 + p_2}{i\omega w_s} \quad (3)$$

$$Z_a = -\frac{p_1 - p_2}{\dot{w}_a} = -\frac{p_1 - p_2}{i\omega w_a} \quad (4)$$

根据声透射系数的定义[7]可知，对称型夹层板的声透射系数为：

$$\tau(\theta) = \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2 = \left| \frac{1}{1 + \frac{Z_s}{2Z'_{air}}} - \frac{1}{1 + \frac{Z_a}{2Z'_{air}}} \right|^2, \quad Z'_{air} = \frac{Z_{air}}{\cos \theta} \quad (5)$$

对于面层与夹芯层为各向同性材料的夹层板，随机入射情况下其平均声透射系数可表达为

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \tau(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{lim}} \sin \theta \cos \theta d\theta} \quad (6)$$

式中， θ_{lim} 基于经验通常取为 78° [8]。

夹层板的传声损失 STL 即为

$$STL = 10 \log_{10} (1/\bar{\tau}) \quad (7)$$

3. 磁流变液粘弹性模量估算

对于各向同性介质，泊松比、弹性模量和剪切粘滞系数之间存在如下关系：

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)} \quad (9)$$

式中，一阶拉梅常数 λ 表示材料的压缩性，等价于体弹性模量或杨氏模量；二阶拉梅常数 μ 表示材料的剪切模量； σ 为泊松比， E 为弹性模量。

杨氏模量与剪切模量的关系如下：

$$E = 2G(1 + \sigma) \quad (10)$$

对于受外部磁场影响的智能材料来说，泊松比在 0.4~0.5 之间。本文磁流变液的泊松比取为 0.45。设磁流变液流体行为为粘弹性的，其复合模量可用储能模量 G_1 和耗能模量 G_2 表示为：

$$G = G_1 + jG_2 \quad (11)$$

式(12)与式(13)为 Weese [9]建立的松弛时间谱参数和储能/耗能模量的关系：

$$G_1 = \sum_{i=1}^N H_i(\bar{\lambda}) \left[\omega^2 \bar{\lambda}_i^2 / (1 + \omega^2 \bar{\lambda}_i^2) \right] \quad (12)$$

$$G_2 = \sum_{i=1}^N H_i(\bar{\lambda}) \left[\omega \bar{\lambda}_i / (1 + \omega^2 \bar{\lambda}_i^2) \right] \quad (13)$$

式中， $\bar{\lambda}$ 表示松弛时间， $H(\bar{\lambda})$ 表示松弛时间谱。

表 1 所示为在不同励磁电流作用下磁流变液的松弛时间谱参数[10]。

基于磁流变液的松弛时间谱参数，利用 MATLAB 软件编写相应的仿真程序，可估算不同励磁电流作用下磁流变液的储能模量 G_1 和耗能模量 G_2 。图 2(a)和图 2(b)分别为励磁电流 $i = 0.2 \text{ A}$ 和 $i = 1.0 \text{ A}$ 时 1/3 倍频带范围内磁流变液的储能模量 G_1 和耗能模量 G_2 。

由图 2 可以看出，由励磁电流引起的磁场变化对磁流变液的储能模量 G_1 和耗能模量 G_2 影响显著。随着励磁电流的增加，储能模量 G_1 和耗能模量 G_2 整体增加，且其随频率的变化趋势不变。储能模量在整个频带范围内，均呈现上升趋势。在低频区，随着频率增加储能模量上升较缓慢；在中频区，储能模量急速上升；而在高频区，储能模量基本维持不变。耗能模量在整个频率段内是先增大后减小，直至在高频区其值接近为零。

4. 传声损失影响因素分析

基于上述夹层板的传声损失数学模型以及磁流变液的粘弹性模量，利用 MATLAB 编写相应的传声损失计算程序，仿真研究在 10~10,000 Hz 频率范围内不同参量对磁流变液夹层板传声损失的影响。

4.1. 励磁电流的影响

本节所研究的磁流变液夹层板的面层厚度为 2.5 mm，面层材料为铝，其密度为 2700 kg/m³，杨氏模

Table 1. Relaxation spectrum parameters of the magneto-rheological fluid

表 1. 磁流变液的松弛时间谱参数

$i(\text{A})$	$\bar{\lambda}$	$H(\bar{\lambda})$				
		0.001	0.00316	0.01	0.03162	0.1
0.2A		17,997	72	1533	1923	1
0.6A		137,019	106	9	9410	4067
1.0A		262,184	4281	322	19,420	13,466
1.4A		452,633	340	22	12,250	41,834
1.8A		586,966	578	40	24,351	61,251

量和剪切模量分别为 70 GPa 和 26 GPa; 磁流变液夹芯层厚度为 15 mm, 密度为 2490 kg/m³。为探讨励磁电流对磁流变液夹层板隔声能力的影响, 取励磁电流分别为 0.2 A、1.0 A、1.8 A, 计算不同励磁电流作用下磁流变液夹层板的传声损失, 其仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 与传统芯层材料的夹层板一样, 磁流变液夹层板的传声损失总体随声波频率的增大而增大, 在某些频率处会出现吻合现象, 即因入射波波长与板的弯曲波波长吻合而引起的板的传声损失骤降现象。因此, 在夹层板设计时, 应尽量避免使吻合频率落在夹层板的工作频率范围内。不难看出, 励磁电流对磁流变液夹层板的传声损失具有明显的影响, 它可以显著改变夹层板的吻合频率, 使其与板的工作频率错开, 从而改善磁流变液夹层板的隔声性能。换句话说, 对于磁流变液夹层板, 可以通过调节励磁电流的大小实现夹层板隔声能力的半主动控制。

4.2. 磁流变液芯层厚度的影响

本节研究了三种不同磁流变液芯层厚度的夹层板的传声损失。铝面层厚度依然为 2.5 mm, 磁流变液芯层

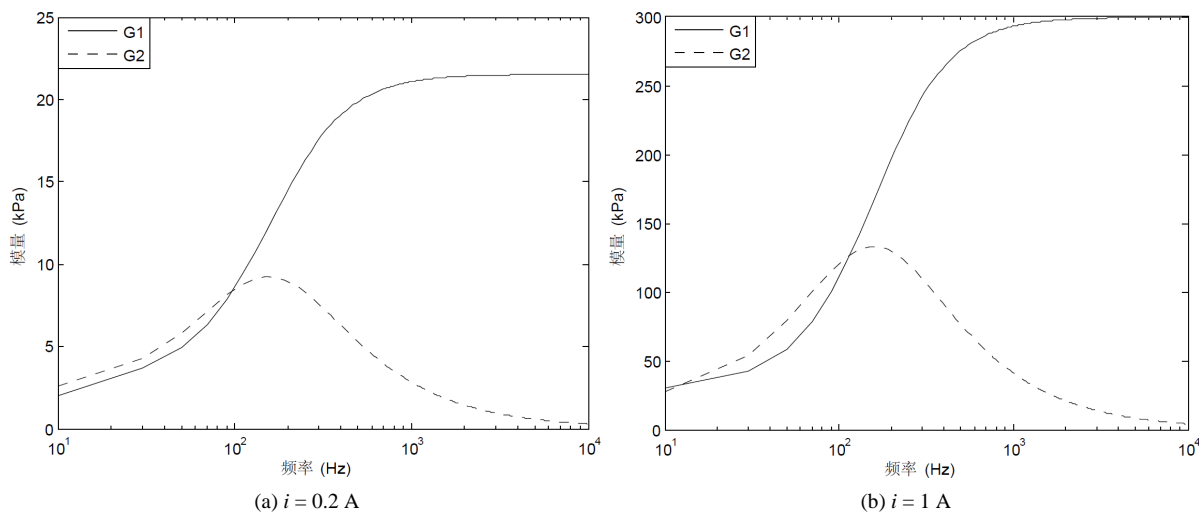


Figure 2. Estimated value of storage/loss moduli
图 2. 储能/耗能模量估算值

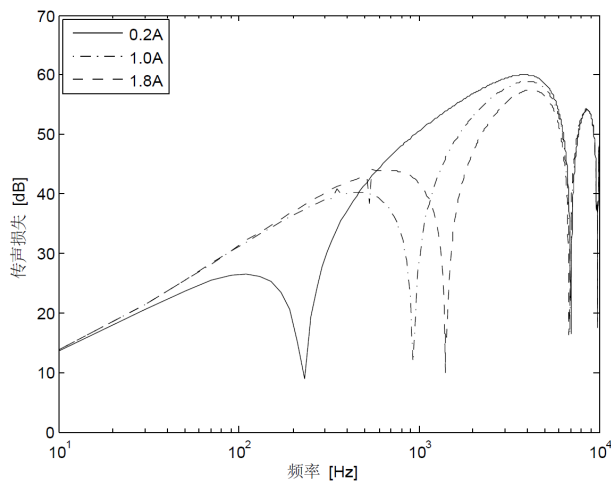


Figure 3. Sound transmission loss of the sandwich panel with different current
图 3. 不同励磁电流下夹层板的传声损失

厚度分别取作 15 mm, 35 mm 和 55 mm, 由其所构成的三种磁流变液夹层板的传声损失模拟结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 磁流变液夹层板的传声损失 STL 总体随着芯层材料厚度增加而增加。但芯层厚度越大, 夹层板的传声损失吻合频率越低, 板的低频隔声能力越差。可见, 并非芯层厚度越大越好, 大的芯层厚度易于使吻合频率落入夹层板的常用工作频率范围, 恶化夹层板的低频隔声性能。因此, 芯层材料厚度的选取应考虑夹层板的实际使用工况。

4.3. 面层材料的影响

本节仿真研究了面层材料分别为铝合金、不锈钢和木质胶合板这三种磁流变液夹层板的隔声性能。夹层板的面层厚度均取为 2.5 mm, 面层材料属性如表 2 所示, 磁流变液芯层厚度为 15 mm。

三种面层材料磁流变液夹层板的传声损失如图 5 所示。由于不锈钢较大的密度值, 使得不锈钢夹层板的传声损失 STL 值在整个研究频率范围内均明显大于其它两种夹层板, 但不锈钢夹层板的第一共振频

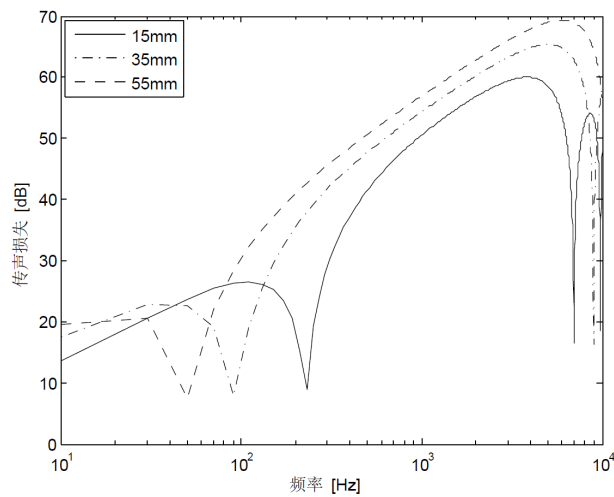


Figure 4. Sound transmission loss of the sandwich panel with different core thickness

图 4. 不同芯层厚度时夹层板的传声损失

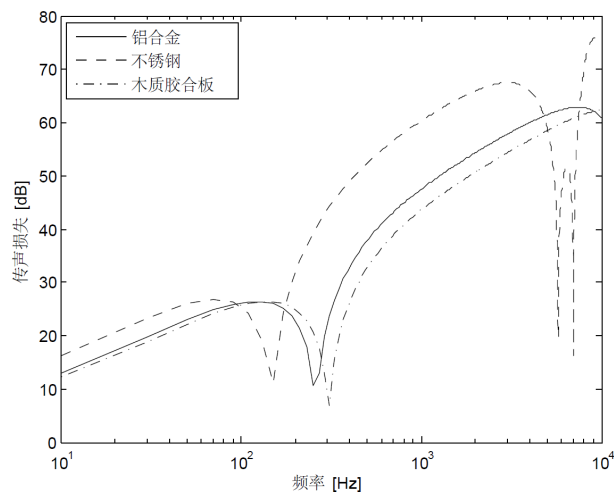


Figure 5. Sound transmission loss of the sandwich panel with different face sheet materials

图 5. 不同面层材料时夹层板的传声损失

Table 2. Material properties of the face sheets
表 2. 面层材料属性

材料	弹性模量(GPa)	密度(kg/m ³)
铝合金	70	2700
不锈钢	206	7900
木质胶合板	6	550

率明显低于其他两种夹层板, 并且其在高频区域出现了两次共振现象, 这将严重影响夹层板在相应低频和低频区域的隔声性能。铝合金面板夹层板的隔声性能在低频段与木质胶合板面层夹层板相当, 在高频段略高于木质胶合板面层夹层板。因此, 在满足结构强度的前提下, 从最小化使用成本角度出发, 可优先选择木质胶合板面层的夹层板作为隔声构件。

总之, 面层材料选择密度大一点的材料能够在总体上提高夹层板的隔声能力, 但因其第一共振频率变低, 高频共振现象增多的特点, 会影响相应频域的隔声性能, 且密度大的面板会使夹层板变重。所以, 面层材料的选取既要综合考虑其高、低频隔声能力, 且要注意轻量化的要求。

5. 结论

论文基于波阻抗分析法和估算的磁流变液的粘弹性模量, 建立了磁流变液夹层板的传声损失数学模型, 采用 MATLAB 仿真研究了磁流变液夹层板的隔声性能, 所取得的主要研究结论如下:

- 1) 励磁电流对磁流变液夹层板的传声损失具有明显的影响, 它可以显著改变夹层板的吻合频率, 使其与板的工作频率错开, 从而改善磁流变液夹层板的隔声性能, 实现夹层板隔声能力的半主动控制。
- 2) 夹层板的芯层厚度并非越大越好, 大的芯层厚度易于使吻合频率落入夹层板的常用工作频率范围, 恶化夹层板的低频隔声性能。
- 3) 夹层板的面板材料选取既要综合考虑夹层板的高、低频隔声能力, 也要注意夹层板的成本和轻量化要求。

基金项目

江苏省博士后科研资助项目(1402084C); 南京林业大学青年科技创新基金项目(CX2016028); 2015年度大学生实践创新训练项目(2015sjcx183)。

参考文献 (References)

- [1] Lu, T. and Xin, F. (2014) *Vibro-Acoustics of Lightweight Sandwich Structures*. Springer, Berlin. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-55358-5>
- [2] Mahjoob, M.J., Mohammadi, N. and Malakooti, S. (2009) An Investigation into the Acoustic Insulation of Triple-Layered Panels Containing Newtonian Fluids: Theory and Experiment. *Applied Acoustics*, **70**, 165-171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.12.002>
- [3] 范玉岭, 王敏庆. 复合板隔声性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2007(2): 90-93.
- [4] Choi, S.B., Seo, J.W. and Kim, J.H. (2001) An Electrorheological Fluid-Based Plate for Noise Reduction in a Cabin: Experimental Results. *Journal of Sound and Vibration*, **239**, 178-185. <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.2000.3051>
- [5] Korobko, E.V., Baev, A.R., Bubulis, A., Kuzmin, *et al.* (2015) The Peculiarities of Ultrasound Wave Propagation in Magnetorheological Fluid with Complex Dispersive Phase. *Vibroengineering Procedia*, No. 6, 326-329.
- [6] Wang, T., Sokolinsky, V.S., Rajaram, S., *et al.* (2005) Assessment of Sandwich Models for the Prediction of Sound Transmission Loss in Unidirectional Sandwich Panels. *Applied Acoustics*, **66**, 245-262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.08.005>

-
- [7] Zhou, R. (2009) Sound Transmission Loss of Composite Sandwich Panels. Auburn University, Alabama.
- [8] Pierce, A.D. (1981) Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [9] Weese, J. (1992) A Reliable and Fast Method for the Solution of Fredholm Integral Equations of the First Kind Based on Tikhonov Regularization. *Computer Physics Communications*, **69**, 99-111.
[http://dx.doi.org/10.1016/0010-4655\(92\)90132-I](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4655(92)90132-I)
- [10] Mahjoob, M.J., Mohammadi, N. and Malakooti, S. (2012) Analytical and Experimental Evaluation of Magnetic Field Effect on Sound Transmission Loss of MR-Based Smart Multi-layered Panels. *Applied Acoustics*, **73**, 614-623.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.12.015>

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>