

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.07.020

隔声复合材料隔声性能的数值模拟及实验研究

颜楚雄, 黄俊

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 根据隔声原理, 制备了一种内部均布钢球的玻璃纤维增强树脂基隔声复合材料。分别使用数值模拟与实验研究的方法研究了复合材料的隔声效果。模拟数值结果和实验结果均显示了隔声复合材料有良好的隔声性能。针对阻抗管测量隔声方法, 利用有限元方法得到了材料隔声量的数值模拟结果。均值材料计算结果与理论结果的比较以及隔声复合材料的计算结果与实验结果的比较, 证明了该数值模拟方法在模拟材料隔声量的有效性与可行性。

关键词: 隔声; 有限元方法; 阻抗管

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)07-0104-05

Numerical and Experimental Investigation on Soundproof Performance of Sound Insulation Composites

Yan Chuxiong, Huang Jun

(School of Aeronautics Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract : Based on the principle of the sound insulation, glass fiber reinforced resin matrix composites inside which some steel balls are uniformly distributed were prepared. The soundproof performances of the composites were studied by using numerical simulation and experimental method, respectively. Both of the simulated and experiment results show the soundproof composites have the good effect in the sound insulation. According to the impedance tube method, the numerical results of the material are obtained by using the finite element method. The comparison between the simulated and theoretical result of homogeneous material and the one between the simulated and the experimental result prove that the numerical method is valid and feasible.

Keywords : sound insulation ; finite element method ; impedance tube

噪声污染已成为人们生活、工作与健康的一大危害, 已经成为一个重大问题。目前, 对噪声进行控制的主要措施之一是采用隔声材料来抑制和减弱噪声在空气中的传播。常用的传统隔声材料多为密度大的均质单层材料, 如金属、木材, 其材料属性单一, 隔声性能遵循质量定律。因此为了得到较好的隔声效果, 隔声材料通常需要很大的面密度而变得笨重, 为降噪隔声带来了许多不便。隔声复合材料由于其低密度、强度高且具有较好的隔声性能, 越来越多地被人们所使用。因各成分间弹性模量不同, 当承受相同的外载荷时, 复合材料将产生不同的应变而形成不同材料之间的相对应变, 通过声波在材料中传播引起粘性流动损失以及材料的分子间相对运动引起的内摩擦将声能转化成热能而散失掉, 进而声波在材料传递间被吸收, 所以相比均质材料, 传过复合材料抵达另一边的声波减少, 从而达到隔声效果。相比单纯的基体材料, 复合材料由于其中包含了密度更大的填充物使得面密度增加, 也使得其隔声性能有所提高。因此材料所含成分间的性能很大程度

决定了材料的隔声性能^[1]。

近年来, 人们研制了许多复合隔声材料, 并且进行了相应的实验研究^[2-4]与数值模拟研究^[5-6]。许鹤等^[7]研究了三维纺织复合材料的隔声效果, 其性能随着纤维体积分数的增加而增强, 同时材料结构的完整性也影响其隔声性能。Zhang Zhe等^[8]运用有限元方法研究了碳纤维增强聚合物在汽车车身上的应用, 并发现其隔声性能优于传统材料。Yuan Chongxin等^[9]利用统计能量法以及统计能量/有限元混合方法分析了复合材料层合板的隔声性能。尽管对于复合材料隔声性能有了许多研究, 但是对于内部含有填充物的复合材料研究还是较少。笔者针对内部填充有钢球和硅橡胶的玻璃纤维增强树脂基复合材料分别进行数值模拟和实验研究, 并提出一种有效且便捷的模拟测量材料隔声量的方法, 数值模拟结果与实验值以及理论值吻合较好, 证明了该方法的准确性。

联系人: 颜楚雄, 硕士, 主要从事噪声控制研究

收稿日期: 2016-04-12

1 有限元理论分析

材料的隔声量分析是一个声振耦合问题。笔者利用有限元方法解决此问题,包含三部分:一是被测材料由于声波引起的结构振动,即结构振动的有限元分析;二是被测材料所处声场的声学有限元分析;三是内部声场的流体与结构在交界处发生耦合作用,需要进行声振耦合的有限元分析^[10]。

1.1 有限元方程

被测材料的结构有限元方程为:

$$\begin{aligned} ([K_s] + j\omega[C_s] - \omega^2[M_s])\{w_i\} + \\ [K_c]\{p_i\} = \{F_{si}\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $[K_s]$, $[C_s]$, $[M_s]$ ——分别为固体的刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵;

j ——虚数单位;

ω ——振动频率;

$[K_c]$ ——声振耦合刚度矩阵,与声振耦合界面的有效面积有关;

w_i, p_i ——分别为节点处的位移与声压值;

F_{si} ——边界上施加的外力。

假定空气是理想流体,声波在空气中传播满足 Helmholtz 方程,将其离散化,可得有限元方程:

$$\begin{aligned} [K_a] + j\omega[C_a] - \omega^2[M_a] \cdot \{p_i\} - \\ \omega^2[M_c]\{w_i\} = \{F_{ai}\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $[K_a]$, $[C_a]$, $[M_a]$ ——分别为流体的刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵;

$[M_c]$ ——耦合质量矩阵, $M_c = -\rho_0 K_c^T$;

F_{ai} ——边界上施加的声压。

声压载荷作用在流固交界面上,使得被测材料产生振动,而结构的振动又造成了流体负载。结合式(1)、式(2),对简谐激励外载荷,模型所满足的控制方程为:

$$\begin{aligned} \left(\begin{bmatrix} K_s & K_c \\ 0 & K_a \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & C_a \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ -\rho_0 K_c^T & M_a \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} w_i \\ p_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{si} \\ F_{ai} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

1.2 四传感器阻抗管法原理分析

隔声量又称为传声损失,为入射与透射声场能量之比。一般情况下,隔声量可用测量入射声压与透射声压之比表示:

$$TL = -20 \lg t_p = -20 \lg \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right) \quad (4)$$

式中: TL ——隔声量;

t_p ——声压透射系数;

p_{in} ——入射声压;

p_{out} ——透射声压。

本实验中的隔声量由四传感器阻抗管法测得,它主要是由声源、前阻抗管、后阻抗管、末端吸声材料以及四个传感器组成(见图1)^[11]。被测材料试样位于阻抗管中间,其直径与阻抗管相等。扬声器置于阻抗管前段产生白噪声。由于被测样品表面的反射以及阻抗管后端的反射,在前、后阻抗管形内成驻波场,入射声波与透射声波由两个传声器分别进行测量。

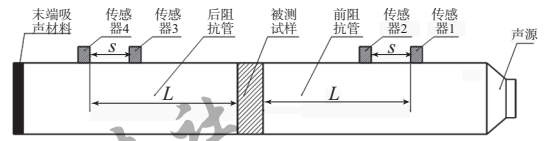


图1 四传感器阻抗管测量装置示意图

声压透射系数 t_p 可以表示为透射声压与入射声压之比^[8],那么:

$$t_p = \frac{2j \sin(ks)(p_3 p_1 - p_4 p_2) e^{2j k L}}{(p_1^2 - p_4^2) e^{2j k s} + 2(p_4 p_3 - p_1 p_2) e^{j k s} + (p_2^2 - p_3^2)} \quad (5)$$

式中: k ——声波波数;

s ——传感器1和传感器2、传感器3和传感器4之间的距离;

L ——传感器1、传感器4与被测试样的距离;

p_1, p_2, p_3, p_4 ——分别为传感器1、传感器2、传感器3和传感器4得到的声压值。

隔声量则可写为:

$$\begin{aligned} TL = -20 \lg |t_p| = \\ -20 \lg |2 \sin(ks)(p_3 p_1 - p_4 p_2)| + \\ 20 \lg |(p_1^2 - p_4^2) e^{2j k s} + \\ 2(p_4 p_3 - p_2 p_1) e^{j k s} + (p_2^2 - p_3^2)| \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(6),只要得到四个传感器的声压就能通过仿真模拟的方法计算得到隔声量。

1.3 有限元模型建立

根据上述四传感器阻抗管法测量的原理及有限元分析,分别建立结构有限元模型和流体有限元模型。结构有限元模型即为被测试样的模型,它包括外层的玻璃纤维增强酚醛树脂以及由硅橡胶包覆的钢制小球,如图2所示。流体有限元模型为模拟阻抗管内空气的模型,如图3所示。根据式(6)可知,

只要得到图3中四个白点的数值就可以利用此式计算被测材料的隔声量。

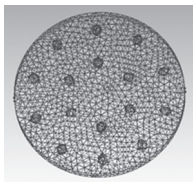


图2 结构有限元模型

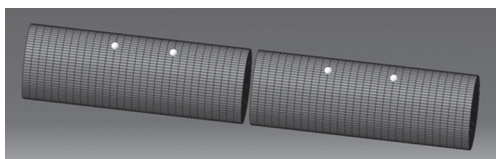


图3 流体有限元模型

1.4 均质材料隔声量的验证

由于铁板各属性单一,便于建模与计算,故先用来检验所提出模型的正确性。文献[8]先针对铁与铝进行计算得到隔声量,验证了所提出模型的准确性,进而将理论应用在碳纤维复合材料上,文献[12]也对其所提出的阻抗管模型应用于铝板,并将计算的隔声量与理论结果进行对比,随后用来预测声子晶体复合材料的隔声效果。

笔者为了验证该方法的正确性,取厚度为2 mm、直径为100 mm的铁质圆盘进行验证。一定厚度的均质板的隔声量可以由理论公式和经验公式得到。

无限大单层板的隔声量计算公式为^[13]:

$$TL = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\pi f M}{\rho_0 c} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中: f ——入射声波频率;

M ——板的面密度;

ρ_0 ——空气密度;

c ——声速。

在低频阶段,材料隔声量的经验公式为^[13]:

$$TL = 14.5 \lg(Mf) - 26 \quad (8)$$

图4显示了分别使用有限元方法、理论公式以及经验公式得到的均质材料的隔声量随频率变化而变化的曲线。从图4可以看出,均质材料的有限元方法得到的隔声值与经验公式得到的隔声值吻合较好,证明了该方法对于均质板的有效性,可以用来预测均质板的隔声量。有限元方法得到的隔声值与理论值有一定误差,主要是由于理论公式是针对无限大均质板,而数值模拟的对象则为直径100 mm圆盘。

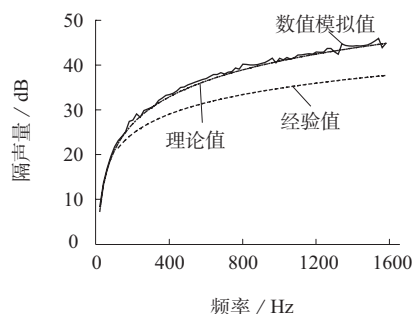


图4 均质圆盘隔声量结果对比

2 隔声复合材料数值模拟及实验研究

2.1 主要原材料

玻璃纤维: 9600tex, 杭州高科复合材料有限公司;

酚醛树脂: 2302, 天津树脂厂;

硅橡胶: HD2151, 阿拉丁试剂有限公司;

钢球: AISI1080, 中山市红润精密钢球有限公司。

2.2 主要仪器与设备

阻抗管: 4206型, 测试频率范围为100~1600 Hz, 丹麦 Brüel & Kjær 公司。

2.3 隔声复合材料的制备

采用酚醛树脂作为基体, 玻璃纤维作为增强体, 夹芯为包覆硅橡胶的钢珠。先把玻璃纤维按照 0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$ 的铺层方法进行铺层, 然后把包覆硅橡胶的钢珠分布于铺层中, 上面铺好玻璃纤维铺层, 移到圆形的定制钢制模具的模腔内, 用压力将树脂胶液注入模腔, 浸透内部嵌有钢珠的硅橡胶材料和玻璃纤维增强材料, 然后固化。固化工艺为: (1) 由室温升至 80°C , 压力升至0.3 MPa, 保温保压0.5 h; (2) 由 80°C 至 125°C , 压力升至1.2 MPa, 保温保压2 h; (3) 在 125°C , 1.2 MPa条件下保温保压1.5 h; (4) 降至常温常压。然后脱模成型得到隔声复合材料。

包覆硅橡胶的钢球布置方式: 在半径为40 mm的圆上均布10个钢球, 在半径为22 mm的圆上均布6个钢球(见图2)。试样直径均为100 mm。试样1的厚度为8 mm, 内部夹芯球的直径为6 mm; 试样2的厚度为11 mm, 内部夹芯球的直径为9 mm。

2.4 隔声复合材料数值模拟及实验研究

对制备的隔声复合材料进行实验测定, 并将实验结果与数值模拟结果进行对比, 结果如图5、图6所示。

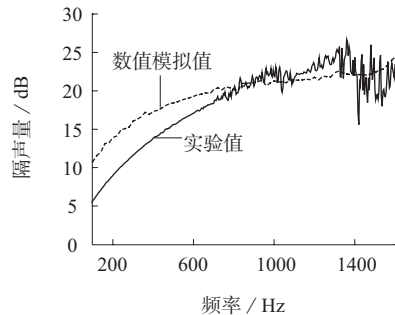


图5 试样1的数值模拟结果与实验方法结果对比

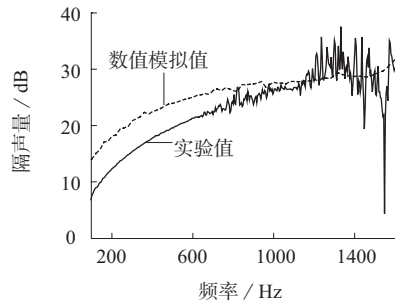


图6 试样2的数值模拟结果与实验方法结果对比

由图5、图6可以看出,声振耦合有限元分析方法所得到的计算结果与实验结果吻合良好。说明笔者提出的数值模拟方法适用于内部含有金属填充物的隔声复合材料。同时说明制备的复合材料具有较好的隔声性能。

通过比较可以看出,误差主要在1400~1600 Hz时,试样产生共振,使得隔声量有所波动,这是理论计算无法体现的。产生误差的原因在于材料参数的确定,本实验在数值模拟计算时所设定的参数是不变的,即各项参数不随频率变化而变化,这就造成了一定的误差。除此之外,在流固耦合方程与结构有限元方程中阻尼因子取值的不同也会影响到共振时的结果。只有进一步得到被测材料的参数值才能进一步使得数值模拟结果更加准确。

图7显示了两种试样实验结果的对比情况。

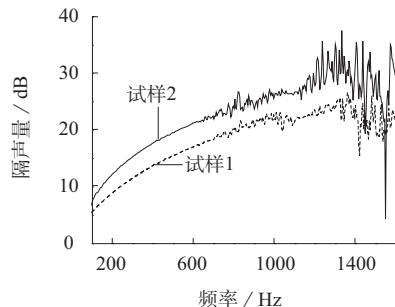


图7 试样1与试样2的实验结果对比

比较两种试样可以看出,频率相同时,试样2的隔声量高于试样1的隔声量,说明该复合材料的隔

声量随着其面密度的增加而增大。面密度的增加会提高材料的隔声性能,但是在1400~1600 Hz时,曲线波动明显加剧。

玻璃纤维增强树脂基隔声复合材料的隔声性能主要由材料的组成和结构决定。该复合材料是使用包裹硅橡胶的钢球填充在树脂中复合而成,由于钢球密度大、强度大等特点使复合材料的性能得到很大提高。

声波入射在玻璃纤维增强树脂基隔声材料的内部传播时,将发生反射、散射、折射和绕射等声学现象。由于树脂基体与其它成分之间密度的差异,当声波遇到钢球时将发生多次折射及散射使得传播路径增大,声能消耗将增多,同时该复合材料中钢球的存在,使声波在树脂基体中传播碰到这些钢球时,类似于受到障碍物阻挡,这样声波必须绕过障碍物发生绕射,从而也使声波的传播路径增大而消耗声能。声能正是由于在玻璃纤维增强树脂基隔声材料传播过程中发生多次反射、散射、折射和绕射等现象,从而达到隔声效果^[14]。

由于树脂基体与玻璃纤维、钢球、硅橡胶的弹性模量不同。当外界应力同时施加在材料上时,将产生不同的应变而形成不同材料之间的相对应变,从而产生额外的耗能。所以,声波入射时,基体与钢球间产生了不同的应变而很大程度提高了声能的损耗。

3 结论

(1) 从实验与有限元分析结果可以看出,内部填充有钢球和硅橡胶的玻璃纤维增强树脂基复合材料具有良好的隔声性能,较传统隔声材料,其密度较低,具有很强的可设计性。

(2) 复合材料的隔声量随其面密度增加而增大。

(3) 通过比较均值材料的有限元分析结果、理论公式和经验公式的计算结果,以及复合材料的有限元分析与实验结果,证明了用有限元法计算复合材料的隔声量是有效的。

参考文献

- [1] 俞来明,朱春燕,高磊,等.核桃壳颗粒填充聚氯乙烯基复合材料的隔声性能[J].浙江理工大学学报,2008(5):497-501.
Yu Laiming, Zhu Chunyan, Gao Lei, et al. Sound insulation property of the PVC-composite filled with walnut shell grain[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2008(5):497-501.
- [2] 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 perfor-

- mance of a glass fabric/PVC composite material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5):94-99.
- [3] 傅雅琴,朱春燕,俞来明,等. 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[J]. 复合材料学报, 2008, 25(2):68-73.
Fu Yaqin, Zhu Chunyan, Yu Laiming, et al. Experimental study on effects of arrangement of reinforcements on acoustic insulation property of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2):68-73.
- [4] Binici H, Aksogan O, Bakbak D, et al. Sound insulation of fiber reinforced mud brick walls [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2):1 035-1 041.
- [5] Nováková K, Mokř P, Vaclavík J. Application of piezoelectric macro-fiber-composite actuators to the suppression of noise transmission through curved glass plates[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012, 59(9):2 004-2 014.
- [6] Kuo Y M, Lin H J, Wang C N. Sound transmission across orthotropic laminates with a 3D model[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(11):951-959.
- [7] 许鹤,唐予远,马菲,等. 三维机织物复合材料的隔声性能研究[J]. 中原工学院学报, 2015, 26(3):47-51.
Xu He, Tang Yuyuan, Ma Fei, et al. Explore the sound insulation property of 3-D woven composite[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2015, 26(3):47-51.
- [8] Zhang Zhe, Du Yu. Sound isolation analysis of carbon fiber composite material[C] // The 21st International Congress on Sound and Vibration(ICSV 21). Beijing:International Institute of Acoustics and Vibration, 2014.
- [9] Yuan C, Bergsma O, Beukers A. Sound transmission loss prediction of the composite fuselage with different methods[J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(6):865-883.
- [10] Barbero E J. Finite element analysis of composite materials using abaqusTM[M]. Boca Raton:CRC Press, 2013.
- [11] 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.
- [12] 周梦平. 声子晶体理论在建筑隔声板材中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
Zhou Mengping. The applied research on the phononic crystals theory in the construction soundproofing plate[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2008.
- [13] 毛东兴,洪宗辉. 环境噪声控制工程[M]. 北京:高等教育出版社, 2010:207-214.
Mao Dongxing, Hong Zonghui. Environmental noise control engineering[M]. Beijing:Higher Education Press, 2010:207-214.
- [14] Lee J C, Hong Y S, Nan R G, et al. Soundproofing effect of nano particle reinforced polymer composites[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(8):1 468-1 474.

2020年前全球聚乙烯产能将大幅增加

低油价已经大大减少了油气的勘探和钻井活动,但是帮助点燃了石化工业的快速发展,因为石化工业的原料是原油和天然气。英国公司 Global Data 表示,全球低密度聚乙烯产能可能从 2015 年时的 2 600 万 t/a 大幅增加至 2020 年时的 3 400 万 t/a,因为期间将有 27 个计划中的项目将陆续投产,其中大部分位于美国和印度。(工程塑料网)

“高分子材料配方分析技术”获青岛市科技进步奖

不久前,青岛市科学技术奖励大会在青岛大学(本部)学术交流中心博学厅召开,会议对 2015 年为全市科技事业发展作出突出贡献的科技工作者和最新的科技创业项目进行了表彰奖励,其中由科标检测完成的“高分子材料配方分析技术”项目荣获青岛市科技进步奖。

该项技术填补了我国在高分子材料配方分析领域的空白,达到了国内领先水平,同时也得到了社会、学界的一致认可。这是继 2012 年科标检测首创“光-色-热-质-元-化”联用技术,成功创建配方分析方法之后又一次技术创新,实现质的飞跃。这不仅是科标检测获得的青岛市科技领域的最高奖,更重要的是科标检测完全具有自主知识产权的核心技术,成为第三方检测行业的标杆企业。

在谈及该项目时科标检测董事长表示,现在是我国转方式、调结构进行供给侧改革的重要时期,各类企业、经济主体

都很困难,GDP 增速一直很低。这样恰恰给了我们年轻的团队很多机会和成长的空间,我们还要不断地进行自主的技术创新,充分利用各方面的资源,走产、学、研相结合的科研发展道路,开发拥有自主知识产权的核心技术,使高新技术向国际化方向发展。

(中国聚合物网)

2021 年北美微孔聚氨酯泡沫市场估值 15.3 亿美元

根据新的市场研究报告,北美微孔聚氨酯泡沫市场 2016 年估值为 12.1 亿美元,预计到 2021 年将达到 15.3 亿美元,2016 年到 2021 年的复合年增长率为 4.9%。

按类型分,高密度泡沫板块主导了北美的微孔聚氨酯泡沫市场,这部分在数量和价值上都是最大的,其增长是由微孔聚氨酯泡沫在装饰业、汽车座椅和床上用品的广泛应用驱动的。而低密度泡沫体的主要优点是良好的声音屏障及生产定制绝缘面板的理想材料。2015 年美国占据北美微孔聚氨酯泡沫市场 74.2% 的份额。微孔聚氨酯泡沫材料的主要生产商总部都设在美国,如巴斯夫、亨斯迈公司、赢创工业集团、陶氏化学公司、罗杰公司等。这些公司的产品在国内外都有消费群体。

加拿大是北美微孔聚氨酯泡沫的第二大市场,而墨西哥市场预计为北美区第二快速增长市场,这一趋势会在未来一段时间内维持。微孔聚氨酯泡沫塑料帮助减轻产品的质量。

(工程塑料网)