

试验研究

环境噪声的建筑门窗隔声研究

杜静盛¹ 何雯艳¹ 张文娟¹ 杜靖宇¹ 林 龙²

- (1. 浙江仁欣环科院有限责任公司, 浙江 宁波 315000;
2. 宁波市鄞州区环境保护局, 浙江 宁波 315000)

摘要:针对建筑门窗环境噪声的隔音问题,根据声波在门窗材料中的传播机理,利用传递矩阵法和边界条件建立了声波在层状材料的声透射系数数学模型,研究了环境噪声垂直入射在层状门窗材料中的声传播特性。以单层门窗材料为研究对象,研究了到当单层门窗厚度为半波长的整数倍时,此时环境噪声门窗隔声效果最差;当声波频厚积为门窗材料声速与厚度乘积一半的整数倍时,此时环境噪声门窗隔声效果最差。

关键词:环境噪声 波动方程 透射系数 频厚积

中图分类号:X827 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-8759(2017)03-0020-03

RESEARCH ON THE SOUND INSULATION OF AMBIENT NOISE IN MULTI-LAYER WINDOW MATERIAL

DU Jing-sheng, HE Wen-yan, ZHANG Wen-juan, DU Jing-yu, LIN Long

- (1. Zhejiang Renxin environmental Sci-Tech academy Co.,Ltd, Ningbo 315000, China; 2. Yinzhou District Environmental Protection Administration, Ningbo 315000, China)

Abstract:As for the problem of the sound insulation of multi-layer building window, the mathematical model of the acoustic transmission coefficient is built according to the wave propagation mechanism, transfer matrices and gas-solid boundary conditions, the rule of acoustic propagation characteristic in the is researched under the condition of the vertical incidence in the window material. Simulation results show the acoustic transmission coefficient is the maximum and the sound insulation is the worst when thickness of window material is an integer time of half wavelength, when the frequency-thickness is integer time of half of product of acoustic velocity of window material and its thickness, the transmission coefficient is also the maximum and the sound insulation is the worst, it provide the theoretical base for sound insulation of PMMA.

Key words:Environmental noise; wave equation; transmission coefficient; frequency - thickness;

噪声污染是空气污染、水污染、垃圾污染及噪声污染的四大环境污染之一^[1-2]。随着国民经济建设的迅速发展和城市化进程的加速,噪音污染的程度正在进一步加剧,噪声污染已成为当今城市比较突出的环境和社会问题,尤其是居住环境噪

声污染^[3-5]。居住环境噪声对人们的生活和工作环境带来了较大影响,诱发人的听力损伤和多种疾病,甚至对人的生理行为都会带来扰动和破坏。所以建筑物和建筑构件的隔声设计和性能评价就显得十分重要。建筑噪声的污染源头主要有交通噪声、施工噪声、设备噪声、社会生活噪声、住户生活噪声^[6-8];噪声传播途径有通过门窗传入室内和通过分户墙或墙壁传入门窗。长期生活在噪音的环

收稿日期:2016-12-20

第一作者简介:杜静盛,1984年生,女,学士,主要研究方向环境声学分析及噪声控制。

境中,容易使人感到烦躁、萎靡不振,影响工作效率,选择隔音效果好的门窗是非常重要的,因此加强对门窗的隔声分析研究就更为重要^[9,10]。

然而,目前国内仅少数学者针对声波在单层门窗中的传播特性进行了理论研究^[11-14],缺少相关的实验验证。本文通过研究垂直入射条件下声波在层状介质传播中的传播机理建立了声波在单层门窗材料中透射系数数学模型;然后建立声波透射单层门窗的实验系统,以有机玻璃材料作为实验试样,获得声波在单层门窗材料中的时域波形,实验检测结果验证了数值分析结果的正确性。

1 声波在层状介质中的传播原理

1.1 物理模型

图1给出了层状门窗玻璃材料声波透射单层门窗材料的传播示意图,一束平面波垂直入射到两种不同介质分界面时,声波在 $x=0$ 处发生反射和透射,当声波传播到下一界面 $x=d$ 处再次发生反射和透射,声波传播 d_n 处发生透射现象。其中,第一层为空气,第二层为门窗材料,第 n 层为空气。 P_i^n 表示第 n 层入射声压, P_r^n 表示第 n 层反射声压, P_t^n 表示第 n 层透射声压,被测介质厚度为 d ,其中, $n=1,2,3$ 。

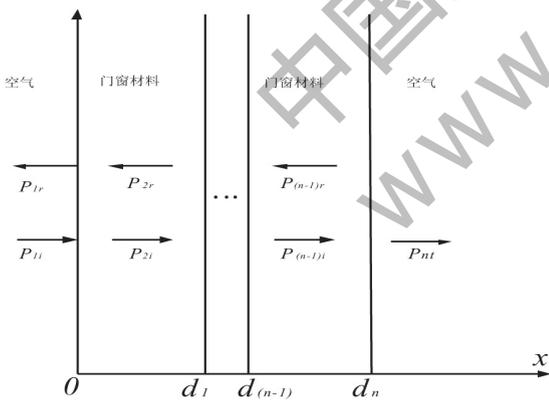


图1 层状门窗玻璃材料声波透射模型

1.2 数学方程及边界条件

根据声压及质点振动速度方程和欧拉公式可以得到声波多层介质中的声压 P_n 和质点速度 cn ^[15]。其中,第一层介质声压 P_1 和质点速度 v_1 表示方法如下:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= (\phi_1 e^{i(k_{1x}x+k_y y)} + \psi_1 e^{i(-k_{1x}x+k_y y)}) e^{i(\omega t)} \\
 c_1 &= \frac{1}{R_1} (\phi_1 e^{i(k_{1x}x+k_y y)} - \psi_1 e^{i(-k_{1x}x+k_y y)}) e^{i(\omega t)}
 \end{aligned} \quad (1)$$

第二层介质声压 P_2 和质点速度 v_2 表示方法如下:

$$\begin{aligned}
 P_2 &= (\phi_2 e^{i(k_{2x}x+k_y y)} + \psi_2 e^{i(-k_{2x}x+k_y y)}) e^{i(\omega t)} \\
 c_2 &= \frac{1}{R_2} (\phi_2 e^{i(k_{2x}x+k_y y)} - \psi_2 e^{i(-k_{2x}x+k_y y)}) e^{i(\omega t)}
 \end{aligned} \quad (2)$$

由于在最后一层介质中只存在透射波,因此 $\psi_n=0$ 。该层介质声压 P_n 和质点速度 v_n 表示方法如下:

$$\begin{aligned}
 P_n &= (\phi_n e^{i(k_{nx}x+k_y y)}) e^{i(\omega t)} \\
 c_n &= \frac{1}{R_n} (\phi_n e^{i(k_{nx}x+k_y y)}) e^{i(\omega t)}
 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $kn=\omega/cn$ ($n=1,2,3\cdots$) 为每层介质波数, $kny=0, knx$ 为每 n 层介质中 x 方向上的波数, A_n, B_n 为第 n 层中入射波和反射波振幅, R_n 分别为每层介质的阻抗。在每个界面处的声压和法向振动速度保持连续性,即在 $x=0$ 处时,

$$\begin{aligned}
 P_{n-1}|_{x=d} &= P_n|_{x=0} \\
 c_{n-1}|_{x=d} &= c_n|_{x=0}
 \end{aligned} \quad (4)$$

将边界条件式(4)代入到式(1)、式(2)、式(3)中,得到线性方程组并写成矩阵(6)的形式,

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\
 \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} & 0 & \ddots & 0 \\
 0 & 0 & e^{i(k_1^x d)} & e^{-i(k_2^x d)} & -1 & \ddots & 0 \\
 0 & 0 & \frac{1}{R_2} e^{i(k_1^x d)} & -\frac{1}{R_2} e^{i(k_2^x d)} & -\frac{1}{R_3} & \ddots & 0 \\
 \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \phi_1 \\
 \psi_1 \\
 \phi_2 \\
 \psi_2 \\
 \vdots \\
 \phi_n \\
 \psi_n
 \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

其中,矩阵为 $2n \times 2n$ 矩阵,奇数行是每层介质质点声压,偶数行是每层介质质点振动速度,由于环境噪声是由空气层传入门窗材料中,则 $R_1=R_3, \psi_n=0$,通过求解方程组(5)可得声波在被测材料中的透射系数 T 如下

$$T = \frac{\phi_n}{\phi_1} \quad (6)$$

式中, ϕ_1 为第一层入射波振幅, ϕ_n 为第三层的透射波振幅。

2 声波在门窗中的传播特性数值分析

为了便于分析,以厚度为 1 mm 的有机玻璃作为研究对象,通过 matlab 软件对公式(6)编程求解,可以获得垂直入射条件下声波在有机玻璃中的透射系数曲线,表1给出了有机玻璃材料和空气的声学参数^[1,16]。

表1 有机玻璃和空气的声学参数

Material	Density (kg/m ³)	Velocity (km/s)	Impedance (MRayl)
PMMA	1 180	2.700	3.19
Air	1.29	0.340	0.0042

利用公式(7),图2给出了垂直入射条件下声波入射有机玻璃时,声波透射系数与厚度-波长比之间的关系。从图中可以看出,当有机玻璃厚度半个波长的整数倍时,声波透射系数达到最大值,声透射系数值为1,更多的声波能量透射有机玻璃,此时隔声效果最差;当有机玻璃厚度不是半个波长的整数倍时,在很大的频厚积范围内声波透射系数几乎为零,声波不易通过,此时隔声效果最佳。因此,门窗厚度-波长比对声透射系数的影响较大。因此,在实际中采用单层门窗隔声时,应根据门窗周围环境的声波频率选择合适的门窗材料厚度。

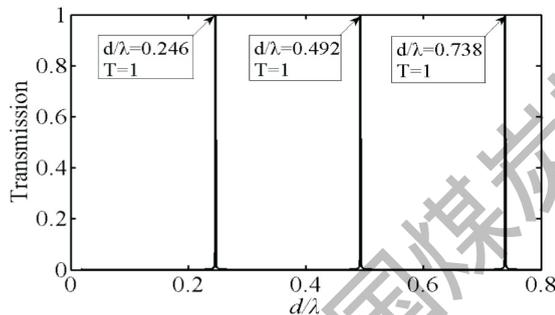


图2 垂直入射下有机玻璃透射系数

图3给出了垂直入射条件下透射系数与声波频厚积之间的关系。由图可知,声波经空气入射有机玻璃时,只有特定的频厚积声波,其能量才能最大程度地穿过有机玻璃材料;其他频厚积的声波在很大的范围内透射系数几乎为零,此时有机玻璃才能达到最佳的隔声效果。从图中还可以了解到,当频厚积分别为1.35 MHz·mm、2.7 MHz·mm、4.05 MHz·mm时,透射系数为1,达到最大值,并且透射系数与频厚积呈现一定的周期性,其周期为1.35 MHz·mm。由表1物理参数可知,有机玻璃的声速 $V = 2.7 \text{ km/s}$,有机玻璃材料厚度 $d = 1 \text{ mm}$,其声速与厚度乘积的一半为 $1.35 \text{ MHz}\cdot\text{mm}$,因此,当声波频厚积为门窗材料声速与其厚度乘积一半的整数倍时,声波透射系数达到最大值,此时更多的能量透过门窗材料,隔声效果最差。

3 结论

采用波动方程、传递矩阵法及声波气-固边界

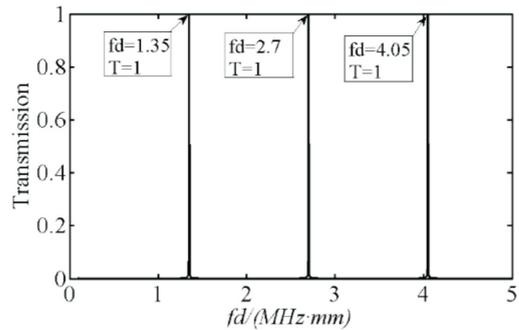


图3 垂直入射下声透射系数与声波频厚积的关系

条件得到声波在多层门窗传播的矩阵方程,得到了垂直入射条件下声波在单层门窗材料中的声透射系数的规律:

(1)当门窗厚度为半个波长的整数倍时,声透射系数达到最大值,此时单层门窗的隔声效果最差;当门窗厚度不是半个波长的整数倍时,透射系数在很宽的频率范围内都很小,此时门窗的隔声效果较好。

(2)当声波频厚积为门窗材料声速与其厚度乘积一半的整数倍时,声透射系数达到最大值,此时门窗的隔声效果较差;当声波频厚积不是门窗材料声速与其厚度乘积的一半整数倍时,声透射系数在很宽的频率范围内都很小,此时门窗的隔声效果较差。

参考文献

[1] 刘丹,陈自勇,脱晓冰.采用主被动控制技术的自然通风隔声窗研究[J].噪声与振动控制,2016,Vol. 36(3):222-228

[2] 相增辉,王双闪,兰桂柳,等.声屏障的发展历程及其发展趋势[J].声学技术,2016,35(01):58-62.

[3] 谭华.实验室隔声测量中试件洞填隙墙传声影响的检验[J].应用声学,2009,28(1):76-80.

[4] 陈克安,曾向阳,杨有粮.声学测量[M].北京:机械工业出版社,2010.

[5] 盛美萍,王敏庆,孙进才.噪声与振动控制技术基础[M].北京:科学出版社,2007.

[6] 王孚懋,任勇生,韩宝.机械振动与噪声分析基础[M].北京:国防工业出版社,2006

[7] 王文成.隔声窗的分析与设计[D].广州:汕头大学,2003.

[8] 王金瑞,李舜酩,韩宝坤.不同顶端结构声屏障绕射声衰减量模拟分析[J].噪声与振动控制,36(1):125-132.

[9] 李彦,朱大勇.声屏障系统设计探讨[J].环境工程.2012,30(S1):98-101.

[10] 伏蓉,张捷,姚丹,等.高速列车车体轻量化层状复合结构隔声设计[J].噪声与振动控制,36(1):48-52.

(下转第8页)

悬浮物矿井水及高矿化度矿井水,与不回用达标外排相比,作为饮用水回用增加处理费用为0.25~0.4元/t,但可减少排污费、水资源费等0.7~1.45元/t^[23]。因此,矿井水资源化可为煤矿带来一定的经济效益。

4 结论

矿井水资源化,是煤矿经济、社会及环境效益的统一。与传统处理工艺相比,膜技术占地小,基建投资少,运行稳定,并且出水可达到高品质水回用。膜处理技术可根据回用水水质水量需求选择组合工艺,节约运行费用,实现矿井水100%资源化。也可作为深度处理工艺,对传统工艺升级改造,使出水达到资源化标准,提高矿井水回用率,减少污染及水资源开采。综上所述,膜处理技术在矿井水资源化领域具有良好的发展前景及不可替代的位置。

参考文献

- [1] 许保玖. 给水处理理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000, 1.
- [2] 袁存中, 陈锦如. 水资源与矿井水处理利用[J]. 合肥工业大学学报, 2000, 23(51): 927-930.
- [3] 何绪文, 杨静, 邵立南等. 我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 63-66.
- [4] 郭雷, 张璐, 胡婵娟等. 我国矿井水管理现状分析及对策[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 484-489.
- [5] 王娟, 张保成, 张湃等. V型孔中空纤维超滤膜在矿井水处理及回用中的应用. 第三届膜分离技术在冶金工业中应用研讨会论文集, 2009, 10.
- [6] 武强, 王志强, 叶思源等. 混凝-微滤膜分离技术在矿井水处理与回用中的试验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 581-584.
- [7] 邱瑞芳, 崔莉, 杨凤玲等. 微滤-电渗析工艺处理高矿化度矿井水的试验研究[J]. 中国矿业, 2009, 18: 385-388.
- [8] 何嘉琦. 混凝-超滤处理煤矿矿井水的实验研究[A]. 中国矿业,

2009, 18: 385-388.

- [9] 赵春生, 陈怀柱. 超滤技术在矿井污水处理中的应用[J]. 河北煤炭, 2011, 2: 72-73.
- [10] 孙兆龙, 盛帅华. 中空超滤在煤矿深井废水预处理中的应用[J]. 现代商贸工业, 2011, 6.
- [11] 毕志斌. 煤矿矿井水深度处理回用工艺设计[J]. 工业用水与废水, 2012, 43(2): 78-80.
- [12] 赵厚斌, 崔东锋, 徐细波. 混凝澄清+超滤反渗透工艺处理天池煤矿矿井水[J]. 能源环境保护, 2015, 29(1): 29-33.
- [13] 聂锦旭, 肖贤明, 陈志正. 纳滤对煤矿矿井水处理的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(6): 22-24.
- [14] 王瑶. 高悬浮物高矿化度矿井水处理及资源化[D]. 河北, 河北工程大学, 2013: 22-24.
- [15] Ikeda K, Nakano H, Ito H, et al. New composite charge driven osmosis membrane [J]. Desalination, 1988, 68(2-3): 109-119.
- [16] 崔玉川, 潘耀祖, 刘婷等. RO法在高矿化度矿井水处理回用中的应用[J]. 净水技术, 2006, 5(2): 4-6.
- [17] 柳炳俊, 郑彭生, 谢毫等. 反渗透处理淮南矿区矿井水试验研究[J]. 能源环境保护, 2014, 28(2): 17-20.
- [18] 赵虎群, 王庚平等. 反渗透水处理技术在煤矿矿井废水处理回用中的应用[J]. 甘肃科技, 2009, 25(4): 39-41. 94-97.
- [19] Kim Kwan-Yeop, Kim Hyung-Soo, Kim Jihoon, et al. A hybrid microfiltration-granular activated carbon system for water purification and wastewater reclamation/reuse[J]. Desalination, 2014, 309(15): 181-186.
- [20] Garcia N, Moreno J, Cartmell E, et al. The cost and performance of an MF-RO/NF plant for trace metal removal [J]. Desalination, 2013, 309(15): 181-186.
- [21] Zhu, Hongtao, Wen Xianghua, Huang Xia, et al. Characterization of membrane fouling in a microfiltration ceramic membrane system treating secondary effluent [J]. Desalination, 2012, 284(4): 324-331.
- [22] 陈明华. 煤矿矿井水资源化效益分析 [J]. 煤矿环境保护, 2000, 14(1).
- [23] 庞振东. 煤矿矿井水资源化研究-以淮南矿区为例[D]. 安徽理工大学.

(上接第22页)

- [11] 徐磊, 张学飞, 王瑞乾, 等. 隔声材料排布顺序对复合板材隔声特性的影响[J]. 噪声与振动控制, 36(4): 58-62.
- [12] 赵娜. 飞机噪声影响区域敏感建筑物隔声窗设计理念 [J]. 噪声与振动控制, 36(4): 120-128.
- [13] 陈正林, 肖任贤, 王兴国等. 氮化硅陶瓷的空气耦合超声纵波传播特性研究[J]. 陶瓷学报, 2015, 36(4): 405-409.

- [14] Antonio J.B, Thdeu, Diogo M.R. Mateus. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation. Applied Acoustics, Vol.62(2001): 307-325.
- [15] 张海澜. 理论声学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 198-210.
- [16] 刘磊, 杨扬, 潘永东, 等. 空气耦合层状复合材料的声传播研究[J]. 固体力学学报, 2014, 35(1): 1-7.