

柔性微穿孔板吸声体声学性能测试与分析

张晓晓^{1,2}, 王焕钦¹, 孔德义¹, 钱玉洁³, 李国欣^{1,2}, 王 兵^{1,2}

(1. 中国科学院 合肥智能机械研究所 传感技术联合国家重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学 合肥物质研究院, 安徽 合肥 230026; 3. 河海大学 物联网工程学院, 江苏 常州 213022)

摘 要:实验探究了高频段(1 500~6 500 Hz)柔性微穿孔板吸声体的吸声特性, 由于聚氯乙烯(PVC)薄膜具有柔韧性好, 黏性不高, 易通孔, 成本低等特点, 因此, 该文以 PVC 为基材, 利用阻抗管测试穿孔率分别为 2.181%、3.407%、5.436%、7.666% 的柔性微穿孔板吸声体的声学性能, 并与马氏理论的计算值进行对比。实验结果表明, 由于板的振动效应使柔性微穿孔板吸声体的共振峰向低频偏移, 且在低频范围内吸声性能提高, 高频范围内吸声性能无明显减弱。因此, 拓宽了整体的吸声频带宽度, 在 1 500 Hz 时, 吸声系数可提高约 33.9%。

关键词:柔性微穿孔板吸声体; 吸声性能; 吸声系数; 聚氯乙烯(PVC); 偏离率

中图分类号: TN0; TB5

文献标识码: A

Acoustics Property Measurement and Analysis of Flexible Micro-perforated Panel Absorber

ZHANG Xiaoxiao^{1,2}, WANG Huanqin¹, KONG Deyi¹, QIAN Yujie³, LI Guoxin^{1,2}, WANG Bing^{1,2}

(1. State Key Lab. of Transducer Technology, Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences,

Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Dept. of Hefei Institutes of Physical Science,

Hefei 230026, China; 3. Hohai University, College of Internet of Things (IOT) Engineering, Changzhou 213022, China)

Abstract: The sound absorption performance of flexible micro-perforated panel absorber (MPPA) at high frequency range from 1 500~6 500 Hz is investigated experimentally in this paper. Since the polyvinyl chloride (PVC) materials have many advantages such as good flexibility, low viscosity, easy-to-piercing, low cost, and so on, the PVC is used as the perforated material. The impedance tube is used to test the sound absorption performance of the PVC-MPPA with perforation rate of 2.181%, 3.407%, 5.436%, 7.666% respectively, and then compared with Maa's model. The experimental results show that the absorption peaks due to the panel vibration effect have a low frequency offset. The sound absorption performance of flexible MPPA is improved significantly at low-frequency range while keeping almost the same at high-frequency range, therefore the frequency band width of sound absorption is widened, and the absorption coefficient increases of about 33.9% at 1 500 Hz.

Key words: flexible micro-perforated panel; sound absorption performance; sound absorption coefficient; PVC; deviation ratio

0 引言

1975 年, 马大猷教授提出, 微穿孔板吸声体是指由穿孔直径小于 $\varnothing 1$ mm 的薄板和板后空腔组成的共振吸声结构, 具有低声质量及高声阻的特点^[1-2]。通过近 40 年的发展, 已取得丰硕的研究成果。目前, 使用微穿孔板吸声体进行吸声降噪的环境更复杂, 如公共场所设备^[3]等, 噪声信号具有频带

宽且频谱复杂等特点。这种情况下, 单层刚性的微穿孔板吸声体的吸声频带窄且不易弯曲, 灵活性较差, 已不能满足需求。因此, 我们迫切需要拓宽微穿孔板吸声体的有效吸声频带。拓宽微穿孔板吸声体的有效吸声频带最有效的方法是减小穿孔直径。当孔径小于 $\varnothing 0.1$ mm 时, 有望达到微穿孔板吸声体的频带极限^[4]。对于刚性的微穿孔板, 随着孔径的

收稿日期: 2016-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11474291); 国家自然科学基金青年基金资助项目(11604077)

作者简介: 张晓晓(1989-), 女, 安徽六安人, 硕士生, 主要从事噪声与振动控制方面的研究。通信作者: 孔德义(1966-), 男, 安徽合肥人, 研究员, 主要从事噪声与振动控制、无人机降噪及传感器的研究。E-mail: kongdy@iim.ac.cn。

减小,穿孔密度相对增大,其共振峰向高频移动,对低频噪声的吸声效果相对减弱。为此,国内、外一些学者开始研究柔性微穿孔板的吸声性能。Lee等^[5]通过实验发现,由于薄板的振动效应,使柔性微穿孔板结构在低频处增加了一个共振吸收峰。Kang等^[6]在薄板振动效应的基础上,不考虑材料的弯曲刚度等因素的影响,给出了微穿孔薄膜的理论计算公式,并通过实验验证了其正确性。Y. Y. Lee等^[7-8]利用振动模态分析法,提出了有限柔性微穿孔板吸声体吸声性能的求解公式,且验证了该公式的正确性。Zhou Xiaoru等^[9]考虑了薄板的振动效应,给出了多层方形微穿孔板吸声体结构的声阻抗的理论模型。

综上所述,国内、外学者对穿孔薄膜进行了一系列理论和实验研究,在低频段吸声效果较好,尤其在1 000 Hz以下,吸声频带较宽,但在高频段吸声效果较差。目前关于柔性微穿孔板吸声体在高频段的吸声性能进行改进的研究工作较少,由于聚氯乙烯(PVC)薄膜的柔韧性好,黏性不高,易通孔,无毒无污染,成本低,可制成透明薄膜以及可大量制作等特点。因此,本文以200 μm 厚的PVC薄膜作为基材,研究了柔性微穿孔板吸声体在高频段的吸声性能,该研究为柔性微穿孔板的选材加工、优化设计、性能改进提供了一定的参考。

1 微穿孔板吸声理论

微穿孔板吸声体由穿孔直径小于 $\varnothing 1\text{ mm}$ 的穿孔薄板和板后空腔组成,其结构及等效电路如图1所示。图中, p 为入射声压, d 为穿孔直径, b 为孔间距, t 为板的厚度, D 为空腔深度, R 为微穿孔板的声阻, M 为声质量, ρc 为空气的特性阻抗(ρ 为空气的密度,常温下 $\rho=1.21\text{ kg/m}^3$, c 为声波在空气中的传播速度,常温下 $c=340\text{ m/s}$), Z_b 为空腔的特征阻抗^[1]。

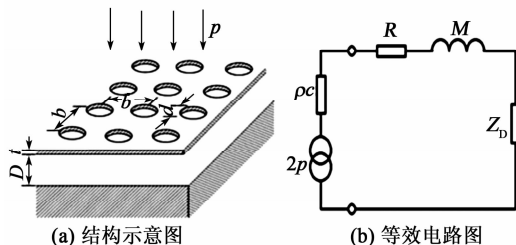


图1 微穿孔板吸声体结构示意图及其等效电路图

根据图1的等效电路,得到微穿孔板吸声体的

垂直入射吸声系数为

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + (\omega m - \cot(\omega D/c_0))^2} \quad (1)$$

式中 ω 为入射声波的角频率。

其最大吸声系数为

$$\alpha_0 = \frac{4r}{(1+r)^2} \quad (2)$$

式中 r, m 分别为相对声阻和相对声质量,且

$$r = \frac{32\mu t}{\rho c d^2} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2k}}{8} \cdot \frac{d}{t} \right] \quad (3)$$

$$m = \frac{t}{\rho c} \cdot \left[1 + \frac{1}{\sqrt{9 + k^2/2}} + 0.85 \frac{d}{t} \right] \quad (4)$$

式中: μ 为空气的运动粘滞系数; k 为穿孔常数,且

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{\mu}} \cdot \frac{d}{2} = \sqrt{\frac{2\pi f}{\mu}} \cdot \frac{d}{2} \quad (5)$$

2 柔性微穿孔板吸声体的参数设计与制作

根据马大猷的微穿孔板吸声理论(简称马氏理论)设计了柔性微穿孔板吸声体的结构参数。本文采用PVC材料,利用铣床加工制作柔性微穿孔板,如表1所示。表中, σ 为穿孔率。当微孔为正方形排列时, $\sigma = 78.5 \times d^2/b^2$ 。部分样品图片如图2所示。

表1 4种不同参数的柔性微穿孔板吸声体

	d/mm	b/mm	t/mm	D/mm	$\sigma/\%$
1 [#]	0.1	0.6	0.20	15	2.181
2 [#]	0.1	0.48	0.20	15	3.407
3 [#]	0.1	0.38	0.20	15	5.436
4 [#]	0.1	0.32	0.20	15	7.666

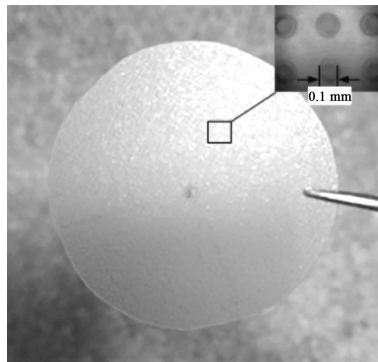


图2 PVC穿孔薄膜实物图及局部放大图

3 实验结果

柔性微穿孔板吸声体的垂直入射吸声系数是用驻波管测试仪的高频管($\varnothing 30\text{ mm} \times 350\text{ mm}$, 1 500~6 500 Hz)测得。与相同参数的马氏理论的

计算值进行比较,结果如图3所示。

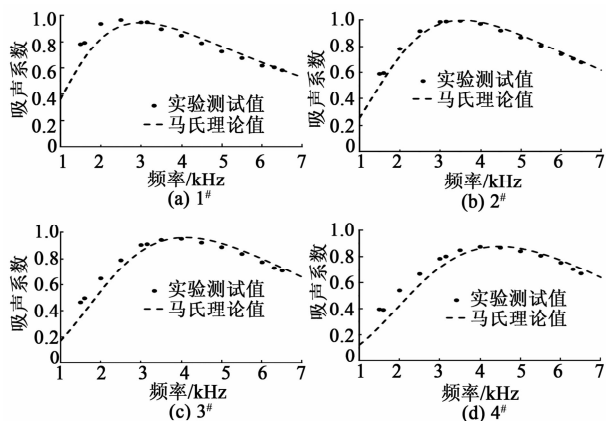


图3 柔性微穿孔板吸声体的实验值与马氏理论值对比

由图3可看出,4种不同参数的柔性微穿孔板吸声体的吸声系数的实验值与马氏理论计算值相比,吸声频带均向低频展宽。因为经典的马氏理论是基于刚性材料假设提出的,而本文以PVC材料作为基材,材料本身较柔软,由于薄板的振动,使柔性微穿孔板吸声体的共振峰向低频偏移。对于刚性微穿孔板吸声体,根据马氏理论可计算出,1[#]、2[#]、3[#]、4[#]的最大吸声系数分别为0.94、0.99、0.96、0.88,其相应的倍频程分别约为2.5、2.4、2.1、1.8(均以吸声系数0.5作为有效吸声范围的低限,下同),共振频率分别为2996 Hz、3543 Hz、4102 Hz、4473 Hz。对于刚性的微穿孔板,随着孔径的减小,穿孔密度相对应增大,其共振峰向高频移动,对低频噪声的吸声效果相对减弱。但对于相同参数的柔性微穿孔板吸声体,对低频噪声的吸声效果有改进,如4[#]在频率为1500 Hz时 $\alpha=0.395$,而相同参数的刚性微穿孔板吸声体在1500 Hz时 $\alpha=0.261$,相对提高了33.9%。此时也拓宽了柔性微穿孔板吸声体的吸声频带宽度,如1[#]、2[#]柔性微穿孔板吸声体的吸声频带度约3个倍频程,3[#]、4[#]柔性微穿孔板吸声体的吸声频带度约为2.2个倍频程,与马氏理论的计算值相比,均有不同程度的提高。图4为4种不同参数的柔性微穿孔板吸声体的实验结果。由图可看出,其他结构参数保持不变时,随着穿孔率的增大,柔性微穿孔板吸声体的吸声系数峰值及共振频率向高频移动,吸声系数峰值先增大后减小,所以穿孔率并非越大越好,适当的穿孔率能提高柔性微穿孔板吸声体的吸声性能。低于共振频率时,吸声系数曲线随着穿孔率的增大,衰减的越

快,高于共振频率时,吸声系数曲线随着穿孔率的增大,衰减均较缓慢。在低于4000 Hz时,4[#]吸声系数曲线衰减速率最快;高于4000 Hz时,吸声系数曲线衰减速率缓慢。

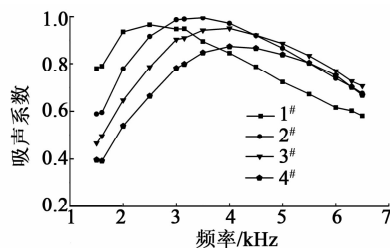


图4 不同穿孔率柔性微穿孔板吸声体的实验结果

为了进一步分析柔性微穿孔板吸声体在高频段的吸声特性,定义偏离率 ϑ 为实验值和理论值之差的绝对值与马氏理论值的比值,即

$$\vartheta = \frac{|a_{\text{exp}}(f) - a_{\text{Maa}}(f)|}{a_{\text{Maa}}(f)} \times 100\% \quad (6)$$

式中 $\alpha_{\text{exp}}(f)$ 、 $\alpha_{\text{Maa}}(f)$ 分别表示频率为 f 时柔性微穿孔板吸声体垂直入射吸声系数的实验值和马氏理论的计算值。

柔性微穿孔板吸声体的垂直入射吸声系数的偏离率随频率变化关系如图5所示。由图可知,在低于共振频率时,相对偏离率较大。在1500 Hz时,1[#]、2[#]、3[#]、4[#]的最大偏离率分别约为19.4%、15.36%、24.36%、33.9%。越靠近共振频率,偏离率越小;接近共振频率时,偏离率最小,即表示此时马氏理论的计算值和实验值基本吻合,此时3[#]的最大偏离率约为1.0%。当高于共振频率时,偏离率先增大后减小,但变化幅度相对于低于共振频率时小,最大的偏离率约为5.0%。在高频段,不同的穿孔率导致的偏离率的变化趋势相同。

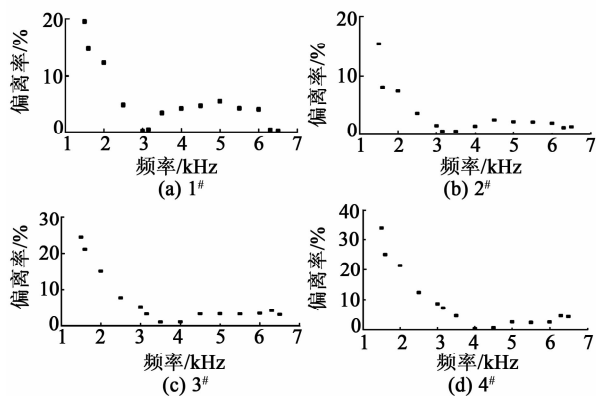


图5 柔性微穿孔板吸声体的偏离率

4 柔性微穿孔板吸声体的吸声机理探讨

实验结果表明,柔性微穿孔板吸声体在低频范围内有明显的改进,高频范围内吸声效果未减弱。Lee^[8]在研究穿孔薄膜的吸声特性时指出,穿孔薄膜在低频段(小于1 000 Hz)出现2个共振峰,一个是由于穿孔效应引起,另一个是由于薄板的振动。通过实验证明,在忽略高阶振动模态的条件下,给出了相应的简化模型及理论计算公式。而从本文的实验结果来看,并未在高频段出现2个共振峰,主要是因为PVC材质较软,低阶固有频率较小,本文主要由于高阶固有频率的影响,从而引起PVC板的振动,导致了与马氏理论计算值的偏差,为了验证此结论,采用一块未穿孔的PVC板和亚克力板进行试验测试,板后留有15 mm空腔,获得其垂直吸声系数曲线,结果如图6所示。由图可看出,材质较硬的亚克力板在整个高频段的吸声效果较差,而PVC薄板在2 500 Hz以内的吸声系数均在0.2以上,说明在低频范围内,未穿孔的PVC板具有一定的吸声效果。在2 000 Hz时,吸声系数可达0.57。未穿孔板的声阻抗主要是板自身所产生的声阻抗和声致振动使未穿孔板两面的声压差产生的声阻抗,图6表明,PVC薄板的振动消耗了一部分能量,引起了薄板表面声阻抗的变化,提高了吸声效果。在此基础上进行穿孔,通过微孔效应等提高低频范围内的吸声效果,高频范围内的吸声效果未减弱,拓宽了吸声频带宽。

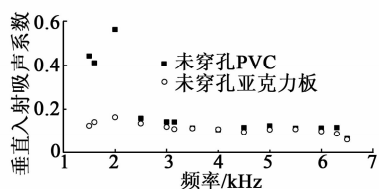


图6 柔性PVC未穿孔板吸声体的吸声系数实验值

5 结束语

本文以PVC材料加工制作柔性微穿孔板吸声体,实验研究发现,在高频段,由于薄板的振动效应使得柔性微穿孔板吸声体的共振吸收峰向低频偏移,且在低频范围内有明显的改进,高频范围内吸声效果未减弱,因此,拓宽了柔性微穿孔板吸声体的吸声频带宽度,在本实验中偏离率可达33.9%,柔性微穿孔板吸声体的吸声频带度可达约3个倍频程。此外,随着穿孔率的增大,吸声系数峰值及共振频率

向高频移动,吸声系数峰值先增大后减小,所以穿孔率并非越大越好,适当的穿孔率能提高柔性微穿孔板吸声体的吸声性能。柔性微穿孔板易弯曲,应用广,适用于很多降噪场合。

参考文献:

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论和设计[J]. 中国科学, 1975(1):38-50.
MA D Y. Theory and design of micro perforated-panel sound-absorbing construction [J]. Sci Sin, 1975(1): 38- 50.
- [2] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1997, 23(5): 21- 29.
MA D Y. General theory and design of micro- perforated panel absorbers [J]. Acta Acustica, 1997, 23(5): 21-29.
- [3] 查雪琴. Fuch 透明的微穿孔吸声材料改善了新建议会大厅的音质[J]. 声学技术, 1994(1): 1- 3.
ZHA Xueqin, Fuch transparent micro perforated sound absorption material improves the sound quality of the new assembly hall [J]. Technical Acoustics, 1994(1): 1-3.
- [4] 马大猷. 微穿孔板的实际极限[J]. 声学学报, 2006, 31(6): 481- 484.
MA D Y. Practical absorption limits of MPP absorbers [J]. Acta Acustica, 2006, 31(6): 481-484.
- [5] LEE J, SWENSON G W. Compact sound absorbers for low frequencies[J]. Noise Control Engineering Journal, 1992, 38(3): 109-117.
- [6] KANG K, FUCHS H V. Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 220(5): 920-950.
- [7] LEE Y Y, LEE E W M, NG C F. Sound absorption of a finite flexible micro- perforated panel backed by an air cavity[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 287: 227-243.
- [8] LEE Y Y, LEE E W M. Widening the sound absorption bandwidths of flexible micro-perforated curved absorbers using structural and acoustic resonances [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(8): 925-934.
- [9] ZHOU Xiaoru, DROTLEFF H, ZHANG Ting. Micro perforated absorber - transparency and room acoustics [OE/OL]. [http://www.icsv21.org/index.php? va=viewpage&-vaid=279](http://www.icsv21.org/index.php?va=viewpage&-vaid=279), 2014-07-13.