

微穿孔板二次余数扩散体复合结构 阻抗管实验研究

刘 玲¹, 王佳琛², 包 飞¹, 蔡 俊¹

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 拜耳技术工程(上海)有限公司, 上海 200240)

摘要: 传统的共振吸声结构由于吸声频带窄而无法满足要求, 为此将具有良好扩散性能的二次余数扩散体(Quadratic Residue Diffuser, QRD)结构与微穿孔板复合以期获得在吸声频带和吸声峰值兼佳的复合结构。阻抗管实验研究表明, 将 QRD 结构与微穿孔板复合之后, 微穿孔板的吸声频带有了很大的扩展, 并同时拥有了 QRD 结构双吸声峰的特点。经过复合, QRD 结构的吸收峰吸声系数明显改善, 从 0.27 提高到 0.6 以上, 半峰宽拓宽到 300 Hz 以上; 与微穿孔板变化规律一致, 微穿孔板/QRD 复合结构的中低频吸收峰频率随微穿孔板穿孔率的增大而向高频移动, 随板厚的增加而向低频移动。

关键词: 微穿孔板; QRD 复合结构; 共振吸声结构; 吸声系数

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-02-0162-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.02.012

Experimental research on impedance tube of composite structure made by quadratic residue diffuser and micro-perforated plates

LIU Ling¹, WANG Jia-chen², BAO Fei¹, CAI Jun¹

(1. Shanghai Jiao Tong University, School of Environmental Science and Engineering, Shanghai 200240, China;

2. Bayer Technology and Engineering (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai 200240, China)

Abstract: The traditional acoustic absorption structure, due to poor sound absorption effect and narrow absorption band, cannot meet the audio requirements. We combine the quadratic residue diffuser (QRD) which has good diffusion performance with the micro-perforated panel so as to get a better absorption-diffusion structure. The experimental results of the impedance tube show that when micro-perforated plates are combined with QRD, the half-peak width of the micro-perforated plates is improved and they also have two absorption peaks as the QRD structure has. The peak of acoustical absorption coefficient is improved to 0.6 from 0.27 and the width of absorption frequency band improved to 300Hz. The experiment results also show that with the increase of the perforation rate of the micro-perforated plate, the absorption peaks of the composite structures decrease. The absorption frequency band moves to higher frequency along with the increase of the perforation rate of the micro-perforated panel. And the absorption frequency band move to lower frequency along with the increase of the thickness of the micro-perforated panel. With the increase of the thickness of the micro-perforated panel, the absorption peaks of the composite structure decrease.

Key words: micro-perforated plate; QRD composite structure; resonance sound absorption structure; absorption coefficient

0 引言

随着经济的发展, 人民生活水平的提高, 环境噪声逐渐成为社会关注的热点问题。而其中解决问题的关键是声学结构的研制。

微穿孔板结构是一种噪声控制中使用非常广

泛的共振声学结构, 其工作原理主要是由于亥姆霍兹共振结构使某些频率的声波在声阻抗突变的界面处发生反射、干涉等现象, 从而消除噪声^[1-3], 虽然其在设计频率具有较高的吸声性能, 但吸声峰单一, 吸声频带窄。长期以来, 声学工作者一直在探索提高微穿孔板吸声性能的方法和技术^[4-8], 但都围绕微穿孔本身结构的变化开展。

二次余数序列扩散体(Quadratic Residue Diffuser, QRD)^[9]由德国声学家施罗德根据数论和声学原理发明, 它是一种格栅型槽沟扩散体^[10,11]。QRD 是由一维的槽或者二维的管道结构组成, 通过扩散

收稿日期: 2014-04-25; 修回日期: 2014-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11004133)

作者简介: 刘玲(1988-), 女, 湖北天门人, 硕士, 研究方向为环境噪声。

通讯作者: 蔡俊, E-mail: juncai@sjtu.edu.cn

附加声能量到一个广阔的范围方向，具有很好的扩散性能。同时研究也表明，QRD 结构除了有较好的扩散性能外，还同时具有吸声结构的性能^[12-14]。K. Fujiwara^[14,15]等通过在混响室和驻波管的实验研究表明，QRD 结构在序列长度、维数以及材料等发生改变时，其吸声效果都一直存在。盛胜我^[12]等人认为 QRD 的吸声原理主要为：声波入射到扩散体后，将从不同深度的槽穴反射回来，由于各个槽穴深度不同，声波在经历不同距离后的相位不一致，在结构表面处产生干涉抵消现象，在设计频率及其谐振频率具有一定的吸声性能。为此，QRD 结构在一定频率范围内兼具扩散和吸声的效果，而且由于谐振频率同时存在多个吸收峰，但是其峰值吸声系数不高。

由于微穿孔板结构与 QRD 结构的吸声特点互补，且声能消耗方式接近，因此，两者复合对声学性能的改善具有可行性。本课题组的前期研究已表明，将微穿孔板与 QRD 结构复合之后，复合结构不仅仍具有良好的扩散性能，而且吸声性能的存在使得反射声能减少了约 5 dB^[16]。因此本研究将微穿孔板结构与 QRD 结构相结合，将微穿孔板覆盖于 QRD 结构表面，通过阻抗管法向入射测试方法^[17]，研究微穿孔板的孔径、板厚等因素对复合结构吸声性能的影响，最终获得在吸声频带和吸声峰值兼具的复合结构。

1 实验材料及实验仪器

本实验所用仪器是北京声望公司的 SW 系列阻抗管测试系统，该系统包括信号发生器、功放、扬声器、传感器、数据处理模块等，可以进行材料的吸声、隔声等声学参数测试。实验用 SW 型阻抗管测试系统如图 1 所示。



图 1 SW 型阻抗管测试系统
Fig.1 The measurement system for SW type impedance tube

根据实验用阻抗管的实际尺寸，确定 QRD 一维模型的相关规格：其直径为 10 cm，高为 8 cm，槽宽为 1 cm，槽长为 7 cm，最大槽深为 6.8 cm，设

计频率 f_r 为 500 Hz，材质为铸铁。实验所采用 QRD 结构如图 2 所示。

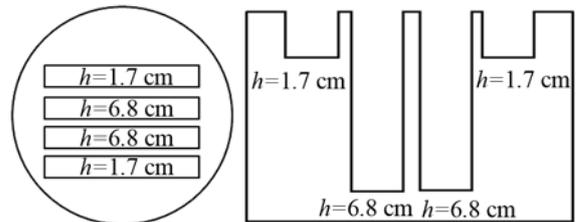


图 2 QRD($f_r=500$ Hz, $W=1$ cm)结构示意图
Fig.2 Structure diagram of QRD($f_r=500$ Hz, $W=1$ cm)

微穿孔板根据已有的理论^[19-20]设计了不同的厚度和穿孔率，微穿孔板的孔洞在薄板上均匀分布。具体尺寸如表 1 所示。

表 1 阻抗管实验材料的规格
Table 1 The material specifications used in the experiment of impedance tube

复合材料	厚/mm	穿孔率/槽数	备注
微穿孔板	0.6	1%、2%、3%	穿孔直径为 1 mm
	0.7	1%、2%、3%	
	0.8	1%、2%、3%	
一维 QRD 模型($N=5$)	80	4 对对称槽	最大槽深为 51 mm

本实验主要测量 QRD 结构以及微穿孔板 QRD 复合结构的吸声系数，研究这些结构在中低频带内(60~1500 Hz)吸声系数的变化，从而得到吸声性能最好的复合结构。

2 实验结果

2.1 微穿孔板 QRD 复合结构的吸声性能研究

对 QRD 结构、微穿孔板以及两者的复合结构进行阻抗管吸声系数测试，研究了 QRD 结构及微穿孔板/QRD 复合结构的吸声系数曲线与材料特性的变化关系。其中，微穿孔板所用空腔深为 6.8 cm。现在选取 QRD 结构、板厚为 0.6 mm、穿孔率为 1% 的微穿孔板以及两者的复合结构为代表进行分析，具体如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，QRD 结构有两个明显的吸收峰，峰值为 0.27。无论从频带宽及峰值大小的角度来看，QRD 结构均具有相当大的局限性。而微穿孔板吸声频带较窄，很难满足宽频带上的吸声要求。两者复合之后吸声性能具有明显改善。对 QRD 而言，复合结构的半峰宽与吸收峰都有很大的提高，吸声系数由原来的 0.27 提升至 0.8 以上；对于微穿孔板而言，从测得实验结果可以推测，复合结构在 1600 Hz 及以上会出现第二个吸声峰，拓宽了

其吸声频带。

由于 QRD 的沟槽占整个面积的 35.7%，从声能吸收量的角度看，复合结构的吸收峰面积应该相应地小于纯微穿孔板结构吸收峰面积，从图 3 看却恰恰相反。因此说明将微穿孔复合 QRD 结构不是将几种不同共振频率的微穿孔板共振吸声结构并联。

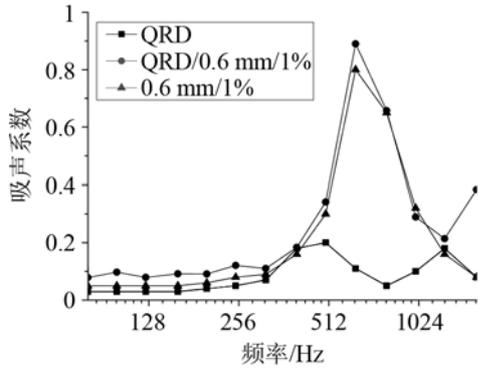


图 3 微穿孔板/QRD 复合结构的吸声频谱(厚 0.6 mm, 穿孔率为 1%)
Fig.3 Absorption coefficient of composite structure made by QRD and micro-perforated plate

由此可见，微穿孔板和 QRD 结构由于其本身特点的限制，在吸收峰值与频带宽度上会有一些缺陷，但将两者复合后，一方面承袭了 QRD 双吸声峰在中低频范围良好的吸声性能，另一方面则弥补和拓展了 QRD 结构在吸声峰及频带宽上的不足，无论从吸收峰峰值还是频带宽上，均有较大的突破。

2.1.1 微穿孔板穿孔率对复合结构吸声性能的影响

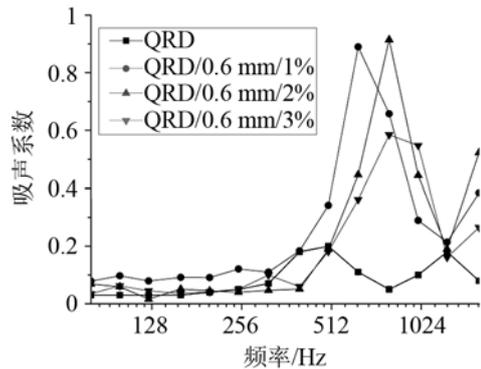
由于 QRD 结构各个槽的参数一定，微穿孔板孔径一定，为 1 mm，所以复合结构的吸声性能主要受微穿孔板的板厚和穿孔率影响。穿孔率对复合结构吸声性能的影响如图 4 所示。

从图 4 中可以明显发现，各曲线变化趋势在 80~1600 Hz 内大致相同，均在中低频范围内具有一个大的吸收峰，且存在明显的规律性变化。

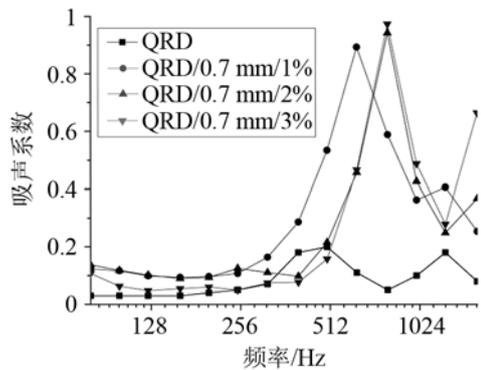
图 4(a)表示的是一维 QRD 结构复合 0.6 mm、穿孔率分别为 1%、2%及 3%微穿孔板的吸声系数曲线。从原始数据以及图 4(a)可知其吸收峰的所在频率从 678 Hz、820 Hz 进一步向右移至 886 Hz，在板厚不变的情况下，随着穿孔率的增大而增大。半峰宽平均值为 314 Hz。

图 4(b)表示的是一维 QRD 结构复合 0.7 mm、穿孔率分别为 1%、2%及 3%微穿孔板的吸声系数曲线，其吸收峰的所在频率从 656 Hz、794 Hz 进一步向右移至 816 Hz，在板厚不变的情况下，随着穿孔率的增大而增大。半峰宽平均值为 357 Hz。

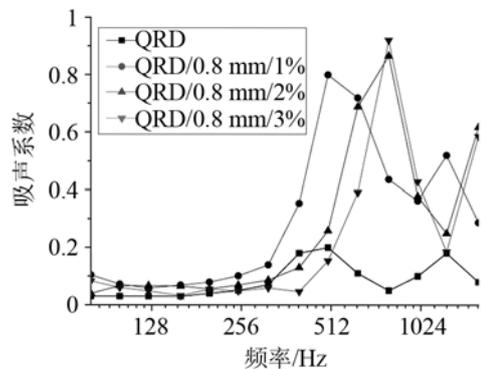
图 4(c)表示的是一维 QRD 结构复合 0.8 mm、穿孔率分别为 1%、2%及 3%微穿孔板的吸声系数



(a) 板厚 0.6 mm



(b) 板厚 0.7 mm



(c) 板厚 0.8 mm

图 4 微穿孔板穿孔率对复合结构吸声系数的影响

Fig.4 Absorption coefficients of composite structures with different perforated percentages

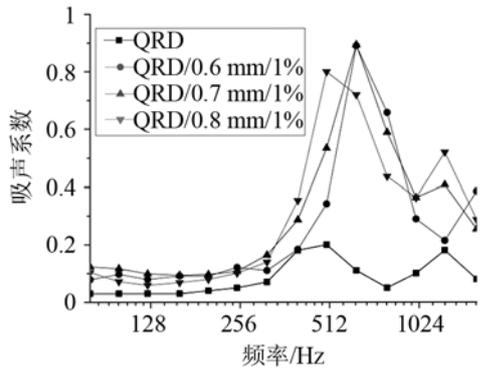
曲线，其吸收峰的所在频率从 558 Hz、734 Hz 进一步向右移至 826 Hz，在板厚不变的情况下，随着穿孔率的增大而增大。半峰宽平均值为 414 Hz。

从上述分析中，可以得出如下结论：一维 QRD 微穿孔板复合结构，吸收峰值频率随穿孔率的增大而增大，即往高频方向移动。

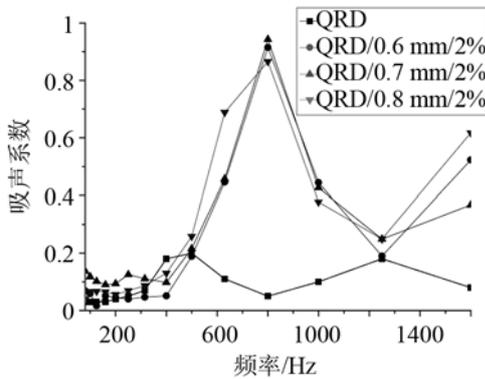
2.1.2 微穿孔板板厚对复合结构吸声性能的影响

将 QRD 结构分别与穿孔率一定、板厚不同的微穿孔板复合，测量其吸声系数，如图 5 所示。

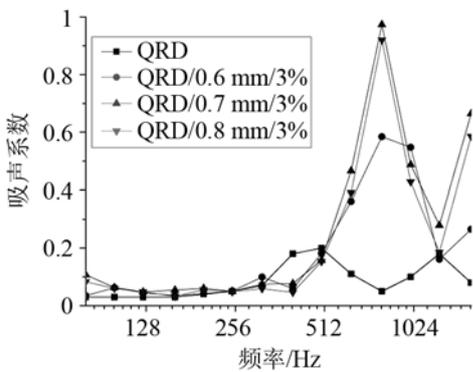
从图 5 可以明显发现，各曲线变化趋势在 80~1500 Hz 内大致相同，均在中低频范围内具有一



(a) 微穿孔板穿孔率为 1%



(b) 微穿孔板穿孔率为 2%



(c) 微穿孔板穿孔率为 3%

图 5 微穿孔板板厚对复合结构吸声系数的影响

Fig.5 Absorption coefficients of composite structures with different thicknesses

个大的吸收峰，且存在明显的规律性变化。

图 5(a)表示的是一维 QRD 结构复合 1%穿孔率、板厚分别为 0.6、0.7 及 0.8 mm 微穿孔板的吸声系数曲线，由图可见，其吸收峰的所在频率从 678 Hz、656 Hz 进一步向左移至 558 Hz，在 1%穿孔率不变的情况下，随着板厚的增大而减小。半峰宽平均值为 357 Hz。

图 5(b)表示的是一维 QRD 结构复合 2%穿孔率、板厚分别为 0.6、0.7 及 0.8 mm 微穿孔板的吸声系数曲线，其吸收峰的所在频率从 82 Hz、794 Hz 进一步向左移至 558 Hz，在 2%穿孔率不变的情况下，随着板厚的增大而减小。半峰宽平均值为 342

Hz。

图 5(c)表示的是一维 QRD 结构复合 3%穿孔率、板厚分别为 0.6、0.7 及 0.8 mm 微穿孔板的吸声系数曲线，由图可见，其吸收峰的所在频率从 886 Hz、816 Hz 进一步移至 826 Hz，观察 3 条复合曲线吸收峰的右半段，依然可以判断，在 1%穿孔率不变的情况下，随着板厚的增大，曲线整体左移。半峰宽平均值为 387 Hz。

从上述分析中可以得出如下结论：QRD 微穿孔板复合结构，吸收峰所在频率随板厚的增加而变小，即往低频方向移动。

复合结构吸声峰及所在频率以及半峰宽如表 2 所示。

表 2 QRD 微穿孔板复合结构吸声峰及半峰宽
Table 2 Sound absorption peaks and half-peak widths of different composite structures made by QRD and Micro-perforated plate

微穿孔板/QRD 复合结构	吸声峰值	吸声峰所在频率/Hz	半峰宽 /Hz
QRD	0.27	602	208
(板厚 6 mm, 穿孔率 1%)/QRD	1.00	678	310
(板厚 6 mm, 穿孔率 2%)/QRD	0.93	820	330
(板厚 6 mm, 穿孔率 3%)/QRD	0.83	886	304
(板厚 7 mm, 穿孔率 1%)/QRD	0.93	656	384
(板厚 7 mm, 穿孔率 2%)/QRD	0.95	794	330
(板厚 7 mm, 穿孔率 3%)/QRD	0.99	816	358
(板厚 8 mm, 穿孔率 1%)/QRD	0.88	558	378
(板厚 8 mm, 穿孔率 2%)/QRD	1.00	734	366
(板厚 8 mm, 穿孔率 3%)/QRD	0.96	826	500

3 结论

本文通过将 QRD 结构与微穿孔板复合，扩展了微穿孔板的吸声半峰宽，同时通过改变微穿孔板的穿孔率和厚度，研究对微穿孔板 QRD 复合结构的吸声系数的影响。最终得到与微穿孔板相一致的结论：

(1) 复合结构吸收峰值频率随微穿孔板穿孔率的增大而增大。

(2) 微穿孔板 QRD 复合结构，其吸收峰随板厚的增加而向低频移动。

综上所述,在与QRD结构复合之后,微穿孔板吸声系数随穿孔率和板厚的变化趋势与之前一致,同时复合之后微穿孔结构出现双吸声峰值,大大拓展了吸声带宽(半峰宽度在300 Hz以上)。

由此,可以根据实际需要,设计特定频率的QRD结构,然后与一定尺寸的微穿孔板复合,使得结构在特定频率及其谐振频率具有较高的声能消耗,实现具有针对性的降噪,从而降低项目降噪的盲目性。

参 考 文 献

- [1] 何柞辅,王曼.水下均匀复合结构吸声的理论研究[J].应用声学,2006,15(5):6-11.
HE Zuoyong, WANG Man. Investigation of the sound absorption of homogenous composite multiple-layer structures in water[J]. Applied Acoustics, 2006, 15(5): 6-11.
- [2] 马大猷.噪声控制学[M].北京:科学出版社,1987:188-191.
MA Dayou. Noise Control acoustics[M]. Beijing: Science Press. 1987: 188-191.
- [3] 洪宗辉.环境噪声控制工程[M].北京:高等教育出版社,2002,6.
HONG Zonghui. Environmental noise control engineering[M]. Beijing: High Education Press 2002, 6.
- [4] 张军峰,王敏庆,刘彦森.高温下双层串联微穿孔板结构声学特性研究[J].压电与声学,2009,31(2):139-141.
ZHANG Junfeng, WANG Minqing, LIU Yansen. Study on acoustic characteristic of double layer micro-perforated panel absorber at high temperature[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(2): 139-141.
- [5] 张倩,吕亚东,杨军,等.管束放置方式对管束穿孔板吸声性能的影响[J].声学技术,2009,28(5):213-214.
ZHANG Qian, LÜ Yadong, YANG Jun, et al. Influence of the configurations of tubes on the absorption characteristics of perforated absorber with flexible tube bundles[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(5): 213-214.
- [6] 徐颖,何立燕.超细不锈钢纤维对厚微穿孔板吸声性能的影响[J].噪声与振动控制,2010,4(2):146-149.
XU Ying, HE Liyan. Improvement of sound absorption characteristics for thick microperforated panels using thin stainless-steel fibers[J]. Noise and Vibration Control, 2010, 4(2): 146-149.
- [7] 卢伟健,张斌,李孝宽.变截面微穿孔板吸声特性研究[J].噪声与振动控制,2009,4(2):147-150.
LU Weijian, ZHANG Bin, LI Xiaokuang. Study on acoustic characteristic of micro-perforated panel with variable cross-section[J]. Noise and Vibration Control, 2009, 4(2): 147-150.
- [8] 马大猷,刘克.特宽频带微穿孔板吸声体及其制造方法和设备:中国,00103311.5[P].2004-09-22.
MA Dayou, LIU Ke. Super wide frequency band micropunching acoustical body and its producing method and equipment: China, 00103311.5[P]. 2004-9-22.
- [9] Morgan P A, Hothersall D C, Chandler S N. Wilde influence of shape and absorbing surface—A numerical study of railway noise barriers. Journal of Sound and Vibration[J]. 1998, 217(3): 405-417.
- [10] SCHROEDER M R. Diffuse sound reflection by maximum-length sequences[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1975, 57(1): 149-150.
- [11] SCHROEDER M R. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion[J]. J. Acoust. Soc. Am. 17797, 65(4): 958-963.
- [12] 盛胜我,王毅刚.基于二次剩余序列的扩散吸声体的研究[J].应用声学,1995,14(3):6-9.
SHENG Shengwo, WANG Yigang. Study on bulk absorber micro perforated two residual series expansion[J]. Applied Acoustics. 1995: 14(3): 6-9.
- [13] COX T, D' ANTONIO P. Schroeder Diffusers: A Review[J]. Build. Acoust., 2003, 10(1): 1-32.
- [14] Fujiwara K, Miyajima T. Absorption characteristics of a practically constructed Schroeder diffuser of quadratic-residue type[J]. Applied Acoustics, 1992, 35(2): 149-152.
- [15] Fujiwara K. On the reverberant sound absorption coefficient of the newly developed absorbing structure for low frequency range[C]// Proc. of Inter-noise, 2006: 581-584.
- [16] 包飞,刘玲.微穿孔板复合对二次余数扩散体结构扩散性能影响研究[J].应用声学,2013,32(5).
BAO Fei, LIU Ling. A study on diffusion properties of the quadratic residue diffuser structure composited with micro-perforated sheet[J]. Applied Acoustics, 2013, 32(5): 383-387.
- [17] 戴根华,徐欣.吸声系数和声阻抗率测量方法[C]//中国声学学会:全国环境声学电磁辐射环境学术会议论文集,2003.
DAI Genhua, XU Xin. Measuring method of coefficient and acoustic impedance rate of absorption[C]// National Environmental Acoustic Electromagnetic Radiation Environmental Conference Proceedings, China, 2003.