

微穿孔板复合对二次余数扩散结构 扩散性能影响研究*

包 飞¹ 刘 玲¹ 王亚晨¹ 雷学东² 蔡 俊^{1†}

(1 上海交通大学环境科学与工程学院 上海 200240)
(2 交通运输部公路科学研究院 北京 100088)

摘要 扩散吸声结构 (Diffusor) 能应用于室内外声品质的改善, 具有很好的研究意义和应用前景。微穿孔复合二次余数扩散 (Quadratic residue diffusers, QRD) 结构能显著提高低频吸声性能, 但复合对扩散性能的影响未见报道。本论文对 QRD 结构及其与厚度为 0.6 mm, 穿孔率为 1%、2%、3% 的微穿孔板复合结构的扩散性能进行测试, 通过计算得出相应的反射声能极坐标图和扩散系数。研究表明, 微穿孔复合 QRD 结构在中低频特别在结构自身共振频率范围内具有良好的扩散性能, 扩散系数在 0.8 到 0.95 之间, 随着频率增加, 复合结构的扩散性能有下降的趋势, 同时由于微穿孔板的吸声性能, 复合后结构的空腔反射声能普遍降低 5 dB 左右。

关键词 QRD 结构, 微穿孔板, 复合结构, 扩散性能

中图分类号: TB535+.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2013)05-0383-05

A study on diffusion properties of the quadratic residue diffuser structure composited with micro-perforated sheet

BAO Fei¹ LIU Ling¹ WANG Yachen¹ LEI Xuedong² CAI Jun¹

(1 School of Environmental Science and Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)
(2 Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract Diffusor can be applied to improve the quality of indoor and outdoor sound, it has good research significance and application prospects. The quadratic residue diffusers (QRD) structure composited with micro-perforated sheet can significantly improve the performance of low-frequency sound absorption, but the diffusion properties about it have seldom been reported. This paper carried out a test to the QRD structure and its composite structure with 0.6 mm-thickness, perforated percentage of 0.1%, 0.2%, 0.3% microperforated-panel, obtained polar coordinate diagrams and diffusion coefficient of different structure by calculating. The results show that the QRD structure composited with micro-perforated sheet has good diffusion properties in the low frequency (especially in structure's resonance frequency range). The diffusion coefficient is between 0.8 and 0.95, and the diffusion properties of the composite structure declines when the

2013-05-10 收稿; 2013-06-30 定稿

*国家自然科学基金项目(11004133), 公路交通环境保护技术交通行业重点实验室开放课题资助

作者简介: 包飞 (1988-), 男, 湖北鄂州人, 硕士研究生, 研究方向: 环境噪声控制。

刘玲 (1988-), 女, 硕士研究生。 王亚晨 (1989-), 男, 硕士研究生。 雷学东 (1979-), 男, 高级工程师。

蔡俊 (1976-), 男, 副教授, 硕士生导师。

† 通讯作者: 蔡俊, E-mail: juncai@sjtu.edu.cn

frequency increases. Meanwhile, due to sound absorption performance of the micro-perforated sheet, the structure space reflected sound generally reduces by about 5 dB after composited with micro-perforated sheet.

Key words QRD structure, Microperforated sheet, Composite structure, Diffusion properties

1 引言

扩散吸声结构能应用于室内外的声品质改善，具有很好的研究意义和应用前景。目前普遍采用的声扩散技术是由德国的 Schoreder 教授运用数学上的数论原理得到一种简单、效果显著的声扩散体，即二次剩余序列扩散体^[1-2]。二次余数扩散结构简称 QRD 结构，由一维的槽或者二维的腔结构组成，在一个周期内，腔的深度根据二次余数序列的不同而不同，声波进入槽时会从密封的刚性腔底反弹向槽口，当反弹的声波与刚进入腔的声波相位差足够大时，这种结构就会使反射声波产生显著的散射，从而扩散到不同方向^[3]。QRD 结构除了具有良好的扩散效果，同时还发现这种结构在低频范围内还具有一定的吸声性能。K. Fujiwara 等人（1992）制作了两种尺寸的 QRD 结构并进行了测试，发现扩散体在低于设计频率下限的频率范围内具有很强的吸声性能^[4]。H.Kuttruff（1994）对 QRD 结构的低频强吸声现象进行了分析，并建立了模型，结果表明，扩散体结构间声波的强平抑运动提供了更多的声能损耗^[5]。K.Fujiwara 等人（1995）证实了声波法向入射时某些 QRD 的吸声系数，在 63 Hz 可以达到 0.5，在 80 Hz 可超过 0.9^[6]。为了得到更好的扩散吸声效果，研究人员进行了很多相关的改进研究，古林强等在 QRD 结构凹槽内填充多孔性纤维材料拓宽结构的扩散角度^[7]，T.Wu，T.J.Cox 等在 QRD 结构凹槽口复合穿孔板扩大结构的声吸收频域范围^[8]，M.Naderzadeh 等在 QRD 结构的凹槽中部加上穿孔板以控制 QRD 结构的声能吸收^[9]。

有研究表明，在 QRD 结构的各个槽口复合微穿孔板得到的微穿孔板复合 QRD 结构能够显著提高低频吸声性能^[10]，但对这种复合结构是否有扩散性能（通常被认为是微穿孔板结构的空腔组合），以及微穿孔板复合对 QRD 结构扩散性能的影响国内外未见报道，因此本文的目的是研究微穿孔复合对 QRD 结构扩散性能的影响，探究复合微穿孔板对 QRD 结构扩散性能的改变规律。

2 微穿孔板复合 QRD 结构扩散原理及其共振频率范围

2.1 复合后结构扩散原理分析

微穿孔板复合后结构的扩散原理主要在两个方面，一个是对入射声波传播路线的改变，一个是对声阻抗的改变。 $N=7$ 的 QRD 结构扩散体截面如图 1 所示（图中 l_n 表示凹槽深度， b 表示凹槽宽度），可以将该扩散体看成由 7 个不同深度的井组成，井口复合微穿孔板之后就会形成 6 个空腔（有一个井深度为 0 不计）。

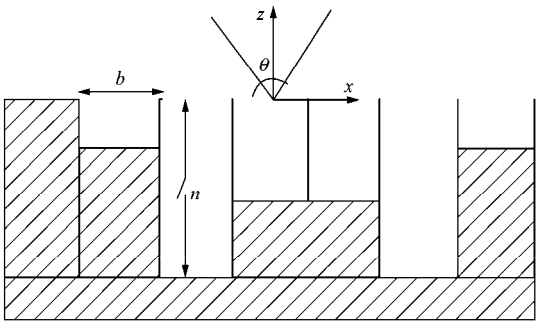


图 1 N=7 的 QRD 结构截面图

根据 T.Wu，T.J.Cox 等人的一些推导^[11-12]，我们可以知道，当单井的深度 l_n 发生改变时，单井的声阻抗会发生变化。当井的数目变化时，复合结构的扩散效果会发生变化。当结构的井口直接加上声阻抗层时（如加上微穿孔板），复合结构的声阻抗发生变化，会导致扩散效果改变，同时，对于不同频率的或者不同方向的声波由于能量吸收等不同其扩散效果也不一样。在这里，我们主要对 QRD 结构加上微穿孔板前后反射声能的变化及其扩散系数进行研究。

2.2 复合后结构共振频率范围

单个穿孔结构共振频率的计算公式如下：

$$f_n = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(t + 0.8 \times 10^{-3} + PL/3)}}, \tag{1}$$

其中， L 为空腔深度， t 为板厚， P 为穿孔率， c 为声速。

据公式(1)对该复合结构的 6 个空腔（如图 1）依次进行计算，可以得出所测微穿孔板复合 QRD 结构的 6 个空腔共振频率范围：穿孔率为 1%时复合结构共振频率主要集中在 200 Hz~500 Hz，穿孔率 2%时集中在 300 Hz~800 Hz，3%时主要集中在 400 Hz~1000 Hz。

3 扩散性能测试

扩散性能是一个反映反射声能在空间分布均匀性的评价标准，可用扩散系数表示^[13-14]，测试方法参照标准 AES-4id-2001^[15]。对于每一组声源和接收位置，分别测量有、无试件时的脉冲响应，对获取的脉冲响应进行傅里叶变换，在频域内计算各个 1/3 倍频带的声能量。依据该测量方法，测试结果可给出各 1/3 倍频带的表面散射声压级的极坐标响应图^[16-17]。当声源以角 θ 入射到扩散体时(图 1)，按

公式(2)计算即得方向扩散系数，将不同声源方向的扩散系数平均可求得无规入射扩散系数，当 θ 为 0° 时测得垂直入射扩散系数。

$$d_\theta = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10})^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1)\sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}, \tag{2}$$

式中， L_i 为均匀分布的 n 个传声器位置的 1/3 倍频带的声压级。

实验测试对象为 $N=7$ 的 QRD 扩散体（见图 2(a)）及其与不同穿孔率微穿孔板复合体，其中 QRD 结构采用全木质结构，试件三维尺寸（长×宽×厚）为 1 m×1 m×0.3 m，凹槽隔断采用三夹板，四周和底部采用 8 mm 木板，凹槽宽度 b 为 0.12 m，凹槽深度 l_n 依次为 0 m、0.06 m、0.24 m、0.12 m、0.12 m、0.24 m、0.06 m，即满足一维的二次余数序列 0:1:4:2:2:4:1，微穿孔板为不锈钢材料，厚度 0.6 mm，穿孔率分别为 1%、2%、3%。实验在半消声室进行，

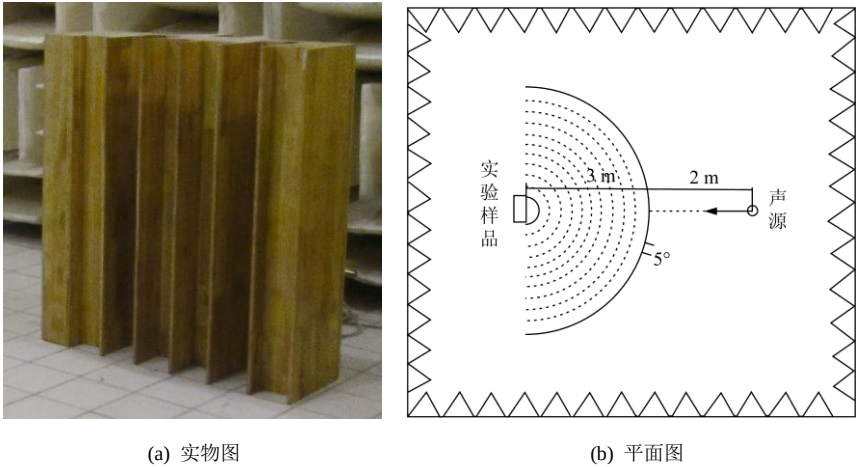


图 2 QRD 扩散体实物及半消声室测量布置平面图

传感器、声源和 QRD 结构摆放位置平面图如图 2(b)所示，图中圆周上每隔 5°布置一个测点（传感器位置），声源和传感器均朝向试样底部中心，声源与试件距离 5m，传感器与试件距离 3m，符合远场测试条件。依据之前介绍的标准 AES-4id-2001^[15]，首先对单一 QRD 结构扩散性能进行测试（每个测点分别进行有试件和无试件测量，对 37 个测点逐一测量），然后将 QRD 结构与三种不同穿孔率的微穿孔板复合，然后分别进行扩散性能测试。

4 实验结果分析

4.1 不同穿孔率微穿孔板复合前后的反射声能分析

对复合微穿孔板前后的结构进行测试，得到一些列反射声能数据，选取几个代表性的频段（125 Hz，500 Hz，2500 Hz）分别作出极坐标图 3、4、5，图中极径单位为 dB。

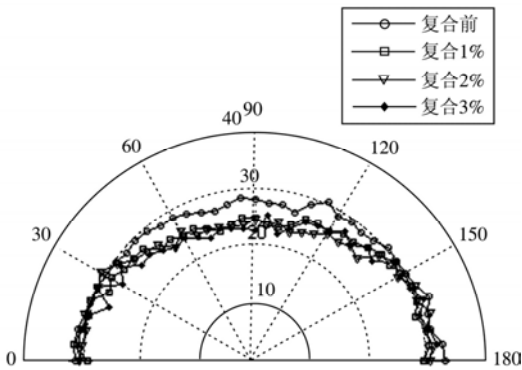


图 3 不同穿孔率 QRD 复合结构 125 Hz 极坐标图

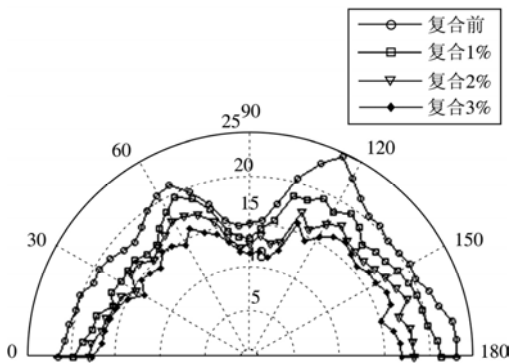


图 4 不同穿孔率 QRD 复合结构 500 Hz 极坐标图

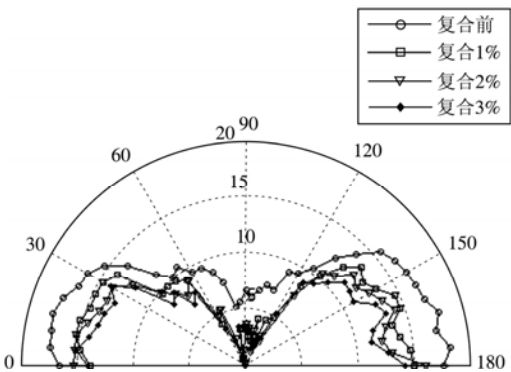


图 5 不同穿孔率 QRD 复合结构 2500 Hz 极坐标图

由图 3 可知，在 125 Hz 频段时，穿孔率的变化对复合结构的扩散性能影响不大，反射声能分布都很均匀，复合结构的扩散性能良好。由图 4 可知在 500 Hz 频段，随着穿孔率的增加，反射声能较为明显的下降趋势。由图 5 可知，2500 Hz 频段时，复合后反射声能不均匀，整个极坐标图呈蝴蝶状，90°左右反射声能较小而两边的反射声能较大，即垂直入射的声能大量的向两边扩散，这可能是部分入射声能与垂直反射声能产生相互抵消的现象，具体原因有待后续研究。

由图 3、4、5 可知，各频段复合后的反射声能都有所下降。图 4 中的 500 Hz 频段的下降幅度最为明显，平均下降幅度达到约 5 dB，根据之前的共振频率计算结构可知 500 Hz 频段属于复合结构的共振频率范围内，反射声能的减小有可能是由于穿孔复合结构的共振吸收造成的。同时也可以发现该频段复合后得反射声能比较均匀，即扩散性能仍然良好，说明复合结构在 500 Hz 频段时同时兼具良好扩散和吸声性能。而由图 3 可知，在 125 Hz 频段时虽然复合结构扩散性能良好，但是反射声能的减小不明显，其仅具有扩散性能但吸声性能不理想。由图 5 可知，在 2500 Hz 的中高频段时，复合后的反射声能有减小，但是扩散性能明显比复合前变差，即具有较好的吸声性能但扩散性能不理想。

4.2 复合前后结构的扩散系数分析

将测试所得数据根据公式(3)计算，得出复合前后各结构不同三分之一倍频程的垂直入射扩散系数，复合前后结构的垂直入射扩散系数绘制成曲线如图 6。

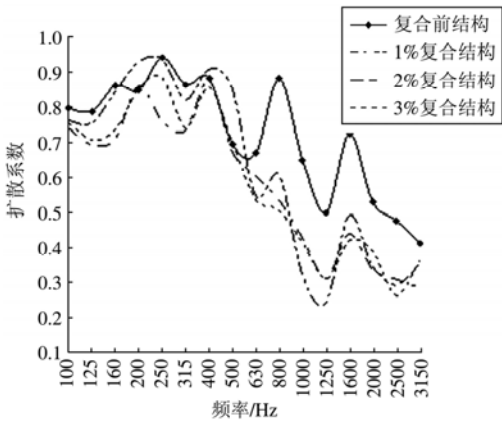


图 6 复合前后结构的扩散系数曲线

由图 6 中可以看出，复合后结构扩散系数整体上随着频率增加呈下降趋势，即复合结构的扩散性能随着频率的增加而有所下降，与前面的极坐标图结论吻合。同时可以发现在 125 Hz~630 Hz 段复合后扩散系数几乎没有减小甚至有些部分系数增大，在中低频段（150 Hz~500 Hz）复合后平均扩散系数在 0.8~0.95 之间，复合后仍然在该频段保持着良好的扩散性能，由于在 125 Hz 等低频段复合结构的吸声性能一般，而 500 Hz 等中低频段吸声性能良好，所以微穿孔板复合结构在 500 Hz 等中低频段兼具良好的扩散和吸声性能，而该频率范围与前面计

算所得的复合结构设计频率范围基本吻合。800 Hz 频段之后，复合后扩散系数明显下降，复合使得结构的扩散性能明显变差，所以复合结构在该频段有较好的吸声性能但并不兼具扩散性。上述不同频段扩散性能的差异说明，在低频范围内，由于声波波长较大，衍射作用明显，声波能轻易透过微穿孔板，与 QRD 结构相左右，对复合结构扩散性能的影响小；而中高频声波的指向性较强，声波较难与板后的 QRD 结构左右，再加上微穿孔结构的声能消耗，导致复合结构的扩散性能下降。

5 结论

由前面的实验结果可知，QRD 复合微穿孔板后结构的扩散性能在中低频特别是其自身共振频率范围内十分良好，扩散系数达到 0.8~0.95。随着频率增加复合后结构扩散性能有下降的趋势。复合后结构空间反射声能下降明显，减小幅度达到 5 dB。在中低频段空间反射声能的减小幅度随着穿孔率的增大而减小。复合后的结构在中低频能兼具良好吸声性能和扩散性能，是良好的扩散吸声结构。

本文通过采用结构扩散性能的测试方法，研究了微穿孔板复合对 QRD 结构扩散性能的影响，得出该复合结构在中低频段特别自身共振频率具有良好的扩散性能，并从该结构复合前后反射声能的变化，进一步验证了微穿孔板复合 QRD 结构后吸声性能的改善，对后续其他复合结构扩散性能的研究提供了理论和实践基础，为扩散吸声结构的设计提供参考依据。

参 考 文 献

[1] COX T,D' ANTONIO P. Schroeder Diffusers: A Review[J]. Build.

Acoust., 2003, 10(1): 1-32.

[2] 盛胜我, 王毅刚, 赵松龄. 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.

[3] SCHROEDER M R. Diffuse sound reflection by maximum-length sequences[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1975, 57(1): 149-150.

[4] FUJIWARA K, MIYAJIMA T. Absorption characteristics of a practically constructed Schroeder diffuser of quadratic-residue type[J]. Appl. Acoust., 1992, 35(2): 149-152.

[5] KUTTRUFF H. Sound absorption by pseudostochastic diffusers (Schroeder diffusers)[J]. Appl. Acoust., 1994, 42(3): 215-231.

[6] FUJIWARA K. A Study on the Sound Absorption of a Quadratic-Residue Type Diffuser[J]. Acta Acustica united with Acustica, 1995, 81(4): 370-378.

[7] 古林强, 盛胜我. 扩散吸声体的优化设计[J]. 应用声学, 2009, 28(3): 184-189.

[8] WU T, COX T J,LAM YW. A profiled structure with improved low frequency absorption[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2001, 110(6): 3064-3070.

[9] NADERZADEH M, MONAZZAM M R, NASSIRI P, et al. Application of perforated sheets to improve the efficiency of reactive profiled noise barriers[J]. Appl. Acoust., 2011, 72(6): 393-398.

[10] ODABAŞ E, ÇALIŞKAN M. Incorporation of double leaf micro perforated panels into Schroeder diffusers as a space absorber[A]. Inter.-Noise 2012[C]. New York City, August 19-22, 2012.

[11] WU T, COX T J, LAM Y W. From a profiled diffuser to an optimized absorber[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 108(2): 643-650

[12] MECHEL F P. The wide-angle diffuser—A wide-angle absorber?[J]. Acta Acustica united with Acustica, 1995, 81(4): 379-401.

[13] 莫方朔, 盛胜我. 室内界面声散射特性的评价与测量的研究进展[J]. 声学技术, 2004, 23(1): 49-53.

[14] HARGREAVES TJ, COX TJ, LAM YW, et al. Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free-field measures[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 108(4): 1710-1720.

[15] AES-4id-2001.AES information document for room acoustics and reinforcement systems-Characterization and measurement of surface scattering uniformity[S]. Audio. Eng. Soc., 2001, 49(3): 149-165.

[16] ROBINSON P, XIANG N. On the subtraction method for in-situ reflection and diffusion coefficient measurements[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2010, 127(3): EL99-EL103.

[17] POGSON MA, WHITTAKER DM, GEHRING GA. Diffusive benefits of cylinders in front of a Schroeder diffuser[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2010, 128(3): 1149-1154.