

微缝吸声板吸声性能探讨

岳峰丽,董磊,王楷焱,蒋从双,宋鲁涛

(沈阳理工大学 汽车与交通学院,沈阳 110159)

摘要: 为了研究微缝吸声板的几何参数对其吸声性能的影响,以微孔吸声板理论为基础,设计制作了微缝吸声板,对微缝吸声板进行阻抗管试验并与仿真模拟结果进行对比分析,仿真结果与试验结果基本一致。通过仿真不同几何参数下微缝吸声板的相对声阻抗,计算得出吸声系数进行对比,结果表明,当缝宽和膜厚相对增加时,微缝吸声板的吸声峰值和吸声带宽均略有减小。

关键词: 微孔吸声板;微缝吸声板;吸声性能;模拟分析

中图分类号: TB535+.1 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1003-1251.2024.04.014

Discussion on Sound Absorption Performance of Mic-slit Sound Absorbing Board

YUE Fengli, DONG Lei, WANG Kaiyan, JIANG Congshuang, SONG Lutao

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: In order to study the effect of geometric parameters on the sound absorption performance of micro-slit board, micro-slit sound absorbing board was designed and manufactured based on the theory of micro-porous sound absorption board. Impedance tube tests were carried out on the micro-slit sound absorbing board and the simulation results were compared and analyzed, and the simulation results were basically consistent with the experimental results. Then, by simulating the relative acoustic impedance of micro-slit sound absorbing board with different geometric parameters, the acoustic absorption coefficient was calculated and compared. The results show that when the slit width and film thickness increase, the sound absorption peak value and the sound absorption bandwidth of the micro-slit sound absorbing board decrease slightly.

Key words: microporous sound absorbing board; micro-slit sound absorbing board; sound absorption performance; simulation analysis

多孔性吸声材料大多会对人体或环境造成影响,为保护环境、降低噪声的影响,微孔吸声板、微缝吸声板等吸声产品应运而生。

Stinson^[1]研究了常规孔型和非常规孔型的声阻抗率,结果表明,声阻抗率均由孔内黏滞摩擦引起。Kristiansen等^[2]设计了具有共振吸声结构的狭缝板,并研究了狭缝孔的末端修正长度。马大猷^[3]提出末端声阻和声抗的修正模型,并对狭缝

孔的孔内效应做了探索,随后将狭缝孔的末端修正视作圆孔的末端修正,研究了狭缝孔的声抗末端修正。Ning等^[4]探索出圆形孔、方形孔及三角形孔的吸声效果,通过对比发现截面积相等情况下三角形孔的吸声效果更好,在保证内切圆和外接圆直径一定的条件下,微形孔的周长越长,其高频吸声效果和吸声带宽越明显。Zhao等^[5]研究了一种新型吸声结构,其厚度与最低吸收峰值对

应波长的比值小于 3.4%。Zieliński 等^[6]通过理论计算和试验结果相结合的方法,探索了有空腔的微缝孔的吸声性能。Cobo 等^[7]研究了微缝板的声阻抗预测模型,并指出将微缝孔等效为圆形孔并运用经典微穿孔板的预测方法比直接运用微缝板的预测方法更准确。

综上所述,对于一定长度的微缝孔,与其相同截面积的其他孔形的孔内声阻明显低于微缝孔。在保证圆形孔直径、方形孔边长、三角形孔边长和微缝孔的缝长相等的情况下,微缝孔的孔内声压最低。由此可知,微缝孔的声阻抗相较于其他孔形更容易调节,微缝吸声板的结构性能更优。

本文对微缝吸声板进行黏热声学仿真分析,研究其相对声阻抗和吸声系数,并与试验数据进行对比分析,探索微缝吸声板的几何参数对其吸声性能的影响规律。

1 微孔吸声板的吸声机理

微孔吸声板的吸声机理主要是指声音在板内的消耗扩散,其包括末端效应和孔内效应。末端效应主要是声波出入微孔时沿障板流动产生的摩擦损失和末端的声辐射;孔内效应主要由孔内的黏滞摩擦引起^[8-9]。

孔内黏滞摩擦引起的声阻抗率 Z_1 为

$$Z_1 = j\omega\rho t \left[1 - \frac{2}{x\sqrt{-j}} \frac{J_1(x\sqrt{-j})}{J_0(x\sqrt{-j})} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: $x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\rho\omega}{\eta}}$, 其中 η 为空气的黏滞系数, d 为微孔吸声板中微孔直径, ω 为角频率, ρ 为空气密度; t 为微孔吸声板中微孔厚度; J_1 为一阶贝塞尔函数; J_0 为零阶贝塞尔函数。

钱佳林等^[10]使用表面声阻抗 R_s 作为声阻的末端修正,末端的声辐射使微孔有限长度增加 $0.85d$, 作为声抗的末端修正。因此,当微孔两端为无限平面折流板时,声阻率增大 $2\sqrt{2\omega\rho\eta}$, 在微孔吸声板中,其相对声阻抗为单个微孔声阻抗率与整个微孔吸声板的穿孔率和空气特性阻抗的商 (ρc), 故微孔吸声板的相对声阻抗 z_1 ^[11-13] 为

$$z_1 = \frac{32\eta}{\rho\rho c} \frac{t}{d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}x}{32} \frac{d}{t} \right) + j \frac{\omega t}{\rho c} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{x^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right) \quad (2)$$

式中: p 为微孔吸声板中微孔面积与微孔吸声板

面积的比,即穿孔率; c 为声音在空气中的传播速度。

2 微缝吸声板的结构及原理

微缝吸声板是在低流阻通透板上贴覆薄膜,并于薄膜表面对应通透处施加连续机械作用,利用薄膜的张力自然形成大量微缝。低流阻通透板主要起通透、支撑和保护的作用,微缝薄膜主要起吸声的作用,两者组合类似于目前工程上常用的穿孔护面板复合矿物棉结构。

微缝吸声板的声阻抗率 Z_2 ^[14-16] 为

$$Z_2 = j\omega\rho t \left[1 - \frac{1}{x\sqrt{j}} \tanh(x\sqrt{j}) \right]^{-1} \quad (3)$$

式中 $x = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{\rho\omega}{\eta}}$, 其中 b 为微缝吸声板中的缝间距。

微缝吸声板的相对声阻抗 z_2 ^[17-19] 为

$$z_2 = \frac{12\eta}{\rho\rho c} \frac{t}{b^2} \left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{18}} + \frac{\sqrt{2}x}{12} \frac{b}{t} \right) + j \frac{\omega t}{\rho c} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{25 + 2x^2}} + \frac{1}{2} F_{(e)} \frac{b}{t} \right) \quad (4)$$

式中 $F_{(e)} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \theta}} d\theta$, 其中 $e =$

$\sqrt{1 - \left(\frac{b}{L}\right)^2}$, θ 为声波与测试板材法线的夹角, L 为微缝吸声板中微缝的长度。

3 微缝吸声板的试验测试

3.1 测试方法

为了验证微缝吸声板的吸声性能,对其进行阻抗管试验。阻抗管常用于测量小试件垂直入射条件下的吸声系数、反射系数和特性阻抗等参数,测试过程参考 GB/T 18696.2—2002《声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第2部分:传递函数法》,测试的频率范围为 200~1 600 Hz。

3.2 测试系统组成

测试系统由驻波管、高端传声器、数据采集卡、电脑等组成,具体包括 4206 型阻抗管、2716-C 型功率放大器、3560 型信号采集仪以及笔记本电脑,如图 1 所示。

测试仪软件能自动计算出吸声系数,并能生成吸声系数与频率的坐标曲线。仪器输出信号的频率和幅度在规定范围内可自由设定。

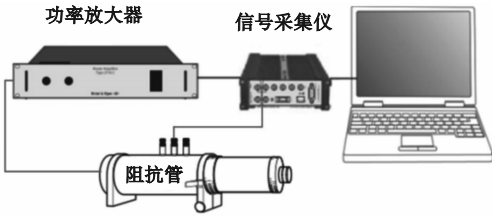


图1 阻抗管测试系统

Fig.1 Impedance tube test system

3.3 测试试样

将试样加工成直径为 100 mm 的圆,底板孔径为 1.5 mm,孔间距为 5 mm,穿孔率为 1.2%,厚度为 0.8 mm,表面膜层为铝箔,膜层厚度为 0.05 mm,裂缝数量为 2,缝长 1.3 mm,腔深 100 mm,如图 2 所示。

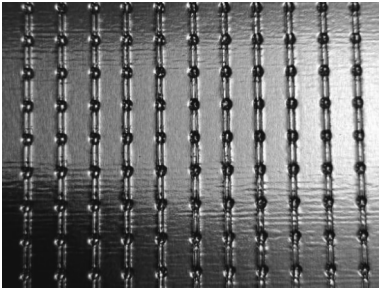


图2 试验试样

Fig.2 Experimental specimens

3.4 软件仿真

由仿真软件得到微缝吸声板的声阻抗与吸声系数,并与试验数据进行对比,结果如图 3 和图 4 所示。

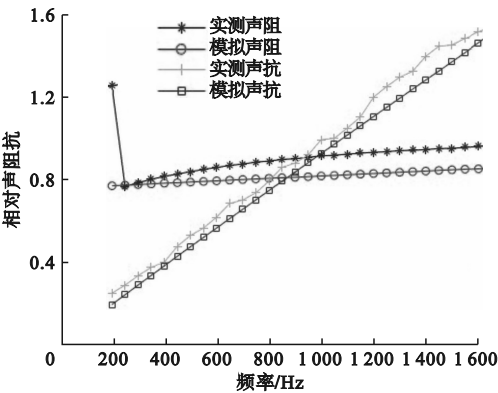


图3 相对声阻抗

Fig.3 Relative acoustic impedance

由图 3、图 4 可知,仿真软件模拟与试验测得的相对声阻和声抗一致性较好,数据误差较小。

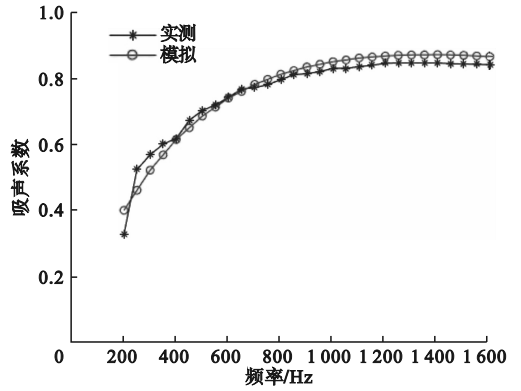


图4 吸声系数

Fig.4 Acoustic absorptivity

4 几何参数对吸声性能的影响

4.1 仿真模型建立

利用模拟软件对微孔吸声板、微缝吸声板及其末端进行模拟,微缝吸声板(MSP)仿真结构如图 5 所示。图 5 中: h_1 表示微孔厚度; b 表示微孔长度; h_2 表示微缝厚度;微缝长度为 $2d/3$;空气场厚度为 $3d/2$;完美匹配层厚度为 $d/2$ 。左侧第一个空气域为单位振幅在平面波入射时的背景声场。

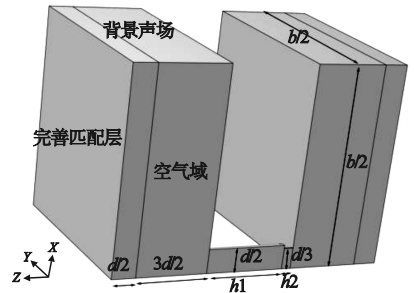


图5 MSP 仿真结构示意图

Fig.5 A schematic diagram of MSP simulation structure

模拟单元由空气域和完美匹配层组成。空气域位于孔隙和裂纹内及孔隙和裂纹的两端。完美匹配层位于空气域的两端,是模拟开放域或无限域的特殊介质层。由于这种特殊介质层的波阻抗与其相邻介质中的波阻抗完全相同,因此声波可以很容易进入完美匹配层,并被完全吸收而不会反射回来。

4.2 设置仿真模型边界条件

三维模型的物理场被设定为黏-热声频域界面,如图 6 所示。

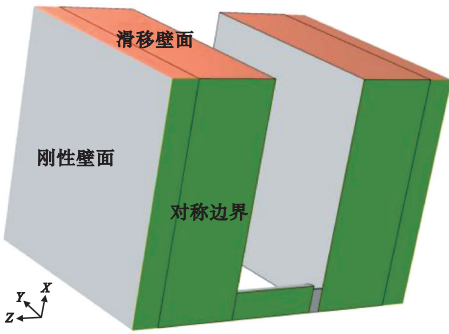


图 6 MSP 仿真结构边界条件设置

Fig. 6 MSP simulation structure boundary condition setting

图 6 中:灰色表示微孔吸声板接触的表面,设置为具有非滑动和等温壁边界条件,即刚性壁;绿色表示对称平面,设置为具有对称边界条件;橙色表示空气域和完美匹配层,设置为具有滑移和绝热边界条件。

4.3 仿真模拟结果

在仿真模型边界条件设置后进行网格划分,如图 7 所示。网格划分结束后进行计算分析即可完成模拟。

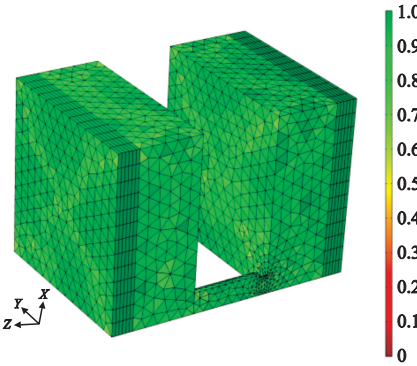


图 7 MSP 仿真结构网格划分

Fig. 7 Meshing of MSP simulation structure

应用仿真软件模拟微缝吸声板,设置底板厚 0.8 mm,矩形孔长 3 mm,宽 1 mm,孔间距 4 mm,膜厚 0.05 mm,裂缝数量为 2,缝长 3 mm,缝宽 0.1 mm,穿孔率为 1.2%。将膜厚 t 从 0.05 mm 增加至 0.11 mm,通过仿真得到不同膜厚情况下的相对声阻抗与吸声系数,如图 8 和图 9 所示。

由图 8 和图 9 可知,随着膜厚的增加,微缝吸声板的相对声阻和相对声抗逐渐增加。当膜厚增加至 0.11 mm 时,相对声阻最大。由式(2)和式(4)可知,孔内效应引起的声阻抗率与厚度成正比,末端效应与厚度无关。表明随着膜厚的增加,微缝吸声板的共振吸声频率向低频缓慢变化,最

大吸声系数也随之减小。

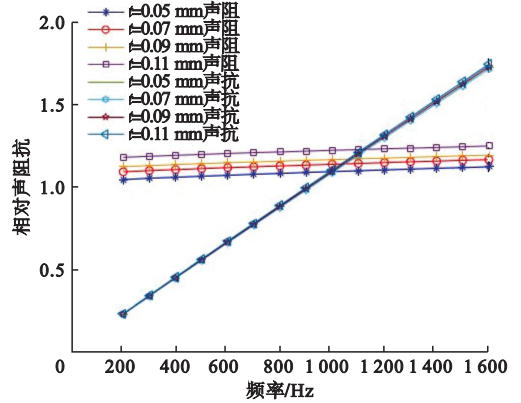


图 8 膜厚对声阻抗的影响

Fig. 8 Effect of the membrane thickness on the acoustic impedance

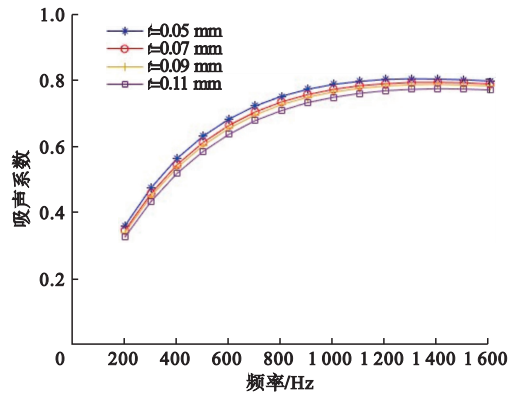


图 9 膜厚对吸声系数的影响

Fig. 9 Effect of membrane thickness on the sound absorption coefficient

保持膜厚为 0.05 mm,其他条件不变,将缝宽 w 从 0.08 mm 增加至 0.14 mm,得到不同缝宽条件下的相对声阻抗和吸声系数,如图 10 和图 11 所示。

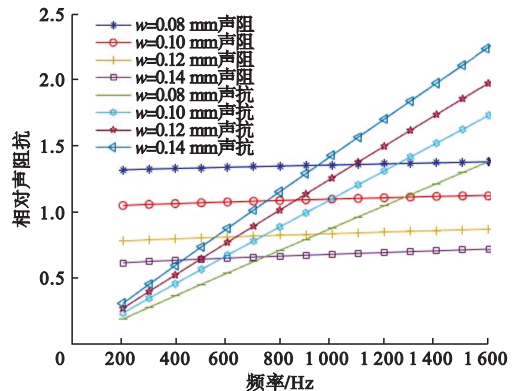


图 10 缝宽对声阻抗的影响

Fig. 10 Effect of the seam width on the acoustic impedance

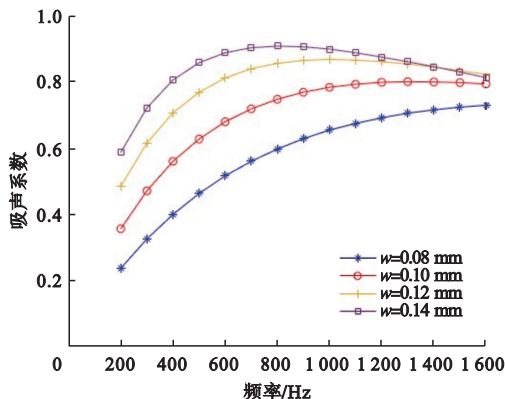


图 11 缝宽对吸声系数的影响

Fig. 11 Effect of seam width on the sound absorption coefficient

由图 10 和图 11 可知:随着缝宽的增加,微缝吸声板的相对声阻逐渐减小,相对声抗逐渐增加;当缝宽增加至 0.14 mm 时,相对声抗最大,增加了 38.4%;相对声阻最多减小了 47.9%。表明随着缝宽的增加,微缝吸声板的共振吸声频率向低频缓慢变化,最大吸声系数也随之变化。

保持缝宽为 0.1 mm,其他条件不变,缝长 l 从 1.5 mm 增加至 3 mm,得到不同缝长条件下的相对声阻抗和吸声系数,如图 12 和图 13 所示。

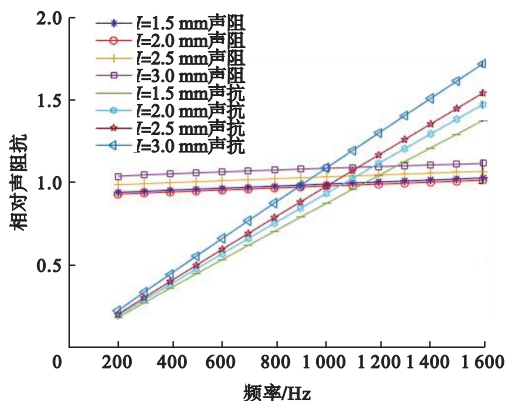


图 12 缝长对声阻抗的影响

Fig. 12 Effect of the seam length on the acoustic impedance

由图 12 和图 13 可知,随着缝长的增加,微缝吸声板的相对声阻逐渐减小,相对声抗变化较小,当缝长增加至 3 mm 时,相对声阻最多减小了 20.4%。表明随着缝长的增加,微缝吸声板的共振吸声频率、最大吸声系数变化不大。

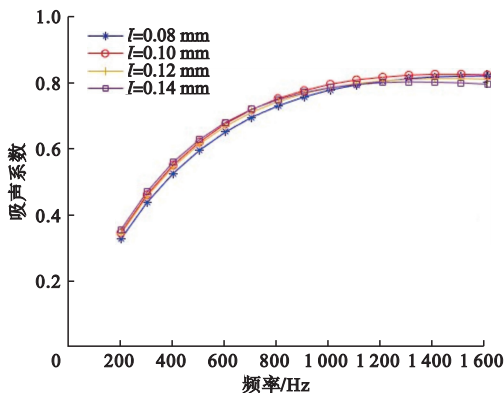


图 13 缝长对吸声系数的影响

Fig. 13 Effect of the seam length on the acoustic impedance

5 总结

本文以微孔吸声板理论为基础,设计制作了微缝吸声板,并对微缝吸声板进行了阻抗管试验与仿真模拟,得出如下结论。

1) 在相同条件下,试验得出的吸声系数和相对声阻抗与仿真结果基本一致。

2) 增加微缝吸声板的膜厚、缝宽,其吸声频率和吸声系数均有所减小。

3) 微缝吸声板的缝长变化对微缝吸声板的共振吸声频率、最大吸声系数等结构性能影响不明显。

参考文献 (References):

- [1] STINSON M R. The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-sectional shape[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 89(2): 550-558.
- [2] KRISTIANSEN U R, VIGRAN T E. On the design of resonant absorbers using a slotted plate[J]. Applied Acoustics, 1994, 43(1): 39-48.
- [3] 马大猷. 微缝吸声体理论[J]. 声学学报, 2000, 25(6): 481-485.
MA D Y. Theory of microslit absorbers[J]. Acta Acustica, 2000, 25(6): 481-485. (in Chinese)
- [4] NING J F, REN S W, ZHAO G P. Acoustic properties of micro-perforated panel absorber having arbitrary cross-sectional perforations[J]. Applied Acoustics, 2016, 111: 135-142.
- [5] ZHAO H G, WANG Y, WEN J H, et al. A slim subwavelength absorber based on coupled microslits[J]. Applied Acoustics, 2018, 142: 11-17.
- [6] ZIELIŃSKI T G, CHEVILLOTTE F, DECKERS E. Sound absorption of plates with micro-slits backed with air cavities: analytical estimations, numerical calculations and experimental validations[J]. Applied Acoustics, 2019, 146: 261-279.
- [7] COBO P, DE LA COLINA C, SIMÓN F. On the modelling of microslit panel absorbers[J]. Applied Acoustics, 2020, 159:

- 107118.
- [8] 蒋从双. 变截面微穿孔板吸声降噪研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020.
- [9] 刘传洋,王晓宇,张光宇,等. 波纹穿孔板吸声特性研究[J]. 声学学报,2023,48(3):559-567.
LIU C Y, WANG X Y, ZHANG G Y, et al. Research on sound absorption characteristics of corrugated perforated plate[J]. Acta Acustica,2023,48(3):559-567. (in Chinese)
- [10] 钱佳林,李广军,王瑞乾,等. 阶梯式复合微穿孔板吸声特性研究[J]. 噪声与振动控制,2023,43(4):262-267.
QIAN J L, LI G J, WANG R Q, et al. Study on sound absorption characteristics of stepped composite micro-perforated plates[J]. Noise and Vibration Control,2023,43(4):262-267,294(in Chinese)
- [11] 盖晓玲,张斌,李贤徽,等. 加工误差分布规律对微穿孔板吸声性能的影响[J]. 压电与声光,2015,37(1):134-137.
GAI X L, ZHANG B, LI X H, et al. Influence of distribution of the processing error on sound absorption property of micro-perforated panel[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2015,37(1):134-137. (in Chinese)
- [12] 钱玉洁,娄思成,张杰. 阻尼耦合双层微穿孔板吸声体研究[J]. 声学学报,2023,48(1):238-248.
QIAN Y J, LOU S C, ZHANG J. Research on damping coupled double-layer microperforated panel sound absorber[J]. Acta Acustica,2023,48(1):238-248. (in Chinese)
- [13] 蒋从双,李贤徽,邢拓. 错位微缝吸声板吸声性能研究[J]. 振动与冲击,2020,39(14):69-74,79.
JIANG C S, LI X H, XING T. Acoustic performance of a micro-staggered structure[J]. Journal of Vibration and Shock,2020,39(14):69-74,79. (in Chinese)
- [14] 陈亮,沈敏,何为,等. 微穿孔板-聚氨酯微孔薄膜复合结构吸声特性[J]. 噪声与振动控制,2022,42(3):36-41.
CHEN L, SHEN M, HE W, et al. Sound absorption characteristics of micro-perforated panel and polyurethane micro-porous membrane composed structures[J]. Noise and Vibration Control,2022,42(3):36-41. (in Chinese)
- [15] 毛东兴,王佐民. 微缝吸声板结构的吸声理论及类比设计[J]. 同济大学学报(自然科学版),2000,28(3):316-319.
MAO D X, WANG Z M. Theory and analogous design of microslitted-panel absorbers[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2000,28(3):316-319. (in Chinese)
- [16] 王卫辰,邢邦圣,顾海霞,等. 微穿孔板几何参数估算及其对吸声性能的影响[J]. 声学学报,2019,44(3):369-375.
WANG W C, XING B S, GU H X, et al. Estimation of geometric parameters for micro-perforated panels and their effect on absorption performance[J]. Acta Acustica,2019,44(3):369-375. (in Chinese)
- [17] 刘红星,吴九汇. 阶梯型微缝超表面低频宽带吸声特性[J]. 西安交通大学学报,2021,55(9):71-79.
LIU H X, WU J H. Low frequency broadband sound absorption characteristics of stepped micro-slit metasurface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2021,55(9):71-79. (in Chinese)
- [18] 吴飞,陈文渊,巨泽港,等. 微缝卷曲耦合低频吸声超材料研究[J]. 振动与冲击,2021,40(17):229-233
WU F, CHEN W Y, JU Z G, et al. Low frequency sound absorbing metamaterials with micro slit-curl coupling[J]. Journal of Vibration and Shock,2021,40(17):229-233. (in Chinese)
- [19] 冯涛,李佳琪,王晶,等. 微穿孔板吸声结构设计参数研究进展[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(2):231-238.
FENG T, LI J Q, WANG J, et al. Research progress on design parameters of micro-perforated plate sound absorption structure[J]. Journal of Safety Science and Technology,2023,19(2):231-238. (in Chinese)
- (责任编辑:徐淑姣)
- (上接第85页)
- [19] 赵忠峰,陈克安. 基于 Zwicker 理论的噪声客观评价方法[J]. 电声技术,2005(10):63-65.
ZHAO Z F, CHEN K A. Objective evaluating approaches for noise based on Zwicker theory[J]. Audio Engineering,2005(10):63-65. (in Chinese)
- [20] CHEN T Q, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree boosting system[C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York, NY, USA: ACM,2016:785-794.
(责任编辑:宋颖韬)