

特约专栏

基于组合微穿孔板的低频宽带吸声超材料研究

吴飞^{1,2}, 陈文渊³, 巨泽港³, 古棋元³, 肖勇², 郁殿龙², 温激鸿²

(1. 重庆大学汽车工程学院, 重庆 400715)

(2. 国防科技大学智能科技学院, 湖南长沙 410073)

(3. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

摘要: 如何实现低频宽带吸声, 一直是噪声控制工程领域亟待解决的问题之一, 近年来声学超材料的迅速发展为此提供了新的解决思路。将拓宽单个峰值吸声带宽与引入第二阶吸收峰两种方式有效结合, 基于组合微穿孔板提出了一种低频宽带吸声超材料, 建立了组合微穿孔板吸声结构的吸声理论模型与数值仿真模型, 分析了其低频宽带吸声机理。理论计算结果与数值计算结果吻合良好, 验证了组合微穿孔板吸声结构的准确性。该吸声结构在低频范围产生双吸收峰, 峰值都接近准完美吸声, 同时具有两个较宽的吸声带宽, 结构厚度满足亚波长尺度, 展现出了良好的低频宽带吸声特性。最后, 通过严格的参数设计, 仅耦合两个吸声单元后在 250~900 Hz 范围内得到了一个连续的吸声频带, 平均吸声系数达到 0.86, 此时结构最大厚度为 70 mm。该吸声结构具有优异的低频宽带吸声特性以及丰富的可调性等特点, 在噪声控制工程领域具有一定的应用前景。

关键词: 声学超材料; 低频宽带; 微穿孔板; 双吸收峰

中图分类号: TU311.3; TB34 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2021)01-0029-05

Research on Low Frequency Broadband Sound Absorption Metamaterial Based on Combined Micro-Perforated Plate

WU Fei^{1,2}, CHEN Wenyuan³, JU Zegang³, GU Qiyuan³, XIAO Yong²,
YU Dianlong², WEN Jihong²

(1. School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400715, China)

(2. College of Intelligence Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(3. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: How to achieve low frequency broadband sound absorption has always been one of the urgent problems in the field of noise control engineering. The rapid development of acoustic metamaterials in recent years has provided new solutions for this. In this paper, widening the single peak absorption bandwidth and introducing the second-order absorption peak was effectively combined to obtain a low frequency broadband sound absorption metamaterial based on the combined micro-perforated plate. Then both the theoretical and numerical simulation models of the structure of combined micro-perforated plate were established. The theoretical results agreed well with the numerical calculation results, which verified the accuracy of the proposed structure. The sound absorption structure can produce double absorption peaks in the low frequency range, and the value of the absorption peak was close to quasi-perfect sound absorption. At the same time, it had two wider absorption bandwidths, and the structure thickness fell in the range of sub-wavelength scale, exhibiting good low frequency broadband sound absorption property. Finally, through strict parameter design, a continuous sound absorption band was obtained in the range of 250~900 Hz by coupling only two sound absorption units. The average sound absorption coefficient of the structure reached 0.86, which corresponding to a maximum thickness of 70 mm. Holding the feature of excellent low frequency broadband sound absorption property and rich adjustability, the sound absorption structure will have certain application prospects in the field of noise control engineering.

收稿日期: 2020-07-13 修回日期: 2020-08-21

基金项目: 中国博士后基金资助项目(2018M643827); 国家自然科学基金资助项目(11702226); 中央高校基本科研业务费项目(XDJK2020B020); 国家自然科学基金重大项目(11991032, 11991034)

第一作者: 吴飞, 男, 1987年生, 副教授, 硕士生导师,
Email: wufeifrank@126.com

通讯作者: 温激鸿, 男, 1971年生, 研究员, 博士生导师,
Email: wenjihong@vip.sina.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202007018

property. Finally, through strict parameter design, a continuous sound absorption band was obtained in the range of 250~900 Hz by coupling only two sound absorption units. The average sound absorption coefficient of the structure reached 0.86, which corresponding to a maximum thickness of 70 mm. Holding the feature of excellent low frequency broadband sound absorption property and rich adjustability, the sound absorption structure will have certain application prospects in the field of noise control engineering.

Key words: acoustic metamaterial; low frequency broadband; micro-perforated plate; double absorption peaks

1 前言

低频噪声因其不易衰减、穿透力强等特点,会对人们的日常生活与身心健康造成严重的影响^[1,2]。由于其固有的能量弱耗散性,低频噪声的吸收一直是一个具有挑战性的课题。尽管传统的多孔材料和常规的微穿孔吸声器可以有效地吸收噪声,但通常需要与工作波长相当的结构厚度,这严重阻碍了其在低频范围内的应用。

声学超材料作为一种新型的人工复合结构材料,拥有自然材料所不具备的超常物理特性(负等效质量密度、负等效弹性模量、负折射率等)。近年来,声学超材料的迅速发展为解决低频噪声吸收问题提供了新的思路与方法。其中,2012年首次提出的空间卷曲型声学超材料^[3]凭借其优异的低频吸声性能、亚波长结构厚度等特点引起了广泛的关注。Li等^[4]设计了一种总厚度为工作波长 $1/223$ 的低频吸声器。近期,Krupali等^[5]最新研究的超薄低频吸声器能在结构厚度仅为 13 mm 的条件下实现在 50 Hz 处的准完美吸声,此时结构厚度仅为工作波长的 $1/527$ 。但是,以上结构吸声带宽相对较窄,在实际工程应用中受到制约。

为了追求低频宽带吸声,目前采用并联多个吸声单元协同耦合的方式拓宽吸声带宽。Hu等^[6]通过并联6个吸声单元实现在 $100\sim 200\text{ Hz}$ 的连续吸声,结构最大厚度为 180 mm 。作者^[7]设计了能在 $300\sim 640\text{ Hz}$ 取得优异吸声性能且厚度为 50 mm 的声学超材料结构。此外,Liu等^[8]提出多阶亥姆霍兹共振(HR)吸声机理,通过引入单元高阶峰值增加吸声带宽^[1],采用8单元耦合获得了在 $400\sim 2800\text{ Hz}$ 的连续吸声带宽。以上结构都能获得较宽的吸声频带,但通常需要并联多个吸声结构,增加了结构之间相干耦合效应的调控难度,且并联多个单体也会受到空间环境的制约,不利于实际应用。

本文设计了一种基于组合微穿孔板的低频宽带吸声超材料。通过建立其吸声理论模型与数值仿真模型开展吸声性能研究,运用阻抗分析法与吸声系数复平面法分析了其低频宽带吸声机理,最终只需要并联两个吸声单元就能获得优异的低频宽带吸声性能。

2 理论模型

本文所提出的吸声超材料结构如图1所示,相关参数标注于图中。该吸声器由两块微穿孔板与一个空腔组成,可看作是两个微穿孔吸声器串联组合而成,只是区别于传统的串联方式。采用此种设计方式能够减小结构的厚度,有利于低频吸声。

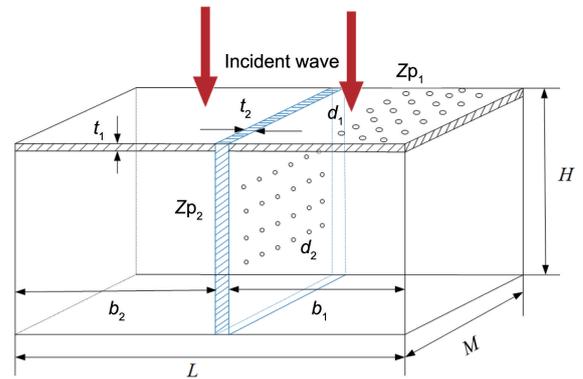


图1 吸声结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sound absorption structure

结构的吸声系数 α 由表面声阻抗率求得,即式(1):

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s/Z_0 - 1}{Z_s/Z_0 + 1} \right|^2 \quad (1)$$

式中, Z_s 为结构的表面声阻抗, Z_0 是空气的特性阻抗($Z_0 = \rho_0 c_0$), ρ_0 是空气密度, c_0 为声波在空气中的传播速度。

结构表面的声阻抗 Z_{s_i} 由微穿孔板的声阻抗 Z_{p_i} 与空腔的声阻抗 Z_{c_i} 组成,即式(2):

$$Z_{s_i} = Z_{p_i} + Z_{c_i} (i = 1, 2) \quad (2)$$

其中 Z_{p_i} 可由式(3)求得^[9], Z_{c_i} 可由微穿孔板的阻抗转移公式(4)求得,即:

$$Z_{p_i} = \frac{j\omega\rho_0 t_i}{p_i} \left[1 - \frac{2J_1(\gamma\sqrt{-j})}{(\gamma\sqrt{-j})J_0(\gamma\sqrt{-j})} \right]^{-1} + \frac{\sqrt{2}\eta\gamma}{p_i d_i} + j \frac{0.85\omega\rho_0 d_i}{p_i} (i = 1, 2) \quad (3)$$

$$Z_{c_i} = Z_0 \frac{Z_{i+1} \cos(kD_i) + jZ_0 \sin(kD_i)}{Z_0 \cos(kD_i) + jZ_{i+1} \sin(kD_i)} \quad (4)$$

式(3)中, ω 为角频率, J_1 和 J_0 分别为一阶和零阶贝塞尔函数, $d_i (i = 1, 2)$ 为微穿孔直径, $p_i (i = 1, 2)$ 为穿孔率, $t_i (i = 1, 2)$ 为实孔板板厚, $-j$ 为虚数单位, $\gamma = d\sqrt{\rho_0\omega/4\eta}$ 是 $\sqrt{2}/2$ 倍穿孔直径与热粘性边界层厚度之比, $\eta = 1.814 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 为空气动力粘度系数。式(4)中, $k = \omega/c_0$ 是波数,当 $i = 1, 2$ 时, $Z_{c_i} = -jZ_0 \cot(kD_i)$, D_i 为穿孔板对应的空腔高度, $D_1 = H$, $D_2 = b_2$ 。

为了验证结构理论模型的准确性,本文采用多物理场分析软件COMSOL Multiphysics 5.4建立数值仿真模型进行对比验证。应用软件内置的压力声学(pressure acoustic)模块与热粘性声学(thermal-acoustic)模块在频域内进行仿真分析。其中压力声学模块模拟结构外部声场,入射声波定义为平面波,入射压力幅值为 1 Pa ,由 Z 轴负方向垂直入射到结构表面,热粘性声学模块模拟结构

内部声场，两个模块的交界处为两个物理场的耦合边界，定义为声-热粘性声学边界。结构仿真模型大部分区域的网格采用自由四面体的方式划分，定义微孔区域网格的最大单元尺度为 $d/6$ ，最小单元尺度为 $d_v/2$ ，其中 $d_v = \sqrt{2\eta/\rho_0\omega}$ 是热粘性边界层厚度。通过在压力声学模块耦合域的上下边界对声压进行积分得到反射声压 P_r 和入射声压 P_0 ，从而得到结构的声压反射系数 $r = P_r/P_0$ 与吸声系数 $\alpha = 1 - |r|^2$ 。

3 低频宽带吸声性能分析

本文所提出的吸声结构的理论与数值计算结果如图 2 所示，相关结构参数列举在表 1 中，其中结构密度 $M=28 \text{ mm}$ ， $b_1=40 \text{ mm}$ ， $b_2=15.3 \text{ mm}$ 。图中红色实线代表理论计算结果，红色圆圈代表仿真计算结果，二者变化趋势一致，吻合良好，对比验证了所提结构的准确性。从图中可以看出，该结构分别在频率 352 和 600 Hz 处产生共振吸收峰，吸声系数分别为 0.97 和 0.98，此时结构厚度为 65 mm，为共振频率 352 Hz 对应波长的 1/15，展示了亚波长低频吸声特性。该吸声结构在 279~786 Hz 范围内平均吸声系数达到了 0.81，展现了优异的宽带吸声性能。

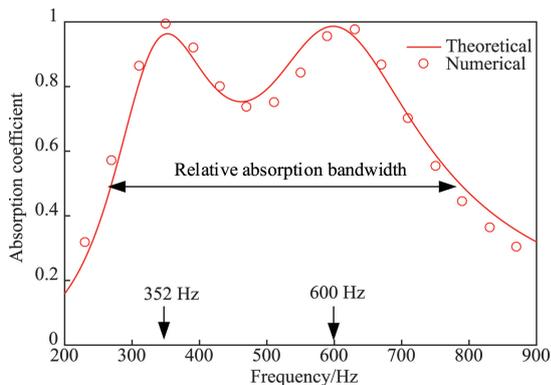


图 2 组合微穿孔结构 1 吸声系数曲线

Fig. 2 Sound absorption coefficient curve of composite micro-perforated structure 1

表 1 组合微穿孔结构 1 结构参数表

Table 1 The table of structural parameters for the composite micro-perforate structure

d_1/mm	t_1/mm	p_1	d_2/mm	t_2/mm	p_2	H/mm
0.9	0.5	0.01	0.8	0.7	0.002	65

图 3 为所设计结构的声阻抗随频率的变化曲线，结构的声阻与声抗分别对应结构相对声阻抗值的实部与虚部。当声阻为 1、声抗为 0 时，结构的声阻抗与空气的特性阻抗相等，达到完美匹配，此时的吸声系数为最大值

1，实现完美吸声。由图可得，本文所设计的结构的声阻抗在共振频率处，其中声抗为 0。此时对应的声阻分别为 1.34 和 0.83，与 1 相差较小，此时结构的吸声系数分别为 0.97 与 0.98，达到了准完美吸声。此外，相比之下，共振频率 600 Hz 对应的声阻与 1 更加接近，这也解释了结构在该频率处的吸声系数大于共振频率 352 Hz 对应的吸声系数。

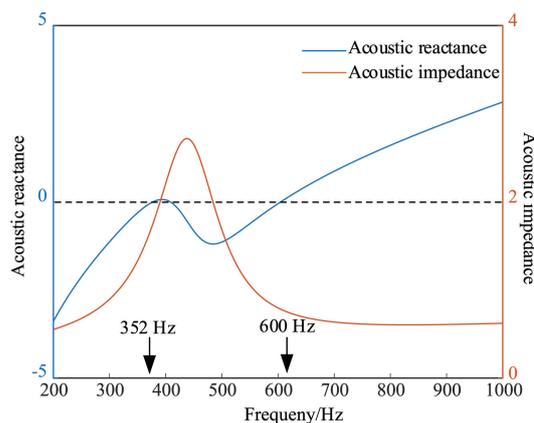


图 3 声阻抗图

Fig. 3 Figure for acoustic impedance

为了进一步研究所设计吸声结构的潜藏物理机理，本文使用图形法研究了该吸声结构在复频率表面内反射系数 r 的分布。通常在没有损耗的情况下，反射系数包含一对复共轭的极点和零点分布在实轴的两侧，这些极点和零点与结构辐射能量泄露有关。当在系统中引入损耗对泄露进行平衡时，零点会逐渐向实轴移动，当结构达到临界耦合状态时，零点刚好落在实轴上，结构实现完美吸声。如图 4 所示，在共振频率 352 和 600 Hz 处，零点的位置都与实轴接近，因此该吸声结构在共振频率下可获得近完美吸声，且从图中也可以直观地看出，共振频率 600 Hz 处的零点更靠近实轴，故 600 Hz 处的吸声系数更大。此外，零点和极点之间的距离也可以表征吸

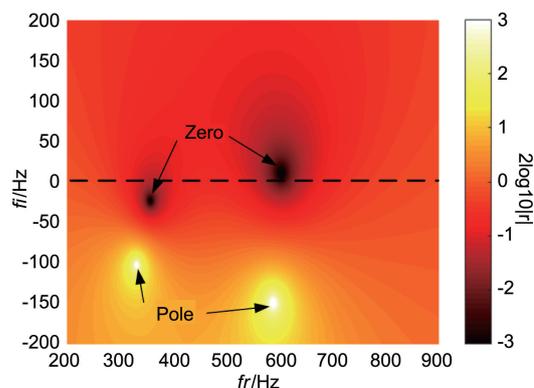


图 4 吸声系数复平面分布图

Fig. 4 Distribution diagram of absorption coefficient in complex plane

声带宽^[14, 15]。这是因为当零点落在实轴上方时, 结构未达到临界耦合状态, 此时吸声系数与吸声带宽都比较弱; 随着零点逐渐向实轴靠拢, 吸声系数与吸声带宽逐渐增大, 当零点落在实轴上时, 结构满足临界耦合条件, 此时结构吸声性能最优; 当零点落在实轴下方, 逐渐远离实轴时, 此时结构超出临界耦合状态, 结构会以牺牲峰值系数的方式补充吸声带宽。

4 结构参数对吸声性能的影响

4.1 穿孔直径的影响

在结构参数对吸声性能影响的研究中, 每次只改变其中一个参数变量, 其余参数保持不变。

图 5 和图 6 为两块穿孔板直径对吸声性能的影响。从图 5 可以看出, 随着穿孔直径 d_1 的减小, 第一阶共振吸收峰吸声系数减小, 吸声系数明显减小时共振频率也向低频移动; 第二阶共振吸收峰向高频移动, 吸声峰值先增大后减小。吸声系数曲线出现这样的变化是由于随着微孔直径的减小, 每个小孔的声质量减小而声阻增加, 从而能够产生更宽的吸声带宽, 但当声阻超过了空气的特性阻抗而一直增大时, 会导致阻抗失配, 吸声性能变差, 显著的影响就是吸声峰值降低。从图 6 可以看出, d_2 的减小明显导致第一阶吸声峰值的减小, 共振频率向高频移动, 吸声带宽逐渐减小, 第二阶吸收峰基本保持不变。

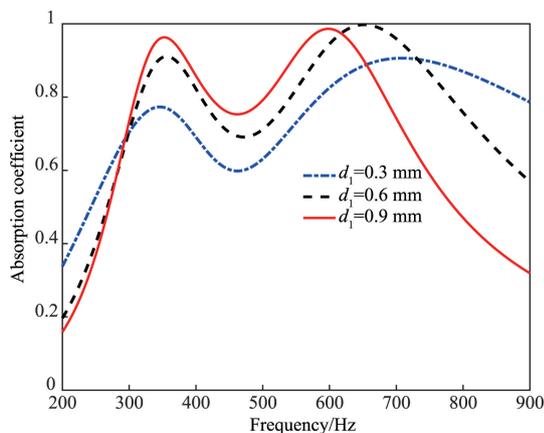


图 5 吸声系数随 d_1 的变化

Fig. 5 Change of absorption coefficient with d_1

4.2 空腔高度的影响

图 7 为结构空腔高度 H 变化对吸声性能的影响, 和传统的亥姆霍兹共振吸声器一样, 空腔的高度决定共振频率。从图中可以看出, 空腔高度 H 的值决定第二阶共振吸收峰, 当 H 逐渐增大时, 第二阶共振频率逐渐向低频移动, 吸声系数基本保持不变, 接近准完美吸声。按照此规律也可以推测出增大内部穿孔板对应空腔的高度,

第一阶吸收峰也会向低频移动, 反之则向高频移动, 在此就不过多赘述。

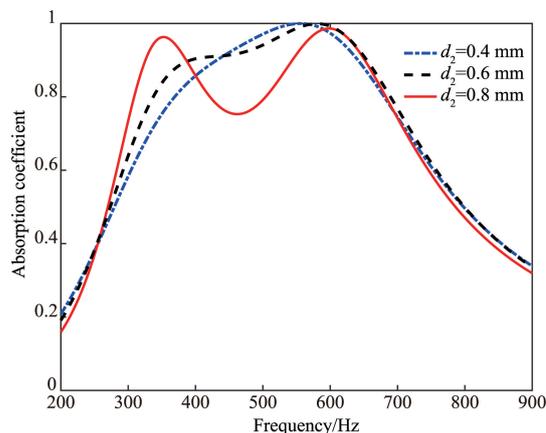


图 6 吸声系数随 d_2 的变化

Fig. 6 Change of absorption coefficient with d_2

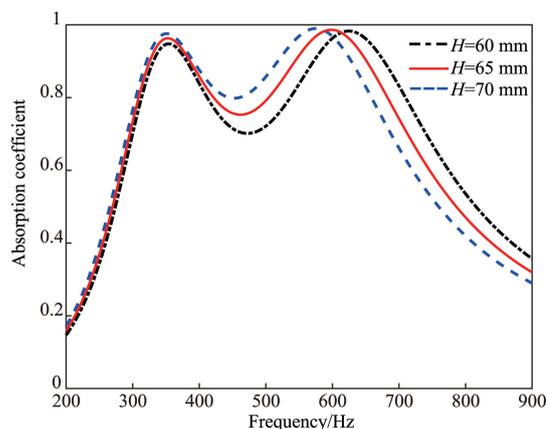


图 7 吸声系数随 H 的变化

Fig. 7 Change of absorption coefficient with H

5 宽带吸声结构设计

为了实现连续宽带吸声, 设计了一种宽带吸声结构。该结构仅由两个吸声单元组成, 减小了吸声单元之间耦合的调控难度。宽带吸声结构的单体 1 为图 2 中论证的结构, 结构厚度为 65 mm。通过严格的参数设计, 设计了另外一个性能优异的低频宽带吸声单体 2, 其厚度为 70 mm, 吸声系数曲线如图 8 所示。理论解与数值解吻合良好, 验证了所设计的低频宽带吸声单体 2 的准确性。该吸声结构分别在 406 和 713 Hz 取得吸声峰值 0.99 和 0.97, 在取得近完美吸声的同时也展示了良好的宽带吸声性能。

图 9 为宽带吸声结构的吸声系数曲线, 从图中可以看出该结构在 250~900 Hz 范围内具有一个连续的吸声频段, 平均吸声系数达到了 0.86。其理论计算结果与数值

计算结果吻合良好, 验证了宽带吸声结构的准确性。所设计的宽带结构仅通过串联两个吸声单体就可以实现宽频吸声, 对促进工程应用具有重要意义。

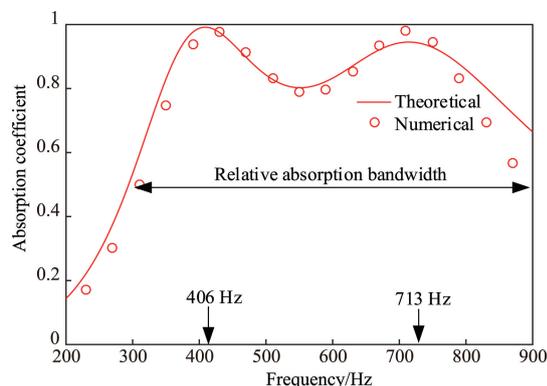


图 8 单体 2 吸声系数曲线

Fig. 8 Curve of sound absorption coefficient for unit 2

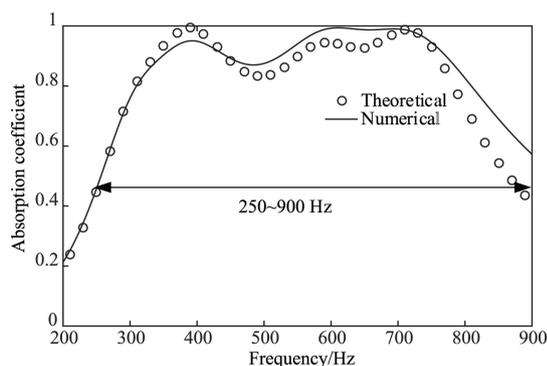


图 9 宽带结构吸声系数曲线

Fig. 9 Curve of the sound absorption coefficient for broadband structure

6 结 论

本文基于组合微穿孔板设计了一种低频宽带吸声结构, 通过理论与数值计算验证了该结构具有良好的低频宽带吸声特性、亚波长尺度以及丰富的吸声性能可调性。通过阻抗分析与复平面分析法揭示了该结构的吸声机理。基于传统微穿孔吸声结构, 在空腔中引入微穿孔隔板, 增加了结构的吸声自由度, 从而获得较好的低频宽带吸声性能。最后, 通过严格的参数设计, 设计了能在 250~900 Hz 范围内取得连续吸声带宽的宽频结构, 平均吸声系数达到 0.86, 最大结构厚度为 70 mm, 满足亚波长吸

声条件。该结构具有频带宽、厚度薄、可调性丰富等特点, 在噪声控制工程领域中具有良好的应用前景。

参考文献 References

- [1] LI Y, LIANG B, TAO X, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2012, 101(23): 036609.
- [2] CUMMER S A, CHRISTENSEN J, ALÛ A. Nature Reviews Materials [J], 2016, 1(3): 16001.
- [3] LIANG Z X, LI J. Physical Review Letters[J], 2012, 108(11): 114301.
- [4] LI Y, ASSOUAR B M. Acoustic Applied Physics Letters[J], 2016, 108(6): 204301.
- [5] DONDA K, ZHU Y, FAN S W, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2019, 115(17): 173506.
- [6] ZHANG C, HU X. Physical Review Applied [J], 2016, 6(6): 064025.
- [7] WU F, XIAO Y, YU D, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2019, 114(15): 151901.
- [8] LIU C R, WU J H, MA F, *et al.* Applied Physics Express[J], 2019, 12(8): 084002.
- [9] 马大猷. 声学学报(中文版)[J], 1997(5): 385-394.
MA D Y. Acta Acustica[J], 1997(5): 385-394.
- [10] CHEN W, WU F, WEN J, *et al.* Japanese Journal of Applied Physics [J], 2020, 59(4): 045503.
- [11] WANG Y, ZHAO H, YANG H, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2018, 123(18): 185109.
- [12] ZHAO H, WANG Y, WEN J, *et al.* Applied Acoustics[J], 2018, 142: 11-17.
- [13] 吴飞, 黄威, 陈文渊, 等. 物理学报[J], 2020, 69(13): 134303.
WU F, HUANG W, CHEN W Y, *et al.* Acta Physica Sinica [J], 2020, 69(13): 134303.
- [14] ROMERO-GARCÍA V, THEOCHARIS G, RICHOUX O, *et al.* Journal of the Acoustical Society of America[J], 2016, 139(6): 3395-3403.
- [15] LONG H, SHAO C, LIU C, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2019, 115(10): 103503.
- [16] ROMERO-GARCÍA V, THEOCHARIS G, RICHOUX O, *et al.* Scientific Reports[J], 2016, 6: 19519.
- [17] 李娟. 组合微穿孔吸声体声学特性研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
LI J. Study on Acoustic Characteristics of Combined Micro-perforated Acoustic[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2015.

(编辑 吴 锐)