

引用格式: 燕山林, 吴锦武, 陈杰, 等. 微穿孔板吸声体参数灵敏度分析[J]. 声学技术, 2022, 41(5): 711-716. [YAN Shanlin, WU Jinwu, CHEN Jie, et al. Analysis on parameter sensitivity of the micro-perforated panel sound absorber[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(5): 711-716.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.05.012

# 微穿孔板吸声体参数灵敏度分析

燕山林, 吴锦武, 陈杰, 熊引

(南昌航空大学飞行器工程学院, 江西南昌 330063)

**摘要:** 轻质耐高温的微穿孔板吸声体的吸声性能主要受腔深、孔径、板厚、穿孔率四个参数的制约, 通过等比例减小和增大这些参数来观察微穿孔板吸声体吸声性能的改变。引入吸声系数变化率的概念, 以吸声系数变化率作为衡量标准, 判断参数的改变对结构吸声性能的影响。整体而言, 影响吸声性能敏感度从高到低的微穿孔板吸声体参数顺序为: 腔深、孔径、穿孔率、板厚。研究结果可为工程人员利用微穿孔板吸声体降噪时设计吸声体尺寸提供一定的指导。

**关键词:** 微穿孔板吸声体; 吸声系数变化率; 敏感度

中图分类号: TB535

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-05-0711-06

## Analysis on parameter sensitivity of the micro-perforated panel sound absorber

YAN Shanlin, WU Jinwu, CHEN Jie, XIONG Yin

(Nanchang HangKong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

**Abstract:** The sound absorption performance of lightweight and high temperature resistant micro-perforated panel absorber (MPPA) is mainly restricted by four parameters: cavity depth, aperture, panel thickness and perforation rate. The change of the sound absorption performance of micro-perforated panel absorber is observed by decreasing and increasing these parameters in equal proportion. The concept of change rate of sound absorption coefficient is introduced, which is taken as the measuring standard to judge the influence of changing these parameters on the sound absorption performance of the micro-perforated panel structure. Generally, the order of the four parameters with the sensitivities affecting sound absorption performance from high to low is as follows: cavity depth, aperture, perforation rate, and panel thickness. The research results can provide some guidance for engineers to design the size of the micro-perforated panel absorber when it is used for noise reduction.

**Key words:** micro-perforated panel absorber; percentage change rate of sound absorption coefficient; sensitivity

## 0 引言

微穿孔板吸声体(Micro-Perforated Panel Absorber, MPPA)自马大猷先生提出以来, 因其轻质、耐高温、吸声效果显著等优点在降噪领域已被广泛应用, 影响微穿孔板吸声体吸声性能的主要因素为微穿孔板的腔深、孔径、板厚、穿孔率<sup>[1]</sup>, 改良吸声性能时也是主要通过改变这几个参数达到想要的目的。

近些年, 国内外学者们针对微穿孔板吸声体进行了大量的研究并取得了不错的成果, 如赵晓丹

等<sup>[2]</sup>将微穿孔板结构设计为多层结构, 极大程度上提高了微穿孔板结构的吸声带宽, 但多层的微穿孔板使得结构变得更加复杂, 不利于工程应用。杨军伟等<sup>[3]</sup>将轻质蜂窝结构和微穿孔板结构结合起来, 形成复合结构来提高结构的降噪效果。Zhang 等<sup>[4]</sup>提出的可调吸声性能的蜂窝微孔板复合结构, 提高了该结构降噪的应用范围。Xie 等<sup>[5]</sup>和 Yi 等<sup>[6]</sup>在微穿孔板背腔内部内置吸声材料, 进一步提高了微穿孔板吸声体的降噪效果。张晓晓等<sup>[7]</sup>利用优化算法设计了多孔径的微穿孔板吸声体来拓宽微穿孔板的吸声带宽。Jiang 等<sup>[8]</sup>、Qian 等<sup>[9]</sup>和 Mosa 等<sup>[10]</sup>分别设计了变截面孔、超微孔、非均匀孔等结构来提高微穿孔板的吸声性能。然而以上的研究均为针对提高或改良微穿孔板吸声体的降噪效果进行的。于是, 侯九霄等<sup>[11]</sup>和胡鹏针等<sup>[12]</sup>对各参数改变对微穿孔板吸声性能的影响进行了研究, 但研究只分析了参数改

收稿日期: 2021-04-16; 修回日期: 2021-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51965041)。

作者简介: 燕山林(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为蜂窝微穿孔设计。

通信作者: 吴锦武, E-mail: wujinwu@nchu.edu.cn

变时吸声性能改变的规律,而未对微穿孔板本身参数改变时,对吸声性能影响的程度进行深入分析。

因此,本文作者根据马大猷先生的声电类比理论,结合COMSOL Multiphysics 5.4有限元分析软件研究微穿孔板吸声体的腔深、孔径、板厚和穿孔率各参数等比例改变时,微穿孔板吸声体吸声性能的改变情况,即吸声性能对哪个参数的改变更加敏感。微穿孔板结构主要应用于中低频噪声的降噪,因此本文的仿真区间为0~3 000 Hz。微穿孔板模型为边长100 mm的正方形区域,结构示意图和网格划分如图1所示。

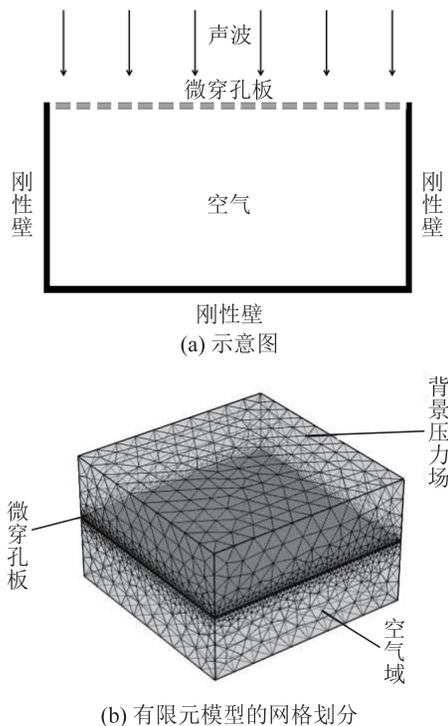


图1 微穿孔板吸声体示意图及其有限元模型的网格划分  
Fig.1 Schematic diagram of MPPA and its finite element model meshing

## 1 吸声系数变化率

研究包含两部分,一为各参数减少相同的比例,二为各参数增加相同的比例。为了分析参数灵敏度,引入吸声系数变化率的概念,以吸声系数变化率 $\phi_\alpha$ 作为衡量标准,表达式为

$$\phi_\alpha = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\alpha_0$ 为初始吸声系数, $\alpha_1$ 为改变参数后的吸声系数。

吸声系数变化率 $\phi_\alpha$ 和频率 $F$ 的关系曲线包含三个阶段:初级阶段、中级阶段和稳定阶段。将结构初始尺寸吸声系数为0.5的对应频率作为分界点,

吸声系数第一次到达0.5时对应的频率记为 $F_1$ ,吸声系数第二次为0.5时对应的频率记为 $F_2$ ,0~ $F_1$ 为初级阶段,该阶段为微穿孔板结构吸声的低频阶段,吸声系数由0开始递增; $F_1$ ~ $F_2$ 为中级阶段,该阶段包含了结构的最大吸声系数,对噪声吸收效果较好; $F_2$ ~3 000 Hz为稳定阶段,该阶段结构的吸收系数逐渐减小,吸声系数变化率曲线归于平稳,成为一条近似平行x轴的直线。

吸声系数变化率为正,代表改变参数后结构的吸声系数增大,吸声系数变化率为负,代表改变参数后结构的吸声系数减小。吸声系数变化率为正时称为正影响,吸声系数变化率为负时称为负影响,可由吸声系数变化率反映各参数对结构吸声系数的影响,吸声系数变化率越大,参数对结构吸声性能的影响程度也越大。

## 2 同比例改变参数对吸声性能的影响

本文采用控制变量的方法进行研究,即控制其余参数不变,只改变其中一个参数,按照相同的比例分别改变腔深、孔径、板厚、穿孔率,观察改变参数前后相同频率对应的吸声系数的变化,从而分析各参数对吸声性能的灵敏度。微穿孔板的参数选取目前技术工艺制作较为简单且运用较多的尺寸,如表1的初始参数所示。

### 2.1 同比例减小参数

对影响吸声性能的腔深、孔径、板厚、穿孔率四个参数,控制其余三个参数不改变,任一参数分别减小10%、20%、30%,微穿孔板吸声体参数改变前后的数据如表1所示。

表1 初始的和减少后的微穿孔板吸声体参数  
Table 1 Parameters of MPPA (original and reduced)

参数变化	腔深/mm	孔径/mm	板厚/mm	穿孔率/%
初始参数	30.00	0.50	1.00	3.00
减少10%	27.00	0.45	0.90	2.70
减少20%	24.00	0.40	0.80	2.40
减少30%	21.00	0.35	0.7	2.10

利用COMSOL软件的压力声学(频域)模块进行仿真分析,空气域材料定义为空气,此时背景压力场压力幅值为1 Pa,声速为340 m·s<sup>-1</sup>,按照初始参数定义内部微穿孔板的参数,得到初始尺寸时结构吸声系数曲线如图2所示。吸声系数为0.5时对应的频率分别为911 Hz和1 815 Hz。因此下文的研究中将0~911 Hz作为初级阶段,911~1 815 Hz作为中

级阶段，1 815~3 000 Hz 作为稳定阶段。

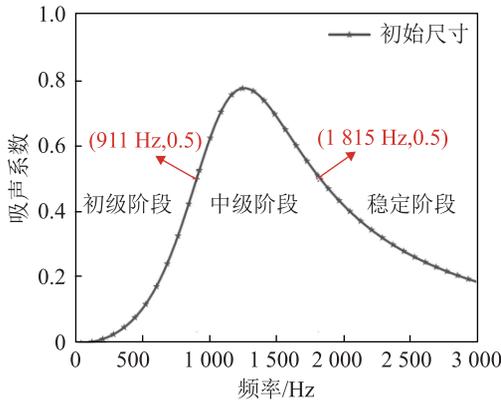


图2 初始尺寸微穿孔板吸声体的吸声系数  
Fig.2 Sound absorption coefficient of the initial MPPA

各参数分别减小10%，吸声系数曲线如图3(a)所示，吸声系数变化率曲线如图3(b)所示

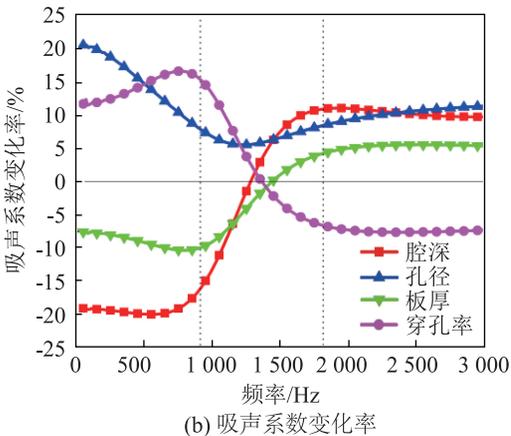
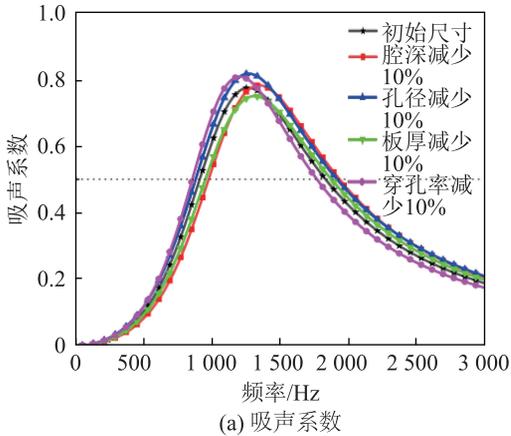


图3 参数减小10%后微穿孔板吸声体的吸声系数和吸声系数变化率曲线  
Fig.3 Curves of sound absorption coefficient and its change rate after a 10% reduction in MPPA's parameters

各参数分别减小20%，吸声系数曲线如图4(a)所示，吸声系数变化率曲线如图4(b)所示。

各参数分别减小30%，吸声系数变化曲线如图5(a)所示，吸声系数变化率变化曲线如图5(b)所示。

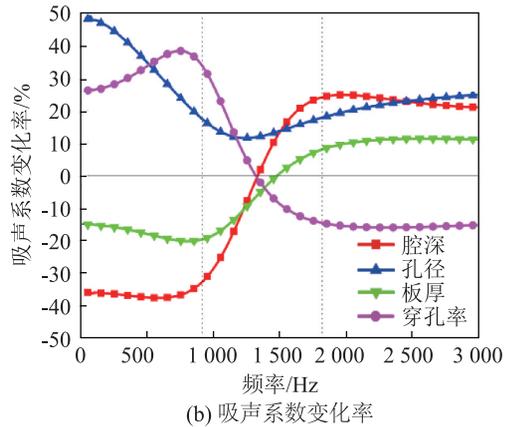
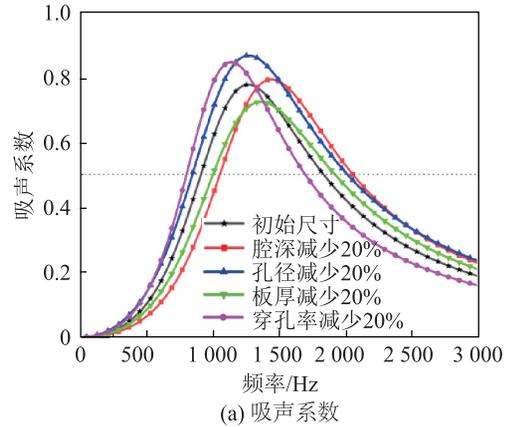
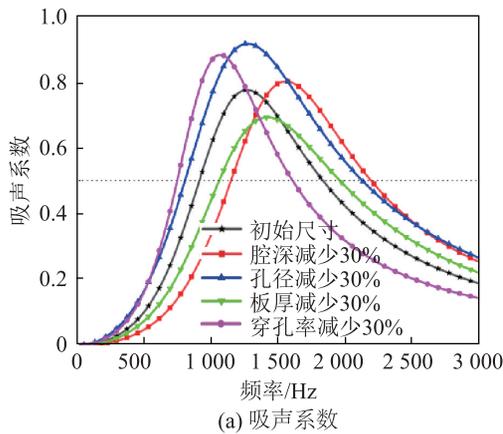


图4 参数减小20%后微穿孔板吸声体的吸声系数和吸声系数变化率曲线  
Fig.4 Curves of sound absorption in MPPA's parameters and its change rate after a 20% reduction in MPPA's parameters

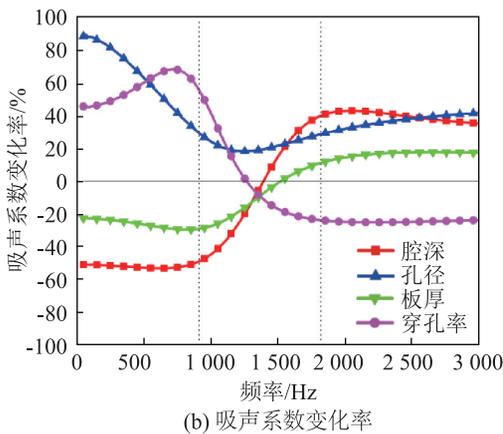
在初级阶段，孔径和穿孔率的吸声系数变化率为正即对吸声体的吸声性能为正影响，孔径的吸声系数变化率逐渐减小，穿孔率的吸声系数变化率递增后逐渐减小，在初级阶段的低频段，孔径对吸声性能的影响要大于穿孔率的影响，随后孔径的影响逐渐减小而穿孔率的影响逐渐增大直至超过孔径的影响。板厚和腔深的吸声系数变化率均为负值故两者为负影响，腔深对吸声性能的影响要大于板厚的影响。

在中级阶段，腔深、板厚和穿孔率三者的吸声系数变化率逐渐减小直至为0，但随着频率的增加，三者的吸声系数变化率又逐渐增大，最终趋于稳定。值得注意的是，腔深和板厚对吸声系数的影响是由负影响变为正影响的，而穿孔率是由正影响变为负影响，在该阶段，孔径的影响为正影响，吸声系数变化率略微减小后逐渐增大并趋于稳定。

在稳定阶段，该阶段四种参数的吸声系数变化率都已趋于稳定，基本不随着频率的改变而变化，此时对吸声性能影响最大的为孔径和腔深，两者吸声系数变化率基本相等，均为正影响。其次是穿孔率，为负影响，吸声系数变化率最小的是板厚，为



(a) 吸声系数



(b) 吸声系数变化率

图5 参数减小30%后微穿孔板吸声体的吸声系数和吸声系数变化率曲线

Fig.5 Curves of sound absorption coefficient and its change rate after a 30% reduction in MPPA's parameters

正影响。

## 2.2 同比例增大参数

对影响吸声性能的腔深、孔径、板厚、穿孔率四个参数，控制其余三个参数不改变，另一个参数分别增加10%、20%、30%，结构改变前后的参数如表2所示。

表2 初始的和增加后的微穿孔板吸声体参数  
Table 2 Parameters of MPPA (original and increased)

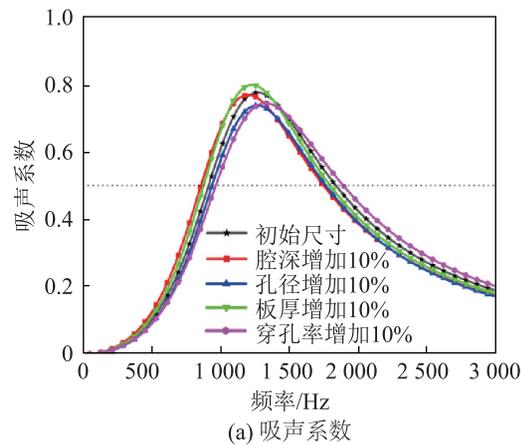
参数	腔深/mm	孔径/mm	板厚/mm	穿孔率/%
初始参数	30.00	0.50	1.00	3.00
增加10%	33.00	0.55	1.10	3.30
增加20%	36.00	0.60	1.20	3.60
增加30%	39.00	0.65	1.30	3.90

各参数分别增加10%，吸声系数曲线如图6(a)所示，吸声系数变化率曲线如图6(b)所示。

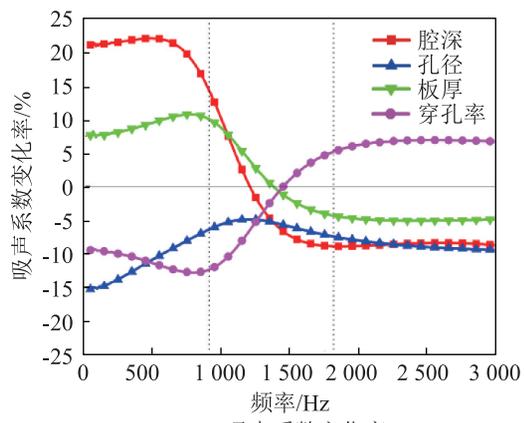
各参数分别增加20%，吸声系数曲线如图7(a)所示，吸声系数变化率曲线如图7(b)所示。

各参数分别增加30%，吸声系数曲线如图8(a)所示，吸声系数变化率曲线如图8(b)所示。

在初级阶段，腔深和板厚的吸声系数变化率为



(a) 吸声系数



(b) 吸声系数变化率

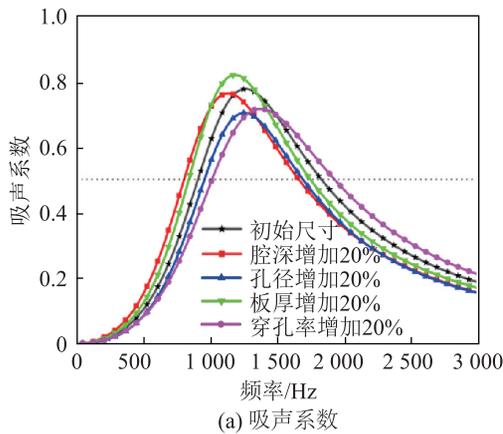
图6 参数增加10%后微穿孔板吸声体的吸声系数和吸声系数变化率曲线

Fig.6 Curves of sound absorption coefficient and its change rate after a 10% increase in MPPA's parameters

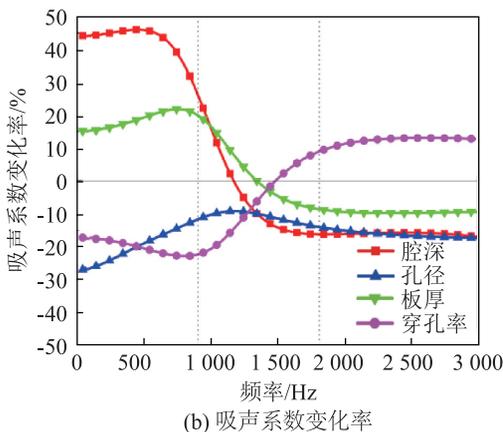
正即为正影响，两者的吸声系数变化率均逐渐增加后略微减小，其中腔深的吸声系数变化率最大，其次是板厚，孔径和穿孔率对结构吸声系数的影响为负影响，在初级阶段的低频段，孔径对吸声性能的影响要大于穿孔率的影响，随后孔径的影响逐渐减小而穿孔率的影响逐渐增大直至超过孔径的吸声系数变化率。

在中级阶段，腔深、板厚和穿孔率三者的吸声系数变化率逐渐减小直至为0，但随着频率的增加，三者的吸声系数变化率又逐渐增大，最终趋于稳定。腔深和板厚对吸声系数的影响由正影响变为负影响，而穿孔率是由负影响变为正影响，在该阶段，孔径的影响为负影响，吸声系数变化率略微减小后逐渐增大并趋于稳定。

在稳定阶段，该阶段四种参数的吸声系数变化率都已趋于稳定，基本不随着频率的改变而变化，此时对吸声性能影响最大的为孔径和腔深，两者吸声系数变化率基本相等，均为负影响。其次是穿孔率，为正影响，吸声系数变化率最小的是板厚，为负影响。



(a) 吸声系数



(b) 吸声系数变化率

图7 参数增加20%后微穿孔板吸声体的吸声系数和吸声系数变化率曲线

Fig.7 Curves of sound absorption coefficient and its change rate after a 20% increase in MPPA's parameters

### 2.3 四个参数对结构吸声性能的影响

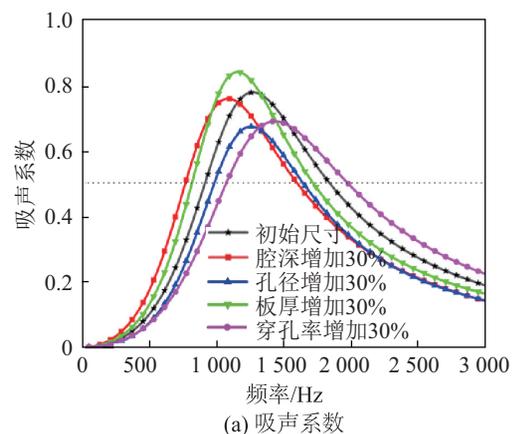
孔径、板厚、穿孔率、腔深对结构的吸声效果均有影响，当孔径减小、穿孔率减小、板厚增大时，结构的最大吸声系数均会变大。

腔深的改变主要影响结构的共振频率，穿孔率减小、腔深增加、板厚增加、孔径增加均可导致结构的最大吸声系数对应的峰值频率向低频移动，其中腔深的改变最为明显。

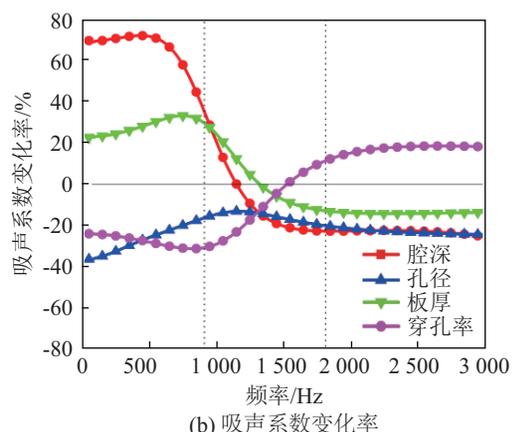
较小的孔径、较小穿孔率、较厚的板厚都会使结构获得更好的吸声效果，但具体的参数尺寸要结合加工条件和安装环境来确定。

## 3 结论

综上所述，在不同阶段各参数的吸声系数变化率是不一样的，但是无论是减小参数还是增加参数，腔深的吸声系数变化率均有着较大的变化，也即改变此参数，结构的吸声系数会发生较大的改变。其次为孔径，在初级阶段的低频段，该参数对结构吸声系数的影响甚至大于腔深的影响。穿孔率和板厚两者的吸声系数变化率绝对值在各频率都非



(a) 吸声系数



(b) 吸声系数变化率

图8 参数增加30%后微穿孔板吸声体的吸声系数和吸声系数变化率曲线

Fig.8 Curves of sound absorption coefficient and its change rate after a 30% increase in MPPA's parameters

常接近，但穿孔率的略大。同比例增加各参数，考虑吸声系数变化率正负时，穿孔率和板厚两者吸声系数变化率基本呈对称分布。整体而言，微穿孔板吸声体的参数灵敏度由大到小依次为：腔深、孔径、穿孔率、板厚。

## 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, 5(1): 38-50.
- [2] 赵晓丹, 胡鹏, 孙平. 多层微穿孔板结构声学性能计算方法对比分析[J]. 应用声学, 2012, 31(3): 196-201.  
ZHAO Xiaodan, HU Peng, SUN Ping. The comparative analyses of the calculation methods for absorptivity of multilayer micro-perforated panel absorbers[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(3): 196-201.
- [3] 杨军伟, 蔡俊, 邵骥. 微穿孔板-蜂窝夹芯复合结构的隔声性能[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(4): 122-125, 176.  
YANG Junwei, CAI Jun, SHAO Cong. Sound insulation property of the composite structure with micro-perforated panels and honeycomb core[J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(4): 122-125, 176.
- [4] ZHANG X, WU J W, MAO Q B, et al. Design of a honeycomb-microperforated panel with an adjustable sound absorption frequency[J]. Applied Acoustics, 2020, 164: 107246.
- [5] XIE S C, YANG S C, YANG C X, et al. Sound absorption

- performance of a filled honeycomb composite structure[J]. *Applied Acoustics*, 2020, **162**: 107202.
- [6] FANG Y, ZHANG X, ZHOU J. Acoustic porous metasurface for excellent sound absorption based on wave manipulation[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, **434**: 273-283.
- [7] 张晓晓, 李子博, 孔德义, 等. 多孔径微穿孔板的主动吸声仿真研究[J]. *压电与声光*, 2017, **39**(1): 48-51.  
ZHANG Xiaoxiao, LI Zibo, KONG Deyi, et al. Simulation study on active sound absorption based on multi-size micro-perforated panel structure[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2017, **39**(1): 48-51.
- [8] JIANG C S, LI X H, CHENG W Y, et al. Acoustic impedance of microperforated panels with stepwise apertures[J]. *Applied Acoustics*, 2020, **157**: 106998.
- [9] QIAN Y J, KONG D Y, LIU S M, et al. Investigation on micro-perforated panel absorber with ultra-micro perforations[J]. *Applied Acoustics*, 2013, **74**(7): 931-935.
- [10] MOSA A I, PUTRA A, RAMLAN R, et al. Absorption coefficient of a double-layer inhomogeneous micro-perforated panel backed with multiple cavity depths[J]. *Acoustics Australia*, 2020, **48**(1): 69-78.
- [11] 侯九霄, 朱海潮, 袁苏伟. 耦合条件下微穿孔板吸声特性研究[J]. *振动与冲击*, 2020, **39**(15): 156-162.  
HOU Jiuxiao, ZHU Haichao, YUAN Suwei. Acoustic absorption characteristics of a flexible micro-perforated panel cavity with a flexible back one[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, **39**(15): 156-162.
- [12] 胡鹏, 毛功平, 赵晓丹. 结构参数对微穿孔板结构声学特性的影响研究[J]. *压电与声光*, 2013, **35**(5): 624-627, 630.  
HU Peng, MAO Gongping, ZHAO Xiaodan. Effects of structure parameters on the sound absorption of micro-perforated panel absorber[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2013, **35**(5): 624-627, 630.