引用格式: 兰晓乾, 吴锦武, 李贺铭, 等. 板膜耦合微穿孔板消声器的性能试验分析[J]. 声学技术, 2023, 42(6): 819-824. [LAN Xiaoqian, WU Jinwu, LI Heming, et al. Experimental analysis of the performance of plate-membrane coupled microperforated plate sound absorber[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(6): 819-824.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.06.016

## 板膜耦合微穿孔板消声器的性能试验分析

## 兰晓乾,吴锦武,李贺铭,陈杰

(南昌航空大学飞行器工程学院,江西南昌 330063)

摘要:为了使微穿孔板消声器具有低频宽频带吸声性能,文章提出一种将刚性微穿孔板与柔性微穿孔薄膜复合而成的微穿孔平面,并利用平均速度法预测了其吸声效果。文章分析了薄膜面积占比、薄膜厚度、背腔深度对吸声效果的影响。由分析结果可知:板膜耦合微穿孔板消声器与刚性微穿孔板消声器相比,吸声频带宽度从260 Hz 拓宽到了 650 Hz,与柔性微穿孔板消声器相比,在一定频率范围内吸声系数从0.55 提高到0.75,通过适当改变薄膜厚度、背腔高度以及薄膜面积占比能控制微穿孔板吸收峰和薄膜共振吸收峰的相对位置,消声器可获得较好的吸声效果。研究成果可进一步拓宽微穿孔板消声器在低频降噪领域的应用范围。

关键词: 微穿孔板; 板膜耦合; 吸声性能; 试验分析

中图分类号: TB53 文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2023)-06-0819-06

# Experimental analysis of the performance of plate-membrane coupled microperforated plate sound absorber

LAN Xiaoqian, WU Jinwu, LI Heming, CHEN Jie

(School of Aircraft Engineering, Nanchang HangKong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

**Abstract:** In order to make the microperforated plate sound absorber has low frequency and wide band sound absorption performance, a kind of microperforated plane absorber composed of rigid composite microperforated plate and flexible microperforated film is proposed in this paper, and its sound absorption effect is predicted by the average velocity method. The effects of film area proportion, film thickness and back cavity depth on sound absorption are analyzed, and the results show that: compared with the rigid microperforated plate sound absorber, the frequency bandwidth of sound absorption of the coupled microperforated plate sound absorber extends from 260 Hz to 650 Hz, and compared with the flexible microperforated plate sound absorber, the sound absorption coefficient increases from 0.55 to 0.75 in a certain frequency range. By appropriately changing the film thickness, the back cavity height and the film area proportion, the relative positions of the absorption peak of the film can be controlled, and a better sound absorption perforated plate and the resonance absorption peak of the film can be controlled, and a better sound absorption perforated plate sound absorber can be obtained. The research results can further broaden the application range of microperforated plate sound absorber in the field of low frequency noise reduction.

Key words: microperforation plate; composite plate membrane; sound absorption performance; test analysis

## 0 引言

微穿孔板是应用最广泛的吸声结构之一,其在 低频结构降噪领域有一定优势。但微穿孔板加背腔 构成的亥姆霍兹(Helmholtz)共振腔消声器存在吸 声频带窄的不足。影响微穿孔板消声器结构吸声性 能参数主要有背腔深度、穿孔率、孔径等。为了拓 宽微穿孔板消声器的吸声带宽,可采用以下方法: 在吸声结构中串联多层微穿孔板<sup>[1-3]</sup>;将不同背腔深 度消声器进行并联<sup>[4-5]</sup>;在双层板上加工非均匀分布 的微孔<sup>[6]</sup>;设计不同形状的微孔以及优化微孔板参 数之间的取值关系亦能有效提升吸声效果<sup>[7-13]</sup>。但 刚性微穿孔板虽然可通过串并联背腔等提高吸声频 带,但同时增加了结构的重量和厚度,因而在对尺 寸有要求的场合就会受到应用限制。

由于薄膜相对薄板结构而言,轻质、轻薄是其 最大优点。对于结构轻量化场合,薄膜消声器结构 具有很大应用前途。薄膜消声器结构主要分为普通 线弹性薄膜材料和超弹性薄膜材料,其中普通线弹 性薄膜材料即为本文研究的聚酰亚胺薄膜。振动线

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(51965041), 南昌航空大学研究生创新 基金(YC2021-046)。

作者简介: 兰晓乾(1997一), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向 为噪声振动控制。

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

弹性薄膜的吸声研究较多,如利用弹性薄板或薄膜 与微穿孔板相结合<sup>[14-15]</sup>,在微穿孔板后的分隔腔内 再加入一层微穿孔柔性板<sup>[16]</sup>。针对柔性微穿孔板吸 声性能计算方面,Lee等<sup>[17-18]</sup>基于经典板的振动方 程的模态分析解以及有限柔性微穿孔板的声波方程 推导出了吸声公式并进行了简化。Bravo等<sup>[19-21]</sup>解 释了刚性挡板包围的柔性微穿孔板结构的有限尺寸 效应,研究了单面板和多层面板的吸声和传声。另 外一种吸声薄膜为超弹性薄膜,如介电弹性体薄 膜<sup>[22-23]</sup>。参考文献[22]研究的是一种打孔后的超弹 性介电体薄膜,主要研究了其孔间距、孔径等对吸 声性能的影响;验证了可利用微穿孔介电弹性体薄 膜结构进一步提高结构吸声性能,且通电后可调整 或拓宽结构的吸声频带。

综上所述,对于柔性微穿孔板的吸声研究大多 注重多层柔性微穿孔板或者多层刚性和柔性微穿孔 板结合。本文主要研究一种由刚性微穿孔板和柔性 微穿孔薄膜耦合成的新型微穿孔板,相比整体刚性 微穿孔板,耦合结构质量较轻。为综合刚性微穿孔 板和柔性微穿孔薄膜的优点以提高吸声性能,本文 提出了理论模型并预测了吸声结果,研究膜面积占 比、背腔变化等对耦合结构吸声性能的影响。本文 设计了一种宽频高吸收性能的消声器结构,为适合 板膜耦合场合的吸声结构提供理论模型和设计思路。

## 1 板膜耦合微穿孔板消声器结构 设计

本文设计的板膜耦合微穿孔板消声器结构如图 1所示。图1中,上表面板四周为刚性微穿孔薄板, 中间区域通过激光切割后,平滑均匀地黏附上聚酰 亚胺(Polyimide, PI)薄膜,利用激光打孔处理可形 成PI穿孔薄膜,通过激光切割亚克力板可形成高度 不同的背腔。



图1 板膜耦合微穿孔板消声器示意图

Fig.1 Schematic diagram of the plate and film coupled microperforated plate sound absorber

#### 2 吸声性能理论模型

对于由封闭矩形空腔支撑的微穿孔板,该空腔 由刚性壁包围。板膜耦合微穿孔板消声器剖面图如 图2所示。





闭合空腔内的声场通过其声速度势 *φ* 进行建模,并由波动方程控制,其表达式为

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

式中:  $c_0=340 \text{ m·s}^{-1}$ ,是空气中声速。孔内空气粒子 平均速度 $\bar{v}_0$ ,薄膜振动平均速度 $\bar{v}$ 以及孔内平均声 压 $\nabla \bar{p}$ 之间的关系为

$$\operatorname{Re}(Z_0)(\bar{v}_0 - \bar{v}) + i\operatorname{Im}(Z_0)\bar{v}_0 = \nabla \bar{p}$$
<sup>(2)</sup>

耦合微穿孔板的穿孔阻抗Z<sub>0</sub>由刚性和柔性微穿 孔板的穿孔阻抗构成<sup>[5]</sup>,表达式为

$$Z_0 = \left(\frac{\lambda}{Z_1} + \frac{\gamma}{Z_2}\right)^{-1} \tag{3}$$

式中:  $\lambda \pi y$ 是柔性和刚性微穿孔板的面积占比;  $Z_1$ 和 $Z_2$ 分别为两者的穿孔阻抗。本文采用马大猷提出 的模型<sup>[24]</sup>,其实部(声电阻)和虚部(声电抗)的计算 公式为

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(Z_{1,2}) = \frac{32\eta h}{d^2} \left( \sqrt{1 - \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}}{8} k \frac{d}{h} \right) \\ \operatorname{Im}(Z_{1,2}) = \rho_0 \omega h \left( 1 + 1/\sqrt{9 + \frac{k^2}{2}} + 0.85 \frac{d}{h} \right) \end{cases}$$
(4)

其中: d为穿孔孔径, h为板厚, 空气动态黏度 $\eta$ = 1.95×10<sup>-5</sup> Pa·s, 空气密度 $\rho_0$ =1.23 kg·s<sup>-1</sup>,  $\omega$ 为角频 率, 微穿孔板系数 $k=d\sqrt{\omega\rho_0/4\eta}$ 。式(2)中三个平均 量计算公式为

$$\nabla \overline{p} = \frac{1}{ab} \int_{0}^{b} \int_{0}^{a} (p - p_{D}) dx dy = p - p_{D}$$
$$\overline{v} = \frac{1}{ab} \int_{0}^{b} \int_{0}^{a} v dx dy$$
$$\overline{v}_{0} = \frac{1}{ab} \int_{0}^{b} \int_{0}^{a} v_{0} dx dy$$
(5)

其中: *p*为微穿孔板下表面均匀分布的声压, *p*<sub>D</sub>为 微穿孔板上表面均匀分布的声压, *a*和*b*为薄膜 边长。

Z=-D处的总平均速度 $\bar{v}_{D}$ 通过计算可得:

$$\bar{v}_D = (1 - \phi)\bar{v} + \phi\bar{v}_0 \tag{6}$$

其中: *ϕ*是微穿孔板的穿孔率, *ϕ*≪1。总阻抗可近 似为

$$Z_{u} = \frac{p}{Z_{c}\bar{v}_{D}} \approx \frac{\bar{Z}_{0}Z_{3}}{Z_{c}(\bar{Z}_{0} + Z_{3})} - \operatorname{icot}(\frac{\omega D}{c_{0}})$$
(7)

其中:  $\bar{Z}_0 = Z_0 / (Z_c \phi)$ , D为背腔深度,  $Z_3$ 为薄膜的 面板阻抗,  $Z_c$ 为空气特性阻抗。薄膜的面板阻抗由 Lee 等<sup>[17]</sup>的简化方法可得:

$$Z_{3} = \frac{\nabla \overline{p}}{\overline{\nu}} = \left(\sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} \frac{\varepsilon_{mn}^{2}}{ab\mu_{mn}Z_{mn}}\right)^{-1}$$
(8)

其中:  $Z_{mn}$ 为薄膜模态阻抗,  $\mu_{mn}$ 和  $\varepsilon_{mn}$ 为积分代换式。三者的表达式为:

$$\begin{cases} Z_{mn} = h_0 \frac{\xi \omega_{mn} \omega + i(\omega^2 - \omega_{mn}^2)}{\omega} \\ \varepsilon_{mn} = \int_0^a \int_0^b X_m(x) Y_n(y) dx dy \\ \mu_{mn} = \int_0^a \int_0^b X_m^2(x) Y_n^2(y) dx dy \end{cases}$$
(9)

式中: $h_0$ 为薄膜厚度, $\xi$ 为结构阻尼, $\omega_{mn}$ 为共振频率, $X_m(x)$ 和 $Y_n(y)$ 为模态模型。

系统的吸声系数确定为

$$\alpha = \frac{4\text{Re}(Z_{u})}{[1 + \text{Re}(Z_{u})]^{2} + \text{Im}(Z_{u})^{2}}$$
(10)

#### 3 试验结果分析

#### 3.1 试样与实验装置

试件样品如图3所示。实验材料为聚酰亚胺, 其密度为1430 kg·m<sup>-3</sup>,杨氏模量为2.35 GPa、泊松 比为0.38。薄膜未施加拉伸应力,钢板的厚度为 0.5 mm,所有孔直径均为0.5 mm,所有样品穿孔 率均为0.785%。

利用阻抗管对试样进行吸声性能测量。通过阻抗管上的两个声压传感器利用传递函数法测得吸声



图 3 试件样品 Fig.3 Photo of specimen sample

系数。吸声测量系统如图4所示,主要由扬声器、 阻抗管和声压传感器、功率放大器、信号分析仪和 计算机组成。试样通过亚克力板背腔密封住,利用 螺栓将试样与阻抗管进行固定。实验的声压传感器 间距为70 mm,能够在50~1600 Hz频率范围内进 行吸声性能测试。



Fig.4 Schematic diagram of the sound absorption coefficient measurement system with impedance tube

#### 3.2 理论模型验证

理论预测与实测的消声器吸声效果对比如图5 所示。通过理论计算和实验验证发现理论模型与实验结果的吸声曲线在各阶共振频率吻合较好,两条曲线表现出了相同的趋势。





试验样品背腔的厚度为80mm,薄膜占比为50%,薄膜厚度为0.2mm。由图5可知,理论预测与试验结果较为吻合。打孔后增加了孔隙中的摩擦

能量损耗,使吸声系数明显提升,耦合作用吸声机 理:在图5中的实验验证曲线中,具有薄膜振动效 应的第一、三、五阶共振频率分别为245、780和 1400 Hz,微穿孔效应的吸声峰频率为500~600 Hz。 如果激励频率高于共振频率,则结构振动在200~ 350 Hz范围内吸声性能降低。在该频率范围内,面 板沿孔处空气颗粒运动的方向振动,空气颗粒的速 度低于面板振动的速度,因此,较低的相对速度会 导致出现较低的吸声效果。相反,如果激励频率低 于共振频率,则结构振动会在600~800 Hz范围内 增强吸声性能,面板的振动方向与空气颗粒运动方 向相反,空气颗粒相对于面板振动的速度较高,相 对速度越高,耦合吸声效果越好。如果薄膜结构共 振频率高于激励频率,则穿孔和结构振动引起的两 个峰会组合在一起,可以拓宽吸声频带。

#### 3.3 三种微穿孔板消声器效果对比

将刚性微穿孔板、柔性微穿孔板以及板膜耦 合微穿孔板消声器进行实验分析对比。三种微穿 孔板消声器的背腔厚度均为80mm,薄膜厚度为 0.15mm,板膜耦合微穿孔板消声器的薄膜占比为 50%,吸声效果如图6所示。



Fig.6 Comparison of sound absorption performances of three kinds of microperforated plates sound absorbers

经典的刚性微穿孔板消声器有较高的穿孔效应 吸收峰,但是频带较窄,而柔性微穿孔板消声器虽 然吸声频带宽,但因为其厚度较薄穿吸声孔效应不 明显,板膜耦合微穿孔板消声器既有较高的吸收峰 也有较宽的频带。由图6可知,在吸声系数为0.75 时,板膜耦合微穿孔板消声器相比刚性微穿孔板消 声器频带带宽由260 Hz 拓宽到了650 Hz,而相对 于柔性微穿孔板消声器,吸声系数由0.55 提高到了 0.75,频带带宽也增加了150 Hz,实验证明耦合微 穿孔板有较高的吸声系数和较宽的吸声频带。

#### 4 吸声性能影响因素分析

#### 4.1 薄膜占比影响

膜占比的变化对吸声效果也有较大影响。试验 样品背腔厚度为80mm,薄膜厚度为0.2mm,实验 结果如图7所示。



图7 膜占比30%和50%的板膜耦合微穿孔板消声器的吸声性 能对比



不同膜占比的消声器预测吸声效果对比如图8 所示,板均未打孔。由图8可知,未打孔薄膜能够 更好地表现出共振所引发的吸声特性,膜占比由 30%提高到50%,各阶共振频率逐渐向低频转移, 第一阶和第三阶共振频率由400 Hz、1150 Hz偏移 至250 Hz、800 Hz附近。图7中,膜占比在30% 时,激励频率(600 Hz)高于共振频率(400 Hz),造 成孔内相对速度较低,出现一个低吸声的凹峰;膜 占比50%时,激励频率(500 Hz)低于薄膜共振频率



图 8 不同膜占比的消声器预测吸声性能对比(板均未打孔) Fig.8 Comparison of the predicted sound absorption performances of the sound absorber with two different film area proportions (the plates are not perforated)

(800 Hz),两个吸收峰组合到了一起,提高了孔内 相对速度,拓宽了吸收频带。合适的膜占比能够调 整薄膜共振频率和穿孔吸收峰之间的位置关系从而 拓宽频带,实验分析结果与理论预测效果吻合较 好,各阶共振频率偏移范围均在预测之内。

#### 4.2 背腔厚度影响

板膜耦合微穿孔板消声器的三个实验背腔的厚度分别为30、50和80mm。实验中的微穿孔板参数为:薄膜厚度为0.1mm,膜占比为50%,背腔的厚度会影响穿孔效应吸收峰的位置,实验结果如图9所示。





由图9可知,随着背腔厚度不断增加,耦合微 穿孔板吸收峰朝低频偏移,微穿孔效应吸收峰从 1200 Hz 偏移至900、650 Hz。柔性薄膜,第一、 三、五、七、九阶共振频率一直在330、580、780、 1030以及1200 Hz附近,吸声带宽一直保持在460 Hz 左右,所以对于柔性薄膜的共振频率和吸声带宽, 背腔的变化对其影响并不大。调整背腔高度可以使 激励频率低于薄膜共振频率,从而获得较好的总体 吸声效果。

#### 4.3 薄膜厚度变化对吸声效果的影响

薄膜厚度的变化不仅影响穿孔效应引起的吸收 峰位置,还影响薄膜的振动模态。实验中实验样品 的背腔厚度均为80mm,膜占比为50%。实验结果 如图10所示。

由图10可知,随着薄膜厚度从0.1 mm增加到0.15 mm,第一、三、五阶共振频率从360、840、970 Hz偏移到了320、810、920 Hz,薄膜厚度增加到0.2 mm,共振频率偏移至210、605、700 Hz。



图10 厚度为0.1、0.15和0.2 mm薄膜的消声器吸声性能对比 Fig.10 Comparison of sound absorption performances of the sound absorber with 0.1, 0.15 and 0.2 mm thick films

在图10中,穿孔效应导致的吸收峰也随薄膜厚度 的增加从620 Hz 偏移至600 Hz 最终到500 Hz,吸 声系数则从平均0.7提高到0.8 最终到0.9 左右。在 薄膜厚度不断增加的情况下,各阶共振频率会向低 频偏移,穿孔效应吸收峰也会向低频偏移,薄膜共 振频率会向激励频率靠近,造成两种吸收峰组合后 吸声频带变窄,适当地调整薄膜厚度可以拓宽吸声 带宽提高吸声系数。

### 5 结论

本文针对传统刚性微穿孔板消声器频带窄和柔 性微穿孔板消声器吸声系数低的问题,提出了一种 板膜耦合微穿孔板消声器,建立了板膜耦合微穿孔 板消声器吸声理论模型,计算结果与实验结果吻合 较好。实验结果表明:刚性微穿孔板消声器在吸声 带宽较窄的情况下耦合一定面积的柔性微穿孔板能 有效拓宽吸声带宽,耦合微穿板消声器相较于刚性 微穿孔板消声器频带宽从260 Hz拓宽到了650 Hz。 相较于柔性微穿孔板消声器,在200~1 000 Hz范围 内吸声系数提升了36%。通过合理选择薄膜厚度、 背腔高度以及薄膜面积占比等参数,使薄膜共振频 率高于穿孔引起的吸收峰频率从而拓宽频带,为微 穿孔板消声器设计与应用提供了一种新的思路。

#### 参考文献

[1] 栾海霞,盛美萍,刘志宏.双层串联微穿孔板吸声体设计理论 及应用研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(11): 1343-1345, 1350.

LUAN Haixia, SHENG Meiping, LIU Zhihong. On design of a double microperforated panel absorber[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, **27** (11): 1343-1345, 1350.

- [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] 潘立敏. 弹簧连接多层微穿孔板的吸声特性研究[D]. 大连: 大 连理工大学, 2015.
   PAN Limin. Sound absorption characteristics research on

multi-layer microperforated panel connected by springs[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

- [4] WANG C Q, HUANG L X. On the acoustic properties of parallel arrangement of multiple micro-perforated panel absorbers with different cavity depths[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(1): 208-218.
- [5] 王鹏, 王敏庆, 刘彦森, 等. 并联微穿孔板吸声结构研究[J]. 压 电与声光, 2008, 30(4): 489-491.
  WANG Peng, WANG Minqing, LIU Yansen, et al. Study on the parallel microperforated panels[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008, 30(4): 489-491.
- [6] MOSA A I, PUTRA A, RAMLAN R, et al. Wideband sound absorption of a double-layer microperforated panel with inhomogeneous perforation[J]. Applied Acoustics, 2020, 161: 107167.
- [7] 熊引, 吴锦武, 燕山林. 蜂窝微穿孔吸声体的宽频吸声性能优 化设计[J]. 声学技术, 2022, 41(1): 124-130.
  XIONG Yin, WU Jinwu, YAN Shanlin. Optimal design of broadband sound absorption performance of honeycomb microperforated sound absorber[J]. Technical Acoustics, 2022, 41 (1): 124-130.
- [8] 刘志恩, 袁金呈, 陈弯, 等. 复合微穿孔板吸声结构吸声特性分析及优化[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 515-520.
   LIU Zhi'en, YUAN Jincheng, CHEN Wan, et al. Analysis and optimization of acoustic absorption characteristics for composite micro-perforated panel absorbers[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(4): 515-520.
- [9] 刘淑梅, 孔德义, 李山山, 等. 计及温度条件下的微穿孔板结构 优化设计[J]. 声学技术, 2015, 34(4): 347-352.
  LIU Shumei, KONG Deyi, LI Shanshan, et al. The structure optimization of micro-perforated panel absorber considering the effect of temperature[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(4): 347-352.
- [10] AKIWATE D C, DATE M D, VENKATESHAM B, et al. Acoustic characterization of additive manufactured perforated panel backed by honeycomb structure with circular and noncircular perforations[J]. Applied Acoustics, 2019, 155: 271-279.
- [11] 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.
- [12] 王卫辰, 冯军, 马然. 穿孔率和穿孔直径耦合下微穿孔板吸声

体整体吸声性能[J]. 声学学报, 2021, 46(5): 721-729.

WANG Weichen, FENG Jun, MA Ran. Integral sound absorption performance of micro-perforated panel absorbers under coupling of porosity and hole diameter[J]. Acta Acustica, 2021, **46**(5): 721-729.

- [13] MOSA A I, PUTRA A, RAMLAN R, et al. Theoretical model of absorption coefficient of an inhomogeneous MPP absorber with multi-cavity depths[J]. Applied Acoustics, 2019, 146: 409-419.
- [14] SAKAGAMI K, FUKUTANI Y, YAIRI M, et al. A theoretical study on the effect of a permeable membrane in the air cavity of a double-leaf microperforated panel space sound absorber[J]. Applied Acoustics, 2014, **79**: 104-109.
- [15] SAKAGAMI K, FUKUTANI Y, YAIRI M, et al. Sound absorption characteristics of a double-leaf structure with an MPP and a permeable membrane[J]. Applied Acoustics, 2014, 76: 28-34.
- [16] SANADA A, TANAKA N. Extension of the frequency range of resonant sound absorbers using two-degree-of-freedom Helmholtz-based resonators with a flexible panel[J]. Applied Acoustics, 2013, 74(4): 509-516.
- [17] LEE Y Y, LEE E W M, NG C F. Sound absorption of a finite flexible micro-perforated panel backed by an air cavity[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 287(1-2): 227-243.
- [18] LEE Y Y, LEE E W M. Widening the sound absorption bandwidths of flexible micro-perforated curved absorbers using structural and acoustic resonances[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(8): 925-934.
- [19] BRAVO T, MAURY C, PINHÈDE C. Sound absorption and transmission through flexible micro-perforated panels backed by an air layer and a thin plate[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 131(5): 3853-3863.
- [20] BRAVO T, MAURY C, PINHÈDE C. Vibroacoustic properties of thin micro-perforated panel absorbers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(2): 789-798.
- [21] BRAVO T, MAURY C, PINHÈDE C. Enhancing sound absorption and transmission through flexible multi-layer microperforated structures[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(5): 3663-3673.
- [22] 陈杰, 吴锦武, 燕山林, 等. 微穿孔介电弹性体薄膜的吸声性能 试验分析[J]. 应用声学, 2022, 41(5): 830-836. CHEN Jie, WU Jinwu, YAN Shanlin, et al. Experimental analysis of sound absorption performance of mic-perforated dielectric elastomer films[J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(5): 830-836.
- [23] PELRINE R, KORNBLUH R, PEI Q, et al. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%[J]. Science, 2000, 287(5454): 836-839.
- [24] MAA D Y. Potential of microperforated panel absorber[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104 (5): 2861-2866.