

基于多孔材料的复合微穿孔板结构声学特性研究

戚美,刘磊,陈庆光,路成,陈文毅

(山东科技大学机械电子工程学院,山东青岛 266590)

摘要:为了拓宽普通单层微穿孔板吸声频段,进一步提高其吸声性能,本研究对基于多孔材料的复合微穿孔板吸声结构声学特征进行研究。应用声学有限元方法对复合吸声结构声场进行数值模拟,研究多孔材料的位置、厚度、流阻率及其与微穿孔板或腔壁间空气层对复合吸声结构吸声性能的影响。结果表明:相较于普通单层微穿孔板吸声结构,添加多孔材料后的复合吸声结构吸声性能显著提高;将多孔材料紧贴微穿孔板安装,或选择较厚的、流阻率较高的多孔材料,均可有效提高复合吸声结构的吸声性能;多孔材料与腔壁间空气层对改善中、低频吸声性能有良好作用;多孔材料与微穿孔板间空气层会降低高频吸声效果。

关键词:微穿孔板;多孔材料;复合吸声结构;吸声性能;数值模拟

中图分类号:TB535⁺.1

文献标志码:A

Research on acoustic performance of composite micro-perforated plate structure based on porous materials

QI Mei, LIU Lei, CHEN Qingguang, LU Cheng, CHEN Wenyi

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to broaden the sound absorption frequency band of ordinary single-layer micro-perforated plates and improve their absorption performance, this paper studied the sound-absorbing performance of a composite micro-perforated plate sound-absorbing structure based on porous materials. The acoustic finite element method was used to numerically simulate the sound field of the composite sound-absorbing structure. The effect of the position, thickness, flow resistance rate of porous materials and the air layer between porous materials and micro-perforated plates or cavity walls on the sound-absorbing performance of the composite sound-absorbing structure were studied. The results show that in comparison with the ordinary single-layer micro-perforated sound-absorbing structure, the sound-absorbing performance of the composite sound-absorbing structure after adding porous materials is significantly improved. Both installing porous materials close to micro-perforated plates and selecting thicker porous materials with higher flow resistance rate can effectively improve the sound absorption performance of the composite sound absorption structure. The air layer between porous materials and cavity walls has a good effect on improving the absorption performance of medium and low-frequency sound. The air layer between porous materials and micro-perforated plates will reduce the absorption effect of high-frequency sound.

Key words: micro-perforated plate; porous material; composite sound-absorbing structure; sound absorption performance; numerical simulation

微穿孔板吸声结构是由中国著名声学专家马大猷^[1]在 20 世纪 70 年代提出的,是由一定穿孔率(穿孔直

收稿日期:2021-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51674156);山东省自然科学基金项目(ZR2021ME242)

作者简介:戚美(1969—),女,山东泰安人,教授,硕士生导师,主要从事节能降噪技术及流体机械研究。

E-mail:1636939993@qq.com

径小于 1 mm)的薄板与板后空腔(背腔)组成的一种低声质量、高声阻的共振吸声系统。当声波入射到微穿孔板表面,一部分声能激起孔洞处的空气分子做往复运动,产生摩擦阻力被消耗掉,还有一部分声能激起微穿孔板的共振,形成薄板共振吸收。由于微穿孔板吸声结构低廉的价格和降噪的有效性,被广泛应用在机械、建筑、航空航天、家用电器等领域的噪声控制方面。

微穿孔板的研究受到众多学者的重视,王卫辰等^[2]提出一种不规则孔的微穿孔板几何参数估算方法,并分析了微穿孔板几何参数对高吸声性能区域的影响;侯九霄等^[3]基于模态叠加法研究了弹性微穿孔板和弹性背腔板的刚度、面密度、张紧力和阻尼对吸声性能的影响;胡齐笑等^[4]针对不同穿孔率并联的复合微穿孔板,研究了多穿孔率对结构吸声性能的影响;Wang 等^[5]提出用波纹状微穿孔板代替传统平面微穿孔板,采用三维有限元模型模拟了波纹状微穿孔板在法向入射、倾斜入射和扩散场作用下的声学性能;Jiang 等^[6]研究表明,在厚板上开阶梯孔可提高微穿孔板吸声性能,克服薄板强度不足的问题;Park^[7]在微穿孔板吸声结构背腔中加入赫姆霍兹结构,采用传递矩阵法计算了结构的吸声系数。

在多孔材料研究方面,朱远志等^[8]针对多孔材料的吸声性能问题,研究了材料孔隙形状及尺寸对吸声性能的影响,并进行了实验验证;马晓文等^[9]构造出梯度穿缝型双孔隙率多孔材料并进行吸声性能研究;Hiro-sawa^[10]通过数值模拟研究了纤维截面形状对纤维多孔材料吸声效率的影响,分析了多孔材料的声学特性;Li 等^[11]研究了由多孔管和多孔材料组成的周期性排列吸声体的扩散吸声特性;Ayub 等^[12]采用正常入射的双麦克风方法,通过阻抗管实验研究了垂直定向碳纳米管材料的吸声特性;韩宝坤等^[13]分析了在多孔金属材料后添加空气背腔对吸声性能的影响。

上述研究大多基于单个微穿孔板或多孔材料,微穿孔板吸声结构只在其共振频率处有较好的吸声性能,并且吸声频带相对较窄,而多孔材料具有优越的高频吸声性能。为拓宽微穿孔板吸声频带,提高其吸声性能,提出一种由微穿孔板和多孔材料组成的复合吸声结构,并利用 COMSOL 仿真软件对复合吸声结构声场进行数值模拟,分析多孔材料的位置、厚度、流阻率与微穿孔板或腔壁间空气层高度对复合吸声结构吸声性能的影响。

1 复合吸声结构理论

1.1 几何模型

复合吸声结构由微穿孔板以及多孔材料组成,几何模型如图1所示。图1中: d 为微穿孔板孔径, b 为微孔间距, t 为微穿孔板厚度, D 为背腔深度, D_1 为多孔吸声材料厚度, D_2 为微穿孔板与多孔材料间空气层高度, D_3 为多孔材料与腔壁间空气层高度, P 为入射声压。

1.2 微穿孔板声阻抗

根据微穿孔板吸声结构理论基础^[14],微穿孔板的声阻抗

$$Z = R + j\omega M. \tag{1}$$

式中: R 为微穿孔板声阻, M 为微穿孔板声质量, j 为虚数单元, ω 为角频率。

对 Z 进行归一化,得到相对声阻抗表达式为:

$$z = \frac{Z}{\rho c} = r + j\omega m. \tag{2}$$

式中: r 为相对声阻, m 为相对声质量, ρ 为空气密度, c 为空气中声波传播速度, ρc 为空气特性阻抗,且有

$$r = \frac{32\mu t}{\delta c d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2} k d}{8 t} \right), \tag{3}$$

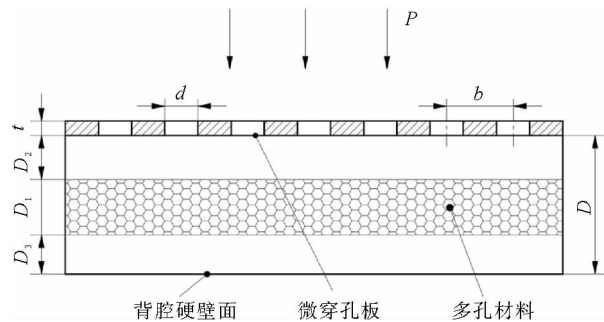


图1 复合吸声结构模型

Fig. 1 Composite sound-absorbing structure model

$$m = \frac{t}{\delta c} \left[1 + \left(9 + \frac{k^2}{2} \right)^{-1/2} + 0.85 \frac{d}{t} \right]. \quad (4)$$

式中: δ 为穿孔率; μ 为空气运动黏滞系数,常温下 $\mu = 1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; k 为穿孔常数,其值为

$$k = d/2\sqrt{\omega/\mu}. \quad (5)$$

1.3 多孔材料声阻抗

多孔材料的复阻抗 Z_p 和复波数 K_p 可由经验公式计算或实验测得^[15-16],本研究的多孔材料为聚合纤维,根据声抗转移公式可得吸声材料的表面声阻抗为^[17]:

$$Z_s = Z_p \frac{Z_{sD_1} + j Z_p \tan(K_p D_1)}{Z_p + j Z_{sD_1} \tan(K_p D_1)}, \quad (6)$$

式中 Z_{sD_1} 为多孔材料背面声阻抗。

1.4 复合吸声结构声阻抗

复合吸声结构的相对声阻抗由微穿孔板的相对声阻抗以及多孔材料的相对声阻抗组成,即

$$Z_c = z + Z_s/(\rho c), \quad (7)$$

则复合吸声结构在声波垂直入射时的吸声系数

$$\alpha = \frac{4\text{Re}(Z_c)}{[1 + \text{Re}(Z_c)]^2 + [\text{Im}(Z_c)]^2}. \quad (8)$$

式中:Re 为复数的实部,Im 为复数的虚部。

在声学上,吸声系数是鉴别吸声材料吸声性能的重要指标,本研究通过分析平面波垂直入射情况下复合吸声结构的吸声系数来衡量其吸声性能。

2 数值模拟计算

2.1 复合吸声结构参数设置

复合吸声结构微穿孔板及多孔材料参数取值分别如表 1、表 2 所示。

2.2 声场边界条件及网格划分

在声场的仿真计算中,设置介质环境为常温常压下的空气,空气密度 $\rho = 1.21 \text{ kg/m}^3$,声速 $c = 343 \text{ m/s}$,空气运动黏滞系数 $\mu = 1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。忽略温度的影响,结构有限元仿真模型及网格划分如图 2 所示。

复合吸声结构声学仿真单元由微穿孔板、多孔材料以及空气域组成,坐标原点设置在微穿孔板几何中心,微穿孔板采用 COMSOL 内置的“内部穿孔板”边界条件。原点左侧的空气域设置为平面波入射的背景压力场,入射声压为 1 Pa ,垂直入射到结构表面。原点右侧为背腔区域,背腔中多孔材料采用 COMSOL 内置的“多孔介质声学”域边界条件,微穿孔板和多孔材料接触面以及背腔后壁面均设置为硬声场边界条件,确保声波全反射。仿真模型区域采用自由四面体网格,为保证计算精度,网格最大单元小于最高计算频率对应波长的 $1/6$ 。

3 数值计算结果与分析

3.1 多孔材料对微穿孔板吸声结构吸声性能的影响

为研究多孔材料对微穿孔板吸声结构吸声性能的影响,对有、无多孔材料的微穿孔板吸声结构分别进行

表 1 微穿孔板参数取值

| 参数 | 孔径/mm | 壁厚/mm | 穿孔率/% |
|------|-------|-------|-------|
| 计算取值 | 0.5 | 0.5 | 4 |

表 2 多孔材料参数取值

| 参数 | 计算取值 | | | |
|--|-------|-------|--------|--------|
| | 板前 | 背腔前 | 背腔中 | 背腔后 |
| 位置 | | | | |
| 厚度/mm | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 流阻率/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})/\text{m}^2$ | 3 500 | 7 500 | 11 500 | 14 500 |
| 空气层高度/mm | 5 | 10 | 15 | 20 |

数值模拟,计算频率范围取 20~4 000 Hz,步长取 20 Hz,吸声系数曲线如图 3 所示。

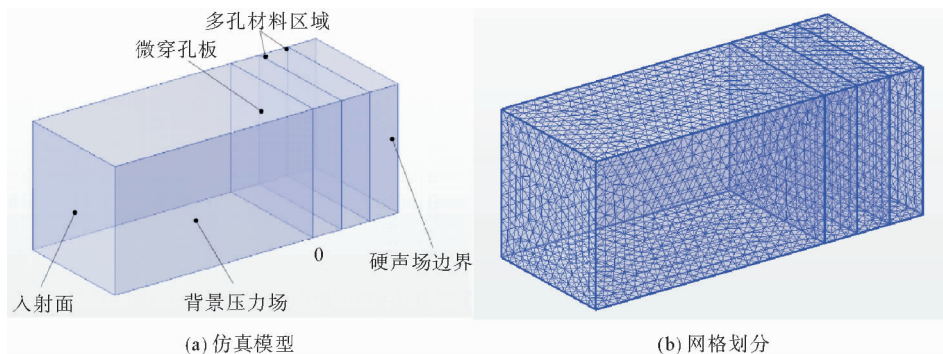


图 2 复合吸声结构声学有限元模型

Fig. 2 Acoustic finite element model of composite sound-absorbing structure

由图 3 可知:相较于普通单层微穿孔板吸声结构,添加多孔材料后的复合吸声结构吸声系数在整个频带范围内都有明显提高,具有更好的宽带吸声效果。这是因为多孔材料是纤维结构,内部有许多相互贯穿的孔洞和微小间隙,并与表面连通,在声波作用下,孔洞和缝隙内空气及多孔材料中的细小纤维发生振动。由于空气具有黏滞性,声波穿过吸声材料受到摩擦和黏滞阻力增大,更多的声能被转化为热能,使得噪声量减弱。同时,孔洞及缝隙内空气压缩膨胀会和壁面发生热交换,进一步降低噪声,增强了对整个频带内声音的吸收。

3.2 多孔材料位置对复合吸声结构吸声性能的影响

选取多孔材料厚度 D_1 为 10 mm,背腔深度 D 设置为 30 mm,多孔材料位置如图 4 所示,由多孔材料位置的改变引起复合吸声结构吸声系数变化情况如图 5 所示。

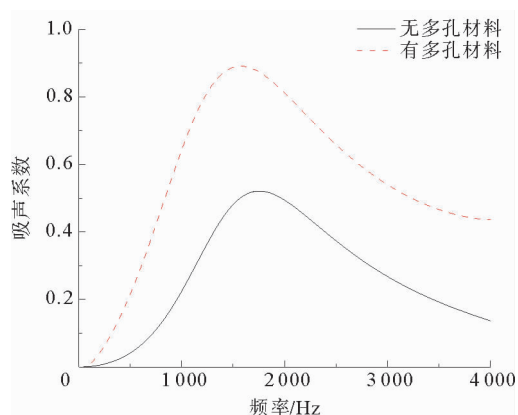


图 3 多孔材料对微穿孔板结构吸声系数的影响

Fig. 3 Effect of porous materials on the sound absorption coefficient of micro-perforated plate structure

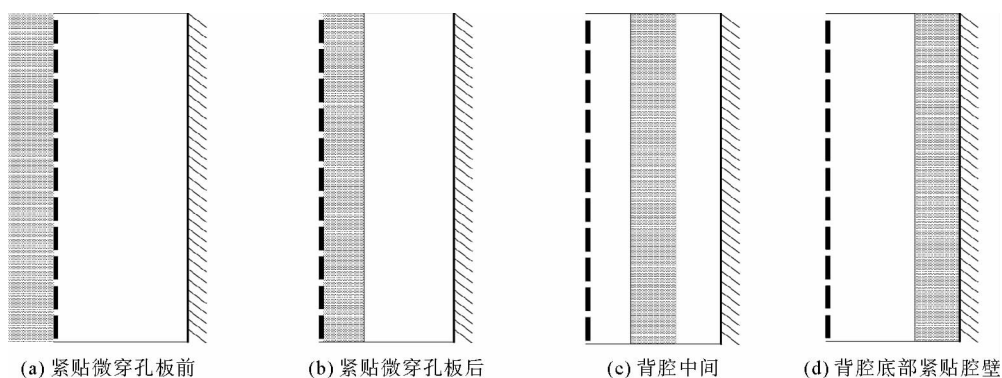


图 4 多孔材料与微穿孔板的位置

Fig. 4 Position of porous materials and micro-perforated plate

将多孔材料紧贴在微穿孔板前时的吸声效果最好,吸声系数曲线出现 0.81 的峰值,对应频率为 1 600 Hz;其次是多孔材料在背腔中并紧贴在微穿孔板后,此时吸声系数在 300~1 500 Hz 频带范围内以及局部高频 2 600~4 000 Hz 范围内略微降低。总体来看,两者的吸声系数曲线基本吻合。而多孔材料放在背腔中

间以及底部位置时,吸声系数峰值相较于结构 4(a)的降低幅度分别为 0.1、0.17。改变多孔材料位置对共振频率的影响较小,基本集中在1 600 Hz左右。因多孔材料的声阻抗和空气特性阻抗较匹配,结构 4(a)中大部分声波透过了多孔材料,微穿孔板加强了对中、低频声波的作用,而结构 4(b)中多孔材料在微穿孔板后,声波大部分被微穿孔板反射回去,导致多孔材料吸收的声能降低,所以结构 4(b)~4(d)的吸声性能均较结构 4(a)有不同程度的降低。由于结构 4(a)与结构 4(b)的吸声效果相差不大,实际应用中可将微穿孔板作为护面板,对多孔材料起保护作用,所以将多孔材料放在背腔中并靠近微穿孔板的复合吸声结构有较广泛的应用前景。

3.3 多孔材料厚度对复合吸声结构吸声性能的影响

将多孔材料紧贴在微穿孔板后,背腔深度 D 设置为 30 mm,改变多孔材料厚度 D_1 ,分别取值为 5、10、20、30 mm,如图 6 所示。研究多孔材料厚度对复合吸声结构吸声性能的影响,如图 7 所示。

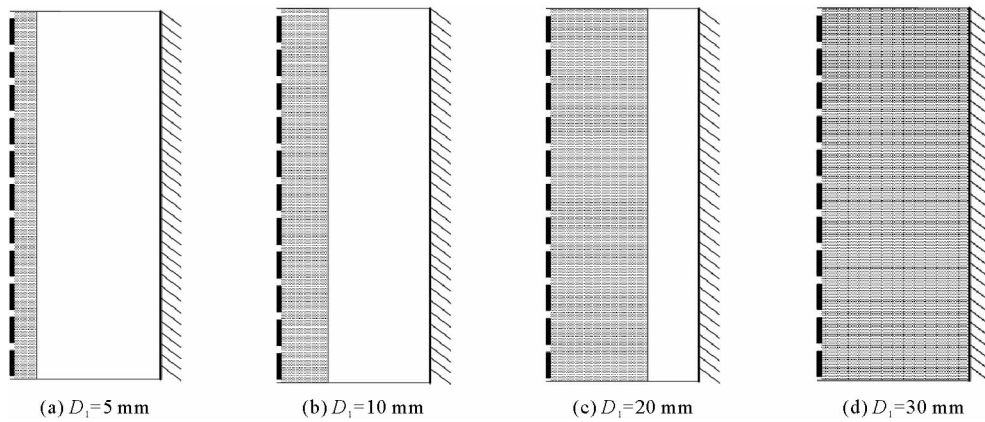


图 6 不同多孔材料厚度的复合吸声结构

Fig. 6 Structure of composite sound absorbers with different porous material thicknesses

随着多孔材料厚度的增加,吸声系数在整个频带范围内均出现上升趋势,峰值系数从 0.7 上升到 0.93,提升幅度为 0.23,共振频率逐渐向低频移动,从 1 680 Hz 移动到 1 580 Hz,但变化不大,主要因为背腔深度保持不变。在 3 000~4 000 Hz 的局部高频段范围内,吸声系数提升幅度最为明显,这是多孔材料优越的高频吸声性能导致。多孔材料厚度从 5 mm 增加到 10 mm,峰值系数提升 0.1,从 10 mm 增加到 20 mm 时,提升幅度为 0.09,而从 20 mm 增加到 30 mm 时,提升幅度仅为 0.04。通过峰值系数变化以及曲线图不难发现,吸声系数随多孔材料厚度的增加虽均有提升,但提升幅度越来越小,并且在多孔材料达到 20 mm 时,结构在整个频带内的吸声系数基本保持在 0.5 以上,与多孔材料厚度为 30 mm 时相差较小。所以在满足声学性能的情况下,为节约成本以及空间的限制,通常不需要无限增大多孔材料厚度,应根据具体情况合理选择。

3.4 多孔材料流阻率对复合吸声结构吸声性能的影响

选用厚度 $D_1 = 20$ mm 的多孔材料并将其紧贴在微穿孔板后,分别取多孔材料的流阻率为 3 500、7 500、11 500、14 500 $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$,研究多孔材料流阻率对复合吸声结构吸声性能的影响,如图 8 所示。

由图 8 可见,不同多孔材料流阻率的复合吸声结构吸声系数曲线整体趋势一致,共振频率基本不变并保

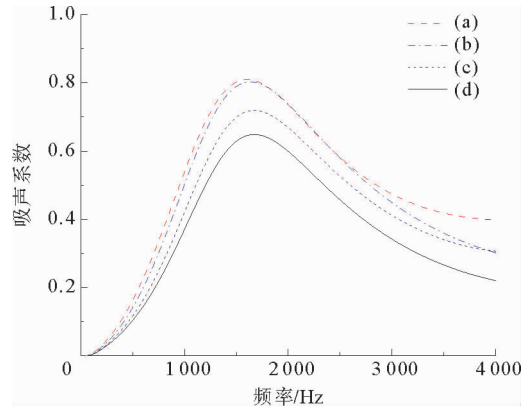


图 5 多孔材料位置对复合吸声结构吸声系数的影响

Fig. 5 Effect of the position of porous materials on the sound absorption coefficient of composite sound-absorbing structure

持在 1 500 Hz 左右。当流阻率较小时,随着流阻率的增加,整个频带内吸声系数提高幅度约为 0.1,吸声效果提升明显;当流阻率为 11 500 Pa·s/m² 时,吸声系数峰值达到 0.93,对应的共振频率为 1 540 Hz;随着流阻率的进一步提高,达到 14 500 Pa·s/m² 时,整个频带范围内吸声系数相较于流阻率为 11 500 Pa·s/m² 时提升幅度较小,仅为 0.03。这是因为当流阻率较小时,在声波的作用下多孔材料空隙中空气质点的振动更为剧烈,声波在传播过程中的摩擦损耗增大,提高流阻率吸声性能得到改善,但流阻率过大会导致声波更难进入多孔材料以致产生过多的反射,不利于声能的吸收。

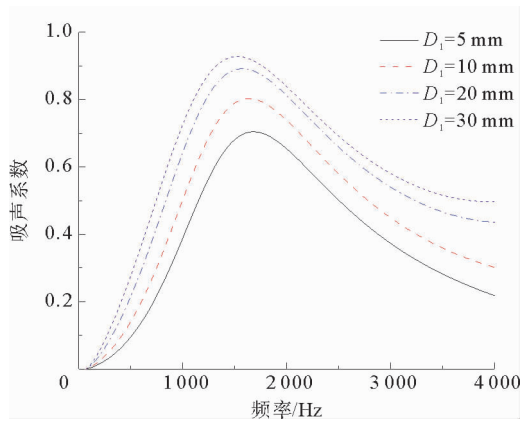


图 7 多孔吸声材料厚度对复合吸声体结构吸声系数影响
Fig. 7 Effect of the thickness of porous sound-absorbing materials on the sound absorption coefficient of composite sound-absorbing structure

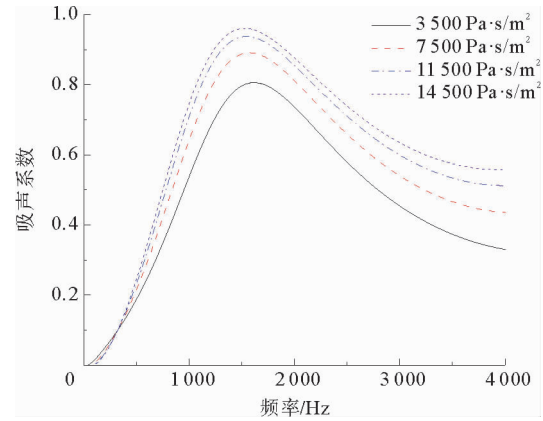


图 8 多孔材料流阻率对复合吸声结构吸声系数的影响
Fig. 8 Effect of the flow resistance rate of porous materials on the sound absorption coefficient of composite sound-absorbing structure

3.5 多孔材料与微穿孔板间空气层对复合吸声结构吸声性能的影响

选用厚度 D_1 为 20 mm 的多孔材料并将其放在背腔底部紧贴腔壁,模型结构如图 4(d)所示,改变多孔材料与微穿孔板间的空气层高度 D_2 ,分别取 5、10、15、20 mm,研究多孔材料与微穿孔板间空气层高度对复合吸声结构吸声性能的影响,如图 9 所示。

随着微穿孔板与多孔材料间空气层高度的增加,吸声系数峰值呈现下降趋势,共振频率逐渐向低频移动。复合吸声结构在 1 500~3 560 Hz 的高频段吸声效果明显减弱,而在 20~1 500 Hz 频段范围内的吸声效果略微提高,进而略微改善了中、低频的吸声效果。当空气层高度逐步增加到 15、20 mm 时,吸声系数曲线分别在 3 460、3 080 Hz 处达到低谷。随后吸声系数曲线呈现上升趋势,并伴有第二个共振峰的出现,且空气层的高度越大,吸声系数低谷出现越早,而在低谷处的吸声系数基本在 0.4 以上,复合吸声结构吸声效果总体良好。总体而言,多孔材料与微穿孔板间空气层的存在并不能有效提高复合吸声结构整个频带内的吸声效果。

3.6 多孔材料与腔壁间空气层对复合吸声结构吸声性能的影响

将多孔材料紧贴在微穿孔板后,模型结构如图 4(b)所示,改变多孔材料与腔壁间空气层高度 D_3 ,分别取 5、10、15、20 mm,研究多孔材料与腔壁间空气层高度对复合吸声结构吸声性能的影响,如图 10 所示。

随着多孔材料与腔壁间空气层高度的增加,复合吸声结构吸声系数共振峰值略微降低,共振频率明显向低频方向移动,从 1 760 Hz 逐渐降到 1 300 Hz,吸收频带宽度基本不变。由于共振频率不断向低频移动,结构中、低频的吸声性能得到显著改善,高频段的吸声效果明显降低,但结构整体吸声效果保持在一个较好水平。因多孔材料与腔壁间空气层的增加导致复合吸声结构声容的增加,而共振频率和声容成反比,所以对共振频率产生较大影响。由于峰值系数对应频率的减小导致声波波长增大,声波通过微孔进入腔体的难度增加,进入腔体的声能减少,声能损耗降低。在实际工程结构中,可通过调节多孔材料与腔壁间空气层的高度来改善复合吸声结构不同频段的吸声性能,满足不同场合需求。

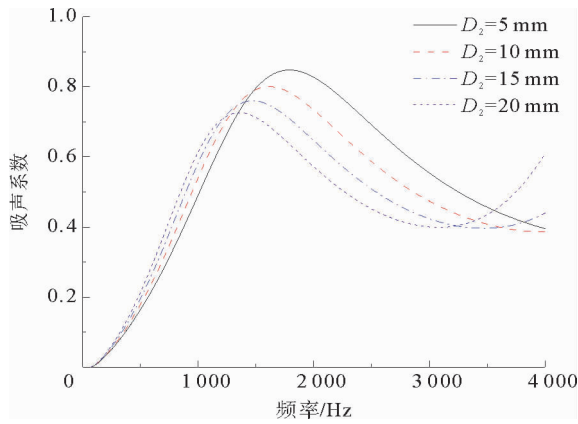


图 9 多孔材料与微穿孔板间空气层对复合吸声结构吸声系数的影响

Fig. 9 Effect of the air layer between porous materials and micro-perforated plates on the sound absorption coefficient of composite sound-absorbing structure

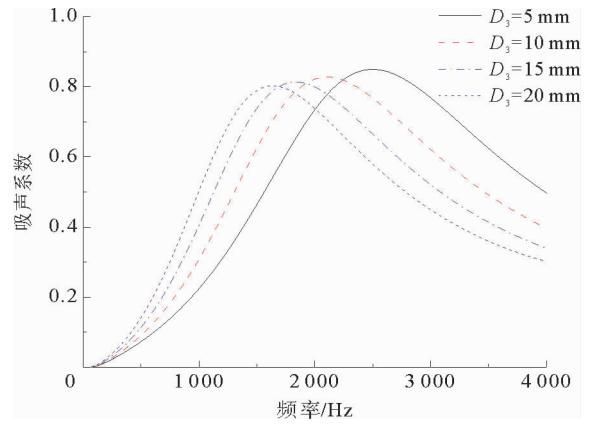


图 10 多孔材料与腔壁间空气层对复合吸声结构吸声系数的影响

Fig. 10 Effect of the air layer between porous materials and cavity wall on the sound absorption coefficient of composite sound-absorbing structure

3.7 多孔材料与微穿孔板的耦合分析

为分析多孔材料与微穿孔板的耦合关系,将多孔材料、微穿孔板、多孔材料-微穿孔板复合吸声结构的仿真结果进行对比,如图 11 所示。不难发现,复合吸声结构的吸声系数比多孔材料、微穿孔板单独作用时有显著提升,复合吸声结构对应的共振频率为 1 640 Hz,而多孔材料对应的共振频率为 3 340 Hz,微穿孔板对应共振频率为 1 700 Hz,进一步说明微穿孔板与多孔材料发生了耦合作用。多孔材料有着优越的高频吸声效果,而微穿孔板在中、低频有较好的吸声性能,两者都具有较强的频率选择性。两种结构的耦合作用,提高了峰值系数,且使多孔材料的共振频率向低频移动。相比于单个微穿孔板结构,复合吸声结构吸声系数在整个频带均有明显的提升,共振频率基本不变。而相比于多孔材料,中、低频吸声效果得到改善,在局部高频段 2 500~4 000 Hz 范围内出现一定程度的降低,主要因微穿孔板对高频声波的反射作用增强,大部分声能被反射回去,只有较少的声能透过微穿孔板被多孔材料损耗掉。

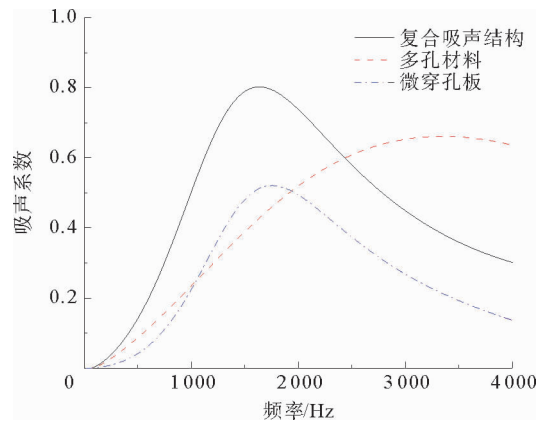


图 11 结构耦合分析对比图

Fig. 11 Comparison of structural coupling analysis

4 结论

本研究提出基于多孔材料的复合微穿孔板吸声结构,分析了其声学性能,得出以下主要结论:

- 1) 多孔材料与微穿孔板组成复合吸声结构的吸声性能较普通单层微穿孔板吸声结构有显著改善,有效拓宽了吸声频带;在多孔材料没有充满背腔的情况下,可将其放置在靠近或紧贴微穿孔板处,此时微穿孔板吸声效果较好,又可作为护面板。
- 2) 合理增加多孔材料的厚度,可使空气特性阻抗和复合吸声结构的声阻抗匹配得更好,增大声能的损耗,提升全频带范围内吸声效果。
- 3) 合理选用流阻率较高的多孔材料,可有效增大声波在吸声材料中传播的阻力,有利于快速衰减声能,提高吸声效果。
- 4) 微穿孔板与多孔材料间空气层的存在会减弱复合吸声结构 1 500~3 560 Hz 高频段的吸声效果,但

在 20~1 500 Hz 频段内的吸声效果得到略微改善。

5) 多孔材料与腔壁间空气层高度主要影响复合吸声结构的共振频率,因此在实际应用中,可通过调节多孔材料与腔壁间空气层的高度来改善吸声材料不同频段的吸声性能,满足特定需求。

6) 微穿孔板与多孔材料结构的耦合作用分析表明,当微穿孔板存在时产生明显的耦合作用,吸声性能得到加强。

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(1):38-50.
- [2] 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 Weichen,XING Bangsheng,GU Haixia,et al.Estimation of geometric parameters of the micro-perforated panels and their effect on absorption performance[J].Acta Acustica,2019,44(3):369-375.
- [3] 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.
- [4] 胡齐笑,丁善婷,刘荻.改进型传递矩阵法的多穿孔率复合微穿孔板吸声性能研究[J].机械科学与技术,2020,39(11):1774-1781.
HU Qixiao,DING Shanting,LIU Di.Study on sound absorption performance of micro-perforated plates with multiple perforation rates based on improved transfer matrix method[J].Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2020,39(11):1774-1781.
- [5] WANG C Q,LIU X.Investigation of the acoustic properties of corrugated micro-perforated panel backed by a rigid wall[J/OL].Mechanical Systems and Signal Processing,2020,140.DOI:10.1016/j.ymsp.2020.106699.
- [6] JIANG C S,LI X H,CHENG W Y,et al.Acoustic impedance of microperforated plates with stepwise apertures[J/OL].Applied Acoustics,2020,157.DOI:10.1016/j.apacoust.2019.106998.
- [7] PARK S H.Acoustic properties of micro-perforated panel absorbers backed by Helmholtz resonators for the improvement of low-frequency sound absorption[J].Journal of Sound and Vibration,2013,332(20):4895-4911.
- [8] 朱远志,曲振林,刘冉,等.孔隙形状对多孔材料吸声性能的影响[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(1):71-76.
ZHU Yuanzhi,QU Zhenlin,LIU Ran,etal.The effect of the pore size and shape on acoustic absorption of porous materials[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2020,59(1):71-76.
- [9] 马晓文,刘学伟,辛锋先.梯度穿缝型双孔隙率多孔材料的吸声性能[J].声学学报,2020,45(2):247-257.
MA Xiaowen,LIU Xuewei,XIN Fengxian.Sound absorption performance of gradiently slit-perforated double porosity materials[J].Acta Acustica,2020,45(2):247-257.
- [10] HIROSAWA K.Numerical study on the influence of fiber cross-sectional shapes on the sound absorption efficiency of fibrous porous materials[J/OL].Applied Acoustics,2020,164.DOI:10.1016/j.apacoust.2020.107222.
- [11] LI D K,CHANG D Q,LIU B L.Diffuse sound absorptive properties of parallel-arranged perforated plates with extended tubes and porous materials[J/OL].Materials,2020,13(5).DOI:10.3390/ma13051091.
- [12] AYUB M,ZANDER A C,HOWARD C Q,et al.Normal incidence acoustic absorption characteristics of a carbon nanotube forest[J].Applied Acoustics,2017,127:223-239.
- [13] 韩宝坤,安郁熙,鲍怀谦,等.多孔金属材料吸声性能优化分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2009,28(6):85-88.
HAN Baokun,AN Yuxi,BAO Huaiqian,et al.Optimization analysis of sound absorption performance of porous sound absorbing materials[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2009,28(6):85-88.
- [14] 马大猷.微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J].声学学报,1997(5):385-393.
MAA Dahyou.General theory and design of microperforated-panel absorbers[J].Acta Acustica,1997(5):385-393.
- [15] OLIVA D,HONGISTO V.Sound absorption of porous materials:Accuracy of prediction methods[J].Applied Acoustics,2013,74(12):1473-1479.
- [16] 季振林.消声器声学设计理论与设计[M].北京:科学出版社,2015:274-277.
- [17] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础[M].南京:南京大学出版社,2012:166-170.

(责任编辑:齐敏华)