

微穿孔共振吸声结构中吸声材料的作用^{*}

蔺 磊 王佐民 姜在秀

(同济大学声学研究所 上海 200092)

2009 年 8 月 13 日收到

2009 年 9 月 29 日定稿

摘要 详细分析了不同厚度和放置方式的吸声材料对空腔声阻抗和穿孔辐射声阻抗的影响, 从而建立起微穿孔-吸声复合结构的理论分析模型, 以用于预测和优化结构的吸声性能。并针对常用的几种微穿孔-吸声复合结构, 通过理论分析和阻抗管实验探讨了其声学性能的不同。分析结果表明, 理论计算和实验结果吻合很好, 证明了模型的可用性。考虑到结构的声学性能和经济性, 建议采用中部放置吸声材料的复合结构。

PACS 数: 43.50, 43.20

Effect of sound-absorbing material on a microperforated absorbing construction

LIN Lei WANG Zuomin JIANG Zaixiu

(*Institute of Acoustics, Tongji University Shanghai 200092*)

Received Aug. 13, 2009

Revised Sept. 29, 2009

Abstract According to the thickness and the configuration of sound-absorbing material, the cavity's acoustical impedance and the aperture's radiation acoustical impedance is analyzed in detail. Thus, to predict and optimize the sound absorption performance of the composite structure of sound-absorbing material and microperforated panel, a theoretical model is established. And the acoustical properties of several commonly used composite structures are comparatively analyzed both in theory and experiment. Good agreement between the theoretical calculations and experimental results shows the availability of the model. Taking into account the performance and economy, the composite structure of sound-absorbing material in the middle of cavity is suggested.

引言

微穿孔共振结构是由低穿孔率的微孔面板和板后的空腔组成的吸声结构, 能应用于高温、高声强、高速气流等特殊环境。马大猷教授于 1975 年提出了这一结构, 并先后给出了基本理论和准确理论^[1-2], 从各方面分析探讨了微穿孔共振结构的吸声机理。其后, 又对扩散场内微穿孔板的吸声特性等方面做了理论计算与实验研究^[3-5]。在国内外, 马大猷教授提出的微穿孔共振结构及其相关理论都受到了广泛关注, 许多声学工作者从优化设计和工程应用等方面发展了微穿孔板理论以及各种应用方面的研究,

并取得了丰富成果^[6-17]。

由于微穿孔共振结构的共振频率与空腔深度密切相关, 要想得到较低的共振频率, 需要较大的腔深。另外, 微穿孔共振结构的吸声频带宽度较窄, 为拓宽吸声频带提出双层微穿孔共振结构。这些因素限定了共振结构的几何尺寸, 使其甚难使用在空间紧凑的场合。为解决这个矛盾, 且考虑到实际应用性价比, 工程应用中常在微穿孔共振结构的空腔内放置吸声材料, 形成复合结构来降低微穿孔共振结构的共振频率, 拓展吸声带宽。空腔内放置吸声材料后, 将会引起微穿孔板末端辐射阻抗以及空腔声阻抗的改变。盛胜我等人分析了吸声材料紧贴穿孔板时末端辐射阻抗的改变^[11]。

^{*} 国家自然科学基金项目资助 (10704057)

根据吸声材料的不同放置方式, 本文对几类复合结构的吸声机理进行一些理论分析和实验探索。基于传统的微穿孔理论模型并考虑吸声材料对穿孔板内侧的作用, 分析了不同厚度和放置方式的吸声材料对微穿孔板末端辐射阻抗的影响, 并通过讨论空腔声阻抗的变化, 建立起可预测微穿孔-吸声材料复合共振结构声学性能的理论模型。文中还对几类复合结构的声学性能进行了实验分析, 并与理论结果比较以证明理论模型的准确和可用性。

1 微穿孔-吸声复合共振结构

根据吸声材料的放置方式, 可组成 5 种微穿孔-吸声复合结构 (图 1)。其中, 结构 (a) 是在空腔底部放置一定厚度的吸声材料, 结构 (b) 是在空腔中间区域放置一定厚度的吸声材料, 结构 (c) 是在空腔上部紧贴穿孔板放置一定厚度的吸声材料, 结构 (d) 是在穿孔板内侧粘贴厚度甚小的薄层材料, 结构 (e) 是在空腔内填满吸声材料。

空腔内的吸声材料将从两方面影响共振结构的声学特性。其一是对小孔辐射声抗 $Z_a(m_a)$ 的影响^[18], 即对结构声质量 m_a 的影响; 其二是对空腔声抗 $Z_a(D)$ 的影响。下面按图 1 中的 5 种不同结构分别进行具体讨论。

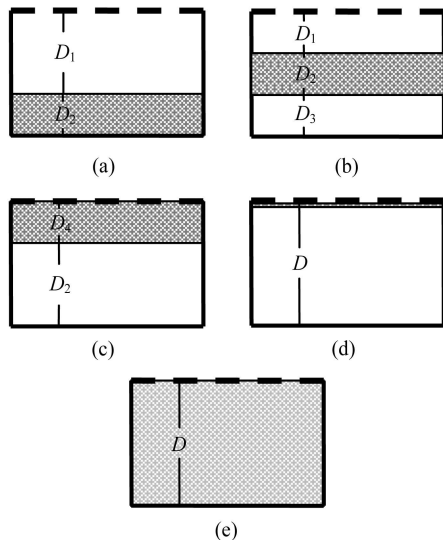


图 1 微穿孔-吸声复合共振结构

1.1 小孔辐射声抗

将半径为 a 的小孔等效成嵌在平板中的刚性活塞, 假定活塞进行匀速简谐运动, 然后导出活塞表面的声压, 即可求得小孔的辐射声抗。5 种结构中的小孔外侧均为空气媒质; 而内侧对应不同结构, 媒质特性有所不同, 需要分别讨论。

(1) 小孔外侧的辐射声抗

当相邻小孔的间距较大, 不考虑小孔间的相互作用时, 可将小孔看成无限大刚性平面上的圆形活塞。对感兴趣的低频情况, 可以得到对应的辐射声抗^[19]。需要注意, 文献 19 是讨论活塞辐射的力阻抗 Z_f , 而本文关注的是声阻抗 Z_a , 两者之间有换算关系 $Z_a = Z_f/S^2$ 。

$$\begin{cases} Z_a(m_{a1}) = j\omega m_{a1}, \\ m_{a1} = \frac{8\rho_0}{3\pi^2 a}, \quad ka \rightarrow 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, 角频率 $\omega = 2\pi f$, f 入射声波频率, 波矢 $k = \omega/c_0$, ρ_0 空气密度, c_0 空气中的声速, 小孔截面积 $S = \pi a^2$ 。

若折算成半径为 a 短管的有效长度 l_1 , 则有:

$$l_1 = \frac{8a}{3\pi}. \quad (2)$$

(2) 对刚性圆形空气管道的声辐射

讨论小孔对刚性壁面圆形空气管道的辐射声抗。由于声波从较细圆管辐射入较粗圆管所产生的活塞发射仅覆盖很短的距离, 通常远小于空腔深度, 故这里可以假定刚性壁面圆形管道内半径 R , 一端刚性封堵、中心为半径 a 的刚性活塞, 另一端则无限延伸, 管内空气媒质 (图 2(a))。

假定小孔 (活塞) 进行稳定简谐运动, 导出活塞表面的声压, 且考虑力阻抗 Z_f 和声阻抗 Z_a 间的换算关系, 即可求得小孔 (活塞) 内侧的辐射声抗^[20]:

$$\begin{cases} Z_{a2}^{(1)}(m_{a2}^{(1)}) = j\omega m_{a2}^{(1)}, \\ m_{a2}^{(1)} = \frac{\rho_0}{\pi a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4J_1^2(\beta_n a/R)}{\beta_n^2 J_0^2(\beta_n) \Gamma_n}, \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\Gamma_n = \sqrt{(\beta_n/R)^2 - (\omega/c_0)^2}$, $J_0(z)$ 零阶 Bessel 函数, $J_1(z)$ 一阶 Bessel 函数, β_n 一阶 Bessel 函数的第 n 个根。

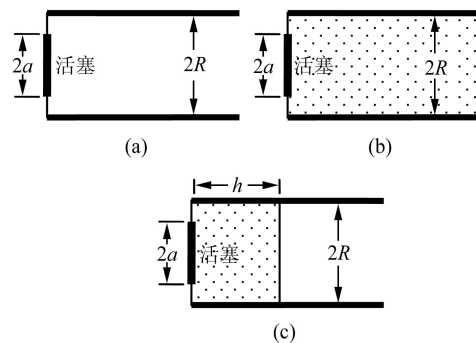


图 2 刚性壁面圆形管道

当声波波长 λ 和管道半径 R 均远大于小孔半径 a 时, 附加声质量近似为:

$$m_{a2}^{(1)} \approx \frac{8}{3\pi} \frac{\rho_0}{a}, \quad (4)$$

折算成半径为 a 短管的有效长度 $l_2^{(1)}$, 则有:

$$l_2^{(1)} = \frac{8a}{3\pi}. \quad (5)$$

(3) 对刚性圆形吸声管道的声辐射

若刚性壁面圆形管道内全部填充吸声材料, 材料的有效密度 ρ_e , 有效声速 c_e (图 2(b)). 则可以采用式 (3) 的相似推导过程, 得到管内填满吸声材料条件下, 小孔 (活塞) 内侧的辐射声抗:

$$\begin{cases} Z_{a2}^{(2)}(m_{a2}^{(2)}) = j\omega m_{a2}^{(2)}, \\ m_{a2}^{(2)} = \frac{\rho_e}{\pi a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4J_1^2(\beta_n a/R)}{\beta_n^2 J_0^2(\beta_n) \Gamma_{e,n}}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Z_{a2}^{(3)}(m_{a2}^{(3)}) = j\omega m_{a2}^{(3)}, \\ m_{a2}^{(3)} = \frac{\rho_e}{\pi a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4J_1^2(\beta_n a/R)}{\beta_n^2 J_0^2(\beta_n) \Gamma_{e,n}} \frac{y k_n [1 + \tanh^2(k_e k_n h)] + [1 + |z|^2 k_n^2] \tanh(k_e k_n h)}{[1 + y k_n \tanh(k_e k_n h)]^2 + [r k_n \tanh(k_e k_n h)]^2} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $k_e = \omega/c_e$, $k_n = \sqrt{(\beta_n/k_e R)^2 - 1}$, $z = \rho_e c_e / \rho_0 c_0 = r + jy$.

对于通常应用的微穿孔结构和中低频段, $k_e = 2\pi R/\lambda_e \leq 1$, $k_n \approx \beta_n/k_e R$, $k_e k_n h \approx \beta_n h/R$; 若同时满足 $h/R \geq 0.5$, 则有 $\tanh(k_e k_n h) \approx 1$, 进而有:

$$\frac{y k_n [1 + \tanh^2(k_e k_n h)] + [1 + |z|^2 k_n^2] \tanh(k_e k_n h)}{[1 + y k_n \tanh(k_e k_n h)]^2 + [r k_n \tanh(k_e k_n h)]^2} \approx 1. \quad (10)$$

$$R_a = \frac{\rho_e c_e}{\pi a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4J_1^2(\beta_n a/R)}{\beta_n^2 J_0^2(\beta_n)} \frac{r[1 - \tanh^2(k_e k_n h)]}{[1 + y k_n \tanh(k_e k_n h)]^2 + [r k_n \tanh(k_e k_n h)]^2}. \quad (11)$$

量级分析表明, 对于普通的多孔吸声材料, 修正项的影响也是很大的。这时能够得到相当大的声质量和声阻, 即使空腔的深度很小, 也能得到较低的吸声系数共振频率和较宽的吸声频带^[12]。

假定微穿孔面板的小孔半径 1 mm, 穿孔率 1%, 每个小孔对应的圆管半径 $R = 10$ mm, 则只有当 $h \leq 5$ mm 时才需要考虑材料后端面阻抗的影响。

而在本文实验的各结构中, 采用厚度为 30 mm 的较厚吸声材料、吸声材料上部空间的深度分别为 45 mm 和 75 mm、薄层吸声材料的厚度为 3 mm。则根据这个分析, 式 (3) — 式 (5) 适用于图 1 中结构

其中, $\Gamma_{e,n} = \sqrt{(\beta_n/R)^2 - (\omega/c_e)^2}$ 。

同样, 当声波波长 λ 和管道半径 R 均远大于小孔半径 a 时, 附加声质量近似为:

$$m_{a2}^{(2)} \approx \frac{8}{3\pi} \frac{\rho_e}{a}. \quad (7)$$

折算成半径为 a 空气短管的等效长度 $l_2^{(2)}$, 则有:

$$l_2^{(2)} = \frac{8a}{3\pi} \frac{\rho_e}{\rho_0}. \quad (8)$$

一般而言, 材料的有效密度 ρ_e 是复量。因此, 式 (6) 不仅包含对应声质量的声抗量, 而且还应包含辐射声阻量。

(4) 吸声材料后端面阻抗的影响

如果吸声材料没有填满整个管道, 而仅填充活塞附近厚度 h 的区域 (图 2(c)), 那么在讨论辐射阻抗时需要考虑材料后端空气界面处端面阻抗的影响。经过相应的推导可得^[20]:

于是式 (9) 退化为式 (6), 即对于通常应用的微穿孔结构和中低频段, 只要材料的厚度 $h \geq 0.5R$, 则在讨论小孔辐射阻抗时不需要考虑材料后端端面阻抗的影响, 可直接采用无限延伸条件下的讨论结论。

对于 $h < 0.5R$ 的情况, 除考虑声质量的修正项式 (9) 作用外, 还需考虑声阻的修正^[20]。

(a) 和结构 (b) 两种情况; 式 (6) — 式 (8) 适用于图 1 中结构 (c) 和结构 (e) 两种情况; 式 (9) 仅将适用于图 1 结构 (d) 中 $h \leq 0.5R$ 的情况。若将这里讨论的小孔内侧辐射声抗有效长度与式 (2) 组合即是微穿孔板两侧等效长度的总修正项。

1.2 空腔声抗

下面分别讨论图 1 中各种空腔结构的声阻抗。

(1) 空腔底部铺置材料层

对于图 1(a) 所示的深度 D_1 的空腔, 底部铺置一定厚度的吸声材料, 空腔截面积 S_0 、刚性背面吸

声材料的法向声阻抗 Z_a , 声阻抗率 $Z_s = Z_a S_0$, 令声阻抗率 Z_s 与空气特性阻抗 $\rho_0 c_0$ 的比值为相对声阻抗率 ζ 。

$$\zeta = Z_s / \rho_0 c_0 = r + jy = |\zeta| e^{j\omega}.$$

则应用管道末端声波反射的推导方法, 求得空腔声阻抗。

$$Z_a = \frac{\rho_0 c_0}{S_0} \coth \left[\delta + j \frac{\omega}{c} \left(D_1 - \frac{\lambda \beta}{2\pi} \right) \right], \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} \delta = -0.5 \ln \left[\sqrt{\frac{(r-1)^2 + y^2}{(r+1)^2 + y^2}} \right], \\ \beta = 0.5 \tan^{-1} \left[\frac{2y}{r^2 + y^2 - 1} \right] \end{cases}$$

这里 β 角的相位应由 y 和 $(r^2 + y^2 - 1)$ 的正、负号决定。可以看到, 底面铺置的吸声材料将从 δ 和 β 两方面对结构的性能产生影响。其中, β 项的影响不仅与材料的相对声阻抗率 ζ 有关, 也与声波波长 λ 相关。当 β 是负值时, 相当于空腔的深度增大; 反之, 当 β 是正值时, 相当于空腔的深度减小; 变化量 $\Delta D_1 = -\lambda \beta / 2\pi$, 对应的空腔等效深度 $D' = D_1 + \Delta D_1$ 。

对于小宗量 η , $\coth(\eta)$ 可近似展开为 $1/\eta + \eta/3$, 于是可将 δ 的作用分为两部分,

$$\coth \left[\delta + j \frac{\omega D'}{c} \right] \cong \frac{\delta}{\delta^2 + \left(\frac{\omega D'}{c} \right)^2} + \frac{1}{3} \delta + \frac{c}{j\omega \left(D' + \frac{\delta^2 c^2}{D' \omega^2} \right)} + \frac{j\omega D'}{3c} \quad (13)$$

式 (13) 右端的第一、第二项是 δ 对共振结构“声阻”的贡献, 第三项是 δ 对空腔深度的影响。第四项是 β 对声质量的影响。由 δ 产生的空腔深度影响 $\Delta D_2 = \delta^2 c^2 / D' \omega^2$ 。

当空腔底面铺置吸声材料后, 对应马大猷教授提出的等效电路^[1], 各元件声阻抗的计算公式将需相应修正。式 (14) 中的下标“ m ”表示铺置吸声材料后的相关参量。

$$\begin{cases} R_m = R_a + \frac{\rho c}{S_0} \left[\frac{\delta}{\delta^2 + (\omega D'/c)^2} + \frac{1}{3} \delta \right], \\ l_m = b + 0.85d + \sigma D_m / 3, \\ C_{a,m} = \frac{D_m S_0}{\rho c^2}, \\ D_m = D_1 - \frac{\lambda \beta}{2\pi} + \frac{\delta^2 c^2}{\left(D_1 - \frac{\lambda \beta}{2\pi} \right) \omega^2}. \end{cases} \quad (14)$$

(2) 材料层与背后空腔的组合

对于图 1(c) 所示的上部紧贴孔板放置厚度 D_1 吸声材料、下部深度 D_2 空腔的组合结构, 根据吸声材料与空腔界面处声阻抗连续的要求, 可以求得材料表面的声阻抗^[18]:

$$\begin{cases} Z_a = \frac{\rho_e c_e}{S_0} \coth \left(\frac{j\omega D_1}{c_e} + \xi \right), \\ \coth \xi = \frac{\rho_0 c_0}{\rho_e c_e} \coth \left(\frac{j\omega D_2}{c_0} \right). \end{cases} \quad (15)$$

当空腔深度 D_2 远小于波长 λ 时, 空腔的作用相当于增加材料层的厚度。但是随着频率的增加, 材料层与背后空腔之间可能不再存在如此简单的相互关系, 应由式 (15) 具体分析。

(3) 材料层置于空腔中部

对于图 1(b) 所示的材料层置于空腔中部的结构, 可以根据上述讨论分两步来计算结构的声阻抗。第一步由式 (15) 求得材料层上表面的声阻抗, 第二步再根据式 (12) 求得整个空腔结构的声阻抗。

(4) 空腔填满吸声材料

对于图 1(e) 所示的空腔内填满有效密度 ρ_e 、有效声速 c_e 的吸声材料, 底面刚性的结构, 空腔声抗的计算公式类似于空气空腔的计算公式, 两者的区别仅是媒质的密度和声速不同。即有:

$$Z_a(D) = \frac{\rho_e c_e}{S_0} \coth \left(\frac{j\omega D}{c_e} \right). \quad (16)$$

一般而言, $|\rho_e c_e| > \rho_0 c_0$, 因此空腔内放置吸声材料会增加空腔的声阻抗; 同时由于通常 ρ_e 和 c_e 是复数, 放置吸声材料也会增加共振结构的声阻。总的效果是降低吸声结构的共振频率、拓宽吸声频宽。由于吸声材料的 ρ_e 和 c_e 是复数, 上面讨论的小孔辐射阻和空腔声抗不再是“纯”的辐射阻和声抗。因此, 建议在求结构的总声阻抗时, 不再采用空腔声顺和小孔有效长度的等效电路计算公式 (14)。而是直接应用各部分的声阻抗公式, 进而得到放置吸声材料后微穿孔-吸声复合共振结构的总声阻抗。最后由总声阻抗来讨论结构的吸声特性。

对于面积 S_0 的面板, 其声阻^[1]

$$\begin{cases} R_a = \frac{0.147 \rho_0 c_0}{d^2} \frac{b}{\sigma S_0} k_r, \\ k_r = \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}}{8} \frac{x d}{b}, \\ x = d \sqrt{f/10}. \end{cases} \quad (17)$$

其中, b 面板厚度, 单位: mm; d 微孔直径, 单位: mm; σ 面板穿孔率, 单位: %; ρ_0 空气密度, 单位:

$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; c_0 空气中的声速, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; f 声波频率
单位: Hz 。

其对应的小孔声抗:

$$\begin{cases} Z_a(m_a) = j\omega m_a, \\ m_a = \frac{\rho_0 l}{\sigma S_0}, \\ Z_a(m_a) = j\omega m_a = \\ \frac{j\omega\rho_0}{\sigma S_0} \left\{ \left[1 + \left(9 + \frac{x^2}{2} \right)^{-1/2} \right] b + l_1 + l_2 \right\}, \end{cases} \quad (18)$$

其中, m_a 小孔的声质量; l_1 和 l_2 分别为小孔内外
侧辐射声抗通过折算得到的有效长度修正。

根据各部分的参数求出结构的总声阻抗:

$$Z_a = R_a + Z_a(m_a) + Z_a(D) = \rho_0 c_0 (x_s + jy_s). \quad (19)$$

然后可以求得结构的吸声系数 α 和吸声带宽,
对于垂直入射情况

$$\alpha_n = \frac{4x_s}{(1+x_s)^2 + y_s^2}. \quad (20)$$

至此, 详细探讨了分析吸声材料对微穿孔共振
结构声学性能影响的理论公式。显然, 其作用不仅与
吸声材料的物理参量 ρ_e 、 c_e 、材料的厚度和安装
方式等因素密切相关, 而且与微穿孔结构的板厚、孔
径、穿孔率和腔深等参数密切相关。因此, 很难进行
全方位的直观讨论。但是, 应用相关的计算公式可以
进行具体结构的优化设计。

2 实验研究

为直观了解空腔内放置吸声材料对共振结构吸
声特性的不同影响, 具体分析图 1 所示结构的吸声
性能, 给出计算实例和相应的实测数据。

在计算时首先需要知道吸声材料的有效密度 ρ_e
和有效声速 c_e , 通常是由实测方法得到这些数据。但

是对于纤维性吸声材料, 也可由微观吸声理论进行
估算^[21]。

为比较吸声材料安装方式对微穿孔共振结构吸
声性能的影响, 计算 7 种结构的垂直入射吸声系数,
并通过实验加以验证。7 种结构的材料安装方式列
于表 1。

本文采用的测量仪器为 B&K4206 型双传声器阻
抗测量管, 用以测量结构表面的声学特性。微穿孔板
为金属材质的穿孔板, 板厚 2.2 mm, 孔径 0.12 mm, 穿
孔率 12%; 吸声材料采用玻璃棉, 容重为 $24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
空腔腔深统一为 150 mm。吸声材料的有效密度和
有效声速通过实际测量获得。图 3 是这 7 种结构的
垂直入射吸声系数的频响计算曲线; 图 4—图 10 是
各种结构垂直入射吸声系数的频响计算曲线和实测
曲线。

由图 4—图 10 可以看出, 各种结构的理论值和
实验值均吻合很好。从图 3 可以看出空腔内填满吸
声材料的复合结构吸声效果最佳, 并且结构的共振
频率往低频移动最多。将吸声材料放在空腔中部的
两种结构效果其次; 吸声材料放在顶部和底部相差
不大。表 2 是根据图 3 数据归纳的吸声系数峰值 (共
振) 频率、吸声系数峰值、以及按 50% 最大吸声系
数计算的吸声系数带宽 (注: 其中空腔中部放置材料
和填满材料两种结构的吸声系数带宽上限超过阻抗
管测量上限 1600 Hz, 这里仅给出带宽下限值)。

为方便比较吸声材料的影响, 文中统一使用了容
重较轻的吸声材料, 相对应的吸声薄层结构的吸声性
能则几乎没有得到提升。有关吸声薄层对穿孔板的
影响, 已有不少文献资料。为比较不同薄层的作用,
图 11 给出穿孔板内侧分别粘贴材料容重 $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
 $48 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 厚度 2 mm、5 mm 的 4 种薄层结构的
垂直入射吸声系数频响计算曲线。理论计算表明容
重较大的吸声材料薄层具有更好的声学性能。

表 1 7 种结构的材料安装方式

结构编号	吸声材料安装方式
1	空腔内无吸声材料
2	空腔底部安置 30 mm 厚吸声材料 (图 1(a))
3	空腔中部安置 30 mm 厚吸声材料、材料上部空间 $D_1 = 45 \text{ mm}$ (图 1(b))
4	空腔中部安置 30 mm 厚吸声材料、材料上部空间 $D_1 = 75 \text{ mm}$ (图 1(b))
5	空腔顶部安置 30 mm 厚吸声材料 (图 1(c))
6	穿孔板内侧粘贴 3 mm 厚吸声材料 (图 1(d))
7	空腔内填满吸声材料 (图 1(e))

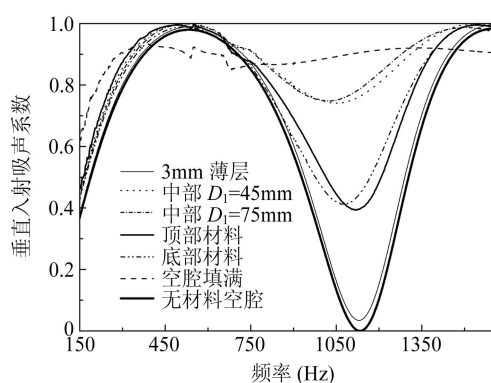


图 3 7 种结构的吸声系数频响计算曲线

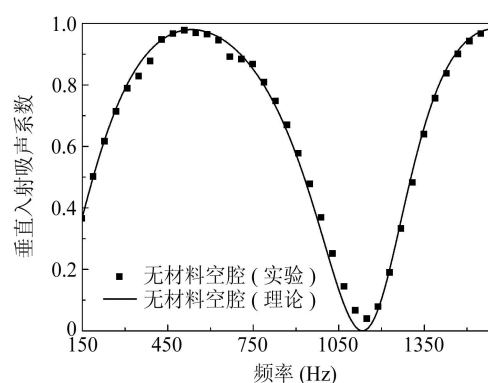


图 4 纯空腔结构吸声系数的频响曲线

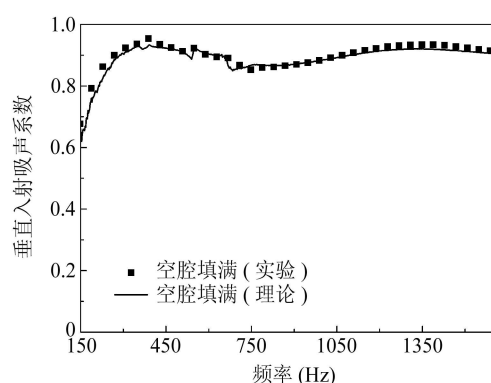


图 5 材料填满空腔结构吸声系数的频响曲线

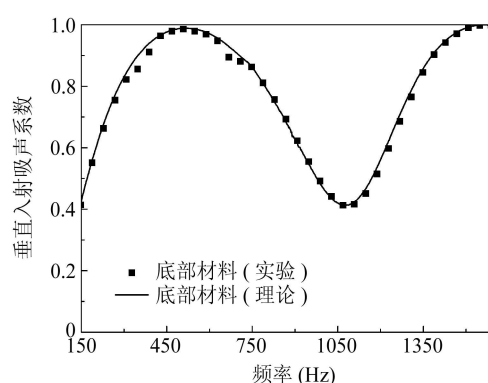


图 6 底部材料结构吸声系数的频响曲线

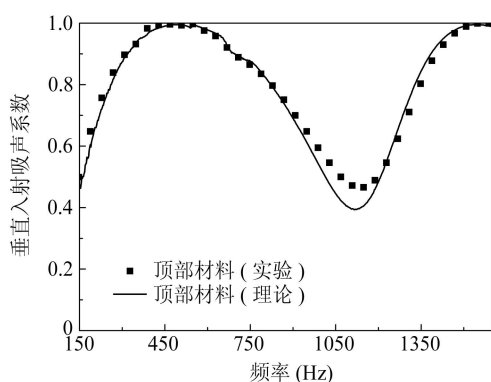


图 7 顶部材料结构吸声系数的频响曲线

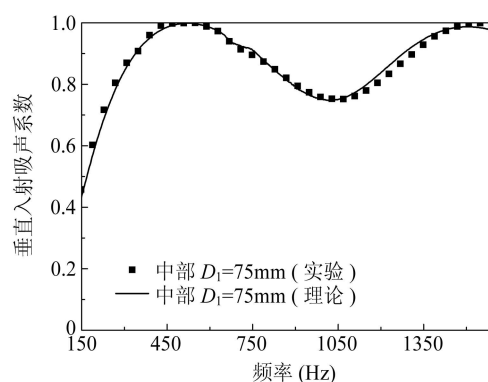
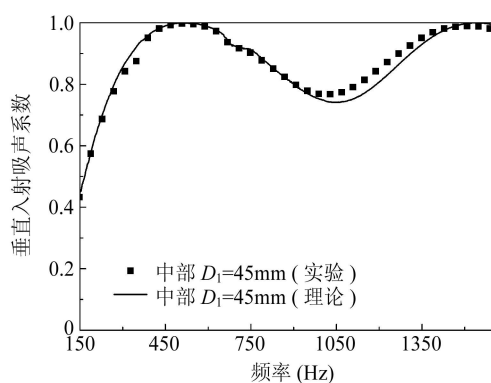
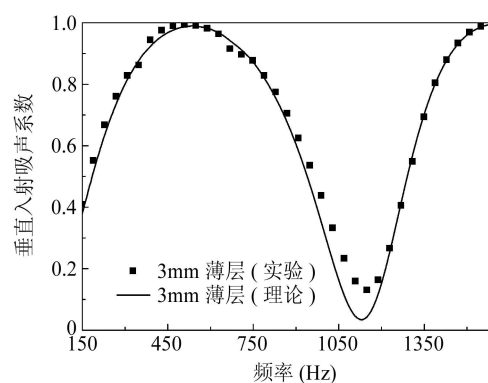
图 8 中部 $D_1 = 75 \text{ mm}$ 结构吸声系数的频响曲线图 9 中部 $D_1 = 45 \text{ mm}$ 结构吸声系数的频响曲线

图 10 3 mm 薄层结构吸声系数的频响曲线

表 2 7 种结构的垂直入射吸声系数分析

7 种结构	峰值频率 (Hz)	吸声系数峰值	吸声系数带宽
单纯空腔	535	0.98	746
底面 30 mm 厚材料	515	0.99	810
中部 30 mm 厚材料 $D_1 = 45\text{ mm}$ $D_1 = 75\text{ mm}$	511	1.00	$>(166\sim1600)$
	530	0.99	$>(168\sim1600)$
顶部 30 mm 厚材料	492	0.99	856
板内侧贴 3 mm 厚材料	538	0.99	756
空腔填满材料	391	0.93	$>(122\sim1600)$

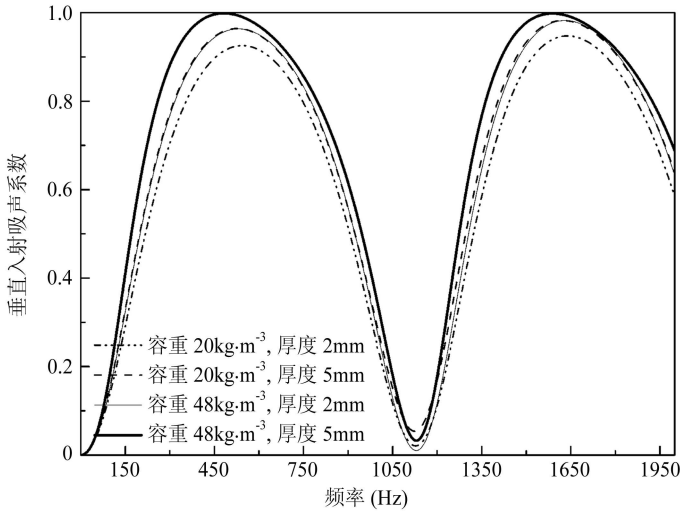


图 11 不同材料容重和厚度的薄层结构垂直入射吸声系数

3 结论

本文通过分析吸声材料对空腔声阻抗和穿孔辐射阻抗的影响，建立起几类常用的微穿孔-吸声复合结构的理论计算模型，并通过实验验证了理论的可靠性，对设计这类复合结构具有重要的工程意义。文章的主要分析结论如下：

(1) 在空腔内安置吸声材料，将会改变空腔声抗，主要等效为腔深的改变；同时由于吸声材料的阻尼特性，空腔将不再能等效为“纯”声抗，还将包含声阻部分。吸声材料对微穿孔板本身的影响主要体现在穿孔的末端修正方面，对于吸声材料紧贴穿孔板的结构，末端增加的声抗将会改变，同时还增加一项声阻；当材料厚度 $h < 0.5R$ (R 为等效刚性圆管半径) 时，还需要考虑材料后端面的影响。根据理论和实验分析证明，在空腔内安置吸声材料，可以在同样的结构空间下明显改善微穿孔共振结构的吸声性能。

(2) 通过对文中 5 类复合结构的峰值 (共振) 频

率、吸声系数峰值和吸声系数带宽等评价量的对比分析表明，在空腔内填满吸声材料具有最佳的吸声效果，但对应的工程成本也最大。对于一定厚度的吸声材料，将吸声材料放置空腔中部的结构吸声效果最好，将材料放在底部和顶部效果相差不大。由于文中实例统一采用容重较小的玻璃棉吸声材料，粘贴吸声薄层结构的吸声性能几乎没有得到提升。根据文中的理论和实验分析，建议优先采用将一定厚度的吸声材料安放在空腔中部适当位置的微穿孔-吸声复合结构。

(3) 若需选用穿孔板内侧粘贴吸声薄层的结构形式，建议优先考虑容重较大且足够薄的吸声材料。两者之间可能存在一定的对应关系，即若选用材料的容重较大，则薄层厚度就可小些。例如，通常在共振结构中使用的吸声无纺布厚度一般为 0.2 mm，面密度 $70\sim90\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (容重 $350\sim450\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。

(4) 文中所给出的理论计算数据与实验数据吻合很好，表明理论模型公式的可靠性，可用来预测微穿孔-吸声复合结构的声学特性，为拓宽微穿孔板的实际应用领域提供了理论支持。

参 考 文 献

- 1 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论与设计. 中国科学, 1975(1): 38—50
- 2 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计. 声学学报, 1997; **22**(5): 385—393
- 3 马大猷. 高声强下的微穿孔板. 声学学报. 1996; **21**(1): 10—14
- 4 马大猷. 微缝吸声体理论. 声学学报, 2000; **25**(6): 481—485
- 5 马大猷, 刘克. 微穿孔板吸声体随机入射吸声性能. 声学学报, 2000; **25**(4): 289—296
- 6 Fuchs H C, Zha Xueqin. Micro-Perforated Structures as Sound Absorbers – A Review and Outlook. *ACUSTICA*, 2005; **92**(1): 139—146
- 7 吕亚东, 魏文等. 管束式穿孔板共振吸声结构. 国家专利, 专利号: 00200768.x.2000
- 8 Kang J, Fuchs H V, Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air cavity. *Journal of Sound and Vibration*, 1999; **220**(5): 905—920
- 9 Masahiro Toyoda, Daiji Takahasni. Sound transmission through a microperforated-panel structure with subdivided air cavities. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008; **124**(6): 3594—3603
- 10 王佐民, 蔺磊, 姜在秀等. 切向流对微穿孔共振吸声结构声学性能的影响. 声学学报, 2009; **34**(4): 350—354
- 11 盛胜我. 穿孔板背面紧贴吸声薄层时的声学特性. 声学技术, 2003; **22**(1): 52—54
- 12 Kimihiro Sakagami, Masayuki Morimoto, Motoki Yairi *et al.* A pilot study on improving the absorptivity of a thick microperforated panel absorber. *Applied Acoustics*, 2008; **69**(2): 179—182
- 13 盛胜我, 赵松龄. 加膜穿孔板声学特性的研究. 声学学报, 1994; **19**(1): 45—52
- 14 张永铎, 马玲俊, 崔昭霞. 泡沫镍吸声性能的研究. 噪声与振动控制, 2001(2): 30—33
- 15 Pedro Cobo, Jaime Pfretzschner *et al.* Hybrid passive-active absorption using microperforated panels. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004; **116**(4): 2118—2125
- 16 姜在秀, 王佐民. 可压缩偏流条件下穿孔板声阻抗率的分析. 同济大学学报 (自然科学版), 2006; **34**(10): 1417—1420
- 17 毛东兴, 洪宗辉, 王佐民等. 高效吸声泡沫玻璃声学性能的实验研究. 噪声与振动控制, 1999(3): 30—31
- 18 赵松龄编著. 噪声的降低与隔离 (上册). 上海: 同济大学出版社, 1985: 104
- 19 莫尔斯 P K, 英格特 K U 著, 吕如榆, 杨训仁译. 理论声学 (上册). 北京: 科学出版社, 1984: 452
- 20 Uno Ingard. On the radiation of sound into a circular tube with an application to resonators. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1948; **20**(5): 665—682
- 21 赵松龄, 卢元伟. 声波在纤维性吸声材料中的传播. 声学学报, 1979(1): 1—11