

# 吸声侧壁对微穿孔共振结构声学性能的影响

蔺 磊, 王佐民, 姜在秀

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

**摘要:** 在微穿孔共振结构的空腔侧壁铺设吸声层将增大空腔的声顺, 引进空腔的声阻, 从而明显改进结构的吸声特性。与对应的刚性壁面空腔结构相比较, 吸声壁面结构的吸声系数共振峰频率降低, 频响曲线平坦, 峰-谷起伏减小。其特性与填满吸声材料的空腔结构基本相同。相应的理论公式得到实例的有力支持。与三维理论相比较, 一维理论比较简洁, 仅需引入材料的垂直入射吸声系数。其预测的共振结构吸声系数幅值能够满足工程设计的要求, 但是没能充分反映吸声材料对共振峰频率的影响, 预测的共振峰频率偏高。

**关键词:** 微穿孔板; 共振结构; 吸声壁面

中图分类号: TB535

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-04-0410-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.04.013

## Effects of absorbing wall on acoustical property of micro-perforated panel absorbers

LIN Lei, WANG Zuo-min, JIANG Zai-xiu

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

**Abstract:** With placing absorbing material on the side wall of cavity in a micro-perforated panel absorber, the acoustic compliance of cavity increases, and the acoustic resistance of cavity appears, thereby the acoustic property of the micro-perforated panel absorber is improved. Compared with an absorber structure with rigid wall, the resonant frequency of the structure with absorbing wall is lower, the absorption coefficient frequency response curve tends to flat, and the difference between peak and valley in the curve decreases. Its acoustical characteristics are basically the same as that of the structure filled up with absorbing material. Two theoretical calculation formulas has been derived and supported by an example. Pithier than three-dimensional formula, one-dimensional formula only requires normal incidence absorption coefficient and can meet engineer accuracy except for higher resonance frequency.

**Key words:** micro-perforated panel; response construction; absorbing wall

## 1 引言

由微穿孔面板和背后空腔组成的微穿孔共振结构具有良好的低频吸声特性(图 1(a))。马大猷教授从理论和实验两方面全面探讨了微穿孔共振吸声结构的基本特性<sup>[1,2]</sup>。为了拓宽结构的吸声频带, 可以采用双层微穿孔结构<sup>[3]</sup>; 或在空腔内加置一些吸声材料。常用的加置方法是在空腔底部或面板背面铺设或粘贴一定厚度的吸声层<sup>[4,5]</sup>。

对于平面尺度较大的共振结构, 可以设置隔板来阻断空腔内的轴向波, 提高结构的吸声性能<sup>[6]</sup>。于是, 也可以通过在空腔侧壁铺设或粘贴一定厚度的吸声材料, 进一步改善结构的吸声性能(图 1(b))。

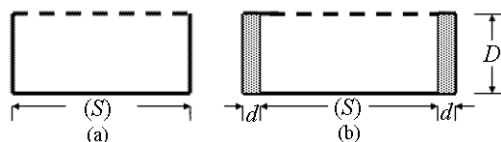


图 1 微穿孔共振吸声结构剖面

Fig.1 Profile of micro-perforated panel absorber

因此, 有必要讨论吸声侧壁对结构声学性能的影响。

## 2 一维传播理论

在空腔侧壁铺设或粘贴吸声材料将会改变空腔的阻抗特性。对于低频区域, 空腔内不会产生声波的高次模式, 且高次波通常比基波具有更大的衰减系数, 所以文中仅就基波的情况来推导、讨论吸声壁面空腔的声阻抗。

### 2.1 壁面吸声空腔的声阻抗

对于图 1(a)所示的单层微穿孔共振吸声结构, 可将空腔看成一段刚性底面的等截面的管道, 应用

收稿日期: 2009-06-11; 修回日期: 2009-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10704057)

作者简介: 蔺磊(1983-), 男, 安徽涡阳人, 博士研究生, 研究方向为噪声与振动控制。

通讯作者: 蔺磊, E-mail: linlin.lei@gmail.com

平面波的反射理论, 可以求得截面面积为  $S$ 、深度为  $D$  的单个空腔的声阻抗  $Z_a$ :

$$Z_a = \frac{\rho_0 c_0}{S} \coth\left(\frac{j\omega D}{c_0}\right) \quad (1)$$

其中,  $\omega$  为入射平面声波的角频率,  $\rho_0$  为空气密度,  $c_0$  为空气声速。

当空腔深度  $D$  远小于声波波长  $\lambda$  时, 近似可得:

$$Z_a = \frac{1}{j\omega C_a} + j\omega m_a$$

其中,  $C_a = \frac{SD}{\rho_0 c_0^2}$  称为空腔的声顺。  $m_a = \frac{\rho_0 D}{S}$  是空腔具有的声质量。

对于侧壁吸声空腔(图 1(b)), 声波在传播过程中会产生衰减, 等截面管道内的入射声波  $p_i$  和反射声波  $p_r$  分别为:

$$p_i = p_0 \exp(j\omega t - jkz - \beta z) = p_0 \exp[j\omega t - j(k - j\beta)z] \quad (2)$$

$$p_r = p_0 \exp[j\omega t + jk(z - 2D) + \beta(z - 2D)] = p_0 \exp[j\omega t + j(k - j\beta)(z - 2D)] \quad (3)$$

其中, 波矢  $k = \omega/c_0$ ,  $\beta$  为声压衰减系数。

进而, 参照式(1)的推导过程得到单个吸声侧壁空腔的声阻抗  $Z_D$  为:

$$Z_D = \frac{\rho_0 c_0}{S(1 - j\gamma)} \coth\left[\frac{j\omega(1 - j\gamma)D}{c_0}\right] \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\beta\lambda}{2\pi}$$

其中,  $\lambda$  为声波波长。

为了更清楚地表述吸声壁面的影响, 将式(4)近似展开, 近似条件为低频声波和小衰减系数。

$$Z_D \cong \frac{\rho_0 c_0^2}{j\omega SD} + \frac{j\omega\rho_0 D}{3S} + \frac{2\gamma\rho_0 c_0^2}{\omega SD} + \frac{j\gamma^2\rho_0 c_0^2}{\omega SD} \quad (5)$$

式(5)右边第 1 项是空腔的原有声顺; 第 2 项是空腔的原有声质量; 第 3 项是吸声壁面结构引进的声阻, 其将改变结构的共振吸声峰值, 拓宽结构吸声频响的宽度; 第 4 项表示空腔声顺的增加或相当于空腔声质量的增加, 其将使结构的共振频率(频谱特性)向低频方向偏移。第 3、4 项反映了吸声壁面对结构声学性能的两方面影响。

### 2.2 参量 $\gamma$ 的计算

在上面推导中引入声压衰减系数  $\beta$  和导出参量  $\gamma$ , 即在声波传播过程中声压幅值以指数  $(-\beta z)$  衰减。然而通常用来表征吸声材料的参量是吸声系数, 因此需要得出声压衰减系数  $\beta$ (或参量  $\gamma$ )与材料吸声系数间的换算关系。

存在声压衰减时, 平面声波传播的数学表述为:

$$p = p_0 \exp(-\beta z)$$

对应的声强传播表述为:

$$I = I_0 \exp(-2\beta z)$$

与文献[7]中的声强传播表述

$$I = I_0 \exp[-(g_s F/S)z]$$

相对比, 可以得到:

$$g_s F/S = 2\beta$$

对于常用的吸声材料<sup>[7]</sup>:

$$g_s = \frac{1 - \sqrt{1 - a}}{1 + \sqrt{1 - a}}$$

其中,  $a$  为材料垂直入射吸声系数。于是可以得到:

$$\beta = \frac{F}{2S} \frac{1 - \sqrt{1 - a}}{1 + \sqrt{1 - a}} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{F\lambda}{4\pi S} \frac{1 - \sqrt{1 - a}}{1 + \sqrt{1 - a}}$$

其中,  $S$  为单个空腔的截面积,  $F$  为空腔侧壁放置的吸声材料周长。

## 3 三维传播理论

### 3.1 非刚性壁面空腔的声阻抗

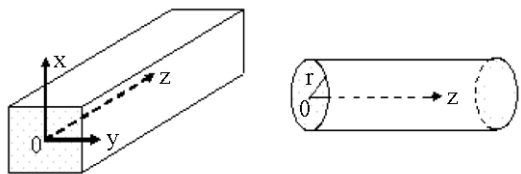
对于非刚性壁面的平直管道(见图 2), 声波传播的表达形式不仅与管轴  $z$  方向的坐标有关, 而且也与管道截面坐标有关, 即可表示为:

$$p(s, z, t) = A(s) \exp(j\omega t - jk_z z) \quad (7)$$

其中,  $s$  表示管道的截面坐标, 对矩形管道是  $x$ 、 $y$  坐标, 对圆管道是  $r$ 、 $\varphi$  坐标;  $k_z$  是声波在传播方向的波矢。

采用相同的推导过程, 对于截面积  $S$ 、深度  $D$ 、底面刚性的空腔, 可以求得空腔的声阻抗为:

$$Z_D = \frac{\omega\rho_0}{k_z S} \coth(jk_z D) \quad (8)$$



(a) 矩形管道 (b) 圆形管道

图 2 非刚性壁面直管

Fig.2 Straight tube with non-rigid wall

### 3.2 波矢 $k_z$

声波在平直管道内传播时的波矢  $k_z$  与管道的截面形状和壁面声阻抗密切相关。这里仅讨论矩形截面和圆形截面两种情况。

#### (1) 矩形截面

对非刚性壁面管道, 假定两个相对壁面的吸声

材料相同,坐标原点在  $x$ - $y$  平面中心(图 2(a)), 声波沿管道  $z$  轴正方向传播的形式为<sup>[6]</sup>:

$$p(t,x,y,z) = A \cos \frac{2\pi g_x x}{l_x} \cos \frac{2\pi g_y y}{l_y} e^{j(\omega t - k_z z)} \quad (9)$$

$$k_z^2 = \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 - \left(\frac{2\pi g_x}{l_x}\right)^2 - \left(\frac{2\pi g_y}{l_y}\right)^2$$

其中,  $l_x$  为矩形截面  $x$  方向的长度,  $l_y$  为矩形截面  $y$  方向的长度。

由式(9)和  $x$ 、 $y$  方向的运动方程

$$\rho_0 \frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}, \quad \rho_0 \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y}$$

可以得到  $g_x$  和  $g_y$  与壁面吸声材料声阻抗率的关系为:

$$z_{sx} = \frac{j\omega\rho_0 l_x}{2\pi g_x} \cot(\pi g_x), \quad z_{sy} = \frac{j\omega\rho_0 l_y}{2\pi g_y} \cot(\pi g_y) \quad (10)$$

其中,  $z_{sx}$  为法向为  $x$  方向的壁面声阻抗率;  $z_{sy}$  为法向为  $y$  方向的壁面声阻抗率。

## (2) 圆形截面

对于半径为  $b$ 、声场轴对称分布的非刚性壁面圆形管道(图 2b), 沿管道  $z$  轴正方向传播的声波形式为:

$$p(r,z) = A J_0 \left(\frac{\pi q r}{b}\right) \exp(j\omega t - jk_z z) \quad (11)$$

$$k_z^2 = \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 - \left(\frac{\pi q}{b}\right)^2$$

采用与矩形管道部分相同的推导过程, 可得:

$$z_{sr} = \frac{j\omega\rho_0 b J_0(\pi q)}{\pi q J_1(\pi q)} \quad (12)$$

其中,  $z_{sr}$  为圆形管道壁面的法向声阻抗率。

对应确定的材料声阻抗率, 式(10)和(12)可以有无数多个解, 分别对应沿管道传播的各个简正波模式。从声学基本理论可知, 其中只有  $k_z > 0$  的简正波才能在管道内传播。在所有能传播的简正波中, 有一种简正波最接近平面波, 称为基波。由于微穿孔共振结构大多应用在低频频段, 因此一般只需关注空腔的基波波矢。确定波矢  $k_z$  后, 就可由式(8)得到非刚性壁面的空腔声阻抗。

## 4 实例

为了验证理论分析的正确性, 使用 B.&K.4206 双传声器阻抗测量管分别测量具有刚性空腔壁面和吸声空腔壁面的两种微穿孔共振结构的垂直入射吸声系数的频率响应<sup>[8]</sup>。两种结构具有相同的穿孔面板、相同截面和相同深度的空腔、空腔底面刚

性。面板厚度为 2.5mm、小孔孔径为 0.2mm、穿孔率为 10%, 空腔直径为 100mm、空腔深度为 172.5mm, 吸声壁面的材料厚度为 30mm。

图 3 是两种结构的垂直入射吸声系数频响曲线的实验值。图 4 中三条曲线分别对应于: (1) 吸声壁面空腔共振结构的实测曲线, (2) 由公式(4)计算得到的吸声壁面空腔结构的一维理论曲线, (3) 由公式(12)计算的吸声壁面空腔结构的三维理论曲线。

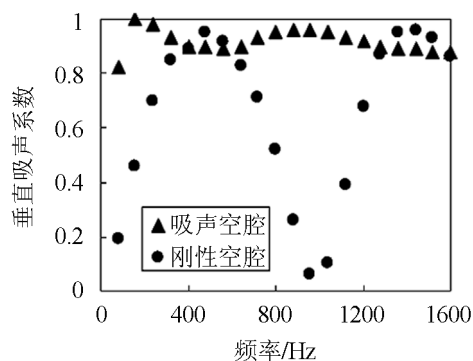


图 3 刚性空腔共振结构和吸声壁面空腔结构的实验值  
Fig.3 Experimental results of the structure with rigid wall and the structure with absorptive wall

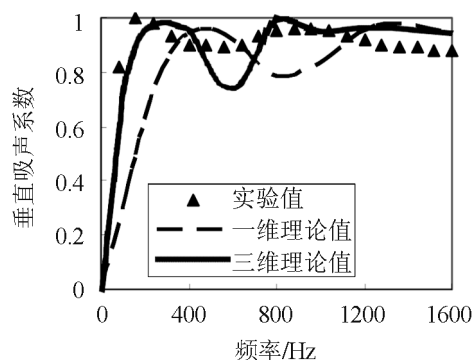


图 4 吸声空腔壁面结构的实验值和理论值  
Fig.4 The experimental and theoretical results of the structure with absorptive wall

下面对实例中的吸声系数频响曲线进行一些初步讨论。

比较刚性壁面空腔结构的频响曲线和吸声壁面空腔结构的实测曲线, 可以看到, 铺设吸声材料将明显改进结构的吸声特性。结构吸声系数的共振峰频率从刚性壁面空腔结构的 500Hz 降低到吸声壁面空腔结构的 125Hz, 低移 2 个倍频程; 且频响曲线整体趋于平坦, 峰-谷起伏减小。这种频响特性与空腔内填满吸声材料时的频响特性基本相同。

对于吸声壁面空腔结构, 理论曲线和实测曲线两者基本吻合, 表明本文讨论的计算公式完全可以应用于工程设计。与三维理论相比较, 一维理论在结构吸声系数的幅值计算方面能够满足工程设计

的要求。但是由于材料的吸声系数只是实数值, 没能明确提供相位关系, 因此不能充分反映吸声材料对共振峰频率的影响, 预测的共振峰频率偏高。考虑到一维理论仅需引入吸声材料的垂直入射吸声系数, 而不需引入材料的法向声阻抗率, 且公式(4)的计算也比公式(12)(对矩形截面是公式(10))的计算简单。因此在一般的工程设计中, 可以优先考虑一维理论。

对于吸声壁面空腔结构, 理论曲线与实测曲线存在一定差异。最大差异值是: 绝对值 0.15, 相对值 16%。这可能是由两方面的原因引起的。

原因之一是为了保证刚性壁面空腔和吸声壁面空腔有相同的空腔内径, 加上壁面吸声材料和外壁的厚度, 吸声壁面空腔结构的外径超过  $\Phi 160\text{mm}$ , 大于阻抗管  $\Phi 100\text{mm}$  的内径, 测量时无法装入阻抗管内, 只能套在阻抗管外面。因而, 不再能够使用阻抗管提供的固定搭扣, 使得被测构件难以紧固安装。在测量过程中构件会产生少量漏声或轻微振动, 漏声的作用是增加吸声系数的测量值, 主要影响小吸声量处的测量值(例如, 波谷处); 振动的作用是减小吸声系数的测量值, 主要影响较大吸声量处的测量值(例如, 波峰处)。这些影响在初期测量时已经发现, 经过努力得到明显改进, 但是仍难完全消除。

原因之二是在理论计算中需要预知吸声材料的法向声阻抗或吸声系数。这些数据是通过阻抗管测量得到的。实例中使用的吸声材料是松散的超细玻璃棉。很难保证空腔侧壁安装的玻璃棉和阻抗管测量时安装的玻璃棉有一致的密实性。玻璃棉密实性的差异会明显影响材料的法向声阻抗和吸声系数, 进而影响理论曲线的计算值。

另一个可能产生计算误差的因素是阻抗管测量的材料是平面形状, 空腔内安装的材料是圆形形状。在柱面波条件下材料的法向声阻抗需要修正。实际计算表明, 对于实例分析的频率区域和结构尺寸, 这个修正的影响是不明显的。

## 5 结论

本文分别基于一维和三维传播理论, 讨论了吸

声侧壁对空腔声阻抗的影响, 并通过实验进行了验证。分析表明, 空腔的声顺将会增大, 同时引入一项声阻项, 从而提升整个共振结构的吸声特性, 其共振频率降低、频响曲线趋于平坦。一维理论计算较简洁, 幅值预测能满足工程设计要求, 但共振频率预测值偏高。相比之下, 三维理论能更好地反映吸声侧壁对微穿孔共振结构声学性能的影响。

## 参 考 文 献

- [1] 马大猷. 微穿孔板吸声结构的理论与设计[J]. 中国科学, 1975, 18(1): 38-50.  
MAA Dayou. Theory and design of micro-perforated panel absorbers[J]. Chinese Science, 1975, 18(1): 38-50.
- [2] 马大猷. 微穿孔板吸声体的准确理论和设计[J]. 声学学报, 1997, 22(5): 385-394.  
MAA Dayou. General theory and design of micro-perforated panel absorbers[J]. Acta Acoustica, 1997, 22(5): 385-394.
- [3] 毛东兴, 王佐民. 双层微穿孔结构扩散场吸声特性[J]. 声学技术, 1999, 18(2): 13-17.  
MAO Dongxing, WANG Zuomin. Absorbing property of multi-layer microperforated structure in diffuse field[J]. Technical Acoustics, 1999, 18(2): 13-17.
- [4] 盛胜我. 穿孔板背面紧贴吸声薄层时的声学特性[J]. 声学技术, 2003, 22(1): 52-54.  
SHENG Shengwo. Acoustic properties of perforated panels closely pasted with an absorptive thin layer[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(1): 52-54.
- [5] 蔺磊, 王佐民, 姜在秀. 微穿孔共振吸声结构中吸声材料的作用[J]. 声学学报, 2010, 35(4): 385-392.  
LIN Lei, WANG Zuomin, JIANG Zaixiu. Effect of sound-absorbing material on a microperforated absorbing construction[J]. Acta Acoustica, 2010, 35(4): 385-392.
- [6] 王佐民, 俞悟周. 铝纤维板共振结构声学特性的理论初析[J]. 声学技术, 2005, 24(3): 183-185.  
WANG Zuomin, YU Wuzhou. Theoretical analysis on acoustical characteristics of aluminum fiberboard[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(3): 183-185.
- [7] 赵松龄. 噪声的降低与隔离(下册)[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989: 4-5, 8-10.  
ZHAO Songling. Noise reduction and isolation (II) [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1989: 4-5, 8-10.
- [8] GB/T 18696.2-2002: 声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第2部分: 传递函数法.  
GB/T 18696.2-2002: Acoustics--Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Part 2: Transfer function method.