

文章编号:1004-2474(2013)05-0624-04

结构参数对微穿孔板结构声学特性的影响研究

胡鹏,毛功平,赵晓丹

(江苏大学汽车与交通工程学院,江苏镇江 212013)

摘要:微穿孔板结构声学特性与结构参数密切相关,该文讨论了这些结构参数对吸声性能的影响。采用传递矩阵法计算微穿孔板结构的声学特性,在验证理论计算结果可靠的基础上,研究结构参数(如穿孔率、微孔直径、板厚和空腔距离)对微穿孔板结构吸声性能的影响规律。结果表明,穿孔直径、板厚和穿孔率主要影响吸声结构的共振吸声峰值,空腔厚度主要影响共振基频;共振吸声峰值随穿孔率、微孔直径和空腔厚度增加而降低,随板厚增加而增大。增加穿孔率,共振基频向低频移动;而增加微孔直径、板厚和空腔厚度,共振基频向高频移动;吸声频带宽度随穿孔率增大而增加,随微孔直径、板厚和空腔厚度增加而变窄。

关键词:微穿孔板;结构参数;传递矩阵法;吸声

中图分类号: TB535 **文献标识码:** A

Effects of Structure Parameters on the Sound Absorption of Micro-perforated Panel Absorber

HU Peng, MAO Gongping, ZHAO Xiaodan

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Since the sound absorption of micro-perforated panel absorber (MPA) was bound up with structure parameters, so the effects of these parameters on the sound absorption of micro-perforated panel absorber was investigated. The reliability of the theoretical results calculated by transfer matrix method was checked. The influence of the perforation rate, perforation diameter, plate thickness and cavity depth of MPA on acoustic characteristics was then discussed. The results indicated that the main factors influencing the resonant sound absorption were perforation rate, perforation diameter and plate thickness, and that the resonance frequency of MPA was determined by cavity depth. The resonant sound absorption decreased with the increase of the perforation rate, perforation diameter and plate thickness, and increased with the raising of cavity depth. The sound absorption curves moved to the low frequency zone and frequency bandwidth increased with the raising of perforation rate. However, when the perforation diameter and plate thickness and cavity depth of MPA increased, sound absorption curves moved to the high frequency zone and the frequency bandwidth decreased at the same time.

Key words: micro-perforated panel; structure parameters; transfer matrix; sound absorption

0 引言

微穿孔板吸声体是由穿孔直径小于 $\varnothing 1$ mm的薄板和板后空腔组成的共振吸声结构。由于微穿孔板结构利用微孔自身的声阻控制吸声结构相对声阻率,无须填充纤维等吸声材料就可获得良好吸声性能,是一种低声质量、高声阻的绿色吸声结构。该结构吸声频带宽,并具有不受材料限制,清洁、无污染且可透明采光的特点,在提倡环保的今天微穿孔板吸声体在各个领域得到广泛应用^[1-8]。微穿孔板结构的声学特性计算有3种方法^[9]。本文采用传递矩

阵法计算微穿孔板结构的声学特性。在验证理论计算结果和程序可靠的基础上,研究结构参数(如穿孔率、微孔直径、板厚及空腔距离)对微穿孔板结构吸声性能的影响规律,为微穿孔板结构在实际工程应用提高理论依据和指导。

1 声学特性理论计算

1.1 微穿孔板的传递矩阵表示

文献[10]用传递矩阵法计算了穿孔板,文献[11]运用传递矩阵法计算微穿孔板,但微孔部分的归一化声阻抗计算采用的是 Rao 和 Munjal^[12]的模

收稿日期:2012-10-22

基金项目:江苏省研究生创新计划基金资助项目(CXZZ12_0675);江苏高校优势学科建设工程基金资助项目(苏政办发[2011]6号);江苏大学高级专业人才培养基金资助项目(11JDG096)

作者简介:胡鹏(1986-),男,湖北天门人,博士生,主要从事内燃机噪声控制及工作过程的研究。E-mail:hptmisme717@126.com

型公式,这一模型中需测量修正系数 δ_x 。文献[13]将传递矩阵的微穿孔部分的声阻抗率用马大猷教授理论计算,不需进行试验测量,本文采用文献[13]中的方法计算微孔部分的传递矩阵。

图 1 为微穿孔板结构中板的声学单元及其等效电路。

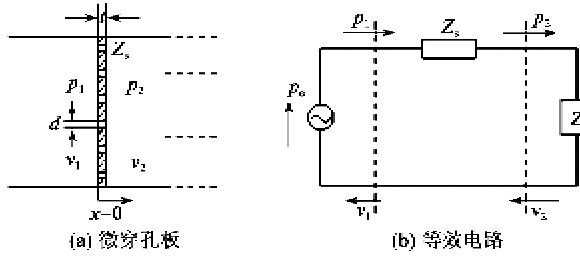


图 1 微穿孔板声学单元及其等效电路

由微穿孔板及其等效电路可得板两侧声压 (p_1, p_2) 与振动速度 (v_1, v_2) 的关系式为

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

则微穿孔板的传递矩阵 P 记为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 Z_s 为微穿孔板的声阻抗率,且^[12]

$$Z_s = \frac{32\rho\mu t}{d^2} \sqrt{1 + \frac{x_f^2}{32}} + j\omega\rho t \left[1 + \left(3^2 + \frac{x_f^2}{2} \right)^{-0.5} \right] \quad (3)$$

$$x_f = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\mu}} \quad (4)$$

式中: ρ, μ 分别为空气密度和运动粘度; t, d 分别为微孔管长和直径; ω 为频率。

1.2 空腔的传递矩阵

对于微穿孔板结构中的空腔(见图 2),设 D 为空腔厚度,通过计算可建立输入和输出的声压与振动速度关系^[10,13]为

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kD) & j\rho c \sin(kD) \\ \frac{j}{\rho c} \sin(kD) & \cos(kD) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

即空腔传递矩阵 S 为

$$S = \begin{bmatrix} \cos(kD) & j\rho c \sin(kD) \\ \frac{j}{\rho c} \sin(kD) & \cos(kD) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 c 和 k 分别为空气声速和波数。

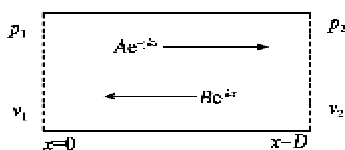


图 2 空腔

1.3 微穿孔板结构的声学特性

图 3 为微穿孔板结构,由微穿孔板和空腔组成。

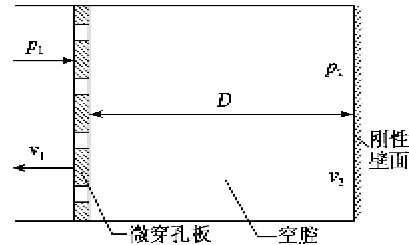


图 3 微穿孔板结构

将 P 与 S 相乘,可得结构的传递矩阵 T 为

$$T = \begin{bmatrix} \cos(kD) + \frac{jZ_s}{\rho c} \sin(kD) & j\rho c \sin(kD) + Z_s \cos(kD) \\ \frac{j}{\rho c} \sin(kD) & \cos(kD) \end{bmatrix} \quad (7)$$

将微穿孔板左侧一端的状态变量记为 1,另一端即刚性壁面一侧的状态变量表示为 2,则矩阵关系为

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

因为振动速度在刚性壁面为 0,得 $v_2 = 0$ 。垂直入射时,微穿孔板结构的声阻抗率为

$$Z_s = \frac{p_1}{v_1} = \frac{T_{11}}{T_{21}} = \rho c (r + jx) \quad (9)$$

得出相对声阻率 $r = \text{Re}[T_{11}/(\rho c T_{21})]$ 和相对声抗率 $x = \text{Im}[T_{11}/(\rho c T_{21})]$,则声波垂直入射时吸声系数为

$$\alpha = \frac{4r}{(1+r)^2 + x^2} \quad (10)$$

2 结构参数对声学特性的影响与分析

为保证计算结果的可靠性,首先对比单层微穿孔板结构的理论计算结果与试验测量结果。实验仪器使用北京声望公司的 sw200 型驻波管,实验装置如图 4 所示。图 5 为采用传递矩阵法计算单层结构的吸声系数 α 和试验测量结果的对比曲线。图中 σ 为穿孔率, f 为频率, t 为板厚。

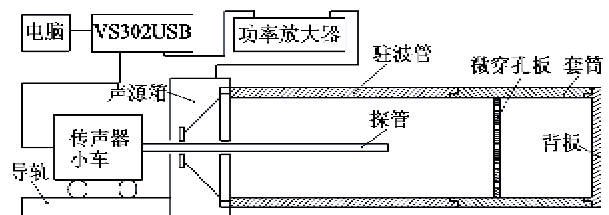


图 4 吸声系数测量试验示意图

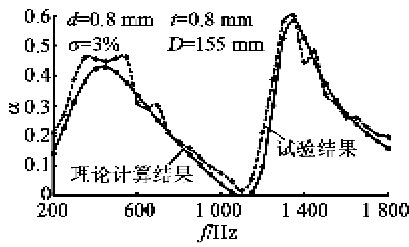


图5 单层结构理论与实验结果对比

由图5可看出,理论计算结果与实验结果吻合较好,表明理论计算结果的可靠性。下面采用仿真法研究结构参数对微穿孔板结构声学特性的影响规律。

2.1 σ 对吸声性能的影响

$d=0.8\text{ mm}, t=0.8\text{ mm}, D=50\text{ mm}$ 时, σ 对微穿孔板吸声结构吸声性能的影响如表1和图6所示。其中 f_r 为共振基频。由表1和图6可看出:

- 1) 单纯考虑 σ 对微穿孔板吸声性能的影响。可看到, σ 增大, α 降低,带宽增加,因此在满足吸声性能要求前提下,适当降低 α 来增加带宽。
- 2) 随着 σ 的增加, f_r 和带宽均向高频方向移动。
- 3) σ 需选择适当, σ 太小, α 虽很高,但在高频基本没有吸声效果;如果 σ 选太大,频带宽度增加小,但吸声系数太低,在实际工程中也没有作用。

表1 σ 对微穿孔板吸声结构的影响

$\sigma/\%$	f_r/Hz	α
1	580	0.869
2	796	0.659
3	946	0.531
4	1 058	0.446

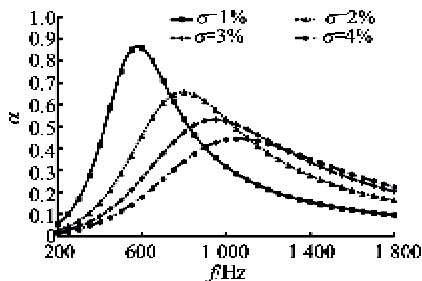


图6 σ 对微穿孔板吸声结构的影响曲线

2.2 d 对吸声性能的影响

表2为 $\sigma=3\%, t=0.8\text{ mm}, D=50\text{ mm}$ 时 d 对微穿孔板吸声结构的影响。由表2中数据绘制出不同微孔直径下微穿孔板吸声结构的 $\alpha-f$ 曲线如图7所示。

表2 d 对微穿孔板吸声结构的影响

d/mm	f_r/Hz	α
0.5	988	0.702
0.6	975	0.627
0.7	961	0.573
0.8	946	0.531

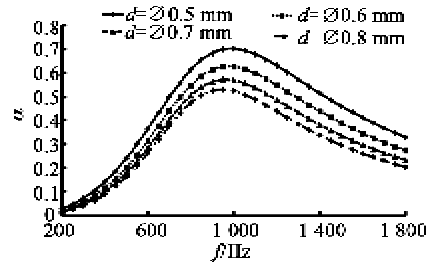


图7 d 对微穿孔板结构的影响曲线

由表2和图7可看出:

- 1) 单纯考虑孔径对微穿孔板吸声性能的影响, d 增大, α 降低,带宽也降低。因此可通过减小孔径来增加微穿孔板的吸声性能。
- 2) d 的增加使 f_r 向低频方向移动,但改变范围不明显。

2.3 t 对吸声性能的影响

表3为 $\sigma=3\%, d=0.6\text{ mm}, D=50\text{ mm}$ 时 t 对微穿孔板吸声结构的影响。由表3中数据绘制出不同板厚下微穿孔板吸声结构的 $\alpha-f$ 曲线,如图8所示。

表3 t 对微穿孔板吸声结构的影响

t/mm	f_r/Hz	α
0.5	1 187	0.537
0.6	1 046	0.570
0.7	1 009	0.600
0.8	975	0.627
0.9	944	0.653
1.0	916	0.678

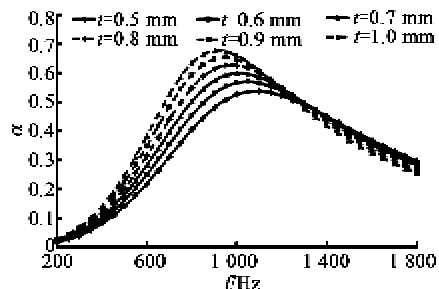


图8 t 对微穿孔板结构的影响曲线

由表3和图7可看出:

- 1) 单纯考虑板厚对微穿孔板吸声性能的影响,

从图 7 可看出, t 增大, α 呈增加趋势, 带宽变窄, 但不明显。可通过适当板厚来增大 α , 如果 t 增加太多吸声频带明显变窄, 且增加材料成本。

2) 随着 t 的增加, α 的位置即 f_r 的位置向低频方向移动, 但变化不明显。

2.4 D 对吸声性能的影响

表 4 为 $\sigma=3\%$, $d=0.6\text{ mm}$, $t=1.0\text{ mm}$ 时 D 对微穿孔板吸声结构的影响, 由表 4 中数据绘制出不同空腔距离下微穿孔板结构的 $\alpha-f$ 如图 9 所示。

表 4 D 对微穿孔板吸声结构的影响

D/mm	f_r /Hz	α
20	1 560	0.750
50	916	0.678
80	678	0.641

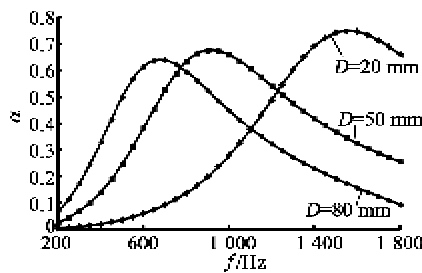


图 9 D 对微穿孔板结构的影响曲线

从表 4 和图 9 可看出:

1) 单纯考虑 D 对微穿孔板吸声性能的影响, 可看出 D 增大, α 降低, 变化不明显, 频带变窄。

2) D 对 α 影响不大, 但 D 增加会使 f_r 及频带宽度向低频移动, 且移动范围较其他参数明显, 可见背后空腔对吸声频率的影响起主要作用, 在改变吸声性能方面有特殊意义。

3) 单层微穿孔板结构的吸声频带范围有限, 为拓宽结构的吸声频带, 一般有采用多层微穿孔结构和斜置微穿孔板结构 2 个途径。

3 结束语

本文采用传递矩阵法计算了单层微穿孔板结构的声学特性。在验证理论计算结果和程序可靠性基础上, 讨论了结构参数穿孔率 σ 、微孔直径 d 、板厚 t 及空腔厚度 D 对微穿孔板结构吸声性能的影响, 得出结论:

1) d, t 和 σ 主要影响微穿孔板吸声结构的最大吸声系数 α ; D 主要影响微穿孔板结构的吸声频率范围。

2) σ 选择要合适。 σ 增大, α 降低, 带宽增加, 共振基频 f_r 和带宽均向高频方向移动。

3) d 增大, α 降低, 带宽也降低, f_r 向低频方向移动, 但改变范围不明显。

4) t 增大, α 呈增加趋势, 带宽变窄, f_r 向低频方向移动, 但带宽和共振频率变化不明显。

5) D 增大, α 降低, 频带变窄; 但 D 增加会使 f_r 及频带宽度显著向低频移动, 可见背后空腔对吸声频率的影响起主要作用。

参考文献:

[1] 胡鹏, 赵晓丹. 斜置微穿孔板结构声学特性计算与试验研究[J]. 压电与声光, 2013, 35(1): 38-42.
 HU Peng, ZHAO Xiaodan. The experiments and calculation of the absorptivity of micro-perforated panel absorber with the alterable air-cavity [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(1): 38-42.

[2] 张德满, 李舜聃, 尚伟燕. 工程机械机外噪声声源分析及降噪处理[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(3): 362-365.
 ZHANG Deman, LI Shunming, SHANG Weiyuan. Outside noise analysis and control for construction machinery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(3): 362-365.

[3] 张军锋, 王敏庆, 刘彦森, 等. 微穿孔板结构抑制声不稳定燃烧试验[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(8): 177-179.
 ZHANG Junfeng, WANG Mingqing, LIU Yansen, et al. Experimental research on instable combustion of fire-box with micro-perforated panel absorber as acoustic restraining equipment[J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(8): 177-179.

[4] 张立强, 侯宏, 杨建华, 等. 微穿孔导流罩用于油烟机的噪声控制[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 1021-1024.
 ZHANG Liqiang, HOU Hong, YANG Jianhua, et al. Noise control of a range hood by a guide flow dome with micro-perforation [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(8): 1021-1024.

[5] 侯献军, 田翠翠, 刘志恩, 等. 双层串联微穿孔板消声器的设计与试验[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 1094-1096.
 HOU Xianjun, TIAN Cuicui, LIU Zhi'en, et al. Design and test of a double layer micropunch plate muffler[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(8): 1094-1096.

(下转第 630 页)