

几何和气动参数对多孔板波涡相互作用影响的研究

北京航空航天大学 唐凌云* 王同庆 孙晓峰

【摘要】 本文对以涡声相互作用为基础的通气多孔板共振腔结构的声学性质进行了一些实验研究和分析。着重于声衬的孔径、腔深、孔板厚度对声衬性能的影响。对实验的结果进行了一些分析,给出了厚板通气的声衬声抗的一种算法。对吹气与吸气情况下声衬的性质进行了对比。

主题词: 几何 气动力 消声

分类号: O 422. 4

1 引言

波涡相互作用是近年来兴起的十分引人注目的研究方向,因为利用声波这种方便的工具可以实现对涡的调控,从而实现对宏观流动的控制。本文研究的是这样一种现象,流体流经锐缘小孔时外加声能将为流动吸收,转化为非定常的涡能,从而达到消声效果并对流动产生影响。从消声方面来讲,这种结构可以提供吸声性能可调的声衬。从流动的控制上来讲,它提供了一种不同于硬壁、可变的流动边界条件,可以实现对流动的控制。本文从声学的角度出发以吸声系数和声边界条件—壁面法向声阻抗 $z = p/v$ (其中 p 为壁面处的扰动声压, v 为垂直壁面处的扰动速度)为变量对小孔射流与声波的相互作用进行了一些实验研究。

1979年Howe由涡声方程出发,对穿过小孔的非定常高雷诺数流动进行了理论研究,导出了通气小孔的Rayleigh声导纳。1990年Hughes和Dowling^[2]在Howe理论的基础上对由通气孔板与共振腔构成的声衬的声学性能进行了一些实验研究。实验结果与Howe的理论值吻合较好。1995年景小东^[3]对与文献[2]中类似的结构进行了实验研究,得到了与文献[2]中类似的实验结果。本文对声衬的几何参数(腔深、孔径与板厚)对孔板涡声作用和声衬性能的影响进行了实验研究,发现板厚对声衬性能尤其是声抗影响较大,与Howe的理论值存在较大的差异。文中对这种差异进行了分析,给出了一种通气厚孔板声抗的算法。本文对吹气与吸气两种情况下的涡声作用进行了对比。

2 物理模型

图1为声衬结构示意图。文献[2]中给出声波垂直入射时的声衬的反射系数为: $R = (Q/X - ikl - kl/\tan kl)/(Q/X + ikl - kl/\tan kl)$ 。其中 k 为入射波的波数, $Q = f/f_r = (kd)^2 l/2a$ 为共振参数, f_r 为声衬的共振频率, $X = K/2a$,其中 a 为小孔半径, K 为反映小孔声学特性的

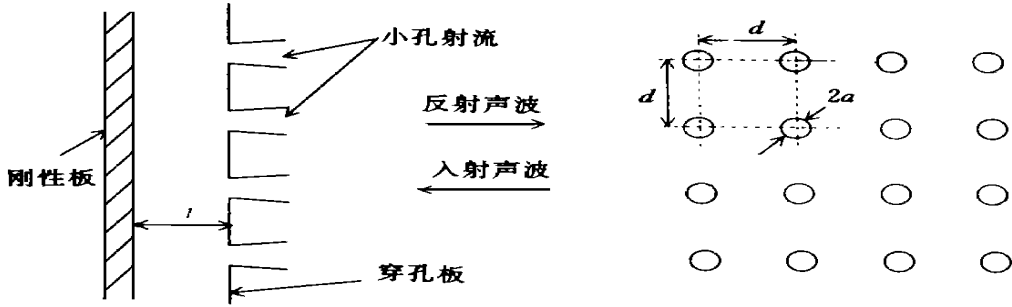


图1 声衬结构示意图

Rayleigh 声导纳, 包含了涡声作用对声衬性质的影响, 表达式为 $K = 2a(\gamma - \delta i)$, 其中:

$$\gamma = \frac{I_1(kR)2(1 + 1/kR) + (4/\pi^2)e^{2kR}\cosh(kR)K_1(kR)^2[\cosh(kR) - \sinh(kR)/kR]}{I_1(kR)^2 + (4/\pi^2)e^{2kR}\cosh^2(kR)K_1(kR)^2}$$

$$\delta = \frac{(2/\pi kR)I_1(kR)K_1(kR)e^{2kR}}{I_1(kR)^2 + (4/\pi^2)e^{2kR}\cosh^2(kR)K_1(kR)^2}$$

式中: $St = \omega a / v$ 为 Strouhal 数, ω 为压力脉动的角频率, v 为孔流速度, $I_1(St)$ 与 $K_1(St)$ 是变形 Bessel 函数。由上式可以看出 K 仅是 St 的函数, 与流体粘性无关。声衬的吸声系数 $A = 1 - R^2$, 声阻抗 $Z = \rho_0 c_0 (1 + R) / (1 - R)$ 。

在 1、2 的推导中都没有考虑到板厚的影响, 而实验中发现板厚对声衬的性质有较大的影响, 本文借鉴了传统声阻抗理论中的处理方法, 将通气厚板的声抗写成 $x = x_i + x_e$, x_i 为小孔的孔内质量抗, x_e 为涡声作用引起的声抗末端修正项。由于其中 $x_i = -\rho_0 \omega L$, $x_e = \text{Im}(-i\pi a \rho_0 \omega / 2X)$, 由此可得出厚板声衬的共振频率 f_r^L 与薄板共振频率 f_r 的关系: $f_r^L = f_r / \sqrt{1 + L / (a\pi/2)}$, L 为板的厚度。对于厚板的声阻也需要修正, 但不同于声抗, 声阻对涡声作用的强弱是比较敏感的, 厚板声阻的末端的修正需要考虑板厚的增加对孔缘涡声作用的削弱, 及其粘性作用的增强。解决这个问题可以用经验公式的方法, 但更为根本的方法须在 Howe 的理论的基础上考虑板厚粘性的影响对孔内外流场进行求解。本文没有进行这部分工作。

3 实验设备

本实验采用驻波管的双传声器法测量声衬的声学性质, 实验设备见图 2。实验装置可分为声源、气源、试样、测量 4 个部分。声源部分由低频发生器、功率放大器、扬声器组成, 提供低频正弦波。气源为真空泵(吸)或空压机(吹)。试样为固定于凹室的一定穿孔率的孔

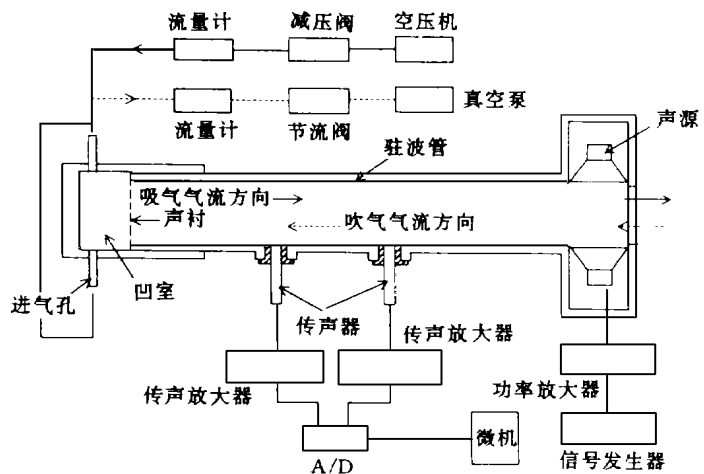


图2 实验设备

板, 孔板及其凹室的空腔构成共振式声衬。测量部分包括驻波管, 传声器, 传声放大器, 采集板, 及带有采集软件的微机组。对于不同孔流速度或不同声波频率, 由两个传声器的声压及相位测量信号可求得声衬的吸声系数及声阻抗。通气声衬的声学性质是由声衬的几何参数: 孔径 a 、孔间距 b 、腔深 d 、板厚 h , 及其孔流马赫数 Ma 决定。

4 实验结果分析

4.1 通气流与不通气流声衬性能参数对比

如图 3 所示, 通气声衬的峰值吸声系数与半吸收频带, 较不通气声衬有明显提高。由声阻

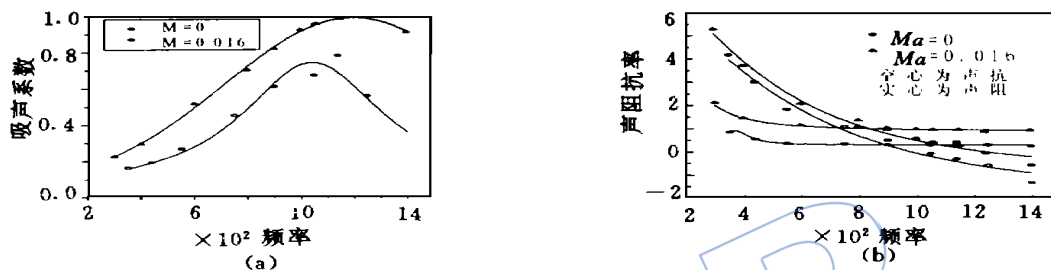


图 3 通气声衬与不通气声衬性能比较 ($a = 1.5$, $d = 17$, $l = 20$, $h = 0.2$)

抗图可见, 在声阻抗上表现为通气声衬声阻较不通气声衬有明显提高, 而声抗值略有增加。

4.2 不同几何参数的声衬性质与理论值的比较

如图 4~6 为几种结构声衬的吸声系数与声阻抗随孔流马赫数的变化关系的实验值与理论值比较, 图中实线为理论值, 图中的实验频率都取为特定结构下的共振频率。由图中可以看出声衬的声阻随孔流马赫数的增加而增加, 声抗随孔流速度的变化不大。吸声系数在孔流速度达到某一数值时接近于 1。几种情况下实验值的比较可看出, 腔深 (20 mm, 60 mm) 及孔径 (1 mm, 1.5 mm) 的不同会影响到声衬的共振频率及其吸声系数峰值点处的孔流马赫数, 但不同情况下试验值与理论值的对比关系是类似的, 实验

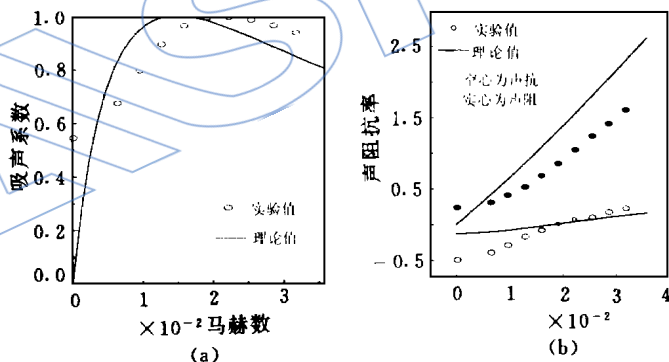


图 4 实验值与理论值随马赫数变化关系比较

($a = 1.5$, $d = 17$, $l = 20$, $f = 1240$ Hz)

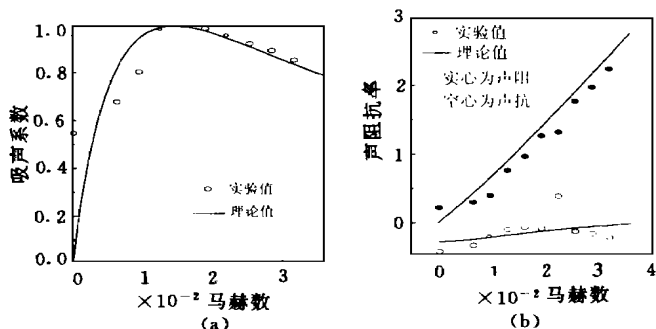


图 5 实验值与理论值随马赫数变化关系比较

($a = 1.5$, $d = 17$, $l = 60$, $h = 0.2$, $f = 720$ Hz)

值与理论值吻合较好。表明这几种参数下理论的适用性是相同的, 通气孔板的吸声机制为涡声相互作用, 如果进一步减小孔径, 情况可能发生变化, 粘性会起主导作用。另外在孔流速度较低时理论值与实验值差别较大, 这是由于此时涡声相互作用已不是决定孔板的声阻抗主要因素, 而 Howe 的理论中忽略了粘性等其它因素的影响。

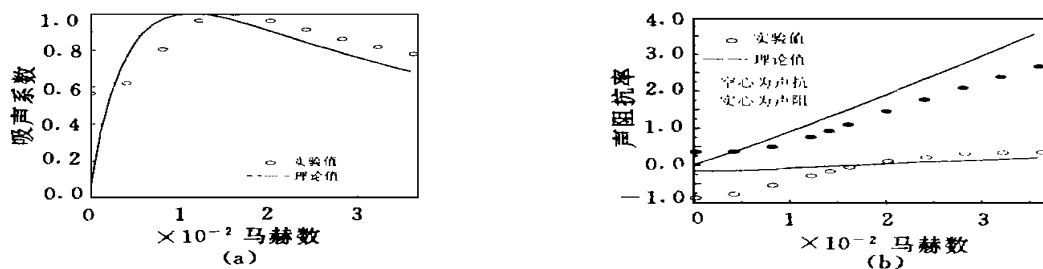


图 6 实验值与理论值随马赫数变化关系比较 ($a=1.0, d=13, l=20, h=0.2, f=1330 \text{ Hz}$)

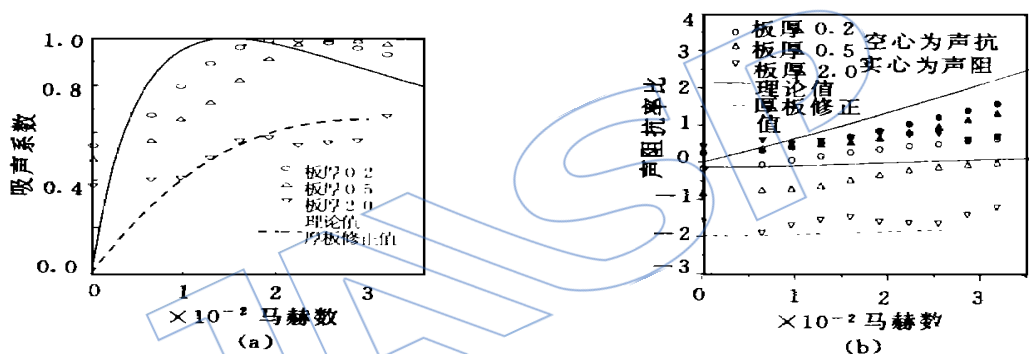


图 7 不同厚度孔板组成的声衬性能随马赫数变化关系比较

($a=1.5, d=17, l=20, f=1240 \text{ Hz}$)

图 7 与图 8 为不同厚度板声衬性质比较, 可见厚度对声衬的性质有较大影响, 图中虚线为本文给出的厚板理论值。很明显虚线于实验数据吻合更好一些。厚板的质量抗使声衬的声抗减小, 结果使声衬的共振点发生偏移。对实验声衬由文献[1]中给出的算法共振频率为 1233 Hz, 本文对厚板声衬的声抗修正后给出的共振频率为 917 Hz, 实验得到的数值约为 900 Hz。厚板使孔流边界层加厚, 从而对厚板声阻产生影响, 一方面粘性阻增加, 另一方面粘性削弱了涡声作用。使的厚板声阻随孔流速度变化不明显。

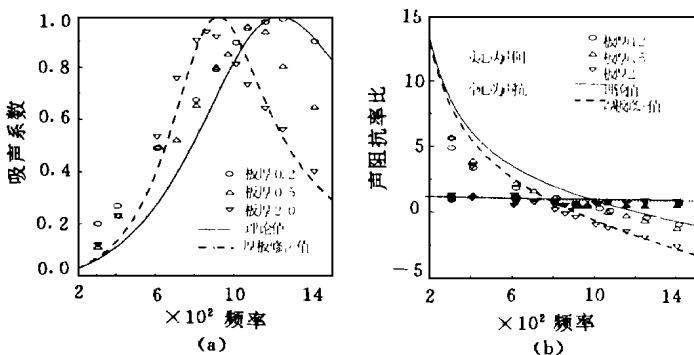


图 8 不同厚度孔板组成的声衬性能随频率变化关系比较

($a=1.5, d=17, l=20, f=1240 \text{ Hz}$)

4.3 吹气与吸气的比较

如图 9 所示的吹气与吸气实验值的对比可看出在实验误差允许范围内吹气与吸气对声衬

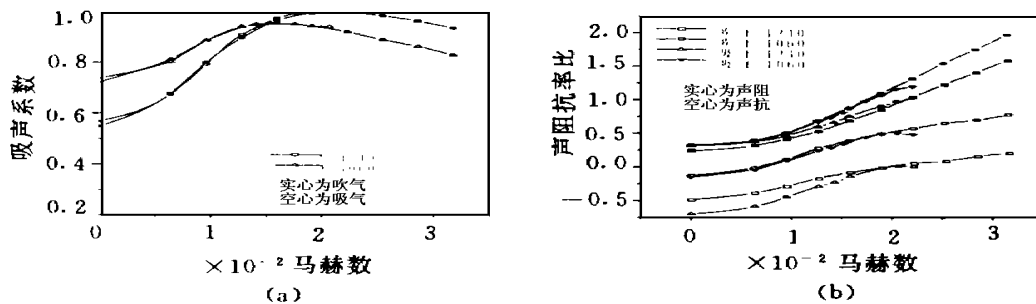


图 9 吹气与吸气声衬性能随马赫数变化关系比较(声衬 1, 腔深 20 mm)

的涡声作用上是等价的, 另外同样可知通气孔板的涡声作用发生在小孔的附近, 与距板较远处是硬壁或自由空间无关, 这一点由前面腔深对涡声作用的影响也可看出。

5 结 论

(1) 在本文选择的腔深(20 mm, 60 mm)及孔径(1 mm, 1.5 mm)下, 0.2 mm 厚度的孔板实验值与理论值吻合较好。但在低频、低速的情况下有些差别。

(2) 厚度较大的板(2 mm)与 Howe 的理论值存在较大的差别, 表现为声阻随 Ma 数变化增加不明显, 可定性解释为涡声作用的削弱, 及粘性作用增强。另外是由于小孔声质量带来的质量抗使厚板共振点偏移, 本文对厚板的声抗进行了修正, 给出了厚板通气声衬声抗的一种计算方法, 在此基础上给出了厚板声衬的共振参数及共振频率, 与实验结果吻合较好。

(3) 吹气、吸气对声衬的性能有同样的影响。

(4) 通过本文中理论值与实验值的对比及其不同厚度板声衬性能的对比, 进一步验证了 Howe 的理论。同时表明了影响理论应用的一些限制条件, 如厚度、低速、低频。

参 考 文 献

- 1 Howe M S. On the Theory of Unsteady High Reynolds Number Flow Through a Circular Aperture. Proc. Roy. Soc. Lond. A 366, 205-233, 1979
- 2 Hughes IJ, Dowling A P. The absorption of Sound by Perforated Linings. J. Fluid Mech. 218, 1990
- 3 孙晓峰, 周盛著. 气动声学. 北京: 国防工业出版社, 1994
- 4 唐凌云. 多孔壁板波涡相互作用的机理及其在控制管道声传播中应用的实验及数值研究: [硕士学位论文]. 北京航空航天大学, 1996
- 5 景小东. 以涡声理论为基础的新型声衬的实验研究与分析: [硕士学位论文]. 北京航空航天大学, 1995

(责任编辑 杨再荣)

developed in SM PLEC algorithm with a layout of staggered grid in generalized curvilinear coordinates. This method is applied to three flow problems as test tasks. The comparison between the iteration performance of the Multi-Grid (MG) and Single-Grid (SG) methods in different grid sizes, Reynolds number and geometries demonstrates that the multigrid method improves convergence rate, reduces CPU time, and overcomes the deficiency of single-grid SM PLEC algorithm in generalized curvilinear coordinates.

Key Words Incompressible flow Aerodynamic computation Curvilinear coordinates Convergence

EFFECTS OF GEOMETRIC AND AERODYNAMIC PARAMETERS ON INTERACTION OF WAVES AND VORTEX ON PERFORATED PLATE

Tang Lingyun, Wang Tongqing, Sun Xiaofeng

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT An experimental investigation has been carried out on a kind of perforated liner with a bias flow through the apertures, according to Howe's vortex sound theory. The attention was focused on the effects of the aperture size, the cavity depth and the perforated plate thickness on the impedance of the liner. The algorithm of the reactance is modified for the liner with thick perforated plate, based on the analysis of experimental results. The perforated liners with sucking and blowing bias flow are compared and the same conclusions are drawn out.

Key Words Geometry Aerodynamic forces Sound reduction

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON ARC SKEWED SLOT CASING TREATMENT

Zhang Yandong and Lu Yajun

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT Different geometrical designs of arc skewed slot casing treatments have been investigated experimentally to research their influences on stall margin and operating efficiency. A study on the mechanism of the casing treatment was carried out on the basis of three dimension flow field measurement. The comparison of different casing treatments revealed that the best configuration of an arc skewed slot casing treatment improved the stall margin by 27%, and the peak efficiency by 1%. Compared with an axial skewed slot casing treatment, the arc skewed one not only made an improvement in stall margin, but also ended the history that the casing treatment had to pay a loss of efficiency in order to improve stall margin.

Key Words Axial fan Treatment Casing Flow measurement