

文章编号:1000-6893(2002)06-0512-05

抽吸孔板的气动实验及附面层抽吸数值模拟

梁德旺, 钱华俊

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF POROUS PLATES AND NUMERICAL SIMULATION OF BOUNDARY LAYER SUCTION

LIANG De-wang, QIAN Hua-jun

(Institute of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 为了给附面层抽吸提供可靠的抽吸边界条件,通过对孔板厚径比 $t/d = 0.1 \sim 2.67$, 开孔率 $\epsilon = 6.3\% \sim 23\%$ 的多孔板进行实验,建立了附面层抽吸孔板小孔马赫数与孔板前后压差、孔板厚径比、孔板开孔率间的关系。发现随着孔板前后压差的加大,小孔马赫数增加,当孔板前后压差达到一定值时,小孔发生壅塞,小孔马赫数不再变化,孔内流动达到壅塞状态。与此同时,总结出了附面层抽吸孔板小孔马赫数的经验公式。为了进一步检验所得经验式的准确性,还用实验所得经验式作为附面层抽吸边界条件,对来流马赫数分别为 1.98, 1.58 和 0.8 三种情况下的附面层抽吸流场进行了数值模拟。计算结果准确反映了超声来流和亚声来流条件下的附面层抽吸的流动特征,抽吸流量与 Willis 和 Syberg 的实验结果吻合较好,表明给定的附面层抽吸边界条件是正确、可行的。

关键词: 附面层抽吸; 数值模拟; 边界条件; 进气道; 多孔板

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A

Abstract: An experimental investigation of aerodynamic characteristics of porous plates is performed in order to develop a reliable boundary layer condition for the numerical simulation of the flow with boundary layer suction. In the experiments, the ratio t/d of the plate thickness to the hole diameter ranges from 0.1 to 2.67 and the porosity of the plate from 6.3% to 23%. The experimental results show that the average Mach number in the hole relates with pressure drop over the porous plate, the ratio of the plate thickness to the hole diameter and the porosity of the plate. The Mach number in the hole will increase with the increase of pressure drop over the porous plate for a given plate. When the pressure drop reaches a certain value, the average Mach number in the hole will remain a constant value and the flow in the hole reaches the critical state. An empirical relation about the Mach number in the hole, pressure drop over the porous plate, the ratio of the plate thickness to the hole diameter and the porosity of the plate is established in this paper. In order to validate the empirical formula for boundary layer suction, numerical simulation of flow over a flat plate with boundary layer suction at free Mach number of 1.98, 1.58 and 0.8 is fulfilled by use of the empirical formula for boundary layer suction. The characteristics of flow over the porous plate are reasonably simulated and the flow rate of suction is in fairly good agreement with experimental data reported by B. P. Willis and J. Syberg. Therefore, the empirical formula described in this paper can be used in the numerical simulation of intake flow field with boundary layer suction.

Key words: boundary layer suction; numerical simulation; boundary layer condition; inlet; porous plate

在进气道内激波与附面层间存在着强烈的干扰,这将使进气道出口流场畸变加剧,总压恢复系数下降,有时还造成进气道流量壅塞,严重时会造成进气道喘振。解决这一问题常用的方法就是在激波与附面层干扰的区域用小孔进行附面层抽吸,将附面层中的低能量气流抽走,从而抑制附面

层分离,减小进气道出口流场畸变。

进气道附面层抽吸一般是在进气道中心锥或压缩面开小孔将附面层中的低能量气流抽走。许多专家^[1~4]已经通过实验研究了抽吸小孔的大小、形状、孔的排列规律、开孔率以及抽吸孔板的厚度对小孔抽吸速度的影响。R. W. Cubbison^[2]等还研究了抽吸流量大小、抽吸位置对进气道性能的影响。

到目前为止,进气道附面层抽吸设计主要依靠模型实验来进行,而模型实验所得到的结果与

收稿日期:2001-12-11; 修订日期:2002-06-17
基金项目:航空科学基金(98C52029) 资金项目
文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2002/06/0512/>

全尺寸进气道上测得的结果存在差异^[1]。因此,建立全尺寸与缩尺模型进气道附面层抽吸孔之抽吸效果的等效性有其理论价值和工程意义。随着计算流体力学的快速发展,许多专家考虑对附面层抽吸进行数值模拟。附面层抽吸数值模拟的方法一般分为两种方法:一种方法是在附面层抽吸边界给定速度分布边界条件^[5~7];另一种方法就是将主流区、抽吸孔、抽吸腔一起生成网格进行计算^[8]。前一种方法计算起来相对简单,适合于工程应用,但对抽吸速度的给定尚无统一格式。后一种方法对计算机硬件要求较高,计算量大。本文拟采用前一种方法对附面层抽吸进行研究。

K. W. Abrahamson^[5]为了给进气道附面层抽吸数值模拟提供速度分布边界条件,通过气动理论分析给出了小孔速度分布与小孔进口处的总压、总温及抽吸背压间的关系。Abrahamson^[5]给出的速度式考虑了小孔发生壅塞的情况,建立了小孔速度与当地的压力、温度之间的关系,但没有考虑孔板的几何尺寸及开孔率的影响,式中系数 C_b 取为常数使公式的准确性下降。

R. Bohning^[6]在研究无源空腔控制激波附面层干扰问题时,为了给模拟空腔抽吸提供边界条件,通过对孔板进行实验,总结出小孔马赫数与孔板前后的静压差之间的经验式。文献^[7]首次用该经验式对无源空腔控制激波附面层干扰流动进行了数值模拟。然而,该实验所采用的孔板的小孔孔径较小(0.085mm 至 0.325mm),实验时小孔最大马赫数在 0.3 左右,而飞机进气道附面层抽吸一般采用的孔径在 1.5mm 至 4mm 之间,抽吸时小孔内流动接近或达到了壅塞状态。另外,上述经验式没有考虑孔板厚度与孔径之比等参数的影响。所以上述公式不能直接用于进气道附面层抽吸边界的数值模拟。

为了给进气道附面层抽吸数值模拟提供速度分布之边界条件,有必要对进气道附面层抽吸小孔的速度分布规律进行进一步的研究。为此,本文首先对多孔板进行了实验研究,意在通过大量的实验建立流过小孔气流速度与孔板两侧压差、开孔率、孔板厚度与孔径比等参数间的经验式。其次,对 B. P. Willis^[9]和 J. Syberg^[11]的附面层抽吸实验进行数值模拟,比较计算和实验所得抽吸流量的大小,从而检验实验所得附面层抽吸速度分布边界条件的正确性。

1 抽吸孔板气动特性实验研究

为了找出附面层抽吸孔板小孔马赫数的规

律,若采用图 1 所示装置对附面层抽吸进行实验,由于抽吸区域内各小孔马赫数不等,孔板前压力沿气流流动方向不断变化,实验时不方便进行测点布置,小孔马赫数的规律也不易寻找。因此采用图 2 所示装置对附面层抽吸孔板进行实验。

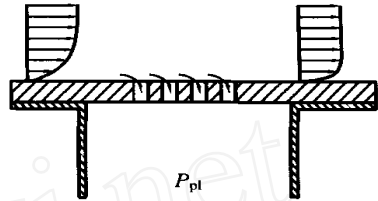


图 1 附面层抽吸示意图

Fig. 1 Diagram of boundary layer suction

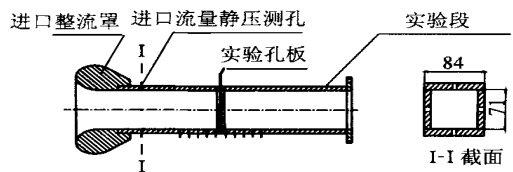


图 2 实验装置图

Fig. 2 Diagram of experimental device

气流通过进口整流罩进入实验段垂直吹向孔板,通过调节旁路阀门的开启程度可以改变进入实验段的气体流量。采取这种以面带点的方法总结出的小孔马赫数的经验公式能准确模拟图 1 中一个小孔的气动特性。

图 3 为多孔板示意图,孔板的几何尺寸主要包括小孔的直径 d ,开孔率,孔板厚度与孔径之比 t/d 。据 J. Syberg^[11]的推荐, t/d 一般小于 4.0,考虑到进气道模型附面层抽吸的常用 t/d 值,本实验选用 t/d 值为 2.67, 1.07, 0.8, 0.64, 0.4, 0.286, 0.2。据孔板节距确定开孔率为 23%, 17%, 14%, 6.3%。小孔之间的排列方式为交错排列。

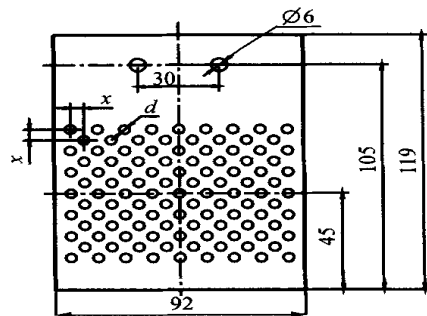


图 3 多孔板示意图

Fig. 3 Diagram of porous plate

1.1 孔板前后压差对小孔马赫数 Ma_{hole} 的影响

图4为对孔径 $d = 2.0\text{mm}$, 开孔率 = 18.02%, 孔板厚度与孔径之比 $t/d = 0.8$ 的孔板进行实验的结果, 纵坐标为小孔马赫数 Ma_{hole} , 横坐标为孔板前后压差与来流总压之比 $p/p_0 = (p_0 - p_{\text{pl}})/p_0$ 。由图可知, 小孔马赫数随孔板前后压差的加大而增加(ABC段), 当孔板前后压差增加到一定值时, 小孔马赫数基本不变(CD段), 小孔内的流动达到壅塞状态。

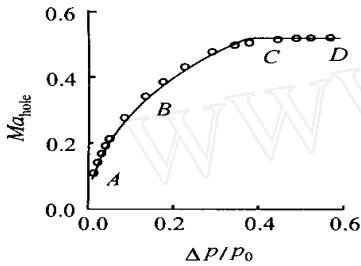


图4 孔板前后压差对小孔马赫数的影响

Fig. 4 Effect of pressure ratio on Mach number in holes

1.2 孔板厚径比 t/d 对小孔马赫数 Ma_{hole} 的影响

图5为开孔率 = 17% 时, 不同 t/d 孔板小孔马赫数 Ma_{hole} 与孔板前后压差间的关系曲线。由图可知, 在相同的压差下, 随着 t/d 的减小, 小孔马赫数 Ma_{hole} 也减小, 但减小的速率不尽相同。

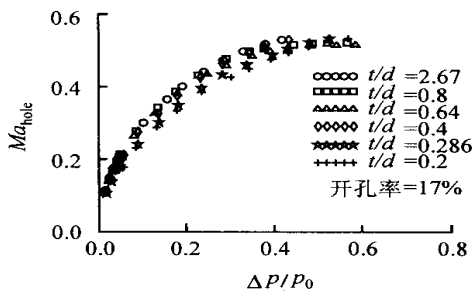


图5 t/d 对小孔马赫数的影响

Fig. 5 Effect of t/d on Mach number in holes

1.3 开孔率 对小孔马赫数 Ma_{hole} 的影响

图6为 $t/d = 0.2$, 开孔率不同时, 小孔马赫数与孔板前后压差间关系图。由图可知, 在相同压差下, 开孔率减小, 小孔马赫数 Ma_{hole} 也减小。随着开孔率的减小, 气流进入小孔的流动情况有所不同, 致使气流在小孔内最小气动面积减小, 因而小孔马赫数也随开孔率的减小而减小。

1.4 经验式的拟合

通过大量的拟合, 图4所示小孔马赫数与孔

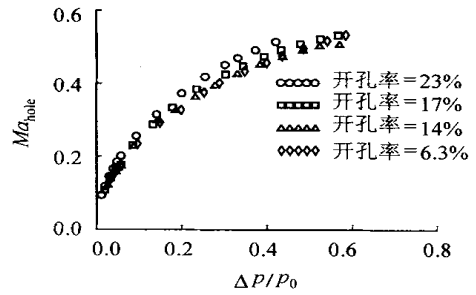


图6 开孔率对小孔马赫数的影响

Fig. 6 Effect of porosity on Mach number in holes

板前后压差间的曲线可用式(1)来描述。

$$Ma_{\text{hole}} = \min \left[c, a \left(\frac{-p}{p_0} \right) \right] \quad (1)$$

式中: 系数 a, b, c 与 t/d 有关, 用最小二乘法对实验所得孔板小孔马赫数与孔板前后压差间的特性曲线进行拟合得出。图4还给出了用式(1)拟合的小孔马赫数(图中实线)。由图可见, 式(1)准确描述了小孔马赫数与孔板前后压差的曲线。图7给出了用经验公式(1)对不同孔板前后压差、不同孔板厚径比 t/d 、不同开孔率 的孔板计算的小孔马赫数误差分析图, 图中纵坐标为实验所得小孔马赫数 Ma_{exp} , 横坐标为经验公式计算的小孔马赫数 Ma_{cal} 。由图可知, 图中各点基本都落在误差带 $\pm 5\%$ 以内。

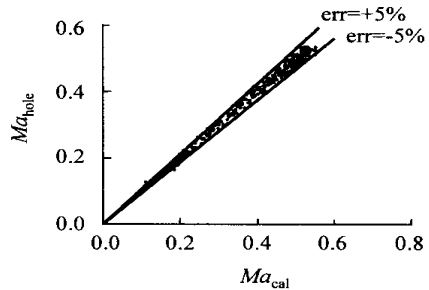


图7 小孔马赫数误差分析图

Fig. 7 Analysis for error of Mach number in holes

2 附面层抽吸数值模拟

在前面的章节中详细研究了附面层抽吸孔板的气动特性, 给出了小孔马赫数的经验公式, 为了对具有孔板之附面层抽吸的流场进行数值模拟, 本节将给出抽吸速度边界条件, 对 Willis^[9], Syberg^[11]的附面层抽吸实验进行数值模拟, 计算出抽吸流量并与实验结果进行比较。其目的是想进一步检验上述经验公式的正确性。

2.1 基本方程及数值方法

计算用 NAPA 湍流流场数值计算软件, 计算

采用 Frave 平均的非定常 N-S 方程。N-S 方程的离散分为时间离散和空间离散。在时间方向使用的是显式差分格式,在求定常解时使用了优化系数的 Runge-Kutta 多步格式。为了加速计算收敛,使用了当地时间步长、隐式残值光滑、多层网格加密等加速收敛技术。空间项求解使用有限体积法,此时只需求得网格界面上的通量即可。粘性通量的计算使用传统的中心差分,对流通量的计算使用了 Jameson 格式和 Swanson 的标量人工粘性。湍流粘性采用 B/L 湍流模型计算。

2.2 物理模型、网格及边界条件

(1) 物理模型及网格 Willis 为了总体模拟附面层抽吸,对抽吸孔板进行实验以期得到可靠的抽吸边界条件。该实验在 NASA Lewis 研究中心一个 0.3m × 0.3m 的超声速风洞上进行,附面层抽吸孔板外形尺寸见图 8。抽吸孔板由 6 排小孔组成,每排 12 个小孔,小孔总面积为 23.75cm²,抽吸区域面积为 6.985cm × 17.78cm。为了形成一个准二维流场,消除超音速风洞壁面附面层的影响,在附面层抽吸区域两侧安置两块挡板。

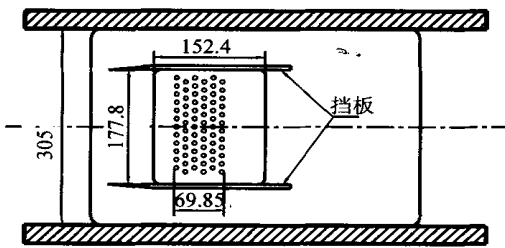


图 8 Willis 实验装置俯视图

Fig. 8 Diagram of Willis's experimental device

根据 Willis 的实验装置图生成计算网格,抽吸区域在 $x = 22.225\text{mm}$ 至 $x = 29.21\text{mm}$ 之间。

(2) 抽吸边界条件 对于图 8 所示流场,需要给定的边界条件有入流边界、出流边界、固壁边界、远场边界、对称边界和抽吸边界。计算的关键是附面层抽吸边界条件的给定。类似于固壁边界,其压力、密度由近边界的内部流场值零阶外推得到,各点的抽吸速度(垂直于壁面)由经验式(1)计算得到。在上一节的实验条件下,通过孔板各孔的速度相等,而在本算例中附面层抽吸孔板各孔两侧压力不尽相等,因而各点的抽吸速度不同。对于某一点,假定流场内部壁面上的静压、静温为通过抽吸小孔气流的总压 p_0 、总温 T_0 ,当抽吸背压给定时,抽吸速度可表示为

$$V = \frac{Ma_{\text{hole}} \sqrt{RT_0}}{\left[1 + \left(\frac{\gamma-1}{2}\right) Ma_{\text{hole}}^2\right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \quad (2)$$

2.3 附面层抽吸对流场的影响

Willis 和 Syberg 等研究了不同来流马赫数时,抽吸小孔几何形状对抽吸流量的影响,给出了抽吸流量系数与抽吸背压之间的关系图。本文选定其中小孔孔径 $d = 6.35\text{mm}$, $t/d = 1.0$,开孔率 = 19.12% 的抽吸孔板为数值模拟对象,数值模拟来流马赫数为 1.98, 1.58, 0.8 三个实验状态。

对于图 8 的流动域,当没有附面层抽吸时其流动是均匀的。而进行附面层抽吸时,由于附面层抽吸扰动,流场不再均匀。图 9 为 $Ma = 1.58$, $p_{p1}/p_0 = 0.04$ 时,附面层抽吸区域等马赫线图,在 $x = 0.22225$ 附近,当超声气流流近抽吸边界时,形成一道膨胀波,波后压力降低,马赫数增加;气流离开附面层抽吸边界时,形成一道压缩波,气流压力升高,马赫数减小。这一结果与 Shih^[8] 给出的单孔抽吸时抽吸对超音流场的影响的结果是一致的。图 10 为抽吸区域等马赫线图。由图可知,气流在抽吸区域加速和减速,但没有在抽吸区域前后边界形成膨胀波和压缩波。

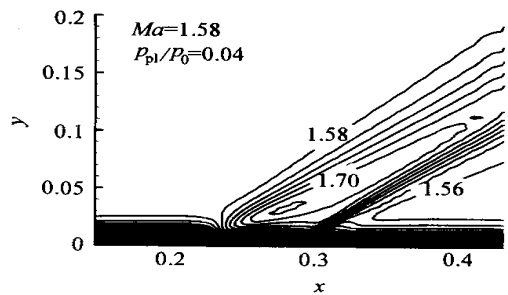


图 9 等马赫线图

Fig. 9 Iso-Mach number map

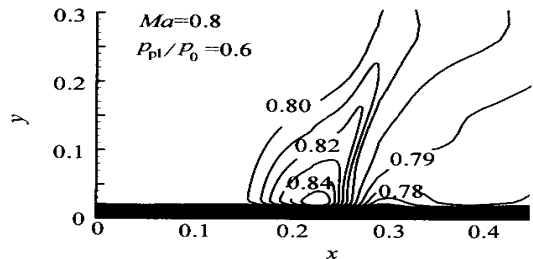


图 10 等马赫线图

Fig. 10 Iso-Mach number map

2.4 抽吸流量的比较

图 11 给出了来流马赫数 $Ma = 1.98, 1.58$ 和

0.8时,不同抽吸压力时,抽吸流量计算值与实验值的比较,图中小方块、三角和圆为实验结果,实线为计算结果。图中纵坐标为抽吸流量系数(抽吸流量 Q 与按来流总温、总压计算得到的通过抽吸孔板最大流量 Q_{\max} 之比)。由图可知,计算所得抽吸流量与实验值吻合很好,而且随着抽吸背压的减小,抽吸流量增加,当抽吸背压减小到一定程度时,抽吸流量达到壅塞,计算结果也同时准确地反映了这一特征,表明所给出的边界条件是正确、可行的。

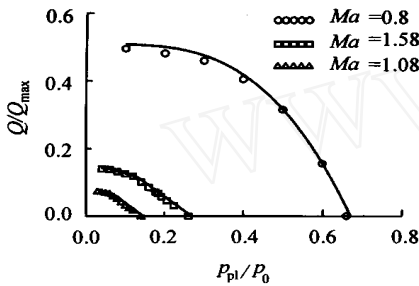


图11 附面层抽吸流量比

Fig. 11 Comparison of mass flow through the porous plate

3 结束语

(1)通过对多孔板进行大量的实验,总结出了附面层抽吸孔板小孔马赫数的经验公式;附面层抽吸孔板小孔马赫数受孔板前后压差、孔板厚径比、孔板开孔率等因素影响。

(2)对超声来流和亚声来流附面层抽吸数值模拟结果表明,本文所给经验公式计算出的附面层抽吸速度能够准确模拟附面层抽吸流动特征和抽吸流量。说明本文给定的附面层抽吸边界条件是正确、可行的。

参 考 文 献

- [1] Syberg J, Koncsek L. Bleed system design technology for supersonic inlets[R]. AIAA 72-1138, 1972.
[2] Cubbison R W, Meleason E T, Johnson D F. Effect of porous

bleed in a high performance axisymmetric mixed-compression inlet at Mach 2.5[R]. NASA TM X-1692, 1968.

- [3] Fukuda M K. Control of shock boundary layer interaction by bleed in mixed compression inlets[R]. NASA CR 2595, 1975.
[4] Wong W F. The application of boundary layer suction to suppress strong shock induced separation in supersonic inlets[R]. AIAA 74-1063, 1974.
[5] Abrahamson K W. An empirical boundary condition for numerical simulation of porous bleed flow[R]. AIAA 88-0306, 1988.
[6] Bohning R. Investigation of porous plate flow [Z]. Internal Report, 1996.
[7] 梁德旺, Bohning R. 具有无源控制空腔时正激波/湍流附面层干扰的数值模拟[J]. 航空动力学报. 1997, 12(4): 381-384.
(Liang D W, Bohning R, Numerical simulation of normal shock wave/turbulent boundary layer interaction with passive cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(4): 381-384)
[8] Shih T F P, Benson T J, Willis B P. Structure of shock-wave/boundary layer interactions with bleed through rows of circular holes[R]. AIAA 97-0508, 1997.
[9] Willis B P, Davis D O, Hingst W R. Flow coefficient behavior for boundary layer bleed holes and slots[R]. AIAA 95-0031, 1995.

作者简介:



梁德旺(1962-) 男,湖南人,南京航空航天大学教授,博士生导师,副校长,研究方向为内流气体动力学、进/发匹配技术,流场测试技术等,发表论文40余篇。Email:L.dw@nuaa.edu.cn



钱华俊(1972-) 男,江苏人,南京航空航天大学硕士,现在中设江苏机械设备进出口集团公司工作。

(责任编辑:吴小勇)