

文章编号: 1000-8055(2005) 01-0092-06

圆排波瓣弯曲混合管引射实验 与数值模拟

刘友宏, 刘 伟

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 将圆排波瓣喷管配以不同的弯曲混合管组成引射混合器, 实验研究了弯曲混合管的几何参数, 试验结果表明: 当弯曲角 $\beta = 40^\circ$ 时, 弯曲混合管的引射流量比 φ 与同样直径的圆柱混合管相当; 当 $\beta > 40^\circ$ 时, 弯曲混合管的引射流量比 φ 相比于同样直径的圆柱混合管有较大的下降, φ 随 β 的增加下降很快; φ 随混合管截面比 λ 的增加先增大后下降, 虽然峰值小于圆柱混合管的最大引射流量比, 但是峰值对应的值却近似等同于圆柱混合管的截面比; φ 随次流进口截面比 σ 的增加而接近线性增大。进行了 1/2 的 12 波瓣喷管弯曲混合管引射混合器的 3D 不可压流场的数值模拟, 模拟结果表明: 当 $\beta > 40^\circ$ 时, 弯曲混合管引射流量比 φ 下降的主要原因是弯曲混合管转弯部分由于主流射流冲击, 静压力较高, 从而弯曲部分附近的有效流通截面积减小, 严重影响了次流的流出。另外, 计算的壁面静压系数与测量值符合良好。

关键词: 航空、航天推进系统; 弯曲混合管; 弯曲角; 截面比; 波瓣; 引射流场

中图分类号: V 231. 3; V 211. 3

文献标识码: A

Experimental and Numerical Study of Ejection Characteristics of Circular Lobe Ejector with Bend Mixers

LIU You-hong, LIU Wei

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: For the purpose of infrared stealth, the lobe and bend exhaust nozzle is required for the turbo shaft engine to eject surrounding cooling air and to change the direction of exhaust jets. The test model used was a set of circular twelve-lobe nozzles with bend mixers. The effects of the mixer bend angles β , the mixer to lobe cross sectional area ratio λ and the cross sectional area ratio σ of the secondary inlet to lobe on ejection ratio φ was studied. The experimental results show that for $\beta = 40^\circ$, the ejection ratio φ of the bend mixer is the same as that of the cylindrical mixer with the same diameter. For $\beta > 40^\circ$, the ejection ratio φ relative to the cylindrical mixer decreases significantly. With the increase of the mixer cross sectional area ratio λ , at first the ejection ratio φ increases and then decreases. The maximum ejection ratio $\varphi_{\max}$ is less than that of the cylindrical mixer, but the optimal

收稿日期: 2004- 09- 08; 修订日期: 2004- 12- 03

基金项目: 中国航空支撑科技基金资助项目(03B51010)

作者简介: 刘友宏(1963-), 男, 江苏东台人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院副教授, 博士, 主要从事传热传质研究。

cross sectional area ratio λ_{mix} is about the same as that of the cylindrical mixer. The ejection ratio φ increases approximately linearly with the cross sectional area ratio σ . Because of the symmetrical feature of the lobe mixer, for simplicity, 3D incompressible flow field of half of the mixer was numerically simulated. The calculated wall static pressure coefficients agree well with the measured ones. The numerical results show that the main reason for the significant decrease of the ejection ratio φ when the mixer bend angle is larger than 40° is due to the high static pressure along the bend part of the mixer, and the high static pressure chokes the effective flow passage area.

Key words: aerospace propulsion system; bend mixer; bend angle; cross sectional area ratio; lobe; flow field

波瓣喷管是一种高效的引射、掺混和降噪元件,在工业生产中有非常大的应用价值。把它与各种形式的混合管结合,可以组成高效的引射混合器。文献[1]对圆排波瓣圆柱混合管的气动特性进行了冷热态实验研究,得出了引射流量比随混合管截面比、主次流温度比和次流进口截面比的变化曲线。文献[2]对一圆排波瓣喷管引射器内的高效掺混流场进行了数值模拟,指出混合管中形成的流向涡阵列大大强化了主次流的掺混。文献[3]对一有中心锥的圆排波瓣喷管引射器内的流场进行了数值计算研究。文献[4,5]对有、无中心锥的圆排波瓣喷管引射器进行了实验和数值模拟,得出了引射器的气动特性规律,并从流动机理上找到了有中心锥的圆排波瓣圆柱混合管的热混合效率大于没有中心锥的原因。

对直升机用的涡轴发动机的排气尾喷管,出于红外隐身的目的,往往安装波瓣喷管,并且要求混合管弯曲,使排气转向。本文通过实验方法研究了弯曲混合管的弯曲角度、混合管截面比以及次流进口截面比对圆排波瓣喷管引射器引射性能的影响,首次通过数值模拟手段研究了弯曲混合管引射混合器内完整的 3D 流场,找到了弯曲混合管在弯曲角度大于 40° 时相比同直径的圆柱混合管引射流量比有较大下降的主要原因。

1 实验模型与结果

1.1 实验模型

采用的实验装置如图 1 所示,与文献[1,5]基本相同,仅实验段有所不同。在常温大气条件下,实验装置的主流马赫数约为 0.22;次流有 2 个进口管,分别称为 $D100$ (内直径为 99 mm) 和 $D80$ (内直径为 80 mm)。12 波瓣圆排波瓣喷管如图 2 所示。设计加工的 5 只弯曲混合管形状如图 3 所示,几何尺寸见表 1。弯曲混合管圆筒段长度 L 与直径 D 相同。弯曲混合管进口截面积 A_m 与波瓣

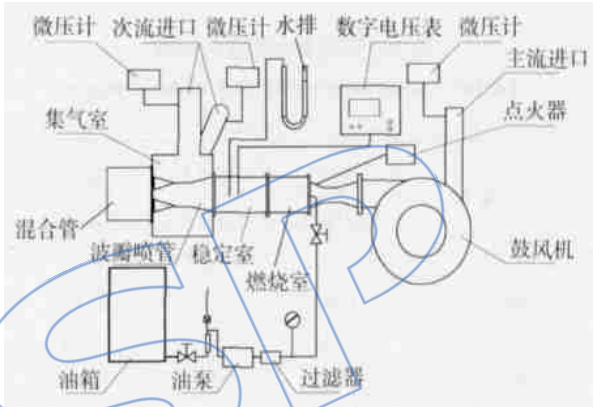


图 1 圆排波瓣弯曲混合管实验装置简图
Fig. 1 Experimental setup

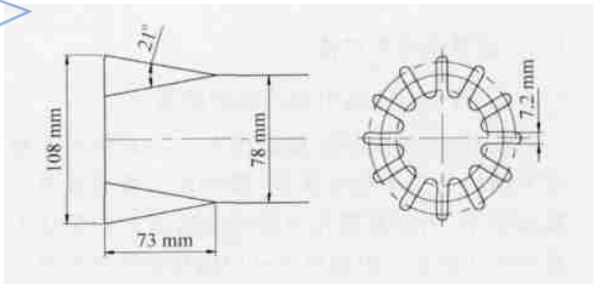


图 2 圆排波瓣喷管
Fig. 2 Circularly lobed nozzle

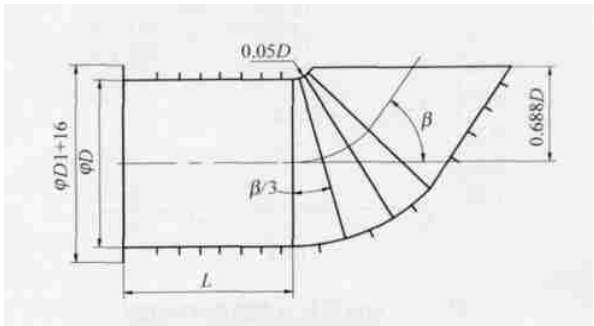


图 3 弯曲混合管
Fig. 3 Bend mixer

喷管出口截面积 A_p 之比 $\lambda = A_m/A_p$, 简称混合管截面比; 次流进口截面积 A_s 与波瓣喷管出口截面积 A_p 之比 $\sigma = A_m/A_p$, 称为次流进口截面比。引射质量流量 $\dot{m}_s$ 与主流质量流量 $\dot{m}_p$ 之比 $\varphi = \dot{m}_s/\dot{m}_p$, 称为引射流量比, 是衡量引射混合器引射性能好坏的主要指标。为了了解混合管中壁面静压分布情况, 在引射器对称面、弯曲混合管的壁面上正对波瓣喷管波峰的位置, 以及相邻的波谷位置沿轴向均匀布置了两排静压测孔, 孔径 1 mm。经测试, 沿波峰处的壁面静压比波谷处的略微大一点, 但两者的壁面静压系数差异甚微, 所以这儿报道的是波峰位置的数值。

表 1 弯曲混合管几何参数

Table 1 Geometry parameter of bend mixer

编号	直径 D/mm	弯曲角 度 $\beta/(\text{ }^\circ)$	截面 比 λ
弯 50 °1#	118.2	50	2.45
弯 50 °2#	129.4	50	2.94
弯 50 °3#	140.4	50	3.46
弯 40 °4#	129.3	40	2.94
弯 60 °5#	129.4	60	2.94

1.2 实验结果与讨论

1.2.1 弯曲角度对引射性能的影响

在其它条件相同, 截面比 $\lambda = 2.94$, 仅弯曲角度不同的条件下进行实验, 测得在 3 种次流进气截面积下, 引射流量比 φ 随弯曲角度 β 的变化关系如图 4 所示。由图可见: (1) 混合管弯曲角度严

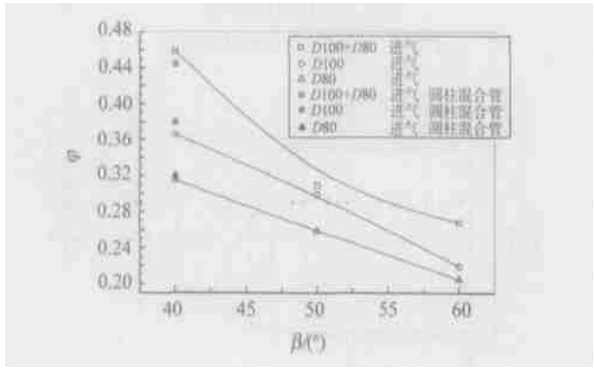


图 4 引射流量比与弯曲角度的关系

Fig. 4 φ vs. β

重影响引射能力。弯曲角度愈大, 对应的引射流量比愈小。在次流 $D100$ 和 $D80$ 同时进气、 $D100$ 进

气和 $D80$ 进气时, $\beta = 60$ 比 $\beta = 40$ 的引射流量比分别降低了 41.5%, 40.0% 和 35.1%。(2) 在 $\beta = 40$ 时, 弯曲混合管的引射流量比与圆柱混合管的相当(还可参见文献[1]), 说明在小弯曲角度下, 混合管弯曲有助于主流在混合管出口前附壁, 此时在大的混合管截面比的条件下, 有可能引射流量比会超过圆柱混合管。不过此时能否超过圆柱混合管, 还与混合管的另一个几何参数: 圆筒段长度比 L/D 有关。对 $L/D = 1$ 的弯曲混合管, 圆筒管段长度增加, 会增加引射的冷空气量。这时引射流量比的变化仍然取决于主流在混合管中的附壁情况和主次的掺混情况, 详细的流动机理, 只能通过数值模拟的手段来解决。(3) 在 $L/D = 1$ 的条件下, 在 $\beta \geq 40$ 时, 弯曲混合管的引射流量比不可能大于同直径的圆柱混合管, 因为图中引射流量比是单调下降的。(4) 引射流量比随弯曲角度几乎呈直线下降, 可以说明主流引射次流的动量也几乎是线性变化的。(5) 在相同弯曲角度时, 次流进气截面 σ 愈大, 引射流量比 φ 愈大。

1.2.2 截面比对引射性能的影响

在 3 种不同的次流进口截面条件下, 采用弯曲角 $\beta = 50$ 的 3 根弯曲混合管进行引射实验, 获得的引射流量比 φ 与截面比 λ 的变化关系如图 5 所示。由图可见, 在相同的 β 下, λ 愈大, 则 φ 愈高, 即混合管截面积的增加有利于提高引射能力。但在次流仅 $D80$ 进口截面条件下, 引射流量比 φ 有一个最大值 $\varphi_{\max} = 0.263$, 对应的 $\lambda_{\max} = 3.12$ 。虽然 $\varphi_{\max} = 0.263$ 大大小于相应圆柱混合管的 $\varphi_{\max} = 0.37$, 但是 $\lambda_{\max} = 3.12$ 却近似等同于圆柱混合管的 $\lambda_{\max} = 3.4$ [1]。在 $D100$ 和 $D100 + D80$ 条件下, 也可预计到它们都存在一个最优的混合管截面比, 使引射流量比达到最大。

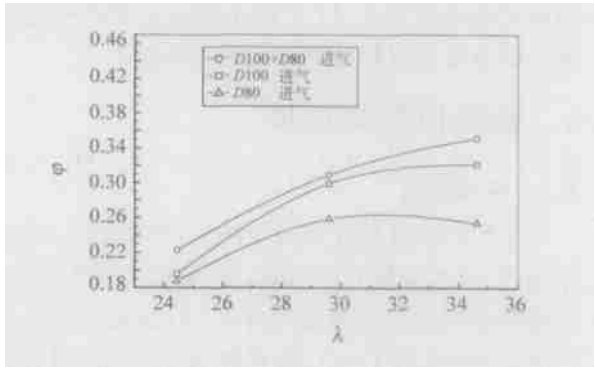


图 5 引射流量比与截面比的关系

Fig. 5 φ vs. λ

比较图 4 和图 5 可见, 图 4 的曲线更陡一些, 说明在本文实验参数范围内, β 对 φ 的影响要大于 λ 。

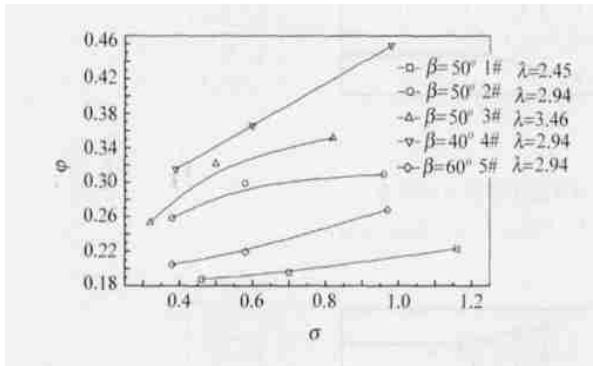


图 6 引射流量比与次流进口截面比关系
Fig. 6 φ vs. σ

1. 2. 3 次流进口截面比对引射性能的影响

5 根弯曲混合管在 3 种不同的次流进气截面下, 进行引射实验的实验结果如图 6 所示。由图可见: (1) 对同一混合管, 次流进口截面比 σ 愈大, 引射流量比 φ 愈大。(2) β 最小的弯曲混合管, 在任何次流进气条件下, φ 都最高。 λ 最小的弯曲混合管, 在任何次流进气条件下, φ 都最低。

2 数值模拟研究

实验得出 $\beta=60$ 比 $\beta=40$ 的引射流量比降低了 40% 左右, 到底什么原因造成引射能力急剧降低呢? 其流动机理是什么? 这是本小节研究的主要目的。

2. 1 计算模型

取 $\beta=60$ 和 $\beta=40$ 的弯曲混合管所在的引射混合器为研究对象, 由于引射混合器有 1/2 对称性, 所以取 1/2 为计算模型。计算中认为气流是三维、定常、有粘的不可压流体, 求解的是三维、不可压、定常的 N-S 方程、连续性方程和标准 $k-\epsilon$ 双方程模型方程。计算域的边界条件: 进口赋气流速度大小和方向, 以及相应的其它参数; 出口赋大气压力; 对称面给定对称边界条件; 固体壁面处速度为 0, 对标准 $k-\epsilon$ 双方程模型的固体壁面采用壁面函数法处理。

计算网格采用四面体网格, 在波瓣体附近网格的平均边长分别为 1 mm 和 2 mm, 划分所得的网格单元数分别为 1 529 330 个和 393 480 个。计算发现这两种网格数下计算的结果几乎相同, 所以可以说数值解与网格无关。计算区域网格划分和波瓣型面的局部放大如图 7 所示。

2. 2 计算结果与讨论

数值模拟的 $\beta=60$ 和 $\beta=40$ 引射混合器在次流 $D100+D80$ 进口条件下对称面上的静压力分布等值线分别如图 8、图 9 所示, 由图可见:

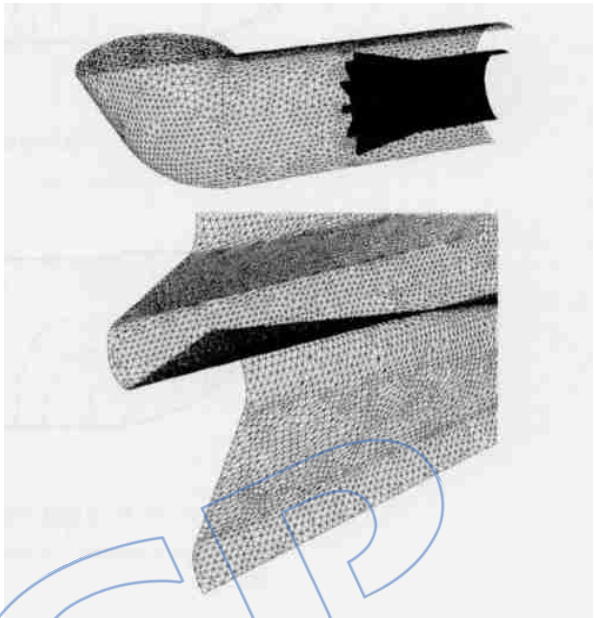


图 7 典型的计算网格及局部放大图
Fig. 7 Mesh and lobe local magnification

(1) 与图 9 相比, 图 8 转弯部分静压力较高。而且 6 线的静压力为 173.7 Pa, 图 9 相应的 7 线的静压力为 73.9 Pa, 所以图 8 的转弯附近的流道截面明显堵塞, 有效的流通截面积减小。次流, 特别是图 8 中底部的被引射的次流, 受到了严重堵塞。

(2) 图 8 中波瓣喷管出口附近形成的负压值明显低于图 9(参见 2 个图中对应的等值线 4), 按常理应该被引射的次流质量流量要大, 为什么引射流量比相比于图 9 反而下降了呢? 这除了本节 (1) 的原因外, 下游的较高压力对图 8 中顶部的被引射的次流也起到了阻碍流动的作用, 影响了顶部次流向下游的流动。

(3) 图 8 这样的压力场分布特点主要是由主流的射流造成的, 对主流的流动影响较小, 实验也得出 $\beta=60$ 引射器的进口流速与圆柱混合管相比变化不大。由此造成了 $\beta=60$ 的引射器的引射流量比的急剧下降。

另外, 从流场的角度看, 被引射次流在 $\beta=60$ 弯曲混合管中的流动远没有有在 $\beta=40$ 弯曲混合管中的流动顺畅, 这从图 10 和图 11 的比较中可以看出。图 10 中底部的被引射的次流的流道被主流侵占了, 在引射器出口截面处, 次流的流动

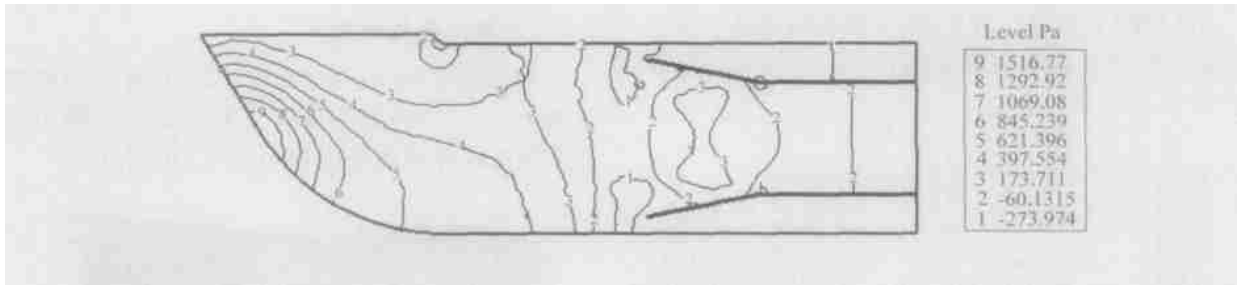


图 8 $\beta=60^\circ$ 引射混合器对称面上静压力分布图

Fig. 8 Static pressure contour for lobed $\beta=60^\circ$ bend mixer

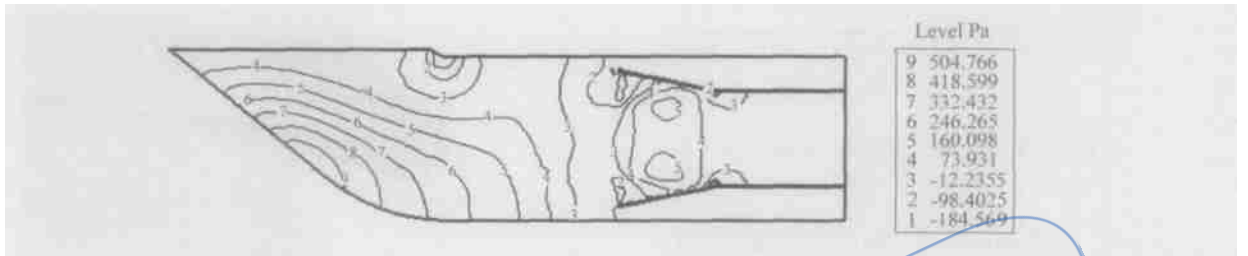


图 9 $\beta=40^\circ$ 引射混合器对称面上静压力分布图

Fig. 9 Static pressure contour for lobed $\beta=40^\circ$ bend mixer

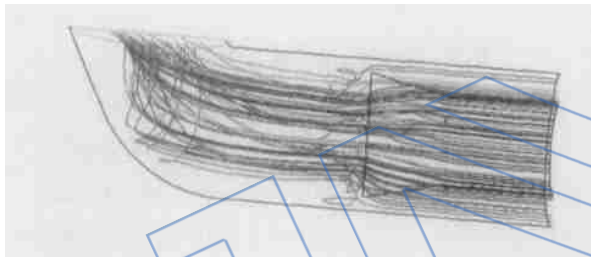


图 10 $\beta=60^\circ$ 引射混合器被引射次流流体粒子迹线图

Fig. 10 Secondary flow particle paths in lobed $\beta=60^\circ$ bend mixer

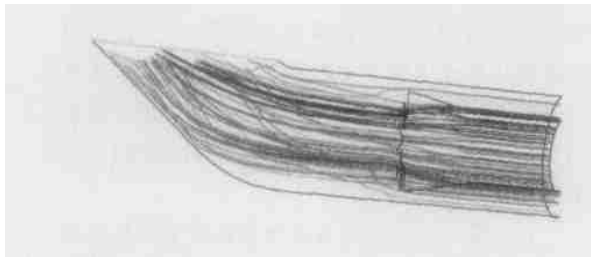


图 11 $\beta=40^\circ$ 引射混合器被引射次流流体粒子迹线图

Fig. 11 Secondary flow particle paths in lobed $\beta=40^\circ$ bend mixer

迹线仅位于弯曲混合管的内侧部分(图中上部),弯曲混合管的外侧完全被主流占领。

数值计算的 $\beta=60^\circ$ 弯曲混合管在次流 $D100 + D80$ 进口条件下,纵向对称面上底部和顶部各

测点的壁面静压系数与实验值的比较分别如图 12、图 13 所示,图中壁面静压系数定义为 $\zeta = P / (0.5 \rho u_p^2)$, u_p 为主流进口截面的速度。由图可见,在混合管的大部分位置上,计算值和实验值符合很好,仅在壁面静压系数有最大值及其附近的一小段位置两者有明显的差别,此处测量值大于计算值。图 12 中存在此差别的原因在于沿混合管底部的纵向,在混合管弯曲处,因为空气射流冲击固壁,所以此处壁面测量孔中测得的静压值含有气流动压的成分。图 13 中存在此差别的原因与图 12 相同,只不过射流来源正好是主流的射流附壁。

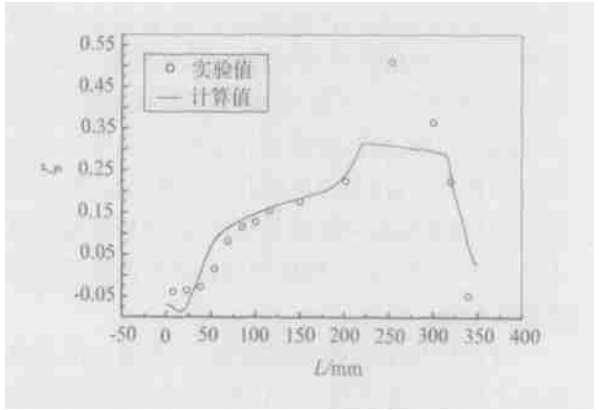


图 12 底对称面上壁面静压系数沿流向的分布
Fig. 12 Static pressure coefficient for low wall in symmetry plane vs. mixer length

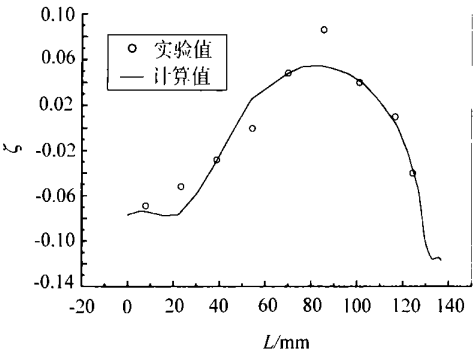


图 13 顶对称面上壁面静压系数沿流向的分布
Fig. 13 Static pressure coefficient for up wall in symmetry plane vs. mixer length

3 结 论

- (1) 在弯曲角等于 40 时, 弯曲混合管引射器的引射流量比与圆柱混合管的相当。
- (2) 在弯曲角大于 40 时, 弯曲混合管引射器的引射流量比, 相比于圆柱混合管而有较大的下降。原因在于混合管的外侧弯曲部分内壁由于主流射流的冲击形成较大的静压力, 严重影响了被引射次流向下游的流动。
- (3) 在弯曲角大于 40 时, 弯曲混合管引射器的引射流量比随弯曲角度的增加而几乎呈直线急剧下降。弯曲角度愈大, 混合管外侧弯曲部分内壁的静压力愈大, 严重阻碍、甚至隔断了弯曲混合管外侧被引射次流向下游的流动; 混合管内侧弯曲部分的被引射次流向下游的流动也受到了阻碍。
- (4) 弯曲混合管引射器的引射流量比随混合管截面比增大有先增大后下降的趋势。虽然在弯曲角大于 40 时, 峰值引射流量比小于圆柱混合管的峰值引射流量比, 但是峰值引射流量比对应的混合管截面比值却出乎意料的近似等同于圆柱混合管。对弯曲混合管引射混合器同样存在一个

最优的混合管截面比, 使引射流量比达到最大。

(5) 弯曲混合管引射器的引射流量比随次流进口截面比 σ 的增加而接近线性增大。

(6) 混合管的壁面静压系数的计算值与测量值符合良好, 说明本文建立的数值计算模型是正确的。

致谢 本文在研究过程中得到了南京航空航天大学李立国教授的支持, 在此表示衷心感谢。

参考文献:

[1] 刘友宏, 陈锋, 李立国. 圆排波瓣圆柱混合管的气动特性实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(4): 375 ~ 380.

LIU You-hong, CHENG Qiang, LI Li-guo. Experimental Investigation of Internal AeroDynamics of Periodically Axis-Symmetry Lobed Exhaust-Ejector Mixer[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2000, 32(4): 375 ~ 380.

[2] 刘友宏, 刘曦, 李立国. 圆排波瓣喷管引射器高效掺混流场数值计算[J]. 化工学报, 2003, 54(2): 147 ~ 152.

LIU You-hong, LIU Xi, LI Li-guo. Numerical Simulation of Entrained Flow Field in Circularly Lobed Nozzle [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2003, 54(2): 147 ~ 152.

[3] 刘友宏, 李立国. 有中心锥圆排波瓣引射器内流场模拟与实验比较[J]. 推进技术, 2002, 23(2): 150 ~ 153.

LIU You-hong, LI Li-guo. Numerical Simulation of Flow Field in Circularly Lobed Nozzle with Cone[J]. *Journal of propulsion technology*, 2002, 23(2): 150 ~ 153.

[4] 刘友宏, 李立国. 有无中心锥圆排波瓣喷管引射器内流场模拟与比较[J]. 航空动力学报, 2002, 17(3): 280 ~ 286.

LIU You-hong, LI Li-guo. Numerical Simulation of Flow Field in Circularly Lobed Exhaust-Ejector Mixer with/ without a Central Plug [J]. *Journal of aerospace Power*, 2002, 17(3): 280 ~ 286.

[5] Liu You-Hong. Experimental and Numerical Investigation of Circularly Lobed Nozzle with/ without Central Plug [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45 (12): 2577 ~ 2585.