

文章编号: 1000-8055(2005)06-0973-05

波瓣喷管结构参数对引射混合器性能影响的数值研究

单 勇, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 通过三维CFD数值计算, 研究了波瓣喷管几何结构参数对波瓣喷管引射-混合器的影响规律。计算结果表明: 瓣宽增加导致引射流量和波瓣出口处速度环量减小, 热混合效率降低, 但可以减小混合流动损失, 提高总压恢复系数。波瓣扩张角的改变, 对引射流量的改变因不同混合管尺寸而异, 在混合管直径较小时, 随着波瓣扩张角在 $20^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围内增大, 引射流量呈先增加后减小的趋势; 在混合管直径较大时, 引射量持续提高。扩张角的增加可提高速度环量, 但是流动混合损失增加, 总压恢复系数减小。

关键词: 航空、航天推进系统; 波瓣喷管; 引射-混合器; 数值计算

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

Numerical Investigation on the Effects of Lobe Nozzle Geometric Parameters on Mixer-Ejector Performance

SHAN Yong, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on three dimensional CFD of the lobed mixer-ejector, the effects of lobe nozzle geometric parameters on the lobed mixer-ejector performance were revealed. The results show that the increase of lobe width causes the rapid decrease of ejection ratio. The velocity circulation at lobe exit section and the thermal mixing efficiency decrease with the increase of lobe width, whereas the pressure recovery coefficient is improved by the increase of lobe width. The effect of lobe diffusion angle on the ejection ratio depends on the mixing duct diameter. For the case of small diameter mixing duct, the ejection ratio increases firstly and then decreases with the increase of lobe diffusion angle from 20 degrees to 90 degrees. For the case of large diameter mixing duct, the ejection ratio increases continuously with the increase of lobe diffusion angle. The increase of lobe diffusion angle results in the increase of velocity circulation at the lobe exit section, but it raises the mixing loss and lowers the pressure recovery coefficient.

Key words: aerospace propulsion system; lobed nozzle; mixer-ejector; numerical computation

波瓣喷管引射-混合器具有高效的引射掺混能力, 能使得主、次流在较短的距离内得到充分混

收稿日期: 2004-12-16; **修订日期:** 2005-05-20

作者简介: 单勇(1978-), 男, 江苏扬州人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事传热与红外隐身研究

合,在航空发动机上具有广泛的应用,诸如垂直/短距起飞着陆飞机的起飞增推,排气系统的尾焰红外辐射抑制以及噪声降低等^[1~3]。由于其特有的几何形状,在波瓣喷管尾缘诱导大尺度的、沿流向发展的二次环流阵列,使得两股气流形成对流型的混合^[4~6]。因此波瓣喷管几何结构参数的改变势必对引射混合器性能产生影响。

对于波瓣喷管引射-混合器的性能已经开展了大量的实验和数值研究,揭示了波瓣喷管强化掺混的机理和诸多参数的影响规律。Skebe 等^[7]曾对高幅正弦、低幅正弦和拱门形三种形状的波瓣结构进行实验研究,对比结果显示拱门形波瓣的性能最好;张靖周等^[8]通过数值计算得到了波瓣尾缘速度环量和总压恢复系数随波瓣瓣高和瓣长的变化关系。但上述研究都是针对波瓣强迫混合器的,对于波瓣喷管引射混合器,几何结构参数的影响研究尚不充分^[9,10]。本文作者曾经基于 Fluent-CFD 软件对三维波瓣喷管引射-混合器的流场和引射特性进行了数值研究^[11],与实验结果的验证表明计算方法是合理的。在此基础上,本文通过改变波瓣喷管几何结构参数,分析其对引射混合器性能的影响。

1 数值研究

1.1 计算模型

考虑到计算模型是中心对称结构,其对称面如图 1 所示,计算时只采用了一半区域。主流进口直径为 150 mm,经一收缩段与直径为 80 mm 的波瓣喷管联接,12 个波瓣沿周向均布。引射气流入入口在集气室上、下方各布置一个,入口直径分别为 80 mm 和 100 mm。考虑到波瓣喷管的复杂型面以及三维模型的复杂结构,计算中采用非结构化网格,在波瓣喷管内部及其外侧和混合管内部采用局部加密网格,整个计算区域的网格数为 884 522。

如图 1 所示,波瓣喷管共 12 瓣均匀分布,呈拱门形。在不改变波瓣出口高度 h (27 mm) 的条件下,通过改变长度 l_b ,得到 4 个不同波瓣扩张全角 α (23°, 38.5°, 50°, 90°)。在不改变波瓣出口高度 h (27 mm) 和扩张全角 (23°) 的条件下,改变瓣宽 b 分别为 4.8 mm, 7.2 mm, 10.8 mm。在同一波瓣宽度和波瓣扩张角的条件下,改变波瓣喷管出口后的混合管参数进行计算。混合管的尺寸分别为:混合管 1 (直径 125 mm, 长度 125 mm); 混合管 2 (直径 137 mm, 长度 37 mm); 混合管 3 (直径 147 mm, 长度 147 mm)。

mm, 长度 147 mm)。

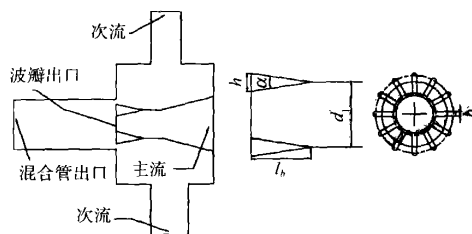


图 1 波瓣喷管引射混合器结构示意图

Fig 1 Scheme of lobed mixer-ejector

1.2 边界条件及计算方法

由于二次流依靠主流的动量驱动,二次流入口难以给定速度边界条件。考虑到外部环境的大气压力是一定的,二次流入口处的总压便可设定为环境大气压力 101 325 Pa,温度为环境温度 300 K。在初始计算时,按照进口速度为 5 m/s 假定一个均匀的进口静压,通过迭代计算对静压值进行修正,同时对进口速度进行修正。主流入口处采用速度进口边界,主流速度 U_p 取为 21 m/s,温度 620 K;混合管出口采用压力边界条件,静压设为环境大气压力,其它变量按沿流向偏导数为零处理。本文采用标准紊流模型,主流和二次流入口处的紊流动能和紊流动能耗散率按照经验关系选取^[12]:

$$k_{in} = 0.03u_{in}^2, \quad \epsilon_{in} = \frac{k_{in}^{1.5}}{0.005D}$$

这里: D 为对应于主流和二次流入口的管道当量直径,近壁区采用标准壁面函数法进行处理。对称面除周向速度设置为零外,其它变量按沿周向偏导数为零处理。流动与传热的控制方程采用一阶迎风差分格式离散,压力与速度耦合采用 SM-PL E 算法。收敛精度为 10^{-5} 。迭代收敛后,对二次流入口的质量流量进行积分,最终确定引射流量比: $\Phi = m_s/m_p$, m_s 为二次流质量流量, m_p 为主流质量流量。

2 计算结果与分析

2.1 引射流量

图 2 为保持波瓣扩张角 $\alpha = 23^\circ$ 时改变波瓣宽度所得到的引射流量比变化规律。可以看出:在不同混合管尺寸下,改变波瓣宽度对引射流量的影响很大,波瓣宽度的增加导致引射流量的急剧减小。一方面,对于同一混合管而言,增加瓣宽,意味着次流通道的面积减小,也就是截面比 λ (混合管进

口面积与波瓣喷管出口面积比)减小, 导致引射流量减小; 另一方面, 波瓣增宽后, 波瓣出口的主流速度减小, 在波瓣出口产生的负压减小, 主流卷吸次流的动量减弱, 从而引射能力减弱。上述改变波瓣宽度所带来的影响在较小的混合管截面比(混合管 1)下更为显著。若选择等截面比的 3 个状态进行比较: (1) 混合管 1, 对应的瓣宽为 4.8 mm; (2) 混合管 2, 对应的瓣宽为 7.2 mm; (3) 混合管 3, 对应的瓣宽为 10.8 mm, 则引射流量比分别为 0.795, 0.753, 0.618。

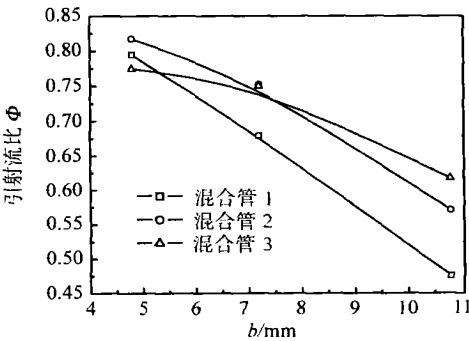


图 2 波瓣宽与引射流量比 ($\alpha=23^\circ$)

Fig 2 Lobe width vs pumping ratio ($\alpha=23^\circ$)

图 3 为保持波瓣宽度 $b=7.2\text{ mm}$ 时改变波瓣宽度所得到的引射流量比变化规律。可以看出: 波瓣扩张角的改变对引射流量的影响因不同混合管直径而异。对于较小截面比的混合管, 随着波瓣扩张角的增大, 引射流量比先增加后减小; 对于中等截面比的混合管, 随着波瓣扩张角的增大, 引射

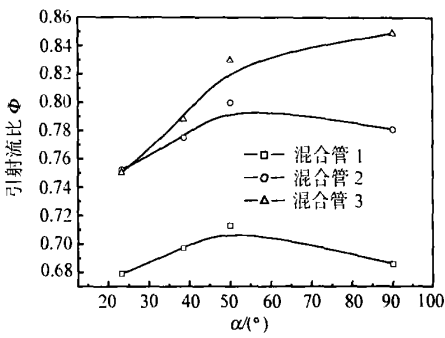


图 3 波瓣扩张角与引射流量比 ($b=7.2\text{ mm}$)
Fig 3 Lobe penetration angle vs pumping ratio ($b=7.2\text{ mm}$)

流量比也呈现先增加后减小的趋势, 但在数值上都比小截面比混合管高出 10%; 对于大截面比混合管, 随着扩张角的增大, 引射流量持续增加。

由图 4(a)~(c)可以看出在混合管直径较小时, 随着波瓣扩张角在 $20^\circ\sim 90^\circ$ 范围内增大, 沿壁面流动的次流速度增加, 主流经历了从未附混合管壁面到附混合管壁面的过程。在这过程中, 主、次流混合边界表面积是先增大后减小, 波瓣喷管出口后的低压区域是先扩大后缩小, 所以引射流量呈先增加后减小的趋势。由图 5(a)~(c)可以看出在混合管直径较大时, 大波瓣扩张角造成的主流附壁向下游推迟, 主流动量仍然能够得到充分利用。

综上所述: 引射流量的改变是各种因素的共同作用结果, 也就是说, 在某一条条件下, 波瓣某一

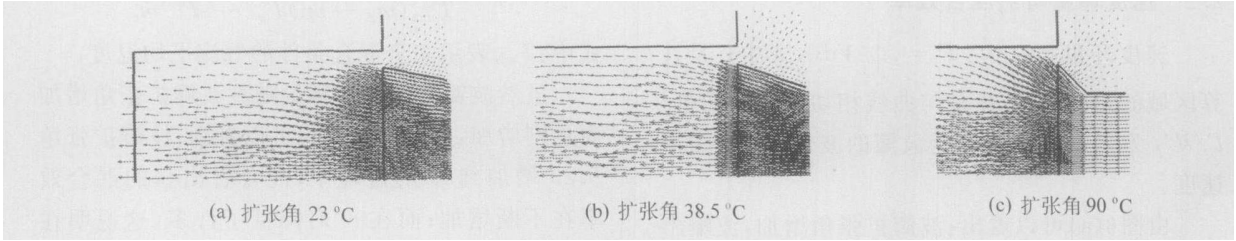


图 4 波峰位置速度矢量 (混合管 1, $b=7.2\text{ mm}$)

Fig 4 Velocity vector at lobe peak (mixing duct 1)

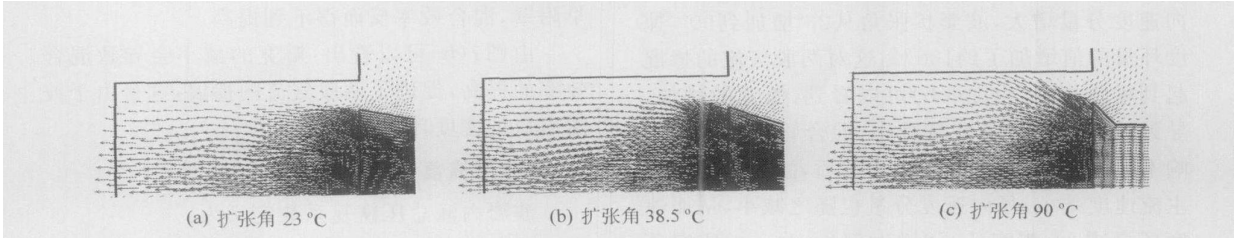


图 5 波峰位置速度矢量 (混合管 3, $b=7.2\text{ mm}$)

Fig 5 Velocity vector at lobe peak (mixing duct 3)

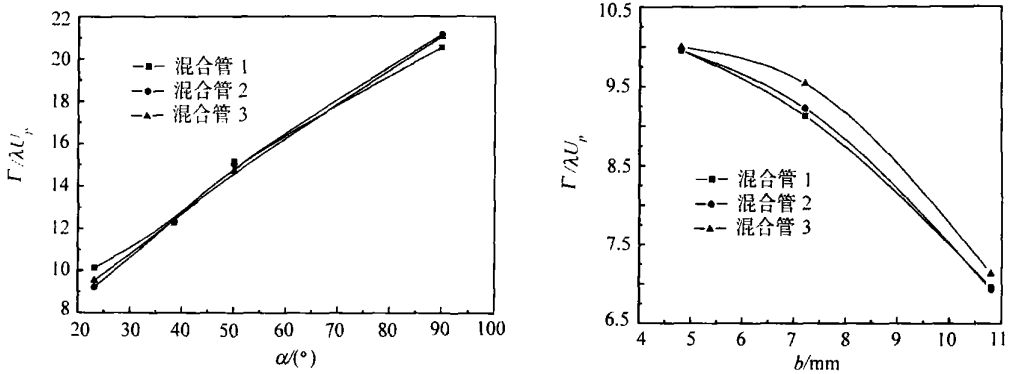


图 6 波瓣结构参数对波瓣出口速度环量的影响

Fig 6 Effects of the lobe geometry on the circulation

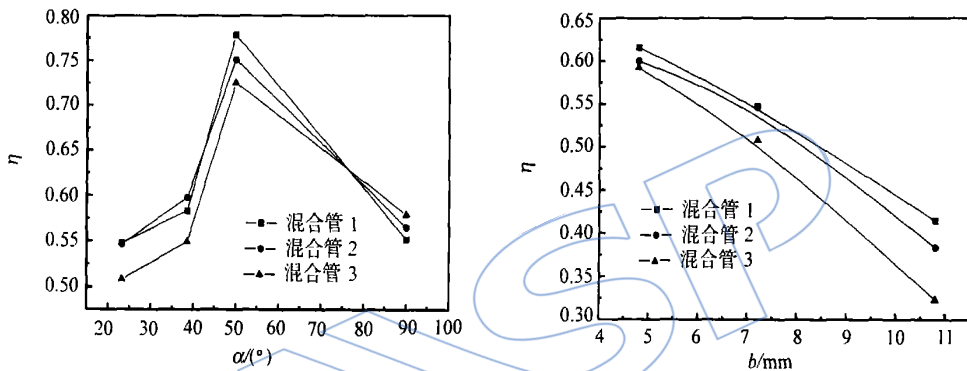


图 7 波瓣结构参数对混合管出口处混合效率的影响

Fig 7 Effects of the lobe geometry on the mixing efficiency at mixing duct outlet

参数的变化引起引射流量改变的规律在其它条件改变后这一规律也将改变。

2 2 速度环量与热混合效率

速度环量定义为: $\Gamma = \oint \mathbf{v} \cdot d\mathbf{s}$, 式中 c 是计算区域的封闭曲线, $\mathbf{v}$ 是与曲线相切的速度向量, $\Gamma/\lambda U_p$ 为无量纲化数, λ 为波瓣的波长, U_p 为主流速度。

由图6(a)可以看出: 波瓣扩张角增加, 波瓣出口速度环量的急剧增加, 且随混合管直径的变化不明显。这是由于扩张角增加后内外涵气流的径向速度分量增大, 波瓣扩张角从23 增加到90°, 速度环量的值增加了约100%, 这对两股气流的掺混起到增强作用。由图6(b)可以看到: 瓣宽的增加, 导致波瓣出口速度环量减小, 混合管直径对其影响不大。这是因为波瓣瓣宽增加后, 波瓣出口后的主流速度减小, 径向速度分量也随之减小, 从而速度环量减小。瓣宽从4.8增大到10.8 mm, 速度环量减小了约30%。

热混合效率是评价主流和次流的混合均匀程

度, 定义为:

$$\eta = \frac{\int T^{0.5} dm - T_p^{0.5} - T_s^{0.5} m_s}{T_{\text{mix}}^{0.5} (m_p + m_s) T_p^{0.5} - T_s^{0.5} m_s}$$

式中: T_{mix} 表示完全混合条件的气流平均温度。

虽然波瓣出口速度环量随着波瓣扩张角增加而急剧增加, 但是从图7(a) 可以看到: 波瓣扩张角从23 增加到50 的过程中, 混合管出口的混合效率在不断增加; 而在90 时降低了许多。这说明在扩张角太大时(如90°), 波瓣出口处虽然产生了较高的速度环量, 但是由于主流在下游不远处就过早附壁, 混合效率反而得不到提高。

由图7(b) 可以看出: 瓣宽的减小会导致混合效率的提高, 促进了两股气流的掺混, 这是由于波瓣出口的速度环量增强所致。

2 3 总压恢复系数

波瓣内涵总压恢复系数定义为:

$$\sigma = \frac{1}{A_{\text{out}}} \int P_{\text{out}}^* dA_{\text{out}} / \frac{1}{A_{\text{in}}} \int P_{\text{in}}^* dA_{\text{in}}$$

式中: 下标 in 为主流进口, out 为混合管出口。

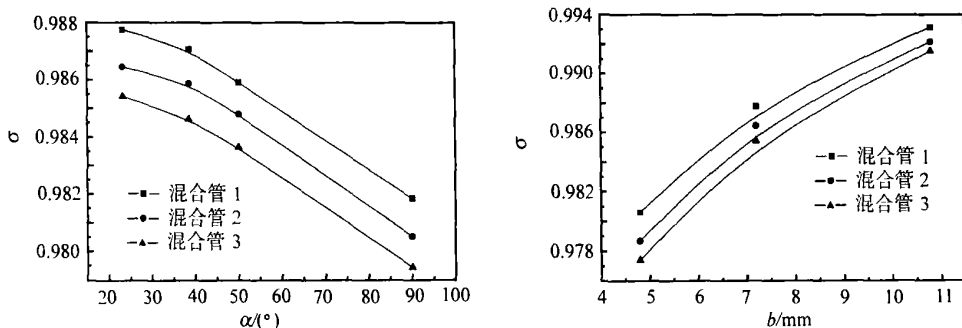


图8 波瓣结构参数对总压恢复系数的影响

Fig 8 Effects of the lobe geometry on the pressure recovery coefficient

图8(a), (b)所示为波瓣瓣宽和扩张角改变对总压恢复系数的影响规律,可以看出:扩张角的增加导致流动损失增加,总压恢复系数减小。波瓣瓣宽的增加可以减小流动损失,提高总压恢复系数。对于不同混合管,由于长度的增加,导致总压恢复系数有微弱的降低。

3 结 论

本文通过改变波瓣喷管几何结构参数,对三维波瓣喷管引射-混合器进行了数值研究,分析其对引射混合器性能产生的影响。

(1) 改变波瓣瓣宽对引射流量的影响很大,波瓣宽增加会导致引射流量的急剧减小。

(2) 波瓣扩张角的改变,对引射流量的改变因不同混合管尺寸而异。在混合管直径较小时,随着波瓣扩张角在 $20^\circ \sim 90^\circ$ 范围内增大,引射流量呈先增加后减小的趋势;在混合管直径较大时,引射量持续增加。

(3) 波瓣扩张角在 $20^\circ \sim 90^\circ$ 范围内增大,速度环量的值增加,但混合管出口处混合效率呈先增加后减小的趋势。瓣宽的增加,导致波瓣出口速度环量减小,混合管出口处混合效率随之减小。

(4) 扩张角的增加导致流动损失增加,总压恢复系数减小。波瓣瓣宽的增加可以减小流动损失,提高总压恢复系数。对于不同混合管,由于长度的增加,导致总压恢复系数有微弱的降低。

参考文献

[1] Presz W M, Reynolds G, McComick D C. Thrust Augment Using Mixer-Ejector-Diffuser Systems[R]. AIAA Paper 94-0020.

[2] Presz W M. Mixer/Ejector Noise Suppressors[R]. AIAA Paper 91-2243.

[3] 张靖周, 李立国, 高潮, 等. 波瓣喷管红外抑制系统的实验研究[J]. 航空动力学报, 1997, 12(2): 212~214.
ZHANG Jing-zhou, LI Lir-gao, GAO Chao, et al. An Experimental Study on a Lobed Nozzle of an Infrared Suppression System[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(2): 212~214.

[4] McComick D C, Bennett J C. Vortical and Turbulent Structure of a Lobed Forced Mixers Free-Shear Layer[J]. AIAA Journal, 1994, 32(9): 1852~1859.

[5] Tsui Y Y, Wu P W. Investigation of the Mixing Flow Structure in Multilobe Mixers[J]. AIAA Journal, 1996, 34(7): 1386~1391.

[6] Hu H, Saga T, Kobayashi T. Investigation of the Vortex Structures Downstream of a Lobed Nozzle by Mean of Dual-Plane Stereoscopic PIV[R]. 4th-International Symposium on Particle Image Velocimetry, Germany, Paper-1020, Sep, 2002.

[7] Skebe S A, Paterson R W, Barber T J. Experimental Investigation of Three-Dimensional Forced Mixer Lobe Flow Fields[R]. AIAA Paper 88-3785-CP, 1988.

[8] 张靖周, 谢志荣, 李立国. 三维强迫混合波瓣结构流场的数值计算[J]. 推进技术, 2001, 22(3): 225~228.
ZHANG Jing-zhou, XIE Zhi-rong, LI Lir-gao. Numerical Investigation of Three-Dimensional Flow Fields for Forced Mixer Lobe Configuration[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(3): 225~228.

[9] Presz W M, Morin B L, Blinn R F. Short efficient ejector systems[R]. AIAA Paper 87-1837.

[10] Skebe S A, McComick D C, Presz W M. Parameter Effects on Mixer-Ejector Pumping Performance[R]. AIAA Paper 88-0188.

[11] 单勇, 张靖周. 波瓣喷管引射-混合器的数值研究与验证[J]. 推进技术, 2004, 25(4): 320~324.
SHAN Yong, ZHANG Jing-zhou. Numerical Computation and Examination of a Lobed Mixer-Ejector[J]. Journal of propulsion technology, 2004, 25(4): 320~324.

[12] 陶文铨. 数值传热学[M]. 陕西西安: 西安交通大学出版社, 1992.