

文章编号: 1000 8055 (2009) 09-1917-06

后缘切角对波瓣混合器性能影响

刘友宏¹, 郭楠¹, 李江宁², 才娟², 徐兴平²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 建立了某实用的后缘切角波瓣混合器流场数值计算模型, 通过三维数值模拟研究, 得到了波瓣后缘切角的角度值对于波瓣混合器流场热混合效率和总压恢复系数的影响规律. 结果表明: 后缘切角在 2.5° 至 15° 之间变化时, 热混合效率随切角角度的增大而增大, 总压恢复系数随切角角度的增大而减小; 后缘切角在 15° 至 60° 之间变化时, 热混合效率随切角角度的增大而减小, 总压恢复系数随切角角度的增大而增大.

关 键 词: 波瓣混合器; 后缘切角; 热混合效率; 总压恢复系数

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Effect of cut angles at trailing edge on the performance of a lobed mixer

LIU You-hong¹, GUO Nan¹, LI Jiang-ning², CAI Juan², XU Xing-ping²

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Aeroengine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The principle of effect of different cut angles at trailing edge of a practical lobed mixer on the thermal efficiency and the total pressure recovery coefficient was studied by 3D-CFD (computational fluid dynamics) numerical simulation. The results show that, when the angles cut at trailing edge of the lobed mixer vary from 2.5° to 15° , the thermal efficiency augments and the total pressure recovery coefficient decline as the angle increases, and when the cut angles vary from 15° to 60° , the thermal efficiency declines and the total pressure recovery coefficient augments as the angle increases.

Key words: lobed mixer; cut angle at trailing edge; thermal efficiency; total pressure recovery coefficient

波瓣混合器能够使主、次流在较短的轴向距离内实现充分的混合, 在航空发动机上有广泛的应用, 比如增加垂直/短距起着陆飞机的推力, 抑制发动机排气系统尾焰的红外辐射以及降低噪声等. 由于其特殊的几何形状, 波瓣下游流场能产生大尺度且沿流向发展的流向涡, 这是主、次流能够实现充分混合的重要因素. 所以, 波瓣混合器的几何结构参数和主、次流的流动参数共同决定了

其性能.

目前关于不同的几何参数对波瓣混合器性能的影响, 国内外已经开展了许多的实验和数值模拟研究^[1-4]. 但对于不同角度的后缘切角如何影响波瓣混合器的混合性能, 目前研究很少. 作者认为, 波瓣混合器的混合效率除主要取决于波瓣下游流向涡的强度外, 波瓣下游法向涡的轴线初始长度, 即主、次流初始剪切混合周长对混合效率也

收稿日期: 2008 09 12; 修订日期: 2008 12 11

基金项目: 航空科技创新基金重点项目(07B51002)

作者简介: 刘友宏(1963-), 男, 江苏东台人, 教授, 博士, 主要从事传热传质、红外、力学等研究.

有较大的影响. 而后缘切角能有效地增加初始剪切混合周长, 因此, 对一定形状和结构的波瓣混合器, 存在一个最佳的后缘切角角度, 使波瓣混合器混合效率最大. 为此, 本文使用商业 CFD(computational fluid dynamics) 软件模拟了某实用的波瓣混合器在相同流动参数工况下、不同角度后缘切角的三维流场, 并结合混合效率以及总压损失两个性能参数, 来定量研究后缘切角对混合器性能的影响.

1 数值研究

1.1 计算模型

由于波瓣混合器具有周期性对称结构, 所以计算时采用含一个完整波瓣的混合器区域作为计算区域, 如图 1 所示. 主、次流入口均为环形通道. 在混合器入口处, 波瓣喷管直径为 756 mm, 内机匣直径为 955 mm, 中心锥直径为 406 mm. 该混合器出口与入口的距离为 962. 6 mm, 为了使数值模拟结果更接近于真实流场, 降低出口给定的边界条件对内部流场的影响, 同时也为了获得更好的收敛性, 将计算模型沿流向延伸, 将该长度值延长到 2000 mm. 波瓣混合器共 22 个瓣结构, 沿周向均匀分布. 在保持波瓣扩张全角 α 不变的情况下, 改变波瓣的后缘切角 β 分别为: 0° , 2.5° , 5° , 15° , 25° , 35° , 45° , 60° , 得到一系列经过后缘修形的波瓣结构, 本文对这一系列波瓣混合器采用商业软件 FLUENT 进行了数值模拟研究.

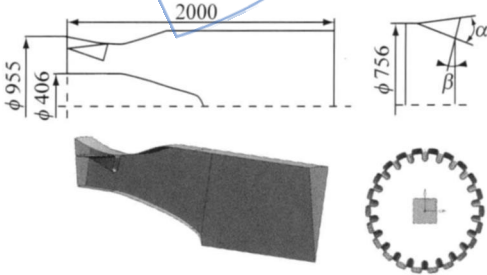


图 1 计算区域及波瓣结构

Fig. 1 Structure of calculation domain and lobe

考虑到三维波瓣模型的复杂性, 选用非结构化网格进行计算区域网格划分. 对波瓣壁面、机匣壁面以及中心锥壁面采用 5 层 prism 边界网格加密, 对波瓣出口邻近区域进行局部加密, 最终网格划分结果如图 2 所示, 网格总数约为 72.5 万.

1.2 边界条件及计算方法

波瓣混合器主、次流气体分别为燃气和空气.

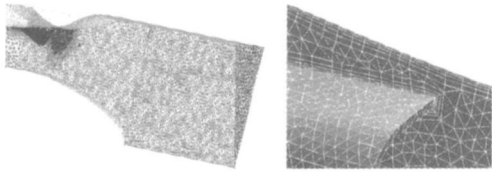


图 2 计算区域的三维网格及其局部放大图

Fig. 2 Mesh and its local magnification

由于主、次流速度不大, 马赫数较小, 可采用不可压气体来处理, 内、外涵入口使用速度入口边界条件, 出口为自由出流边界条件. 根据计算模型的对称性, 两波峰纵截面采用对称边界条件. 波瓣、中心锥及内机匣壁面采用固壁边界条件. 在计算工况下, 已知的入口参数如表 1 所示, 表中 H , V , p , T 分别表示飞行高度、速度、压力和温度.

表 1 边界条件
Table 1 Boundary conditions

Case	H/km	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p/MPa	T/K
外涵	18	20 97	0.119	373
内涵	18	54 36	0.088	722

根据 Hui Hu, Nathan J. Cooper 等人^[5]对某模型波瓣下游流场的 PIV (partial imaging velocimetry) 测量数据, 与使用不同湍流模型数值模拟的该波瓣流场, 进行对比, 发现 Realizable $k-\epsilon$ 模型与实验结果吻合最好, 精度最高. 所以本文采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 在壁面附近选用标准壁面函数进行本文波瓣混合器的数值模拟研究. 主流燃气和次流空气的混合采用 MIXTURE 模型. 为了获得更高的精度, 流动方程对流项采用二阶迎风格式进行离散, 其他方程采用一阶迎风格式进行离散. 流动和压力的耦合采用 SIMPLE 算法. 收敛精度标准为 10^{-5} .

2 计算结果与分析

2.1 流场分析

波瓣混合器在不同的后缘切角下计算的流场分别如图 3 所示, 为简洁起见, 图 3 中仅给出了后缘切角 β 分别为: 0° , 5° , 15° , 45° 工况下的结果. 在图 3 中, x 为流向, 坐标原点位于波瓣出口截面, λ 为一个波瓣周期对应的波瓣喷管入口直径的弧长. 由图 3 可以看出, 在 $x/\lambda = 0$ 位置, 当后缘切角 β 为 0° (也就是不切角的波瓣, 同时作为本文比较基准的标准波瓣) 时, 波瓣混合器其主、次流产生了较大的径向速度分量, 为下游流向涡的形成提

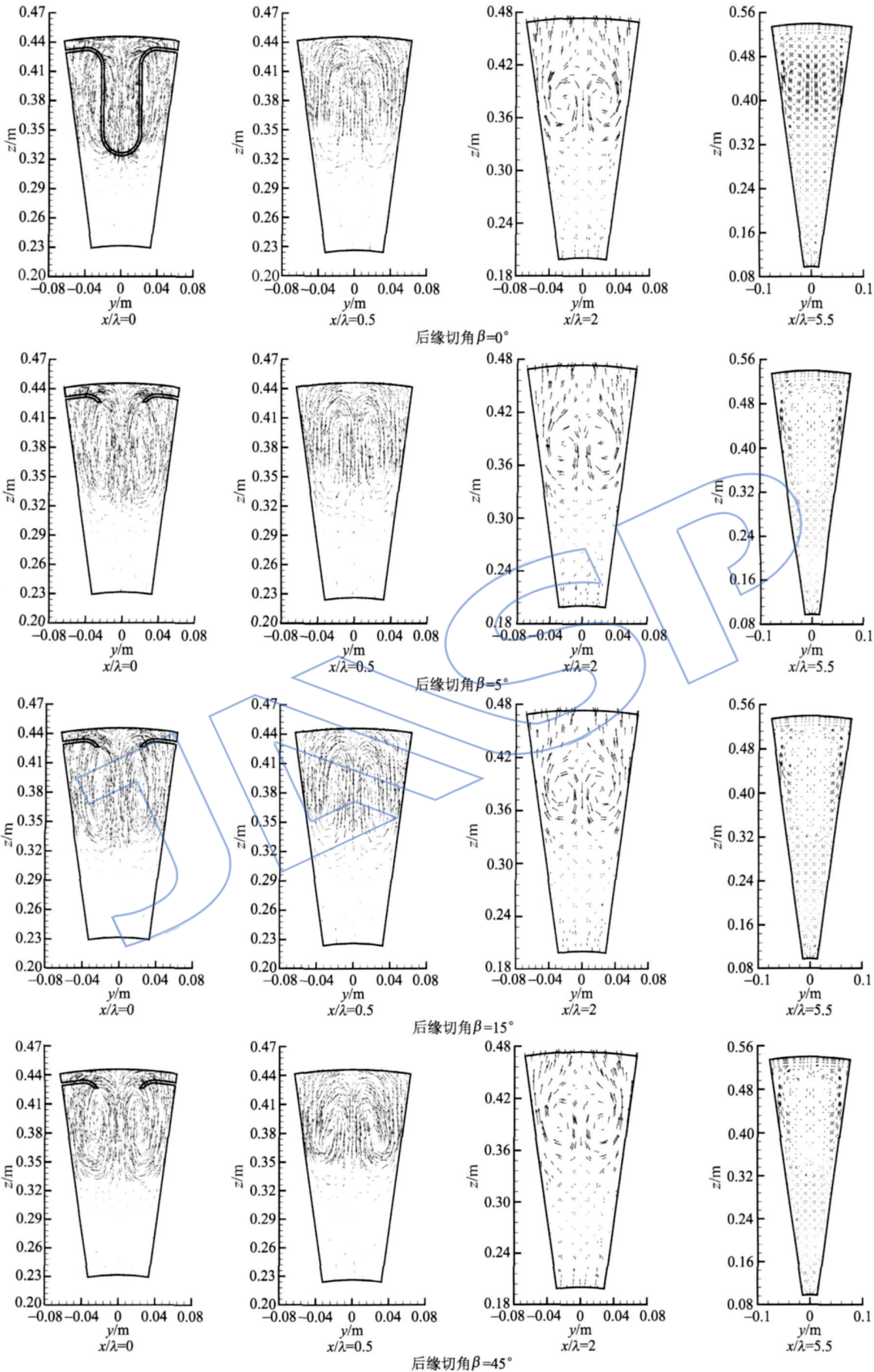


图 3 沿流向各个横截面速度矢量图

Fig.3 Velocity vector at different cross sections

供了有利条件;而当其它后缘切角 β 不为 0° 时,在波瓣混合器出口截面处,由于主、次流已经开始接触混合,所以形成了强度不一的流向涡。

在 $x/\lambda=0.5$ 的截面上,各计算模型的流向涡均具有较大的强度,并且向外扩散发展。在 $x/\lambda=2$ 的截面上,流向涡的强度开始减弱;在 $x/\lambda=5.5$ 的截面处,流向涡的强度已经很小,趋于消失。

描述横截面上流向涡的强弱可以用速度环量来表示: $\Gamma = \oint_C V ds = \int_A \Omega_s dA$, 式中 c 为包围半个波瓣的封闭积分曲线, V 是与封闭积分曲线相切的速度向量, Ω_s 为封闭积分曲线的流向涡量, A 为封闭积分曲线的面积。速度环量等效于流向涡量的面积分,沿着流动方向速度环量因能量耗散而衰减,最后趋于消失。

根据 Skebe 等人^[6] 的研究,流向涡的初始环量 Γ_0 可以表示为

$$\Gamma_0 = 4 \bar{u} h \tan \frac{\alpha}{2} \tag{1}$$

式中 $\bar{u}$ 为主、次流的平均速度 $\bar{u} = \frac{u_{hot} + u_{cold}}{2}$, u 为速度,下标 hot, cold 分别表示主流(热流体)、次流(冷流体); h 为波瓣的瓣结构高度,对于有后缘切角的波瓣混合器, h 为主、次流接触处波瓣的瓣结构有效高度; α 为波瓣扩张角。对本文研究的波瓣混合器, h 随着后缘切角角度的增大而减小,由式(1)可见,后缘切角大则初始流向涡强度小,后缘切角小则初始流向涡强度大。然而,波瓣混合器的混合效率除主要取决于波瓣下游流向涡的强度外,波瓣下游法向涡的初始长度,即主、次流初始剪切混合周长对混合效率也有较大的影响。因为波瓣上下均具有扩张角,所以一般情况下,后缘切角大则初始剪切混合周长小,后缘切角小则初始剪切混合周长小。因此,对一定形状和结构的波瓣混合器,存在一个最佳的后缘切角角度,使得混合效率最大,当然带来的流动损失也较大,这在工程实际应用中需要综合衡量。

2 2 热混合效率

流体混合效率是衡量混合器性能的最直接和最重要的指标^[7],然而在工程实际中因为流体成分测量不方便,所以应用并不广泛。本文采用热混合效率来衡量混合器性能,虽然它的内涵与流体混合效率的不完全等价。热混合效率用于评价主流和次流热混合的均匀程度, Frost T. H.^[8] 根

据 1D 流动模型推导、定义的热混合效率为

$$\eta_T = \frac{\int T^{0.5} d\dot{m} - T_{hot}^{0.5} \dot{m}_{hot} - T_{cold}^{0.5} \dot{m}_{cold}}{T_{mix}^{0.5} (\dot{m}_{hot} + \dot{m}_{cold}) - T_{hot}^{0.5} \dot{m}_{hot} - T_{cold}^{0.5} \dot{m}_{cold}} \tag{2}$$

式中 T_{hot} 为热流体的温度, T_{cold} 为冷流体的温度, $\dot{m}_{hot}$ 为热流体的质量流量, $\dot{m}_{cold}$ 为冷流体的质量流量, T_{mix} 为冷、热流体完全混合后的温度,它的定义为

$$T_{mix} = \frac{T_{hot} \dot{m}_{hot} + T_{cold} \dot{m}_{cold}}{\dot{m}_{hot} + \dot{m}_{cold}} \tag{3}$$

但是,在使用此方法处理小流量,也就是 3D 数值模拟得到的每个单元流量的时候,混合效率的计算结果可能会出现很大的波动,由此带来很大的误差,需要进行改进。根据能量守恒、方差的物理意义以及无量纲化原理(具体的研究过程另文发表),将式(1)修正如下:

$$\eta_T = 1 - \frac{\int (T - T_{mix})^2 d\dot{m}}{T_{hot}^2 \dot{m}_{hot} + T_{cold}^2 \dot{m}_{cold} - T_{mix}^2 (\dot{m}_{hot} + \dot{m}_{cold})} \tag{4}$$

根据式(4),可得到不同后缘切角波瓣混合器沿流向的热混合效率变化规律曲线,如图 4 所示。图 5 为图 4 在波瓣混合器出口截面附近(不包括延长区域)温度混合效率的局部放大图。

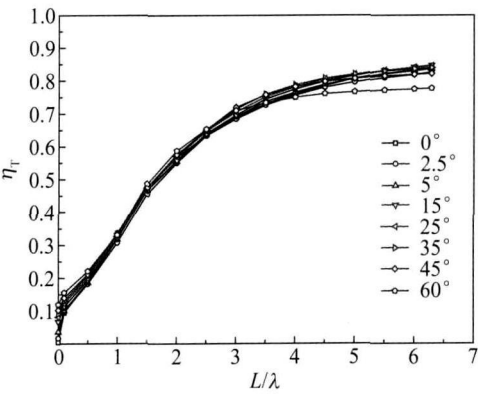


图 4 不同后缘切角的热混合效率

Fig. 4 Thermal efficiency at different cut angles

在图 4 中,在不同的流向距离上不同的切角对温度混合效率的影响是不同的。总体而言,当混合长度较小时,切角愈大,混合效率愈高;当混合长度很大时,切角愈大,混合效率愈低;当混合长度中等时,在本文切角范围内温度混合效率随切角的增加各有升降,存在一个最优的后缘切角。在每种给定的混合器结构和尺寸下,均存在最佳的尾缘切角角度,使混合效率最大。

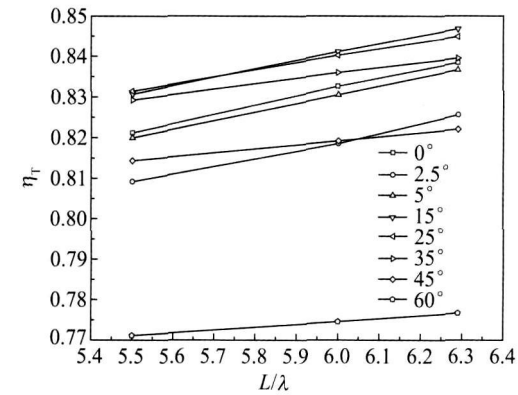


图 5 混合器出口截面附近热混合效率局部放大图
Fig. 5 Local magnification of thermal efficiencies around the outlet section of the lobed mixer

当混合长度较小时, 切角愈大, 混合效率愈高. 这主要是因为内、外涵气体从开始接触混合处到波瓣出口截面的距离随后缘切角的增大而增加, 而且由于这段混合距离很短, 主、次流刚开始接触, 环量很大, 所产生的流向涡的强度很大, 所以混合效率随后缘切角的增大而增加.

当混合长度较大时, 在切角大于某一数值后切角愈大, 混合效率愈低. 当混合长度中等时, 在本文切角范围内温度混合效率随切角的增加各有升降. 这是因为波瓣混合主要依靠流向涡, 其次依靠法向涡. 流向涡强度的大小仅取决于流场中环量的大小; 而法向涡对混合作用的贡献大小主要取决于主次流初始剪切混合周长. 在波瓣尾缘, 内外涵两股流体将要接触时, 流体的初始环量 Γ_0 最大, 随着流动距离的增加, 环量逐渐减小, 最后消失. 因此, 在距离波瓣出口不远的一段距离内, 流向涡含能大, 对于主、次流混合的强化作用十分明显, 混合效率迅速增大. 随着流向距离的增大, 流向涡逐渐耗散直到消失, 此时混合效率的增长变缓. 当流向涡消失后, 流场混合主要依靠扩散, 此时混合效率沿流向的增长十分缓慢.

波瓣有效高度 h 随着后缘切角角度的增大而减小, 由式(1)可知, 流向涡初始环量 Γ_0 减小, 从而流向涡的强度减小, 这就说明了当切角太大, 超过了某一切角值后, 混合效率肯定很低, 这在混合长度较大时肯定表现出来. 但是, 当后缘切角不太大时, 相对于后缘没有切角的标准波瓣混合器, 波瓣下游初始环量几乎没有变化, 而法向涡的初始长度, 即主、次流初始剪切混合周长增加较多, 这种结构则有可能达到最大的混合效率.

由图 5 可见, 本文研究的波瓣混合器, 在其给定的波瓣下游混合长度范围内, 当后缘切角为 15°

时混合效率达到最大值 84.7% .

2.3 流动损失

波瓣混合器总压恢复系数定义为

$$\sigma = \frac{1}{\dot{m}_{\text{mix}}} \frac{\int p^*_{\text{mix}} d\dot{m}_{\text{mix}}}{\frac{1}{\dot{m}_{\text{in}}} \int p^*_{\text{in}} d\dot{m}_{\text{in}}} \tag{5}$$

式中 $\dot{m}$ 为质量流量, p^* 为总压, 下标 in 表示该值为波瓣混合器入口处的值, 下标 mix 表示该值为波瓣出口下游主、次流接触混合后, 垂直于流向的横截面上的值. 图 6 为根据式(5)计算的波瓣混合器在波瓣出口截面下游不同距离内总压恢复系数的变化规律. 在混合初期, 由于流向涡强度大且不断向外发展扩散, 主、次流得以迅速混合, 流体微团之间摩擦剧烈, 能量损失大, 总压恢复系数迅速下降, 所以这段的曲线较为陡峭. 在下游, 随着流向涡不断强化主、次流混合, 其强度也沿流向逐渐减弱, 由此混合速度逐渐降低, 沿流向的能量损失程度变缓, 所以总压恢复系数曲线变得平坦.

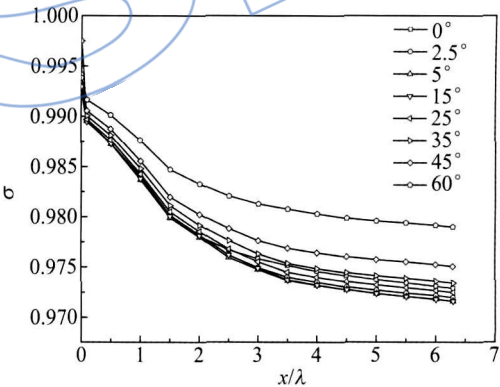


图 6 不同后缘切角的总压恢复系数
Fig. 6 Total pressure recovery coefficient of different cut angles

图 7 为图 6 在混合器出口截面附近的局部放大图. 由图可见, 在其给定的波瓣下游混合长度范围内, 后缘切角 β 在 $2.5^\circ \sim 15^\circ$ 之间变化时, 混合器出口处的总压恢复系数随 β 的增大而减小. 总压恢复系数在 β 为 15° 时达到最小值 0.9716 . 当 β 在 $15^\circ \sim 60^\circ$ 之间变化时, 混合器出口处总压恢复系数随 β 的增大而增加, β 为 60° 时的总压恢复系数明显高于 β 为其他角度时的值. 结合本文 2.2 节中关于热混合效率的研究结果可知, 混合器出口处热混合效率的提高说明流场中流动损失的增大, 即表现为总压恢复系数的减小.

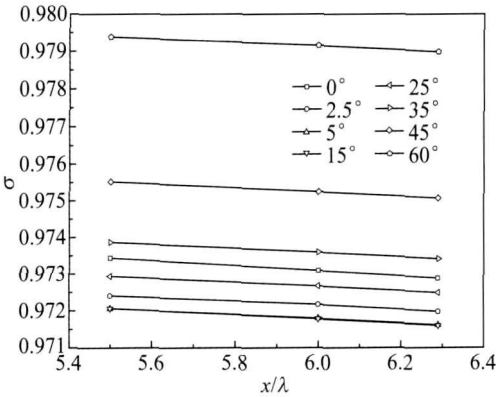


图 7 混合器出口附近的总压恢复系数
Fig. 7 Local magnification of the total pressure recovery coefficients around the outlet section of the lobed mixer

3 结 论

本文建立了波瓣后缘切角混合器的数值计算模型,对其三维流场进行了数值研究,得到了如下几点结论:

- 1) 进行后缘切角修形后的波瓣混合器,其下游流向涡的发展及耗散规律与不切角的基本相同,只是流向涡的强度不同,但是对法向涡有很大的影响.后缘切角大则流向涡强度小、法向涡对混合的贡献增大;后缘切角小则流向涡强度大、法向涡对混合的贡献减小.
- 2) 后缘切角在 2.5°至 15°之间变化时,随着切角角度的增大,热混合效率逐渐增大,流动损失增大,总压恢复系数逐渐减小.
- 3) 后缘切角在 15°至 60°之间变化时,随着切角角度的增大,热混合效率逐渐减小,流动损失减小,总压恢复系数逐渐增大.
- 4) 后缘切角为 15°时,本文波瓣混合器出口处的热混合效率达到最大值,为 84.7%;总压恢复系数达到最小值,为 0.9716.在工程设计中,可

以根据对热混合效率、总压恢复系数和重量的不同侧重,合理选取后缘切角的角度值.

参考文献:

[1] 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 Youhong, LI Ligu. 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 (in Chinese)

[2] 刘友宏,陈锵,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 Youhong, CHEN Qiang, LI Ligu. Experimental investigation of internal aerodynamics of periodically axis symmetry lobed exhaust ejector mixers[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 32(4): 375-380 (in Chinese)

[3] LIU Youhong. Experimental and numerical investigation of circularly lobed ejector with bend mixer[J]. Heat Transfer Asian Research, 2007, 36(7): 387-397

[4] LIU Youhong. Experimental and numerical research on high pumping performance mechanism of lobed exhaust ejector[J]. International Communication of Heat and Mass Transfer, 2007, 34: 197-209

[5] Cooper N J, Merati P, Hu H. Numerical simulation of the vortical structures in a lobed jet mixing flow[R]. AIAA 2005-635

[6] Skebe S A, Paterson R W, Barber T J. Experimental investigation of three dimensional forced mixer lobed flow fields[R]. AIAA Paper 88-3785

[7] 刘友宏,谢翌.菊花形混合器混合效率理论计算研究[J].航空动力学报,2009,24(4): 740-745.
LIU Youhong, XIE Yi. Analytical solution of mixing efficiency of lobed mixer[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 740-745. (in Chinese)

[8] Frost T H. Practical bypass mixing systems for fan jet aerorengines[J]. Aeronautical Quarterly, 1966, 17: 141-160