

文章编号: 1000-8055(2002) 03-0280-07

有无中心锥圆排波瓣喷管引射器内 流场模拟与比较

刘友宏¹, 李立国²

(1. 清华大学 工程力学系, 北京 100084;

2. 南京航空航天大学 动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 用数值模拟手段研究了中心锥增进圆排波瓣喷管引射器内热混合流场的影响, 推导了非正交曲线坐标系下有无中心锥圆排波瓣喷管引射器内流场的基本方程, 采用 SIM PLEC 算法和一种完全压力修正方法, 以物理平面速度分量作为求解变量, 以逆变速度作为界面流速, 在同位网格上求解了有中心锥波瓣喷管引射器内的流场控制方程, 并与实验测量结果和无中心锥的数值计算结果进行了比较。结果表明, 计算结果与测量值符合较好。有中心锥的低温等值线可以延伸至中心轴线, 与在没有中心锥的情况下, 混合管中心轴线处的温度始终保持为高温状态有很大的不同。从而找到了有中心锥的圆柱混合管热混合效率大于没有中心锥的根本原因。

关键词: 中心锥; 波瓣; 引射器; 热混合效率

中图分类号: V 231. 3; V211. 3

文献标识码: A

Numerical Simulation of Flow Field in Circularly Lobed Exhaust-Ejector Mixer with/without a Central Plug

LIU You-hong¹, LI Li-guo²

(1. Tsinghua University, Beijing 100083, China;

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

Abstract: The role of the central plug in promoting the thermal mixing between the primary and the secondary flows of the circularly lobed nozzle was assessed mainly by the numerical simulation. The fundamental equations were derived in the body-fitted nonorthogonal coordinates from cylindrical coordinates for the circularly lobed exhaust-ejector mixers with/without a plug in the center of the lobe. These equations were solved using SIM PLEC and a kind of complete pressure correction algorithm in the nonstaggered grids, with the velocity components in physical plane as solving variables and the contravariant velocity components as boundary velocities of the controlled volume. Better agreements have been observed between the numerical results and the experimental values. The numerical results show that there are great differences between the temperature contour in the outer section of the column mixer with the plug in which the low temperature contour lines can reach the center line of the mixer, and that in the outer section of column mixer without the plug in which the elevated temperature contour lines always lie in the central zone. This is the basic reason why the thermal mixing efficiency of the mixer with the plug is much more than that of the mixer without the plug.

收稿日期: 2001- 06- 20; 修订日期: 2001- 10- 08

作者简介: 刘友宏(1963-), 男, 江苏东台人, 清华大学工程力学系副教授, 博士。

Key words: plug; lobe; exhaust-ejector; thermal mixing efficiency

1 引言

次流的充分混合,因此在发动机排气降噪及红外抑制系统中有广泛的应用前景。近年来国际上对直排波瓣喷管引射器已有研究,对圆排波瓣喷管引射器研究报道较少。对于中心锥结构在增进引射混合器性能方面,到目前为止尚未见到报道。文献[1]的实验结果表明:与无中心锥的圆排波瓣喷管引射器相比,有中心锥的圆排波瓣喷管引射器的引射流量比有显著的提高。本文通过数值模拟手段研究中心锥对引射器中掺混流场和热混合效率的影响。

2 数值计算

2.1 基本方程

波瓣喷管引射器内的流场可认为是三维、不可压缩的湍流。湍流模型使用 $k-\epsilon$ 模型。由链导法则, 通用变量 Φ 在曲线坐标系 $\xi(\xi, \eta, \zeta)$ 下的守恒方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{Jr} \left\{ \frac{\partial (\rho U_1 \Phi)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\rho U_2 \Phi)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\rho U_3 \Phi)}{\partial \zeta} \right\} = \\ & \frac{1}{Jr} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\Gamma \Phi}{Jr} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \xi} B_1^1 + \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} B_2^1 + \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} B_3^1 \right) \right] + \right. \\ & \quad \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\Gamma \Phi}{Jr} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \xi} B_1^2 + \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} B_2^2 + \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} B_3^2 \right) \right] + \\ & \quad \left. \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\Gamma \Phi}{Jr} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \xi} B_1^3 + \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} B_2^3 + \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} B_3^3 \right) \right] \right\} + S_\Phi \end{aligned} \quad (1)$$

式中, J 是坐标变换的 Jacob 矩阵, U_i 表示 ξ_i 方向的逆变速度:

$$\begin{aligned} U_1 &= (z\eta r\zeta - z\eta g\eta)u_1 + r(\theta_{\mathbb{K}}\zeta - \theta_{\mathbb{Z}}\eta)u_2 + \\ &\quad r(r\eta\theta_{\mathbb{K}} - r_{\mathbb{K}}\eta)u_3 \\ U_2 &= (z\eta g\zeta - z_{\mathbb{K}}r\zeta)u_1 + r(\theta_{\mathbb{K}}\zeta - \theta_{\mathbb{Z}}\zeta)u_2 + \\ &\quad r(r\zeta\theta_{\mathbb{K}} - r_{\mathbb{K}}\theta_{\mathbb{K}})u_3 \\ U_3 &= (z_{\mathbb{K}}r\eta - z\eta r_{\mathbb{K}})u_1 + r(\theta_{\mathbb{K}}\eta - \theta_{\mathbb{Z}}\xi)u_2 + \\ &\quad r(r_{\mathbb{K}}\theta_{\mathbb{K}} - r\eta\theta_{\mathbb{K}})u_3 \end{aligned} \quad (2)$$

B_i^j 表示下列乘积:

$$B_i^j = \beta_k^i \beta_k^j \quad (3)$$

$$\beta_i^j = r^k \left[Cof \frac{\partial z_i}{\partial \xi_k} \right] \quad (4)$$

式中, $Cof\left[\frac{\partial z_i}{\partial \xi_h}\right]$ 表示坐标变换 Jacob 矩阵中 $\frac{\partial z_i}{\partial \xi_h}$ 的余因子, 并且有:

$$\begin{aligned} r_k &= 1 \quad i = 1 \quad (\text{i.e., } z_i = \theta) \\ r_k &= r \quad i = 2, 3 \quad (\text{i.e., } z_i = r, z) \end{aligned} \quad (5)$$

动量、温度、 k 和 ϵ 输运方程的相应源项表达式见文献 [1]。

2.2 数值方法和网格

本文采用贴体曲线坐标系、SIMPLEC 算法和完全压力修正^[2],在同位网格上求解了上述不可压 N-S 方程,以物理平面速度分量作为求解变量,以逆变速度作为界面流速^[3]。扩散项采用界面上被求变量呈线性变化的型线假设;交叉扩散项同样采用线性型线离散,用已知的速度值来计算,

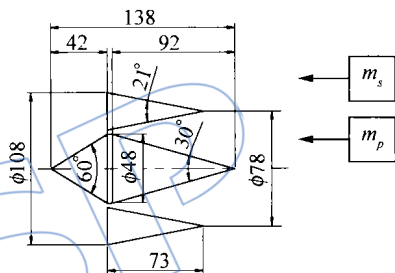


图1 有中心锥圆排波瓣喷嘴简图

Fig. 1 Circularly lobed nozzle with a central plug

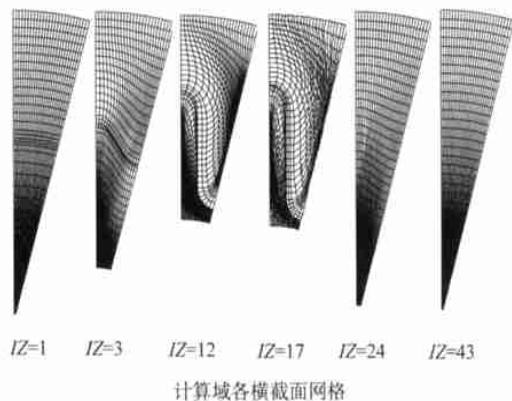


图2 计算域各横截面网格划分

Fig. 2 Computational grids in sequential cross-sections

并加入到离散代数方程源项中。同位网格引起的压力与速度间的失耦,采用动量插值方法^[4]。采用的非正交曲线坐标系下的壁面函数理论和具体用法见文献[5, 6]。非正交曲线坐标系中同位网格SIMPLEC 计算步骤和边界条件的给定见文献[1]。湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 涡粘模型。利用圆排

波瓣喷管的周期性和对称性,取夹角为15°的相邻波峰、波谷纵向对称截面和混合管的壁面为计算域,如图1所示。有中心锥圆排波瓣喷管引射器计算域结构型计算网格划分如图2所示,网格节点数为 $26 \times 34 \times 43$,图中 IZ 表示 Z 方向网格的网格层数。由图可见,两相邻网格线的最小夹角已小于 10° 。

3 计算结果与讨论

针对文献[7]实验的圆排波瓣喷管和截面比约为3.0、长径比约为1.0的圆柱混合管,在次流D100+D80进气、波瓣主喷管有中心锥的情况下,进行了冷、热态数值模拟计算,并与无中心锥在相同工况下的数值模拟结果^[1]进行了比较。进口边界条件为给定主、次流的进口速度,所用的主次流进口流量与实验的数据一致,见表1。出口边界条件为给定背压,计算中,为了充分保证混合管出口截面流动状况不受计算域出口边界条件的影响,计算域沿混合管轴向向下游外推了 27.8ζ (ζ 为波瓣的波长)距离。

表1 引射器实验结果

Tab 1 Experimental results of exhaust-ejector

主 流 温 度 (℃)	质量流量/(kg/s)				次 流 温 度 (℃)
	有中心锥		无中心锥		
	主流 m_p	次流 m_s	主流 m_p	次流 m_s	
25	0. 3161	0. 2684	0. 4296	0. 2164	25
175	0. 2817	0. 2755	0. 4032	0. 2313	25
250	0. 2656	0. 2755	0. 3921	0. 2415	25
345	0. 2520	0. 2739	0. 3661	0. 2473	25

3.1 混合管截面上的速度分布与主次流掺混比较

有中心锥圆排波瓣喷管引射器混合管在冷态条件下各横截面上速度分布及涡核区放大如图3所示,图中波瓣喷管出口截面重新定义为 $Z=0$ 截面。与没有中心锥的图4比较后可见,有中心锥混合管在 $Z/\lambda=3.34$ 横截面内流向涡已较明显,没有中心锥混合管到 $Z/\lambda=7.03$ 截面流向涡才基本形成,说明有中心锥的混合管中流向涡的形成早于没有中心锥的混合管;同时波谷侧次流流向中心轴的径向速度有中心锥的远大于没有中心锥的。

为了更好地了解有中心锥混合管中主次流

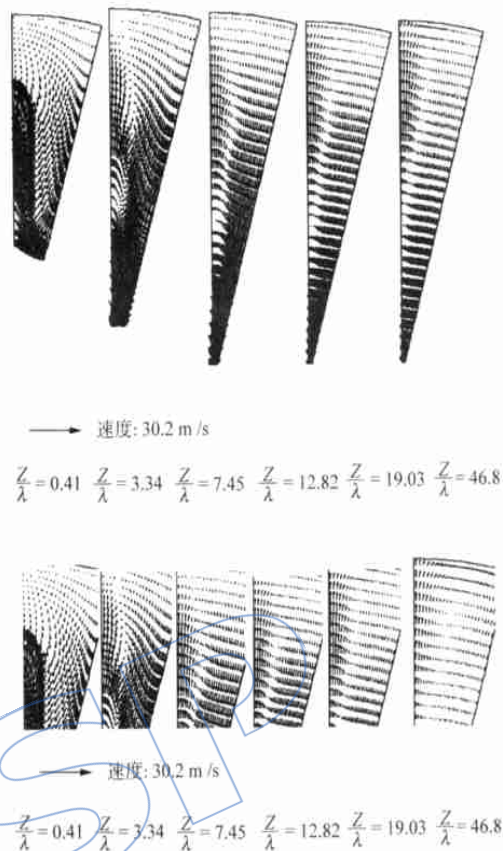


图3 有中心锥混合管中不同轴向距离上速度矢量图及局部放大图

Fig. 3 Velocity vectors and the local magnifying map with the central plug

的掺混情况,图5列出了主次流均为常温实验条件下,计算的混合管各横截面上的轴向速度分布等值线图。比较图5与没有中心锥的图6可见,虽然两者在波瓣喷管尾缘出口截面的轴向速度分布等值线基本相同,但是,随后的主次流掺混情况两者完全不同。在图5中,主次流掺混后的速度等值线逐渐演变成沿径向分布形态,特别是在混合管中心轴附近。在图6中,主次流掺混后的速度等值线仍然保持了波瓣喷管型面的特征,轴向速度等值线最后演变成了“涡”状。

3.2 有无中心锥热混合效率、温度场比较

为了比较不同形式引射器的主次流热混合情况,定义热混合效率^[8]为:

$$\eta = \frac{\int T^{0.5} dm - T_H^{0.5} m_H - T_c^{0.5} m_c}{T_{\text{mix}}^{0.5} (m_H + m_c) - T_H^{0.5} m_H - T_c^{0.5} m_c}$$

式中: $T_{\text{mix}} = \frac{m_H T_H + m_c T_c}{m_H + m_c}$ 为完全混合温度。

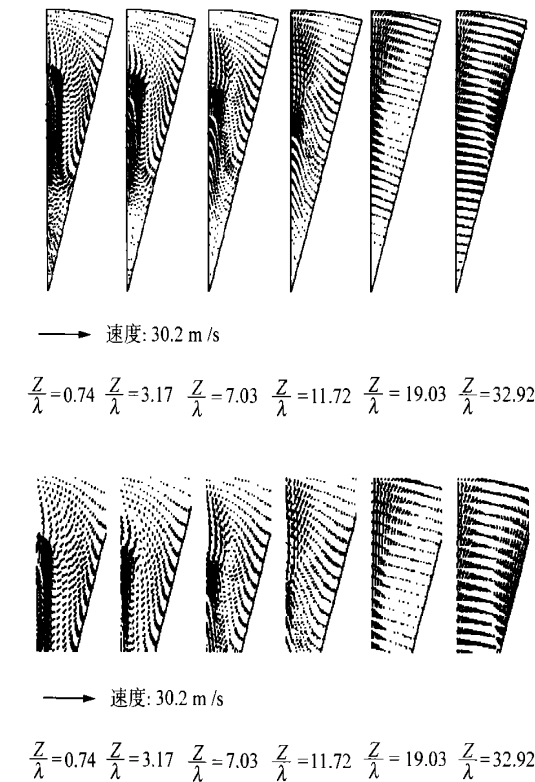


图4 无中心锥混合管中不同轴向距离上的速度
矢量图及局部放大图

Fig. 4 Velocity vectors and the local magnifying map
without the central plug

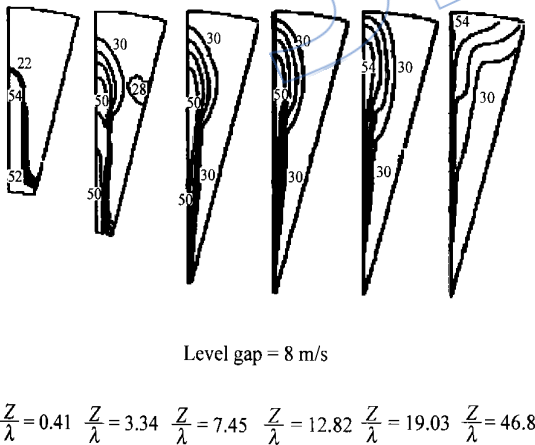


图5 有中心锥混合管中轴向速度分布等值线
(单位: m/s)

Fig. 5 Axial velocity contours with the central plug
(unit: m/s)

根在主流为175℃、250℃和345℃, 次流为25℃的数值模拟结果, 在同样的圆排波瓣喷管、同样的引射混合管和同样的主流总压条件下, 计算

的有无中心锥的混合管中热掺混效率沿轴向的变化如图7所示。由图可见: 中心锥确实增进了主
次流的热掺混效果, 比没有中心锥的情况提高了许多。在波瓣喷管出口附近, 有中心锥的热混合效率
上升速率高于无中心锥; 在混合管出口截面, 三种主流温度下的最大热掺混效率, 有中心锥的为
 $\eta_{\max}=0.992$, 没有中心锥的为 $\eta_{\max}=0.874$, 同比
提高了11.8%。

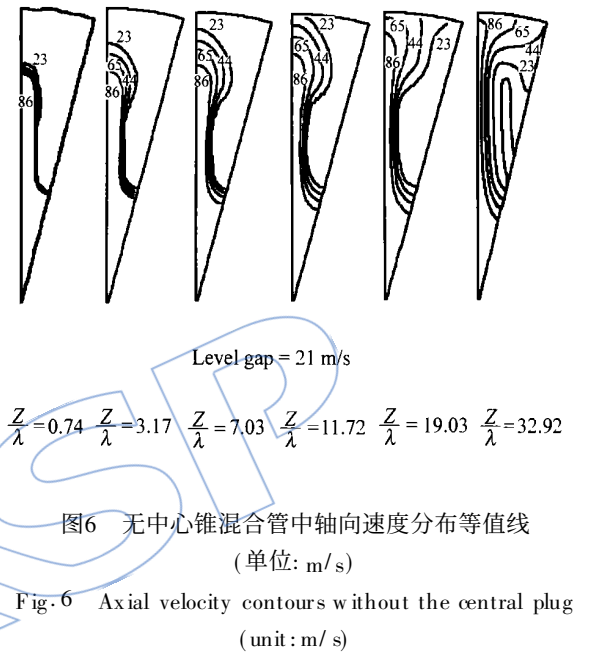


图6 无中心锥混合管中轴向速度分布等值线
(单位: m/s)

Fig. 6 Axial velocity contours without the central plug
(unit: m/s)

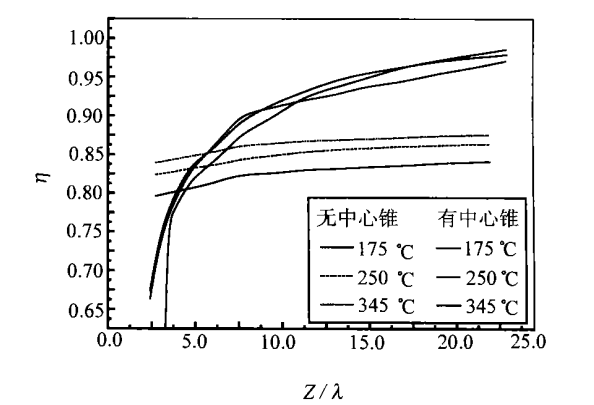


图7 热混合效率沿轴向的变化

Fig. 7 Thermal mixing efficiency versus axial distance

在主流250℃、次流常温条件下, 数值计算的
有中心锥混合管不同横截面上的温度分布等值线
如图8所示。比较图8和没有中心锥的图9可见, 虽
然两者的进口工况相同, 在波瓣喷管尾缘出口截
面处的温度分布等值线也基本相同, 但是, 有中心
锥混合管中主次流热掺混情况完全不同于没有中

心锥情况。在图8中, 主次流热掺混的结果, 温度分布等值线几乎变化为径向线。在图9中, 主次流热掺混的结果, 温度分布等值线几乎变化为周向线。另外, 从图9中还可以看出, 在没有中心锥

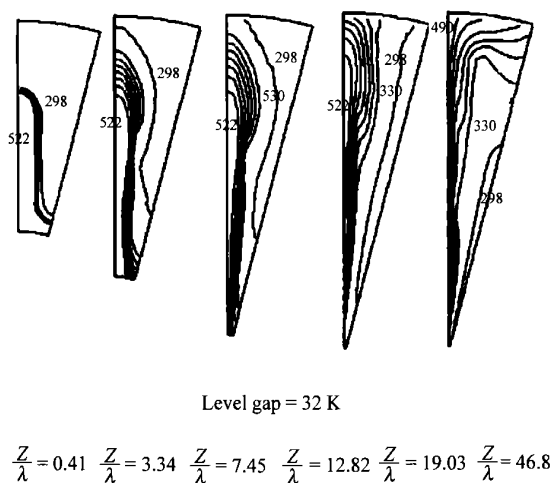


图8 有中心锥混合管不同横截面上的温度分布等值线(温度单位: K)

Fig. 8 Temperature contours with the central plug (unit: K)

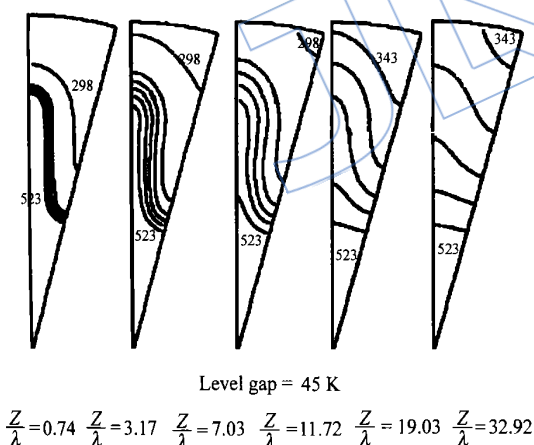


图9 无中心锥混合管不同横截面上的温度分布等值线图(温度单位: K)

Fig. 9 Temperature contours without the central plug (unit: K)

的情况下, 混合管中心轴线处的温度始终保持为高温状态, 与图8的低温等值线可以延伸至中心轴线有很大的不同。这也就是有中心锥的圆柱混合管热混合效率大于没有中心锥的重要原因。

3.3 混合管出口截面的轴向速度、温度分布比较

有中心锥圆排波瓣喷管引射器在冷态实验条件下, 混合管出口截面上对应波瓣波峰中线向波谷中线方向旋转5°位置的轴向速度分布的计算值与七孔探针测量值^[1]的比较见图10。无中心锥的见图11。由图10可见, 计算值与实验值在混合管中心和壁面附近符合很好, 在混合区计算的轴向速度略大于实验测定值。总的来看, 计算值和实验值符合较好。比较图10和图11可知, 有无中心锥的混合管出口截面速度分布有很大的不同。

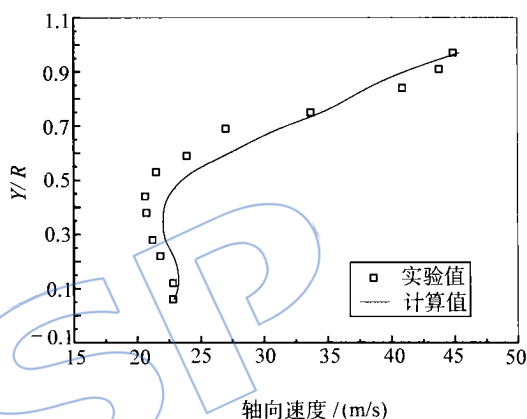


图10 有中心锥混合管出口截面速度分布

Fig. 10 Axial velocity pattern in outer-section with the plug

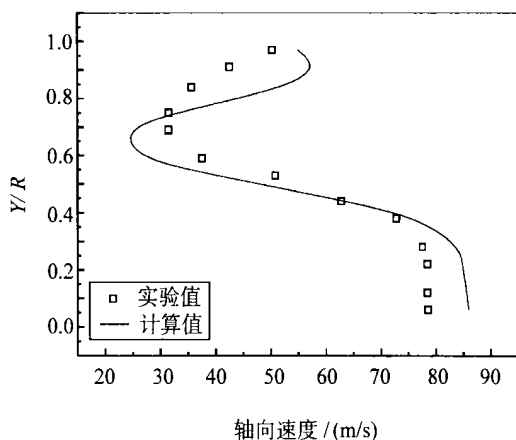
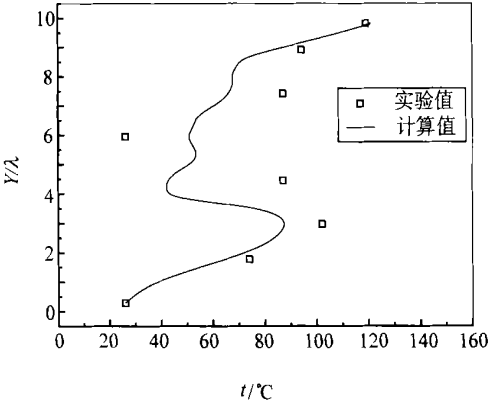


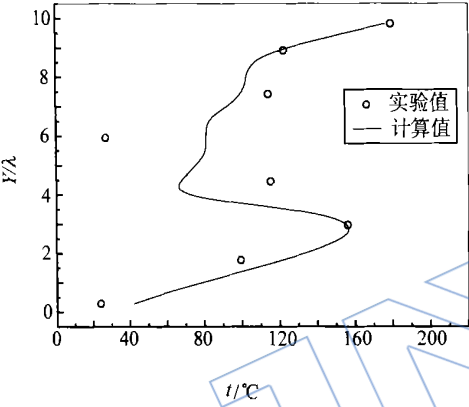
图11 无中心锥混合管出口截面速度分布

Fig. 11 Axial velocity pattern in outer-section without the plug

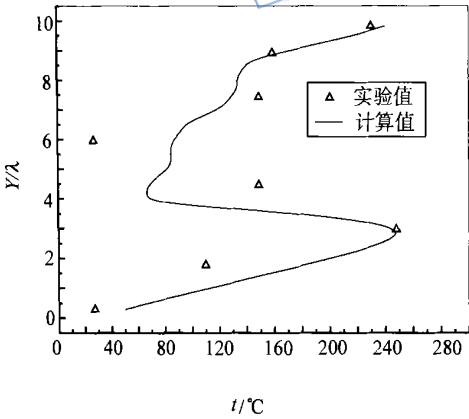
主流温度分别为175℃, 250℃和345℃, 次流为25℃条件下, 有中心锥圆排波瓣喷管引射器混合管出口截面对应波谷中线的温度分布计算值和



(a) $t_p = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $t_p = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $t_p = 345\text{ }^{\circ}\text{C}$

图12 出口温度分布

Fig. 12 Temperature distribution with the plug

实验值分别如图12(a)~(c)所示。由图可见: 两者在形状上基本符合, 在大小上有一定的差别。在混

合管中心和壁面附近, 计算值和实验值相同; 在主流混合区温度最低点的位置, 计算值比实验值靠近混合管中心线。另外, 比较图12与没有中心锥的图13可见, 有中心锥混合管出口温度分布

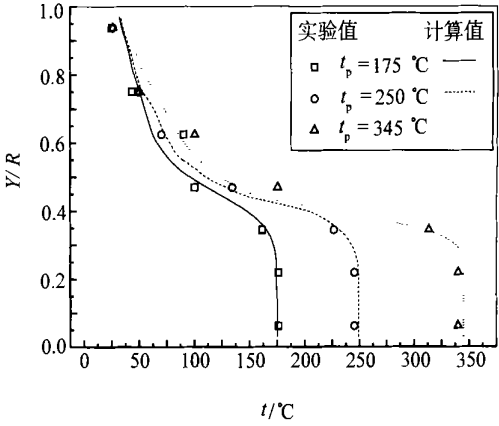


图13 无中心锥混合管出口温度分布

Fig. 13 Temperature distribution without the plug

形状与没有中心锥的完全不同, 中心锥改善了混合管出口温度分布的均匀性。

4 结 论

(1) 根据波瓣主喷管有无中心锥时, 在混合管不同横截面上的温度与速度等值线分布的演变过程分析, 我们发现: 有锥时, 在锥体斜面的作用下, 次流冷气有机会深入到混合管轴心, 使这些等值线从波瓣型面形状沿径向拉长, 逐渐变成径向的分布。无锥时, 没有波瓣的中心区的高温主流限制了冷气向混合管中心轴的扩散, 使这些等值线从波瓣型面形状沿周向伸展, 几乎变成周向的分布。正是由于这两种不同的等值线走向, 导致有中心锥时热混合效率提高, 出口温度分布较为均匀这样的结果。

(2) 根据流场数值模拟结果可以获得混合管横截面上的速度矢量图, 明确显示出波瓣喷管出口下游流向涡的形成与发展过程。

(3) 对混合管多个横截面计算出了轴向速度的等值线分布、温度的等值线分布, 利用这种分布曲线可以判断混合流动的演变过程。

(4) 在边界进气参数与实验相同的条件下, 利用本文研究的数值方法, 求出了圆柱混合管出口截面的速度分布、温度分布, 速度分布与实验数据符合良好, 温度分布与实验数据有一定的差别。

综合以上数值模拟和分析的结果说明: 本文

所作的数值模拟结果揭示了中心锥对圆排波瓣喷管热混合流场的作用机理。

参考文献:

[1] 刘友宏. 波瓣引射器冷态实验研究与数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.

[2] Cho M J, Chang M K. New Treatment of Nonorthogonal Terms in the Pressure-Correction equation [J]. Numerical Heat Transfer. Part B, 1994, 26: 133– 145.

[3] Shyy W, Vu T C. On the Adoption of Velocity Variable and Grid System for Fluid Flow Computation in Curvilinear Coordinates [J]. Journal of Computing Physics, 1991, 92: 82– 105.

[4] Rhie C M, Chow W L. A numerical Study of the Turbulent Flow past an Isolated Airfoil with Trailing Edge Separation

[J]. AIAA Journal, 1983, 21(11): 1525– 1552.

[5] Sondak D L. Application of Wall Functions to Generalized Nonorthogonal Curvilinear Coordinate Systems [J]. AIAA Journal, 1995, 33(1): 33– 41.

[6] Huang P G. Comment on "Application of Wall Functions to Generalized Nonorthogonal Curvilinear Coordinate Systems" [J]. AIAA Journal, 1995, 33(12): 2445– 2446.

[7] 刘友宏, 陈镔, 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.

[8] Koutmos P, McGuirk J J. Turbofan Forced Mixer/ Nozzle Temperature and Flow Field Modeling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(6): 1141– 1153.

(责任编辑 吴一黄)

CSA 来函商请收录本刊

最近主编曹传钧教授收到 CSA(Cambridge Scientific Abstracts) 于2002年5月30日发来的信函。信中提到:

CSA feels that your publication, Journal of Aerospace Power, is of significant interest to the engineering and scientific community. The large volume of information available today can make it difficult to get your product the recognition it deserves. It has been proven that an effective marketing tool to reach both current and potential customers is to have your publications abstracted in comprehensive databases. CSA’s products and services can help you to bring your products to the forefront.

CSA would like to include Journal of Aerospace Power among the sources abstracted and indexed for its’ two new worldwide databases: CSA civil Engineering Abstracts and CSA Mechanical ” Transportation Engineering Abstracts(WWW. csa. com/ engineering/). I am writing to request a complimentary subscription for this purpose. Database entries include an abstract as well as a full bibliographic citation including references.

经主编与部分编委协商, 认为这是在国际学术界中宣传本学报的机会, 决定同意收录, 并立即寄去近期的本学报。