

文章编号: 1000-8055(2007)03-0384-06

圆转矩形大宽高比收敛喷管过渡型面及 喷口形式对射流掺混特性的影响

张 勃, 吉洪湖

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 设计了一组宽高比为 8 的不同形式的矩形喷口, 对其尾喷流掺混特性进行了数值模拟. 通过改变圆到矩形过渡段的型面, 在喷管出口下缘加装下挡板以及在侧面加装挡板, 得到了 4 种不同形式的矩形喷管模型, 分别在相同边界条件下研究了它们的射流掺混特性. 结果表明, 加装下挡板和侧挡板能够有效增强射流掺混, 缩短射流高温区长度.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 射流; 矩形喷口; 强化掺混

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Influence of high aspect ratio convergent nozzle with different transition cross-section and nozzle shape on jets mixing characteristics

ZHANG Bo, JI Hong hu

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

Abstract: The mixing characteristics of jets from four rectangular nozzles with aspect ratio of 8 were investigated by numerical simulation. The first and second nozzles had different transition sections from circular to rectangular, the third nozzle had a rectangular flip which was an extension of the bottom wall of nozzle exit on the base of the first one, while the last one had two triangular flips on the left and right sides of the nozzle exit on the base of the third one. The results show that the mixing characteristics of the two nozzles with different transition sections have little difference, while the flips cause strong mixing.

Key words: aerospace propulsion system; jets mixing; circular to rectangular transition section; flip

现代战争中, 随着红外跟踪系统的发展, 尾喷流作为飞机重要红外辐射源, 其隐身技术已经日益成为人们关注的重点. 降低尾喷流的红外辐射强度是提高飞机的红外隐身性能的重要举措. 研究表明, 尾喷流的高温核心区的红外辐射能量占

整个尾喷流红外辐射能量的 70% ~ 80%. 因此, 强化尾喷流与外流的掺混, 缩小高温核心区的大小是缩小尾喷流红外特征的一个重要途径. 采用非轴对称二元喷管可以增强射流掺混, 从而减小高温核心区大小. 对矩形喷管型面作适当改进, 能

收稿日期: 2006-03-13; 修订日期: 2006-08-02

作者简介: 张勃 (1976), 江苏南京人, 南京航空航天大学能源与动力学院讲师, 沈阳 606 所在职博士, 主要从事强化传热、红外隐身方向的研究.

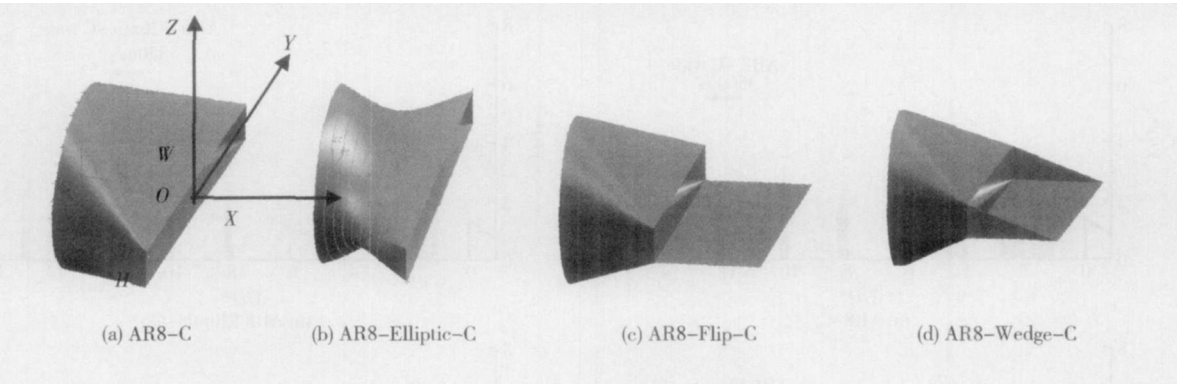


图 1 不同形式的 AR8 喷管

Fig. 1 Different nozzles of aspect ratio of 8

够进一步提高掺混效果^[1].

张勃等^[2]通过数值模拟的方法研究了宽高比为 1~ 16 的矩形喷管的掺混特性, 结果表明, 与轴对称喷管相比, 矩形喷管能够增强尾喷流与外流的掺混, 高温核心区随着宽高比的增大而逐渐减小. 圆转矩形过渡段的存在可以使得射流的二次流与涡量增大, 从而进一步增强掺混.

本文在宽高比一定的条件下, 研究不同过渡型面以及喷口形式对射流掺混特性的影响.

1 物理模型

研究了四种宽高比均为 8 的圆转矩形收敛喷管的射流掺混特性, 所采用的模型如图 1 所示. 喷管进口是面积为 0. 75 m² 的圆形截面, 出口为宽 (W) 1. 68 m, 高 (H) 0. 21 m 的矩形截面, 即宽高比 $AR = W/H = 8$, 喷管总体长度均为 0. 62 m. 第一个模型, AR8-C, 其圆到矩形过渡面是由四个三角形和四个圆锥面组合而成, 见图 1(a). Wallace^[3]的研究发现具有这类型面的矩形喷口具有较好的红外抑制特性, 图中也给出了所采用的坐标系, X 的正方向为射流方向, Y 和 Z 方向分别为垂直于喷口窄边与宽边的方向, 原点取在喷口中心, 其余喷管采用相同的坐标系. 第二种模型, AR8-Elliptic-C, 它的过渡型面采用超椭圆方程 $((Z/a)^n + (Y/b)^n = 1)$ 设计得到, 见图 1(b). 通过这两个模型可以研究不同过渡面对尾喷流掺混特性的影响. 第三个模型 AR8-Flip-C, 是在第一个模型的基础上, 把喷管下缘沿 X 正方向延长 $1. 1D^*$ (当量直径 $D^* = \sqrt{4A/\pi}$, A 为喷管出口面积) 而形成的, 见图 1(c). 第四个模型, AR8-Wedge-C, 是在第 3 个模型基础上, 在两个窄边加装侧挡板形成的, 见图 1(d). 模型 1, 3, 4, 用来研究下挡板以及侧挡板对喷流掺混的影响.

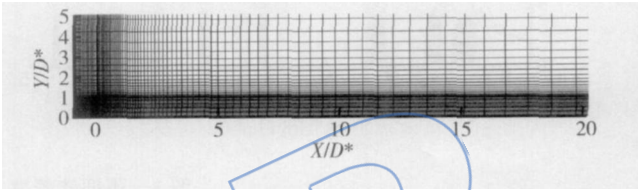


图 2 计算域局部网格

Fig. 2 Meshes of part compute domain

2 计算网格与边界条件

由于喷管 AR8-C 和 AR8-Elliptic-C 关于 XOY 与 XOZ 面均对称, 文中选取其 1/4 区域进行计算; 而 AR8-Flip-C 和 AR8-Wedge-C 则选取其关于 XOZ 面对称的 1/2 区域进行研究. 计算采用 Fluent 软件进行, 计算域在 X 方向为 $30D^*$, Y 与 Z 方向均为 $10D^*$. 图 2 给出了 AR8-C 喷管在 XOY 平面上的局部网格分布, 在速度梯度较大的区域对网格进行加密, 而沿着射流轴向和径向将网格适当稀化处理.

计算时所采用的喷管进出口气动参数为: 燃气进口总温 391. 65 K, 总压 48 604 Pa, 环境大气温度为 217 K, 压力 18 767 Pa. 另外, 在计算时没有考虑外流的速度影响, 忽略喷管壁厚, 流体流动按理想可压流处理. 采用 Fluent 软件进行计算, 使用隐式耦合算法, 紊流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型, 壁面附近采用标准壁面函数进行修正.

3 计算结果与分析

3.1 速度矢量分布

图 3 给出了所研究的 4 种喷管的射流在喷口下游 $X = 1D^*, 2D^*, 4D^*, 8D^*, 10D^*, 15D^*$ 等 6 个位置上宽对称面上的速度矢量分布. 本文定义 $U \geq 0. 95U_o$ (U_o 为喷口中心速度) 的区域为高速

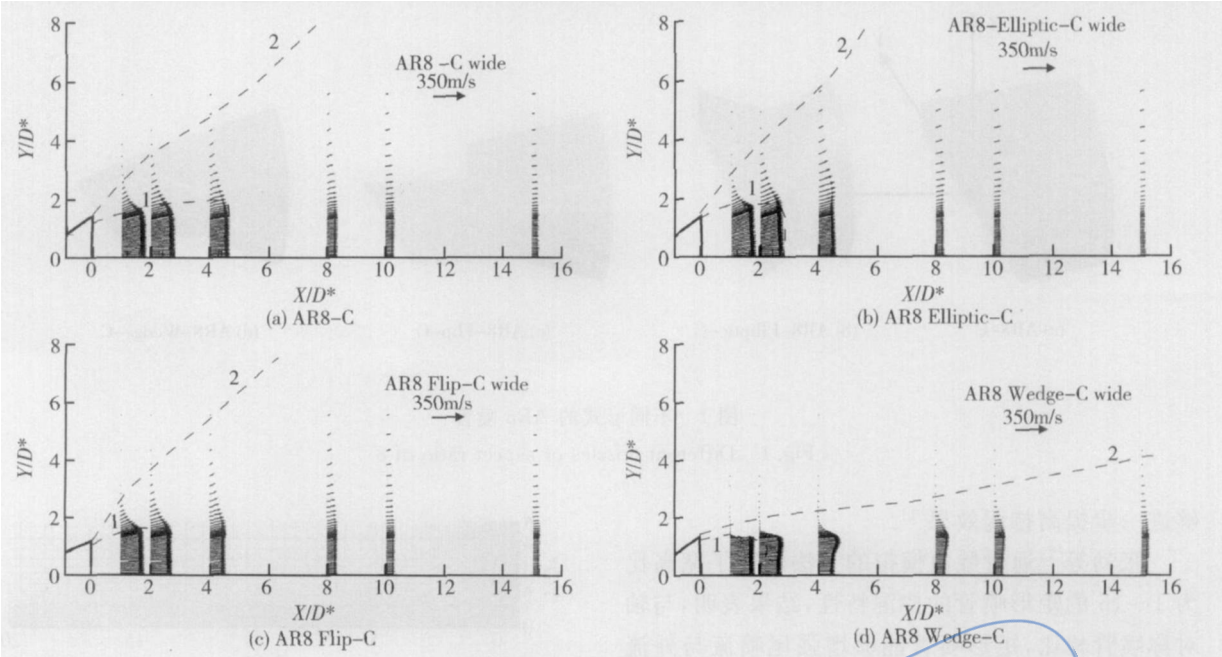


图 3 不同喷管宽对称面射流速度分布
Fig. 3 Distribution of jet velocity on wide symmetrical planes

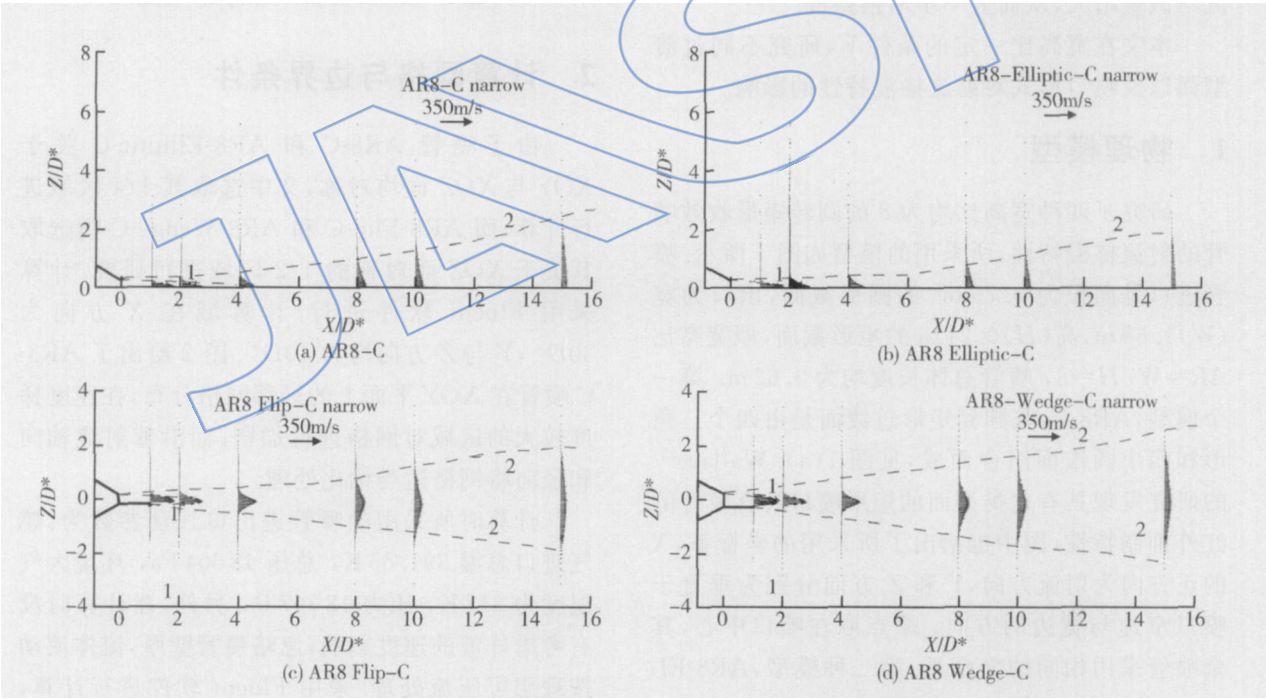


图 4 不同喷管窄对称面射流速度分布
Fig. 4 Distribution of jet velocity on narrow symmetrical planes

区,即图中虚线 1 与横轴之间的区域,文中还定义了外流区($U \leq 0.05U_{c0}$),其内边界如虚线 2 所示,外流区与高速区之间的区域为混合区($0.05U_{c0} \leq U \leq 0.95U_{c0}$),射流与外流的掺混主要发生在这个区域。可以看出,AR8 C 模型的高速区长度最长,达到 $4.5D^*$ (图 3(a)),AR8 Elliptic-

C 模型的高速区长度缩短至 $2.8D^*$ (图 3(b)),AR8 Flip C 的高速区长度则进一步减小为 $2.5D^*$ (图 3(c)),这三个模型射流在 Y 方向的扩展区域相似,说明 AR8 Flip C 中,下挡板对宽对称面上的速度分布并没有产生明显的影响。AR8 Wedge C 模型的高速区进一步缩短到 $2.2D^*$,受

到两侧板的影响, 在 $X = 1D^*$ 截面上, 射流在 Y 方向的发展受到了限制, 而在侧挡板范围之外 ($X/D^* \geq 1$), 射流在 Y 方向得到自由发展. 从图 3 可以看出, 这四个模型的宽对称面上的速度分布均表现出双峰分布, 尤其 AR8 Wedge-C 模型更为明显.

图 4(a), (b), (c), (d) 分别给出了 4 种喷管模型射流在窄对称面上速度分布, 图 4(a), (b) 中 AR8-C 与 AR8 Elliptic-C 模型的速度分布与宽对称面类似. 从图 4(c)、(d) 可以看出, 在 AR8-Flip-C 与 AR8-Wedge-C 模型中, 由于下挡板或侧挡板的存在, 在近喷口区, $Z = 0$ 两侧速度分布不再对称, 而到了距离较远的下游区域, Z 向两侧速度分布的区别逐渐减小.

3.2 无量纲温度分布

采用无量纲温度 $\theta = (T - T_\infty)/(T_{c0} - T_\infty)$ 来反映射流温度变化 (式中, T 为局部温度, T_∞ 为环境温度, T_{c0} 为喷口中心射流温度). 图 5(a), (b) 分别给出了宽对称面与窄对称面上的无量纲温度分布. 文中设等温线 $\eta(\theta \geq 0.65)$ 所覆盖的区域为高温区, 从图 5(a) 可以看出, 模型 AR8-C 宽对称面上的高温区长度为 $4D^*$ 左右, AR8 Elliptic-C 的高温区略短, 为 $3.5D^*$, 两者高温区轮廓相似. 模型 AR8 Flip-C 的高温区长度减小到了 $3D^*$, 同时可以发现, 由于下挡板的存在, 与前两个模型相比, 高温区头部的形状发生了明显的变化. 模型 AR8 Wedge-C 的高温区在中心线上也是 $3D^*$, 在 Y 向偏离中心线 $1D^*$ 左右处, 高温区长度为 $5D^*$ 左右, 这是由于侧板的存在使得高温射流在近喷口区不能有效向外界扩散, 使得两侧高温区较长, 这与图 3(d) 中速度分布是吻合的. 窄对称面上 (图 5(b)), AR8-C 与 AR8 Elliptic-C 的温度等值线分布规律与对应的宽对称面相似. 而模型 AR8 Flip-C 和模型 AR8 Wedge-C 则由于下挡板的存在, 使得无量纲温度等值线略向 $Z = 0$ 下方偏移, 这种影响在射流下游较远处逐渐减弱, 窄对称面温度等值线的分布与图 4 中对应速度分布也是吻合的.

由以上讨论可见, 采用超椭圆过渡型面使得射流高温区有所减小, 但形状变化不大. 加装下挡板后, 喷管射流的高温区则明显缩短, 同时加装下挡板与侧挡板时, 高温区形状发生了明显变化, 中心线上高温区缩短, 而在中心线两侧 $Y/D^* = 1$

附近高温区有所增大.

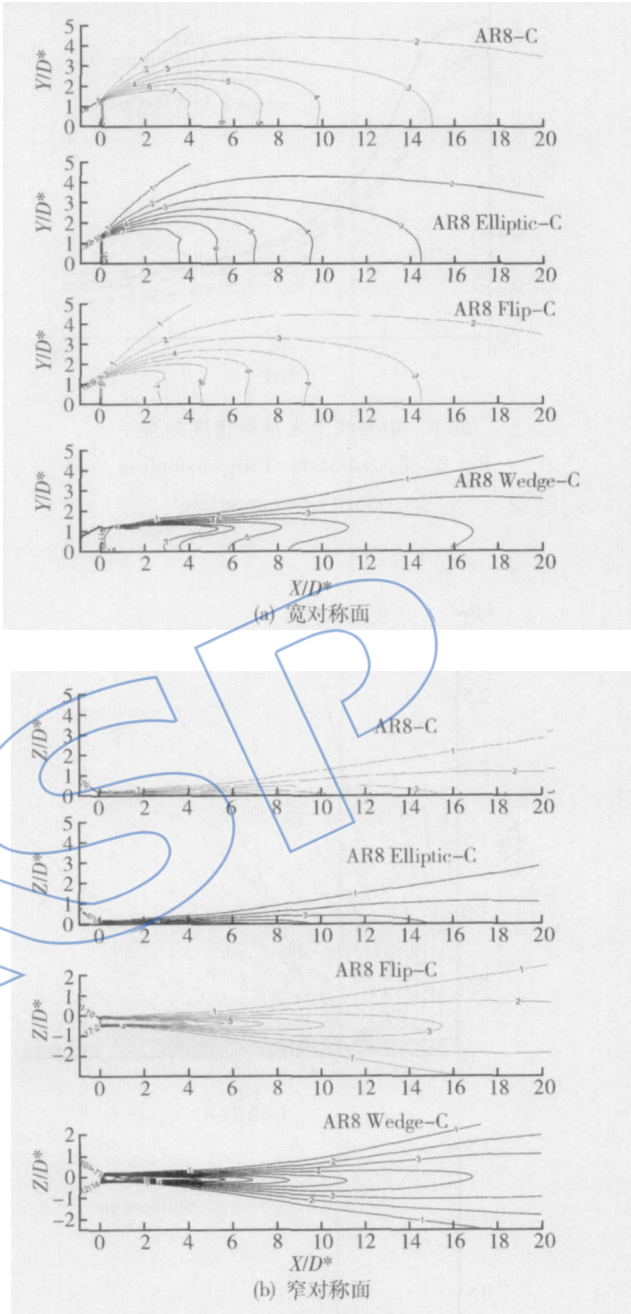


图 5 射流对称面上无量纲温度分布

Fig. 5 Distribution of jet dimensionless temperature on symmetrical planes

3.3 中心轴线上无量纲温度与无量纲速度分布

图 6 中给出了喷管射流中心轴线上无量纲速度分布, 可以看出, 射流速度首先经历一个波动的阶段, 而后逐渐下降, AR8-C 的高速区最长, 为 $4.5D^*$, AR8 Elliptic-C, AR8 Flip-C, AR8 Wedge-C 高速区逐渐减小, 分别为 $2.8D^*$, $2.5D^*$, $2.2D^*$, 分别是 AR8-C 的 62%, 56%, 49%.

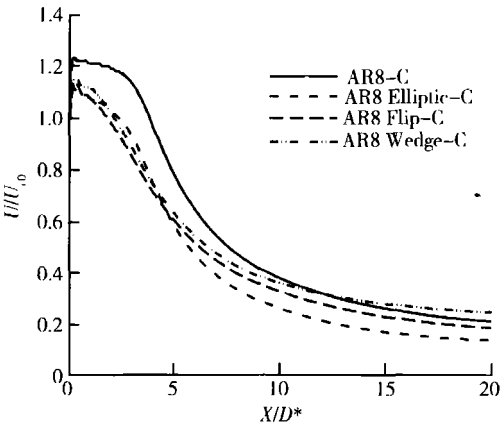


图 6 中心线上无量纲速度分布
Fig. 6 Distribution of dimensionless
jet velocity on centerline

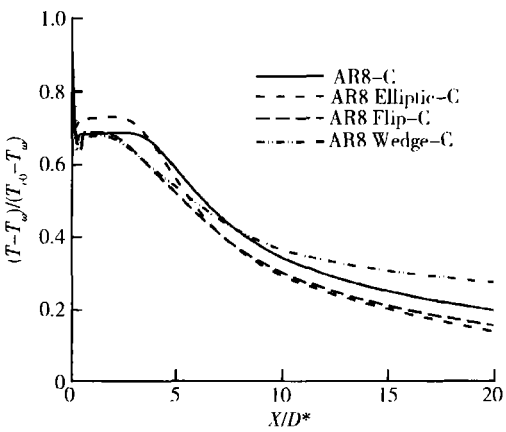


图 7 中心线上无量纲温度分布
Fig. 7 Distribution of dimensionless
jet temperature on centerline

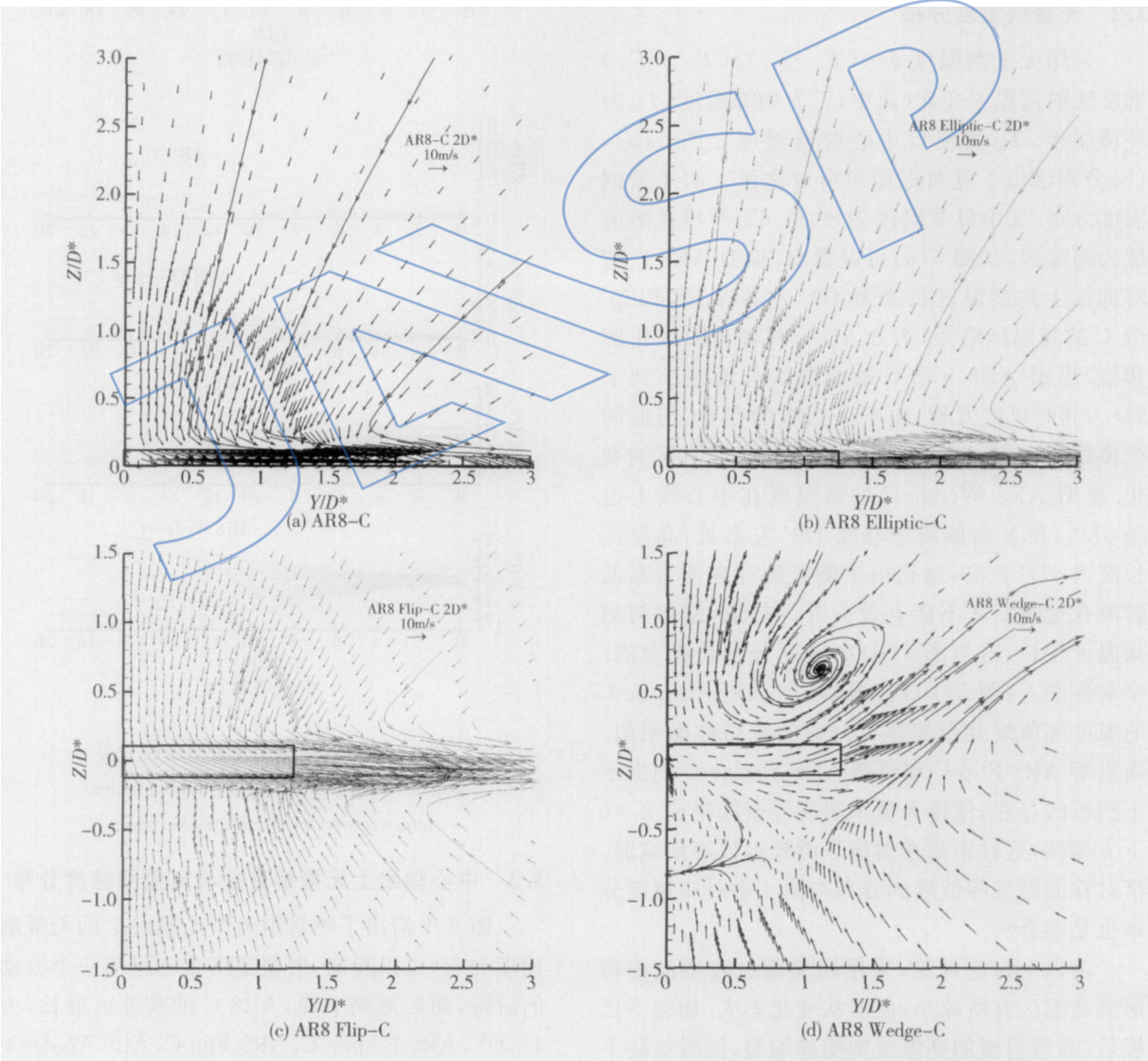


图 8 喷口下游 $2D^*$ 处二次流分布
Fig. 8 Distribution of jet secondary velocity on the cross section of $2D^*$

图7中给出了各个模型中心线上无量纲温度分布,射流温度在近喷口区域出现波动,而后是一段近似恒温区,最后温度开始下降。AR8 Elliptic C 高温区长度比 AR8 C ($4D^*$) 略小,为 $3.5D^*$, AR8 Flip C 与 AR8 Wedge C 高温区减小到 $3D^*$ 。

3.4 下游截面二次流分布

矩形喷口射流具有较强的二次流。图8(a), (b), (c), (d) 分别给出了所研究的4种喷管模型的射流在下游 $2D^*$ 处的二次流分布。为了判断二次流的影响区域,图中左下角给出了喷口对应区域的轮廓。可以看出,AR8 C 模型的二次流在宽边侧由远场向射流中心流动,而在窄边侧则由中心向远场流动(图8(a)),模型 AR8 Elliptic C 的二次流分布与 AR8 C 类似(图8(b))。对于模型 AR8 Flip C(图8(c)),其二次流分布的基本特征与 AR8 C 相同,但是由于下挡板的存在,使得其二次流分布不再关于 $Z=0$ 平面对称,在 $Z=0$ 平面两侧附近,没有挡板的敞开侧的二次流影响区域大于有挡板侧,流动略向下侧偏转如图1(c)所示,下挡板位于 $Z=0$ 下侧。对于模型 AR8 Wedge C(图8(d)),由于下挡板与侧挡板的存在使得二次流在喷口的敞开侧上方形成一个逆时针涡旋,它把外界冷空气卷吸到射流中心,然后再从窄边侧把热流体向外输送,这使得喷管侧壁面附近的射流速度较大,出现了图3(d)中的速度分布情况及图5(a)中相应的温度等值线分布。从图中可以看出,在这两个旋涡的共同作用下,二次流不

再如其余三个模型那样密集分布,更加容易与外流发生掺混。

分析得到,仅仅是喷管过渡型面的改变,对射流二次流的影响较小,而加装下挡板或侧挡板明显改变了二次流的流动方式,使得射流掺混得到明显增强。

4 结 论

(1) 采用超椭圆方程设计型面的模型与采用简单过渡型面的模型的射流高温区与高速区形状相似,但前者高温区与高速区长度较短。说明采用超椭圆方程设计的圆转矩形型面能够提高喷管出口射流的掺混性能。

(2) 对喷口进行局部修型能够增强喷管出口二次流,使得射流掺混增强。模型 AR8 Flip C 与 AR8 Wedge C 高温区相对 AR8 C 明显缩短。

参考文献:

- [1] Milton L, Taylor J G. Static internal performance of a two dimensional convergent divergent nozzle with external shelf [R]. NASA 96-4719, 1996.
- [2] 张勃, 吉洪湖. 大宽高比矩形喷管的射流与外流的掺混特性的数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 104-110.
ZHANG Bo, Ji Honghu. Numerical investigation of jet mixing characteristics of rectangular nozzle with high aspect ratio[J]. Journal of Aeronautics Power, 2005, 20(1): 104-110.
- [3] Wallace R C. Apparatus for suppressing infrared radiation emitted from gas turbine engines[P]. United States Patent, No. 4800715.