

文章编号: 1000-8055(2008)03-0454-06

回流燃烧室燃烧过程的三维数值模拟

胡好生, 蔡文祥, 赵坚行, 吉洪湖

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 在三维任意曲线坐标系下数值模拟回流燃烧室火焰筒内两相燃烧过程, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型模拟紊流粘性、EBU-Arrhenius 模型模拟燃烧反应速率、离散坐标模型以及六通量模型考虑辐射传热, 液相采用颗粒轨道模型, 气相采用 SIMPLE 算法求解, 并用 PSIC 算法考虑气液两相之间的相互作用的影响, 计算得到燃烧室内速度、温度等各气流参数分布。通过将计算与实验结果对比表明, 计算方法可靠, 离散坐标模型优于六通量辐射模型, 更适用于模拟火焰筒内两相燃烧流场。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 回流燃烧室; 两相反应流场; 离散坐标辐射模型; 数值模拟
中图分类号: V231.2 **文献标识码:** A

Numerical simulation of three-dimensional combustion flows in annular reversed combustor

HU Hao-sheng, CAI Wen-xiang, ZHAO Jian-xing, JI Hong-hu

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

Abstract: Numerical simulations of two-phase reacting flow in an annular reverse flow combustor were developed in a three-dimensional non-orthogonal curvilinear coordinate system. RNG $k-\varepsilon$ model, EBU-Arrhenius turbulence combustion model, discrete-ordinates (DO) model and Six-flux model were used for the gas phase flows. The liquid phase calculations were carried out with the Particle Trajectory model. The gas discretization equations were solved with SIMPLE algorithm. PSIC algorithm was employed to take into account the mass, momentum and energy coupling between two phases. The calculated exit temperature coefficient distributions are in agreement with the corresponding measurements. Predictions show that this numerical method is reasonable; the DO model is better than the six-flux model and is therefore more applicable for simulation of two-phase reacting flows of the annular reversed combustor.

Key words: aerospace propulsion system; reverse flow combustor;
two-phase reacting flow; discrete-ordinates radiation model;
numerical simulation

自 20 世纪 80 年代以来, 小型发动机燃烧室大都采用回流燃烧室, 如 T800, RTM322 和 MTR390 等, 这是因为此类型燃烧室可缩短压气机与涡轮之间的轴向长度, 而且还具有对燃烧室进口流场不敏感、燃烧充分、油气混合均匀以及

排气污染低等优点。但是为了克服燃烧室内气流要经过 2 个 180 转弯对燃烧室性能带来不利的影响以及冷却困难等缺点, 为此国内外对此燃烧室开展了试验与数值研究工作^[1-3], 经过几十年努力, 在小发燃烧室部件研制以及其燃烧技术研究

收稿日期: 2007-03-13; 修订日期: 2007-06-15

作者简介: 胡好生(1968-), 男, 湖南永州人, 博士生, 主要从事航空发动机燃烧室设计。

都取得了重要的进展^[4]。

随着计算流体力学以及计算燃烧力学的迅速发展,数值模拟已经成为燃烧室设计与研制的一种的有效手段,但此类燃烧室结构较为复杂,故大部分数值研究都针对火焰筒和大弯管^[5],或不带涡流器的环形回流燃烧室^[6],或带涡流器回流燃烧室火焰筒头部^[7],考虑到涡流器、火焰筒和大弯管都是回流燃烧室不可缺少的重要组成部分,因此本文研究对象为带涡流器、火焰筒及大弯管的回流环形燃烧室。采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型^[8]、颗粒轨道模型、离散坐标辐射模型^[9]以及六通量辐射模型和 Arrhenius 紊流燃烧模型等在三维贴体坐标系下对其两相燃烧流场进行计算^[10],并数值研究两种辐射模型对燃烧室流场与出口温度分布的影响。

1 计算对象

本文所研究的重流环形燃烧室,在其火焰筒头部装有若干个斜切径向涡流器,在火焰筒内外环壁上分别开有主燃孔、掺混孔和气膜冷却孔,在大弯管处也开有许多排气膜冷却孔。从压气机流出气体分别从涡流器、火焰筒内外环壁面上的各种孔进入火焰筒内,并通过大弯管流出燃烧室。由于涡流器周向均匀布,本文选取包含一个涡流器的环形燃烧室扇形部分作为计算区域。为了更好地模拟实际燃烧室,本文采用 TTM 法并结合型线定点法^[8]生成燃烧室三维贴体网格,其中图 1 为含涡流器、火焰筒及大弯管的总体网格轮廓,图 2 为斜切径向涡流器网格图。由图可知,在火焰筒内外环壁上开有一排主燃孔(外环 5 个,内环 4 个)和一排掺混孔(外环 6 个,内环 3 个)以及 4 道气膜冷却孔,一级涡流器由 6 个斜切孔组成,二级涡流器由 8 个径向叶栅通道组成。

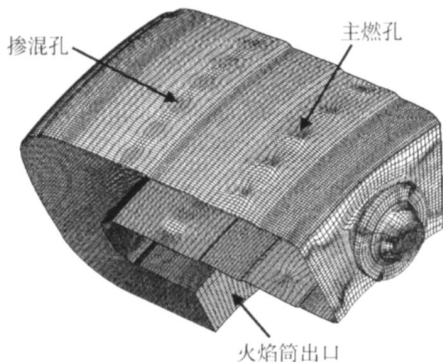


图 1 火焰筒总体网格轮廓图

Fig.1 Schematic three dimensional grid of combustor

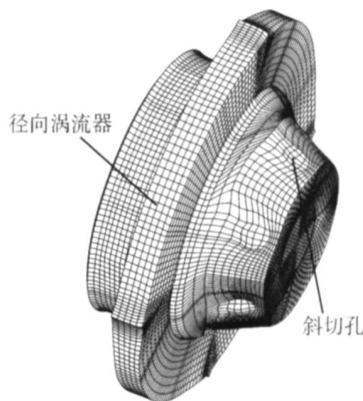


图 2 涡流器三维网格

Fig.2 Three dimensional grid of swirler cup

2 数学模型

2.1 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型

RNG $k-\varepsilon$ 模型是通过频谱分析把小尺度涡运动从控制方程中去除,而在大尺度涡运动和修正后的粘性项中考虑小尺度涡的影响。所得的紊流动能 k 与其耗散率 ε 的输运方程形式上与标准 $k-\varepsilon$ 模型一样,而是其 5 个模型系数是利用 RNG 理论推导,可表示为^[11]

$$C_{\mu} = 0.085, C_{\varepsilon 1} = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/\beta)}{1 + \beta^2},$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1.68, \alpha_k = 0.7179, \alpha_{\varepsilon} = 0.7179$$

式中

$$\eta = Sk/\varepsilon, S = \left(2 \overline{S_{i,j}^2}, \overline{S_{i,j}^2} \right)^{0.5},$$

$$\eta_0 = 4.38, \beta = 0.015$$

2.2 气相燃烧模型

气相燃烧采用 EBU-Arrhenius 模型,同时考虑反应动力学与紊流混合同时作用的影响,其反应速率表达式为

$$R_{fu} = - \min(R_{fu,1}, R_{fu,2}) \quad (1)$$

其中

$$R_{fu,1} = C_R g^{1/2} \rho \varepsilon / k,$$

$$R_{fu,2} = A_0 \rho^2 m_{fu} m_{ox} \exp(-E/RT)$$

2.3 辐射传热模型

在燃烧室内温度很高,火焰传热过程中辐射换热十分剧烈,辐射传热是主要传热方式之一,因此对辐射模型在燃烧过程数值模拟中的准确性的研究相当重要。本文分别采用离散坐标以及六通量辐射模型考虑燃烧室内的辐射传热,比较不同模型对模拟结果的影响。

2.3.1 离散坐标辐射模型

离散坐标法的基本思想是将空间辐射传热离

散为 M 个离散方向,每个方向对应一定的立体角 Ω_m ,在此角度内的辐射强度为定值,使用该方法后在所有波长下在一定边界条件下积分所得的辐射传热方程可写成如下形式

$$\frac{\mu_m}{r} \frac{\partial I_m}{\partial r} + \frac{\eta_m}{r} \frac{\partial I_m}{\partial \theta} + \xi_m \frac{\partial I_m}{\partial x} - \frac{1}{r} \frac{\partial \eta_m I_m}{\partial \phi} = - (k_a + k_s) I_m + k_a I_b + \frac{K_s}{4\pi_m} \sum_{m=1}^M \omega_m \phi_{m,m} I_m' \quad (2)$$

式中 m 和 m' 分别为射入或射出方向, I 为辐射强度, μ_m, ξ_m, η_m 为在立体角 Ω_m 下方向余弦, ω_m 为 m 方向加权因子, $\phi_{m,m}$ 为散射相函数, I_b 为黑体辐射强度。

假定微元体界面上和微元体中心的辐射强度间存在一定的关系 f , 则所构成的特定空间格式为

$$I_{m,p} = f_{m,j} I_{j-1} + (1 - f_{m,j}) I_j \quad (3)$$

不同的 $f_{m,j}$ 可用不同差分格式来表示^[12], 本文采用指数格式进行差分, 可令

$$f_{m,j} = \frac{1}{1 - \exp(-\tau_{m,j})} - \frac{1}{\tau_{m,j}}, \quad \tau_{m,j} = \frac{\beta_{m,p} \Delta x_j}{|\mu_m|}$$

将方程(2)离散后并用式(3)消去上游影响, 其结果如下^[13]

$$I_{m,p} = I_U / I_D \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} I_U &= |\mu_m| [A_i f_j f_k I_{m,i} + |\xi_m| [B_{j+1} f_k f_i I_{m,j} + \\ I_{m,j} f_i f_j f_k (B_j - B_{j+1})] + |\eta_m| [C_k f_i f_j I_{m,k} + \phi_{add} \\ I_D &= |\mu_m| [A_i f_j f_k + |\xi_m| [B_{j+1} f_k f_i + |\eta_m| [C_k f_i f_j + \\ f_i f_j f_k a_{m+1/2} / (f \omega_m) + \beta_{m,p} f_i f_j f_k V_p \\ \phi_{add} &= f_i f_j f_k [a_{m+1/2} (1 - f) I_{m-1/2} + f a_{m-1/2} I_{m-1/2}] (f \omega_m) + \\ [K_a I_{b,p} + K_s / (4\pi)] \sum_m (\omega_m', \phi_{m,m} I_{m',p}) f_i f_j f_k V_p \\ \beta_{m,p} &= K_a + K_s - [K_s / 4\pi] \omega_m \phi_{m,m} \end{aligned}$$

除了在 x, r, θ 三个方向辐射外, 在周向还有附加辐射, 可按下式处理

$$a_{m+1/2} - a_{m-1/2} = \omega_m \mu_m$$

$$\text{且} \quad a_{1/2} = a_{M+1/2} = 0$$

2.3.2 六通量辐射模型

当采用六通量辐射模型时, 各方向辐射通量可采用下式求解

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{k_a + k_s} \frac{dR_x}{dx} \right) &= \\ a(R_x - E_b) + \frac{k_s}{3} (2R_x - R_r - R_\theta) \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\frac{r}{k_a + k_s + 1/r} \frac{dR_r}{dr} \right) &= \\ a(R_r - E_b) + \frac{k_s}{3} (2R_r - R_x - R_\theta) \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{d\theta} \left(\frac{r}{k_a + k_s} \frac{dR_\theta}{d\theta} \right) = a(R_\theta - E_b) + \frac{k_s}{3} (2R_\theta - R_x - R_r) \quad (5)$$

式(5)中 R_x, R_r 和 R_θ 分别为 x, r 和 θ 方向净辐射通量。

本文来流流量分配是给定的, 进口气流速度由流量、进口面积和气流密度确定; 在圆周方向上采用周期性边界处理, 在出口采用令各变量法向梯度为零并利用流量连续对速度和压力进行修正, 加速收敛; 对于固体壁面, 采用壁面函数处理近壁区流动。

3 计算结果与分析

本文采用上述方法对计算对象进行数值研究, 同时比较离散坐标模型(Model A)与六通量辐射模型(Model B)等两种不同辐射模型对数值模拟结果的影响, 部分结果如图3~图13所示。

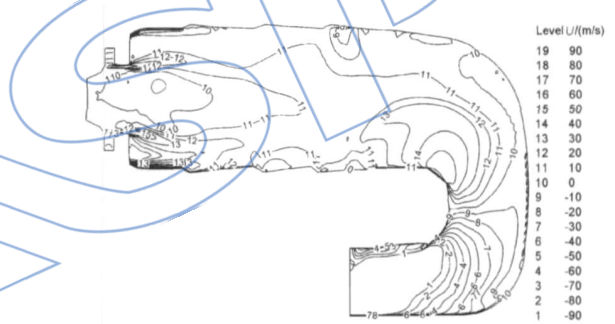


图3 火焰筒中心 ($K=41$) 轴向速度 (Model A)
Fig.3 $K=41$ axial velocity profiles (Model A)

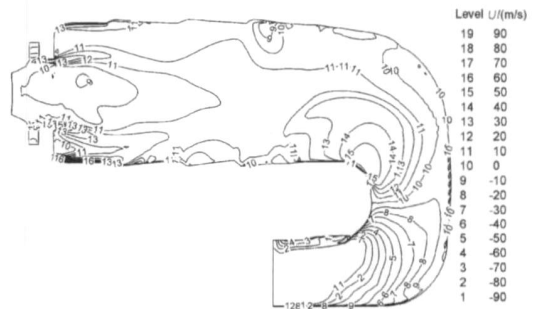


图4 火焰筒中心 ($K=41$) 轴向速度 (Model B)
Fig.4 $K=41$ axial velocity profiles (Model B)

图3与图4分别给出 Model A 与 B 的火焰筒周向中心 ($K=41$) 截面轴向速度 U 等值线分布。由图可知, 在旋流器的旋转气流作用下, 气流在火焰筒头部产生一个稳定火焰的回流区, 由于火焰筒内外环通道内冷气流的流动方向以及内外环面的曲率半径不同, 使靠近内外环壁面区域的速度分布也不相同, 但两种不同辐射模型所得的

火焰筒内气流速度场基本相似,仅在回流区处以及出口截面上速度分布略有差别.

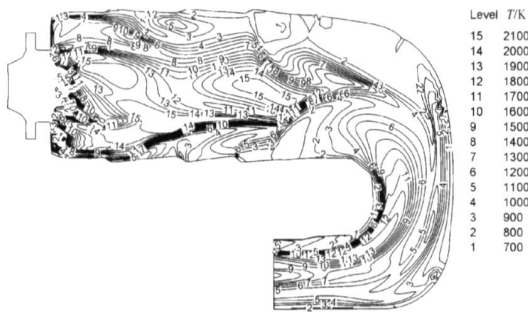


图 5 火焰筒中心 ($K=41$) 燃气温度 (Model A)
Fig. 5 $K=41$ temperature profiles (Model A)

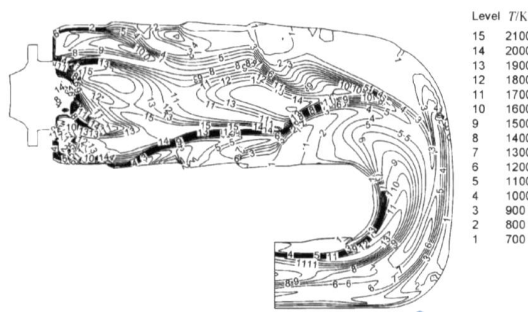


图 6 火焰筒中心 ($K=41$) 燃气温度 (Model B)
Fig. 6 $K=41$ temperature profiles (Model B)

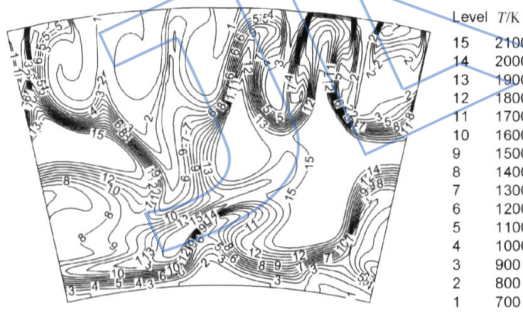


图 7 外环掺混孔 ($I=93$) 温度分布 (Model A)
Fig. 7 $I=93$ temperature profiles (Model A)

图 5 与图 6 分别为两种辐射模型在火焰筒周向中心 ($K=41$) 截面上的温度 T 等值线分布. 由图可以看到,高温区位于火焰筒的前部掺混孔之前的主燃区,从掺混孔进入冷却空气与高温燃气流混合,使燃气温度降低,由于掺混孔进气的冷却作用,显著地影响出口温度分布. 又因燃烧室的主燃孔与掺混孔的数目较多,可使气流温度沿周向分布较均匀. 此外,辐射模型不同,预估的辐射换热不同能直接影响火焰筒内的温度分布,因此在主燃区内及火焰筒近壁区域采用 Model A 所得温度略高于 Model B 所得的结果,这可能是因为离散坐标模型中考虑到各个方向之间辐射换热

的相互作用引起. 图 7 与图 8 分别为两种辐射模型在火焰筒外环掺混孔 ($I=93$) 截面上温度分布. 由图可见,两种模型所得的计算结果仍相当类同,考虑到回流燃烧室内、外环面上进气的方向以及流量的不同,火焰筒的近内环区域内的温度要明显高于近外环区域.

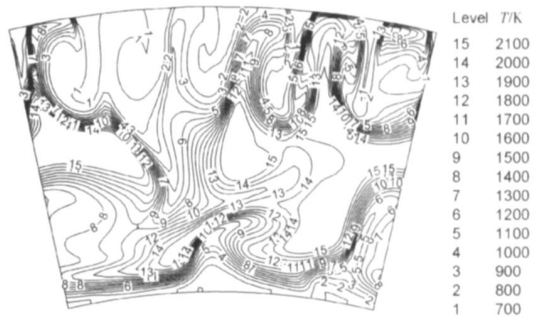


图 8 外环掺混孔 ($I=93$) 温度分布 (Model B)
Fig. 8 $I=93$ temperature profiles (Model B)

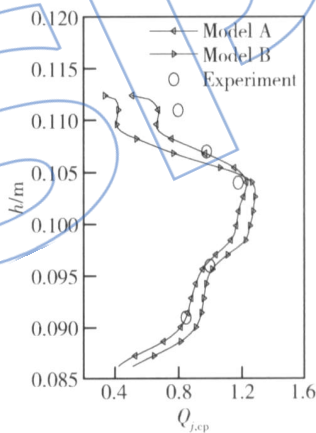


图 9 出口温度径向不均匀分布系数 $Q_{j,\phi}$
Fig. 9 Simulation and experiment data of $Q_{j,\phi}$

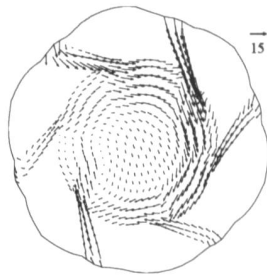


图 10 斜切孔进气截面 ($I=19$) 速度矢量 (Model A)
Fig. 10 $I=19$ velocity vector profile (Model A)

图 9 为计算所得的燃烧室出口温度径向分布不均匀系数 $Q_{j,\phi}$ 与实验数据的比较,其中
$$Q_{j,\phi} = \frac{\text{出口第 } j \text{ 环平均温度} - \text{进口平均温度}}{\text{出口平均温度} - \text{进口平均温度}}$$
由图可知,采用不同的辐射模型所得的计算值与实验数据基本一致,但是离散坐标模型的计算结

果要比六通量辐射模型更加符合实验数据.这是由于不同的辐射模型对辐射传热的预测的准确程度不同,由于离散坐标辐射模型考虑到辐射中内散射的影响,且在一定程度上考虑不同辐射方向上的辐射强度的影响,在理论上可预测得到更为准确的温度分布,这一结论在图 9 中有所体现.

图 10 表示斜切径向涡流器斜切孔进气截面 ($I = 19$) 速度矢量,斜切孔进气沿涡流器圆周方向变化,这使得涡流器内的速度分布在其圆周方向也有所差别.图 11 为周向中心 ($K = 41$) 截面相对压力等值线分布.由图可知,在火焰筒内压力较为稳定,在主燃区内压力上下不对称,在大弯管内侧压力梯度较大.图 12 与图 13 分别给出采用 Model A 时外环掺混孔截面以及内环掺混孔界面的

速度矢量分布规律.由图可知,虽然掺混进气均为垂直于在内、外环面,但内、外环面上进气的方向以及流量的不同,火焰筒内环进气穿透深度明显大于近外环区域,与高温燃气混合也较好,因此使近外环处气流温度低于近内环处(图 5 和图 6).

4 结 论

综合上述结果分析表明,采用数值模拟可了解燃烧室内部气流流动情况各参数分布规律.通过与实验结果的对比表明,数值模拟具有较强的可信性;采用不同的数学模型对计算结果有着一定影响,如本文对离散坐标模型以及六通量辐射模型进行数值研究表明,两种模型的计算结果基本相当,尽管采用离散坐标模型时工作量略高些,但其所得的计算结果更为准确,故该模型可在工程问题中推广与应用.

参考文献:

- [1] Paskin M D, Acoasta W A. Compliant metal enhanced convection cooled reverse-flow annular combustor [R]. AIAA 94-2710, 1994.
- [2] Bharani S, Singh S N, Agrawal D P. Effect of swirl on the flow characteristics in the outer annulus of a prototype reverse-flow gas turbine combustor [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001, 25: 337-347.
- [3] Martino P D, Cinque G. Experimental and computational results from an advanced reverse-flow gas turbine combustor [R]. AIAA-95-2999, 1995.
- [4] 侯晓春, 季鹤鸣, 严传俊, 等. 高性能航空燃气轮机燃烧技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [5] Cline M C, Deur J M, Micklow G J, et al. Computation of the flow field in annular gas turbine combustor [R]. AIAA-93-2074, 1993.
- [6] 雷雨冰, 胡好生, 赵坚行. 环形回流燃烧室两相反应流场的数值研究 [J]. 航空动力学报, 2001, 16(4): 350-354.
- [7] 蔡文祥, 胡好生, 赵坚行. 涡流器燃烧室头部两相反应流数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 837-842.
- [8] Speziale C G, Thangam S. Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows [J]. Int. J. Engng. Sci., 1992, 30(10): 1525-1531.
- [9] Jamaluddin A S, Smith P J. Predicting radiative transfer in rectangular enclosures using the discrete ordinates method

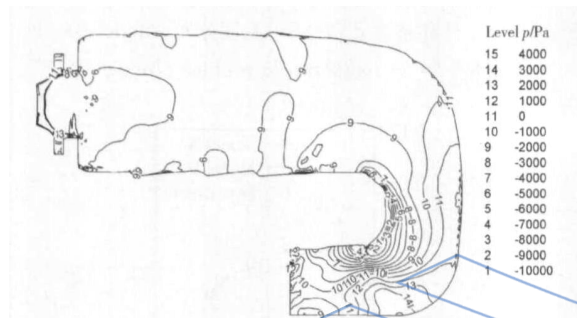


图 11 火焰筒中心 ($K = 41$) 压力等值线 (Model A)
Fig. 11 $K = 41$ pressure profiles (Model A)

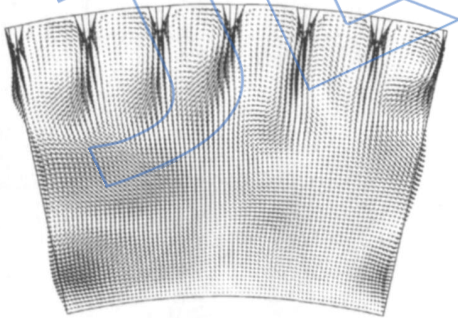


图 12 外环掺混孔 ($I = 93$) 截面速度矢量 (Model A)
Fig. 12 $I = 93$ velocity vector profiles (Model A)

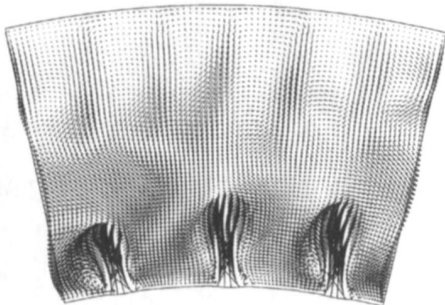


图 13 内环掺混孔 ($I = 97$) 截面速度矢量 (Model A)
Fig. 13 $I = 97$ velocity vector profiles (Model A)

- od [J]. Combustion Science and Technology, 1988, 59: 321-340.
- [10] 赵坚行. 燃烧的数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [11] 郭尚群,赵坚行. RNG 模型数值模拟油雾燃烧流场[J]. 航空动力学报,2005,20(5):807-812.
- GUO Shanggun,ZHAO Jianxing,Numerical simulation of three-dimensional spray combustion flow field by RNG turbulent model[J].Journal of Aerospace Power, 2005,20(5):807-812.
- [12] Chai J C,Lee H C,Patankar S V. Improved treatment of scattering using the discrete-ordinates method[J]. ASME Journal of Heat Transfer,1994,116:260-263.
- [13] 张建,李荣先,周力行,等. 三维湍流回流气相和煤粉燃烧辐射传热离散坐标模型和热流模型比较[J]. 燃烧科学与技术,2000,6(1):19-23.
- ZHANG Jian, LI Rongxian, ZHOU Lixing, et al. Comparison of two radiative heat transfer models in three-dimension turbulent gas and coal-particle combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2000, 6(1):19-22.

JAS SP