

文章编号: 1000-8055(2001) 04-0350-05

环形回流燃烧室两相反应流场的数值研究

雷雨冰, 胡好生, 赵坚行

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 本文在任意曲线坐标系下, 采用区域数据即时传递法, 对包括冷却通道在内的整个环形回流燃烧室的三维两相反应流进行了数值模拟。气相采用 Euler 方法处理, 并采用标准 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型, EBU-Arrhenius 紊流燃烧模型, 六通量热辐射模型, 液相采用 Lagrange 法处理。在非交错网格体系下, 气相用 SIMPLE 法求解, 液相采用颗粒群轨道模型, 并用 PSIC 算法对其进行数值求解。通过 4 种工况的计算表明, 计算结果是合理的。

关键词: 燃烧室; 数值计算; 两相流

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

1 引言

为了满足武装直升飞机未来作战发展的需要, 航空涡轮发动机的性能也不断提高。80 年代以来, 小型发动机的燃烧室一般都采用回流燃烧室, 如 TM 333, RTM 322 和 T 800 等。回流燃烧室是由火焰筒、内外环冷却通道和大弯管组成(见图 1), 在火焰筒头部装有旋流器, 在火焰筒内外环上开有主燃孔、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。由于该燃烧室结构较复杂, 以往的数值研究主要针对火焰筒和大弯管部分, 如 Cline 等^[1]采用修改了的通用程序 KIVA-II 对回流燃烧室火焰筒内部流场进行了计算。Crocker 等^[2]使用商业程序 CFD-ACE 研究了回流燃烧室掺混孔的进气角度对燃烧室气流混合的影响。Mongia 等^[3]也对回流燃烧室流场进行计算, 但对内外环通道计算作了简化处理。为了使计算更接近于实际情况, 本文在三维任意曲线坐标系下采用区域数据即时传递法^[4]对整个回流燃烧室流场进行数值模拟。其优点是利用数值分析方法研究火焰筒、大弯管及内外环冷却通道之间的匹配对燃烧室性能影响, 这对燃烧室优化设计和研制是非常重要的。

2 基本控制方程

2.1 气相控制方程

气相采用 Euler 方法处理, 在圆柱坐标系下的流体控制方程的通用形式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(r\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho w\Phi) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left[r\Gamma^\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial r}\left[r\Gamma^\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right] + \\ \frac{\partial}{\partial \theta}\left[\frac{\Gamma^\Phi}{r}\frac{\partial\Phi}{\partial \theta}\right] + rS^\Phi + \frac{rS_d^\Phi}{\Delta V} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 Φ 是通用变量, 分别代表速度分量 u, v, w , 紊流动能 k , 紊流动能耗散率 ϵ , 焓 h , 混合分数 f , 燃油质量分数 m_{fu} 和燃油质量分数的脉动均方值 g, Γ^Φ 是紊流输运系数, S^Φ 是源项, S_d^Φ 是油滴蒸发产生的源项, ΔV 是油滴所在微元体体积。

化学反应采用 EBU-Arrhenius 模型:

$$R_{fu} = \min\{R_{fu,ARR}, R_{fu,EBU}\} \quad (2)$$

式中: $R_{fu,ARR} = B\rho^2 m_{ox} m_{fu} \exp\left[-\frac{E}{RT}\right]$

$$R_{fu,EBU} = (Cr\rho g^{1/2}\epsilon)/k$$

热辐射采用六通量辐射模型:

$$(d/dx)[r\Gamma^x(dR^x/dx)] =$$

$$r[a(R^x - E) + (s/3)(2R^x - R^r - R^\theta)]$$

$$\begin{aligned} (d/dr) [r\Gamma^r(dR^r/dr)] &= r \cdot \\ [a(R^r - E) + (s/3)(2R^r - R^x - R^\theta)] & \quad (3) \\ (d/d\theta)[(\Gamma^\theta/r)(dR^\theta/d\theta)] &= r \cdot \\ [a(R^\theta - E) + (s/3)(2R^\theta - R^r - R^x)] & \end{aligned}$$

式中: $\Gamma^x = \Gamma^\theta = 1/(a + s)$, $\Gamma^r = 1/(a + s + 1/r)$

2.2 液相控制方程

液相采用 Lagrange 方法处理,按照颗粒轨道法求解油滴的运动轨迹,以及沿轨道的颗粒速度、大小和温度的变化过程。

假定喷嘴雾化尺寸服从 Rosin-Rammler 分布:

$$R = 1 - \exp[-(d_k/\bar{d})^n] \quad (4)$$

式中 R 是直径小于 d_k 的液滴质量占液滴总质量的百分数, $\bar{d}$ 是液滴的特征尺寸, n 均匀度指数。

圆柱坐标系下液滴的运动方程为:

$$\begin{aligned} du_d/dt &= (1/\tau_d)(u - u_d) \\ dv_d/dt &= (1/\tau_d)(v - v_d) + w^2_d/r \\ dw_d/dt &= (1/\tau_d)(w - w_d) - v_d w_d/r \end{aligned} \quad (5)$$

对于蒸发的液滴,其直径是随时间变化的速率为:

$$dD/dt = -(C_b/2D)(1 + 0.23Re^{1/2}) \quad (6)$$

液滴温度到达沸点温度之前,温度随时间的变化率为:

$$\frac{dT_d}{dt} = 6Nu \frac{T - T_d}{\rho_d D^2 C_{p,d}} \quad (7)$$

2.3 曲线坐标系下的控制方程

设 (x, r, θ) 是圆柱坐标, (ξ, η, ζ) 是任意曲线坐标,两组坐标的雅可比行列式为: $J = \partial(x, r, \theta)/\partial(\xi, \eta, \zeta) \neq 0$, 通过变换可得到气相在曲线坐标系下的控制方程通用形式:

$$\begin{aligned} (\partial/\partial\xi)(\rho U\Phi) + (\partial/\partial\eta)(\rho V\Phi) + (\partial/\partial\zeta)(\rho W\Phi) \\ = (\partial/\partial\xi)[(\Gamma^\Phi/rJ)(q_{11}\Phi + q_{12}\Phi + q_{13}\Phi)] + \\ (\partial/\partial\eta)[(\Gamma^\Phi/rJ)(q_{21}\Phi + q_{22}\Phi + q_{23}\Phi)] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\partial/\partial\zeta)[(\Gamma^\Phi/rJ)(q_{31}\Phi + q_{32}\Phi + q_{33}\Phi)] + \\ rJS^\Phi + S^\Phi_d \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $U = rA_{11}u + rA_{21}v + A_{31}w$
 $V = rA_{12}u + rA_{22}v + A_{32}w$
 $W = rA_{13}u + rA_{23}v + A_{33}w$

为曲线坐标系下的速度分量, A_{ij} 为 J 的代数余子式, $q_{ij} = r^2 A_{1i} A_{1j} + r^2 A_{2i} A_{2j} + A_{3i} A_{3j}$, 具体内容见文献[5]。

3 数值求解方法和网格生成

采用控制容积法对方程(8)进行积分,差分系数根据混合格式^[6]确定,可以得到如下离散方程:

$$\begin{aligned} A_P\Phi = A_E\Phi + A_W\Phi + A_N\Phi + \\ A_S\Phi + A_T\Phi + A_B\Phi + S_u \end{aligned} \quad (9)$$

在非交错网格体系下,采用 SIMPLE 方法^[6]求解离散方程。

液滴的运动方程采用四阶 Runge-Kutta 法求解。气液两相的耦合采用 PSIC 方法^[7]。

边界条件: 进口边界条件给定,固体壁面采用壁面函数处理,出口按等梯度处理,周向边界采用周期性条件处理,具体内容见文献[5]。

采用偏微分方程生成网格,网格生成方程的形式为:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 g^{ij} \vec{r}_{\xi^i \xi^j} + \sum_{k=1}^3 g^{kk} P_k \vec{r}_{\xi^k} = 0 \quad (10)$$

式中: $\xi^i (i = 1, 2, 3)$ 为任意曲线坐标系的坐标, $g^{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ 为逆变度量张量, $\vec{r}$ 为位置矢径, $P^k (k = 1, 2, 3)$ 为控制源项,用来调整网格的分布和正交性。

本文中燃烧室形状较为复杂,为保证网格分布的合理性,把燃烧室分为 6 个子区域,分别生成

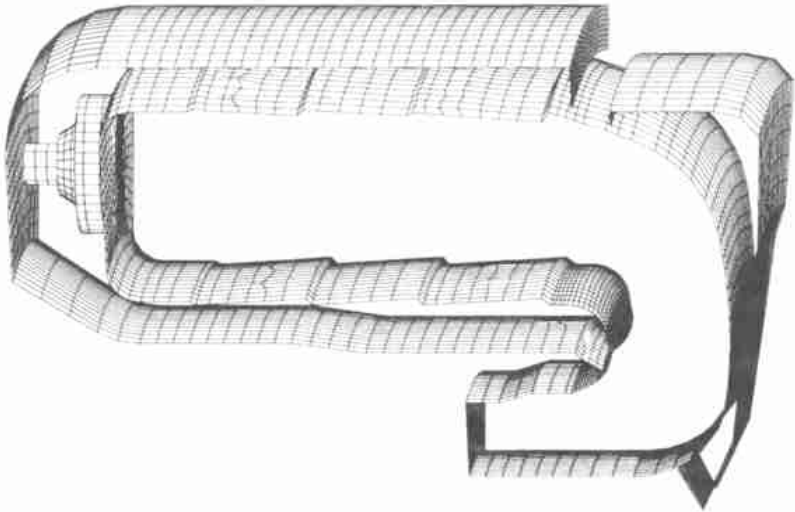


图1 环形回流燃烧室总体网格框架图

网格, 然后再把这 6 个区域的网格贴合在一块, 作为计算流场的网格。旋流器上各网格点的坐标预先给定, 并在网格生成过程保持不变。图 1 是燃烧室的总体网格图。

4 计算结果及分析

本文对包括火焰筒、大弯管以及内外环冷却通道的整个燃烧室的两相反应流进行数值模拟, 其中旋流器进口参数按等梯度条件确定, 旋流器出口气流参数根据旋流数计算得到。本文计算了 4 种工况: 流量为 4.366~3.804 kg/s; 温度为 625~587 K; 压力为 1.0374~0.8595 MPa。图 2~7

为计算结果, 其中图 2~6 为工况 1 的结果。
图 2 和图 3 分别为燃烧室的 $k=6$ 和 $k=9$ 截面的速度矢量图。图 3 为通过旋流器中心位置的截面($k=9$)的速度分布, 在这个截面上还有主燃孔的进气。在旋流器和主燃孔气流的作用下, 气流在火焰筒头部产生了上下两个较强的回流区, 这是燃烧室稳定工作的必要条件。火焰筒的内外环大孔进气的穿透深度差别较大, 靠内环一侧穿透深度较小, 这是由于内环壁面后部的转弯的曲率较大, 因而气流沿壁面方向的压力梯度较大, 使大孔的径向进气转变流动方向, 因而穿透深度较小。可以看出燃烧室出口的速度分布的明显不

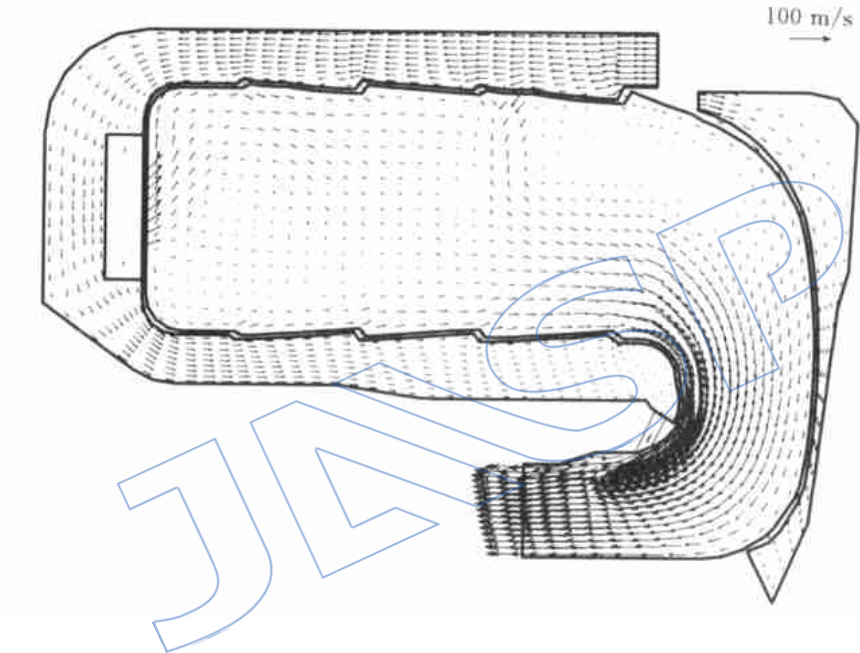


图 2 燃烧室 $k=6$ 截面速度矢量图(工况 1)

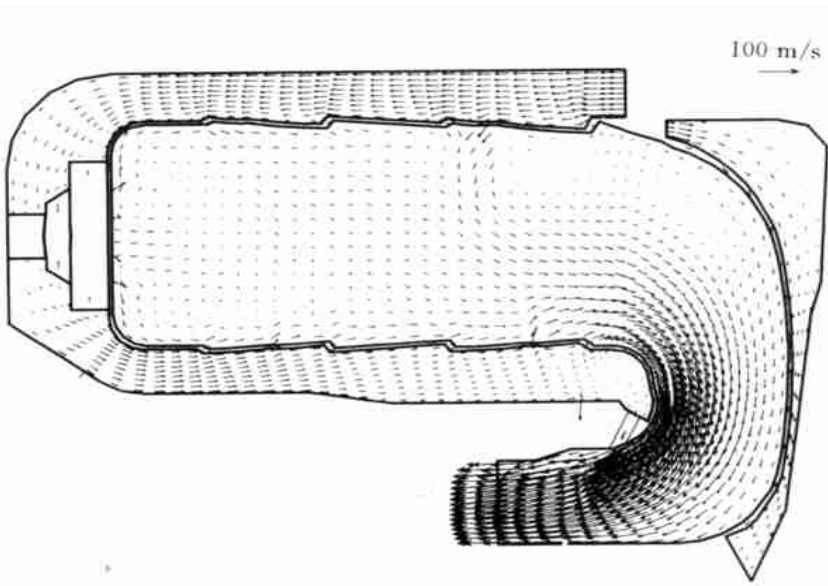


图 3 燃烧室 $k=9$ 截面速度矢量图(工况 1)

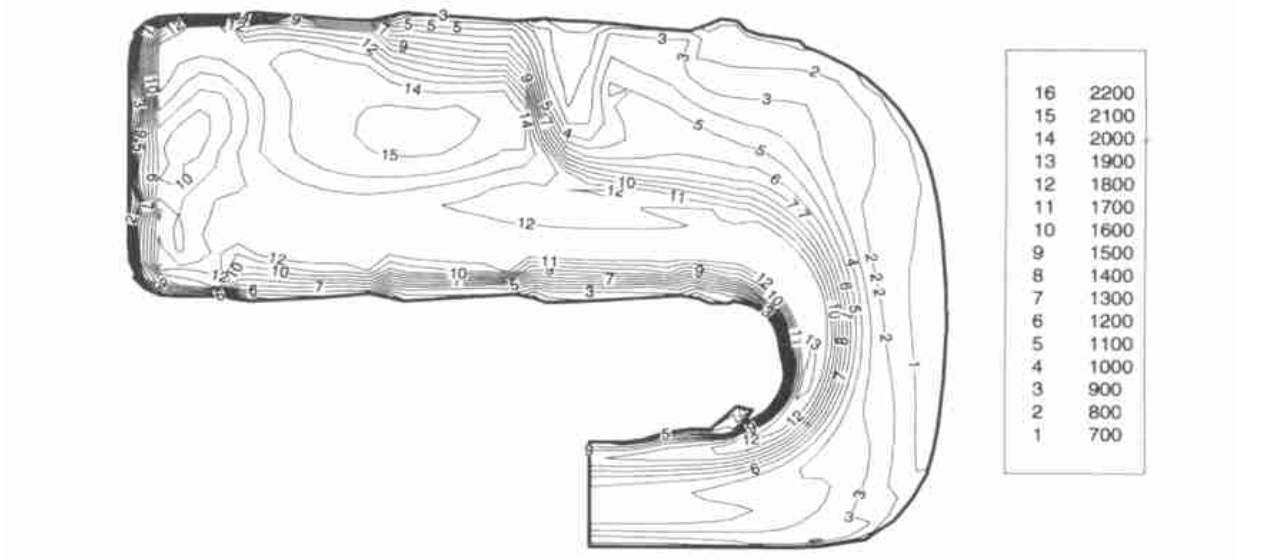


图 4 火焰筒 $k=6$ 截面温度分布图(工况 1)

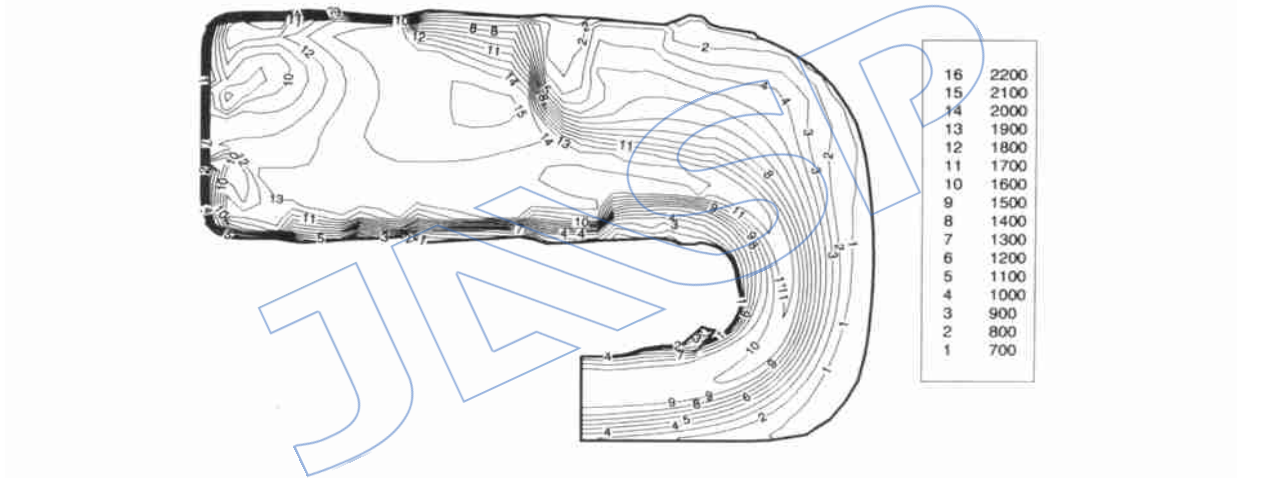


图 5 火焰筒 $k=9$ 截面温度分布图(工况 1)

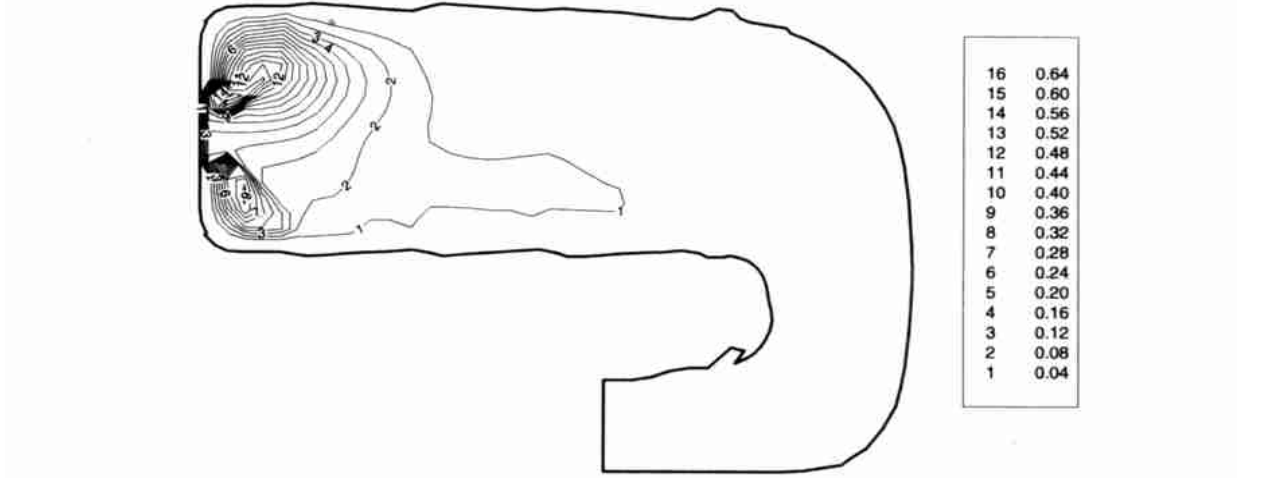


图 6 火焰筒 $k=9$ 截面燃油浓度分布图(工况 1)

同,内环一侧的大孔进气对出口速度分布产生较大影响,没有大孔进气时,出口气流速度的峰值位

于燃烧室出口沿径向偏上的位置(见图 2), 有大孔进气时, 峰值的位置向下移动(见图 3)。图 4 和图 5 分别为火焰筒的 $k=6$ 和 $k=9$ 截面的温度分布图。可以看出, 高温区位于掺混孔之前, 掺混孔对火焰筒高温气流的冷却作用非常明显, 显著地影响燃烧室出口的温度分布。图 6 为火焰筒 $k=9$ 截面的燃油浓度分布, 这个截面通过旋流器中心位置, 燃油分布沿火焰筒上下较为均匀, 燃油在大弯管之前就被消耗完了。图 7 为 4 个计算状态的燃烧室出口温度分布。可以看出, 温度的峰值大致位于径向的 $2/3$ 的位置, 计算状态 1 气流温度较高, 计算状态 4 的出口温度相对较低。4 种状态燃烧室出口温度变化规律基本一致, 这表明当燃烧室进出口状态在某一范围内变化时, 对气流温度分

布规律影响不大, 但对温度数值大小是有一定影响的。

5 结 论

本文发展了任意曲线坐标下计算复杂区域内三维两相反应流的计算机程序, 并对包括火焰筒、大弯管和内外环冷却通道在内的环形回流燃烧室进行了计算。计算结果表明把燃烧室作为一个整体进行研究可以较全面地反映燃烧室的气流流动、换热、燃烧等现象, 而且有助于加深对燃烧室内各种复杂现象的的进一步理解, 为燃烧室的研制提供参考依据。

参考文献:

- [1] Cline M C, Deur J M, Micklow G J, Harpar M R, et al. Computation of the Flow Field in Annular Gas Turbine Combustor[R]. AIAA-93-2074.
- [2] Crocker D S, Smith C E. Numerical Investigation of Angled Dilution Jets in Reverse Flow as Turbine Combustors[R]. AIAA-94-2771.
- [3] Mongia H C, Reynolds R S. Combustor Design Criteria Validation[R]. USARTL-TR-78, 1979.
- [4] 雷雨冰, 赵坚行. 数值模拟环形燃烧室两相反应流场[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(3): 222-225.
- [5] 雷雨冰. 三维贴体坐标数值模拟燃烧室流[D]. 南京航空航天大学, 1997.
- [6] 帕坦卡 S V 著, 张政译. 传热与流体的数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [7] Crowe C T, Sharama M P, Stock D E. The Particle-Source-in-Cell (PSI-Cell) Model for Gas-Droplet Flows[R]. 75-WA/HT-25, 1975.

(责任编辑 杨再荣)

Numerical Study of Two-Phase Reacting Flow in Annual Reversed Combustor

LEI Yu-bing, HU Hao-sheng, ZHAO Jian-xing

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

Abstract: A zone data transmit method has been developed for simulating the two-phase reacting flowfield of the whole annual reversed combustor including the cooling passages in an arbitrary curvilinear coordinates. The gas phase is treated with Eulerian method by adopting the $k-\epsilon$ two-equation turbulent model, EBU-Arrhenius turbulent combustion model and six-flux radiation model, and the liquid phase is treated with Lagrangian method. The gas phase is solved with SIMPLE algorithm in non-staggered grid system, and the liquid phase is solved with PSIC algorithm by adopting the particle trajectory model. The calculation results of the flowfield under four different conditions are reasonable. It is shown that the numerical study of the combustor as a whole can reflect flowfield heat transfer and combustion comprehensively and provide useful information for the engineering research and optimization of the combustor.

Key words: combustor chambers; numerical computation; two-phase flow

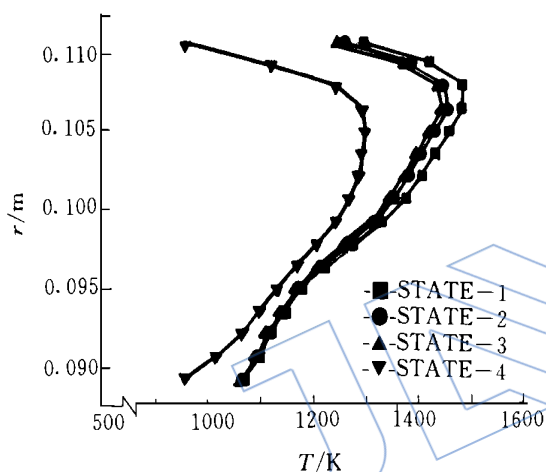


图 7 燃烧室出口温度分布图