

分级进风旋流燃烧室内湍流燃烧的数值模拟

陈莹, 张健

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要: 应用考虑湍流-化学反应相互作用的代数二阶矩-概率密度函数(PDF)湍流燃烧模型, 对分级进风旋流燃烧室内两组工况下的甲烷湍流燃烧进行了数值模拟, 得到的二氧化碳浓度和气体轴向脉动速度均方根值分布与实验数据相符合, 得到的气体轴向和切向速度、轴向-切向脉动速度关联量、温度和氧气浓度分布与实验数据基本相符合。研究结果表明, 选取适当的二次风率可以起到优化燃烧过程的作用。

关键词: 分级进风; 湍流燃烧; 旋流燃烧室; 代数二阶矩-概率密度函数湍流燃烧模型; 气体速度; 组分浓度

中图分类号: TK16

文献标识码: A

引言

旋流燃烧在各种工程燃烧反应装置中有许多应用。对湍流旋流燃烧过程进行合理的定量预报, 对于有效地利用旋流这一流动与燃烧的控制手段、优化燃烧过程、实现低污染排放和发展旋流低污染燃烧技术具有重要的意义。

目前, 在湍流旋流燃烧的预报中已发展并应用了多种湍流燃烧理论模型, 包括 EBU-Arrhenius 模型、快速反应的简化概率密度函数(PDF)模型、有限反应的简化 PDF 模型、层流小火焰模型、二阶矩模型和 PDF 输运方程模型等^[1~6]。其中, PDF 输运方程模型取得了与实验相符合的模拟结果, 但求解联合 PDF 输运方程的计算量很大。对湍流旋流燃烧进行定量预报的关键在于合理地描述湍流-化学反应的相互作用。文献[7~8]综合吸取 PDF 模型和二阶矩模型的概念、方法和特点, 提出并建立了考虑湍流-化学反应相互作用的代数二阶矩-PDF 湍流燃烧模型。这一模型已分别应用于旋流燃烧室和 TECFLAM 旋流燃烧室内湍流燃烧的数值模拟, 得到了与实验相符合的气体速度场、温度场和组分浓

度场^[7~8]。

为了达到对各种条件下的旋流燃烧过程的预测与优化, 需要将代数二阶矩-PDF 湍流燃烧模型应用于更多的旋流燃烧反应装置的模拟。为此, 本研究针对旋流分级燃烧这一有效降低燃烧过程中 NO_x 排放的技术, 进一步应用代数二阶矩-PDF 模型对分级进风旋流燃烧室内的湍流燃烧进行了数值模拟, 并将模拟结果与文献中给出的实验测量数据进行了对比。

1 代数二阶矩-PDF 湍流燃烧模型

碳氢燃料的燃烧反应机理十分复杂。本研究将燃料与氧气的燃烧反应视为单步不可逆的化学反应, 其瞬时的化学反应速率为:

$$W_f = B \rho^2 Y_f Y_{ox} \exp(-E/RT) \quad (1)$$

假设气体组分质量分数的湍流脉动与温度的脉动相互无关, 气体密度的湍流脉动仅由温度的脉动引起, 于是可将湍流平均反应速率表示为:

$$\overline{W_f} = B(\overline{Y_f Y_{ox}} + \overline{Y_f' Y_{ox}'}) \overline{\rho^2} \exp(-E/RT) \quad (2)$$

式中: $\overline{Y_f' Y_{ox}'}$ —浓度脉动关联量; $\overline{\rho^2} \exp(-E/RT)$ —温度相关平均量; 下标: f, ox—燃料和氧气。

通过建立浓度脉动二阶关联矩 $\overline{Y_f' Y_{ox}'}$ 、 $\overline{Y_f'^2}$ 和 $\overline{Y_{ox}'^2}$ 的输运方程, 对方程进行封闭, 利用平衡近似忽略方程中的对流项和扩散项, 可得到 $\overline{Y_f' Y_{ox}'}$ 的显式表达式为^[9]:

$$\overline{Y_f' Y_{ox}'} = \left[\frac{C_{gl} G_{fo}}{C_{g2} C_T (\overline{Y_{ox}} + i \overline{Y_f}) \frac{\tau_c}{\tau_T} + 2i \overline{Y_f}} - \frac{i C_{gl} G_f \overline{Y_{ox}}}{C_{g2} C_T (\overline{Y_{ox}} + i \overline{Y_f}) \frac{\tau_c}{\tau_T} + 2 \overline{Y_{ox}}} \right] \times \left\{ \frac{\rho}{\tau_c} \left[C_{g2} C_T \frac{\tau_c}{\tau_T} + 1 - \right. \right.$$

收稿日期: 2009-05-27; 修订日期: 2009-09-21

基金项目: 内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLE200902); 国家自然科学基金资助项目(51076082)

作者简介: 陈莹(1983-), 女, 湖北随州人, 清华大学博士研究生。

$$\left. \frac{2i\bar{Y}_f\bar{Y}_{ox}/(\bar{Y}_{ox}+i\bar{Y}_f)}{C_{g2}C_T(\bar{Y}_{ox}+i\bar{Y}_f)\frac{\tau_c}{\tau_T}+2i\bar{Y}_f} - \frac{2i\bar{Y}_f\bar{Y}_{ox}/(\bar{Y}_{ox}+i\bar{Y}_f)}{C_{g2}C_T(\bar{Y}_{ox}+i\bar{Y}_f)\frac{\tau_c}{\tau_T}+2\bar{Y}_{ox}} \right\}^{-1} \quad (3)$$

式中: $G_{fo} = \mu_i \frac{\partial \bar{Y}_f}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{Y}_{ox}}{\partial x_j}$; $G_f = \mu_i \left(\frac{\partial \bar{Y}_f}{\partial x_j} \right)^2$; $G_{ox} = \mu_i \left(\frac{\partial \bar{Y}_{ox}}{\partial x_j} \right)^2$; i —化学当量比系数; 湍流时间尺度 $\tau_T = C_T k / \varepsilon$; 反应时间尺度 $\tau_c = [B(\bar{Y}_{ox} + i\bar{Y}_f) \rho^2 \exp(-E/RT)] / \rho$; C_{g1} 、 C_{g2} 、 C_T —湍流模型常数; μ_i —湍流粘性系数; 下标: fo—燃料与氧气。

利用理想气体状态方程, 温度相关平均量可表示为:

$$\overline{\rho^2 \exp(-E/RT)} = \left(\frac{\bar{p} \bar{M}}{R} \right)^2 \frac{1}{\bar{T}^2 \exp(-E/RT)} \quad (4)$$

式中包含温度的指数函数, 通过引入气体瞬时温度的概率密度函数(PDF)得:

$$\overline{\rho^2 \exp(-E/RT)} = \left(\frac{\bar{p} \bar{M}}{R} \right)^2 \int_{T_0}^{T_m} \frac{1}{T^2} \exp(-E/RT) p(T) dT \quad (5)$$

式中: T_m —燃料在化学当量比下的绝热燃烧温度; T_0 —燃烧系统的最低温度(一般取在进口处或壁面处)。

从式(5)可以看出, 将 $p(T)$ 取为均匀分布, 则可求出该式右端的积分。

为便于设定 $p(T)$, 定义无量纲气体瞬时温度 $\eta = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$, η 的取值范围为 $0 \sim 1$ 。 η 的概率密度函数 $p(\eta)$ 与 $p(T)$ 一样, 也为均匀分布。一般情况下, 可设 $p(\eta)$ 的具体表达式为:

$$p(\eta) = \frac{1}{\eta^+ - \eta^-} [H(\eta - \eta^-) - H(\eta - \eta^+)] \quad (6)$$

式中: $H(\xi)$ —Heaviside 阶梯函数, 当 $\xi \geq 0$ 和 $\xi < 0$ 时, 分别有 $H(\xi) = 1$ 和 $H(\xi) = 0$; η^+ 、 η^- —待定参数, 应满足条件 $0 \leq \eta^- < \eta^+ \leq 1$ 。

按照利用 PDF 求出的 η 的一阶矩 $\bar{\eta}$ 和二阶矩 $\bar{\eta}^2$ 应与采用统计平均模拟得到的相应结果一致的原则, 可求出 $p(\eta)$ 中的待定参数: $\eta^+ = \bar{\eta} + \sqrt{3\bar{\eta}^2}$ 、

$\eta^- = \bar{\eta} - \sqrt{3\bar{\eta}^2}$ 。若求出的 η^+ 或 η^- 超出了它们的取值范围, 则应对 $p(\eta)$ 作相应的修正, 可将 $p(\eta)$ 取为均匀分布加上在 $\eta = 0$ 或 $\eta = 1$ 处的 δ 函数分布, 或将 $p(\eta)$ 取为均匀分布加上在 $\eta = 0$ 和 $\eta = 1$ 处的双 δ 函数分布。

将 $p(\eta)$ 代入式(5)中, 可得到温度相关平均量的封闭表达式。一般情况下有:

$$\overline{\rho^2 \exp(-E/RT)} = \frac{R \bar{\rho}^2 \bar{T}^2}{(T^+ - T^-) E} [\exp(-E/RT^+) - \exp(-E/RT^-)] \quad (7)$$

式中: $\bar{\rho} = \bar{p} \bar{M} / RT$; $T^+ = T_0 + (T_m - T_0) \eta^+$; $T^- = T_0 + (T_m - T_0) \eta^-$ 。

综合利用浓度脉动二阶矩的式(3)和温度相关平均量的式(7), 可得到湍流平均反应速率的封闭式。

$p(\eta)$ 中待定参数的确定需要利用 η 的平均值 $\bar{\eta}$ 和脉动均方值 $\bar{\eta}^2$, 它们可分别由气体平均温度 $\bar{T}$ 和温度脉动均方值 $\bar{T}^2$ 求出。在求解了以焓为变量的平均能量方程后, $\bar{T}$ 可利用平均焓 $\bar{h}$ 求出。 $\bar{T}^2$ 则利用焓脉动均方值 $\bar{h}^2$ 求出, $\bar{h}^2$ 通过求解其输运方程得到。

在轴对称圆柱坐标系中建立湍流旋流燃烧的平均控制方程组。对湍流燃烧采用上述代数二阶矩-PDF 模型进行模拟, 对湍流的模拟采用浮力修正的 $k-\varepsilon$ 模型^[10], 辐射传热的模拟采用四热流量模型^[11]。封闭后的湍流旋流燃烧平均控制方程组包括连续、轴向、径向与切向动量、湍能、湍能耗散率、组分质量分数、焓、焓脉动均方值以及轴向与径向辐射热流方程。在交错网格结点系上采用有限容积法对平均控制方程组进行离散化^[12], 对各变量离散化方程组的耦合求解采用 SIMPLE 算法。

2 计算工况

应用代数二阶矩-PDF 湍流燃烧模型对分级进风旋流燃烧室内的甲烷湍流燃烧进行了数值模拟, 该燃烧室结构如图 1 所示。气体燃料甲烷通过中心管喷入燃烧室, 空气分为旋流一次风和直流二次风分别通过同轴的内、外环型通道进入燃烧室内。燃烧室长度为 1 000 mm, 中心燃料管、旋流一次风管、直流二次风管和燃烧室内径分别为 8、40、58 和 160 mm, 外直径分别为 14、44、68 和 236 mm。燃烧室圆柱筒壁内衬有 35 mm 厚的耐火材料。

为便于与实验测量数据进行对比, 选取分别与文献[13~14]实验条件相同的两组工况即工况 1 与工况 2 进行了数值模拟。重力沿 x 负方向。一次风的旋转通过放置在靠近内环形通道出口的旋流叶片产生, 实验中使用的旋流叶片角度为 45° 。旋流

数是表征流动旋流强度的无量纲参数,按旋流叶片角度得到的一次风旋流数为 0.69。工况 1 的燃料、一次风和二次风流量分别为 0.52、6.2 和 3.0 m³/h, 工况 2 的燃料、一次风和二次风流量则分别为 0.73、7.3 和 1.0 m³/h。工况 1 和工况 2 的二次风率(二次直流风流量占总空气流量的比例)分别为 32.6% 和 12%。两种工况下燃烧室各进口处的气体温度均按实测的环境温度取为 288 K, 燃烧室圆筒壁的外侧表面温度根据实验测量的平均值取为 392 K, 燃烧室底壁内侧表面温度也取为 392 K。圆筒壁内侧表面温度可依据筒壁径向导热热流与壁内侧表

面对流及辐射热流的局部平衡通过计算得到。按轴对称性,数值求解的计算域取为燃烧室的半个纵向剖面。采用非均匀网格划分,沿轴向和径向共选取了 60×33 个网格节点。

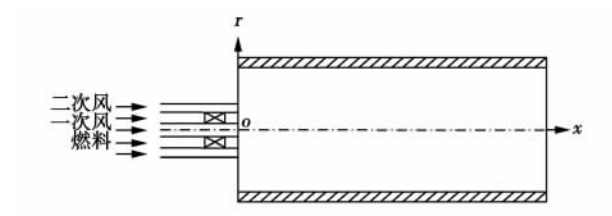


图 1 分级进风旋流燃烧室

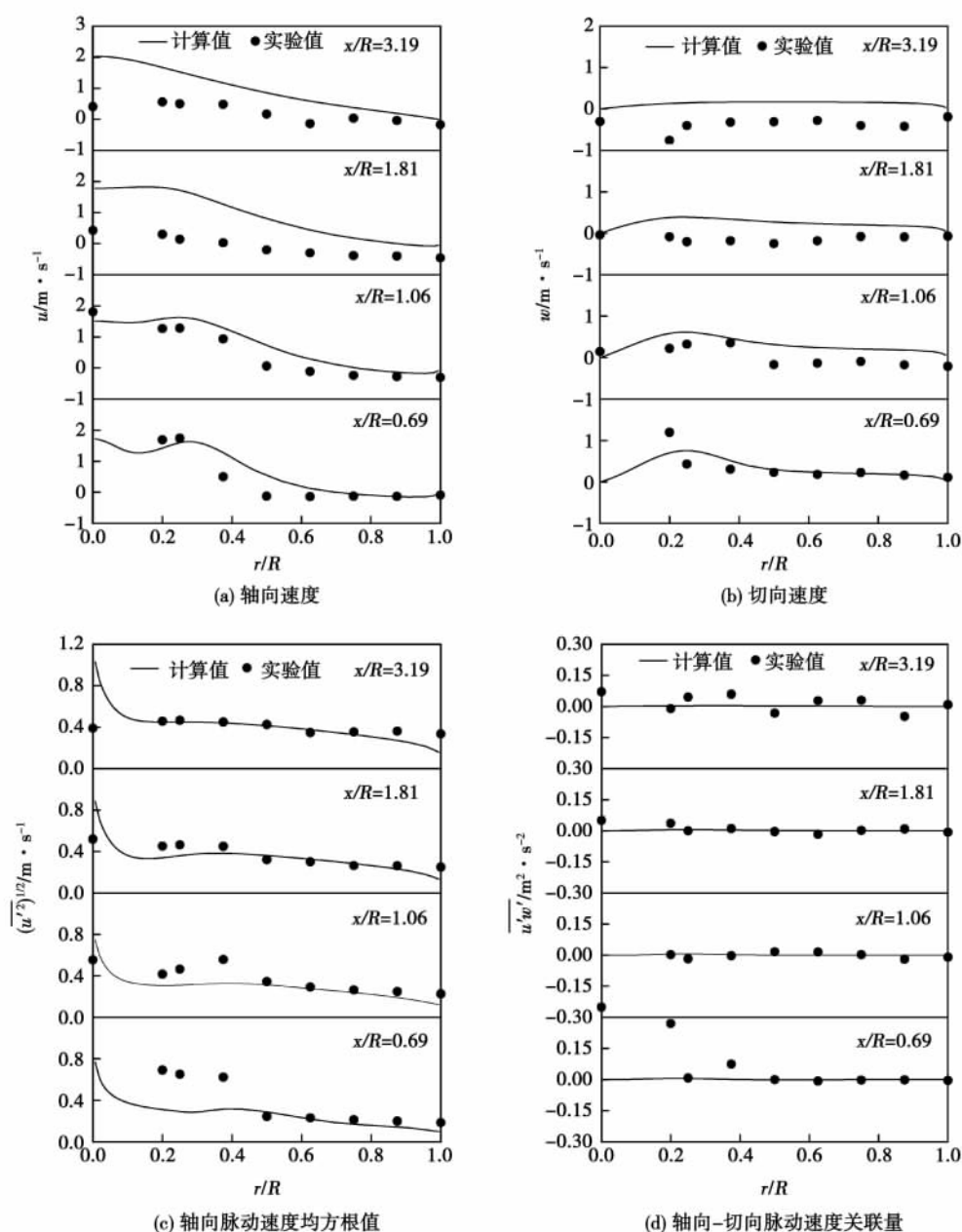


图 2 工况 1 气体速度及脉动速度关联量模拟结果与实验的比较

3 结果与讨论

图 2 给出了工况 1 条件下采用代数二阶矩 - PDF 湍流燃烧模型对分级进风旋流燃烧室内甲烷湍流燃烧的气体速度及脉动速度关联量的模拟结果,并与文献 [13] 的实验数据进行了比较。图中 R 为燃烧室内半径。

图 2(a) 为气体轴向速度分布模拟结果。在燃烧室前部的两个截面上,预报出的气体轴向速度分布与实验相符。在燃烧室后部的两个截面上,中心轴线附近轴向速度的预报值比实验值偏高,在壁面附近则与实验相符。气体轴向速度分布呈现出中心区域高、近壁区域低的特点,在燃烧室前部的近壁区

域出现了回流。而中心区域则未出现回流,这与该工况下的二次风率相对较高有关。因此可适当降低二次风率,以有利于在燃烧室前部形成中心回流。

图 2(b) 气体切向速度分布模拟结果。预报的气体切向速度分布与实验基本相符。在燃烧室前部,气体切向速度在中心区域较高,在近壁区较低。在燃烧室后部,气体切向速度逐渐衰减到接近于零。

图 2(c) 为气体轴向脉动速度均方根值分布模拟结果。轴向脉动速度的预报值与实验值相符合,但在中心轴线处,计算结果比实验值偏高。气体轴向脉动速度均方根值在中心区域较高,在近壁区较低。由于采用了分级进风,从燃烧室前部到后部的中心区域气体速度均保持了相对较强的湍流脉动。

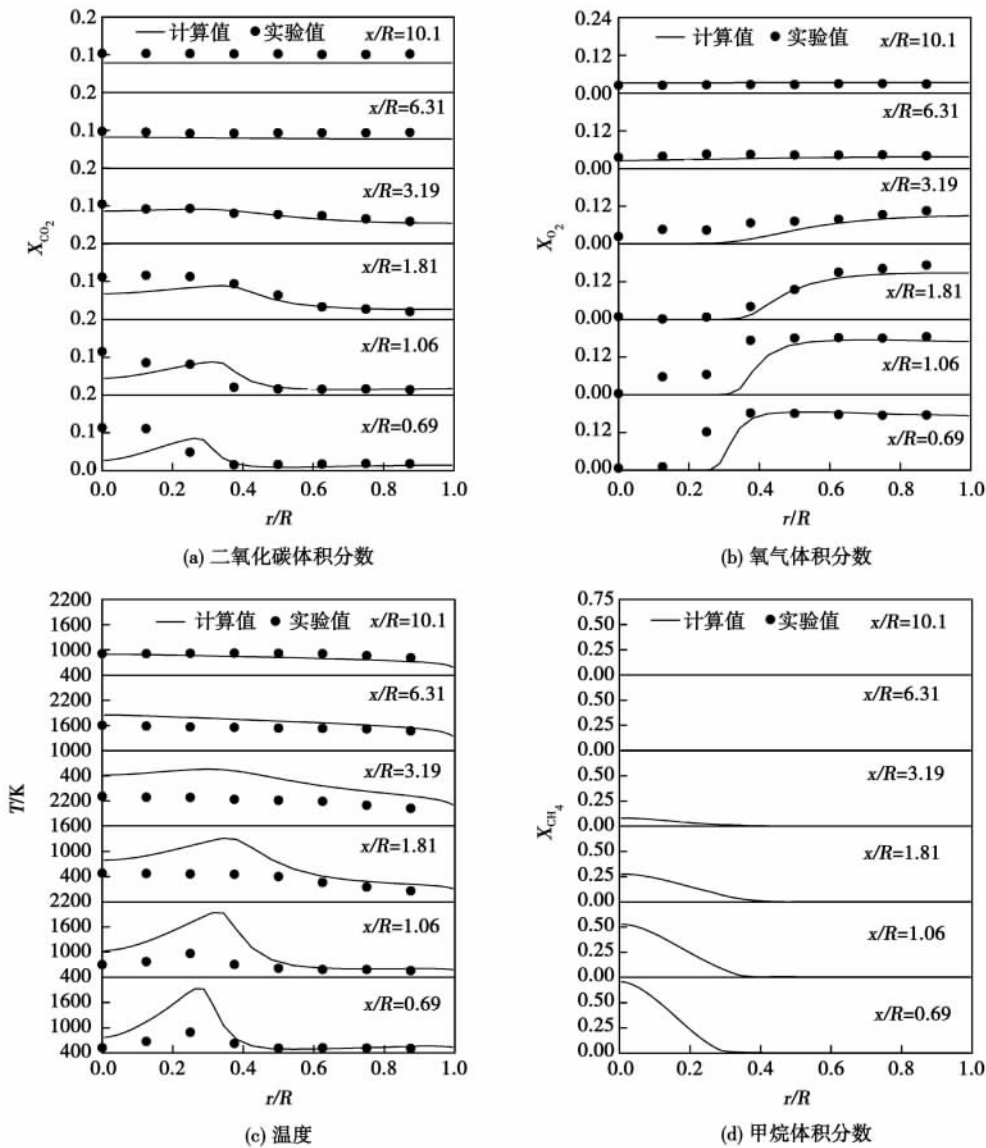


图 3 工况 2 气体组分体积分数和温度模拟结果及其与实验的比较

图 2(d) 为气体轴向 - 切向脉动速度二阶关联量即 Reynolds 切应力分量 $\overline{u'w'}$ 分布的模拟结果。气体轴向 - 切向脉动速度关联量的预报值在燃烧室前部近壁区域和燃烧室后部区域与实验值相符合,二者均接近于零。但在燃烧室前部的中心区域预报值比实验值偏低。

图 3 给出了工况 2 条件下采用代数二阶矩 - PDF 湍流燃烧模型对分级进风旋流燃烧室内甲烷湍流燃烧气体组分体积分数和温度的模拟结果,并与文献 [14] 的实验数据进行了比较。

图 3(a) 为二氧化碳体积分数分布模拟结果。从图中可以看出,预报值与实验值相符合。二氧化碳体积分数在中心区域较高,近壁区域较低,在燃烧室后部区域逐渐趋于均匀。

图 3(b) 为氧气体积分数分布模拟结果。预报的氧气体积分数在燃烧室前部的近壁区域和燃烧室后部与实验数据相符合,但在燃烧室前部的中心区域内比实验值偏低。氧气体积分数分布在燃烧室前部呈现出中心区域低而近壁区域高的特点,在燃烧室后部则趋于均匀。燃烧室前部中心区域的氧气消耗较快、燃烧反应较为剧烈,这与该工况下的二次风率较低有关。

图 3(c) 为气体温度分布模拟结果。计算得到的温度分布在燃烧室前部的近壁区域和燃烧室后部与实验相符。在燃烧室前部的中心区域,预报的气体温度比实验值偏高。气体温度在中心区域较高,近壁区域较低。在燃烧室后部,温度沿径向的变化趋于平缓。由于较高的气体温度会增大 NO_x 的生成,为降低燃烧室前部中心区域的气体温度,可适当提高二次风率,促使燃烧分级进行。

图 3(d) 为甲烷体积分数分布的模拟结果。甲烷体积分数在燃烧室前部中心区域较高,在轴线处达到峰值,在近壁区域则接近于零。随着燃烧反应的进行,甲烷浓度沿轴向逐渐降低。在燃烧室后部,甲烷逐渐趋于消耗完毕。

4 结 论

应用代数二阶矩 - PDF 湍流燃烧模型,对分级进风旋流燃烧室内的甲烷湍流燃烧进行了数值模拟,得到的气体速度、脉动速度关联量、组分浓度和温度与实验基本相符合,结论为:

(1) 气体轴向和切向速度以及轴向脉动速度均方根值在中心区域较高,近壁区域较低。切向速度

沿轴向逐渐衰减。

(2) 在燃烧室前部,气体温度和甲烷与二氧化碳体积分数在中心区域较高,近壁区域较低,而氧气体积分数分布在中心区域较低,近壁区域较高。在燃烧室后部,气体温度和各组分的体积分数都逐渐趋于均匀分布或接近于零。

(3) 选取恰当的二次风率,可有利于在燃烧室前部形成中心回流,并降低燃烧室前部中心区域的气体温度,使得燃烧分级进行。

参考文献:

- [1] HUTCHINSON P, KHALIL E E, WHITELAW J H, et al. The calculation of furnace-flow properties and their experimental verification [J]. ASME J Heat Transfer, 1976, 98: 276 - 283.
- [2] KHALIL E E, SPALDING D B, WHITELAW J H. The calculation of local flow properties in two-dimensional furnaces [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1975, 18: 775 - 791.
- [3] BOARDMAN R D, EATOUGH C N, GERMANE G J, et al. Comparison of measurements and predictions of flame structure and thermal NO_x in a swirling natural gas diffusion flame [J]. Combustion Science and Technology, 1993, 93: 193 - 210.
- [4] BENIM A C, SYED K J. Laminar flamelet modelling of turbulent premixed combustion [J]. Applied Mathematical Modelling, 1998, 22: 113 - 136.
- [5] HUTCHINSON P, KHALIL E E, WHITELAW J H. The measurement and calculation of furnace-flow properties [J]. Journal of Energy, 1977, 1: 210 - 221.
- [6] ANAND M S, HSU A T, POPE S B. Calculations of swirl combustors using joint velocity-scalar probability density function method [J]. AIAA Journal, 1997, 35: 1143 - 1150.
- [7] YANG W P, ZHANG J. Simulation of swirling turbulent combustion in the TECFLAM combustor [J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32: 2280 - 2289.
- [8] ZHANG J, ZHU C K. Simulation of swirling turbulent flow and combustion in a combustor [J]. Numerical Heat Transfer A, 2009, 55: 448 - 464.
- [9] ZHANG J, CHEN C M. Simulation of turbulent reacting flow in a swirl reactor [J]. Numerical Heat Transfer A, 2008, 53: 605 - 624.
- [10] RODI W. Turbulent models for environmental problems // Kollmann W. Prediction Methods for Turbulent Flows [C]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1980. 259 - 350.
- [11] GOSMAN A D, LOCKWOOD F C. Incorporation of a flux model for radiation into a finite-difference procedure for furnace calculations // Proceedings of the 14th Symposium (International) on Combustion [C]. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1972. 661 - 671.
- [12] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [13] 普 勇, 张 健, 周力行. 旋流燃烧室内湍流燃烧的 PDA 实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2002, 23: 394 - 396.
- [14] 普 勇, 张 健, 周力行. 分级进风对旋流燃烧室内湍流燃烧的影响 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25: 174 - 176.

510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2011, 26(1). – 79 ~ 83

With the highest net power generation efficiency and systematic exergy efficiency serving as the targets respectively and through a thermodynamic analysis, determined were two principles for choosing a working medium for a power generation system with different types of waste heat: for waste heat with a constant heat flux, a working medium with a relatively high critical temperature should be chosen and for waste heat with a constant initial temperature and mass flow rate, a working medium with a relatively low critical temperature should be chosen. Moreover, the main parameters α and β for evaluating an optimal working medium for a corresponding type of waste heat were defined and the working medium with bigger values enjoys a better performance. With a two-stage flue gas waste heat power generation system serving as an example, the Aspen Plus software was used to simulate, calculate and verify the theoretically analytic results. The research results show that the variation tendency of the net power, parameter α and exergy loss of different working media in the first stage of the system with the evaporation temperature fully corresponds to the theoretically analytic results and so does that of the net power, parameter β and exergy loss of different working media in the second stage of the system. This indicates that the principles and methods for choosing an optimal working medium being proposed by the authors are correct and feasible. **Key words:** waste heat power generation, working medium with a low boiling point, index for evaluating a work medium, thermodynamic analysis, flow path simulation

分级进风旋流燃烧室内湍流燃烧的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Turbulent Flow Combustion in a Staged Air Swirling-flow Combustor** [刊, 汉] CHEN Ying, ZHANG Jian (Engineering Mechanics Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2011, 26(1). – 84 ~ 88

By adopting the turbulent flow combustion model of an algebraic second-order moment-probability density function (PDF) , which has taken into account the interaction of the turbulent flow-chemical reactions, a numerical simulation was performed of the methane turbulent flow combustion under two groups of operating regimes in a staged-air swirling-flow combustor. The distribution of the mean square root values of carbon dioxide concentration and gas axial pulsation speed being obtained corresponds to the test data. Basically so do the air axial and tangential speed, correlation value of the axial-tangential pulsation speed as well as the distribution of the temperature and oxygen concentration. The research results show that to choose a proper secondary air ratio can play a role of optimizing the combustion process. **Key words:** staged air admission, turbulent flow combustion, swirling flow combustor, algebraic second-order moment-probability density function (PDF) turbulent flow combustion model, air speed, component concentration

600 MW 超超临界墙式切圆锅炉燃烧过程数值模拟 = **Numerical Simulation of the Combustion Process of a 600 MW Ultra-supercritical Wall Type Tangentially-fired Boiler** [刊, 汉] LIU Dun-yu, QIN Ming, WU Shao-hua (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) , SUN Qiao-qun (College of Astronautics and Architectural Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2011, 26(1). –