

# Numerical Simulation and Analysis of Jet Combustion Characteristic in Tubular Furnace

Hong Laifeng<sup>1</sup>, Sun Tie<sup>1</sup>, Yang Xuefeng<sup>1</sup>, Hui Huaiming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology, Liaoning Fushun, 113001, China

<sup>2</sup>Petro China Fushun Petrochemical Company, 113015, China

Email: Honglaifeng2008@163.com

**Abstract:** Numerical simulation method was applied to study the combustion characteristics of the jet combustion in tube furnace of delayed coking process. The simplified model of the furnace, the non-structural mesh, the k- $\epsilon$  turbulence model, the simplified PDF combustion model and the discrete ordinate transfer radiation model were used to simulate the three-dimension jet combustion in a combustion chamber. The effect of combustion parameters on combustion characteristics of furnace was discussed, when the fuel flow and excess air coefficient were changed, the change regularity of the temperature distribution in the combustion chamber was analyzed, and that can be used to direct the actual operating conditions.

**Key words:** furnace; combustion; numerical simulation

## 管式加热炉内射流燃烧特性的数值模拟与分析

洪来凤<sup>1</sup>, 孙 铁<sup>1</sup>, 杨雪峰<sup>1</sup>, 惠怀明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>辽宁石油化工大学, 辽宁抚顺 113001;

<sup>2</sup>中国石油抚顺石化分公司, 辽宁抚顺 113015

Honglaifeng2008@163.com

**摘 要:** 利用数值模拟的方法研究了延迟焦化工艺中管式加热炉内射流燃烧的燃烧特性。对加热炉进行模型简化, 采用非结构网格划分, 选用 k- $\epsilon$  湍流模型、PDF 扩散燃烧模型和离散辐射传热模型, 对一个燃烧室内三维射流燃烧过程进行了模拟。讨论燃烧参数对加热炉燃烧特性的影响, 分析了燃料流量和空气过量系数变化时, 燃烧室温度分布的变化规律, 从而对实际工况操作进行指导。

**关键词:** 加热炉, 燃烧, 数值模拟

### 1 引言

方箱管式加热炉是延迟焦化工艺中的关键设备, 燃料在炉膛内燃烧所产生的高温火焰和烟气作为热源通过炉管管壁来加热炉管中流动的重质油, 使其达到工艺所需的温度。但如果由于设计或操作不当而使炉温局部过高, 就会发生炉管内流体结焦、炉管烧穿等事故, 迫使装置停工检修; 反之, 如果由于设计或操作不当而使炉温过低或局部过低, 管内的流体就达不到所需的反应温度<sup>[1]</sup>。以往的研究大多是通过实验来进行的, 所得到的结果难以提供炉内燃烧状况的细节。数值模拟方法速度快, 重复性好, 可以提供加热炉内部过程的详细情况, 有助于解释和理解观察到的燃烧

现象, 指导加热炉及燃烧器的设计, 甚至代替困难或昂贵的试验, 因此它作为研究燃烧过程的一种新方法得到了迅速发展<sup>[2]</sup>。本文利用 FLUENT 流体计算软件, 对延迟焦化工艺中的方箱管式加热炉进行三维模拟, 探讨了燃烧参数对炉膛燃烧特性的影响, 为加热炉的实际燃烧操作提供了理论指导。

### 2 数学模型

本文研究的是加热炉燃烧室内甲烷与空气燃烧过程, 计算区域内流动、燃烧和传热过程可以用气相燃烧基本方程组来描述。气相燃烧的基本方程组包括: 连续性方程、动量方程、能量方程以及组分输运方程。由于实际的加热炉内的燃烧过程都是湍流燃烧, 而且计算区域的传热主要是以辐射的方式, 因此方程组还

基金项目: 辽宁省自然科学基金 (20092182)

需要湍流模型、燃烧模型、以及辐射传热模型加以封闭。

### 2.1 气相燃烧的基本方程组及湍流模型方程

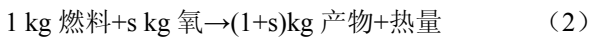
如果把这些方程中的未知数都用 $\phi$ 来表示,所有方程都可以表示成下式<sup>[3]</sup>

$$\partial(\rho\phi) / \partial t + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) + s_{\phi} \quad (1)$$

左边第一项是非定常项,第二项是对流项。右边第一项是扩散项,第二项是生成项(也叫源项)。在式(1)中,当 $\phi=1$ 时成为连续性方程;  $\phi=u, v, w$ 时,成为动量守恒式;当 $\phi=h$ 时成为能量守恒式;当 $\phi=m_i$ 时成为化学组分守恒式。 $\Gamma_{\phi}$ 为扩散系数,可代表粘度和导热系数等,是源项,相当于各方程统一用(1)表示时的剩余项以及反应引起的生成和消失项。式(1)中具体变量的含义见文献[4]。

### 2.2 气相燃烧模型

对于湍流扩散燃烧的数值模拟,采用简化的 PDF 快速反应扩散燃烧模型。该燃烧模型适用于扩散燃烧的数值模拟计算,认为扩散燃烧反应速度足够快,燃烧速率取决于燃料与空气的混合速度;燃料与氧化剂在同一时间不共存,但在有限反应区内其时均值可在同一位置共存。燃烧反应方程式为<sup>[5]</sup>:



式中  $s$  是完全燃烧 1 公斤燃料在理论上所需氧化剂的重量,简称为燃料及氧化剂的当量比,显然它与燃料和氧化剂的种类有关,而与化学反应及流动的状态无关。

### 2.3 辐射传热模型

计算辐射传热的目的是为能量方程的求解提供合适辐射传热速率。离散坐标法<sup>[6]</sup>是基于对辐射强度的方向变化进行离散,通过求解覆盖整个  $4\pi$  立体角的一套离散方向上的辐射传递方程而得到问题的解。离散坐标法可以很方便地处理入射散射项,且在计算有散射的辐射问题方面要优于现有的其他方法,能与流动方程方便地联立求解,因此本文采用这种方法计算辐射传热。

## 3 模拟对象及边界条件

本文对抚顺石油二厂的延迟焦化加热炉(编号 1204-F-101A)的燃烧室燃烧进行模拟。由于此加热炉

尺寸较大,共有六个大型燃烧室,144 个烧嘴,且每个燃烧室为轴对称结构,为简化模型及减少计算量,取其中一个燃烧室的 1/4 进行模拟,简化模型网格如图 3.1 所示:

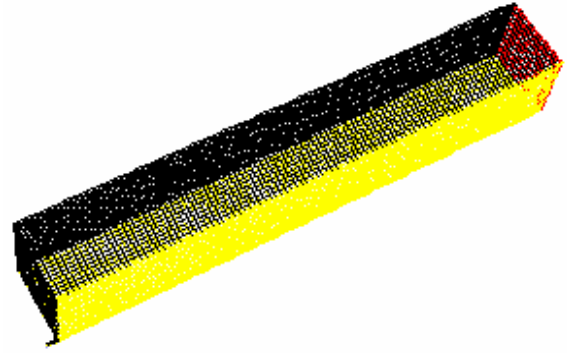


Figure 3.1 Grid map of the chamber

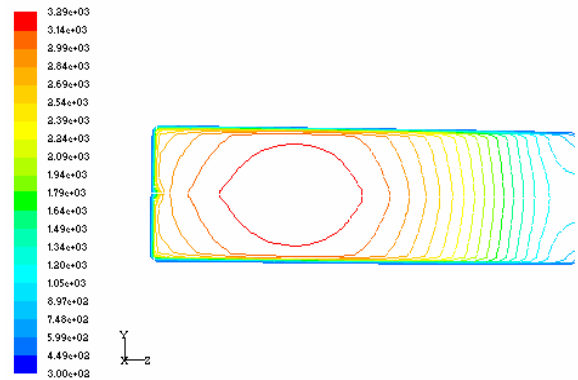
图 3.1 燃烧室网格图

所计算的加热炉 1/4 燃烧室尺寸为  $750\text{mm} \times 750\text{mm} \times 5000\text{mm}$ ,底部燃烧器直径为  $40\text{mm}$ 。根据实际加热炉的参数,设定边界条件为:燃气入口为 velocity-inlet,温度为  $383\text{K}$ ;烟气出口为 pressure-outlet,表压为  $-20\text{Pa}$ ;右侧面和背面为对称面,其他壁面热边界条件为  $300\text{K}$ 。

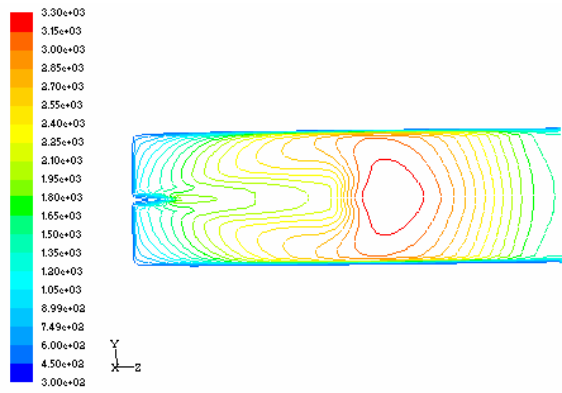
## 4 模拟结果及分析

### 4.1 燃料流量对燃烧室温度分布的影响

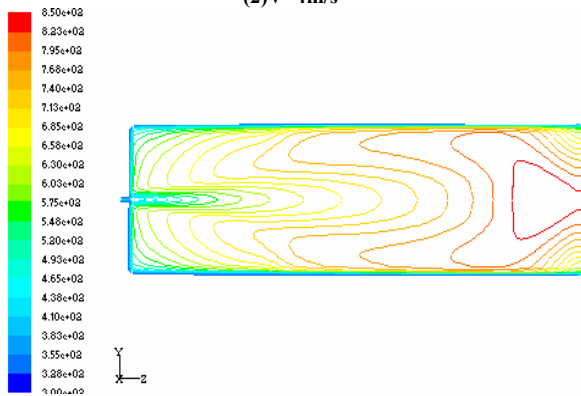
燃烧过程中,实际通入空气量与理论燃烧所需空气量的比值叫过量空气系数。当过量空气系数为 1.2 时,分别设置不同的燃料入口速度,燃烧室中心对称平面上温度分布情况如下:



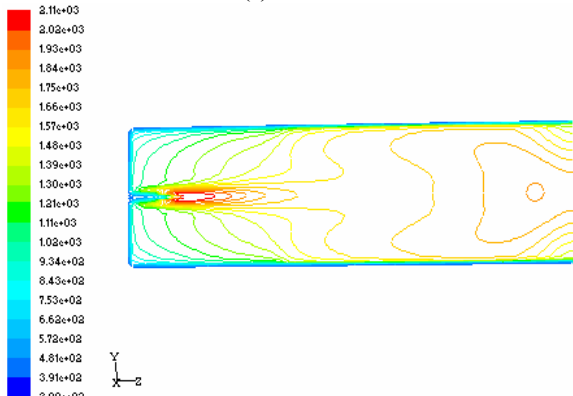
(1)  $V=2\text{m/s}$



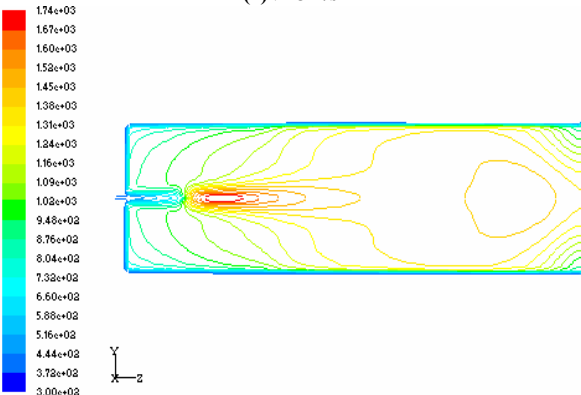
(2) V=4m/s



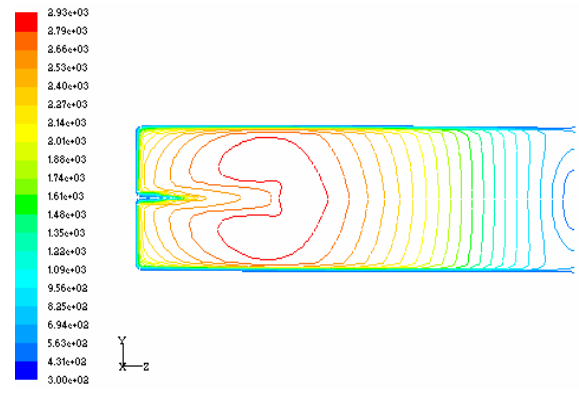
(3) V=6m/s



(4) V=8m/s



(5) V=10m/s



(6) V=12m/s

Figure 4.1 the temperature contours of central symmetric surface when the fuel inlet velocity V changes

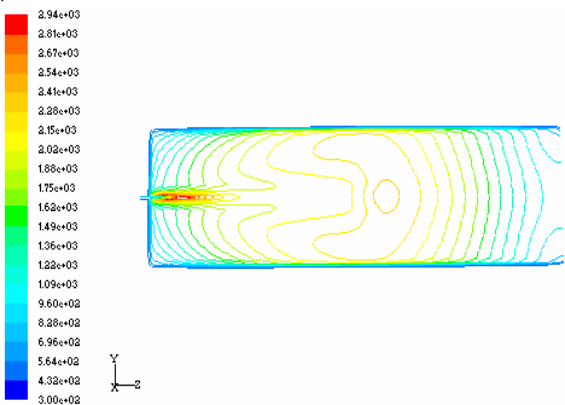
图 4.1 燃料入口速度 V 变化时，中心对称面上温度等值线图

由不同燃气入口速度时，温度的分布图(图 4.1)可以看出，随着燃气流量的增加，燃烧室内温度分布逐渐均匀，并且整体温度较高，平均温差较小。这主要是因为燃料流量的增加，增加了单位时间内进入燃烧室的热量，提高了燃烧室的容积热负荷。另外，燃烧室内高温区域主要分布在燃料射流周围，并且随着燃料流量的增加，高温区域逐渐扩大，并延伸到炉膛底部附近。

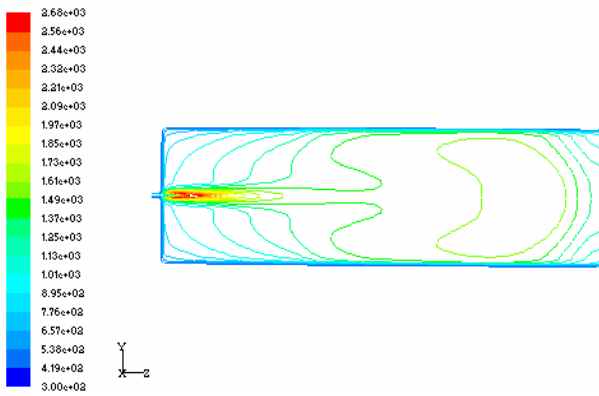
另一方面，当燃气流量过高时，虽然炉膛温度分布均匀，但平均温度过高，会使炉管中原料在加热炉中分解，甚至造成结焦而烧坏炉管。所以在满足加热炉所需加热温度的前提下，为均匀加热炉管，应调节燃料流量到较大值，但不能过大。

#### 4.2 过量空气系数对燃烧室温度的影响

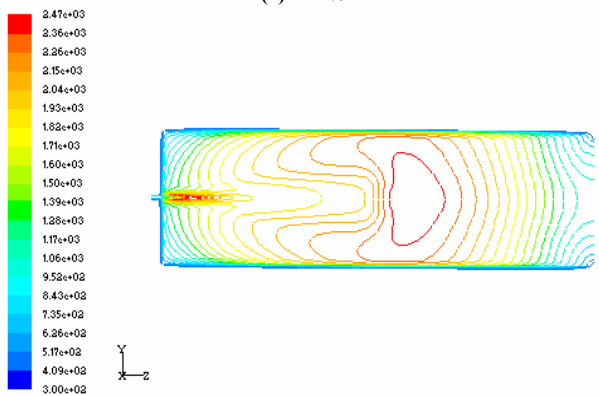
当燃料入口速度为  $V=8\text{m/s}$  时，分别设置不同的过量空气系数，燃烧室中心对称面上温度分布情况如下：



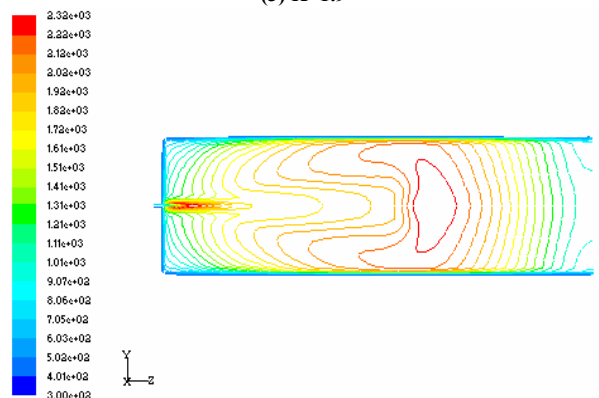
(1) K=1.3



(2)  $K=1.6$



(3)  $K=1.9$



(4)  $K=2.2$

Figure 4.2 the temperature contours of central symmetric surface when the excessive air coefficient  $K$  changes

图 4.2 过量空气系数  $K$  变化时, 中心对称面上温度等值线图

图 4.2 表示过量空气系数变化时, 燃烧室中心对称平面上的温度分布情况。由图可见, 随着  $K$  的增大, 燃烧室内温度分布逐渐不均匀, 温度梯度变大, 平均温度下降。当燃烧过程过量空气系数  $K$  较大时, 单位时间内进入燃烧室内的氧气量增加, 一方面, 氧气量的增加, 燃料在进入燃烧室后迅速发生燃烧反应, 在

很短的距离内燃烧殆尽, 燃烧火焰仅局限在燃料射流进口附近, 燃料在较小的范围内释放热量, 导致燃烧室内温度分布不均匀, 燃烧效率下降; 另一方面, 大量助燃空气进入燃烧室, 势必要吸收燃料燃烧释放的热量, 使得燃烧室内平均温度下降, 同时也加剧了温度分布的不均匀性。

同时, 过量空气系数对加热炉的热效率影响很大。过量空气系数过大, 一方面, 加热炉内烟气含氧量过多, 排烟时, 过剩空气将热量带走, 排入大气, 使得炉子的排烟热损失增加, 热效率下降; 另一方面, 会降低炉膛内的燃烧温度, 使得炉管表面热强度下降, 若要保证加热炉的恒定热负荷, 则必须增强燃料用量, 使得加热炉热效率下降。过剩空气系数过小, 会造成燃料燃烧不完全, 同样使得加热炉燃料消耗量增加, 从而使加热炉的热效率下降。所以在满足炉膛温度的前提下, 应选择适当的过量空气系数, 以提高加热炉的热效率。

另外, 实际情况下, 为了控制烟气的出炉温度, 入口燃料流量和过量空气系数是可调节的。此加热炉辐射段烟气的实际出口温度大约为 1100K, 由以上温度分布图可以看出, 当  $V=8\text{m/s}$ ,  $K=1.3$  时, 加热炉内温度分布较均匀, 辐射段烟气出口温度在误差范围内与实际情况相符。

## 致谢

感谢辽宁石油化工大学孙铁教授对本论文的悉心指导和大力帮助, 同时也感谢中国石油抚顺石化分公司的支持和合作。

## Reference (参考文献)

- [1] Huang Zuqi, Yang Guangjiong, Yu Zhunhong, et al. Simulation and computer calculation of petrochemical tube furnace [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1993, 203-204  
黄祖祺, 杨光炯, 于遵宏, 等. 石油化工管式炉的模拟与计算机计算[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993: 203-204
- [2] Wang Juan, Mao Yu, Jiang Hua, et al. Numerical simulation of turbulent flow and combustion in a delayed coking furnace [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 20(6): 58-59  
王娟, 毛羽, 江华等. 延迟焦化加热炉内湍流流动和燃烧的数值模拟研究[J]. 石油学报, 2004, 20 (6): 58-59
- [3] Guo Defeng. The application of numerical simulation in combustion research [J]. Technology and Economy, 2006, 4: 66-67  
郭得锋. 数值模拟在燃烧研究中的应用[J]. 科技与经济, 2006, 4: 66-67
- [4] Zhou Lixing. The theory and numerical simulation of turbulent gas-particle flows and combustion [M]. Beijing: Science Press, 1994, 24-36  
周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1994, 24-36
- [5] Zhou Guijuan, Mao Yu, Wang Zizong, et al. Numerical simula-

tion of air swirl gas combustion [J]. Petroleum Chemical Equipment Technology, 2009, 30(5): 1-2  
周桂娟, 毛羽, 王子宗等. 空气旋流气相燃烧过程数值模拟研

究[J]. 石油化工设备技术, 2009, 30 (5): 1-2  
[6] Turelove J S. Discrete ordinate solutions of the radiation heat transport equation[J]. J Heat Transfer, 1987, 109(4): 1048-1051