

文章编号:1673-5005(2007)03-0133-04

双辐射室裂解炉不同横跨段结构实验及数值模拟

刘熠斌¹, 肖家治¹, 杨朝合¹, 沈国平¹, 何细藕²

(1. 中国石油大学 重质油国家重点实验室, 山东东营 257061; 2. 中国石化工程建设公司, 北京 100101)

摘要:双辐射室裂解炉采用两个辐射室共用一个对流段的结构,在一侧辐射室正常生产而另一侧进行烧焦操作时,对流室烟气的偏流和回流会引起对流炉管的受热不均,局部对流炉管传热能力下降。通过冷模实验和数值模拟分析了双辐射室裂解炉原水平横跨段结构、倾斜横跨段结构和桥墙结构对对流室底部烟气流动的影响。结果表明,倾斜横跨段结构和对流室底部增设桥墙结构对对流室烟气的偏流和回流具有明显的改善作用,烟气在对流室的偏流率由原来的 50.08% 分别降为 24.39% 和 2.44%,烧焦一侧对流室的温度也有较大程度地降低。

关键词:裂解炉; 对流段; 横跨段; 冷模实验; 数值模拟

中图分类号:O 368

文献标识码:A

Experiment and numerical simulation of different crossover section in double-firebox cracking furnace

LIU Yi-bin¹, XIAO Jia-zhi¹, YANG Chao-he¹, SHEN Guo-ping¹, HE Xi-ou²

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Engineering Incorporation, SINOPEC, Beijing 100101, China)

Abstract: There is only one convection section in double-firebox cracking furnace. The deflection and circumfluence of flue gas in convection section would affect the heat transfer when one firebox is on decoking operation, and some tube's temperature would be higher. For this problem, cold experiment and numerical simulation were used to study the influences of customary horizontal crossover section, gradient crossover section and oriented wall. The results show that oriented wall could reduce the flue gas deflection and the circumfluence in convection section bottom clearly, and the ratio of gas deflection reduces to 24.39% and 2.44%, respectively. The temperature of flue gas in convection section whose tubes went to the decoking firebox also reduces.

Key words: cracking furnace; convection section; crossover section; cold experiment; numerical simulation

乙烯生产是衡量一个国家和地区石油化工生产水平的标志^[1]。石油烷烃经管式裂解炉裂解生产乙烯的方法至今在乙烯的生产中仍占统治地位^[2]。常见的乙烯裂解炉有蓄热式裂解炉、砂子裂解炉、熔盐裂解炉、管式裂解炉等。管式裂解炉法是各国普遍采用的方法^[3]。双辐射室管式裂解炉采用两个辐射室共用一个对流段的结构,两个辐射室是相对独立的,可以分别裂解不同的原料,控制不同的操作温度,也可以实现一个辐射室进行正常生产,而另一个辐射室进行烧焦操作。当裂解炉的两个辐射室都进行正常生产操作时,虽然各自裂解的原料或工艺

参数控制有所不同,但对于两个辐射室来讲,它们的工艺参数如烟气量、烟气横跨段温度、辐射室平均烟气温度等相差不大;当裂解炉一个辐射室进行正常生产而另一个辐射室进行烧焦操作时,由于烧焦时的热负荷只有正常生产时的 1/4 ~ 1/3,烧焦炉膛的空气过剩系数比较大,两辐射室的烟气流量及烟气横跨温度都相差较大,这种差异会导致裂解炉横跨段的烟气流动状态发生较大的变化,影响对流室烟气的流动和传热,增加了现场调节的难度^[4]。针对这一问题,笔者通过实验和模拟两种方法研究双辐射室裂解炉横跨段烟气流动,并对几种优化结构的

收稿日期:2006-11-20

作者简介:刘熠斌(1980-),男(汉族),山东潍坊人,博士研究生,研究方向为化学反应工程。

改进效果进行模拟考察。

1 不同横跨段结构的实验

1.1 实验装置及流程

参照双辐射室裂解炉的结构,建立冷模实验装置,用混有 CO_2 的空气及纯压缩空气作为介质,在冷态下测定不同结构形式的横跨段在正常生产和一侧辐射室正常生产另一侧烧焦两种工况下,对流室底部 CO_2 的浓度分布,对不同结构的结果进行比较。不同结构形式的横跨段示意图如图 1 所示。



图 1 不同结构形式的横跨段示意图

实验装置流程如图 2 所示,压缩空气经过缓冲罐后分为两路,与自制的双辐射室裂解炉冷模实验模型相对应。左辐射室对应的左支路采用管道混合方式通入 CO_2 作为示踪剂。压缩空气经过流量计计量后进入裂解炉的左右辐射室底部。辐射室底部采用两层不同孔径的分布器以保证空气分布均匀。在对流室底部和辐射室安装 U 型管压差计。用气相色谱仪检测辐射室底部和对流室底部 CO_2 浓度分布。取样点位置如图 3 所示,取样点间隔为 100 mm,高度距横跨段底部 400 mm,横跨段高度 200 mm。

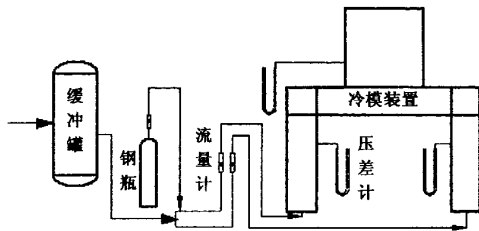


图 2 冷模实验装置流程示意图

1.2 不同横跨段实验结果

实验内容包括两个辐射室流量相同的正常实验和辐射室流量不同的偏流实验。基础实验时控制两个辐射室介质流量相同,根据设计规范和实验条件的限制,横跨段流速定为 0.43 m/s;偏流实验时左侧辐射室介质流量保持不变,右侧辐射室流量为左侧辐射室的 1/3。倾斜横跨段的结构倾角为 45°,桥墙的高度为 300 mm,实验结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,偏流实验时,对流室靠近烧焦操作的一侧烟气流量增大,致使其 CO_2 的浓度增大,

这说明一侧辐射室正常生产而另一侧烧焦时,正常生产一侧的对流炉管得到的烟气量比所需的少,而烧焦一侧对流炉管得到的烟气量比所需的多。当采用 45° 倾斜横跨段和桥墙结构时,烟气在对流室的偏流会得到明显地改善。这是因为上述两种结构改变了烟气进入对流室的流动方向,使其在 x 方向的分速度减小,从而使其偏流的量减少。可见倾斜横跨段和桥墙横跨段可以改善对流室烟气的偏流,桥墙横跨段的改善效果优于倾斜横跨段。

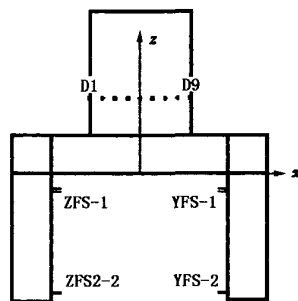


图 3 冷模实验装置取样点位置示意图

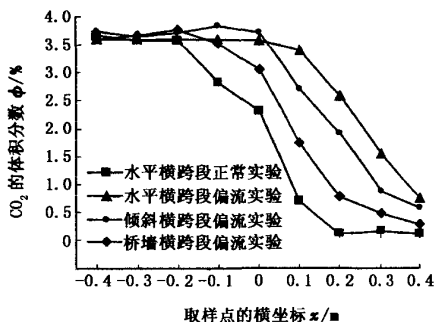


图 4 不同结构横跨段冷模偏流实验结果

2 不同横跨段结构的数值模拟

CFX 软件可以用来计算流体流动、耦合传热、多相流、粒子输送、化学反应、燃烧以及辐射等方面的问题,广泛应用于空气动力学、多相流以及加热炉的流场模拟。CFX 软件在湍流模型中纳入了单方程模型、双方程模型、雷诺应力模型等,其中的 $k \sim \epsilon$ 模型在流场的模拟计算中应用最多^[5-7]。采用 CFX 软件对不同结构横跨段进行模拟,对指导现场的操作及设备改造具有重要意义。

2.1 $k \sim \epsilon$ 模型的基本方程

CFX 软件采用奈维-斯托克斯方程作为基本控制方程^[8],即

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho u\phi) = \nabla \cdot (\Gamma \text{grad}\phi) + S.$$

式中, ρ 为流体密度; u 为流体流动速度; Γ 是扩散系数; S 是源项; ϕ 为化学组分的质量分数、焓、速度分量、湍流动能或湍流长度尺度等, 对于特定意义的 ϕ , 具有特定的 Γ 和 S 。

除了上述控制方程外, 流场还应当满足一个附加的约束条件, 即质量守恒或连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0.$$

$k \sim \varepsilon$ 模型是工程上的标准双方程模型, 在其控制方程中引入了两个新的参数 B_i 和 V_i , 则有

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \nabla \cdot (\rho u u_i) = \nabla \cdot (\mu_e \text{grad} u_i) - \nabla p' + B_i + V_i,$$

其中

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k, \mu_e = \mu + \mu'.$$

式中, μ_e 是湍流有效粘度; p 是压力; B_i 是单位容积内的体积力; V_i 代表除 $\nabla \cdot (\mu_e \text{grad} u_i)$ 所表示的粘性力项之外的其他所有粘性力项; μ 是流体粘度; μ' 为湍流粘度。 $k \sim \varepsilon$ 模型假设 μ' 和湍流动能 k 以及湍流动能的耗散率 ε 之间有如下的关系:

$$\mu' = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, k = (0.5\% \sim 1.5\%) \left(\frac{1}{2} u^2 \right),$$

$$\varepsilon = c_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L}, L = 0.07l.$$

其中, C_μ 是常数, 取 0.09; l 为特征尺寸。

2.2 不同结构横跨段的建模及求解

以现场双辐射室裂解炉的尺寸为参考, 对模拟研究的对象进行构体。横跨段的高度为 900 mm, 宽度为 2800 mm。构体时采用直角坐标系(图 3), 对炉膛的壁面进行一定的简化, 忽略炉管对流动的影响。选用热空气模拟烟气, 忽略浮力和旋转的影响, 采用 $k \sim \varepsilon$ 双方程模型; 辐射室底部设为入口, 左辐射室模拟正常操作, 烟气温度为 1200 ℃, 右辐射室模拟烧焦操作, 烟气温度为 900 ℃^[9]; 根据设计规范的要求, 使左横跨段的烟气流速为 0.8 m/s^[10], 右横跨段烟气流速为左横跨段的 1/3; 采用自适应适体网格, 在对流室底部建立网格控制, 对其进行细化, 以得到更精确的计算结果; 收敛精度控制为 0.0001。

在保持介质、湍流模型和边界条件不变和辐射室及对流室结构不变的条件下, 对横跨段结构进行调整。在原水平横跨段的基础上将横跨段分别改为倾斜 45°, 以及对流室底部增设宽度为 100 mm、高度为 1100 mm 的桥墙, 如图 1 所示。对以上的 2 种改

进结构以及原有结构进行模拟, 考察改进结构对对流室烟气偏流及回流的影响。

2.3 模拟结果比较分析

为了详细考察非正常操作时对流段的偏流情况, 以对流室与横跨段底部的交点作为坐标原点(如图 3 所示), 定义烟气在对流室的偏流率为

$$\phi = \frac{Q_D^0 - Q_D}{Q_D^0}.$$

其中

$$Q_D = \sum \frac{u_{n-1} + u_n}{2} dD.$$

式中, Q_D^0 为正常操作(两辐射室烟气流量相同)时对流室左侧烟气流量, m³/s; Q_D 为偏流操作(两辐射室烟气流量不同)时对流室左侧烟气流量, m³/s; u_n 为对流段第 n 检测点的 z 向速度, m/s; d 为两个检测点的 x 方向间隔距离, m; D 为炉体长度, m。

取 $z = 1300$ mm 的水平面作为考察平面, 在其平面的中心线均匀取 13 个点作为检测点, 间距为 100 mm。通过检测点的 z 向速度、温度等参数比较分析不同横跨段结构对偏流现象的影响。模拟的结果见表 1, 表 2 和图 5。

表 1 不同横跨段结构各检测点的 z 向速度

检测点 x 坐标	z 向速度 $v_z/(m \cdot s^{-1})$		
	原始横跨段	倾斜横跨段	桥墙横跨段
-0.6	-0.347	0.775	0.471
-0.5	-0.061	0.861	0.748
-0.4	0.413	0.928	1.086
-0.3	0.859	0.967	1.357
-0.2	1.066	0.963	1.452
-0.1	1.164	0.923	1.448
0.0	1.192	0.882	1.176
0.1	1.188	0.835	0.857
0.2	1.169	0.781	0.567
0.3	1.099	0.711	0.424
0.4	0.991	0.641	0.329
0.5	0.878	0.579	0.19
0.6	0.808	0.539	-0.11

通过表 1、2 中的模拟结果可以得出:

(1) 原水平横跨段结构。采用原水平横跨段结构, 烧焦操作时对流室右侧最低温度为 969 ℃, 比右辐射室的初值温度高约 70 ℃; 对流室右侧烟气流速高于左侧, 偏流率为 50.08%, 这将导致对流室右侧炉管的温度比实际要求高, 影响炉管的使用寿命; 而对流室左侧的烟气流量较小, 将使对流炉管的温度低于对流转辐射要求的温度, 影响正常生产一侧辐射室的裂解操作; 在对流室的左侧边壁位置检测点的 z 向速度为负值, 速度矢量图显示此位置烟气回

流现象严重。

表 2 不同横跨段结构各检测点的温度

检测点 x 坐标	烟气温度 $\theta/^{\circ}\text{C}$		
	原始横跨段	倾斜横跨段	桥墙横跨段
-0.6	1194	1200	1200
-0.5	1194	1200	1200
-0.4	1196	1197	1200
-0.3	1196	1195	1200
-0.2	1196	1190	1195
-0.1	1191	1172	1176
0	1185	1151	1132
0.1	1172	1127	1062
0.2	1150	1094	989
0.3	1111	1047	935
0.4	1058	997	907
0.5	1007	958	906
0.6	969	938	906

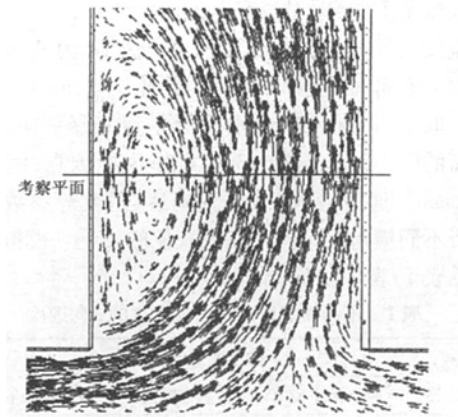


图 5 烧焦操作时回流区速度矢量图

(2) 倾斜横跨段结构。采用 45° 倾斜横跨段结构,烧焦操作时对流室右侧最低温度比采用原水平横跨段时降低 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$,烟气偏流率下降到 24.39%,整个对流室的烟气流速趋于平均化,左右两侧的差距不大,对流室底部回流区消失。倾斜横跨段结构对对流室内烟气偏流及回流都有所改善。

(3) 桥墙横跨段结构。按照工业双辐射室裂解炉横跨段结构尺寸,在对流室底部增设桥墙时,对流室左侧烟气流量明显高于右侧,偏流率从 50.08% 下降到 2.44%,烟气的偏流现象得到明显改善,对流室底部的回流区消失。从温度的模拟结果看,右侧的温度明显低于采用水平横跨段时的温度,符合烧焦操作的要求。

3 结 论

(1) 在一侧辐射室正常生产另一侧辐射室烧焦

操作时,对流室烟气偏流现象严重,对流室底部存在回流区。

(2) 采用倾斜横跨段结构和横跨段底部安装桥墙的结构能够改善对流室烟气的偏流和回流,桥墙结构的改善效果优于倾斜横跨段结构。

参考文献:

[1] 陈滨. 乙烯工学[M]. 北京:化学工业出版社,1997.

[2] 王国清,曾清泉. 裂解技术进展[J]. 化工进展,2002, 21(2):92-96.

WANG Guo-qing, ZENG Qing-quan. Advance in prolysis technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2002, 21(2): 92-96.

[3] 王松汉. 乙烯装置技术[M]. 北京:中国石化出版社, 1994.

[4] 申海女,何细藕. 计算流体力学在裂解炉设计上的应用[J]. 乙烯工业,2004,16(4):34-37.

SHEN Hai-nü, HE Xi-ou. Application of CFD in design of cracking heater [J]. Ethylene Industry, 2004, 16(4): 34-37.

[5] 杨湘,程素森,郭汉杰,等. 蓄热式加热炉流场的数值模拟[J]. 北京科技大学学报,2003,25(2):135-138.

YANG Xiang, CHENG Su-sen, GUO Han-jie, et al. Numerical simulation on the flow field of a regenerate reheating furnace [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(2): 135-138.

[6] 梅炽,李欣峰,殷志云,等. 阳极焙烧炉燃烧室三场动态仿真[J]. 中南工业大学学报,1998,29(5):438-441.

MEI Chi, LI Xin-feng, YIN Zhi-yun, et al. Dynamic simulation of anode baking furnace flue [J]. Journal of Central South University of Technology, 1998, 29(5): 438-441.

[7] 李欣峰,梅炽,张卫华,等. 铜闪速炉数值仿真[J]. 中南工业大学学报,2001,32(3):262-266.

LI Xin-feng, MEI Chi, ZHANG Wei-hua, et al. Simulation of copper flash smelter [J]. Journal of Central South University of Technology, 2001, 32(3): 262-266.

[8] 帕坦卡 S V. 传热与流体流动地数值计算[M]. 张政,译. 北京:科学出版社,1984.

[9] NOUWEN W, DUPON E BARENDREGT S, et al. Simulation tolls evaluate large-capacity furnace designs [J]. Oil & Gas Journal, 1998(3):52-55.

[10] 王松汉,何细藕. 乙烯工艺与技术[M]. 北京:中国石化出版社,2000.

(编辑 刘为清)