

Studies on Coke Cooling Process in Coke Drum

Lanjuan Wang¹, Wenzhong Zhang, Jiazhi Xiao

State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, College of Chemistry and Chemical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266555, Shandong, China

Email: wanglan.j@163.com

Abstract: On the basis of the multidimensional transient heat transfer differential equation, two-dimensional transient heat transfer governing equation in the cylindrical coordinate was derived. Fully implicit discretization equation of inner nodes and discretization equation of boundary nodes by means of additional source term method were built up. Taking cokes in coke drum as the research object, a simplified middle-channel model was built up. Then the mathematical model established in this paper was numerically analyzed using finite volume method. Visual Basic 6.0 was used to program to calculate the temperature fields of cokes in coke drum. On the assumption that the exothermic amount of coke is equal to the heat absorption amount of water, the calculated vaporization amount of water 1.4~12.0t/h is close to the flux range of condensed water 4~15t/h.

Keywords: Delayed coking; Coke drum; Coke cooling process; Transient heat transfer; Middle-channel model

焦炭塔冷焦过程的研究

王兰娟, 张文钟, 肖家治

中国石油大学重油国家重点实验室, 青岛, 中国 266555

Email: wanglan.j@163.com

摘要: 从多维非稳态传热微分方程出发, 推导了圆柱坐标系下的二维非稳态传热主控方程, 建立了内节点全隐式离散方程, 由附加源项法得到了边界节点离散方程。以焦炭塔焦层为研究对象, 假定成型焦层为中间孔道结构, 运用控制容积法对中间孔道焦层模型进行了数值计算和分析; 以Visual Basic 6.0为平台, 编制了含焦炭塔温度场计算程序; 假定焦层降温放热量等于冷焦水汽化吸热量, 计算得到给水冷焦过程冷焦水汽化量为1.4~12.0t/h, 接近于现场冷凝水实际产生量4~15t/h。

关键词: 延迟焦化; 焦炭塔; 给水冷焦; 非稳态传热; 中间孔道模型

前言

延迟焦化装置焦炭塔由两塔轮流切换操作, 在焦炭塔切换后, 老塔处理过程中每个环节的工作, 都可能对焦炭塔下一次的切换造成影响, 尤其是在老塔处理的给水冷焦过程中, 如果操作不当, 会产生粘油回流、塌焦、水击等不良现象, 直接影响装置的正常生产和设备使用的寿命。

本文假定焦炭层降温放出热量全部传递给冷焦水用于升温汽化; 忽略冷焦水在焦层微孔内部的汽化及不同部位焦层性质的差异, 假定焦层降温是一个二维轴对称非稳态过程; 从基本能量守恒方程出发, 得到不同时刻不同部位焦层温度场、焦层放热量及冷焦水汽化量的数值解, 找到冷焦水汽化量的影响因素及

冷焦水汽化量的变化规律, 为焦化装置大型化和在役装置消除瓶颈制约、缩短生焦周期提供技术支撑。

1. 二维非稳态传热方程的推导及数值解

焦炭塔壁温是可测的, 但整个焦层的降温曲线未知。给水冷焦过程中, 假定焦层降温是一个二维轴对称非稳态过程, 则推导适合焦炭塔和塔内焦层的二维非稳态传热方程及稳定数值解是求解焦层温度场的基础。

从多维非稳态传热微分方程^[1]出发, 不考虑焦炭塔焦层周向传热, 得到圆柱坐标系下的二维非稳态传热主控方程:

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (1)$$

P 为计算域内任意一个节点, E、W、N、S 分别为紧邻 P 点的节点, e、w、n、s 为 P 点的控制体在 E、W、N、S 方向的控制界面, 虚线所围成的封闭域是 P 点的控制体。对控制容积 P 作积分, 则二维非稳态传热方程的全隐格式为:

$$a_P t_P = a_W t_W + a_E t_E + a_S t_S + a_N t_N + b \quad (2)$$

其中:

$$a_W = \frac{r_P \Delta r}{(\delta z)_w / \lambda_w} = \frac{r_P \Delta r}{\Delta z / \lambda_w}, \quad a_E = \frac{r_P \Delta r}{(\delta z)_e / \lambda_e} = \frac{r_P \Delta r}{\Delta z / \lambda_e} \quad (3a)$$

$$a_S = \frac{r_s \Delta z}{(\delta r)_s / \lambda_s} = \frac{r_s \Delta z}{\Delta r / \lambda_s},$$

$$a_N = \frac{r_n \Delta z}{(\delta r)_n / \lambda_n} = \frac{r_n \Delta z}{\Delta r / \lambda_n} \quad (3b)$$

$$\Delta V = r_P \Delta r \Delta z, \quad a_P^0 = \frac{(\rho c_p)_P \Delta V}{\Delta \theta}, \quad b = a_P^0 t_P^0 \quad (3c)$$

$$a_P = a_W + a_E + a_S + a_N + a_P^0 \quad (3d)$$

为使内部节点的温度代数方程组得以封闭, 本文采用附加源项法处理边界条件, 在附加源项法中, 把由第二类或第三类边界条件所规定的进入或导出计算

区域的热量作为与边界相邻的控制容积的当量源项 S 。并结合 Fourier 定律, 得到第三类边界条件时边界节点附加源项表达式:

$$S_{C,ad} = \frac{t_f r_s \Delta z}{1/\alpha_i + \Delta r / 2\lambda_i} \cdot \frac{1}{\Delta V} \quad (4a)$$

$$S_{P,ad} = -\frac{r_s \Delta z}{1/\alpha_i + \Delta r / 2\lambda_i} \cdot \frac{1}{\Delta V} \quad (4b)$$

建立封闭的代数方程组之后, 选择交替方向隐式算法 ADI 和三对角阵算法 TDMA 作为代数方程组求解的方法。经过划分节点、区域离散, 径向 TDMA 逐行扫描和轴向 TDMA 逐列扫描后, 就可得到下一时层的各个节点温度。

2. 中间孔道焦层模型的建立及分析

2.1 中间孔道焦层模型的建立

关于焦炭塔内的焦层结构, 国内普遍认为焦炭由塔壁向中心扩展, 中心形成进料通道^[2]; H.T.波霍金柯^[3]描述了焦炭塔内物料的流动状态及焦炭的形成过程; 美国 Great Lakes Carbon 公司提出了“焦炭塔里树样结构”的孔道分枝理论^[4,5,6]。如图1所示, 根据国内外文献对生焦机理的解释及现场调研分析, 焦炭塔内的焦层结构可概括为:

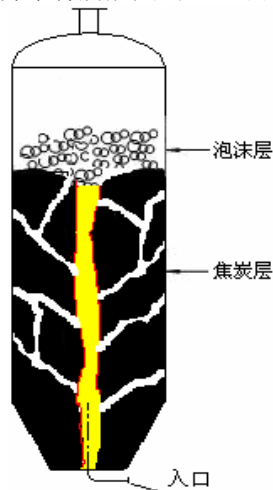


Figure 1. Coke structure in coke drum
图1 焦层基本结构

(1) 塔内存在中间孔道和分枝孔道, 中间孔道是冷焦水和汽化蒸汽上升的主要通道。

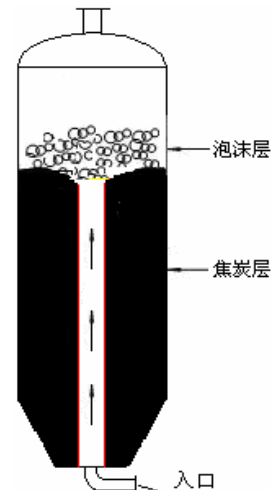


Figure 2. Middle channel structure
图2 焦层中间孔道结构

(2) 冷焦水和汽化蒸汽沿中间孔道上升过程中, 少量水和蒸汽也会进入分枝孔道。

(3) 焦层内的焦炭为多孔熔融状物质,孔内存在残余油气。

假定焦炭塔内成型焦层为中间孔道结构,提出中间孔道焦层模型。参见图 2,焦层中间孔道直径 $d_{\text{孔道}}$ 参考现场经验值:焦炭塔直径 5.6m 时, $d_{\text{孔道}}$ 为 300~400mm;塔径 9.4m 时, $d_{\text{孔道}}$ 为 500~600mm。本文忽略冷焦水在焦层微孔内部的汽化,并假定给水冷焦之前残余油气已被蒸汽全部带走,考察冷焦水汽化量的变化规律。

2.2 中间孔道焦层模型的求解

(1) 网格

网格的划分有很多种,本文采用均匀网格。网格大小和时间步长的选择对计算结果的影响较大。从结果精度和计算时间两方面综合考虑,确定了含焦焦炭塔温度场计算程序合理的网格参数:径向划分 188 个网格,轴向划分 50 个网格,时间步长 1min。

(2) 初始条件

①考虑到焦层内侧受到吹汽阶段过热蒸汽三小时的冲刷,取内侧轴向初始温度等于吹汽阶段过热蒸汽温度。

②考虑到焦层外侧紧贴焦炭塔壁且导热良好,取外侧初始温度与吹汽过程结束时塔壁温度相等且轴向线性分布。

③初始时刻焦层径向温度场采用稳态导热分布。

(3) 边界条件

①内边界和上边界都是第三类边界,沸腾给热系数取 $2500\sim25000\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ ^[7],流体主体温度取塔顶压力对应的饱和水温度^[8]。

②外边界取第一类边界,等于现场塔壁热电偶温度且轴向线性分布。

③下边界取绝热边界。

(4) 焦层物性参数

焦层物性参数主要包括焦炭的导热系数 λ 、比热容 c_p 及密度 ρ 。这三个参数均没有相关的实验数据,也没有文献报道,只能参考烟煤炼焦得到的焦炭物性^[9,10]:导热系数取 $1.33\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,比热容取 $1.136\times10^3\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,密度取 $850\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(5) 结构及操作参数

某炼油厂焦炭塔结构参数参见表 1,焦炭塔安装下、中、上三个塔壁热电偶,给水冷焦过程中塔壁降温曲线参见图 3。

2.3 中间孔道焦层模型程序设计

本文以 Visual Basic 为平台,编制了中间孔道焦层模型含焦焦炭塔温度场计算程序。程序具有封装性、完整性、可移植性等特点,主要包括网格划分、初值给定、计算及输出结果四部分。

2.4 中间孔道焦层模型结果分析

根据冷焦水沿中间孔道上升的速率,选取给水 10min 作为计算初始时刻。运用控制容积法对中间孔道焦层模型进行数值计算,得到不同时刻不同部位焦层温度场,并基于焦层降温放热量等于冷焦水汽化吸热量的假定,得到冷焦水汽化量的变化规律及影响因素,计算结果参见图 4:

①冷焦水汽化量随给水时间的增加而减小,且开始一段时间变化较快。

②冷焦水汽化量计算值为 1.4~12.0t/h,与现场冷凝水实际产生量(4~15t/h)接近但偏小。

③中间孔道焦层模型选取的焦炭导热系数较小,导致焦层热量传递较慢,是冷焦水汽化量计算值小于现场值的主要原因。

Table 1 Structure parameters of a coke drum

表 1 某炼油厂焦炭塔结构参数

项目	单位	数据	备注
焦炭塔直径 D	m	6	
下部热电偶高度 $H_{\text{下}}$	m	7	
中部热电偶高度 $H_{\text{中}}$	m	12	以直筒段底部 为基准
上部热电偶高度 $H_{\text{上}}$	m	19	
焦层高度 $H_{\text{焦层}}$	m	16	

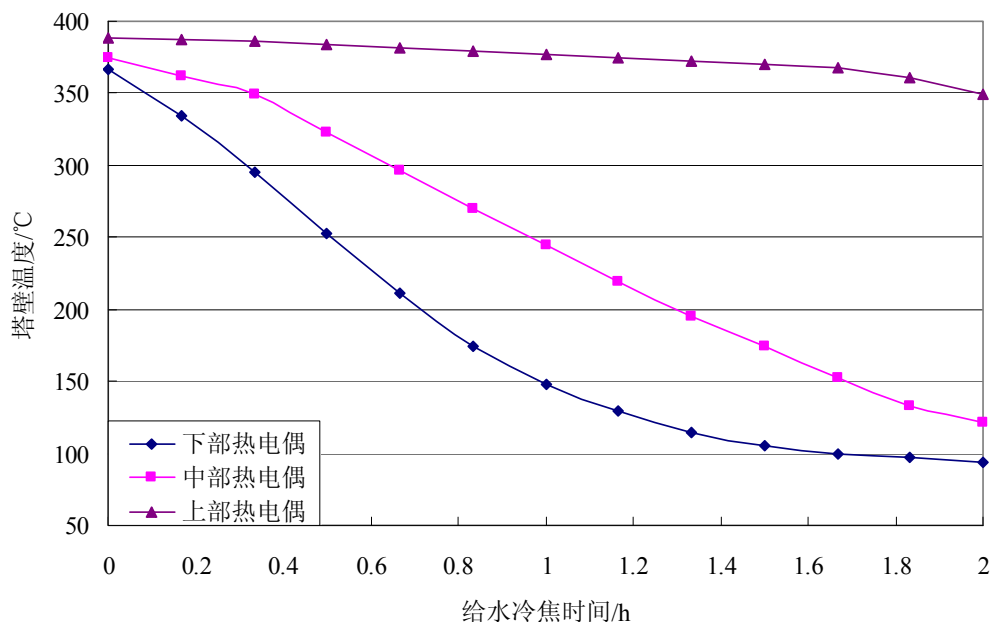


Figure 3 Typical shell temperature change of coke cooling process

图3 焦炭塔给水冷焦过程塔壁降温曲线

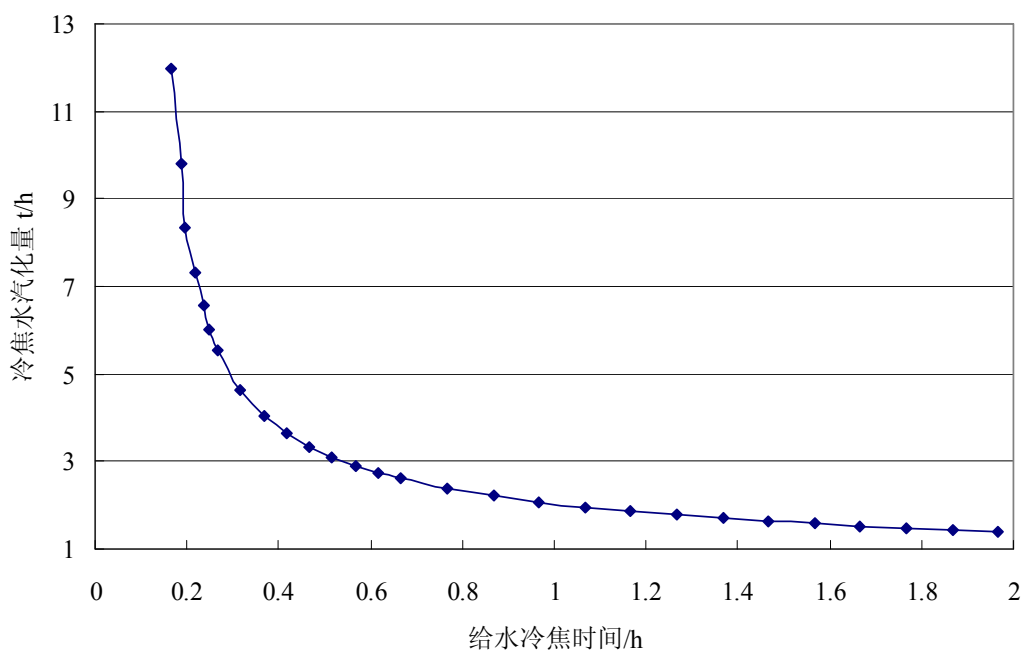


Figure 4. Water vaporization rate curves

图4 冷焦水汽化量计算结果

3. 结论与展望

本文以焦炭塔焦层为研究对象,假定成型焦层为中间孔道结构,运用控制容积法对中间孔道焦层模型进行了数值计算,考察分析了不同时刻不同部位焦层

温度场及冷焦水汽化量的变化规律。

(1) 从多维非稳态传热微分方程出发,推导了圆柱坐标系下的二维非稳态传热主控方程,建立了内节点全隐式离散方程,由附加源项法得到了边界节点离散方程,选择交替方向隐式算法 ADI 和三对角阵算法

TDMA 作为代数方程组求解的方法。

(2) 以 Visual Basic 为平台, 采用面向对象编程技术, 编制了含焦炭塔温度场计算程序, 计算得到冷焦水汽化量为 1.4~12.0t/h, 与现场冷凝水实际产生量接近。

作为一个探索性课题, 模型的选择是重要的, 实际的焦层是多孔道、多分支结构, 冷焦水会进入空隙冷却焦层, 而本文只考察了简化的中间孔道焦层模型; 同时, 实验测定一套完整的焦炭导热系数等物性参数有助于课题的进一步开展。

References (参考文献)

- [1] Tao Wenquan, Numerical Heat Transfer[M]. The second edition. Xi'an, Xi'an Jiaotong University Press, 2001:15-102
陶文铨.数值传热学[M].第二版.西安:西安交通大学出版社,2001:15-102
- [2] Li Chuhe. Some Problems to consider in Coke Drum Design [A]. The proceeding of Sinopec delayed coking technique exchanges and the second Annual Conference of coking [C].Beijing. The editorial office of "refining technology and engineering" of Sinopec intelligence station.
李出和.焦炭塔工艺设计应考虑的几个问题[A].中国石化延迟焦化技术交流暨第二届焦化年会报告论文集[C].北京:中国石化股份有限公司焦化情报站《炼油技术与工程》编辑部,2006:261-263
- [3] Походенко,Н.Т. Petroleum Coke production[M].Beijing, China Petrochemical Press, 1992:67-79
Н.Т.波霍金柯.石油焦生产[M].北京:中国石化出版社,1992:67-79
- [4] Paul J. Ellis, Christopher A. Paul. Delayed Coking Fundamentals[A]. 5th International Conference on Refinery Processing AIChE 2002 Spring National Meeting[C]. New Orleans, 2002:67-68
- [5] Ellis, Paul J., Hardin, et al. How Petroleum Delayed Coke Forms In A Drum[J]. Light Metals, 1993:509-515
- [6] Hardin, Edward E., Ellis, et al. Pilot Delayed Coker[J]. Light Metals, 1992:609-615
- [7] Yang shiming. Heat Transfer Theory[M]. The second edition. Beijing. China Higher Education Press ,1987:6-7
杨世铭.传热学[M].第二版.北京:高等教育出版社,1987:6-7
- [8] Chen Sunyi. Numerical analysis method for design of preventing deformation of coke drum[J]. China Petroleum Machinery,2003,31(10):30-31
陈孙艺.焦炭塔防变形设计的数值分析方法及应用[J].石油机械,2003,31(10):30-31
- [9] Wang Chengming. The physical property of coke. [EB/OL], <http://baike.baidu.com/view/465250.htm>, 2009-05-03/2009-05-12
王成明.焦炭的物理性质[EB/OL], <http://baike.baidu.com/view/465250.htm>, 2009-05-03/2009-05-12
- [10] Zhang Xinxin, Si Junlong, Wang Dinan. Study on Local Heat Exchanger Factor and Inverse Problem of Heat Conduction in Coke[J]. Fuel & Chemical Processes. 2004,35(6):9-10
张欣欣,司俊龙,王荻楠.焦炭局部换热系数与导热反问题的研究[J].燃料与化工,2004,35(6):9-10