

6-6-2020

Modeling and Simulation of Heat Transfer Process of Coke Oven Twin Flue

Kun Shen

1. Institute of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;;2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

Wang Ling

1. Institute of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;;

Tianyu Ma

1. Institute of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Heat Transfer Process of Coke Oven Twin Flue

Abstract

Abstract: To study the heat transfer process of flues in 5.5m coke oven with waste gas circulation, the heat transfer mechanism of flue in coke oven's combustion chamber and gas exchange process of twin flue were analyzed; *the simulation models of upflow flue and downflow flue were built respectively. According to tables of coke pushing and coal charging sequence in coking production, combining with gas exchange process in twin flue, the simulation analysis on surface temperature characteristics of twin flue walls in real coking production process were achieved by the designed simulation model.* The simulation results show that the surface temperature of wall varies periodically; the surface temperature curves of downflow flue wall are gradient distribution with uniform intervals, but in middle and upper part of upflow flue wall, the temperatures of surface are higher and almost equal; on the macro level, the surface temperature curves of twin flue walls present 'W' style.

Keywords

coke oven, twin flue, heat transfer process, gas exchange, modeling

Recommended Citation

Shen Kun, Wang Ling, Ma Tianyu. Modeling and Simulation of Heat Transfer Process of Coke Oven Twin Flue[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3016-3022.

焦炉双联火道传热过程建模与仿真

沈坤^{1,2}, 王玲¹, 马天雨¹

(1. 湖南师范大学物理与信息科学学院, 湖南 长沙 410081; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对具有废气循环的5.5 m焦炉立火道传热过程, 分析了焦炉燃烧室内立火道的传热机理及双联火道的气体交换过程, 构建了上升火道及下降火道传热过程的仿真模型。基于实际推焦装煤计划表, 结合双联火道气体交换过程, 利用仿真模型对炼焦生产过程中双联火道炉墙的表面温度特性进行了仿真分析。仿真结果表明, 立火道墙面温度呈周期变化, 下降火道炉墙表面温度以均匀间隔梯度分布, 上升火道炉墙表面上部温度较高且基本相等; 宏观上双联火道炉墙表面温度曲线呈现“W”型。

关键词: 焦炉; 双联火道; 传热过程; 气体交换; 建模

中图分类号: TQ522.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2017)12-3016-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712011

Modeling and Simulation of Heat Transfer Process of Coke Oven Twin Flue

Shen Kun^{1,2}, Wang Ling¹, Ma Tianyu¹

(1. Institute of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha, 410081, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, 410082, China)

Abstract: To study the heat transfer process of flues in 5.5m coke oven with waste gas circulation, the heat transfer mechanism of flue in coke oven's combustion chamber and gas exchange process of twin flue were analyzed; the simulation models of upflow flue and downflow flue were built respectively. According to tables of coke pushing and coal charging sequence in coking production, combining with gas exchange process in twin flue, the simulation analysis on surface temperature characteristics of twin flue walls in real coking production process were achieved by the designed simulation model. The simulation results show that the surface temperature of wall varies periodically; the surface temperature curves of downflow flue wall are gradient distribution with uniform intervals, but in middle and upper part of upflow flue wall, the temperatures of surface are higher and almost equal; on the macro level, the surface temperature curves of twin flue walls present 'W' style.

Keywords: coke oven; twin flue; heat transfer process; gas exchange; modeling

引言

当前随着焦化行业的持续低迷, 国内各焦化厂

普遍面临着改变生产模式、提高生产效益、节能环保等问题。而借助先进的建模与分析手段分析炼焦传热过程是实现优化焦炉结构、提高热工效率、改善污染物排放的重要途径。

在炼焦生产过程中, 由于受煤气燃烧、立火道内气流周期交换以及炭化室内间歇装煤等过程的影响, 使得焦炉立火道的传热过程呈现出不稳定、非连续、具有周期性等特点。因此, 难以构建有效



收稿日期: 2015-12-31 修回日期: 2016-04-12;
基金项目: 湖南省自然科学基金(2015JJ6070), 湖南省教育厅科学研究项目(15C0826);
作者简介: 沈坤(1984-), 男, 湖南浏阳, 博士, 讲师, 博士后, 研究方向为复杂工业系统建模与优化控制; 王玲(1962-), 女, 湖南长沙, 博士, 教授, 博导, 研究方向为信息系统及信号处理。

<http://www.china-simulation.com>

• 3016 •

的计算模型实现对连续炼焦生产过程中立火道传热过程的分析,而已有的分析方法也以实验与理论分析为主。文献[1]基于传热学原理对立火道内传热过程进行了理论分析,建立了立火道传热过程的稳态模型,用于指导加热制度的设计,但缺乏对连续生产过程的动态分析;文献[2]虽然考虑了立火道传热过程的动态,但没考虑气体交换过程的影响;文献[3]基于焦炉燃烧室内 NO_x 的生产机理,对立火道内的火焰高度及温度分布进行了理论分析;在对焦炉炭化室传热过程进行分析时,燃烧室内的非连续传热过程通常被处理为扰动^[4];此外,文献[5]对立火道温度变化规律进行了研究,文献[6]分析了结焦时间与换向时间对立火道温度影响的特征。这些研究及分析以实际测量数据为基础,因此对于特定的焦炉对象具有实际意义。

本文对连续生产过程中焦炉燃烧室双联火道内的传热过程进行分析,将立火道按高向均匀分为 10 个传热单元,根据火焰高度及煤气消耗比例的关系,计算每个传热单元内消耗的煤气量,并按相同的过剩空气系数计算消耗的空气量,以及由此产生的能量与废气量,最后根据剩余的煤气、空气及总的废气量计算该传热单元内的气体温度。此外,对于燃烧室与两侧炭化室的耦合关系,模型以炭化室内的能量需求作为燃烧室内煤气燃烧的能量负载,按照实际推焦装煤计划表以两侧炭化室结焦过程的能量需求作为燃烧室左右侧炉墙的热流量(边界条件)。最终实现了对连续生产过程中焦炉立火道炉墙表面温度变化特性的模拟。

1 焦炉双联火道传热过程分析

本文以具有废气循环的 5.5 m 焦炉立火道为对象,分析其在连续炼焦生产过程中的传热过程。5.5 m 焦炉燃烧室及立火道结构如图 1 所示,在图 1 中,对焦炉燃烧室内的立火道从机侧到焦侧依次编号,在同一交换周期内编号为奇数的立火道同时处于下降火道或上升火道,对应编号为偶数的立火道同时处于上升火道或下降火道;相邻编号的立火

道构成双联火道,在双联火道上部存在跨越孔,而下部有循环孔。为便于建模及分析立火道内温度的特性,将立火道由下到上均分为 10 个传热单元,即图 1 中的 C1-C10 单元。

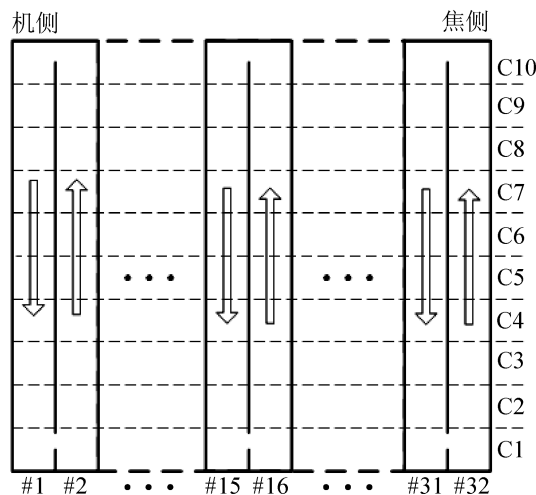


图 1 5.5 m 焦炉燃烧室结构示意图

Fig. 1 Structure of combustion chamber in 5.5m coke oven

假设立火道内的传热单元仅存在与高向相邻单元及左右炭化室炉墙的热能交换过程,即假设各立火道之间的隔墙是绝热的。对于双联火道,在上升火道,通过煤气燃烧的热辐射提供炼焦所需的能量;而在下降火道,则通过废气的热辐射提供能量。由于上升火道及下降火道的热源不同,因此分别针对上升火道传热单元与下降火道传热单元构建传热模型。

1.1 上升火道传热单元传热过程分析

由上分析可知,在上升火道传热单元中,煤气燃烧产生的热量主要用于向左右炭化室炉墙辐射传热以及对本单元内气体的加热。因此,假设入炉煤气在整个上升火道内充分燃烧,即上升火道内充满火焰,各传热单元的煤气消耗量按比例分配^[2]。此外,设定入炉煤气为焦炉煤气。

(1) 上升火道传热单元内气体温度计算

在上升火道各传热单元中,入炉煤气量按一定比例分配,且设定煤气燃烧的过剩空气系数为 1.2,因此可以认为在各单元内煤气充分燃烧,空气消耗

量与煤气消耗量的比例相同。由此,在单位时间内,对于各传热单元,进入第 i 个单元内的气体包括经过 $i-1$ 个单元燃烧后剩余的煤气、剩余的空气以及由 $i-1$ 个单元燃烧后的废气和经过废气循环孔的废气,而进入第 i 个单元的气体即为第 $i-1$ 个单元输出的气体。进入第 i 个传热单元内的气体量为:

$$V_i = V_{cog} \left(1 - \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j\right) (1 + h_{a2c}) + f_{eg} V_{cog} \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j + V_{cveg} \quad (1)$$

式中: V_{cog} 为单位时间内进入立火道的焦炉煤气量, λ_j 为第 j 个单元的煤气消耗百分比, h_{a2c} 为按照过剩空气系数计算的单位体积焦炉煤气消耗的空气量,系数 f_{eg} 为按照过剩空气系数计算的燃烧单位体积焦炉煤气产生的废气量, V_{cveg} 为单位时间内废气循环量。

考虑到在上升火道传热单元中,主要包含焦炉煤气、空气及废气等三种物质,而煤气燃烧后的热量除去对左右炭化室炉墙的辐射传热外都用于气体的升温,因此第 i 个传热单元的热能平衡方程为:

$$Q_{cogi} + Q_{i-1} = Q_{iL} + Q_{iR} + Q_i(T_{ai}) \quad (2)$$

式中: Q_{cogi} 为第 i 单元内焦炉煤气燃烧释放的热量, Q_{i-1} 为由第 $i-1$ 单元气体带来的热量, Q_{iL} 、 Q_{iR} 分别为第 i 单元向左右炭化室炉墙的辐射传热量, $Q_i(T_{ai})$ 表示气体温度所包含的热量,它是第 i 单元内气体温度 T_{ai} 的函数。对于炼焦生产过程中热流量 Q_{iL} 、 Q_{iR} 的计算,考虑到篇幅问题,在本文中并没有详细分析,可以参见作者关于焦炉炭化室传热过程建模与仿真的研究论文。

针对上升火道传热单元内气体成分复杂,各传热单元内气体成分比例不同的特点,采用按体积比加权的混合气体比热计算方法,具体过程为:

$$C_m = (C_{cog}(T_{ai})V_{cog} \left(1 - \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j\right) + C_{air}(T_{ai})h_{a2c}V_{cog} \left(1 - \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j\right) + C_f(T_{ai})(f_{eg}V_{cog} \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j + V_{cveg})) / V_i \quad (3)$$

式中: $C_{cog}(T_{ai})$ 、 $C_{air}(T_{ai})$ 、 $C_f(T_{ai})$ 分别为焦炉煤气、

空气及废气的比热容,这三个参数都是气体温度的函数。由此,基于式(1-3)可计算出第 i 单元内的气体温度 T_{ai} 。

(2) 上升火道传热单元炉墙表面温度计算

假设在火焰燃烧辐射传热中只有二氧化碳和水蒸气是辐射物质^[1-2]。由辐射传热原理可知,焦炉立火道内废气向炉墙辐射传热量^[1]为:

$$Q = \frac{C_0}{\frac{1}{A_g} + \frac{1}{A_s} - 1} \left[\frac{\varepsilon_g}{A_g} \left(\frac{T_g}{100}\right)^4 - \frac{\varepsilon_s}{A_s} \left(\frac{T_s}{100}\right)^4 \right] \quad (4)$$

式中: A_g 、 A_s 分别为废气与炉墙的吸收率, ε_g 、 ε_s 分别为废气与炉墙的黑度, C_0 为黑体的辐射系数, T_g 、 T_s 分别为废气与炉墙表面的绝对平均温度。对于一般固体而言,其黑度等于吸收率,即 $A_s = \varepsilon_s$ 。

基于式(4),在已知炉墙表面热流量及废气温度的前提下,可以计算出对应炉墙表面的温度。对于立火道传热单元,其气体厚度已知,可由 CO_2 及水蒸汽黑度曲线获得对应的吸收率及黑度,由此得出混合气体的吸收率及黑度^[1]。最后根据立火道炉墙的热流量计算出炉墙的温度,具体过程为:

$$T_s = 100 \left[\frac{\varepsilon_g}{A_g} \left(\frac{T_g}{100}\right)^4 - \frac{Q \left(\frac{1}{A_g} + \frac{1}{A_s} - 1\right)}{C_0} \right]^{0.25} \quad (5)$$

1.2 下降火道单元传热过程分析

由上述分析可知,在下降火道不存在煤气燃烧放热过程,也不存在气体体积与成分的变化过程,因此其温度仅与废气温度、炉墙初始温度及炉墙热流量有关。

与上升火道单元气体温度计算过程相似,在下降火道单元气体温度计算过程中,将式(2)中的 Q_{cogi} 项去除,且式(3)中的 C_m 等于 C_f ,由此可计算出下降火道单元气体的温度。

由于在上升火道及下降火道中,废气对炉墙的辐射传热过程完全相同,因此对于下降火道单元炉墙温度的计算可以采用上升火道单元炉墙温度的

计算方法, 如式(5)所示。

1.3 双联火道交换过程分析

在炼焦生产过程中, 为实现均匀供热, 立火道内上升气流与下降气流按周期交替更换, 形成双联火道的气流交换过程, 如图 2 所示。图中实线表示双联火道中奇数编号火道由上升火道变为下降火道时煤气与空气的变化过程, 虚线表示双联火道中偶数编号火道由下降火道变为上升火道的过程。整个交换过程交换机的操作时间为 46.6 s, 开、关煤气及空气的时间均为 15 s, 且遵循先关煤气再关空气以及先开空气再开煤气的操作原则。

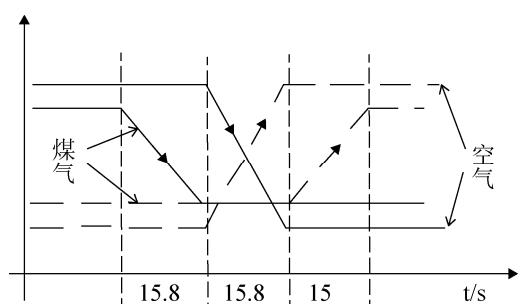


图 2 双联火道气体交换过程示意图
Fig. 2 Gas exchange process of twin flue

2 仿真模型建模

基于上述分析, 结合模块化建模思想, 本文采用 Matlab/simulink 构建立火道传热单元模型, 考虑到上升火道与下降火道传热过程的差异, 因此分别构建上升火道传热单元及下降火道传热单元模型, 最后由各传热单元模型构建如图 1 所示的双联火道模型。此外, 对于双联火道的交换过程, 则根据交换周期交替使能上升火道模型及下降火道模型, 以此实现对连续炼焦生产过程的模拟。

2.1 上升火道传热单元建模

(1) 传热单元内气体温度建模

上升火道传热单元内气体温度计算模型由单元内气体量计算模型、单元输出气体热量计算模型及单元内气体温度计算模型构成, 如图 3 所示。根据式(1)构建的单元内气体量计算模型如图 3(a)所

示, 图中单元内煤气燃烧产生的废气量由模块 Q_F 计算, 而单元内煤气的消耗量则取决于该单元在上升火道中的位置, 由参数 N 决定, 参数 $M=10$ 为立火道的单元总个数。此外, 前一单元输入的气体由端口 V_F_UI 引入, 而本单元输出的气体由端口 V_F_UO 输出, 对于上升火道的 $C1$ 单元, 其输入气体包括由循环孔进入的废气、由斜道口进入的空气以及由灯头进入的焦炉煤气, 本文将废气循环的比例设置为 50%。

单元输出气体热量计算模型如图 3(b)所示, 认为上升火道传热单元输出的气体成分为焦炉煤气、空气及废气, 由各成分的体积、温度及对应的比热计算各成分携带的热量, 最后相加得出本单元输出气体的总热量, 由端口 Q_N_O 输出。

基于式(2)、(3)构建的单元内气体温度计算模型如图 3(c)所示, 图中端口 V_G_N 表示该单元消耗的煤气量, 常数 Q_G 为焦炉煤气热值, Q_N-1_I 表示由前一单元输入的气体总热量, Q_L 、 Q_R 分别表示左、右侧炭化室炉墙的热流量, 模块 $T_VC_Calculate$ 用于计算混合气体的等效比热, 最后根据单元内剩余热量、混合气体体积及等效比热计算混合气体的温度。

(2) 传热单元炉墙表面温度建模

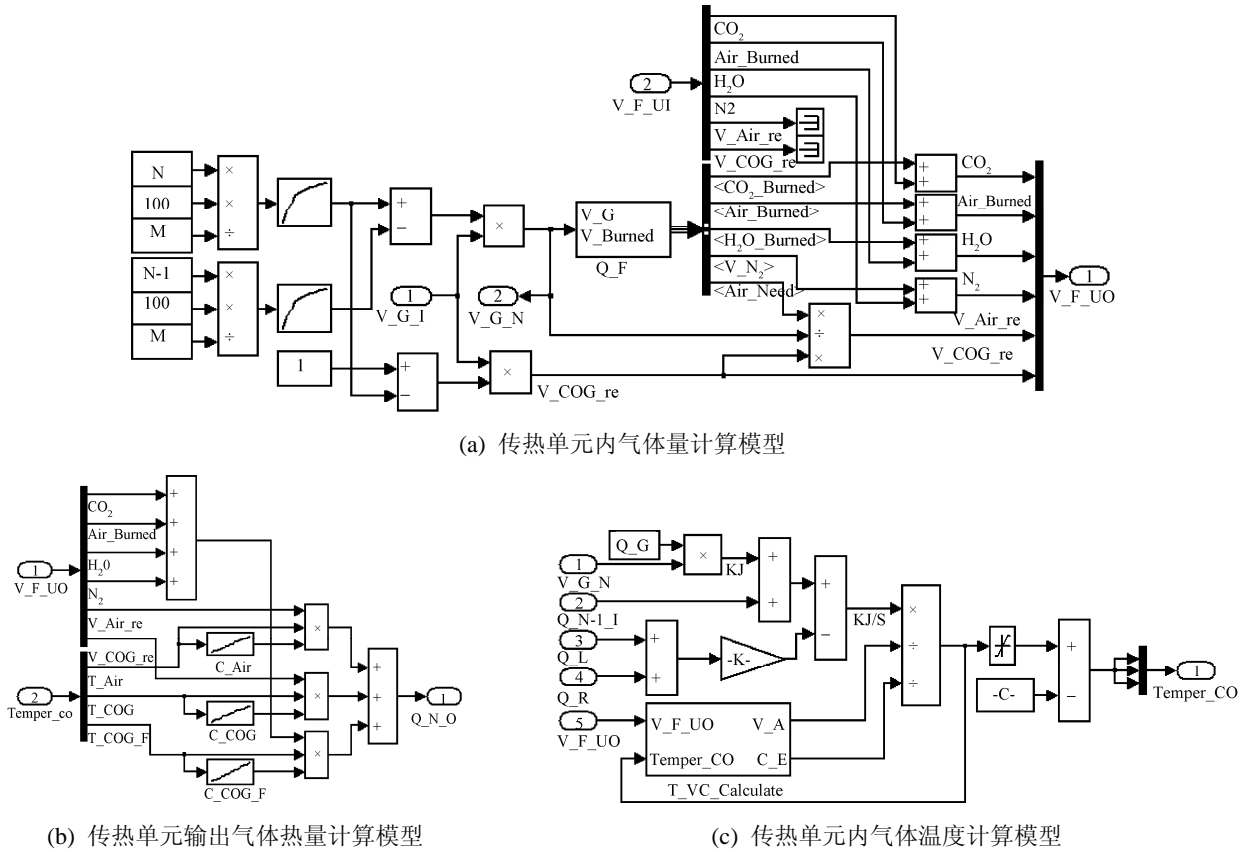
根据式(5)构建的传热单元炉墙表面温度模型如图 4 所示, 图中单元内气体温度采用进、出单元气体的平均温度; 而对于废气吸收率及废气的计算, 则基于焦炉煤气燃烧后 CO_2 及 H_2O 的含量, 结合已知的单元气体厚度, 根据文献[1]提供的 CO_2 及 H_2O 汽黑度曲线^[1], 由当前气体温度查表获得。考虑到在相同气体温度情况下, 左、右侧炉墙的温度仅与其热流量有关, 因此左、右侧炉墙温度独立计算, 计算结果分别由端口 $Temper_L_k$ 及 $Temper_R_k$ 输出。

2.2 下降火道传热单元建模

根据上述分析, 下降火道传热过程与上升火道传热过程基本相似, 区别在于在下降火道不存在煤气燃烧和气体成分及体积的变化, 因此下降火道传

热单元模型完全可以复用上升火道传热单元模型，但需要注意的是气体流动的方向不同，如图 1 所示。由此，下降火道传热单元模型可以在上升火道传热单元模型的基础上，去除图 3(a)所示的单元内

气体量计算模型，简化图 3(b)(c)所示模型(仅考虑废气)，最后综合图 4 实现对下降火道传热单元气体温度和炉墙表面温度的计算。



(a) 传热单元内气体量计算模型

(b) 传热单元输出气体热量计算模型

(c) 传热单元内气体温度计算模型

图 3 上升火道传热单元模型

Fig. 3 Calculation model of upflow flue heat transfer unit

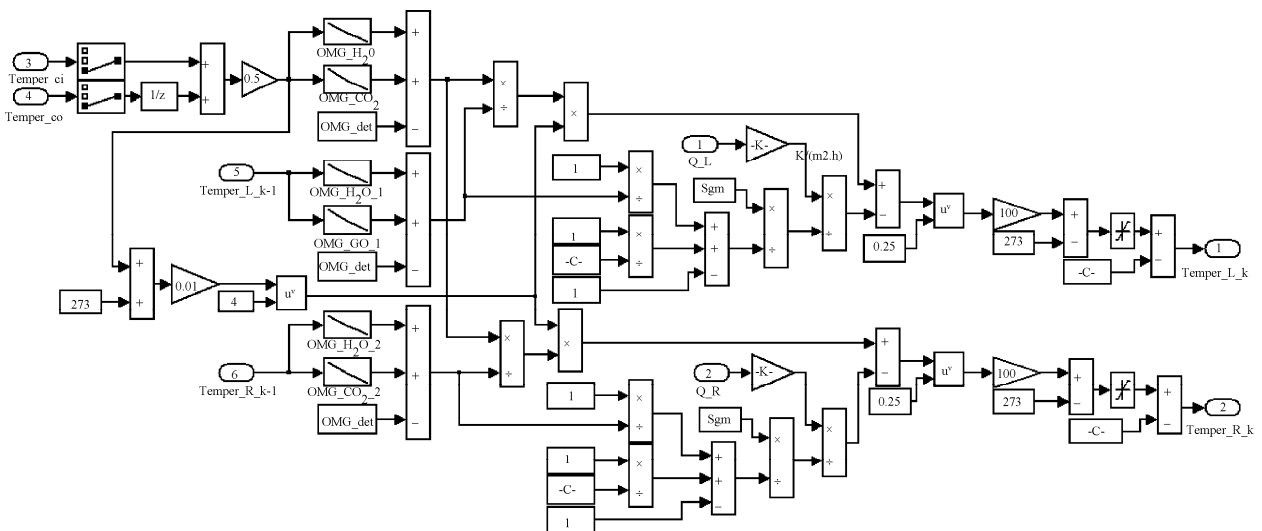


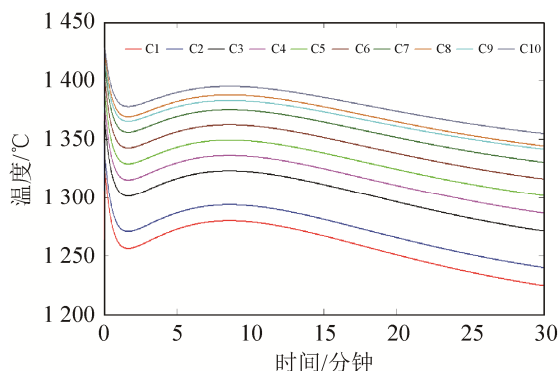
图 4 炉墙表面温度模型

Fig. 4 Temperature calculation model of wall surface

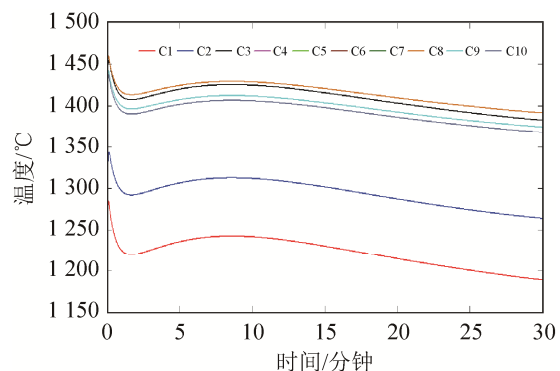
3 立火道炉墙表面温度仿真与分析

3.1 装煤后温度仿真与分析

基于上述分析及所构建的仿真模型, 本文对一个交换周期内双联火道单侧炉墙表面的温度特性进行仿真。仿真结果如图 5 所示, 仿真的工况为燃烧室右侧炭化室装煤后的一个交换周期。



(a) 下降火道



(b) 上升火道

图 5 右侧炭化室装煤后双联火道右侧炉墙温度

Fig. 5 Temperature of right wall surface in twin flue after coal charging

由图 5 可知, 无论是上升火道还是下降火道, 受右侧炭化室装煤初期能量需求量较大的影响, 装煤开始后几分钟内双联火道右侧炉墙表面温度出现较大跌落, 而在煤饼表面水分蒸发后炉墙表面温度稍稍恢复, 之后随着炼焦过程的稳定进行, 炉墙表面温度缓慢降低。对于下降火道炉墙表面温度, 如图 5(a)所示, 由于废气从立火道上部向下部流动, 且不存在煤气燃烧过程, 因此各单元炉墙表面温度从 C10 到 C1 依次降低, 但各单元之间的温度间隔

并不一致且 C8 曲线稍高于 C9 曲线, 这主要受交换前炉墙表面初始温度不同的影响。在图 5(b)所示的上升火道炉墙表面温度曲线中, 由于焦炉煤气在立火道中各单元内消耗的比重不同, 其炉墙表面温度存在明显差别, 且受初始温度的影响, 曲线 C4、C5、C6、C7、C8 重叠。而由于在立火道底部存在废气循环及进入立火道的焦炉煤气与空气温度相对较低, 因此 C1 单元炉墙表面温度最小, 且比下降火道对应位置的温度还要低, 这与立火道温度实际测量的结果不一致, 其原因在于测量时立火道底部温度受上升火道内煤气燃烧过程的影响, 因此实际测量值并非真实温度值, 而本文的仿真结果更符合实际情况。

3.2 连续生产过程温度仿真与分析

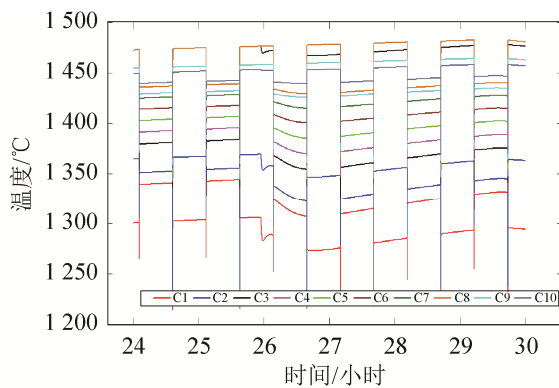
为仿真分析连续生产过程中立火道炉墙表面温度的变化, 本文基于湖南华菱涟钢焦化厂的实际推焦装煤计划表, 采用 5-2 串序, 交换周期为 30 分钟, 以 6#炭化室装煤开始为仿真时间起点, 考察#6 燃烧室内立火道炉墙表面温度。取背对燃烧室轴向, #6 燃烧室的右侧是 5#炭化室, 其左侧为 6#炭化室, 6#炭化室经过 26 小时结焦后进行推焦装煤, 这期间 5#炭化室已完成装煤, 仿真结果如图 6 所示。受交换过程的影响, 图 6 中各温度曲线呈现方波状, 且在交换时温度波动较大, 这与实际测量的结果基本一致。

图 6(a)为偶数编号火道右侧炉墙表面温度, 由于火道右侧的 5#炭化室煤饼处于结焦中期, 其热能需求稳定, 因此图 6(a)中温度变化较平缓, 仅在 6#炭化室装煤后出现了较小的跌落。

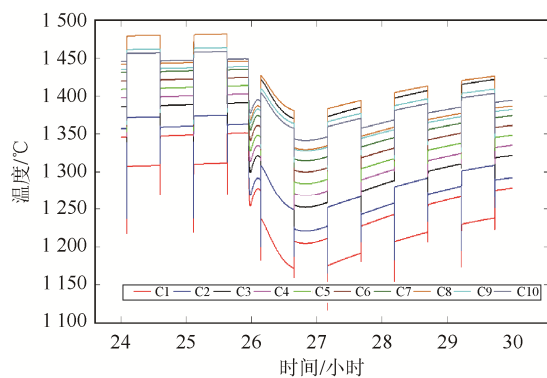
图 6(b)为奇数编号火道左侧炉墙表面温度, 受火道左侧 6#炭化室推焦装煤的影响, 图 6(b)中温度曲线在装煤后出现较大的跌落, 且需经过较长时间才能恢复, 这与文献[6]分析的实际立火道‘W’型温度曲线相吻合。

此外, 由图 6 可知, 在由偶数编号火道与奇数编号火道构成的双联火道中, 在同一交换周期内分

别属于上升火道与下降火道,且对应的温度曲线与图5所示曲线相似;而在整个炼焦生产过程中,立火道的温度曲线呈周期变化,这与实际立火道的温度在线测量结果是一致的。



(a) 偶数编号火道右侧炉墙温度



(b) 奇数编号火道左侧炉墙温度

图6 连续生产过程双联火道炉墙温度

Fig. 6 Temperature of wall surface in twin flue during continuous production

4 结论

本文针对焦炉燃烧室内双联火道的传热过程构建仿真模型,并仿真分析了连续炼焦生产过程中双联火道炉墙表面温度的变化特性,仿真结果表明所构建的仿真模型可以较真实的模拟实际炼焦生产过程中双联火道炉墙表面的温度特性。本文侧重

于对连续生产过程进行建模,所考虑的动态过程是指包括双联火道气体交换过程、炭化室推焦装煤过程等宏观生产过程,而并没有对微观的燃烧动态过程进行分析,这也将是后续研究的主要工作。

参考文献:

- [1] 苏宜春. 炼焦工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010, 345-353.
Su Yichun. Coking Process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010, 345-353.
- [2] 梁明昭. 焦炉加热火道温度模型的建立及焦炉控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005: 18-22.
Liang Mingzhao. Model development of temperature for heating fire way in coke stove and control of coke stove. [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005: 18-22.
- [3] Christian Weiss, Johannes Rieger, Bernhard Rummer. Formation and control of Nitrogen Oxide in the heating system of a coke oven[J]. Environmental Engineering Science (S1092-8758), 2012, 29(7): 555-561.
- [4] 金珂, 冯妍卉, 张欣欣, 等. 耦合燃烧室的焦炉炭化室内热过程的数值分析[J]. 化工学报, 2012, 63(3): 788-795.
Jin Ke, Feng Yanhui, Zhang Xinxin, et al. Numerical analysis on thermal processes in coupled coking and combustion chambers of coke oven[J]. CIESC Journal, 2012, 63(3): 788-795.
- [5] 郭军, 宁芳青, 韵金虎, 等. 焦炉立火道温度变化规律的探讨[J]. 燃料与化工, 2012, 43(4): 19-21.
Guo Jun, Ning Fangqing, Yun Jinhui, et al. Discussion on change regularity of vertical flue temperature of coke oven [J]. Fuel & Chemical processes, 2012, 43(4): 19-21.
- [6] 严文福, 郑明东, 宁方青, 等. 火道温度随结焦时间与换向时间变化规律的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 93-96.
Yan Wenfu, Zheng Mingdong, Ning Fangqing, et al. Research on the change rules of flue temperature with coking time and reversing cycle[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 93-96.