

基于模型的JN60型焦炉加热控制

宁芳青^{*1} 严文福²

(1. 安徽工业大学电气信息学院 安徽马鞍山 243002; 2. 安徽工业大学化工与环境学院 安徽马鞍山 243002)

【摘要】介绍了JN60型焦炉的加热控制研究与应用,并采用了火道温度串级控制和烟道吸力的前馈控制的系统控制方案与模糊控制策略,建立了相关的控制数学模型和工艺模型,利用计算所得的炼焦指数为在线参数对焦炭质量指标进行控制。系统运行结果表明节能约3.5%左右,炉温平均波动小于3℃,安定系数均在0.95以上。

关键词 焦炉; 炼焦指数; 火道温度; 加热控制

中图分类号 TK39

Heating Control of JN60' Coke Oven Based on Models

Ning Fangqing¹ Yan Wanfu²

(1. College of Electrical Engineering & Information Anhui Polytechnic University AnhuiMaanshan 243002)

(2. College of Chemical Engineering & Environment Anhui Polytechnic University AnhuiMaanshan 243002)

Abstract It is described in this paper for the heating control study on JN60' coke oven and application, the scheme of cascade control for flue temperature and feedforward control for draft used in the system, the strategy of fuzzy inference, establish of the mathematical model for heating control and technology, utilizes the coking index as the parameter on line to control coke quality. The results indicates that average energy conservation is about 3.5%, the temperature fluctuation is below 3℃, the steady coefficient of temperature is above 0.95.

Key words coke oven; coking index; heating control; flue temperature

我国是一个焦炭生产大国,但焦炉的生产自动化水平却远低于美、日、欧等国的水平。焦炉火道温度的控制基本以手工操作为主,即根据操作经验给定一个标准火道温度,由测温工用光学高温计检测立火道底部温度,每4小时检测一次,根据实测的温度与标准温度的偏差,人工增减煤气流量。由于焦炉的热惯性很大,干扰因素较多,导致火道温度的波动较大,能耗上升,焦炭质量不稳定。在国外,70年代中期日本钢管公司首先研究焦炉计算机加热控制系统^[1],在以后的20年间,世界各国均已开发出适合自身焦炉特点的自动控制系统,它包括供热量前馈控制系统、炉温反馈控制和前、反馈相结合三大类^[2-4]。近几年研究又趋以活跃,在控制理论、数学模型以及控制系统等方面均取得进展^[5-9],不同系统的实施均对降低炼焦耗热量、延长炉体寿命、提高焦炭质量以及推动炼焦技术进步起到了积极的作用。国内70年代开始了这方面的探索,1984年上海焦化厂首先开发出了实用的焦炉加热控制系统^[10],近几年也有一些研究报道,但由于焦炉复杂性的制约,能够长期、稳定、有效运行的控制系统不多。为此,本研究针对攀钢焦化厂5#焦炉客观条件,于1999年6月开发完成了焦炉计算机加热控制系统,目前已连续运行两年多,下面讨论主要技术和工艺。

2002年5月8日收稿

* 男 37岁 硕士 副教授

1 控制方案

5#焦炉为JN60型双联火道、废气循环、煤气下喷、复热式结构，由53个炭化室和55个燃烧室(由32个立火道构成)交替配置构成，换向周期为20 m，推焦循序为5-2串序，采用纯高炉煤气加热，加热所需的空气是利用燃烧室负压(吸力)以自然抽风的形式提供，焦炉加热过程的主要目的是通过稳定立火道的温度来确保炭化室中焦炭的成熟。控制系统由四部分组成：1) 根据结焦时间、煤质、煤的含水量、空气湿度的变化，确定优化的标准火道温度；2) 由炼焦指数判断焦炭的成熟度，并对标准火道温度进行修正；3) 火道温度的间接测量与控制；4) 吸力的控制。控制系统框图如图1所示。

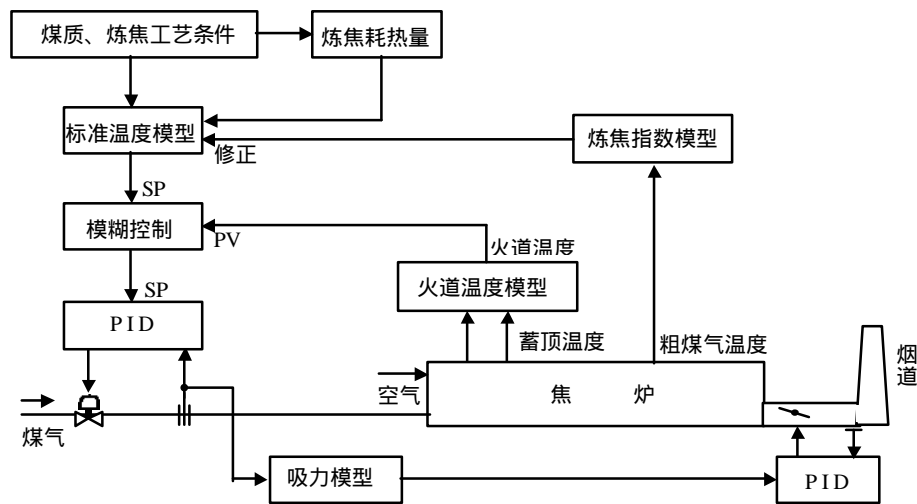


图1 控制系统框图

1.1 标准火道温度

标准火道温度模型：确定不同装煤与生产条件下的机焦侧标准温度，利用开发的炭化室传热模型计算软件，在输入各种不同参数条件下运行得到的一系列不同结焦时间 t 、不同装煤水分 M_t (%)、不同炭化室装入干煤量 C_g (T)和不同焦饼中心温度 t_k ()条件下的火道温度数据，经线性回归法得到的标准火道温度(机焦侧平均值) t_f 为

$$t_f = 1\ 178.0 + 635.83M_t + 1.895C_g + 0.468t_k - 25.7t \quad (1)$$

式中 t 为结焦时间17.5~22.3 h; M_t 为含水量1~12%; t_k 为焦饼中心温度950~1 050 ; C_g 为装煤量28.88~38.5 T

方程的相关系数 $r = 0.977\ 9$; 标准误差 $s = 2.5$ 。

机侧标准火道温度

$$t_{f1} = t_f - 30 \quad (2)$$

焦侧标准火道温度

$$t_{f2} = t_f + 30 \quad (3)$$

1.2 炼焦指数与焦炭成熟度的判断

焦炭的成熟度是焦炉生产的主要质量指标，由挥发份、焦炭强度等参数构成，在实际生产中这些参数又是通过焦饼表面温度或焦饼中心温度来控制的。由于工业现场特殊环境的限制，焦饼温度难以长时间在线连续测量，因而直接用焦饼表面温度或焦饼中心温度来控制焦炭的质量指标很困难。在炼焦过程中，要产生大量的粗煤气，粗煤气在炼焦周期的不同时间段按一定规律在变化。通过测量桥管处粗煤气温度的变化(变化曲线如图2所示)，可得出炼焦指数：

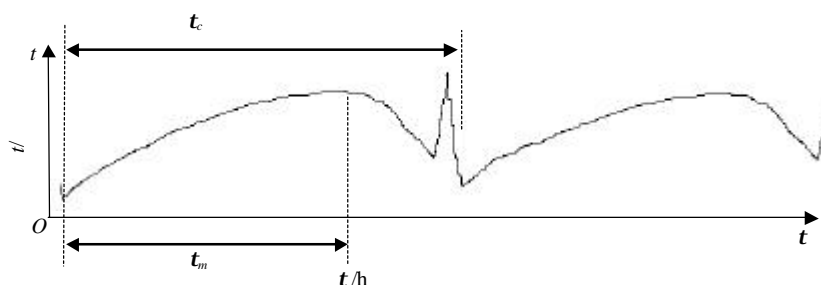


图2 桥管处粗煤气温度的变化

$$CI = t_c / t_m$$

式中 CI 为炼焦指数； t_c 为结焦周期； t_m 为从装煤开始到粗煤气温度到达最大值的时间。

根据对焦饼表面温度的测量和焦炭质量指标的综合分析，炼焦指数在1.25~1.30范围内，焦炭的成熟度好，质量指标比较合理，因而在生产过程中，将炼焦指数稳定在上述范围内，就可较好地控制焦炭质量。根据炼焦指数可对机焦侧标准火道温度进行修正，其修正关系如表1所示。

表1 炼焦指数与标准火道温度修正关系

炼焦指数	温度修正量/	炼焦指数	温度修正量/
$1.25 < CI < 1.30$	0	$1.30 < CI < 1.35$	-1
$1.20 < CI < 1.25$	+1	$1.35 < CI < 1.40$	-2
$1.15 < CI < 1.20$	+2	$CI < 1.40$	-3
$CI < 1.15$	+3		

1.3 吸力控制模型

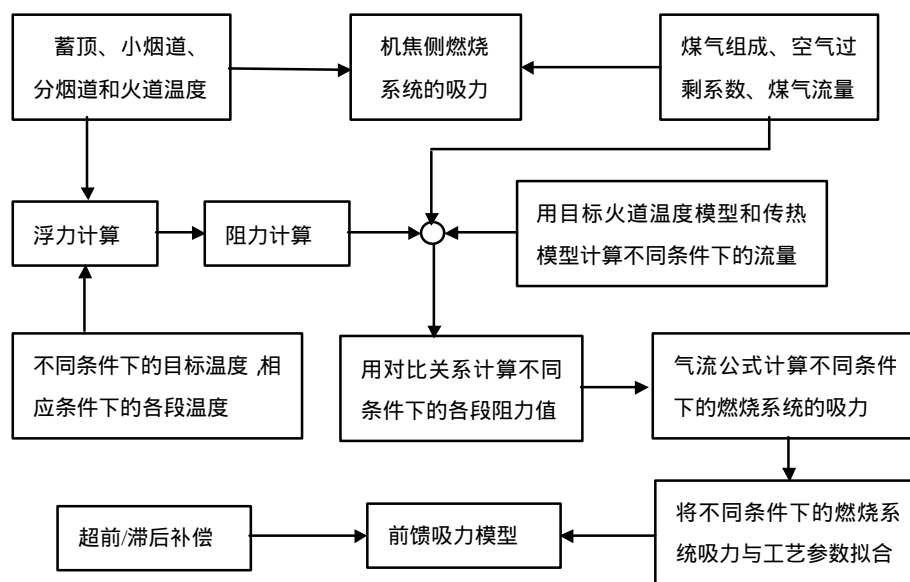


图3 吸力模型计算框图

焦炉的烟道吸力与蓄顶吸力随加热煤气流量、组成、空气过剩系数、火道温度等因素的变化而变化。它们之间的相关模型可从大量的生产控制数据统计中得到。由于难以整理出较为完善的相应数据，所以采用实际测量与理论相结合的方法再经线性回归得到不同加热条件下的吸力值。吸力模型计算框图如图3所示，根据测量数据和图3程序，经计算机模拟运算得到吸力模型为

$$P = a + bV + ct_f + da + eQ^{net} \quad (4)$$

式中 P 为烟道吸力； V 为小时平均流量； t_f 为目标火道温度； a 为空气过剩系数； Q^{net} 为煤气热值； a 、 b 、 c 、 d 、 e 为常数。

1.4 相关关系模型

1) 蓄热室顶部温度和火道温度的相关方程

火道温度的在线连续监测是实现焦炉加热控制的必要手段，火道温度的监测以前主要靠光学高温计测量焦炉立火道底砖表面温度来实现，检测精度很低，且受测温工的人为因素及环境影响较大。根据焦化生产工艺，蓄热室顶部温度与火道温度是相关的，通过蓄热室顶部温度可间接反映火道温度的高低。在机焦侧各选10个工况条件较好的10个蓄热室(如5#炉的20#~29#)，并分别在其顶部插上S型热电偶，直接测量蓄热室顶部下降气流温度，该温度在每个交换周期内是连续变化的，但在交换后10 m左右变化较平稳，故取此刻的温度作为最终的测量值。10个蓄热室顶部温度的平均值(以下简称蓄顶温度)基本上可代表全炉的平均火道温度(以下简称火道温度)的变化。结焦时间为18.5 h和19.5 h的情况下得出的机侧和焦侧蓄顶温度及火道温度的静态线形回归方程分别为

$$T_{c1}=0.5879t_1 + 606.1 \pm A \quad (5)$$

$$T_{c2}=1.290t_2 - 232.6 \pm B \quad (6)$$

式中 T_{c1} 为机侧火道温度； t_1 为机侧蓄顶温度； T_{c2} 为焦侧火道温度； t_2 为焦侧蓄顶温度； A 、 B 为修正量，在不同的结焦时间里取不同的修正值。

火道温度与蓄顶温度相关关系如图4所示，从图4的实验数据可以看出，它们之间的相关性较好，能满足工业控制的需要。

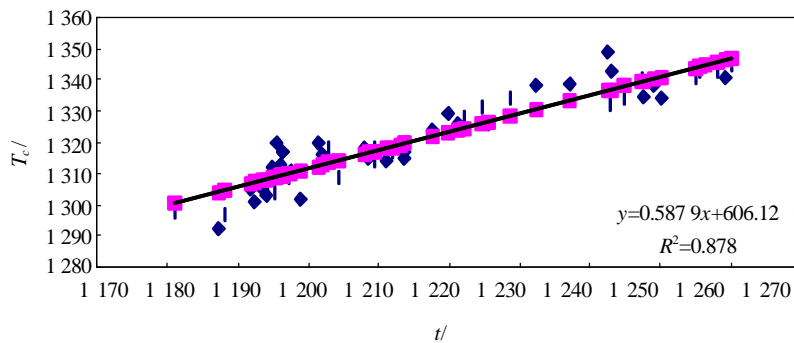


图4 火道温度与蓄顶温度相关关系

2) 废气含氧量与空气过剩系数的相关方程

在正常稳定操作条件下，机、焦侧分烟道废气含氧(O_2)与小烟道空气系数(a)的线性拟合方程分别为(5#炉为例)：

$$a_{11} = 0.942 + 0.07 O_1 \quad a_{21} = 0.9584 + 0.1433 O_1$$

$$a_{12} = 0.715 + 0.11 O_2 \quad a_{22} = 0.7185 + 0.1865 O_2$$

式中 O_1 、 O_2 为机、焦侧分烟道含氧； a_{11} 、 a_{12} 为机、焦侧小烟道空气系数； a_{21} 、 a_{22} 为机、焦侧分烟道吸力。

2 控制算法

焦炉的加热控制系统包括炉温控制和吸力控制两部分，两者是相互关联的，但由于其工作频率相差很大，因而可将它们看成两个相互独立的部分。温度控制系统采用串级控制方案，以火道温度和高炉煤气流量为主、副回路的被控参数。主回路采用模糊控制；吸力控制系统采用前馈控制，直接根据高炉煤气流量的变化调整系统的吸力大小。模糊控制规则是模拟人对生产过程的控制操作经验而总结出来的，现场主要操作经验为：

- 1) 火道温度高于目标值5 且有上升趋势时, 减少高炉煤气压力100 Pa;
- 2) 火道温度低于目标值5 且有下降趋势时, 增加高炉煤气压力100 Pa;
- 3) 其他情况, 基本不作调整。

设焦炉火道温度的目标值为 T_f , 实测值为 T_C , 则: 火道温度偏差 $e(k) = T_f - T_C$, 其中 $e(k)$ 为当前时刻偏差; 火道温度的变化趋势 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$, $e(k-1)$ 为前一采样时刻偏差。

取偏差 $e(k)$ 、变化趋势 $\Delta e(k)$ 以及控制输出的语言变量分别为 E 、 EC 和 U , 其模糊子集为

$$E = \{ PB \quad PM \quad PS \quad O \quad NS \quad NM \quad NB \}$$

$$EC = \{ PB \quad PM \quad PS \quad O \quad NS \quad NM \quad NB \}$$

$$U = \{ PB \quad PM \quad PS \quad O \quad NS \quad NM \quad NB \}$$

论域为

$$E = \{ -6 \quad -5 \quad -4 \quad -3 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad +1 \quad +2 \quad +3 \quad +4 \quad +5 \quad +6 \}$$

$$EC = \{ -6 \quad -5 \quad -4 \quad -3 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad +1 \quad +2 \quad +3 \quad +4 \quad +5 \quad +6 \}$$

$$U = \{ -6 \quad -5 \quad -4 \quad -3 \quad -2 \quad -1 \quad 0 \quad +1 \quad +2 \quad +3 \quad +4 \quad +5 \quad +6 \}$$

焦炉实际的火道温度基本上在(1 280-20, 1 280+20) 范围内变化, 而生产工艺要求温度的波动在(-7, 7) 内, 若温度偏差的论域选得过大, 则控制精度差; 若把温度偏差 E 的量化等级分得更精细一些, 将导致控制规则复杂化。因此采用压缩论域的方法来改善控制系统的静态特性。取 E 的基本论域为: (-5.5, +5.5) 。温度变化趋势 EC 的基本论域为(-2, +2) /h, 控制输出 U 的基本论域为(700, 1100) Pa。为了便于控制规则的在线调整, 采用解析式表述的控制规则是非常适合

$$U = aE + (1-a)EC \quad (0 < a < 1)$$

式中 ... 为取整运算; a 为调整因子。通过调整 a 的大小可以调整模糊控制规则, 即改变 E 、 EC 在控制输出中的权重。当偏差较大时, 控制系统的主要任务是尽快消除偏差, 此时偏差 E 的权重应大一些, 而当偏差较小时, 控制系统的主要任务是使系统尽快稳定下来, 这时偏差的变化 EC 的权重应大一些, 取:

$$a = \frac{1}{3} (\alpha_1 - \alpha_2) / |E| + \alpha_2$$

根据现场操作经验和反复调试, 取 $\alpha_1 = 0.75$, $\alpha_2 = 0.40$ 较合理。采取这种自调整模糊控制规则, 有利于尽快消除偏差和提高系统的稳定性。

当生产工况有变动时, 温度的变化往往会超过(-5.5, +5.5) 范围, 若仍采用上述方法, 由于焦炉的大惯性, 必然会导致超调量大, 调节时间过长。针对上述情况, 在控制过程中增加了一个预测部分, 即首先对温度的偏差进行判断, 当 $e(k)$ 的范围不超过(-5.5, +5.5) 时, 采用模糊控制; 若温度超过上述范围, 则控制输出调到上限值或下限值。这样既保证了控制的精度, 又保证了被控对象的快速性。

3 运行结果

1) 节能效果。攀钢焦炉采用纯高炉煤气加热, 结焦时间稳定在19.5h, 近半年的统计数据为控制前煤气流量平均37 528 m³/h, 控制后煤气流量平均36 030 m³/h, 平均节能量为3.99%, 节能效果超过国外报道的3%水平。

2) 炉温稳定性和安定系数。投入运行以来, 平均安定系数达0.95以上, 生产稳定条件下, 安定系数均为1.0, 全炉温度波动平均小于3 。

3) 控制系统的适应性和控制系统的可靠性。运行期间曾人为地改变了不同的结焦周期, 结果表明焦炉炉温过渡平稳, 稳定时间短。在相同结焦时间下, 同人工调节和仪表控制相比, 本系统人工干预次数大大减少, 吸力系统几乎不需干预。

4) 系统实施与投资。系统对硬件设备要求低，系统简单，平均无故障时间长。

参 考 文 献

- 1 Yasuo N, Yoshiaki W, Mamoru I, *et al.* Upgrading of computerized control in coke oven. Ironmaking Proceedings, 1989, 48: 421-425
- 2 Buss B C, McCollum H R. Feedforward heating control for coke batteries. Ironmaking Proceedings. 1984, 43 : 205-209
- 3 Thijssen N J W, Vander T. Influence of the measured coke end temperature of coke battery heating. Ironmaking Proceedings, 1984, 43: 209-214
- 4 Rainer W, Dieter S. Automatic control of bethlehem steel's 'A' coke battery at bethlehem, Pa. Ironmaking Proceedings, 1988, 47: 99-107
- 5 骆光强, 温 治, 陈鸿复, 等. 焦炉燃烧室-炭化室传热过程数学模型. 燃料与化工, 1998, 29(2): 78-82
- 6 郑明东, 严文福. 焦炉加热基础研究. 燃料与化工, 1997, 28(1): 18-22
- 7 Choi K I, Kim S Y, Swo J S, *et al.* A mathematical model for the estimation of flue temperature in a coke oven . Ironmaking Conference Proceeding, 1997, 56: 725-730
- 8 Kim J H, Go H W, Park J W, *et al.* Improvement of the battery heating control system. ICSTI /Ironmaking Conference Proceeding, 1998, 57: 725-730
- 9 Nicholas W M. The development of heating control at dofasco's No.6 battery. Ironmaking Conference Proceeding, 1998, 57: 725-730
- 10 鲍立威, 何 敏, 申志强. 大型焦炉计算机优化控制系统. 冶金自动化, 1994, 18(1): 21-26

· 成果与专利 ·

含高价阳离子的铋系铜酸盐高温超导体及其制备方法

发明人员：李言荣 杨邦朝

该发明公开了含高价阳离子的铋系铜酸盐高温超导体及其制备方法。它掺有元素周期表中一种高于3价的阳离子，其掺入离子的配比范围在0.1~0.6之间，再加上采用高于熔点5~10°C的热冲击工艺制备方法，使铋系铜酸盐高温超导体中的110K相的含量达85%以上，其工艺稳定，安全无毒性，是大量生产铋系铜酸盐高温超导体的有效方法。

· 甬 江 ·