

· 系统与装置 ·

钢铁企业高炉煤气系统动态仿真

李文兵^{1,2}, 李华德¹

(1. 北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083; 2. 冶金自动化研究设计院)

摘要:分析了钢铁企业高炉煤气发生、储存和使用的特点,建立了高炉煤气系统动态数学模型,开发了高炉煤气仿真系统,并对某钢铁企业高炉煤气系统进行了实例计算。仿真计算结果表明:在 3 座高炉和煤气用户完全正常生产的情况下,高炉煤气略有盈余;在煤气用户生产情况和高炉生产情况同时发生变化的情况下,高炉煤气一天的平衡在可调范围内,而动态瞬时平衡由于波动较大,超出调节范围;系统还可展现调度方案的效果,为调度方案的评估提供参考。

关键词:高炉煤气;动态仿真;煤气动态平衡

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7059(2009)02-0033-05

Dynamic simulation of BFG system in iron and steel plant

LI Wen-bing^{1,2}, LI Hua-de¹

(1. School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Automation Research and Design Institute of Metallurgical Industry)

Abstract: Based on analysis of BFG production, storage and usage, dynamic mathematic model of BFG supply and consumption system in iron and steel plant was set up, simulation software of BFG system was designed, and the BFG system of a certain iron and steel plant was taken as an example to calculate. Simulation results show that BFG has a little surplus under normal production condition of three blast furnaces and BFG user. If production of blast furnaces and BFG user have fluctuated simultaneously, dynamic balance of BFG will be beyond adjustable range, although BFG is balanceable statically for a period of time. The simulation system can be used to evaluation of schedule scheme according to simulating effect of schedule scheme.

Key words: BFG; dynamic simulation; dynamic balance of gas

0 引言

我国钢铁企业能源结构中,副产煤气量占总能耗的 30%~40%,煤气对钢铁企业能源平衡和调节起到重要作用。我国钢铁企业的副产煤气存在不同程度的放散现象,高炉煤气由于发热量较低,燃烧温度亦较低,是首先放散的对象。并且,与转炉煤气放散主要在于设备和工艺的原因不同,高炉煤气的放散主要是由煤气供应系统的合理性和平衡等问题造成的。

目前,对钢铁企业煤气系统的平衡、调度、优

化利用等有很多研究成果,然而,这些研究主要针对对煤气的中长期平衡和基于一段时间的静态平衡,而对短期和动态平衡研究不足。尽管制定的月日等煤气计划是平衡的,但在实际生产中,由于煤气产生和消耗随着工艺生产状态的改变而经常波动,煤气的产生和消耗存在局部、瞬时的不平衡,从而造成供需不平衡,对煤气的使用和优化造成影响。因此,有必要对煤气的产生、使用、存储等做进一步的动态建模,以支持更细节的煤气的研究、分析和优化。所谓的动态是与静态相比较

收稿日期: 2008-10-21; 修改稿收到日期: 2009-01-20

作者简介: 李文兵(1971-),女,辽宁昌图人,高级工程师,博士研究生,研究方向为冶金行业流程仿真、MES的应用与开发。

而言的,若在某段时间内,煤气消耗是平均的,则其动态模型和静态模型相同,若煤气消耗不平均,则需要对更小范围内时间段的煤气消耗建立模型,即需要将煤气的动态变化信息表现出来。本研究主要针对动态模型的建立,在时间粒度上采用分钟,以表现煤气因生产变化而产生的动态性。

作者根据高炉煤气动态平衡数学模型^[1],建立了高炉煤气动态仿真系统,利用该模型,从高炉煤气系统的结构、消耗用户生产模式等方面,深入研究了发生量、使用量、存储量、放散量随时间变化的规律,具体内容包括:(1)高炉煤气系统动态平衡数学模型的建立;(2)高炉煤气动态仿真系统的设计;(3)高炉煤气用户生产模式、高炉生产方式等对高炉煤气动态平衡影响的计算和分析。

1 高炉煤气系统的组成和特点

钢铁企业煤气系统涉及煤气生产、输送、分配、消耗诸多环节,管理对象一般包括高炉煤气、焦炉煤气和转炉煤气。作者将高炉煤气相关的内容剥离出来,作为一个独立的系统。

高炉煤气系统包括:高炉煤气发生源(高炉),高炉煤气的存储和输送(煤气管道和煤气柜),高炉煤气的用户(包括基本用户和缓冲用户)。其中,高炉煤气基本用户是生产工艺过程中需要使用煤气的用户,煤气的主要作用就是满足这些用户的需求,如加热炉、热风炉等;缓冲用户是在煤气平衡中用于调节煤气的使用量和稳定管网压力的用户,这些用户在煤气有盈余时使用煤气进行生产,当煤气产量减少时,则需停止使用煤气而调换其它燃料,如发电厂、锅炉等。煤气混合站将两种或两种以上热值不同的煤气混合在一起,以保证用户热工制度的稳定和工艺流程的要求,一般设有热值、压力、流量等调节设备进行调节,调节方式有流量配比调节和热值指数调节。本研究将煤气混合站作为一个高炉煤气用户进行处理。

高炉煤气的平衡状况取决于高炉的生产状况、高炉煤气用户的使用特点、以及高炉煤气管网和煤气柜的存储能力。一般来讲,高炉生产越稳定,存储系统的储存能力越大,用户的煤气消耗越均衡,越有利于高炉煤气的瞬时供需平衡。然而,在钢铁企业生产中,高炉在生产过程中,因检修、处理事故或其它原因,可能中断生产;煤气用户也会因生产工艺要求而使煤气的消耗发生波动,从而严重影响高炉煤气的供需平衡,特别是加热炉

等煤气消耗较大用户的生产波动,往往是造成放散的主要原因。

2 高炉煤气系统动态模型的建立

高炉煤气的发生量、储存量和用户的使用量随时间变化的规律可以用数学方程式描述出来,根据高炉煤气平衡原理,可以建立高炉煤气动态平衡方程。高炉煤气系统动态模型主要包括高炉煤气产生和消耗动态模型,煤气混合加压站模型,以及管网系统和煤气柜的存储模型。本研究中主要对某钢铁厂的以下高炉煤气用户进行建模:烧结机、竖炉、热风炉、喷煤、混铁炉和加热炉。

2.1 高炉煤气产生和消耗动态模型

高炉煤气动态模型的建立,需要将煤气的动态变化信息表现出来。整个钢铁制造流程是一个既包含连续运行过程、又包含间歇运行过程的准连续运行流程,高炉煤气的动态性主要表现在具有间歇性的工序生产上。因此,动态模型的建立需要考虑生产工序的不同状态和阶段,对不同的生产状态和阶段建立相应的模型。

文献[1]根据煤气的使用和消耗情况将相应的工序划分为生产阶段,不同的生产阶段反映了煤气产生和消耗的不同特点。在生产阶段的基础上,建立了高炉煤气用户的动态消耗模型。包括高炉煤气的回收模型、烧结机煤气消耗模型、竖炉煤气消耗模型、热风炉煤气消耗模型、喷煤工序煤气消耗模型、炼钢混铁炉煤气消耗模型和热轧加热炉煤气消耗模型。

2.2 煤气混合加压站模型

煤气混合站的主要功能是为保证用户热工制度的稳定和工艺流程的要求,把不同的煤气进行混合,并对混合煤气的热值、压力和流量进行调节。煤气混合站既不产生煤气,也不消耗煤气,混合煤气的消耗是由其用户决定的。若混合站煤气的调节采用流量配比调节系统。则有以下模型。

(1)煤气混合加压站高炉煤气消耗为

$$q_{混}(t) = \sum_{k=1}^n q_{混}^k \quad (1)$$

式中, n 为混合煤气的用户个数; t 为时间; $q_{混}^k$ 为第 k 个混合煤气用户的高炉煤气消耗。发电厂和锅炉一般都使用混合煤气,这里也将其作为混合煤气的用户。这是因为发电厂和锅炉为缓冲用户,对煤气的使用具有一定的调节作用,其调节作用表现在对混合煤气的消耗上。

(2)发电厂中煤气消耗设备主要是锅炉,一个

发电厂一般有若干个锅炉,其煤气消耗模型与用于供汽的锅炉相同,因此,将发电厂的煤气消耗与锅炉的煤气消耗一起考虑。则锅炉(包括发电厂内锅炉)的煤气消耗为

$$q_{\text{锅}}(t) = \sum_{i=1}^l \dot{q}_{\text{锅}}^i \quad (2)$$

式中, l 为锅炉的个数; $\dot{q}_{\text{锅}}^i$ 为第 i 个锅炉的煤气消耗量。对于一般混合煤气的用户,用户的数量是固定的,即混合煤气的消耗与其生产相关,很难针对混合煤气供应的多少进行调节。而发电厂和锅炉的 l 值是可以变化的,即可根据煤气供应的量将某些锅炉的燃料进行替换,从而增加或减少煤气的消耗。

2.3 管网系统和煤气柜的存储模型

管网系统压力的变化在一定范围之内,且相对于煤气的产生、消耗量和煤气柜的存储量来说非常有限,而且在煤气的使用过程中,管网系统始终滞留一定的煤气量,因此,忽略其存储量对煤气平衡的影响。

煤气柜的主要作用是在煤气产生、消耗量发生短时波动时,及时吞吐煤气,起到以余补欠的作用,同时稳定管网压力、改善煤气用户热工制度。煤气柜既可像发生源一样向管网输送煤气,也可像消耗用户一样,从管网吸取煤气,其煤气的吸入或吐出与管网的压力有关。

煤气柜的存储量为

$$v(t) = V_0 + \text{sign} [q_{\text{高炉}}(t) - \sum_{i=1}^m q_{\text{用户}}^i(t)] \times | q_{\text{高炉}}(t) - \sum_{i=1}^m q_{\text{用户}}^i(t) | \quad (3)$$

其中, $0 \leq v(t) \leq V_{\text{max}}$

式中, V_0 为初始存储量; $q_{\text{高炉}}(t)$ 为高炉煤气的回

收量; $q_{\text{用户}}^i(t)$ 为第 i 个高炉煤气用户的煤气消耗量; m 为高炉煤气用户个数; V_{max} 为煤气柜的最大存储量。当高炉煤气供应大于消耗时,煤气柜储存煤气;当消耗大于供应时,煤气柜吐出煤气补充到管网中。

2.4 高炉煤气动态模型

根据上述分析和高炉煤气平衡原理,可以得到高炉煤气动态平衡方程,表达式为

$$q_{\text{高炉}}(t) = \sum_{i=1}^m q_{\text{用户}}^i(t) + q_r(t) + v(t) \quad (4)$$

式中, $q_r(t)$ 为放散的高炉煤气流量(回收后)。

3 高炉煤气仿真系统的设计

高炉煤气仿真系统主要用于观察高炉煤气发生量和使用量随时间变化的规律,以及某一时刻高炉煤气的存储量、放散量等,从而判断高炉煤气的平衡状况,并可以通过确定和修改高炉煤气系统中的高炉生产状态、用户作业模式、煤气柜参数等,分析讨论高炉煤气发生、储存和使用的规律,为高炉煤气系统研究及调度提供有效的工具和手段。

煤气仿真系统主要分为系统参数设置、高炉煤气产生仿真、高炉煤气消耗仿真、煤气柜计算和结果处理 5 个模块。系统参数设置模块主要用来设置与物流相关的各种参数,如生产计划相关内容、各工序产量等。通过系统参数设置模块,高炉煤气仿真系统与物流数据和生产建立联系。煤气产生仿真主要计算高炉煤气和转炉煤气的回收量。煤气消耗仿真主要计算高炉煤气用户的高炉煤气消耗量。煤气柜计算模块对煤气的存储量及以余补欠功能进行简单计算。结果处理模块将仿真计算的结果进行存储,供进一步分析和研究。高炉煤气系统功能结构如图 1 所示。

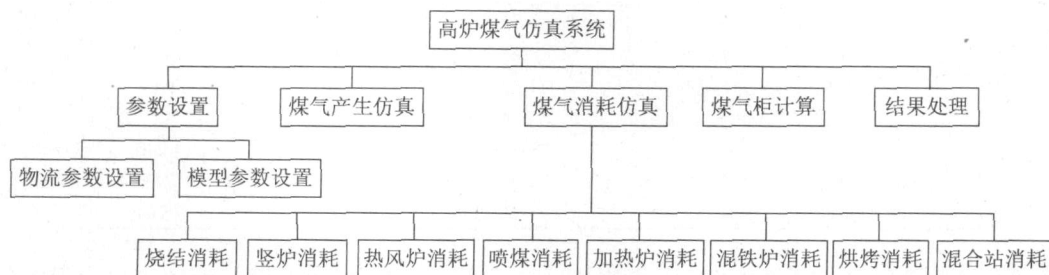


图 1 高炉煤气仿真系统功能结构

Fig. 1 Function architecture of the BFG simulation system

煤气仿真系统在 Windows XP 操作系统上开发和运行,开发环境采用 Microsoft 的 Visual Studio .Net,开发语言为 C#。

4 应用举例

某钢铁企业铁钢材配套生产能力 180 万 t,高炉煤气月回收量约 29 000 万 m³,月使用量约为

27 200 万 m^3 , 没有设置高炉煤气柜, 高炉煤气年放散量约 6%。高炉煤气发生涉及 3 座高炉; 高炉煤气用户为炼铁厂的 9 座热风炉 (每个高炉 3 个), 1 个喷煤工序, 烧结厂的 3 座烧结机和 2 座竖炉, 炼钢厂的烘烤和 2 座混铁炉, 以及宽带热轧的两座加热炉。另外, 高炉煤气还同焦炉煤气加压混合作为混合煤气供发电厂、冷轧厂、钢管厂等使用。

利用该厂数据, 建立了该厂的高炉煤气动态模型和仿真系统, 利用该模型可以从高炉煤气的发生、储存和使用方面讨论高炉煤气的动态平衡

和动态放散问题。

4.1 高炉煤气平衡的影响情况

4.1.1 高炉生产状况对煤气平衡的影响

从表 1 可知, 在 3 座高炉和各煤气用户完全正常生产的情况下, 高炉煤气略有盈余, 由于没有高炉煤气柜对盈余的煤气进行储存, 这部分盈余将被放散掉。当某个高炉出现停产, 则高炉煤气量出现大量短缺, 由于没有煤气柜, 则必须调整煤气用户的煤气使用量, 甚至停掉某些煤气使用用户。

表 1 高炉生产情况对煤气平衡的影响

Table 1 Influence of production fluctuation of blast furnace for BFG balance

| 高炉生产状况 | 正常生产 | 停 1 座高炉 | 停 2 座高炉 |
|-----------------------|-----------|-------------|-------------|
| 高炉煤气回收量 / m^3 | 5 234 425 | 3 489 616 | 1 744 808 |
| 炼铁用户煤气使用量 / m^3 | 268 597 | 179 065 | 89 533 |
| 混合站煤气使用量 (缓冲) / m^3 | 1 374 747 | 1 374 747 | 1 374 747 |
| 其他用户煤气使用量 / m^3 | 3 482 143 | 3 482 143 | 3 482 143 |
| 高炉煤气盈余 / m^3 | 108 937 | - 1 546 339 | - 3 201 615 |
| 放散率 /% | 2.1 | 0 | 0 |

4.1.2 高炉及消耗用户生产变化对煤气平衡的影响

高炉煤气用户的生产由于种种原因, 经常会发生变化, 这些变化对高炉煤气系统平衡造成的影响是十分巨大的。通过仿真系统可以分析这些变化对高炉煤气系统的影响。

某钢铁厂高炉煤气主要生产用户的生产发生如下变化: 1[#]竖炉在 5:00 ~ 11:00 检修 6 h; 二轧 1[#]加热

炉因处理故障, 在 2:00 ~ 8:00 停产 6 h; 1[#]高炉在 12:00 ~ 24:00 休风 12 h。

表 2 为该高炉煤气系统全天 24 h 的煤气平衡情况和在 5:00 和 15:00 两个时刻 (时间跨度为分钟) 的煤气平衡情况。可以看到, 从全天平衡来看, 煤气的供应存在一定的短缺, 但在某些时刻, 煤气却出现了一定的盈余。

图 2 为仿真系统模拟的部分高炉煤气消耗用

表 2 高炉及消耗用户生产变化对煤气平衡的影响

Table 2 Influence of production fluctuation of blast furnace and consumption users for BFG balance m^3

| 高炉生产时间 (时刻) | 24 h | 5:00 (某时刻) | 15:00 (某时刻) |
|---------------|-----------|------------|-------------|
| 高炉煤气回收量 | 4 581 384 | 3 874 | 2 552 |
| 炼铁用户煤气使用量 | 217 245 | 204 | 182 |
| 混合站煤气使用量 (缓冲) | 1 374 747 | 955 | 955 |
| 竖炉煤气使用量 | 594 076 | 236 | 472 |
| 热轧煤气使用量 | 1 518 677 | 626 | 1 240 |
| 其他用户煤气使用量 | 1 083 887 | 756 | 743 |
| 高炉煤气盈余 | - 207 248 | 1 097 | - 1 040 |

户的煤气消耗量在 24 h 之内随时间变化的曲线。图 3 为高炉煤气产出消耗量和煤气盈余情况 24 h 变化曲线。高炉和煤气用户的生产波动导致煤气平衡情况大幅波动。

4.2 发电厂缓冲能力对煤气平衡的调节

发电厂使用的煤气占到混合煤气总使用量的

90%, 因此, 混合站煤气使用量具有很大的缓冲余地。理论上, 发电厂对高炉煤气的调节能力约在 1 237 272 m^3/d , 即调节能力约为 859 m^3/min 。

从一天的平衡看, 高炉煤气供应短缺量完全在发电厂的缓冲能力范围内, 可通过发电厂减少煤气消耗使问题得到解决。但从一天中的某些

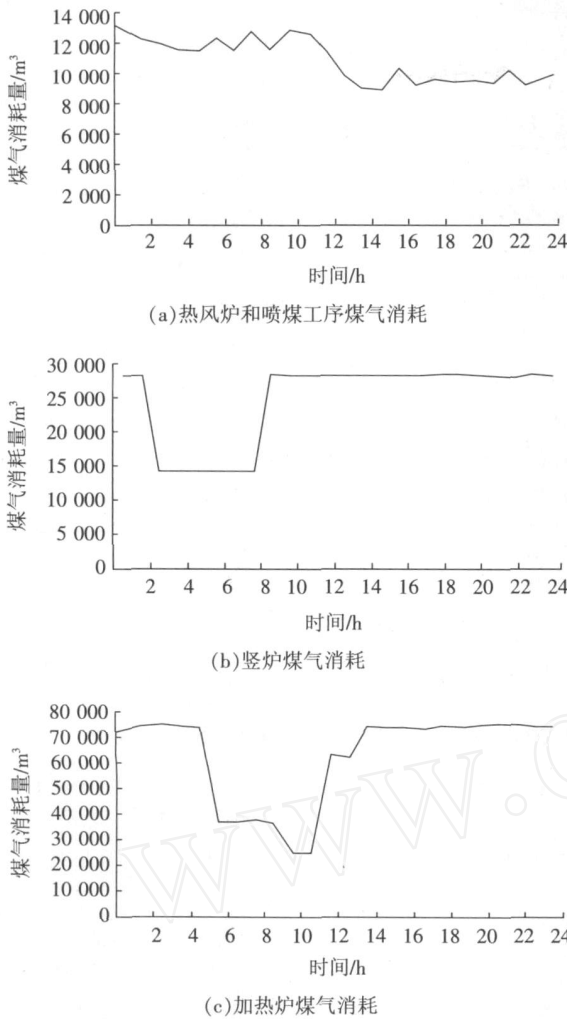


图 2 高炉煤气用户的煤气消耗

Fig. 2 Gas consumption of the BFG users

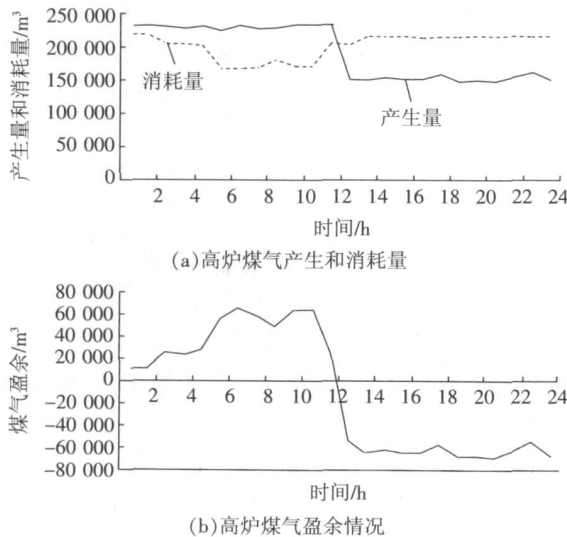


图 3 调整前的高炉煤气产生、消耗量及盈余情况

Fig. 3 Production, consumption and surplus of the BFG before adjusting

局部点来看, 5: 00 出现了煤气盈余, 需要被放散掉, 而 15: 00 出现的煤气短缺量超过了发电厂的调节能力, 需要限制其他煤气用户的煤气使用量。通过动态仿真系统, 可对高炉煤气系统的瞬时动态进行分析, 并提出调整建议方案。

4.3 调度方案的验证

从图 3 的曲线上看, 在高炉煤气供应较多的时间段 0 ~ 12: 00, 竖炉和加热炉却进行了检修和故障处理, 减少了煤气的使用量, 致使出现高炉煤气的盈余; 而在 1# 高炉休风导致煤气减产的情况下, 煤气用户全负荷生产, 导致煤气出现不足。

因此, 除通过电厂缓冲用户进行调节外, 也可在生产调节允许的情况下, 调节高炉的休风时间和消耗用户的检修时间, 使产出和使用趋于平衡。

对高炉及其主要生产进行如下调节: 1# 竖炉在 8: 00 ~ 14: 00 检修 6 h; 二轧 1# 加热炉因处理故障, 在 2: 00 ~ 8: 00 停产 6 h; 1# 高炉在 0: 00 ~ 12: 00 休风 12 h。

图 4 是生产调整后, 通过仿真系统运行得到高炉煤气产生和消耗曲线, 以及高炉煤气盈余情况。与图 3 的曲线相比, 高炉煤气平衡波动减小。

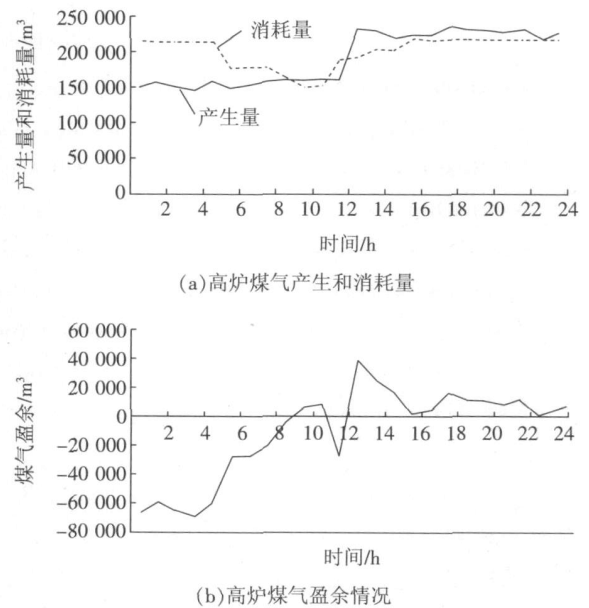


图 4 调整后的高炉煤气产生、消耗量及盈余情况

Fig. 4 Production, consumption and surplus of the BFG after adjusting

5 结论

(1) 高炉煤气系统动态模型反映了高炉煤气系统的时变规律。

(下转第 51 页)

相机计算机的保留地址。

3.6 画面图像突然变得很暗

当系统正常工作时,画面图像突然变得很暗。

解决方法是:(1)检查照明电源或 LED 照明板是否异常。(2)检查编码器是否故障或信号传输是否错误。(3)使用画面上的“Light”按钮,将照明亮度手动加大,若得到更亮的图像,说明照明控制有问题。

4 结束语

该系统自 2008 年 1 月投运以来,运行状态良好,性能稳定可靠。该系统可对连续退火机组带钢生产的全过程实施实时、在线、连续的表面缺陷检测。它不但可以自动完成整个带钢宽度(包括边部)上、下表面的缺陷检测,而且可对所有指定的缺陷进行自动检测、快速分类,并给出缺陷的名称、尺寸、位置及整个钢卷的表面缺陷判定等

级。

该系统的成功应用,减少了质检人员的工作强度,保证了缺陷检测的及时性和准确性;相关人员可以清楚地了解带钢表面的质量信息,从而可以快速查找出缺陷产生的原因,特别是周期性缺陷,从而大大提高了产品质量的合格率和优质率。

参考文献:

- [1] 杨水山,何永辉,王振龙,等. 带钢视觉检测系统的研究现状及展望 [J]. 冶金自动化, 2008, 32(2): 5-9.
YANG Shui-shan, HE Yong-hui, WANG Zhen-long, et al. Development and perspective of automatic strip surface inspection system based on machine vision [J]. Metallurgical Industry Automation, 2008, 32(2): 5-9.

[编辑:沈黎颖]

(上接第 37 页)

(2)高炉煤气动态仿真系统可对高炉煤气系统结构的评估提供参考。

(3)高炉煤气动态仿真系统不仅可表现煤气某段时间的平衡情况,还可对高炉煤气的瞬间动态平衡情况进行展现,可用来分析高炉及煤气用户生产发生变化对煤气动态平衡带来的影响,为煤气调度提供有效的分析手段和方法。

(4)高炉煤气动态仿真系统可对用户的调度

方案进行展示,为调度方案的评估提供参考。

参考文献:

- [1] 李文兵,纪扬,李华德. 钢铁企业煤气产生消耗动态模型研究 [J]. 冶金自动化, 2008, 32(3): 28-33.
LI Wen-bing, JI Yang, LI Hua-de. Dynamic models for gas output and consumption in iron and steel company [J]. Metallurgical Industry Automation, 2008, 32(3): 28-33.

[编辑:夏宁]

(上接第 46 页)

操作曲线可以设定为对真空罐循环烘烤,即最后一条曲线运行完成后,自动回到第 1 条曲线重新运行。当点火器点火失败时,煤气、氧气阀门关闭,同时氧枪保护气体阀门打开。处理过程中会对各种信号进行检测,如煤氧实际配比,煤气、氧气压力等。出现异常或人为终止时,煤气、氧气阀门关闭,氧枪提升到停枪位,同时氧枪保护气体阀门打开。

4 应用效果

此系统于 2004 年在国内某大型钢厂 RH 炉真空系统投产以来,运行稳定、控制效果良好,在转炉终点碳 $[C] = 0.04\% \sim 0.06\%$ 的条件下,经吹氧 1~3 min,强制脱碳 15~19 min,可获得 $[C] = 0.0010\% \sim 0.0020\%$ 的超低碳钢;加铝化学升温速度可达到 $6.2 \sim 6.9$ /min,耗铝量 $0.030 \sim 0.034$

kg/(t·),耗氧量 $0.020 \sim 0.028$ m³/(t·),最高可升温 80 ;烘烤真空罐时真空罐最高温度可达 1300 ,升温速度可达 37.5 /h,满足了超低碳钢的钢水要求。

整体来讲,RH 炉控制水平可靠、稳定,与国外同类型 RH 炉相比已经处于同一水平线上。但在提高控制精度和更完备的故障处理过程还有需要完善的地方,此外,国内的大量成功应用为开拓海外市场奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 高泽平,贺道中. 炉外精炼 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2005.
[2] 袁章福,潘贻芳. 炼钢氧枪技术 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2007.

[编辑:魏方]