

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20200305

加热炉自动燃烧系统的研究与应用

高 月, 陈丽娟, 赵 帅, 王泽举

(首钢京唐钢铁联合有限责任公司热轧部, 河北 唐山 063200)

摘 要: 自动燃烧是未来轧钢加热炉发展趋势。1 580 mm 生产线 4 号加热炉于 2017 年投产, 为提高加热炉自动控制水平, 实现全自动燃烧, 开发了脉冲式燃烧程序和板坯温度自动控制模型。通过脉冲燃烧, 实现了炉膛温度的快速响应以及良好的板坯长度温度均匀性; 通过温度控制模型功能优化, 对每一类钢种都制定了最优升温曲线, 实现了板坯温度的自动控制。叙述了 1 580 mm 产线 4 号加热炉脉冲燃烧系统及模型控制模块的主要功能, 提出了用于一些程序优化的方法, 这对提高板坯的加热质量和降低能源消耗具有明显的效果。

关键词: 加热炉; 自动燃烧; 脉冲; 模型; 温度

文献标志码: A **文章编号:** 1006-9356(2021)01-0046-06

Research and application of automatic combustion system for heating furnace

GAO Yue, CHEN Li-juan, ZHAO Shuai, WANG Ze-ju

(Hot-rolling Department, Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, Hebei, China)

Abstract: Automatic combustion is the development trend of rolling reheating furnace in the future. The No. 4 heating furnace of 1 580 mm hot rolling production line was put into production in 2017, in order to improve the automatic control level of the reheating furnace to realize automatic heating of slab, the pulsed combustion program and automatic slab temperature control model. Through pulse combustion, the rapid response of furnace temperature and good temperature uniformity of slab length were realized. Through the function optimization of the temperature control model, the optimal temperature-rise curve has been worked out for each type of steel, and the automatic control of slab temperature is realized. The main functions of the pulse combustion system and the model control module of the No. 4 heating furnace in the 1 580 mm production line were described, and some methods for program optimization were proposed, which can improve the heating quality of slab and reduce the energy consumption.

Key words: heating furnace; automatic combustion; pulse; model; temperature

加热炉作为轧钢工序中的主要耗能设备, 能源消耗占热轧工序能耗 70% 以上, 其节能降耗水平对整个冶金生产占有举足轻重的作用^[1-2]。目前国内大多数轧钢产线的加热炉仍处于半自动控制, 板坯加热质量因人而异, 板坯出炉温度波动大, 能耗和烧损居高不下, 对轧制稳定性和过程温度指标控制造成很大影响。自动燃烧技术能稳定加热炉的烧钢质量, 提高加热炉的各项指标控制水平^[3]。开发先进的自动燃烧控制系统是目前加热炉发展的主流, 国外一些先进大型钢铁企业例如浦项、现代制铁等都已实现了加热炉自动烧钢^[4-5]。2017 年以来, 1 580 mm 产线开始对加热炉进行燃烧控制系统升级改造, 通过采用先进的一级脉冲燃烧控制技术, 配合二级温控模型的开发, 实现了“一键式烧钢”的控

制功能, 自动投入率达到 95% 以上, 加热炉综合能耗控制水平和板坯加热质量得到显著提高。

1 加热炉主体结构

1 580 mm 生产线主要为汽车、家电、建筑及结构、机械、电气等行业提供高品质、高技术含量、高附加值的板材产品。4 号加热炉的额定加热能力为 300 t/h(冷坯)。加热炉炉体结构如图 1 所示, 设 5 个炉温自动控制段, 即预热段, 第一加热段, 第二加热段, 均热段上、下, 除上部均热段采用平焰烧嘴供热, 其余各段均采用低 NO_x 脉冲式烧嘴侧向供热。其中均热段上采用双交叉限幅连续燃烧控制, 其余各段均采用数字化脉冲燃烧控制。另外, 加热炉还设有一个不供热的热回收段, 以充分回收烟气余热,

作者简介: 高 月(1989—), 男, 大学本科, 工程师; E-mail: 867008705@qq.com; 收稿日期: 2020-05-26

节约能源。

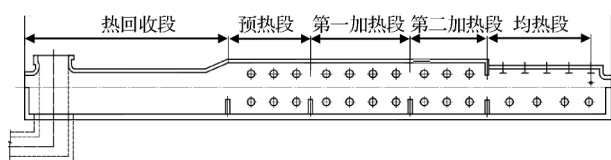


图 1 加热炉结构图

Fig. 1 Furnace structure diagram

2 加热炉自动控制系统架构

1 580 mm 产线 4 号加热炉自动控制系统分成两级:基础自动化系统(简称 L1)和过程自动化系统(简称 L2)。L1 级包括电控系统和仪控系统,主要功能是完成加热炉的顺控、步进梁控制、加热炉燃烧控制、介质的测量和控制等,其中燃烧控制是 L1 中最为重要的部分。L2 级主要功能是对加热炉区内的板坯进行跟踪和温度控制,通过控制模型,对炉内板坯按加热工艺要求进行加热,确保板坯加热过程温度和出钢温度满足轧制要求。加热炉 L2 系统通过工业以太网与其他外部系统 L1、轧线 L2 系统连接实现系统间的数据传输。

随着市场对产品差异化需求的增大,热轧大型板坯加热炉生产的特点是同一辊期内产品种类多、规格跨度大、冷热混装,采用常规比例控制的加热炉常由于分区大而无法对同一区的不同板坯进行差异化加热控制,因此 L1 燃控系统必须达到炉膛温度快速调节、精确控制的要求。4 号炉 L1 燃烧控制系统采用脉冲燃烧控制系统,相比常规控制式加热炉,

炉内分区由 8 段增加至 14 个段温控区,能够精确控制板坯加热过程温度,通过烧嘴脉冲式燃烧,每个温控区的炉温响应速度大幅提高。

为降低能耗,提高带钢表面质量和组织性能,选择合适的升温曲线尤为重要,同时,一些钢种需采用特定的升温曲线践行加热。为满足不同钢种对升温曲线的需求,4 号炉对原有 L2 温度控制模型进行全面升级,细化了各类钢种升温曲线,同时根据钢种成分,对各类钢种的热物理性质进行调整。

3 脉冲式燃烧控制系统

3.1 脉冲燃烧系统配置

1 580 mm 产线 4 号加热炉除上均热段采用了双交叉限幅控制的平焰烧嘴外,其余各温度控制段采用脉冲控制的可调焰烧嘴,烧嘴全部安装在侧墙上。每个脉冲烧嘴都由空气、煤气系统配合而成,烧嘴前的空、煤气管道上分别安装了 ON/OFF 快切阀,每个快切阀都配备了全开、全关限位开关。为了提高炉膛温度控制精度,由传统的 8 段炉温控制提高至 14 段炉温控制,由装料端到出料端共有 24 对烧嘴形成 14 个独立供热区,其中上部段 6 个控制区,下部段 8 个控制区,具体分区如图 2 所示。每个温度控制区内有 2~4 块板坯,区内烧嘴可单独进行启动、停止及操作,实现了对每一对烧嘴的单独控制,同时每个温控区内配置一对热电偶,正常情况下,炉膛两侧烧嘴连锁成对使用,通过控制系统下达的燃烧指令实现脉冲燃烧。这样能够精确控制板坯温度。

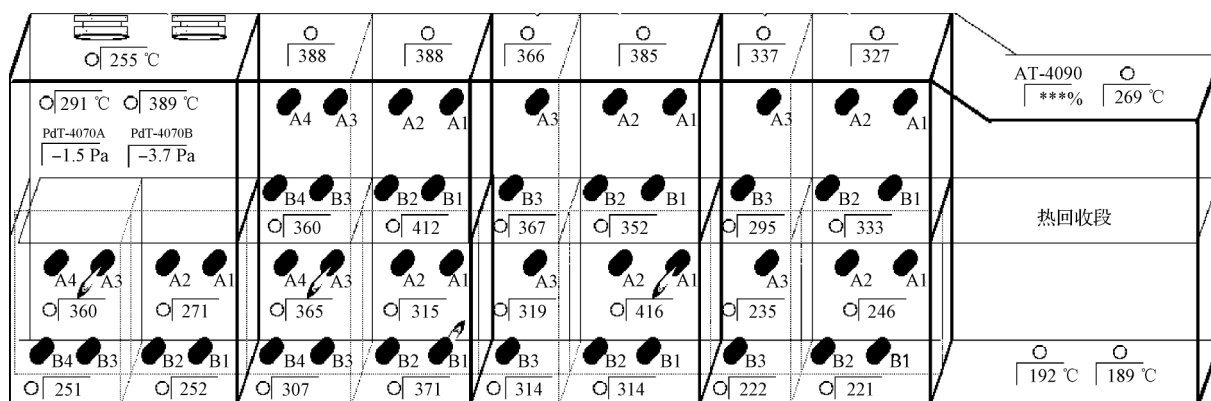


图 2 脉冲烧嘴及控制区分布

Fig. 2 Distribution of pulse burner and control zone

3.2 脉冲燃烧时序控制

脉冲控制原理如图 3 所示,当温度调节器

(PID)输出信号 MV 在 0~100% 范围变化时,脉冲变换器的输出脉冲的开时间也线性地在 0~T 中间

变化,其中 T 为脉冲周期。然后,经过脉冲时序分配器,将控制脉冲发到相应的空/燃气的阀门控制执行机构,最终完成阀门的开/闭,从而达到控制炉温的目的。脉冲燃烧时烧嘴的实际工作过程如图 4 所示,在一个脉冲周期内,加热炉负荷不变。

1 580 mm 产线 4 号炉设定脉冲周期为 40 s,每

40 s 扫描一次热负荷需求,当热负荷大于 90% 时,所有的脉冲阀门全部打开;当热负荷小于 10% 时,所有的脉冲阀门全部关闭。在一个控制段内,空、燃气脉冲阀成对打开和关闭。当某个打开时先开空气脉冲阀,确认开信号到位后,再开燃气脉冲阀;关闭时先关燃气脉冲阀,关闭信号到位后,再关空气脉冲阀。

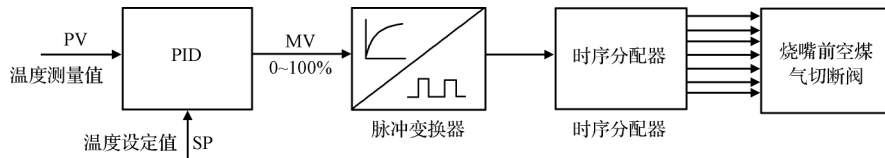
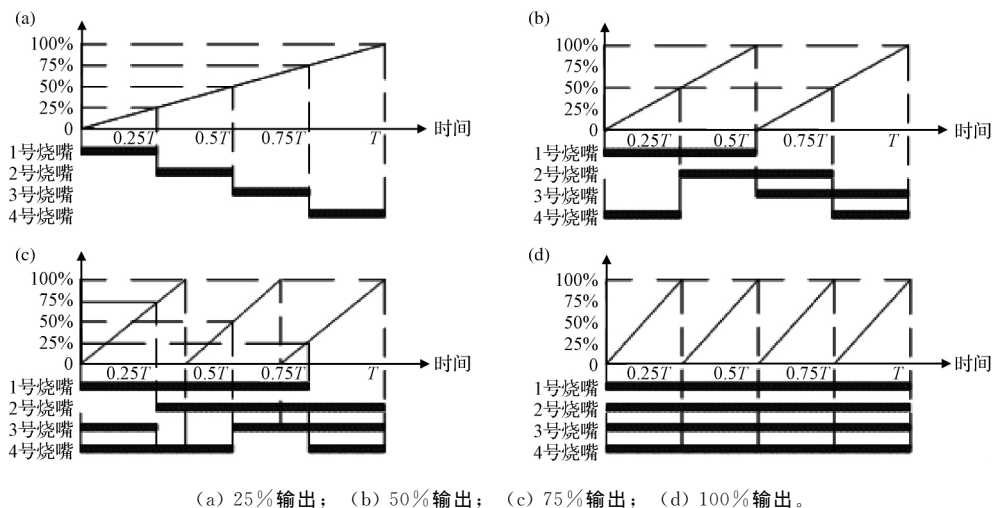


图 3 脉冲控制原理图

Fig. 3 Schematic diagram of pulse control



(a) 25% 输出; (b) 50% 输出; (c) 75% 输出; (d) 100% 输出。

图 4 烧嘴工作原理时序图

Fig. 4 Time sequence diagrams of working principle of burner

3.3 脉冲燃烧的优点

(1) 在脉冲燃烧模式下,每个烧嘴喷出火焰的热焓、速度以及火焰的长度都是一个定值,如果对多个烧嘴进行适当的组合分区、合理的布置,就会获得满意的处理炉内温度场的分布,保证极高的板坯加热质量^[6]。

(2) 对于在“小流量”的保温状态下,也就是低负荷燃烧状态下,每一个烧嘴在打开期间,喷出的燃料和空气量和“大流量”状态下是相同的,仅仅是打开的时间不同,所以不存在火焰长度受到常规控制下的小流量影响的问题,这能够提高板坯在长度方向的温度均匀性。

(3) 通过烧嘴间隔性的开闭组合,能够更大地增强炉内各段的炉气紊流搅拌,促进炉气和钢坯

的热交换,达到节能和提高炉子热效率的目的^[6]。

3.4 脉冲式燃烧的常见问题及解决方案

4 号炉投产初期,板坯长度方向温度存在头尾高、中间低的问题,经过现场跟踪分析发现,板坯火焰偏短,根据实际生产需求,通过调节脉冲烧嘴一次风和二次风配比,同时对煤气手阀进行调整,标定了每个烧嘴嘴前压力,通过多次试验,确定了合适的火焰长度,最终实现了板坯长度方向温度均匀。4 号加热炉板坯典型 R2DT 曲线如图 5 所示,中间坯通长方向温度极差 20 °C,效果良好。

烧嘴开闭过程造成炉压波动也是脉冲燃烧的主要问题点,调整加热炉热负荷设定周期与脉冲周期的时长,以及调节 PDI 中关于升、降温的限幅对炉压稳定性有很大改善。

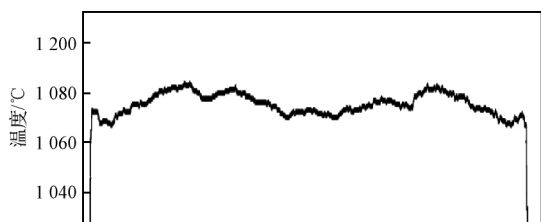


图 5 中间坯 R2DT 曲线

Fig. 5 R2DT curve of intermediate billet

4 加热炉温度控制模型

加热炉温度控制模型是整个加热炉过程控制系统的核心,主要任务是按生产工艺要求,对进入加热炉区域的钢坯进行准确的生产控制和跟踪,并通过数学模型的有效运行,对加热炉炉内钢坯的温度进行实时跟踪计算,优化控制钢坯的升温过程,精确控制钢坯的出炉温度和均匀度,降低氧化烧损,在提高加热质量及产量的前提下节省能源。

由于加热炉是个具有大惯性、纯滞后、多变量和时变参数的复杂的被控系统,工作机理复杂^[7-9]。实际生产过程中,存在很多影响板坯温度控制的因素,其中最为显著的几项工况包括加热时间的不确定性、板坯目标出钢温度跳跃大、重点钢种的特定升温曲线、轧制节奏的变化等,这些问题都会造成加热炉负荷发生较大变化。如何实现这些特殊工况下,平衡各种因素的影响,给出最佳的炉温设定值,是加热炉温度控制模型是否能够真正实现自动化的瓶颈^[10-11]。对此,结合工艺专业和优秀操作工人生产经验,以及各类钢种工艺需求,对 1 580 mm 产线 4 号炉温度控制模型关键模块进行了完善和优化。

4.1 板坯升温曲线

为提高板坯加热质量和带钢质量性能,同时兼顾烧损和燃耗控制水平,1 580 mm 产线 4 号炉对不同类别的钢种制定不同升温曲线。用一元三次函数描述钢坯升温曲线,根据工艺要求确定定解条件,求解方程组获得一组钢坯表面的升温曲线,钢坯升温曲线描述为

$$T(t) = at^3 + bt^2 + ct + d$$

式中: T 为钢坯温度; l 为板坯在炉内的位置; a 、 b 、 c 、 d 为待求系数。

根据钢坯入炉温度、出炉温度等可以获得以下方程组和约束条件。

$$\begin{cases} T(0) = d = T_0 \\ T(l_s) = al_s^3 + bl_s^2 + cl_s + d = T_{tar} \\ T_2(l) = 3al^2 + 2bl + c = 0 \end{cases}$$

式中: T_0 为钢坯入炉温度; T_{tar} 为钢坯目标温度。

为达到节能降耗的目的,对于常规钢种,分为三大类升温曲线,可根据生产情况手动选择提前升温、均匀升温、滞后升温 3 种模式,其中,提前升温曲线指提高预热段、第一加段段供热负荷,此模式加热质量最好;滞后升温曲线,指提高第二加段、均热段供热负荷,此模式最为节能,但加热质量略差;均匀升温曲线介于提前升温 and 滞后升温之间,此模式能够兼顾能耗和加热质量。

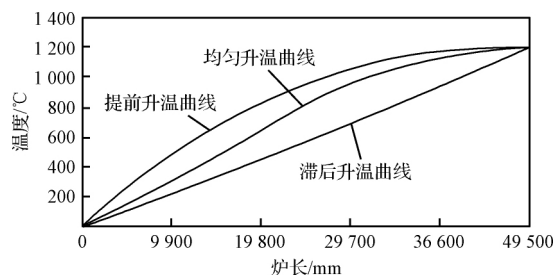


图 6 板坯升温曲线

Fig. 6 Slab heating curves

1 580 mm 产线 4 号炉温度模型中,对于常规钢种默认执行上述 3 种升温曲线,操作人员可根据生产情况手动选择。对于部分特定钢种,保证加热质量及产品性能则更为重要,其升温曲线由工艺人员单独设定。温度模型根据板坯当前温度及炉内位置和剩余在炉时间预测,自动下发每一时刻下最优炉膛温度设定值。

4.2 炉内板坯温度计算模型

炉内板坯温度计算模型是加热炉温度控制模型的核心部分,包括热流量计算模型和板坯内部传热过程数学模型。热流量计算模型是以上一周计算出的板坯温度为基准,根据炉内板坯的位置和由炉内热电偶测得的炉温插值计算出的板坯上、下的炉气温度,推算出流入板坯表面的热流量(单位时间内流过单位面积的热量)。在计算热流量时,模型要考虑板坯所在段水印的补偿(加热段板坯水印下部、均热段的水印下部分别考虑补偿)。通过板坯表面的热流量计算板坯表面温度,求解钢坯一维导热方程,获得板坯在厚度方向的温度分布,板坯加热过程的导热方程为

$$\rho C \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right]$$

初始条件 $t=0, t(0, y) = t_0(y)$

边界条件 $y=0, \lambda \frac{\partial t}{\partial y} = q_a$

$$y = H, \lambda \frac{\partial t}{\partial y} = q_b$$

式中: ρ 为钢坯密度; C 为钢坯比热; λ 为钢坯导热系数; $t_0(y)$ 为钢坯初始温度; q_a 为钢坯上表面热流密度; q_b 为钢坯下表面热流密度; H 为钢坯厚度。

控制模型将板坯厚度分为 5 层, 将一维热传导模型在板坯厚度方向的 5 个层别上分别做差分模型方程组, 通过求解方程组, 得到每一层板坯的温度。差分模型周期计算, 利用前一次计算的板坯温度和板坯当前的炉温计算新的板坯温度, 从而实现板坯温度的不断更新。

由于不同钢种的热物理性质不同, 每一类钢种在不同温度下比热、导热系数是不同的, 1 580 mm 产线 4 号炉根据实际生产结构, 将常规板坯分为 8 大类钢种, 按照英国钢铁协会标准, 根据板坯成分自动设定每类钢种的热物理参数, 能够准确计算每一类钢种在加热过程中的温度状态。

4.3 炉温设定模型

炉温设定控制模型综合考虑炉内所有板坯的加热需求(单个板坯的必要炉温设定值)和板坯特性, 计算出炉内各板坯的加权系数, 然后对炉内各板坯必要炉温进行加权计算, 并结合加热控制经验设定策略, 模糊计算出各段设定炉温。

在板坯当前温度计算完成以后, 为了进行炉温加热设定, 需要先进行板坯温度预测计算。板坯温度预测模型根据板坯剩余在炉时间计算模型计算的板坯剩余在炉时间、板坯厚、当前炉温、板坯当前温度等, 从而推算出到各段段末时板坯的预测平均温度。在设定炉温之前要进行板坯温度敏感度计算。温度敏感度就是指段炉温变化对段出口侧板坯预测平均温度的影响变化量。板坯温度敏感度计算是计算板坯所在段和经过段炉温变化对该段出口侧板坯预测平均温度的影响。板坯的炉温计算模型是将板坯段末出口的预测平均温度与加热炉出口板坯的目标温度进行比较, 从而计算出每块板坯的必要炉温设定值, 同时根据每块板坯权重系数高低, 选择最为合理的温度设定值。

1 580 mm 产线 4 号炉模型能够对炉内 14 个温度区分别下发炉温设定值, 当相邻板坯出钢温度目标值出现变化时, 通过每块板坯的权重系数, 可实现各温度区内板坯温度的实时调控。

5 应用效果

加热炉脉冲燃烧控制系统和二级温度模型控制

系统上线调试完成后投入正常运行, 期间现场按照正常生产组织, 板坯入炉后无人工干预, 通过三级下发坯钢种、规格、目标温度等基本参数, 通过二级温度模型自动分析钢种成分、物理参数, 并自动划分钢种大类, 按照预设升温曲线进行温度设定, 脉冲燃烧控制系统根据炉温设定值自动调节炉膛温度。经评价板坯出炉温度及加热过程温度曲线可满足生产加热质量及生产稳定性需求, 加热效果与手动烧钢相比有显著提高。

5.1 板坯温度计算模型精度

为验证板坯温度计算模型准确性, 对 4 号加热炉进行两次黑匣子试验, 通过埋偶的方式测量板坯实际出钢温度与模型计算温度, 试验板坯选择 10 500 mm × 1 400 mm × 237 mm 标准坯, 钢种为 Q235B, 出钢温度目标值为 1 200 °C。第一次测量结果显示二级计算平均温度高于实测值 35 °C, 中心温度高于实测值 22 °C, 平均温度取为头、中、尾 3 部分的上下表面与中心温度均值, 共计 9 点温度; 中心温度取头、中、尾 3 点厚度方向中心温度均值。通过模型参数相应调整后, 二次试验显示, 模型计算数据与实测值吻合度较高。出钢前板坯实测温度与模型计算温度基本一致, 平均温度温差不大于 12 °C, 中心温度温差不大于 10 °C, 温度曲线如图 7 和图 8 所示。

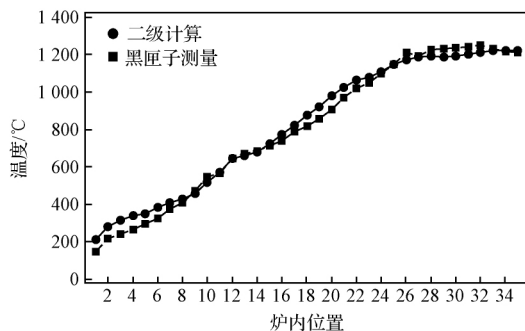


图 7 平均温度对比

Fig. 7 Comparison of mean temperature

5.2 出钢温度控制精度及自动投入率

4 号炉出钢温度控制精度良好, 图 9 所示为 2019 年 12 月温度控制情况, 当月板坯目标温度为 1 150~1 250 °C, 共计生产 10 150 卷, 目标值 ±20 °C 以内命中率达到 85% 以上, 超标部分为钢种过渡影响。图 10 所示为 2019 年随着脉冲控制程序和二级温度模型不断优化, 自动控制投入率趋势图, 截止 2019 年 12 月自动控制投入率达到 95% 以上。

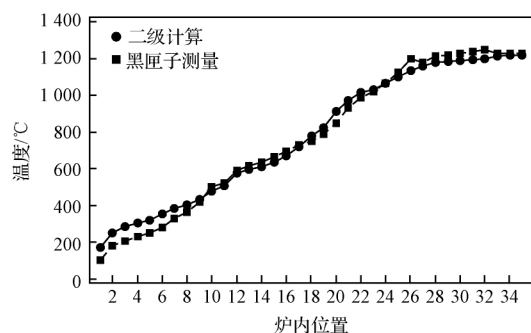


图 8 中心温度对比

Fig. 8 Central temperature contrast

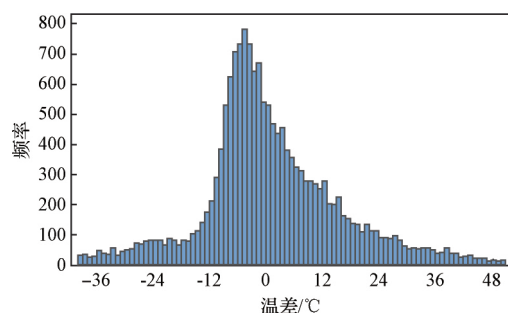


图 9 出钢温度偏差

Fig. 9 Temperature deviation of tapping

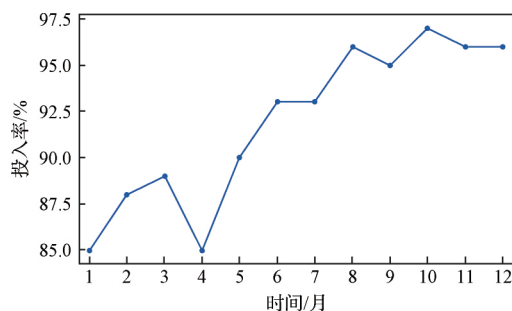


图 10 加热炉模型自动控制投入率

Fig. 10 Model of reheating furnace
automatic control input rate

6 结论

本文介绍了 1 580 mm 产线 4 号脉冲式加热炉

自动控制的关键技术和控制框架。

(1)虚拟分区技术和脉冲燃烧控制,使炉膛温度能够快速响应并精确控制,每个温控区内板坯数量由 4~8 块降低至 2~4 块,实现了当今小批量、多规格产品结构下板坯温度的精确控制。

(2)调整脉冲烧嘴烧嘴前空、煤气压力,确定合适的火焰长度,在脉冲控制时序下,板坯长度方向温度波动能够控制在 20 °C 以内。

(3)对钢种热物理参数优化,提高了板坯温度模型计算精度,同时根据工艺需求,针对不同钢种开发特定升温曲线,依托脉冲燃烧技术对炉温的精准控制,实现了板坯温度自动控制,控制偏差在 ± 20 °C 内。

经过实践发现,良好的加热炉自动燃烧控制系统无论是对提高板坯加热质量还是降低能耗都有明显的效果。

参考文献:

- [1] 周劲军,史德明,范满仓,等.板坯加热炉燃烧控制系统优化[J].冶金动力,2018(9):30.
- [2] 唐嘉瑞,黄琼玲,曹欣川洲.板坯加热炉热平衡测试与能效分析[J].冶金能源,2019,38(2):45.
- [3] 沈际海.加热炉燃烧控制模型在梅钢 1780 中的应用[J].冶金自动化,2014,38(3):33.
- [4] 吴建光,秦建超.加热炉优化炉温分布均匀性的研究[J].冶金自动化,2011(增刊 2):441.
- [5] 左为恒,王彦.燃气加热炉燃烧控制方法的研究[J].热能动力工程,2010,25(5):543.
- [6] 赵钰.脉冲燃烧技术在太钢步进式加热炉中的应用[J].中国冶金,2013,23(9):31.
- [7] 张银娟.步进梁式加热炉炉温设定策略研究[J].热加工工艺,2012,47(19):102.
- [8] 杨英华,石翔,李鸿儒.基于数据特征的加热炉钢温预报模型[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(3):305.
- [9] 陶曙明,苏福永,李智,等.连续加热炉内钢坯换热机理模型的能耗预测方法研究[J].工业炉,2015,37(2):44.
- [10] 柴天佑,王中杰,张莉.加热炉的炉温优化设定模型[J].自动化学报,2000,26(4):537.
- [11] 刘显军,徐光,熊俊伟.钢坯加热升温曲线优化[J].热加工工艺,2006,35(17):57.