

蓄热和预热组合式燃烧技术在大型板坯加热炉上 研究和应用

陈迪安¹ 李春生¹ 苗为人¹ 余威² 刘志民²

(1. 北京首钢国际工程技术有限公司, 北京, 100043;

2. 河北省首钢迁安钢铁有限责任公司, 迁安, 064404)

摘要: 蓄热和预热组合式燃烧技术在提高加热炉的出炉板坯长度方向温度均匀性方面与常规燃烧技术相比具有优势。本文结合首钢迁钢 1580 热轧 270t/h 蓄热式板坯加热炉项目, 为提高出炉板坯温度均匀性、降低燃料消耗、降低氧化烧损, 在供热方案、烧嘴选型和燃烧控制等方面进行分析和研究, 确定的优化方案在实际运行中取得了良好的效果, 有助于提高热轧产品质量及蓄热式燃烧技术的推广。

关键词: 蓄热式燃烧; 温度均匀性; 氧化烧损; “间拔”控制技术

Research and application of regenerative and preheat modular combustion technology on a large slab reheating furnace

Chen Di'an¹, Li Chunsheng¹, Miao Weiren¹, Yu Wei², Liu Zhimin²

(1. Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100043; 2 Hebei Shougang Qian'an Iron & Steel Co., Ltd., Hebei Qian'an, 064404)

Abstract: The regenerative and preheat modular combustion technology had big advantage on discharged slab temperature uniformity than conventional combustion technology on reheating furnace. To improve the uniformity, based on analysis and research of heating proposal, burner selection and combustion control, the proposal made for the 270t/h reheating furnaces of Shougang Qiangang 1580 HSM got very good operation results. The ideas talked in this paper were helpful for improving slab temperature uinformity and quality, and prompting regenerative combustion technology.

Key words: regenerative and preheat modular combustion technology; temperature uniformity; Slag loss; “thinned out” control technology

1 引言

随着钢铁行业的快速发展, 提高产品质量, 利用钢铁企业现有附产煤气、节约能源、保护环境已成共识。蓄热高温燃烧技术作为一种创新性燃烧技术, 越来越得到广泛的应用, 据不完全统计, 2006~2010年新上的热轧生产线, 约90%以上采用了该技术。蓄热式燃烧技术具有高效、节能的优点, 其NO_x的排放也能有效控制, 能较大限度的回收利用钢铁企业附产煤气和降低轧钢加热工序能耗, 减少企业附产

煤气的放散和 NO_x 的排放，从而减少环境污染。但加热炉是否选择蓄热燃烧技术，应从工厂实际条件、产品大纲和生产特点来考虑，而非“人云亦云”。在一定条件下，蓄热式燃烧技术的优点是常规燃烧技术所无法取代的。

首钢迁钢钢铁厂 1580mm 热轧工程，是首钢搬迁结构调整的重点工程之一，生产规模 280 万吨，于 2009 年年底投产。为满足钢坯加热的需要，设置了 4 座步进梁式加热炉。

2 板坯出炉温度均匀性研究

对于热轧加热炉的主要要求是控制炉内板坯的加热工艺即升温过程，这在总体上容易实现。但对于大型的板坯加热炉，由于炉膛宽、火焰组织难，在实际运行中存在着出炉板坯长度方向温度均匀性问题。如果待轧板坯长度方向温差大，则有以下影响：

轧制后的同一钢带不同位置金属物理特性不同，产品性能差别特别大，钢带板形特别差；

轧制时轧制力的变化大，增加轧机的控制难度，降低轧后产品的精度；

为保证温度最低点能顺利轧制，必须提高整体出炉温度，炉内加热时的燃耗增加，氧化烧损加大。

所以，尽可能降低出炉板坯温差，提高板坯长度方向的温度均匀性，有利于提高产品质量和精度，延长轧机寿命，降低燃耗和钢坯在炉内氧化烧损，提高产品的质量。

2.1 常规加热炉出炉板坯温度均匀性研究

目前国内加热炉主流供热方式为除均热上布置平焰烧嘴外，其余供热段侧墙布置常规低 NO_x 调焰烧嘴（引进日本中外炉公司 SDF 型超低 NO_x 调焰烧嘴），这种供热方式系统简单，维护方便，但与轴向布置烧嘴相比难以控制炉宽方向的炉温分布和出炉板坯温度均匀性。

首钢迁钢热轧作业部 1# 生产线（2160mm）2007 年建成 3 座 250t/h 板坯加热炉。炉膛内宽 11.2m，均热段上部采用炉顶布置的平焰烧嘴，其余 5 个供热段采用侧向布置常规低 NO_x 调焰烧嘴，流量控制。投产后，出现板坯长度方向的温度分布呈现中间高、两端低的规律，且温差较大，详见文献^[2]。对烧嘴进行了一系列改造后，中间温度高的情况有所好转，但整体的均匀性和分布规律仍未达到理想的轧制工艺要求。文献^[1]中提到的常规侧向燃烧加热炉也有出炉板坯温度均匀性问题，不同的是该例的板坯温度分布规律为中间低、两端高。

以上温度均匀性问题产生的主要原因是炉内两侧烧嘴的火焰匹配不好；火焰偏长则炉中间火焰重叠，导致板坯中间温度高；火焰短则板坯中间区域加热不足，导致中间温度低。而烧嘴的火焰长度，一方面与供热能力有关；另一方面是因为加热炉所用调焰烧嘴一般不具备与使用条件完全相同的开发条件，设计预期与实际表现总有一定差别，导致难以精确预测火焰特性，这是任何工业烧嘴无法回避的，也使得烧嘴侧墙布置时的两侧烧嘴的火焰匹配、炉宽方向温度分布和炉内板坯长度方向温度均匀性具有不可预测性，即使采用脉冲控制技术，也只规避了低流量下火焰短的问题，而无法从根本上解决这个问题。

2.2 蓄热式加热炉出炉板坯温度均匀性研究

近几年国内新建热轧大型板坯加热炉流供热方式为除均热上布置平焰烧嘴外，其余供热段侧墙布置 Bloom 的 1150 系列 Lumi-flame 低 NO_x 蓄热式烧嘴，采用该类型厂家有宝钢 1880 热轧、武钢 1580mm 热轧、梅钢 1780 热轧、太钢 2250 热轧等，通过对这几家调研，均存在出炉板坯中间温度高、两端温度低的“凸”型分布。虽然蓄热烧嘴是通过一对烧嘴周期性交替燃烧的方式给炉内板坯加热，单个蓄热烧

嘴的能力相对常规加热炉烧嘴能力大一倍，蓄热烧嘴的火焰长度较常规烧嘴长，导致两侧烧嘴火焰在炉膛中心存在叠加现象，造成炉膛中间温度偏高，而烧嘴端部空气和煤气的混合不充分使得烧嘴端部的火焰温度偏低。另外炉墙会向外不停的传热，也造成靠近炉墙区域温度偏低，因此炉内温度场呈现中间高两端低的“凸”型分布，炉内温度场的分布情况会传递给板坯，从而造成板坯温度场成类似的分布，从过粗轧后温度如图 2-1 示：

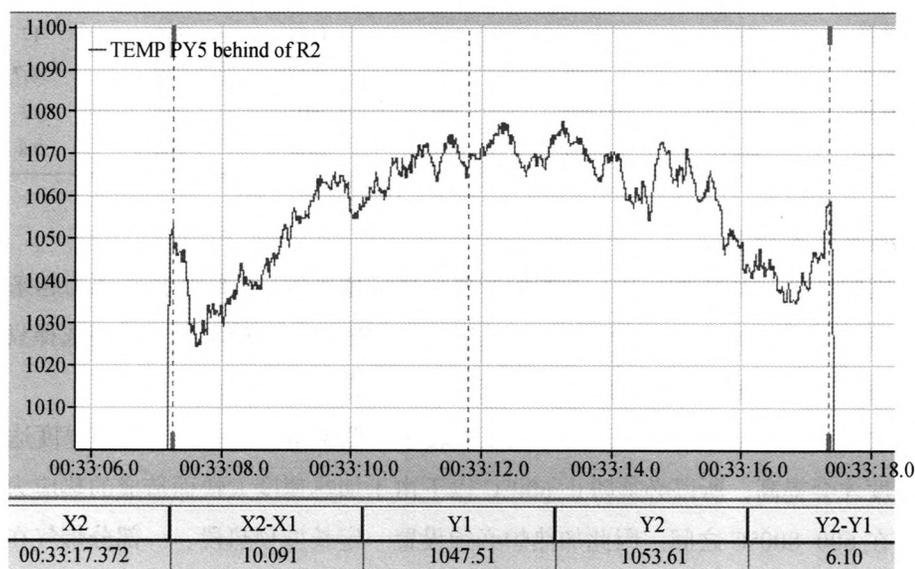


图 2-1 板坯 RT2 温度曲线

3 板坯加热炉燃烧系统选择研究

大型板坯加热炉燃烧系统的选择和确定已成为一个新的课题，选择烧嘴的供热方式必须考虑工艺及燃料条件、加热钢种以及质量要求、操作维护、使用寿命、一次性投资成本、运行和维护费用等诸多因素，迁钢 1580 热轧最终采用空气单蓄热，煤气换热器预热，上均热用平焰烧嘴的燃烧系统，是基于实际的煤气条件以及工程投资费用等，确保加热质量和产量的前提下，尽可能降低消耗等方面综合考虑的结果。

3.1 几种燃烧方式计算数据比较

不同的燃烧方式节能的差别主要体现在排烟损失上，通过一些基本的理论计算数据，可以更清楚地看出几种燃烧方式的差别，以下是计算的一些基础条件：

煤气热值：2300Kcal/Nm³；

炉膛温度：1280℃；

炉尾温度：700℃（蓄热）；

800℃（常规）；

炉温系数：0.7；

空气过剩系数：1.05；

1250℃时钢的平均热焓：204Kcal/Kg。

则可以得出各种情况下炉子的理论炉温、排烟温度、排烟损失以及单位热耗等理论计算数据，详见表 3-1。

表 3-1 几种燃烧方式的计算数据比较

序号	空气预热方式	煤气预热方式	空气预热温度 (°C)	煤气预热温度 (°C)	理论炉温 (°C)	排烟温度 (°C)	排烟损失 (%)	单位热耗 (Gj/t)
1	换热器	不预热	550	0	1358	400	21	1.40
2	换热器	换热器	550	300	1424	350	17	1.33
3	蓄热式	不预热	1000	0	1547	329	16.7	1.32
4	蓄热式	换热器	1000	300	1607	230	12	1.21
5	蓄热式	蓄热式	1000	1000	1811	160	7.8	1.16

3.2 煤气预热方式的选择

随着全球气候变暖，海平面上升，人类生产现状越来越恶劣，节能减排的压力越来越大，结合迁钢的煤气条件，空气采用蓄热方式已成为共识，从表 1 中的数据也不难看出，需要选择只在煤气的预热方式上，煤气采用蓄热式的单耗是最低的，但存在以下几个方面的问题：

加热炉入炉钢种部分特殊钢，由于其导热系数较小、低温塑性较差，只有当温度达到 600°C 以上时钢的塑性和强度才会提高，所以必须防止 600°C 以下由于加热速度太快而造成的热应力内裂或断裂，预热段炉气温度在 600~800°C 之间。因此加热炉必须设置一定长度预热段，一部分烟气在预热段对硅钢坯料进行低温缓慢加热，因此加热炉采用双蓄热燃烧方式不合适；

燃烧系统复杂，对换向阀的要求更高，故障率相对提高，而且，煤气系统上设备故障的处理需要停炉作业，对生产影响更大；

混合煤气中甲烷高温分解易堵塞蓄热体，加上换向阀的泄露，都会使节能的效果大打折扣；

由于煤气呈还原性气氛，烟气中的 Fe_2O_3 飞屑会被还原成 FeO ，更容易与蓄热体耐火材料粘结，影响正常的使用；

工程一次性投资和操作维护费用更高，操作维护量大，且不方便。

由此可见，在首钢迁钢 1580mm 热轧工程加热炉建设，考虑其加热特殊钢钢种、系统复杂性和可靠性以及燃料的节约性，煤气采用换热器预热方式更为合适。

4 IRSH 型超低 NO_x 蓄热式烧嘴结构和运行特点

针对大型板坯加热炉配置蓄热烧嘴功率大，火焰长，容易在加热炉中间区域导致火焰叠加，出现出炉板坯中间温度高、两端温度低的“凸”型分布现状，迁钢 1580 热轧加热炉采用 IRSH 型超低 NO_x 蓄热烧嘴，该蓄热式烧嘴煤气分两股喷到炉内与空气混合，其火焰长度相当于一般蓄热烧嘴一半功率的火焰长度，有效避免大功率蓄热烧嘴火焰长，导致出炉板坯中间温度高、两端温度低的“凸”型分部的问题。

4.1 IRSH 型超低 NO_x 蓄热烧嘴结构特点

IRSH 型超低 NO_x 蓄热烧嘴是由主喷嘴组合、二次煤气喷管和点火烧嘴组成，具体外形见图 4-1 所示：

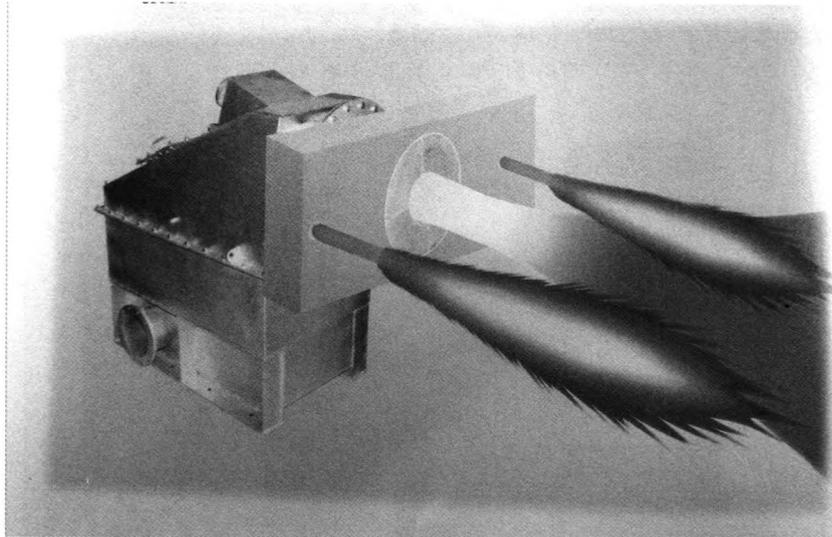


图 4-1 IRSH 超低 NO_x 蓄热烧嘴三维模型图

IRSH 型超低 NO_x 蓄热烧嘴的主要结构特点：

一次煤气喷口 F1 用于烘炉或低于 800℃ 炉温时运行，此时二次煤气喷口 F2 关闭；当炉温高于 800℃ 时二次煤气喷口 F2 打开，分两股喷入炉内与空气混合燃烧，此时一次煤气喷口 F1 关闭；

蓄热箱体积小：蓄热体采用纯度大于 99% 的氧化铝小球，稳定性和耐热冲击性非常好，蓄热能力强，用量少；加之蓄热箱壁隔热性能好，所以蓄热箱体积小，节省空间；

独立的换向装置：采用 3 个快速开闭气动金属硬密封蝶阀分别作为煤气、空气和烟气的换向阀，其动作快速、准确，故障率低。

4.2 IRSH 型超低 NO_x 蓄热烧嘴工作机理

IRSH 型低 NO_x 蓄热烧嘴由空气蓄热箱、一次煤气喷嘴、二次煤气喷嘴、点火煤气喷嘴、蓄热体等组成。当助燃空气通过蓄热的蓄热体，蓄热体前一换向周期从烟气获得的热焓传递给助燃空气，将用于助燃的空气预热到 1000℃ 以上，高温的空气经烧嘴砖高速喷入炉内，与一次煤气混合燃烧。当炉温超过 800℃ 以上时，燃烧控制系统自动切断一次煤气（F1）的供给，同时自动切换到二次煤气（F2）喷嘴，二次煤气（F2）喷口分布在空气喷口两侧，从图 4.2 可知，二次煤气（F2）喷嘴和助燃空气一起高速喷入炉内，卷吸炉内烟气，实现燃料在贫氧（2%~20%）状态下燃烧，火焰没有明显的高温区。众所周知，燃料在燃烧过程中产生 NO_x 的条件如下：

燃料在燃烧过程中燃烧区域氧气的浓度。氧气浓度越大，燃烧产生的 NO_x 的浓度就越高，反之亦然；

燃料在燃烧过程中火焰的温度。火焰温度越高，燃烧产生的 NO_x 的浓度就越高，两者成指数关系，反之亦然。

由以上两点可知，IRSH 型低 NO_x 蓄热烧嘴从燃烧机理上抑制 NO_x 的产生，其燃烧机理如图 4-2 所示。

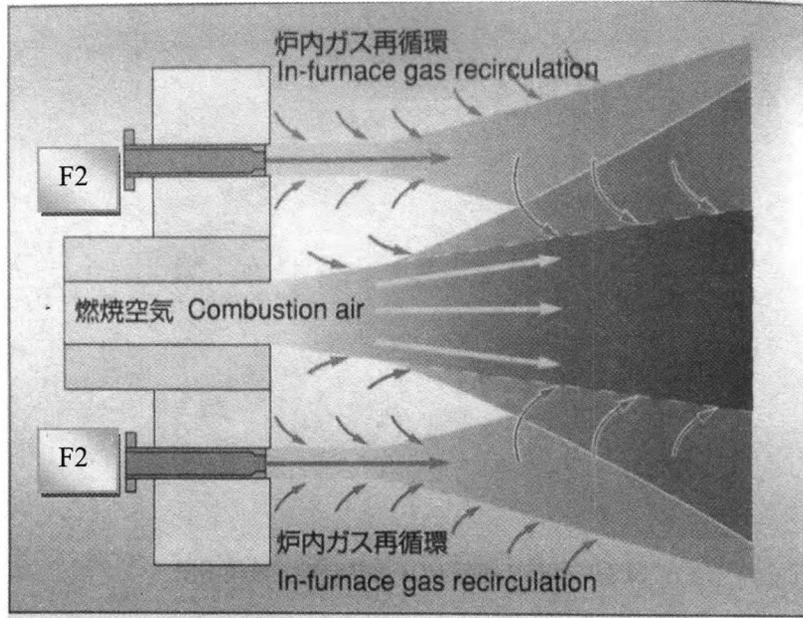


图 4-2 IRSH 型超低 NO_x 烧嘴燃烧机理示意图

4.3 IRSH 型超低 NO_x 蓄热烧嘴燃烧系统

IRSH 型低 NO_x 蓄热烧嘴基本原理如图 4-3 所示，从鼓风机出来的常温空气由换向阀切换进入蓄热式燃烧器 B 后，在经过蓄热式燃烧器 B（陶瓷球或蜂窝体等）时被加热，在极短时间内常温空气被加热到接近炉内温度（一般比炉温低 50~100℃），被加热的高温热空气进入炉膛后，卷吸周围炉内的烟气开成一股含氧量大大低于 21% 的稀薄贫氧高温气流，同时往稀薄高温空气附近注入燃料（燃油或燃气），燃料在贫氧（2~20%）状态下实现燃烧，与此同时，炉膛内燃烧后的热烟气经过另一个蓄热式燃烧器 A 排入大气，炉膛内高温热烟气通过蓄热式燃烧器 A 时，将显热储存在蓄热式燃烧器 A 内，然后以低于 150℃ 的低温烟气经过换向阀排出。工作温度不高的换向阀以一定的频率进行切换，使两个蓄热式燃烧器处于蓄热与放热交替工作状态，从而达到节能和降低 NO_x 排放量等目的，常用的切换周期为 60s。

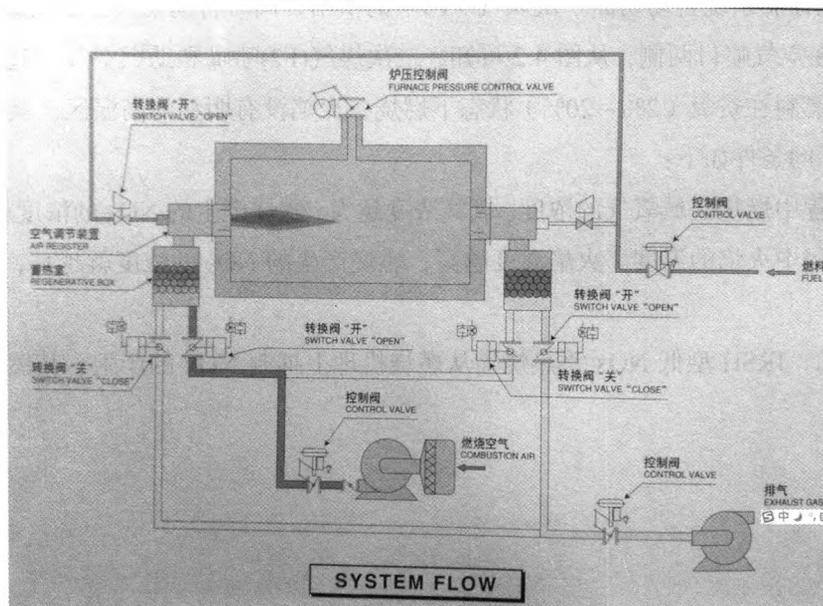


图 4-3 IRSH 型超低 NO_x 烧嘴燃烧系统流程图

5 实际运行效果

迁钢 1580 热轧的 3 座 270t/h 加热炉于 2009 年 12 月份陆续投产，至今运行良好。烧嘴实际输出能力采用流量控制，烧嘴的火焰特性采用“间拔”控制，系统可以实现如下控制：

点火烘炉或起炉阶段采用“一键式”点火，炉温升到 800℃以后，蓄热烧嘴由 F1 模式自动切换到 F2 模式，阀组自动切换，无需人工干预；

对于蓄热烧嘴，运行人员可以根据具体工况选择集中换向、交叉换向和分组延迟换向工作模式；

所有侧烧嘴在低负荷时均可实现间拔或脉冲控制。

蓄热烧嘴由于其功率相对较大，调节比小，没有配备中心风，因此在其低负荷工作时，其喷口速度非常低，火焰刚性差，燃气从喷口出来后沿炉墙上飘，导致出炉坯料温度温差大。在低负荷采用一种简单实用的间拔控制模式，即通过关闭蓄热烧嘴前换向阀即可实现，无需增加任何硬件设施，其控制思路如下：如果一个段有 4 对烧嘴，则运行在 100%~75%段额定负荷；4 对烧嘴全部运行；则运行在 75%~50%，3 对烧嘴运行；则运行在 50%~25%，2 对烧嘴运行；则运行在低于 25%，1 对烧嘴运行；根据各段烧嘴数量一次类推。间拔的烧嘴可任意选择，根据加热炉热负荷情况相应切断各个供热段部分蓄热烧嘴，为避免各个供热段长度方向温度梯度过大以及保温待轧期间局部高温，各个供热段切断烧嘴位置按照预先设定好的模式进行时序“间拔”切换，图 5-1 是迁钢 1580 热轧加热炉时序“间拔”燃烧控制画面。

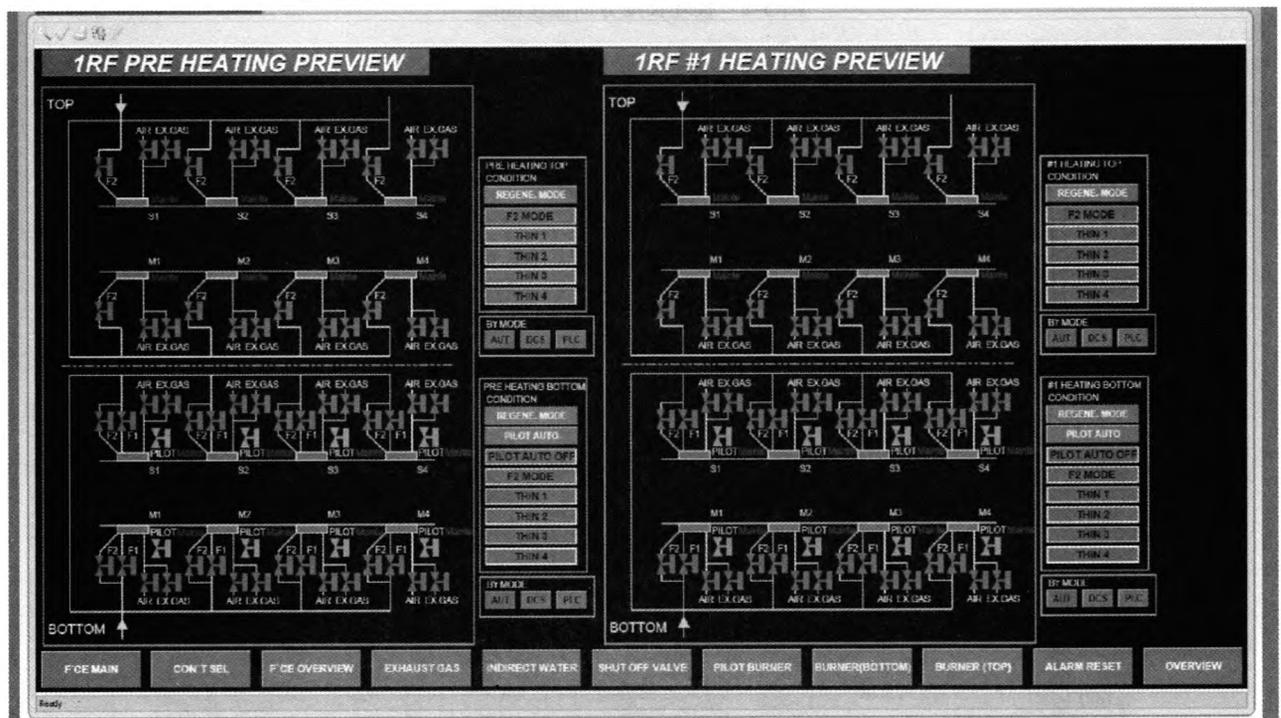


图 5-1 迁钢 1580 热轧加热炉时序“间拔”燃烧控制画面

5.1 能耗和 NO_x 的含量

迁钢 1580mm 热轧大型蓄热步进梁式板坯加热炉自 2009 年 12 月份竣工投产，经过 3 年多生产检验，加热炉采用空气蓄热至 1000℃和煤气采用预热器预热 300℃组合式燃烧技术，加热炉单位热耗：1.16Gj/t，

该指标达到国际先进水平，与迁钢 2160mm 热轧常规空、煤气双预热加热炉加热单耗：1.36 GJ/t 相比，燃料节约率为 14.7%，有明显的节能降耗效益，烟气中 NO_x 含量经测定在 88.6mg/m³，远小于《工业企业大气污染排放标准》中规定的 NO_x ≤ 150mg/m³。

5.2 板坯加热质量

迁钢 1580 热轧加热炉自 2009 年投产以来，前后做过三次埋偶实验，从埋偶实验来看坯料长度方向温差 < 10℃（详见图 5-2、5-3）、黑印温差 < 15℃（详见图 5-4）。埋偶实验同时，还做了小样烧损测试，三次埋偶实验平均烧损率：0.67%。

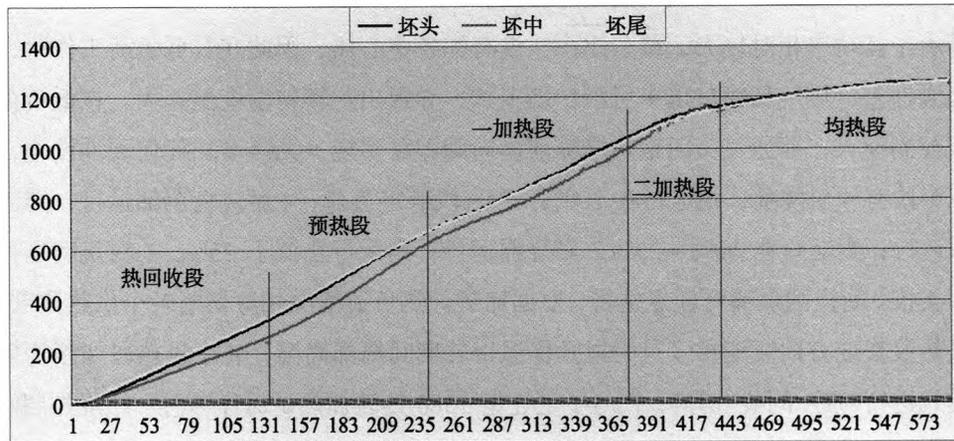


图 5-2 板坯长度方向温度曲线

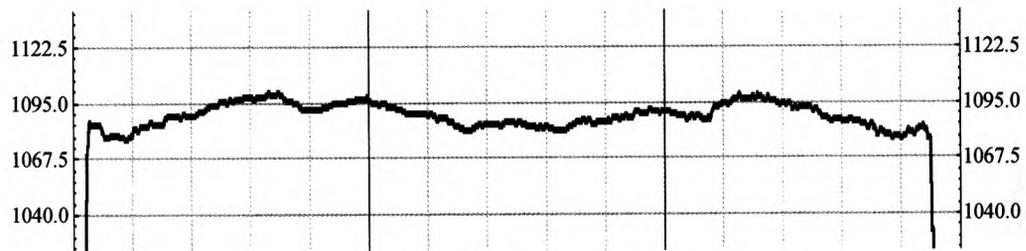


图 5-3 粗轧 RT2 温度曲线

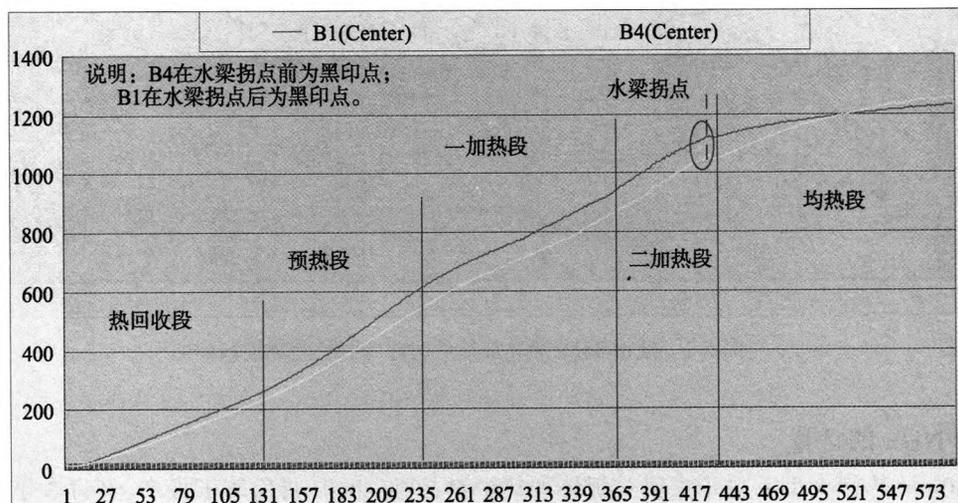


图 5-4 水梁黑印点与非黑印点中心温度曲线

5.3 蓄热小球使用状况

在实际生产中，蓄热体的使用寿命直接影响到加热能力的发挥，严重时甚至导致停产，迁钢 1580 热轧加热炉选用 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 99\%$ 高铝小球，每年加热炉中修时，打开蓄热箱时蓄热球状态见图 5-5，从图可以看出，蓄热球没有堵塞和板结现象，也没有蓄热球碎裂现象，只有上表层有轻微的灰尘，清洗一下可以装回蓄热箱继续使用。

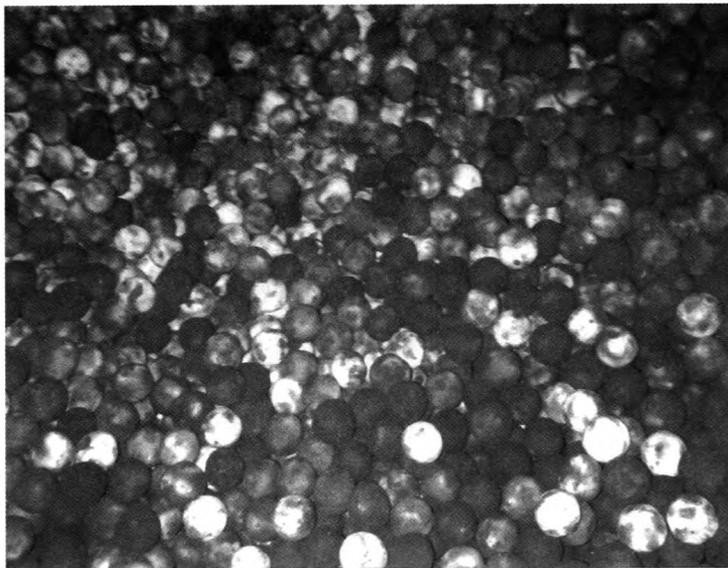


图 5-5 投产 1 年后蓄热箱内小球状态

6 结论

迁钢 1580mm 热轧大型蓄热式板坯加热炉技术方案选择，是对当今国内外大型蓄热式板坯加热炉进行了总结和分析研究，结合迁钢 1580mm 热轧生产线工艺及燃料条件、加热钢种以及质量要求、操作维护、使用寿命、一次性投资成本、运行和维护费用等诸多因素等进行了技术创新。在大型板坯加热炉上选择采用蓄热和预热组合式燃烧技术、三流股宽火焰超低 NO_x 蓄热烧嘴技术、蓄热排烟系统“抽吸比”控制技术、煤气热值在线检测和分段残氧在线监测等检测技术、蓄热烧嘴全分散换向技术、蓄热烧嘴低负荷时序“间拔”控制等综合技术在首钢迁钢 1580mm 热轧生产线上应用，提高了其整体技术工艺水平、装备水平、自动化控制水平，经过 1 年的生产实践表明首钢迁钢 1580mm 热轧生产线大型蓄热式板坯加热炉的设计是合理的，技术水平达到国际先进水平。

迁钢 1580mm 热轧生产线大型蓄热式板坯加热炉整体设计理念先进，工艺布局合理，对我国大型板坯加热炉综合技术应用提供借鉴，成为我国新建或改造大型板坯加热炉的典范和样板，具有较高的推广应用价值和广阔的推广应用前景。

参考文献

- [1] 兰霄, 田小果. 脉冲燃烧控制技术, 自动化与仪器仪表, 2005 年第 5 期
- [2] 胡立新, 施泳改. 常化炉脉冲点火控制系统运行故障分析.《河北冶金》2012 年 11 期
- [3] 秦朝葵, 张同, 吴念劬, 姜正侯. 脉冲燃烧控制和稳定性的研究,《煤气与热力》1995 年 06 期