

热轧加热炉气氛控制应用实践

艾铖坤¹, 张天赋², 王进臣³

(1. 鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司, 辽宁 营口 115007; 2. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009; 3. 鞍钢股份有限公司热轧带钢厂, 辽宁 鞍山 114021)

摘要: 针对板坯在轧钢加热炉中产生氧化铁皮的问题, 提出了一种兼顾燃料燃烧和板坯加热过程的加热炉炉内气氛控制策略。通过将均热段采用较小的空气过剩系数设为弱还原气氛、加热段采用较大的空气过剩系数设为氧化性气氛, 结合“烟气氧含量反馈+煤气热值前馈”的空燃比控制方式, 可有效抑制高温钢坯的氧化铁皮生成。基于该控制策略建立了加热炉气氛控制系统, 在保证加热炉清渣周期为7个月的条件下, 钢坯平均氧化烧损率从1.41%下降到1.02%, 该系统为同类加热炉气氛调整提供了参考。

关键词: 加热炉; 气氛控制; 空气过剩系数; 氧化铁皮

中图分类号: TG307 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)02-0068-05

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 02. 008

Application Practice of Atmosphere Control for Reheating Furnace in Hot Strip Mill

AI Chengshen¹, ZHANG Tianfu², WANG Jinchen³

(1. Bayuquan Branch of Angang Steel Co., Ltd., Yingkou 115007, Liaoning, China;

2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China;

3. Hot Rolled Strip Steel Mill of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: A furnace atmosphere control strategy that took into account both fuel combustion and the heating process of the slab in the hot rolling reheating furnace was proposed to address the issue of oxide scale formation on the slab. By setting a weakly reducing atmosphere with a smaller air excess coefficient in the soaking zone and an oxidizing atmosphere with a larger air excess coefficient in the heating zone, and combining the “flue gas oxygen content feedback + gas calorific value feedforward” air-fuel ratio control method, the formation of oxide scale on high-temperature slabs could be effectively suppressed. Based on this control strategy, an atmosphere control system for the reheating furnace was established. Under the condition of ensuring a slag removal cycle of 7 months for the reheating furnace, the average oxidation burning loss rate of the steel billet decreased from 1.41% to 1.02%. This system provided a reference for the atmosphere adjustment of similar reheating furnaces.

Key words: reheating furnace; atmosphere control; excess air coefficient; oxide scale

轧钢加热炉为热轧生产过程的第一道工序, 加热工艺的合理控制不仅能够降低加热炉的能源消耗, 提升板坯加热质量, 同时能够有效减少炉生

氧化铁皮、延长加热炉清渣周期, 但煤气热值波动等因素增加了加热工艺控制的难度。钢坯加热工艺主要包括加热时间、加热温度和炉内气氛等, 大量文献就钢坯加热时间和加热温度对加热工艺的影响进行了报道, 但涉及加热炉气氛控制的文献相对较少。本文对加热炉炉内燃烧过程、炉生氧

艾铖坤, 高级工程师, 2003年毕业于东北大学材料成型及控

制工程专业。E-mail: 94227095@qq.com

化铁皮产生机理和钢坯升温过程等进行分析,形成加热炉气氛控制技术方,并在鞍钢股份有限公司热轧带钢厂设计年产量为420万t钢的热轧带钢生产线加热炉上建立了气氛控制系统,实现了加热炉气氛优化控制,有效降低了氧化铁皮生成量,延长加热炉的清渣周期。

1 钢坯加热工艺分析

1.1 加热炉燃烧过程分析

加热炉的气氛反映了加热炉内燃料完全燃烧的程度。燃烧过程划分为富燃料燃烧(贫氧燃烧)、化学当量燃烧和贫燃料燃烧(富氧燃烧,指燃烧产物中存在富余氧);按燃料与空气的混合方式可将燃烧过程分为预混燃烧和扩散燃烧。加热炉气氛可以通过空气过剩系数来控制,在预混燃烧过程中,当空气过剩系数小于1时,形成富燃料燃烧,由于助燃空气量不足,燃料中的可燃成分无法完全燃烧,燃烧产物中存在CO等还原性成分,形成弱还原性气氛;当空气过剩系数接近1时,形成化学当量平衡燃烧,助燃空气量刚好满足燃料燃烧要求,燃料完全燃烧,产生烟气体量最小,能够达到的燃烧温度最高;当空气过剩系数大于1时,形成贫燃料燃烧区,助燃空气过剩,燃料完全燃烧,燃烧产物存在少量过剩自由氧,形成氧化性气氛。对于扩散燃烧过程,燃料与助燃空气边混合边燃烧。空气过剩量与理论燃烧温度关系如图1所示,由图1可知,理论燃烧温度曲线右移,理论燃烧温度最高点靠右,大部分燃烧区处于贫燃料燃烧区,但与预混燃烧相似,燃烧过程同样包括富燃料燃烧、化学当量燃烧和贫燃料燃烧3种燃烧工况。

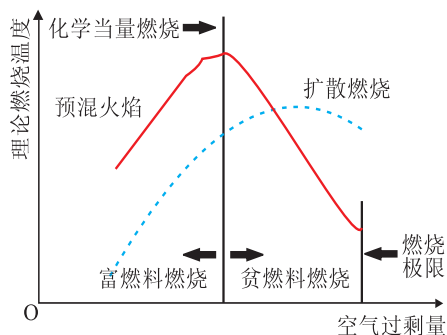


图1 空气过剩量与理论燃烧温度关系

Fig. 1 Relation between Combustion Temperature and Excess Air

轧钢加热炉燃烧过程以扩散燃烧为主,煤气与空气通过不同类型的烧嘴进入加热炉,并在加热炉内边混合边燃烧。在加热炉内,均热段、加热段燃料燃烧产生的高温烟气在炉尾烟道抽力的作用下从出钢侧流向装钢侧,为加热钢坯提供热源,钢坯运动方向与炉气方向相反。通常加热炉烧嘴具有较大的调节比,可以满足富燃料燃烧、化学当量燃烧和贫燃料燃烧3种燃烧工况。传统加热炉炉气氛控制方式为各燃烧段均采用较大的空气过剩系数,形成氧化性气氛,属于贫燃料燃烧。如果要优化加热炉气氛控制,改善钢坯加热工艺,可以从调整加热炉气氛控制方面进行尝试。

1.2 炉生氧化铁皮生成机理

轧钢加热炉均为明火炉,钢坯在加热炉中氧化形成氧化铁皮是不可避免的。在加热炉内氧化铁皮的形成是一个复杂的过程,钢坯氧化示意图见图2^[1-3],从外向内,可近似将钢坯表面的氧化铁皮结构看成由 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、FeO和Fe构成,钢坯外表面氧化可以看成O原子从钢坯外表面向钢坯内扩散并与Fe原子发生反应的过程。

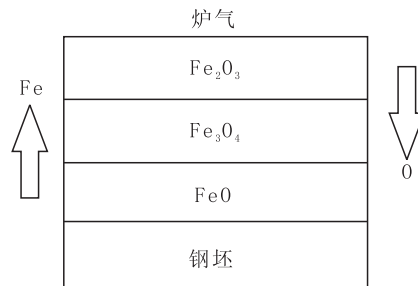


图2 钢坯氧化示意图^[1-3]

Fig. 2 Schematic Diagram of Steel Billet Oxidation^[1-3]

轧钢加热炉氧化铁皮生成主要受加热温度、加热时间、炉内气氛和钢种等因素的影响,炉气中可能包含 O_2 、 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 CH_4 、 H_2 、 H_2S 等成分^[4]。热轧带钢生产线加热炉实测气氛见表1(不包括 N_2),炉气的氧化性由强至弱分别为: O_2 、 SO_2 、 H_2O 和 CO_2 ,煤气中含S则必然产生 SO_2 ,因此 SO_2 的产生主要受煤气成分影响^[4-5],可以通过调整空气过剩系数对 O_2 、 H_2O 和 CO_2 的含量进行控制来降低炉气的氧化性。有研究表明^[6],在1250℃条件下, $CO_2/CO < 0.3$ 、 $H_2O/H_2 < 0.85$ 时炉气为还原性,可以减少加热炉炉生氧化铁皮的量。

表1 热轧带钢生产线加热炉实测气氛

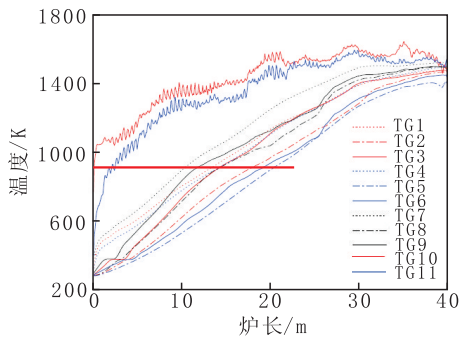
Table 1 Measured Atmosphere of the Reheating Furnace in the Hot-rolled Strip Production Line

位置	O ₂ /%	CO ₂ /%	CO/%	SO ₂ (ppm)
均热段	2.64	18.19	0	33
加热段	3.64	17.86	0.015	58
预热段	4.59	16.52	0.015	55

1.3 钢坯升温过程分析

图3^[7]为实测加热炉板坯温度分布,其中TG1~TG9为钢坯内部不同测点温度变化情况,钢坯入炉后,各测点温度逐渐升高,在均热段达到最高值,升温趋势为均热段温度>加热段温度>预热段温度。对于多数加热炉来说,钢坯温度最大值出现在加热段出口附近;钢坯外表面与内部温差从预热段开始逐渐增加,在均热段入口附近达到最大值,出均热段前逐步降低至工艺要求范围内。

从CO₂/CO判断^[8],当温度>923 K(650℃),炉气氧化性增强,从加热段中部开始,各测点温度超过923 K,钢坯所处位置通常靠近加热段出口,其外表面容易氧化产生氧化铁皮。钢坯进入均热段后,炉气和钢坯均处于较高温度。但对于含H元素燃料,通过控制炉气中水分减少氧化铁皮的生成很难实现。

图3 实测加热炉板坯温度分布图^[7]Fig. 3 Actual Measured Temperature Distribution Map of the Slab in the Reheating Furnace^[7]

2 控制策略及控制系统

2.1 加热炉概况

热轧带钢板坯加热炉示意图见图4,该加热炉包括预热段、加热段和均热段,上加热段和上均热段设置平焰烧嘴,下加热段和下均热段设置端烧嘴。箭头方向为炉气流动方向,钢坯运动方向与炉气方向相反,轧线配备3座加热炉。

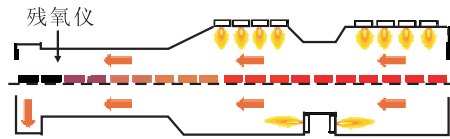


图4 热轧带钢板坯加热炉示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of a Reheating Furnace for Hot-rolled Steel Strip Billets

2.2 控制策略

由加热炉燃烧过程、炉生氧化铁皮生成机理、钢坯升温过程分析可知,钢坯在均热段温度最高,钢坯表面容易生成氧化铁皮^[9-10]。因此在均热段采用较小的空气过剩系数,形成富燃料燃烧过程,气氛呈弱还原性,可以降低氧化铁皮生成量;加热段采用较大的空气过剩系数,使燃料和空气先混合后燃烧,局部气氛呈氧化性,虽然气氛局部呈氧化性,但在出加热炉段后充分燃烧。预热段气氛呈现弱氧化,但钢坯温度较低,不容易生成氧化铁皮。均热段未燃烧的燃料在加热段完全燃烧,避免了燃料不完全燃烧的损失。将预热段气氛设置为加热段空气过剩合理性的判断标准,对加热段的空气过剩系数进行调整,保证均热段为还原性气氛、加热段为氧化性气氛、预热段为弱氧化性气氛。

按照反馈控制模式和前馈控制模式实现加热炉气氛控制,加热炉气氛控制的目标需要达到炉尾残氧值为1.6%~2.6%。

反馈控制模式:当炉尾残氧值<1.6%时,增加加热段的空气量,空燃比按0.05的增量递增,且每次递增设定后延时30 s;延时结束后,若残氧值在1.6%~2.6%,则保持该设定值不变;若炉尾残氧值仍然低于1.6%,则空燃比继续按0.05的增量递增,直至残氧值在1.6%~2.6%为止。当炉尾残氧值>2.6%时,降低加热段的空气量,空燃比按0.03的减量递减,且每次递增设定后延时30 s;延时结束后,若炉尾残氧值在1.6%~2.6%,则设定值不变;若炉尾残氧值仍然高于2.6%,则空燃比继续按0.03的减量递减,直至炉尾残氧值在1.6%~2.6%为止。

前馈控制模式按燃料燃烧公式^[11]计算均热段和加热段的实际空气需要量,燃烧公式如下:

$$L_0 = \frac{4.76}{100} \left[\frac{1}{2} \varphi(\text{CO}_{\text{湿}}) + \frac{1}{2} \varphi(\text{H}_2_{\text{湿}}) + 2\varphi(\text{CH}_4_{\text{湿}}) + (x + \frac{y}{4}) \varphi(\text{C}_x\text{H}_y_{\text{湿}}) + \frac{3}{2} \varphi(\text{H}_2\text{S}_{\text{湿}}) - \varphi(\text{O}_2_{\text{湿}}) \right] \quad (1)$$

式中, L_0 为理论空气需要量, 表示每立方米煤气燃烧的理论空气量, m^3/m^3 ; $\varphi(\text{CO}_{\text{湿}})$ 、 $\varphi(\text{H}_2_{\text{湿}})$ 、 $\varphi(\text{CH}_4_{\text{湿}})$ 、 $\varphi(\text{C}_x\text{H}_y_{\text{湿}})$ 、 $\varphi(\text{H}_2\text{S}_{\text{湿}})$ 、 $\varphi(\text{O}_2_{\text{湿}})$ 为煤气中 CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_xH_y 、 H_2S 和 O_2 的湿成分, %; x 和 y 分别为碳原子和氢原子的个数。

$$L_n = nL_0 \quad (2)$$

式中, L_n 为实际空气需要量(空燃比), 表示每立方米煤气燃烧的实际空气量, m^3/m^3 ; n 为空气过剩系数, 本文均热段 n 取值范围为 0.95~1.0, 加热段 n 取值范围为 1.15~1.20。

对不同热值煤气成分进行标定, 并计算出空燃比, 在实际运行中按热值仪检测结果, 设定空燃比。以炉尾残氧值作为判断全炉空燃比设置合理性的参考, 当残氧值不在目标范围时, 对设定的空燃比进行调整, 调整幅度及方式应与反馈控制模式相同。

2.3 控制系统建立

为实现加热炉气氛分段的灵活控制, 在加热炉炉尾(装钢侧)增设残氧仪, 检测预热段炉气残氧含量, 为避免加热段气氛和装钢过程因吸收冷风影响残氧检测, 安装位置距加热段和装钢侧足够远。实际安装位置为预热段炉顶距装钢侧 2.5 m 的中心线上(残氧仪位置如图 4 所示)。增设一台热值仪, 检测煤气热值, 为前馈控制模式空燃比的设定提供依据。

在增设炉尾残氧仪和热值仪的基础上开发了两种加热炉气控制模式: 基于炉尾残氧仪的反馈模式和基于煤气热值的前馈模式。反馈控制画面见图 5, 由图 5 可知, 控制画面上方第 1 排依次为 1#加热炉、2#加热炉、3#加热炉气氛自动控制系统操作按钮, 点击相应按钮可实现系统投入运行或停止运行。当某一座加热炉残氧仪故障时, 由于相邻加热炉的相似性, 可参考另一座加热炉的残氧进行气氛控制, 在采用相邻加热炉的残氧进行参考控制时充分考虑了不同加热炉间的工况差异性。如: 1#加热炉残氧仪故障, 可选择其下方按钮, 点击 F2 则参考 2#加热炉残氧仪进行气氛控制。

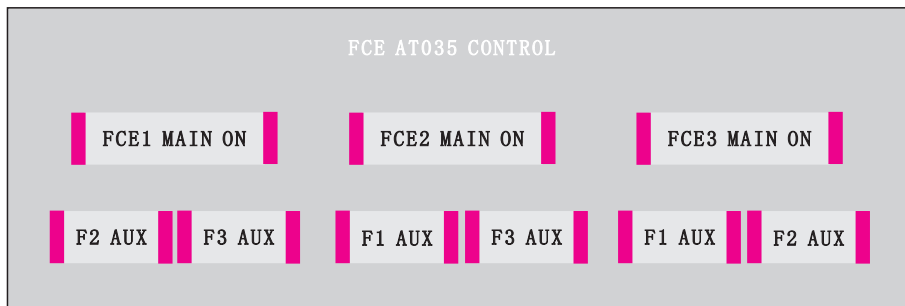


图5 反馈控制画面

Fig. 5 Feedback Control Screen

前馈控制画面见图 6, 在相应加热炉控制画面上按图 6 所示画面内容设定空气过剩系数, 点击 AUTO, 即可投入加热气氛控制系统, 图 6 所示工况设定整座加热炉空气过剩系数为 1.06, 在当前热值条件下空燃比为 2.19。

2.4 应用效果

通过加热炉气氛控制系统的建立及技术方案的实施, 能够有效降低加热炉炉生氧化铁皮量; 氧化铁皮结构疏松, 表现为钢坯出炉瞬间钢坯表面氧化铁皮容易脱落, 经过粗轧除鳞箱后, 中间坯表

面无炉生氧化铁皮残留。

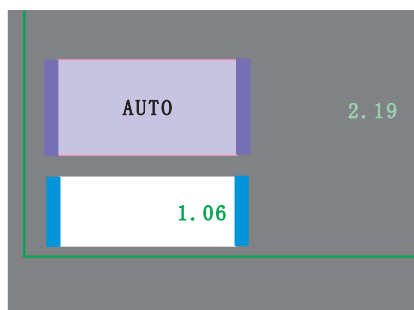


图6 前馈控制画面

Fig. 6 Feedforward Control Screen

在保证加热炉清渣周期为7个月的条件下,统计了10个月钢坯氧化烧损率,钢坯平均氧化烧损率从1.41%下降到1.02%,技术方案实施前后氧化烧损率对比如图7所示。

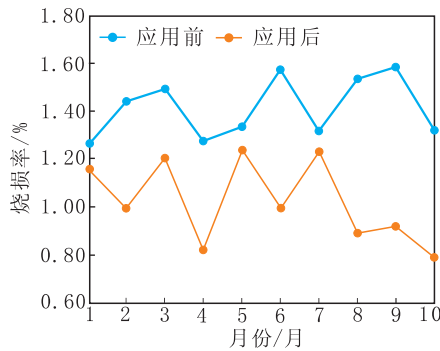


图7 技术方案实施前后氧化烧损率对比
Fig. 7 Comparison of Oxidation Loss Rate before and after the Implementation of the Technical Solution

3 结论

(1) 明火加热炉在加热钢坯过程中,氧化铁皮的形成是不可避免的,钢坯温度超过935 K(650 °C)以后,表面容易形成氧化铁皮,所处位置通常靠近加热段出口,控制加热炉氧化铁皮的重点部位在加热段出口侧和均热段。

(2) 改变传统加热炉气氛控制策略,均热段采用较小的空气过剩系数,燃烧过程为富燃料燃烧过程,形成弱还原性气氛,有利于抑制钢坯和炉气在高温条件下氧化铁皮的生成;加热段采用较大的空气过剩系数,燃烧过程为贫燃料燃烧过程,局部形成氧化性气氛。

(3) 加热炉空燃比控制系统可基于炉尾烟气氧含量进行反馈控制和基于煤气热值检测的前馈控制;采用反馈控制时,在考虑相邻加热炉工况偏差的基础上,可参考相邻加热炉残氧值进行控制;采用前馈控制时,炉尾残氧值可作为参考值,对空

燃比设置的合理性进行判断。

(4) 通过加热炉气氛控制系统的建立,在保证加热炉清渣周期为7个月的条件下,钢坯平均氧化烧损率从1.41%下降到1.02%。该系统为同类加热炉气氛调整提供了参考,但加热段和均热段空气过剩系数等参数的设定应根据具体加热炉的燃料条件等因素进行重新设定。

参考文献

- [1] Jung Hyun Jang, Dong Eun Lee, Man Young Kim, et al. Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53: 4326-4332.
- [2] 赵军, 霍健. 步进式加热炉内气氛对钢坯氧化烧损影响的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2010(11): 11-14.
- [3] 高军, 马光宇, 孙静, 等. 轧钢加热炉无焰富氧燃烧技术应用研究[J]. 鞍钢技术, 2020(5): 30-34.
- [4] 韩仁志, 张羽, 李先春. 加热炉钢坯氧化烧损影响因素的分析研究[J]. 鞍钢技术, 2005(2): 37-38.
- [5] 赵侯, 马光宇, 张天赋, 等. 富氧燃烧气氛下钢坯氧化烧损影响因素试验研究[J]. 鞍钢技术, 2023(2): 42-46.
- [6] 陆忠武. 火焰炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [7] Zhi Yang, Xiaochun Luo, Jinwei Qiao. Optimal investigation of the reheating furnace based on a 3D numerical model with the formation of both oxide scale layer and skid marks[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2022, 128: 12-20.
- [8] H. Liu, M. Saffaripour, P. Mellin, et al. A thermodynamic study of hot syngas impurities in steel reheating furnaces—Corrosion and interaction with oxide scales[J]. Energy, 2014, 77: 352-361.
- [9] Yiwei Liu, Jin Wang, Chunhua Min, et al. Performance of fuel-air combustion in a reheating furnace at different flowrate and inlet conditions[J]. Energy, 2020, 206: 118206.
- [10] 白飞龙. 加热炉形成氧化烧损的成因及措施[J]. 工业炉, 2018(2): 27-29.
- [11] 王华. 加热炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.

(编辑 白璐)

修回日期: 2025-09-12

《鞍钢技术》版权声明

遵循《中华人民共和国著作权法》,作者向本刊主动投稿(或接受约稿),视为作者将该论文的许可使用权(复制权和发行权)、汇编权、信息网络传播权及其他各种形式出版的使用权等授予《鞍钢技术》编辑部。本刊一次性支付作者的稿酬包含上述各种稿酬。作者应保证论文的原创性、不涉密、不侵权、署名无争议。若发生问题,一切责任由作者承担,文责自负。未经书面许可,任何人及单位不得以任何形式复制、翻印、使用本刊的任何图文。如作者不同意将文章版权交予《鞍钢技术》编辑部,敬请在来稿首页显著位置作出书面声明。

《鞍钢技术》编辑部