

加热炉板坯氧化铁皮控制研究

甄长鹏 郭立平

德龙钢铁有限公司, 河北 邢台 054009

[摘要]文中结合德龙钢铁有限公司 850 线加热炉现状, 分析板坯在炉内氧化烧损严重的影响因素, 通过加热制度、加热参数优化及设备升级改造等措施, 可有效降低煤气消耗, 减少板坯氧化烧损量, 提高带钢成材率。

[关键词]加热; 氧化烧损; 消耗; 成材率

DOI: 10.33142/ect.v2i4.11840

中图分类号: TG335

文献标识码: A

Research on the Control of Iron Oxide Scale on Heating Furnace Slab

ZHEN Changpeng, GUO Liping

Delong Steel Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054009, China

Abstract: Based on the current situation of the 850 line heating furnace of Delong Steel Co., Ltd., this article analyzes the influencing factors of severe oxidation and burning loss of slabs in the furnace. Through measures such as heating system, optimization of heating parameters, and equipment upgrading and renovation, gas consumption can be effectively reduced, the amount of oxidation and burning loss of slabs can be reduced, and the yield of strip steel can be improved.

Keywords: heating; oxidative burning loss; consumption; yield

引言

在钢铁工业中, 轧钢加热炉作为轧钢工序的重要设备。加热炉的好坏直接影响着整个流程的生产质量, 不仅影响着钢材的质量和生产成本, 同时也影响着轧钢过程的能耗指标, 轧钢厂 10%~15%的能耗都用在加热炉上。钢坯在加热炉中加热、均热时间越长, 生产的氧化铁皮越厚, 钢坯的烧损量也就越多。从降低损耗和节能方面上考虑, 应该尽量缩短钢坯的加热和均热时间, 但是从元素和组织均匀化方面上考虑, 钢坯需要一个较长的加热和保温时间。因此, 在实际工业生产上需要制定一个平衡的加热工艺, 在减少氧化铁皮生成量的前提下, 同时保证了炉生氧化铁皮结构的易于清除。

随着后续工序的技术改造、工艺优化, 产能大幅提升, 用途也更加多元化, 包括链轮用钢、公路护栏等。加热炉的供热能力已跟不上生产的需求, 所以推钢式加热炉的劣势日益凸显, 受结构的影响, 铸坯本体温度满足轧制要求的情况下, 铸坯与水梁接触部位却得不到良好的加热, 铸坯整体温度不均。因此为了保证板坯温度的均匀性和后续轧制的稳定性, 需要充足的在炉时间, 从而导致板坯氧化烧损严重, 成材率降低, 同时煤气、电能等能耗大幅上升。

1 加热炉氧化铁皮的形成机理

通过对加热炉氧化烧损机理进行分析, 钢坯的氧化是在加热炉加热过程中, 氧原子与铁原子发生反应的结果。即在加热过程中, 炉气中的氧原子通过钢坯表面向钢坯内部扩散, 而铁原子则由钢坯内部向外扩散, 当两种元素相遇时, 在一定条件下就会起化学反应生成氧化物。通过对不同在炉时间下的氧化铁皮进行金相分析, 发现氧化铁皮

分三层, 表层是具有灰色金属光泽的致密的三氧化二铁, 中间层为四氧化三铁和氧化亚铁的混合物, 里层为氧化亚铁。这就表明该氧化主要是由于炉内气氛中的氧原子浓度过高造成的。因此钢在加热过程发生氧化的基本条件是: 必须有氧或氧化性介质的存在, 如二氧化碳、水蒸气等, 并具有一定的化学反应条件, 如温度、空煤比、时间等使氧和铁充分接触, 并相互进行扩散。

板坯加热时的氧化过程中由于内外部氧气气氛的差异, 会出现明显的分层结构。在板坯基体与氧气接触的界面, 靠近空气的外层氧的浓度高, 铁的浓度低, 生成铁的高价氧化物; 而靠近板坯基体的内层铁的浓度高, 氧的浓度低, 生成铁的低价氧化物。因此, 板坯的氧化层会形成如图 1 所示的典型三层结构, 最靠近基体的是二价的 FeO 中间是 Fe₃O₄, 外层是三价的 Fe₂O₃。

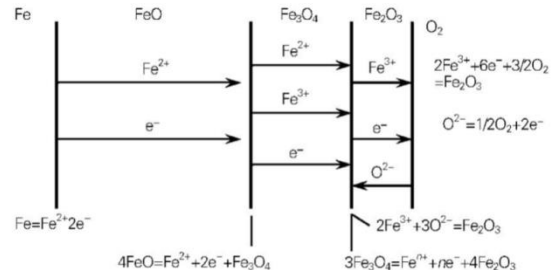


图 1 板坯加热时的氧化物形成机制示意图

与此同时, 板坯加热时的氧化行为还存在一些其他特征。当温度低于 570℃时, FeO 氧化物相会因热力学稳定性而分解成 Fe₃O₄ 和铁的共析产物。因此, 当温度低于 570℃时, 氧化物结构中无 FeO 存在, 仅形成 Fe₃O₄ 和 Fe₂O₃。而

当温度高于 570℃时,氧化物呈现三层结构,FeO、Fe₃O₄、Fe₂O₃均会形成。此外,由于 Fe 原子在 FeO 相中的扩散系数远大于 Fe₃O₄和 Fe₂O₃,FeO 氧化物相的生长速度相对更快,从而形成了如图 2 所示的典型氧化层结构比例。通常,最内层的 FeO 层呈蓝灰色,厚度占比约为 40%,具疏松多孔的形貌特征。中间层的 Fe₃O₄层呈黑色,厚度占比约为 50%,相对致密,也存在较多的缺陷和孔隙。最外层的 Fe₂O₃层呈红色,厚度占比约为 10%,形貌最紧密。

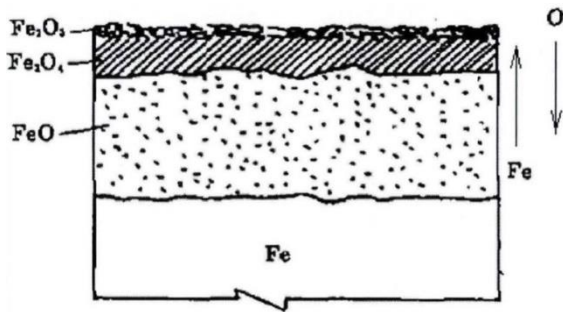


图 2 板坯高温氧化的氧化层结构及离子扩散示意图

3 加热炉氧化铁皮的影响因素

3.1 化学成分对氧化铁皮的影响

钢坯成分中硅(Si)元素对氧化铁皮的改善有着积极的作用。首先, Si 元素可以改善氧化层的结构。加热过程中, Si 元素通过原子扩散会在氧化铁皮和钢基体界面处富集。这种 Si 元素的富集会降低氧化铁皮和钢基体界面处的 Fe 原子浓度,从而在后续加热过程中减少 Fe 原子在钢基体表面扩散的速度与数量,同时也阻碍 O 原子与铁原子的接触。此外, Si 元素在界面处还会与氧气发生化学反应生成 SiO₂,再与铁离子发生一系列的复杂化学反应生成 Fe₂SiO₄,如图 3 所示还会进一步与 FeO 和 SiO₂结合形成 FeO/Fe₂SiO₄(熔点 1177℃)或 SiO₂/Fe₂SiO₄(熔点 1178℃)。最终,这一层由 Si、O、Fe 组成的氧化物层降低了界面处 Fe 浓度,较少 O 与铁离子的接触反应,降低氧化铁皮层生长速度,提升抗氧化能力。当加热温度高于 Fe₂SiO₄液相线时,钢基体和氧化铁皮之间便会存在一层以 Fe₂SiO₄为主要组织结构的液相层。这层物质能够很好的保护钢基体不再继续发生氧化,对基体起到保护作用。但是,当加热温度低于 Fe₂SiO₄液相线或钢坯出炉后自然温降后,FeO/Fe₂SiO₄的共析相凝固对 FeO 层产生钉扎作用,氧化铁皮的剥离性变得非常困难。

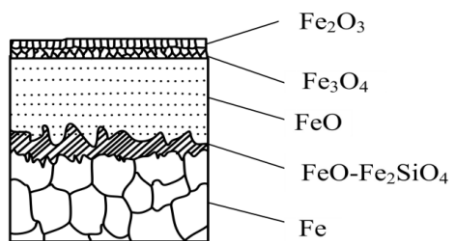


图 3 Si 含量高于 0.01 wt.%的板坯氧化铁皮结构

C 元素在钢中氧化会部分生成 CO,从而阻碍了氧化性气体的作用,降低烧损率。但是其自身氧化过程中释放气体也使得氧化铁皮开裂。此外, Mn 和 P 元素直接发生反应也会造成氧化铁皮起皮。S 元素与 Si 元素相类似,会在氧化铁皮和钢基体界面处形成其他相,通过影响氧化铁皮的粘附性来对其可除鳞性造成巨大的变化。Ni 元素由于本身可以被氧化,并且氧化倾向大于 Fe 元素,可以在钢基体表面生成一层非常薄而致密的氧化膜,提高抗氧化性能。但是, Ni 元素的干预也会使钢基体和氧化铁皮的接触面变得不再光滑,使氧化铁皮的剥离性急剧恶化。其他合金元素如 Cr、Al、V 等对氧化铁皮的构造也会造成影响,并利用自身氧化倾向高于 Fe,发生氧化作用并在晶界处聚集形成一个保护层,减缓 Fe 元素和 O 元素的扩散速度从而影响氧化速率。

3.2 加热温度对氧化铁皮的影响

在相同材质和炉况的情况下,对氧化铁皮厚度进行试验,发现加热温度正好处在氧化烧损量很高的温度段,随着加热温度的升高,各种成分的扩散加速,为加速氧化创造了条件,使钢的氧化加剧。加热温度与钢坯氧化烧损之间呈指数关系,其速率的增加非常快。

如图 4 所示为钢坯在不同温度下的氧化烧损量。由图可知,在加热炉内,温度在 600℃以下时氧化量几乎为零;当温度达到 800℃时,氧化量开始上升;炉内温度继续升高,钢坯内各成分的扩散加快,当温度超过 1000℃时,表面生成的氧化铁熔化,扩散的阻力减小,氧化速度大幅增加。随着温度分别升高至 900℃、1000℃、1100℃和 1200℃时,研究表明氧化增重曲线遵循线性-抛物线规律^[1]。其氧化增重随着氧化温度升高而增强,氧化层厚度增大,且随着氧化温度的升高,线性氧化阶段持续时间越长、氧化速率加快。

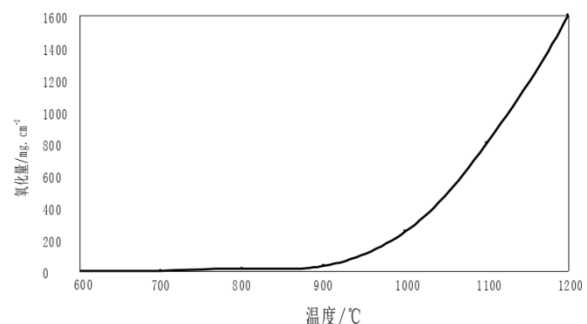


图 4 加热温度与板坯氧化量关系示意图

3.3 加热时间对氧化铁皮的影响

以普通碳素结构钢为例,分别对不同的保温时间下氧化铁皮厚度进行试验,结果发现钢在高温条件下,停留时间越长,氧化铁皮生成量就越大。开始时随时间的增长氧化较快,而后逐渐减慢,这是因为开始形成氧化铁皮后,阻碍了扩散。在实际生产中氧化铁皮经常在炉内脱落,使

这种已生成的氧化铁皮的“保护作用”降低，加热时间的影响将更为显著。

不同加热温度下钢坯加热时间与氧化量的关系曲线如图 5 所示，在 1100~1200℃ 之间的六个温度下，随着加热时间的增加，氧化量的增重随温度升高而更加明显。但是，各温度下的钢坯氧化量随时间变化的趋势特征大致相同。0~30min 内氧化反应剧烈；随着时间增加，氧化速率明显降低，符合氧化动力学特征。氧化初期，钢坯表面无氧化层或氧化层较薄，氧元素与铁元素接触后，反应速率较快；随着氧化反应的进行，氧化层厚度逐渐增加，形成致密氧化层后，外部的氧化性介质不易渗入，使钢的氧化速率降低，但整体氧化随时间仍呈现增加趋势。

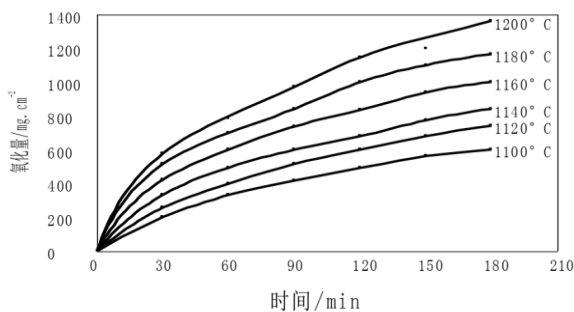


图 5 不同加热温度下加热时间与氧化量的关系示意图

3.4 氧气浓度对氧化铁皮的影响

不同的炉内空气氛围将会影响氧化铁皮的成分，而加热炉炉内气氛决定于燃料成分、空气消耗系数及燃烧完全程度。炉气中一般含有 CO₂、H₂O、O₂、SO₂、CO、H₂、CH₄ 和 N₂，它们与钢的化学反应各有不同。

根据金属氧化程度的影响，炉内气氛可以分为氧化性气氛、中性气氛和还原性气氛。其中 H₂O、CO₂、O₂ 都会对钢坯起到氧化的作用，N₂ 为中性气体，CO 和 H₂ 则是还原性气体。由于加热炉内无法存在较多的 H₂ 和 CO，很难形成还原性气氛。钢坯在 1200℃ 条件下，在不同氧气浓度气氛中保温 180 分钟后的氧化量与氧气浓度的关系如图 6 所示，氧化量随氧气浓度的增加呈抛物线增长形式^[2]。氧气浓度高时，氧元素和铁元素的反应速率加剧，钢坯的氧化得到加速。而加热炉内常见的气体中 O₂、CO₂、H₂O、SO₂ 均属于氧化性气体，其浓度均呈现浓度越大则扩散速率越大，氧化程度越严重。

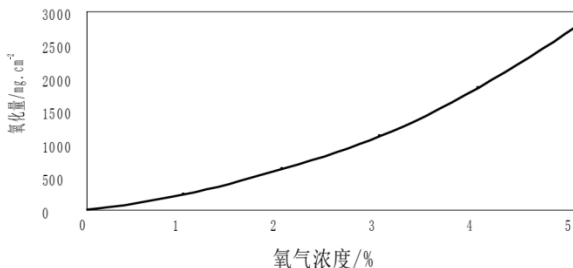


图 6 氧气浓度与氧化烧损的关系示意图

4 控制加热炉氧化铁皮的预防措施

4.1 加热工艺控制

考虑对板坯氧化的影响外，同时与轧制负荷、产品性能等进行匹配，为实现炉生氧化铁皮的控制和清除效果，采用低温加热工艺技术，如表 1 所示，减轻除鳞系统的压力，调节加热工艺参数，保证加热板坯温度高于 Fe₂SiO₄ 液化温度，避免钉扎现象出现。在减少氧化铁皮生成量的前提下，同时保证了炉生氧化铁皮结构的易于清除。

表 1 加热工艺控制表

厚度区间/mm	0~3.5	3.5~6.0	6.0~9.0	9.0~12.0
新方案/℃	1295±15	1275±15	1265±15	1255±15
在炉时间/min	90~130	90~120	80~120	80~110

4.2 炉内气氛控制

4.2.1 炉压控制

加热炉采用高炉煤气双蓄热燃烧方式，使用分段大三通换向阀进行换向，调整后加热炉两侧每 55s 交替燃烧和排烟一次，在煤气大三通换向阀至蓄热室之间的管道（含蓄热室），是煤气进气和排烟的共用管道。通过对加热参数进行相应调整，换向时间由 60s 缩短至 55s，炉压由 15Pa~20Pa 提高至 25Pa~30Pa，空煤比由 0.8 降低至 0.6，煤气的有效利用率大大提升，氧化烧损稳步得到控制。

在换向瞬间，冷空气会通过炉门进入炉内，造成炉内氧含量升高，从而加大氧化烧损。为此通过对炉压进行调整，如表 2 所示，提高炉膛压力，在换向时减少外部空气吸入对钢坯氧化的影响程度。

表 2 炉压控制表

	优化前	优化后
炉压/Pa	8~13	15~20

4.2.2 空煤比控制

改变各段空燃比，如表 3 所示，将加 1 段的空燃比调整为 0.6~0.65，加 2 段调整为 0.6~0.65，实现在加 1、加 2 段快速加热，减少钢坯的在炉时间，实现快速加热。均热段的空燃比调整为 0.45~0.55 呈还原性气氛，减少钢坯在高温段的氧化。

表 3 空煤比控制表

	加 1 段	加 2 段	均热段
空燃比	0.6~0.65	0.6~0.65	0.45~0.55

4.3 残氧量控制

加热炉增加了 CO 反吹、低氮燃烧设施的技术改造工作，烟气循环如图 7 所示，利用烟气反吹技术可将换向公共联箱和嘴前管道中残存的煤气全部送入炉内燃烧，通过将空气含氧量 21% 降低到 16% 左右，减少 NO_x 的大量生成。

在低氮燃烧及一氧化碳反吹系统投入条件下，通过对比分析板坯氧化烧损变化规律及对加热效果的影响，针对试验前后氧化烧损进行对比，结果发现对燃烧效率、在炉

时间、坯料温度无较大的影响,通过跟踪检测氧化烧损率逐步下降。

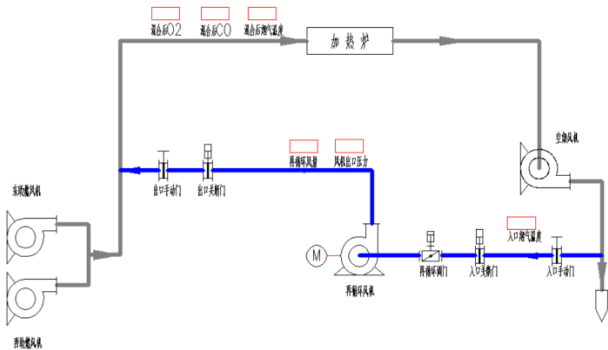


图7 烟气再循环流程图

5 采取措施后的效果

通过三个月的效果跟踪,德龙钢铁有限公司850线加热炉氧化烧损率由1.104%降低至0.957%,成材率提高了0.12%,清渣周期由3个月延长至4个月,有效的减少了加热炉板坯氧化铁皮的生成量,同时降低了能耗。

通过分析氧化烧损与加热温度、在炉时间、炉内气氛的关系,并分析出其变化规律,针对加热方式及煤气使用

比例进行优化,有效的提高了推钢式加热炉的燃烧效率,降低了氧化烧损,提高了成材率,对降低生产成本,提高生产效益,提高企业的市场竞争力具有重要的意义。

6 结束语

钢坯在炉内加热而出现氧化烧损是不可避免的,但通过采取一定的措施,是可以控制和减少的。降低钢坯表面氧化烧损率,其中最主要的措施就是控制加热时间、加热温度和炉内气氛等工艺参数对钢坯氧化的影响,分析研究高合金钢氧化规律和机理,采取降低氧化烧损相应的措施,是可以实现降低氧化烧损率、节能降耗、提高钢材表面质量等目的的。

[参考文献]

[1]赵小龙,王雍期,唐兴昌,等.钢坯在加热过程中的氧化机理及其研究综述[J].轧钢,2019(6):4-6.

[2]白龙飞.加热炉形成钢坯氧化烧损的成因及措施[J].工业炉,2018,40(2):3-5.

作者简介:甄长鹏(1990.9—),毕业院校:河北工业职业技术学院,所学专业:材料工程技术,当前就职单位:德龙钢铁有限公司,职务:无,职称级别:工程师。