

1780 双蓄热式加热炉氧化铁皮成因 与控制策略研究

鲍青峰 陈国涛 张斯 郑国安 周景鑫 那凤祥 肖鹏
(板带事业部)

摘要: 本论文以 1780 双蓄热式加热炉为研究对象,采取“机理分析和数据分析”双驱动的研究方法结合现场生产数据对轧钢加热炉的氧化铁皮的成因进行分析并且提出降低氧化烧损的策略。该课题的研究对提高轧钢生产线的成材率以及轧钢生产线的降本增效有着重要意义。同时,通过研究加热过程的板坯氧化烧损及其温度变化规律,可以有效控制板坯的加热工艺过程,改善板坯轧制的质量。也对改进轧钢加热炉的加热工艺制度有着指导意义。

关键词: 机理分析 数据驱动 氧化烧损 加热制度 控制策略

0 前言

板坯在加热过程中会产生氧化铁皮,而减少氧化烧损已经成全国钢铁企业降本增效的重要内容^[1]。就目前的轧钢技术来说,板坯的氧化烧损是不可避免的,国内轧钢加热炉在加热过程中钢的氧化烧损率一般为 1.5%左右,而由此造成了巨大的经济损失和能源消耗的浪费。同时还会带来其它方面有害影响,通过降低氧化烧损可以为钢厂带来经济效益,提高企业的管理水平。同时,通过降低氧化烧损也可以体现出我们生产线的工艺控制水平,技术水平。因此研究降低钢坯氧化烧损具有科研和现实的意义。

1 氧化铁皮在轧钢生产中研究的背景

钢板的生产主要工序包括炼铁,炼钢,连铸、加热、除鳞、粗轧、精轧,酸洗、冷轧、卷取等。而氧化烧损是钢板在热成型时不可避免的过程,也是造成生产过程中钢材损耗的重要原因。不同钢厂,耗损比例虽有差别,其总量却相当巨大。目前板坯的氧化烧损最高可达 1.6%。1780 产线每年生产 400 万吨钢板计算,氧化造成的板材损耗最多可达 6.4 万吨。以钢板价格为 4000 元/吨估算,经济损失最多可达 2.6 亿元。如果将氧化损耗降至 1%以下,那么每年可减少经济损失 9600 多万元。降低钢板成型过程中的氧化烧损对钢铁企业来说具有重大的现实意义。因此,研究钢坯在高温下的氧化烧损机理,寻找一条工业生产中控制钢坯氧化烧损的有效控制策略,对指导企业节能降耗,产品质量和生产技术升

级以及可持续发展具有重要意义。

2 氧化铁皮在轧钢生产中形成机理分析与数据分析

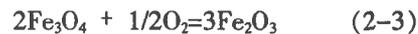
2.1 基于氧化铁皮的形成原因的分析

机理分析是通过系统内部原因(机理)的分析研究,从而找出其发展变化规律的一种科学研究方法。这种方法常常与科学研究的演绎法配合使用^[2]。

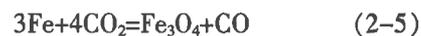
在板坯加热炉加热过程中,氧原子与铁原子发生反应从而造成了钢坯的氧化。而氧化铁皮是加热炉内的氧化性气体与钢中铁元素发生氧化反应生成的。同时伴随了扩散过程:氧元素由表面向钢的内部进行扩散,而铁元素则由钢的内部向钢的表面进行扩散。钢的外层氧元素的浓度大,铁元素的浓度小,从而生成高价铁的氧化物 Fe_2O_3 ^[3]。内层铁的浓度大,而氧的浓度小,生成铁的低价氧化物 FeO 。

板坯在加热过程中钢坯的氧化反应公式如下:

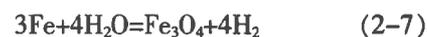
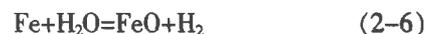
O_2 与铁的反应:

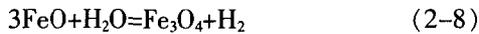


CO_2 与钢的反应:



H_2O 与铁的反应:





氧化铁皮的结构是分层的,钢坯基体氧化皮最内层的是FeO,向外铁的氧化物依次是Fe₃O₄和Fe₂O₃。一般FeO较松散,Fe₃O₄和Fe₂O₃较致密。由于氧化铁皮松散层的气孔较多,导致除磷效果随着氧化铁皮松散层厚度的增大而降低。

氧化铁皮影响板坯的成材率,影响下游工艺的产品质量和轧制的操作。由于板坯表面所生成氧化铁皮的导热系数比板坯基体的导热系数低的多,板坯表面因为氧化覆盖氧化铁皮,氧化铁皮层阻碍了炉气与钢基体之间的热交换,恶化了加热过程中的传热条件,加热炉的加热效率降低,从而使加热炉的生产率降低,能源的消耗增大。而且加热过程中生成的氧化铁皮需要在轧制前通过除磷工序去除,如果除磷过程不彻底,部分未除去的氧化铁皮会保留在板坯表面,在后续轧制过程中,部分氧化铁皮会成为杂质轧入钢成品中,会对钢的质量产生影响。

2.2 影响降低氧化铁皮的形成的因素

有关专家和学者对板坯的氧化进行了理论分析,数据实验,数值计算的方法研究取得的成果表明:板坯高温氧化过程中,最主要的影响因素有加热温度、加热时间、炉内气氛、钢的成分等^[4]。

(1) 加热温度的影响:

加热温度是板坯表面氧化主要因素。随着加热温度的升高板坯表面氧化速度逐渐加快。碳钢氧化烧损变化曲线呈现抛物线变化规律,当温度低于300℃时,碳钢在加热过程中的氧化烧损量很少,一

般可忽略不计;当温度在300℃~500℃时,碳钢在加热过程中的氧化烧损量较小;当温度在500℃~1000℃时,碳钢在加热过程中的氧化烧损量缓慢增大;当温度在1000℃~1300℃,各组分的扩散加快,碳钢在加热过程中的氧化烧损量快速增大;当温度超过1300℃,碳钢表面氧化铁皮开始熔化,碳钢在加热过程中的氧化烧损量急剧增大^[9]。

实验研究表明:碳钢在600℃~1200℃加热温度范围内,碳钢的表面氧化烧损量与温度以及时间的函数关系如下:

$$\alpha = 6.3 \sqrt{\tau} e^{-\frac{900}{T}} \quad (2-9)$$

式中: τ 是加热时间,min; e 是自然对数; T 是钢的表面温度,K; α 是碳钢的表面烧量kg/m²。

(2) 加热时间的影响

同一加热制度条件下,随着加热时间的延长,板坯表面氧化烧损量逐渐增加,其增加呈现指数线性规律。在不同表面温度条件下,氧化烧损量与加热时间的关系曲线是:钢氧化烧损量急剧上升,一段时间过后,碳钢氧化烧损量逐渐减缓。主要是由于氧化初期钢基体与空气直接接触,氧化增重速率较快,随着加热的进行,生成的氧化铁皮会致密地覆盖在钢基体表面,阻碍氧化铁皮的生成,因此氧化速率减缓^[9]。

根据测试结果发现,加热温度越高,氧化铁皮在单位时间内生成的量就越多。具体如下表1所示。

表1 加热温度与氧化烧损的定性关系表

温度(℃)	<300	>500	>700	>900
氧化程度(degree)	0	开始氧化	增大	快速增大

(3) 炉内气氛的影响

加热炉内气氛指炉内空气、煤气、水等元素的燃烧的配比的总体物理化学情况。空气过剩就容易形成氧化性气氛;煤气过剩,就容易形成还原性气氛;加热炉在氧化性气氛下,氧化烧损最严重。炉气中一般含有CO₂、H₂O、O₂、CO、H₂、CH₄和N₂。它们与钢的化学反应各有不同。其中CO、H₂O、O₂等为氧化性气体,其中氧化性最强的是O₂,钢与这些氧化性气体之间反应的过程就是氧化铁皮的生成过程^[7]。

(4) 钢的化学成分的影响

影响板坯氧化烧损的化学元素主要是:碳,硅,铝,铜,锰,钒等。下面就碳,铝,硅等进行论述:

关于碳,研究表明随着碳含量的增加,钢的氧化烧损量有所降低,因为钢中碳氧化,部分生成CO,阻碍了氧化气体的扩散,也可能是由于碳含量不同,使得板坯基体组织结构不同。Meurer和Schmalzried等通过氧化动力学实验对比不同温度下碳在FeO中的溶解度对氧化速率的影响^[8],结果

表明:碳在 FeO 中的溶解度与钢的氧化速率的密切相关。D.Caplan 在指定温度下研究了钢中不同碳含量对氧化速率的影响,当钢中碳含量为 1%时,钢基体组织结构主要为珠光体加铁素体;碳含量为 0.5%时,钢基体组织结构主要为铁素体加渗碳体。钢基体组织结构为渗碳体时,生成的氧化铁皮会出现起皮现象,使基体中铁元素向氧化铁皮的扩散效率降低,氧化速率降低。

关于铝,当钢中铝元素含量较低时,对氧化速率影响可忽略不计;当铝元素较高时,高温氧化过程中会形成 Al_2O_3 ,生成的氧化铝结构致密,其覆盖在钢基体表面,阻碍铁与氧元素的扩散,从而降低铁的氧化,降低氧化速率。

关于硅,当钢中硅元素含量较低时,对氧化速率影响可忽略不计;当钢中硅含量较高时,在钢基体表与氧化铁皮的界面处氧化亚铁会与二氧化硅结合形成 $2FeO \cdot SiO_2$ (铁橄榄石),研究表明:氧化亚铁会与二氧化硅结合形成铁橄榄石粘度较大,

与钢基体表面接触紧密,阻碍了铁与氧元素的扩散,从而降低铁的氧化,降低氧化速率^[9]。

关于 Cr, Ni, Mn, V, Cu 等化学元素都是比铁活泼,比铁更易氧化,其对应含量较高时,都会被氧化,生成保护膜,从而有效的提高钢的抗氧化性能。

(5) 氧化铁皮对轧钢生产的不良影响

在轧制生产的过程中,氧化铁皮的存在有以下不利影响:降低板材的成材率;增加轧钢加热炉的能耗;粗轧的第一道轧制打滑;精轧的氧化铁皮的压入薄板影响板坯的表面质量和性能;同时还影响板坯的加热速度以及板坯的同板温差。

根据实验表明:随着板坯氧化铁皮的增厚,同样加热条件下,板坯出炉温度略有降低,断面温差明显增大。当氧化铁皮大于 2mm 时,板坯出炉温度降低速率增大,断面温差增大,因此,加热过程中板坯表面氧化铁皮的厚度对板坯加热质量影响较大,对于易生成氧化铁皮的钢种确定其基本加热制度时应该考虑氧化铁皮的影响。

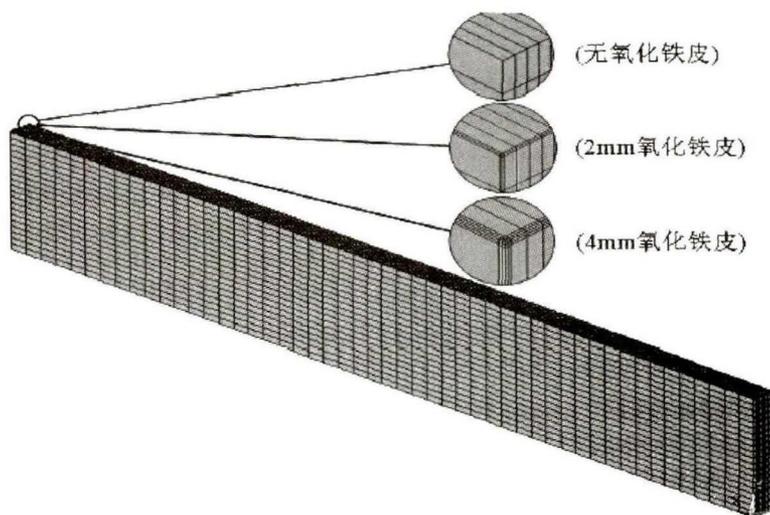


图 1 氧化铁皮在板坯表面的示意图

2.3 1780 加热炉关于氧化烧损测试数据分析

数据分析是大数据处理的核心,数据集成和清洗是数据分析的基础,大数据的价值产生于数据分析^[10]。数据分析挖掘的常用方法包括统计分析方法、数据挖掘方法、机器学习方法及新兴方法等^[11]。轧钢生产线的实时数据的本质反映的轧线的生产本质。通过保存,调取,预处理数据,分析数据,应用数据可以分析出轧制生产线的状态是否最优。1780 生产线每月通过实验的方法对轧钢加热炉的板坯的氧

化烧损进行随机测试并且保留了详细的数据资料。这为我们通过数据分析氧化烧损提供的数据支撑。

1780 加热炉 2014 年 5 月,6 月,8 月三个月的板坯氧化烧损测试数据如表 2-表 4 所示,具体的测试方式为:测试板坯数量为每月随机抽取返回板坯测试 10 块;上料方式是凉装(温度小于 300℃入炉),热装(温度小于 300℃入炉),混装(前面二者混合上料方式);轧制规格覆盖 1.9mm---13.5mm;轧制钢种包括 Q345B,SS400,S235JR-3,SS400B 等。

该测试方法合理,考虑要素基本全面,但是存在问题是:一方面,存在手动测试,手动记录,存在随机误差,测量误差,记录误差等“非真实数据”。这将大大降低了测试结果的可靠性。另一方面,测试样本少不能绝对反映 1780 加热炉氧化烧损率等不足。因此,有必有对上述测试方法进行改善,就是通过出炉端口增加测试称重装置,全程监控测试与跟踪每一块板坏的氧化烧损数据,并且通过计算机存储,可视化,监控 1780 加热炉的氧化烧损的具体情况,从而有的放矢的匹配具体可行的降低氧化烧损措施,提高板坏的成材率。

通过对测试样本的相关性分析看出,装入凉板

坏的氧化烧损率大于 1%,因此,匹配的降低氧化烧损率的措施是优化上料制度,热装直装最大化。

通过对测试样本的相关性分析看出,板坏在炉时间越长,氧化烧损率越高。但是本采样点的对应的第六个点在炉时间是 163 分钟,氧化烧损率为 1.94%。说明该数据是“非正常数据”,不能反映测试板坏在炉时间和氧化烧损率的相关性关系。但是,整体上反映了:“板坏在炉时间越长,氧化烧损率越高”这一趋势。因此,针对在炉时间长匹配降低氧化烧损率的措施可以保证轧制节奏,均匀出钢。针对停轧,换辊等特殊情况,提前降低加热炉的各个燃烧段的温度。

表 2 1780 加热炉氧化烧损测试数据明细表(2014 年 5 月)

序号	板坏号	钢种	板坏规格	轧制规格 (mm)	入炉温度 (°C)	在炉时间 (min)	工艺时间 (min)	超出时间 (min)	检重日期	入炉前重量 (t)	出炉后重量 (t)	烧损量 (t)	烧损率
1	14303193033	SS400	200×1500×12000	5.75	609°C	223.6	110	113.6	5月4日	28.66	28.42	0.24	0.84%
2	14303185012	SPHC	200×1250×9900	3	300°C	232.7	130	102.7	5月5日	19.68	19.54	0.14	0.71%
3	14303071041	SS400B	200×1220×11100	5	300°C	273.9	110	163.9	5月6日	21.5	21.28	0.22	1.02%
4	14203685024	SS400B	200×1250×10800	3	300°C	191.6	130	61.6	5月9日	21.58	21.36	0.22	1.02%
5	14203685014	SS400B	200×1250×10800	3.75	300°C	193.3	130	63.3	5月9日	21.64	21.48	0.16	0.74%
6	14303432024	SS400B	200×1450×12000	3.25	300°C	163.9	130	33.9	5月16日	27.8	27.26	0.54	1.94%
7	14303585033	SS400B	200×1500×12000	7.5	450°C	175.8	110	65.8	5月17日	28.48	28.1	0.38	1.33%
8	14303585024	SS400B	200×1500×12000	7.5	439°C	174.8	110	64.8	5月17日	28.68	28.28	0.4	1.39%
9	14303585014	SS400B	200×1500×12000	9.75	378°C	173.3	110	63.3	5月17日	28.52	28.26	0.26	0.91%
10	14303673032	Q345B	200×1500×12000	8	599°C	203.7	110	93.7	5月20日	28.62	28.36	0.26	0.91%

表 3 1780 加热炉氧化烧损测试数据明细表(2014 年 6 月)

序号	板坯号	钢种	板坯规格	轧制规格 (mm)	入炉温度 (°C)	在炉时间 (min)	工艺时间 (min)	超出时间 (min)	检重日期	入炉前重量 (t)	出炉后重量 (t)	烧损量 (t)	烧损率
1	14204307034	Q345B	200×1500×12000	13.75	387°C	121.2	110	11.2	6月1日	28.36	28.2	0.16	0.56%
2	14303185012	SS400	200×1500×12000	5.5	515°C	315.3	110	205.3	6月2日	28.4	28.18	0.22	0.77%
3	14303071041	SS400	200×1500×12000	7.5	600°C	138.5	110	28.5	6月9日	28.42	28.24	0.18	0.63%
4	14203685024	S235JR -3	200×1400×12000	1.9	454°C	171.7	130	41.7	6月10日	26.9	26.68	0.22	0.82%
5	14203685014	S235JR -3	200×1400×12000	1.9	410°C	179.4	130	49.4	6月10日	26.94	26.68	0.26	0.97%
6	14303432024	Q345B	200×1500×12000	9.75	578°C	118.2	110	8.2	6月17日	28.56	28.42	0.14	0.49%
7	14303585033	S235JR -3	200×1400×12000	1.9	300°C	163.3	130	33.3	6月18日	26.8	26.46	0.34	1.27%
8	14303585024	Q235B	200×1260×9700	1.35	300°C	231.6	130	101.6	6月22日	19.42	19.14	0.28	1.44%
9	14303585014	Q345B	200×1500×9500	5.5	300°C	151.8	110	41.8	6月22日	17.88	17.62	0.26	1.45%
10	14303673032	SS400B	200×1010×12000	1.6	300°C	169.2	130	39.2	6月22日	20	19.74	0.26	1.30%
合计										251.68	249.36	2.32	0.92%

表 4 1780 加热炉氧化烧损测试数据明细表(2014 年 8 月)

序号	板坯号	钢种	板坯规格	轧制规格 (mm)	入炉温度 (°C)	在炉时间 (min)	工艺时间 (min)	超出时间 (min)	检重日期	入炉前重量 (t)	出炉后重量 (t)	烧损量 (t)	烧损率
1	14206230024	SS400	200×1500×12000	5.5	300°C	167.1	110	57.1	8月2日	28.66	28.48	0.18	0.63%
2	14206375013	SS400	200×1500×12000	5.75	300°C	207.3	110	97.3	8月7日	28.34	28.24	0.1	0.35%
3	14206365032	SPHC	200*1220*10300	3	300°C	204.2	110	94.2	8月8日	19.7	19.48	0.22	1.12%
4	14100258031	SS400	200*1500*12000	2.8	506°C	196.2	110	86.2	8月13日	28.54	28.38	0.16	0.56%
5	14100241032	SS400	200*1260*12000	11.75	300°C	186.6	110	76.6	8月13日	28.5	28.26	0.24	0.84%
6	14100373031	SS400B	200*1175*11500	2.8	300°C	170.3	110	60.3	8月20日	21.7	21.48	0.22	1.01%
7	14100419024	SS400	200*1500*12000	7.5	300°C	193.9	110	83.9	8月21日	28.6	28.38	0.22	0.77%
8	14304904054	SS400	200*1250*9500	3	300°C	376.2	110	266.2	8月23日	18.84	18.24	0.6	3.18%
9	14100373022	SS400B	200*1175*11500	2.8	300°C	173.9	130	43.9	8月20日	21.7	21.42	0.28	1.29%
10	14100378041	SS400B	200*1175*11500	2.8	300°C	171.3	110	61.3	8月20日	21.7	21.38	0.32	1.47%
合计										246.28	243.74	2.54	1.03%

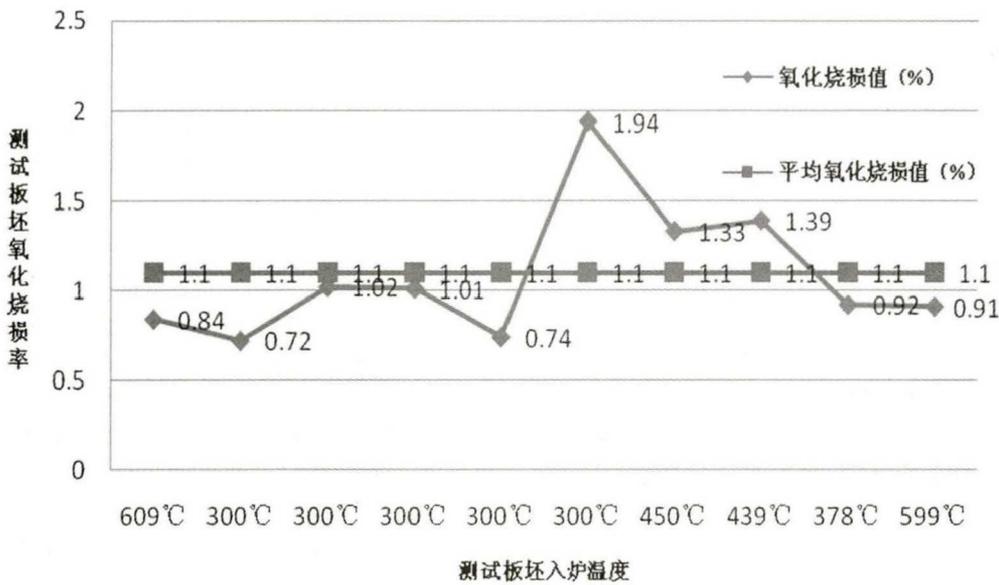


图2 测试板坯氧化烧损率与入炉板坯温度关系图

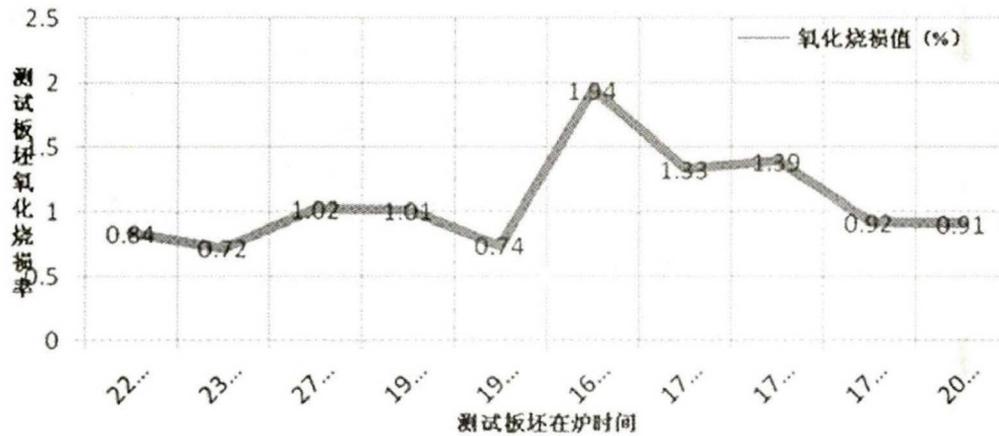


图3 测试板坯氧化烧损率与板坯在炉时间关系图

3 降低氧化烧损的控制策略

根据氧化铁皮在轧钢加热炉的形成机理匹配相应的控制措施,从而达到降低氧化烧损,提高轧制产品的成材率。一般而言,降低氧化烧损的控制策略有:控制各个加热段的空燃比和空气过剩系数法;优化板坯加热工艺法;分级工艺制度法,气氛控制法,时间控制法,优化待温停轧制度等^[12]。

(1) 控制空燃比和空气过剩系数法降低板坯的氧化烧损。根据加热工艺制度和现场实际炉况,首先要确保各个加热段的空燃比符合加热制度的要求。操作工人要时刻监控空燃比,动态精准控制空燃比值。其次,在均热段难免会吸入冷风,所以空气过剩系数在均热段应该适当取小些,以0.9~0.95之间最好,这样可以使吸入的冷风与多余燃料发生

氧化反应,并能使均热段处于还原气氛当中。在一加热段和二加热炉段,空气过剩系数在加热段应该取1.05~1.2之间最好,这样不仅可以使燃料充分燃烧,而且还可以使均热段剩余的燃料在加热段与多出来的空气发生氧化反应,使炉内的气氛处于弱氧化气氛^[13]。

(2) 钢坯在500℃以下时氧化量很少,而超过500℃则氧化量迅速增大。因此,此时就应该优化上料制度,保证热装热送的最大化。加速加热速度(调整步进梁给定速度),减少板坯的在炉时间。在RT5返回温度贴近轧制要点的下限烧钢。因此,优化钢坯的加热工艺,满足钢坯出炉目标温度和出钢节奏,这样不仅减少了钢坯的氧化量,而且提高了钢坯成材率^[14]。

4 结论

本文从理论分析和实验数据两个角度分析了1780加热炉的氧化烧损的成因。并且用相关性图表分析得出了降低氧化烧损的措施,同时从理论分析上给出了降低氧化烧损的控制策略。

在探讨1780加热炉氧化烧损的测试时也提出更加优化的氧化烧损测试的方法和优化节能的研究方向,供相关人员进一步的研究分析,目前,对轧钢加热炉温度场进行分析的软件有ANSYS等软件,可以对轧钢加热炉的温度模型进行数值分析,这也是轧钢加热炉的模型优化的另一个研究方向,在这个方向上我们将继续优化轧钢加热炉的温度控制模型,进一步降低加热炉的氧化烧损。

参考文献

- [1] 李江. 超高层矩形钢管混凝土柱施工质量控制及关键技术研究[D]. 北京建筑大学, 2014.
- [2] 王宇. 铁路货物运输发展演化机理研究[D]. 西南交通大学, 2016.
- [3] 彭卫革, 常建喜, 金松岩, 等. 氧化锆分析仪在轧钢加热炉的应用[C]. 全国轧钢加热炉综合节能技术研讨会论文集, 2013.
- [4] 董晓旭. 步进式加热炉过程控制模型研究[D]. 北京科技大学, 2017.
- [5] 邢旭腾. 钢坯表面抗氧化涂料及其耐高温性能的研究[D]. 华北理工大学, 2015.
- [6] 谷聪敏. 降低低碳钢板坯高温氧化烧损的研究[D]. 华北理工大学, 2017.
- [7] 赵景涛. 钢坯高温抗氧化涂料及钢坯温度场调控研究[D]. 华北理工大学, 2016.
- [8] Schmalzried, H. N. A. Toropov and V. P. Barzakovskii: High - Temperature Chemistry of Silicates and Other Oxide Systems. Translated from Russian by C. N. Turton and T. I. Turton. Consultants Bureau, New York 1966. 216 Seiten, 110 Abbildungen[J]. ZeitschriftFürElektrochemie, Berichte Der BunsengesellschaftFürPhysikalischeChemie, 2015, 70 (9 - 10):1184-1184.
- [9] 曹志成, 孙体昌, 吴道洪, 等. 转底炉直接还原铜渣回收铁、锌技术[J]. 材料与冶金学报, 2017, 16(1): 38-41.
- [10] 陈旭光. 大数据的应用分析[J]. 数字技术与应用, 2015(3):224-224.
- [11] 王茜. 英国大数据战略分析[J]. 全球科技经济瞭望, 2013(8):24-27.
- [12] 刘国良, 郭营利. 奥氏体不锈钢中厚板加热工艺优化[J]. 山东冶金, 2015(2):18-19.
- [13] 吕鹏鹏. 锂离子电池氧化硅基复合负极材料的制备和电化学性能研究[D]. 北京科技大学, 2015.
- [14] 张廷玉. 加热炉钢温建模与炉温优化设定研究[D]. 东北大学, 2014.