

150 t LF 工艺操作与供电制度优化

王义芳¹ 胡志刚² 赵英利² 周学禹³ 李杰²

(1 河北钢铁集团, 石家庄 050000; 2 河北钢铁技术研究总院, 石家庄 050000; 3 河北钢铁集团承钢公司, 承德 067002)

摘要 150 t 钢包炉(LF)精炼的钢种主要有汽车大梁钢、车轮钢等,其生产流程为 150 t 转炉-150 t LF-板坯连铸-连轧。通过 150 t LF 平均初渣碱度由 3.4 降至 2.1,喂 Ca 线平均速度由 4.0 m/s 提高至 4.7 m/s,改善了初渣流动性,吨钢 Al 用量降低 0.15 kg,钙的收得率提高了 17%;通过供电制度的优化,在加热期间降低电耗 2.5 kWh/s,钢液升温速度可提高 0.93 °C/min。

关键词 150 t LF 精炼 初渣碱度 供电制度 优化

Optimization of Process Operation and Power Supply Scheme for 150 t LF

Wang Yifang¹, Hu Zhigang², Zhao Yingli², Zhou Xueyu³ and Li Jie²

(1 Hebei Iron & Steel Group, Shijiazhuang 050000; 2 Hebei Iron & Steel Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000; 3 Chengde Iron and Steel Company, Hebei Iron & Steel Group, Chengde 067002)

Abstract The 150 t ladle furnace (LF) refining main steels are beam steels for car and wheel steels etc, with production flow sheet 150 t converter-150 t LF-slab casting-continuous rolling. With decreasing the 150t LF average initial slag basicity from 3.4 to 2.1 and increasing the Ca wire average feeding rate from 4.0 m/s to 4.7 m/s, the initial slag flowability is obviously improved, the Al consumption decreases by 0.15 kg/t and the yield of calcium increases by 17%; with optimizing the power supply scheme the electricity consumption decreases by 2.5 kWh/s in heating period and the heating-up rate of liquid increases by 0.93 °C/min.

Material Index 150 t LF, Refining, Initial Slag Basicity, Power Supply Scheme, Optimization

LF 的主要作用是对钢水进行合金化,调整钢水成分,深脱硫和去夹杂,并通过加热调节温度,协调初炼炉与连铸机的节奏匹配^[1]。目前 90% 以上钢种均需通过 LF 精炼,一些高端品种钢一般需要在 LF 进行深脱氧、深脱硫和去夹杂,精炼时间会更长,精炼效果直接影响钢的品质和生产成本。LF 的主要成本消耗为渣料、合金和电耗,由于品种钢的精炼时间长、合金用量大,精炼工序占炼钢成本的比重更大;而不同的精炼工艺,由于造渣制度、供电制度和脱氧剂消耗不同,成本差异很大,是影响产品质量和市场竞争力的关键环节,也是具有较大挖掘成本潜力的工艺环节。

目前,LF 生产过程中普遍存在的问题是造渣制度、渣系选择和脱氧合金化缺乏标准化操作,主要由人工经验控制,由于操作水平的差异,钢水质量和精炼成本波动较大。LF 的主要成本消耗之一为电耗,其供电制度的制定非常关键,但是目前各厂使用的供电制度基本为厂家提供的初步设计方案,很多 LF 工作的电气参数长期处于低效率高电耗的工作点上,缺乏结合工艺和电气两个专业对工作点选择的

深入研究^[2-4]。

河北钢铁集团 1780 热连轧生产线,生产工艺流程为:150 t 转炉-150 t LF-板坯连铸机-7 机架热连轧,生产钢种主要有汽车大梁钢、车轮钢、焊瓶钢、锅炉压力容器等。目前,在 LF 精炼过程中存在渣料结块、脱氧剂用量较大、电耗高等问题,增大了精炼成本,严重影响了产品的市场竞争力。

为解决上述问题,在 150 t LF 上进行了加料制度和精炼渣系的优化,缩短了成渣时间,降低了渣料和脱氧剂用量;并利用电气特性曲线分析,对该 LF 的供电制度和工件进行了优化,降低了初期供电的噪声,提高了加热效率和降低了电耗,提高了 LF 的标准化操作水平,降低了 LF 精炼成本,增强了产品的市场竞争力。

1 LF 工艺操作优化

1.1 加料制度优化

原有加料制度存在的问题主要有:

- (1) 造初渣存在比较严重的渣料结块问题;
- (2) 加热时电弧埋弧效果不好,初期化渣噪声较大,三相电极不平衡问题较严重;

(3) 铝制品脱氧剂消耗量大。

初渣结块的原因主要是原有的加料制度为一次性加入全部石灰(600 kg 左右)和萤石(150 kg 左右),由于一次加入的石灰量过大,初渣熔化不好,形成渣团结块现象,导致初期加热电弧埋弧不好和电弧不稳定。此外,原有的造渣制度主要采用喂铝线和加铝粉强脱氧,由于初渣碱度高,铝脱氧产物初期不能有效地降低渣的熔点,渣的熔化性和流动性差,同时吹氩造成的二次氧化也消耗了大量铝制品。

针对以上问题,调整了加料和造渣制度,并减弱了各阶段的吹氩强度,转炉出钢优先采用预熔渣 200 kg 造初渣,进 LF 后根据初渣量先补加少量预熔

渣,同时调整石灰和萤石的加料顺序,采用石灰和萤石分批次加入,每次石灰加料不超过 200 kg,并减少萤石的加入量。在造渣和脱氧方面,初期改用 CaC_2 和 SiC 进行炉渣弱脱氧,降低初渣碱度造还原渣,改善初渣的流动性,优化前后各 5 炉次的 LF 精炼初始渣样成分和碱度如表 1 所示。表 1 中初渣碱度平均值由 3.4 降低到 2.1 后,渣的流动性明显改善。后期适当用铝线和铝粉进行强脱氧,形成低熔点流动性好的铝酸钙渣系,加快石灰的溶解和熔化,提高炉渣碱度,保证脱硫效果。通过造渣制度的改进,初渣流动性明显改善,吨钢降低 Al 用量 0.15 kg,同时脱硫效果也有所提高。

表 1 优化前后 150 t LF 精炼初始渣样成分和碱度 ($R = \text{CaO}/\text{SiO}_2$)

Table 1 Ingredient and basicity ($R = \text{CaO}/\text{SiO}_2$) of 150 t LF refining initial slag samples before and after optimization

工艺	成分/%								碱度 R	平均 R
	CaO	SiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	BaO		
优化前	41.5~51.1	11.8~15.2	0.43~1.35	0.08~0.32	19.9~23.3	1.84~3.63	7.6~12.0	0.06~0.76	3.0~4.1	3.4
优化后	24.0~47.2	14.6~20.1	0.28~1.02	0.08~0.55	17.3~38.4	1.24~3.15	7.7~12.7	0.75~2.37	1.4~2.9	2.1

1.2 喂钙参数优化

由于现有钢包透气砖位置与喂线机布置在同一侧,喂钙后钙会顺着钢水流场上升到钢液面,导致了钙的二次氧化较多,造成钙的收得率低且不稳定,使得不同炉次钢水钙含量和钙消耗波动较大。因此,在优化加料制度后,对喂钙速度进行了优化试验。在相同工艺条件下(钢水成分和吹氩制度)测试了不同喂钙速度下钙的收得率,将喂钙线速度从 4.0 m/s 提高到 4.7 m/s,钙的收得率由 12.45% 提高到了 14.53%,喂钙速度进一步提高,钙的收得率反而下降,试验结果见表 2。因此,将喂钙参数调整为 4.7 m/s。

表 2 喂线速度对 LF 精炼时钙收得率的影响

Table 2 Effect of wire feeding rate on yield of calcium during LF refining

喂钙线速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	钙收得率/%
4.0	12.45
4.5	11.70
4.7	14.53
5.0	13.59

1.3 实施效果

调整了加料和造渣制度后,成渣快,初渣结块很少出现,供电埋弧效果好,初期精炼供电噪声下降,供电平稳性增强。通过增加少量 CaC_2 和 SiC 脱氧剂造前期渣,减少了铝制品消耗,同时降低了初渣

碱度有利于初期化渣;降低了各阶段的吹氩强度,减少了铝和钙的二次氧化,并通过提高喂钙速度,使钙的收得率提高了 17%。采用以上技术措施后,降低了吨钢成本约 2 元。

2 LF 供电制度优化

2.1 LF 设备参数

150 t LF 的主要设备参数见表 3。目前该 150 t LF 有 13 个电压档位,前 4 档电压分别为 380、367、355、342 V。每个电压档位下设置长弧、中弧、短弧 3 个电流档位,电流依次增大。原有供电制度只使用第 4 档电压供电,在精炼初期采用长弧电流档位化渣,后期用短弧档位加热。

表 3 150 t LF 的主要技术参数

Table 3 Main technical parameters of 150 t LF

项目	参数
额定处理量/t	150
钢包直径/mm	3 888
电极直径/mm	450
自由空间/mm	400
变压器容量/MVA	30
升温速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	4.5

采用该供电制度存在的主要问题有:

(1) 初期供电噪声大,经常出现弧光闪烁现象,埋弧差,化渣慢;

(2) 加热期间变压器功率因子在 0.5 左右,电

能的利用率较低,电耗较高;

(3) 供电初期存在比较严重的三相不平衡问题。

2.2 原有供电制度分析

原有供电制度在化渣阶段选择长弧供电,不利于埋弧;在加热阶段选择短弧供电,功率因子偏低,热效率低,需要根据电气参数进行优化。由于在精炼初期,渣层较薄不易埋弧,此时易采用短弧供电来保证埋弧效果,精炼后期炉渣造好后,在加热期可以适当增加弧长,根据不同弧长的加热效果和埋弧效果,分析电气特性曲线,使用最接近最优工作点的位置工作,保证最佳的加热效率以降低电耗。分析三相不平衡形成的原因,一方面是底吹透气砖的位置设计与电极位置重叠,底吹过大时造成电极晃动,由于透气砖的位置无法更改,需要降低供电时的底吹氩流量;另一方面是化渣不好和采用长弧档位供电造成的。

2.3 供电制度优化

供电制度的制定需要对各档位进行电气特性曲线分析,由于电气特性分析需要建立电气参数与热工量的函数关系并进行寻优,传统采用画电气原图的方法手工分析工作点比较繁琐^[5],本研究利用计算机建模方法和数据库技术,设置寻优条件,建立了电气特性曲线分析的优化模型,能自动绘出各档位的电气特性曲线图,进行最佳工作点的寻优。

对各电压档位下最优电流工作点的寻优是在加热阶段用尽可能少的电耗输出尽可能高的电弧能量,在保证电弧功率的条件下,电弧电流的设定还应满足下列条件^[6]:

- (1) 表观功率不超过变压器许用容量 $S \leq S_F$;
- (2) 工作电流不超过变压器许用电流 $I \leq I_n$;
- (3) 电弧需要稳定燃烧的条件 $\cos\phi$ (功率因子) $\leq 0.77 \sim 0.86$;
- (4) 较好的电能利用状况 $\cos\phi \geq 0.65$, η (热效率) ≥ 0.90 ;
- (5) 避开耐火材料侵蚀指数 (R_E) 峰值区。

经过 LF 供电模型的计算,第4档 342 V 电压下的电气特性曲线见图1。

从图1可以看出,当电压档位固定时,电流越大,弧长越短,该电压档位下设置的长中短3个弧长档对应的工作点位置分别见图1中 a, b, c 处,3个工作点的弧长分别为 78、40、27 mm。该电压下最佳工作点位置在 I^* 处,图中 a 点离最佳工作点最近,是3个工作点中加热速度最快也最省电的工作点, c 点

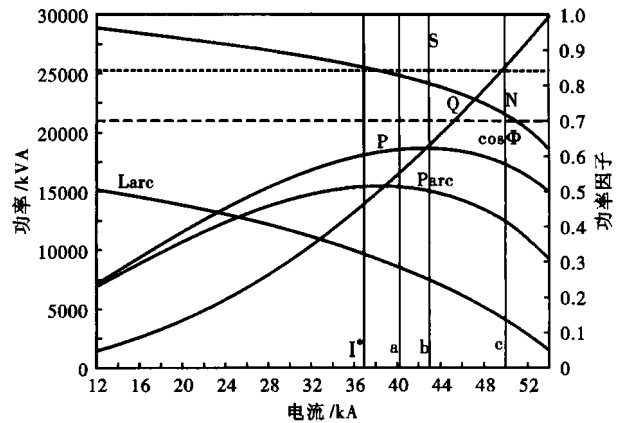


图1 342 V 电压下的电气特性曲线和工作点位置

Fig.1 Electric characteristic curves and position of working point at 342 V level

是加热速度最慢电耗最大的工作点,但是 c 点的弧长最短, b 点介于两者之间。由于精炼初期的渣厚一般小于 150 mm, 为保证埋弧效果, 渣厚至少要达到弧长的 2.5 倍, 因此, 化渣期间需要先采用 c 点进行短弧供电, 待初渣化好后, 渣厚可以达到 300 mm, 此时可选择 a 点供电, 加热速度最快且电耗小。

以上是对第4档 342 V 电压下工作点的分析结果, 根据变压器功率和实际冶炼工艺的需要, 还需要对其它档位的电气特性进行分析, 综合考虑各档位各工作点的热效率、加热速度、弧长等参数制定最优的供电制度。前4档位下不同工作点的工作参数见表4。表中 S 为变压器表观功率, 要求尽可能不超过变压器的额定功率, 表观功率越小输入能量越小, 电耗越低; P_{arc} 为电弧功率, 在埋弧条件下为输入钢水中的有效能量, 与升温速度成正比; Q 为无功功率, $\cos\phi$ 为功率因子, η 为热效率, L_{arc} 为电弧弧长, 最佳工作点位置为以最小的表观输出功率达到最大的电弧输出功率时的电流值。从表4中可见, 除了第1档 380 V 档位下, 中弧档最接近最佳工作点外, 其它几档都是长弧档最接近最佳工作点。因此, 在加热期以最靠近最佳工作点的工作档位供电有利于快速升温 and 节电。

新的供电制度以第4档 342 V 电压档为主要供电档位, 化渣期间采用短弧档供电, 加热升温期间采用长弧档供电。在生产节奏紧张要求最快的升温速度时, 化渣期间采用 342 V 电压短弧档供电, 加热采用 380 V 下中弧供电。

2.3 加热和节电效果

通过优化供电制度和降低供电期间的吹氩流量, 有效地解决了初期冶炼埋弧效果差和供电三相

表 4 供电系统前 4 档位下的各工作点的技术参数

Table 4 Technical parameters of each working point at first fourth level of power supply system

电压档位/V	工作点位置	电流/kA	$P_{arc}/$ MW	$Q/$ MW	$S/$ MW	$\cos\phi$	η	$L_{arc}/$ mm	升温速度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)
380	最佳	40.5	17.615	16.001	26.301	0.770	0.847	105.9	4.25
	长弧	36.0	17.096	13.014	23.896	0.818	0.873	118.2	4.13
	中弧	40.9	17.549	17.438	26.467	0.772	0.840	103.4	4.24
	短弧	44.8	17.461	19.989	29.213	0.725	0.820	88.7	4.22
367	最佳	39.1	16.475	16.008	25.511	0.770	0.847	98.1	3.98
	长弧	36.8	16.247	13.979	23.622	0.810	0.861	105.2	3.92
	中弧	44.2	16.053	19.896	28.000	0.715	0.820	80.1	3.88
	短弧	50.2	14.168	25.331	31.865	0.601	0.725	50.4	3.42
355	最佳	37.8	15.373	13.955	22.998	0.770	0.847	93.4	3.71
	长弧	40.8	15.239	16.836	24.978	0.750	0.828	85.1	3.68
	中弧	43.6	15.002	18.492	26.516	0.700	0.810	75.2	3.62
	短弧	51.0	12.522	25.201	30.312	0.556	0.721	40.0	3.02
342	最佳	36.8	14.310	13.429	21.768	0.770	0.847	88.6	3.46
	长弧	40.2	14.033	16.417	23.905	0.724	0.823	78.3	3.39
	中弧	43.2	11.786	23.664	28.540	0.560	0.721	39.8	2.85
	短弧	50.1	10.198	25.228	29.836	0.517	0.681	27.1	2.46

表 5 第 4 档下不同工作点的电耗和加热效果

Table 5 Electricity consumption and heating effect of different working point at fourth level

工作点	电耗/($\text{kWh} \cdot \text{s}^{-1}$)	升温速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)
a	5.07	3.39
b	6.73	2.85
c	7.56	2.46

不平衡的问题。经过优化供电制度,大幅度降低了吨钢电耗。表 5 为优化供电制度过程中,现场测试的第 4 档(342 V)电压下长弧(a)、中弧(b)、短弧(c)三个工作点下的电耗。从表 5 中可以看出,在加热期用 a 工作点替代原来采用的 c 点供电,电耗每秒可下降 2.5 kWh,同时升温速度还可提高 0.93 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,按照加热升温平均 8 min/炉计算,每炉约可节电 1 200 kWA,吨钢约可节约成本 4 元。

3 结论

(1) 对于 LF 精炼工艺,由于造渣制度、供电制度和脱氧剂消耗不同,成本差异很大,是影响产品质量和市场竞争力的关键环节,也是具有较大挖掘成本潜力的工艺环节。

(2) 初渣碱度过高,石灰一次性加入量大,是 LF 精炼初渣熔化慢和初期供电埋弧不好的主要原因,通过石灰分批次加料和前期采用弱脱氧剂 SiC 和 CaC_2 造渣,可以提高初渣成渣速度和降低初渣碱度,不仅可以改善供电埋弧效果,还可以减少脱氧剂铝的消耗,吨钢降低 Al 用量 0.15 kg。

(3) 在本文研究的 150 t LF 的工艺条件下,将喂钙速度从 4 m/s 提高到 4.7 m/s,钙的收得率可提高 17%。

(4) 针对本文研究的 150 t LF,利用电气特性曲线分析方法,优化供电制度和降低供电期间的吹氩流量,有效地解决了初期冶炼埋弧效果差和供电三相不平衡的问题。通过对供电期间工作点位的优化,在加热期可降低电耗 2.5 kWh/s,同时升温速度可提高 0.93 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,按照加热升温平均 8 min/炉计算,每炉约可节电 1 200 kWA,吨钢可节约生产成本 4 元左右。

参考文献

- [1] 张 鉴. 炉外精炼的理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 1993.
- [2] 胡志刚,赵彦华,孙玉虎,等. 120 t LF 供电曲线的优化[J]. 特殊钢, 2007, 28(5): 45-48.
- [3] 阎立懿,肖玉光,李延智,等. LF 炉变压器容量及技术参数确定[J]. 冶金设备, 2006(3): 55-58.
- [4] 姜周华,唐 东,李花兵,等. LF 炉运行电抗模型及供电优化[J]. 中国冶金, 2007, 17(1): 17-19.
- [5] 黄有明,白熙敬,张莹君. 电弧炉电气特性测试计算及优化配电曲线应用软件[J]. 节能, 1992(9): 36-40.
- [6] 李伟立,李士琦,刘仁刚. 现代电弧炉炼钢[M]. 北京:原子能出版社, 1995.

王义芳(1958-),男,博士,教授级高级工程师,1982年武汉钢铁学院毕业,炼钢和 LF 精炼工艺技术研究。

收稿日期:2012-08-06