

· 工艺技术 ·

120 t LF 供电曲线的优化

胡志刚 赵彦华 孙玉虎 李庆胜

(邯钢钢铁集团公司, 邯郸 056015)

摘要 LF(钢包炉)二次精炼是邯钢转炉-LF-CSP 流程生产冷轧低碳钢的关键工序。通过所建立的优化模型,研究了 20 MW、120 t LF 的电气特性,以优化供电曲线和缩短精炼时间、提高精炼效果。结果表明,邯钢 LF 不同档位下最快升温速度为 1.45~5.14 °C/min;通过合理工作点,在第 3 档电压(302 V)下,可将升温速度从目前的 4.01 °C/min 提高到 4.58 °C/min。

关键词 LF 供电曲线 优化

Optimization of Power Supply Curves for a 120 t LF

Hu Zhigang, Zhao Yanhua, Sun Yuhu and Li Qingsheng

(Technical Center, Handan Iron and Steel Group Corp Ltd, Handan 056015)

Abstract LF (ladle furnace) refining is a key metallurgical process for steelmaking cold rolled low carbon steel in BOF-LF-CSP flow sheet. The electric characteristics of a 120 t LF with 20 MW transformer and the power supply curves have been studied and optimized by established optimizing model to decrease refining time and improve refining effect. Results show that with different voltage level the maximum heating up of LF at Handan Steel is from 1.45 °C/min to 5.14 °C/min; and with third voltage level (302 V) the heating up speed shall be increased from 4.01 °C/min at present to 4.58 °C/min.

Material Index LF, Power Supply Curves, Optimization

邯钢目前采用转炉-LF-CSP 工艺生产热轧卷板,除常规产品外,还有近 50% 的低碳冷轧用钢;因此,LF 在该工艺流程中是非常关键的一道工序。

1 LF 电气特性和供电曲线

1.1 电弧电流的设定条件和 LF 技术参数

加热期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:

- (1) 表观功率(S)不超过变压器许用功率容量(S_F): $S \leq S_F$;
- (2) 工作电流(I)不超过变压器许用电流(I_n): $I \leq I_n$;
- (3) 电弧稳定燃烧: 功率因子 $\cos\Phi \geq 0.77 \sim 0.86$;
- (4) 较好的电能利用状况: $\cos\Phi \geq 0.65$, 热效率 $\eta \geq 0.90$;
- (5) 避开耐火材料侵蚀指数(R_E)峰值区。

常用的工程分析方法是根据已知的次级相间工作电压 $U(V)$ 、操作电抗 $X_{op}(\Omega)$ 和线路电阻 $r(\Omega)$, 设定 $\cos\Phi$ 值,然后求各项参数和指标。

邯钢 LF 的电压共有 11 个档位,每档电压下有 3 个电流档。未做优化以前,冶炼中一般将电压固定在第 3 档位上,电压为 302 V,电流也选择第 3 档,即最大电流档,工作电流在 3.6~3.9 MA 之间。从现场检测的数据看,功率因子很低,约为 0.6,所以电能的利用率较低,工作点不是在最合适的位置上。

表 1 LF 的主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of LF

项目	参数
额定炉容量/t	120
变压器/MW	20
额定容量时的钢包净空高度/mm	300~500
电极直径/mm	450
电极圆/mm	700
钢包直径/mm	3 610
升温速度/(°C·min ⁻¹)	4

LF 的主要技术参数见表 1。

1.2 LF 电气特性分析模型

本研究利用计算机建模方法和数据库技术,建立了电气特性曲线分析的优化模型,只需在软件界面上输入需要研究的 LF 或电弧炉的设备工艺参数,可自动进行寻优,绘出各档位的电气特性曲线图,找出最佳工作点,并制定最佳的供电制度。

2 LF 电气特性曲线分析模型

2.1 模型算法

将 LF 的主电路图简化为三相电原理图。假设 LF 三相等值电路的三相为对称负载时,即三相电压、电流及电弧电阻相等,可以用单相等值电路来表示三相等值电路。由单相等值电路,根据交流电路

定律可以作出阻抗、电压和功率三角形。寻优变量为不同冶炼时期的电压档位 (U^*) 和不同电压档位下的最优电极工作电流 (I^*)。

I^* 的约束条件为: (1) 电弧保证稳定燃烧: 功率因子 $\cos\Phi \leq 0.84$, 最佳范围: $0.7 \leq \cos\Phi \leq 0.84$; (2) 表观功率不超过变压器许用功率容量: $S \leq S_F$, 工作电流不超过变压器许用电流: $I \leq I_n$; (3) 保证炉子的热效率和升温速度最快, 尽可能高的电弧功率 ($Parc^*$); (4) 较好的电能利用状况, 热效率 (η) 尽可能高; (5) 电弧弧长不超过泡沫渣的高度。

开发本模型使用的主要编程软件为 Inprise 公司(原 Borland 公司)的 C++ builder, C++ builder 使用集成开发环境(IDE), 在编写用户界面时, 可方便地使用通用的可视化组件库(VCL)对象; 此外, 它还具有强大的数据库开发功能, 允许访问各种类型的数据库^[1]。

2.2 LF 电气特性曲线分析

模型建立后, 输入相应的 LF 设备参数和电压档位, 可进行电气特性曲线分析和最优工作点的选择。以邯钢 LF 第 1 档位为例, 分析 LF 的电气特性曲线与最优工作点, 图 1(a) 为模型计算的第 1 档位下(即 320 V)的电气特性曲线。图 1(a) 中 η 越高越有利, 要求 $\cos\Phi$ 在 0.77 ~ 0.86 之间, 保证电弧稳定燃烧和电能利用, S 为表观功率, 超过 20 MW 后, 变压器要过载运行, P 为有功功率, Q 为无功功率, $Parc$ 为电弧功率, 该值越大, 加热效率越好, $Larc$ 为电弧弧长, 要求不大于炉渣厚度, 最好炉渣厚度是电弧长度的 2 倍以上。 I^* 为最佳工作点的电流。

从图 1(a) 中可见, 随着电流值的增加, 电弧功

率先升后降, 不同工作点对应的电弧功率差异很大, 而要保证最大的加热速度, 需要选择最大的电弧功率点。但电弧功率并不随电流增加而增加, 超过最大值后, 电流进一步加大, 表观功率即变压器输入功率增加了, 但电弧功率反而减小, 炉子热效率反而下降。从图 1(a) 中可以看出, 最佳的工作电流在 I^* 的位置, 电流值在 35.8 kA 左右。

3 LF 供电曲线优化的结果与应用

3.1 LF 不同档位下的最佳工作点

通过模型的计算和寻优, 不同电压档位下的最佳优化电流 I^* 为最快加热速度电流, 各档位下最快加热速度工作点的技术参数见表 2。

从表 2 可见, 邯钢 LF 不同档位下的最快升温速度在 1.45 ~ 5.14 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之间, 档位越高, 最快升温速度越大。在最高电压 320 V 下以最快加热速度 (5.14 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) 工作时, 变压器载荷为 19 MW, 小于变压器的额定容量 20 MW。

3.2 炉渣厚度与电压档位选择

研究表明, 当渣厚与弧长相等时, 电弧表现为明弧燃烧; 当渣厚为弧长的 1.5 ~ 1.7 倍时, 电弧表现为侵入式燃烧; 当渣厚超过弧长 2 倍以上时, 电弧才表现为埋弧燃烧, 才能实现电能的有效利用。

精炼前期, 考虑到炉渣的熔化过程, 炉渣厚度不断增加, 冶炼前期选择的电压应选择稍低的电压, 使电弧长度尽量小于炉渣厚度; 冶炼中期, 对于泡沫化程度较好的炉次, 可不考虑炉渣厚度, 采用高档位电压, 以长弧供电为主, 以获得最大的升温速度; 冶炼后期, 炉渣泡沫化减弱, 钢液温度接近控制目标时,

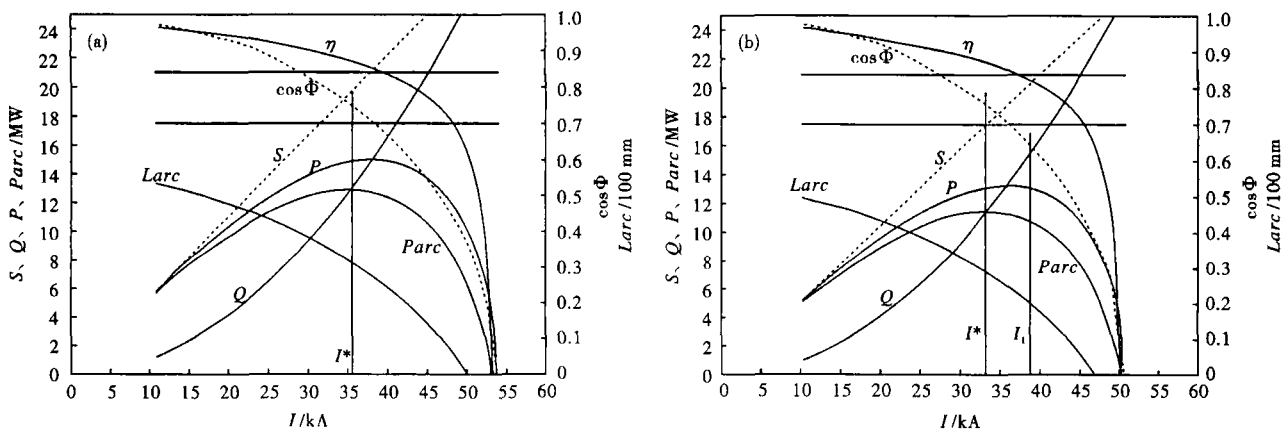


图 1 邯钢 120 t LF 320 V 下的电气特性曲线和最优工作点 (a); 302 V 供电时优化前后的工作点比较 (b); S - 表观功率; P - 有功功率; Q - 无功功率; $Parc$ - 电弧功率; $Larc$ - 弧长; $\cos\Phi$ - 功率因子; η - 热效率

Fig. 1 Electric characteristics and optimum work point with 320V for a 120 t LF at Handan Steel; S - apparent power; P - active power; Q - wattless power; $Parc$ - arc power; $Larc$ - length of arc; $\cos\Phi$ - power factor; η - heat efficiency

表2 各档位下的120 t LF 最快加热速度工作点技术参数

Table 2 Technical parameters at each work point for maximum heating up speed for a 120 t LF with different voltage level

电压档位/ V	最佳升温 电流/kA	Parc/ MW	Q/ MW	S/ MW	cosΦ	η	Larc/ mm	升温速度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)
320	35.8	12.856	12.128	19.009	0.77	0.877	82.8	5.14
311	33.3	12.143	11.456	17.955	0.77	0.877	79.3	4.85
302	32.3	11.450	10.802	16.931	0.77	0.877	75.8	4.58
294	31.5	10.851	10.238	16.045	0.77	0.877	72.3	4.34
278	29.8	9.702	9.154	14.346	0.77	0.877	66.4	3.88
264	28.3	8.750	8.255	12.938	0.77	0.877	60.9	3.50
251	26.9	7.909	7.462	11.695	0.77	0.877	55.9	3.16
229	24.5	6.583	6.211	9.735	0.77	0.877	47.3	2.63
207	22.1	5.379	5.075	7.954	0.77	0.877	38.7	2.15
188	20.1	4.437	4.186	6.561	0.77	0.877	31.0	1.77
170	18.2	3.628	3.423	5.364	0.77	0.877	24.3	1.45

以炉渣厚度和最佳输入功率为约束条件,宜采用较低的电压。

实际操作时,由于转炉下渣情况不一样,导致进LF站时钢包的渣厚差别很大,从30~150 mm不等。根据计算,在电压为320 V时,电弧长度为82.8 mm;电压为311 V时,电弧长度为79.3 mm;电压为302 V时,电弧长度为75.8 mm。因此,冶炼前期在炉渣熔化前,如果采用前3个档位工作,至少要求渣厚在160 mm以上,才有较高的电能利用率。

3.3 电弧功率与最佳工作点电流

在一个电压档位下,通常可以选择多个工作点电流,需要对各工作点进行比较寻优,确认不同电压档位的最佳电流值。在需要最快升温速度时,选择工作电流时要使电弧功率最大。图1(b)为邯钢LF第3电压档位下优化前后的电流选择值,其中 I_1 为优化前的电流工作点, I^* 为优化后的电流工作点。从图1(b)中可见,优化前的电流工作点 I_1 较大,虽然变压器的输入功率很大,但无功功率增加的幅度超过电弧功率,实际上电弧功率已经超过了最大值,电能的利用率已经很低了。优化后,电流值减小,变压器输入功率减小了,电耗减小,但电弧功率增加,加热效果反而提高了0.57 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

冶炼中期需要确定的工作点为加热速度最快工作点。从电气特性曲线图1(b)上可以看出,正常情况下,每档电压下,在满足电弧稳定燃烧和表观功率不超过许用功率的前提下,电弧功率均有一最大值;如果此时渣厚满足弧长要求,电弧热量基本被吸收,该位置处的工作电流为该电压档位下的最快加热速度电流。工艺参数优化前,在第3档位电压下,实际工作点的升温速度为4.01 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,而该档位下最佳工作点的升温速度为4.58 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$;如果采用第1档位,最快加热速度可达5.14 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。因此,最佳的

选择方法应根据渣厚和炉渣的发泡性能选择电压档位,在该电压档位下选择最快的升温电流。

3.4 变压器容量与电压档位选择

邯钢LF的变压器容量为20 MW,原工艺在需要最快加热速度时主要采用第3档位电压302 V供电。从电气曲线图1(b)可以看出,在该工作档位下,采用原工作点电流取 I_1 时,表观功率为19.8 MW,已经接近变压器的最高容量,加热速度为4.01 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$;采用优化电流 I^* 时,表观功率下降到16.9 MW,电耗减少了,加热速度则提高到4.58 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。如果采用第1档位320 V供电,从电气特性曲线图1(a)可以看出,采用优化后的最快工作电流时,表观功率为19 MW,没有超过变压器的允许容量,加热速度可达到5.14 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

4 结论

利用寻优模型绘制电气特性曲线进行工作点选择和供电制度的制定,可快速分析LF的电气特性参数和优化供电曲线;邯钢LF不同档位下的最快升温速度在1.45~5.14 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 之间;档位为320 V时,升温速度最大,且该工作点的表观功率在变压器允许范围内;通过合理工作点的优化,在第3档位电压(302 V)下,可将升温速度从4.01 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 提高到4.58 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

参考文献

- 1 陈周造,陈灿煌.精通C++ builder 5 程序设计高级教程.北京:中国青年出版社,2001

胡志刚(1971-),男,博士后,高级工程师,1995年武汉科技大学毕业,炼钢连铸工艺、计算机模型及控制技术研究。

收稿日期:2007-04-29