

## 60 t LF 节能工艺优化研究及应用

胡志刚<sup>1</sup>, 朱海亚<sup>2</sup>, 刘利香<sup>1</sup>, 石磊<sup>2</sup>, 刘浏<sup>1</sup>, 张贺<sup>2</sup>

(1 江苏冶金技术研究院产品所人工智能室, 苏州 215600;

2 江苏永钢集团炼钢总厂, 苏州 215600)

**摘要:** 通过调研炼钢车间 60 t LF 的变压器参数, 结合选取的 GCr15 试验钢 LF 工艺特点要求, 开发软件并计算其电气功率特性曲线, 提出了两种适合该 LF 的最快升温速度且较省电和最经济电耗且速度较快的供电方案, 第 1 种供电方案, 第一阶段化渣及升温期采用 4 档(220 V)电压、18~20 kA 相电流, 第二阶段升温期采用 3 档(240 V)电压、20 kA 相电流, 适用于生产节奏较快且较省电的 LF 炉次供电; 第 2 种供电方案, 第一阶段化渣及升温期采用 5 档(203 V)电压、17~19 kA 相电流供电制度, 第二阶段升温采用 4 档(220 V)电压、18 kA 相电流的供电制度, 第三阶段保温期与第一种供电方案相同, 可适用于大部分生产节奏不太紧张的炉次。与试验前主要能耗指标相比, GCr15 试验钢 LF 工序的吨钢电耗、单位重量钢水温升电耗分别降低 8.51%、7.29%, 升温速度提高 8.14%。

**关键词:** 60 t LF; 供电制度; 电气特性曲线; 电耗; 升温速度

## Research and Application of 60 t LF Energy Saving Process Optimization

Hu Zhigang<sup>1</sup>, Zhu Haiya<sup>2</sup>, Liu Lixiang<sup>1</sup>,

Shi Lei<sup>2</sup>, Liu Liu<sup>1</sup>, Zhang He<sup>2</sup>

(1 AI Laboratory, Jiangsu Metallurgical Technology Research Institution, Suzhou 215600;

2 Steelmaking Factory, Jiangsu Yonggang Group, Suzhou 215600)

**Abstract:** By investigating the transformer parameters of 60 t LF in a steelmaking workshop and combining with the selected test GCr15 steel LF process characteristics, the software is developed and its electrical power characteristic curve is calculated, two power supply schemes that are suitable for the LF with the fastest heating speed and relatively power saving and the most economical power consumption are proposed. The first power supply scheme, at slagging and heating phase in the first stage the 4 stages (220 V) voltage and 18-20 kA phase current are adopted, and at heating phase in the second stage the 3 stages (240 V) voltage and 20 kA phase current are adopted, which is suitable for LF secondary power supply with fast production rhythm and relatively power saving. In the second power supply scheme, the 5-grade (203 V) voltage and 17-19 kA current power supply system are adopted in the first stage of slag melting and heating up; in the second stage of heating up, the 4-grade (220 V) voltage with 18 kA current is adopted; in the third stage, the heat preservation period is the same as the first power supply scheme, it can be applied to most of the production rhythm not too tight heats. Compared with the index before the test of the power consumption per ton of GCr15 steel and energy consumption per unit weight of molten steel temperature rise, the main energy consumption are reduced by 8.51% and 7.29% respectively, and the heating rate is increased by 8.14%.

**Key Words:** 60 t LF; Power Supply System; Electrical Characteristic Curve; Power Consumption; Rate of Heating

大多数品种钢在 LF 精炼时间长、合金用量大, 精炼工序中电耗占炼钢成本的比重比较大, 因而 LF 供电制度是精炼降低能耗环节的重要组成部分。

调研国内 LF 应用现状, 很多厂家的 LF 变压器电气参数长期处于低效率高电耗的工作点位上, 缺乏结合精炼工艺和电气设备参数深入研究所选工作点的合理性。科学研究 LF 变压器的电气功率特性曲线, 优化现有 LF 供电制度已经成为炼钢节能增

效的重要环节。

### 1 LF 变压器工作原理

LF 变压器选型设计时, 其二次侧电压的选择范围要特别谨慎, 必须结合品种钢工艺要求进行综合考虑。其原则是: 精炼渣能将电弧遮蔽, 且尽量避免电极使钢水增碳<sup>[1]</sup>。变压器供电参数和工作电流决定着 LF 炉的电气运行状况, 其最佳工作点也是变压器各主要变量参数、许用范围、精炼工艺等指标

的最优化问题。表观功率  $S$ 、电弧功率  $P_{arc}$ 、无功功率  $Q$  及有功功率  $P$  的工程经验式分别见式(1)~(4)<sup>[2]</sup>。

$$\text{表观功率 } S = \sqrt{3}IU_2 \text{ (三相)} \quad (1)$$

$$\text{电弧功率 } P_{arc} = 3IU_{arc} \text{ (三相)} \quad (2)$$

$$\text{无功功率 } Q = 3I^2x \text{ (三相)} \quad (3)$$

$$\text{有功功率 } P = \sqrt{S^2 - Q^2} \text{ (三相)} \quad (4)$$

式中: $x$ -单相等值电路电抗, $x = x_{变} + x_{网} + x_{抗}$ ;  $I$ -电弧电流,  $I = I_2$  (二次侧电流);  $U_{arc}$ -电弧电压,  $U_2$ -二次侧电压。

从式(1)和式(2)可以看出,输入到 LF 内的电弧功率与电弧变压器所承受的表观功率相差甚远。仅仅选择 LF 变压器的容量并不能唯一地确定炉子的实际功率输入。从式(2)、式(3)可以看出,电弧功率与电流成正比,但无功功率与电流的平方成正比,说明并不是电流越大越好。式(4)表明,有功功率并不等同于电弧功率,而与表观功率和无功功率存在一定关系,表观功率越大,电耗越高;而无功功率主要消耗在变压器和短网等区域。

电气功率特性曲线图可以衡量电弧炉各运行参数之间的关系,系指在无限容量电网的理想情况下,对给定的次级相电压、线路电阻和电抗所得到的各项功率及重要的运行参数随电极电流变化的曲线图<sup>[3]</sup>。由该曲线图可以看出电弧炉运行状态的特殊工作点,如有功功率  $P$  最大时,变压器初级有功功率和无功功率相等,功率因子  $\cos\varphi = 0.707$ ; 电弧功率最大时,该工作点的功率因子  $\cos\varphi > 0.707$ 。

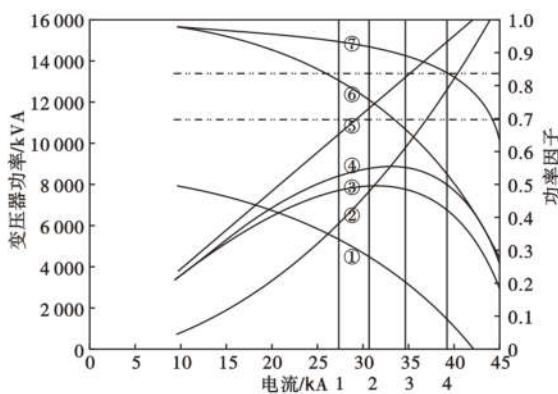


图1 第4档电压的电气功率特性曲线图:①电弧长度;②无功功率;③电弧功率  $P_{arc}$ ;④有功功率  $P$ ;⑤表观功率;⑥功率因子;⑦热效率

Fig. 1 Electrical power characteristic curve at fourth order voltage:① arc length; ② reactive power; ③ arc power  $P_{arc}$ ; ④ active power; ⑤ apparent power; ⑥ power factor; ⑦ heat efficiency

## 2 试验 LF 电气功率特性曲线分析

### 2.1 试验用 LF 主要参数及供电工艺分析

采用炼钢车间的 60 t 双工位 LF 设备,其变压器功率为 10 000 kVA,设有 9 个电压档位和 9 个电流档位,原供电制度常用 3 档(240 V)、4 档(220 V)、5 档(203 V)电压,现场供电调整的基准为:在电弧连续保证的前提下,顺序调高电压;炉渣发泡性能未达到预期目标、发生埋弧不良的断弧现象时,顺序降低电压等级调整。这种供电工艺主要由操作人员根据现场实际情况把控,工艺执行随意性较大,实际工艺执行时不能有效选择电弧变压器的合理工作点,导致实际能耗也差别较大。

根据现场供电电压和电流点位实际执行情况,以 4 档(220 V)电压为例计算并对比电气功率特性曲线下的能耗及加热结果。

### 2.2 第 4 档(220 V)电压下电气特性曲线

炼钢车间生产时选择的主要升温档位是第 4 档电压(220 V),分别采用过 16、18、20、22 kA (相电流)等几个电流档的位置。根据三相电路中电流的分布规律,线电流等于相电流的  $\sqrt{3}$  倍,线电流值大约分别对应 28、31、35、38 kA。利用电弧炉主要运行参数之间的经验公式自编软件,计算出 4 档(220 V)电压下的电气功率特性曲线,分别对应图 1 工作点位置为 1、2、3、4 的位置。

从图 1 电气功率特性曲线中可以看出:电压一定的情况下,在电流较小的时候,电弧功率  $P_{arc}$  随电流的增长较快,而无功功率  $Q$  随电流增长较缓;当电流增大到较大值后,情况会发生改变,电弧功率  $P_{arc}$  随电流的增长增速变缓,甚至开始急速降低,而无功功率  $Q$  随电流增长则会加速增长。当电弧功率  $P_{arc}$  等于无功功率  $Q$  时,功率因子  $\cos\varphi$  在 0.70 ~ 0.75 合理区间。在电气功率特性曲线上,此点所对应的电流叫做最佳“经济电流”<sup>[4]</sup>,用  $I^*$  表示。

当工作电流  $< I^*$  时,由于电弧功率较小,渣料熔化和钢水升温速度较慢;当工作电流  $> I^*$  时,电弧功率不会继续增长甚至会急速下降,而无功功率则会急速增长,从而会消耗大量的电能而对生产无益<sup>[5]</sup>。而在  $I^*$  附近,功率因子  $\cos\varphi$  和电能利用系数  $\eta_e$  也比较合适。因此在 LF 精炼过程中,需要将电流大小调至最接近经济电流为宜。

从图 1 中可以看出,采用工作点 2 (相电流 18 kA) 时电弧功率和有用功率最高、功率因子合适,加热速度和热效率最高。

表 1 第 4 档 (220 V) 电压下四个电流工作点参数对比  
Table 1 Parameter comparison between four current operating points at fourth order voltage (220 V)

相电流/kA	线电流值/kA	电弧弧长/mm	电弧功率/kVA	电耗/kWh	功率因子	理论加热速度/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ )
22	38	120	7 100	13 000	0.55	3.1
20	35	130	7 900	12 000	0.68	3.5
18	31	150	8 100	9 600	0.72	3.7
16	28	180	7 840	8 500	0.75	3.3

表 2 21B22 炉次 4 档电压不同电流下的单位时间电耗指标对比

Table 2 Comparison between power consumption index per unit time with different current at fourth order voltage, of 21B22 heat

相电流/kA	通电时间/min	电耗/kWh	单位时间电耗/( $\text{kWh} \cdot \text{min}^{-1}$ )
22	11.8	1 290.1	109.33
18	3.97	385.03	96.98
18	3.7	359.47	97.15
13	1.85	119.45	64.57

表 3 21B23 炉次四个电流工作点的实际加热效果

Table 3 Actual heating effect of four current working points, of 21B22 heat

电压档位	相电流值/kA	通电时间/min	单位时间电耗/( $\text{kWh} \cdot \text{min}^{-1}$ )	温差/ $^{\circ}\text{C}$	升温速度/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ )
5	10	11.8	109.33	41	3.47
4	22				
4	18	3.97	96.98	15	3.78
4	18	3.7	97.15	12	3.24

### 2.3 第 4 档电压 (220V) 下主要工作点指标分析

在图 1 电气功率特性曲线中分别找到对应 4 档电压 (220 V) 下的 16、18、20、22kA (相电流) 等几个电流档的位置工作点, 其理论计算的工艺参数见表 1。可以看出, 热效率和加热速度最快的工作点为 18 kA (相电流), 电耗也相对较低。

选取 GCr15 轴承钢 21B22 炉次全程采用 4 档电压 (220 V) 的数据分析其工作点在实际生产中的情况, 表 2 列出了此炉四个工作点的单位时间电耗指标, 可以看出, 在 LF 升温期间, 相电流 18 kA 工作点的单位时间电耗比 22 kA 要低, 与电气功率特性曲线结果对比一致。

表 3 是选取 21B23 炉次的实际加热效果, 可以看出与理论计算数据基本相当, 4 档电压下相电流为 18 kA 时的升温速度比 22 kA 要快、单位时间电耗最低。在埋弧保证的条件下, 应该尽量优先使用该工作点。

### 2.4 LF 供电制度优化原则

LF 电弧供电过程中, 电弧长度与电弧电压成正比, 见经验公式 (5):

$$L_{\text{arc}} = U_{\text{arc}} - 40 \sim 44^{[2]} \quad (5)$$

式中:  $L_{\text{arc}}$  电弧长度, mm;  $U_{\text{arc}}$  电弧电压值, V (此处只取用电压数值)。

电压的确定应以炉渣的厚度为重点考虑对象, 一般以炉渣厚度大于电弧长度为最佳。在某一电压下, 电弧长度随电流的增加而减少, 电流越低则弧长越长。精炼过程中, 化渣期渣层较薄不易埋弧, 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降低电耗<sup>[6]</sup>; 最后保温期不需要升温, 可采用相对低电压长弧供电<sup>[7]</sup>。

根据主要电压档位下 LF 电气功率特性曲线结果, 分别提出了两种适合该 LF 的最快升温速度且较省电和最经济电耗且速度较快的供电方案<sup>[8]</sup>, 第 1 种升温速度最快且较省电的方案, 第一阶段化渣及升温期采用 4 档 (220 V) 中高电压、较高的相电流 18 ~ 20 kA 供电, 第二阶段升温采用 3 档 (240 V) 高电压、较高的相电流 20 kA, 第三阶段保温期采用 5 档 (203 V) 中档电压、较低的相电流 16 kA 的供电制度, 可以适用于生产节奏较快的品种 LF 周期供电; 第 2 种电耗较低且升温速度较快的供电方案, 第一阶段化渣及升温期采用 5 档 (203 V) 中档电压、中高档相电流 17 ~ 19 kA 供电, 第二阶段升温采用 4 档 (220 V) 中高电压、中高档相电流 18 kA 的供电制度, 第三阶段保温期与第一种供电工艺相同, 可适用于大部分生产节奏不太紧张的炉次, 可很好地实现节能降耗的目标。调整后的 LF 供电制度, 由现场操作人员根据生产紧张程度自行选择。

## 3 试验钢种及主要能耗指标对比分析

选取轴承钢 GCr15 的 LF 精炼进行供电制度优化试验。该钢种在 LF 过程中需要加入大量的合金, 精炼前后升温较高, 过程热能需求较多, 生产周期相对长。分析对比不同供电工艺下电耗和加热速度等指标变化趋势。

### 3.1 主要能耗指标对比

钢水精炼过程中, 考虑连浇顺序及生产安排等因素影响, 部分炉次会存在实际通电时间较长、过程升温远高于整个 LF 通电前后的温差, 仅用吨钢能耗这个指标并不能全面衡量 LF 的实际能效指标。

本次试验引入了单位时间电耗、单位重量钢水温升电耗和吨钢电耗等多个能耗指标概念,更真实地表述 LF 供电制度优化前后单位能耗指标的变化。此处的单位重量钢水温升电耗指每吨钢水在整个精炼过程中、钢水从座包开始通电到通电结束转包期间每升温 1 °C 所需要的电耗。

3 个月累计试验 GCr15 钢种 346 炉,表 4 为统计分析试验炉次的单位重量钢水温升电耗和吨钢电耗指标,与试验前同钢种 360 炉原始数据同类型指标相比,平均吨钢电耗降低 8.51%,平均单位重量钢水温升电耗降低 7.29%。

### 3.2 加热速度对比

表 4 LF 试验前后平均吨钢电耗和平均单位重量钢水温升电耗降低比例

Table 4 Power consumption reduction ratio of average ton steel and average unit weight before and after LF test

供电工艺	炉数	温差/°C	吨钢电耗/ (kWh · t <sup>-1</sup> )	吨钢电耗降低 比例/%	单位重量钢水温升电 耗/(kWh · t <sup>-1</sup> · °C <sup>-1</sup> )	单位重量钢水温升电 耗降低比例/%
原始工艺	360	96	77.8		0.809	
试验工艺	346	95	71.18	8.51	0.750	7.29

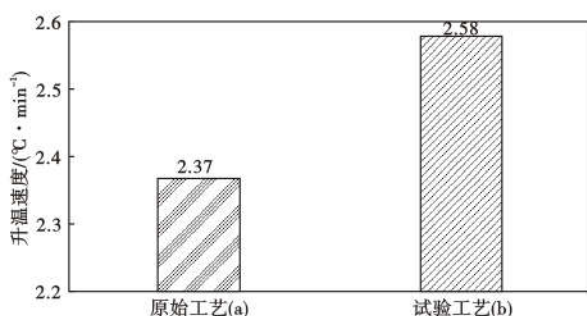


图 2 LF 供电制度优化前(a)后(b)升温速度对比图

Fig. 2 Comparison between heating rate before (a) and after (b) LF power supply system optimization

对比分析 LF 试验供电工艺和原供电工艺加热速度数据发现,钢水采用优化后的供电方案进行精炼,LF 平均升温速度提高了 8.14%,具体平均升温速度结果见图 2。可以看出:供电试验炉次平均升温速度高于原始供电工艺生产炉次平均值,在精炼实现节能的前提下,还可以很好地满足炼钢提高生产效率的目的。

## 4 结论

(1)通过对炼钢车间 LF 变压器设备和工艺等特性参数的调研,详尽地计算出了 LF 主要电压档位的电气功率特性曲线,可以科学指导设定钢水 LF 供电制度。

(2)提出了两种适合该 LF 的最快升温速度且较省电和最经济电耗且速度较快的供电方案,第一种升温速度最快且较省电的方案,第一阶段化渣及升温期采用 4 档(220 V)中高电压、较高的相电流 18 ~ 20 kA 供电,第二阶段升温采用 3 档(240 V)高电压、较高的相电流 20 kA,第三阶段保温期采用 5 档(203 V)中档电压、较低的相电流 16 kA 的供电制度,可以适用于生产节奏较快的 LF 炉次供电;第二种电耗较低且升温速度较快的供电方案,第一阶段化渣及升温期采用 5 档(203 V)中档电压、中高档相电流 17 ~ 19 kA 供电,第二阶段升温采用 4 档(220 V)中高电压、中高档相电流 18 kA 的供电制度,第三阶段保温期与第一种供电工艺相同,整体可适用于大部分生产节奏不太紧张的炉次,可很好地实现节能降耗的目标。调整后的 LF 供电制度,由现场操作人员根据生产紧张程度自行选择。经过在精炼炉 3 个月的现场批量试验,实现了吨钢电耗及单位重量钢水温升电耗分别降低 8.51%、7.29%,同时升温速度提高了 8.14%,在科学安排生产调度的前提下可以提高生产效率。

本项供电制度优化工艺,已经在该公司所有 LF 炉进行了全面推广,并取得可观的经济效益。

### 参考文献

- [1] 阎立懿,肖玉光,李延智,等. LF 炉变压器容量及技术参数的确定[J]. 冶金设备,2006,157(3):55-58.
- [2] 李士琦. 现代电弧炉炼钢[M]. 北京:原子能出版社,1995:181-198.
- [3] 庞永刚,吴龙,韩建军等. 150 t 20 MVA LF 钢包炉的供电研究[J]. 工业加热,2012,41(1):6-8.
- [4] 阎立懿,刘喜海,萧玉光,等. 现代炼钢电炉电气特性与供电制度的设计[J]. 冶金设备,2006,160(6):25-26.
- [5] 范佳,徐学良,郝强,等. 邯钢三炼钢厂 LF 精炼炉电热特性及供电制度的研究[C]. 北京:中国金属学会 2011 年北京第八届中国钢铁年会.
- [6] 王义芳,胡志刚,赵英利,等. 150t LF 工艺操作与供电制度优化[J]. 特殊钢,2013,34(1):37-40.
- [7] 阎立懿. LF 炉电热特性及供电制度[J]. 工业加热,2003,32(1):29-33.
- [8] 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.