

· 工艺技术 ·

60 t 电弧炉高效化生产的研究

李士琦¹ 张标¹ 钱刚^{1,2} 刘润藻¹ 王玉刚¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 大冶特殊钢股份有限公司,黄石 435001)

摘要 通过优化炉料结构-采用铁水热装技术;集束氧枪技术强化供氧;疏通物流-强化二次精炼和增加连铸生产能力,使1台60 t AC炉和1台60 t DC炉的年生产率由改造前25.45万t增至87.34万t,冶炼周期由107 min/炉降至71 min/炉,电耗由547 kWh/t降至213 kWh/t,变压器利用系数由3 142 t/(MVA·a)增至10 783 t/(MVA·a)。探索出适合大冶特钢实际生产的冶炼工艺,取得了良好的经济技术效果。

关键词 60 t 电弧炉 高效化 热装铁水 强化供氧

A Study on High Efficient Steelmaking of 60 t EAFs

Li Shiqi¹, Zhang Biao¹, Qian Gang^{1,2}, Liu Runzao¹ and Wang Yugang¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Daye Special Steel Corp Ltd, Huangshi 435001)

Abstract With optimizing charging structure- using hot metal charging technology; intensifying oxygen supply by coherent oxygen lance technique; material flow sheet revamping by intensifying secondary refining and increasing concasting production capability, the annual steel output of a 60 t AC furnace and a 60 t DC furnace increased from before revamping 254 500 t to 873 400 t, tap-to-tap time decreased from 107 min to 71 min, electric power consumption decreased from 547 kWh/t to 213 kWh/t, coefficient of utilization of transformer increased from 3 142 t/(MVA·a) to 10 783 t/(MVA·a) to get a available steelmaking process at Daye Special Steel and obtain better economic and technology effect.

Material Index 60 t EAF, High Efficient, Hot Metal Charging, Intensifying Oxygen Supply

传统的电弧炉炼钢使用冷炉料,废钢和冷生铁配比约为85:15,冶炼过程所需能量主要来自于电弧,采用三期操作工艺,冶炼周期约为4 h^[1]。20世纪60年代以来以超高功率、二次精炼在线应用为代表的各项技术的成功应用,将生产效率很低的还原期操作移至后步的二次精炼工序,使电弧炉主要成为炼钢工序中冷炉料“熔化”的初炼炉,加速了电弧炉炼钢高效化的进程,电弧炉炼钢的生产速率大幅度提高,至20世纪90年代电弧炉炼钢的冶炼周期缩短至1 h以内,单位炉容的利用系数达到7 000~10 000 t/(t·a)^[2,3],优化了与后步连铸的匹配。

1 主要设备参数及高效化工艺的提出

大冶特钢四炼钢厂现有装备为:1台60 t AC EBT EF(28 MVA)、1台60 t DC EBT EF(56 MVA)、2台LF、1台VD、1台RH和2台连铸机。AC电弧炉的主要技术参数见表1。

多年来,四炼钢厂平均年产钢25万t,平均冶炼周期(出钢-出钢)为107 min,电弧炉冶炼电耗为547 kWh/t。与国内外先进水平相比,差距较大,尤其是电弧炉单位炉容量的年利用系数仅为2 121 t/(t·a),不足世界先进水平7 000 t/(t·a)的1/3;

表1 60 t AC EBT 电弧炉的技术参数
Table 1 Main Technical parameters of EAF

项目	改造前	改造后
熔炼周期/min	107	69
日平均炉数	9	17
平均容量/t	60	60
废钢/%	77.3	42.9
热铁水/%	0	52.6
冷生铁/%	22.7	4.5
变压器容量/MVA	25	25
电极直径/mm	500	500
电耗/(kWh·t ⁻¹)	552	183
电极消耗/(kg·t ⁻¹)	4.8	1.8
氧耗/(m ³ ·t ⁻¹)	33	67

变压器年利用系数仅为3 142 t/(MVA·a),也不足世界先进水平的1/3。因此,需努力提高四炼钢厂电弧炉炼钢的生产速率。

2 高效化工艺

2.1 优化炉料结构

传统的电弧炉炼钢使用废钢和冷生铁,配加冷生铁的目的是保证熔化过程中有一定的碳,其碳氧反应生成的CO₂气泡搅拌熔池,有利于传热升温、去气、去除杂质、促进冶金反应的进行。

从能量来看,如取冷废钢和冷生铁的比例为

85:15,通过物料和能量平衡,计算出理论上冶炼每吨钢水缺能 $385 \text{ kWh/t}^{[4]}$,约占电弧炉炼钢过程所需总能量的60%^[5]。若考虑由电网补充能量,按出钢量 $G = 70 \text{ t}$ 、冶炼周期 $\tau = 1 \text{ h}$,其中通电时间 $t = 45 \text{ min}$ 、热效率 $\eta = 0.8$ 、电效率 $\eta_e = 0.9$ 、 $\cos\varphi = 0.84$,则变压器功率应为:

$$S_F = 385 \times G / (t/60 \times \eta_e \times \cos\varphi \times \eta) = 385 \times 70 / (45/60 \times 0.9 \times 0.84 \times 0.8) = 59.4 \text{ MVA} \quad (1)$$

从式(1)可见,每台电弧炉的变压器额定功率应达到60 MVA,即变压器功率级别应达到1000 kVA/t左右,才能使冶炼周期降至1 h左右。而实际上,交流电弧炉的变压器容量仅为28 MVA,2台电弧炉平均的变压器级别仅为700 kVA/t。可见,要想实现生产的高效化,就要求有大量的额外能量补充。补充能量的手段之一是使用氧燃烧嘴,但每支烧嘴的功率一般不超过3 MVA,其能量强度较小,热效率较低。而铁水有大量物理热和化学热,可以补充电弧炉冶炼所需要的能量。表2为配加热铁水比为0、10%、30%、60%四种情况下所需补充的电能值。从表2可见,铁水热装比为60%时所需补充电能仅为全废钢冶炼的44%。

表2 电弧炉配加铁水后需补充的电能

Table 2 Electric power supplying required in EAF with different charging ratio of hot metal

铁水热装比/%	补充电能/($\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$)
0	385
10	356
30	285
60	169

在理论分析的基础上,结合大冶特钢的实际生产状况,分别在交流电弧炉中配加40%~60%、直流电弧炉中配加20%~40%的热铁水。

容量为60 t的专用铁水包的热铁水,按配加量从炉顶一次性将铁水兑入电弧炉内,完成热装铁水操作。

2.2 强化供氧

在电弧炉炼钢的实际操作中,为控制熔池中的碳含量,满足造泡沫渣等工艺操作需要,在炉壁安装碳粉喷吹系统,冶炼过程中每吨炉料约喷入碳粉10 kg。通过物料平衡计算,可以求出不同炉料结构下的氧气消耗量。由图1可以看出,全废钢冶炼,且不

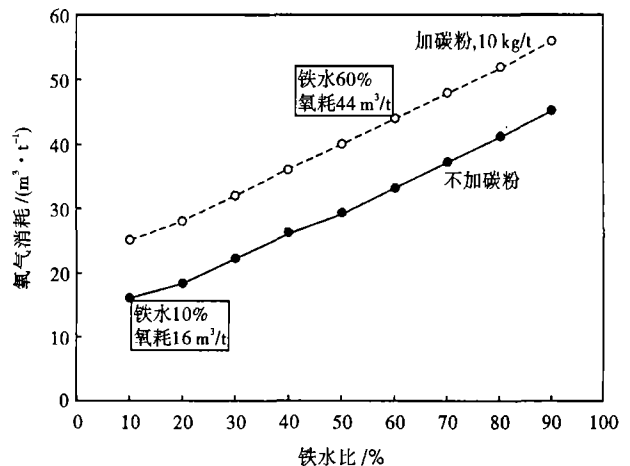


图1 电弧炉炼钢铁水比与氧气消耗量的关系

Fig. 1 Relation between ratio of hot metal and oxygen consumption for EAF steelmaking

喷吹碳粉条件下,理论上吨钢需氧量为 16 m^3 ;在既喷入碳粉又热装铁水的情况下,氧气需求量增加,当铁水热装比例为60%时,供氧量需达到 $44 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

若按冶炼过程的供氧时间45 min、出钢量70 t计算,则氧气流量的理论值 Q_{O_2} 为:

$$Q_{O_2} = 44 \times G / (T/60) = 44 \times 70 / (45/60) = 4107 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2)$$

在电弧炉炉壁上安装3支氧枪供氧,要达到 $4107 \text{ m}^3/\text{h}$ 的氧气流量,则每支氧枪的供氧流量按 $1500 \text{ m}^3/\text{h}$ 计量,最大供氧流量为 $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

电弧炉炼钢中使用传统的超音速氧枪气流喷射距离较短、冲击力较小、氧气利用率较低。与传统的超音速射流相比,集束氧气射流的喷射射流长度更长,能够穿透钢液,集束射流氧气的出口马赫数可以达到2.0左右,射流距离能够达到1.2~2.1 m,可直接安装在电弧炉炉壁,实现助熔脱碳等功能。图2是集束射流与传统超音速射流射入钢液时的示意图。大冶特钢使用集束氧枪后,显著提高了喷入氧气的利用效率。

2.3 疏通物流

电弧炉炼钢高效化使得整个炼钢车间的物流量大为增加,为此必须采用相应的疏通技术,使整个车间物流流通顺畅,甚至应使其他相应工位物流流通能力适当大于主冶炼工位的能力。

为疏通物流,主要采取了以下技术措施:

(1)增加运输热铁水的60 t铁水包系统,对2台电弧炉实行差异化配料方式。交流电弧炉采取适当提高铁水热装比例和减少装料次数的方法来提高

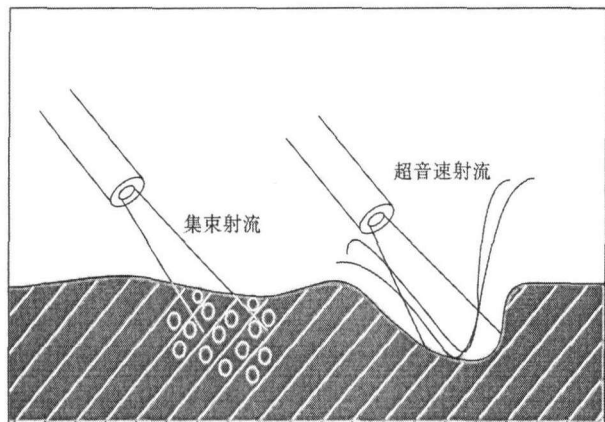


图 2 集束射流与传统超音速射流示意图

Fig. 2 Schematic of coherent jet and conventional supersonic jet

冶炼节奏,弥补其变压器容量偏低的不足,每炉钢的铁水兑入量交流电弧炉约 40 t,直流电弧炉约 25 t。

(2) 冶炼跨增加 1 台 120 t 天车,使热装铁水可分别从 2 座电弧炉的两端就近进入四炼钢厂房,避免 2 台电弧炉因为装料等待作业造成相互之间的干扰,减少非工艺停炉时间。

(3) 70 t LF 由 1 台增至 2 台。

(4) 增加 1 台 70 t RH 真空精炼炉。

(5) 增加 1 台 350 mm × 470 mm 大断面合金钢连铸机。同时优化原连铸机的铸坯断面结构,实施大断面技术改造,去掉原来的 Φ155 mm 断面,使炉机基本实现匹配。

(6) 实施电弧炉除尘系统改造。减少烟尘排放量,保护环境,降低电弧炉设备的热停工时间,为进一步扩大铁水热装比做准备。除尘系统改造后,设备故障率下降 1%、作业率提高 0.5%,烟尘排放量大幅降低,环境效益明显。

3 单元技术的集成及其效果

3 项单元操作——优化炉料结构、强化供氧、疏通炼钢车间物流,每项单元操作实际上还包含了一系列的技术内容和管理内容。四炼钢厂的高效化冶炼工艺为:

(1) 直流电弧炉采用二次装料。第 1 次装料后及时兑入铁水,装入的钢铁料大小配比为:小块料 20% ~ 30%,中型废钢 50% ~ 60%,重型废钢 10% ~ 20%,一次料配总重量的 60% ~ 70%,总高度不超过料斗高度的 3/4;二次料配总重量的 30% ~ 40%。而交流电弧炉中的废钢料保证能一次性装入,避免多次装料造成的时间损失。

(2) 分时供氧技术。使用集束供氧,氧气供应能力提高,需改进的问题是提高氧气利用率,其对策

是采用总量控制及分时段控制氧气流量的方法,即根据冶炼进程控制氧气供应量,将电弧炉炼钢过程中作用相同、能进行统一控制的吹氧(助熔)方式合并在一起,将供氧方式模块化,进行模块化控制。

各项单元操作技术经合理集成,取得了很好的高效化效果(表 3)。电弧炉冶炼周期由 107 min 缩短至 71 min,生产率提高了 3.43 倍,冶炼电耗降至 213 kWh/t,炉容量利用系数达到 7 278 t/(t·a),变压器利用系数超过了 10 000 t/(MVA·a)。

表 3 大冶特钢四炼钢厂电弧炉炼钢高效化效果

Table 3 High efficient steelmaking results of EAFs at No. 4 shop, Daye Steel

指标	改造前	改造后	高效化效果
年生产率/($10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)	25.45	87.34	增至 3.43 倍
冶炼周期/min	107	71	降至 66.4%
电弧炉冶炼电耗/($\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$)	547	213	降至 38.9%
炉容量利用系数/[$\text{t} \cdot (\text{t} \cdot \text{a})^{-1}$]	2 121	7 278	增至 3.43 倍
变压器利用系数/[$\text{t} \cdot (\text{MVA} \cdot \text{a})^{-1}$]	3 142	10 783	增至 3.43 倍

4 结论

(1) 在不适合更换电弧炉、变压器和电网增容的条件下,四炼钢厂电弧炉炼钢的高效化采用了 3 项单元操作技术,分别是优化炉料结构、使用热装铁水技术;强化供氧、使用集束氧枪技术;增加热铁水供应、强化二次精炼、连续铸钢等前后步工序的疏通炼钢车间物流流通技术。

(2) 通过各项单元操作技术合理集成,四炼钢厂电弧炉炼钢取得了良好的效果,生产率比高效化改造前提高了 3.43 倍,冶炼电耗降至 213 kWh/t,变压器利用系数超过 10 000 t/(MVA·a)。

参考文献

- 李士琦,张汉东,陈煜,等. 电弧炉炼钢流程的能量状况. 钢铁, 2006, 41(8): 24
- 李士琦,林纲,陈煜,等. 关于电炉炼钢能量问题的讨论. 中国电炉流程与工程技术文集, 2005: 51
- 殷瑞钰. 关于新世纪发展现代电炉流程工程的认识. 中国电炉流程与工程技术文集, 2005: 20
- 钱刚. 现代电弧炉炼钢高效节能研究[博士论文]. 北京科技大学, 2007
- Unal Camdali, Murat Tunc. Exergy Analysis and Efficiency in an Industrial AC Electric ARC Furnace. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(17): 2262

李士琦(1942-),男,教授,《特殊钢》编委,从事钢铁冶金研究。

收稿日期:2007-08-07