

120 t 转炉高供氧强度冶炼工艺开发

张 天 蒋鲤平 于 飞 刘宇龙

(中天钢铁集团有限公司第三炼钢厂,常州 213100)

摘 要 通过优化氧枪的喷头参数,120 t 转炉供氧强度由 $3.6 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ 提高到 $4.5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$,同时为了保证终点钢水成分满足生产要求,对转炉冶炼枪位和加料制度进行了优化。生产实践表明,采用新的氧枪喷头组织生产,转炉终点成分与原工艺相近,转炉吹氧时间可由 15.1 min 缩短到 12.8 min,冶炼周期相应缩短了 2.4 min,炉渣全铁含量可由 18.5% 降低到 17.5%,预计年产量可提高 12 万 t。

关键词 120 t 转炉 喷头 供氧强度 脱磷

Development of Smelting Process with High Oxygen Supply Intensity for 120 t Converter

Zhang Tian, Jiang Liping, Yu Fei and Liu Yulong

(No. 3 Steelmaking Plant, Zenith Steel Group Co Ltd, Changzhou 213100)

Abstract By optimizing the nozzle parameters of oxygen lance, the oxygen supply intensity of 120 t converter is increased from $3.6 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ to $4.5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$, and the oxygen lance blowing system and charging system of converter are optimized to ensure the end liquid composition satisfying the requirement of production. The production practice shows that the end-point composition of converter by using the new oxygen lance nozzle is similar to the original process, the oxygen blowing time of converter can be shortened from 15.1 min to 12.8 min, the tap-to-tap time can be shortened by 2.4 min, the total iron content in slag can be reduced from 18.5% to 17.5%, and the annual output can be increased by 120 000 tons.

Material Index 120 t Converter, Nozzle, Oxygen Supply Intensity, Dephosphorization

转炉出钢量不变的情况下,提高供氧强度可有效减少吹氧时间,缩短转炉冶炼周期,增加炼钢产量。经估算,120 t 转炉吹氧时间每缩短 1 min,每炉每年可增加产量约 5 万 t,经济效益明显。国内钢厂对缩短转炉吹氧时间进行了研究^[1-6],鞍山钢铁公司 100 t 转炉供氧强度提高 $0.48 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$,冶炼时间缩短 1~2 min;联鑫钢铁公司 100 t 转炉,供氧强度由 $3.8 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ 提高至 $4.55 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$,并配合高废钢冶炼,供氧时间可由原来的 12.8 min/炉降低至 9.5 min/炉;唐山钢铁公司 40 t 转炉供氧强度由 $3.9 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ 提高至 $4.65 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$,转炉吹氧时间缩短 2.1 min。提高转炉供氧强度,可缩短转炉吹氧时间,但会增加喷溅的风险,并且脱磷难度变大。针对此种情况,需优化氧枪参数和冶炼工艺。

1 现状分析

中天钢铁公司炼钢车间有 3 台 120 t 转炉,氧枪喷头参数为 5 孔,喉口直径 36.5 mm,出口直径 47.4 mm,工作压力 0.92 MPa,马赫数 2.03,流量 $28\,000 \text{ m}^3/\text{h}$,倾角 13° 。2020 年上半年转炉冶炼铁水成分及原辅料消耗情况如表 1 所示。转炉冶炼周期(TTT 时间)及吹氧时间分布情况如图 1(a)所示,转炉终点 C 含量和 P 含量分布情况如图 1(b)所示。由图 1(a)可知,现有工艺冶炼,转炉氧枪流量为 $28\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ [$3.6 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$],转炉冶炼周期分布在 26.2~51.2 min,均值为 33.4 min;转炉吹氧时间分布在 13.2~19.4 min,均值为 15.1 min。由图 1(b)可知,现有工艺转炉终点 C 含量在 0.02%~0.18%,均值为 0.068%;终点 P 含量在 0.003%~0.035%,均值为 0.013%。现有 $28\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 的供氧强度下,转炉吹氧时间为 15.1 min,通过提高供氧强度,可缩短吹氧时间,从而缩短冶炼周期。

h,倾角 13° 。2020 年上半年转炉冶炼铁水成分及原辅料消耗情况如表 1 所示。转炉冶炼周期(TTT 时间)及吹氧时间分布情况如图 1(a)所示,转炉终点 C 含量和 P 含量分布情况如图 1(b)所示。由图 1(a)可知,现有工艺冶炼,转炉氧枪流量为 $28\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ [$3.6 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$],转炉冶炼周期分布在 26.2~51.2 min,均值为 33.4 min;转炉吹氧时间分布在 13.2~19.4 min,均值为 15.1 min。由图 1(b)可知,现有工艺转炉终点 C 含量在 0.02%~0.18%,均值为 0.068%;终点 P 含量在 0.003%~0.035%,均值为 0.013%。现有 $28\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 的供氧强度下,转炉吹氧时间为 15.1 min,通过提高供氧强度,可缩短吹氧时间,从而缩短冶炼周期。

表 1 转炉冶炼铁水成分及原辅料消耗

Table 1 Composition of hot metal and consumption of raw and auxiliary materials of converter

项目	铁水/ t	废钢/ t	铁水成分/%		辅料消耗/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)		
			Si	P	轻烧白云石	石灰	生白云石
范围	108~ 120	25~ 40	0.1~ 1.2	0.09~ 0.15	10.0~ 15.8	21.0~ 45.0	0~ 13.9
均值	113	32	0.45	0.12	12.8	29.2	6.8

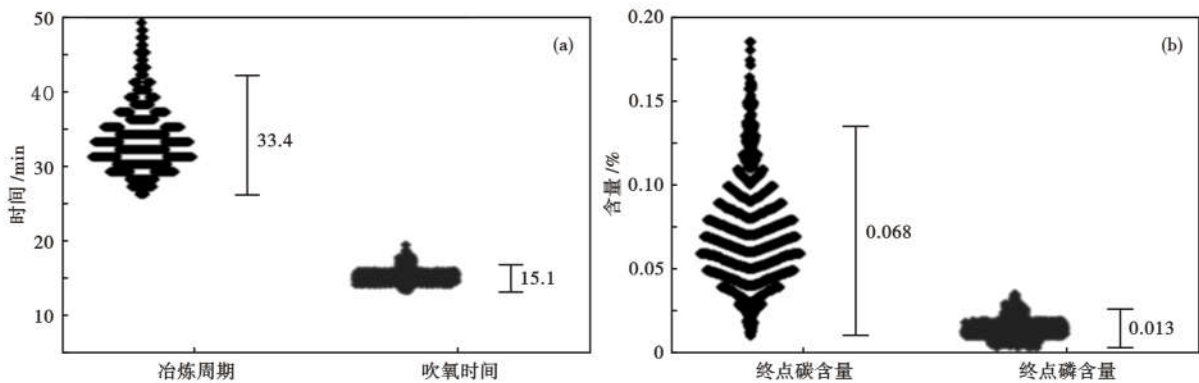


图1 原转炉冶炼和吹氧时间分布(a)和终点C含量和P含量分布(b)

Fig.1 Distribution of original converter smelting and oxygen blowing time (a) and [C] and [P] at end point (b)

2 优化氧枪参数

2.1 马赫数的选择

马赫数是气流速度与当地温度条件下的音速之比:

$$M = U/a \quad (1)$$

式中: U - 气流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); a - 在当地温度下的音速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

氧枪供氧压力的大小是由喷头的出口马赫数确定的,将氧气的压力能转化成动能,得到超音速的氧气流股。生产实践证明,采用过高的设计氧压,不但喷溅,而且炉衬侵蚀严重,而采用过低的设计氧压,氧气出口速度过低,熔池得不到良好的搅拌。从提高氧气射流的冲击能力考虑,希望采用较高的马赫数,当 $M > 2.0$ 以后,随着马赫数的增大,氧气出口温度减低,出口音速不断减小,使出口速度增加变慢,而设计工况压力却增加很快。过高的马赫数需要高压管线设施,相对投资较大,且反应激烈,操作难度大;而马赫数过小,则输氧管线的氧压未被充分利用,不经济。根据生产车间的实际情况,综合考虑:选取马赫数为2.05。

2.2 工况氧压 P_0

根据等熵流表^[7],当 $M = 2.05$, $P_{\text{出}}/P_0 = 0.1182$,由于炉膛压力近似于大气压力,所以 $P_{\text{出}} = 0.102 \text{ MPa}$,则 $P_0 = 0.86 \text{ MPa}$ 。如果操作氧压高于设计氧压,氧流仍有部分压力能未转化为动能,离开喷孔后继续膨胀,射流产生激波,导致氧流不稳定,能量损失大,造成化渣不好,喷溅增加,不利于吹炼;如果操作氧压过低时,出口氧射流衰减较快,熔池搅拌减弱,氧气利用率降低,延长了吹炼时间,降低生产效率。基于此种情况,建议使用阀后压力为 $0.88 \sim 0.93 \text{ MPa}$ 。另外,考虑到管路压力损耗阀后压力一般要稍高于喉口滞止压力,避免使用氧压低

于 0.80 MPa ,以防止氧枪回火事故的发生。

2.3 设计氧枪流量

氧枪流量 Q 是指在单位时间内向熔池供氧的数量,可由 $Q = \text{吨钢氧耗} \times \text{出钢量} \times 60 / \text{纯供氧时间} / 0.95$,其中0.95为氧气的利用率,新设计氧枪的目标供氧时间为 $\leq 13.0 \text{ min}$,根据现场的实际情况,可计算氧气供氧流量应 $\geq 34100 \text{ m}^3/\text{h}$ 。此流量为氧气在设定工况下的流量,当使用氧气压力变化时氧流量随之变化,应属正常。

2.4 氧枪喷头参数的设计

(1)喷头孔数。综合考虑化渣效果和炉衬侵蚀,根据车间的生产实践经验,120 t转炉的氧枪喷头孔数建议设计为4孔。

(2)喉口直径。由氧流量公式:

$$Q = 64.32 \times P_0 \times A_{\text{喉}} \quad (2)$$

式中: P_0 - 使用压力/kg; $A_{\text{喉}}$ - 喉口截面积; Q - 氧气流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)。

可计算得出 $D_{\text{喉}} = 45.7 \text{ mm}$ 。

(3)出口直径。根据 $M = 2.05$,查等熵流表,

$$A_{\text{出}}/A_{\text{喉}} = 1.76 \quad (3)$$

式中: $A_{\text{出}}$ - 出口截面积; $A_{\text{喉}}$ - 喉口截面积。

可计算得出 $D_{\text{出}} = 60.7 \text{ mm}$ 。

(4)氧孔倾角。每股射流各自对喷枪中心线的倾角 $\alpha > 10^\circ$ 时各股射流在达到熔池液面之前不会相交的,而当 $\alpha = 5^\circ$ 时则在到达液面之前就已经相交。根据大量实验研究表明,合理的倾角 α 与喷孔的数目 n 有关,且随着喷孔数目的增加而增大。多孔喷枪射流各个流股发生汇交和不汇交的临界以效应角 θ_c 为界,大于 θ_c 各个射流就很少汇交甚至不汇交,小于 θ_c 则必定汇交。效应角 θ_c 与喷孔倾角 α 的相关方程位:

$$\sin\theta = \sin\alpha \times \sin 180^\circ/n \quad (4)$$

式中: θ - 临界效应角, $7.5^\circ \sim 9^\circ$; α - 喷孔倾角/ $^\circ$; n - 喷孔数目。

由此可计算四孔喷头的倾角 α 在 $10.8^\circ \sim 14.5^\circ$ 。由此可得出, 当 $10^\circ \leq$ 倾角 $\leq 15^\circ$ 时, 四孔喷头能满足射流不交汇的要求, 根据车间的实际需求, 可取孔倾角 $\alpha = 12.8^\circ$ 。

(5) 扩张段长度。理论的气体膨胀角为 $4^\circ \sim 8^\circ$, 扩张段的张角理应也设计成 $4^\circ \sim 8^\circ$ ^[8]。小扩张角具有控制膨胀作用, 因而出口流股会有轻微膨胀, 氧流贴近孔壁流动会出现层流, 从而加重射流表面与炉氧混合, 有利于提高热效率。大扩张角控制膨胀作用小, 扩张段短, 受孔壁粗糙度影响小, 有利于减小氧射流的能量损失, 提高作用熔池贯穿力, 对于新炉子, 装入深度较深, 考虑喷头的穿透能力, 应取较大的张角, 定为 3.5° 。则 $L = (60.7 - 45.7)/2 \times \tan 3.5^\circ = 122 \text{ mm}$ 。

氧枪喷头参数优化前后各参数的对比如表 2 所示, 由表 2 可知, 与原氧枪对比, 新喷头的孔数由 5 孔减少到 4 孔, 增大了喉口直径、出口直径、马赫数、供氧流量和氧孔倾角; 综合来看, 氧枪氧流股的冲击深度增大, 为保证转炉的脱 P 能力, 需优化炼钢工艺, 提高化渣效果。

3 优化冶炼工艺

由于改进氧枪喷头参数增大了氧流股的冲击深度, 为提高化渣效果, 保证脱 P 能力, 需对转炉冶炼工艺进行优化。

3.1 优化供氧枪位

熔池的冲击深度可根据 A Flinn 公式^[9]进行计算,

$$h = \left(\frac{340 \cdot P_0 \cdot D_{\text{喉}}}{\sqrt{H}} + 3.81 \right) \cos\theta \quad (5)$$

式中: h - 熔池的冲击深度/cm; θ - 喷孔倾角/ $^\circ$ 。

研究表明^[10], 转炉吹炼过程的枪位高度 L 与熔池深度 L_0 的比值 L/L_0 在各吹炼阶段的最优值为: 吹炼初期 $0.50 \sim 0.58$, 吹炼中期: $0.58 \sim 0.62$, 吹炼末期: $0.63 \sim 0.68$ 。中天炼钢厂 120 t 转炉的熔池深度为 135 cm, 结合改进喷头的氧枪参数、A Flinn 公式以及转炉的实际情况, 设定转炉冶炼各阶段的枪位为: 前期 220 ~ 250 cm, 中期 200 ~ 220 cm, 末期 170 ~ 200 cm。

3.2 优化加料制度

由于提高了转炉氧枪的冲击深度, 转炉化渣变

表 2 氧枪原喷头和改进喷头参数的对比

Table 2 Comparison between original and improved oxygen lance nozzle parameters

喷头类型	孔数/孔	喉口直径/mm	出口直径/mm	马赫数	工作压力/MPa	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	倾角/ $^\circ$
原喷头	5	36.5	47.4	2.03	0.92	28 000	12.5
改进喷头	4	45.7	60.7	2.05	0.91	35 000	12.8

得困难, 冶炼过程加入矿石将有利于提高化渣效果。Arisa Nakamura 等对提高转炉化渣效果进行了研究^[11]得出, 转炉冶炼前期加入烧结矿并增大烧结矿的加入量, 有利于提高炉渣 FeO 含量。由此分析可知, 为提高转炉化渣效果, 建议在吹炼时提高烧结矿的加入量。

4 生产实践

2020 年 10 ~ 11 月, 采用改进氧枪喷头进行生产实践, 转炉供氧流量控制在 $35\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ [$4.5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$], 工艺优化前后冶炼枪位的对比如图 2 所示。由图 2 可知, 改进的新工艺较大幅度提高了转炉冶炼枪位。另外, 对转炉冶炼过程的加料制度进行优化, 石灰加入量以原工艺执行, 矿石加入时机按表 3 的规定进行加入。

在原有铁水条件和废钢条件下, 采用改进工艺组织生产, 转炉冶炼周期和吹氧时间如图 3(a) 所示, 转炉终点 C 含量和 P 含量分布情况如图 3(b) 所示, 终点钢水成分和炉渣成分如表 4 所示。由图 3

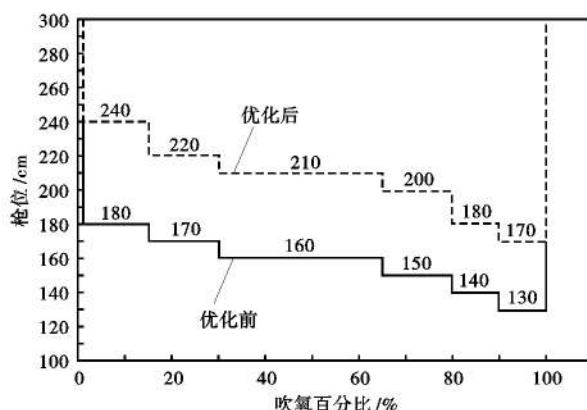


图 2 工艺优化前后转炉枪位对比

Fig. 2 Comparison between oxygen lance position of converter before and after process optimization

表 3 矿石加入时机
Table 3 Ore adding time

模型计算矿石量/kg	
$\leq 1\,500$	$> 1\,500$
3 min 内加完	3 min 内加入 1 500 kg, 6 ~ 10 min 加入剩余量

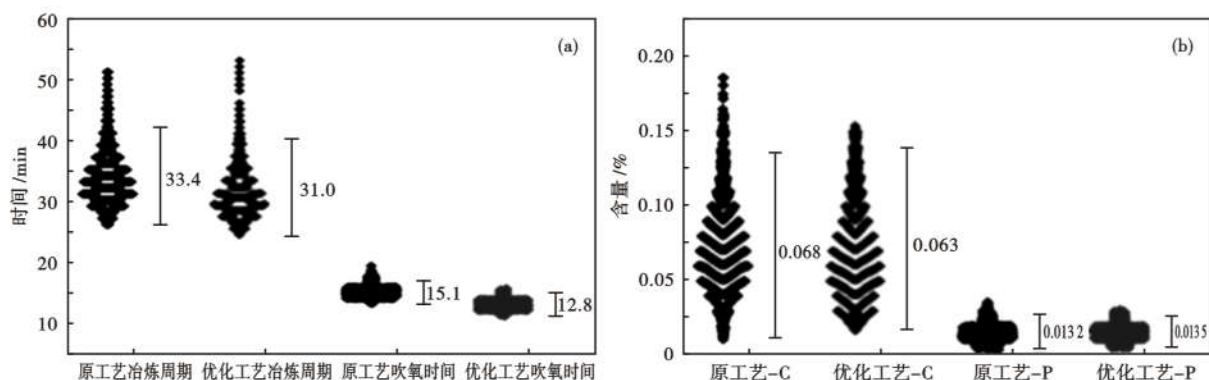


图3 工艺优化前后转炉冶炼时间和吹氧时间(a);终点[C]和[P](b)对比

Fig. 3 Comparison between converter smelting and oxygen blowing time (a); end [C] and [P] (b) before and after process optimization

可知,改进氧枪喷头可在转炉终点钢水成分相近的情况下,缩短转炉平均吹氧时间2.3 min,相应的可缩短冶炼周期2.4 min。由此可计算,转炉每炉每年产量可提高约12万t,经济效益明显。由表4可知,优化工艺前后的转炉终点炉渣成分和钢水成分基本相近,优化工艺炉渣TFe含量较原工艺降低1.0%,可节省钢铁料消耗。

5 结论

(1)新设计了转炉氧枪喷头,与原工艺相比,喷头孔数由5孔减少到4孔,并增大了喉口直径、出口直径、马赫数、供氧流量和氧孔倾角,提高了氧流股的冲击深度。

(2)由于优化了转炉氧枪喷头,供氧流量由

表4 工艺优化前后转炉终点情况对比

Table 4 Comparison between converter end point before and after process optimization

工艺	范围	终点温度/ ℃	终点 C/ %	终点 P/ %	终渣(T. Fe)/ %	终渣 碱度
原工艺	范围	1 600~1 700	0.02~0.18	0.003~0.035	9.0~25.0	2.5~4.0
	均值	1 635	0.068	0.013 2	18.5	3.12
优化工艺	范围	1 610~1 695	0.02~0.16	0.004~0.033	8.0~23.0	2.5~4.0
	均值	1 632	0.063	0.013 5	17.5	3.21

28 000 m³/h提高到35 000 m³/h,转炉吹氧时间可缩短2.3 min,冶炼周期可缩短2.4 min,炉渣全铁含量可降低1.0%,预计年产量可提高12万t。

(3)采用大流量氧枪喷头冶炼,通过对冶炼枪位和加料进行工艺优化,转炉终点成分与原工艺相近,能满足炼钢需求。

参考文献

- [1] 杨文远,郑丛杰,王明林,等. 转炉高效吹炼技术的研究[J]. 钢铁,2001,36(11):13-16.
- [2] 刘 浏. 转炉炼钢生产技术的发展[J]. 中国冶金,2004,14(2):7-11.
- [3] 郎秋燕. 高供氧强度下转炉脱碳速度及炉渣的变化规律[J]. 江苏冶金,2000,28(5):6-8.
- [4] 郑 毅,吴 康,刘正祥,等. 提高供氧强度对转炉冶炼的影响[J]. 冶金丛刊,2010,33(5):15-17.
- [5] 黄彦飞. 联鑫钢铁100 t转炉高效炼钢实践[J]. 中国冶金文摘,2019,33(1):38-39.
- [6] 徐向阳. 氧气顶吹转炉高速冶炼技术实践[J]. 鞍钢技术,2009,46(2):39-42.
- [7] 张彦恒. 攀钢200 t炼钢转炉氧枪设计与应用[J]. 炼钢,2018,34(3):1-4.
- [8] 林腾昌,汪成义,王 杰,等. 顶枪供氧强度对复吹转炉冶炼效果的影响[J]. 工业加热,2016,45(4):37-39.
- [9] Flinn R, Pehlke R and Glass D, et al. Jet Penetration and Bath Circulation in the Basic Oxygen Furnace [J]. Transaction of the Metallurgical Society of Aime, 1967, 239(11):1766-1791.
- [10] 杨文远,蒋晓放,王明林,等. 大型转炉炼钢工艺参数优化的研究[J]. 钢铁,2010,45(10):27-32.
- [11] Arisa Nakamura, Keita Ouchi and Yu Miyamoto, et al. Improvement of Blowing Method for High Carbon Low Phosphorus Steel in BOF [C]. The 15th China-Japan Symposium on Science and Technology of Iron and Steel. 2019: 92-101.

张 天(1991-),男,工程师,2013年南京工程学院(本科)毕业,转炉炼钢工艺研究。E-mail: ztsn1991@163.com

收稿日期:2021-02-19