

200 t 顶底复吹转炉半钢冶炼深脱磷工艺实践

陈均¹ 江南红² 龚洪君² 张彦恒² 曾建华¹

(1 攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 攀枝花 617000;

2 攀钢集团西昌钢铁有限公司, 西昌 615000)

摘要 针对转炉终点钢水磷含量高且波动大的问题, 对钢水深脱磷控制难点及影响脱磷的因素进行了分析, 提出了采用“双渣高拉碳放渣”的深脱磷工艺路线; 通过优化造渣制度、供氧和底吹气制度、枪位控制和终点控制等脱磷工艺, 9 炉 34CrMo4 钢的冶炼结果表明, 钢水脱磷率达 84.6%, 终点渣-钢磷分配比 L_p 达到 90.1, 实现了转炉终点钢水 $[P] \leq 0.006\%$ 的稳定控制, 并通过采用滑板挡渣及顶渣改制等减少回磷的技术措施, 具备了批量生产磷含量小于 0.010% 的低磷钢种的能力。

关键词 200 t 顶底复吹转炉 半钢冶炼 干法除尘 转炉脱磷 工艺实践

Process Practice of Deep Dephosphorization Technology of 200 t Top and Bottom Combined Blowing Converter with Semi-Steel

Chen Jun¹, Jiang Nanhong², Gong Hongjun², Zhang Yanheng² and Zeng Jianhua¹

(1 State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Research Institute Co Ltd, Pangang Group, Panzhihua 617000; 2 Xichang Vanadium & Steel Co Ltd, Pangang Group, Xichang 615000)

Abstract According to the issue of high phosphorus content in liquid with great fluctuation at end-point of converter, the difficult points for control of deep dephosphorization of liquid and the influence factors on dephosphorization are analyzed, and to use the deep dephosphorization process scheme of “double slagging catch carbon method” is proposed. With the dephosphorization measures including optimizing slagging, oxygen supplying, bottom gas blowing and lance level and end point control, the results of 9 heats of steel 34CrMo4 steelmaking shows that the dephosphorization rate of liquid is up to 84.6%, the end slag-steel phosphorus partition ratio L_p is up to 90.1 to realize the stable control on converter liquid end $[P] \leq 0.006\%$, and with using the technology measures of skateboard and reformed top slag to reduce rephosphorization, the ability of batch steelmaking low phosphorus steel with phosphorus content less than 0.010% is qualified.

Material Index 200 t Top and Bottom Combined Blowing Converter, Semi-Steel Steelmaking, Dry De-dusting, Converter Dephosphorization, Process Practice

磷在大多数钢中是一种有害元素, 容易在晶界偏析, 造成钢材“冷脆”, 显著降低钢材的低温冲击韧性^[1]。近年来, 用户对许多钢种的磷含量提出了更高的要求; 如优质钢要求成品磷含量低于 0.015%, 低温用钢管、特殊深冲钢、镀锡板要求磷低于 0.010%; 一些航空、原子能、耐腐蚀管线用钢要求成品磷低于 0.005%^[2]。国外先进钢铁企业生产低磷、超低磷钢多采用“双联”工艺^[3-5], 脱磷炉终点磷含量能控制在 0.020% 以下, 脱碳炉结束后终点钢水磷含量也能控制在 0.005% 以下, 钢坯磷含量最低能达到 0.003%。

攀钢集团西昌钢铁有限公司(西昌钢铁)高炉采用钒钛磁铁矿冶炼, 炼钢转炉公称容量为 200 t, 采用顶底复吹工艺, 转炉冶炼以半钢为原料, 冶炼终点磷波动在 0.008% ~ 0.025%, 成品钢材磷含量很难稳定控制在 0.015% 以下。本文针对西昌钢铁 200 t 炼钢转炉采用干法除尘工艺以及半钢冶炼的

特殊性, 在分析转炉脱磷机理的基础上, 开展了转炉深脱磷工艺的研究, 建立了终点钢水 $[P] \leq 0.006\%$ 转炉深脱磷工艺制度。

1 转炉终点磷含量控制现状及存在的问题分析

1.1 终点钢水磷含量控制现状

西昌钢铁炼钢厂 2 座 200 t 转炉冶炼采用先进干法除尘工艺, 配备副枪及滑板挡渣等先进设备, 产品主要有合金结构钢、普碳钢、管线钢、超低碳钢等。转炉冶炼原料为提钒后的半钢, 半钢成分及温度如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 入炉半钢磷含量平均为 0.060%, 碳含量平均仅为 3.32%, 温度为 1306 °C, 且硅、锰等发热成渣元素为痕迹, 可见半钢冶炼具有热源不足、成渣元素少, 成渣难的特点。

采用上述半钢冶炼后, 代表钢种转炉终点钢水磷含量控制水平如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 典型钢种转炉终点钢水磷含量平均在 0.010% 以上, 波动在 0.006% ~ 0.022%; 且从钢水磷含量的

表1 入炉半钢成分和温度

Table 1 Composition and temperature of charged semi-steel

项目	半钢成分/%					温度/ ℃
	C	Si	Mn	P	V	
平均	3.32	痕迹	0.03	0.060	0.05	1 306
最小	2.65	-	0.01	0.054	0.02	1 247
最大	3.88	-	0.05	0.065	0.08	1 365

表2 电工、管线、普碳和结构钢转炉终点磷的控制现状

Table 2 Present status of converter end phosphorous control for electric, pipeline, carbon and structure steel

钢种	P _{终点平均} /%	P _{终点} /%	样本数(n)/炉
电工钢	0.012	0.006~0.017	41
管线钢	0.013	0.010~0.019	85
普碳钢	0.014	0.006~0.022	103
结构钢	0.012	0.006~0.019	118

分布情况看,终点钢水磷含量小于0.010%的比例不足30%,而多数炉次终点钢水磷含量大于0.012%。

1.2 转炉深脱磷控制难点及问题分析

(1) 转炉冶炼热源不足,初期渣形成时间晚,脱磷效果差。铁水提钒后的半钢C含量较普通铁水低0.7%~1.4%;半钢温度平均低近100℃,且入炉半钢条件波动较大,转炉冶炼化学热明显不足。在转炉冶炼低磷钢种时,常常需要加入碳质提温剂进行温度补偿,而碳质提温剂的加入,将显著减少冶炼过程中 ΣFeO 的含量,对前期快速化渣脱磷产生较大的负面影响,且容易导致冶炼中后期炉渣返干。同时,由于半钢中成渣元素[Si]、[Mn]为痕迹,半钢冶炼时通常需要外加酸性材料以促进成渣。初期渣形成和渣中全铁含量有很大关系。从热力学条件来讲,渣中的 FeO_n 能与石灰形成低熔点的铁酸钙,从而降低石灰的熔点;成渣动力表明, FeO_n 有利于降低炉渣粘度,其含量过少会使炉渣粘度增加,呈半凝固状态,恶化了石灰外部的传质和扩散条件,从而丧失脱磷、脱硫能力。半钢炼钢由于[C]氧化速度的提前,前期脱碳速率过大,大量消耗熔池中的 FeO_n ,从而明显延长成渣时间,影响脱磷效果。

(2) 干法除尘工艺对脱磷造渣工艺影响较大。西昌钢钒200 t炼钢转炉采用干法除尘,炼钢转炉干法除尘回收工艺的烟气是由 CO 、 CO_2 、 N_2 和少量 H_2 、 O_2 等组成的高温、高粉尘、易燃易爆、高毒性气体。在净化过程中还混入了一定量的水蒸气(或氮气)。烟气从汽化冷却烟道约1000℃降到70℃,若此时烟气组成达到 $\text{CO} > 9\%$ 、 $\text{O}_2 > 6\%$ 或者 $\text{H}_2 > 3\%$ 、 $\text{O}_2 > 2\%$,由于静电除尘器的电晕放电作用,产

生电火花,将产生爆炸,爆炸后气体压力急剧升高,泄爆阀泄爆。泄爆将导致转炉冶炼中断,对冶炼工艺即设备均有较大影响,因此,转炉冶炼必须尽可能的降低除尘泄爆几率。为了防止冶炼前期烟气中 $\text{O}_2 > 6\%$,吹炼前期供氧流量应较小,同时为降低大批量加入造渣材料导致粉尘泄爆,冶炼过程造渣材料必须少量多批次加入。前期供氧强度偏低将导致造渣材料不能充分熔化,初期渣形成时间晚。少量加入造渣材料将导致整个冶炼过程都在加料,转炉升温效率慢。另外,如果采用双渣冶炼(前期倒渣)在大幅度减少煤气回收的同时,倒炉后二次造渣难,且极易导致泄爆。因此,干法除尘条件下半钢冶炼低磷钢难度更大,必须对冶炼工艺进行深入的研究。

1.3 转炉深脱磷工艺路线的选择

通过出钢前、后均采用滑板档渣,并考虑合金回磷,要实现成品磷含量小于0.010%的稳定控制,转炉终点钢水磷含量应稳定控制在 $\leq 0.006\%$ 。采用单渣法很难实现稳定控制,而采用传统的双渣(前期放渣)冶炼,由于半钢硅、锰等发热元素为痕迹,前期即直接是碳氧反应,成渣后倒渣(5~6 min)碳氧反应正是剧烈之时,煤气量也大,此时倒渣不仅严重影响煤气回收量,更会显著增加干法除尘泄爆的风险。因此,采用高拉碳时放渣的双渣冶炼方法更为合适;高拉碳时钢水碳含量一般在0.20%~0.50%,此时碳氧反应相对较弱,煤气回收量小,对煤气回收和干法除尘影响均较小,且此时炉内温度一般不高于1600℃,脱磷效果仍然较好;第一次放渣后,二次造渣形成的高碱度、高氧化性的炉渣留在炉内可以促进下一炉快速成渣。分析认为,要实现终点钢水磷含量 $\leq 0.006\%$ 的稳定控制,采用“双渣高拉碳放渣+留渣”的工艺路线更适合西昌钢钒200 t转炉的冶炼条件。

2 转炉深脱磷工艺技术研究

2.1 转炉脱磷反应机理分析

通过炼钢炉渣成分变化对炉渣脱磷能力的影响热力学研究^[6],得出炼钢过程如何使铁水磷与炉渣发生化学反应稳定生成磷酸钙是脱磷效率高低的关键;转炉炼钢快速形成炉渣,同时炉渣中含有较高FeO和CaO含量以及较低的钢水温度是脱磷反应的热力学条件,可使渣、钢间磷分配比(L_p)越高。

脱磷动力学研究表明,脱磷速度常数(K_p)不仅受碱度、炉渣氧化性和化渣效果的影响,同时受搅拌动能(氧枪枪位、供氧强度以及复吹搅拌)的影

响^[7]。随熔池搅拌能(ϵ)的增加,脱磷速度(K_p)提高^[1]。

综合以上热力学、动力学条件分析,影响转炉脱磷效果的主要因素表现为:

(1)温度。因脱磷是强放热的反应,故较低的温度有利于脱磷,但温度过低不能满足渣铁的流动性、粘度及造渣等工艺过程的需要以保证脱磷的动力学要求,同时也不能满足炉机匹配,兼顾两者,对于转炉深脱磷需要选择合适的温度范围。

(2)碱度。炉渣中氧化钙与五氧化二磷结合,是使其活性降低的主要因素,适当增加渣中 CaO 可以增大 CaO 的活度,降低 P_2O_5 的活度系数,提高磷在渣钢间的分配比,但 CaO 含量过高则导致炉渣的流动性、粘度等恶化而不利于脱磷的动力学条件。

(3)渣中的氧化铁含量。炉渣的 FeO 含量越高,炉渣氧化性越强,磷在渣钢间的分配比越大。钢液中[O]的高低实际上是由熔渣中 FeO 的活度决定。因此,增加渣中 FeO 的浓度是增大 FeO 活度的主要手段,且 FeO 含量高可以增加熔渣的流动性,但炉渣的 FeO 含量过高(FeO 含量在 26% 以上)容易产生渣溢甚至喷溅,反而对工艺操作、铁损以及脱磷效果产生影响。

(4)供氧制度与底吹模式。氧枪枪位的高低直接关系到转炉冶炼过程的化渣效果、渣中 FeO 含量的生成速度以及脱 C 速度;高供氧强度以及底吹供气强度能加强熔池搅拌,可以使渣钢充分混合,扩大渣钢间反应界面,提高脱磷效果,因此,对于转炉深脱磷需要选择合适的供氧制度与底吹供气模式。

2.2 影响转炉深脱磷的因素分析

低温、高碱度、高氧化性有利于钢水脱磷。图 1

(a,b,c)分别统计了西昌钢钒转炉终点温度、炉渣碱度及氧化性与渣钢间的磷分配比(L_p)变化规律。从图 1(a)可以看出,随着钢水温度的升高,渣钢间磷分配比逐渐降低。且试验发现当终点钢水温度大于 1 640 °C 以后,终点钢水磷含量升高明显。故冶炼低磷钢时最好控制终点钢水温度在 1 640 °C 以内,以防止高温回磷。

从图 1(b)可以看出,渣钢间的 L_p 不是随着炉渣氧化性的升高而无限制升高。当炉渣氧化性达到约 22% 时渣钢间的 L_p 达到最高,此时如炉渣氧化性继续升高,炉内深吹严重,温度也急剧升高,反而会导致钢水回磷。因此,不管从脱磷效果还是炉衬维护考虑,终点炉渣中全铁含量都不应过高。

从图 1(c)可以看出,不是炉渣碱度越高脱磷效果越好。炉渣碱度控制在 3.5 ~ 4.5 具有最佳的脱磷效果。如果炉渣碱度过高,流动性变差,渣钢间的脱磷动力学条件变差,反而削弱脱磷效果。

2.3 转炉深脱磷工艺控制技术

2.3.1 造渣制度

西昌钢钒公司由于采用半钢炼钢,必须采用多组元造渣方法,通过大量的半钢炼钢炉渣形成的机理和石灰溶解速度理论的研究和实践,形成了以石灰、高镁石灰以及复合造渣剂为半钢炼钢造渣材料(其成分见表 3)的造渣工艺路线,该路线不仅能保证石灰在渣中有很大的溶解速度(即来渣时间为 3 ~ 4 min),同时避免过程炉渣的返干成坨现象。

结合西昌钢钒干法除尘特性及钢种对磷含量的要求,为了实现转炉深脱磷,提出了采用“双渣高拉碳排放渣 + 留渣”进行深脱磷的技术方案:

(1)上一炉出完钢后留渣,留渣后向炉内定量

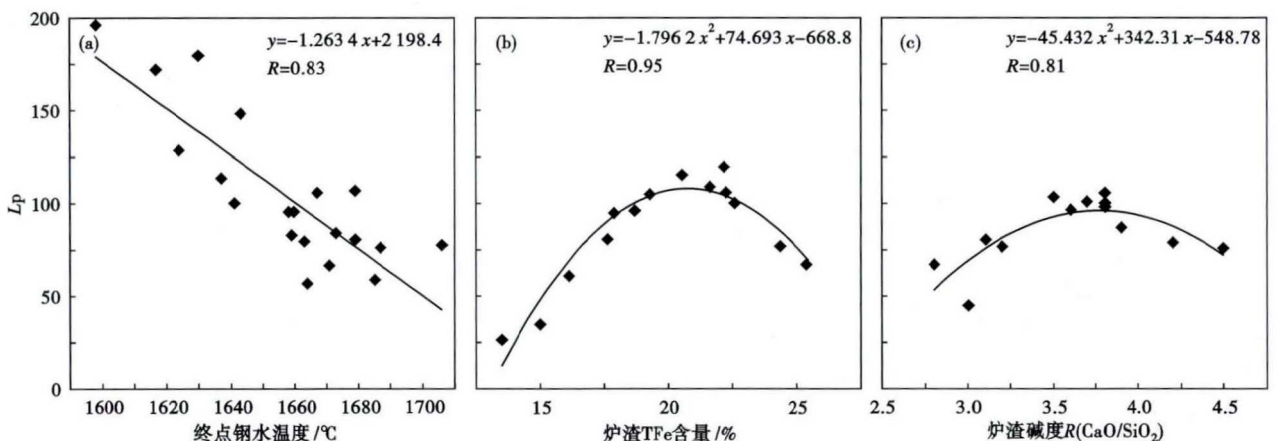


图 1 转炉钢水终点温度(a)、炉渣 TFe 含量(b)和炉渣碱度(c)对钢-渣磷分配比 L_p 的影响

Fig. 1 Effect of converter liquid end temperature (a), TFe content in slag (b) and slag basicity (c) on slag-steel phosphorus partition ratio L_p

加入活性石灰 2 t, 高镁石灰 1 t, 开吹后加入复合造渣剂, 第一批加入量根据前期碱度按 1.5 ~ 2.5 控制, 冶炼前期, 化好渣, 化透渣, 保证冶炼前期充分脱磷; 余下的造渣材料按 300 ~ 500 kg 每批次, 分批多次加入, 并在开吹后前 5 min 内完成 50% ~ 60% 的加料, 倒炉前完成 80% 的造渣材料加入。

(2) 活性白灰加入总量 5 ~ 6 t/炉, 高镁石灰加入总量 4 ~ 5 t/炉, 复合造渣剂加入总量 3 ~ 4 kg/炉; 终渣碱度按照 3 ~ 4 控制, 终渣 MgO 按 10% ~ 12% 控制, 终点渣态不好的炉次, 加入 500 ~ 1 000 kg 高镁石灰或不大于 300 ~ 600 kg 的改质剂进行调渣。

(3) 采用副枪定碳进行高拉碳, 高拉碳放渣后进行二次造渣。冶炼过程钢水温度富裕时加渣钢调温, 按照 500 kg/批次, 多批少量加入, 温度不足时不加废钢, 开吹时少量加入增碳剂提温。

(4) 入炉条件较好的炉次需要加渣钢或废钢降温, 要提前加入, 后期严禁加入渣钢降温, 避免终渣氧化性过高。入炉半钢条件较差的炉次, 不加废钢, 开吹时可加入吨钢 2 ~ 3 kg 硅铁提温和化渣, 以防冶前期长时间不成渣和炼终点因温度不够烧铁升温, 造成炉次深吹。

(5) 冶炼过程多批次少量加入造渣材料, 在保证炉渣活跃的同时减少因大批量加料操作使炉内钢液面上渣料较多, 下枪时, 烟尘较大, 进入静电除尘器发生粉尘泄爆的比例。

2.3.2 供氧及底吹供气制度

西昌钢钒 200 t 炼钢转炉采用 5 孔氧枪进行冶炼, 工作流量为 45 000 m³/h, 供氧强度为 3.75 m³/(min · t_钢), 氧枪具体参数如表 4 所示。考虑到西昌钢钒干法除尘系统泄爆问题, 改变了全程吹氧流量为 45 000 m³/h 的供氧制度, 制定出了合理的供氧制度, 即开吹 45 s 供氧流量为 24 000 m³/h, 45 s 后过程氧流量提高到 45 000 m³/h, 中途提枪后必须等待 3 min 后再次下枪, 再次下枪后氧流量调整为 24 000 m³/h, 45 s 后调整为 45 000 m³/h。通过对供氧参数的优化, 转炉泄爆率稳定控制在 0.6% 以内, 减少了干法除尘工艺对转炉冶炼的影响。

西昌钢钒 200 t 炼钢转炉采用 10 块透气砖进行底部供气, 为提高转炉脱磷效率, 对底吹供气制度进行了研究。单砖最大供气流量达到 100 m³/h, 底部供气强度最大达到 0.083 m³/(min · t_钢), 冶炼过程进行前搅和后搅, 促进快速来渣和降低终渣全铁含

表 3 200 t 转炉造渣材料主要成分 / %

Table 3 Main ingredient of slagging materials of 200 t converter / %

项目	SiO ₂	TFe	P	S	CaO	MgO
复合渣	46.43	19.63	0.060	0.120	-	5.16
石灰	-	-	0.018	0.019	88.95	-
高镁白灰	-	-	0.020	0.072	47.77	32.68

表 4 200 t 转炉氧枪技术参数

Table 4 Technical parameters of oxygen lance of 200 t converter

喷头形式	喷孔夹角 / °	喷孔布置形式	喉口直径 / mm	出口直径 / mm	马赫数 (Ma)	氧管外径 / mm	氧管内径 / mm	马赫数 (Ma)
中心水冷锻压式	16	周边 5 孔	45	59.9	2.05	273	219	2.05

量。底部供气模式如图 2 所示。

2.3.3 枪位控制

过程枪位必须与底吹供气制度、造渣工艺相结合, 严禁后期高拉碳时活跃炉渣而高枪位操作, 减少转炉喷渣的现象。图 3 为低磷钢冶炼时枪位控制示意图, 即在加入第一批造渣材料后应适当低枪位加强搅拌, 此时枪位在 2 m 左右, 搅拌约 1 min 后适当提高枪位以增大冲击面积, 提高渣中全铁含量促进早化渣, 此时枪位控制在 2.5 m 左右; 初期渣形成后, 应降低枪位至 1.7 ~ 2 m 并适当吊枪或滑枪操作

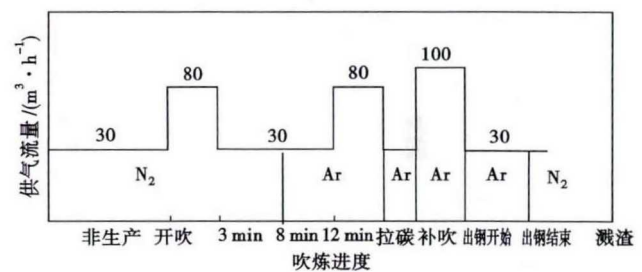


图 2 200 t 转炉底吹供气模式

Fig. 2 Scheme of 200 t converter bottom gas blowing

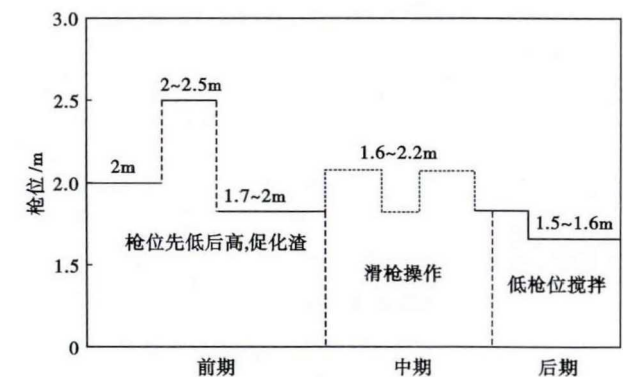


图 3 200 t 转炉吹炼过程枪位控制示意图

Fig. 3 Schematics of lance level of 200 t converter during blowing process

防止炉渣返干;中、后期逐渐降低枪位,并保证后期低枪位(1.5~1.6)m吹炼2 min以上的时间以降低渣中全铁含量。

2.3.4 终点控制

通过对西昌钢钒生产数据统计分析,得出渣、钢间的磷分配比(L_p)与终点钢水温度的关系见式(1)。

$$L_p(P)/[P] = -1.12 T + 1967.3 \quad (1)$$

要实现终点钢水磷含量不高于0.006%的终点控制,计算出终点钢水温度范围值为1620~1650℃。终点钢渣的氧化性随终点钢水碳含量降低而升高,在转炉冶炼低磷钢水时,要保持终点具有一定钢渣氧化性,但又避免深吹而影响钢水脱氧工艺以及钢水质量,可将终点钢水碳含量控制在0.04%~0.06%,对转炉终点钢水磷含量要求较高时可适当

降低终点钢水碳含量以增加炉渣氧化性促进脱磷。根据碱度对钢水磷分配比的影响得出终点钢渣碱度控制在3.5~4.5较为适宜。

3 转炉深脱磷试验效果

根据试验方案,在入炉半钢条件相当(平均磷含量为0.060%,平均温度为1310℃,平均碳含量为3.3%)的情况下开展了9炉转炉深脱磷试验,试验钢种均为34CrMo4(‰:0.33~0.37C,0.20~0.35Si,0.75~0.90Mn, $P \leq 0.012$, $S \leq 0.008$,0.98~1.1Cr,0.2~0.3Mo)。从表5中可知,通过对深脱磷工艺的研究和优化,与原前期倒渣工艺相比,在吨钢辅料消耗更低的情况下,高拉碳倒渣的深脱磷工艺全程脱磷率提高到了84.6%,且新工艺煤气回收量达到了105.1 m³/t_钢,显著高于原工艺。

表5 优化前后200 t转炉脱磷相关参数和效果

Table 5 Relative parameters and effects of dephosphorization of 200 t converter before and after optimization

工艺	脱磷工艺	项目	倒炉碳/%	倒炉磷/%	终点磷/%	终点温度/℃	脱磷率/%	磷分配比(L_p)	煤气回收量/(m ³ ·t _钢 ⁻¹)	吨钢辅料消耗/kg
优化前	前期倒渣	均值	1.95	0.042	0.012	1656	80.6	76.3	88.6	48.6
		范围	1.68~2.32	0.030~0.048	0.008~0.015	1648~1669	83.1~88.9	56.5~98.3	71.6~98.9	46.9~50.3
优化后	拉碳倒渣	均值	0.35	0.014	0.006	1638	84.6	90.1	105.1	43.8
		范围	0.024~0.054	0.011~0.017	0.005~0.006	1620~1649	83.1~88.9	82.1~121.5	96.3~110.8	39.6~47.5

优化后9炉3CrMo4钢终点钢水磷含量为0.005%共计5炉,磷含量为0.006%共计4炉,通过深入研究,试验炉次终点钢水磷含量实现了低于0.006%的稳定控制。同时,配合采用滑板挡渣及顶渣改制等减少回磷的技术措施,试验炉次成品磷含量均小于0.010%,具备了批量生产磷含量小于0.010%的低磷钢种的能力。

4 结论

(1)在掌握西昌钢钒200 t半钢炼钢转炉终点钢水磷含量控制现状和分析转炉深脱磷的基础上,对转炉钢水深脱磷难点进行了分析,确定了采用“高拉碳放渣”的转炉深脱磷工艺,制定了合理的转炉深脱磷工艺制度。

(2)转炉深脱磷试验表明,在辅料消耗更低及煤气回收量更大的情况下,试验炉次全程脱磷率由原来的80.6%提高到84.6%, L_p 由76.3提高到90.1,实现了终点钢水磷含量低于0.006%的稳定控制。

(3)“高拉碳放渣”的转炉深脱磷工艺已在西昌钢钒推广应用,同时配合采用滑板挡渣及顶渣改制等减少回磷的技术措施能够实现成品磷含量小于

0.010%的稳定控制,具备了批量生产磷含量小于0.010%的低磷钢种的能力。

参考文献

- [1] 刘 浏. 超低磷钢的冶炼工艺[J]. 特殊钢,2000,21(6):20-24.
- [2] 黄成红,于学斌,雷加鹏. 低磷钢生产实践的研究[J]. 钢铁研究,2003,31(5):25-28.
- [3] 孙礼明. 转炉双联法冶炼工艺及其特点[J]. 上海金属,2005,27(2):44-46.
- [4] Liu Z. Purity Steel Production Technology[J]. Iron & Steel, 2000(2):64-69.
- [5] 卢春生. 转炉脱磷-脱碳冶炼工艺及其物流参数解析[A]. 北京科技大学冶金与生态工程学院. 冶金研究中心2005年“冶金工程科学论坛”论文集[C]. 北京科技大学冶金与生态工程学院,2005:6.
- [6] Basu S, Kumar L A, Seetharaman S. A Model for Activity Coefficient of P₂O₅ in BOF Slag and Phosphorus Distribution Between Liquid Steel and Slag[J]. ISIJ International,2007,47(8):1236-1238.
- [7] 陈家祥. 钢铁冶金学(炼钢部分)[M]. 北京:冶金工业出版社,1990.

陈 均(1986-),男,硕士生,工程师,2009年内蒙古科技大学(本科)毕业,炼钢工艺优化研究。

E-mail:foresttiger119@163.com

收稿日期:2017-06-05