DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.008

半钢冶炼提高转炉终点碳出钢试验研究

陈　均[1],王二军[2],李小勇[2],曾建华[1],梁新腾[1]

(1. 攀钢集团研究院有限公司 材料工程技术研究所，四川 攀枝花 617000; 2. 攀钢集团攀枝花钢钒有限公司 提钒炼钢厂,四川 攀枝花 617067)

摘　要:针对攀钢半钢冶炼提高转炉终点碳出钢存在的热源不足和脱磷难的问题,在采用半钢增硅热补偿工艺的基础上对炼钢转炉成渣路线进行了研究,制定了转炉脱磷保碳关键工艺参数。结果表明,在保证转炉脱磷效果的同时,重轨钢转炉终点钢液碳含量由 0.068%提高到 0.109%,Q 系列钢终点钢液碳含量由 0.053%提高到 0.081%;终点钢液碳含量提高后，重轨及 Q 系列钢终点钢液氧活度分别降低 180×10^{-6} 和 291×10^{-6}，终渣全铁含量 TFe 平均降低 1.28%和 1.96%。提高转炉终点碳出钢的新工艺推广应用后,在降低冶炼成本的同时,提高了钢液质量。

关键词:半钢;热补偿;成渣路线;脱磷;终点碳

中图分类号: TF713　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)10-1054-06

Study on Improving Tapping-Carbon of Semi-Steel Steelmaking Converter

CHEN Jun[1], WANG Erjun[2], LI Xiaoyong[2], ZENG Jianhua[1] , LIANG Xinteng[1]

(1. Institute of Materials Engineering Technology, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, China; 2. Vanadium Refinery Steelmaking Branch, Pangang Group Panzhihua Steel & Vanadium Co., Ltd., Panzhihua 617067, China)

Abstract: Aiming at the shortage of heat source and difficulty of dephosphorization in improving the tapping-carbon of converter by semi-steel smelting at Pangang Group. The key technological parameters of dephosphorization and carbon preservation in converter are established. The results show that while ensuring the dephosphorization effect of converter, the tapping-carbon content of steel in the end of heavy rail steel converter increases from 0.068% to 0.109%, and that of steel in the end of Q series steel increases from 0.053% to 0.081%. After the increase of tapping-carbon content in end steel, the oxygen activity of heavy rail and Q series end steel decreased by 180×10^{-6} and 291×10^{-6}, respectively, and the total iron TFe content of final slag decreased by 1.28% and 1.96% on average. After the extension and application of the new technology of improving the carbon steel at the end of converter, the quality of molten steel is improved while the smelting cost is reduced.

Key words: semi-steel; thermal compensation; slag forming route; dephosphorization; carbon of the endpoint

近年来,随着钢铁行业竞争越来越激烈,在提升钢铁产品质量的同时降低制造成本成为各钢铁企业在竞争中生存的首要任务[1-5]。转炉炼钢工序作为炼钢厂钢铁产品质量控制的源头以及制造成本控制的关键环节,在钢铁生产全流程中起着举足轻重的作用。

攀钢集团攀枝花钢钒有限公司提钒炼钢厂 (以下简称 “攀钢钒”)5 座 120 t 炼钢转炉投产以来,经过长期的技术攻关,形成了具有攀钢特色的半钢冶炼工艺,转炉冶炼技术经济指标大幅度提高[6]。但是,长期以来半钢炼钢热源不足的问题使得攀钢钒在重轨钢、45 钢等中高碳钢生产时也不得不采用增碳法冶炼；而国内多数钢铁企业在中高碳钢生产时转炉终点常采用高拉补吹的方法[7-12],这种终点控制方法既能降低转炉冶炼成本,又能提高钢液质量。为解决半钢热源不足的问题，攀钢曾采用在转炉内加入焦炭粉、无烟煤、碳化硅等提温剂的方式来提高转炉内热源、采用双流道氧枪提高转炉热效率、采用废钢预热等温度补偿的措施 [13-16]，均未取得良好的效果。近年来,在提钒炉后向半钢中加入硅铁对半钢进行化学热补偿的“半钢增硅”热补偿工艺的全面推广应用,为提高转炉终点碳出钢创造了条件。本文通过对半钢增硅后炼钢转炉成渣路线及脱磷保碳工艺参数的深入研究，实现了提高转炉终点碳含量出钢工艺的全面推广应用。

1　转炉冶炼现状

钒钛铁液经转炉提钒后得到的半钢温度波动大,低时能低至 1 250 ℃以下,高时能高达 1 400 ℃,

收稿日期:2019-06-09

作者简介:陈　均(1986-),四川资阳人,硕士,工程师.主要从事炼钢工艺方面的工作.电话:18180123568,Email:18180123568@163.com

半钢碳含量也在2.5%～4.5%之间波动，半钢热源不足以及入炉半钢质量的波动使得转炉终点控制难度增大。图1为方坯重轨钢及板坯Q系列钢转炉终点碳含量控制情况。从图中可以看出，重轨钢转炉终点钢液碳含量平均为0.068%，碳含量小于0.04%的比例达到了9.8%；板坯Q系列钢终点钢液平均碳含量仅为0.053%，碳含量小于0.04%的比例高达12.5%。终点钢液碳含量低使得钢液氧活度偏高。图2为终点钢液氧活度控制情况。从图中可以看出，重轨钢平均氧活度达到478×10^{-6}，而板坯Q系列钢平均氧活度达到了586×10^{-6}，这也使得重轨钢终渣全铁含量TFe平均为19.9%，板坯Q系列钢平均TFe含量达到20.85%，终点炉渣氧化性高不仅加速炉衬侵蚀，而且增加倒渣时钢铁料的损失。

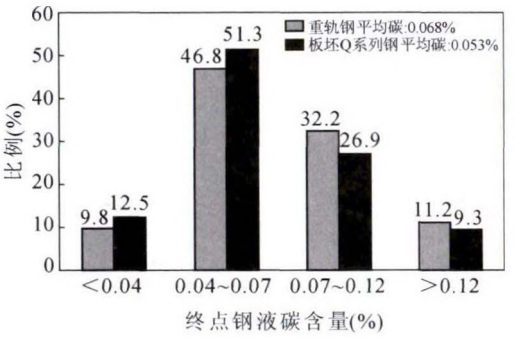

图1 中高碳钢转炉终点碳含量控制情况

Fig.1 Tapping carbon content of medium and high carbon steel

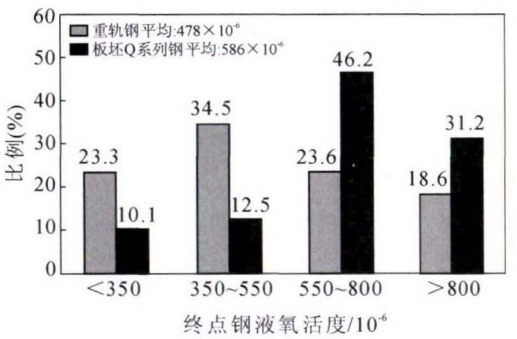

图2 中高碳钢转炉终点氧活度控制情况

Fig.2 Oxygen activity of medium and high carbon steel

半钢增硅的热补偿技术推广应用后，半钢碳含量平均提高0.161%(如图3所示)，半钢温度平均提高5.3 ℃(如图4所示)，且半钢温度及半钢碳含量波动范围更小，半钢质量更为稳定，为提高转炉终点碳出钢创造了条件。但是增硅后炼钢转炉成渣路线与原工艺有较大差异，为保证脱磷效果，必须对增硅前后转炉成渣路线进行深入研究。

2　成渣路线的变化规律

为探寻增硅前后转炉成渣路线变化规律，对转炉初渣及终点炉渣进行分析，如表1所示。从表中

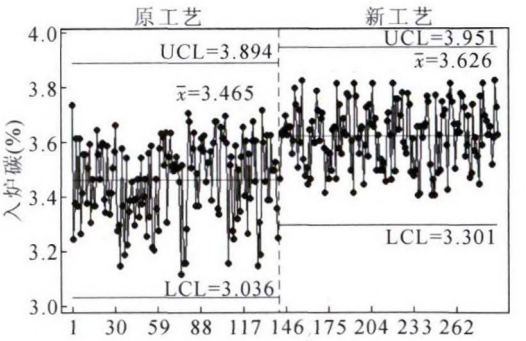

图3 半钢碳含量变化情况

Fig.3 Changes of carbon content in semi-steel

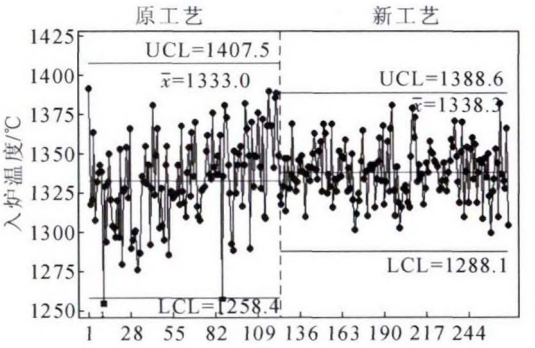

图4 半钢温度变化情况

Fig.4 Changes of temperature of semi-steel

表1 初渣及终渣成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of initial and end slag

编号	项目	P	CaO	FeO	MgO	TFe	SiO_2	fCaO
1	初渣(新工艺)	0.771	37.83	13.25	12.5	13.0	24.47	6.95
2	初渣(原工艺)	0.816	39.14	15.7	10.58	15.9	20.29	9.25
3	终渣(新工艺)	0.667	36.06	21.31	12.6	22.6	9.54	6.73
4	终渣(原工艺)	0.756	38.18	21.86	12.4	23.1	9.8	6.5

可以明显看出，采用新工艺后初渣TFe含量由15.9%降低到13.0%，SiO_2含量则由20.29%提高到24.47%，且新工艺初渣fCaO含量仅为6.95%，比不增硅时低2.3%，半钢增硅后在初渣氧化性更低的情况下炉渣熔化更好，可见增硅后有利于半钢冶炼时快速成渣。

从初渣熔化温度(表2)来看，采用新工艺后软化温度为1 275 ℃，较原工艺低26 ℃，且半球温度更是低40 ℃，可见新工艺初渣熔点更低，成渣更快。

表2 初渣熔点/℃

Tab.2 Melting point of initial slag

编号	软化温度	半球温度	流动温度
1	1 275	1 305	1 350
2	1 301	1 345	1 365

根据初渣及终渣成分（表1），利用Facsage软件，对不同温度下(初渣1 450 ℃，终渣1 600 ℃)炼钢过程钢渣物相组成进行了计算，计算结果如表3所示。从表中可以看出，采用新工艺后初渣的液渣中SiO_2含量高达30.43%，而不增硅炉次仅为10.23%；

表 3 炉渣物相组成
Tab.3 Phase composition of slag

相图上成分点序号			新工艺 1	原工艺 2	新工艺 3	原工艺 4
	温度 /℃		1 450	1 450	1 600	1 600
a-Ca_2SiO_4	物相质量 /g		20.29	57.54		
	物相组成含量 w(%)	Mg_2SiO_4	6.37	2.32		
		Ca_2SiO_4	88.91	96.83		
		Fe_2SiO_4	4.72	0.85		
a-Monoxide	物相质量 /g		12.64	19.73	1.89	2.61
	物相组成含量 w(%)	FeO	51.61	48.45	3.75	3.76
		Fe_2O_3	1.43	1.23	0.18	0.18
		CaO	0.11	0.76	96.06	96.05
		MgO	46.85	49.56		
$Ca_3(PO_4)_2$	物相质量 /g		3.86	4.09	3.34	3.79
液渣	物相质量 /g		6.10	1.39	62.02	64.45
	物相组成含量 w(%)	SiO_2	30.43	10.23	15.38	15.21
		CaO	37.62	35.89	52.30	52.16
		FeO	19.84	45.76	30.83	31.13
		Fe_2O_3	1.54	5.40	1.49	1.50
		MgO	10.58	2.71		
	液渣比		14.22	1.67	92.22	90.97

同时新工艺初渣中 FeO 含量仅为 19.84%，而原工艺则达到 45.76%。可见，采用半钢增硅新工艺后转炉初渣液渣相由高铁向高硅方向转移，初渣成渣主要靠形成硅酸盐成渣，而铁酸盐成渣作用逐渐削弱，新工艺初渣液渣比明显更高。

将初渣及终渣物相组成、熔点等反映在多等温线的 CaO-SiO_2-FeOn 三元相图上（如图 5 所示），则可明显看出，采用增硅新工艺后成渣路线大致是由相图中 1→3+4，而不增硅的原工艺成渣大致是从相图中 2→3+4。因此，半钢增硅后转炉冶炼时初渣成渣路线由铁质成渣逐步向钙质成渣转变，即增硅后依靠前期高 FeO 成渣的传统成渣路线逐步被削弱。

通过对初渣进行岩相分析得出，炉渣中物相主要为硅酸二钙、RO 相、铁酸钙相、方镁石、硅酸三钙。炉渣中各元素在各物相的富集状态如表 4 所示。从表中可以明显看出，炉渣中磷在硅酸二钙中含量高达 83.47%，而在铁酸钙相、RO 相和硅酸三钙

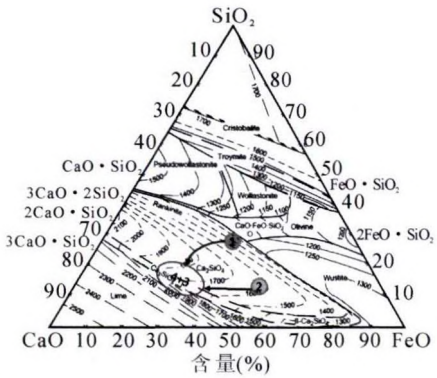

图 5 多等温线的 CaO-SiO_2-FeOn 三元相图
Fig.5 Ternary phase diagram of CaO-SiO_2-FeOn

中含量相对较少。可见，转炉脱磷主要是靠熔化后的硅酸二钙固溶相，而不靠提高氧化性而生成的铁酸钙相。

对比采用增硅工艺前后初期炉渣物相组成（如图 6）可以看出，采用增硅工艺后硅酸二钙、硅酸三钙及 RO 相含量明显提升，而铁酸钙相含量明显降低。可见，增硅后成渣路线由铁质成渣向钙质成渣转

表4 元素在矿物中的富集状态 w(%)
Tab. 4 Enrichment state of elements in mineral

矿物	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	Mo	P	S	Si	Ti	V
硅酸二钙	5.69	34.02	12.51	16.78	29.11	81.27	83.47	0.00	69.02	0.00	0.00
方镁石	0.00	0.16	3.36	49.73	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
铁酸钙	81.52	58.85	66.20	0.00	2.97	7.57	9.67	100.00	22.00	99.98	100.00
RO 相	1.30	3.57	15.70	28.75	37.13	0.00	2.72	0.00	3.86	0.00	0.00
硅酸三钙	0.02	2.24	0.26	0.00	0.00	0.00	3.45	0.00	3.53	0.00	0.00

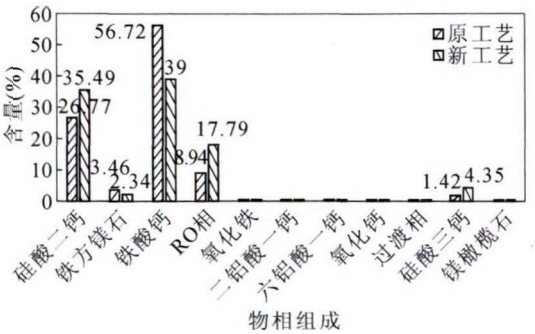

图 6 炉渣物相变化

Fig.6 Changes of phase in slag

变有利于转炉脱磷效率的提高，同时渣中含铁量的降低还能有效降低倒渣时的金属损失。

3 脱磷保碳关键工艺参数

提高转炉终点碳出钢首先要保证冶炼过程脱磷效果。不管是脱磷分子理论还是离子理论均认为：较高 FeO 含量可促进脱磷。但转炉冶炼中期，炉内碳氧反应剧烈，此时碳与渣中 FeO 反应大量消耗 FeO，使得炉渣中 FeO 急剧下降，炉渣熔点升高，同时流动性变差，炉渣“返干”，脱磷反应逆向进行，极易发生“回磷”现象，影响转炉脱磷效果。因此，选用合理的脱磷工艺参数来促进过程脱磷，减少中期返干显得尤为必要。

3.1 造渣制度

FeO 对石灰的熔化速度具有决定性的影响，它是石灰熔化的基本熔剂，能显著降低炉渣熔点，但其含量易受转炉冶炼过程的影响。炉渣中 Al_2O_3 可以和渣中 FeO、CaO 等形成低熔点的铝酸钙渣系，同样具有降低炉渣熔点的作用，且其含量不会受制于转炉碳氧反应。研究表明[17]，低 TFe 炉渣中 Al_2O_3 含量每增加 1%，其熔化温度降低 12 ℃；高 TFe 炉渣中 Al_2O_3 含量每增加 1%，其熔化温度降低约 6 ℃。同时，炉渣中加入 Al_2O_3 后形成的物质熔点基本在 1 500 ℃左右，而冶炼中期碳氧反应剧烈时炉内温度平均在 1 600 ℃以上，此时炉渣不会返干。为此，可在返干期来临前加入 Al_2O_3 缓解返干。

攀钢采用铝热法进行钒渣提钒后产生的刚玉渣中含有较高的 Al_2O_3，通过向炉内加入刚玉渣进行调渣的方式既能缓解中期返干，又能实现废弃资源的综合利用。刚玉渣成分如表 5 所示。

表5 刚玉渣主要化学成分 w(%)

Tab.5 Chemical component of corundum slag

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	V_2O_5
7.43	0.53	64.01	<0.5	13.23	1.94

综合考虑，制定高效脱磷造渣制度，造渣示意图如图 7 所示。

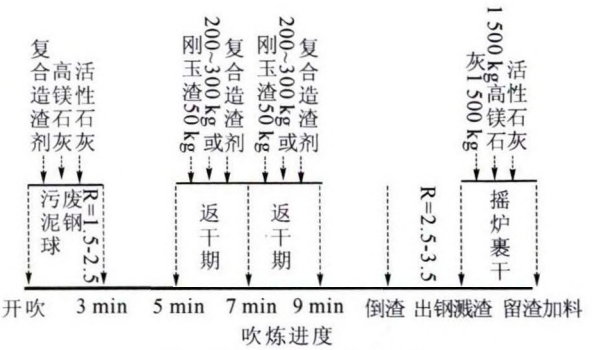

图 7 转炉冶炼造渣示意图

Fig.7 Schematic diagram of BOF slagging

3.2 供氧及底吹搅拌

采用半钢增硅热补偿新工艺后，为促进前期化渣脱磷，并控制脱碳速率和升温速率，制定了专用底吹供气模式和顶吹氧枪供氧模式，如图 8 所示。顶吹氧枪降低前期供氧强度，延长低温脱磷时间，而底吹则主要为增强熔池搅拌，减少中期返干。顶吹氧枪枪位改变原来的“滑枪”操作模式，采用“恒压恒枪”模式，通过调整加料来保持炉渣活跃，避免返干，冶炼后期降低终渣 TFe 含量。枪位控制如图 9 所示。

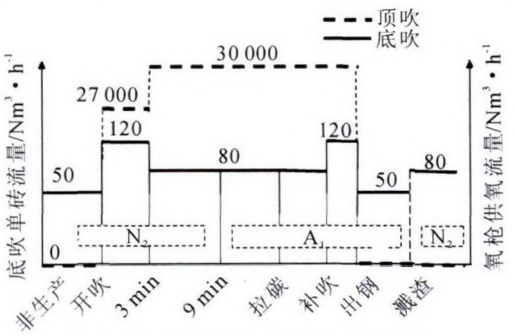

图 8 顶吹氧枪供氧及底吹供气制度

Fig.8 Top and bottom blowing system

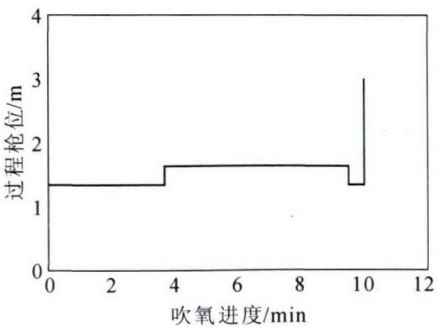

图 9 枪位控制示意图

Fig.9 Sketch map of lance position

3.3 终点控制

采用半钢增硅热补偿工艺工业应用后，仅从热源方面考虑，在保证出钢温度不变的情况下，从热平衡计算上转炉终点碳含量可提高到 0.20%~0.25%，但终点出钢碳含量与倒渣用时、钢液温降速率及降碳

速率有较大关系，如图 10 和图 11 所示。

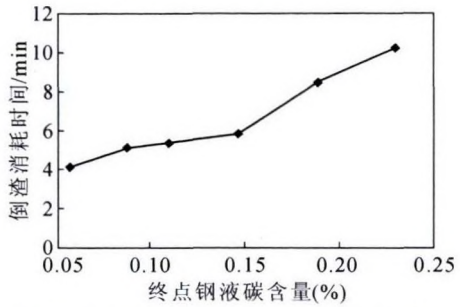

图 10 终点钢液碳含量与倒渣时间的关系

Fig.10 Relationship between carbon content and deslagging time

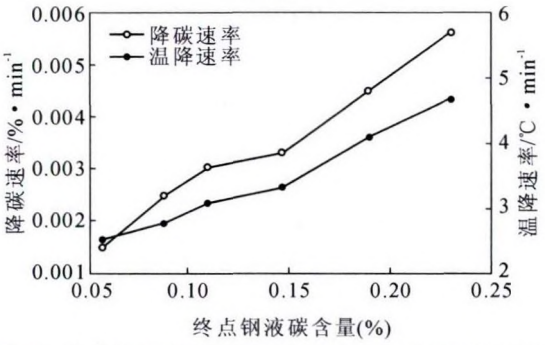

图 11 终点钢液碳含量与温降速率及降碳速率的关系

Fig.11 Relationship between carbon content and temperature falling and carbon dropping velocity

由于采用留渣加料的冶炼方式，炉内渣量较大，每炉出钢前必须倒渣。终点钢液碳含量过高，出钢时炉内碳氧反应剧烈，倒渣时炉内翻腾厉害，从而使得倒渣时间长，温降大，碳损失高。从图 10 可以看出，随着终点钢液碳含量的提高，倒渣时间延长。终点钢液碳含量在 0.15%以内时，倒渣时间基本控制在 6 min 以内，增速并不明显；超过 0.15%时倒渣时间增速明显加快。从图 11 可以看出，随着终点钢液碳含量的升高，倒渣时温降速率及降碳速率增大。终点钢液碳含量升高到 0.15%以上后，无论是温降速率还是降碳速率都明显增大，不利于钢液碳含量的精确控制、且不经济。综上所述，采用半钢增硅热补偿工艺后，将转炉终点钢液碳含量控制在 0.15%以内既能保证提高终点钢液碳含量，又能将对转炉冶炼周期、过程温降等影响降低到最小。

4 试验效果

4.1 过程控制

半钢中加入硅铁后增加了半钢热源、兑铁及转炉冶炼过程硅的氧化，提高了炉内温度，同时有利于初期渣的形成。现场跟踪重轨钢发现，半钢增硅炉次无论在新区还是老区冶炼初期渣形成时间均较对比炉次明显缩短(如表 6 所示)。从表中可以看出，试验炉次成渣时间平均仅为 3 min，较对比炉次平均缩短 0.9 min；纯吹氧时间平均缩短 61 s，吨钢氧耗降低 2.7 m^3；而吨钢辅料消耗平均降低 3.6 kg，废钢消耗平均增加 5.1 kg/$t_{钢}$。

4.2 终点碳及脱磷效果

表 7 为试验炉次终点钢液控制情况。从表中可以看出，重轨试验炉次终点钢液碳含量平均为 0.109%，较对比炉次平均提高 0.041%；而 Q 系列钢终点钢液碳含量由 0.053%提高到 0.081%。终点钢液碳含量提高后，重轨及 Q 系列钢终点钢液氧活度

表 6 过程控制数据

Tab.6 Data of process control

项目	初期渣形成时间 /min	吹氧时间 /s	吨钢氧耗 /m^3	吨钢渣料消耗 /kg	废钢消耗 /kg.t^{-1}	样本数 / 炉
原工艺	3.9 3.0~5.0	671 621~789	39.2 37.2~43.5	54.4 49.7~60.9	36.8 37.2~43.5	35
新工艺	3.0 2.0~3.5	610 585~647	36.5 35.2~38.2	50.8 46.5~55.8	41.9 37.2~43.5	41

表 7 终点钢液情况

Tab.7 Molten steel at the endpoint

钢种	项目	C (%)	T/℃	P (%)	a[O] / 10^{-6}	样本数 / 炉
重轨	试验	0.109 0.07~0.16	1 673 1 653~1 701	0.010 0.007~0.013	298 221~343	123
	对比	0.068 0.003~0.14	1 672 1 655~1 694	0.010 0.004~0.016	478 265~1 086	268
	增减	+0.041	+1	0	-180	/
Q 系列	试验	0.081 0.063~0.12	1672 1 627~1 681	0.010 0.065~0.014	395 179~355	356
	对比	0.053 0.03~0.09	1673 1 635~1 694	0.011 0.004~0.018	586 246~1 146	413
	增减	+0.028	-1	-0.001	-291	123

分别降低 180×10⁻⁶ 和 291×10⁻⁶。在辅料消耗更低以及吹氧时间缩短的条件下，转炉终点钢液磷含量与原工艺基本相当。

通过对冶炼过程钢液磷含量变化情况进行取样分析，得出增硅前及增硅后去磷保碳工艺钢液过程磷控制情况如图 12 所示。从图中可以看出，通过前期快速成渣，中期减少返干等措施后，新的"去磷保碳"工艺在吹氧时间更短的情况下，脱磷效果明显提升。

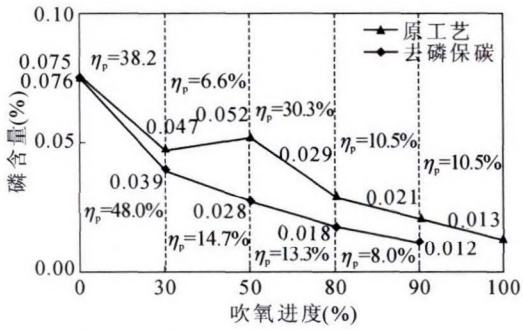

图 12 转炉冶炼过程磷含量变化情况对比

Fig.12 Comparison of phosphorus content in BOF blowing process

4.3 终渣全铁含量 TFe

表 8 为重轨钢和板坯 Q 系列钢终渣成分控制情况。从表中可以看出，提高终点钢液碳含量后，在终渣碱度及其它成分基本相当的情况下，重轨钢及板坯 Q 系列钢试验炉次终渣 TFe 含量分别为 18.62%和 18.89%，较对比炉次分别降低 1.28 和 1.96 个百分点。

表 8 终点渣样成分对比 (%)

Tab.8 Comparison of slag composition at endpoint

钢种	项目	TFe	CaO	SiO_2	MgO	其它 R
重轨钢	试验	18.62	41.28	11.64	11.24	3.55
	对比	19.90	40.99	11.57	11.61	3.54
Q 系列钢	试验	18.89	40.98	11.56	11.64	3.54
	对比	20.85	40.46	11.13	11.72	3.64

5 结论

(1)半钢增硅工艺缓解了半钢热源不足的问题，为提高转炉终点碳出钢创造了条件。

(2)通过对炼钢转炉成渣路线的理论研究表明，半钢增硅后成渣路线由原来的铁质成渣向钙质成渣转变，初渣形成时间由 3.9 min 缩短到 3 min。

(3)通过对去磷保碳工艺制度的研究，在保证转炉脱磷效果的同时，重轨钢终点钢液碳含量由 0.068%提高到 0.109%，钢液氧活度降低 180×10⁻⁶，终渣 TFe 含量降低 1.28 个百分点；Q 系列钢终点钢液碳含量由 0.053%提高到 0.081%，钢液氧活度降低 291×10⁻⁶，终渣 TFe 含量降低 1.96 个百分点。

(4)提高转炉终点碳出钢的工艺可提高钢液质量、降低冶炼成本。

参考文献：

[1] 萧忠敏. 武钢炼钢生产技术进步概况 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003:108-118.

[2] 文永才，杨森祥，王胜，等. 现代转炉炼钢技术及对攀钢炼钢发展的建议[J]. 钢铁钒钛, 2002, 23(1): 29.

[3] 杨文远，郑丛杰. 转炉溅渣护炉技术的现状及其在我国的应用前景[J]. 钢铁, 1997, 32(9): 69-71.

[4] 佟傅翘，液刘浏. 武钢二炼钢复吹转炉溅渣护炉工艺技术研究[J]. 钢铁, 2000, 35(6): 18-32.

[5] 喻承欢，骆忠汉. 武钢第二炼钢厂复吹转炉溅渣护炉冶金效果分析[J]. 钢铁, 2000, 35(增刊): 144-148.

[6] 李安林. 复吹转炉底吹供气制度的研究与应用. 钢铁, 2010, 45(4): 26-30.

[7] 纪瑞东. 转炉高拉碳法冶炼中高碳钢技术 [J]. 世界钢铁, 2013(2): 23-26.

[8] 贺书明，李志广. 复吹转炉冶炼中高碳钢时的脱磷工艺实践[J]. 冶金丛刊, 2013(3): 24-26.

[9] 张臣，曹志众. 转炉冶炼中碳钢高拉碳工艺的生产实践[J]. 本钢技术, 2010(6): 16-19.

[10] 王硕明，何东颖. 低磷高碳钢冶炼过程中磷的控制[J]. 唐山工程技术学院学报, 1995(2): 24-27.

[11] 崔立镇，韩永镇. 中高碳钢脱磷的研究与实践 [J]. 科技信息, 2011(23): 58, 71.

[12] 武郁璞，程官江，王三忠，等. 转炉冶炼中高碳钢磷的控制[J]. 钢铁研究, 2005(6): 34-36.

[13] 潘树范. LD 转炉半钢炼钢的温度问题探讨 [J]. 钢铁钒钛, 1996(1): 37-46.

[14] 袁章福，万天骥，李华. 转炉炼钢热补偿技术[J]. 炼钢, 1991(1): 44-49.

[15] 古隆建，许立志，刘南平. 转炉以煤代焦吹炼半钢的试验研究[J]. 钢铁钒钛, 1990(1): 7-10.

[16] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995, 4-377.

[17] Tsai Hwantang，潘秀兰. 渣中 TiO_2 和 Al_2O_3 对转炉溅渣护炉的影响[J]. 鞍钢技术, 2004(5): 58-62, 66.