

120 t 转炉半钢增硅热补偿技术研究及应用

陈 均¹ 曾建华¹ 李平凡² 杨森祥² 梁新腾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 攀钢集团攀枝花钢钒有限公司, 攀枝花 617062)

摘 要 针对攀钢钒采用半钢冶炼热源不足带来的终点碳偏低、终渣 TFe 含量高及捞渣烟尘大的问题, 提出在提钒转炉出半钢时加入硅铁对半钢进行化学热补偿的炼钢新工艺, 并通过对工艺参数的研究和优化, 实现了工业应用。应用效果表明, 增硅新工艺减少了转炉兑半钢时碳的烧损以及过程温降, 提高了半钢炼钢转炉热源, 半钢质量更为稳定, 使得中高碳钢终点钢水碳含量在 0.07% ~ 0.12% 的比例由 32.2% 大幅度提高到 92.38%; 重轨钢终渣 TFe 由 19.9% 降低到 18.62%, Q 系列钢终渣 TFe 由 20.85% 降低到 18.89%; 且新工艺的应用明显缓解了提钒捞渣烟尘大的问题, 具有明显的环保效益。

关键词 半钢炼钢 热补偿 转炉终点碳

Research and Application on Technology of Semi-Steel Thermal Compensation by Adding Silicon in 120 t BOF

Chen Jun¹, Zeng Jianhua¹, Li Pingfan², Yang Shenxiang² and Liang Xinteng¹

(1 State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000; 2 Vanadium-recovering and steel-making plant of Pangang, Panzhihua 617062)

Abstract To solve the problem of low carbon content at the endpoint, high TFe and heavy smoke during dredging, new steelmaking process is put forward which by adding the silicon to semi-steel to thermal compensation. By researching and optimizing the process parameters, the new steelmaking process was industrial applied. Application effect indicated that the new process could reduce the carbon burning and temperature drop during charging semi-steel, and the heat and quality of semi-steel was improved, the proportion of carbon content at the endpoint of rail steel between 0.07% ~ 0.12% was increased sharply from 32.2% to 92.38%, TFe in slag of rail steel reduced from 19.9% to 18.62%, while carbon-steel reduced from 20.85% to 18.89%. In addition, the new process greatly reduced the problem of heavy smoking during vanadium slag picking up process, which has obviously benefit of environmental protection.

Material Index Semi-Steel Steelmaking, Thermal Compensation, Carbon Content at Endpoint of Converter

攀钢集团攀枝花钢钒有限公司(简称攀钢钒)高炉采用钒钛磁铁矿冶炼,其铁水硅、锰等发热元素含量低,硫含量高。含钒铁水经脱硫提钒后获得的半钢中碳质量百分含量为 2.5% ~ 4.0%, 半钢中硅、锰发热成渣元素含量均为痕迹,因此,半钢冶炼具有热源严重不足、初期渣形成时间晚,终渣 TFe 含量高等特点。

在中高碳钢生产时转炉终点一般采用拉碳法冶炼^[1-9],由于受半钢热源不足的影响,攀钢钒在冶炼中高碳钢(45 钢、重轨钢)时,也不得不采用增碳法的终点控制方式,这种控制方式在增加转炉冶炼成本的同时,降低了钢水质量。为解决半钢热源不足的问题,攀钢科技工作者曾提出在转炉内加入焦炭粉、无烟煤、硅锰粉、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、采用废钢预热等方式降低加入废钢带来的温降等温度补偿的措施^[10-11]。由于种种原因,目前攀钢半钢冶炼

时常通过向转炉内加入采用无烟煤的方式来缓解半钢热源不足的问题,这种方式同样仍然不能解决半钢成渣慢的问题,且加入增碳剂后炉渣极易返干;另外,提钒工序增设捞渣机后,捞渣烟尘大的问题得不到解决。为此,提出在提钒炉后加入硅铁对半钢增硅以达到补偿半钢热源的目的,从而缓解半钢热源不足的问题。

1 攀钢钒半钢炼钢存在的问题及解决方案

1.1 攀钢钒半钢冶炼现状

转炉提钒时由于铁水碳、温度以及钒含量的波动导致吹氧时间不同,使得提钒后半钢温度波动大,低时能低至 1 250 °C 以下,高时能高达 1 400 °C;同时半钢碳含量也波动在 2.5% ~ 4.5%。

转炉提钒后得到半钢质量波动大,严重影响了转炉终点控制精度。加之半钢热源不足使得炼钢转炉终点钢水碳含量很难提高,深吹比例一直波动在

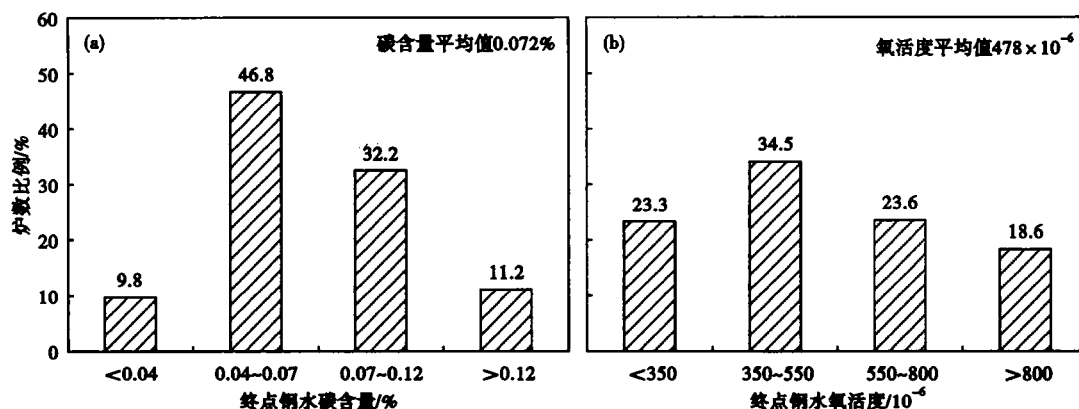


图1 中高碳钢转炉终点碳含量(a)和氧活度(b)的分布

Fig. 1 Distribution of BOF end carbon content (a) and oxygen activity (b) in medium and high carbon steel

9%~10%。深吹炉次偏多导致终点钢水氧活度及终渣 TFe 含量高。从图 1(a)中可以看出,中高碳钢碳含量在 0.07%~0.12% 的比例仅为 32.2%,碳含量小于 0.04% 的比例达到了 9.8%。同时从图 1(b)可以看出,终点钢水氧活度大于 800×10^{-6} 的比例也达到了 18.6%。转炉深吹炉次偏多直接导致终渣 TFe 含量的升高,对转炉终点炉渣随机取样发现,转炉终渣 TFe 含量平均为 20.13%,终渣 TFe 含量偏高。

另外,提钒出半钢时会有部分钒渣随钢流进入半钢罐,这部分钒渣进入下一工序后不能回收利用,且对下工序(尤其是炼钢溅渣护炉)带来不利影响。为更好的实现钒资源的合理利用和降低生产成本,炼钢厂在提钒炉后新增捞渣机,对提钒出半钢时进入半钢罐的钒渣进行回收利用。但提钒后的半钢中含有少量的氧,捞渣机捞渣时与半钢碳反应形成一氧化碳,导致捞渣过程烟尘大,环境污染严重。

1.2 解决思路

常用的碳质提温剂可达到提温的效果。但是,加入碳质提温剂后会大量消耗炉渣中 FeO 含量,半钢炼钢铁质成渣为主要成渣路线,如在初期加入会因渣中 FeO 含量的大量消耗而抑制初期渣的形成;而在中期加入则会导致炉渣返干,影响转炉冶金效果。而如果半钢中加入硅则可达到提温的目的,且吹炼初期硅氧化将显著缩短初期渣形成时间,改善炉内温度不足的现状。富裕的温度则可用于提高转炉终点碳含量,减少深吹比例。因此,通过半钢增硅后提高转炉终点碳含量,减少深吹是可行的。

为解决提钒捞渣时烟尘大的问题,需要对半钢进行脱氧,且脱氧后产物不能为气体。可采用常用的脱氧剂硅铁、铝铁、锰铁等。但考虑脱氧成本,采

用硅铁较为合适。提钒捞渣时反应为: $2C + O_2 = 2CO \uparrow$, $2CO + O_2 = 2CO_2 \uparrow$;脱氧后: $Si + O_2 = SiO_2$;产生的一氧化碳气体脱氧产物为二氧化硅进入渣中,从而减少捞渣过程烟尘量。同时,渣中的二氧化硅在兑入转炉后可促进初期渣的形成,融入半钢的硅可增加半钢热源,因此,提钒出半钢后采用硅铁脱氧可减少捞渣时烟尘量。

综上所述,通过在提钒出半钢时向半钢增硅,即可解决提钒炉后捞渣烟尘大的问题,又可缓解半钢热源不足的现状。因此,半钢增硅工艺是解决目前攀钢钒半钢炼钢问题的适宜方案。

2 半钢增硅工艺技术研究

2.1 增硅量的确定

要减少提钒出半钢时捞渣烟尘情况,须采用硅铁对半钢进行脱氧处理。根据碳氧平衡,提钒后由于半钢碳含量在 3.2%~3.8% 时,半钢中平衡氧含量 $\leq 80 \times 10^{-6}$,计算时半钢氧含量按 80×10^{-6} 计算,出钢量 135 t,硅铁中硅含量按 75% 计算,理论计算每炉半钢需要加入的最低硅铁量为 12.6 kg。

为保证增硅后半钢热源能合理的利用,在现有的半钢条件(如表 1 所示,表中“C”为碳含量)及渣料消耗情况下(如表 2 所示),对攀钢钒 120 t 转炉热平衡进行了计算。得出了半钢炼钢条件下废钢消

表1 含钒半钢和转炉终点钢水成分及温度

Table 1 Chemical composition and temperature of charging semi-steel bearing vanadium and BOF end liquid

名称	成分/%							温度/ $^{\circ}C$
	C	S	Si	Mn	P	V	Ti	
含钒半钢	3.55	0.012	0.03	0.03	0.064	0.03	痕迹	1324
终点钢水	0.05	0.008	痕迹	0.03	0.015	痕迹	痕迹	1680

表 2 金属装入量、渣料消耗以及渣量/(t·炉⁻¹)

Table 2 Metal charging amount, slag material consumption and slag amount/(t·heat⁻¹)

入炉 半钢量	钢渣 总量	石灰	新型 造渣剂	高镁	终渣 调整剂
135	9.3	3.3	2.3	3.2	0.5

表 3 废钢消耗量与半钢及入炉条件的关系

Table 3 Relation between scrap consumption and semi-steel with charging condition

项目	废钢加入量的计算依据	
半钢及入 炉条件	半钢	半钢入炉碳每增减 0.01%, 废钢加入量相应增减 1.0 kg/t _钢 。
	碳	
	半钢 温度	半钢入炉温度每增减 1℃, 废钢加入量相应增减 0.62 kg/t _钢 。
	增碳剂	每增加 1 kg 无烟煤, 废钢加入量相应增加 0.037 kg/t _钢 。
	污泥球	每增加 1 kg 污泥球, 废钢加入量相应降低 0.03 kg/t _钢 。
	总渣料	渣料加入量每增加 1.0 kg, 废钢相应降低 1.56 kg/t _钢 。

耗量与半钢条件及造渣材料的关系, 如表 3 所示。如果按照现有的半钢炼钢条件, 在终点温度不变的情况下, 提高转炉终点碳含量至 0.10% ~ 0.15%, 计算出需要加入硅铁 121 ~ 168 kg/炉。

通过热力学软件对初渣中不同 SiO₂ 含量对液相区的影响进行计算, 如图 2 所示。结果表明, 随着初渣中 SiO₂ 含量的升高, 液相区逐渐扩大, 因此, 半钢增硅后有利于初期渣快速形成。但是半钢增硅量过大, 使得初渣中 SiO₂ 含量过高将导致初渣碱度低, 辅料消耗增加, 同时影响脱磷效果。

转炉装入量按照 135 t 计算, 如废钢加入量达到 12 t 以上, 吹损按 4% 计算, 出钢量约为 142 t, 出钢

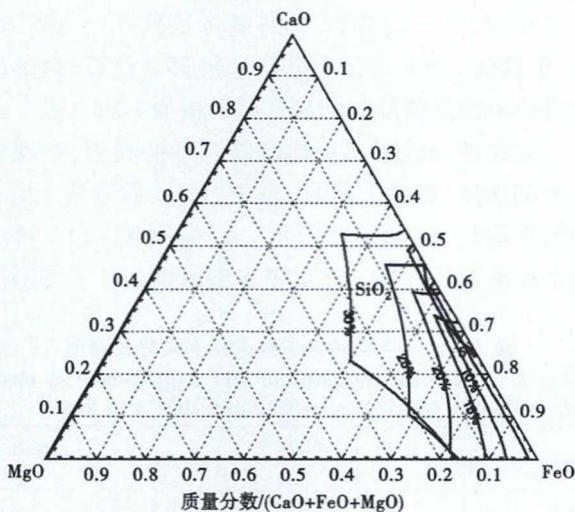


图 2 初渣中 SiO₂ 含量对液相区的影响

Fig. 2 Effect of SiO₂ content in initial slag on liquid phase zone

量过大会影响精炼处理。为此, 加入的硅铁含量应使得转炉废钢消耗量不大于 12 t, 即吨钢废钢消耗低于 88.9 kg。以此为依据, 根据热平衡计算结果, 提钒增硅时硅铁消耗量应不高于 300 kg/炉。

同时考虑在不增加活性石灰消耗量的情况下, 初渣碱度按 1.5 ~ 2.5 控制, 硅铁加入量控制在 150 ~ 250 kg/炉为最佳。

2.2 理论温降计算

出半钢时加入硅铁将对半钢温度产生一定的影响, 按钢水量 135 t, 硅铁中含铁量按 20% 计算, 理论计算表明, 加入 1 t 废钢后半钢的温降为 7.6℃, 每加入 1 kg 硅铁后, 半钢的温降为 0.00152℃, 出钢时加入 1 kg 硅铁后半钢的温降为 0.0098℃, 加入 300 kg 硅铁后半钢温降为 2.9℃, 对半钢温度影响较小, 同时出半钢时还有部分硅氧化放热, 因此, 几乎不考虑加入硅铁后对半钢温降带来的影响。

2.3 硅铁加入时间

提钒出半钢时间根据出钢口寿命波动在 3 ~ 5 min, 为提高硅铁加入硅的收得率, 在出钢前、出钢开始和出钢 1/3 后, 分别加入硅铁的增硅效果进行了对比试验, 试验结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出, 硅铁不同加入时间对硅收得率有一定影响, 在出钢 1/3 后加入硅铁时, 硅收得率最高。在正常工业应用时, 硅铁即在出钢 1/3 以后加入。

2.4 半钢质量稳定控制技术

通过对硅、碳的发热量计算得出, 半钢硅与碳热量对应关系, 并按照硅铁实际收得率 78.39% 计算, 根据半钢碳含量来确定出半钢时硅铁实际用量, 提钒出半钢时半钢碳含量与硅铁加入量的对应关系如

表 4 硅铁加入方式对硅收得率的影响

Table 4 Effect of ferrosilicon adding method on silicon yield

加入时间	硅铁加入量/kg	增硅量/%	硅收得率/%
出钢前	246	0.082	60.60
出钢开始	204	0.094	75.51
出钢 1/3	238	0.113	78.39

表 5 半钢碳含量与硅铁加入量的对应关系

Table 5 Corresponding relation between carbon content in semi-steel and silicon adding amount

半钢碳含量/%	硅铁用量/(kg·炉 ⁻¹)	折算成碳增加量/%
<3.0	300	0.31
3.0~3.2	200~300	0.21~0.31
3.2~3.4	100~200	0.10~0.21
3.4~3.6	100	0.10
>3.6	0	0

表6 增硅后对稳定半钢碳含量的贡献

Table 6 Attributing stable semi-steel carbon content to adding silicon

半钢碳含量/%	折算成碳增加量/%
<3.0	<3.31
3.0~3.20	3.31~3.41
3.2~3.40	3.41~3.51
3.40~3.60	3.50~3.60
>3.60	>3.60

表5所示。

根据表5得出,增硅后折算成碳含量对稳定半钢碳含量的贡献如表6所示。从表6中可以看出,增硅后折算成半钢碳含量增加量平均在0.10%~0.31%,并根据表5进行加入,入炉半钢碳含量波动由最初的3.0%~3.60%减小到3.31%~3.60%,在增加半钢热源的同时,进一步缩小了半钢碳含量的波动范围,为转炉冶炼奠定了基础。

3 半钢增硅新工艺试验效果

3.1 硅的收得率

试验用硅铁主要成分指标为(/%):1.18Al, 0.026P, <0.005S, 75.13Si。

在硅铁平均加入量为184 kg/炉时,半钢硅含量平均为0.085%,硅铁收得率平均为80.63%。

3.2 提钒炉后捞渣的影响

试验炉次半钢罐内渣态有明显变化,达到了用硅铁替代增碳剂改善半钢罐内钒渣渣态的初步设想效果,但试验炉次半钢罐内回收的钒渣质量波动较大(如表7所示),主要是受罐内钒渣量的影响,同时受Si氧化的影响,回收的钒渣中SiO₂组分含量较高,但试验炉次捞渣过程烟气产生量明显减少。

3.3 半钢温度变化

提钒出半钢时加入硅铁,硅铁熔化吸热,对出钢过程有一定影响,理论计算表明,每加入1 kg 硅铁,钢水温降为0.0074℃,故加入200 kg 硅铁半钢温降为1.48℃,对出钢过程半钢温降影响不大。其他条件相当的情况下,从半钢增硅扩大试验炉次与对比炉次半钢过程温度变化情况可以看出,试验炉次在半钢温度(1376℃)对比炉次半钢温度(1377

表7 试验炉次捞出的钒渣成分/%

Table 7 Ingredient of vanadium slag picking up in test heats /%

项目	CaO	V ₂ O ₅	SiO ₂	TFe	P
平均值	7.51	8.16	27.25	20.88	0.060
波动值	1.59~11.82	4.68~14.38	18.6~31.93	16.04~25.88	0.020~0.210

表8 半钢碳变化情况/%

Table 8 Variation of carbon content in semi-steel /%

项目	提钒炉后	入炼钢炉	碳烧损
试验	3.60	3.56	0.05
对比	3.61	3.50	0.11
试验-对比	-0.01	0.06	-0.06

℃)低1℃的情况下,入炉温度(1341℃)对比炉次(1336℃)高4℃。半钢增硅炉次提钒到入炼钢炉平均温降为35℃,较对比炉次(平均温降40℃)平均降低5℃,分析认为主要是硅烧损后的热量补偿了半钢温度的损失。

3.4 半钢碳含量变化

表8为试验炉次半钢碳含量变化情况。选择提钒炉后终点碳含量相当炉次进行作为对比炉次,试验炉次提钒后到炼钢兑铁后半钢碳烧损平均为0.05%,对比炉次碳烧损为0.11%,试验炉次提钒出半钢至兑铁后半钢中硅的烧损减少了碳的损失,试验炉次碳的烧损减少了0.06%。可见,半钢中硅的烧损减少了碳的烧损。

4 半钢增硅新工艺的应用

4.1 半钢质量稳定

通过对工艺参数的优化以及根据不同半钢碳含量条件下硅铁加入量的研究,半钢质量得到了良好的控制,优化前后半钢碳及半钢温度波动情况如图3所示(横坐标为统计的样本数)。从图3可以看出,通过对提钒冶炼工艺参数的优化及不同半钢碳条件下增硅量的确定,半钢碳含量平均提高0.161%,半钢温度平均提高5.3℃,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,为转炉冶炼奠定了基础。

4.2 终点碳含量

项目研究成果应用后,根据攀钢钒中高碳钢转炉终点钢水碳含量在0.07%~0.12%的比例变化情况可以看出,随着对新工艺相关参数的不断完善和优化,攀钢钒中高碳钢转炉终点钢水碳含量在0.07%~0.12%的比例由2014年3月的32.2%大幅度提高到2016年12月的92.38%,在降低转炉冶炼成本的同时,提高了钢水质量。

4.3 终渣 TFe 含量

图4为项目研究成果应用前后,攀钢钒典型中高碳钢重轨钢和Q系列钢(Q235、Q195、Q235B)转炉终渣TFe变化情况。从图4中可以看出,随着研究的不断深入以及对相关参数的进一步优化,提高终点钢水碳含量后,2013年至2016年转炉终渣TFe

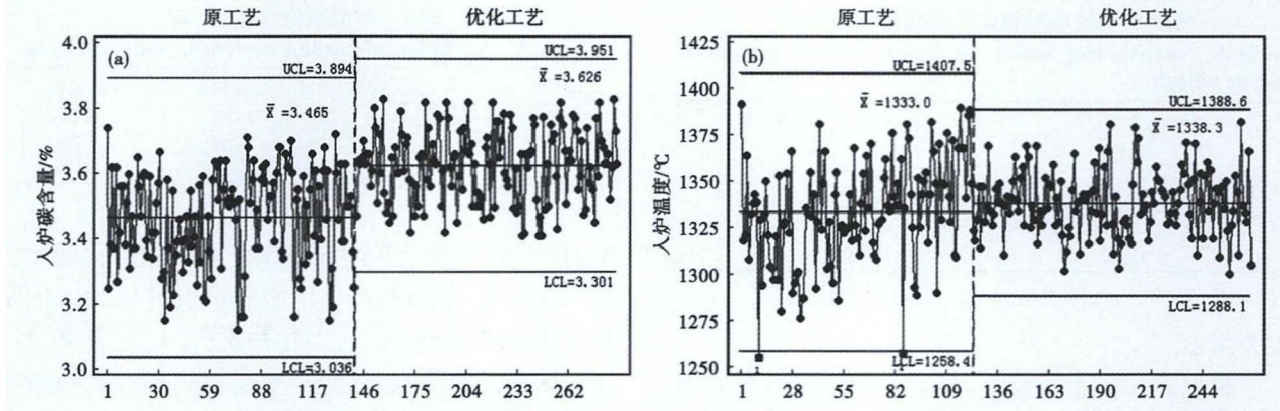


图 3 原工艺(左)和优化工艺(右)半钢碳含量(a)和温度(b)变化范围

Fig. 3 Variation range of carbon content (a) and temperature (b) of semi-steel with original process (left) and optimal process (right)

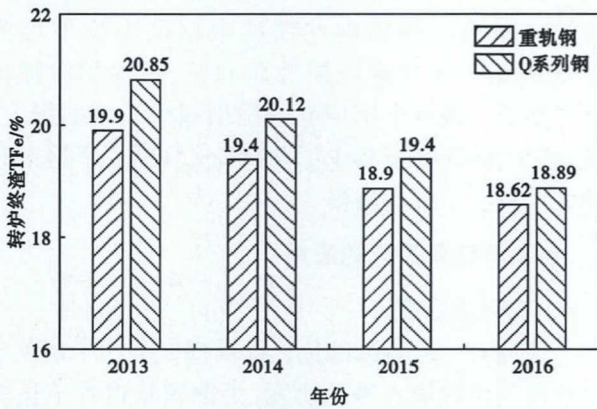


图 4 转炉冶炼重轨钢和 Q 系列钢的终渣 TFe 含量变化
Fig. 4 Variation of TFe content in end slag for BOF melting heavy rail steel and Q-series steels

呈明显下降趋势,其中重轨钢由最初的19.9%降低到18.62%,Q235系列钢由20.85%降低到18.89%。

参考文献

[1] 纪瑞东. 转炉高拉碳冶炼中高碳钢技术[J]. 世界钢铁, 2013, 13(2): 23-26.
 [2] 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]. 工程技术研究, 2013, (3): 24-26.
 [3] 张 臣, 曹志众. 转炉冶炼中高碳钢高拉碳工艺的生产实践[J]. 本钢技术, 2010(6): 16-19.
 [4] 王硕明, 何东颖. 低磷高碳钢冶炼过程中磷的控制[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 1995, 17(2): 24-27.
 [5] 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.
 [6] 李建新, 郝旭东, 韩秀丽, 等. 转炉冶炼工艺过程中炉渣的岩相研究[J]. 钢铁, 2009, 44(11): 41-46.
 [7] 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, 33(6): 34-36.
 [8] 慕进文. 转炉高拉碳单渣法冶炼高碳钢[A]. 第十七届(2013年)全国炼钢学术会议论文集(A卷)[C]. 杭州: 中国金属学会炼钢分会, 2013, 5.

5 结论

- (1) 半钢增硅热补偿工艺能有效的缓解攀钢钒半钢冶炼存在的问题, 工艺可行。
- (2) 采用提钒炉后加入硅铁对半钢进行增硅试验表明, 半钢增硅炉次提钒到入炼钢炉平均温降低5℃; 提钒出半钢至兑铁后半钢中硅的烧损减少了碳的损失, 试验炉次碳的烧损平均减少0.06%。
- (3) 根据提钒半钢成分加入不同硅铁进行增硅, 可达到稳定半钢质量的目的, 为炼钢转炉提高终点碳含量出钢创造了条件。
- (4) 半钢增硅热补偿优化工艺全面推广应用后, 中高碳钢转炉终点钢水碳含量在0.07%~0.12%的比例由32.2%大幅度提高到92.38%, 重轨钢终渣TFe含量由19.9%降低到18.62%, Q235系列钢终渣TFe含量由20.85%降低到18.89%, 在降低转炉冶炼成本的同时, 提高了钢水质量。

[9] 王运卿, 闫卫兵, 熊牧军, 等. 宣钢转炉高碳低磷冶炼技术[A]. 河北省冶金学会、河北钢铁集团唐钢公司. 河北省2011年炼钢连铸生产技术与学术交流会论文集[C]. 唐山: 河北省冶金学会、河北钢铁集团唐钢公司, 2011: 3.
 [10] 袁章福, 万天骥, 李 华. 转炉炼钢热补偿技术[J]. 炼钢, 1991(3): 44-49.
 [11] 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, 11(3): 7-10.

陈 均(1986-), 男, 硕士(2017年北京科技大学), 工程师, 2009年内蒙古科技大学(本科)毕业, 转炉炼钢及工艺优化研究. E-mail: foresttiger119@163.com

收稿日期: 2018-06-20