

## 200 t 转炉半钢冶炼提高转炉废钢消耗的试验研究

陈 均 梁新腾

(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)

**摘 要** 针对攀钢半钢冶炼转炉热源不足,废钢消耗偏低的问题,通过对转炉热平衡计算,得出了不同半钢条件下的理论废钢消耗量以及终点碳、温度与废钢消耗量的对应关系。通过采用半钢增硅+转炉碳质提温相结合的提温方式进行热补偿,以及采用优化造渣加料制度、降低出钢温度等技术措施后,终点钢水碳含量由 0.048% 提高到 0.068%,转炉出钢温度由 1 658 ℃ 降低到 1 638 ℃,在吨钢辅料消耗更低的情况下,脱磷率平均提高 1.1 个百分点,废钢消耗由原来的 38.9 kg/t<sub>钢</sub> 提高到 68.7 kg/t<sub>钢</sub>。

**关键词** 废钢 半钢冶炼 热补偿 出钢温度

## Test and Research on Improving Scrap Consumption of Converter During Semi-Steel Steelmaking of 200 t BOF

Chen Jun and Liang Xinteng

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co Ltd, Panzhihua 617000)

**Abstract** According to low consumption of scrap consumption in semi-steel smelting converter at Panzhihua Steel caused by insufficient heat source of semi-steel, by calculating the heat balance of the converter, the theoretical scrap consumption under different semi-steel conditions and the corresponding relationship between the end-point carbon, temperature and scrap consumption are obtained. By charging silicon in semi-steel and using carbon during blowing for thermal compensation and adopting technical measures of optimized slag charging system, reducing tapping temperature, the carbon content at the end-point of molten steel has increased from 0.048% to 0.068%, BOF tapping temperature reduced from 1 658 ℃ to 1 638 ℃, in the case of a lower material consumption of per ton steel, the dephosphorization rate increased by 1.1 percentage point on average, and the scrap consumption increases from original 38.9 kg/t<sub>钢</sub> to 68.7 kg/t<sub>钢</sub> as well.

**Material Index** Scrap, Semi-Steel Steelmaking, Thermal Compensation, Tapping Temperature

随着中国钢铁产能的增加,粗钢产量占全球的 50% 以上。粗钢产量增加的同时,废钢资源也在逐年累积,2020 年我国废钢的资源量已达到 2.1 亿 t, 预计 2030 年可达 3.2~3.5 亿 t<sup>[1-2]</sup>。

有研究表明<sup>[3]</sup>,使用废钢炼 1 t 钢,可减少 1.6 t 碳排放,其 CO<sub>2</sub> 排放量仅为长流程的 27%,转炉作为废钢消耗的关键设备,在提高废钢消耗方面已有大量工业应用实践<sup>[4-9]</sup>,常规铁水冶炼转炉吨钢废钢消耗可达 200 kg 以上<sup>[10]</sup>,而采用半钢炼钢的企业由于热源不足,废钢消耗普遍偏低。

攀钢采用钒钛磁铁矿冶炼,其炼钢转炉公称容量为 200 t,工艺流程为:钒钛磁铁矿→高炉冶炼→钒钛铁水→转炉提钒→预处理脱硫→转炉半钢冶炼,提钒后的半钢转炉冶炼热源不足,废钢消耗与铁水炼钢企业相比偏低。为提高转炉废钢消耗,在对炼钢转炉热平衡计算的基础上,通过对工艺参数的优化,形成了半钢增硅热补偿提高炼钢转炉废钢消耗的工艺并实现工业应用,在保证转炉冶炼顺畅的同时,使得炼钢

转炉平均废钢由 38.9 kg/t<sub>钢</sub> 提高到 68.7 kg/t<sub>钢</sub>。

### 1 半钢冶炼提高转炉废钢消耗的难点及思路

首先,攀钢采用钒钛磁铁矿冶炼,含钒铁水经脱硫提钒后获得的半钢中碳含量平均仅有 3.32%,硅、锰等发热成渣元素含量很低,半钢温度仅为 1 280 ℃~1 360 ℃(表 1),与普通铁水相比,半钢碳和温度更低,转炉冶炼热源严重不足,要实现高废钢消耗难度较大。

其次,转炉出钢温度过高也是导致废钢消耗偏低的主要原因。如 Q235 钢平均出钢温度达到 1 658 ℃,在热源不足的情况下,终点钢水温度偏高使得出钢碳含量也偏低,平均出钢碳含量仅为 0.048%,且低于 0.04% 的比例达到了 36.2%。

半钢冶炼热源不足加之出钢温度偏高导致转炉废钢消耗量偏低。平均仅为 38.9 kg/t<sub>钢</sub>。

针对这一问题,从以下几个方面开展工作:

(1) 半钢化学热补偿,提高炉内热效率。

表1 普通铁水和半钢的化学成分及温度

Table 1 Chemical component comparison of iron and semi-steel and temperature

原料	成分/%						温度/℃
	C	Si	Mn	P	S	V	
半钢	2.50~4.00	≤0.02	≤0.02	0.04~0.09	0.01~0.03	0.02~0.06	1280~1360
普通铁水	4.00~5.50	0.25~0.70	0.15~0.50	0.05~0.12	0.01~0.04	-	1300~1380

表2 碳质增碳剂和硅铁热补偿的优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of thermal compensation by carbon recarburization agent and ferrosilicon

热补偿介质	加入时间及方式	优点	缺点
碳质增碳剂	转炉冶炼中期料仓加入	热补偿成本较低,在冶炼中期加入对冶炼过程影响较小,可根据炉内温度灵活加入。 (1)出半钢及兑铁时氧化的硅形成 SiO <sub>2</sub> 可促进快速成渣,提高脱磷效果。 (2)硅溶入半钢成为其中一元素,燃烧时热量分布均匀,热效率高; (3)可减少转炉兑铁时烟尘及半钢碳损失,提高半钢化学热。	粒度较小,燃点低,热利用率不高
硅铁	提钒出半钢加入		成本较高

保证有足够的热源是提高废钢消耗的前提。增加炼钢转炉半钢中的硅含量,不但可以提高半钢热源,硅氧化后还可以促

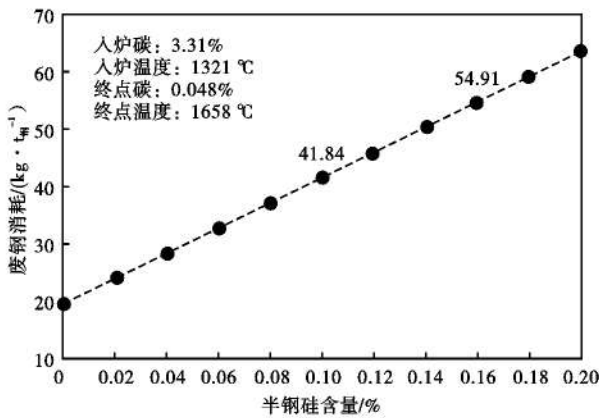


图1 半钢硅含量对转炉废钢消耗量的影响

Fig.1 Effect of silicon content in semi-steel on BOF scrap consumption

进快速成渣脱磷,可有效缓解半钢冶炼提高废钢消耗后成渣难的问题。

(2)合理利用热源,规范废钢加入。

为实现炉内现有热源的有效利用,有必要对转炉

热平衡进行计算,根据不同入炉条件及终点控制,规范废钢加入量,对废钢加入量提供指导。

(3)降低出钢温度。

根据钢种特性,合理规范钢水过程温度,可降低出钢温度进而利用炉内更多的热源来消耗废钢。

## 2 转炉热补偿技术

攀钢曾在冶炼前期采用无烟煤增碳剂在转炉炉内进行热补偿<sup>[9-11]</sup>,但由于加入后大量消耗渣中 FeO 导致冶炼前期成渣难。为此,结合攀钢半钢冶炼的特殊性开发出在提钒出半钢时加入硅铁对半钢进行化学热补偿的半钢增硅新工艺,该工艺的推广应用可在提高半钢热源的同时加速转炉前期成渣,有利于提高脱磷效果<sup>[11]</sup>。同时,考虑到热补偿经济性,转炉增加废钢消耗时提出了增硅工艺与碳质提温工艺结合的热补偿技术。该热补偿方式及其优缺点如表2所示。

经测算,半钢中硅含量的适宜范围为0.10%~

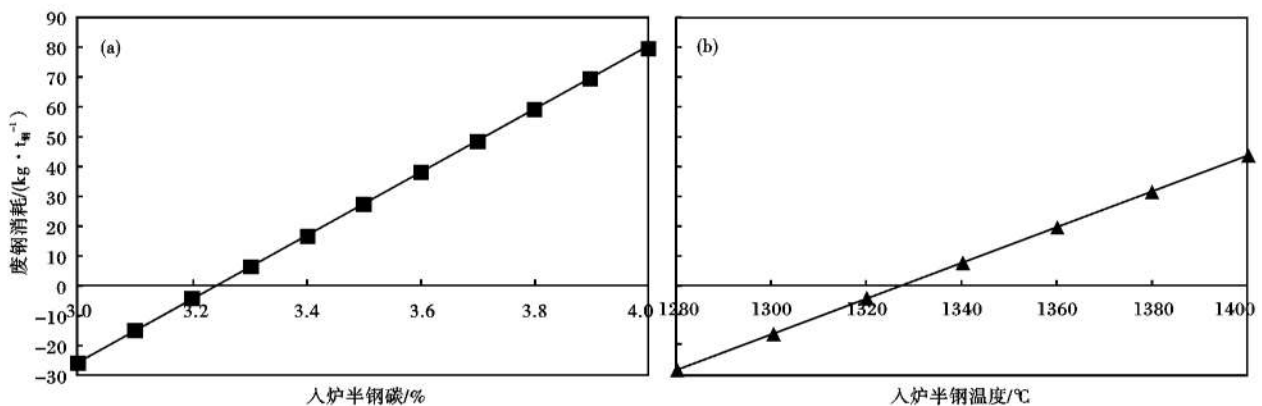


图2 转炉半钢碳(a)和半钢温度(b)对理论废钢消耗的影响

Fig.2 Effect of BOF semi-steel carbon content (a) and semi-steel temperature (b) on theoretical scrap consumption

表 3 200 t 转炉废钢加入量操作制度  
Table 3 Operation system of scrap charing in 200 t BOF

项目	废钢加入量的计算依据		
	[C] = 3.5%	T = 1 274 ℃	废钢 = (0/t)/炉
临界废钢消耗			
半钢及入炉条件	半钢 C	半钢入炉 [C] 每增减 0.01%, 废钢加入量相应增减 0.89 kg/t <sub>钢</sub> 。	
	半钢温度	半钢入炉温度每增减 1 ℃, 废钢加入量相应增减 0.68 kg/t <sub>钢</sub> 。	
	提温剂	每增加 1 kg 类石墨 (C = 80.2%), 废钢加入量相应增加 0.032 kg/t <sub>钢</sub> 。	
	废钢	加入 1 t 废钢, 铁水 (半钢) 温降 7.3 ℃。	

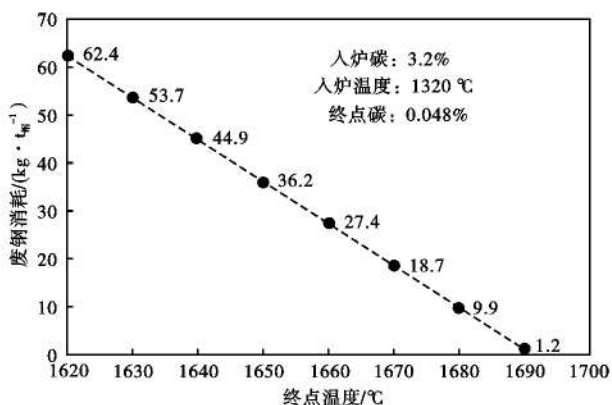


图 3 转炉终点钢水温度对理论废钢消耗的影响

Fig. 3 Effect of BOF liquid tapping temperature on theoretical scrap consumption

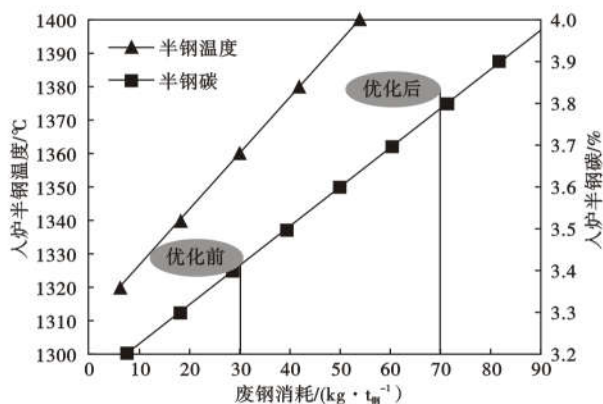


图 4 120 t 转炉优化前后废钢消耗变化

Fig. 4 Changes of scrap consumption before and after optimization of 120 t BOF

0.15%, 提钒炉后硅铁加入量在 300 ~ 500 kg/炉, 在表 1 的半钢条件下, 不同半钢硅含量对废钢消耗量的影响如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 当半钢中硅含量达到 0.10% ~ 0.16% 后, 从热量方面考虑, 吨钢理论废钢消耗可达到 41.84 ~ 54.91 kg, 较目前废钢消耗明显提升。

### 3 理论废钢消耗计算

为提高转炉终点命中精度和热源利用率, 对 200 t 转炉热平衡进行了计算, 得出了不同半钢碳、温度条

件下理论废钢消耗量(图 2), 并通过对半钢碳、温度及碳质提温剂对炉内热源的影响的研究得出了炼钢转炉废钢加入量操作制度(表 3)。

图 3 为现有入炉条件下出钢温度与理论废钢消耗量的关系。从图 3 中可以看出, 随着出钢温度的降低, 理论废钢消耗量逐渐升高。如将现有出钢温度从 1 658 ℃ 降低到 1 640 ℃ 以内, 吨钢废钢消耗可提高约 20 kg。因此, 降低出钢温度显得尤为必要。

根据理论计算, 不同半钢条件下热补偿前后废钢消耗变化如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 热补偿和降低出钢温度后转炉废钢消耗吨钢可达到 70 kg 左右。

## 4 冶炼工艺优化

### 4.1 留渣加料及造渣工艺参数优化

为减少对初期成渣的影响, 对加料顺序及造渣工艺参数进行了优化, 首先, 改变了装料顺序, 将原来的先兑铁再加废钢改为先加废钢再兑铁, 利用炉内钢渣余热对废钢进行预热。其次, 对过程造渣制度进行了

表 4 优化前后转炉加料制度

Table 4 Charging system for BOF before and after optimization

冶炼过程	优化前/(kg·炉 <sup>-1</sup> )			优化后/(kg·炉 <sup>-1</sup> )		
	白灰	高镁	复合渣	白灰	高镁	复合渣
留渣加料期	2000	2000	0	1000	1000	1500
开吹 3min 内	600	1000	1300	1000	1000	500
吹炼过程	1000	400	800	1000	1000	100

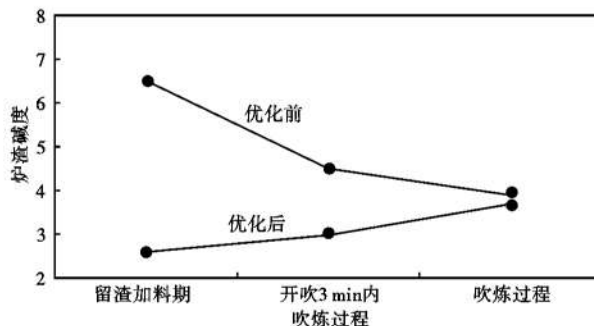


图 5 优化前后转炉冶炼过程炉渣碱度变化

Fig. 5 Changes of slag basicity in BOF steelmaking process before and after optimization

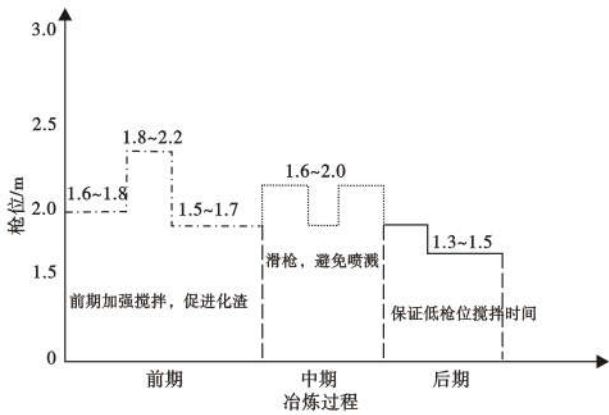


图6 转炉冶炼过程枪位控制示意图

Fig.6 Sketch map of lance control in BOF steelmaking process

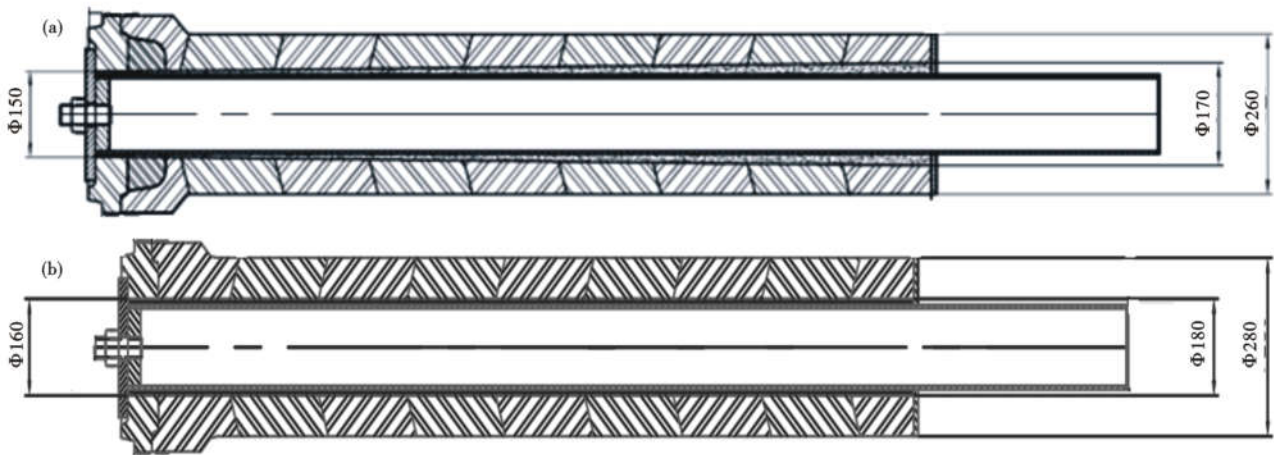


图7 (a)优化前150/170 mm出钢口(b)优化后160/180 mm出钢口示意图

Fig.7 Schematics of tapping hole before 150/170 mm (a) and after 160/180 mm (b) optimization

位,并保证后期低枪位(1.3~1.5 m)吹炼时间1 min以上以降低渣中全铁含量。冶炼过程枪位控制示意图如图6所示。

4.3 降低出钢温度

为避免深吹,将终点钢水碳含量提高至0.06%~0.08%。再根据钢种浇注温度反推确定了出钢温度的控制范围,出钢温度可按如下方法计算:

$$T_{出} = T_L + \Delta T + \Delta t \quad (1)$$

式中:  $T_{出}$ -出钢温度/°C;  $\Delta t$ -从出钢、钢水精炼至钢水开浇时的钢水温降/°C;  $T_L$ -钢水的液相线温度/°C;  $\Delta T$ -钢水的过热度/°C。

钢水的液相线温度取决于钢水中所含元素的性

质和含量,计算公式如式(1)所示:

4.2 过程枪位控制

为避免转炉增加废钢消耗后导致冶炼过程喷溅及终渣 TFe 升高的问题。对氧枪枪位进行了优化。综合考虑氧气射流与熔池的相互作用,开吹时逐渐提高枪位促进化渣;初期渣形成后,冶炼过程采用滑枪操作防止炉渣喷溅和过程返干;中、后期逐渐降低枪

质和含量,计算公式如式(1)所示:

$$T_L = 1537 - [88C\% + 8Si\% + 5Mn\% + 30P\% + 25S\% + 5Ca\% + 4Ni\% + 2Mo\% + 2V\% + 1.5Cr\%] \quad (2)$$

经测算,典型钢种 Q235 出钢温度仅为 1 630~1 640 °C即可满足要求。同时,对出钢口结构进行了优化,将原来的 150/170 mm 出钢口扩大至 160/180 mm出钢口。出钢口优化后,出钢时间平均缩短 1 min,出钢过程温度降低 9 °C,优化前后出钢结构如图7所示。

5 试验效果

5.1 废钢消耗

从表5中可以看出,优化后吨钢废钢消耗由原来的38.9 kg提高到68.7 kg,且通过对造渣工艺的优化,初期渣成渣时间由4.1 min缩短到3 min,在辅料消耗更低的情况下

表5 优化前后转炉废钢消耗

Table 5 BOF scrap consumption before and after optimization

工艺	成渣时间/min	废钢消耗/(kg·t <sup>-1</sup> )	硅铁/(kg·炉 <sup>-1</sup> )	碳质提温剂/(kg·炉 <sup>-1</sup> )	脱磷率/%	辅料消耗/(kg·t <sup>-1</sup> )
优化后	3.0	68.7	489	456	82.3	42.2
优化前	4.1	38.9	0	246	81.2	45.8

表6 优化前后转炉终点渣样成分对比

Table 6 BOF end slag composition before and after optimization

工艺	终渣成分/%					碱度(R)
	TFe	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	fCaO	
优化后	17.32	40.16	10.86	10.59	2.88	3.60
优化前	19.33	40.24	11.14	11.78	6.89	3.70

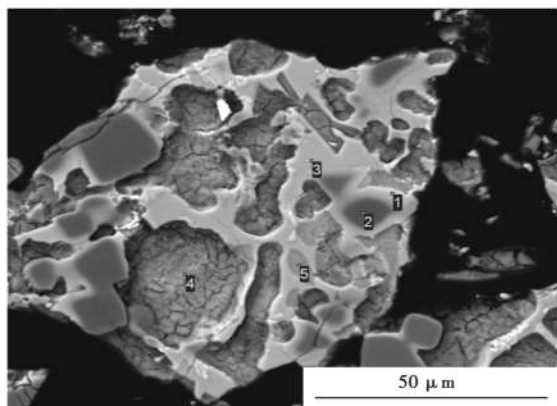


图8 转炉终渣形貌

Fig. 8 Morphology of BOF end slag

表7 终点钢渣岩相矿物组成及含量/%

Table 7 Mineral composition and content of end-point slag/%

工艺	硅酸三钙	硅酸二钙	铁酸钙	铁方镁石	RO相	游离CaO	金属铁
优化前	6~10	38~44	12~16	12~16	3~7	4~8	2~4
优化后	2~4	37~43	8~11	11~15	3~7	2~5	2~4

脱磷率由81.2%提高到82.3%，保证了提高废钢消耗后转炉正常冶炼。

## 5.2 终点控制

根据出钢温度及终点碳含量变化情况,对转炉热平衡进行计算,实施热补偿及工艺优化措施,在保证提高废钢消耗的同时,Q235钢平均出钢温度由原来的1658℃降低到1638℃,且出钢温度在1660℃以上的比例由原来的28.8%降低到4.7%,出钢温度在1640℃以下的比例由原来的25.4%显著提高到75.9%。热源富裕后,转炉终点钢水碳含量也由原来的0.048%提高到0.068%,终点碳小于0.04%的比例由36.2%降低到6.9%,深吹比例显著降低。

## 5.3 钢渣组分变化

从表6中可看出,热补偿后虽然废钢消耗显著提升,但是通过热平衡计算使得炉内热源利用更为合理,终点温度显著降低,提高了终点碳,终渣TFe含量由原来的19.33%降低到17.32%,且由于对造渣加料制度的优化,初期渣形成时间缩短,石灰利用率提高,渣中游离CaO(fCaO)显著降低。

从图8中可以看出,炉渣中物相主要为RO相(1)、方镁石(2)、铁酸钙相(3)、硅酸二钙(4、5)。通过对提高废钢消耗前后钢渣岩相组分分析结果(表7)可以看出,提高废钢消耗后通过对工艺参数的优化,炉渣熔化更好,吨钢辅料消耗更低,炉渣中游离CaO及硅酸三钙含量均显著降低。而终点碳提高、温度降低显著降低了深吹比例,炉渣中铁酸钙含量也显著降低,进一步验证了炉渣TFe含量降低。

## 6 结论

(1)采用半钢增硅和碳质增碳剂相结合的提温方式可有效提高半钢转炉热源。

(2)通过转炉热平衡计算得出了不同入炉半钢条件下理论废钢消耗量,有利于提高炉内热源利用率和规范废钢加入。

(3)通过工艺优化,转炉出钢温度由1658℃降低到1638℃,终点钢水碳含量也由0.048%提高到0.068%,在吨钢辅料消耗更低的情况下,脱磷率平均提高1.1个百分点,终渣TFe平均降低2.01个百分点,废钢消耗由原来的38.9 kg/t<sub>钢</sub>提高到68.7 kg/t<sub>钢</sub>。

## 参考文献

- [1] 孙建新,张继强.提高转炉废钢比的整体解决方案[J].炼钢,2018,34(5):19-25.
- [2] 上官方钦,郇秀萍,周继程,等.中国废钢资源发展战略研究[J].钢铁,2020,55(6):8-14.
- [3] 张志伟.提高转炉废钢比研究综述[J].柳钢科技,2018(1):6-9.
- [4] 王 劼,华福波,谢 祥,等.提高冶炼低硅含钛铁水转炉废钢比工艺攻关[J].连铸,2020(6):27-33.
- [5] 方 文,杨宁川,游香米,等.高效低耗转炉大废钢比技术路径研究[J].炼钢,2020,36(6):8-13.
- [6] 冯春松,肖步庆,田晓涛,等.转炉炼钢最佳废钢比计算模型[J].炼钢,2020,36(3):7-12+43.
- [7] 何顺生,杨文远,李任春,等.邯宝大型转炉炼钢工艺优化的研究[J].炼钢,2019,35(5):16-22+49.
- [8] 郭江增,谭雷红,田 芳,等.济源钢铁降铁耗高废钢比生产组织实践[J].河南冶金,2020,28(4):35-37.
- [9] 孙建新,马兵书.转炉冶炼中炉外废钢的应用[J].天津冶金,2019(4):11-14.
- [10] 金 磊,司 宇,栗克建.80 t转炉提高废钢比的生产实践与炉况维护[J].连铸,2021(1):21-25.
- [11] 陈均,曾建华,陈炼等.攀钢半钢冶炼热补偿工艺开发及应用[J].钢铁研究学报,2020,32(7):618-625.

陈 均(1986-),男,硕士(2018年北京科技大学),高级工程师,2009年内蒙古科技大学(本科)毕业,炼钢工艺研究。  
E-mail:foresttiger119@163.com

收稿日期:2021-03-28