

180 t 转炉高废钢比冶炼工艺开发

管挺¹ 王耀¹ 刘飞¹ 邹长东¹ 王建华²

(1. 江苏省(沙钢)钢铁研究院, 张家港 215625; 2. 江苏沙钢集团有限公司转炉炼钢厂, 张家港 215625)

摘要 通过对转炉炼钢过程的平衡计算结果进行分析, 得出了提高废钢比的措施: 减少渣量, 减少冷却剂用量和添加升温材料等。结合理论计算和生产实践, 减少 1 kg/t 炉渣可提高废钢比 0.10%, 减少 1 kg/t 冷却剂可提高废钢比 0.19%, 增加 1 kg/t 无烟煤可提高废钢比 0.27%, 增加 1 kg/t 清洁升温剂可提高废钢比 0.41%, 工艺优化后转炉废钢比可由 17.0% 提高到 23.1% 以上。

关键词 180 t 转炉 废钢比 无烟煤 升温剂

Development of High Scrap Ratio in Steelmaking Process of 180 t Converter

Guan Ting¹, Wang Yao¹, Liu Fei¹, Zou Changdong¹, Wang Jianhua²

(1 Institute of Research of Iron and Steel, Jiangsu Province/Shasteel (IRIS), Zhang Jiagang 215625;

2 Converter Steelmaking Plant, Jiangsu Shasteel Group Co. Ltd, Zhang Jiagang 215625)

Abstract Based on the analysis of the equilibrium calculation results of the converter steelmaking process, the measures to increase the scrap ratio are obtained that are reducing slag, reducing the amount of coolant and adding heating agent. The results show that, the scrap ratio can be increased by 0.10% by reduce 1 kg/t slag, 0.19% by reduced 1 kg/t coolant, 0.27% by adding 1 kg/t anthracite, and 0.41% by adding 1 kg/t clean heat agent, and the scrap ratio can be increased from 17.0% to 23.1% by optimized the process.

Material Index 180 t Converter, Scrap Ratio, Anthracite, Heating Agent

废钢作为钢铁工业的绿色资源, 具有较高的节能环保价值。在铁水量相对固定的情况下, 提高转炉冶炼废钢比, 可降低环境污染, 提高炼钢产量。江苏沙钢集团有限公司转炉某炼钢车间 2017 年第一季度平均废钢比为 17.0%。

转炉提高废钢比冶炼面临的主要问题为炉内热源不足, 针对此种情况, 国内外常用的技术有以下 4 种^[1-5]。(1) 转炉内废钢预热, 通过喷吹煤粉、氧气、天然气或重油来预热废钢, 之后加入铁水进行冶炼; 比利时西德玛尔厂在一座 200 t 转炉上, 每吨钢水喷入 9.5 m³ 天然气与 10 m³ 氧气, 每吨钢水可多兑入 80 kg 废钢, 一般预热时间为 9~15 min, 延长操作时间 7~19 min, 预热后提高废钢比 5%~9%。(2) 冶炼过程添加发热剂, 将一定粒度的煤块或者焦粉从炉口通过加料料斗直接加入, 增加炉内热源。前苏联顿涅兹黑色冶金科学研究所 160 t 转炉中将装料量 0.6%~0.7% 的无烟煤和一定量的石灰一起加在炉底, 可少用铁水 30~35 kg/t, 相当于千克无烟煤可熔化 5 kg 废钢。(3) 喷吹煤粉, 主要有炉顶喷煤粉和炉底喷煤粉两种, 新日铁君津厂的 240 t 转

炉在开吹 1 min 后将煤粉高速喷入熔池内, 煤被喷吹到熔池深部, 可立即溶解, 煤的收得率几乎可达 100%。该厂实践证明, 每喷吹 1 kg 煤, 可增加废钢 6.1 kg, 吨钢喷煤量达 25 kg。(4) CO 二次燃烧技术, 借助于特定的供氧装置—二次燃烧氧枪, 将吹炼时炉内产生的 CO 燃烧成 CO₂, 以提高钢水温度的热补偿技术。日本新日铁君津厂、住友和歌山厂, 国内的鞍钢三炼厂、首钢一炼厂采用此技术进行冶炼, 废钢比可提高 1.5%~3.5%。

根据沙钢自身的实际情况, 转炉冶炼过程添加发热剂相对较为可行, 经过一年的生产实践, 转炉炼钢废钢比可达 23.1% 以上。

1 现状分析

收集 2017 年 1~3 月沙钢转炉炼钢某车间转炉冶炼的数据。金属料消耗情况以及铁水信息如表 1 所示, 冶炼过程辅料消耗情况及转炉终点信息如表 2 所示。由表 1 和表 2 可知, 2017 年 1~3 月, 现有铁水条件下冶炼, 转炉废钢比约为 17.0%, 对应的转炉终点出钢温度为 1 619 ℃, 出钢碳含量为 0.058%。根据表 1 和表 2 的数据, 建立物料平衡模

型和热平衡模型,如表 3 和表 4 所示。由表 4 可知,现有冶炼条件下热量的来源主要有铁水物理热、元素反应热、炉渣的成渣热、初始渣热量以及铁氧化所产生的热量。体系热支出主要用于钢水的升温,钢水物理热占比为 68.2%;除了不可控的热损失外,通过减少渣量和减少冷却剂消耗可减少热损失。由此分析可知,为增加转炉冶炼废钢比,可采用增加转炉热源、减少转炉渣量、减少冷却剂用量等措施。

2 工艺优化措施及应用效果分析

采用表 4 的热平衡模型计算了转炉废钢比增加 1% 所需热量为 22 344.5 kJ/t。通过减少转炉炉渣、降低冷却剂用量、添加增热材料并采用一些辅助措施可提高转炉废钢比,以下对此进行详细分析。

2.1 减少转炉渣量

表 1 2017 年 1~3 月转炉炼钢吨钢原料消耗情况
Table 1 Metal materials consumption of converter steel-making in Jan. to Mar. 2017

铁水量/(kg·t ⁻¹)	废钢量/(kg·t ⁻¹)	铁水硅/%	铁水温度/℃
899.2	184.2	0.33	1 381

表 2 2017 年 1~3 月转炉冶炼过程吨钢辅料消耗及终点信息情况

Table 2 Auxiliary materials consumption and tapping information of converter steelmaking in Jan. to Mar. 2017

冷却剂/(kg·t ⁻¹)	石灰/(kg·t ⁻¹)	轻烧/(kg·t ⁻¹)	[C] _{TSO} /%	[P] _{TSO} /%	出钢温度/℃	终渣全铁/%
13.8	29.3	13.8	0.058	0.012 8	1 619	18.0

表 3 物料平衡模型计算结果

Table 3 Result of mass balance calculations

物料	输入量/(kg·t ⁻¹)	物料	输出量/(kg·t ⁻¹)
铁水量	899.2	出钢量	1 000
废钢	184.2	渣量	112.3
冷却剂量	13.8	废气	99.6
辅料	46.4	烟尘	27.2
初始渣	27.6		
氧气	65.8		
总量	1 237.0	总量	1 239.1

表 4 热平衡模型计算结果

Table 4 Result of heat balance calculations

物料输入			物料输出		
项目	热量 (kJ·t ⁻¹)	百分比/%	项目	热量 (kJ·t ⁻¹)	百分比/%
铁水物理热	1148682.2	55.8	钢水	1404439.6	68.2
元素反应热	659269.1	32.0	炉渣	261086.9	12.7
成渣热	25897.0	1.3	冷却剂	46085.9	2.5
铁的氧化	172976.9	8.4	废钢铁锈	43954.2	1.8
初始渣	53173.7	2.6	烟尘	46277.3	2.2
			废气	166091.6	8.1
			热损失	92760.1	4.5
总量	2059998.9	100.0	总量	2060695.5	100.0

表 5 球团的成分/%

Table 5 Ingredient of pellets/%

FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P	S
0.34	91.78	4.55	0.26	0.37	1.36	0.017	0.003

表 6 升温材料主要成分

Table 6 Main ingredient and cost of heating agents

升温材料	C/%	S/%	水分/%	挥发分/%	灰分/%	低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	价格/(元·t ⁻¹)
无烟煤	72.3	0.53	9.85	7.6	9.72	24.89	1 000
清洁升温剂	77.8	0.1	4.1	5.1	8.0	26.79	2 000

1 kg/t 转炉炉渣由常温升高到 1 619 ℃ 需要吸收热量 2 208.1 kJ,每减少 1 kg/t 转炉渣相当于增加 2 208.1/22 344.5 × 0.01 = 0.10% 的废钢比。针对沙钢现有转炉冶炼的实际情况,提出了减少炉渣渣量的措施:(1)提高铁水扒渣率,减少铁水带渣量;(2)控制冶炼过程喷溅现象;(3)控制终点过氧化现象,减少炉渣全铁含量;(4)减少废钢垃圾;(5)提高转炉冶炼过程化渣效果,减少炼钢辅料消耗。生产实践表明,通过减少渣量措施的应用,转炉冶炼渣量可减少 6.7~8.9 kg/t,相应的可提高废钢比约 0.67%~0.89%。

2.2 减少冷却剂用量

转炉冶炼过程冷却剂主要用来化渣和控制熔池温度,通过优化转炉冶炼过程的供氧制度和加料制度提高化渣效果,可降低冷却剂消耗。沙钢某车间转炉常用的冷却剂为球团,其成分如表 5 所示。以此成分带入平衡模型进行计算,1 kg/t 球团的吸热量为 4 291.7 kJ/t,减少 1 kg/t 球团可提高废钢比为 4 291.7/2 2344.5 × 1% = 0.19%。

2.3 增加热源

转炉炼钢常用的升温材料有碳系升温剂和硅系升温剂,结合沙钢自身的实际情况,主要采用碳系升温剂作为升温材料,分别为:无烟煤和清洁升温剂,具体成分如表 6 所示。无烟煤相对廉价但硫含量较高,可应用于成品硫含量要求不太严格的钢种;清洁升温剂价格较贵但硫含量相对较低,可应用于成品硫含量要求较为严格的钢种。

2.3.1 无烟煤的使用效果分析

沙钢无烟煤为粉状物质,随废钢一块加入转炉可提高无烟煤的利用率,试验的具体加料方式为:废钢装入废钢斗→往废钢斗中加入无烟煤→将废钢和无烟煤一起加入转炉→加铁水→下氧枪吹炼。无烟煤的加入量根据铁水硅含量及温度进行调整,具体加入量如表 7 所示。

表 7 铁水温度 1 350 ℃ 下无烟煤加入量与铁水硅的关系
Table 7 Relationship between adding amount of anthracite and silicon in hot metal at 1 350 ℃

铁水硅/%	0.2	0.30	0.4	0.5	0.6	0.7
无烟煤量/kg	13.0	10.5	8.0	5.5	3.0	0.5

注:铁水温度每提高 10 ℃,无烟煤量少加入 1.2 kg/t。

表 8 转炉加煤吹炼试验原料条件和相对冶炼参数

Table 8 Feedstock conditions and relative steelmaking parameters for converter steelmaking with coal addition blowing test

工艺类型	铁水量/(kg·t ⁻¹)	废钢量/(kg·t ⁻¹)	Si/%	S/10 ⁻⁶	铁水温度/℃	冷却剂/(kg·t ⁻¹)	煤/(kg·t ⁻¹)	吹氧量/(m ³ ·t ⁻¹)	吹氧时间/min	出钢碳/%	出钢硫/10 ⁻⁶	出钢温度/℃	
试验工艺	范围	833 ~ 882	178 ~ 266	0.1 ~ 0.75	150 ~ 450	1 287 ~ 1 429	0 ~ 19.4	6.9 ~ 11.1	44.7 ~ 57.6	13.3 ~ 16.4	0.03 ~ 0.15	100 ~ 432	1 582 ~ 1 663
	均值	847.2	236.2	0.39	180	1 349	6.1	8.2	50.2	14.9	0.052	282	1 614
	范围	889 ~ 944	178 ~ 211	0.15 ~ 0.65	100 ~ 500	1 260 ~ 1 470	0 ~ 39.8	0	42.0 ~ 53.2	12.2 ~ 15.3	0.02 ~ 0.12	120 ~ 530	1 585 ~ 1 696
常规工艺	均值	899.2	184.2	0.33	180	1 381	13.8	0	46.2	13.5	0.058	250	1 619

表 9 铁水温度 1 340 ℃ 下清洁升温剂加入量与铁水硅的关系

Table 9 The relationship between the amount of clean heating agent and silicon in hot metal at 1 340 ℃

铁水硅/%	无烟煤量/kg
0.2	7.4
0.30	5.7
0.4	4.0
0.5	2.2
0.6	0.5

注:铁水温度每增加 10 ℃,清洁升温剂减少 0.8 kg/t。

的发热量为 6 063 673 kJ,由此可计算无烟煤的热效率为 $6\ 063\ 673 / (24.89 \times 10^6) \times 100 = 24.36\%$;以 180 t 转炉为例,增加 1 kg/t 无烟煤可提高废钢比为 $1\ 094\ 419 / (22\ 344.5 \times 180) \times 0.01 = 0.27\%$ 。

煤为碳系增热剂,主要靠碳的氧化反应提供热量,因此转炉加无烟煤冶炼将增加吹氧量,延长冶炼时间,另外,由于无烟煤中含有较高的硫含量,将导致钢水硫含量增加。结合表 8 中的数据,试验工艺在加入 8.2 kg/t 煤进行冶炼的情况下,较常规工艺吹氧量多消耗 4.0 m³/t,吹氧时间延长 1.4 min,出钢硫含量增加 32×10^{-6} 。由此可计算,1 kg/t 煤将多消耗氧气 0.5 m³/t,吹氧时间延长 0.17 min,钢水硫含量增加 3.9×10^{-6} 。

2.3.2 清洁升温剂的使用效果分析

清洁升温剂密度相对较轻,为提高升温剂的利用率,一般在吹氧前加入转炉。具体的加料顺序为转炉溅渣护炉→加升温剂→加废钢→加铁水→下氧枪吹炼;清洁升温剂的加入量根据铁水硅含量进行控制,如表 9 所示。

本次共开展了 46 炉生产试验。试验过程与同批次常规工艺的数据如表 10 所示。

将试验数据代入模型进行计算,3.3 kg/t 升温

剂的实际发热量为 5 448 085.2 kJ,则 1 kg/t 升温剂的发热量为 1 650 934.9 kJ,1 t 升温剂的发热量为 9 265 451.0 kJ,升温剂的低位发热量为 26 778 760.0 kJ/t,由此可计算升温剂的热效率为 34.6%。以 180 t 转炉为例,使用 1 kg/t 升温剂可提高废钢比为 $1\ 650\ 934.9 / (22\ 344.5 \times 180) \times 0.01 = 0.41\%$ 清洁升温剂与无烟煤类似,均靠碳的氧化提供热量,因此将增加吹氧量并延长冶炼时间,另外,清洁升温剂中的硫含量仅有 0.1%,对钢水硫含量的影响较小。本文对比了加清洁升温剂冶炼和常规工艺冶炼数据,发现 3.3 kg/t 的升温剂吹氧量较常规工艺增加 3.18 m³/t,吹炼时间延长 1 min,钢水硫含量增加 2.0×10^{-6} 。由此可计算 1 kg/t 清洁升温剂的使用将增加吹氧量 0.93 m³/t,吹氧时间延长 0.30 min,增加钢水硫含量 0.61×10^{-6} 。由此可知,清洁升温剂的使用对钢水硫含量基本没有影响。

通过上述分析可知,考虑到升温剂和无烟煤的价格和含硫量情况,为提高转炉废钢比,建议转炉冶炼常规钢种加入无烟煤,冶炼硫含量较为严格的钢种加入清洁升温剂。

2.4 其他辅助措施

沙钢常规工艺冶炼,通常在转炉冶炼到达目标终点时,先向前倒炉出渣,然后向后摇炉出钢。倒渣操作(副枪检测结束至出钢开始时间)平均花费时间 3.7 min(2.6 ~ 6.5 min),倒渣过程熔池的温度大约降低 10 ℃(8 ~ 15 ℃)。开发转炉终点不倒渣直接出钢工艺并投入生产应用,可节省温降约 10 ℃,减少时间 3.7 min。另外,加强车间的调度管理,加强铁水包周转,减少空铁水包和铁水温降;缩短转炉的辅助作业时间以及转炉炉次之间的等待时间,减少

表 10 试验炉次铁水、废钢信息和相关冶炼参数

Table 10 Hot metal and scrap information of test heats and relative steelmaking parameter

项目	铁水量/ (kg·t ⁻¹)	废钢量/ (kg·t ⁻¹)	Si/%	S/10 ⁻⁶	铁水温 度/℃	冷却剂/ (kg·t ⁻¹)	升温剂/ (kg·t ⁻¹)	吹氧量/ (m ³ ·t ⁻¹)	吹氧时 间/min	出钢 碳/%	出钢硫/ 10 ⁻⁶	出钢温 度/℃	
试验 工艺	范围	889 ~	117 ~	0.15 ~	14 ~	1 279 ~	3.1 ~	2.5 ~	45.8 ~	13.2 ~	0.03 ~	30 ~	1 650 ~
		922	183	0.46	60	1 391	17.3	4.5	50.3	15.5	0.07	65	1 685
	均值	874.6	195.0	0.38	25	1 341	10.7	3.3	48.0	14.5	0.041	48	1 639
常规 工艺	范围	889 ~	117 ~	0.16 ~	13 ~	1 258 ~	0 ~	0	41.9 ~	12.5 ~	0.03 ~	24 ~	1 600 ~
		933	183	0.46	120	1 430	22.8		48.8	14.6	0.07	90	1 690
	均值	910.6	162.8	0.35	25	1 359	11.3	0	44.8	13.5	0.043	46	1 641

表 11 改进工艺与常规工艺参数的对比

Table 11 Comparison of converter steelmaking parameters of improved process and conventional process

项目	铁水/ (kg·t ⁻¹)	废钢/ (kg·t ⁻¹)	废钢 比/%	铁水 硅/%	铁水温 度/℃	冷却剂/ (kg·t ⁻¹)	清洁升温剂/ (kg·t ⁻¹)	无烟煤/ (kg·t ⁻¹)	终点温 度/℃	直接出 钢比/%	出钢 量/t	吹氧 量/m ³	冶炼周 期/min
新工艺	834	251	23.1	0.36	1 371	6.5	5.6	8.3	1 629	65	180.9	9 389	34.2
常规工艺	899.2	184.2	17.0	0.33	1 381	13.8	0	0	1 619	0	181.2	8 512	35.3

转炉的散热;均可节省转炉热量,增加废钢用量,提高废钢比。

3 工业应用情况

转炉冶炼通过减少渣量和冷却剂消耗、推广转炉终点不倒渣工艺、加强铁水包周转、缩短辅助作业时间等可减少热量损失,另外,冶炼常规钢种加入无烟煤,冶炼成品硫含量控制较为严格的钢种加入清洁升温剂可增加热源,从而达到提高废钢比的目的。将此工艺应用到沙钢 180 t 顶底复吹转炉,并收集 2018 年上半年冶炼数据,如表 11 所示。通过工艺优化,废钢比可达 23.1%,较 2017 年第一季度的 17.0% 提高了 6.1%。通过提高废钢比措施的应用,出钢量略有降低,分析原因主要为废钢的品位相对较低,增加了钢铁料消耗;吹氧量较常规工艺增加 877 m³;冶炼周期较常规工艺减少 1.1 min;考虑废钢和铁水价格、升温剂自身成本、氧气消耗、增产的效益、煤气回收量等综合评估测算,使用升温剂提高废钢比,吨钢可降低炼钢成本约 5.9 元。

4 结论

(1)减少转炉炼钢渣量,减少冷却剂消耗及转炉中加入升温材料可增加炉内热源,提高废钢比;每减少 1 kg/t 炉渣,废钢比可相应提高 0.10%;每减少 1 kg/t 冷却剂,废钢比可提高 0.19%;每增加 1 kg/t 无烟煤可提高废钢比 0.27%,每增加 1kg/t 清洁升温剂可提高废钢比 0.41%。

(2)转炉冶炼加入 1 kg/t 无烟煤,转炉冶炼吹氧量消耗增加 0.50 m³/t,吹氧时间增加 0.17 min,钢水硫含量增加 3.9 × 10⁻⁶;转炉冶炼加入 1 kg/t 清洁升温剂,转炉冶炼吹氧量消耗增加 0.93 m³/t,吹氧时间增加 0.30 min,钢水硫含量增加 0.61 × 10⁻⁶。

(3)根据升温材料的实际情况,转炉冶炼常规钢种可采用无烟煤作为升温材料,冶炼成品硫含量较为严格的钢种采用清洁升温剂作为升温材料。

(4)工艺优化后,180 t 转炉冶炼平均废钢比为 23.1%,较常规工艺提高了 6.1%,吨钢生产成本降低 5.9 元。

参考文献

- [1]贺章瑶,刘继姣.国内外转炉二次燃烧氧枪技术的应用[J].炼钢,1998,14(2):57-60.
- [2]李江,袁建平.提高废钢比操作的生产实践[J].江苏冶金,2004,32(6):20-22.
- [3]蔡廷书.重钢提高转炉废钢比的可行性研究[J].炼钢,1995,11(3):25-29.
- [4]戴云阁,王文忠.转炉能耗和提高废钢比问题[J].东北大学学报,1994,15(4):384-389.
- [5]王书智.降低转炉炼钢的铁水消耗和提高废钢比[J].鞍钢技术,1988,(11):5-10.

管挺(1985-),男,硕士(2010年重庆大学),研究员,2007年河南科技大学(本科)毕业,转炉炼钢工艺研究。
E-mail:guanting1999@163.com

收稿日期:2018-11-23