

唐钢 60 t 转炉石灰石替代部分石灰造渣炼钢的工业试验

李晨晓¹ 郝华强² 王书桓¹ 赵定国¹ 陈建军² 刘善喜²

(1 华北理工大学冶金与能源学院,唐山 063000;2 河钢集团唐钢公司,唐山 063000)

摘要 对唐钢 60 t 转炉石灰石替代部分石灰造渣炼钢进行工业试验和分析,结果表明,石灰石替代比在 7% ~ 33% 时,估算吨钢节省能耗 1.45 ~ 6.90 kg 标煤;石灰石替代部分石灰炉次终点钢水平平均 P 含量为 0.02%,脱磷率均值达到 83.13%。同时出钢温度增加,石灰石替代部分石灰造渣炉次的脱磷率下降,符合热力学规律;石灰造渣炉次吨钢入炉 CaO 量为 51.99 kg,而石灰石替代部分石灰炉次的吨钢入炉 CaO 量为 51.67 kg,并无明显硅挥发现象。

关键词 60 t 顶底复吹转炉 石灰石替代部分石灰 脱磷 造渣 炼钢 渣量

Commercial Pilot Production on Replacing Partial Lime in Slag by Limestone in 60 t Converter Steelmaking at Tangsteel

Li Chenxiao¹, Hao Huaqiang², Wang Shuhuan¹, Zhao Dingguo¹, Chen Jianjun² and Liu Shanxi²

(1 Metallurgy and Energy College, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000;

2 Tangsteel Co, HBIS Group, Tangshan 063000)

Abstract The commercial pilot production and analysis on replacing partial lime in slag by limestone in 60 t BOF steelmaking at Tangsteel have been carried out. Results show that of heats with limestone replacement ratio 7% ~ 33% the energy consumption saving is 1.45 ~ 6.90 kg standard coal per ton steel by estimated calculation; with replacing partial lime by limestone the average end [P] is 0.02% and average dephosphorization rate is up to 83.13%; with tapping liquid temperature increasing the dephosphorization rate in heats replacing partial lime by limestone decreases that meets the law of thermodynamics; and compared with CaO charging amount 51.99 kg per ton steel of heats by lime slagging, the CaO charging amount is 51.67 kg per ton steel slagging by limestone to replace partial lime which shows no-obvious silicon volatile phenomenon.

Material Index 60 t Top and Bottom Combined Blowing Converter, Limestone to Replace Partial Lime, Dephosphorization, Slagging, Steelmaking, Slag Amount

出于节能减排和降低成本的考虑,北京科技大学李宏提出了“转炉石灰石替代石灰造渣炼钢”的方法,该工艺将石灰石直接加入到转炉内分解化渣,不经过煅烧过程,缩短了工序,减少了造渣料消耗,降低转炉工序的能耗和碳排放^[1-2]。鉴于转炉采用石灰石造渣炼钢的优点,国内已有数十家钢铁公司应用此方法炼钢,并取得了良好冶炼效果和经济效益^[3-8]。相比于石灰造渣,石灰石造渣前期热量消耗大,且分解产生的 CO₂ 会对熔池反应产生影响,为此需要进行石灰石造渣炼钢工业试验验证其冶炼效果。唐钢在 60 t 转炉上进行了石灰石替代部分石灰造渣冶炼的工业试验,对其冶炼效果进行初步研究。

1 试验方法

试验在唐钢二炼钢厂 60 t 氧气顶底复吹转炉上进行,所用造渣剂成分如表 1 所示。

本次工业试验炉次共计 13 炉,其中石灰石造渣炉次 10 炉,石灰造渣炉次为 3 炉。试验炉次石灰石替代石灰比例在 7% ~ 33%。唐钢 60 t 转炉的入炉金属料为铁水和废钢,含铁原料还包括除尘球和铁

表 1 60 t 转炉造渣剂成分 / %

Table 1 Ingredient of 60 t BOF slag making materials / %

造渣剂	TFe	CaO	MgO	S	SiO ₂	其他
石灰石	-	52.40	4.14	0.035	1.6	41.83
石灰	-	86.86	5.90	0.053	1.42	5.77
轻烧白云石	-	52.84	36.59	0.015	1.17	9.39
铁皮球	50.83	14.57	3.31	0.080	8.59	22.62
除尘球	49.51	10.86	3.40	0.380	3.59	32.26

皮球。吹氧开始后加入第一批造渣料,石灰石和石灰的加入时间和批次根据冶炼情况确定,一般分为 2 ~ 3 个批次,加入量依据铁水硅含量确定;轻烧白云石的加入量考虑渣中 MgO 成分需求,铁皮球和除尘球的加入量按照热平衡及吹炼情况进行控制增减。吹氧时间合计为 13 ~ 15 min。

入炉铁水成分、温度以及金属料加入量如表 2 所示,终点钢水成分及温度如表 3 所示,此次试验仅记录终点钢水参数,后续试验会进一步分析终渣成分。

2 结果与讨论

石灰石替代部分石灰造渣冶炼炉次主要在普通钢种上进行,终点钢水磷含量在 0.02% 左右即可,

表 2 60 t 转炉装入铁水成分温度和铁水、废钢加入量
Table 2 Composition and temperature of hot metal and charging amount of metal and scrap, 60 t BOF

铁水成分/%					温度/ ℃	铁水 量/t	废钢 量/t
C	Si	Mn	P	S			
4.08 ~ 4.62	0.51 ~ 0.85	0.19 ~ 0.31	0.114 ~ 0.131	0.024 ~ 0.045	1 287 ~ 1 320	62.3 ~ 67	1.9 ~ 14.5

表 3 转炉石灰石-石灰造渣和石灰造渣冶炼终点钢水成分温度
Table 3 Composition and temperature of BOF end liquid slagging by limestone-lime and lime

造渣剂	BOF 终点钢水主要成分/%			温度/℃
	C	P	S	
石灰石- 石灰	0.04 ~ 0.11	0.008 ~ 0.031	0.026 ~ 0.039	1 654 ~ 1 682
	0.03 ~ 0.12	0.007 ~ 0.034	0.028 ~ 0.041	1 661 ~ 1 665

从表 3 可以看出,石灰石替代部分石灰造渣炼钢完全可以达到终点要求;纵观试验炉次的吹炼结果可以得知,唐钢 60 t 转炉采用石灰石替代部分石灰造渣炼钢,冶炼过程平稳,终点钢水成分和温度满足出钢要求。

2.1 石灰石替代部分石灰造渣节能效果估算

研究表明^[9-10],相比于石灰造渣炼钢,转炉采用全石灰石(替代比为 100%)造渣吨钢可节省能量约 20.86 kg 标煤,相当于吨钢减排 52.15 kg CO₂。而石灰石造渣的节能减排量直接与替代比呈线性相关,替代比越高,炉次的节能减排效果越明显。从表 4 可知,试验各个炉次石灰石替代比不一,在 7% ~ 33%,因此试验炉次节省能耗量在 1.45 ~ 6.90 kg 标煤。

2.2 石灰石造渣炉次脱磷脱硫效果分析

2.2.1 石灰石造渣炉次脱磷脱硫效果

冶炼前期加部分石灰石可以在一定程度上降低前期熔池温度,而低温有利于脱磷;同时石灰石在转

表 4 BOF 各炉次石灰石替代石灰比例和节省能耗值
Table 4 Percentage of replacing partial lime by limestone and corresponding save energy value of each BOF heat

试验炉次	替代比/%	节省能耗/kg 标煤
1	28.8	6.01
2	24.84	5.18
3	24.62	5.14
4	22.35	4.66
5	22.73	4.74
6	33.06	6.90
7	13.71	2.86
8	6.93	1.45
9	12.97	2.71
10	29.63	6.18

表 5 转炉冶炼石灰石-石灰造渣和石灰造渣脱磷脱硫效果对比
Table 5 Comparison of dephosphorization and desulphurization effect between BOF steelmakings by limestone-lime slagging and lime slagging

项目	石灰石-石灰造渣	石灰造渣
脱磷率 η_p /%	83.13	73.69
终点钢水 P 含量 β_p /%	0.020	0.033
脱硫率 η_s /%	-3.94	-5.81
终点钢水 S 含量 β_s /%	0.032	0.043
终渣平均表观碱度 R_2	2.48	2.55
出钢温度/℃	1 667	1 664
终渣 FeO /%	17.60	14.54
出钢量/t	73.38	74.10

炉内高温快速分解可生成高活性的热态石灰^[10-11],利于快速成渣,加快磷的脱除过程。

从表 5 可以看出,石灰石替代部分石灰造渣炉次终点钢水平均 P 含量为 0.02%,满足终点 P 含量小于 0.02% 要求,且与石灰造渣炉次比较有所降低。石灰石替代部分石灰造渣炉次平均脱磷率为 83.13%,对比石灰造渣炉次,脱磷率有较大提高;另外石灰石替代部分石灰造渣与石灰造渣工艺炉次的脱硫率,平均脱硫率大体相当,均为负值。相较于全石灰造渣炉次,石灰石替代部分石灰炉次的终渣 FeO 含量有所提高,分析可能与枪位操作有关。对比二者的出钢量可知,石灰石替代部分石灰造渣炉次稍微降低,分析与石灰石耗热量大而减少冷铁料入炉量有关,后续可通过提高铁水加入比例来调整。

2.2.2 出钢温度对脱磷率的影响

转炉脱磷为放热反应,熔池温度较低有利于增大反应的平衡常数,从而增加 P 在炉渣中的分配比,熔池温度低有利于脱磷,因此出钢温度高低直接影响炉次脱磷效果,图 1 为各炉次转炉脱磷率与出钢温度的关系。因两个炉次发生故障,故取 11 个炉

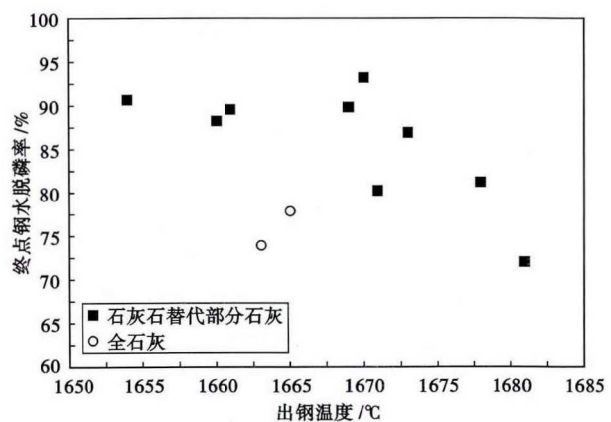


图 1 转炉出钢温度对终点钢水脱磷率的影响

Fig. 1 Effect of BOF tapping temperature on end liquid dephosphorization rate

次终点钢水温度分析。

由图 1 可知,石灰石替代部分石灰造渣炉次终点钢水温度在1 655 ~1 682 ℃,从表 5 可以得知,石灰石替代部分石灰造渣炉次的出钢温度与石灰炉次大体相当,可见尽管石灰石的吸热量大,但只要保证合适的人炉料比例(铁水和废钢)即可保证出钢温度要求。石灰石替代部分石灰造渣炉次的脱磷率与钢水终点温度呈反比关系,即出钢温度越低,炉次脱磷率越高,因此转炉在采用石灰石替代部分石灰造渣脱磷时,在满足出钢要求的前提下,为保证脱磷效果,应适当控制出钢温度。

2.3 石灰石替代部分石灰对造渣料消耗影响

唐钢 60 t 转炉的造渣料有石灰、石灰石、轻烧白云石,而除尘球和铁皮球中同样含有氧化钙(CaO)。理论分析可知,炉次估算渣量与入炉 CaO 量呈正相关关系,意味着可以用入炉 CaO 量表征炉次估算渣量多少。表 6 为炉次的人炉 CaO 量统计。其中第 5 炉和第 8 炉因现场称量故障无法获取。

根据表 6 求得,石灰造渣炉次吨钢入炉 CaO 量为 51.99 kg,而石灰石替代部分石灰炉次的人炉 CaO 量为 51.67 kg,二者相差不大。但根据理论分析和现场试验结果可知^[12-14],石灰石在转炉分解产生的大量 CO₂ 促使铁水中的一部分 Si 元素挥发生成 SiO(g) 进入炉气中带走,因此采用全石灰石造同等碱度渣时可以减少含 CaO 物料(石灰石、白云石)的加入量,转炉渣量也会随之减少。而此次试验之所以石灰石替代部分石灰炉次的人炉 CaO 量并无明显减少,分析原因主要与石灰石替代比例较低有关系,后续试验则会提高石灰石替代比例,进一步研

表 6 60 t 转炉各炉次估算的入炉 CaO 量

Table 6 Estimated-calculated charging CaO amount in each heat of 60 t BOF

炉次	造渣原料加入量/kg			除尘球/	铁皮球/	估算入炉 CaO 量/kg
	石灰石	石灰	轻烧白云石	kg	kg	
1	0	2 267	1 799	1 340	0	3 099.83
2	0	2 282	1 878	999	206	3 126.55
3	0	2 288	1 897	838	353	3 134.23
4	311	2 086	1 810	0	1 231	3 049.75
5						称量故障无法获取
6	762	1 884	1 844	0	618	3 061.21
7	623	1 885	1 850	510	609	3 065.29
8						称量故障无法获取
9	612	2 126	1 876	838	0	3 264.95
10	613	2 083	1 881	502	0	3 181.77
11	931	1 885	1 889	509	0	3 181.01
12	300	1 888	1 894	679	0	2 880.23
13	155	2 082	1 941	1 535	0	3 122.16

究硅挥发现象以及对渣量的影响。

3 结论

(1)唐钢 60 t 转炉工业试验证实了石灰石替代部分石灰造渣炼钢上的可行性,石灰石替代比在 7% ~33%,估算吨钢节省能耗 1.45 ~6.90 kg 标煤。

(2)石灰石替代部分炉次终点钢水平均 P 含量为 0.02%,脱磷率均值达到 83.13%,满足冶炼需求。且石灰石替代石灰造渣炉次的脱磷率与出钢温度呈反比,符合热力学规律。

(3)石灰造渣炉次吨钢入炉 CaO 量为 51.99 kg,而石灰石部分替代石灰炉次的人炉 CaO 量为 51.67 kg,并无明显硅挥发现象,分析石灰石替代比例较低有关。

国家科技支撑计划项目(2012BAC27B02)

参考文献

[1] 李 宏,曲 英.一种在氧气顶吹转炉中用石灰石代替石灰造渣炼钢的方法:中国,CN101525678 [P]. 2009-09-09.

[2] 李 宏,曲 英.氧气转炉炼钢用石灰石代替石灰节能减排初探[J].中国冶金,2010,20(09):45-48.

[3] 董大西,冯佳,年 武,等.石钢 60t 转炉采用石灰石替代石灰造渣炼钢试验[J].中国冶金,2013,23(11):58-61.

[4] 秦登平,杨建平,危尚好,等.100 t 顶吹氧气转炉石灰石造渣炼钢技术的分析和工艺实践[J].特殊钢,2014,45(05):34-36.

[5] 石 磊,钱高伟,朱志鹏,等.转炉采用石灰石替代部分石灰的工业试验[J].武钢技术,2013,35(04):23-25.

[6] 王鹏飞,张怀军.石灰石替代石灰炼钢造渣效果研究[J].包钢科技,2012,36(04):30-32.

[7] 张 飞.石灰石在莱钢 120 t 转炉炼钢中应用实践[J].中国冶金,2015,25(03):37-40.

[8] 张春杰,郝 强,王玉生,等.石灰石部分替代石灰转炉炼钢技术研究与应用[J].炼钢,2015,31(05):47-50.

[9] 李晨晓,李 宏,朱少楠,等.石灰石替代石灰作炼钢造渣原料节能减排估算[J].中国冶金,2015,25(10):66-69,72.

[10] 冯 佳,胡龙飞.不同条件下石灰石煅烧的产物特性研究[J].

炼钢,2015,31(06):5-10.

[11] 吴 伟,戴诗凡.石灰石对转炉冶炼效果的影响[J].中国冶金,2016,26(05):52-56.

[12] 年 武,冯 佳,李晨晓,等.氧气转炉采用石灰石造渣炼钢铁水中硅挥发的分析[J].北京科技大学学报,2014,35(S1):122-125.

[13] 毛文文,李晨晓,鲁 华,等.石灰石造渣炼钢硅挥发现象及其控制工艺探索[J].炼钢,2017,33(01):39-42.

[14] 李晨晓,毛文文,李 宏,等.转炉采用石灰石造双渣脱磷试验研究[J].炼钢,2016,32(06):11-14,26.

李晨晓(1988-),男,博士(2017年北京科技大学),讲师,2009年河北理工大学(本科)毕业,转炉炼钢研究。

E-mail:lichenxiao34@163.com

收稿日期:2017-06-07