

高炉钛煤混喷工业试验

董亚锋^{1,2} 郭培民¹ 刘克明² 翟 丹²

(1.钢铁研究总院 北京 100801; 2.新冶高科技集团有限公司 北京 100081)

摘 要: 钛煤混喷是将富钛粉加入原煤中制成钛煤粉,从风口喷入高炉的工艺过程。为验证钛煤混喷的实际效果,在国内某 2 500 m³ 级高炉进行了钛煤混喷工业试验。试验结果显示,钛煤混喷可利用原有喷煤设施进行。在喷吹入炉钛负荷为 3.7 kg/t 时,铁水 [Ti] 含量达到 0.13%,同样铁水 [Ti] 含量则需炉顶钛矿带入 TiO₂ 负荷为 7.7 kg/t,钛煤混喷时钛的还原率明显高于炉顶加入钛矿。炉缸二段冷却水温差数据基本保持稳定。炉缸下部和炉底的维护需要更为综合性的措施。

关键词: 高炉; 钛煤混喷; 护炉; 铁水; 还原率

中图分类号: TF823, TF538.6

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2020)06-0099-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.06.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Industrial Test of Titanium Powder and Pulverized Coal Co-injection

Dong Yafeng^{1,2}, Guo Peimin¹, Liu Keming², Zhai Dan²

(1. Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. New Metallurgy Hi-tech Group Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Titanium powder and pulverized coal co-injection is the process in which rich titanium powder is mixed with raw coal and injected into blast furnace through tuyeres. The industrial test of titanium powder and pulverized coal co-injection was carried out in a 2 500 m³ blast furnace to verify the practical effect. The experimental result showed that the process can be carried out by the existing PCI system. The [Ti] in hot metal reached 0.13% when the injection TiO₂ was 3.7 kg/t, while the same percent of [Ti] in hot metal needed 7.7 kg/t TiO₂ being added from the top of the furnace as titanium ore. The reduction utilization rate of TiO₂ from titanium-coal mixture was obviously higher than that of the titanium ore. The temperature difference of the cooling water in the second section of the hearth remained stable during the test. The maintenance of the lower part and the bottom of the hearth needs more integrated measures.

Key words: BF; titanium powder and pulverized coal co-injection; hearth protection; hot metal; reduction ratio

0 引言

我国对钛矿护炉效果的初步认识源自攀枝花某高炉停炉后的调查,当时在高炉炉缸炉底的砖衬上发现了厚度较大的高熔点沉积物,这些沉积物保护

了炉缸炉底。这些沉积物由钛的低价化合物、渣相矿物和金属铁组成^[1]。受攀枝花高炉冶炼钒钛磁铁矿炉缸受到良好保护的启发,柳钢^[2]、湘钢^[3]等冶炼普通铁矿的高炉也尝试将钒钛磁铁矿配入烧结矿,收到了炉缸冷却壁水温差降低的效果。经过冶金部

收稿日期: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会—中国宝武钢铁集团有限公司钢铁联合重点研究基金资助(U1560201)。

作者简介: 董亚锋(1983—),男,湖北枣阳人,博士研究生,主要工作方向: 炼铁技术开发, E-mail: dyf205@126.com。郭培民(1975—),男,安徽含山人,教授级高工,博士生导师,通讯作者,主要研究方向: 炼铁新技术, guopm@pku.org.cn。

的宣传与推广,钛矿具有护炉效果在全国炼铁从业人员中形成共识,有关钛矿护炉的研究逐渐增多。

关于钛矿护炉微观机理方面的研究较多,如:Ti(C,N)形成机理研究以及促进Ti(C,N)生成的热力学理论计算^[4-9],Wang Z Y等^[10]研究了钛在低钛渣和铁水间的分配比,韦勳方等^[11]研究了微钛渣中Ti的还原行为,常治宇^[12]等开展了渣铁成分、温度、活度等因素对渣铁间钛分配比的影响研究。

从宏观角度来看,钛矿入炉的方式有三种:炉顶加入、风口加入、铁口加入。含钛烧结矿、含钛球团矿、含钛块矿,都从炉顶加入;风口喷吹含钛包芯线^[13-14]、风口喷吹富钛粉属于风口加入;使用含钛炮泥^[15]属于铁口加入。炉顶加入含钛炉料,虽然可以遏制不断上升的炉缸侧壁温度,保护炉缸,但也给高炉生产带来燃料消耗升高、透气性变差、炉缸活性变差等不良影响^[16-17],给高炉操作增加难度。炉缸加入含钛炮泥,钛的护炉效应集中在铁口附近,不能完成炉缸周向的修复,不是广泛的护炉方法。

从风口加入含钛物料,钛粉的所有反应发生在风口带和炉缸,而不是在炉身和软熔带,在炉身没有含TiO₂物料堆积粘结,对高炉顺行的影响大大减小。而风口喷吹距离炉缸侵蚀部位很近,侵蚀修复起效时间大大缩短,可以用较少的TiO₂取得较好的护炉效果。因为Ti的利用率高,使用量小,喷钛对高炉燃料比的影响相对就小。国外实践经验表明,风口喷吹TiO₂为0.9 kg/t时,铁水[Ti]的质量分数最大达到0.08%^[18],具有养护炉缸的效果。从国内钛矿护炉的实践效果看,生产上通过控制铁水中[Si]+[Ti]含量^[19]来保证护炉效果,对铁水中

[Ti]含量要求为质量分数 $\geq 0.07\%$ ^[20]。

常说的风口喷钛,是指将含钛粉矿或精矿通过一个或数个风口喷入高炉,风口喂线也是针对单个风口进行操作^[14],这些都不适于炉缸的常规养护。笔者提出的钛煤混喷,不同于之前局部风口喷吹的应急性护炉,而是高炉全部风口常规、同时喷吹钛煤粉。为验证钛煤混喷的工业可行性,在实验室内进行了钛煤流动特性、偏析分层效应、悬浮沉降特性、钛煤燃烧特性的模拟试验。结果表明,控制合适的钛煤比例和钛粉粒度,钛煤混喷具有工业应用的可行性^[21]。在此基础上,在国内某2 500 m³级高炉进行了钛煤混喷工业试验,进一步考察钛铁喷吹的实际应用效果。

1 试验准备

1.1 喷吹方案

在国内2 500 m³级高炉上开展工业试验。该高炉共有30个风口,配置两个喷煤系统,分别向单号风口和双号风口供煤。为保证高炉喷煤的连续性,降低试验风险,此次钛煤混喷试验只在单号系列风口进行;一旦试验过程出现不可控因素,随时终止钛煤喷吹,由双号风口喷煤系统进行供煤。

试验开始前,该高炉已进行程序一个月的炉顶加钛矿护炉;为避免钛矿对钛煤混喷试验的影响,在正式喷吹之前,自2019年4月7日18:00开始停止炉顶加钛矿,2019年4月8日13:00开始钛煤混喷试验。为考察不同钛负荷下的喷吹效果,试验设计了1、3、4、5 kg/t四个配比,分阶段进行喷吹,设计的喷吹方案见表1。

表1 钛粉配比及喷吹时段
Table 1 Titanium powder proportion and injection plans at different dates

日期	钛负荷/ (kg · t ⁻¹)	铁产量/ (t · d ⁻¹)	煤比/ (kg · t ⁻¹)	煤粉中钛 比例/%	钛煤比/ (kg · t ⁻¹)	钛煤喷吹量/ (t · h ⁻¹)	
配比 1	4 月 8~9 日	1.0	6 000	105	3.82	109.17	13.65
配比 2	4 月 9~11 日	3.0	6 000	105	10.64	117.50	14.69
配比 3	4 月 11~13 日	4.0	6 000	105	13.70	121.67	15.21
配比 4	4 月 13~14 日	5.0	6 000	105	16.56	125.83	15.73

炉顶停止加入钛矿后,炉渣(TiO₂)及铁水[Ti]含量随时间变化曲线见图1。

图1中,横坐标对应的时间是出铁终了时间,每次出铁持续大约2 h。从图1看,停止炉顶加钛矿后,铁水和炉渣中钛含量的明显降低是在停止炉顶钛矿后的8.5~10 h,渣铁中钛含量持续下降6 h后含量

趋于稳定。炉渣中(TiO₂)含量从2.3%降到1.0%,下降幅度为56.5%;铁水[Ti]含量从0.13%降到0.06%,下降幅度为53.8%。渣铁钛含量下降幅度基本相同。从图1看,当入炉TiO₂的含量变小时,炉渣中(TiO₂)含量呈稳定下降趋势,而铁水中[Ti]含量则有偶然起伏,炉渣(TiO₂)含量与入炉钛负荷呈现

更好的正相关性。钛煤混喷试验开始前,由其它炉料带入钛负荷形成的渣铁钛含量的背景值为:铁水 $[\text{Ti}] \approx 0.06\%$,炉渣 $(\text{TiO}_2) \approx 1.0\%$ 。

1.2 钛煤粉制备过程

按照钛煤混喷工艺流程,钛煤粉的起点是原煤

场,终点是喷吹罐。在原煤场,精钛粉与原煤分储在不同的料仓,根据方案设计的配比进行配料。由于精钛粉在配比低时上料量小,要利用原煤料仓进行上料,就需要改进料仓下料口,使其能够进行小剂量配料。

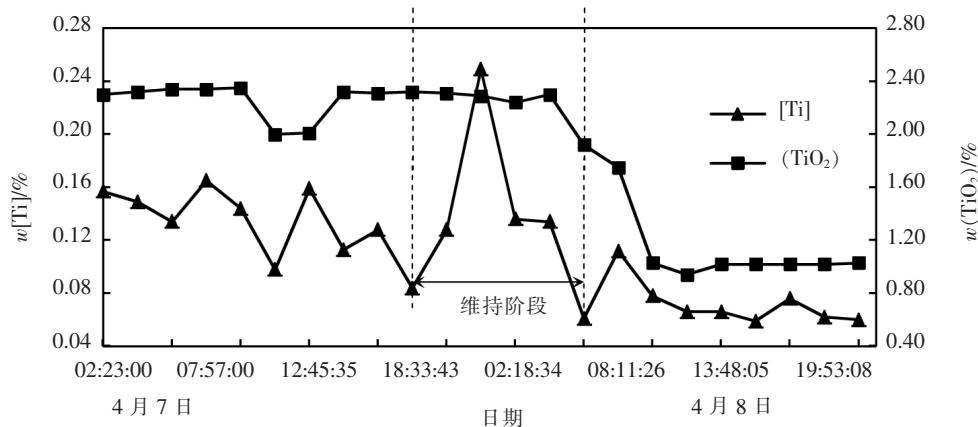


图1 钛煤混喷试验前渣铁钛含量变化

Fig.1 Titanium contents in the hot metal and slag before the industry test

在磨机磨制钛煤粉时,定期巡检磨机内部磨辊的磨损情况,检测磨机是否吐出钛精粉,检查布袋系统里是否存在钛精粉堆积现象。按照工业试验前开展的实验室模拟试验结果^[21]设计的工业喷吹方案,工业试验中对钛煤粉取样化验,结果显示钛煤粉中钛的比例基本与配加比例同步增大,见表2,精钛粉在残留煤粉及布袋系统中也未见堆积。

表2 钛煤粉的灰分及含钛量

Table 2 The components of ash and titanium powder in the blend powders

取样日期	取样时间	灰分 / %	$w(\text{TiO}_2) / \%$
2019-4-8	15:00	13.43	2.05
2019-4-9	1:00	12.28	1.44
2019-4-9	19:00	17.19	4.05
2019-4-11	1:00	18.66	4.83
2019-4-12	1:00	17.93	4.44
2019-4-12	7:00	19.25	5.14
2019-4-13	15:00	20.13	5.61

2 试验过程渣铁钛含量变化

在钛煤试验过程中,基于试验前期数据,对入炉钛负荷进行了调整,调整后的配比及持续的喷吹时段如图2所示。在实际操作中,入炉钛负荷并未总按照设计方案进行,钛煤混喷时的入炉钛负荷有所

波动,从实际计量的钛煤量计算,钛煤喷吹基本只进行了前4个阶段:1、3、4、5 kg/t,在1 kg/t和3 kg/t钛负荷的试验中间,有过短时间的2 kg/t钛负荷喷吹阶段。

从喷煤车间的计量数据看,配比1的钛煤实际入炉时间为4月8日21点。该阶段渣铁中钛含量变化如图3所示。炉渣中 (TiO_2) 含量在9日2点升至1.4%,相对基准值1.0%上升40%。炉渣 (TiO_2) 含量明显上升,提示入炉钛负荷增大,此时距离钛煤入炉相隔5 h,考虑取样时间范围,推测钛煤混喷对渣铁的起效周期为3.5~5 h。从配比1喷吹阶段的铁水 $[\text{Ti}]$ 含量看,在钛煤喷吹带入1~2 kg/t的 TiO_2 负荷时,铁水 $[\text{Ti}]$ 为0.07%~0.09%。

增大钛煤喷吹量,当钛煤带入炉内的 TiO_2 达到2.9 kg/t时,铁水 $[\text{Ti}]$ 含量在0.09%~0.14%,平均值 $\geq 0.1\%$,炉渣中 (TiO_2) 为1.4%左右,见图4。当钛煤入炉钛负荷增到3.7 kg/t时,铁水 $[\text{Ti}]$ 含量在0.12%~0.14%,炉渣 (TiO_2) 为1.4%~1.8%,见图5。按照调整后的喷吹计划,钛煤混喷预计将在14日上午6点结束;为保证入炉钛负荷的不突降,4月13日17:30开始恢复炉顶加钛矿,加入量为每批料加入2.5 t钛矿。故而在钛煤喷吹量增加到5 kg/t的后期,叠加了炉顶钛矿的影响。该阶段渣铁钛含量如图6所示。

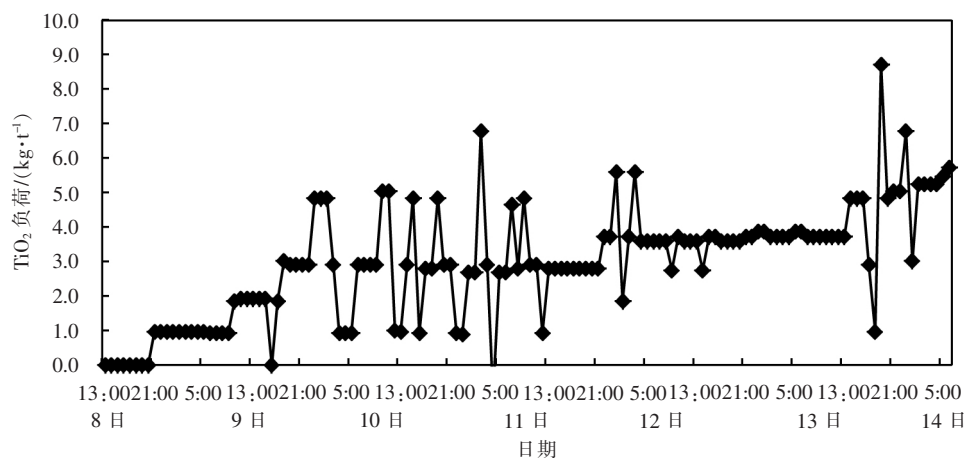
图2 实际喷吹入炉的 TiO_2 负荷

Fig.2 The real injection proportion of titanium powder during the test

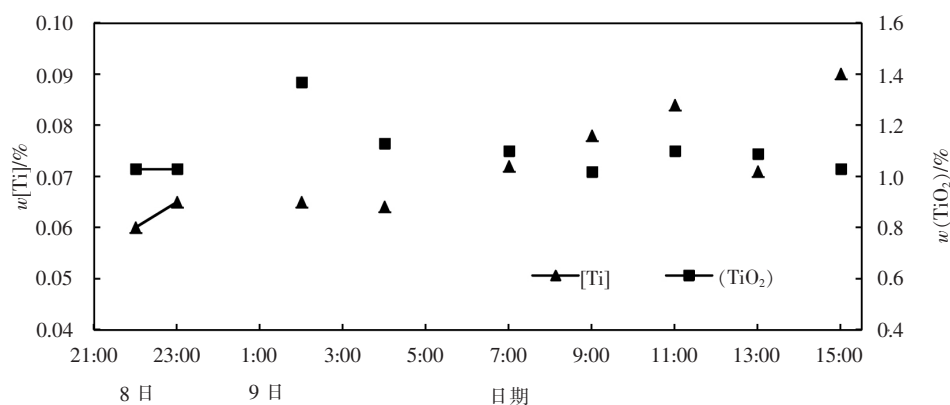


图3 渣铁中钛含量变化(钛煤入炉钛负荷 1~2 kg/t)

Fig.3 Titanium content in hot metal and slag(titanium load: 1~2 kg/t)

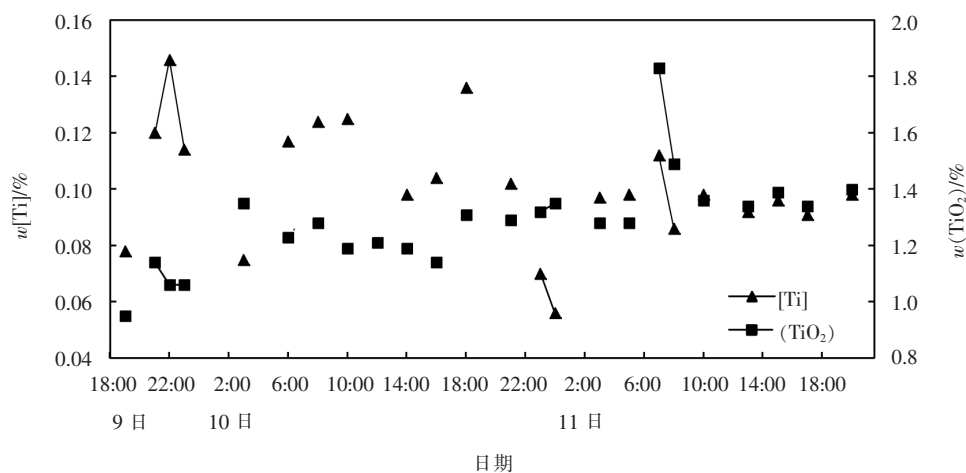


图4 渣铁中钛含量变化(钛煤入炉钛负荷 2.9 kg/t)

Fig.4 Titanium content in hot metal and slag(titanium load: 2.9 kg/t)

从图6可知,4月14日4点渣铁钛含量同时大幅度上升,这说明炉顶加入的钛矿开始还原进入铁水和炉渣,此时距离恢复炉顶加钛矿是10.5 h,这与

停止炉顶加钛矿后铁水和炉渣中钛含量明显下降的时间基本一致。从炉顶加入的含铁物料,其作用于铁水和炉渣的时间周期约为9.5 h。

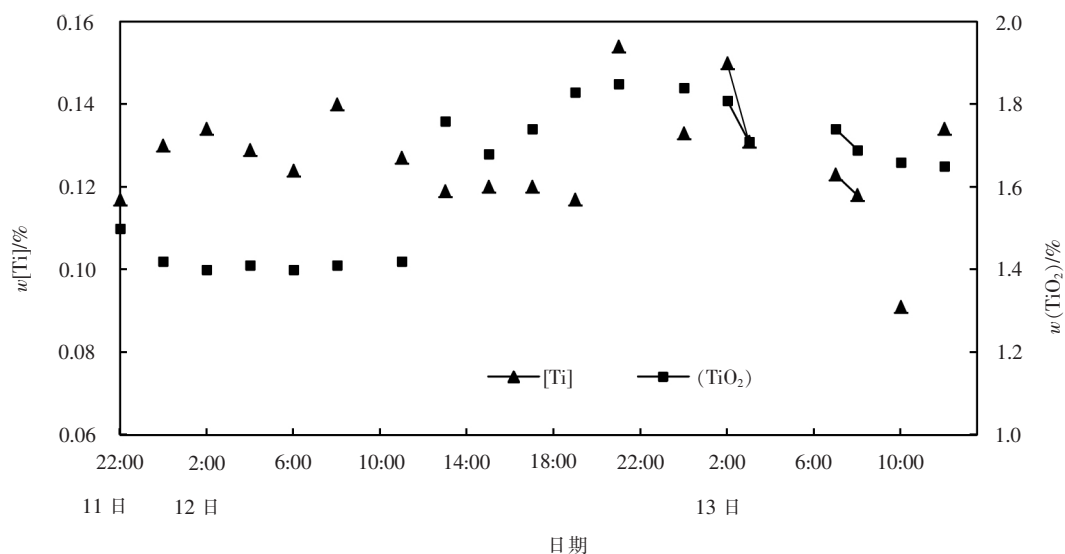


图 5 渣铁中钛含量变化(钛煤入炉钛负荷 3.7 kg/t)

Fig.5 Titanium content in hot metal and slag(titanium load: 3.7 kg/t)

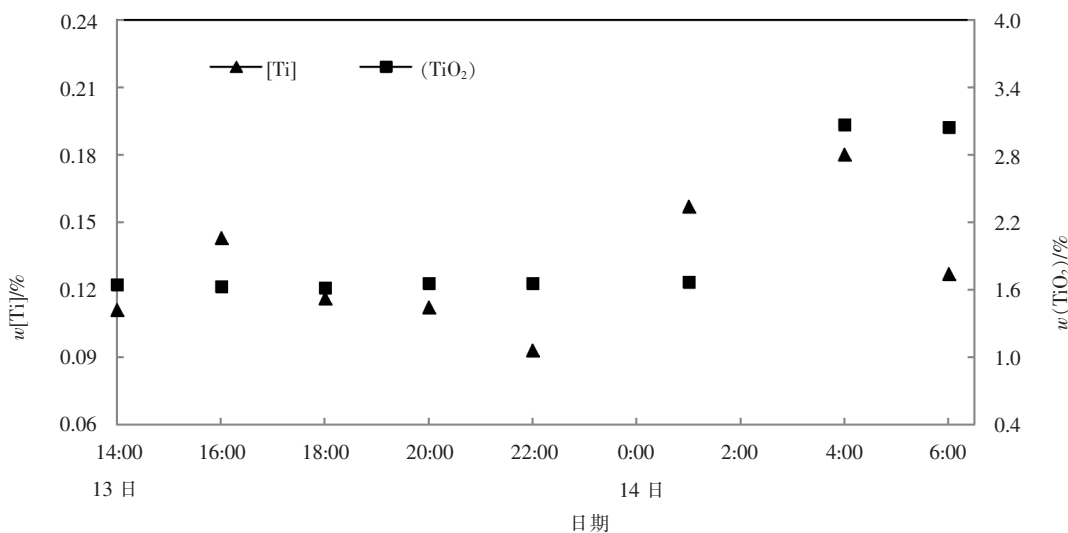


图 6 渣铁中钛含量变化(钛煤入炉钛负荷 5 kg/t)

Fig.6 Titanium content in hot metal and slag(titanium load: 5 kg/t)

3 钛的还原率分析

在 4 月 1~6 日炉顶加钛矿时期,铁水中还原出来的钛量占全部入炉钛量的比例与全部物料带入炉内 TiO_2 负荷的对应关系如图 7(a) 所示,4 月 9~13 日钛煤混喷时期对应关系见图 7(b),图 7 显示,不管含钛炉料以何种方式入炉,都有入炉钛负荷增大、铁水中还原的钛占入炉钛总量比率下降的共性现象,且拟合曲线的斜率也比较接近。这说明不能只靠增大入炉钛负荷来提升铁水 [Ti] 含量,应在入炉钛负荷与铁水 [Ti] 含量之间寻找

平衡点。

分析 4 月 1 日~13 日钛矿、钛煤带入炉内钛负荷与铁水中 [Ti] 含量的对应关系发现,当风口钛煤混喷带入钛负荷为 3.69 kg/t 时,铁水 [Ti] 能达到 0.13%,而同样的铁水 [Ti] 含量则需要炉顶钛矿带入 7.7 kg/t 的钛负荷,说明钛煤带入的钛更多地还原进入了铁水。入炉钛负荷越大,还原利用率越低。在钛矿入炉负荷较小、与钛煤带入炉内的钛负荷相当时,铁水 [Ti] 是否能达到同样的水平? 为此分析了钛矿护炉初期的数据。

该高炉自 3 月 4 日开始向每批料加入 1.5 t 钛

矿3月6日增加到2 t,3月8日增加到2.5 t。该阶段钛矿带入炉内的钛负荷与铁水[Ti]的对应关系,钛煤混喷试验阶段钛煤入炉钛负荷与铁水[Ti]的对应关系,见图8。

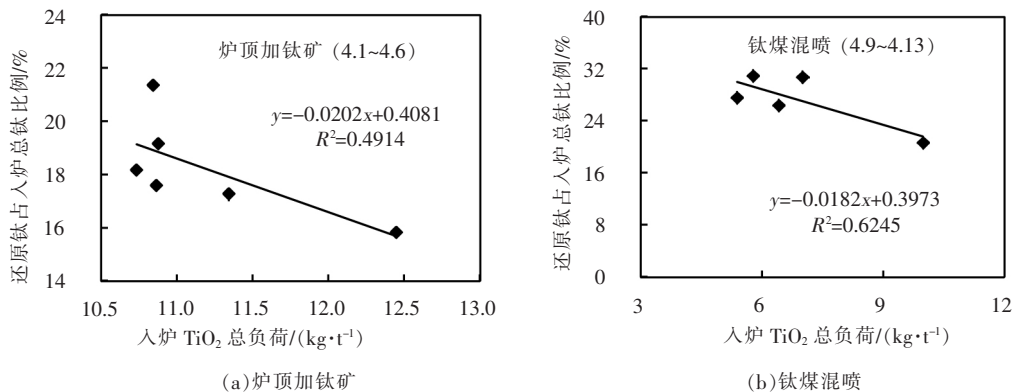


图7 铁水钛还原比率与入炉钛负荷关系

Fig.7 Changes of titanium reduction ratio with injection load of titanium

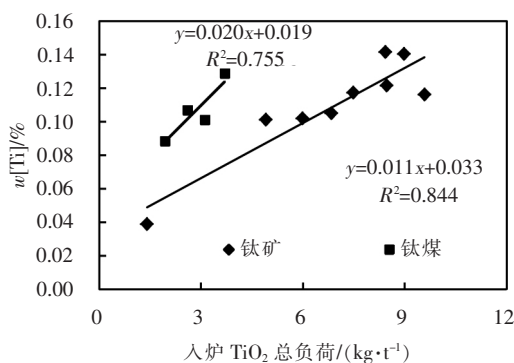


图8 钛矿、钛煤与铁水[Ti]对应关系

Fig.8 The [Ti] in hot metal vs charged TiO_2 load for titanium co-injection and top charge

4 钛煤混喷护炉效果分析

1) 炉缸二段冷却水温差变化

以4月7日上午9:00的炉缸二段冷却壁水温差为试验基准值,以4月13日上午9:00炉缸二段冷却水温差为风口喷钛试验对应的试验值,比较两者变化情况。结果为:钛煤混喷期间,炉缸二段的120点冷却水温差,有27个点出现温度下降,最大下降值为0.3℃,只有2个温度点出现上升,最大升高值为0.1℃,其它水管的水温差保持不变。这说明钛煤混喷后,炉缸二段冷却水温差呈现稳中有降趋势。

2) 炉缸炉底电偶温度变化

图8显示,在入炉钛负荷2~6 kg/t区间,钛煤混喷带入高炉的钛与铁水[Ti]的相关系数为0.02;炉顶钛矿带入高炉的钛与铁水[Ti]的关联系数为0.011。钛煤混喷带入的 TiO_2 还原成铁水[Ti]的比例更高。

图9为炉底三层至炉缸七层热电偶在3月1日~4月14日的层均温度变化情况。从各层电偶均温数值看,温度最高的分别是炉底四层、炉底三层、炉缸三层,说明炉底和炉缸炉底结合部侵蚀最为严重。从各层电偶均温的变化趋势看,炉底三层至炉缸三层的热电偶在钛煤混喷期间呈现温度较快上升趋势,炉缸四层至炉缸七层在钛煤混喷期间呈现平稳或温度下降趋势。

图9显示,炉底三层、炉底四层热电偶的温度在3月1日~4月14日时段整体呈现上升趋势,仅在炉顶加钛矿持续一月后的4月初有过短暂的温度稳定阶段,这说明炉底部位很难形成稳定性强的钛保护层。在停止炉顶加钛矿后,使用风口钛煤混喷时,虽然风口喷入的钛还原进入铁水的比例更高,但在试验早期阶段,风口带入钛的还原优势无法抵消炉顶钛的数量优势时,炉底三层、四层热电偶温度在炉顶加钛矿时期达成的短暂平衡被打破,电偶温度重启上升趋势。与炉底电偶温度难以控制形成对比的是,炉缸铁口水平线以上部位的电偶温度变化趋势更为平滑,对应的是钛积层具有相当的稳定性。

对炉底、炉缸耐火内衬中埋设的热电偶而言,其温度高低取决于钛积层附着的厚度,并不区分钛的来源。当钛煤混喷带入的钛还原进入铁水的数量达到相当程度时,炉缸上部热电偶温度即呈下降趋势;而此时炉底三层、四层电偶温度仍呈现上涨趋势,说明炉底在炉顶加钛矿时形成的保护层已经被再次侵

蚀,而风口喷钛带入的还原钛,在短期内仍无法形成足够厚度的有效钛积层,短期内不能达到抑制电偶

温度升高的效果。如果钛煤混喷的时间延长到一个月,推测炉底三层、四层温度也将呈现下降趋势。

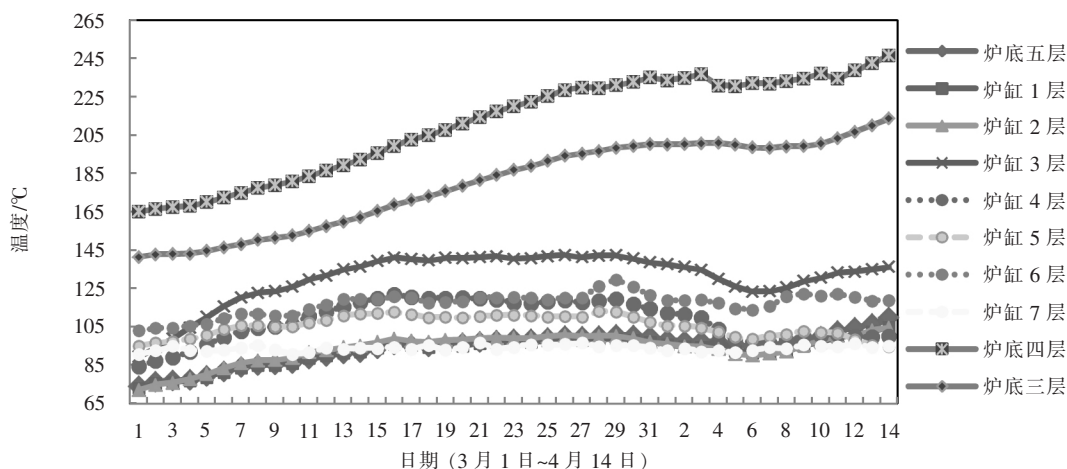


图9 炉底炉缸各层热电偶均温变化

Fig.9 The temperature change of thermal couples in the hearth bottom and wall

5 结语

本次钛煤混喷工业试验得到以下几个认识:

1) 从钛煤粉的制备与喷吹过程看,利用现有制粉喷煤设备,可以实现单系列喷吹 5 kg/t 钛负荷,钛煤混喷在实施上具备完全的可行性。

2) 从铁水钛含量变化上看,在钛煤喷入高炉的钛负荷 $\geq 2.9 \text{ kg/t}$ 时,铁水平均 $[\text{Ti}] \geq 0.1\%$; 当钛煤混喷带入高炉的钛负荷达到 3.7 kg/t 时,铁水 $[\text{Ti}]$ 达到 0.13% 。在炉顶加钛矿时,要使铁水 Ti 含量达到同一水平,需要炉顶钛矿带入 7.7 kg/t 的钛负荷,钛煤混喷带入的钛还原进入铁水的比例更高。

3) 炉缸二段冷却水温差数据在钛煤混喷护炉期间基本保持稳定,炉底三层至炉缸三层热电偶温度呈现上升趋势,炉缸四层至炉缸七层热电偶温度呈现下降趋势。结合炉顶加钛矿护炉期间的炉底电偶温度变化趋势分析,无论炉顶加钛矿或是风口钛煤混喷,短期内对炉底电偶温度都很难起到明显抑制作用,只能依靠长时间的钛料入炉,才能抑制炉底电偶温度上升。本次工业试验时间相对较短,无法给出钛煤混喷一个月的数据;但依据钛煤混喷更高的钛还原率来看,更长时间的钛煤混喷应该如同炉顶加钛矿一样,终将抑制炉底电偶温度升高。

参考文献

- [1] Wang Hongmin, Sheng Shixiong. Blast furnace smelting of vanadium titanium magnetite with high titanium in Pansteel for ten years [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1980, 1(4): 4.
(王宏民, 盛世雄. 攀钢高钛型钒钛磁铁矿高炉冶炼十年 [J]. 钢铁钒钛, 1980, 1(4): 4.)
- [2] Technical Group of Liu Steel Iron-making Workshop. Summary of blast furnace maintenance by using vanadium titanomagnetite in Liu steel [J]. Liuzhou Technology, 1982 (2): 7.
(柳钢炼铁车间技术组. 柳钢高炉使用钒钛铁矿补炉小结 [J]. 柳州科技, 1982 (2): 7.)
- [3] Zhang Shijue. Vanadium-titanium magnetite for blast furnace protection technology appraisal held in Xiang steel [J]. Ironmaking, 1984(4): 88.
(张世爵. 钒钛磁铁矿用于高炉护炉技术鉴定会在湘钢召开 [J]. 炼铁, 1984(4): 88.)
- [4] Jiao Kexin, Zhang Jianliang, Zuo Haibin *et al.* Control model of effective titanium content for furnace protection in titanium-containing material [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2014, 35(8): 1160.
(焦克新, 张建良, 左海滨, 等. 含钛物料中高炉有效钛含量的控制模型 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(8): 1160.)

- [5] Li Y ,Li O ,Fruhan R J. Formation of titanium carbonitride from hot metal [J]. ISIJ International 2001 41(12) : 1417.
- [6] Cai Haoyu ,Cheng Shusen ,Ma Jinfang. Study on the law of furnace protection with titanium ore [J]. Iron and Steel. 2012 47(11) : 16.
(蔡皓宇 程树森 马金芳. 高炉钛矿护炉规律的研究 [J]. 钢铁 2012 47(11) : 16.)
- [7] Jiao Kexin ,Zhang Jianliang ,Liu Zhengjian *et al.* Formation mechanism of the protective layer in a blast furnace hearth [J]. Journal of Mineral Metallurgy and Materials 2015 22(10) : 1017.
- [8] He X ,Ye J W ,Liu Y *et al.* Phase transition and microstructure evolution during the carbothermal preparation of Ti(C ,N) powders in an open system [J]. Advanced Powder Technology 2010 21(4) : 448.
- [9] Morizane Y ,Ozturk B ,Fruehan R J. Thermodynamics of TiO_x in blast furnace-type slags [J]. Metallurgical and Materials Transactions B 1999 30(1) : 29.
- [10] Wang Z Y ,Zhang J L ,Xing X D *et al.* Congregated electron phase and Wagner model applied in titanium distribution behavior in low-titanium slag [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 2015 25(5) : 1640.
- [11] Wei Mengfang ,Zhang Jianliang ,Mao Rui *et al.* Reduction behavior of Ti in micro-titanium slag in blast furnace ironmaking condition [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2013 34(4) : 41.
(韦勐方 张建良 毛瑞 等. 高炉炼铁条件下微钛熔渣中 Ti 还原行为 [J]. 钢铁钒钛 2013 34(4) : 41.)
- [12] Chang Zhiyu ,Jiao Kexin ,Ning Xiaojun *et al.* The analysis of titanium distribution ratio under the condition of hearth maintenance by titanium ore [J]. Iron Steel Vanadium Titanium 2018 39(4) : 114.
(常治宇 焦克新 宁晓钧 等. 基于钛矿护炉条件下的钛分配比分析 [J]. 钢铁钒钛 2018 39(4) : 114.)
- [13] Liu Donghui ,Wang Xiaozhe ,Zhang Jianliang *et al.* The application status and investigation analysis of titanium-containing materials for blast furnace maintenance [J]. China Metallurgy 2018 28(2) : 1.
(刘东辉 王晓哲 张建良 等. 高炉护炉用含钛物料应用现状及调研分析 [J]. 中国冶金 2018 28(2) : 1.)
- [14] Wang Wenzhong. New technology and practice of tuyere feeding for blast furnace maintenance [J]. Ironmaking Technology Journal , 2007 (1) : 2.
(王文忠. 风口喂线护炉新工艺及其实践 [J]. 炼铁技术通讯 2007 (1) : 2.)
- [15] Zhang Chongmin ,Tong Fayong. Experimental study of mud containing titanium for blast furnace hearth protection [J]. Ironmaking 1995 14(4) : 57.
(张崇民 佟发勇. 含钛炮泥护炉的实验研究 [J]. 炼铁 1995 14(4) : 57.)
- [16] Sun Jian ,Liu Zhenggen ,Chu Mansheng *et al.* Optimal selection of titaniferous burden for BF maintenance [J]. Journal of Materials and Metallurgy 2018 17(2) : 81.
(孙健 柳政根 储满生 等. 高炉加钛护炉用含钛炉料优选 [J]. 材料与冶金学报 2018 17(2) : 81.)
- [17] Yu Z G ,Li G H ,Jiang T *et al.* Effect of basicity on titanomagnetite concentrate sintering [J]. ISIJ International 2015 55(4) : 907.
- [18] Walter Hartig ,Djamschid Amirzadeh-Asl ,Dieter Fünders. Campaign live extension at Rogesa blast furnaces by coinjection of PCI and titanium dioxide [C] // ICSTI 2009: 920.
- [19] Chang Zhiyu ,Jiao Kexin ,Ning Xiaojun *et al.* The protective effect of titanium ore and affecting factors of titanium distribution ratio in No.4 blast furnace of Liu steel [J]. Ironmaking 2018 37(3) : 21.
(常治宇 焦克新 宁晓钧 等. 柳钢 4 号高炉钛矿护炉效果及影响钛分配比的因素 [J]. 炼铁 2018 37(3) : 21.)
- [20] Chang Li ,Yu Changfeng. Steady production practice and furnace protection experience of No.1 BF in Sha steel [J]. Ironmaking , 2018 37(6) : 15.
(常李 余昌锋. 沙钢 1 号高炉稳产实践及护炉经验 [J]. 炼铁 2018 37(6) : 15.)
- [21] Dong Yafeng ,Guo Peimin ,Zhang Xu *et al.* Simulation test of mixed pulverized titanium -coal injection [J]. Ironmaking 2020 39(1) : 20.
(董亚锋 郭培民 张旭 等. 钛煤混喷模拟试验 [J]. 炼铁 2020 39(1) : 20.)