

采用铁矿石替代废钢的炼钢工艺实践

田志国

(湘潭钢铁集团公司, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 介绍了湘潭钢铁集团公司炼钢厂 80 t 转炉采用铁矿石替代部分废钢作为冷料, 通过调整转炉的物料配比和操作方式, 以降低炼钢成本的工艺实践。实践证明, 采用铁矿石替代废钢, 可使矿石消耗量增加, 而废钢消耗量减少, 从而降低钢铁料、氧气、化渣剂等的成本支出。

关键词: 铁矿石; 废钢; 炼钢; 工艺实践

中图分类号: TF723

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)03-0004-04

The Technology of Steelmaking Process with Iron Ore Replacing to Scrap

Tian Zhiguo

(Xiangtan Iron and Steel Group Corporation, Xiangtan Hunan 411101, China)

Abstract: The 80 t converter using iron ore partly instead of scrap as cold material in the steelmaking plant of Xiangtan Iron and Steel Group Corporation was introduced. By adjusting material ratio in the converter and optimizing the operation, the cost of steelmaking was reduced. It proved that with iron ore alternative to scrap, the iron ore consumption was increased and the scrap consumption was decreased, and the costs of oxygen, steel material and flux, etc. were dropped.

Keywords: iron ore; scrap; steelmaking; technology practice

据测算, 铁水、废钢、原材料、合金等的成本占炼钢总成本的 70% 以上^[1]。根据热平衡计算可知, 转炉炼钢时炉内热量有富余, 必须加入适量的冷却剂。转炉炼钢可用的冷却剂有废钢、铁矿石、氧化铁皮等, 用量最多的为废钢。2010 年以来, 废钢价格暴涨, 且采购困难, 造成炼钢厂成本超支。湘钢在炼铁产能富余的情况下, 使用铁矿石替代废钢, 以降低炼钢成本, 平衡生产。

1 工艺条件

1.1 设备条件

湘钢炼钢厂现有 3 座公称容量为 80 t 的转炉, 平均装入量为 98 t, 转炉冶炼周期为 32 min, 吹氧时间

为 15 min, 供氧流量为 17 500 ~ 19 500 Nm³/h, 氧压为 0.7 ~ 0.9 MPa。炉外精炼装备含 3 座 CAS (composition adjustment by sealed argon bubbling) 站、3 座 LF (ladle furnace) 钢包炉、一台 VD (vacuum degassing) 炉, 连铸含 2 台 8 机 8 流罗可普小方坯连铸机、1 台 4 机 4 流克虏伯型方坯连铸机、1 台 4 机 4 流康卡斯特方坯连铸机。

根据工艺要求的不同, 炼钢厂的工艺流程主要分为: 转炉—CAS—铸机—CAS—LF—(VD)—铸机, 转炉—CAS—转炉—CAS—LF—(VD)—铸机 2 种形式。

1.2 原料条件

炼钢厂使用的铁水由湘钢炼铁厂供应, 铁水成

收稿日期: 2011-03-21

作者简介: 田志国 (1977-), 男, 湖南湘潭人, 湘潭钢铁集团公司工程师, 主要从事转炉炼钢技术方面的工作,

E-mail: tg1977@sina.com

分与温度情况如下： S_i 的质量分数为0.20%~0.80%， Mn 的质量分数为0.30%~0.60%， P 的质量分数不大于0.150%， S 的质量分数不大于0.050%，入炉温度大于1250℃，带渣量质量分数应小于0.5%。

转炉中使用的铁矿石粒度为6.3~50 mm，粒度超过此范围的质量分数不超过10%。最大粒度不超过70 mm。铁矿石标准中各物质的质量分数见表1。

表1 转炉用矿石标准

$w(Fe)$	$w(S)$	$w(P)$	$w(As)$	$w(Cu)$	$w(Pb)$	$w(Zn)$	$w(SiO_2)$	$w(H_2O)$
>61	<0.1	<0.1	<0.01	<0.1	<0.1	<0.1	<4.5	<5

1.3 采用铁矿石替代废钢的操作难点

铁矿石的主要成分为 Fe_2O_3 或 Fe_3O_4 ，矿石的熔化、分解和铁被还原都需吸热，因而能起到调节熔池温度的作用。铁矿石加入量增大会给转炉的操作带来诸多问题：一方面，由于铁矿石的含氧量较高，钢水中的碳氧反应较为活跃，易造成冶炼前期出现较多的溢渣现象；另一方面，铁矿石中带有脉石，而脉石的存在会增加矿渣总量，且铁矿石的一次加入量过多会引起喷溅和冒烟现象。所以采用铁矿石替代废钢炼钢时，需加强对转炉操作的控制，可通过灵活控制铁矿石的加入时间和加入质量、调整氧枪枪位及调控熔池温度等措施来解决以上问题。

1.4 铁矿石替代废钢作冷却剂的理论依据

1.4.1 铁矿石的冷却效应吸热

铁矿石的冷却效应吸热包括物理和化学冷却吸热2方面。铁矿石的物理冷却吸热是指铁矿石从常温加热至熔化，直至出钢温度的整个过程所吸收的热量；化学冷却吸热是指铁矿石分解时所吸收的热量。因铁矿石的冷却效应吸收的热量值计算式为^[2]：

$$Q_{\text{矿}} = m \times C_{\text{矿}} \times \Delta t \times \lambda_{\text{矿}} + m \times [112/160w(Fe_2O_3) \times 6459 + 56/72w(FeO) \times 4249],$$

式中： m 为铁矿石质量，kg； $C_{\text{矿}}$ 为铁矿石质量热容，且 $C_{\text{矿}}=1.016 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$ ； Δt 为铁矿石加入熔池后需升高的温度数，℃； $\lambda_{\text{矿}}$ 为铁矿石的熔化潜热，即209 kJ/kg。

从上式可看出 Fe_2O_3 的分解热所占比例较大，这说明铁矿石冷却炉温主要靠 Fe_2O_3 分解吸热。因此，铁矿石冷却效应吸收热量值随 Fe_2O_3 质量分数的变化而变化。如设铁矿石中 Fe_2O_3 的质量分数为70%， FeO 的质量分数为10%，则1 kg该铁矿石在出钢温度为1660℃时因冷却效应吸收的热量值是5409.6 kJ。

1.4.2 废钢的冷却效应吸热

废钢的冷却效应吸热即废钢从常温加热到全部熔化，并升温至出钢温度所需吸收的总热量。废钢冷

却效应吸热主要依靠升温吸热来冷却熔池，由于不知废钢的准确成分，其熔点通常按低碳钢的(1500℃)计算，入炉温度按25℃计算，其计算式为^[1]：

$$Q_{\text{废}} = 1 \times [C_{\text{固}}(t_{\text{熔}} - 25) + \lambda_{\text{废}} + C_{\text{液}}(t_{\text{出}} - t_{\text{熔}})],$$

式中： $C_{\text{固}}$ 为固态废钢的质量热容，为0.699 kJ/(kg·℃)； $t_{\text{熔}}$ 为废钢的溶化温度； $\lambda_{\text{废}}$ 为铁矿石的熔化潜热，即272 kJ/kg； $C_{\text{液}}$ 为液态废钢的质量热容，且 $C_{\text{固}}=0.837 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$ ； $t_{\text{出}}$ 为钢水的出炉温度。

经计算，1 kg废钢在出钢温度为1660℃时因冷却效应吸收的热量值是1436.9 kJ。对比铁矿石和废钢的冷却效应吸热值可知，1 kg铁矿石的冷却效应吸热值相当于3.7 kg废钢的冷却效应吸热值。因此，在减少废钢用量的情况下，可通过增加铁矿石的用量来平衡炼钢的富余热量。

2 工艺过程控制

2.1 合适的装入制度

原有装入制度为铁水(82±2)t，废钢16t。为获取最合适的装入制度，在保证铁水装入量一定的情况下，按照不加废钢和加入(8~10)t废钢2种方式进行对比试验。结果表明：不加废钢时，每炉钢的冶炼过程中需加入5t以上铁矿石，备料和操作控制都较困难，易发生钢水、铁水喷溅，且烟尘外溢现象严重，使得钢铁料损失较大，并严重污染环境。在控制废钢加入量为(8~10)t时，每炉钢的冶炼过程中仅约需加入铁矿石3~4t。备料和冶炼操作都较易控制，冶炼过程较平稳。因加入较多量的铁矿石，会使出钢量有所增加，故总的装入量按下限控制，即最佳装入制度为：装入铁水(89±1)t，废钢8t。

2.2 供氧制度

采用铁矿石替代废钢时，由于铁矿石加入量较大，易形成熔渣，流动性能好，因此，采用适当的低位置操作枪位是供氧操作的关键。枪位的控制对熔池温度的变化起决定性作用，灵活调节枪位可控制好转炉冶炼过程的温度和化渣情况。低枪位操作时，熔池中氧气、熔渣、金属液紧密接触，因而炉内化学反应速度较快，也使熔池升温速度加快，熔池搅拌速度加大。高枪位操作时，炉内的化学反应速度较缓慢，控制不当会使炉渣中 FeO 的质量分数增加，易发生喷溅现象，使热量损失增加。

在改进后的冶炼操作中，采用分阶段恒压变枪操作^[3]，即由原来“高一低一高一低”的操作模式改为“低—高一低—低”的操作模式。采用矿石替代废钢之后，转炉氧枪操作模式如图1所示。图1中，枪位1为原有模式，枪位2为采用矿石替代废钢工艺之后的操作模式。

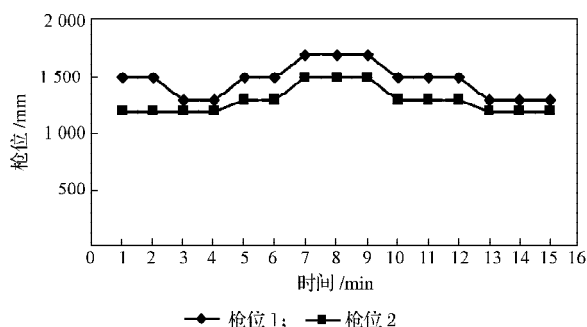


图1 枪位控制对比图

Fig. 1 The contrast of lance control

因开吹时已加入大批量的铁矿石,故冶炼前期采用较低枪位化渣,使熔池温度迅速上升,促进石灰熔化,尽快形成具有一定碱度的炉渣。为避免在碳化剧烈反应期出现返干现象,冶炼中期适时提高枪位,使渣中 FeO 的质量分数保持在 $10\% \sim 15\%$,以利于继续去除铁矿石中的磷、硫。在接近终点时降枪,以加强熔池搅拌速度,继续脱碳及均匀熔池成分和温度,降低终渣中 FeO 的质量分数。

2.3 造渣制度

氧气转炉炼钢炉渣可简化为 $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ 三元系,炼钢过程中石灰的溶解过程及渣成分的变化如图2所示。一般情况下,炼钢过程中转炉吹炼初期渣的组成位于图2中的A区,根据工艺要求,终渣成分需达到图2中的B区^[3]。

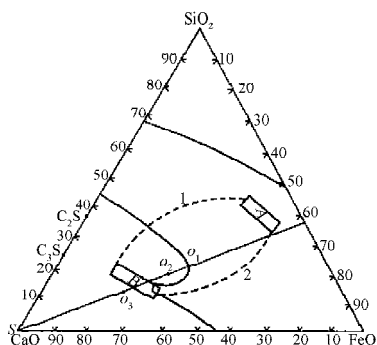


图2 炼钢过程中石灰的溶解过程及渣成分的变化

Fig. 2 The process of limestone dissolution and the variation of slag composition during steelmaking

采用铁矿石替代部分废钢后,因铁矿石加入量较大,渣中总 FeO 质量分数增加速度较快,熔渣成分在液相区内沿图2中途径2到达B区。根据装入的铁水成分、数量确定造渣材料的加入量,石灰消耗量约为 50 kg/t ,在开始吹炼时加入约 2.5 t 石灰,占总添加量的一半,其余的石灰在冶炼过程中分批加入。因加入的铁矿石中带有 SiO_2 ,所以需补加石灰,以保证熔渣碱度。若矿石中 $w(\text{SiO}_2) = 3\%$,渣碱度 $R=3.5$ 时,每 100 kg 矿石约需补加 13.5 kg 石灰。在实际操作过程中,

经过对比发现,与采用原工艺相比,每炉钢的石灰消耗总量并没有增加。经初步分析,认为其原因如下:一是石灰易渣化,改进工艺中石灰的利用率得到了提高;二是废钢质量差,减小废钢的加入量也即减少了夹杂物的带入;三是该工艺操作控制平稳,减少了用石灰降温等浪费行为。

轻烧白云石的热量消耗情况为 28 kg/t ,在冶炼前期加完,并保持渣中 $w(\text{MgO}) \geq 8\%$,以减少炉衬蚀损。冶炼后期根据渣况和溅渣要求确定是否补加轻烧白云石,若渣稀则补加 $300 \sim 500 \text{ kg}$ 。原炼钢工艺中,每炉钢约需添加萤石等化渣材料 300 kg 。采用铁矿石替代废钢工艺时,可不添加化渣材料。

采用铁矿石替代废钢工艺的造渣操作要点为:前期快速成渣,中期熔渣化透,后期终渣作黏。冶炼前期快速成渣,与原工艺相比,适当的压枪操作可快速升温,改善熔渣流动性和加速矿石扩散。抓紧有利时机早化渣,多脱磷;同时,通过加快成渣速度,提高脱硫效率。冶炼中期正值碳的激烈氧化期,通过加入铁矿石和提高 300 mm 左右的枪位,使矿渣中继续保持 $w(\text{FeO})$ 在 $10\% \sim 20\%$,避免发生返干现象。冶炼后期的压枪操作,降低了渣中 FeO 质量分数。在整个冶炼过程中,因采用了比原工艺要低 $100 \sim 200 \text{ mm}$ 的操作枪位,避免了泡沫性喷溅或溢渣现象的产生。

2.4 温度制度

根据具体情况正确判断冶炼过程中的温度变化情况,及时调整铁矿石用量。开吹时加入铁矿石 2 t 左右,占加入总量的 $50\% \sim 60\%$ 。冶炼过程的中后期,分批次加入铁矿石,每批次加入量不大于 500 kg ,具体加入方法为:在硅及锰的氧化基本结束、头批渣料已经化好、碳焰初起的时候(开吹约 5 min)加入2批铁矿石,每批约加入 0.5 t 。在吹炼中期(开吹约 $8 \sim 10 \text{ min}$)返干或熔池温度高时加入1批铁矿石,在终点前 3 min 左右,根据熔池温度情况加入铁矿石1批,以调整熔池温度。吹炼末期不再加入铁矿石,主要进行升温 and 均匀温度工作。

2.5 终点控制

炼钢终点的选择主要根据耗氧量及吹氧时间判断,距提枪 120 s 时不再加入铁矿石,以避免因铁矿石未充分分解造成脱氧异常。距提枪 90 s 时“压枪”,对熔池进行深枪位搅拌,尽量降低渣中氧化铁的质量分数,均匀钢液温度及成分。

3 工艺和成本分析

3.1 熔渣成分对比分析

通过对比2009年与2010年第三季度的炼钢厂终

渣数据(见表2),可发现以铁矿石替代废钢后,转炉内终渣成分变化不大。冶炼过程中大量使用铁矿石后,转炉终渣碱度、 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{FeO})$ 仍旧分别控制在合格范围内。因此,以铁矿石替代废钢的装入制度对转炉炉况无较大影响。通过优化操作,终点处总 FeO 的质量分数有所降低。

表2 终渣数据对比表

Table 2 The comparison of final slag data

年份	矿石消耗/ ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	终渣碱度 平均值	MgO 平均 质量分数/%	总 FeO 质量 分数/%
2009	9.81	2.86	11.35	17.05
2010	22.53	2.94	10.75	16.76

3.2 铁水的影响

采用铁矿石替代废钢工艺技术的必要条件之一是铁水供应充足。炼钢厂2010年第三季度铁水单耗为989 kg/t,比2009年第三季度指标964 kg/t增加了25 kg/t。因此,炼铁厂的铁水产量高低、铁水成分波动、铁水温度波动对该工艺的实施有较大影响。

3.3 对环境的影响

转炉吹氧时,金属熔池局部温度可高达2 500~2 800 $^{\circ}\text{C}$,以致一部分铁或其氧化物蒸发而随炉气带出,并夹带出部分散状料粉尘和渣粒,组成了烟尘。铁矿石的加入使转炉内局部供氧增加,瞬间发生较剧烈的反应,使烟尘量加大。为了减少环境污染,采用如下应对措施:一是加大一次除尘风机转速,由2 200 r/min增加到2 600 r/min,从而加大一次除尘的处理能力;二是减少喷溅和返干现象,通过前述标准化操作,使反应过程较平稳。

3.4 成本分析

通过对2010年和2009年第三季度的炼钢厂成本(数据见表3)进行对比分析可知,采用铁矿石替代废钢的生产工艺能降低炼钢成本。

表3 成本数据对比表

Table 3 The comparison of cost data

年份	矿石 消耗/ ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	氧气消耗 (标态)/ ($\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$)	化渣剂 消耗/ ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	钢铁料 消耗/ ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	吨钢铁水 消耗量/ ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)
2009	9.81	53.6	2.32	1096.4	964
2010	22.53	50.1	0.39	1087.3	989

相关资料显示,湖南地区中废钢采购价格平均为3 700元/t,65%铁精矿粉采购执行价平均为1 475元/t^[5]。湘钢铁水的内部价格为2 900元/t。采用该工艺,每炉钢可减少废钢加入约8 t,增加铁水加入约8 t,在这方面降低的成本不计入该工艺的直接效益。按

上述价格,铁矿石消耗增加单位量为12.72 kg/t,导致成本增加18.76元/t。氧气消耗(标态)降低3.5 m^3/t ,单价0.6元/ m^3 ,故该成本降低2.1元/t。化渣剂消耗降低1.93 kg/t,单价1 200元/t,成本降低2.32元/t。钢铁料消耗因加入铁矿石和操作改进,综合降低9.1 kg/t。按矿石品位65%、收得率90%测算,其中因增加铁矿石加入而直接降低的消耗为7.44 kg/t,成本降低21.58元/t。因此可测算出,采用该工艺可降低钢铁水成本7.24元/t。

4 结论

1) 采用铁矿石替代废钢的炼钢工艺,通过调整转炉冶炼操作制度可以有效控制转炉的喷溅或返干现象,冶炼过程平稳。

2) 采用铁矿石替代废钢的炼钢工艺,仅增加铁矿石的消耗量,而钢铁料消耗、氧气消耗、化渣剂消耗均降低,可降低转炉炼钢成本7.24元/t。

3) 采用铁矿石替代废钢的炼钢工艺,终点炉渣成分没有明显变化。

参考文献:

- [1] 范鼎东. 炼钢金属炉料的经济性研究[J]. 炼钢, 1999, 15(3): 46-49.
Fan Dingdong. Research on Economics of Metal Charge for Steelmaking[J]. Steel Making, 1999, 15(3): 46-49.
- [2] 张岩, 张红文. 氧气转炉炼钢工艺与设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 135-137.
Zhang Yan, Zhang Hongwen. BOF Steel-Making Technology and Equipment[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010: 135-137.
- [3] 高泽平. 炼钢工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 117-119.
Gao Zeping. Steel-Making Technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 117-119.
- [4] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 161-162.
Huang Xihu. Principles for Steel and Iron Metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 161-162.
- [5] 亦文. 国内原料市场一周综述(2月26日—3月4日)[N]. 中国冶金报, 2011-03-10(C4).
Yi Wen. A Week Summary of the Domestic Raw Material Market (February 26 to March 4)[N]. China Metallurgical News, 2011-03-10(C4).

(责任编辑: 廖友媛)