

气化脱磷机理及对下炉次冶炼过程的影响研究

周朝刚¹,艾立群¹,王书桓¹,郭瑞华¹,薛月凯¹,赵定国¹,李晨晓¹,侯明山²

(1.华北理工大学冶金与能源学院,唐山市特种冶金及材料制备重点实验室,河北唐山 063009; 2.河钢唐钢技术中心,河北唐山 063000)

摘 要:为了解决转炉渣由于磷含量过高而不能返回到转炉内循环利用的问题,采用 FactSage7.2 并结合 SEM+EDS 对气化脱磷理论和影响因素、留渣操作和枪位控制对脱磷的影响以及气化脱磷渣形貌进行了分析。结果表明,在温度高于 941 K 时用 C 还原出炉渣中 P_2O_5 的 P 是可行的,同时降低反应分压有利于气化脱磷反应的进行;采用焦粉作为还原剂时,碳当量和底吹流量分别控制为 2 倍碳当量和 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 时气化脱磷效果最好;当底吹流量为 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 、2 倍碳当量和 $w(\text{FeO}) \geq 18\%$ 时气化脱磷率最高,为 42%。采用留渣操作溅渣护炉气化脱磷模式时终点钢液磷含量较低,前期采用稍高的吹炼枪位,后期逐渐降低枪位,气化脱磷渣形貌结构表明 P 元素主要富集在 Ca、Si 所在的深灰色区域。

关键词:气化脱磷渣;溅渣护炉;气化脱磷;碳当量;底吹流量

中图分类号:TF704.4 文献标志码:A 文章编号:1004-7638(2018)06-0129-08

DOI:10.7513/j.issn.1004-7638.2018.06.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on Mechanism of Gasification Dephosphorization and Influence of Next Heat Smelting Process

Zhou Chaogang¹, Ai Liqun¹, Wang Shuhuan¹, Guo Ruihua¹,
Xue Yuekai¹, Zhao Dingguo¹, Li Chenxiao¹, Hou Mingshan²

(1.College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan Key Laboratory of Special Metallurgy and Materials Manufacturing, Tangshan 063009, Hebei, China; 2.Technology Center of Tangshan Company, HBIS Group, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: In order to solve the problem that BOF slag can not be returned back into BOF due to its high P content, the dephosphorization mechanism of gasification and influencing factors, effect of slag remaining operation and lance controlling on dephosphorization and morphology of gasification dephosphorization slag were analyzed by FactSage7.2 and SEM+EDS in this paper. The result shows that it is feasible to use C to reduce P of P_2O_5 for slag when temperature exceeding 941 K and it is beneficial to the gasification dephosphorization reaction by reducing the reaction partial pressure. While taking coke powder as a reducing agent, the best results of gasification dephosphorization were obtained when the carbon equivalent and bottom blowing flow were controlled at 2 times the carbon equivalent and $300\text{ m}^3/\text{h}$ respectively. Gasification dephosphorization rate can reach a maximum value of 42% when bottom blowing flow, carbon equivalent, FeO content are $300\text{ m}^3/\text{h}$, 2 times and $\geq 18\%$. When using slag remaining operation for gasification dephosphorization mode of splashing furnace protection, where higher blowing lance operation at the early stage and gradually lower high and low blowing lance operation at later stage, the phosphorus content of molten steel at the end is relatively low. SEM observation on morphology structure of gasification dephosphorization slag indicated that P mainly concentrated in enriched Ca and Si areas.

Key words: gasification dephosphorization slag, slag splashing, gasification dephosphorization, carbon equivalent, bottom blowing flow

收稿日期:2018-10-15

基金项目:河北省重点研发计划自筹项目(17214602),华北理工大学博士后日常经费(3103/14310335),华北理工大学博士启动基金资助项目(28411099)。

作者简介:周朝刚(1985—)博士,讲师,研究方向:主要从事炼钢新技术与品种钢冶炼方面的研究 E-mail:zhouchaogang9@163.com。
通信作者:艾立群(1965—)博士,教授,主要从事纯净钢冶金理论与工艺、品种钢冶炼等方面的研究 E-mail:ailiqun@ncst.edu.cn。

0 引言

在转炉冶炼过程中,钢渣是炼钢过程的副产品之一,钢渣高效利用,最直接和最经济的方法就是返回到转炉中直接进行下一炉次的造渣冶炼。由于转炉终渣含有一定的 FeO 和热量,直接返回到下一炉次利用不仅可以提高金属收得率,同时也可以提供一部分热源,在同等条件下,减少冶炼过程硅铁等增温剂的加入量,有效地降低冶炼成本,提高企业的市场竞争力^[1-4]。

要实现炉渣的返回利用,首先应降低炉渣中 P_2O_5 的含量,目前部分钢铁企业和研究者通过加入碳源等还原剂将炉渣中的 P_2O_5 通过气化脱磷的方式将磷降低。例如:郝华强等^[5]为去除转炉渣中的磷,实现转炉渣在转炉内的循环利用,通过理论分析,结合顶底复吹转炉工业试验,证明在炼钢温度下通过碳质脱磷剂还原炉渣中 P_2O_5 是可行的,通过不同还原剂对气化脱磷的影响确定了选择碳质还原剂更加合理,同时也确定了熔渣气化脱磷的温度。么洪勇^[6]为了获得较好的气化脱磷效果,实现钢渣的二次资源利用,通过溅渣护炉操作分别研究了供氮强度、焦粉加入增加比例和底吹气体流量等对气化脱磷的影响,从而得到了气化脱磷大于 36% 的较优控制参数。

上述研究都表明:通过气化脱磷方式可以有效地

将炉渣中的 P_2O_5 部分去除,然而,在顶底复吹转炉上采用溅渣护炉进行气化脱磷后,气化脱磷的热力学条件、底吹流量、留渣量、枪位控制以及炉渣形貌等都必然会对下一循环炉次冶炼操作造成影响,且针对这一方面的研究目前相对较少^[7]。因此,笔者首先分析气化脱磷的热力学反应温度、反应压力,同时系统研究采用溅渣护炉气化脱磷时不同底吹流量以及下炉次留渣操作、枪位控制及炉渣形貌等因素的影响,从而为实现工业达到较佳的气化脱磷率并确保下一炉次终点磷合格的冶金操作提供技术指导。

1 试验工艺及条件

1.1 试验工艺

通过某钢厂 65 t 顶底复吹转炉利用溅渣护炉采用碳源进行气化脱磷,为了确保下炉次冶炼低合金钢 HRB400D 终点温度、C、P 等合格,整个工艺过程如图 1 所示。由图 1 可知,当冶炼终点条件合格时进行出钢,然后加入焦炭进行溅渣护炉,溅渣结束后将炉渣全部留下进行下一炉次冶炼,然后兑入铁水和废钢,根据留渣条件、铁水条件进行造渣和吹氧以及枪位控制,当终点合格时进行出钢,如果不合格,进行补吹直到合格,然后进行出钢,按上述进行循环,经过多炉次循环后,当炉渣磷含量过高后,溅渣结束后将炉渣全部倒出,一个循环结束。

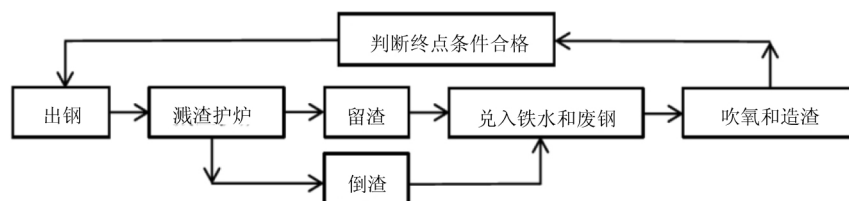


图 1 冶炼工艺流程

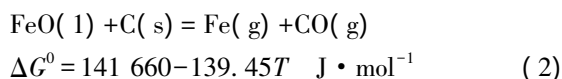
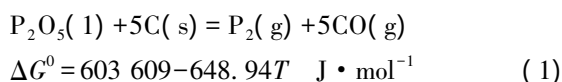
Fig.1 Smelting process flow chart

1.2 入炉铁水条件

冶炼过程入炉铁水量为 61.8~71.4 t,废钢量为 6.8~13.25 t。出钢量为 67.25~78.2 t。冶炼过程铁水条件如表 1 所示。由表 1 可知,铁水温度为 1 268~1 367 °C,碳含量为 4.01%~4.48%,Si 含量为 0.14%~0.76%。Mn 含量为 0.13%~0.18%,P 含量为 0.102%~0.124%,S 含量为 0.022%~0.049%。表明入炉铁水温度和硅含量存在一定的波动性。

2 气化脱磷反应热力学理论分析

在转炉进行溅渣护炉冶炼条件下,加入的碳源主要与炉渣中的 P_2O_5 和 FeO 反应,其反应如式(1)和式(2)所示^[8-9]。



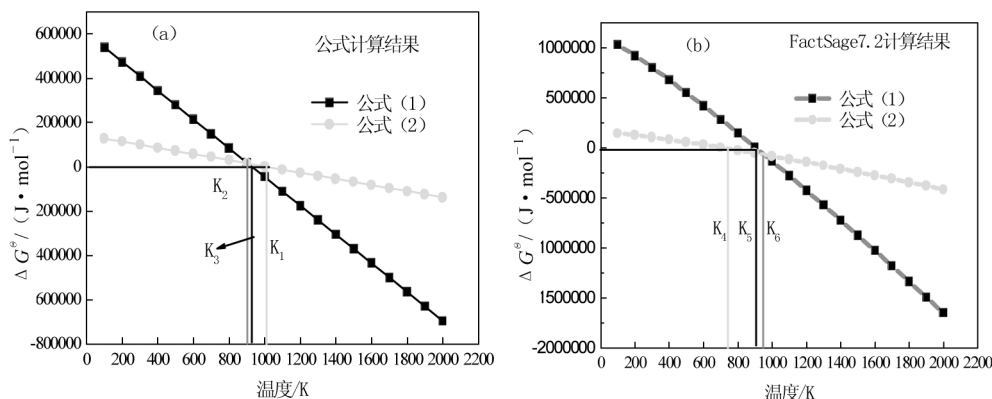
式中 ΔG^0 为化学反应的标准吉布斯能 $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; s、l、和 g 分别表示固体、液体和气体, T 为体系的温度, K。由式(1)和式(2)计算得到化学反应的标准吉布斯自由能与温度的关系计算如图 2(a) 所示, 通过 FactSage7.2 模拟软件 Reaction 模块计算标准吉布斯自由能与温度的关系如图 2(b) 所示。其中 K_1 和 K_4 分别表示 C 还原 P_2O_5 的通过公式和软件计算得到的平衡温度, K_2 和 K_6 分别表示 C 还原 P_2O_5 和 FeO 通过公式和软件计算得到的选择性温度, K_3 和 K_5 分别表示 C 还原 FeO 的通过公式和软件计算得到的平衡温度。由图 2(a) 可知, 采用 C 还原炉渣 P_2O_5 和 FeO 的平衡温度分别为 930 K (即 657 °C) 和 1 015 K (即 742 °C), 其还原二者的选择性温度为 894 K, 当温度高于 894 K 时, 在同等条件下, C 优先还原 P_2O_5 。因此当温度高于 930 K (即 657 °C) 时主要以碳还原炉渣 P_2O_5 为

主, 即炉渣温度高于 930 K (即 657 °C) 时可满足还原渣中 P_2O_5 的热力学条件。由图 2(b) 可知, 通过 FactSage7.2 计算得到 C 还原炉渣 P_2O_5 和 FeO 的平衡温度分别为 904 K (即 631 °C) 和 734 K (即 461 °C), 其还原二者的选择性温度还原温度为 941 K, 当温度高于 941 K 时, 在同等条件下, C 优先还原 P_2O_5 , 并且当温度高于 941 K (即 668 °C) 时主要进行 C 还原炉渣 P_2O_5 的反应, 即炉渣温度高于 941 K (即 668 °C) 时可满足还原渣中 P_2O_5 的热力学条件。综上所述, 当温度炉渣温度高于 941 K (即 668 °C) 时即可满足 C 优先还原熔渣中 P_2O_5 。而在实际炼钢过程中, 由于炼钢温度高于 1 573 K (1 300 °C) 在流动氮气气氛条件下, 用合适的碳质还原剂还原熔渣时, 从热力学角度讲, 熔渣中首先被还原的是 P_2O_5 , 而不是通常人们所认为的 FeO 。

表 1 65 t 顶底复吹转炉入炉铁水成分及温度

Table 1 The temperature and composition of charged hot metal into the 65 t top and bottom combined blown converter

	温度/°C	w/%				
		[C]	[Si]	[Mn]	[P]	[S]
范围	1 268~1 367	4.01~4.48	0.41~0.76	0.13~0.18	0.102~0.124	0.022~0.049
平均	1 316	4.25	0.61	0.16	0.112	0.030

图 2 C 还原 P_2O_5 和 FeO 的标准吉布斯自由能与温度的关系Fig.2 Relation between standard gibbs free energy and temperature by using carbon reducing P_2O_5 and FeO

同时由于气化脱磷反应产物均是气体, 气化脱磷效果与气化脱磷反应平衡分压密切相关。由式(1), 采用 FactSage7.2 软件 Reaction 模块计算不同分压下 C 还原 P_2O_5 的标准吉布斯自由能与温度的关系如图 3 所示。由图 3 可知, 采用 C 还原熔渣中的 P_2O_5 时, 当气化反应达到平衡, 其选择的反应物的分压越低, 则达到平衡的温度也越低, 即反应分压越低越有利于气化脱磷反应的进行。

例如当反应平衡分压分别为 $1.013\ 25 \times 10^{-5}$ 、 $1.013\ 25$ 、 $1.013\ 25 \times 10^5$ 、 $1.013\ 25 \times 10^{10}$ Pa 时, 其反应所达到的平衡温度分别为 508、655、904、1 502 K。而在实际溅渣护炉冶炼过程中, 依靠溅渣护炉过程能有效气化脱除熔渣中磷的一个关键点就是由于溅渣时高速氮气流能显著降低气化还原反应产物 P_2 和 CO 的分压, 即是氮气流将反应产物 P_2 (g) 和 CO (g) 带走。

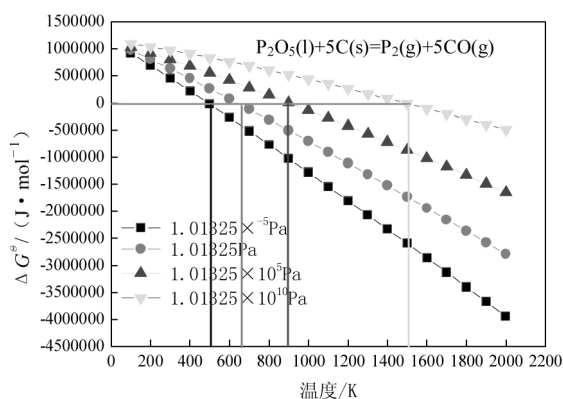


图3 不同分压下C还原 P_2O_5 的标准吉布斯自由能与温度的关系

Fig.3 Relation between standard gibbs free energy and temperature by using carbon reducing P_2O_5 under different partial pressures

3 试验结果及讨论

3.1 不同因素对气化脱磷效果的影响

通过上面理论分析,反应分压大小是影响气化脱磷效果的一个重要因素之一。本试验中气化脱磷率的确定是根据冶炼过程中磷的总收入等于总支出平衡计算得到。由于考虑到实际溅渣过程中所取渣样不同区域 P_2O_5 含量存在一定的偏差,为了提高气化脱磷率计算的准确性,试样过程中利用磷收支平衡对5~8炉次作为一个循环进行磷平衡法计算,从而能确定出较为准确的气化脱磷效果。

1) 不同碳当量下底吹气体流量与气化脱磷率的关系

在采用溅渣护炉工业气化脱磷试验中,以焦粉作为还原剂,首先必须明确合适的焦粉加入量。焦粉加入量根据碳当量计算得到。这里的1倍理论碳当量是指用加入的焦粉全部还原完炉渣中的 P_2O_5 和FeO含量时所需的碳含量。第一阶段为了探索不同碳当量对气化脱磷的影响,同时考虑到底吹气体流量也会对气化脱磷率造成影响,试验设置底吹流量分别为100、200、300、400、500 m^3/h ,然后在每种底吹流量模式下采用1、1.5、2、2.5、3倍碳当量进行试验。试验过程中溅渣护炉前焦粉由高位料仓加入,然后降枪顶吹氮气进行气化脱磷操作。

不同碳当量下底吹气体流量对气化脱磷率的影响的试验结果如图4所示。由图4可知,当底吹流量控制在100~500 m^3/h 时,气化脱磷率随着碳当量的增加先增加后降低。并且在底吹气体流量为300

m^3/h 时,在各碳当量下均可以达到较好的气化脱磷效果。例如在底吹流量为300 m^3/h 时,1、1.5、2、2.5、3倍碳当量所达到的最佳气化脱磷率分别为36%、40%、42%、38%、35%。这是因为当碳当量低于2倍时,随着焦粉加入量的增加,可以有效地提高焦粉与炉渣接触面积,同时在反应过程中炉渣也能保持良好的流动性,因此在溅渣护炉时能有效地促进焦粉与炉渣中的 P_2O_5 反应,促进气化脱磷。而当碳当量高于2倍,在底吹流量等其他因素保持不变时,随着碳当量的增加反而恶化了炉渣的流动性,从而阻碍了炉渣和焦粉的有效接触,并且在溅渣过程中过多的焦粉会随吹入的氮气等气体带出炉外,导致实际参加反应的有效焦粉量比例降低,反而不利于气化脱磷反应的进行。因此,为了获得较优的气化脱磷率,通过控制底吹流量为300 m^3/h ,采用2倍碳当量可以实现气化脱磷率最高达到42%的效果。

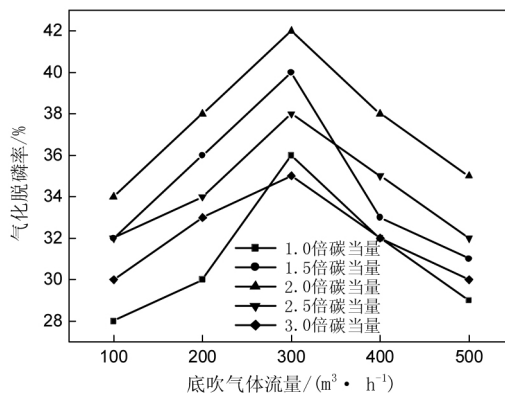


图4 不同碳当量下底吹气体流量与气化脱磷率的关系
Fig.4 Relation between bottom blowing gas flow rate and gasification dephosphorization ratio under different carbon equivalent

2) 不同FeO含量下底吹气体流量与气化脱磷率的关系

通过上述分析,在确定了合适的碳当量条件下,为了探索底吹气体流量与气化脱磷率之间的关系,同时也进一步验证上述不同碳当量下,当底吹流量为100~500 m^3/h ,控制底吹流量为300时气化脱磷效果较好的正确性。在本阶段依据终渣FeO含量大小为 $\leq 14\%$ 、 $14\% \sim 18\%$ 、 $\geq 18\%$ 期间(注:试验过程中FeO含量最高仅为24%)。在FeO含量的三个期间分别改变底吹气体流量,验证底吹气体流量与气化脱磷率之间的关系。每个FeO含量期间底吹气体流量分别控制在100、200、300、400、500 m^3/h 。

每次的气化脱磷结果由 6~8 炉次作为一个循环, 焦粉每炉次加入量控制在 2 倍碳当量。

不同 FeO 含量下底吹气体流量与气化脱磷率之间的关系如图 5 所示, 由图 5 可知, 在 FeO 含量相同时, 气化脱磷率随底吹气体流量的增加而先升高后降低。例如当炉渣 FeO 含量控制在 $\geq 18\%$ 时, 当底吹气体流量分别为 100、200、300、400、500 m^3/h 时, 所对应的气化脱磷率分别为 31%、35%、38%、34%、32%。由底吹气体流量相同时, 不同 FeO 含量与气化脱磷率之间的关系表明在同一流量下, 气化脱磷率随 FeO 含量增加而增加。这是由于在试验过程中, 试验炉次 FeO 含量最高仅为 24%, 因此提高 FeO 含量可以促进炉渣流动性, 提高气化脱磷反应的效率。因此, 为了实现较高的气化脱磷率, 控制 $\text{FeO} \geq 18\%$, 底吹气体流量在 300 m^3/h 时, 可以实现气化脱磷率最高 38%。

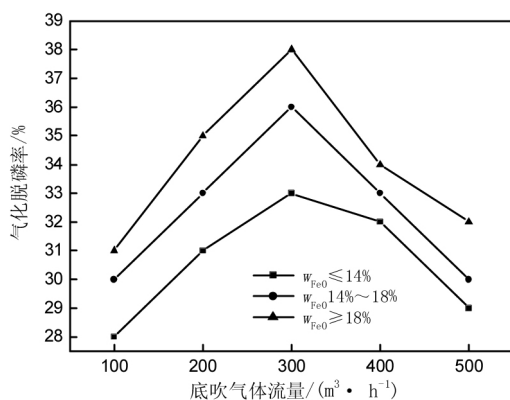


图 5 不同 FeO 含量底吹气体流量与气化脱磷率的关系
Fig.5 Relation between bottom blowing gas flow rate and gasification dephosphorization ratio under different FeO content

3.2 气化脱磷渣多炉循环留渣和枪位控制对脱磷的影响

转炉熔渣气化脱磷循环利用后, 熔渣成分、温度等因素对下炉次的冶炼工艺及化渣效果产生重要影响, 进而影响到转炉的脱磷效果及冶炼过程操作及终点控制条件。因此, 为了保证下一炉次的顺利进行, 达到最佳的脱磷效果, 分析气化脱磷渣循环利用后对下炉次冶炼影响具有重要的意义。通过结合冶炼工艺路线, 主要分析该工艺路线下循环利用气化脱磷渣各工艺影响因素对转炉脱磷的影响, 从而保证在有效利用气化脱磷渣的条件下可以稳定实现终点钢液磷含量, 达到冶炼钢种的要求。

1) 留渣与不留渣对终点钢液磷含量的影响

冶炼过程采用传统工艺不留渣操作和采用留渣操作溅渣护炉气化脱磷模式时试验炉次终点钢液磷含量的影响如图 6 所示。采用传统工艺不留渣操作终点钢液磷含量为 0.021%, 而采用溅渣护炉气化脱磷模式下终点钢液磷含量为 0.019%, 表明采用留渣操作溅渣护炉气化脱磷模式时终点磷含量相对较低, 脱磷效果较好。通过对采用溅渣护炉气化脱磷冶炼和常规冶炼试验炉次统计对比发现, 采用溅渣护炉气化脱磷冶炼, 留渣操作过程平稳无喷溅, 在终点钢液磷含量合格时, 确定留渣, 留渣率一般可以实现 85% 以上; 而常规不留渣炉次, 冶炼过程控制稳定相对较差, 后吹炉次相对较多, 一般需要增加补吹等措施才能满足终点目标要求。因此, 通过采用留渣, 对提高留渣率, 实现冶炼过程操作稳定性以及降低冶炼成本等较为有利。

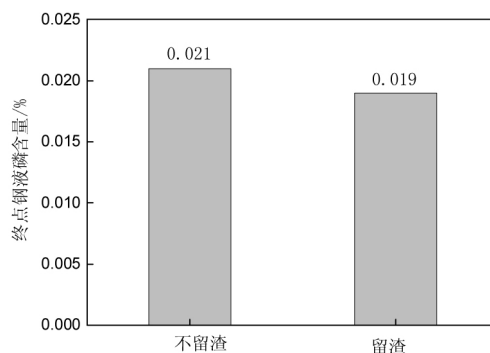


图 6 留渣与不留渣对终点钢液磷含量的影响
Fig.6 Change of phosphorus content in end-point molten steel with / without remaining slag operation

2) 多炉循环下的枪位调控对脱磷的影响

A1 炉次枪位控制如图 7 所示, 在冶炼前期主要加入石灰、轻烧白云石、除尘灰球, 加入的石灰仅为 749 kg, 同时保持冶炼前 6 min 时枪位控制高度不变。冶炼后期加入 1 600 kg 石灰, 以及加入少量铁皮球 185 kg, 采用高枪位吹炼主要为了化渣, 由于后期加入铁皮球冷料会降低熔池温度, 因此对应的枪位为低枪位。整个过程加入的化渣剂较少, 因此整个冶炼过程枪位高度偏低。在终点碳含量为 0.138% 时, 所对应的终点磷含量为 0.023%。

为了保证下一炉次的终点钢液磷含量, 对冶炼过程枪位进行了优化, 7C04588 炉次的枪位控制为优化后的吹炼枪位。A2 炉次的枪位控制如图 8 所示, 在冶炼

前期主要加入石灰和轻烧白云石,加入量分别为 2 554 kg 和 1 807 kg,由于加入的石灰和轻烧白云石相对较多,为了保证炉渣化透,在脱碳后期之前一直采用低枪位进行化渣。在冶炼后期加入了大量的铁皮球和除尘灰球,加入量分别达到 1 074 kg 和 2 532 kg。同时采用高-低-高-低的逐渐降低的冶炼枪位,主要是加强搅拌和提高热量^[10]。最终使终点温度为 1 658 ℃,终点碳含量为 0.07%,终点磷含量为 0.018%。

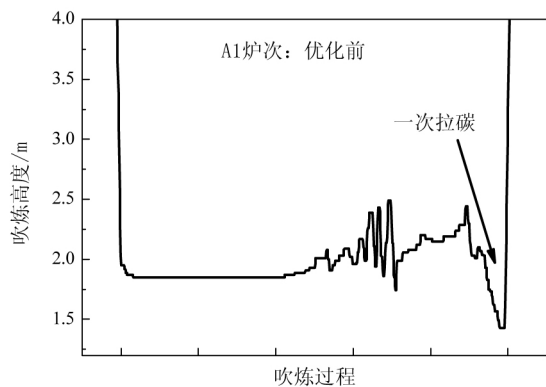


图7 A1 炉次吹炼过程枪位控制
Fig.7 Lance operation chart during blowing process for A1 heat

综上所述:为了实现好的脱磷效果和保证冶炼的稳定性,结合辅料和枪位控制的关系,吹炼过程枪位应控制为:在前期加入石灰和轻烧白云石时,主要采用稍高的吹炼枪位进行化渣,后期加入铁皮球和除尘灰球,采用逐渐降低的高低枪位,主要进行化渣和加强搅拌促进脱磷。

3.3 气化脱磷渣形貌结构分析

选择两种不同气化脱磷效果的炉渣,其气化脱磷率分别为 28%和 36%。分别用 A 渣和 B 渣表示。对 A 渣进行 SEM+EDS 进行形貌和 P 元素分析,采用面扫描得到 A 的形貌图,如图 9 所示。由图 9 可知,其中图 9(A2) 为面扫描的区域,图 9(A1) 为扫描后的元素分布形貌。Ca、Si 主要富集在深灰色和灰色的区域, P 元素主要富集 Ca、Si 所在的区域,并且富集在 Fe 元素的周围, O 主要分布在深灰色的块状区域, Fe 主要分布在树枝状的浅白色或浅灰色区域。采用 Image-ProPlus 软件对 A1 区域面积统计得到 Ca、Fe、P、Si、O 所占的区域面积分别为 46%、18%、4%、17%和 15%。进行 EDS 能谱扫描得到的结果如表 2 所示:由表 2 可知,主要形成的矿物为 $3\text{CaO} \cdot \text{FeO}$ 以及少量的 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ ^[11]。

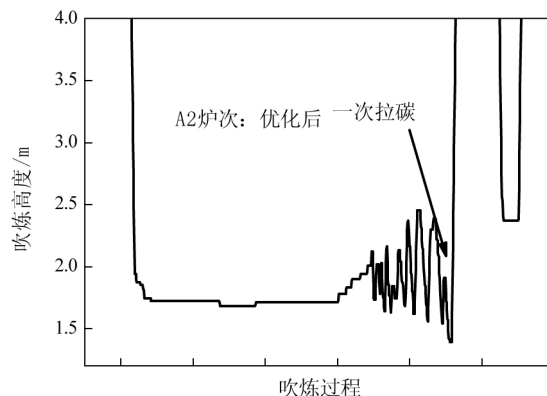


图8 炉次 A2 吹炼过程枪位控制
Fig.8 Lance operation chart during blowing process for A2 heat

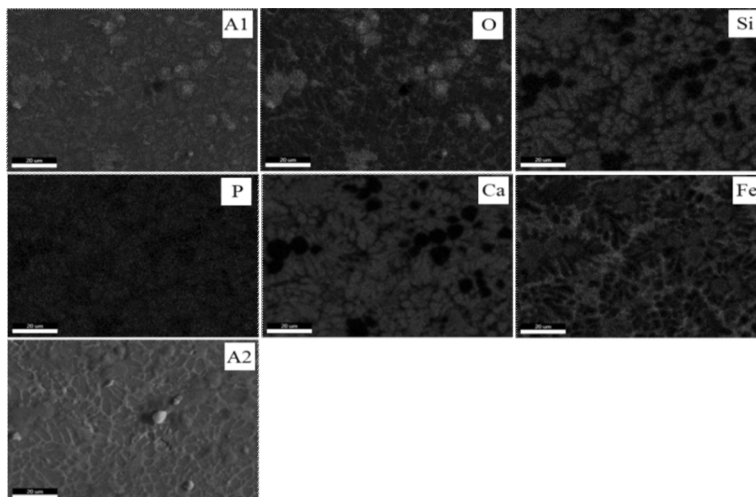


图9 A 气化脱磷渣面扫描显微形貌
Fig.9 Surface scanning micrograph of gasification dephosphorization slag A

表 2 A 气化脱磷渣渣面扫描矿相元素含量
Table 2 Mineral element content in gasification
dephosphorization slag by area scanning %

矿相	O	Si	P	Ca	Fe
A 渣	20.92	7.74	1.47	42.9	27.37

为了和 A 渣进行对比,选取气化脱磷较好的 B 渣进行分析。采用 SEM+EDS 通过点扫描和面扫描一步探索脱磷渣的形貌和元素分布,得到点扫描的形貌分布和能谱分布如图 10 和表 3 所示。由图 10 和表 3 可知,B1 渣矿相结构元素组成,P 在深灰色的平滑区域,同时此区域中 Ca、Si 含量较高,Fe 元素含量较低,并且主要形成的矿相主要以 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 为主。

为了更加明确各元素的分布,对 B 渣进行了面扫描,其结果如表 4 和图 11 所示,其中图 11(B2)为面扫描的区域,图 11(B1)为扫描后的元素分布形貌图。Ca 主要富集在深灰色和灰色的区域,Si 主要富集在深灰色区域,P 元素主要富集 Ca、Si 所在的共同区域,并且富集在 Fe 元素的周围,O 主要分布在浅灰色的块状区域,Fe 主要分布在浅白色或浅灰色的树枝状区域。采用 Image-ProPlus 软件对 B1 区域面积统计得到 Ca、Fe、P、Si、O 所占的区域面积分别为 44%、25%、4%、15%和 12%。根据 EDS 能谱扫描得到的结果(表 4)分析可知,主要形成的矿物为 $3\text{CaO} \cdot \text{FeO}$ 以及少量的 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 和 $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 等。

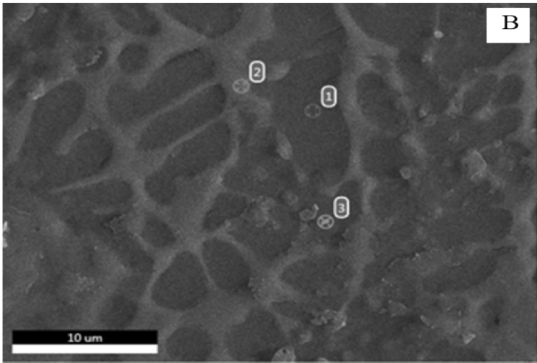


图 10 B 气化脱磷渣点扫描显微形貌

Fig.10 Point scanning micrograph of gasification dephosphorization slag B

表 3 B 渣点扫描矿相元素组成
Table 3 Mineral element content of gasification
dephosphorization slag B by point scanning %

矿相	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe
B1-1	16.66			13.57	2.22	61.53	0.98	5.03
B1-2	18.92	6.08	0.77	0.8		8.10	7.55	57.81
B1-3	29.44	4.03		11.20	3.07	44.58	1.38	6.30

表 4 B 渣面扫描矿相元素组成
Table 4 Mineral element content of gasification
dephosphorization slag B by area scanning %

矿相	O	Si	P	Ca	Fe
B 渣	15.06	6.46	1.35	42.46	21.45

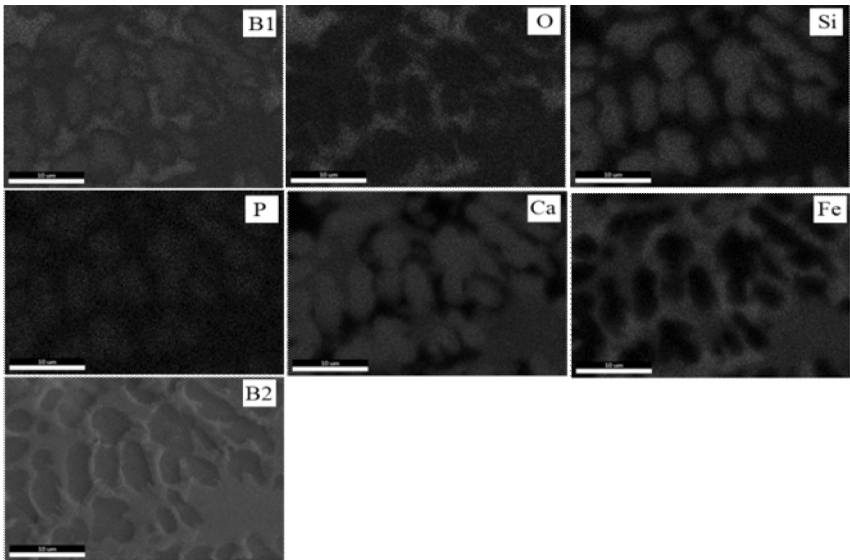


图 11 B 气化脱磷渣面扫描显微形貌

Fig.11 Surface scanning micrograph of gasification dephosphorization slag B

4 结论

为了实现单渣法冶炼下的转炉终渣能够有效地返回到下炉次利用,并保证下炉次终点钢液磷含量稳定合格。采用 FactSage7.2 并结合 SEM+EDS 分析了气化脱磷理论、不同因素对气化脱磷效果的影响、气化脱磷渣多炉循环留渣和枪位控制对脱磷的影响以及气化脱磷渣的 P 元素分布,得到的主要结论如下:

1) 通过采用公式和 FactSage7.2 软件计算得到用 C 还原炉渣 P_2O_5 和 FeO 的吉布斯自由能和温度关系的分析,结果表明,当温度高于 941 K 时,在同等条件下, C 优先还原炉渣中的 P_2O_5 ,在溅渣护炉工艺下用 C 还原渣中炉渣中 P_2O_5 的热力学条件是可行的。采用 C 还原熔渣中的 P_2O_5 时,反应分压越低越有利于气化脱磷反应的进行。

2) 通过不同因素对气化脱磷效果的影响研究

结果表明:采用焦粉作为还原剂时,碳当量和底吹流量分别控制在 2 倍碳当量和 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 时,气化脱磷效果最好;当底吹流量控制在 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 、采用 2 倍碳当量,控制 $\text{FeO} \geq 18\%$ 可以实现气化脱磷率最高达到 42% 的效果。

3) 通过气化脱磷渣多炉循环留渣和枪位控制对脱磷的影响结果表明:和传统工艺不留渣操作相比,采用留渣操作溅渣护炉气化脱磷模式时终点钢液磷含量较低。为了实现好的脱磷效果和保证冶炼的稳定性,吹炼过程枪位应控制为:在前期加入石灰和轻烧白云石时主要采用稍高的吹炼枪位,后期加入铁皮球和除尘灰球采用逐渐降低的高低枪位。

4) 气化脱磷渣形貌结构分析表明:Ca 主要富集在深灰色和灰色的区域,Si 主要富集在深灰色区域,P 元素主要富集在 Ca、Si 所在的共同区域,并且 P 主要富集在 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 的矿相中。

参考文献

- [1] Motita K, Guo M, Noka J *et al.* Resurrection of the iron and phosphorus resource in steelmaking slag [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 2002(4): 93-101.
- [2] Ibraev K, Ibraev T. Problems of dephosphorization during steelmaking [J]. *Russian Metallurgy* 2013(12): 435-436.
- [3] Jung S, Do Y, Choi J. Reduction behavior of BOF type slags by solid carbon [J]. *Steel Research International* 2006 77(5): 305-311.
- [4] Ai Liqun, Zhang Yanlong, Zhu Yiheng. Research on carbothermic reduction for dephosphorization from converter slag by micro-wave heating [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium* 2015 36(6): 63-67.
(艾立群, 张彦龙, 朱祯姮. 微波碳热还原转炉钢渣脱磷研究 [J]. *钢铁钒钛* 2015 36(6): 63-67.)
- [5] Yao Hongyong. Effect of slag splashing on gasification dephosphorization in converter [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium* 2017 38(6): 108-112.
(么洪勇. 转炉溅渣护炉冶炼因素对气化脱磷的影响 [J]. *钢铁钒钛* 2017 38(6): 108-112.)
- [6] Hao Huaqiang, Wang Shuhuan, Zhang Chaofa *et al.* Dephosphorization and recycle utilization practice of molten slag in converter [J]. *China Metallurgy* 2018 28(6): 56-58.
(郝华强, 王书桓, 张朝发, 等. 转炉热态熔渣脱磷及循环利用生产实践 [J]. *中国冶金* 2018 28(6): 56-58.)
- [7] Xue Yuekai, Wang Shuhuan, Li Chenxiao *et al.* Experimental study on recycle utilization of slag after gasification dephosphorization in 60 t converter [J]. *Steelmaking* 2018 34(1): 20-24.
(薛月凯, 王书桓, 李晨晓, 等. 60 t 转炉炉渣气化脱磷后循环利用试验研究 [J]. *炼钢* 2018 34(1): 20-24.)
- [8] Wei Shoukun. *Metallurgical process thermodynamics* [J]. Beijing: Beijing Science Press 2010.
(魏寿坤. *冶金过程热力学* [M]. 北京: 科学出版社 2010.)
- [9] Huang Xihu. *Principles of iron and steel metallurgy* (3rd edition) [J]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2004.
(黄希祜. *钢铁冶金原理* (第3版) [M]. 北京: 冶金工业出版社 2004.)
- [10] Zhou Chaogang, Wang Shuhuan, Wang Wenhui *et al.* Study on dephosphorization technology in converter with high scrap ratio [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium* 2017 38(5): 123-128.
(周朝刚, 王书桓, 王文辉, 等. 基于高废钢比的转炉脱磷工艺研究 [J]. *钢铁钒钛* 2017 38(5): 123-128.)
- [11] Han Xiao, Zhou Chaogang, Li Jing *et al.* Effect of phase structure of converter dephosphorization slag on dephosphorization [J]. *Journal of Iron and Steel Research* 2016 28(9): 40-49.
(韩啸, 周朝刚, 李晶, 等. 转炉脱磷渣物相结构对脱磷的影响 [J]. *钢铁研究学报* 2016 28(9): 40-49.)

编辑 杨冬梅