

120 t 转炉底吹供气系统控制模型与应用效果

汪成义^{1,2} 吴巍¹ 杨利彬¹ 赵舸¹ 罗啟洸¹ 姜周华²

(1 钢铁研究总院冶金工艺研究所,北京 100081;2 东北大学冶金学院,沈阳 110004)

摘要 根据鞍钢 120 t 转炉底吹供气系统的应用情况,基于 PID 调节算法建立了转炉底吹系统控制模型,可以实现供气管道气体流量的迅速、准确、稳定控制,满足生产工艺要求,使底吹元件在炉役期内可以保持稳定的形态和良好的透气性能,不易堵塞。该转炉进行底吹供气控制模型、设备和工艺优化后,钢水终点碳氧积由 0.003 16 降低为 0.002 73,终点炉渣 T. Fe 含量降低 1.69%,吨钢降低成本 12.2 元,经济效益显著。

关键词 120 t 转炉 底吹系统 炉底厚度 碳氧积 炉渣 T. Fe

Control Model of Gas Supply System of Bottom Blowing for 120 t Converter and Application Effect

Wang Chengyi^{1,2}, Wu Wei¹, Yang Libin¹, Zhao Ge¹, Luo Qilong¹ and Jiang Zhouhua²

(1 Metallurgical Department, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081;

2 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract According to application of gas supply system of bottom blowing for 120 t converter at Angang Steel, the BOF bottom blowing control model has been established by PID control arithmetic method to realize the rapid, accurate and stable control of gas flow in gas supply pipeline, and meet the requirements of the production process, which could keep the bottom blowing element under stable & good shape and air permeability and not easy been blocked during the converter service period. With the bottom blowing control model, equipment and technology optimized, the end-point [% C] · [% O] is reduced from 0.003 16 to 0.002 73, the end-point T. Fe content in slag is reduced by 1.69%, the economic benefit of a ton steel is 12.2 yuan /t to achieve the effect of improving quality and reducing cost.

Material Index 120 t Converter, Gas Supply System of Bottom Blowing, Bottom Thickness, Carbon-Oxygen Equilibrium, T. Fe in Slag

炼钢厂转炉顶底复合吹炼起步于 1978 年卢森堡贝尔瓦厂 180 t 转炉上 LBE 法的应用,转炉增加底吹功能后,减少了熔池的喷溅和金属的过氧化,使转炉的吹炼更接近于平衡,提高了脱磷率^[1-3]。国内在采用 N₂/Ar 气体进行转炉底吹搅拌时,与国外不同,除了极少数企业底吹强度在 0.1 m³/(min · t) 以上,普遍采用弱搅拌技术(底吹强度在 0.03 ~ 0.08 m³/(min · t)),底吹寿命短,效果发挥不充分,与供气设备的选用、现场操作水平以及底吹维护等有很大的关系^[4-6]。

在重新设计的 120 t 转炉底吹供气控制系统,整套系统包括:阀门站、PLC 电控柜、工控计算机与监控软件等,其中,供气元件采用自主研发的双环缝式底吹枪,流量调节范围大,阻损小,不易堵塞,冶炼中可形成稳定的“炉渣-金属透气性蘑菇头”^[7-8]。鞍钢目前使用的底吹供气强度在 0.01 ~ 0.05 m³/(min · t),底吹元件使用数量 2 ~ 4 支,支数偏少,底吹供气强度偏低。

1 改进前底吹系统存在的问题

改进前底吹系统存在的问题有以下几方面:

(1) 仅有底吹供气控制界面,没有底吹供气自动化控制模型,导致炉底难以有效维护,效果不佳且增加了安全风险;

(2) 供气工艺模式单一,完善的底吹控制系统应有多种供气曲线模式以供选择;

(3) 缺失底吹防堵工艺和吹堵功能,没有安全连锁报警设置及处理工艺,不利于转炉底吹供气元件的维护;

(4) 底吹供气强度弱,常规使用最高强度不超过 0.05 m³/(min · t),供气系统工作范围受限,底吹效果较差;

(5) 底吹供气元件选型、布置方式、数量及供气模式不合理,导致维护难度较大。

2 底吹控制系统的设计

由于转炉底吹装备及工艺老化,设计及硬件装备主要按照小流量的一般控制思路进行,功能单一、

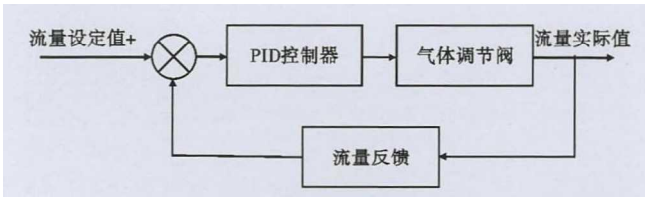


图 1 PID 控制原理图

Fig. 1 Schematic of PID control principle

装备水平不能满足现有炼钢的需求。须建立具备强底吹、长寿命、精确控制功能的转炉底吹控制系统,以满足高品质钢低成本、高效化、稳定生产的需求。

本项目设计的底吹控制系统,PID 的控制原理为:流量反馈环节对气体流量进行检测,与气体流量设定值进行比较,运算结果通过 PID 控制器控制,对执行单元气体调节阀进行调节,使实际气体流量按照设定值进行输出^[9],PID 控制原理图如图 1 所示。

基于经典 PID 调节算法模型基础上,开发了专家变参数 PID 调节相结合的控制技术,并采用西门子 S7-300 系列 PLC 进行设计控制系统,同时结合 WinCC 组态软件编程实现对现场仪表的实时监控。根据转炉冶炼的过程分成:兑铁装料、吹炼前期、吹炼后期、测温取样、点吹、出钢、溅渣、倒渣等待等 9 个阶段,控制不同阶段的气体流量大小和种类。转

炉底吹系统原理图如图 2 所示,包括压缩气源、主氮气源、主氩气源等,通过主路切断阀和支路调节阀进行各个管道气体流量的单独控制。

120 t 转炉采用 6 支路底吹供气系统,优化底吹元件布置,选用环缝式底吹供气元件以及相配套的上、下护砖,开发了底吹气体自动控制模型(底吹自动化设备和控制软件),底吹管路各支流量可单独控制,流量控制主画面如图 3 所示,通过底吹控制画面可以实时掌握各支管路的流量、压力变化以及通畅度情况,并且可以根据需要设置自动、半自动或手动状态以及强搅模式等。

3 底吹流量控制模式

复吹转炉冶炼技术的核心是底吹供气元件的长寿维护,要求在炉底供气元件端部生成“炉渣-金属永久性透气蘑菇头”,在整个炉役期或相当长的时间内,保持稳定、良好的形态和透气性能。在开新炉时,要求连续采用开炉模式,在保证安全的前提下,快速生成“炉渣-金属蘑菇头”。炉役初期持续溅渣,在炉底尽快形成一定厚度的渣层,保证底枪不受损坏;同时,保证终渣具有一定的粘度和适当的 MgO 含量,促进炉底挂渣。正常冶炼时,根据钢水终点碳

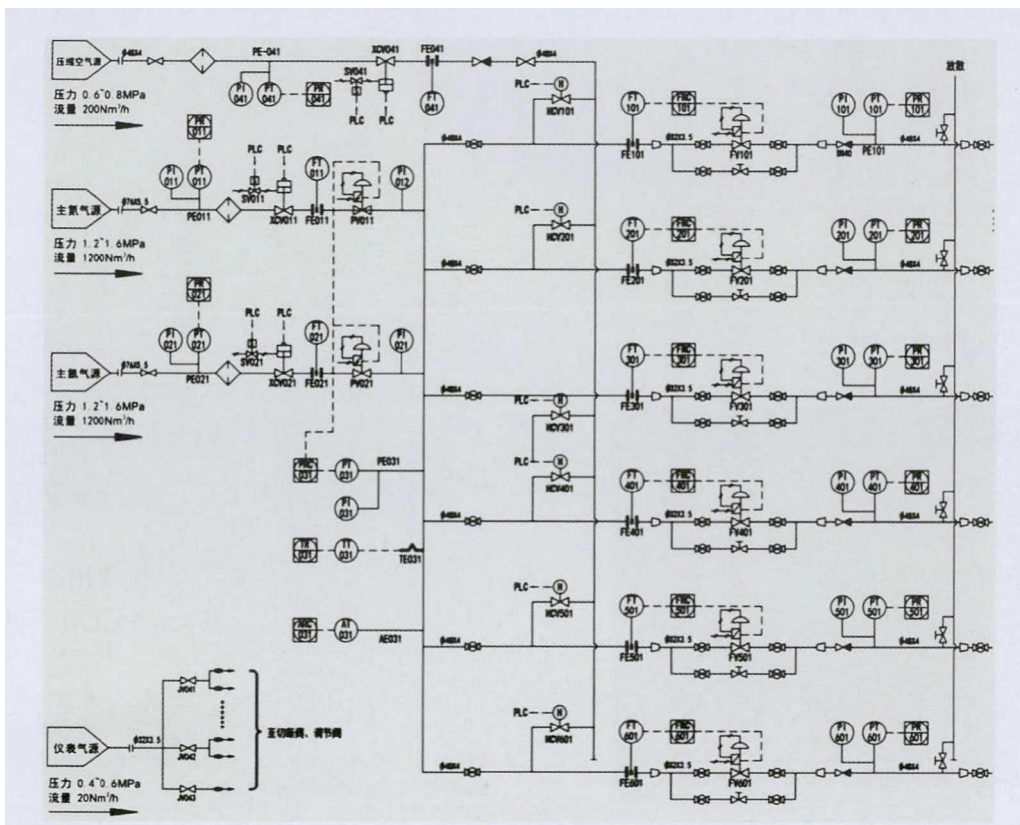


图 2 转炉底吹系统原理图

Fig. 2 Schematic of gas supply system of BOF bottom blowing

控制要求,可以选择 A/B/C 三种模式,按表 1 选择好供气模式,底吹自动控制系统根据转炉炉体位置和吹氧状态等实时数据自动判断当前冶炼阶段,自动根据表 1 中的流量设定值和气源种类进行底吹供气,无需人工干预即可由计算机自动完成对底吹气体的控制。

4 底吹工艺冶金效果分析

底吹供气设备选择、供气模式及维护工艺不当会使得底吹元件侵蚀较快,形成凹坑,虽然短时间内通气效果良好,但是底吹寿命大打折扣。选用环缝式供气元件,由于其本身具有透气能力强、不易堵塞

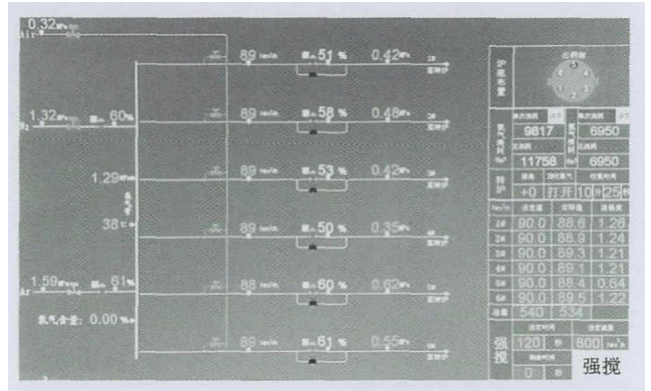


图 3 底吹管路气体流量控制主画面
Fig. 3 Main picture of flow control in bottom blowing

表 1 120 t 转炉底吹供气流量指导模型
Table 1 Guidance model of gas supply of bottom blowing for 120 t BOF

| 模式 | 钢水终点碳/ % | 底吹供气流量 / (m ³ · h ⁻¹) | | | | | | | | |
|--------|-------------|--|----------------|------|------|-----|------|-----|----------------|----------------|
| | | 兑铁装料 | 吹炼前期 | 吹炼后期 | 测温取样 | 点吹 | 测温取样 | 出钢 | 溅渣 | 倒渣等待 |
| A | <0.10 | 420 | 280 | 540 | 280 | 540 | 280 | 280 | 540 | 240 |
| B | 0.10 ~ 0.25 | 420 | 280 | 480 | 280 | 480 | 280 | 280 | 480 | 240 |
| C | ≥0.25 | 420 | 280 | 420 | 280 | 420 | 280 | 280 | 420 | 240 |
| D | 备用模式 | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 |
| E | 烘炉模式 | 420 | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 | 280 |
| K | 开炉模式 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 | 480 |
| 底吹气源种类 | | N ₂ | N ₂ | Ar | Ar | Ar | Ar | Ar | N ₂ | N ₂ |

的特点,配合合理的维护供气使得底吹元件上方形成透气性能良好的“炉渣-金属蘑菇头”,既保证良好的底吹效果,又能很好的保证元件寿命。

鞍钢底吹系统顺利投产后,炉底 6 支底吹供气元件位置“蘑菇头”清晰可见,透气位置未形成凹坑,且操作画面流量、压力均正常。底吹位置炉底砖处生成适当厚度的渣层和弥散性的蘑菇头,可形成稳定的底吹气体通道,截止到统计炉次底吹“炉渣-金属蘑菇头”仍保持良好,且管道流量、压力控制稳定。120 t 转炉底吹元件典型热态画面如图 4 所示。



图 4 120 t 转炉底吹元件典型热态画面
Fig. 4 Typical hot state picture of bottom blowing element in 120 t converter

底吹系统改进后,对冶炼工艺进行跟踪,统计工艺改进后的 3996 炉的铁水成分,并与工艺改进前的成分进行对比,如表 2 所示,可以看出,工艺改进前后的铁水成分波动不大,有利于工艺效果的定量比较分析。

4.1 底枪位置炉底厚度变化

从图 5 可以看出,在统计数前的大约 2000 炉范围内,炉底厚度整体呈逐渐下降趋势,炉底厚度由原始 920 mm 下降至 700 mm 左右,其中的 2# 枪处的炉底厚度降低最快,且波动较大,因该位置处于兑铁侧,易受到兑入铁水的冲刷,故导致该处的炉底厚度下降快,增加了炉底维护的难度。炉底维护时采取的措施是将底吹系统控制画面的气量控制模式调节为半自动状态,并控制溅渣后石灰料的添加,炉底各底枪位置渣厚波动将会逐渐降低。

4.2 终点钢水碳氧积

图 6 为冶炼终点 [C]、[O] 值与 [C]-[O] 平衡

表 2 工艺改进前后转炉铁水成分 / %
Table 2 Composition of molten iron in converter before and after process improvement / %

| 工艺 | C | Si | Mn | P | S |
|-----|------|------|------|-------|-------|
| 改进前 | 5.04 | 0.32 | 0.27 | 0.112 | 0.024 |
| 改进后 | 5.10 | 0.33 | 0.24 | 0.104 | 0.035 |

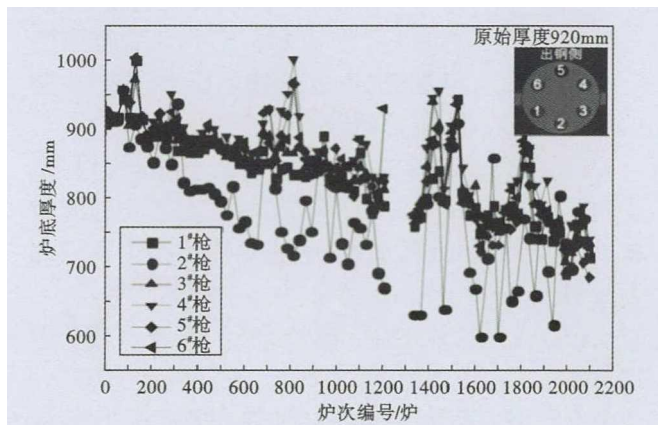


图5 转炉炉底厚度随炉次的变化

Fig.5 Change of bottom thickness of converter with number of heats

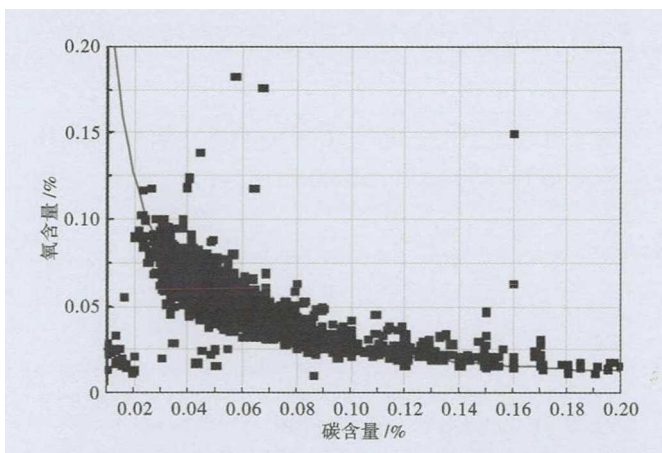


图6 终点[C]、[O]值与[C]-[O]平衡曲线的关系

Fig.6 Relationship between the end point [C], [O] value and [C]-[O] equilibrium curve

曲线的关系,冶炼终点的C 主要分布在0.03% ~ 0.10%,与1600℃的[C]-[O]平衡曲线(碳氧积0.0025)相比较,大部分数据点集中在平衡曲线的附近,说明熔池搅拌动力学条件较好。同时,在碳含量较低时,由于吹炼模式对熔池的搅拌能力很强,为碳氧反应提供了很好的动力学条件,终点碳含量增高时,吹炼模式对熔池的搅拌能力下降,影响了碳氧反应的动力学条件,碳氧积出现增加的现象。

工艺改进前的终点钢水平均碳氧积为0.00316,碳氧反应不充分,工艺改进后根据现场取样的终点[C]、[O]数据计算得到前3996炉的平均碳氧积为0.00273,同时,冶炼终点钢水平均氧含量降低,由工艺前的 578×10^{-6} 降低到工艺后的 512×10^{-6} 。

4.3 冶炼终点渣中T. Fe 含量变化

通过前3996炉的统计数据得出,转炉冶炼终点渣中T. Fe含量变化如图7所示。转炉终点炉渣全铁

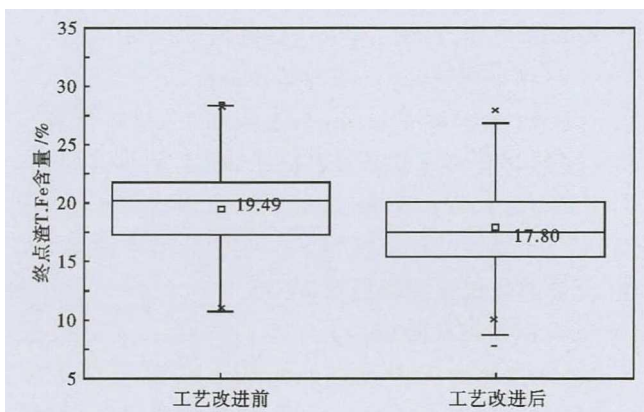


图7 工艺改进前后转炉冶炼终点渣中T. Fe 含量变化

Fig.7 Change of T. Fe content in slag at BOF end point before and after process improvement

工艺改进之前为19.49%,工艺改进之后为17.80%,波动范围在15% ~ 20%,平均降低1.69%,渣中全铁降低显著,说明碳氧反应动力学条件较好,钢中的溶解氧降低,铁与氧反应的平衡向左移动,使渣中铁含量降低。根据文献[10]报道,当碳含量大于0.03%时,渣中的FeO含量降低,使得钢水的过氧化程度减轻,这就在一定程度上降低了终点的碳氧积,同时终点碳氧积的值随动力学条件上吹炼强度减弱有增加的趋势,可见在渣中T. Fe的变化和碳氧积之间存在一定的关系。

4.4 经济效益计算

通过对上述冶炼SPHC钢种炼钢辅料消耗、渣中T. Fe降低的效益、终点残锰效益、铝铁消耗和氧气消耗按照吨钢计算,得到底吹系统改进后的综合经济效益为12.2元/t。具体分析、计算如下:

(1) 辅料消耗。

较工艺优化前,减少了轻烧镁球、石灰石、烧结矿的加入量,增加了菱镁石的加入量。石灰消耗变化不大,石灰石消耗降低明显,工艺改进前后辅料加入情况对比如表3所示。参考相关原料价格,计算得到,工艺改进后的辅料消耗减少,吨钢成本约可降低2.50元。

(2) 渣中T. Fe降低。

以磷平衡计算转炉成渣量,工艺改进前为85 kg/t,工艺改进后成渣量78 kg/t,渣中T. Fe由

表3 工艺改进前后转炉加料统计/(kg · t⁻¹)

Table 3 Statistics of BOF charge before and after process improvement / (kg · t⁻¹)

| 工艺 | 石灰 | 石灰石 | 菱镁石 | 轻烧镁球 | 烧结矿 |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|
| 改进前 | 30.38 | 14.07 | 6.86 | 12.94 | 3.09 |
| 改进后 | 30.39 | 5.77 | 11.46 | 4.91 | 1.63 |

19.49% 降至 17.80%，吨钢成本降低约 5.10 元。

(3) 终点残锰效益、节省锰铁合金。

以 SPHC 钢种成分 Mn 含量为 0.5% 进行计算，工艺改进前需要锰铁合金 900.1 kg，工艺改进后需要锰铁合金 859.8 kg，以添加低碳锰铁合金(7139.9元/t)为参考标准，得到终点钢水增加的 Mn 含量使吨钢成本降低 2.24 元。

(4) 铝铁消耗降低。

铝铁消耗由工艺改进前的 233 kg 降低到 210 kg，铝铁价格按 7613 元/t 计算，降低铝铁消耗的效益为 1.29 元/t。

(5) 氧气消耗减少。

在工艺改进后耗氧量由 6817.5 m³ 下降到 6615.6 m³，供氧时间由 14 min 34 s 减少至 14 min 20 s，供氧时间平均缩短了 14 s。折合吨钢的氧气消耗，降低成本 1.10 元/t。

5 总结

(1) 对钢厂 120 t 转炉底吹工艺系统经过改进

升级后，系统运行良好，管道气体流量、压力控制稳定，炉底供气元件端部“炉渣-金属蘑菇头”在炉役期内可以保持稳定、良好的形态和透气性能。

(2) 工艺改进后根据现场取样的 [C]、[O] 数据得到的终点碳氧积为 0.002 73，相比工艺改进前的碳氧积 0.003 16 降低显著，熔池搅拌动力学条件大为改善。

(3) 工艺改进前，转炉终点炉渣 T. Fe 为 19.49%，工艺改进后为 17.80%，平均降低 1.69%，渣中全铁降低显著，底吹气体搅拌有效促进了渣-钢传质。

(4) 对炼钢辅料消耗、渣中 T. Fe 降低的效益、终点残锰效益、铝铁消耗和氧气消耗降低的经济效益计算，底吹工艺改进后的吨钢经济效益为 12.2 元/t。

国家重点研发计划(2017YFB0304000)，国家自然科学基金(51674092&51704080&51874102)资助

参考文献

[1] 冶金部复吹专家组、宝钢设计研究院编. 氧气顶底复吹转炉设计参考[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.

[2] 汪成义,王洪伟,林腾昌,等. 45 t 转炉双渣工艺及底吹系统改造试验研究[J]. 工业加热,2018,47(1):17-20.

[3] Kitamura S, Yonezawa K and Ogawa Y, et al. Improvement of Reaction Efficiency in Hot Metal Dephosphorization[J]. Ironmaking and Steelmaking,2002,29(2):121-124.

[4] Yang L B, Liu L and Jiao X L. Study and Application of Bottom Blowing Technique of Combined Blowing Converter[J]. Journal of Iron and Steel Research, International,2014,21(1):41-45.

[5] 曾加庆,潘贻芳,王立平,等. 对复吹转炉低成本、高效化生产洁净钢水理论与实践的再认识[J]. 钢铁,2014,49(10):1-6.

[6] 李 东,胡加学. 国内复吹转炉底吹元件研究应用现状及展望[J]. 中国冶金,2012,22(2):7-9.

[7] 佟溥涵,赵进宣,郑丛杰,等. 复吹转炉环缝式底吹供气元件的开发及应用[C]. 第七届(2009)中国钢铁年会论文集(下)[A]. 北京:中国金属学会,2009:340-344.

[8] Sahai Y and Guthrie R I L. The Formation and Growth of Thermal Accretions in Bottom Blown/Combination Blown Steelmaking Operations[J]. IRON&STEEL MAKER,1984,11(4):34-38.

[9] 赵 炯,何 平. 顶底复吹转炉底吹流量优化控制技术[J]. 特殊钢,2007,28(5):48-50.

[10] 武 珣,包燕平,岳 峰,等. 影响转炉终点碳氧积的因素分析[J]. 钢铁研究,2010,38(2):26-29.

汪成义(1989-),男,博士生,工程师,2012年安徽工业大学(本科)毕业,炼钢工艺研究. E-mail:wangcy0615@163.com

收稿日期:2019-12-11