



## 100 t脱磷转炉顶吹CO<sub>2</sub>冶炼工艺探究

虎晓东, 李俊华, 李振钢, 陈兴润  
(酒钢集团宏兴股份公司不锈钢分公司, 嘉峪关 735100)

**摘要:**酒钢不锈钢100 t脱磷转炉开展了顶吹CO<sub>2</sub>的工业试验,分析了脱磷转炉顶吹混入不同比例CO<sub>2</sub>对冶炼终点炉渣 $w[\text{FeO}]$ 、脱磷率、铁水收得率、出钢温度及石灰块消耗的影响。本研究共设置5组试验方案,顶吹CO<sub>2</sub>混入的比例分别为5%、10%、15%、20%,同时增加对照试验方案。试验结果表明,顶吹混入CO<sub>2</sub>后,能够改善脱磷转炉炉内反应的热力学和动力学条件,提高脱磷效率;顶吹CO<sub>2</sub>混入比例15%时,渣中的 $w[\text{FeO}]$ 达到19.95%;渣中的 $w[\text{TFe}]$ 达到19.35%;脱磷效率达到82.82%;铁水收得率达到97.8%;顶吹CO<sub>2</sub>混入比例15%达到最佳效果。

**关键词:**脱磷转炉; 顶吹CO<sub>2</sub>; 脱磷率; CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>混合; 铁水收得率

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2025-00030 **中图分类号:**TF724.5

## Smelting Process Exploration on CO<sub>2</sub> Top Blowing of 100 t Dephosphorization Converter

Hu Xiaodong, Li Junhua, Li Zhengang, Chen Xingrun  
(Stainless Steel Branch of Hongxing Iron & Steel Co., Ltd., Jiuquan Iron and Steel Group Corporation, Jiayuguan 735100, China)

**Abstract:** 100 t dephosphorization converter carried out the top blowing CO<sub>2</sub> industrial test by JISCO stainless steel branch, analyzed the dephosphorization converter top blowing mixed with different proportions of CO<sub>2</sub> on the smelting end of the slag  $w[\text{FeO}]$ , dephosphorization rate, molten iron yield, steel temperature and lime block consumption. In this paper, five groups of test schemes were set up, and the proportions of top-blowing CO<sub>2</sub> mixing were 5%, 10%, 15% and 20%, and the control test schemes was added at the same time. The test results show that: the top blowing CO<sub>2</sub> mixing can improve the thermodynamic and kinetic conditions of the reaction in the dephosphorization converter furnace, and improve the efficiency of dephosphorization; when the top blowing CO<sub>2</sub> mixing ratio is 15%,  $w[\text{FeO}]$  in the slag reaches 19.95%; The efficiency of dephosphorization reaches 82.82%; the rate of molten iron yield reaches 97.8%; the top blowing CO<sub>2</sub> mixing ratio of 15% achieves the optimal effect.

**Key Words:** Dephosphorization Converter; Dephosphorization Rate; CO<sub>2</sub> top Blowing; CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> Mixture; Yield of Molten Iron

酒钢不锈钢炼钢现有100 t脱磷转炉一座,对高炉铁水进行脱磷处理,为氩氧精炼炉(AOD)提供低磷铁水,是处理脱磷铁水的关键工序。酒钢不锈钢品种钢冶炼工艺为:高炉铁水→脱磷转炉→AOD(VOD)→LF→CCM,脱磷转炉在品种钢冶炼过程中是重要的一环。脱磷转炉采用顶吹超音速氧气射流、顶加块状石灰、小流量底吹氮气搅拌的传统吹炼方式生产。由于块状石灰成渣慢、渣金反应界面小、熔池搅拌能力不足等因素,导致目前的脱磷转炉原辅料消耗较高,难以高效、经济地完成深脱磷任务<sup>[1]</sup>。

基于上述原因,不锈钢炼钢引进并采用新开发的喷吹CO<sub>2</sub>高效冶炼新工艺和新技术,对脱磷转炉

现有设备设施进行局部改造,可以有效改善脱磷转炉炉内反应的热力学和动力学条件,在有效降低脱磷转炉原辅料消耗的同时,显著改善脱磷转炉冶金效果<sup>[2-4]</sup>。

### 1 顶吹CO<sub>2</sub>热力学及动力学分析

#### 1.1 顶吹CO<sub>2</sub>热力学分析

脱磷转炉冶炼过程中,温度能够达到1 300 °C以上,CO<sub>2</sub>气体为弱氧化性气体,在冶炼过程中,能够与铁水中的C、Si、Mn、P及Fe发生反应<sup>[5-6]</sup>。

冶炼过程中,通过顶部氧枪向炉内吹入CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>的混合气体,CO<sub>2</sub>气体进入炉内后,脱硅和脱锰期,与铁水中的Si、Mn反应放热,但是由于弱氧化性,热量较比纯氧气放出的热量有所降低,更有利

**基金项目:** 不锈钢炼钢脱磷转炉喷吹CO<sub>2</sub>、底喷粉工艺技术研发(嘉峪关市科技重大专项计划:QKJ22-01 嘉峪关市科技计划资助)

**作者简介:** 虎晓东(1990—),男,本科,助理工程师; **E-mail:** huxiaodong81654@jiugang.com; **收稿日期:** 2025-02-10

于脱磷期铁水脱磷,因此,冶炼过程中从顶枪吹入  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  的混合气体,可降低高温热点区温度,减少因炉内温度太高而造成的铁的蒸发氧化,更有利于铁水脱磷<sup>[7-8]</sup>。

## 1.2 顶吹 $\text{CO}_2$ 动力学分析

较比于纯氧气,向炉内吹入  $\text{CO}_2$  气体后,1 mol  $\text{CO}_2$  气体与铁水中的 Si、Mn、P 反应时可以生成 1 mol CO 气体,在冶炼后期与铁水中的 C 反应时,可生成 2 mol 的 CO 气体,整个冶炼过程中,铁水中的反应生成气体量增加,从而增强了对熔池的搅拌能力。相关研究结果显示,从顶枪吹入  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  的混合气体后,混合气体的射流密度增加,密度的提升导致射流出口速度有所降低,但射流轴向动压力相应增加。因此,尽管射流速度减缓,其冲击能力却得到了增强,从而在应用过程中表现出更高的效率<sup>[9]</sup>。

冶炼过程中从顶枪吹入  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  的混合气体,可以有效增加冶炼过程中铁水的搅拌能力,这种搅拌作用对于促进铁水中各种元素的氧化反应以及物质的传质运动具有极其重要的作用<sup>[10]</sup>。

## 2 顶吹 $\text{CO}_2$ 冶炼试验方案

### 2.1 主要设备及工艺流程

顶吹  $\text{CO}_2$  冶炼试验的脱磷转炉为 100 t 的顶底复吹转炉,底吹气体为  $\text{N}_2$ ,原工艺顶吹气体为  $\text{O}_2$ ,开展试验炉次是采用  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  的混合气体作为顶吹气体。图 1 所示为  $\text{CO}_2$  顶吹试验的流程图。

二氧化碳气源系统主要包含:液态二氧化碳储罐、水浴式加热器、缓冲罐、其他控制阀组以及自动化控制系统。首先将外购液态二氧化碳填充入液态二氧化碳储罐内,再经水浴式加热器将二氧化碳

汽化后,进入气态二氧化碳缓冲罐,再经减压平衡装置减压之后与氧枪的二氧化碳气源管路相连,实现氧枪使用二氧化碳的连续、稳定供给。

### 2.2 顶吹 $\text{CO}_2$ 冶炼方案

在本次冶炼工艺中所研究的变量仅为顶吹  $\text{CO}_2$  的混入比例,根据顶吹混入  $\text{CO}_2$  比例的不同情况制定了 4 种试验方案,分别是方案 1、方案 2、方案 3、方案 4,此次试验中的四种方案顶吹  $\text{CO}_2$  混入的比例分别为 5%、10%、15%、20%,同时增加对照试验方案,对照试验方案为原工艺冶炼模式,全程顶吹  $\text{O}_2$ ,不混入  $\text{CO}_2$  气体,通过这种对照试验,我们可以更清晰地判断  $\text{CO}_2$  混入比例变化对冶炼工艺的具体影响。

4 种试验方案中均为全程顶吹混入  $\text{CO}_2$ ,试验炉次和对照试验炉次采用相同的底吹模式,全程底吹气体为  $\text{N}_2$ ,其流量大小为 2  $\text{m}^3/\text{min}$ ,具体试验方案见表 1。

表 1 顶吹  $\text{CO}_2$  冶炼试验方案

Table 1 Top-blown  $\text{CO}_2$  smelting test plan

| 试验项目   | 对照组 | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 | 方案 4 |
|--|-----|------|------|------|------|
| 混入 $\text{CO}_2/\%$                              | 0   | 5    | 10   | 15   | 20   |
| 底吹 $\text{N}_2/(\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1})$ | 2   | 2    | 2    | 2    | 2    |

脱磷转炉冶炼采用变流量的方式进行冶炼,前期为大流量,后期为小流量,平均顶枪流量为 70  $\text{m}^3/\text{min}$ ,吹炼时间基本稳定在 10~15 min 左右,主要和入炉的铁水条件有关,因此,试验过程中每个方案做 4 组,以下数据为 4 组的平均值。

### 2.3 试验铁水及出钢半钢成分

此次试验的铁水条件及出钢半钢的成分见表 2,除方案 4 中铁水平均硅含量、平均锰含量较高外,

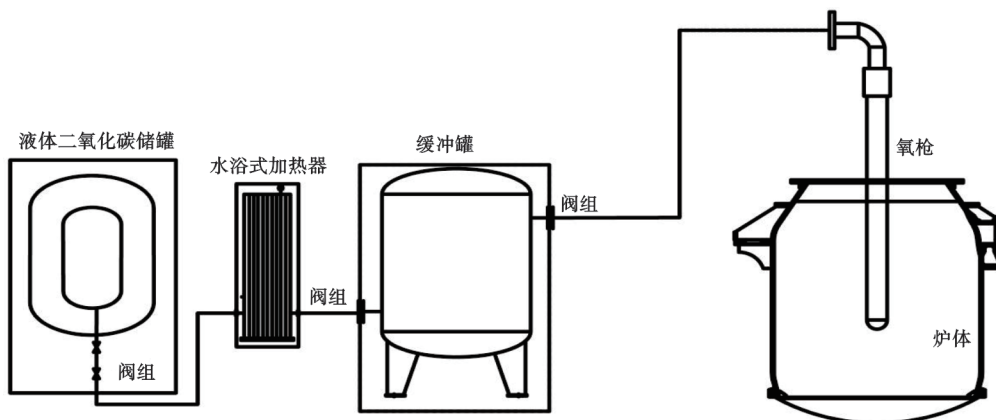


图 1  $\text{CO}_2$  顶吹试验的流程图

Fig. 1 Flowchart of  $\text{CO}_2$  top-blown test

其他试验炉次入炉铁水成分趋于稳定,以上的入炉铁水条件对试验可能存在一定影响,但均在可控范围内。

表2 铁水及出钢半钢成分(质量分数)

Table 2 Molten iron and semi-steel composition for tapping

| 试验方案 | 入炉铁水 |      |      |       | 出钢半钢 |      |      |       |
|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|
|      | C    | Si   | Mn   | P     | C    | Si   | Mn   | P     |
| 对照组  | 4.49 | 0.49 | 0.76 | 0.072 | 3.41 | 0.02 | 0.23 | 0.017 |
| 方案1  | 4.48 | 0.40 | 0.81 | 0.089 | 3.49 | 0.01 | 0.23 | 0.017 |
| 方案2  | 4.57 | 0.37 | 0.86 | 0.088 | 3.58 | 0.02 | 0.24 | 0.015 |
| 方案3  | 4.52 | 0.54 | 0.79 | 0.073 | 3.62 | 0.05 | 0.30 | 0.012 |
| 方案4  | 4.60 | 0.72 | 0.99 | 0.089 | 3.39 | 0.02 | 0.27 | 0.017 |

### 3 顶吹CO<sub>2</sub>冶炼试验结果分析

对对照组、方案1、方案2、方案3及方案4这五种方案的冶炼数据对比分析,得到在试验条件下顶吹CO<sub>2</sub>不同混入比例对脱磷转炉各项指标的影响。试验中主要分析的冶炼指标包括:炉渣 $w[\text{FeO}]$ 、脱磷率、铁水收得率、出钢温度及石灰块消耗。

#### 3.1 炉渣 $w[\text{FeO}]$ 对比分析

图2显示了在五种不同的试验方案下,炉渣中 $w[\text{FeO}]$ 的变化趋势。通过图2可以得到,方案1的炉渣中 $w[\text{FeO}]$ 表现出较大的波动性,相比之下,其他四种方案的炉渣中 $w[\text{FeO}]$ 则相对稳定。具体来说,方案3和方案4的炉渣中 $w[\text{FeO}]$ 均低于对照组的水平,方案3和方案4的渣中 $w[\text{FeO}]$ 分别比对照组下降了5.95%和0.875%。这一结果表明,在这五种试验方案中,方案3和方案4在控制炉渣中 $w[\text{FeO}]$ 方面表现更为出色,显示出较好的稳定性和降低效果。

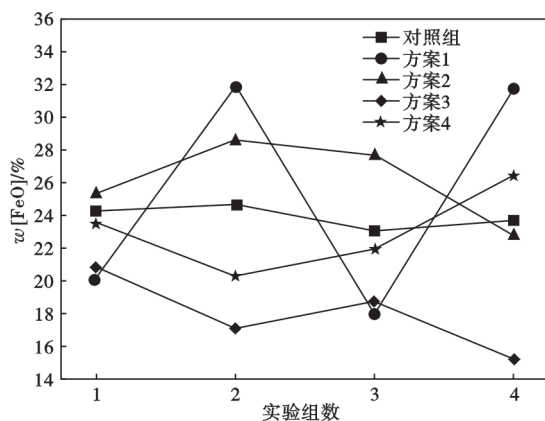


图2 不同试验方案下渣中 $w[\text{FeO}]$

Fig. 2  $w[\text{FeO}]$  in slag under different test schemes

对渣中FeO变化规律进行分析,CO<sub>2</sub>作为一种具有弱氧化性的气体,其向炉渣中传递氧气的的能力相对较弱。然而,顶吹CO<sub>2</sub>的存在却能够增强熔池的搅拌效果<sup>[9-11]</sup>,这对于钢液中的元素向钢渣界面的扩散和传质过程是有利的。这种搅拌作用促进了渣钢之间的反应,从而导致炉渣中的 $w[\text{FeO}]$ 相对较低。从图2中可以观察到,当顶吹CO<sub>2</sub>混入比例达到15%时,炉渣中FeO达到最低水平,顶吹CO<sub>2</sub>混入比例提高至20%时,炉渣中FeO反而升高。因此,可以得到方案3(顶吹CO<sub>2</sub>混入比例15%)为最佳方案<sup>[12]</sup>。

结合不同试验方案下渣中FeO的情况,统计 $w[\text{TFe}]$ ,具体如图3所示。从图3可以看出在五种不同的试验方案下,方案3和方案4的 $w[\text{TFe}]$ 均低于对照组,方案3和方案4的渣中 $w[\text{TFe}]$ 分别比对照组下降了7.41%、2.82%。这一结果表明,在这五种试验方案中,方案3可以有效地降低渣中 $w[\text{TFe}]$ ,提高铁水收得率。

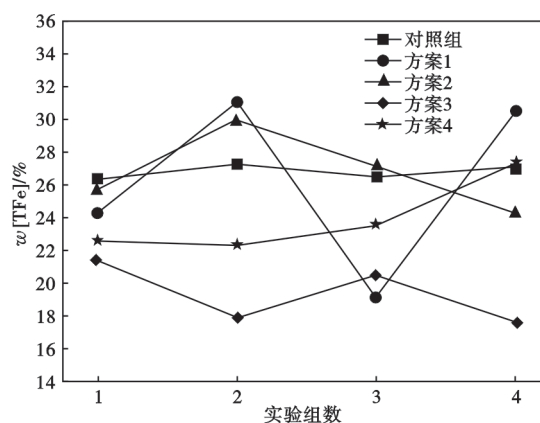


图3 不同试验方案下渣中 $w[\text{TFe}]$

Fig. 3  $w[\text{TFe}]$  in slag under different test schemes

#### 3.2 脱磷率对比分析

从图4可以看出,随着顶吹CO<sub>2</sub>混入比例的增加,脱磷率先升高后降低。并且除方案2之外,其他方案的脱磷率均优于对照组,方案3的脱磷率趋于平稳,方案3和方案4相对于对照组分别提高了6.61%、2.54%。因此,可以得到方案3(顶吹CO<sub>2</sub>混入比例15%)为最佳方案。

基于热力学分析,CO<sub>2</sub>与铁水中的各种元素发生反应时,表现出吸热和微放热的特性,这可以使铁水在冶炼过程中升温速度减慢,低温条件下有利于进行脱磷,进一步提高脱磷效率<sup>[13-14]</sup>;基于动力学分析,CO<sub>2</sub>在铁水中参与反应后均生成CO,这一

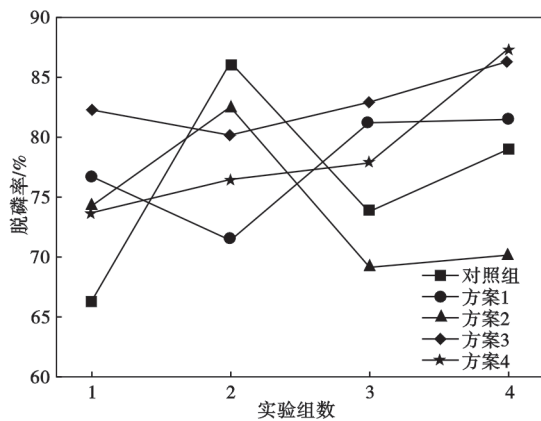


图 4 不同试验方案下的脱磷率

Fig. 4 Phosphorus removal rates under different test schemes

过程增加了熔池的搅拌能力,增加了脱磷反应的力学条件,铁水中的磷更容易脱除<sup>[15-17]</sup>。当 CO<sub>2</sub> 的混入比例达到 20% 时,脱磷率下降,分析原因是顶吹 CO<sub>2</sub> 混入的比例提高后,吹入铁水 CO<sub>2</sub> 的总量增加,导致铁水温降较大,导致脱磷阶段化渣困难,炉渣变得黏稠,炉渣流动性变差,这使得脱磷效果变差。

### 3.3 铁水收得率对比分析

图 5 为五种不同的试验方案下,铁水收得率的变化趋势。通过图 5 可以得到,除方案 3 外,其他试验方案组的铁水收得率均低于对照组,方案 3 铁水收得率比对照组提高了 0.47%。这一结果表明,在这五种试验方案中,方案 3 在铁水收得率方面比其他试验组均要好,可以得到方案 3 (顶吹 CO<sub>2</sub> 混入比例 15%) 为最佳方案。

### 3.4 出钢温度对比分析

图 6 为五种不同的试验方案下,出钢温度的变化趋势。通过图 6 可以得到,出钢温度的偏差相对

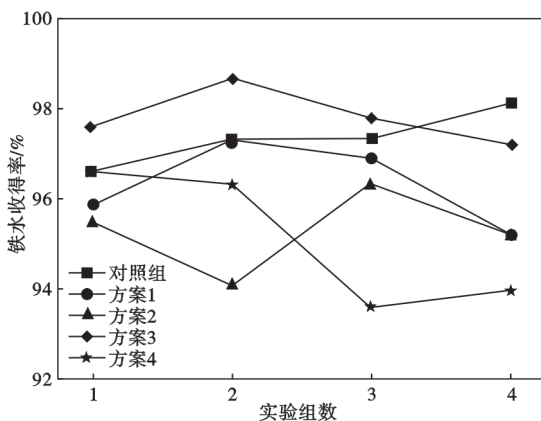


图 5 不同试验方案下的铁水收得率

Fig. 5 Yield rate of molten iron under different test schemes

较小,这一情况主要受到入炉铁水成分及温度的影响,同时也与过程中停炼时间的长短相关,因此,可以得出,顶吹 CO<sub>2</sub> 混入比例的不同对出钢温度的影响并不显著<sup>[11-12]</sup>。

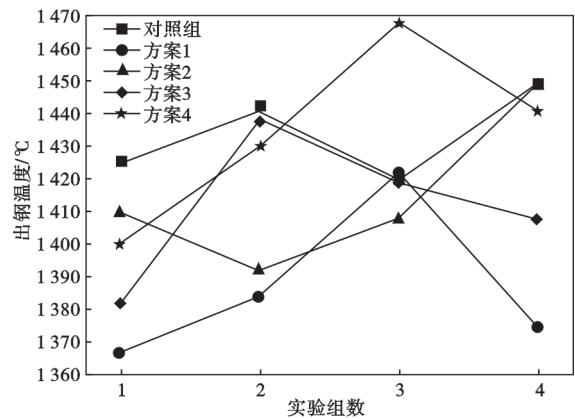


图 6 不同试验方案下的出钢温度

Fig. 6 Steel tapping temperature under different test schemes

通过对对照组、方案 1、方案 2、方案 3 及方案 4 这五种方案的冶炼指标进行对比分析,结果显示方案 3 (顶吹 CO<sub>2</sub> 混入比例 15%) 在各项冶炼指标上均表现出色,达到了最优的冶炼效果。因此,综合考虑各项数据和指标,方案 3 被认为是最佳的试验方案。

### 3.5 石灰块消耗对比分析

表 3 为五种不同的试验方案下,冶炼加入辅料及计算石灰块消耗的情况。脱磷转炉主要使用石灰石、轻烧白云石及石灰块,计算方法为将辅料中的 CaO 含量折算为石灰块消耗,具体如表 3 中标注所示,将通过对比石灰块消耗可以有效看出辅料消耗情况。

表 3 不同试验方案下的石灰块消耗

Table 3 Lime consumption under different test schemes

| 项目                          | 对照组   | 方案 1  | 方案 2  | 方案 3  | 方案 4  |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 轻烧白云石/kg                    | 1 375 | 1 425 | 1 225 | 1 200 | 1 550 |
| 石灰块/kg                      | 1 375 | 1 700 | 1 500 | 1 300 | 1 425 |
| 石灰石/kg                      | 1 450 | 1 100 | 1 200 | 950   | 1 125 |
| 石灰块消耗/(kg·t <sup>-1</sup> ) | 34.48 | 33.01 | 28.70 | 27.07 | 31.51 |

注:石灰块消耗=[(轻烧白云石×0.525+石灰块×0.9357+石灰石×0.53)/0.9357]/入炉铁量

通过对对照组、方案 1、方案 2、方案 3 及方案 4 这五种方案的石灰块进行对比分析,经过对比石灰块消耗,结果显示方案 3 (顶吹 CO<sub>2</sub> 混入比例 15%) 在

石灰块消耗最少,辅料消耗最低,因此,方案3被认为是最佳的试验方案。

## 4 结论

1)通过对比5个方案的炉渣 $w[\text{FeO}]$ 、脱磷率、铁水收得率及石灰块消耗,可以得出方案3(顶吹CO<sub>2</sub>混入比例15%)为最佳试验方案。

2)顶吹CO<sub>2</sub>混入比例15%时,渣中的 $w[\text{FeO}]$ 达

到最低水平为19.95%;渣中的 $w[\text{TFe}]$ 达到最低水平为19.35%;脱磷效率较比常规工艺提高6.61%,达到82.82%;铁水收得率较比常规工艺提高0.47%,达到97.8%。

3)顶吹混入CO<sub>2</sub>后,可以有效改善脱磷转炉炉内反应的热力学和动力学条件,提高脱磷效率。

4)顶吹CO<sub>2</sub>混入比例15%时,石灰块消耗量为最少,辅料消耗最低。

### 参考文献

- [1] 孙华康. 转炉喷吹石灰石粉高效脱磷行为基础研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
- [2] 许志国, 李 勇, 郭佳宁, 等. 二氧化碳在转炉中的应用[J]. 山西冶金, 2023, 46(7): 185-188.
- [3] 于春强. 转炉底吹二氧化碳技术的应用[J]. 河北冶金, 2022, (10): 35-38+44.
- [4] 陈豪卫. 转炉炼钢中的二氧化碳应用分析[J]. 山西冶金, 2017, 40(1): 96-97.
- [5] 李智峥, 朱 荣, 刘润藻, 等. 炼钢过程底吹气体的冶炼效果对比[J]. 钢铁, 2016, 51(9): 40-45.
- [6] 郭木星, 陈襄武. 底吹CO<sub>2</sub>气体在复吹转炉熔池中的作用机理[J]. 钢铁研究学报, 1993, (1): 9-14.
- [7] 郭木星, 陈襄武, 肖清安, 等. 顶底复吹转炉底吹CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>的冶金特性[J]. 北京科技大学学报, 1991, (5): 410-416.
- [8] 夏 韬, 朱 荣, 冯 超, 等. CO<sub>2</sub>掺混比例对于O<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>混合喷吹氧枪射流特性的影响[J]. 工业加热, 2022, 51(7): 1-7.
- [9] 冯 超, 董 凯, 朱 荣, 等. 120 t转炉顶吹CO<sub>2</sub>冶炼工艺研究与应用[J]. 炼钢, 2023, 39(5): 11-16.
- [10] 郭汉杰. 冶金物理化学教程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [11] 李长华. 二氧化碳在转炉炼钢中的应用与创新[J]. 中国金属通报, 2020(10): 113-114.
- [12] 周 赟, 魏光升, 朱 荣, 等. 不锈钢冶炼底吹CO<sub>2</sub>对熔池动力学条件影响[J]. 钢铁, 2023, 58(1): 39-46.
- [13] 董建锋, 魏光升, 朱 荣, 等. CO<sub>2</sub>顶吹比例对转炉终点控制的影响[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1476-1482.
- [14] 李智峥, 朱 荣, 朱益强. CO<sub>2</sub>对脱磷转炉物料和能量的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(S1): 232-237.
- [15] 朱 荣, 王雪亮, 刘润藻. 二氧化碳在钢铁冶金流程应用研究现状与展望[J]. 中国冶金, 2017, 27(4): 1-4+10.
- [16] 吕 明, 朱 荣, 毕秀荣, 等. 应用COMI炼钢工艺控制转炉脱磷基础研究[J]. 钢铁, 2011, 46(8): 31-35.
- [17] 吕 明, 朱 荣, 毕秀荣, 等. 二氧化碳在转炉炼钢中的应用研究[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(S1): 126-130.