

## 转炉双联法进行锰矿直接合金化的实践

吴伟<sup>1</sup>, 徐维利<sup>2</sup> 汪成义<sup>1</sup>, 李双江<sup>3</sup>, 张 飞<sup>1,3</sup>, 赵博<sup>1</sup>, 王建忠<sup>4</sup>,

李家征<sup>3</sup>, 曾加庆<sup>1</sup>, 林路<sup>1</sup>, 梁强<sup>1</sup>

1.钢铁研究总院冶金工艺研究所, 北京 100081; 2. 建龙西林钢铁有限公司, 黑龙江伊春 153025;  
3.河钢集团钢研总院, 石家庄 050023; 4. 宣化钢铁集团有限责任公司, 张家口 075100

### Practice of Direct Alloying of Manganese Ore by Converter Duplex

#### Method

Wu Wei<sup>1</sup>, Xu weili<sup>2</sup>, Zhang Fei<sup>1,3</sup>, Li Shuang-jiang<sup>3</sup>, Zhao Bo<sup>1</sup>, Wang cheng-yi<sup>1</sup>, Wang Jian-zhong<sup>4</sup>, Li

Jiang-zheng<sup>4</sup>, Zeng Jia-qing<sup>1</sup>, Lin Lu<sup>1</sup>, Liang Qing<sup>1</sup>

1. Metallurgical Technology Research Institute, General Iron and Steel Research Institute,

Beijing 100081, China; 2. Jianlong Xilin Steel Co., Ltd., Yichun, Heilongjiang 153025;

3.Technology and Research Institute of HBIS Group, Shijiazhuang 050023, China; 4.Xuanhua Iron and

Steel Group Co., Ltd, Zhangjiakou 075100, China

## 1. 前言

高效率、低成本洁净钢水生产技术是钢铁厂科技创新中一项具有普适性、基础性、事关钢厂效率、质量、成本的共性关键技术, 对提高企业市场竞争力具有重要意义<sup>[1]</sup>。

当前世界钢铁工业发展趋势是在高连铸比的基础上, 炼钢工艺技术着重发展分段炼钢, 即形成铁水预处理脱硫、磷、硅→转炉脱碳升温→炉外精炼→连铸的最佳工艺流程。分段炼钢意味着转炉进行少渣吹炼, 渣中(FeO)较低, 具有一定程度的还原功能, 冶炼中高碳钢时, 转炉出钢进行高拉碳操作, 在转炉中加入锰矿进行直接合金化, 可部分替代锰铁合金, 大比例降低传统流程中过分依赖高能耗、高污染的铁合金需求。锰矿熔融还原合金化是控制炼钢合金化成本、降低总体能耗、减轻行业环境污染和绿色化的一项有效技术。目前, 国内真正成功应用锰矿熔融还原技术的钢铁企业几乎是空白, 作为转炉功能优化的重要部分, 该技术应用目前仍有很大的发展空间<sup>[2-7]</sup>。

转炉炼钢过程锰矿熔融还原主要控制难点首先是渣量控制, 即要实现转炉少渣炼钢, 就必须先实现铁水的“三脱”预处理, 并稳定达到一定的处理深度, 需要突破铁水预处理工艺技术。其次是炉渣氧化性控制。转炉底吹效果不佳, 容易导致冶炼终点炉渣氧化性偏高, 影响炉渣中氧化锰的还原。第三是冶炼终点的精确控制。锰矿熔融还原技术更适合冶炼中高碳钢种, 采用高碳出钢模式, 低碳出钢条件势必影响锰收得率的提高<sup>[8]</sup>。

本文以获得较高锰收得率的工艺参数为目标, 在转炉内采用双联法进行锰矿直接合金化的试验, 探讨了提高转炉锰矿直接合金化中锰收得率的途径, 为转炉锰矿熔融还原技术的开发和应用提供依据。

## 2. 试验设备及方法

工业试验在某钢厂 200 t 转炉上进行, 试验钢种为 82B, 顶吹供氧强度为  $3.4 \text{ Nm}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ , 底吹供气强度为  $0.02 \sim 0.05 \text{ Nm}^3 \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。试验采用双渣冶炼操作, 为了保证热量充裕, 不加或少加废钢, 废钢要求选用轻薄料。转炉双渣倒渣率为 70%, 倒渣时间为 3 min, 倒渣后, 二次下氧枪操作时, 加入石灰、轻烧和锰矿。锰矿粒度要求为 15~40 mm 占总量 95% 以上, 锰矿加入方式为吹炼过程中从高位料仓加入, 锰矿的加入是分批次加入, 一般 2-4 个批次加完, 每批次加入锰矿 500-1000kg, 吹氧前三分钟不加锰矿; 转炉终点尽量压枪, 降低炉渣氧化性, 终点温度为 1580~1620 °C。试验钢种化学成分见表 1。

表 1 某钢厂试验钢种 82B 化学成分, 质量分数(%)

Table 1 Chemical composition of 82B in a steel plant (mass%)

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
SWRH82B-L	0.79-0.86	0.15-0.35	0.60-0.90	≤0.025	≤0.025	0.15-0.35	0.040-0.060
目标值	0.82-0.82	0.20	0.80	≤0.020	≤0.010	0.25	0.050
内控	0.74-0.81	0.18-0.22	0.72-0.78	≤0.020	≤0.010	0.23-0.27	0.048-0.052

### 3. 实验结果及分析

#### 3.1. 造渣料加入量和配比与锰收得率关系

在转炉二次造渣时, 加入的主要造渣料是石灰、镁球和烧结矿。由于是铁水脱磷后的二次造渣, 半钢中的硅含量和锰含量很低。因此, 可以认为二次造渣后的加入造渣料总量近似等于造渣的总量。试验过程中锰收得率  $\eta_{Mn}$  的计算式为:

$$\eta_{Mn} = \frac{M \times (w([Mn])_f - w([Mn])_i)}{m \times \alpha} \times 100 \quad (1)$$

式中: M 为钢水质量, kg; m 为锰矿加入质量, kg;  $\alpha$  为锰矿中 TMn 含量, %;  $w([Mn])_i$  为初始钢水锰含量, %;  $w([Mn])_f$  为终点钢水锰含量, %。

造渣料加入总量与锰收得率之间的关系如图 1 所示。由图可知, 随着造渣料总量的增加, 锰收得率明显降低, 控制渣量在 40-60kg/t 之间能获得较高的锰收得率。

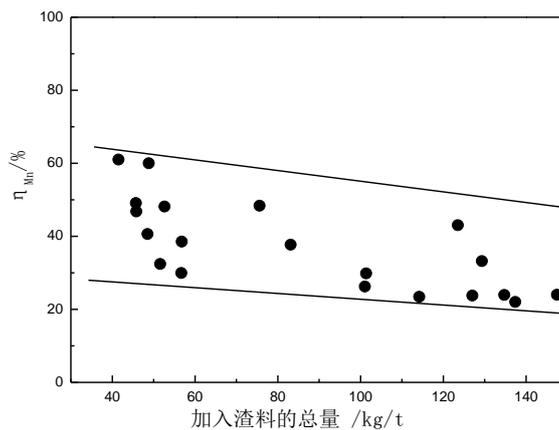


图 1 造渣料加入总量与锰收得率之间的关系

Fig. 1 The relationship between the total amount of slagging material added and the manganese yield

图 2 为石灰、烧结矿、锰矿加入量与锰收得率之间的关系。由 2 图可以看出, 随着石灰加入量的增加, 锰收得率和终点锰含量降低。当石灰加入量为 10-15kg/t 时, 能获得较高的锰收得率。随着烧结矿加入量的

增加，锰收得率和终点锰含量降低。当烧结矿加入量为 15-20kg/t 时，能获得较高的锰收得率。随着锰矿加入量的增加，锰收得率降低。锰矿加入量为 6-8kg/t 时，能获得较高的锰收得率。随着锰矿与烧结矿的比值增加，锰收得率影响显著降低，当锰矿与烧结矿比值在 0.4-0.6 时，锰的收得率较高。

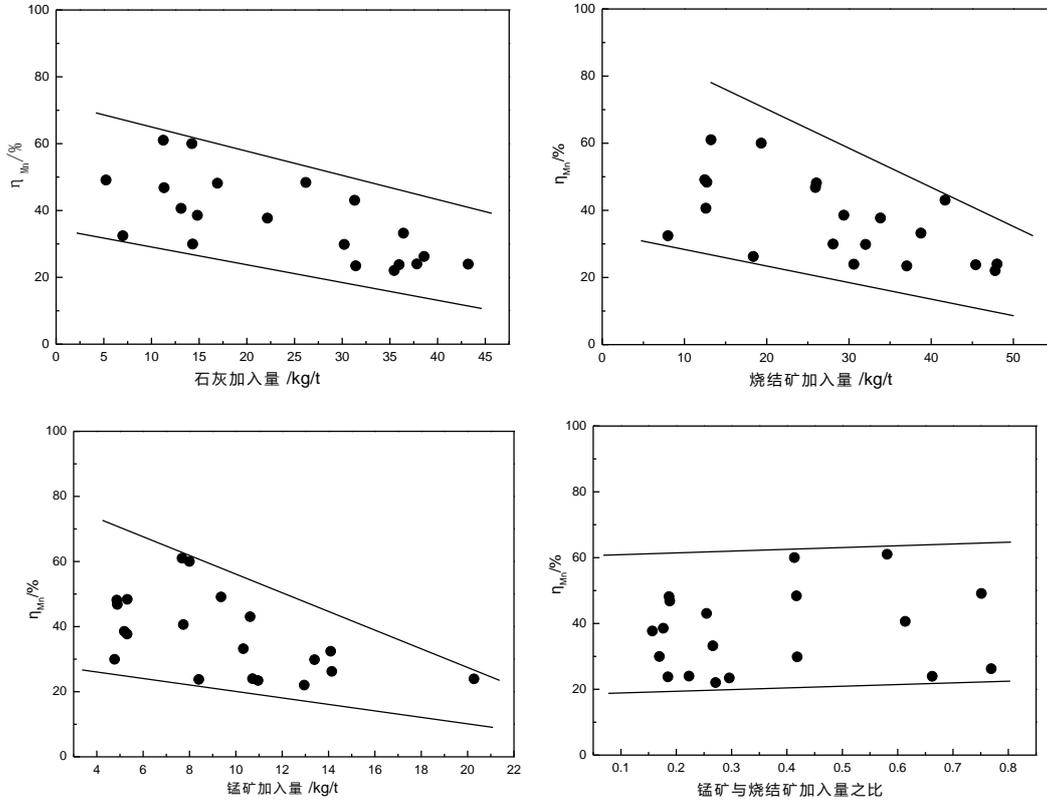


图 2 石灰、烧结矿、锰矿加入量与锰收得率之间的关系

Fig. 2 Relationship between lime, sinter and manganese ore addition and manganese yield

### 3.2. 终渣成分与锰收得率关系

表 2 为试验中得到的终点炉渣和钢水化学成分和温度。

表 2 试验中得到的终点炉渣和钢水化学成分和温度

Table 2 Chemical composition and temperature of end slag and molten steel obtained in the test

序号	终渣化学成分 /%					终点钢水化学成分/%				终点温度 /°C
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	TFe	MnO	C /%	Mn /%	P /%	S /%	
1	43.69	14.6	5.91	9.52	3.68	0.14	0.12	0.017	0.015	1595
2	43.69	14.65	5.92	9.12	3.67	0.2	0.13	0.014	0.011	1580
3	41.2	13.31	5.02	13.53	4.71	0.11	0.134	0.0171	0.014	1594
4	41.31	13.63	5.06	13.53	4.72	0.1	0.127	0.0163	0.017	1592
5	43.36	13.23	4.76	11.65	4.8	0.21	0.207	0.0181	0.009	1580
6	43.23	13.31	4.72	11.5	4.79	0.14	0.218	0.0171	0.014	1604
7	42.47	10.94	6.79	19.73	5.84	0.16	0.19	0.015	0.017	1594
8	45.09	11.12	7.81	14.48	8.01	0.16	0.211	0.0144	0.016	1597
9	46.58	12.66	7.54	14.45	6.34	0.12	0.2	0.015	0.016	1610
10	43.44	10.36	7.35	18.76	7.23	0.11	0.18	0.011	0.013	1586

11	43.93	11.38	6.72	18.38	6.65	0.09	0.17	0.016	0.021	1616
12	45.11	10.2	9.59	15.96	7.2	0.07	0.17	0.011	0.017	1584
13	44.97	10.25	7.64	18.65	5.81	0.09	0.13	0.01	0.014	1590
14	45.71	11.29	8.06	16.44	6.36	0.15	0.21	0.014	0.01	1588
15	49.25	10.17	8.88	14.76	4.88	0.16	0.2	0.017	0.013	1587
16	48.58	10.62	8.01	15.98	4.63	0.16	0.18	0.014	0.011	1595
17	46.72	11.3	10.88	14.96	4.4	0.18	0.12	0.011	0.014	1575

根据公式（1）计算得到炉渣成分与锰收得率之间关系。由图可知，当终渣碱度增加，炉渣中 T.Fe 含量降低，炉渣(MnO)含量降低，有利于锰收得率的提高。控制较好的终渣成分为：终渣碱度>3.2, T.Fe<12%。

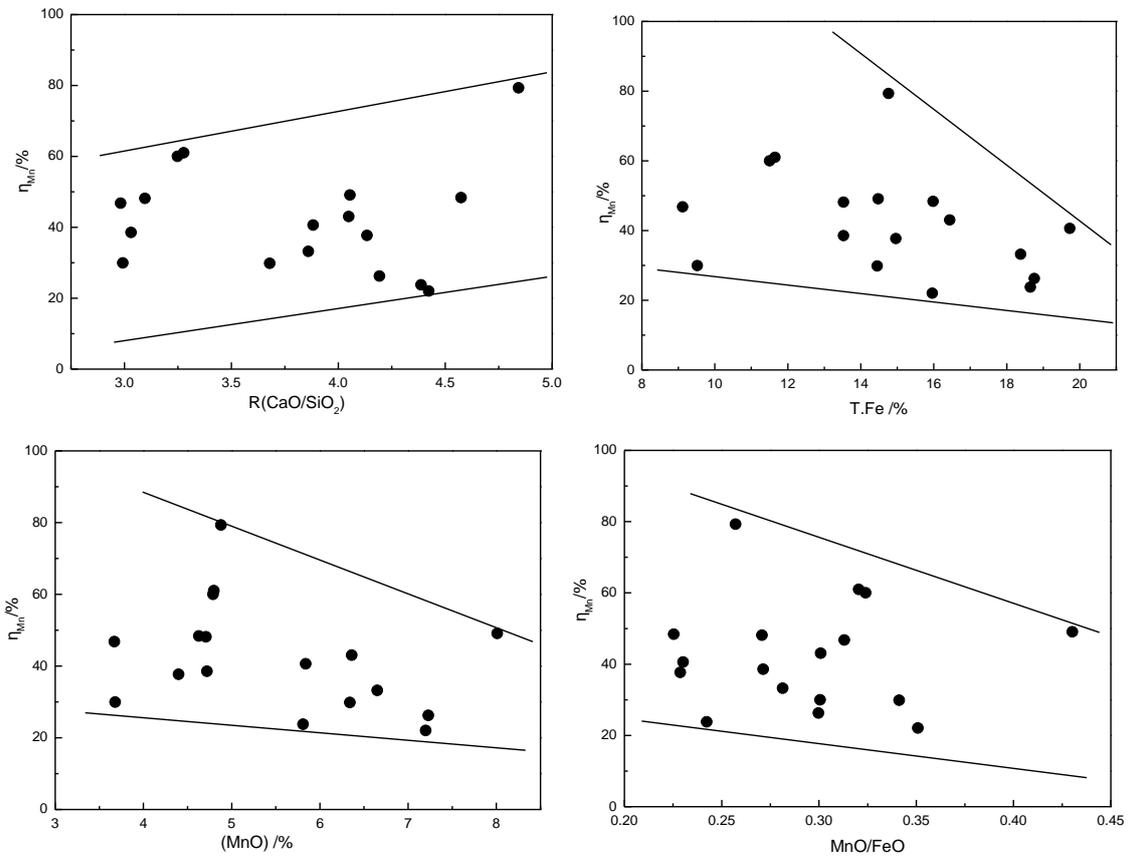


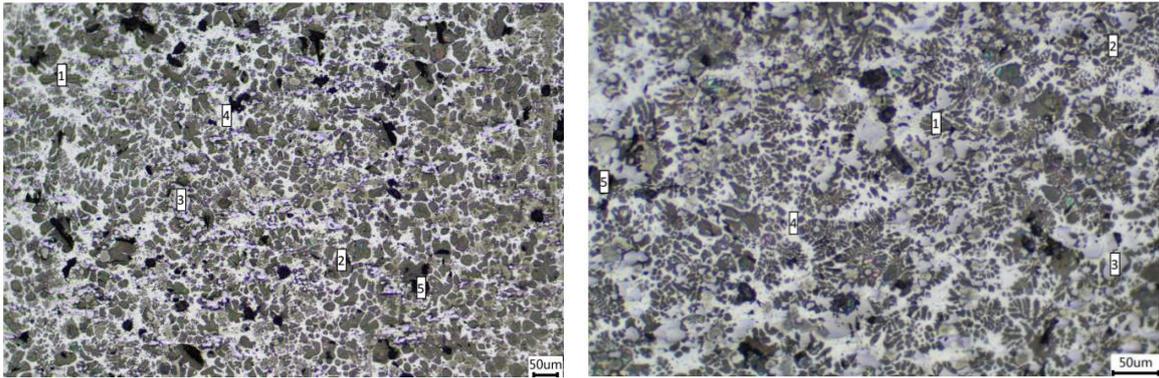
图 3 终渣中炉渣碱度、T.Fe、(MnO)与锰收得率之间的关系

Fig. 3 Relationship between slag basicity, T.Fe, (MnO) of final slag and manganese yield

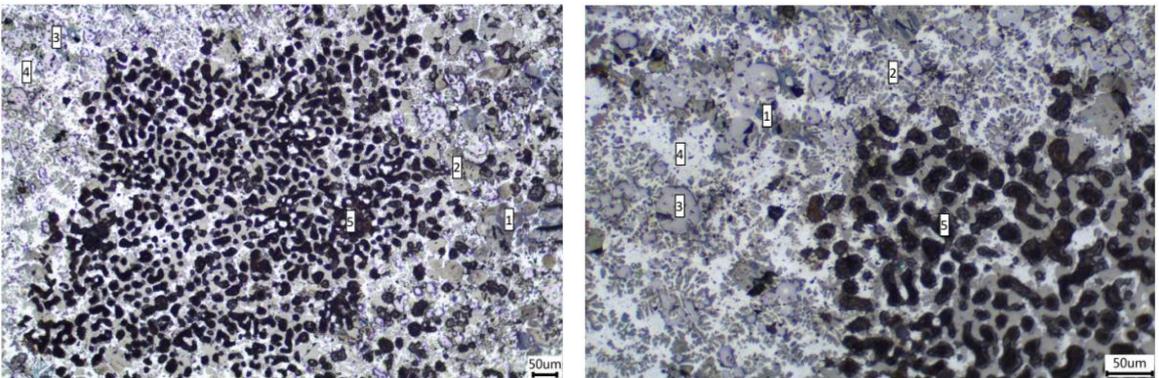
### 3.3. 炉渣矿相组成对渣钢间锰分配比的影响

在炼钢炉渣与钢水发生反应时，钢水中锰的氧化反应主要时是锰与氧气的反应。炉渣中（MnO）分解和还原反应主要是（MnO）的分解反应、（MnO）被钢中[C]还原和[Fe]还原的反应。这时候，产生的炉渣的熔化特性对锰矿还原有很大的影响。图 4 和图 5 为选取炉渣组成时的矿相组成情况。

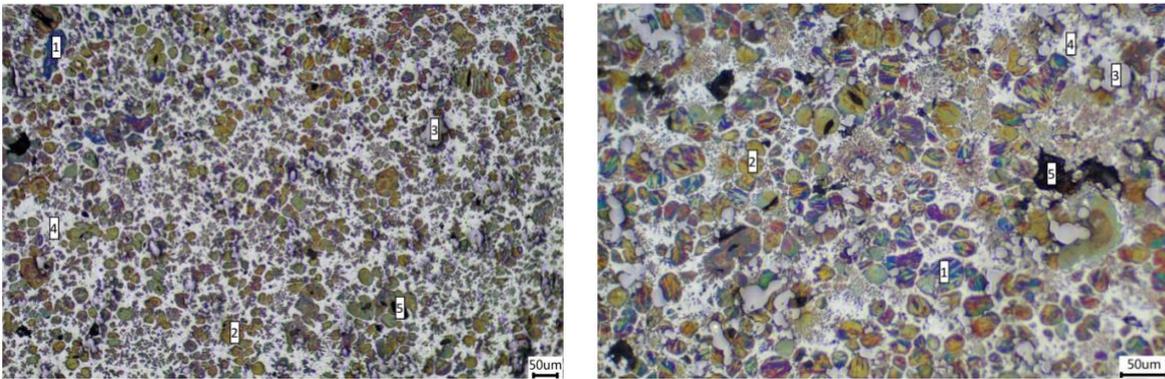
图 4 给出了不同炉渣 T.Fe 含量时的炉渣矿相组成。其中炉渣碱度为 3.76-3.88, MnO 为 4.88-7.54%。由图可知，随着炉渣 T.Fe 含量增加，炉渣中 C2F 相增多，游离氧化钙相减少。



T.Fe=9.12, 图中 1-C3S 相, 占 10-15%, 2-C2S 相, 占 25-30%, 3-RO 相, 占 15-20%, 4-C2F 相, 占 25-30%, 5-f-CaO 相, 占 3-5%。



T.Fe=14.76, 图中 1-C3S 相, 占 10-15%, 2-C2S 相, 占 20-25%, 3-RO 相, 占 15-20%, 4-C2F 相, 占 10-15%, 5-f-CaO 相, 占 20-25%。

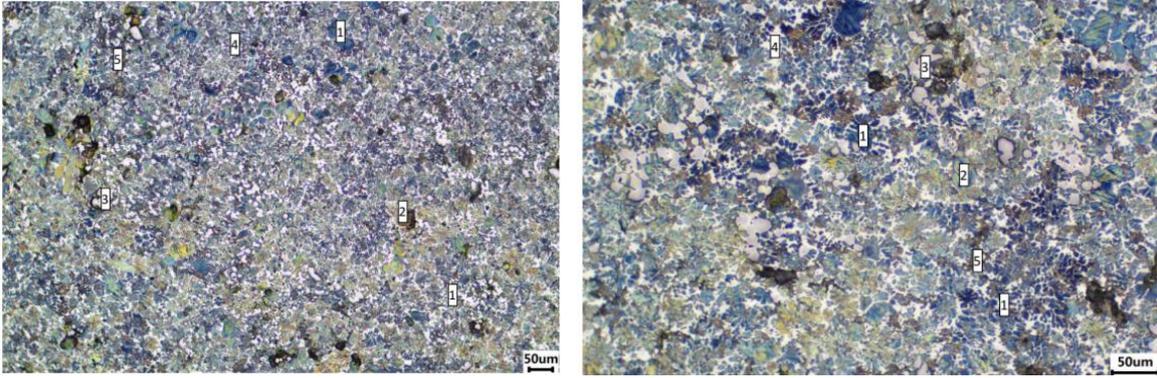


T.Fe=19.73, 图中 1-C3S 相, 占 15-20%, 2-C2S 相, 占 25-30%, 3-RO 相, 占 15-20%, 4-C2F 相, 占 20-25%, 5-f-CaO 相, 占 1-5%。

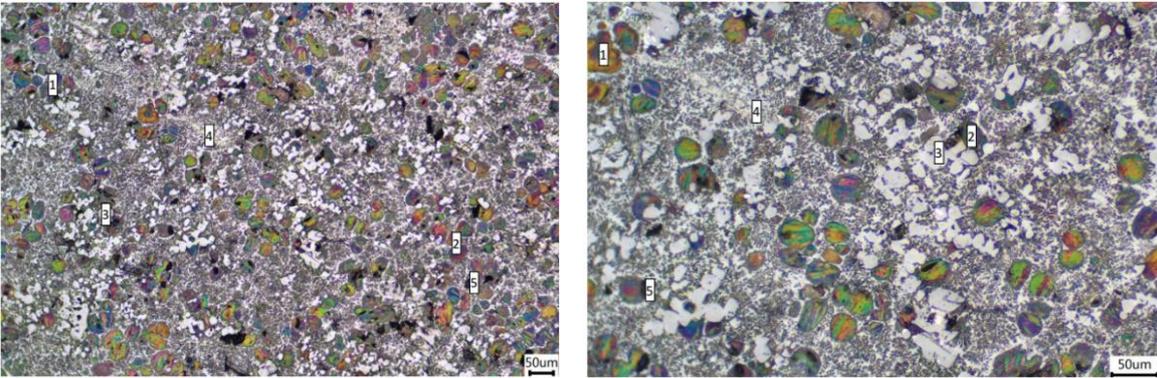
图 4 不同 T.Fe 含量时炉渣的矿相组成

Fig.4 Mineral phase composition of slag with different T.Fe content

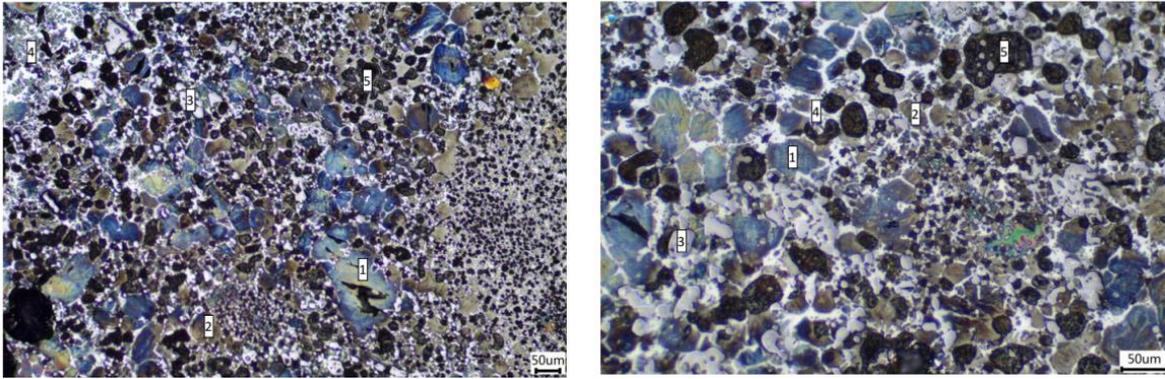
图 5 给出了不同炉渣碱度时的炉渣矿相组成。其中炉渣碱度为 3.76-3.88, MnO 为 4.88-7.54%。由图可知, 随着炉渣 T.Fe 含量增加, 炉渣中 C2F 相增多, 游离氧化钙相减少。



R=3.03, 图中 1-C3S 相, 占 35-40%, 2-C2S 相, 占 30-35%, 3-RO 相, 占 5-10%, 4-C2F 相, 占 5-10%, 5-f-CaO 相, 占 3-5%。



R=3.68, 图中 1-C3S 相, 占 15-20%, 2-C2S 相, 占 25-30%, 3-RO 相, 占 20-25%, 4-C2F 相, 占 15-20%, 5-f-CaO 相, 占 1-5%。



R=4.84, 图中 1-C3S 相, 占 25-30%, 2-C2S 相, 占 10-15%, 3-RO 相, 占 15-20%, 4-C2F 相, 占 10-15%, 5-f-CaO 相, 占 15-20%。

图 5 不同炉渣碱度时炉渣的矿相组成

Fig.5 The mineral phase composition of slag at different slag basicity

以上确定了不同 MnO, T.Fe 和 R 的影响, 可以得到不同条件下炉渣的矿相组成情况。RO 相和 fCaO 的变化。由此可见, 改变炉渣成分, 炉渣的矿相也发生变化。

### 3.4. 提高锰收得率的工艺参数控制窗口的途径

依据试验结果, 确定了以下几个因素是获得高锰矿收得率的途径。

(1)降低半钢磷含量，减少转炉终点对磷含量的负担。根据试验数据可知，影响转炉终点锰矿收得率的因素主要是转炉终点碳含量、终点磷含量和终点温度。降低转炉终点磷含量，实现转炉高拉碳[C]>0.2%是获得锰矿收得率的关键技术。因此，提高半钢的脱磷效果是很必要的。

(2)减少转炉终渣渣量，合理控制配料的配比。本研究在铁水脱磷处理后，倒掉脱磷渣，之后重新造渣，加入的主要造渣料是石灰、镁球和烧结矿。由于这时候铁水硅含量和锰含量已全部氧化，再氧化进入渣中的氧化硅和氧化锰含量很少。因此，这里把后期加入的造渣材料的重量认为是转炉产生的渣量。随着渣料总量的增加，锰矿收得率明显降低，控制渣量在 50kg/t 以内能获得较高的锰矿收得率。建议锰矿加入量为 6-8kg/t，石灰加入量为 10-15kg/t，控制烧结矿与锰矿之比为 2-2 时，能获得较好的锰矿收得率。

## 4. 结论

在转炉内采用双联法进行锰矿直接合金化的试验，探讨了提高转炉锰矿直接合金化中锰收得率的途径，得到如下结论：

(1)为了获得较好的锰收得率，控制加入造渣料总量为 40-60 kg/t，最佳炉料配比是：石灰 10-15kg/t，烧结矿 15-20kg/t，锰矿 6-8kg/t。

(2)当终渣碱度增加，炉渣中 T.Fe 含量降低，炉渣(MnO)含量降低，有利于锰收得率的提高。控制较好的终渣成分为：终渣碱度>3.2，T.Fe<12%。

(3)确定了不同 MnO，T.Fe 和 R 对炉渣矿相组成的影响。

## 参考文献

- [1] 殷瑞钰. 关于高效率低成本洁净钢平台的讨论—21 世纪钢铁工业关键技术之一[J]. 炼钢, 2011, 27 (1) : 1-10.
- [2] M. Matsuo, C. Saito, H. Katayama, et al. Smelting Reduction of Iron Ore with Top-and-Bottom Blowing Converter[J]. Tetsu-to-Hagane, 1990, 76(11):1871-1878.
- [3] S. Kawasaki, H. Hirahashi, M. Aoki, et al. Improvement of the Refining Process around Combined Blowing Converter in Kobe Works[J]. Tetsu-to-Hagane, 1990, 76(11):1900-1907.
- [4] T. Kaneko, T. Matsuzaki, T. Kugimiya, et al. Improvement of Mn Yield in Less Slag Blowing at BOF by Use of Sintered Manganese Ore[J]. Tetsu-to-Hagane, 1993, 79(8):941-947.
- [5] 艾立群, 刘世洲, 张华书. 锰矿直接合金化研究[J]. 河北理工学院学报, 1996, 18(2): 13-17.
- [6] 熊伟, 李光强, 陈兆平, 等. 顶底复吹转炉内锰矿直接合金化的动力学模型[J]. 过程工程学报, 2009, 9(Z1): 369-373.
- [7] 王大萍, 张波, 郝春晖, 刘浪, 李春晓. 转炉锰矿直接合金化生产实践[J], 特殊钢, 2019, 40 (1) : 39-42.
- [8] 林路, 曾加庆, 李双江, 等. 转炉锰矿熔融还原工业试验研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1575-1584.