

# 转炉“双渣法”工艺的平衡计算研究

张桢凯, 赵俊学\*, 王泽、康毅、曹赓、王贺

西安建筑科技大学冶金学院, 西安 710055

## Study on Balance Calculation of Converter "Double Slag Method" Process

Zhang Zhenkai, Zhao Junxue\*, Wang Ze, Kang Yi, Cao Geng, Wang He

School of Metallurgy, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China

### 1. 前言

中国粗钢产量连续多年位居世界第一位, 2022 年国内粗钢产量达 10.2 亿吨<sup>[1]</sup>。与此同时, 钢铁工业消耗了大量的能源、资源以及烟尘、炉渣等固体废弃物排放等问题, 在钢铁工业绿色发展方面面临着巨大的挑战与压力<sup>[2-4]</sup>。据文献报道, 每生产 1 t 钢约产生 150 kg 钢渣, 而且国内钢渣堆存量巨大且利用率低<sup>[3]</sup>。近年来, 面对激烈的竞争与环保“高压线”, 国内以首钢为代表的钢铁企业大规模采用转炉少渣炼钢新工艺, 均降低了渣料消耗量、减少了渣量、提高了脱磷率, 取得了显著的经济与生态环境效益<sup>[5-6]</sup>。山西某钢厂为了应对行业激烈的竞争, 积极的推进转炉品种钢结构的调整, 然而优特钢产品的生产, 对于转炉生产低磷钢的冶炼有着更严格的需求。因此, 为了生产低磷钢水及进一步降低渣料消耗, 建立了某钢厂的双渣法物料平衡, 并结合脱磷模型对双渣法工艺的渣料消耗、脱磷能力等进行了测算。

### 2. 研究方法

#### 2.1. 双渣法物料平衡建立

通过项目组多次到某钢厂现场调研、收集相关的基础数据为建立物料平衡提供基础, 其中原料条件如表 1 所示。

表 1 某钢厂原料条件 (质量分数,%)

Table 1 Raw material conditions of a steel plant (mass fraction, %)

	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P
石灰	81.2	1.82	3.87	1.10	0.095	0.020
轻烧白云石	52.1	4.64	33.4	0.54	0.045	0.010
生白云石	30.9	2.74	19.10	0.33	0.024	-
石灰石	52.1	0.68	2.10	0.34	0.039	0.010

建立了适合某钢厂的双渣留渣法物料平衡, 参考鞍钢炼钢厂平均装入量为 275t 时, 留渣量控制在 8~12 t<sup>[7]</sup>, 针对某钢厂平均装入量 145 t 时, 取留渣量为 5 t, 并结合物料平衡对该工艺 (碱度脱磷期 1.8, 脱碳期 3.0) 与某钢厂常规冶炼进行了对比, 并计算了改变脱碳期结束后留渣量、脱磷期结束后倒渣量参数对冶炼工艺的影响 (取留渣量在 3t~6t, 取倒渣量在 40%~60%)。参照相关资料, 选定脱碳期结束留渣的成分如表 2 所示。

表 2 少渣冶炼留渣成分（质量分数,%）

Table 2 Composition of residual slag in low-slag smelting (mass fraction, %)

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	碱度 R
51.4	17.8	2	9	2.5	18	2.9

## 2.2. 脱磷模型的选择

脱磷是转炉冶炼重要的任务之一，在研究脱磷问题时，需要选择合适的平衡理论公式来计算脱磷反应。前人建立了众多的磷分配比模型，所对比的磷分配比模型如表 3 所示。并通过所取钢渣样进行了对比验证，确定合适的磷分配比模型。

表 3 常用的磷分配比模型

Table 3 Common phosphorus partition ratio model

磷分配比模型				磷容量模型
Healy 模型 <sup>[8]</sup>	Sutio 模型 <sup>[9]</sup>	Ting 模型 <sup>[10]</sup>	Kunisada 模型 <sup>[11]</sup>	Young 模型 <sup>[12]</sup>

磷分配比模型的对比效果如图 1 所示。由图 1 可以看出，Sutio 磷分配比模型更合适该企业的冶炼情况。因此，选取 Sutio 磷分配比模型与 Young 磷容量模型探究了双渣留渣法不同工艺参数情况下脱磷能力的变化情况。

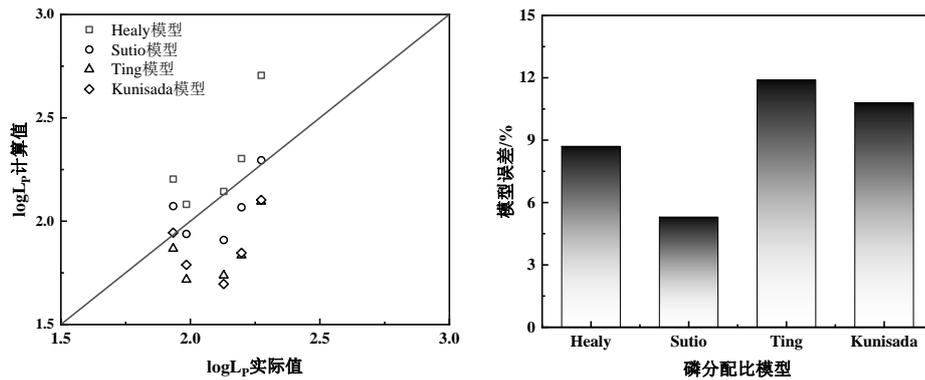


图 1 磷分配比模型对比效果

Fig. 1 Comparison effect of phosphorus partition ratio model

## 3. 结果与分析：

根据上述方案计算得到的双渣留渣法渣料消耗、渣量情况与企业常规冶炼的对比如图 2 所示。根据图 2 可以看出，相比于企业的常规冶炼，双渣留渣法可以大幅减少渣料消耗，但双渣留渣脱磷期的渣量变化不大，而脱碳期的渣量大幅降低。

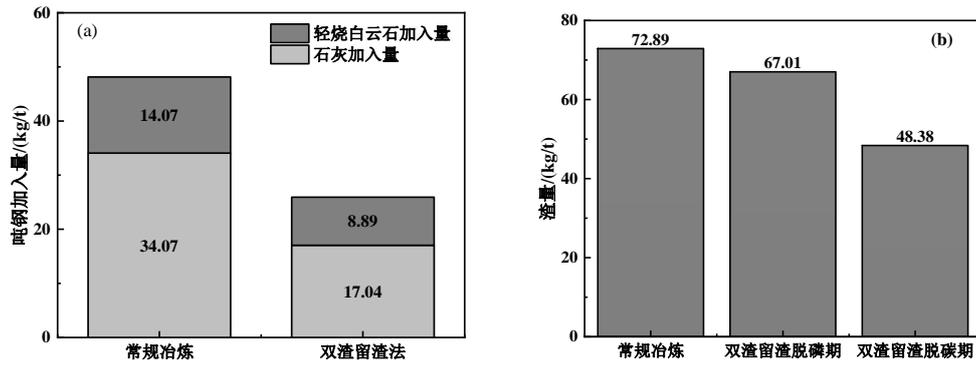


图2 双渣留渣法与企业常规冶炼对比:(a)渣料消耗;(b)渣量

Fig. 2 Comparison between double slag method and conventional smelting:(a) slag consumption; (b) slag quantity

脱碳期结束后的留渣量对双渣法工艺的影响,如图3所示。由图3可知,当造渣料加入量一定时,随着脱碳期结束后留渣量从3t增加到6t,脱磷期炉渣碱度从1.60增大到1.92,而脱碳期炉渣碱度变化不明显;留渣量变化对脱磷期的脱磷能力影响较大,随着留渣量的增大,脱磷期的磷分配比与磷容量增大。

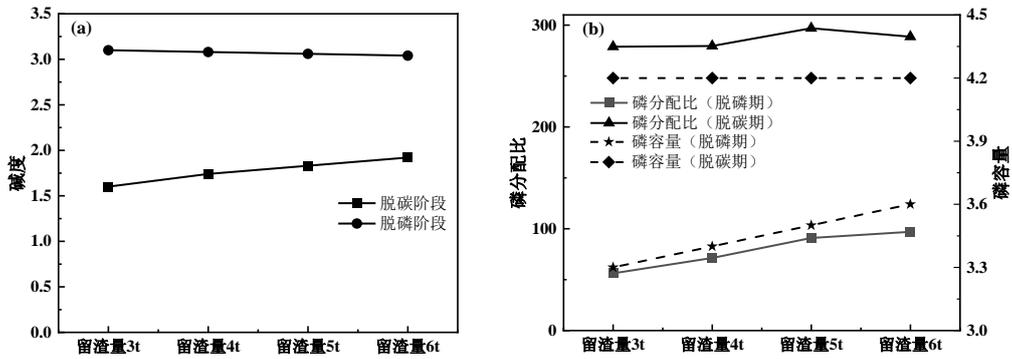


图3 脱碳结束后留渣量对双渣法工艺的影响:(a)炉渣碱度;(b)脱磷能力

Fig. 3 Effect of residue amount after Decarbonization on Double Slag Process:(a) slag basicity; (b) dephosphorization capacity

脱磷期结束后的倒渣量对双渣法工艺的影响,如图4所示。由图4可知,当造渣料加入量一定时,随着脱磷期结束后倒渣量从40%增加到60%,脱碳期炉渣碱度从2.86增大到3.37,而脱磷期炉渣碱度无明显变化;倒渣量变化对脱碳期的脱磷能力影响较大,随着倒渣量的增大,脱碳期的磷分配比与磷容量增大。

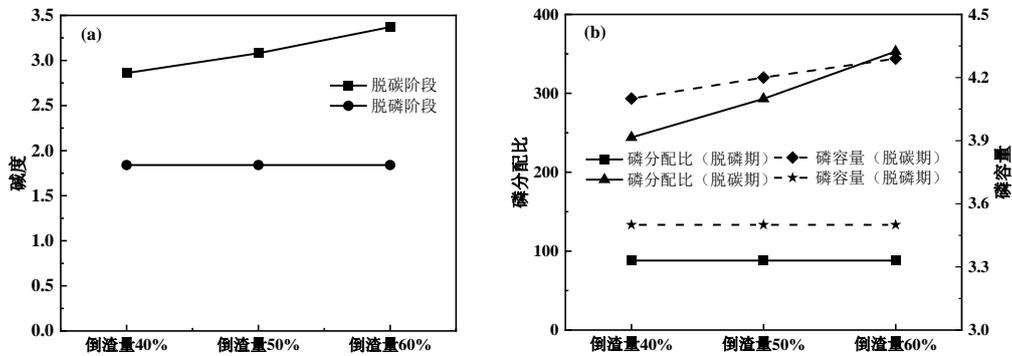


图4 脱磷期结束后倒渣量对双渣法工艺的影响:(a)炉渣碱度;(b)脱磷能力

Fig. 4 Effect of slag quantity on double-slag process after dephosphorization period:(a) slag basicity; (b) dephosphorization capacity

因此，在转炉双渣法冶炼过程中，需要根据脱碳期后留渣量、脱磷期后倒渣量的变化，及时动态调整渣料的加入量以保证合理的炉渣成分及脱磷效果。

## 4. 结论

(1) 针对某钢厂而言，相比于常规冶炼，采用双渣留渣法可以显著降低造渣料消耗，进而降低冶炼成本，同时又为生产品种钢打下基础。

(2) 留渣量变化主要对脱磷期影响较大，倒渣量变化对脱碳期影响较大。因此，在转炉双渣法冶炼过程中，需要根据脱碳期后留渣量、脱磷期后倒渣量的变化，及时动态调整渣料的加入量以保证合理的炉渣成分及脱磷效果。

## 致谢

感谢国家自然科学基金项目（项目号：51674185）的支持。

## 参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL].(2023-02-28)[2023-04-07]. [http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202302/t20230228\\_1919001.html](http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202302/t20230228_1919001.html).
- [2] 张琦,王小壮,许立松,沈佳林.钢铁流程资源-能源-碳排放耦合关系及分析[J].钢铁,2020,55(10):103-114.
- [3] 张俊,严定鏊,齐渊洪,沈朋飞,徐洪军,高建军.钢铁冶炼渣的处理利用难点分析[J].钢铁,2020,55(01):1-5.
- [4] 张春霞,王海风,张寿荣,殷瑞钰.中国钢铁工业绿色发展工程科技战略及对策[J].钢铁,2015,50(10):1-7.
- [5] 王新华,朱国森,李海波,吕延春.氧气转炉“留渣+双渣”炼钢工艺技术研究[J].中国冶金,2013,23(04):40-46.
- [6] 张良明,吴发达,王爱民,石知机.马钢 120t 转炉少渣冶炼工艺应用实践[J].钢铁,2014,49(06):26-29.
- [7] 齐志宇,田勇,王鹏,张志文,朱国强,孙艳霞.260t 转炉留渣双渣法冶炼低磷 IF 钢的半钢控制实践[J].鞍钢技术,2016(05):45-47+52.
- [8] G W Healy. A new look at phosphorus distribution[J]. ISIJ International, 1970, 664-668.
- [9] Sutio H, Indue R, Takada M. Phosphorus Distribution Between Liquid Iron and MgO Saturated Slag of the System CaO-MgO-FeOx-SiO<sub>2</sub> System[J]. Testu-to-Hagane, 1986, 72(2), 225-232.
- [10] Ting T, Katayama H G, Tanaka A. Phosphorus distribution between molten iron and slags of the system CaO-MgO-FeO-SiO<sub>2</sub>[J]. Tetsu-to-Hagané, 1986, 72(2), 225-232.
- [11] Kunisada K, Iwai H. Effects of CaO, MnO, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on phosphorus distribution between liquid iron and Na<sub>2</sub>O-MgO-FeO-SiO<sub>2</sub> slags[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1987, 27(5), 332-339.
- [12] Young R W, Duffy J A, et al. Hassall G J Use of optical basicity concept for determining phosphorus and sulphur slag-metal partitions[J]. Ironmaking & Steelmaking, 1992, 19(3), 201-219.