

120 t 转炉“半留渣”新工艺：降成本提效率的炼钢妙招

Semi-slag Process in Steelmaking: Cutting Costs for 120 t Converters

供稿|潘佳¹, 汪聪², 江涛勇¹, 张超杰², 张立强² / PAN Jia¹, WANG Cong², JIANG Taoyong¹, ZHANG Chaojie², ZHANG Liqiang²

内容导读

炼钢时炉渣太多会怎样？成本高、控制难！某钢厂在 120 t 转炉生产中，虽然传统“全留渣”工艺（把上一炉渣全留下）对去杂质和保护炉子有用，但渣量太大反而增加了石灰等原料消耗，操作也过于依赖经验，效果不稳定。“半留渣”工艺（只留一部分炉渣）应运而生。通过研究炉渣的特性，计算出了既能保证去杂质效果又能保护炉子的最佳渣量，同时优化了炉渣的状态（熔点和黏度）和喷枪高度。效果如何？立竿见影！新工艺实施后：造渣用的石灰等材料消耗从每吨钢 40 kg 降到了 27.6 kg；钢铁原料（铁水+废钢）消耗成功控制在每吨钢 1050 kg 以内；炉子运行更稳定，操作更轻松。这项研究不仅为优化转炉炼钢提供了理论和实践依据，更重要的是，它展示了一种更经济、更高效的炼钢新思路，实实在在地降低了成本。

在炼钢过程中，冶炼的关键在于构建一个熔点低、流动性优良，兼具高效脱磷、去杂能力及良好护炉性能的炉渣体系。为了提高脱磷率，传统炼钢工艺通常采用高渣量和高碱度操作模式。但这种模式会导致转炉造渣材料和钢铁料的消耗大幅增加，炉型维护难度上升，并伴随高喷溅率，不仅显著提高转炉生产成本，还加剧了环境污染问题。此外，由于炉渣的化学性能欠佳及流动性不足，在冶炼后期易发生“返干”现象，使得炉渣的磷容量受前序炉次影响，进一步导致脱磷能力波动，严重影响转炉生产的节奏与产品质量。因此，兼具超低排放与低

成本的少渣冶炼技术逐渐成为国内外转炉炼钢研究的焦点^[1]。

少渣冶炼技术通过调整工艺模式与操作参数，有效减少石灰、白云石等生产原料的消耗，进而降低炉渣生成量，有力推动绿色低碳炼钢技术的发展。目前，许多钢厂围绕少渣冶炼开发出多种创新模式。例如，JFE 钢铁株式会社推出的林茨-多瑙维茨新精炼（LD-NRP）双联法，利用 2 座转炉实现铁水的脱硅、脱磷和少渣量脱碳，虽然其三脱能力显著增强，但因工序增多导致冶炼效率下降，仅脱碳炉的渣量明显降低，同时存在炉龄较短的缺陷；林

茨-多瑙维茨优化精炼（LD-ORP）双联法、神户H专用炉法及住友精炼（SRP）双联法通过脱碳炉与脱磷炉构成两级反应器，可快速获得低磷铁水并减少石灰消耗，但双转炉操作限制了生产作业率的提升^[2]；新日本制铁公司采用的（住友精炼法）住友精炼（MURC）双渣法则在单座转炉内完成双联少渣操作，但其二次造渣过程对提升冶炼效率、降低钢铁料消耗的效果有限；宝山钢铁股份有限公司依据日本少渣冶炼技术开发的宝钢精炼（BRP）法，同样通过脱碳炉和脱磷炉实现少渣冶炼^[3-4]。

本文以某钢厂 120 t 转炉为研究对象，结合理论分析与现场实践，应用半留渣工艺探索少渣冶炼技术。与其他少渣模式相比，该工艺将渣量控制环节前置于冶炼初期，显著降低了控渣难度，同时不影响转炉的冶炼效率。结合普碳钢冶炼的现状，该工艺在低灰耗、低钢铁料消耗及较宽成分适应范围的基础上，通过工艺优化确保脱磷效果及炉况稳定，显著降低了渣料和钢铁料的消耗，为显著降低转炉冶炼成本提供了切实可行的技术方案。

某厂 120 t 转炉生产工艺条件

某钢厂配备 2 座 120 t 顶吹转炉，均采用 5 孔氧枪设计，氧枪喷口夹角为 12.5°，喉口直径为 (38.2±0.02) mm，马赫数为 2，供氧强度为 3.0~3.5 m³/t。炼钢工序未配备铁水预处理设备。入炉铁水成分如表 1 所示，造渣材料成分稳定且质量较高，其具体数据见表 2。

表 1 铁水主要成分（质量分数） %

元素	C	Si	Mn	P	S
范围	3.6~5.5	0.10~1.00	0.20~0.40	0.080~0.200	0.010~0.075
平均值	4.3	0.35	0.22	0.125	0.032

表 2 造渣材料主要化学成分及活性度

原材料	质量分数/%				活性度/mL
	CaO	SiO ₂	MgO	S	
石灰	91	1	3	0.012	340
轻烧白云石	54	3	34	0.015	170

在半留渣法实施前，该钢厂转炉生产主要采用全留渣法进行造渣，即将上一炉次的炉内渣全部保留至下一炉作为初渣使用。工艺优化前的部分关键

指标见表 3，可见全留渣工艺存在渣料消耗高（每吨钢达 40 kg）、炉容比波动大、脱磷率不稳定等问题，同时钢铁料消耗量每吨钢高达 1068 kg，显著增加了冶炼过程的控制难度。为了在保证脱磷率及炉容比稳定的前提下有效降低渣料和钢铁料的消耗，本文开发引入适用于 120 t 转炉的半留渣工艺，以显著降低转炉冶炼成本。

表 3 工艺优化前部分关键指标

每吨钢消耗量/kg			波动范围/%		每吨钢灰渣量/kg
石灰	白云石	钢铁料	炉容比	脱磷率	
29	11	1068	0.60~0.82	0.65~0.90	110

某厂 120 t 转炉脱磷工艺优化方案

脱磷环境变化

实现高效脱磷的基本条件包括高碱度、高 FeO 含量、良好的渣液流动性、大量熔渣、充分的熔池搅动以及适宜的温度^[5]。在半留渣工艺实施后（工艺流程如图 1 所示），经过摇炉倒渣和溅渣操作，转炉炉内的留渣量显著减少。



图 1 半留渣工艺流程

跟踪分析 2023 年 9 月至 2024 年 9 月优化实施前后炉渣中 P₂O₅ 和 FeO 的含量发现，随着渣量的减少（即工艺推进过程中渣量的动态降低），炉渣中 P₂O₅ 含量呈上升趋势，而 FeO 含量则呈显著下降趋势，见图 2。

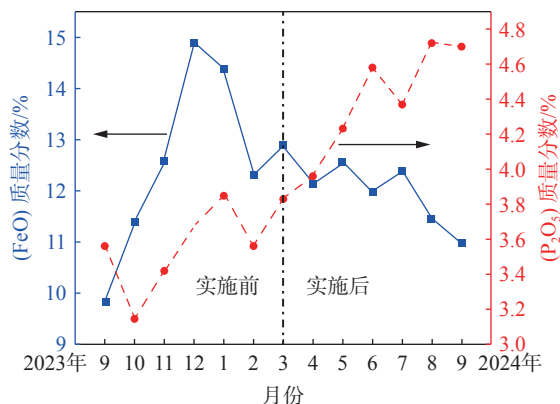


图 2 转炉渣中 P₂O₅ 与 FeO 含量变化趋势

半留渣工艺实施前后,转炉炉渣成分的对比详见表4。由表4可知,实施半留渣工艺后,炉渣的碱度 R 、FeO含量及磷容量($\lg C_{\text{PO}_4^{3-}}$)均呈下降趋势,说明脱磷条件有所恶化。但是,炉渣中的磷含

量存在差异,半留渣工艺中 P_2O_5 质量分数比原工艺高0.3%,这表明该工艺具有更好的脱磷效果。根据杨利彬等^[6]的研究,随着磷分配比(L_P)的增加,在满足脱磷需求的前提下,所需渣量可显著降低。

表4 半留渣法施行前后渣样部分成分及磷容量对比

工艺类型	质量分数/%									碱度, R	$\lg[C_{\text{PO}_4^{3-}}/(\text{g}/\text{cm}^3)]$
	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO		
原工艺	14.49	13.06	1.51	41.76	8.27	4.29	1.21	3.33	12.09	3.25	4.92
半留渣工艺	13.83	14.07	1.74	41.01	8.09	4.72	1.59	3.63	11.31	2.91	4.85

注:渣样成分均为平均值。

脱磷工艺方案优化

为了解决半留渣工艺实施后炉渣碱度、FeO含量及磷容量等脱磷条件恶化的问题,并提升炉渣的脱磷能力,本文主要从提高磷分配比入手,优化炉渣的脱磷效果。根据朱英雄^[7]的研究,炉渣的磷分配比主要受到钢液温度、炉渣FeO含量以及炉渣碱度等因素影响。

温度控制优化

分析现场大量数据后发现,随着出钢温度的升高,磷分配比呈下降趋势(见图3),这与理论结果一致。因此,后续操作中应逐步降低出钢温度,以优化脱磷效果。

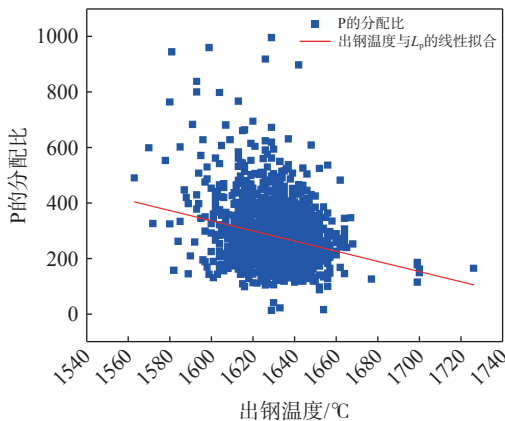


图3 磷分配比随出钢温度变化示意图

成渣路线优化

相较于全留渣工艺,半留渣工艺在冶炼前倒出部分炉渣,导致冶炼初期炉内留渣量大幅降低,初渣中的FeO及有效CaO减少,因此需要重新选择成渣路线加快前期成渣速度。转炉炼钢采用恒压变枪位冶炼

操作工艺,在该工艺条件下,根据成渣过程中FeO和CaO的含量变化,可分为铁质成渣路线和钙质成渣路线^[8-10]。图4为1400~2000℃时CaO-FeO-SiO₂三元渣系液相线图,可见理想的成渣路线应使磷分配比迅速升高,同时炉渣熔点先降后升,这样既能快速化渣,又能形成有利于脱磷的炉渣。因此,应采取图4中A、B、C点形成的铁质成渣路线。在该路线中:从A点到B点,渣中FeO含量升高、渣系碱度下降,同时渣系熔点降低,更易满足脱磷条件;从B点到C点,渣系中碱度升高,磷分配比进一步提高,增强脱磷效果;渣中FeO含量降低,有利于减少脱磷终期的铁损失。

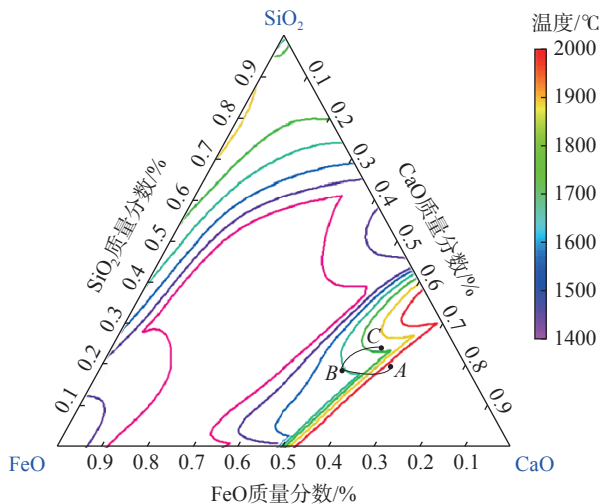


图4 1400~2000℃时,CaO-FeO-SiO₂三元渣系液相线图

炉渣流动性改进

为了确保熔池得到充分搅拌,必须保持炉渣的良好流动性。通常情况下,随着炉渣碱度的升高,

熔渣中高熔点组分（如熔点为 2130℃ 的 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ）和自由氧化钙（熔点为 2600℃）的含量增加，导致渣料的熔化温度升高^[11]。同时，生成的 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$

会使熔渣更加黏稠，进而降低流动性^[12]。因此，为了改善炉渣流动性，在调整目标渣成分时，应降低炉渣的 R 值和 MgO 含量，具体见表 5。

表 5 全留渣工艺终渣情况及目标渣成分

渣类型	质量分数/%									碱度, R	黏度/(Pa·s)	熔点/℃
	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	TiO_2	P_2O_5	FeO			
全留渣工艺	15.25	13.75	1.59	43.96	8.70	4.52	1.27	3.50	12.72	3.25	0.042	1904
目标渣	14.86	15.62	1.75	44.82	7.57	4.83	2.09	3.61	12.03	2.91	0.035	1750

石灰加入模型优化

为促进石灰的熔化并提高其利用率，建立新的石灰加入模型，以适应炉内渣量不断减少的工况^[13]。在保证脱磷率和炉渣耐火度的前提下，为了平衡炉内渣量，将 R 值的设定分为 3 个阶段：当铁水硅质量分数 $\leq 0.3\%$ 时， R 值设定为 3.2；当铁水硅质量分数为 $0.30\%\sim 0.45\%$ 时， R 值设定为 3.0；当铁水硅质量分数 $> 0.45\%$ 时， R 值设定为 2.8。石灰加入量 Q_{lim} 的计算见式 (1)。

$$Q_{\text{lim}} = \frac{2.14w(\Delta[\text{Si}])}{w(\text{CaO})_{\text{eff}}} \cdot R \times 1000 \cdot K_S + W_B \quad (1)$$

式中： $w(\Delta[\text{Si}])$ 为金属炉料中硅的氧化质量分数； $w(\text{CaO})_{\text{eff}}$ 为石灰中有效 CaO 的质量分数； K_S 为修正系数，用于根据炉内实际留渣量和石灰利用率不断调整 R 值，使其符合设计要求； W_B 为常数，涉及铁水的磷含量、 P_2O_5 含量以及炉渣的耐火度。石灰中有效 CaO 的质量分数可根据式 (2) 计算：

$$w(\text{CaO})_{\text{eff}} = w(\text{CaO})_{\text{lim}} - R \cdot w(\text{SiO}_2)_{\text{lim}} \quad (2)$$

式中， $w(\text{CaO})_{\text{lim}}$ 为 CaO 加入量； $w(\text{SiO}_2)_{\text{lim}}$ 为 SiO_2 加入量。

在石灰加入量下调的过程中设定下限，以维持炉内合适的渣量，主要目的是将 P_2O_5 质量分数控制在 6% 以内，从而保证炉渣具有良好的脱磷能力。根据 7500 组数据分析（见图 5），当 P_2O_5 质量分数超过 6% 时，磷分配比开始下降。

加料模式优化

现场引入了初始温度和前期渣供氧量的概念，并基于此构建数学模型。初始温度与铁水温度、废钢量以及硅含量等因素密切相关，前期渣供氧量则与入炉材料的特性相关。根据渣料的加入时机和加入量，制定以下加料模式。

(1) 硅质量分数 $\leq 0.3\%$ ：当初始温度 $\leq 1150^\circ\text{C}$ 时，在前期渣供氧阶段一次性加入 900 kg 白云石和 300 kg 石灰（加料时 CO 质量分数 $> 20\%$ ，氧量可偏差 100 m^3 ），后续石灰及白云石按每批 250~350 kg，间隔 20~30 s 交替加入，优先添加白云石，并确保在抬枪化渣前完成；当初始温度 $> 1150^\circ\text{C}$ 时，在前期渣供氧阶段一次性加入 900 kg 白云石，分 2 批（每批 300 kg）加入 600 kg 石灰（加料时 CO 质量分数 $> 20\%$ ，氧量可偏差 100 m^3 ），后续石灰及白云石按每批 250~350 kg，间隔 20~30 s 交替加入，优先添加白云石，并确保在抬枪化渣前完成。

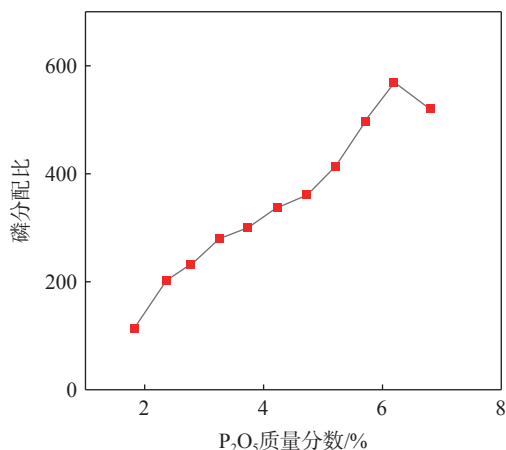


图 5 P_2O_5 质量分数与磷分配比的关系

(2) 硅质量分数 $> 0.3\%$ ：当初始温度 $\leq 1110^\circ\text{C}$ 时，在前期渣供氧阶段分 2 批（每批 300 kg）加入 600 kg 石灰（加料时 CO 质量分数 $> 20\%$ ，氧量可偏差 100 m^3 ），后续石灰及白云石按每批 250~350 kg，间隔 20~30 s 交替加入，优先添加白云石，并确保在抬枪化渣前完成；当初始温度 $> 1110^\circ\text{C}$ 且 $\leq 1130^\circ\text{C}$ 时，在前期渣供氧阶段分 3 批（每批

300 kg) 加入 900 kg 石灰 (加料时 CO 质量分数 >20%, 供氧量可偏差 100 m³), 后续石灰及白云石按每批 250~350 kg, 间隔 20~30 s 交替加入, 优先添加白云石, 并确保在抬枪化渣前完成。

通过优化上述加料模式, 可以有效避免因 FeO 含量不足或前期温度过低导致的石灰熔化不均问题。

供氧工艺改进

采用“软吹”工艺, 即提高前中期冶炼枪位并降低供氧流量, 有助于提升炉渣中 FeO 的含量^[14], 促进石灰充分熔化, 从而提高炉渣中的磷分配比。因此, 对枪位和流量进行优化, 具体优化方案如图 6 所示。通过调整前中期的枪位控制策略, 降低供氧流量, 实现更高效的冶炼过程。

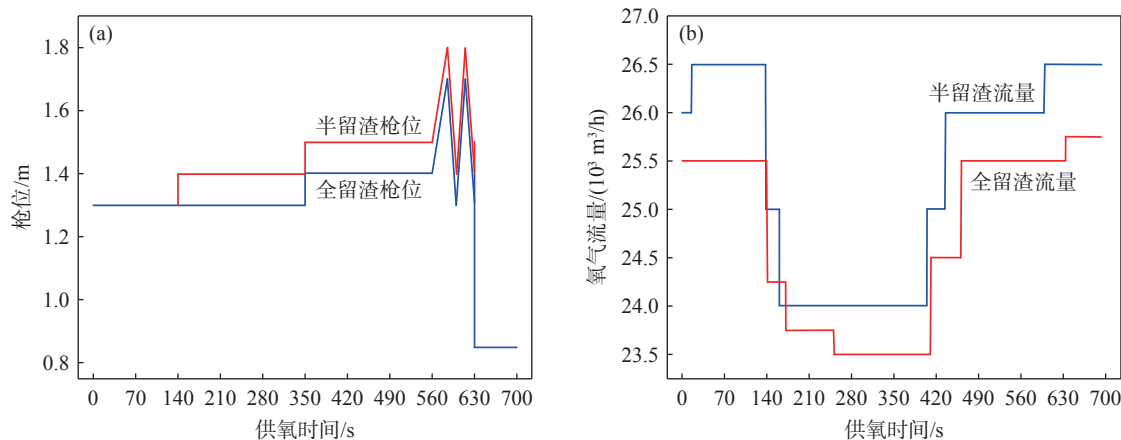


图 6 全留渣和半留渣工艺的 (a) 枪位与 (b) 氧气流量

炉况维护工艺方案优化

由于半留渣工艺引入了摇炉倒渣工序, 造渣材料用量减少, 导致炉内渣量显著降低。溅渣作业完成后, 半留渣工艺下的溅渣层厚度低于全留

渣工艺, 具体情况如图 7 所示。因此, 必须提高炉渣的利用率, 确保溅渣层厚度稳定, 以维持炉况稳定, 从而降低半留渣工艺对护炉效果的影响。

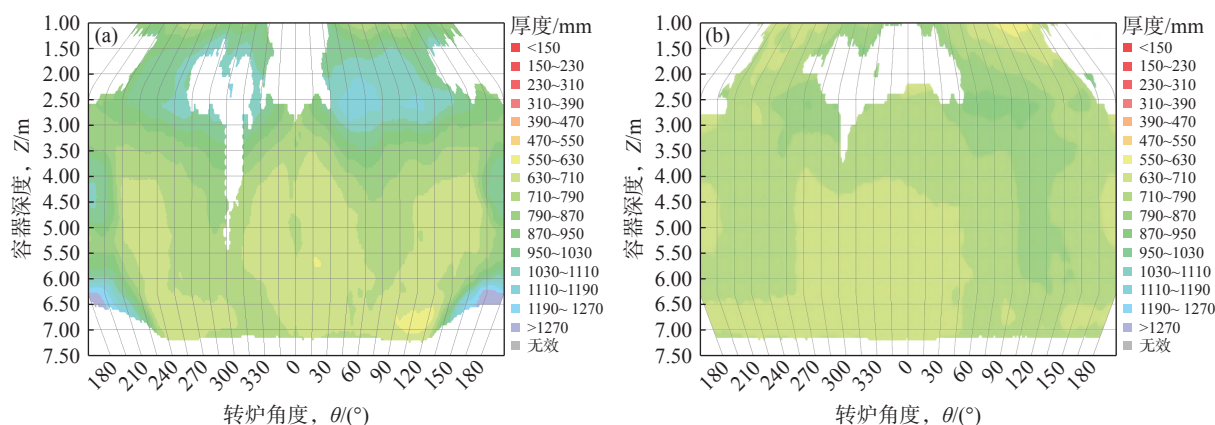


图 7 全留渣工艺 (a) 与半留渣工艺 (b) 溅渣层厚度对比

溅渣护炉效果与溅渣枪位、渣量以及炉渣黏度等因素密切相关^[15-17], 为此提出以下优化方法。

溅渣枪位动态调控

当溅渣枪位发生变化时, 炉衬各部位获得的渣

量也会随之改变。若枪位较低, 溅渣量将增加, 转炉上部的溅渣量也会增大; 反之, 若枪位较高, 溅渣量减少, 渣料更多地溅到中下部区域, 具体情况见图 8。实施半留渣工艺后, 炉内渣量显著减

少,原有的“高-低-高-低”溅渣模式难以保证溅渣层厚度,因此将其调整为“低-低-低”模式,以实现针对性溅渣,增强薄弱部位的溅渣层厚度,调整枪位后溅渣效果如图9所示。枪位(H)应根据测厚数据反馈的薄弱区域进行调整,具体计算见式(3)。

$$H = H_1 + H_b \quad (3)$$

式中: H_1 为最低枪位; H_b 为动态控制高度,与具体

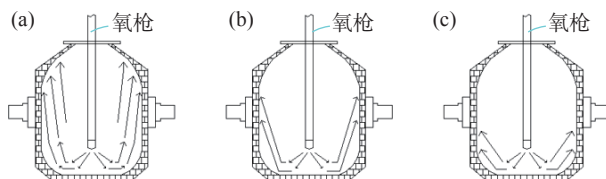


图8 高枪位(a)、中枪位(b)与低枪位(c)不溅渣位置及溅渣量示意

薄弱部位有关。

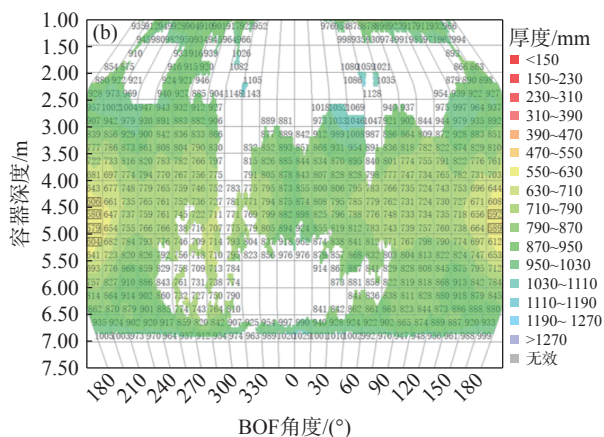
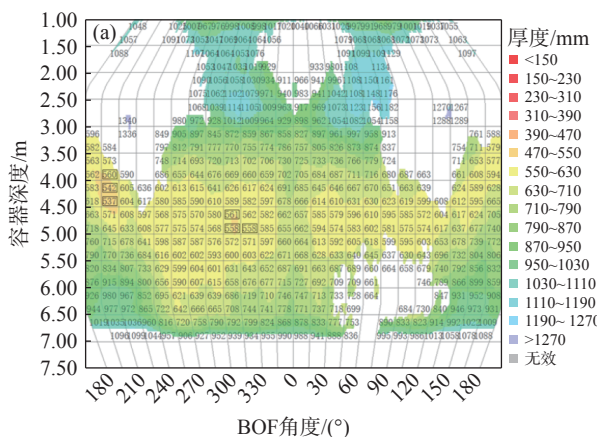


图9 调整后溅渣效果:(a) 溅渣前;(b) 溅渣后

➤ 渣层厚度控制策略

在溅渣护炉过程中,随着炉渣黏度的增加,溅渣层的厚度呈先升后降的趋势,如图10(a)所示。随

着渣量的增加,溅渣层厚度先上升后趋于平稳,如图10(b)所示。因此,为了优化护炉效果,需要将炉渣的黏度和渣量控制在合理范围内。

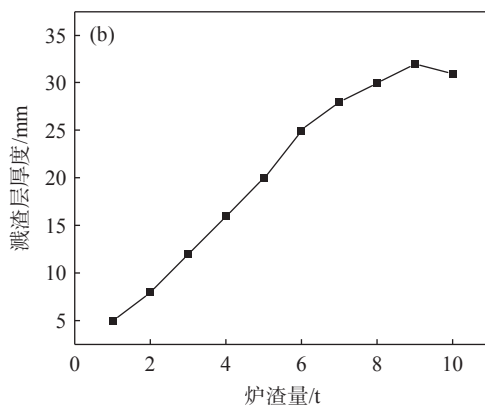
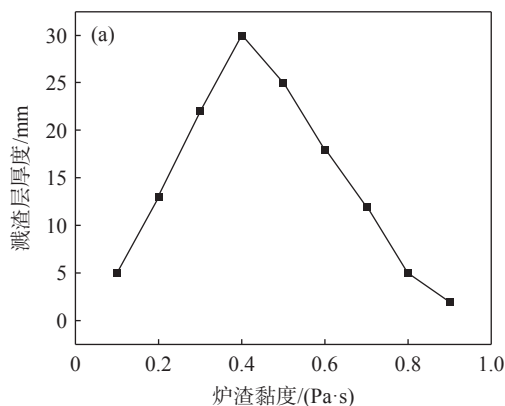


图10 溅渣层厚度与炉渣黏度(a)和炉渣量(b)的关系

➤ 白云石动态补偿技术

半留渣工艺实施后,炉内渣量显著减少。为了避免炉渣黏度过高,需要严格控制白云石的加入量。白云石的加入量应根据炉渣黏度、耐火度和渣

量等参数不断调整,以满足溅渣护炉需求。通过数据平台实时监控渣样黏度,确保炉渣黏度维持在0.30~0.42 Pa·s(如图11所示),为溅渣护炉效果和出钢过程中的脱磷效率提供保障。

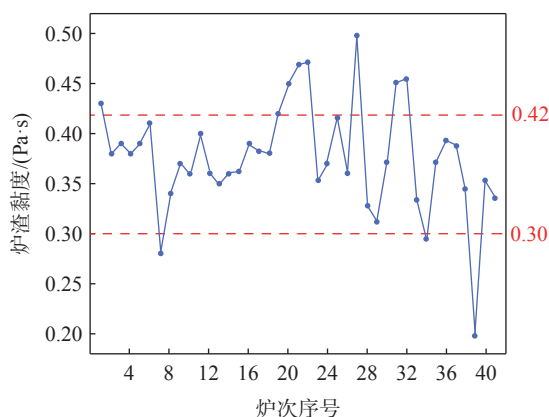


图 11 炉渣黏度控制情况

120 t 转炉半留渣工艺实施效果

成分控制情况

通过 2024 年 1—10 月的数据可以看出,虽然实施半留渣工艺后脱磷率出现一定波动,但通过一系列调控措施,磷成分出格炉数并未明显增加,如图 12 所示。

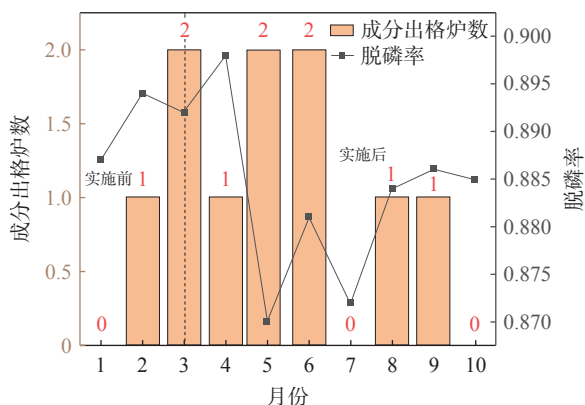


图 12 2024 年半留渣工艺实施前后出钢磷及成分出格控制情况

过程控制及钢铁料消耗

图 13 为 2024 年 1—10 月半留渣法实施前后每吨钢灰渣量、钢铁料消耗和过氧化情况的对比。由于炉内渣量大幅下降,转炉过程控制难度降低,喷溅、溢渣现象明显减少,灰渣量指标呈总体下降趋势。喷溅、溢渣现象的减少和炉内渣带走铁量的降低,导致钢铁料消耗显著减少。过程控制的稳定性为静态模型的应用与优化提供了良好基础,炉前碳温命中率得到相应改善,过氧化率显著降低。

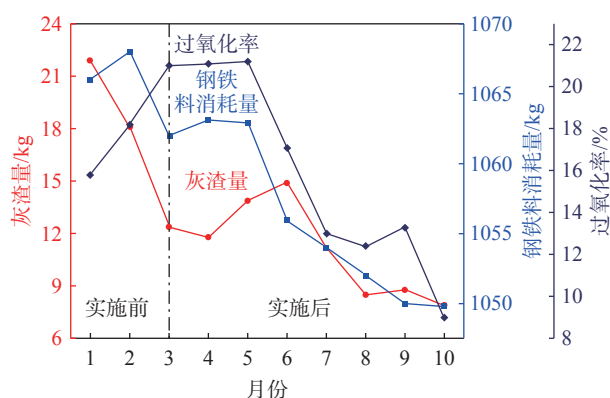


图 13 2024 年半留渣工艺实施前后灰渣量、过氧化率及钢铁料消耗量变化趋势

渣料消耗

图 14 为 2024 年 1—10 月的半留渣工艺实施前后每吨钢渣料消耗的变化趋势,可见通过针对性优化炉渣成分控制措施,转炉渣料消耗明显下降。

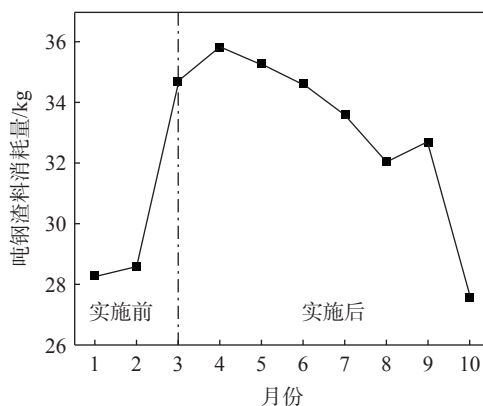


图 14 2024 年半留渣工艺实施前后渣料消耗量控制趋势

对熔池热量的影响

渣量下降后,通过数据收集可知,转炉溅渣完成后炉渣的温度约为 1000℃,比热容为 1.25 kJ/(kg·℃)。相较于全留渣工艺,半留渣工艺条件下炉内留渣量约减少 7 t,可根据比热容公式计算其热量,见式(4)。

$$Q = cm\Delta t \quad (4)$$

式中: Q 为吸收或放出的热量; c 为比热容; m 为炉渣质量; Δt 为吸热或放热后的温度变化量,本文中取值为 640℃。

1 kg 废钢熔化需要吸收 1400 kJ 热量,而 1 kg 返矿熔化需要吸收 3943 kJ 热量,因此通过半留

渣工艺节约的热量, 可供每炉废钢及返矿加入量有所提高。

耐火度

通过数据平台实时监控 2024 年 1—12 月 1#和 2#转炉渣样的耐火度, 并根据渣中 FeO 、 Al_2O_3 及 TiO_2 等成分变化动态调整, 最终将炉渣耐火度从约 1900°C 降至约 1750°C , 如图 15 所示。此调整措施的主要目的是使溅渣过程更加平稳均匀, 炉容比更加稳定, 1#转炉的炉容比如图 16 所示。

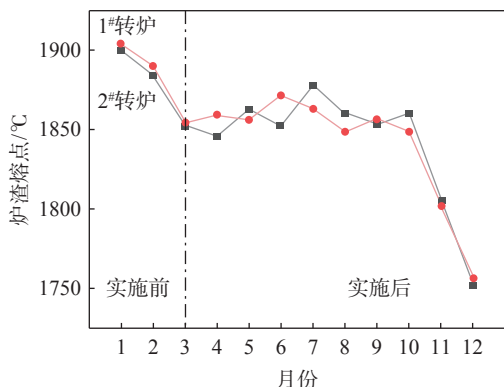


图 15 2024 年 1—12 月半留渣工艺实施前后炉渣熔点控制趋势

炉龄控制情况

通过优化炉渣成分和改进溅渣方式, 实施半留渣工艺后, 转炉炉衬侵蚀速度未明显加快; 与全留渣工艺相比, 熔池侵蚀情况有所改善。图 17 为炉龄 14000 炉时半留渣与全留渣工艺下的炉衬厚度变化情况。

不同转炉留渣工艺的应用与效果分析

某钢厂 120 t 转炉采用半留渣工艺后, 钢液磷含

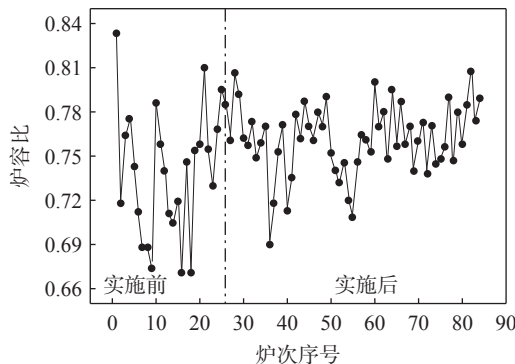
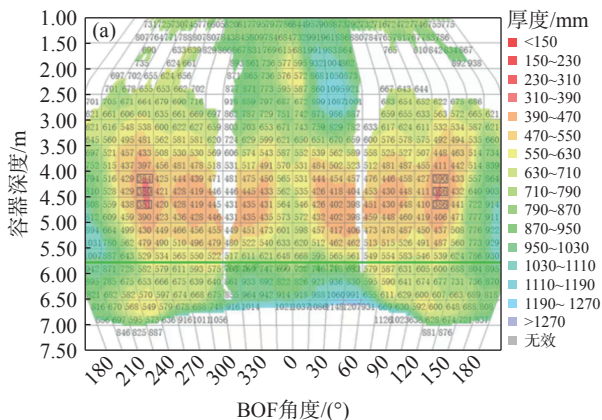


图 16 半留渣工艺实施前后炉容比控制趋势

量出现一定波动, 这与齐志宇等^[18]在 260 t 转炉冶炼低磷无间隙原子钢时的研究结论存在差异, 后者通过留渣双渣工艺精准控制留渣量, 成功将终点磷质量分数控制在 0.012% 以下, 氧的质量分数同步降低 0.0112%。这可能是因为齐志宇等^[18]的研究聚焦于低磷钢种的多目标成分协同控制, 而本工艺主要针对常规钢种, 更侧重于通过渣量优化实现热力学条件稳定。

在原料消耗方面, 采用半留渣工艺可使每吨钢的钢铁料消耗量从 1068 kg 降至 1050 kg, 渣料消耗量从 40 kg 优化至 27.6 kg。渣量减少后, 废钢和返矿的加入量分别提升 4 和 1.4 t, 同时炉渣耐火度从 1904°C 降至 1750°C , 并稳定了炉容比。兰天等^[19]关于 350 t 转炉的工业实验表明, 吨钢钢铁料消耗量降低 5.4 kg, 石灰轻烧单耗量减少 4.45 kg; 崔弘等^[20]在 150 t 转炉实验中发现, 合理的留渣量 (4~5 t) 可使白灰单耗量从 47.59 kg 降至 40.13 kg。这些结论均与本研究结果高度契合。

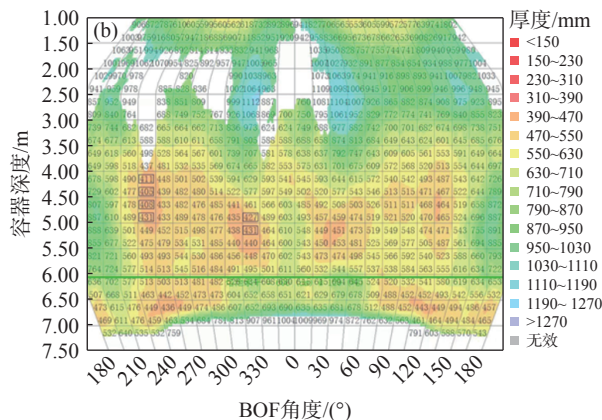


图 17 炉龄 14000 炉时炉衬效果: (a) 全留渣工艺; (b) 半留渣工艺

半留渣工艺并未对炉龄产生负面影响,反而呈现改善的趋势,这与郑果等^[21]在45 t转炉实验中的研究结果一致,表明留渣操作通过提高初期渣碱度、减少炉衬侵蚀,最终可使炉龄突破24978炉,从而达到历史最高水平。

尽管不同研究因工艺类型、炉容参数及冶金目标差异可能导致应用效果存在波动,但大量实践表明,合理的留渣量可显著降低原料消耗并优化热量利用效率。因此,半留渣工艺通过确定合理的留渣量、优化炉渣动力学条件等方法,在推动炼钢工艺绿色化、高效化发展中展现出广阔的应用前景。

结束语

(1) 半留渣工艺在120 t转炉应用中展现出显著优势,在保持与全留渣工艺相当的脱磷率(0.65%~0.90%)和炉况稳定性的前提下,显著降低了冶炼难度。相较于全留渣工艺,其钢铁料消耗量从1068 kg降至1050 kg,渣料消耗量从40 kg优化至27.6 kg,成功构建了低成本、高效率的冶炼模式。

(2) 应用半留渣工艺释放的热量相当于熔化4 t废钢或1.4 t返矿,为进一步降低铁耗提供了热力学支撑。同时,通过动态调控炉渣熔点(从1904℃降至1750℃)与黏度(从0.042 Pa·s降至0.035 Pa·s),实现了溅渣层厚度的控制,使炉容比波动范围从0.60~0.82收窄至稳定区间。

(3) 未来的改进方向应主要集中于进一步优化各项改进措施的细化场景,并实现细化场景的量化,例如构建渣量、枪位调控与底吹强度的多参数动态耦合模型,实现冶炼过程的精准协同控制,借助数据平台推动操作标准化。

参考文献

- [1] 富强,郭晓春,王志强,等.120 t转炉少渣冶炼工艺研究和实践.炼钢,2017,33(6): 5
- [2] 潘秀兰,王艳红,梁慧智,等.转炉双联法炼钢工艺的新进展.鞍钢技术,2007(5): 5
- [3] Shin'ichi W, Satoshi K, Kazutoshi K, et al. Dephosphorization at hot metal pretreatment in a BOF vessel. CAMP-ISIJ, 1996, 9(4): 864
- [4] 刘佩勤. NKK福山厂少渣炼钢新工艺的开发.太钢译文,2001(1): 13
- [5] 高泽平.炼钢工艺学.北京:冶金工业出版社,2006
- [6] 杨利彬,刘浏,庄辉,等.转炉少渣冶炼的试验研究及工艺控制.炼钢,2013,29(3): 28
- [7] 朱英雄.转炉溅渣护炉技术(一).炼钢,2003,19(1): 50
- [8] 张小伟,虎晓东,王攀峰,等.新造渣模式下转炉炼钢成渣路线的研究.现代冶金,2018,46(5): 32
- [9] 杨利彬.大型转炉脱磷规律与工艺优化研究[学位论文].北京:钢铁研究总院,2015
- [10] 孟华栋,刘浏.转炉炼钢成渣过程的岩相研究.钢铁,2010,45(6): 26
- [11] 魏寿昆.冶金过程热力学.上海:上海科学技术出版社,1980
- [12] 杨文远,蒋晓放,王明林,等.大中型转炉高效吹氧技术研究.钢铁,2009,44(1): 27
- [13] 宋佳强,尹纪峰.转炉渣熔化温度的实验研究.山东冶金,2015,37(5): 35
- [14] 陈家祥.钢铁冶金学(炼钢部分).北京:冶金工业出版社,2006
- [15] 朱苗勇.现代冶金工艺学(钢铁冶金卷).北京:冶金工业出版社,2011
- [16] 李远洲.氧气转炉炼钢过程的解析与控制.北京:冶金工业出版社,2018
- [17] 陶子玉,李静,姜茂发.30 t转炉的溅渣护炉工艺.钢铁研究学报,2005,17(3): 72
- [18] 齐志宇,田勇,王鹏,等.260 t转炉留渣双渣法冶炼低磷IF钢的半钢控制实践.鞍钢技术,2016(5): 45
- [19] 兰天,潘永飞,靳随城,等.350 t转炉留渣法冶炼技术研究及实践//第十一届中国钢铁年会论文集.北京,2017: 101
- [20] 崔弘,刁瑞荣.150 t转炉双渣及留渣工艺实践.包钢科技,2014,40(4): 14
- [21] 郑果,田新喜,武炜.45 t转炉留渣操作工艺实践.山西冶金,2015,38(3): 87

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52104317)。

作者简介: 潘佳(1991—),男,湖南省湘潭人,2014年毕业于湖南工业大学冶金工程专业。主要研究方向: 转炉炼钢。通信地址: 广东省阳江市阳春市马水镇新钢铁生活区; E-mail: 1710801141@qq.com。