

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180274

钢包底喷粉精炼新工艺技术的开发及应用

娄文涛, 朱苗勇, 程中福
(东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对高效洁净钢生产的实际需求与发展要求, 研发了钢包底喷粉精炼新工艺(L-BPI), 对涉及此新工艺的重大理论问题与关键技术开展了深入研究, 揭示了钢包底喷粉的钢水渗漏和粉剂堵塞机理, 提出了底喷粉元件的设计理论, 研制出抗磨损和耐高温侵蚀的喷粉元件, 阐明了钢包底喷粉新工艺多相流传输行为及精炼反应动力学行为, 突破了超细狭缝元件中粉剂输送的关键工艺技术, 开发了钢包底喷粉新型喷吹装置及自动化控制系统, 并成功实施了工业应用试验。结果表明, L-BPI 新工艺体现了炉外精炼的高效率和低成本, 对新一代洁净钢生产流程的发展具有重要意义。

关键词: 洁净钢; 钢包底喷粉; 精炼新工艺

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)11-0029-07

Development and application of a new refining process for ladle bottom powder injection

LOU Wen-tao, ZHU Miao-yong, CHENG Zhong-fu
(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: Regarding the requirement and development for producing clean steel with high efficiency, a new refining process of ladle bottom powder injection (L-BPI) was developed, and some important theory and key technologies related to this new process were investigated. The mechanisms both for the leakage of molten steel and powder clogging during bottom powder injection in the ladle were revealed, and the theory of designing the device for bottom powder injection was put forward, as well as the powder injection device that is wear proof and high temperature erosion resisting was invented and made. The inherent mechanism of multiphase flow transport and refining kinetics of the L-BPI was revealed. The key process technology of powder transport in ultra-slit refractory has been a breakthrough, and the new equipment with automatic control system for the L-BPI was developed. A successful application test of L-BPI in one steelmaking plant has been made, which shows high efficiency and low cost for secondary refining and the prospective for the development of new generation of clean steel production.

Key words: clean steel; ladle bottom powder injection; new refining process

钢中杂质元素、夹杂物等对钢的性能影响极大, 1962 年, Kiessling R^[1] 首先提出了洁净钢(clean steel)一词。20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 洁净钢才从一个科研名词转向量化生产, 欧、美、日的一些著名钢铁厂建立了洁净钢生产平台, 此后洁净钢的生产拓展到深冲薄板、IC 引线框、轮胎子午线、滚珠轴承钢、钢轨、热作模具等从超低碳钢到高碳钢的广泛领域^[2-6]。

铁水预处理对于优化钢铁冶金工艺、提高钢的质量、发展优质钢种、提高钢铁冶金的综合效益起着重要作用^[7-11], 但目前广泛用于生产的机械搅拌法和喷吹法均存在一定的局限性, 主要表现为: 转炉

炼钢时的回硫现象削弱了铁水预脱硫的实际效果; 搅拌器或喷枪会污染铁水; 铁损较大; 温降大, 操作环境较差。

对于超低硫钢生产, 在铁水预处理和转炉冶炼的基础上, 还需要进行钢水二次深脱硫^[12-15], 方法主要有 LF 搅拌脱硫、RH 喷粉脱硫、钢包喷粉脱硫。LF 脱硫因主要依赖渣-金界面反应, 处理时间过长; 通过浸入式喷枪, 即通常所称的顶枪, 向钢水喷吹合金粉或精炼粉剂, 如 SL、TN、KIP 工艺, 反应速率快、处理周期短, 但存在喷溅、钢液二次污染严重、操作稳定性和灵活性较差等问题; 对于非接触式喷粉如 RH-PTB 即 RH 顶喷粉法, 可实现真空喷粉脱

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51604071); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805105)

作者简介: 娄文涛(1984—), 男, 博士, 讲师;

E-mail: louwt@smm.neu.edu.cn;

收稿日期: 2018-07-03

硫,但存在喷枪制作成本高、操作难度大、效果不稳定,以及真空室因粉气流冲击而使用寿命缩减等问题。

总体上看,目前洁净钢生产存在的主要问题是流程长、消耗大、效率低、成本高。洁净钢生产平台建设作为一项具有普适性、基础性,事关企业效率、质量、成本的共性关键技术^[3],对提高企业市场竞争力具有重要意义。因此,开发高效、低成本的精炼新工艺技术显得十分重要而迫切。

通过安装在钢包底部的透气砖吹氩已是最为普遍而简捷的炉外精炼手段,如果能开发出通过安装在钢包底部透气砖位置的元件喷吹精炼粉剂或合金化的合金粉的精炼新工艺,即新一代钢包喷射冶金工艺技术 L-BPI (ladle-bottom powder injection),可以克服传统工艺的缺陷,全面提高洁净钢生产的效率,降低生产成本,实现节能减排^[16]。

但此新工艺技术要实现应用,需解决钢水渗漏(安全性)、粉剂堵塞(稳定性)、喷吹元件使用寿命(可靠性)、底喷气-粉-钢液多相流行为与脱硫动力学(效率与效果)等关键技术问题。为此,东北大学先进冶炼-连铸工艺与装备研究所(ASC)进行了多年深入研究,获得了重大进展:提出了底喷粉元件的设计理论,研制出抗磨损和耐高温侵蚀的喷粉元件,突破了超细狭缝元件中粉剂输送的关键工艺技术,研制了具有自动控制系统的钢包底喷粉装置,并在 45 t 钢包成功实施工业试验和应用,为此新工艺技术的大规模工业化推广应用奠定了重要的技术基础。

1 关键技术研究

新一代钢包喷射冶金工艺技术如图 1 所示。L-BPI 工艺首先要解决钢水渗透和粉剂堵塞的问题。使用狭缝以克服钢水的渗透是一种较佳途径,狭缝型供气元件的防渗透能力、气体可控能力强的特点已得到实际验证。狭缝型喷粉元件作为底喷粉新工艺重要功能元件,在二次精炼底喷粉领域属于一种新的尝试。因此,研究设计既能防钢水渗漏又能防粉剂堵塞的底喷粉元件结构进行底喷粉以实现钢水脱硫、乃至脱氧合金化处理是首先要解决的关键问题,是 L-BPI 工艺成功的关键;其次,粉气流对喷粉元件的狭缝会产生摩擦和磨损,喷粉元件工艺的稳定性及其使用寿命以适应钢包精炼炉次的要求是需解决的第二个关键问题;涉及钢包底喷粉精炼效率与效果的传输现象及反应工程学理论探索

与描述是需要解决的又一个关键问题。针对此新工艺所涉及的重大理论与关键技术问题开展深入研究,以奠定此新精炼工艺技术工业化基础。为此,需要解决 L-BPI 工艺开发所面临的关键技术难点。

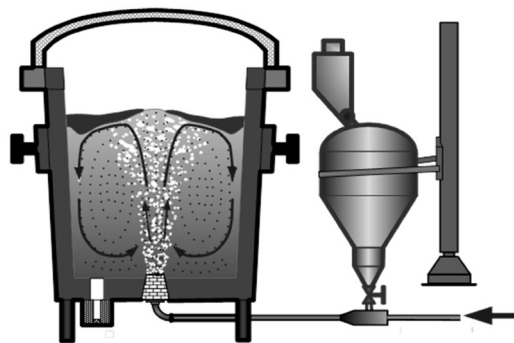


图1 新一代钢包喷射冶金工艺(L-BPI)示意图

Fig. 1 A new generation of ladle-bottom powder injection technology (L-BPI)

1.1 底喷粉元件防钢液渗漏及其设计理论

基于界面张力理论,分析了决定缝隙内钢液渗漏的极限力,如图 2 所示。结合钢包精炼的实际工作环境和条件,利用物理学和力学理论,建立了底喷粉元件的重要参数如缝隙安全宽度、安全长度与钢液物理性能(密度、表面张力、润湿角及钢包熔池的深度、压力等工作条件)之间的关系,提出了计算缝隙安全宽度的理论模型^[17],即

$$\delta = -\frac{2\sigma(k \cos \theta - d)}{P_0 + \rho g H - P} \cdot \left(1 + \frac{\delta}{W}\right) \quad (1)$$

式中: δ 为缝隙安全宽度; σ 为钢液表面张力; θ 为钢液与耐火材料前进接触角(大于 90°); P_0 为大气环境压力; ρ 为钢液密度; H 为钢包内钢液熔池深度; P 为缝隙内残余压力; W 为缝隙安全长度。

该模型综合考虑影响钢水向缝隙内渗透的影响因素,并引入了修正系数 k 和 d 来考虑底喷粉元件表面粗糙度及宏观形貌的影响。

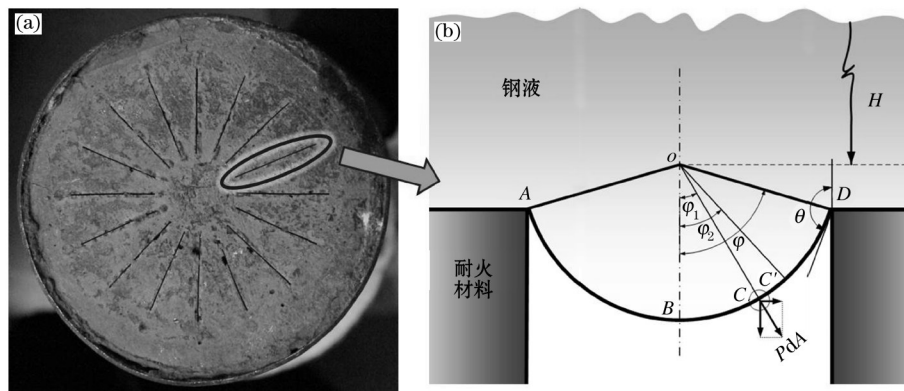
基于底喷粉元件缝隙内渗透钢液的动量守恒及能量得失,建立了动态描述钢液向透气砖缝隙内渗透过程的数学模型,揭示了钢液渗漏速度和渗漏深度随时间变化规律。

底喷粉元件中钢液渗透的检测是一项技术难点^[17]。本研究提出一种通过测量电信号来反映缝隙内钢液渗透情况的方法,简单可行,安全可靠。试验装置主要由金属熔池、缝隙式底喷粉元件、定厚度薄片电极及测量电路组成。钢液未渗入缝隙,定厚度薄片电极间电阻很大,电路近似处于断路状态,当钢液渗入缝隙,电极间电阻减小,采集到电极

间电压信号,随钢液渗入深度的增加,电极间电阻发生连续变化,采集电极间电压信号的连续变化,来实现对钢液渗漏深度的定量测量。

试验金属熔池深度与缝隙安全长度之间的关系如图3所示,可以发现,理论计算与实测值比较一致。试验中金属液渗透缝隙过程如图4所示,试验

表明钢液向透气砖缝隙渗透过程主要分为3个阶段,即不稳定渗透阶段、主渗透阶段和终点渗透阶段。不稳定渗透阶段主要是由于耐火材料成分不均匀、透气砖表面粗糙不一致、缝隙安全宽度不严格造成的,严格控制耐火材料成分、透气砖表面状况、缝隙尺寸,可以有效防止钢液渗透的发生。



(a) 狭缝型底喷粉元件; (b) 缝隙内液膜处受力。

图2 底喷粉元件缝隙液膜受力分析

Fig. 2 Schematic illustration of stress of liquid film considering interface contact

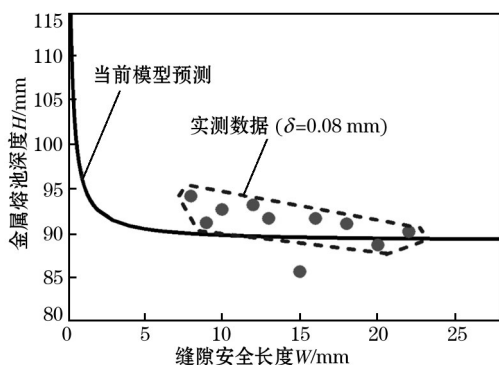


图3 试验金属熔池深度与缝隙安全长度之间的关系

Fig. 3 Relationship between slot length and molten metal bath depth

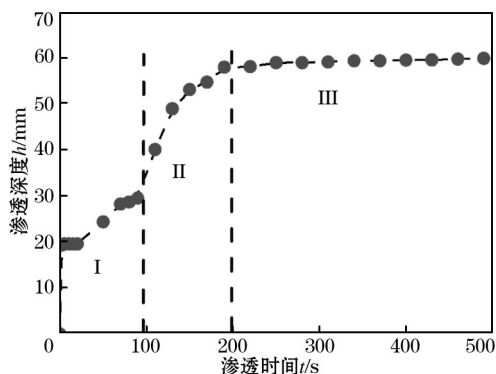


图4 试验过程缝隙内金属液渗透进程

Fig. 4 Penetration behavior of molten metal into plug slot measured in experiments

1.2 底喷粉元件及喷吹装置研制

钢包底喷粉用喷粉元件主要材质为透气砖,其工作环境恶劣,是钢包使用条件最苛刻的部位,为实现底喷粉新工艺,透气砖必须具备较好的高温耐压强度、耐侵蚀性、抗热震性、高温体积稳定性、操作稳定、透气性好、外形尺寸准确、钢水渗透少,安全性好、吹成率高、使用寿命长等特点。由于钢包底喷粉元件长期经受粉气流的磨损,还要求其具有强的抵抗粉气流磨蚀的能力。在2 t感应炉热态试验的基础上,研发了用于45 t钢包工业级试验的底喷粉元件,如图5所示,其中狭缝缝隙宽度0.18 mm,缝隙条数为30条,透气砖高为500 mm。图6所示为研制的用于工业级钢包底喷粉的装置及自动控制系统,该装置由喷粉罐体、气流平衡系统、流化补偿系统、密封系统、粉剂定量系统、PLC控制监测系统等组成。罐体容积为350 L,工作压力为0.2~0.8 MPa,喷粉速率为0~18 L/min。新装置具备手动、自动控制、粉剂定量连续调节、粉气流快速切换、安全保护等多种功能,实现了超细狭缝元件中精确调节、连续稳定、安全可靠的输送粉剂。粉剂流量调节准确率达90%以上,并具备底吹氩和喷粉双重精炼功能。

1.3 钢包底喷粉精炼动力学

钢包底喷粉过程中气-液-粉多相流传输及精炼反应行为如图7所示^[18],其中主要包含气泡扩散上

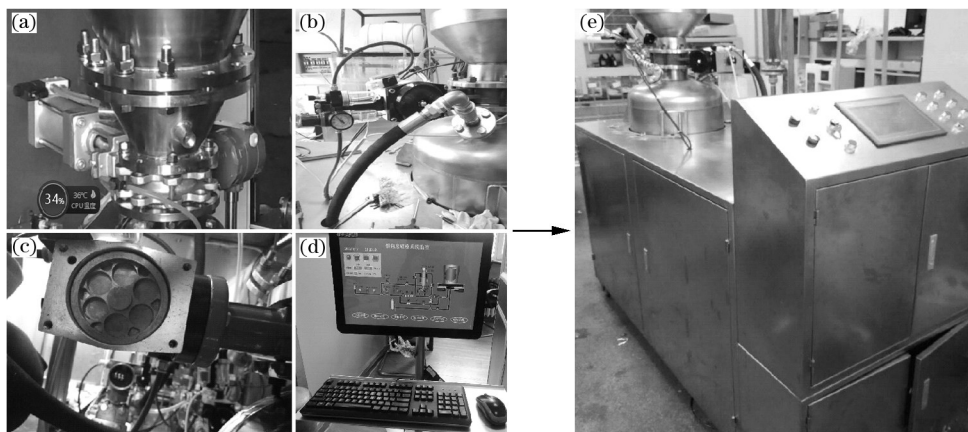
浮、气泡搅拌引起的钢液湍流流场、粉剂间的碰撞聚合、粉剂与气泡间碰撞吸附、粉剂进入渣层去除以及顶渣-钢液、粉剂-钢液及气泡-钢液界面精炼反应等单元现象。本文提出了顶渣-钢液、空气-钢液、粉剂-钢液、气泡-钢液多界面多组分同时反应模型理论,基于欧拉方法,建立了钢包底喷粉过程中多相流传输及精炼反应动力学数学模型,对气泡行为、钢液湍流流场、粉粒传输和去除行为、组分元素的变化及分布进行数值仿真。

钢包底喷粉过程中,钢液中硫平均质量浓度及各个脱硫机制下的脱硫率随喷粉时间的变化典型曲线如图 8 所示。图 8(a)所示为模拟预测的 2 t 感应炉中钢水硫质量浓度随时间的变化以及与实测数据的对比。由图可见,在不同试验条件下,预测结果与实测结果吻合基本良好,该模型可以较好地预测钢包中的脱硫行为。图 8(b)所示为模拟预测的 80 t 钢包底喷粉过程各个脱硫机制下的脱硫率随喷粉时间的变化曲线,由图 8(b)可见,底喷粉



图 5 45 t 钢包底喷粉元件

Fig. 5 Powder injection element for 45 t industrial-scale ladle



(a) 流化系统; (b) 平衡系统; (c) 粉剂定量系统; (d) 操作系统; (e) 整体装置。

图 6 工业级的钢包底喷粉装置

Fig. 6 Bottom powder injection equipment of industrial-grade

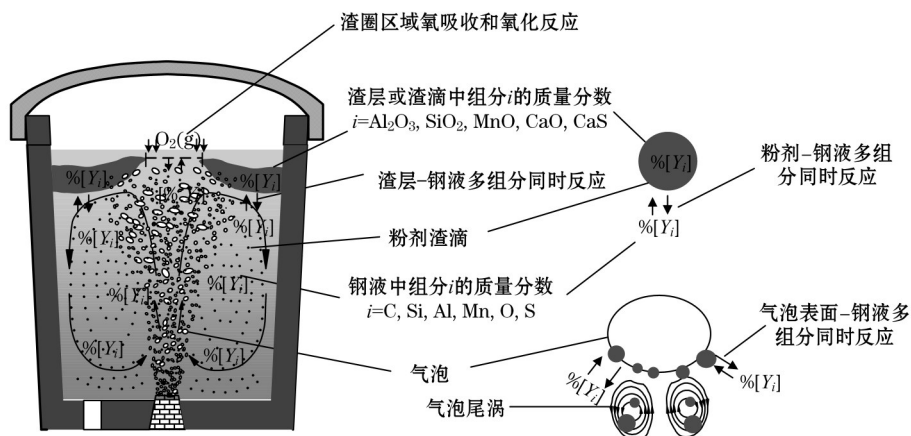
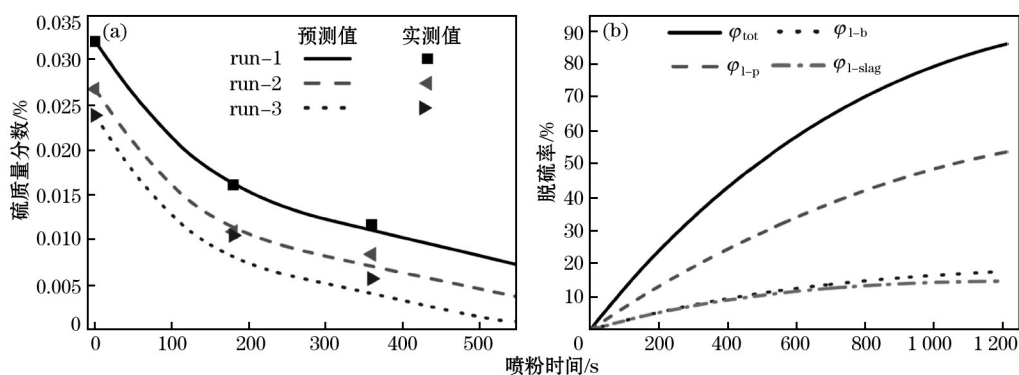


图 7 钢包底喷粉气-液-粉多相流传输和精炼反应行为示意图

Fig. 7 Schematic diagram of multiphase flow transport behavior and reaction kinetics in ladle with bottom powder injection



(a) 预测的 2 t 感应炉中钢液中硫平均质量浓度随时间的变化; (b) 预测的 80 t 钢包中各脱硫机制下的脱硫率随时间的变化。

图 8 预测的 2 t 感应炉中钢液中硫平均质量浓度及 80 t 钢包中各脱硫机制下的脱硫率随时间的变化

Fig. 8 Predicted and measured removal rate of sulfur in 2 t hot experiment predicted desulfurization ratio due to various desulfurization mechanisms with time in 80 t ladle

20 min 后的钢液总脱硫率为 85.77%, 其中对于钢液-粉滴、钢液-顶渣以及钢液-气泡 3 个脱硫反应机制而言, 钢液中弥散粉滴与钢液间的脱硫反应贡献最大, 即 φ_{l-p} 为 53.36%, 其次是气泡表面-钢液间的反应, 即 φ_{l-b} 为 17.66%, 而顶渣-钢液界面反应贡献最小, φ_{l-slag} 为 14.75%。

1.4 钢包底喷粉精炼新工艺工业试验

采用本研究研发的喷粉元件和自动化喷粉装置在 45 t 钢包的底喷粉工业试验过程如图 9 所示, 主要包含: 红包出钢→测温取样→钢包底喷粉→测

温取样→连铸等工序。在 45 t 钢包中成功进行了 8 炉次底喷粉热态试验, 其中喷粉时所用的载气流量为 400~600 L/min (标准态), 脱硫粉剂平均粒度为 23 μm , 喷粉速率为 2.0~3.0 kg/min, 喷粉时间为 8~12 min, 喷粉过程平均温降为 27 $^{\circ}\text{C}$, 温降速率约为 2.7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。底喷粉与原单独底吹搅拌时相比钢液温降速率变化不大, 可见, 喷吹粉剂造成的物理吸热和反应吸收相比钢包炉衬和渣层散热对钢液温度影响较小。钢包底喷粉过程中的钢液界面情况如图 10 所示, 喷粉试验前后钢液成分变化的部分



(a) 红包出钢; (b) 测温取样; (c) 钢包底喷粉; (d) 送至连铸区。

图 9 45 t 钢包底喷粉工业试验过程

Fig. 9 Industrial testing process of L-BPI in 45 t ladle



图 10 底喷粉过程中的钢液界面情况

Fig. 10 Surface conditions during powder injection

取样测量结果见表 1。由此可见,经过底喷粉脱硫后,钢液中硫质量分数可由 0.031% 左右降至 0.007%,且随着喷粉量和喷粉时间的增加,脱硫效果增强。

2 展望

L-BPI 工艺属于一项原创新性技术,其成功开

发及应用,不仅给钢铁行业提供一项新的精炼技术,改变长期依赖引进、跟踪、模仿的局面,而且对钢铁生产流程的变革和节能减排深远影响。此工艺实现应用将克服传统铁水预处理存在铁损大、转炉回硫、搅拌器或喷枪污染,以及传统的 LF 钢包炉脱硫工艺存在处理时间长、消耗大等问题,不仅可以实现不用铁水预脱硫而实现低硫钢和超低硫钢的生产,而且也取消 LF 炉长时间深脱硫处理开辟了一条新途径,从而生产效率得以大幅度提升。L-BPI 工艺技术将依据不同冶炼钢种及冶炼工艺要求,制定实施不同长流程或短流程的工艺制度,合理配置钢包底喷粉新工艺和钢铁企业现有的脱硫工艺的调节制度,确保生产钢种的资源效率最优化。如通过 RH 结合形成 RH-BPI 工艺(图 11),可使底喷粉工艺更加高效化和多功能化(去除杂质元素和夹杂物、脱氧合金化、调整成分、均匀温度和成分等)^[19-21],将对高端产品的高效化、低成本生产产生极其重要的影响。

表 1 喷粉试验前后钢液成分(质量分数)

Table 1 Composition of molten steel in ladle before and after bottom powder injection						%
喷粉速率	喷粉时间	[C]	[Si]	[Mn]	[P]	[S]
2.1 kg/min	初始	0.224	0.552	1.268	0.025	0.027
	10 min	0.213	0.490	1.300	0.026	0.008
2.4 kg/min	初始	0.273	0.509	1.429	0.022	0.029
	10 min	0.269	0.478	1.478	0.023	0.009
2.7 kg/min	初始	0.252	0.448	1.524	0.020	0.031
	12 min	0.247	0.401	1.513	0.022	0.007

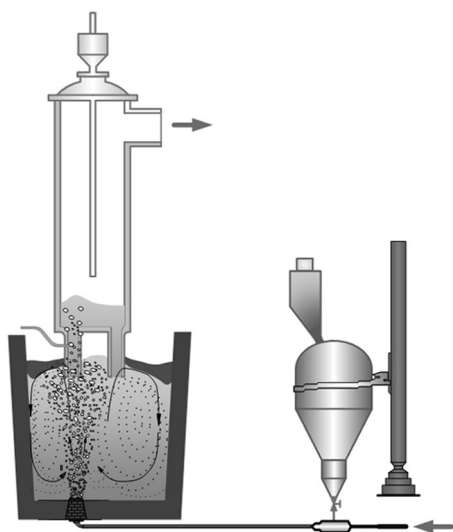


图 11 RH-BPI 工艺示意图

Fig. 11 Schematic diagram of RH-BPI process

3 结论

(1) 基于高效、低成本洁净钢的生产需求和当前炉外处理工艺存在的问题,开展了钢包底喷粉钢水精炼新工艺研究。提出了底喷粉元件的设计理论,研制出了具有防钢液渗漏、防粉剂堵塞、抗粉气流磨损和耐高温侵蚀的钢包底喷粉元件,解决了钢包底喷粉元件实际应用的安全性、稳定性和可靠性等关键技术难题,为钢包底喷粉精炼新工艺应用提供前提保证。

(2) 突破了超细狭缝元件中粉剂输送的关键工艺技术,开发出适用于钢包底喷粉的新型喷粉装置和自动化控制系统。实现了在超细狭缝元件中精确调节、连续稳定、安全可靠的输送粉剂,粉剂流量调节准确率达 90% 以上,并具备底吹氩和喷粉双重

精炼功能。

(3) 揭示了钢包底喷粉新工艺多相流传输行为及精炼动力学反应的内在机制,并用热态试验进行了验证,阐明了各传输和反应机制的作用和贡献,为其工业化提供理论支撑。

(4) 成功实施了 45 t 钢包的工业应用试验,经过底喷粉脱硫后,钢液中硫质量分数可由 0.031% 左右降至 0.007%,体现了 L-BPI 新工艺体的高效率和低成本,对新一代洁净钢生产流程的发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] Kiessling R. Clean Steel[R]. London: The Iron and Steel Institute, 1962.
- [2] 徐匡迪. 关于洁净钢的若干基本问题[J]. 金属学报, 2009, 45(3): 257. (XU Kuang-di. Certain basic subjects on clean steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(3): 257.)
- [3] 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. (YIN Rui-yu. Discussion on high efficient and low Cost clean steel production platform: One of the key technologies for steel industry in 21st century[J]. Steelmaking, 2011, 27(1): 1.)
- [4] 刘浏. 洁净钢生产技术的发展与创新[J]. 中国冶金, 2016, 26(10): 18. (LIU Liu. Development and innovation of clean steel production technology[J]. China Metallurgy, 2016, 26(10): 18.)
- [5] 勾新勇. 低磷低钛低硫钢冶炼工艺技术创新集成和应用[J]. 中国冶金, 2018, 28(3): 46. (GOU Xin-yong. Innovative integration and application of low-phosphor low-titanium low-sulfur steel smelting process technology[J]. China Metallurgy, 2018, 28(3): 46.)
- [6] 马强, 李勤, 黄财德, 等. 加快钢包周转六西格玛方法实践[J]. 中国冶金, 2017, 27(7): 39. (MA Qiang, LI Qin, HUANG Cai-de, et al. Practice of accelerating ladle turnaround based on six sigma method[J]. China Metallurgy, 2017, 27(7): 39.)
- [7] 赵长亮, 田志红, 陈虎, 等. 首钢京唐 KR 高效脱硫技术[J]. 中国冶金, 2015, 25(4): 60. (ZHAO Chang-liang, TIAN Zhi-hong, CHEN Hu, et al. KR high efficient desulphurization technology in Shougang Jingtang[J]. China Metallurgy, 2015, 25(4): 60.)
- [8] 孙亮, 朱良, 赵晓东. 3 种铁水脱硫工艺的应用实践[J]. 中国冶金, 2018, 28(3): 50. (SUN Liang, ZHU Liang, ZHAO Xiao-dong. Application practice of three kinds of hot metal desulphurization process[J]. China Metallurgy, 2018, 28(3): 50.)
- [9] 刘延强, 罗磊, 张鹏, 等. 首钢京唐热态渣、钢绿色循环利用体系开发[J]. 中国冶金, 2018, 28(6): 25. (LIU Yan-qiang, LUO Lei, ZHANG Peng, et al. Development of green recycling system of hot slag and molten steel at Shougang Jingtang[J]. China Metallurgy, 2018, 28(6): 25.)
- [10] 刘宝喜, 高彩茹, 郑文超, 等. 高韧性桥梁钢 Q420qD 的开发[J]. 中国冶金, 2018, 28(2): 67. (LIU Bao-xi, GAO Cai-ru, ZHENG Wen-chao, et al. Development of Q420qD bridge steel with high toughness[J]. China Metallurgy, 2018, 28(2): 67.)
- [11] 李显鹏, 高金涛, 张延玲, 等. CaO-FeO-SiO₂-Al₂O₃-Na₂O/TiO₂ 渣系与碳饱和铁水间磷分配行为[J]. 钢铁, 2017, 52(2): 18. (LI Xian-peng, GAO Jin-tao, ZHANG Yan-ling, et al. Distribution behavior of phosphorus between CaO-FeO-TiO₂-Al₂O₃/Na₂O/TiO₂ slags and carbon-saturated iron[J]. Iron and Steel, 2017, 52(2): 18.)
- [12] 张强, 袁宏伟, 杨森祥, 等. 攀钢低硫管线钢硫含量控制生产实践[J]. 钢铁, 2013, 48(11): 32. (ZHANG Qiang, YUAN Hong-wei, YANG Sen-xiang, et al. Practice of sulfur content control during the smelting of low sulfur pipeline steel in Pan-zhihua steel[J]. Iron and Steel, 2013, 48(11): 32.)
- [13] 陈鹏举, 朱诚意, 张志成, 等. GCr15 轴承钢 LF 精炼过程脱硫能力的热力学评价[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(5): 30. (CHEN Peng-ju, ZHU Cheng-yi, ZHANG Zhi-cheng, et al. Thermodynamic evaluation of desulfurization ability of GCr15 bearing steels during LF refining process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(5): 30.)
- [14] 杨荣光, 王志刚. 超低硫钢精炼工艺生产实践[J]. 中国冶金, 2013, 23(5): 34. (YANG Rong-guang, WANG Zhi-gang. Practice of secondary refining for ultra-low sulphur steel[J]. China Metallurgy, 2013, 23(5): 34.)
- [15] 杨宏博, 李京社, 高增福, 等. RH 喷粉脱硫工业试验研究[J]. 炼钢, 2014, 30(1): 55. (YANG Hong-bo, LI Jing-she, GAO Zeng-fu, et al. Study on process of RH desulfurization by powder injection[J]. Steelmaking, 2014, 30(1): 55.)
- [16] 朱苗勇, 周建安, 潘时松, 等. 狭缝式钢包底吹喷粉工艺及装置: 中国, 2005100479801[P]. 2006-06-21. (ZHU Miao-yong, ZHOU Jian-an, PAN Shi-song, et al. Technology and Device for Bottom Powder Injection Through Slot Brick in Ladle: Chinese Patent, CN2005100479801[P]. 2006-06-21.)
- [17] CHENG Z F, ZHU M Y. Theoretical analysis and experiment of liquid metal penetration into slot plug applied for refining ladles[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, 45(5): 1695.
- [18] LOU W T, ZHU M Y. A Mathematical model for the multi-phase transport and reaction kinetics in a ladle with bottom powder injection[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(6): 3196.
- [19] 朱苗勇, 程中福, 娄文涛, 等. 一种 RH 真空精炼底吹喷粉装置: 中国, 2012100127821[P]. 2012-07-11. (ZHU Miao-yong, CHENG Zhong-fu, LOU Wen-tao, et al. A Device for RH Vacuum Refining with Bottom Powder Injection: Chinese Patent, CN2012100127821[P]. 2012-07-11.)
- [20] 朱苗勇, 程中福, 娄文涛, 等. 一种底喷粉单嘴真空脱气精炼钢液的装置及方法: 中国, 2015100221808[P]. 2015-04-29. (ZHU Miao-yong, CHENG Zhong-fu, LOU Wen-tao, et al. A Device and Method for Single-mouth Vacuuming Degassing Refining of Molten Steel With Bottom Powder Injection: Chinese Patent, CN2015100221808 [P]. 2015-04-29.)
- [21] 朱苗勇, 程中福, 娄文涛. 一种底喷粉真空脱气精炼钢水的装置及方法: 中国, 2013102075258[P]. 2013-08-21. (ZHU Miao-yong, CHENG Zhong-fu, LOU Wen-tao. A Device and Method for Vacuum Degassing Refining of Molten Steel with Bottom Powder Injection: Chinese Patent, 2013102075258[P]. 2013-08-21.)