

侧吹炉内气流穿透和搅动行为实验研究

王书晓^{1,2}, 陈学刚², 温 治¹

(1. 北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 冶金炉冶炼过程伴随高温复杂多相化学反应, 直接开展试验困难且成本高, 众多学者采用水模型实验和数值模拟方法开展研究。侧吹气流穿透距离和搅动情况是侧吹炉体和喷枪设计中的关键数据指标, 影响侧吹炉宽度设计和喷枪结构设计。本文采用水力模型实验研究喷枪浸入深度、喷枪高度、熔池液面高度、喷枪孔径和气体流量等因素对侧吹气流穿透距离和熔池搅动情况的影响。结果表明: 熔池液面高度、喷枪高度和喷枪浸入深度对气流穿透距离没有影响或影响不明显; 侧吹气流穿透距离主要与气流出口速度有关, 穿透距离随气体流量增加而变长, 随喷枪孔径减小而变长; 气体流量对炉内熔池流动和搅动情况影响较大, 合理的喷枪结构及排布设计和气体流量选择, 有利于侧吹炉内形成充分的流动场和搅拌动力场。

[关键词] 侧吹炉; 气体射流; 穿透距离; 熔池搅动; 水力模型实验; 气体出口速度; 气体流量; 喷枪孔径

[中图分类号] TF03; TF806 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2021)06-0097-06
DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.06.018

0 引言

侧吹熔池熔炼技术广泛应用于钢铁冶金和有色冶金领域。侧吹熔池熔炼是通过安装在炉体侧墙上的喷嘴向炉内熔池喷入空气、氧气、还原剂或燃料, 侧吹气体射流迅速搅动熔池进而加速熔池内传热、传质和化学反应的过程。

冶金炉冶炼过程是伴随复杂化学反应的高温多相反应体系, 直接开展试验很困难且成本高昂, 众多学者采用水模型实验和数值模拟方法开展研究。冶金工业大量研究文献^[1-3]充分验证了水力模型试验研究的可靠性。魏季和等^[4]在 120 t AOD 炉水模型装置上研究了侧顶复吹过程中熔池内的混合效果, 发现侧吹主枪气量对熔池内的混合效果有决定性作

用; 刘燕庭等^[5]利用不同湍流模型开展模拟研究, 发现 Realizable $k-\varepsilon$ 模型得到的数值模拟结果与水模型试验结果最为接近; 李小龙等^[6]通过水模型实验方法模拟研究了侧吹炼铜过程中的乳化现象, 铜铈和渣的分离由重力和扩散传质引起; 成慰等^[7]利用高速摄像机和 MATLAB 图像处理法研究了气体流量、液体黏度、喷管直径等对气泡脱离频率的影响规律及侧吹气流流动特性。

总体而言, 目前侧吹气流穿透距离方面可指导侧吹炉设计的研究偏少, 而侧吹气流穿透距离和搅动情况, 是侧吹炉体和喷枪设计中的关键指标, 影响侧吹炉宽度设计和喷枪结构设计。侧吹熔池熔炼过程中, 熔池温度很高, 且很难直接观察到冶炼过程中侧吹气流穿透行为, 直接进行原型实验还存在经济成本高、实施困难、安全风险大等缺点。本文分别以某试验侧吹炉和某冶炼企业实际生产采用的侧吹炉为原型, 通过水力模型实验方法研究喷枪浸入熔池距离、喷枪高度、液面高度、喷枪孔径和气体流量等因素对侧吹气流穿透距离的影响规律, 以及不同气体流量炉内熔池搅动情况。研究结果可以为侧吹炉设计和现场生产实践提供参考。

[收稿日期] 2021-06-20 [修订日期] 2021-07-21

[录用日期] 2021-07-26 [出版日期] 2021-12-28

[作者简介] 王书晓(1990—), 男, 河北邯郸人, 博士研究生, 工程师, 从事冶金炉窑仿真模拟方面的研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划项目“复杂铅基多金属固废协同冶炼技术与大型化装备”(2019YFC1907302)。

[引用格式] 王书晓, 陈学刚, 温治. 侧吹炉内气流穿透和搅动行为实验研究[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 97-102.

1 水力模型实验

1.1 相似原理

在研究对象上直接进行试验会受到研究对象尺度、试验环境、测试手段等限制,从经济性和可行性方面考虑,常采用模型实验的方法。如何设计实验台以及如何把模型实验的结果应用到实际中去的理论依据是相似原理。为保证模型中的流动与原型中的流动保持相似,必需遵从相似原理,即需要满足几何相似、动力相似和运动相似等相似条件。

本文选用修正的弗劳德准数为相似准数,其表达式见式(2)。

$$Fr' = \frac{v_g^2 \rho_g}{gd_0 \rho_l} \tag{1}$$

式中: v_g 为气流速度, m/s; g 为重力加速度, m/s²; d_0 为氧枪直径, m; ρ_g 为气体密度, kg/m³; ρ_l 为液体密

度, kg/m³。

在建立水力模型时,根据动力学相似原理,模型中修正的弗劳德准数必须与原型相等,见式(2)。

$$\left(\frac{v_g^2}{gd_0}\right)_m \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)_m = \left(\frac{v_g^2}{gd_0}\right)_p \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)_p \tag{2}$$

式中:下标 m 表示模型参数;下标 p 表示原型参数;其他字符含义同上。

1.2 模型参数

本文以某试验炉为原型建立比例为 1:2 的圆形侧吹炉水模型,研究了单枪喷吹情况下侧吹气流穿透距离的影响因素和影响规律;以某企业实际生产侧吹炉为原型建立比例为 1:10 的矩形侧吹炉水模型,验证了水模型研究结论,并研究了多枪喷吹情况下气流穿透和熔池内搅动情况。侧吹炉原型与水模型如图 2 所示。原型与模型结构参数、物性参数和操作参数如表 1 和表 2 所示。

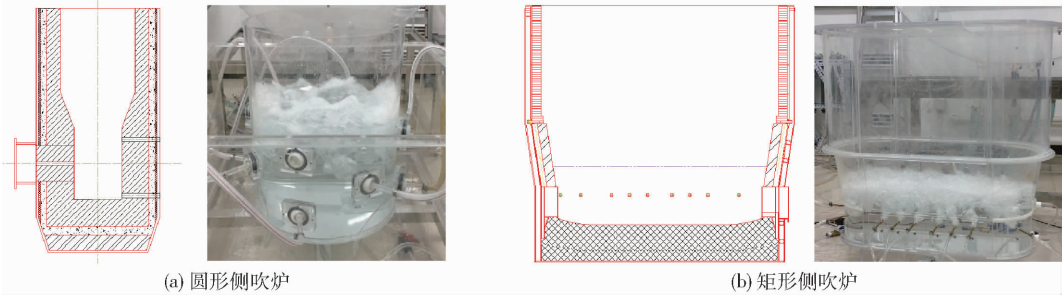


图 1 侧吹炉原型与水模型

表 1 原型与模型结构参数

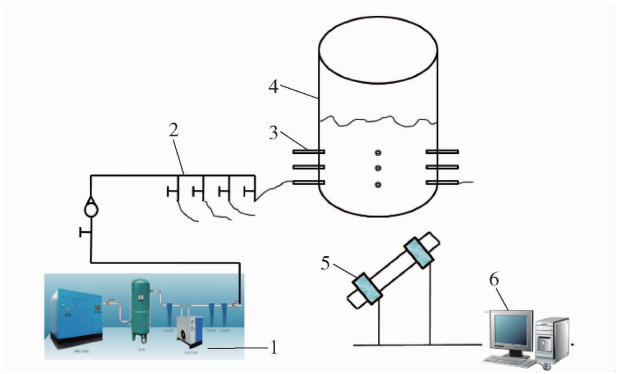
参数	圆形侧吹炉		矩形侧吹炉	
	原型	模型	原型	模型
长度比例尺	1:1	1:2	1:1	1:10
截面尺寸/mm	φ1 200	φ600	6 800 × 2 500	680 × 250
高度/mm	1 600	800	7 500	750
喷枪高度/mm	250	125/250/375	950	95
喷枪数量/支	4	4	14	14

2 实验装置

实验装置如图 2 所示,空压机提供压缩空气模拟实际喷吹气体,储气罐稳定气体流量和压力;实验开始之前将水注入水模型至一定液面高度来模拟熔池内一定液面高度的高温熔体;实验过程中使用高速摄像机采集实验数据,随后利用图形工作站进行实验数据处理。

表 2 原型及模型物性参数和操作参数表

炉型	圆形侧吹炉				矩形侧吹炉			
	原型参数		模型参数		原型参数		模型参数	
参数项	熔体密度/kg·m ⁻³	4 500	水密度/kg·m ⁻³	998	熔体密度/kg·m ⁻³	4 500	水密度/kg·m ⁻³	998
	气体密度/kg·m ⁻³	1.21	空气密度/kg·m ⁻³	1.29	气体密度/kg·m ⁻³	1.21	空气密度/kg·m ⁻³	1.29
	出口流速/m·s ⁻¹	280	流量/Nm ³ ·h ⁻¹	5/10/15/20/25	喷枪流量/Nm ³ ·h ⁻¹	4 974	流量/Nm ³ ·h ⁻¹	10/15/20



1 - 气源系统;2 - 阀站系统;3 - 侧吹喷枪;4 - 水模型;5 - PIV 粒子图像测速;6 - 图形工作站

图 2 实验装置示意图

3 结果与讨论

3.1 喷枪出口速度对穿透距离的影响

侧吹气流由喷枪射入炉内熔池后,高压高速气体动能提供的冲击力使气体射流向前穿透一段距离后才开始受浮力作用明显上浮,这段距离定义为侧吹气流的穿透距离。气流穿透距离由气流出口速度决定,改变气体流量和喷枪孔径,均会改变喷枪出口气流速度,进而影响气体射流穿透距离。流量相同时,喷枪孔径越小,出口气流速度越大,气流穿透距离变大;喷枪孔径相同时,流量加大,喷枪出口气流速度也增大,侧吹气流穿透距离变大。

图 3 为不同喷枪出口速度下得到的侧吹气流穿透距离实验结果。图 3 表明,侧吹气流穿透距离主要与喷枪出口速度有关,喷枪出口速度越大,侧吹气流穿透距离越大。气流穿透距离与喷枪出口速度的关系表达为式(3)。

$$L = -0.0514V^2 + 7.3387V + 22.147 \quad (3)$$

式中: L 为气流穿透距离,mm; V 为喷枪出口速度,m/s。

3.2 熔池液面和喷枪高度对穿透距离的影响

侧吹炉设计和生产实践中,部分生产技术人员认为由于熔池静压,喷枪高度和熔池液面深度会对侧吹气流穿透距离产生影响。针对此疑问,本文利用单枪圆形侧吹炉水模型,研究了熔池液面高度和喷枪高度(即炉底至喷枪孔距离)对侧吹气流穿透距离的影响。在保持其他参数不变的条件下,分别改变熔池液面高度和喷枪高度,不同流量下气流的穿透距离实验结果见图 4 和图 5。

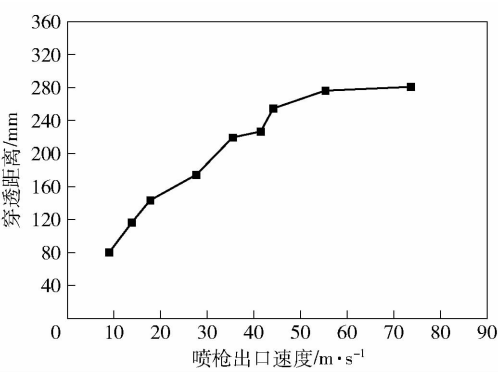


图 3 不同喷枪出口速度下的侧吹气流穿透距离

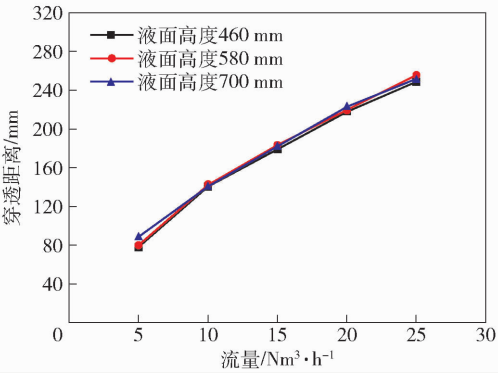


图 4 不同液面高度情况下的侧吹气流穿透距离

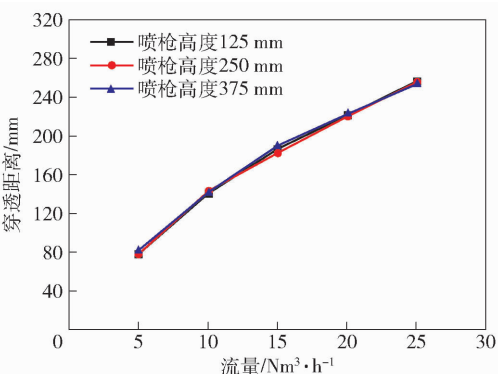


图 5 不同喷枪高度情况下的侧吹气流穿透距离

由图 4 和图 5 可知,不同熔池液面高度和喷枪高度情况下,侧吹气流穿透距离均随气体流量的增加而变大;但是侧吹气流穿透距离并未明显受到液面高度和喷枪高度变化的影响;相同气体流量情况下,不同液面高度和喷枪高度时的侧吹气流穿透距离基本相同,相差 3% 以内。

可见,熔池液面高度和喷枪高度对侧吹气流穿透距离并无明显影响,侧吹气流穿透距离主要受气体流量(实践中为“流速”)的影响。

3.3 喷枪浸入深度对穿透距离的影响

实际生产中,侧吹喷枪一般会浸入熔池里一段距离,炉墙内壁面至喷枪出口的这段距离被称为喷枪浸入深度。浸入深度的主要作用是尽可能减轻高温火焰和高速气流对炉墙的冲刷侵蚀。利用单枪圆形水模型,保持喷枪孔径、喷枪高度和熔池液面高度不变,考察了不同喷枪浸入深度下,不同流量侧吹气流的穿透距离,实验结果见图6。

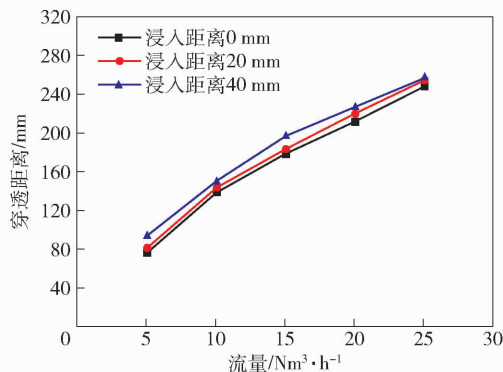


图6 不同喷枪浸入距离情况下的侧吹气流穿透距离

图6表明,喷枪浸入深度相同时,侧吹气流穿透距离随气体流量的增加而变长;流量相同时,随着喷枪浸入深度变长,侧吹气流穿透距离也变长,但侧吹气流穿透距离变化幅度远小于喷枪浸入深度的变化幅度。

实验结果表明侧吹喷枪浸入深度会影响侧吹气流穿透距离,但影响较小。

3.4 侧吹气流穿透行为与熔池搅动

图7和图8分别为矩形侧吹炉采用双枪对喷和14支喷枪喷吹时,不同单枪气体流量情况下,侧吹气流穿透行为和炉内熔池搅动图。单枪流量分别为 $0.71 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、 $1.07 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、 $1.42 \text{ Nm}^3/\text{h}$,对应14支喷枪总流量分别为 $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、 $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 和 $20 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

图7表明,双枪对喷,单枪流量为 $0.71 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 时,侧吹气流穿透距离较小,熔池中心处存在搅拌死区,不利于熔池内冶炼反应的充分进行;双枪对喷,单枪流量为 $1.07 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 和 $1.42 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 时,两股侧吹气流弯曲段能够汇聚合拢,汇合搅动使得喷枪位置切面处熔体搅动较为充分,有利于熔池内反应的充分进行。

图8表明,14支喷枪喷吹,单枪流量为 $0.71 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 时,侧吹气流对熔池的搅动较不充分,存在较多搅拌死区,不利于熔池内冶炼反应的充分进行;14

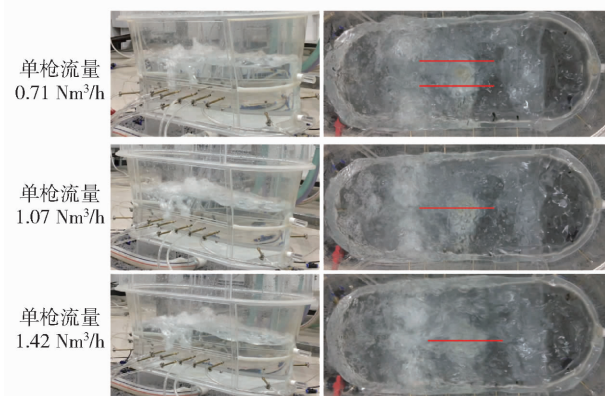


图7 双枪对喷,不同气体流量情况下侧吹炉内气流穿透及搅动情况

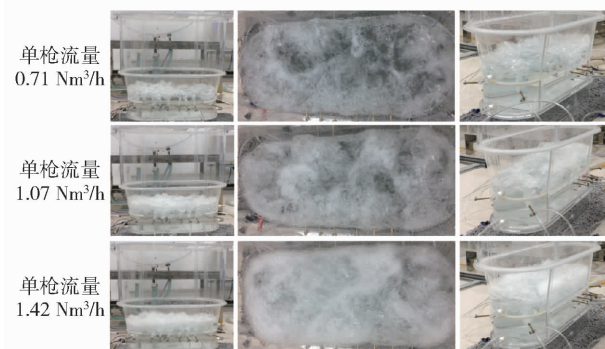


图8 14支喷枪,不同气体流量情况下侧吹炉内气流穿透及搅动情况

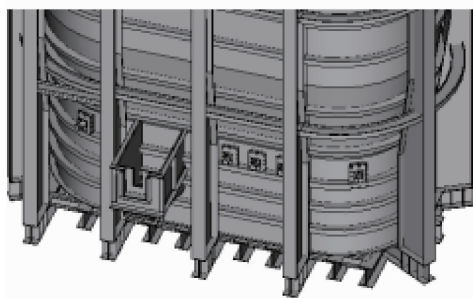
支喷枪喷吹,单枪流量为 $1.07 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 和 $1.42 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 时,侧吹气流能够对喷枪以上熔体进行充分搅动,但总流量为 $20 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (单枪流量 $1.42 \text{ Nm}^3/\text{h}$)时,气泡密集区较多,导致侧吹炉内乳化现象严重,控制不当可能会出现较严重的泡沫渣。

图9为矩形侧吹炉原型虹吸出铅口,以及由虹吸口前方观察侧吹炉水模型14支喷枪喷吹时的气流穿透及搅动局部图。图8和图9表明,侧吹气流对喷枪以下区域的搅动较弱,侧吹炉内喷枪以下熔池处于宏观安静区,这有利于渣金分离。需要指出的是,宏观安静区并非完全静止状态,通过PIV粒子图像测试可知,喷枪以下熔体也存在较小的流动速度。

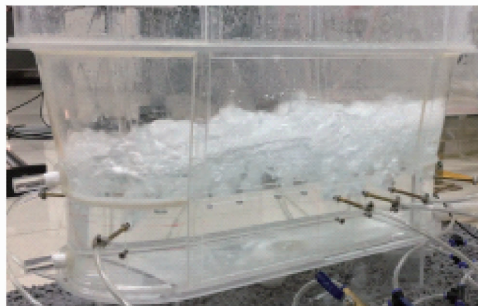
3.5 模拟结果对实践设计的指导

根据水模型模拟实验结果,针对圆形侧吹炉和矩形侧吹炉的设计可提出如下建议。

1) 侧吹气流穿透距离与熔池液面高度、喷枪高度等因素无关,喷枪浸入深度的影响作用不大,因此



(a) 矩形侧吹炉原型虹吸出铝口



(b) 虹吸排铝口前方视角炉内搅动情况

图9 侧吹炉内气流穿透及搅动局部图

设计时无需考虑这些因素对气流穿透和气流搅动的影响,主要考虑工艺条件。

2) 圆形侧吹炉水模型,单枪出口截面积约 80 mm^2 、单枪气量约 $160 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 情况下,侧吹气流穿透距离约 540 mm ;此外,根据笔者的研究^[8],圆形侧吹炉喷枪数量建议设置为 3 支,可实现对炉体的充分搅动。

3) 矩形侧吹炉原型条件为单枪流量 $355 \text{ Nm}^3/\text{h}$,气流穿透距离约 $1\,200 \text{ mm}$ 情况下,模拟结果表明可对熔池进行充分搅动,有利于炉内反应充分进行;但局部由于现场条件限制,未均匀设置侧吹喷枪,由图 9 可知,导致侧吹炉侧吹气流对局部区域的熔池搅动非常不充分,因此侧吹炉喷枪布置应尽量均衡布置,避免出现大量搅动不充分区域。

4 结论

侧吹气流穿透距离和搅动情况是侧吹炉体和喷枪设计中的关键数据指标,影响侧吹炉宽度设计和喷枪结构设计。本文采用水力模型实验对喷枪浸入深度、喷枪高度、熔池液面高度、喷枪孔径和气体流量等因素对侧吹气流穿透距离和熔池搅动情况的影响进行了研究,得到如下结论。

1) 侧吹气流穿透距离与熔池液面高度和喷枪高度的变化无关,侧吹喷枪浸入深度影响气流穿透距离,但影响作用较小,气流穿透距离变化幅度远小于喷枪浸入距离的变化幅度。

2) 侧吹气流穿透距离主要与气流出口速度有关,因此喷枪孔径和气体流量变化对侧吹气流穿透距离的影响较大,穿透距离随气体流量增加而变长,

随喷枪孔径减小而变长。

3) 气体流量还会影响炉内熔池流动和熔池搅动情况,进而影响熔池内冶炼反应的充分进行。流量较小时,气流穿透距离较小,熔池中心存在搅拌死区,侧吹气流熔池搅动不充分,不利于熔池内反应的充分进行;流量较大时,侧吹气流能够对熔池进行充分搅动,但流量太大超过合理值时会导致炉内乳化现象严重。

水模型实验获得的定性和半定量结果可以为侧吹炉设计和优化提供指导建议,满足工艺条件前提下,通过合理的炉型、喷枪结构及排布设计和气体流量选择,有利于侧吹炉内形成充分的流动场和搅拌动力场。

[参考文献]

- [1] 颜慧成,丁剑,王现周,等. 260 t 转炉底吹工艺水模试验与工业应用[J]. 炼钢, 2020, 36(2): 1-5.
- [2] 王正,孙彦辉. 300 t 转炉底吹布置优化水模试验[J]. 河南冶金, 2015, 23(6): 1-4.
- [3] 曹同友,杨治争,孙云虎,等. 80 t 转炉复吹工艺水模试验研究[J]. 武钢技术, 2015, 53(1): 28-31.
- [4] 魏季和,朱宏利,池和冰,等. 侧顶复吹条件下 AOD 转炉熔池内流体的混合特性[J]. 过程工程学报, 2009, 9(S1): 364-368.
- [5] LIU Yanting, YANG Tianzu, CHEN Zhuo, et al. Experiment and numerical simulation of two-phase flow in oxygen enriched side-blown furnace[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(1): 249-258.
- [6] 李小龙,刘燕,王东兴,等. 侧吹炼铜过程中乳化现象的模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 649-653.
- [7] 成慰,周萍,马骥,等. 侧吹气流穿透深度及气泡脱离频率模型实验[J]. 有色冶金设计与研究, 2014(5): 17-20.
- [8] 王书晓,陈学刚,温治,等. 侧吹炉内流体宏观不稳定现象实验研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(9): 18-25.

Experimental study on gas flow penetration and stirring behavior in side-blowing furnace

WANG Shu-xiao, CHEN Xue-gang, WEN Zhi

Abstract: The smelting process of metallurgical furnace is accompanied by complex multiphase chemical reactions at high temperature, so it is difficult and costly to carry out experiments directly. Hydraulic model experiment and numerical simulation methods are widely applied by researchers to carry out the study. The side-blowing gas penetration distance and agitation conditions are the key indicators in the design of side blowing furnace and lance, which affect the design of side blowing furnace width and spray gun structure. In this paper, the impact of the lance immersion depth, lance height, bath liquid level, lance diameter and gas flow volume on the side-blowing gas penetration distance and bath agitation are studied by using hydraulic model experiment. The results show that: bath liquid level, lance height and the immersion depth of the lance have no or insignificant impact on the gas penetration distance; the side-blowing gas penetration distance is mainly related to the gas outlet velocity as the distance increases with the increase of gas flow and the decrease of lance diameter; the gas flow has a great impact on the flow and agitation of the bath in the furnace, reasonable lance structure, layout design and gas flow selection will facilitate the formation of sufficient flow field and agitation power field in the side blowing furnace.

Key words: side-blowing furnace; gas jet flow; penetration distance; bath agitation; hydraulic model experiment; gas outlet velocity; gas flow; lance diameter

~~~~~  
(上接第 55 页)

## Element distribution and phase characteristics of copper slags from oxygen-rich side-blowing smelting + multi-lances top converting process for copper smelting

GAO Yong-liang, ZHANG Zhe-kai

**Abstract:** Continuous Cu smelting technology comprising oxygen-rich side-blowing smelting + multi-lances top converting process + pyrometallurgical anode refining” is the advanced copper smelting technology in the world. In order to reduce the loss of valuable metals in slag, oxygen-rich side blowing slag and multi-lances top converting slag are selected as objects to study the distribution of copper and iron elements in slag in different mineral phases, and the following conclusions are obtained: the copper content in smelting slag and converting slag is 1% – 1.7% and 12% – 15% , respectively; smelting slag is mainly composed of fayalite, magnetite, glass phase and Cu matte. The slag with high Fe – Si ratio is selected for smelting slag, and a certain proportion addition of pulverized coal can reduce the slag viscosity. The converting slag is mainly composed of calcium ferrite, magnetite and metal Cu phase. Calcium slag is selected for converting slag, and the content of SiO<sub>2</sub> shall be controlled below 3% . The main factors affecting Cu content in slag are slag type, furnace temperature, magnetic iron content, slag layer and matte/blister copper layer thickness.

**Key words:** continuous Cu metallurgy process; oxygen-rich side-blowing smelting; multi-lances top converting process; smelting slag; converting slag; slag phase characteristics; Cu content in slag; slag viscosity