

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2020.12.004

底吹炉氧枪喷口形式对气泡形态及混合状况的影响

王辉¹, 谭秋生¹, 苏福永²

(1. 青岛特殊钢铁有限公司 装备部, 山东 青岛 266409;
2. 北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:针对4种不同的氧枪喷口结构进行了冷态试验研究,采用高速相机获得了不同喷口下的炉内气泡形态,采用电导率法测试了不同喷口下炉内流体的混合状况。试验结果表明,在相同的气体流量下,不同的气体喷口时炉内气泡的形态十分相似,当采用结构最复杂的喷口时,炉内的混合状态是最好的,结构最简单的喷口混合效果最差,其最小响应时间较最复杂喷口的增加约11%,均混时间增加约4.7%。

关键词:底吹熔炼炉;氧枪喷口;冷态试验

中图分类号:TF811

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2020)12-0018-05

Effect of Nozzle Type of Oxygen Lance on Bubble Morphology and Mixing Condition in Bottom Blown Furnace

WANG Hui¹, TAN Qiu-sheng¹, SU Fu-yong²

(1. Equipment Department, Qingdao Special Steel Co., Ltd., Qingdao 266409, Shandong, China;

2. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Four different nozzle structures of oxygen lance were studied by cold state experiment. Bubble morphology of different nozzle was obtained by high-speed camera, and mixing state of fluid in furnace under different nozzle was measured by conductivity method. The experimental results show that with the same gas flow rate, shape of bubbles in furnace is very similar with different gas nozzles. When nozzle with the most complex structure is used, mixing state in furnace is the best, and mixing effect of nozzle with the simplest structure is the worst. The minimum response time rises by about 11% and mixing time rises by 4.7% compared with the most complex nozzle.

Key words: bottom blown smelting furnace; oxygen lance nozzle; cold state experiment

铜冶炼工艺发展至今以火法炼铜为主,目前全球75%~80%的矿铜都是采用这类方法^[1]。火法炼铜工艺可分为两段^[2-3]:第一步是造钼熔炼,是将铜精矿炼成铜钼(或称冰铜)的过程,铜钼含铜量大约在40%~75%。第二步是对铜钼继续进行冶炼,最后得到粗铜。其中造钼熔炼通常是在1150~

1250℃的高温下将硫化铜精矿和溶剂混合后在熔炼炉内进行熔炼的过程。

目前主要有两种主流的铜熔炼方法^[4-6]:一是闪速炉熔炼,二是熔池熔炼。其中熔池熔炼技术起源于20世纪70年代,该技术将富氧空气通过炉体的底部、侧面或顶部通入高温熔体中。其中的氧气底

收稿日期:2020-09-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0605904)

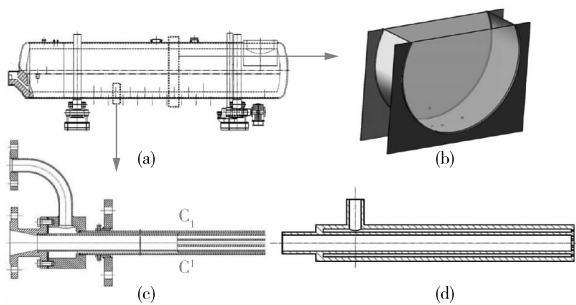
作者简介:王辉(1975-),男,山东青岛人,工程师;通信作者:苏福永(1982-),男,天津人,博士,讲师

吹熔炼技术是由我国自主研发的造锕熔炼技术,该技术目前已经具有国际先进水平。作为该技术主体设备的底吹熔炼炉具有原料适应性强、熔炼强度高等优点,目前已经得到广泛推广和应用。但该设备在使用过程中,由于内部存在高温熔体,因此其炉内流动状态、混合效果等都无法直接观测。国内外很多学者都对底吹熔炼炉技术进行了研究,主要研究方法包括数值模拟^[7-8]、冷态试验及工业试验等^[9-12],研究内容大多聚焦于炉体结构、运行参数及氧枪布置等。本文借鉴之前学者的研究方法,采用冷态试验的手段对不同氧枪喷口形式下底吹炉内流动形态及混合状况开展研究,以促进底吹炉的技术进步。

1 冷态试验设计

1.1 试验平台设计

所设计试验平台截取了底吹炉内一部分结构,主要由底吹炉与氧枪模型及图像观测系统和电导率测试系统组成。主要试验设备和试验材料包括:底吹炉模型、饱和 KCl 溶液、高速摄像机、电导率仪及氧枪模型等,主体设备的结构图如图 1 所示。试验一共设计了 4 种不同结构形式的喷口,喷口分为内层喷口和外层喷口,喷口结构由复杂到简单,试验过程中 4 种形式的喷口流量保持一致,重点测试不同结构形式对底吹炉的影响,4 种喷口结构形式如图 2 所示。



(a)底吹炉原型;(b)底吹炉模型;(c)氧枪原型;(d)氧枪模型

图 1 原型及模型结构图

Fig. 1 Prototype and model structure

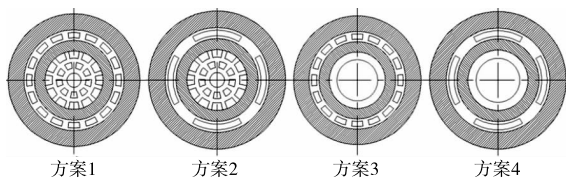


图 2 喷口结构形式

Fig. 2 Four structure of nozzles

试验过程主要模拟底吹气体由氧枪向熔池内熔融液体喷吹搅拌过程,试验平台模型与原型底吹炉的详细结构参数及操作参数如表 1 所示。

表 1 原型及模型结构参数

Table 1 Parameters of prototype and model

名称	符号	单位	原型	模型
炉体内型直径	D	m	3.88	1.293
炉体内型长度	L	m	20.74	0.40
熔液/水层高度	H	m	1.545	0.515
氧枪长度	l	m	0.968	0.20
氧枪外层气体出口面积	$S_{o,out}$	mm ²	350.03	35.60
氧枪内层气体出口面积	$S_{o,in}$	mm ²	473.16	50.26
氧枪外层气体流量	\dot{V}_{out}	m ³ /h	324.72	7.25
氧枪内层气体流量	\dot{V}_{in}	m ³ /h	202.78	4.84
氧枪外层气体流速	v_{out}	m/s	317.27	63.75
氧枪内层气体流速	v_{in}	m/s	139.63	30.01

1.2 采用的测试方法

1.2.1 气泡形态分析

气泡形态分析由平面光源、高速摄像机、信号采集卡、电源和三脚架等组成(如图 3 所示)。摄像机在全分辨率的条件下帧频可以达到 108 fps,其作用是将气体喷吹及液体流动过程显示出来以供定量测量和定性分析。

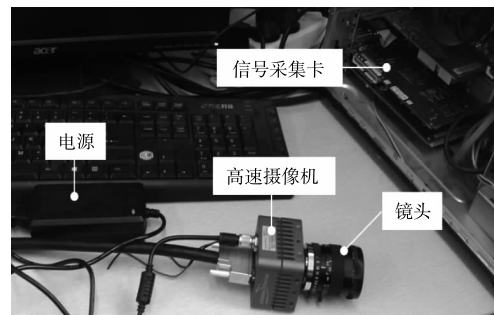


图 3 图影采集系统部分实物图

Fig. 3 Image acquisition system

1.2.2 混合状况分析

炉内溶液的混合状况采用测量溶液电导率的方式进行,电导率测量系统的作用是绘制示踪剂的停留时间分布(RTD)曲线,进而得到混匀时间等参数。该系统由电导率仪、电导率探头、示踪剂、电源和电脑等部分组成。图 4 为电导率仪及电导率探头实物图。

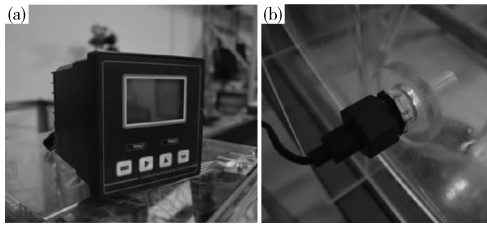


图4 电导率仪(a)及电导率探头(b)实物图

Fig. 4 Images of conductivity meter (a) and conductivity probe (b)

2 试验结果及分析

2.1 气泡形态试验结果分析

在气泡形态的试验结果中,虽然4种喷口的结构不同,但其气泡形态十分相似。图5为喷口结构为方案1不同时刻下的气体射流形貌图。

对图像进行分析发现,底吹射流气泡生成过程符合如下规律:

- 1) 气体经喷口喷出,逐渐形成一个较大的气泡;
- 2) 大气泡逐渐上升,最终与喷口壁面脱离;
- 3) 气体继续喷吹,在喷口处形成一个较小的气泡,小气泡较大气泡具有更快的上升速度;
- 4) 快速上升的小气泡与前一个低速的大气泡发生碰撞融合,最终小气泡与喷口平面发生脱离,气泡

破碎并发生弥散;

5) 通过更多的图像分析发现,不同尺寸气泡并不是完全间隔产生的,2~3个大气泡或小气泡连续产生的情况是存在的。

2.2 溶液混合状况试验结果分析

图6为通过电导率仪测量得到的4种方案的电导率变化曲线。横坐标表示时间,总共记录时间为60 s,加入示踪剂时间为 $t_0 = 10$ s。纵坐标表示电导率,其绝对值的大小没有意义。从图6可以看出,4种方案电导率变化曲线的整体规律基本一致,即:从 $t_0 = 10$ s加入示踪剂开始,经过一段响应时间,在 t_s 时刻电导率曲线上升,至 t_{max} 时刻达到最大,最后在 t_f 时刻后基本保持不变。

为了减小操作误差,每个方案分别设置3组试验,测量记录电导率值的变化,其中重要参数包括最小响应时间、峰值时间和混匀时间,分别以 t_h ($t_h = t_s - t_0$), t_m ($t_m = t_{max} - t_0$), t_{mix} ($t_{mix} = t_f - t_0$)表示,将试验结果整理汇总成表2。从表2可以看出,4种方案相比较,以方案1为基准,其他三种方案的响应时间、峰值时间和混匀时间的最大相对偏差分别为11.64%、9.37%、4.75%,方案1(结构最复杂)三种时间均最短,方案2和方案3相当,方案4(结构最简单)最长,说明方案1的搅拌效果最佳、方案4最差。

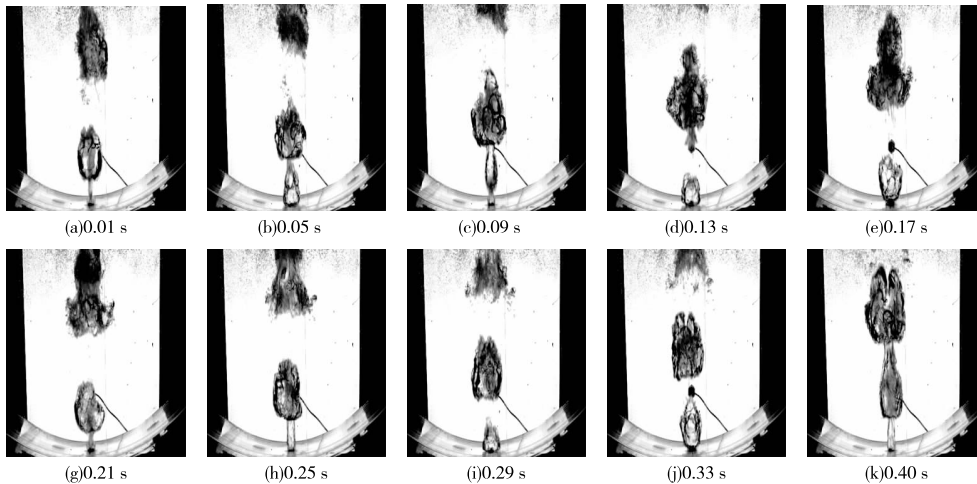


图5 喷口结构为方案1时不同时刻下的气泡形态图

Fig. 5 Bubble morphologies of scheme No. 1 under different moment

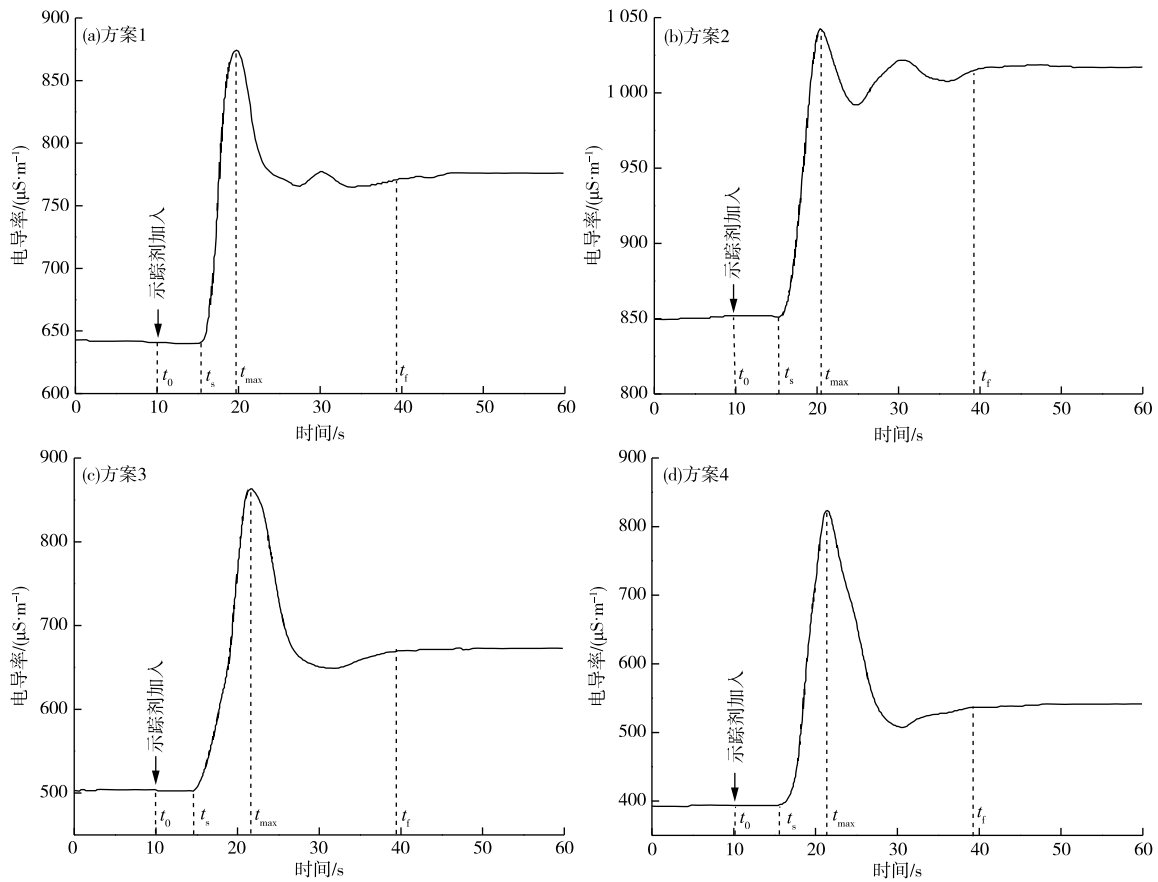


图6 4种方案喷口结构下所得电导率变化曲线
Fig. 6 Conductivity curves of four schemes

表2 电导率试验结果

Table 2 Results of conductivity test

方案	最小响应时间/s		峰值时间/s		混匀时间/s	
	单次	平均(最大相对偏差)	单次	平均(最大相对偏差)	单次	平均(最大相对偏差)
方案 1	5		10		28	
	6	5.67	12	10.67	28	28
	6		10		28	
方案 2	6	6.00	11	11.00	29	28.33
	6	(+5.82%)	11	(+3.09%)	28	(+1.18%)
	6		11		28	
方案 3	7	6.33	12	11.33	29	28.33
	6	(+11.64%)	11	(+6.19%)	28	(+1.18%)
	6		11		28	
方案 4	6	6.33	12	11.67	29	29.33
	7	(+11.64%)	12	(+9.37%)	30	(+4.75%)
	6		11		29	

3 结论

针对底吹熔炼炉氧枪喷口的形式进行研究,设计了4种不同的喷口形式(由复杂到简单),并进行了冷态试验,通过图像分析研究了底吹炉在这4种不同喷口形式下炉内的气泡形态,通过电导率测试

研究了溶液的混合状况,得到以下结论:

1)不同喷口形式下所形成的溶液内气泡形态基本相同,气体经过氧枪喷入液体中,经历了气泡形成、脱离、融合、弥散的过程,不同尺寸气泡并不是完全间隔产生的,2~3个大气泡或小气泡连续产生的情况是存在的。

2)在电导率试验中,不同氧气喷口形式试验结果存在不同,方案1(结构最复杂)相对于其它方案其响应最快,混合状况最好,方案4(结构最简单的)响应最慢,混合状况最差。

参考文献

- [1] 崔志祥,申殿邦,王智,等.高富氧底吹熔池炼铜新工艺[J].有色金属(冶炼部分),2010(3):17-20.
CUI Z X, SHEN D B, WANG Z, et al. New process of copper smelting with oxygen enriched bottom blowing technology[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2010(3):17-20.
- [2] 胡立琼,李栋.氧气底吹熔炼炉的研发与应用[J].有色设备,2011(1):34-37.
HU L Q, LI D. Development and application of oxygen bottom blowing melting furnace [J]. Non-Ferrous Metallurgical Equipment, 2011(1):34-37.
- [3] 曲胜利,李天刚,董准勤,等.铜富氧底吹生产实践及设计探讨[J].有色金属(冶炼部分),2012(3):10-13.
QU S L, LI T G, DONG Z Q, et al. Plant practice of and design discussion on oxygen enriched bottom blowing smelting [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2012(3):10-13.
- [4] 王书晓,余跃,温治,等.铜底吹炉氧枪出口端蘑菇头生成过程水模试验研究[J].中国有色冶金,2018,47(1):47-53.
WANG S X, YU Y, WEN Z, et al. Hydraulic model test study on mushroom head at the end of oxygen lance of the bottom-blowing copper smelting furnace[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(1):47-53.
- [5] 余跃.气体流量对底吹炼铜炉吹炼过程的影响[J].有色金属(冶炼部分),2020(8):1-8.
YU Y. Influence of gas flow rate on converting process of bottom-blowing copper converter [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2020(8):1-8.
- [6] KUMAR A, MAZUMDAR D, KORJA S C. Experimental validation of flow and tracer-dispersion models in a four-strand billet-casting tundish[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2005, 36(6):777-785.
- [7] 娄文涛,李勇,朱苗勇.顶底复吹转炉内气液两相流行为的数值模拟[J].过程工程学报,2011,11(6):926-932.
LOU W T, LI Y, ZHU M Y. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow behavior in the top and bottom combined blowing converter[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(6):926-932.
- [8] YU H Q, ZHU M Y, WANG J. Interfacial fluctuation behavior of steel/slag in medium-thin slab continuous casting mold with argon gas injection [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2010, 17(4):5-11.
- [9] 尹德友,程伟玲,谢金印,等.铁浴式熔融还原炉浸入式侧吹对熔池内流动影响的数值分析[J].过程工程学报,2010,10(6):1066-1070.
YIN D Y, CHENG W L, XIE J Y, et al. Mathematical simulation on flow behavior of immersion side-blowing in iron-bath smelting reduction furnace [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(6):1066-1070.
- [10] HANS-JUERGEN O L, THIEDEMANN U, FALKENRECK U, et al. Simulation of fluid flow and oscillation of the argon oxygen decarburization (AOD) process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2010, 41(2):396-413.
- [11] VALENCIA A, ROSALES-VERA M, ORELLANA C. Fluid dynamics in a teniente type copper converter model with one and two tuyeres [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 902874. [http://dx. doi. org/10.1155/2013/902874](http://dx.doi.org/10.1155/2013/902874).
- [12] ALMARAZ A, LOPEZ C, ARELLANO I, et al. CFD modeling of fluid flow in a Peirce-Smith converter with more than one injection point [J]. Minerals Engineering, 2014, 56:102-108.