

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.09.003

侧吹炉内流体宏观不稳定现象试验研究

王书晓^{1,2}, 陈学刚², 温治¹, 余跃²

(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:首次报道了侧吹炉的宏观不稳定现象和宏观不稳定类型,通过水力模型试验研究分析了侧吹炉内宏观不稳定现象的发生条件、影响因素及规律、消除措施。结果表明,侧吹炉宏观不稳定现象的发生需要满足一定的条件,主要与喷嘴上方的液位、喷嘴的数量和布置有关;宏观不稳定频率与喷嘴高度、液位、流量、喷嘴数量和布置无关;采用一定的措施可以避免或消除侧吹炉的宏观不稳定性现象。试验结果可为侧吹炉设计和运行提供参考。

关键词:水模型试验;侧吹炉;宏观不稳定

中图分类号:TF806.2

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)09-0018-08

Hydraulic Experiment on Macro-instability in Side-Blown Furnace

WANG Shu-xiao^{1,2}, CHEN Xue-gang², WEN Zhi¹, YU Yue²

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Macro-instability phenomenon in side-blown furnace was first identified in this paper, and occurrence conditions, influencing factors and rules, eliminating measures were studied and analyzed by hydraulic experiment. The results show that occurrence of macro-instability in side-blown furnace needs to meet certain conditions, which is mainly related to liquid level above jet nozzle, as well as number and arrangement of jet nozzles. However, the frequency macro-instability is irrelevant to nozzle height, liquid level, air flow and nozzle diameter, number and arrangement of jet nozzles. Macro-instability phenomenon in side-blown furnace can be avoided or eliminated by adopting certain measures which can be used as reference for side-blown furnace design and operation.

Key words: hydraulic experiment; side-blown furnace; macro-instability

高速高压气流通过喷嘴喷入高温熔池,广泛应用于冶金工业。根据喷嘴安装位置,可分为底吹炉、侧吹炉、顶吹炉和复合吹炉。侧吹炉广泛应用于铜、铅、锌等有色金属的冶炼过程。侧吹气流通过喷枪喷入侧吹炉内,对熔池进行强裂搅拌,强化炉内的传热传质和化学反应过程。

搅拌槽内流体流动存在大尺度低频非稳态准周期现象,这种现象被一些学者称作流场的“宏观不稳定性”(Macro-instability, MI)^[1]。WINARDI等^[2]首次报道了搅拌槽内宏观失稳现象。BRUHA等^[3]发现搅拌槽内的宏观不稳定性是由叶轮在旋转过程中驱动系统内单循环和双循环流动的交替引起的。

收稿日期:2021-04-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1907302)

作者简介:王书晓(1990-),男,河北邯郸人,博士研究生,工程师

刘作华等^[4]采用小波分析和流场可视化方法研究了双刚性柔性叶轮对宏观失稳频率的影响。机械搅拌槽内宏观不稳定性的研究较多,而侧吹炉内宏观不稳定性的研究未见报道。目前关于侧吹炉的研究主要集中在气流穿透深度、气泡的形成和分布、射流行为和乳化现象^[5-6]等。侧吹炉也可以被认为是一种典型的搅拌系统,炉内熔池受到高速气流的强烈搅拌。宏观不稳定性现象会影响侧吹炉内的传质和能量传递行为、以及熔体对耐火材料的冲刷侵蚀作用。因此,有必要对侧吹炉的宏观不稳定性进行研究。

本文首次报道了侧吹炉内流体宏观不稳定现象和宏观不稳定类型,研究了宏观不稳定性现象的发生条件、影响因素、影响规律及消除措施,并结合生产实际进行了分析。

1 水力模型试验

1.1 相似原理

冶金工业领域,在研究对象上直接进行试验会受到尺度、试验环境、测试手段等限制,从经济性和可行性方面考虑,常采用模型试验的方法。如何设计试验台以及如何把模型试验的结果应用到实际中去的理论依据就是相似原理。

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。

几何相似是必须满足的首要条件,指所建模型与原型具有相似的几何形状,所有对应尺寸成比例,所有对应角相等。长度比例尺是指模型特征尺寸与原型特征尺寸的比值,数学表达式为:

$$\lambda = \frac{L_m}{L_p} \quad (1)$$

式中, λ 为长度比例尺; L_m 为模型特征尺寸(m); L_p 为原型特征尺寸(m)。

本文选用修正的弗劳德准数为相似准数,其表达式为:

$$Fr' = \frac{v_g^2}{gd_0} \frac{\rho_g}{\rho_l} \quad (2)$$

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,模型中修正弗劳德准数必须与原型相等,即:

$$\left(\frac{v_g^2}{gd_0}\right)_m \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)_m = \left(\frac{v_g^2}{gd_0}\right)_p \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)_p \quad (3)$$

1.2 水模型试验可靠性

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,一般采用水模型试验和数值模拟开展研究。冶金工业大量水模试验研究文献^[7-9]充分验证了水力模型试验研究的可靠性,颜慧成等^[7]建立260 t转炉1:10水模型研究底吹砖数量的影响,基于模拟试验结果,选择8块底吹砖,服役寿命大大提高;王正等^[8]通过开展底吹布置优化水力模型试验研究,对现场喷枪数量和布置方式进行了改进,实践表明:优化后各项指标均有了提高,炉况稳定、可以实现快速换枪;曹同友等^[9]制作了80 t顶底复吹转炉水模型,获得了最优底吹布置方式,可以确保吹炼的稳定、减少喷溅和粘枪。

1.3 模型参数

在确定长度比例尺时,需要综合考虑实验室空间、模型加工条件、经济成本等因素,长度比例尺既不能太大也不能太小。结合本文研究对象的原型尺寸、试验条件及经济成本等,选取模型与原型的长度比例尺为1:2,结构参数见表1。

表1 原型与模型结构参数
Table 1 Structural parameters of model and prototype

项目	原型	模型
相似比例尺	1:1	1:2
侧吹炉内径/mm	1 200	600
液面高度/mm	920	460
喷枪高度/mm	500	250
喷枪出口截面积/mm ²	314	78.5

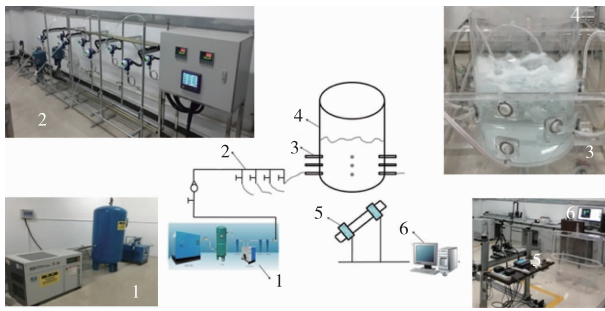
试验中选取水来模拟熔池内高温熔体,选取压缩空气来模拟实际喷吹气体。物性参数和操作参数如下。

原型:熔体密度8 700 kg/m³;N₂密度1.25 kg/m³;O₂密度1.43 kg/m³;天然气密度0.71 kg/m³;气体流量80 m³/h。

模型:水密度998 kg/m³;压缩空气密度1.29 kg/m³;气体流量5、10、15 m³/h。

2 试验装置

本模拟试验台主要由侧吹炉体及氧枪模型、气源系统、阀站系统、测试系统等部分组成。试验装置实物图和示意图如图1所示。



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1 试验装置实物图与示意图

Fig.1 Real facilities and Schematic diagram of experiment facility

3 试验结果及分析

3.1 宏观不稳定现象

侧吹炉内宏观不稳定现象是开展水力模型试验研究时发现的有趣试验现象。在侧吹喷枪正后方观察:侧吹气体射流由喷枪喷出穿透一段距离后上浮并有规律地左右甩动,炉内熔池则规律地呈现周期性“潮涨潮落”海浪似的起伏晃动现象。该现象不同于正常喷吹过程中熔池内发生的不规律喷溅现象,而是在宏观上有规律并有固定频率的晃动,称之为宏观不稳定现象。图2是圆形侧吹炉宏观不稳定现象发生后半个周期内液面起伏晃动的图像,图3是矩形侧吹炉宏观不稳定现象发生后的速度分布和流线图。

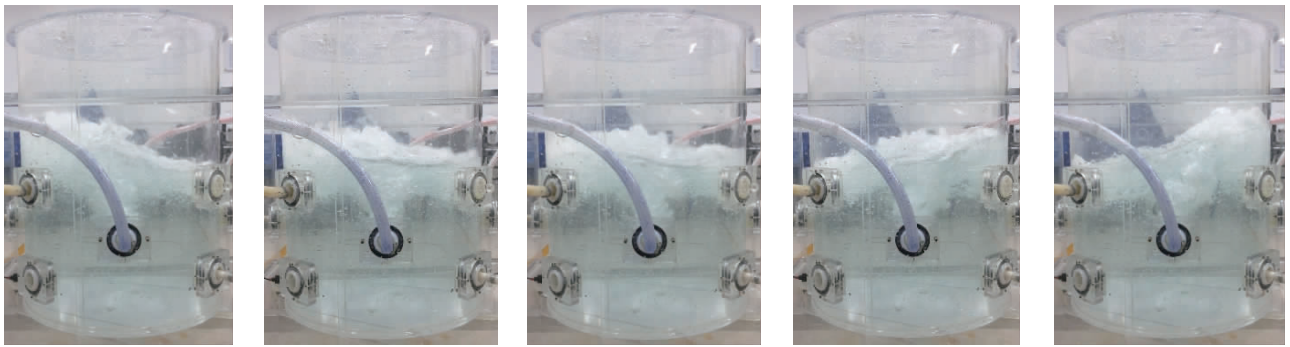


图2 圆形侧吹炉内宏观不稳定现象(0.5周期)

Fig.2 Macro-instability phenomenon in circular side-blown(0.5 period)

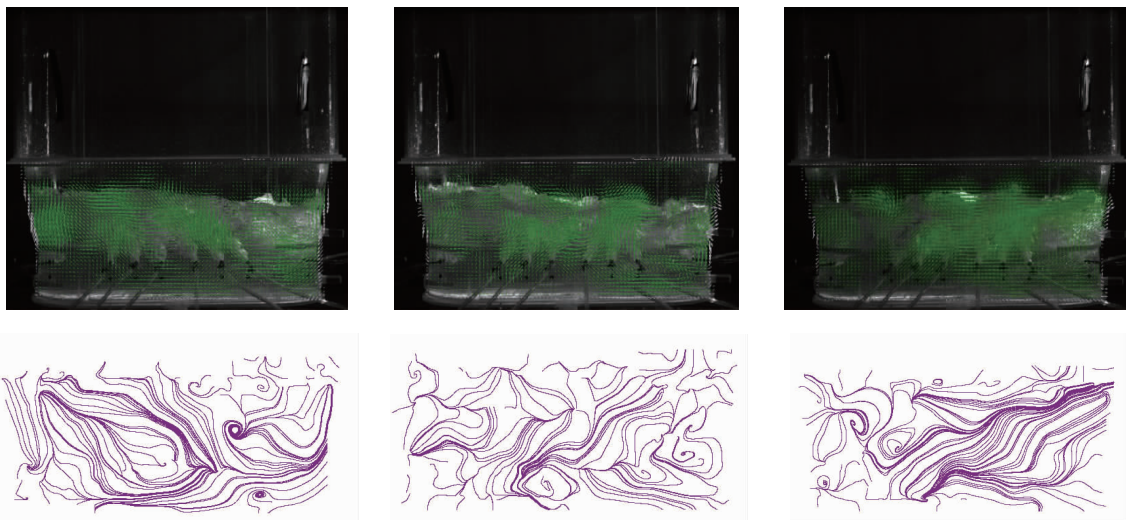


图3 矩形侧吹炉内宏观不稳定现象(0.5周期)

Fig.3 Macro-instability phenomenon in rectangular side-blown(0.5 period)

正常的喷吹过程中,熔池内液面会呈现不规则的波动和喷溅现象,如图4所示。侧吹炉内若出现严重的宏观不稳定现象,会造成炉墙耐火材料冲刷侵蚀

严重,炉窑使用寿命减少,或者引发渣口冒炉,威胁现场操作人员安全。因此对侧吹炉内宏观不稳定现象开展研究很有必要。

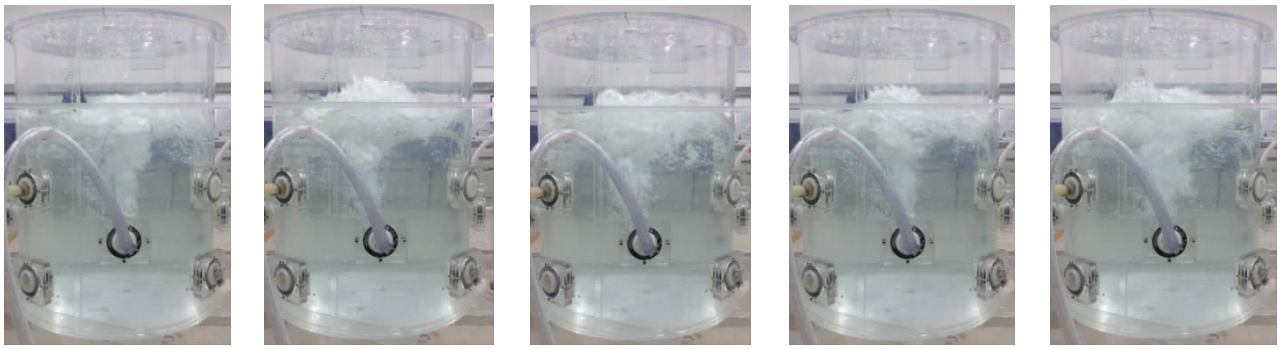


图 4 正常喷吹无宏观不稳定现象时熔池液面波动图

Fig. 4 Normal injection process without macro-instability phenomenon

3.2 液面高度和喷枪高度的影响

由表 2 和表 3 试验结果可知:

1) 保持气体流量一定, 喷枪以上液面高度 210 mm 相同, 当喷枪高度分别为 125、250 和 375 mm 时, 均发生宏观不稳定现象, 且宏观不稳定频率一致, 喷枪以上液面高度是宏观不稳定现象发生与否的关键影响因素。

2) 气体流量不变, 保持液面高度 460 mm, 当喷枪高度分别为 125 和 250 mm 时, 侧吹炉内出现宏观不稳定现象, 而当喷嘴高度为 375 mm 时则不会出现宏观失稳现象, 喷枪高度会影响侧吹炉宏观不

稳定的发生。

3) 气体流量一定, 喷枪高度 250 mm 时, 在 395~555 mm 液面高度内, 侧吹炉内会发生宏观不稳定现象, 液面高度范围之外, 宏观不稳定现象不会发生, 即液面高度也会影响侧吹炉内宏观不稳定现象的发生, 宏观不稳定现象只在一定液位范围内才会发生。

4) 宏观不稳定现象一旦发生, 其频率与喷枪高度和液面高度无关, 试验用圆形侧吹炉的宏观不稳定频率为 1.2 Hz。

表 2 相同气体流量条件下不同喷枪高度试验结果

Table 2 Experimental data in different nozzle height under same gas flow

喷枪高度 H_1 /mm	液面高度 H_2 /mm	喷枪以上液面高度 ($H_3 = H_2 - H_1$)/mm	宏观不稳定性现象	
			Yes/No	频率/Hz
125	335	210	Yes	1.2
250	460	210	Yes	1.2
375	585	210	Yes	1.2
125	460	335	Yes	1.2
250	460	210	Yes	1.2
375	460	95	No	/

表 3 相同气体流量条件下不同液面高度试验结果

Table 3 Experimental data in different liquid level under same gas flow

喷枪高度 H_1 /mm	液面高度 H_2 /mm	喷枪以上液面高度 ($H_3 = H_2 - H_1$)/mm	宏观不稳定性现象	
			Yes/No	频率/Hz
250	380	130	No	/
250	385	135	No	/
250	390	140	No	/
250	395	145	Yes	1.2
250	400	150	Yes	1.2
250	430	180	Yes	1.2
250	460	210	Yes	1.2
250	490	240	Yes	1.2
250	520	270	Yes	1.2
250	550	300	Yes	1.2
250	555	305	No	/
250	560	310	No	/
250	565	315	No	/

3.3 气体流量的影响

以喷枪高度 250 mm、液面高度 460 mm 为基准工况,研究了不同气体流量情况下宏观不稳定性现象的发生时间、频率和液面波动等情况。我们定义侧吹气流开始喷吹后,液面由静止状态到出现宏观不稳定性现象的时间为宏观不稳定性现象发生时间,宏

观不稳定性现象发生时间一定程度上反映了宏观不稳定性现象发生的难易程度。试验结果如表 4 所示。试验结果表明:1)保持其他条件不变,增大气体流量时,宏观不稳定性现象发生时间变短,液面波动幅度变大即宏观不稳定性程度变大;2)宏观不稳定性频率与气体流量无关,圆形侧吹炉模型频率为 1.2 Hz。

表 4 不同气体流量试验结果

Table 4 Experimental data in different air flow

气体流量/ (m ³ · h ⁻¹)	宏观不稳定性现象		液面波动/mm			
	发生时间/s	频率/Hz	最低点 H _L	最高点 H _H	波动范围(H _R =H _H -H _L)	
5	38	1.2	410	535	125	
10	19	1.2	400	560	160	
15	9	1.2	395	575	180	

3.4 喷枪数量和喷枪排布方式的影响

保持液面高度 460 mm,单枪气体流量 5 m³/h 不变,研究了不同喷枪数量和排布方式对宏观不稳定性现象的影响,喷枪排布方式示意图如图 5 所示,试验结果见表 5。由表 5 可知,单枪喷吹,炉内会发生宏观不稳定性现象。双枪喷吹,Case②和 Case③情况下,炉内不会发生宏观不稳定性现象;而 Case④双枪对喷方式,炉内则会发生宏观不稳定性现象。多枪喷吹,Case⑤和 Case⑥三枪喷吹和四枪喷吹,侧吹炉内熔池均未发生宏观不稳定性现象。不同喷枪数量及喷枪排布情况下,若发生宏观不稳定性现象,其频率均

为 1.2 Hz。

单枪喷吹情况下,炉内熔池容易发生宏观不稳定性现象,若与此喷枪呈 45°增加一支喷枪,则宏观不稳定性现象消失,斜角布置打破了第一支喷枪气体射流的规律甩动。双枪对吹,刚开始一支喷枪的气体射流会出现左右甩动情况,另一支喷枪的气体射流不甩动或呈现相反的左右甩动,但最终两支喷枪的气体射流呈现一致的左右规律甩动,进而带动炉内熔池发生严重宏观不稳定性现象,因此双枪对喷,炉内熔池会发生宏观不稳定性现象,但宏观不稳定性发生时间晚于单枪喷吹情况。

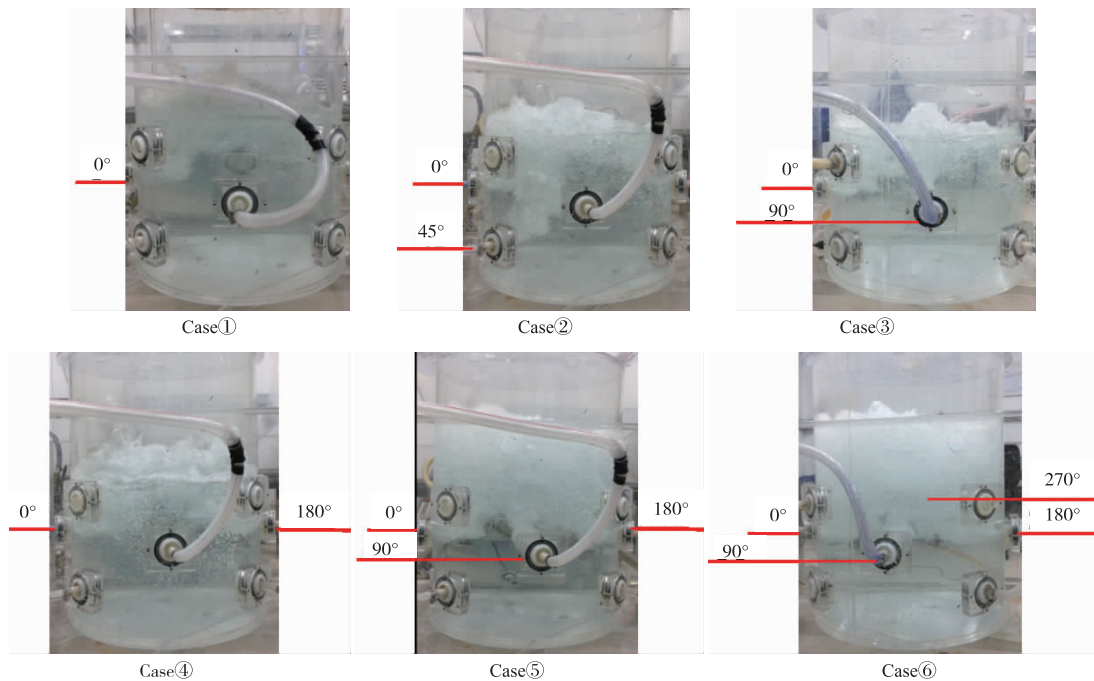


图 5 喷枪数量和排布方式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of number and arrangement of jet nozzles

表5 不同喷枪数量和排布方式试验结果

Table 5 Experimental results in different number and arrangement of jet nozzles

Case	喷枪数量与排布方式		宏观不稳定现象		
	数量	喷枪高度/mm	角度/ $^{\circ}$	Yes/No	频率/Hz
①	1	250	0	Yes	1.2
②	2	125	45	No	/
		250	0		
③	2	250	0	No	/
			90		
④	2	250	0	Yes	1.2
			180		
⑤	3	250	0	No	/
			90		
			180		
⑥	4	250	0	No	/
			90		
			180		
			270		

3.5 宏观不稳定现象的类型

在侧吹气流喷吹作用下,侧吹炉内熔池存在两种搅动状态:紊态搅动和宏观不稳定规律搅动。正常喷吹下,侧吹炉内熔池会发生如图6所示紊乱不规则搅动和喷溅,称为“紊态搅动”。侧吹炉内发生宏观不稳定现象后,炉内熔池则会出现宏观上有规律、具有固定频率的搅动和喷溅,称为宏观不稳定规律搅动。不同工况下,侧吹炉内会发生如图7~9所示“左右晃动型”、“中心撕裂型”、“前后晃动型”等三种不同类型的宏观不稳定规律搅动。

宏观不稳定频率是固有属性,宏观不稳定现象一旦发生,频率一定;宏观不稳定频率与气体流量、液面高度和喷枪排布方式无关,但与宏观不稳定状态类型有关,本文矩形侧吹炉模型“左右晃动型”宏观不稳定频率为0.93 Hz,“中心撕裂型”宏观不稳定频率为1.47 Hz,“前后晃动型”宏观不稳定频率为1.63 Hz。

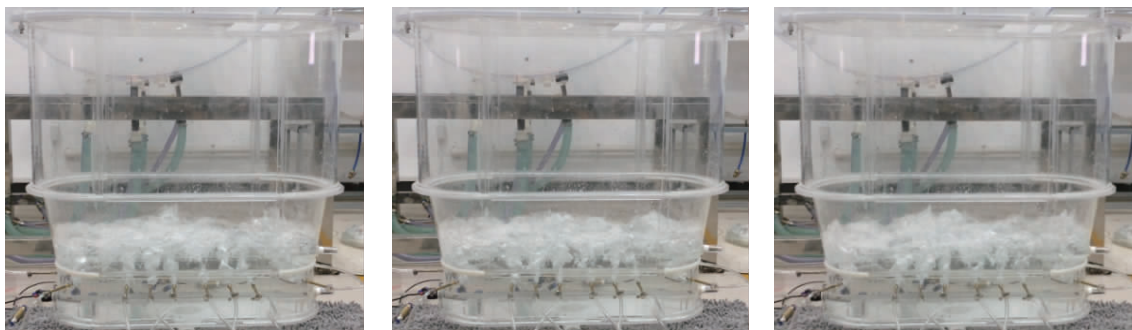


图6 侧吹炉内正常喷吹时“紊态搅动”

Fig. 6 Normal injection process without macro-instability phenomenon

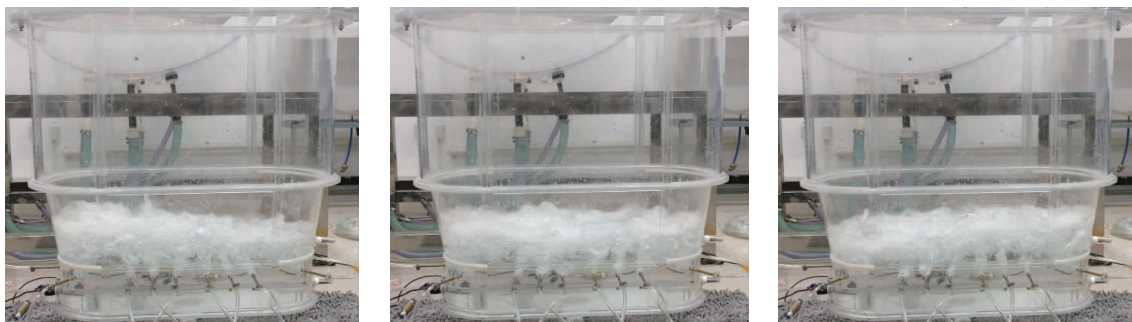


图7 侧吹炉内“左右晃动型”宏观不稳定现象

Fig. 7 “Left-right sloshing” macro-instability phenomenon in the side-blown furnace

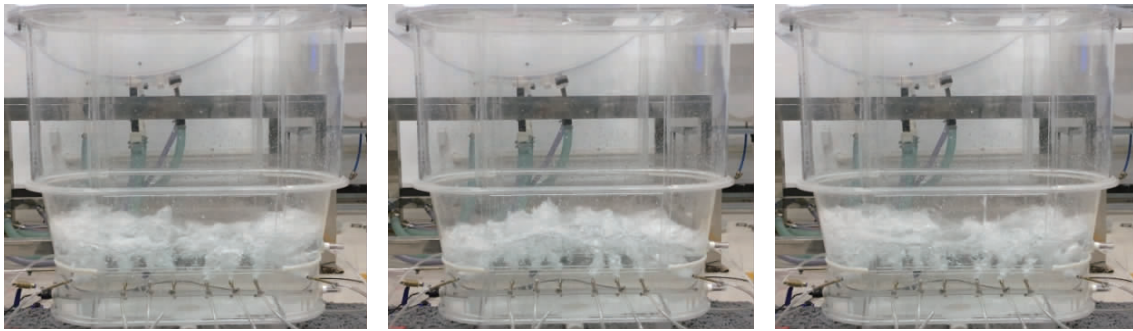


图8 侧吹炉内“中心撕裂型”宏观不稳定现象

Fig.8 “Center-tearing” macro-instability phenomenon in the side-blown furnace

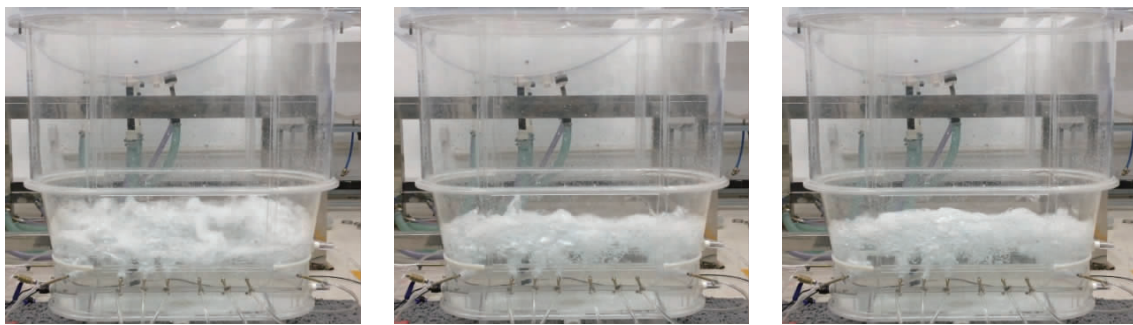


图9 侧吹炉内“前后晃动型”宏观不稳定现象

Fig.9 “Forward-backward sloshing” macro-instability phenomenon in the side-blown furnace

3.6 设计和生产实践建议

据笔者调研,侧吹炼铜生产现场较多发生宏观不稳定现象,表现为渣口有明显的浪涌现象,而现场操作人员均按照发生泡沫渣的前兆进行处理,增加冷料投入。建议侧吹炉设计时应考虑宏观不稳定现象:1)圆形侧吹炉不建议设计为双枪对喷形式,建议布置3支或4支喷枪;2)矩形侧吹炉的设计,在条件具备情况下,考虑喷枪双层排布形式。

4 结论

1)侧吹炉内宏观不稳定现象的发生需满足一定条件,主要与喷枪以上液面高度有关。喷枪高度、液位、喷枪数量和布置等都会影响宏观不稳定的发生。

2)在侧吹气流喷吹作用下,侧吹炉内熔池存在两种搅动状态:紊乱不规则搅动和宏观不稳定规律搅动,其中宏观不稳定现象根据晃动类型主要可分为“左右晃动型”、“中心撕裂型”、“前后晃动型”等三种不同类型。

3)宏观不稳定频率是侧吹炉固有属性,宏观不稳定现象一旦发生,频率一定;宏观不稳定频率与气体流量、喷枪高度、液面高度、喷枪数量和喷枪排布

方式无关,仅与炉窑规格和宏观不稳定类型有关。本研究中,圆形侧吹炉模型宏观不稳定频率为1.2 Hz,矩形侧吹炉模型的宏观不稳定频率分别为:“左右晃动型”0.93 Hz、“中心撕裂型”1.47 Hz、“前后晃动型”频率1.63 Hz。

4)通过提高液位、降低喷嘴高度、优化喷嘴数量和布置等措施,可以避免或消除侧吹炉内的宏观不稳定现象,为侧吹炉设计和运行提供参考。

参考文献

[1] 朱俊,刘作华,郑雄攀,等. 双层刚柔组合搅拌桨调控流体宏观不稳定性行为[J]. 化工学报, 2015, 66(3): 896-904.
ZHU J, LIU Z H, ZHENG X P, et al. Macro-instability regulated by double rigid-flexible combination impeller[J]. CIESC Journal, 2015, 66(3): 896-904.

[2] WINARDI S, NAGASE Y. Unstable phenomenon of flow in a mixing reactor with a marine propeller[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1991, 24(2): 243-249

[3] BRUHA O, FORT I, SMOLKA P. Large scale unsteady phenomena in a mixing vessel [J]. Acta Polotechnica/Journal of Advanced Engineering, 1993,

- 33(1):27-35.
- [4] 刘作华,唐巧,王运东,等.刚柔组合搅拌桨增强混合澄清槽内流体宏观不稳定性[J].化工学报,2014,65(1):78-86.
- LIU Z H, TANG Q, WANG Y D, et al. Enhancement of macro-instability in a mixer-settler with rigid-flexible impeller [J]. CIESC Journal, 2014, 65 (1): 78-86.
- [5] MA J, ZHOU P, CHENG W, et al. Dimensional analysis and experimental study of gas penetration depth model for submerged side-blown equipment[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 75: 220-227
- [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.
- LI X L, LIU Y, WANG D X, et al. Physical simulation of emulsion phenomena in copper side-blown smelting process [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(5): 649-653.
- [7] 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.
- YAN X L, DING J, WANG X Z, et al. Water modeling study and industrial application of bottom blowing technology in 260 t converter[J]. Steelmaking, 2020, 36(2):1-5.
- [8] 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.
- WANG Z, SUN Y H. Water model test for bottom blowing of 300 t converter [J]. Henan Metallurgy, 2015, 23(6):1-4.
- [9] 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.
- CAO T Y, YANG Z Z, SUN Y H, et al. Water model study on top and bottom combined blowing of 80 t converter[J]. Electrical Steel, 2015, 53(1):28-31.