



底吹熔池氧枪排布对气体振荡射流 强化搅拌效果的定量评价

李 鹏^{1,2}, 王仕博^{1,2}, 王 华^{1,2}, 张文海³

- (1. 昆明理工大学 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093;
2. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093;
3. 中国瑞林工程技术有限公司, 南昌 330002)

摘 要: 为阐明底吹熔池气体射流振荡强化搅拌机制, 提出了基于 Betti 数来定量表征底吹气体振荡射流强化搅拌效果的新途径, 并以此为评价标准提出底吹熔池氧枪排布的优化方案。首先, 基于正交试验理论, 设计了多水平因子水模型实验方案; 其次, 运用摄像设备捕捉了 19 组底吹水模型容器内气液流态演化过程的连续图片, 通过图像处理技术得到连续流态图片的 Betti 数; 最后, 通过 Betti 数的分布规律来实现不同工况下气体射流振荡搅拌效果的差异化表征。结果表明: 在单排氧枪排布方式下, 在 $0^{\circ}\sim 14^{\circ}$ 范围枪倾角越大, 射流产生气泡数量越多, 分布更为均匀; 在双排氧枪排布方式下, 非对称喷吹的射流振荡搅拌效果明显更好, 且采用 0° 与 7° 倾角的特征数值更为理想。

关键词: 底吹熔池; 射流振荡; 强化搅拌; 图像处理; 氧枪排布

文章编号: 1004-0609(2020)-07-1653-14

中图分类号: TF806.24; TQ027

文献标志码: A

氧气底吹熔池炼铜法是具备完全自主知识产权的熔炼技术^[1], 该熔炼技术的核心是通过炉底氧枪鼓入的气体上浮带动熔池内部液体流动, 同时氧气与矿料中的成分反应放出大量的热量, 从而实现熔池内三相的快速传质传热过程, 满足熔炼过程的动能及热能要求。但一味通过外部强化手段提高冶炼强度导致熔池不稳定性增强, 熔池液体容易发生喷溅, 对炉衬及氧枪等炉体关键结构磨损严重, 炉体寿命缩短, 不当的喷吹操作将未熔化的精矿料起尘甚至熔体喷射, 导致在烟道负压抽风的过程中大量的烟尘堆积在烟道中, 因此容易发生堵塞烟道等事故。在不增加熔池负荷的条件下, 探究底吹熔池气体射流固有的振荡强化搅拌机制, 对炉况顺行、抑制熔池喷溅甚至提高单炉冶炼能力均有积极作用。

目前, 已有的研究内容主要借助数值模拟的方法探究了底吹气体流量、氧枪结构、氧枪直径及喷吹角度等因素对底吹熔池熔体流动的影响, 如 LI 等^[2-3]利用 VOF 多相流和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟建立底吹钢包气-液-渣三相流动数学模型, 探究喷吹气体流量大小变化对渣眼无量纲面积及渣眼附近溶液流动速度的影

响。而对于铜冶炼来说, VALENCIA 等^[4]针对 Teniente 铜转炉为研究对象, 运用 VOF 多相流模型和标准 $k-\epsilon$ 湍流模型数值模拟预测渣层的轴向位移、槽内振荡和射流的形成, 同时在水模型测定在不同风口下熔池的平均振幅和频率。ROSALES 等^[5]探究了水下风口喷入气体对炉衬耐火材料的磨损, 提出通过使用两组风口对喷的形式干扰熔池表面的振荡模式可以有效控制喷溅的产生。张振扬等^[6-7]运用数值模拟方法, 建立底吹熔池内气液两相流的三维数学模型, 以气含率、熔体平均流速及平均湍动能作为优化指标, 对熔炼炉进行氧枪结构多目标优化, 得到氧枪结构最优组合。闫红杰等^[8-10]结合底吹熔池熔炼过程机理的相关研究, 建立数值模型对底吹熔池高温熔体气液两相流进行数值模拟研究, 探讨了氧枪布置方式及氧枪直径对底吹熔池熔炼过程和产物的影响, 得到了最佳熔炼条件下的氧枪布置方式及直径大小。张延安等^[11]采用 Euler-Euler 模型描述底吹冰铜吹炼炉内气液两相流行为, 对比双喷嘴不同喷吹角度下气液两相流行为及气含量的模拟计算结果, 得到 14° 氧枪倾角喷吹下喷溅现象最为严重, 同时考虑到双喷嘴夹角越大会使得喷

基金项目: 国家十三五重点专项资助项目(YS2016YFGX050058); 云南省科技厅计划资助项目(2015IC005)

收稿日期: 2016-09-05; **修订日期:** 2020-06-30

通信作者: 王仕博, 讲师, 博士; 电话: 13888807645; E-mail: ph.d.wangshibo@foxmail.com

嘴口距离液面垂直距离越小, 气泡在熔池中的停留时间反而减小。余跃等^[12]利用 VOF 模型, 模拟氧枪结构变化对底吹炉流场流动过程的影响进行了研究。同时针对底吹熔炼过程中的理论研究也具有较为深刻的认识, 郭学益等^[13-15]通过对底吹熔池熔炼机理及多组元造渣行为的研究, 将底吹熔池内部熔炼过程进行划分, 建立了底吹熔池熔炼机理模型, 阐明底吹熔池熔炼过程氧和硫的传递路径, 根据氧势-硫势分布梯度变化及渣型优化的合理建议操作, 调整底吹工艺参数, 提高底吹熔炼能力。近期, 利用数字图像处理技术来研究气体喷吹搅拌过程取得了一些有益的研究成果^[16]。例如, FEI 等^[17]和 XU 等^[18]针对直接接触换热过程中气泡群扰动的场均匀性问题进行深入研究, 提出了基于图像处理技术与统计学理论的量化多相体系混合均匀性的新方法。因此他们同时认为精确估计混合时间对于衡量流体混合效果、优化设计搅拌设备均具有重要意义^[19]。另外, 有效提取多相混合体系中流体混合的混沌特征是衡量流体混合效果的重要工作; 多相体系中流体混合的混沌特征与搅拌效果、传热性能存在相关关系^[20]。上述研究为进一步提取与表征底吹熔炼炉搅拌体系中的流动特性提供了借鉴意义。

基于上述, 众多学者针对底吹熔池熔炼过程及熔池搅拌的研究取得的有益成果, 为后续的研究工作提供了极大的便利。本文主要是利用底吹气体射流本身具有左右摇摆及向上泉涌的特性作为熔池强化搅拌手段, 探究不同氧枪排布喷吹方式对气体射流振荡的影响。在研究过程中依据给定的设计参数, 借助于高清摄像仪设备对底吹炉搅拌混合过程实时图像进行捕捉和采集, 并运用数字图像处理技术对获得的搅拌混合图像进行二值化处理^[16], 利用免费软件计算二值图像的第 0 维 Betti 数以及第 1 维 Betti 数, 得到底吹熔池气体喷吹搅拌过程中第 0 维 Betti 数以及第 1 维 Betti 数的时间序列, 结合底吹熔池熔炼的搅拌特点, 探究二水平因子(单双排)及三水平因子(氧枪个数、氧枪倾角)对底吹气体射流稳定性及气泡分布的影响机制。通过对比本试验所有工况的最终评价特征值, 从而得到最佳搅拌效果下的氧枪排布方式。

1 实验

1.1 实验装置

本实验过程主要通过拍摄不同底吹氧枪排布方式下熔池内喷吹气体射流形态变化过程。依据底吹熔炼

炉的主要结构参数及张振扬等^[6-7]有关氧枪排布对底吹熔池流场影响的研究内容。制作与真实底吹炉大小为 1:10 相似水模型, 其结构如图 1 所示, 水模型直径为 0.36 m, 长 1.2 m, 底部均匀分布 7 排氧枪口, 每排之间枪口中心线夹角约 7°, 每排为 10 个枪口, 枪口直径均为 0.04 m。在实际生产过程中, 从熔炼炉顶部加料口加入炉料, 通过底部氧枪将富氧空气喷入熔池内搅动熔池并参与反应, 入炉物料在熔池中完成加热、融化、氧化、造渣和造钎等过程, 产出的冰铜、炉渣和烟气分别从放钎口、放渣口和排烟道排出。

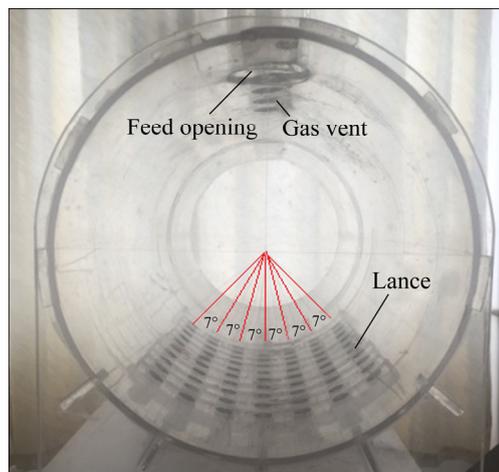


图 1 底吹熔池水模型

Fig. 1 Bottom-blowing bath hydraulics model

水模型内部液体为水, 液面深度为 0.18 m, 喷嘴距液面处的垂直距离为 0.10~0.18 m。通过 PVC 透明胶管连接电磁式小型空气压缩机、玻璃转子流量计及氧枪, 其中玻璃转子流量计的型号为 LZB-15; 其测量范围是 0.25~2.5 m³/h, 电磁式小型空气压缩机的号为海利 ACO-208; 其额定功率为 25 W, 额定压强为 >0.015 MPa, 容积流量为 2.7 m³/h。将高速摄像仪放置在底吹水模型的横截面进行拍摄, 另一端贴有黑纸可以最大限度地减少外部光线的影响, 有助于提高所拍摄照片的对比度, 高速摄像仪的型号为德国 PCO.dimax HD, 在全分辨率 1920×1080 像素下, 其最高摄像速度为 2128 帧/秒下可捕获到超清晰的图像, 在全分辨率 1008×1000 像素时候, 其最高摄像速度为 3822 帧/秒, 最短曝光时间是 1.5 μs, 其自带内存为 36 GB。

1.2 实验步骤与方法

本实验过程主要借助高速摄像仪设备, 对水模型实验中的气体在熔体流动状况进行拍摄。为了简化实

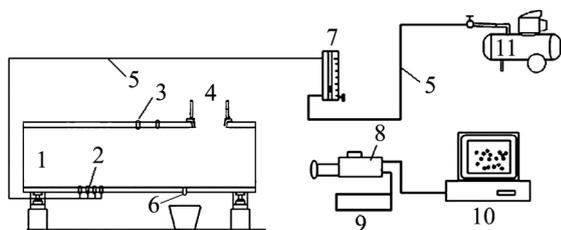


图 2 底吹熔池实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bottom-blown bath experiment device: 1—Bottom-blown bath smelting furnace; 2—Lance; 3—Gas vent; 4—Feed opening; 5—PVC Transparent hose; 6—Copper export; 7—Glass rotameter; 8—High speed camera; 9—Power supply; 10—Computer; 11—Electromagnetic small air compressor

表 1 正交实验因素水平配置表

Table 1 Orthogonal experimental factors level configuration

Level	Lance inclination/(°)	Lance number	Lance row number
A ₁	0	1	1
A ₂	0	2	1
A ₃	0	3	1
B ₁	7	1	1
B ₂	7	2	1
B ₃	7	3	1
C ₁	14	1	1
C ₂	14	2	1
C ₃	14	3	1
D ₁	7-7	2	2
D ₂	7-7	4	2
D ₃	14-14	2	2
D ₄	14-14	4	2
E ₁	0-7	2	2
E ₂	0-7	4	2
E ₃	0-14	2	2
E ₄	0-14	4	2
E ₅	7-14	2	2
E ₆	7-14	4	2

验内容, 在实验过程中保证总的气体流量为 2.0 m³/h 及氧枪直径 0.04 m 不变, 且实验周围环境条件均相同的条件下进行。具体实验步骤如下。

1) 在所有的实验中, 假定在初始时间熔池为静止状态, 不考虑熔池内化学反应、气流速度、氧枪直径对熔池流动的影响, 同时也不考虑加料、放钎渣对熔

池的影响, 也不考虑炉壁散热等过程。为了突出实验效果, 加入颜色指示剂并使其均匀、稳定的分布于熔池中。

2) 利用摄像机记录下底吹气泡群的分布形态变化过程, 摄像机光圈值 F 为 2.2, 焦距为 50 mm, 快门速度为 1/1250 s, 使用额定功率 40 W, 频率 50 Hz 的白炽灯进行灯光补偿, 在拍摄炉体对面壁面放置黑色纸板防止漏光、反光对图片质量的影响。视频记录时间为 2~4 min, 并将视频按帧存储为 2000 张流动分布状态图样。

3) 对 2000 张图像进行二值化处理, 借助于 CHomP 软件^[16]计算二值图的第 0 维 Betti 数 β_0 和第 1 维 Betti 数 β_1 。某工况下喷吹开始及终止时刻的图像处理结果如图 3 所示。

1.3 图像分析方法

在代数拓扑中, 第 0 维 Betti 数代表所构成空间的连通分支的数量, 而第 1 维 Betti 数则提供了结构中通道数量的量化。简而言之, 第 0 维 Betti 数表示图样中块的个数, 第 1 维 Betti 数指的是区域中洞的个数^[21]。根据徐等的研究(2011 年), Betti 数可以应用量化多相流混合效果。第 0 维 Betti 数 β_0 代表图像中块的个数, 第 1 维 Betti 数 β_1 的代表区域中孔的个数^[22]。据黄等的研究(2014), Betti 数可以用来描述异构和伪齐鼓泡流态。第 0 维 Betti 数 β_0 代表连续相的数量, 第 1 维 Betti 数 β_1 代表气泡群的数量^[23]。

从实验图像所呈现的结果可以发现, 经过相当长的搅拌混合后, 一些小气泡团聚形成大气泡甚至气泡群(其中还有分离出去的小气泡)以及底吹射流在喷吹过程中射流出现左右摇摆等现象大量存在于反应器中, 这恰恰反应了气体搅拌多相流混合过程中的复杂性和不稳定性。借助于一种基于计算同调群的原始图像分析技术, 能够获得气体搅拌射流不稳定性的特征量化参数, 从而实现了底吹炉气体射流气泡分布情况以及气流稳定性规律进行评价, 总结出最优的底吹氧枪排布方式。

针对底吹炉底吹气流的特殊性, 经过图像分析后若玻璃反应器中块的个数变化幅度小, 表示气泡团聚或分裂程度以及射流摇摆幅度小, 底吹气体射流稳定性好, 此外, 在这些结块中洞的个数, 表示底吹炉中气泡个数, 反映了气泡混合均匀性程度, 气泡个数越多代表该种喷吹方式下熔池含有的气体量大, 矿料颗粒与氧气发生碰撞而进行化学反应的几率大, 因此熔炼效率高。因此, 第 0 维 Betti 数和第 1 维 Betti 数可以被用来多角度表征气体射流振荡强化搅拌效果。

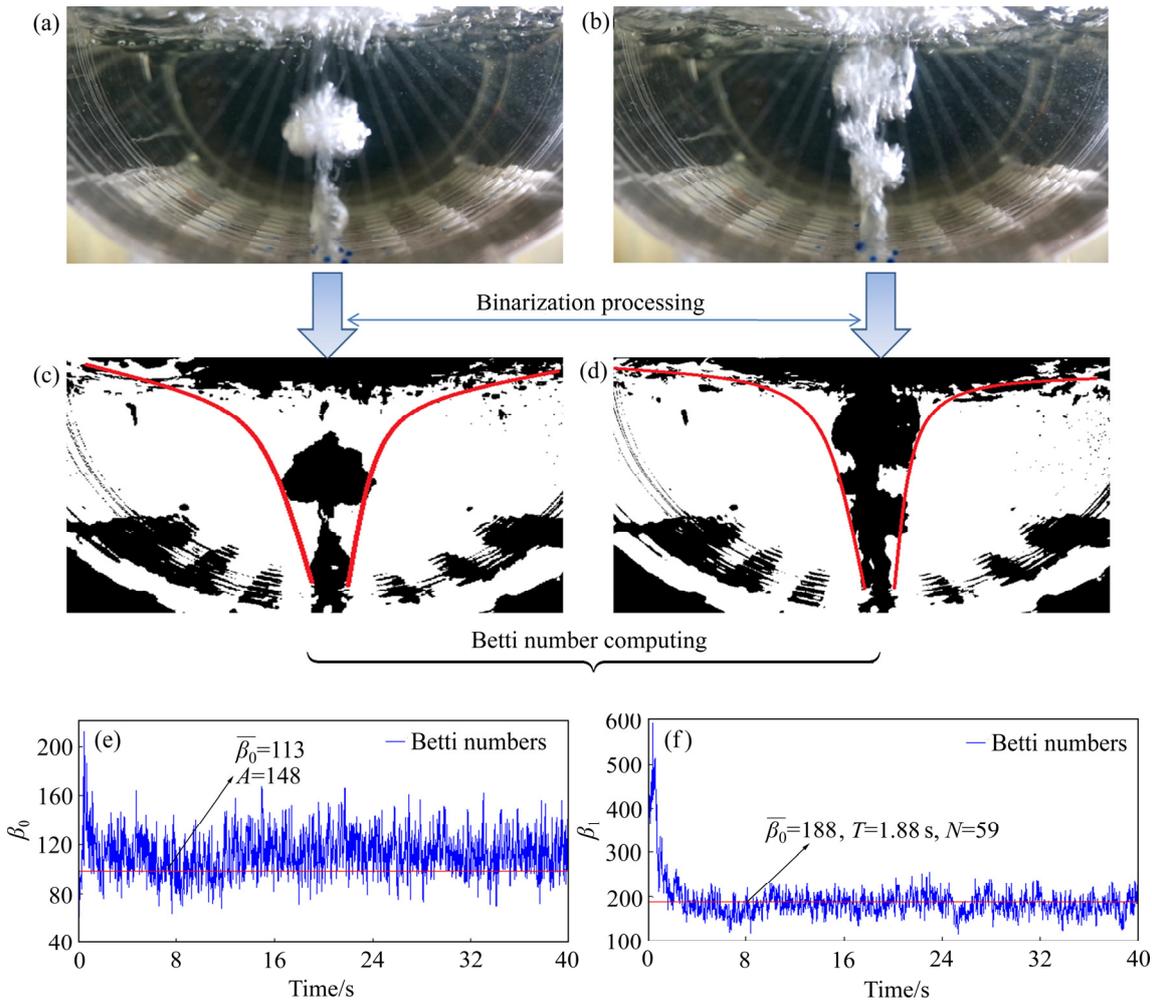


图3 图像处理步骤

Fig. 3 Image processing steps: (a), (b) Experimental image; (c), (d) Binarization images; (e), (f) Betti numerical time sequence diagram()

借助 CHomP 软件包来计算不同底吹氧枪排布方式下二值化图像的第 0 维 Betti 数及第 1 维 Betti 数，可以获得的第 0 维和第 1 维 Betti 数时间序列。为了衡量气体搅拌过程的强化搅拌效果，探索强化搅拌效果的评价，需要定义量化强化搅拌效果评价参数，即开始振荡时间 T (单位: s)。将二值化图像的第 1 维 Betti 数开始大于每一组实验产生的所有二值化图像的 Betti 数的平均值的时刻定义为开始振荡时间 T 。第 0 维 Betti 数的平均值 $\bar{\beta}_0$ 是指 $t > T$ 之后稳定状态下对第 0 维 Betti 数计的平均值。开始振荡时间 T 的数值可以被用来估计实验中气体射流开始出现振荡效果的最短时间。振荡次数 N 是指在统计时间段内某时间点二值图像第 1 维 Betti 数位于均值附近时即为一次振荡，在后面某一时刻第 1 维 Betti 数再次到达均值时开始记录为第二次振荡。

考虑集合:

$$\chi^+ := \{t | \beta_0(t) > \bar{\beta}_0, t > T\},$$

$$\chi^- := \{t | \beta_0(t) < \bar{\beta}_0, t > T\},$$

$$A := \frac{1}{2} \left[\frac{1}{m} \sum_{t \in \chi^+} \beta_0(t) - \frac{1}{n} \sum_{t \in \chi^-} \beta_0(t) \right],$$

式中: β_0 表示在时间 T 时刻捕捉到的图样二值图的第 0 维 Betti 数; m 、 n 表示 χ^+ 、 χ^- 中元素的个数 A 被用来估计第 0 维 Betti 数偏离它的平均值 $\bar{\beta}_0$ 的幅度，即振幅。

通过计算同调群的程序对实验获得的每一组实验数据进行计算，获得关于第 0 维 Betti 数和第 1 维 Betti 数随时间演化的时间序列，通过计算开始振荡时间 T ，振幅 A 以及第 0 维 Betti 数和第 1 维 Betti 数的平均值，建立最优化模型，从而对每一种排布工况下的气体射

流振荡效果进行评价。

2 结果与讨论

2.1 底吹气体射流稳定性

底吹气体射流在刚进入熔池时, 在熔池内部压力作用的约束下首先会形成大气泡, 进而破散成看似无规律的气泡群, 气泡间存在相互作用力, 因此气泡的上升路径并不是竖直向上, 而是弯曲的向上流动, 由气泡组成的气体射流在熔池中的流动就会呈现左右摇摆的运动形式。上浮的气泡群带动溶液流动, 将动能传递给溶液从而使得溶液鼓出熔池表面, 同时可以发现喷吹形成的气泡群越大鼓出的泉涌幅度越大。因此底吹气体射流在熔池流动具有左右摇摆和向上泉涌两

种现象, 其中左右摇摆的流动形式不仅能够保证熔池内具有良好的动力学条件, 同时通过增加气泡向上的距离, 延长气泡在熔池内的停留时间, 有效地减小气泡向上的速度, 抑制向上泉涌的幅度。同时减小喷出气泡体积, 尽量使气泡破碎成小气泡对于抑制熔池喷溅, 提高冶炼效率具有重要意义。

2.1.1 单排氧枪不同工况下射流稳定性

在不同喷吹方式下射流的摇摆幅度存在明显差异, 利用第 0 维 Betti 数均值及振幅可以定量评价气体射流的稳定性程度。单排氧枪不同工况下第 0 维 Betti 数随时间序列变化及第 0 维 Betti 数均值见图 4 中所示(下同)。具体实验统计结果见下图 4 所示。

根据图 4 统计结果, 计算出各个工况下第 0 维 Betti 数的均值和振幅, 其数值大小以及变化趋势如下表 2、图 5 及图 6 所示。

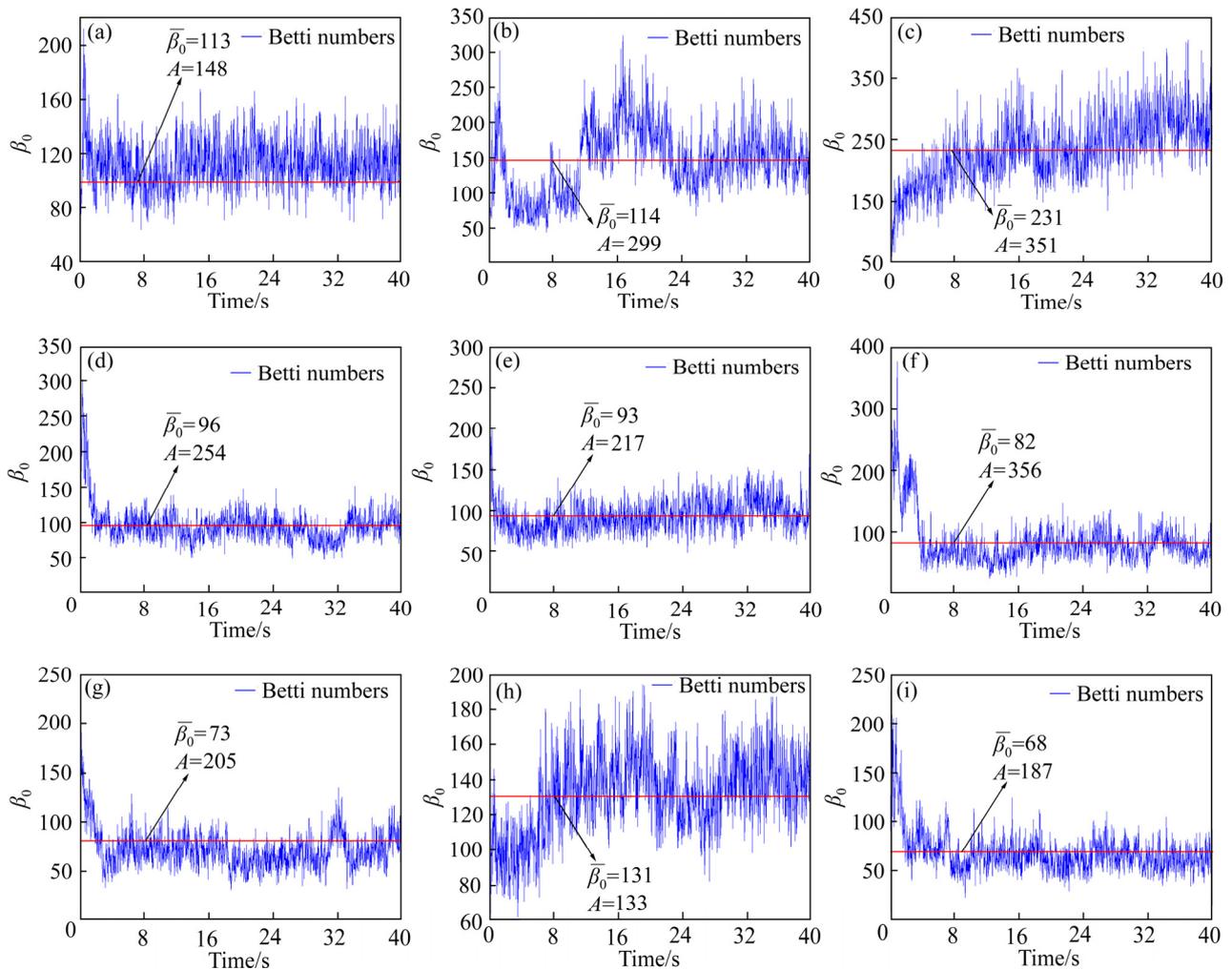


图 4 单排氧枪不同工况下第 0 维 Betti 数时间序列

Fig. 4 Zeroth Betti numbers' time series of single row lance under different working conditions: (a) Lance angle of 0° (1); (b) Lance angle of 7° (1); (c) Lance angle of 14° (1); (d) Lance angle of 0° (2); (e) Lance angle of 7° (2); (f) Lance angle of 14° (2); (g) Lance angle of 0° (3); (h) Lance angle of 7° (3); (i) Lance angle of 14° (3). (Number of lances are shown in brackets)

表 2 单排氧枪不同工况下第 0 维 Betti 数的均值和振幅
Table 2 Zeroth Betti numbers' average and amplitude of single row lance under different working conditions

Lance angle/(°)	1 lance		2 lances		3 lances	
	$\bar{\beta}_0$	A	$\bar{\beta}_0$	A	$\bar{\beta}_0$	A
0	113	148	96	254	73	205
7	144	299	93	217	131	133
14	231	351	82	356	68	187

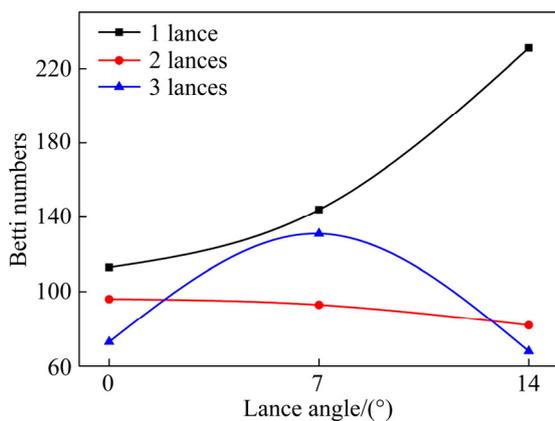


图 5 单排氧枪不同工况下第 0 维 Betti 数均值变化
Fig. 5 Zeroth Betti numbers' average changes of single row lance under different working conditions

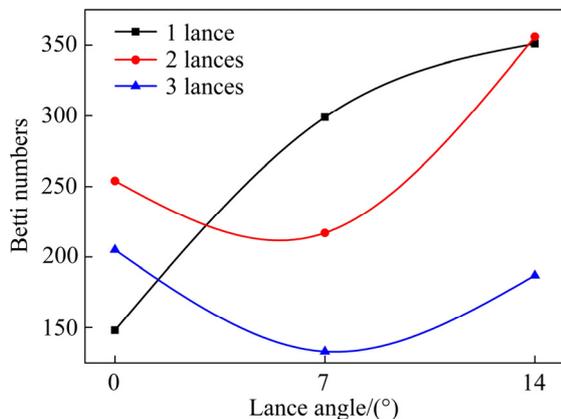


图 6 单排氧枪不同工况下第 0 维 Betti 数振幅变化
Fig. 6 Zeroth Betti numbers' amplitude changes of single row lance under different working conditions

根据图 4、5 和 6 中不同工况下第 0 维 Betti 数均值及振幅变化趋势可以得出：在单排氧枪排布方式下，单氧枪喷吹射流随着氧枪倾角越大，第 0 维 Betti 数均值数值逐渐增加，即氧枪倾角越大射流摇摆振荡的趋势更加明显。但在实验中发现当氧枪倾角超过 14° 时，氧枪口距离液面的垂直距离较短，气泡在熔池中

流动距离减小，气泡在熔池中的停留时间较短；从上图 4 可以看出，随着氧枪个数增加，第 0 维 Betti 数的数值整体变化范围缩小，说明射流产生的气泡数变化减小，喷吹射流会趋于稳定；对比三个氧枪倾角具体的 Betti 均值及振幅变化，可以发现单氧枪喷吹，随着角度变大，均值越大且振幅越大，即射流产生气泡数多且分散；多氧枪喷吹时，可见第 0 维 Betti 数均值及振幅数值明显减小，因气体总气量不变，分成多股射流鼓入熔池内，射流压力减小，破碎成气泡个数明显减小，即射流产生气泡少且局限在区域内。因此从底吹熔炼实际过程中分析可知在产生更多的气泡个数的条件下，有利于带动熔体流动，增加了氧气与硫化物接触的表面积，即促进化学反应的发生更为彻底。因此在单根氧枪喷吹时，在一定范围内氧枪倾角越大，气泡个数越多，数量变化越大。

2.1.2 双排氧枪不同工况下射流稳定性

考虑到底吹熔池熔炼过程中为了改善熔池内的动力学条件需要将设置双排氧枪同时对喷的情况，因此在实验过程中探究了双排氧枪喷吹射流对熔池搅拌的影响。其中双排氧枪分为对称与非对称两种氧枪排布方式，两根氧枪对喷为一组，四根氧枪两两对喷为两组，具体图像处理结果如下图 7 及 8 所示。

根据图 7 及图 8 中双排氧枪不同工况下第 0 维 Betti 数时间序列，计算出各个工况下第 0 维 Betti 数的均值和振幅，其数值大小以及变化趋势如表 3、图 9 及图 10 中所示。

根据图 9 和 10 中不同工况下第 0 维 Betti 数均值及振幅变化趋势可以得出：在双排氧枪喷吹时，非对称喷吹相较于对称喷吹射流第 0 维 Betti 数均值及振幅数值明显更高，即非对称喷吹射流产生的气泡个数更多，分布更为均匀，因此对熔池的搅拌作用更为明显；增加喷吹氧枪个数时，对称喷吹射流的均值及振幅数值变化更为明显，即喷吹氧枪个数的改变对对称喷吹射流的影响较大。因此采用双排氧枪喷吹时，非对称氧枪排布喷吹射流产生的气泡个数更多，分布更为均匀，且气体射流较为稳定，因此对熔池的搅拌效果更好。

2.2 底吹气体射流振荡强化搅拌规律性

底吹熔池熔炼是利用底吹氧枪喷吹气体射流进入熔池中，气体射流既具有搅拌熔池的作用，射流中含有的氧气也可以与熔池中的硫化矿发生氧化反应，产生的热量满足熔炼过程的热量需求，从而能够达到自

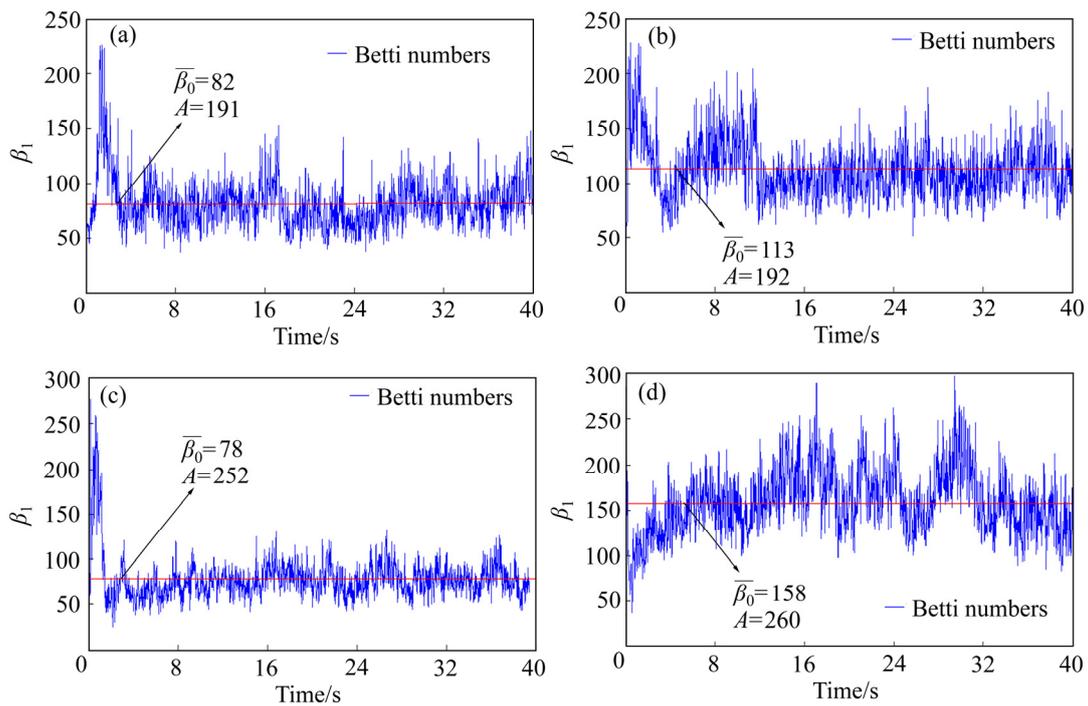


图7 双排氧枪对称排布方式下第0维 Betti 数时间序列

Fig. 7 Zeroth Betti numbers' time series of double rows lance under symmetrical arrangement way: (a) Lance angle of 7°-7° (1-1); (b) Lance angle of 14°-14° (1-1); (c) Lance angle of 7°-7° (2-2); (d) Lance angle of 14°-14° (2-2). (1-1 means one row of two lances injecting; 2-2 means two rows of four lances injecting)

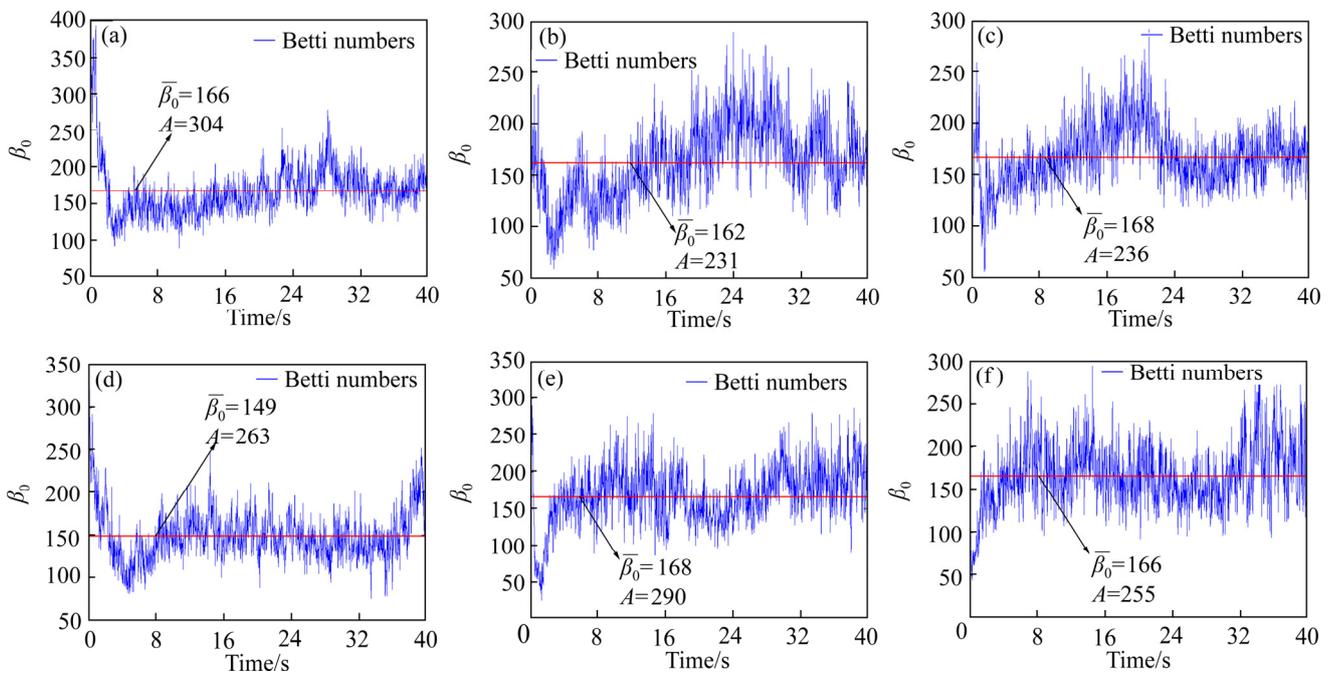


图8 双排氧枪非对称排布方式下第0维 Betti 数时间序列

Fig. 8 Zeroth Betti numbers' time series of double rows lance under asymmetric arrangement way: (a) Lance angle of 0°-7° (1-1); (b) Lance angle of 0°-14° (1-1); (c) Lance angle of 7°-14° (1-1); (d) Lance angle of 0°-7° (2-2); (e) Lance angle of 0°-14° (2-2); (f) Lance angle of 7°-14° (2-2)

表3 双排氧枪不同工况下第0维 Betti 数的均值和振幅
Table 3 Zeroth Betti numbers' average and amplitude of double rows lance under different working conditions

Lance angle/(°)	2 lances (1-1)		4 lances (2-2)	
	$\bar{\beta}_0$	A	$\bar{\beta}_0$	A
7-7	82	191	146	252
14-14	113	192	158	260
0-7	166	304	149	263
0-14	162	231	169	290
7-14	168	236	166	255

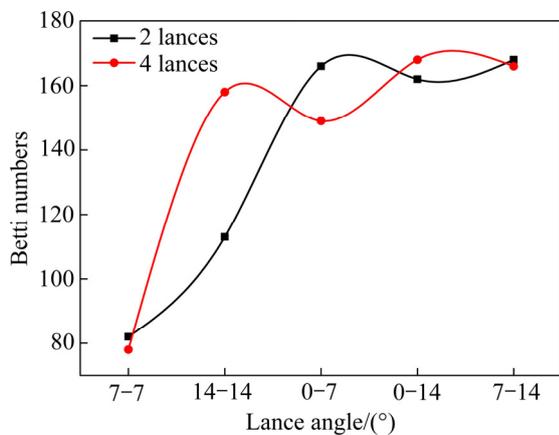


图9 双排氧枪不同工况下第0维 Betti 数均值变化

Fig. 9 Zeroth Betti numbers' average changes of double rows lance under different working conditions

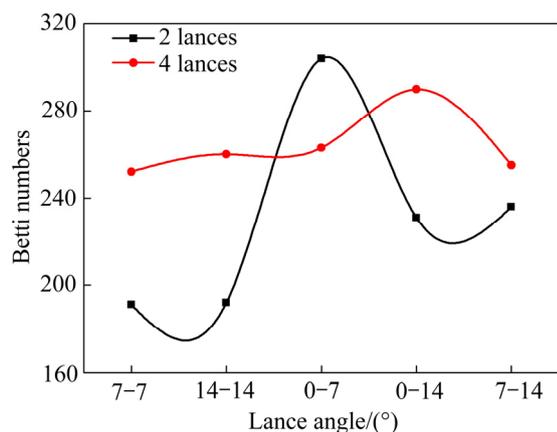


图10 双排氧枪不同工况下第0维 Betti 数振幅变化

Fig. 10 Zeroth Betti numbers' amplitude changes of double rows lance under different working conditions

热熔炼的目的。因此，在气体喷吹的过程中，若将大气泡破碎成小气泡会使得搅拌面积更大，有效抑制气

泡上突泉涌的幅度。同时能够减小气泡上浮的动力，延长气泡在熔池中流动的时间，矿料颗粒与氧气有更多的机会接触，氧化反应更为彻底，极大地提高了熔池熔炼效率。而第1维 Betti 数就是表征熔池中气泡的个数，通过统计不同工况下熔池中第1维 Betti 数的变化规律，从而得出气体射流振荡强化搅拌对底吹熔池熔炼效果的影响。

2.2.1 单排氧枪排布方式气体射流强化搅拌规律

单排氧枪排布方式下喷吹气体射流第1维 Betti 数值变化如下图11所示：

根据图11中单排氧枪不同工况下第1维 Betti 数时间序列，计算出各个工况下第1维 Betti 数的均值 $\bar{\beta}_1$ 、开始振动时间 T 及振动次数 N ，其数值大小以及变化趋势如表4、图12、图13及图14中所示。

根据图12振动时间变化趋势可知：0°及14°氧枪倾角下射流能够更快进入振荡周期；由图13振动次数变化可知：在相同的时间段内，0°氧枪倾角下气体射流振荡次数均较多，说明0°氧枪倾角下，气体射流振荡周期较短，振动幅度较小，随着氧枪倾角的增加射流振荡次数呈减少的趋势，即气体射流摇摆振荡周期时间延长，射流摇摆振荡的幅度变大，搅拌面积随之增加；由图14中第1维 Betti 数均值变化情况可以得出：在单根氧枪喷吹时，第1维 Betti 数均值随氧枪倾角的增加出现明显的增加，即图像中块的个数越多，气泡分布更为均匀，范围更广；而多氧枪喷吹时，第1维 Betti 数均值较小且随氧枪倾角的增加数值变化不大，即图像中块的个数较少，气泡分布在有限的区域内。从气泡的运动上分析，单根氧枪喷吹时，气体射流鼓入熔池，在熔体压力下破碎成大量的小气泡，自由向上扩散流动，而在总气量不变的条件下，分成两根氧枪将气体鼓入熔池中，气体压力减小，因此破碎成小气泡个数明显减少，且两股射流形成的气泡群相互影响，呈互相吸引后又互相排斥的反复运动状态，极大地影响气泡的扩散，两束射流距离过近而产生的叠加作用也会加大液面喷溅。综上所述：在单喷枪喷吹下，随着氧枪倾角变大即气体射流的振荡幅度增加，气泡分布更为均匀，对于熔池熔炼搅拌及熔炼效果较为有利；从射流振荡幅度及气泡分布均匀程度上可以看出，单根氧枪的强化搅拌效果明显强于多根氧枪下的搅拌效果，因此在喷吹时，保持合理的氧气压力及氧枪间距，对于搅拌效果具有较大的影响。

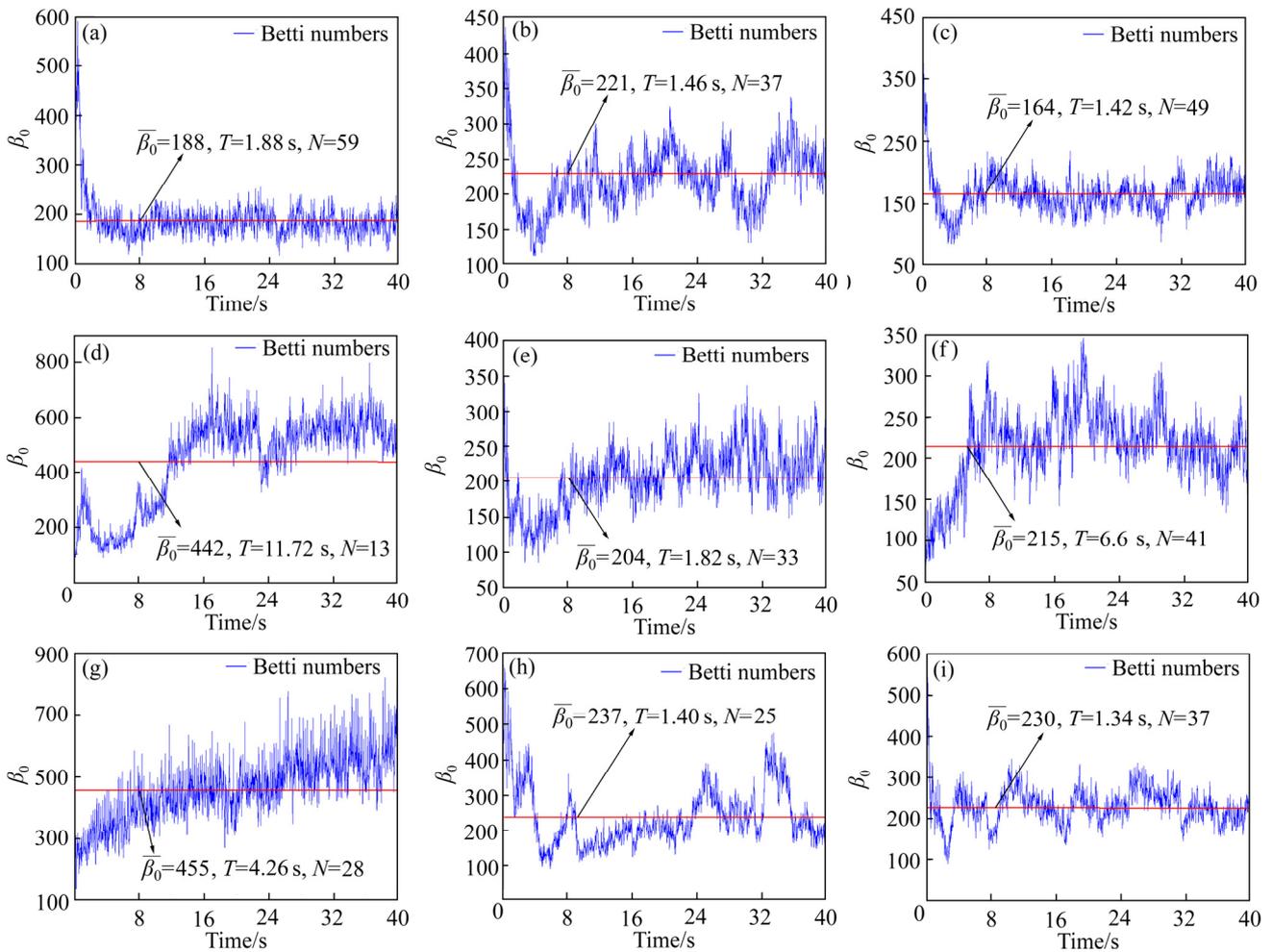


图 11 单排氧枪不同工况下第 1 维 Betti 数时间序列图

Fig. 11 First Betti numbers' time series of single row lance under different working conditions: (a) Lance angle of 0° (1); (b) Lance angle of 0° (2); (c) Lance angle of 0° (3); (d) Lance angle of 7° (1); (e) Lance angle of 7° (2); (f) Lance angle of 7° (3); (g) Lance angle of 14° (1); (h) Lance angle of 14° (2); (i) Lance angle of 14° (3). (Number of lances are shown in brackets)

表 4 单排氧枪不同工况下第 1 维贝蒂数特征值

Table 4 First Betti numbers' several characteristic values of single row lance under different working conditions

Lance angle/(°)	1 lance			2 lances			3 lances		
	$\bar{\beta}_1$	T/s	N	$\bar{\beta}_1$	T/s	N	$\bar{\beta}_1$	T/s	N
0	188	1.88	59	221	1.46	37	164	1.42	49
7	422	11.72	13	204	1.82	33	215	6.6	41
14	455	4.26	28	237	1.40	25	230	1.34	37

2.2.2 双排氧枪排布方式气体射流强化搅拌规律

双排氧枪排布方式喷吹气体射流第 1 维 Betti 数值序列图如下图 15 和图 16 所示。

根据图 15 和 16 中双排氧枪不同工况下第 1 维 Betti 数时间序列, 计算出各工况下第 1 维 Betti 数的均值、开始振动时间 T 及振动次数 N, 其数值大小以及变化趋势如表 5、图 17、18 和 19 所示。

根据图 17 中不同工况下开始振动时间可知, 对称喷吹射流进入振荡周期更快。由图 18 中不同工况下振荡次数变化可以发现, 在相同时间段内, 当一根氧枪倾角为 14° 时, 振荡次数显著减小, 即气体射流振荡周期时间增加, 振荡幅度变大, 射流搅拌范围变大; 最后根据图 19 可知, 双排对称喷吹气体射流的均值较小, 即破裂产生的气泡分布不均匀, 气体射流在鼓入

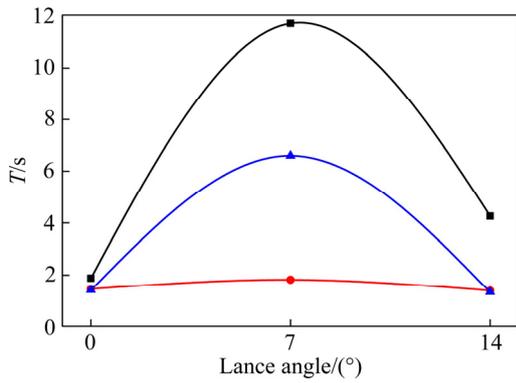


图 12 单排氧枪不同工况下开始振动时间变化
Fig. 12 Start vibration time change of single row lance under different working conditions

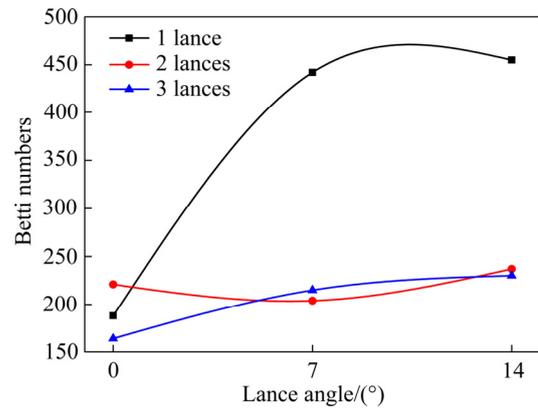


图 14 单排氧枪不同工况下第 1 维 Betti 数均值变化
Fig. 14 First Betti numbers' average change of single row lance under different working conditions

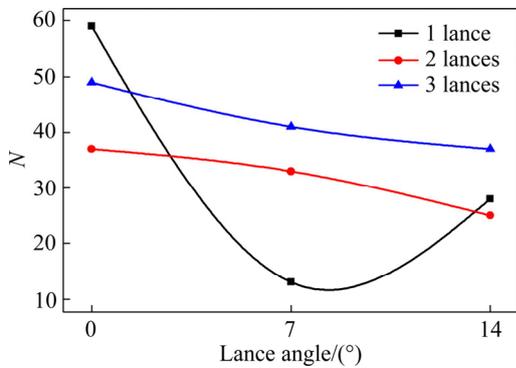


图 13 单排氧枪不同工况下振动次数变化
Fig. 13 Vibration times change of single row lance under different working conditions

熔池后基本呈大气泡或气泡群的形式，而喷吹出的气泡群产生的泉涌的幅度明显要强于小气泡自由上浮带动的泉涌幅度。在非对称喷吹方式下，因一根氧枪采用 0° 倾角，出口压力更大，破碎成小气泡个数更多，随着两根氧枪倾角的增加第 1 维 Betti 数均值逐渐减小，即当氧枪倾角越大，气泡分布不均匀，将产生的更多的大气泡或气泡群上浮，这对于控制熔体泉涌喷溅极为不利。综上所述：当双排氧枪排布时，从气泡的均匀性来说，应该采用非对称喷吹方式，同时双氧枪倾角不宜过大，否则熔池液面产生较为严重的喷溅，损害炉体。

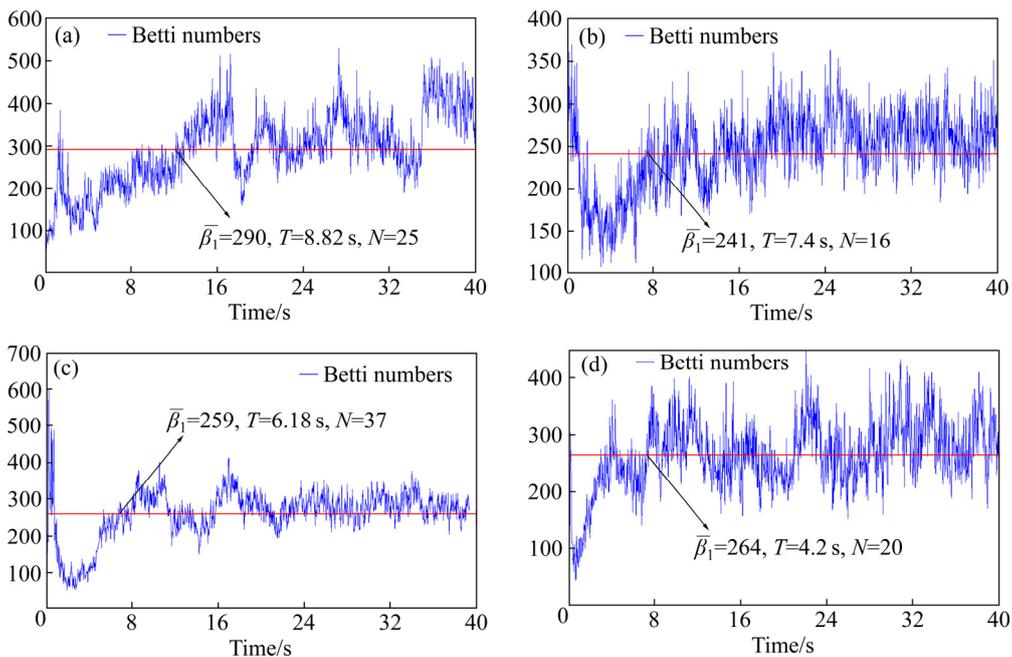


图 15 双排氧枪对称排布方式下第 1 维 Betti 数时间序列
Fig. 15 First Betti numbers' time series of double rows lance under symmetrical arrangement way:
 (a) Lance angle of 7°-7° (1-1); (b) Lance angle of 14°-14° (1-1); (c) Lance angle of 7°-7° (2-2); (d) Lance angle of 14°-14° (2-2)

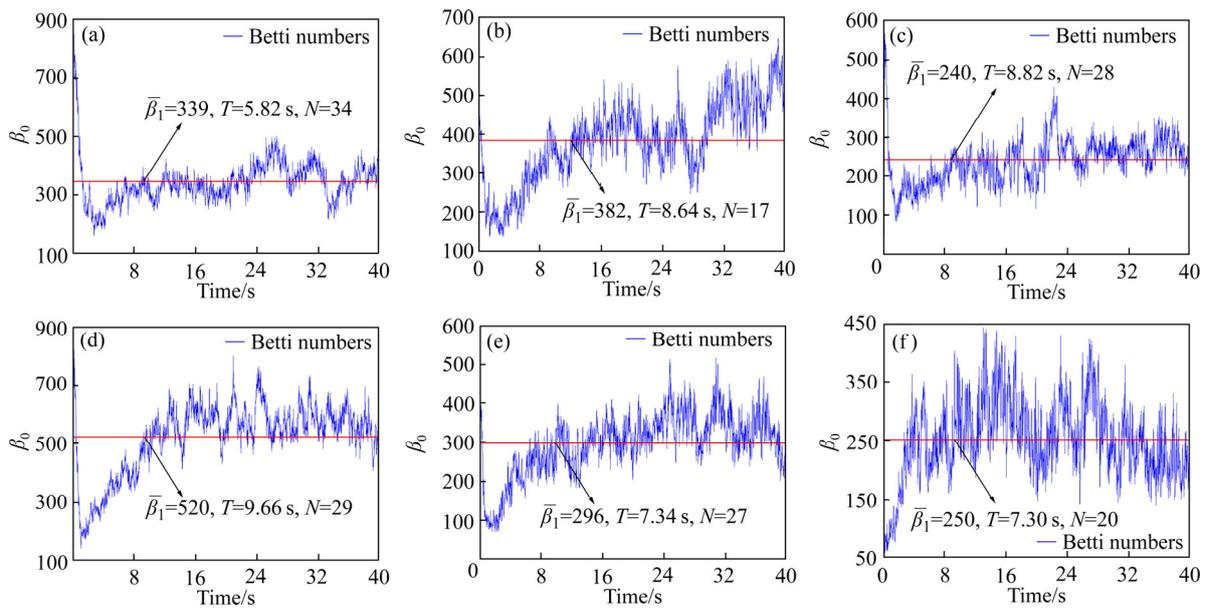


图 16 双排氧枪非对称排布方式下第 1 维 Betti 数时间序列

Fig. 16 First Betti numbers' time series of double rows lance under asymmetric arrangement way: (a) Lance angle of 0°-7° (1-1); (b) Lance angle of 0°-14° (1-1); (c) Lance angle of 7°-14° (1-1); (d) Lance angle of 0°-7° (2-2); (e) Lance angle of 0°-14° (2-2); (f) Lance angle of 7°-14° (2-2)

表 5 双排氧枪不同工况下第 1 维贝蒂数特征值

Table 5 First Betti numbers' several characteristic values of double rows lance under different working conditions

Lance angle/(°)	2 lances			4 lances		
	$\bar{\beta}_1$	T/s	N	$\bar{\beta}_1$	T/s	N
7-7	290	8.82	25	259	6.18	37
14-14	242	7.40	16	264	4.20	20
0-7	339	5.82	34	520	9.66	29
0-14	382	8.64	27	296	7.34	27
7-14	240	8.82	28	250	7.30	20

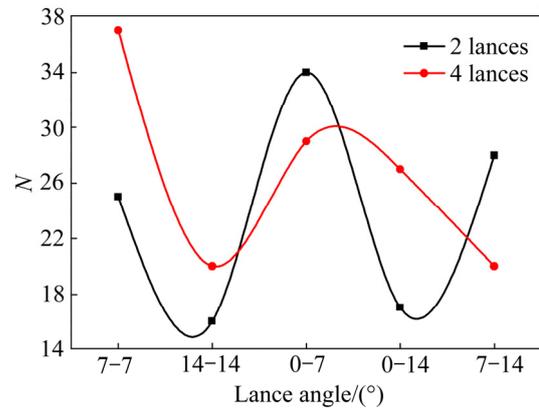


图 18 双排氧枪不同工况下振动次数变化

Fig. 18 Vibration times change of double rows lance under different working conditions

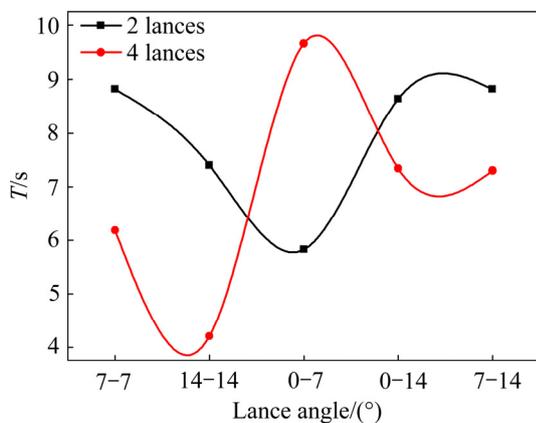


图 17 双排氧枪不同工况下开始振动时间变化

Fig. 17 Start vibration time change of double rows lance under different working conditions

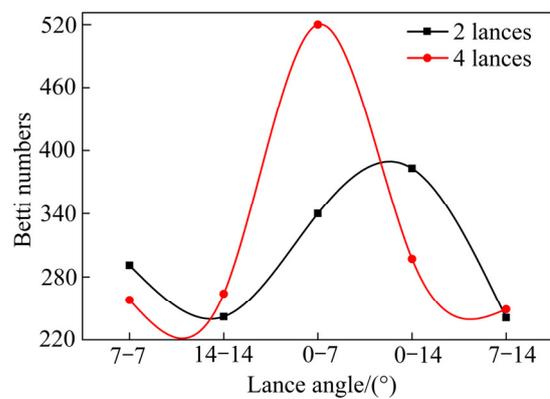


图 19 双排氧枪不同工况下第 1 维 Betti 数均值变化

Fig. 19 First Betti numbers' average change of double rows lance under different working conditions

3 结论

1) 在单排氧枪排布方式下, 当单个氧枪喷吹时, 氧枪倾角越大, 射流产生的气泡数量越多, 分布更为均匀, 对于熔池搅拌及熔炼有利; 对比单氧枪与多氧枪喷吹特征值, 在总气量不变的条件下, 单氧枪强化搅拌效果明显好于多氧枪, 因此在实际进行氧枪排布时, 氧气压力大小对于底吹气体搅拌效果影响较大。

2) 在双排氧枪排布方式下, 非对称喷吹相较于对称喷吹方式产生的气泡个数更多, 分布更为均匀, 射流振动幅度也更大, 因此进入振动周期时间较晚, 对熔池强化搅拌效果明显更好。实验过程采用 0° 和 7° 氧枪倾角的特征数值较为理想, 因此在双排氧枪排布时氧枪倾角应当尽量采用小角度下进行喷吹。

3) 在底吹氧气喷吹时, 氧枪倾角不宜过大。过大的氧枪倾角虽然能够有效增强喷吹气体射流摇摆搅拌效果, 但氧枪口距离熔池表面垂直距离减小, 在较小的气体动量下就容易形成剧烈的泉涌现象, 同时要注意控制氧枪间距, 两束气体射流距离较近产生叠加作用, 从而造成熔池表面喷溅, 加大了熔池对炉壁的冲刷作用。

REFERENCES

- [1] 崔志祥, 申殿邦, 王智, 李维群, 边瑞民. 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 Zhi-xiang, SHEN Dian-bang, WANG Zhi, LI Wei-qun, BIAN Rui-min. New process of copper smelting with oxygen enriched bottom blowing technology[J]. Non-ferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2010(3): 17-20.
- [2] LI B K, YIN H B, ZHOU C Q, TSUKIHASHI F. Modeling of three-phase flows and behavior of slag steel interface in an argon gas stirred ladle[J]. ISIJ International, 2008, 48(12): 1704-1711.
- [3] 李宝宽, 顾明言, 齐凤升, 王芳, 周谦. 底吹钢包内气/钢液/渣三相流模型及渣层行为的研究[J]. 金属学报, 2008, 44(10): 1198-1204.
LI Bao-kuan, GU Ming-yan, QI Feng-shen, WANG Fang, ZHOU Qian. Modeling of three-phase(gas/molten steel/slag) flows and slag layer behavior in an argon gas stirred ladle[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(10): 1198-1204.
- [4] VALENCIA A, ROSALES M, PAREDES R, LEON C, MOYANO A. Numerical and experimental investigation of the fluid dynamics in a Teniente type copper converter[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, 33(3): 302-310.
- [5] ROSALES M, VALENCIA A, FUENTES R. A Methodology for controlling slopping in copper converters by using lateral and bottom gas injection[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2009, 7(1): 91-97.
- [6] 张振扬, 陈卓, 闫红杰, 刘方侃, 刘柳, 崔志祥, 申殿邦. 富氧底吹熔炼炉内气液两相流动的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1826-1834.
ZHANG Zhen-yang, CHEN Zhuo, YAN Hong-jie, LIU Fang-kan, LIU Liu, CUI Zhi-xiang, SHEN Dian-bang. Numerical simulation of gas-liquid flows in oxygen enriched bottom-blown furnace[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1826-1834.
- [7] 张振扬, 闫红杰, 刘方侃, 王计敏. 富氧底吹熔炼炉内氧枪结构参数的优化分析[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1471-1477.
ZHANG Zhen-yang, YAN Hong-jie, LIU Fang-kan, WANG Ji-min. Optimization analysis of lance structure parameters in oxygen enriched bottom-blown furnace[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1471-1477.
- [8] 闫红杰, 夏韬, 刘柳, 何秋安, 何志军, 李全清. 高铅渣还原炉内气液两相流的数值模拟与结构优化[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(10): 2642-2651.
YAN Hong-jie, XIA Tao, LIU Liu, HE Qiu-an, HE Zhi-jun, LI Quan-qing. Numerical simulation and structural optimization of gas-liquid two-phase flow in reduction furnace of lead-rich slag[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(10): 2642-2651.
- [9] 闫红杰, 刘方侃, 张振扬, 高强, 刘柳, 崔志祥, 申殿邦. 氧枪布置方式对底吹熔池熔炼过程的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(8): 2393-2400.
YAN Hong-jie, LIU Fang-kan, ZHANG Zhen-yang, GAO Qiang, LIU Liu, CUI Zhi-xiang, SHEN Dian-bang. Influence of lance arrangement on bottom-blowing bath smelting process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(8): 2393-2400.
- [10] 刘柳, 闫红杰, 周子民, 高强, 张振扬, 刘方侃, 崔志祥. 氧气底吹铜熔池熔炼过程的机理及产物的微观分析[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2116-2124.
LIU Liu, YAN Hong-jie, ZHOU Jie-min, ZHANG

- Zhen-yang, LIU Fang-kan, CUI Zhi-xiang. Mechanism of copper smelting process by oxygen bottom blowing and microanalysis of smelting products[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(7): 2116–2124.
- [11] 邵 品, 张延安, 刘 燕, 王东兴. 底吹冰铜吹炼炉中气-液流动状况的数学模拟[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(9): 1303–1306.
- SHAO Pin, ZHANG Yanan, LIU Yan, WANG Dong-xing. Numerical simulation of gas liquid flow behavior in a copper matte bottom blowing converter[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33(9): 1303–1306.
- [12] 余 跃, 温 治, 刘训良, 苏福永, 蓝海鹏, 郝小红. 喷枪结构对底吹炼铜炉流场影响的模拟及实验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(12): 4129–4236.
- YU Yue, WEN Zhi, LIU Xun-liang, SU Fu-yong, LAN Hai-peng, HAO Xiao-hong. Simulation and experiment of influence of nozzle structure on bottom-blowing furnace flowing process[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(12): 4129–4236.
- [13] 郭学益, 王亲猛, 田庆华, 张永柱. 基于区位氧势硫势梯度变化下铜富氧底吹熔池熔炼非稳态多相平衡过程[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(4): 1072–1079.
- GUO Xue-yi, WANG Qin-meng, TIAN Qing-hua, ZHANG Yong-zhu. Nonsteady multiphase equilibrium process of copper oxygen enriched bottom blowing bath smelting with gradual change of oxygen and sulfur potential of different positions in furnace[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(4): 1072–1079.
- [14] 王亲猛, 郭学益, 田庆华, 廖立乐, 张永柱. 氧气底吹铜熔炼渣中多组元渣行为及渣型优化[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(6): 1678–1686.
- WANG Qin-meng, GUO Xue-yi, TIAN Qing-hua, LIAO Li-le, ZHANG Yong-zhu. Multicomponents lagging behavior and constitution optimization of slag in copper oxygen bottom blowing bath smelting process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(6): 1678–1686.
- [15] 王亲猛, 郭学益, 廖立乐, 田庆华, 张永柱. 氧气底吹炼铜多组元渣行为及组元含量的映射关系[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(1): 188–196.
- WANG Qin-meng, GUO Xue-yi, LIAO Li-le, TIAN Qing-hua, ZHANG Yong-zhu. Mapping relationship between multicomponent matte forming behavior and content in copper oxygen bottom blowing bath smelting process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(1): 188–196.
- [16] XU Jian-xin, XIAO Qing-tai, FEI Yu, WANG Shi-bo, HUANG Jun-wei. Accurate estimation of mixing time in a direct contact boiling heat transfer process using statistical methods[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 75: 162–168.
- [17] FEI Yu, XIAO Qing-tai, XU Jian-xin, PAN Jian-xin, WANG Shi-bo, WANG Hua, HUANG Jun-wei. A novel approach for measuring bubbles uniformity and mixing efficiency in a direct contact heat exchanger[J]. *Energy*, 2015, 93: 2313–2320.
- [18] XU Jian-xin, XIAO Qing-tai, CHEN Yin, FEI Yu, PAN Jian-xin, WANG Hua. A modified L2-star discrepancy method for measuring mixing uniformity in a direct contact heat exchanger[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97: 70–76.
- [19] XIAO Qing-tai, XU Jian-xin, WANG Hua. Quantifying the evolution of flow boiling bubbles by statistical testing and image analysis: Toward a general model[J]. *Scientific Reports* 6, 2016: 31548.
- [20] XIAO Q, WANG S, ZHANG Z, XU J. Analysis of sunspot time series (1749-2014) by means of 0-1 test for chaos detection[C]//2015 11th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS). IEEE, 2015: 215–218.
- [21] 高 勤, 肖清泰, 王仕博, 李 鹏, 徐建新, 王 华. 基于 0-1 测试的底吹搅拌混合过程混沌特性分析[J]. *过程工程学报*, 2018, 18(2): 288–293.
- GAO Qin, XIAO Qing-tai, WANG Shi-bo, LI Peng, XU Jian-xin, WANG Hua. Analysis on Chaotic Characteristics of Bottom-blowing Stirred Mixing Process Based on 0-1 Test[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(2): 288–293.
- [22] XU J, WANG H, FANG H. Multiphase mixing quantification by computational homology and imaging analysis[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(5): 2160–2171.
- [23] HUANG J W, XU J X, SANG X L, WANG H T, WANG H. Quantifying the synergy of bubble swarm patterns and heat transfer performance using computational homology[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 75(4): 497–503.

Quantitative evaluation of enhanced stirring effect of oscillatory gas jet caused by oxygen lance arrangement in bottom blown bath

LI Peng^{1,2}, WANG Shi-bo^{1,2}, WANG Hua^{1,2}, ZHANG Wen-hai³

(1. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. China Nerin Engineering Co., Ltd., Nanchang 330002, China)

Abstract: In order to clarify the enhanced stirring mechanism of oscillatory gas jet in bottom-blown bath, a new way based on Betti numbers to quantitatively characterize the enhanced stirring effect was proposed. The optimization scheme of oxygen lance arrangement in bottom blowing furnace was confirmed by the evaluation standard of Betti numbers. Firstly, based on the orthogonal experiment theory, the multi-level factor water model experiment was designed. Secondly, the continuous images of the evolution process of the gas-water flow state in 19 sets of water model vessels were captured by camera equipment, and Betti numbers of continuous flow images were obtained by image processing technique. Finally, the differential characterization of the stirring effect of the oscillatory gas jet under different working conditions was realized through the distribution regularities of Betti numbers. The results show that, in the single row oxygen lance arrangement mode, from the range of 0 ° to 14 °, the larger the angle of oxygen lance is, the more bubbles the jet produces, and the bubble distribution is also more uniform. Under the arrangement mode of double row oxygen lance, the stirring effect of oscillatory gas jet with asymmetric injection is obviously better, and the characteristic values of 0 ° and 7 ° inclination angle are more ideal.

Key words: bottom-blowing bath; jet oscillation; reinforce stirring; image processing; lance arrangement

Foundation item: Project(2016YFGX050058) supported by the National Key Research and Development Program of the 13th Five-Year Plan of China; Project(2015IC005) supported by the Planned Project of Yunnan Science and Technology Department, China

Received date: 2016-09-05; **Accepted date:** 2020-06-30

Corresponding author: WANG Shi-bo; Tel: +86-13888807645 ; E-mail: ph.d.wangshibo@foxmail.com.

(编辑 何学锋)