

# 大喷嘴充气器充气性能的仿真研究

吴峰<sup>1</sup>, 孙伟成<sup>1</sup>, 史帅星<sup>1</sup>, 董干国<sup>1</sup>, 段莉莉<sup>2</sup>

(1. 矿冶科技集团有限公司 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100160;

2. 天津市天河计算机技术有限公司, 天津 300457)

**[摘要]** 本文简要介绍了大喷嘴充气器的工作原理及充气性能表征参数, 利用流体仿真软件建立了基于实际工况的大喷嘴充气器仿真模型, 重点研究了大喷嘴充气器在实际工作参数即充气压力和浸没深度条件下的气流喷射长度、末端扩散宽度与喷气流量的变化规律。结果表明, 在同一浸没深度条件下, 随着充气压力的增大, 大喷嘴充气器的三个性能参数都相应增大, 同时得到在实际浸没深度量值时, 浸没深度对喷气流量的影响不可忽略; 在同一压力条件下, 随着喷嘴浸没深度的增加, 喷气流量和气流喷射宽度在减小, 气流喷射长度也在相应的减小。本文的研究为大喷嘴充气器在实际应用中工作参数的选取提供重要的数据支撑。

**[关键词]** 大喷嘴充气器; 实际工况; 充气性能; 仿真研究

**[中图分类号]** TD456

**[文献标志码]** B

**[文章编号]** 1003-8884(2023)04-0020-06

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.04.004

当下冶金化工等行业大量的反应设备都需要空气的参与, 充气系统设计的优劣是影响反应设备性能的主要因素, 因此提高相关反应设备充气系统的性能一直是该领域研究的重点和难点<sup>[1-2]</sup>。近年来, 矿冶科技集团在多个项目的支持下, 开发出压力式充气器并将其应用到冶金耗氧反应设备氰化槽和氧化槽充气系统中, 在现场的工业试验和实际工程应用中均取得了较好的指标, 受到业内广泛关注, 应用领域在进一步扩展<sup>[3-6]</sup>。由于冶金及化工反应设备普遍高度较高, 实验室研究无法匹拟现场实际高度, 导致无法真实的获得充气器在实际工况下的充气性能数据。本文在实验室前期实验研究的基础上<sup>[7]</sup>, 利用仿真手段研究大喷嘴充气器(出气口径 10 mm)在真实工作环境状况下的充气特性, 即充气压力和浸没深度与充气性能之间的关系, 为大喷嘴充气器的实际应用提供理论支持, 进一步为其在实际工况应用下时相关参数的选取提供数据支撑。

## 1 大喷嘴充气器的工作原理

大喷嘴充气器的工作原理示意图如图 1 所示。空压机送来的高压气体通过充气器的进气口进入水平管道, 进而到达前方的喷嘴处, 因为气体压力的作用压缩后面执行机构中的弹簧, 弹簧带动运动阀杆向后运动, 使得前端喷嘴打开, 高压气体通过喷嘴喷出进入反应设备的浆液中, 并通过浆液的剪切作用产生大量小气泡, 小气泡由于初始速度的作用向喷嘴的前方及左右方向运动, 并且在浮力的作用下同步向上运动。

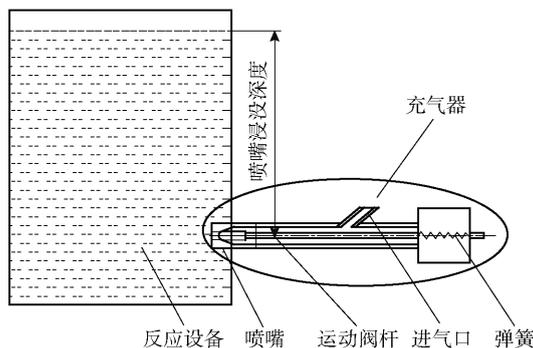


图 1 大喷嘴充气器工作原理示意图

表征大喷嘴充气器充气性能的参数主要有单位时间内喷射出的空气体积流量  $V$ 、气流喷射长度  $L$ 、气流末端扩散宽度  $B$  和喷射气泡直径  $D$  等<sup>[8]</sup>, 示意

**[收稿日期]** 2023-05-06

**[第一作者]** 吴峰(1986—), 男, 山西大同人, 高级工程师, 硕士, 主要从事浮选装备及湿法冶金装备的设计及研究工作。

**[基金项目]** 国家重点研发计划(2021YFC2902901)

**[引用格式]** 吴峰, 孙伟成, 史帅星, 等. 大喷嘴充气器充气性能的仿真研究[J]. 有色设备, 2023, 37(4): 20-25.

图如图2所示。

对于大型冶金设备而言,当反应所需气量一定时,单个喷嘴喷射出的气体体积流量决定了充气器的配置数量,是大喷嘴充气性能最重要的表征参数;而气流喷射长度和末端扩散宽度则决定了充气系统中充气器的配置方式。

根据前期的实验研究<sup>[5]</sup>可知,充气压力和喷嘴结构参数对大喷嘴喷射气泡直径 $D$ 影响最大,其它因素影响都较小。由于充气压力达到一定值后,喷射的气泡平均直径已经满足工业上的使用要求,同时考虑仿真计算中气泡直径不好评判获取,故本文中不对其进行对比研究。

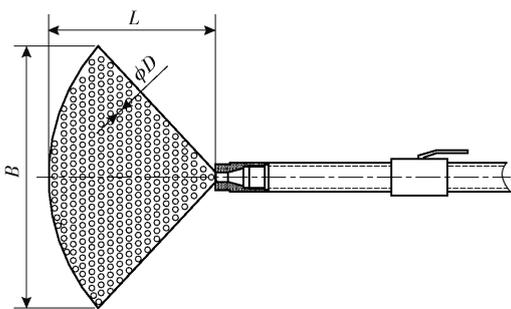


图2 大喷嘴充气器充气性能表示示意图

## 2 大喷嘴充气器工作仿真模型的建立

由于大喷嘴充气器工作时将高压空气喷射入反应液中,涉及两种流体的变化状态,采用CFD流体仿真软件对其进行模拟<sup>[9-10]</sup>,反应液简化为清水。

### 2.1 几何模型

依据前期实验室实验结果<sup>[7]</sup>,大喷嘴喷射气体长度在500 mm左右,末端扩散宽度也为500 mm左右,仿真模型采用水槽横截面为1 m × 1 m的正方形,考虑到喷嘴喷出的气体向下扩散的区域很小,喷嘴中心距水槽底部300 mm,喷嘴前端伸入水槽壁面100 mm,水槽的高度依据大喷嘴真实工作的浸没深度设定,大喷嘴充气器工作时的三维几何模型如图3所示。

### 2.2 求解计算模型

由于大喷嘴的充气试验所使用的气量较大,工作时要求具有较好的载气条件,所以采用欧拉-欧拉模型模拟气相与液相的流动情况。

### 2.3 气泡处理方法

在计算流体力学数值模拟的商业软件中,气泡

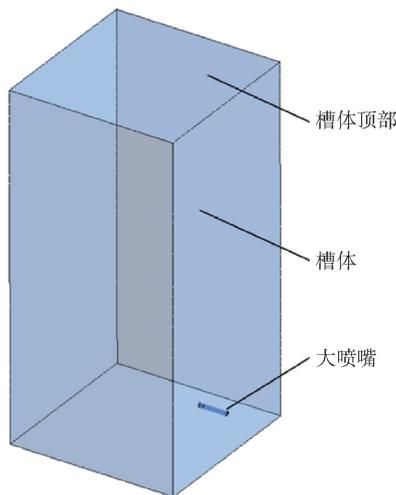


图3 大喷嘴充气器工作三维几何模型示意图

尺寸分析方法分为单一气泡尺寸模型和多组气泡尺寸模型。单一气泡尺寸适用于气泡流动稳定,粒子与主相的速度大小方向相同,即Stokes数值较小的情况。多尺寸分组模型(MUSIG模型)是简化的群体平衡模型。群体平衡模型是一种“刻画”多相流中分散相分布的方法,能够考虑到喷气过程中气泡的聚并与破碎现象,且气泡有尺寸范围的分布,对于提高水槽内气含率的准确性具有一定的意义。本文中所使用的MUSIG方法的破碎模型和聚并模型选用的分别是Luo and Svendsen模型和Prince and Blanch模型。

### 2.4 求解策略与网格无关性验证

对于边界条件的设置,将充气的入口设置在喷嘴靠近槽壁处,顶部出口可以设置为主轴degassing出口边界或Opening开放边界。为保证容易收敛,顶部出口设置Opening开放边界,定义仅允许空气流进和流出,压力为0 Pa。除动静流体域的交界面外,其余边界选择为壁面边界。以稳态计算方法为主,求解设定目标残差小于 $10^{-4}$ ,或模拟至喷嘴入口流量和顶部出口流量守恒为止,数值模拟计算工作使用天津市天河计算机技术有限公司超算平台的商业软件完成计算。

仿真选用四面体的非结构网格,非结构网格尽管计算量较大,但具有适应性强,划分网格单元消耗时间短等显著优点。采用100万、200万、400万网格单元数的模型进行网格无关性验证。如图4所示,对比了喷嘴压充气力为0.4 MPa,浸没水深2 m的喷气量情况。可以看到相比100万网格数,在网

格 200 万的时候喷嘴喷出的气流基本已经连续和网

格 400 万的情况已经较类似,不影响分析的精度。

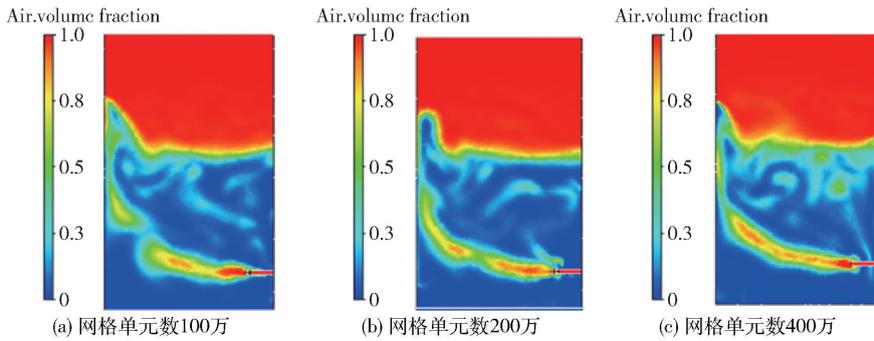


图 4 不同网格单元数的气含率分布

计算该条件下的喷嘴喷射出的气体流量,结果见表 1,表 1 数据表明 200 万和 400 万网格单元数的模型气体流量较为接近。

表 1 不同网格单元数时喷嘴喷出的气体流量

网格单元/万	气体流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
100	248
200	234
400	234

综合计算时间和求解精度考虑,最终每 2 米深度采用 200 万网格的模型方法进行大喷嘴充气器在不同气体压力和不同浸没深度条件下的仿真计算,图 5 给出了 200 万网格量的模型图。

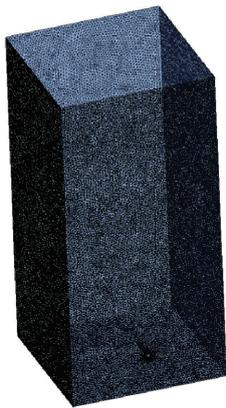


图 5 大喷嘴充气器工作仿真模拟四面体网格模型

### 2.5 仿真变量参数

利用上面仿真模型的建立策略,本文重点对大喷嘴充气器在实际工作条件下的充气性能进行清水仿真研究,也即对大喷嘴充气器实际浸没深度和充气压力对充气性能的影响,这两个仿真变量参数如表 2 所示。

表 2 大喷嘴充气器实际工况下仿真变量参数

充气压力/MPa	浸没深度/m
0.3	2,4,6,8
0.4	2,4,6,8
0.5	2,4,6,8

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 出流量随浸没深度及充气压力的变化情况

通过后处理软件处理仿真结果,获取到 10 mm 喷嘴出口截面各点的气体流速,计算出平均气体流速乘以喷嘴截面积即得到不同情况下的喷嘴出流量,利用绘图软件绘制各工况下的气体出流量曲线图,如图 6 所示。

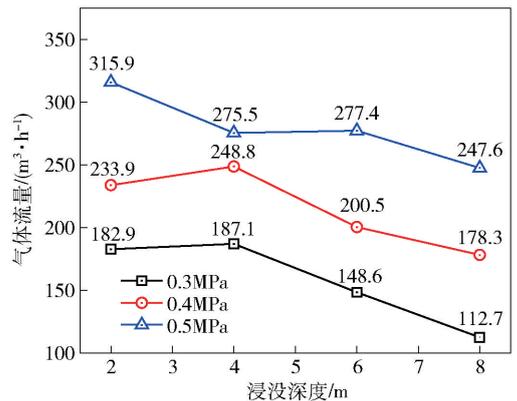


图 6 浸没深度和充气压力与喷嘴的出流量关系

从图 6 中可以看出,在相同的充气压力条件下,随着浸没深度的增大,喷嘴出流量在逐渐减小;在相同的浸没深度条件下,随着充气压力的增大,喷嘴的出流量在增大,这两点变化趋势与实验工况下得到的结论是完全一样的。从表中数据可以得到充气压

力为 0.3 MPa、0.4 MPa 和 0.5 MPa 时,随浸没深度的增大喷嘴出流量的减小幅度分别为 39.7%、28.4%、21.6%,可知在喷嘴浸没深度达到实际生产量值时,出流量的减小值非常显著,特别是在充气压力值较低时此影响更加不可忽略。

### 3.2 喷射气流长度随浸没深度及充气压力的变化情况

通过后处理软件,显示不同浸没深度及充气压力下仿真结果中的含气率云图,截取充气器喷嘴中心竖直截面,可以看到喷嘴喷射气流长度的变化情况,如图 7 所示。

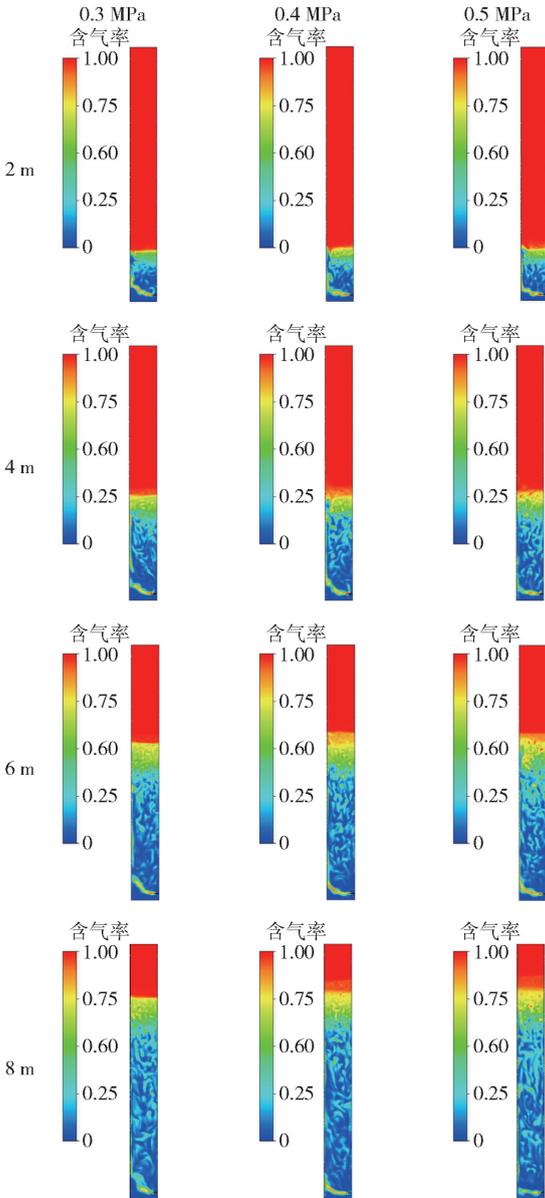


图 7 浸没深度和充气压力与喷嘴喷射气流长度关系

在图 7 中,纯红色代表气相,纯蓝色代表液相,中间的过渡颜色代表含气率的变化,从图中可以直观的看出,在相同的充气压力条件下,随着浸没深度的增大,喷嘴的喷射气流长度在逐渐的减小;在相同的浸没深度条件下,随着充气压力的增大,喷嘴的喷射气流长度在逐渐增大。

通过提取各工况下喷嘴中心线上距喷嘴前端中心点远近不同距离处的含气率数据,绘制曲线图如图 8 所示,从图中可以看出,不同浸没深度和充气压力时离开喷嘴的距离小于等于 500 mm 的范围内,其水中的含气率都大于 60%,可以认为喷嘴喷出气体的气流长度都大于 500 mm。

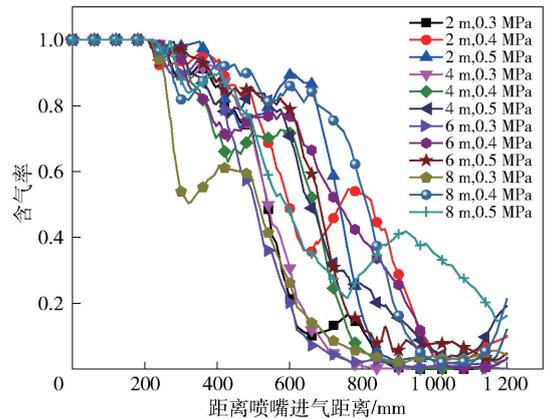


图 8 浸没深度和充气压力与离开喷嘴不同距离的含气率关系

### 3.3 喷射气流宽度随浸没深度及充气压力的变化情况

利用 3.2 小节的方法,仍旧在显示不同浸没深度及充气压力下仿真结果中的含气率云图下,截取充气器喷嘴中心水平截面,可以很清楚的看到喷嘴喷射气流宽度的变化情况,如图 9 所示。

在图 9 中,纯蓝色到纯红色仍旧代表水相到气相的变化情况,纯蓝色表示全是液相,纯红色代表全是气相,中间的过渡颜色代表液相中含气率的大小变化,从图中可以直观的看出,在相同的充气压力条件下,随着浸没深度的增大,喷嘴的喷射气流宽度在逐渐的减小;在相同的浸没深度条件下,随着充气压力的增大,喷嘴的喷射气流宽度在逐渐增大。

通过提取各工况下喷嘴中心线上距喷嘴前端中心点左右不同距离处的含气率数据,绘制曲线图如图 10 所示,从图中可以看出不同浸没深度和充气压力时离开喷嘴中心距离等于 100 mm 的范围内,其

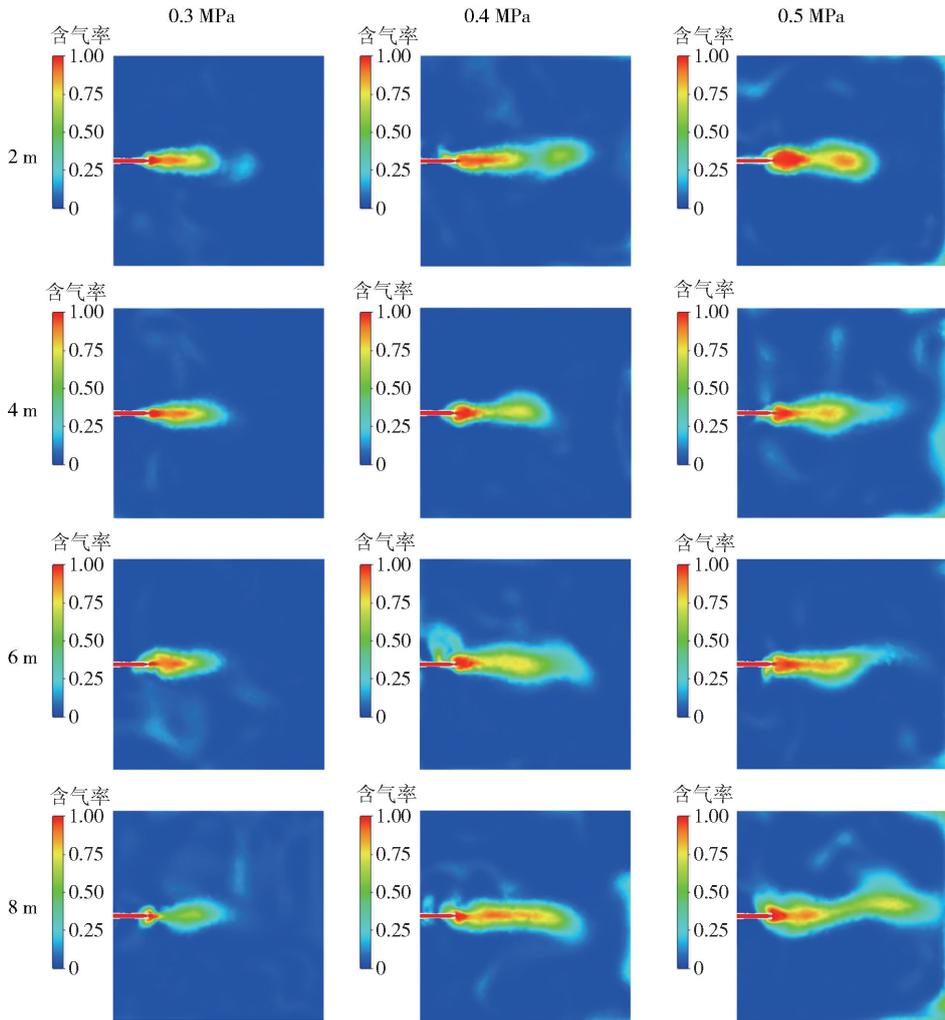


图 9 浸没深度和充气压力与喷嘴喷射气流宽度关系

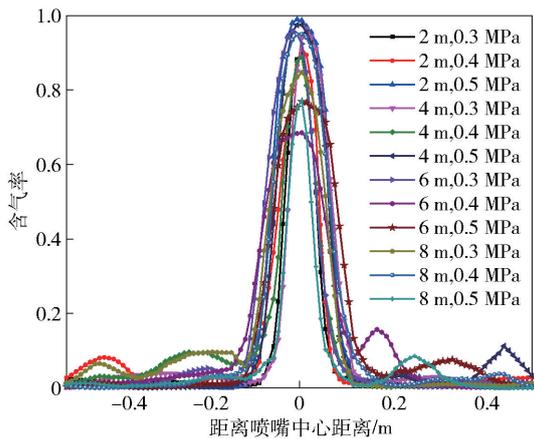


图 10 浸没深度和充气压力与离开喷嘴中心距离的含气率关系

水中的含气率基本都减小为 0, 可以认为喷嘴喷出气体的末端扩散宽度都小于 200 mm。

## 4 结论

本文在分析大喷嘴充气器的工作原理及充气性能表征参数的基础上, 利用流体仿真软件建立了基于实际工况的大喷嘴充气器仿真模型, 通过仿真得到大喷嘴充气器充气性能随实际工作参数的变化规律, 得到以下主要结论。

1) 在同一浸没深度条件下, 随着充气压力的增大, 大喷嘴充气器的三个充气性能参数都相应增大, 同时得到大喷嘴充气器在实际浸没深度量值时, 浸没深度的变化对喷气流量的影响不可忽略。

2) 在同一压力条件下, 随着喷嘴浸没深度的增加, 喷气流量和气流喷射宽度在减小, 气流喷射长度也在相应的减小。

3) 在所模拟的操作参数条件下, 气流喷射长度都达到 500 mm, 而气流喷射宽度都小于 200 mm, 相

对于数米或者数十米的大型反应器来讲,这两个性能表征量相对来说影响较弱。

以上规律的得出对于大喷嘴充气器在实际应用中工作参数的选取提供重要的数据支撑。

#### [参考文献]

- [1] 杨显万,邱定番. 湿法冶金(第2版)[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [2] 钟秦,王娟,陈乔迁,等. 化工原理[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [3] 董干国,李晔,杨丽君,等. 一种新型生物氧化反应器的研制[J]. 有色金属(冶炼部分),2013(9):52-55.
- [4] 吴峰,董干国,史帅星. 中国黄金矿山氰化浸出槽的研究及应用[J]. 黄金,2014,35(增刊1):121-126.
- [5] 吴峰,董干国,史帅星,等. HAT型氰化浸出槽溶氧量清

水实验研究[J]. 矿冶工程,2016,36(增刊):408-410.

- [6] 赖茂河,韩志彬,吴峰,等.  $\Phi 9.5\text{ m} \times 10\text{ m}$  新型生物冶金反应器工业试验研究[J]. 矿冶,2015,24(增刊):41-44.
- [7] 吴峰,史帅星,董干国. 大喷嘴充气器工作参数对充气性能影响的试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2017(z1):156-159.
- [8] 史帅星,姚明钊,曹亮. 气泡发生器的流体动力学性能研究[J]. 有色金属(选矿部分),2006,24(3):42-45.
- [9] 史帅星. KYZ-B浮选柱发泡器喷嘴流体动力学数值模拟[J]. 有色金属(选矿部分),2008,26(5):38-40.
- [10] 王瑞金,张凯,王刚. FLUENT技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

## Simulation Research on Big Nozzle Sparger Aerating Performance

WU Feng, SUN Wei-cheng, SHI Shuai-xing, DONG Gan-guo, DUAN Li-li

**Abstract:** In this paper, the working principle and the characterization parameter of aerating performance of the big nozzle sparger are briefly introduced, and the simulation model of the big nozzle sparger is established by using the fluid simulation software based on the actual working conditions. The variation rules of the air injection length, airflow tip diffusion width and the jetting outflow of the big nozzle sparger are studied emphatically under the actual working conditions which are the aeration pressure and immersion depth. It is shown that three performance parameters of big nozzle sparger increase with the increase of the aeration pressure under the same immersion depth, and the effect of the immersion depth on the jetting outflow can not be ignored when the immersion depth reaches the magnitude of the actual immersion depth. Under the same pressure condition, with the increase of the immersion depth of big nozzle sparger, the jetting outflow and airflow tip diffusion width gradually decrease, and the air injection length also gradually decrease. The research of this paper provides important data support for the selection of working parameters of big nozzle sparger in practical application.

**Key words:** big nozzle sparger; actual working condition; aeration performance; simulation study ▲