

引用格式:袁爱武,黄金豪. 基于 CFD 流场模拟的大型卧式反应釜结构研究[J]. 有色设备,2024,38(3):58-63.

YUAN Aiwu, HUANG Jinhao. Research on the structure of large horizontal reactor based on CFD flow field simulation[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(3): 58-63.

# 基于 CFD 流场模拟的大型卧式反应釜结构研究

袁爱武, 黄金豪

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019)

**[摘要]** 近年来,加压浸出湿法冶金工程在向更大规模的发展道路受到了配套装备大型化带来的技术制约。为了适应加压浸出工艺关键核心设备-卧式反应釜的规模大型化发展,更好地保证该设备在使用过程中的可靠性与高效性。本文采用 CFD 流体模拟软件,针对某项目使用的 300 立卧式反应釜,研究其在不同长径比下的流场分布情况以及搅拌器功率消耗大小与长径比的关系。研究表明适当增加长径比有利于改善水平方向的流场特性,减小长径比有利于改善垂直方向的流场特性,减小长径比有利于搅拌功率的降低。当长径比取 1.08 或 1.13,能够有效提高卧式反应釜内的反应效率,降低成本和系统能耗。

**[关键词]** 卧式反应釜; 长径比; 流场分布; 功率消耗; CFD; 数值模拟

**[中图分类号]** TQ052 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)03-0058-06

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.03.009

## 0 引言

加压浸出湿法冶金技术因具有环境友好、技术应用面广、金属资源综合回收效率高等特点,成为当前最具发展前景的湿法冶金技术之一。该技术广泛应用于锌、镍、钴、钼、镓、锗等 30 多种金属的湿法提取<sup>[1]</sup>。为提高加压浸出工艺关键核心设备卧式反应釜的使用效率,必须使其内部获得适宜的流场环境,进行稳定的化学反应。反应釜结构尺寸设计是实现高效反应的首要影响因素,研究如何确定设备的直径和长度尤为重要。

卧式反应釜根据有效容积通常被分为多个隔室,每个隔室的长径比与内部流场关系十分密切,目前常用的单个隔室长径比通常大于 1。但实际使用过程中,仍然存在反应效率不高,混合效果欠佳,搅拌功率过大等问题。因此深入研究卧式反应釜内部流场特性成为湿法冶金领域备受关注的问题。

计算流体动力学(CFD)模拟可解决了试验过程受到物理模型和环境限制的问题,为卧式反应釜的

内部流场研究提供了一种省时、经济和数据详细完整的有效研究方法。徐胜利等<sup>[2]</sup>利用 CFD 技术对制药行业的搅拌釜内流场进行了数值模拟研究。刘国平等<sup>[3]</sup>采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型、多重参考系法对平直叶桨搅拌槽内高黏流体湍流流场进行数值模拟,分析了搅拌槽内流体的流动特性和混合过程。周储朋<sup>[4]</sup>开展了一种面向非牛顿流体混合的组合式搅拌器研究,并讨论其结构参数、工况参数、转动方式对流体搅拌特性的影响。吴国良<sup>[5]</sup>以某厂多级含钒页岩搅拌浸出槽为研究对象,采用数值模拟的方法对比分析了机械搅拌和吹气-机械联合搅拌下浸出槽内多相流场与浓度场,通过水力学模型试验对数学模型验证,改进桨叶运行参数及搅拌方式,为高效提钒提供理论指导。

目前,反应釜 CFD 模拟技术发展已经日渐成熟,使用 CFD 技术预测反应釜内流场特性,已成为反应釜设计的有效工具。本文通过利用 CFD 流体模拟软件,针对某项目使用的 300 立卧式反应釜,在保持有效容积不变的条件下,通过改变单个隔室的长径比,获得不同的内部流动特性和搅拌功率,为卧式反应釜今后的结构设计提供依据。

## 1 研究方案

本文的对象为 300 立卧式反应釜,根据设计经验,

**[收稿日期]** 2024-03-05

**[第一作者]** 袁爱武(1970—),男,湖南平江人,高级工程师,主要从事湿法冶金化工和冶炼烟气治理方面的技术研究与设计咨询工作。

该釜可分为 7 个反应隔室, 每个隔室的有效容积约 45 立, 隔室两侧被砖挡墙分隔, 每块挡墙上设置有阻流墩, 用来加强物料的湍流程度, 进而提高反应效率, 具体结构如图 1 所示。为达到反应效果, 该卧式反应釜使用搅拌器结构如图 2 所示, 搅拌轴直径为 150 mm。

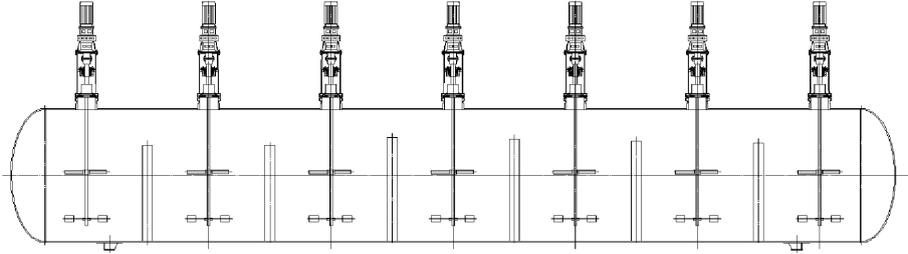


图 1 卧式反应釜结构示意图

Fig. 1 Horizontal reactor structure diagram

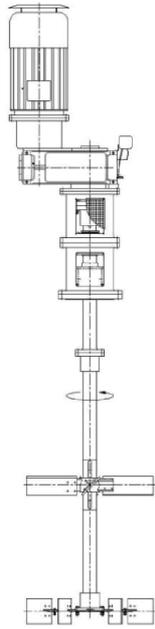


图 2 搅拌器结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of agitator

取设备单个隔室长度分别为 4 100 mm、4 200 mm、4 300 mm、4 400 mm、4 500 mm、4 600 mm, 保持有效容积不变的条件下, 得到设备直径分别为 4 194 mm、4 094 mm、4 000 mm、3 908 mm、3 821 mm、3 738 mm, 对应的长径比分别为 0.98、1.03、1.08、1.13、1.18、1.23。模拟时, 只改变模型的长径比, 搅拌器结构、搅拌器转速、搅拌器距底部高度、挡墙结构等因素均不变。

为获得矿浆在单个隔室内的流场分布情况, 因此将固体和液体物料简化为矿浆单相流, 等效密度

搅拌器为双层桨叶结构, 上层为折叶涡轮形式, 桨叶直径为 1 430 mm、桨叶宽度为 286 mm、桨叶倾角为 45°; 下层为平直叶圆盘涡轮形式, 圆盘直径为 965 mm、桨叶直径为 1 430 mm、桨叶宽度为 286 mm、下层搅拌中心平面距离设备底部约为 600 mm、搅拌器的转速为 85 r/min。

通过计算为 1 460 kg/m<sup>3</sup>, 运动黏度为 100 mPa·s, 不考虑物料的进出。

## 2 CFD 数值模拟

### 2.1 数学模型

流体流动需要满足物理守恒定律, 即流体流动需要满足质量守恒方程、动量守恒方程。可通过使用 CFD 求解质量守恒和动量守恒方程来研究流动问题。

质量守恒方程见式(1)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中:  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为速度沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度矢量。

动量守恒方程见式(2)~(4)。

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right) + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho f_x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right) + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \rho f_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right) + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \rho f_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (4)$$

式中:  $f_i$  为单位质量体积力在  $i$  方向上的分量;  $\tau_{mn}$  为  $n$  方向上的黏性应力在垂直于  $m$  轴平面上的投影分量。

### 2.2 网格划分

根据卧式反应釜几何尺寸, 建立流体域模型。考虑卧式反应釜各部件对釜内流场的影响程度, 简

化单个隔室模型,保留搅拌轴、搅拌桨、釜壁、挡墙等主要部件。图3为反应釜单个隔室流体域网格模型,网格划分方法采用非结构化形式,上下两层搅拌桨附近区域几何结构较复杂,流体流动较强烈,故将流体区域划分为桨叶区域(旋转域)和其他区域(静止域)。桨叶区域采用较为密集的四面体网格,釜内其他区域采用较为稀疏的四面体网格。



图3 反应釜单个隔室流体模型网格划分

Fig.3 Grid division of fluid model for a single compartment of a reactor

### 2.3 边界条件

采用多重参考系方法(MRF)进行流场模拟,设置搅拌轴以及桨叶附近(包括桨叶)区域为旋转域,转速为85 r/min,其他区域均设置为静止域。湍流模型使用标准 $k-\varepsilon$ 模型,对其进行稳态计算。考虑环境重力因素,加速度为 $9.81 \text{ m/s}^2$ 。搅拌轴、搅拌桨叶、釜壁、挡板的边界均设置为无滑移壁面,搅拌轴、搅拌桨叶的边界设置为动边界,相对于旋转域静止,釜壁、挡板边界设置为静边界,流体域的自由液面使用对称边界。

## 3 模拟结果分析

### 3.1 水平流场分析

取流体域 $y=0$ 的水平中心截面速度云图进行分析,图4为不同长径比下的模拟结果。为了使得流场速度分布更加直观,便于分析,不同长径比的分析结果使用统一的速度刻度值。由图4(a)~4(b)可知,当长径比为0.98和1.03时,核心区流动速度相对较低,但核心区域范围较大,高速区域覆盖的面积大,总体湍流程度良好,速度分布均匀,流体介质能够得到一定程度的混合。由图4(c)~4(d)可知,当长径比为1.08和1.13时,核心区流动速度提

高,核心区域范围没有明显变化,高速区域覆盖的面积大,总体湍流程度提高,速度分布均匀,有利于提高流体介质的混合效果。由图4(e)~4(f)可知,当长径比为1.18和1.23时,虽然核心区流动速度进一步增加,但核心区域范围发生明显缩小,高速区域覆盖的相对截面积减小,总体湍流程度相应降低,速度分布不均匀,不利于流体介质的混合。

### 3.2 垂直流场分析

取流体域 $Z=0$ 的垂直中心截面速度矢量图进行分析,图5为不同长径比下的模拟结果。由图5(a)~5(d)可知,当长径比为0.98、1.03、1.08、1.13时,在下层桨上方、上层桨叶下方以及上层桨叶上方形成三股旋涡,流场为“三循环模式”,物料可通过三股旋涡,从釜底部不断向上流动,最终到达釜顶部,有利于釜底附近的物料混合。由图5(e)~5(f)可知,当长径比为1.18、1.23时,流场仍为“三循环模式”,但最顶端的旋涡逐渐减小,位置从上层桨叶的上方有明显的下移,物料通过底部和中部的股旋涡后,无法通过上部的旋涡到达釜顶部,降低了物料的混合效果。总体而言,双层搅拌结构能够形成“三循环模式”的流场,该流场能够较好地实现垂直方向的物料混合,但随着长径比的增加,旋涡变小,位置逐渐下移,混合效果降低。

### 3.3 功率分析

长径比的选择,不仅要考虑流体域内水平方向和垂直方向上的流场分布情况,搅拌功率也是十分关键的因素。在搅拌转速确定的情况下,长径比不同导致流场的改变,叶轮产生的剪切力也会有所不同。本研究使用功率表征搅拌器的功率特性,首先通过模拟得到上下桨叶的扭矩值,再通过式(5)得到搅拌功率。

$$P = M\omega = \pi nM/30 \quad (5)$$

式中: $P$ 为功率,W; $M$ 为扭矩,Nm; $\omega$ 为叶轮角速度,rad/s; $n$ 为叶轮转速,r/min。

通过计算,各长径比的功率消耗如表1所示,从表1中可以看出,随着长径比的增加,搅拌器需要混合的区域范围变大,功率消耗随之增大。

表1 功率消耗

Table 1 Power consumption

| 长径比   | 0.98 | 1.03 | 1.08 | 1.13 | 1.18 | 1.23 |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| 功率/kW | 83   | 86   | 91   | 92   | 96   | 98   |

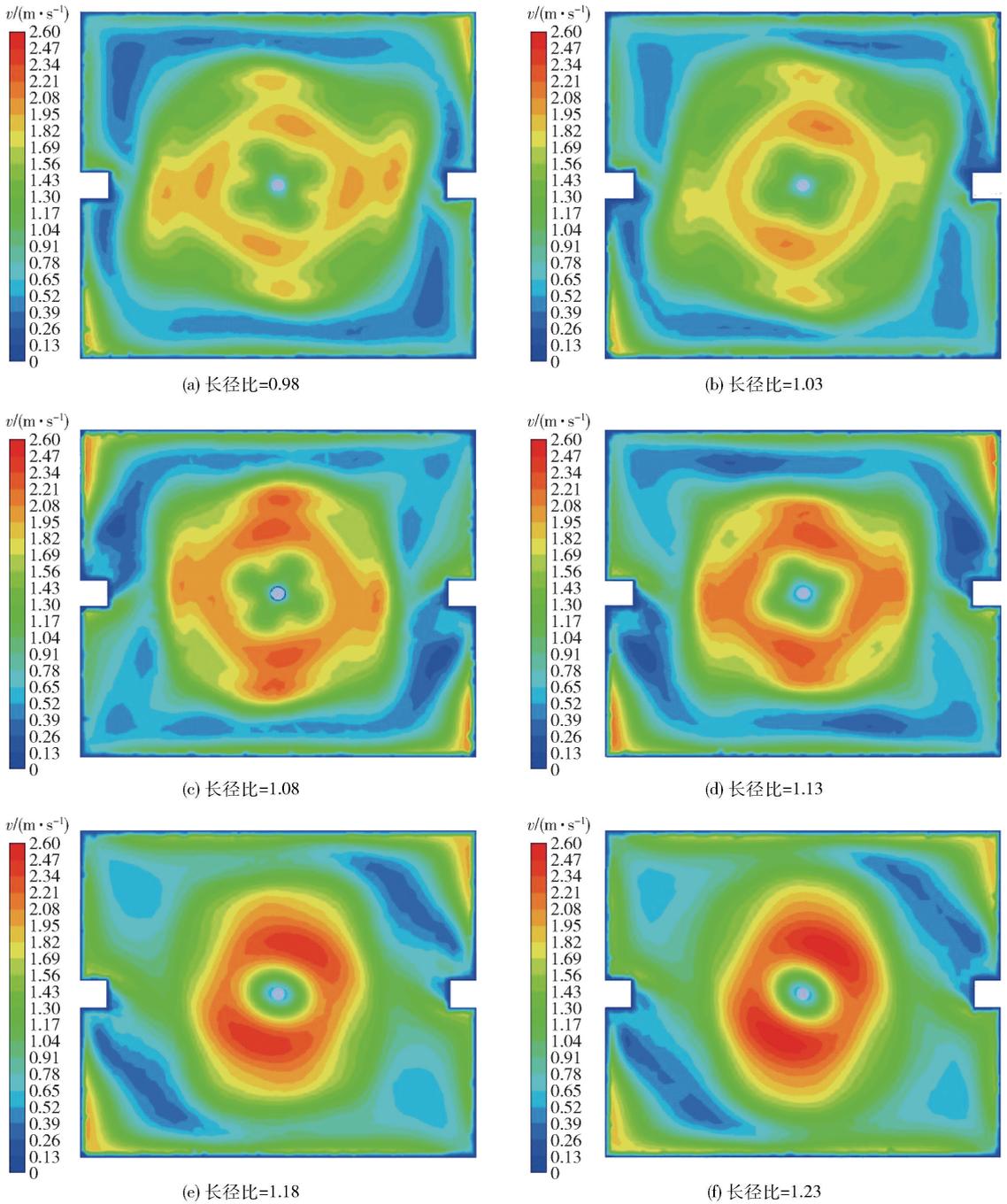


图 4 水平中心截面速度云图

Fig. 4 Horizontal center section velocity cloud map

## 4 结语

本文采用 CFD 流体模拟软件,针对某项目使用的 300 立卧式反应釜,分析了单个隔室在不同长径比下,水平中心截面速度云图、垂直中心截面速度矢量图、搅拌器功率与长径比的关系,综合考虑分析结

果,得到以下结论。

1) 适当增加长径比有利于改善水平方向的流场特性,减小长径比有利于改善垂直方向的流场特性,有利于搅拌功率的降低。

2) 长径比取 1.08 和 1.13,能够有效提高卧式反应釜内的反应效率,降低成本和系统能耗。

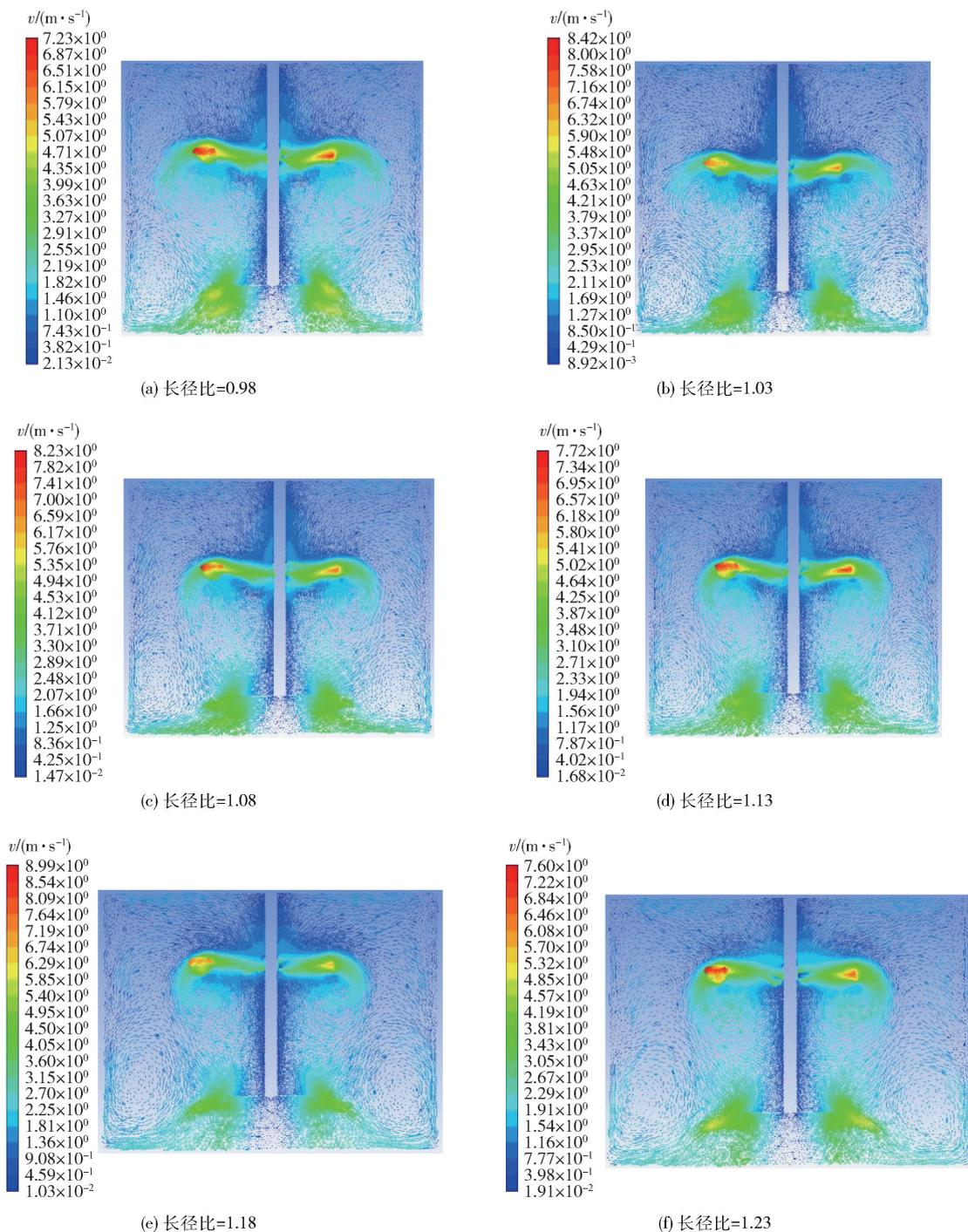


图5 垂直中心截面速度矢量图

Fig.5 Vertical center section velocity vector diagram

该研究成果对实际工程问题也起到一定的参考价值。

[参考文献]

[1] 欧阳灿,黄金豪,金生龙.湿法冶金大型卧式加压浸出反应釜有限元分析设计程序开发[J].有色设备,2022,36(4):40-44.

[2] 徐胜利,张博伦,程昉.基于CFD流场模拟的反应釜结构设计[J].化工进展,2016,35(S2):401-406.

[3] 刘国平,郑坤.平直叶浆搅拌槽内流体混合过程数值模拟研究[J].机械设计与制造,2021(6):115-117,121.

[4] 周储朋.非牛顿流体搅拌流场特性研究[D].无锡:江南大学,2023.

- [5] 吴国良. 湿法提钒搅拌浸出槽多相流行为优化的模拟研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
- [6] 郭天宇, 刘诚, 姚心, 等. CFD 仿真在萃取箱设计上的应用[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(1): 43 - 49, 53.
- [7] 唐勇, 吴伟, 樊帆, 等. 基于 CFD-DEM 耦合算法的后混合磨料水射流数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(6): 163 - 168.
- [8] 张永兴, 高丙朋. 基于 CFD 的高海拔地区氧化槽温场数值仿真研究[J]. 湿法冶金, 2022, 41(2): 170 - 175.
- [9] 许欣. 综合回收处理炉设计特点及应用[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(5): 12 - 16.

## Research on structure of large horizontal reactor based on CFD flow field simulation

YUAN Aiwu, HUANG Jinhao

(Changsha Engineering and Research Institute Ltd. of Nonferrous Metallurgy, Changsha 410019, China)

**Abstract:** In recent years, the development of pressurized leaching hydrometallurgy engineering towards a larger scale has been hindered by the technological constraints brought about by the large-scale development of supporting equipment. In order to adapt to the large-scale development of the key core equipment of the pressure leaching process-the horizontal reactor, and better ensure the reliability and efficiency of the equipment during use, This article uses CFD fluid simulation software to study the flow field distribution and the relationship between agitator power consumption and aspect ratio of a 300 vertical horizontal reactor used in a certain project under different aspect ratios. Research has shown that increasing the aspect ratio appropriately is beneficial for improving the horizontal flow field characteristics, reducing the aspect ratio is beneficial for improving the vertical flow field characteristics, and reducing the aspect ratio is beneficial for reducing the stirring power. When the aspect ratio is set to 1.08 or 1.13, it can effectively improve the reaction efficiency in the horizontal reactor, reduce costs and system energy consumption.

**Key words:** horizontal reactor; length to diameter ratio; flow field distribution; power consumption; CFD; numerical simulation



### 敬告读者

为了加快稿件处理速度,缩短稿件出版周期,方便广大作者投稿及查询稿件处理情况。本刊开通由中国知网提供的“腾云”网络采编系统,作者投稿请注册并登录本刊主页上的“作者投稿系统”进行相关操作,网址 <https://yssb.cbpt.cnki.net/>。注册登录后可以向本刊投稿并查询稿件处理状态。请勿重复注册,否则可能导致您的信息查询不完整。

本刊文章数字版可在中国知网(<http://www.cnki.net>)、万方数据知识服务平台(<https://www.wanfang-data.com.cn/>)、维普网(<http://www.cqvip.com/>)下载使用。本刊从未委托任何单位或个人组稿或代收、代转稿件,作者咨询投稿事宜请拨打编辑部办公电话 010 - 63936591、63933053 联系。

《有色设备》编辑部