



浮选机内部气-液两相流场特性研究

张晋霞^{1,2}, 牛福生^{1,2}, 王学涛¹, 李卓林¹

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063009;
2. 河北省安全技术及开采重点实验室, 河北 唐山 063009)

摘要: 本物浮选过程中的多相流体特征直接影响矿物分选效率, 针对有效容积为 0.1m^3 的充气机械搅拌式浮选机, 运用计算流体力学对浮选机内部气-液两相流体特性进行数值模拟计算, 分析了矿物浮选过程中复杂的流体特性。基于 CFX 流场数值模拟软件, 建立了气-液两相流场数值模拟策略, 通过对比标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 确定了离散气相-零方程、连续液相标准 $k-\epsilon$ 湍流模型的数学模型, 探究了不同表面张力、曳力相间作用力对浮选机内部气-液两相流场特性的影响, 模拟了充气强度和搅拌强度对浮选机内部气-液两相流场的影响。研究表明: 表面张力系数在浮选机内部气-液两相流场数值模拟研究中影响很小, 选定较为常用的表面张力系数 0.073 为模拟标准; Grace 曳力模型适合充气机械搅拌式浮选机气-液两相流场的数值模拟; 浮选机充气速度应小于 2.0 m/s 时, 此时气相流场速度分布较均匀, 气相逸散性较好; 浮选机转子转速每增加 50 rpm 转子和定子表面受压大约增加 300 Pa, 中等转速 450 rpm 适合该类型浮选机的浮选作业, 气-液两相流体特性模拟结果将为浮选工艺参数的设定提供基础理论指导。

关键词: 浮选机; 气液两相; 流场特性; 表面张力; 曳力模型

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.03.029

中图分类号: TD911 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2018) 03-0137-04

矿物浮选是在固-液-气三相混合流体中进行的, 其内部流动特性非常复杂, 且不易观察和监测, 在理论上一直缺乏关于浮选机内部流场的详细研究^[1-2]。随着计算流体力学的不断进步, 关于矿物在浮选机内部的多相流体计算, 是当前计算流体动力学和矿物浮选过程多相流场特性数值模拟研究中重点和难点较多而研究相对活跃的领域之一^[3-5]。由于矿物在实际浮选过程中内受固-液-气三相混合流体作用以及流体压力、流量、浓度、矿物体颗粒大小、形状、浮选机工作参数等众多因素的影响, 目前对矿物浮选过程的三相流体运动特征尚无统一且完整的描述方法^[6-7]。

本文对浮选机气-液两相流场进行了数值模拟, 通过对比标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和 RNG $k-\epsilon$ 湍

流模型, 确定了离散气相-零方程、连续液相标准 $k-\epsilon$ 湍流模型的数学模型, 探究了表面张力、曳力相间作用力对浮选机内部气-液两相流场特性的影响, 模拟了充气强度和搅拌强度对浮选机内部气-液两相流场的影响, 确认所采用的数学模型是和数值求解方法是否正确, 从而为浮选机气-液-固三相流场的数值模拟研究奠定基础。

1 计算模型及边界条件

1.1 计算模型

研究选定通用性较强的 KYF 型充气式浮选机为对象, 设计制造了适合实验室条件的单槽容积较小 (0.1m^3) 的充气机械搅拌式浮选机体模型, 浮选机主要部件几何参数见表 1。

收稿日期: 2016-07-18; 改回日期: 2016-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51474087)

作者简介: 张晋霞 (1979-), 女, 副教授, 主要从事复杂难选矿分选理论与工艺研究。

通讯作者: 牛福生 (1974-), 男, 教授, 主要从事复杂难选矿分选理论矿产资源综合利用等方面研究。

表1 浮选机主要部件几何参数
Table 1 Geometry parameter of flotation machine parts

| 转子直径 /mm | 定子直径 /mm | 叶片角 /° | 槽底直径 /mm | 槽顶直径 /mm | 槽体高 /mm |
|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|------------|
| 120 | 180 | 30 | 360 | 300 | 360 |

对充气机械搅拌式浮选机模拟进行了简化,初步确定了浮选机转子、定子、充气装置和浮选机槽体的几何结构,并对其内部区域进行了划分。应用ICEM网格划分平台,对浮选机内部流场计算域进行四面体网格划分,并对局部网格进行了细化处理,浮选机计算域网格质量参数平均值为0.83,其中质量参数超过0.6的网格占总计算网格的96%以上,满足CFX对网格计算的要求。

1.2 边界条件

1.2.1 壁面边界条件

在整个模型的壁面处,因气相的剪切应力在壁面处为零,且气相流体与壁面没有明显的摩擦作用,故气相流场采用自由滑移边界条件,即Free Slip模型。在多相流体相互作用下,因Free Slip边界条件显著影响流体特性,故液相流场由于黏度的影响应用最为广泛的无滑移边界条件,即No Slip模型。

1.2.2 气相入口边界条件

矿物浮选过程中的多相流体特征模拟研究选用的气相为25℃状态下的空气,摩尔质量为28.96 g/mol,密度为1.185 kg/m³,动力黏度为1.831×10⁻⁵ Pa·s,入口边界定义为法向速度入口,入口的速度v=2.0 m/s。整个入口进气的过程默认为气体湍流充分发展,速度在入口截面处均匀分布。

1.2.3 气相出口边界条件

根据浮选机槽体液面只允许气相从浮选槽口出、不允许液相出的实际情况选择气相出口边界为Degassing Condition。此边界条件无需其他参数设置,故默认为可自动不断迭代计算。

1.2.4 气相进入液相旋转域的边界条件

浮选机中气体分流装置的作用是将气相分散到旋转的液相中,为更加贴近实际情况,选择Interface条件,其为气体和液体的交互界面,网格连接方式为GGI网格连接方式,此连接方式适用于交界面两侧网格不同的情况,允许节点位置、网格类型、面尺寸、面形状甚至流体类型的不同,同时采用冻结转子模型处理动静网格交界面,其

中叶轮转速为450 r/min。

2 浮选机内部气-液两相流场特性研究

2.1 湍流模型对气液两相流场速度特征的影响

湍流模型初步选定两种模型:标准k-ε模型与RNG k-ε模型。标准k-ε模型是将速度与长度分开求解的双方程模型,用动能k反应特征速度,用湍动能耗散率ε反应特征长度尺度,引进了 $v=Ck/\epsilon$ 的关系式,该模型当前已成为标准的工业模型,针对浮选机内部流场数值模拟该模型具有较好的适用性,能够准确预测矿物浮选过程中的流场特性。RNG k-ε模型是标准k-ε模型的修正方程,该模型通过在大尺度运动和修正后的黏度项体现小尺度的影响,小尺度运动被控制除去。RNG k-ε模型可以很好的处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动,且RNG k-ε模型对充分发展的湍流仍是有效的,是高雷诺数的湍流计算模型^[2]。

k-ε和RNG k-ε湍流模型下分别对浮选机内部气-液两相流场进行数值模拟计算,其中气液两相表面张力系数为0.073,充气速度为2.0 m/s。

由模拟结果可知,气相通过充气装置的空气进出口在压力作用下进入旋转液相流场,由于转子高速搅拌,使气相流体充分扩散,实际浮选时与浮选机内部的矿物颗粒充分接触、碰撞、粘附,矿化气泡最终沿轴向向上运动,通过上升区,最终到达浮选泡沫层稳定区。通过湍流数学模型的对比,研究发现湍流模型对浮选机内部气液两相流场速度矢量影响较小,速度矢量分布特征基本一致,其中液相与气相流场速度矢量分布略有不同,尤其是在接近浮选机槽体内壁的矿浆流体上升区,液相速度方向变化较平稳,而气相速度变化方向较快,说明气泡在上升区速度变化较大,这与实际矿物浮选过程中气泡运动特性较一致。

湍流模型对液相流场速度大小影响较小,两端流模型的流速相差极小,在误差允许范围内可以忽略,而湍流模型对气相流场速度大小影响同液相相比相对较大,其中标准k-ε模型数值计算的最大气相流速稍小于RNG k-ε湍流模型,就整个流域速度场变化而言,两种湍流模型对于模拟计

算浮选机内部流场速度分布特征影响不大，故以下流场特性研究采用适用范围更广的标准 $k-\epsilon$ 湍流模型。

2.2 不同表面张力系数对流体特征的影响研究

基于标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、Grace 曳力模型，在气-液两相表面张力系数分别为 0.065、0.073 和 0.081、0.090 条件下进行浮选机内部气-液两相流体数值模拟研究，探究气-液两相表面张力作用对浮选机内部气-液两相流场特性的影响。

通过对比不同表面张力系数下气相流场速度矢量分布特性可知，表面张力系数对浮选机内部气相速度分布特征影响很小，流场分布大致相同，其中气体的流速分布几乎没有变化，因此确定表面张力系数在浮选机内部气-液两相流场数值模拟研究中影响很小，故此后的气-液两相模拟选定较为常用的表面张力系数 0.073 为模拟标准。

2.3 曳力作用对流体特征的影响

为探求气-液两相间相互作用力对浮选机内部流场特性的影响，比较气-液两相流场在曳力作用下流场的变化区别，针对 Grace 曳力模型对气相流场的影响，对浮选机内部气-液两相流场在曳力模型分别为 Grace、Grace 2、Grace 6 的条件下进行数值模拟，模拟结果可知，Grace、Grace 6 条件下， $Y=0$ 截面处气相速度分布相对比较均匀，对上、下循环区域流场速度分布影响不大，而在曳力系数较小的 Grace 2 模型中，气相速度方向在浮选机槽体收缩口处变化较大，不利于浮选机内部气泡的稳定性，综合比较 Grace 曳力模型对浮选机内部气相流场速度的影响，Grace 曳力模型均适合充气机械搅拌式浮选机气-液两相流场的数值模拟，故后续对浮选机内部气-液两相流场特性的研究选定 Grace 曳力模型。

2.4 充气强度对流体特征的影响研究

在上述模拟条件下，设定充气速度分别为 1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s，并分别进行数值模拟。

由气相速度矢量图可知，当充气速度小于 2.0 m/s 时，气相流场速度分布较均匀，气相逸散性较好。当充气速度为 2.5 m/s 时，浮选机内部气相流场速度发生明显变化，速度分布不均匀，尤其是上升区气相速度方向变化很大，不利于矿化气泡的稳

定上升，当充其量过大时，矿化气泡在上循环区运动极其不稳定，极易造成矿物颗粒脱落于气泡，降低气泡矿化概率，进而影响矿物颗粒的浮选分离指标，导致浮选分离效率差。因此，针对微细粒矿物浮选分离工艺，充气强度不易过大，以免造成矿化气泡稳定性差，在浮选机内部上升过程中易破裂，影响浮选分离效率。

通过对比不同充气强度对浮选机内部气相涡流强度的影响可知，随着充气速度的增加，浮选机内部气相涡流强度和涡流区域都有所增加，充气速度达到 2.5 m/s 时，涡流强度和涡流区域范围增大比较明显，在矿化气泡上升区存在较大的涡流区域，且涡流强度过高，不利于矿物气泡的稳定上升，综合比较上、下循环区域的涡流强度和涡流区域范围，充气速度为 2.0 m/s 时，浮选机内部气相流场相对稳定，适合矿物的浮选分离。

2.5 搅拌强度对气-液两相流场特性的影响研究

在上述模拟条件下，选定充气速度为 2.0 m/s，设定转子转速分别为 400 r/min、450 r/min、500 r/min、550 r/min，并分别进行数值模拟。

由 $Y=0$ 截面气相矢量数值模拟结果可知，在设定转速范围内，转子转速对浮选机气相速度矢量变化影响较小，结合液相流场速度分布云图分析可知，随着转子转速增加，浮选机内部气-液两相运动速度增加，转速每增加 50 r/min，气-液两相流场速度大约增大 0.3 m/s，通过对图 9 中液相流速分布特征的对比，可知当转子转速为 450 r/min 时，矿化气泡在浮选机内部上升区运动速度分布相对较平稳，而随着转子转速的增加，浮选机电机消耗功率也相应增加，综合考虑浮选机功率消耗和浮选机内部矿浆流体运动特性等因素，中等转速 450 r/min 更适合所设计充气机械搅拌式浮选机的浮选作业。

为探究转子转速对浮选机内部气相涡流强度的影响，对不同转速条件气相涡流强度进行了数值模拟，模拟结果见图 10。

由数值模拟结果分析可知，过大转速和过低转速都容易在上循环区的底部形成较强涡流，都不利于气相在浮选槽内部的有效分散，进而不利于矿物颗粒与气泡的接触碰撞和粘附。相比之下，转子转速为 450 r/min 时，未在上循环区域形成局

部强涡流分布点, 利于气泡在浮选机选好区域的逸散, 同时有助于提高矿化气泡在上升区的稳定性, 进而有效提高了矿物浮选分离效率。

3 结 论

(1) 不同的表面张力系数条件下浮选槽内的流场分布大致相同, 其中气体的流速分布几乎没有变化; Grace 曳力模型适合浮选机内部气液两相流场数值模拟;

(2) 充气强度对浮选机气液两相流场分布影响较大, 充气速度为 2.0 m/s 时, 气相速度流场分布较稳定, 有利于增加气泡与矿物颗粒的碰撞概率, 且适合矿化气泡在上升区的稳定性, 增加矿物浮选分离效率;

(3) 转子转速直接影响矿浆的混合搅拌强度, 当转子转速为 450 r/min 时, 浮选机内部气—液两相流场速度和涡流强度分布较为稳定, 有助于矿物分选效率的提高。

参考文献:

- [1] 韩伟. 浮选机内多相流动特性及浮选动力学性能的数值研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.
- [2] 沈政昌, 陈建华. 浮选机流场模拟及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] 沈政昌, 卢世杰, 史帅星, 等. 基于 CFD 的 KYF 浮选机气-液两相流分析与探讨[J]. 有色金属, 2013(4):59-62.
- [4] Han W, Li R, Yang R. Redesign of mechanically agitated flotation machine based on interior flow fields simulation[J]. Minerals Engineering, 2011, 45(12):84-88
- [5] 魏昌杰, 程宏志, 石焕, 等. XJM-S 型浮选机流场的试验研究[J]. 选煤技术, 2010(2):11-14.
- [6] 杨应江, 陈建华, 沈政昌, 等. 充气搅拌式浮选机流场特性模拟研究[J]. 矿产保护与利用, 2015(2): 22-26.
- [7] 胡明振, 陈锦全, 吴伯增, 等. 大型贫锡硫化矿浮选机内流场特性的数值模拟[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34,(7):71-74.

Study on Flow Field Characteristics of Gas-liquid Two Phase in Flotation Machine

Zhang Jinxia^{1,2}, Niu Fusheng^{1,2}, Wang Xuetao¹, Li Zhuolin¹

(1.College of Mining Engineering, North China University of science and technology, Tangshan, Hebei, China; 2.Key Laboratory of Mineral Development and Security Technology of Hebei Province, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: The characteristics of multi-phase fluid in the process of flotation have direct influence on separation efficiency. Computational fluid dynamics were applied to conduct numerical simulation computation and analyze the complex fluid characteristics in the process of flotation aiming at the gas-fluid two phase fluid characteristics of the air-blowing mechanical flotation machine with effective volume of 0.1m³. Based on CFX numerical simulation software, gas-fluid two phase flow field numerical simulation strategy were established. Through comparing standard k-ε turbulence model and RNG k-ε turbulence model, discrete gas phase-zero equation and the mathematical model of continuous liquid phase standard k-ε turbulence model were confirmed, the influence of acting force of different surface tension and drag force on gas-fluid two phase flow field characteristics were investigated, the influence of inflation intensity and stirring intensity on gas-fluid two phase flow field were simulated. The research results: The influence of surface tension coefficient on the research of gas-fluid two phase flow field numerical simulation within flotation machine was minimal, so the common surface tension coefficient(0.073) was selected as simulation criterion; Grace drag force model was suitable for the gas-fluid two phase flow field numerical simulation of air-blowing mechanical flotation machine; When the aeration rate of flotation machine was less than 2.0m/s, the velocity distribution of gas phase flow field was relatively even, the gas phase fugitive emission was better; The rotator speed of flotation machine every 50 increase, the surface pressure of rotor and stator increased approximately 300Pa, mid rotating speed(450 rotate/min) was suitable for this type of flotation machine to conduct flotation operation, the simulation results of gas-fluid two phase fluid characteristics will provide basic theoretical guidance for the setting of flotation technical parameters.

Keywords: Flotation machine; Gas liquid two phase; Flow field characteristics; Surface tension; Drag force model