

充气搅拌式浮选机流场特性模拟研究^{*}

杨应江¹, 陈建华², 沈政昌³, 廖幸锦⁴

(1. 四川会理铅锌股份有限公司, 四川 西昌 615105; 2. 广西大学 资源与冶金学院, 广西 南宁 530004; 3. 北京矿冶研究总院, 北京 100106; 4. 广西区地质矿产测试研究中心, 广西 南宁 530002)

摘要:采用计算流体力学方法模拟了充气机械搅拌式浮选机的流场分布, 分别讨论了单一液相、液气两相以及固液气三相条件下浮选机的流场特性, 并讨论了液相条件下浮选机流场对转子和定子磨损的影响。研究结果对于进一步改进改善浮选机的分选效果以及开发高效浮选设备具有指导意义和实际应用价值。

关键词:流场特性; 浮选机; 计算流体力学; 模拟

中图分类号:TD456 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0076(2015)02-0022-05

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2015.02.006

Simulation Study of the Flow Field Characteristics for Aeration Stirring Type Flotation Machine

YANG Yingjiang¹, CHEN Jianhua², SHEN Zhengchang³, LIAO Xingjin⁴

(1. Sichuan Huili Zinc mine Co. Ltd., Xichang 615105, Sichuan, China; 2. College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 3. Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, Beijing 100106, China; 4. Guangxi Geological Mineral Test Research Center, Nanning 530002, Guangxi, China)

Abstract: In this work, the distribution of fluid field of aeration stirring type flotation machine has been simulated by computational fluid dynamics (CFD). The characteristics of fluid field for water phase, liquid-gas phase and solid-liquid-gas phase have been discussed, respectively. Furthermore, the effects of fluid field on abrasion of rotor and stator have been researched. The results could provide the guidance for improving the separation efficiency of flotation machine.

Key words: flow field characteristics; flotation machine; CFD; simulate

1 前言

浮选是矿物加工中处理低品位复杂矿最重要的方法, 而浮选机作为浮选工艺过程的核心装备, 一直受到矿物加工从业人员的高度关注^[1]。浮选机的性能和技术指标很大程度上取决于浮选流场的特性。不合理的流场分布会导致分选效率下降, 甚至无法实现浮选工艺的要求^[2]。

浮选流场是一种固-液-气三相混合流场, 长期以来由于三相流场无法精确测量, 同时缺乏关于浮选机内部流场的理论研究, 只能利用经验进行浮选机设备改造和升级。近年来, 浮选机大型化、高效化成为主要趋势^[3-4]。但是传统的浮选机设计方法存在着周期长、成本高、适应性差等缺点, 而采用计算流体力学方法对浮选机流场进行模拟研究, 并对浮选机进行“虚拟”试验, 有助于提高设备分选性能

^{*} 收稿日期: 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474032, 51074027)

作者简介: 杨应江(1968-), 工程师, 四川人, 现在四川会理铅锌股份有限公司从事生产及技术管理工作。

和设计质量,缩短研制周期、降低研制费用^[1-2,5]。

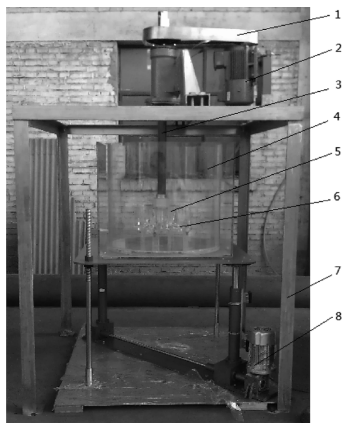
计算流体力学(CFD),即通过计算机数值计算和图像显示,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。国内外学者针对浮选机流场特性进行了大量研究并取得了一些成果,如浮选机流场气泡与矿物颗粒碰撞模拟^[6-7]、自吸式浮选流场模拟^[8]、Denver浮选机流场^[9]以及 Outotec浮选机流场^[10]等模拟。

本研究的创新之处在于,采用了整体六面体网格划分方法对模型进行网格处理。利用 CFD 方法研究 0.2 m² 的 KYF 充气机械搅拌式浮选机的流场分布,探讨液相、气相和三相浮选机流场的区别,并讨论流场特性对转子和定子磨损的影响,研究结果对于进一步改进选机流场特性,改善浮选机的分选效果具有一定指导意义。

2 计算模型及边界条件

2.1 物理模型

0.2 m³ (KYF-0.2) 充气机械搅拌式浮选机见图 1。



1 - 传动装置; 2 - 电机; 3 - 主轴; 4 - 槽体; 5 - 叶轮;
6 - 定子; 7 - 支架; 8 - 电动推杆

图 1 KYF-0.2 充气机械搅拌式浮选机

该模型槽体: $\Phi 720 \times 640$ mm、转子叶轮直径 240 mm、定子直径 390 mm,定子采用低阻尼直悬式定子,安装在叶轮周围斜上方,由支脚固定在槽底。浮选机槽体的几何模型在 PRO-E 软件中建立,PRO-E 建模中根据槽体、转子、定子的实际几何尺寸分别建立零件,然后按照浮选机实体的空间位置进行组装。组装好的模型选用 ANSYS 软件中 ICEM-CFD 模块软件进行网格划分。由于四面体网格

和六面体网格两种划分方式有较大区别,因此进行了二者的对比,如图 2 所示。由图可见,六面体网格质量比四面体要高,另外已有计算表明在三维不可压流的分析中,六面体网格产生最好的结果^[2,5]。因此本文采用六面体网格划分方法。

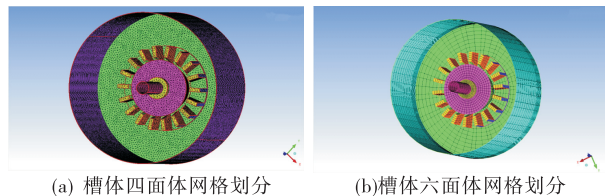


图 2 浮选机槽体网格划分

KYF-0.2 浮选机的 CFD 模型网格拥有 132 368 节点和 152 855 个六面体形网格单元。网格数量较少时,增加网格数目可提高计算精度,而不会显著增加计算时间。当网格数量增加到一定值时,随着网格数量增加,计算精度变化不大,而计算时间却显著增加。因此,网格数不是越多越好,而是在精度和计算成本之间有一个合适的值。多相流的计算相比单相流计算要耗费更多的时间,为了提高计算效率,多相流和单相使用不同网格数量,即单相流采用较高的网格数,提高计算精度,多相流采用适宜的网格数,保障计算效率。

2.2 边界条件设置

边界条件控制整个流场中流体在边界处的流体变量值,因此对浮选机合适的的流场数值进行试验。气相流体为常温状态下的空气,摩尔质量为 28.96 g/mol,密度 1.185 g/cm³,动力粘度为 1.831×10^{-5} Pa·s,入口边界定义为速度入口,入口的流速 $\mu_i = \mu = 1$ m/s,整个入口进气的过程默认为气体湍流充分延展,速度在入口截面处上均匀分布,直接指定了法向时均速度值。出口边界条件,选取浮选机实际情况的应用边界,只允许气相出口,不允许液相流出。

在整个模型的壁面处,气相流场采用自由滑移边界条件,因为此时剪切应力在壁面处为零 ($\tau = 0$),并且气相流体贴近的壁面之间,不是明显的摩擦作用。液相流场,采用最广泛应用的无滑移边界条件。为了消除转子和机体之间干扰,采用冻结转子模型,冻结转子属于柯西-稳态算法,动静之间有相对固定的位置。旋转全区域全部设置为旋转,即

瞬态效应被忽略。交界处的计算采用通用网格界面,允许不同类型的网格块粘接。对于所有的流动方程在交界面上都可以保证严格的守恒;交界面处理为全隐式格式,不会影响解的收敛性;当流体通过交界面时被自动地放大或缩小以适应网格的大小差异。

3 结果与讨论

3.1 浮选机水相流场

单质液相条件下,槽体中心竖直剖面速度矢量计算结果,如图 3 所示。由图可分辨出浮选槽内液相流场特征,Z 轴方向具备上、下两个子域,形成两个独立的旋转流场,且构成一个整体的循环流场。下部的子域流场速度由中心向两边逐渐减低,中心部分速度梯度较小。该流域中的速度分布与浮选机的搅拌区、碰撞区对速度的要求构成对应关系。上部的子域自下而上逐渐降低,该结果与浮选机的搅拌混合区、运输区、富集区、浮选区对速度的要求构成对应关系。

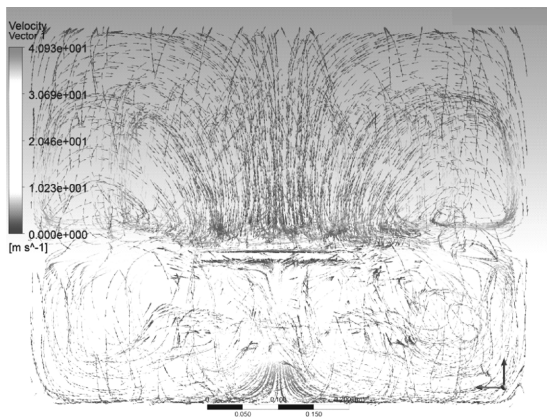


图 3 单质液相条件下浮选槽的速度矢量图

气泡的分散、药剂的扩散、矿粒与气泡的碰撞等过程绝大部分均发生在搅拌混合区。搅拌混合区内,足够高的紊流强度才能使气泡最大限度地充满该区,提高容积的利用系数,使矿物颗粒与气泡在该区具有较高的碰撞概率。

在离开搅拌混合区时,由于搅拌力较强,形成的矿粒-气泡集合体大部分已解体,所有气泡矿化程度较弱。由于流体动力及矿粒、气泡自身的速度,它们脱离搅拌混合区进入运输区。在运输区内,矿粒和气泡又重新碰撞,附着,这种现象称为二次碰撞附着。因此,运输区不仅要求有上升流,将矿化气泡运

送至分离区,而且要求适当的上升速度,尽可能减少粗粒级矿物在气泡上的脱落概率,同时促进矿粒与气泡的二次碰撞。

分离区要求矿浆流相对稳定,使脉石颗粒与矿化气泡充分分离的同时,要尽可能减少已附着的粗粒矿物的脱落,在保证回收率的同时提高精矿质量。

浮选区使矿物进一步得到富集,要求泡沫层更加平稳,保证泡沫层中的矿物不致脱落,泡沫能顺利地流入泡沫槽内。因此浮选区流场应该尽量减少紊流,流场应该更加稳定。

通过观察转子-定子局部速度云图的流场特征可知,模拟结果已经比较接近浮选槽内真实的流场情况。转子-定子 XY 平面的液相速度分布,如图 4 所示。由图可知,转子中心部分流速最大,由于转子的不断转动使液体具有切向速度,而定子和转子间隙产生的剪切力导致流体的加速甩出,形成了局部的峰值区域,其中径向射流居多,但随着与转子距离的不断增加,径向速度不断减小。

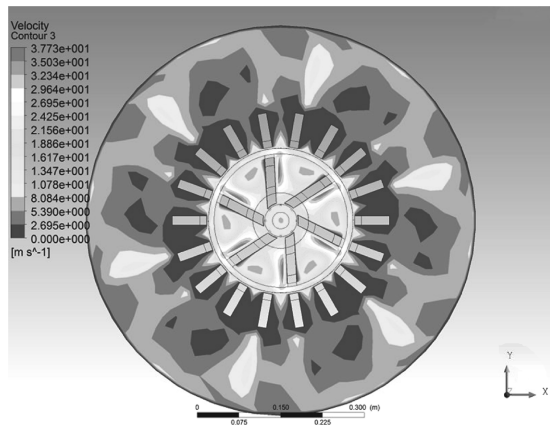


图 4 单质液相条件下距底 170 mm 液面的速度云图

3.2 气液两相流场特性

气液两相流场中受到多种作用力影响,其中一种是促使液体表面收缩的表面张力。液体的表面张力系数表示液体表面相邻两部分间单位长度的相互牵引力,对于气液两相流场具有重要影响。本研究采用标准大气与常温两种条件下,研究水的表面张力系数对浮选机流场的影响。

如图 5 所示,不同的表面张力系数条件下,浮选槽内的速度流场的分布情况。通过比较可以发现,不同表面张力系数下流场分布大致相同,其中气体的流速分布几乎没有变化,说明表面张力系数对浮

选机流场影响很小,这主要是因为本文模拟的是机械搅拌式浮选机,浮选机的流场主要取决于转子的运动,液体表面张力影响液相的性质,但不能改变液相的基本运动状态。因此,本文所有模拟采都取常用的表面张力系数0.072。

28.96,密度 1.185 g/cm^3 ,动力学粘度为 $1.831 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,入口边界定义为速度入口,气相入口的流速仍为 $\mu_i = \mu = 1\text{ m/s}$ 。液相流体为常温常压下纯水,固相介质选取 CFD 自有的标准的玻璃渣为固相介质,密度为 4.0 g/cm^3 。

图 6 为标准条件下浮选槽内三相流速矢量图。

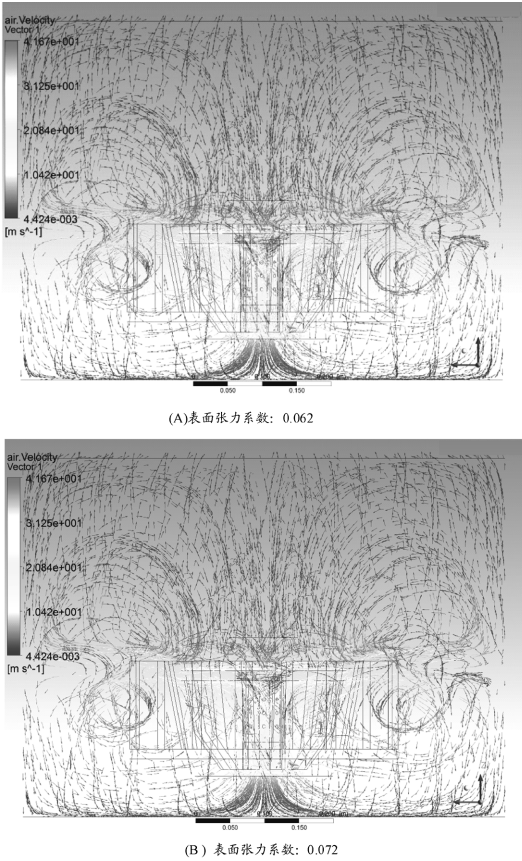


图 5 表面张力系数对气相矢量的影响

表面张力的计算结果说明,液气界面张力对流场影响比较小,机械搅拌式浮选的流场和液体性质关系不大,因此浮选机中添加有机表面活性剂,如起泡剂和捕收剂,不会对浮选机流场产生影响,另外采用不同的水质也不会影响机械搅拌式浮选机的流场特性,但是水质会影响浮选药剂的作用效果。因此浮选机的设计可以不用考虑浮选药剂对流场性能影响,着重考虑浮选机物理因素,如空间结构等对流场分布和特性的影响。

3.3 三相流场特性

在气液两相数值模拟结果的基础上,为了保证流场的稳定和准确性,选取湍流控制方程为标准的 $k-\varepsilon$ 方程,进行三相流场模拟。三相流场的计算参数为:气相流体为常温状态下的空气,摩尔质量为

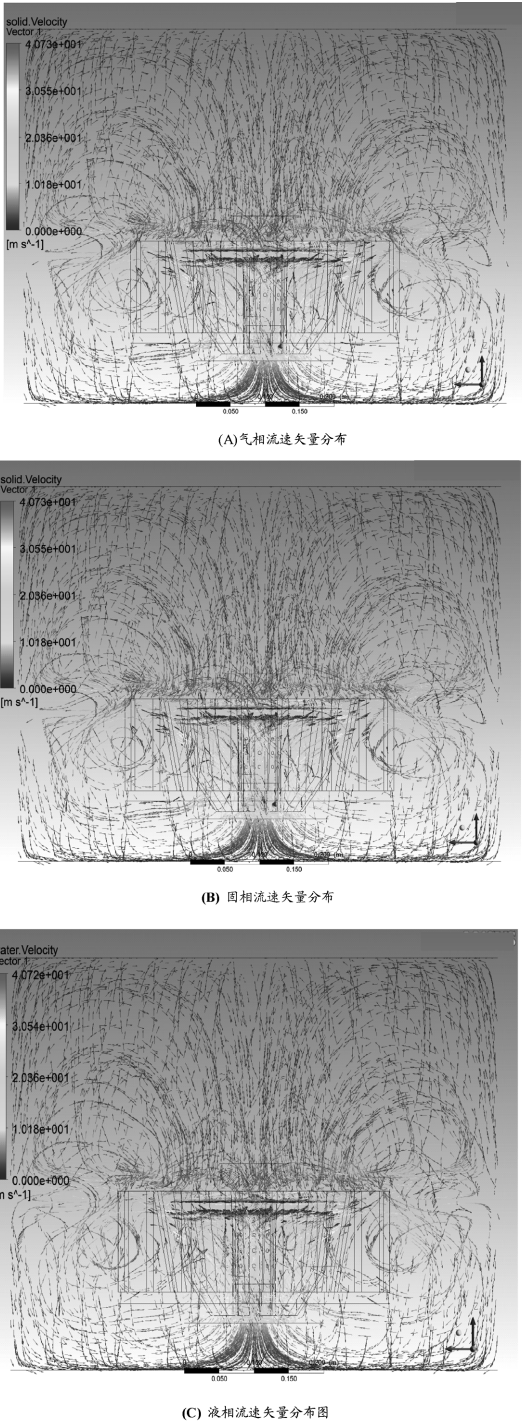
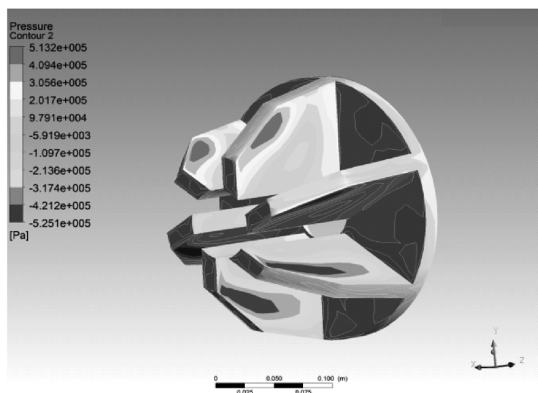


图 6 标准条件下浮选槽内三相流速矢量图

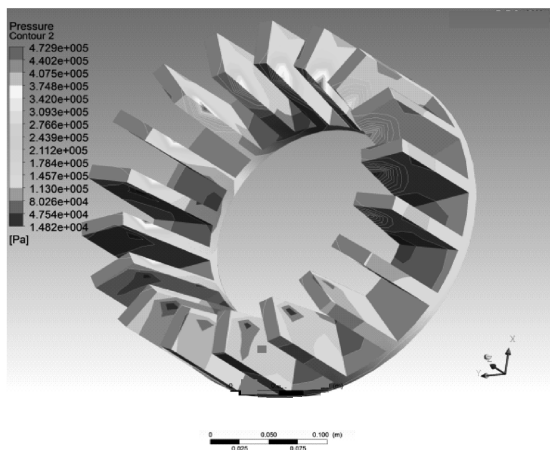
由图 6 可见,气、固、液三相的流场在浮选机中的分布非常形似,特别是气-固两相的流场几乎完全相同,液相流场在转子附近具有不同于气相和固液的流场。因此浮选机设计的时候,应重点考虑液体的流场特性,对气相则主要考虑其空气弥散度,即充气方式的设计。

3.4 定子、转子叶片受压云图

为了了解转子、定子叶片受压情况,图 7 给出转子、定子壁面获取压力云图。



(a) 转子的受压图



(b) 定子的受压图

图 7 转子和定子在场中的受压云图

转子叶片受压云图,如图 7(a)所示。由图可见,叶轮的迎风面属于正压,由受力边缘向中心减弱;而背风面属于低压区,由边缘处的负压逐渐向中心升高,最终转为正压。图 7(b)中在定子表面的高压区域是与转子的高压区相对,而与定子负压区相对围转子的背风面。转子、定子叶片的受压情况与

现场的经验是吻合的,实际中的磨损主要也是叶片相对应压力较高区域。因此在浮选机转子和定子设计的时候,应该对转子、定子叶片迎风面进行专门的耐磨处理,增强叶片使用寿命。

4 结论

采用流体力学计算方法研究了充气机械搅拌式浮选机的流场特性。研究结果表明,充气机械搅拌式浮选机上下两个子域形成两个独立的旋转流场,下部的子域流场对应浮选机的搅拌区和碰撞区,上部的子域流场对应浮选机的运输区、富集区。气体和固体对浮选机流场分布影响较小。通过对流场分布的改进,能够改善浮选机的选浮选效果以及提高浮选机部件的使用寿命。

参考文献:

- [1] 沈政昌. 浮选机理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2012.
- [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] Yianatos J. B., Bergh L. G., Aguilera, J.. Flotation scale up: use of separability curves[J]. Minerals Engineering, 2003, 6(4): 347-352.
- [4] Yianatos J. B., Henriquez F. H., Oroz A. G.. Characterization of large size flotation cells[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(6/8): 531-538.
- [5] 谢龙汉,赵新宇. ANSYS CFX 流体分析及仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [6] Koh P. T. L., Schwarz M. P.. CFD modelling of bubble-particle collision rates and efficiencies in a flotation cell[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(11): 1055-1059.
- [7] Yoon R. H.. The role of hydrodynamic and surface forces in bubble-particle interaction[J]. International Journal of Mineral Processing, 2000, 58(1-4): 129-143.
- [8] Koh P. T. L., Schwarz M. P.. CFD model of a self-aerating flotation cell[J]. International Journal of Mineral Processing, 2007, 85(1-3): 16-24.
- [9] Sawant S. B., Joshi, J. B., Pangarkar V. G., et al. Mass transfer and hydrodynamic characteristics of the Denver type of flotation cells[J]. Chemical Engineering Journal, 1981, 21(1): 11-19.
- [10] Xia J. L., Rinne A., Grönstrand S.. Effect of turbulence models on prediction of fluid flow in an Outotec flotation cell[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(11): 880-885.