

基于 CFD 技术的选矿药剂生产用反应釜 流场特性研究概述^{*}

李超, 尚衍波, 朱阳戈, 罗科华, 阳光

(北京矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘要:选矿药剂生产常使用机械搅拌式反应釜,产品质量与药剂经过混合后的均质性直接相关,反应釜内部的流场特性对设备的混合效率以及产品的均质性具有重要影响。CFD 技术是研究反应釜流场特性的一种有效技术手段,本文概述了 CFD 技术在该领域的应用现状以及选矿药剂行业常用的反应釜内部流场特性的相关研究成果,并介绍了常见的设备优化技术手段。

关键词:CFD;反应釜;流场特性;选矿药剂

中图分类号:TQ052 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2019)05-0135-05

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.05.018

Overview of Flow Field Characteristics of Reactor for Beneficiation Reagent Production Based on CFD Technology

LI Chao, SHANG Yanbo, ZHU Yangge, LUO Kehua, YANG Guang

(Li Chao Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy Co. Ltd., Beijing 100160, China)

Abstract: Mechanical stirred reactor is widely used in the production of beneficiation reagents. The quality of products is directly related to the uniformity of reagent after mixing. The flow field characteristics in the reactor have an important influence on the mixing efficiency of the equipment and the uniformity of the product. CFD technology is an effective technical means to study the flow field characteristics of reactor. In this paper, the application status of CFD technology in this field and the related research results of flow field characteristics in reactor commonly used in beneficiation reagent industry are summarized. Common technical means of equipment optimization are also introduced.

Key words: CFD; stirred reactor; flow field characteristics; beneficiation reagent

1 前言

选矿药剂的复配是选矿药剂生产中普遍应用的一种生产工艺,生产设备通常选择搅拌反应釜,根据所生产药剂的理化性质不同而选取不同的搅拌形式和材质。选矿药剂生产有自身的一些特点,如某些原料为石化行业的副产品甚至下脚料,无技术标准;

药剂产品的理化指标与药剂在矿山使用的效果间难以建立起清晰明确的联系^[1],目前主要考查的是混合后产品的均质性^[2]。大部分药剂复配工艺都是在常压下进行,影响药剂复配生产工艺的主要因素有反应釜结构和温度,温度主要影响原料的黏度。以常用的捕收剂油酸为例,在低温环境下,流动性会显著下降甚至凝固^[3],工业上常采取加热融料的方

* 收稿日期:2019-07-02

作者简介:李超,男,(1986-),硕士,研究方向:绿色高效选矿药剂研发、工业化。

式使其满足复配生产所必须的流动性要求。本文主要研究非低温环境下反应釜结构对生产工艺的影响。当前,选矿药剂生产还比较传统和粗放,行业内应用的反应釜内搅拌器形式还比较传统,对于搅拌器的研究,目前国内外也有新型搅拌器的开发利用,国外的如美国 lightnin 公司开发的高效轴流式搅拌器,国内的如华东理工大学开发的翼型搅拌器等更加先进高效的搅拌器^[4],受成本和相关研究工作缺乏等原因的影响,目前还未见应用到选矿药剂行业。反应釜结构不同,内部的流场特性也不同,对流体的混合效果有重要影响^[5],进而影响药剂混合后的均质性,因此对反应釜的内部的流场特性进行研究对优化选矿药剂生产工艺具有实际的指导意义。

机械搅拌反应釜的主要结构包括搅拌容器和搅拌器,其中搅拌器是反应釜的关键部件。搅拌器种类很多,分类方法也较多,按搅拌器结构可分为平叶、折叶、螺旋面叶。桨式、涡轮式、框式和锚式的桨叶都有平叶和折叶两种结构;推进式、螺杆式和螺带式的桨叶为螺旋面叶。按搅拌器用途可分为:低粘流体用搅拌器和高粘流体用搅拌器。用于低粘流体搅拌器有:推进式、长薄叶螺旋桨、桨式、开启涡轮式、圆盘涡轮式、布鲁马金式、板框桨式、三叶后弯式、MIG 和改进 MIG 等。用于高粘流体的搅拌器有:锚式、框式、锯齿圆盘式、螺旋桨式、螺带式(单螺带、双螺带)、螺旋-螺带式等^[6]。选矿药剂生产所使用的反应釜中,选择较多的搅拌器有锚式搅拌器和桨式搅拌器以及板框式搅拌器,他们的优点是结构简单,成本低,但如只有普通的搅拌器,也有混合效率低、物料黏度适应范围小等缺点。

因搅拌釜应用的目的和介质不同,有关反应釜的研究方向包括颗粒悬浮分散效果、挡板对釜内流场影响、搅拌桨间距和桨径比对釜内流场影响、搅拌头转速对釜内流场影响、搅拌桨优化设计等^[7],而反应釜内部流场特性的研究是开展上述研究的基础。

对于选矿药剂行业来说,利用 CFD 技术来研究优化生产过程,主要考察的是物料混合过程中反应釜内部流场特性、物料混合时间、物料混合过程中的组分分布^[8]等方面。使用 CFD 技术优化选矿药剂的生产过程,是一个新的思路和方向。亦可通过仿真模拟来优化反应设备,方德明^[9]等根据具体工况利用 CFD 技术对搅拌器的型式进行了改进,提高了混合效率。CFD 技术对研究实验室反应釜放大也

具有非常好的适应性,孙士丹^[10]等利用 CFD 模拟进行了实验室反应釜放大,结果符合中试要求,CFD 技术的可靠性得到了验证。

2 CFD 技术及其研究方法

CFD(计算流体力学)技术是 20 世纪 60 年代伴随计算科学与工程迅速崛起的一门学科分支。近几十年来,已经在航空航天、水利、船舶、冶金、化工、建筑、生物^[11]等领域有了较为成熟的应用。利用 CFD 技术指导选矿药剂生产的实际应用目前还很少见到相关报道,但作为一种技术手段已经成功应用在机械搅拌反应釜内部流场特性的研究工作中。

利用 CFD 求解流体问题的过程都需要用到流体流动的控制方程,包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,也统称为纳维-斯托克斯(N-S)方程,任何 CFD 问题都是求解相关控制方程的偏微分方程组的问题,并且系统的自由度为零,即方程式的个数必须等于未知量的个数才能够求解^[12]。

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m \quad (1)$$

式(1)中 ρ 为流体密度,流体 u_i 为 i 方向上的速度分量, S_m 是从分散的二级项中加入到连续项的质量,源项也可以是任何自定义的源项。

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式(2)中 p 为静压; τ_{ij} 为应力张量; g_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力。

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (3)$$

式(3)中 C_p 为比热容; T 为温度; k 为流的传热系数; S_T 为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分^[13]。

利用 CFD 技术研究反应釜内部流场特性时常用的计算机软件是 ANSYS 下的 FLUENT、ICEMCFD 等。研究方法通常是先利用三维建模软件建立反应釜的三维模型,之后将模型进行网格划分,根据模型的不同可以采用结构化网格和非结构化网格或者两者相结合的形式。根据实际工况选择合适的物理模型,给出合理的边界条件和计算求解参数,再进行数值计算,后处理后根据计算结果进行流场分析,得到

所需的结论,指导实际工作。

3 反应釜流场特性研究中常用的物理模型

在研究反应釜内的流场特性过程中,需要根据实际的工况建立计算求解的物理模型。以常用的FLUENT软件为例,软件中内置有丰富的物理模型,如多相流模型、能量方程、湍流模型、辐射模型、热交换模型、多组分模型、离散型模型、噪声模型等。研究反应釜内部流场特性中通常会使用湍流模型,常用的湍流模型有Inviscid、Laminar、Spalart-Allmaras模型、标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型、雷诺应力模型。物理模型的选取在求解CFD问题中是比较关键的步骤,有些问题只有特定的物理模型才适合,有些问题虽然可以选择多种模型进行计算,但不同模型的选取对计算的复杂程度、收敛性、解的精度都会产生影响,因此在使用CFD技术解决问题的过程中,研究人员一直为建立更合适的物理模型而不断的探索新方法,相继开发出内外迭代、MRF(多重参考系)模型、快照法、运动网格模型、滑移网格模型等模型和方法。搅拌模拟工作的湍流模型多使用标准 $k-\varepsilon$ 模型和RNG $k-\varepsilon$ 模型,动静区域的处理常使用MRF模型和滑移网格模型^[14]。

MRF模型通常适用于稳态流场计算,使用两个不同的参考系,将搅拌区域设置为旋转转动区域,将其作为一个参考系。在搅拌反应釜内部的其它静止区域,使用静止的参考系求解,设置为静区域。使用MRF方法进行计算时,整个计算域被划分成一个个小的子域,子域间的运动形式都是彼此独立的,使用流场控制方程在每个子域上求解,在子域间的交界面上,通过将速度换算成绝对速度的方式来交换传递不同子域间的流场信息。此方法的主要特点是在动静区域的设置上,不会出现交叉的区域,使得计算量大为减小,正因如此,使之成为反应釜流场计算的通用方法。

另一种常用的方式是使用滑移网格模型,该方法将计算区域划分为搅拌桨叶区和搅拌桨外区两个区域,两个区域均采用静止坐标系。搅拌桨和搅拌桨区域的网格一起旋转,其它区域的网格保持静止。在界面处,两部分网格是相对滑动的,可以在界面上采用守恒插值法,使得质量和动量匹配。滑移网格

模型主要应用于计算搅拌器的非稳态过程,适合于存在计算搅拌桨叶片和挡板相互作用的体系,从而达到研究流场特性的研究目的。这种方法的优点是有不涉及网格的变形与重生,不会产生负体积的网格,但这种方法的最大缺点是需要占用大量的CPU时间,计算时间过长,对硬件的要求也比较高,而且后期处理比较麻烦^[15]。尽管如此,滑移网格模型仍然是解决实际问题中经常使用的物理模型。

4 选矿药剂行业常用的反应釜内部流场特性研究

在研究过程中,人们习惯将反应釜内部的流型分为三种,分别是径向流、轴向流和切向流。径向流是指流体流动垂直于搅拌轴方向,轴向流是指流体沿搅拌轴方向流动,切向流是指流体随着搅拌器的运动沿圆周方向流动。在这三种流型当中,切向流不利于流体混合,因为其对体系内各层流体没有速度梯度,因此在搅拌混合过程中要设法抑制切向流的强度^[16]。流型与设备结构直接相关,在一定范围内,设备结构固定,转速变化,一般只会使得流体流动速度增加,不会改变流型^[17]。流体的黏度也对搅拌器的选型具有重要影响,选矿药剂生产中使用高粘度搅拌器的案例不多,但也有这方面的需求,在反应釜的相关研究中,杨琳琳^[18]等利用螺杆搅拌器反应釜进行了CFD模拟,研究了反应釜对高粘度流体的混合效果。因搅拌器形式较多,本文仅对选矿药剂行业常用的机械搅拌反应釜流场特性进行分析说明。

4.1 锚式反应釜

锚式反应釜因其结构简单,成本低廉,能够满足基本的搅拌混合需求,在选矿药剂生产中应用较为广泛。

锚式反应釜的特点是搅拌器边缘距离釜的内壁较为贴近,搅拌时在搅拌器边缘和釜内壁形成的狭窄流道使得此区域内的流体流动速度较大,湍流程度较强,是流体混合的核心区域。但同样因其结构使然,锚式反应釜沿轴向的流体湍流程度不高,使得设备整体混合效率较低。在工业实际应用中,通常通过在釜内增加挡板来增强釜内流体沿轴向的湍流强度,加强混合效率。闫一野^[19]等利用CFD技术对锚式反应釜内三维流场进行了数值模拟研究,证

明了挡板的增加有助于增强锚式反应釜内部流体轴向湍流强度。普通锚式反应釜内部流场为高度不同的环流,湍流程度不强,挡板的存在打破了单纯环流的情况,使流体从反应釜中部分为上下两部分,形成沿轴向的对流,能够显著提高混合效率。挡板的位置和尺寸一般根据设备结构和仿真模拟以及实验来确定,常见的加装挡板的位置为釜体内壁和釜底部。

4.2 桨式反应釜

桨式反应釜也经常用于物料黏度较高的选矿药剂生产,鹿鹏^[20]等利用 CFD 技术研究了桨式反应釜内部的流场特性,得到了桨式反应釜内部流场分布。釜内流体从桨叶区射流到釜壁向上到达液面后又返回桨叶区,从而使得反应釜上部形成一个大的循环;另一小部分流体从桨叶区碰到釜壁后向下流动到釜底后又返回桨叶区形成一个小循环;在中心搅拌轴下方,也存在一个小循环。在整个反应釜内部存在若干大大小小的涡流,没有“死区”的形成,混合效果较好,靠近桨区的流体流动速度较大,远离桨区的流体速度较小。从流场特性的角度来看,相同工况下,桨式反应釜的混合效率要高于锚式反应釜。

为了进一步提高桨式搅拌反应釜的混合效率,改善内部的流场特性,工业上通常会使用双层甚至三层搅拌桨的型式。马泽文^[21]等对双层搅拌桨反应釜内部的流场特性进行了数值模拟并且与单层桨的反应釜内部流场分布进行了对比研究。在相同转速下,双层桨相对于单层桨使得釜内流体流动速度更快,并且将原有桨叶区到釜顶部的流体大循环分成两个循环,流体的湍流动能更大,在两层桨叶之间上层桨叶向下方的流体循环和下层桨叶向上的流体循环连接起来,形成轴向对流,更加有助于流体充分混合,优化了流场分布,提高了流体的混合效率。马庆勇^[22]也对单层桨和多层桨的搅拌效果做了对比研究,发现多层桨的安装能大大提高池面液体的转速,有利于带动整个池液的循环,使整个池中的浓度达到更均匀化,起到更好的搅拌效果。使用多层桨叶是工业上为了提高设备混合效率经常采用的技术手段。有研究表明,如对设备的混合效率要求较高,对于长径比大于 1 的反应釜应当考虑加装双层桨叶。也有研究表明,采用将搅拌桨偏心放置的方法,有助于流体的对流和形成轴向的湍流,利于流体混合。且有研究表明,搅拌桨偏心放置,能够比加装挡板的效果更好^[23]。张慧敏^[24]

等的研究证明了搅拌桨偏心放置时,存在一个最佳偏心率。车占富^[25]等用试验证明了偏心率越大,液体扰动越大,但是功耗也随之增大,确需找到一个最佳偏心率。

4.3 板框式反应釜

张云电^[26]等利用 CFD 技术对板框式搅拌反应釜的内部流场进行了数值模拟并进行了分析。釜内流体水平截面多以周向流动为主,搅拌框的存在有助于流体形成水平方向的涡流,搅拌轴和釜壁间的流体形成了一个大循环和一个小循环,板框式搅拌反应釜主要靠这两个循环进行流体混合,釜底部液体流速较低,不同的流体对流交换效果较差,混合效率不高。相比锚式反应釜和桨式反应釜,在相同工况下,板框式反应釜的混合效率要好于锚式反应釜,但比桨式反应釜差。

5 结语

选矿药剂经过复配后产品的均质性,直接影响着产品外观和使用效果。无论从商业角度还是技术角度,保持良好的产品均质性对药剂生产企业来说都至关重要,而选择高效的混合设备,不仅能够提高混合效果,还能够提高生产效率。研究生产设备内部的流场特性,有助于了解设备的混合能力,是设备选型、设备优化设计和生产工艺改进的技术基础。CFD 技术是研究反应釜流场特性的一种非常有效和便捷的技术手段,但在选矿药剂行业的应用还比较少,且对于反应釜内流场特性的研究工作中基本都是用清水为流体介质。在研究选矿药剂的生产过程时,可以先对药剂原料的理化指标(密度、黏度、浊度、折光率、pH 值等)进行测试,收集测试数据,之后利用 CFD 技术根据实际工况对原料的加料顺序与混合时间、混合效果之间的关系进行研究,根据模拟和实验的结果选取最佳的技术方案,不但可以优化、规范选矿药剂的生产操作规程,还能够提高生产效率,节约能源,无论从经济上还是技术上都具有十分重要的现实意义。随着计算机技术的飞速发展以及药剂生产质量标准的不断成熟完善,CFD 技术将在选矿药剂生产领域发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 张翼,王旭东. 基于正交试验和 BP 人工神经网络的浮选药剂制度优化[J]. 有色金属(选矿部分),2018(2):99-102.

- [2] Attila Egedy, Tamás Varga, Tibor Chovún. CFD Modelling and Video Analysis Based Model Validation for a Stirred Reactor [J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2012(6): 17 – 20.
- [3] 刘德志,张国范,陈伟. 改性油酸对某石英型萤石矿的浮选试验研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(4): 79 – 81.
- [4] 孟汉卿. 工业规模大长径比搅拌釜混合效率的数值模拟[D]. 烟台:烟台大学, 2017.
- [5] 周勇军,袁名岳,孙存旭. 改进型框式组合桨搅拌釜内流场特性研究[J]. 化工进展, 2019. DOI:10.16085/j.issn.1000 – 6613. 2019 – 0848.
- [6] 冯桂江. 机械搅拌反应釜概述[J]. 橡塑技术与装备, 2015 (22): 56 – 57.
- [7] 胡效东,田强,戚振,等. 基于滑移网格的反应釜内部流体动力学特性研究[J]. 压力容器, 2013(7): 30 – 38.
- [8] 吴裕凡,王修纲,麦永懿,等. 同轴异速桨在丙烯淤浆反应釜中的流场研究[J]. 化学工程, 2019(4): 45 – 49.
- [9] 方德明,陈涛,杨象岳,等. 基于CFD流场分析的反应釜搅拌器结构改进[J]. 轻工机械, 2014(2): 95 – 98.
- [10] 孙士丹,胡大鹏,于洋,等. 反应釜流动传热模拟及放大设计[J]. 化工装备技术, 2018(4): 20 – 23.
- [11] G. R. Kasata, A. R. Khopkarb, V. V. Ranadeb, et al. CFD simulation of liquid – phase mixing in solid – liquid stirred reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2008(63): 3877 – 3885.
- [12] Maciel Filho, R., Bezerra, V. M. F. A CFD – finite volume method to generate a deterministic model: application to stirred tank reactors[J]. Computer aided chemical engineering, 2000 (8): 415 – 420.
- [13] 黄卫星,陈文梅. 工程流体力学[M]. 北京:化学工业出版社, 2001. 7.
- [14] 刘凯特. 铬黄反应釜的计算流体力学[D]. 上海:华东理工大学, 2014.
- [15] 马泽文. 基于CFD的1 – 4升结晶搅拌反应釜流场分析及改进[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
- [16] 王文鹏. 新型搅拌器的搅拌特性数值模拟[D]. 西安:西安石油大学, 2018.
- [17] 刘耀庭. 气 – 液两相搅拌釜流体行为的数值模拟研究[D]. 北京:北京科技大学, 2017.
- [18] 杨琳琳,吴高杰,陈剑佩,等. 螺带螺杆搅拌釜中高黏流体的CFD模拟计算[J]. 华东理工大学学报:自然科学版, 2019(5): 693 – 700.
- [19] 闫一野,张士玺. 锚式搅拌反应釜三维流场数值模拟[J]. 机电产品开发与创新, 2012(1): 50 – 51.
- [20] 鹿鹏,李伟,郑星文,等. 搪玻璃反应釜流场特征的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺, 2016(2): 97 – 105.
- [21] 马泽文,刘涛,孙旭东. 基于CFD的结晶搅拌反应釜流场分析与改进[J]. 系统仿真学报, 2018(5): 1900 – 1907.
- [22] 马庆勇,张奇志,张林. 用CFD模拟分析单层、双层搅拌桨叶对搅拌效果的影响[J]. 湖南农机, 2014(4): 38 – 41.
- [23] Hall J F, Barigou M, Simmons M J H, et al. Mixing in unbaffled high – throughput experimentation reactors [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43(15): 4149 – 4158.
- [24] 张慧敏,胡守明,孔祥征. 偏心双桨搅拌流场及效果分析[J]. 化学反应工程与工艺, 2017(1): 49 – 54.
- [25] 车占富,杨敏官,冯浪,等. 偏心搅拌槽内流场特性试验研究[J]. 流体机械, 2012(11): 5 – 9.
- [26] 张云电,董昌帅,储瑞,等. 反应釜内搅拌混合特性研究[J]. 机电工程, 2017(10): 1101 – 1105.

引用格式:李超,尚衍波,朱阳戈,罗科华,阳光. 基于CFD技术的选矿药剂生产用反应釜流场特性研究概述[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 135 – 139.

LI Chao, SHANG Yanbo, ZHU Yangge, LUO Kehua, YANG Guang. Overview of flow field characteristics of reactor for beneficiation reagent production based on CFD technology[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(5): 135 – 139.