

基于 Fluent 的直管式旋桨反应器三维流场的数值模拟

朱瑞瑞^{a,b}, 祝建中^{a,b}, 吉栋梁^{a,b}, 陈冠寰^{a,b}, 戴会超^c

(河海大学 a. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室; b. 环境学院; c. 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 运用计算流体力学(CFD)软件对新型直管式旋桨反应器进行流场模拟。用 Gambit 建立三维实体模型,采用多重参考系法(MRF)和标准 $\kappa-\varepsilon$ 双方程模型对反应器内液相流场进行模拟,运用 Tecplot 对计算结果进行后处理。结果表明:计算所选模型能较准确地模拟反应器内的流场分布,反应器内最大流速和湍动能分布在桨叶端部附近,流体的整体流动趋势以环流为主,有利于不同区域内物料的均匀混合;相比于单一桨叶反应器,该多组合桨叶反应器能提供更大范围的紊动流场。在模拟物为水体的情况下,本反应器对应的最佳转速是 40 r/min,并提出反应器在水环境中的应用方法。

关键词: 直管式旋桨反应器; 湍流; 数值模拟; 计算流体力学

中图分类号: TV13 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)02-0149-04

Simulation of 3-dimensional flow field for stirred reactor of straight pipe

ZHU Ruirui^{a,b}, ZHU Jianzhong^{a,b}, JI Dongliang^{a,b}, CHEN Guanhuai^{a,b}, DAI Huichao^c

(a. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on Shallow Lakes, Ministry of Education;

b. College of Environment; c. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper applied the computational fluid dynamics (CFD) software to simulate 3-Dimensional flow field for a straight pipe stirred reactor. Multiple reference frames (MRF) impeller rotation model and standard $\kappa-\varepsilon$ turbulence model were used to simulate the flow field by using Gambit to build 3-Dimensional reality model. Then it used Tecplot to treat calculation result. The result showed that the calculation model could simulate detailed information on distribution of velocity and turbulence kinetic energy. The maximum velocity and turbulent kinetic energy in the reactor distribute in the vicinity of blade tip. The overall flow trend of fluid is mainly ring circulation, which is conducive to the uniform mixture of materials in different areas; compared to single blade reactor, the combination of multi blade reactor can provide a turbulent flow of wider range. Under the circumstance of simulation material being water, the best speed corresponding to the reactor is 40r/min. The paper proposed a application method of the reactor in water environment.

Key words: stirred reactor of straight pipe; turbulent flow; numerical simulation; computer fluid dynamics

搅拌反应器广泛应用于化工领域^[1-3],是一种常用的化工反应器,可用于均相反应和多相反应,通过搅拌,反应器内的物料可达到宏观和微观上的均一。随着技术要求的提高,带搅拌装置的反应器得到了更多的应用,如用于工业脱硫^[4]。目前也有将搅拌反应器应用于环境流体领域的研究,主要用于模拟天然水体及水流^[5-6],大多数都为槽式搅拌反应器,但由于其造价高、空间大、高度低等各方面条件的影响,其应用范围很小,所以本研究提供一种新

型管式旋桨反应器。该反应器占地空间小,结构简单,操作方便,造价低,且能满足高度的要求,大大增加了它的可实用性,直管式旋桨反应器可以很好地模拟天然水体及水流波动,还可用于浅水湖泊及河流水体环境下沉积物及泥沙再悬浮和水体中污染物的迁移转化的研究,化工领域药剂的合成混合研究及污水处理厂药剂的絮凝沉降研究,具有广阔的适应性。数值模拟周期较短,成本较低,不仅可以形象地展现流体流动过程,还能够获得一些实体实验难

收稿日期:2013-12-17; 修回日期:2014-01-03

基金项目:教育部留学人员回国启动基金(No. 1061-51200312);国家杰出青年科学基金(Grant No. 50925932)

作者简介:朱瑞瑞(1988-),女,河南商丘人,硕士研究生,主要从事污水治理及计算水力学研究。

通讯作者:祝建中(1970-),男,江西上饶人,博士,教授,主要从事环境材料的研究与应用工作。

以观测的数据^[7-8],近年来很多研究者对各类反应器进行了数值模拟并对模拟结果做了相应的验证实验^[9-12],证实了利用数值计算方法模拟反应器内部的流体力学特性具有很好的可行性。目前国内外对搅拌反应器的 CFD 研究以搅拌槽居多^[13-15],对于直管式反应器的研究较少,本文将运用 Fluent 软件对一种新型直管式旋桨反应器装置进行内部流场数值模拟,分析内部流场的速度和湍流动能分布,为反应器的优化和放大建立基础。

对于浅水湖泊,底部沉积物很容易受到风浪的扰动作用而发生再悬浮,扰动条件下,水体中的这些悬浮物在沉降过程中,通过吸附、絮凝等作用往往与水体中的营养盐、其他颗粒及微生物结合在一起,因此,水体中悬浮物的沉降对水生生态系统中有有机物的迁移、转化及营养盐循环再生具有重要意义^[16-17]。本反应器占地空间小,结构简单,操作方便,造价低,且能满足高度的要求,可用于研究浅水湖泊及河流水体环境下悬浮物的沉降及扰动条件下沉积物的再悬浮过程,水体中污染物的迁移转化。反应器壁上有很多取样口,在悬浮物的沉降实验中,通过不同时刻的不同高度处的悬浮物浓度和污染物的测定,可以得到悬浮物的絮凝沉降速度及沉降规律和不同高度处污染物随时间的变化;在不同的扰动条件下,通过对水体中颗粒物絮凝体的形态学分析,获取絮凝体的分形参数,可了解水动力与水体中悬浮物絮凝速度及絮凝团大小的关系。

1 反应器的结构

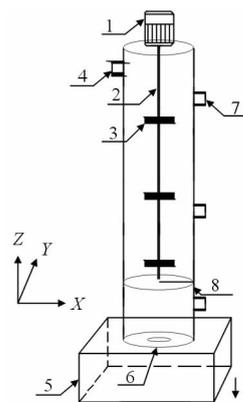
直管式旋桨反应器结构见图 1,反应器高度和内径分别为 2 000 和 240 mm,有效容积约为 90 L,反应器上部处于不完全封闭状态,中间封闭用于固定搅拌器,两边可拆卸用于投加物料。搅拌轴高度和直径分别为 1 550 和 12 mm,底部用支架固定,每对桨叶长×宽×高尺寸为 100 mm×2 mm×20 mm,间距 500 mm 均匀分布在搅拌轴上,搅拌电机通过搅拌轴带动桨叶旋转,可使反应器内部产生均匀的水流。反应器侧壁设有阀门,用于取样、进样等用途,反应器置于可移动基座上。

2 反应器内流场的数值模拟

2.1 建立模型

采用 Gambit 软件对直管式旋桨反应器进行三维实体建模,模型尺寸与反应器实际尺寸一致,其离散化方法选用基于网格节点和网格单元的有限体积

法,采用非结构化四面体单元对模型进行网格划分,见图 2。



1. 搅拌电机, 2. 搅拌轴, 3. 搅拌桨叶, 4. 进水口, 5. 基座, 6. 出水口, 7. 取样口, 8. 固定支架

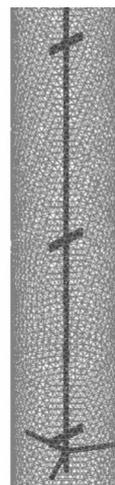


图 1 反应器结构示意图 图 2 反应器网格划分

2.2 边界条件

设置液面高度为 2 000 mm,进口采用均匀水流速度条件,出口设为压力出口。对于搅拌桨叶与管壁之间的相互作用,目前使用最多的是多重参考系法(MRF)^[18-19],本文采用多重参考系法(MRF)对反应器内液相流场进行模拟,桨叶及其附近区域的流体域设为旋转坐标系,该区域流体随桨叶一起转动;其他外部区域设为静止坐标系。壁面、搅拌轴和搅拌桨设置为固体壁面,界面采用无滑移固壁条件。

2.3 计算模型

本文采用单相流体力学模型,模拟物系为水,液相湍流模型采用标准 $\kappa-\varepsilon$ 双方程模型,流动状况为定常流动。连续性方程与动量方程采用显示耦合的 SIMPLEC 算法,动量、湍流动能、湍流耗散率离散格式均采用二阶迎风格式(Second Order Upwind),动量松弛因子设为 0.3,模拟过程设为稳态,各项收敛残差精度设为 10^{-4} 。

3 结果与分析

3.1 速度分布

设置旋转桨叶的旋转速度为 40 r/min,则旋转角速度为 4.19 rad/s,因此各表面旋转角速度为 4.19 rad/s,桨叶端部的旋转线速度为 0.21 m/s。模型计算收敛后,将计算结果导入 Tecplot 进行后处理,对 Z 截面的流场图进行分析。图 3 为稳态流场后的不同截面的速度分布图,从图 3 可以看出流体速度较大区域集中在桨叶附近,最大值在桨叶端部附近,为 0.22 m/s,与转速 40 r/min 对应的桨叶端

部线速度 0.21 m/s 相差不大,模拟值可靠有效。桨叶附近的流体流动速度大,带动物料的运输能力强,该区域的传质效率高。

比较图 3(a)~(c)的流场速度分布,在 3 组桨叶所在不同截面上,流速分布相差不大,图 3(a)表明最下端的桨叶受到位于其下面固定支架的影响,相比其他截面流速该桨叶覆盖的内部区域的速度较大,桨叶外部区域的速度较小,但整体流速分布基本一致。从图 3 还可以看出,相比于单一桨叶反应器^[20-21],多组合桨叶反应器能提供更加稳定的大范

围的紊动流场。

图 4 为反应器内不同截面的速度矢量图,从图 4(a)可以看出反应器内部流动不均匀,整体流动趋势以沿着桨叶转动方向的环流为主,并有许多漩涡产生。从图 4(b)中可看出,在 Y 截面上流体形成 4 个环流,对称分布在桨叶两旁,正是这样的环流促进了不同区域内物料的混合,改善整个反应器区域的循环。说明模拟结果很好地再现了直管式旋桨反应器内的流型,这与其他搅拌反应器模拟结果一致^[4,22]。

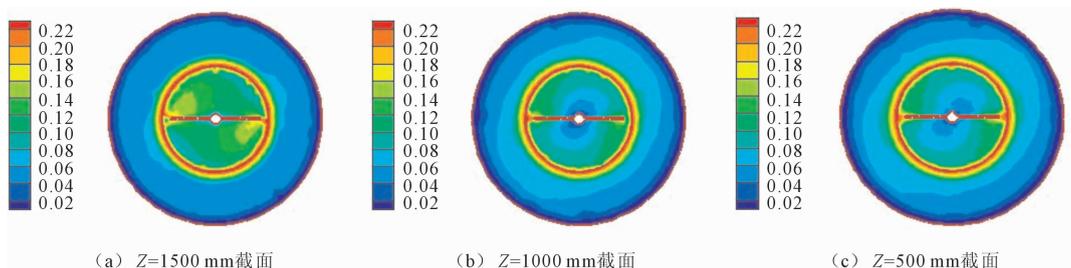


图 3 流场速度分布图(单位:m/s)

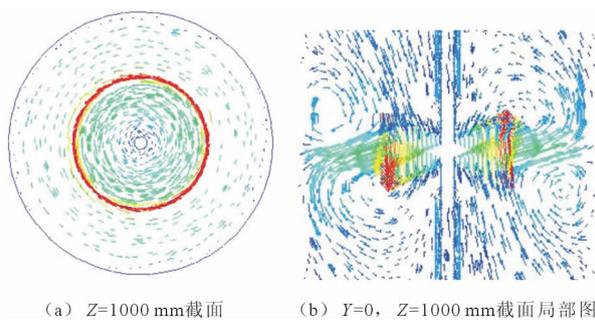


图 4 速度矢量图

3.2 湍动性能

图 5 为直管式旋桨反应器内的湍动能分布,从图 5 可以看出反应器内的湍动能区域较大,并集中在旋转桨叶附近。在桨叶区域,桨叶旋转带动流体运动,产生很强的湍动能,桨叶端部区域,流体的湍动能最大,同时漩涡交错运动产生较大的剪切作用。该种直管式旋桨反应器的设计使得内部流体湍动能分布比较均匀,改善了流体的流动效果,有利于物料在反应器内的充分混合。选取 $Y = 0$ 截面, X 分别为 0.02, 0.05, 0.08 m 处,不同高度的湍动能作图,见图 6,从纵向看,高度为 0.5, 1.0, 1.5 的截面处(即桨叶所在截面中心)湍动能 κ 较大,最大值为 $0.0016 \text{ m}^2/\text{s}^2$;从横向看,桨叶覆盖区域湍动能沿径向逐渐增大,尤其是 $X = 0.05 \text{ m}$ 处(即桨叶端部所在区域)湍动能最大,而桨叶外部区域湍动能逐渐减弱。

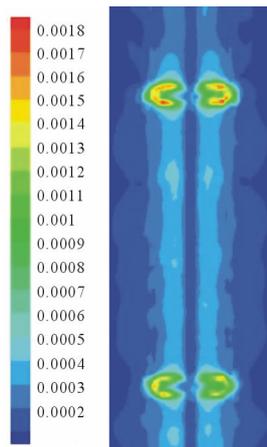


图 5 流场湍动能图(单位: m^2/s^2)

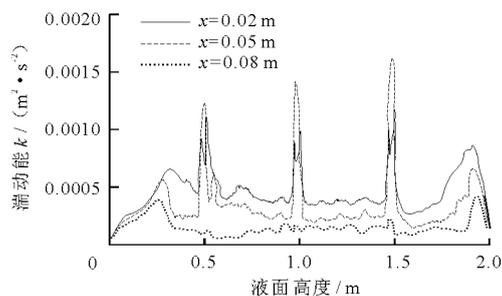


图 6 不同液面高度处的湍动能($Y = 0$)

3.3 最佳转速分析

分别模拟搅拌轴旋转速度为 20, 40, 100, 150 r/min 的速度流场,选取 $Z = 1000 \text{ mm}$, $X = 0$ 截面进行 Y 轴径向速度分析,结果见图 7,从图 7 可以看

出,流体的速度沿径向逐渐增大,当转速较小时,速度沿径向增加幅度较小,如转速为 20 r/min,较小的速度流场会使物料混合不完全;当转速较大时,速度沿径向增长幅度很大,如转速为 150 r/min 时,反应器处于较强的环流状态,搅拌轴附近的流体会形成死区,不利于反应器内物料的混合,所以转速不能太大,这与曹晓畅^[23]等人的计算结果是一致的。经过不同转速的模拟计算可知,当搅拌转速为 40 r/min 时,可提供均一稳定的流场,满足物料的混合且节约功率,因此本反应器对应的最佳转速为 40 r/min 左右,模拟结果为实验研究提供适当的操作参数,对反应器的优化和放大建立一定基础。

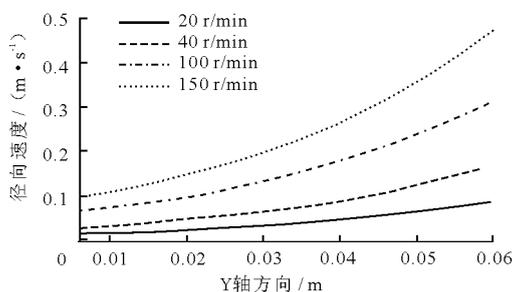


图7 不同转速下的径向速度($Z = 1\ 000\ \text{mm}$, $X = 0$)

4 结 语

反应器的模拟结果表明,CFD 技术能够较准确地模拟反应器内的流体流动情况。通过分析反应器内的速度场和湍动性能,反应器内最大流速和湍动能分布在桨叶端部附近,在旋转速度为 40 r/min 条件下,反应器内流体最大速度和湍动能分别为 0.22 m/s 和 $0.0016\ \text{m}^2/\text{s}^2$;通过反应器内速度流场分析可知,每组桨叶都能提供最大值为 0.22 m/s 的流场,相比于单一桨叶反应器,多组合桨叶反应器能提供更大范围的紊动流场。

反应器内流体整体流动趋势以沿着桨叶转动方向的环流为主,有利于不同区域内物料的混合,为直管式旋桨反应器的应用提供依据。直管式旋桨反应器可以很好地模拟天然水体及水流波动,还可用于浅水湖泊及河流水体环境下沉积物及泥沙再悬浮的研究,及污水处理厂药剂的絮凝沉降研究。通过对不同转速的流场进行分析,过高的转速和较低的转速均不利于反应器内物料的混合,在模拟物系为水的情况下,本反应器对应的最佳转速为 40 r/min,并提出反应器在水环境中的应用方法。模拟结果为实验研究提供适当的操作参数,对反应器的应用和放大具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 尹晔东,王运东,费维扬. 计算流体力学(CFD)在化学工程中的应用[J]. 石化技术,2000,7(3):166-169.
- [2] 侯拴弟,张政,王英琛,等. 涡轮桨搅拌槽流动场数值模拟[J]. 化工学报,2001,52(3):241-246.
- [3] Kasat G R, Khopkar A R, Ranade V V, et al. CFD simulation of liquid-phase mixing in solid-liquid stirred reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(15): 3877-3885.
- [4] 毕学工,岳锐,周进东,等. 基于 Fluent 的搅拌流场模拟研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版),2012,35(5):321-324.
- [5] Rodriguez M G, Aguilar R, Soto G, et al. Modeling an electrochemical process to remove Cr(VI) from rinse-water in a stirred reactor[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2003,78(4):371-376.
- [6] Pastor L, Mangin D, Barat R, et al. A pilot-scale study of struvite precipitation in a stirred tank reactor: conditions influencing the process [J]. Bioresource Technology, 2008,99(14):6285-6291.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [8] Khopkar A R, Rammohan A R, Ranade V V, et al. Gas-liquid flow generated by a Rushton turbine in stirred vessel: CARPT/CT measurements and CFD simulations [J]. Chemical Engineering Science, 2005,60(8):2215-2229.
- [9] 沈丹,仲兆平,过小玲. 600MW 电厂 SCR 烟气脱硝反应器内不同导流板的流场数值模拟[J]. 电力环境保护,2007,23(1):42-45.
- [10] 朱家亮,张涛,韦朝海. 基于结构参数响应的内循环流化床流体特性优化数值模拟[J]. 环境科学学报,2012,32(11):2732-2740.
- [11] Colegrove P A, Shercliff H R. 3-Dimensional CFD modeling of flow round a threaded friction stir welding tool profile [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005,169(2):320-327.
- [12] Langtry R B, Menter F R. Transition modeling for general CFD applications in aeronautics [J]. AIAA Journal, 2005,522.
- [13] 张国娟,闵健,高正明,等. 翼形桨搅拌槽内混合过程的数值模拟[J]. 高校化学工程学报,2005,19(2):169-174.
- [14] Sbrizzai F, Lavezzo V, Verzicco R, et al. Direct numerical simulation of turbulent particle dispersion in an unbaffled stirred-tank reactor[J]. Chemical Engineering Science, 2006,61(9):2843-2851.

里主要存在 2、8 和 19 年左右变化周期,其中 19 年左右时间尺度为第一主周期;8 年、2 年的时间尺度分别为第二、第三主周期。通过分析不同尺度的小波变换系数实部变化过程,发现目前年径流处在枯水期后期,水量有转向增加的趋势。

(3)用 BP 神经网络模型对秃尾河流域年径流量进行预测,模型的预测结果平均相对误差仅为 5.92%,说明所建立的 BP 神经网络模型用于该流域的年径流预测的精度较高,是一种非常有效地年径流预测方法。

参考文献:

[1] 王兮之,索安宁,洪军,等.黄土高原泾河流域水沙特征分析[J].水土保持学报,2006,20(2):22-25+93.
 [2] 黄胜.嘉陵江北碛站年径流量变化规律及预测研究[J].人民长江,2008,39(2):13-14.
 [3] 王莹.小波分析在语音端点检测中的应用[J].科技信

息,2011(18):134-135+138.

[4] 张建锋,王雯璐.小波分析在水文学中的应用[J].地球科学期刊,2012,2(1):27-32.
 [5] 曹建廷,秦大河,罗勇,等.长江源区 1956-2000 年径流量变化分析[J].水科学进展,2007,18(1):29-33.
 [6] 吕静渭,马孝义,高文强,等.近 70 年来泾河年径流量周期变化的小波分析[J].人民黄河,2010,32(2):49-50+67.
 [7] 张少文,丁晶,廖杰,等.基于小波的黄河上游天然年径流变化特性分析[J].四川大学学报(工程科学版),2004,36(3):32-37.
 [8] 彭玉华.小波变换与工程应用[M].北京:科学出版社,1999.
 [9] 杨雪菲,粟晓玲,马黎华.基于人工神经网络模型的关中地区用水量的预测[J].节水灌溉,2009(8):4-6.
 [10] 崔东文.多隐层 BP 神经网络在径流预测中的应用[J].水文,2013,33(1):68-73.

(上接第 152 页)

[15] Guha D, Ramachandran P A, Dudukovic M P, et al. Evaluation of large Eddy simulation and Euler - Euler CFD models for solids flow dynamics in a stirred tank reactor [J]. AIChE Journal, 2008,54(3):766-778.
 [16] Simon M, Grossart H P, Schweitzer B, et al. Microbial ecology of organic aggregates in aquatic ecosystems[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2002,28(2):175-211.
 [17] Turner J T. Zooplankton fecal pellets, marine snow and sinking phytoplankton blooms[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2002,27(1):57-102.
 [18] Deglon D A, Meyer C J. CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations [J]. Minerals Engineering, 2006,19(10):1059-1068.
 [19] Jahoda M, Tomášková L, Moštek M. CFD prediction of liquid homogenisation in a gas-liquid stirred tank [J].

Chemical Engineering Research and Design, 2009, 87(4):460-467.

[20] Gullberg P, Löfdahl L, Nilsson P, et al. Continued study of the error and consistency of Fan CFD MRF Models[C] // SAE World Congress, 2010.
 [21] 吴巍,范志伟,徐立群,等.絮凝反应池中流体的 CFD 模拟及应用性能[J].化工进展,2012,31(002):283-286.
 [22] Kerdouss F, Bannari A, Proulx P. CFD modeling of gas dispersion and bubble size in a double turbine stirred tank [J]. Chemical Engineering Science. 2006,61(10):3313-3322.
 [23] 曹晓畅,张延安,赵秋月,等.基于 FLUENT 软件的管式搅拌反应器流场的数值模拟[J].过程工程学报,2008,8(Z1):98-100.