

基于 Fluent 软件的旋流池分离效果数值模拟*

郭劲松¹, 张永东¹, 方芳¹, 龙曼¹, 龙天渝¹, 李隆键²

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400045)

摘要:介绍了 FLUENT 软件并采用该软件对某型旋流池进行了数值建模与计算, 得出了该旋流池的分离效率曲线和累计效率曲线, 明确了该旋流池的沉淀特征。其结论对于优化旋流池的设计具有参考价值。

关键词:FLUENT 软件; 旋流池; 数值模拟; 分离效率曲线; 累计效率曲线

中图分类号:X757 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2006)04-0079-04

Numerical Simulation of the Separation Effect of a Rotational Flow Sedimentation Tank Based on Fluent

GUO Jin-song¹, ZHANG Yong-dong¹, FANG Fang¹,
LONG Man¹, LONG Tian-yu¹, LI Long-jian²

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: This paper introduced FLUENT CFD simulation software and based on this software, the numerical modeling of the rotational flow sedimentation tank is set up and calculated. The separation efficiency curve and accumulation efficiency curve have been obtained and the deposition character inside the rotational flow sedimentation tank is shown. The conclusions given in this paper are valuable to the further improvement of the rotational flow sedimentation tank design.

Keywords: FLUENT simulation software; rotational flow sedimentation tank; numerical simulation; separation efficiency curve; accumulation efficiency curve

传统的反应器开发与优化, 主要依赖于经验数据的支撑和物理模型试验。在流体力学的范畴内, 进行实验研究的方法是按照几何相似、运动相似和动力相似设计相应的反应器进而建立物理模型, 通过试验研究确定反应器内的流态和流动特征, 从而获得反应器设计的优化参数, 再进行实际反应器的设计。传统研究方法存在的主要缺点是开发周期较长、开发成本较大。

随着计算机数值计算技术的发展与人们对反应器机理认识的不断深化, 计算机模拟已成为研究反应器的重要手段^[1]。相比传统的反应器开发方法而言, 计算机模拟开发缩短了设计周期, 减少了实验室测定试验的项目, 从而减少产品开发成本。目前正式发布的有关反应器数值模拟的软件众多, 如 PHOENICS、ANSYS、FLUENT 等。美国 Fluent 公司开发的 FLUENT 是其中的典型代表, 该软件已在机械、建筑、汽

车、化工等行业得到了广泛的使用^[2-4]。拟采用 FLUENT 软件, 对某型水力旋流池的固液分离效果进行数值模拟计算。

1 FLUENT 软件简介

1.1 FLUENT 软件的结构特征^[5]

FLUENT 软件将不同领域的计算软件组合起来, 由以下几个部分组成: 用于建立几何结构和网格的 GAMBIT、用于进行流动模拟计算的求解器 FLUENT、用于模拟 PDF 燃烧过程的 prePDF、用于从现有的边界网格生成体网格的 TGrid 和一个转换工具 Filters。

FLUENT 软件作为 CFD (Computational Fluid Dynamics) 计算模拟的软件群, 软件之间可以方便地进行数值交换, 并采用统一的前、后处理工具, 省却了在计算方法、编程、前后处理等方面投入的重复、低效劳动, 而将主要精力用于物理问题本身的解析和研究上。

* 收稿日期: 2006-01-06

基金项目: 重庆市科技攻关项目 (CSTC2005EA7039)

作者简介: 郭劲松 (1963-), 男, 四川射洪人, 教授, 博导, 主要从事水污染控制理论与技术研究。

在数值模拟计算中,主要用到 FLUENT 软件中建立几何结构和网格的 GAMBIT 和求解器 FLUENT。

1.2 FLUENT 软件的应用特征

FLUENT 软件能应用于多种物理模型,如定常和非定常流动、牛顿流体和非牛顿流体、无黏流、层流及湍流、不可压缩和可压缩流动、对流换热、两相流等等。对每一种物理问题的流动特点,有与其相应的数值解法,用户可对显式或隐式差分格式进行选择,以期在计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳。

1.3 用 FLUENT 软件求解问题的步骤

- 1) 用 GAMBIT 建立几何模型,生成计算网格^[6]。
- 2) 将网格化后的几何模型输入 FLUENT 求解器并检查网格。
- 3) 选择求解模型。
- 4) 设置与模型相关的材料物性、边界条件及边界类型。
- 5) 输入初始条件,进行流场初始化。
- 6) 求解计算。

2 某型旋流池固液分离效果的数值模拟

如图 1 所示的旋流池是冶金行业水处理工程中的一个重要构筑物,其作用是分离某工艺冷却回水中的氧化铁皮,使分离后的氧化铁皮沉积于底槽中。在生产应用中发现,该池在吸水井内存在较为严重的氧化铁皮沉积现象,由此易引起水泵吸水头堵塞和水泵泵体损害,给生产管理带来不便。为优化旋流池设计,达到减少吸水井积泥的目的(积泥即为沉积的氧化铁皮),拟从研究旋流池内氧化铁皮的沉淀特征入手。

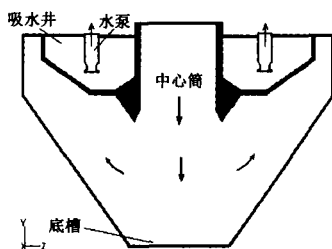


图1 旋流池剖面示意图

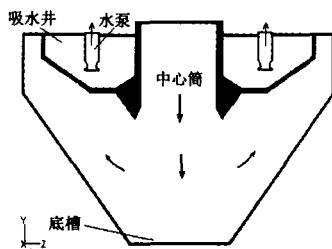


图2 旋流池网格划分示意图

2.1 数值模型的建立

- 1) 利用 GAMBIT 进行旋流池几何建模。为了节

省内存空间,采用分块网格划分的方法,整个区域划分为 15 块。在规则区域利用六面体单元进行区域离散,以减少离散单元数;在非规则区域,采用四面体单元进行区域离散。整个区域划分约 77 万个混合型单元。图 2 是旋流池网格划分示意图。

- 2) 将上述计算网格输入 FLUENT 求解器,在检查确认没有负网格后选择求解模型。旋流池内水流运动的模拟计算应用湍流流动模型,联立连续性方程、动量方程、 k 方程以及 ϵ 方程^[7]共同积分求解;旋流池内氧化铁皮运动的模拟计算应用两项流中离散相颗粒运动模型,通过对颗粒力平衡方程^[8]的积分来求解。

2.2 材料物性、边界条件、边界类型和初始条件

- 1) 旋流池模拟计算进水水温为 43 ℃,此时水的密度 $\rho = 992.2 \text{ kg/m}^3$,动力粘度 $\mu = 0.0006321 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$;离散相氧化铁皮的密度按 3000 kg/m^3 考虑。
- 2) 对连续相而言,在流场近壁区,采用双层非平衡壁面函数法进行处理;旋流池中与大气连通的水平液面处理为自由液面。

- 3) 对离散相而言,为简化问题起见,不考虑颗粒与连续相之间的相互影响。在利用 FLUENT 软件中的离散相模拟模型进行计算时,假定一定数量或质量流率的颗粒均布在旋流池入口截面上,底槽和吸水井底均设定为“吸附”边界,池壁设定为“反射”边界,出口设定为“逃逸”边界。

- 4) 旋流池模拟计算进水流量为 12300 m^3/h ,入口处水流速度为 3.418 m/s ,进行流场初始化。

2.3 求解计算

根据上述设定,按照隐式差分格式进行迭代计算直至收敛(残差控制在 10^{-5} 数量级),模拟出氧化铁皮在旋流池不同区域中的沉淀特征。根据这些沉淀特征,可以得到旋流池氧化铁皮的分离特性。

3 旋流池氧化铁皮分离特性的模拟结果与分析

3.1 分离效率的模拟结果与分析

3.1.1 分离效率的计算 假定进口水流中氧化铁皮为单一粒径,则针对该粒径的氧化铁皮可以得到某一确定的分离效率 e , e 由下式确定:

$$e = N/M \quad (1)$$

式中: N 为通过 FLUENT 软件计算所得沉淀分离的某粒径氧化铁皮粒子数量; M 为模拟计算中设定的水力旋流池进口处某粒径氧化铁皮粒子数量。

然后改变进口水流中颗粒的粒径,再获得相应的分离效率数据,则可以得到分离效率与氧化铁皮粒径的关系曲线。该曲线即为分离效率曲线。

根据分离效率曲线的概念,可以作出如图3所示的氧化铁皮分离效率—粒径关系模拟曲线。

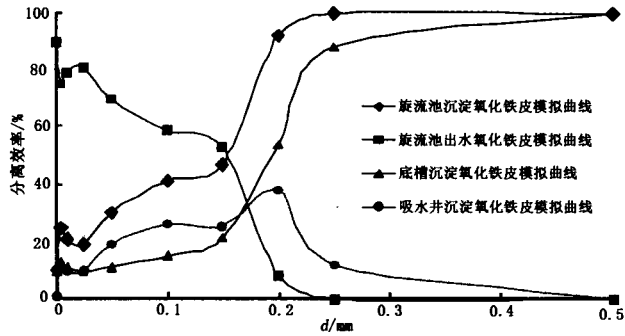


图3 氧化铁皮分离效率—粒径关系模拟曲线

3.1.2 结果与分析 旋流池沉淀氧化铁皮模拟曲线揭示了不同粒径氧化铁皮在旋流池中的沉淀率。沉淀分离的总趋势是随着粒径的增大,沉淀率增高。其中粒径小于0.14 mm时沉淀率缓慢上升;当粒径在0.14 mm到0.25 mm之间时,沉淀率显著上升;当粒径大于0.25 mm时,沉淀率达到100%,即粒径大于0.25 mm以上的氧化铁皮将完全沉淀于旋流池中。

旋流池出水氧化铁皮模拟曲线揭示了不同粒径氧化铁皮通过水泵入口的逃逸率。粒径小于0.14 mm的铁皮逃逸率在55%以上;当粒径大于0.14 mm之后,铁皮逃逸率将急剧下降;0.2 mm粒径以上的铁皮的逃逸率在10%以下;当粒径大于0.25 mm时,逃逸率为0,这和旋流池沉淀氧化铁皮模拟曲线表达的当粒径大于0.25 mm时,沉淀率达到100%是完全吻合的。

底槽沉淀氧化铁皮模拟曲线揭示了不同粒径氧化

铁皮在旋流池底槽中的沉淀率。随着粒径的增大,沉淀率逐渐提高。其中粒径小于0.14 mm时,沉淀率缓慢上升;在0.1 mm到0.14 mm之间,沉淀率基本不发生变化;当粒径在0.14 mm到0.25 mm之间,沉淀率显著上升;当粒径大于0.25 mm以后,沉淀率达到100%,即粒径大于该值的氧化铁皮将被完全沉淀在底槽中。

吸水井沉淀氧化铁皮模拟曲线揭示了不同粒径氧化铁皮在旋流池吸水井中的沉淀率。由图可知粒径0.2 mm的铁皮在吸水井中的沉淀率达到最大值;小于0.2 mm粒径的铁皮沉淀率随着粒径的增大逐渐上升;当粒径处于0.2 mm至0.25 mm之间时,铁皮沉淀率将快速下降;不过当粒径大于0.25 mm以后,铁皮沉淀率将平缓下降;0.5 mm以上粒径的铁皮在吸水井中的沉淀率为0,这说明它们已经沉淀在底槽中,没有随水流到达吸水井。结合前3条曲线的分析可知:粒径小于0.2 mm的铁皮大部分经水泵吸水逃逸,而粒径大于0.2 mm的铁皮大部分沉积于底槽中,0.2 mm粒径的铁皮在吸水井沉淀积泥中占主要部分。吸水井沉淀氧化铁皮模拟曲线对于揭示该型旋流池吸水井积泥现象的实质,具有重要意义。

3.2 累计分离效率的模拟结果与分析

上述分离效率曲线模拟的是单一粒径氧化铁皮的沉淀特征,是一种假设的理想状态。在实际旋流池进水中,氧化铁皮具有一定的级配,其粒度分布如表1所示,故还需作累计分离效率曲线来模拟某确定粒径范围氧化铁皮的沉淀特征。

表1 旋流池进水中氧化铁皮粒度分布

序号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
粒径 d/mm	<0.005	0.005~0.01	0.01~0.025	0.025~0.05	0.05~0.10	0.10~0.25	0.25~0.50	0.50~1.0	1.0~2.5	>2.5
重量百分比 $g_i/\%$	2.2	0.8	0.2	1.5	10.5	40.9	21.3	18.1	3.4	1.1

3.2.1 累计分离效率的计算 累计分离效率 ε_i 按下式计算:

$$\varepsilon_i = \left(\sum_{j=1}^n \frac{N_j}{M_j} g_j \right) \left(\sum_{j=1}^{10} \frac{N_j}{M_j} g_j \right), \quad n = 1, 2, \dots, 10 \quad (2)$$

式中: N_i 为通过 FLUENT 软件计算所得沉淀分离的某粒径范围氧化铁皮粒子数量; M_i 为模拟计算中设定的水力旋流池进口处某粒径范围氧化铁皮粒子数量; g_i 为旋流池进水中某粒径范围氧化铁皮重量百分比。

累计分离效率曲线即为累计分离效率与氧化铁皮粒径的关系曲线。

根据累计分离效率曲线的概念,可以作出如图4所示的氧化铁皮累计分离效率—粒径关系模拟曲线。

3.2.2 结果与分析 旋流池沉淀氧化铁皮模拟曲线

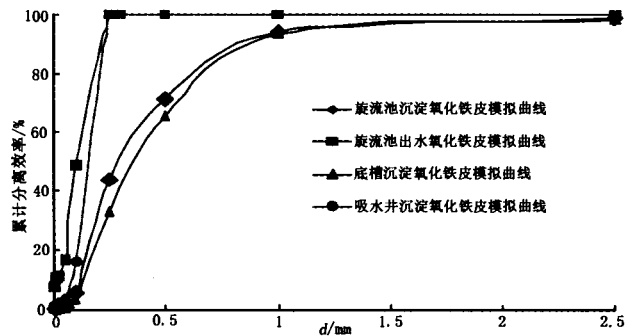


图4 氧化铁皮累计分离效率—粒径关系模拟曲线

表明,粒径小于1 mm时,累计分离效率的增长趋势较快;粒径大于1 mm时累计分离效率的增长趋于平缓;当粒径达到2.5 mm时累计分离效率接近100%。由图可知,小于1 mm粒径的氧化铁皮占旋流池中沉积

氧化铁皮(包括底槽和吸水井中沉淀的氧化铁皮)的绝大部分,为94.3%。

旋流池出水氧化铁皮模拟曲线表明,粒径小于0.25 mm时,累计分离效率的增长趋势较快;当粒径达到0.25 mm时,累计分离效率已达100%,说明出水中不存在大于0.25 mm粒径的氧化铁皮,即大于0.25 mm粒径的氧化铁皮已在旋流池中除去。

底槽沉淀氧化铁皮模拟曲线表明,粒径在小于1 mm时,累计分离效率的增长趋势较快;粒径大于1 mm以后累计分离效率的增长趋于平缓;当粒径达到2.5 mm时累计分离效率接近100%。由图可知,小于1 mm粒径的氧化铁皮占底槽沉积氧化铁皮的93.1%。该曲线和旋流池沉淀氧化铁皮分布模拟曲线十分相似,说明底槽和旋流池的沉淀特征较为类似。

吸水井沉淀氧化铁皮模拟曲线表明,粒径在小于0.25 mm时,累计分离效率的增长趋势很快;粒径达到0.25 mm时,累计分离效率已接近100%。说明在吸水井中大于0.25 mm粒径的氧化铁皮含量很少,即大于0.25 mm粒径的氧化铁皮已基本在底槽中除去。

5 结论

1) 基于 FLUENT 的旋流池内氧化铁皮沉淀特征的数值研究结论。

(1) 旋流池对氧化铁皮的分离效果随着氧化铁皮粒径的增大而提高。当粒径小于0.2 mm时,氧化铁皮大部分经水泵吸水逃逸旋流池;当粒径在0.2 mm左右时,氧化铁皮主要沉积于吸水井中;当粒径大于0.25 mm时,氧化铁皮将完全沉积于旋流池中,该粒径范围的氧化铁皮主要沉积于旋流池底槽中,其中粒径大于0.5 mm的氧化铁皮将完全沉积于旋流池的底槽中。

(2) 旋流池吸水井中的积泥,主要由粒径0.20 ~ 0.25 mm左右的氧化铁皮构成,不存在大于0.5 mm粒径的氧化铁皮。旋流池底槽中的积泥,主要由粒径在0.25 mm以上氧化铁皮构成。

(3) 在旋流池沉积的氧化铁皮中,小于1 mm粒径的氧化铁皮占94.3%。

2) 采用 FLUENT 软件对反应器进行数值研究,能够深入了解反应器内部的规律、减少实验室测定试验的项目从而减少产品开发成本。

3) 旋流池内氧化铁皮沉淀特征的数值研究结论对于优化旋流池设计参数,减少旋流池吸水井积泥具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 蔡金榜,段祥宝,朱亮. 沉淀池水流数值模拟[J]. 重庆建筑大学学报,2003,24(4):64-69.
- [2] 李勇,刘志友,安亦然. 介绍计算流体力学通用软件——FLUENT[J]. 水动力学研究与进展,2001,16(2):254-258.
- [3] 朱娟娟,陈江平,陈芝久等. 汽车空调双后风道结构数值优化分析[J]. 制冷技术,2004,(3):8-10.
- [4] 刘霞,葛新锋. FLUENT 软件及其在我国的应用[J]. 能源研究与应用,2003,(2):36-38.
- [5] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [6] 周华君. 河流海岸工程水动力数值模拟的基本过程[J]. 重庆建筑大学学报,2001,23(5):1-5.
- [7] 刘家利. 四气门发动机进气道内流动的三维数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2003.
- [8] S. A. Morsi and A. J. Alexander. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems[J]. Fluid Mech, 1972,55(2):193-208.