

文章编号:1005-0523(2013)02-0016-05

涡旋澄清池反应区数值模拟研究

童祯恭, 闵 凯, 杨静芝, 董红军

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:众多的工程实践证明,涡流澄清技术具有较好的经济效益及社会效益。为更好利用该技术,利用Fluent软件模拟水流在涡旋澄清池反应区中的涡旋尺度、涡旋分布、流场状态,获得反应器内部流场的详细信息,同时利用Zeta电位仪及FCD(絮凝光学检测仪)检测絮体Zeta电位及其结构形状的变化情况,通过数值模拟及现场试验,验证并分析了涡旋澄清池反应区中的相关流动参数,提出了影响絮凝效果的因素及规律。

关键词:涡旋澄清池;涡流反应器;数值模拟

中图分类号:TU99

文献标志码:A

由华东交通大学研制的涡旋澄清技术在众多的工程实践中显示出了较好的技术性及经济效益,具有较高的实用价值和社会效益^[1]。然而由于对微涡旋絮凝及其澄清机理研究的不够全面及深入,工程应用时在反应器设计参数及运行参数的选用上^[2],还存在着较大的盲目性及随意性;一定程度上制约着涡旋澄清技术在安全饮用水工程中的进一步推广。

Fluent软件是应用最广泛的计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)工程运用软件,它基于有限体积法,针对每一种流动物理问题的特点,采用适合于它的数值解法使之在计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳^[3]。本研究利用Fluent软件模拟水流在涡旋澄清池反应区中的涡旋尺度、涡旋分布、流场状态,获得反应器内部流场的详细信息,同时利用Zeta电位仪及FCD(絮凝光学检测仪)检测絮体Zeta电位及其结构形状的变化情况,通过数值模拟及现场试验,为优化反应器的设计及运行参数提供思路。

1 涡旋澄清池反应区的试验研究

1.1 涡旋澄清池试验系统

涡旋澄清池结构如图1所示。加入混凝剂的原水经管道混合器后从进水管经喷嘴、喉管进入第1涡旋反应室及第2涡旋反应室(反应室中放置如图2所示的涡流反应器,有关涡流反应器介绍可参阅文献[4]),然后流入斜管沉淀区进行泥水分离。

1.2 试验水质及仪器

实验中对于处理水质的检测指标主要包括进出水浊度、Zeta电位、絮体粒径3项指标;对于原水则需测定其水温、pH等指标。检测所需仪器及设备如表1所示;以学校孔目湖小湖的原水作为水源,实验水质如表2所示,采用的混凝剂是聚合氯化铝(PAC)。

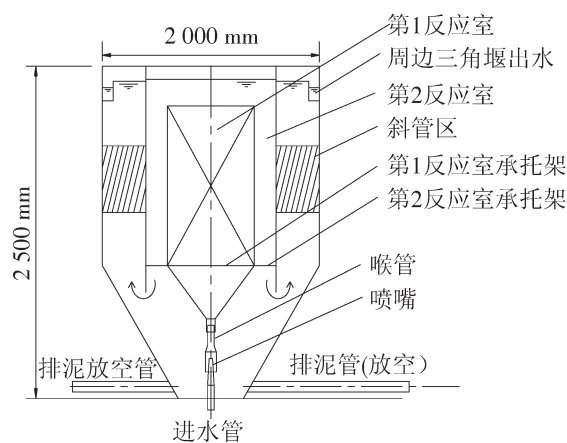


图1 涡旋澄清池结构图

Fig.1 The structure of vortex coagulation clarifier

收稿日期:2013-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51268012);江西省自然科学基金项目(20122BAB206002)

作者简介:童祯恭(1972—),男,副教授,博士,研究方向为给水处理理论和技术。

表1 主要试验仪器及设备

Tab.1 The main test instruments and equipment

序号	试验仪器设备	功能用途	生产厂家
1	TDT-2型浊度仪	测定浊度	武汉恒岭科技有限公司
2	Zeta电位仪	测定Zeta电位	90 plus Zeta 电位分析仪
3	FCD显示式絮凝控制仪	测定絮体粒径	上海尼成实业环保有限公司
4	METTLER TOLEDO 320 pH Meter	测定pH	梅特勒-托利多仪器有限公司
5	温度计	测定温度	
6	SC2000-6E 梅宇牌混凝试验搅拌机	混凝搅拌	潜江市梅宇仪器有限公司

表2 实验水质

Tab.2 The experimental raw water quality

指标项	浊度/NTU	pH值	Zeta电位/mV	水温/℃
数值	17.3	6.71	-16.50	21.2

1.3 试验结果

试验进水量分别为6,8,10 m³·h⁻¹,分别对澄清池出水浊度及第2反应室底部(流至沉淀区部分)的絮体粒径、Zeta 电位进行检测,数据整理如图3和图4所示。

在向水体中不断投加絮凝剂(PAC)的过程中,水中胶体颗粒表面的Zeta电位也不断升高,由负电位逐渐变为正电位,凝聚后变成矾花沉淀下来,随着絮凝剂的过量投加,颗粒表面的正电荷升高,颗粒之间的排斥力增大,阻碍颗粒之间的碰撞,形成矾花的能力减弱,体系重新稳定,出水浊度又会重新升高。图3为不同流量的出水浊度和Zeta电位之间的关系,3种进水流量的Zeta电位都是随着出水浊度的降低而升高。



图2 涡流反应器

Fig.2 The vortex reactor

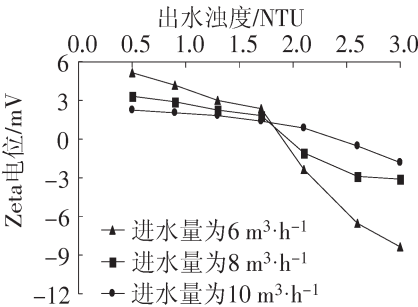


图3 出水浊度和Zeta电位之间的关系

Fig.3 The relationship between the outlet water NTU and Zeta potential

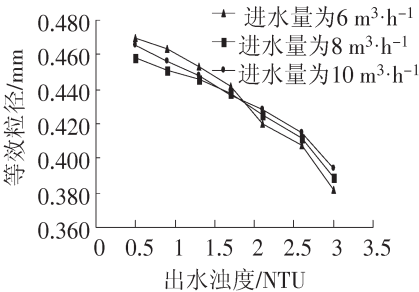


图4 出水浊度和等效粒径的关系

Fig.4 The relationship between the outlet water NTU and floc equivalent

3种流量相比较,出水浊度在1.7~3.0 NTU时,Zeta电位由负值减少的速度随着进水流量的增大而加快;当出水浊度在0.5~1.7 NTU时,Zeta电位随着进水流量的增大其数值改变又趋于减小。主要原因是为了保证一定的出水浊度,各工况的水力条件不同,因此投药量也不一样,导致Zeta电位发生不同的变化。图4为不同流量的出水浊度和等效粒径的关系,当出水浊度在1.7~3.0 NTU时,等效粒径是随着进水流量的增

大而增大,主要原因是在一定投药量范围内,流速大则紊流强度大,混合效果相对较好,絮体碰撞机会相对较多。而当出水浊度在0.5~1.7 NTU时,进水流量为 $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时其矾花等效粒径最大,主要原因一方面是投药量较大,另一方面是此工况下反应时间相对较长,导致絮体等效粒径相对较大。由于在本试验投药系统中无管道混合器(混凝剂直接加入进水管中进行水力混合),流量大则流速快,药剂与原水混合均匀性好,混合效果好。FCD的测试显示,随着絮凝剂(PAC)投加量的不断增加,泥水分离区的絮体颗粒不断变大,絮体之间的间距也变得更为密实,絮体粒径也就越大。但投药量过大会使矾花结构松散,密实度降低,尽管粒径加大,但由于密实度不好,导致出水会出现跑花现象。因此,根据澄清池出水浊度,本次试验确定最佳投药量为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右^[5]。

2 涡旋澄清池反应区内流场的数值模拟

2.1 涡旋澄清池模型及边界设置

本研究采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,即分别引入关于紊动能 k 和耗散率 ε 的方程,针对涡流反应器的建模采用“top-down”方法,对模型的边界条件也进行适当设置^[6]。

2.2 模拟结果

本次模拟主要是针对涡流反应区而言的,模拟参数如表3所示。模拟的澄清池反应区各剖面速度矢量图如图5所示。

表3 数值模拟参数

Tab.3 The parameters for numerical simulation

进水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	进水流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	湍流强度/%
6	0.59	4.32
8	0.79	4.17
10	0.98	4.05

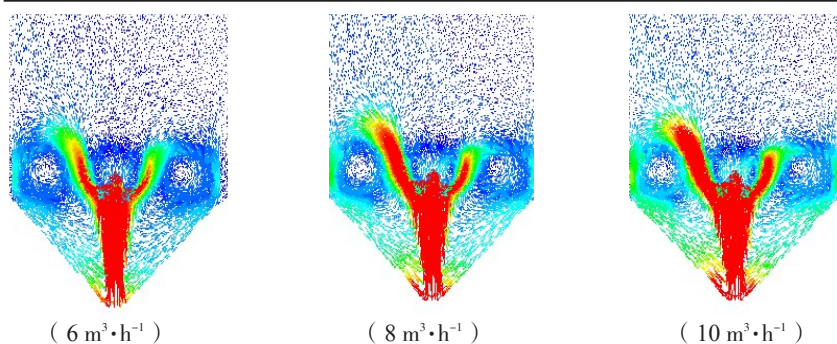


图5 第1反应室XZ剖面局部速度矢量图

Fig.5 The local velocity vector of XZ cross-section in the first reaction zone

从图5可知,入口速度比较大,呈现一股射流,数值模拟显示其紊动能很大,并且随着进水流量的增大而加强,在一定程度上有效提高颗粒间的碰撞效率。其产生的大涡旋主要是完成动力的传输,只有小部分的能量耗散,剩余的能量传输给下一级的涡旋,通过这样逐级递减的涡旋进行传输,直到涡旋尺度达到颗粒粒径相似,涡旋的离心惯性效应增加,带动颗粒旋转运动,颗粒之间相互碰撞,形成矾花^[7]。在锥形区域和第1反应室连接的地方,当进水接触到涡流反应器时,速度明显衰减,紊动能开始减弱,周围产生很多微涡旋,大涡旋逐渐变成小涡旋及微涡旋,这样有效避免在澄清池反应区后端打碎已经形成的矾花。主流由涡流反应器表面的众多小孔流进及流出,但仍有部分流体从涡流反应器之间的间隙流过,亦形成众多的微小涡旋。从矢量图5中可知,在一定范围内,随着流速的增大,产生的微涡旋就越多,颗粒之间碰撞的几率增加,絮凝效果也就越好。

3 涡旋澄清池反应区内模拟结果与实验的比较分析

在加入涡流反应器后,涡旋澄清池反应区内形成了很多微涡流,湍动能 k 及湍动能耗散率 ε 相对未投加反应器时的都高,而从现场试验中也发现投加涡流反应器的池子Zeta电位上升较高,为颗粒之间的有效碰撞创造了条件,投加涡流反应器的涡旋澄清池形成的絮体等效粒径较大,所以加设涡流反应器的涡旋澄清池的运行效果较好^[8]。现场试验可知,在相同投药量,不同进水量情况下的除浊效果有较明显的区别。下面从三维流动场、湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 等数值模拟的结果来进一步分析。

在模型上取5个不同高度的截面,坐标轴的中心落在澄清池的中间,截面高度从上往下依次是-0.4,-0.5,-0.6,-0.8,-0.9 m。按整体高度计算,截面高度从上往下依次为1,1.1,1.2,1.4,1.5 m。

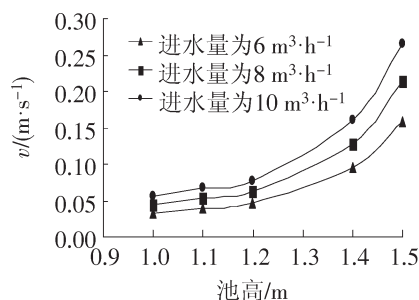


图6 第1反应室速度 v 面平均变化曲线图
Fig. 6 The surface average curve of velocity in the first reaction zone

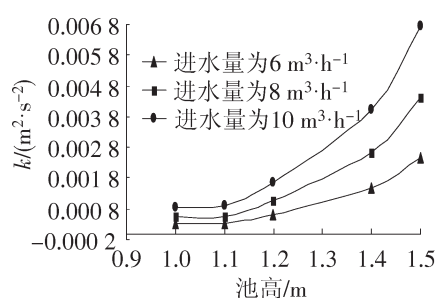


图7 第1反应室湍动能 k 面平均变化曲线
Fig. 7 The surface average curve of turbulent kinetic energy in the first reaction zone

在图5的三维流态图中可知,进水量越大,在锥形区域的射流速度越大,从锥形区域进入第1反应室后形成的微涡旋越多。图6中,在锥形区域,池长在1.2~1.5 m内,流速变化非常明显,随着水流流动的方向,速度在逐渐减弱。根据紊流微涡旋动力学理论,湍动能 k 及湍动能耗散率 ε 越大,池内絮凝效果越好,得到的絮体越密实。从图7及图8可知,进水流量越大,速度越大,湍动能 k 就越大,湍动能耗散率 ε 越大。在一定范围内,湍动能和湍动能耗散率越大,产生的微涡旋就越多,微涡旋带动颗粒之间做沿旋涡径向运动,颗粒之间的碰撞机会增加,形成的絮体就越密实,出水效果就越好。在现场

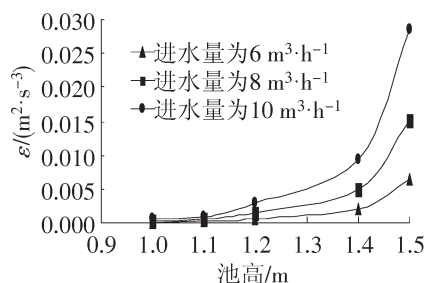


图8 第1反应室湍动能耗散率 ε 面平均变化曲线
Fig. 8 The surface average curve of turbulent kinetic energy dissipation rate in the first reaction zone

试验中测试可知,在相同的出水浊度下(试验中主要控制涡旋澄清池出水浊度在2.5 NTU左右),进水量大,其Zeta电位相对就较接近等电点,颗粒之间越容易相互吸引,其等效粒径也相对较大,这与数值模拟的结果基本吻合。但是在图7及图8中可以观察到在锥形区域部分(1.2~1.5 mm),进水量为 $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的湍动能和湍动能耗散率曲线下落的幅度都偏大,斜率较高,这是因为在锥形区域部分的流体呈现出的射流状态,动能及剪切力急剧增加,紊动十分强烈,混合部分接触的时间过短,横向部分颗粒碰撞机会减少。此时形成的絮体粒径较大、多孔且相对不密实,很容易在水流剪切力下破碎。进水量为 $8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时 k 值和 ε 值比较合适,不会因为湍动能过大,造成絮体破碎,也不会因为湍动能过小,不能形成较好的絮体,故本中试模型反应区较适合的处理规模为 $8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

4 结语

利用Fluent对涡旋澄清池反应区进行模拟,得到了涡旋澄清池反应区的流场状况,进而获得反应器内部流场的详细信息,如局部流速、运行轨迹等;动同时利用电位仪及FCD检测絮体Zeta电位及其结构形状

的变化情况,并与数值模拟结合分析比较,模拟结果与实际试验情况基本相符,证明了这个数值模型的可行性和正确性,为优化模型的设计及运行参数提供了依据,对以后的实际工程也具有较好的科学指导意义。同时从微观的角度观察池内的水流特性,为从动力学角度研究絮凝机理提供了一个新的研究方法。

参考文献:

- [1] 童祯恭,胡锋平.一体化涡旋网格澄清工艺的研制与应用[J].中国给水排水,2010,26(6):63-68.
- [2] 丰桂珍,童祯恭.斜管沉淀技术优化研究进展[J].华东交通大学学报,2011,28(6):28-31.
- [3] 李国强.基于CFD的网格絮凝池中过栅紊流特性数值模拟研究[D].武汉:武汉大学,2010:9-48.
- [4] 童祯恭,方永忠,胡锋平.微涡流混凝技术在十堰水厂的应用[J].中国给水排水,2008,24(4):21-24.
- [5] 杨静芝.基于Fluent涡旋澄清池反应区流态模拟及参数优化[D].南昌:华东交通大学,2012:47-56.
- [6] 贺维鹏.絮凝过程絮体粒度分布特征及流场仿真研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:52-87.
- [7] 严煦世.给水工程[M].4版.北京:中国建筑工业出版社,1999:264-267.
- [8] 杨静芝,童祯恭,董红军.涡旋澄清池反应区流场模拟分析研究[J].市政技术,2012,30(5):64-67.

Study on Flow Numerical Simulation of Vortex Coagulation Clarifier Reaction Zone

Tong Zhengong, Min Kai, Yang Jingzhi, Dong Hongjun

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The projects have proved that the vortex coagulation technology has good economic and social benefits. In order to make better use of this technology, this paper analyzes the relevant flow parameters of vortex coagulation clarifier reaction zone through the numerical simulation and the experiment, proposing the influence factors and principles on flocculation.

Key words: vortex coagulation clarifier; vortex reactor; flow numerical simulation