

文章编号: 1006-4710(2013)04-0469-06

基于群体平衡模型的污泥絮凝-沉降三维模拟

黄忠钊, 谭立新

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对在实验室中观测污泥絮凝-沉降过程及污泥颗粒絮团粒径分布情况存在盲点的问题, 运用群平衡体模型(PBM)定义污泥颗粒的尺寸, 通过 Lou 模型与 Ghadiri 模型分别模拟污泥颗粒间的聚合及破碎机理, 耦合 PBM 及两相流混合模型对 Jeriffa De Clercp 等在沉降桶内的污泥沉降实验进行三维数值模拟。结果表明: 本模拟所选用的数学模型及方法能比较合理地反映污泥颗粒絮凝-沉降过程的变化规律, 并且具有一定精度; 在固定水深处小粒径絮团数量随时间的推移不断减少, 大粒径絮团数量随时间的推移先增加后减少, 但是随着水深的增加污泥絮团的粒径分布范围逐渐变宽, 大粒径污泥絮团的数量逐渐增多。

关键词: 群体平衡模型; 絮凝; 沉降; 粒径分布; 数值模拟

中图分类号: TV145+.2

文献标志码: A

Three-Dimensional Simulation of Flocculation-Settling for Sludge Based on Population Balance Model

HUANG Zhongzhao, TAN Lixin

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Since it is difficult to observe the process of flocculation-settling for sludge and the particle size distribution of sludge in the lab, particle size of sludge is defined using population balance model(PBM) in this paper. Through Lou model and Ghadiri models respectively, mechanism of aggregation and fragmentation for sludge particles is simulated. Also, a numerical simulation is conducted on test of flocculation-settling for sludge of Jeriffa De Clercp et al. by using PBM and two phase flow mixture model. The results reveal that the selected mathematical model and simulation method can more reasonably reflect the change rule of flocculation-settling for sludge with a certain accuracy; when the well depth is constant, the decrease in the number of small particle size of floccules with the passage of time, the number of large diameter floccules increased after decreasing first with the passage of time, but particle size distribution range of floccules is widened with depth of water increases, and the number of large diameter floccules increases gradually.

Key words: population balance model; flocculation; settling; particle size distribution; numerical simulation

在污水处理工艺中污泥颗粒絮凝-沉降情况的好坏直接影响污水处理厂的净水能力, 然而在实验室中观测污泥絮凝-沉降过程及污泥颗粒絮团粒径分布情况比较困难, 因此关于污泥絮凝-沉降的研究具有重要的理论价值和实践意义。

现有的研究表明污泥颗粒的絮凝过程可直观地认为是颗粒的随机碰撞、聚合、破碎、再聚合的过程^[1-2]。污泥颗粒絮团具有复杂的内部构造, 对于单个絮团颗粒而言, 在絮凝过程中絮团的个体粒径尺度逐步增大, 相对密度逐步减小, 沉降速率逐步

收稿日期: 2013-10-10

基金项目: 陕西省重点学科建设专项资金资助(106-00X92)。

作者简介: 黄忠钊, 男, 硕士生, 研究方向为水力学与两相流数值模拟研究。E-mail: 136226156@qq.com。

谭立新, 女, 博士, 副教授, 研究方向为计算水力学及两相流数值模拟。E-mail: tanlx@xaut.edu.cn。

提升^[3]。

近年来,人们对基于分形理论的有限扩散模型单体凝聚模型(DLA)^[1-6]以及有限扩散模型集团聚集模型(DLCA)^[7]进行了大量的计算机数值仿真模拟,然而由于计算机性能的限制,现有模型方法只能在较为狭小的空间内进行模拟,在实际中的应用存在一定难度^[8]。研究运用群体平衡模型(PBM)定义污泥颗粒的尺寸,通过 Lou 模型^[9]与 Ghadiri 模型^[10]分别模拟污泥颗粒间的成核及破碎机理,并耦合 PBM 及两相流混合模型对 Jeriffa De Clercq 等^[11]在 1 m 高沉降桶内的污泥沉降实验进行三维数值模拟。验证了本模拟数学模型的可靠性,并分析了污泥颗粒絮团的粒径分布及时空变化。

1 数学模型描述

1.1 群体平衡模型

群体平衡模型(PBM)是描述多相流颗粒离散相粒径尺寸分布情况的常用方法^[12]。在固液两相流模拟中研究固相在液相中的相互作用机理,运用群体平衡模型(PBM)考察固相颗粒聚合与破碎作用对固相颗粒絮团粒径大小分布情况的影响。群体平衡模型的基本方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial [n(V,t)]}{\partial t} + \nabla \cdot [un(V,t)] + \nabla \cdot [G_V n(V,t)] = \\ \frac{1}{2} \int_0^V \alpha(V-V',V')n(V-V',t)n(V',t)dV' + \\ \int_\infty^0 \alpha(V,V')n(V,t)n(V',t)dV' + \\ \int_{\Omega_V} pg(V')\beta(V|V')n(V',t)dV' - g(V)n(V,t) \quad (1) \end{aligned}$$

其中, $n(v,t)$ 是 t 时刻固相颗粒体积 V 的分布函数; \vec{u} 是固相颗粒的速度矢量; G_V 是基于固相颗粒体积的增长速率, $G_V = \partial V / \partial t$; $\alpha(V, V')$ 是固相颗粒聚合速率函数; $g(V)$ 是固相絮团破碎速率函数; p 是单位颗粒絮团分解成子颗粒的数目; $\beta(V, V')$ 是体积位于 V 到 V' 的固相絮团破碎生成子颗粒的概率密度函数。等号后面第一项表示固相颗粒的聚合生成,第二项表示固相颗粒的聚合消失;第三项表示固相絮团的破碎生成;第四项表示固相颗粒的破碎消失。

在固液两相混合流动中,固体颗粒的聚合与破碎是一个相当复杂的动态过程。较为常用的聚合模型有 Luo 模型、Free molecular 模型、Turbulent 模型等,较为常用的破碎模型有 Luo 模型、Lehr 模型、Ghadiri 模型等,本次模拟采用 Luo 模型^[9]及 Ghadiri 模型^[10]分别模拟污泥颗粒间的聚合及破碎机理。

1.2 固液两相流混合模型

由于本次模拟存在大范围的固体颗粒相分布,固液两相之间的相互作用情况复杂,并且出于对该次模拟使用的计算机性能的综合考虑,采用两相流混合模型作为该次模拟的基本数学模型。混合模型的基本方程表示为:

1.2.1 连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = m \quad (2)$$

$$\vec{V}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{V}_k}{\rho_m} \quad (3)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (4)$$

其中, \vec{V}_m 是混合相的质量平均速度; \vec{V}_k 是第 k 相的质量平均速度; ρ_m 是混合相密度; ρ_k 是第 k 相的密度; m 是混合相的传递质量; α_k 是第 k 相的体积分数。

1.2.2 动量方程

混合模型的动量方程是通过对各相的动量求和得到的,其表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \\ \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \\ \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (5) \end{aligned}$$

其中, μ_m 是混合粘度, $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$; $V_{dr,k}$ 是第 k 相的漂移速度, $\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m$; \vec{F} 是体积力; g 是重力加速度; n 是相数。

1.2.3 第二相的体积分数方程

由第二相的连续方程可以推导出关于第二相的体积分数方程,其表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) \quad (6)$$

1.3 标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型

本次模拟中对液相的紊流采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,该模型是基于紊流充分发展的流动建立的,对于不可压缩流体,标准 $k-\varepsilon$ 模型的紊流耗散率 ε 和紊动能 k 的输运方程表达式为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + p - \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) +$$

$$c_1 P \frac{\varepsilon}{k} - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

其中, p 是紊动动能产生项, $p = v_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$; v_t 是紊动粘性系数, $v_t = c_\mu k^2 / \varepsilon$; $c_\mu = 0.09$; $c_1 = 1.41$; $c_2 = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.22$ 。

2 几何模型边界条件及算法

根据 Jeriffa De Clercq 等在 1 m 高圆柱桶内进行污泥絮凝-沉降实验,装置见图 1。本次模拟建立的三维几何圆柱模型尺寸是 $h = 1 \text{ m}$, $r = 0.2 \text{ m}$,对模型划分网格,共生成 19 248 个单元,几何模型见图 2。



图 1 Jeriffa De Clercq 等试验装置图
Fig. 1 Jeriffa De Clercq et test device

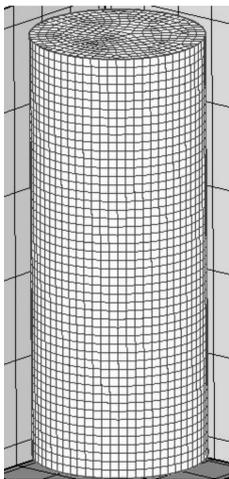


图 2 模拟沉降桶网格划分图
Fig. 2 The gridding map

对几何模型的上顶面采用通量为零的边界条件,即初始时刻以后不再有污泥混合液从顶面进入几何模型空间,对于下底面和侧面采用无滑移的固定壁面边界条件。时间计算步长设为 0.1 s。采用 Simple 格

式离散压力-速度耦合方程;采用 Quick 格式离散动量方程,松弛因子为 0.4;采用二阶迎风格式离散体积分数方程和标准 $k-\varepsilon$ 紊流方程,松弛因子为 0.3;采用一阶迎风格式离散群平衡模型,定义聚合核心与破碎核心相关系数。该次模拟材料基本物性为:污泥颗粒密度 $\rho_s = 1\ 175 \text{ kg/m}^3$,液态水密度 $\rho_w = 998.6 \text{ kg/m}^3$,污泥颗粒粘度 $\eta_s = 2 \times 10^{-5} \text{ pa} \cdot \text{s}$,液态水粘度 $\eta_w = 0.001\ 003 \text{ pa} \cdot \text{s}$,污泥颗粒表面张力系数 $\sigma = 0.031 \text{ N/m}$,且不考虑固液两相之间的能量交换及质量交换。初始污泥颗粒尺寸为 $50 \text{ }\mu\text{m}$,污泥颗粒离散尺寸详见表 1。

表 1 污泥颗粒离散尺寸
Tab. 1 Size of discrete particle

序号	0	1	2	3	4	5
尺寸/ μm	1 058.1	574.6	312.1	169.5	92.1	50.0

3 结果分析与讨论

3.1 污泥等值浓度线对比分析

图 3 是本次模拟中不同时刻污泥浓度大于 3.23 kg/m^3 的区域的中心面污泥浓度分布云图。

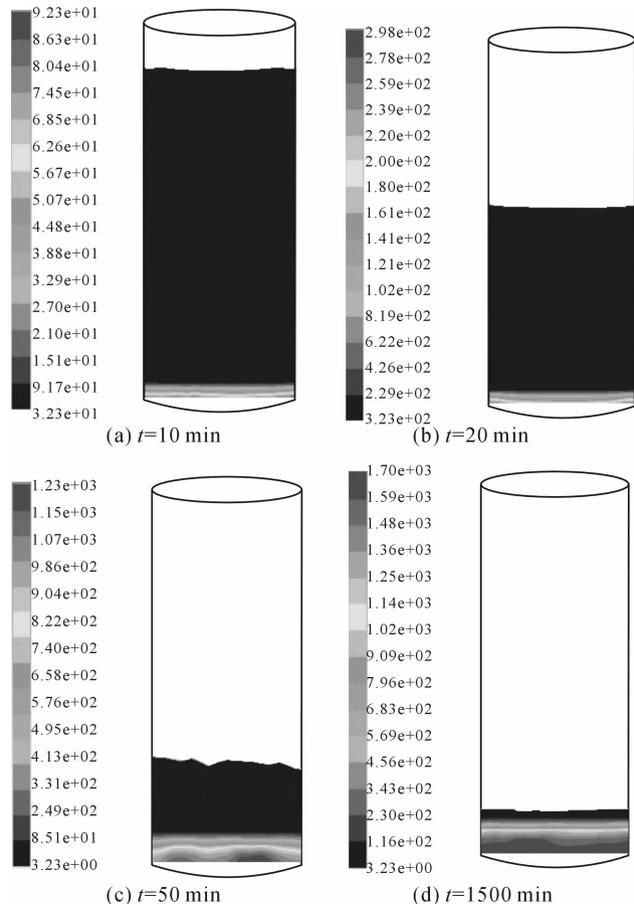


图 3 污泥浓度大于 3.23 kg/m^3 区域的污泥浓度分布图
Fig. 3 The sludge concentration distribution of the sludge concentration is greater than 3.23 kg/m^3

图4是Jeriffa De Clercq等运用伽马摄像机及对流体无干扰的固体放射性物质作为示踪剂,对初始污泥浓度为 3.23 kg/m^3 的浑水絮凝-沉降试验进行测量所得出的不同污泥浓度分布曲线。

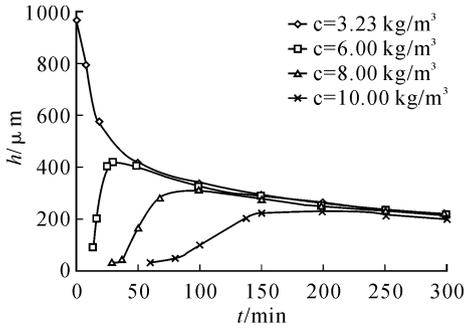


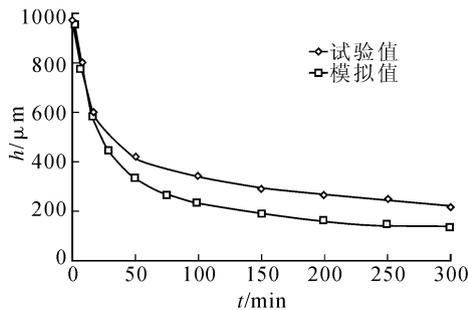
图4 Jeriffa De Clercq等试验值

Fig. 4 Jeriffa De Clercq et experimental value

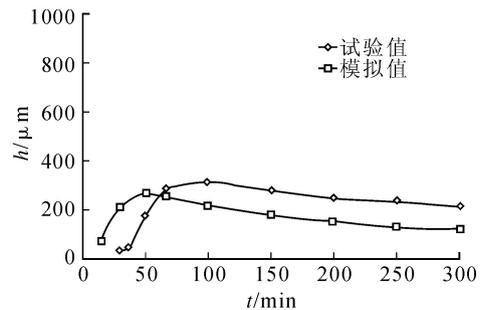
图5是污泥浓度分别为 3.23 kg/m^3 、 6.00 kg/m^3 、 8.00 kg/m^3 和 10.00 kg/m^3 的浓度曲线试验值与模拟值的对比。从图5可以看出,试验值与模拟值的变化轨迹和时间点基本吻合。在絮凝-沉降过程的中后段时间内模拟值的等浓度曲线高度较试验值略低一些,且模拟值比试验值更快达到沉降平衡,因为本模拟采用的数学模型是假定絮团成长为无空隙的等密度絮团过程,即生成的絮团是与初始颗粒相等密度的球形结构,与实际絮团的松散多空不规则状结构有偏差,在实际絮凝-沉降过程中絮团的个体粒径尺度逐步增大,相对密度逐步减小,然而本模拟

所采用的数学模型假定絮团的密度不会随着沉降时间发生变化,模拟絮团密度较实际絮团密度偏大,如此便造成模拟絮团的沉降速率较实际值偏大,污泥压缩沉降后的体积较实际值偏小,模拟值的底部浓缩污泥更为密实,因此在絮凝-沉降过程的中后段时间内模拟值的等浓度曲线高度较试验值略低一些,且模拟值比试验值更快达到沉降平衡。

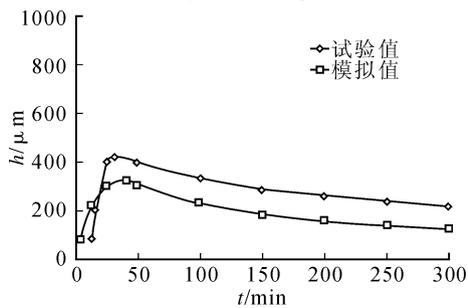
由图5(a)知,初始时刻后一段时间内浓度曲线基本为直线变化,该部分属于等浓度拥挤沉降,之后一段时间内浓度曲线的曲率逐渐增大,属于变浓度压缩沉降,最后浓度曲线的曲率又逐渐降低直至趋于稳定平衡状态。图5(b)~5(d)可以看出,模拟中浓度曲线普遍较试验值浓度曲线更早到达峰值,且模拟值各浓度曲线的峰值高度比试验值峰值高度略低,这是由于本次模拟假设所有颗粒在碰撞前后均为实心球体,即污泥颗粒几乎不相互粘结形成网状结构,从而减落了拥挤沉淀作用,造成上部污泥颗粒迅速进入下部,污泥沉降过程比实际更快进入最后阶段,即压缩沉降阶段。然而,由于选取的比较浓度大于混合液的初始浓度,随着时间的推移浓度曲线从沉降桶底部逐步升高,当其升高到峰值时又缓慢下降,直至达到平衡,这种曲线的变化规律与Jeriffa De Clercq等试验结果吻合。由此认为本次模拟研究比较准确地反应了粘性污泥絮凝-沉降的浓度变化规律。



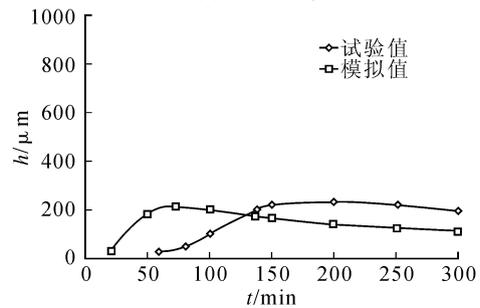
(a) $c=3.23 \text{ kg/m}^3$



(b) $c=6.00 \text{ kg/m}^3$



(c) $c=8.00 \text{ kg/m}^3$



(d) $c=10.00 \text{ kg/m}^3$

图5 试验值与模拟值对比图

Fig. 5 Compare between numeration and examination

3.2 污泥絮团分布

3.2.1 污泥絮团粒径分布

本次模拟使用群体平衡模型(PBM)预测沉降桶内的污泥絮团粒径分布。图7是 $t=200\text{ min}$ 该次模拟空间的污泥絮团粒径分布情况,模拟结果显示污泥絮团的直径以 $200\sim 550\ \mu\text{m}$ 为主,几乎没有发现大于 1.20 mm 直径的污泥絮团。

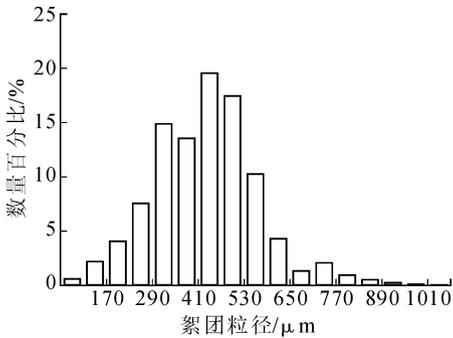


图6 污泥絮团粒径分布

Fig. 6 Distribution of diameter of sludge flocules

3.2.2 污泥絮团分布的时空变化

图7是本次模拟中水深 0.7 m 处絮团粒径在不同时刻的分布情况,图7横坐标表示污泥絮团浓度,纵坐标表示污泥絮团粒径, t 表示时刻。从图7可以看出,小粒径絮团数量随时间不断减少,大粒径絮团数量随时间先增加后减少。这是因为在初始后一段时间内,模型空间内的污泥颗粒几乎都处于絮凝聚合阶段,絮团不断成长,与此同时上部污泥颗粒絮团由于重力的作用不断向下移动,从而补充下部污泥颗粒絮团的移失,但是由于初始时刻以后计算模型空间内便不再有污泥颗粒进入,上部污泥絮团对下部絮团的补充变弱,而对于大粒径絮团来说,在上部絮团补充减少的同时,向下部的移动较小粒径絮团迅速的多,因此大粒径絮团数量会随时间先增加后减少。

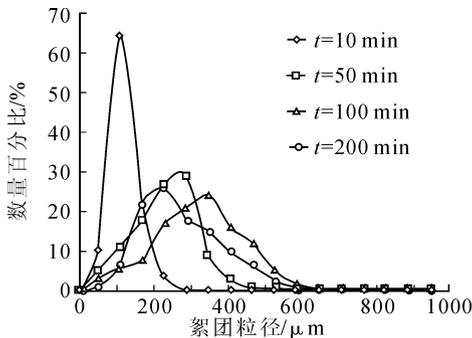


图7 水深 0.7 m 处不同时刻絮团粒径分布

Fig. 7 Floccules particle size distribution of different moments in 0.7 m depth

分布情况,图8中横坐标表示污泥絮团浓度,纵坐标表示污泥絮团粒径, h 表示距上顶面的水深位置,污泥絮团在不同深度下的浓度分布曲线形态类似,随着水深的增加污泥絮团的粒径分布范围变宽,大粒径污泥絮团的数量逐渐增多。其主要原因是,当水深较小时上部颗粒絮团在较短的时间内得不到有效补充,且大粒径絮团在重力作用下向下部移动,故造成污泥絮团的粒径分布范围较下部窄;当水深增大时上部污泥絮团在一定时间内能有效补充该水深位置的污泥絮团移失,且由于絮凝的作用补充的污泥絮团普遍偏大,故造成污泥絮团的粒径分布范围变宽,大粒径污泥絮团的数量逐渐增加。

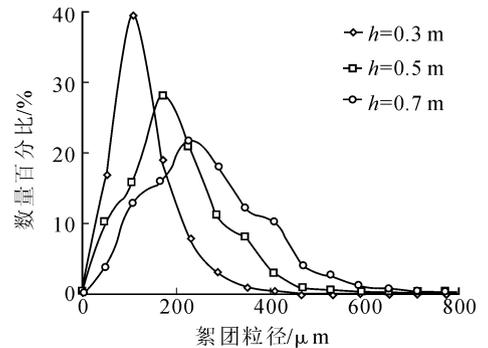


图8 150 min 时刻不同水深处絮团粒径分布

Fig. 8 Floccules particle size distribution of different depths in 150 min

4 结论

本研究运用群体平衡模型(PBM)耦合两相流混合模型对Jeriffa De Clercp等在 1 m 高沉降桶内的污泥沉降实验进行三维数值模拟,通过模拟试验及初步观察统计分析,获得结论:

1) 本模拟所选用的数学模型能比较准确地反映粘性污泥絮凝-沉降的浓度变化规律,且具有一定精度。

2) 模拟结果显示:固定水深处小粒径絮团数量随时间的推移不断减少,大粒径絮团数量随时间的推移先增加后减少,但是随着水深的增加污泥絮团的粒径分布范围逐渐变宽,大粒径污泥絮团的数量逐渐增多。

参考文献:

- [1] 常青,傅金镒,酆兆龙.絮凝原理[M].兰州:大学出版社,1992.
- [2] 杨铁笙,熊祥忠,詹秀玲,等.粘性细颗粒泥沙絮凝研究概述[J].水利水运工程学报,2003,6(2):65-77.
Yang Tiesheng, Xiong Xiangzhong, Zhan Xiuling, et al. Flocculation of cohesive fine sediment[J]. Hydro-Science

图8是 $t=150\text{ min}$ 时絮团粒径在不同水深下的

- And Engineering, 2003, 6(2): 65-77.
- [3] 柴海霞. 絮凝体分形仿真模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
Chai Haixia. A study on the simulation of fractal floc structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture And Technology, 2008.
- [4] Thomas D N, Judd S J, Fawcett N. Flocculation modeling: a review[J]. Water Research, 1999, 33(7): 1579-1592.
- [5] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. New York: Freeman W H Company, 1983.
- [6] Wihen T A, Sander L M. Diffusion limited aggregation a kinetic critical phenomenon[J]. Physical Review Letters, 1981, 47: 1400-1403.
- [7] Meakin P. Cluster-particle aggregation with fractal (levy flight) particle trajectories [J]. Physical Review Letters, 1984, 29: 3722.
- [8] 赵明. 黏性细颗粒泥沙的絮凝及对河口生态的影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
Zhao Ming. On flocculation of cohesive sediment[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [9] Luo H. Coalescence, breakup and liquid circulation in bubble column reactors[D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1993.
- [10] Ghadiri M, Zhang Z. Impact attrition of particulate solids: a theoretical model of chipping[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57: 3659-3669.
- [11] Jeriffa De Clercq, Filip Jacobs, David J K. Detailed spatio-temporal solids concentration profiling during batch settling of activated sludge using a radiotracer[J]. Water Research, 2005, 39: 2125-2135.
- [12] 徐琰, 董海峰, 田肖, 等. 鼓泡塔中离子液体-空气两相流的 CFD-PBM 耦合模拟[J]. 化工学报, 2011, 10(62): 2699-2706.
Xu Yan, Dong Haifeng, Tian Xiao, et al. CFD-PBM coupled simulation of ionic liquid-air two-phase flow in bubble column[J]. CIESC Journal, 2011, 10(62): 2699-2706.
- [13] 刘玉玲, 高升, 白凯. 好氧颗粒污泥的培养及其特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(3): 329-333.
Liu Yuling, Gao Sheng, Bai Kai. Research on aerobic granular sludge of its cultivation and characteristics[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(3): 329-333.

(责任编辑 李虹燕)