**文章编号:**1671 - 2021(2006)06 - 0981 - 04

# 往复式隔板絮凝池流场模拟与结构优化

# 张海龙,伍悦滨,崔福义

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院,黑龙江哈尔滨 150090)

摘 要:目的为了合理地设计和优化混凝工艺,改善流场结构,提高混凝效果,并验证往复式隔板絮凝池的结构优化参数.方法应用计算流体力学(CFD)技术对往复式隔板絮凝池的流场进行了数值模拟.结果 模拟结果表明转弯过水断面面积 A<sub>1</sub> 与廊 道内的过水断面面积 A<sub>2</sub> 比值 A 为 1.3 时,絮凝池转弯处流速分布较合理,整个流场 过渡较平稳.模拟结果还表明.将絮凝池直角拐角和隔板的矩形端面设计成圆弧形, 可以消除拐角处的死水区,为絮凝过程创造良好的水力条件.结论应用 CFD 技术对 絮凝池流场进行数值模拟,获得水流结构,分析研究其流场特性,能够为高效絮凝的 理论研究与絮凝池的优化设计提供一定的依据.

关键词:往复式隔板絮凝池;流场;数值模拟;结构优化

**中图分类号**:TU991.22 **文献标识码**:A

混凝是水处理工艺流程中不可缺少的前置关 键技术环节,是沉淀和过滤处理的基础.实践证 明,合理地选定和优化混凝工艺,不仅会提高出水 水质,还能达到节能、节药及降低运行费用的目 的<sup>[1]</sup>.

絮凝就是通过水流流动的能量消耗,促使水 中胶体颗粒在混合阶段脱稳,经初步聚集的微絮 粒相互接触碰撞,逐步形成能满足沉降分离要求 的较大絮体的过程.往复式隔板絮凝池就是靠通 过水流在廊道间的往返流动造成颗粒碰撞聚集. 在这一过程中,水流的流态以及水流的结构等水 力特性对絮凝效果起着决定性作用<sup>[2]</sup>.而由于实 验手段及量测仪器的限制,使得单纯依靠实验很 难认识清楚絮凝池中复杂的水流结构.笔者采用 计算流体力学(CFD)技术对往复式隔板絮凝池的 流场进行数值模拟,分析研究其流场特性,优化结 构参数,为高效絮凝的理论研究与絮凝池的优化 设计提供一定的依据.

# 1 絮凝池流场的控制方程

往复隔板絮凝池主要是通过控制廊道的宽度 来调节各部分的流速以达到理想的絮凝效果,因 此速度梯度是反映絮凝效果的主要控制指标<sup>[3]</sup>. 假设往复隔板絮凝池工作过程与外界没有质量和 能量交换,故不考虑能量方程,其三维单相流流场 的控制方程如下<sup>[4]</sup>:

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{u} \, \mathbf{U}) = X + \operatorname{div}(\boldsymbol{\mu} \operatorname{grad} u) - \frac{1}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x}$$
(2)

$$\frac{\partial}{\partial t} + \operatorname{div}(U) = Y + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad}) - \frac{1}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y}$$
(3)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \operatorname{div}(w \mathbf{U}) = Z + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) - \frac{1}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z}$$
(4)

式中:
$$t$$
为时间(s),为流体的密度(kg/m<sup>3</sup>), $\mu$ 

收稿日期:2006-06-10

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2003AA601120)

作者简介:张海龙(1965-),男,博士研究生,主要从事给水处理技术的研究.

为流体的动力黏度 (Pa ·s),  $X \ Y \ Z \ D$ 别为 x, y, z方向的单位质量力 (m/s<sup>2</sup>), 为流体微元体上 的压力 (Pa), U 是速度矢量, u, v, w 分别为 U 在 x, y, z 方向的速度分量 (m/s).

# 2 控制方程的数值求解

笔者利用 FLUENT 软件<sup>[5]</sup>数值模拟往复隔 板絮凝池的流场.该软件采用有限体积法对流场 控制方程进行离散,对流项和扩散项分别采用二 阶迎风差分格式和中心差分格式进行离散,经过 离散后统一形式的差分方程为<sup>[6]</sup>

$$p \quad p = \sum_{nb \quad nb} h + b \tag{5}$$

式中: 为物理量, nb 表示节点 p 周围的所有相 邻节点, a, b 为系数,数值取决于离散格式.

往复隔板絮凝池池内流动型态为湍流. FLUENT软件中提供了多种湍流模型,其中标准 *k*- 模型是相对发展较完善的一种湍流模型,并 且在实际应用中也取得了比较理想的效果,它成 功地模拟了许多复杂的湍流问题,得到了一致认 可<sup>[7]</sup>.这里采用标准*k*- 两方程模型求解往复隔 板絮凝池内流场结构.

标准 k - 两方程模型<sup>(8)</sup>如下:  

$$\frac{\partial}{\partial t}(k) + \frac{\partial}{\partial t}(ku_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_b - (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(k) + \frac{\partial}{\partial t}(ku_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( (\mu + \frac{\mu_i}{k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + \frac{C_1}{k} G_k - C_2 - \frac{2}{k}$$
(7)

式中: G<sub>k</sub>为平均速度梯度引起的湍动能 K的产生 项,由下式计算:

$$G_k = \mathbf{\mu}_l \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$
(8)

 $C_1 \ C_2 \ C_\mu \ k \ k$ 、为模型常数,它们各自取值如表 1.

表1 模型常数				
$C_1$	$C_2$	Cµ	k	
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

进、出口边界条件采用速度进口和压力出口, 水面为自由表面,没有剪切和滑移速度,池底与池 壁为固体壁面,使用标准壁面函数.压力-速度耦 合选用 SIMPLE算法进行求解,计算中采用非结 构化四面体网格形式<sup>[9]</sup>.

# 3 往复式隔板絮凝池流场的计算

#### 3.1 絮凝池的基本计算参数

隔板絮凝池长 19.7 m,宽 22 m,正常水深 2.8 m,设计进口流量为 75 000 m<sup>3</sup>/d,进口宽和高 分别为 0.92 m 和 1.0 m,停留时间为 20 min.根 据设计流速 0.55 m/s、0.41 m/s、0.36 m/s 及 0.25 m/s,将絮凝池分成 4 个阶段.各阶段廊道宽 度逐级增大,同一阶段各个廊道宽度相同,1~4 级分别包含 6、5、5 及 4 个廊道,廊道设计宽度分 别为 0.6 m,0.8 m,1.0 m 及 1.3 m,如图 1 所示.



3.2 边界条件

絮凝池边界条件采用进口速度为 1.0 m/s, 出口压力为 1 工程大气压.固体壁面上除动量扩 散外,所有的通量值均设为零,即:u = 0, v = 0, w= 0, k = 0. = 0.

#### 3.3 模拟结果分析

尽管絮凝池内流态复杂,但如果忽略池底部 及池顶自由液面的影响,池内各水平层的流动情 况基本一致.笔者在 Z=2.0 m 水平面上,每个廊 道中心取一个实验点,得到各个廊道的时均速度 图,如图2所示.



由图 2 可见,整个絮凝池速度场分成 4 个阶段,每一阶段的平均速度依次递减,分别为 0.55 m/s、0.42 m/s、0.34 m/s及 0.26 m/s,与设计流 速基本吻合.

为进一步观察各廊道内速度分布情况,在宽为0.6m和0.8m的两个廊道上沿横向分别取若 干点,得到廊道内的速度分布图,见图3.由图可见,由于边壁黏性作用,廊道内的速度沿横向由边 壁到中央逐渐递增,即存在横向速度梯度.



在往复式隔板絮凝池中,水流在廊道间的往 复流动,带动颗粒碰撞聚集.池子起端廊道间距较 窄,水流速度较大,增加了絮凝颗粒相互间的接触 碰撞机会,有利于反应初期絮凝颗粒较小时,通过 絮凝剂的电性中和及吸附架桥作用,使胶体颗粒 脱稳再结合形成矾花.矾花在流动过程中不断吸 附其他胶体颗粒逐渐长大,在絮凝反应后期凝聚 形成大颗粒絮凝体,但其密实性和抗剪切能力却 较低,较大的速度冲击作用会使形成的矾花重新 被打碎<sup>[10]</sup>.因此,为了减少水流动力效应对絮凝 颗粒的破坏作用,将絮凝池后部廊道变宽,使流速 降低.图3所示的数值模拟结果表明0.8 m 宽廊 道内的水流速度小于0.6 m 宽廊道内相应点的流 速.

#### 3.4 絮凝池结构优化

设隔板转弯处过水断面面积  $A_1$  与廊道内的 过水断面面积  $A_2$  比值为 A ,即  $A = A_1/A_2$ . 实验 证明 A 值对混凝效果影响较大<sup>(11)</sup>. 笔者分别对 A = 1.0, 1.3, 1.8 的絮凝池进行模拟,第一阶段 0.6 m 宽廊道转弯处水流沿纵向(由池壁至隔板 端部)的速度分布见图 4,该部分的水流平均流速 为 0.55 m/s.

由图可见,当 A = 1.0 时转弯处流速几乎都 大于廊道内的平均流速,此时顶冲水流对絮凝颗 粒有较大的剪切作用,易造成已经形成的大絮体 破碎;当A = 1.8时转弯处流速偏低,使水流无法 带走絮体,易造成絮体在絮凝池中过早沉淀,阻碍 水流通道,降低混凝效果;当A = 1.3时絮凝池转 弯处流速分布较合理,矾花颗粒既能被带走又不 致破裂,是絮凝池结构设计的最佳参数.



图 5 转弯处流场比较(A = 1.3)

此外,水流在经过矩形端面的隔板时,在廊道 头部形成了一个较大范围的死水区,死水区的存 在使得廊道头部及附近区域的絮凝效果受到影 响,容易造成矾花在死水区沉降.为了实现水流平 稳过渡,消除廊道头部的死水区,将絮凝池直角拐 角和隔板矩形端面设计成圆弧形,A 取 1.3,比较 改进前后絮凝池的流场分布,模拟计算结果见图 5.可见,改进后廊道转弯处过渡较平稳,拐角处的 死水区现象基本消失.

### 4 结 语

笔者应用 CFD 技术对往复式隔板絮凝池的 流场进行了数值模拟.模拟结果验证了转弯过水 断面面积 A<sub>1</sub> 与廊道内的过水断面面积 A<sub>2</sub> 比值 为 1.3 左右时,絮凝池转弯处流速分布较合理,整 个流场过渡较平稳.模拟结果还表明,将絮凝池直 角拐角和隔板的矩形端面设计成圆弧形,可以消 除拐角处的死水区,为絮凝过程创造良好的水力 条件.

#### 参考文献:

- [1] 严煦世,范谨初.给水工程[M].4版.北京:中国建 筑工业出版社,1999.
- [2] 吴龙华,唐洪武,严忠民,等.DPIV技术在絮凝池 流场特性研究中的应用[J].河海大学学报:自然科 学版,2003,31(1):38-41.
- [3] 詹咏,王惠民.隔板絮凝池水流结构对水质浊度影响的探讨[J].河海大学学报,2001,29(5):88-91.
- [4] 祝皎琳,林建国.往复式隔板絮凝池流场数值模拟 及混凝效果分析[J].环境工程,2005,23(2):72-74.
- [5] 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.

- [6] Anderson J D, Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications [M]. New York: Mc-GrawHill, 1995.
- [7] Du Tao, Wu Zi Niu. Mixed analytical/ numerical method applied to the high Reynolds number turbulence model [J]. Journal of Computers & Fluids, 2005 (34):97 119.
- [8] Chen CJ ,Jaw S Y. Fundamental of Turbulence Modeling[M]. Washington: Taylor & Francis, 1998.
- [9] Van Doormal J P, Raithby G. Enhancement of the SIMPL E method for predicting incompressible fluid flows[J]. Numerical Heat Transfer, 1984(7):147 -163.
- [10] Biggs S, Habgood M, Jameson G. Aggregate Structures via a Bridging Flocculation Mechanism[J]. Journal of Chemical Engineering, 2000(80):13 - 22.
- [11] 武道吉. 絮凝动力学机理与控制指标研究[J]. 环境 工程,2002,18(5):22-23.

# Numerical Simulation of Flow Field and Configuration Optimization of a Reciprocating Baffled Flocculation Tank

#### ZHANG Hailong, WU Yuebin, CUI Fuyi

(School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract :** It is one of the effective ways to enhance the efficiency of coagulation by configuration optimization of the coagulation process to improve rationally the flow field. In this paper CFD technology is applied to numerically simulate the flow field of a reciprocating baffled flocculation tank to confirm the optimum configuration parameter. Simulation results indicate that the velocity distribution at the turning is reasonable and the flow transition is smooth when the ratio of A<sub>1</sub> to A<sub>2</sub> is about 1.3, where A<sub>1</sub> is the area of the wetted cross-section at the turning and A<sub>2</sub> is the area of the wetted cross-section at the gallery. Simulation results also show that the arched end sections comparative to rectangular ones of the baffle and the turning of a flocculation can decrease the die zone and provide a better hydraulic condition for the coagulation process. **Key Words** :reciprocating baffled flocculation; flow field ;numerical simulation ;configuration optimization