

## 水源与饮用水保障

方若凡,朱静萍,张天阳,等. 水厂清水池的水力特性模拟与结构优化[J]. 净水技术,2021,40(1):28-36.

FANG R F, ZHU J P, ZHANG T Y, et al. Hydraulic characteristic simulation and structural optimization for clear water reservoir of WTP [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(1):28-36.



扫我试试?

## 水厂清水池的水力特性模拟与结构优化

方若凡,朱静萍,张天阳,徐 斌\*

(同济大学环境科学与工程学院,污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

**摘要** 以某水厂清水池为案例,构建7种不同结构的清水池几何模型进行CFD模拟,对比水力效率和粒子扩散特征。结果表明,清水池前段流态接近混流,后段逐渐均匀,近似平稳推流模式。进口第一个廊道区,导流板背水面和弯道拐角区域易出现回流、大面积循环流等水力状态。增加导流板数目,延长导流板长度,将进出水口设置在进出水廊道宽边中间位置可使清水池更接近理想推流状态。此外,当进水流速为1.2 m/s和2 m/s时,导流板垂直布置的清水池模型因其廊道数更多,比平行布置时的水力效率评价指标值 $T_{10}/T$ 分别提升23%和13%。CFD模拟显示,实际工程中用于池体稳定的结构柱会显著影响清水池流场流线和消毒剂粒子停留时间,当进水流速为1.2 m/s和2 m/s时,结构柱的存在会使 $T_{10}/T$ 分别提升31%和38%,但同时会引起流线的纵向扰动,是影响清水池水力条件的重要因素。研究成果可以为水厂清水池的设计优化提供参考借鉴。

**关键词** 清水池 计算流体力学 结构优化 消毒剂 扩散路径

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2021)01-0028-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2021.01.006

## Hydraulic Characteristic Simulation and Structural Optimization for Clear Water Reservoir of WTP

FANG Ruofan, ZHU Jingping, ZHANG Tianyang, XU Bin\*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Characteristic of flow patterns and particle diffusion of clear water reservoir with 7 different structures was studied by numerical modeling and CFD simulation. The results indicated that the flow pattern in the first section of clear water reservoir was close to the mixed flow, and the flow in the rear section was gradually uniform, which was approximately a plug flow pattern. At the entrance of the first corridor, back-water surface of guide plate and corner area of the curve were prone to backflow, large area of circulating flow and other hydraulic states. Increasing the number of guide plates, extending the length of guide plates, and setting the inlet and outlet in the center of the corridor could effectively improve hydraulic efficiency of clear water reservoir. Due to its more corridors, vertical arrangement of guide plates had higher hydraulic efficiency than parallel arrangement, and its hydraulic efficiency index  $T_{10}/T$  value increased by 23% and 13% when the inflow velocity was 1.2 m/s and 2 m/s, respectively. CFD simulation showed that structural columns used for pool stability would significantly affect flow streamline and disinfectant particle residence time, and increased  $T_{10}/T$  val-

[收稿日期] 2020-09-17

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51778444, 51808222, 51978483); 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207004)

[作者简介] 方若凡(1994—),男,硕士,研究方向为饮用水处理与消毒, E-mail: 270540445@qq.com。

[通信作者] 徐斌,男,教授,主要从事饮用水安全保障相关理论与技术方面工作, E-mail: tjwenwu@tongji.edu.cn。

ue by 31% and 38% when the inflow velocity was 1.2 m/s and 2 m/s, respectively. Meanwhile, structural column could cause longitudinal disturbances and it was one of important factors affect the hydraulic efficiency of clear water reservoir. The results can provide reference for the design and optimization of clear water reservoir in water treatment plants (WTP).

**Keywords** clear water reservoir computational fluid dynamics(CFD) structural optimization disinfectant diffusion path



方若凡,同济大学环境科学与工程学院徐斌教授团队一员。徐斌教授团队重点针对饮用水处理技术所面临的问题,致力于饮用水消毒技术与消毒副产物控制、二次供水水质提升技术等方面的研究,在饮用水安全保障与供水节水方面积累了丰富的经验。团队目前有教授2名,包括教育部长江学者特聘教授,另有副教授2名及副研究员1名。课题组目前在读博士8名,在读硕士9名。先后承担多项国家高技术863计划、国家水体污染控制与治理科技重大专项、国家自然科学基金、省部级及企业合作项目等20余项,具有从事饮用水水质处理与提升的优异研究条件。研究团队已公开发表中英文论文180余篇(SCI论文80余篇),SCI论文累计引用次数2500余次,授权国家发明专利20余项,参与编写技术标准、导则、指南等5部,研究成果获得科技进步国家二等奖、上海市科学技术进步一等奖。

清水池是水厂用来贮存净化后的清水,调节水厂均匀供水和用户不均匀用水的重要设施,不仅发挥贮水功能,更为满足消毒接触时间提供稳定条件。现阶段,我国对清水池的设计主要考虑在满足30 min消毒接触时间的前提下保证居民用水量<sup>[1]</sup>,但没有考虑清水池中水体流动的水力特性和消毒剂的扩散消耗。在研究中,清水池通常被当作“黑盒”处理,池内流场的水力效率被忽略。清水池中进出口与挡板的存在和布置使池内水体流态更加复杂,也导致消毒剂在清水池中的混合扩散过程受到紊流回流的影响严重。Shiono等<sup>[2]</sup>研究发现,清水池导流板背面和清水池壁区域有明显的回流现象,这些“流动死区”会严重影响清水池的消毒效率,且易出现局部氯耗量过快和消毒副产物浓度过高的风险。另一方面,循环流在客观上增加了清水池中部分水流的迟滞时间,促进了粒子交换和均衡水质的作用。Bishop等<sup>[3]</sup>研究发现,清水池的水力效率评价指标 $T_{10}/T$ 与池中导流板设置、进出口条件、廊道拐角等结构因素有很大的关系。马强<sup>[4]</sup>指出,改进清水池结构,以提高其水力效率,可有效提升消毒效率。目前,常采用传统示踪试验,研究清水池的水力效率:在清水池入口处投加示踪剂,在水流出口处观察示踪剂出流浓度随时间的变化规律,以此得到示踪剂的停留时间分布,用以评价水力效率。但是,采用示踪试验的方法得到清水池不同结构工况下的水力效率费时费力,且常受限于现场条件。近年来,随着计算机技术的发展,数值模拟技术逐渐成熟,计算流体力学(computa-

tional fluid dynamics, CFD)被证明是研究流体流动问题的经济有效的技术<sup>[5]</sup>。利用CFD技术对水流流态进行模拟能更加容易、直观和准确地分析流场的水流速度分布情况和流态特征。

本研究将CFD三维建模引入清水池的水力效率和消毒过程的研究中。通过1种典型清水池和6种变式清水池的CFD模拟,从改进清水池结构设计、优化水流流态出发,模拟流态水力条件、消毒剂扩散路径和停留时间,为提高清水池的水力效率,优化清水池的设计和改造提供理论依据。

## 1 数值模拟计算

### 1.1 模型建立

以上海市某水厂的矩形清水池为案例,清水池结构如图1(a)所示。该清水池进水量为10万 $\text{m}^3/\text{d}$ ,分为独立的2格,单格清水池的有效容积为 $76\text{ m} \times 35.1\text{ m} \times 4\text{ m} = 10\,670\text{ m}^3$ 。增压泵房单泵流量为1750 $\text{m}^3/\text{h}$ ,3用1备,单格清水池进水量按增压泵房同时开启2台泵考虑,则单格进水量为3500 $\text{m}^3/\text{h}$ 。清水池进水管取DN1000,则流速 $v_{\text{进}} = 3\,500 / [3\,600 \times 3.14 \times (0.5)^2] \approx 1.2\text{ m/s}$ 。清水池单格进水量为50000 $\text{m}^3/\text{d}$ ,长为76 m、宽为35.1 m、池深为4 m。池内设8块导流板,将池体分为9个廊道,第1个进水廊道宽为12 m,余下廊道宽为8 m,进水管管径为1000 mm,进口流速为1.2 m/s。Issakhanian等<sup>[6]</sup>指出,在清水池中,水头损失导致的水面的整体下降深度几乎可以忽略不计,因此,本研究将清水池的水面视为平面,忽略由水头损失引起的纵向上的水深变化。据此,采用Inventor软件

对该清水池案例进行几何建模,简化模型如图 1 (b) 所示。

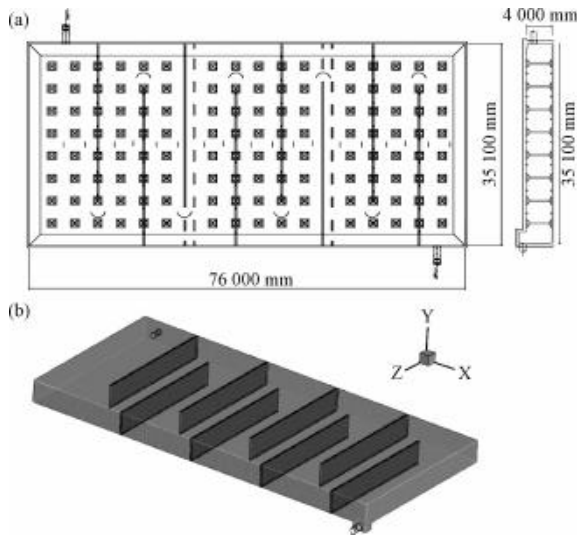


图 1 清水池平面和剖面图 (a) 及简化几何模型图 (b)  
Fig. 1 Plan and Profile (a) and Simplified Geometric Model (b) of Clear Water Reservoir

## 1.2 网格划分

网格划分基于 Ansys ICEM 软件,采用六面体非结构化网格形式<sup>[7]</sup>。对清水池中流态变化复杂的区域,包括进出口管道处、廊道拐弯处、池壁面及导流板壁面处进行网格加密,以更精确表述清水池内的流体流动。该几何模型生成网格总数约 135 万个,节点数约 45 万个。网格质量采用行列式 (determinant) 评判标准,本模型中行列式均值为 0.69,表明网格划分质量良好,网格质量符合要求,生成的整体网格及局部加密网格如图 2 所示。

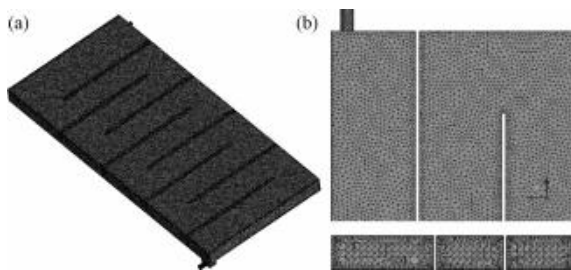


图 2 清水池整体 (a) 和局部加密 (b) 网格示意图  
Fig. 2 Overall Grid Diagram (a) and Partial Refinement Grid Diagram (b) of Clear Water Reservoir

## 1.3 控制方程

流场计算基于 Ansys Fluent 软件,采用黏性流体的 Navier-Stokes (N-S) 方程中基于湍流动能  $k$  及

湍流耗散率  $\varepsilon$  的标准子模型,控制方程如式 (1) ~ 式 (2)。式 (2) 右端 3 项分别为生成项、耗散项和壁面项。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon + \phi_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j \varepsilon - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - c_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \phi_\varepsilon \quad (2)$$

其中:  $\mu_t$  —— 涡黏性;

$S_{ij}$  —— 平均速度应变率张量;

$\rho$  —— 流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$k$  —— 湍动能;

$\delta_{ij}$  —— 克罗内克算子;

$\mu_s$  —— 平行于壁面的流动速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$f_2$  —— 近壁衰减函数;

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}$  —— 常数, 分别取 1.0、1.3、1.45、1.92;

$\phi_k, \phi_\varepsilon$  —— 壁面项。

颗粒相采用离散相模型 (DPM) 中的欧拉-拉格朗日分散相模型, 颗粒在流场中的受力方程如式 (3)。式 (3) 右端 3 项分别为单位质量颗粒所受拉力、单位质量颗粒所受重力、颗粒所受其他力。

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3)$$

其中:  $u$  —— 连续相 (水相) 的流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$u_p$  —— 离散相 (颗粒相) 的流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$\rho$  —— 连续相 (水相) 的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\rho_p$  —— 离散相 (颗粒相) 的颗粒密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 1.4 求解器参数

采用 Fluent 软件作为求解器, 求解参数设置如下。

对水相/连续相的模拟, 采用雷诺时均标准模型 (Reynolds average navier-stokes)。边界条件为无滑移墙体, 速度进口和压力出口, 进口流速为 1.2  $\text{m}/\text{s}$ , 出口压力为 101 325 Pa, Simple 耦合方式。

将消毒剂视作惰性颗粒, 在流动过程中无损耗。



采用离散相模型对消毒剂在清水池中的扩散/运输轨迹进行模拟。颗粒为 Surface 类型的惰性颗粒。边界条件为无滑壁面和质量-流量进/出口,投加粒子各向无初速度,进出口边界条件设为逃逸,单项耦合方式。

## 2 结果与讨论

### 2.1 清水池典型简化模型三维 CFD 模拟

#### 2.1.1 水流运动轨迹

典型简化清水池中流场速度的等值线图 and 流线图如图 3 所示。在水池进水第 1 个廊道中,由于流速惯性的存在,流速较高,其有效过水断面减小,廊

道右侧水体回流,在第 1 个廊道中形成环流漩涡,这样第 1 个廊道的流态便具有全混反应器的流态特征。相较于全混反应器,平推流反应器是使消毒效果最大化的理想水动力条件,因此,第 1 个廊道的宽度过大会直接导致消毒效率低下。这与 Angeloudis 等<sup>[8]</sup>对示踪剂停留时间分布曲线分析和水力效率指标相关关系的研究结果(在池体进口附近,消毒性能较差)一致。在逐渐远离入口的廊道中,水流流动趋于平缓并表现出一定的规律,流体流速较均匀,呈现平推流流动,且导流板迎水面流速高于背水面。背水面拐角处水体流速较低,易形成滞留区。

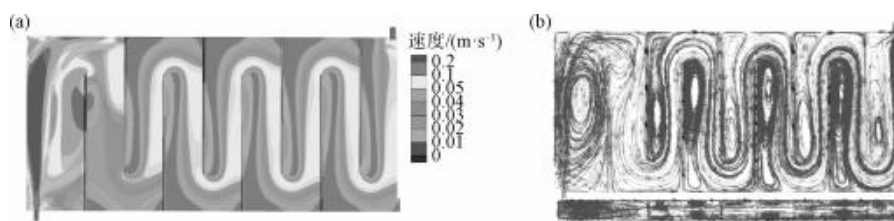


图 3 典型简化清水池的速度等值线图 (a) 和流线图 (b)

Fig. 3 Contours of Velocity (a) and Streamlines (b) of Typical Simplified Clear Water Reservoir

由图 3(b) 流场流线图可知,流场进口第 1 个廊道中水流方向复杂,扰动很大,存在纵向混合。廊道右侧水流存在逆向的流动,湍动明显,形成大面积漩涡,造成大量水体的循环往复流动。并且,由于水流惯性的存在,第 1 个廊道拐弯处有水流冲击清水池壁面,本应流入第 2 个廊道的水体受清水池池壁的反作用力后,有部分水流向第 1 个廊道回流。由于投加的消毒剂随水流流动,推测若在进水口投加消毒剂,易造成部分消毒剂与滞留水体在第 1 个廊道中长时间接触反应,氯耗量增大,降低后段消毒效率;但将消毒剂投加点后移,则需考虑消毒接触时间满足设计要求。Angeloudis 等<sup>[8]</sup>的研究对清水池进水流道进行改造,通过抬高进水口处池底,形成池底坡度,随水流方向生成渐变的过水断面,有效改善流动特性。由图 3(b) 下方的纵向流线图可知,清水池前端廊道流线在纵向方向扰动明显,在清水池后部廊道水流恢复为二维流动,纵向深度上,水流混合度大大减弱,直到容器出口。在清水池后半段廊道拐角处对应的水深底部,相较于水深中部,出现明显的流线混合扰动现象,易导致池底沉积物泛起,影响出水水质。由图 3 可知,在廊道拐弯处,导流板背水面有循环流存在,易形成滞水区。

#### 2.1.2 消毒剂粒子运动轨迹

为探明消毒剂在水中的流动规律,明晰流场的水力运输效率和消毒剂的使用效率,利用离散相 (DPM) 模型,将消毒剂粒子视为独立分散的颗粒进行模拟,选取 6 种具有代表性的粒子,计算模拟得出颗粒在已知流场内的完整运动轨迹,如图 4 所示。轨迹线的颜色表示粒子在池中停留时间的长短,由蓝到红,停留时间逐渐增大。结果表明,粒子在水平和纵向深度上均明显流动,如图 4(b)、4(d) 和 4(f) 所示。图 4(a)、4(c) 和 4(e) 显示,回流的存在会影响粒子在清水池内的流动,粒子进入回流区后,需经过相对较长的时间才能离开。第 1 廊道存在大涡流,使部分进水在此廊道中循环往复流动,导致消毒剂在第 1 廊道内停留时间过长。图 4(a) 中粒子在清水池中的运动轨迹显示,该粒子在第 1 和第 2 廊道内循环,无法挣脱回流进入后续流动,在清水池出水口未观测到该粒子逃逸路径,严重影响后段消毒效率。

### 2.2 导流板数量和长度对流态的影响

清水池的导流板数量(廊道数)和导流板长度是影响其水力特性的重要因素之一<sup>[9-10]</sup>。图 5 (a)、5(b) 和 5(c) 分别对比 9 个、7 个、19 个廊道

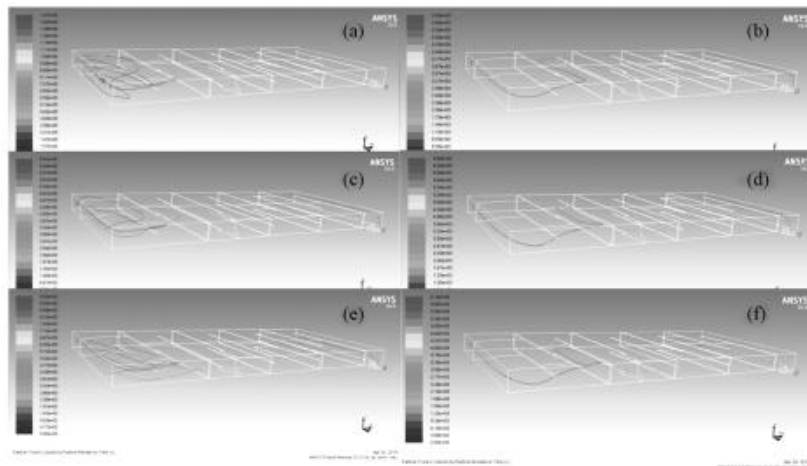


图4 6种代表性粒子在清水池中的粒子运动轨迹

Fig. 4 Motion Trajectory of Six Representative Particles in Clear Water Reservoir

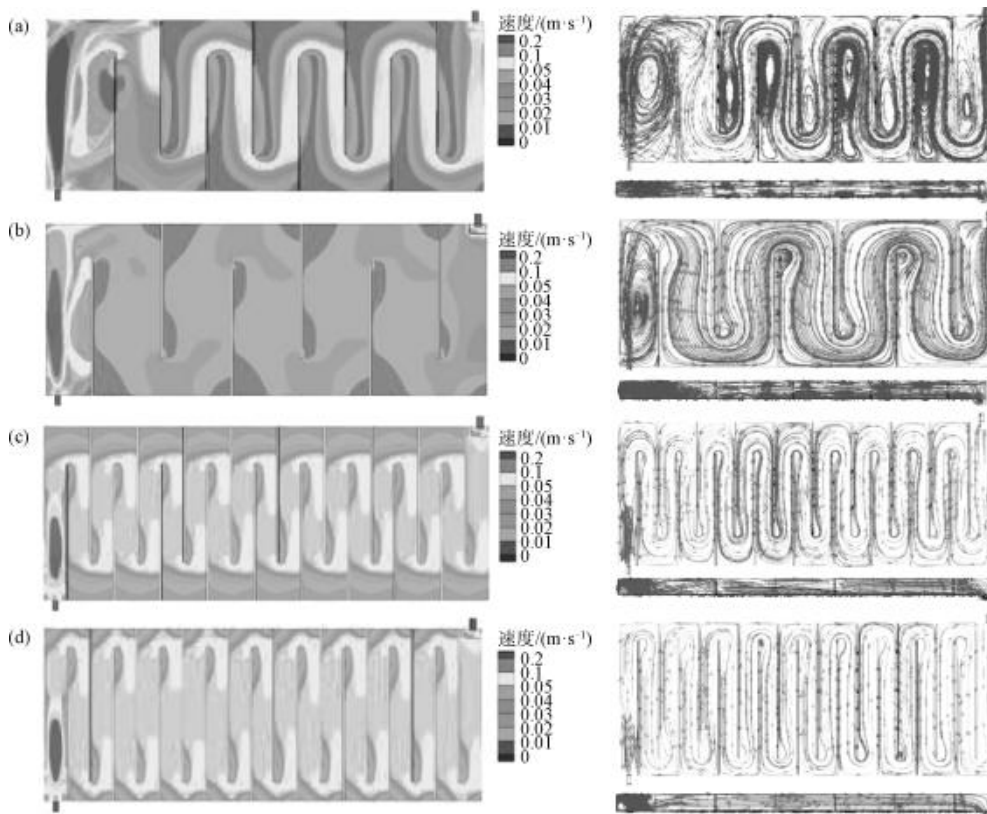


图5 清水池在不同导流板数量(导流板数 a:8个;b:6个;c:18个)和长度条件  
 (单个导流板长度 a:27 m;b:31 m)下的速度等值线图(左侧)和流线图(右侧)

Fig. 5 Velocity Contour (Left) and Streamlines (Right) with Different Guide Plate Numbers  
 (a: 8; b: 6; c: 18) and Lengths (a: 27 m; b: 31 m) in Clear Water Reservoir

数的清水池的速度等值线图 and 流线图。导流板数量减少时,由于过水断面增大,流速放缓,清水池流场内部存在面积较大的滞留区。这些滞留区的存在直接影响清水池的水力效率<sup>[11]</sup>,如图5(b)所

示。增加导流板数量,过水断面减小,流速相应提高。图5(c)结果显示,增加廊道数使清水池直道部分的流动均匀性变好,第1个廊道中的大涡流消失,水力效率提升,流线纵向扰动减少,清水池

的流动逐渐接近推流模型,水力条件向理想状态靠拢。图 5(c)和 5(d)通过对比相同导流板数、不同导流板长度的 2 种清水池工况,探究导流板长度对清水池水力特性的影响。图 5(c)为导流板长度较短的计算模拟结果,直道宽度为 4 m,弯道宽度为 8 m。图 5(d)为导流板长度较长的计算模拟结果,直道宽度为 4 m,弯道宽度也为 4 m。结果显示,增加导流板长度,可使弯道部分(导流板终点至池壁区域)滞留区面积大大缩小,此外,直道均匀流动部分的面积也有所增加。但对靠近弯道部分的导流板背水面(非弯道区域)滞留区来说,增加导流板长度作用不大。增加导流板长度使流线长度的差异性减小,相较于短的导流板,有效避免了短流发生。总体上,增加导流板长度使整个清水池的水流均匀性显著提高。

### 2.3 导流板布置方式和进出水管位置对流态的影响

在实际工程建设中,导流板一般沿着清水池长度或宽度方向平行布置,形成蛇形廊道。本研究在保证相同廊道宽度的前提下,将部分导流板垂直布置,划分出更多小廊道,建立另外一种清水

池几何模型。图 6(a)和 6(b)显示了清水池在不同导流板布置条件下的速度等值线图 and 流线的模拟计算结果。通过对比 2 种不同导流板布置的清水池的流态特征,发现导流板平行布置的流态分布更均匀,形成较少的涡流区域。由图 6(b)可知,相较于平行布置方式,垂直布置方式使弯道数增加,直流区域面积减小。垂直布置方式中,单个过流廊道的长宽比减小,从“长窄型”向“短宽型”变化,廊道长宽比的变化和拐角的增多导致水流在拐角混合处偏离推流流态,单个廊道中循环流的形成,需很长时间才能进入下一个廊道流动,且大体积循环流的存在使得廊道中的有效过水断面减小。杜志鹏等<sup>[12]</sup>在对清水池有效水力停留时间的影响因素的研究中,也得出转弯数越少,水力效率越高的结论。因此,在对清水池的导流板布置进行设计时,一方面需考虑增加廊道数对水力条件的正面影响;另一方面也要考虑弯道数对流态的不利影响。

为探究清水池的进出水管位置在水平方向上对清水池的水流特性影响,将进、水管的位置分别设在清水池对角线或进、出水廊道宽度方

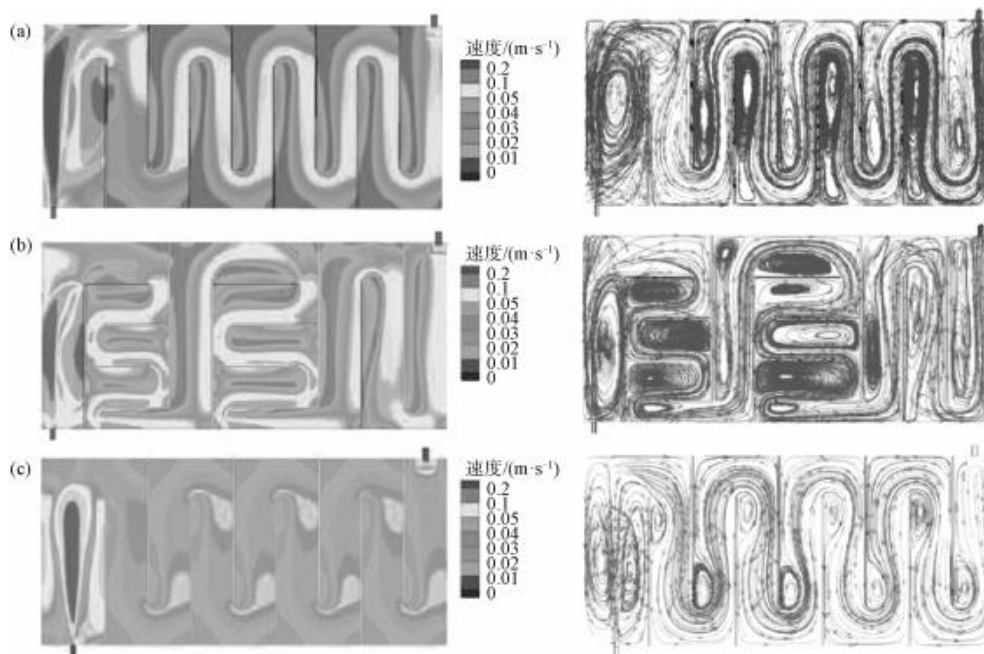


图 6 清水池在不同导流板布置(a:典型简化;b:导流板垂直布置)和进出水管位置(a:在清水池对角线;c:在进出水廊道的中心线上)条件下的速度等值线图(左侧)和流线图(右侧)

Fig. 6 Velocity Contour (Left) and Streamlines (Right) with Different Guide Plate Arrangements (a: Typical Simplify; b: Vertical Arrangement of Guide Plates) and Inlet and Outlet Positions (a: on the Diagonal of the Clear Water Reservoir; c: on the Center Line of the Corridor) in Clear Water Reservoir



向的中心线上,速度等值线图 and 流线的计算模拟结果如图 6(a) 和 6(c) 所示。由图 6(c) 可知,将进水管道设置在廊道中心线上,池内水流(尤其是清水池后段)的均匀性显著提高,速度分布更加均匀,导流板背水面的低速滞留区面积减小。结合图 6(c) 流线图,第 1 个廊道由于宽度较大,循环流仍存在,大体积涡流分解成 2 个小循环流,第 2 个廊道向第 1 个廊道回流的情况基本消失。清水池后段,廊道内流线向各自廊道中心偏移。导流板背水面的循环流面积减少,有效过水断面增加,单一廊道内部流速放缓,分布更加均匀,水力效率提升。因此,清水池进出口水管位置布置的修正意义重大。仅对进出口位置稍作调整,可以在不增加任何经济投入的条件下,改善流态特性,提高水力效率,从而优化消毒条件。本文中的案例清水池,其进出水管位置原设在清水池的对角线上,偏离廊道中心,看似给了进水流体一个最大的流程,却没有考虑水流的流态带来的影响。本研究的 CFD 模拟显示,如果将其进水管位置设在廊道中心,能更大程度地提高清水池的水力效率。

## 2.4 实际清水池构筑中的结构柱对流态的影响

在实际工程中,由于清水池体积大、土地覆盖面积大,常需设置大量的支撑柱来维持清水池物理结构的稳定性。但这些结构柱在对清水池进行建模求解前,常被简化忽略以降低模型复杂性,减小计算工作量。本研究将案例清水池的结构柱考虑进来,探讨结构柱的存在对水流状态的影响。结构柱如图 1(a) 清水池设计图布置,柱子简化为正方形截面立柱柱,边长为 0.3 m,间隔 4 m 排列,共 88 根(不考虑廊道隔板重合的结构柱)。典型简化清水池[图 7(a)]和结构柱存在情况[图 7(b)]的清水池速度等值线图和流线的模拟结果表明,结构柱的存在会显著影响清水池的水力特性。当结构柱存在时,沿着廊道流动的水体在遇到结构柱后水流方向改变,在水平和纵向方向均产生了流线扰动的现象,严重偏离典型简化模型。另一方面,结构柱的存在可明显减少导流板靠近弯道背水面的涡流区域。因此,在对清水池相关的实际问题建模求解时,应将结构柱考虑进几何模型,从而减小模拟结果与实际流态的偏差。

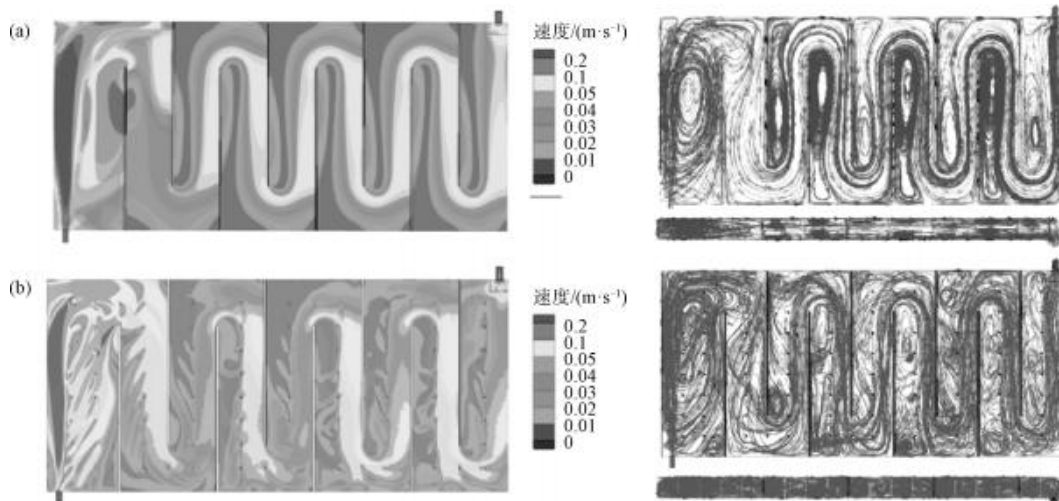


图 7 清水池在有(b)无(a)结构柱存在条件下的速度等值线图(左侧)和流线图(右侧)

Fig. 7 Velocity Contour (Left) and Streamlines (Right) with (b) or without (a) Structural Columns in Clear Water Reservoir

## 2.5 清水池不同内部构造对停留时间的影响

停留时间分布通常用来反映非理想反应器偏离理想反应器的程度<sup>[13-14]</sup>。研究表明,消毒剂粒子的停留时间受实际水力条件的影响,往往偏离理论停

留时间<sup>[15]</sup>。本研究主要探讨典型简化清水池(2.1节)、导流板垂直布置方式(2.3节)和结构柱存在条件下(2.4节)的 3 种清水池工况,消毒剂粒子的停留时间分布,进口流速分别设置为 1.2 m/s 和 2.0 m/s,模拟结果如图 8 所示。本案例单格清水池单格容积

为  $10\ 670\ \text{m}^3$ , 当进水流速为  $1.2\ \text{m/s}$  时, 理论水力停留时间  $T_{1.2} = V/Q_{1.2} \approx 3.14\ \text{h}$ , 水力效率值  $T_{10}/T = 1.23/3.14 = 0.39$ ; 当进口流速为  $2.0\ \text{m/s}$  时, 理论水力停留时间  $T_{2.0} = V/Q_{2.0} \approx 1.89\ \text{h}$ ,  $T_{10}/T = 0.76/1.89 = 0.40$ 。图 8 结果显示, 3 种工况中, 典型简化清水池的实际停留时间最接近理论值。导流板垂直布置导致较多循环流的存在, 使粒子在池内的停留时间变长, 当进水流速为  $1.2\ \text{m/s}$  时, 导流板垂直布置  $T_{10}/T = 1.51/3.14 = 0.48$ , 水力效率值提升 23%; 当进水流速为  $2.0\ \text{m/s}$  时, 导流板垂直布置  $T_{10}/T = 0.85/1.89 = 0.45$ , 水力效率值提升 13%。推测这是由于导流板垂直布置时与典型简化模型相比廊道数增加, 由 2.2 节讨论可知, 廊道数的增加可有效减少

短流现象, 从而提升水力效率。图 8 显示, 结构柱的存在导致清水池停留时间分布曲线后移, 这是由于结构柱的存在影响粒子流动, 池内流线复杂, 但可有效减缓导流板靠近拐角背水面的循环流现象。由图 8(a) 结构柱存在情况下的累积曲线可知, 当累积频率为 1.0, 即粒子全部流出清水池的时间大于 10 h 时, 小部分粒子无法流出水池。当结构柱存在的情况下, 进水流速为  $1.2\ \text{m/s}$  时,  $T_{10}/T = 1.62/3.14 = 0.51$ , 水力效率值与简化模型相比提高 31%; 进水流速为  $2.0\ \text{m/s}$  时,  $T_{10}/T = 1.04/1.89 = 0.55$ , 水力效率值提高 38%。因此, 在工程设计实践中, 应考虑廊道数对水力效率的影响; 在对清水池进行 CFD 建模求解时, 不应将结构柱这一重要因素简化忽略。

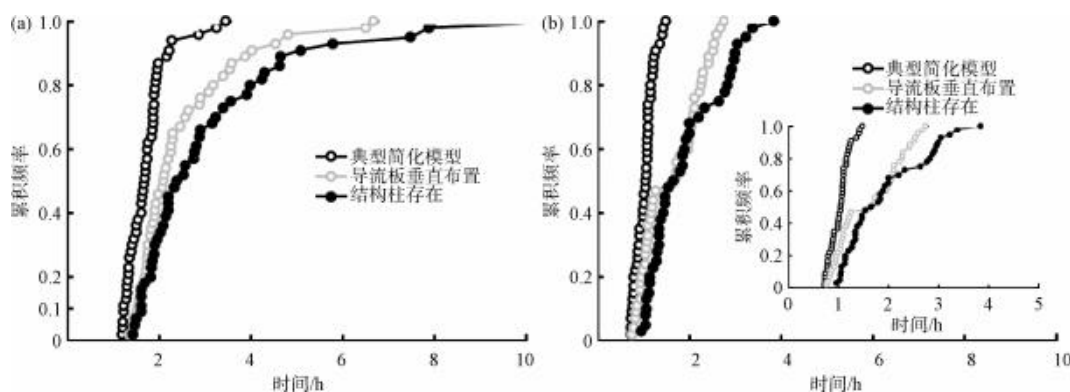


图 8 典型简化模型、导流板垂直布置和结构柱存在情况下的粒子停留时间分布  
(a: 入口流速为  $1.2\ \text{m/s}$ ; b: 入口流速为  $2.0\ \text{m/s}$ )

Fig. 8 Particle Residence Time Distribution under Typical Simplified Model, Vertical Arrangement of Guide Plate and the Presence of Structural Columns (a: Inlet Velocity  $1.2\ \text{m/s}$ ; b: Inlet Velocity  $2.0\ \text{m/s}$ )

### 3 结论

本研究对案例清水池的典型简化模型和 6 种变式清水池的水力特性进行了 CFD 模拟, 明确了清水池的三维结构对流场流态和颗粒扩散的影响, 结论归纳如下。

(1) 清水池入口第 1 个廊道水流流速大, 有效过水断面小, 导致水体出现回流现象; 导流板的背水面及弯道拐角区域有循环流存在, 易形成滞留区。

(2) 增加导流板数目和长度, 将清水池进出水口设置在进出水廊道中心, 可减少短流发生, 使水流更接近理想推流模型, 有利于提高清水池水力消毒效率。

(3) 清水池廊道内结构柱的存在会显著改变清水池水力效率, 在水平和纵向方向均产生了流线扰动现象。因此, 在对清水池实际问题建模求解时, 应将结构柱考虑进几何模型, 以减小模拟结果与实际

流态的偏差。

### 参考文献

[ 1 ] 住房和城乡建设部. 室外给水设计标准: GB 50013—2018 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

[ 2 ] SHIONO K, TEIXEIRA E C. Turbulent characteristics in a baffled contact tank [J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38 (6): 271-278.

[ 3 ] BISHOP M M, MORGAN J M, JAMISON C D K. Drinking water and health: Balancing risks || Improving the disinfection detention time of a water plant clearwell [J]. Journal, 1993, 85 (3): 68-75.

[ 4 ] 马强. 清水池节能与氯消毒优化设计研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

[ 5 ] ZHANG J, TEJADA-MARTÍNEZ A E, ZHANG Q. Developments in computational fluid dynamics-based modeling for disinfection technologies over the last two decades: A review [J]. Environmental Modelling & Software, 2014 (8): 71-85.



- [6] ISSAKHANIAN E, SAEZ J A, HELMNS D, et al. Full simulation of disinfection stage in a water recycling plant using low-cost, hybrid 3-dimensional computational fluid dynamics[J]. *Water Environment Research*, 2019,91(8):177-184.
- [7] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [8] ANGELOUDIS A, STOESSER T, GUALTIERI C, et al. Contact tank design impact on process performance[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2016,21(5):563-576.
- [9] 张硕,王如华,邹伟国. 基于CFD的清水池水力特性研究[J]. *中国给水排水*, 2010(21):80-83.
- [10] 刘文君,崔磊. 应用计算流体力学优化清水池水力效率[J]. *中国给水排水*, 2005(5):1-5.
- [11] 王虹,彭期冬,靳宝华. 蛇形消毒池模型浓度场试验研究[J]. *水力发电学报*, 2004(5):76-79.
- [12] 杜志鹏,刘文君,张素霞,等. 清水池有效水力停留时间的影响因素[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007(12):2139-2141.
- [13] ANGELOUDIS, ATHANASIOS. Numerical and experimental modelling of flow and kinetic processes in serpentine disinfection tanks[D]. Cardiff: Cardiff University, 2014.
- [14] 戚以政,汪叔友. 生化反应动力学与反应器[M]. 北京:化学工业出版社, 1996.
- [15] PORTER R L, STEWART K P, FEAGIN N, et al. Baffling efficiency insights gained from tracer studies at 32 Washington treatment plants [J]. *Awwa Water Science*, 2019(1). DOI: 10.1002/aws2.1115.

**【本文点评】**清水池作为供水安全的重要环节,往往由于非处理单元而被忽视。论文将计算流体力学(CFD)三维建模引入清水池的水力效率和消毒过程的研究中。通过1种典型清水池和6种变式清水池的CFD模拟,从改进清水池结构设计、优化水流流态出发,模拟流态水力条件、消毒剂扩散路径和停留时间,为提高清水池的水力效率,优化清水池的设计和改造提供理论依据。论文选题针对水厂实际问题,具有理论意义和实用价值,研究方法可以借鉴,计算分析合理,撰写规范,研究成果为水厂清水池的设计和改造提供了参考。

(上接第12页)

- [44] CARSTEA E, POPA C, BAKER A, et al. In situ fluorescence measurements of dissolved organic matter: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134361. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134361.
- [45] ZHAO Z, GU J, LI H, et al. Disinfection characteristics of the dissolved organic fractions at several stages of a conventional drinking water treatment plant in Southern China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009(2-3): 1093-1099.
- [46] HYUN-CHUL K, YU M. Characterization of aquatic humic substances to DBPs formation in advanced treatment processes for conventionally treated water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007(1-2): 486-493.
- [47] DAVIS W, ERICKSON C, JOHNSTON C, et al. Quantitative Fourier transform infrared spectroscopic investigation of humic substance functional group composition [J]. *Chemosphere*, 1999, 38(12): 2913-2928.
- [48] RODRIGUEZ F, NUNEZ L. Characterization of aquatic humic substances[J]. *Water and Environment Journal*, 2011, 25(2): 163-170.
- [49] HER N, AMY G, CHUNG J, et al. Characterizing dissolved organic matter and evaluating associated nanofiltration membrane fouling[J]. *Chemosphere*, 2008(3): 495-502.
- [50] 刘新超,李俊,谢丽,等. 腐植酸表征方法研究进展[J]. *净水技术*, 2009, 28(3): 6-9, 22.
- [51] LAM B, BAER A, ALAEE M, et al. Major structural components in freshwater dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(24): 8240-8247.
- [52] MAO J, CAO X, OLK D, et al. Advanced solid-state NMR spectroscopy of natural organic matter[J]. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 2017(3): 17-51.
- [53] LI C, WANG D, XU X, et al. Tracking changes in composition and amount of dissolved organic matter throughout drinking water treatment plants by comprehensive two-dimensional gas chromatography-quadrupole mass spectrometry[J]. *Science of the Total Environment*, 2017(24): 123-131.
- [54] 罗崇佳,陈浩,廖振良. 三维荧光与高分辨率质谱技术在溶解性有机物结构解析中的研究进展[J]. *能源环境保护*, 2018, 32(5): 1-6.
- [55] STENSON A, MARSHALL A, COOPER W. Exact masses and chemical formulas of individual Suwannee River fulvic acids from ultrahigh resolution electrospray ionization Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectra [J]. *Analytical Chemistry*, 2003(6): 1275-1284.
- [56] ZHANG H, ZHANG Y, SHI Q, et al. Characterization of low molecular weight dissolved natural organic matter along the treatment trait of a waterworks using Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry [J]. *Water Research*, 2012, 46(16): 5197-5204.