

# 斜板沉淀池前配水渠的数值模拟及结构优化

姚娟娟, 宋莉莉, 刘存

(重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045)

**摘要:** 针对配水渠出水优化措施单一、优化效果欠佳的问题, 运用 CFD 软件, 采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型对其流速场进行数值模拟, 探究了进口宽度 ( $b$ ) 和配水渠宽度 ( $B$ ) 变化时出水均匀度最优的配水渠长度 ( $L$ ), 并优化了挡墙在双段配水渠中的最佳位置。结果表明: 配水渠进口集中主流在池内流域空间的扩散程度是出水均匀度的主要影响因素; 当  $b$  在 1 200 ~ 1 600 mm 范围时,  $L$  取 1 750 ~ 2 250 mm 时的出水均匀度最优, 若  $b$  大于 1 600 mm, 最优的  $L$  值须适当增加, 但不应大于 3 000 mm; 当  $B$  为 3 900 mm 时,  $L$  最佳取值为 1 750 ~ 2 250 mm, 当  $B$  为 5 300 或 6 700 mm 时, 最佳的  $L$  值应增加 500 mm 左右; 采用双段配水渠时, 挡墙位置应设在进口侧, 而不应在配水渠的中间位置。该研究可为配水渠的设计提供一定的理论指导。

**关键词:** 配水渠; 网格絮凝池; 斜板沉淀池; 计算流体力学; 流速场; 结构优化

中图分类号: TV131.2; TU991.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0120-07

## Numerical simulation and structural optimization of water distribution channel between the flocculation tank and sedimentation tank with inclined plate settler

YAO Juanjuan, SONG Lili, LIU Cun

(College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** In view of the limited optimization measures of the outflow and their unsatisfactory effects in the design of water distribution channels, we adopted Realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model in CFD software to simulate its velocity field. In the simulation we explored the water distribution channel length ( $L$ ) for the optimal outflow uniformity with changing inlet widths ( $b$ ) and water distribution channel widths ( $B$ ), and optimized the position of sectioning wall in double sectioned water distribution channel. The simulation results indicated that the diffusion of the mainstream at the entrance of the distribution channel was the main factor affecting the uniformity of the outflow. The optimization results showed that, when  $b$  was in the range of 1 200 - 1 600 mm, the outflow uniformity of the distribution channel was optimal when  $L$  was 1 750 - 2 250 mm. If  $b$  was greater than 1 600 mm, the optimal  $L$  should be increased accordingly, but not more than 3 000 mm. When  $B$  was 3 900 mm, the optimal  $L$  was 1 750 - 2 250 mm, and when  $B$  was 5 300 or 6 700 mm, the optimal  $L$  should be increased by about 500 mm. When double sectioned distribution channel was used, the sectioning wall should be constructed close to the inlet instead of in the middle of the channel. This study can provide some theoretical guidance for the design of water distribution channels.

**Key words:** water distribution channel; grid flocculation tank; sedimentation tank with inclined plate settler; computational fluid dynamics (CFD); velocity field; structural optimization

### 1 研究背景

配水渠(或称过渡段)是连接絮凝池和沉淀池

的中间构筑物,其作用在于保证配水的均匀性和提高沉淀效果<sup>[1-2]</sup>。而沉淀效果的好坏将直接影响最终出水的水质、后续水处理工艺的运行负荷以及制

收稿日期:2019-12-11; 修回日期:2020-02-15

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51108481);中央高校基本科研业务费资助项目(106112016CDJXY210008);重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyj AX0206)

作者简介:姚娟娟(1982-),女,四川隆昌人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水处理理论与技术。

水成本的高低<sup>[3]</sup>。为了提高配水的均匀度,学者们通常采用传统的纯理论计算方法,对配水渠的流态进行控制优化<sup>[4-5]</sup>。但是理论计算只能对流场的主要特征进行求解,缺乏对流场局部特征的量化表达<sup>[6]</sup>。近年来,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)逐渐被应用于水处理领域。对于不同的水处理单元,CFD 的研究与应用深度不同,絮凝、沉淀、消毒过程以及活性污泥反应器的相关研究与日俱增,但是关于配水渠的研究相对较少<sup>[7-10]</sup>。采用 CFD 软件对配水渠进行数值模拟,可获得流场内的流速分布及其随时间的变化情况,对优化配水渠的设计和沉淀的效果有着重要意义。贺卫宁等<sup>[11]</sup>对微涡流絮凝池和平流沉淀池之间的配水渠进行了三维单相流模拟,通过在进、出口之间安装弧形导流板来改善配水渠内的流速分布,使得沉淀池的进水均匀度明显提升。

目前仍缺乏对其他絮凝沉淀池型之间配水渠及其结构尺寸优化设计方面的研究。由于网格絮凝/斜板(管)沉淀工艺被广泛地应用在中小型规模的给水处理厂中<sup>[12-14]</sup>。所以本研究选取网格絮凝池与斜板沉淀池中间的配水渠为研究对象,运用 CFD 软件对其进行三维单向流稳态模拟,以获取出流均匀度最佳的结构尺寸优化方案。

## 2 数学模型

### 2.1 几何模型

絮凝池-配水渠-沉淀池系统的布置形式如图 1 所示。由于配水渠内部的流动属于三维运动,因此需建立三维模型反映其流态分布,配水渠三维几何模型示意图如图 2。考虑到网格絮凝池出水口和沉淀池进水孔口的布置均具有对称性,本研究取镜面对称简化后的配水渠作为研究对象,简化后的几何尺寸见表 1。

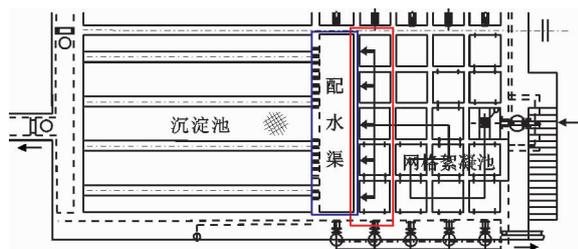


图 1 絮凝池-配水渠-沉淀池系统布置形式

### 2.2 湍流模型和控制方程

基于配水渠回流明显,流线弯折曲率较大的特点,湍流模型选择 Realizable  $k-\varepsilon$  模型。该模型在

标准  $k-\varepsilon$  模型基础上增加了 1 个湍流黏性公式,且耗散率运输方程从精确的方程中推导得到,可以实现使流体在较小流域空间中符合湍流的发展情况。控制方程为连续方程、动量方程、湍动能方程以及湍动能耗散率方程<sup>[15-17]</sup>,现列出湍动能方程和湍动能耗散率方程如下:

$$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_\kappa \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>;  $\kappa$ 为湍动能,J;  $\varepsilon$ 为湍动能耗散率,%;  $\sigma_\kappa$ 和  $\sigma_\varepsilon$ 为相应的普朗特数;  $G_\kappa$ 为流速梯度引起的湍流动能,J;  $G_b$ 为浮力引起的湍动能产生项,J;  $Y_M$ 为可压湍流中脉动扩张项,J;  $\mu_t$ 为湍流涡黏系数;  $S_\kappa$ 和  $S_\varepsilon$ 为用户定义源项;  $C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$  ( $\eta = \frac{S_\kappa}{\varepsilon}$ ,  $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ );  $C_2$ 、 $C_{1\varepsilon}$ 和  $C_{3\varepsilon}$ 均为常数,其中  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_2 = 1.9$ 。

表 1 配水渠简化几何模型尺寸

项目	尺寸/mm
配水渠长度 $L$	1000 ~ 4000, 增量 250
配水渠宽度 $B$	3900、5300、6700
进口宽度 $b$	1200、1400、1600、2000
配水渠高度 $H$	3370
进口高度 $h$	420

### 2.3 边界条件

(1) 进口边界条件:采用流速进口(velocity-inlet),进口流速  $v$  根据《室外给水设计标准》(GB 50013-2018)设置为 0.1 m/s。进口湍流选择 intensity and hydraulic diameter,其中湍流强度  $I$  设置为 5%,水力直径  $D$  设置为 0.8 m。

(2) 出口边界条件:由于配水渠出口处流态发展完全,属于自由出流(outflow)。

(3) 壁面边界条件:选择刚体无滑移(no slip)的边界条件,不考虑摩擦力的影响。

(4) 配水渠液面基于刚盖假设原理,不考虑液面的竖向流速,设置为 symmetry 类型。

(5) 模型求解选择稳态(steady)控制方式,求解算法采用较为成熟稳定的 Simple 算法。

### 2.4 网格独立性测试

使用 ICFM CFD 软件对配水渠进行结构网格划

分,见图3。网格数量依据最大全局尺寸的不同划分为4个梯度来对网格独立性进行测试,具体参数见表2。提取直线  $x = 0.7\text{ m}$ ,  $z = 1.1\text{ m}$  上均匀分布的15个点的流速值和直线  $x = 0.8\text{ m}$ ,  $y = 1.6\text{ m}$  上均匀分布的15个点的湍动能值,分别绘制不同网格数量下其随坐标的变化曲线,结果见图4。

表2 配水渠模型网格参数表

编号	最大全局尺寸	网格数
1	120	107781
2	80	339841
3	60	789709
4	40	1093280

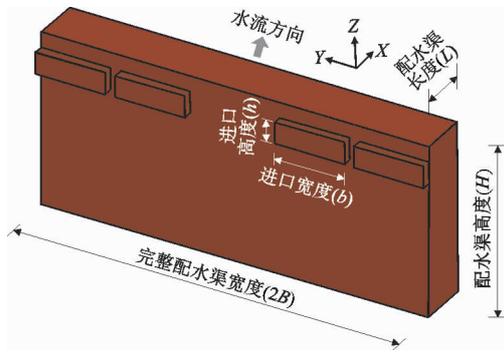


图2 配水渠三维几何模型示意图

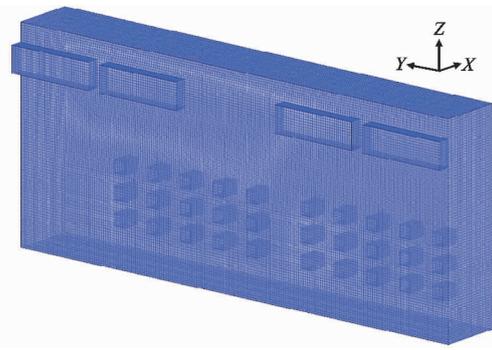


图3 配水渠几何模型的六面体结构网格划分图

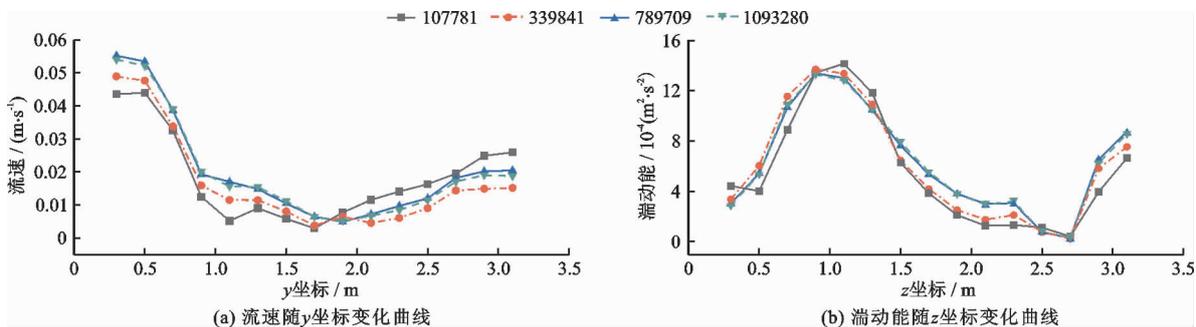


图4 不同网格数量下流速及湍动能随坐标的变化曲线

由图4可知,网格数量为789709个时,各监测位置上的流速值和湍动能值的波动逐渐变小,模拟流场趋于稳定,已基本满足使用要求。为达到更为精确的效果,在现有的计算性能条件下,选取网格数量为1093280个(即最大全局尺寸为40mm)的方案,进行后续的求解和分析研究。

### 2.5 配水渠出水均匀度评价指标

采用流速变异系数  $C_V$  值来表征配水渠的出水均匀度<sup>[18]</sup>,  $C_V$  值越小,流速分布则越均匀,其计算公式如下:

$$C_V = \frac{S}{\bar{V}} \times 100\% \quad (3)$$

$$S = \left[ \sum (V_i - \bar{V})^2 / (n - 1) \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中: $S$  为标准偏差,  $m/s$ ;  $V_i$  和  $\bar{V}$  分别为第  $i$  个流速值和流速平均值,  $m/s$ ;  $n$  为采样数量。

## 3 模型验证

以配水渠前端网格絮凝池竖井为5个并排布置

时的情况设计实验所用装置。所用的配水渠原型尺寸为  $b = 1400\text{ mm}$ ,  $B = 3900\text{ mm}$ ,  $L = 2250\text{ mm}$ ,  $H = 3370\text{ mm}$ ,  $h = 420\text{ mm}$ ,根据  $F_r$  相等得到模型长度比尺为10,进口流速为  $0.03162\text{ m/s}$ 。采取脉冲示踪法对模型进行验证,在配水渠入口处瞬间投入  $3.42\text{ g}$  饱和  $KCl$  溶液作为示踪剂,并在配水渠出口断面测量电导率。将测得的电导率换算成相应的示踪剂浓度后,绘出水力停留时间曲线图,如图5所示。

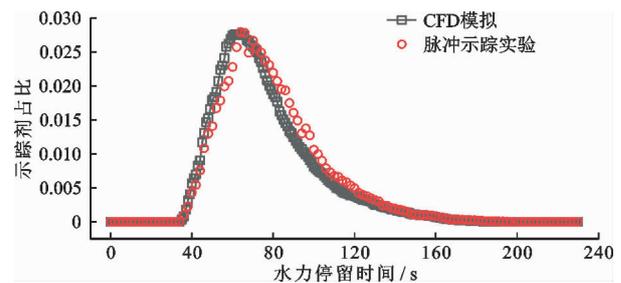


图5 示踪剂浓度-水力停留时间曲线图

由图5可知,通过脉冲示踪实验与CFD模拟两种方式,得到的配水渠出口处示踪剂浓度随时间变

化的规律具有的高度一致性,浓度峰值均在 62 s 左右,并且于 180 s 左右时归零。另外,由公式(5)可得脉冲实验和模拟结果的平均停留时间分别为 82.35 和 79.49 s,误差为 3.6%。由此可知,CFD 模拟与实际测量的水力条件吻合较好,模型可以真实可靠地反映配水渠内部的实际水力情况。

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i E(t_i)}{\sum_{i=1}^n E(t_i)} \quad (5)$$

式中: $\bar{t}$  为平均停留时间,s; $t_i$  为第  $i$  个采样点的时间,s; $E(t_i)$  为  $t_i$  停留时间概率密度。

## 4 配水渠的数值模拟及结构优化

### 4.1 配水渠进口宽度对出水均匀度的影响

配水渠的进口宽度  $b$  通常与网格絮凝池单个竖井的边长相等,以此来保证网格絮凝池末端竖井的出流流速在规范范围内,避免流速增大而导致絮体破碎。本研究在配水渠宽度  $B = 3\ 900\ \text{mm}$  条件下,选取  $b = 1\ 200、1\ 400、1\ 600、2\ 000\ \text{mm}$  4 种进口宽度,探究在不同进口宽度下,配水渠出流均匀度最优时对应的配水渠长度  $L$  ( $L$  为网格絮凝池至斜板沉淀池方向对应的长度)。其中进口宽度  $b = 1\ 400\ \text{mm}$  时的模拟结果见图 6、7。

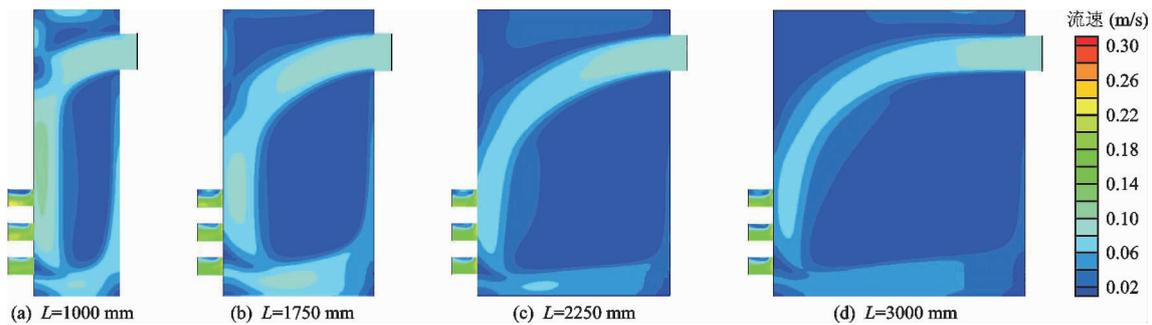


图 6  $B = 3\ 900\ \text{mm}$ 、 $b = 1\ 400\ \text{mm}$  时不同配水渠长度  $L$  的进口主流扩散过程对比

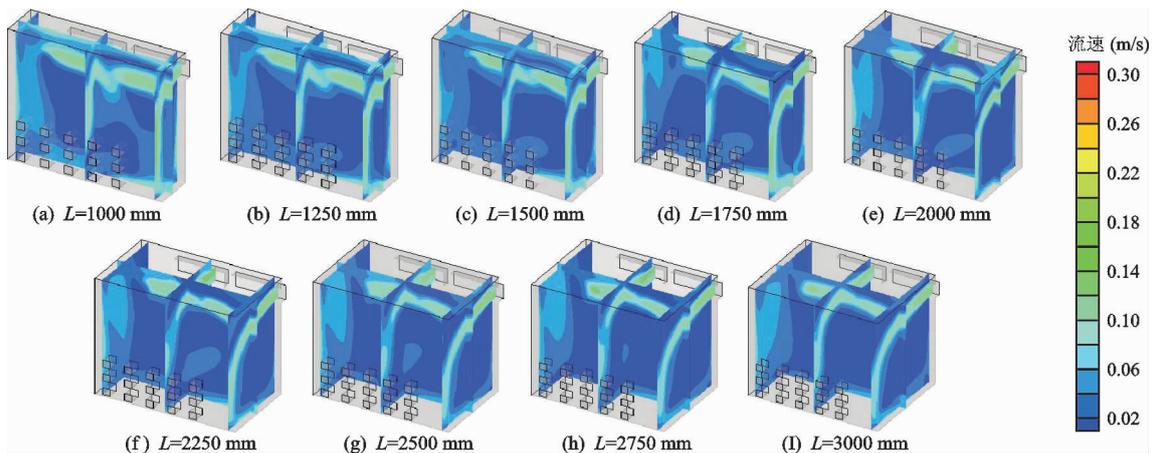


图 7  $B = 3\ 900\ \text{mm}$ 、 $b = 1\ 400\ \text{mm}$  时不同配水渠长度  $L$  的配水渠流速分布多切面云图

由图 6 可以看出,配水渠进口的主流沿配水渠长度方向发展为一道高速流水舌。当  $b = 1\ 400\ \text{mm}$  时,主流水舌随着  $L$  的增加始终都与出口端面相贴合,并在底部形成明显的回流曲线。当  $b$  为  $1\ 600\ \text{mm}$  或  $2\ 000\ \text{mm}$  时(由于篇幅所限,文中省略配水渠流速分布图),水舌随着  $L$  的增加,逐渐脱离出口端面,同样在配水渠底部发生弯曲回流。

从图 7 知,越靠近进口位置,水舌流态愈明显,配水渠底部的水舌回流强度越高;越接近配水渠镜面位置,水舌流型越模糊,且水舌在出口近壁面的延

伸路程越短。在 4 组模拟工况中(省略其他 3 个进口宽度工况的配水渠流速分布),水舌向下弯折,水舌的上方区域和下方区域形成显著的慢速流区,在上方慢速流区中,对应进口的出口近壁面处,其流速为出口端面流速最小的区域。

$b = 1\ 400\ \text{mm}$ 、 $L = 1\ 000\ \text{mm}$  时的配水渠出口断面的流速分布云图如图 8 所示,提取各个孔口出口的断面流速来评测其结构的合理性,并绘制流速  $C_v$  值随配水渠长度  $L$  的变化曲线,见图 9。

由图 9 可以发现,随着  $L$  的增加,流速分布越来越

越均匀,但 $L$ 增大到一定值后均匀度有所下降。具体表现为:对于 $b$ 为1 200 mm的研究组,在 $L$ 为2 000 mm的模拟工况中,流速 $C_V$ 值最小,出口流速分布均匀度最高,所对应的 $L$ 最佳范围在1 750 ~ 2 250 mm;对于 $b$ 为1 400 mm的研究组,其流速 $C_V$ 值在 $L$ 为2 000和2 250 mm的工况中最小, $L$ 的最佳范围同上;同理可知,对于 $b$ 为1 600和2 000 mm的研究组, $L$ 的最佳范围分别为2 000 ~ 2 500 mm和2 500 ~ 3 000 mm。另外,对于不同的进口宽度 $b$ ,配水渠在最佳渠长下的流速 $C_V$ 值分别为2.68%,3.12%和4.35%,呈现出上升的趋势,这表明后端沉淀池的来

流布水均匀度越来越低。所以,当 $b$ 增加时, $L$ 应该适当增加以便达到最优的出流效果。

#### 4.2 配水渠宽度对出水均匀度的影响

在给水厂网格絮凝池的设计中,一般有5、7、9个竖井并排布置的形式<sup>[19]</sup>。配水渠宽度 $B$ 的变化,对应着网格絮凝池的3种布置形式。本研究选择 $b$ 为1 400 mm, $B$ 分别为3 900、5 300和6 700 mm,模拟 $B$ 变化对出水均匀度的影响并进行结构优化,探究 $L$ 的最佳范围。其中 $B$ 为5 300和6 700 mm时,数值模拟的配水渠流速分布云图分别见图10和11( $B$ 为3 900 mm时的流速分布云图见图7)。

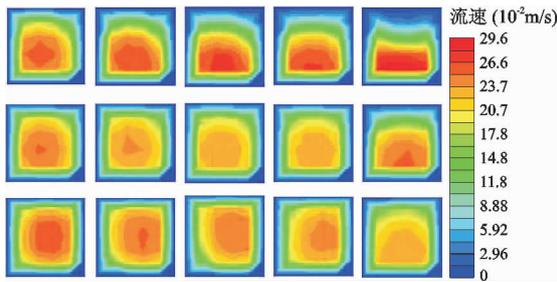


图8 配水渠出口断面流速分布云图  
( $b = 1\ 400\ \text{mm}$ ,  $L = 1\ 000\ \text{mm}$ )

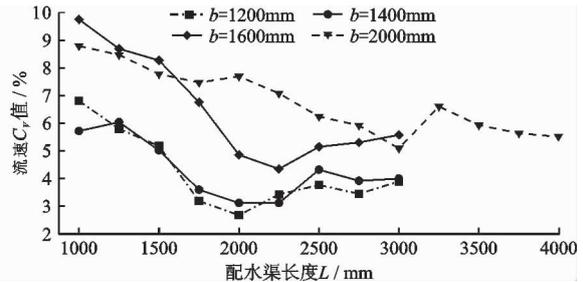


图9 不同进口宽度孔口出口流速 $C_V$ 值随配水渠长度 $L$ 变化曲线

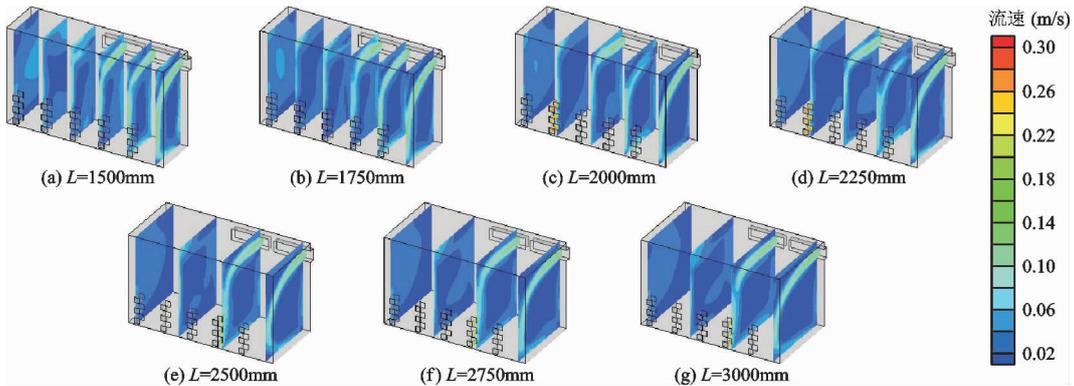


图10  $B = 5\ 300\ \text{mm}$ 、 $b = 1\ 400\ \text{mm}$ 时不同配水渠长度 $L$ 的配水渠流速分布多切面云图

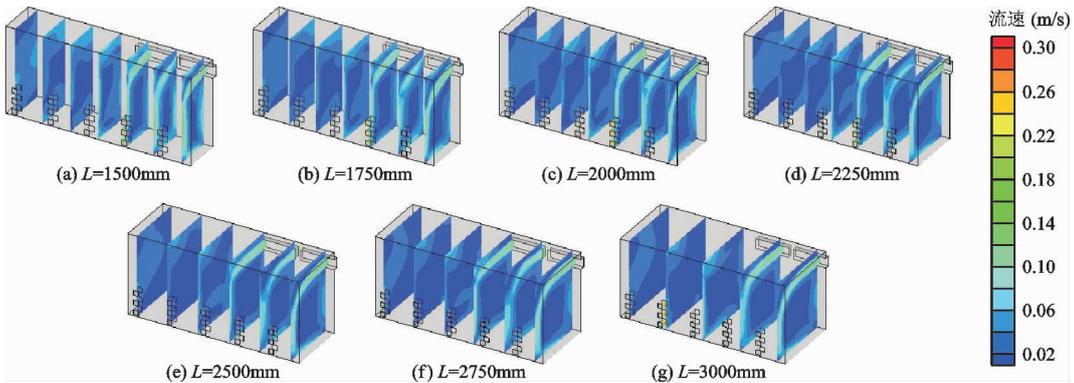


图11  $B = 6\ 700\ \text{mm}$ 、 $b = 1\ 400\ \text{mm}$ 时不同配水渠长度 $L$ 的配水渠流速分布多切面云图

由图10和11可以看出,不同渠宽下的模拟流场的主要特征同图7。在渠宽方向上,流速剖切面

越靠近配水渠对称面位置,流域流速越小,且随着 $B$ 的增大,这一新的慢速流区范围也显著扩大,导致远

离进口的出水孔口相对其他出口流量偏小。

取各个出口的断面流速并绘制流速  $C_V$  值随配水渠长度  $L$  的变化曲线,见图 12。

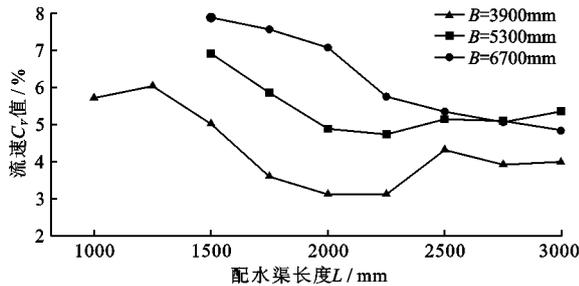


图 12 不同水渠宽度出口流速  $C_V$  值随配水渠长度  $L$  变化曲线

由图 12 可知,  $B$  为 3 900 mm 时,其流速  $C_V$  值在  $L$  为 2 000 和 2 250 mm 的模拟工况中最小,出口流速分布均匀度最高,所对应的  $L$  最佳范围为 1 750 ~ 2 250 mm;同理可知,对于  $B$  为 5 300 和 6 700 mm 时,所对应的  $L$  最佳范围分别为 2 000 ~ 2 500 mm 和 2 500 ~ 3 000 mm。随着  $B$  的增加,出口断面的流速  $C_V$  值整体增大,最小流速  $C_V$  值从 3.12% 上升到 4.74% 和 5.07%,这表明  $B$  越大,其最佳出流条件下出口流速的分布均匀度越低,对应的最佳渠长应适当增大。另外,当  $B$  从 3 900 mm 增加到 5 300 mm 时,即对应着网格絮凝池从 5 个竖井变化到 7 个竖井并排布置时,其出水均匀度降低了 52%,而当  $B$  从 5 300 mm 增加到 6 700 mm 时,即从 7 个竖井变为 9 个竖井并排布置时,出水均匀度仅仅降低 7%,这表明在后期,  $B$  的增加对出水均匀度的影响程度有限。

### 4.3 双段配水渠及其挡墙位置的优化

双段配水渠的出现往往是为了防止短流现象的发生,优化布水效果。选择  $L$  为 2 000 mm,  $b$  为 1 200、1 400、1 600、2 000 mm 的配水渠进行研究,模拟共分为 3 组,挡墙距进口的距离分别为 800 ( $l_1$ )、1 000 ( $l_2$ ) 和 1 200 mm ( $l_3$ )。 $b$  为 1 400 mm 时模拟的配水渠流速分布云图见图 13。

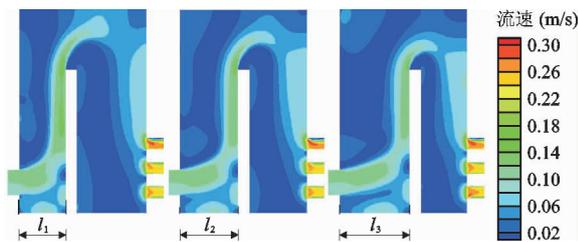


图 13 挡墙距进口不同距离时配水渠流速分布切面云图 ( $L=2\ 000$  mm,  $b=1\ 400$  mm)

由图 13 可以看出,进口的集中来流形成主流水舌,在首段配水渠扩散程度较低;主流翻越挡墙时,在挡墙上方区域的扩散程度加大;在第 2 段配水渠内主流进一步扩散,贴着出口端面一侧向下流动,此时其流速分布已经较为均匀。

提取各个出口断面的流速,计算其流速  $C_V$  值,并与单段配水渠(无挡墙)进行比较分析,其结果如图 14 所示。

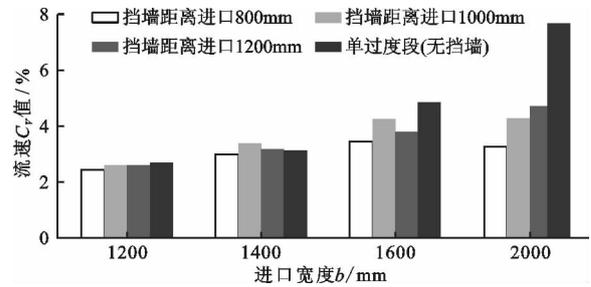


图 14 不同进口宽度下挡墙距进口的距离对出流均匀度的影响

分析图 14 可以发现:(1)当  $b$  为 2 000 mm 时,挡墙的加设对均匀出流贡献了 57% 的提升率;而当  $b$  为 1 200 mm 时,挡墙对均匀出流的效果仅仅提升了 9%;而当  $b$  为 1 400 mm,挡墙位置在距离进口 1 000 和 1 200 mm 时,出流均匀度反而降低了。表明在相同的  $L$  下,  $b$  较长时(1 600 和 2 000 mm 工况),双段配水渠对均匀出水的贡献效果才更为明显。(2)在确定设置双段配水渠的情况下,双段配水渠挡墙一般不应安置于配水渠中间,而应安置于距离进口 800 mm 的位置,以减小低效率配水渠(首段配水渠)的流域空间,增加第 2 段配水渠容积,从而提高主流扩散程度,此种条件下的流速  $C_V$  值最小,出水流动最为均匀。

## 5 结 论

本文采用 CFD 数值模拟方法,针对网格絮凝池与斜板沉淀池之间的配水渠进行了三维单向流稳态模拟,以流速变异系数  $C_V$  值为评价指标对配水渠进口宽度  $b$ 、配水渠宽度  $B$ 、配水渠长度  $L$  进行了水力优化研究,得出以下结论:

(1) 为达到最优的均匀出流效果,研究了  $b$  (等于网格絮凝池竖井边长) 变化时  $L$  的最佳取值范围。优化结果显示,当  $b$  在 1 200 ~ 1 600 mm 范围之内时,  $L$  的最佳取值范围在 1 750 ~ 2 250 mm 之内,此时出水均匀度最优;当  $b$  较窄时,  $L$  的最优取值可适当缩短;当  $b$  大于 1 600 mm 时,  $L$  的最优取值应适当增加,但不应大于 3 000 mm。

(2) 针对网格絮凝池的3种常规布置形式,对 $B$ 与 $L$ 的函数关系进行了数值模拟研究。分析结果发现,当网格絮凝池为7个或9个竖井并排布置时(对应 $B$ 为5 300或者6 700 mm), $L$ 的最佳取值范围在2 250 ~ 2 750 mm内,相对于5个竖井并排布置的情况增加了500 mm。

(3) 通过改变 $b$ ,对双段配水渠及其挡墙位置进行了优化研究。分析结果发现, $b$ 较大时(2 000 mm左右),设计双段配水渠对出流均匀度的提升效果显著,提高率可达为57%; $b$ 较窄时(1 200 ~ 1 600 mm),双段配水渠对出流均匀度的提升效果较低,仅为9%;若设计双段配水渠,其挡墙位置宜靠近进口一侧布置而不宜位于池体中间。

### 参考文献:

- [1] LIU Yuling, ZHANG Pei, WEI Wenli. Simulation of effect of a baffle on the flow patterns and hydraulic efficiency in a sedimentation tank[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(54):25950-25959.
- [2] 黄廷林,李玉仙,何文杰,等. 布水不均匀性对斜管沉淀池临界沉速的影响[J]. 水处理技术, 2008,34(12):28-31.
- [3] ALALAM M G, NASR M, OOKAWARA S. Assessment of a novel spiral hydraulic flocculation/sedimentation system by CFD simulation, fuzzy inference system, and response surface methodology[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 169:137-150.
- [4] 陈金锥. 配水渠水面线分析与水力设计[J]. 水科学与工程学报, 2006(5):35-37.
- [5] 张立强,李晓英,秦莉. 周进周出二沉池配水渠参数计算方法探讨[J]. 河北工业大学学报, 2007, 36(5):83-88.
- [6] 陆先镭,胡远来,樊佳,等. 基于CFD的水处理构筑物数值模拟操作要点分析[J]. 低碳世界, 2017(8):178-179.
- [7] 刘存,王庆涛,陈翔宇,等. 网格絮凝池结构参数对流场影响的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(4):162-167.
- [8] 陈翔宇,姚娟娟,王庆涛,等. 基于CFD技术的臭氧给水处理工艺研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2):110-115.
- [9] SADINO - RIQUELME C, HAYES R E, JEISON D, et al. Computational fluid dynamic (CFD) modelling in anaerobic digestion: General application and recent advances [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2018, 48(1):39-76.
- [10] SÁNCHEZ F, REY H, VIEDMA A, et al. CFD simulation of fluid dynamic and biokinetic processes within activated sludge reactors under intermittent aeration regime [J]. Water Research, 2018, 139:47-57.
- [11] 贺卫宁,陆先镭,胡远来. 平流沉淀池前配水渠流态的数值模拟[J]. 中国给水排水, 2013, 29(7):56-58.
- [12] TAKATA K, KUROSE R. Influence of density flow on treated water turbidity in a sedimentation basin with inclined plate settler[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2017,17(4):1140-1148.
- [13] 蒋绍阶,赖锐杰. 西部小城镇宾川二水厂工程设计[J]. 工业水处理, 2008, 28(8):72-74.
- [14] 赵竞. 异向流斜管沉淀池的三维数值模拟[J]. 工程与建设, 2015, 29(2):158-160.
- [15] 王君,徐卫光. 往复式隔板絮凝池的优化设计与数值模拟[J]. 给水排水, 2014, 40(S1):18-21.
- [16] 王磊磊,许光明,陈俊,等. 超大型周进周出式沉淀池优化设计中的水力性能数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(2):168-172.
- [17] 张浩,李录平,唐学智,等. 燃气轮机动叶缩放型气膜孔冷却效果的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2019, 34(3):33-42.
- [18] 李坦,靳世平,黄素逸,等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11):60-63.
- [19] 胡国林,周力波. 絮凝斜管沉淀池-浸没式超滤膜工艺在水厂改扩建中的应用[J]. 给水排水, 2014, 40(11):25-28.