

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.17.009

# 基于CFD仿真模拟的斜板微涡流絮凝池结构优化

陈 蕃<sup>1,2</sup>, 曾寒轩<sup>3</sup>, 周石庆<sup>1</sup>, 邓 林<sup>1</sup>, 施 周<sup>1</sup>

(1. 湖南大学土木工程学院 水安全保障技术及应用湖南省工程研究中心, 湖南 长沙 410082; 2. 中机国际工程设计研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410021; 3. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘 要:** 采用计算流体力学(CFD)仿真模拟方法,优化一种新型斜板微涡流絮凝池的结构参数。基于流速、湍动能和湍流耗散率等基础水力指标,提出以涡旋尺度为衡量标准,考察不同结构参数下的流场流态,优化水力条件,提高絮凝效率。而后利用粒子图像测速技术(PIV)和中试验证仿真计算结果,确定最佳运行参数。结果表明,涡旋尺度是一种针对微涡流絮凝池效果评价的有效指标。粒子图像测速技术和中试结果均验证了对新型斜板微涡流絮凝池内部流场进行优化所取得的最佳结构参数。

**关键词:** 计算流体力学; 微涡流; 涡旋尺度; 絮凝

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)17-0057-08

## Structural Optimization of Inclined Plate Micro-vortex Flocculation Tank Based on Computational Fluid Dynamics Simulation

CHEN Fan<sup>1,2</sup>, ZENG Han-xuan<sup>3</sup>, ZHOU Shi-qing<sup>1</sup>, DENG Lin<sup>1</sup>, SHI Zhou<sup>1</sup>

(1. Hunan Engineering Research Center of Water Security Technology and Application, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. China Machinery International Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Changsha 410021, China; 3. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** The structural parameters of a novel inclined plate micro-vortex flocculation tank were optimized through computational fluid dynamics (CFD) simulation. Utilizing the vortex scale as a criterion, the flow field and flow state under different structural parameters were investigated based on fundamental hydraulic indexes such as velocity, turbulent kinetic energy, and turbulent dissipation rate. This approach aimed to optimize hydraulic conditions and enhance flocculation efficiency. Subsequently, particle image velocimetry (PIV) and a pilot test were employed to validate the simulation results and ascertain the optimal operating parameters. The vortex scale served as an effective indicator for assessing the performance of micro-vortex flocculation tank. The particle image velocimetry technique and pilot test results validated the optimal structural parameters obtained through optimization of the internal flow field in the novel inclined plate micro-vortex flocculation tank.

**Key words:** computational fluid dynamics; micro-vortex; vortex scale; flocculation

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52270004); 湖湘青年英才项目(2021RC3039)

通信作者: 邓林 E-mail: lindeng@hnu.edu.cn; 施周 E-mail: zhous61@163.com

微涡流絮凝是一种新型高效絮凝技术。水流通过絮凝组件结构中的微小孔洞时会出现流速与流向的突变,造成局部强烈紊流现象并产生大量微小涡旋,微涡流的存在使颗粒间的碰撞几率大大增加,从而能够提高絮凝效率<sup>[1]</sup>。基于微涡流技术开发的絮凝池具有絮凝周期短、耗药量低、处理量大等优势,其中一些已被应用于老水厂提质改造中<sup>[2]</sup>。

当前的研究主要通过将各种形状的微涡流组件填入网格/栅条絮凝池内,以获得强化微涡流产生的效果。然而这种微涡流组件容易在絮凝过程中滋生藻类、堵塞微孔,严重影响了净水厂的稳定运行<sup>[3]</sup>。与此同时,在对这种新型微涡流絮凝组件进行计算流体力学(CFD)模拟优化时,通常采用规范手册中评价传统絮凝池的指标( $G$ 值、 $GT$ 值)作为标准,未细致考量设计参数的合理性,因此结构参数是否已达最优化依然存疑。理论上的 $G$ 值只能代表能量的空间平均耗散率,不能反映流场局部能量的耗散率,并且Camp公式是基于层流提出来的公式,并不能很好地适用于紊流居主要地位的絮凝池中,特别是依赖于局部强紊动的微涡流絮凝池,因此使用 $G$ 值作为模拟结果的评价标准优化絮凝组件是不合理的<sup>[4]</sup>。Kolmogoroff现代絮凝理论认为当涡旋尺度( $\lambda$ )与矾花尺寸相近时,絮凝过程最充分,效果最佳。当涡旋尺度超过该值时,水流的紊动不足以提供絮凝所需的能量;反之,当涡旋尺度低于该值时,过高的水流剪切力会将絮体剪切破碎<sup>[5]</sup>。因此,利用CFD对湍流场中各处流态的准确模拟获取各点的湍流耗散率( $\varepsilon$ ),通过公式 $\lambda=(\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$ ( $\nu$ 为水的运动黏滞系数)计算流场中各处的 $\lambda$ ,能够直观地评价微涡流絮凝组件的絮凝效果<sup>[6]</sup>。

鉴于此,笔者基于新型斜板微涡流絮凝单元组件(专利号:ZL201320375067.4)<sup>[7]</sup>,以 $\lambda$ 为评价标准,利用CFD技术对其结构参数进行深度优化,并结合粒子图像测速技术(PIV)和中试,确立新型斜板微涡流絮凝池的结构和运行参数,旨在为这种能够长效稳定运行的微涡流絮凝池的实际应用提供理论指导和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 CFD数值模拟

#### 1.1.1 物理模型

以专利ZL201320375067.4为基础构建初始模

型,如图1所示。竖井池体的上部尺寸为1 000 mm×1 000 mm×850 mm,中部尺寸为1 000 mm×1 000 mm×700 mm,下部尺寸为1 000 mm×1 000 mm×700 mm。过水孔尺寸为850 mm×800 mm(上)、1 000 mm×700 mm(下);絮凝组件的斜板倾角为60°,斜板开孔率分别为46%和66%,微孔孔径分别为35和45 mm,板间距分别为125和250 mm,板厚为30 mm。

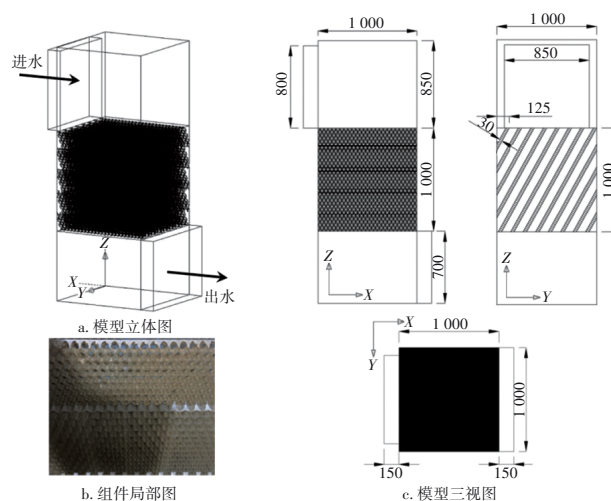


图1 新型斜板微涡流絮凝池模型示意

Fig.1 Schematic diagram of novel inclined plate micro-vortex flocculation tank model

#### 1.1.2 模拟方案

通过改变斜板开孔率(46%、66%)、微孔孔径(35、45 mm)、板间距(125、250 mm),利用CFD对新型斜板微涡流絮凝组件进行模拟优化。分析 $X=0.5$  m截面上进水流量为500 m<sup>3</sup>/h时流场的流态。

#### 1.1.3 边界条件

根据相关研究结果和多次理论模拟计算,考察收敛性情况,并对比模拟与实际流场,设定的CFD模拟边界条件如下:①进口边界处采用速度进口边界条件,水力直径为0.82 mm、流速为0.20 m/s、雷诺数为168 350.2、湍动能为 $7.9 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>、湍流耗散率为 $2.0 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>;②出口边界采用自由出流边界条件;③固体壁面上,流速、紊动能 $k$ 、湍流耗散率 $\varepsilon$ 采用无滑动边界条件,近壁流动区采用壁面函数法处理,需考虑重力作用,即 $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>;④自由水面位置按“刚盖”近似法处理,自由面采用对称边界条件,即标量 $k$ 、 $\varepsilon$ 和平行于对称平面的速度分量的法向梯度为零,垂直于对称平面的速度分量为零<sup>[8]</sup>。

### 1.1.4 计算方法

采用三维双精度稳态模式模拟絮凝池内流态;应用分离式隐式解算器对流场进行数值模拟;采用标准壁面函数结合 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型模拟湍流流态;在数值计算解法中,压力-速度耦合使用 Simple 算法;使用 Standard quick 和二阶迎风格式处理差分<sup>[9]</sup>。

### 1.2 PIV 试验

根据弗劳德相似准则,对 CFD 模型以长度比尺为 4、流速比尺为 2、流量比尺为 32 进行缩放,构建 PIV 模型<sup>[10]</sup>。参数如下:流量为 15.6 m<sup>3</sup>/h,激光为双脉冲,穿透力为 500 mJ,532 nm 绿光,强度为 480 mW;工作频率为 1 Hz;偏光厚度<1 mm;CCD 相机分辨率为 4 000×2 672 像素;最小曝光时间<1 μs;跨帧时间为 1 500 μs;传输速率>500 MB/s。

### 1.3 中试方法

根据弗劳德相似准则对 CFD 模型以长度比尺=4、流速比尺=2、流量比尺=32 进行缩放,构建中试模型<sup>[11]</sup>,如图 2 所示。微涡流絮凝池后衔接斜管沉淀池,并在沉淀池出水堰处取样测定出水浊度。同时采用传统折板絮凝池作为平行对照。中试场地选在湖南省长沙市某自来水厂,时间为 2019 年 3 月—4 月,采用聚合氯化铝(PAC)作为絮凝剂。使用高岭土配制原水(水温为 16~18 ℃,pH 为 7~8),进行梯度原水浊度絮凝试验,原水浊度分别为 5、40、60、80、150、200、300 NTU。考察絮凝剂投量(2、4、6、8、10 mg/L)、絮凝时间(4、6 min)等参数对微涡流絮凝装置除浊效果的影响。

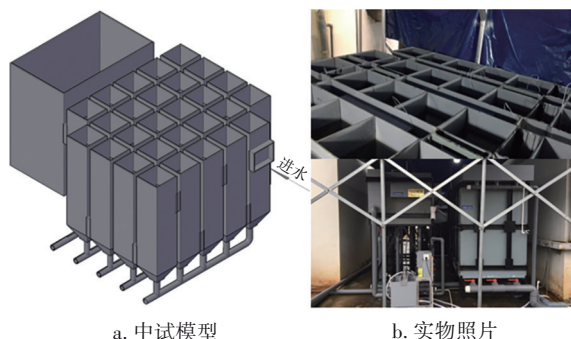


图 2 新型斜板微涡流絮凝池中试模型与装置实物照片

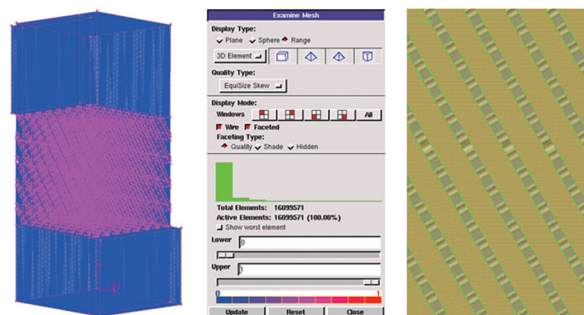
Fig.2 Pilot model and physical photo of novel inclined plate micro-vortex flocculation tank

## 2 结果与分析

### 2.1 CFD 模拟结果分析

网格的划分质量对计算结果的准确性具有重

要影响。对竖井各部分网格进行精密划分(其中上下部网格尺寸 10×10,絮凝核心组件为 5×5),如图 3 所示。全模型 90% 以上使用结构化网格进行划分,最大扭曲度低于 0.4,80% 以上网格扭曲度低于 0.1,各模型平均总网格数量近 1 700×10<sup>4</sup>。



a. 模型整体网格划分 b. 网格质量检查 c. 斜板局部网格划分  
图 3 网格质量

Fig.3 Quality of mesh

### 2.1.1 斜板开孔率对流场与絮凝效果的影响

在初始模型结构参数条件下,模拟了进水流量为 500 m<sup>3</sup>/h、斜板开孔率分别为 46% 和 66% 时絮凝单池内部流场流态分布情况,如图 4 所示。

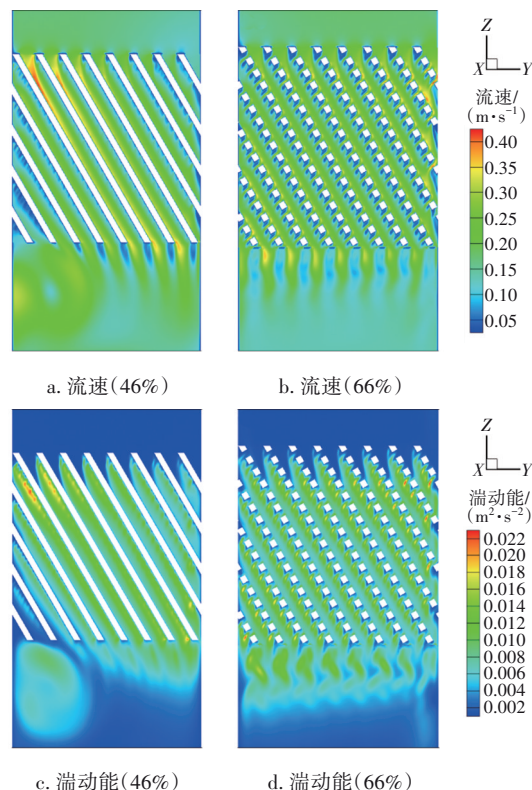


图 4 斜板开孔率对流场流态的影响

Fig.4 Effect of inclined plate opening rate on flow field and flow state



由图4可知,低开孔率(46%)时,水流在重力作用下更趋向于从板间穿过,而非透过斜板上的微孔形成微涡流。水流仅在进口左上方和出口右下方出现速度突变,由此引起的湍动能增加也仅出现在这两块区域,絮凝组件利用率低致使絮凝池整体的絮凝效果较差。此外,由于竖井内斜板介入导致的不均匀配水使得竖井下部死水区产生大涡旋,这一局部水力现象对絮体成核是极为不利的。而当开孔率为66%时,水流均匀穿过斜板上密集的微孔后出现了流向和流速的突变,促进了微涡流的形成,使得水流过孔后端动能增大,更利于絮体的形成与密实<sup>[11]</sup>。

在微孔孔径为35 mm、板间距为125 mm的条件下,考察斜板开孔率对涡旋尺度的影响,结果如图5所示。

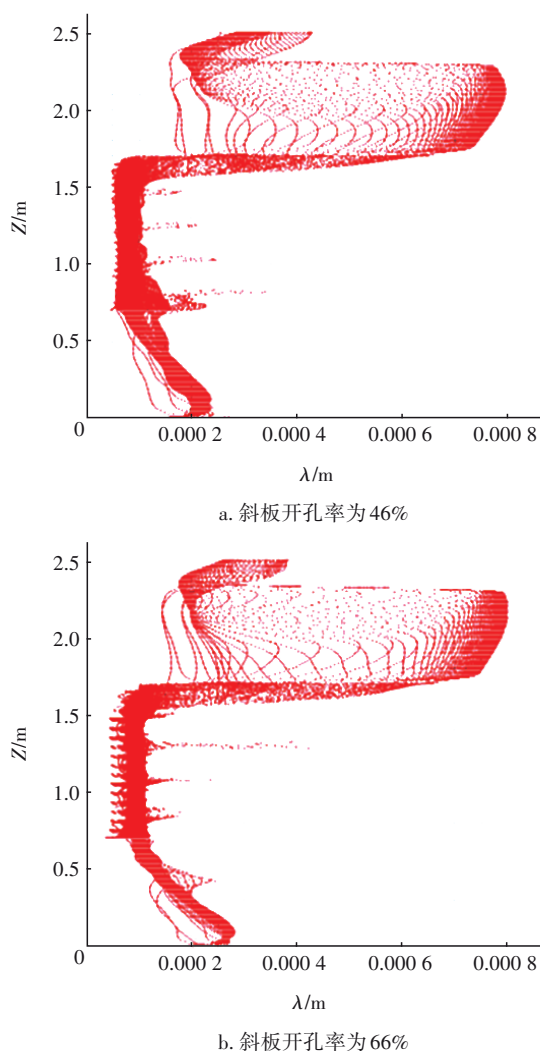


图5 斜板开孔率对涡旋尺度的影响

Fig.5 Effect of inclined plate opening rate on vortex scale

从图5可知,当水流通过微涡流絮凝组件时,涡旋尺度急剧下降,在经过水力条件剧烈变化后又小幅度上升,这一变化趋势与水流在絮凝池上部、中部和下部的穿越过程相符。然而,两种开孔率条件下,涡旋尺度的变化趋势并无明显区别。当涡旋尺度与矾花尺寸相近时,絮凝反应最充分,效果最佳。当涡旋尺度超过该值时,水流的紊动不足以提供絮凝所需的能量;反之,当涡旋尺度低于该值时,过高的水流剪切力会将絮体剪切破碎。由图5还可以发现,絮凝组件主要区域的涡旋尺度都远低于矾花可自然沉降的尺寸,因此过强的水流剪切力将会抑制矾花的生长,降低絮凝阶段絮体的密实度,增大后续处理工艺的负荷<sup>[12]</sup>。

### 2.1.2 微孔孔径对流场与絮凝效果的影响

根据上述分析,开孔率仅对流场整体流态的影响较大而对涡旋尺度的影响较小。因此,设定开孔率为66%,模拟微孔孔径分别为35和45 mm两种工况下流场的分布情况,分析微孔孔径对絮凝效果的影响,结果如图6所示。

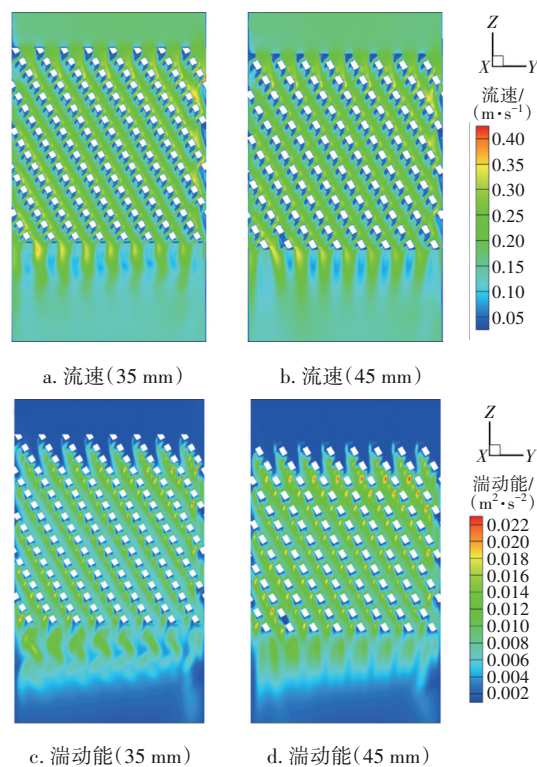


图6 微孔孔径对流场流态的影响

Fig.6 Effect of pore diameter on flow field and flow state

由图6可知,两种微孔孔径的絮凝组件对流态的影响相近,池体内部流速分布情况和湍动能均匀

程度类似。值得注意的是,35 mm孔径工况下,斜板表面的紊动更柔和,其湍动能介于 $0.006\sim 0.008\text{ m}^2/\text{s}^2$ 之间,而在45 mm孔径下,斜板对水流的导流作用明显减弱,水流倾向于在各板孔中交错通过,垂直穿过池体。

在斜板开孔率为66%、板间距为125 mm条件下,考察微孔孔径对涡旋尺度的影响,结果如图5(b)和图7所示。可知,提高微孔孔径并不能有效抑制流场局部紊动强度。这是由于增大微孔孔径改变了微涡流的形成方式,小孔径时,微涡流是由水流通过微孔时局部收缩和扩张形成的,而水流在相邻板孔中交错通过导致的流速和流向突变是大孔径时微涡流形成的主要原因<sup>[11,13]</sup>。应当注意的是,将孔径提高到45 mm后,微涡流组件的抗冲击强度将大幅降低,过大的孔隙使其难以承受水流的高速冲击。因此将最佳微孔孔径设置为35 mm。

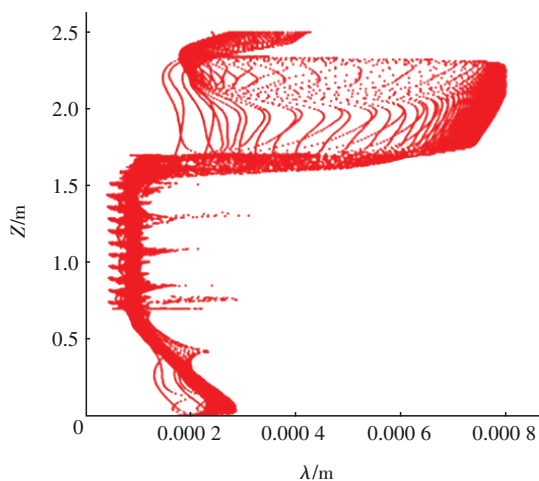


图7 微孔孔径为45 mm时涡旋尺度的变化

Fig.7 Change of vortex scale at bore diameter of 45 mm

### 2.1.3 板间距对流场与絮凝效果的影响

板间距对流场流态的影响见图8。将微涡流絮凝组件的板间距从125 mm扩宽到250 mm后,组件内部的流场发生了明显的变化,水流在穿过板孔后的流速迟滞现象也更为明显,水流在斜板的正反两面分别形成了高速层和低速层,这可能是由于更宽的板间距延长了微涡流的扩散距离,使其不至于冗积在板间,从而避免多次强化造成组件内部紊动过于剧烈。这一结论也可由湍动能云图佐证,水流通过穿孔斜板后湍动能瞬时增加到 $0.010\sim 0.014\text{ m}^2/\text{s}^2$ ,并在板间扩散过程中逐渐降低,在抵达相邻板层时降低到 $0.004\text{ m}^2/\text{s}^2$ 以下,此时水流再次经过穿

孔斜板的阻挡形成新的微涡流。如此往复,水流穿过孔板后会在能量耗散完毕时再通过下一块孔板,从而达到抑制水流紊动强度的目的。

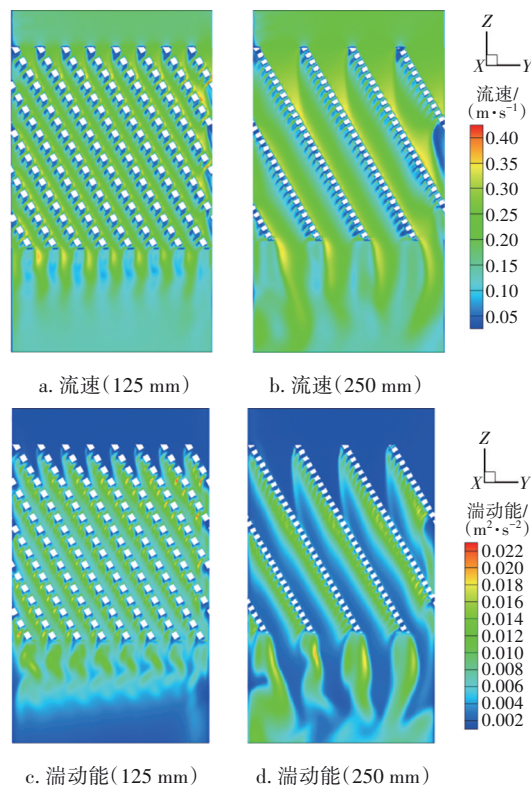


图8 板间距对流场流态的影响

Fig.8 Effect of plate spacing on flow field and flow state

当斜板开孔率为66%、微孔孔径为35 mm时,考察板间距对涡旋尺度的影响,结果见图5(b)和图9。

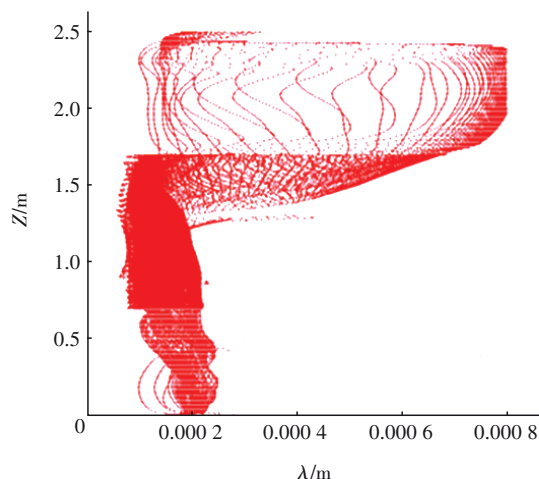


图9 板间距为250 mm时涡旋尺度的变化

Fig.9 Change of vortex scale at plate spacing of 250 mm

由图5(b)和图9可知,通过增大板间距可以很好地抑制絮凝组件区域的紊动强度,其涡旋尺度提升到 $0.0001\sim 0.0002\text{ m}$ 之间,该值基本处于矾花形



成的初期尺寸范围。此结构参数下的絮凝组件能够有效控制池体内部流态,加快矾花初期成核过程,提高絮凝效率。

## 2.2 PIV试验结果分析

采用PIV技术监测了400和500 m<sup>3</sup>/h两种流量工况下,微涡流絮凝装置中实际流场流速分布情况,结果如图10所示。可知,PIV实测流场流速与CFD模拟结果非常吻合。值得指出的是,水流在斜板上端有流速剧烈变化区域,同时在两个剧烈紊动水流之间会产生2~3个较大的涡旋,这与CFD模拟结果高度一致。以上结果表明,CFD模拟结果对指导中试具有显著的意义。

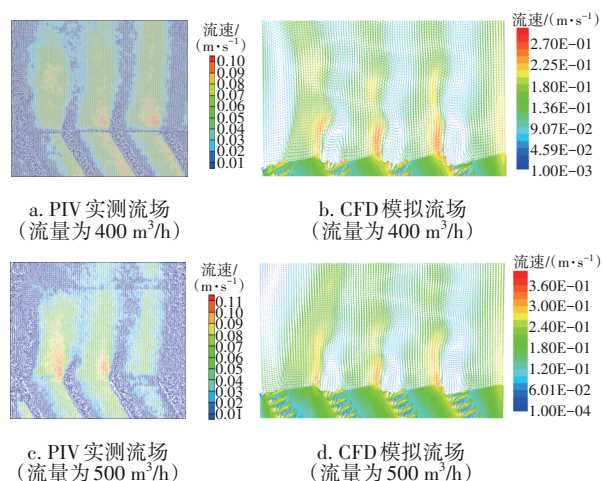


图10 PIV监测结果与CFD模拟结果对比

Fig.10 Comparison between PIV monitoring results and CFD simulation results

## 2.3 中试结果分析

基于CFD模拟和PIV实测结果设计了成套中试装置,对新型斜板微涡流絮凝池的絮凝效果进行了验证。在不同原水浊度、进水流量为15.6 m<sup>3</sup>/h条件下,当絮凝时间分别为4、6 min时,新型斜板微涡流絮凝沉淀装置除浊效果如图11所示。可知,当PAC投量较低(2 mg/L)时,浊度高于80 NTU的原水经新型斜板微涡流絮凝沉淀装置处理后浊度依然高于10 NTU,而当PAC投量超过4 mg/L后,继续增加PAC投量不仅不能提高除浊效果,反而会使出水浊度略微上升,这是由于过多的絮凝剂会导致过量负电荷胶体的产生,强静电排斥作用使得絮体难以成核<sup>[14]</sup>。当絮凝剂投量为4 mg/L,絮凝时间为4 min,原水浊度为5、40、60、80、150、200、300 NTU时,出水浊度分别为1.07、9.36、7.93、9.63、10.75、14.58、

6.32 NTU;而当絮凝时间延长至6 min时,沉淀出水浊度分别为0.99、6.31、7.24、7.01、7.59、7.98、6.43 NTU。由此可知,对于浊度高于100 NTU的原水来说,调整PAC投量无法有效控制沉淀池出水浊度,只能依靠提高絮凝时间来延长絮体的成核过程,以降低出水浊度。

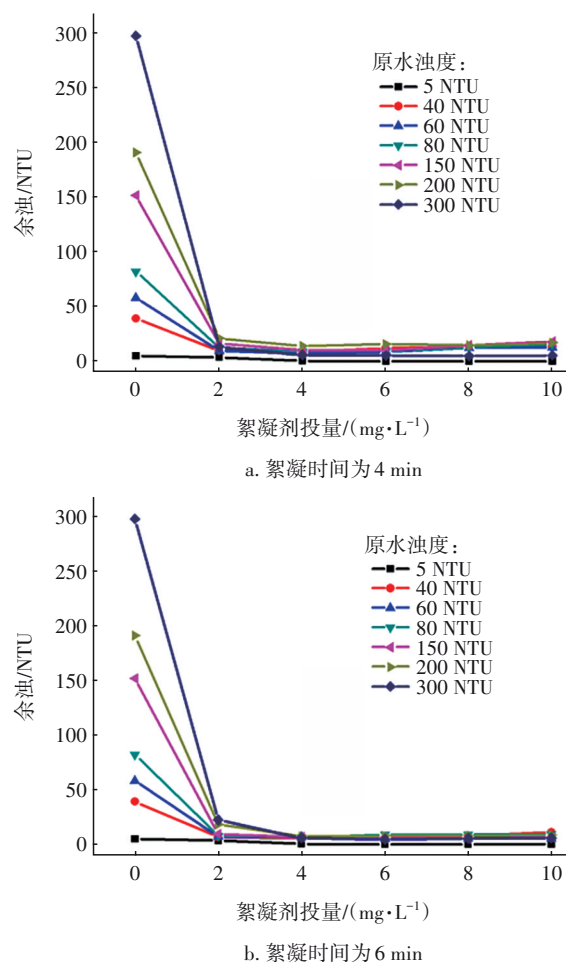


图11 新型斜板微涡流絮凝池除浊效果

Fig.11 Effect of turbidity removal by novel inclined plate micro-vortex flocculation tank

传统折板絮凝池除浊效果如图12所示。可知,当传统折板絮凝池在絮凝时间不充分时,其除浊效果远低于新型斜板微涡流絮凝池。当进水浊度为150~300 NTU、絮凝时间为4 min时,出水浊度为30~40 NTU;而当传统折板絮凝池的絮凝时间增至6 min后,其除浊效果可达到新型斜板微涡流絮凝池的水平。可见,与传统折板絮凝池相比,新型斜板微涡流絮凝池在应对不同原水浊度时可大幅缩短絮凝时间、减少絮凝剂投量、节约运行成本。

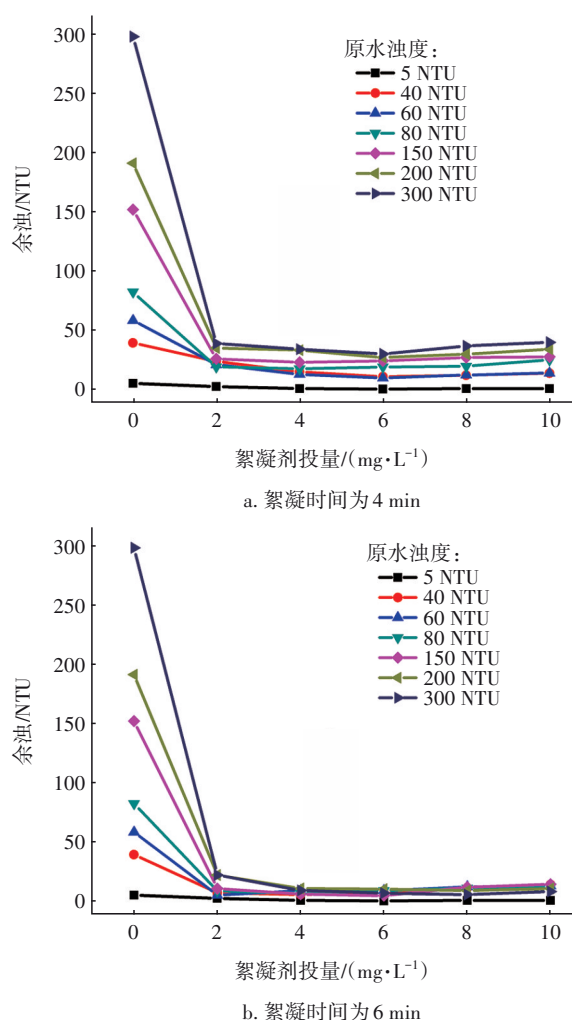


图12 传统折板絮凝池除浊效果

Fig.12 Effect of turbidity removal by traditional folded plate flocculation tank

网眼堵塞是限制微涡流絮凝池进一步发展应用的关键问题<sup>[15]</sup>。经过一个月的连续运行后,将新型斜板微涡流絮凝池的絮凝组件取出,网眼堵塞情况如图13所示。

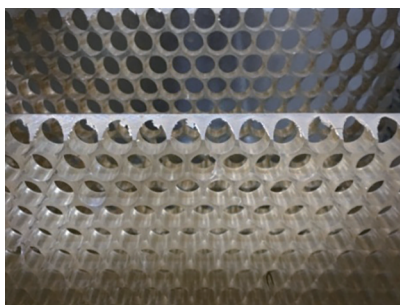


图13 长期使用后絮凝组件堵塞情况

Fig.13 Blockage of flocculating module after long-term using

由图13可知,该装置经过一个月的连续运行后依然没有出现藻类滋生、网眼堵塞等问题,这可能归因于新型斜板微涡流絮凝池独特的斜板结构使得污泥和藻类在水流的冲击下无法在网眼上积聚。

### 3 结论

通过CFD仿真模拟确定了新型斜板微涡流絮凝池的最佳结构参数为开孔率66%、微孔孔径35 mm、板间距250 mm。PIV结果佐证了CFD模拟结果的准确性。中试结果表明,与传统折板絮凝池相比,新型斜板微涡流絮凝池拥有更高的絮凝效率,能够灵活应对低、中、高浊度的原水,可大幅缩短絮凝时间、减少絮凝剂投量、节约运行成本。新型斜板微涡流絮凝池独特的斜板结构有效避免了网孔堵塞问题,为微涡流絮凝池的优化提供了一种切实可行的解决方案。

### 参考文献:

- [1] 黄继华. 微涡流絮凝/斜管沉淀技术用于脉冲澄清池的改造[J]. 中国给水排水, 2012, 28(2): 74-76.  
HUANG Jihua. Reconstruction of pulse clarifier using micro-vortex flocculation and inclined-tube settling technology [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(2): 74-76(in Chinese).
- [2] 徐丹, 卫正刚, 柳瑞瑶, 等. 回转式隔板絮凝池中增设折板工艺对低温低浊水的处理[J]. 净水技术, 2022, 41(5): 165-169.  
XU Dan, WEI Zhenggang, LIU Ruiyao, et al. Rotary clapboard flocculation tank process by adding folded plate for treatment of low temperature and low turbidity water [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(5): 165-169(in Chinese).
- [3] 童祯恭, 胡锋平. 涡流澄清技术在污水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2009, 35(9): 117-119.  
TONG Zhengong, HU Fengping. Implement of whirling clarification technique in wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(9): 117-119 (in Chinese).
- [4] 范文飙, 李伟光, 公绪金, 等. 基于CFD流场计算的水力桨隔板絮凝池絮凝效果研究[J]. 给水排水, 2016, 42(4): 22-27.  
FAN Wenbiao, LI Weiguang, GONG Xujin, et al. Study on flocculation tank with hydraulic impeller based on computation fluid dynamics [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(4): 22-27(in Chinese).

- [5] 张世豪, 艾恒雨, 崔婉莹, 等. 基于CFD模拟的絮凝效果评价指标研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(5): 45-53.  
ZHANG Shihao, AI Hengyu, CUI Wanying, *et al.* Evaluation indicators of flocculation performance based on CFD simulation [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(5): 45-53(in Chinese).
- [6] 赵国强, 戴红玲, 王艺, 等. 低温低浊水絮凝工艺的数值模拟与响应面优化试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 117-124.  
ZHAO Guoqiang, DAI Hongling, WANG Yi, *et al.* Numerical simulation and response surface optimization of low temperature and turbidity water flocculation process [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(1): 117-124(in Chinese).
- [7] 吴玉华, 罗松柏, 黄茂林, 等. 一种斜板式微涡流絮凝单元: ZL201320375067.4[P]. 2013-06-27.  
WU Yuhua, LUO Songbai, HUANG Maolin, *et al.* A Inclined Plate Micro Vortex Flocculation Unit: ZL201320375067.4[P]. 2013-06-27(in Chinese).
- [8] 徐琪珂, 戴红玲, 赵国强, 等. 微涡流絮凝工艺处理高浊水的数值模拟与响应面优化试验[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 62-69.  
XU Qike, DAI Hongling, ZHAO Guoqiang, *et al.* Numerical simulation and response surface optimization of micro-vortex flocculation process for high turbidity water treatment [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 62-69 (in Chinese).
- [9] 常青. 絮凝动力学的现状与研究方法进展[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10): 3042-3049.  
CHANG Qing. Current state of flocculation dynamics and methodology progress [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(10): 3042-3049 (in Chinese).
- [10] 贺维鹏, 曹玉焯, 施周, 等. 基于CFD的网格絮凝池内水流紊动协同效应分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, 40(4): 14-20.  
HE Weipeng, CAO Yuzhu, SHI Zhou, *et al.* Synergetic analysis of water flow turbulence in grid flocculating tank based on CFD[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2017, 40(4): 14-20(in Chinese).
- [11] 何亚其, 白健华, 孙超, 等. 新型微涡流混凝器絮凝效果评价及数值模拟分析[J]. 工业水处理, 2021, 41(6): 206-210.  
HE Yaqi, BAI Jianhua, SUN Chao, *et al.* Flocculation effect evaluation and numerical simulation analysis of new micro-vortex coagulator [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(6): 206-210(in Chinese).
- [12] 黄继华, 方永辉, 程霄, 等. 微涡流絮凝/斜管沉淀技术用于机械搅拌澄清池改造[J]. 中国给水排水, 2009, 25(20): 77-78.  
HUANG Jihua, FANG Yonghui, CHENG Xiao, *et al.* Micro-vortex flocculation/inclined-tube settling technology for reconstruction of mechanical clarifier [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(20): 77-78 (in Chinese).
- [13] 季必燕. 微涡流絮凝沉淀/转盘滤池深度处理工业园区污水[J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 137-139, 143.  
JI Biyan. Application of combined process of micro-vortex flocculating, vertically inclined-tube settling and rotary filter to advanced treatment of wastewater from an industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(24): 137-139, 143(in Chinese).
- [14] 刘蕊, 吴佳瑶. 改良絮凝剂在高浊度及含油废水处理中的应用[J]. 应用化工, 2023, 52(9): 2566-2570.  
LIU Rui, WU Jiayao. Modified flocculants for high turbidity and oily wastewater treatment [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(9): 2566-2570 (in Chinese).
- [15] 王存岩, 谭竞男, 田雨欣, 等. 基于CFD的水力式絮凝工艺结构优化研究进展[J]. 当代化工, 2023, 52(3): 644-649.  
WANG Cunyan, TAN Jingnan, TIAN Yuxin, *et al.* Research progress in structural optimization of hydraulic flocculation process based on CFD [J]. Contemporary Chemical Industry, 2023, 52(3): 644-649 (in Chinese).

作者简介: 陈蕃(1983-), 男, 湖南长沙人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为给排水构筑物性能优化。

E-mail: lindhnu@126.com

收稿日期: 2023-05-08

修回日期: 2023-06-12

(编辑: 任莹莹)