

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.020

## 细砂在曝气除砂设备中的流动特性与沉降模拟

侯锋<sup>1</sup>, 刘莹<sup>1</sup>, 千里里<sup>1</sup>, 周晓<sup>1</sup>, 刘艳臣<sup>2</sup>, 范茏<sup>3</sup>

(1. 国投信开水环境投资有限公司, 北京 101101; 2. 清华大学环境学院, 北京 100080; 3. 合肥大学能源材料与化工学院, 安徽合肥 230601)

**摘要:**文章采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的方法, 对同时含有50、60  $\mu\text{m}$ 这2种砂的新型曝气除砂一体化设备进行数值模拟, 探讨其流体力学特性和颗粒沉降规律。结果表明: 模拟去除率与理论计算值一致, 证明模拟结果的可靠性; 无曝气时50  $\mu\text{m}$ 颗粒的质量浓度分布和去除率与60  $\mu\text{m}$ 颗粒有所差异, 可能是一体化的集成设计放大了颗粒直径的影响; 曝气的引入消除了2种颗粒在质量浓度分布、去除率等方面的差别, 增大了去除率, 50、60  $\mu\text{m}$ 颗粒的平均去除率分别从无曝气时的77.9%、86.4%同时增大到95.0%, 且去除率随时间变化更缓和; 气水比从0.1增大到0.4时去除率没有明显提高, 反而带来波动和能耗的增加。该新型设备对100  $\mu\text{m}$ 以下小颗粒的去除率明显优于现有曝气沉砂池, 为后续生化池的高效稳定运行奠定基础。

**关键词:**除砂; 计算流体力学(CFD); 精细砂粒; 去除率; 颗粒粒径

**中图分类号:** TU992.24; O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)07-0989-07

### Numerical simulation of flow characteristics and sedimentation of fine sand particles in an aerated sand removal equipment

HOU Feng<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, GAN Lili<sup>1</sup>, ZHOU Xiao<sup>1</sup>, LIU Yanchen<sup>2</sup>, FAN Long<sup>3</sup>

(1. SDIC Xinkai Water Environment Investment Co., Ltd., Beijing 101101, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100080, China; 3. School of Energy Materials and Chemical Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In this paper, a new type of integrated aerated sand removal equipment with two fine sand particles (50  $\mu\text{m}$  and 60  $\mu\text{m}$ ) was numerically simulated using computational fluid dynamics (CFD) method to investigate its hydrodynamic characteristics and particle sedimentation patterns. The results showed that the modeled removal rates were in good agreement with the theoretical values, which proved the reliability of the simulation. Without aeration, the solid distribution and removal rate of particles of 50  $\mu\text{m}$  differed from those of particles of 60  $\mu\text{m}$ . This may come from the amplified effect of diameter difference due to the integrated structure. The inclusion of aeration removed the difference of solid distribution and removal rate between two particles. Meantime, the removal rates were increased. The average removal rates of 50  $\mu\text{m}$  and 60  $\mu\text{m}$  particles were increased from 77.9% and 86.4% to 95.0%, respectively. The variation in removal rate over time became more stable. The increment of the ratio of gas to liquid from 0.1 to 0.4 did not enhance the removal rate, but brought fluctuation and energy cost. Compared to the conventional aerated grit chambers, this new integrated equipment achieves markedly higher removal rate for particles below 100  $\mu\text{m}$ , which lays a foundation

**收稿日期:** 2023-05-10; **修回日期:** 2023-05-25

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52270091); 安徽省重点研究和开发计划资助项目(202204a05020077)和安徽省教育厅重点资助项目(KJ2021A1015)

**作者简介:** 侯锋(1961—), 男, 陕西安康人, 博士, 国投信开水环境投资有限公司研究员;

千里里(1983—), 男, 四川成都人, 博士, 国投信开水环境投资有限公司高级工程师, 通信作者, E-mail: ganlili@sdic.com.cn;

刘艳臣(1980—), 男, 黑龙江兰西人, 博士, 清华大学研究员, 博士生导师;

范茏(1979—), 女, 山东济南人, 博士, 合肥大学教授, 硕士生导师。

for the efficient and stable operation of biochemical ponds.

**Key words:** sand removal; computational fluid dynamics(CFD); fine sand particles; removal rate; particle size

我国城市污水处理厂进水中砂粒尺寸偏小, 100  $\mu\text{m}$  以下及 100~200  $\mu\text{m}$  的细砂占比多, 传统沉砂池对这部分细砂去除效果不好<sup>[1]</sup>, 导致污水厂生化池中混合液挥发性悬浮固体质量浓度与混合液悬浮固体质量浓度比值偏低, 污水厂的运行质量下降, 且使污泥产量增加<sup>[2]</sup>, 影响污泥的资源化处置。针对这一问题, 本文设计开发了一种精细除砂一体化设备, 将斜板沉降与螺旋脱泥等结构集成为紧凑的一体, 去除目标更偏重 100  $\mu\text{m}$  以下的细砂。

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)在反应器的设计开发和优化中应用广泛<sup>[3]</sup>, 对沉砂池的设计也有一定的指导作用。文献[4]基于回归正交试验, 对沉砂池进行模拟和试验研究, 在其最优条件下, 200  $\mu\text{m}$  以上砂粒去除率为 96.99%, 100~200  $\mu\text{m}$  为 84.26%, 100  $\mu\text{m}$  以下仅为 16.57%; 文献[5]对某旋流式沉砂池进行 CFD 模拟, 认为搅拌转速影响砂粒的去除, 转速为 26 r/min 时, 砂粒去除率高达 80% 以上; 文献[6]模拟旋流沉砂池, 随时间延长砂粒逐渐向池中心靠拢并最终沉淀下来; 文献[7]对装有导流板的旋流沉砂池进行模拟, 200  $\mu\text{m}$  以上颗粒去除率最高可达 71.10%, 相较于无导流板的模型提高了 7.9%; 文献[8]对四廊道的平流沉淀池进行数值模拟, 研究导流挡板长度、角度等对配水的影响, 优化后的结构能减少横向流对沉降颗粒的扰动, 提高出水水质。以上文献均采用 CFD 方法对沉砂池或沉淀池的流体力学特性进行研究, 可提高沉砂池的效率, 尤其是细小颗粒的去除率。

因此, 本文采用 CFD 模拟来评估一体化设备的结构, 将 CFD 模拟、中试试验和理论计算相结合, 重点考察设备内流体的流动特性和细小砂粒的沉降规律, 并与试验结果、理论计算值和其他设备参数进行比较, 以期达到高效去除 100  $\mu\text{m}$  以下细砂的目的。

## 1 中试设备

设备的三维模型、网格划分及测试面如图 1 所示。其中: 平面 1 为过进水口中心的竖直截面; 平面 2 为过第 3 列配水孔中心及部分斜板的平面。进水流量为 800  $\text{m}^3/\text{d}$ 。污水首先进入小型

蓄水池, 然后通过多孔配水花墙流入主体沉降区。配水花墙后紧邻竖直倒 T 型进气管, 进气管的底部水平段为曝气管, 曝气管表面均布斜向下方的曝气孔。沉降区主要由斜板沉降区和底部的螺旋脱泥机组成, 通过斜板沉降和旋转排泥, 可有效提高砂的去除率<sup>[9-10]</sup>。

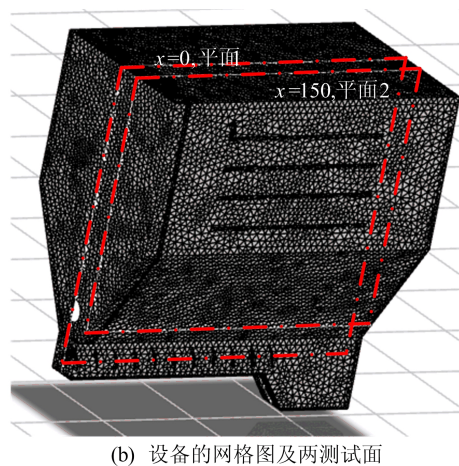
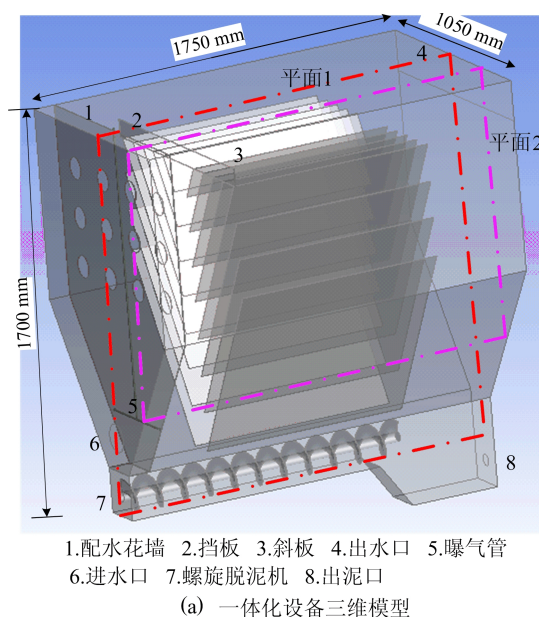


图 1 设备的三维模型、网格划分及测试面

## 2 模拟方法

### 2.1 模型设置

以 ANSYS Workbench 对中试设备建立三维模型(图 1a), 生成网格(图 1b)。利用 ANSYS

Fluent 20.0 软件对其进行非稳态模拟,模拟设备内同时存在 2 种细砂颗粒,采用欧拉-欧拉多相流模型模拟设备内四相(气-液-固相 1-固相 2)流动,液相水作为连续相,气相、固相作为离散相,气泡和固体颗粒均作为刚性小球处理,不考虑其破裂或聚合。设备内流动为湍流,采用标准的  $k-\epsilon$  湍流模型处理。

## 2.2 螺旋脱泥机的模拟

螺旋脱泥机的加入使一体化设备结构更加复杂,其旋转增加了模拟难度。本文采用多重坐标系法(multiple reference frame, MRF)<sup>[11]</sup>处理,计算区域分为不同子域,每个子域相对于实验系可能是旋转或平移的,每个子域的控制方程针对子域参考系撰写。本文研究中,螺旋脱泥机区域在旋转坐标系中求解,其他部分采用固定坐标系。

## 2.3 边界条件和求解方法

进水口、进气口均采用质量流量入口,出泥口和出水口均设为压力出口。液面为自由表面,固体壁面均采用无滑移边界条件。采用一阶迎风格式求解对流项,用相耦合的 SIMPLE 算法<sup>[12]</sup>对模型进行求解,计算残差设为  $10^{-6}$ 。

## 3 结果与讨论

模拟设备的尺寸、处理量均与中试相同,但进水中仅存在密度为  $2\ 650\ \text{kg}/\text{m}^3$  的 2 种细砂,粒径分别为  $50\ \mu\text{m}$ 、 $60\ \mu\text{m}$ ,质量浓度均为  $50\ \text{mg}/\text{L}$ 。曝气管均匀曝气,气水比 0.1,气泡直径  $3\ \text{mm}$ <sup>[13]</sup>。螺旋脱泥机转速  $25\ \text{r}/\text{min}$ 。实际操作时设备间歇排泥,模拟中,将出泥口先关闭 60 min,然后开启 2 min,时间步长随出泥口关闭和开启而调整。

### 3.1 无曝气条件下的模拟

首先对无曝气时的流动进行模拟研究,此时体系只有水和 2 种细砂,为水-固相 1( $50\ \mu\text{m}$ )-固相 2( $60\ \mu\text{m}$ )的三相流动。水进入蓄水池后,迅速充满,并经上、中、下 3 排配水孔流入斜板沉降区,平面 1、平面 2 的速度矢量和质量浓度分布如图 2 所示。

由图 2a 可知,出泥口关闭 60 min 时,平面 1 的沉降区内,水从配水孔流下的速度起主导作用,高速区集中在沉降区中部。沿对角线位置,水流方向变化较多;在螺旋脱泥机末端、出泥口上方均存在漩涡。平面 2 的左侧水流从 3 个配水孔急速向下,部分流体撞击到斜板后改变速度方向,各层斜板之间形成大小不一的漩涡。出斜板区域后,流体有向上方出水口流动的趋势。

由图 2b 可知,平面 1 内大部分  $50\ \mu\text{m}$  颗粒沉积在螺旋脱泥机和出泥口附近,但沉降区主体仍有固体颗粒存在。相对于  $50\ \mu\text{m}$  颗粒, $60\ \mu\text{m}$  的颗粒沉积较好,沉降区的主体无颗粒分布。

由图 2c 可知,在平面 2 所示的斜板区域,同样发现粒径的不同使  $50\ \mu\text{m}$ 、 $60\ \mu\text{m}$  颗粒的分布发生变化。 $50\ \mu\text{m}$  颗粒在底部斜板上有明显沉积,从最底层向上,沉积位置由中部逐渐后移。 $60\ \mu\text{m}$  颗粒也有类似的现象,但是斜板上沉积的质量浓度小于  $50\ \mu\text{m}$  颗粒。结合图 2b 可知, $60\ \mu\text{m}$  颗粒更易从斜板上滑下,沉积在沉降区底部。

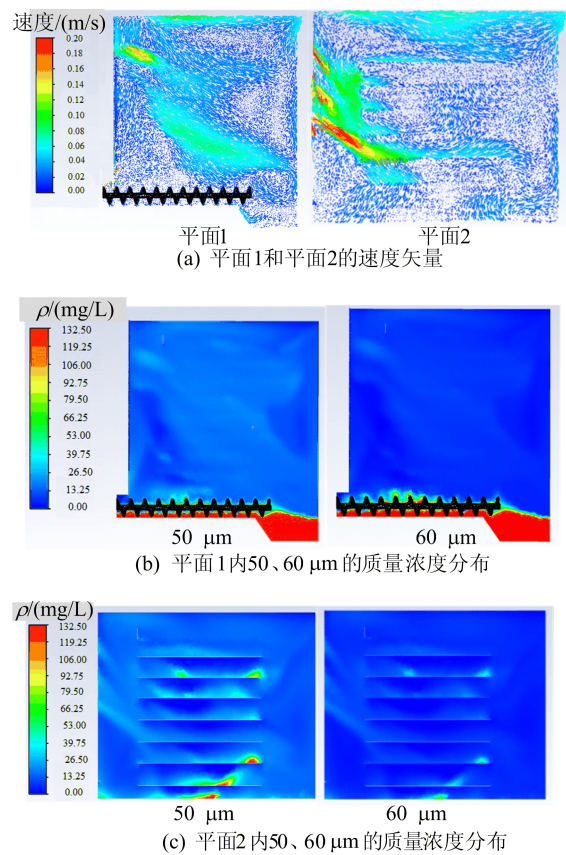


图 2 平面 1、平面 2 的速度矢量和质量浓度分布

出泥口打开后,颗粒随水从出泥口向外排出,沉降区内整体速度有所增加,流态变化不大,但固体颗粒分布有较大差异。出泥口打开 120 s 时固体颗粒的质量浓度分布如图 3 所示。

从图 3a 可以看出,平面 1 内颗粒从出泥口流出,底部沉积的颗粒迅速减少,但沉降区主体颗粒质量浓度反而增大,且  $50\ \mu\text{m}$  颗粒在主体的质量浓度高于  $60\ \mu\text{m}$  颗粒。这说明出泥口打开后对细小颗粒产生扰动,颗粒越小扰动越剧烈,可以预见,细砂去除率所受影响有所降低。因此,无曝气时更应关注一体化设备内部的细小颗粒,即使是

出泥口的开启也会对小颗粒分布产生显著影响。

从图 3b 可以看出,平面 2 内可以看到颗粒从 3 个配水孔流向斜板,斜板上沉积颗粒明显增多,出泥口颗粒质量浓度增大。与出泥口关闭时类似,50  $\mu\text{m}$  颗粒在斜板上沉积更多,60  $\mu\text{m}$  颗粒在沉降区底部沉积较多。

虽然 50、60  $\mu\text{m}$  这 2 种颗粒的粒径尺寸只有微小差别,但在无曝气条件下,粒径 10  $\mu\text{m}$  的差别给颗粒分布带来了明显差异,这可能是由于一体化的设计产生协同效应,强化了 2 种颗粒的沉降差异。

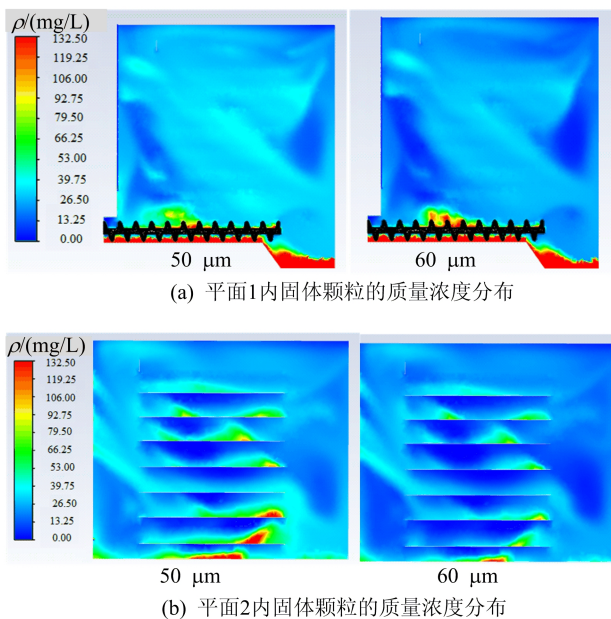


图 3 出泥口打开 120 s 时固体颗粒的质量浓度分布

### 3.2 试验结果和理论计算值的比较

#### 3.2.1 中试试验结果

中试试验在无曝气条件下进行,实测颗粒的粒径分布范围较宽,在 0.69~286.80  $\mu\text{m}$  之间,平均粒径(中位径)  $D_{50}$  为 28.58  $\mu\text{m}$ ,  $D_{75}$  为 50.36  $\mu\text{m}$ 。实测中随机采样,因此只取试验的平均值和上、下限与 3.1 节的模拟结果进行比较。去除率模拟值与试验值的比较如图 4 所示。

由图 4a 可知,出泥口关闭时,50、60  $\mu\text{m}$  这 2 种颗粒模拟去除率均先下降,然后逐渐上升,这主要是由于进水逐渐充满蓄水池和沉降区,需要一定的时间才能稳定,稳定时间约为 20 min。去除率随粒径的增大而增大,20~60 min 之间,2 种颗粒的去除率分别达到 87.0%、95.7%,而试验平均去除率仅为 40.0%,最高值为 75.0%,模拟去除率远优于试验结果。由图 4b 可知,出泥口打

开后,液体向出泥口运动,由图 3a 可知颗粒分布在沉降区主体的大部分区域,这对固体颗粒的分布产生了扰动,2 种颗粒的模拟去除率均有所下降,50、60  $\mu\text{m}$  颗粒的去除率从 87.0%、95.7% 分别降低到 68.4%、75.2%,但模拟结果仍远好于试验平均值 40.0%。

造成模拟值与试验结果差异的主要原因来自于颗粒尺寸。模拟仅限于 2 种小粒径的细砂粒,而试验中实际砂粒存在一定的尺寸分布,有大有小,无曝气时颗粒尺寸的微小差别会给去除率带来显著差异。同时模拟中将颗粒假设为刚性小球,而实际的砂粒是不规则的几何形状,一定程度上也会带来结果的不一致。

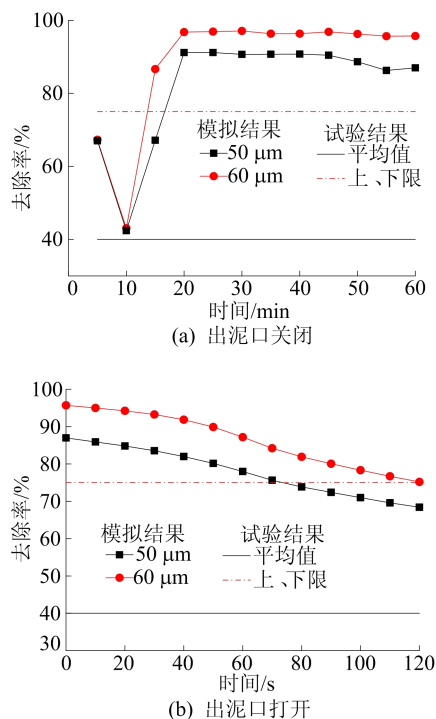


图 4 去除率模拟值与试验值的比较

#### 3.2.2 理论计算值的比较

理论去除率可以根据浅池理论<sup>[14]</sup>及斜板理论<sup>[15-16]</sup>,通过沉降速度与截留沉速的比值得到。沉降速度  $u_t$  计算公式为:

$$u_t = \frac{\rho_p - \rho}{18\mu} g d_p^2 \quad (1)$$

其中: $\rho_p$  为固体颗粒密度; $\rho$  为水的密度, $\mu$  为水的黏度, $g$  为重力加速度, $d_p$  为颗粒直径。

在进水负荷为 800  $\text{m}^3/\text{d}$  时,50  $\mu\text{m}$  颗粒截留沉速为 0.209 cm/s,根据沉降速度计算可得其沉降速度为 0.173 cm/s,因此理论去除率为 82.8%。模拟所得平均去除率为 82.0%,与理论计算值非

常接近,这一定程度上证明模拟结果是可靠的。

### 3.2.3 同类设备的比较

一体化设备的去除率也与国内、外同类除砂设备的去除率进行了比较。同类设备对不同粒径颗粒的去除率<sup>[17-19]</sup>见表 1 所列,200  $\mu\text{m}$  以上的大颗粒去除率较高,150  $\mu\text{m}$  及以下的颗粒去除率普遍较低,甚至为 0。本研究中,一体化设备对 50、60  $\mu\text{m}$  的小颗粒平均去除率可以达到 82.0% 以上,远高于其他设备的去除效果。

表 1 本文设备与其他设备的去除率 %

设备	砂粒直径/ $\mu\text{m}$				
	$\geq 300$ (200,300)	200 (150,200)	$\leq 150$	$\leq 100$	
旋流沉砂池	95	92	90	—	85 75
曝气沉砂池	92	80	95	—	42 0
其他同类设备	95	85	—	65	0 —
本一体化设备	—	—	99	—	— $\geq 82$

### 3.3 有曝气时的模拟

研究工作从无曝气过渡到有曝气,将气水比设为 0.1 进行模拟,此时体系变为水-气-固相 1 (50  $\mu\text{m}$ )-固相 2(60  $\mu\text{m}$ )的四相流动。

#### 3.3.1 流体流动特性

出泥口关闭时,平面 1 内速度矢量和颗粒质量浓度分布如图 5 所示。

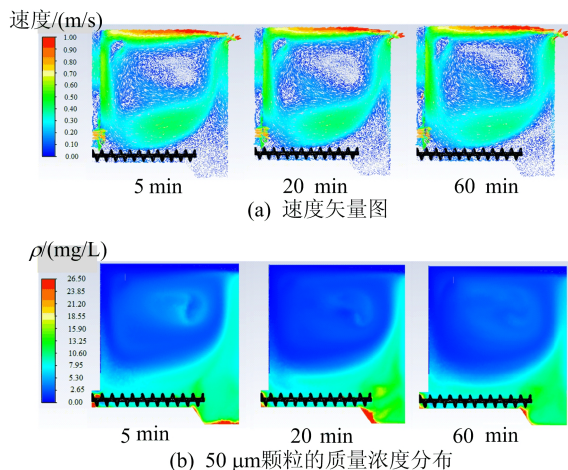


图 5 出泥口关闭平面 1 内速度矢量图和颗粒质量浓度分布

从图 5a 可以看出,随着水的注入,沉降区的下中部速度逐渐增大,20 min 以后达到稳定。与无曝气相比,沉降区内速度更大。配水孔流入的水迅速向下流动,与水平曝气管接近时,曝气管及底部螺旋脱泥机的阻挡使速度减小,并向斜上方出水口流动。整个沉降区内液体呈逆时针方向流动,同时,斜向上的水流将流体运动分为 2 个区

域。右下方出泥口关闭时,出泥口附近及脱泥机末端速度较小,形成死区,会有颗粒沉积。左上方流速较大,池中上部及左上角有大小不同漩涡形成,这主要是向下的流动和向上的曝气相互作用的结果。出泥口打开后,螺旋脱泥机上部及出泥口附近速度增大,部分液体从出泥口流出,但对整个沉降区内的影响不大,流态没有明显变化。

平面 2 内斜板区域的流动与平面 1(图 5a)类似,出泥口关闭时,靠近左侧配水孔位置的水流急速向下,撞击到底部后获得较大的水平流速,并逐渐上流。出泥口打开后,流态没有明显变化,只是左侧向下的速度和底部速度有所增大。为节约篇幅,仅文字说明,平面 2 的速度矢量图省略。

#### 3.3.2 颗粒质量浓度分布

曝气不仅影响了沉降区的液体流动,也改变了固体颗粒的分布。曝气的引入消除了细小颗粒之间粒径的差别,50、60  $\mu\text{m}$  颗粒的质量浓度分布几乎完全一致,为节约文字篇幅,下文只给出 50  $\mu\text{m}$  颗粒的分布图。由图 5b 可知,5 min 时,颗粒随流体进入沉砂池,先向下后向上从出水口流出,在中上部速度漩涡处(图 5a)颗粒质量浓度有所增大;随着时间延长,沉降区内流速增大,固体颗粒的分布逐渐均匀、稳定,与速度矢量图(图 5a)相吻合;20 min 稳定后,颗粒集中在底部螺旋脱泥机和出泥口附近,仅少量颗粒从出水口流出。图 5b 中颗粒最大质量浓度仅为 26.5 mg/L,远小于无曝气时的 132.5 mg/L,意味着颗粒的去除率得到明显提高。

出泥口开启后,固体颗粒从出泥口排出,出水口的颗粒相对于出泥口关闭时明显减少,整个沉降区颗粒质量浓度分布与图 5b 中 60 min 的分布非常接近,出泥口的开启没有对颗粒分布产生扰动,这说明曝气减弱了其他因素对颗粒分布的负面影响,起到稳定细砂去除率和工艺流程的作用。

平面 2 内,左侧配水孔处固体颗粒质量浓度最大,随后颗粒从底部斜板流过,部分颗粒在底部斜板上沉积,部分颗粒向上随水流流失。出泥口打开后,斜板上沉积的固体减少,右下角的出泥口附近质量浓度降低。与无曝气时相比,颗粒在斜板上沉积较少,细砂的去除效果更好。(为节约篇幅,仅文字说明,平面 2 的质量浓度分布图也省略。)

#### 3.4 气水比的影响

本研究进一步将气水比由 0.1 增大为 0.4,并将气水比为 0(无曝气)、0.1、0.4 时颗粒的去除

率进行比较。气水比对颗粒去除率的影响如图 6 所示。由图 6a 可知,出泥口关闭,无曝气时,颗粒去除率 20 min 后可以达到稳定,而有曝气时,去除率 10 min 左右就达到稳定,并且随时间的变化更平缓。因此,图中仅绘出了 10 min 后的去除率变化曲线。由图 6b 可知,出泥口开启后,无曝气时去除率明显下降,而气水比 0.1 和 0.4 的去除率有所波动,总体仍呈现上升趋势。这主要是由于曝气条件下液体速度明显增大,而颗粒直径较小,更易被液体裹挟带动向出泥口运动,由出泥口排出,因此曝气的存在一定程度上增大了去除率。比较图 6b 中气水比为 0.1 和 0.4 时颗粒的去除率,可以发现气水比从 0.1 增大至 0.4 没有显著改变颗粒的去除率。

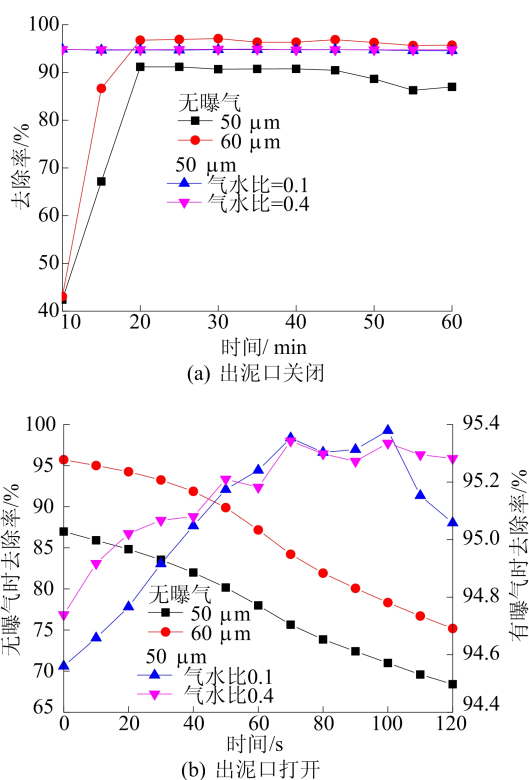


图 6 气水比对去除率的影响

对于粒径小于  $100\ \mu\text{m}$  的小颗粒而言,出泥口关闭,有无曝气时,2 种细小颗粒的去除率接近,但有曝气时去除率达到稳定的时间更短。出泥口打开后,无曝气时的去除率明显下降,50、60  $\mu\text{m}$  颗粒的平均去除率分别为 77.9%、86.4%,而曝气的存在使去除率上升,并相对稳定,平均去除率可达 95.0%。综合考虑,曝气有利于小颗粒的去除,但曝气量进一步增大,去除率并没有明显提高,反而会有所波动,且曝气能耗增大。因此在

本研究范围内,气水比取 0.1 较好。

文献[20]研究发现曝气沉砂池的去除率与砂的粒径有一定的正相关性,一般粒径大的砂粒,去除率也高。粒径大于  $150\ \mu\text{m}$  颗粒去除率在 83.0% 以上,粒径为  $150\ \mu\text{m}$  的细砂去除率大于 75.0%。本研究中颗粒直径远小于  $150\ \mu\text{m}$ ,但去除率优于文献[20]的结果,由于粒径越大,颗粒去除率越高,因此,一体化设备对于  $100\ \mu\text{m}$  以上大颗粒的去除率会更高。

国内的曝气沉砂池对粒径小于  $100\ \mu\text{m}$  细砂粒的去除率普遍较低<sup>[21]</sup>,气水比在 0.1 左右时,去除率从 12%~38% 不等,这些结果都远低于一体化设备的模拟结果。新开发的精细除砂一体化设备相对于普通曝气沉砂池,细砂去除率明显提高,且在有曝气的条件下,去除率更稳定,适合处理无机悬浮物细小、有机物质量浓度低的进水,避免粒径小于  $200\ \mu\text{m}$  的颗粒物“穿透”预处理,进入生化池,干扰后续各单元的稳定运行。

## 4 结 论

本文对含有 2 种细小砂粒的一体化设备进行了计算流体力学模拟、中试试验和理论计算,并将三者结果进行比较,得到以下结论:

1) 在一体化设备中,无曝气时,50、60  $\mu\text{m}$  颗粒的质量浓度分布和去除率有差别,去除率随粒径增大而增大,60  $\mu\text{m}$  颗粒平均去除率(86.4%)大于 50  $\mu\text{m}$  的平均去除率(77.9%)。此时出泥口的开启对小颗粒分布会产生扰动,颗粒越小,扰动越剧烈。

2) 将无曝气条件下的液相-固相 1-固相 2 的三相模拟结果与试验值比较,模拟去除率优于试验值,模拟去除率与理论计算值接近,证明模拟结果的可靠性。模拟颗粒的平均去除率在 82.0% 以上,远优于同类除砂设备的去除效果。

3) 曝气的引入消除了 2 种小颗粒直径的差别,不论是质量浓度分布还是去除率,在曝气条件下,2 种颗粒的结果几乎没有差别。

4) 气水比从 0 到 0.1,颗粒去除率会显著提高,从 82.0% 提高到 95.0%,且去除率随时间的变化更平缓。进一步增大气水比,颗粒去除率并未明显提高,反而导致去除率波动及能耗增大。因此,对一体化设备而言,最优的气水比为 0.1。在此条件下,一体化设备对粒径小于  $100\ \mu\text{m}$  的小颗粒具有较高的去除率(>95.0%),达到甚至优于同类设备对  $200\ \mu\text{m}$  以上大颗粒的处理水平。

## [参 考 文 献]

- [1] 戴晓虎. 污泥处理处置的瓶颈与技术分析[C]//第八届全国市政污泥处理与处置高级研讨会. 北京:[出版者不详], 2017:1-12.
- [2] 曹业始,郑兴灿,刘智晓,等. 中国城市污水处理的瓶颈、缘由及可能的解决方案[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(11):1292-1302.
- [3] 范茏,徐农,施汉昌,等. 计算流体力学在污水处理中的应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:100-120.
- [4] 许晓毅,葛丹丹,于兰,等. 基于回归正交设计的沉砂池细砂分离特性分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(11):63-69.
- [5] 邵超,叶勇,汪家权,等. 新型旋流沉砂池砂粒去除效果的数值模拟[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(5):373-379.
- [6] 周士雄. 基于 Fluent 对旋流沉砂池的数值模拟[J]. 水科学与工程技术, 2018(5):60-63.
- [7] 王旭博,王延涛. 新型导流板旋流沉砂池数值模拟及水处理效能研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(5):106-111.
- [8] 许畅,罗凡,周锐,等. 平流沉淀池导流挡板优化设计[J]. 给水排水, 2021, 47(增刊 1):18-22.
- [9] 汪光焘. 城市供水行业 2000 年技术进步发展规划[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1993:20-32.
- [10] 黄延林,李玉仙,何文杰. 斜管沉淀池结构参数优化的理论分析[J]. 给水排水, 2007, 33(4):20-26.
- [11] ANSYS Inc. ANSYS Fluent user's guide[EB/OL]. [2023-03-10]. <http://www.ansys.com>.
- [12] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. New York: McGraw Hill, 1980:146-151.
- [13] 肖柏青,张法星,戎贵文. 气泡尺寸对曝气池内气液两相流数值模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11):2006-2010.
- [14] 陈虹,李婷,林春敬,等. U 型斜管在给水厂沉淀池改造中的应用及探讨[J]. 城镇供水, 2020(2):27-32.
- [15] 智凯敏. 斜板沉降器的分析研究[J]. 石油化工设计, 2017, 34(1):17-19.
- [16] 王喜良,黄云平,周兴龙,等. 斜板沉降固液分离理论及设备进展[J]. 金属矿山, 1999(2):21-24.
- [17] 龙干,颜振邦,赵华,等. 旋流沉砂池在上海白龙港污水处理厂的应用[J]. 中国市政工程, 2001(增刊 1):26-31.
- [18] 何强,王琦,胡澄,等. 山地城市污水特细砂除砂系统目标粒径确定[J]. 环境工程学报, 2014, 8(7):2653-2657.
- [19] HUNTER G, BARBADILLO C, BLACKD P, et al. The testing of grit systems: understanding fact and fiction [C]//Annual Conference Technical Program. Raleigh: NC AWWA-WEA, 2007:124-126.
- [20] 石艳玲,濮晨熹. 曝气沉砂池的运行效果评估[J]. 给水排水, 2015, 41(增刊 1):134-138.
- [21] 王水兵,高俊贤,王燕,等. 某污水处理厂旋流沉砂池结构改造及运行效果分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7):116-121.

(责任编辑 吴 亮)

## (上接第 988 页)

- [2] 王建宇,胡元芳,刘志强. 高地应力软弱围岩隧道挤压型变形和可让性支护原理[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3):9-17.
- [3] 康红普,徐刚,王彪谋,等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J]. 煤矿开采, 2019, 1(2):1-33.
- [4] QIU D H, LI S C, ZHANG L W, et al. Rockburst prediction based on tunnel geological exploration and ground stress field inverse analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7):2034-2040.
- [5] 周子寒,何川,蒙伟,等. 花岗质侵入岩地层隧址区的初始地应力场反演分析[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(2):322-330.
- [6] 陶文斌,陶杰,侯俊领,等. 深埋巷道地应力特征及优化支护设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(4):28-37.
- [7] 王金安,李飞. 复杂地应力场反演优化算法及研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2):189-205.
- [8] 孙礼健,朱元清. 初始地应力场分析方法的研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2008, 29(3):14-21.
- [9] 裴书锋,赵金帅,于怀昌,等. 考虑洞室岩体应力型破坏特征的局部地应力反演方法及应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(12):4093-4104.
- [10] 唐建新,王宏图,李晓红,等. 深部岩盐矿地应力的确定及特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23):3954-3958.
- [11] 张志峰. 位移函数法回归初始地应力与围岩稳定分析[D]. 南京:河海大学, 2004.
- [12] 王庆武,巨能攀,杜玲丽,等. 拉林铁路桑日至加查段三维地应力场反演分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(4):1450-1462.
- [13] 张强勇,向文,于秀勇,等. 双江口水电站地下厂房区初始地应力场反演分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(8):86-95.
- [14] 代聪,何川,陈子全,等. 超大埋深特长公路隧道初始地应力场反演分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10):100-108.
- [15] 杨志强,高谦,翟淑花,等. 复杂工程地质体地应力场智能反演[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(4):154-160.
- [16] HAIMSON B C, CORNET F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7):1011-1020.

(责任编辑 吴 亮)