

不同回流比与配水管高度下水泵循环式调质池数值模拟

张新喜^{1,2}, 王凯¹, 钟梅英¹, 冯承民¹, 胡小兵¹, 邱高¹, 李嘉伟¹, 王晨¹, 秦晴¹

(1. 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 南京工业大学浦江学院, 江苏 南京 211200)

摘要: 针对污水处理过程中进水水质波动问题,在进水质量流量、进水波动周期一定的情况下,采用矩形波为波动类型,通过 Fluent 软件对水泵强制循环式调质池的调质过程进行数值模拟,分析不同回流比和回流配水管高度对调质池调质效果的影响。结果表明:回流比是影响调质池调质效果的主要因素;随着回流比的增大调质功能系数呈现“先剧增后趋稳”的趋势,在“快速增长区”内,当回流比由 0.16 增大至 1.00 时,调质功能系数相应从 0.72 增长至 0.82;进入“缓慢增长区”后,回流比继续增至 6.00,则调质功能系数增至 0.92,可以得出回流比越大,调质效果越好,但进入“缓慢增长区”后,回流比对调质效果的影响减弱。回流配水管高度的变化对调质池的调质效果无显著影响;当配水管高度在 50 ~ 350 mm 之间变化时,调质功能系数在 0.81 ~ 0.85 之间波动,变化幅度仅为 3.7%,回流配水管高度为 350 mm 时,因回流配水管接近出水口而增强了出水口区域的水体混合和水流流速,调质功能系数相对较大(0.843)。若需提升调质池的调质效果,应优先选择调整回流比,研究成果可为水泵强制循环式调质池的设计与运行提供相应的理论依据。

关键词: 水泵强制循环式调质池; 调质功能系数; 数值模拟; 回流比; 水质波动

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0115-09

Numerical simulation of water pump forced water quality equalization basin under different reflux ratios and reflux distribution pipe height

ZHANG Xinxi^{1,2}, WANG Kai¹, ZHONG Meiyong¹, FENG Chengmin¹, HU Xiaobing¹,
QIU Gao¹, LI Jiawei¹, WANG Chen¹, QIN Qing¹

(1. College of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;

2. Nanjing Tech University Pujiang Institute, Nanjing 211200, China)

Abstract: In view of the influent water quality fluctuation in the process of sewage treatment, the rectangular wave was used as the fluctuation type under the condition of certain influent mass flow and influent fluctuation period to simulate the equalization process of the water pump forced water quality equalization basin (WPFWQEB) using Fluent. The equalization function coefficient (γ) was introduced to the simulation, and then the effects of different reflux ratios (s) and reflux distribution pipe heights (h) on the equalization effect of the WPFWQEB were analyzed. Results indicated that s was the main factor affecting the equalization effect of the WPFWQEB, with the increase of s , the γ showed a trend of “rapid growth followed by stabilization”. Firstly, γ increased from 0.72 to 0.82 correspondingly with the increase of s from 0.16 to 1.00 in the “rapid growth area”; then s increased gradually to 6.00 and γ to 0.92 correspondingly in the “slow growth area”, indicating that the larger the s value, the better the equalization effect; however, after entering the “slow growth area”, the influence of s on the equalization effect was weakened. Further study revealed that the change of h had no significant effect on the equalization effect of the WPFWQEB, because γ merely fluctuated from 0.81 to 0.85 when h varied from 50 to 350 mm, which only accounted for 3.7% of the variation range; However, it was worth noting that when h was set as 350 mm, the water mixing and flow velocity in the outlet area were enhanced because the reflux distri-

收稿日期: 2021-08-26; 修回日期: 2022-01-19

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (202004h07020030)

作者简介: 张新喜 (1961-), 男, 安徽黄山人, 教授, 硕士生导师, 研究方向为污水与污泥处理。

通讯作者: 王凯 (1996-), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理与数值模拟。

bution pipe was close to the outlet, in turn y increased slightly to 0.843. So, if it is necessary to improve the equalization effect of the WPFWQEB, priority should be given to adjusting s . This study could provide a theoretical basis for the design and operation of the WPFWQEB.

Key words: water pump forced water quality equalization basin (WPFWQEB); equalization function coefficient; numerical simulation; reflux ratio; water quality fluctuation

1 研究背景

水质波动是污水处理厂难以稳定运行的重要影响因素之一^[1]。受人类活动和气候变化等因素的影响,进入污水处理系统的污水水质几乎每时每刻都在发生变化且有时变化巨大^[2-3]。一方面,进水水质的变化在很大程度上影响着污水厂的设计及处理技术的选择^[4]、导致对运行条件敏感的高速反硝化工艺性能恶化甚至崩溃^[5]、在不同程度上限制了载体厌氧折流板反应器的设计和废水回收工艺的选择^[6];另一方面,进水水质波动会降低污水处理工艺的运行效率。Sharma 等^[7]研究发现,在混合地下水人工湿地系统中,较高的进水负荷会通过降低硝化作用进而影响系统的 TN 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除;Choi 等^[8]在使用热水解-厌氧共消化装置处理高浓度有机废物时发现,厌氧消化装置中微生物的活动会因水质波动而受限,导致消化器性能减弱;进水水质严重超过进水标准时会造成生化处理装置运行失常^[9],导致污水处理效果大为降低。

水质调节池(简称“调质池”)用于减弱和控制污水进水水质波动,进水经调质池混合、均质化后稳定进入后期处理工艺单元,可避免因水质波动带来的污水处理厂出水不达标或者生物处理系统崩溃等问题^[4]。根据水质调节的方式,调质池可分为差程式与外加动力式两大类^[10]。一般的差程式调质池(如对角线式调质池、往复折流式调质池^[11]等)主要依靠复杂的池型结构来增加水力混合效果,但复杂的池型结构无法根据进水参数调整运行参数,难以根据用户要求实现实时水质调节,因而其可调性差。水泵强制循环式调质池是外加动力式调质池的一种,其利用水泵将调质池底部的废水抽回到池中,再由配水管均匀分配,从而达到调质效果^[12]。目前国内外关于该调质池池型的研究较少,其调质性能及效果并不明确,值得进一步研究。

ANSYS Fluent 软件因其具有功能多、界面友好以及数值算法准确、丰富等优点^[13-14],已经被广泛地应用于污水处理过程模拟和新设备及构筑物的设计、改进等方面^[15-19]。Neto 等^[20]利用该软件研究

了一种新型管状陶瓷膜组件的油水混合物分离过程,表明该系统有利于清水的输送和油的滞留;Ding 等^[13]使用 Fluent 软件,通过模拟氨氮浓度和流场分布,预测和评价了氨的电氧化过程,得出氨氮去除模型的理论值与实验值误差小于 4%。该软件也被应用于模拟观察初沉池的流动和悬浮固体的传输过程,对初沉池的水动力驱动设计和升级提供了依据^[21]。此外,有学者也将 Fluent 用于对曝气池^[22]、旋流混合反应器^[23]、明渠紫外线废水消毒反应器^[24]和好氧颗粒污泥^[25]等方面的研究,应用效果良好。水泵强制循环式调质池池内水流为非定常流,调质效果难以观察,因此可以合理利用 Fluent 的数值模拟功能对其进行调质研究。

本研究通过 Gambit 对调质池进行三维建模,使用 Fluent 中的混合模型对污水、示踪剂两相流进行数值模拟,然后利用各相的体积分数、流速分布以及示踪剂进出浓度等参数,比较不同回流比、回流配水管高度下的调质效果,阐明各调质效果下的调质机理,验证调质功能系数运用的可行性,为水泵强制循环式调质池的工程应用与改进提供依据。

2 模型建立

2.1 数学模型

在计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)中,多相流动不只限于气态、液态和固态三相,在多相流动中,所谓的“相”可以定义为具有相同类别的物质^[26]。为了方便地评估水泵强制循环式调质池的调质效果,在入口处除污水流入之外,增加小流量的液体示踪剂作为第二相,构成污水-示踪剂双相流。

选用 Fluent 提供的 Mixture 模型^[27]及标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[28]进行模拟,假设条件如下:边界参数均匀且为定常数;池壁面为无滑移绝热壁面;池内两相之间为互相贯通的连续体;两相流体为稳态不可压缩流体。其中 Mixture 模型基于混合相的连续性方程、动量方程、能量方程以及第二相的体积分数方程对调质池进行数值模拟^[20,27-29],该模型允许相间有穿插,两相间无相对速度和漂移速度,适合污水-示踪剂双相流的模拟。标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型中的 k 为

湍动能、 ε 为耗散率,采用系统默认的设置值^[20]。

2.2 采用 Gambit 建立模型

水泵强制循环式调质池的三维实体模型采用 Gambit 建立。池主体长度为 1 250 mm,宽度为 600 mm,有效水深为 400 mm;进、出水管直径均为 25 mm,回流管直径为 30 mm,回流配水管的配水孔(8个)直径为 16 mm。污水进入调质池后,一部分经出口流出,另一部分经回流管分配再次进入调质池。为了实现污水回流功能,在回流管一处添加“旋转桨叶区”,模拟运行时桨叶的旋转产生的推力,使回流管内水流向上运动进而达到回流的目的,同时根据转速的不同实现不同的回流流量。网格划分过程中,池主体与回流管大部(除桨叶旋转区)采用 Hex/Wedge 单元,并采用 Cooper 方案;桨叶旋转区采用 Tet/Hybrid 单元, TGrid 方案,网格划分结果如图 1 所示。

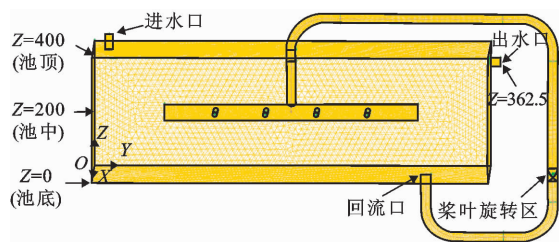


图1 水泵强制循环式调质池数值模型三维网格划分(单位:mm)

2.3 Fluent 求解设定

本文数值模拟求解器采用 Fluent 19.0,网格文件导入到求解器时,相关设置如下:采用三维双精度求解器(3ddp),对于不可压缩流体选用非耦合求解器,求解器属性为压力基、绝对速度和非定常流。设置边界条件时,入口类型为质量流量入口(mass-flow inlet),出口为自由出流(outflow),桨叶旋转区Z方向的上下边界为内部边界(interior),回流配水管出水孔接触面为interface边界。

矩形波函数是常见的描述水质水量波动的数学函数之一^[30],本文调质池的进水浓度波动函数为周期 120 min 的矩形波函数,质量流量为 0.12 kg/s,示踪剂的最大浓度为 25.77 g/L,最小浓度为 15.16 g/L,计算得到示踪剂最大质量浓度为 0.003 18 kg/s,最小质量流量为 0.001 85 kg/s。由于 Fluent 软件没有周期变化的进水函数,本文将清水作为恒定流进水,示踪剂的进水流量利用 UDF 即用户自定义函数自行编译,作为进水参数。

2.4 调质效果评价指标

目前,对于各类调质池的调质效果研究评价多使用定性评价,难以准确表达调质池的调质效果。为

了对本研究中的调质池的调质效果进行定量评价,引入调质池调质功能系数 y 作为量化评价指标^[31],所得调质池调质功能系数 y 越接近 1,则调质效果越好。首先每隔一段时间记录调质池进、出水的浓度参数,然后根据记录的进、出水浓度参数计算进、出水时水质评价指标的浓度标准差,进而计算 y ,具体计算公式如下:

$$y = \frac{\sigma_i - \sigma_o}{\sigma_i} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CI_i - \overline{CI})^2}{n-1}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CO_i - \overline{CO})^2}{n-1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CI_i - \overline{CI})^2}{n-1}}} \quad (1)$$

式中: σ_i 为进水浓度标准差,kg/m³; σ_o 为出水浓度标准差,kg/m³; n 为进/出水水样采集样本总数; CI_i 为第 i 个进水水样的浓度,kg/m³; $\overline{CI}$ 为进水水样浓度的平均值,kg/m³; CO_i 为第 i 个出水水样浓度,kg/m³; $\overline{CO}$ 为出水水样浓度的平均值,kg/m³。

3 模型验证

验证试验的水泵强制循环式调质池池体主要尺寸与采用 Gambit 建立的数值模型尺寸一致。水质波动发生装置采用双阀双盘可调水质波动发生器^[32],该装置可以产生试验所需的水质变化为矩形波变化的进水;验证试验设定水质波动周期为 120 min,进口流量、示踪剂浓度也与数值模型一致,回流流量与进口流量相同,回流配水管高度为 200 mm;采用示踪剂(红墨水,上海英雄(集团)有限公司)浓度作为进出水水质检测指标,使用紫外线分光光度计(722s,上海精密科学仪器有限公司)通过检测示踪剂吸光度,分析示踪剂浓度,模拟与试验过程中示踪剂浓度曲线如图 2 所示。

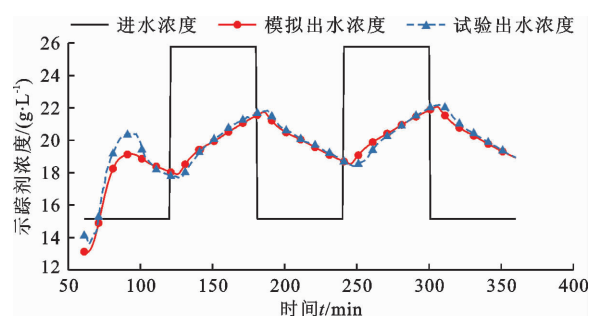


图2 模拟与试验过程示踪剂浓度曲线

由图 2 可见,试验与 Fluent 模拟得出示踪剂浓度随时间的变化规律相似。当 t 较小时,出水浓度不稳定且较小,随着 t 的增大,出水浓度趋于稳定且在 $17.5 \sim 22.0 \text{ g/L}$ 内波动。当进水浓度波动时,试验与模拟浓度均会相应地保持一定时间段的增大或减小,然后再呈减小或增大变化,这是因为示踪剂在水中需要运动一段时间才可以到达出水口,出水口示踪剂浓度变化后滞于进水口浓度变化。总体而言,试验和模拟的出水示踪剂浓度在 t 达到 60 min 后趋于稳定。试验数据与模拟数据的重合度较高,由公式(1)得出模拟出水和试验出水的调质功能系数分别为 0.82、0.78,仅相差 5.1%。因此,本文所设计的 Fluent 模型可真实地反映水泵强制循环式调质池的进、出水状况与调质效果。

4 结果分析与讨论

4.1 无循环设备调质池的调质效果

为了体现使用水泵强制循环式调质池的调质效果,首先对去除水泵循环设备的调质池进行模拟,无循环设备调质池出水设置为自由出流。无循环设备调质池在进水波动周期 T 为 60、66、75、86、100 和 120 min 时的调质功能系数 y 如图 3 所示。

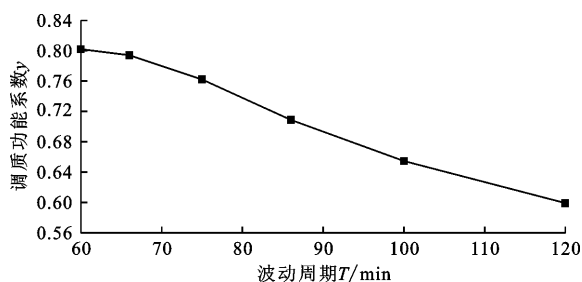


图 3 无循环设备调质池进水波动周期 T 与调质功能系数 y 的关系曲线

由图 3 可以看出,进水波动周期 T 在 60 min 和 66 min 时,由于进水波动周期较短,且与进水停留时长(40 min)接近,则进水在 1 个周期内及周期交替阶段过程中,池内水质混合较为均匀,同时进水在池内呈紊流状态,可促进水质的均匀混合,此时调质功能系数 y 可达 0.80,调质性能良好,说明调质池在无外加辅助设备的情况下本身具备一定的调质能力;随着进水波动周期的增大,调质功能系数 y 从 0.80 降至 0.60,调质效果明显变差,这可能由于波动周期变长后,进水在高浓度或低浓度阶段时间变长,而停留时间较短,进水无法在调质池内混掺均匀而流出,使得调质池的调质能力逐步降低。 T 为 120

min 时 y 达到最低值,此时无循环设备调质池的调质效果有较大提升空间,因此下面采用进水水质波动周期为 120 min 的矩形波进水进行水泵强制循环式调质池的模拟研究。

4.2 水泵强制循环式调质池内流体的运行轨迹

为判别水流在池体内的运动状态,利用 Fluent 的 UDF 即用户自定义函数功能自行编译,在回流比为 1 的情况下,对池内的水流进行雷诺数计算,计算所得雷诺数为 2 026 ~ 5 250,最小雷诺数大于矩形断面层流流动的临界雷诺数 575,因此,设定模拟研究中水流为紊流状态。

图 4 为水泵强制循环式调质池的进水质点迹线图。由图 4 中可以看出,进水在入口处流速较大,进水自调质池上端径直流入,接触池底后向图中右侧与上侧移动;在池主体部分中的迹线杂乱无章,符合紊流流体质点运动极不规则的特征,且水流在池中形成众多小的环流区,可进一步促进不同水质进水的扩散混掺^[33];水流到达池体右侧后,一部分经过出水口进入后续处理设施,另一部分在底部经回流管均匀分配到调质池中实现回流,与后续的进水进行混合,回流流量大小可由水泵进行控制。

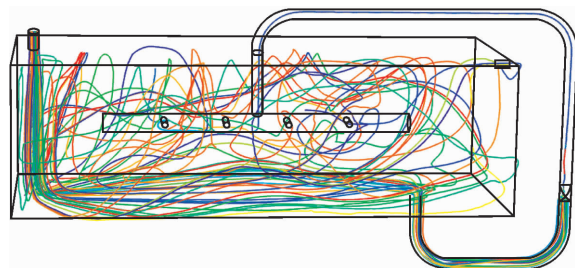


图 4 水泵强制循环式调质池的进水质点迹线示意图

4.3 回流比对调质效果的影响

水泵强制循环式回流比 s 为回流口抽取流量与调质池进水流量的比值,是对调质池调质性能研究的一个量化参考指标。因旋转区域转速为 35、80 和 125 rad/s 时对应的回流比 s 分别为 0.16、0.42 和 0.71,所以本节中回流比 s 从小至大分别取 0.16、0.42、0.71、1.00、2.00、3.00、4.00、5.00 和 6.00 等 9 个值,在调质池出水稳定(模拟运行 6 h)时截取示踪剂体积分数分布效果图,进行分析。

为方便观测出水口处的水质浓度情况,在池主体截取 $Z = 362.5 \text{ mm}$ 高度处的 XOY 截面(图 1 出口截面)作为示踪剂体积分数观测面。图 5 为上述 9 种回流比时 $Z = 362.5 \text{ mm}$ 处 XOY 截面的示踪剂体积分数分布。由图 5(a)可以看出,当回流比为

0.16 时,图中颜色差异较大,中间大部颜色为浅绿色,左、右两端向青色过渡,说明此时进口和出口截面的水质浓度梯度大,这是因为水流在进口向池体扩散时,流动面突然扩大,导致进口附近流速差异较大,进而导致进水水质的浓度梯度较池体中部更大,同时因出口处截面突然变窄,出水流速加快,因而出水水质浓度梯度也同样增大。如图 5(b)、5(c)、5(d) 所示,小幅度增大回流比后,图中颜色差异变大,浓度梯度较大的现象依然存在,但此时截面颜色分布相互“混杂”,不单是两侧的颜色差异较大,截面中部同样差异明显,表明此时不同浓度的进水开始相互接触,进而增加了不同浓度进水的混合效果。随着回流比由 0.71 进一步增大至 2.00,截面大部出现浅黄色(图 5(e)、5(f)),说明增大回流比后,池内流速增大,截面的示踪剂体积分数变大^[34],但右

侧的颜色分布均匀,表明出水水质稳定。由图 5(g)、5(h)、5(i) 可以看出,在 $s = 4.00$ 、5.00、6.00 时,示踪剂浓度处于高低浓度值的 50%,颜色差异变小,多为绿色与青色,单色的分布区域变大,表明该截面浓度梯度变化较小,在右侧出水口处的出水水质进一步稳定,出水浓度波动变小,调质效果较好。综上所述,回流比的增大可以增强系统内不同浓度间污水的混合作用,回流比越大,则水流运动的动力越大,污水均质化效果越好。

图 6 为上述 9 种回流比时 $Z = 200 \text{ mm}$ 处 XOY 截面的混合相流速矢量图。该截面为回流配水管各配水孔中心轴向的 XOY 平面,可直观显示回流水的运动情况。在流速矢量图中,用箭头的长度和颜色代表梯度^[35],当颜色相近时,箭头线的长短即代表流速的大小。

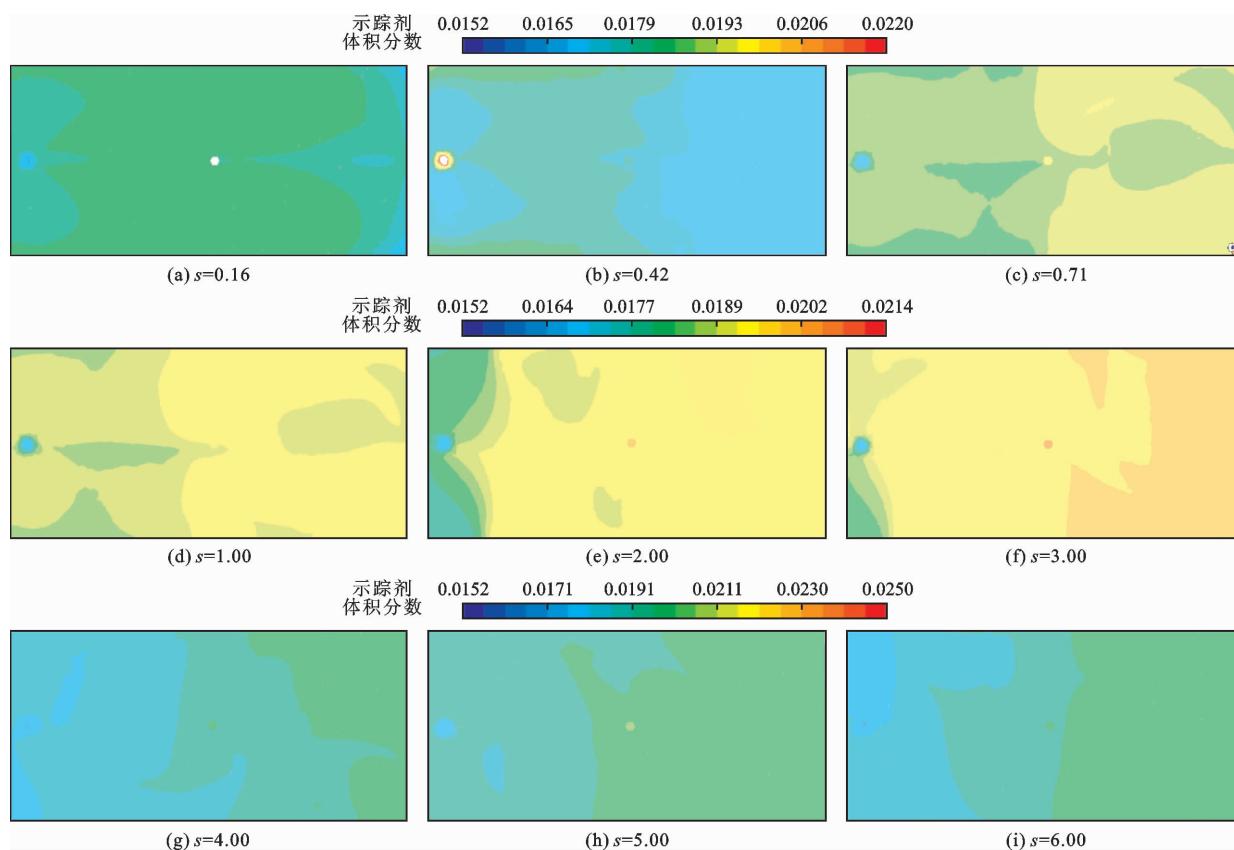


图5 不同回流比下 $Z = 362.5 \text{ mm}$ 截面的示踪剂体积分数分布

如图 6(a) 所示,回流比为 0.16 时,因回流比很小,因此相比调质池进水流量,8 个回流配水管配水孔(以下简称“配水孔”)的流量同样很小,此时由于池体右侧进口流量相对较大导致流速较大,回流水流与进口水流相互作用下,形成上下两个环流区,但由于右侧离进水口较远、回流量不足等原因导致水流流速和紊流程度过小^[23],进而易形成死水区,出水口区

域调质效果较差。由图 6(b)、6(c)、6(d) 可以看出,小幅度增大回流比后,随着回流量的增大,配水孔的出水流速变大;同时,除最右侧两个配水孔外,左侧 6 个配水孔的出水均向左侧并最终向池底部运动,究其原因,虽然回流量略有增大,但回流污水在经过回流管时产生了一定的能耗,导致流速减缓,同时回流水经过 8 个配水孔分配后,每个配水孔的出水流量相

比进水流量偏小(不足进水流量的 $1/8$),因此进水流速远大于回流水的流速,水流流速越大,则压强越小,导致回流水向进水方向流动循环,大部分环流依旧在池体左侧发生,而池内右侧的流速只是比回流量为 0.16 时有所增大,同样易产生死水区。继续增大回流比后发现,各配水孔出水流速明显增大,水流在上、下两侧接触池壁后,向左、右两侧分流(图 6(e)、6(f)、6(g)),这是因为回流比大幅度增大后,回流流量也大幅度增大,如回流比 $s = 4$ 时(图 6(g)),各分配管出流量理论上为进水口流量的一半,即 0.06 kg/s ,从而使池内水流的运动趋势由回流水主导,进一步增加了

不同浓度污水的混匀;左侧水流与池体进水形成一定的逆流接触,在力的相互作用下增强了水质的混合^[33],右侧区域同样在回流水的作用力下形成环流区,死水区不复存在。当 $s = 5.00$ 、 6.00 时(图 6(h)、6(i)),除了入口进水与配水孔出水区域之外的截面大部分区域的流速矢量箭头颜色变为蓝色,而配水孔区域的流速矢量箭头颜色变成青色、绿色,甚至黄色和红色,表示回流污水已经主导了调质池内水流的环流、接触等调质现象的产生,整个截面区域的流速大小基本相近(配水孔出水除外),形成了大的环流区,明显有利于提升调质池的调质效果。

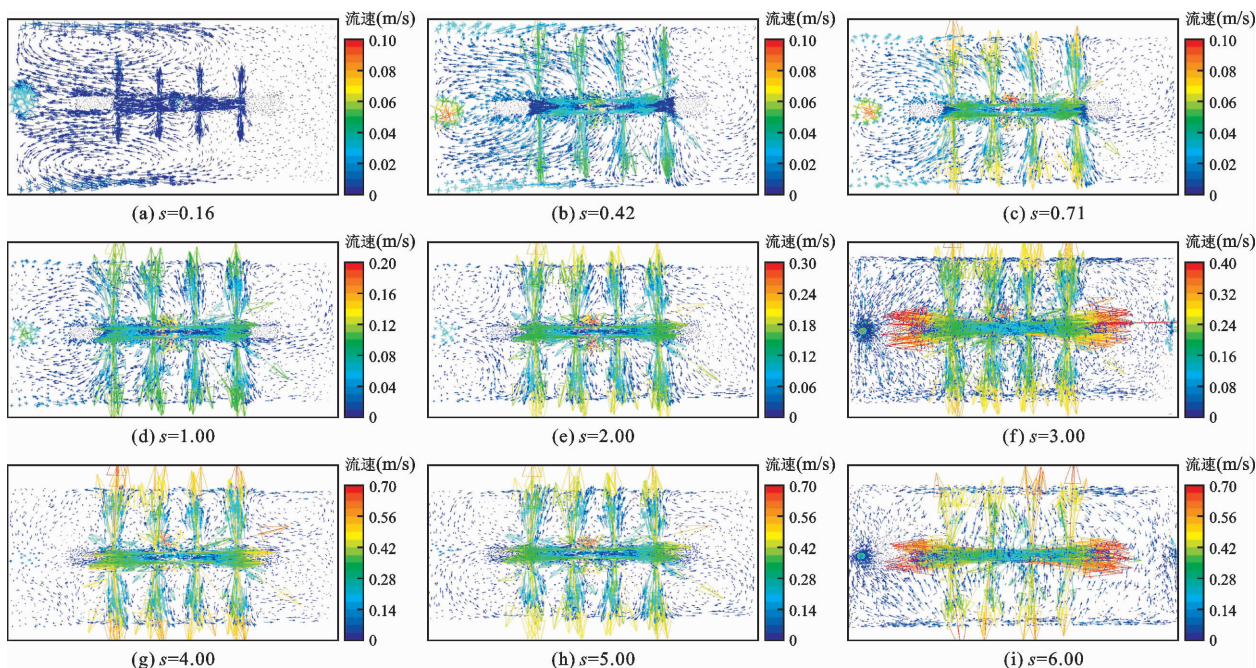


图 6 不同回流比下 $Z = 200 \text{ mm}$ 截面的混合相流速矢量图

图 7 为回流比 s 与调质功能系数 y 值的关系曲线,可以直观显示出水泵强制循环式调质池的调质效果随回流比 s 的变化而产生的差异。

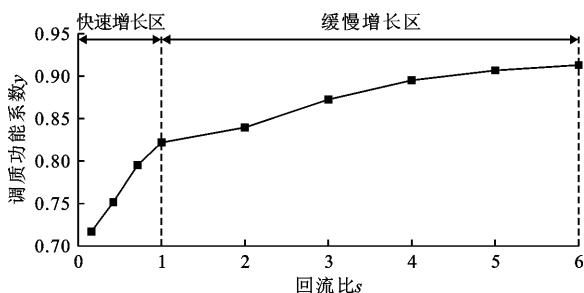


图 7 回流比 s 与调质功能系数 y 的关系曲线

由图 7 可以看出,不同回流比的调质功能系数 y 值在不同区间内均不同, y 值随着回流比的增大而不断增大。 s 为 0.16 时 y 值最低,为 0.72,相比同水

质波动周期下无辅助设备调质池的 y 值增大了 20%,因为回流水流的存在可提升调质池的调质效果。当 s 从 0.16 增大到 1.00 时, y 值相应地从 0.72 增大到 0.82, s 值增大了 0.84,而 y 值相对增大了 13.9%,增长速度较快,可称为“快速增长区”,拟合该区 s 与 y 的一次函数关系式为 $y = 0.1275s + 0.6985$ (复相关系数为 0.990);当回流比从 1.00 增大至 6.00 时, y 值相对增大了 12.2%,但 s 值增大了 5.00,因此称此区域为“缓慢增长区”,此区域 y 值随 s 值的增幅变缓,曲线梯度变小,回流比为 6.00 时, y 值达到 0.92,拟合该区 s 与 y 的二次函数关系式为 $y = -0.002547s^2 + 0.03729s + 0.7831$ (复相关系数为 0.986)。整个的曲线变化趋势基本与体积分数云图以及流速矢量图的变化趋势和分析相一致,说明了 y 值作为调质池调质效果量化评价指标的可

行性。同时表明,回流比是影响水泵强制循环式调质池调质功能的重要因素,当调质效果一般时,可提高回流比以增强调质池的调质效果,但提升回流比无疑会加大水泵的运行负担,能源消耗也随之增大。因此,可参考拟合的 s 与 y 的函数关系,结合工程实际与运行成本分区域分策略地提升回流比。

4.4 回流配水管高度对调质效果的影响

根据以上分析,综合考虑调质池调质效果和能源消耗等因素,设定 s 均为 1.00,进行回流配水管高度对调质效果影响的模拟。回流配水管高度 h 为回流配水管中心的 XOY 面距池底的高度,分别设定为 50、150、200、250 和 350 mm,其中 $h = 200$ mm 的调质效果图与 4.3 节 $s = 1.00$ 的效果图相似,因此未在下文图 9 和 10 中表达。回流配水管高度 h 分别为 50、150、250 和 350 mm 时 $Z = 362.5$ mm 处 XOY 截面(出口截面)的示踪剂体积分数分布如图 8 所示,图 8 直观展现了出口截面上示踪剂体积浓度随 h 和空间的变化情况。

由图 8、图 5(d)可见, $h = 50$ 、150、200、250 和 350 mm 时,出口截面的平均体积分数分别为

0.0185、0.0189、0.0192、0.0184 和 0.0193,最大值与最小值仅相差 4.7%,体积分数变化很小,表明回流配水管高度的变化对示踪剂体积分数影响较小。图 8、图 5(d)中体积分数变化剧烈的区域为左侧,而左侧靠近进水口,此区域流速较大,使得水流充分紊动,示踪剂接触面积变大^[24,28],同时相对流速的增大也增强了水流的卷吸作用,使得体积分数进一步变化。右侧区域由于远离进水口,流速相对较低,体积分数分布相对均匀,说明调质效果良好。 h 从 50 mm 增大至 350 mm 的过程中,截面的整体体积分数变大,这可能是因为随着 h 的增大,回流配水管越来越接近出水口,增强了出口区域的水体混合效果和水流流速;另有研究表明,在一定范围内,水流流速变大时,体积浓度也会增高^[34]。整体来说,不同 h 的出水口区域体积分数分布都比较均匀,没有出现大的波动。

回流配水管高度 h 分别为 50、150、250 和 350 mm 时各回流配水管中心 XOY 剖面的混合相流速矢量见图 9,通过此图可以观察到各剖面的流速矢量随垂向高度与平面位置的变化情况。

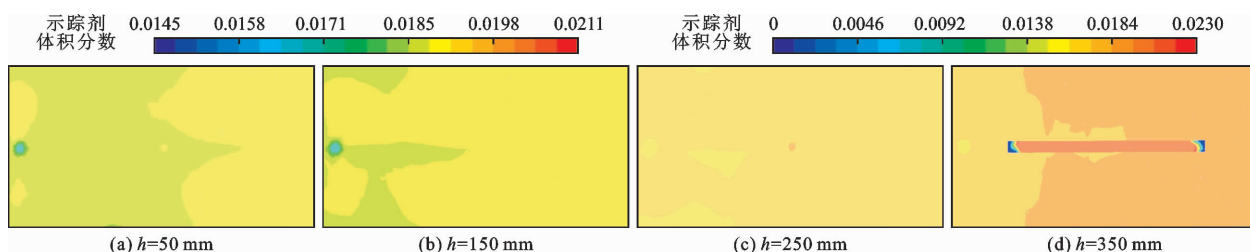


图8 不同回流配水管高度下 $Z = 362.5$ mm 截面的示踪剂体积分数分布

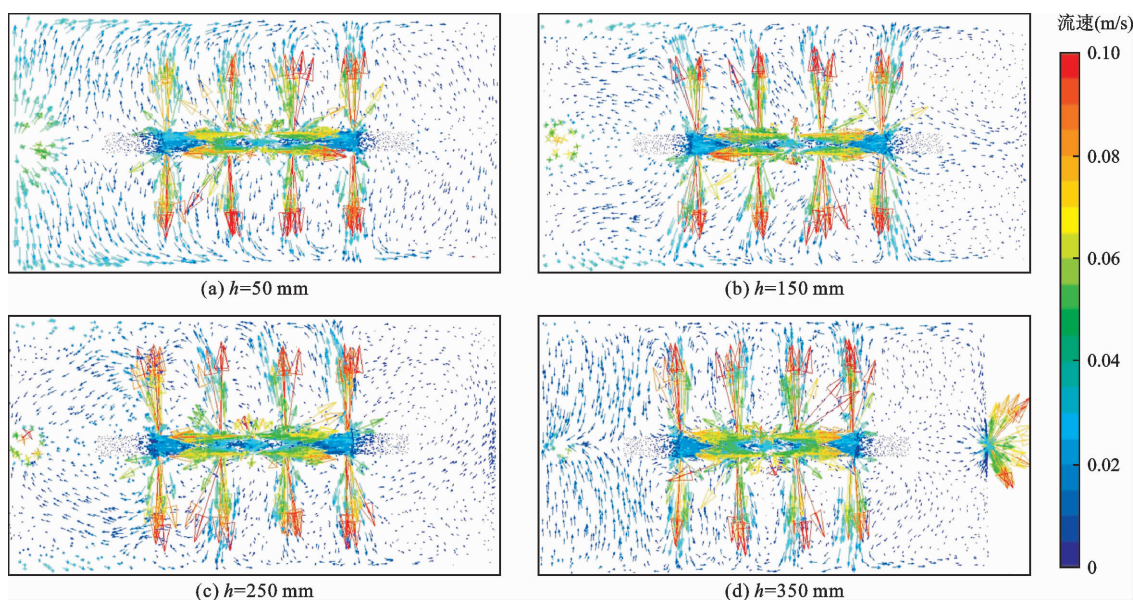


图9 不同回流配水管高度下各回流配水管中心 XOY 剖面的混合相流速矢量

由图 9、图 6(d) 可以看出, 截面左侧水流流速大于截面右侧流速, 与图 8、图 5(d) 的分析结果一致。如 $h = 50 \text{ mm}$ 时(图 9(a)), 左侧水流的平均流速为 0.025 m/s , 右侧水流的平均流速为 0.015 m/s , 因此左侧流体旋流作用增强^[20], 加速了水流的混合。8 个配水孔出水的初始流速远大于池内大部分区域的流速, 使整个截面形成大的环流, 有力地促进了整个截面乃至池体内流体的均质化。当 $h = 350 \text{ mm}$ 时(图 9(d)), 截面高度靠近出水口, 回流水流可直接与出水面的水流进行混匀, 调质效果最佳。

图 10 为回流配水管高度 h 与调质功能系数 y 值的关系曲线, 直观显示了水泵强制循环式调质池的调质效果随回流配水管高度 h 变化而表现出的差异。

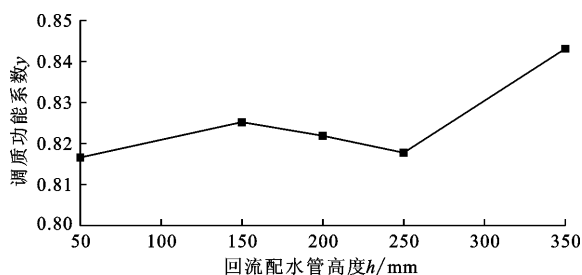


图 10 回流配水管高度 h 与调质功能系数 y 的关系曲线

由图 10 可以看出, 随着 h 由 50 mm 逐渐增加至 350 mm , 其调质功能系数 y 在 $0.81 \sim 0.85$ 之间变化, 相较于无设备调质池 $T = 120 \text{ min}$ 下的 y 值(0.60), 调质效果提升率达 $35\% \sim 40\%$, 再一次说明回流设备对调质系统的调质效果有较大的提升作用。 y 值在 h 的取值范围内的变化幅度为 3.7% , 相比 s 取值范围内的变化幅度(27.8%)大幅度降低, 这说明回流管配水管高度对调质效果的影响远低于回流比对调质效果的影响。此外, 当 $h = 350 \text{ mm}$ 时, y 值相对较大, 这对应了流速矢量图的分析, 曲线图、体积分数分布云图及矢量图的分析结果相吻合。

上述结果表明, 水泵强制循环式调质池可高效地抑制水质波动。在提升调质池调质效果的方法上, 由于回流配水管一旦建成, 则难以对其高度进行调整, 且调整回流配水管高度不易于达到提升调质效果的目的, 所以应优先考虑调整水泵强制循环式调质池的回流比。

5 结 论

针对污水处理过程中的进水水质波动问题, 利用 Fluent 对水泵循环式调质池内部流场进行模拟, 获取示踪剂体积分数分布云图与流速矢量图, 引入

调质功能系数对调质效果进行量化评价, 得到结论如下:

(1) 回流比是影响水泵强制循环式调质池调质效果的主要因素。当回流比在 $0 \sim 1$ 区间时, 调质功能系数随回流比的增大而快速增大, 回流比等于 1 时调质功能系数可达 0.82 , 此区间内增大回流比可大幅度提高调质功能系数, 即增强调质池的调质效果; 当回流比大于 1 时, 调质功能系数随回流比的增长变缓; 当回流比大于 4 时, 调质功能系数随回流比的增长幅度进一步减小。调整回流比应综合考虑运行成本与调质功能系数的提升幅度。

(2) 回流配水管高度对调质池的调质效果无明显影响。调质功能系数在回流配水管高度为 $50 \sim 350 \text{ mm}$ 范围内的变化幅度仅为 3.7% , 相比回流比取值范围内的变化幅度(27.8%)大为减小。当配水管高度接近出水口时, 调质功能系数有小幅增长, 建议将回流配水管设置高度与出水口高度相近。需要提升调质池的调制效果时, 应优先考虑回流比因素。

(3) 无辅助设备的调质池本身具备一定的调质能力, 但随着进水质量波动周期的增大, 无辅助设备调质池的调质效果会逐步降低。水泵强制循环式调质池可明显增强调质池的调质效果, 是一种理想、有效的抑制水质波动的调质系统。

参考文献:

- [1] KIM M, KIM Y, KIM H, et al. Evaluation of the k - nearest neighbor method for forecasting the influent characteristics of wastewater treatment plant[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016, 10(2): 299 - 310.
- [2] LUO Tao, YANG Min, HAN Jingyi, et al. A novel model-based adaptive control strategy for step-feed SBRs dealing with influent fluctuation [J]. Bioresource Technology, 2014, 167: 476 - 483.
- [3] WANG Xiaodong, KVAAL K, RATNAWEERA H. Characterization of influent wastewater with periodic variation and snow melting effect in cold climate area[J]. Computers & Chemical Engineering, 2017, 106: 202 - 211.
- [4] SUN Yan, CHEN Zhuo, WU Guangxue, et al. Characteristics of water quality of municipal wastewater treatment plants in China; Implications for resources utilization and management[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 1 - 9.
- [5] LI Wei, ZHENG Ping, ZHANG Jiqiang, et al. The effect of substrate concentration fluctuation on the performance of high-rate denitrifying reactor[J]. Bioresource Technology, 2014, 167: 53 - 60.
- [6] NIWA T, HATAMOTO M, YAMASHITA T, et al. Demon-

- stration of a full-scale plant using an UASB followed by a ceramic MBR for the reclamation of industrial wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 218: 1–8.
- [7] SHARMA P K, TAKASHI I, KATO K, et al. Effects of load fluctuations on treatment potential of a hybrid sub-surface flow constructed wetland treating milking parlor waste water[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 216–225.
- [8] CHOI G, KIM H, LEE C. Long-term monitoring of a thermal hydrolysis-anaerobic co-digestion plant treating high-strength organic wastes: Process performance and microbial community dynamics[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 319: 124138.
- [9] ZHOU Xu, JIA Lixia, LIANG Chenglong, et al. Simultaneous enhancement of nitrogen removal and nitrous oxide reduction by a saturated biochar-based intermittent aeration vertical flow constructed wetland: Effects of influent strength[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 1842–1850.
- [10] 罗惠云, 韩洪波. 无动力调节池设计原理及应用[J]. *给水排水*, 2015, 51(6): 40–42.
- [11] 唐胜卫, 马超, 张新喜, 等. 马钢焦化废水水质调节技术改造[J]. *冶金动力*, 2012(1): 59–62.
- [12] 张新喜, 何媛, 丁磊, 等. 焦化废水水质稳定技术研究[C]// 全国冶金用水节水与废水综合利用技术研讨会, 青岛, 2009.
- [13] DING Jing, GAO Qingwei, WANG Yuhan, et al. Simulation and prediction of electrooxidation removal of ammonia and its application in industrial wastewater effluent[J]. *Water Environment Research*, 2021, 93(1): 51–60.
- [14] 李淑江, 李程前, 沈敏敏. 基于 FLUENT 的气液两相流喷嘴雾化性能研究[J]. *轻工机械*, 2021, 39(6): 81–85.
- [15] LI Chao, DENG Tong, WEN Zengguang, et al. Evaporation experiment and numerical simulation study of desulfurization wastewater in high-temperature raw gas[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2019, 146: 117–129.
- [16] STANKO S, HRUDKA J, SKULTETYOVA I, et al. Analysis of seasonal temperature influence on hydraulic processes in a waste water sedimentation tank[J]. *Monatshefte für Chemie*, 2017, 148(3): 489–495.
- [17] NETO G L O, OLIVEIRA N G N, DELGADO J M P Q, et al. Hydrodynamic and performance evaluation of a porous ceramic membrane module used on the water–oil separation process: An investigation by CFD[J]. *Membranes*, 2021, 11(2): 121.
- [18] 龚发云, 潘明铮, 汤亮. 基于 FLUENT 的潜水搅拌机数值模拟[J]. *湖北工业大学学报*, 2017, 32(1): 93–96.
- [19] 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.
- [20] NETO G L O, OLIVEIRA N G N, DELGADO J M P Q, et al. A new design of tubular ceramic membrane module for oily water treatment: Multiphase flow behavior and performance evaluation[J]. *Membranes*, 2020, 10(12): 403.
- [21] PATZIGER M, KISS K. Analysis of suspended solids transport processes in primary settling tanks[J]. *Water Science and Technology*, 2015, 72(1): 1–9.
- [22] 周靖. 曝气池内气液流态的实验分析和数值模拟[J]. *西安文理学院学报(自然科学版)*, 2018, 21(5): 9–12+53.
- [23] 马亚兵, 李赓, 李薇, 等. 基于 Fluent 的旋流混合反应器模拟与优化[J]. *石油机械*, 2021, 49(3): 111–116+124.
- [24] SAHA R K, RAY M, ZHANG Chao. Computational fluid dynamics simulation and parametric study of an open channel ultra-violet wastewater disinfection reactor[J]. *Water Quality Research Journal of Canada*, 2015, 50(1): 58–71.
- [25] PAN Kai, SU Kuizu, ZHANG Shuai, et al. Hydrodynamics and permeability of aerobic granular sludge: The effect of intragranular characteristics and hydraulic conditions[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, 113: 133–140.
- [26] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- [27] 刘存, 王庆涛, 陈翔宇, 等. 网格絮凝池结构参数对场影响的数值模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(4): 162–167.
- [28] 姚娟娟, 宋莉莉, 刘存. 斜板沉淀池前配水渠的数值模拟及结构优化[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5): 120–126.
- [29] 金建华, 张红伟. 潜水搅拌机三维两相流的数值模拟[J]. *中国农村水利水电*, 2014(10): 159–162.
- [30] KHUDENKO B M. Development and analysis of equalization basins[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1985, 111(6): 907–922.
- [31] 张新喜, 陈逸梅, 钟梅英, 等. 一种调质池调质功能评价方法及其应用: CN 105574664B[P]. 2019-11-29.
- [32] 王保. 水量水质波动发生器的研制及出水特性曲线的研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2015.
- [33] 冯雪林, 范世良, 张溢铭, 等. 流体剪切破解剩余污泥的实验与模拟研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(4): 136–140.
- [34] 汪文生, 卢雪飞, 朱永伟, 等. 悬浮填料颗粒在水处理过程中的分布[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(23): 83–86.
- [35] 丁欣硕, 焦楠. FLUENT 14.5 流体仿真计算从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.