

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.11.011

基于回归正交设计的沉砂池细砂分离特性分析

许晓毅¹, 葛丹丹¹, 于 兰², 温 妍¹, 徐 璇², 吉芳英²

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045)

摘 要: 悬浮颗粒粒度特性是影响旋流沉砂池设计与运行效能的重要因素之一,我国城镇污水中无机物粒径细微,不宜直接采用常规参数取值进行设计。针对城镇污水中无机悬浮颗粒的粒度分布特征,构建了比氏旋流沉砂池模型,以回归正交试验设计为手段,开展了数值模拟与实际物理模型相结合的研究。基于悬浮颗粒不同粒径范围(0~100、100~200、>200 μm),建立了分离效率与影响因素之间的多元回归模型,明确了各因素对不同粒径颗粒去除率的影响规律及优化运行参数。不同粒度范围悬浮颗粒去除的各最优工况中,搅拌浆转速和水力停留时间各不相同,适当增加水力停留时间和转速,可以在一定程度上提高对细微无机颗粒的分离去除效能,但对粒径<100 μm 的颗粒去除率提升空间较低。在优化工况条件下,物理模型试验结果与回归模型分析的误差为1.86%~4.20%,具有良好可信度。

关键词: 粒度分级; 数值模拟; 回归正交; Pista 沉砂池

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)11-0063-07

Analysis of Fine Grit Separation Characteristics in a Vortex-type Grit Chamber Based on Regression Orthogonal Design

XU Xiao-yi¹, GE Dan-dan¹, YU Lan², WEN Yan¹, XU Xuan², JI Fang-ying²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Particle size characteristic of suspended particles is one of the important factors affecting the design and operation efficiency of a vortex-type grit chamber. The particle size of inorganic substances in urban sewage in China is very small, so it is inappropriate to use the conventional parameters to design or operate a grit chamber directly. According to the distribution characteristics of inorganic suspended solid (ISS) in urban sewage, a Pista vortex-type grit chamber model was established, and separation characteristics of fine grit in the vortex-type grit chamber were simulated by means of regression orthogonal design. Based on different particle size range of the suspended particles (0-100 μm , 100-200 μm and >200 μm), a multivariate regression model between ISS removal efficiency and influencing factors was developed, and the influence rule of each factor on particle removal efficiency and the optimal conditions were determined. Rotation speed and hydraulic residence time (HRT) were different in the

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07314-001-002)

通信作者: 许晓毅 E-mail: xuxiaoyiskd@usts.edu.cn

optimal conditions for ISS removal in various particle size ranges. Although the increase of HRT and rotation speed could improve the separation and removal efficiency of the fine inorganic particles to a certain extent, it had a poor effect on the removal efficiency of particles with particle size less than $100\text{ }\mu\text{m}$. Under the optimal operation conditions, the error between the actual physical model results and the regression prediction was $1.86\% - 4.20\%$, which had good reliability.

Key words: particle size grading; numerical simulation; regression orthogonal; Pista grit chamber

沉砂池是污水处理厂去除水中无机悬浮固体(inorganic suspended solid, ISS)的关键预处理单元,规范要求按照“去除相对密度为 2.65、粒径 $d > 200\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒”设计。但是,我国许多城镇污水处理厂进水 ISS 粒径细微(平均中位径小于 $200\text{ }\mu\text{m}$)而难以通过沉砂池有效去除^[1-3],导致污水处理厂生化单元混合液有机分比值(MLVSS/MLSS)远低于设计值(0.75),也影响了处理工艺运行效率和剩余污泥后续处理的能源回收^[2,4],强化预处理单元细微无机物的去除对城镇污水处理厂的高效运行具有实际意义。

旋流池颗粒分离特性研究主要采用数值模拟与现场模型试验。数值模拟研究最早衍生于水力旋流器的固液分离过程。王淦等^[5]采用多重参考系模型和离散相模型,对旋流池除砂效率的影响因素进行了数值分析,认为转速对细砂去除率的影响较显著,搅拌桨高 $140 \sim 150\text{ mm}$ 、转速 $15 \sim 25\text{ r/min}$ 时,粒径为 $100 \sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 的 ISS 去除率约为 60%。周琴^[6]针对初期雨水的单因素控制数值模拟分析,得出旋流沉砂池的最佳运行工况。叶勇^[7]在新型旋流沉砂池数值模拟研究中认为搅拌桨倾角对 ISS 去除率具有影响。汪家权等^[8]基于旋流沉砂池物理模型小试,采用正交试验方法分析了旋流沉砂池除砂率与各影响因素的相关性。赵德强等^[9]针对中位径 $106\text{ }\mu\text{m}$ 的含砂进水,基于响应曲面分析确定了除砂效能的关键影响因素(停留时间、桨叶转速和桨叶高度)及优化取值。由于粒度分级特性与沉砂池构型的差异,依赖于有限样本数据支撑的小试模型试验所获得的研究结论难以充分阐释影响因素间的关联;现有数值模拟报道也鲜有基于计算流体力学与城镇污水细微砂分级特征的细砂去除效能优化的研究成果。

笔者根据我国典型城镇污水的 ISS 特征,针对构建的 Pista 旋流池,建立颗粒分离效率的数值分析

方法,进行旋流沉砂池构型参数与运行条件优化,明确关键影响因素的相互关系,旨在为旋流池工艺设计优化与运行控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数值模拟方法

1.1.1 Pista 沉砂池数值模拟模型构建

参照《给水排水设计手册(第5册):城镇排水》中旋流沉砂池Ⅱ型构造及前期工作基础,设计构建了 Pista 沉砂池三维模型^[10],如图 1 所示。

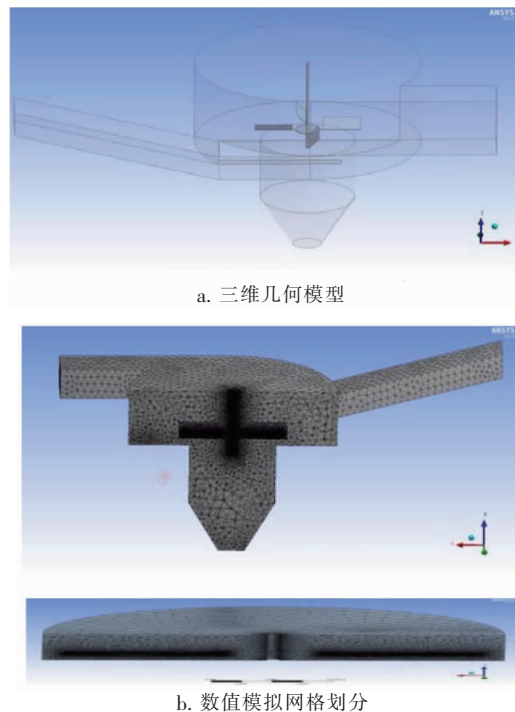


图1 Pista 沉砂池三维几何模型与网格划分示意

Fig.1 Three-dimensional geometrical model and meshing of Pista grit chamber

模型由封闭满流的进水斜坡(坡度为 15°)、沉砂池体(砂斗、弓形隔板、导流板和叶轮等)、出水渠组成。

模型构型参数如下:进水斜坡段水平长 600 mm 、宽 145 mm ;沉砂池池体直径 732 mm 、总高 304

mm,其中砂斗直径304 mm,砂斗高406 mm,搅拌桨转盘直径60 mm,搅拌桨叶片长宽分别为120 mm与50 mm;出水渠宽145 mm,高214 mm。水中无机颗粒在搅拌桨转动与水平环流等形成的强制涡旋作用下,实现ISS的沉降分离。

由于进水斜坡、出水渠具有非轴对称性,因此采用三维造型软件(Unigraphics NX 10.0)进行Pista沉砂池的几何建模,同时运用“Design Modeler”对其进行可动区域的分离。采用Delaunay方法划分三维非结构化网格以控制网格质量。选用细网格密度,网格总数为1 986 215、节点数为357 713。

1.1.2 数学模型的确定

以欧拉-拉格朗日模型模拟Pista沉砂池中的固液两相流动。粒子相采用非稳态离散相模型追踪细微泥砂的运动轨迹^[11]。流体相的湍流运动过程采用RNG $k-\varepsilon$ 模型(ISS粒径 $\leq 200\ \mu\text{m}$)和Realizable $k-\varepsilon$ 模型(ISS粒径 $> 200\ \mu\text{m}$)^[10,12]。搅拌桨周围可动区域使用滑移网格模型模拟计算瞬态流动。

1.1.3 边界条件设置与数值求解

进口边界设定流速均匀,流动为湍流状态,进水渠入口面与矩形出水渠出口面分别设置为速度进口边界与压力出口边界,自由液面采用对称面边界,搅拌桨设置为壁面边界。同时,设定进口处颗粒分布均匀,ISS(密度为 $2\ 650\ \text{kg}/\text{m}^3$)速度等于流体相速度。ISS粒径分布 $0\sim 100$ 、 $100\sim 200$ 、 $> 200\ \mu\text{m}$ 占比分别为47%、28%、25%。此外,在颗粒离散相的边界条件中,砂斗底部和出口分别为捕获类型、逃逸类型。

运用Fluent软件进行数值求解以及后处理工作。采用一阶迎风格式对控制方程进行离散,采用分离式解法求解离散控制方程。

根据HRT和质量流率确定进砂总量,基于沉砂池有效容积和质量浓度确定沉砂总量,进而计算ISS去除率。

1.2 回归正交试验

以沉砂池对ISS的去除率为试验指标(Y),在前期研究工作的基础上^[10,13],选用水力停留时间(HRT)、搅拌桨转速(n)、搅拌桨倾角(θ)、搅拌桨距池底高度(h)作为主要考察因素(分别记作 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4)。

回归正交的数值模拟采用二水平全面试验,选

择 $L_{16}(2^{15})$ 正交表,各因素的水平编码设置具体如表1所示。

表1 各考察因子的水平编码

Tab.1 Coding levels of each factor

规范变量编码 Z_j	自然变量			
	X_4/mm	$X_3/(\text{°})$	$X_2/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	X_1/s
上星号臂 $Z_{2j}(\text{r})$	80	75	30	50
上水平 $Z_{0j} + \Delta j(1)$	70	67.5	25	42.5
零水平 $Z_{0j}(0)$	60	60	20	35
下水平 $Z_{0j} + \Delta j(-1)$	50	52.5	15	27.5
下星号臂 $Z_{1j}(-\text{r})$	40	45	10	20
变化间距 Δj	10	7.5	5	7.5

1.3 模型验证试验

1.3.1 试验装置与试验水质

验证试验装置用有机玻璃板制作,如图2所示。搅拌桨采用不锈钢材料,通过无极变速减速器控制其转速。



图2 试验验证中试装置

Fig.2 Pilot test facility for verification

试验配水采用自来水投加石英砂,ISS粒径分布与数值模拟试验基本一致,不同ISS粒径($0\sim 100$ 、 $100\sim 200$ 、 $> 200\ \mu\text{m}$)的体积分数分别为42%~48%、25%~31%、25%~30%。中位粒径为 $119\sim 129\ \mu\text{m}$,配水ISS浓度为 $190\sim 200\ \text{mg}/\text{L}$ 。

1.3.2 试验方法

采用潜水泵稳定调节沉砂池进水量($1.8\sim 2.9\ \text{L}/\text{s}$),连续均匀投砂。每组试验完成后,将沉砂池底部ISS烘干,测定颗粒粒径分布(BT-9300HT型激光粒度仪),采用重量法测定并计算ISS去除率,各组进行3次平行试验。

2 结果与讨论

2.1 回归试验数值模拟结果与检验分析

2.1.1 回归方程数值模拟结果

各回归正交试验组数值模拟的具体结果如表2

所示。

回归方程显著性检验结果见表 3。

表 2 各试验组回归数值试验结果

Tab. 2 Numerical simulation results of general regression design experiments

序号	h	θ	n	HRT	ISS 去除率 $Y/\%$		
	X_4/mm	$X_3/(\circ)$	$X_2/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	X_1/s	粒径 $< 100 \mu\text{m}$	粒径: $100 \sim 200 \mu\text{m}$	粒径 $> 200 \mu\text{m}$
1	70	67.5	25	42.5	9.86	65.10	90.40
2	50	67.5	25	42.5	9.98	66.19	89.68
3	70	52.5	25	42.5	12.15	63.16	85.13
4	50	52.5	25	42.5	12.18	53.78	83.12
5	70	67.5	15	42.5	6.73	75.42	93.52
6	50	67.5	15	42.5	6.88	74.19	92.07
7	70	52.5	15	42.5	7.00	64.42	85.80
8	50	52.5	15	42.5	7.14	65.99	87.45
9	70	67.5	25	27.5	13.09	74.68	92.64
10	50	67.5	25	27.5	13.14	72.62	93.23
11	70	52.5	25	27.5	13.38	78.74	94.91
12	50	52.5	25	27.5	13.48	74.11	92.98
13	70	67.5	15	27.5	9.79	75.92	93.60
14	50	67.5	15	27.5	10.89	76.63	94.44
15	70	52.5	15	27.5	12.18	75.34	93.42
16	50	52.5	15	27.5	12.35	77.51	94.96
17	60	60	20	20	9.28	75.18	92.23
18	60	60	20	50	11.89	75.82	92.98
19	60	60	10	35	12.89	76.59	96.39
20	60	60	30	35	12.56	71.73	86.18
21	60	45	20	35	11.63	72.82	88.46
22	60	75	20	35	8.80	77.55	94.02
23	40	60	20	35	11.40	75.62	92.74
24	80	60	20	35	10.83	75.17	92.22
25	60	60	20	35	16.42	86.58	97.61
26	60	60	20	35	16.27	86.04	96.98
27	60	60	20	35	14.41	84.83	99.56
28	60	60	20	35	13.38	82.60	96.94
29	60	60	20	35	15.46	76.27	89.51
30	60	60	20	35	13.89	80.98	95.04
31	60	60	20	35	12.35	89.94	98.56

根据显著性分析结果,当 $d < 100 \mu\text{m}$ 时,二次项 Z_1^2 、 Z_3^2 在置信度 $\alpha = 0.01$ 下显著,一次项 Z_1 、 Z_2 和二次项 Z_4^2 在置信度 $\alpha = 0.05$ 下显著,表明 HRT、 n 、 θ 和 h 均对粒径 $< 100 \mu\text{m}$ 的除砂率有一定影响,其中 HRT 的二次项和 θ 的影响特别显著,且并非简单的线性关系。

当 $100 \mu\text{m} \leq d \leq 200 \mu\text{m}$ 时, Z_1 和 Z_1^2 、 Z_2^2 、 Z_3^2 、 Z_4^2 在置信度 $\alpha = 0.01$ 下显著, Z_2 和 $Z_1 Z_3$ 在置信度 $\alpha = 0.1$ 下显著,表明 HRT、 n 、 θ 和 h 的二次项均对粒径为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 的 ISS 除砂率有特别显著影响,

HRT 和 θ 的交互关系也是除砂率的影响因素之一。

当 $d > 200 \mu\text{m}$ 时, Z_1 在置信度 $\alpha = 0.01$ 下显著,表明 HRT 对粒径 $> 200 \mu\text{m}$ 的除砂率影响特别显著;一次项 Z_2 、 Z_3 和二次项 Z_2^2 、 Z_3^2 以及交互项 $Z_1 Z_3$ 在置信度 $\alpha = 0.05$ 下显著,表明 n 、 θ 及它们的二次项、HRT 和 θ 的交互关系对除砂率也具有显著影响。

回归方程显著性检验说明各因素与除砂率 Y 之间的数学关系在选定的试验点与试验结果拟合良好。

表3 回归方程的显著性检验

Tab.3 Significance test of regression equation

差异源	粒径 < 100 μm		粒径: 100 ~ 200 μm		粒径 > 200 μm	
	F	显著性	F	显著性	F	显著性
Z ₁	4.908	显著	10.058	特别显著	8.537	特别显著
Z ₂	6.126	显著	3.805	一般显著	5.590	显著
Z ₃	2.519	—	2.403	—	5.373	显著
Z ₄	0.099	—	0.205	—	0.001	—
Z ₁ ²	8.937	特别显著	9.347	特别显著	3.847	一般显著
Z ₂ ²	2.317	—	11.720	特别显著	6.604	显著
Z ₃ ²	10.519	特别显著	9.881	特别显著	6.711	显著
Z ₄ ²	6.896	显著	9.523	特别显著	4.076	一般显著
Z ₁ Z ₂	1.199	—	1.839	—	0.458	—
Z ₁ Z ₃	0.005	—	4.052	一般显著	5.231	显著
Z ₁ Z ₄	0.016	—	0.045	—	0.095	—
Z ₂ Z ₃	0.009	—	0.266	—	0.036	—
Z ₂ Z ₄	0.026	—	0.865	—	0.329	—
Z ₃ Z ₄	0.016	—	0.201	—	0.000	—
回归	2.663	显著	3.889	特别显著	2.991	显著

注: $F_{0.1}(1, 16) = 3.05$, $F_{0.05}(1, 16) = 4.49$, $F_{0.01}(1, 16) = 8.53$, $F_{0.05}(14, 16) < F_{0.05}(12, 16) = 2.42$, $F_{0.01}(14, 16) < F_{0.01}(12, 16) = 3.55$ 。
“—”表示无显著影响;显著性强弱:一般显著($\alpha = 0.1$) < 显著($\alpha = 0.05$) < 特别显著($\alpha = 0.01$)。

2.1.2 回归方程失拟性检验

回归模型失拟性检验结果表明(零水平试验次数为7),各粒径分级ISS去除率与各因素之间的四元二次回归方程的失拟的 F 值分别为2.019($d < 100 \mu\text{m}$)、1.355($100 \mu\text{m} \leq d \leq 200 \mu\text{m}$)、0.623($d > 200 \mu\text{m}$), F 值均小于 $F_{0.1}(10, 6)$ 。因此,在置信度0.1下,所建立的回归模型失拟性不显著,在研究范围内回归方程拟合度较高。

2.2 回归方程的回代与因素贡献分析

2.2.1 回归方程的回代

根据回归方程检验结果,剔除不显著的变量,将编码公式 $Z_j = \frac{X_j - X_0}{\Delta_j}$ 回代,得到不同粒径各因素的四元二次化简回归方程:

ISS 粒径: $d < 100 \mu\text{m}$

$$Y = -119.10522 + 1.23878X_1 + 0.19700X_2 + 2.52247X_3 + 1.14889X_4 - 0.01938X_1^2 - 0.02102X_3^2 - 0.00957X_4^2 \quad (1)$$

ISS 粒径: $100 \mu\text{m} \leq d \leq 200 \mu\text{m}$

$$Y = -198.37032 + 0.43226X_1 + 4.62224X_2 +$$

$$4.60365X_3 + 3.38843X_4 - 0.04973X_1^2 - 0.12530X_2^2 - 0.05111X_3^2 - 0.02824X_4^2 + 0.04378X_1X_3 \quad (2)$$

ISS 粒径: $d > 200 \mu\text{m}$

$$Y = -13.88598 - 0.67558X_1 + 1.94997X_2 + 2.1484X_3 + 1.31392X_4 - 0.01891X_1^2 - 0.05575X_2^2 - 0.02498X_3^2 - 0.01095X_4^2 + 0.02948X_1X_3 \quad (3)$$

式(1)表明,当ISS粒径 $< 100 \mu\text{m}$ 时, Y 与 X_1 、 X_3 、 X_4 呈现“倒U”型关系,即随着HRT、 θ 或 h 的增大,除砂效率先增大后减小。而除砂效率与 n 呈正相关关系,表明试验条件下除砂效率随 n 增大而增大。随着 n 增大,尽管涡流强度对沉降扰动作用加强,但小粒径ISS的响应较弱,转速增大的不利影响也相应降低。

根据式(2)、(3),当ISS粒径 $\geq 100 \mu\text{m}$ 时,随着HRT、 θ 、 n 或 h 的增大,除砂效率先增大后减小;HRT和 θ 的交互作用对ISS去除有较大影响。

2.2.2 回归方程各因素的贡献分析

采用贡献率分析法^[14],计算各回归系数显著性检验的均方比 F_j 、 F_{jj} 、 F_{ij} ($j = 1, 2, 3, 4$; $i = 1, 2, 3, 4$),并按下式计算因素贡献:

$$\delta = \begin{cases} 0 & (F \leq 1 \text{ 时}) \\ 1 - \frac{1}{F} & (F > 1 \text{ 时}) \end{cases} \quad (4)$$

然后求第 j 个因素的贡献率 Δ_j :

$$\Delta_j = \delta_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \delta_{ij} + \delta_{jj}, j = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

回归方程各系数贡献率结果见表4。

表4 不同粒径范围各因素的贡献率

Tab.4 Contribution rate of each factor in different particle size ranges

粒径/ μm	h	θ	n	HRT
	Δ_4	Δ_3	Δ_2	Δ_1
< 100	0.467 0	1.253 6	0.919 9	0.671 8
100 ~ 200	0.614 0	1.588 5	1.872 7	2.861 1
> 200	0.098 3	1.673 7	1.362 6	2.748 0

$d < 100 \mu\text{m}$ 时,各因素的贡献率值总体较低,表明参数优化对极细砂去除率的提高效果影响甚微;搅拌桨倾角与搅拌桨转速具有一定的调节空间。当 $d \geq 100 \mu\text{m}$ 时,ISS去除率影响因素的主次顺序为:HRT $> n \approx \theta > h$ 。

极细砂主要呈悬移质运动特征,在搅拌桨转动

产生的轴向环流流场以及水平推力作用下,通过离心力被甩向池壁后,在重力作用下沉入池底。而搅拌桨倾角不仅会影响轴向环流和水平环流流态,而且流体在搅拌桨上方产生的二次循环区域不利于小粒径颗粒的沉降,因此,细粒度微粒难以通过参数优化提高沉降率。随着粒径的增加,颗粒呈现推移质运动特征逐渐显著,水力停留时间则成为主要贡献因素。

2.2.3 模型的运行条件优化

根据上述回归模型得出不同粒径分级 ISS 最佳去除率的优化条件(见表 5)。不同粒径特性最佳去除率对应的优化条件中,搅拌桨距池底高度与搅拌桨倾角相同,而水力停留时间与搅拌桨转速有差异。细颗粒 ISS 呈悬移质态,增大 HRT 能够减小轴向环流强度,降低流动对池底细微颗粒的冲击效应;同时细微颗粒沉降需要更大的涡流强度,应适当提高搅拌桨转速。同时,从表 5 可知,最优条件下 $d < 100 \mu\text{m}$ 的去除率仅为 16.57%,极细颗粒不可避免地进入后续生化单元,进而降低污泥活性并提高运行能耗。因此在污水厂进水细粒度特征明显的条件下,不宜取消初沉池运行。

表 5 回归试验中不同 ISS 粒径范围去除率的参数优化

Tab.5 Parameter optimization of removal rates of different ISS particle size ranges

粒径/ μm	h/mm	$\theta/^\circ$	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	HRT/s	ISS 最佳去除率/%
< 100	60	60	30	35.0	16.57
100 ~ 200	60	60	20	27.5	84.26
> 200	60	60	15	27.5	96.99

2.3 回归模型验证分析

根据表 5 中各粒径分级的运行优化条件,分别进行回归方程模拟和现场模型验证试验,结果如表 6 所示。

表 6 回归预测和验证试验结果的相对误差

Tab.6 Relative errors between regression prediction results and experimental results

粒径/ μm	回归预测/%	验证试验/%	相对误差/%
< 100	16.57	12.37	4.20
100 ~ 200	84.26	80.15	4.11
> 200	96.99	95.13	1.86

根据表 6,ISS 去除率回归预测结果与现场试验结果的相对误差范围为 1.86% ~ 4.20%,说明所建立的回归模型可信度高。误差的来源主要包括沉砂

池物理模型构型导致的局部流动性状差异与试验投砂过程的持续一致性等。

3 结论

① 基于构建的 Pista 沉砂池,采用不同粒度分级条件下的数值模拟,并结合回归正交分析方法,通过显著性、失拟性分析和贡献率分析,得出各影响因素对不同粒径分级去除率的影响。 $d < 100 \mu\text{m}$ 时,各因素的调节优化对细砂去除率提升的影响程度较小; $d \geq 100 \mu\text{m}$ 时,除砂率影响因素的主次顺序为: $\text{HRT} > n \approx \theta > h$ 。

② 根据 ISS 不同粒度分级,通过回归正交试验确定了获得最大去除率的因素水平组合。即不同粒径条件下,搅拌桨倾角均为 60° 、搅拌桨距池底高度均为 60 mm;而水力停留时间、搅拌桨转速的最优取值具有差异。最优工况下,模型沉砂池对粒径 $> 100 \mu\text{m}$ 的颗粒去除率可达 80% 以上,对粒径 $< 100 \mu\text{m}$ 的颗粒去除效能仍极为有限,在污水处理过程中,特细悬浮颗粒对生化单元污泥活性的影响不可避免。

③ 回归正交的数值模拟方法可大大减少仿真时间,提高工作效率。建立的回归模型可信度高,能准确地反映 ISS 去除率与因素之间关系通用性和科学性,能够为城镇污水厂旋流沉砂池的设计与优化提供参考。

参考文献:

- [1] 吉芳英,周卫威,裴玲,等. 细微泥沙对活性污泥系统的影响及其恢复特征[J]. 环境科学研究,2015,28(2):326-332.
JI Fangying,ZHOU Weiwei,PEI Ling,et al. Impacts of fine sediment on activated sludge system and system recovery characteristics[J]. Research of Environmental Sciences,2015,28(2):326-332(in Chinese).
- [2] FAN J P,JI F Y,XU X Y,et al. Prediction of the effect of fine grit on the MLVSS/MLSS ratio of activated sludge[J]. Bioresource Technology,2015,190:51-56.
- [3] 何强,胡澄,徐志恒,等. 山地城市合流污水特细砂粒径特征及分布[J]. 环境工程学报,2013,7(1):72-78.
HE Qiang,HU Cheng,XU Zhiheng,et al. Characteristics and distribution of ultra-fine grit in combined sewer system of mountainous urban[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2013,7(1):72-78(in

- Chinese).
- [4] 熊京忠,来铭笙,吉芳英,等. 细微泥沙粒径对SBR系统污泥性质的影响[J]. 中国给水排水,2015,31(13):37-41.
- XIONG Jingzhong, LAI Mingsheng, JI Fangying, *et al.* Effect of fine sediment size on sludge properties in SBR system[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(13): 37-41 (in Chinese).
- [5] 王淦,叶勇,张辉,等. 新型旋流沉砂池的除砂率数值模拟[J]. 中国给水排水,2013,29(9):92-95.
- WANG Gan, YE Yong, ZHANG Hui, *et al.* Numerical simulation of grit removal with new rotational flow grit chamber[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(9): 92-95 (in Chinese).
- [6] 周琴. 旋流—平流沉砂池的构建及数值模拟[D]. 太原:太原理工大学,2016.
- ZHOU Qin. The Construction and Numerical Simulation of Vortex-Advection Grit [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [7] 叶勇. 新型旋流沉砂池固液两相流数值模拟研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
- YE Yong. The Numerical Simulation Research of Solid-Liquid Two-phase Flow Simulation on the New Rotational Flow Grit Chamber [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [8] 汪家权,蒋文韬,王淦. 新型高效旋流沉砂池除砂效果研究[J]. 中国给水排水,2007,23(15):98-100.
- WANG Jiaquan, JIANG Wentao, WANG Gan. Grit removal efficiency of new type high-effective rotational flow grit chamber [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(15): 98-100 (in Chinese).
- [9] 赵德强,张齐艳,纪家林,等. 基于进水水质的比氏旋流沉砂池除砂效果优化[J]. 中国给水排水,2017,33(13):40-45.
- ZHAO Deqiang, ZHANG Qiyang, JI Jialin, *et al.* Optimization of grit removal efficiency in Pista vortex grit chamber based on influent water quality [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(13): 40-45 (in Chinese).
- [10] LU Z F, YU L, XU X Y, *et al.* Comparative study on turbulence models simulating inorganic particle removal in a Pista grit chamber[J]. Environmental Technology, 2018, 39(24): 3181-3192.
- [11] 栾闯. 基于CFD的水电工程砂石废水旋流沉砂池的优化设计[D]. 天津:天津大学,2009.
- LUAN Chuang. Optimization Design on CFD of Grit Chamber with Rotational Flow in Sandstone Wastewater Treatment of Hydropower Engineering [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009 (in Chinese).
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- WANG Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis: Principle and Application of CFD Software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (in Chinese).
- [13] 柳菁翠. 基于不同粒径的旋流沉砂池除砂效能研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- LIU Jingcui. Discuss on Grit Removal Rate of Rotational Flow Grit Chamber for Different Particle Size [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016 (in Chinese).
- [14] 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- XU Zhongru. Regression Analysis and Test Design [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998 (in Chinese).

作者简介:许晓毅(1974—),女,重庆人,博士,教授,
主要从事水污染控制理论与技术研究。

E-mail: xuxiaoyiskd@usts.edu.cn

收稿日期:2020-07-08

修回日期:2020-10-06

(编辑:孔红春)