

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.010

# 城市污水含砂特征及不同沉砂池除砂效率研究

刘 梁<sup>1</sup>, 刘伟华<sup>1</sup>, 刘智晓<sup>2</sup>

(1. 智汇流体<北京>科技有限公司, 北京 100120; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

**摘 要:** 为明确我国城市污水含砂特征,向除砂工艺优化设计提供参考,采集了6座不同城市污水处理厂的沉砂池进出水,分析了砂粒分布特征,并计算了沉砂池的除砂率。结果表明,城市污水含砂量介于1.28~80.96 mg/L之间,粒径>212  $\mu\text{m}$ 的砂粒(粗砂)占22.25%~74.14%;各污水厂进水含砂量及粒径分布特征均存在明显差异。各污水厂使用中的曝气沉砂池或旋流沉砂池实测除砂目标粒径介于150~212  $\mu\text{m}$ 之间,加权平均除砂率介于9.16%~52.02%之间。降低旋流沉砂池表面负荷至60 m/h以下,或者延长曝气沉砂池停留时间至10 min以上,可以将沉砂池除砂精度提升至150  $\mu\text{m}$ 以下,并可有效提升沉砂池加权平均除砂率。

**关键词:** 城市污水; 沉砂池; 砂粒分布; 除砂率; 多层旋流工艺

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0061-06

## Characteristics of Grit Distribution in Municipal Wastewater and Grit Removal Efficiency of Different Grit Chambers

LIU Liang<sup>1</sup>, LIU Wei-hua<sup>1</sup>, LIU Zhi-xiao<sup>2</sup>

(1. SmartFlow <Beijing> S&T Co. Ltd., Beijing 100120, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

**Abstract:** This paper collected the wastewater samples from the inlet and outlet of grit chambers in six different municipal wastewater treatment plants, analyzed the distribution characteristics of grit particles, and calculated the grit removal efficiency of the grit chambers, so as to investigate the characteristics of grit distribution in domestic municipal wastewater and provide reference for optimizing the design of grit removal process. The grit concentration in municipal wastewater ranged from 1.28 mg/L to 80.96 mg/L, and the grit with particle size greater than 212  $\mu\text{m}$  (coarse grit) accounted for 22.25% to 74.14%. There were obvious differences in the distribution of grit concentration and particle size in the influent of each wastewater treatment plant. The measured target grit removal diameter of the aerated grit chambers and the vortex grit chambers in each plant was between 150  $\mu\text{m}$  and 212  $\mu\text{m}$ , and the weighted average grit removal rate ranged from 9.16% to 52.02%. The target grit removal diameter of these chambers could be improved to less than 150  $\mu\text{m}$ , and the weighted average grit removal rate could be significantly increased by reducing the surface load of the vortex grit chambers to less than 60 m/h or extending the residence time of the aerated grit chambers to more than 10 min.

**Key words:** municipal wastewater; grit chamber; grit particle distribution; grit removal rate;

## multilayer vortex process

取消初沉池以避免污水中的碳源流失成为多数污水厂的选择,但该举措降低了无机悬浮固体(ISS)的去除率,使其成为污水厂运行提质增效的主要挑战之一。一方面,ISS进入系统会加快泵、推进器、搅拌器等设备的磨损,增加维护成本;另一方面,粒径较小的ISS易被活性污泥裹挟进入污泥处理系统,降低污泥中有机物比例,增加处置难度;同时,粒径较大的ISS淤积在构筑物底部也会导致有效池容减少,使运行能耗上升,增加清掏工作量。

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)的要求,污水处理厂应设计沉砂池,去除相对密度为2.65、粒径为0.2 mm以上的砂粒<sup>[1]</sup>。但不同城市污水中的含砂量与粒径分布存在显著时空差异<sup>[2-3]</sup>。现行除砂标准对不同时空条件下城市污水的砂特征缺乏普适性。因此,在城市污水厂设计与运维过程中,宜根据自身实际进水含砂特征设定ISS去除设施(如沉砂池、初沉池)的目标粒径,选择经济、适用的除砂工艺。为此,笔者针对国内不同城市的6座污水处理厂开展调研,分析进水含砂分布特征,比较不同沉砂池的除砂率,旨在为各污水厂沉砂池的优化运行提供数据支撑与理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与装置

6座调研污水厂均已运行10年以上,设计规模在 $3 \times 10^4 \sim 60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 之间(见表1)。其中3座污水厂采用旋流除砂工艺,以气提方式排砂,设计停留时间 $\leq 1 \text{ min}$ ;其余污水厂采用曝气沉砂池工艺,采用桥式吸砂机气提排砂,设计停留时间为3~8 min,设计气水比为0.11~0.18;另有青岛某污水厂内一套多层旋流沉砂设备(设计规模为 $2\,500 \text{ m}^3/\text{d}$ ,停留时间为2.4 min),其是一种由多级倒锥形斜板堆叠而成、针对粒径 $< 0.2 \text{ mm}$ 砂粒具有强化去除效果的沉砂设施<sup>[4]</sup>,该设备亦纳入本次调研用于比较不同除砂工艺的除砂率。选取沉砂池进出水廊道内流态平稳的位置悬吊放置潜水取样泵( $Q=20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=5 \text{ m}$ )采集污水样品。泵进水口距廊道内底20~30 cm,出水口使用三通及调节阀分流 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 水样至采样器,其余样品回流至采样廊道。采样器为一种连续式砂样采集装置,包括进水沉淀区、缓冲区、泥砂区

和出水区。控制进水流量 $\leq 2 \text{ m}^3/\text{h}$ ,使其表面负荷在3~5  $\text{m}^3/\text{h}$ 之间,以实现针对进水中95%以上粒径 $> 0.05 \text{ mm}$ 的ISS截留效果<sup>[2]</sup>。

表1 测试污水处理厂现状除砂工艺设计参数

Tab.1 Design parameters of current grit chambers in the tested WWTPs

污水厂所在城市	设计规模/( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	现状除砂工艺	设计停留时间/min	表面负荷/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	设计气水比	投运时间
北京市	60	比氏旋流沉砂池	0.8	134	—	2005年11月
深圳市	38	比氏旋流沉砂池	0.6	116	—	1997年6月
苏州市	4	比氏旋流沉砂池	1.0	60	—	2011年12月
青岛市	30	曝气沉砂池	5.0	—	0.13	2005年5月
成都市	20	曝气沉砂池	3.0	—	0.11	2013年1月
西安市	3	曝气沉砂池	8.0	—	0.18	2010年8月

### 1.2 试验方法

各城市污水处理厂的样品采集量 $\geq 10$ 组,单个样品的采集时间 $\geq 1 \text{ h}$ ,以保障所收集样品的均匀性及代表性。单次采样完成以后,收集采样器锥斗内砂水混合液依次进行如下操作:利用200目的筛网筛分所有混合液,截留筛上物;使用清水反复冲洗筛上物直至筛下液澄清,以实现其中可溶物质和粒径 $< 0.05 \text{ mm}$ 的附着物与其他组分分离;将淘洗后的筛上物收集至铝箔盘内,105  $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量;烘干后的样品转移到马福炉中,于550  $^{\circ}\text{C}$ 灼烧2 h;取出样品冷却至室温,利用30、40、50、70、100、150、200目的筛网进行筛分,考虑到75  $\mu\text{m}$ 以下砂粒在污泥混合液中以悬浮或附着态存在,其不易沉降在构筑物底部<sup>[5]</sup>,因此仅取筛上物进行称量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污水厂进水砂粒分布特征

进水含砂量及其粒径分布特征是污水厂除砂构筑物设计的重要参考依据。《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定:“污水的沉砂量可按0.03

L/m<sup>3</sup> 计算”,按照其含水率为 60%、密度为 1 500 kg/m<sup>3</sup>可推算出砂粒各组分质量比为:无机固体(相对密度为 2.65):有机固体(相对密度为 0.72<sup>[6]</sup>):水(相对密度为 1.00)=32:8:60,经计算污水处理厂进水中无机固体质量的设计参考值为 14.40 mg/L。

不同城市各污水处理厂进水含砂量特征见图 1。

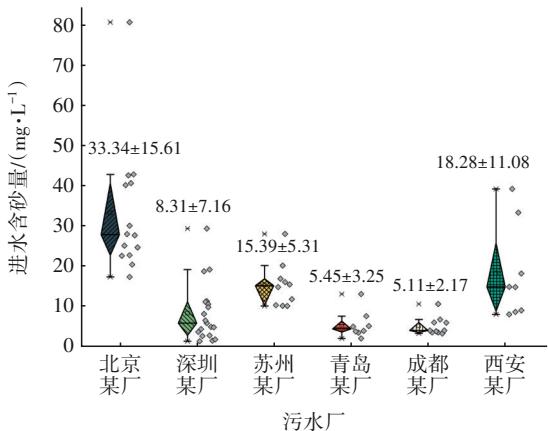


图 1 不同城市各污水处理厂进水含砂量特征  
Fig.1 Characteristics of inlet grit concentration of each WWTPs in different cities

由图 1 可知,各污水厂进水含砂量(以无机固体质量计)展现出明显的厂间差异。含砂量均值由高至低依次为北京某厂、西安某厂、苏州某厂、深圳某厂、青岛某厂及成都某厂;各样品中含砂量的极大值(80.96 mg/L)出现于北京某厂,接近上述计算所得设计参考值的 6 倍;极小值(1.28 mg/L)出现于深圳某厂,不足设计参考值的 1/10。另外,各污水厂样品含砂量的极大值均达到极小值的 3 倍以上,其中深圳某厂更是超过 20 倍,亦展现出明显的厂内差异。造成上述差异的原因虽然不尽相同,但大致可以概括为地形地貌条件、居民生活习惯、城市建设程度、排水管网体制四个方面<sup>[7]</sup>。如服务片区内是否有高强度的基建开发、收水管网的漏损程度,以及管网的清淤维护工作均可造成污水厂进水含砂量的波动。因此,在污水处理厂除砂工艺设计过程中,宜结合当地实际污水含砂量的特征,确定除砂构筑物的峰值固体负荷;对于含砂量超过设计参考值的污水厂,宜设置冲洗等防堵塞措施,提升沉砂池运行的稳定性,降低淤堵风险。

进一步分析各样品的砂粒粒径分布特征(见表 2)可知,粒径>212 μm 的粗砂粒占比为 22.25%~74.14%;106~212 μm 的砂粒占比为 16.58%~

57.25%;75~106 μm 的砂粒占比为 2.41%~20.50%。依据现行沉砂池设计标准中“去除相对密度 2.65、粒径 0.2 mm 以上的砂粒”要求,即使将成都某污水厂进水中粒径>212 μm 的砂粒全部拦截在沉砂池,仍有 75% 以上的砂粒逃逸到后续构筑物中。如果按照覆盖进水中 80% 以上砂粒的标准进行设计,则各污水厂沉砂池的除砂目标粒径如下:北京某厂为 150 μm、深圳某厂为 106 μm、苏州某厂为 106 μm、青岛某厂为 106 μm、成都某厂为 106 μm、西安某厂为 106 μm。由此可见,即使不考虑沉砂池针对各粒径分布区间砂粒去除率的差异,仅以进水中可以覆盖到的砂粒总量进行衡量,0.2 mm 的除砂目标粒径已经难以满足实际应用需求。

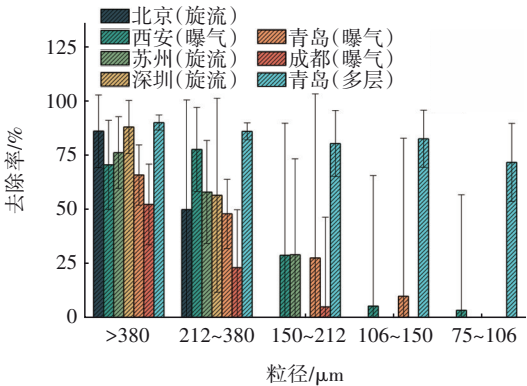
表 2 不同城市各污水处理厂进水砂粒粒径分布质量占比

Tab.2 Quality ratio of grit particles distribution of each WWTPs in different cities %

污水厂 所在城 市	75~ 106 μm	106~ 150 μm	150~ 212 μm	212~ 380 μm	380~ 550 μm	>550 μm
北京市	9.28	4.68	11.90	39.64	14.92	19.58
深圳市	2.41	20.12	9.68	24.81	10.06	32.93
苏州市	14.07	31.33	23.57	8.76	11.99	10.28
青岛市	4.68	18.19	12.23	46.67	7.87	10.36
成都市	20.50	28.08	29.17	8.67	7.22	6.36
西安市	19.91	19.23	18.85	25.59	8.44	7.99

2.2 不同工艺除砂率比较

沉砂池对于各个粒径分布区间内砂粒的去除率存在差异<sup>[8]</sup>;对于大于目标去除粒径的砂粒,去除率随着粒径的增大而提高,而对小于目标去除粒径的砂粒,去除率则接近于零。比较各污水厂中不同工艺沉砂池的除砂率,结果见图 2。



a. 不同城市污水厂沉砂池的除砂率

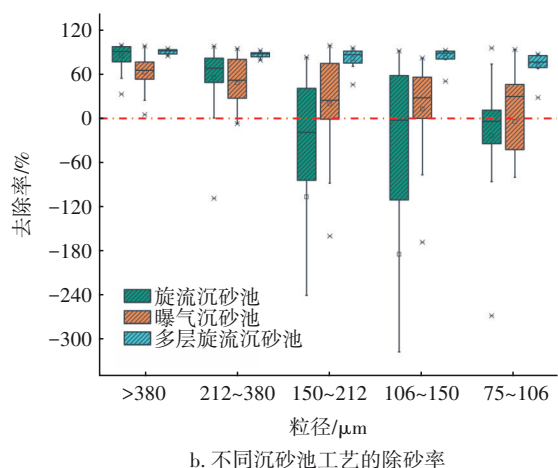


图2 不同城市污水处理厂间及多种沉砂工艺的除砂率  
Fig.2 Grit removal rates of different process in each WWTPs of different cities

各污水厂沉砂池的除砂率整体呈现随砂粒径减小而降低的趋势。以212  $\mu\text{m}$ 为分界,所调研沉砂池对于粒径 $>212 \mu\text{m}$ 砂粒的去除率均为正值;对于粒径 $<212 \mu\text{m}$ 砂粒的去除率,不同除砂工艺间存在差异:旋流沉砂池的均值为负值,曝气沉砂池的均值为正值,但亦出现负值样本,多层旋流工艺在

此粒径分布区间的除砂率则稳定在70%以上。

何强等<sup>[3]</sup>就三峡库区山地城市污水厂进水砂粒特征进行了调研,并结合不同粒径分布区间的除砂率计算加权平均除砂率,提出了“当地污水中特细砂含量高,除砂系统的加权平均除砂率应达到70%~95%”的观点。据此方法,将本次调研的各污水厂进水含砂量、粒径分布和各粒径区间的除砂率汇总于表3。可以看出,除多层旋流工艺以外,即便是整体除砂率最高的深圳某厂,其加权平均除砂率也仅为52.02%,成都某厂更是不足10%,如果考虑砂水分离器的效率,系统的总砂水分离效率还要更低。结合各厂进水含砂量,并参考上述推算的砂粒中无机固体占比(32%)计算,所调研的污水厂内由沉砂池逃逸至后续构筑物的砂体积至少为68~350  $\text{L}/10^4 \text{ m}^3$ 进水。对比多层旋流工艺可以发现,其针对青岛某厂进水的加权平均除砂率可以达到85.01%,尤其针对粒径 $<212 \mu\text{m}$ 砂粒的去除率明显提升,每万吨出水中的砂含量较厂内曝气沉砂池降低75%左右,可有效减缓细砂对设备及管道的磨损,延长清淤周期,节省运维费用。

表3 各污水处理厂加权平均除砂率

Tab.3 Weighted average grit removal rates in different WWTPs

粒径级配/ $\mu\text{m}$	北京某厂			西安某厂			苏州某厂			深圳某厂			青岛某厂			成都某厂			青岛某厂(多层旋流)		
	含砂量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	质量占比/%	去除率/%	含砂量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	质量占比/%	去除率/%	含砂量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	质量占比/%	去除率/%	含砂量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	质量占比/%	去除率/%	含砂量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	质量占比/%	去除率/%	含砂量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	质量占比/%	去除率/%	含砂量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	质量占比/%	去除率/%
$>380$	11.5	35	86	3	16	78	3.43	22	76	3.57	43	88	0.99	18	66	0.69	14	53	0.99	18	90
212~380	13.22	40	50	4.68	26	71	1.35	9	58	2.06	25	57	2.54	47	48	0.44	9	23	2.54	47	86
150~212	3.97	12	0	3.45	19	29	3.63	24	29	0.81	10	0	0.67	12	28	1.49	29	0	0.67	12	81
106~150	1.56	5	0	3.51	19	0	4.82	31	0	1.67	20	0	0.99	18	10	1.43	28	0	0.99	18	83
75~106	3.09	9	0	3.64	20	0	2.16	14	0	0.20	2	0	0.26	5	0	1.05	21	0	0.26	5	72
合计	33.34	100	—	18.28	100	—	15.39	100	—	8.31	100	—	5.45	100	—	5.11	100	—	5.45	100	—

注: 当某个粒径区间内的除砂率均值低于10%且负值数据量超过50%时,除砂率按零进行处理。北京某厂、西安某厂、苏州某厂、深圳某厂、青岛某厂、成都某厂、青岛某厂(多层旋流)的加权平均除砂率分别为49.65%、36.40%、29.04%、52.02%、39.82%、9.16%、85.01%。

### 2.3 除砂工艺优化方法探讨

由上述分析可知,所调研的6座城市污水厂整体的除砂率偏低,这与进水含砂特征、目标除砂粒径和各粒径区间的除砂率均紧密相关。围绕上述影响因素,就各污水厂除砂工艺提出针对性的优化方案,可为类似沉砂系统设计、运维提供参考。

从各污水厂进水含砂总量的比较结果考量,宜

在北京某厂、西安某厂及苏州某厂的沉砂系统内增加反冲洗设施或设置连续排砂的运行方式,保障系统沉砂、排砂过程的稳定性;基于粒径分布特征和除砂率的理论计算分析,将除砂目标粒径设置在150  $\mu\text{m}$ 以下有利于提升各污水厂的加权平均除砂率。由表3中的数据可见,北京某厂、深圳某厂及成都某厂的除砂精度尚未达到这一要求,需要对沉砂



池运行参数或形式进行针对性地改进。

针对北京某厂及深圳某厂使用的旋流除砂工艺,诸多案例研究提出了可供借鉴的改进方法:王峰等<sup>[9]</sup>对北京某厂旋流沉砂池在不同工况下除砂率的调研结果显示,降低表面负荷至 59 m/h 后(约为原设计值的 50%),可将粒径 $>150\text{ }\mu\text{m}$ 砂粒的去除率提升 30% 以上;姜宁<sup>[10]</sup>通过拆除重庆市某污水厂旋流沉砂池搅拌设施、增加斜板等导流部件,实现了池体表面负荷的下降,显著提升了旋流沉砂池对粒径 $<212\text{ }\mu\text{m}$ 砂粒的去除率;尹雷等<sup>[11]</sup>对西安某厂旋流沉砂池进出水进行连续监测发现,池体表面负荷降低至 50 m/h 以内,可以有效提升粒径 $>106\text{ }\mu\text{m}$ 砂粒的整体去除率。综合上述案例的工艺设计参数,将旋流沉砂池表面负荷降至 60 m/h 以下,并通过增加水力导流组件优化池体内部流态,是提升旋流沉砂池除砂目标粒径至  $150\text{ }\mu\text{m}$  以下的可行方法。

针对成都某厂使用的曝气除砂工艺,由于其内部为水平流与螺旋流的组合流态,停留时间和气水比对除砂率的影响则更加显著。侯锋等<sup>[2]</sup>针对贵阳多个污水厂曝气沉砂池运行效率的研究显示,最佳气水比为 0.1~0.15,最优水力停留时间为 10~15 min,该工艺条件下曝气沉砂池对粒径介于  $106\sim 212\text{ }\mu\text{m}$  砂粒的去除率可达 80% 以上;邵超<sup>[12]</sup>监测合肥市某厂的曝气沉砂池运行时发现,水力停留时间与曝气沉砂池的除砂效果具有线性关联,曝气强度与停留时间存在最佳结合工况点。因此,延长西安、青岛、成都各厂曝气沉砂池的停留时间至 10 min 以上,降低西安某厂气水比至 0.15 以内,理论上可以提升各厂针对粒径 $>150\text{ }\mu\text{m}$ 砂粒的总体去除率。

除此以外,应用多层旋流工艺也是一种改善旋流沉砂池除砂率的潜在方案。该工艺通过在旋流沉砂池体内部放置堆叠的倒锥形斜板,分层配水,缩短砂粒沉降距离,实现除砂率的提升。青岛某厂采用的多层旋流工艺设有 3 层倒锥形斜板,各层斜板单独连接进水渠道,斜板间水流接近异向流流态。各斜板及池体的有效投影总面积为  $6.46\text{ m}^2$ ,按照 0.8 的有效系数计算,在  $2\,500\text{ m}^3/\text{d}$  的设计工况下,池体表面负荷为 20.16 m/h,远低于旋流沉砂池  $150\sim 200\text{ m/h}$  的设计参考值。另外,引用宋嘉林等<sup>[13]</sup>实测的生活污水黏度( $1.22\times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ )及密度( $996.02\text{ kg/m}^3$ ),使用不同方法计算相对密度为 2.65 的不同粒径砂粒的沉降速度,结果见表 4。与

各厂旋流沉砂池设计表面负荷进行比较可知,青岛某厂内的多层旋流工艺设计表面负荷低于  $75\text{ }\mu\text{m}$  砂粒的理论沉速,是其除砂精度、除砂率均较高的主要原因;而北京、深圳、苏州某厂内的旋流沉砂池设计表面负荷对应的理论除砂精度分别为 212、212 和  $150\text{ }\mu\text{m}$ 。该结果与表 2 相符,也表明使用多层旋流工艺改进旋流沉砂池、降低池体表面负荷,是一种提升除砂精度与除砂率的有效措施。

表 4 不同粒径砂粒的理论沉降速度计算值

Tab.4 Computed theoretical settling velocities for particles with different diameters

粒径/ $\mu\text{m}$	雷诺数 $Re$	理论沉降速度/ $(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	
		文献[14]	文献[15]
212	14.72	134.84	114.90
150	6.77	86.07	74.70
106	2.91	51.77	45.42
75	1.18	29.54	26.12

### 3 结论

① 受到地形地貌条件、居民生活习惯、城市建设程度、排水管网体制的影响,6 座城市污水处理厂进水砂粒分布特征差异显著:进水含砂量(按无机固体质量计)为  $1.28\sim 80.96\text{ mg/L}$ ,粒径 $>212\text{ }\mu\text{m}$ 的砂粒占比为 22.25%~74.14%。

② 各污水厂沉砂池实测除砂目标粒径均大于  $150\text{ }\mu\text{m}$ ,加权平均除砂率为 9.16%~52.02%。

③ 倒锥形异向流斜板形式多层旋流除砂工艺的设计表面负荷为 20.16 m/h,理论除砂精度达到  $75\text{ }\mu\text{m}$ ,实测加权平均除砂率为 85.01%。

④ 将除砂目标粒径设置在  $150\text{ }\mu\text{m}$  以下有利于提升各污水厂的加权平均除砂率,旋流沉砂池通过降低表面负荷至 60 m/h 以内、曝气沉砂池通过延长停留时间至 10 min 以上,可实现设计目标。

### 参考文献:

- [1] 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.  
XU Xiaoyi, GE Dandan, YU Lan, et al. Analysis of fine grit separation characteristics in a vortex-type grit chamber based on regression orthogonal design [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(11): 63-69 (in Chinese).
- [2] 侯锋,周晓,王洪臣,等. 喀斯特地区污水含砂特征及

- 除砂工艺优化研究[J]. 给水排水, 2023, 49(5): 25-31.
- HOU Feng, ZHOU Xiao, WANG Hongchen, *et al.* Study on characteristics of wastewater grit content and grit removal process optimization in karst area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(5): 25-31 (in Chinese).
- [3] 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.
- HE Qiang, WANG Qi, HU Cheng, *et al.* Target particle size of ultra-fine grit removal system of mountainous urban[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(7): 2653-2657(in Chinese).
- [4] 夏海琛,朱羽廷,董滨,等. 城市污水和污泥细微砂旋流去除技术综述[J]. 给水排水, 2022, 48(S1): 546-553.
- XIA Haichen, ZHU Yuting, DONG Bin, *et al.* Review of vortex grit-removing technology of fine grit of municipal sewage and sludge [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(S1): 546-553(in Chinese).
- [5] 范剑平. 生化池不同粒径细微泥沙的悬浮特性及其分离技术[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- FAN Jianping. Suspension Properties of Fine Grit with Different Particle Sizes in Bioreactors and Separation of Fine Grit from Bioreactors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016(in Chinese).
- [6] YESILLER N, HANSON J L, COX J T, *et al.* Determination of specific gravity of municipal solid waste [J]. Waste Management, 2014, 34(5): 848-858.
- [7] 侯锋. 地下式污水处理厂关键技术研究 with 工程实践 [D]. 北京:清华大学, 2017.
- HOU Feng. Key Technologies Research and Engineering Practice of Underground Municipal Wastewater Treatment Plant [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017 (in Chinese).
- [8] 林杰. 污水处理中沉砂池去除高浓度悬浮物效能与运行优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- LIN Jie. The Efficiency and Operational Optimization of the High Concentration Suspended Substance Removal in Sewage Treatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [9] 王峰,郝二成,尹雷,等. 机械旋流沉砂池对不同粒径区间砂砾的除砂效率[J]. 净水技术, 2018, 37(2): 70-73.
- WANG Feng, HAO Ercheng, YIN Lei, *et al.* Removal efficiency of mechanical induced vortex (MIV) grit chamber for different particle sizes distribution [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(2): 70-73(in Chinese).
- [10] 姜宁. 污水处理厂预处理段除砂能力及细微泥砂强化去除技术[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
- JIANG Ning. Grit Removal Ability Evaluation of Sewage Disposal Pretreatment Plant and Removal Technique of Fine Sediment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese).
- [11] 尹雷,刘艇,周文政,等. 新型水力旋流除砂设备在西安市某污水厂的运行情况研究[J]. 节能与环保, 2021(1): 92-94.
- YIN Lei, LIU Ting, ZHOU Wenzheng, *et al.* Study on the operation of a new hydrodynamic separator in WWTP in Xi'an [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2021(1): 92-94(in Chinese).
- [12] 邵超. 曝气沉砂池除砂效率实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2012.
- SHAO Chao. The Experimental Study on Desanding Efficiency of Aerated Grit Chamber [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012(in Chinese).
- [13] 宋嘉林,张吉礼,张志远. 城市原生污水物性参数测试与分析[J]. 建筑热能通风空调, 2022, 41(5): 50-55.
- SONG Jialin, ZHANG Jili, ZHANG Zhiyuan. Testing and analysis of basic physical parameters of urban untreated sewage [J]. Building Energy & Environment, 2022, 41(5): 50-55 (in Chinese).
- [14] TURTON R, LEVENSPIEL O. A short note on the drag correlation for spheres [J]. Powder Technology, 1986, 47(1): 83-86.
- [15] ALCERRECA J C, SILVA R, MENDOZA E. Simple settling velocity formula for calcareous sand [J]. Journal of Hydraulic Research, 2013, 51: 215-219.
- 作者简介:刘梁(1988-),男,河北廊坊人,博士,工程师,主要研究方向为环境流体力学、污水处理及污泥资源化。
- E-mail:thuliuliang@126.com
- 收稿日期:2023-06-25
- 修回日期:2023-09-14

(编辑:任莹莹)