

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.01.015

珠三角市政污水处理厂除砂效率评估及优化

陈娟娟^{1,2}, 晁伟翔¹, 陈功², 简美婷³, 刘梁⁴, 任南琪¹,
路璐¹

(1. 哈尔滨工业大学<深圳> 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司 广东分院, 广东 广州 510075; 3. 广州市番禺污水处理有限公司, 广东 广州 511400; 4. 智汇流体<北京>科技有限公司, 北京 102218)

摘要: 针对珠三角地区污水处理厂除砂效率较低的问题,对6座污水处理厂的除砂工艺进行了分析。结果显示,传统除砂工艺的加权平均除砂率仅为39.42%~88.55%,对细小砂砾(粒径 $\leq 212 \mu\text{m}$)的去除效果较差,其中对(75,106] μm 砂砾的去除率仅为13.78%~76.14%,对(106,212] μm 砂砾的去除率为20.70%~87.81%。研究发现,停留时间和气水比是影响除砂效率的关键因素,延长停留时间可将粒径 $>380 \mu\text{m}$ 砂砾的去除率提高至96.35%~99.16%,而当气水比增至0.10~0.18(部分厂达到0.25以上)时,可将(106,212] μm 砂砾的去除率提高至32.27%~37.35%。针对细小砂砾去除效率低的问题,提出了一种新型多层旋流沉砂工艺,通过增加旋流层数和优化水流路径,提高了对全尺寸粒径范围内砂砾的去除效果,显著优于传统工艺。

关键词: 除砂效率; 曝气沉砂; 多层旋流沉砂; 停留时间; 气水比

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)01-0091-08

Evaluation and Optimization of Grit Removal Efficiency in Municipal Wastewater Treatment Plants in the Pearl River Delta

CHEN Juanjuan^{1,2}, CHAO Weixiang¹, CHEN Gong², JIAN Xianting³, LIU Liang⁴,
REN Nanqi¹, LU Lu¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology <Shenzhen>, Shenzhen 518055, China; 2. Guangdong Branch, Beijing Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510075, China; 3. Guangzhou Panyu Wastewater Treatment Co. Ltd., Guangzhou 511400, China; 4. SmartFlow Beijing Science & Technology Co. Ltd., Beijing 102218, China)

Abstract: The grit removal processes of six facilities were systematically analyzed to address the issue of low grit removal efficiency in wastewater treatment plants within the Pearl River Delta region. The weighted average grit removal efficiency of the traditional grit removal process ranged from 39.42% to 88.55%, with limited effectiveness in removing fine grit (particle size $\leq 212 \mu\text{m}$). Specifically, the removal efficiency for grit sized (75,106] μm ranged from 13.78% to 76.14%, while that for grit sized (106,212]

基金项目: 广东省住房和城乡建设厅科研开发项目(2024-K40-073000); 国家自然科学基金创新研究群体项目(52321005); 深圳市高层次人才团队项目(KQTD20190929172630447)

通信作者: 路璐 E-mail: lulu@hit.edu.cn

μm ranged from 20.70% to 87.81%. Retention time and air-to-water ratio were critical factors influencing grit removal efficiency. Extending the retention time could enhance the removal efficiency of grit with a particle size greater than $380 \mu\text{m}$ to between 96.35% and 99.16%. Furthermore, when the air-to-water ratio increased to the range of 0.10–0.18 (exceeded 0.25 in certain facilities), the removal efficiency for grit sized $(106,212] \mu\text{m}$ could reach 32.27%–37.35%. To address the issue of low removal efficiency for fine grit, a novel multi-layer hydro-cyclone grit removal process was proposed. By increasing the number of cyclone stages and optimizing the hydraulic flow path, the system achieved enhanced removal performance across the entire particle size range, demonstrating a significant improvement compared to conventional methods.

Keywords: grit removal efficiency; aerated grit removal; multi-layer hydro-cyclone grit removal; retention time; air-to-water ratio

珠三角地区作为我国经济高度发达的核心区域,快速的城市化进程与人口持续增长推动了生活污水和工业废水排放量的激增^[1]。随着污水处理设施的逐步完善,区域污水处理量逐年攀升,但同时也面临着一系列突出的技术挑战。其中,低碳源强度的进水特征尤为显著。受该地区高降雨强度、高地下水水位的影响,污水中可生化性差的溶解性有机物占比偏高,导致污水处理厂在生化脱氮过程中需要额外投加碳源,这不仅增加了运行成本,还加剧了碳排放^[2-4]。

为破解这一困境,珠三角多数污水处理厂采用取消初沉池的设计方案以提高进水碳源利用率^[5]。然而,这一举措却引发了严峻的除砂问题。在传统工艺中,初沉池承担着去除污水中大量砂砾与悬浮物的重要作用,将其取消直接导致砂砾未经有效拦截便进入后续处理单元,既造成设备磨损加剧,又因占据反应器有效空间而降低处理效率,对工艺稳定运行构成潜在威胁^[6]。

目前,区域内污水处理厂主要依赖旋流沉砂池和曝气沉砂池等传统除砂单元。旋流沉砂池依托离心力实现砂水分离,对大粒径砂砾去除效果较好,但对细小砂砾的捕获能力有限^[7];曝气沉砂池通过调节气水比强化砂砾沉降,但其除砂效能受多重因素制约,在取消初沉池后砂砾含量显著增加的情况下,难以满足处理需求^[8-10]。现有工艺的局限性使得除砂效率成为制约污水处理厂运行效能提高的关键因素,亟须有针对性地进行优化。

笔者聚焦珠三角地区污水处理厂除砂效率提升问题,选取6座具有代表性的污水处理厂作为研

究对象,系统开展除砂工艺分析。首先,梳理传统除砂工艺在当前运行条件下的性能短板,明确其在应对取消初沉池后面对砂砾负荷时的适应性不足,进而探究影响除砂效率的关键因素,分析停留时间和气水比对去除不同粒径砂砾的作用机制;在此基础上,有针对性地提出工艺优化策略,包括传统曝气沉砂池的参数调整方案,并研发新型多层旋流沉砂工艺以突破细小砂砾去除瓶颈,旨在为珠三角地区污水处理厂除砂工艺的科学优化提供理论依据与技术支撑,助力降低设备损耗、提升运行效率、削减运行成本与碳排放,同时为其他类似地区污水处理厂提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验厂区

选取珠三角地区6座具有代表性的污水处理厂作为研究对象,其均采用曝气沉砂池。其中,深圳A厂的设计规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,曝气沉砂池设计停留时间 $< 5 \text{ min}$,设计气水比为0.10~0.13;深圳B厂的设计规模为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,曝气沉砂池设计停留时间 $> 10 \text{ min}$,设计气水比 > 0.25 ;东莞C厂的设计规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,曝气沉砂池设计停留时间 $< 5 \text{ min}$,设计气水比 > 0.25 ;广州D厂的设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,曝气沉砂池设计停留时间 $< 5 \text{ min}$,设计气水比为0.10~0.13;广州E厂的设计规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,曝气沉砂池停留时间 $> 10 \text{ min}$,设计气水比为0.10~0.18;广州F厂的设计规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,曝气沉砂池停留时间 $> 10 \text{ min}$,设计气水比为0.10~0.18。深圳A厂的停留时间较短,气水比较低,污水厂设计规模较小,主要服务于深圳当地的局部区域。深圳B

厂是本次研究中规模最大的污水处理厂,设计停留时间较长,气水比也较高,该厂的设计参数表明其在处理大规模污水时对除砂效率有较高要求。东莞C厂的设计规模与深圳A厂相同,但其气水比大于深圳A厂,这表明东莞C厂在除砂工艺设计上更注重气水比对除砂效率的影响。广州D厂的设计规模介于深圳A厂和深圳B厂之间,其除砂工艺的设计停留时间和气水比与深圳A厂相似,反映了珠三角地区在中小规模污水处理厂设计上的共性。广州E厂的设计规模与深圳A厂和东莞C厂相同,但其设计停留时间较长,气水比介于深圳A厂和东莞C厂之间,这种设计参数的组合可能与其进水水质特征和处理要求有关。广州F厂与广州E厂的设计规模相同,且在停留时间和气水比的设计上也较为接近,这表明两厂在除砂工艺设计上可能存在相似的优化方向。

1.2 多层旋流沉砂技术

本研究采用新型多层旋流沉砂中试系统进行试验。该系统设计进水负荷为 $100\text{ m}^3/\text{h}$,沉砂精度为 $75\text{ }\mu\text{m}$,停留时间为 $3\sim 5\text{ min}$,主要由沉砂池体(直径为 3.2 m ,高度为 4.5 m)、分层布水器、6层旋流沉砂碟盘(每层碟盘直径为 1.8 m ,间距为 0.3 m)及出水堰组成。其工作原理为:待处理污水通过进水管切向引入混凝土池体,经布水器均匀分布至疏水性聚乙烯碟盘中,形成旋流。多层碟盘的设计显著增加了池体表面负荷,提升了砂砾沉降效率。旋流流体与碟盘表面的摩擦作用进一步促进砂砾向中心集砂通道汇集。砂砾在底部集砂斗经泵提排至洗砂设备或砂水分离器,处理后的水通过溢流堰进入出水廊道,接入后续处理单元,如图1所示。

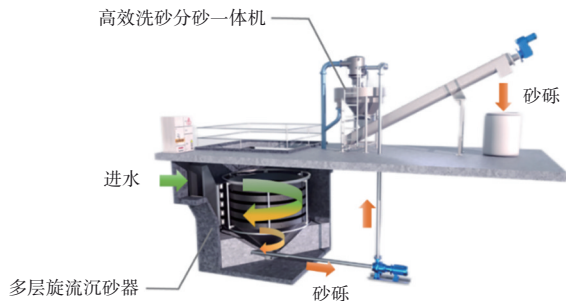


图1 多层旋流沉砂系统的沉砂单元示意

Fig.1 Schematic diagram of grit removal unit in multi-layer hydro-cyclone grit removal system

进水取自曝气沉砂池进水廊道,采用离心泵抽取。为精确控制进水流量,进水管道上设置流量计

和并联排放管路。处理后的出水通过溢流堰排放至附近污水井,避免干扰厂内正常运行。该系统经过多次优化,旨在提高对细小砂砾的去除效率,降低能耗和运行成本。与传统工艺相比,其在去除粒径 $\leq 212\text{ }\mu\text{m}$ 的砂砾方面具有显著优势,尤其适用于高浓度、小粒径砂砾的进水条件。此外,该系统具备良好的可扩展性和适应性,可根据实际需求进行定制化设计。

1.3 砂砾样品采集

本研究利用固定式采样设备采集砂砾样品。该设备安装于曝气沉砂池进水廊道内,垂直于水流方向采样。根据廊道水流速度,采样设备纵向开槽尺寸为 $15\text{ cm}\times 3\text{ cm}$,以保证进水的均匀性。采样口通过PVC管道连接卧式离心泵,管道上设置三通流量调节阀,确保采样流量稳定。样品通过泵进入自制采样桶内,桶底呈锥形,便于砂砾沉降。采样桶内部设计导流部件,可在进水流量低于 0.5 L/s 时实现对 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以上砂砾的完全沉降。采样流量控制在 $1.5\sim 1.8\text{ m}^3/\text{h}$,采样时间为 $2\sim 4\text{ h}$,通常以收集约 1 L 砂砾为宜。在采样过程中,每隔 15 min 进行一次流量测试。若流量变化较大,则进行调整,以确保采样过程的稳定性和代表性。采样结束后,计算采样体积。样品采集工作在不同降雨条件和进水负荷下进行,以全面反映进水砂砾的粒径分布特征和浓度变化规律。

1.4 砂砾样品处理

洗砂:将采样桶中的沉积物收集至宽口水桶中,从切线方向注入清水冲洗样品,直至水桶蓄满,静置 20 min 或待出现明显分层后,弃去上清液及悬浮有机污泥。由于旋流作用使砂砾集中于桶中心,需要重复洗砂操作 10 次左右,以彻底分离有机杂质。**烘干:**将洗砂后的砂砾收集至铝箔盘内,放入烘箱中,在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘至恒质量。**灼烧:**将烘干后的样品转移至马福炉中,在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下灼烧 2 h ,以去除残留的有机物,确保样品仅包含无机砂砾成分。**筛分:**将灼烧后的样品冷却至室温后,利用不同目数的筛网(30 、 40 、 50 、 70 、 100 、 140 、 200 及 300 目)进行筛分,将砂砾按粒径大小分级并称质量。

2 结果与分析

2.1 进水砂砾特征分析

分析珠三角地区6座污水处理厂的进水含砂量,结果显示,各厂进水含砂量均值较为接近,全部

样本的平均含砂量为 (12.35 ± 7.30) mg/L(按无机固体质量计),其中粒径为 $(212, 380]$ μm 的粗砂占比 $(58.84 \pm 5.78)\%$ 。这一结果表明,尽管各厂的设计规模和所在城市有所不同,但其进水含砂特征相对趋同。这种趋同性可能与珠三角地区相似的地质条件、气候特征和城市排水系统有关。该地区的降雨强度较大,且排水系统多为合流制或不完全分流制,导致大量砂砾通过雨水径流和生活污水进入污水处理厂。

从具体厂站来看,各厂平均进水含砂量存在明显差异。深圳B厂与广州E厂含量较高,分别为14.19与14.20 mg/L;深圳A厂为12.64 mg/L;而广州F厂、东莞C厂和广州D厂则相对较低,分别为11.81、9.91和10.88 mg/L。这种差异主要与各厂的汇水区域特征有关:深圳B厂含砂量相对偏高,很可能是由于其汇水区内施工活动密集、地表裸露或管网沉积物再悬浮;广州E厂同样较高,这可能与区域开发强度大、地表侵蚀显著有关。深圳A厂处于中高水平,也可能受到类似施工或地面覆盖不足的影响。相反,广州F厂含砂量中等偏低,反映其汇水区可能以建成区为主,地表硬化完善,施工管控有效;东莞C厂与广州D厂较低,这可能是由于区域排水系统完善、地面覆盖良好,或雨污分流程度较高,减少了砂砾入流。

进一步分析各厂进水砂砾的粒径分布特征,结果见表1。可以看出,不同粒径区间的砂砾分布存在显著差异。具体而言,粒径 >380 μm 的砂砾在各厂进水中的占比为18.81%~32.79%,粒径为 $(212, 380]$ μm 的砂砾在各厂进水中的占比为50.42%~65.25%,而粒径在 $(106, 212]$ 和 $(75, 106]$ μm 的细砂占比相对较低,分别为3.80%~8.38%和3.38%~13.15%。这表明进水中的砂砾主要集中在较大粒径区间,细砂含量相对较低。这种粒径分布特征可能与污水来源和排水系统的设计有关。一方面,较大粒径的砂砾主要来源于城市道路、建筑工地等区域的雨水径流,这些区域的砂砾在雨水冲刷下直接进入排水系统;另一方面,排水系统的管道设计和水流速度也会对砂砾的输送和沉积产生影响。例如,管道中的水流速度如果过低,可能导致细砂在管道中沉积,而较大粒径的砂砾则更容易被冲刷至污水处理厂。

此外,东莞C厂和广州D厂的进水砂砾中粒径

为 $(75, 106]$ μm 的细砂含量较低,分别为4.25%和3.38%。分析原因,可能与这两座水厂所在区域的土壤类型和排水系统的运行状况有关。例如,如果排水系统中有较多的砂滤设施或沉淀池,可能会对细砂的输送产生一定截留作用,从而导致进水中细砂含量相对较低。

表1 各污水处理厂进水砂砾粒径分布

Tab.1 Particle size distribution of influent grit in each wastewater treatment plant %

项目	>380 μm	$(212, 380]$ μm	$(106, 212]$ μm	$(75, 106]$ μm
深圳A厂	32.79	50.42	4.74	12.05
深圳B厂	23.79	62.01	6.90	7.30
东莞C厂	25.94	63.21	6.61	4.25
广州D厂	32.06	60.76	3.80	3.38
广州E厂	18.81	65.25	5.33	10.61
广州F厂	27.08	51.39	8.38	13.15

主成分分析揭示了进水含砂量与粒径分布特征之间的关系,结果显示,样本的粒径分布特征与进水含砂量相关性较差,未显现出随着进水波动某一粒径分布区间砂砾占比增加或减少的特征。这表明珠三角区域的进水含砂特征相对趋同,不同污水处理厂的进水砂砾粒径分布较为一致。这种现象可能与该地区的地质条件和污水来源有关。珠三角地区以河流冲积平原为主,土壤颗粒较细,且城市污水主要来源于生活污水和部分工业废水,其含砂特征相对稳定。此外,进水含砂量的稳定也可能与污水管网的设计和运行有关。污水管网在输送过程中会对砂砾进行一定程度的筛选和沉积,导致进入污水处理厂的砂砾粒径分布较为一致。这种趋同性表明,污水处理厂在设计和优化除砂工艺时,可以参考区域内其他厂的运行经验,以提高除砂效率。

2.2 传统除砂效率分析

分析6座污水处理厂对砂砾的去除率,结果如图2所示。可以看出,A~F厂对砂砾的总去除率存在显著差异,分别为49.29%、88.55%、39.42%、50.27%、71.63%、87.53%。其中,深圳B厂对砂砾的去除率最高,达到88.55%,而东莞C厂的除砂效率最低,仅为39.42%。这种差异可能与各污水处理厂的除砂工艺设计参数密切相关,尤其是停留时间和气水比。

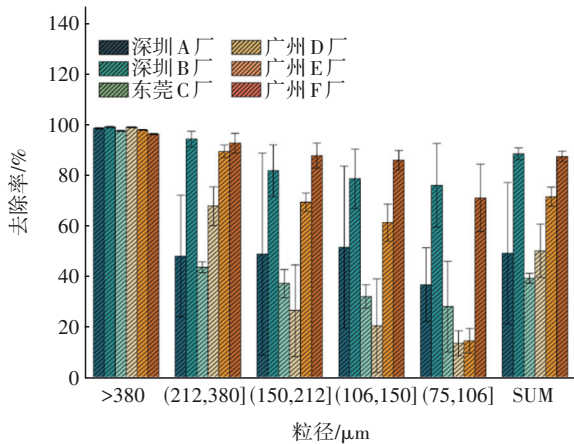


图2 各污水处理厂的除砂效率
Fig.2 Efficiency of traditional aerated grit removal processes in each wastewater treatment plant

不同粒径区间对砂砾的去除率存在显著差异。对于粒径 $>380\ \mu\text{m}$ 的粗砂,各厂的去除率普遍较高(96.35%~99.16%),这可能是因为粗砂的密度较大,沉降速度较快,容易在较短的停留时间内被去除。而对于粒径较小的砂砾,去除率则相对较低,如(75,106] μm 砂砾的去除率为13.78%~76.14%,(106,212] μm 砂砾的去除率为20.70%~87.81%。这表明现有除砂工艺对细小砂砾的去除能力有限,需要进一步优化工艺参数或采用更高效的除砂技术。

2.3 工艺参数相关性分析

实际运行参数表明,A~F厂的实际停留时间分别为4.2、11.5、4.5、4.0、10.8、10.5 min,实际气水比分别为0.11、0.27、0.28、0.12、0.15、0.17。可以看出,实际停留时间和气水比与设计值存在一定偏差。

砂砾去除率与影响因素的相关系数及方差分析结果见表2。可以看出,对于粒径 $>380\ \mu\text{m}$ 的砂砾,去除率与停留时间呈显著正相关关系($r=0.89$, $P<0.01$),延长停留时间可以显著提升去除率。如深圳B厂实际停留时间为11.5 min,对该粒径范围砂砾的去除率达99.16%;广州E厂实际停留时间为10.8 min,去除率达97.99%,且ANOVA结果显示停留时间对该粒径去除率的方差解释度达78.3%。对于(106,212] μm 的砂砾,去除率与气水比呈显著正相关($r=0.76$, $P<0.05$),适当增大气水比可促进砂砾的去除。例如,广州D厂的实际气水比为0.12,对该粒径范围砂砾的去除率仅为20.70%~

26.65%;东莞C厂的实际气水比为0.28,去除率则可达32.27%~37.35%(相较于气水比低的污水厂更优),气水比对该粒径去除率的方差解释度为62.5%。对于(75,106] μm 的细小砂砾,其去除率与停留时间($r=0.23$, $P>0.05$)、气水比($r=0.18$, $P>0.05$)的相关性均不显著,两者的联合解释度仅为12.7%,表明单纯调整工艺参数对细小砂砾去除的作用有限。

表2 砂砾去除率与影响因素的相关系数及方差分析结果

Tab.2 Correlation coefficients and ANOVA results for grit removal efficiency and its influencing factors

项目	相关系数(r)	P 值	方差解释度/%
粒径 $>380\ \mu\text{m}$ 砂砾去除率与停留时间	0.89	<0.01	78.3
粒径为(106,212] μm 砂砾去除率与气水比	0.76	<0.05	62.5
粒径为(75,106] μm 砂砾去除率与停留时间	0.23	>0.05	7.1
粒径为(75,106] μm 砂砾去除率与气水比	0.18	>0.05	5.6
粒径为(75,106] μm 砂砾去除率与进水细砂占比	-0.68	<0.05	45.2

结合进水砂砾粒径分布特征进行分析,结果显示,进水中大粒径砂砾($>380\ \mu\text{m}$)占比与去除率呈弱正相关($r=0.35$, $P>0.05$),可能是由于大粒径砂砾占比较高时,工艺更易通过沉降使其分离,但影响不显著。进水中(75,106] μm 小粒径砂砾占比与传统工艺对其去除率呈显著负相关($r=-0.68$, $P<0.05$),即进水细砂的占比越高,传统工艺对其去除难度越大,如广州F厂进水中粒径为(75,106] μm 的砂砾占比13.15%,其去除率仅为71.14%。ANOVA分析结果显示,该因素对细砂去除率的方差解释度为45.2%。

主成分分析结果进一步表明,停留时间(第一主成分,贡献率为42.6%)、气水比(第二主成分,贡献率为28.3%)及进水细砂占比(第三主成分,贡献率为15.8%)是影响砂砾去除率的三大核心因素,三者累计贡献率可达86.7%。其中,停留时间主要影响大粒径砂砾的去除,气水比主要影响中等粒径砂砾的去除,而进水中细砂占比则是制约细砂去除率的关键因素。这一结果为后续工艺优化提供了

多维度的靶向方向。进一步地,根据主成分分析发现,停留时间和气水比是影响砂砾去除率的关键因素,这一发现为优化曝气沉砂池的设计和运行提供了重要理论依据。

对于粒径 $>380\ \mu\text{m}$ 的砂砾,延长停留时间能显著提高砂砾去除率。例如,深圳B厂和广州E厂的停留时间均大于 $10\ \text{min}$,其对大粒径砂砾的去除率分别达到 99.16% 和 97.99% 。这一结果表明,较长的停留时间有利于砂砾沉降,从而提高去除效果。较长的停留时间可以延长砂砾的沉降时间,使其在水中逐渐沉积到沉砂池底部。此外,停留时间的延长对 $(212, 380]\ \mu\text{m}$ 粒径区间砂砾的去除有积极作用,这可能是因为该粒径区间的砂砾密度和沉降速度介于粗砂和细砂之间,适当的停留时间可以使其在水流剪切力和气泡干扰下更好地沉降。

气水比对砂砾去除率的影响则因粒径区间而异。对于 $(212, 380]\ \mu\text{m}$ 的砂砾,适当增大气水比可以显著提高其去除率。例如,广州D厂的气水比为 $0.10\sim 0.13$,其对该粒径区间砂砾的去除率可达到 67.92% ,这是由于气水比的增加可以增强水的流动性,促进砂砾与水分离。然而,对于 $(75, 106]\ \mu\text{m}$ 的细小砂砾,气水比和停留时间的影响并不显著(广州D厂该尺寸下砂砾去除率仅为 13.78%)。这可能是因为细小砂砾的密度较低,其沉降速度受水流剪切力和气泡干扰的影响更大,单纯依靠气水比和停留时间难以实现高效去除。此外,细小砂砾的表面性质和颗粒间的相互作用也可能影响其去除率。

2.4 传统沉砂工艺优化及新型沉砂工艺评估

为系统评估不同除砂工艺的效能,在广州E厂开展了旋流沉砂池、曝气沉砂池与新型多层旋流沉砂池的对比试验。试验连续进行 $15\ \text{d}$,覆盖晴天、小雨及中雨三种天气条件。三种工艺均采用同一水源,即通过固定式采样设备从曝气沉砂池进水廊道同步采集水样,确保进水水质一致。每天在各工艺出水端采集3次样品(间隔 $4\ \text{h}$),分析砂砾粒径分布及去除率,并计算日均去除率以减少偶然误差。

试验期间进水含砂量为 $(14.20\pm 2.00)\ \text{mg/L}$,粒径 $>380\ \mu\text{m}$ 的砂砾占比 18.81% ,粒径为 $(212, 380]\ \mu\text{m}$ 的砂砾占比 65.25% ,粒径为 $(106, 212]\ \mu\text{m}$ 的砂砾占比 5.33% ,粒径为 $(75, 106]\ \mu\text{m}$ 的砂砾占比 10.61% 。3种工艺的设计进水负荷均为 $100\ \text{m}^3/\text{h}$,关键运行参数如下:旋流沉砂池的停留时间为 1.5

min ,旋流速度为 $2.8\ \text{m/s}$,旋流层数为 1 层;曝气沉砂池的停留时间为 $10.8\ \text{min}$,气水比为 0.15 ;多层旋流沉砂池的停留时间为 $4.0\ \text{min}$,旋流速度为 $3.2\ \text{m/s}$,旋流层数为 6 层。

图3展示了三种不同沉砂池工艺的除砂结果。可以明显看出,各沉砂工艺在去除不同粒径砂砾时表现出显著差异。旋流沉砂池利用离心力原理,通过高速旋转的水流将砂砾分离出来,其核心优势在于对细小砂砾的高效去除能力。旋流沉砂池对粒径为 $(106, 212]\ \mu\text{m}$ 砂砾的去除率仅为 $40\%\sim 55\%$,去除效果有限。

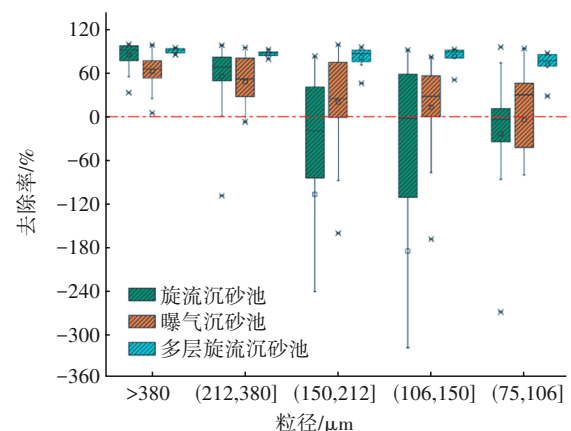


图3 不同沉砂工艺的除砂效果

Fig.3 Grit removal efficiency of different grit removal processes

相比之下,曝气沉砂池通过曝气增加水流的流动性,促进砂砾沉降。其对砂砾的去除率受停留时间和气水比的影响显著。从图3可以看出,曝气沉砂池在去除大粒径砂砾($>380\ \mu\text{m}$)时去除率较高,但在处理细小砂砾($\leq 212\ \mu\text{m}$)时去除率较低。较长的停留时间有助于砂砾充分沉降,从而提高去除率,而适当的气水比可以增强水的流动性,促进砂砾沉降。然而,气水比过高可能导致细小砂砾重新悬浮,降低去除率。此外,曝气沉砂池在去除大粒径砂砾时去除率较高,但在粒径为 $(106, 212]$ 和 $(75, 106]\ \mu\text{m}$ 时的表现不如多层旋流沉砂池,表明其更适合处理含大粒径砂砾的污水,但对于细小砂砾的去除能力有限。

多层旋流沉砂池结合了旋流沉砂池和传统沉砂池的优点,通过多层旋流分离和沉降,进一步提高对砂砾的去除率。多层旋流沉砂池在所有粒径区间对砂砾的去除率均高于传统曝气沉砂池,且显

著优于旋流沉砂池的除砂效果(粒径 $>380\ \mu\text{m}$ 砂砾的优势显著性相对较弱)。这可能是由于多层旋流沉砂池通过多级旋流分离,增加了砂砾与水的接触时间并提高了分离机会,从而对细小砂砾表现出较高的去除率。其既能高效去除细小砂砾,也能有效去除大粒径砂砾,综合性能更好。

通过上述分析可以发现,旋流沉砂池适用于对细小砂砾去除率要求较高的污水处理厂,尤其是在处理粒径 $\leq 212\ \mu\text{m}$ 的砂砾时表现出色,其短停留时间和高效的去除性能使其在运行成本和除砂效果上具有显著优势;曝气沉砂池适合处理含大粒径砂砾的污水,尤其在优化停留时间和气水比后,对大粒径砂砾的去除率较高,然而其对细小砂砾的去除能力有限,需要结合其他工艺或优化设计参数;多层旋流沉砂池则表现出良好的综合性能,既能高效去除细小砂砾,也能有效去除大粒径砂砾,适用于多种粒径砂砾的去除。

基于上述分析可知,停留时间和气水比对砂砾去除率的影响因粒径而异。对于大粒径砂砾,延长停留时间是提高去除率的关键;而对于中等粒径的砂砾,适当增大气水比可以显著提高去除效果;然而,对于细小砂砾,需要考虑其他因素,如砂砾表面性质和颗粒间的相互作用。因此,建议在优化曝气沉砂池设计时,综合考虑停留时间和气水比,并结合其他技术手段,如旋流沉砂池或高效沉淀池,以提高对细小砂砾的去除效果。

珠三角地区污水处理厂进水含砂特征的趋同性为除砂工艺的优化提供了参考。各厂可以共享运行数据和经验,通过技术交流与合作,进一步提升除砂效率。一些潜在的具体优化措施如下:①优化曝气沉砂池设计参数,通过调整气水比和停留时间,提高对细小砂砾的去除率;②引入高效旋流沉砂池,对于需要进一步提高细小砂砾去除率的污水处理厂,建议引入水力旋流沉砂池,其对粒径为 $(106, 212]\ \mu\text{m}$ 的砂砾去除率可达95.00%,显著优于传统曝气沉砂池;③加强进水预处理,在污水进入沉砂池前,增加预处理措施(如格栅过滤或筛网过滤),以去除部分大粒径砂砾,减轻沉砂池的负荷;④定期维护和优化设备,针对现有设备的运行状况,进行定期维护和优化,例如对砂水分离器进行技术改造,提高其对细小砂砾的分离效率。

综上所述,建议污水处理厂根据进水砂砾特征

和除砂目标,合理选择沉砂池工艺。对于细小砂砾含量较高的污水,建议优先选择旋流沉砂池或多层旋流沉砂池。对于含砂特征复杂的污水,可考虑将旋流沉砂池与曝气沉砂池组合使用,先利用曝气沉砂池去除大粒径砂砾,再通过旋流沉砂池去除细小砂砾。此外,无论选择何种沉砂池工艺,均需要定期维护设备,确保其运行效率和除砂效果。通过合理选择和优化沉砂池,污水处理厂可以提高除砂效率,降低运行成本,为后续污水处理工艺的稳定运行提供保障。

3 结论

① 珠三角地区污水处理厂进水含砂量和粒径分布具有趋同性,平均含砂量为 $(12.35\pm 7.30)\ \text{mg/L}$,粒径在 $(212, 380]\ \mu\text{m}$ 的粗砂占比约为58.84%。并且,珠三角地区污水处理厂传统曝气沉砂池和旋流沉砂池对细小砂砾(粒径 $\leq 212\ \mu\text{m}$)的去除效果差,加权平均除砂率仅为39.42%~88.55%。

② 主成分分析显示,停留时间和气水比是影响曝气沉砂池除砂效率的关键因素。延长停留时间可显著提高对大粒径砂砾($>380\ \mu\text{m}$)的去除率;增大气水比有利于提高 $(106, 212]\ \mu\text{m}$ 中等粒径砂砾的去除效果;但对 $(75, 106]\ \mu\text{m}$ 细小砂砾去除率的影响有限。新型多层旋流沉砂工艺对全粒径砂砾的去除效果显著,尤其是对 $(75, 106]\ \mu\text{m}$ 细小砂砾的去除效果优于传统工艺。

参考文献:

- [1] 马乃毅, 龚义枫. 珠江三角洲城市群污水资源化利用价值分析[J]. 科技和产业, 2023, 23(4): 53-57.
MA N Y, GONG Y F. Value analysis of sewage resource utilization in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Science Technology and Industry, 2023, 23(4): 53-57 (in Chinese).
- [2] 孙强强, 陈贻龙. 南方某省城镇污水处理厂碳排放特征[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3231-3244.
SUN Q Q, CHEN Y L. Characteristics of carbon emission from municipal wastewater treatment plants in a south-China province [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3231-3244 (in Chinese).
- [3] 朱铁才, 刘舸, 马少杰, 等. 广东省城镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(5): 67-69.

- ZHU T C, LIU G, M S J, et al. Analysis of influent water quality characteristics of urban wastewater treatment plants in Guangdong Province [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37 (5): 67-69 (in Chinese).
- [4] 李俊华. 关于A/O工艺实例脱氮控制的运行实例分析[J]. 广州化工, 2016, 44(8): 171-173.
- LI J H. A case analysis of nitrogen removal control in A/O process [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, 44 (8): 171-173 (in Chinese).
- [5] 张潇, 赵博玮, 岳秀萍. 取消初沉池对AAO工艺活性污泥微生物结构的影响[J]. 工业水处理, 2019, 39 (6): 30-34.
- ZHANG X, ZHAO B W, YUE X P. Influences of canceling primary settling tanks on the microbial structure of activated sludge in AAO process [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39 (6): 30-34 (in Chinese).
- [6] 苏东霞, 刘学锋. 某污水处理厂曝气沉砂系统的提质增效与改造[J]. 净水技术, 2023, 42(9): 116-123.
- SU D X, LIU X F. Upgrading and reconstruction of aeration sand settling system in a WWTP [J]. Water Purification Technology, 2023, 42 (9): 116-123 (in Chinese).
- [7] 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.
- WANG S B, GAO J X, WANG Y, et al. Structure modification and operation effect analysis of vor-tex-type grit chamber in a wastewater treatment plant [J]. Environmental Engineering, 2020, 38 (7): 116-121 (in Chinese).
- [8] 关永年, 李立新. 某污水厂曝气沉砂系统技术改造实践[J]. 净水技术, 2018, 37(12): 19-21.
- GUAN Y N, LI L X. Practice of technical reconstruction of aerated grit chamber in a wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37 (12): 19-21 (in Chinese).
- [9] 王保贵, 蔺洪永, 刘玉婷, 等. 污水处理厂积砂情况分析防治对策[J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 107-111.
- WANG B G, LIN H Y, LIU Y T, et al. Analysis of grit sediment in a sewage treatment plant and the prevention countermeasures [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 107-111 (in Chinese).
- [10] 刘佳佳, 刘佳琳, 刘伟. 污水处理厂曝气沉砂系统常见故障分析[J]. 辽宁化工, 2018, 47(5): 407-409.
- LIU J J, LIU J L, LIU W. Analysis of common faults of aerated grit chamber system in a sewage treatment plant [J]. Liaoning Chemical Industry, 2018, 47 (5): 407-409 (in Chinese).

作者简介:陈娟娟(1984—),女,湖北麻城人,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为水污染和固体废物污染治理理论与技术。

E-mail:vdanielle@vip.qq.com

收稿日期:2025-02-12

修回日期:2025-04-27

(编辑:任莹莹)

复苏河湖生态,建设人水和谐美丽中国