

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.22.003

高效沉淀池在市政污水深度处理中的应用研究进展

包 鹏¹, 庞洪涛¹, 曹效鑫^{1,2}, 郭媛媛¹, 王东尔², 张术宝¹,
张显忠³, 高靖伟¹, 李 朋¹

(1. 信开环境投资有限公司, 北京 101100; 2. 贵州筑信水务环境产业有限公司,
贵州 贵阳 550081; 3. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125)

摘 要: 以污泥回流为特点的非介质强化高效沉淀池在市政污水深度处理领域已得到了广泛的推广与应用,通过对相关研究报告的跟踪和整理,概述了我国污泥回流高效沉淀池在市政污水深度处理中的应用研究趋势,介绍了斜管区表面负荷、混合区停留时间、絮凝区停留时间等设计参数,以及进出水水质、药剂类型、药剂投加量、污泥回流比等运行参数的应用研究现状,并总结了现阶段研究的不足及发展方向。

关键词: 高效沉淀池; 深度处理; 市政污水

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)22-0013-08

Research and Application Progress of High-performance Sedimentation Tank in Domestic Sewage Advanced Treatment

BAO Peng¹, PANG Hong-tao¹, CAO Xiao-xin^{1,2}, GUO Yuan-yuan¹,
WANG Dong-er², ZHANG Shu-bao¹, ZHANG Xian-zhong³, GAO Jing-wei¹, LI Peng¹
(1. Xinkai Environment Investment Co. Ltd., Beijing 101100, China; 2. Guizhou Zhuxin Water Environment Co. Ltd., Guiyang 550081, China; 3. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: High-performance sedimentation tank with sludge recycling has been widely used in the advanced treatment of domestic sewage. The research and application progress of the high-performance sedimentation tank were reviewed by tracking and sorting out relevant research. Process and design parameters including surface load of inclined-tube zone, residence time of coagulation mixing zone and flocculation zone, influent and effluent quality, chemicals type and dosage, sludge return ratio, etc., were introduced. Existing problems and development prospects of current research were also expounded.

Key words: high-performance sedimentation tank; advanced treatment; domestic sewage

以污泥回流为特点的非介质强化高效沉淀池(以下简称污泥回流高效沉淀池)是一种高效物化处理工艺,其主要工作原理为:向污水中投加混凝

剂等相关药剂,与污染物发生混凝沉淀反应,以回流污泥颗粒为载体絮核,快速生成密度较大的矾花,从而大大缩短沉淀时间;同时结合斜管沉淀方

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-007); 北京市科协金桥工程种子资金资助项目
通信作者: 曹效鑫 E-mail: caoxiaoxin@cwewater.com

式提升沉淀池的处理能力,并有效应对高冲击负荷。此类高效沉淀池技术在2000年前后逐渐进入我国水处理领域,最初主要应用于给水处理。随着我国市政污水厂提标改造的推进,该工艺凭借其表面负荷高、占地面积小、处理效率高等技术优势,逐步推广应用于市政污水深度处理环节,目前已成为主流处理工艺,能够保障污水处理设施稳定达到城镇污水一级A排放标准,部分工程可达到地表水Ⅳ类标准或杂用水标准,实现污水的再生利用^[1-5]。相比其他技术而言,此类高效沉淀池在深度处理中的应用时间还不长,迫切需要整理总结经验教训,以优化完善相关设计与运行。

1 污泥回流高效沉淀池的应用情况

1.1 基本工艺

污泥回流高效沉淀池基本工艺概况如图1所示。

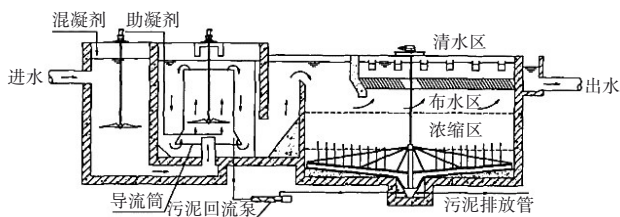


图1 污泥回流高效沉淀池基本工艺概况

Fig.1 Process of high-performance sedimentation tank with sludge recycling

1.2 应用整体情况

利用中国知网数据库(CNKI)“专业检索”,检索“主题:高效沉淀池+全文:深度处理”(SU='高效沉淀池' AND FT='深度处理')、“主题:高密度沉淀池+全文:深度处理”(SU='高密度沉淀池' AND FT='深度处理')分别获得187篇和136篇论文。对数据进行人工筛选,进一步过滤掉非市政污水领域、非污泥回流类型(加磁粉或微砂等介质)以及重复内容等不符合统计要求的文献,最终获得有效文献99篇。分析结果表明:污泥回流高效沉淀池深度处理相关研究从2010年前后陆续出现(见图2),2010年—2017年此类高效沉淀池相关文献研究较少,2017年以后相关报道数量迅速增加。从2010年的1篇文献报道到2020年(截至9月)的24篇文献报道的快速增长,反映了10年间尤其是2018年—2020年阶段,伴随全国污水厂提标改造的要求,此类高效沉淀池已逐渐成为污水厂深度处理的主要研究

方向之一。

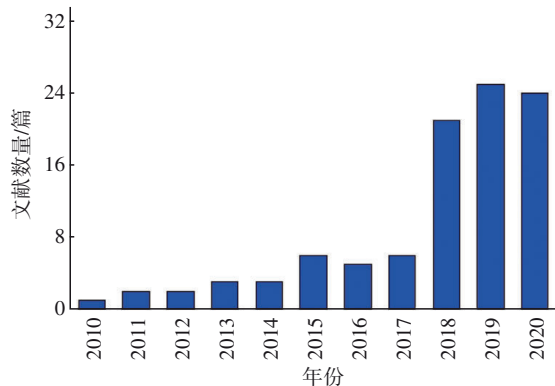


图2 污泥回流高效沉淀池研究论文数量

Fig.2 Number of research paper on high-performance sedimentation tank with sludge recycling

在已整理的研究论文中,约77%以上为实际工程报道,较多的是涉及深度处理高效沉淀池设计参数的污水处理厂新建或提标改造的工程案例。此类文献在2010年—2017年报道较少,从2018年后数量显著升高,同样体现了以污泥回流为特点的高效沉淀池在深度处理领域从初期推广到广泛应用的变化趋势。其中,74项工程案例可明确所在地理位置:华东地区31项,华中地区10项,东北地区9项,华北地区8项,西南地区8项,华南地区4项,以及西北地区4项。由此可见,此类高效沉淀池在我国不同地区已得到普遍应用,在华东等经济较发达、污水处理回用水平较高地区的应用推广尤为明显。

对研究报道整体分析发现,论文作者第一单位主要由高校、设计院、环保企业及运营单位组成。其中,各设计院发表的相关文献最多,由于是实际工程的主要设计单位,其发表文章绝大多数涉及此类高效沉淀池深度处理设计参数。各地高校等科研机构发表近30篇相关文章,由于其科技研发的特点,除设计参数外,还包含了此类高效沉淀池运行参数的相关研究。环保企业及运营单位作为工程项目的主要参与者和实际设施的运行者也发表了一部分研究文章,均涉及运行参数和设计参数。

2 污泥回流高效沉淀池的关键设计参数

污泥回流高效沉淀池的主要设计参数包括混合区停留时间、絮凝区停留时间、斜管区表面负荷、絮凝出水口上升流速、絮凝反应区过水洞流速、斜管斜长及倾角等。虽然我国相关设计规范标准,如

《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)、《城镇污水再生利用工程设计规范》(GB 50335—2016)、《江苏省太湖地区城镇污水处理厂 DB 321072 提标技术指引(2018 版)》(以下简称江苏太湖 DB 321072 指引)、《地下式城镇污水处理厂工程技术指南》(T/CAEPI 23—2019),也逐渐增加了此类高效沉淀池深度处理环节的设计内容,不同程度地规定或推荐了相关设计参数的取值,但其中部分建议范围较大。为了进一步总结设计经验,提升设计水平,整理了此类高效沉淀池在深度处理领域应用的工程设计参数取值趋势及相关研究,具体见表 1。

表 1 污泥回流高效沉淀池设计参数
Tab.1 Design parameters of high-performance sedimentation tank with sludge recycling

主要参数	GB 50014—2021	GB 50335—2016	江苏太湖 DB 321072 指引	T/CAEPI 23—2019
混合时间/min	0.5~2	0.5~1	≥2	1~3
絮凝时间/min	8~15	8~15	8~15	8~15
表面负荷/ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	6~13	10~20		
斜管区上升流 速/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)			19~25	
污泥回流比/%	3~6	3~6	4	3~6
斜管斜长/m		1.0~1.5		1.0~1.5
斜管倾角/(°)		60		60

2.1 斜管区表面负荷

现有报道中对污泥回流高效沉淀池表面负荷的叙述存在差异,常出现“沉淀区表面负荷”“沉淀区上升流速”“斜管区表面负荷”等不同用语,亦存在混淆现象。故集中针对涉及或可核算斜管区表面负荷的研究报道进行整理。斜管区表面负荷(斜管区上升流速)是高效沉淀池最重要的设计参数之一,与沉淀池土建占地及处理效果密切相关,直接影响建设成本和后期稳定运行。GB 50014—2021 规定了深度处理污泥回流高效沉淀池斜管区表面负荷取值宜为 $6 \sim 13 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其他标准也有涉及,如《城镇污水再生利用工程设计规范》(GB 50335—2016)中 5.4 沉淀章节规定,此类高效沉淀池表面水力负荷宜为 $10 \sim 20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。统计的涉及斜管区表面负荷设计参数的工程案例共 48 项,如图 3 所示。在单池处理量为 $800 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下的设施中,斜管区表面负荷设计值较为集中;在单池处理量为 $800 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上的设施中,斜管区表面负荷设计值较为分

散。在 48 项工程案例中,污泥回流高效沉淀池斜管区表面负荷平均值为 $11.63 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,最高为 $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ^[6],最低为 $4.85 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ^[7]。

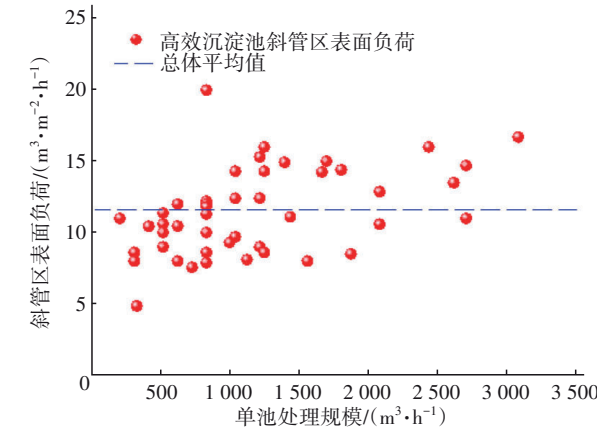


图 3 高效沉淀池深度处理斜管区表面负荷
Fig.3 Surface load of inclined-tube zone in high-performance sedimentation tank

2.2 混合区及絮凝区停留时间

高效沉淀池混合区停留时间对进水污染物与药剂的充分反应具有重要影响。目前,在涉及污水处理二级出水混凝沉淀工艺设计相关规范标准中,混合时间的取值规定较为接近,建议值一般为 $0.5 \sim 3 \text{ min}$ 。在涉及高效沉淀池设计参数的研究报道中,涉及或可核算混合区停留时间的污泥回流高效沉淀池工程案例共 59 项,在单池处理量为 $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下的设施中,混合时间设计值较为分散,在单池处理量为 $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上的设施中混合时间设计值较为集中(见图 4)。混合区停留时间最大为 5 min ^[8],最小为 0.3 min ^[9]。

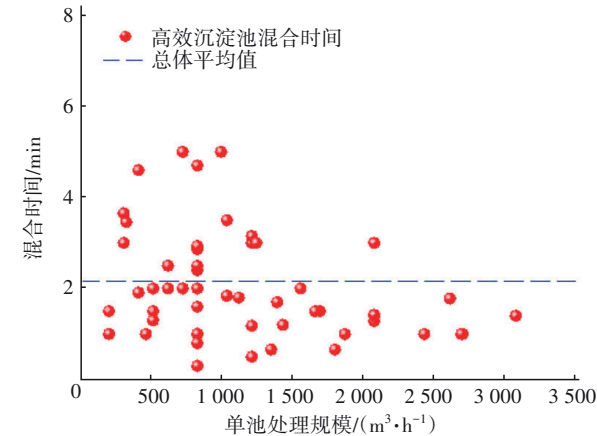


图 4 高效沉淀池混合区停留时间
Fig.4 Residence time of coagulation mixing zone in high-performance sedimentation tank

由于现阶段此类高效沉淀池混合区的设计相对灵活,在保证污水与药剂充分混合的情况下,可根据现场条件和整体建(构)筑物设计,优化混合区尺寸参数,降低对土建投资的影响。在设置方面,常见两个高效沉淀系统共用同一混合区的设置方式,也存在单系统对应单独混合区的设置方式。另外,还存在以管式静态混合器代替混合区的设置方案^[10],可节约一定的空间和土建投资,但案例较少,其混合效果、巡检难度、维修情况等仍有待评估。

高效沉淀池絮凝区是矾花形成的主要区域,其参数也是后续沉淀的重要影响因素。在相关标准规范中,对絮凝时间也有较为详细的取值建议,GB 50014—2021、GB 50335—2016、T/CAEPI 23—2019、江苏太湖DB 321072指引等建议絮凝时间均为8~15 min。目前,给出或可核算絮凝区停留时间的污泥回流高效沉淀池工程案例共59项,在不同单池处理规模下,絮凝区取值无明显趋势,差异性较大,絮凝时间最大为25 min^[11],最小为3.95 min^[12],统计得出絮凝平均时间为12.68 min(见图5)。

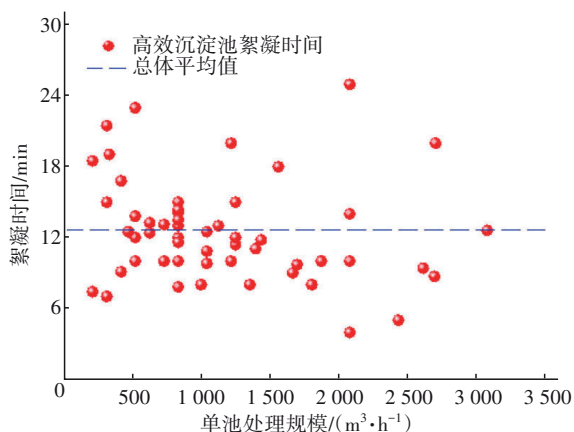


图5 高效沉淀池絮凝区停留时间

Fig.5 Residence time of flocculation zone in high-performance sedimentation tank

2.3 其他设计参数

除上述参数外,相关设计标准还涉及斜管斜长和角度,考虑处理效果及斜管技术规格等方面因素,高效沉淀池斜管斜长宜为1.0~1.5 m,倾角宜为60°。在已知设计斜管参数的10项工程案例中,斜管斜长分为1.0、1.2、1.5 m三种规格,斜管倾角均为60°,符合相关设计标准。

其他设计参数也有少量涉及^[13],如:导流筒回流比为10,导流筒内流速为0.5~0.6 m/s等。而清

水区高度、污泥浓缩时间、絮凝区过水洞流速、絮凝出水区上升流速等参数鲜有报道。

在自动化控制方面,高玮寅^[14]指出高效沉淀池在沉淀区中均需配置一体化超声波液位计,并根据液位测量参数来控制污泥排放泵,集水坑中还应增设浮球开关。在池型优化方面,何彦^[15]利用流体动力学模型对黄岩院桥污水厂深度处理高效沉淀池进行模拟,发现进水口与过水淹没堰之间有湍流形成,流场中有小旋涡,流体不规则运动,同时在模拟条件下证实,若增设挡墙,可使沉淀区流态分布更均匀,沉淀效果更好。

3 污泥回流高效沉淀池的关键运行参数

相对设计参数而言,关于污泥回流高效沉淀池深度处理运行参数的研究报道较少。此类高效沉淀池是通过混凝沉淀反应发挥化学除磷等功能,同时辅助污泥回流系统提升处理效果,其主要运行参数包括进出水水质、药剂、污泥回流控制等。

3.1 进水水质和出水要求

进水水质是高效沉淀池运行处理效果的主要因素之一。张晖等^[16]发现进水(二沉池出水)浊度越大,高效沉淀池正磷酸盐去除率越低,相关药剂投加量越高。王丽娜^[17]发现温度对高效沉淀池处理效果有着明显影响,同一反应器在同一运行工况下,当温度降至10℃以下时,TP去除率从90%以上下降至70%~80%,COD、SS去除率同样降低。因此,在高效沉淀池运行过程中应注意污染物浓度变化和季节性温度变化引起的进水水质波动,及时预判并调整高效沉淀池的运行策略。

目前,经高效沉淀池深度处理后,出水总磷等污染物指标可满足城镇污水厂一级A排放标准要求,但作为常与滤池、膜处理等形成组合深度处理工艺的高效沉淀池,除TP、COD、SS之外的其他水质指标也值得关注。张磊等^[18]通过小试、中试研究了净水厂给水沉淀澄清环节应用的高密度澄清池出水残余聚丙烯酰胺(PAM)对超滤膜运行的影响,证实较低的PAM投加量(0.05~0.2 mg/L)仍会对超滤膜造成直接污染。此类情况亦可能出现于市政污水深度处理高效沉淀池+膜处理组合工艺运行中,造成后端膜处理环节膜阻塞加剧、产水量下降等问题。同时,对于市政污水深度处理较为常用的“高效沉淀池+砂滤(滤布滤池、精密过滤)”等工艺,前

端高效沉淀池投加的PAM等药剂在出水中的残留也易造成滤池滤料板结等问题,影响后端工艺的稳定运行。但是目前关于此方面的研究报道较少,因此应予以更多关注并开展系统性研究。

3.2 药剂类型和药剂投加量

目前,常应用铝盐或铁盐作为深度处理除磷药剂,如聚合氯化铁^[19]、硫酸铝^[20]、聚合氯化铝(PAC)^[21-22]、聚合硫酸铁^[23]等,药剂投加量一般宜按有效金属离子与进水总磷的物质的量之比为1.5~3进行设计,常用的高效絮凝药剂为PAM,设计投加量一般为0.5~1.0 mg/L^[20-23]。

药剂实际投加量则是各个运营单位根据实际水质情况进行调节,现阶段分享的运营评估报道较少。在整理的有限的3个运行案例^[24-26]中,当进水(二沉池出水)总磷为0.8~3.0 mg/L、出水总磷<0.5 mg/L时,PAC投加量约8~16 mg/L(以铝有效浓度为30%核算),PAM投加量约为0.18~0.8 mg/L(见图6)。经估算,运行案例中有效金属离子与总磷的物质的量之比为1.2~3.5,但其代表性有待加强,仍需更多的案例数据支持,以更准确地反映实际趋势。

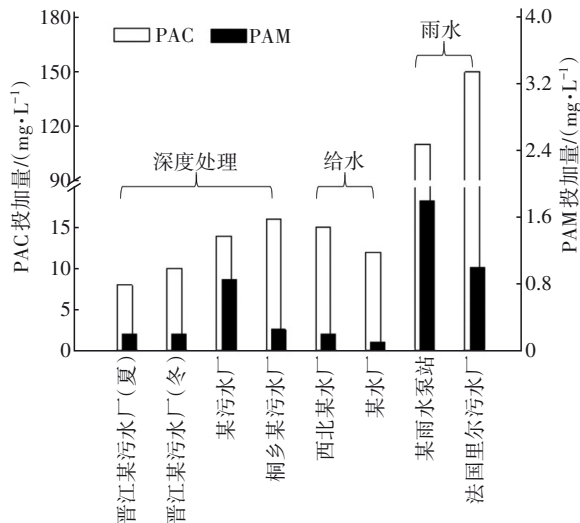


图6 典型高效沉淀池案例中药剂投加量

Fig.6 Dosage of chemicals in typical high-performance sedimentation tank cases

总体来看,在污泥回流高效沉淀池深度处理单元,PAC、PAM投加量与其在给水澄清处理应用^[27-28]时较为相似,远低于介质强化型高效沉淀池在雨水处理领域的应用投加量^[29-30](见图6),主要原因可能是初期雨水中污染物浓度较高。而李丽琴等^[24]对晋江某污水厂高效沉淀池工艺运行进行评估时

发现,高效沉淀池除磷效果受温差变化的影响,夏季温度较高,温差变化小,PAC投加量仅需8~9 mg/L,PAM投加量为0.18 mg/L;冬季温度较低时,PAC投加量需达10 mg/L以上,PAM投加量为0.2 mg/L。这也从运行的角度再次印证了低温对高效沉淀池深度处理效果的影响。另外,复合型除磷药剂也已得到应用,故应加强对其在高效沉淀池深度处理领域设计和运行条件的总结评估。

3.3 污泥回流比

在深度处理领域中,污泥回流系统的增效作用同样得到证实。王丽娜^[17]在小试模拟反应器中证实污水强化处理高效沉淀池中无污泥回流工况的出水SS明显高于有污泥回流工况;于小迪等^[31]同样证实污泥回流对沉淀池运行效果的影响较大。

但是,目前对深度处理污泥回流理论的深入研究较少,一般以实际工程经验为主。相关设计标准规范给出了高效沉淀池污泥回流比的建议取值,如GB 50335—2016、T/CAEPI 23—2019中建议值均为3%~6%(见表1)。在整理的工程案例中有11项涉及污泥回流比参数的设施,多数污泥回流比为3%或5%(部分设施为范围值,取上限统计),个别设施污泥回流比最大为10%(见图7)。实际运营过程中,各设施仍需根据现场情况及运行经验,通过变频污泥回流泵对回流比进行调整和优化。因此,针对合理调控污泥回流方面需要开展更深入的研究和工程经验分享。

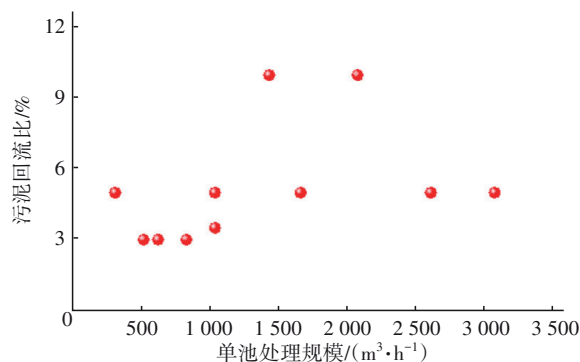


图7 高效沉淀池污泥回流比

Fig.7 Sludge return ratio of high-performance sedimentation tank

3.4 其他运行参数

除以上主要运行参数外,污泥回流高效沉淀池还包括剩余污泥产量、沉淀区泥位、剩余污泥浓度、絮凝区污泥浓度等其他运行参数或指标。由于高

效沉淀池在市政污水深度处理环节主要发挥除磷作用,其剩余污泥产量取决于投加药剂的种类及用量,一般可按1 kg铁盐产生2.5 kg污泥或1 kg铝盐产生4.0 kg污泥设计计算。在实际工程中药剂投加量、进水SS等存在波动,导致剩余污泥产量出现变化,常用沉淀区泥位指导剩余污泥的排放,同时部分设施通过检测剩余污泥浓度、絮凝区污泥浓度等来指导高效沉淀池的稳定运行。但在实际运行过程中这些参数差异性较为明显,如李舒扬^[32]调研的某城镇污水厂高效沉淀池正常运行时泥位控制在0.5~1.0 m,而枣庄市某污水厂高效沉淀池泥位控制在1.0~1.8 m,絮凝区污泥浓度为120~180 mg/L,剩余污泥浓度为8~12 g/L时运行效果最佳^[33]。因此,进一步深入研究污泥产量、污泥浓度及污泥性状等因素对高效沉淀池运行效果的影响,有助于其在市政污水深度处理领域的规范运行及优化升级。

4 总结与展望

① 污泥回流高效沉淀池技术已成为市政污水深度处理应用研究的重要方向之一,现阶段设计参数研究占比较高,运行参数研究相对较少。

② 在设计参数方面,除主要设计参数外,其他参数(如清水区高度、污泥浓缩时间、絮凝区过水洞流速、絮凝出水区上升流速等)鲜有介绍,应进一步加强研究和工程验证,形成标准化设计指导。

③ 在运行参数方面,现阶段相关研究仍十分欠缺,主要运行参数在深度处理领域的系统性深入研究较少,应重点加强泥位控制、各环节污泥浓度监测控制、智能加药、对前后端工艺环节影响等方面的研究。

④ 为了避免歧义,适应各类型科研设计人员理解,在以斜管区为主要设计依据时,应明确“斜管区表面负荷”或“斜管区上升流速”文字叙述。

参考文献:

- [1] 胡维杰,周友飞. 上海市石洞口污水处理厂提标改造工程设计[J]. 中国给水排水,2018,34(10):43-47.
HU Weijie, ZHOU Youfei. Process design for upgrading and reconstruction of Shanghai Shidongkou WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10):43-47(in Chinese).
- [2] 陈建平,毛云飞. 传统污水处理厂Ⅳ类水提标改造工程实践[J]. 中国给水排水,2017,33(24):87-91.
CHEN Jianping, MAO Yunfei. Renovation of traditional wastewater treatment plant for the effluent quality similar to the fourth class[J]. China Water & Wastewater, 2017, 32(24):87-91(in Chinese).
- [3] 戴仲怡,王雪,彭建国,等. 曝气缺氧/多级AO工艺用于大型污水厂提标改造[J]. 中国给水排水,2019,35(18):50-54.
DAI Zhongyi, WANG Xue, PENG Jianguo, et al. Application of aeration anoxia-multi-stage AO process in improvement of large sewage treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18):50-54(in Chinese).
- [4] 赵璋,朱成豪,戴一鸣. 温州市西片污水处理厂提标改造及扩建工程设计要点[J]. 净水技术,2019,38(4):40-45.
ZHAO Zhang, ZHU Chenghao, DAI Yiming. Design consideration on upgrading reconstruction and expansion project for Wenzhou Xipian wastewater treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(4):40-45(in Chinese).
- [5] 刘连清,王知远. 长三角地区某污水处理厂提标扩建工程工艺设计[J]. 净水技术,2020,39(3):43-47,63.
LIU Lianqing, WANG Zhiyuan. Process design of upgrading and expansion project of a WWTP in the Yangtze River delta region[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(3):43-47,63(in Chinese).
- [6] 张樱凡. 莱西市污水处理厂深度处理工程[D]. 青岛:青岛理工大学,2013.
ZHANG Yingfan. Deep Processing Project in Sewage Treatment Plant of Laixi[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013(in Chinese).
- [7] 柯伟,王丽娜. 甘南北控污水处理厂一期工程提标改造的设计与运行[J]. 价值工程,2019,38(17):201-203.
KE Wei, WANG Lina. Design and operation in reconstruct of first-phase project of Gannan BEWG's sewage factory[J]. Value Engineering, 2019, 38(17):201-203(in Chinese).
- [8] 杨叶青. 南通某污水处理厂升级改造及扩建工程设计[J]. 净水技术,2018,37(z2):71-74.
YANG Yeqing. Design of reconstruction and extension project of a wastewater treatment plant in Nantong City[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(z2):71-74(in Chinese).
- [9] 李艳春. 污水处理厂提标改造工程设计[J]. 价值工

- 程,2017,36(4): 127-128.
- LI Yanchun. Design of upgrading and reconstruction project of sewage treatment plant [J]. Value Engineering, 2017, 36 (4): 127-128(in Chinese).
- [10] 董淑贤,张志军. 高密度沉淀池-V型滤池工艺再生水厂的设计与运行[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(4): 83-85.
- DONG Shuxian, ZHANG Zhijun. Design and operation of high density tank-V type filter process in reclaimed water plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2010, 41(4): 83-85(in Chinese).
- [11] 王雅楠. 钱江地下式集约化污水处理厂设计方案[J]. 净水技术, 2020, 39(6): 38-42.
- WANG Yanan. Design scheme of Qianjiang integrated underground wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2020, 39 (6) : 38-42 (in Chinese).
- [12] 吴艳华,张晓维,许从愿,等. 同安污水厂改造与扩建工程案例[J]. 净水技术, 2020, 39(4): 34-38, 53.
- WU Yanhua, ZHANG Xiaowei, XU Congyuan, *et al.* Case analysis of reconstruction and extension project for Tong'an WWTP [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(4): 34-38, 53(in Chinese).
- [13] 郑星宇,何华,黄康. 某区域生活污水处理厂工艺设计[J]. 广东化工, 2019, 46(22): 114-115.
- ZHENG Xingyu, HE Hua, HUANG Kang. Process design of a domestic sewage treatment plant in a certain area[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(22): 114-115(in Chinese).
- [14] 高玮寅. 地下式污水处理厂自动化控制系统的设计与应用[J]. 中国设备工程, 2019(13): 191-193.
- GAO Weiyin. Design and application of automatic control system in underground wastewater treatment [J]. China Plant Engineering, 2019 (13) : 191-193 (in Chinese).
- [15] 何彦. 利用CFD技术对高密度沉淀池沉淀区的数值模拟和优化改进[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- HE Yan. Numerical Simulation on Setting Zone of Densadeg and Improved Optimazation Using CFD Technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013(in Chinese).
- [16] 张晖,张岩. 城市污水生物系统后置除磷实验研究[J]. 上海化工, 2019, 44(4): 20-23.
- ZHANG Hui, ZHANG Yan. Research on efficiency of post-chemical phosphorus removal of biological wastewater treatment system [J]. Shanghai Chemical Industry, 2019, 44(4): 20-23(in Chinese).
- [17] 王丽娜. 高密度沉淀技术在污水强化处理中的试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2011.
- WANG Lina. Experimental Study on Densadeg Technique in Enhanced Wastewater Treatment [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2011(in Chinese).
- [18] 张磊,顾军农,王敏,等. 基于PAM投加的高密度澄清池+超滤组合工艺中膜污染特征分析[J]. 给水排水, 2018, 44(5): 57-59.
- ZHANG Lei, GU Junnong, WANG Min, *et al.* Analysis of membrane fouling in densadeg-ultrafiltration combination process based on PAM dosing [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44 (5) : 57-59 (in Chinese).
- [19] 陈淑芳,张修奎,杨松. A²O/纤维转盘滤池用于污水处理厂的设计与运行[J]. 中国给水排水, 2018, 34(12): 57-60.
- CHEN Shufang, ZHANG Xiukui, YANG Song. Design and operation of A²O/rotary fibre-plate filter for wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(12): 57-60(in Chinese).
- [20] 周媛,陈金荣,徐向东,等. 大连开发区污水处理二厂深度处理工艺设计[J]. 中国给水排水, 2015, 31(10): 69-72.
- ZHOU Yuan, CHEN Jinrong, XU Xiangdong, *et al.* Design of advanced treatment process in second wastewater treatment plant in Dalian development zone [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(10): 69-72 (in Chinese).
- [21] 刘晋,刘金星,张万里. 某Carrousel氧化沟工艺污水处理厂达标改造设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(10): 47-51.
- LIU Jin, LIU Jinxing, ZHANG Wanli. Reaching standard and renovation project design of a wastewater treatment plant with Carrousel oxidation ditch process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10): 47-51 (in Chinese).
- [22] 聂守田,王楠,王璐. 西安市泾渭新城污水厂提标改造及再生水利用工程设计[J]. 中国给水排水, 2016, 32(14): 44-47.
- NIE Shoutian, WANG Nan, WANG Lu. Design of reconstruction and reclaimed water reuse project of Xi'an Jingwei new town WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(14): 44-47 (in Chinese).
- [23] 瞿露,张华伟. 重庆地区A-A²/O工艺污水处理厂提标改造工程实例[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6):

- 72-75.
- QU Lu, ZHANG Huawei. A case study of upgrading and reconstruction project of A-A²/O process wastewater treatment plant in Chongqing [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 72-75 (in Chinese).
- [24] 李丽琴, 游美. 高效沉淀池工艺的控制与优化[J]. 化学工程与装备, 2020(5): 270-271.
- LI Liqin, YOU Mei. Control and optimization of high-efficiency sedimentation tank [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020 (5): 270-271 (in Chinese).
- [25] 钱志军, 熊仁久, 钱旺, 等. 高效沉淀池工艺运行控制探讨[J]. 资源节约与环保, 2016(9): 74, 78.
- QIAN Zhijun, XIONG Renjiu, QIAN Wang, et al. Discussion on process operation control of high-efficiency sedimentation tank [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2016 (9): 74, 78 (in Chinese).
- [26] 李畅宇. 高效沉淀池与深床滤池联合处理工艺在某污水处理厂的调试及试运行[J]. 新型工业化, 2020, 10(4): 138-141.
- LI Changyu. Commissioning and trial operation of high-efficiency sedimentation tank and deep bed filter combined treatment process in a sewage treatment plant [J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10 (4): 138-141 (in Chinese).
- [27] 周强. 高密度沉淀池用于处理低温低浊水库水的技术改造分析[J]. 科技创新与应用, 2019(20): 114-115, 118.
- ZHOU Qiang. Technical transformation analysis of densadeg for treating low-temperature and low-turbidity reservoir [J]. Technology Innovation and Application, 2019(20): 114-115, 118 (in Chinese).
- [28] 苑杨. 大连开发区某水厂原水强化混凝研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- YUAN Yang. The Enhanced Coagulation Study on Raw Water of a Waterwork in Dalian Development Zone [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [29] 顾建. 高效组合澄清系统在某雨水泵站污染物削减中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(z2): 102-105.
- GU Jian. Analysis on reduction of pollutant from rainwater pumping station by high-efficiency comagentic-flo system [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(z2): 102-105 (in Chinese).
- [30] 王银爽, 周立, 王英, 等. 法国里尔污水厂 Actiflo-Turbo 工艺处理大流量暴雨水[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 111-115.
- WANG Yinshuang, ZHOU Li, WANG Ying, et al. Actiflo-Turbo application for stormwater treatment of Lille WWTP in France [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 111-115 (in Chinese).
- [31] 于小迪, 王洪波, 李莹莹, 等. 污泥回流对高密度沉淀池运行效果的影响[J]. 环境科技, 2013, 26(2): 28-31.
- YU Xiaodi, WANG Hongbo, LI Yingying, et al. The influence of sludge reflux on Densadeg running effect [J]. Environmental Science and Technology, 2013, 26 (2): 28-31 (in Chinese).
- [32] 李舒扬. 城镇污水处理厂准IV类提标改造工艺探讨[J]. 四川建材, 2020, 46(5): 18-19.
- LI Shuyang. Discussion on reconstruction of sewage wastewater treatment to reach IV standard [J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46(5): 18-19 (in Chinese).
- [33] 柴春省. 高效混凝沉淀池的运行管理[J]. 工业用水与废水, 2017, 48(3): 59-62.
- CHAI Chunsheng. Operation management of efficient coagulation sedimentation tank [J]. Industrial Water & Wastewater, 2017, 48(3): 59-62 (in Chinese).

作者简介:包鹏(1985-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,高级工程师,主要从事城镇污水深度处理、垃圾渗滤液等高浓度废水处理的研究、设计以及工程推广应用工作。

E-mail:396808284@163.com

收稿日期:2021-07-19

修回日期:2021-08-11

(编辑:丁彩娟)