

“清时捷”供排水企业运行及管理成果专栏

范绍锦, 陈柱堆. 污水提标项目氨氮去除问题的思考与分析[J]. 净水技术, 2022, 41(8):174-179.

FAN S J, CHEN Z D. Thinking and analysis of ammonia nitrogen removal in sewage upgrading project [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(8):174-179.



扫我试试?

污水提标项目氨氮去除问题的思考与分析

范绍锦, 陈柱堆*

(东莞市水务集团净水有限公司, 广东东莞 523000)

摘要 南方某地区为落实生态环境保护精神, 实现水环境保护目标, 近年来逐步投资了多个污水提标项目, 将原污水处理项目出水各项指标由执行一级 B 标准全面提升为一级 A 标准或广东省地方标准较严值, 部分提标项目在运营过程中发现存在出水氨氮污染物无法稳定达标的问题。文章结合该地区污水提标项目实际运营状况, 分别对投加药剂去除氨氮、新增硝化工艺段去除氨氮两个方案展开思考与分析。研究发现, 投加药剂方案应考虑增加工艺过程仪表, 于折点加氯法实施段前端对水质氨氮指标进行持续、实时且精准的仪表检测及数据监控; 新增硝化工艺段方案中, 新增后置曝气生物滤池硝化工艺段比新增前置曝气生物滤池硝化工艺段前期工程投资小, 且后期运营成本低。

关键词 污水提标项目 氨氮污染物 投加药剂 硝化工艺 氨氮去除

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)08-0174-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.08.025

Thinking and Analysis of Ammonia Nitrogen Removal in Sewage Upgrading Project

FAN Shaojin, CHEN Zhudui*

(Dongguan Water Group Sewage Purification Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract In order to implement the spirit of ecological and environmental protection, to achieve the goal of water environmental protection, a certain area in southern China has gradually invested in a number of sewage upgrading projects in recent years. The effluent indices of the original sewage treatment projects have been comprehensively upgraded from first class B standards to first class A standards or the stricter local standards in Guangdong Province. In the operation process of some projects, it was found that the ammonia nitrogen pollutants of effluent could not reach the standard stably. In this paper, the two schemes of ammonia nitrogen removal by adding reagents and nitrification process section were considered and analyzed when combined with the actual operation status of the sewage upgrading project in this area. It was found that the design process instrument should be added to the solution of adding reagents, and continuous, real-time and accurate instrument detection and data monitoring of water quality ammonia nitrogen index should be carried out at the front end of fold point chlorine process. In the scheme of the new nitrification process section, the newly added post-biological aerated filter nitrification process section has less engineering investment in the early stage and lower operation cost in the later stage than the newly pre-biological aerated filter nitrification process section.

Keywords sewage upgrading projects ammonia nitrogen pollutant chemical doing nitrification process ammoniac nitrogen removal

[收稿日期] 2021-12-14

[作者简介] 范绍锦(1997—), 男, 工程师, 研究方向为给排水技术创新及给排水项目运营管理, E-mail: 2922802529@qq.com。

[通信作者] 陈柱堆(1987—), 男, 工程师, 研究方向为给排水技术创新及给排水项目运营管理, E-mail: 510263611@qq.com。

城市污水处理工程建设是城市稳步发展的重要基础,也是城市重要的民生工程,污水处理项目的建设和完善与城市开发、经济发展、环境治理和保护相辅相成。近年来,南方某地区为贯彻落实《环境保护“十三五”要求》文件精神,完成《南粤水更清行动计划(2013—2020年)》的要求,改善该地区投资环境,促进本地社会经济可持续发展,实现水环境保护目标的需要,该地区推进各原出水水质执行一级B标准的污水处理厂进行原有处理工艺因地制宜的提标改造工程。

南方某地区内不同镇街的污水处理提标改造项目,采取全部接收前端出水标准执行一级B标准的项目尾水,并将二次出水排放标准全部提升至一级A标准或地方更严值。全部提标改造项目已于2021年投入运营,但在运营过程中发现部分提标项目存在设计参数或工艺段配置欠合理等问题。提标项目进水水质即为前端污水处理项目出水水质,随着管网污水收集系统的不断完善,提标项目前端污水处理项目进水污染物浓度将会不断提高,而部分提标工程无硝化功能,若前端污水处理项目执行一级B标准运行及排放污水,提标工程将接受氨氮污染物浓度偏高的污水,污水在经过提标处理后排放存在氨氮超标风险。如何改进运营中现有提标工程的氨氮去除效果及降低运营成本,成为各污水处理项目应重点思考及分析的问题之一。

1 提标项目运营概况

1.1 提标项目工艺设计

近年,南方某地区为实现进一步提升污水处理项目排放水质标准、改善当地生态环境的目标,逐步启动多个提标改造项目,但基于提标改造项目预留地大小、总工程初期投资成本及后期运营成本等因素,并结合最重要的各项目进出水水质标准考虑,各提标改造项目的工艺设计并不相同。其中,主体设计工艺有3种:(1)“反硝化+滤布滤池+紫外消毒”工艺;(2)“硝化+反硝化+滤布滤池+紫外消毒”工艺;(3)“AO-膜生物反应器(MBR)+紫外消毒”工艺。3种污水提标处理工艺具体占比如图1所示。

“硝化+反硝化+滤布滤池+紫外消毒”工艺适用于前期预留地较小的项目,具有耐冲击负荷优势,并且具有多种净化功能,除了用于有机物去除外,还能去除一定程度的氨氮。“AO-MBR+紫外消毒”工艺

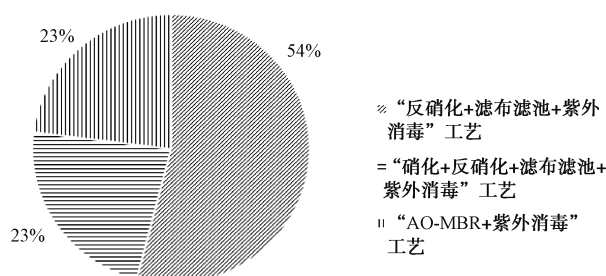


图1 提标改造项目设计工艺占比

Fig. 1 Proportion of Design Process of Upgrading and Reconstruction Project

采用超滤膜分离技术进行固液分离,适用于进出水水质标准较高的提标项目,不仅可保障出水悬浮物指标稳定达标,而且大大提高了生物反应器中的生物浓度和种群数量。该工艺可截留硝化菌这类不易形成菌胶团且增殖缓慢的细菌,有利于它的生长和繁殖,使得氨氮去除效果好,进一步提高了生物降解效率。

3种工艺中,“硝化+反硝化+滤布滤池+紫外消毒”和“AO-MBR+紫外消毒”工艺对氨氮的去除都采取相应的设计,而采用“反硝化+滤布滤池+紫外消毒”工艺的项目,因为工程设计调研结果表明项目进水氨氮较低,工艺设计时主要侧重于总氮、总磷、有机物及悬浮物的深度去除,对氨氮的去除效果有限。

1.2 提标项目运营现状

1.2.1 前端污水处理项目

以该地区某提标项目为例,由该提标项目的前端污水处理项目在2017年1月—2019年12月(提标改造前)的实际运行数据可知,前端污水处理项目出水氨氮质量浓度均在4.00 mg/L以下(表1),已达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A标准。在该进出水水质情况下,提标工程工艺设计无需考虑硝化段处理单元。

根据该提标项目提供的2020年6月—2021年11月的进出水水质监测数据可知,现阶段该提标项目的前端污水处理项目出水氨氮质量浓度不稳定,枯水期个别时段接近8.00 mg/L,具体如图2所示。主要原因是随着管网收集系统的不断完善,进水中污染物浓度不断提高,前端污水处理项目的进水氨氮将呈升高的趋势,而前端污水处理项目去除氨氮能力有限,导致提标项目进水氨氮也呈升高的趋势。

表 1 前端污水处理项目出水氨氮浓度(2017年1月—2019年12月)

Tab. 1 Ammonia Nitrogen Concentration of Effluent of Front End Sewage Treatment Project (during January 2017 to December 2019)

指标	2017年	2018年	2019年
进水氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	12.10~26.10	17.30~24.50	16.30~26.80
进水氨氮平均质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	20.73	20.81	22.63
出水氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.35~3.81	2.12~3.34	2.07~3.85
出水氨氮平均质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2.14	2.75	2.88

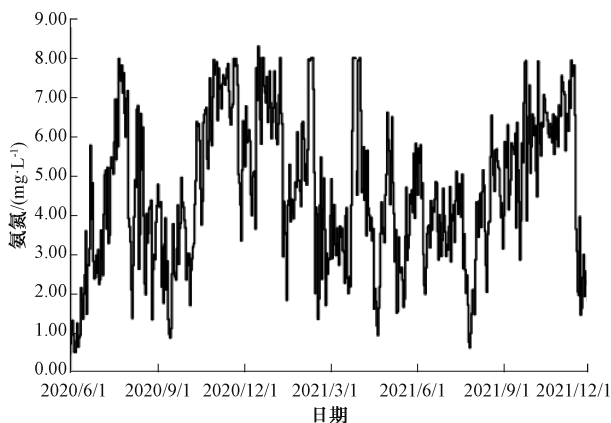


图 2 提标项目 2020 年 6 月—2021 年 11 月进水氨氮浓度
Fig. 2 Ammonia Nitrogen Concentration in Influent during June 2020 to November 2021

提标项目前端原污水处理项目运营时间较久,受原设计进出水参数或设备设施参数等各方面影响,通过改造增强硝化能力的技术难度较大。而且前端原污水处理项目为“BOT”经营模式管理,与提标项目分属两家不同运营单位。前端原污水处理项目出水水质暂时可稳定达标且生化系统改造项目投资成本较大,从前端原污水处理项目着手增强系统硝化能力的协调难度较大^[1]。

1.2.2 提标项目执行标准

南方某地区为强化城镇生活污染治理,加快城镇污水处理设施建设与改造,在现有城镇污水处理设施上因地制宜进行提标改造,2020 年底前达到相应排放标准或再生利用要求。该地区运营管理的提标改造项目把各“BOT”模式运营下原污水处理项目的污水排放标准进行全面提高,保证该地区内所有污水处理项目排放污水可达到一级 A 标准和广东省地方标准较严值。其中,个别项目考虑排放水域或地理敏感性及后期的生态环保需求,设计时采用更高的出水排放标准。

在多个提标项目实际运营中发现,采用“反硝化+滤布滤池+紫外消毒”工艺,以及部分出水水质排放标准执行地方更高标准的提标项目中,出水氨氮水质达标稳定性较差,甚至有超标风险。

2 提标项目氨氮去除方法及思考

2.1 投加药剂去除氨氮

应对原项目处理尾水氨氮浓度偏高的情况,污水提标项目为保证二次出水水质稳定达标,可采取折点加氯法的工艺管理措施。折点加氯法是利用次氯酸钠或除氨剂等强氧化液体药剂,按需加入所处理污水中,将所处理污水中的氨氮转化为氮气,以期达到氨氮去除的目的^[2]。

2.1.1 投加药剂去除氨氮的问题

提标项目的强氧化液体药剂投加点一般考虑在生化工艺出水末端或过滤工艺出水末端,基于提标改造预留地少和后期运营成本,该地区提标改造工程的过滤处理工艺基本采用占地少且易与消毒工艺合建的滤布滤池工艺。若考虑在生化工艺出水末端进行强氧化药剂投加,药剂会随污水流经滤布滤池,虽然滤布滤池污水不会回流至生化工艺段,但滤布滤池定期反冲洗所产生的废水未经单独处理,该部分废水水质较差,如按常规性处理回流到深度处理工艺段进水端,容易影响深度处理工艺段出水水质稳定性。基于此因素,将滤布滤池反冲洗废水排放至更前端的生化工艺段,但该股含强氧化剂的污水对生化工艺段菌群具有抑制作用,一定程度上会弱化污水的生化处理效果,致使污水处理效果更差。综上,该地区提标项目采取折点加氯法时应考虑将强氧化剂投加至过滤工艺出水末端和滤布滤池出水末端。

一般而言,折点加氯法的最佳反应时间为 0.50~2.00 h,但滤布滤池出水段流经紫外消毒渠再达到较好的出水明渠的时间一般仅为 0.25~0.50

h, 在远短于最佳反应时间的情况下, 只能通过加大强氧化剂投加量达到较好的氨氮去除效果^[3-4]。利用该地区提标项目配套化验室进行项目处理污水的折点加氯法小试试验, 强氧化剂采用提标项目较常用的质量分数为 10% 的次氯酸钠, 小试结果表明, 在与实际工艺段相同反应时间下, 每降低所处理污水中 1 mg/L 的氨氮污染物, 需投加约 100 mg/L 的 10% 次氯酸钠。按照该地区 2021 年年末最新的 10% 次氯酸钠市场价(2 100 元/t) 计算, 即每降低 1 万 m³ 污水中 1 mg/L 的氨氮, 折点加氯法原材料成本为 2 100 元。

该地区污水提标项目所处理污水水温一般高于 12 ℃, 即提标前端污水处理项目出水氨氮质量浓度执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中一级 B 标准, 为 8 mg/L, 而提标处理项目出水氨氮质量浓度执行 GB 18918—2002 中一级 A 标准, 为 5 mg/L, 甚至需要执行更严值(1.5 mg/L 或 2.0 mg/L), 高达 3.0~6.5 mg/L 的氨氮去除要求成为提标项目的运营难题, 如果长时间使用折点加氯法保证出水水质稳定达标, 会给提标项目带来较大的运营成本压力。综上, 折点加氯法成本较高, 一般仅适用于提标项目处理氨氮浓度稍高于排放标准的污水或者作为提标项目氨氮去除的应急手段。

折点加氯法作为投加药剂法去除氨氮, 会使得出水中余氯量增加。虽然中华人民共和国生态环境部于 2020 年 4 月的《关于疫情期间城镇污水处理厂余氯排放问题的回复》中明确指出, “《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 未对出水余氯排放作出具体规定”, 但次氯酸钠作为强氧化剂, 如长期作为折点加氯法的投加药剂使用, 容易破坏河涌等生态环境的 pH 平衡, 带来水生态的负面影响, 并且投加药剂时反应所产生的副产物氯胺和氯化有机物会造成水体的二次污染。

2.1.2 投加药剂去除氨氮的改进

对该地区几个提标项目长时间运营研究发现, 提标项目在使用折点加氯法去除氨氮时, 对污水氨氮实时浓度监测能力较差或监测手段受限, 通常采取持续及大剂量投加次氯酸钠的方法以确保出水氨氮浓度达标, 导致提标项目运营成本难以下降。

一般污水处理项目检测氨氮的方法为化验室纳氏试剂分光光度法或快速检测包检测法。检测耗时较短且操作简易的快速检测包检测法存在检测数据

准确度一般及购买成本较高等问题^[5], 而检测数据准确度较高的化验室纳氏试剂分光光度法存在耗时较长且部分高精检测仪器需专业化验人员使用等问题^[6]。基于以上两种氨氮检测方法的局限性, 运营中提标项目应考虑增加工艺过程仪表, 于折点加氯法实施段前端对水质氨氮指标进行持续、实时且精准的仪表检测及数据监控, 并结合不同时间段的氨氮数据设定次氯酸钠的相应投加量及投加频率, 精准控制次氯酸钠使用量, 减少药剂浪费与生态环境二次污染, 进而降低提标项目运营成本, 为类似提标项目在去除氨氮这个问题上提供较好的指导和参考。

2.2 新增硝化工艺段去除氨氮

无硝化工艺段的污水提标项目无法利用生化手段去除氨氮, 在应对原项目处理尾水氨氮浓度偏高的情况下较为被动, 该类提标项目应根据项目实际进水水质及处理出水水质执行标准, 并综合考虑各个流程的特点和优势, 选择新增运行适应力强、工艺调节灵活、低能耗、低投入、少占地和方便操作管理的成熟处理工艺。提标项目去除污染物考虑为氨氮, 可通过新增硝化工艺段达到生化去除目的, 常规活性污泥法占地大、投资高、效率低下, 在深度处理过程中已较少采用, 一般采用生物膜法工艺对二级出水进行深度处理。生物膜法主要有曝气生物滤池、生物接触氧化、生物转盘、生物流化床。其中生物接触氧化填料需定期更换, 增加运营费用; 生物转盘的盘片生物膜有易脱落及处理效率低的问题; 生物流化床构造特殊, 仅适用于小规模污水处理工程; 曝气生物滤池池内使用粒状滤料进行填充, 滤料作为载体形成稳定的固定床, 各类微生物群附着于滤料, 滤料表面形成一层生物膜, 然后从填料的中下部进行曝气及供氧, 污水与空气同向或逆向混合后流经并通过固定床, 依靠附着在载体表面的生物膜对污水中的污染物进行吸附、氧化与分解等, 可使污水得到净化效果, 且粒状滤料层同时具有物理截留作用, 而其中硝化曝气生物滤池就是以硝化去除污水中的氨氮为目的的一种曝气生物滤池。各类生物膜法相比之下, 硝化曝气生物滤池具有占地小、耐冲击负荷、水质处理效果好、出水水质稳定等多项优势, 更适用于新增硝化工艺段。根据相关工程经验, 新增硝化曝气生物滤池硝化工艺段可加在原反硝化工

艺前段或后端^[7]。

2.2.1 新增前置硝化工艺段分析

提标项目将新增硝化工艺段置于反硝化工艺段之前,污水中氨氮在硝化工艺段中转化为硝态氮,随后进入反硝化工艺段,硝态氮转化为氮气最终被去除。和后置硝化工艺相比,前置硝化工艺的反硝化效果偏差,但无论后置反硝化还是前置反硝化,在进水碳氮比偏低的基础下,项目都需要根据实际反硝化处理效果适量投加碳源以提高反硝化处理效果。同时,新增前置硝化工艺段的碳源投加点在整体工艺段的后端,投加碳源后反应时间较短,项目投加碳

源时需要避免由于碳源投加过量或碳源未完全消耗导致的出水水质不达标问题。根据相关工程运营经验分析,部分硝化曝气生物滤池对进水中悬浮物颗粒粒径要求较高,进水中大颗粒悬浮物会影响后续工艺及设备正常运行,项目需考虑实际运行需要和曝气生物滤池参数,决定是否在曝气生物滤池前端设置精细格栅。另外,为了避免硝化工艺段中污水携带氧气影响反硝化工艺段的反硝化效果,需要在反硝化工艺段前设置脱氧池,削减硝化工艺段中溶解氧,保证污水总氮的去除效果。新增前置硝化工艺段的工艺流程如图3所示。



图3 新增前置硝化工艺段的工艺流程

Fig. 3 Process Flow of Newly Added Pre-Nitrification Process Section

2.2.2 新增后置硝化工艺段分析

提标项目将新增硝化工艺段置于反硝化工艺段之后,氨氮在新增硝化工艺段中转化为硝态氮,使出水水质达标。提标项目进水先经过反硝化滤池,大颗粒悬浮物在反硝化滤池中被去除,因此,新增后置

硝化工艺段无需设置精细格栅。同时,污水先经过反硝化滤池后进入硝化池,硝化池中溶解氧不会对反硝化滤池处理效果造成影响。新增后置硝化工艺段的工艺流程如图4所示。

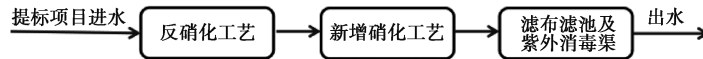


图4 新增后置硝化工艺段的工艺流程

Fig. 4 Process Flow of Newly Added Post-Nitrification Process Section

2.2.3 综合对比分析

新增前置硝化工艺段和新增后置硝化工艺段均具有氨氮去除效果好、无二次污染和运维简单的运营优势,但新增前置硝化工艺段由于所需新增构筑物较多,容易增加水头损失,导致需要增加或更换二次提升泵房的水泵。后置反硝化工艺段为提高反硝化工艺处理效率,需考虑投加商业碳源,而新增后置硝化工艺段需要新增的构筑物较少,投加商业碳源率低。整体而言,新增后置曝气生物滤池硝化工艺段比新增前置曝气生物滤池硝化工艺段前期工程投资小且后期运营成本低^[8],更适用于新增硝化工艺段改造工程。

3 结论

(1)污水提标项目通过投加药剂去除氨氮效果显著且高效,但会导致项目运营成本增高,一般适用于处理氨氮浓度稍高于排放标准的污水或者作为氨

氮去除应急手段。运营提标项目可通过在线氨氮分析仪掌握氨氮实时浓度数据,及时调整药剂的投加时间及投加剂量,减少药剂使用量,实现氨氮去除的同时降低提标项目运营成本。

(2)无硝化工艺段的污水提标项目通过新增前置曝气生物滤池硝化工艺段或后置曝气生物滤池硝化工艺段均能达到氨氮生化去除的效果,有效降低出水中氨氮浓度,但为节省新增改造投资,且减少后期运营成本压力,采取新增后置曝气生物滤池硝化工艺段的方案更合适。

(3)投加药剂和新增硝化工艺段都能有效提高或改进污水提标项目的氨氮去除效果,达到出水氨氮水质稳定达标的目的。类似提标项目在遇到氨氮去除效果不佳问题时,可根据项目实际进出水水质、排放执行标准和原有设计工艺段进行氨氮去除方案选择。

(4)氨氮作为出水水质中主要监控的指标之一,城镇污水处理项目日常运营中需要通过灵活调整生化工艺段溶解氧浓度、排泥量及内外回流等参数来加强工艺硝化效果,另外,还需要合理安排生化工艺段镜检化验工作,形成及时有效的工艺管理依据,从而保证出水氨氮的排放浓度及稳定性。

参考文献

- [1] 张喜宝. 活性污泥法中控制氨氮去除效果的方法[J]. 净水技术, 2014, 33(s2): 35-40.
- [2] 黄蓉, 吴志超, 王巧英, 等. 次氯酸钠对氨氮及硝酸盐氮测定结果的影响和消除策略[J]. 净水技术, 2021, 40(6):

65-70.

- [3] 李晓, 刘碧武, 郭军. 折点加氯法去除生活污水氨氮的试验研究[J]. 能源环境保护, 2019, 33(5): 32-35.
- [4] 许高平, 冯在玉, 任婉璐, 等. 折点加氯去除氨氮特性[J]. 净水技术, 2020, 39(11): 106-109.
- [5] 范萌, 李超. 国内水质氨氮快速检测试剂盒的研究进展[J]. 环境与发展, 2016, 28(1): 104-106.
- [6] 赵薇, 徐海峰. 水体环境监测中氨氮分析的几种不同方法探讨[J]. 皮革制作与环保科技, 2020(21): 28-33.
- [7] 贺琳杰, 屈撑围. 水体中氨氮去除技术研究进展[J]. 广州化工, 2021, 49(8): 17-19, 42.
- [8] 文越, 郑平, 张萌, 等. 高效生物硝化工艺研究进展[J]. 工业用水与废水, 2016, 47(5): 1-7.

【编辑推荐】在精细化逐渐成为行业生存运行管理的关键热词时,对生产中出现的問題采取针对性的应对措施,也是精细化工作的重要组成部分。在污水处理项目中,氨氮的有效去除方法的选择,根据不同的工况、成因,都应有不同的针对性方案,通过前期的梳理和储备,方能在具体问题的应对过程中对症下药、精准施策。文章所提出的集中可行性方案按照不同工况和项目背景进行区分,提出了优先级的建议,对开展污水厂运行的一线技术人员有较好的参考价值。

(上接第 94 页)

(4)中试结果验证达标,在此基础上设计了废水分质物化预处理工艺流程。对达标出水混合后进行生化可行性分析,结果表明 B/C 为 0.65,废水可生化性良好,后续生化处理工艺可采用厌氧好氧耦合技术如复合水解酸化-MBBR 工艺。

参考文献

- [1] 国家统计局. 2020 年 12 月份规模以上工业增加值增长 7.3%[EB/OL]. (2021-01-18) [2021-05-30]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202101/t20210118_1812427.html.
- [2] 李静, 孙冬旭, 张亚, 等. 汽车制造企业清洁生产分析[J]. 青海环境, 2015, 25(4): 161-164.
- [3] 韦东, 沈致和. 汽车涂装废水处理工程实践[J]. 工业用水与废水, 2011, 42(2): 72-75.
- [4] 刘锋, 李昂, 冯震. 水性工业涂料废液的处理研究[J]. 涂料工业, 2021, 51(1): 56-61.
- [5] 吕开雷, 郑淑文. 汽车涂装废水处理技术及工程实例[J]. 工业用水与废水, 2012, 43(3): 67-70.
- [6] 蔡莹, 高亮. 典型汽车涂装废水处理工艺[J]. 净水技术, 2004, 23(6): 41-4.
- [7] KURT U, AVSAR Y, GONULLU M. Treatability of water-based paint wastewater with Fenton process in different reactor types [J]. Chemosphere, 2006, 64(9): 1536-1540.
- [8] KHANDAKER N R, AFREE N I, DIBA D S, et al. Treatment

of textile wastewater using calcium hypochlorite oxidation followed by waste iron rust aided rapid filtration for color and COD removal for application in resources challenged Bangladesh [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2020, 10: 100342. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100342.

- [9] 卢浩, 常莎, 陈思莉, 等. 工业废水可生物降解性 COD 定量检测分析方法与应用[J]. 工业水处理, 2017, 37(12): 90-93.
- [10] 邹文彬, 刘石军, 刘哲, 等. 分质物化-DAT-IAT-过滤组合工艺处理汽车涂装废水[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(s1): 205-208, 214.
- [11] 蔡文良, 谢艳云. Fenton 氧化-混凝沉淀处理电镀废水中重金属镍的研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 106-109.
- [12] 张存芳, 王鹏程, 吕斯濠, 等. Fenton 氧化技术处理电镀废水的研究[J]. 山东化工, 2019, 48(3): 174-176.
- [13] 王成刚, 陈铭, 赵德忠, 等. 芬顿氧化工艺处理化学镀镍废水中的总镍[J]. 山东化工, 2020, 49(7): 261-262.
- [14] 刘芳. 还原沉淀法对含铬重金属废水的处理研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(4): 54-59.
- [15] 杨楠楠, 刘永红, 王宁, 等. 水解酸化-MBBR 生物处理印染废水工艺[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34: 38-42.
- [16] 许劲, 洪国强, 赵绪光, 等. 水解酸化/MBBR 工艺处理中药废水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(3): 1-4.
- [17] 陶应杨. PVA 工业废水水解酸化-MBBR 处理工艺的改造[J]. 安徽化工, 2014, 40(6): 88-91.