



焦化废水含氮污染物分析与控制研究进展

剧盼盼, 刘洪泉, 刘 斌, 陈卫江

(河北协同水处理技术有限公司, 河北石家庄 050000)

[摘要] 焦化废水是一类典型的难降解工业废水, 在目前焦化产能置换浪潮下, 焦化废水总氮达标处理已成为行业普遍关注问题。焦化废水中含氮污染物种类较多, 这导致了其生化降解处理过程的复杂性。基于此, 对目前焦化废水处理中普遍应用的 AO/AAO 工艺、OAO 工艺、AAO 及其变型工艺、OHO 工艺和反硝化滤池等脱氮工艺及新技术、设备的应用进行了分析, 在此基础上进一步阐述了影响焦化废水脱氮效果的几个重要因素, 主要包括毒性抑制成分、总氮成分、原水碳氮比, 最后指出焦化废水脱氮技术可以从优化和合理分配原水碳源、强化硝化、增加深度反硝化和采用新型脱氮技术等几方面进行改良, 以期为焦化废水总氮达标排放工艺的选择优化提供参考。

[关键词] 焦化废水; 含氮污染物; 生化降解; 总氮

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)11-0040-06

Research progress on analysis and control of nitrogen-containing pollutants in coking wastewater

JU Panpan, LIU Hongquan, LIU Bin, CHEN Weijiang

(Hebei Think-do Water Treatment Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Coking wastewater is a kind of typical refractory industrial wastewater. Under the current wave of coking capacity replacement, the standards process of total nitrogen in coking wastewater has become a common concern in the industry. There are many kinds of nitrogen-containing pollutants in coking wastewater, which leads to the complexity of biochemical degradation treatment. Based on this, the application of AO/AAO, OAO, AAO and its variant process, OHO process, denitrification filter and other denitrification processes and new technologies and equipment, which were widely used in the coking wastewater treatment at present, were analyzed. Several important factors affecting the denitrification effect of coking wastewater were further elaborated, mainly including toxicity inhibitory components, total nitrogen components, and the ratio of C/N in raw water. Finally, it was pointed out that the denitrification technology of coking wastewater could be improved from the aspects of optimizing and reasonably allocating the carbon source of raw water, strengthening nitrification, increasing deep denitrification and adopting new denitrification technology, which could provide reference for the selection and optimization of coking wastewater total nitrogen emission process.

Key words: coking wastewater; nitrogen compounds; biochemical degradation; total nitrogen

焦化废水主要在煤的炼焦、煤气净化及化工产品的生产与精制过程中产生, 是一种典型的难降解工业废水^[1-2]。含氮污染物浓度高且种类多样是该类废水的主要特征之一, 这就决定了其处理过程的复杂性。在目前焦化产能置换浪潮及行业零排放需求下^[3-4], 总氮达标已成为必不可少的一环, 此外含氮污染物的有效转化和去除也直接关系到整个生化

工艺运行和出水达标情况^[5], 因此选择合适的脱氮工艺尤为重要。目前焦化企业污水处理厂常用的污水生化处理工艺有 AO、AAO、SBR 等, 由于这些工艺受碳源、硝化液回流量等因素限制导致其总氮去除率存在极限值^[6], 出水总氮难以满足现有《炼焦化学工业污染物排放标准》(GB 16171—2012)要求, 为解决此问题, 需要在现有工艺基础上进行改进或新

[基金项目] 河北省重点研发计划项目(资源与环境创新专项, 21373602D)

增深度处理设施。

笔者在对 40 余家焦化企业废水水质及处理工艺进行充分了解和分析的基础上,总结了焦化行业常用的脱氮工艺及一些新型高效工艺、设备的应用情况,并对影响脱氮效率的因素进行了归纳,以期为焦化废水总氮达标处理工艺的选择优化提供参考。

1 焦化废水含氮污染物分析

焦化废水中总氮包含无机氮和有机氮,无机氮主要有氨氮、硫氰、氰化物等,其中氨氮和硫氰是最

大的总氮贡献者,其在废水中浓度的差异是造成不同企业总氮差异的主要原因。笔者调研分析了山西、山东、河北的 6 家焦化企业焦化废水水质,其总氮的平均构成(以质量分数计)为硫氰化物氮 45.75%、氰化物氮 3.25%、氨氮 34.50%、有机氮 17.00%,硝态氮含量较低可忽略。虽然相较于无机氮,有机氮在废水中的含量较低,但其成分更为复杂,主要包含含氮杂环类、有机氰类和胺类物质^[7]。表 1 为某焦化厂焦化废水原水中可检测出的含氮污染物^[7]。

表 1 某焦化厂废水原水中检出的含氮污染物
Table 1 Nitrogen pollutants detected in the raw water of a coking plant wastewater

种类	成分
无机氮	NH ₄ ⁺ -N、氰化物、硫氰化物、NO ₂ ⁻ -N、NO ₃ ⁻ -N
有机氮 (含氮杂环类)	喹啉、2-甲基喹啉、2-苯基喹啉、异喹啉、1-甲基异喹啉、6-苯基异喹啉、5-氨基异喹啉、苯并[b]喹啉、吡啶、2-苯基吡啶、喹啶、2-甲基喹啶、吡啶、2-甲基吡啶、吩嗪、9-甲基吡啶、咪唑、3-甲基咪唑、1,8-二氮杂萘、9,10-二氮杂菲、4-氮杂茚、4-氮杂茚、2,3-苯-4-氮杂茚、1-乙烯基苯并[c]咪唑、6-甲基苯并、5H-1-氮茚、亚氨基茚、1H-二苯并[e,g]咪唑等
有机氮 (有机腈类)	苯腈、苯乙腈、1-萘腈、2-氨基腈苯、3-吡啶腈、3-吡啶腈、4-氨基苯腈、1-异喹啉腈、9-茚腈、11H-吡啶-5-腈、3,4-联苯腈、9-茚腈等
有机氮(胺类)	苯胺、2-甲基苯胺、1-萘胺、1-氨基茚、1-氨基茚、N-(3-苯甲基)乙酰胺、2-氨基茚满等

2 焦化废水脱氮工艺研究

焦化废水中含氮污染物种类的多样性决定了其处理过程的复杂性,为保障出水总氮稳定达标,需要根据废水中含氮污染物成分选择适合的工艺路线。

2.1 AO/AAO 工艺

AO 及 AAO 工艺是目前焦化废水处理中最为常用的工艺,AAO 较 AO 多一个厌氧水解池。厌氧水解池主要依靠厌氧微生物健全的开环酶体系,为多环芳烃、杂环化合物等物质的降解提供可能性^[8],但由于来水水质、设计细节及运行条件等因素影响,该设施在绝大多数焦化厂并未发挥其应有作用,多处于闲置或被改造为他用的状态。

废水脱氮主要采用 AO 前置反硝化工艺,其包含活性污泥法和生物膜法 2 种基本方法。活性污泥法 AO 为单泥系统,整个系统使用同一种活性污泥,污泥先后进入缺氧池、好氧池,并通过搅拌、曝气实现与废水的充分接触进而对废水中污染物进行去除,最后净化废水与活性污泥在二沉池实现泥水分离[图 1(a)];生物膜法则通过在 AO 系统缺氧池设置生物填料固定反硝化菌群,将 AO 系统组建为多泥系统,反硝化菌及硝化菌在各自适宜的环境下生

存,可发挥更高的处理效率,该系统硝化液由二沉池溢流上清液提供[图 1(b)]。

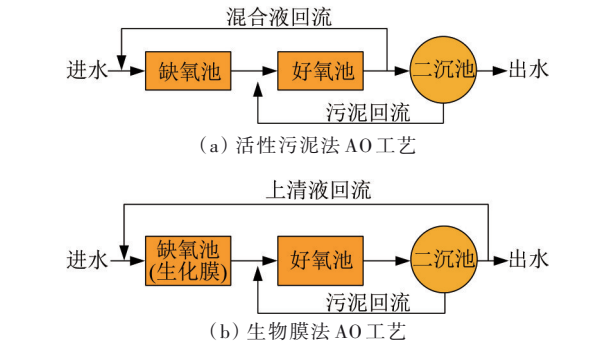


图 1 AO 前置反硝化工艺

Fig. 1 AO pre-denitrification process

前置 AO 可实现含氮污染物的充分硝化及大部分总氮的低成本去除,工艺成熟、可靠,设备简单,能够最大限度地利用废水自身碳源实现脱氮,运行成本低,但脱氮率受硝化液回流规模限制,如设定硝化液回流倍数为 R (一般为 200%~400%, 过高则不经济),则反硝化脱氮率为 $\eta=R/(R+1)$,存在极限值^[9]。据调研,目前多数焦化厂采用的废水生化处理工艺仍以 AO、AAO 等一级前置反硝化脱氮工艺为主,由于焦化废水总氮较高(一般大于 300 mg/L),经此工

艺处理后焦化废水出水总氮难以达到《炼焦化学工业污染物排放标准》(GB 16171—2012)中表2直排或表3间排对总氮的要求(限值分别为20、25 mg/L)。对此,合理且经济的做法是,在保证一级AO、AAO对氮的最大去除率的基础上新增脱氮设施,且对于采用AAO工艺的焦化厂应成功启动水解厌氧装置,利用厌氧菌更加丰富的酶系统通过水解酸化作用实现部分难降解有机氮的氨化,提高废水可生化性,优化原水碳源,从而实现进一步脱氮^[10]。此外,厌氧体系中同时反硝化/产甲烷反应因具有同时去碳脱氮的特点,也成为目前焦化废水处理技术研究的热点^[11]。王孝维等^[12]接种成熟的厌氧反硝化产甲烷颗粒污泥,以焦化废水特征污染物苯酚、喹啉、吡啶和吡啶为碳源,研究了不同 $m(C)/m(N)$ (记作C/N)下体系中有机的降解特征,结果表明,以焦化废水特征污染物为碳源,在C/N为3、6时系统内只发生反硝化反应,在C/N为12、50时系统内发生同时反硝化/产甲烷反应,且同时反硝化/产甲烷反应的有机物去除效率高于单一厌氧产甲烷体系的有机物去除效率。

2.2 OAO工艺

OAO工艺在AO前段增设预曝池,依据水质情况将原水分流进入预曝池(一般为总水量的20%~30%)和AO工艺缺氧池。设置预曝池的目的是通过好氧处理手段对部分焦化废水进行预处理,预先去除一部分污染物,降低废水中污染物(特别是对微生物有抑制作用的物质,如酚类、硫氰酸根、氰化物等毒性物质)浓度,同时少量的分流又可降低对后端反硝化反应所需碳源的影响。此外,通过控制OAO工艺中预曝池 NO_2^- 的积累,也可实现焦化废水的短程硝化反硝化处理等^[13],且预曝池还可根据不同需求进行设计,比如设计为高效的降碳降硫氰反应器等。

目前焦化厂OAO存在单泥和双泥2种形式,如图2所示,二者主要区别在于预曝工艺段是否有独立的泥水分离设施,双泥法所具有单独的泥系统更有利于预曝池优势菌种的培养和富集。

一般来说,AAO工艺与OAO工艺的选取主要依据来水难降解物质浓度、有机负荷和C/N等,当有机负荷或毒性物质浓度过高时往往会选择OAO工艺。汤清泉等^[14]考察了在不同有机负荷和C/N条件下,AAO与OAO 2种工艺对焦化废水中COD、氨氮、总氮的去除效果,结果表明废水所含污染物中难降解

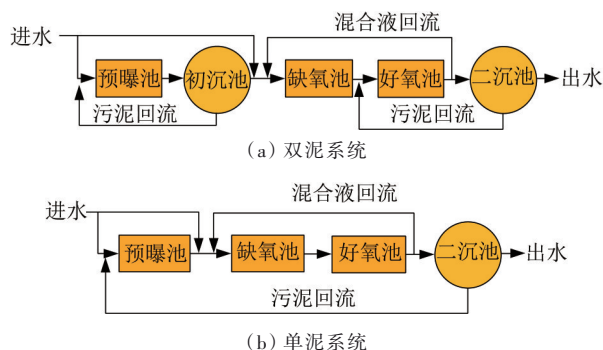


图2 OAO工艺

Fig. 2 OAO processes

物质的比例和废水C/N是决定2种工艺处理效果优劣的关键,难降解物质比例高或C/N低的焦化废水适合采用AAO工艺处理,难降解物质比例低且C/N高的焦化废水适合采用OAO工艺处理。

研究表明,OAO工艺虽能通过设置预曝气系统降低后续AO系统进水污染物负荷,却难以平衡系统进水水质波动的影响,进水水质波动时预曝气系统将首先受到冲击,系统整体能耗也会提高^[14]。此外,预曝气系统大量消耗原水碳源,可能造成反硝化阶段碳源缺乏,提高后续脱氮成本^[15]。

2.3 AAO及其变型工艺

AAO工艺为两级AO工艺,根据系统内两级AO单元是否为同一种污泥,可以分成单泥系统和双泥系统,二者工艺流程见图3。

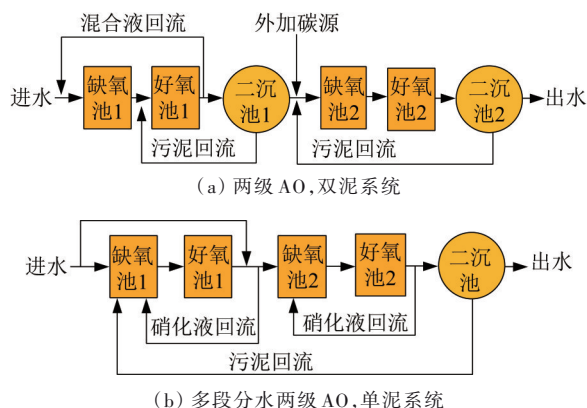


图3 AAO工艺

Fig. 3 AAO processes

双泥两级AO系统通过设置中间沉淀池(二沉池1)将其分隔为串联的2个拥有独立泥系统的工艺单元,前后工艺单元内的污泥不同,第一级AO系统利用原水碳源进行初步脱氮,其出水剩余的硝酸盐氮利用投加的外碳源在第二级AO系统缺氧池中被

反硝化脱除。单就两级AO而言,其工艺设备简单,运行稳定,操作维护较为方便,但该系统占地面积大,土建成本较高。目前应用AOAO工艺的焦化厂家有河北鑫悦焦化、邢台三阳焦化等。

单泥系统多级AO工艺在市政废水处理中较为常见,其仅有一个泥水分离设备(二沉池),系统中运转的为同一种污泥。该工艺通过串联设置的多段缺氧好氧区及进水的合理分配,可更加充分地利用原水碳源进行反硝化脱氮,其单泥两级AO硝化液各自回流或交叉回流实现反硝化^[16]。对于焦化废水处理,需要保证合适的C/N和二段分流废水的充分硝化,具体的分流量和硝化液回流量等参数可以根据验证实验获取。

2.4 OHO工艺

OHO工艺是由华南理工大学韦朝海团队开发的一种用于焦化废水处理的高效工艺^[17],该工艺以三泥系统的三相流化床反应器为核心,第1个O为预曝气流化床,用于去除绝大部分有机物,H为水解流化床,通过水解作用提高废水生化性,为进一步降解有机物创造条件,第2个O为好氧流化床,进行有机物的进一步降解和氨氮的硝化反应。该工艺的脱氮反应主要通过水解-好氧组合来实现。

该技术适用于高浓度焦化废水的处理,其在邯郸金牛天铁和天津天铁项目中均有应用。以某焦化废水处理工程为例,在总HRT为64 h的条件下,系统进水COD、挥发酚、硫化物、氰化物和氨氮平均质量浓度分别为4 876、987、20.4、26.2、90.4 mg/L时,相对应的各污染物去除率分别达94.6%、99.9%、97.7%、97.6%、89.4%^[18]。

2.5 反硝化滤池工艺

反硝化滤池是曝气生物滤池的一种,主要用于市政或工业废水的深度脱氮处理或提标改造项目中^[19-20]。按滤池内的水流方向可将其分为降流式反硝化生物滤池和升流式反硝化生物滤池。反硝化滤池内装设生物填料(如陶粒火山岩、沙砾等),利用附着在其上的反硝化细菌对废水进行反硝化脱氮处理。

反硝化滤池具有较为理想的推流式结构,滤料表面富集了高浓度的反硝化细菌,使其具有很高的脱氮负荷,以 NO_3^- -N计,脱氮负荷约为 $0.5\sim 3.0 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,是常规工艺的3~5倍。因为反硝化滤池本身为滤池结构,其出水SS可控制在20 mg/L以下。反硝化滤池自

动化程度高,采用成熟的精准加药设施可节省碳源,不需设置后续的再曝气池等出水保障设施,系统整体占地面积较小,且通过自控系统的控制可在单池中实现脱氮-过滤全过程。当然,该工艺也有自己的缺陷,比如设备维护复杂,进水SS要求高(一般要求 $\text{SS}\leq 60 \text{ mg/L}$)等^[21]。

焦化废水在保证一级生化系统充分硝化的基础上,可引进反硝化滤池技术进行深度脱氮。在针对焦化废水水质特点进行改进和优化后(如选取适宜的配水方式、滤料材料、上下游衔接方式及设计参数等),反硝化滤池在焦化废水提标改造项目中具有较为明显的优势,尤其是在占地和投资方面具有显著优势,目前其已开始应用于新建及改造项目中。

3 焦化废水脱氮影响因素

一般来讲,废水的脱氮过程比较复杂,涉及氨化、亚硝化、硝化、反硝化等多个生物过程,每个过程中微生物的组成、工艺机制和对环境的要求各不相同^[22],其整体脱氮效果受水质条件、环境因素和工况运行条件等多方面影响。水质条件主要包含C/N、毒性物质种类及含量等,环境因素主要有pH、温度、DO、碱度等,工况运行条件则包含污泥龄的控制、污泥回流比、硝化液回流比、废水分流比等^[23]。同样这些因素对于焦化废水处理也有重要影响,但焦化废水又具有自己的特殊性,以下针对焦化废水自身水质特点,对影响焦化废水处理效果的几个因素进行重点介绍。

3.1 毒性抑制成分

焦化废水含有大量的有机物组分和多种有毒有害物质,包括氨氮、酚类、氰化物、硫氰、油等,废水水质、水量会因焦化企业煤种、地域、焦炉类型、炼焦工艺及管理水平的变化而发生变化^[24]。当废水中某些毒性物质浓度增大时,可能对生化系统造成影响,尤其是比较脆弱的硝化菌将首先受到抑制,进而影响硝化系统的稳定性及处理效率,甚至造成系统硝化过程的停止。因此进行来水的精准监测并设立预警系统,对于焦化废水的脱氮很有必要,并且除对常规氨氮、酚类、氰化物、硫氰、硫化物等特征污染物理化指标的检测预警外,建议还应加入生物预警技术,比如活性污泥耗氧速率的监测预警等^[25]。

3.2 总氮成分

焦化废水中含氮组分较为复杂,据相关水质分析及文献报道,其无机氮主要有氨氮、氰化物、硫氰

等,有机氮有喹啉类、吡啶类、咪唑类和吡啶类等含氮杂环,以及有机腈类、胺类等^[7]。其中,多环芳烃、含氮杂环等含氮污染物难于生物降解且具有一定的生物毒性,该类含氮污染物中的氮难以通过氨化进入生物脱氮过程,此为焦化废水难以较为完全脱氮的原因之一。

焦化废水含氮组分的多样性决定了其生物脱氮过程的复杂性。由于目前焦化废水脱氮多以传统脱氮理论为依据,需要经过氨化—硝化—反硝化过程,因此保证有机氮、硫氰、氰化物和氨氮的充分硝化是脱氮的关键。此外,为保证一级AO的脱氮效率,需使回流硝化液中含氮组分绝大部分甚至全部是硝态氮,进一步地,为保证二级或深度脱氮系统反硝化脱氮效率,需保证一级脱氮系统出水具有较高的硝态氮浓度。

3.3 原水 C/N

原水 C/N 是制约焦化废水脱氮效率和处理成本的一个重要因素。据报道,当市政污水系统进水 C/N 大于 10 时,可通过提高硝化液回流比有效提高系统脱氮效率^[26]。

不同的焦化企业废水中 C/N 存在一定差异(一般在 10~16 之间),实际项目运营中发现,焦化废水原水所含碳源一般均可满足前置 AO 系统脱氮需求,剩余的碳源有机物则通过曝气池降解去除,而深度或者二级脱氮无法有效利用该部分碳源,还需投加额外碳源,这无疑增加了运行成本。因此需要确定或挖掘焦化企业废水中的可利用碳源,通过适当的预处理改善水质,或提高回流比或采用多段分流的方式,最大限度地利用原水碳源来脱氮,节省整个工艺的运行成本。此外,确定焦化废水脱氮所需最小 C/N 后,即可在不影响系统反硝化脱氮的基础上,引进预曝工艺初步降低污染物负荷,达到系统碳、氮的统筹。

4 总结与展望

目前焦化废水脱氮工艺在运行过程中普遍存在 3 大难点,一是废水对碳源的需求,二是工艺处理过程中总氮的转化率问题,三是投资及运行成本的降低。

针对这些问题及目前焦化行业脱氮工艺的运行现状,可以从优化和合理分配原水碳源、强化硝化、增强深度反硝化和引用新型脱氮技术等几方面进行改良研究,具体可以考虑以下方法:(1)进行厌氧水解的设计、调控,充分发挥厌氧菌对有机碳的预处理

作用,同时优化碳源;(2)确定来水可利用碳源,采用提高回流比或多点布水的方式合理分配碳源,尽可能地充分利用原水低价碳源实现反硝化;(3)采用填料或者高效反应器来强化氨氮的硝化;(4)引入新型脱氮技术,例如短程反硝化、同步硝化反硝化技术等,缩短脱氮路径并降低运行成本。

参考文献

- [1] 王绍文,王海东,张兴昕. 焦化工业节水减排与废水回用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2017:1-24.
WANG Shaowen, WANG Haidong, ZHANG Xingxin. Technology of water saving, emission reduction and wastewater reuse in Coking Industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017: 1-24.
- [2] YANG Wenlan, WANG Jicheng, HUA Ming, et al. Characterization of effluent organic matter from different coking wastewater treatment plants[J]. Chemosphere, 2018, 203: 68-75.
- [3] JIN Xuewen, LI Enchao, LU Shuguang, et al. Coking wastewater treatment for industrial reuse purpose: Combining biological processes with ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(8): 1565-1574.
- [4] ZHANG Huanzhen, DONG Changqing, BIAN Lei, et al. Experiment study on corrosion control using coking wastewater as circulating cooling water[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 186-189.
- [5] 王泽斌,马云,王强. 含氮废水生物处理技术研究现状及发展趋势[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(9): 108-112.
WANG Zebin, MA Yun, WANG Qiang. Advance and trend of biological nitrogen removal technologies in wastewater treatment [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(9): 108-112.
- [6] 鲍任兵,高廷杨,宫玲,等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14-20.
BAO Renbing, GAO Tingyang, GONG Ling, et al. Review of process optimization of biological denitrification and phosphorus removal in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 14-20.
- [7] 吕鹏飞,刘雷,吴海珍,等. 焦化废水中总氮的构成及在生物工艺中的转化[J]. 环境工程学报, 2015, 9(10): 4789-4796.
LÜ Pengfei, LIU Lei, WU Haizhen, et al. Composition of nitrogenous compounds in coking wastewater and their transformation during biological treatment process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(10): 4789-4796.
- [8] 汤清泉,魏宏斌,陈良才. AAO 与 OAO 工艺处理焦化废水的对比研究[J]. 工业用水与废水, 2016, 47(3): 31-35.
TANG Qingquan, WEI Hongbin, CHEN Liangcai. Comparison between AAO and OAO processes for coking wastewater treatment [J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(3): 31-35.
- [9] 巴雅尔,李妍,刘翠萍. 350 m³/h 焦化废水生物脱氮处理系统开工调试[J]. 包钢科技, 2009, 35(3): 72-75.
BA Yaer, LI Yan, LIU Cuiping. Debugging for start operation of 350

- m³/h coking wastewater treatment system by bionitrification[J]. Science & Technology of Baotou Steel(Group) Corporation, 2009, 35(3):72-75.
- [10] 马睿莉,徐乐中,陈茂林. 高有机氮废水AO工艺脱氮研究进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(10):8-13.
- MA Ruili, XU Lezhong, CHEN Maolin. Research progress on treatment of high organic nitrogen wastewater with AO process[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(10):8-13.
- [11] 韩晓宇,彭永臻,张树军,等. 厌氧同时反硝化产甲烷工艺的应用及进展[J]. 中国给水排水, 2008, 24(6):15-19.
- HAN Xiaoyu, PENG Yongzhen, ZHANG Shujun, et al. Application and progress of anaerobic simultaneous denitrification and methanogenesis process[J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(6):15-19.
- [12] 王孝维,岳秀萍,薛晖军. 焦化废水在厌氧反硝化产甲烷体系中降解动力学特征[J]. 环境工程学报, 2017, 11(8):4609-4614.
- WANG Xiaowei, YUE Xiuping, XUE Huijun. Degradation kinetics characteristics of coking wastewater in anaerobic simultaneous denitrification and methanogenesis[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(8):4609-4614.
- [13] 李欢. 焦化废水节能降耗生物脱氮技术与新模式[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
- LI Huan. Energy-saving and consumption-reducing biological nitrogen removal technology and new model for coking wastewater[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 汤清泉,魏宏斌,陈良才. AAO与OAO工艺处理焦化废水的对比研究[J]. 工业用水与废水, 2016, 47(3):31-35.
- TANG Qingquan, WEI Hongbin, CHEN Liangcai. Comparison between AAO and OAO processes for coking wastewater treatment[J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(3):31-35.
- [15] 刘伟,游海,姚媛,等. AO和OAO工艺对焦化废水处理效果的比较[J]. 燃料与化工, 2012, 43(1):55-56.
- LIU Wei, YOU Hai, YAO Man, et al. Comparison of AO and OAO processes on coking effluent treatment effect[J]. Fuel & Chemical Processes, 2012, 43(1):55-56.
- [16] 吴沛,朱继涛,顾鑫,等. 多段进水A/O生物接触氧化工艺模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(5):908-916.
- WU Pei, ZHU Jitao, GU Xin, et al. Simulation of step-feeding A/O biological contact oxidation process[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(5):908-916.
- [17] 范丹. 焦化废水生化处理工艺的选择及工程运行能耗的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
- FAN Dan. Selection of coking wastewater (CW) biological treatment process(BTP) and the operation energy consumption(EC) in CW treatment plant[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [18] 易欣怡,韦朝海,吴超飞,等. O/H/O生物工艺中焦化废水含氮化合物的识别与转化[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9):2190-2198.
- YI Xinyi, WEI Chaohai, WU Chaofei, et al. Identification and transformation of nitrogen compounds in coking wastewater during O/H/O biological treatment process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(9):2190-2198.
- [19] 闫高俊,杨治广,庄国强,等. 生物滤池在污水深度处理中的研究进展[J]. 环境科技, 2021, 34(3):73-78.
- YAN Gaojun, YANG Zhiguang, ZHUANG Guoqiang, et al. Research progress of biological filter in advanced wastewater treatment[J]. Environmental Science and Technology, 2021, 34(3):73-78.
- [20] 吕顺,戴栋超. 污水处理厂高标准提标改造思路:以苏州木渎新城污水厂为例[J]. 净水技术, 2021, 40(6):107-114.
- LÜ Shun, DAI Dongchao. High level upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant—A case of Suzhou Mudu WWTP[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6):107-114.
- [21] 王子杰,王郑,林子增,等. 反硝化生物滤池在污水处理中的应用研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(8):1727-1731.
- WANG Zijie, WANG Zheng, LIN Zizeng, et al. Research progress on application of denitrification biological filter in sewage treatment[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(8):1727-1731.
- [22] 彭永臻. SBR法污水生物脱氮除磷及过程控制[M]. 北京:科学出版社, 2011:202-209.
- PENG Yongzhen. Biological nitrogen and phosphorus removal from wastewater by SBR process and process control[M]. Beijing: Science Press, 2011:202-209.
- [23] 王志康,兰彬彬,李凯,等. 氧化沟工艺脱氮除磷特征影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(22):8860-8867.
- WANG Zhikang, LAN Binbin, LI Kai, et al. Analysis of influencing factors of nitrogen and phosphorus removal process in oxidation ditch process[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(22):8860-8867.
- [24] 韦朝海,朱家亮,吴超飞,等. 焦化行业废水水质变化影响因素及污染控制[J]. 化工进展, 2011, 30(1):225-232.
- WEI Chaohai, ZHU Jialiang, WU Chaofei, et al. Influence factors of coking wastewater components and pollution control[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(1):225-232.
- [25] 张春燕. 污水厂预防冲击技术研究[D]. 大庆:大庆石油学院, 2008.
- ZHANG Chunyan. Impact prevention technology for wastewater treatment plant[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [26] 武克亮. 新型多级AO-MBR工艺在市政污水处理的应用[J]. 科技创新与应用, 2020(12):108-109.
- WU Keliang. Application of new multistage AO membrane bioreactor process in municipal wastewater treatment[J]. Technology Innovation and Application, 2020(12):108-109.
- 【作者简介】 剧盼盼(1986—), 硕士, 环保工程师. E-mail: jppngu@163.com.
- 【收稿日期】 2022-07-15(修改稿)