



高级氧化-水解酸化-A/O 组合工艺处理印染废水

梁培瑜¹, 沈紫飞², 吴永明¹, 吴施婧¹, 邓 觅¹, 朱 林¹, 邓利智²

(1. 江西省科学院微生物研究所, 江西南昌 330096;

2. 南昌大学资源环境与化工学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西南昌 330031)

[摘要] 日益严格的印染废水排放标准对污水处理工艺提出更高要求, 针对传统工艺的改进提升成为当前重要研究内容。以处理效果更佳的两级“Fe/C 微电解联合 Fenton 氧化”-混凝沉淀作为改进的高级氧化工艺, 在此基础上提出了改进的高级氧化-水解酸化-A/O 组合工艺, 研究了该组合工艺对南昌市某工业园印染废水处理厂的高 COD(>9 000 mg/L)、高氮(>700 mg/L)印染废水的处理效果。结果表明, 改进的高级氧化工艺可有效去除废水中的难降解污染物, 降低废水 COD 及 TN, 其中 COD 去除率由 50.8% 提高至 72.5%; 水解酸化阶段可对 COD 进行进一步去除, 并使含氮有机物通过氨化作用转化为氨氮, 提高废水可生化性; A/O 处理工艺可有效去除大部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN, 其中缺氧反应阶段采用强化脱氮措施可有效强化 A/O 阶段对 TN 的去除。该组合工艺对印染废水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 去除率分别为 95.8%、33.8%、93.3%, 出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 分别为 413.5、34.7、48.6 mg/L, 满足当地工业园区污水处理厂纳管标准。

[关键词] Fe/C 微电解; 水解酸化; A/O 工艺; 印染废水

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)11-0107-06

Treatment of printing and dyeing wastewater using advanced oxidation-hydrolysis acidification-A/O combined process

LIANG Peiyu¹, SHEN Zifei², WU Yongming¹, WU Shijing¹, DENG Mi¹, ZHU lin¹, DENG Lizhi²

(1. Institute of Microbiology, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, School of Resources Environment & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Increasingly stringent discharge requirements put forward for higher sewage treatment efficiency of printing and dyeing wastewater. The improvement and promotion of traditional process become an important research content. In this paper, two-stage “iron-carbon micro-electrolysis combined with Fenton oxidation”-coagulation sedimentation was proposed as improved advanced oxidation process. On this basis, the combined process of improved advanced oxidation-hydrolysis acidification-A/O was used for treatment of printing and dyeing wastewater (COD>9 000 mg/L, TN>700 mg/L) in an industrial park in Nanchang. The results showed that advanced oxidation unit had significant effect on the removal of refractory organic pollutants, COD and TN, and the COD removal rate was increased from 50.8% to 72.5%. The hydrolysis acidification unit realized further removal of COD, and improved the biodegradability by promoting the conversion of nitrogen-containing organic matter to ammonia nitrogen through ammoniation. The A/O unit could easily remove most of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN. In anoxic reaction stage, enhanced nitrogen removal measures could effectively increase the denitrification effect of A/O stage. The removal rates of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN of the combined process were 95.8%, 33.8% and 93.3% respectively, and the effluent COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN were 413.5, 34.7, 48.6 mg/L respectively, which met the discharge the specified standards for discharging in the pipe of local chemical industry park.

Key words: Fe/C micro-electrolysis; hydrolytic acidification; A/O process; printing and dyeing wastewater

[基金项目] 江西省科学院省级科技计划项目包干制试点示范项目(2021YSBG10003, 2021YSBG22024); 江西省科学院省级财政科研项目经费包干制试点示范项目(2022YSBG22012)

随着印染行业的飞速发展,印染工业废水污染问题日趋严重。印染废水含有大量的染料、助剂及表面活性剂等复杂化学物质,使其普遍具有高COD、高色度、可生化性低等特点,部分印染废水在纺织印染过程受加工工序所使用的化学原料影响,还具有含氮量高的污染特征^[1]。印染废水处理包括物理法、化学法及生物法。随着我国环保相关政策要求的不断提高,印染废水排放标准也逐渐提高,单一方法通常不能满足印染废水处理达标排放的要求,多技术联用协同处理成为当前主流趋势^[2]。目前,传统工艺中的混凝、吸附、气浮等物理方法,臭氧、Fenton等化学氧化技术,A/O、水解酸化、生物滤池、生物膜技术等生物法已普遍被应用在多技术联用协同处理工艺中^[3-4],此外,微电解、催化氧化、纳米材料等处理技术也逐步成为研究热点^[5-7]。

本研究以两级“铁碳微电解联合Fenton氧化”-混凝沉淀工艺作为改进的高级氧化工艺,采用改进的高级氧化工艺-水解酸化-A/O组合工艺对印染废水进行处理,考察多技术联用处理特定印染废水的效果,以期对印染废水处理提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验废水取自南昌市某工业园印染废水处理厂调节池,其污染物主要成分为一甲胺、活性染料及表面活性剂等,废水COD、 NH_4^+-N 、TN分别为(9 782±50)、(52.4±2.0)、(723.2±3.0) mg/L, pH为7.5±0.3。

铁碳微电解填料选用新型一体化填料,购自元芝环保公司,铁碳(Fe/C)质量比为3:1,有效成分(Fe+C)质量分数≥99%。

其他试剂: H_2O_2 (30%),分析纯,购自天津玉福泰有限公司;聚合氯化铝(PAC, Al_2O_3 质量分数≥30%)、聚丙烯酰胺(PAM,质量分数21%),购自中科环保。

1.2 实验方法

根据该印染废水COD、TN高, NH_4^+-N 低的水质特点,采用高级氧化法对其进行预处理,通过Fe/C微电解联合Fenton氧化法将废水中难降解有机物转化为易生物降解的有机物,以降低有机胺、有毒有害物质对生化处理的影响^[8],同时为保障预处理效果,探究了两级“微电解联合Fenton氧化”的优化工艺对处理效果的提升作用。之后对该处理单元出水进行

混凝沉淀以进一步去除废水中的污染物,提升其可生化性。混凝沉淀处理后的废水接入水解酸化-A/O系统进行二级生化处理,考察A/O阶段不同强化脱氮措施对TN去除效果的提升。

1.2.1 高级氧化处理

改进的高级氧化工艺包含以下2个连续处理单元:

(1)铁碳微电解联合Fenton氧化。在进行Fe/C微电解联合Fenton氧化法应用实验前,采用单因素分析法确定了最佳实验条件,即微电解法进水pH为3.0,一体化Fe/C填料投加质量浓度为150 g/L,反应时间为6 h,Fe/C填料粒径为1~2 mm,曝气量为2 L/min;Fenton法 H_2O_2 (30%)投加量为5 mL/L,反应时间为3 h。

(2)混凝沉淀。调节混凝前进水pH至8~8.5,PAC、PAM投加质量浓度分别为250、3 mg/L,混凝时间为15 min,沉降时间为30 min。

1.2.2 生化处理

水解酸化池和A/O池的接种污泥分别取自南昌市某印染废水处理厂厌氧池和好氧池,过筛后分别装入水解酸化装置和A/O实验装置中进行培养驯化,21 d后系统出水水质趋于稳定,开始进行生化处理实验。

经高级氧化处理后的废水pH为7.2~7.5,将其直接通入水解酸化装置,控制温度为30~32℃进行实验。经水解酸化处理后废水pH为6.0~6.2,将其调节至7.0,在温度30℃左右、缺氧段DO 0.2~0.8 mg/L、好氧段DO 2~5 mg/L条件下使废水进入A/O装置进行实验。

1.3 分析方法

采用连华科技5B-6C(V8)多参数水质测定仪,依据快速水解分光光度法测定COD;采用雷磁pHB-4便携式pH计测定pH;依据文献[9]中国国家标准方法测定 NH_4^+-N 、TN。

2 结果与讨论

2.1 两级“铁碳微电解联合Fenton氧化”-混凝沉淀处理效果

研究表明,Fe/C微电解联合Fenton氧化法可以提升废水的可生化性^[10]。通过预实验考察得知,在最佳条件下采用微电解联合Fenton氧化对实验废水进行处理,废水COD从9 782 mg/L降低至4 816 mg/L,去除率仅为50.8%。为保障处理效果,本实验

采用两级“微电解联合 Fenton 氧化”工艺对废水进行处理,其处理效果见图 1。

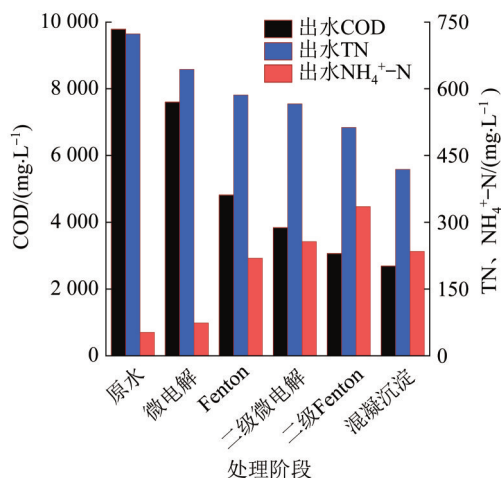


图1 高级氧化单元对废水的处理效果

Fig. 1 Treatment effect of advanced oxidation unit on wastewater

由图1可知,两级“微电解联合 Fenton 氧化”工艺较一级工艺对 COD 去除率提升了 17.9%,这与冯晓娟等^[11]的研究结果相似。最终经两级“微电解联合 Fenton 氧化”工艺处理后的出水经过混凝沉淀后,COD 被降低至 2 686 mg/L,去除率达到 72.5%。

实验采用的印染废水中含有一甲胺等小分子有机氮,这使得废水水质显示出高 TN、低 NH₄⁺-N 的性质。如图1所示,经过两级“微电解联合 Fenton 氧化”处理后,废水中 TN 由 723.2 mg/L 降低至 560 mg/L 左右,而 NH₄⁺-N 则相反,由 52.4 mg/L 上升至 335 mg/L。这可能是因为废水中难生物降解的小分子有机氮含有的氨基(-NH₂)被微电解及 Fenton 氧化过程产生的羟基自由基(·OH)打断,从而转化为了 NH₄⁺-N^[12],这也使得废水的可生化性得到提升,为后期生物脱氮的实现提供了可能。由图1还可以看出,混凝沉淀处理可实现对 NH₄⁺-N 和 TN 的进一步去除,使二者分别降低至 234、419 mg/L。

2.2 水解酸化处理效果

经两级“铁碳微电解联合 Fenton 氧化”-混凝沉淀处理后,废水的 COD 和 TN 被有效降低,大部分有生物毒性的有机胺被转化为易生物降解的氨氮物质,使得废水的可生化性得到了提升。但经高级氧化处理后的出水 COD 仍高达 2 600~2 800 mg/L,若直接进入 A/O 处理系统,将对生化处理系统造成不利影响。因此,在生化处理前设置水解酸化处理单元,一方面可削减部分 COD 以减轻后续 A/O 处理单

元的进水负荷,另一方面可通过水解酸化作用进一步降解含氮有机物以改善废水的可生化性。

在水解酸化处理单元主要研究了水力停留时间(HRT)对 COD、NH₄⁺-N、TN 去除效果的影响,结果见图2。

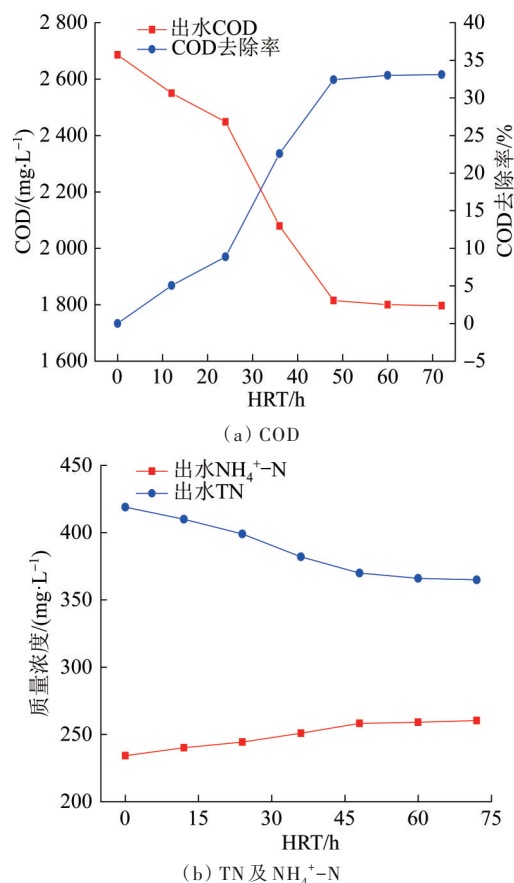


图2 水解酸化单元对废水的处理效果

Fig. 2 Treatment effect of hydrolytic acidification unit on wastewater

由图2可以看出,在水解酸化处理初期(0~24 h),废水 COD、TN 去除率随着 HRT 的增加逐渐上升;水解酸化处理中期(24~48 h),随着 HRT 的增加,COD 去除率迅速升高,出水 TN 变化相对平缓;当 HRT 延长至 48 h 后,COD 去除率和出水 TN 均保持稳定。此外,NH₄⁺-N 变化与 TN 相反,说明废水中未被高级氧化处理所降解的小分子有机胺通过水解酸化被降解为 NH₄⁺-N^[13]。由图2还可以看出,水解酸化处理阶段 COD 去除率达到 32%~33%,出水 COD 为 1 800~1 815 mg/L,TN 去除率仅为 11.7%,出水 TN 为 370 mg/L,可见在水解酸化阶段前期,大量小分子有机物质被微生物进一步降解为小分子醇类、脂肪

酸类物质,使COD得到进一步去除,而水解酸化对含氮有机物的降解去除能力有限。随着HRT的延长,水解酸化阶段产生的酸性物质不断累积, NH_4^+-N 持续升高,水解酸化菌的活性被抑制,水解酸化反应无法继续进行,COD、TN去除率逐渐趋于稳定,即HRT的进一步提高无法持续提升水解酸化效果^[14-15]。

2.3 A/O处理效果

水解酸化单元出水直接进入A/O处理缺氧阶段,考察此阶段COD、 NH_4^+-N 、TN变化,结果见图3。

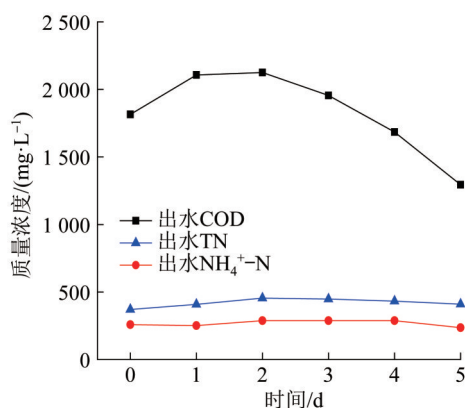
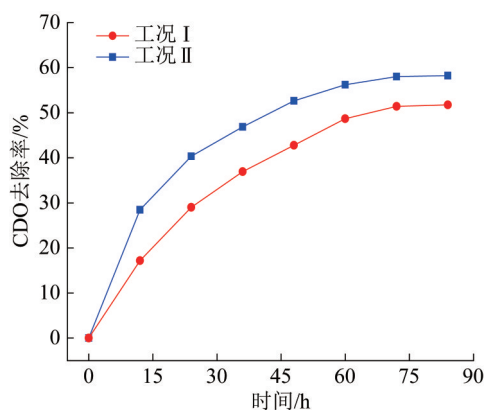


图3 缺氧处理中COD、 NH_4^+-N 和TN的变化

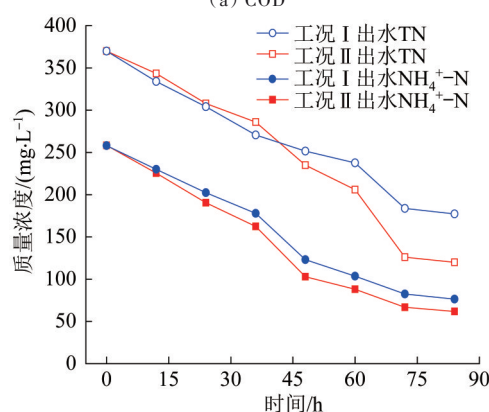
Fig. 3 Changes of COD, NH_4^+-N and TN by anoxic treatment

由图3可以看出,随反应进行,单元出水COD先增后降,但出水 NH_4^+-N 、TN与进水数据相比无明显变化,这是因为水解酸化后的废水C/N过低导致A/O工艺无法取得理想的脱氮效果。为提高废水C/N,在缺氧反应阶段设置了2种工况条件。工况I为投加10%蒸馏后医药中间体废水(主要成分为甲醇),以考察外加碳源的强化脱氮效果;工况II为投加10%蒸馏后医药中间体废水,同时向系统投加强化脱氮菌剂,以考察投加碳源并增强脱氮微生物活性对于脱氮效果的强化作用。2种工况下缺氧反应单元对废水中COD、 NH_4^+-N 、TN的处理效果见图4。

由图4可知,在工况I外加碳源条件下,废水COD、 NH_4^+-N 、TN的去除较未加碳源时有较明显的改善,其中 NH_4^+-N 、TN去除率分别为59.1%、50.3%;而工况II(外加碳源及强化脱氮菌剂)条件下污染物去除效果又较工况I时有进一步提升,84 h后出水 NH_4^+-N 、TN分别为66.6、125.89 mg/L。这说明菌剂的投加强化了反硝化作用,从而取得了最佳的脱氮效果。



(a) COD



(b) NH_4^+-N 与TN

图4 不同工况下缺氧处理对COD、 NH_4^+-N 和TN的去除效果

Fig. 4 Removal effects of anoxic treatment on COD, NH_4^+-N and TN under different working conditions

将在工况II条件下缺氧处理72 h后的出水通入好氧装置中,考察好氧单元对废水中COD、 NH_4^+-N 、TN的处理效果,结果见图5。

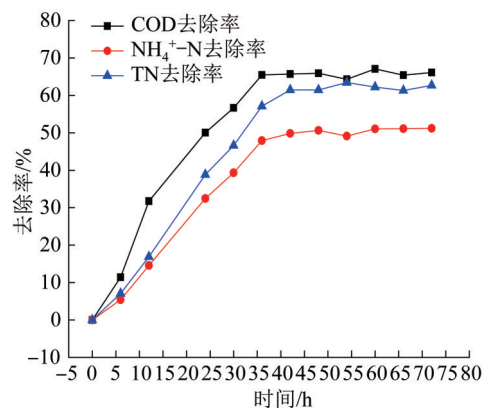


图5 好氧处理对COD、 NH_4^+-N 和TN去除效果

Fig. 5 Removal effects of aerobic treatment on COD, NH_4^+-N and TN

经过缺氧处理,废水中污染物负荷大幅降低,为好氧处理提供了有利条件^[16]。由图5可知,废水中

COD、NH₄⁺-N、TN 去除率均随反应时间延长而升高,经好氧处理 36 h 后废水 COD、NH₄⁺-N、TN 分别由 1 220.11、71.11、130.04 mg/L 降低至 421.66、37.05、55.78 mg/L;当 HRT 超过 48 h 后去除率均趋于平缓,继续延长反应时间并未提升处理效果,最终 COD、NH₄⁺-N、TN 的去除率分别达到 66.11%、51.20%、62.67%。

综合以上分析结果可知,最终 A/O 处理单元废水 COD、NH₄⁺-N、TN 去除率分别达到 77.2%、87.1%、86.9%。

2.4 组合工艺处理效果

综合以上分析,采用改进的高级氧化-水解酸化-A/O 组合工艺对高 COD、高氮印染废水进行处理时,各处理单元及组合工艺的最终处理效果见表 1。

表 1 出水水质
Table 1 The quality of effluent water

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)
原水	9 782	52.4	723.2
高级氧化处理后出水	2 686	234	419
水解酸化处理后出水	1 815	268	370
A/O 处理后出水	413.5	34.7	48.55
《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)三级标准	500	/	/
该工业园区污水处理厂纳管标准	600	45	55

由表 1 可知,组合工艺对 COD、NH₄⁺-N、TN 的去除率分别为 95.8%、33.8%、93.3%,对应出水质量浓度分别为 413.5、34.7、48.6 mg/L,其中 TN 去除率相比于其他组合工艺技术具有明显提升^[3,17-18]。经处理后系统出水水质达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)三级标准,满足当地工业园区污水处理厂的纳管标准。

3 结论

(1)采用两级“微电解联合 Fenton 氧化”工艺对印染废水进行预处理,其处理效果较一级“微电解联合 Fenton 氧化”工艺有明显提升,其中 COD 去除率可提升 17.9% 左右。该处理阶段中,难生物降解的小分子有机胺被转化为 NH₄⁺-N,废水可生化性得到改善,之后经混凝沉淀,COD、NH₄⁺-N、TN 被进一步降低,为后续处理提供了良好的条件。

(2)水解酸化单元进一步使废水中的小分子有机胺降解为 NH₄⁺-N,改善了废水的可生化性。该处理阶段中,COD 和 TN 去除率分别为 32.4%、11.7%。

(3)采用强化脱氮措施的 A/O 工艺可解决反硝化碳源不足及微生物活性被抑制的问题,从而提高系统脱氮效果,实现对 NH₄⁺-N、TN 的高效去除。该处理阶段中,NH₄⁺-N、TN 去除率分别为 87.1%、86.9%。

(4)两级“铁碳微电解联合 Fenton 氧化”-混凝沉淀-水解酸化-A/O 组合工艺对染料废水具有较好的处理效果,废水中 COD、NH₄⁺-N、TN 去除率分别可达 95.8%、33.8%、93.3%,相应的出水质量浓度分

别为 413.5、34.7、48.6 mg/L,达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)三级标准,同时满足当地园区污水处理厂纳管标准。

参考文献

[1] 陈红,李响,薛罡,等.当前印染废水治理中的关键问题[J].工业水处理,2015,35(10):16-19.
CHEN Hong, LI Xiang, XUE Gang, et al. Key problems in present printing and dyeing wastewater treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(10): 16-19.

[2] 刘俊逸,黄青,李杰,等.印染工业废水处理技术的研究进展[J].水处理技术,2021,47(3):1-6.
LIU Junyi, HUANG Qing, LI Jie, et al. Research progress on the treatment technologies of industrial printing and dyeing wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(3): 1-6.

[3] 张挺,唐佳琦,高冲.印染废水深度处理及回用技术研究进展[J].工业水处理,2013,33(9):6-9.
ZHANG Ting, TANG Jiayu, GAO Chong. Progress in the advanced treatment and reuse of dyeing wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(9): 6-9.

[4] 丁静,张建良,任烨,等.混凝+A/O+气浮+臭氧+磁混凝工艺处理印染废水[J].中国给排水,2021,37(20):112-115.
DING Jing, ZHANG Jianliang, REN Ye, et al. Treatment of dyeing wastewater by a combined process of coagulation, A/O, flotation, ozone, and magnetic coagulation [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 112-115.

[5] 余帅奇,陈红,薛罡,等.铁碳微电解处理印染废水的作用机制[J].化工环保,2021,41(6):699-704.
SHE Shuaiqi, CHEN Hong, XUE Gang, et al. Mechanism for treatment of dyeing wastewater by Fe-C micro-electrolysis [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2021, 41(6): 699-704.

- [6] 杨余维, 梁康, 许文卿, 等. 超声强化下多相催化臭氧体系处理印染废水[J]. 环境科学研究, 2021, 34(8): 1852-1859.
YANG Shewei, LIANG Kang, XU Wenqing, et al. Advanced treatment of dyeing and printing effluent by ultrasonic enhanced heterogeneous catalytic ozonation system[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(8): 1852-1859.
- [7] 殷晓春, 师玉卓, 思广慧, 等. 壳聚糖基纳米材料在水处理应用的研究进展[J]. 高分子通报, 2019(3): 17-28.
YIN Xiaochun, SHI Yuzhuo, SI Guanghui, et al. Progress of chitosan nano-substrate in water treatment[J]. Polymer Bulletin, 2019(3): 17-28.
- [8] 张刚, 张宗霖, 李明智. 催化氧化-A/O工艺-生物滤池处理高浓度有机胺废水中试[J]. 环境工程, 2013, 31(4): 35-39.
ZHANG Gang, ZHANG Zonglin, LI Mingzhi. A pilot test of treatment of high concentration organic amine wastewater by catalytic oxidation-A/O-BAF process[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(4): 35-39.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境出版社, 2002: 255-281.
State Environmental Protection Administration. Water and waste water monitoring and analysis method[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 255-281.
- [10] 王白杨, 曾悦, 邱攀, 等. 物化生化组合工艺处理分散染料废水[J]. 中国给水排水, 2018, 34(14): 80-83.
WANG Baiyang, ZENG Yue, QIU Pan, et al. Treatment of disperse dye wastewater by a combined physical-chemical and biochemical process[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(14): 80-83.
- [11] 冯晓娟, 李德生, 洪飞宇, 等. Fenton试剂强化二级铁炭微电解预处理有机助剂废水[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(5): 35-38.
FENG Xiaojuan, LI Desheng, HONG Feiyu, et al. Pretreatment of organic promoter wastewater by Fenton reagent enhanced two-stage ferric-carbon micro-electrolysis[J]. Industrial Water & Wastewater, 2010, 41(5): 35-38.
- [12] 王婉贞. 有机胺废水处理技术实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
WANG Wanzhen. Experimental research on the treatment of organic amine wastewater[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [13] 肖椿, 袁帅, 刘文俊. ABR-A/O联合工艺处理印染废水研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(9): 23-28.
XIAO Chun, YUAN Shuai, LIU Wenjun. ABR-A/O combined process for treatment of printing and dyeing wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(9): 23-28.
- [14] 马宏瑞, 任健, 王保和. 混凝-催化氧化-水解酸化-生物接触氧化法处理染料废水的中试研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(11): 39-43.
MA Hongrui, REN Jian, WANG Baohe. Pilot scale study on dyeing wastewater treatment with coagulation/catalytic oxidation/hydrolytic acidification/biological contact oxidation[J]. Environmental Pollution & Control, 2009, 31(11): 39-43.
- [15] 田海峰. 两级厌氧处理有机氮废水及去除氨氮研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
TIAN Haifeng. Research of two stages of anaerobic dispose organic nitrogen wastewater and remove ammonia[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [16] 肖霄, 崔康平, 王郑, 等. Fe/C微电解-Fenton协同氧化-混凝沉淀-A/O工艺处理萘醌类染料废水[J]. 水处理技术, 2016, 42(12): 55-59.
XIAO Xiao, CUI Kangping, WANG Zheng, et al. Treatment of anthraquinone dye wastewater with Fe/C electrolysis-Fenton synergistic oxidation-coagulation sedimentation-A/O process[J]. Technology of Water Treatment, 2016, 42(12): 55-59.
- [17] 王忠泉, 郑威城, 娄小丹, 等. 高氨印染废水脱氮处理技术与工程应用[J]. 工业水处理, 2021, 41(11): 134-137.
WANG Zhongquan, ZHENG Weicheng, LOU Xiaodan, et al. Technology and engineering application of printing and dyeing wastewater with high ammonia[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(11): 134-137.
- [18] 张双圣, 刘汉湖, 张龙, 等. 混凝沉淀-厌氧水解-A/O-混凝沉淀工艺处理印染废水[J]. 环境工程学报, 2011, 5(3): 528-532.
ZHANG Shuangsheng, LIU Hanhu, ZHANG Long, et al. Treatment of dyeing wastewater by coagulating sedimentation-anaerobic hydrolysis-A/O-coagulating sedimentation combined technique[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(3): 528-532.
- [作者简介] 梁培瑜(1990—), 硕士. E-mail: liangpeiyu@jxas.ac.cn. 通讯作者: 吴施婧, 助研. E-mail: 465471658@qq.com.
[收稿日期] 2022-08-15(修改稿)