



# 电催化臭氧-BAF 工艺深度处理印染废水中试研究

周 鹏<sup>1,2</sup>, 展巨宏<sup>2,3</sup>, 赵尔卓<sup>3</sup>, 李 阳<sup>2,3</sup>, 吴 玮<sup>1</sup>, 王玉珏<sup>2,3</sup>

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏苏州 215000; 2. 清华苏州环境创新研究院, 江苏苏州 215163; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

**[摘要]** 以江苏某纺织染整工业园区污水处理厂综合排放池的污水为处理对象, 构建以电催化臭氧-曝气生物滤池(BAF)为主体工艺的印染废水深度处理中试系统, 通过优化系统运行参数, 考察该系统对难降解有机污染物的去除效果。结果表明, 在进水流量 10 m<sup>3</sup>/h、臭氧投加质量浓度 20 mg/L、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 投加质量浓度 7.2 mg/L、催化氧化停留时间 30 min、BAF 停留时间 60 min 的条件下, 系统对污水中 COD 的去除率稳定在 38%~45% 之间, 出水 COD<sub>Cr</sub> ≤ 35 mg/L, 达到《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要污染物排放限制》(DB 32/1072—2018)规定的出水 COD<sub>Cr</sub> < 40 mg/L 的要求, 同时, 系统对 UV<sub>254</sub>、色度也具有较好的去除效果, 对废水中检测到的酮洛芬、避蚊胺和咖啡因的去除率也均达到 85% 以上。经运行成本核算, 该系统的吨水处理成本约为 0.77 元, 且运行过程中无二次污染, 具有良好的经济和环境效益。

**[关键词]** 印染废水; 臭氧; 过氧化氢; 深度处理; 能耗

**[中图分类号]** X791 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)11-0100-07

## Pilot study on advanced treatment of printing and dyeing wastewater by Electro-peroxone-BAF process

ZHOU Peng<sup>1,2</sup>, ZHAN Juhong<sup>2,3</sup>, ZHAO Erzhuo<sup>3</sup>, LI Yang<sup>2,3</sup>, WU Wei<sup>1</sup>, WANG Yujue<sup>2,3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, China; 2. Research Institute for Environmental Innovation(SUZHOU), Tsinghua, Suzhou 215163, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Take the sewage from comprehensive discharge pool of a textile dyeing and finishing industrial park in Jiangsu Province as the treatment object, a pilot scale system for advanced treatment of printing and dyeing wastewater with Electro-peroxone-Biological Aerated Filter(BAF) as the main process was constructed. The removal effect of the system on refractory organic pollutants was investigated by optimizing the system operating parameters. The results showed that under the conditions of 10 m<sup>3</sup>/h of influent flow, 20 mg/L of ozone dosing mass concentration, 7.2 mg/L of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosing mass concentration, 30 min of catalytic oxidation retention time and 60 min of BAF retention time, the COD removal rate of the system was stable between 38% and 45%, and the effluent COD was ≤ 35 mg/L, which met the requirement of COD < 40 mg/L in effluent specified in the Discharge Limits of Major Pollutants from Urban Sewage Treatment Plants and Key Industries in Taihu Lake Area(DB 32/1072—2018). Meanwhile, the system had good removal effects on UV<sub>254</sub> and chromaticity, and the removal rates of ketoprofen, DEET and caffeine detected in the wastewater were also more than 85%. According to the operation cost accounting, the treatment cost per ton of water of the system was about 0.77 yuan, and there was no secondary pollution in the operation process, which had good economic and environmental benefits.

**Key words:** printing and dyeing wastewater; ozone; hydrogen peroxide; advanced processing; energy consumption

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(51878370)

印染废水具有水量大、有机污染物含量高、色度深、水质变化大等特点,属较难处理的工业废水。近年来随着纺织印染行业的快速发展和新型染剂的开发应用,常规的物化-生化处理工艺已难以满足印染废水的出水要求,尤其印染废水COD的达标处理已成为突出问题<sup>[1-3]</sup>。2018年江苏省颁布了《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要污染物排放限制》(DB 32/1072—2018),规定太湖流域的一、二级保护区内印染废水处理厂出水COD需低于40 mg/L,这无疑对污水处理厂或企业提出了更高的要求,废水处理工艺提标改造势在必行。

曝气生物滤池(BAF)具有工艺流程简单、成本低、有机负荷高等优点<sup>[4]</sup>,被广泛应用于废水深度处理领域,但该工艺对进水COD和SS要求较高,对难降解有机物去除效果差,因此实际应用中,BAF工艺经常与高级氧化工艺联用以实现技术优势互补。电催化臭氧(Electro-peroxone,EP)技术是一种新型的高级氧化技术,近年来已被证明在处理难降解有机废水方面比传统电化学和臭氧氧化技术具有更明显的优势,不仅可以高效降解各种有机污染物,还可以大幅度降低处理能耗<sup>[5-7]</sup>。EP技术结合了电化学和臭氧氧化过程,其基本原理是:在臭氧氧化过程中,曝入气体(O<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>的混合气体)中的O<sub>2</sub>在气体扩散阴极上通过二电子还原途径生成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,原位产生的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>与O<sub>3</sub>发生过臭氧化(Peroxone)反应生成强氧化性的·OH,进而实现有机污染物的高效降解<sup>[8-9]</sup>。

江苏某纺织染整工业园区污水处理厂为了达到DB 32/1072—2018排放标准,需在原有工艺基础上进行提标改造,改造的核心目标是将目前水厂出水COD由60 mg/L降至40 mg/L以下。本研究构建了以EP-BAF为主体工艺的印染废水深度处理中试系统,处理规模240 t/d,通过优化臭氧投加量、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>投加量等参数,重点考察该组合工艺对COD、UV<sub>254</sub>、色度及3种微污染物(酮洛芬、避蚊胺和咖啡因)的去除效果,并核算该工艺的运行成本,以期为该技术的工程化应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 污水处理厂概况

该污水处理厂设计规模为3万m<sup>3</sup>/d,其中80%的废水来源于上游的棉染厂、织布厂、毛巾厂等,废水中有机污染物主要来源于染色过程中使用的染

料、表面活性剂等,剩余20%的废水来源于市政生活废水。该污水处理厂提标改造前采用的主体工艺为“水解酸化+生物活性炭工艺+混凝沉淀+活性炭”,详细流程见图1。

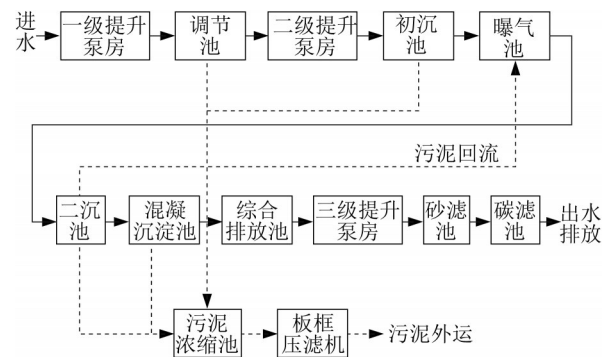


图1 污水处理厂原有工艺流程

Fig. 1 Original process flow chart of wastewater treatment plant

该污水处理厂2018年的出水水质指标统计见表1。以DB 32/1072—2018为参照,2018年度COD达标天数仅为2 d,达标排放量不足此年度总排放量的1%,因而认为在原有废水处理工艺下,实现COD达标排放的可能性小于1%。

表1 污水处理厂出水指标和排放标准

Table 1 Effluent index and discharge standard of sewage treatment plant

水质指标	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	SS	
出水 (2018年)	最大值	59	5	10.66	2.54	0.39	13
	最小值	35	0	1.72	0.13	0.02	2
	平均值	51	1	5.39	0.36	0.12	8
DB 32/1072—2007	60	10	5(8)	15	0.5	10	
DB 32/1072—2018	40	10	3(5)	10	0.3	10	
达标率/%	<1	100	66.75	100	100	99.79	

注:括号外数值为水温≥12℃时控制指标,括号内数值为水温≤12℃时控制指标;各指标单位均为mg/L。

1.2 EP-BAF中试系统的搭建

针对1.1节的分析结果,搭建了EP-BAF深度处理中试系统。考虑到水厂构筑物的实际情况,未能直接取水厂的出水作为中试系统的进水,而是取水厂混凝沉淀池后、三级提升泵房之前的综合排放池内的污水作为进水。中试系统的取水口位于综合排放池的上游,中试系统的出水排放至综合排放池下游,中试系统工艺流程见图2,整个系统布置于撬装式装置中。

来水首先进入到砂滤池,去除水中的SS,这一方面有利于减少EP氧化池中氧化剂的投加量,另一

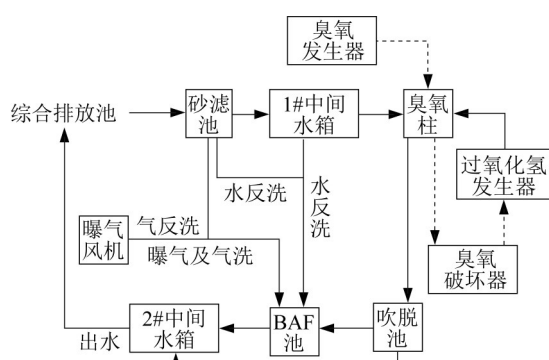


图2 EP-BAF组合工艺流程

Fig. 2 Flow chart of EP-BAF combined process

方面可以防止SS引起氧化出水中COD的升高。

砂滤出水进入到1#中间水箱,当系统正常运行时,通过潜水泵将废水以 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 的流量提升到EP氧化池中,水力停留时间 $30\text{ min}$ ;当系统停止运行时,1#中间水箱的水可作为砂滤池和BAF池的反冲洗用水。

以臭氧柱作为EP氧化池,采用上进下出的运行方式对1#中间水箱的来水进行处理,氧化池底部设置3组微孔曝气盘,外接臭氧发生器。氧化池顶部接有气管联通臭氧破坏器,氧化池内的臭氧尾气由抽风机抽出,进入臭氧破坏器,尾气在破坏器入口处通过预加热来防止其在臭氧破坏器内的催化器中发生冷凝。进入反应室后,臭氧分子在通过催化器时被分解破坏。

氧化池进水管路接双氧水发生器,用于EP氧化池中 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的投加。双氧水发生器通过自制的碳-聚四氟乙烯电极的电化学反应生成 $\text{H}_2\text{O}_2$ ,其气源为来自EP氧化池的尾气经臭氧破坏器破坏之后的气体。双氧水发生器产生的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 以一定的流量和EP氧化池进水相混合,并与EP氧化池中的 $\text{O}_3$ 发生过氧化反应生成 $\cdot\text{OH}$ 从而降解有机污染物。

EP氧化池出水进入到臭氧吹脱池进行 $20\text{ min}$ 的吹脱,其主要目的是避免残留的 $\text{O}_3$ 对后端BAF产生影响。

考虑到处理量为 $240\text{ t/d}$ 的BAF池较大,本研究将臭氧吹脱池出水分2路,一路以 $9.5\text{ m}^3/\text{h}$ 的流量直接排放到2#中间水箱,另一路以 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 的流量由底部进入到BAF池,并从顶部出水堰出水进入2#中间水箱,水力停留时间 $1\text{ h}$ 。BAF池作为EP氧化池的一个保障措施,可进一步降解未被完全氧化的

小分子有机物,其内部填充高度为 $1.5\text{ m}$ 的火山岩颗粒作为载体填料。

中试系统正式启用之前,首先采用闷曝法对BAF进行挂膜,取水厂活性污泥菌种与面粉等营养物质混合加入到BAF中,闷曝 $7\text{ d}$ 后将滤柱放空,开始小水量运行 $7\text{ d}$ ,至填料表面观察到少量的黄色絮体,逐渐增加水量运行 $7\text{ d}$ ,挂膜完成。2#中间水箱的水最终由潜水泵打回到综合排放池下游。

系统各单元设计参数及材质为:砂滤池, $1.0\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 3.4\text{ m}$ ,304不锈钢;1#中间水箱, $1.6\text{ m}\times 2.3\text{ m}\times 2.3\text{ m}$ ,304不锈钢;臭氧柱, $D\ 0.9\text{ m}\times 2.9\text{ m}$ ,有机玻璃;吹脱池, $0.6\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 2.9\text{ m}$ ,316不锈钢;臭氧发生器, $1\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ ,316不锈钢;过氧化氢发生器, $1\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 1.3\text{ m}$ ,金属合金;BAF池, $D\ 0.8\text{ m}\times 2.3\text{ m}$ ,有机玻璃;2#中间水箱, $0.6\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 2.3\text{ m}$ ,304不锈钢。

### 1.3 分析方法

COD和色度依据《水和废水监测分析方法》测定<sup>[10]</sup>;  $\text{UV}_{254}$ 的检测采用紫外分光光度法(哈希DR6000),将废水过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 孔径的聚四氟乙烯滤膜,取滤液在波长 $254\text{ nm}$ 条件下进行测定;气相 $\text{O}_3$ 浓度利用臭氧检测仪(立美UV-100)进行实时在线测定; $\text{H}_2\text{O}_2$ 的检测采用钛盐分光光度法<sup>[11]</sup>;酮洛芬、避蚊胺和咖啡因的浓度采用高效液相色谱-质谱联用法进行测定,大致流程为:滤膜( $0.22\text{ }\mu\text{m}$ , Whatman)抽滤→固相萃取小柱(PEP-2, Agela Technologies)萃取→洗脱→LC-MS/MS(API 3200, Applied Biosystems, USA)检测,色谱柱型号为XBridge™ C18( $3.5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $D\ 3.0\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ , Waters)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 臭氧氧化技术与EP技术的比较

在进水流量 $10\text{ m}^3/\text{h}$ 、氧化停留时间 $30\text{ min}$ 、BAF停留时间 $60\text{ min}$ 的条件下,分别研究了单独臭氧氧化和EP技术在与BAF联用的印染废水深度处理过程中对水中COD、 $\text{UV}_{254}$ 和色度的去除效果,结果见图3。

图3显示,在单独臭氧氧化实验组中随着 $\text{O}_3$ 质量浓度从 $10\text{ mg/L}$ 提高到 $40\text{ mg/L}$ ,系统对COD的总去除率从 $11.2\%$ 提高到 $23.6\%$ ,具有先升高后趋于平缓的

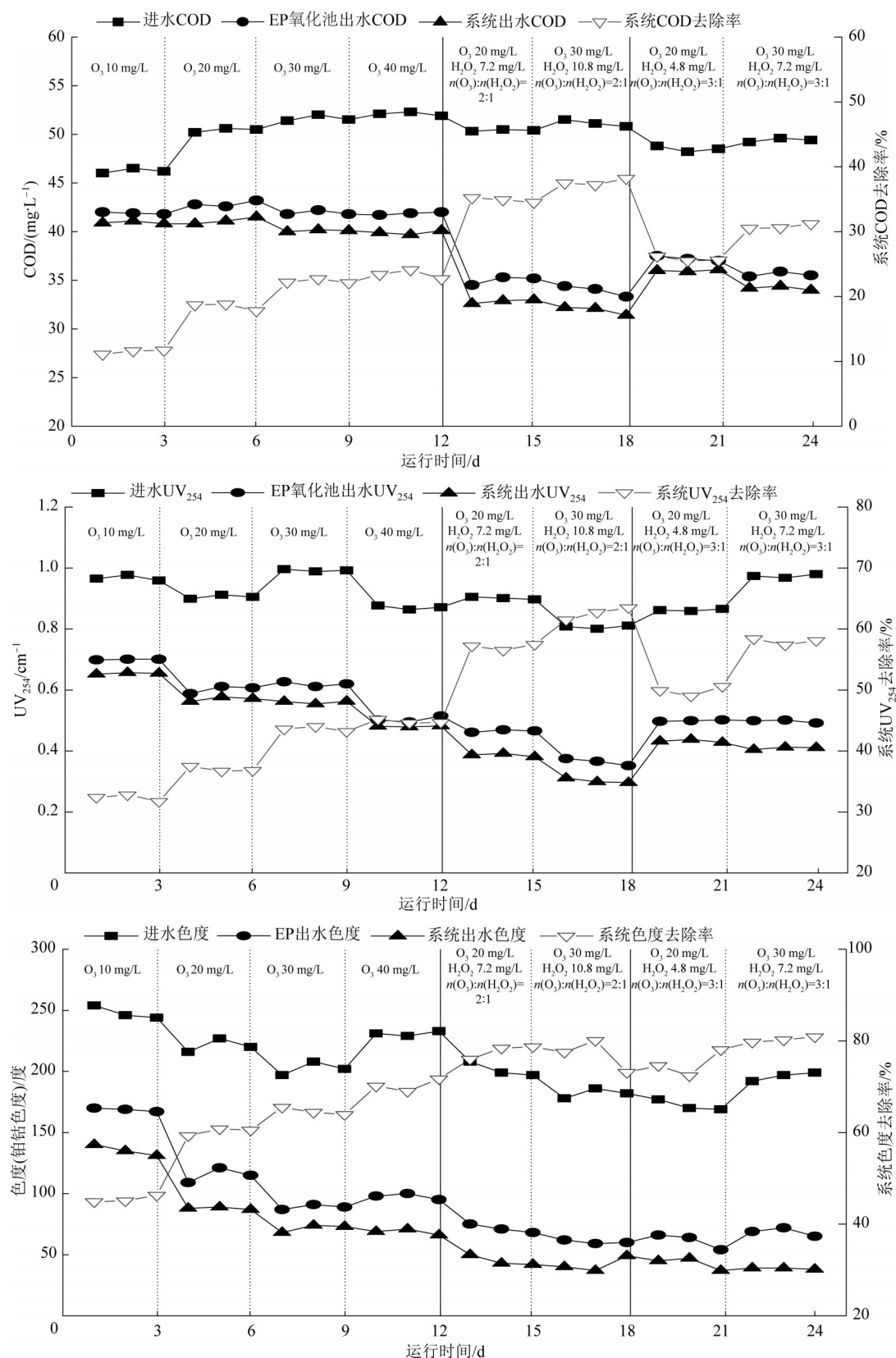


图3 EP-BAF联合处理系统对印染废水的处理效果

Fig. 3 Treatment effect of printing and dyeing wastewater by EP-BAF combined treatment system



变化趋势,对  $UV_{254}$  与色度的总去除率逐步提升,  $UV_{254}$  的总去除率从 24.6% 提高到 36.2%, 色度的总去除率从 44.9% 提高到 71.1%;  $O_3$  质量浓度为 30 mg/L 时系统对 COD 和  $UV_{254}$  的总去除率明显高于  $O_3$  质量浓度为 10 mg/L 与 20 mg/L 时的去除率, 但与  $O_3$  质量浓度为 40 mg/L 时的去除率相差不大。在 EP 实验组中, 固定  $O_3$  与  $H_2O_2$  物质的量比不变, 随着  $O_3$  与  $H_2O_2$  浓度的提高, 各指标总去除率也有所提高; 固定  $O_3$  浓度不变时,  $O_3$  与  $H_2O_2$  物质的量比为 2:1 的实验组对 COD 与  $UV_{254}$  的处理效果明显高于  $O_3$  和  $H_2O_2$  物质的量比为 3:1 的实验组的处理效果。进一步分析原因, 根据传质理论, 增加曝入气体中臭氧浓度可以增强臭氧从气相到液相的传质, 而增加  $H_2O_2$  浓度可以显著地提高  $O_3$  向  $\cdot OH$  转化的速率, 从而提高 COD 去除率<sup>[12]</sup>。 $\cdot OH$  容易与有机物的  $C=C$  反应, 对苯环也有较强的破坏能力, 会使有机物的芳香性降低或消失<sup>[13-14]</sup>, 这也是相同  $O_3$  浓度下,  $O_3$  与  $H_2O_2$  物质的量比为 2:1 时对 COD、 $UV_{254}$  的总去除率高于物质的量比为 3:1 时的原因。由图 3 还可知,  $O_3$  与  $H_2O_2$  的物质的量比 2:1 与 3:1 时对色度的去除率相近。在经过电催化臭氧处理后废水中仍含有可生物降解的染料。在曝气生物滤池内有充足的溶解氧, 滤料表面生长着驯化过的微生物, 这些微生物能够吸附并氧化分解染料, 从而进一步去除印染废水的色度。

综合以上实验结果可知, 臭氧质量浓度 20 mg/L、 $H_2O_2$  质量浓度 7.2 mg/L 为该中试实验较佳条件, 此时臭氧与过氧化氢物质的量比约为 2:1。

## 2.2 EP-BAF 系统稳定运行效果

在水温 20~25 °C、进水流量 10 m<sup>3</sup>/h、有效接触时间 30 min、臭氧质量浓度 20 mg/L、 $H_2O_2$  质量浓度 7.2 mg/L 的条件下, 对中试装置进行 60 d 的连续运行, 测定了 EP-BAF 对 COD、 $UV_{254}$ 、色度的去除效果, 结果见图 4。

从图 4(a) 可以看出, EP 出水 COD、系统出水 COD 与进水 COD 的变化呈现相似的波动趋势, 实际应用中要注意进水 COD 的变化。进水 COD 在 44.1~54.6 mg/L 的范围内, EP 出水 COD  $\leq 37.5$  mg/L, 系统出水 COD  $\leq 35$  mg/L, 系统对 COD 的去除率稳定在 38%~45% 之间, 说明该系统可稳定地去除来水中的 COD, 具有稳定达标性。

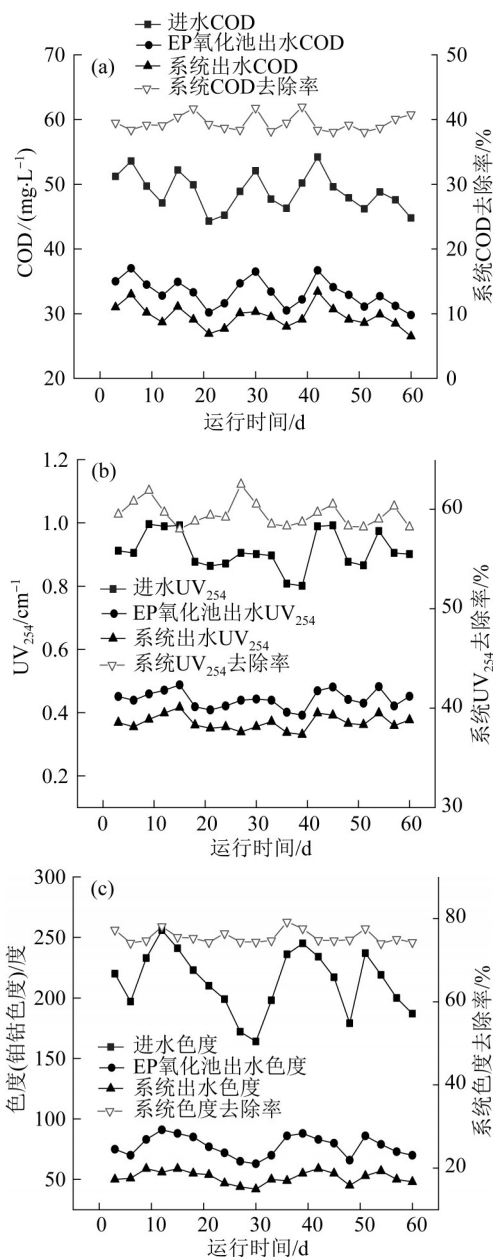


图4 优化条件下COD、 $UV_{254}$ 、色度的处理效果

Fig. 4 Removal effects of COD,  $UV_{254}$  and chroma under optimization conditions

从图 4(b) 可以看出, 进水  $UV_{254}$  在 0.8~1.0 cm<sup>-1</sup> 之间, EP 出水  $UV_{254} \leq 0.5$  cm<sup>-1</sup>, 系统出水  $UV_{254} \leq 0.4$  cm<sup>-1</sup>, 即系统对  $UV_{254}$  的去除率稳定在 58%~65% 之间。

从图 4(c) 可以看出, 进水色度的波动较大, 在 165~262 度之间, 但 EP 出水色度与系统出水色度都较为稳定, 分别在 70 度与 50 度上下, 系统对色度的去除率稳定在 72%~82%。说明该系统可有效、稳定地去除色度。

由于药品及个人护理品(PPCPs)的残留可以通过食物链积累从而威胁到人类和动物的健康,PPCPs在水体中的出现引起了越来越多的关注<sup>[15]</sup>。有研究表明,EP技术对PPCPs展现出了较好的去除效果<sup>[16]</sup>,因此本研究在优化条件下考察了EP-BAF系统对3种PPCPs(酮洛芬、避蚊胺、咖啡因)的去除效果,结果见图5。

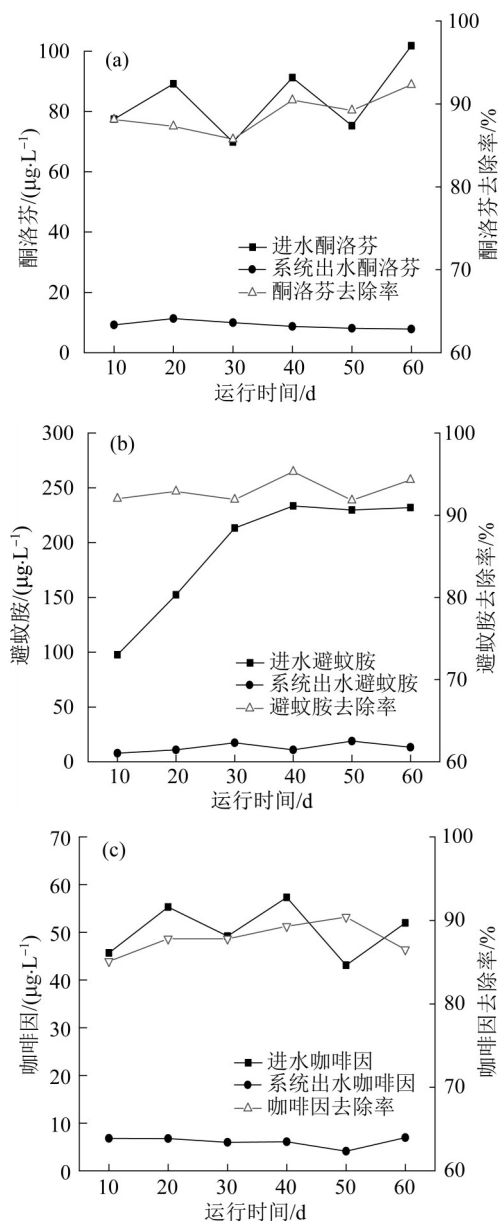


图5 优化条件下微污染物的去除效果

Fig. 5 Removal effect of PPCPs under optimized conditions

由图5(a)可以看出,酮洛芬的进水质量浓度在70~100 μg/L并随运行时间延长呈波动上升趋势,而出水质量浓度稳定在10 μg/L上下,系统对酮洛芬去

除率在85%~94%;由图5(b)可以看出,避蚊胺的进水浓度逐渐上升,后又趋于稳定,质量浓度在98~224 μg/L,这主要是因为实验开始于夏季初期,随着温度上升,避蚊胺的使用量上升,水体中的避蚊胺浓度也随之上升,而出水避蚊胺质量浓度稳定在20 μg/L左右,系统对避蚊胺的去除率可达92%以上;由图5(c)可以看出,咖啡因的进水质量浓度在43~57 μg/L波动,而出水质量浓度稳定在7 μg/L上下,去除率可达85%以上。综合图5(a)~5(c)可以看出,在连续60 d的稳定运行中,系统对3种PPCPs均具有较佳的去除效果,总去除率均在85%以上,说明系统能稳定、有效地去除PPCPs。

### 2.3 经济性分析

该中试系统运行成本主要包含药剂费、水费及设备运行电耗费用3部分。反应器在60 d的连续运行期间内,处理总污水量约为14 400 m<sup>3</sup>;实验所使用药剂为工业级硫酸钠,共消耗约1 072.8 kg,其市场价格为1.0元/kg,因此药剂消耗费用为1 072.8元;实验主要的耗电设备为进水泵、鼓风机、臭氧发生器、过氧化氢发生器、反冲洗泵,共耗电15 138 kW·h,电价按0.65元/(kW·h)计,总耗电费用为9 839.7元;实验用水量约为75.6 m<sup>3</sup>,水价以2.53元/t计,耗水费用为191.27元。

综上,在60 d的中试连续运行期间,共处理污水量为14 400 m<sup>3</sup>,共花费11 103.77元,可得出该工艺水处理成本约为0.77元/t。

## 3 结论

构建了以EP-BAF为主体工艺的印染废水深度处理中试系统,用以对江苏某纺织染整工业园区污水处理厂综合排放池的污水进行深度处理,得到如下结论:

(1)在水温20~25℃、进水流量10 m<sup>3</sup>/h的条件下,得到较佳的EP-BAF系统运行条件,即催化氧化停留时间为30 min,BAF停留时间为60 min,臭氧质量浓度为20 mg/L, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>质量浓度为7.2 mg/L。EP-BAF系统长期稳定运行时,在此较佳条件下系统对COD、UV<sub>254</sub>、色度的去除率分别能达到38%、58%、

72%以上。

(2) EP-BAF 系统对酮洛芬、避蚊胺、咖啡因有较好的去除效果,去除率均在 85% 以上,即系统对于 PPCPs 有较为良好并稳定的去除效果。

(3) EP-BAF 系统在印染废水深度处理过程中的吨水处理成本为 0.77 元,整个处理过程绿色安全,无二次污染。

### 参考文献

- [1] 国家统计局,环境保护部. 中国环境统计年鉴—2016[M]. 北京: 中国统计出版社,2016:27-32.  
National Bureau of Statistics, Ministry of Environmental Protection. China environmental statistics yearbook—2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016:27-32.
- [2] 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.
- [3] 姜金宏,何席伟,熊晓敏,等. 纺织印染废水毒性特征与控制技术研究进展[J]. 工业水处理,2021,41(6):77-87.  
JIANG Jinhong, HE Xiwei, XIONG Xiaomin, et al. Research progress on toxicity characteristics and control technologies of textile dyeing wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(6): 77-87.
- [4] 徐绮坤,汪晓军. 曝气生物滤池在印染废水处理中的应用[J]. 环境科学与技术,2010,33(6):177-180.  
XU Qikun, WANG Xiaojun. Application of biological aerated filter process to treatment of dyeing and printing wastewater[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(6): 177-180.
- [5] WANG Yujue, YU Gang, DENG Shubo, et al. The electro-peroxone process for the abatement of emerging contaminants: Mechanisms, recent advances, and prospects[J]. Chemosphere, 2018, 208: 640-654.
- [6] YAO Weikun, WANG Xiaofeng, YANG Hongwei, et al. Removal of pharmaceuticals from secondary effluents by an electro-peroxone process[J]. Water Research, 2016, 88: 826-835.
- [7] 展巨宏. 电催化臭氧法再生活性碳纤维研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.  
ZHAN Juhong. Regeneration mechanism of saturated activated carbon fiber by the electro-peroxone process [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [8] 李响. 电催化臭氧技术对水中药物的去除性能和机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.  
LI Xiang. Degradation of pharmaceuticals in E-peroxone process: Removal efficiency and mechanism [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [9] 袁实. 电催化臭氧水处理技术的开发和研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.  
YUAN Shi. The development of a novel electro-peroxone technology for water and wastewater treatment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 90-216.  
State Environmental Protection Administration. Water and waste water monitoring and analysis method [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 90-216.
- [11] SELLERS R M. Spectrophotometric determination of hydrogen peroxide using potassium titanium(IV) oxalate[J]. The Analyst, 1980, 105(1255): 950.
- [12] 刘烈,李魁岭,徐莉莉,等. 电催化臭氧技术去除水中草酸的研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(8): 89-93.  
LIU Lie, LI Kuiling, XU Lili, et al. Study on the degradation of oxalic acid in water by electro-peroxon technology [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(8): 89-93.
- [13] 杨彬,杨文斌,文志潘,等. 催化臭氧氧化印染工业园尾水提标处理研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(12): 64-68.  
YANG Bin, YANG Wenbin, WEN Zhipan, et al. Catalytic ozonation tail water treatment of printing and dyeing industrial park to meet the upgrading emission standard [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(12): 64-68.
- [14] 董文艺,张红亮,黄廷林,等. 微污染源水的预臭氧氧化研究[J]. 中国给水排水, 2003, 19(12): 48-50.  
DONG Wenyi, ZHANG Hongliang, HUANG Tinglin, et al. Research on preozonation of mic-polluted water [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(12): 48-50.
- [15] KOSTICH M S, BATT A L, LAZORCHAK J M. Concentrations of prioritized pharmaceuticals in effluents from 50 large wastewater treatment plants in the US and implications for risk estimation[J]. Environmental Pollution, 2014, 184: 354-359.
- [16] ČESEN M, KOSJEK T, LAIMOU-GERANIOU M, et al. Occurrence of cyclophosphamide and ifosfamide in aqueous environment and their removal by biological and abiotic wastewater treatment processes[J]. Science of the Total Environment, 2015, 527/528: 465-473.
- [作者简介] 周鹏(1995—), 硕士。E-mail: 18206206197@163.com。通讯作者: 吴玮, 副教授, 博士。E-mail: wuwei@usts.edu.cn。
- [收稿日期] 2022-08-18(修改稿)