

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.23.012

# 基于电絮凝工艺的洗衣废水深度处理与再生利用

罗嘉豪<sup>1,2</sup>, 金鑫<sup>1</sup>, 唐茂森<sup>2</sup>, 许路<sup>1</sup>, 商亚博<sup>1</sup>, 金鹏康<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安建筑科技大学  
环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 以洗衣废水的深度处理与再生利用为目的,通过多种工艺比选,发现以电絮凝(EC)为核心的工艺对COD的去除效果显著优于其他工艺;在以EC为核心的耦合工艺及串联工艺的基础上,进一步优选出了以碳纤维极板为阴极、铝极板为阳极的电凝聚臭氧氧化耦合工艺(C-E-HOC),探究了该工艺对洗衣废水中COD、浊度及阴离子表面活性剂(LAS)的去除效果及最佳运行条件。结果表明,在电流密度为15 mA/cm<sup>2</sup>、臭氧流量为400 mL/min的最佳条件下,C-E-HOC工艺对洗衣废水中COD、浊度及LAS的去除率分别可达到97.6%、99.9%和99.6%,出水水质满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)和《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)标准要求。同时,分析了C-E-HOC工艺去除COD与LAS的反应动力学特性。另外,考察了洗衣废水中微塑料的排放情况,结果显示,在家庭日常洗涤过程中,每100 L水向环境中排放的微塑料数量为(40~150)×10<sup>4</sup>个,C-E-HOC工艺对微塑料的去除率可达到94.2%。

**关键词:** 洗衣废水; 电凝聚臭氧氧化耦合工艺; 电絮凝; 微塑料

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)23-0084-07

## Advanced Treatment and Recycling of Laundry Wastewater Utilizing Electrocoagulation Process

LUO Jia-hao<sup>1,2</sup>, JIN Xin<sup>1</sup>, TANG Mao-sen<sup>2</sup>, XU Lu<sup>1</sup>, SHANG Ya-bo<sup>1</sup>,  
JIN Peng-kang<sup>1,2</sup>

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In the context of advanced treatment and recycling of laundry wastewater, it was observed that electrocoagulation (EC) served as the core process with a significantly superior COD removal efficiency compared to alternative methods. Building upon the coupling and series processes centered around EC, this paper further optimized the electro-hybrid ozonation-coagulation (C-E-HOC) that utilized a carbon fiber electrode plate as the cathode and an aluminum electrode plate as the anode, and investigated the process's efficacy in removing COD, turbidity, and anionic surfactants (LAS) from laundry wastewater, while also exploring its optimal operating conditions. Under the optimal conditions characterized by the current density of 15 mA/cm<sup>2</sup> and the ozone flow rate of 400 mL/min, the C-E-HOC

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170052、52070151); 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-06)

通信作者: 金鹏康 E-mail: pkjin@xjtu.edu.cn

process demonstrated removal efficiencies for COD, turbidity and LAS in laundry wastewater reaching 97.6%, 99.9%, and 99.6%, respectively. The effluent quality complied with the limits specified in *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Use* (GB/T 18920-2020) as well as *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Industrial Uses* (GB/T 19923-2005). Meanwhile, the reaction kinetics characteristics of COD and LAS removal in the C-E-HOC process were analyzed. Furthermore, the release of microplastics in laundry wastewater was investigated. The findings indicated that the quantity of microplastics discharged into the environment during a typical household washing process amounted to  $(40-150) \times 10^4$  per 100 liters of water, while the C-E-HOC process demonstrated a removal efficiency for microplastics reaching up to 94.2%.

**Key words:** laundry wastewater; electro-hybrid ozonation-coagulation; electrocoagulation; microplastics

洗衣废水的排放量约占生活污水总量的20%以上,是一种潜在的回用水资源<sup>[1]</sup>。目前家庭洗衣废水通常是通过城市污水管网统一收集至污水厂进行处理,但洗衣废水中含有大量的表面活性剂,当表面活性剂负荷超过一定量时会造成微生物呼吸减少和磷吸收中断,还会影响活性污泥的形态,导致絮体破碎和原生动物细胞溶解,进而影响污水厂的处理效率<sup>[2]</sup>。洗衣废水若是能够单独处理回用,不仅可以减轻污水处理厂的负荷,还可以提高污水的再生利用率,节约水资源。

目前,针对洗衣废水的处理工艺有移动床生物反应器(MBBR)<sup>[3]</sup>、膜分离技术<sup>[4]</sup>、太阳能光芬顿工艺<sup>[5]</sup>、UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>工艺<sup>[6]</sup>等,这些工艺能够实现对污染物的高效去除,但是存在需要额外添加药剂、运行时间长、运行成本较高等缺点。笔者所在课题组在前期构建了臭氧-混凝耦合反应体系(HOC)<sup>[7-8]</sup>,提高了对污水中溶解性有机物的去除效率,但由于混凝工艺在实际运行过程中会增加操作强度,而电絮凝(EC)无需添加混凝剂,可由阳极原位电解产生混凝剂,于是将混凝工艺替换为电絮凝工艺,构建了电凝聚臭氧氧化耦合工艺(E-HOC)<sup>[9-10]</sup>,实现了药剂零添加与无需人工操作。笔者进一步将电絮凝与高级氧化工艺进行组合,经过多种工艺比选后,选取以碳纤维为阴极、铝为阳极的电凝聚臭氧氧化耦合工艺(C-E-HOC),基于与电絮凝工艺、臭氧氧化工艺、电絮凝串联电催化氧化工艺、电絮凝串联臭氧催化氧化工艺等的对比,考察C-E-HOC工艺对洗衣废水的处理效果;同时,研究了C-E-HOC工艺对有机物和表面活性剂的去除动力学特性;并对

洗衣废水中的微塑料进行了分析,探究了C-E-HOC工艺对微塑料的去除效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验原水

洗衣废水一般分为洗涤废水、一次漂洗废水及二次漂洗废水,其中洗涤废水水质最差,本实验以洗涤废水为处理对象。实验水样来自实验室自配水及家庭日常洗衣排水,在考察对洗衣废水中COD、浊度、阴离子表面活性剂(LAS)的去除效果时采用实验室自配水,在考察对洗衣废水中微塑料的去除效果时采用家庭日常洗衣排水。由于洗衣废水中含有大量表面活性剂、尘土颗粒以及油污,因此实验室自配水采用洗衣液、高岭土以及油脂来配制,具体水质如下:COD为684~1 170 mg/L、LAS为74.4~127.8 mg/L、浊度为83~129 NTU。

### 1.2 实验装置与方法

#### 1.2.1 实验装置

实验装置如图1所示。采用矩形柱有机玻璃电解反应器,长×宽×高=10 cm×7 cm×12 cm,每次实验水样体积均为500 mL。阳极材料为铝电极或DSA电极,阴极材料为不锈钢(316级)或碳纤维极板,电极完全浸没于水中,有效表面积为84 cm<sup>2</sup>,长×宽×厚度=7 cm×6 cm×0.1 cm,极板间距为2 cm。在实验开始前,电极先用砂纸打磨,再用1 mol/L的HCl溶液清洗10 min,然后用去离子水冲洗,最后烘干使用。电极直接连接到稳压直流电源。反应过程中采用磁力搅拌器以100 r/min的速度进行搅拌。采用氧气源臭氧发生器制造臭氧,臭氧流量通过气体流量计控制。

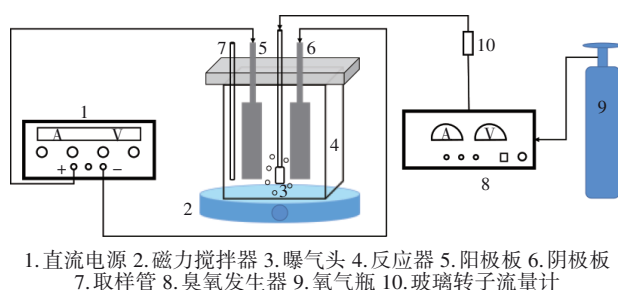


图1 E-HOC实验装置示意

Fig.1 E-HOC experiment setup

阳极为铝电极、阴极为不锈钢电极的电凝聚臭氧氧化耦合工艺记作SS-E-HOC工艺;阳极为铝电极、阴极为碳纤维电极的电凝聚臭氧氧化耦合工艺记作C-E-HOC工艺;在电絮凝串联电催化氧化工艺(EC+EO)中,电絮凝(EC)的阳极为铝电极、电催化(EO)的阳极为DSA电极,阴极为不锈钢电极;电絮凝串联臭氧催化氧化工艺(EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂)的阳极为铝电极,阴极为不锈钢电极;电絮凝串联紫外臭氧氧化工艺(EC+UV/O<sub>3</sub>)的阳极为铝电极,阴极为不锈钢电极。

### 1.2.2 实验方法

取500 mL实验水样,根据电流密度向水样中添加适量电解质Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,用磁力搅拌器充分搅拌使Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>完全溶解。实验开始前,设置好电流密度(5、10、15、20 mA/cm<sup>2</sup>)以及臭氧流量(100、200、300、400 mL/min)。将电极与直流电源连接,在耦合体系中,将臭氧发生器与曝气头连接,同时开启臭氧发生器与直流电源,此时,EC和O<sub>3</sub>氧化反应同时发生,反应时间为1 h;在非耦合体系中,EC阶段反应时间为1 h,后续阶段反应时间为1 h,总反应时间为2 h。反应结束后,静置沉降30 min,然后取样测定COD、浊度、LAS等。在进行动力学分析时,每10 min取一次样。

### 1.3 分析项目及方法

COD:快速消解分光光度法;浊度:便携式浊度仪;LAS:亚甲蓝分光光度法,测定前先将水样用中速定性滤纸过滤。微塑料:参考Tian等人<sup>[11]</sup>的方法,收集家庭洗衣过程的三次排水(洗涤废水、一次漂洗废水、二次漂洗废水),混合并搅拌均匀,取500 mL水样,采用0.7 μm玻璃纤维滤膜过滤,然后将滤膜置于蒸发皿中并用铝箔包裹,在铝箔表面用针头扎若干细孔,置于烘箱中于60℃干燥1 h,然后在显微镜下观察计数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 洗衣废水处理工艺比选

在电流密度为10 mA/cm<sup>2</sup>、臭氧流量为200 mL/min条件下,比较电絮凝工艺(EC)、臭氧氧化工艺、电絮凝磁分离耦合工艺、电絮凝臭氧氧化耦合工艺(E-HOC)、电絮凝串联臭氧催化氧化工艺(EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂)、电絮凝串联电催化氧化工艺(EC+EO)、电絮凝过氧化氢耦合工艺(EC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、紫外过氧化氢耦合工艺(UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、紫外臭氧氧化耦合工艺(UV/O<sub>3</sub>)、电絮凝串联紫外臭氧氧化工艺(EC+UV/O<sub>3</sub>)、紫外过氧化氢臭氧氧化耦合工艺(UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>)、铁碳过氧化氢耦合工艺对洗衣废水中COD的去除效果,结果见图2(图中横轴的a-l依次代表上述12种工艺)。

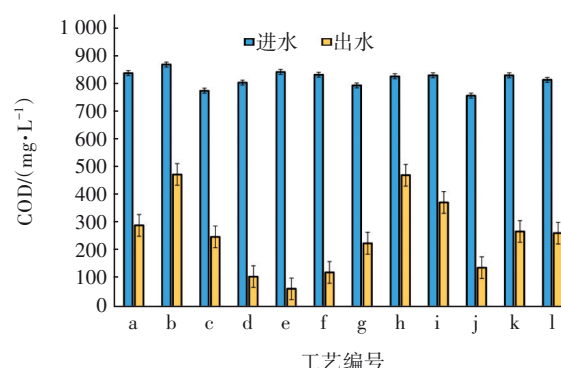


图2 不同工艺对洗衣废水中COD的去除效果

Fig.2 Removal effect of COD in laundry wastewater by different processes

从图2可以看出,以电絮凝(EC)为核心的工艺对COD的去除效果显著优于其他非电絮凝工艺,由此优先考虑以EC为核心的工艺。在相同条件下,耦合工艺体系以及电絮凝串联氧化工艺相较于单独电絮凝、单独氧化工艺对COD的去除效果更好,COD去除率提升了16.3%~47%。相较于EC工艺,E-HOC、EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂、EC+EO、EC+UV/O<sub>3</sub>工艺对COD的去除率分别提高了21.3%、27.2%、20%、16.3%,可能是由于臭氧及电催化的引入增加了体系中·OH的产生,从而促进了对有机物的去除作用,且DSA电极在电解过程中具有高电催化活性,能够产生·OH<sup>[12]</sup>,这与Heffron等人<sup>[13]</sup>的研究结果一致。臭氧、臭氧/催化剂体系在反应过程中会产生·OH、·O<sub>2</sub><sup>-</sup>以及H<sub>2</sub>O<sub>2</sub><sup>[14]</sup>,且·O<sub>2</sub><sup>-</sup>在体系中会转化为·OH,进一步强化对于COD的去除。

相较于单独O<sub>3</sub>氧化工艺,E-HOC、EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催

化剂、EC+UV/O<sub>3</sub>工艺对COD的去除率分别提高了41.1%、47%、36.1%,EC常被用作去除浊度和天然有机物的预处理工艺,通过牺牲阳极在水中原位产生混凝剂,而碳纤维作为阴极时还会产生H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,从而促进了对洗衣废水中COD的进一步去除。Bernal-Martinez等<sup>[15]</sup>研究发现,电絮凝臭氧联用工艺对工业废水中的COD和BOD<sub>5</sub>去除率可达到60%,而E-HOC工艺对COD、BOD<sub>5</sub>、色度、浊度、总大肠菌群的去除率分别可达到84%、79%、95%、96%、99%;Garcia-Morales等<sup>[16]</sup>得到了相似的结果,电絮凝与臭氧耦合工艺的协同作用提高了对色度、浊度及COD的去除效果。

因此,选择以电絮凝为核心的电凝聚臭氧氧化耦合工艺(E-HOC)、电絮凝串联电催化氧化工艺(EC+EO)、电絮凝串联臭氧催化氧化工艺(EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂)、电絮凝串联紫外臭氧氧化工艺(EC+UV/O<sub>3</sub>)作为处理洗衣废水的优选工艺。

## 2.2 洗衣废水中污染物去除效果分析

### 2.2.1 不同电流密度下的除污效果

控制臭氧流量为200 mL/min,在电絮凝阶段电流密度分别为5、10、15、20 mA/cm<sup>2</sup>的条件下,考察SS-E-HOC、C-E-HOC、EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂、EC+UV/O<sub>3</sub>、EC+EO等5种工艺对洗衣废水中COD、浊度、LAS的去除效果,结果见图3。可以看出,在仅改变电絮凝阶段电流密度的条件下,相比较而言,EC+UV/O<sub>3</sub>工艺对COD的去除效果最好,当电流密度为10 mA/cm<sup>2</sup>时COD去除率最高达到89.8%;其次是EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂和C-E-HOC工艺。对于浊度,SS-E-HOC、C-E-HOC两种工艺的去污效果最好,去除率均在90%以上。EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂、EC+UV/O<sub>3</sub>及C-E-HOC等3种工艺对LAS的去除效果更好,去除率可达到98.2%以上。

另外,在EC+EO工艺中,控制电絮凝阶段的电流密度为10 mA/cm<sup>2</sup>,改变电催化阶段的电流密度分别为5、10、15、20 mA/cm<sup>2</sup>,考察该工艺对洗衣废水中COD、浊度、LAS的去除效果。结果显示,在4种电流密度下,EC+EO工艺对COD的去除率均在80%以下;当电催化阶段电流密度为10 mA/cm<sup>2</sup>时,EC+EO工艺对浊度的去除率最高,达到90%以上;当电催化阶段的电流密度分别为10、15、20 mA/cm<sup>2</sup>时,EC+EO工艺对LAS的去除率均超过了90%。

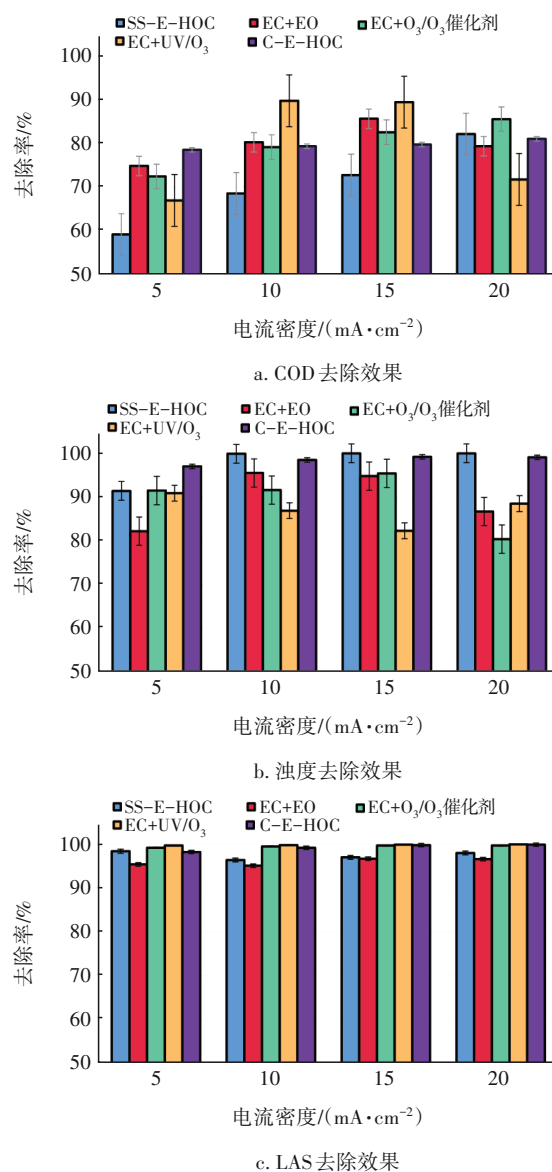


图3 不同电流密度条件下各工艺对污染物的去除效果

Fig.3 Removal effect of pollutants in various processes at different current densities

### 2.2.2 不同臭氧流量下的除污效果

控制电絮凝阶段电流密度为10 mA/cm<sup>2</sup>,在臭氧流量分别为100、200、300、400 mL/min的条件下,考察不同工艺对洗衣废水中COD、浊度、LAS的去除效果,结果见图4。可以看出,C-E-HOC和EC+UV/O<sub>3</sub>工艺对COD的去除率可达到90%以上,SS-E-HOC和C-E-HOC两种工艺对浊度的去除率最高达到100%,EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂、EC+UV/O<sub>3</sub>和C-E-HOC工艺对LAS的去除率可达到99%以上。EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂工艺对COD的去除率虽然可达到80%以上,但出水水质未达到回用标准。

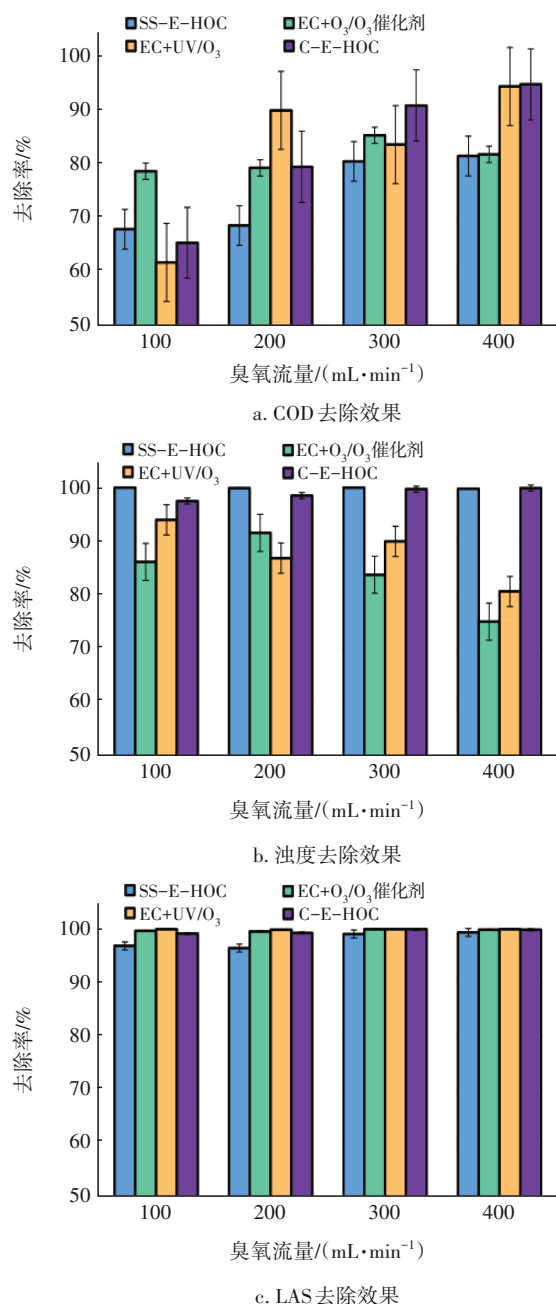


图4 不同臭氧流量条件下各工艺对污染物的去除效果

Fig.4 Removal effect of pollutants in various processes at different ozone dosage

综合考虑,最终选择电凝聚臭氧氧化耦合工艺作为洗衣废水的处理工艺,在电流密度为15 mA/cm<sup>2</sup>、臭氧流量为400 mL/min(对应臭氧投加量为69.12 mg/L)的条件下,该工艺对洗衣废水中COD、浊度及LAS的去除率分别为97.6%、99.9%及99.6%,出水水质可达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)和《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)标准,满

足回用要求。此外,该工艺的阴极是碳纤维材质极板,采用钛盐光度法测得反应10 min时H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>浓度为4.42 mg/L,证明在反应过程中产生了H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。

根据臭氧发生器、直流电源功率及反应时间等估算处理成本,见式(1)<sup>[9]</sup>, $E_{EO}$ 定义为将1 m<sup>3</sup>水中的污染物浓度降低一个数量级所需的电能(kW·h),其中, $U$ 为电压(V), $I$ 为施加电流(A), $T$ 为电解时间(h), $V$ 为反应器中的水量(m<sup>3</sup>), $C_0$ 和 $C$ 分别为初始与最终COD浓度(mg/L)。在最佳运行条件下,工艺处理能耗为86.2 kW·h/(m<sup>3</sup>·order),该技术可应用于医院、酒店、洗衣工厂的污水处理。

$$E_{EO} = \frac{U \cdot I \cdot T}{V \cdot \lg(C_0/C)} \quad (1)$$

## 2.3 动力学分析及微塑料去除特性

### 2.3.1 动力学分析

基于以上结果,在臭氧流量为400 mL/min,电流密度分别为5、10、15、20 mA/cm<sup>2</sup>的条件下,对C-E-HOC工艺去除洗衣废水中的COD和LAS进行动力学分析,反应总时间为60 min,每隔10 min取一次样,COD和LAS的去除曲线如图5所示。随着反应的进行,COD和LAS的去除率均在前30 min快速升高,在后30 min升高速率开始变慢,去除曲线变得平缓。对于COD,当电流密度为15 mA/cm<sup>2</sup>时前30 min的去除速率最快;LAS则是在电流密度为20 mA/cm<sup>2</sup>时前30 min的去除速率最快。通过拟合发现,C-E-HOC工艺对COD和LAS的去除过程符合一级反应动力学模型,如图6所示。

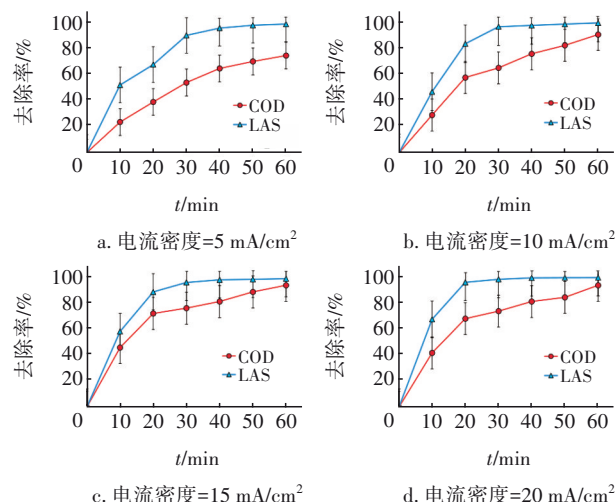


图5 C-E-HOC工艺对COD和LAS的去除曲线

Fig.5 Removal curves of COD and LAS by C-E-HOC process

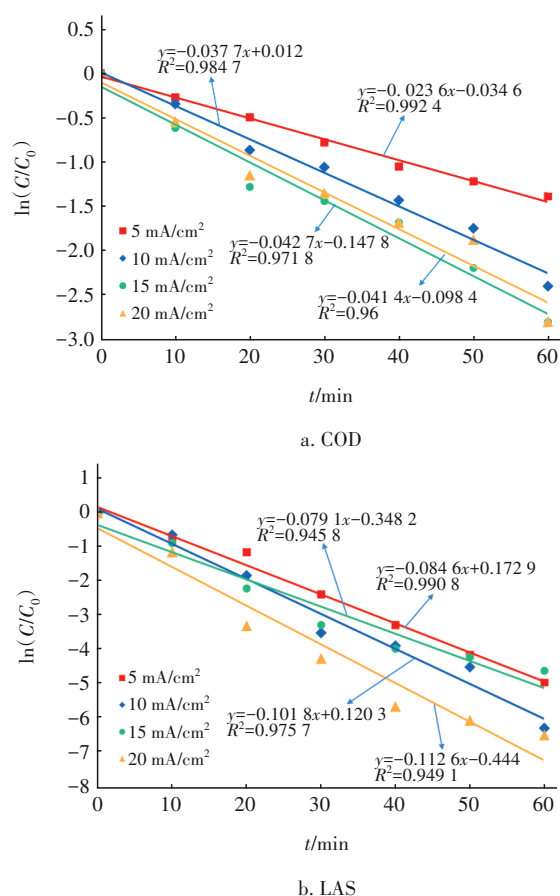


图6 C-E-HOC工艺去除COD和LAS的动力学拟合结果

Fig.6 Dynamics fitting results of COD and LAS removal by C-E-HOC process

### 2.3.2 微塑料去除特性

微塑料通常是指尺寸小于5 mm的塑料纤维、碎片和颗粒<sup>[17-18]</sup>。合成纺织品在洗涤过程中释放的微塑料被认为是海洋和污水处理厂中微塑料的主要来源<sup>[19]</sup>。在本研究中,预估在家庭洗衣过程中,每100 L水会向环境中释放 $(40\sim150)\times10^4$ 个微塑料。C-E-HOC工艺可以高效去除洗衣废水中的微塑料,在电流密度为15 mA/cm<sup>2</sup>、臭氧流量为400 mL/min的条件下,C-E-HOC工艺对微塑料的去除率可达到94.2%。推断C-E-HOC工艺对微塑料的高效去除主要得益于电絮凝,铝阳极在反应过程中可以原位产生铝盐混凝剂,通过电性中和、吸附架桥、网捕卷扫等作用,形成絮体沉淀来去除水体中的微塑料。

## 3 结论

① 在洗衣废水处理工艺的初步筛选中,通过对比各工艺对COD的去除效果,确定了以电絮凝(EC)为核心的电凝聚臭氧氧化耦合工艺(E-HOC)、

电絮凝串联电催化氧化工艺(EC+EO)、电絮凝串联臭氧催化氧化工艺(EC+O<sub>3</sub>/O<sub>3</sub>催化剂)、电絮凝串联紫外臭氧氧化工艺(EC+UV/O<sub>3</sub>)作为优选工艺。

② 针对本研究中的洗衣废水,最终选择了以碳纤维极板为阴极、铝极板为阳极的电凝聚臭氧氧化耦合工艺(C-E-HOC)。在电流密度为15 mA/cm<sup>2</sup>、臭氧流量为400 mL/min条件下,C-E-HOC工艺对洗衣废水中COD、浊度及LAS的去除率分别为97.6%、99.9%及99.6%,出水水质能够达到《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)和《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)标准。

③ C-E-HOC工艺去除COD和LAS的过程遵循一级反应动力学模型。在本研究中,预估在家庭机洗衣物时,每100 L水向环境中排放的微塑料纤维数量约为 $(40\sim150)\times10^4$ 个。C-E-HOC工艺在最优条件下对洗衣废水中微塑料的去除率可以达到94.2%。

## 参考文献:

- [1] 马云. 电絮凝-臭氧处理回用洗衣废水的研究[D]. 镇江:江苏大学, 2020.  
MA Yun. Study on Treatment and Reuse of Laundry Wastewater by Electro Flocculation Ozone [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020 (in Chinese).
- [2] DERESZEWSKA A, CYTAWA S, TOMCZAK-WANDZEL R, *et al.* The effect of anionic surfactant concentration on activated sludge condition and phosphate release in biological treatment plant [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2015, 24(1): 83-91.
- [3] BERING S, MAZUR J, TARNOWSKI K, *et al.* The application of moving bed bio-reactor (MBBR) in commercial laundry waste water treatment [J]. Science of the Total Environment, 2018, 627: 1638-1643.
- [4] KOGUT I, SZWAST M, HUSSY S, *et al.* Evaluation of wastewater reuse in commercial laundries: a pilot field study [J]. Desalination and Water Treatment, 2021, 214: 39-48.
- [5] GARCIA A B E, SZYMANSKI K, MOZIA S, *et al.* Treatment of laundry wastewater by solar photo-Fenton process at pilot plant scale [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(7): 8576-8584.
- [6] ZOTESSO J P, COSSICH E S, JANEIRO V, *et al.*

- Treatment of hospital laundry wastewater by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(7): 6278–6287.
- [7] JIN X, LIU Y G, WANG Y, *et al.* Towards a comparison between the hybrid ozonation-coagulation (HOC) process using Al- and Fe-based coagulants: performance and mechanism [J]. *Chemosphere*, 2020, 253: 126625.
- [8] 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 等. 臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 [J]. *环境科学*, 2017, 38(2): 640–646.
- HOU Rui, JIN Xin, JIN Pengkang, *et al.* Characteristics and mechanism of ozone coagulation coupling process for advanced wastewater treatment [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2): 640–646 (in Chinese).
- [9] JIN X, XIE X Y, ZHANG S H, *et al.* Insights into the electro-hybrid ozonation-coagulation process—significance of connection configurations and electrode types [J]. *Water Research*, 2021, 204: 117600.
- [10] 谢新月, 许建军, 张少华, 等. 电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 [J]. *环境科学*, 2021, 42(2): 883–890.
- XIE Xinyue, XU Jianjun, ZHANG Shaohua, *et al.* Characteristics and removal mechanism of an electro-hybrid ozonation-coagulation system in the treatment of organic matters [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 883–890 (in Chinese).
- [11] TIAN Y J, CHEN Z, ZHANG J Y, *et al.* An innovative evaluation method based on polymer mass detection to evaluate the contribution of microfibers from laundry process to municipal wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 407: 124861.
- [12] 丁海洋, 冯玉杰, 吕江维, 等. 钛基二氧化锡电极电解过程中羟基自由基检测及电催化机理 [J]. *分析化学*, 2007, 35(10): 1395–1399.
- DING Haiyang, FENG Yujie, LÜ Jiangwei, *et al.* Detection of hydroxyl radicals during electrolysis of Ti/SnO<sub>2</sub> electrode and analysis of the electrocatalytic mechanism [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2007, 35(10): 1395–1399 (in Chinese).
- [13] HEFFRON J, RYAN D R, MAYER B K. Sequential electrocoagulation-electrooxidation for virus mitigation in drinking water [J]. *Water Research*, 2019, 160: 435–444.
- [14] WANG J, LI Y, CHEN G, *et al.* Catalytic oxidation mechanism of organics degradation by ozone in high salt wastewater of coal chemical industry [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(1): 493–502.
- [15] BERNAL-MARTINEZ L A, BARRERA-DIAZ C, SOLIS-MORELOS C, *et al.* Synergy of electrochemical and ozonation processes in industrial wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 165(1): 71–77.
- [16] GARCIA-MORALES M A, ROA-MORALES G, BARRERA-DIAZ C, *et al.* Integrated advanced oxidation process (ozonation) and electrocoagulation treatments for dye removal in denim effluents [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2013, 8(6): 8752–8763.
- [17] SUN J, DAI X H, WANG Q L, *et al.* Microplastics in wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal [J]. *Water Research*, 2019, 152: 21–37.
- [18] 吴君怡, 张燕, 李宁远, 等. 中国水环境微塑料污染及水处理工艺对其去除效果 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(16): 17–23.
- WU Junyi, ZHANG Yan, LI Ningyuan, *et al.* Micro plastic pollution of water environment in China and its removal effect by water treatment process [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(16): 17–23 (in Chinese).
- [19] LIU J L, LIANG J Y, DING J N, *et al.* Microfiber pollution: an ongoing major environmental issue related to the sustainable development of textile and clothing industry [J]. *Environment Development and Sustainability*, 2021, 23(8): 11240–11256.

作者简介: 罗嘉豪(1996–), 男, 陕西铜川人, 硕士研究生, 主要研究方向为水与废水的深度处理技术。

E-mail: 1242625283@qq.com

收稿日期: 2022-08-16

修回日期: 2023-01-05

(编辑: 刘贵春)