

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180343

数字出版日期: 2019-12-18; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20191218.1627.002.html>

新型微电解材料预处理退浆废水研究

李桂菊^{1,2}, 郭丽芹¹, 贾蕊宁¹, 谢婧怡¹, 李 丽¹

(1. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 天津市海洋环境保护与修复技术工程中心, 天津 300457)

摘要: 使用铁铝碳为基础材料制成新型微电解材料, 以聚乙烯醇(PVA)模拟废水为研究对象, 筛选出最佳处理工艺参数为: 在曝气条件下, 反应时间 60 min、进水 pH 为 5、材料一次投加量 465 g/L。通过处理实际退浆废水, 比较了此新型微电解材料与市售产品的性能, 新型微电解材料出水的 COD_{Cr} 和 PVA 去除率分别为 48.7% 和 36.7%, $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 为 0.32; 而市售材料出水的 COD_{Cr} 和 PVA 去除率仅为 15.3% 和 11.7%, $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 为 0.19。采用混凝和微电解技术预处理实际退浆废水, 再联合活性污泥法处理后, 最终出水 COD_{Cr} 去除率为 85.4%, PVA 去除率为 66.2%。

关键词: 新型微电解材料; 聚乙烯醇; 退浆废水; 可生化性

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2020)02-0051-06

Pretreatment of Desizing Wastewater with a Novel Micro-electrolytic Material

LI Guiju^{1,2}, GUO Liqin¹, JIA Ruining¹, XIE Jingyi¹, LI Li¹

(1. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Marine Environmental Protection and Rehabilitation Engineering Center, Tianjin 300457, China)

Abstract: A new type of micro-electrolytic material based on iron, aluminum and carbon was employed in this research. Taking polyvinyl alcohol simulated wastewater as the research subject, optimum processing parameters were discovered as follows: under the condition of aeration, the reaction time was 60 min, the wastewater pH value was 5, and the material dosage was 465 g/L. Compared with commercially available products, the removal rates of COD_{Cr} and PVA by the novel micro-electrolytic material were 48.7% and 36.7%, respectively, and the $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ ratio was 0.32, while the effluent removal rates of COD_{Cr} and PVA by the commercially available micro-electrolytic material were only 15.3% and 11.7%, respectively, and the $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ ratio was only 0.19. Coagulation and micro-electrolysis were employed as pretreatment methods for desizing wastewater. Combined with the activated sludge process, the effluent removal rates of COD_{Cr} and PVA were 85.4% and 66.2%, respectively.

Key words: novel micro-electrolytic material; polyvinyl alcohol; desizing wastewater; biodegradability

微电解法又称内电解法、零价铁法, 由于该技术具有适用范围广、处理效果好、使用寿命长、成本低廉等优点而广泛应用于印染废水的处理中^[1-4]。近年来, 以铁屑和活性炭为主要原料, 以膨润土为黏结剂的球状微电解材料的应用, 既解决了传统铁碳床铁屑板结的问题, 又达到去除废水的有机物、降低废水的生物毒性和提高废水的可生化性的目的^[5-6]。但是,

目前市售的微电解材料仍存在 pH 适应范围较窄, 处理后废水可生化性较低的问题。

聚乙烯醇(PVA)作为上浆剂广泛应用于纺织印染行业, 使得印染退浆废水含有大量的 PVA。PVA 是典型的难生物降解物, 单独采用生物手段处理往往存在成本高、工艺复杂、特种微生物筛选繁杂困难等问题^[7-11]。

收稿日期: 2018-10-05; 修回日期: 2018-12-14

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201810057007)

作者简介: 李桂菊(1969—), 女, 黑龙江人, 教授, liguij@tust.edu.cn

杨晓明^[12]在铁碳微电解处理印染废水研究中发现,酸性条件下微电解处理效果较好,而在 pH 大于 5 之后 COD_{Cr} 去除率降低至 30% 以下. 李虹^[13]的研究表明通过添加两性金属可拓宽微电解材料的 pH 适用范围,提高废水的可生化性. 本文基于前人对微电解材料的研究^[14],开发出一种处理能力高于市售微电解材料、pH 适应范围更广的新型微电解材料,利用该材料与传统铁碳微电解材料预处理实际 PVA 废水,比较二者对污染组分的去除效果以及对可生化性的提高程度,确定其工艺参数,为 PVA 废水处理提供一种更加经济适用的预处理工艺.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验采用的微电解材料为本实验室自制的改性微电解材料. 将铁粉、铝粉、活性炭、膨润土按照质量比 6 : 3 : 3 : 5 混合均匀,加入适量水使其呈黏稠状,用造粒机造粒成均匀的直径为 10 mm 的球体. 将其置于高温管式炉内,在流动的氮气保护下,于 800 °C 焙烧 3 h,即得改性微电解材料. 经分析测定,其平均孔径 5.463 nm,总孔容 0.09 cm³/g,比表面积 65.686 m²/g.

PVA 模拟废水由 0.14 g/L 的蔗糖、0.13 g/L 的 NH₄Cl 和 0.3 g/L 的 PVA 配制而成. PVA 模拟废水与实际退浆废水(来源于浙江某印染厂)的具体水质指标见表 1.

表 1 PVA 模拟废水及实际退浆废水水质指标
Tab.1 Quality index of the PVA simulated wastewater and actual desizing wastewater

| 水质指标 | PVA 模拟废水 | 实际退浆废水 |
|--|----------|--------|
| COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹) | 683.2 | 5 315 |
| BOD ₅ /(mg·L ⁻¹) | 120 | 517 |
| BOD ₅ /COD _{Cr} | 0.18 | 0.10 |
| pH | 8.2 | 8.2 |
| PVA 质量浓度/(g·L ⁻¹) | 0.3 | 0.68 |

1.2 实验方法

1.2.1 新型微电解材料工艺参数筛选

先用 PVA 模拟废水将微电解材料充分浸泡至吸附饱和. 量取质量浓度为 0.3 g/L 的 PVA 模拟废水 100 mL 作为处理对象. 通过单因素实验,分别讨论材料一次投加量、反应初始 pH 以及反应时间对处理效果的影响. 测定 PVA 含量、COD_{Cr}、BOD₅,并计算 BOD₅/COD_{Cr},确定最佳工艺条件. 本文所用实验装

置如图 1 所示.

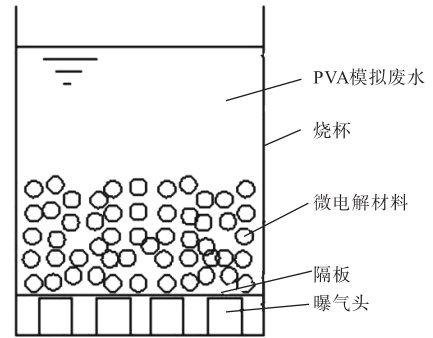


图 1 微电解实验装置示意图

Fig. 1 Schema of micro-electrolytic experimental device

1.2.2 微电解预处理实际退浆废水实验

实际退浆废水中有大量的固体悬浮物,在微电解预处理前,先对废水进行混凝处理. 向实际退浆废水中加入废水体积 2% 的质量分数为 3% 的聚合氯化铝 (PAC) 溶液,用搅拌机以 150 r/min 快转 2 min,再加入废水体积 1% 的质量分数 1% 的聚丙烯酰胺 (PAM) 溶液,再以 50 r/min 慢转 10 min,反应结束后沉淀一段时间,取上清液. 在已筛选出的最佳工艺参数下,使用自制微电解材料与市售传统微电解材料(来源于山东某环保公司)对混凝后的出水进行微电解预处理,测定 PVA 含量、COD_{Cr} 和 BOD₅. 预处理后的水经过 pH 调节后进入小试生物处理装置(生化反应池),并接种来自实验室 SBR 装置中的污泥,好氧曝气反应 48 h,进行两日活性污泥曝气实验. 每隔一段反应时间,沉淀后取上清液测定其 PVA 含量、COD_{Cr}. 以 COD_{Cr} 去除率和 PVA 去除率为主要指标,考察两种材料对退浆废水的处理效果. 微电解预处理实际退浆废水工艺流程如图 2 所示.

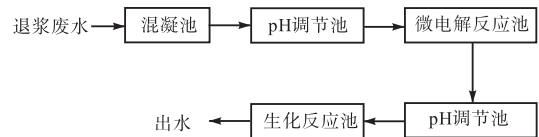


图 2 微电解预处理实际退浆废水工艺流程

Fig. 2 Microelectrolytic pretreatment process of actual desizing wastewater

1.3 检测方法

COD_{Cr} 测定采用 HJ/T 399—2007 《水质化学需氧量的测定快速消解分光光度法》; BOD₅ 使用德国 WTW 公司 OxiTopIS6/IS12 型 BOD 测定仪测定; PVA 的测定目前国家没有明确的规范,查阅文献后

采用标准曲线法测定^[15].

2 结果与讨论

2.1 新型微电解材料降解 PVA 模拟废水最佳工艺参数筛选

2.1.1 一次投加量

微电解材料一次投加量的增加会提高微电解材料的反应比表面积,这是影响有机物降解效率的重要因素之一.因此在曝气条件下,反应时间为 60 min、初始 pH 为 5 时,将材料的用量控制在 301、384、465、543、619 g/L,考察微电解材料在不同材料用量条件下对 COD_{Cr} 和 PVA 去除率的影响,结果如图 3 所示.

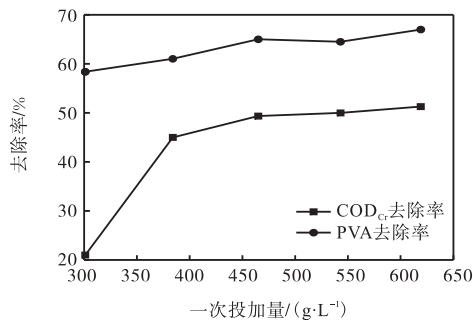


图 3 微电解材料一次投加量对污染物去除率的影响

Fig.3 Effect of micro-electrolytic material dosage on pollutant removal rate

由图 3 可知:材料一次投加量从 301 g/L 增至 619 g/L 时,PVA 去除率提高不显著,但是均可达 58% 以上.其中一次投加量由 465 g/L 增加至 543 g/L 时,PVA 的去除率从 65.1% 略微减少到 64.5%,考虑到测定过程存在人为误差等因素,两者差距可以忽略不计.

相比于 PVA 的去除率随材料一次投加量无显著性的规律变化,当材料一次投加量从 301 g/L 增至 384 g/L 时,COD_{Cr} 的去除率随材料一次投加量的增加呈显著的上升趋势.这是由于 PVA 模拟废水与微电解材料接触的表面积随着材料一次投加量的提高而增加,产生了更多的微观原电池,提高了微电解材料对于污染物的降解效果.当材料一次投加量增至 465 g/L 时,COD_{Cr} 去除率达到 49.3%,之后再继续增加投加量,COD_{Cr} 去除率增长缓慢,在材料一次投加量为 619 g/L 时,COD_{Cr} 去除率为 51.3%.

材料一次投加量的多少直接关系到经济成本,用量过大会加速板结,增加运行成本.从去除效果与经

济效益两个方面来看,最终确定 465 g/L 为最佳材料一次投加量.

2.1.2 反应初始 pH

反应体系的 pH 是影响自制微电解材料分解速率的重要因素之一.在曝气条件下,反应时间为 60 min、微电解材料投加量为 465 g/L 时,将反应体系初始 pH 控制在 3、5、7、9、11,考察自制微电解材料在不同 pH 条件下对 COD_{Cr} 和 PVA 去除率的影响,结果如图 4 所示.

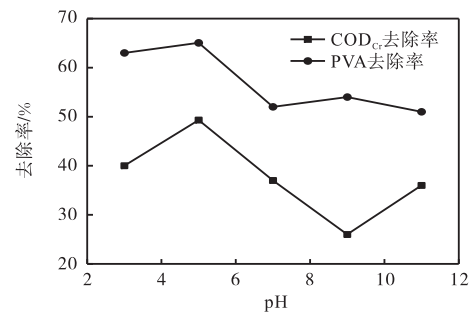


图 4 微电解反应初始 pH 对污染物去除率的影响

Fig.4 Effect of initial pH of micro-electrolytic reaction on pollutant removal rate

由图 4 可知:自制的微电解材料在 pH 为 3 和 5 的条件下经过 60 min 的曝气反应后,PVA 去除率均可达到 60% 以上,COD_{Cr} 去除率可达 40% 以上.与传统微电解填料只能在酸性条件下才能使用相比,该材料在 pH 为 3、5、7 和 11 均可应用,即酸性条件和碱性条件下,反应效果均较好.酸性条件下,金属铝和铁的还原作用及置换反应所产生的原子态[H]具有高的化学活性,它能改变废水中许多有机物的结构和特性,使有机物发生断链、开环,促进了微电解反应的进行,其反应方程式为 $\text{Fe} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2[\text{H}]$, $\text{Al} + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3[\text{H}]$, $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2[\text{H}]$.碱性条件下,由于铝是两性物质,同样会发生化学还原反应生成原子态[H],其反应方程式为 $\text{Al} + \text{OH}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{AlO}_2^- + 3[\text{H}]$;同时大量存在的 OH^- 在电化学反应中也会生成 $\cdot\text{OH}$,使溶液中 $\cdot\text{OH}$ 增多,因此 pH 升高到 11 时,COD_{Cr} 的去除率开始回升.

在初始 pH 为 7、9 和 11 的中性和碱性废水中,经过 60 min 的曝气微电解,PVA 模拟废水中 PVA 的去除率可达 50% 以上,在中性和碱性废水中也有较好的污染物去除率,拓宽了微电解材料的 pH 适用范围,提高了 PVA 废水的可生化性.

pH = 5 时,PVA 和 COD_{Cr} 的去除率分别为 65.1%、49.3%,均达到最大,因此选取 5 为最佳 pH.

2.1.3 反应时间

在曝气条件下,反应初始 pH 为 5、微电解材料投加量为 465 g/L 时,考察反应时间对 COD_{Cr} 和 PVA 去除率的影响,结果如图 5 所示. 由图 5 可知: 90 min 内 COD_{Cr} 和 PVA 的去除率整体呈现出增加的趋势,这是因为铁和碳之间、铝和碳之间形成的宏观电池和微观电池能够持续产生较强的氧化还原作用,将难断链或开环的有机物变成了易降解的小分子物质^[16]. 随着处理时间的延长,废水中 COD_{Cr} 的去除率增加程度减小,趋于平稳,此研究结论与蒋霞等^[17]使用铁碳微电解材料处理印染废水的实验结果吻合. 这是由于废水中污染物浓度不断下降,使得反应速率减小.

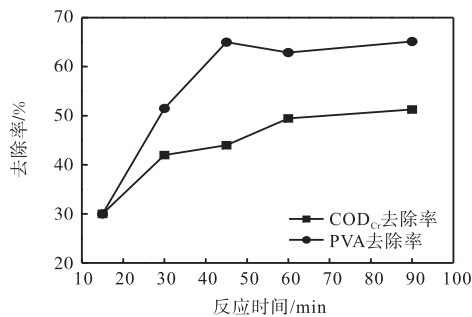


图 5 微电解反应时间对污染物去除率的影响

Fig. 5 Effect of micro-electrolytic reaction time on pollutant removal rate

在反应时间为 45 min 与 60 min 时 PVA 的去除率出现波动,是因为 PVA 模拟废水的初始 PVA 质量浓度较低,反应 45 min 时 PVA 质量浓度为 0.105 g/L, 60 min 时为 0.111 g/L,二者相差不大,在误差允许范围内. 在反应初期,由于原子态[H]和 Fe²⁺的作用使 PVA 发生开环、断链,PVA 质量浓度降低;PVA 断链后中间产物仍能以 COD 的形式被检测出来,致使 COD_{Cr} 与 PVA 的去除率不同步. 在反应 60 min 后 COD_{Cr} 与 PVA 的去除率基本达到稳定,分别稳定在 49.3% 和 65.1% 以上,综合考虑两个指标将后续稳定反应的时间设在 60 min.

综上所述,微电解的最佳工艺参数为:曝气条件下,微电解材料一次投加量 465 g/L,反应初始 pH 为 5,反应时间为 60 min. 在最佳实验条件下,得到自制微电解材料对 PVA 模拟废水的 COD_{Cr} 与 PVA 的去除率分别为 49.3% 和 65.1%. 在此实验基础上,测定了水中 Fe³⁺ 和 Al³⁺ 的含量分别为 0.03‰ 和 0.02‰,溶出的 Fe³⁺ 和 Al³⁺ 在后期混凝处理实验中可以起到絮凝的作用.

2.2 微电解材料预处理实际退浆废水及后续生物处理

2.2.1 不同微电解材料对实际退浆废水生化性的影响

废水的可生化性是指废水中的有机物被生物降解的难易水平,因此又称为生物降解性. 废水的可生化性直接关系到该种废水能否直接采用生物方法进行处理以及其运行稳定的难易程度,一般用 BOD₅/COD_{Cr} 进行表征, BOD₅/COD_{Cr} 越大可生化性越好.

在已筛选出的微电解最佳工艺参数下,对混凝后的实际退浆废水进行微电解处理,处理效果见表 2. 由表 2 可知:自制微电解材料处理后,实际退浆废水的 BOD₅/COD_{Cr} 为 0.32 明显优于市售材料的 0.19. 同时实验表明,自制微电解材料出水的 COD_{Cr} 和 PVA 去除率分别为 48.7% 和 36.7%,而传统微电解材料的仅为 15.3% 和 11.7%. 这是因为自制微电解材料所使用活性炭粉末、膨润土以及金属铝与传统的微电解材料相比,比表面积更大,吸附杂质的有效面积也更大^[18],对污染物的去除效果也相对更好;而且,铝的金属性比铁活泼,在原电池反应中,加强了微电解材料降解性能和适应能力.

表 2 不同微电解材料处理实际退浆废水水质对比

Tab. 2 Comparison of actual desizing wastewater quality after being treated with different micro-electrolytic materials

| 微电解材料 | 去除率/% | | BOD ₅ /COD _{Cr} |
|---------|-------|-------------------|-------------------------------------|
| | PVA | COD _{Cr} | |
| 自制微电解材料 | 36.7 | 48.7 | 0.32 |
| 市售微电解材料 | 11.7 | 15.3 | 0.19 |

2.2.2 不同微电解材料对组合工艺处理实际退浆废水效果影响

以实际退浆废水为研究对象,利用自制的新型微电解材料与市售材料进行预处理实验,由表 3 可知:实际退浆废水经混凝处理后 COD_{Cr} 由 5 315 mg/L 降至 2 981 mg/L,去除率为 43.9%,同时 PVC 也得到少量去除. 混凝出水进一步进行微电解反应,采用自制微电解材料出水 PVA 质量浓度和 COD_{Cr} 分别降至 0.38 g/L 和 1 529 mg/L,而从市面购置的材料处理出水 PVA 质量浓度和 COD_{Cr} 仅降至 0.53 g/L 和 2 525 mg/L. 通过对表 2 中数据进行计算可知,在微电解处理后废水的两日生化处理实验阶段,自制微电解材料的 COD_{Cr} 去除率为 49.2% (从 1 529 mg/L 下降到 776 mg/L),高于市售材料的 27.2% (从 2 525 mg/L 下降到 1 837 mg/L),此结果与表 2 中自制微电解材料 BOD₅/COD_{Cr} 更高的实验结果相吻合,实现了提高生化性的目的,完全可以用于后续的好氧生物工

艺. 在用新型微电解材料处理真实退浆废水的混凝-微电解-生化处理实验中,最终 COD_{Cr} 去除率能够达到 85.4%, PVA 的去除率达到 66.2%. 综上所述,相

比于传统市售材料,自制微电解材料对污染物的降解能力更优,适应性更强,提高可生化性的作用更显著,对退浆废水预处理的效果更佳.

表 3 组合工艺处理实际退浆废水后出水水质

Tab. 3 Effluent quality of actual desizing wastewater after combined treatment

| 微电解材料 | 水样 | COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹) | COD _{Cr} 去除率/% | ρ(PVA)/(g·L ⁻¹) | PVA 去除率/% |
|---------|--------|--|-------------------------|-----------------------------|-----------|
| 自制微电解材料 | 实际退浆废水 | 5 315 | — | 0.68 | — |
| | 混凝池出水 | 2 981 | 43.9 | 0.60 | 11.8 |
| | 微电解池出水 | 1 529 | 71.2 | 0.38 | 44.1 |
| | 一日生化出水 | 985 | 81.5 | 0.30 | 55.9 |
| | 两日生化出水 | 776 | 85.4 | 0.23 | 66.2 |
| 市售微电解材料 | 实际退浆废水 | 5 315 | — | 0.68 | — |
| | 混凝池出水 | 2 981 | 43.9 | 0.60 | 11.8 |
| | 微电解池出水 | 2 525 | 52.5 | 0.53 | 22.1 |
| | 一日生化出水 | 2 414 | 54.6 | 0.51 | 25.0 |
| | 两日生化出水 | 1 837 | 65.4 | 0.38 | 44.1 |

3 结 论

(1) 与传统微电解填料只能在酸性条件下使用相比,自制微电解材料在初始中性和碱性废水中对 PVA 模拟废水都有一定的去除效果. 自制微电解材料处理 PVA 模拟废水的最优工艺条件为:在曝气条件下,反应时间为 60 min、进水 pH 为 5、材料一次投加量为 465 g/L.

(2) 使用新型材料微电解处理实际退浆废水,能够改善实际退浆废水的可生化性,使 BOD₅/COD_{Cr} 值增加至 0.32,达到了预处理提高可生化性的目的.

(3) 使用混凝法与自制微电解材料结合对实际退浆废水预处理,并联合后续活性污泥法的小试实验结果表明:此种组合工艺对实际退浆废水具有很好的处理效果,最终 COD_{Cr} 去除率达到 85.4%, PVA 去除率达到 66.2%.

参考文献:

- [1] 郑智波,陈治鑫. 新型铁碳微电解填料的制备及其在印染废水的处理研究[J]. 广东化工,2018,45(2):46-47.
- [2] 张波,戚永洁,蒋素英,等. 铁碳微电解-生物膜法-高级氧化工艺处理印染废水中试研究[J]. 环境工程,2018,36(3):44-48.
- [3] Liang S, Zhang B, Shi J, et al. Improved decolorization of dye wastewater in an electrochemical system powered by microbial fuel cells and intensified by micro-electrolysis[J]. Bioelectrochemistry, 2018, 124: 112-118.
- [4] Wang X, Gong X, Zhang Q, et al. Degradation mechanism of Direct Pink 12 B treated by iron-carbon micro-electrolysis and Fenton reaction[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(S1): 63-68.
- [5] 周璇,王灿,季民,等. 新型水处理铁炭微电解材料的制备及应用[J]. 工业水处理,2012,32(3):23-26.
- [6] Chen R H, Chai L Y, Wang Y Y, et al. Degradation of organic wastewater containing Cu-EDTA by Fe-C micro-electrolysis[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(4): 983-990.
- [7] 陈惠芳,武斌. 印染行业含 PVA 退浆废水处理技术探讨[J]. 广东化工,2018,45(12):195-199.
- [8] 温沁雪,王进,郑明明,等. 印染废水深度处理技术的研究进展及发展趋势[J]. 化工环保,2015,35(4):363-369.
- [9] 李阳阳,张润强,王亮,等. 印染废水铝炭微电解连续处理工艺研究[J]. 广东化工,2016,43(24):108-109.
- [10] 杨华,涂军桥,王燕. Fe/C 微电解耦合 H₂O₂ 氧化预处理印染废水[J]. 长江大学学报:自科版,2018,15(5):61-64.
- [11] Su X H, Ling W L, Teng T T, et al. Combination and hybridisation of treatments in dye wastewater treatment: A review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(3): 3618-3631.
- [12] 杨晓明. 电解及微电解法对印染废水的处理研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [13] 李虹. 三元微电解填料催化降解染料生产废水研究[J]. 环境保护与循环经济,2018(1):31-34.
- [14] 李赞,魏胜军,高彦龙,等. 铁屑内电解技术在抗生素废水预处理技术上的应用研究[J]. 绿色科技,2013(5):198-199.

- [15] 崔双科, 王志刚, 强雪妮, 等. 改进的分光光度法测定退浆废水中的 PVA 含量[J]. 西安工程大学学报, 2014, 28(1): 68-71.
- [16] Zhu X Y, Chen X J, Yang Z M, et al. Investigating the influences of electrode material property on degradation behavior of organic wastewaters by iron-carbon micro-electrolysis[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 338: 46-54.
- [17] 蒋霞, 杨智迪, 徐岗, 等. 印染废水的铁碳微电解预处理工艺[J]. 印染, 2015(19): 38-41.
- [18] 曹立伟, 张淑娟, 张有智, 等. 微电解填料的研究进展[J]. 现代化工, 2015, 35(6): 13-17.

责任编辑: 周建军

(上接第 44 页)

- Fischer-Tropsch (F-T) wastewater by novel anaerobic biofilm system with scrap zero valent iron (SZVI) assisted[J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 117: 66-76.
- [8] 郝子兴, 杨文玲. 催化臭氧化处理抗生素废水催化剂的制备[J]. 水处理技术, 2018, 44(3): 39-44.
- [9] 杨霞珍, 刘化章, 唐浩东, 等. Fe、Co 基费托合成催化剂助剂研究进展[J]. 化工进展, 2006, 25(8): 867-870.
- [10] 党楠楠, 蔡会武, 朱金萌, 等. 半焦催化臭氧氧化模拟酸性品红染料废水[J]. 水处理技术, 2013, 39(7): 39-41.
- [11] 孙亚茹, 黄远星. 载锰污泥活性炭催化臭氧氧化草酸废水的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 101-107.
- [12] 杨郭, 曾凡炎, 王淑静, 等. CeO₂-活性炭催化臭氧化降解水中草酸的研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(8): 55-59.
- [13] Von G U. Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation[J]. Water Research, 2003, 37(7): 1443-1467.
- [14] 周午阳, 张朝升, 孙志民, 等. Cu²⁺助芬顿法处理高浓度邻苯二甲酸二甲酯废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(7): 2789-2794.
- [15] Zhao L, Ma J, Sun Z, et al. Mechanism of heterogeneous catalytic ozonation of nitrobenzene in aqueous solution with modified ceramic honeycomb[J]. Applied Catalysis B Environmental, 2009, 89(3): 326-334.
- [16] 马莹莹, 吴跃辉, 李锦卫, 等. 镀铜废水中 Cu²⁺-H₂O₂ 体系氧化降解硝基苯[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 4775-4782.

责任编辑: 周建军

(上接第 50 页)

- 京: 科学出版社, 2006.
- [21] 傅建顺, 周展云. 含金矿物的氰化浸取动力学[J]. 华东理工大学学报, 1990(2): 145-151.
- [22] 李浩然, 冯雅丽, 罗小兵, 等. 湿法浸出粘土矿中钒的动力学[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(6): 1181-1184.
- [23] Tian Jun, Yin Jingqun, Chi Ruan, et al. Kinetics on leaching rare earth from the weathered crust elution-deposited rare earth ores with ammonium sulfate solution[J]. Hydrometallurgy, 2010, 101(3/4): 166-170.

责任编辑: 周建军