

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.016

强化微电解-水解酸化-SBR 处理造纸废水的效果

李长海

(滨州学院山东省工业污水资源化工程技术研究中心, 山东 滨州 256603)

摘要: 研究采用混凝、强化微电解、水解酸化和 SBR 组合技术处理造纸废水的效果。结果表明, 废水经混凝处理、 H_2O_2/MnO_2 /微电解处理后, 废水 COD、SS、 NH_3-N 、TP、BOD 的去除率分别为 88.23%、98.47%、86.78%、98.68% 和 82.56%, 废水的可生化性由 0.32 提高到 0.42; 经水解酸化和 SBR 处理后, 出水中 COD 平均质量浓度为 85 mg/L, SS 质量浓度为 0 mg/L, NH_3-N 平均质量浓度为 1.42 mg/L, TP 平均质量浓度为 0.1 mg/L, BOD 平均质量浓度为 30 mg/L。工程连续运行 15d, 进水中 COD 平均质量浓度为 5865 mg/L, 出水中 COD 平均质量浓度为 85 mg/L, COD 总去除率为 98.55%, 出水达到废水一级排放要求。

关键词: 造纸废水; 微电解; 水解酸化; SBR

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2016)04-0100-05

Treatment of papermaking wastewater with intensified micro-electrolysis-hydrolysis acidification-SBR technology

LI Changhai

(Engineering Research Center for Industrial Wastewater Reclamation of Shandong Province, Binzhou University, Binzhou 256603, China)

Abstract: The treatment of papermaking wastewater with combined technologies of coagulation, and intensified micro-electrolysis-hydrolysis acidification-SBR was studied. The results show that the removal rates of COD, SS, ammonia nitrogen, total phosphorous, and BOD were 88.23%, 98.47%, 86.78%, 98.68%, and 82.56%, respectively, and the biodegradability of wastewater increased from 0.32 to 0.42 with coagulation and H_2O_2/MnO_2 /micro-electrolysis. Treatment with the hydrolysis acidification-SBR process generated average concentrations of COD, SS, ammonia nitrogen, total phosphorous, and BOD in the effluent water of 85 mg/L, 0 mg/L, 1.42 mg/L, 0.1 mg/L, and 30 mg/L, respectively. Fifteen days after the treatment, the average concentration of COD was 5865 mg/L in the influent water and 85 mg/L in the effluent water, and the total removal rate of COD was 98.55%. The effluent water met the grade I standard for wastewater discharge.

Key words: papermaking wastewater; micro-electrolysis; hydrolysis acidification; SBR

废纸浆造纸废水中含有细微纤维、树脂、染料、化学药品等污染物, 废水中 COD、BOD、色度等污染指标较高, 现有处理技术主要有物化法、生化法和组合技术处理法等^[1-3]。笔者在前人研究基础上, 综合微电解技术和序批式活性污泥法(SBR)在工业

废水处理方面的优势^[4-18], 采用强化微电解和强化生化法组合技术处理造纸废水, 并开展混凝、 H_2O_2/MnO_2 强化微电解、水解酸化和 SBR 组合技术处理造纸废水的效果研究, 以确定工艺路线和运行参数, 为实际工程应用提供依据。

基金项目: 山东科技发展计划资助项目(2011GSF11713)

作者简介: 李长海(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事工业污水资源化技术研究。E-mail: lichanghai2000@163.com

1 实验部分

1.1 实验材料

实验所用试剂均为分析纯。废铁屑为机械加工废料,粒径 5~8 mm,使用前,先用 10% 的氢氧化钠溶液浸泡 30 min,去除铁屑表面油污,再用 5% 的盐酸溶液浸泡 30 min,去除铁屑表面氧化物,进行活化处理,最后用自来水冲洗干净^[8]。活性炭为上海国药集团生产,粒径 3~5 mm,使用前用废水充分浸泡,以消除其吸附作用产生的干扰。

实验用水取自山东某纸业有限公司再生造纸废水。该废水经格栅、调节池和初沉池处理后,水质情况为:COD 平均质量浓度为 5 865 mg/L;SS 平均质量浓度为 1 259 mg/L;pH 值平均为 7.0;NH₃-N 质量浓度平均为 30.36 mg/L;TP 质量浓度平均为 9.23 mg/L;BOD 质量浓度平均为 1 841 mg/L;BOD 与 COD 质量浓度之比为 0.31^[19]。

1.2 实验方法

废水进入混凝沉淀池,加入浓度 4 g/L 的 A-1 型混凝剂进行混凝沉淀处理,沉淀反应时间为 30 min。将上清液加入微电解反应器。微电解反应器材质为有机玻璃,容积为 10 L,内装铁屑、活性炭共 8 L。铁屑装柱之前与活性炭混合均匀。在微电解反应器底部装有曝气器。通过控制进水流速来确定反应时间,微电解反应时间为 50 min。

生化技术采用水解酸化 SBR 处理工艺,水解酸化池工作容积为 12 L,SBR 工作容积为 8 L,水解酸化和 SBR 停留时间分别是 6 h 和 9 h;水解酸化池和 SBR 池均装入填料,填料为化学稳定性高、具有一定刚性及孔隙率、价格低廉,密度为 0.90~0.91 g/cm³、规格为 90 g/m² 的聚丙烯材料,将其制作成中空圆筒状,尺寸为内径 10 mm、外径 11 mm、高 11 mm;生物菌种接种于某化工污水处理厂污泥,经驯化挂膜后加入一定浓度的废水和 N、P 营养物,进行生化处理,定期分析水解酸化、SBR 出水中的 COD、BOD 等指标。工艺流程见图 1。

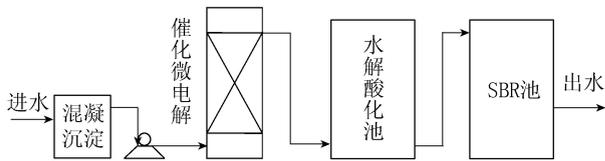


图 1 工艺流程示意图

1.3 分析方法

COD:重铬酸钾法(GB/T11914—1989);BOD:稀释与接种法(HJ505—2009);NH₃-N:纳氏试剂分光光度法(HJ535—2009);TP:钼锑抗分光光度法

(GB/T11893—1989);SS:重量法(GB/T11901—1989)。

2 结果与讨论

2.1 废水的强化预处理

2.1.1 混凝-微电解的废水处理效果

选择 A-1 型混凝剂用量 4 g/L,沉淀时间为 30 min,微电解的初始 pH 值为 3.0,铁炭总量为 10 g/L,铁炭比为 1:1。反应时间达 50 min 时,对废水进行预处理。预处理结果见表 1。

表 1 混凝-微电解处理废水效果

项目	出水质量浓度/(mg·L ⁻¹)	去除率/%
COD	3 417.00	41.74
SS	105.20	91.64
NH ₃ -N	17.28	43.08
TP	0.59	93.61
BOD	1 230.00	33.19

由表 1 可知,经过混凝-微电解处理后废水的 COD、SS、TP 污染负荷降低较大,废水的可生化性进一步提高,BOD 与 COD 质量浓度之比由 0.31 提高到 0.36。

2.1.2 MnO₂ 对混凝-微电解体系处理效果的影响

废水经混凝处理后,在 pH 值为 3.0,铁炭总量 20 g/L,铁炭比 1:1,反应时间 50 min 的情况下,分别加入 0 g/L、1 g/L、1.25 g/L、1.5 g/L、2 g/L、2.5 g/L、3 g/L、3.5 g/L、4 g/L、4.5 g/L、5 g/L 的 MnO₂,考察 MnO₂ 对微电解处理废水体系的催化作用,结果见图 2。

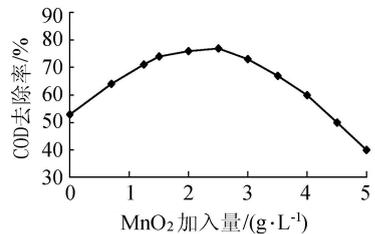


图 2 MnO₂ 加入量对废水 COD 去除率的影响

由图 2 可知,随着 MnO₂ 加入量的增加,废水微电解 COD 去除率升高,当 MnO₂ 加入量为 2.5 g/L 时,废水中 COD 去除率达到 77%,相比单独微电解处理体系提高了 14.5%,主要原因是 MnO₂ 引发氧化降解反应,污染物首先吸附到 MnO₂ 表面的活性点位上,形成表面复合体,再在复合体内发生电子转移作用,使 Mn⁴⁺ 还原成 Mn³⁺,进一步还原成 Mn²⁺,污染物同时被氧化,发生氧化还原反应,为微电解反应提供反应载体^[20]。继续增加 MnO₂ 加入量,废水中 COD 的去除率开始降低,并且降低速度较快,主要原因是当 MnO₂ 加入量较多时,MnO₂ 阻碍了铁和炭的有效接触,微电解反应降低,废水处理效果下降。

2.1.3 H₂O₂ 对混凝-MnO₂-微电解废水处理体系处理效果的影响

废水经氢氧化钙混凝处理后,在 pH 值 3.0,铁炭总量 20 g/L,铁炭比 1:1,反应时间 50 min, MnO₂ 加入量为 2.5 g/L 的情况下,进行 H₂O₂ 投加量分别为 0.25 g/L、0.35 g/L、0.45 g/L、0.55 g/L、0.65 g/L、0.75 g/L 的实验,结果见图 3。

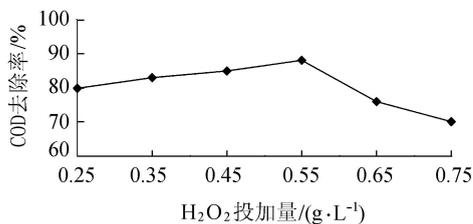


图3 H₂O₂ 投加量对废水 COD 去除率的影响

由图 3 可知,随着 H₂O₂ 投加量的增加,废水 COD 去除率增加,当 H₂O₂ 投加量在 0.55 g/L 时,COD 去除率达到最大值 88.23%。随后 H₂O₂ 继续增加,COD 去除率开始下降,原因是过量的 H₂O₂ 直接将 Fe²⁺ 氧化成 Fe³⁺,消耗了 H₂O₂,并抑制了·OH 的生成,因而污染物降解率降低。另外,残留的 H₂O₂ 也会干扰出水中 COD 质量浓度的测定。另外,在 H₂O₂ 存在的情况下,氢会结合到 MnO₂ 粒子的表面,从而导致过氧化氢分子结构改变,处于一个不稳定的中间态,这时的中间态分子比相对稳定的过氧化氢分子更容易生成水和氧气,从而使反应易于进行。

2.1.4 H₂O₂/MnO₂/微电解联合处理废水

造纸废水经混凝处理后,在上述微电解反应条件下,分别加入 0.55 g/L H₂O₂ 和 2.5 g/L MnO₂,以强化微电解处理效果。处理后废水水质见表 2。

由表 2 可知,处理后 COD、SS、NH₃-N、TP、BOD 的去除率分别为 88.23%、98.47%、86.78%、98.68% 和 82.56%,出水 pH 值在 7 左右。强化预处理实验降低了废水的污染负荷,废水的可生化性由 0.32 提高到 0.42,为后续生化降解反应处理创造了条件。

表 2 H₂O₂/MnO₂/微电解处理废水结果

项目	出水质量浓度/(mg·L ⁻¹)	去除率/%
COD	690.48	88.23
SS	19.26	98.47
NH ₃ -N	4.01	86.78
TP	0.12	98.68
BOD	290.33	82.56

2.2 水解酸化运行实验

前期研究^[19]表明,在水温低于 40℃ 时,水解酸化池对有机物的去除效果受温度影响较小,故水解

酸化在常温下进行即可,保持温度在 25~30℃,进水 pH 值在 7 左右,进水 COD 和 BOD 质量浓度平均分别为 676 mg/L 和 279 mg/L。水解酸化反应池出水 COD、BOD 质量浓度及其去除率随反应停留时间变化情况见图 4~5。

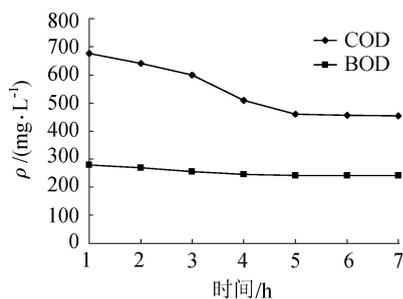


图4 水解酸化出水 COD 和 BOD 随时间变化情况

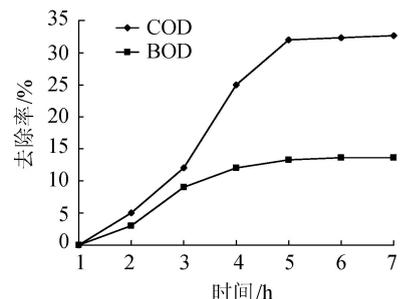


图5 水解酸化出水中 COD 和 BOD 去除率随时间变化情况

由图 4 可知,随着反应时间的增加,出水中 COD 和 BOD 质量浓度降低,而且在 1~4 h 内质量浓度降低较快;当反应停留时间超过 5 h 后,出水中 COD 和 BOD 质量浓度变化不大,因此水解酸化适宜的反应停留时间确定为 6 h。由图 5 可知,随着水解酸化反应时间的增加,出水中 COD 和 BOD 的去除率提高,当反应停留时间超过 5 h 后,去除率趋于稳定。而且由图 5 中可知,废水经水解酸化处理后,COD 去除率为 30% 以上,BOD 去除率 10% 以上。通过计算,BOD 与 COD 质量浓度比由处理前的 0.42 升至 0.53,其原因可能是水解酸化池中存在的产酸性厌氧、兼氧菌将水中结构复杂的大分子有机物分解为简单的小分子有机物,将不溶物质分解成可溶性物质,为后续好氧生化处理创造有利条件,进一步提高了废水的可生化性。

2.3 SBR 运行实验

经水解酸化处理后的出水进入 SBR,在运行周期的安排上采取瞬时进水,曝气反应结束后沉淀 1 h,排放占反应器容积 60% 的上清液。保持 pH 值为 6.8~7.2,DO 质量浓度在 4 mg/L 左右,进水中 COD 和 BOD 平均质量浓度分别为 457 mg/L 和 241 mg/L。曝气反应时间对 COD、BOD 质量浓度及其去除率的

影响见图 6~7。

由图 6 可以看出, SBR 反应中, 随着曝气反应时间的增加, 出水中 COD 和 BOD 质量浓度不断降低, 当反应时间达到 3 h, COD 和 BOD 质量浓度降低速度较快。反应时间超过 7 h 后, 出水中 COD 和 BOD 质量浓度分别达到 85 mg/L 和 30 mg/L, 并基本维持不变, 表明适合的 SBR 反应时间为 8 h。SBR 停留时间包括反应时间和沉淀时间, 总计 9 h。

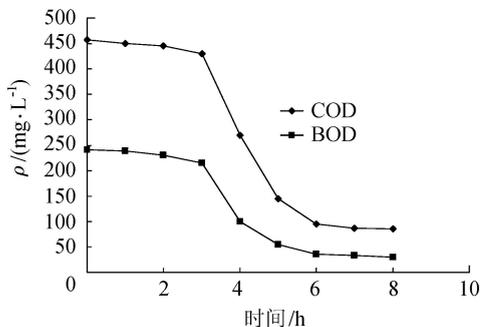


图 6 SBR 出水中 COD 和 BOD 质量浓度随时间变化情况

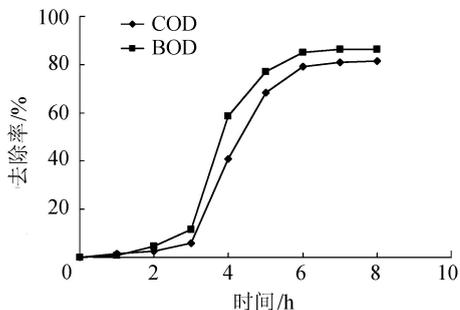


图 7 SBR 出水中 COD 和 BOD 去除率随时间变化情况

由图 7 可知, 废水经 SBR 处理, 随着反应时间的增加, 废水中 COD 和 BOD 不断降低。当反应时间达到 8 h 时, COD 和 BOD 质量浓度分别为 85 mg/L、30 mg/L 左右, COD 和 BOD 去除率分别达到 81% 和 86% 以上。BOD 与 COD 质量浓度的比值降至 0.39 以下, 废水的可生化性开始降低。

2.4 实际工程运行情况

造纸废水进水中, COD 平均质量浓度为 5 865 mg/L, SS 平均质量浓度为 1 259 mg/L, pH 值平均为 7.0, NH₃-N 质量浓度平均为 30.36 mg/L, TP 质量浓度平均为 9.23 mg/L, BOD 平均质量浓度为 1841 mg/L, BOD 与 COD 质量浓度之比为 0.32。对废水进行混凝、强化微电解、水解酸化和 SBR 综合处理, 工程设计废水处理能力 1 000 m³/d, 稳定运行半年多后, 连续 15 d 监测废水中 COD、SS、NH₃-N、TP、BOD 的变化情况, 结果见图 8。

由图 8 可知, 在稳定运行阶段, 连续监测 15 d, 出水中 COD 平均质量浓度为 85 mg/L, COD 平均总去除率为 98.55%; 出水中 SS 平均质量浓度为 0, SS

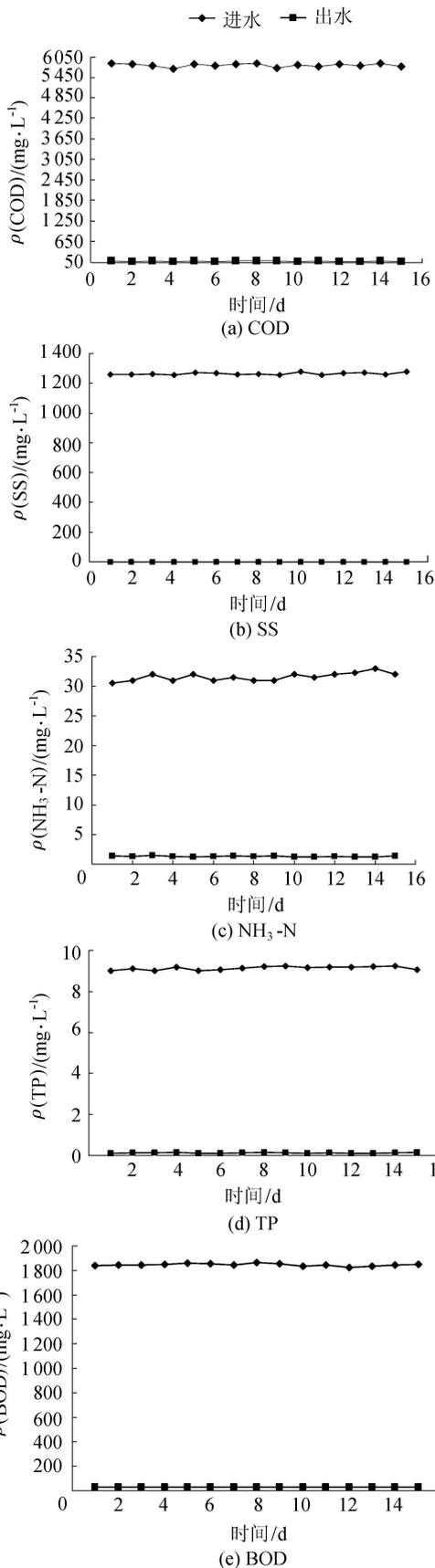


图 8 工程运行阶段进/出水中各指标质量浓度变化情况
平均总去除率 100%; 出水 NH₃-N 平均质量浓度为 1.42 mg/L, 氨氮平均总去除率为 95.31%; 出水中 TP 平均质量浓度为 0.1 mg/L, TP 平均总去除率为

98.97% ; 出水中 BOD 平均质量浓度为 30 mg/L, BOD 平均总去除率为 98.37%。造纸废水经该工艺处理后,出水达到废水一级排放要求,且操作简单、运行连续稳定。

3 结 论

a. 应用微电解体系预处理造纸废水,加入 MnO_2 和 H_2O_2 ,可有效去除废水中 COD、SS、 NH_3-N 、TP、BOD 提高废水的可生化性。

b. 废水经混凝处理后,在最佳条件下采用 H_2O_2/MnO_2 /微电解处理,废水中 COD、SS、 NH_3-N 、TP、BOD 的去除率分别为 88.23%、98.47%、86.78%、98.68% 和 82.56%,出水的 pH 值在 7 左右,废水的可生化性由 0.32 提高到 0.42。

c. 实际工程运行结果表明,连续监测运行 15 d,进水中 COD 平均质量浓度为 5865 mg/L 时,出水中 COD 平均质量浓度为 85 mg/L, COD 平均总去除率为 98.55%。

d. 采用混凝- H_2O_2 /微电解/ MnO_2 -水解酸化-SBR 技术处理造纸废水,处理后出水中 COD 平均质量浓度为 85 mg/L, SS 质量浓度为 0 mg/L, NH_3-N 平均质量浓度为 1.42 mg/L, TP 平均质量浓度为 0.1 mg/L, BOD 平均质量浓度为 30 mg/L, 达到废水一级排放要求。该工艺运行连续稳定,操作简单,技术可行、可靠。

参考文献:

[1] 彭涛,李志健,缪爱园,等. 造纸废水深度处理的研究进展[J]. 纸和造纸,2010,29(1): 53-57. (PENG Tao, LI Zhijian, MIAO Aiyuan, et al. Research approach of advance treatment of wastewater from paper making[J]. Paper and Paper Making, 2010, 29(1): 53-57. (in Chinese))

[2] 王娟娟,张安龙. 造纸废水深度处理新技术[J]. 湖南造纸,2012(2): 26-29. (WANG Juanjuan, ZHANG Anlong. Advanced treatment of paper wastewater technology[J]. Hunan Paper Making, 2012(2): 26-29. (in Chinese))

[3] 赵晓波,邹友琴,孔德馨,等. 药剂与粉煤灰联合处理再生造纸废水的实验研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2004,34(2): 255-259. (ZHAO Xiaobo, ZOU Youqin, KONG Dexin, et al. Experimental study on the treatment of regenerate paper industry wastewater with chemical and coke breeze[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(2): 255-259. (in Chinese))

[4] 张春永. 铁炭微电解法废水处理技术研究[D]. 南京: 东南大学,2004.

[5] 刘维. 铁碳微电解处理难降解有机废水的应用研究[D]. 长沙: 中南大学,2011.

[6] JIN Yizhong, ZHANG Yuefeng, LI Wei. Experimental study on micro-electrolysis technology for pharmaceutical wastewater treatment[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2002, 3(4): 401-404.

[7] YANG Yuefeng, XU Xinhua, CHEN Haifeng. Treatment of chitin-producing wastewater by micro-electrolysis-contact oxidation[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2004, 5(4): 436-440.

[8] 任健,马宏瑞,王宝和,等. Fe/C 微电解-Fenton 氧化-混凝沉淀-生化法处理染料母液废水[J]. 环境工程学报, 2010, 4(7): 1457-1462. (REN Jian, MA Hongrui, WANG Baohe, et al. Treatment of mother liquor of dyeing waste water with Fe/C electrolysis-Fenton oxidation-coagulation sedimentation-biochemical process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(7): 1457-1462. (in Chinese))

[9] 张志军,王华海,陈整生,等. 强化铁炭微电解法预处理沥青废水[J]. 环境科学与技术,2014,37(3): 84-88. (ZHANG Zhijun, WANG Huahai, CHEN Zhengsheng, et al. Intensified ferric-carbon microelectrolysis pretreatment of asphalt wastewater[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(3): 84-88. (in Chinese))

[10] 于璐璐,林海,陈月芳,等. 曝气微电解法预处理难降解含氰农药废水[J]. 化工学报,2011,62(4): 1091-1096. (YU Lulu, LIN Hai, CHEN Yuefang, et al. Pretreatment of high salinity pesticide wastewater containing cyanide by aerated zero-valent iron[J]. CIESC Journal, 2011, 62(4): 1091-1096. (in Chinese))

[11] 赖波,秦红科,周岳溪,等. 铁炭微电解预处理 ABS 凝聚干燥工段废水[J]. 环境科学,2011,32(4): 1055-1059. (LAI Bo, QIN Hongke, ZHOU Yuexi, et al. Wastewater from the condensation and drying section of ABS was pretreated by microelectrolysis[J]. Environmental Science, 2011, 32(4): 1055-1059. (in Chinese))

[12] 宋智,申泽星,王飞羽,等. 微电解催化处理染料废水研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版),2007,32(2): 83-85. (SONG Zhi, SHEN Zexing, WANG Feiyu, et al. Research on treatment of dyestuff wastewater through micro-electrolysis[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2007, 32(2): 83-85. (in Chinese))

[13] 徐东辉,李德生,姚智文. 铁炭曝气微电解对炸药废水的试验研究[J]. 环境科学与技术,2006,29(11): 79-81. (XU Donghui, LI Desheng, YAO Zhiwen. Treatment of dynamite wastewater by ferric-carbon aeration micro-electrolysis[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(11): 79-81. (in Chinese))

(下转第 116 页)

- immobilized sludge reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 180:54-58.
- [43] KIM S H, HAN S K, SHIN H S. Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, 29(15): 1607-1616.
- [44] ZHU H, PARKER W, BASNAR R, et al. Biohydrogen production by anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludges [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(14): 3651-3659.
- [45] LIN Y, WU S, WANG D. Hydrogen-methane production from pulp & paper sludge and food waste by mesophilic-thermophilic anaerobic co-digestion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(35): 15055-15062.
- [46] SREELAOR C, PLANGKLANG P, IMAI T, et al. Co-digestion of food waste and sludge for hydrogen production by anaerobic mixed cultures; statistical key factors optimization [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(21): 14227-14237.
- [47] KIM D, KIM S, KIM H, et al. Sewage sludge addition to food waste synergistically enhances hydrogen fermentation performance [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(18): 8501-8506.
- [48] 袁雨珍. 餐厨垃圾联合剩余污泥厌氧发酵产氢的特性研究 [D]. 湘潭:湘潭大学, 2014.
- [49] 董雪云, 张金流, 郭鹏飞. 农业固体废弃物资源化利用技术研究进展及展望 [J]. *安徽农学通报*, 2014, 20(18): 86-89. (DONG Xueyun, ZHANG Jinliu, GUO Pengfei. Research progress and prospect in resource utilization technology of agricultural solid waste [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2014, 20(18): 86-89. (in Chinese))
- [50] CHENG C L, LO Y C, LEE K S, et al. Biohydrogen production from lignocellulosic feedstock [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(18): 8514-8523.
- [51] WANG W, XIE L, LUO G, et al. Enhanced fermentative hydrogen production from cassava stillage by co-digestion; the effects of different co-substrates [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(17): 6980-6988.
- [52] WANG W, XIE L, CHEN J, et al. Biohydrogen and methane production by co-digestion of cassava stillage and excess sludge under thermophilic condition [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(4): 3833-3839.
- [53] SITTIJUNDA S, REUNGSANG A. Biohydrogen production from waste glycerol and sludge by anaerobic mixed cultures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(18): 13789-13796.
- [54] RIVERO M, SOLERA R, PEREZ M. Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge with glycerol: Enhanced biohydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(6): 2481-2488.
- [55] CHEN Y, XIAO N, ZHAO Y, et al. Enhancement of hydrogen production during waste activated sludge anaerobic fermentation by carbohydrate substrate addition and pH control [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 349-356.

(收稿日期:2016-02-02 编辑:彭桃英)

(上接第 104 页)

- [14] ARORA M L, BARTH E F, UMPHRES M B. Technology evaluation of sequencing batch reactors [J]. *Water Pollution Control Federation*, 1985, 57(8): 867-875.
- [15] BOON A G. Sequencing batch reactors; a review [J]. *Water and Environmental Management Journal*, 2003, 17(2): 68-73.
- [16] 于德爽, 彭永臻, 凌云, 等. 水解酸化-气浮-SBR 工艺处理亚麻废水 [J]. *给水排水*, 2002, 28(4): 32-33. (YU Deshuang, PENG Yongzhen, LING Yun, et al. Hydrolysis acidification-air floatation-SBR process treating linen wastewater [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2002, 28(4): 32-33. (in Chinese))
- [17] GUIMARAES P, MELO H N S, CAVALCANTI P F F, et al. Anaerobic-aerobic sewage treatment using the combination UASB-SBR activated sludge [J]. *Journal of Environmental Science and Health: Part A*, 2003, 38(11): 2633-2641.
- [18] 彭杰, 黄天寅, 曹强, 等. 一体化 SBR 农村生活污水处
- 理设施设计 [J]. *水处理技术*, 2015, 41(1): 132-134. (PENG Jie, HUANG Tianyin, CAO Qiang, et al. Design of integrated SBR facility for rural domestic sewage treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(1): 132-134. (in Chinese))
- [19] 李贞玉, 阮望, 李长海, 等. 水解酸化-SBR-微滤处理造纸中段废水试验研究 [J]. *工业水处理*, 2014, 34(2): 47-50. (LI Zhenyu, RUAN Wang, LI Changhai, et al. Hydrolytic acidification-SBR-microfiltration process for treating paper-mill mid-stage wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2014, 34(2): 47-50. (in Chinese))
- [20] 陈月芳, 曹丽霞, 于璐璐, 等. 强化微电解法预处理难降解农药废水 [J]. *环境工程学报*, 2012, 6(7): 2361-2366. (CHEN Yuefang, CAO Lixia, YU Lulu, et al. Pretreatment of refractory pesticide wastewater by intensified microelectrolysis [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(7): 2361-2366. (in Chinese))

(收稿日期:2015-08-21 编辑:彭桃英)