

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.05.009

芬顿氧化 PAM 助凝法预处理 高浓度烟草香料废水试验

何玉洁¹, 陈 卫¹, 郑晓英¹, 张 轶², 王兴楠¹, 黄 希¹, 夏 敏³

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 无锡市排水管理处, 江苏 无锡 214011;

3. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用芬顿氧化 PAM 助凝法对高浓度烟草香料废水进行预处理, 并通过试验确定该方法的最佳操作条件(包括最佳反应时间、药剂投加顺序及其投加量等)。结果表明:(a) 芬顿氧化助凝法是高浓度烟草香料废水预处理的有效措施, 废水经芬顿试剂氧化、PAM 助凝、pH 调节后, COD 的去除率可达 79.6%, 出水完全澄清。(b) 芬顿氧化助凝法最佳操作条件为: 将 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, H_2O_2 分别按照 45 g/L, 150 mL/L 的标准加入废水中反应 60 min, 再投加 PAM 助凝反应 10 min 后, 最后用 NaOH 调节 pH 至 7。

关键词:烟草香料废水; 废水预处理试验; 芬顿氧化法; PAM 助凝; pH 调节

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)05-0525-05

Pretreatment experiment of high-concentration aromatic tobacco flavor wastewater with Fenton reagent and PAM coagulation

HE Yujie¹, CHEN Wei¹, ZHENG Xiaoying¹, ZHANG Yi², WANG Xingnan¹, HUANG Xi¹, XIA Min³

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Wuxi Drainage Management Office, Wuxi 214011, China;

3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: High-concentration aromatic tobacco flavor wastewater was pretreated with Fenton reagent and PAM coagulation, and the optimal operating conditions of the method, including the optimal reaction time and reagent dosing sequence and dosage were determined. The results show the following: (a) The Fenton reagent oxidation and coagulation method is an effective measure for pretreatment of high-concentration aromatic tobacco flavor wastewater. The COD removal rate was 79.6% and the wastewater was completely clarified after pretreatment with the Fenton reagent, PAM coagulation, and pH regulation. (b) The optimal operating conditions of the method were as follows: 45 g/L of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and 150 mL/L of H_2O_2 were initially added to the wastewater, and after 60 minutes' reaction, they were treated by PAM coagulation for 10 minutes. Finally, the pH value was adjusted to 7 with NaOH.

Key words: aromatic tobacco flavor wastewater; wastewater pretreatment experiment; Fenton reagent oxidation; PAM coagulation; pH regulation

20 世纪 60 年代, 随着“美式混合型卷烟”的成功研发以及消费者对低焦油含量香烟的青睐, 烟草香料的市场需求量日益增大, 香料生产商开始向烟草业供应越来越多的复合香料和特质配方香料^[1]。然而, 由于香料生产更换产品时必须清洗反应釜, 因此会产生污染物浓度相当高的废水或反应残留物(COD 质量浓度高达几万甚至几十万毫克每升)。这类废水或反应残留物中不仅含有多达 20 种芳烃、芳香化合物及其衍生物

收稿日期: 2011-11-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2009B18014); 河海大学自然科学基金(2009422711)

作者简介: 何玉洁(1991—), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事污水处理及资源化研究。E-mail: comeon_pb@163.com

通讯作者: 郑晓英(1976—), 女, 重庆人, 讲师, 博士, 主要从事污水处理及资源化研究。E-mail: zhxyqq6@hhu.edu.cn

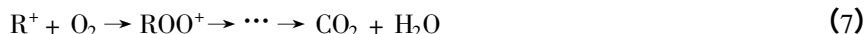
(包括酚、甲苯等有毒有害物质^[2-3]),而且其可生化性低、污染源成分复杂、水质波动大^[4]。因此,常规的废水处理方法难以对其进行净化。

目前,在烟草行业,国内外的研究主要集中在烟草薄片废水的处理方面,常用的处理方法有芬顿氧化法、混凝法以及适宜的生化法^[5-6]。在烟草香料废水方面,由于其有机物质量浓度超过 10 万 mg/L,是薄片废水的 3 倍之多,因此多数研究只是对香料废水中有毒物质种类进行分析^[5],而研究烟草香料废水处理的很少。由于芬顿试剂是一种强氧化剂,能有效氧化去除传统废水处理技术无法去除的难降解有机物,且对多种有机工业废水都有较好的处理效果^[7-9],因此笔者采用芬顿氧化法对烟草香料废水进行预处理以降低有机物的浓度,为后续的生化处理创造良好条件。鉴于芬顿氧化法的处理成本较高,笔者在芬顿氧化后利用聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM)复合混凝及单独投加 PAM 助凝(芬顿试剂中含有的 Fe^{2+} 具有混凝作用)2 种方法去除色度、降低有机物浓度,并对 2 种方法进行对比分析。

1 试验介绍

1.1 试验原理

a. 芬顿试剂是指由 H_2O_2 和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 所配成的混合溶液,具有极强的氧化能力^[10-12],其反应方程式如下:



在 Fe^{2+} 的催化作用下, H_2O_2 能产生活泼的氢氧自由基($\cdot\text{OH}$),其氧化能力仅弱于 F_2 ,且可与废水中的有机物发生反应,使有机物分解或改变其电子云结构,从而引发和传播自由基链反应,加快有机物和还原性物质的氧化。另外,反应过程中 Fe^{3+} 与 OH^- 生成具有凝聚、吸附性能的羟基配合物(其絮凝的最佳 pH 范围为 3.5 ~ 5.0^[13]),使水中的悬浮固体凝聚沉淀。芬顿试剂的氧化能力与废水的性质、pH、 Fe^{2+} 浓度、 H_2O_2 用量以及反应时间有关^[14-15]。

b. PAC 和 PAM 的助凝原理: PAC 由于预生成稳定的 Al_{12} 类聚合形态,因而比无机铝盐具有明显的延迟水解沉淀作用。低温下混凝剂形成的絮凝体细小而松散,沉降性能很差,可考虑另外投加高分子助凝剂 PAM 改善混凝作用,增加吸附架桥和网捕卷扫作用^[16]。由于芬顿氧化时已投加 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,其与 PAM 协同作用可起到混凝的效果,本文试验将进一步考察芬顿氧化后是否需要再投加 PAC 混凝。

1.2 仪器和试剂

仪器 S-3D 型 pH 计、BS124S 型天平、COD 消解仪、CJJ-931 型磁力搅拌器(转速 0 ~ 600 r/min)、UV-1801 型分光光度计、过滤装置。

药剂 质量分数为 30% 的 H_2O_2 溶液、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、PAC、PAM、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 标准溶液、 H_2SO_4 - Ag_2SO_4 溶液、 HgSO_4 - $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2$ 指示剂、NaOH 溶液、HCl 溶液。

试验所用废水取自无锡某烟草香料公司,避光保存。废水为褐色半透明状,COD 质量浓度高达 109 000 mg/L, $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{COD}) = 0.016$,可生化性差,属于较难生化处理的工业废水。因实际生产过程中烟草香料废水水量仅有 5 m^3/d ,占总产水量的 6.25%,因此可与生产过程中产生的大量无污染冷却水、蒸馏废水以及低污染浓度的废水混合稀释,从而有效减小废水处理难度。根据该公司实际运作情况,将原废水稀释 3 倍后进行预处理,稀释后废水中污染物质量浓度如下: $\rho(\text{COD}) = 36\,275 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{BOD}_5) = 600 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 97.51 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 29.41 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TN}) = 102.97 \text{ mg/L}$ 废水的 pH 为 3.45。

1.3 试验步骤

取 300 mL 稀释 3 倍后的废水水样至 500 mL 的锥形瓶中,锥形瓶置于磁力搅拌器上。用 HCl 调节 pH 后

搅拌(250 r/min) 10 min,再加入一定量 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 快速搅拌(250 r/min) 15 min 至其完全溶解后,加入 H_2O_2 溶液搅拌(60 r/min)反应60 min。芬顿氧化后加入一定量的 PAC 快速搅拌(250 r/min) 1 min,之后加入 PAM 慢速搅拌(60 r/min) 10 min,最后用 NaOH 调节 pH,静置取滤液测定 COD。

2 结果与讨论

2.1 芬顿氧化对 COD 的去除

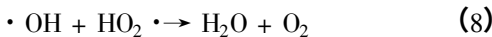
由于废水中部分污染物的存在形态和溶解度在不同 pH 和温度下存在显著差异,因此在室温下调节 pH 可实现污染物的分离^[17]。笔者发现调节 pH 对烟草香料废水的 COD 去除率无影响。

芬顿系统受 pH 的影响较大,其最佳 pH 范围为 3~5,该范围与有机物种类关系不大^[18-19]。因试验中原废水的 pH 为 4~5,故芬顿氧化前不需要调节 pH。除 pH 外, Fe^{2+} 和 H_2O_2 的投量比以及反应时间是影响芬顿氧化系统的重要因素。基于前人研究成果,试验中取 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{Fe}^{2+})=3:1$ ^[20-21],搅拌时间为 60 min。

2.1.1 H_2O_2 最佳投加量的确定

分别取 300 mL 稀释 3 倍后的废水于 6 个 500 mL 锥形瓶中,按照质量浓度为 25 g/L 的标准投加 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,快速搅拌 15 min 完全溶解后,加入不等量 H_2O_2 搅拌反应 60 min,取滤液测定 COD,结果如图 1 所示。

由图 1 可知,对于高有机物浓度的烟草香料废水, H_2O_2 的最佳投加量(体积比)为 150 mL/L。随着 H_2O_2 投加量的增加, $\cdot\text{OH}$ 逐渐增多,废水中的 COD 去除率升高。然而当 H_2O_2 投加量过大时,会发生 3 步化学反应,其中第 1,2 步反应如式(1),(3)所示,第 3 步反应如下:



即当反应体系中 H_2O_2 过量时,反而成为 $\cdot\text{OH}$ 的清除剂, H_2O_2 的无效分解导致氧化效率降低^[22]。另外酸性条件下,进行 COD 测定时 Cr^{6+} 会和多余的 H_2O_2 发生还原反应生成 Cr^{3+} ,影响测定结果^[23]。

2.1.2 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 最佳投加量的确定

分别取 300 mL 稀释 3 倍后的原废水于 7 个 500 mL 锥形瓶中,加入不等量的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,快速搅拌 15 min 至 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 完全溶解后,按照体积比为 150 mL/L 的标准加入 H_2O_2 搅拌反应 60 min,取滤液测定 COD,结果如图 2 所示。

由图 2 可知, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的最佳投加量(质量浓度)为 45 g/L,继续增加投加量不会提高 COD 的去除率。 Fe^{2+} 投加量过大时,产生 $\cdot\text{OH}$ 的速率过快,使其来不及与体系中的有机污染物发生反应而形成积累效应($4\cdot\text{OH} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$),致使具有强氧化性的 $\cdot\text{OH}$ 损耗,不利于有机物的去除,试验中也发现有气泡溢出;另外 Fe^{2+} 投加量过大会导致芬顿氧化后的沉积物数量增多、色度增大,不易于后续处理^[19]。

2.2 氧化溶液的后续澄清

芬顿氧化后溶液呈深黄褐色絮凝状,试验证实简单过滤和活性炭吸附都无法有效去除色度。综合考虑经济指标,设计对比试验,通过调节 pH 和 PAC + PAM 复合混凝的方法去除色度,并进一步降低有机物浓度。

取 300 mL 稀释 3 倍的废水,分别按照 45 g/L,150 mL/L 的标准加入 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, H_2O_2 ,充分反应后设计 6 组平行试验,试验结果如表 1 所示。

由表 1 中的数据可得:(a)比较 a 和 b 试验可知,芬顿氧化后用 NaOH 调节 pH 可使 COD 去除率明显提高,对比 c,d 以及 f,e 也有相同的结论。加入 NaOH 后锥形瓶中有大量棕色沉淀物产生,滤后滤液完全澄清,不需单独设计工艺去除色度,且调节 pH 至中性也更易于后续的生化反应;(b)比较 b 和 d 试验,氧化后加入

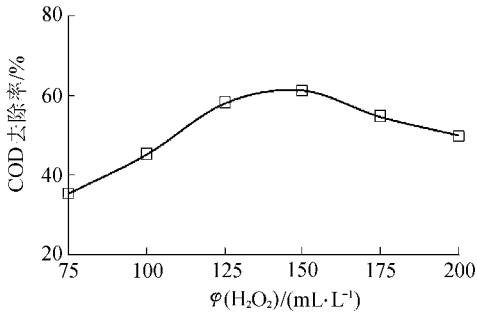
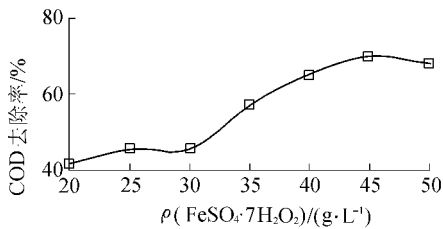


图 1 废水中 H_2O_2 投加量对 COD 去除率的影响

Fig. 1 Influence of quantity of H_2O_2 on removal rate of COD in wastewater



2 废水中 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 投加量对 COD 去除率的影响

Fig. 2 Influence of quantity of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ on removal rate of COD in wastewater

表1 氧化溶液的后续澄清试验结果
Table 1 Clarification of oxidation solution

试验编号	氧化后的试验条件	COD 去除率/%
a	不调节 pH	68.9
b	用 NaOH 调节 pH 至 7	78.8
c	不调节 pH,按照 0.25 g/L 的投加量(质量浓度)投加 PAM 助凝	73.9
d	按照 0.25 g/L 的投加量(质量浓度)投加 PAM 助凝,调节 pH 至 7	79.6
e	不调节 pH,按照 2 g/L 的投加量(质量浓度)加入 PAC 絮凝后,再按照 0.25 g/L 的投加量(质量浓度)加 PAM 助凝	74.1
f	按照 2 g/L 的投加量(质量浓度)加入 PAC 絮凝后,再按照 0.25 g/L 的投加量(质量浓度)加 PAM 助凝,调节 pH 至 7	79.6

PAM 助凝再调节 pH,可进一步提高有机物去除效率;(c)比较 c,f 和 d,e 试验可知,在去除有机物方面 PAC + PAM 复合混凝相比单独投加 PAM 无实质性的改良效果,因此选择单独投加 PAM 助凝。由对比试验的结论可知,d 方法(即在 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, H_2O_2 投加量(质量浓度)分别为 45 g/L 和 150 mL/L 的芬顿氧化的基础上,投加助凝剂 PAM,最后调节 pH 至 7)可以有效地降低有机物浓度,相比 PAC + PAM 复合混凝,单独投加助凝剂 PAM 又可进一步降低成本,助凝剂的最佳投量有待后续试验确定。

2.3 水质指标分析

芬顿氧化后加入 PAM 助凝,再调节 pH 至 7,参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)综合测定其他水质指标,结果如表 2 所示。

表2 芬顿氧化助凝预处理出水水质

Table 2 Water quality after pretreatment with Fenton reagent and PAM coagulation

常规指标	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
稀释 3 倍后废水水质	36275	97.51	23.41	102.97	3.45
预处理后水质	7400	69.25	8.77	95.0	7.05

3 结 论

a. 对于有机物含量高、可生化性低的烟草香料废水,芬顿试剂有着极强的氧化作用。单独投加 PAM 助凝和 PAC + PAM 复合混凝有相同去除有机物的效果。芬顿氧化协同 PAM 助凝作用,对有机物的去除具有良好的功效,为后续处理创造条件。

b. 向稀释 3 倍的烟草香料废水中按照 45 g/L,150 mL/L 的标准加入 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 H_2O_2 以 60 r/min 转速搅拌 60 min,反应后按照 0.25 g/L 的标准投加 PAM 助凝慢速搅拌 10 min,再用 NaOH 调节 pH 至 7,此时 COD 的去除率可达 79.6%,出水完全澄清。

c. 经芬顿氧化和助凝法预处理后,烟草香料废水最终出水 COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP 和 TN 质量浓度分别为 7400 mg/L,69.25 mg/L,8.77 mg/L 和 95.0 mg/L。试验证实该方法具有反应快、去除效果明显等优点,是烟草香料废水预处理的有效措施。

参考文献:

[1] 刘宇,颜合洪. 烟草致香物质的研究进展[J]. 作物研究,2006(5):470-474. (LIU Yu, YAN Hehong. Research development of aroma components in tobacco[J]. Crop Research,2006(5):470-474. (in Chinese))

[2] 郑一新,沈平. 高浓度香料废水治理技术[J]. 水处理技术,2001,27(4):229-232. (ZHENG Yixin, SHEN Ping. Treatment of high-level aromatics wastewater[J]. Technology of Water Treatment,2001,27(4):229-232. (in Chinese))

[3] MEHER K K, PANCHWAGH A M, RANGRASS S, et al. Biomethanation of tobacco waste[J]. Environmental Pollution,1995, 90(2): 199-202.

[4] 杨琦,钱易,陆雍森,等. 湿式氧化处理香料废水[J]. 给水排水,1998, 24(11):35-37. (YANG Qi, QIAN Yi, LU Yongsen, et al. Wet oxidation to treatment of spice production[J]. Water & Wastewater Engineering,1998, 24(11):35-37. (in Chinese))

[5] 李友明,陈元彩,陈中豪,等. 处理造纸厂烟草薄片生产废水的试验研究[J]. 中国给水排水,2008,24(3):53-55. (LI Youming, CHEN Yuancai, CHEN Zhonghao, et al. Study on treatment of wastewater from manufacture of tobacco slice by papermaking process[J]. China Water & Wastewater,2008, 24(3):53-55. (in Chinese))

- [6] 王玉峰,陈夏克,莫立焕,等. 造纸法烟草薄片废水混凝预处理研究[J]. 中国造纸,2012,31(2):35-39. (WANG Yufeng, CHEN Xiake, MO Lihuan, et al. Coagulation-flocculation treatment of wastewater from reconstituted tobacco sheet manufacturing by papermaking process[J]. China Pulp & Paper,2012,31(2):35-39. (in Chinese))
- [7] 汤茜,任百祥,王艳华. Fenton 氧化-混凝-SBR 工艺处理糠醛废水[J]. 化工环保,2009,29(2):151-153. (TANG Qian, REN Baixiang, WANG Yanhua. Treatment of furfural wastewater by Fenton reagent oxidation-coagulation-SBR process[J]. Environment Protection of Chemical Industry,2009,29(2):151-153. (in Chinese))
- [8] 闵怀,傅亮,陈泽军. Fenton 法及其在废水处理中的应用研究[J]. 环境污染与防治,2004,26(1):28-30. (MIN Huai, FU Liang, CHEN Zejun. Fenton process and its application in wastewater treatment[J]. Environmental Pollution & Control,2004,26(1):28-30. (in Chinese))
- [9] 惠祖刚,陈英文,刘臻臻,等. Fenton 法处理石化废水混凝泥及其剩余液的氧化回用研究[J]. 环境污染与防治,2011,33(3):48-51. (HUI Zugang, CHEN Yingwen, LIU Zhenzhen, et al. Fenton oxidation of coagulation sludge from petrochemical wastewater and reutilization of residual liquid[J]. Environmental Pollution & Control,2011,33(3):48-51. (in Chinese))
- [10] 伏广龙,徐国想,祝春水,等. 芬顿试剂在废水处理中的应用[J]. 环境科学管理,2006,31(8):133-135. (FU Guanglong, XU Guoxiang, ZHU Chunshui, et al. Application of Fenton's reagent to wastewater treatment[J]. Environmental Science and Management,2006,31(8):133-135. (in Chinese))
- [11] 安立超,余宗学,严学亿,等. 利用芬顿试剂处理硝基苯类生产废水的研究[J]. 环境科学与技术,2001,24(增刊2):3-4. (AN Lichao, YU Zongxue, YAN Xueyi, et al. Application of Fenton's reagent for treatment of nitrobenzene manufacturing process wastewater[J]. Environmental Science & Technology,2001,24(Sup2):3-4. (in Chinese))
- [12] MA Xiangjuan, XIA Huilong. Treatment of water-based printing ink wastewater by Fenton process combined with coagulation[J]. Journal of Hazardous Materials,2009,162:386-390.
- [13] 常文贵,谢红璐. 芬顿试剂法降解对苯二酚和工业废水[J]. 渤海大学学报:自然科学版,2004,25(1):15-18. (CHANG Wengui, XIE Honglu. Degradation of p-benzenediol and industrial waste water by using Fenton's reagent[J]. Journal of Bohai University: Nature Science Edition,2004,25(1):15-18. (in Chinese))
- [14] KURT U, AVSAR Y, GONULLU M T. Treatability of water-based paint wastewater with Fenton process in different reactor types[J]. Chemosphere, 2006,64:1536-1540.
- [15] CIOTTA C, BACIOCCHIA R, TUHKANEN T. Influence of the operating conditions on highly oxidative radicals generation in Fenton's systems[J]. Journal of Hazardous Materials,2009,161:402-408.
- [16] 赵永志,李德生,王宝山,等. 复合投药混凝法预处理低温生活污水的试验研究[J]. 兰州交通大学:自然科学版,2005,24(1):77-80. (ZHAO Yongzhi, LI Desheng, WANG Baoshan, et al. Experimental study of low-temperature domestic sewage pre-treatment by complex chemical-feed[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University: Nature Science Edition,2005,24(1):77-80. (in Chinese))
- [17] 程学文,栾金义,王宜军,等. pH 调节-Fenton 试剂氧化法预处理间甲酚生产氧化废水[J]. 化工环保,2005,25(4):291-294. (CHENG Xuewen, LUAN Jinyin, WANG Yijun, et al. Pretreatment of oxidation wastewater from m-cresol production by pH adjustment-Fenton reagent oxidation process[J]. Environment Protection of Chemical Industry,2005,25(4):291-294. (in Chinese))
- [18] 程丽华,黄君札,王丽,等. Fenton 试剂的特性及其在废水处理中的应用[J]. 化学工程师,2001,84(3):24-25. (CHENG Lihua, HUANG Junli, WANG Li, et al. Property and application in wastewater treatment of Fenton[J]. Chemical Engineering,2001,84(3):24-25. (in Chinese))
- [19] MA Xiangjuan. Treatment of papermaking tobacco sheet wastewater by fenton process [C]//3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Beijing:ICBBE,2009:1-4.
- [20] 苏荣军. 芬顿试剂、高锰酸钾对餐饮业废水的预氧化效果研究[J]. 环境保护科学,2008,34(4):21-23. (SU Rongjun. Study on pre-oxidation of food and drink industrial wastewater by KMnO_4 and Fenton reagent[J]. Environmental Protection Science,2008,34(4):21-23. (in Chinese))
- [21] 苏荣军. 芬顿试剂氧化污水及无机离子影响的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2008,24(2):210-213. (SU Rongjun. Study on oxidation of life wastewater using Fenton reagent and influence of inorganic ions[J]. Journal of Harbin University of Commerce: Nature Science Edition,2008,24(2):210-213. (in Chinese))
- [22] 杨丽云,李怡帆,孙剑辉. Fenton 氧化法深度处理草浆造纸废水的研究[J]. 工业水处理,2010,30(11):59-62. (YANG Liyun, LI Yifan, SUN Jianhui. Study on the advanced treatment of pulp and papermaking wastewater by Fenton oxidation[J]. Industrial Water Treatment,2010,30(11):59-62. (in Chinese))
- [23] 韩笑,夏代宽. Fenton 试剂处理苯酚和甲醛废水的研究[J]. 硫磷设计与粉体工程,2004(6):25-28. (HAN Xiao, XIA Daikuan. Study on the treatment of phenol and formaldehyde waste water using Fenton reagent[J]. SP & Bimonthly Related Engineering,2004(6):25-28. (in Chinese))