

文章编号:1000-582X(2011)09-121-07

# 铁/炭微电解-Fenton 氧化技术处理 1,2,4-酸生产废水

原金海<sup>1,2</sup>, 鲜学福<sup>1</sup>, 雷 菊<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 资源与环境科学学院, 重庆 400044; 2. 重庆科技学院 化学化工学院, 重庆 401331)

**摘 要:**以 6-硝(6-硝基-1,2-重氮氧基萘-4-磺酸)生产过程中产生的 1,2,4-酸废水作为研究对象,将铁/炭微电解和 Fenton 氧化技术结合进行废水处理,研究了微电解的 pH 值、反应时间、反应温度、铁炭质量比、活性炭用量的影响以及 Fenton 氧化的 pH 值和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量,并进行了处理工艺的经济性分析。通过单因素实验确定 1,2,4-酸废水处理的工艺条件为铁碳微电解的 pH 值为 1 时,铁碳质量比为 3:1,反应 3 h,过滤,调 pH 值为 3,添加废水体积 2.5% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(质量分数为 30%),反应 1 h,电石渣调 pH 值 7~8,过滤。该工艺对废水 COD 的去除率可提高到 95% 以上,废水处理成本 5.4 元/m<sup>3</sup>。

**关键词:**1,2,4-酸废水;铁炭微电解;Fenton 氧化;混凝;萘磺酸

**中图分类号:**X788

**文献标志码:**A

## Treatment of 1,2,4-acid wastewater by ferric-carbon microelectrolysis combined with Fenton oxidation process

YUAN Jin-hai<sup>1,2</sup>, XIAN Xue-fu<sup>1</sup>, LEI Ju<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. College of Chemistry & Chemical Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, P. R. China)

**Abstract:** Experiments on the treatment process of 1,2,4-acid wastewater combined ferric-carbon microelectrolysis with Fenton oxidation process are carried out. The 1,2,4-acid wastewater is produced in the production process of 6-nitry(6-nitro-1-diazo oxygen naphthalene-4-acid). The experimental conditions of Ferric-Carbon microelectrolysis, including pH value, react time, react temperature, Fe/C ratio and dosage of active carbon are studied. Fenton oxidation conditions of pH value, dosage of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and the economy data of the process are analyzed. Through single-factor experiments, the conditions for treating acid wastewater are found out. pH value is 1, Fe and C mass ratio is 3:1, and iron-carbon microelectrolysis reaction time is 3 h. Filter the iron-carbon micro-electrolysis water to adjust its pH value into 3, and then adding 2.5% wastewater of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with mass fraction of 30%, react at room temperature for 1 h, adjust the pH value into 7~8, and then filter the iron-carbon micro-electrolysis water. The removal efficiency of COD of raw water can be improved to more than 95%. The cost of wastewater treating is 5.4 yuan/m<sup>3</sup>.

**Key words:** 1,2,4-acid wastewater; Fe-C micro-electrolysis; Fenton oxidation; coagulation; naphthalenesulfonic acid

收稿日期:2011-04-08

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07315-005)

作者简介:原金海(1978-),男,重庆大学博士研究生,讲师,主要从事三废治理及资源化利用方向的工作和研究,  
(E-mail)wenzhuyuan@sina.com。

染料中间体生产废水中有机物含量高,化学结构稳定,大多除含有磺酸基外,还带有氨基、羟基等取代基,属高浓度难生化降解有毒有机废水。6-硝基-1,2-重氮氨基萘-4-磺酸(6-硝基-1,2,4-酸,简称6-硝)为黄色至棕黄色膏状物,是制造酸性媒介染料的中间体。1,2,4-酸母液废水来源于6-硝生产过程中的转位、吸滤工段。1,2,4-酸母液主要含有2-萘酚约193 mg/L,1-氨基-2-萘酚-4-磺酸(简称1,2,4-酸)约为5 840 mg/L, pH值=0.47, COD在17 200 mg/L之间。此类废水属高浓度、高酸化、高含盐有机废水,废水中有机物品种多、毒性大、色度高,生化处理性差,尤其是含 $-\text{SO}_3\text{H}$ 和 $-\text{NH}_2$ 的氨基芳香磺酸中间体,属于微生物难降解物质,因此拟采用化学及物理化学方法对废水进行处理。目前的有机废水处理主要有吸附法<sup>[1-2]</sup>,但由于6-硝生产废水COD含量高,吸附剂吸附容量有限,会造成操作过程不断地频繁进行吸附剂再生,操作过于繁琐;混凝法<sup>[3-4]</sup>处理方便,药剂消耗量不高,成本通常可以接受,但对于单独用于高浓度有机废水的处理往往不能使废水达标处理;微波辐射法<sup>[5-6]</sup>处理快速,有一定的处理效果,但是由于反应器规模的限制,使该方法不利于大规模工业

水处理;生化法<sup>[7-8]</sup>水处理成本低,处理量大,但对于含盐有机废水则可生化性极差;萃取法<sup>[9-10]</sup>处理效果明显,萃取过程快速,但是该法也存在缺点,如用于6-硝生产废水处理时,COD难以降到2 000 mg/L以下,萃取剂可循环再生次数少,再生时耗碱量大,这些都造成处理成本居高不下,且有二次污染产生等。近年来铁/炭微电解<sup>[11]</sup>、Fenton氧化技术<sup>[12-13]</sup>在废水处理中得到广泛应用,将这两种技术结合进行难降解有机废水的处理也屡见报道<sup>[14-15]</sup>,下面就2种工艺结合处理1,2,4-酸母液废水的工艺条件进行探索。

## 1 实验部分

### 1.1 实验方法

Fe-C微电解及Fenton氧化的机理参照文献<sup>[16-18]</sup>。先利用Fe-C组成的无数微电池作为还原体系将1,2,4-酸母液废水中的芳环支链还原、破坏掉,从而起到脱色作用;由于微电解过程产生Fe(II),催化 $\text{H}_2\text{O}_2$ 生成强氧化性的 $\text{OH}\cdot$ ,进而氧化破坏芳环;在这个过程中Fe(III)的絮凝作用可以节省 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的使用量,降低处理成本。

该工艺流程如图1所示。

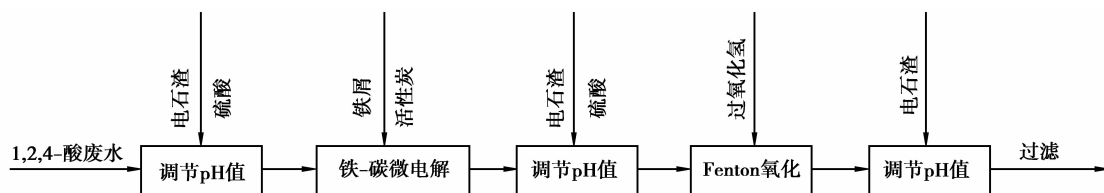


图1 1,2,4-酸生产废水处理工艺流程

### 1.2 微电解实验

铁屑采用机加工产生的铁刨花,先用一定浓度的碱液浸泡,再用10%的 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 酸洗后浸泡,去除其表面油渍脏物和氧化膜后使用。

取1,2,4-酸,在一定pH值条件下,加入一定比例的活性炭和废铁屑,使之反应一段时间,过滤,再用电石渣调节pH值=7~8,再过滤。

### 1.3 Fenton氧化实验

用硫酸调节微电解后废水的pH值,在微电解出水中缓慢滴加质量分数为30%的 $\text{H}_2\text{O}_2$ ,微电解出水中含有 $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Fe}^{3+}$ 与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液自动产生Fenton试剂,搅拌反应一定时间后,静置1 h。

### 1.4 分析方法

COD参照文献<sup>[19]</sup>测量;pH值采用pHS-25

酸度计进行测定。吸收光谱采用岛津RF5301荧光光谱仪测定( $\lambda_{\text{EM}}=245\text{ nm}$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微电解的影响因素

#### 2.1.1 微电解pH值的确定

取1,2,4-酸100 mL,用硫酸调节水样pH值,活性炭按1 g/100 mL废水(即1%)加入,铁碳质量比为3:1,在常温下进行3 h的微电解反应,反应后过滤,电石渣调pH值=7~8,静置半小时过滤,硫酸调pH值=3,加入2.5 mL质量分数为30%的 $\text{H}_2\text{O}_2$ (即2.5%),进行1 h的Fenton反应,电石渣调pH=7~8,过滤,分析微电解反应pH值与COD去除率关系,如图2所示。

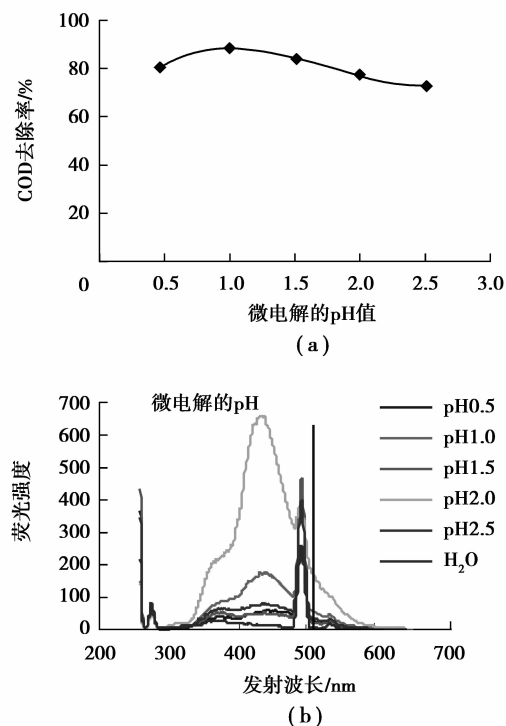


图2 pH值对微电解的影响及废水荧光光谱

由图2(a)可知,在偏酸性条件下,COD去除率较高。由于pH值直接影响氧化还原反应,在pH值较低时,可提高氧化电极电位,加大微电池的电压差,促进电极反应的进行,而电极产物以新生原子态的[H]和Fe<sup>2+</sup>为主,有利于氧化还原作用的进行。废水经微电解处理后,出水pH值上升,从图2(a)还可以看出,当微电解进水pH值在0.5~1.5之间时,1,2,4-酸废水的COD去除率较高,都超过70%,综合考虑确定微电解最佳pH值为1.0左右。

由2(b)知,pH值=0.5时,荧光强度最大,荧光强度随着pH值的上升反而下降,pH值的上升使得微电解的电极电位下降,6-硝废水被氧化的程度就少能够产生荧光的物质越少,荧光强度就弱。

#### 2.1.2 微电解停留时间的确定

调节1,2,4-酸废水的pH值至1,铁碳质量比为3:1,取不同的停留时间进行微电解反应,在常温下让1,2,4-酸废水进行微电解反应及Fenton反应,其他实验条件同前。实验结果如图3所示。

由图3(a)可知,随停留时间的增加,COD的去除率也增高,当停留时间超过60min后,COD的去除率就超过80%,之后随停留时间的增加,COD的去除率上升平缓,增加停留时间对去除率的影响较小。在微电解过程中破坏或转换了显色基团。综合考虑最佳停留时间为180min。

由图3(b)可知,停留时间的长短能够影响微电

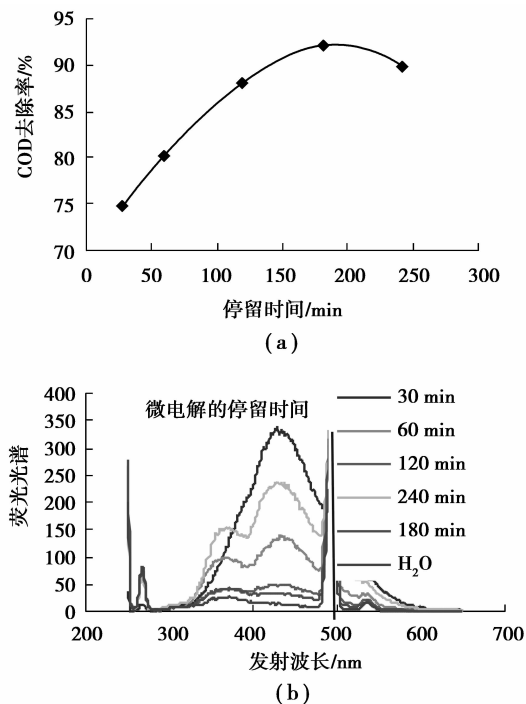


图3 停留时间对微电解的影响及废水荧光光谱

解的反应程度,时间越长反应越充分,越能破坏萘环的官能团,所以随着停留时间的增加,荧光强度也逐渐下降,最佳停留时间是180min。

#### 2.1.3 微电解温度的影响

调节1,2,4-酸废水的pH值至1,铁碳质量比为3:1,在不同的温度条件下进行微电解反应和Fenton反应,其他实验条件同前,实验结果如图4所示。

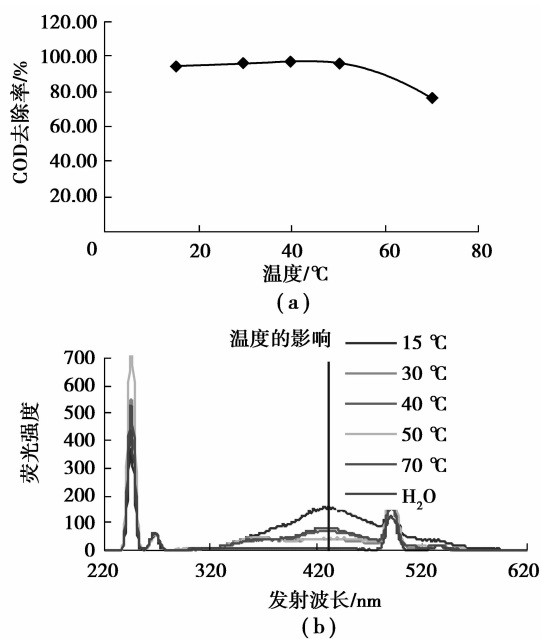


图4 温度对微电解的影响及废水荧光光谱

由图 4(a)可知,6-硝废水的 COD 去除率随温度的增加反而有所下降,但去除率的变化趋势几乎没有多大变化,出现一个平台,可见温度对去除率的影响不是很大,不需要特意控制温度,在各个季节都可以达到处理的要求。

由图 4(b)可知,处理后的废水荧光强度都很小,且不同温度下且变化不大。

#### 2.1.4 铁炭质量比的影响

活性炭 1 g,在不同的铁炭质量比条件下进行微电解反应及 Fenton 反应,其他实验条件同前,实验结果如图 5 所示。

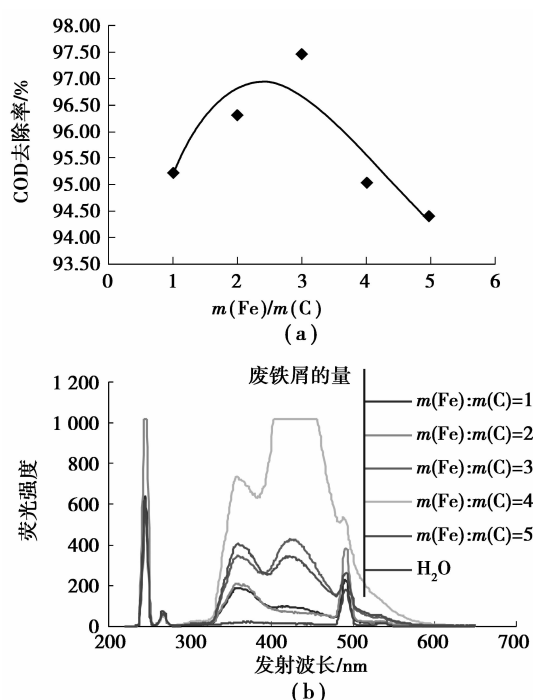


图 5 铁炭比对微电解的影响及废水荧光光谱

由图 5(a)可知,当铁屑的量在 3 g 之前,去除率随着铁屑的量的增加而增加,超过了 3 g 之后 COD 去除率反而随之下降,加入铁屑是为了组成宏观电池,当铁碳质量比较低时,增加铁屑的量可使体系中的原电池阳极表面增多,提高对有机物等的去除效果。但当铁屑的量增多时,使 Fe、C 电极表面失去平衡,效果反而变差。从图 5 可以看出,铁炭质量比为 3:1 时 COD 的去除率达到 97%。

由图 5(b)可知,铁屑构成微电极,但是铁屑的量不足会阻止微电解,达不到处理的效果,随着铁量的增加,微电极数目也不断增加,萘环上的基团慢慢的被脱落下来,之后再 Fenton 氧化反应破坏萘酚结构,使得荧光强度下降。

#### 2.1.5 活性炭(吸附)量的影响

铁粉的量 0.3 g,在不同的活性炭条件下进行微电解反应及 Fenton 反应,其他实验条件同前,实验结果如图 6 所示。

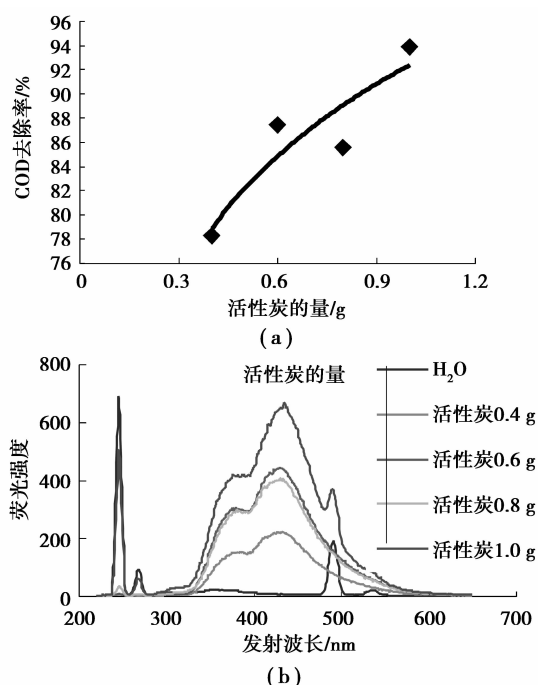


图 6 活性炭用量对微电解的影响及废水荧光光谱

由图 6(a)可知,在 1 g 之前,COD 去除率随活性炭的增加而增加,活性炭与铁屑形成微电解,由于活性炭的量都很小,直接与铁屑形成原电池,增加活性炭的量可使体系中的原电池阴极表面增多,提高对有机物等的去除效果。随着活性炭的量的增加去除率逐渐增加,在铁粉为 0.3 g 时,最佳活性炭的量为 1.0 g。

由图 6(b)可知,增加活性炭的量可使体系中的原电池阴极表面增多,提高对有机物等的去除效果。随着活性炭的量的增加荧光强度下降,变化趋势相当明显,活性炭不仅可以与铁屑构成微电解原理,而且它本身也有吸附作用,量的增加微电解数目增多,吸附的空间也大,废水中的大分子结构很快被除去,荧光强度下降得越明显。

## 2.2 Fenton 氧化的影响因素

#### 2.2.1 pH 值的影响

取微电解出水,调节 pH 值从 1.0 到 6.0。加入 2.5 mL 质量分数为 30% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,反应时间 1 h,调 pH=7~8 后过滤,测 COD。实验结果如图 7 所示。

由图 7(a)可知,Fenton 氧化在酸性情况下的效果比中性条件下的好,在 pH 值为 3 时,6-硝废水的

COD去除率达到90%。pH值升高不仅抑制了HO·的产生,而且导致Fe<sup>2+</sup>以氢氧化物的形式沉淀而失去催化能力,因而pH值越高,处理效率越低。

由图7(b)可知,Fenton氧化法在一定pH值范围内的去除率相差并不是很大,荧光强度和变化趋势都不是很大差别,说明在酸度条件下反应都能正常进行,1,2,4-酸废水中的大分子结构含量有所下降。

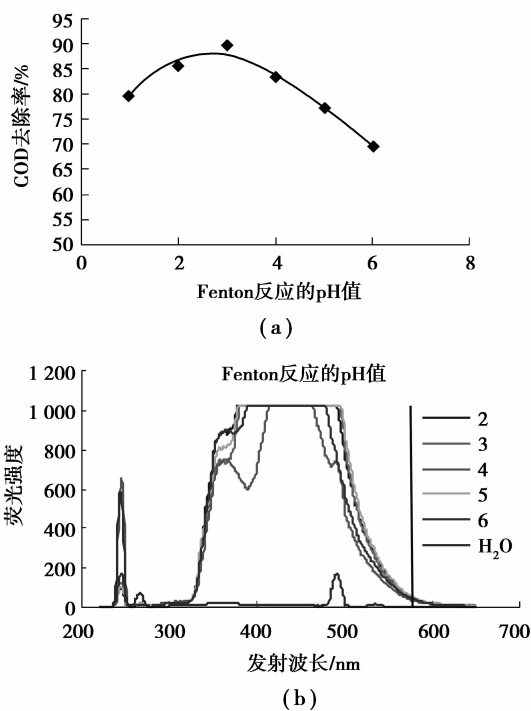
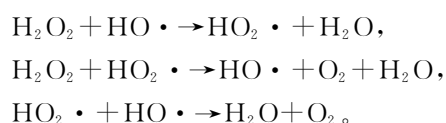


图7 pH值对Fenton反应过程的影响及废水荧光光谱

### 2.2.2 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>用量的影响

分别投加不同量的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>进行Fenton反应,其他微电解反应条件和Fenton反应条件同前。实验结果如图8所示。

由图8(a)可见,随着H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>投入量的增加,1,2,4-酸废水的去除率明显上升,当H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>投加达到2.5 mL时,6-硝废水的去除率达到97.12%,但当H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>投加达到3.5 mL时,COD的去除率明显下降。这是由于在高浓度H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>存在下,会发生下列反应:



因为存在过量的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,产生了大量的过羟基自由基(HO<sub>2</sub>·),虽然HO<sub>2</sub>·能促进自由基链反应,并且HO<sub>2</sub>·本身具有氧化能力,但其效率远低于羟

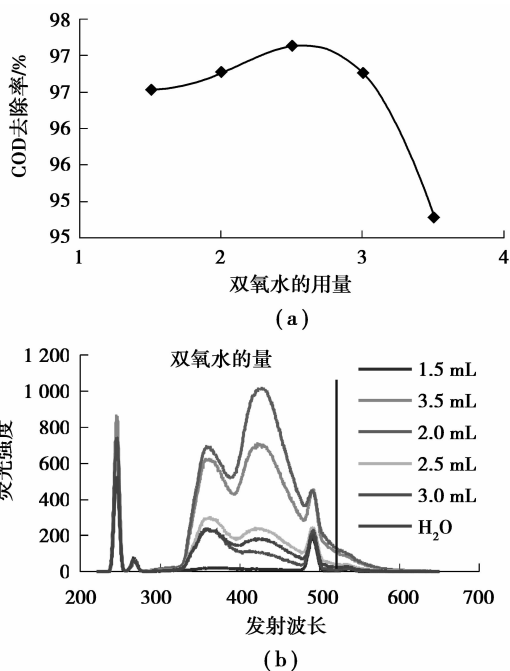


图8 双氧水的量对Fenton反应的影响及废水荧光光谱

基自由基(HO·),而且对一些有机底物,HO<sub>2</sub>·不具备降解能力。

由图8(b)可知,双氧水的量对1,2,4-酸废水的处理有着显著的影响,当双氧水的量增加到2.5 mL左右时荧光强度就有大幅度的下降,说明萘酚结构已被破坏,量的增加,荧光强度的变化却不是很明显,而且在3.5 mL时,荧光强度还有所回升,可见并不是双氧水的量越多越好。

### 2.2.3 $n(\text{Fe}^{2+})/n(\text{H}_2\text{O}_2)$ 对COD去除率的影响

不用微电解预处理,直接加入0.6535 mol/L的FeSO<sub>4</sub>再加入双氧水直接进行Fenton氧化反应,考察 $n(\text{Fe}^{2+})/n(\text{H}_2\text{O}_2)$ 对COD去除率,其他实验条件同前,实验数据如图9所示。

由图9(a)可知,在 $n(\text{H}_2\text{O}_2)/n(\text{Fe}^{2+})$ 在12~49时Fenton氧化均可以达到比较高的氧化水平。Fe<sup>2+</sup>作为催化剂,在催化H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>产生羟基自由基时起着重要的作用。Fe<sup>2+</sup>过多,则消耗H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,使用于氧化有机物的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>量减少,使氧化能力降低;Fe<sup>2+</sup>过少,则会使催化效率降低。

由图9(b)可知, $n(\text{H}_2\text{O}_2)/n(\text{Fe}^{2+})$ 在12~49时,荧光强度变化不大,与COD变化规律一致。

### 2.3 经济性分析

本实验是利用废铁屑及活性炭组成的微电解反应对6-硝废水进行预处理,废水处理中所用的铁屑一般为刨花或废弃的铁屑,每吨废水需要用4元双氧水,0.2元活性炭共计5.4元左右,符合“以废治

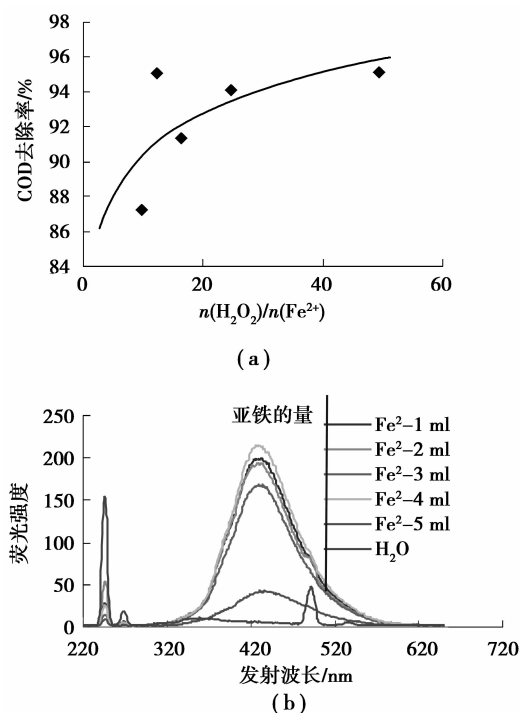


图9  $n(\text{H}_2\text{O}_2)/n(\text{Fe}^{2+})$ 对Fenton氧化过程的影响

废”的方针;而且使用寿命长,操作维护方便,在整个实验过程中废铁屑和活性炭都可以再重复利用,废铁屑的利用率为90%,活性炭的利用率为95%。以处理 $1\text{ m}^3$ 1,2,4-酸废水为参照,其物料消耗及单价如表1。

表1 1,2,4-酸废水处理工艺的经济分析

物料	消耗	单价	成本/元
废铁屑	0.6 kg	2 000 元/吨	1.2
活性炭	0.5 kg	6 000 元/吨	0.2
$\text{H}_2\text{O}_2$ (质量分数为30%)	0.25 L	16 元/L	4.0
总计:			5.4 元

### 3 结 语

1)6-硝生产过程产生的1,2,4-酸母液废水采用铁/微电解工艺和Fenton氧化工艺结合,由单因素实验得到其工艺参数为:1,2,4-酸母液废水用电石渣调节pH值=1,活性炭添加量1%, $m(\text{Fe}):m(\text{C})=3:1$ ,在常温下进行微电解反应3 h,过滤,电石渣调pH值为7~8,再过滤;将微电解后的滤液用硫酸调pH值为3,加入 $\text{H}_2\text{O}_2$ 2.5%(按废水的体积比计算)进行1 h的Fenton反应,电石渣调pH值为7~8过滤。

2)该工艺处理1,2,4-酸母液废水,COD去除率高达95%。 $1\text{ m}^3$ 1,2,4-酸废水处理费用约5.4元。

3)通过对比试验,省去微电解过程直接用硫酸

亚铁溶液代替微电解后的 $\text{Fe}^{2+}$ 进行反应,微电解反应后的COD去除率比用硫酸亚铁直接进行Fenton反应后的COD去除率高得多。

### 参考文献:

- [1] MITTAL A, MITTAL J, MALVIYA A, et al. Adsorption of hazardous dye crystal violet from wastewater by waste materials[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 343(2):463-473.
- [2] MITTAL A, KAUR D, MALVIYA A, et al. Adsorption studies on the removal of coloring agent phenol red from wastewater using waste materials as adsorbents [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 337(2): 345-354.
- [3] HAYDAR S, AZIZ J A. Coagulation - flocculation studies of tannery wastewater using combination of alum with cationic and anionic polymers[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2/3): 1035-1040.
- [4] WANG Y F, GAO B Y, YUE Q Y, et al. Flocculation performance of epichlorohydrin-dimethylamine polyamine in treating dyeing wastewater[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91(2): 423-431.
- [5] ZHAO G H, GAO J X, SHI W, et al. Electrochemical incineration of high concentration azo dye wastewater on the in situ activated platinum electrode with sustained microwave radiation [J]. Chemosphere, 2009, 77(2): 188-193.
- [6] LIN L, YUAN S H, CHEN J, et al. Removal of ammonia nitrogen in wastewater by microwave radiation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2/3): 1063-1068.
- [7] ABOU-ELELA S I, KAMEL M M, FAWZY M E. Biological treatment of saline wastewater using a salt-tolerant microorganism [J]. Desalination, 2010, 250(1): 1-5.
- [8] SIRIANUNTAPIBOON S, CHAIRATTANAWAN K, RARUNROENG M. Biological removal of cyanide compounds from electroplating wastewater (EPWW) by sequencing batch reactor (SBR) system[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/3): 526-534.
- [9] LI S J, ZHANG L, CHEN H L, et al. Complex extraction and stripping of H acid wastewater [J]. Desalination, 2007, 206(1/3): 92-99.
- [10] HU H S, YANG M D, DANG J, et al. Treatment of strong acid dye wastewater by solvent extraction[J]. Separation and Purification Technology, 2005, 42(2): 129-136.
- [11] YANG X Y. Interior microelectrolysis oxidation of polyester wastewater and its treatment technology[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 169(1/3): 480-485.

- [12] RODRIGUES C S, MADEIRA L M, BOAVENTURA R A. Optimization of the azo dye degradation by Fenton's reagent using experimental design [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 987-994.
- [13] MALIK P K, SAHA S K. Oxidation of direct dyes with hydrogen peroxide using ferrous ion as catalyst[J]. *Separation and Purification Technology*, 2003, 31(3): 241-250.
- [14] 赵文生, 邓锡斌, 赵勇胜, 等. 铁炭微电解-Fenton试剂预处理山梨酸废水[J]. *工业水处理*, 2008, 28(3): 48-51.  
ZHAO WEN-SHENG, DENG XI-BIN, ZHAO YONG-SHENG, et al. Pretreatment of sorbic acid wastewater by micro-electrolysis and Fenton oxidation[J]. *Industrial Water Treatment*, 2008, 28(3):48-51.
- [15] 王延峰, 李亚峰. 微电解-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>处理印染废水的实验研究[J]. *工业安全与环保*, 2009, 35(2): 9-10.  
WANG YAN-FENG, LI YA-FENG. Experimental investigation of dye wastewater treatment by using micro-electrolysis-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2009, 35(2): 9-10.
- [16] CHENG H F, XU W P, LIU J L, et al. Pretreatment of wastewater from triazine manufacturing by coagulation, electrolysis, and internal microelectrolysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 146(1/2): 385-392.
- [17] WALLING C. Fenton's reagent revisited[J]. *Accounts of Chemical Research*, 1975, 8(4): 125-131.
- [18] 原金海, 雷菊, 党亮. 铁碳微电解及Fenton氧化法在染料废水处理中的应用[J]. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2010, 12(1): 34-41.  
YUAN JIN-HAI, LEI JU, DANG LIANG. Fe-C micro-electrolysis and Fenton oxidation wastewater treatment in the application[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition*, 2010, 12(1): 34-41.
- [19] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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.

(编辑 郑洁)

(上接第120页)

- [11] 张献民, 蔡靖. 桩基缺陷量化低应变动测研究[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(1): 47-50.  
ZHANG XIAN-MIN, CAI JING. Study of low strain testing of pile defect [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(1): 47-50.
- [12] 阎明礼, 张东刚. CFG桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [13] 佟建兴, 胡志坚. CFG桩复合地基承载力确定[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(7): 87-91.  
TONG JIAN-XING, HU ZHI-JIAN. Identification of the bearing capacity of CFG pile composite foundation[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(7): 87-91.
- [14] 王士杰, 何满潮, 朱常志, 等. GC与CFG桩组合桩型复合地基承载特性研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(10): 2632-2636.  
WANG SHI-JIE, HE MAN-CHAO, ZHU CHANG-ZHI, et al. Research on bearing properties of composite foundation integrated by CFG piles and gravel piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(10): 2632-2636.
- [15] 黄生根. CFG桩复合地基现场试验及有限元模拟分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(5): 1275-1279.  
HUANG SHENG-GEN. Test study and finite element analysis of CFG composite foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1275-1279.
- [16] HUANG J, COLIN J G, HAN J. 3D numerical modeling of a geosynthetic reinforced pile-supported embankment stress and displacement analysis[C]// *The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, September 12-16, 2005, Osaka, Japan. [S. l.]: Millpress Science, [2005]: 913-916.
- [17] REN P, YU Z Q, ZHANG H. Analysis of bearing capacity properties for rammed enlarged carrier CFG piles [C] // *The Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals*, July 31-August 3, 2008, Chengdu, China. [S. l.]: ASCE, [2008]: 2715-2721.
- [18] 刘杰, 张可能. 复合地基荷载传递规律及变形计算[J]. *中国公路学报*, 2004, 17(1): 20-23.  
LIU JIE, ZHANG KE-NENG. Load transfer law and deformation calculating of the composite foundation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2004, 17(1): 20-23.
- [19] 陈善雄, 许锡昌. 柔性荷载下粉喷桩复合地基承载特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(2): 274-278.  
CHEN SHAN-XIONG, XU XI-CHANG. Experimental study on bearing characteristics of dry jet mixing pile composite ground under flexible load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(2): 274-278.

(编辑 郑洁)