

# Ti/RuO<sub>2</sub> 网状电极降解 对硝基苯甲酸废水的研究

李 联<sup>1</sup>, 冯琬茹<sup>1</sup>, 何 平<sup>1\*</sup>, 张小娟<sup>1</sup>, 董发勤<sup>1</sup>, 陈 阳<sup>1</sup>, 李 洪<sup>2</sup>

(1. 西南科技大学材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621010;

2. 国家城市污水处理及资源化工程技术研究中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:**采用刷涂法制备了 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极, 通过 X 射线衍射和扫描电镜对电极的组分和形貌进行了表征。以 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极为阳极, 不锈钢网电极为阴极, 研究了电解电压、pH、温度和电解时间等因素对对硝基苯甲酸废水电化学催化降解的影响。正交实验结果表明, 影响对硝基苯甲酸废水电化学催化降解的顺序依次为 pH、温度、电解时间、电解电压。通过单因素实验得到的电化学降解优化条件为: 电解电压为 2 V, pH 为 3, 温度为 30℃, 电解时间为 180 min。在该条件下, 对硝基苯甲酸废水的 COD 去除率和降解率分别为 79.5%、77.2%。

**关键词:** Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极; 对硝基苯甲酸; 电化学降解; 正交实验

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2016)03-0082-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.03.020

## Preparation of Ti/RuO<sub>2</sub> mesh electrode for degradation of *p*-nitrobenzoic acid wastewater

LI Lian<sup>1</sup>, FENG Wan-ru<sup>1</sup>, HE Ping<sup>1\*</sup>, ZHANG Xiao-juan<sup>1</sup>, DONG Fa-qin<sup>1</sup>,  
CHEN Yang<sup>1</sup>, LI Hong<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2 National Engineering Research Center for Municipal Wastewater Treatment and Reuse, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Ti/RuO<sub>2</sub> coating mesh electrode is prepared by brush coating method. The composition and morphological characteristics of as-prepared electrode are investigated by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. *p*-Nitrobenzoic acid is degraded by using as-prepared electrode as anode and stainless steel mesh electrode as cathode. Various influencing factors, including electrolytic voltage, temperature, pH and electrolytic time, are examined through orthogonal experiment design. The results show that the order of influencing factors on the degradation of *p*-nitrobenzoic acid is: pH > temperature > electrolytic time > electrolytic voltage. On the base of single factor experiment, the optimum conditions are as follows: 2 V of electrolysis voltage, 3 of pH, 30℃ of electrolytic temperature and 180 minutes of electrolysis time. Under such condition, the removal efficiency of COD and degradation rate of *p*-nitrobenzoic acid can reach 79.5% and 77.2%, respectively.

**Key words:** Ti/RuO<sub>2</sub> coating mesh electrode; *p*-nitrobenzoic acid; electrochemical degradation; orthogonal test

对硝基苯甲酸(简称 PNA)广泛用于医药、染料、兽药等有机合成的生产中<sup>[1]</sup>。PNA 具有结构稳定的苯环以及硝基与羧基处于对位的结构特点,被认为是难降解的有毒污染物之一<sup>[2]</sup>。因此,如何有效地降解 PNA 废水具有重要的研究意义。

目前,处理 PNA 废水的方法主要有光催化氧化、臭氧催化氧化、树脂吸附和微生物降解等<sup>[3-6]</sup>。其中,光催化氧化的运行成本较低,但是催化剂的催化效率和稳定性不高。臭氧氧化能力较强,但是设备耗电高,成本高。树脂吸附具有吸附快和操作

方便等优点,但是吸附剂重复利用性差。微生物降解 PNA 废水需要的能耗低,但是微生物可培养性差。

电化学法处理废水的反应装置简单,无二次污染,广泛应用于染料、造纸、炸药、皮革、医药等有机废水处理方面<sup>[7-11]</sup>。电化学处理废水的核心是阳极材料,包括金属电极、石墨电极、钛基氧化物电极和掺硼金刚石电极(BDD)等<sup>[12-15]</sup>。其中 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极的催化活性、使用寿命和耐腐蚀性优于传统电极,在废水处理方便具有广阔的应用前景。

收稿日期: 2015-08-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC13B05); 西南科技大学研究生创新基金项目(15ycx021)

作者简介: 李联(1990-),女,硕士生,主要从事电化学研究,15881423538,460356744@qq.com; 何平(1971-),博士,教授,通讯联系人,0816-6089371,heping@swust.edu.cn。

目前,未见 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极电化学氧化降解 PNA 废水的研究报道。

笔者利用 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极电化学降解 PNA 模拟废水,通过比较降解实验中 PNA 废水 COD 去除率的高低,确定出降解 PNA 模拟废水的最佳条件。

## 1 实验部分

### 1.1 药品和仪器

RuCl<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O,上海久岳化工有限公司生产;K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 及 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O,AR,天津市科密欧化学试剂有限公司生产;对硝基苯甲酸,AR,北京化学试剂公司生产;邻菲罗啉、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaOH、浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、草酸、乙醇和异丙醇,AR,成都市科龙化工试剂厂生产;钛网,陕西宝鸡鑫诺新材料有限公司生产。

DF1731SI3A 型直流电源,宁波中策电子有限公司生产;HJ-3 型数显恒温磁力搅拌器,常州澳华仪器有限公司生产;TM-3000 型扫描电镜(SEM),日本日立公司生产;X<sup>3</sup>pert PRO 型 X 射线衍射仪(XRD),荷兰帕纳科公司生产;U-3900H 型紫外可见分光光度计,日本 HITACHI 公司生产。

### 1.2 电极制备

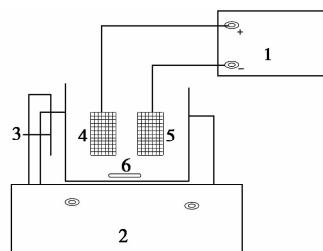
钛网基底预处理步骤如下:①用砂纸打磨钛网,直至呈现金属光泽为止;②将钛网放入盛有质量分数为 20%,温度为 80℃ 的 NaOH 溶液中,超声除油 30 min;③再将钛网置于盛有 20% 草酸溶液的烧杯中,煮沸刻蚀 2 h,使得钛网表面呈现出无金属光泽的灰色麻面,用蒸馏水冲洗干净后于无水乙醇中保存,备用。

外层活性层制备步骤如下:①将 RuCl<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O 和异丙醇按照一定比例混合,同时滴入一定量的浓盐酸,防止溶液发生水解,配制成活性层的刷涂液;②在预处理过的钛网上双面均匀刷涂,于 90℃ 鼓风干燥箱中干燥 15 min 后,将其置于 450℃ 的马弗炉中热分解 10 min,自然冷却,并重复刷涂 15 次;③将电极置于马弗炉中,450℃ 恒温煅烧 2 h,冷却至室

温,取出得到灰黑色的 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极。

### 1.3 电化学降解实验

将 10.0 mg PNA 与 0.20 g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 电解质加入到自来水中,用 1.0 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液和 1.0 mol/L NaOH 溶液调节废水 pH,配成 50 mL 的 PNA 模拟废水。废水的初始 COD 为 250 mg/L。以 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极为阳极,不锈钢网为阴极,在一定条件下电化学降解体积为 50 mL 的 PNA 模拟废水。实验装置如图 1 所示。



1—直流电源;2—恒温磁力搅拌器;3—控温装置;  
4—Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极;5—不锈钢网电极;6—磁力搅拌子

图 1 实验装置示意图

### 1.4 COD 去除率和 PNA 降解率的检测方法

采用重铬酸钾法测试废水的 COD 值,计算式为:

$$\text{COD(以 O}_2 \text{ 计算,mg/L)} = C_1(V_1 - V_2) \times 8000/V_0 \quad (1)$$

$$\text{COD 去除率(\%)} = (\text{COD}_{\text{Cr},0} - \text{COD}_{\text{Cr},t})/\text{COD}_{\text{Cr},0} \quad (2)$$

式中: $C_1$  为 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 溶液的浓度(mol/L); $V_1$  为 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 溶液滴定空白样时的用量(mL); $V_2$  为 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 溶液滴定水样时的用量(mL); $V_0$  为所取水样的体积(mL); $\text{COD}_{\text{Cr},0}$  为降解前 PNA 废水的化学需氧量(mg/L); $\text{COD}_{\text{Cr},t}$  为降解  $t$  时间后 PNA 废水的化学需氧量(mg/L)。

利用紫外可见分光光度计检测 PNA 废水的吸光度,计算式为:

$$A = Kbc \quad (3)$$

$$\text{PNA 去除率(\%)} = (A_0 - A_t)/A_0 \quad (4)$$

式中: $A$  为吸光度; $K$  为 PNA 的吸收系数[L/(mol·cm)]; $b$  为吸收层厚度(cm); $c$  为 PNA 废水的浓度(mol/L); $A_0$  为降解前 PNA 废水的吸光度; $A_t$  为降解  $t$  时间后 PNA 废水的吸光度。

tions[J]. Chemical Reviews,2012,112(2):86-932.

[4] 范俊刚,兰海叶,张志刚,等.树脂基改性球形活性炭的汽油吸附脱硫性能研究[J].石油炼制与化工,2014,45(9):10-15.

[5] Maldonado-Hernandez A J, Yang R T. Desulfurization of liquid fuels by adsorption via  $\pi$ -complexation with Cu(II)-Y and Ag-Y zeolites [J]. Ind Eng Chem Res,2003,42(1):123-129.

[6] Li J R, Sculley J, Zhou H C. Metal-organic frameworks for separa-

[7] 吴乐乐,张青.用于润滑油精制的 FCC 催化剂废渣改性工艺研究[J].石油炼制与化工,2014,45(8):44-48.

[8] 杨世成,李维彬,张淑艳,等. FCC 废催化剂用于石蜡吸附精制过程的研究[J].天津化工,2004,18(5):45-47.

[9] 何捍卫,孟佳,解东梅,等.废 FCC 催化剂吸附苯酚废水[J].粉末冶金材料科学与工程,2012,17(1):69-75. ■

(上接第 81 页)

## 2 结果与讨论

### 2.1 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极的 XRD 分析

Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极的 XRD 图如图 2 所示。

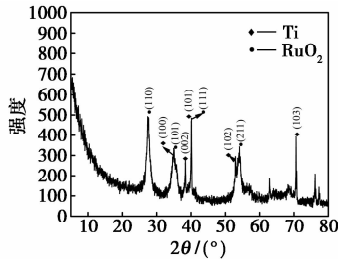
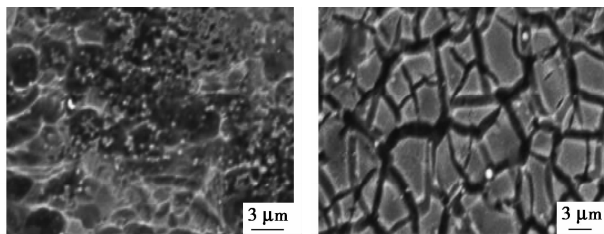


图 2 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极的 XRD 图

由图 2 可知,在  $2\theta$  分别为  $35.09^\circ$ 、 $40.17^\circ$  和  $70.18^\circ$  处出现 Ti 的特征衍射峰,晶面分别为 (100)、(101) 和 (103)<sup>[16]</sup>。在  $2\theta$  为  $27.33^\circ$ 、 $35.91^\circ$ 、 $41.05^\circ$  和  $54.08^\circ$  处出现 RuO<sub>2</sub> 的特征衍射峰,晶面分别为 (110)、(101)、(111) 和 (211)<sup>[17]</sup>。从 XRD 图谱可知,该电极的活性层是金红石结构的 RuO<sub>2</sub>,而金红石结构的物质具有较好的物理性能和化学性能,不仅能够改善电极的寿命,还能提高电极的稳定性。

### 2.2 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极的表面形貌分析

Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极刷的 SEM 图如图 3 所示。



(a) 刷涂前

(b) 刷涂后

图 3 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极的 SEM 图

由图 3 可知,未刷涂的 Ti 网基底呈现出蜂窝状。经过刷涂后的电极表面有较多的龟裂纹,这是因为涂刷在 Ti 网上的溶液在高温下热分解而形成<sup>[18]</sup>。裂纹增加了电极的实际面积,有利于电极催化效果的提高<sup>[19]</sup>。

### 2.3 正交实验

为了研究各影响因子在 PNA 废水处理效果中所占权重,在  $4.0 \text{ g/L Na}_2\text{SO}_4$  电解质条件下,设计了 4 因素 4 水平的正交实验,具体如表 1 所示。

根据所选因素、水平及  $L_{16}(4^4)$  正交实验表,进行了一系列的实验并对实验的结果进行了极差分析,结果如表 2 所示。

表 1  $L_{16}(4^4)$  影响因素和水平

因素	电解电压(A)/ V	pH(B)	温度(C)/ ℃	电解时间(D)/ min
水平 1	2.0	3	20	90
水平 2	2.5	5	30	120
水平 3	3.0	7	40	150
水平 4	3.5	9	50	180

表 2  $L_{16}(4^4)$  正交实验及结果分析

实验号	A	B	C	D	COD 去除率/%
1	1	1	1	1	50.88
2	1	2	2	2	50.03
3	1	3	3	3	32.30
4	1	4	4	4	39.21
5	2	1	2	3	53.81
6	2	2	1	4	40.36
7	2	3	4	1	37.03
8	2	4	3	2	27.96
9	3	1	3	4	70.99
10	3	2	4	3	55.44
11	3	3	1	2	17.05
12	3	4	2	1	20.55
13	4	1	4	2	53.19
14	4	2	3	1	56.24
15	4	3	2	4	29.31
16	4	4	1	3	27.74
$K_1$	183.20	228.87	136.03	164.70	
$K_2$	159.16	202.07	153.70	148.23	
$K_3$	164.03	115.69	187.49	169.29	
$K_4$	166.48	115.46	184.87	179.87	
$\bar{K}_1$	45.8	57.22	34.01	41.18	
$\bar{K}_2$	39.7	50.22	38.43	37.06	
$\bar{K}_3$	41.0	28.92	46.87	43.32	
$\bar{K}_4$	41.62	28.87	46.22	45.00	
R	6.01	28.35	12.86	7.94	

由表 2 可以看出,最优组合为  $A_3B_1C_3D_4$ 。根据极差分析结果可知,PNA 废水降解影响因素的大小顺序依次为 pH、温度、电解时间、电压,且极差分析得出的最优组合为  $A_1B_1C_3D_4$ 。

### 2.4 单因素实验

为了进一步探讨各因素对 PNA 废水降解的影响,在正交实验的基础上进行了单因素实验分析。

具体过程是以极差分析的最优水平组合为基准,只改变1个因素水平,研究其对PNA废水COD去除率的影响。从而寻求出最佳的水平组合。

#### 2.4.1 pH的影响

实验中控制电解电压为2 V,温度为30℃,电解时间为180 min时,PNA废水的COD去除率随pH的变化趋势如图4所示。由图4可知,在酸性条件下,COD去除率先升高后降低,这是由于pH=1的强酸性溶液中H<sup>+</sup>对·OH的淬灭作用较为明显<sup>[20]</sup>。然而pH=5高于PNA的解离常数( $pK_a = 3.42$ ),电负性的PNA与阳极之间的吸引作用使得电极表面堆积过多的PNA离子,降低了电极的活性<sup>[21]</sup>。尤其是碱性条件下的COD去除率下降明显,除了因为PNA在碱性条件下的稳定性较差以外,还由于析氧副反应的竞争,从而极大地降低了PNA废水的去除率<sup>[22]</sup>。本实验中,选取降解pH为3。

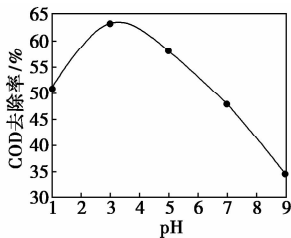


图4 pH对PNA废水COD去除率的影响

#### 2.4.2 温度的影响

实验中控制电解电压为2 V,pH为3,电解时间为180 min时,PNA废水COD去除率随温度变化趋势如图5所示。由图5可知,随着温度的升高,PNA的COD去除率增大。这是因为温度升高,分子运动加快,增加了PNA与电极接触的机会<sup>[23]</sup>。但是温度的升高不能显著地改善PNA的降解效果,反而增加了成本<sup>[24]</sup>。本实验中,选取降解温度为30℃。

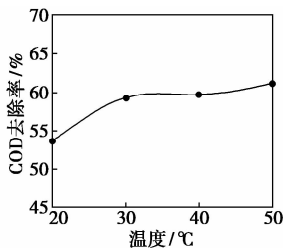


图5 温度对PNA废水COD去除率的影响

#### 2.4.3 电压的影响

实验中控制pH为3,温度为30℃,电解时间为180 min时,PNA废水COD去除率随电压变化趋势如图6所示。由图6可知,当电压未超过2 V时,电

压的增加,直接导致废水中·OH自由基浓度升高,有利于催化电解反应的进行<sup>[25]</sup>;当电压高于2 V时,随着电压的增加,电极上的析氧反应逐渐变得剧烈,产生大量的气泡,电极损耗严重,PNA废水COD去除率下降<sup>[26]</sup>。本实验中,选取降解电压为2 V。

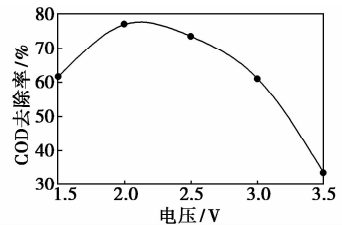


图6 电压对PNA废水COD去除率的影响

#### 2.4.4 电解时间的影响

实验中控制电解电压为2 V,pH为3,温度为30℃时,探究电解时间对PNA废水COD去除率的影响,结果如图7所示。由图7可以看出,在0~180 min的电解时间内,PNA废水的COD去除率随电解时间的增加而增加;但当电解时间超过180 min后,PNA废水的COD去除率略有下降。这是由于电解过程中产生大量白色絮凝物质包裹在电极的表面,降低了电解效率<sup>[27]</sup>。本实验中,选取降解时间为180 min。

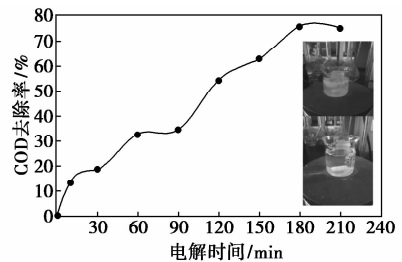
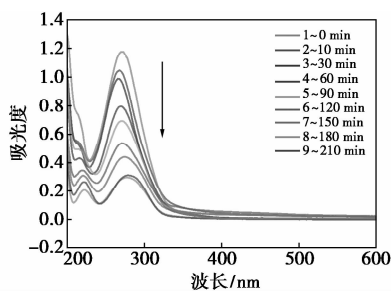


图7 电解时间对PNA废水COD去除率的影响

#### 2.4.5 PNA废水降解的紫外光谱分析

PNA废水降解过程中的UV-vis光谱变化情况如图8所示。

由图8可以看出,PNA的最大特征吸收峰在272 nm处,这是由于PNA的苯环与其相连的发色基团—NO<sub>2</sub>共同作用产生的,并以此作为测定波长。随着电解时间的延长,PNA在272 nm处的吸收峰逐渐减弱,这是由于苯环与NO<sub>2</sub>相连的C—N键被打断,破坏其发色基团<sup>[3]</sup>。在降解180 min后,PNA的降解率达到77.2%,COD去除率达到79.5%,表明Ti/RuO<sub>2</sub>涂层网状电极对PNA废水有较好的降解效果。



1—0 min; 2—10 min; 3—30 min; 4—60 min; 5—90 min;  
6—120 min; 7—150 min; 8—180 min; 9—210 min

图8 PNA 废水降解过程中的 UV-vis 光谱变化图

### 3 结论

通过自制的 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层网状电极电化学降解 PNA 废水。正交实验结果表明,影响因素的大小顺序为 pH、温度、电解时间、电解电压。通过单因素分析得出,在电解电压为 2 V, pH 为 3, 温度为 30℃, 电解时间为 180 min 的最佳条件下, PNA 废水的 COD 去除率和降解率均达到最高,分别为 79.5% 和 77.2%。

### 参考文献

[1] 于振云. 对硝基苯甲酸及其衍生物的合成与应用进展[J]. 化工中间体, 2002, 20: 13-15.

[2] 杨娟, 任源, 肖凯军, 等. 混凝-Fenton 氧化-Fe<sup>0</sup> 还原预处理高浓度硝基苯生产废水[J]. 环境工程学报, 2012, 6(5): 1483-1488.

[3] 石飞, 刘红, 李杨薇, 等. Ba/TiO<sub>2</sub>/MCM-41 光催化降解对硝基苯甲酸[J]. 环境工程学报, 2012, 8: 2629-2634.

[4] 郭中权, 周如禄, 高亮. 臭氧催化氧化处理对硝基苯甲酸废水[J]. 能源环境保护, 2005, 18(5): 39-41.

[5] 唐树和, 陈宏梅, 成姻. 几种吸附树脂对硝基化合物吸附性能的研究[J]. 离子交换与吸附, 2003, 19(2): 147-154.

[6] 张庆. 硝基苯甲酸类废水污泥驯化及其微生物群落结构研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.

[7] Trabelsi H, Bensalah N, Gadri A. Anodic oxidation of aqueous wastes containing hydroquinone on BDD electrode[J]. J Adv Oxid Technol, 2015, 18(1): 155-160.

[8] 覃燕, 颜幼平, 胡剑, 等. 电催化氧化技术处理造纸废水的实验研究[J]. 工业安全与环保, 2013, 39(2): 21-24.

[9] 潘静, 赵晓梅, 杜利成, 等. 炸药废水化学法处理研究进展[J]. 工业水处理, 2014, 34(9): 1-5.

[10] 胡剑, 颜幼平, 覃燕, 等. 电催化氧化技术处理制革综合废水

[J]. 环境工程学报, 2012, 6(10): 3679-3683.

[11] Santos D, Pacheco M J, Gomes A, et al. Preparation of Ti/Pt/SnO<sub>2</sub>-Sb<sub>2</sub>O<sub>4</sub> electrodes for anodic oxidation of pharmaceutical drugs[J]. J Appl Electrochem, 2013, 43: 407-416.

[12] 赵晓梅, 谢正伟, 何平, 等. 电化学催化降解有机废水的研究进展[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(5): 127-133.

[13] Kong Y, Wang Z L, Wang Y, et al. Degradation of methyl orange in artificial wastewater through electrochemical oxidation using exfoliated graphite electrode[J]. New Carbon Mater, 2011, 26(6): 459-464.

[14] Papastefanakis N, Mantzavinos D, Katsaounis A. DSA electrochemical treatment of olive mill wastewater on Ti/RuO<sub>2</sub> anode[J]. J Appl Electrochem, 2010, 40: 729-737.

[15] Kapalka A, Föti G, Comminellis C. The importance of electrode material in environmental electrochemistry: Formation and reactivity of free hydroxyl radicals on boron-doped diamond electrodes[J]. Electrochim Acta, 2009, 54(7): 2018-2023.

[16] 赵晓梅, 何平, 潘静, 等. Ti/TiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub> 电极催化降解 HMX 炸药废水的研究[J]. 工业水处理, 2014, 34(4): 26-30.

[17] Takasu Y, Sugimoto W, Nishiki Y. Structural analyses of RuO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>/Ti and IrO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>/Ti anodes used in industrial chlor-alkali membrane processes[J]. J Appl Electrochem, 2010, 40: 1789-1795.

[18] Kong H, Lu H, Zhang W, et al. Performance characterization of Ti substrate lead dioxide electrode with different solid solution interlayers[J]. J Mater Sci, 2012, 47(16): 6709-6715.

[19] 赵晓梅, 谢正伟, 王昱豪, 等. 用 Ti/SnO<sub>2</sub>-RuO<sub>2</sub> 电极处理黑素金废水[J]. 化工环保, 2013, 33(5): 447-552.

[20] 魏健, 邓雪娇, 宋永会, 等. 电-Fenton 法预处理干法腈纶生产废水[J]. 环境工程学报, 2013, 7(7): 2529-2535.

[21] 宋亚丽, 张光明, 常爱敏, 等. US/ZnO 体系降解水中的对硝基苯甲酸[J]. 环境工程学报, 2014, 8(5): 1797-1801.

[22] 景长勇, 楼静, 廉冬青, 等. 电化学法降解苯酚废水的实验研究[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(2): 16-17.

[23] El-Ashtouky E S Z, El-Taweel Y A, Abdelwahab O, et al. Treatment of petrochemical wastewater containing phenolic[J]. Int J Electrochem Sci, 2013, 8(2): 1534-1550.

[24] 张芳, 李光明, 胡惠康, 等. 电催化氧化技术在含酚废水处理中的应用[J]. 化工进展, 2005, 24(8): 860-864.

[25] 姜辉, 周德鸿, 陈卫国, 等. 三维电极处理氨氮废水的电化学反应特性[J]. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2551-2555.

[26] 李常青, 刘发强, 杨岳, 等. Sb-Dy-SnO<sub>2</sub>/Ti 电极的制备及其对石化污水反渗透浓水的电催化氧化处理[J]. 化工环保, 2014, 34(4): 390-393.

[27] 何国建, 刘晓波, 汪德燧. 三维电极法处理印染废水[J]. 化工环保, 2004, 24(2): 124-127. ■