

# UV-Fenton 催化氧化法对采油废水中多环芳烃的处理效果

李婷<sup>1</sup> 陈冰<sup>1,2\*</sup> 马虹<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学区域能源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 纽芬兰纪念大学工程与应用科学学院, 圣约翰斯 A1B 3X5)

**摘要** 针对采油废水中含有多环芳烃种类多且较难去除的特点, 采用 UV-Fenton 技术对采油废水中多环芳烃的处理效果进行了研究, 通过正交实验和单因素实验, 研究了在 254 nm 波长紫外光照射下,  $\text{Fe}^{2+}$  投加量、 $\text{H}_2\text{O}_2$  投加量、pH 值和光照时间对水样中多环芳烃中的菲和芴处理效果的影响。实验结果显示, 处理初始浓度为 1 000  $\mu\text{g}/\text{L}$  的菲、芴时, 反应的最佳工艺条件为:  $\text{Fe}^{2+}$  浓度为 1.8 mmol/L、 $\text{H}_2\text{O}_2$  投加量为 0.15 mmol/L、pH 值为 4、光照时间 1.25 h。在此条件下, 菲和芴的去除率可达 71.9%。

**关键词** 采油废水 多环芳烃 UV-Fenton

中图分类号 X741 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)10-3475-06

## Catalytic oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons in oil field wastewater by UV-Fenton

Li Ting<sup>1</sup> Chen Bing<sup>1,2</sup> Ma Hong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Regional Energy and Environmental Systems Optimization, Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, St. John's, NL A1B 3X5, Canada)

**Abstract** It is difficult to remove a variety of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) existing in the wastewater generated from oil and gas production. This study focused on the UV-Fenton method and the treatment efficiency for PAHs. The orthogonal test and single factor experiments were applied to examine the influence of the dosage of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{H}_2\text{O}_2$ , pH and UV (254 nm) irradiation time on the removal rates of phenanthrene and fluorene in the water samples. The results showed that the optimum operation conditions for phenanthrene and fluorene removal (initial concentration of 1 000  $\mu\text{g}/\text{L}$ ) were determined as  $\text{Fe}^{2+}$  dosage of 1.8 mmol/L,  $\text{H}_2\text{O}_2$  dosage of 0.15 mmol/L, pH value of 4, exposure time of 1.25 h, the removal rates was 71.9%.

**Key words** oil field wastewater; polycyclic aromatic hydrocarbons; UV-Fenton

随着我国油田采油已进入注水驱油阶段, 许多地区采出的原油含水量已达 70% ~ 80%, 一些油田甚至高达 90%<sup>[1,2]</sup>。因此造成采油废水排放量非常大, 如果不经处理而直接排放到环境中, 不仅会污染土壤和水源, 对环境造成破坏, 而且对生物的健康及生命造成威胁。采油废水的 COD 主要由油和极微量的有机化学添加剂两部分组成。经分析, 在油中, 烃类物质占 95% ~ 99.5%, 其他仅占 0.5% ~ 5%。烃类化合物主要为烷烃、芳烃、不饱和烃、稠环和杂环化合物, 其中烷烃和芳烃含量最高。某油田采出水中含有多环芳烃 34 种, 为萘及其衍生物、蒽及其衍生物、菲、芴<sup>[3-6]</sup>。

多环芳烃 (PAHs) 具有极强的致癌、致畸及致突变性<sup>[7]</sup>, 对环境造成污染的同时严重威胁人类的身体健康。常用的 PAHs 的处理方法主要有 3 类: 物理方法、化学氧化方法和生物降解方法。其中利用化学氧化法处理废水中的 PAHs 得到了广泛的应用, 而这其中尤以 Fenton 法最受关注<sup>[8]</sup>。Fenton<sup>[9]</sup> 在 1894 年首次指出在亚铁离子 ( $\text{Fe}^{2+}$ ) 的催化作用

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51179070)

收稿日期: 2012-04-26; 修订日期: 2012-07-04

作者简介: 李婷 (1984 ~), 女, 硕士研究生, 主要从事水污染控制方面的研究。E-mail: dearliting@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: bingchen05@gmail.com

下,过氧化氢( $H_2O_2$ )具有氧化多种有机物的能力。Fenton 试剂即为  $H_2O_2$  与  $Fe^{2+}$  的组合,具有极强的氧化能力<sup>[10]</sup>。近年来,有研究把紫外光(UV)加入 Fenton 反应,增强了 Fenton 试剂对有机物的氧化能力,同时节约了  $H_2O_2$  和  $Fe^{2+}$  的使用量,被称为 UV-Fenton 光催化氧化技术<sup>[11]</sup>。Fenton 试剂与 UV 相结合,使  $H_2O_2$  的利用率保持在较高水平,同时 UV 和  $Fe^{2+}$  的协同效应<sup>[12]</sup>使  $H_2O_2$  催化分解速率远远大于  $Fe^{2+}$  和 UV 分别催化  $H_2O_2$  的催化分解效率的加和。

本文以菲、芴为代表的 PAHs 为研究对象,研究了在 254 nm 波长条件下 UV-Fenton 体系中处理 PAHs 中菲和芴的过程和效果;通过实验室控制正交实验和单因素实验条件,对光催化氧化采油废水中 PAHs 的影响因素如  $Fe^{2+}$  投加量、pH 值、 $H_2O_2$  投加量、光照时间等进行研究,为利用 UV-Fenton 法处理含 PAHs 的采油废水提供了理论依据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

本实验所用的采油废水为实验室自配模拟废水,该废水中含 PAHs 菲、芴的浓度均为 1 000  $\mu\text{g/L}$ 。硫酸亚铁和 30% 的过氧化氢均为分析纯试剂(北京化工厂);固相萃取装置型号为 QSE-12(天津旗美科技有限公司);固相萃取小柱为 Cleanert PEP 小柱(天津博纳艾杰尔科技有限公司);循环水真空泵型号为 SHZ-III(上海亚荣生化仪器厂);旋转蒸发器型号为 RE-52A(上海亚荣生化仪器厂)。气相色谱-质谱联用仪为 Agilent 7890A/5975GC-MSD。

### 1.2 分析方法

本实验采用固相萃取-气相色谱/质谱联用方法(GC-MS)对菲和芴进行检测。

#### 1.2.1 固相萃取方法

1 L 水样中加入 20 mL 10% 的硝酸溶液。

(1)活化:5 mL 异丙醇和 5 mL 水分别流过萃取小柱。

(2)过样:将处理的水样过萃取小柱。

(3)淋洗:用 5 mL 淋洗液淋洗萃取小柱(300 mL 水 + 700 mL 甲醇 + 2.1 g  $Na_2HPO_4$  + 2.04 g  $KH_2PO_4$ )。

(4)抽干:用循环水真空泵抽真空 30 min。

(5)洗脱:用 4 mL 洗脱液洗脱萃取小柱(90 mL 异丙醇 + 10 mL 冰醋酸 + 200 mL 甲苯,加入到 1 L

石油醚中),收集洗脱液。

(6)用旋转蒸发器浓缩、定容。

#### 1.2.2 气相色谱-质谱分析方法

色谱条件<sup>[13,14]</sup>为:HP-5MS(30 cm  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ )毛细色谱柱,载气 He,柱前压 0.03 MPa,流速 1 mL/min。进样量 1  $\mu\text{L}$ 。进样口温度 260 $^{\circ}\text{C}$ ,不分流进样。初始温度 40 $^{\circ}\text{C}$ ,保持 4 min,以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度升温至 270 $^{\circ}\text{C}$ ,保持 20 min,至样品完全流出。

质谱条件为:EI 电离方式,电离源 70 eV,采用全离子扫描方式,质量范围 45 ~ 600 amu,倍增器电压 1 478 V,离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$ ,四级杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$ 。菲和芴的特征离子分别为 178(179、176)和 166(165、167);色谱保留时间分别为 20.953 min 和 18.696 min,其色谱图如图 1 所示。

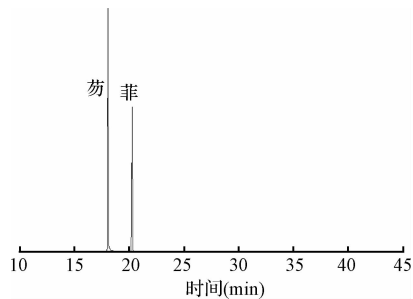


图1 PAHs 色谱图

Fig. 1 Chromatograms of PAHs

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交实验

根据 UV-Fenton 光催化氧化法处理采油废水中 PAHs 的反应机理,选取  $Fe^{2+}$  投加量、 $H_2O_2$  投加量、pH 值、和紫外光照时间 4 个主要因素建立 4 因素 3 水平的正交实验<sup>[15]</sup>,正交实验因素水平设计见表 1。正交实验直观分析结果见表 2。

表 1 正交实验因素水平设计

Table 1 Factors and levels of the orthogonal test

水平	因素			
	$Fe^{2+}$ 浓度 (mmol/L)	$H_2O_2$ 用量 (mmol/L)	光照时间 (h)	pH
1	0.36	0.18	1.5	6
2	0.72	0.06	1.0	4
3	1.80	0.12	0.5	2

根据极差的大小,由表 3 可知光催化降解效率的影响因素主次顺序为: $Fe^{2+}$  浓度 > 光照时间 > pH

表 2 正交实验设计及结果

Table 2 Design and results of the orthogonal test

实验号	Fe <sup>2+</sup> 浓度 (mmol/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 用量 (mmol/L)	光照 时间 (h)	pH	菲去除率 (%)	芴去除率 (%)	总去除率 (%)
1	0.36	0.18	1.5	6	42.8	45.5	43.6
2	0.36	0.06	1.0	4	57.9	65.1	60.0
3	0.36	0.12	0.5	2	40.2	49.5	42.9
4	0.72	0.18	1.0	2	62.2	65.2	63.1
5	0.72	0.06	0.5	6	30.8	27.2	29.7
6	0.72	0.12	1.5	4	39.5	49.8	42.5
7	1.80	0.18	0.5	4	63.9	67.4	64.9
8	1.80	0.06	1.5	2	61.3	65.0	62.4
9	1.80	0.12	1.0	6	54.0	65.0	57.2
K <sub>1</sub>	146.5	171.5	148.5	130.4			
K <sub>2</sub>	135.3	152.2	180.2	167.5			
K <sub>3</sub>	184.5	142.6	137.5	168.4			
k <sub>1</sub>	48.8	57.2	49.5	43.5			
k <sub>2</sub>	45.1	50.7	60.1	55.8			
k <sub>3</sub>	61.5	47.5	45.8	56.1			
R	16.4	9.7	14.3	12.6			

注:K 为同水平的和值;k 为同水平的平均数;R 为极差。

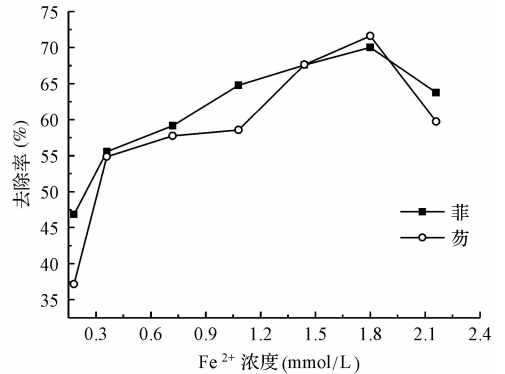
值 > H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量。并且根据均值  $k_i$ , 最佳反应条件初步确定为: Fe<sup>2+</sup> 浓度为 1.80 mmol/L、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量为 0.18 mmol/L、pH 值为 2, 光照时间为 1.0 h。为了进一步确定最优化条件, 还需要对主要影响因素按照正交实验所确定的主次顺序进行单因素实验。

## 2.2 单因素实验

### 2.2.1 Fe<sup>2+</sup> 量对多环芳烃去除率的影响

根据正交试验的结果, 对于 100 mL 水样, 选择实验条件为: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 用量为 0.18 mmol/L、pH 值为 2, 光照时间为 1.0 h, 考察 Fe<sup>2+</sup> 的投加量对 PAHs 中的菲和芴去除效果的影响, 实验结果如图 2 所示。

由图 2 可知, Fe<sup>2+</sup> 用量为 1.8 mmol/L 时去除率最好; 增大或者减少 Fe<sup>2+</sup> 用量导致菲和芴去除效果显著下降。增加 Fe<sup>2+</sup> 用量时, 菲和芴去除率显著下降, 这是因为在 Fenton 试剂 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup> 催化氧化体系中, Fe<sup>2+</sup> 对于 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 分解产生羟基自由基 ·OH 方面起催化作用, 当 Fe<sup>2+</sup> 适量时, 催化效果最好, 能够加快 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 分解产生 ·OH, 提高了对菲和芴的氧化效果。但是当 Fe<sup>2+</sup> 用量增加时, 过多的 Fe<sup>2+</sup> 会消耗 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 生成的 ·OH, 使 ·OH 在开始阶段浓度较大, 增加 ·OH 的复合几率, 同时过多的 Fe<sup>2+</sup> 也会与 ·OH 进行反应<sup>[16]</sup>, 消耗 ·OH, 减少

图 2 Fe<sup>2+</sup> 投加量对多环芳烃去除率影响Fig. 2 Effect of Fe<sup>2+</sup> dosage on removal rate of PAHs

与有机污染物进行反应的 ·OH 量, 因此, 过多的 Fe<sup>2+</sup> 会使 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 利用率下降。另外, 过多的 Fe<sup>2+</sup> 也会被氧化为 Fe<sup>3+</sup> 使水的色度提高, 而且降低了处理效果<sup>[17]</sup>。根据实验结果, 确定 Fe<sup>2+</sup> 最佳投加量为 1.8 mmol/L。

### 2.2.2 光照时间对多环芳烃去除率的影响

图 3 显示了当 100 mL 水样中 Fe<sup>2+</sup> 用量为 1.80 mmol/L、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 投加量为 0.18 mmol/L、pH 值为 2, 在室温下, 光照时间对 PAHs 中菲和芴去除率的影响。

由图 3 可知, 前 75 min 内菲和芴去除率随着反应时间的延长而明显增加, 此后趋于稳定。这是

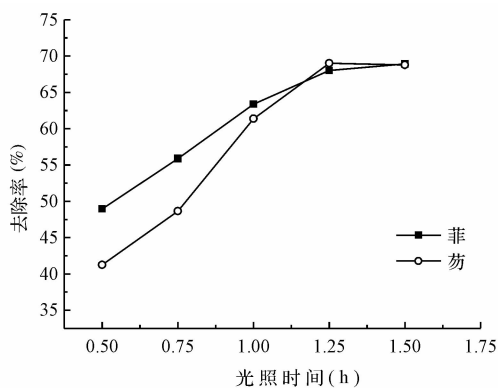


图3 光照时间对多环芳烃去除率的影响

Fig.3 Effect of illumination time on removal rate of PAHs

由于  $H_2O_2$  含量随着反应的进行逐渐减少,导致羟基自由基  $\cdot OH$  的产生受到限制,并且光照时间过久时,  $H_2O_2$  分解产生  $H_2O$  和  $O_2$ ,使  $H_2O_2$  的利用率降低<sup>[18]</sup>,导致菲和芴去除效果不再明显增加。综合考虑处理效果和经济性,最佳的光照时间确定为 1.25 h。

### 2.2.3 pH 值对多环芳烃去除率的影响

对于 100 mL 水样,固定反应条件  $Fe^{2+}$  用量为 1.80 mmol/L,  $H_2O_2$  投加量为 0.18 mmol/L,光照时间 1.25 h,改变 pH 值,探讨 pH 对 PAHs 中菲和芴去除率的影响,结果如图 4 所示。

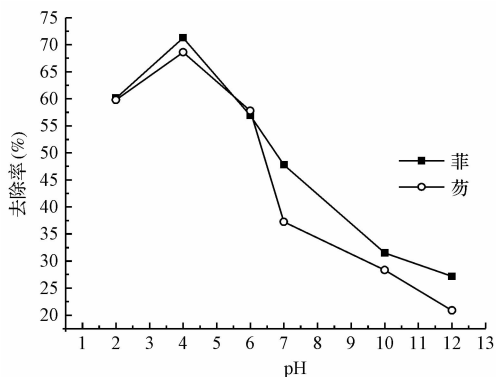


图4 pH 值对多环芳烃去除率影响

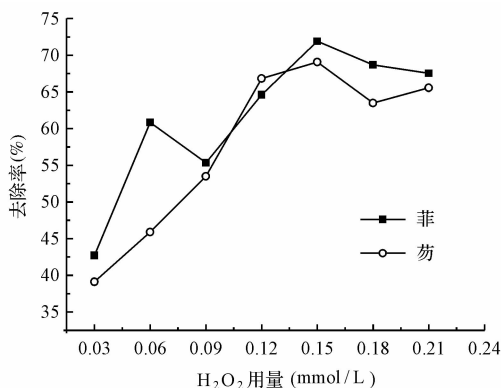
Fig.4 Effect of pH value on removal rate of PAHs

由图 4 可知,当 pH 值在 2~5 时,菲和芴去除率较高;在 pH 值为 4 时,去除率最高,达到 71.9%;当  $pH > 5$  时,去除率明显下降。这是因为当 pH 值较高时,会抑制  $H_2O_2$  分解<sup>[19]</sup>,同时  $Fe^{2+}$  会被氧化成  $Fe^{3+}$ ,并生成  $Fe(OH)_3$  沉淀,导致  $Fe^{2+}$  浓度降低。在 pH 在 6.5~7.5 时,  $Fe^{2+}$  也会部分形成氢氧化物沉淀而失活<sup>[20]</sup>,降低  $Fe^{2+}$  的利用

率,从而降低去除效果。因此确定最佳 pH 值为 4。

### 2.2.4 $H_2O_2$ 量对多环芳烃去除率的影响

过量的  $H_2O_2$  会消耗  $\cdot OH$ ,同时也会增加处理费用,因此有必要讨论  $H_2O_2$  投加量。对于 100 mL 水样,在保持  $Fe^{2+}$  用量为 1.80 mmol/L, pH 值为 4,光照 1.25 h 条件下,改变  $H_2O_2$  投加量,考察  $H_2O_2$  用量对 PAHs 中菲和芴去除率的影响,实验结果如图 5 所示。

图5  $H_2O_2$  用量对多环芳烃去除率的影响Fig.5 Effect of  $H_2O_2$  dosage on removal rate of PAHs

由图 5 可知,随着  $H_2O_2$  用量增加,菲和芴去除率不断增加,当  $H_2O_2$  用量增加到 0.15 mmol/L 时,菲和芴的去除率最高,继续增加  $H_2O_2$  用量,菲和芴去除率没有明显增加。这是由于过量的  $H_2O_2$  会与  $\cdot OH$  发生反应,使  $H_2O_2$  分解无效,降低了去除效果;并且过量的  $H_2O_2$  会将  $Fe^{2+}$  氧化为  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  会抑制  $\cdot OH$  的产生<sup>[21,22]</sup>;同时过量的  $H_2O_2$  在溶液中产生大量气泡,阻碍了反应的进行。所以通过实验可确定最佳的  $H_2O_2$  投加量为 0.15 mmol/L,在此条件下,菲和芴的去除率达到 71.9%。

## 3 结论

(1)本研究采用 UV-Fenton 技术,配置采油废水模拟水样,考察了在 254 nm 波长紫外光照射下,  $Fe^{2+}$  投加量、 $H_2O_2$  投加量、pH 值和光照时间对水样中 PAHs 菲、芴处理效果的影响。4 因素 3 水平的正交实验表明:光催化降解效率的影响因素主次顺序为  $Fe^{2+}$  浓度  $>$  光照时间  $>$  pH 值  $>$   $H_2O_2$  用量;单因素实验表明:反应的最佳工艺条件为  $Fe^{2+}$  投加量为 1.80 mmol/L,  $H_2O_2$  用量为 0.15 mmol/L, pH 值为 4,光照时间为 1.25 h,菲和芴的去除率

可达到 71.9%。

(2) 光催化氧化过程中,  $\text{Fe}^{2+}$  投加量存在最适宜范围。当  $\text{Fe}^{2+}$  浓度过低时, 菲和芴去除率非常低, 随着  $\text{Fe}^{2+}$  用量从 0.36 mmol/L 增加到 1.80 mmol/L, 光催化氧化效率显著增加, 当继续增加  $\text{Fe}^{2+}$  投加量时, 由于  $\text{Fe}^{2+}$  浓度过大, 会消耗羟基自由基  $\cdot\text{OH}$ , 而且会形成氢氧化沉淀而使溶液色度增加, 阻碍光催化氧化反应的进行。

(3) 光催化氧化中,  $\text{H}_2\text{O}_2$  投加量要在适合的范围内, 光催化氧化效率较高。其投加量从 0 增加到 0.15 mmol/L 过程中, 菲和芴去除率显著增加, 而继续增加其投加量时, 菲和芴去除率增长不明显。当  $\text{H}_2\text{O}_2$  用量较低时, 产生的羟基自由基  $\cdot\text{OH}$  较少, 氧化能力较弱, 菲和芴去除率较低; 当  $\text{H}_2\text{O}_2$  用量超过 0.15 mmol/L 时,  $\text{H}_2\text{O}_2$  又和  $\cdot\text{OH}$  发生反应, 失去了继续氧化的能力。因此,  $\text{H}_2\text{O}_2$  既是  $\cdot\text{OH}$  的生成剂, 也是  $\cdot\text{OH}$  的消耗剂。

(4) 在本实验研究中, pH 值的变化会直接影响  $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{Fe}^{3+}$  之间的络合平衡, 从而影响 UV-Fenton 试剂的催化氧化能力。同时, 光照时间变化对光催化氧化效率影响也很大。在 254 nm 波长条件下光照 1.25 h 可基本达到最大降解效果, 在 1.25 h 后菲和芴去除率没有明显变化。

(5) UV-Fenton 光催化氧化技术对于去除采油废水中难降解有机物具有明显的优势, 但其反应条件较为苛刻,  $\text{Fe}^{2+}$  浓度、 $\text{H}_2\text{O}_2$  用量、pH 值的细微改变会引起反应进行程度的较大变化, 需要继续开发和研究可以强化 UV-Fenton 光催化氧化效果的方法。但是对于去除毒性或者难以被其他氧化剂降解的有机物仍然是较好的方法。在实际应用中, 可以将其作为深度处理, 先用其他处理方法处理, 再采用 UV-Fenton 法继续处理, 不仅可以降低处理成本, 同时还能拓宽其使用范围。

## 参 考 文 献

[1] 徐婷, 苏宏智, 李友平. 采油废水回注处理技术的现状及展望. 污染防治技术, **2010**, 23(1): 70-73  
Xu T., Su H. Z., Li Y. P. Present situation and prospect on refilling treatment technology of oil extraction wastewater. Pollution Control Technology, **2010**, 23(1): 70-73 (in Chinese)

[2] 刘国强, 王铎, 段传慧, 等. 外置式超滤膜生物反应器处理油田废水. 化工环保, **2006**, 26(3): 226-230  
Liu G. Q., Wang D., Duan C. H., et al. Treatment of

oil field wastewater with recirculated ultrafiltration membrane bioreactor. Environmental Protection of Chemical Industry, **2006**, 26(3): 226-230 (in Chinese)

- [3] 陈进富, 黄军荣, 吴芳云. 油田采油污水的 COD 构成分析. 工业水处理, **2002**, 22(8): 29-31  
Chen J. F., Huang J. R., Wu F. Y. COD composition analysis of oilfield effluent. Industrial Water Treatment, **2002**, 22(8): 29-31 (in Chinese)
- [4] Madian E. S., Moelyodihardjo T., Snavely E. S., et al. Treating of produced water for surface discharging at the Arun Gas Condensate Field. 1997 SPE Annual Technical Conference, San Antonio Texas USA, **1997**
- [5] Fatone F., Bolzonella D., Battistoni P., et al. Removal of nutrients and micropollutants treating low loaded wastewaters in a membrane bioreactor operation the automatic alternate-cycles process. Desalination, **2005**, 183(1-3): 395-405
- [6] 李凌波, 严松, 曾向东, 等. 油田采出水中有机物组成分析. 石油化工, **2002**, 31(6): 472-475  
Li L. B., Yan S., Zeng X. D., et al. Analysis of organic compounds in oilfield produced water. Petrochemical Technology, **2002**, 31(6): 472-475 (in Chinese)
- [7] 程家丽, 黄启飞, 魏世强, 等. 我国环境介质中多环芳烃的分布及其生态风险. 环境工程学报, **2007**, 1(4): 138-144  
Cheng J. L., Huang Q. F., Wei S. Q., et al. A review on distribution and risks of pollution from polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in China. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2007**, 1(4): 138-144 (in Chinese)
- [8] 何立平, 杨迎春, 徐成华, 等. Fe/活性炭多相类 Fenton 法湿式氧化罗丹明 B 废水的研究. 环境工程学报, **2009**, 3(8): 1433-1437  
He L. P., Yang Y. C., Xu C., et al. Degradation of rhodamine-B wastewater by heterogeneous Fenton-like reaction using active carbon-Fe. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2009**, 3(8): 1433-1437 (in Chinese)
- [9] Fenton H. J. Oxidation of tartaric acid in the presence of iron. Journal of the Chemical Society, Transactions, **1894**, 65: 899-910
- [10] 程丽华, 黄君礼, 王丽, 等. Fenton 试剂的特性及其在废水处理中的应用. 化学工程师, **2001**, 84(3): 24-25  
Cheng L. H., Huang J. L., Wang L., et al. Property and application in wastewater treatment of Fenton. Chemical Engineer, **2001**, 84(3): 24-25
- [11] Otoberos E., Legrini O., Mutler M. Large scale devel-

- opment of a light-enhanced Fenton reaction by optimal experimental design. *Water Science and Technology*, **1997**, 35(4):223-230
- [12] Goi A., Trapido M. Hydrogen peroxide photolysis Fenton reagent and photo-Fenton for the degradation of nitrophenol a comparative study. *Chemosphere*, **2002**, 46(6):913-922
- [13] Orecchio S., Ciotti V. P., Culotta L. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coffee brew samples: analytical method by GC-MS, profile, levels and sources. *Food and Chemical Toxicology*, **2009**, 47(4):819-826
- [14] 牛宏亮, 周围, 王波. 气相色谱-质谱法测定烤羊肉串中的多环芳烃. *光谱实验室*, **2010**, 27(4):1380-1384  
Niu H. L., Zhou W., Wang B. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in lamb kebab by gas chromatography-mass spectrometry. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, **2010**, 27(4):1380-1384
- [15] 李云雁, 胡传荣. 实验设计与数据处理. 北京: 化学工业出版社, **2008**
- [16] Delaat J., Gallard H. Catalytic decomposition of hydrogen peroxide by Fe (III) in homogeneous aqueous solution: Mechanism and kinetic modeling. *Environmental Science and Technology*, **1999**, 33(16):2726-2732
- [17] 乔瑞平, 杨旭, 龙可明, 等. UV-Fenton 法处理草浆造纸废水的研究. *工业水处理*, **2007**, 27(10):31-33  
Qiao R. P., Yang X., Long K. M., et al. UV-Fenton oxidation of the straw pulp and paper making effluent. *Industrial Water Treatment*, **2007**, 27(10):31-33 (in Chinese)
- [18] 杨文忠, 陈戈, 王海峰. Fenton 试剂和 UV/Fenton 试剂联合作用处理硝基苯废水. *南京化工大学学报*, **1998**, 18(1):24-27  
Yang W. Z., Chen G., Wang H. F. Study of the nitrobenzene wastewater treatment by Fenton reagent and UV-Fenton reagent. *Journal of Nanjing Chemical University*, **1998**, 18(1):24-27 (in Chinese)
- [19] 刘磊, 肖艳波, 高明. UV-Fenton 试剂降解水中苯酚的研究. *长春工业大学学报(自然科学版)*, **2009**, 30(1):33-36  
Liu L., Xiao Y. B., Gao M. Study on phenol degradation in water UV-Fenton reagent. *Journal of Changchun University of Technology (Nature Science Edition)*, **2009**, 30(1):33-36 (in Chinese)
- [20] Zepp R. G., Faust B. C., Hoigne J. Hydroxyl radical formation in aqueous reactions (pH 3-8) of iron (II) with hydrogen peroxide: The photo-Fenton reaction. *Environmental Science and Technology*, **1992**, 26(2):313-319
- [21] 陈传好, 谢波, 任源, 等. Fenton 试剂处理废水中各影响因子的作用机制. *环境科学*, **2000**, 21(3):93-96  
Chen C. H., Xie B., Ren Y., et al. The mechanism of affecting factors in treating wastewater by Fenton reagent. *Environmental Science*, **2000**, 21(3):93-96 (in Chinese)
- [22] 刘冬莲, 黄艳斌. OH 的形成机理及在水处理中的应用. *环境科学与技术*, **2003**, 26(2):44-46  
Liu D. L., Huang Y. B. Hydroxide free radical: Its formation and application in water treatment. *Environmental Science and Technology*, **2003**, 26(2):44-46 (in Chinese)