

# 微电解-生物滤池等耦合处理 抗生素类混合工业废水

陈建发<sup>1</sup>, 刘福权<sup>2</sup>

(1. 漳州职业技术学院食品与生物工程系, 福建 漳州 363000;

2. 福州江阴工业区污水处理厂, 福建 福州 353000)

**摘要:** 针对抗生素工业废水极难处理特点, 采用“微电解 + A<sup>2</sup>O 法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合技术处理以抗生素类制药废水为主的混合工业废水。实验结果表明, 进水 COD<sub>Cr</sub> 质量浓度 235 ~ 667 mg/L, NH<sub>3</sub>-N 质量浓度 28.2 ~ 72.3 mg/L, TP 质量浓度 4.52 ~ 19.6 mg/L, 色度为 69 ~ 151 倍, pH 6 ~ 9, 设计流量 30.0 L/h 条件下, 系统取得了良好的处理效果, 其 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度的平均去除率分别达到 90.0%、94.1%、97.9% 和 79.4%, 出水 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度等指标均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准, 该工艺处理效果稳定可靠, 运营管理较简单。

**关键词:** 微电解; A<sup>2</sup>O 法; 絮凝沉淀; 生物滤池; 抗生素类; 混合工业废水

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)02-0120-04

## Treatment of antibiotics-based mixed industrial wastewater by microelectrolysis coupled biofilter

CHEN Jian-fa<sup>1</sup>, LIU Fu-qian<sup>2</sup>

(1. Department of Food and Biotechnology Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China;

2. Fuzhou Jiangyin industrial district sewage treatment plant, Fuzhou 353000, China)

**Abstract:** According to the refractory feature of antibiotic industrial wastewater, the micro-electrolysis + A<sup>2</sup>O + flocculation + biofilter method is used to treat antibiotic pharmacy-based mixed industrial wastewater. The results show that the treatment effect is good under the following conditions: 235 - 667 mg/L of the COD<sub>Cr</sub> concentration, 28.2 - 72.3 mg/L of the concentration of NH<sub>3</sub>-N, 4.52 - 19.6 mg/L of the concentration of TP, 69 - 151 times of the chromaticity, 6 - 9 of the pH and 30L/h of the design flow. The average removal efficiency of COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>3</sub>-N, TP and chromaticity can reach 90.0%, 94.1%, 97.9% and 79.4%, respectively. The residual COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>3</sub>-N, TP and chromaticity in effluents achieve the first grade A standard of Municipal Wastewater Treatment Plant Discharge Standard (GB 18918—2002). The treatment effect of this process is stable and reliable with easy management.

**Key words:** micro-electrolysis; A<sup>2</sup>O method; flocculation; biofilter; antibiotics; mixed industrial wastewater

抗生素生产废水作为一类成分复杂、色度高、生物毒性大、含多种抑制物质的高浓度难降解有机废水, 是目前国内外工业污水处理的难点和热点<sup>[1-6]</sup>。某大型工业集中区污水厂采用“水解酸化 + 改进型 SBR + 臭氧氧化 + 絮凝沉淀 + 曝气生物滤池”组合技术处理该区以抗生素类制药废水为主的混合工业废水, 该工业区污水厂进水特点为水质、水量变化较大, 以抗生素类制药废水为主, BOD<sub>5</sub>/COD<sub>Cr</sub> 比低, 废水极难生物降解, 运营实践表明, 该工艺只能达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996) 一级排放标准的要求。随着环保排放标准的日益严格, 能否开发一套针对抗生素废水经济有效的处理新工艺, 使其满足更高的排放标准一直是污水处理业界非常关注的一个课题。

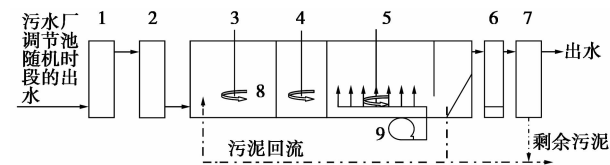
A<sup>2</sup>O 工艺直接处理工业废水的报道较少, 特别是以抗生素类制药为主的工业废水未见报导。生物滤池对以抗生素类制药为主的工业废水处理也未见报导。本课题在国内外研究的基础上, 采用“微电解 + A<sup>2</sup>O 法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合技术, 以实际工业废水为试验水质, 研究该组合工艺对该混合工业废水的深度处理效果。

## 1 试验工艺流程及方法

### 1.1 试验工艺流程

如图 1 所示。在试验装置中, 除微电解塔外, 其余反应器采用的是有机玻璃池体。微电解塔材质为碳钢(内涂耐酸碱防腐涂料)。填料采用某公司提供的新型催化活性微电解填料, 由具有高电位差的

金属合金融合催化剂,并采用高温微孔活化技术冶炼而成,密度 $1.0\text{ t/m}^3$ ,比表面积 $1.2\text{ m}^2/\text{g}$ ,空隙率65%,化学成分(质量分数):铁75%~85%,碳10%~20%,催化剂5%。具有铁炭一体化、熔合催化剂、微孔架构式合金结构、比表面积大、密度小、活性强、电流密度大、作用水效率高特点,作用于废水,可高效去除COD、降低色度、提高可生化性,处理效果稳定,可避免传统微电解工艺运行过程中的填料钝化、板结等现象。微电解装置设计进水流量 $Q=1\ 000\text{ L/h}$ ,出水加碱进行酸碱调节,其经沉淀后经蠕动泵再进入后续试验装置。



1—微电解塔;2—中沉池;3—厌氧水解池;4—缺氧池;  
5—带泥水自动分离的好氧池;6—絮凝沉淀池;  
7—两级生物滤池;8—可调速搅拌器;9—曝气机

图1 试验装置流程图

为便于研究“微电解 +  $A^2O$  法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合工艺对工业废水的处理效果,试验中各生化处理单元池体的水力停留时间参考该污水处理厂的相应单元的水力停留时间,总停留时间与污水厂基本一致,各反应器具体尺寸及有效容积如表1所示。各个反应器之间水力连通,其中带泥水自动分离的好氧池的污泥全部回流至厌氧水解池(进水流量 $q=30.0\text{ L/h}$ ),进水、污泥回流及加药均通过统一型号蠕动泵实现。

表1 各反应器尺寸及水力停留时间

反应器	a/cm	b/cm	H/cm	有效容积/L	水力停留时间/h
微电解塔	$\phi 120$		280	2000	2.0
厌氧水解池	100	100	60	500	16.7
缺氧池	100	20	60	100	3.3
好氧池	100	135	60	500	16.7
絮凝沉淀池	100	35	40	75	2.5
第一级生物滤池	40	40	110	48	1.6
第二级生物滤池	40	40	110	48	1.6

## 1.2 接种污泥

试验所用接种污泥直接取自该污水处理厂相应处理单元的活性污泥,无须进行培养。经镜检发现,活性污泥有大量的鞭毛虫、钟虫等原生动物和轮虫

等后生动物,表明污泥活性很好。

## 1.3 试验水质及试验方法

试验在该工业区污水处理厂现场进行,参照该污水处理厂化验室的监测数据,调节池出水主要污染物的日平均质量浓度为:进水 $\text{COD}_{\text{Cr}}$  235~667 mg/L,  $\text{NH}_3\text{-N}$  28.2~72.3 mg/L, TP 4.52~19.6 mg/L, pH 6~9。试验装置的进水取自污水处理厂调节池随机时段的出水。小试系统经过1周调试成功后,在30 L/h的水力负荷条件下,研究“微电解 +  $A^2O$  法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合工艺去除 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP的效果。本试验设计处理水量为30 L/h,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,设计进水、出水水质见表2。

表2 设计进、出水水质

监测项目	$\text{COD}_{\text{Cr}}$	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	色度
进水	$\leq 500$	$\leq 60$	$\leq 8$	$\leq 100$
出水	$\leq 50$	$\leq 5$	$\leq 0.5$	30

## 1.4 检测项目及分析方法

试验中检测的主要污染物指标为化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ )、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、总磷(TP)和色度。水质分析方法均按照《水和废水监测分析方法》测定<sup>[7]</sup>。

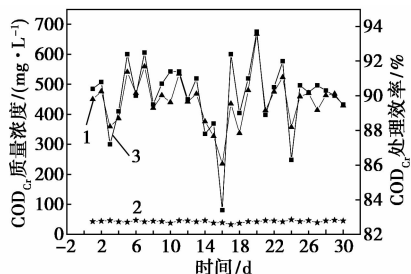
## 2 试验结果与讨论

### 2.1 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除

进水 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 质量浓度为235~667 mg/L,平均445 mg/L,出水 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 质量浓度为33~49 mg/L,平均43 mg/L, $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 去除效率为83.4%~93.7%,平均去除效率为90.0%。

从图2明显看出,进水有机物质量浓度波动较大,但经过该工艺处理后,出水水质相对稳定。分析其原因,是由于该工艺微电解单元新产生的铁表面及反应中产生的大量初生态的 $\text{Fe}^{2+}$ 和原子H具有高化学活性,能改变废水中许多有机物的结构和特性,使有机物发生断链、开环,大分子变成小分子,难降解转变成易降解;微电池电极周围的电场效应也能使溶液中的带电离子和胶体富集并沉积在电极上而除去;另外反应产生的 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 及其水合物具有强烈的吸附絮凝活性,能进一步提高 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 处理效果。而该组合工艺的生物处理单元 $A^2O$ 首先利用厌氧工艺把废水中大分子物质转化为小分子有机物,提高废水的可生化性,之后利用好氧工艺进一步

处理废水中的有机物,因而发挥了很好的生物降解作用<sup>[5-8]</sup>。另外,生物处理单元生物滤池的滤材表面生成一层凝胶状生物膜(细菌类、原生动物、藻类、菌类等),从表面向内部逐步形成一个溶解氧梯度,填料及生物膜表面形成好氧区,往里是缺氧区,再往其内部形成缺氧区或厌氧区,形成无数个微小的 A<sup>2</sup>O 单元,具有很好的有机物生物降解作用。



1—进水 COD<sub>Cr</sub> 质量浓度;2—出水 COD<sub>Cr</sub> 质量浓度;  
3—COD<sub>Cr</sub> 处理效率

图 2 COD<sub>Cr</sub> 去除效果

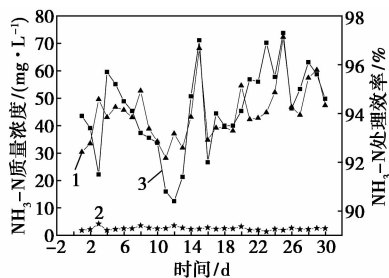
以上分析表明,采用“微电解 + A<sup>2</sup>O 法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合工艺处理以抗生素类制药为主的混合工业废水,进水 COD<sub>Cr</sub> 浓度为 235 ~ 667 mg/L,出水 COD<sub>Cr</sub> 浓度为 33 ~ 49 mg/L,达到一级排放 A 标准要求,取得良好的有机物去除效果,而且该工艺具有较强的抗冲击负荷能力。

### 2.2 NH<sub>3</sub>-N 的去除

如图 4 所示,当进水氨氮质量浓度为 28.2 ~ 72.3 mg/L,平均 44.8 mg/L;试验最终出水氨氮质量浓度为 1.37 ~ 4.21 mg/L,平均 2.50 mg/L;氨氮去除效率为 90.4% ~ 97.3%,平均去除效率为 94.1%。

按照经典氨氮去除理论,氨氮的去除可以分为硝化和反硝化 2 个阶段,作用微生物分别为好氧自养的硝化细菌和厌氧异养的反硝化细菌,这 2 种微生物的特性和生存条件各不相同,因此,这 2 种微生物往往不能存在于载体或者反应器的同一位置<sup>[12]</sup>。根据这一理论,A<sup>2</sup>O 单元同时具有好氧池、缺氧池和厌氧池,完全具有实现同步硝化、反硝化的条件,可以实现对氨氮的有效去除。在生物滤池,由于在某些孔隙结构复杂的填料表面及其内部形成的生物膜,从表面向内部逐步形成一个溶解氧梯度,填料及生物膜表面形成好氧区,其内部形成缺氧区或厌氧区,因而生物滤池也可以实现在同一个生物膜系统内的同步硝化、反硝化,从而实现高效脱氮。因此,该工艺的厌氧段和好氧段发挥了较好的硝化与反硝

化作用。



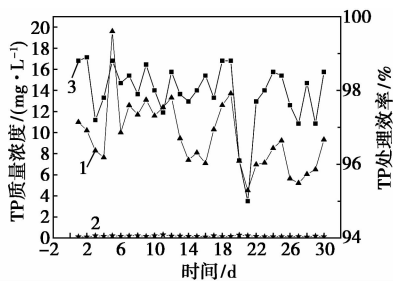
1—进水 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度;2—出水 NH<sub>3</sub>-N 质量浓度;  
3—NH<sub>3</sub>-N 处理效率

图 3 NH<sub>3</sub>-N 去除效果

以上分析表明,采用“微电解 + A<sup>2</sup>O 法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合工艺处理以抗生素类制药为主的混合工业废水,进水氨氮质量浓度为 28.2 ~ 72.3 mg/L,出水氨氮质量浓度为 1.37 ~ 4.21 mg/L,达到一级 A 标准要求,而且对进水氨氮质量浓度较大变化范围的抗冲击负荷能力较强。

### 2.3 TP 的去除

从图 4 中可以看出,该工艺的生物除磷效果很好。进水 TP 质量浓度为 4.52 ~ 19.6 mg/L,平均 9.55 mg/L;实验出水 TP 浓度为 0.106 ~ 0.324 mg/L,平均 0.182 mg/L,远低于一级 A 标准 0.5 mg/L 的要求;TP 总去除效率为 95.0% ~ 98.9%,平均总去除效率为 97.9%。



1—进水 TP 质量浓度;2—出水 TP 质量浓度;3—TP 处理效率

图 4 TP 去除效果

试验中的微电解单元出水 pH 很低,为 2 ~ 4,加碱进行调节,首先是防止酸性过强对后续处理单元造成冲击,其次反应产生的 Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 及其水合物具有强烈的吸附絮凝活性,有效去除了一大部分磷,之后污水再进入生物处理单元进行生物除磷。

现有的生物除磷技术普遍通过创造适宜的环境让聚磷菌在厌氧条件下释放菌体内的磷,然后在好氧条件下以超过自身代谢需求的量过量吸收水中的磷元素进入菌体,最终将聚磷菌以剩余污泥的形式排出废水处理系统。因此,磷的去除实际上只是将

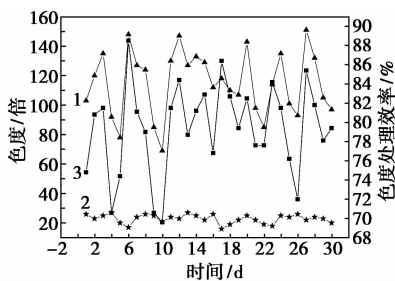
水体中的磷转移到微生物体内,进而以剩余污泥的形式排出污水处理系统外,并未真正将磷分解掉<sup>[12]</sup>。试验中的生化处理单元 A<sup>2</sup>O 里厌氧池的聚磷菌在厌氧条件下很好释放出菌体内的磷,到好氧池又以超过自身代谢需求的量过量吸收水中的磷元素进入菌体,然后通过排放剩余污泥的形式排出废水处理系统。之后污水进入絮凝沉淀池,通过化学除磷又去除一大部分磷。最后进入生物滤池,由于在某些孔隙结构复杂的填料表面及其内部形成的生物膜上,从表面向内部逐步形成一个溶解氧梯度,让聚磷菌在厌氧条件下释放菌体内的磷,然后在好氧条件下吸收水中的磷元素进入菌体,实现了在同一个生物膜系统内的同步释放磷和吸收磷,从而实现高效除磷。

实验表明,采用“微电解 + A<sup>2</sup>O 法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合工艺处理以抗生素类制药为主的混合工业废水,进水 TP 质量浓度为 4.52 ~ 19.6 mg/L,以生物除磷为主,辅助化学除磷,取得了很好的除磷效果。

#### 2.4 色度的去除

废水中的致色物质主要是水中溶解态或者胶体态带有生色基团的有机物,如生活污水中的腐殖质、工业废水中的重氮、偶氮化合物和金属离子等。

从图 5 中可以看出,该工艺的脱色效果很好。进水色度为 69 ~ 151 倍,平均 115 倍;出水色度为 16 ~ 27 倍,平均 23 倍,低于一级 A 标准 30 倍的要求;色度总去除效率为 69.6% ~ 88.5%,平均总去除效率为 79.4%。



1—进水色度;2—出水色度;3—色度处理效率

图 5 色度去除效果

该系统对污水中色度的去除主要通过 2 种作用:首先,微电解产生的强氧化作用,使有机物发生断链、开环,对污水中的致色物质具有很好的去除效果;其次,活性污泥中的微生物菌群对污水中致色物质如腐殖质等具有生物降解作用,将其分解成为无色的小分子化合物,从而使水体色度显

著降低<sup>[12-19]</sup>。

以上分析表明,采用“微电解 + A<sup>2</sup>O 法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合工艺处理以抗生素类制药为主的混合工业废水,进水色度为 69 ~ 151 倍,平均 115 倍;实验出水色度为 16 ~ 27 倍,平均 23 倍,达到一级 A 标准要求,而且对进水色度较大变化范围的抗冲击负荷能力较强。

### 3 结论

(1) 提出了“微电解 + A<sup>2</sup>O 法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合工艺深度处理难生物降解的抗生素类制药废水为主的混合工业废水。进水质量浓度 COD<sub>Cr</sub> 235 ~ 667 mg/L、NH<sub>3</sub>-N 28.2 ~ 72.3 mg/L、TP 4.52 ~ 19.6 mg/L,色度为 69 ~ 151 倍、pH 6 ~ 9、设计流量 30.0 L/h 条件下,系统取得了良好的处理效果,其 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP、色度的平均去除效率分别达到 90.0%、94.1%、97.9%、79.4%,出水 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 和色度等指标均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,并且该工艺处理效果稳定可靠,运行成本较低。

(2) 与目前该工业园区污水处理厂采用的“水解酸化 + 改进型 SBR + 臭氧氧化 + 絮凝沉淀 + 曝气生物滤池”工艺相比,本文中提出的“微电解 + A<sup>2</sup>O 法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合工艺处理效果更佳,出水达到“一级 A 标准”,更具技术优越性。

(3) 提出的组合工艺处理以抗生素类制药为主的混合工业废水,具有工艺耐冲击负荷强,不易受进水水质波动及其他因素影响,容易获得稳定的磷和氮去除,且生化污泥分开不会影响微生物活性,污泥沉降性能好,无污泥膨胀现象的特点。由此可见,“微电解 + A<sup>2</sup>O 法 + 絮凝沉淀 + 生物滤池”组合工艺作为难生物降解的抗生素类制药废水为主的混合工业废水深度处理工艺具有很好的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 曹猛,冉阿倩,赵应宏,等. 预处理 + SBR + MBR 处理抗生素制药废水试验研究[J]. 工业水处理,2010,30(7):28-32.
- [2] 任健,马宏瑞,马炜宁,等. Fe/C 微电解-Fenton 氧化-混凝沉淀-生化法处理抗生素废水的试验研究[J]. 水处理技术,2011,(3):84-87.
- [3] 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,(7):1457-1462.

仍然没有得到很好地解决<sup>[8]</sup>。研究大型、高效、可靠的细颗粒脱水设备,不仅能够降低滤饼水分,有利于物料回收,而且还可以节约能源、减少运力、保护环境,对矿物的洗选加工和洁净煤技术的发展都有着深远的意义。

## 2 高铝粉煤灰生产中过滤分离工艺存在的主要问题

高铝粉煤灰生产氧化铝的工艺如图1所示。在整个工艺流程中涉及了多个过滤分离操作。主要有:

(1)在粉煤灰进行预脱硅工序后,通过泵输送进入分离与洗涤工序,在此工序内,通过过滤设备完成脱硅粉煤灰和硅酸钠溶液的分选<sup>[9]</sup>。

(2)预脱硅后分离得到的铝酸钠溶液进一步加工生产活性硅酸钙,经过过滤分离操作得到活钙产品,并回收氢氧化钠溶液<sup>[10]</sup>。

(3)在熟料溶出后经过过滤分离形成固相的硅钙渣和液相的铝酸钠溶液<sup>[11]</sup>。

(4)得到的硅钙渣送往硅钙渣脱碱工序与电石渣或者石灰石反应,再经过过滤分离单元生成符合质量要求的副产品硅钙渣<sup>[12]</sup>。

这些工序中过滤操作的稳定进行是正常生产的前提和保证。然而,由于在过滤操作中对要分离的物料缺少系统的物性测试与分析,对于已选择好的过滤分离设备不能科学合理地确定操作条件,致使

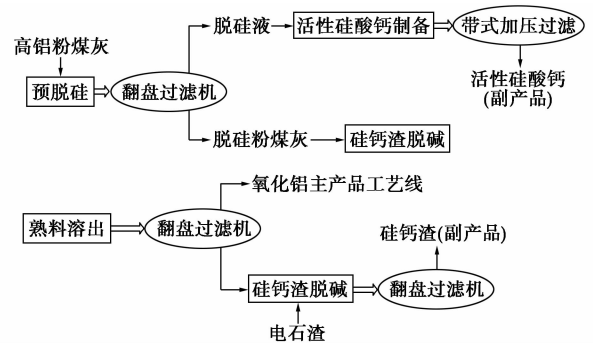


图1 高铝粉煤灰生产氧化铝的工艺

分离精度低,生产效率不高。例如在预脱硅处理后物料进入翻盘过滤器,其进料浓度、进料速度会影响形成的滤饼厚度,进而影响过滤效率和过滤效果,因此定量研究滤饼厚度与处理量之间的关系的问题亟待解决。

此外,不能根据具体的情况选择合理的过滤介质,以致无法满足或提高过滤截留精度与处理量的要求。例如在翻盘过滤器处理脱硅粉煤灰悬浮液时,由于脱硅粉煤灰滤饼致密、板结、透气率差等原因造成滤布阻塞,致使滤布使用寿命降低,生产效率低下,所以需要对滤布的材质、透水、透气、鼓泡、织法以及再生方式等进行实验研究和深入探讨<sup>[13]</sup>。一般采用单一的过滤分离技术,较少采用预过滤分离技术或者不能正确选择助滤剂与确定助过滤方法和操作条件<sup>[14]</sup>。例如,本工艺生产的活性硅酸钙有效地利用了传统生产中废弃的物料,并将其用作

(上接第123页)

- [4] 徐森,胡晓东,郑秋辉. 生物组合工艺处理抗生素废水现状及展望[J]. 工业水处理,2011,(2):5-8.
- [5] 岳秀萍,张涛. Fenton氧化与Fe/C微电解预处理头孢菌抗生素废水的实验研究[J]. 太原理工大学学报,2012,(3):325-328.
- [6] 姜文明,袁浩. 铁碳内电解-厌氧-好氧处理安普霉素废水的调试研究[J]. 环境科学与管理,2008,(7):110-112.
- [7] 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.
- [8] 李天鹏,荆国华,周作明. 微电解技术处理工业废水的研究进展及应用[J]. 工业水处理,2009,(10):9-13.
- [9] 王兵,高洁,任宏洋,等. 超声-微电解耦合处理难降解污染物研究进展[J]. 环境科学与技术,2012,(s2):217-220.
- [10] 管硕,张鸿涛,吴春旭,等. 水解-复合生物滤池工艺处理盐化工工业废水[J]. 环境工程学报,2013,(4):1411-1416.
- [11] 吴烈善,杨希,罗锴. 铁炭内电解-CASS工艺处理模拟印染废水实验研究[J]. 环境科学与技术,2011,(1):132-135,143.
- [12] 吴光前,张齐生,周培国,等. 固定化微生物竹炭对废水中主要

污染物的降解效果[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2009,33(1):20-24.

- [13] 潘碌亭,王文蕾,吴锦峰. 水解酸化/SBR/强化絮凝处理抗生素废水[J]. 中国给水排水,2011,27(4):78-80.
- [14] 商佳吉,邢子鹏,孙德智. 水解酸化-好氧 MBBR 耦合 Fenton 法处理抗生素废水研究[J]. 工业水处理,2008,28(12):45-48.
- [15] 黄健,汤利华,张华,等. 化学磷回收辅助 A<sup>2</sup>O 工艺处理低碳城市污水的除磷规律[J]. 安全与环境工程,2007,14(1):68-71.
- [16] 王伟锋,孟祥磊,徐建顺,等. A/O 生物膜法(SDF/SAF)在污水厂的应用与调试[J]. 中国给水排水,2009,25(22):46-48.
- [17] 陈级新. AAO 法污水处理运行浅谈[J]. 燃料与化工,2007,38(6):50-52.
- [18] 赵应宏,冉阿倩,曹猛. 混凝法处理抗生素制药废水研究[C]. 中国环境科学学会学术年会,2009:213-217.
- [19] 林衍,王海业. 内电解-水解酸化-UASB-MBR 工艺处理香料废水[J]. 给水排水,2010,36(11):59-61. ■