

# 曝气生物滤池深度处理印染废水的研究

龚 鸣,徐乐中\* (苏州科技学院,江苏苏州 215011)

**摘要** [目的] 研究曝气生物滤池对污水厂出水的深度处理效果。[方法] 采用上流式曝气生物滤池对污水厂出水进行深度处理,研究气水比、水力负荷对处理效果的影响,分析滤池中沿程微生物活性与污染物降解规律。[结果] 在气水比 4:1,水力负荷为 0.35 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)时,COD 的去除效率为 54%,色度的去除率为 78%,NH<sub>3</sub>-N 去除率为 91%,满足 GB/T 18920-2002 城市杂用水水质标准。试验条件下,60 cm 滤料层以下为 COD 降解主要区域,60~90 cm 为 NH<sub>3</sub>-N 降解主要区域。生物量沿滤池高度范围逐渐降低,并趋于稳定,微生物活性呈现先升高后降低再升高的趋势。[结论] 该研究可为污水处理厂污水处理工艺提标升级提供基础数据和理论支撑。

**关键词** 生物滤池;印染废水;深度处理  
**中图分类号** S183 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)31-11091-04

**Research on the Dyeing Wastewater Treatment with Biological Aerated Filter**  
**GONG Ming, XU Le-zhong\*** (Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011)

**Abstract** [Objective] The research aimed to study the advanced treatment effects of biological aerated filter on the sewage plant effluent. [Method] Sewage plant effluent was treated with up-flow biological aerated filter, and the influences of gas-water ratio, hydraulic loading on the treatment effects was studied at the same time. In addition, the microbes activities from the inlet to the outlet and the degradation rules were analyzed. [Result] The results showed that with gas-water ratio of 4:1, hydraulic loading rate of 0.35 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h), the COD removal rate was 55%, colority removal rate was 78%, NH<sub>3</sub>-N removal rate was 91%. The effluent could meet the GB/T 18920-2002 urban miscellaneous water quality standards. The main COD removal area was below the 60 cm height of filter. The main NH<sub>3</sub>-N removal area was between 60 cm and 90 cm area. Microbe biomass decreased from the inlet to the outlet. The microbial activity reduced after the first increase and then increased again. [Conclusion] This study could provide basic data and theoretical supports for the improvement of sewage treatment technology in sewage plant.

**Key words** Biological filter; Dyeing wastewater; Advanced treatment

纺织印染行业是我国工业废水排放大户,由于使用多种生产原料和化学溶剂,导致出水中色度、COD 等污染较为严重。当前污水厂处理印染废水常用的方法有物化法、生化法、化学法和几种工艺结合的处理方法<sup>[1]</sup>,出水色度、COD 和氨氮等已达到 GB 4287-2012 中规定的企业水污染物排放标准,但是距离城市杂用水的要求差距还很大。

印染废水深度处理的方法有很多,如吸附技术、氧化技术、膜技术<sup>[2-3]</sup>均具有脱色效率高、处理和运行效果良好的优点,但是单独使用成本偏高。因此均未获得广泛的工业应用。而生物技术与其他技术相比具有效果明显、成本相对低廉而且回用率高等优点<sup>[4-5]</sup>。曝气生物滤池是目前广泛应用的一种废水深度处理生物工艺,具有在低营养物质下运行稳定<sup>[6]</sup>、抗有毒有害物质能力强<sup>[7]</sup>的特点。生物活性炭技术借助活性炭巨大的比表面积作为微生物的载体<sup>[8-9]</sup>,不仅能够吸附水中有机物,并能生物降解水中有机物,大大延长活性炭使用寿命,还能去除活性炭和微生物单独作用时无法去除的污染物质<sup>[10-12]</sup>。

由于所需深度处理的污水来自盛泽镇某污水处理厂二沉池,具有可生化性较差,COD 和色度超标,浊度较低的水质特点。故笔者采用上流式活性炭曝气生物滤池深度处理污水样品,研究了运行过程中气水比和水力停留时间,沿程微生物活性与生物量变化特征以及污染物降解规律,为该厂污水处理工艺提标升级提供基础数据和理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置与污水样品

试验装置如图 1 所示。曝气生

**作者简介** 龚鸣(1988-),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向:水污染处理。\*通讯作者,副教授,从事水污染处理研究。  
**收稿日期** 2014-09-22

物滤池采用有机玻璃制作,上向流浸没式设计,总高度 1 300 mm,内径 50 mm,鹅卵石承托层。使用粒径 3~4 mm 的活性炭填料,填料层总高 900 mm。反应器底部曝气。储水箱的污水经泵抽入反应器底部,在滤池内自下而上流动。

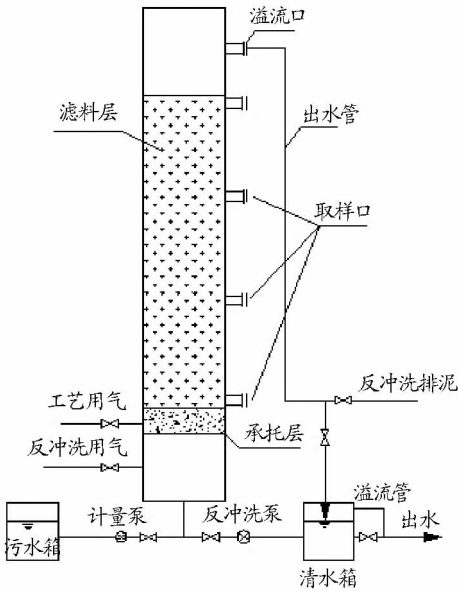


图 1 试验装置示意

试验所用污水来自盛泽某污水处理厂二池,出水 COD 为 70~100 mg/L;NH<sub>3</sub>-N 为 5~8 mg/L,B/C 在 0.10~0.15 之间;色度 70~90 度,浊度 5~10 NTU;pH 7~8。

### 1.2 分析测试方法

**1.2.1 常规指标测定方法** NH<sub>3</sub>-N:纳氏试剂分光光度法测定。COD:重铬酸钾法测定。色度:采用 APHA(铂钴色度)

法,使用哈希便携式光度计 DR890 测定。pH 采用 PB-10 型号 pH 计测定。

**1.2.2 微生物指标的分析方法。**微生物量的测定:生物膜用超声波剥落后采用可挥发灰分法 (MLVSS) 测定微生物量,结果用  $\text{mg/g}$  表示,即单位干重填料上的微生物量。

微生物比耗氧速率:采用溶氧仪测定,单位用  $\text{mg O}_2/[\text{g (MLVSS)} \cdot \text{h}]$  表示,即单位重量微生物的耗氧速率,可以用来表征微生物活性<sup>[13-14]</sup>。

## 2 结果与分析

**2.1 气水比对曝气生物滤池运行效果的影响** 试验稳定运行阶段保持水力负荷  $0.35 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,通过调节气体流量计改变气水比的大小分别为 2:1、3:1、4:1、5:1、6:1、7:1,每改变一次气水体积比,稳定运行 5 d,结果如图 2~4 所示。

由图 2~4 可知,运行期间,气水比从 2:1 逐步上升到 7:1,这期间出水污染物浓度都有明显降低,气水比在 2:1 时,出水口 DO 质量浓度在  $1.8 \text{ mg/L}$  以下,过低的 DO 抑制了好氧微生物的活性,此时 COD 去除率为 29%,出水 COD 稳定在  $53 \sim 70 \text{ mg/L}$ ;  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率为 50%,出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  稳定在  $2.69 \sim 2.95 \text{ mg/L}$ ;色度去除率为 65%,出水色度为  $28 \sim 36$  度。

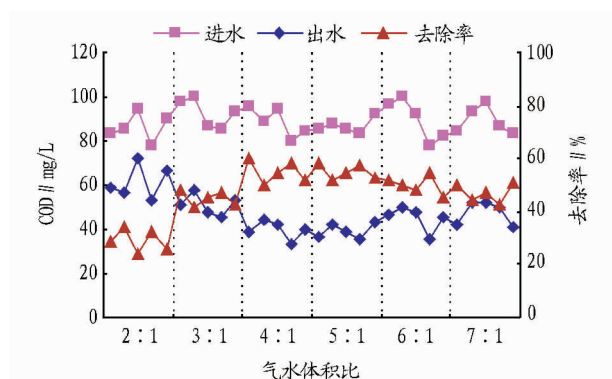


图2 不同气水比下 COD 去除率

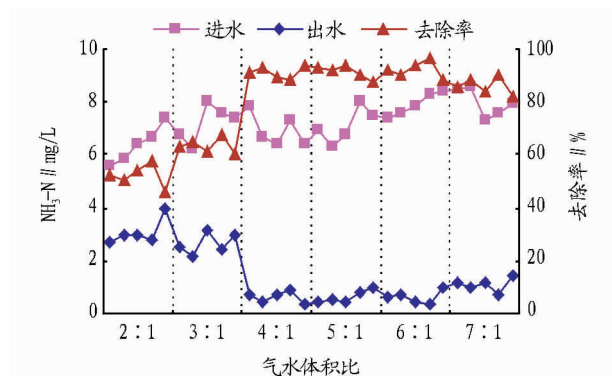


图3 不同气水比下  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率

当气水比为 4:1 时,出水口 DO 浓度上升到  $5.7 \text{ mg/L}$ 。此时 COD 去除率上升至 55%,出水 COD 为  $37 \sim 46 \text{ mg/L}$ ;  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率为 91%,出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  为  $0.38 \sim 0.70 \text{ mg/L}$ ;色度去除率为 75%,出水色度在  $17 \sim 21$  度,达到了较好的处理效果。这一气水比取值要低于文献报道<sup>[15]</sup>。

气水比再提高后,污染物去除率出现下降的趋势,表明

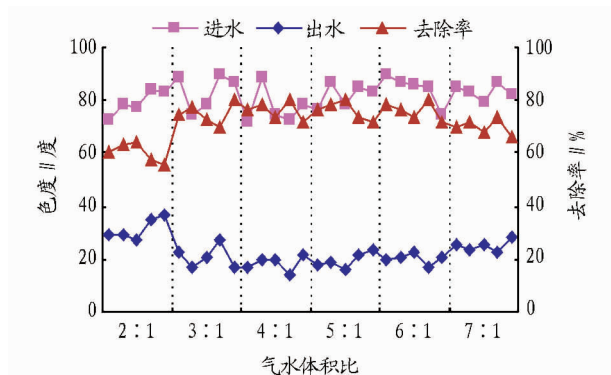


图4 不同气水比下色度去除率

过量曝气无法让污染物去除效果进一步提高。

以上数据表明,反应器对于有机污染物的去除需要保证一定量 DO,但由于进水中污染物浓度较低,过高的气水比无疑是一种浪费。主要原因是气水比过大造成较大的水力剪切力,造成部分溶解氧的溢出,同时填料表面生物膜遭受较大程度的扰动,影响生物膜活性,导致出水水质的下降。综合来看最佳气水比为 4:1。

**2.2 水力负荷对于曝气生物滤池运行效果的影响** 该阶段采用气水比 4:1,水力负荷分别在  $0.15$ 、 $0.20$ 、 $0.26$ 、 $0.35$ 、 $0.45$ 、 $0.55 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  条件下运行,每改变一次水力负荷稳定运行 5 d,结果如图 5~7 所示。

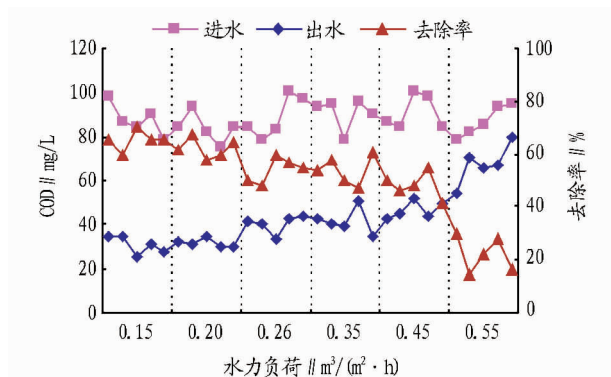


图5 水力负荷对 COD 去除效果的影响

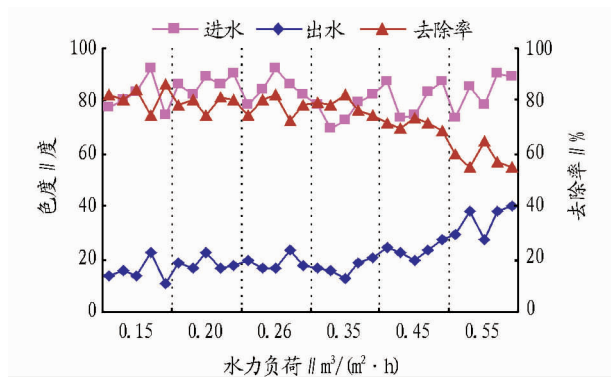


图6 水力负荷对色度去除效果的影响

由图 5~7 可知,水力负荷从  $0.15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  增大到  $0.55 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  期间,COD 平均去除率从 65% 分别下降为 62%、57%、53%、46%、22%;色度的去除率从 81% 分别下降为 80%、78%、76%、71%、57%; $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率从 93% 分别下

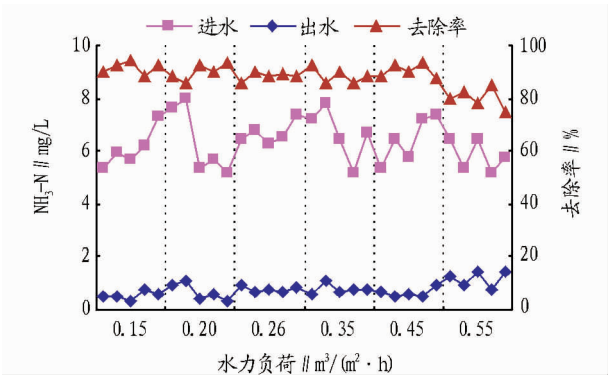


图7 水力负荷对于氨氮去除效果的影响

降为91%、90%、90%、86%、86%、80%。由此可见,水力负荷对COD的影响较大,色度次之,NH<sub>3</sub>-N影响最小。

在水力负荷0.15~0.35 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)范围内污染物去除率均较为稳定,但当水力负荷继续增高后,去除率明显下降。分析原因认为,在水力负荷相对较低的情况下,污染物沿着水流方向不断被氧化降解,到达填料层上部后,由于底物浓度不足,限制了反应速率。随着水力负荷的提高,单位时间内进入滤池的污染物量增加,滤池下部降解的有机物要比低负荷时增加,但总去除率降低,于是更多的污染物进入滤池上部,使得部分有机物在此处得到降解,使滤池总去除效果变化不大,当水力负荷进一步增大,上层填料上微生物来不及降解时,去除率便显著下降。

印染废水二沉池出水中COD为70~100 mg/L,色度70~90度,NH<sub>3</sub>-N 5~8 mg/L。由于过低的水力负荷会造成基建成本的增加,综合考虑将水力负荷定为0.35 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),此时水力停留时间为1.73 h,出水COD为37~46 mg/L,色度为15~20度,NH<sub>3</sub>-N为0.45~0.72 mg/L,满足GB/T 18920-2002城市杂用水水质要求。

**2.3 曝气生物滤池沿程降解特征** 如图8所示,滤池对COD的去除率随着填料层高度的增加而增大,进水口30 cm厚填料层内COD的去除率为40%,反应器对于废水总COD去除率约为55%,表明废水中大部分COD都在0~30 cm填料层内得到去除。之后随着填料层的升高,COD去除率逐渐提高,但是单位高度填料层COD去除率却在逐渐递减。

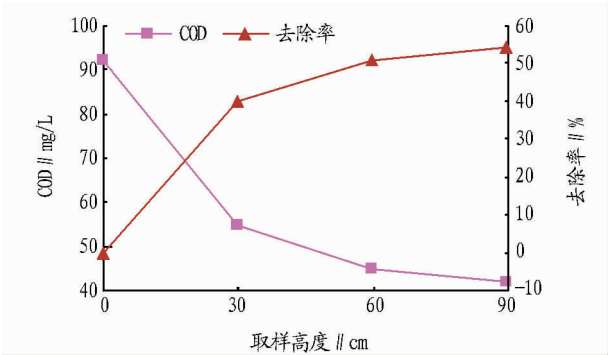


图8 COD去除率与填料高度关系

由图9可知,NH<sub>3</sub>-N在60 cm填料层高度以下无去除效果,在30~60 cm这段填料层之间,NH<sub>3</sub>-N浓度还略有增高。

因为60 cm填料层高度以下,水中底物浓度较高,异养菌为优势菌种,进而占据在此段填料中,硝化细菌生长受到抑制。60 cm填料层高度以上,底物浓度较低,异养菌受到抑制,硝化细菌开始活跃。

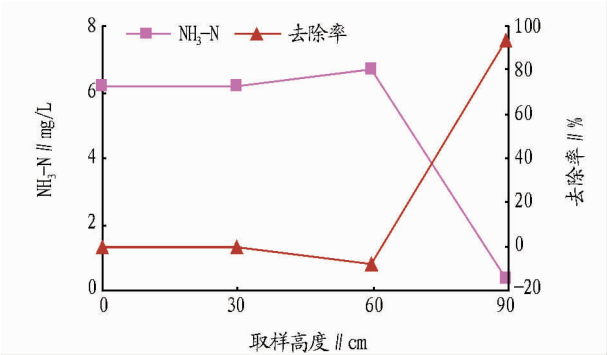


图9 NH<sub>3</sub>-N去除和填料层高度的关系

**2.4 曝气生物滤池沿程生物量分布** 曝气生物滤池通过填料作为微生物的载体,对废水中有机物进行生物降解,因此了解填料上微生物的含量对于了解滤池去除机理具有重要意义。滤池稳定运行90 d后,在距滤柱底部0、30、60、90 cm高度取样口取样,采用可挥发灰分法测定填料表面的微生物含量,结果如图10所示。由图10可以看出,生物量沿着水流方向逐渐减小,进水口附近生物量为67 mg/g,出水口附近生物量为14 mg/g,进水口附近生物量要明显高于出水口附近。表明生物量和滤料层高度关系密切,在滤柱底部由于底物相对丰富,造成微生物大量增殖,随着沿程底物浓度的下降,微生物量也逐渐减小。

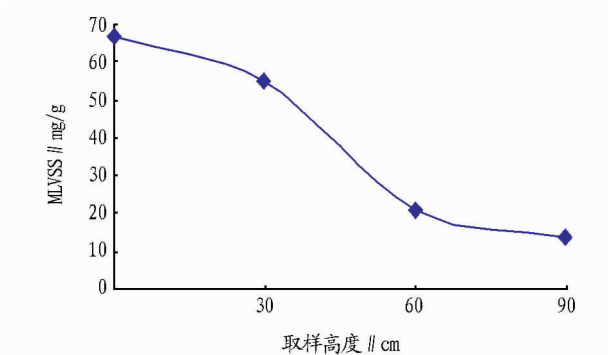


图10 滤池填料高度与生物量的关系

**2.5 曝气生物滤池沿程微生物比耗氧速率(SOUR)变化** 一般认为,微生物活性会随着底物浓度沿程递减而降低,即滤池底部微生物活性最高,出水口附近微生物活性最低,但由图11可以看出,微生物活性呈现先增高后降低再增高的趋势,最大值出现在30 cm填料高度附近,最小值出现在60 cm填料高度附近,即0~30 cm、60~90 cm这两段填料内微生物活性递增。这与杨波等使用ttc-脱氢酶法测得的单位生物量活性曲线极为相似<sup>[17]</sup>。朱小彪等<sup>[18]</sup>认为进水口附近填料和微生物截留了大量悬浮惰性物质使得营养基质的扩散受到了影响;虽然此处微生物能够大量生长,但是增殖速度受到了限制。而在30 cm填料高度附近,底物浓度与传质条件均较为适宜,因此生物活性在这里达到最大。国外

学者 Peter 和 Daniel 通过观察填料表面生物膜发现,填料生物膜过厚导致生物膜内部微生物由于传质阻力较大,代谢活力要低于生物膜表面微生物,这就导致出现了生物膜较薄、生物活性较高的现象<sup>[14]</sup>。国内学者邱立平等也得出了类似的结论<sup>[19]</sup>。但笔者认为,这能够解释 0~30 cm 填料高度处微生物活性增加的现象,但还无法解释 30~90 cm 填料高度处微生物活性先降低后增加的现象。由上述  $\text{NH}_3\text{-N}$  沿程降解特征可以看出,60 cm 填料高度以上为  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除区域,故笔者认为底物浓度的降低导致 30~60 cm 填料高度区域异养菌活性下降,60 cm 填料高度以上硝化细菌等自养微生物开始活跃,导致 60~90 cm 填料高度区域微生物活性显著增加。

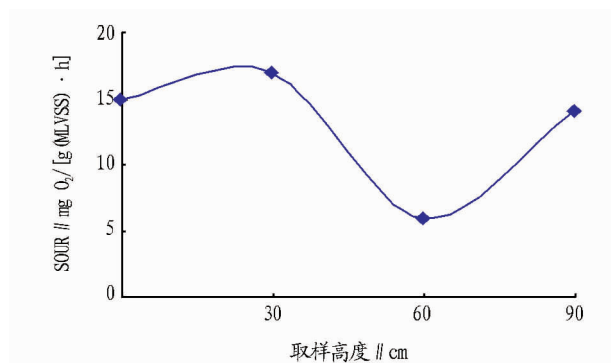


图 11 不同填料高度微生物 SOUR

此外,测定微生物 SOUR 时直接采用滤池进水,其基质浓度要高于对应高度填料层水中实际基质浓度。微生物活性的本质是细胞内各种酶促反应的反映,而酶数量的多少反映了微生物活性的高低。微生物细胞内的酶分为组成酶和诱导酶两种<sup>[16]</sup>,其细胞内大部分酶为后者。微生物可灵活依据底物的多少通过某种反馈机制来实现对诱导酶数量的调节。因此试验测得的滤池内生物膜 SOUR 值实际上是该高度微生物所能达到的活性的最大值,而通常情况下,该处微生物活性要低于这个值,且滤层高度越高,数值越低。这也是滤池具有一定抗冲击负荷能力的根本原因之一。

### 3 小结

采用上向流活性炭曝气生物滤池对印染废水二级出水的深度处理的试验表明,正常运行过程中,气水比对于 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除影响较大,而对色度影响较低。水力负荷的变化对 COD 影响较大,对色度次之,而对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的影响最小,在气水比 4:1,水力负荷  $0.35 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的条件下运行时,出水色度为 15~20 度, COD 为 37~46 mg/L,  $\text{NH}_3\text{-N}$  为 0.45~0.72 mg/L,满足 GB/T 18920-2002 规定的城市杂用水水质标准。

滤池 30 cm 以下为 COD 主要去除区域,在该区域 COD 去除率为 40%, 30~60 cm 为 COD 次要去除区域,此区域 COD 去除率为 15%,在 0~60 cm 区域内  $\text{NH}_3\text{-N}$  无去除效果。60~90 cm 区域处为  $\text{NH}_3\text{-N}$  主要去除区域,表明自养菌和异养菌在填料上各自占据了不同的高度。

滤池沿程生物量受底物浓度的影响较大,生物量从进水口开始逐渐下降,60 cm 填料层高度附近微生物量仅为进水口处微生物量的 31% 左右,60 cm 填料层高度以上微生物量趋于稳定。

滤池填料上微生物活性在 0~30 cm 填料层高度上升,在 30 cm 填料层高度处达到最大值后下降,在 60 cm 填料层高度达到最小值,之后又逐渐上升。

### 参考文献

- [1] 韩月,卢徐节,陈方雨,等. 印染废水处理技术现状研究[J]. 工业安全与环保,2008,34(7):12-14.
- [2] 姚曙光,杨玉杰,李贵森,等. 印染废水深度处理及回用技术的研究现状[J]. 河南化工,2007,27(14):14-17.
- [3] 赵雪,何瑾馨,展义臻. 印染废水处理技术的研究进展[J]. 化学工业与工程技术,2009,30(2):38-43.
- [4] 陆继来,任洪强,夏明芳,等. 新排放标准下的印染废水深度处理技术进展[J]. 工业水处理,2009,29(7):7-10.
- [5] 冯翔,廖银章,李旭东. 印染废水生物处理技术的进展[J]. 印染,2010(15):48-51.
- [6] JOU C G, HUANG G C. A pilot study for oil refinery wastewater treatment using a fixed-film bioreactor[J]. Advanced Environment Research, 2003, 7:463-469.
- [7] YANG L, LAI C T, SHIEH W K. Biodegradation of dispersed diesel fuel under high salinity conditions[J]. Water Research, 2000,34(130):3303-3314.
- [8] 张真江,李继. 进水负荷对曝气生物滤池内微生物的影响[J]. 环境工程,2011,29(2):40-44.
- [9] 田晴. 印染碱减量废水二级出水生物活性炭法深度处理工艺的研究[D]. 上海:东华大学,2006.
- [10] 刘义. 生物活性炭处理废水机理的理论探讨[J]. 河北建筑工程学院学报,1997(1):24-28.
- [11] 兰淑澄. 生物活性炭技术及在污水处理中的应用[J]. 给水排水,2002(12):1-5.
- [12] 于洪斌,丁蕴铮. 活性炭在水处理中的应用方法研究与进展[J]. 工业水处理,2003(8):12-16.
- [13] SURMACZ - GORSKA J, GERNAEY K, DEMUYNCK C, et al. Nitritification monitoring in activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) measurements[J]. Wat Res, 1996,30(5):1228-1236.
- [14] URFER D, HUCK P M. Measurement of biomass activity in drinking water biofilters using a respirometric method[J]. Wat Res, 2001,35(6):1469-1477.
- [15] 许峰. BAF 在印染废水深度处理中的试验研究[J]. 水处理技术, 2010,36(10):80-83.
- [16] 马文漪,杨柳燕. 环境为生物工程[M]. 南京:南京大学出版社,1998.
- [17] 杨波,魏爽,田晴,等. 上流式曝气生物滤池深度处理碱减量印染废水[J]. 环境工程,2013(1):30-34.
- [18] 朱小彪,许春华,高宝玉,等. 曝气生物滤池生物量和生物活性的试验研究[J]. 环境科学学报,2007(7):1135-1140.
- [19] 邱立平,马军. 曝气生物滤池的生物膜及其微生物种群特征[J]. 中国环境科学,2005(2):214-217.