

# 沸石生物滤池处理低浓度生活污水的工艺性能及影响因素

田文华<sup>1</sup>, 文湘华<sup>1</sup>, 杨爱华<sup>2</sup>, 钱易<sup>1</sup> (1. 清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084, E-mail: tianwh98@mails.tsinghua.edu.cn; 2. 中国地质大学水资源与环境科学学院, 北京 100085)

**摘要:**为将电厂低浓度生活污水处理后回用于循环冷却水, 开发了沸石滤料曝气生物滤池(ZBAF)工艺, 在直径 0.2 m 滤料高 3 m 的 ZBAF 装置中处理低浓度生活污水. 结果表明, 在温度为 12℃~17℃, 停留时间 1.4 h, 气水比 4:1, 进水浊度、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 分别为 59 NTU、30 mg/L、81 mg/L 和 16 mg/L 时, 相应的出水指标为 3.2 NTU、3.2 mg/L、14.5 mg/L 和 0.5 mg/L, 满足再生水用作循环冷却补充水的水质标准. 改变水力停留时间和气水比对 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub> 和浊度去除率影响不大, 但对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率影响较大. 生物相观察发现: 反应器内脱碳/硝化区(C/N区)生物相很丰富, 其中固着型纤毛虫很多; 而硝化区(N区)生物相比较单一, 主要为硝化菌. 固着型纤毛虫数量明显减少处为 2 个区的分界线.

**关键词:**沸石; 曝气生物滤池; 生活污水; 循环冷却水; 氨氮去除

中图分类号: X773 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)05-05-0097

## Performance and Its Influencing Factors of a Zeolite Biofilter for Dilute Domestic Wastewater Treatment

Tian Wenhua<sup>1</sup>, Wen Xianghua<sup>1</sup>, Yang Aihua<sup>2</sup>, Qian Yi<sup>1</sup> (1. ESPC State Key Joint Lab., Dept. of Environ. Sci. & Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China E-mail: tianwh98@mails.tsinghua.edu.cn; 2. School of Water Resource & Environ. Sci., China Univ. of Geosciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** To reuse dilute domestic wastewater in power plant region as the makeup of recirculating cooling water, a renovate reactor—zeolite media biological aerated filter (ZBAF) was developed. A pilot scale ZBAF of 0.2 m in diameter and 3 m in media height was tested to treat dilute domestic wastewater. The results showed that turbidity, BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Cr</sub> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in effluent was 3.2 NTU, 3.2 mg/L, 14.5 mg/L and 0.5 mg/L when the corresponding influent concentration was 59 NTU, 30 mg/L, 81 mg/L and 16 mg/L, respectively, under the conditions of  $t=12\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , HRT=1.4 h and gas/liquid=4:1. The effluent quality met the water quality standards of the treated water reused for cooling water makeup. The removal rate of BOD<sub>5</sub>, COD and turbidity did not change much with the change of HRT and the ratio of gas to liquid, but NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal rate changed greatly. The parameters along the depth of ZBAF showed that the biofilm phase was abundant in carbon-oxidation/nitrification(C/N) zone and simplex in nitrification(N) zone. Ciliate was plentiful in C/N zone. Biofilm in N zone was mainly consists of nitrifiers. The point that the number of ciliate decreased apparently was the boundary of the two zones.

**Keywords:** zeolite; biological aerated filter; domestic wastewater; recirculating cooling water; ammonia removal

发电厂一般都远离市区, 生活污水需单独处理. 调查研究表明, 现有火电厂生活污水浓度较低, SS、COD、BOD<sub>5</sub> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均浓度分别只有 83、77、50、15 mg/L, 仅有城市生活污水的 1/3 左右<sup>[1]</sup>. 处理后再生水一般可回用作循环冷却补充水. 根据建设部最新编制的《污水回用设计规范》(征求意见稿), 当换热器为铜材

时, 再生水用作循环冷却补充水的水质标准为: 浊度 < 5 NTU、BOD<sub>5</sub> < 10 mg/L、COD<sub>Cr</sub> < 60 mg/L、TP < 1 mg/L, 循环水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N < 1

基金项目: 科技部重大专项专题

作者简介: 田文华(1968~), 男, 甘肃省庆阳市人, 博士研究生, 主要从事污水回用处理工艺研究.

收稿日期: 2002-09-26; 修订日期: 2002-11-27

mg/L, 要达到这一标准, 要求补充水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N} < 3 \text{ mg/L}$ . 对其它指标也进行了严格规定. 采用活性污泥法和化学混凝法等现有工艺很难达到上述要求<sup>[1]</sup>. 常见的污水回用工艺是在二级处理后再进行混凝、沉淀、过滤、消毒等深度处理. 针对电厂生活小区污水有机物浓度较低, 且对回用水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  等要求较严格的情况, 笔者开发了沸石滤料曝气生物滤池 (zeolite media biological aerated filter, ZBAF) 工艺, 它可以代替二级处理及混凝、沉淀、过滤等, 出水只需要消毒就可达到污水回用于循环冷却水的标准. 因为天然沸石对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  具有离子交换作用, 因此 ZBAF 具有很强的抗  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  冲击负荷能力<sup>[2]</sup>, 可以减小滤池体积; 另外, 沸石的价格便宜, 可大幅度降低滤料的成本<sup>[3]</sup>.

本文目的是研究 ZBAF 处理火电厂低浓度生活污水回用作为循环冷却水的工艺参数及处理效果, 以及停留时间、气水比等因素对去除效果的影响, 并对 ZBAF 中的生物相进行初步分析, 以便对 ZBAF 的工业应用提供指导.

## 1 试验装置和方法

试验用 ZBAF 反应器为  $\phi 200 \text{ mm}$  有机玻璃柱, 总高约 5.5 m (见图 1), 其中装填了高 3.0 m、粒径 4~6 mm 的天然沸石滤料<sup>[3]</sup>. 滤层下部有高 0.3 m 的卵石承托层, 其中分布有曝气管, 同

时兼作反冲洗布气管. 为了维持反应柱有一定的液位, 在出水管路上设置 1 个高位出水堰. 反应柱两侧从滤料顶部向下每隔 0.3 m 分别设 1 个污水取样口和 1 个滤料取样口, 共有 11 个取样口. 反应器采用下向流运行. 试验原水为清华大学校园生活污水, 经污水泵抽入沉淀池, 用自来水稀释 2~3 倍后, 浓度与电厂生活小区接近 (稀释后的水质指标见表 1). 进行初步沉淀后, 经孔径 0.5 mm 的滤网过滤掉漂浮的杂物, 再用计量泵打入反应器.

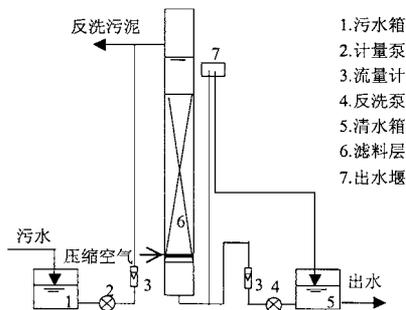


图 1 试验装置及流程图

Fig. 1 Scheme of experimental pilot and flow chart

试验从 2001-09-10 开始, 至 2002-01-30 结束, 在此之前装置已运行 4 个月. 根据水力停留时间和气水比不同, 将试验分为 3 个工况, 见表 2. 试验期间温度变化不是很大. 每个工况运行稳定后, 再测定有关指标. 期间当水头损失达到

表 1 反应器进水水质 /  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Influent water quality of the bioreactor /  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

pH	SS	BOD <sub>5</sub>	COD	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TP	总硬度 <sup>1)</sup>	总碱度 <sup>1)</sup>	$\text{Cl}^-$	电导率 / $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$
7.5~8.2	8.5~63	30~42	48~172	8.0~27	0.9~2.6	175~260	325~370	35~46	648~827

1) 以  $\text{CaCO}_3$  计

### 1.2 m 时用水气同时反冲洗.

表 2 试验工况及条件

Table 2 Experimental conditions

工况	水力负荷 / $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	气水比 <sup>1)</sup>	水流量 / $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$	水力停留时间 / h	温度 / $^{\circ}\text{C}$
1	2.2	2:1	60	1.4	13~17
2	2.2	4:1	60	1.4	14~17
3	4.4	2:1	120	0.7	12~14

1) 工艺用气与进水流量之比

电导率等指标的测定采用国家标准方法<sup>[4]</sup>. 由于出水 SS 很低, 无法检出, 采用浊度来代表, 两者关系经测定为:  $\text{SS} = 0.959x - 6.83 (\text{mg/L})$ ,  $R^2 = 0.992$ .  $x$  为浊度 (NTU). 显微镜为厦门产 MOT-IC 生物显微镜, 配 SONY 数码相机; 扫描电子显微镜为日本 SHI MADA 公司产品.

## 2 试验结果和讨论

### 2.1 水力停留时间和气水比对去除效果的影响

#### 2.1.1 对 COD、BOD<sub>5</sub> 和浊度去除效果的影响

COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、浊度、TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、碱度和

表 3 为改变停留时间和气水比对 COD、BOD<sub>5</sub> 和浊度去除效果的影响.在停留时间为 1.4h,气水比由 2:1 提高至 4:1 时,COD 平均去除率由 78%提高至 82%,BOD<sub>5</sub> 去除率由 87%提高至 90%,浊度去除率由 93%提高至 95%;气水比为 2:1,停留时间由 1.4h 缩短至 0.7h,

COD 平均去除率由 78%降至 74%,BOD<sub>5</sub> 去除率由 87%降至 85%,浊度去除率不变,为 93%.可见气水比提高 1 倍或停留时间减少 1 倍时,COD、BOD<sub>5</sub> 和浊度去除率变化不大.3 种工况下,出水 COD、BOD<sub>5</sub> 和浊度平均值分别为 15.7 mg/L、6 mg/L 和 3.7 NTU,均低于标准.

表 3 水力停留时间和气水比对 COD、BOD<sub>5</sub> 和浊度去除效果的影响

Table 3 Influence of HRT and gas/liquid on the removal of COD、BOD<sub>5</sub> & turbidity

指标	工况	进水 / mg·L <sup>-1</sup>	出水 / mg·L <sup>-1</sup>	平均去除率 / %	容积负荷 / kg·(m <sup>3</sup> ·d) <sup>-1</sup>	测定次数
COD	1	49.4~172.2(80.7) <sup>1)</sup>	2.5~30.8(15.7)	78	0.87~3.04(1.43)	9
	2	64.8~104.6(81.2)	11.6~15.9(14.5)	82	1.15~1.85(1.44)	3
	3	48.0~103.0(66.6)	14.0~16.0(14.9)	74	1.70~3.64(2.35)	3
BOD <sub>5</sub>	1	42.3	5.0	87	0.75	1
	2	30.0	3.2	90	0.53	1
	3	40.0	6.0	85	1.41	1
浊度/NTU	1	16.7~94.5(54.3)	1.8~4.7(3.0)	93		17
	2	26.2~79.7(58.9)	1.2~8.2(3.2)	95		15
	3	43~55.8(49.4)	2.4~4.8(3.7)	93		3

1) 括号内为平均值,下同

2.1.2 对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果的影响

图 2 显示改变停留时间和气水比时对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果的影响.工况 1 与工况 2 停留时间均为 1.4h,气水比分别为 2:1 和 4:1,可见气水比提高 1 倍时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均去除率由 86%提高至 97%,出水平均浓度由 2.5 mg/L 降至 0.5 mg/L.工况 1 与工况 3 气水比均为 2:1,停

去除 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率影响很大.另外,3 种工况下出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 均达到了标准,工况 2 处理效果最好.

图 3 显示了不同工况下 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除容积负荷与进水容积负荷之间的关系,可见在试验条件下,去除容积负荷随进水容积负荷的增大而增大.图 3 中的点越接近 100%去除线,说明去除效果越好,工况 2 去除效果最好,在进水容积负荷为 0.42kg/(m<sup>3</sup>·d) 时,去除容积负荷达 0.41 kg/(m<sup>3</sup>·d),去除率达 97%.工况 1 次之,

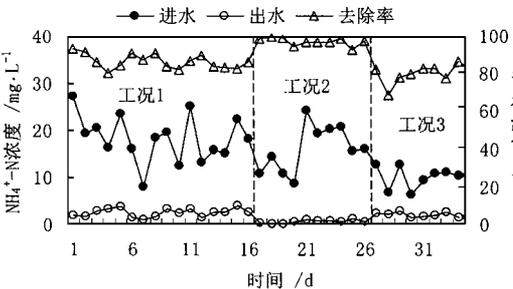


图 2 水力停留时间和气水比对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 出水浓度及去除率的影响

Fig. 2 Influence of HRT and gas/liquid on NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal rate

留时间分别为 1.4h 和 0.7h,可见停留时间减小 1 倍时, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均去除率由 86%降至 80%,出水平均浓度分别为 2.5 mg/L 和 2.0 mg/L.这说明停留时间和气水比对 ZBAF

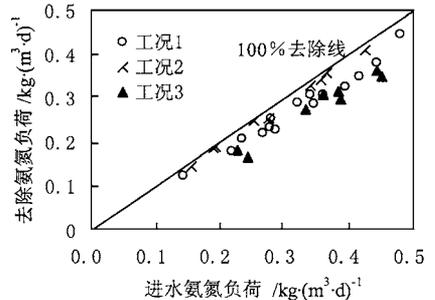


图 3 不同工况下 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除容积负荷与进水容积负荷的关系

Fig. 3 Relationship between NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal loading rate and applied loading rate under different conditions

工况 3 最差。

上述试验表明,减小气水比和停留时间对 BOD、COD 和浊度的去除率影响不大,但对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率影响很大。

## 2.2 对 TP、TN 的去除效果及对碱度和电导率的影响

表 4 为工况 1 时对进、出水中 TN、TP、碱度和电导率的测定结果。对 TN、TP 的平均去除率分别为 35% 和 17%,碱度、电导率平均下降 27% 和 11%。碱度和电导率的降低有利于提高循环冷却水的浓缩倍数。另外需要注意的是,ZBAF 对 TP 的去除率不高,出水 TP 超过了  $1 \text{ mg/L}$ ,但由于再生水水量占循环冷却补充水水量的比例在  $1/3$  以下,经过稀释后 TP 浓度完全能够达到标准。尽管如此,回用再生水时,水稳剂配方中应尽量不要含磷。

表 4 对 TN、TP 的去除效果及碱度和电导率下降情况(平均值)

Table 4 The removal rate of TN, TP and the decrease rate of alkalinity & conductivity (average)

指标	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	碱度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	电导率 / $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$
进水	21.4	1.4	345	827
出水	14.0	1.2	250	738
去除率/%	35	17	27	11

## 2.3 沿程微生物分区状况

笔者对 ZBAF 反应器处理低浓度生活污水时  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度沿程变化的测定结果表明<sup>[5]</sup>,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度下降曲线由 2 段直线组成,第 1 段下降慢,第 2 段下降快,溶解性 COD 的去除在第 1 段,据此将反应器分为 2 个区:脱碳/硝化区(C/N 区)和硝化区(N 区)。工况 1 时 2 个区的硝化反应速率常数分别为  $9.1$  和  $19.1 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ ,工况 3 时分别为  $8.2$  和  $18.3 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 。将 2 个区的硝化反应速率常数换算到  $20^\circ\text{C}$  并取平均值,分别为  $14.4$  和  $31.0 \text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$ ,后者是前者的 2.1 倍。

沿程取滤料样品,用生物显微镜对生物膜微生物相观察发现:滤池内生物相非常丰富,从

细菌、真菌、原生动物中的肉足纲、鞭毛纲、纤毛纲一直到后生动物中的线虫、轮虫,构成一个完整的生物体系。其中,固着型纤毛虫种类丰富,数量众多,在 C/N 区均有分布,主要有独缩虫、聚缩虫、累枝虫和盖纤虫等。它们的尾柄很丰富,互相粘连,这样在反洗过程中不易被冲出来。固着型纤毛虫在 N 区则基本没有,它的数量明显减少的地方恰好位于 C/N 区和 N 区的分界线,这可作为区分 C/N 区和 N 区的标志。C/N 区的高度与进水 COD 负荷有关,从工况 1 到 3, COD 容积负荷由  $1.4$  增加到  $2.4 \text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ,生物相观察结果显示 C/N 区高度从  $1.2 \text{ m}$  增加到  $1.8 \text{ m}$ ,N 区高度相应从  $1.8 \text{ m}$  减小到  $1.2 \text{ m}$ ,这是造成  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率下降的另一个重要原因。

为了更深刻地认识生物膜的结构,工况 1 时,在一个运行周期的中期(36h)取沸石样品用扫描电镜进行观察拍照。图 4(a) 是  $0.3 \text{ m}$ (C/N 区)处样品的照片,可见生物膜很厚,群体生活的固着型纤毛虫很多,尾柄丰富。图 4(b) 是其中一个尾柄的放大照片,显示纤毛虫的尾柄上密密麻麻地排列了许多杆菌,可见固着型纤毛虫丰富的尾柄为细菌提供了巨大的附着面积,增加了细菌的生物量,同时也使细菌在反冲洗过程中不至于流失太多。图 5 是  $2.1 \text{ m}$ (N 区)处取样照片,此处溶解性 COD 浓度很低,且不再变化,因此细菌主要为硝化菌。可见硝化细菌数量很多,主要分布在沸石表面的凹陷里边,尖锐部分则较少。沸石表面非常粗糙,且布满了大小不一的坑,非常利于硝化菌附着<sup>[3]</sup>,所以 N 区的硝化速率为 C/N 区的 2.1 倍。

在 BAF 反应器中,异养菌和硝化菌在滤料表面的生物膜中存在着对生存空间和溶解氧的竞争,硝化菌由于世代周期长,而且对溶解氧要求较高,在与异养菌的竞争中处于劣势<sup>[6]</sup>,因此 C/N 区分布在靠近进水口处,而 N 区则远离进水口处,这样反应条件的改变对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果影响更大。因此为了保证  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率达到预定值,必须保证反应器有足够的高度或者停留时间。

(a) 固着型纤毛虫 ( $\times 250$ )(b) 纤毛虫尾柄上附着有很多杆菌(上 $\times 5000$ ; 下 $\times 1000$ )

图 4 C/N 区电镜照片(0.3 m 处, 36h)

Fig. 4 Biofilm photos by electron scan microscope in C/N zone (0.3 m, 36h)

图 5 N 区电镜照片(2.1 m 处, 36h,  $\times 5000$ )Fig. 5 Biofilm photo by electron scan microscope in N zone(2.1 m, 36h,  $\times 5000$ )

### 3 结论

(1) 应用单级 ZBAF 直接处理经过初步沉淀的电厂低浓度生活污水, 在进水浊度、 $BOD_5$ 、 $COD_{Cr}$  和  $NH_4^+-N$  分别为 59 NTU、30 mg/L、81 mg/L 和 16 mg/L 时, 停留时间为 1.4 h、气水比为 4:1 的条件下, 出水浊度、 $BOD_5$ 、 $COD_{Cr}$  和  $NH_4^+-N$  平均值分别为 3.2 NTU、3.2 mg/L、14.5 mg/L 和 0.5 mg/L, 满足再生水回用作循环冷却补充水水质标准, 再经过杀菌处理就可补充到电厂循环冷却水中。

(2) 气水比和停留时间对 ZBAF 去除  $BOD_5$ 、 $COD$  和浊度的去除率影响不大, 对  $NH_4^+-N$  的去除率影响很大。水力停留时间由 1.4 h 减至 0.7 h, 气水比由 4:1 降至 2:1 时,  $NH_4^+-N$  去除率分别下降 6% 和 10%。

(3) 生物相观察发现: 反应器内靠近进水处为脱碳/硝化区 (C/N 区), 生物相很丰富, 其中固着型纤毛虫很多; 而硝化区 (N 区) 远离进水处, 生物相比较单一, 主要为硝化菌。固着型纤毛虫数量明显减少处为 2 个区的分界线。为了保证  $NH_4^+-N$  去除率达到预定值, 必须保证反应器有足够的高度或者停留时间。

#### 参考文献:

- 1 王志轩, 关越, 朱法华. 全国火电厂生活污水处理设施运行状况及建议. 电力环境保护, 1999, 15(3): 53 ~ 58.
- 2 Oldenburg M, Sekoulov I. Multipurpose filters with ion-exchanger for the equalization of ammonia peaks. Wat. Sci. Technol., 1995, 32(7): 199 ~ 206.
- 3 田文华, 文湘华, 钱易. 沸石作为曝气生物滤池滤料的可行性研究. 环境工程, 2003, 增刊: 1 ~ 3.
- 4 国家环保局. 水和废水监测分析方法(第 3 版). 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- 5 田文华. 用于生活污水回用的沸石曝气生物滤池工艺研究 [D]. 北京: 清华大学环境科学与工程系, 2003.
- 6 Gilmore K et al. Influence of organic and ammonia loading on nitrifier activity and nitrification performance for a two-stage biological aerated filter system. Wat. Sci. & Tech., 1999, 39(7): 227 ~ 234.