

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.028

# BBR + Fenton 氧化 + BAF 组合工艺处理垃圾渗滤液

高峻峰<sup>1</sup>, 胡晓玲<sup>2</sup>, 宋建阳<sup>2</sup>, 王 斌<sup>2</sup>, 张献旭<sup>1</sup>, 王弘宇<sup>2</sup>

(1. 武汉环投城市废弃物运营管理有限公司, 湖北 武汉 430014; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 介绍了武汉陈家冲生活垃圾卫生填埋场采用 BBR——基于芽孢杆菌(*Bacillus*)为优势菌群的生物处理系统 + Fenton 氧化 + BAF 组合工艺处理垃圾渗滤液原液的工程实例。实际运行数据表明,该工艺对垃圾渗滤液中的有机物、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  及 TN 具有良好且稳定的去除效果。当 BBR 系统进水  $\text{COD} \leq 14\,000 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 2\,500 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 3\,000 \text{ mg/L}$  时, BBR 系统出水  $\text{COD} \leq 1\,300 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 28 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 275 \text{ mg/L}$ ; 深度处理段出水  $\text{COD} \leq 96 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N} \leq 7.6 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} < 40 \text{ mg/L}$ , 出水各项指标均达到了《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)。组合工艺处理成本为 103.20 元/t, 具有良好的经济效益和环境效益。

**关键词:** 垃圾渗滤液; BBR 系统; Fenton 氧化; 曝气生物滤池

**中图分类号:** TU993 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0151-05

## Case Study on Landfill Leachate Treatment by a Combined Process of BBR System, Fenton Oxidation, and BAF

GAO Jun-feng<sup>1</sup>, HU Xiao-ling<sup>2</sup>, SONG Jian-yang<sup>2</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, ZHANG Xian-xu<sup>1</sup>,  
WANG Hong-yu<sup>2</sup>

(1. Wuhan Environment Investment & Development Group Municipal Waste Management Co. Ltd.,  
Wuhan 430014, China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A combined process of BBR (a biological treatment system based on *Bacillus* as the dominant bacteria), Fenton oxidation, and BAF is used to treat landfill leachate produced from Chenjiachong domestic waste sanitary landfill in Wuhan. The actual data showed that the process had satisfactory and stable removal performance on organic matter,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN in landfill leachate. When the influent concentrations of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and TN were within 14 000 mg/L, 2 500 mg/L and 3 000 mg/L, respectively, the effluent concentrations of the biological treatment section were within 1 300 mg/L, 28 mg/L and 275 mg/L, respectively, and the effluent concentrations of the advanced processing section were within 96 mg/L, 7.6 mg/L and 40 mg/L, respectively. All the effluent indexes met the requirements of the *Standard for Pollution Control on the Landfill Site of Municipal Solid Waste* (GB 16889-2008), and the operation cost of the combined process is 103.20 yuan/t, which has good economic and environmental benefits.

**Key words:** landfill leachate; BBR system; Fenton oxidation; BAF

在垃圾填埋过程中,大量溶解性有机物、无机物及重金属离子等污染物与降雨、径流以及渗入的地下水一起形成垃圾渗滤液。垃圾渗滤液中污染物浓度高且成分复杂,氨氮含量高,水质水量变化大,色度大,有臭味<sup>[1-2]</sup>,并且含有酚类、醛类、多环芳烃、杂环化合物等大量有毒有害物质<sup>[3]</sup>,处理不当会对环境及人体健康产生重大影响。

目前,国内外处理垃圾渗滤液的方法主要有生物法和物化法<sup>[4]</sup>。生物法具有运行费用低、处理效率高及二次污染少的优点<sup>[5]</sup>,但由于垃圾渗滤液中含有对微生物有毒害作用的成分及难生物降解有机物,只采用生化法处理其出水一般不能达到排放标准<sup>[6]</sup>。通常使用一定的物化法进行预处理和深度处理以提高处理效果<sup>[7-8]</sup>,使出水水质达到排放标准。我国目前使用较多的垃圾渗滤液处理工艺为膜生物反应器+双膜法(NF/RO)的组合工艺,但膜技术费用高,且产生的浓缩液需进一步处理<sup>[9]</sup>。

本工程处理垃圾渗滤液采用生物膜法与活性污泥法相结合的生物处理系统,并在生物处理系统中投加抗逆性强的优势菌群芽孢杆菌(*Bacillus*),深度处理采用两级 Fenton 氧化与 BAF 去除前端生物处理系统难以降解的物质,使出水达标排放。

## 1 工程概况

### 1.1 垃圾渗滤液来源及设计水质

垃圾渗滤液为自 2007 年该生活垃圾卫生填埋场投入运营以来积存的老龄渗滤液及填埋区不断产生的新鲜渗滤液,处理规模 500 m<sup>3</sup>/d。渗滤液水质特征主要表现为 COD、BOD<sub>5</sub> 逐年降低,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 逐年上升,可生化性逐年降低。设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项 目	COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg · L <sup>-1</sup> )	pH 值
设计进水	20 000	2 500	3 000	6 ~ 9
设计出水	100	25	40	6 ~ 9

### 1.2 工艺流程

根据该工程垃圾渗滤液的水质、排放要求及处理规模,采用基于芽孢杆菌(*Bacillus*)为优势菌群的 BBR 生物处理系统,Fenton 氧化与 BAF 组合的深度处理单元的组合工艺。

设计工艺流程见图 1。

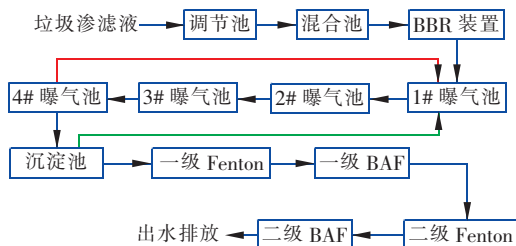


图 1 垃圾渗滤液处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of landfill leachate treatment process

垃圾渗滤液首先进入调节池,去除其中的固体垃圾和杂质,均化水质,调节水量;再进入 BBR 生物处理系统,包括 BBR 装置和 BBR 曝气池系统。BBR 装置为生物转盘,垃圾渗滤液与载体上附着的生物膜充分接触,其中部分有机物质被吸附并降解,生物膜外部的好氧层通过硝化作用去除部分 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,内部厌氧层可反硝化脱氮。BBR 曝气池系统由 4 座曝气池组成,其中的好氧微生物及兼氧微生物降解垃圾渗滤液中的有机物、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及 TN,4#曝气池剩余硝化液回流至 1#曝气池;BBR 系统出水进入沉淀池,依靠重力沉淀去除废水中剩余无机颗粒、有机物质及进入衰亡期的微生物个体等,同时,沉淀池提供的厌氧环境使 *Bacillus* 菌能产生抗生素、抗菌蛋白质或多肽以及抗真菌物质,抑制有害细菌的生长<sup>[10]</sup>;沉淀池出水泵送至一级 Fenton 反应池,Fe<sup>2+</sup>在 pH 值为 2~4 的条件下催化双氧水产生具有强氧化能力的羟基自由基,羟基自由基氧化渗滤液中的部分难生物降解有机物为二氧化碳和水,或部分转化为能生物降解有机物,降低 COD,同时提高废水的可生化性;随后渗滤液进入一级 BAF(厌氧+好氧),BAF 集生物氧化、生物絮凝和过滤截留于一体,可有效去除渗滤液中残余的 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 及 SS<sup>[11]</sup>;再通过二级 Fenton 反应池的强氧化作用进一步去除渗滤液中的难生物降解有机物;后续通过二级 BAF 去除 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 及 SS 等,实现渗滤液的达标排放。

在该工艺的设计与调试运行过程中,由青海洁神环境能源产业有限公司与广州市华绿环保科技有限公司提供技术支持。

## 2 主要构筑物及设计参数

### 2.1 调节池

来自填埋场的垃圾渗滤液由 2 台原水泵送入调节池,去除原水中的固体垃圾,调节水质水量,保证

后续处理系统稳定运行。设置 1 座调节池,采用钢筋混凝土结构,有效容积  $1\,500\text{ m}^3$ 。调节池内设有 4 台篮式过滤器,2 用 2 备,孔径  $1.5\text{ mm}$ 。

## 2.2 BBR 装置

BBR 为生物转盘,其盘片为采用聚乙烯树脂制成的特殊网状结构,具有较大的比表面积,可附着大量微生物。有机物及  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的降解主要在生物膜的好氧层内进行,在生物膜内层为厌氧区,外层的有机物及硝化作用产生的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  传递至厌氧区进行反硝化脱氮。设置 14 台 BBR,设计单台处理能力为  $300\text{ kgBOD}_5/\text{d}$ ,设计处理水量  $500\text{ m}^3/\text{d}$ 。

## 2.3 BBR 曝气池系统

BBR 曝气池系统由 4 座曝气池组成,属于悬浮生长式反应器。1#、2#、3#及 4#曝气池的 DO 依次控制在  $1.0$ 、 $0.8$ 、 $0.6$ 、 $0.2\text{ mg/L}$ 。在好氧池中,好氧微生物降解有机物,同时发生硝化作用去除  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,缺氧池中的反硝化细菌利用剩余的可生物降解有机物质作为电子供体反硝化脱氮。4#曝气池的剩余硝化液回流至 1#曝气池,利用 1#曝气池的有机碳源反硝化脱氮。*Bacillus* 菌在 DO 为  $0.1 \sim 1.0\text{ mg/L}$  时活性最高,其在自身增殖的同时也能脱氮除碳。曝气池单座尺寸  $12.4\text{ m} \times 5\text{ m} \times 8.5\text{ m}$ ,设 8 格,钢筋混凝土结构,水力停留时间 7 d,配套曝气风机 3 台(2 用 1 备),内回流泵 2 台(1 用 1 备)。

## 2.4 沉淀池

设置 1 座竖流型沉淀池,钢筋混凝土结构,直径 7 m,深 7 m,有效水深  $3.5\text{ m}$ ,单池有效容积  $150\text{ m}^3$ 。配置 2 台污泥回流泵,1 用 1 备。

## 2.5 Fenton 系统

Fenton 系统包括 Fenton 催化设备及 Fenton 反应、絮凝、沉淀单元。生化池出水进入 Fenton 系统后,首先投加少量硫酸调节 pH 值至  $2 \sim 4$ ,然后投加硫酸亚铁和双氧水,同时开启循环泵与 Fenton 催化塔进行循环催化<sup>[12]</sup>。待反应完全后,投加液碱将废水的 pH 值调至  $7 \sim 8$ ,然后投加 PAM 助凝剂,在废水中形成氢氧化铁沉淀物,形成氧化与絮凝的双重作用,显著降低 COD 和色度。一级及二级 Fenton 系统各设置 1 座 Fenton 反应池,钢筋混凝土结构,池体尺寸  $13.1\text{ m} \times 5.2\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ ,各配置 1 套 Fenton 催化塔,2 台 Fenton 循环泵(1 用 1 备)。

## 2.6 BAF 池

BAF 池包括脱氮型 BAF(DN - BAF,厌氧)和脱

碳型 BAF(DC - BAF,好氧)。渗滤液经过 Fenton 系统处理后,可生化性提高,为深度脱氮创造了有利条件,一级 Fenton 池出水首先进入一级脱氮型 DN - BAF,由于渗滤液的  $\text{BOD}_5/\text{TN}$  值仍然较低,因此需要外加补充碳源葡萄糖,实现反硝化去除 TN。后续经过一级脱碳型 DC - BAF 进一步降低渗滤液中的 COD、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、SS 等。为了进一步去除 COD、 $\text{BOD}_5$ 、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、SS 等污染物,二级 Fenton 池出水依次通过二级 DN - BAF、二级 DC - BAF。一级、二级厌氧 BAF(DN 池)各设置 2 座,池体尺寸  $5.0\text{ m} \times 4.0\text{ m} \times 6.0\text{ m}$ ;一级、二级好氧 BAF(DC 池)各设置 2 座,池体尺寸  $5.0\text{ m} \times 4.0\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ 。池体均为钢筋混凝土结构,内部各配置 2 套含布水布气及承托装置、反冲洗布气系统、曝气布气系统、级配承托层、生物填料、出水堰板等的组件。

## 2.7 污泥处理系统

生物处理系统剩余污泥约  $100\text{ m}^3/\text{d}$ ,含水率为 98%;化学氧化处理系统产生约  $125\text{ m}^3/\text{d}$ 、含水率为 99%的絮凝污泥,剩余污泥和絮凝污泥采用叠螺污泥脱水机进行脱水处理,污泥脱水后的含水率为 80%,脱水清液用 2 台(1 用 1 备)泵回流至生化系统。设 1 座钢筋混凝土污泥池,尺寸为  $15.1\text{ m} \times 5.1\text{ m} \times 3.3\text{ m}$ ;1 座钢筋混凝土脱水清液池,尺寸为  $5.1\text{ m} \times 4.0\text{ m} \times 3.3\text{ m}$ ;污泥脱水间采用钢筋混凝土框架,尺寸为  $20\text{ m} \times 10\text{ m} \times 6\text{ m}$ ,脱水能力  $250\text{ t/d}$ 。

## 3 运行效果

该工程于 2018 年初正式运行,取 2018 年 7 月运行稳定的水质指标分析该组合工艺对垃圾渗滤液各项污染物的去除效果。

### 3.1 组合工艺对 COD 的去除效果

组合工艺对垃圾渗滤液中 COD 的去除效果如图 2 所示。当进水 COD 为  $6\,244 \sim 13\,915\text{ mg/L}$  时,BBR 生物处理系统、一级 Fenton 系统及最终出水的 COD 分别为  $993 \sim 1\,311$ 、 $221 \sim 387$ 、 $40 \sim 96\text{ mg/L}$ ,组合工艺对 COD 的总去除率均大于 98.8%。其中 BBR 生物处理系统的微生物充分利用垃圾渗滤液中可生物降解有机物进行自身新陈代谢作用,去除 81.8% ~ 91.4% 的 COD,降低了后续深度处理单元的负荷。一级 Fenton 系统中具有强氧化能力的羟基自由基氧化大部分难生物降解有机物,进一步降低 COD。随后渗滤液先后进入一级 BAF、二级 Fenton、二级 BAF 处理单元,通过生物氧化、化学氧



化和絮凝等作用去除污水中残余的 COD。该组合工艺具有较强的抗冲击负荷能力,当系统进水 COD 突然升高,出水 COD 仍然保持在较低水平。同时,组合工艺对垃圾渗滤液的臭味及色度也有很好的去除效果。

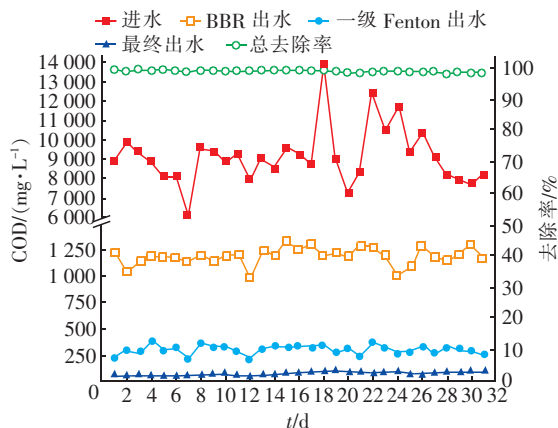


图2 组合工艺对 COD 的去除效果

Fig. 2 COD removal effect of the combined process

### 3.2 组合工艺对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

组合工艺对氨氮的去除效果如图3所示。

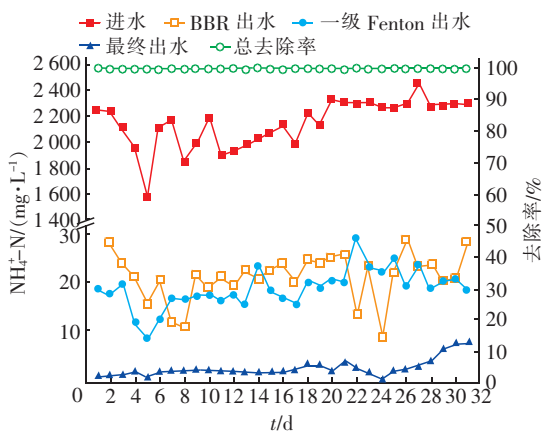


图3 组合工艺对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除效果

Fig. 3  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal effect of the combined process

当进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为 1 572 ~ 2 449 mg/L 时, BBR 生物处理系统出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为 8.29 ~ 27.77 mg/L, 生物系统进行了较为彻底的反硝化作用,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率达到 99.0% 以上。但 BBR 的 4#曝气池碳源不足,反硝化反应不完全,有部分  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  积累, BBR 生物处理系统出水 TN 为 167.9 ~ 274.7 mg/L。在硝化、反硝化反应中, *Bacillus* 菌可有效提高生物系统中的菌群对外界不利环境的适应性。一级 Fenton 系统出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为 8.88 ~ 30.52 mg/L,

相较于 BBR 生物处理系统出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  略有上升, Fenton 系统在氧化难生物降解的有机物时,使部分含氮有机物生成  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。组合工艺最终出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为 0.44 ~ 7.59 mg/L,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的总去除率 > 99.6%。好氧 BAF 池的硝化细菌进行硝化作用进一步去除  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,厌氧 BAF 池发生反硝化作用脱氮<sup>[13]</sup>,使得最终出水 TN 为 16.4 ~ 39.6 mg/L,最终出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 均满足排放要求。

### 4 运行成本

该工程的运行费用主要包括人工费、设备维修维护费、药剂费、电费、水费等。填埋场有固定职工 21 人,工资 3 000 元/(人·月),人工费合计 63 000 元/月;常规的设备维修维护需 1 500 元/月;用电量 162 030 kW·h/月,电价 0.9 元/(kW·h),电费合计 145 827 元/月;用水量 1 233 m<sup>3</sup>/月,水价 3.15 元/m<sup>3</sup>,水费合计 3 883.95 元/月。所用药剂、用量及费用如表 2 所示。药剂费包括双氧水、硫酸亚铁、葡萄糖、液碱、PAM、BBR 生物处理系统的营养液费用及化验室药剂运输、定期水质检测产生的化验费,合计 577 444.9 元/月;以上各项运行成本合计 791 655.85 元/月,垃圾渗滤液实际处理量为 7 671 t/月,组合工艺处理垃圾渗滤液运行费用为 103.20 元/t,具有较好的经济性。

表2 工程药剂成本

Tab. 2 Chemical reagent cost of the project

项目	用量	单价	实际费用/(元·月 <sup>-1</sup> )
双氧水	85.62 t	2 400 元/t	205 488
硫酸亚铁	173.82 t	570 元/t	99 077.4
营养液	72.5 L	500 元/L	36 250
葡萄糖	3.4 t	4 680 元/t	15 912
液碱	81.65 t	1 950 元/t	159 217.5
PAM	1.312 5 t	24 000 元/t	31 500
化验费			30 000
合计			577 444.9

### 5 结论

采用 BBR 系统 + Fenton 氧化 + BAF 组合工艺处理垃圾渗滤液, BBR 生物处理系统能高效降解垃圾渗滤液中的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  及可生物降解有机物, Fenton 氧化系统进一步去除难生物降解物质,再通过后续的生物氧化、絮凝等过程使出水水质达标。运行结果表明,组合工艺对垃圾渗滤液的 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  及 TN 具有良好且稳定的去除效果,其中,

对 COD 及  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除率分别达到 98.8% 及 99.6%,出水各项指标均满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)。

#### 参考文献:

- [1] 王凡. 采用 ANAMMOX 工艺系统处理中晚期垃圾渗滤液试验研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2018.  
WANG Fan. Study on the ANAMMOX Process System for the Treatment of Middle-late Landfill Leachate[D]. Suzhou:Suzhou University of Science and Technology, 2018(in Chinese).
- [2] GOMES A I, SANTOS S G S, SILVA T F C V, *et al.* Treatment train for mature landfill leachates: optimization studies[J]. Science of the Total Environment, 2019, 673:470–479.
- [3] 郁斯怡. 高效降解垃圾渗滤液中有有机污染物的微生物菌株筛选和研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.  
YU Siyi. Isolation and Study of Highly Effective Organics – Degrading Bacteria in Landfill Leachate[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015 (in Chinese).
- [4] OLOIBIRI V, CHYS M, WANDEL S D, *et al.* Removal of organic matter and ammonium from landfill leachate through different scenarios: operational cost evaluation in a full-scale case study of a Flemish landfill[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 203:774–781.
- [5] XIE B, XIONG S, LIANG S B, *et al.* Performance and bacterial compositions of aged refuse reactors treating mature landfill leachate[J]. Bioresource Technology, 2012, 103(1):71–77.
- [6] YU D H, YANG J Y, TENG F, *et al.* Bioaugmentation treatment of mature landfill leachate by new isolated ammonia nitrogen and humic acid resistant microorganism [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2014, 24(7):987–997.
- [7] AMOR C, TORRES-SOCIÁS E D, PERES J A, *et al.* Mature landfill leachate treatment by coagulation/flocculation combined with Fenton and solar photo-Fenton processes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 286:261–268.
- [8] 陆景波,王丹,邓俊平,等. 我国垃圾渗滤液处理现状及发展方向[J]. 中国标准化,2018(8):235–236.  
LU Jingbo, WANG Dan, DENG Junping, *et al.* Current status and development direction of landfill leachate treatment in China [J]. China Standardization, 2018 (8):235–236(in Chinese).
- [9] EL KATEB M, TRELLU C, DARWICH A, *et al.* Electrochemical advanced oxidation processes using novel electrode materials for mineralization and biodegradability enhancement of nanofiltration concentrate of landfill leachates [J]. Water Research, 2019, 162:446–455.
- [10] WANG G Y, MANNS D C, GURON G K, *et al.* Large-scale purification, characterization, and spore outgrowth inhibitory effect of Thurincin H, a bacteriocin produced by *Bacillus thuringiensis* SF361 [J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2014(6):105–113.
- [11] 袁延磊. 聚铁混凝 – Fenton – BAF 组合工艺处理垃圾渗滤液 RO 浓水[D]. 广州:华南理工大学,2015.  
YUAN Yanlei. Combined Processes of PFS Coagulation – Fenton Oxidation – BAF for Treating Landfill Leachate Reverse Osmosis Brine [D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [12] 陆和炜,卓霞军. Fenton – BAF 工艺在垃圾渗滤液深度处理中的应用[J]. 环境卫生工程,2018,26(5):46–49,53.  
LU Hewei, ZHUO Xiajun. Introduction on application of Fenton – BAF process in advanced treatment of landfill leachate [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2018, 26(5):46–49, 53(in Chinese).
- [13] 曹妹文,肖晶,桑子祥. Fenton – BAF 在晚期垃圾渗滤液深度处理中的应用[J]. 中国给水排水,2013,29(2):70–72.  
CAO Shuwen, XIAO Jing, SANG Zixiang. Application of Fenton oxidation/biological aerated filter process in advanced treatment of mature landfill leachate [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(2):70–72 (in Chinese).

作者简介:高峻峰(1972–),男,湖北武汉人,大学,工程师,从事固体废弃物无害化处置及资源化利用、填埋气发电、渗滤液处理等管理工作。

E-mail:122661251@qq.com

收稿日期:2019–09–24

修回日期:2021–02–01

(编辑:衣春敏)