

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.22.011

# 两级A/O+超滤+两级反渗透处理焦化产业园区废水

樊 佳

(上海电气集团国控环球工程有限公司, 山西 太原 030006)

**摘 要:** 针对废水种类多、氨氮及有机物浓度高等特点,山西某焦化产业园区废水处理系统采用除油+气浮+调节+厌氧+两级A/O+二沉池+混凝沉淀+机械过滤+超滤+树脂软化+有机物脱除+两级反渗透工艺处理3 000 m<sup>3</sup>/d园区焦化废水。当进水COD为3 000~5 000 mg/L、NH<sub>3</sub>-N为200~280 mg/L时,出水COD、NH<sub>3</sub>-N分别降至3~8 mg/L和1~2 mg/L,出水水质达到《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)中再生水用于间接冷却水系统补充水的水质指标,全部回用。系统产生的高盐浓水进入三效蒸发结晶系统进行处理,产生的结晶盐园区统一外协处理,从而实现了焦化废水的“近零排放”。

**关键词:** 焦化废水; 两级A/O; 深度处理; 近零排放

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)22-0067-05

## Application of Two-stage A/O, Ultrafiltration and Two-stage Reverse Osmosis Process in Wastewater Treatment of a Coking Industrial Park

FAN Jia

(Shanghai Electric Group Guokong Global Engineering Co. Ltd., Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Coking wastewater has the characteristics of complex composition, high ammonia nitrogen and high concentration of organic matter. The scale of a wastewater treatment process of a coking industrial park in Shanxi Province is 3 000 m<sup>3</sup>/d, which consists of oil removal, flotation, regulation, anaerobic treatment, two-stage A/O, secondary sedimentation tank, coagulation precipitation, mechanical filtration, ultrafiltration, resin softening, organic matter removal and two-stage reverse osmosis. When the COD and NH<sub>3</sub>-N in influent are 3 000–5 000 mg/L and 200–280 mg/L, the COD and NH<sub>3</sub>-N in effluent are 3–8 mg/L and 1–2 mg/L, respectively. And the effluent quality reaches the supplementary water limit for reclaimed water used in indirect cooling open circulating cooling water system specified in *Code for Design of Industrial Recirculating Cooling Water Treatment* (GB/T 50050–2017), and all the reclaimed water is recycled. The high-salt concentrated water produced by the system is treated by three-effect evaporation crystallization systems, and the crystalline salt is uniformly treated by external cooperation outside the park, so as to realize near-zero discharge of coking wastewater.

**Key words:** coking wastewater; two-stage A/O; advanced treatment; near-zero discharge

### 1 工程概况

山西某焦化产业园区以生产销售焦炭为主,园

区企业在生产运行过程中产生大量的废水,主要有生产废水、循环排污水、化工产品生产泵轴密封冲

通信作者: 樊佳 E-mail: 2365372319@qq.com

洗水、煤气管道冷凝水、地坪冲洗水等,废水排放量合计约 3 000 m<sup>3</sup>/d。特征污染物主要包括 COD、NH<sub>3</sub>-N、氰化物、挥发酚、油、悬浮物及大量难生物降解的多环、杂环类有毒有害物质<sup>[1]</sup>。为解决园区废水对环境的污染,园区全部废水经分类后进行收集,并结合各类废水的水质特征<sup>[2]</sup>,分别进入园区废水处理系统的不同工艺节点进行处理,最终出水水质达到《工业循环冷却水处理设计规范》(GB 50050—2017)中再生水用于间冷开式循环冷却水系统补充水的水质指标,全部回用于园区内企业。

该工程设计进、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/<br>(mg·<br>L <sup>-1</sup> ) | NH <sub>3</sub> -N/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | 挥发酚/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | 氰化物/<br>(mg·<br>L <sup>-1</sup> ) | 油/<br>(mg·<br>L <sup>-1</sup> ) | SS/<br>(mg·<br>L <sup>-1</sup> ) | pH  |
|----|-----------------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----|
| 进水 | 6 000                             | 300  | 1 000                         | 30                                | 100                             | 300                              | 7~9 |
| 出水 | 60                                | 5  |                               |                                   | 5                               | 10                               | 6~9 |

## 2 工艺流程

因废水中油类物质浓度较高,故废水首先需通过除油和气浮工艺预处理以除去其中的油类物质。针对园区废水中有机物及氨氮浓度均较高的特点且有脱除总氮的要求,确定本项目生化处理工段核心工艺为厌氧+两级 A/O+二沉池工艺。废水首先通过厌氧微生物的水解酸化提高其可降解性,然后经 A/O 工艺进一步降解有机物,同时达到除磷脱氮的双重目的<sup>[3]</sup>。为保证回流的硝化液和废水充分混合,本项目的厌氧池出水进入硝化液回流井,与硝化液充分混合后再回流至缺氧池。缺氧池出水进入好氧池,废水经好氧池处理后自流至二沉池。设两级 A/O 工艺的目的是进一步降解废水中的有机物,同时保证脱氮效果,为后续深度处理提供有效保障。

深度处理工段包括混凝沉淀、过滤、超滤、树脂软化、有机物脱除、两级反渗透处理等工序。混凝沉淀的作用是使废水中的SS和COD得到进一步降低。其原理是通过先后向废水中加入高效混凝剂及高分子絮凝剂进行混合反应,使废水中的小分子物质吸附架桥形成大分子物质,从而大幅度提高泥水分离效果<sup>[4-5]</sup>。混凝沉淀池出水进入过滤系统,混凝污泥排入污泥浓缩池。过滤器出水经超滤、树脂软化、有机物脱除、两级反渗透等工序处理后,产水

全部回用为循环水补充水。高盐浓水进入三效蒸发结晶系统,产生的结晶盐由园区统一外协处理。

废水处理工艺流程见图1。

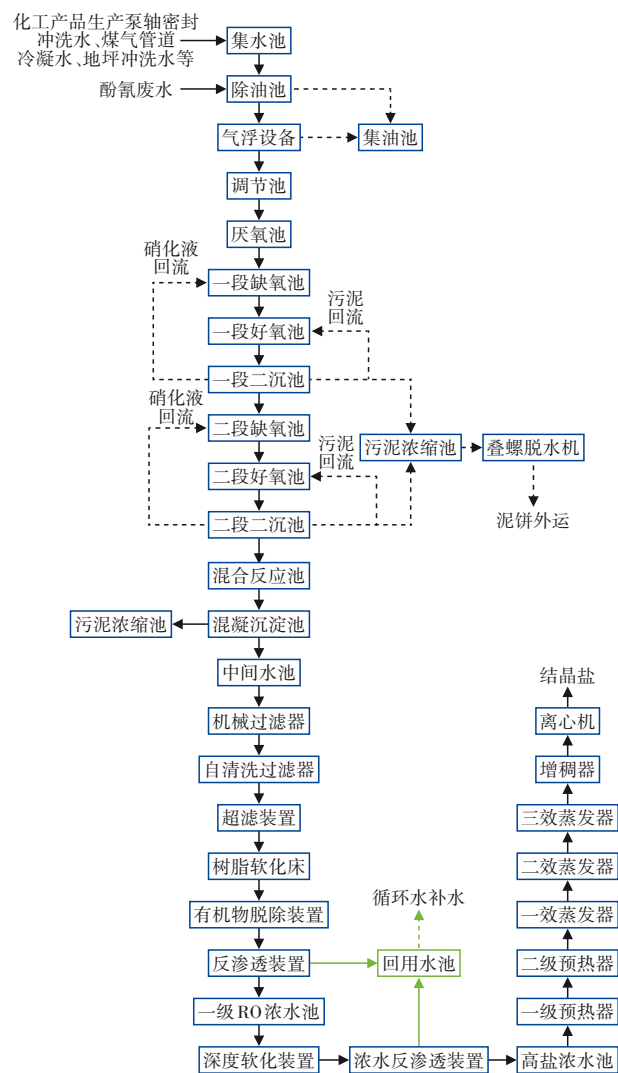


图1 废水处理工艺流程

**Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process**

### 3 主要构筑物设计参数及设备配置

### 3.1 预处理工段

预处理系统由集水池、除油池、气浮设备、调节池组成。考虑到厂区废水种类较多,水质及水量波动范围大,预处理工段设置调节池,以达到调节水量、均化水质的目的。另外设事故池,在系统出现临时事故时可以保证园区污水暂时存储在事故池,不外排。

根据设计规范及设计经验,结合园区废水实际情况,集水池容积确定为 $280\text{ m}^3$ 。除油池容积确定为 $750\text{ m}^3$ ,水力停留时间约 $6\text{ h}$ 。调节池和事故池容

积确定为 $3\,312\text{ m}^3$ ,调节池水力停留时间约22 h。主要设备:集水池提升泵2台, $Q=40\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=160\text{ kPa}$ , $N=4\text{ kW}$ ;调节池提升泵4台, $Q=60\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=200\text{ kPa}$ , $N=11\text{ kW}$ 。溶气气浮设备2套,单套处理能力 $60\text{ m}^3/\text{h}$ 。另外设有潜水搅拌机和事故池提升水泵等。

### 3.2 生化处理工段

#### ① 厌氧池

厌氧池尺寸为 $25\text{ m}\times 20\text{ m}\times 6\text{ m}$ ,水力停留时间约20 h。主要设备为潜水搅拌机。

#### ② 两级A/O生化池

一段缺氧池尺寸为 $25\text{ m}\times 26\text{ m}\times 6\text{ m}$ ,水力停留时间约30 h。缺氧池进水通过池底所设管道均匀布水;内置组合填料;硝化液回流比3:1。一段好氧池尺寸为 $32\text{ m}\times 46\text{ m}\times 6\text{ m}$ ,水力停留时间约60 h。好氧池设导流管保证进水均匀分布;为保证好氧池中活性污泥浓度,好氧池进水口设污泥回流管,污泥回流比1:1。一段好氧池主要设备:空气悬浮鼓风机4台(3用1备), $Q=70\text{ m}^3/\text{min}$ , $H=70\text{ kPa}$ , $N=90\text{ kW}$ ;可提升曝气器800套。

二段缺氧池尺寸为 $20\text{ m}\times 21\text{ m}\times 6\text{ m}$ ,水力停留时间约15 h;硝化液回流比2:1;缺氧池内设有组合填料。二段好氧池尺寸为 $26\text{ m}\times 24\text{ m}\times 6\text{ m}$ ,水力停留时间约25 h,污泥回流比1:1。二段好氧池主要设备:空气悬浮鼓风机3台(2用1备), $Q=60\text{ m}^3/\text{min}$ , $H=70\text{ kPa}$ , $N=75\text{ kW}$ 。可提升曝气器450套。

硝化液中含有硝化细菌氧化氨氮产生的硝酸盐氮,回流到缺氧池后,与缺氧池进水中的有机物混合,由反硝化细菌进行硝酸盐氮的反硝化反应,实现总氮的去除。设硝化液回流提升泵8台(4用4备), $Q=240\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=160\text{ kPa}$ , $N=22\text{ kW}$ 。

#### ③ 二沉池

一段二沉池和二段二沉池尺寸: $\varnothing\times H=20\text{ m}\times 4.2\text{ m}$ ,共4座;二沉池表面负荷为 $1.2\sim 1.5\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,旁设污泥池。主要设备: $\varnothing 20\text{ m}$ 周边传动刮泥机4台;污泥回流泵8台(4用4备), $Q=60\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=200\text{ kPa}$ , $N=7.5\text{ kW}$ 。

#### ④ 污泥浓缩池

在污泥浓缩池中浓缩后的污泥送叠螺式污泥脱水机脱水,然后配煤掺烧。尺寸: $\varnothing\times H=7\text{ m}\times 6.5\text{ m}$ ,设 $\varnothing 7\text{ m}$ 污泥浓缩机1台。

### 3.3 深度处理工段

#### ① 混合反应池

混合反应池的作用是充分混合絮凝剂和废水,使废水中的小分子物质形成絮凝物。混合反应池尺寸为 $8\text{ m}\times 2\text{ m}\times 3\text{ m}$ ,废水停留时间为20 min。主要设备:混合搅拌机1台,反应搅拌机3台。

#### ② 混凝沉淀池

尺寸: $\varnothing\times H=18\text{ m}\times 4.2\text{ m}$ ,混凝沉淀污泥排入污泥池。主要设备: $\varnothing 18\text{ m}$ 周边传动刮泥机1台, $N=0.55\text{ kW}$ ;设污泥提升泵2台(1用1备), $Q=40\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=160\text{ kPa}$ , $N=4\text{ kW}$ 。

#### ③ 机械过滤器

机械过滤器的作用是去除部分有机物、SS、微生物、胶体等物质,以降低废水浊度。尺寸: $\varnothing\times H=3\text{ m}\times 5\text{ m}$ ,数量4台;多介质滤料 $56.6\text{ m}^3$ ,滤速 $10\text{ m/h}$ 。机械过滤器设反洗泵2台(1用1备), $Q=380\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=250\text{ kPa}$ , $N=55\text{ kW}$ 。

#### ④ 超滤装置

超滤的作用是深度去除废水中会对后续反渗透工序造成膜污染的微生物、胶体物质、SS及大分子有机物等,进而保证进入反渗透系统的废水水质符合要求。

为避免废水中硬度较大的杂质对超滤膜丝造成破坏,在超滤装置前配备自清洗过滤器,它可以进一步去除废水中的SS、颗粒物等,使废水浊度降低,从而使水质得到净化。设自清洗过滤器很大程度上减少了系统污垢、菌藻、锈蚀等产生<sup>[6]</sup>。超滤系统使用的膜元件为中空纤维、外压式膜,材质:PVDF。超滤装置设计为2套,单套处理能力 $65\text{ m}^3/\text{h}$ ;单支膜进水膜通量 $\leq 40\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,最高产水量控制在 $4.5\text{ m}^3/\text{h}$ 。

#### ⑤ 树脂软化装置

混凝沉淀工艺无法去除废水中的全部硬度,这些残余的硬度会给后续的反渗透系统带来膜污堵等问题。因此在反渗透工序前加入树脂软化装置,以除去废水中残余的硬度。本系统选用大孔弱酸阳树脂。设3台DN2500软化树脂床,总处理量 $125\text{ m}^3/\text{h}$ 。二级反渗透前设置二级软化树脂,二级软化树脂同样采用大孔弱酸阳树脂,树脂床装置设计为2套DN1500软化树脂床,单套最大制水能力为 $30\text{ m}^3/\text{h}$ ;既可单独运行,又可同时运行。

#### ⑥ 有机物吸附脱除装置

采用有机物吸附脱除装置吸附脱除废水中难生物降解的小分子有机物、色度等,以降低膜污垢,延长膜的清洗周期及膜寿命。设3台DN200树脂吸附塔,最大制水能力125 m<sup>3</sup>/h。

#### ⑦ 反渗透装置

反渗透装置的目的是去除水中的有机物及溶解盐类等物质。本系统采用“反渗透+浓水反渗透”两级浓缩分离,尽可能提高废水产水率。反渗透膜元件采用抗污染苦咸水淡化膜元件。其中,一级反渗透装置设计为3套,单套设计处理水量为56 m<sup>3</sup>/h,采用二段设计,产水率70%~75%;浓水反渗透装置设计为2套(1用1备),单套产水40 m<sup>3</sup>/h,采用二段设计,产水率50%~60%。

#### ⑧ 蒸发结晶单元

二级反渗透浓水进入三效蒸发系统进行处理,即浓水在进料泵的提升下,依次进入EV1强制循环蒸发器1(一效)、EV2强制循环蒸发器2(二效)及EV3强制循环蒸发器(三效)进行蒸发浓缩,各效产生的浓缩水自动流入下一级,被上一级产生的二次蒸汽加热蒸发浓缩,三效蒸发过程中产生的盐浆经增稠器增稠及离心机脱水后得到结晶盐。结晶盐产生量约为4 000 t/a,主要成分为盐类物质及有机物,其中盐类物质主要有氯化钠(67%)、硫酸钠(28%)及少量其他杂盐(5%)。结晶盐含水率≤3%,由园区统一外协处理。

蒸发结晶单元设冷凝水水箱,用以回收系统产生的冷凝水,冷凝水分质回用。主要技术参数:结晶器设计规模15 m<sup>3</sup>/h;蒸发加热器材质:钛材;蒸发分离器及循环管道材质:双相钢2205。

### 3.4 污泥脱水车间、加药间

用机械浓缩脱水方式处理二沉池和混凝沉淀池的剩余污泥。污泥脱水车间及加药间平面尺寸为30 m×9 m。

主要设备:

① JY型加药装置:a. 溶解槽0.5 m<sup>3</sup>,共3套,用于碱和PAC投加。溶液箱2 m<sup>3</sup>,配套搅拌机1台,N=0.75 kW;配计量泵2台,Q=0~1 000 L/h,P=1.0 MPa,N=1.5 kW。b. 溶解槽0.5 m<sup>3</sup>,共2套,用于碳源和磷源投加;溶液箱2 m<sup>3</sup>,配套搅拌机1台,N=0.75 kW;配计量泵2台,Q=0~500 L/h,P=1.0 MPa,N=0.75 kW。

② 全自动加药装置:a. 药液制备量为1 000

L/h,共2套,分别用于混合反应池和气浮设备的PAM投加。配套计量泵2台,Q=0~1 000 L/h,P=1.0 MPa,N=1.5 kW;输粉机功率0.18 kW,搅拌机功率2×0.37 kW。b. 药液制备量为3 000 L/h,用于污泥脱水PAM投加。配套计量泵2台,Q=0~1 500 L/h,P=0.4 MPa,N=0.75 kW;输粉机功率0.18 kW,搅拌机功率2×0.75 kW。

③ 叠螺式污泥脱水机:共2套,污泥产生量360~600 kg/h,处理能力22 m<sup>3</sup>/h,整机功率为7.5 kW。污泥进料泵2台(1用1备),Q=30 m<sup>3</sup>/h,H=200 kPa,N=22 kW。

## 4 处理效果

项目运行期间,废水处理量为1 800~2 500 m<sup>3</sup>/d。实际进、出水水质见表2。

表2 实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality

| 项目         | COD/<br>(mg·<br>L <sup>-1</sup> ) | NH <sub>3</sub> -N/<br>(mg·<br>L <sup>-1</sup> ) | 色度/<br>倍    | SS/<br>(mg·<br>L <sup>-1</sup> ) | pH  | 挥发酚/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | 氰化物/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) |
|------------|-----------------------------------|--|-------------|----------------------------------|-----|-------------------------------|-------------------------------|
| 进水         | 3 000~<br>5 000                   | 200~280  | 450~<br>600 | 250~<br>280                      | 7~9 | 720~950                       | 22~26                         |
| 生化段<br>出水  | 220~<br>300                       | 8~15   | 220~<br>260 | 80~<br>120                       | 6~9 | 0.38~<br>0.45                 | 0.08~<br>0.13                 |
| 深度处<br>理出水 | 3~8                               | 1~2  | 22~<br>26   | ND                               | 7~9 |                               |                               |
| 标准         | 60                                | 5  |             | 10                               | 6~9 |                               |                               |

## 5 效益分析

### 5.1 经济分析

废水近零排放系统共投资约11 800万元,其中设备、土建、安装费共计10 900万元,其他费用共900万元。吨水处理成本30.82元/m<sup>3</sup>(不含蒸汽费),其中预处理+生化处理吨水处理成本17.83元/m<sup>3</sup>,深度处理+蒸发提盐吨水处理成本12.99元/m<sup>3</sup>(不含蒸汽费)。工程装机容量约为3 293 kW,运行容量约为2 253 kW。

### 5.2 节能减排分析

本工程对废水生化处理后进行深度处理,深度处理工段设计水量为125 m<sup>3</sup>/h,系统产水率达90%,产水水质达到间冷开式循环冷却水系统补充水质指标,全部回用。每年可节约水量98.5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,极大地解决了园区一次水耗量大的问题,实现了废水的循环资源化利用。



本项目的实施每年可减少COD排放量6 570 t、NH<sub>3</sub>-N排放量328 t,环境效益极为显著。

## 6 结论

① 采用预处理+生化处理+深度处理工艺处理3 000 m<sup>3</sup>/d的园区焦化废水,系统最终出水水质达到《工业循环冷却水处理设计规范》(GB 50050—2017)中再生水用于间冷开式循环冷却水系统补充水的水质指标,全部回用于园区内企业,实现了焦化废水处理的“近零排放”。

② 针对园区废水种类多的特点,园区全部废水进行分类收集,并结合各类废水的水质特征,分别进入园区废水处理系统的不同工艺节点。针对园区瞬时水质、水量变化大等特点,在预处理段设调节池,以达到调节水量、均化水质的目的;针对废水有机物、氨氮浓度高的特点,生化段采用厌氧+两级A/O工艺。

③ 深度处理工段采用两级反渗透,减少浓水量,提高系统产水率;对高浓盐水进行蒸发结晶处理,解决了高盐浓水处理难度大、无法存放的问题。该项目减少了污染物的排放,保护和改善了生态环境,从企业长期发展来看,提高了企业的经济效益。

## 参考文献:

- [1] 李欢,陶若虹,孙斌,等. 焦化废水处理工程设计实例及运行效果[J]. 中国给水排水, 2018, 34(4): 97-101.  
LI Huan, TAO Ruohong, SUN Bin, *et al.* Case study on design and operation of a coking wastewater treatment project[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(4): 97-101(in Chinese).
- [2] 孙自谦,王祥清,周新宇,等. 厌氧(DUASB)+好氧(HTO)工艺处理玉米深加工废水[J]. 中国给水排水, 2018, 34(24):109-113.  
SUN Ziqian, WANG Xiangqing, ZHOU Xinyu, *et al.* Treatment project of intensive corn processing industrial wastewater by DUASB and HTO process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(24): 109-113 (in Chinese).
- [3] 纪振,李东升,王旭波,等. 物化预处理+厌氧+两级A/O工艺处理农药废水[J]. 工业水处理, 2017, 37

(3):104-106.

JI Zhen, LI Dongsheng, WANG Xubo, *et al.* Treatment of pesticide wastewater by physicochemical pretreatment+anaerobic+two-stage A/O process [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(3): 104-106(in Chinese).

- [4] 刘尚超,薛改凤,张垒,等. 焦化废水处理技术的应用与研究进展[J]. 工业水处理, 2012,32(1):15-17.  
LIU Shangchao, XUE Gaifeng, ZHANG Lei, *et al.* Research progress in the treatment technology of wastewater from coke plants [J]. Industrial Water Treatment, 2012,32(1):15-17 (in Chinese).

- [5] 张敏. AAO-AO两段生物脱氮在山钢日照公司废水处理中的应用[C]//中国金属学会,全国冶金焦化信息网. 2018年(第十二届)焦化节能环保及干熄焦技术研讨会论文集. 大连:中国金属学会,全国冶金焦化信息网, 2018: 59-63.

ZHANG Min. Application of AAO-AO two-stage biological denitrification of wastewater treatment in Shanxi Iron and Steel Rizhao Company [C]//Chinese Society of Metals, National Metallurgical Coking Information Network. Proceedings of Coking Energy Saving Environmental Protection and CDQ Technology Seminar in 2018 (12th). Dalian: Chinese Society of Metals, National Metallurgical Coking Information Network, 2018:59-63(in Chinese).

- [6] 靖阳,魏宏斌,邹平,等. “UF+RO双膜法”深度处理焦化废水的工程应用研究[J]. 环境工程, 2017, 35(增刊):172-176.

JING Yang, WEI Hongbin, ZOU Ping, *et al.* The engineering study on advanced treatment of coking wastewater by double membrane method [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(S1): 172-176 (in Chinese).

**作者简介:**樊佳(1980—),男,山西大同人,本科,高级工程师,主要从事污水处理设计、采购、安装及调试等技术工作,曾获优秀勘察设计项目二等奖、三等奖。

**E-mail:**2365372319@qq.com

**收稿日期:**2021-09-07

**修回日期:**2021-10-18

(编辑:孔红春)