

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.08.026

预处理 + 两级 A/O + UF + Fenton + BAF 处理餐厨沼液

宋欣欣¹, 闵海华², 丁西明²

(1. 天津市政工程设计研究总院有限公司, 天津 300392; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 餐厨垃圾经过厌氧发酵后脱水产生的沼液,成分复杂,水质波动大,有机物和氨氮浓度高,含杂含油量高,处理难度大。以国内某餐厨垃圾综合处理厂餐厨沼液处理为例,详细分析餐厨沼液水质特性,对多种污染物去除遵循“分步解决,先易后难”的原则,采用预处理(隔油沉淀+气浮+膜细格栅)+两级A/O+超滤(UF)+芬顿(Fenton)高级氧化+曝气生物滤池(BAF)组合工艺处理餐厨沼液,确保出水COD、BOD₅、氨氮、TN、TP、SS和动植物油等指标满足当地污水处理厂接管标准。该组合工艺具有出水水质稳定、投资少、占地省等优点,并且没有传统膜法产生的浓缩液问题,可为同类项目的建设提供参考。

关键词: 餐厨沼液; 芬顿高级氧化; 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)08-0143-06

Treatment of Food Waste Biogas Slurry by Process of Pretreatment, Two-stage A/O, UF, Fenton Advanced Oxidation and BAF

SONG Xin-xin¹, MIN Hai-hua², DING Xi-ming²

(1. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300392, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: The biogas slurry produced by dehydration of food waste after anaerobic fermentation has complex pollutant composition, great fluctuations in water quality, high concentration of organic matter and ammonia nitrogen, large amount of impurities and oil content, which is difficult to treat. Taking the biogas slurry treatment of a domestic food waste comprehensive treatment plant as an example, the water quality characteristics of food waste biogas slurry is elaborated. Following the principle of “step-by-step solution, easy first and then hard” to remove multiple pollutants, the combined process of pretreatment (oil separation sedimentation, air floatation, and fine membrane screen), two-stage A/O, UF, Fenton advanced oxidation, and BAF is adopted to treat the food waste biogas slurry, thus ensuring the indexes of COD, BOD₅, ammonia nitrogen, TN, TP, SS and animal and vegetable oils meet the discharged standards of local sewage treatment plant. The combined process has the advantages of stable effluent water quality, less investment, less land occupation, and no concentrated liquid problem generated by the traditional membrane method, which could provide reference for the construction of similar projects.

Key words: food waste biogas slurry; Fenton advanced oxidation; BAF

基金项目: 天津市科技计划项目(19ZXSZSN00080)

近几年国内垃圾分类工作取得积极进展,餐厨垃圾处理厂作为与垃圾分类相衔接的终端处理设施,如雨后春笋般在全国范围内推广。餐厨垃圾处理工艺以预处理+厌氧发酵为主,餐厨垃圾经过厌氧发酵后脱水产生的沼液,污染物成分复杂,水质波动大,有机物和氨氮浓度高,含杂含油量大,处理难度大。以国内某餐厨垃圾综合处理厂为例,对餐厨厌氧沼液处理工艺进行介绍,以期同类项目的建设提供参考。

1 设计规模与设计水质

1.1 设计规模

该餐厨垃圾综合处理厂分别处理400 t/d餐饮垃圾和400 t/d厨余垃圾,采用预处理+厌氧发酵的主流工艺。厂区污水来源主要有餐饮垃圾湿式厌氧脱水后沼液,厨余垃圾干式厌氧脱水后沼液,厂区车辆、设备及车间冲洗排水等。根据全厂物料平衡和水量平衡分析,并参照国内其他同类项目经验,确定沼液设计处理规模为1 000 m³/d(分期实施,其中一期500 m³/d,土建一次性建成,设备分期安装)。

1.2 设计进、出水水质

污水来源主要为餐饮垃圾和厨余垃圾厌氧脱水后沼液,属高浓度有机废水,主要污染物指标为COD、NH₃-N、SS等,其特点是污染物浓度高、成分复杂、氨氮含量高。厂区车辆、设备及车间冲洗排水水量小,污染物浓度不高,与高浓度沼液在调节池均质均量后进入污水处理站处理。参考国内同类项目进水情况,确定本项目设计进、出水水质(见表1)。根据本项目环境影响评价报告,出水水质应满足当地污水处理厂接管标准。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	设计进水水质	设计出水水质
pH值	7.5~8.5	6~8
COD/(mg·L ⁻¹)	15 000~18 000	≤300
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	6 000~8 000	≤150
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	2 800~3 000	≤35
TN/(mg·L ⁻¹)	3 200~3 500	≤50
TP/(mg·L ⁻¹)	50~60	≤6
SS/(mg·L ⁻¹)	2 000~2 500	≤200
动植物油/(mg·L ⁻¹)	1 000~2 500	≤100

2 沼液处理工艺的确定

2.1 进水水质分析

① 污染物成分复杂、水质波动较大

由于餐饮和厨余垃圾组分复杂,造成厌氧后脱水沼液中的污染物成分复杂。沼液的污染成分包括有机物、无机离子和营养物质,另外还含有氨氮和各种溶解态的阳离子、酚类、可溶性脂肪酸及其他难降解有机污染物。水质波动主要受厌氧处理效果的影响,干式厌氧和湿式厌氧,高温厌氧和中温厌氧,厌氧后产生的沼液水质均不一样,即使一种厌氧形式在运行的不同时段,其产生的沼液水质也会有所变化,这些都增加了沼液处理工艺选择的难度^[1]。

② 有机物浓度高

沼液中的COD和BOD₅浓度最高可达几万mg/L,并且沼液中含有大量的腐殖酸,采用传统的生化处理工艺,很难处理至COD为300 mg/L以下。根据垃圾渗滤液和其他沼液处理的运行经验,沼液中含有部分难降解有机物,很难用生物处理的方式去除,后续需要增加深度处理工艺,才能满足出水指标要求。

③ 氨氮浓度高

沼液中的氮多以氨氮形式存在,氨氮浓度和餐厨垃圾本身特性、厌氧停留时间等有关,沼液中氨氮浓度一般为2 500~3 000 mg/L,而排放标准对出水氨氮和总氮的要求极为严格,这就要求沼液处理工艺必须具备高效脱氮的能力。

④ 悬浮物和油类含量高

由于餐饮和厨余垃圾组分复杂,尤其是厨余垃圾,里面杂物很多,虽然经过三级脱水,沼液中仍含有大量悬浮物;此外,餐饮垃圾含有大量油脂,虽然餐饮垃圾预处理设有除油工艺,但是仍有部分油脂类物质进入沼液处理系统,对后续沼液处理工艺产生不利影响。

2.2 工艺设计思路

通过对沼液水质进行详细分析,沼液处理工艺必须满足以下条件:①抗冲击负荷能力强,以满足沼液水质水量波动大的特点;②高效去除污染物的能力,大幅降解沼液中高浓度的有机物和氨氮;③高效的预处理系统,去除油类和悬浮物,减轻对后续主体工艺的不利影响;④深度处理不能有浓缩液产生,以满足本项目浓缩液无法消纳的特点。

根据以上分析,并参照国内其他城市同类项目餐厨沼液处理的经验,确定沼液处理采用预处理+两级A/O+超滤(UF)+芬顿(Fenton)高级氧化+BAF组合处理工艺。预处理工段采用隔油+气

浮+膜细格栅组合工艺,高效去除悬浮物、TP和油类等污染物,减轻其对后续工艺的不利影响。生化系统采用国内渗滤液处理行业运行稳定可靠的两级A/O+超滤工艺,该工艺具有耐冲击负荷能力强、去除有机物和脱氮效果好的特点。深度处理采用Fenton高级氧化+曝气生物滤池组合工艺,去除难降解有机物,确保出水COD和TN满足排放标准。该工艺没有传统膜法产生的浓缩液问题。

2.3 工艺流程

沼液处理工艺流程如图1所示。

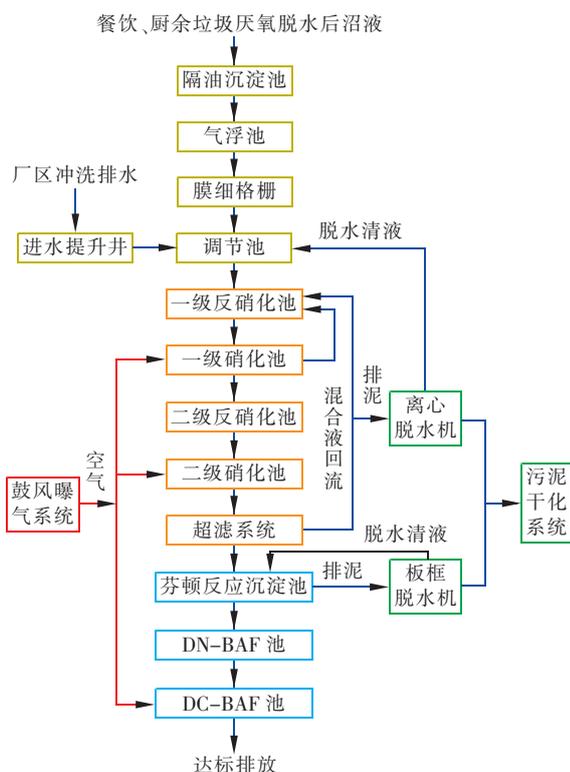


图1 沼液处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of slurry treatment process

餐饮和厨余厌氧沼渣经过脱水后的沼液分别由专用泵送至沼液处理系统,通过设置在调节池顶预处理车间内的隔油沉淀池+气浮+膜细格栅,去除油类、浮渣、TP和SS后,进入调节池,厂区其他冲洗废水先进入进水提升井,经细格栅去除较大悬浮物及漂浮物后,由泵提升进入调节池,高、低浓度污水在调节池内充分混合,均质均量后进入后续生化处理系统,隔油沉淀池污泥进入生化污泥脱水系统,含油浮渣送至餐厨垃圾提油工艺进行油水分离。

生化处理系统主要由一级反硝化、一级硝化、二级反硝化、二级硝化系统和超滤单元组成。将两级

生物脱氮技术与膜生化反应器技术组合,同时综合了两级生物脱氮技术与MBR技术的优点。当一级反硝化和一级硝化脱氮不完全时,一级反硝化、一级硝化过程中残留的氨氮、硝态氮和亚硝态氮可在二级反硝化和二级硝化池中进行深度脱氮反应,从而保障生化脱氮的完全性和稳定性。一级、二级硝化池采用鼓风射流曝气,以增加水中DO,由于生化池内水温较高,为使池内温度保持在硝化反应适宜范围内,设置冷却塔和换热设备对硝化池泥水混合物进行换热。生化处理出水经过自清洗过滤器进入超滤膜系统,处理出水进入深度处理系统。同时,设置严格的流量、温度、压力监控,并配置清洗装置,可以保证系统在各种复杂的运行条件下均安全稳定地工作。

污水经过超滤系统处理后,出水BOD₅、氨氮和SS已达到排放标准,但是难生化降解有机物形成的COD和TN仍然超标。超滤出水继续进入Fenton高级氧化系统进行处理,通过投加Fenton试剂产生的羟基自由基,将难降解的大分子有机物进一步氧化生成二氧化碳和水或转化为小分子有机物。待反应完全后投加液碱,将污水的pH值调至7~8,然后投加PAM,部分污染物随形成的氢氧化铁沉淀物从污水中得以去除。经Fenton氧化处理后,COD和色度大幅降低,且提高了废水的可生化性。出水最后进入BAF,该BAF由缺氧(DN池)和好氧(DC池)两部分组成,同时具有生物氧化、絮凝和过滤作用,可对废水中残余的COD和总氮进行有效去除,确保处理出水各项指标达到排放要求^[2]。

3 主体工艺设计

3.1 进水提升井

进水提升井主要功能是将厂区内车辆、设备及车间冲洗排水经过格栅去除较大悬浮物及漂浮物后提升至调节池。

主要设备:潜水排污泵, $Q=20\text{ m}^3/\text{h}$, $H=200\text{ kPa}$, $N=3.0\text{ kW}$,2台(1用1备),二期增加1台,2用1备。

3.2 调节池及与预处理系统

调节池主要功能是对沼液和其他冲洗废水进行均质均量。预处理系统主要包括隔油沉淀池、气浮池和膜细格栅,主要功能是去除SS、TP和油类等杂质,确保后续工艺系统稳定运行。为防止沼液处理过程中臭气外逸,池顶设置预处理车间。

隔油沉淀池停留时间2 h,调节池停留时间5 d。

主要设备:气浮机,2台, $Q=20\text{ m}^3/\text{h}$, $N=11\text{ kW}$,二期再增加1台;膜格栅除污机,1台, $Q=30\text{ m}^3/\text{h}$, $b=1\text{ mm}$, $N=2.2\text{ kW}$,二期增加1台;潜水搅拌机, $N=5.5\text{ kW}$,不锈钢材质,4套;生化进水泵,2台(1用1备), $Q=30\text{ m}^3/\text{h}$, $H=220\text{ kPa}$, $N=4.0\text{ kW}$,二期增加1台,2用1备。

3.3 生化池

生化池主要由一级反硝化池、一级硝化池、二级反硝化池、二级硝化池组成。硝化池内曝气采用专用设备射流鼓风机曝气,通过高活性的好氧微生物作用,废水中的大部分有机污染物在硝化池内得到降解,同时氨氮在硝化微生物作用下氧化为硝酸盐氮。硝化池至前置反硝化池设有混合液回流泵(硝态氮回流),硝态氮回流至反硝化池,在缺氧环境中还原成氮气排出,达到生物脱氮的目的。两级A/O系统对氨氮的去除率为99%以上。

生化系统辅助设施:

① 冷却系统

由于夏天外界温度较高,且生化反应放热,因此设计冷却系统对生化活性污泥进行降温。

② 外加碳源投加设施

为保证生物脱氮效果,设计外加碳源投加设施用于向一级反硝化和二级反硝化投加碳源。

一级A/O生化系统设计参数:水温 $25\text{ }^\circ\text{C}$,污泥浓度 15.0 g/L ,好氧泥龄 30 d , $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时脱氮速率 $0.04\text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,污泥总产率系数 $0.25\text{ kgVSS}/\text{kgCOD}$,内回流比 $36^{[3-4]}$,供气量 $166\text{ m}^3/\text{min}$,剩余污泥量 $168\text{ m}^3/\text{d}$,一级A池停留时间 4.6 d ,一级O池停留时间 9.2 d 。

二级A/O生化系统设计参数:水温 $25\text{ }^\circ\text{C}$,污泥浓度 15.0 g/L ,好氧泥龄 30 d , $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时脱氮速率 $0.04\text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,污泥总产率系数 $0.24\text{ kgVSS}/\text{kgCOD}$,供气量 $6\text{ m}^3/\text{min}$,剩余污泥量 $6.50\text{ m}^3/\text{d}$,二级A池停留时间 0.8 d ,二级O池停留时间 0.8 d 。

主要设备:一级反硝化潜水搅拌机, $N=7.5\text{ kW}$,不锈钢材质,2台;一级硝化潜水射流曝气器,16路,8台;一级硝化射流泵, $Q=630\text{ m}^3/\text{h}$, $H=130\text{ kPa}$, $N=37\text{ kW}$,4台;硝态氮回流泵, $Q=375\text{ m}^3/\text{h}$, $H=130\text{ kPa}$, $N=22\text{ kW}$,2台;二级反硝化潜水搅拌机, $N=2.5\text{ kW}$,不锈钢材质,2台;二级硝化潜水射

流曝气器,8路,1台;二级硝化射流泵, $Q=180\text{ m}^3/\text{h}$, $H=130\text{ kPa}$, $N=11\text{ kW}$,1台;冷却污泥输送泵, $Q=700\text{ m}^3/\text{h}$, $H=130\text{ kPa}$, $N=45\text{ kW}$,1台;冷却水输送泵, $Q=700\text{ m}^3/\text{h}$, $H=130\text{ kPa}$, $N=45\text{ kW}$,1台;冷却塔, $Q=700\text{ m}^3/\text{h}$, $N=22.0\text{ kW}$,1台,配套板式换热器1台;超滤进水泵, $Q=300\text{ m}^3/\text{h}$, $H=250\text{ kPa}$, $N=30\text{ kW}$,2台(1用1备);进水自清洗过滤器, $Q=300\text{ m}^3/\text{h}$,过滤精度 $800\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$, $N=0.37\text{ kW}$,1台;磁悬浮鼓风机, $Q=180\text{ m}^3/\text{min}$, $H=80\text{ kPa}$, $N=300\text{ kW}$,2台(1用1备);以上设备均按照一期规模 $500\text{ m}^3/\text{d}$ 配置。

3.4 UF

UF主要功能是实现泥水分离,使生化系统内的污泥浓度达到 $15\sim 30\text{ g/L}$,本项目拟采用管式超滤膜,其过滤孔径为 $0.03\ \mu\text{m}$,可以有效截留所有的微生物菌体和悬浮物。此外,超滤系统采用大流量高速循环的方式,膜管内的水力流速达到 $3\sim 5\text{ m/s}$,可以有效防止污染物的沉积,减少膜污染的风险,延长膜使用寿命。

超滤膜设计过滤通量 $68\text{ L}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$,理论计算膜总面积 306 m^2 ,实际配置膜总面积 352 m^2 。

主要设备:双环路超滤集成设备1套, $Q=400\text{ m}^3/\text{d}$, $N=110\text{ kW}$;单环路超滤集成设备(带清洗系统), $Q=100\text{ m}^3/\text{d}$, $N=68\text{ kW}$,1套;Fenton进水泵, $Q=25\text{ m}^3/\text{h}$, $H=100\text{ kPa}$, $N=1.5\text{ kW}$,2台(1用1备)。

3.5 Fenton高级氧化和BAF深度处理

Fenton高级氧化和BAF深度处理主要功能是去除难降解有机物和TN,首先利用Fenton的强氧化和絮凝沉淀作用去除大部分有机物,同时破坏废水中难生物降解有机物的结构及发色基团,使其转换为易于生物降解的物质,从而在提高废水可生化性的同时显著降低废水的色度;后续利用BAF的生物氧化、絮凝及过滤截留作用进一步降低COD及总氮。

Fenton氧化系统主要包括Fenton反应沉淀池及加药系统,BAF深度处理主要包括DN-BAF池、DC-BAF池及清水池、反洗水收集池等。

深度处理系统主要设计参数:①Fenton反应池,水力停留时间 13.45 h ;②Fenton沉淀池,表面负荷 $0.42\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,沉淀时间 5.8 h ,水平流速 0.97 mm/s ;③DN-BAF池,表面水力负荷 0.46

$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, BOD_5 容积负荷 $0.37 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 反硝化容积负荷 $0.222 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 空床水力停留时间 6.48 h ; ④DC-BAF池, 表面水力负荷 $0.46 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 容积负荷 $0.267 \text{ kgBOD}_5/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 硝化容积负荷 $0.022 \text{ kgNH}_3 - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 空床水力停留时间 5.4 h 。

主要设备: BAF 进水泵, $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 130 \text{ kPa}$, $N = 1.5 \text{ kW}$, 2台(1用1备); 硝化液回流泵, $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 100 \text{ kPa}$, $N = 1.5 \text{ kW}$, 2台(1用1备); BAF 曝气风机, $Q = 10 \text{ m}^3/\text{min}$, $H = 60 \text{ kPa}$, 配套变频器, 2台(1用1备); BAF 反冲洗风机, $Q = 18 \text{ m}^3/\text{min}$, $H = 80 \text{ kPa}$, 配套变频器, 2台(1用1备)。

3.6 污泥脱水系统

污泥主要由生化系统产生的生化污泥和 Fenton 氧化系统产生的化学污泥两部分组成。由于这两部分污泥特性不一样, 脱水后上清液处置方式不同, 因此将两种污泥分开收集、分开处理。生化污泥进入离心脱水机, 脱水清液回调节池, 化学污泥则进入板框脱水系统, 脱水清液回芬顿氧化池。两种污泥经过脱水机脱水后含水率达到 80%, 泥饼运至污泥干化系统。由于厂区餐饮垃圾和厨余垃圾厌氧后同样需要脱水, 便于后期运行管理, 有利于臭气收集, 节省占地。脱水系统集中布置, 统一设置在厨余垃圾预处理车间。

主要设备: 离心脱水机, $Q = 25 \sim 30 \text{ m}^3/\text{h}$, $N = 37.5 \text{ kW}$, 1台, 二期再增加1台; 板框压滤机: 150

表3 实际运行进、出水水质

Tab.3 Actual operational influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD_5	SS	TN	$\text{NH}_3 - \text{N}$	TP	动植物油
进水平均值	16 870	7 032	2 630	3 270	2 912	52.0	2 390
生化出水平均值	650	85	20	140	10	1.6	50
Fenton 出水平均值	320	120	68	156	12	1.5	45
最终出水平均值	220	100	50	45	8	1.5	40

5 主要经济技术指标

本项目处理规模 $1\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ (土建)、 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ (设备), 劳动定员 8 人, 工程投资 9 200 万元, 单位成本 $42.37 \text{ 元}/\text{m}^3$, 占地 1 hm^2 。该组合工艺具有投资少、占地小和运行成本适中等特点, 整个废水处理系统无浓缩液产生, 处理出水稳定达标排放。

6 结论

① 餐厨垃圾经厌氧脱水后沼液污染物浓度高, 成分复杂, 水质水量波动大, 处理难度大。

m^2 , $N = 5.5 \text{ kW}$, 1台, 二期再增加1台。

3.7 主要建(构)筑物及尺寸

主要建(构)筑物及尺寸见表2。

表2 主要建(构)筑物及尺寸

Tab.2 Main building and structure size

建(构)筑物	数量尺寸
进水提升井	4.0 m × 3.5 m × 6.0 m
隔油沉淀池	分两格, 单格尺寸 14.4 m × 4.0 m × 3.0 m
调节池	分两格, 单格尺寸 20.0 m × 19.0 m × 7.5 m
一级反硝化池	分2格, 每格尺寸 18.0 m × 16.0 m × 9.5 m
一级硝化池	分4格, 每格尺寸 16.0 m × 16.0 m × 9.5 m
二级反硝化池	分2格, 每格尺寸 7.8 m × 7.0 m × 9.5 m
二级硝化池	分2格, 每格尺寸 7.8 m × 7.0 m × 9.5 m
Fenton 反应池	22.0 m × 5.0 m × 6.0 m
Fenton 沉淀池	22.0 m × 5.0 m × 6.0 m
Fenton 污泥池	10.3 m × 2.0 m × 6.0 m
DN-BAF池	3座, 单座尺寸: 6.0 m × 5.0 m × 8.0 m
DC-BAF池	3座, 单座尺寸: 6.0 m × 5.0 m × 6.0 m
生化污泥池	8.0 m × 8.0 m × 5.3 m
1#脱水清液池	8.0 m × 6.0 m × 5.3 m
2#脱水清液池	8.0 m × 5.0 m × 5.3 m
污水处理车间	46.8 m × 19.4 m + 48.5 m × 10.5 m
预处理车间	20.7 m × 19.7 m

以上主要建(构)筑物尺寸均按照总规模为 $1\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ 进行设计。

4 实际运行效果

项目建成后实际运行的进、出水水质情况如表3所示。

② 采用预处理+两级A/O+UF+Fenton高级氧化+BAF组合工艺处理餐厨沼液, 可确保出水水质满足当地污水处理厂接管标准。

③ 该组合处理工艺具有投资少、占地省等优点, 并且没有传统膜法产生的浓缩液问题, 在餐厨沼液处理领域具有一定的推广应有价值。

参考文献:

[1] 吕凡, 章骅, 邵立明, 等. 基于物质流分析餐厨垃圾灰

- 氧消化工艺的问题与对策[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(1):1-9.
- LÜ Fan, ZHANG Hua, SHAO Liming, *et al.* Problems of anaerobic digestion process to deal with food waste and its countermeasures through material flow analysis [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2017, 25(1):1-9 (in Chinese).
- [2] 周文龙, 汪晓军. 两级 A/O - Fenton - BAF 工艺处理垃圾渗滤液[J]. 中国给水排水, 2011, 27(10):40-42, 46.
- ZHOU Wenlong, WANG Xiaojun. Combined process of two-stage A/O, Fenton oxidation and BAF for treatment of landfill leachate[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(10):40-42, 46 (in Chinese).
- [3] 丁西明, 李洪君, 李晓尚, 等. MBR + NF/RO 工艺处理垃圾渗滤液设计计算[J]. 中国给水排水, 2015, 31(4):72-76.
- DING Ximing, LI Hongjun, LI Xiaoshang, *et al.* Design and calculation of MBR + NF/RO process for treatment of landfill leachate[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(4):72-76 (in Chinese).
- [4] 杜昱, 孙月驰, 李瑞华, 等. 垃圾渗滤液 MBR 处理系统设计要点[J]. 中国给水排水, 2018, 34(2):63-67.
- DU Yu, SUN Yuechi, LI Ruihua, *et al.* Key points in designing MBR project for landfill leachate treatment[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(2):63-67 (in Chinese).

作者简介:宋欣欣(1983-),女,河北石家庄人,硕士,高级工程师,主要从事污水处理研究和工程设计工作。

E-mail:songxx_0728@163.com

收稿日期:2020-07-08

修回日期:2020-08-27

(编辑:衣春敏)

(上接第 142 页)

- Wastewater, 2016, 32(7):121-125 (in Chinese).
- [2] 钱钰, 朱乐辉. 养猪场粪便废水处理工程实例[J]. 水处理技术, 2017, 43(6):126-128.
- QIAN Yu, ZHU Lehui. An engineering example of the piggery manure wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(6):126-128 (in Chinese).
- [3] 杨峰, 刘君君, 赵选英, 等. 低碳氮比规模化养猪场废水处理改造工程实例[J]. 水处理技术, 2018, 44(12):134-136, 140.
- YANG Feng, LIU Junjun, ZHAO Xuanying, *et al.* A project case of reconstruction of large-scale piggery wastewater with low carbon nitrogen ratio treatment project [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(12):134-136, 140 (in Chinese).
- [4] 樊杰, 胡晗. 化学铁盐辅助除磷对生物除磷的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(2):41-45.
- FAN Jie, HU Yan. Effects of chemical addition on biological phosphorus removal system [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(2):41-45 (in Chinese).
- [5] 戴炜豪, 刘宪武, 曾贤桂, 等. 生态生物反应池/化学除磷用于污水厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2015, 31(22):90-94.
- DAI Weihao, LIU Xianwu, ZENG Xiangui, *et al.* Application of ecological bioreactor/chemical phosphorus removal to upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(22):90-94 (in Chinese).
- [6] 姚小文, 王白杨, 陈海红. 高浓度染料废水处理工程设计与运行[J]. 中国给水排水, 2019, 35(2):83-87.
- YAO Xiaowen, WANG Baiyang, CHEN Haihong. Design and operation of high concentration dye wastewater treatment project [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2):83-87 (in Chinese).

作者简介:吴俊雄(1993-),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail:1603986629@qq.com

收稿日期:2019-11-28

修回日期:2020-01-09

(编辑:衣春敏)