

设计经验

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.008

餐厨垃圾/市政污泥/城市粪便联合厌氧消化沼液处理设计

李义烁, 梁远, 颜莹莹, 胡啸, 李雪怡, 刘迪, 马嘉蔚
(北京首创污泥处置技术有限公司, 北京 100044)

摘要: 针对北京某有机质生态处理站餐厨垃圾、市政污泥、城市粪便联合厌氧消化产生的沼液等综合废水特点,采用生物+物化组合工艺,即:预处理+外置式膜生物反应器(MBR,两级硝化反硝化+超滤)+部分纳滤(NF)处理工艺,纳滤产生的浓缩液采用中温催化氧化工艺进行处理,最终实现废水达标排放。该工程设计处理规模为700 m³/d,工程运行结果表明,该工艺运行稳定、效果良好,综合出水水质达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的三级标准,其中氨氮和总氮指标达到北京市地方标准《水污染物综合排放标准》(DB 11/307—2013)。

关键词: 餐厨垃圾; 市政污泥; 城市粪便; 联合厌氧消化; MBR; NF; 中温催化氧化

中图分类号: TU993 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0056-07

Design of Treatment Process of Biogas Slurry from Anaerobic Co-digestion of Kitchen Waste/Municipal Sludge/Urban Excrement

LI Yi-shuo, LIANG Yuan, YAN Ying-ying, HU Xiao, LI Xue-yi, LIU Di,
MA Jia-wei

(Beijing Capital Sludge Disposal Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Based on analyzing characteristics of biogas slurry water quality from anaerobic co-digestion of kitchen waste, municipal sludge and urban excrement in an organic ecological treatment station in Beijing, a biological and physicochemical combination process was employed, which consisted of pretreatment, external membrane bioreactor (MBR, two-stage nitrification/denitrification and ultrafiltration) and partial nanofiltration (NF). Concentrate produced by the nanofiltration was treated by mesophilic catalytic oxidation process, and the effluent quality could finally reach the discharge standard. The designed treatment capacity of this project was 700 m³/d. The operational results indicated that the process was stable and had a good performance. The comprehensive effluent quality reached the third level limitations of *Integrated Wastewater Discharge Standard* (GB 8978-1996), among which ammonia nitrogen and total nitrogen met the limitations of the Beijing local standard *Integrated Discharge Standard of Water Pollutants* (DB 11/307-2013).

Key words: kitchen waste; municipal sludge; urban excrement; anaerobic co-digestion; MBR; NF; mesophilic catalytic oxidation

餐厨垃圾、市政污泥、城市粪便联合厌氧消化工艺一方面可以促使 C/N 稳定在一个较适宜的范围,另一方面还可促进物料的营养平衡,提高单位体积的产气量,在餐厨垃圾处理方面很有前途^[1-4]。但联合厌氧消化后产生的大量沼液等综合废水属于高浓度有机废水,该类废水一般存在一定的毒性和致病菌,会导致二次污染,处理难度较大^[5]。目前,关于这三种物料联合厌氧消化产生沼液处理工艺的研究和应用鲜有报道。

针对北京某有机质生态处理站餐厨垃圾、市政污泥、城市粪便联合厌氧消化产生的沼液等综合废水特点,采用生物+物化组合工艺,即:预处理+外置式膜生物反应器(MBR,两级硝化反硝化+超滤)+部分纳滤(NF)处理工艺,纳滤产生的浓缩液采用中温催化氧化工艺进行处理,最终实现废水达标排放。

表1 废水处理系统设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of wastewater treatment system

项 目	COD/ (mg · L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg · L ⁻¹)	SS/ (mg · L ⁻¹)	NH ₃ - N/ (mg · L ⁻¹)	TN/ (mg · L ⁻¹)	TP/ (mg · L ⁻¹)	pH 值
进水指标范围	10 000 ~ 15 000	4 000 ~ 6 000	3 000 ~ 10 000	1 000 ~ 3 000	1 100 ~ 3 500	10 ~ 20	6 ~ 9
建议进水设计值	12 000	5 000	3 000	2 000	2 500	15	6 ~ 9
出水水质指标	500	300	400	45	70	8	6 ~ 9

2 废水水质特点

① 污染物成分复杂,水质波动较大

本项目处理对象主要为餐厨垃圾、市政污泥和城市粪便经厌氧消化后的沼液。由于餐厨垃圾组分复杂多变,本项目污水中的污染物成分很复杂,水质波动较大。污染成分包括有机物、无机离子和营养物质,其中主要是氨氮和各种溶解态的阳离子、重金属、酚类、可溶性脂肪酸及其他有机污染物。

② 悬浮物浓度高

有别于常规的填埋场、转运站渗滤液,餐厨垃圾、市政污泥、城市粪便经过厌氧消化后,上清液经脱水后依然含有大量的悬浮物,是常规填埋场渗滤液悬浮物浓度的10多倍。

③ 有机物(COD、BOD₅)浓度高

本项目废水主要为经过厌氧消化后的沼液,其中含有大量难降解有机物,COD浓度高,并且含有大量的腐殖酸。

④ 营养比例失调

沼液中营养比例失调,其氨氮含量偏高,可降解

1 项目概况

北京某有机质生态处理站项目日处理餐厨垃圾200 t、市政污泥100 t、城市粪便300 t,采用破碎+分选制浆+除砂+沥水提油+联合厌氧消化工艺。项目主要包括预处理系统、厌氧消化系统、沼气净化及利用系统、废水处理系统等几个部分。废水处理系统主要处理沼液约530 m³/d,设备清洗水、车间冲洗水等其他生产废水约90 m³/d,总计620 m³/d,考虑到废水产量具有一定的波动性,并考虑一定的设计余量,确定本系统设计处理规模为700 m³/d。

废水处理系统进水水质设计参考可研及同类项目经验,出水执行《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的三级标准,其中氨氮和总氮指标执行北京市地方标准《水污染物综合排放标准》(DB 11/307—2013)。

本项目废水处理设计进、出水水质见表1。

有机物含量低,C/N失调,处理难度大。从表1中设计数值来看,BOD₅/TN为2,而生化反应正常进行BOD₅/TN要大于3,因此,需要外加碳源。

⑤ 盐分含量高,有一定量的油脂

餐厨垃圾中有较高含量的盐分和一定量的油脂,盐分及厌氧消化未处理完的油脂经消化液脱水直接进入废水生化处理系统,会对微生物的生长产生抑制作用,增大处理难度。

3 工艺路线选择

本项目废水中污染物浓度高、成分复杂、水质波动较大,仅依靠单一的处理工艺很难达到严格的出水要求或者对产生残余物的再处置要求,兼顾经济和社会生态的双重效益,可采用生物+物化组合工艺进行处理。

废水中的绝大部分有机污染物(COD)和氨氮可采用生物法进行降解去除,避免污染物的二次转移;经生物法处理后的残留污染物采用物理法(如膜技术)进行处理;膜法产生的浓缩液可采用化学法(如中温催化氧化工艺)处理至达到排放标准;由

于废水中油脂、悬浮物含量较高,因此在生化段之前应设置预处理,采用气浮工艺将油脂及悬浮物一并去除。

因此综合考虑,本项目主体工艺路线为预处理+外置式膜生物反应器(MBR,两级硝化反硝化+超滤)+部分纳滤(NF),浓缩液采用中温催化氧化工艺进行处理,最终三股综合出水混合后达标排放。

4 工艺流程

本项目具体流程见图1。

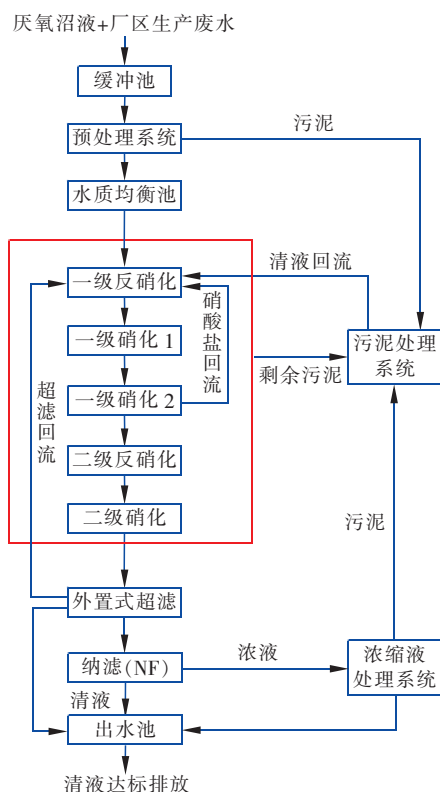


图1 废水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

首先在预处理系统进行隔油及降悬浮物处理,处理后废水统一进入水质均衡池调配水量、均衡水质,减小水质水量对后续生化系统的冲击。调质后废水经生化进水泵提升并通过布水系统进入外置式膜生化反应器,为保护后续膜处理单元,在布水系统前设有过滤级别为 $800 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 的袋式过滤器,以防止大颗粒固体物进入后续处理单元。由于 BOD_5/TN 小于3,需在生化系统前端单独设置碳源投加系统,以获得合适的碳氮比。本项目外置式膜生化反应器设有两级生物脱氮功能,即由一级反硝化硝化(初级生物脱氮)、二级反硝化硝化(深度生

物脱氮)和外置式超滤单元组成。带有两级生物脱氮功能的外置式膜生化反应器的生物脱氮率在99%以上。

经过外置式MBR处理的超滤出水的 BOD_5 、氨氮、总氮、悬浮物等已经达到或接近排放标准,但是难生化降解的有机物形成的COD和色度仍然超标,因此设计将 $350\ \text{m}^3/\text{d}$ 超滤出水进入纳滤进行深度处理,去除难生化降解的有机物。纳滤的清液产率可达85%。纳滤浓缩液采用中温催化氧化工艺处理,纳滤出水清液与剩余的 $350\ \text{m}^3/\text{d}$ 超滤出水及纳滤浓缩液处理后的清液三股综合出水混合达标排放。

5 工艺设计

本工程设计总规模为厌氧消化后产生的沼液和其他生产废水 $700\ \text{m}^3/\text{d}$,项目占地面积为 $5\,000\ \text{m}^2$ 。

本项目废水处理系统可以分为预处理系统、外置式MBR系统、纳滤系统、纳滤浓缩液处理系统、污泥处理系统等几部分。

5.1 预处理系统

由于本项目废水主要为厌氧沼液,可能含有少量油脂,同时SS浓度很高,若不对其进行预处理,油脂对后续处理系统尤其是膜处理系统会带来显著的不利影响,高浓度SS会造成后续生化工艺段产泥量急剧增加,生化反应器中污泥浓度过高,会对好氧曝气系统造成更大的压力且大大加重污泥脱水系统的运行负荷。因此,工艺设计气浮预处理系统,一并去除原水中的残留油脂及SS,减轻后续处理段的负荷。气浮预处理后设置水质均衡池,起到调配水量、均衡水质的作用,以减小水质水量对后续生化系统的冲击。

① 缓冲池

设置污水提升泵2台, $Q=10\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=200\ \text{kPa}$, $N=2.2\ \text{kW}$ 。设置缓冲池1座,半地下式钢混结构,池体进行防渗、防腐处理,尺寸为 $4.0\ \text{m} \times 4.0\ \text{m} \times 9.0\ \text{m}$,有效水深8 m,池顶标高5.7 m,池底标高-3.5 m,水力停留时间4.5 h。

② 气浮系统

气浮系统处理量 $700\ \text{m}^3/\text{d}$, $N=18\ \text{kW}$,气浮池的水力停留时间为 $15 \sim 30\ \text{min}$;表面负荷率为 $3 \sim 5\ \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,溶气水工作压力 $0.3 \sim 0.5\ \text{MPa}$ 。配套均衡池进水螺杆泵2台, $Q=40\ \text{m}^3/\text{h}$, $H=200\ \text{kPa}$, $N=9.2\ \text{kW}$;絮凝剂(PAM)制备装置1套, $Q=$

3 m³/h,制备浓度0.1%~0.3%, $N=2$ kW;螺杆泵1台, $Q=3$ m³/h, $H=150$ kPa, $N=2$ kW;三氯化铁储罐1座, $V=10$ m³;隔膜泵1台, $Q=200$ L/h, $H=500$ kPa, $N=0.18$ kW。

③ 均衡池

设置均衡池1座,半地下式钢混结构,池体进行防渗、防腐处理,尺寸为(8.0 m×6.5 m+3.5 m×4.5 m)×9.0 m,有效水深8 m,池顶标高5.7 m,池底标高-3.5 m,水力停留时间18 h;设置MBR进水螺杆泵3台, $Q=20$ m³/h, $H=200$ kPa, $N=5.5$ kW。

5.2 外置式MBR系统

外置式膜生化反应器由一级反硝化、硝化,二级反硝化、硝化和外置式超滤单元组成。

一级反硝化设置一座总有效容积为1 500 m³的反硝化池,一级硝化设置两座总有效容积为4 000 m³的硝化池。硝化池内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。硝化池至前置反硝化池设有污泥回流,硝态氮回流至反硝化池内在缺氧环境中还原成氮气排出,达到生物脱氮的目的。一级硝化对氨氮的去除率为99%以上,设计反硝化率大于97%,实际运行过程中的反硝化率可通过硝酸盐回流比进行调节。

针对本项目极为严格的总氮排放标准,设计二级反硝化和二级硝化。当一级反硝化和硝化脱氮不完全时,在二级反硝化和二级硝化反应器中进行强化脱氮反应。二级生化反硝化池和硝化池总有效容积分别为600、400 m³。

与传统生化处理工艺相比,微生物菌体可通过高效超滤系统从出水中分离,确保粒径大于20 nm的颗粒物、微生物和与COD相关的悬浮物安全地截留在系统内。超滤清液进入清液储槽。由于超滤实现了泥水分离,因此生化反应器中的污泥浓度可以达到15~30 g/L。

UF进水泵将生化池的混合液分配至UF环路。超滤最大压力为600 kPa。超滤系统设4条环路,每条环路设有5支管式超滤膜。

超滤环路设有循环泵,该泵沿膜管内壁提供一个需要的流速,从而形成紊流,产生较大的过滤通量,以避免堵塞。膜管清洗由储存有清水或清液的清洗槽通过清洗泵来完成。自动压缩空气控制阀能

同时切断进料,留在管内的污泥随冲刷水去生化池。CIP是一种偶发过程,清洗后期阀门按程序打开,允许清洗水在膜环路中循环后回到清洗槽,直到充分清洗。如需要,清洗后期可向清洗槽滴加少量膜清洗药剂。超滤的药剂清洗周期一般为1次/月。

超滤系统采用集成化装置设备,即所有超滤相关的水泵、膜壳等设备以及自控系统均集成在集成架上,所有系统管路和设备(包括电气)在出厂前已经完成设备运转测试、管路压力测试以及电气测试,运至现场后只需连接进出口管线、动力电源以及自控电缆即可投入使用,可以大大节省现场施工和调试时间。

① 一级、二级反硝化池及硝化池

设置一级反硝化池1座,半地下式钢混结构,池体进行防渗、防腐处理,尺寸为10.5 m×18.0 m×9.0 m,有效水深8 m,池顶标高5.7 m,池底标高-3.5 m,水力停留时间2.1 d,反硝化速率为0.128 kgNO₃⁻-N/(kgMLSS·d),池内安装4台液下搅拌机, $N=4$ kW。设置一级硝化池2座,半地下式钢混结构,池体进行防渗、防腐处理,尺寸为14.0 m×18.0 m×9.0 m,有效水深8 m,池顶标高5.7 m,池底标高-3.5 m,水力停留时间2.8 d,污泥龄17.35 d。配套4台专用负压免维护式射流曝气器;一级射流循环泵4台, $Q=600$ m³/h, $H=130$ kPa, $N=37$ kW;硝酸盐回流泵2台, $Q=250$ m³/h, $H=130$ kPa, $N=15$ kW;消泡循环泵2台, $Q=100$ m³/h, $H=300$ kPa, $N=15$ kW;消泡剂隔膜投加泵4台, $Q=1.5$ L/h, $H=1.6$ MPa, $N=0.024$ kW。

设置二级反硝化池1座,半地下式钢混结构,池体进行防渗、防腐处理,尺寸为8.0 m×11.0 m×9.0 m,有效水深8 m,池顶标高5.7 m,池底标高-3.5 m,水力停留时间1 d,反硝化速率为0.128 kgNO₃⁻-N/(kgMLSS·d),池内安装2台液下搅拌机, $N=2.5$ kW。设置二级硝化池1座,半地下式钢混结构,池体进行防渗、防腐处理,尺寸为8.0 m×6.5 m×9.0 m,有效水深8 m,池顶标高5.7 m,池底标高-3.5 m,水力停留时间0.6 d,配套1台专用负压免维护式射流曝气器;二级射流循环泵1台, $Q=200$ m³/h, $H=130$ kPa, $N=15$ kW;鼓风机6台, $Q=2\ 200$ m³/h,风压80 kPa, $N=90$ kW。

生化池水温25℃,生化反应器污泥浓度15 g/L,总反硝化率97.2%,反硝化回流比23:1,剩余

污泥产泥系数 0.20 kgMLSS/kgCOD, 剩余污泥日均产量 209.7 m³/d, 供气量 9 000 m³/h。

② MBR 超滤系统

设置集成模块化超滤装置 2 套, 单套处理量 380 m³/d, $N=110$ kW。超滤系统设 4 条环路, 每条环路设有 5 支管式超滤膜, 过流方式为错流过滤, 膜材质为 PVDF, 膜过滤孔径 20 ~ 30 nm, 总膜面积 540 m² (单支膜面积为 27.05 m²), 设计膜通量 68 L/(m²·h), 系统操作压力 440 ~ 600 kPa。配套超滤进水泵 3 台, $Q=150$ m³/h, $H=160$ kPa, $N=11$ kW; 袋式过滤器, $Q=150$ m³/h, 过滤精度 800 ~ 1 000 μm; 污泥输送螺杆泵 2 台, $Q=10$ m³/h, $H=200$ kPa, $N=4$ kW; 超滤清液槽 1 座, $V=20$ m³; 超滤清液循环泵 2 台, $Q=40$ m³/h, $H=150$ kPa, $N=3$ kW; 酸储槽 1 座, $V=10$ m³; 超滤清液加配泵 2 台, $Q=70$ L/h, $H=400$ kPa, $N=4$ kW。

③ 冷却系统

好氧反应装置内的水温往往较高, 原因是由于好氧生化反应的发热量和鼓风机曝气风温对装置内水温的提升。由于夏天外界温度较高, 且生化反应放热, 为避免过高温度对活性污泥微生物产生抑制作用, 应对好氧反应装置内的污水进行冷却。因此设计冷却系统对生化活性污泥进行降温。

本项目冷却系统服务对象为高负荷生化反应器, 置于高负荷生化反应器旁。主要设备包括冷却塔、板式换热器、冷却污泥泵和冷却水泵。同时冷却系统根据温度监控仪表的数据进行控制。

设置冷却塔 2 台, $Q=400$ m³/h, $N=11$ kW; 板式换热器 2 台, 换热量 1 500 kW; 冷却水泵 2 台, $Q=400$ m³/h, $H=130$ kPa, $N=30$ kW; 冷却污泥泵 2 台, $Q=400$ m³/h, $H=130$ kPa, $N=30$ kW。

5.3 纳滤系统

由于本项目先采用完全生物脱氮的膜生化反应器对综合废水进行了处理, 超滤出水悬浮物和可生物降解的有机物浓度较低, 这在很大程度上避免了纳滤膜的无机和有机污垢的产生, 从而可以降低纳滤膜的清洗频率, 并且使纳滤能够在压力相对较低的情况下运行, 延长了纳滤膜的寿命。

设置集成模块化纳滤装置 1 套, $N=25$ kW, 采用卷式纳滤膜, 24 支膜元件, 总膜面积 814 m², 设计膜通量 18 L/(m²·h), 系统操作压力 0.5 ~ 1.5 MPa, 产水率 85%。配套纳滤进水泵 1 台, $Q=15$

m³/h, $H=400$ kPa, $N=4$ kW; 阻垢剂投加泵 1 台, $Q=1.5$ L/h, $H=1.6$ MPa, $N=0.024$ kW。

5.4 纳滤浓缩液处理系统

膜生化反应器出水除 COD 不能达到排放标准外, 其他污染物如氨氮、悬浮物等污染物均达到排放标准, 为此设计采用纳滤进行深度处理。纳滤系统浓缩液的主要污染物浓度如表 2 所示。

表 2 纳滤浓缩液主要污染物

Tab. 2 Main pollutants in NF concentrate

项目	pH 值	COD/ (mg · L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg · L ⁻¹)	NH ₃ - N/ (mg · L ⁻¹)	TN/ (mg · L ⁻¹)
设计进水	6 ~ 9	5 000	150	20	180

根据浓缩液水质水量特点和处理要求, 确定处理工艺为: 混凝沉淀 + 预处理 + 中温催化氧化, 最终出水达标排放。

具体工艺流程如图 2 所示。

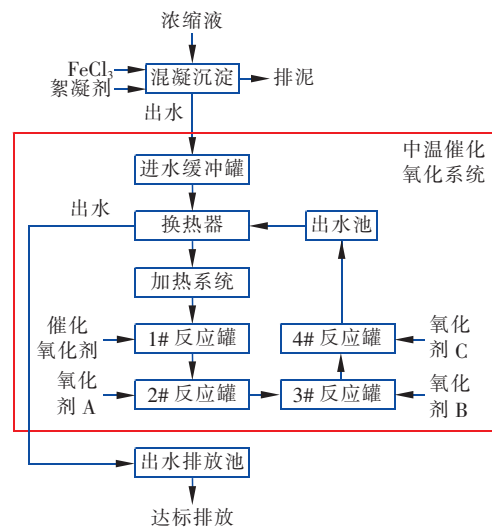


图 2 浓缩液处理工艺流程

Fig. 2 Flow chart of NF concentrate treatment process

纳滤浓缩液在进入中温催化氧化系统前, 先进入混凝沉淀系统, 混凝沉淀对 COD 的去除率在 50% 左右。经过混凝沉淀的浓缩液 COD 以及盐分得到部分降解, 进入缓冲系统, 缓冲系统可去除大部分的硬度, 确保后续系统长期稳定运行。经过初步处理及去除硬度的浓缩液 COD 约为 2 500 ~ 3 000 mg/L, 进水通过预换热及加热, 达到 70 °C 以上 (最佳反应温度), 进入中温催化氧化主系统。主系统反应罐动力全程采用溢流, 增加了系统的连续运行能力。系统出水采用投加氢氧化钙调节 pH 值以及

沉淀硫酸根、铁离子。经过中温催化氧化系统处理后的浓缩液 COD 在 500 mg/L 以下。

设置混凝沉淀池 1 座,半地下式钢混结构,池体进行防渗、防腐处理,尺寸为 4.0 m × 4.0 m × 7.5 m,有效水深 6.5 m,池顶标高 4.2 m,池底标高 -3.5 m。进水缓存罐 $V = 2 \text{ m}^3$,浓缩液处理系统 1 套(含进水泵、换热器,加热系统,1#、2#、3#、4#反应器,增压泵等),处理量 $60 \text{ m}^3/\text{d}$ 。配套出水泵 1 台, $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 200 \text{ kPa}$, $N = 7.5 \text{ kW}$;混凝沉淀排泥泵 1 台, $Q = 5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 200 \text{ kPa}$, $N = 2.2 \text{ kW}$;出水沉淀池排泥泵 1 台, $Q = 5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 200 \text{ kPa}$, $N = 2.2 \text{ kW}$ 。

5.5 污泥处理系统

剩余污泥采用化学调理 + 板框脱水工艺处理,将污泥脱水到含水率达 60% 后外运处置,脱水清液回水处理生化系统。

设置调理池 1 座,全地下式钢混结构,池体进行防渗、防腐处理,池体尺寸为 5.0 m × 4.0 m × 3.5 m,池容 70 m^3 。设置污泥脱水高压板框机 1 台, $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$, $N = 15.8 \text{ kW}$;进料螺杆泵 1 台, $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$, $N = 22 \text{ kW}$;加药系统 1 套;洗布泵 1 台, $Q = 170 \text{ L}/\text{min}$, $N = 30 \text{ kW}$,出口压力 5 MPa。

5.6 工艺设计特点

① 由于外置式膜生化反应器污泥浓度高、泥龄长,使膜生化反应器具有极强的生物脱氮能力和有机污染物的降解能力,且反应器容积较小,有效降低了占地面积和土建投资。

② 针对极为严格的总氮达标排放标准,采用两级生物脱氮保障了脱氮的完全性和稳定性。

③ 将两级生物脱氮技术与分体式膜生化反应器技术组合,综合了两级生物脱氮技术与 MBR 技术的优点,出水水质优质稳定,出水中无细菌和固体悬浮物。

④ 采用部分超滤出水进入纳滤深度处理,纳滤运行操作压力相对较小,能耗较低,同时清液产率较高,浓缩液量较少。

⑤ 纳滤不截留一价盐离子,因此可以在截留不可降解的大分子有机物于浓液中的同时使盐分随出水排出,浓缩液内一价盐与垃圾渗滤液原水中的一价盐浓度基本相同,降低了纳滤浓缩液处理难度。

⑥ 采用部分纳滤与 MBR 超滤出水混合,可减少纳滤膜深度处理浓缩液的产生,降低投资与运行成本,具有较好的经济效益。

⑦ 各工艺段都考虑设计冗余,无论对于 MBR 超滤出水水质、纳滤系统的规模还是深度氧化系统的规模,均留有余量,即对最终的混合出水达标做了多重保障,在正常情况下,纳滤系统无需全部开启,在突发情况下也能保证最终出水达标。

⑧ 只需在现有设备基础上增加纳滤设备或者反渗透设备就可实现后期项目的提标扩容。

6 运行效果及运行成本

6.1 运行效果

该项目稳定运行后的实际进、出水水质见表 3,可见出水稳定达标。

表 3 实际进、出水水质

Tab. 3 Actual influent and effluent quality

项 目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH ₃ - N/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值
原水	10 980	4 730	2 840	1 960	2 390	12	6.9
外置式 MBR 出水	549	28	20	20	67	2	6.6
部分纳滤出水	92	17	2	13	43	0	6.8
纳滤浓缩液处理系统出水	433	22	12	16	58	2	7
混合出水	465	25	15	18	61	2	6.7
排放要求	500	300	400	45	70	8	6~9

6.2 运行成本

该项目于 2018 年 12 月建成,调试 3 个月后稳定运行,废水处理系统人工费为 3.13 元/ m^3 ,维护保养费为 0.47 元/ m^3 ,膜更换费用 1.22 元/ m^3 ,分析化验费 0.39 元/ m^3 ,电费 28.66 元/ m^3 ,消泡剂 0.42 元/ m^3 ,膜清洗剂 0.43 元/ m^3 ,阻垢剂 0.24

元/ m^3 ,硫酸 0.60 元/ m^3 ,絮凝剂 2.80 元/ m^3 ,甲醇 7.05 元/ m^3 ,三氯化铁 1.28 元/ m^3 ,催化氧化剂 0.01 元/ m^3 ,氧化剂 A 2.70 元/ m^3 ,氧化剂 B 1.40 元/ m^3 ,氧化剂 C 0.03 元/ m^3 ,酸 0.10 元/ m^3 ,混凝、絮凝剂 1.00 元/ m^3 ,石灰 0.61 元/ m^3 ,自来水费 0.15 元/ m^3 ,蒸汽费 1.50 元/ m^3 ,合计运行成本为

54.19元/m³。

7 结论

采用预处理+外置式膜生物反应器(MBR,两级硝化反硝化+超滤)+部分纳滤工艺处理厌氧消化沼液,浓缩液采用中温催化氧化工艺进行处理,该工艺可使出水水质稳定达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)中的三级标准,氨氮和总氮达到北京市《水污染物综合排放标准》(DB 11/307—2013)。该工艺有效解决了餐厨垃圾、市政污泥、城市粪便联合厌氧消化沼液的环境污染问题,为类似工程的设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 唐朝春,段先月,陈惠民,等.餐厨垃圾联合厌氧消化研究进展[J].现代化工,2016,36(4):34-37,39.
TANG Chaochun, DUAN Xian Yue, CHEN Huimin, *et al.* Research progress of anaerobic digestion of food waste [J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(4): 34-37, 39 (in Chinese).
- [2] 康凯.餐厨垃圾与污泥混合厌氧消化处理[D].大连:大连理工大学,2014.
KANG Kai. Anaerobic Digestion Treatment of Kitchen Waste and Sludge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014 (in Chinese).
- [3] 张晨光,祝金星,王小韦,等.餐厨垃圾、粪便和污泥联合厌氧发酵工艺优化研究[J].中国沼气,2015,33(1):13-16.
ZHANG Chenguang, ZHU Jinxing, WANG Xiaowei, *et al.* Optimization of anaerobic fermentation with mixed material of kitchen waste, faeces and sludge [J]. China Biogas, 2015, 33(1): 13-16 (in Chinese).
- [4] 李婧,高立杰,刘牡,等.市政污泥、粪便及餐厨的混合厌氧消化的研究[J].环境工程,2017,35(增刊):428-433.
LI Jing, GAO Lijie, LIU Mu, *et al.* Research on the anaerobic co-digestion of municipal sludge, septic tank feces and food waste [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(S): 428-433 (in Chinese).
- [5] 汤萌萌,张亚琳,丁西明,等.预处理/MBR/臭氧高级氧化工艺处理餐厨垃圾废水[J].中国给水排水,2017,33(22):71-73.
TANG Mengmeng, ZHANG Yalin, DING Ximing, *et al.* Treatment of kitchen wastewater with pretreatment unit/MBR/ozone-based advanced oxidation process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 71-73 (in Chinese).

作者简介:李义烁(1986-),男,湖北孝感人,硕士,工程师,从事餐厨垃圾及污泥处理工程设计与研究工作。

E-mail: lyshwuhan@163.com

收稿日期:2020-12-29

修回日期:2021-01-27

(编辑:孔红春)

实施国家节水行动,

统筹山水林田湖草系统治理