

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.02.018

精馏脱氮处理垃圾填埋场渗滤液工程案例

陈方方, 古创, 孔芹, 何敏霞, 苏雅, 郑晓宇, 安瑾
(光大环境科技<中国>有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对江西某垃圾填埋场渗滤液处理存在的处理量不足、运行成本高、占地面积紧张等问题,将精馏脱氮技术应用于渗滤液处理。采用“预处理+精馏脱氮+生化+超滤+纳滤”组合工艺,在占地紧张的前提下,使原有生化系统处理量提高到原来的1.5倍,且无需投加碳源,解决了处理量不足、运行成本高的问题。其中,精馏脱氮工艺脱氮效率高,氨氮去除率可达96%,总氮去除率可达95%。改造后渗滤液处理能力由300 m³/d提升至700 m³/d,最终产水水质达到《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)的表2标准(TN<40 mg/L),具有良好的经济效益和环境效益。

关键词: 垃圾填埋场渗滤液; 精馏脱氮; 生物脱氮; 深度处理; 总氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)02-0110-05

Engineering Case of Landfill Leachate Treatment by Distillation Denitrification

CHEN Fang-fang, GU Chuang, KONG Qin, HE Min-xia, SU Ya,
ZHENG Xiao-yu, AN Jin

(Everbright Environment Sci-tech Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: In view of the problems such as insufficient treatment capacity, high operating cost, and tight occupation area of leachate treatment in a landfill in Jiangxi, the distillation denitrification technology is applied to leachate treatment. The combined process of pretreatment, distillation denitrification, A/O, UF, and NF is adopted. Under the premise of tight occupation, the processing capacity of the original biochemical system is increased by 1.5 times, and there is no need to add carbon source, which solves the problem of insufficient processing capacity and high operating cost. The nitrogen removal efficiency of the distillation denitrification process is high, the removal rate of ammonia nitrogen can reach 96%, and the total nitrogen removal rate can reach 95%. After the transformation, the leachate treatment capacity increased from 300 m³/d to 700 m³/d, and the final effluent quality can reach the criteria in table 2 of the *Standard for Pollution Control on the Landfill Site of Municipal Solid Waste* (GB 16889-2008) (TN<40 mg/L), which has good economic and environmental benefits.

Key words: landfill leachate; distillation denitrification; biological denitrification; advanced treatment; total nitrogen

卫生填埋是垃圾处理的一种方式,因为成本低、卫生程度好在国内被广泛应用。但垃圾填埋会产生渗滤液,具有高COD、高氨氮、高盐分等特点,且水质比较复杂,如果未经处理直接排放会对环境造成破坏^[1]。江西某垃圾填埋场于2010年开始接收垃

圾,渗滤液处理系统于2014年开工建设,设计处理量为300 m³/d。随着垃圾填埋量增加,渗滤液产量越来越多,日产量约500 m³/d,其中200 m³/d为填埋年限较短的垃圾产生的新鲜渗滤液,300 m³/d为填埋年限较长的垃圾产生的可生化性差的渗滤液,且

还有 $14 \times 10^4 \text{ m}^3$ 可生化性较差的库存渗滤液。渗滤液处理原采用“两级生化+超滤+纳滤”工艺,但生化过程将渗滤液中的氨氮部分转化为硝态氮或亚硝态氮,导致系统产水总氮不能满足要求^[2],且生化单元需要投加大量的碳源,运行成本高。面对产生量大于处理量且环保要求降低库存、产水水质需满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)表2标准(TN<40 mg/L)的现状,亟需对渗滤液处理系统进行提标改造。

精馏脱氮根据溶液中各组分挥发度的差异,使各组分得以分离^[3]。通过气、液两相的直接接触,使渗滤液中易挥发的氨氮由液相向气相传递,并将气相中的氨氮与二氧化碳反应,得到副产品铵盐。精馏脱氮技术占地面积小,以处理量 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 为例,生化处理系统需要占地面积约 $1\,300 \text{ m}^2$,而精馏脱氮工艺占地约 420 m^2 ,若采用精馏脱氮技术作为主要的脱氮单元可降低占地面积65%以上。该技术占地面积小且脱氮率高,不需要碳源,没有污泥产生,运行成本低,因此新增脱氮单元采用精馏脱氮技术。渗滤液处理系统采用“精馏脱氮+生化+超滤+纳滤”组合工艺进行提标改造。

1 设计水质

该填埋场库存渗滤液和填埋年限较长的垃圾产生的渗滤液COD、氨氮、盐分等浓度高,且可生化性较差。精馏脱氮系统进水及整个系统出水标准见表1。产生的新鲜渗滤液COD为20 000~30 000 mg/L,氨氮为1 200~1 800 mg/L。

表1 渗滤液进水及设计出水水质

Tab.1 Leachate influent and design effluent quality

项目	进水水质	出水标准
COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	4 500~6 000	100
氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	3 000~3 500	25
总氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	3 200~4 000	40
硬度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	800~2 000	
电导率/($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	30~36	

2 设计流程

该项目工艺流程和水量平衡见图1。与原“两级生化+超滤+纳滤”处理工艺相比,新增1套处理量为 $500 \text{ m}^3/\text{d}$ 的精馏脱氮系统、1套处理量为 $250 \text{ m}^3/\text{d}$ 的生化系统和2套处理量分别为 $400 \text{ m}^3/\text{d}$ 的超滤、纳滤系统。可生化性较差的渗滤液氨氮浓度高,经过调节池直接进入精馏脱氮系统去除大部分氨氮

及部分碱度、硬度后进入生化系统,由于精馏脱氮系统大大降低了生化系统的负荷,根据水质水量情况,部分新鲜渗滤液可直接进入原有两级A/O和新增的A/O系统,生化系统进一步去除渗滤液中的氨氮及大部分COD后进入超滤系统。渗滤液经超滤系统截留大分子有机物及几乎全部悬浮物后进入纳滤系统,纳滤系统设计回收率为90%,产水达标排放,浓水进入蒸发系统,实现渗滤液的全量处理。经过提标改造后,整个系统的处理能力可达到 $700 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上,产水水质可稳定达到《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)的表2标准(TN<40 mg/L)。

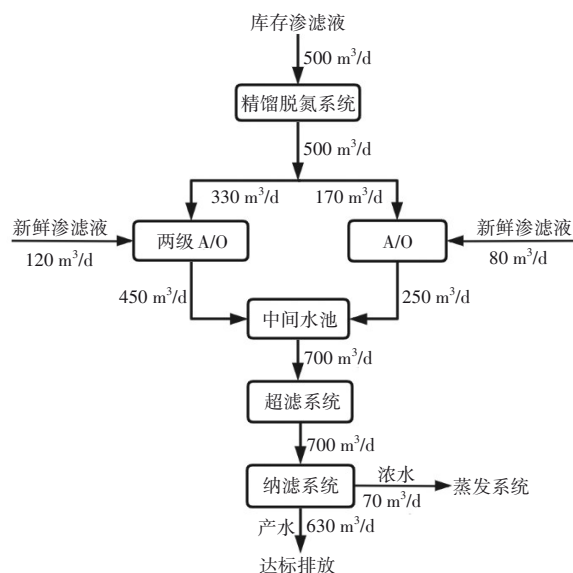


图1 工艺流程和水量平衡

Fig.1 Process flow and water balance diagram

3 主要处理系统

主要改造单元包括精馏脱氮系统、生化系统和深度处理系统(超滤、纳滤)。精馏脱氮系统主要由脱碳塔、脱氮塔和吸收塔组成,生化系统采用钢结构罐体节约占地面积。超滤、纳滤系统在原有厂房空余的位置扩大规模。

3.1 精馏脱氮系统

精馏脱氮工艺流程见图2。渗滤液经过预热后由进水泵送入脱碳塔,由于渗滤液碱度、硬度较高,在高温条件下碱度易分解为 CO_3^{2-} ,与渗滤液中的 Ca^{2+} 结合生成钙盐析出。脱除部分碱度、硬度的渗滤液由脱氮塔进水泵送入脱氮塔,自上而下与自下而上的蒸汽进行逆流接触传质传热,渗滤液中的氨进入蒸汽,含氨蒸汽进入氨吸收塔,脱除氨氮的渗

滤液进入后续处理系统。由于渗滤液硬度、碱度高,塔板易结垢^[4],因此采用双塔设计负压运行,脱碳塔用于去除渗滤液中部分硬度、碱度,脱氮塔用于去除渗滤液中的氨氮,此设计将易结垢的脱碳塔和脱氮塔分离。易结垢的脱碳塔采用1用1备,清洗时无需整个系统停机,保证了系统的连续稳定运行。吸收塔利用二氧化碳与含氨蒸汽中的氨反应生成铵盐结晶体,经后续离心机脱水后作为铵盐外销。系统采用填埋气燃烧产生的蒸汽作为热源,无需外购蒸汽,不仅降低了运行成本,而且实现了“以废治废”。

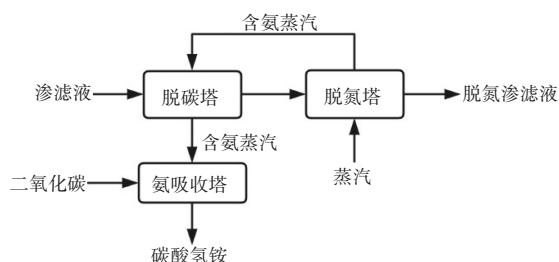


图2 精馏脱氮工艺流程

Fig.2 Flow chart of distillation denitrification process

精馏脱氮系统主要设计参数见表2。

表2 精馏脱氮系统主要设计参数

Tab.2 Main design parameters of distillation denitrification system

项目	数值
处理量/(t·h ⁻¹)	25
工作压力/MPa	-0.05 ~ -0.03
工作温度/°C	80~90
进水氨氮/(mg·L ⁻¹)	3 000~3 500
出水氨氮/(mg·L ⁻¹)	≤150
蒸汽耗量/(kg·m ⁻³)	≤100

精馏脱氮系统主要设备:脱碳塔2台;脱氮塔1台;吸收塔1台;脱碳塔进水泵2台, $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$, $H=300\text{ kPa}$;脱氮塔进水泵2台, $Q=50\text{ m}^3/\text{h}$, $H=300\text{ kPa}$;其他配套设备。

3.2 生化系统及深度处理系统

精馏脱氮产水进入生化系统去除大部分有机物及氨氮后,再进入深度处理系统进一步去除小分子污染物,保证产水水质达标。

3.2.1 生化系统

新增生化系统处理量 $250\text{ m}^3/\text{d}$,其中 $170\text{ m}^3/\text{d}$ 来自精馏脱氮产水, $80\text{ m}^3/\text{d}$ 来自新产生的渗滤液。由于新产生的渗滤液可生化性好,生化系统无需外

加碳源,降低了运行成本。

生化系统采用钢结构罐体,主要设备为反硝化反应罐和硝化反应罐。反硝化反应罐容积 750 m^3 ,反硝化速率 $0.05\sim0.12\text{ kgNO}_3^--\text{N}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$,罐内设置搅拌机。硝化反应罐容积 $1\,400\text{ m}^3$,硝化速率 $0.02\sim0.05\text{ kgNH}_4^+-\text{N}/(\text{kgMLSS}\cdot\text{d})$,设有射流曝气器。反硝化反应罐和硝化反应罐的罐体之间设有连通管,精馏脱氮产水首先进入硝化反应罐进行硝化反应,含氮有机物被细菌分解成氨,然后在亚硝化菌的作用下进一步转化为亚硝酸盐氮,再经硝化菌作用而转化为硝酸盐氮。硝酸盐氮进入反硝化反应罐后进行反硝化反应,利用或部分利用污水中原有的有机物碳源作为电子供体,以硝酸盐代替分子氧作电子受体进行“无氧”呼吸,分解有机质,同时将硝酸盐氮还原成气态氮^[5]。

生化系统主要设备:射流泵2台, $Q=600\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$;罗茨风机2台, $Q=38\text{ m}^3/\text{min}$, $H=90\text{ kPa}$;冷水泵1台, $Q=300\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$;热泵1台, $Q=300\text{ m}^3/\text{h}$, $H=150\text{ kPa}$;配套冷却塔和换热器。

3.2.2 深度处理系统

深度处理系统包括超滤和纳滤。原深度处理的超滤和纳滤系统处理量均为 $300\text{ m}^3/\text{d}$,由于生化系统处理量提升至 $700\text{ m}^3/\text{d}$,新增的超滤和纳滤系统处理量均为 $400\text{ m}^3/\text{d}$ 。

超滤系统采用外置式管式超滤膜,渗滤液经过生化处理后,进入超滤进行泥水分离,产水进入后续纳滤系统,分离的泥水返回生化系统。超滤系统回流量与产水量设计值为9:1,大循环量保证了膜面流速,减缓了膜孔的堵塞速度,延长了膜清洗周期。

超滤系统截留渗滤液中大分子有机物及几乎全部悬浮物,产水进入纳滤系统,进一步截留小分子污染物,使产水达标排放。

新增超滤系统膜进水量 $20\text{ m}^3/\text{h}$,膜面积 27.2 m^2 ,设计膜通量 $65\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,膜数量12支。

新增纳滤系统膜进水量 $20\text{ m}^3/\text{h}$,膜面积 37.2 m^2 ,设计膜通量 $10\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,膜数量49支,设计回收率90%。

4 运行效果及分析

4.1 精馏脱氮系统

精馏脱氮系统处理量可达到设计值 $500\text{ m}^3/\text{d}$,

产水氨氮平均值低于设计值(150 mg/L),整体运行良好。但在调试运行过程中偶尔出现产水氨氮波动较大的情况,经分析发现可能有两种原因:一是进水水质波动;二是填埋场渗滤液中含有表面活性剂,在精馏过程中易起泡,导致脱碳塔和脱氮塔的塔内压力波动,当压力降低时,通过视窗可看到塔内有大量气泡产生。起泡严重会影响气液之间的传质传热效率,导致脱氮效率下降^[6],出水氨氮波动较大(见图3)。此种情况可通过添加消泡剂解决。

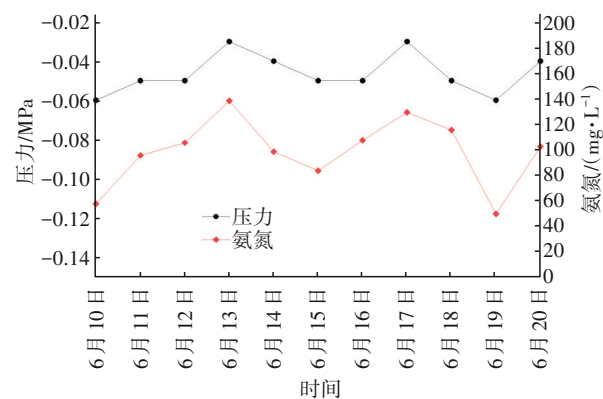


图3 脱氮塔塔顶压力和产水氨氮随时间的变化

Fig.3 Variation of pressure at the top of denitrification tower and ammonia nitrogen in produced water with time

精馏脱氮系统将氨氮资源化为碳酸氢铵产品,经检测,该产品满足《农用碳酸氢铵》(GB/T 3559—2001)要求,可作为农用肥料进行外销。碳酸氢铵产量约5 t/d,单价为310元/t,收益约1 600元/d,进一步降低了运行成本。碳酸氢铵的检测结果显示表3。

表3 碳酸氢铵检测结果

Tab.3 Test results of ammonium bicarbonate

检测项目	标准要求	实测值	单项结论
外观	白色或浅色结晶	白色结晶	合格
水分/%	≤5.0	1.4	合格
氮/%	≥16.8	17.3	合格

4.2 生化系统

精馏脱氮系统产水氨氮平均值<150 mg/L,大大降低了生化系统的负荷,使原有生化系统的处理量由300 m³/d增至450 m³/d,提高到原来的1.5倍,且无需额外投加碳源。由于精馏脱氮系统没有污泥产生,大大减少了生化系统的污泥产生量,进一步降低了运行成本。

4.3 深度处理系统

由于精馏脱氮系统去除了渗滤液中部分硬度,延缓了膜的结垢速度,延长了膜的清洗周期。纳滤膜清洗周期由原来的2个月延长至两个半月,增加了膜系统的运行稳定性。控制纳滤系统进水pH由原来约5.6增至约6.5,减少了盐酸的投加量,降低了加药成本。

5 各处理单元污染物去除效果

该项目自2019年7月开始调试,2020年5月验收,设备稳定运行。稳定运行期间收集了5月—12月的数据并进行分析。表4为各处理单元污染物去除效果。

表4 各处理单元去除效果

Tab.4 Treatment effect of process units

项目		COD	氨氮	硬度	总氮
精馏脱氮系统	进水/(mg·L ⁻¹)	5 860	3 156	815	3 481
	出水/(mg·L ⁻¹)	4 688	127	448	158
	去除率/%	20	96	45	95
生化+超滤系统	进水/(mg·L ⁻¹)	12 788	660		792
	出水/(mg·L ⁻¹)	997	2		80
	去除率/%	92	99.7		90
纳滤系统	进水/(mg·L ⁻¹)	997	2		80
	出水/(mg·L ⁻¹)	42	0		32
	去除率/%	95.8	100		60
注: 生化+超滤系统的进水水质为蒸氨产水与新鲜渗滤液根据水质水量计算出的加权平均值。					

精馏脱氮作为主要脱氮单元,氨氮由进水的3 156 mg/L降至127 mg/L,去除率为96%。总氮由进水的3 481 mg/L降至158 mg/L,去除率可达95%。该单元脱氮效率高为系统最终产水总氮达标提供了保障。硬度由815 mg/L降至448 mg/L,去除率约45%,减缓了后续膜系统的结垢倾向,延长了膜系统清洗周期。系统最终产水水质满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)的表2标准。

6 经济效益分析

精馏脱氮与生物脱氮的技术经济对比分析见表5。一方面,精馏脱氮相对于生物脱氮节约电耗66%,主要是因为生物脱氮需要风机和射流泵等高电耗的设备。另一方面,精馏脱氮技术不需要添加碳源,而对于可生化性差的填埋场渗滤液需要投加大量碳源,增加了运行成本。此外,精馏脱氮可将氨氮资源化为铵盐外销,进一步降低了运行成本。

相对于生物脱氮,精馏脱氮运行成本低于 10 元/m³(所用蒸汽为燃烧填埋气产生,不计入费用),较传统生物脱氮运行成本降低约 80%,投资成本可降低约 32%,具有很好的经济效益和环境效益。

表 5 精馏脱氮与生物脱氮的技术经济对比分析
Tab.5 Comparative and economic analysis between distillation denitrification and biological denitrification

项目	耗量		单价	费用/(元·t ⁻¹)	
	精馏脱氮	生化处理		精馏脱氮	生化处理
电	8.58 kW·h/m ³	25.00 kW·h/m ³	0.65 元/(kW·h)	5.58	16.25
消泡剂	0.15 kg/m ³	0.01 kg/m ³	28 元/kg	4.20	0.28
碳源	0	15.00 kg/m ³	2 000 元/t	0	30.00
CO ₂	1.86 kg/m ³	0	550 元/t	1.02	0
药剂	0.27 kg/m ³	0	4 800 元/t	1.30	0
碳酸氢铵外销	0.01 t/m ³	0	310 元/t	-3.10	0
总计				9.00	46.53

7 结论

江西某垃圾填埋场将精馏脱氮技术用于垃圾渗滤液脱氮处理,脱氮效率高,出水水质稳定,氨氮去除率可达 96%,总氮去除率可达 95%,大幅降低了后续生物脱氮负荷,提高了生化系统处理能力,解决了处理量不足和运行成本高的问题,最终产水水质达到《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)的表 2 标准(TN<40 mg/L)。精馏脱氮工艺使渗滤液中的氨氮转化为铵盐外销,且使用由填埋气经锅炉产生的蒸汽作为热源,大大降低了运行成本,实现了精馏脱氮技术与垃圾填埋场物质、能量的高效协同,具有良好的经济效益和环境效益。

参考文献:

[1] 王罕,蒋文化,马三剑. UASB+MBR+NF 处理焚烧垃圾渗滤液的设计及运行[J]. 工业水处理,2014,34(11): 87-89.
WANG Han, JIANG Wenhua, MA Sanjian. Design and

operation of the treatment of refuse leachate by UASB+MBR+NF [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34 (11):87-89(in Chinese).
[2] 熊鑫. 垃圾渗滤液生物硝化和电化学氧化预处理的性能研究[D]. 长沙:中南大学,2022:4-8.
XIONG Xin. Performance of Biological Nitrification and Electrochemical Oxidation Pretreatment of Landfill Leachate [D]. Changsha: Central South University, 2022:4-8(in Chinese).
[3] 赵举浪. 新型余热焦化蒸氨工艺的应用分析[J]. 广州化工,2023,51(16):123-126.
ZHAO Julang. Application analysis of a new type of waste heat coking ammonia distillation process [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51 (16) : 123-126 (in Chinese).
[4] 古创,姚春阳,彭磊,等. 蒸氨法脱除垃圾渗滤液中氨氮的研究[J]. 中国给水排水,2019,35(9):67-70.
GU Chuang, YAO Chunyang, PENG Lei, et al. Removal of ammonia nitrogen from landfill leachate by ammonia evaporation method [J]. China Water & Wastewater, 2019,35(9):67-70(in Chinese).
[5] 曹春华,浦燕新,朱卫兵. 沈湫填埋场渗滤液处理提标工程实例[J]. 中国给水排水,2013,29(14):86-89.
CAO Chunhua, PU Yanxin, ZHU Weibing. Upgrade project for leachate treatment at Shendu landfill site [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29 (14) : 86-89 (in Chinese).
[6] 陈方方. 基于空气增湿去湿的渗滤液浓缩液处理研究[D]. 杭州:浙江大学,2017:27-41.
CHEN Fangfang. The Research of Concentrate Leachate Treatment by Air Humidification-dehumidification Technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 27-41(in Chinese).

作者简介:陈方方(1990—),女,山东聊城人,硕士,工程师,主要从事污水处理研究工作。
E-mail:chenff@ebchinaintl.com.cn
收稿日期:2024-01-19
修回日期:2024-03-19

(编辑:衣春敏)