

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.20.021

基于MVR蒸发处理垃圾渗滤液膜浓缩液的实例研究

吴杭航^{1,2}, 王中慧^{1,2}, 张路路^{1,2}, 叶脉^{1,2}

(1. 广东省环境科学研究院, 广东 广州 510045; 2. 粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广东 广州 511486)

摘要: 以广东省某垃圾填埋场渗滤液膜浓缩液处理项目为例,介绍了基于机械蒸汽压缩(MVR)蒸发的垃圾渗滤液膜浓缩液处理系统设计参数、运行效果和运行成本。该系统的应用使垃圾填埋场渗滤液膜浓缩液的减量化率达到85%以上,对COD和NH₃-N的平均去除率分别达到99.86%和99.95%,出水指标均满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)的表3水污染物特别排放限值要求。MVR蒸发系统运行成本为86.87元/m³,项目实施后可为垃圾填埋场节省运营开支790万元/a,经济效益可观。

关键词: 垃圾渗滤液; MVR蒸发; 膜浓缩液; 减量化; 降低成本

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)20-0127-05

Case Study on Treatment of Landfill Leachate Membrane Concentrate by MVR Evaporation

WU Hang-hang^{1,2}, WANG Zhong-hui^{1,2}, ZHANG Lu-lu^{1,2}, YE Mai^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China;
2. Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 511486, China)

Abstract: Taking the treatment project of landfill leachate membrane concentrate in Guangdong Province as a case, the design parameters, operating effects and operation cost based on a mechanical vapor recompression (MVR) evaporation system are introduced. The application results show that the landfill leachate membrane concentrate is reduced by over 85% in weight. The average removal rates of chemical oxygen demand (COD) and ammonia-nitrogen (NH₃-N) are 99.86% and 99.95%, respectively. The effluent indexes of the landfill site meet the special discharge limits of water pollutants in table 3 of *Standard for Pollution Control on the Landfill Site of Municipal Solid Waste* (GB 16889-2008). The operation cost for the MVR evaporating system is 86.87 yuan/m³. It brought considerable economic benefits for the landfill site by implementing this system, which would save 7.90 million yuan annually.

Key words: landfill leachate; MVR evaporation; membrane concentrates; volume reduction; cost reduction

生活垃圾填埋场渗滤液一般具有污染物浓度高、成分复杂、水质不稳定等特点,属于高浓度有机

基金项目: 广东省环保专项资金项目(粤财资环[2023]12号)

通信作者: 叶脉 E-mail: vein1980@163.com

废水^[1]。我国在 2008 年修订出台了《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008),促使国内垃圾填埋场渗滤液处理设施进行提标改造,一些较先进的技术得到快速发展和应用,如纳滤(NF)、反渗透(RO)、两级碟管式反渗透(DTRO)、高压反渗透(HPRO)、离子交换系统(DI)等^[2-4]。

MBR+NF/RO 是我国目前最常用的渗滤液处理工艺之一,通常会产生 20%~30% 的膜浓缩液,需要进一步处理。近年来,机械蒸汽压缩(MVR)技术依靠较低的成本优势和节能效果逐渐被国内外垃圾渗滤液膜浓缩液处理工程采用,已有不少成功应用实例^[5]。垃圾渗滤液膜浓缩液经蒸发处理后减量化效果显著,蒸发浓缩液通常进行无害化处置,处置量远小于未经处理的原膜浓缩液^[6-7],很大程度上减轻了生活垃圾填埋场后续的处置压力,蒸发冷凝水经过简单处理可作为杂用水^[8]。

以广东省某垃圾填埋场渗滤液膜浓缩液的 MVR 蒸发处理工程为例,介绍了系统设计、运行效果和运行成本,可为类似工程应用提供借鉴。

1 工程背景

该生活垃圾填埋场已配套建有渗滤液处理工程,处理规模为 1 100 m³/d,主体工艺采用调节池+两级 A/O+MBR+化学软化+两级 DTRO+RO+DI(见图 1),可实现达标排放清水约 750 m³/d。

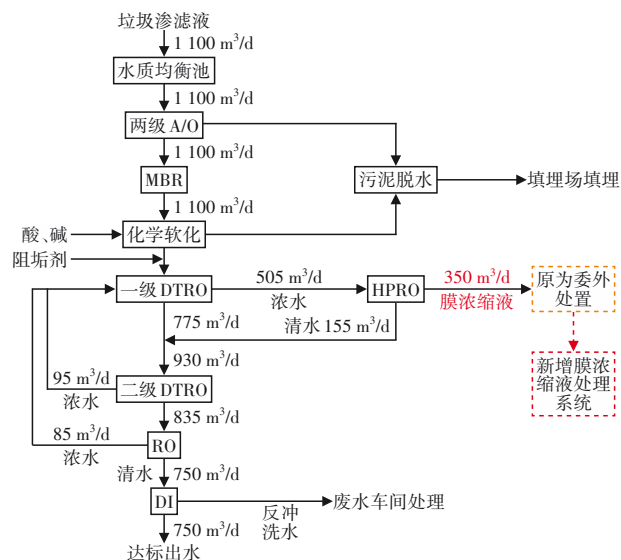


图 1 垃圾填埋场渗滤液处理主体工艺

Fig.1 Main process of leachate treatment

其中,一级 DTRO 产生的浓水(505 m³/d)需经过 HPRO 系统处理,处理后的清水(155 m³/d)进入二级

DTRO 系统。HPRO 系统产生的 350 m³/d 膜浓缩液原为外运处理,委外处置费用为 263 元/m³,每年因此产生开支近 3 000 万元。为实现垃圾填埋场渗滤液膜浓缩液进一步减量化,降低外运处置成本,该填埋场新增了一套 MVR 蒸发系统对渗滤液膜浓缩液进行深度处理。

2 工艺流程与设计参数

2.1 渗滤液膜浓缩液蒸发系统工艺

渗滤液膜浓缩液蒸发系统采用“预处理+MVR 强制循环蒸发+单效釜蒸发+深度处理”工艺(见图 2)。

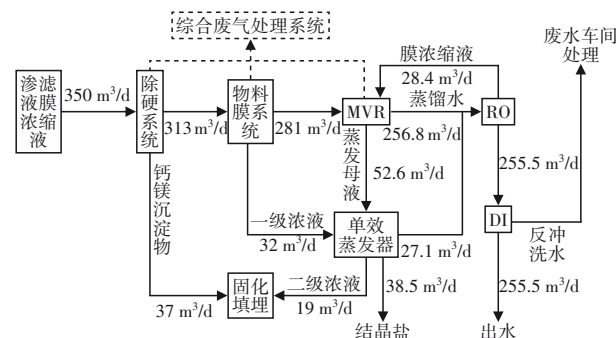


图 2 膜浓缩液蒸发处理工艺流程

Fig.2 Process flow chart of membrane concentrate evaporation

首先膜浓缩液依次经过除硬系统和物料膜系统进行预处理,分别降低硬度和 COD,将产生的钙镁沉淀物进行脱水后收集;预处理后的膜浓缩液进入 MVR 蒸发器,蒸发母液和预处理产生的一级浓液进入单效蒸发釜进行二次浓缩,过程中浓缩液所含盐分结晶析出,收集后委外处置;预处理产生的钙镁沉淀物与蒸发后剩余的二级浓液混合收集后进行固化填埋;蒸发冷凝水经 RO 膜和 DI 系统深度处理后达标排放,DI 反冲洗水送填埋场废水车间统一处理。除硬系统、物料膜系统和 MVR 产生的废气统一抽送至综合废气处理系统,设计处理风量为 5 000 m³/h,采用“酸碱洗+活性炭”组合工艺处理后达标排放。

2.2 系统设计参数

2.2.1 总体设计参数

垃圾渗滤液膜浓缩液处理在工艺设计时需着重考虑膜浓缩液的高浓度溶解性总固体物质(TDS)、高浓度氨氮、高浓度氯化物和难降解 COD 等特性。渗滤液原液与 MVR 蒸发系统处理前的膜浓缩液关键参数如表 1 所示。

表1 渗滤液原水与膜浓缩液关键参数对比
Tab.1 Comparison of key parameters between raw leachate and membrane concentrate

项目	pH	电导率/ (10 ⁵ μS·cm ⁻¹)	TDS/ (g·L ⁻¹)	氯化物/ (g·L ⁻¹)	COD/ (g·L ⁻¹)	氨氮/ (g·L ⁻¹)
渗滤液原水	7.54	1.47	74.1	35.2	11.3	7.35
膜浓缩液	7.62	1.32	65.9	33.3	1.77	1.45

渗滤液膜浓缩液MVR蒸发系统有效处理水量350 m³/d,设计富余系数取1.1,第一级浓液约32 m³/d,第二级浓液约19 m³/d,回收结晶盐38.5 t/d,设计膜浓缩液减量化率达85%以上,出水水质满足GB 16889—2008表3规定的水污染物特别排放限值要求。

2.2.2 预处理过程

渗滤液膜浓缩液MVR蒸发系统的预处理过程包括除硬系统和物料膜系统两部分。设置除硬系统的目的是防止预热器、换热器、管道等设备结垢堵塞。首先向进入系统的膜浓缩液投加烧碱和纯碱,充分搅拌,将膜浓缩液pH调至10.5~11,使钙镁离子反应生成钙镁沉淀物,絮凝沉淀后进入板框压滤机,再经压滤分别得到滤液和钙镁沉淀物,滤液总硬度(以CaCO₃计)降至100 mg/L以下进入物料膜系统,钙镁沉淀物则与后端产生的浓缩液一起固化后填埋处置。物料膜系统的主要作用是降低进水COD(COD去除率可达65%),并防止MVR蒸发浓缩过程中溶液沸点温升过高,设计产水率90%,操作压力为0.5~0.6 MPa,进水最高温度为40℃,单支物料膜面积26.4 m²。一段物料膜设计处理规模24 m³/h,膜元件数量为60支;二段物料膜设计处理规模12 m³/h,膜元件数量为30支。膜浓缩液中的大分子有机物经物料膜系统截留后进入一级浓液,一级浓液产量约32 m³/d,再接入单效蒸发器进行蒸发、浓缩、结晶。

2.2.3 蒸发过程

渗滤液膜浓缩液经预处理后进入MVR主系统蒸发,本项目共设置2台MVR蒸发器,设计浓液处理量约350 m³/d,蒸发产水率83%,单台设计蒸发量10 m³/h,装机总功率198 kW/台,单位能耗16.5 kW·h/台,主换热面积1 000 m²/台,MVR分离器直径2 400 mm。本项目单台MVR蒸发器的设计进液温度为25℃,进液总量12 m³/h,压缩机设计进、出口温度分

别为85℃和105℃,蒸汽温度为(85±2)℃,料液温度(97±2)℃,料液沸点最大温升12℃。

MVR的工作原理是将原液蒸发产生的蒸汽经压缩机提高品位后作为热源,从而实现蒸发循环,冷凝水先对浓液进行预热后再排出,使余热得到充分利用。本项目采取了多种措施减缓MVR蒸发系统发生结垢现象。蒸汽进入压缩机前,首先经过气液分离器,避免气液夹带,分离器中设计了盐腿结构并配置两级除雾。将浓液pH调节至3~4,同时采用列管式强制循环蒸发可提高料液流速,降低蒸发管内停留时间,并且保证管内满液循环,提升抗垢性能。

MVR蒸发所得浓液首先打入稠厚器析出晶体,当晶体增多到一定程度时打入压滤机进行固液分离,滤液返回MVR蒸发器继续循环。MVR蒸发器后端配备2 m³/h单效蒸发器,当滤液循环造成沸点升高超过12℃时,将浓液排入单效蒸发器,与一级浓缩液同时蒸发浓缩,得到结晶盐和二级浓缩液。二级浓缩液与预处理产生的钙镁沉淀物混合收集后固化填埋,结晶盐委外处置。

2.2.4 深度处理过程

本项目蒸发冷凝水依次经过RO和DI两个系统深度处理后最终外排,设计出水水质指标执行GB 16889—2008表3规定的水污染物特别排放限值。

RO膜系统设计处理水量为20 m³/h,产水量18 m³/h,设计回收率90%,膜通量20.3 L/(m²·h),设计操作压力0.8~1.0 MPa,最大操作压力1.5 MPa。RO膜系统采用连续运行的错流过滤形式,2路循环,采用3段6支膜壳并联设置,每支膜壳内串4支共计24支膜组件,单支膜组件面积37 m²,膜组件总面积887 m²。

DI系统采用DN1 800×3 000 mm吸附塔装填除氨氮吸附交换树脂,2套(1用1备),设计进水氨氮为150 mg/L,设计出水氨氮为4.5 mg/L,设计处理水量为20 m³/h,工作温度为10~35℃,工作压力为0.1~0.2 MPa,离子交换树脂体积为15 m³,树脂交换率为60%~80%,再生盐酸浓度为8%~10%,再生时间为20 h。

3 测试指标与分析方法

本项目于2020年11月18日完成安装和调试,调试完成后进行为期10 d的连续试运行(2020年11

月19日—28日),试运行期间对MVR蒸发系统进出水分别进行计量和水质采样检测。水质测试指标为COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$,分别采用快速消解分光光度法和气相分子吸收光谱法进行检测分析。

系统通过试运行测试并连续稳定运行后,委托具备中国计量认证(CMA)资质的检测机构,根据相关标准要求进行采样检测,各项测试指标及对应分析方法见《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)的表4。

4 运行效果分析

4.1 MVR蒸发稳定性及减量化程度

2020年11月19日—28日,试运行期间进水量为201~268 m^3/d ,出水量为133~175 m^3/d ,产水率为66.17%~67.77%。在此期间渗滤液膜浓缩液进水量控制在设计进水量的50%~70%,MVR蒸发系统平均产水率67%,系统运行表现稳定。

实际运行中产生的剩余物质包括二级浓缩液、钙镁氧化物和结晶盐,其中二级浓液和钙镁氧化物产生比例约15%~17%,经混合固化后填埋(固液比为1.3:1),无需委外处置;结晶盐产率约12%~15%,目前仍需委外处置。采用“预处理+MVR强制循环蒸发+单效釜蒸发+深度处理”工艺对渗滤液膜浓缩液进行处理后,末端处置减量化率达67%,委外处置减量化率达到85%~88%,可大幅节约委外处置费用。

4.2 COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果

2020年11月19日—28日,试运行期间进水COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别为10 119~13 293 mg/L 和6 360~7 837 mg/L ,经MVR蒸发和深度处理后,出水COD降至10~25 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ 降至4.5 mg/L 以下,均大幅低于出水水质控制标准限值,对COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率分别达到99.86%和99.95%,符合项目设计预期。

4.3 稳定出水水质达标情况

渗滤液膜浓缩液MVR蒸发系统稳定运行1个月,出水COD为22 mg/L , BOD_5 为3.8 mg/L ,悬浮物为4 mg/L ,氨氮为1.13 mg/L ,总氮为1.25 mg/L ,总磷为0.03 mg/L ,总汞、总镉、总铬、六价铬、总砷、总铅等重金属均未检出,既满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)表3规定的水污染物特别排放限值要求,又可稳定达到《城镇污水

处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。

5 经济成本分析

本项目的刚性运行成本主要包括药剂费、蒸汽费、电费和水费等,其他成本还包括人工费、委外处置费、运行维护费等。不计设备折旧,经过实际核算,总运行成本为201.16 $\text{元}/\text{m}^3$,其中包含结晶盐的委外处置费114.29 $\text{元}/\text{t}$,扣除该部分费用后,渗滤液膜浓缩液MVR蒸发系统运行成本为86.87 $\text{元}/\text{m}^3$,与文献报道的类似工艺处理成本接近^[9-10]。本项目实施后可节省运行费用61.84 $\text{元}/\text{m}^3$,可为垃圾填埋场节省约790万元/a,经济效益相当可观。

6 结论与展望

① 采用“预处理+MVR强制循环蒸发+单效釜蒸发+深度处理”工艺处理垃圾渗滤液膜浓缩液,实现膜浓缩液减量85%以上,对COD和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率分别达到99.86%和99.95%,出水各项指标均大幅优于《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)表3规定的水污染物特别排放限值。

② 本项目运行成本为201.16 $\text{元}/\text{m}^3$,其中MVR蒸发系统运行成本为86.87 $\text{元}/\text{m}^3$,与类似应用案例接近,实施后为垃圾填埋场节省790万元/a,经济效益可观。

③ 本项目产生的MVR结晶盐仍需委外处置,产生了较高的处置费用,一旦解决结晶盐资源化利用出路问题,基于MVR蒸发技术处理垃圾渗滤液膜浓缩液可产生更大经济效益。

参考文献:

- [1] 钟文杰,许刘成,袁浩田,等.生物转盘—两级A/O—MBR工艺处理晚期垃圾渗滤液[J].中国给水排水,2023,39(1):19-25.
ZHONG Wenjie, XU Liucheng, YUAN Haotian, et al. Rotating biological contactor - two-stage A/O - MBR process for treatment of mature landfill leachate: efficiency and microbial community structure [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (1) : 19-25 (in Chinese).
- [2] 张文存,张国辉,王丽莉,等.垃圾渗滤液处理技术研究进展[J].应用化工,2022,51(4):1207-1211,1218.
ZHANG Wencun, ZHANG Guohui, WANG Lili, et al. Research progress of landfill leachate treatment

- technology [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(4):1207-1211,1218(in Chinese).
- [3] 刘建伟,康心悦,岳鹏,等.城市生活垃圾综合处理厂渗滤液全量化处理工程设计[J].中国给水排水,2020,36(10):70-75.
- LIU Jianwei, KANG Xinyue, YUE Peng, *et al.* Project design of total quantitative treatment of leachate of urban municipal waste comprehensive treatment plant [J]. [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(10):70-75 (in Chinese).
- [4] 徐丽丽,聂剑文,杨新海,等.MVC蒸发+DI离子交换在纳滤浓缩液处理中的应用[J].环境卫生工程,2016,24(4):67-69.
- XU Lili, NIE Jianwen, YANG Xinhai, *et al.* Application of mechanical vapor compression-deionization on exchange in nanofiltration concentrate treatment [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2016, 24(4):67-69(in Chinese).
- [5] 徐昌文,王声东.垃圾渗滤液及膜滤浓缩液处理技术探讨与分析[J].环境与可持续发展,2020,45(5):72-75.
- XU Changwen, WANG Shengdong. Discussion and analysis on treatment technology of leachate and membrane filtration concentrated solution [J]. Environment and Sustainable Development, 2020, 45(5):72-75(in Chinese).
- [6] 谢炜炫,王舒东,郝润琴,等.生活垃圾渗滤液膜浓缩液固化初探[J].环境科学与技术,2020,43(9):47-51.
- XIE Weixuan, WANG Shudong, HAO Runqin, *et al.* Preliminary study on solidification of membrane retentate of landfill leachate [J]. Environmental Science & Technology, 2020,43(9):47-51(in Chinese).
- [7] 陈刚,胡啸,熊向阳,等.沈阳市老虎冲生活垃圾渗滤液全量处理工艺设计[J].给水排水,2017,43(2):56-58.
- CHEN Gang, HU Xiao, XIONG Xiangyang, *et al.* Process design for total amount treatment of domestic waste leachate in Laohuchong, Shenyang City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(2):56-58 (in Chinese).
- [8] 程振杰.蒸发法处理垃圾渗滤液试验研究[D].北京:北京工业大学,2013:49-50.
- CHENG Zhenjie. Experimental Study on Landfill Leachate Treatment by Evaporation Method [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013:49-50 (in Chinese).
- [9] 蔡名金.MVR强制循环蒸发技术处理垃圾填埋场渗滤液膜浓缩液[J].环境卫生工程,2022,30(6):16-21.
- CAI Mingjin. The MVR forced cycle evaporation technology for the treatment of the landfill leachate membrane concentrate [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2022, 30(6):16-21(in Chinese).
- [10] 李强.青岛市小涧西垃圾渗滤液扩建工程高排放标准工艺设计[J].中国给水排水,2019,35(18):46-49.
- LI Qiang. Process design of high discharge standard for landfill leachate extension project in Xiaojianxi, Qingdao City [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18):46-49(in Chinese).
-
- 作者简介:**吴杭航(1991-),男,广东河源人,硕士,工程师,主要研究方向为固体废物资源化处理技术、环境损害鉴定评估。
- E-mail:**eelawwhh@126.com
- 收稿日期:**2023-01-30
- 修回日期:**2023-03-13

(编辑:衣春敏)

贯彻执行《中华人民共和国水土保持法》