

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.013

## 低温蒸发技术处理垃圾渗滤液膜浓缩液

李向东, 陈方方, 姚鹏, 安瑾, 朱亚茹, 苏雅, 常俊俊,  
郑晓宇

(光大环境科技<中国>有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 采用低温蒸发技术对某垃圾焚烧厂渗滤液反渗透膜浓缩液进行减量化处理,考察了系统的运行稳定性、减量化效果、污染物去除效果、综合运行成本,评估了处理反渗透膜浓缩液的污染情况,并探究了换热器污染控制措施。结果表明,采用该技术可实现平均浓缩倍率达到2倍,低温蒸发系统运行稳定,产水电导率均值小于 $26\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ ,脱盐率为99.9%,产水COD均值小于 $20\text{ mg/L}$ , $\text{Cl}^-$ 浓度小于 $7\text{ mg/L}$ ,pH接近中性,总体水质优于《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)中再生水用作工业用水水源的水质标准。系统采用垃圾焚烧厂废热作为热源,可不考虑热源成本,综合运行成本为 $14.88\text{ 元}/\text{m}^3$ 。系统换热器为主要污染部位,换热器污染速率与浓缩倍率呈正相关,污染物以有机物为主,可通过在线化学清洗和调控浓缩倍率实现对污染速率的控制。

**关键词:** 垃圾渗滤液; 膜浓缩液; 低温蒸发; 污染控制

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0084-05

## Treatment of Landfill Leachate Membrane Concentrate via Low Temperature Evaporation Technology

LI Xiang-dong, CHEN Fang-fang, YAO Peng, AN Jin, ZHU Ya-ru, SU Ya,  
CHANG Jun-jun, ZHENG Xiao-yu

(Everbright Environmental Technology <China> Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Low temperature evaporation technology was employed to decrease the concentration of reverse osmosis (RO) concentrate from the leachate of a garbage incineration plant. This study examined the operational stability, reduction efficiency, pollutants removal performance, and comprehensive operating cost of the system. Additionally, it evaluated the environmental impact of the RO concentrate after treatment and investigated pollution control measures for the heat exchanger. By employing this technology, the average concentration ratio could be doubled. The low temperature evaporation system operated stably, with the average conductivity of the produced water being less than  $26\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ . The desalination rate reached as high as 99.9%, while the average COD of the produced water was below  $20\text{ mg/L}$  and the average  $\text{Cl}^-$  concentration was less than  $7\text{ mg/L}$ . Additionally, the pH remained near neutral. The overall water quality significantly surpassed the limits outlined in *The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Industrial Uses* (GB/T 19923–2005). The system utilized waste heat from the garbage incineration plant as a heat source. Without accounting for the cost of this heat source, the comprehensive operating cost was  $14.88\text{ yuan}/\text{m}^3$ . The system's heat exchanger was the main pollutant

通信作者: 李向东 E-mail: li\_xd@cebenvironment.com.cn

site, and the pollution rate of the heat exchanger exhibited a positive correlation with the concentration ratio. The primary pollutants consisted of organic compounds. This pollution rate could be effectively managed through online chemical cleaning and by adjusting the concentration ratio.

**Key words:** landfill leachate; membrane concentrate; low temperature evaporation; pollution control

垃圾渗滤液具有高COD、高氨氮、高含盐量、高氯离子、生化性差等特点。焚烧厂渗滤液的典型处理工艺为预处理系统+生化系统+膜系统,该工艺在实际工程中会产生大量膜浓缩液。目前常用的处置手段为石灰浆制备和入炉回喷,但均会对烟气指标和焚烧炉运行产生一定的影响,且存在污染物转移的风险,随着环保要求越来越严格,未来可能将不能通过上述两种手段对浓缩液进行处置。针对膜浓缩液消纳困难的问题,传统蒸发技术可以实现垃圾渗滤液膜浓缩液的高倍浓缩减量化处理,但存在蒸发器容易结垢污堵、运行稳定性差、需要频繁清洗、处理成本过高等一系列问题<sup>[1]</sup>。

基于增湿减湿原理的低温蒸发技术在焦化废水、高盐废水、海水淡化、垃圾渗滤液处理等领域已有应用研究<sup>[2-7]</sup>。该技术蒸发温度低、流程简单,可缓解蒸发器结垢污堵的情况,同时还可广泛使用低品位热源,有望大幅降低蒸发处理成本,是解决垃圾渗滤液膜浓缩液问题的新思路。

笔者以低温蒸发技术处理某垃圾焚烧厂渗滤液反渗透膜浓缩液的实际工程为例,重点考察了低温蒸发系统在处理水质复杂的膜浓缩液时的稳定性、处理效果和经济性,并初步评估了系统的污染情况和控制措施,旨在为高盐、高COD、高硬度的复杂工业废水处理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 进水水质及水量

江苏某垃圾焚烧发电厂渗滤液处理工艺为预处理+厌氧+AO+超滤+纳滤+反渗透。因系统膜元件老化,导致反渗透浓水中污染物浓度比常规系统更高,属于复杂水质。其中COD为900~1 800 mg/L、总硬度(以CaCO<sub>3</sub>计)为4 000~5 000 mg/L、硫酸根为70~1 100 mg/L、电导率为39~41 mS/cm。构建低温蒸发系统用于处理渗滤液站反渗透系统的浓水,设计处理规模为24 m<sup>3</sup>/d,浓缩倍率为2倍,产水水质满足《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T

19923—2005)中再生水用作工业用水水源的水质标准。

### 1.2 工艺流程

图1为低温蒸发工艺流程,包括增湿器和减湿器两部分。进水进入浓水循环管路与循环浓水混合后,首先在预热器内与减湿器的循环清水进行换热,回收一部分热量并升温后,进入加热器与热源蒸汽换热,升温至设定温度后自增湿器顶部进入,在增湿器内部与风机从增湿器底部送入的冷空气进行逆流接触,进行传质和传热,完成盐分离的蒸发过程。与空气传质换热后的浓水自增湿器底部排出后继续进行循环浓缩,当增湿器内循环物料浓度达到设定值时,则由循环管路旁路排出,中试产生的浓水与渗滤液站浓水合并以后统一送至主厂房用于石灰制浆。浓水中的成分主要为有机物、钠盐和钾盐等,需要对其进行进一步处理,考虑到钠盐和钾盐具有资源回收的价值,可以进一步探究低温蒸发浓缩液的资源化处理路径,例如盐的分离回收等。

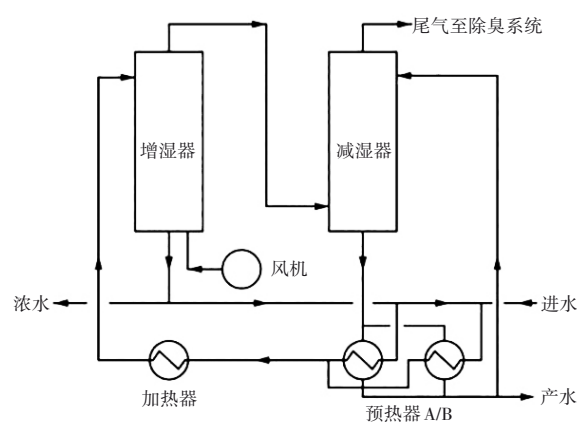


图1 低温蒸发工艺流程

Fig.1 Flow diagram of low temperature evaporation process

与热水接触后的湿热空气自增湿器顶部排出后自减湿器底部进入,在减湿器内部与循环清水进行逆流接触,以实现水蒸气冷凝回收。减湿器顶部

出口尾气可能含有夹带的污染物,因此需进一步处理,主要包括喷淋和吸附。减湿器清水自底部排出后进行循环,与循环的浓水进行换热,当减湿器内清水达到设定液位时,则由循环管路旁路排出。

系统操作压力为常压,采用该厂的低压乏汽为热源,浓水进水温度为70~80℃,产水出水温度为40~45℃。系统配置2台循环泵,规格为 $Q=15\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=30\text{ m}$ ;风机1台,规格为 $Q=3\ 000\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $P=2\ 000\text{ Pa}$ 。主体设备采用非金属耐热材质制作,抗腐蚀性强,可有效处理高盐、高氯、酸性的复杂工业废水。

### 1.3 分析项目及方法

COD采用微波消解法测定;pH、电导率采用哈希HQ11D便携式多参数分析仪测定;总硬度采用EDTA滴定法测定;硫酸根离子和氯离子采用毛细管电泳仪测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 运行情况概述

系统进水COD浓度偏高,调试初期增湿器内存在起沫现象,造成增湿器压力出现波动的情况。通过连续添加消泡剂,增湿器内部气体压力基本稳定,未再出现明显波动,这说明增湿器内部起泡现象得到了有效缓解。经过长时间的运行,增湿器不同位置的压力保持稳定,压力波动范围均小于0.2 kPa,这说明增湿器内部的气液流道未出现明显的结垢堵塞现象。

增湿器上部气体温度随进料温度而波动,最大波动范围为2℃。这是由于高温物料与温度较低的空气接触后,液体既给气体以显热,又给汽化的水以潜热,传热过程较为剧烈。而中部与下部气体温度基本保持稳定,温度波动范围均小于0.5℃,说明增湿器内部成功建立了热量平衡。

### 2.2 处理效果分析

系统进水电导率为39~41 mS/cm,平均为40 mS/cm。经过低温蒸发系统浓缩处理后,浓水电导率为75~90 mS/cm,平均为81 mS/cm,平均浓缩倍率约为2倍,满足设计要求。

图2为产水电导率和氯离子浓度的变化。可知,最大产水电导率为31  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,平均产水电导率为26  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,脱盐率高达99.9%。产水氯离子浓度均小于7 mg/L,远低于敞开式循环冷却水系统补充水水质要求的250 mg/L,蒸发产水可直接达标回用。

同时系统出水水质不低于传统蒸发工艺的<sup>[8]</sup>,且相比于渗滤液处理站反渗透系统的产水,出水水质更优,无需再进入反渗透系统进行进一步处理。

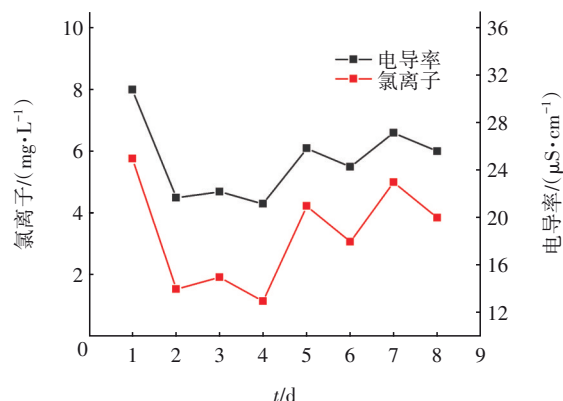


图2 产水电导率和氯离子浓度的变化

Fig.2 Change in conductivity and chloride ion concentration of produced water

图3为进水、浓水和产水COD的变化。可知,进水COD浓度较高,最高能达到1 800 mg/L,高于常规工况下反渗透膜浓缩液,这与前端纳滤系统的膜元件老化和运行波动有关。进水经过浓缩后,浓水COD最高能达到3 100 mg/L,出现了严重的气泡,需连续添加消泡剂。长时间运行后有机物会附着在换热壁面和增湿器内构件的表面,因此在运行过程中需要严格监测系统的污堵情况。

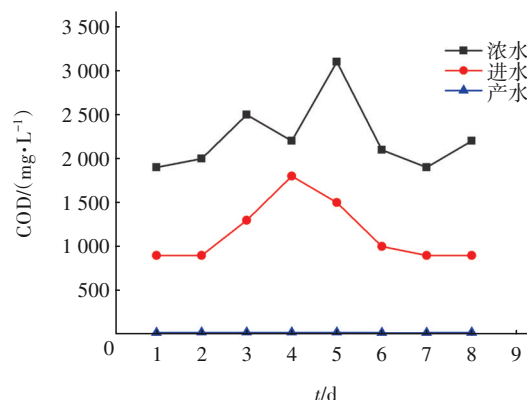


图3 进水、浓水和产水COD的变化

Fig.3 Change in COD concentration of influent, concentrated water and produced water

渗滤液膜浓缩液中的有机物主要为分子质量小于1 500 u的水溶性腐殖质,以烷烃类为主,还有部分苯系物、醇类和酯类物质。膜浓缩液中的有机物分子质量大、挥发性小,在蒸发过程中大部分会残留在浓水中,其中少量沸点相对较低的有机物,



主要为烷烃类和醇类,会随湿空气夹带至产水中,冷凝液的 $UV_{254}$ 几乎完全被去除也说明腐殖质类大分子有机物及含C=C双键和C=O双键的芳香族化合物没有挥发到产水中<sup>[2]</sup>。因系统进水pH为酸性,浓缩液中残留的微量有机酸在酸性条件下挥发性大,也会通过传质作用挥发到湿空气中,通过对尾气的检测发现,微量污染成分主要为硫化氢、甲硫醇、二甲二硫等,均是常见的异味因子,需排入厂区除臭系统进行进一步处理<sup>[7]</sup>。系统最终产水COD均值小于20 mg/L,满足冷却塔补水标准,进一步说明只有极少部分有机物被夹带至产水中。

图4为进水和浓水硬度、硫酸根的变化。可知,进水硬度为4 900 mg/L,硫酸根为780 mg/L,水质恶劣,经蒸发器浓缩后,浓缩液硬度高达11 400 mg/L,硫酸根浓度达到1 950 mg/L,料液中硫酸钙处于较高的过饱和状态,在换热界面上结垢倾向更加明显。为防止无机结垢,需要严格控制进水为酸性,同时控制合理的在线清洗频率以保证系统稳定运行。

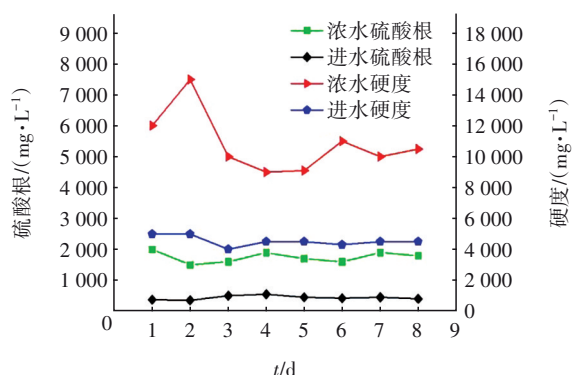


图4 进水和浓水硬度、硫酸根的变化

Fig.4 Change in hardness and sulfate concentration of influent and concentrated water

### 2.3 污染分析与控制

图5为预热器平均对数传热温差的变化。定义系统的污染速率为预热器平均对数传热温差随时间的变化速率,单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。以预热器为研究对象,图5分为3个运行阶段。在第一阶段,设置4倍浓缩倍率,连续运行4 d,预热器污染程度增加,出现换热效率明显下降的情况,污染速率为 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。此阶段一直采取在线化学酸洗,频率为12 h清洗1次,每次持续2 h,但换热效率的下降速率未得到有效控制,说明酸洗对换热器污染无明显控制效果。化学

清洗水箱的pH也未发生明显上升,经过16个周期的运行,pH从2.9上升至3.1,说明酸洗液与污染物未发生剧烈反应,pH的缓慢上升可能是预热器内残留的废水中和清洗液后造成的。

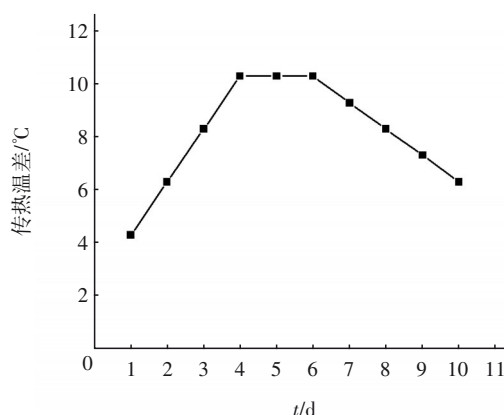


图5 预热器平均对数传热温差的变化

Fig.5 Change in average logarithmic heat transfer temperature difference of preheater

在第二阶段,降低浓缩倍率,严格控制在2倍,中间未进行在线化学清洗,连续运行2 d后,预热器污染得到有效控制,换热效率基本维持不变,污染速率为0。这说明预热器污染速率与浓缩倍率呈正相关,过高的浓缩倍率会造成预热器的严重污染。另外,第一阶段的酸洗对换热器污染无明显的控制作用,与第二阶段未投入化学酸洗只控制浓缩倍率换热器效率基本不变,推测更有可能是胶体与有机物黏附换热器造成的污堵,即有机污染占主导地位,无机污染占次要地位。

在第三阶段,为了验证有机污染占主导地位的可能性,维持2倍浓缩倍率不变,将化学酸洗改为化学碱洗。由图5可知,连续在线化学碱洗后换热效率逐渐恢复,说明污染成分主要为胶体和有机物。因此系统运行时,需严格监测水质的变化情况并控制系统的浓缩倍率,设置在线碱洗,以保证系统的稳定运行。

### 2.4 经济成本分析

以垃圾渗滤液反渗透膜浓缩液为处理对象,蒸发浓缩倍率控制在2倍,不考虑处理蒸发母液的成本。低温蒸发系统的平均运行电耗为 $19.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,单价按0.65元/( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )计算,成本为12.87元/ $\text{m}^3$ ;HCl用于调节进水pH,用量为 $1.39 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,单价按0.35元/kg计算,成本为0.49元/ $\text{m}^3$ ;消泡剂用量为 $0.056 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,单价按25元/kg计算,成本为1.40

元/m<sup>3</sup>;氢氧化钠用于化学清洗,用量为0.04 kg/m<sup>3</sup>,单价按3元/kg计算,成本为0.12元/m<sup>3</sup>。不考虑低品位废蒸汽的费用,总运行成本为14.88元/m<sup>3</sup>。在实现同样处理效果的前提下,低温蒸发系统相较于机械蒸汽再压缩蒸发系统运行成本可节省约15元/m<sup>3</sup>,相较于浸没式蒸发系统可节省约60元/m<sup>3</sup>。可知,相比于传统蒸发工艺,低温蒸发系统具有明显的经济优势。

### 3 结论

① 低温蒸发技术处理渗滤液反渗透膜浓液的减量化效果明显,产水电导率均值小于26 μS/cm,脱盐率高达99.9%,产水COD均值小于20 mg/L,Cl<sup>-</sup>浓度小于7 mg/L,pH接近中性,系统产水水质可直接达到冷却塔补水标准。

② 基于增湿减湿原理的低温蒸发系统能够实现废热、余热等低品位热源的有效利用,综合运行成本为14.88元/m<sup>3</sup>,相比于传统蒸发工艺具有一定的优势。

③ 该系统运行温度较低,主体采用非金属材料,抗腐蚀性较强,在处理渗滤液等高盐、高氯、高有机物的工业废水过程中可以保证运行的稳定性。

### 参考文献:

- [1] 刘宇,刘晓静,姜安平,等. A/O-MBR+NF组合工艺用于垃圾渗滤液处理工程[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14): 77-81.  
LIU Yu, LIU Xiaojing, JIANG Anping, et al. Application of combined processes of A/O-MBR+NF in landfill leachate treatment project [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(14): 77-81(in Chinese).
- [2] 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.  
CHEN Fangfang. The Research of Concentrate Leachate Treatment by Air Humidification-Dehumidification Technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 (in Chinese).
- [3] 乔树峰,王培功. 低温蒸发技术处理焦化厂蒸氨废水的工程试验研究[J]. 煤化工, 2019, 47(6): 6-8, 23.  
QIAO Shufeng, WANG Peigong. Study on engineering experiment of low temperature evaporation technology in the treatment of coking ammonia distillation wastewater [J]. Coal Chemical Industry, 2019, 47(6): 6-8, 23(in

Chinese).

- [4] 吴志根,邱兰,朱羽廷,等. 加湿除湿技术用于高盐工业废水脱盐的实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(10): 1435-1442.  
WU Zhigen, QIU Lan, ZHU Yuting, et al. Experimental study on the application of humidification-dehumidification technology in the desalination of high-salt industrial wastewater [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(10): 1435-1442(in Chinese).
- [5] 王明. LAT低温常压蒸发技术处理焦化蒸氨废水的工程应用[J]. 工业水处理, 2023, 43(6): 176-181.  
WANG Ming. Engineering application of low temperature atmospheric pressure evaporation technology (LAT) for the treatment of coking ammonia wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(6): 176-181(in Chinese).
- [6] FAEGH M, BEHNAM P, SHAFII M B. A review on recent advances in humidification-dehumidification (HDH) desalination systems integrated with refrigeration, power and desalination technologies [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 196: 1002-1036.
- [7] 陆飞鹏,李向东,姚鹏,等. 高压蝶管式反渗透浓液低温蒸发减量化中试研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(11): 129-132.  
LU Feipeng, LI Xiangdong, YAO Peng, et al. Pilot-scale on DTRO concentrate reduction using low-temperature evaporation [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(11): 129-132(in Chinese).
- [8] 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:**李向东(1992-),男,天津人,博士,工程师,注册环保工程师,主要研究方向为环保和化工工艺开发。

**E-mail:**li\_xd@cebenvironment.com.cn

**收稿日期:**2023-09-10

**修回日期:**2023-11-30

(编辑:任莹莹)