

# 低温蒸发技术处理垃圾渗滤液 反渗透浓缩液的研究

严刚<sup>1</sup>, 杨虎君<sup>2</sup>, 范茂军<sup>2\*</sup>

(1. 江苏城乡建设职业学院, 江苏常州 213147;  
2. 维尔利环保科技集团股份有限公司, 江苏常州 213125)

**摘要:**采用低温蒸发技术(40℃, -96 kPa)处理长沙市黑麋峰垃圾填埋场反渗透(RO)浓缩液, 系统考察了蒸发过程中的产水性能、水质变化及结垢特性。结果表明, 浓缩液经30 h连续蒸发, 浓缩倍数约为10倍, 母液体积占比为10.05%, 含固率稳定在22%~25%。蒸发罐内壁以及盘管处的垢层变厚, 导致传热系数下降, 产水量由9.7 L/h降至6.8 L/h; 经5% HCl在线清洗后产水量恢复。对垢层进行X射线光电子能谱技术(XPS)分析手段进行分析, 发现主要成分为碳酸钙、硅酸钙、硅酸镁以及硫酸钙。本研究为低温蒸发处理技术工程应用提供关键设计参数与运行经验。

**关键词:**垃圾渗滤液; 反渗透膜浓缩液; 低温蒸发; X射线光电子能谱技术

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)06-0239-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.037

## Study on the treatment of reverse osmosis concentrate from landfill leachate using low-temperature evaporation technology

YAN Gang<sup>1</sup>, YANG Hu-jun<sup>2</sup>, FAN Mao-jun<sup>2\*</sup>

(1. Jiangsu Urban and Rural Construction Vocational College, Changzhou 213147, China;  
2. Welle Environmental Group Co., Ltd., Changzhou 213125, China)

**Abstract:** Low-temperature evaporation technology of RO concentrate from Changsha Heimifeng Landfill Leachate by low-temperature evaporation (40℃, -96 kPa) was systematically investigated for water production performance, water quality evolution, and scaling characteristics. Key findings indicate: The concentrated solution undergoes 30 hours of continuous evaporation, achieving a concentration factor of approximately 10 times. The mother liquor accounts for 10.05% of the total volume, with the solid content remaining stable at 22%~25%; Scale deposition on the evaporation tank walls and heating coils reduced heat transfer efficiency, decreasing water production from 9.7 L/h to 6.8 L/h-restored after online cleaning with 5% HCl; X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) analysis identified calcium carbonate, calcium silicate, magnesium silicate, and calcium sulfate as primary scale components. This study provides critical design parameters and operational insights for engineering applications of low-temperature evaporation technology.

**Key words:** landfill leachate; reverse osmosis membrane concentrate; low-temperature evaporation; XPS

垃圾渗滤液作为一种高盐、高氨氮的难降解有机废水备受行业关注和广泛研究<sup>[1-3]</sup>, 由于其含有的有机物呈现出难生化降解和复杂多变的特点, 截至目前主要采用膜生物反应器+膜深度处理工艺, 而膜深度处理将产生相当于处理量20%~30%的膜滤浓缩液<sup>[4]</sup>, 不可生化的有机物以及盐分等物质均会被富集在膜滤浓缩液中, 故而渗滤液膜滤浓缩液则变成了对环境具有极强破坏力的潜在污染源<sup>[5]</sup>。

目前针对渗滤液膜滤浓缩液的处理方法包括焚烧法、回灌法、浓缩法以及无害化处理等<sup>[6-7]</sup>, 虽然回灌法可以有效去除膜浓缩液的COD等污染物, 然而由于膜浓缩液中盐分浓度高, 盐类物质回灌后无法得到消纳从而富集于新鲜渗滤液中, 当回灌持续进行达到吸附容量时, 高电导率的渗滤液会对生化系统产生破坏性的冲击, 同时影响后续反渗透膜系统的净化效率及回收率。常规的纳滤和反渗透浓缩液的COD相较于焚烧法处理时热值较低需要额外

收稿日期: 2025-08-15; 修回日期: 2026-04-07

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022426); 江苏省高职院校教师企业实践项目(2024QYSJ065)

作者简介: 严刚(1991-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为环境污染控制与资源化, 010494@jsec.edu.cn; 范茂军(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为垃圾渗滤液全量化处理, 通讯联系人, fanmaojun@wellegroup.com。

增加助燃剂,同时在高温条件下氯离子对炉膛的腐蚀也是制约其工程化应用的因素之一;无害化处理方法需要高级氧化法搭配生化、物化等工艺段,工艺链长,处理技术比较复杂,同时部分氧化技术在处理过程中产生二次污染物如卤代烃等。

从工程应用上看,主流的浓缩技术主要为膜技术和蒸发技术 2 大类,两者都是基于浓缩液体量较大而需要减量的实际需求。其中,蒸发技术可将 DTRO 等技术产生的浓缩液体量减量 50% 以上,在实际蒸发过程中,只有小部分挥发性有机酸、氨和挥发性烃会随着蒸气进入冷凝液,而全部无机物、重金属和大部分有机物则会残存在剩余浓缩液中。蒸发处理工艺可把渗滤液浓缩到原体积的 2% ~ 10%。蒸发法处理膜浓缩液具有对水质水量变化适应性强、产生浓缩液少等特点<sup>[8]</sup>,但常压下水分子沸点高会导致氯离子的活性增强腐蚀设备,同时在温度较高的工况硫酸钙及碳酸钙的溶解度均会变小导致蒸发罐内壁结垢现象严重<sup>[9]</sup>,因此采用低温蒸发技术处理垃圾渗滤液膜浓缩液具有一定的可行性和经济合理性<sup>[10]</sup>。

本研究采用低温蒸发工艺处理垃圾渗滤液 RO 膜浓缩液,以长沙市黑麋峰垃圾填埋场渗滤液的反渗透膜浓缩液为研究对象,在进行膜浓缩液水质特征分析的基础上,通过中试实验,对膜浓缩液进行蒸发浓缩处理,研究不同操作参数(蒸发温度、浓缩液初始 pH 和蒸发率等)对冷凝液水质和主要污染物去除效果的影响。

## 1 实验研究

### 1.1 试剂与样品

实验中所用试剂均为分析纯及以上级别,实验中所用试剂包括过碘化汞(分析纯,国药集团化学试剂有限公司),碘化钾(分析纯, Sigma-Aldrich),氢氧化钠(分析纯,国药集团化学试剂有限公司),COD 试剂(美国哈希公司),TN 试剂(美国哈希公司),氨氮试剂(美国哈希公司),碱度试剂(美国哈希公司),EDTA-2Na(分析纯,沪试),氯化钠(优级纯,天津市福晨化学试剂厂)。

本实验的膜浓缩液于 2019 年 4 月取自长沙市黑麋峰垃圾渗滤液处理厂的 RO 浓缩液。水质检测结果如表 1 所示。

针对表 1 所列水质情况,RO 浓缩液的 COD 浓度在 2 700~3 000 mg/L 之间,在本项目中采用 UF+RO 的处理工艺。所以本项目 RO 浓缩液呈现出有

表 1 反渗透浓缩液水质

水质指标	数值	水质指标	数值
pH	6.8~7.2	TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	800
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	2700~3000	Cl <sup>-</sup> /(g·L <sup>-1</sup> )	12
含固率/%	3~4	总硬度/(mmol·L <sup>-1</sup> )	34~40
电导率/(ms·cm <sup>-1</sup> )	39.5	Ca <sup>2+</sup> /(mmol·L <sup>-1</sup> )	22~25
密度/(g·mL <sup>-1</sup> )	1.02~1.05	Mg <sup>2+</sup> /(mmol·L <sup>-1</sup> )	12~15
总碱度/(mmol·L <sup>-1</sup> )	50~60	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	830
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	3~5	Na <sup>+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	7400

有机物(HA 以及 FA)浓度高的特点,1 价盐与 2 价盐所占的比例相差不大,RO 浓缩液的电导率高达 39 500 μs/cm,其中 2 价盐含量约占 35%,2 价盐分主要有钙离子、镁离子、碳酸根离子、硫酸根离子,1 价盐分主要为氯离子、碳酸氢根离子、钠离子、钾离子,含量约占 65%。本次试验进水属于比较典型的垃圾渗滤液膜浓缩液<sup>[11]</sup>。

### 1.2 实验方法

本实验采用 316L 不锈钢制的低温真空蒸发设备进行中试处理 RO 浓缩液,具体处理流程见图 1 所示;通过喷射泵+文丘里管组合将真空罐内部抽至真空状态,蒸发罐与真空罐相互连接,随着真空度达到相应的设定值,开启进水气动阀门,待蒸发处理的 RO 浓缩液进入蒸发罐内,PLC 自控设定的蒸发罐内的最高液位为 30 L,随着水分子的蒸发,当蒸发罐内部的液位低于工作液位时将会进水补充蒸发罐内的废水至 30 L(进水气动阀门的开启时间间隔为 20 s)。本设备配套的加热装置等设备是按照清液产水量为 10 L/h 设计,试验过程中在蒸发罐的循环泵后端取样检测罐内母液的水质数据,在出水端收集冷凝清液进行水质数据以及产水量的检测测定。

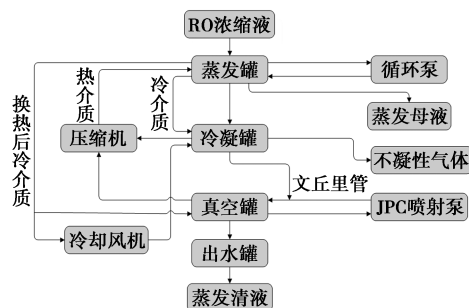


图 1 RO 浓缩液蒸发流程示意图

### 1.3 分析方法

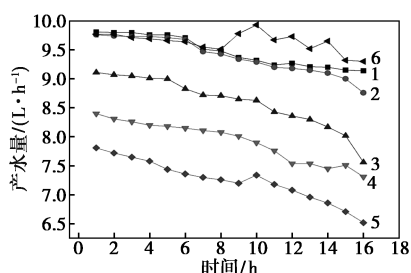
中试试验过程中采用美国哈希公司生产的

DRB200型COD消解仪与DR1010型COD测定仪测定COD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 测试方法为纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009),用美国哈希公司生产的HQ30D53303000型便携式水质分析仪测定pH与电导率数值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 产水量的变化

真空蒸发设备的产水量随浓缩时间的变化曲线如图2所示。



1—第1次;2—第2次;3—第3次;4—第4次;5—第5次;  
6—消除垢层后

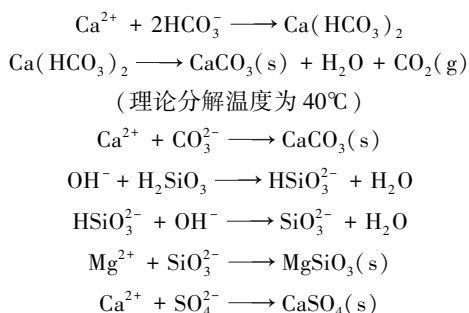
图2 试验产水量变化曲线

从图2可以看出,第1次与第2次进行试验时产水量曲线并未发生较为明显的偏移,从刚开始的9.7 L/h随着浓缩时间的增长逐渐降低9.3 L/h,主要原因在于蒸发罐内浓水的浓度升高,含水率降低,故而冷凝液的产水量会降低,随着蒸发的进行,蒸发罐内壁以及盘管处的垢层变厚,加热盘管的导热性能变差,从而表现出冷凝液的产水量呈现大幅下降的趋势。当用盐酸清洗蒸发罐后,加热盘管处的垢层脱落,材质为304的加热盘管裸露在空气中,加热盘管恢复了原样,故而产水量又从6.8 L/h恢复至9.7 L/h。

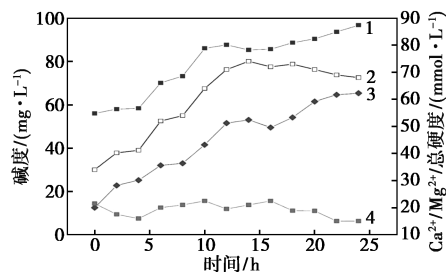
### 2.2 水质变化

#### 2.2.1 蒸发罐内液体的水质变化情况

RO浓缩液中钙镁硬度含量为3500 mg/L,其中钙含量约占64.7%,镁含量约占35.3%,其中总硅的含量为74.9 mg/L,碱度为56 mmol/L。关于垢层沉淀的反应式如下:

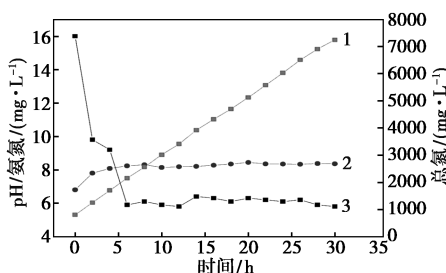


由上面所列几个反应方程式可得,随着浓缩液的蒸发浓缩,当pH在7.0~9.0之间时,  $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$  体系中主要以  $\text{HCO}_3^-$  的形式存在,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  的占比为0.17%~18.64%,  $\text{HCO}_3^-$  的占比为81.32%~95.36%,  $\text{CO}_3^{2-}$  的占比为0.04%~4.47%。母液的pH主要在8.3左右,故而首先产生大量的碳酸氢钙物质在40℃时分解产生碳酸钙沉淀,原水浓缩后大量的  $\text{CO}_3^{2-}$  首先与钙离子结合生成碳酸钙沉淀,使得  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{CO}_3^{2-}$  组成的平衡方程式向碳酸根离子的方向移动,当  $\text{HCO}_3^-$  生成  $\text{CO}_3^{2-}$  时需要消耗氢离子,故而浓缩液中的pH会从6.8上升至8.3左右,随着浓缩时间的增长,  $\text{HCO}_3^-$  与  $\text{CO}_3^{2-}$  组成的pH缓冲体系也增强,故而后续的母液pH没有发生大幅度的变化。在浓缩时间小于10 h之前,碱度和硬度持续上升,如图3中曲线1和曲线2所示,当浓缩时间大于10 h之后,蒸发罐内的浓缩液总硬度维持在7000~7500 mg/L的区间内波动(以碳酸钙计)。钙离子浓度呈现下降的趋势,如图3中曲线4所示,主要原因在于生成的碳酸钙和硅酸钙沉淀导致,蒸发罐内浓缩液pH、氨氮、总氮随浓缩时间变化关系如图4所示。



1—碱度;2—总硬度;3—镁离子;4—钙离子

图3 蒸发罐内液体碱度/ $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ /总硬度随时间变化曲线图



1—总氮;2—pH;3—氨氮

图4 蒸发罐内浓缩液pH、氨氮、总氮随浓缩时间变化关系图

由图4中曲线2可知RO浓缩液的pH=6.6呈弱酸性,随着浓缩时间的增加,碳酸根离子与钙离

子反应生成碳酸钙沉淀析出,此时为了维持碳酸盐缓冲体系的平衡,氢离子被消耗与碳酸氢根反应生成碳酸根离子,使得整个溶液中 pH 上升,由于碳酸根离子与氢氧根离子、氢离子之间的转换,也就是碳酸氢根/碳酸根体系中主要以碳酸氢根(占比为 97%)的形式存在。此时的稳定 pH 即为 8.3,故而在浓缩时间超过 4 h 后,蒸发母液中稳定的 pH 为 8.3 左右。

氨氮浓度变化如图 4 中曲线 3 所示,从初始的 16 mg/L 降低至 5.9 mg/L 左右维持稳定,主要原因在于在负压 -96 kPa 的真空状态下,铵根离子转化为游离氨随着蒸发水蒸气流至真空罐内,最终残留在冷凝液中。总氮主要包括硝酸盐氮、氨氮、亚硝酸盐氮和有机氮,其中扮演螯合剂的腐殖酸中含有的有机氮被沉积在垢层中,部分氨氮经蒸发转移至冷凝液中,蒸发至 30 h 时,总氮从最初的 800 mg/L 上升至 7 250 mg/L。

蒸发母液密度随浓缩时间的变化关系曲线如图 5 所示,RO 浓缩液原水的密度 1.05 mg/mL,随着浓缩时间的增加,蒸发罐内的溶液密度逐渐增大,在浓缩时间升至 16 h 时,蒸发罐内的密度从 1.05 mg/mL 上升至 1.143 mg/cm<sup>3</sup>,浓缩时间继续延长至 20、24、30 h 时,蒸发母液的密度分别为 1.174、1.203、1.217 mg/mL。从密度随着浓缩时间变化的曲线图上来看,蒸发初期由于 30 L 水样中含固率为 5%左右,含水率高,清液的产水量为 9.7 L/h,蒸发罐内母液的密度呈现上涨的趋势,随着蒸发时间的延长,蒸发时间达到 20 h 后,密度的变化曲线呈现出平缓的趋势,主要原因在于随着浓缩时间的增加,蒸发罐内浓液离子和有机物被浓缩,其中钙镁离子、碳酸氢根离子、碳酸根离子、活性硅、非活性硅和硫酸根离子被浓缩至析出浓度而形成钙垢附着在蒸发罐内壁和加热盘管之上,故而蒸发母液中密度在蒸发浓缩时间超过 20 h 后,蒸发母液中大量的碳酸钙、硫酸钙、硅酸镁以及有机物析出沉淀在蒸发罐内壁和盘管上,导致蒸发母液密度上涨速率低于沉淀未

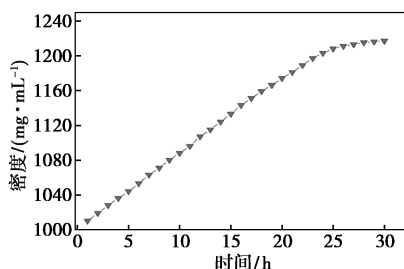


图 5 蒸发母液密度随浓缩时间变化关系

析出阶段的密度增长速率,母液最终含固率稳定在 22%~25%。

### 2.2.2 冷凝液水质变化情况

在冷凝液未检测出钙镁离子和硬度,说明在冷凝液中未携带出钙镁硬度离子和硫酸根离子。冷凝液中 pH、氨氮与 TN 浓度随浓缩时间变化的关系曲线如图 6 所示。

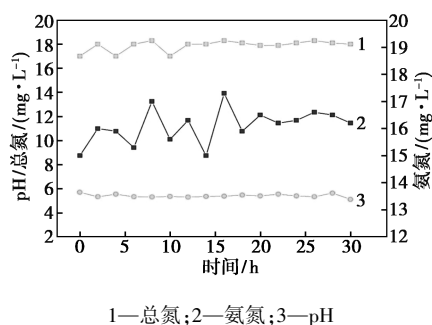


图 6 冷凝液中 pH、氨氮与 TN 随浓缩时间变化关系

由图 6 曲线 3 可以看出,冷凝液中 pH 为 5.3 左右,主要原因在于挥发性的部分有机物呈现酸性,冷凝液中含有铵根离子,铵根离子与水中的氢氧根离子形成电离平衡之后水样呈现弱酸性。TN 的数值维持在 16~18 mg/L 之间、氨氮的浓度维持在 15~17 mg/L 之间。

冷凝液中 COD 与氯离子的含量随浓缩时间变化的关系曲线如图 7 所示。

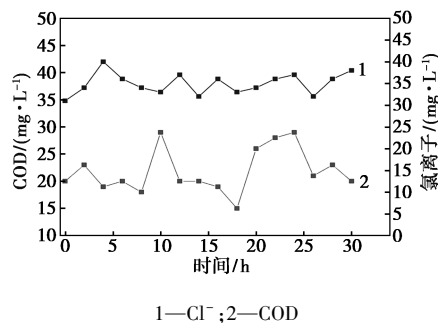


图 7 冷凝液中 COD 与氯离子随浓缩时间变化关系

从图 7 中曲线 2 可以看出,蒸发出水中 COD 含量(14~30 mg/L 之间)基本维持稳定,在低温真空状态下,小分子易挥发的有机物随着水蒸气越过扑沫器在冷凝室冷凝溶解在冷凝液中,冷凝液的 COD 指标满足排放要求,由于该部分 COD 属于易挥发性的有机物,冷凝液具有轻淡的异味。同时在蒸发过程中,水蒸气也夹带了少量的氯离子,故而冷凝液中含有少量的氯离子(浓度在 30~

40 mg/L 之间)。

### 2.3 垢层物质分析

在试验过程中发现蒸发罐内壁以及加热盘管有

不同程度的垢层出现,通过 X 射线光电子能谱技术(XPS)分析手段对垢层物质进行成分分析,具体谱图如图 8 所示。

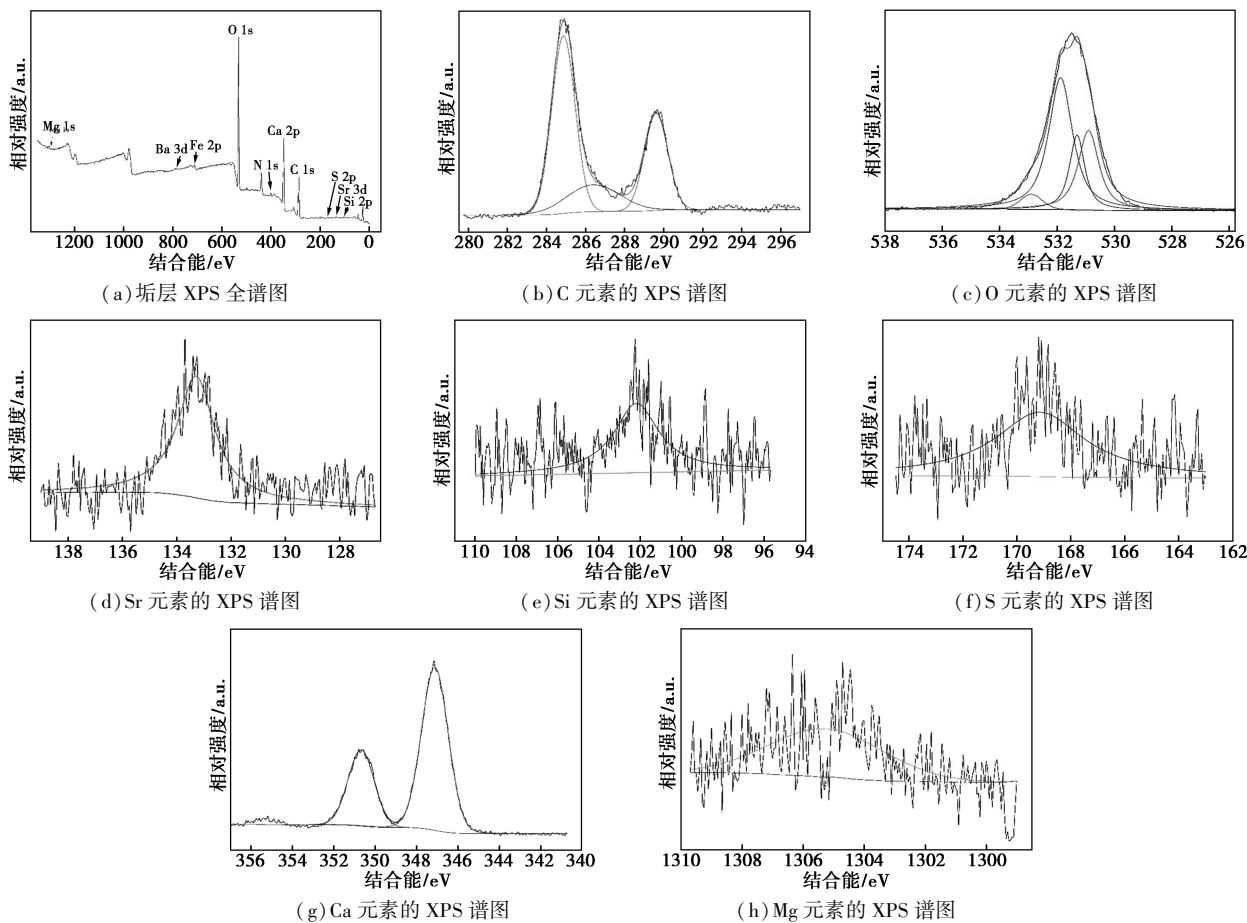


图 8 垢层 XPS 分析谱图

图 8(a) 是垢层的 XPS 全谱图,由该图可看出垢层的主要元素包括 C、O、Si、Mg、Ca、S、Sr、N、Ba 及 Fe 等元素组成。通过分析发现碳元素的结合能主要由 284.86、289.8、286.4 eV 组成,其中 C 1s 在 284.86、289.8、286.4 eV 处对应的化学结构分别对应为有机物的组成基团 C—H、 $\text{HCO}_3^-$  和 C=O 的结合能;氧元素的 XPS 谱图主要由 530.9、532.9、531.88、531.3 eV 组成,所对应的化学结构分别为  $\text{CaCO}_3$ 、MgO、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgSiO}_3$  的 XPS 结合能,532.9 eV 对应 C=O、 $\text{SiO}_2$  的结合能态,531.88 eV 对应  $\text{SO}_4^{2-}$ 、Si—O 的化学状态,531.3 eV 对应 C=O 的化学状态;与 C 1s 的化学状态相比,基本吻合;在蒸发过程中,Sr 元素所对应的不溶性化学物质主要为  $\text{SrCO}_3$  和  $\text{SrSO}_4$  组成;Si 2p 谱图中的 103.46 eV 所对应的化学结构为 Si—O;S 2p 谱图中的 169.4 eV 结合能所对应的化学结构为  $\text{SO}_4^{2-}$ ;钙元素的 XPS 全谱图主要由 352.65 eV 处的  $\text{Ca } 2p_{1/2}$  和 356.2 eV 处的

$\text{Ca } 2p_{3/2}$  组成,所对应的化学结构为  $\text{CaSiO}_3$  和  $\text{CaCO}_3$ 。

### 3 结论

本研究以长沙市黑麋峰垃圾填埋场 RO 膜浓缩液为对象,通过低温蒸发技术处理垃圾渗滤液 RO 浓缩液,系统评估了蒸发过程中产水性能、水质演变规律以及结垢行为。研究表明,低温蒸发技术(40℃、-96 kPa)可将 RO 浓缩液削减至原体积的 2%~5%,母液最终含固率稳定在 22%~25%;冷凝液中 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及 TN 浓度均满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2024)表 2 排放限值,验证了该工艺在工程化减量与达标产水方面的可行性。同时,XPS 证实垢层以  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{MgSiO}_3$  及硫酸钙  $\text{CaSO}_4$  为主,含少量 Sr、Ba 等杂质。工程建议在蒸发单元前强化软化预处理,蒸发罐设计预留 CIP(在线化学清洗)接口并采用 316L 或更高等级耐蚀材质,可显著延长运行周期、降低

(下转第 251 页)

- 109-114.
- [5] 田继林,朱建国,朱书骏,等.60 t/h 煤粉预热燃烧锅炉宽负荷运行特性研究[J].热力发电,2024,53(4):133-140.
- [6] 吕清刚,朱书骏,朱建国,等.煤粉预热燃烧技术研发进展[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6535-6547.
- [7] 杨希刚,陈国庆,黄林滨,等.尿素法 SNCR 对大型电站煤粉锅炉运行影响的工业试验[J].化工进展,2022,41(7):3573-3581.
- [8] 欧阳子区,王宏帅,吕清刚,等.煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J].中国电机工程学报,2023,43(22):8772-8790.
- [9] Fang Z Q, Tao B, Yu X H, et al. Achieving an ultra low emission of nitrogen oxides by using activated carbon with hydrophobic modification[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 315: 128165.
- [10] Xu W T, Huang Y J, Song S H. On-line combustion optimization framework for coal-fired boiler combining improved cultural algorithm, deep learning, multi-objective evolutionary algorithm with improved case-based reasoning technology [J]. Fuel, 2024, 358: 130225.
- [11] 任少君,朱保宇,翁琪航,等.基于物理信息神经网络的燃煤锅炉 NO<sub>x</sub> 排放浓度预测方法[J].中国电机工程学报,2024,44(20):8157-8165.
- [12] Dušan S N, Marko A, Jurij A, et al. Optimization of an old 200 MW coal-fired boiler with urea injection through the use of supervised machine learning algorithms to achieve cleaner power generation [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 90: 125200.
- [13] Matsuzaki A, Kiribuchi D, Shimizu K. Machine learning approach to NO<sub>x</sub> prediction for SCR process of thermal power plant[J]. IFAC-PapersOnLine, 2023, 56(2):2858-2864.
- [14] Nikhil P. An emission predictive system for CO and NO<sub>x</sub> from gas turbine based on ensemble machine learning approach [J]. Fuel, 2024, 366: 131421.
- [15] Liu G F, Yu Z, Shen D K, et al. Anticipatory NH<sub>3</sub> injection control for SCR system based on the prediction of the inlet NO<sub>x</sub> concentration[J]. Journal of the Energy Institute, 2021, 94: 167-175.
- [16] Wen X Q, Li K C, Wang J G. NO<sub>x</sub> emission predicting for coal-fired boilers based on ensemble learning methods and optimized base learners [J]. Energy, 2023, 264: 126171.
- [17] Hoque K E, Hossain T, Haque A M, et al. NO<sub>x</sub> emission predictions in gas turbines through integrated Data-Driven machine learning approaches [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2024, 146(7):071201.
- [18] 苏连成,朱娇娇,郭高鑫,等.基于 XGBoost 和 Wasserstein 距离的风电机组塔架振动监测研究[J].太阳能学报,2023,44(1):306-312.
- [19] 张子洵,魏业文,张轲钦,等.基于 ICOA-XGBoost 的光伏阵列复合故障诊断研究[J].太阳能学报,2025,46(5):251-259.
- [20] 陈林,陶润哲,谢雨池,等.基于 LightGBM 的 ASIC 芯片互连线延迟预测模型[J].微电子学,2025,55(1):134-139.
- [21] Qiu H, Xia Y P, Xiang C L, et al. Prediction of hydrogen storage in metal-organic frameworks using CatBoost-based approach [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 79: 952-961.
- [22] Zhou Y F, Wang S L, Xie Y X, et al. Remaining useful life prediction and state of health diagnosis of lithium-ion batteries with multi-scale health features based on optimized CatBoost algorithm [J]. Energy, 2024, 300: 131575.
- [23] Yan P L, Fan W J, Zhang R C. Predicting the NO<sub>x</sub> emissions of low heat value gas rich-quench-lean combustor via three integrated learning algorithms with Bayesian optimization [J]. Energy, 2023, 273: 127227.
- [24] Tang H, Liu Z D, Han X J, et al. Experimental study on combustion characteristics of a 40 MW pulverized coal boiler based on a new low NO<sub>x</sub> burner with preheating function [J]. Energy, 2024, 305: 132319.
- [25] 蔡晋,单露,王志宁,等.超临界 350 MW 循环流化床锅炉变负荷特性[J].热力发电,2020,49(9):98-103,108.
- [26] Li Y X, Yan C W, Zhang J, et al. Prediction of coal gangue volcanic ash activity based on machine learning [J]. Construction and Building Materials, 2024, 443: 137737. ■

(上接第 243 页)

维护成本,保障设备传热效率与连续运行能力。综上,低温蒸发技术可高效实现垃圾渗滤液 RO 浓缩液的减量化和冷凝液达标排放,但需结合软化预处理与清洗策略以控制结垢。研究成果为填埋场膜浓缩液的工程化处置提供了关键设计参数与运行经验,对推动我国渗滤液“零排放”技术的规模化应用具有重要参考价值。

### 参考文献

- [1] 王凯,武道吉,彭永臻,等.垃圾渗滤液处理工艺研究及应用现状浅析[J].北京工业大学学报,2018,44(1):1-12.
- [2] 范茂军.垃圾渗滤液膜浓缩液处理技术的研究进展[J].节能,2019,38(11):145-147.
- [3] 张净瑞,郑铭灏,郑飞龙,等.我国生活垃圾渗滤液的产生、处理现状及发展趋势[J].环境工程学报,2025,19(11):2724-2734.
- [4] 徐昌文,王声东.垃圾渗滤液及膜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.
- [5] 丁晶,关淑妍,赵庆良,等.垃圾渗滤液膜浓缩液处理技术研究与应用进展[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(11):1-13.
- [6] 王潇潇,钟溢健,李金城,等.垃圾渗滤液膜浓缩液处理技术研究进展[J].桂林理工大学学报,2024,44(4):677-683.
- [7] 苏增琛,刘永德,宋雪,等.垃圾渗滤液膜浓缩液处理技术研究[J].河南科技,2025,52(12):84-87.
- [8] 宋薇,李丽,王玉如.低温真空蒸发处理垃圾渗滤液膜浓缩液[J].环境工程学报,2017,11(10):5417-5423.
- [9] 李向东,陈方方,姚鹏,等.低温蒸发技术处理垃圾渗滤液膜浓缩液[J].中国给水排水,2025,41(3):84-88.
- [10] 张文贞,王少东,陈福达,等.垃圾渗滤液膜浓缩液处理工艺应用研究[J].广东化工,2024,51(1):103-107.
- [11] 吴梦瑶.熟石灰软化—氧化剂氧化—蒸发法处理垃圾渗滤液膜浓缩液试验研究[D].北京:中国地质大学,2023. ■