

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.013

套管式气隙膜蒸馏组件浓缩处理垃圾渗滤液

苑宏英^{1,2}, 王永昆¹, 刘 博³, 宋 阳³, 何少林³, 梁卓彬¹,
杜永亮^{1,2}

(1. 天津城建大学环境与市政工程学院 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384; 2. 基础设施防护和环境绿色生物科技国际联合研究中心, 天津 300384; 3. 中国石油规划总院, 北京 100089)

摘 要: 针对反渗透技术处理垃圾渗滤液过程中产生的反渗透浓缩液(LLROC),采用套管式气隙膜蒸馏组件(DP-AGMD-M)对其进行浓缩处理,探究温度、流量等工艺参数对DP-AGMD-M性能的影响,考察深度浓缩过程中DP-AGMD-M对污染物的截留能力,并评估生活垃圾焚烧余热驱动DP-AGMD-M的可行性。结果表明,在所考察的工艺参数中,料液温度对组件性能影响最大,当料液温度为90℃时,膜通量、造水比及热效率的最高值分别可达到1.95 kg/(m²·h)、0.24和20.8%。在LLROC深度浓缩过程中,DP-AGMD-M的膜通量较为稳定,未出现膜污染现象。当将LLROC浓缩5倍时,DP-AGMD-M对除氨氮外的其他污染物的截留率均超过99%。余热利用可行性分析表明,垃圾焚烧厂余热可满足DP-AGMD-M系统现场处理需求。可见,DP-AGMD-M能够应用于LLROC深度浓缩处理领域,且具备利用低品位热源的工程化应用潜力。

关键词: 垃圾渗滤液; 膜蒸馏; 反渗透浓缩液; 深度浓缩; 余热利用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0090-07

Concentrated Treatment of Landfill Leachate Using a Double-pipe Air Gap Membrane Distillation Module

Yuan Hongying^{1,2}, Wang Yongkun¹, Liu Bo³, Song Yang³, He Shaolin³,
Liang Zhuobin¹, Du Yongliang^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. International Joint Research Center for Infrastructure Protection and Green Biotechnology in the Environment, Tianjin 300384, China; 3. PetroChina Planning & Engineering Institute, Beijing 100089, China)

Abstract: To address the reverse osmosis concentrate (LLROC) generated from the treatment of landfill leachate by reverse osmosis technology, a double-pipe air gap membrane distillation module (DP-AGMD-M) was employed for its further concentration. The effects of process parameters, including temperature and flow rate, on the performance of the DP-AGMD-M were investigated. The rejection

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际创新合作”专项(2019YFE0122400); 中国石油天然气股份有限公司规划总院管理决策支持项目(JH2025-010)

通信作者: 杜永亮 E-mail: duyongliang@tcu.edu.cn

capacity of the DP-AGMD-M for various pollutants during the deep concentration process was examined, and the feasibility of driving the DP-AGMD-M using waste heat from municipal solid waste incineration was evaluated. The results indicated that among the parameters studied, feed temperature exerted the most significant influence on module performance. When the feed temperature was 90 °C, the maximum membrane flux, gained output ratio (GOR), and thermal efficiency reached 1.95 kg/(m²·h), 0.24, and 20.8%, respectively. During the deep concentration of LLROC, the membrane flux of the DP-AGMD-M remained relatively stable, with no observable membrane fouling. When the LLROC was concentrated to one-fifth of its original volume, the DP-AGMD-M achieved over 99% rejection for all pollutants except ammonia nitrogen. The feasibility analysis of waste heat utilization demonstrated that the waste heat from the incineration plant could satisfy the on-site treatment requirements of the DP-AGMD-M system. Overall, the DP-AGMD-M shows promising applicability for the deep concentration of LLROC and possesses significant potential for engineering implementation powered by low-grade heat sources.

Keywords: landfill leachate; membrane distillation; reverse osmosis concentrate; deep concentration; waste heat utilization

反渗透(RO)技术常被用于垃圾渗滤液的深度处理,但其运行中会产生垃圾渗滤液反渗透浓缩液(LLROC)。与垃圾渗滤液相比,LLROC所含污染物进一步被富集,且色度高、可生化性较差,难以通过常规工艺达到较好的处理效果^[1]。

LLROC的传统处理方式是回灌填埋场、蒸发和焚烧^[2]。然而,回灌可能导致难降解有机物和盐分持续累积,蒸发和焚烧则易受高盐腐蚀,且存在能耗及运行成本高等问题^[3]。膜蒸馏(MD)作为一种新型的水处理技术,以疏水微孔膜两侧的蒸气压差为驱动力,可利用低品位热源实现高盐、难降解废水的浓缩与净化,对盐分和非挥发性污染物具有较高的截留率^[4]。其中,气隙式膜蒸馏(AGMD)由于膜与冷凝面之间存在气隙,可降低传热损失并提高热效率^[5],在低能耗废水浓缩与资源化处理方面展示出良好的应用前景。若AGMD与低品位余热耦合,可进一步提升能源利用效率。已有研究证明,通过废热回收提高料液温度能够提高MD系统产水通量^[6],在小规模集成装置中电解所产生的废热可为MD提供足够动力^[7]。垃圾焚烧厂运行过程中会产生大量低品位废热,这为驱动MD处理垃圾填埋场渗滤液及其浓缩液提供了现实基础。然而,目前将垃圾焚烧厂低品位热源与MD相结合的应用潜力还未得到充分评估。基于此,本研究采用自主设计的套管式气隙膜蒸馏组件(DP-AGMD-M),系统考察其不同运行参数下对LLROC的处理性能,

分析LLROC深度浓缩过程中的运行稳定性和污染物截留效果,并进一步评估利用生活垃圾焚烧厂废热驱动DP-AGMD-M运行的可行性。

1 材料和方法

1.1 LLROC特征

LLROC取自天津市某生活垃圾卫生填埋场渗滤液RO处理工艺产生的浓缩液。其水质指标如下:COD为2 600 mg/L, NH₄⁺-N为0.854 mg/L, pH为8.34, 溶解性总固体(TDS)为8 750 mg/L, Cl⁻为6 550 mg/L, NO₃⁻为24.8 mg/L, SO₄²⁻为1 400 mg/L, 金属离子K⁺为2 600 mg/L, Na⁺为5 100 mg/L, Ca²⁺为42.7 mg/L, Mg²⁺为196 mg/L, 铬为390 μg/L, 锰为137 μg/L, 钴为114 μg/L, 镍为609 μg/L, 砷为341 μg/L, 镉为0.13 μg/L, 铅为3.22 μg/L。其中, COD采用重铬酸钾法测定, NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法测定, pH采用便携式pH计测定, TDS采用电导率仪测定, Cl⁻采用硝酸盐滴定法测定, NO₃⁻采用紫外分光光度法测定, SO₄²⁻采用铬酸钡分光光度法测定, 金属离子采用电感耦合等离子质谱法测定。

1.2 膜蒸馏装置

膜蒸馏实验装置如图1所示,料液经0.45 μm水性膜过滤后,在磁力搅拌器中加热,经磁力泵加压后输入到DP-AGMD-M内。料液中的水在跨膜温差作用下蒸发,形成的水蒸气穿过膜孔在冷凝管表面冷凝产水,分别采用电子天平和电导率仪测定产水的质量和电导率,待系统稳定后每10 min计数

一次,通过单位时间内的产水质量计算膜通量。DP-AGMD-M的料液和冷却液进出口分别设置温度检测元件,同时在进口处设置转子流量计用以测定料液和冷却液流量。

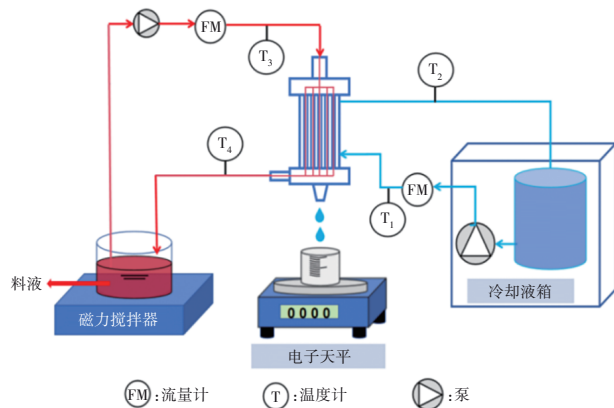


图1 DP-AGMD-M膜蒸馏装置

Fig.1 Schematic diagram of DP-AGMD-M membrane distillation setup

DP-AGMD-M的结构如图2所示,外壳为有机玻璃材质,内含37根有机玻璃冷凝管,每根冷凝管中布置1根中空纤维膜丝。冷凝管内、外径分别为4.0、6.0 mm,长为450 mm,冷凝管的底部开2 mm×3 mm切口用于收集冷凝水,冷凝管的顶端和底部分别用有机玻璃盖片将膜丝拉直并固定。冷凝管通过直径为89 mm、厚度为5 mm的多孔有机玻璃圆板固定。膜组件外壳的内、外径分别为89、95 mm,长度为400 mm,在距离外壳顶部和底部50 mm处分别开直径为8 mm的圆孔作为冷却液的出入口。

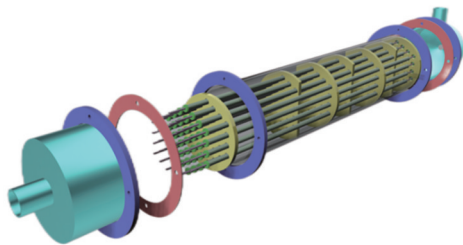


图2 DP-AGMD-M结构

Fig.2 Structure diagram of DP-AGMD-M

实验中使用的疏水聚四氟乙烯(PTFE)膜丝购自浙江东大环境工程有限公司,其平均内径为1.1~1.2 mm,厚度为0.5 mm。DP-AGMD-M的有效长度为0.4 m,膜丝37根,有效蒸发面积为0.465 m²,有效冷凝面积为0.186 m²,热侧和冷侧流道横截面积分别为2.91×10⁻⁵、4.65×10⁻⁴ m²。

1.3 膜组件性能参数

浓缩系数(CF)定义为进料侧的初始进料体积与浓缩体积之比,初始料液的CF为1,当CF累积到5时停止浓缩实验。

污染物截留率的计算公式如下:

$$R = (1 - c_p/c_f) \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为污染物截留率,%; c_p 和 c_f 分别为产水和料液中污染物的浓度。

膜通量定义为单位膜面积在单位时间内产生的冷凝水质量,计算公式如下:

$$J = \frac{W}{S \cdot t} \quad (2)$$

式中: J 为膜通量,kg/(m²·h); W 为产水质量,kg; S 为基于中空纤维膜内径计算出的有效膜面积,m²; t 为测量时间,h。

造水比用来衡量膜蒸馏过程的热量利用率,计算公式如下:

$$\text{GOR} = \frac{J \cdot S \cdot \Delta H}{Q_m} = \frac{J \cdot S \cdot \Delta H}{Q \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2)} \quad (3)$$

式中:GOR为造水比; Q_m 为外部热源提供的热量,kJ/h; ρ 为料液密度,kg/m³; C_p 为料液的比热容,kJ/(kg·°C); Q 为料液的循环流量,m³/h; T_3 和 T_2 分别为热侧进口温度与冷侧出口温度,°C; ΔH 为热料液的蒸发焓,kJ/kg。

热效率为产水汽化潜热与热料液提供的总热量之比,计算公式如下:

$$\eta = \frac{J \cdot S \cdot \Delta H_2}{Q \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4)} \times 100\% \quad (4)$$

式中: η 为热效率,%; T_4 为热侧出口温度,°C; ΔH_2 为产水汽化潜热,kJ/kg。

饱和蒸气压为一定温度下水蒸气与液态水处于平衡状态时的压力,计算公式如下:

$$\lg P = A - \frac{B}{T + C} \quad (5)$$

式中: P 为水的饱和蒸气压,mmHg(1 mmHg相当于133.32 Pa); T 为液体温度,°C; A 、 B 和 C 均为安托因常数, $A=8.071\,31$, $B=1\,730.63$, $C=233.426$ (对水适用于1~100 °C)。

1.4 垃圾焚烧余热回收能力评价

垃圾焚烧会产生大量热量,总热量与低热值、垃圾质量的关系如下:

$$Q_{\text{tot}} = 1\,000 \cdot m \cdot \text{LHV} \quad (6)$$

式中: Q_{tot} 为总热量, kJ/d; LHV 为低热值, kJ/kg; m 为垃圾质量, t/d。

发电厂剩余废热 (Q_w) 由总热量减去电功率 (Q_e) 得到, 即: $Q_w = Q_{\text{tot}} - Q_e$ 。

可回收废热的计算公式如下:

$$Q_r = \sum Q_w \cdot \alpha_T \cdot \varepsilon_T \quad (7)$$

式中: Q_r 为可回收废热, kJ/d; α_T 表示温度为 T 时的余热百分比; ε_T 表示温度为 T 时的热回收效率, 通过公式(8)计算。

$$\varepsilon_T = \frac{T_w - T_{\text{MD}} - \Delta T_{\text{HX}}}{T_w} \quad (8)$$

式中: T_w 和 T_{MD} 分别为废热温度和 MD 最低运行温度, °C; ΔT_{HX} 为换热器 (HX) 中热流和冷流间的温差, 取实际最小值即 5 °C。

比能耗用于表征 MD 系统的性能, 指产生 1 m³ 蒸馏水所消耗的能量^[8], 计算公式如下:

$$\text{SEC} = \frac{Q \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4)}{3600 \cdot Q_d} \quad (9)$$

式中: SEC 为比能耗, kW·h/m³; Q_d 为产水率, m³/h。

MD 系统的处理能力 (C , m³/d) 可由下式计算:

$$C = \frac{Q_r}{3600 \cdot \text{SEC}} \quad (10)$$

2 结果与讨论

2.1 DP-AGMD-M 的性能

2.1.1 温度对膜组件性能的影响

在冷却液温度为 20 °C、冷却液流量为 10 L/h、料液流量为 5 L/h 的条件下, 随着料液温度的升高, 膜通量呈显著上升趋势。当温度升至 90 °C 时膜通量升至 1.95 kg/(m²·h), 与 50 °C 相比膜通量提升了 375.6%。膜蒸馏过程的传质推动力是膜两侧的水蒸气压差, 而水的饱和蒸气压与温度相关, 在较高温度下水的饱和蒸气压随温度呈指数级上升^[9]。在冷却液温度不变的情况下, 料液温度上升会使跨膜温差增大, 由式(5)计算得出膜两侧的水蒸气压差由 9.98 kPa (50 °C) 显著增加至 67.72 kPa (90 °C), 最终传质推动力上升使得膜通量显著升高^[10]。

另外, 随着料液温度的升高, GOR 和热效率均呈上升趋势 (见图 3), 当料液温度升至 90 °C 时, GOR 由 50 °C 时的 0.10 升至 0.24, 热效率由 50 °C 的 5.0% 升至 20.8%。由式(3)可知, GOR 与膜通量、料液蒸发焓以及热侧进口温度与冷侧出口温度间的温差

有关。在实验过程中, 膜通量和温差均随料液进口温度的上升而增大, 但料液的蒸发焓变化相对较小。与温差相比, 由于膜通量随料液温度变化更为显著, 因此 GOR 会随料液温度的升高而上升, 这说明膜组件在高进料温度下可取得较高的热量利用率。同样, 由于与热料液进出口温差相比, 膜通量随料液温度升高的上升幅度更为显著, 因此热效率随料液温度的升高而上升, 说明在高进料温度下外部热源输入热量直接用于汽化料液的比例增加。

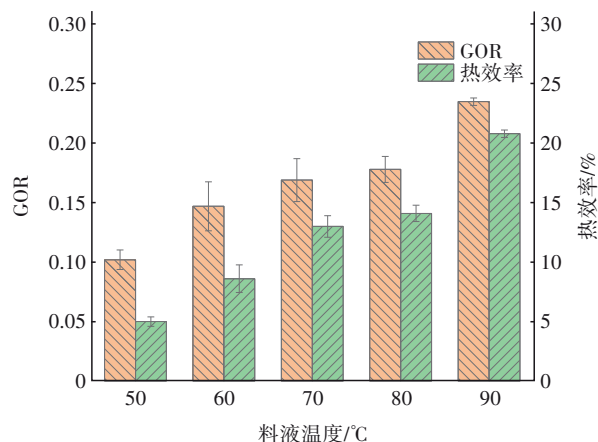


图3 膜组件性能随料液温度的变化

Fig.3 Change in membrane module performance with feed temperature

在料液温度为 60 °C、料液流量为 5 L/h、冷却液流量为 10 L/h 的条件下, 冷却液温度对 GOR 及热效率的影响见图 4。可知, 随着冷却液温度的升高, 膜组件的 GOR 和热效率均逐渐下降。当冷却液温度升至 30 °C 时, GOR 由 10 °C 时的 0.162 降至 0.142, 热效率由 10 °C 时的 18.3% 显著降至 4.4%。随着冷却液温度的升高, 膜通量和热侧进口温度与冷侧出口温度间的温差均下降, 因此 GOR 的变化幅度较小。而在热料液进出口温差不变的情况下, 膜通量降低会导致热效率显著下降。此外, 随着冷却液温度的升高膜通量呈下降趋势。当冷却液温度由 10 °C 升至 30 °C 时, 膜通量由 1.03 kg/(m²·h) 降至 0.52 kg/(m²·h)。在料液温度不变的情况下, 冷却液温度升高会导致膜冷侧温度上升, 跨膜温差减小会引起膜两侧的水蒸气压差降低 (由 10 °C 时的 18.60 kPa 降至 30 °C 时的 15.59 kPa), 进而导致膜通量随冷却液温度的升高而降低^[11]。由于在低温下水的饱和蒸气压随温度变化不显著, 因此冷却液温度变化对膜通量的影响没有料液温度显著。

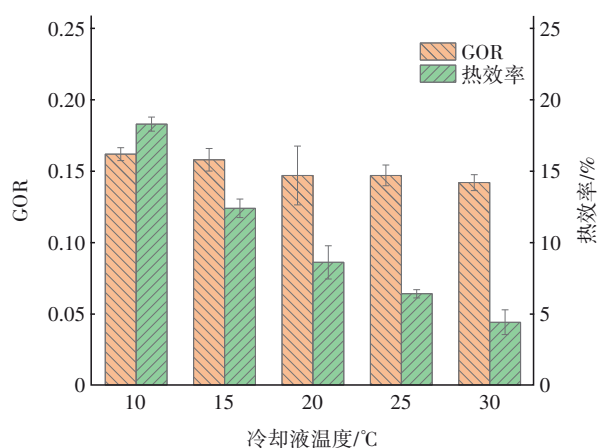


图4 膜组件性能随冷却液温度的变化

Fig.4 Change in membrane module performance with coolant temperature

2.1.2 流量对膜组件性能的影响

在料液温度为60℃、冷却液温度为20℃、冷却液流量为10 L/h的条件下,随着料液流量的增加,膜通量呈上升趋势。当料液流量增至5 L/h时,膜通量由2 L/h时的0.33 kg/(m²·h)升至0.76 kg/(m²·h),升高了130.3%。料液通道内流速会随着料液流量的升高而增大,进而使得膜组件料液通道内部的料液运动呈现紊流状态,导致膜表面边界层厚度减小,使得料液层膜表面温度升高并接近料液温度^[11]。在膜表面温度升高引起料液侧水蒸气压力上升的情况下,由于冷却液温度和流速均不变,因而引起膜两侧水蒸气压差明显增大,最终传质推动力增加使得膜通量上升。

另外,随着料液流量的增加,膜组件的GOR由0.17降至0.14,热效率由3.9%增至8.6%(见图5)。当料液流量升高时,膜通量和温差均上升,因此GOR变化幅度较小。由式(4)可知,在膜通量上升的情况下,热侧进出口温差随料液流量的增加而减小,进而导致热效率上升。

在料液流量为5 L/h的条件下,增大膜组件冷却液流道内的流速,对流传热效果随之提升,进而使得冷凝管表面温度降低,通过冷凝管与膜间的空气隙导热作用使得空气隙侧膜表面温度也降低,从而增加膜两侧水蒸气压差,促使膜蒸馏过程中传质推动力提高,使得膜通量上升。由于膜组件内部气隙的阻隔,空气隙侧膜表面温度变化不显著,因此冷却液流量变化对膜通量的影响没有料液流量显著。

随着冷却液流量由10 L/h增至25 L/h,GOR由

0.15升至0.19,热效率则由8.7%降至4.5%(见图6)。在热侧进口温度与冷侧出口温度之差变化不明显,冷却液流量增加导致膜通量增加,进而GOR随冷却液流量的增加而增大。由式(4)可知,在料液温度不变的条件下,膜通量升高会导致热效率升高。

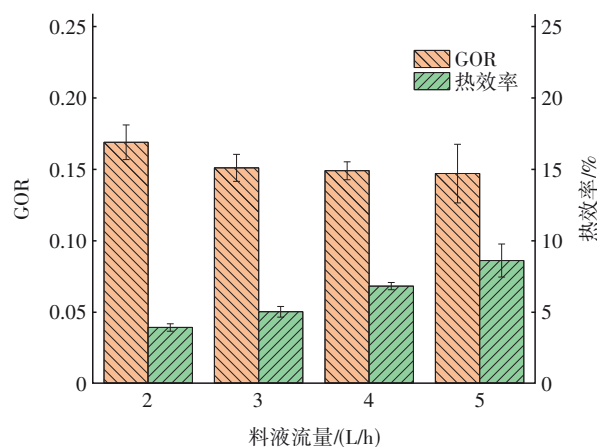


图5 膜组件性能随料液流量的变化

Fig.5 Change in membrane module performance with feed flow rate

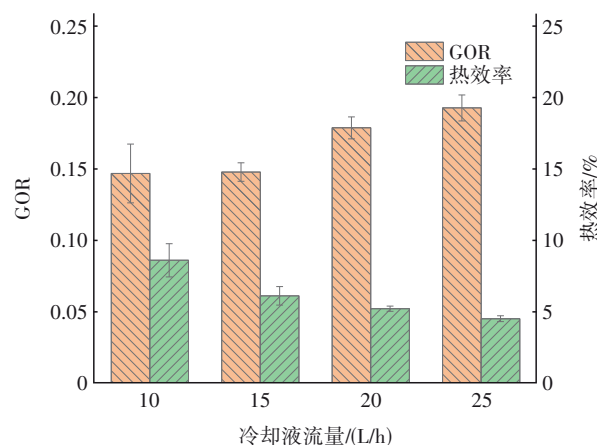


图6 膜组件性能随冷却液流量的变化

Fig.6 Change in membrane module performance with coolant flow rate

2.2 DP-AGMD-M 浓缩处理 LLROC

2.2.1 浓缩过程中DP-AGMD-M的性能

在料液和冷却液温度分别为70和20℃、流量分别为5和10 L/h的条件下,使用DP-AGMD-M对LLROC进行浓缩处理,膜通量和电导率的变化如图7所示。可知,在浓缩实验初期产水电导率呈先上升后下降的趋势,并在浓缩系数为2时达到最大值。这是因为浓缩初期料液中的氨氮在碱性环境下通

过氨化反应生成氨并与水结合,在加热条件下分解生成氨气,氨气和一些可挥发性物质随水蒸气一起进入冷凝侧,导致浓缩初期产水电导率升高^[12]。随着浓缩过程的进行,料液中可挥发性物质含量逐渐降低,产水的电导率呈现出逐渐下降的趋势。由图7可知,在整个浓缩实验周期内DP-AGMD-M性能稳定,膜通量为 $(1.02 \pm 0.20) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,波动幅度较小,未出现明显的下降趋势,说明在LLROC浓缩过程中未出现显著的膜污染现象。

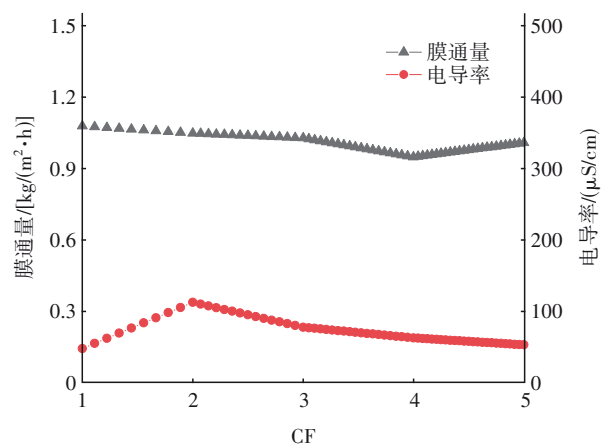


图7 LLROC浓缩过程中膜通量和电导率的变化

Fig.7 Change in membrane flux and conductivity during LLROC concentration

2.2.2 DP-AGMD-M对污染物的截留性能

进一步检测LLROC浓缩过程中不同浓缩系数下产水中污染物的浓度。经计算,COD的截留率整体保持在98%以上,在CF为5时高达99.83%。相较于其他污染物, NH_4^+-N 的截留率整体较低,浓缩初期(CF=2)截留率仅为42.60%,随着料液中可挥发性物质含量的逐渐降低, NH_4^+-N 的截留率呈显著上升趋势,当CF为5时截留率高达93.84%。整体上看,在LLROC浓缩过程中,DP-AGMD-M对各阴阳离子和重金属均具有较好的截留效果。除浓缩初期(CF=2) SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、Cr、Mn、Ni、Pb的截留率相对较低外,DP-AGMD-M对各阴阳离子和重金属污染物的截留率均超过99%。需要注意的是,金属离子容易与LLROC中的腐殖酸和有机酸物质相结合,在浓缩过程中易附着于膜表面,导致部分膜孔被堵塞^[13],进而造成浓缩实验后期膜通量出现一定程度的下降(见图7)。

2.3 DP-AGMD-M利用垃圾焚烧厂余热的可行性

余热是指生产过程中排放的富余热能,如高温

废气所携带的热量等。考虑到MD可使用低品位热源的特点,将余热回收用于加热料液,可减少能源浪费,并提高能源利用效率。垃圾焚烧厂产生的余热,经由热交换器传导至溶液中,可驱动MD系统的运行。对垃圾焚烧厂进行初步调查发现,约有96%的余热包含在温度低于 41.5°C 的冷凝器中,约有1%和3%的余热分别包含在温度约为 128.4 和 543.0°C 的冷凝器中。在进行实际应用评估时,考虑到DP-AGMD-M的料液温度为 70°C ,因此温度低于 41.5°C 的余热被视为不可回收余热^[14]。

对天津市某生活垃圾焚烧厂进行余热回收评价,该厂的设计规模为 $3\,000 \text{ t/d}$ 。生活垃圾的低位发热量主要取决于固废的成分和含水量,根据已有研究^[15-16]该值在 $5\,200 \sim 9\,500 \text{ kJ/kg}$ 之间变化,本文采用经典值 $7\,100 \text{ kJ/kg}$,余热容量为 $1.44 \times 10^{10} \text{ kJ/d}$,发电能力为 80 MW 。通过公式(7)和(8)计算得出可回收的余热量为 $4.33 \times 10^8 \text{ kJ/d}$ 。

对于本研究中的DP-AGMD-M,当料液温度为 70°C 时比能耗为 $5\,169 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。在实际操作过程中,小试和中试存在明显的能耗差距^[17]。将可回收余热全部用于驱动DP-AGMD-M,每天产水 23.26 m^3 ,以浓缩5倍计,每天可处理 29.08 m^3 的LLROC,大于生活垃圾填埋场的LLROC日产量。因此,利用垃圾焚烧发电产生的余热驱动DP-AGMD-M可以满足现场对LLROC的浓缩处理要求。在AGMD系统中,气隙在提高系统热效率的同时,其所增加的传热阻力会导致膜通量降低。在实际应用过程中,为提高AGMD的处理能力,需要增加膜的用量和投资。因此,在实际推广应用中还需要从优化操作参数和膜组件结构方面来进一步提升DP-AGMD-M的性能。

3 结论

① 料液温度对DP-AGMD-M性能的影响最为显著,料液温度升高可显著提升膜组件的质量通量、造水比和热效率。

② 在深度浓缩处理LLROC的过程中,DP-AGMD-M的性能表现较为稳定,对污染物具有较好的截留效果,产水水质良好,未出现膜污染现象;在浓缩后期(CF=5),对除氨氮外的其他污染物的截留率均超过99%。

③ 生活垃圾焚烧厂产生的余热足以驱动DP-

AGMD-M现场处理LLROC。

参考文献:

- [1] Keyikoglu R, Karatas O, Rezaia H, et al. A review on treatment of membrane concentrates generated from landfill leachate treatment processes [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 259: 118138.
- [2] Shi J Y, Dang Y, Qu D, et al. Effective treatment of reverse osmosis concentrate from incineration leachate using direct contact membrane distillation coupled with a NaOH/PAM pre-treatment process [J]. Chemosphere, 2019, 220: 195-203.
- [3] Chen L, Chen Z Y, Wang Y C, et al. Effective treatment of leachate concentrate using membrane distillation coupled with electrochemical oxidation [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 267: 118630.
- [4] Silva T L S, Morales-Torres S, Esteves C M P, et al. Desalination and removal of organic micropollutants and microorganisms by membrane distillation [J]. Desalination, 2018, 437: 121-132.
- [5] 杜永亮, 梁卓彬, 龚耀熙, 等. 气隙式膜蒸馏技术研究现状和应用[J]. 化工进展, 2024, 43(4): 1655-1666.
Du Yongliang, Liang Zhuobin, Gong Yaoxu, et al. Research status and application of air gap membrane distillation technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43 (4): 1655-1666 (in Chinese).
- [6] Hafiz A H A, Khalifa A E. Heat recovery of multistage circulated permeate gap membrane distillation for energy-efficient water production[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 352: 127689.
- [7] Arthur T, Millar G J, Love J. Integration of waste heat recovered from water electrolysis to desalinate feedwater with membrane distillation [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 56: 104328.
- [8] Liu Z Q, Lu X L, Wu C R, et al. Exploiting the potential of a novel "in-situ latent heat recovery" in hollow-fiber vacuum membrane distillation process for simultaneously improved water production and energy efficiency [J]. Water Research, 2024, 256: 121586.
- [9] Zhu C Y, Qin J Y, Gao Y W, et al. Experimental investigation of enhanced direct contact membrane distillation performance through turbulence promoters and structural optimization [J]. Journal of Membrane Science, 2025, 723: 123897.
- [10] Schwantes R, Morales Y, Pomp E, et al. Thermally driven ultrapure water production for water electrolysis — a techno-economic analysis of membrane distillation [J]. Desalination, 2025, 608: 116972.
- [11] Lawal D U, Abdallah M, Falath W, et al. Performance investigation of a novel direct contact membrane distillation unit with air bubble injection [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 362: 119782.
- [12] 叶林雄. 膜蒸馏处理垃圾渗滤液的效能和膜污染特性及其控制[D]. 广州: 广州大学, 2022.
Ye Linxiong. Efficiency and membrane fouling characteristics and its control of membrane distillation for landfill leachate treatment [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022 (in Chinese).
- [13] Liu C, Zhu L, Chen L. Effect of salt and metal accumulation on performance of membrane distillation system and microbial community succession in membrane biofilms [J]. Water Research, 2020, 177: 115789.
- [14] Gingerich D B, Mauter M S. Quantity, quality, and availability of waste heat from United States thermal power generation [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(14): 8297-8306.
- [15] Lu F L, Zhu Y, Pan M Z, et al. Thermodynamic, economic, and environmental analysis of new combined power and space cooling system for waste heat recovery in waste-to-energy plant [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226: 113485.
- [16] Wang D, Tang Y T, He J, et al. Generalized models to predict the lower heating value (LHV) of municipal solid waste (MSW) [J]. Energy, 2021, 216: 119327.
- [17] Eykens L, Hitsov I, De Sitter K, et al. Direct contact and air gap membrane distillation: differences and similarities between lab and pilot scale[J]. Desalination, 2017, 422: 91-100.

作者简介:苑宏英(1974—),女,山西大同人,博士,教授,研究方向为污水、污泥处理及资源化。

E-mail:yuanhy_00@163.com

收稿日期:2025-05-12

修回日期:2025-08-25

(编辑:刘贵春)