

# 基于膜吸收法处理垃圾渗滤液废水的研究

杨跃<sup>1</sup>,任亚涛<sup>2</sup>,赵子龙<sup>2</sup>,侯惠惠<sup>2</sup>,王宏杰<sup>2,3,4\*</sup>,董文艺<sup>2,3,4</sup>

(1.深圳能源环保股份有限公司,广东深圳518048;

2.哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院,广东深圳518055;

3.深圳市水资源利用与环境污染控制重点实验室,广东深圳518055;

4.城市水资源与水环境国家重点实验室,黑龙江哈尔滨150090)

**摘要:**为了处理垃圾渗滤液废水中高浓度氨氮,通过“泡沫分离、混凝沉淀、除钙、微/超滤”和膜吸收法脱氨组合工艺对垃圾渗滤液进行预处理,以保证后续生化处理系统的稳定运行。结果表明,膜吸收前处理可有效削减垃圾渗滤液中表面活性物质、大分子有机物、悬浮颗粒物和重金属,使Zn、Cu和Pb等离子含量满足生活垃圾填埋污染控制标准(GB 16889—2008)排放要求。在渗滤液pH=11.5、流速为3.6 cm/s、吸收液浓度为2 mol/L、流速为1.1 cm/s条件下,采用4级串联的中空纤维膜组件对垃圾渗滤液进行连续处理,氨氮去除率可达到97%以上,出水氨氮质量浓度始终低于50 mg/L,过膜通量基本稳定在3.0~3.2 mg/(m<sup>2</sup>·s)。

**关键词:**膜吸收法;垃圾渗滤液;预处理;高氨氮;组合工艺

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)07-0176-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.07.033

## Study on treatment of landfill leachate by membrane absorption process

YANG Yue<sup>1</sup>, REN Ya-tao<sup>2</sup>, ZHAO Zi-long<sup>2</sup>, HOU Hui-hui<sup>2</sup>, WANG Hong-jie<sup>2,3,4\*</sup>, DONG Wen-yi<sup>2,3,4</sup>

(1.Shenzhen Energy Environment Protection Co., Ltd., Shenzhen 518048, China; 2.School of Civil and

Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;

3.Shenzhen Key Laboratory of Water Resource Utilization and Environmental Pollution Control,

Shenzhen 518055, China; 4.State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** High concentration of ammoniacal nitrogen is a key issue in the biological treatment of landfill leachate. A process combining “foam separation → coagulation sedimentation → calcium removal → micro/ultrafiltration” with membrane absorption deamination is proposed to pretreat landfill leachate to ensure the stable operation of the subsequent biochemical treatment system. Results show that membrane absorption pretreatment can effectively reduce the contents of surfactants, macromolecular organic matters, suspended particulate matters and heavy metals in landfill leachate, making the residual contents of Zn, Cu and Pb meet the emission requirements of China's pollution control standard for domestic waste landfill (GB16889—2008). Landfill leachate is continuously treated by using 4-stage hollow fiber membrane modules in series under the conditions that pH and flow rate of leachate are 11.5 and 3.6 cm·s<sup>-1</sup>, respectively, the concentration and flow rate of absorption solution are 2 mol·L<sup>-1</sup> and 1.1 cm·s<sup>-1</sup>, respectively. The removal rate of ammoniacal nitrogen exceeds 97%, the concentration of ammonia nitrogen in effluent is always lower than 50 mg·L<sup>-1</sup>, and the membrane flux remains basically stable at 3.0~3.2 mg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>.

**Key words:** membrane absorption; landfill leachate; pre-treatment; high concentration of ammoniacal nitrogen; combined process

垃圾渗滤液中过高的氨氮浓度易导致废水C/N比降低、营养比例失衡,严重影响生化处理系统的稳定运行<sup>[1]</sup>。目前,常用的氨氮脱除技术包括吹脱(汽提)法<sup>[2]</sup>、化学沉淀法<sup>[3]</sup>、催化氧化法<sup>[4]</sup>和膜吸收<sup>[5]</sup>等。其中,膜吸收法是膜分离技术与气体吸收技术相结合的新型处理技术,具有设备简单、能耗低、抗冲击能力强等优点,适用于各种高氨氮废水的

处理<sup>[6-7]</sup>。陈卫文<sup>[8]</sup>采用多级并联3级串联的疏水性PTFE膜组件构建高质量浓度(5 000 mg/L)氨氮废水处理系统,经常温常压处理后氨氮质量浓度可降低至40~60 mg/L,可满足后续生化处理进水要求。李金忠等<sup>[9]</sup>利用脱氨膜集成装置吸收高质量浓度氨氮,44℃条件下氨氮质量浓度由3 200~4 000 mg/L骤降至50~70 mg/L,去除率高达98.49%。

收稿日期:2022-07-20;修回日期:2023-04-10

基金项目:可持续发展科技专项(KCXFZ202002011006362)

作者简介:杨跃(1981-),女,博士,高级工程师,研究方向为污水处理与资源化,232828123@qq.com;王宏杰(1983-),男,博士,研究员,研究方向为污水处理与资源化、海绵城市技术开发与应用及水环境生态修复,通讯联系人,whj1533@qq.com。

就垃圾渗滤液而言,其污染物组分尤为复杂,其中油性物质和表面活性剂易使疏水性膜丝亲水化;悬浮物和胶体易在膜表面沉积结垢并堵塞膜孔;高质量浓度有机物易吸附在膜表面造成膜污染,不利于膜吸收效能的提升<sup>[10-12]</sup>。设置前处理工艺如絮凝沉淀、气浮、微滤、臭氧氧化等是保障膜吸收正常运行的必要步骤<sup>[13]</sup>。然而,截止目前涉及垃圾渗滤液膜吸收法脱氮的集成工艺研究相对较少,尤其针对实际废水的处理。

为此,笔者根据南方城市生活垃圾渗滤液水质特点,采用“泡沫分离→混凝沉淀→除钙→微/超滤”工艺进行前处理,在此基础上系统研究不同因素对膜吸收法处理垃圾渗滤液效能的影响,并考察了其连续运行效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料及试剂

硫酸( $H_2SO_4$ )、氢氧化钠( $NaOH$ )、碳酸钠( $Na_2CO_3$ )、氢氧化钙( $Ca(OH)_2$ )、硫化钠( $Na_2S$ )、酒石酸钾钠( $C_4H_4O_6KNa \cdot 4H_2O$ )、碘化钾( $KI$ )、碘化汞( $HgI_2$ )等,均为分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司生产。聚丙烯中空纤维膜组件,浙江新辉膜科技有限公司生产。

垃圾渗滤液取自深圳市某生活垃圾填埋场,其水质特性如表1所示,该渗滤液含有大量有机物、氨氮和SS,水质呈弱酸性,重金属中Ni和Zn的质量浓度相对较高。

表1 垃圾渗滤液水质情况

水质指标	范围	平均值
$COD/(mg \cdot L^{-1})$	40 000~46 000	43620
$\rho(NH_4^+-N)/(mg \cdot L^{-1})$	1 600~1 900	1780
$TP/(mg \cdot L^{-1})$	75~85	79.6
$SS/(mg \cdot L^{-1})$	2 300~2 500	2 430
pH	5.8~6.6	6.3
$\rho(Cu)/(mg \cdot L^{-1})$	0.3~0.5	0.4
$\rho(Pb)/(mg \cdot L^{-1})$	0.15~0.23	0.20
$\rho(Ni)/(mg \cdot L^{-1})$	5~7	5.8
$\rho(Cd)/(mg \cdot L^{-1})$	0.01~0.02	0.013
$\rho(Zn)/(mg \cdot L^{-1})$	23~25	24.2

### 1.2 实验装置与方法

采用“泡沫分离→混凝沉淀→除钙→微/超滤”工艺对垃圾渗滤液进行膜吸收前处理。首先,通过

细孔鼓泡方式分离去除垃圾渗滤液中表面活性物质;然后,利用 $Ca(OH)_2$ 调节废水pH至12,投加500 mg/L PAC,快速搅拌(100 r/min)10 min后进行抽滤;随后,在滤液中投加适量 $Na_2CO_3$ 以去除酸碱调节过程引入的 $Ca^{2+}$ ;最后,对垃圾渗滤液进行微/超滤物理筛分处理,以去除残存的悬浮杂质和大分子物质。

后续膜吸收法处理流程如图1所示。将上述垃圾渗滤液与吸收液( $H_2SO_4$ 溶液)分别泵入膜组件壳程和管程下端。在沿PP中空纤维膜流动过程中,吸收液与扩散至膜表面的 $NH_3$ 反应生成硫酸铵 $[(NH_4)_2SO_4]$ ,并回流至吸收液储槽,而处理后的垃圾渗滤液则流入垃圾渗滤液出水槽。

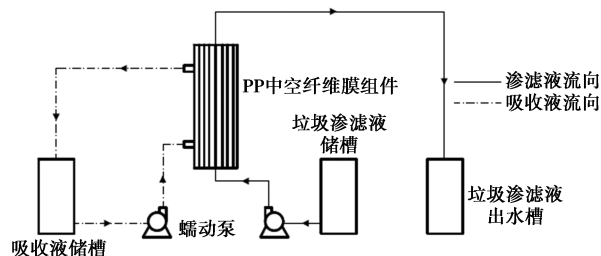


图1 膜吸收法连续处理垃圾渗滤液流程

### 1.3 分析方法

废水常规指标如COD、 $NH_4^+-N$ 、TP、SS和pH等参照《水与废水分析检测方法》(第4版)进行测定;重金属含量采用电感耦合等离子法进行测定。以氨氮去除率( $\eta, \%$ )、总传质系数( $K, m/s$ )和过膜通量 $[J, mg/(m^2 \cdot s)]$ 为指标,评估膜吸收处理垃圾渗滤液效能,其计算式分别为:

$$\eta = [(C_0 - C_t)/C_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$K = (Q \ln C_0/C_t)/A \quad (2)$$

$$J = [(C_0 - C_t) \cdot V]/At \quad (3)$$

式中: $C_0$ 、 $C_t$ 分别为氨氮起始质量浓度和 $t$ 时刻瞬时质量浓度,mg/L; $Q$ 为垃圾渗滤液流量, $m^3/s$ ;A为有效膜面积, $m^2$ ;V为渗滤液体积, $m^3$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 膜吸收前处理工艺

膜吸收前处理对垃圾渗滤液水质特性的影响如表2所示。从表2中可以看出,经泡沫分离和絮凝沉淀处理后,垃圾渗滤液中油类等表面活性物质质量浓度大幅减少,表面张力由35 mN/m增加至55 mN/m以上,尽管微/超滤过程可以通过物理筛分作用去除部分表面活性物质,但对表面张力的提

升有限。絮凝沉淀有助于降低垃圾渗滤液中 SS 质量浓度;在上浮气泡吸附和  $\text{CaCO}_3$  沉降絮凝作用下,泡沫分离和除钙过程亦表现出不同程度的 SS 削减作用,而微/超滤过程则对 SS 去除不明显。经膜吸收前处理后,垃圾渗滤液中 SS 质量浓度降低至 900 mg/L 左右,去除率可达 64%,表观颜色由深黑色逐渐转变为透明黄褐色。为降低  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加产生的盐入效应,投加  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  以去除额外引入的  $\text{Ca}^{2+}$ ;经微/超滤进一步处理后,废水中  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度可低至 1 mg/L。氨氮的去除主要集中在絮凝沉淀阶段,在该阶段其下降幅度高达 250 mg/L,这是因为垃圾渗滤液 pH 的升高有助于氨氮不断以游离氨的形式挥发至空气中。*COD* 主要依赖于泡沫分离和絮凝沉淀过程,但削减程度有限。经微/超滤处理后,垃圾渗滤液中氨氮和 *COD* 质量浓度可分别降低至 1350 mg/L 和 37600 mg/L 左右,分子质量则低于 10 kDa。此外,膜吸收前处理工艺还有助于去除垃圾渗滤液中绝大多数重金属,尤其是 Zn、Cu 和 Pb 等,如表 3 所示,其出水质量浓度均满足生活垃圾填埋污染控制标准(GB 16889—2008)排放要求。

表 2 膜吸收前处理对垃圾渗滤液水质特性的影响

水质指标	表面张力/ ( $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	SS/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{Ca}^{2+})$ / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	<i>COD</i> / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
原水	35.1	2440.0	156.7	1742.0	43031.0
泡沫分离后	49.0	2150.0	154.3	1675.0	41259.9
絮凝沉淀后	55.8	993.3	2156.7	1426.3	38139.5
除钙后	—	856.7	1.1	—	—
滤后	58.2	843.3	1.0	1351.3	37658.0

表 3 膜吸收前处理对垃圾渗滤液中重金属的去除效果

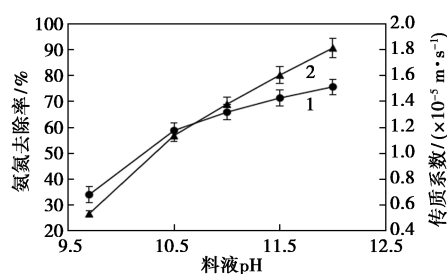
重金属 种类	重金属质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )					去除率/ %
	原水	碱处 理后	混凝 沉淀后	微/超滤	排放 标准	
Zn	24.14	1.60	0.72	0.35	—	99
Cu	0.40	0.10	未检出	未检出	—	100
Pb	0.20	0.05	0.02	0.02	0.1	90
Ni	5.78	3.97	3.41	1.06	—	82
Cd	0.013	0.007	0.005	0.005	0.01	62

## 2.2 膜吸收法处理垃圾渗滤液效能研究

### 2.2.1 垃圾渗滤液侧参数

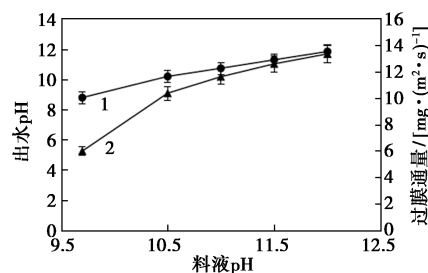
利用膜吸收法对垃圾渗滤液进行脱氨处理,不

同 pH 条件下膜吸收法处理垃圾渗滤液的氨氮去除率、传质系数和过膜通量如图 2 所示。从图 2 中可以看出,随着垃圾渗滤液 pH 的升高,氨氮去除率、传质系数和过膜通量均有所增加。根据氨水的电离平衡式( $[\text{NH}_3]/[\text{NH}_4^+] = 1.0 \times 10^{\text{pH}-9.255}$ ),大量离子态  $\text{NH}_4^+$  在碱性条件下易转化为  $\text{NH}_3$ ,这有助于增加膜两侧  $\text{NH}_3$  浓度差,促进传质过程的发生,提高膜过滤通量。尽管垃圾渗滤液 pH 升高可以有效提高氨氮去除效能,但伴随出水 pH 的升高,综合考虑  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加量及膜吸收后续生化处理工艺段的 pH 回调成本,以 pH 为 11.5 左右为宜。



1—去除率;2—传质系数

(a) pH 对氨氮去除率和传质系数的影响



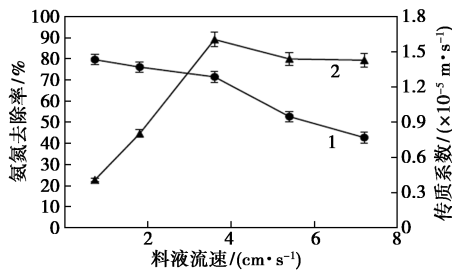
1—出水 pH;2—过膜能量

(b) pH 对出水 pH 和氨氮过膜通量的影响

图 2 垃圾渗滤液 pH 对氨氮去除效能的影响

垃圾渗滤液流速对氨氮去除率、传质系数和过膜通量的影响如图 3、表 4 所示。从图 3、表 4 中可以看出,随着渗滤液流速的升高,氨氮去除率逐渐下降,过膜通量不断升高,而传质系数则呈现先升高后降低的变化趋势。高流速条件下膜组件内渗滤液停留时间缩短、气液两相接触时间不足是导致氨氮去除率逐渐降低的重要原因。就膜吸收法总传质阻力( $1/K$ )而言,其主要来源于垃圾渗滤液侧边界层阻力( $1/K_L$ )、吸收液侧边界层阻力( $1/K_X$ )和膜组件传质阻力( $1/K_M$ )<sup>[14]</sup>。对于相同膜组件,吸收液侧  $\text{NH}_3$  与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  可迅速反应生成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  时, $1/K_X$  和  $1/K_M$  可忽略不计,此时总传质阻力( $1/K$ )主要与垃圾渗滤液侧边界层阻力( $1/K_L$ )有关。根据流体

力学中传质系数与流速之间的关系: $K \cdot (d/D) = 1.64 \cdot (d^2 v / DL)^{1/3}$ ,其中, $d$ 、 $L$ 、 $D$ 分别为膜组件内径(m)、有效长度(m)及挥发性组分扩散系数( $m^2/s$ ), $v$ 为溶液流速( $m/s$ )<sup>[15]</sup>,传质系数与溶液流速的1/3次方成正比。受湍流扰动影响,随着流速的增加,垃圾渗滤液侧边界层厚度和浓差极化程度不断减小<sup>[16]</sup>, $NH_3$ 扩散系数相应增大,因而导致总传质阻力减小、传质系数增大、过膜通量增加。然而,当流速过高时( $>3.6 cm/s$ ),垃圾渗滤液侧的边界层厚度和浓差极化降至最低,且传质系数与溶液流速的1/3次方不再符合正比关系<sup>[17]</sup>,此时传质系数表现出下降趋势。因此,最佳流速选择 $3.6 cm/s$ 。



1—去除率;2—传质系数

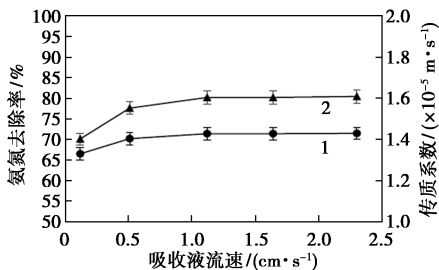
图3 垃圾渗滤液流速对氨氮去除率和传质系数的影响

表4 垃圾渗滤液流速对氨氮过膜通量的影响

料液流速/( $cm \cdot s^{-1}$ )	0.72	1.8	3.6	5.4	7.2
过膜通量/[ $mg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ ]	2.8	6.3	12.6	14.0	15.1

### 2.2.2 吸收液侧参数

吸收液流速对氨氮去除率、传质系数及过膜通量的影响如图4、表5所示。从图4、表5中可以看出,当吸收液流速由 $0.12 cm/s$ 增加至 $1.1 cm/s$ 时,氨氮去除率、传质系数和过膜通量分别提高 $4.9\%$ 、 $14.5\%$ 和 $7\%$ ;继续增加流速,三者基本保持



1—去除率;2—传质系数

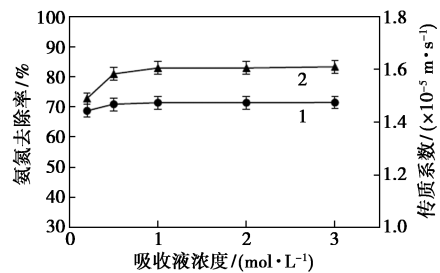
图4 吸收液流速对氨氮去除率和传质系数的影响

表5 吸收液流速对氨氮过膜通量的影响

吸收液流速/( $cm \cdot s^{-1}$ )	0.12	0.51	1.12	1.64	2.3
过膜通量/[ $mg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ ]	5.88	6.21	6.31	6.31	6.32

不变。原因是 $H_2SO_4$ 与 $NH_3$ 之间的化学反应主要发生在微孔膜与吸收液的接触界面<sup>[18]</sup>,吸收液流速的提高可以降低吸收液侧的边界层厚度,加速吸收液与扩散至膜表面 $NH_3$ 的混合,但吸收液流速继续增大时,吸收液侧的传质已基本不受流速的影响。因此最佳流速选取 $1.1 cm/s$ 。

吸收液浓度对氨氮去除效能的影响如图5、表6所示。从图5、表6中可以看出,当吸收液浓度由 $0.2 mol/L$ 升高至 $1 mol/L$ 时,氨氮去除率、传质系数和过膜通量分别由 $68.7\%$ 、 $1.5 \times 10^{-5} m/s$ 、 $6.1 mg/(m^2 \cdot s)$ 增加至 $71.4\%$ 、 $1.6 \times 10^{-5} m/s$ 、 $6.3 mg/(m^2 \cdot s)$ ,随后基本保持不变。原因是 $H_2SO_4$ 浓度较低时,膜内侧扩散至吸收液的 $NH_3$ 无法完全与 $H_2SO_4$ 反应,导致膜两侧的 $NH_3$ 浓度差较低, $NH_3$ 扩散速度减慢;当 $H_2SO_4$ 浓度增加至 $1 mol/L$ 时,其可以实现对 $NH_3$ 的完全吸收,有利于硫酸铵的回收利用<sup>[8]</sup>;继续增加 $H_2SO_4$ 浓度则对氨氮的去除没有显著影响。高 $H_2SO_4$ 浓度可以降低膜组件的更换频率,但也会腐蚀膜组件外壳及膜丝<sup>[19]</sup>,从操作安全、成本及产物回收角度考虑,确定硫酸吸收液浓度为 $2 mol/L$ 。



1—去除率;2—传质系数

图5 吸收液浓度对氨氮去除率和传质系数的影响

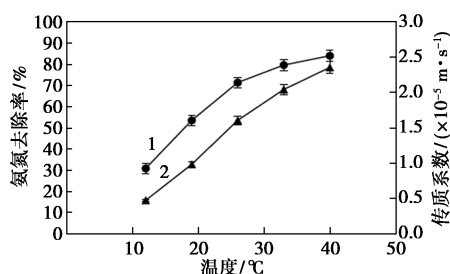
表6 吸收液浓度对氨氮过膜通量的影响

吸收液浓度/( $mol \cdot L^{-1}$ )	0.2	0.5	1	2	3
过膜通量/[ $mg \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$ ]	6.07	6.27	6.31	6.31	6.32

### 2.2.3 温度对氨氮去除效能的影响

温度对氨氮去除率、传质系数及过膜通量的影响如图6、表7所示。从图6、表7中可以看出,随着

温度的升高,氨氮去除率、传质系数和过膜通量均呈上升趋势。当温度由 12℃ 升高至 40℃ 时,氨氮去除率、传质系数和过膜通量分别由 30.8%、 $0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、 $5.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  提高至 80.1%、 $2.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、 $14.9 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。研究表明,传质系数  $K$  的自然对数与绝对温度的负倒数呈线性关系<sup>[20]</sup>,升高温度一方面有助于加快  $\text{NH}_3$  向气液两相接触界面扩散,增大垃圾渗滤液侧传质推动力<sup>[21]</sup>;另一方面,升温条件下吸收液侧  $\text{H}_2\text{SO}_4$  与  $\text{NH}_3$  的反应速度加快,也进一步促进了吸收液侧传质过程的发生。然而,高温条件不仅对膜吸收装置要求有所提高,也会增加系统能耗,因此综合考量选取温度为 26℃。



1—去除率;2—传质系数

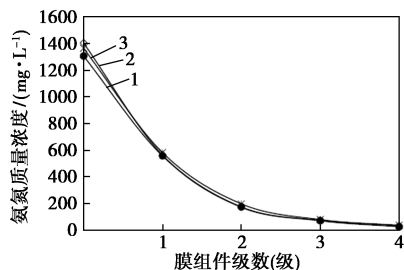
图 6 温度对氨氮去除率和传质系数的影响

表 7 温度对氨氮过膜通量的影响

温度/°C	12	19	26	33	40
过膜通量/ $[\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}]$	5.44	9.46	12.62	14.09	14.87

### 2.2.4 膜组件级数

以氨氮质量浓度 50 mg/L 为处理目标,考察相同条件下垃圾渗滤液重复进入同一膜组件所需的膜组件级数。3 次重复实验结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,经 4 级膜组件处理后,氨氮质量浓度由 1400 mg/L 左右稳定降低至 50 mg/L 以下。



1—第 1 次;2—第 2 次;3—第 3 次

图 7 膜组件级数对氨氮去除效果的影响

### 2.3 连续运行效能考察

采用 4 级串联的中空纤维膜组件对预处理后的

垃圾渗滤液进行连续运行处理,考察膜吸收系统长期运行稳定性。考虑到垃圾渗滤液组分复杂,容易造成膜污染,每次实验后利用清水对膜组件进行清洗直至出水中无氨氮残留。膜吸收法处理垃圾渗滤液长期运行结果如表 8 所示。从表 8 中可以看出,随着膜吸收系统处理水量的增加,出水氨氮质量浓度略有升高,但均保持在 50 mg/L 以下;由于污染负荷的增加,系统传质系数和氨氮去除率呈持续下降趋势;而过膜通量基本稳定,始终保持在  $3.0 \sim 3.2 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。当处理水量增加至  $550 \text{ L}/\text{m}^2$  时,氨氮去除率仍达到 97.05%,表明膜吸收法处理垃圾渗滤液具有良好的运行效能。

表 8 膜吸收法处理垃圾渗滤液长期运行结果

实验次数	处理水量/ $(\text{L}\cdot\text{m}^{-2})$	进水氨氮/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	出水氨氮/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	去除率/%	传质系数/ $(\times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$	过膜通量/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
1	50	1307	24.7	98.11	9.19	3.0
2	100	1424	26.8	98.12	9.20	3.2
3	150	1341	29.6	97.79	8.83	3.0
4	200	1369	31.9	97.67	8.70	3.1
5	250	1405	32.3	97.70	8.73	3.2
6	300	1437	34.1	97.63	8.66	3.2
7	350	1350	36.4	97.30	8.36	3.0
8	400	1370	36.9	97.31	8.37	3.1
9	450	1400	37.5	97.32	8.38	3.2
10	500	1365	36.1	97.36	8.41	3.1
11	550	1320	38.9	97.05	8.16	3.0

## 3 结论

采用“泡沫分离→混凝沉淀→除钙→微/超滤”预处理和膜吸收法脱氨组合工艺处理城市垃圾渗滤液。经预处理后,垃圾渗滤液水质得以明显改善,呈透明黄褐色,表面张力高于 55 mN/m,  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度低于 1 mg/L, 分子质量小于 10 kDa,  $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{COD}$  质量浓度分别为 1 400 mg/L 和 37 000 mg/L 左右, 重金属含量满足生活垃圾填埋污染控制标准 (GB 16889—2008)。在垃圾渗滤液流速为 3.6 cm/s、 $\text{pH}=11.5$ 、吸收液流速为 1.1 cm/s、浓度为 2 mol/L 硫酸溶液条件下,利用 4 级串联的中空纤维膜组件进行后续脱氨处理,垃圾渗滤液中氨氮质量浓度可长期稳定在 50 mg/L 以下。

## 参考文献

- [1] 程家丽,魏世强,黄启飞.垃圾渗滤液中氨氮脱除技术研究进展[J].环境科学与管理,2006,31(4):125-128.
- [2] 罗圣熙,杨春平,龙智勇,等.离子交换树脂对高浓度氨氮废水的吸附研究[J].环境科学学报,2015,(8):2457-2463.
- [3] 苏丽娜.物化法在治理环境中高氨氮废水的应用探讨[J].山西化工,2016,(4):15-16.
- [4] Lei C S, Ma J F, Li D L, *et al.* Composite denitrification reagent for high concentration ammonia removal by air stripping[J]. Science Bulletin, 2010, 55(24): 2657-2661.
- [5] 唐娜,曹莎,熊清华.溴水的膜吸收性能研究[J].膜科学与技术,2012,(1):79-85.
- [6] Bi Q, Chen C, Wei Z, *et al.* Membrane absorption method for the removal of ammonia nitrogen in oil shale destructive distillation wastewater[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2015, 25(3): 29-31.
- [7] Liu H Y, Shi-Jun H E, Yang C P, *et al.* Removal of cyanide and ammonia nitrogen from acrylonitrile wastewater by membrane absorption process[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(15): 86-88.
- [8] 陈卫文.膜吸收技术用于处理高氨氮废水的研究[J].膜科学与技术,2016,36(5):95-100.
- [9] 李金忠,杨虎君,苏克钢,等.膜吸收法去除废水氨氮的试验研究[J].广东化工,2021,48(17):66-68+57.
- [10] 郭鹏.不同填埋期垃圾渗滤液生化-物化组合处理技术研究[D].济南:山东大学,2009:84.
- [11] Wu L N, Tu N N, Cheng J K, *et al.* Research of the characteristics and treatment technology of landfill leachate [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 31(14): 136-143.
- [12] 刘疆鹰,徐迪民,赵由才,等.大型垃圾填埋场渗滤水氨氮衰减规律[J].环境科学学报,2001,(3):323-327.
- [13] 郭智,邱明建,徐伟,等.膜吸收法去除垃圾渗滤液中氨氮的技术进展[J].现代化工,2018,38(4):46-49.
- [14] Xu Z H, Lei L, Shen Z S. Treatment of praziquantel wastewater using the integrated process of coagulation and gas membrane absorption[J]. Water Research, 2005, 39(10): 2189-2195.
- [15] Rathore N S, Sonawane J V, Gupta S K, *et al.* Separation of uranium and plutonium from aqueous acidic wastes using a hollow fiber supported liquid membrane [J]. Separation Science and Technology, 2005, 39(6): 1295-1319.
- [16] 李建峰,于水利,姚加兴.膜吸收法分离回收废水中氨氮的研究[J].中国给水排水,2017,33(5):80-84.
- [17] 侯惠惠.膜吸收法处理高浓度氨氮废水研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [18] Tan X Y, Tan S P, Teo W K, *et al.* Polyvinylidene fluoride (PVDF) hollow fibre membranes for ammonia removal from water [J]. Journal of Membrane Science, 2006, 271(1-2): 59-68.
- [19] 王冠平,方喜玲,施汉昌,等.膜吸收法处理高氨氮废水的研究[J].环境工程学报,2002,3(7):56-60.
- [20] 于伯杉,仇琦.气态膜的传质系数与温度的关系[J].水处理技术,1988,(5):30-35.
- [21] 高涛,胡兆吉.高氨氮含量废水组合吹脱处理工艺实验研究[J].水处理技术,2022,48(2):44-48. ■
- [6] Deng N P, Liu Y, Li Q X, *et al.* Functional mechanism analysis and customized structure design of interlayers for high performance Li-S battery[J]. Energy Storage Materials, 2019, 23(23): 314-349.
- [7] Jeoun Y, Kim M S, Lee S H, *et al.* Lean-electrolyte lithium-sulfur batteries: Recent advances in the design of cell components [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450: 138209.
- [8] Xiang Y Y, Wang Z, Qiu W J, *et al.* Interfacing soluble polysulfides with a SnO<sub>2</sub> functionalized separator: An efficient approach for improving performance of Li-S battery [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 563: 380-387.
- [9] Wang Y, Deng Z, Huang J Y, *et al.* 2D Zr-Fc metal-organic frameworks with highly efficient anchoring and catalytic conversion ability towards polysulfides for advanced Li-S battery [J]. Energy Storage Materials, 2021, 36: 466-477.
- [10] Wang Y, Huang J Y, Lu J G, *et al.* Fabricating ultrathin ZrB<sub>2</sub>/Graphene oxide/carboxymethocel layer onto cathode as effective polysulfide shuttling barrier for Li-S battery [J]. Electrochimica Acta, 2019, 321: 134694.
- [11] 李英杰,田森林,宁平.二茂铁表面活性剂的电化学行为[J].化学研究,2010,21(1):59-63.
- [12] Bacem Z, Anne-Marie H, Azzedine B, *et al.* Charge transfer and band gap opening of a ferrocene/graphene heterostructure [J]. Carbon, 2019, 153: 557-564.
- [13] Karthick N A, Thangappan R, Arivanandhan M, *et al.* A facile synthesis of ferrocene functionalized graphene oxide nanocomposite for electrochemical sensing of lead [J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2018, 28: 1021-1028.
- [14] 邓磊,徐赛男,吴锋,等.金属有机骨架材料在锂硫电池正极中的应用[J].中国材料进展,2020,39(7):9-11.
- [15] Cao X Y, Zhang M G, Zhu F S, *et al.* Surfactant modified CNTs@S as cathode materials for high rate performance lithium sulfur batteries [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 911: 165101.
- [16] Sammy S D, Van N T, Craig A R, *et al.* Redox-dependent surface tension and surface phase transitions of a ferrocenyl surfactant: Equilibrium and dynamic analyses with fluorescence images [J]. Langmuir, 2003, 19: 8292-8301.
- [17] Song M K, Zhang Y, Elton J C, *et al.* Long-life, high-rate lithium/sulfur cell: A multifaceted approach to enhancing cell performance [J]. Nano Letter, 2013, 13(12): 5891-5899.
- [18] 张宝宏,张光绪,殷金玲,等.表面活性剂对双电层电容器性能的影响[J].电源技术,2007,31(6):484-487.
- [19] Zhi W S, Jakob K, Colin F D, *et al.* Combining theory and experiment in electrocatalysis: Insights into materials design [J]. Science, 2017, 355(6321): eaad4998.
- [20] Mi Y Y, Liu W, Yang K R, *et al.* Ferrocene-promoted long-cycle lithium-sulfur batteries [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2016, 55(47): 14818-14822. ■

(上接第175页)