



移动扫码阅读

王志伟, 同济大学环境科学与工程学院院长, 教授、博士生导师, 国家杰出青年基金获得者。主要从事污水处理与资源化研究工作。近年来主持了国家重点研发项目、国家杰出青年基金、国家自然科学基金重点项目等, 深入开展了膜法污水处理与资源化理论探索、技术创新与工程应用, 构建了膜法污水处理与资源化能源化的方法、材料、反应器及工艺技术。在《Science Advances》《Environmental Science & Technology》《Water Research》等期刊发表论文 200 余篇, 论文在 Google Scholar 引用 14 000 余次 (H-index 66), 入选 Elsevier 环境科学领域中国高被引学者榜单, 以第一完成人获教育部科技进步一等奖等奖励。获授权国家/国际发明专利 40 余件, 主编团体标准 4 项, 出版专著 3 部。兼任国际水协会 (IWA) Fellow, IWA 中国青年委员会主席 (至 2020 年)、中国环境科学学会常务理事等学术兼职和《Chinese Chemical Letters》期刊副主编、《Desalination》《Environmental Research》等 SCI 期刊编委。

王玲娜, 田晨昕, 戴若彬, 等. 水处理寿命终点膜再生循环利用技术研究进展[J]. 能源环境保护, 2023, 37(1): 91-101.

WANG Lingna, TIAN Chenxin, DAI Ruobin, et al. Research progress on regeneration and recycling technology of end-of-life membranes for water treatment[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(1): 91-101.

水处理寿命终点膜再生循环利用技术研究进展

王玲娜¹, 田晨昕¹, 戴若彬¹, 王志伟^{1, 2, *}

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092;

2. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:膜分离技术因具有分离效率高、过程无相变、易于自动化控制等优点, 在污/废水处理、水回用、海水淡化、苦咸水处理等领域应用广泛。在“双碳”战略布局下, 膜法水处理技术须向可持续发展方向迈进。当膜到达寿命终点时, 采用适当方法对其进行处理回收, 从而循环利用膜本体或膜配件, 能有效减少填埋或焚烧等处理处置方式带来的资源浪费和环境危害。本文综述了目前寿命终点膜的主流再生循环利用技术, 将膜本体的循环利用技术划分为直接循环利用技术与间接循环利用技术, 重点综述了间接循环利用技术中寿命终点高压膜降级再生、寿命终点低压膜升级再生与寿命终点膜平级再生的前沿进展, 并系统总结了寿命终点膜再生前后的水渗透率、截留率等分离性能指标, 同时概述了寿命终点膜配件的循环利用技术。最后, 提出了水处理寿命终点膜再生循环利用技术的未来发展方向。

关键词:水处理; 寿命终点膜; 再生循环利用技术; 水渗透率; 截留率

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2023)0091-11

Research progress on regeneration and recycling technology of end-of-life membranes for water treatment

WANG Lingna¹, TIAN Chenxin¹, DAI Ruobin¹, WANG Zhiwei^{1, 2, *}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Membrane separation technology is widely used in wastewater treatment, water reuse, sea-water desalination, brackish water treatment and other fields, due to its advantages of high separation efficiency, no phase change and facile automation control. Under the guidance of the policy aiming at carbon emission peak and carbon neutrality, membrane-based wastewater treatment technology has to develop in the direction of sustainable development. It is of great environmental benefits to reuse and recycle end-of-life membranes, which enables the recycling of membranes or membrane components

收稿日期: 2022-12-12; 责任编辑: 蒋雯婷

DOI: 10.20078/j.eep.20230125

基金项目: 国家自然科学基金(51925806, 52200108); 上海市扬帆计划(22YF1450700)

作者简介: 王玲娜(1999—), 女, 安徽铜陵人, 硕士研究生在读, 研究方向为寿命终点膜材料循环利用。E-mail: 2130562@tongji.edu.cn

通讯作者: 王志伟(1980—), 男, 河南商丘人, 教授, 研究方向为污水处理与资源化。E-mail: zwwang@tongji.edu.cn

and reduces the waste of resources and environmental hazards resulting from landfill or incineration. This paper reviews various regeneration and recycling technology of end-of-life membranes. The recycling technology of membranes are classified into direct recycling technology and indirect recycling technology. Recent advances in the indirect recycling technology including downcycling of end-of-life high-pressure membranes, upcycling of end-of-life low-pressure membranes and recycling after treatment of end-of-life membranes are systematically summarized. The properties of the regenerated membranes based on water permeance and rejection rate are evaluated. Meanwhile, the recycling technology of end-of-life membrane components is briefly outlined. The future development directions of the recycling technology of end-of-life membranes are proposed.

Keywords: Water treatment; End-of-life membranes; Regeneration and recycling technology; Water permeance; Rejection rate

0 引言

膜分离技术凭借其分离效率高、过程无相变、易于自动化管理等优势,在污水处理和回用中应用愈发广泛^[1-5]。水处理膜分离过程通常以压力差作为驱动力,根据分离精度常划分为微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)、反渗透(RO)等^[6-8],以匹配不同污水处理的需求。然而,膜分离过程中膜污染不可避免。由于污染物在膜面或膜孔内的沉积与黏附,进而形成膜面滤饼层或引起膜孔隙堵塞,导致膜水渗透率下降与截留率的变化^[9]。虽然膜清洗能去除膜污染中的可逆污染与不可逆污染,但由于不可恢复污染的累积,膜性能也会逐步恶化,直至最终无法满足产水需求^[10-11],即达寿命终点。此外,因膜破损、配件损坏等原因,也可能导致膜到达寿命终点。

当膜到达寿命终点,需废弃现有膜组件并更换新膜。目前,行业对于废弃膜的处理处置方法通常为传统的填埋、焚烧等^[12-13]。水处理寿命终点膜多由聚合物构成,常归为惰性固体废物填埋处理,占用大量土地资源^[14]。而寿命终点膜的焚烧处理中,若对燃烧过程控制不当,会排放有毒气体及其他有害物质^[15]。可见,传统的寿命终点膜处理处置方式易造成土地与资源浪费,给环境带来潜在负面影响,不利于膜法水处理工艺的可持续发展。近年来,通过再生循环利用延长膜的使用寿命已成为寿命终点膜绿色处理处置的新兴途径和研究热点^[16]。通过寿命终点膜再生循环利用,不仅能削减碳排,降低环境影响,也能降低企业长期用膜成本,利于构建水处理膜材料应用新范式(图1),从而助力膜法污水处理技术绿色低碳发展。

本文综述了目前水处理寿命终点膜再生循环

利用的主流技术,着重阐述了间接循环利用技术中寿命终点高压膜的降级再生、寿命终点低压膜的升级再生与寿命终点膜的平级再生相关前沿进展,并系统分析了再生膜的水渗透率、截留率等分离性能指标,最后展望了寿命终点膜再生循环利用技术的未来发展方向。

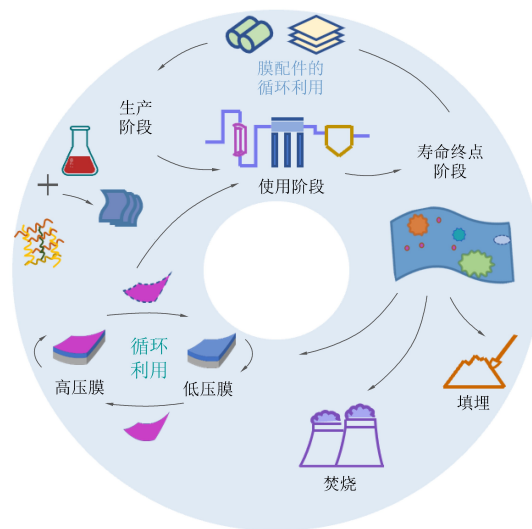


图1 基于寿命终点膜循环利用的水处理膜材料应用新范式
Fig. 1 New application paradigm of membrane materials for water treatment based on recycling technology of end-of-life membranes

1 寿命终点膜循环利用技术分类

膜元件或膜组件一般由膜本体与其对应的配件组成。在循环利用膜本体时,根据是否需要经过一定的化学前处理,分为直接循环利用与间接循环利用。在间接循环利用中,根据再生膜与初始膜相比是否发生了高低压膜形式的转化,又进一步分为寿命终点高压膜的降级再生、寿命终点低压膜的升级再生与寿命终点膜的平级再生(图2)。

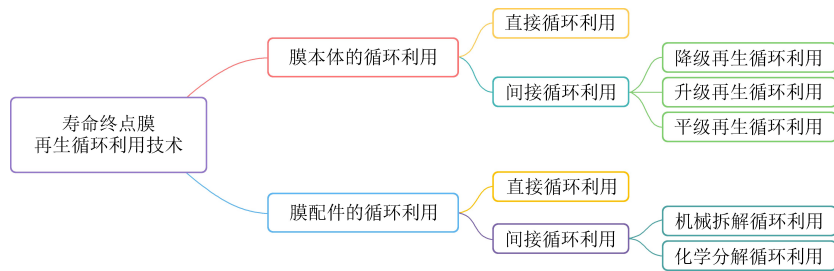


图2 寿命终点膜再生循环利用技术分类

Fig. 2 Classification of regeneration and recycling technology of end-of-life membranes

当寿命终点膜不再适用于原有工艺系统的处理要求,但若经测试评估发现依然保留一定的截留率等过滤性能,则可考虑直接循环利用^[13]。目前,文献中直接循环利用主要针对报废 RO 膜,无需额外的清洗或处理,将其直接用作 NF 膜^[12],在海水预处理或出水水质要求较低的其他应用中循环利用^[17-19]。直接循环利用不涉及到额外的化学处理及土地占用等问题,所获得的环境效益较大。寿命终点膜若出现分离层破损严重、膜结构老化等情况,经评估后不再适用于直接循环利用,则可采用间接循环利用技术。其中,寿命终点高压膜的降级再生是指通过化学药剂将废弃 RO 膜或 NF 膜转化为 UF 膜^[20],由此转化后的再生膜与市场中的 UF 新膜相比具有同等水平的过水能力和污染物截留效果^[21-22]。升级再生循环利用是指寿命终点低压膜经表面清洗修复后,通过界面聚合在膜基底上形成聚酰胺分离层而再生为高压膜。寿命终点膜的平级再生目前主要实践集中于寿命终点低压膜,在经过一定的化学处理后,修复再生后的膜未

改变组件形式而可直接投入原工艺生产应用。

除了上述方法对膜本体进行再生利用,膜配件的充分回收同样也能支撑寿命终点膜的循环利用。寿命终点膜配件的主要回收方式为机械拆解循环利用,将膜元件经拆卸和分类,单独考虑每个膜配件对于机械回收的潜在适用性。但由于机械拆解过程难以应用于混合聚合物和受污染的材料等,膜配件的循环利用是视为需要耗费劳动力和高昂成本的资源循环利用过程^[13]。

Lawler 等^[20]采用生命周期评价手段,量化比较了不同寿命终点 RO 膜处理处置方案的环境影响,如图 3(a)所示。结果表明,直接循环利用是对环境比较有利的选择,其次是降级再生利用,而填埋或焚烧处理是最不利的选择^[20],几种不同处理处置方式的优先级如图 3(b)所示。需注意,该研究并未将新兴的升级再生和平级再生技术考虑在内。不过,该研究仍能表明膜到达寿命终点时依然具有潜在利用价值,进一步证明对寿命终点膜进行再生循环利用具有重要的环境意义。

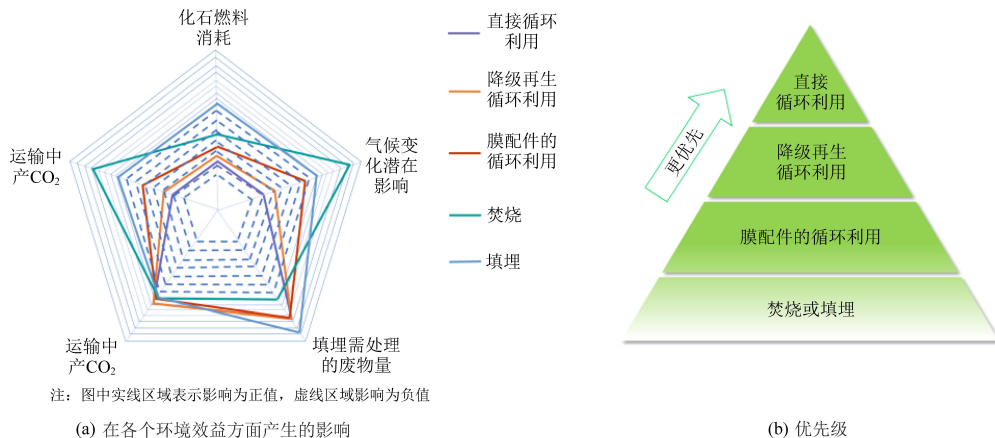


图3 寿命终点 RO 膜主要处理处置方式

Fig. 3 Main treatment and disposal methods of end-of-life RO membranes

2 寿命终点膜直接循环利用

目前,文献中有关寿命终点膜直接循环利用的研究主要集中于 RO 膜。RO 膜在污水深度处

理与回用、海水淡化、苦咸水处理等领域中发挥着重要作用,其中,以聚酰胺为活性层的薄膜复合膜占总量的 2/3 以上^[23],其通常包括如下结构:芳香族聚酰胺构成的超薄致密活性选择层(约

0.2 μm 厚),多孔基膜(约 40 μm 厚)和无纺布支撑层(120~150 μm 厚)。RO 膜到达寿命终点是由多种污染累积造成的,包括无机污染(主要是硅污染)、有机污染和生物污染,同时可能伴随着聚酰胺分离层的破损而导致盐截留率降低,无法满足产水要求^[11, 24]。据报道,全球每年有超过 84 万套 RO 膜组件报废,重量超过 1.4 万 t^[25],而在我国每年就有数十万的 8 英寸废旧 RO 膜亟待处理^[26]。在 2010 年 Ould 等^[12]对废弃 RO 膜进行拆解评估,发现其在未经任何处理时水渗透率 $[(2.1 \pm 0.1) \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}]$ 是原始膜 $[(1.0 \pm 0.1) \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}]$ 的 2 倍,盐截留率则在 35%~50%之间,且通过数学模型分析发现在废弃 RO 膜中对流传质占主导地位,证明该寿命终点 RO 膜已属于 NF 膜的范畴。

近年来,不少工程应用和实验研究验证了寿命终点 RO 膜直接循环利用的潜力。Awaleh 等^[27]直接循环利用了原先用于医疗废水和工业废水处理的寿命终点 RO 膜,与 MF 装置联合处理生活污水。处理后的出水电导率、浊度及总溶解盐量与进水水质相比分别降低了 75%~85%、96.7%和 95.4%,水中的总大肠菌群和粪大肠菌群平均含量在 254 CFU/100 mL 和 87 CFU/100 mL,出水水质完全符合世界卫生组织关于处理废水用于农业灌溉的标准(粪大肠杆菌群的几何平均值 $\leq 1 \times 10^3 \text{ CFU/100 mL}$ ^[28])。有研究^[29]测试了 4 种不同的寿命终点海水淡化 RO(SWRO)膜的水渗透率与盐截留率,其出水含盐量在 800~1 300 mg/L 左右,达到了农业用水标准。与两种不同的商用膜(苦咸水淡化 RO 膜(BW30)和 NF 膜(NF90))的性能相比,直接循环利用的寿命终点膜实现了 84%~92%的 NaCl 截留率,优于 2 种商用膜的截留效果。

3 寿命终点膜间接循环利用

3.1 寿命终点高压膜的降级再生循环利用

寿命终点高压膜的降级再生循环利用,常通过氧化药剂对聚酰胺致密层经部分或完全降解转化为再生 NF 膜或再生 UF 膜(图 4)。RO 膜的选择性和渗透性能主要取决于聚酰胺层的性质及制备过程^[30-36],而聚酰胺层暴露在一定浓度的氧化剂下易降解脱落,因此,针对寿命终点 RO 膜降级再生常通过氧化转化技术去除聚酰胺选择层^[37]。降级再生得到的低压膜在海水淡化预处理^[23]、地表水处理^[38]和湿法磷酸分离^[39]等方面的应用都

有相关研究报道。

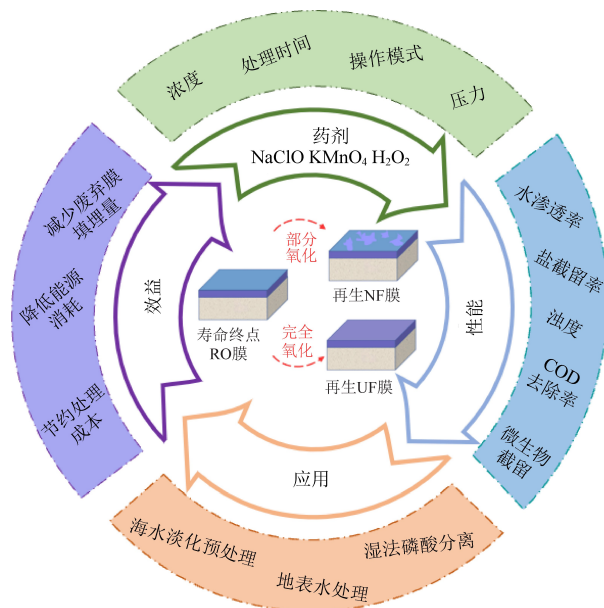


图 4 寿命终点高压膜的降级再生循环利用

Fig. 4 Downcycling of end-of-life high-pressure membranes

寿命终点高压膜降级再生所使用的氧化剂通常有次氯酸钠(NaOCl)、高锰酸钾(KMnO_4)和过氧化氢(H_2O_2)^[40-46],降级再生循环利用过程涉及氧化剂类型、膜类型、氧化剂的暴露强度($\text{ppm} \cdot \text{h}$,即氧化剂浓度与处理时间的乘积)等影响参数,一般通过测试氧化处理前后膜的水渗透率和盐截留率以评估参数选择的合理性(表 1)。

从表 1 可知,在研究报道中 NaOCl 是寿命终点膜循环利用主要采用的氧化药剂,这是由于 NaOCl 具有优异的物理化学稳定性,且在处理成本和效率上更具有优势。图 5(a)进一步总结了近年研究中常用 3 种氧化剂的暴露强度,图 5(b~c)分析了 NaOCl 作为氧化剂时暴露强度和膜降级再生性能的关联关系。在氧化剂的处理浓度(ppm)保持一定时,随着氯的暴露强度($\text{ppm} \cdot \text{h}$)的增大,聚酰胺层降解程度显著上升,膜的分离选择性能发生明显的变化,再生膜的水渗透率不断增加,而盐截留率则随之降低。有研究分析比较废弃 RO 膜置于 50 000 $\text{ppm} \cdot \text{h}$ (在低浓度 124 ppm 下暴露 410 h)与 300 000 $\text{ppm} \cdot \text{h}$ (在高浓度 6 200 ppm 下暴露 48 h)两种暴露强度下,发现废弃膜在 50 000 $\text{ppm} \cdot \text{h}$ 暴露强度下获得的再生膜的过滤性能与 300 000 $\text{ppm} \cdot \text{h}$ 暴露强度下的差别不大,同样能够降级再生转化为低压 UF 膜^[50]。因此,工程上多采用高浓度氧化剂降级再生高压膜,进而缩短处理所需时间^[37, 49-50]。

表 1 寿命终点高压膜降级再生循环利用前后性能对比

Table 1 Performance comparison of downcycling of end-of-life high-pressure membranes before and after oxidation treatment

氧化剂 类型	氧化剂的 暴露强度 /(ppm·h)	膜类型 或编号	初始膜水渗透率 ^① /(L·m ⁻² ·h ⁻¹ ·bar ⁻¹)	再生膜水渗透率/ (L·m ⁻² ·h ⁻¹ ·bar ⁻¹)	初始膜盐截 留率 ^② /%	再生膜盐截 留率/%	参考文献
NaClO	300 000	Bo85HF 4040	0.83	35.4	96 ^③	<5 ^③	[47]
		BW30-4040		27.0			
	222 000	TW30	4.52	28.8	99.4 ^④	/	[48]
	333 000			37.2			
	444 000			50.4			
	555 000			50.4			
	124	TM720-400	3.56±0.11	4.7 1± 0.25	97.49 ±0.25 ^⑤	96.85±0.50 ^⑤	[49]
	2 480			7.37±2.03		90.64±0.56 ^⑤	
	4 464			12.82±1.45		75.96±4.44 ^⑤	
	6 200			17.17±2.02		64.49±5.67 ^⑤	
	15 128			34.44±7.79		14.96±13.72 ^⑤	
	30 008			37.38±4.37		1.51±0.66 ^⑤	
	50 840			41.98±9.26		1.40±0.85 ^⑤	
	4 464	BW30	3.63±0.16	6.01±0.36	97.68 ±0.11 ^⑤	94.58±0.19 ^⑤	[49]
	6 200			7.37±0.24		91.59±0.38 ^⑤	
	15 128			20.75±0.92		45.6±1.71 ^⑤	
	30 008			40.57±1.49		1.68±0.27 ^⑤	
	50 840			38.37±1.34		1.66±0.09 ^⑤	
	4 464	SW30HRLE-440I	1.13±0.25	3.32±0.40	99.22±0.20 ^⑤	97.65±0.57 ^⑤	[49]
	6 200			4.72±0.54		95.08±2.32 ^⑤	
	15 128			14.80±4.25		53.08±16.17 ^⑤	
	30 008			33.80±1.68		4.56±3.45 ^⑤	
	50 840			34.98±2.44		0.79±0.42 ^⑤	
	4 464	TM820C	1.61±0.06	2.63±0.22	99.01±0.04 ^⑤	96.74±1.25 ^⑤	[50]
	6 200			3.32±0.43		88.9±5.56 ^⑤	
	15 128			7.40±1.46		32.62±12.41 ^⑤	
	30 008			11.03±1.41		32.6 2± 2.78 ^⑤	
	50 840			10.72±1.19		0.23±0.67 ^⑤	
	4 464	HSWC3	1.29±0.06	2.00±0.07	94.20±0.18 ^⑤	94.34±0.21 ^⑤	[50]
	6 200			2.19±0.07		94.52±0.24 ^⑤	
	15 128			2.93±0.13		93.78±0.22 ^⑤	
	30 008			3.61±0.14		82.09±0.34 ^⑤	
	50 840			6.78±0.16		34.09±0.56 ^⑤	
	50 000	TM720-400 (BW-1)	/	313.5	/	/	[50]
	300 000			274.6		/	
	50 000	TM720-400(BW-2)	/	235.6	/	/	[50]
	300 000			281.8		/	
	50 000	BW30(BW-3)	/	236.0	/	/	[50]
	300 000			141.5		/	
	50 000	BW30(BW-4)	/	196.9	/	/	[50]
	300 000			157.5		/	
	50 000	TM820C-400	/	27.6	/	/	[50]
	300 000			13.0		/	
	50 000	HSWC3	/	13.4	/	/	[50]
	300 000			27.1		/	
	8 000	RO	5.59	9.87	/	/	[51]
	9 000			8.65		/	
	10 000			17.36		/	
	300 000	NF90	0.2	73.1	/	14.5 ^⑥	[38]
	6 200	BW_4	2.07±0.06	2.8±0.1	97.89±0.24 ^⑦	77.4 ^⑦	[23]
	12 500			4.4±0.1		47.9 ^⑦	

续表

氧化剂类型	氧化剂的暴露强度/(ppm·h)	膜类型或编号	初始膜水渗透率 ^① /(L·m ⁻² ·h ⁻¹ ·bar ⁻¹)	再生膜水渗透率/(L·m ⁻² ·h ⁻¹ ·bar ⁻¹)	初始膜盐截留率 ^② /%	再生膜盐截留率/%	参考文献
NaClO	42 000	BW_4	2.07±0.06	30.2±0.30	97.89±0.24 ^⑦	/	[23]
	6 200			1.80±0.10		77.40 ^⑦	
	12 500			3.80±0.10		47.90 ^⑦	
	42 000	BW_14	1.63±0.12	43.04±0.50	98.42±0.88 ^⑦	/	
	6 200			3.40±0.10		91.70 ^⑦	
	12 500			5.10±0.20		71.30 ^⑦	
	42 000	BW_7	1.32±0.12	32.60±0.10	99.22±0.28 ^⑦	/	
	350 000			31.60±0.40		/	
	600 000~800 000			31.00±2.50		/	
	350 000	BW_3	2.70±0.70	32.00±1.80	/	/	
	600 000~800 000			38.50±3.50		/	
	1000 000			43.70±0.70		/	
	6 200	BW_9	2.04±0.52	2.60±0.60	98.31±0.81 ^⑦	83.10 ^⑦	
	12 500			4.90±0.30		43.40 ^⑦	
	350 000			28.50±0.40		/	
KMnO ₄	600 000~800 000	BW_5	4.30±0.10	36.60±0.10	/	/	[37]
	10 000 000			40.90±1.70		/	
	300 000			88.20		95.40±0.60 ^④	
KMnO ₄	300 000	BW30 (B)	2.80	88.20	95.40±0.60 ^④	17.20±2.30 ^④	[37]
	300 000	BW30 (C)	3.30	67.80	/	/	
	4 000	LFC3-LD	4.00	8.80	/	/	
H ₂ O ₂	350 000	BW30	2.30±0.60	/	/	/	[37]
	299 200			2.20±0.40		/	

注:①初始膜水渗透率是指寿命终点膜经过化学预清洗或浸润后的水渗透率;②初始膜盐截留率是指寿命终点膜经过化学预清洗或浸润后的盐截留率;③实际灰水溶液;④NaCl 溶液;⑤含有 NaCl、MgSO₄ 和葡萄糖的合成微咸水;⑥MgSO₄ 溶液;⑦实际苦咸水

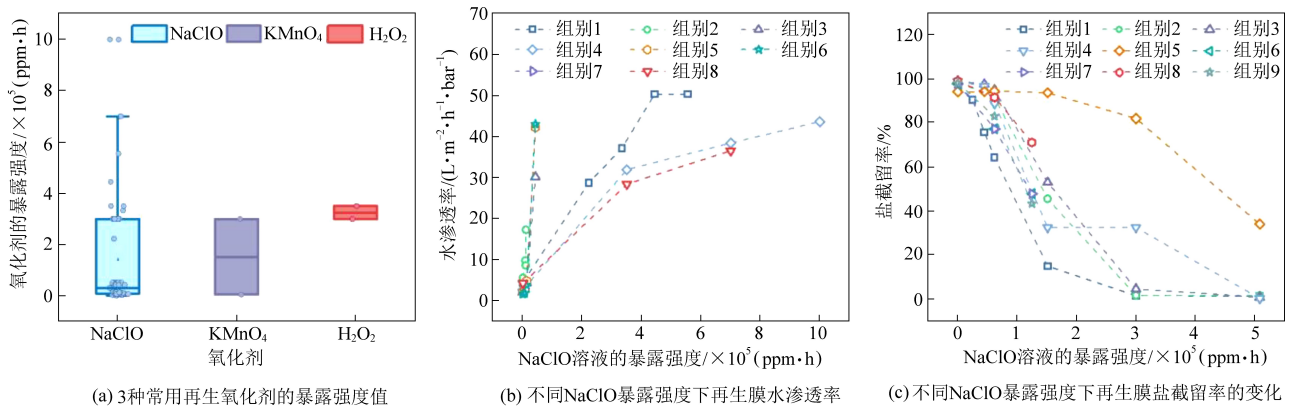


图 5 寿命终点高压膜氧化降级再生主要参数与再生膜性能

Fig. 5 Major parameters for downcycling of end-of-life high pressure membranes based on oxidation method and the properties of the recycled membranes

当 NaOCl 暴露强度在 1 000~48 000 ppm·h 时,处理后的 RO 膜呈现类似 NF 膜的特性^[23, 52-53],而一般在达到 200 000~350 000 ppm·h 时,水渗透率大于 100 L·m⁻²·h⁻¹·bar⁻¹,盐截留率则小于 15%,逐渐接近低压膜的处理范畴^[23, 40, 49, 52-54]。当降级再生 RO 膜彻底达到低压膜的分离水平时,继续增加氧化剂的暴露强度不

会显著改变再生膜的性能,这是由于 RO 膜在聚酰胺层降解后暴露出聚砜(PSF)支撑层具有较好的化学稳定性,其在接触次氯酸盐后不会受到明显影响^[50]。然而,仍有研究提出再生膜长时间浸泡于 NaOCl 溶液中会出现 PSF 链断裂、分子结构变化等问题,影响再生低压膜的过滤性能^[55-57]。因此,在降级再生寿命终点高压膜时需注意合理

控制氧化剂的浓度和处理时间。

有研究以 SW30 RO 膜通过氯氧化去除聚酰胺层转化为 UF 膜,再通过层层沉积聚电解质的方式再生为 NF 膜^[58]。由此得到的最优再生 NF 膜水渗透率与盐截留率均优于对应商业膜。因此,通过氧化降解-层层沉积的策略能将寿命终点 RO 膜定向降级再生为具有理想性能的 NF 膜。氧化降级再生技术不仅适用于 RO 膜,同样也适用于寿命终点 NF 膜。有研究^[38]将废弃 NF 膜置于 NaClO 溶液中通过去除其聚酰胺层转化为低压膜,并经过小试和中试规模实验评估该回收方法,将再生膜用于河水处理,其出水渗透率和离子截留率与低压膜相似,且回收再生总成本与购入新 UF 膜相比只有后者的 1.1%。

3.2 寿命终点低压膜的升级再生循环利用

寿命终点低压膜的升级再生循环利用常指寿命终点低压膜在经表面清洗修复后,通过界面聚合在膜基底上形成聚酰胺分离层而再生为高压膜。低压膜表面的生物多聚物是典型的膜污染组分,但在一些膜材料制备过程中,生物多聚物亦是有益的添加剂^[59-62]。基于这一思路,Dai 等^[63]开创性地利用生物多聚物污染的 MF 膜作为基底材料,通过界面聚合反应在基底上形成交联、无缺陷的聚酰胺活性层,

将污染低压膜升级再生为高压薄膜复合膜。再生后的膜水渗透率约为 $30 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$,对 Na_2SO_4 的截留率达到 95% 左右,首次证明了将寿命终点低压膜直接升级再生为高压膜的理论可行性。

实际工程中,低压膜表面污染种类繁多且分布不均匀,直接升级再生可能存在产品再生膜质量不稳定的问题。为进一步提升升级再生技术普适性,Dai 等^[63]针对实际寿命终点聚偏氟乙烯(PVDF)MF 膜,提出了一种清洗-修复-界面聚合策略。首先采用化学清洗去除膜上大部分的有机和无机污染物,然后在膜面涂覆聚多巴胺(PDA),PDA 涂覆层能修复膜面可能的破损位点并提升界面亲水性,有利于后续形成连续的聚酰胺层。最后,通过哌嗪和均苯三甲酰氯的界面聚合作用形成连续完整的聚酰胺层(图 6),升级再生后的聚酰胺 NF 膜纯水渗透率为 $(20.2 \pm 1.1) \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$,对 Na_2SO_4 的截留率达到 $92.4\% \pm 1.2\%$,与在原始 MF、寿命终点 MF、清洗 MF 膜上升级再生的对应 NF 膜对比,在修复 MF 膜上升级再生的 NF 膜具有更高的盐截留率,表明 PDA 涂覆修复对于低压膜的成功升级再生与循环利用具有重要作用。

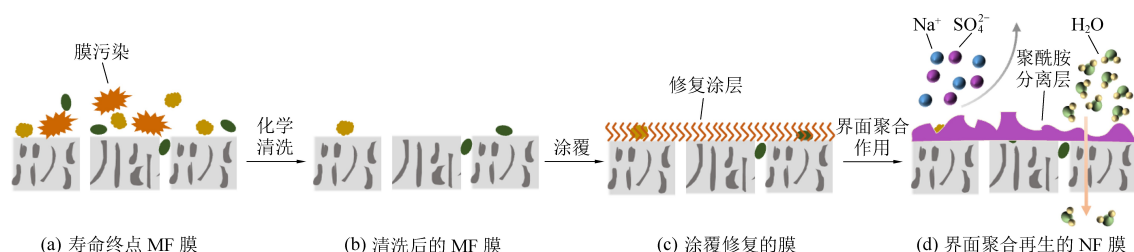


图 6 通过清洗-修复-界面聚合实现寿命终点微滤膜的升级再生

Fig. 6 Upcycling of end-of-life microfiltration membrane by interfacial polymerization

然而,上述升级再生策略中涉及的 PDA 涂覆过程所需成本高(约 93 元/ m^2 膜)且反应时间长(24 h),在实际工程中难以大规模应用。因此,该团队^[64]进一步改进了该升级再生策略,通过利用单宁酸-铁配位化合物取代 PDA 涂覆作为修复步骤,整个修复过程所需时间仅为 20 min。升级再生 NF 膜的水渗透率为 $(23.7 \pm 1.4) \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$,对 Na_2SO_4 的截留率达到 $96.9\% \pm 0.7\%$,且升级再生所需成本约为 35 元/ m^2 膜。近期,该团队为进一步简化低压膜的再生循环利用过程,提出了一种表面活性剂介导的新型界面聚合升级再生策略^[65]。在哌嗪水溶液中添加十二烷基苯磺酸钠(SDBS),SDBS 能降低界面张力并调节界面润湿

性,从而促进哌嗪单体在寿命终点低压膜表面的均匀分布(即使膜面存在污染物),有助于形成具有高交联度、连续的聚酰胺层。

3.3 寿命终点膜平级再生循环利用

寿命终点膜的平级再生循环利用理论上应包括寿命终点低压膜和高压膜的平级再生。然而,目前文献中仅有寿命终点低压膜平级再生的相关研究,还未有高压膜平级再生的报道。膜到达寿命终点的重要原因之一是不可恢复污染的积累,因此,实现寿命终点膜的平级再生需首先考虑如何去除不可恢复污染。Tian 等^[66]基于 Hansen 溶解度参数理论,从污染物与膜之间的强相互作用出发,提出了某实际污水处理厂膜生物反应器中寿命终点 PVDF 膜不可恢复污染的

绿色溶剂清洗策略。由于绿色溶剂甲基-5-(二甲氨基)-2-甲基-5-氧代戊酸酯与 PVDF 材料具有很强的相互作用,能取代不可恢复污染的结合位点,经绿色溶剂处理,寿命终点 PVDF 膜的水渗透率从 $(47.6 \pm 4.7) \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ 恢复到了 $(390.9 \pm 8.2) \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$,达到新膜水平,并且保留稳定的污染物截留率。

该团队同时开发了一种深度清洗-结构转化-亲水改性技术^[67-69],通过化学药剂清洗寿命终点膜的可恢复污染,再利用结构转化药剂处理该膜,最后利用多巴胺在膜表面的自聚合反应在膜面形成 PDA 亲水层,从而改善膜表面亲水性,恢复抗污染性能。结构转化药剂的引入对 PVDF 膜进行扩孔、亲水化的同时,并洗出不可恢复污染,有效恢复膜通量。采用此平级再生策略修复实际寿命终点 PVDF 膜,其水渗透率从 $(43.7 \pm 8.8) \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ 恢复到 $(426.0 \pm 40.3) \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$,达到了新膜的处理水平。经评估,与直接更换新膜相比,平级再生成本支出与碳排放量分别减少约 20 元/(m^2 膜·a)和 $0.059 \text{ kg CO}_2\text{-e/膜组件}$ (膜组件的有效面积为 20 m^2 ,干重 8 kg,城市污水处理厂到垃圾填埋场的距离按 20 km 计)^[69]。进一步将该技术应用于工程化膜架,每个膜架含 80 片膜,有效过滤面积为 $1\,600 \text{ m}^2$,与未平级再生的对照组相比,运行通量提升 2 倍以上,且跨膜压差增长速率降低 3 倍以上。

除了将寿命终点膜经上述策略处理后恢复其性能至新膜水平,平级再生技术还包括使用溶剂溶解提取有机膜材料中的聚合物^[70-73],并以此为原料重新制备再生膜,但此种方法步骤较为繁琐,药剂成本高,且再生过程需要专门的制膜设备,在实际工程放大中仍面临诸多技术瓶颈。

4 寿命终点膜配件的循环利用

除膜材料本体外,寿命终点膜配件也是可循环利用的一种资源,例如 RO 膜组件除膜本体外还包括:进料隔板(常为聚丙烯材质),渗透隔板(常为聚酯材质),渗透管和端盖(常为丙烯腈丁二烯苯乙烯),以及外壳(玻璃纤维),这些膜配件同样可以回收利用。针对寿命终点膜配件的循环利用,同样分为直接循环利用与间接循环利用。

4.1 寿命终点膜配件的直接循环利用

寿命终点膜配件的直接循环利用,是指将寿命终点膜元件/组件中的配件直接拆装,重新用于新膜元件/组件生产过程。不过,膜配件可能存在

污染或者老化的问题,即使经清洗后直接循环利用,也可能达不到预期效果^[15, 74]。因此,建议寿命终点膜元件/组件中的膜配件在直接循环利用前,可通过适当采样分析机械强度等重要性能指标,并与新膜配件对比,来充分评估膜配件直接循环利用的可行性。

4.2 寿命终点膜配件的间接循环利用

寿命终点膜配件的间接循环利用目前可分为机械拆解循环利用与化学分解循环利用两类方式。机械拆解循环利用是寿命终点膜配件间接回收的主要方法,根据不同配件其物化特性和受污染程度,进行拆卸分类回收利用。例如,PP 进料隔板可以使用上述方法直接回收^[75-77],对于塑料部件则是将其薄片切碎融化重整,以得到尺寸均匀的颗粒,将其用作生产新产品的原材料^[78-80],玻璃纤维也可以通过物理机械回收方法再利用,并将其转化为热固性材料^[25]。化学分解循环利用指将塑料材料分解成更小分子(通常是液体或气体)的过程,具体包括非催化热裂解(热解)、催化裂解或蒸汽降解的化学过程^[81],渗透隔板和膜片等聚酯材料适用于化学回收,通过水解成小分子然后经过缩聚反应生成新的聚合物^[13],但回收方法适用于不受污染的膜配件,且其成本较昂贵、过程较为复杂^[15]。

5 结论与展望

水处理寿命终点膜循环利用技术是实现寿命终点膜资源化利用的重要手段,对于提升膜法水处理技术可持续性具有重要意义。目前,寿命终点低压膜升级再生技术还处于实验室小试阶段,而寿命终点高压膜降级再生技术和寿命终点膜平级再生技术已迈入工程应用阶段。有关膜配件循环利用的研究在文献中仍处于发展初期,相关工程应用也报道较少。为进一步推动水处理寿命终点膜再生循环利用技术发展,建议在以下几个方面加强基础研究与技术攻关工作:(1)持续加强寿命终点低压膜升级再生的技术储备;(2)持续推进寿命终点中空纤维膜、卷式膜的组件再生循环利用研究与应用工作;(3)持续加强膜配件直接与间接循环利用技术的研发工作;(4)建立膜本体与膜配件再生循环利用的评价指标与再生技术标准。

参考文献(References):

- [1] CRINI G, LICHTFOUSE E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment [J]. Environmental

- Chemistry Letters, 2019, 17(1): 145–155.
- [2] SONUNE A, GHATE R. Developments in wastewater treatment methods[J]. Desalination, 2004, 167(1–3): 55–63.
- [3] CRINI G. Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment[J]. Progress in Polymer Science, 2005, 30(1): 38–70.
- [4] SANMARTINO J A, KHAYET M, GARCIA-PAYO M C. Re-use of discarded membrane distillation membranes in microfiltration technology[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 539: 273–283.
- [5] BARAKAT M A. New trends in removing heavy metals from industrial wastewater[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2011, 4(4): 361–377.
- [6] RAVANCHI M T, KAGHAZCHI T, KARGARI A. Application of membrane separation processes in petrochemical industry: A review[J]. Desalination, 2009, 235(1–3): 199–244.
- [7] SIRKAR K K. Membrane separation technologies: Current developments[J]. Chemical Engineering Communications, 1997, 157: 145–184.
- [8] CHEN J P, MOU H, WANG L K, et al. Membrane separation: Basics and applications [M/OL]/WANG L K, CHEN J P, HUNG Y T, et al. Membrane and Desalination Technologies: Totowa; Humana Press Inc, 2011: 271–332.
- [9] MADAENI S S. The application of membrane technology for water disinfection[J]. Water Research, 1999, 33(2): 301–308.
- [10] GUO W, NGO H H, LI J. A mini-review on membrane fouling[J]. Bioresource Technology, 2012, 122: 27–34.
- [11] PONTIÉ M, AWAD S, TAZEROUT M, et al. Recycling and energy recovery solutions of end-of-life reverse osmosis (RO) membrane materials: A sustainable approach [J]. Desalination, 2017, 423: 30–40.
- [12] OULD MOHAMEDOU E, PENATE SUAREZ D B, VINCE F, et al. New lives for old reverse osmosis (RO) membranes[J]. Desalination, 2010, 253(1): 62–70.
- [13] LAWLER W, BRADFORD-HARTKE Z, CRAN M J, et al. Towards new opportunities for reuse, recycling and disposal of used reverse osmosis membranes [J]. Desalination, 2012, 299: 103–112.
- [14] NIELSEN P H, HAUSCHILD M. Product specific emissions from municipal solid waste landfills [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1998, 3(3): 158.
- [15] AL-SALEM S M, LETTIERI P, BAEYENS J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review[J]. Waste Management, 2009, 29(10): 2625–2643.
- [16] LI W C, TSE H F, FOK L. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566–567: 333–349.
- [17] OUMAR ANNE C, TRÉBOUET D, JAOUEN P, et al. Nano-filtration of seawater: Fractionation of mono- and multi-valent cations[J]. Desalination, 2001, 140(1): 67–77.
- [18] CADOTTE J, FORESTER R, KIM M, et al. Nanofiltration membranes broaden the use of membrane separation technology [J]. Desalination, 1988, 70(1): 77–88.
- [19] JOHNSON D J, HILAL N. Nanocomposite nanofiltration membranes: State of play and recent advances [J]. Desalination, 2022, 524: 115480.
- [20] LAWLER W, ALVAREZ-GAITAN J, LESLIE G, et al. Comparative life cycle assessment of end-of-life options for reverse osmosis membranes[J]. Desalination, 2015, 357: 45–54.
- [21] AVLONITIS S, HANBURY W T, HODGKISS T. Chlorine degradation of aromatic polyamides [J]. Desalination, 1992, 85(3): 321–334.
- [22] GHOSH A K, HOEK E M V. Impacts of support membrane structure and chemistry on polyamide-polysulfone interfacial composite membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 336(1–2): 140–148.
- [23] GARCÍA-PACHECO R, LANDABURU-AGUIRRE J, TERRERO-RODRÍGUEZ P, et al. Validation of recycled membranes for treating brackish water at pilot scale [J]. Desalination, 2018, 433: 199–208.
- [24] ABADA B, SAFARIK J, ISHIDA K P, et al. Surface characterization of end-of-life reverse osmosis membranes from a full-scale advanced water reuse facility: Combined role of bioorganic materials and silicon on chemically irreversible fouling [J]. Journal of Membrane Science, 2022, 653: 120511.
- [25] LANDABURU-AGUIRRE J, GARCÍA-PACHECO R, MOLINA S, et al. Fouling prevention, preparing for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination [J]. Desalination, 2016, 393: 16–30.
- [26] 祝文哲, 陈逸琛, 代丹阳, 等. 基于专家调查的我国旧 RO 膜回收利用及废弃膜处置市场研究 [J]. 膜科学与技术, 2022, 42(3): 180–186+194.
- ZHU W, CHEN Y, DAI D, et al. Studies on the reuse market of old and end-of-life reverse osmosis membrane in China based on questionnaire [J]. Membrane Science and Technology, 2022, 42(3): 180–186+194.
- [27] AWALEH M O, AHMED M M, SOUBANEH Y D, et al. Wastewater reclamation using discarded reverse osmosis membranes for reuse in irrigation in Djibouti, an arid country [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2013, 67(6): 1362–1369.
- [28] 卢陆, 伊冰. 农用处理废水的微生物学质量标准——对修订 WHO 标准的建议 [J]. 国外医学(卫生学分册), 2001, 2: 82–91.
- LU L, YI B. Microbiological quality standards for agricultural treatment wastewater – Suggestions for revision of WHO standards [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2001, 2: 82–91.
- [29] AL-HAMIMI N, KYAW H H, AL-GHAFFRI B, et al. Reuse of end-of-life seawater reverse osmosis (RO) membranes for water treatment [J]. SSRN Electronic Journal, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4034061.
- [30] HUNG W S, LAI C L, AN Q, et al. A study on high-performance composite membranes comprising heterogeneous polyamide layers on an electrospun substrate for ethanol dehy-

- dration[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 470: 513–523.
- [31] XIE W, GEISE G M, FREEMAN B D, et al. Polyamide interfacial composite membranes prepared from m-phenylene diamine, trimesoyl chloride and a new disulfonated diamine[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 403–404: 152–161.
- [32] ZHAO J, SU Y, HE X, et al. Dopamine composite nanofiltration membranes prepared by self-polymerization and interfacial polymerization[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 465: 41–48.
- [33] WANG T, YANG Y, ZHENG J, et al. A novel highly permeable positively charged nanofiltration membrane based on a nanoporous hyper-crosslinked polyamide barrier layer[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 448: 180–189.
- [34] JEWRAJKA S K, REDDY A V R, RANA H H, et al. Use of 2,4,6-pyridinetricarboxylic acid chloride as a novel co-monomer for the preparation of thin film composite polyamide membrane with improved bacterial resistance[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 439: 87–95.
- [35] LIU M, ZHOU C, DONG B, et al. Enhancing the permselectivity of thin-film composite poly(vinyl alcohol) (PVA) nanofiltration membrane by incorporating poly(sodium-p-styrene-sulfonate) (PSSNa)[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 463: 173–182.
- [36] YONG Z, SANCHUAN Y, MEIHONG L, et al. Polyamide thin film composite membrane prepared from m-phenylenediamine and m-phenylenediamine-5-sulfonic acid[J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 270(1–2): 162–168.
- [37] COUTINHO DE PAULA E, GOMES J C L, AMARAL M C S. Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes by oxidative treatment: a technical evaluation[J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2017, 76(3–4): 605–622.
- [38] COUTINHO DE PAULA E, MARTINS P V, FERREIRA I C de M, et al. Bench and pilot scale performance assessment of recycled membrane converted from old nanofiltration membranes[J]. *Environmental Technology*, 2020, 41(10): 1232–1244.
- [39] KHALESS K, ACHIOU B, BOULIF R, et al. Recycling of spent reverse osmosis membranes for second use in the clarification of wet-process phosphoric acid[J]. *Minerals*, 2021, 11(6): 637.
- [40] VEZA J M, RODRIGUEZ-GONZALEZ J J. Second use for old reverse osmosis membranes: Wastewater treatment[J]. *Desalination*, 2003, 157(1): 65–72.
- [41] RODRÍGUEZ J J, JIMÉNEZ V, TRUJILLO O, et al. Reuse of reverse osmosis membranes in advanced wastewater treatment[J]. *Desalination*, 2002, 150(3): 219–225.
- [42] DO V T, TANG C Y, REINHARD M, et al. Degradation of polyamide nanofiltration and reverse osmosis membranes by hypochlorite[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 852–859.
- [43] KANG G D, GAO C J, CHEN W D, et al. Study on hypochlorite degradation of aromatic polyamide reverse osmosis membrane[J]. *Journal of Membrane Science*, 2007, 300(1): 165–171.
- [44] KWON Y N, LECKIE J O. Hypochlorite degradation of cross-linked polyamide membranes: II. Changes in hydrogen bonding behavior and performance[J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 282(1): 456–464.
- [45] KWON Y N, LECKIE J O. Hypochlorite degradation of cross-linked polyamide membranes: I. Changes in chemical/morphological properties[J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 283(1): 21–26.
- [46] MITROULI S T, KARABELAS A J, ISAIAS N P. Polyamide active layers of low pressure RO membranes: Data on spatial performance non-uniformity and degradation by hypochlorite solutions[J]. *Desalination*, 2010, 260(1): 91–100.
- [47] AHMED J, JAMAL Y. A pilot application of recycled discarded RO membranes for low strength gray water reclamation[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(26): 34042–34050.
- [48] MOREIRA V, LEBRON Y, SANTOS L, et al. Recycled reverse osmosis membranes operated at low-pressure for water treatment and point-of-use applications[J]. *SSRN Electronic Journal*, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4029258.
- [49] GARCÍA-PACHECO R, LANDABURU-AGUIRRE J, MOLINA S, et al. Transformation of end-of-life RO membranes into NF and UF membranes: Evaluation of membrane performance[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 495: 305–315.
- [50] MOLINA S, LANDABURU-AGUIRRE J, RODRÍGUEZ-SÁEZ L, et al. Effect of sodium hypochlorite exposure on polysulfone recycled UF membranes and their surface characterization[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 150: 46–56.
- [51] SEIBEL F, OTÁVIO G, GIUBEL M, et al. End-of-life reverse osmosis membranes: Recycle procedure and its applications for the treatment of brackish and surface water[J]. 2021, 8: 77–87.
- [52] SENÁN-SALINAS J, GARCÍA-PACHECO R, LANDABURU-AGUIRRE J, et al. Recycling of end-of-life reverse osmosis membranes: Comparative LCA and cost-effectiveness analysis at pilot scale[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 150: 104423.
- [53] RAVAL H D, CHAUHAN V R, RAVAL A H, et al. Rejuvenation of discarded RO membrane for new applications[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 48(1–3): 349–359.
- [54] LAWLER W, ANTONY A, CRAN M, et al. Production and characterisation of UF membranes by chemical conversion of used RO membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 447: 203–211.
- [55] REGULA C, CARRETIER E, WYART Y, et al. Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic UF membranes: A review[J]. *Water Research*, 2014, 56: 325–365.
- [56] REGULA C, CARRETIER E, WYART Y, et al. Ageing of ul-

- trafiltration membranes in contact with sodium hypochlorite and commercial oxidant; Experimental designs as a new ageing protocol[J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 103: 119–138.
- [57] ROUAIX S, CAUSSERAND C, AIMAR P. Experimental study of the effects of hypochlorite on polysulfone membrane properties[J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 277(1): 137–147.
- [58] MORADI M R, PIHLAJAMÄKI A, HESAMPOUR M, et al. End-of-life RO membranes recycling: Reuse as NF membranes by polyelectrolyte layer-by-layer deposition[J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 584: 300–308.
- [59] GAO S, ZHU Y, WANG J, et al. Layer-by-layer construction of Cu^{2+} /alginate multilayer modified ultrafiltration membrane with bioinspired superwetting property for high-efficient crude-oil-in-water emulsion separation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28: 1801944.
- [60] GUAN Y F, HUANG B C, QIAN C, et al. Improved PVDF membrane performance by doping extracellular polymeric substances of activated sludge[J]. *Water Research*, 2017, 113: 89–96.
- [61] GALIANO F, BRICEÑO K, MARINO T, et al. Advances in biopolymer-based membrane preparation and applications[J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 564: 562–586.
- [62] HOU D, LI T, CHEN X, et al. Hydrophobic nanostructured wood membrane for thermally efficient distillation[J]. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaaw3203.
- [63] DAI R, HAN H, WANG T, et al. Fouling is the beginning: Upcycling biopolymer-fouled substrates for fabricating high-permeance thin-film composite polyamide membranes[J]. *Green Chemistry*, 2021, 23(2): 1013–1025.
- [64] WANG X, HAN H, ZHOU H, et al. Rapid upcycling of end-of-life microfiltration membrane mediated by the healing of metal-organic complex[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(30): 9841–9849.
- [65] DAI R, CHEN J, HAN H, et al. Interfacial wettability regulation enables one-step upcycling of the end-of-life polymeric microfiltration membrane[J]. *ACS ES&T Engineering*, 2022. DOI: 10.1021/acsestengg.2c00329.
- [66] TIAN C, WANG T, HAN H, et al. Green solvent cleaning removes irrecoverable foulants from end-of-life membranes in membrane bioreactors: Efficacy and mechanisms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(17): 12563–12572.
- [67] 王志伟. 膜法污水处理技术的绿色低碳化发展思考[J]. *给水排水*, 2022, 58(7): 1–10.
- WANG Z. Thoughts on the green and low-carbon development of membrane-based wastewater treatment technology[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 58(7): 1–10.
- [68] 王志伟, 戴若彬, 张星冉, 等. 膜法污水处理技术研究应用动态与未来可持续发展思考[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(3): 86–103.
- WANG Z, DAI R, ZHANG X, et al. Recent advances and overview on sustainable development of membrane-based wastewater treatment technology[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(3): 86–103.
- [69] TIAN C, CHEN J, LI X, et al. Chemical cleaning-solvent treatment-hydrophilic modification strategy for regenerating end-of-life PVDF membrane[J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 669: 121325.
- [70] ZHANG R, LIU Y, HE M, et al. Antifouling membranes for sustainable water purification: Strategies and mechanisms[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45(21): 5888–5924.
- [71] 吴杰, 顾维娣, 任月萍, 等. 以废旧聚偏氟乙烯平板膜制备再生膜的研究[J]. *膜科学与技术*, 2015, 35(5): 79–84.
- WU J, GU W, REN Y, et al. Study of the preparation of recycled membranes by waste PVDF membranes[J]. *Membrane Science and Technology*, 2015, 35(5): 79–84.
- [72] 胡月, 张庆磊, 卢彦斌, 等. PVDF中空纤维膜修复技术探究[J]. *膜科学与技术*, 2021, 41(4): 110–116.
- HU Y, ZHANG Q, LU Y, et al. Research on PVDF hollow fiber membrane repair technology[J]. *Membrane Science and Technology*, 2021, 41(4): 110–116.
- [73] KRAVETS L I, GILMAN A B, DINESCU G. Modification of polymer membrane properties by low-temperature plasma[J]. *Russian Journal of General Chemistry*, 2015, 85(5): 1284–1301.
- [74] KOFOWOROLA O F. Recovery and recycling practices in municipal solid waste management in Lagos, Nigeria[J]. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 2007, 27(9): 1139–1143.
- [75] HOWELL S G. A ten year review of plastics recycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1992, 29(2): 143–164.
- [76] GU L, OZBAKKALOGLU T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review[J]. *Waste Management*, 2016, 51: 19–42.
- [77] ILYAS M, AHMAD W, KHAN H, et al. Plastic waste as a significant threat to environment – A systematic literature review[J]. *Reviews on Environmental Health*, 2018, 33(4): 383–406.
- [78] WELLE F. Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(11): 865–875.
- [79] MERAN C, OZTURK O, YUKSEL M. Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene[J]. *Materials & Design*, 2008, 29(3): 701–705.
- [80] YIN S, TULADHAR R, SHI F, et al. Mechanical reprocessing of polyolefin waste: A review[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2015, 55(12): 2899–2909.
- [81] HOPEWELL J, DVORAK R, KOSIOR E. Plastics recycling: Challenges and opportunities[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364(1526): 2115–2126.