



压力延迟渗透技术在水处理中的应用

路孝振¹,陈天宇¹,王琳^{1,2},赵路¹,郑成龙¹,张娟¹,陈飞勇²

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101;

2. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 山东济南 250101)

[摘要] 在减少废水排放和获取绿色能源的目标下,压力延迟渗透(PRO)技术作为一种能有效获取盐水中盐差能且符合碳中和发展目标的新兴膜法水处理技术正受到广泛关注。在实际应用中,PRO技术具有产水率高、出水水质好等优点,但技术相对不够成熟的现状导致其对盐差能的转化利用效率较低。为有效实现水和能源的循环利用,介绍了PRO技术的原理及水通量、功率密度等关键指标,对影响PRO技术性能的因素(膜种类、膜朝向、浓差极化和膜污染等)进行了讨论,针对不同膜污染类型,着重分析了有效的预处理及清洗措施;重点综述了PRO技术在海水淡化发电、非常规水处理等水处理领域的实际应用;提出在满足经济可行性的同时,通过优化PRO组合工艺设计、提高整体工艺效率等措施,推动并实现PRO技术在水处理领域的低碳、高效运行。

[关键词] 压力延迟渗透;盐差能;功率密度;海水淡化;发电;水处理

[中图分类号] P747;TQ085 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)10-0031-07

Application of pressure retarded osmotic technology in water treatment

LU Xiaozhen¹, CHEN Tianyu¹, WANG Lin^{1,2}, ZHAO Lu¹, ZHENG Chenglong¹, ZHANG Juan¹, CHEN Feiyong²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China;

2. Resources and Environment Innovation Institute, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

Abstract: With the goal of reducing wastewater discharge and harvesting green energy, pressure retarded osmosis (PRO) technology is receiving widespread attention, as an application of membrane in water treatment that can effectively capture the salinity energy in brine and satisfy carbon neutral development goals. In actual practice, PRO technology has the advantages of high water production rate and excellent effluent water quality, but its use of salinity gradients energy was less efficient because of its relatively immature technology. In order to effectively achieve water and energy recycling, this review first introduced the principle of PRO technology and key indicators such as water flux and power density, then discussed the factors affecting the performance of the technology, such as membrane type, membrane orientation, concentration polarization and membrane fouling. The effective pretreatment and cleaning measures for PRO technology were highlighted for different membrane fouling types. This review focused on the practical applications of PRO technology in water treatment, such as desalination and power generation, non-conventional water treatment and other processes. It was proposed to promote and realize the low-carbon and efficient operation of PRO technology in the field of water treatment by optimizing the combined process design of PRO and improving the overall process efficiency, while meeting the economic feasibility.

Key words: pressure retarded osmosis; salinity gradients energy; power density; seawater desalination; power generation; water treatment

当今世界正处于经济快速发展、人口急剧增加的高速发展时期,环境恶化和能源短缺问题日益加剧,寻

求可再生的绿色能源成为世界各国瞩目的焦点。地球上海洋资源丰富,全球海洋能源总量高达 1.428×10^{14}

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金项目(51708337);山东建筑大学博士基金项目(XNBS1629);山东省“青创人才引育计划”立项建设团队“水环境绿色修复技术研究创新团队”

$\text{kW}\cdot\text{h/a}$,其中盐差能作为海洋能源中最具潜力的能源正受到广泛关注^[1]。由于盐差能广泛存在于不同盐度水域间的界面上(如淡水河流入海处^[2]),如何高效获取这种高潜力的能源成为研究的热点。

随着膜法水处理工艺的日益成熟,膜工艺在海水淡化、生产饮用水、清洁水源、资源回收、能源生产等方面发挥了巨大作用^[3-5]。开发以膜为基础的水处理技术以满足人类对淡水和能源的需求,是当前的迫切需要。压力延迟渗透(PRO)技术应运而生,其在膜工艺基础上利用不同水源间的盐差能发电的同时,还可对地表水、地下水、淡水、苦咸水、海水以及污水和工业废

水等多种水源进行处理^[6-8]。PRO技术在实际应用过程中具有脱盐率高、产水性能好、污染物去除率高、出水水质好等优点,在能源获取方面非常有希望利用可再生的盐差能减少人类对化石燃料的依赖以及实现碳中和的发展目标^[9]。

笔者从压力延迟渗透技术的原理、影响因素及其在水处理中的实际应用等方面对该技术的研究进展进行了综述。

1 压力延迟渗透原理

膜脱盐过程分为3大类,包括正渗透(FO)、PRO和反渗透(RO),渗透过程见图1^[10]。

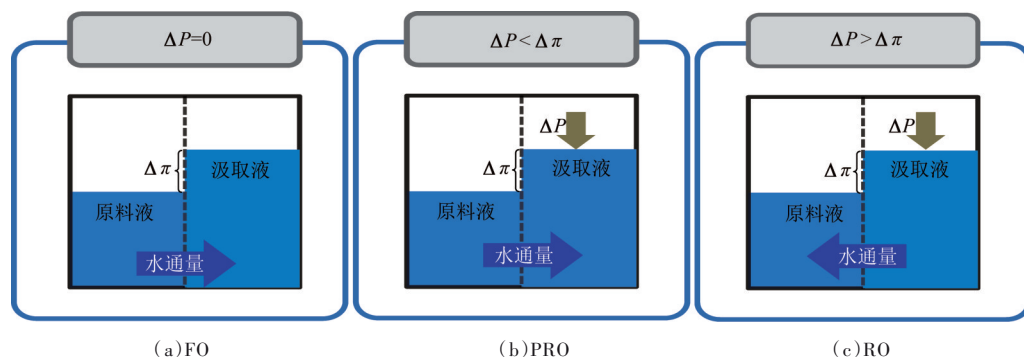


图1 FO、PRO、RO渗透过程示意

Fig. 1 Schematic diagrams of osmosis-driven processes of FO, PRO and RO

FO利用的是自然界中存在的渗透过程,即在半透膜2侧渗透压差($\Delta\pi$)的驱动下,低浓度溶液(原料液,FS)中的淡水自然地高浓度溶液(汲取液,DS)转移,高浓度溶液的浓度降低,直到二者达到平衡。RO则是一个相反过程,RO是将足够高于 $\Delta\pi$ 的操作压力(ΔP)作用于高浓度溶液(DS), ΔP 迫使高浓度溶液中的淡水透过半透膜而截留下溶质。PRO的

运行机制介于FO和RO之间,PRO是在高浓度溶液(DS)侧施加操作压力 $\Delta P(0 < \Delta P < \Delta\pi)$,以延缓水分子由低浓度溶液(FS)扩散至高浓度溶液的渗透过程,使得高浓度溶液一侧势能增大,从而推动涡轮机旋转做功发电。FO和RO的目的是稀释高浓度溶液或生产淡水,而PRO主要用于盐差能发电过程,发电流程见图2^[11]。

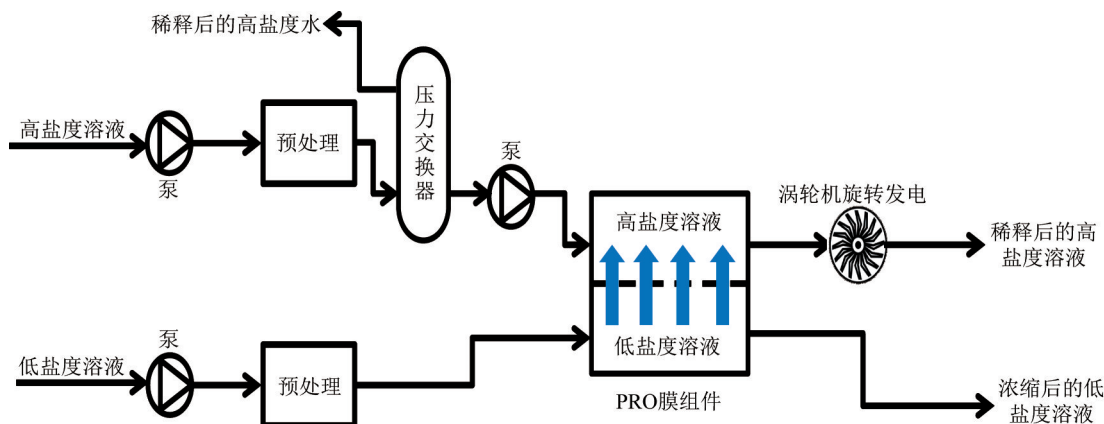


图2 PRO发电流程

Fig. 2 PRO power generation process

在PRO过程中,水通量(J_w)与操作压力(ΔP)及渗透压差($\Delta\pi$)有关。根据溶液渗透模型及其变形公式,水通量 J_w 的计算公式见式(1)。功率密度 W 是指在单位膜面积上所产生的功率,是水通量和操作压力的乘积^[12],计算公式见式(2)。

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad (1)$$

$$W = J_w \Delta P = A(\Delta\pi - \Delta P) \Delta P \quad (2)$$

式中: J_w ——水通量, $L/(m^2 \cdot h)$;

A ——纯水渗透系数, $L/(m^2 \cdot h \cdot kPa)$;

ΔP ——操作压力(施加在汲取液一侧), kPa ;

$\Delta\pi$ ——汲取液和原料液之间的渗透压差, kPa ;

W ——功率密度, W/m^2 。

图3为PRO过程中理想水通量(J_w)和功率密度(W)随操作压力(ΔP)的变化曲线^[13]。

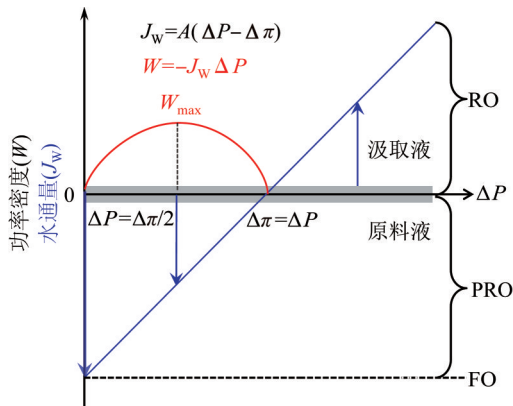


图3 PRO过程中理想水通量(J_w)和功率密度(W)随操作压力(ΔP)变化曲线

Fig. 3 The variation of ideal water flux (J_w) and power density (W) with hydraulic pressure (ΔP) in PRO process

如图3所示,PRO过程中的最大功率密度 W_{max} 与膜的渗透压差 $\Delta\pi$ 的平方成正比,当操作压力 ΔP 接近 $\Delta\pi/2$ 时,PRO可获得最大发电量, W_{max} 的计算公式见式(3)。

$$W_{max} = A\Delta\pi^2/4 \quad (3)$$

但是,在实际PRO过程中,最大功率密度的获取是根据汲取液和原料液之间的渗透压差、膜朝向、膜污染程度、操作参数和膜的性能等来量化的^[14],并不是由单一条件决定的。

2 PRO过程的影响因素

PRO的应用性能与选用的PRO膜、实际操作压力以及渗透压差的大小等条件息息相关。因此,与这些条件相关的因素如膜自身的限制条件、膜朝向及浓差

极化现象、膜污染程度等都会影响PRO过程。

2.1 PRO膜

PRO膜在PRO过程中起着至关重要的作用,PRO的经济可行性与膜的性能有着直接的联系。因为PRO与RO有相似之处(操作压力的施加和膜朝向的选择),所以PRO初步研究中使用了非对称性的RO膜。但RO膜的支撑层很厚,导致了内部浓差极化的发生,以至于 J_w 和 W 都很低,逐渐被淘汰。

PRO过程中常见的膜有3类,分别是醋酸纤维素膜、薄膜复合(TFC)膜、中空纤维薄膜复合PRO膜。虽然这3类膜在PRO水处理过程中经常使用,但是其自身存在的一些问题(如膜的变形和分层、严重的浓差极化、膜污染加剧等)影响了PRO的实际操作过程。美国HTI研发了一种用于FO和PRO技术的醋酸纤维素膜,该膜曾经广泛应用于PRO模拟过程,但由于在实施PRO海水淡化工艺中,其内部严重的浓差极化现象导致目标水通量和功率密度无法实现,逐渐被其他膜取代^[15]。在PRO过程较高的操作压力作用下,由于TFC膜机械稳定性相对较低,TFC膜层之间的黏结力不足以克服操作压力或流体剪切作用,TFC膜将发生膜分层和变形问题。在中空纤维薄膜复合PRO膜的研发过程中,为了获得高功率密度和水通量,研发人员将膜基底去除,但该方法导致膜的机械强度和稳定性降低,膜的耐压性能也有待优化。膜分层和变形问题降低了PRO技术的水通量和功率密度,从而严重影响了PRO过程的可行性。添加新型黏合剂或直接改变膜自身材料可增强膜层之间的黏结力^[16],Y. H. CHO等^[17]通过热辅助方法研发了机械强度高且表层不对称的中空纤维薄膜复合PRO膜,其功率密度和能承受的操作压力分别高达 $5.5 W/m^2$ 和 $1.8 MPa$,提高了PRO过程的功率密度和耐压强度。

2.2 膜朝向及浓差极化现象

PRO膜不同于传统高压膜,其正反两面均能朝向原料液,分为膜活性层朝向原料液一侧的AL-FS模式和膜活性层朝向汲取液一侧的AL-DS模式,朝向不同可产生不同形式的膜污染。PRO膜的浓差极化现象根据其位置的不同可分为内部浓差极化(ICP)和外部浓差极化(ECP)^[18]。其中,ECP可以通过改变外部水力条件去除,而膜支撑层内部产生的浓差极化被认为是限制PRO过程的重要因素。AL-FS和AL-DS模式

最大的不同在于其产生的内部浓差极化现象的差异。李志浩等^[18]以蔗糖、葡聚糖等天然有机物为水体污染物,研究发现了AL-DS模式下可以形成浓缩型内浓差极化,而AL-FS模式下可以形成稀释型内浓差极化。Lin WANG等^[19]以单宁酸为污染物,研究发现膜通量在AL-FS模式下更加稳定,截留污染物的效果更好且具有低污染倾向,但较大的内部浓差极化导致获得的水通量较低。由于PRO过程的汲取液多为渗透压较高和成分复杂的海水、苦咸水等,为降低内部浓差极化并获取更高的功率密度,PRO一般采用AL-DS模式。

2.3 膜污染

膜污染被认为是造成PRO水通量和功率密度

降低的关键因素,可能受PRO膜朝向、操作压力、料液组成等的影响。膜污染的类型主要有无机污染、有机污染、胶体污染和生物污染等^[20],但这些膜污染发生的位置和严重程度不尽相同。PRO膜的污染机理主要有缩小膜孔隙、堵塞膜孔隙、形成滤饼层^[9]。在污垢颗粒较小或较细的情况下,污垢颗粒可进入膜多孔结构中并在孔内积聚,造成膜孔径缩小;当污垢颗粒和膜孔径相当时,污垢颗粒可能堵塞膜孔;当污垢颗粒尺寸较大时,污垢可被截留在膜表面,积聚到一定程度形成结块或滤饼层。表1介绍了不同物质对膜污染的影响机理及解决办法。

表1 不同污染物对膜的污染机理及清洗措施

Table 1 Fouling mechanisms and cleaning measures of different pollutants on membrane

污染物种类	污染部位	污染机理	解决方法	参考文献
天然有机物	支撑层内部及其与活性层界面处	阻塞膜孔隙、缩小膜孔隙、形成滤饼层	渗透反冲洗;对污水进行纳滤(NF)、超滤(UF)等预处理;添加化学药剂等	[21]
硫酸钙等无机物	支撑层内部和膜表面	无机物晶体在膜表面和支撑层中集聚导致膜孔堵塞	添加阻垢剂抑制垢体的形成;利用物理方法(如反向水力冲洗、负压、气洗等)将污染物从膜上移除	[22]
微生物	支撑层表面及内部	随着废水中有机物和细菌进入支撑层,营养物的持续运输刺激细菌生长并在支撑层孔内形成生物膜,堵塞膜支撑层的空隙	反向水力冲洗;添加化学药剂(如氧化剂、酶、螯合剂、酸、碱、表面活性剂、盐等)	[23-25]
胶体颗粒	支撑层表面	胶体表面的电荷通过静电作用吸附在膜表面,造成膜孔隙阻塞	物理清洗(如空气冲刷和超声清洗);化学清洗(添加化学药剂、调节酸碱度等)	[26-27]

抗污染膜的开发主要集中在对膜进行化学改性或引入具有功能性和内在亲水性的纳米材料,减少膜和污染物之间的吸附、络合作用,从而缓解膜污染。常用的改性材料有聚醚砜^[28]、氨基硅烷^[29]、超支化聚甘油^[30]、埃洛石纳米管^[31]等,这些改性材料在提高水通量和功率密度的同时,还可提高膜的抗污染能力。

此外,还可以通过优化操作条件以及采取预处理和清洗措施减轻膜污染^[20]。常用的预处理方法有物理法和化学法。物理法主要包括砂滤、超滤、纳滤、低压反渗透等^[32-33]。Gang HAN等^[34]通过调节酸碱度和添加清洁剂后发现,膜通量可恢复至初始通量的83%~90%。Xue LI等^[35]的研究证实了乙二醇四乙酸防垢剂对减轻硫酸盐结垢、二氧化硅结垢和钙沉积有明显的效果。

3 PRO技术在水处理中的应用

近年来随着汲取液和原料液可选择范围的扩大、新型渗透膜的成功研发以及装置的不断优化,

PRO工艺的应用范围越来越广泛。PRO不仅可以与其他工艺联用来高效获取盐差能,还可以对海水、非常规水、工业及农业水等进行处理,从而起到改善生态环境和获取经济效益的双重作用^[36]。

3.1 海水淡化发电

自从利用盐差能发电的PRO技术于1976年被首次提出以来,研究者们对PRO获取盐差能的潜力及在水处理方面的应用进行了深入的研究。巴西亚马逊河流入大西洋的入海口被评估为全球具有最大盐差能的河流入海口,据估计PRO的全球理论产能约为 $1.65 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ ^[13]。2009年挪威Statkraft公司率先建成了世界上首家基于PRO发电的海水淡化发电厂,使得PRO在海水淡化发电领域进入实际应用阶段^[13]。但目前PRO技术不够成熟导致其对盐差能的利用效率较低。因此,为了获得符合经济可行性的PRO商用功率密度(5 W/m^2)^[37]和提高发电效率,PRO技术常与其他技

术联用。目前联用工艺的形式多种多样,几种 PRO 海水淡化发电联用工艺的比较见表 2。虽然 PRO 海水淡化发电联用工艺已经有效地提高了盐差能利用效率,但是在经济可行性上仍受选用的膜面积及价格、操作压力、进料液性质等的影响较大,还需要进一步优化工艺方案。

表 2 PRO 海水淡化发电联用工艺比较

Table 2 Comparison of PRO hybrid systems for seawater desalination and power generation						
联用工艺	用途	优点	局限	汲取液	原料液	η
RO-PRO ^[38]	处理海水淡化中的 RO 浓缩水	与单独的 RO 相比,能耗减少,污染少,对海洋环境友好	需要的膜面积大,水通量较低	RO 浓缩水	海水	2
SWRO-NF-PRO ^[39]	处理海水淡化过程中的 RO 浓缩水、生产饮用水、灌溉水	发电量大,不需要海水前处理工艺,成本低	成本受原料液浓度和 PRO 膜价格影响	RO 浓缩水	海水、城市污水	—
FO-PRO ^[40]	处理市政污水、海水淡化过程中的 RO 浓缩水	有效降低高盐溶液中的总溶解性固体(TDS),污染低,易于膜清洗,能耗低	功率密度低,处理水价高	高盐海水	FO 处理过的市政污水	2.0
PRO-FO ^[41]	处理页岩气工业回流水,实现海水淡化发电	功率密度高于 FO-PRO 模式,能有效降低高盐溶液的 TDS	膜污染较 FO-PRO 模式严重	高盐海水	页岩气工业回流水	3.04
双级 PRO ^[42]	处理废水和苦咸水,实现海水淡化发电	处理盐度范围广,膜污染轻,发电量高于单一 PRO 模式	运行费用高	海水、苦咸水	淡水	14
PRO-MD ^[43]	生产饮用水,实现海水淡化发电	水回收率高,渗透发电能力大,膜污染控制良好,对环境的影响小	能源消耗相对较高	海水	地表水	6.2
MVMD-PRO ^[44]	生产饮用水	预处理成本低,热能回收率高,对环境友好	发电量较低,所需膜面积大	MVMD 过程中产生的浓水	河水	1.94
NF-PRO ^[45]	处理海水淡化过程中的 RO 浓缩水、市政污水	水通量高,功率密度与单一 PRO 相比显著提高,操作压力较低	NF 膜污染严重	RO 海水淡化过程中的浓缩水	污水厂二级出水	2.7

注: η 是指工艺最佳功率密度与符合经济可行性 PRO 商用功率密度(5 W/m^2)的比值,比值越大说明经济可行性越好;SWRO 为海水反渗透技术;MD 为膜蒸馏技术;MVMD 为多级闪蒸技术。

3.2 非常规水处理

近年来,PRO 技术可利用海水淡化过程中的浓缩水和城市污废水分别作为汲取液和原料液,由于盐度梯度高以及能从污水中回收水和能量的优点而受到了极大关注。Manli MENG 等^[8]提出了一种 PRO 与活性污泥法相结合的新型 PRO-MBR 联用工艺并用于废水处理,在实现对有机物和营养物有效去除的同时获得了较高的功率密度,其中 TOC 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均高达 98%,TN 的去除率约为 97%,TP 去除率接近 100%。戚永兴等^[46]发明了一种增湿-除湿耦合 PRO 的脱硫废水零排放系统,该系统在实现废水脱硫的同时,还能将盐差能转换为电能,实现对水和能量的高效回收。PRO 技术还被应用于处理石油采出水^[47],该技术能够重复使用 PRO 浓缩后的石油采出水,同时降低泵的能量消耗,减少废液产生量,提高注入能力,从而提高石油产量。

3.3 其他应用

PRO 技术除了可以在海水淡化、非常规水处理中获取盐差能,还可以利用其他过程中的盐差能。F. VOLPIN 等^[48]分别以农业肥料、灌溉用水作为汲取液

和原料液,成功将发电、加压灌溉、水处理综合利用起来,实现了绿色 PRO 的新概念。此外,PRO 技术还可以和地热发电结合起来,最近开发的 Salt Power 能源系统在实现区域供热的时候,又能满足家庭用电的需求^[49]。PRO 技术在未来的发展中将会更加贴近生活需求,具有广阔的实际应用前景。

4 结语与展望

PRO 技术发展飞速,作为可以利用海洋及内陆咸水湖中盐差能的新兴膜法水处理技术,具有脱盐性能高、能耗低、碳排放量少等优势,在碳中和的发展过程中具有广阔的应用前景。但是 PRO 在实际运行过程中仍有局限性,例如,在和其他技术联用时,海水淡化预处理过程中能量易损失、缺少可商业化利用的膜、运行成本较高、膜和膜组件使用寿命低、膜污染较重等。因此,今后还需研究不同的 PRO 配置、优化膜的性能以及多阶段组合工艺设计,以提高整体工艺效率,最大限度地减少能源需求和运营成本,在有效利用盐差能的同时,发挥 PRO 技术在海水淡化、污水处理等水处理领域的优势,实现 PRO 低碳运行的应用前景。

参考文献

- [1] WANG Wanjun, HAO Jiacheng, ZHU Yongqiang, et al. Research on the correlation between ocean energy policy and other policies[C]// 2nd Annual International Conference on Energy, Environmental & Sustainable Ecosystem Development(EESD 2016), Paris, France: Atlantis Press, 2017:22-28.
- [2] TAOUSANIDIS N, GAVROS K. Investigation of pressure retarded osmosis power production[J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 112:10004.
- [3] KIM D I, GONZALES R R, DORJI P, et al. Efficient recovery of nitrate from municipal wastewater via MCDI using anion-exchange polymer coated electrode embedded with nitrate selective resin[J]. Desalination, 2020, 484:114425.
- [4] TANG C Y, YANG Zhe, GUO Hao, et al. Potable water reuse through advanced membrane technology[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(18):10215-10223.
- [5] LOGAN B E, ELIMELECH M. Membrane-based processes for sustainable power generation using water[J]. Nature, 2012, 488(7411):313-319.
- [6] HELFER F, LEMCKERT C, ANISSIMOV Y G. Osmotic power with pressure retarded osmosis: Theory, performance and trends—A review[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 453:337-358.
- [7] MATSUYAMA K, MAKABE R, UYEYAMA T, et al. Power generation system based on pressure retarded osmosis with a commercially-available hollow fiber PRO membrane module using seawater and freshwater[J]. Desalination, 2021, 499:114805.
- [8] MENG Manli, LIU Shuyue, WANG Xinhua. Pressure retarded osmosis coupled with activated sludge process for wastewater treatment: Performance and fouling behaviors[J]. Bioresource Technology, 2020, 307:123224.
- [9] GONZALES R R, ABDEL-WAHAB A, ADHAM S, et al. Salinity gradient energy generation by pressure retarded osmosis: A review[J]. Desalination, 2021, 500:114841.
- [10] KIM J, JEONG K, PARK M, et al. Recent advances in osmotic energy generation via pressure-retarded osmosis (PRO): A review[J]. Energies, 2015, 8(10):11821-11845.
- [11] SKILHAGEN S E, DUGSTAD J E, AABERG R J. Osmotic power: Power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients[J]. Desalination, 2008, 220(1/2/3):476-482.
- [12] 王红柳. 基于PRO技术的盐差能发电过程操作条件优化与能量效率评价[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- WANG Hongliu. Operating conditions optimization and energy efficiency evaluation of the osmotic power generation process based on the pressure retarded osmosis technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [13] TOUATI K T F. Pressure retarded osmosis as renewable energy source[M]. Manhattan: Academic Press, 2017:1-54.
- [14] SARP S, LI Z, SATHTHASIVAM J. Pressure retarded osmosis (PRO): Past experiences, current developments, and future prospects[J]. Desalination, 2016, 389:2-14.
- [15] ACHILLI A, CATH T Y, CHILDRESS A E. Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation[J]. Journal of Membrane Science, 2009, 343(1/2):42-52.
- [16] 虞源, 吴青芸, 陈忠仁. 压力延迟渗透膜技术[J]. 化学进展, 2015, 27(12):1822-1832.
- YU Yuan, WU Qingyun, CHEN Zhongren. Pressure retarded osmosis membrane technology[J]. Progress in Chemistry, 2015, 27(12):1822-1832.
- [17] CHO Y H, KIM S D, KIM J F, et al. Tailoring the porous structure of hollow fiber membranes for osmotic power generation applications via thermally assisted nonsolvent induced phase separation[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 579:329-341.
- [18] 李志浩. 水体溶解性有机物正向渗透去除特性研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- LI Zhihao. Study on removal of dissolved organic matter in water by forward osmosis[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020.
- [19] WANG Lin, CHU Huaqiang, DONG Bingzhi. Effects on the purification of tannic acid and natural dissolved organic matter by forward osmosis membrane[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 455:31-43.
- [20] SHI Yongxuan, ZHANG Mingming, ZHANG Hanmin, et al. Recent development of pressure retarded osmosis membranes for water and energy sustainability: A critical review[J]. Water Research, 2021, 189:116666.
- [21] YIP N Y, ELIMELECH M. Influence of natural organic matter fouling and osmotic backwash on pressure retarded osmosis energy production from natural salinity gradients[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(21):12607-12616.
- [22] ZHANG Minmin, HOU Dianxun, SHE Qianhong, et al. Gypsum scaling in pressure retarded osmosis: Experiments, mechanisms and implications[J]. Water Research, 2014, 48:387-395.
- [23] BOGLER A, LIN Shihong, BAR-ZEEV E. Biofouling of membrane distillation, forward osmosis and pressure retarded osmosis: Principles, impacts and future directions[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 542:378-398.
- [24] WANG Zhiwei, MA Jinxing, TANG C Y, et al. Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 468:276-307.
- [25] KIM D I, KIM J, HONG S. Changing membrane orientation in pressure retarded osmosis for sustainable power generation with low fouling[J]. Desalination, 2016, 389:197-206.
- [26] 王沛芳, 包天力, 胡斌, 等. 天然胶体的水环境行为[J]. 湖泊科学, 2021(1):28-48.
- WANG Peifang, BAO Tianli, HU Bin, et al. Environmental behaviors of natural colloids in water environment[J]. Journal of Lake Sciences, 2021(1):28-48.

- [27] KIM Y, LI Sheng, GHAFPOUR N. Evaluation of different cleaning strategies for different types of forward osmosis membrane fouling and scaling[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 596: 117731.
- [28] ZHAO Dieling, DAS S, CHUNG T S. Carbon quantum dots grafted antifouling membranes for osmotic power generation via pressure-retarded osmosis process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(23): 14016–14023.
- [29] ZHANG Lizhi, SHE Qianhong, WANG Rong, et al. Unique roles of aminosilane in developing anti-fouling thin film composite (TFC) membranes for pressure retarded osmosis (PRO)[J]. *Desalination*, 2016, 389: 119–128.
- [30] ZHANG Yu, LI Jia le, CAI Tao, et al. Sulfonated hyperbranched polyglycerol grafted membranes with antifouling properties for sustainable osmotic power generation using municipal wastewater[J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 563: 521–530.
- [31] LIM S, PARK M J, PHUNTSHO S, et al. Dual-layered nanocomposite membrane incorporating graphene oxide and halloysite nanotube for high osmotic power density and fouling resistance[J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 564: 382–393.
- [32] ABBASI-GARRAVAND E, MULLIGAN C N, LAFLAMME C B, et al. Role of two different pretreatment methods in osmotic power (salinity gradient energy) generation[J]. *Renewable Energy*, 2016, 96: 98–119.
- [33] YANG Tianshi, WAN Chunfeng, XIONG Junying, et al. Pre-treatment of wastewater retentate to mitigate fouling on the pressure retarded osmosis (PRO) process[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 215: 390–397.
- [34] HAN Gang, ZHOU Jieliang, WAN Chunfeng, et al. Investigations of inorganic and organic fouling behaviors, antifouling and cleaning strategies for pressure retarded osmosis (PRO) membrane using seawater desalination brine and wastewater[J]. *Water Research*, 2016, 103: 264–275.
- [35] LI Xue, CAI Tao, AMY G L, et al. Cleaning strategies and membrane flux recovery on anti-fouling membranes for pressure retarded osmosis[J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 522: 116–123.
- [36] LEE C, CHAE S H, YANG E, et al. A comprehensive review of the feasibility of pressure retarded osmosis: Recent technological advances and industrial efforts towards commercialization[J]. *Desalination*, 2020, 491: 114501.
- [37] GERSTANDT K, PEINEMANN K V, SKILHAGEN S E, et al. Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant[J]. *Desalination*, 2008, 224(1/2/3): 64–70.
- [38] PRANTE J L, RUSKOWITZ J A, CHILDRESS A E, et al. RO-PRO desalination: An integrated low-energy approach to seawater desalination[J]. *Applied Energy*, 2014, 120: 104–114.
- [39] TOUATI K, USMAN H S, MULLIGAN C N, et al. Energetic and economic feasibility of a combined membrane-based process for sustainable water and energy systems[J]. *Applied Energy*, 2020, 264: 114699.
- [40] CHENG Zhenlei, LI Xue, CHUNG T S. The forward osmosis–pressure retarded osmosis (FO–PRO) hybrid system: A new process to mitigate membrane fouling for sustainable osmotic power generation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2018, 559: 63–74.
- [41] ALTAEE A, HILAL N. Dual-stage forward osmosis/pressure retarded osmosis process for hypersaline solutions and fracking wastewater treatment[J]. *Desalination*, 2014, 350: 79–85.
- [42] ALTAEE A, SHARIF A, ZARAGOZA G, et al. Dual stage PRO process for power generation from different feed resources[J]. *Desalination*, 2014, 352: 118–127.
- [43] HAN Gang, ZUO Jian, WAN Chunfeng, et al. Hybrid pressure retarded osmosis–membrane distillation (PRO–MD) process for osmotic power and clean water generation[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2015, 1(4): 507–515.
- [44] LEE J G, KIM Y D, SHIM S M, et al. Numerical study of a hybrid multi-stage vacuum membrane distillation and pressure-retarded osmosis system[J]. *Desalination*, 2015, 363: 82–91.
- [45] CHEN Yunfeng, LIU Chang, SETIAWAN L, et al. Enhancing pressure retarded osmosis performance with low-pressure nanofiltration pretreatment: Membrane fouling analysis and mitigation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 543: 114–122.
- [46] 戚永兴, 张建东. 一种增湿–除湿耦合压力延迟渗透的脱硫酸废水零排放系统: CN208471753U[P]. 2019-02-05.
- [47] JANSON A, DARDOR D, AL MAAS M, et al. Pressure-retarded osmosis for enhanced oil recovery[J]. *Desalination*, 2020, 491: 114568.
- [48] VOLPIN F, GONZALES R R, LIM S, et al. Green PRO: A novel fertiliser-driven osmotic power generation process for fertigation[J]. *Desalination*, 2018, 447: 158–166.
- [49] MADSEN H T, BRUUN HANSEN T, NAKAO T, et al. Combined geothermal heat and pressure retarded osmosis as a new green power system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 226: 113504.

[作者简介] 路孝振(1997—), 硕士研究生。电话: 17866619865, E-mail: XiaozhenLu123@163.com。通讯作者: 王琳, 副教授。E-mail: lynn04@126.com。

[收稿日期] 2022-08-02(修改稿)