

膜集成工艺在 PEM 电解水制氢中的应用试验研究

王晓丽¹, 黄鹏飞¹, 陈琛¹, 马振强², 王生辉^{1,3}, 蒋立东³, 李东洋¹

(1. 自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192;

2. 国投津能发电有限公司, 天津 300480;

3. 天津市蓝十字膜技术有限公司, 天津 300192)

摘要: 随着氢能产业的快速发展,未来其对水的消耗量将会激增. 质子交换膜(PEM)电解水制氢作为最有潜力的制氢工艺之一,其过程需要高品质淡水资源. 反渗透海水淡化作为开源增量技术,是解决淡水资源紧缺的重要途径. 为缓解电解制氢对高品质淡水的需求压力,本研究通过对膜集成工艺组合研究,以海水为原水,对比了不同膜集成工艺淡化处理效果和有无能量回收装置工艺的能耗情况. 设计试验装置处理规模为 40 m³/d,工艺流程主要包括介质过滤、三级反渗透和 EDI,并采用高压泵能量回收一体机进行集成化设计. 试验结果显示,产水电导率(25 °C)≤0.1 mS/m,吨水电耗约为 2.9 kW·h,与无能量回收相比能耗节约 49%,形成适用于 PEM 电解水制氢用水的膜集成海水淡化工艺.

关键词: PEM 电解水制氢; 高品质淡水; 膜集成工艺; 能量回收

中图分类号: TQ051;P747 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)01-0092-09

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.01.010

氢气作为一种清洁能源载体,在未来具有成为替代燃料的巨大潜力^[1]. 在众多氢气生产方法中,环保和高纯度的氢气可以通过水电解获得. 在可持续性和环境影响方面,质子交换膜(PEM)水电解被认为是最有前景的高纯高效技术,因其具有电流密度高、能源效率高、质量体积小的特性,并且易于处理和维修而受到广泛关注^[2]. 迄今为止,人们已投入大量精力开发先进的电催化剂、改进 PEM 电解槽,以提高效率并降低成本. 然而在电解槽电解淡水制取

氢气过程中,不仅电能消耗较大,且消耗大量淡水资源^[3]. 《全球制氢用水报告》指出,目前每年全球制氢抽取的淡水规模为 22 亿 m³,聚焦到氢能产能密集的局部地区,水资源的消耗情况就会变得更为严峻. 《报告》发现,目前全球绿氢和蓝氢(正在运营和已在规划中)产能中逾 35%位于高水压力的地区. 中国、欧盟、美国和其他 G20 国家也都面临着不同程度的水压力.

我国海岛资源丰富,海岛风能、太阳能资源品质

收稿日期: 2024-08-09; 修改稿收到日期: 2024-09-26

基金项目: 2023 年国家(兵团)科技计划项目(2023AB034); 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室开放课题(2023OWSL-01); 山东省重大科技创新工程项目(LSKJ202204503); 天津市科技计划项目(22JCYBIC00660); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(K-JBYWF-2023-T04, K-JBYWF-2024-ZT06, K-JBYWF-2021-T06, K-JBYWF-2024-QR-06, K-JBYWF-2024-QR-08)

第一作者简介: 王晓丽(1986-),女,河北石家庄人,工程师,硕士,从事海水与苦咸水淡化技术研究, E-mail: wxl861115@163.com

引用本文: 王晓丽,黄鹏飞,陈琛,等. 膜集成工艺在 PEM 电解水制氢中的应用试验研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(1): 92-100.

Citation: Wang X L, Huang P F, Chen C, *et al.* Experimental study on the application of membrane integration process in PEM water electrolysis for hydrogen production[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(1): 92-100.

高,年满发小时数远高于东部沿海陆地,并且海洋波浪能是海洋能中品位最高、分布最广的可再生能源,可与风能、太阳能优势互补。海上能源岛的建设,可作为能源汇集点,不仅限于汇集岛上及周边的风电场、光伏电站、波浪能等可再生能源设施的电力,还包括储能、制氢、海水淡化、海洋养殖等多种功能,可形成一个综合能源供给和转换的枢纽。例如,德国和丹麦共同启动的 Bornhold 能源岛项目,旨在将波罗的海上的多个风电场连接起来,形成一个综合能源供给中心;丹麦等国计划在北海建设一个人工能源岛,预计安装 200 台海上风力发电机,容量达到 3 GW,未来可能扩大到 10 GW。2023 年 10 月 18 日,我国能源局发布《关于组织开展可再生能源发展试点示范的通知》,提出到 2025 年,组织实施一批技术先进、经济效益合理、具有较好推广应用前景的示范项目,其中包括了“海上能源岛示范”。2023 年,海南省决定建设“清洁能源岛”,到 2025 年,清洁能源发电装机比重达到 83%,清洁能源岛初具规模。到 2035 年,能源清洁转型基本实现,清洁能源发电装机比重达到 89%,海南清洁能源岛基本建成。随着技术的不断进步和成本的逐步降低,海上能源岛有望在未来实现更加广泛的应用和推广^[4-5]。

海岛区域海水丰富,近年来,直接海水电解制氢技术取得了显著进展。例如,中国科学院大连化学物理研究所开发的 $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 直接电解海水制氢装置,已经实现了 2 000 h 连续稳定运行,电解槽平均直流电耗为 $4.04 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{Nm}^3 \text{H}_2$ ^[6]。国外也出现一些海水直接电解制氢的示范项目,但这些项目大多仍处于小规模试点阶段,尚未实现大规模商业化应用。尽管有所突破,但海水成分复杂,含有超过 90 种化学物质和元素。这些杂质在电解过程中会引起副反应竞争、催化剂失活以及隔膜堵塞等问题,严重影响电解效率和设备寿命,仍面临诸多技术难题,需要持续的研发和投入。现有 PEM 电解高纯水、ALK 电解水设备与工艺已得到广泛应用和验证,具有较高的技术成熟度和可靠性。虽然需要的水质要求较高,但通过海水淡化等脱盐技术,可解决用水问题。尽管海水淡化需要一定的能源消耗和资金投入,但相比于直接电解海水,其技术更为成熟,设备更为完善,能够在一定程度上降低制氢的总成本,每千克制氢成本从

15.89 元左右降低至 12.32 元左右。

海水淡化作为淡水增量技术成熟可靠,产水稳定且应用广泛^[7]。需要注意的是在电解水过程中,氯离子的析出会对电极腐蚀破坏,电极材料会逐渐溶解或磨损,导致电极有效面积减小,电解效率降低。严重的腐蚀会破坏电解槽结构的完整性,导致电解槽密封性下降、漏液等问题,增加生产成本和维护难度^[8-9]。另外,包括用于碱性的电解质中的隔膜和催化剂以及 PEM 中膜和多孔传输层,都可能受到水杂质(如铁、铬、铜等)的不利影响,这些杂质在电解过程中可能堵塞膜孔或引发副反应,影响电解效率和设备寿命,所以电解水制氢要求使用高纯度水^[10-11],目前要求水的电导率(25°C) $\leq 0.1 \text{ mS/m}$ ($1 \mu\text{S/cm}$)。常规的海水淡化一般采用两级或部分两级反渗透工艺,产水电导率在 $20 \sim 100 \mu\text{S/cm}$ 范围^[12],水质不能满足制氢用水需求。目前纯水及超纯水的制备一般以自来水为原水,含盐量 $\leq 500 \text{ mg/L}$,电导率 $\leq 1\,000 \mu\text{S/cm}$,一般采用低压反渗透结合 EDI 或者混床,但是海水含盐量较高,为 $30\,000 \sim 35\,000 \text{ mg/L}$,电导率 $\leq 46\,000 \sim 53\,000 \mu\text{S/cm}$,所采用的工艺及能耗均有较大差异^[13-14]。

为满足制氢用水需求,发展高效集成的海水脱盐技术提供高质量淡水,对于实现大规模电解水制氢具有重要意义。本文开展了膜集成工艺对海水深度脱盐处理效果研究,分析了不同级数脱盐效果和出水水质,并对比了有无能量回收装置工艺的能源消耗情况,为电解水制氢对水资源的获取提供一种新途径。

1 实验部分

1.1 原水水质

原水为青岛海域海水,盐质量浓度 $30\,100 \sim 32\,900 \text{ mg/L}$,电导率 $46\,140 \sim 50\,053 \mu\text{S/cm}$,浊度 $3 \sim 5 \text{ NTU}$,微量元素及重金属盐含量大部分结果显示稳定,随季节变化幅度很小。

1.2 产水要求

PEM 电解制氢是一种高效的水分解制氢技术,在电解水制氢过程中,水质对电解效率和电极寿命有重要影响,需使用高纯度的水以保证电解过程的效率和设备的长期稳定运行,水中不能含有杂质、悬浮物、微生物、有机物等,要求水的电导率(25°C) $\leq 0.1 \text{ mS/m}$ ($1 \mu\text{S/cm}$)。

表 1 原海水水质

Table 1 Raw seawater quality

检测项目	检测结果	检测依据
钙离子/(mg·L ⁻¹)	388	GB/T 33584.1—2017
镁离子/(mg·L ⁻¹)	1 280	GB/T 33584.1—2017
浊度/NTU	5	HJ 1075—2019
pH	7.61	GB 17378.4—2007. 26
电导率/(μS·cm ⁻¹)	5.3×10 ⁴	GB/T 6908—2018
总硬度/(mg·L ⁻¹)	62.5	GB/T 15452—2009
悬浮物/(mg·L ⁻¹)	10.5	GB 17378.4—2007 27
碳酸盐/(mg·L ⁻¹)	0.7	GB/T 15451—2006 7
化学需氧量(COD _{Mn})/(mg·L ⁻¹)	0.16	GB 17378.4—2007. 32
硫酸盐/(mg·L ⁻¹)	2 750	DL/T 502.11—2006
氯化物/(mg·L ⁻¹)	19 500	GB 17378.4—20073. 28
氟化物/(mg·L ⁻¹)	1.4	GB/T S750.5—2006 3.1
活性硅酸盐(以 SiO ₂ 计)/(mg·L ⁻¹)	0.1	GB 17378.4—2007 17. 2
硼/(mg·L ⁻¹)	4.56	GB/T 5750.6—2006 1.4

表 2 PEM 水电解制氢水质要求

Table 2 Water quality requirements for hydrogen production by PEM water electrolysis

名称	指标
电导率(25℃)/(mS·m ⁻¹)	≤0.1
可氧化物质含量/(mg·L ⁻¹)	≤0.08
吸光度(254 nm,1 cm 光程)	≤0.01
蒸发残渣(105±2℃)/(mg·L ⁻¹)	≤1.0
可溶性硅/(mg·L ⁻¹)	≤0.02

1.3 能耗指标计算

正常工作时,采集配电柜上的电流和电压显示值,测量参数的波动范围应小于 5%。取测量数据的平均值作为计算值,一级反渗透每吨产出水的运行功率和能耗按式(1)和式(2)计算^[15-16]:

$$P=\frac{\sqrt{3}\times U\times I\times \cos\theta}{1\,000}\tag{1}$$

$$SEC=\frac{\sum P}{Q}\tag{2}$$

式中: P 为设备运行功率,kW; U 为器件工作电压,V; I 为设备工作电流,A; $\cos\theta$ 为设备的功率因数,一般在铭牌或说明书上注明,如无规定则取 0.92; Q 为采出水流量,m³/h; SEC 表示每吨水的耗电量,(kW·h)/m³。

2 试验装置设计

中试海水处理装置规模为 40 m³/d,分为预处理和脱盐两个单元。预处理单元工艺包括原水箱、供水泵、两级砂滤和精密过滤器,主要去除原海水中的悬浮物、胶体等杂质;脱盐单元流程包括保安过滤器、高压泵、三级反渗透、EDI 深度脱盐和产水箱,主要脱除净化后的海水中的离子成分,最终保证产水为 PEM 水电解制氢系统提供用水。

整体工艺流程:原海水由取水泵取出,进入两级砂滤过滤器,去除原水中胶体、悬浮物等杂质,然后进入保安过滤器,加压进入一级反渗透系统,产水进入二、三级反渗透系统进一步脱盐,浓水返回原水箱,产水进入 EDI 深度脱盐系统,EDI 系统产水进入产水箱。每级反渗透产水设电导率仪、取样阀和截断阀门,可分别对一级反渗透、两级反渗透和三级反渗透产水及多级不同组合工艺运行性能进行试验测试,设备照片、流程图及布置图如图 1~图 3 所示。

另外,根据高压系统是否进行浓海水余压能量回收,进行了两种高压工艺设计,如图 4 所示。



图 1 试验装置

Fig. 1 The test equipment

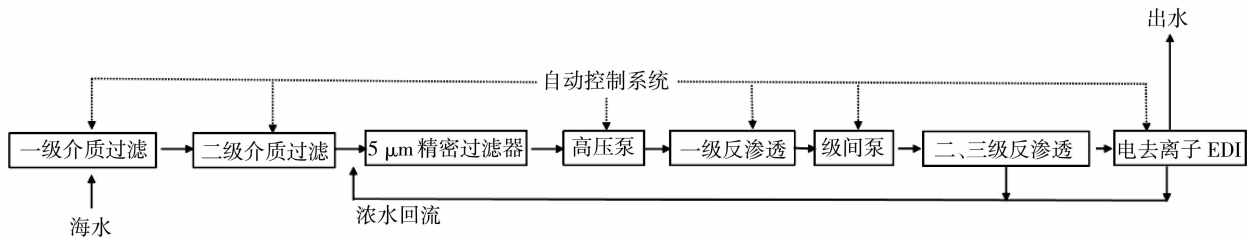


图 2 试验工艺流程示意图

Fig. 2 Flow chart of experiment

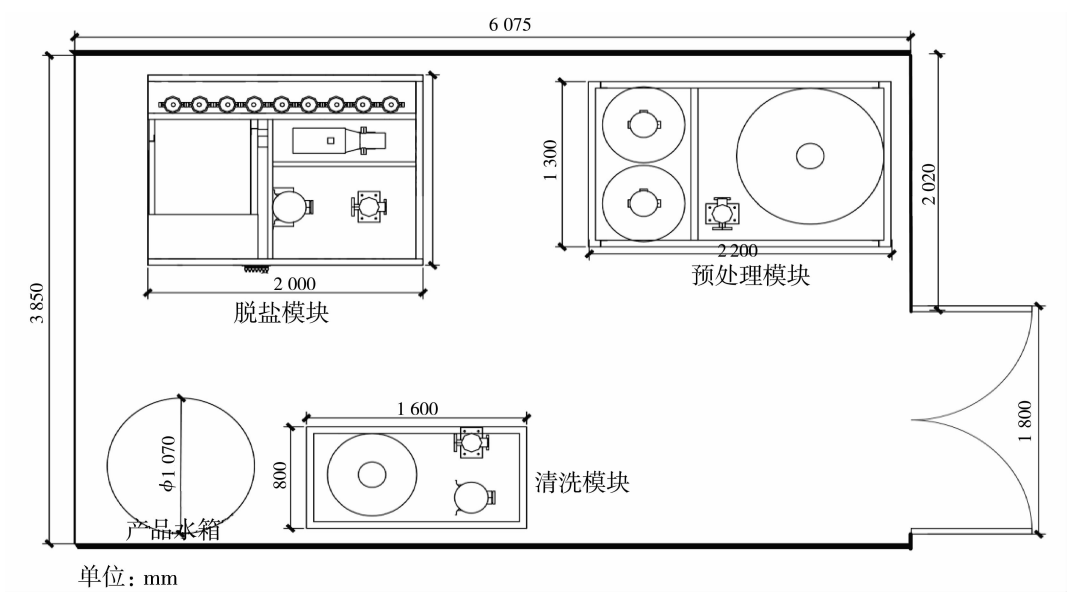


图 3 试验装置布置图
Fig. 3 The test equipment layout

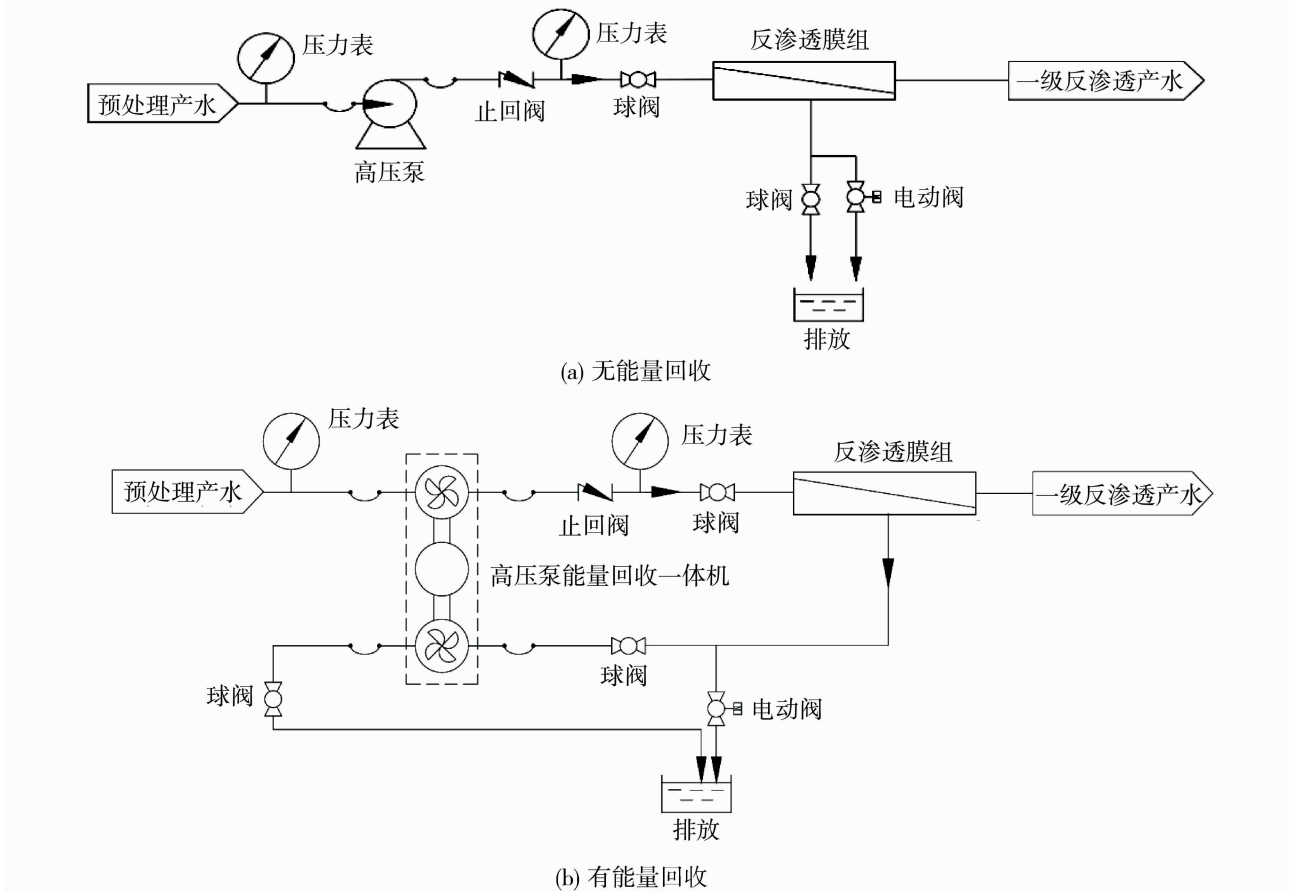


图 4 高压系统流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental device for high pressure system

2.1 预处理系统

预处理系统前端设置水质自动识别系统,通过配置浊度计、电导率仪、流量计、压力表等在线仪表,实时监测预处理进水及产水水质指标.设计采用两

级砂滤为主体预处理设备. 原水经过取水泵进入砂滤系统, 去除海水中悬浮物、胶体、大颗粒杂质等, 有效降低水的浊度及悬浮物含量, 延长后续反渗透膜的化学清洗周期及使用寿命.

单套砂滤处理规模 1.7 m³/h, 直径 600 mm, 罐体为玻璃钢材质, 设置自动多路阀, 实现全自动运行, 可根据时间/压差/累计出水流量进行砂滤系统的自动反洗.

2.2 脱盐系统

2.2.1 一级反渗透膜组

一级采用耐污染海水反渗透膜元件, 脱盐率≥99%, 主要是去除水中的离子、有机物、微生物、病毒等. 膜组共 4 支压力容器, 每支压力容器中装有 1 支 4040 的海水反渗透膜.

2.2.2 二级反渗透膜组

二级采用 2540 低压反渗透膜元件, 作用是进一步去除一级反渗透产水中的离子、有机物、微生物、病

毒等. 为提高二级回收率, 膜组件采用四段式排列方式, 每支压力容器中装有 1 支 2540 的低压反渗透膜.

2.2.3 三级反渗透膜组

三级采用 2540 低压反渗透膜元件, 作用是可以对二级产水进行深度脱盐, 去除水中的离子、有机物、微生物、病毒等. 由于水量较少, 膜组件采用二段式排列方式, 每支压力容器中装有 1 支 2540 的低压反渗透膜.

2.2.4 EDI 脱盐系统

EDI 技术采用直流电迫使污染离子持续地从进水中迁移出来, 并穿过离子床和离子交换膜进入浓水室. 同时直流电能够将水分子电离成氢离子和氢氧根离子, 持续的对树脂进行再生. 因此 EDI 可以连续、可预知的生产出等同甚至优于混床出水的高纯水.

EDI 给水要求电导率<10 μS/cm, 选用最小规模处理量 50 L/h 的 EDI 模块.

表 3 脱盐系统参数

Table 3 Desalting system parameter

设备名称	型号	有效面积/m ²	运行压力/MPa	产水量/(m ³ ·d ⁻¹)
一级反渗透膜	SW30-4040	7.4	5.5	7.4
二级反渗透膜	BW30-2540	2.6	1.55	3.2
三级反渗透膜	TW30-2540	2.6	1.55	3.2

表 4 EDI 系统参数

Table 4 EDI system parameter

设备名称	型号	工作电压/V	工作电流/A	产水量/(m ³ ·d ⁻¹)
EDI	SD-50L	20~40	0.5~1	1.2

2.3 化学清洗/冲洗系统

当反渗透系统长期运行后, 不可避免的将发生膜污染, 系统产水量将会下降, 系统能耗增加. 针对反渗透系统运行过程中需要清洗的问题, 设计定期的清洗装置, 本流程预处理和膜系统具备自动间歇性清洗功能, 故化学清洗周期为 3~6 个月, 保证系统产水量能够恢复.

反渗透化学清洗系统包括化学清洗水箱、清洗水泵、清洗保安过滤器及附属设备材料. 化学清洗水泵兼做反渗透停机保护用冲洗水泵. 当反渗透系统停机或化学清洗过程完毕后, 用反渗透产水自动冲洗膜内和管道中的浓水, 使膜完全浸泡在淡水中, 置换系统内的浓盐水, 可防止系统腐蚀和膜的自然渗透造成的膜损坏, 同时还可以防止再次运行时加入的药剂形成亚稳态在膜上沉淀, 冲洗还可以带走部

分污垢, 形成对膜和装置的有效保养.

系统设置化学清洗装置 1 套, 包括化学清洗水箱 1 台, 体积为 200 L, 化学清洗水泵 1 台, 流量为 2.5 m³/h, 扬程为 30 m, 清洗保安过滤器 1 台, 流量为 2.5 m³/h.

2.4 控制系统

控制系统拟采用 PLC+触摸屏的控制方式, 具备手动和自动两种功能. 在手动模式下, 系统将根据现场操作情况决定各设备的启停; 自动模式下, 系统将根据逻辑程序全自动运行. 具有水处理系统信息的采集、处理和记录, 对异常工况进行报警. 电气控制柜满足 GB 50171 的要求, 具备防止盐雾腐蚀、凝露等功能. 在室内的电气设备, 防护等级不低于 IP54; 室外的电气设备, 其防护等级不低于 IP55, 特殊规定的除外.

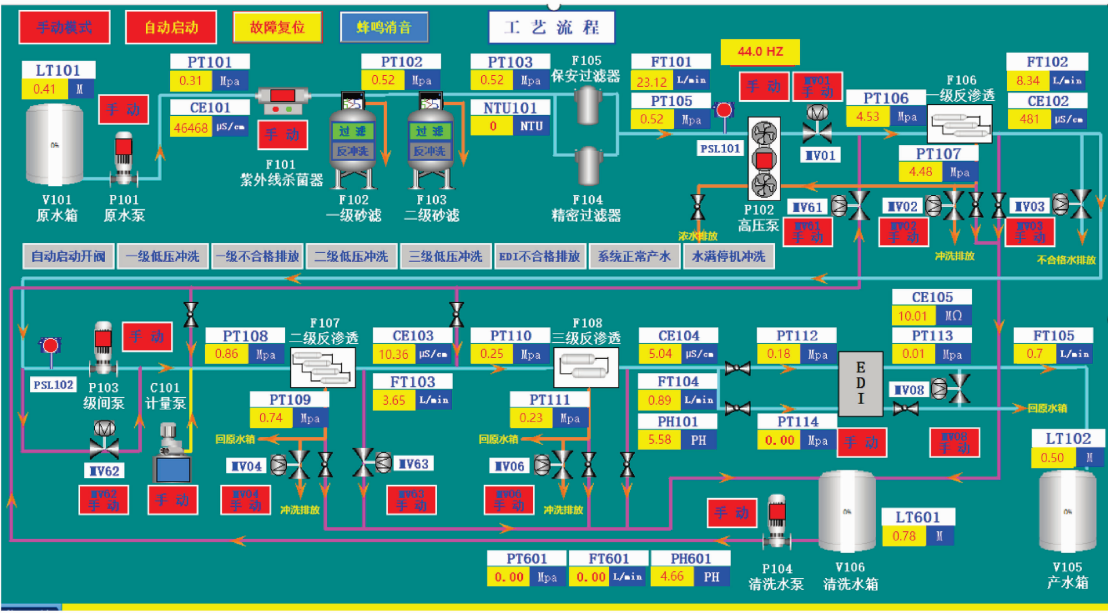


图 5 系统控制操作界面

Fig. 5 System control operation interface

3 结果与讨论

3.1 运行情况

3.1.1 各级运行压力

在 30 d 的运行试验过程中,各级处理及脱盐模块进水压力波动不大,如图 6 所示,预处理、一级反渗透、二级反渗透、三级反渗透、EDI 的实际运行压力平均值分别为 0.31、4.53、0.86、0.25 和 0.18 MPa;另外,反渗透系统压力与浓水压力的压差 ≤ 0.10 MPa,如图 7 所示,证明膜元件无明显污染指

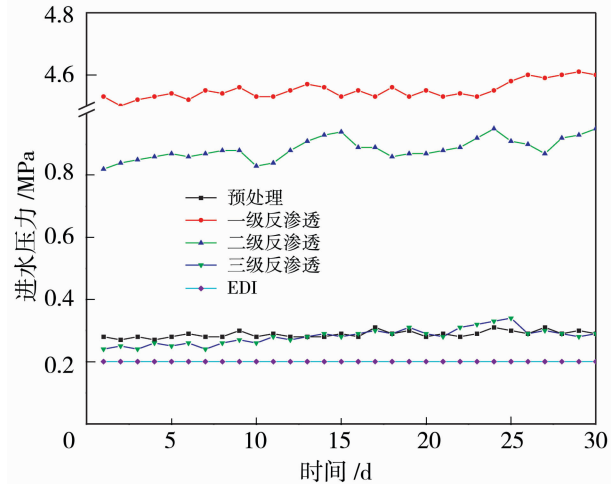


图 6 预处理及脱盐系统处理运行压力

Fig. 6 Operating pressure of pre-treatment and desalination system treatment

征. 因为膜污染的初期标志是反渗透的压差升高,系统从进水到浓水出口之间的压差通常在 0.03~0.2 MPa 之间. 综上说明本设计的预处理工艺切实可行,能够满足反渗透装置的进水要求,各个脱盐模块设计合理,系统运行稳定.

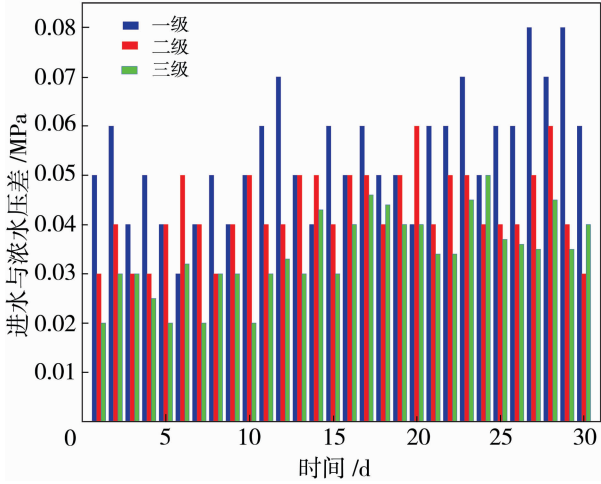


图 7 各级反渗透进水与浓水压差

Fig. 7 Inlet water pressure drop of reverse osmosis system

3.1.2 产水水质和脱盐率

海水淡化进水电导率在 46 140~50 053 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,如图 8 所示,一级出水电导率在 445~490 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 范围,脱盐率 99%;二级出水电导率在 11~15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 范围,脱盐率 97%;三级出水电导率

在 5~6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 范围,脱盐率 50%~60%;EDI 出水较纯,电阻率 $\geq 10\text{ M}\Omega\cdot\text{m}$,脱盐率 95%,如图 8 所示.

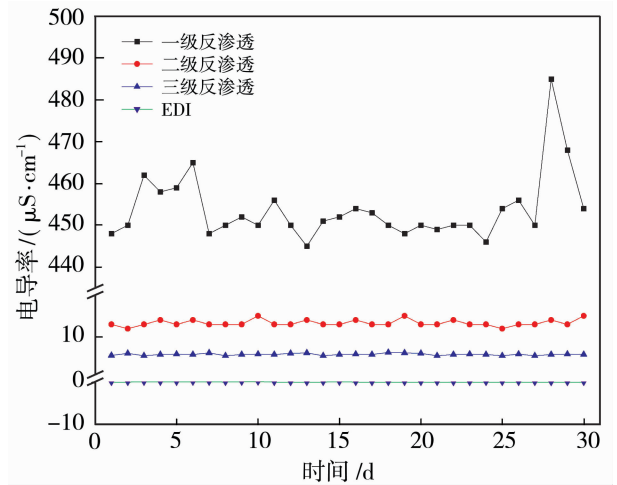


图 8 各级反渗透及 EDI 系统产水水质情况
Fig. 8 Water quality of reverse osmosis and EDI system

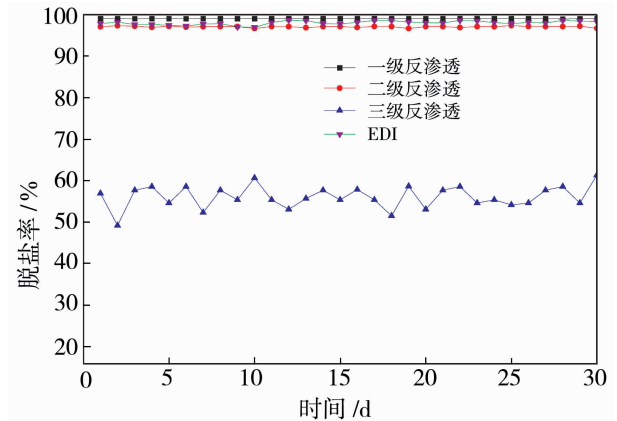


图 9 各级反渗透及 EDI 系统脱盐率
Fig. 9 Desalinization rate of reverse osmosis and EDI system

一、二级反渗透脱盐率较高,但由于原水为海水,电导率较高,二级反渗透的产水电导率仍 $\geq 10\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$,不满足制氢的要求;另外,若二级反渗透产水直接进入 EDI 系统,则会影响 EDI 系统的性能和寿命,整个系统的产水水质也会受到影响;二级反渗透的产水再经过三级反渗透进一步脱盐,三级反渗透产水电导率 $<10\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$,三级反渗透产水水质仍不满足制氢用水的要求,但进入 EDI 系统不会造成负担.

多级反渗透+EDI 系统可以提高最终产水水质,实现 99.5%以上的脱盐率,可使产水水质满足制氢用水要求.

3.2 能耗优化

能耗是膜集成脱盐处理技术运行的重要指标.高压泵作为主要的耗电设备,是 RO 系统的核心,为克服海水的渗透压提供动力.反渗透系统中为降低能耗,可配置能量回收装置对一级反渗透产生的带压浓水能量进行回收.

本试验装置规模较小,为了研究有无能量回收能耗的不同,能量回收工艺设计中选择高压泵能量回收一体机,型号 APP1.8/APM1.2,材质 APP,泵和 APM 发动机的所有部件都是由耐腐蚀性材料如双相 (SAF 2205/EN1.4462/UNS S31803—S32205) 和超双相 (SAF 2507/EN1.4410/UNS S32750) 不锈钢,以及碳纤维加固的聚醚醚酮 (PEEK) 制成,装机功率为 3 kW,电动机效率为 86%;无能量回收工艺设计中仅设置高压泵,一级反渗透产生的带压浓水直接排放.

对两种工艺的设计、运行能耗及投资进行了对比,结果如表 5 及表 6 所示.

表 5 有无能量回收装置配置对比

Table 5 Comparison of process configuration with or without energy recovery device							
工艺	设备名称	型号	流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	扬程/m	装机功率/kW	运行功率/kW	设备投资/万元
无能量回收	高压泵	APP1.8	1.7	500	4	2.9	2.5
有能量回收	带能量回收的海水高压泵	APP1.8/APM1.2	1.7	500	3	1.5	5

有能量回收工艺比无能量回收工艺,投资相差 2.5 万元,但是运行功率相差 1.4 kW,可节约将近 50%的电能.通过测试计算可知,有能量回收工艺吨水能耗为 2.7 $(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{m}^3$,与无能量回收工艺相比可节约 50%的能耗,这是因为,能量回收将一级反渗透的浓水余压回收,节约了高压泵的能耗.

表 6 吨水能耗分析

Table 6 Energy consumption analysis per ton of water				
工艺	电压/V	电流/A	功率/kW	吨水能耗/ $(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$
无能量回收	380	5.1	2.9	5.4
有能量回收	380	2.6	1.5	2.7

4 结论与展望

电解水制氢对水质的要求较高,常规的海水淡化一般采用两级反渗透,出水水质无法达到要求. 本工作通过研究膜集成海水深度脱盐技术,探讨了各级脱盐率和水质指标,分析了能耗及成本,为电解水制氢提供了一种可行的水源解决方案.

随着膜材料和制造工艺的不断进步,预计未来该技术将更加高效、经济,有助于推动电解水制氢技术的商业化应用. 同时,进一步研究和优化膜集成工艺,降低系统成本,提高操作稳定性,将是未来研究的重点.

此外,本试验装置主要研究工艺的脱盐效果,验证产水水质是否符合制氢用水需求,受规模限制,未讨论回收率相关问题,二、三级膜的支数较少,回收率较低,规模扩大后,二三级的回收率可达 90%.

参考文献:

- [1] Wang T Z, Cao X J, Jiao L F. PEM water electrolysis for hydrogen production: Fundamentals, advances, and prospects[J]. *Carb Neutrality*, 2022, 1: 21.
- [2] Kumar S S, Himabindu V. Hydrogen production by PEM water electrolysis — A review[J]. *Mater Sci Energ Technol*, 2019, 2(3): 442—454.
- [3] 张显峰,唐 乾,刘 伟,等. PEM 电解制氢技术问题及现状分析[J]. *山东化工*, 2024, 53(4): 105—109.
- [4] Busch H, Radtke J, Islar M. Safe havens for energy democracy? Analysing the low-carbon transitions of Danish energy islands[J]. *Z Politikwiss*, 2023, 33(2): 227—251.
- [5] Armeni A, Semenyuk M, Plet C, *et al.* D12.5 deployment plan for future european offshore grid development. Short-term project-bornholm island cleanstream energy hub[R]. Kongens Lyngby: DTU, 2021.

- [6] Li M, Li H, Fan H F, *et al.* Engineering interfacial sulfur migration in transition—metal sulfide enables low overpotential for durable hydrogen evolution in seawater[J]. *Nat Commun*, 2024, 15: 6154.
- [7] 李 露,薛喜东,靳少培,等. 反渗透淡化工程设计案例分析[J]. *净水技术*, 2019, 38(7): 130—132.
- [8] Chakik F E, Kaddami M, Mikou M. Effect of operating parameters on hydrogen production by electrolysis of water[J]. *Int J Hydrogen Energ*, 2017, 42(40): 25550—25557.
- [9] Amikam G, Nativ P, Gendel Y. Chlorine-free alkaline seawater electrolysis for hydrogen production[J]. *Int J Hydrogen Energ*, 2018, 43(13): 6504—6514.
- [10] Zeng K, Zhang D K. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications[J]. *Prog Energ Combust*, 2010, 36(3): 307—326.
- [11] Vermeiren P, Moreels J P, Claes A, *et al.* Electrode diaphragm electrode assembly for alkaline water electrolyzers[J]. *Int J Hydrogen Energ*, 2009, 34(23): 9305—9315.
- [12] 潘献辉,郑 睿,王晓楠,等. 膜法海水淡化厂产品水水质与饮用安全分析[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(20): 19—23.
- [13] 李颖华. 航空电子用高纯水制取工艺及应用[J]. *冶金丛刊*, 2017(5): 211—212.
- [14] Zhang X B, Yang Y Y, Ngo H H, *et al.* A critical review on challenges and trend of ultrapure water production process[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 785: 147254.
- [15] 中华人民共和国自然资源部. HY/T 245—2018 海水淡化装置能量消耗测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 32359—2015 海水淡化反渗透膜装置测试评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

Experimental study on the application of membrane integration process in PEM water electrolysis for hydrogen production

WANG Xiaoli¹, HUANG Pengfei¹, CHEN Chen¹, MA Zhenqiang²,
WANG Shenghui^{1,3}, JIANG Lidong³, LI Dongyang¹

(1. The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, MNR(Tianjin), Tianjin 300192, China; 2. Tianjin SDIC Jinneng Electricity Generating Co., Ltd., Tianjin 300480, China; 3. Tianjin Lanshizi Membrane Technology Co., Ltd., Tianjin 300192, China)

Abstract: With the rapid development of the hydrogen energy industry, its water consumption will surge in

the future. PEM electrolysis of water for hydrogen production is one of the most promising hydrogen production processes, which requires high-quality fresh water resources. Reverse osmosis seawater desalination, as an open-source incremental technology, is an important way to solve the shortage of fresh water resources. To alleviate the demand pressure for high-quality fresh water in electrolytic hydrogen production, this study compared the desalination treatment effects of different membrane integration processes and the presence or absence of energy recovery devices using seawater as raw water through a combination of membrane integration processes. The designed experimental device has a processing capacity of 40 m³/d, and the process mainly consists of medium filtration, three-stage reverse osmosis, and EDI, with an integrated design using a high-pressure pump energy recovery machine. The experimental results show that the conductivity of the produced water (25 °C) is ≤ 0.1 mS/m, and the power consumption per ton of water is about 2.9 kW · h. Compared with no energy recovery, it can save 49% of energy consumption, forming a membrane integrated seawater desalination process suitable for PEM electrolysis water hydrogen production water, providing technical reference for seawater desalination in hydrogen production water.

Key words: PEM water electrolysis for hydrogen production; high-quality fresh water; membrane integration process; energy recovery



致谢 2024 年度《膜科学与技术》全体审稿专家

《膜科学与技术》1981 年创刊,刊号 CN10—1905/TB,连续出版物号 ISSN 1007—8924,邮发代号 54—40,是膜技术领域专业性科技期刊。

2024 年,《膜科学与技术》入选首版《化工领域高质量科技期刊分级目录》T2 期刊,继续入选北京大学《中文核心期刊要目总览》、《中国科学引文数据库》(CSCD)核心期刊目录、RCCSE 中国核心学术期刊(A)、《中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)》,继续被《中国学术期刊(光盘版)》(CNKI)、万方数据库、维普数据库、《世界期刊影响力指数(WJCI) 报告》及美国化学文摘社(CAS)、JSTChina 等国内外多家数据库收录。

2024 年,《膜科学与技术》在 201 位审稿专家的大力支持和倾情付出下,顺利地完成了期刊的出版工作。正是您严谨、专业的评审建议,使期刊学术质量得以保障与提升。在此,我们衷心感谢您在繁忙的工作中,抽出宝贵时间,为《膜科学与技术》的论文质量进行严格把关,为期刊的发展贡献力量。我们期待在新的一年里继续与您携手前行,为膜科学与技术的发展贡献智慧与力量。

以下是 2024 年度《膜科学与技术》审稿专家名单(按姓氏音序排列):

安全福	白云翔	毕 飞	蔡卫卫	曹雪丽	曹义鸣	常启兵	崔朝亮	崔 鹏	崔振宇	代忠德	单美霞
邓 橙	丁 力	董应超	樊森清	范益群	冯世超	付维贵	傅荣强	高学理	葛 亮	龚耿浩	古其林
顾学红	郭春禹	郭红霞	郭立玮	郭玉海	韩 乐	韩小龙	何本桥	何春菊	何 涛	何雪忠	侯得印
胡云霞	黄 霞	黄小军	江河清	姜晓滨	姜忠义	蒋兰英	解利昕	金丽梅	金万勤	靳 健	康国栋
康玉堂	况 武	郎万中	李保安	李 博	李传润	李春丽	李 浩	李 健	李建新	李 琳	李 培
李胜海	李炜怡	李卫星	李贤辉	李砚硕	李奕帆	李战胜	梁 恒	梁 帅	梁松苗	廖俊斌	廖祥军
林 彬	林红军	林久养	林立刚	林亚凯	刘 富	刘公平	刘江涛	刘 杰	刘 凯	刘立芬	刘新磊
刘 毅	刘长坤	刘 壮	逯 鹏	罗建泉	罗双江	吕晓龙	马沧海	马小华	马晓华	孟广祯	孟秀霞
牛青山	潘福生	潘杰峰	潘巧明	潘宜昌	彭跃莲	乔志华	秦培勇	邱鸣慧	任吉中	邵嘉慧	邵 路
申利国	沈江南	宋成文	苏保卫	孙海翔	孙世鹏	唐 娜	田 瑞	万灵书	王保国	王海辉	王海涛
王 虹	王建强	王建友	王 捷	王景涛	王 军	王 雷	王 磊	王丽华	王乃鑫	王同华	王小侏
王新华	王旭亮	王学瑞	王 艳	王 哲	王正宝	王 志	王志刚	王志宁	王志伟	韦 奇	魏嫣莹
魏逸彬	吴昌飞	吴汉阳	吴 洪	吴 亮	吴雪梅	武春瑞	夏圣骥	肖 康	肖通虎	谢 锐	徐 佳
徐 慢	徐志康	许振良	焉晓明	严 峰	杨建华	杨正金	姚之侃	伊春海	易 砖	于海军	于水利
余立新	俞三传	袁黎明	张慧峰	张 林	张奇峰	张秋根	张守海	张小珍	张新波	张新妙	张 轩
张亚涛	张 杨	张永明	张宇峰	张玉忠	赵 平	赵 颂	赵之平	郑吉富	郑 祥	钟 璟	仲兆祥
周荣飞	周守勇	周 勇	周政忠	朱宝库	朱利平	朱雪峰	庄黎伟	邹 栋			