西北大学学报(自然科学版)
2026 年 10 月,第 56 卷第 5 期,Oct. ,2026,Vol. 56,No. 5
Journal of Northwest University (Natural Science Edition)

·能源资源的绿色低碳转化与高效利用·

电场作用下烟气水热回收用陶瓷膜的传质性能

李明杰,杨晨龙,连子赫,睢国众,杜　铭

西安交通大学 化学工程与技术学院,陕西 西安　710049

摘要　能源和水资源短缺已成为 21 世纪人类面临的主要问题之一,利用膜法回收烟气中的水和热量是近年来提出的一种有效方法。但在实际应用中,膜表面形成的液膜会覆盖膜孔,阻碍毛细冷凝过程中的热质传递。该研究提出了一种在膜表面外加电场去除液膜的新方法,对比了聚偏二氟乙烯(PVDF)膜、聚丙烯(PP)膜、聚碳酸酯(PC)膜和陶瓷膜的水回收性能,并研究了电源电压、入口压力和蒸气温度对传质过程的影响。研究表明,陶瓷膜在电场作用下回收性能更稳定,与无电场的情况相比,在 20 V 电压下回收水质量通量可提高 158.52%,而蒸气温度和压力对回收启动阶段强化作用较为明显。该方法简单且有效,具有良好的应用前景,对我国节水、节能减排工作具有重要意义。

关键词　陶瓷膜;水热回收;电场强化;毛细冷凝

中图分类号:TK01 +9　　**DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-05-004

Mass transfer performance of ceramic membranes for water and heat recovery from flue gas under electric field

Li Mingjie, Yang Chenlong, Lian Zihe, Sui Guozhong, Du Ming

School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract　Energy and water scarcity is one of the main problems to be solved in the 21st century. Using the membrane technology to recover water and heat from flue gas has been an effective method proposed in recent years. However, in actual application, the liquid film formed on the membrane surface blocks the membrane pores, which hinders the mass and heat transfer in the capillary condensation process. In this study, a new method of removing the liquid film by applying an electric field on the surface of the membrane is proposed. The water recovery performance of polyvinylidene fluoride (PVDF), polypropylene (PP), polycarbonate (PC), and ceramic membranes was compared. And the effects of power voltage, inlet pressure, vapor temperature on the mass transfer process were investigated. The results indicate that ceramic membranes exhibit more stable recovery performance under an applied electric field and the mass flux of recovered water is increased by 158.52% at 20 V compared with that without electric field. The enhancement effect of vapor temperature and pressure is more significant during the initial stage of the recovery process. This method is simple, effective, and has promising application potential, making it highly important for energy conservation, water saving and emission reduction in our country.

Keywords　ceramic membrane; water and heat recovery; electric field-enhanced; capillary condensation

收稿日期:2026-03-21　　修回日期:2026-04-13

基金项目:国家自然科学基金(52576093)

第一作者:李明杰,女,博士,副教授,从事余热回收,气液两相流数值模拟等研究,mjli2018@mail.xjtu.edu.cn。

水资源短缺和能源绿色转型已成为未来几十年人类面临的主要问题。据联合国统计,到 2050 年,约有 60 个国家的 70 亿人将面临严重的淡水短缺问题[1-3]。随着工业化的快速发展,发电(尤其是火力发电)消耗了大量的水资源[4-5]。2019 年中国火电总用水量已达 479 亿立方米,占全国工业总用水量的 39.4%[6]。尽管新能源发电的比例不断上升,但火电装机容量等规模仍在缓慢增长,截至 2023 年底,中国火电总装机容量占中国电力总装机容量的 48%。在未来一段时间内,火力发电仍将是主要的发电形式[7-8]。此外,为避免腐蚀问题,高湿度电厂烟气的温度通常设定在 110 ℃以上,其中含有大量的水和潜热资源。因此有必要将其中的水和余热回收再利用,从而提高发电效率[9-10]。

目前,从高湿度烟气中回收水的典型方法包括干燥剂吸收法、冷凝法和膜法[11]。液体和固体干燥剂可通过物理或化学吸附作用直接吸收烟气中的蒸气,但在实际应用过程中,干燥剂的再生温度相对较高,需要额外的再生系统,而这导致经济性差[12]。传统冷凝法使用不锈钢换热器来回收烟气中的蒸气和废热,这种技术成熟且简单,但存在酸性气体造成的腐蚀问题[13]。膜回收法又根据膜的材质不同分为有机膜和无机膜,按孔径分为致密膜和多孔膜[14]。高孔隙的聚偏二氟乙烯(PVDF)膜具有较好的蒸气输送性能[15],聚丙烯(PP)膜也被制作为膜冷凝器用于回收蒸气,回收水通量最高可达 0.59 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$[16],在这些膜中,陶瓷膜凭借其操作简单、寿命长、耐高温酸碱环境、回收效率高等优点在工业中得到越来越多的应用[17-19]。在相同实验条件下,对陶瓷膜管和相同尺寸的传统不锈钢管进行对比测试后发现,陶瓷膜的努塞尔数高出 50% ~80%[17]。目前,许多陶瓷膜法水回收工作都集中在不同操作参数、膜孔径、膜结构的影响上。操作参数方面,回收水量随烟气流速和温度的提高而升高,随冷却水入口温度的增加而降低[20-21],烟气中相对湿度的提高也有利于水的回收[22]。对于膜孔径,常用的膜孔径分纳米级和微米级,如 5 ~90 nm[23-24] 或 1 ~3 μm[25]。纳米级陶瓷膜回收水通量为 6 ~12 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$。而对于微米级,最大水回收通量约为 4 ~6 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$。纳米级陶瓷膜有更好的水回收性能,原因是更容易发生毛细冷凝[26]。膜两侧的跨膜压差被认为是影响膜回收的重要因素,为了提高跨膜压差而采用真空、负压扫气等方法,但其回收性能不如在相同跨膜压差下,采用循环冷却水为冷却介质的系统[27]。也有学者研究了烟气与冷却水的流动方式与布置,根据其数值模拟的结果,错流布置方式的回收性能优于相同条件下逆流[28]。

尽管采用了很多方式提高膜回收水性能,在工业实际应用中,膜冷凝器回收水效率仍然较低,仅为 16.80% 左右[29]。其原因是陶瓷膜回收烟气时,毛细冷凝与壁面冷凝共存。对于孔径为 20 ~100 nm 的陶瓷膜,毛细冷凝占主导。而随着壁面冷凝的进行,在无孔区域冷凝液堆积进而形成液膜覆盖膜孔,从而限制毛细冷凝作用,且冷凝液在表面堆积会导致导热系数的下降,增加热阻[30],导致回收水性能降低。

本研究通过在膜表面添加电场来改善烟气回收过程中冷凝液膜积聚的问题,并搭建了电场作用下膜回收蒸气的实验系统,对比了聚偏二氟乙烯(PVDF)膜、聚丙烯(PP)膜、聚碳酸脂(PC)膜和陶瓷膜在电场下的水回收性能,并研究了电源电压、烟气温度和入口压力等操作参数对陶瓷膜回收性能的影响,为电场强化膜回收水领域的工业应用提供理论指导。

1　实验系统与方法

1.1　实验系统介绍

电场作用下膜法回收烟气水资源系统如图 1 所示。实验系统主要包括蒸气发生器、膜组件、干燥管和出口阀。蒸气发生器可以产生指定流量和温度的饱和蒸气,经带有伴热和保温棉的管路输送,在经过三通后分为 2 路,一路与膜组件连接用于回收蒸气,另一路连接出口阀、干燥管,在膜组件的入口管路内设置有温度和压力传感器,并连接到数据采集仪,出口阀的作用是通过旁路来调节蒸气入口压力。蒸气冷凝后在电场作用下,克服重力跨膜输送到冷却水侧后液面上升,通过出口管刻度记录体积变化并记录时间,得到回收水体积随时间变化关系曲线。实验结果不确定性主要来源于温度、流量和压力的测量。表 1 显示了关键实验参数的相对不确定度。

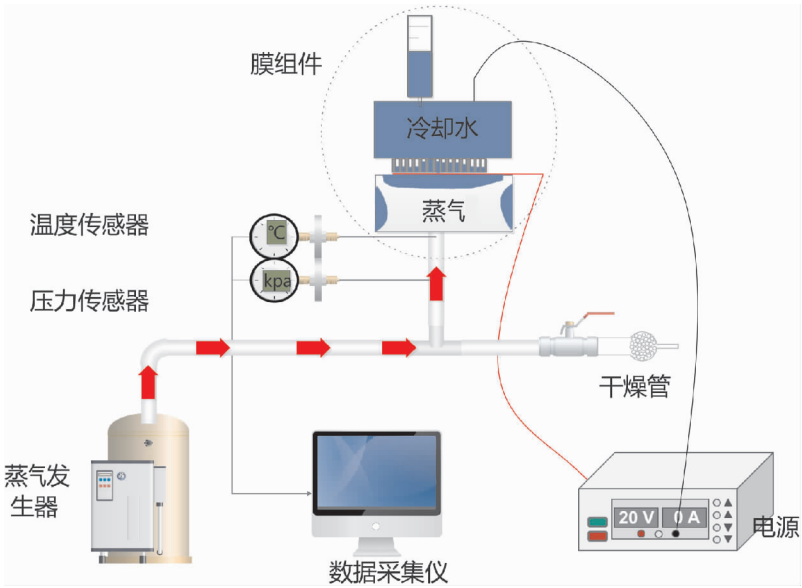


图 1 电场作用下膜法水回收系统

Fig. 1 Schematic of the membrane water recovery system under electric field

表 1 各测量仪器的量程与精度

Tab. 1 Ranges and accuracies of the measuring instruments

参数	设备型号	量程	精度
蒸气温度	WRNK-191	−200 ~ 450 ℃	0.5 ℃
蒸气发生器流量	HSG10	0 ~ 10 g · min^{-1}	0.3 g · min^{-1}
蒸气入口压力	CYG1102T	−50 ~ 50 kPa	0.25 kPa
天平	XY2000-2C	0 ~ 2 000 g	0.01 g

1.2 理论电渗流量的计算

当电渗泵连续工作时,流量 $\dot{M}_{tot}$ 可通过下式(1)计算,其中包括电场效应 $\dot{M}_{eo}$ 和压差效应 $\dot{M}_p$。

$$\dot{M}_{tot} = \dot{M}_{eo} + \dot{M}_p = \frac{\psi}{\tau}\left[-\frac{pAa^2}{8\mu L} - \frac{\varepsilon\zeta A V_{eff}}{\mu L} f\right] \tag{1}$$

式中:$\dot{M}_{tot}$ 是电渗理论流量;τ、ψ、a、A 和 L 分别表示膜的孔隙弯曲系数、孔隙率、膜孔径、表面积和厚度;ε 和 μ 分别表示工作液体的介电常数和黏度;ζ 为 zeta 电位;V_{eff} 为轴向电压;f 表示有限双电层对流速影响的修正系数,可通过公式(2)计算,

$$f = 1 - \frac{2I_1(a/\lambda)}{a/\lambda I_0(a/\lambda)} \tag{2}$$

式中:I_0 和 I_1 分别代表零阶和一阶第一类修正贝塞尔函数;λ 表示德拜长度,可表示为

$$\lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon k_B T}{2e^2 zn}} \tag{3}$$

式中:n、k_B、T、e 和 z 分别为溶液中的反离子浓度、玻尔兹曼常数($k_B = 1.381 \times 10^{-23}$ J · K^{-1})、液体温度、电子电荷($e = 1.602 \times 10^{-19}$ C)和反离子的价数($z = 1$)。去离子水的离子浓度 n 为 1.0×10^{-5} M,根据公式(3),可计算出 Debye 长度 λ 为 100 nm。

2 膜材料及操作参数对回收性能的影响

为探究电场作用下蒸气回收性能,本文通过理论计算不同膜的电渗流量,并结合实验对比分析,系统研究不同电压、入口温度和压力下陶瓷膜回收蒸气的规律。

2.1 电场作用下不同膜的回收性能

为探究电场对不同膜的作用机理,本文选取了膜回收领域中常用的聚偏二氟乙烯(PVDF)膜、聚丙烯(PP)膜、陶瓷膜和电渗泵中常用的径迹刻蚀聚碳酸酯(PC)膜为研究对象。所使用的陶瓷膜包括选择层(纳米级)、中间层和支撑层(微米级)的多层结构,主要成分为 95% 氧化铝以及 5% 的硅、高岭土、碳酸钙。膜实物图如图 2 所示,膜孔径均为 0.1 μm,直径为 30 mm。

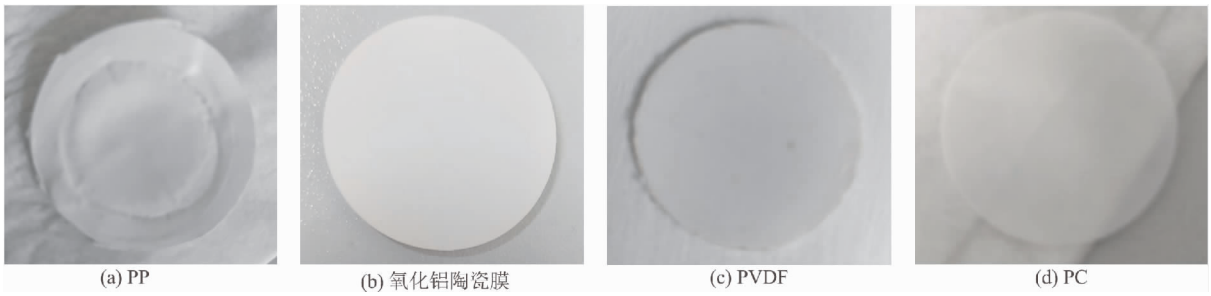


图 2　膜实物图

Fig. 2　Membrane

当入口压力 p = 5 kPa、电源电压 V = 10 V 时,计算 4 种膜的理论电渗流量,如表 2 所示。

由理论计算可知,PC 膜电渗流量最高,而陶瓷膜较厚导致电渗流量最低。陶瓷膜理论电渗流量为 0.161 5 mL · min^{-1},可换算为 13.708 9 kg · m^{-2} · h^{-1}。相比于前人研究中未加电场条件下的回收水通量实验值 8 kg · m^{-2} · h^{-1}[21],电场作用可提升膜的回收性能。

表 2　膜电渗流量理论计算

Tab. 2　Theoretical calculation of membrane electroosmotic flow

膜名称	膜直径/mm	膜厚度/mm	膜孔径/μm	孔隙率	总流量 M_{tot} /(mL · min^{-1})
PVDF	30	0.21	0.1	0.5	3.954 6
PC	30	0.02	0.1	0.17	7.550 3
陶瓷膜	30	2	0.1	0.4	0.161 5
PP	30	0.45	0.1	0.5	0.897 2

为进一步研究 4 种膜的实际回收性能,设置蒸气发生器蒸气流量为 2 g · min^{-1}、膜组件入口压力为 5 kPa、温度为 99.57 ℃、冷却水温度为 2 ℃,由图 3 可知,在未加电场时,PVDF 膜回收性能优于 PC 膜,而陶瓷膜略优于 PP 膜。在 1 V 电场作用下,PVDF 和 PC 膜回收水体积在前 60 s 内极大提高,流量分别可达 1.14 mL · min^{-1}和 0.88 mL · min^{-1},分别提升了 114.29% 和 41.94%,随后回收流量呈现波动性变化,并逐渐趋于稳定。但是 419 s 之后,由于 PVDF 膜局部区域电流密度过高,膜局部被击穿,电极间短接最终使电场失效。实验结束后观察到膜完全润湿。对于 PC 膜,高温环境(99.57 ℃)蒸气与高热通量作用下,PC 膜发生结构变形和性能衰减(见图 4),最终无法维持正常工作。

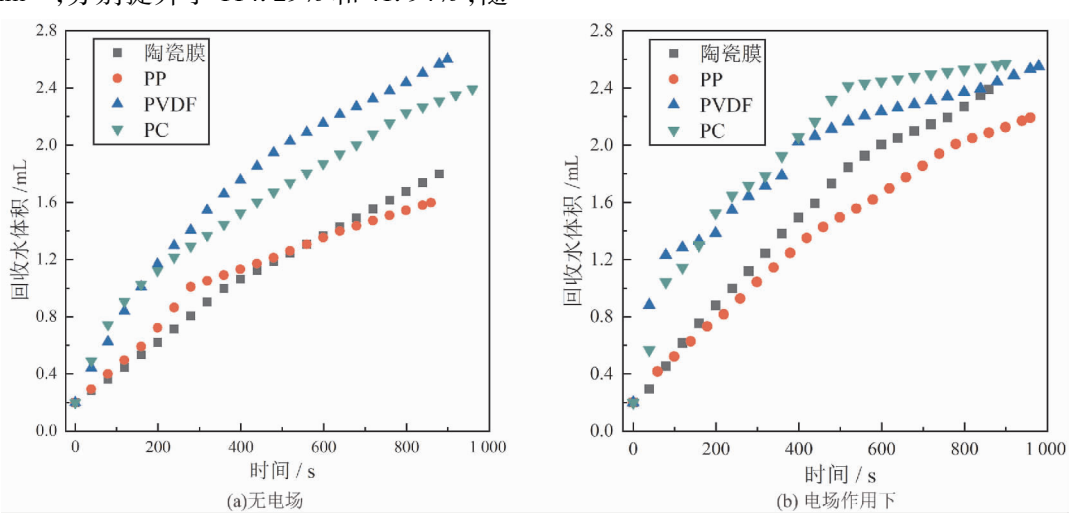


图 3　不同膜回收水体积随时间关系

Fig. 3　Recovered water volume vs. time under different membranes

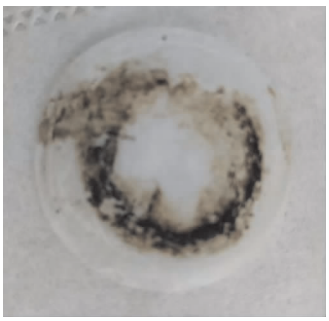


图 4 失效的 PC 膜

Fig. 4 Failed PC membrane

陶瓷膜具有优异的耐高温性和机械性能,在电场作用下,其回收水体积显著增加,并在实验前 600 s 内保持相对稳定,流量约为 0.2 mL · min^{-1}。实验结束后,陶瓷膜表面无异常,可重复使用。PP 膜表现出与陶瓷膜相似的趋势,但在电场作用下,流量为 0.17 mL · min^{-1},相同时间内的回收水体积低于陶瓷膜。可见陶瓷膜凭借其优异的耐高温性、可重复使用性及在电场作用下的稳定回收性能,更适用于电场作用下的蒸气回收过程。

2.2 电压对陶瓷膜回收性能的影响

设置蒸气发生器蒸气流量 2 g · min^{-1}、膜组件入口压力为 5 kPa、温度为 99.57 ℃、冷却水温度为 2 ℃。当陶瓷膜孔径为 10 ~ 5 nm 时,回收水通量更高[21],因此本文采用孔径为 5 nm 的氧化铝陶瓷膜。不同电压下回收水体积随时间变化关系如图 5 所示,与未加电场(0 V)相比,在电场作用下,单位时间内回收水体积明显增加。通过在陶瓷膜表面施加电场,冷凝液克服重力实现跨膜输送,使得陶瓷膜表面无液膜积聚,蒸气分子更容易通过扩散作用进入膜孔冷凝从而提高蒸气回收性能。回收水体积随着电压的升高而增加,且在 25 V 时达到最大值。这是因为较高的电压提供了更强的驱动力,促进了冷凝液的跨膜输送。然而,在相同电压下,回收速率逐渐变缓,主要原因是随着水侧温度升高,温差减少,冷凝质量降低,进而减少了跨膜输送的回收水。

实验结束后,陶瓷膜表面液膜分布如图 6 所示,铂电极和陶瓷膜的直径分别为 20 mm 和 30 mm。在电场实际作用的中心区域未形成明显液膜,而在边缘无电场区域,冷凝水积聚成液膜。此结果表明,电场加速了冷凝液克服重力的跨膜输送,减少了陶瓷膜表面的液膜,从而有效提高了回收性能。

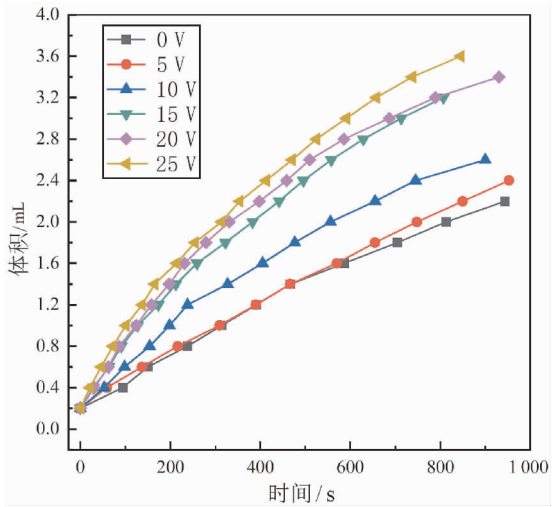


图 5 不同电压下回收水体积随时间变化关系

Fig. 5 Recovered water volume vs. time under different voltage levels

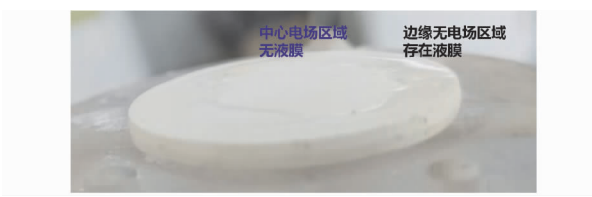


图 6 陶瓷膜表面液膜分布

Fig. 6 Dry area and condensate distribution on ceramic membrane surface

在电压 25 V 的实验条件下,观察到电极表面产生气泡,如图 7 所示。水的理论电解电压为 1.23 V,传统电渗泵中,泵芯是厚度 6 μm 的氧化铝陶瓷膜,当电压高于 3 V 时就会产生气泡[31],由于本文使用厚度为 2 mm 陶瓷膜,厚度延缓了氢离子向阴极的积聚,提高了电解电压阈值。

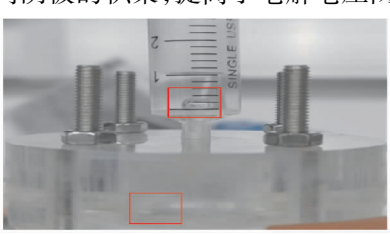


图 7 电极表面产生气泡

Fig. 7 Gas bubbles generated on the electrode surface

气泡的存在导致在电压 25 V 条件下测得的回收水体积大于实际值。使用回收水质量通量能更准确地反映电压对回收水性能的影响。回收水质量通量定义如下,

$$J = \frac{m_{tot} - m_{unrec}}{A \cdot \Delta t} \tag{4}$$

式中:m_{tot} 是膜组件实验前后质量差(g);m_{unrec} 是

膜组件蒸气腔实验前后质量差(g),即冷凝后未能跨膜输送的液体质量。A 代表膜面积(m^2);Δt 是实验时间(s)。回收水质量通量随不同电压下的变化关系如图 8 所示,与图 5 回收水体积不同,在 25 V 时实际回收的质量下降,这是因为电压 25 V 时,水电解产生氢气泡、氧气泡无法排除而覆盖在电极与膜表面,使得回收水体积相比实际偏高,同时减少了液态水通流面积,导致回收性能下降。可见过高的电压不利于蒸气冷凝液的输送。相对比未加电场的条件下,电场 20 V 时回收水通量提升了 158.52%,电场作用下陶瓷膜回收性能提升明显。

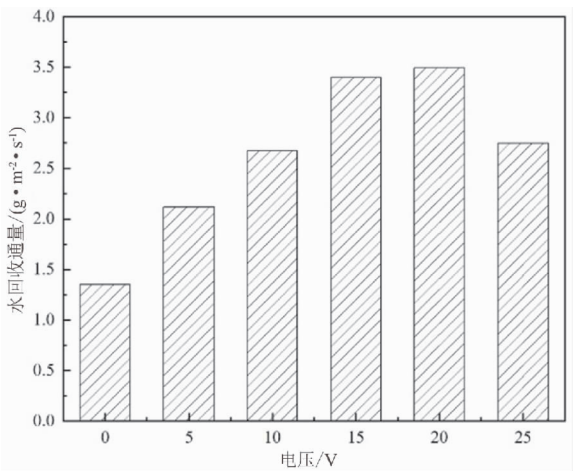


图 8　回收水通量随电压变化关系

Fig. 8　Recovered water mass flux vs. power voltage

2.3　温度对陶瓷膜回收性能的影响

蒸气发生器的蒸气流量为 2 g·min^{-1}、入口压力为 5 kPa、电源电压为 1 V、陶瓷膜孔径为 5 nm 时,不同蒸气温度下回收水体积随时间变化曲线如图 9 所示。实验过程中未产生气泡。在入口温度 99.57 ~ 137.27 ℃时,回收水体积随蒸气温度的升高呈现先增加后下降的趋势,在 104.47 ℃时,达到相同体积所需要的时间更短。这是因为蒸气温度升高会增大陶瓷膜孔隙双电层附近的温度梯度,从而引入更多离子进入扩散层,在电场的作用下,更多的水分子被拖向阴极,增强了电渗效应。同时,较高温度降低液体黏度,有利于冷凝液的跨膜传输。然而随着温度进一步升高,回收水体积反而显著下降,这是由于膜组件水侧冷却水量较少,高温蒸气使冷却水温度迅速上升,降低了膜两侧的温差驱动力,从而减少进入膜孔的蒸气分子,最终导致气体侧冷凝质量的减少及回收水体积的下降。

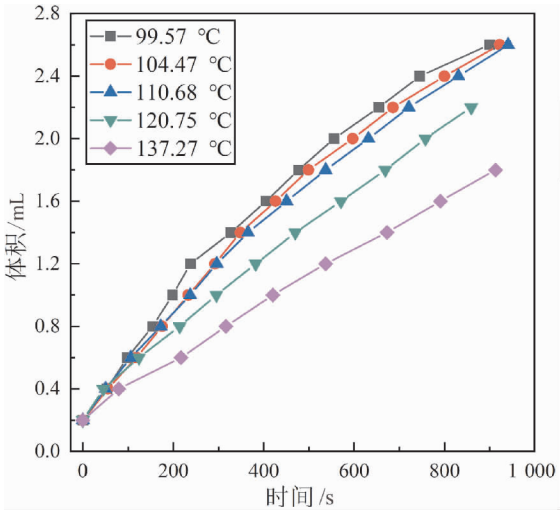


图 9　不同蒸气温度下回收水体积随时间变化关系

Fig. 9　Recovered water volume vs. time under different inlet temperature

2.4　压力对陶瓷膜回收性能的影响

蒸气发生器的蒸气流量为 2 g·min^{-1}、入口温度为 99.57 ℃、电源电压为 10 V、陶瓷膜孔径为 5 nm 时,不同蒸气入口压力下回收水体积随时间变化关系如图 10 所示。实验过程中未产生气泡,相同时间内回收水体积随着入口压力的升高而增长,但增长速率逐渐减慢,表明提高入口压力对回收水体积的强化作用逐渐减弱。由图 10 可知,在前 300 s 内,提高入口压力,回收水体积增长更为明显,而 300 ~ 1 000 s 阶段,不同入口压力条件下,回收水体积增长曲线斜率接近,表明此阶段驱动力主要为电场作用而非跨膜压力。提高蒸气入口压力有利于回收的启动阶段,但随着冷凝水充满膜孔,电场驱动力变为主导因素。

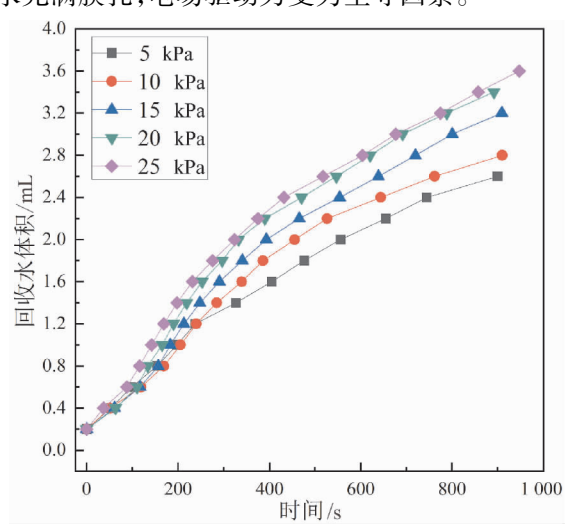


图 10　不同入口压力时回收水体积随时间变化关系

Fig. 10　Recovered water volume vs. time under different inlet pressure

3 结论与展望

本研究提出来一种利用电场强化陶瓷膜表面冷凝水跨膜输运从而提高水回收性能的新方法,比较了不同膜材料的水回收性能并研究了不同电压、蒸气温度和入口压力条件下电场驱动的陶瓷膜水回收性能。

1)对比了电场作用下 PP 膜、氧化铝陶瓷膜、PVDF 膜、PC 膜 4 种膜蒸气回收性能,PVDF 和 PC 膜回收性能较好但会失效,陶瓷膜回收性能优于 PP 膜并且性能稳定,可反复使用,因此最适合电场下的蒸气回收。

2)电场作用可强化陶瓷膜表面冷凝液输送。相比于未加电场情况,水的跨膜输运质量最高可提高 158.52%。

3)在温度 99.57 ~ 137.27 ℃范围内,随着温度升高,回收水体积略微增加后明显下降。

4)入口压力对回收启动阶段作用明显,而随着冷凝进行,电场驱动占主导,提高入口压力作用较小。

本研究结果为电场强化陶瓷膜水热回收性能提供了理论指导和数据支撑,对提高余热回收和能源利用效率具有重要意义。未来需对膜组件进一步优化,针对工业实际烟气的余热回收开展研究。

参考文献

[1] 李博抒. 我国能源问题与对策:以页岩气产业发展为例[J]. 西北大学学报(自然科学版),2015,45(2):313-317.
Li B S. Problems and countermeasures of China's resource: A case study of shale gas industry development [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2015, 45(2):313-317.

[2] 刘强, 邓旭, 王博文, 等. "一带一路"沿线国家能源部门气候变化减缓技术需求评估[J]. 西北大学学报(自然科学版),2021,51(4):675-683.
Liu Q, Deng X, Wang B W, Teng F. Climate change mitigation technology needs assessment for energy sector in countries along the Belt and Road[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(4):675-683.

[3] Li G P, Wang J R, Zhang F F, et al. Comprehensive operational parameter analysis of cross-flow hollow fiber membrane humidifier for humidification dehumidification desalination [J]. Desalination, 2022, 542: 116066.

[4] Teng D, Jia X X, Yang W K, et al. Experimental investigation into flue gas water and waste heat recovery using a purge gas ceramic membrane condenser[J]. ACS Omega, 2022, 7(6): 4956-4969.

[5] 曹语,王乐,季超,等. 陶瓷膜冷凝器用于烟气脱白烟过程的中试研究[J]. 化工学报,2019,70(6):2192-2201.
Cao Y, Wang L, Ji C, et. al. Pilot-scale application on dissipation of smoke plume from flue gas using ceramic membrane condensers [J]. CIESC Journal, 2019, 70(6): 2192-2201.

[6] 2020 年中国电力行业年度发展报告[EB/OL]. (2020-06-12)[2025-02-18]. https://www.cec.org.cn/upload/zt/ngfzbg2020/index.html.

[7] 中国电力行业年度发展报告 2023(简版)[EB/OL]. (2023-06-12)[2025-02-18]. https://cec.org.cn/detail/index.html? 3-322625.

[8] 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据——国家能源局[EB/OL]. (2024-01-26)[2025-02-18]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.

[9] Córdoba, Patricia. Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs[J]. Fuel,2015, 144: 274-286.

[10] Wang Z Y, Zhang X Y, Li Z. Evaluation of a flue gas driven open absorption system for heat and water recovery from fossil fuel boilers[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 128: 57-65.

[11] Zhong W, Ji W H, Cao X L, et al. Flue gas water recovery by indirect cooling technology for large-scale applications: A review[J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29(5): 1223-1241.

[12] Qi R H, Dong C S, Zhang L Z. A review of liquid desiccant air dehumidification: From system to material manipulations [J]. Energy and Buildings, 2020, 215: 109897.

[13] Scovazzo P, Scovazzo A J. Isothermal dehumidification or gas drying using vacuum sweep dehumidification [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 225-233.

[14] Li Z H, Zhang H, Chen H P, et al. Advances, challenges and perspectives of using transport membrane condenser to recover moisture and waste heat from flue gas[J]. Separation and Purification Technology, 2022,

285: 120331.

[15] Liu Y L, Wei Y Y, Su J C, et al. Surface-modified PVA/PVDF hollow fiber composite membrane for air dehumidification[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(13): 5415-5430.

[16] Nurrohman, Albeirutty M H, Almisbahi H, et al. Development and evaluation of a hybrid membrane condenser for water recovery from cooling tower plume [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354: 128815.

[17] Bao A N, Wang D X, Lin C X. Nanoporous membrane tube condensing heat transfer enhancement study[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 456-462.

[18] 程超, 张衡, 陈海平. 陶瓷膜烟气余热回收性能实验研究[J]. 热力发电,2021,50(2):62-67.
Cheng C, Zhang H, Chen H P. Experimental study on waste heat recovery performance of flue gas of ceramic membranes [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2):62-67.

[19] 滕达, 杨文楷, 贾歆羡, 等. 纳米陶瓷膜烟气脱水及余热回收实验分析[J]. 动力工程学报,2022,42(2):173-181.
Teng D, Yang W K, Jia X X, et al. Experimental analysis of flue gas dehydration and waste heat recovery with nanometre ceramic membrane[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(2):173-181.

[20] Wang T T, Yue M W, Qi H, et al. Transport membrane condenser for water and heat recovery from gaseous streams: Performance evaluation[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 484: 10-17.

[21] Chen H P, Zhou Y N, Cao S T, et al. Heat exchange and water recovery experiments of flue gas with using nanoporous ceramic membranes[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 686-694.

[22] Chen H, Yang B. Experiment and simulation method to investigate the flow within porous ceramic membrane [J]. Journal of the Australian Ceramic Society, 2018, 54(3): 575-586.

[23] Chen H P, Zhou Y N, Su X, et al. Experimental study of water recovery from flue gas using hollow micro-nano porous ceramic composite membranes[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2018, 57: 349-355.

[24] Kim J F, Park A, Kim S J, et. al. Harnessing clean water from power plant emissions using membrane condenser technology[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(5): 6425-6433.

[25] Xiao L H, Yang M L, Yuan W Z, et. al. Macroporous ceramic membrane condenser for water and heat recovery from flue gas[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 186: 116512.

[26] 马语峻, 刘向军. 多孔陶瓷膜烟气水分回收理论与模型研究[J]. 化工学报,2022,73(9):4103-4112.
Ma Y J, Liu X J. Theoretical studies of water recovery from flue gas by using ceramic membrane[J]. CIESC Journal, 2022, 73(9): 4103-4112.

[27] Teng D, Wang M, Li Z, et. al. Research on mass transfer characteristics of the flue gas dehydration using ceramic membrane transport condensers [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022: 101409.

[28] Xiao L, Yang M, Huang S M, et al. Performance analysis of a cross-flow transport membrane condenser for heat and moisture recovery from flue gas[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 183: 107880.

[29] Gao D, Li Z, Zhang H, et. al. Moisture recovery from gas-fired boiler exhaust using membrane module array [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 1110-1121.

[30] Li Z, Qi R, Zhang Z, et. al. Thermal conductivity analysis of ceramic membranes for recovering water from flue gas[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 300: 121838.

[31] Ai Y, Yalcin S E, Gu D F, et. al. A low-voltage nano-porous electroosmotic pump [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 350(2): 465-470.

(编　辑　李　波)