



基于 CPU 余热的膜蒸馏海水淡化系统的实验研究

陈佳炜, 胡 箫, 梁辉舜, 刘忠辉, 杨智澄

(浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为系统探究 CPU 余热驱动膜蒸馏海水淡化系统的可行性及关键影响因素, 搭建了一套基于 CPU 余热的膜蒸馏海水淡化实验系统, 研究了 CPU 功率、进料温度、渗透侧流量及盐质量分数对系统散热效果、膜通量、热效率及等效节电量的影响。结果表明: 系统在 240 W 以上 CPU 余热驱动下运行稳定可行, 当 CPU 功率为 360 W、进料温度 55 °C 时, 膜通量为 12.4 kg/(m²·h), 热效率为 35.2%, 散热效果为 46.8%, 等效节电量为 0.09 kW·h。随着 CPU 功率增大, 膜通量和等效节电量增加; 进料温度升高使膜通量和热效率提高, 但散热效果和等效节电量降低; 渗透侧流量增加可提高膜通量、降低热效率; 盐质量分数增大则抑制膜通量和热效率。系统性能受热力学驱动力主导, 其中 CPU 功率与进料温度影响最为显著, 盐质量分数次之, 渗透侧流量相对较弱。研究结果可为数据中心“余热-水”耦合系统的开发提供实验依据与理论支撑。

关键词: CPU 余热; 膜蒸馏; 膜通量; 热效率; 散热效果

中图分类号: TQ028.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2026)01-0084-09

引文格式: 陈佳炜, 胡箫, 梁辉舜, 等. 基于 CPU 余热的膜蒸馏海水淡化系统的实验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(1): 84-92.

Reference Format: CHEN Jiawei, HU Xiao, LIANG Huishun, et al. Experimental study of a membrane distillation desalination system based on CPU waste heat[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(1): 84-92.

Experimental study of a membrane distillation desalination system based on CPU waste heat

CHEN Jiawei, HU Xiao, LIANG Huishun, LIU Zhonghui, YANG Zhicheng

(School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To investigate the feasibility and key influencing factors of a CPU waste heat-driven membrane distillation desalination system, an experimental setup based on CPU waste heat was constructed. The effects of CPU power, feed temperature, permeate flow rate, and salt mass fraction on system heat dissipation, membrane flux, thermal efficiency, and equivalent electricity savings were studied. Results indicate that the system operated stably and effectively when driven by CPU waste heat exceeding 240 W. At 360 W CPU power and 55 °C feed temperature, membrane flux reached 12.4 kg/(m²·h), thermal efficiency was 35.2%, heat dissipation efficiency was 46.8%, and equivalent electricity savings amounted to 0.09 kW·h. Increasing CPU power enhanced membrane flux and equivalent electricity savings. Higher feed temperatures boosted membrane flux and thermal efficiency but reduced heat dissipation efficiency and equivalent electricity savings. Elevating permeate flow rate increased membrane flux while decreasing thermal efficiency. Higher salt mass fraction inhibited both membrane flux and thermal efficiency. System performance was primarily governed by thermodynamic driving forces, with CPU power and feed temperature exerting the most significant influence, followed by salt mass fraction,

收稿日期: 2025-06-26 网络出版日期: 2025-12-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52476039); 国家自然科学基金青年项目(12202392)

作者简介: 陈佳炜(2003—), 男, 杭州人, 本科生, 主要从事膜蒸馏海水淡化方面的研究。

通信作者: 胡 箫, E-mail: huxiao@zstu.edu.cn

while permeate flow rate had a relatively weaker effect. These findings provide experimental evidence and theoretical support for developing "waste heat-water" coupling systems in data centers.

Key words: CPU waste heat; membrane distillation; membrane flux; thermal efficiency; heat dissipation effect

0 引言

淡水资源短缺已成为制约全球社会经济发展的关键问题,尤其是在中国沿海地区,工业化与人口增长加剧了水资源供需矛盾。采用丰富且易获取的海水资源进行淡化处理,是补充淡水资源缺口行之有效的措施^[1]。据国家发展改革委与自然资源部联合发布的《海水淡化利用发展行动计划(2021—2025年)》预测,到2025年中国海水淡化总规模需达到290万t/d以上,该文件不仅设定了明确的产能目标,更强调可再生能源与海水淡化的耦合利用。这一导向清晰表明,未来海水淡化产业的发展不仅在于规模扩张,更在于其能耗结构与来源的绿色低碳化,因而对高效、低能耗海水淡化技术的研发提出了迫切需求。膜蒸馏(Membrane distillation, MD)技术因具备低温运行、脱盐率高以及可利用低品位热源等优势^[2],逐渐成为热法海水淡化领域的研究热点。然而,限于热源利用效率不足,膜蒸馏技术的大规模推广仍面临挑战。

针对低品位热能的利用,国内外学者已开展了大量探索。目前,太阳能驱动膜蒸馏系统的相关研究已广泛验证了其利用低品位余热的可行性^[3]。例如, Li 等^[4]设计的太阳能驱动膜式加湿减湿淡化系统,实验测得每天可以生产 25.88 kg/m² 的高纯度淡水; 习成思等^[5]搭建了一套光热-光电真空膜蒸馏系统,测得该系统的全天峰值膜通量可达 10.1 kg/(m²·h), 并发现进料温度对系统产水性能具有决定性作用, 进料流速和盐质量分数的影响相对次要。工业及交通领域的余热也被证明是一种潜在热源。例如, Arthur 等^[6]通过实验验证了在工业电解水制取绿氢过程中,利用电解废热驱动膜蒸馏可实现水资源净产出; Bahar 等^[7]制作了船舶余热膜蒸馏实验系统,同样发现料液温度和流量的增加均能提升膜通量; Khalifa 等^[8]采用汽车发动机尾气驱动气隙式膜蒸馏系统,通过实验证实进料温度和流量均能显著提升产水性能。此外, Ebrahimi 等^[9]利用数据中心的余热驱动多效蒸馏进行海水淡化,但设计的系统需通过热泵将余热热源温度提升至 75 °C 以上才能有效运行。Kanbur 等^[10]根据热力学准则,评估了

液体浸没式冷却数据中心与直接接触式膜蒸馏的耦合方案,结果显示该方案在技术上具有可行性,其最大日淡水产量达 6.13 kg,且热力学性能良好;然而,该研究的分析重点集中于系统能量分析,针对 CPU 热源与膜蒸馏过程集成后的综合性能与关键参数影响规律,尚缺乏系统性实验研究。综上所述,现有研究表明低品位热能驱动膜蒸馏具备可行性,然而其热源多集中在太阳能、船舶废热及工业余热等领域,关于 CPU 余热这一新兴热源的利用尚缺乏系统性实验研究。

CPU 作为数据中心的核​​心发热单元,其余热利用具有重要意义。数据中心作为高能耗设施,近年来能耗总量快速增长,其中约 40%~50% 的电能消耗在冷却环节^[11]。随着人工智能与大规模计算的发展,单个 CPU 的功率水平不断提升,其散热过程中产生大量低品位余热,若直接排放将造成能源浪费与环境负担^[12]。已有研究表明,利用数据中心余热驱动蒸馏或热泵系统具有潜在可行性^[9-10],然而相关实验多停留在宏观能量利用层面,未能深入到 CPU 这一具体热源与膜蒸馏过程的耦合机理。

为了系统分析 CPU 余热驱动膜蒸馏海水淡化系统的可行性,并探究影响其性能的关键因素,本文通过搭建实验平台,重点考察 CPU 功率、进料温度、渗透侧流量和盐质量分数等关键参数对系统散热效果、膜通量、热效率及等效节电量的影响规律,以期揭示不同参数影响下的系统性能变化规律,从而为数据中心 CPU“余热-水”耦合系统的开发提供实验依据与理论支撑。

1 实验部分

1.1 实验系统

本文设计了一套利用 CPU 余热的膜蒸馏海水淡化系统,其结构示意图如图 1 所示。整个系统包括 CPU 余热部分、膜蒸馏部分和循环部分。CPU 余热部分位于系统上侧,通过冷排与蛇形换热铜管将热量传递至热交换池;膜蒸馏部分位于右下方,包括膜组件和测温、测流装置,用于实现传热传质与汽液分离;循环部分位于膜组件两侧,由料液和渗透液两

路循环泵及管路系统构成,维持溶液的连续流动。所搭建的实验系统实物如图2所示,系统的关键部

件包括 CPU 模拟热源、冷排、热交换池及膜组件,整体布局与图1中的结构对应。

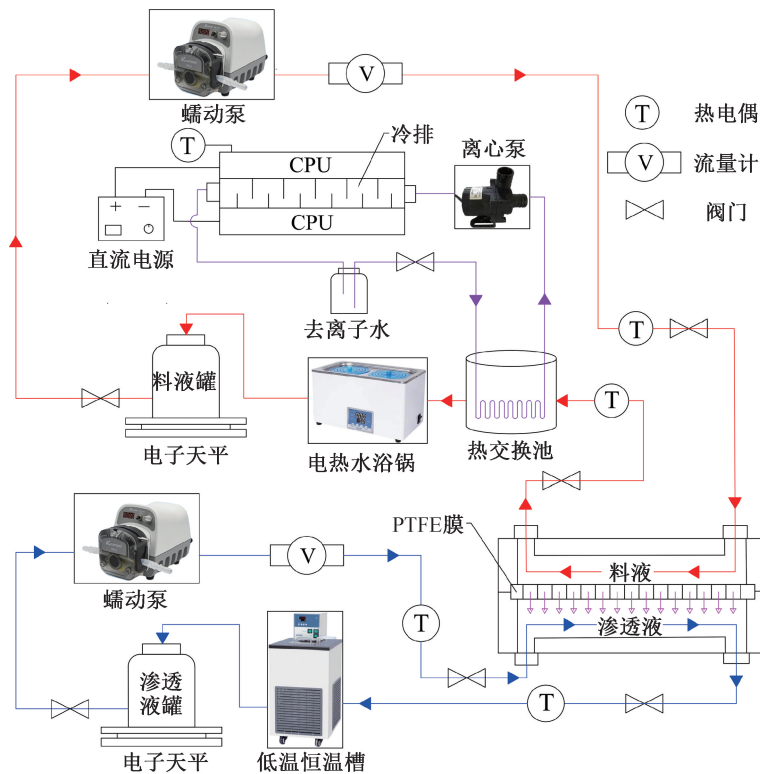


图1 利用 CPU 余热的膜蒸馏海水淡化系统示意图

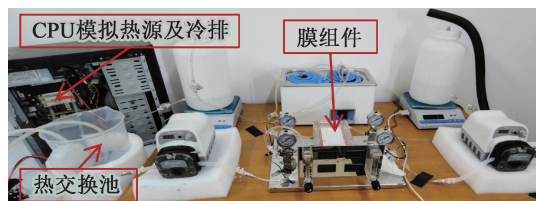


图2 实验系统实物照片

膜蒸馏部分采用自制平板式膜组件^[13],膜组件的结构示意图如图3所示。它由两个对称的流道组成,一个用于料液流通,一个用于渗透液流通,两者由膜隔开。膜材料为双面疏水聚四氟乙烯(PTFE),孔径 $0.22 \mu\text{m}$,壁厚 0.23 mm ,有效膜面积 0.0072 m^2 。膜组件用平板直通式结构固定,两侧以有机玻璃板压紧密封,以便于实验中操作与观察。为模拟实际海水工况,实验所用盐溶液由工业分析纯 NaCl 配制,盐质量分数范围为 $0 \sim 6.0\%$ 。

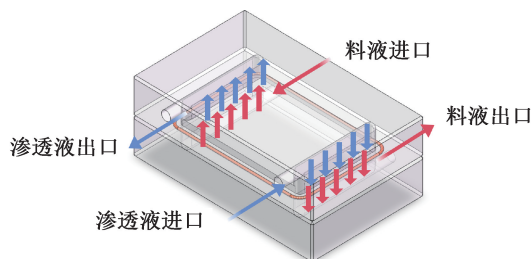


图3 膜组件结构示意图

CPU 余热部分采用由 5 枚 5Ω 水泥电阻(额定功率 100 W)和 5 枚 1Ω 水泥电阻(额定功率 100 W)组成的 CPU 模拟热源,其功率可调节至 120 、 240 W 和 360 W ,以模拟不同负载下的 CPU 散热情况。CPU 模拟热源由直流可调电源供电,并通过耐高温导热胶粘在冷排上。冷排内通入去离子水(电导率小于 $0.1 \mu\text{s}/\text{cm}$),去离子水作为传热介质在冷排与蛇形换热铜管之间循环。蛇形铜管置于热交换池中,最终将 CPU 模拟热源的热量传递至盐溶液。去离子水的循环动力由 DC50A-2450A 型可调速离心泵提供,流量调节范围为 $0 \sim 3600 \text{ L/h}$ 。去离子水的循环管路采用耐高温 PVC 软管并加装保温层,管路中设置 NTC 型热电偶和开关阀门以调控运行状态。

循环部分包括料液侧和渗透侧 2 个回路。料液侧通过 DIP1500-SI83-GB 型可调节蠕动泵驱动盐溶液在热交换池、电热水浴锅、料液罐与膜组件之间循环,流量范围为 $0 \sim 1500 \text{ mL/min}$;渗透侧由同型号蠕动泵维持渗透液在冷却器、渗透液罐与膜组件之间循环流动。管路中采用 NTC 型热电偶监测膜组件进出口料液温度和渗透液温度。电子天平与计算机连接,每秒自动采集 3 个质量数据,实时记录渗透液的质量变化。

1.2 实验流程与方法

实验前,首先向料液侧回路的料液罐中加入 2.5 L 配制好的盐溶液(质量分数 0~6.0%),向渗透侧回路的渗透液罐中加入 2 L 纯净水,并向 CPU 余热部分循环回路中加入去离子水,直至去离子水充满整个循环管路;随后打开管路中的开关阀门并启动各回路的循环泵,缓慢调节料液侧和渗透侧流量至设定值,其中料液侧流量始终保持为 600 mL/min。检查管路密封性及流体循环情况,并确保膜组件内不存在大量气泡,以保证传热传质过程稳定。

在系统运行准备就绪后,根据实验设计设定电热水浴锅与 CPU 模拟热源的功率,将 CPU 模拟热源功率依次设定为 120、240 W 和 360 W,并使进料温度稳定在 35~60 °C 范围内,以模拟不同负载下的散热情况。渗透侧入口温度通过低温恒温槽控制在 15 °C。

当系统运行达到稳定状态,即各测点温度波动小于 ±0.5 °C 并持续 10 min 以上时,开始正式实验。在实验过程中,收集的渗透液通过电子天平进行实时称量,电子天平与计算机连接,每秒自动采集 3 个质量数据并存储。与此同时,料液侧与渗透侧的进出口温度和流量通过热电偶与流量计同步记录。每组实验数据采集时长持续 2 h。为保持盐溶液盐质量分数相对不变,每间隔 5 min 使用盐度计测量料液罐中盐溶液盐质量分数,并补充适量纯净水。

数据采集 2 h 后,关闭 CPU 余热部分,其余设备运行参数保持不变,当系统重新达到稳定状态时,记录各测点热电偶温度值。考虑到 PTFE 膜寿命对实验的影响,每进行两组实验后更换一次 PTFE 膜。

本文采用单因素的实验方法,分别研究 CPU 功率、渗透侧流量、进料温度及盐质量分数等因素对膜蒸馏系统性能的影响,其余条件保持不变,具体设置为:

a) 探究 CPU 余热驱动膜蒸馏系统对 CPU 模拟热源散热效果的影响。在 120、240 W 和 360 W 条件下开展实验,并将进料温度设定在 35~60 °C 范围内进行对比,盐质量分数 3.5%,渗透侧流量保持 600 mL/min。

b) 探究渗透侧流量对膜蒸馏性能的影响。在 360 W 功率条件下开展实验,进料温度保持 60 °C,盐质量分数 3.5%,并将渗透侧流量设定在 400~600 mL/min 范围内进行对比。

c) 探究盐质量分数与进料温度对膜蒸馏性能的综合作用。在 360 W 功率条件下开展实验,并将进料温度设定在 35~55 °C 范围内、盐质量分数设定为 0、1.0%、3.5% 和 6.0% 进行对比,渗透侧流量保持 600 mL/min。

d) 探究 CPU 余热驱动膜蒸馏系统的节电表现。在 120、240 W 和 360 W 条件下开展实验,并将进料温度设定在 35~60 °C 范围内进行对比,盐质量分数 3.5%,渗透侧流量保持 600 mL/min。

1.3 系统性能表征

在本文中,使用散热效果、膜通量、热效率和等效节电量来衡量系统的整体性能。散热效果是指使发热物体温度降低的程度与最大可能降低程度的比值,即 CPU 模拟热源在冷却前后的稳定温度差值与 CPU 模拟热源冷却前与环境温度差值的比值。在实验中,散热效果 β 可由式(1)计算:

$$\beta/\% = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_e} \times 100 \quad (1)$$

其中: T 为不同进料温度下 CPU 模拟热源稳定时的温度,°C; T_e 为实验环境温度,°C; T_0 为 CPU 模拟热源在室温下未进行任何冷却措施时的稳定温度,°C。

膜通量定义为单位时间内通过单位膜面积的产水质量,是衡量膜蒸馏海水淡化系统的重要指标^[14]。在实验中,膜通量 j_v (单位 kg/(m²·h))可由式(2)计算:

$$j_v = \frac{M}{S \cdot \Delta t} \quad (2)$$

其中: M 为同一工况实验下产出的总淡水质量,kg; S 为膜面积,m²; Δt 为单一工况单次实验运行时间,h。

等效节电量是指,将 CPU 余热为膜蒸馏部分提供的热量,折算为采用常规热泵产生等量热量所需消耗的电量。在实验中,等效节电量 E (单位 kW·h)可由式(3)计算:

$$E = \frac{\Delta t}{C_h} [(Q_{\text{proc},2} - Q_{\text{proc},1}) + (\Phi_{\text{rad},2} - \Phi_{\text{rad},1}) + (\Phi_{\text{conv},2} - \Phi_{\text{conv},1})] - W_{\text{pump}} \Delta t \quad (3)$$

其中: $\Phi_{\text{rad},1}$ 和 $\Phi_{\text{conv},1}$ 分别为关闭 CPU 模拟热源时,热交换池中的料液与空气的辐射换热量和对流换热量,kW; $\Phi_{\text{rad},2}$ 和 $\Phi_{\text{conv},2}$ 分别为开启 CPU 模拟热源时,料液与空气的辐射换热量和对流换热量,kW; $Q_{\text{proc},1}$ 和 $Q_{\text{proc},2}$ 分别为关闭和开启 CPU 模拟热源时,料液每小时在膜组件中被带走的热量,kW; C_h

为常规热泵的性能参数; W_{pump} 为循环所用的离心泵的功率, 厂家提供值为 0.086 kW。 $\Phi_{\text{conv},1}$ 、 $\Phi_{\text{conv},2}$ 、 $\Phi_{\text{rad},1}$ 和 $\Phi_{\text{rad},2}$ 可由式(4)–(5)计算:

$$\begin{cases} \Phi_{\text{conv},1} = hA(T_1 - T_{\text{air}}) \\ \Phi_{\text{conv},2} = hA(T_2 - T_{\text{air}}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Phi_{\text{rad},1} = \sigma\epsilon A(T_1^4 - T_{\text{air}}^4) \\ \Phi_{\text{rad},2} = \sigma\epsilon A(T_2^4 - T_{\text{air}}^4) \end{cases} \quad (5)$$

其中: h 为料液的对流传热系数, 取值为 0.14 kW/($\text{m}^2 \cdot \text{C}$); A 为有效换热面积, 热交换池圆顶面面积为 0.0855 m^2 ; T_1 和 T_2 分别为关闭和开启 CPU 模拟热源时热交换池料液表面的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{air} 为环境空气的温度, $^{\circ}\text{C}$; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, 其值为 5.67×10^{-8} W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$); ϵ 为料液的发射率, 取值为 0.97。

$Q_{\text{proc},1}$ 和 $Q_{\text{proc},2}$ 可由式(7)计算:

$$\begin{cases} \Phi_{\text{proc},1} = cm(T_{\text{in},1} - T_{\text{out},1}) \\ \Phi_{\text{proc},2} = cm(T_{\text{in},2} - T_{\text{out},2}) \end{cases} \quad (6)$$

其中: c 为料液比热容, J/($\text{kg} \cdot \text{C}$); m 为料液的质量流量, kg/s; $T_{\text{in},1}$ 和 $T_{\text{in},2}$ 分别为关闭和开启 CPU 模拟热源时膜组件料液侧入口温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{out},1}$ 和 $T_{\text{out},2}$ 分别为关闭和开启 CPU 模拟热源时膜组件料液侧出口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

热效率定义为渗透液潜热与渗透液总得热量之比, 用来衡量膜蒸馏过程中热量的利用效率。在实验中, 热效率 η 可由式(7)计算:

$$\eta = \frac{j_v S \Delta H}{cm(T_{\text{in},2} - T_{\text{out},2})} \times 100\% \quad (7)$$

其中: ΔH 为料液的蒸发焓, kJ/kg。

2 结果与讨论

2.1 CPU 散热效果分析

为探究 CPU 余热驱动膜蒸馏系统对 CPU 模拟热源散热效果的影响, 考察了进料温度和 CPU 功率对散热效果的变化规律。图 4 为不同进料温度和不同 CPU 功率下散热效果的变化曲线。由图 4 可知: 当进料温度升高 25 $^{\circ}\text{C}$ 时, 120、240 W 和 360 W 工况下的散热效果分别下降 12.1%、4.2% 和 2.5%, 表明 CPU 散热效果随功率增加而增强; 而在相同功率下, 进料温度升高会削弱散热效果, 且高功率 CPU 的散热效果更稳定, 对进料温度变化的敏感性较低。产生这种趋势的原因与传热驱动力有关; 不同功率 CPU 在室温下的稳定温度 T_0 分别为 107.8、225.6 $^{\circ}\text{C}$ 和 334.7 $^{\circ}\text{C}$, 低功率 CPU 在未冷却状态下温度较低, 冷却过程中的传热温差有限, 因此

进料温度升高对散热效果影响显著; 高功率 CPU 的未冷却温度远高于低功率 CPU, 根据牛顿冷却定律, CPU 散热与传热温差直接相关, 冷却过程中具有更大的热驱动力, 即使进料温度有所升高, 散热效果下降幅度仍有限。

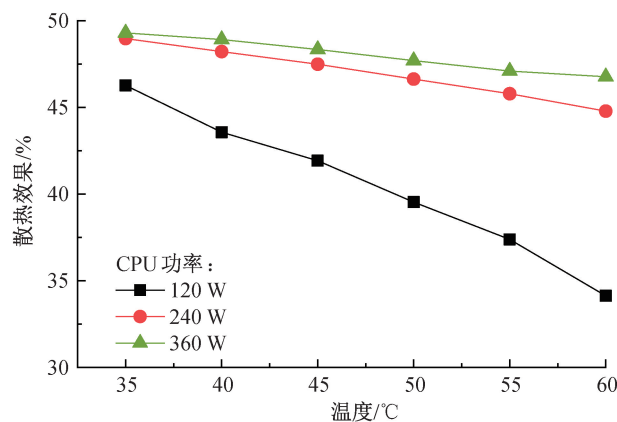


图 4 不同进料温度和不同 CPU 功率下散热效果的变化曲线

散热效果对 CPU 模拟热源温度的变化率可用式(8)计算:

$$\frac{d\beta}{dT} = -\frac{1}{T_0 - T_e} \quad (8)$$

从式(8)也可发现, 高功率工况下 $T_0 - T_e$ 较大, 因此高功率工况下散热效果对进料温度变化的敏感性更低。

综上所述, 高功率条件下 CPU 散热效果对进料温度变化的敏感性较低, 系统在较大热负荷下仍能保持稳定的散热性能。因此, CPU 余热驱动的膜蒸馏系统更适用于高功率高算力场景。

2.2 不同运行参数对膜蒸馏性能的影响

为系统分析运行参数对膜蒸馏产水性能的影响, 分别考察了渗透侧流量、进料温度及盐质量分数对膜通量与热效率的变化规律, 图 5 为不同渗透侧流量下膜通量与热效率的变化曲线。

由图 5 可知: 当流量由 400 mL/min 增加至 600 mL/min 时, 膜通量由 12.69 kg/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$) 提高至 15.91 kg/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$), 总体提升 25.4%; 膜通量随渗透侧流量增加而增加, 在较低流量区间, 膜通量增长较为显著; 而超过 450 mL/min 后, 增长逐渐趋缓; 热效率随着渗透侧流量的增加而降低, 热效率由 56.5% 下降至 47.1%, 总体降低 16.6%。

实验结果表明, 热效率与膜通量呈现相反的变化趋势。这是因为渗透侧流量对膜蒸馏过程的传热与传质具有双重影响^[15]。首先, 渗透侧流量的提高强化了膜表面边界层的对流换热, 削弱膜表面的温

度极化^[16],降低边界层内的热阻,从而增大了膜两侧温差,并提升了蒸汽分压差这一主要驱动力;同时,较高流量可及时带走冷凝潜热,避免冷凝液堆积,从而保持较高的传热传质效率。其次,渗透侧流量的增大也会加剧跨膜导热损失,使系统单位膜通量的热输入增加,导致热效率降低。当流量超过一定值时,膜表面边界层已接近充分扰动^[17],且供蒸汽凝结的冷量趋于饱和^[18]。在此阶段,传热传质的提升受限,膜通量增长逐渐趋缓。因此,渗透侧流量通过改变膜表面温度极化与边界层温度分布共同影响传热传质特性。在低流量区主要受传热限制,而在高流量区则转而受热力学驱动力约束。实际应用中应平衡流量与能耗,以实现最佳能效。

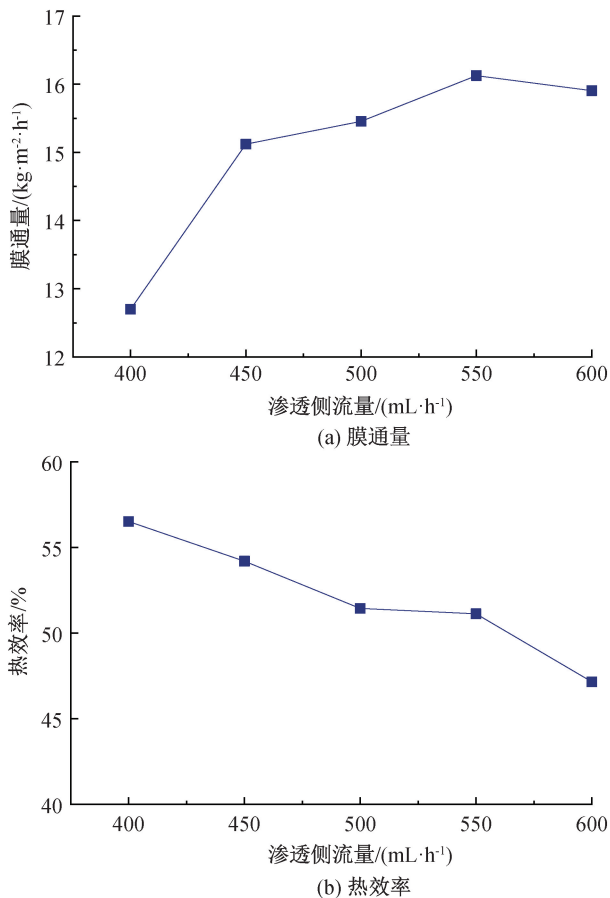


图 5 不同渗透侧流量下膜通量与热效率的变化曲线

在明确渗透侧流量影响规律的基础上,为进一步探究热力学驱动力的关键作用,本文重点考察了进料温度与盐质量分数对膜蒸馏产水性能的耦合影响。实验测得的膜通量与热效率随进料温度与盐质量分数的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知:在 3.5% 盐质量分数下,进料温度从 35 °C 升高至 55 °C,膜通量增加 95.8%,热效率提高 35.3%,这表明进料温度对膜通量和热效率具有主导作用。在 50

°C 的进料温度下,膜通量由无盐溶液下的 12.29 kg/(m²·h) 降至 6.0% 盐质量分数下的 7.49 kg/(m²·h),下降 39.1%;热效率由 47.0% 降至 27.9%,下降 40.6%,这表明盐质量分数升高会抑制膜通量和热效率。

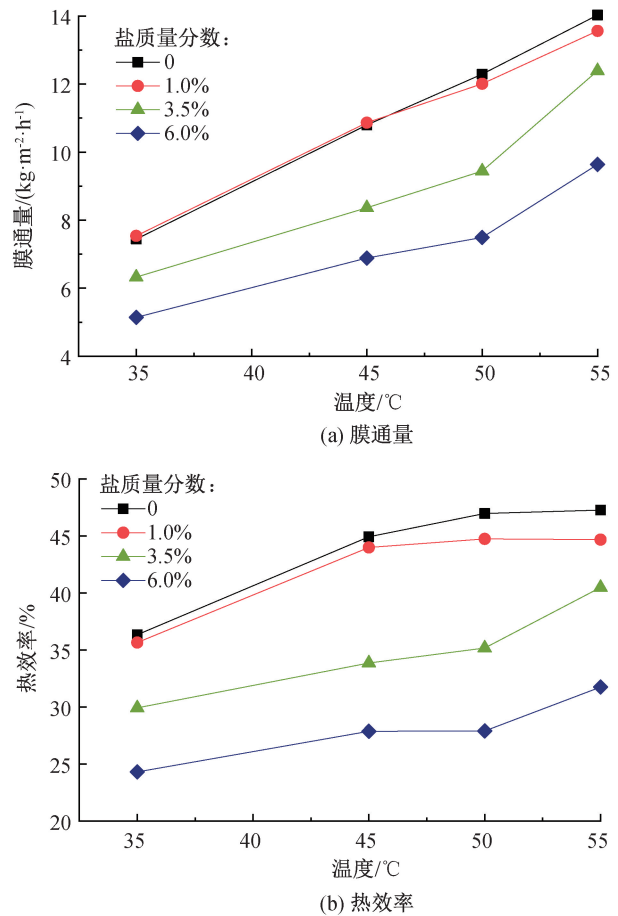


图 6 不同进料温度和不同盐质量分数下膜通量与热效率的变化曲线

从机理上看,进料温度升高使得膜两侧温度差增大,同时进料温度升高会提高溶液蒸汽压蒸气压。根据 Antoine 方程,蒸气压随温度呈指数增加,蒸气压增加会显著增强膜两侧蒸气压差,因此膜通量与热效率均随进料温度升高而增加,这表明热效率更多地取决于进料温度^[19]。相反,盐质量分数升高会降低溶液中水的蒸气压,该关系可由拉乌尔定律定量描述,如式(9)所示:

$$p = p^* n_A / (n_A + n_B) \quad (9)$$

其中: p 为盐溶液中水的蒸气压,Pa; p^* 为纯水在相同温度下的饱和蒸气压,Pa; n_A 为水的物质的量,mol; n_B 为 NaCl 的物质的量,mol。由式(9)可知,溶液中水的摩尔分数随盐质量分数升高而降低,蒸气压下降,跨膜驱动力减弱,从而导致膜通量下降。同时,料液盐质量分数升高使更多的盐分在膜表面

富集,形成浓度极化层,加厚离子边界层,增加水蒸气分子的传质阻力,使膜通量降低。由式(7)可知,盐质量分数对热效率不会产生直接影响,而是受膜通量影响,因此热效率也随之降低。

为进一步探究盐质量分数对膜通量的影响是否与温度有关,以相同进料温度下无盐溶液的膜通量为基准,计算不同盐质量分数下膜通量的下降幅度,结果如图7所示。由图7可知,膜通量的下降幅度随进料温度升高先增大后减小,当温度为50℃时达到峰值,表明盐质量分数对膜通量的抑制作用具有一定的温度依赖性。

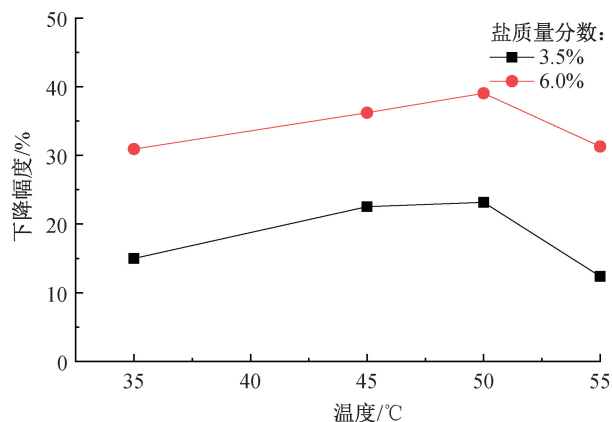


图7 不同盐质量分数和不同进料温度下膜通量下降幅度的变化曲线

其原因在于,虽然较高的进料温度能增强蒸汽压差,提高膜通量,但不同温度下驱动力的利用效率存在差异^[20]。当进料温度低于临界值时,盐质量分数对膜通量的抑制效应增长快于温度驱动力的增强,膜通量下降幅度增加;而当进料温度高于临界值时,热力学驱动力占优,膜通量的下降幅度降低。

这一结果表明,进料温度是决定系统产水性能的核心因素,而盐质量分数主要起约束作用。提高进料温度可有效增强热力学驱动力,并在一定程度上缓解高盐质量分数的不利影响。需要指出的是,本文主要从热力学驱动力与传质阻力角度分析了盐质量分数的影响,未深入探讨膜污染与膜润湿等长期运行问题。在实际应用中,盐分累积及有机物沉积会引起膜孔堵塞或润湿^[21-22],进而导致膜通量下降。这些因素在短期实验中不显著,但对系统长期稳定运行具有潜在影响。

2.3 系统等效节电量分析

等效节电量采用能量平衡方法计算。将循环的盐溶液视作一个热力系统,流入系统的能量分为两部分:一部分为蛇形铜管与盐溶液之间的对流换热

量;另一部分为电热水浴锅与盐溶液之间的对流换热量。流出系统的能量分为2部分:一部分为盐溶液在膜蒸馏装置中跨膜汽化潜热以及通过膜从料液侧到渗透液侧的传导热;另一部分为盐溶液通过热交换池圆顶面与周围空气的对流换热量和辐射换热量。热交换池侧面和底部均采用保温材料包覆,忽略其导热损失。基于上述假设,并结合式(4)~(7),可计算CPU余热部分对膜蒸馏部分的等效节电量,计算结果如图8所示。

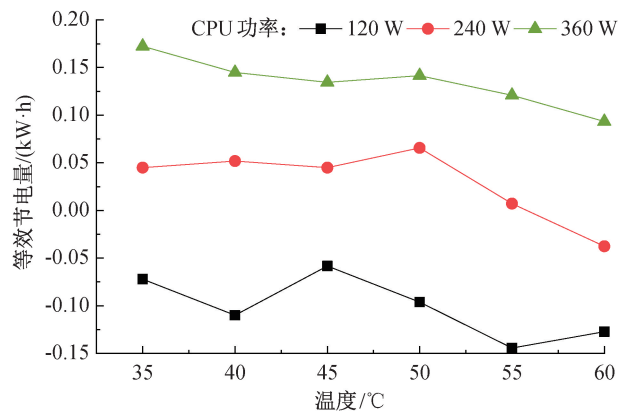


图8 不同CPU功率和不同进料温度下等效节电量的变化曲线

由图8可知,等效节电量随进料温度的升高呈下降趋势。在CPU模拟热源功率设定保持不变的前提下,进料温度升高会增加盐溶液热力系统的总热需求,包括跨膜汽化潜热、跨膜导热以及与环境之间的对流和辐射换热。虽然CPU余热部分的热量输出随进料温度变化略有波动,但在240W和360W功率条件下,其变化幅度均小于5%,难以满足进料温度升高带来的额外热需求。为维持膜蒸馏过程的稳定运行,系统需依赖电热水浴锅提供补偿热量。随着电加热供热占比的提高,CPU余热在总供热中的贡献相应减弱,因此节电量随进料温度的升高而下降。该趋势与实验结果一致:在360W条件下,进料温度从35℃提高至60℃时等效节电量下降45.8%;在240W条件下等效节电量下降183.6%。

此外,在120W条件下等效节电量为负值,即引入CPU余热部分增加了系统整体能耗。主要原因在于CPU余热回收回路中离心泵的持续能耗。当CPU功率较低时所产生的余热不足以抵消泵功消耗,系统能效降低。与之相比,高功率工况下等效节电量始终为正,且其对进料温度的敏感性减弱,说明在高功率条件下CPU余热利用更具稳定性。

综上所述,系统等效节电量存在以下规律:低功率下难以实现节电,系统等效节电量易受辅助能耗

影响;高功率下节电量为正,表现出一定的节能潜力。在系统应用中,需根据 CPU 功率匹配余热部分回路的泵功率,降低低功率工况下的能耗负担,同时在高功率工况下通过优化进料温度区间提升余热利用效率,以平衡等效节电量与膜通量。

3 结 论

本文设计并搭建了基于 CPU 余热的膜蒸馏海水淡化实验系统,系统考察了 CPU 功率、进料温度、渗透侧流量及盐质量分数对系统散热效果、膜通量、等效节电量及热效率的影响,揭示了 CPU 余热驱动膜蒸馏的可行性及运行特性。主要结论如下:

a)系统性能主要受热力学驱动力因素影响。CPU 功率的升高可显著增强传热与蒸发过程,提高膜通量、热效率及等效节电量;进料温度的升高虽然可提升膜通量与热效率,但由于 CPU 余热供热贡献相对减弱,系统等效节电量呈下降趋势;盐质量分数的增加会削弱蒸汽压差、加剧传质阻力,导致膜通量与热效率下降;渗透侧流量对整体性能影响相对较小,仅在低流量区间对边界层扰动与传热具有一定改善作用。

b)CPU 余热可有效驱动膜蒸馏过程,实现散热与淡化的协同运行。随着 CPU 功率提高,系统散热效果提升,且在较大热负荷下仍能保持稳定的散热性能。系统在实验常规工况下表现为散热效果 46.8%,膜通量 12.39 kg/(m²·h),热效率 35.2%。当前系统的热传递通过冷排、换热铜管等多级界面,累计热阻较大,CPU 余热利用效率仍处于较低水平,未来研究可通过引入分离式热管等高效率传热元件,从根本上优化传热路径,提升整体系统对余热利用的效率。

本文拓展了膜蒸馏技术在电子设备 CPU 余热利用中的应用范围,揭示了关键运行参数对系统性能的耦合影响,为低品位热能的高效回收提供了实验依据,对高算力 CPU 设备的散热与节能一体化具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] Lin S, Zhao H, Zhu L, et al. Seawater desalination technology and engineering in China: A review[J]. *Desalination*, 2021, 498: 114728.

[2] Ashoor B B, Mansour S, Giwa A, et al. Principles and applications of direct contact membrane distillation (DCMD): A

comprehensive review[J]. *Desalination*, 2016, 398: 222-246.

[3] Moreira V R, Raad J V, Lazarini J X, et al. Recent progress in membrane distillation configurations powered by renewable energy sources and waste heat[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53: 103816.

[4] Li G P, Zhang L Z. Investigation of a solar energy driven and hollow fiber membrane-based humidification-dehumidification desalination system[J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 393-408.

[5] 习成思, 张亮, 张高明, 等. 太阳能光热-光电真空膜蒸馏系统实验研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 29-34.

[6] Arthur T, Millar G J, Love J. Integration of waste heat recovered from water electrolysis to desalinate feedwater with membrane distillation [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 56: 104426.

[7] Bahar R, Ng K C. Fresh water production by membrane distillation (MD) using marine engine's waste heat [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 42: 100860.

[8] Khalifa A, Etman A, El-Adawy M, et al. Development of membrane distillation powered by engine exhaust for water desalination [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258: 124839.

[9] Ebrahimi K, Jones G F, Fleischer A S. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 622-638.

[10] Kanbur B B, Wu C, Duan F. Multi-criteria thermoeconomic and thermodynamic assessments of the desalination-integrated two-phase liquid-immersion data center cooling system [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44 (13): 10453-10470.

[11] Brunschwiler T, Smith B, Ruetsche E, et al. Toward zero-emission data centers through direct reuse of thermal energy [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 2009, 53(3): 476-488.

[12] 韩冰冰. 数据中心可再生能源和余热利用现状[J]. *智能建筑*, 2020(5): 47-53.

[13] Shang W, Chen H, Lu G, et al. In-situ temperature measurement and non-linear interaction analysis of temperature polarization in direct contact membrane distillation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2025, 735: 124508.

[14] 邓会宁, 马淑洁, 张伟, 等. 气液两相流对直接接触膜蒸馏传质强化和阻垢性能研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2023, 56(6): 595-603.

[15] 吉彦龙, 卢小平, 魏彦艳. 膜蒸馏系统的热质扩散耦合分析[J]. *膜科学与技术*, 2021, 41(2): 51-55, 62.

[16] 韩非, 王康, 汪凯, 等. 温度极化对膜蒸馏性能的影响研究进展[J]. *工业水处理*, 2021, 41(9): 31-36.

[17] Kandi A, Mohammed H A, Khidani M, et al. The effect of turbulence promoters on DCMD process: A comprehensive review[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 69: 106810.

- [18] 袁越锦, 赵泽颖, 徐英英, 等. 远洋船舶用蒸馏海水淡化系统试验研究[J]. 机械设计与制造, 2021(11): 69-73.
- [19] Alkudhri A, Darwish N, Hilal N. Membrane distillation: A comprehensive review[J]. Desalination, 2012, 287: 2-18.
- [20] Zhang X, Koirala R, Date A, et al. Modelling and simulation of flux prediction and salinity variation in direct contact membrane distillation for seawater desalination and brine treatment[J]. Desalination, 2022, 540: 116021.
- [21] 申静, 毛鑫, 张冰, 等. 膜蒸馏过程中膜污染问题及其缓解策略研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(24): 24-32.
- [22] Zheng W, Chen Y, Xu X, et al. Research on the factors influencing nanofiltration membrane fouling and the prediction of membrane fouling [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 59: 104876.

(责任编辑:康 锋)