

文章编号:0253-4339(2013)04-0086-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.04.086

热电制冷在空气隙膜蒸馏系统中的应用研究

杨胜男¹ 杨晓宏¹ 田瑞^{1,2} 尹秀翠¹

(1 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院 呼和浩特 010051; 2 内蒙古可再生能源重点实验室 呼和浩特 010051)

摘 要 设计了一种采用热电制冷的并接式空气隙膜蒸馏系统,以热电制冷替代机械式制冷为膜蒸馏过程提供冷量。通过对膜蒸馏过程与热电制冷的匹配研究,给出了最佳匹配工况的基本要求。制作了具有水冷散热热电制冷的膜蒸馏冷腔,对单片热电制冷器采用风冷散冷的制冷性能进行研究,结果表明:一定热端散热强度下,热电制冷膜蒸馏冷腔的冷面温度可满足膜蒸馏运行;当热端循环水进口温度为 20℃、流量为 100L/h、风机风量为 660m³/h、热电制冷器工作电流为 5.5A 时,热电制冷量为 87.1W,制冷效率为 1.3,二者均为最大值,且预测相应理论蒸馏通量为 40kg/(m²·h)。研究结果为小型太阳能热电制冷空气隙膜蒸馏系统的理论研究和实际应用奠定了基础。

关键词 膜蒸馏; 热电制冷; 匹配理论

中图分类号:TB66; O472⁺.7

文献标识码:A

Application Research of Thermoelectric Refrigeration in Air Gap Membrane Distillation System

Yang Shengnan¹ Yang Xiaohong¹ Tian Rui^{1,2} Yin Xiucui¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, 010051, China; 2. Renewable Energy Laboratory in Inner Mongolia, Hohhot, 010051, China)

Abstract A Parallel-Connected AGMD system was designed, which uses thermoelectric refrigeration instead of mechanical refrigeration to provide refrigeration capacity for membrane distillation. With the analysis of matching method between membrane distillation and thermoelectric refrigeration, the basic requirements of the optimum matching mode have been given out. A thermoelectric refrigeration membrane distillation cold chamber with water cooled heat dissipation components was built to research the refrigeration performance of a TEC with air-cooled model in its cold side. The results show that the cryogenic temperature of the thermoelectric refrigeration membrane distillation cold chamber can meet the membrane distillation operation requirement under constant intensity of heat dissipation. Under the experimental conditions of inlet water of 20℃ and 100L/h and air flow rate of 660m³/h, when the working current of TEC is 5.5A, the thermoelectric refrigerating capacity is 87.1W and cooling efficiency is 1.3, which reaches the maximum of both. The corresponding theoretical distillation flux is calculated to be 40kg/(m²·h). This investigation establishes the foundation for the theoretical research and practical application of solar air gap membrane distillation system with thermoelectric refrigeration.

Keywords membrane distillation; thermoelectric refrigeration; matching theory

气隙式膜蒸馏(Air Gap Membrane Distillation, AGMD)是将膜分离技术与传统蒸馏技术相结合的一种液体分离技术^[1-2],采用高分子微孔膜将膜组件冷热端隔开,利用膜两侧冷热端温差引起的蒸汽压差作为传质推动力,溶液中挥发性组分在疏水膜表面蒸发后透过微孔膜穿过空气隙,经扩散至冷壁冷凝,实现溶液浓缩分离。在 AGMD 膜组件中,冷腔冷壁的冷量一般由机械式制冷模式提供,使得系统结构过大,且耗电量大。为此,需要寻求新的制冷形式以简化系

统结构,提高能量利用率。

热电制冷又称半导体制冷或温差电制冷^[3],主要依据帕尔帖效应利用电能直接实现热能的传递,具有无机械运动、制冷迅速等特点,尤其适用于制冷量不大,又要求装置小型化的场合,广泛应用于军事、航天、医疗等特定领域^[4-5]。

热电制冷效率的提高,受到应用场合多因素影响,主要取决于其热端散热、冷端传冷方式及良好的结构设计。拟应用热电制冷技术替代压缩机制冷技

术,将其应用于太阳能空气隙膜蒸馏苦咸水淡化系统的冷腔,充分发挥其制冷迅速、体积小及调节便捷的特性,适应太阳能膜蒸馏热端温度随太阳能辐射变化的工况,提高膜通量,同时降低冷端能耗。

1 小型热电制冷空气隙膜蒸馏系统

如图1所示,在原有的多层并接式膜组件^[6]基础上,将热电制冷片的热端面贴附于冷腔两侧,将冷壁(铝板)贴附于热电制冷片的冷端面。利用太阳能发电系统为热电制冷器提供直流电能制冷。冷腔内工质可为待处理的原液,吸收热电制冷器产生的热量,从而对原液进行预热处理,预热后的原液进入太阳能集热系统,吸收太阳能达到工作温度后进入热腔,高温原液在膜热侧表面的气液边界层中发生气化,气化后的水蒸气分子通过扩散穿过膜孔进入空气隙中,水蒸气分子吸收热电制冷器释放的冷量,一部分在膜冷侧面和空气隙中冷凝为水,其余扩散至冷壁凝结为纯水。浓缩后的原液与待处理的原液混合后进入冷腔,进行预热处理。将冷凝的纯水进行收集,从而完成分离、浓缩、提纯的目的。

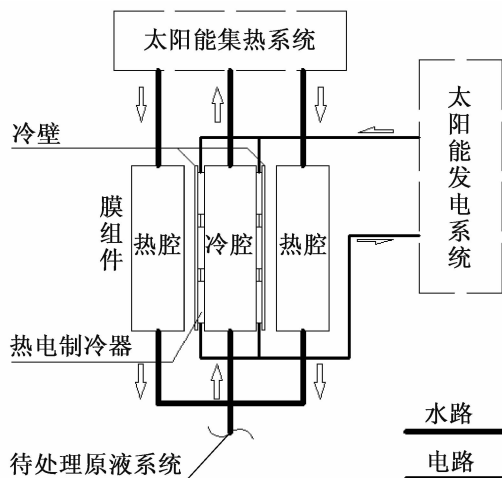


图1 采用热电制冷的空气隙膜蒸馏系统的工作流程

Fig. 1 Workflow of AGMD system with thermoelectric refrigeration

利用热电制冷器的冷端对被冷却介质进行冷却的工况称为热电制冷工况。热电制冷器的产冷量即为从被冷却介质中吸收的热量,也就是膜蒸馏过程产生的冷负荷。根据热电制冷器的制冷特性,在确定了膜组件热端蒸汽冷凝时所需要的冷量后,调节热电制冷组件的制冷工况,使其提供相应的制冷量。同时,根据膜蒸馏的传质推动力为膜两侧冷热温差引起的蒸汽压差,因此在确保一定的制冷量的同时还应确保

膜两侧冷热温差。当热腔工质温度一定时,热电制冷器冷端温度越低,膜两侧温差越大,膜蒸馏系统的膜通量也越大。通过上述分析可知当膜蒸馏系统采用热电制冷时,热电制冷系统运行的最佳工况应具备以下要求:1)在确保制冷量的同时具有较高的制冷效率;2)制冷面温度尽可能低;3)热电制冷器热端产热量尽可能高,便于实现预热目的。

2 膜蒸馏过程与热电制冷匹配计算

2.1 膜蒸馏过程冷负荷计算

膜蒸馏过程的冷负荷 Φ 包括以下三方面:

1)透膜蒸汽冷凝换热量 Φ_1

蒸汽冷凝放热计算简化为两步:第一步,透膜蒸汽冷凝为水时的气化潜热 Φ_q ;第二步,冷凝水降温至出口水温时的放热量 Φ_h 。

$$\Phi_q = r \times J \times S \quad (1)$$

$$\Phi_h = (h'' - h') \times J \times S \quad (2)$$

$$\Phi_1 = \Phi_q + \Phi_h \quad (3)$$

式中: r 为透膜水蒸气的气化潜热,kJ/kg; h' 为出口处水的焓值,kJ/kg; h'' 为凝结水的焓值,kJ/kg; J 为膜通量,kg/(m²·h); S 为膜面积,m²。

2)膜面与冷壁的辐射换热量 Φ_2

由于空气隙的间隙很小(1mm~5mm),可认为属于无限大平行表面间的辐射传热问题。其单位面积的辐射换热量 Φ_2 可按式计算:

$$\Phi_2 = \frac{5.67A \times \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4)$$

式中: A 为容腔接触面积,m²; ε_1 、 ε_2 分别为聚四氟乙烯膜及光面铝板的表面发射率, $\varepsilon_1 = 0.94$, $\varepsilon_2 = 0.03$; T_1 、 T_2 为聚四氟乙烯膜及铝板的表面温度,K。聚四氟乙烯膜可近似等于热腔工质温度。

3)空气隙换热量 Φ_3

相关文献^[7-8]指出,当空气隙厚度小于5mm时,空气隙中的传热方式可看做单纯的热传导。特别是当空气隙厚度为1mm时,不论空气隙封闭与否,其热量传递方式都可看做热传导^[9]。为了获得较大的膜通量,空气隙膜蒸馏系统中的空气隙厚度常设为1mm。因此,空气隙换热量可由下式确定,定性温度采用两壁的平均温度:

$$\Phi_3 = A \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) \quad (5)$$

式中: δ 为空气隙名义厚度, $\delta = 1$ mm; λ 为空气导热系数 W/(m·K)。

2.2 热电制冷工况的计算

根据热电制冷原理^[10],结合具有热电制冷的空气隙膜蒸馏系统的工作流程,可知当系统处于热平衡时,制冷功率 Q_c 、散热功率 Q_h 和输入功率 P 三者的关系可由下面公式给出:

$$Q_c = Q_h - P = c_p \rho Q_v \Delta T - UI \quad (6)$$

式中: c_p 为循环冷却水的比热容,取常温常压下水的比热容 $c_p = 4.183 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; Q_v 为循环冷却水体积流量, mL/s ; ρ 为循环冷却水密度, $\rho = 1 \text{ g/mL}$; ΔT 为循环冷却水的进出口温差, K ; U 为热电制冷器的工作电压, V ; I 为热电制冷器的工作电流, A 。

制冷效率COP的计算式为:

$$\text{COP} = Q_c / P \quad (7)$$

制冷面温度(冷壁温度) T_2 可在实际运行中由温度传感器测得。

2.3 膜蒸馏过程与热电制冷的匹配

当膜蒸馏组件结构、膜材料、热腔工质流量一定时,膜蒸馏系统的膜通量受膜两侧温差制约。膜通量可表示为:

$$J = f(T_1, T_2) \quad (8)$$

根据膜蒸馏系统冷负荷的计算可得:

$$\Phi = f(J, T_1, T_2) \quad (9)$$

根据热电制冷原理,分析温度分布可得,当热电制冷器热端温度一定时,

$$Q_c = f(J, T_2) \quad (10)$$

由式(8)~(10)亦可知,热电制冷应用于膜蒸馏系统需满足:当工作电流为 I 时,热电制冷产生的制冷量 Q_c 等于该工况下制冷面温度 T_2 对应的膜蒸馏过程的冷负荷 Φ 。

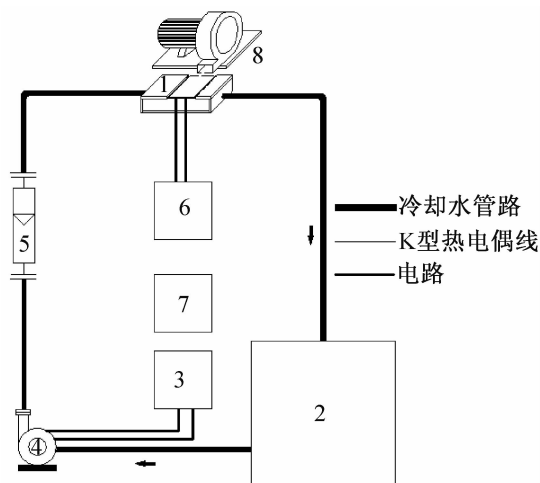
3 热电制冷系统实验研究

为进行热电制冷与膜蒸馏过程的匹配研究,设计了一种方形腔体式热电制冷膜蒸馏冷腔,对热电制冷器在散冷工况受限条件下的制冷性能进行研究,为热电制冷与膜蒸馏过程匹配的运行工况研究提供借鉴。

3.1 热电制冷系统实验流程

热电制冷系统如图2所示。通过磁力循环泵将水箱中的循环冷却水输入至安装有插片式散热器的隔板式水流通道箱,该过程通过流经玻璃浮子流量计对流量进行计量,循环冷却水在水流通道内与插片式散热器进行换热后回到储水箱。通过配电箱控制循环泵的启闭,且配电箱内设有变频器可对循环泵进行流量控制。稳压稳流电源的作用是为热电制冷器提供直流电。热电制冷器在直流电的作用下,热端制冷,冷端制冷,散热方式采取水冷,散冷方式采取风

冷,该散冷方式由风机完成。温度信号由K型热电偶采集,并由TP700多路数据记录仪自动记录。



1 热电制冷膜蒸馏冷腔 2 储水箱 3 配电箱 4 磁力驱动循环泵 5 ZBL 型玻璃转子流量计 6 稳压稳流电源 7 TP700 多路数据记录仪 8 风机

图2 热电制冷系统流程图

Fig. 2 Flow chart of thermoelectric refrigeration system

3.2 仪器与装置

1) 热电制冷器规格

利用制冷片特性参数和性能曲线图,可进行选型计算^[11]。以膜蒸馏最佳工况为例,水蒸汽温度 90°C 、产水出水温度 20°C 、膜面温度 90°C 、冷面温度 10°C 、膜通量为 $64 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、膜面积为 0.0104 m^2 ^[12],按照膜蒸馏冷负荷计算方法计算该工况下的膜蒸馏系统冷负荷约为 $\Phi = 500 \text{ W}$ 。根据膜蒸馏系统的最大冷负荷 500 W 以及模拟膜蒸馏冷壁面积 0.0104 m^2 ,参照某热磁电子公司的制冷器样品,初步选定制冷器型号为9501/242/160B,外形尺寸为 $55 \text{ mm} \times 55 \text{ mm} \times 3.45 \text{ mm}$,热电制冷器基础温度 T_b 为 50°C 时,最大电流为 16.0 A ,最大电压为 33.3 V ,最大温差 ΔT 为 72°C ,最大吸热量 Q_c 为 289 W 。

2) 散热器与冷板

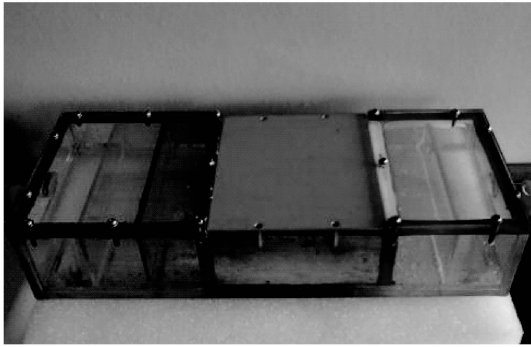
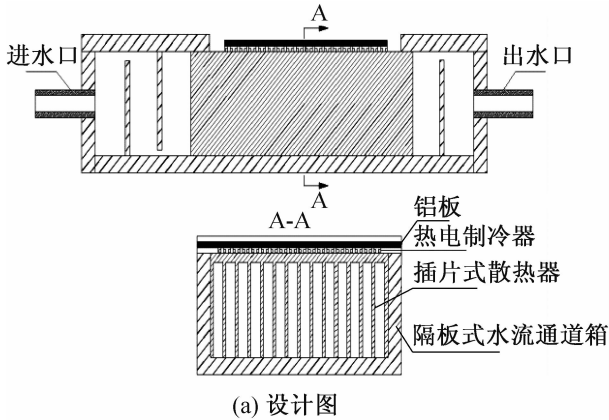
热电制冷器热端散热器为不锈钢插片式散热器,外形尺寸为 $147 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$,肋片的外形尺寸 $147 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm} \times 50.2 \text{ mm}$,共16个。冷端换热器为铜制冷板,外形尺寸 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 。

3) K 型热电偶

实验用K型热电偶精度等级为I级。为提高其测量精度,采用与一等温度计对比的比较法,对每个通道的K型热电偶进行零点修正和满度修正,并得到相应修正函数。以下温度数据均为修正后的数据,且测温误差小于 0.5°C 。

4) 热电制冷膜蒸馏冷腔

如图 3 所示,根据插片式散热器尺寸、热电制冷器排布、流道设计等方面要求,热电制冷膜蒸馏冷腔包括热电制冷器、插片式散热器、隔板式水流通道箱。在热电制冷器的两面涂覆一层厚度 0.02mm 的导热硅脂,然后将铝板贴附于热电制冷器的冷端表面,将热端表面贴服在散热器上,最后将散热器放置在隔板式水流通道箱的相应位置,即完成热电制冷膜蒸馏冷腔的组装。



(b) 实物图

图 3 热电制冷膜蒸馏冷腔设计图及实物图

Fig. 3 Design drawing and photo of membrane distillation cold chamber with thermoelectric refrigeration

3.3 实验方法及操作条件

为研究单片热电制冷器在散冷条件受限情况下的制冷性能,设定 8 个温度测点,即环境测点 1 个、循环水进口测点 1 个、循环水出口测点 1 个、制冷面测点 5 个,如图 4 所示。实验工况为热端循环水流量 100L/h,风机风量 660m³/h,输入电流 I 分别为 5.0A、5.5A、6.0A、6.5A、7.0A。

4 热电制冷系统实验结果分析

4.1 空冷方式对热电偶测温准确性的影响

实验中采用高温胶布对热电偶测点进行平面固定。为考察空冷方式对热电偶测温准确性的影响,在热电制冷器运行中冷面温度基本平衡后,采用泡沫塑料盖住 6 号测点,观察覆盖前后 6 号测点的温度变化

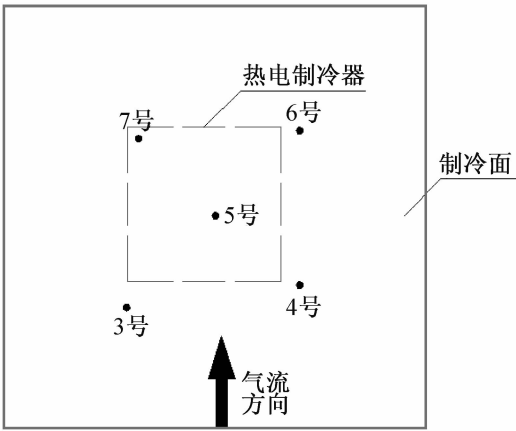


图 4 制冷面热电偶测点相对位置图

Fig. 4 Relative location chart of thermocouple measuring point on refrigeration surface

情况,如图 5 所示,3s 时覆盖 6 号测点,从图中可以看到温度有约 0.5℃ 的变化,说明空冷方式的空气温度确实对热电偶测温有一定影响,但可满足实验精度要求。

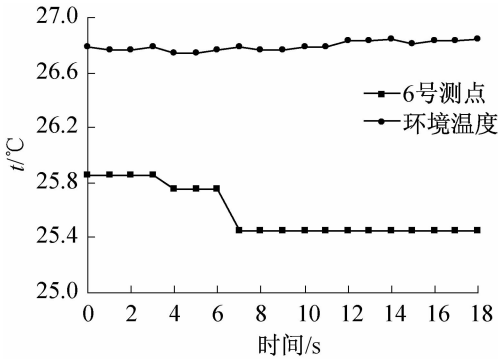


图 5 空冷方式对热电偶测温准确性的影响

Fig. 5 The effect of air cooling mode to the temperature measurement accuracy of thermocouple

4.2 热电制冷膜蒸馏冷腔传热响应性能

对不同输入电流下制冷面及循环水进出口温度数据进行分析,发现不同工况下测点响应时间及趋势相似。由于热电制冷器对电流的感知灵敏,制冷面温度从电源启动时刻到制冷温度时刻基本恒定不超过 1min,进出口温差从电源启动时刻到基本恒定时刻不超过 5min。仅以 $I = 5.0A$ 工况为例,如图 6、图 7 所示。

以 5 号测点为例,图 6 中 5 号测点温度由电源启动时的初始温度 28.7℃ 经过 38s 下降到制冷温度 22.5℃,而图 7 中循环冷却水进出口温差由电源启动时刻经过 118s 后基本稳定在 0.8℃,可见热电制冷组件传热响应迅速。相比于热电制冷,传统机械式制冷则需提前 1h 进行制冷,可见采用热电制冷可减少准

备时间,增加分离提纯的运行时间,提高日产水量。此外,图 6 还显示若仅用一片热电制冷器置于制冷面下方中心位置,当系统处于热平衡时,制冷面温度分布不均匀且存在明显的差异。3 号测点制冷温度最高,5 号测点制冷温度最低,两者温差高达 3.1℃。

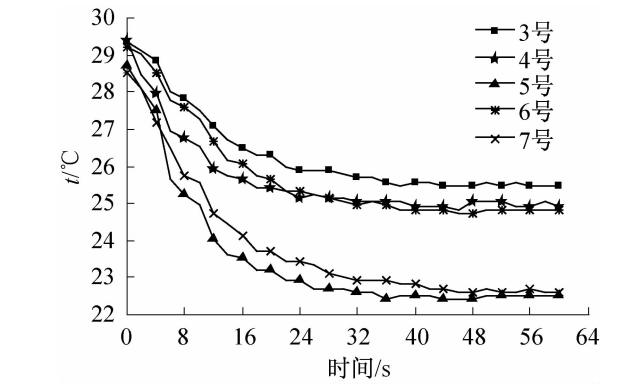


图 6 制冷面测点温度随时间变化趋势图 ($I=5.0\text{ A}$)
Fig. 6 Temperature variation chart with time of the measuring point on refrigeration surface ($I=5.0\text{ A}$)

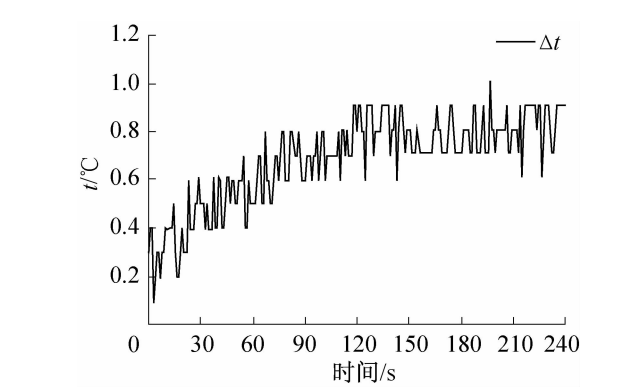


图 7 循环水进出口温差随时间变化趋势图 ($I=5.0\text{ A}$)
Fig. 7 Variation chart with time of the import and export temperature difference of circulating water ($I=5.0\text{ A}$)

4.3 散冷强度对制冷面温度的影响

图 8 给出了不同输入电流下 5 号测点温度随环境温度变化趋势。图 8 表明在同一输入电流下,随着环境温度的升高,制冷面各测点温度均有所升高。以 $I=5.5\text{ A}$ 为例,当环境温度由 28.6°C 变化到 29.1°C 时,5 号测点温度由 21.8°C 增加到 22.3°C 。这是由于,随着环境温度的升高,冷端散冷强度增大,空气从制冷面吸收的冷量增加,致使制冷面温度增高。可见当热电制冷器热端散热强度满足要求时,被冷却介质工况的变化会影响制冷温度。

4.4 热电制冷性能分析

取工况为热端循环水进口温度 20°C 、流量 100 L/h 、风机出口气温 29°C 、风量 $660\text{ m}^3/\text{h}$ 时的温度数据,根据式(6)和式(7)得到热电制冷器在冷端散冷强度

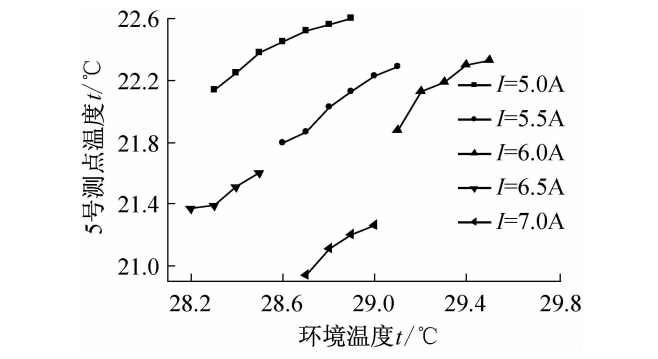


图 8 不同工况下 5 号测点温度随环境温度变化图
Fig. 8 Temperature variation chart with ambient temperature of the No. 5 measuring point under different working conditions

有限时的性能曲线,如图 9 所示。随着工作电流的增加,制冷量及制冷效率先增大后减小,而制热量则先增大后减小再增大。这说明,当输入电流处于 5.0 A 至 6.0 A 范围内时,输入功率主要用于热电制冷器的制冷,进而影响制热量;当输入电流大于 6.0 A 时,输入功率主要用于增大制热量。从图 9 可知,当热电制冷器工作电流为 5.5 A 时,制冷量为 87.1 W ,制冷效率为 1.3 ,制冷量及制冷效率均为最大,且此时散热量为 153.1 W ,散热量也相对较大,便于实现热端散热量的回收再利用。

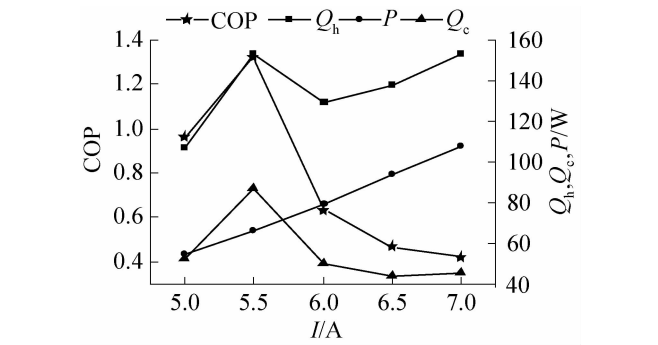


图 9 热电制冷器的性能曲线图
Fig. 9 Performance graph of TEC under the design condition

图 10 给出了不同工作电流下 5 号测点温度变化,当热电制冷器工作电流为 5.5 A 时,5 号测点温度为 21.1°C 相对较低,满足膜蒸馏系统运行的冷端温度要求。

4.5 理论膜通量的预测

基于跨膜传质机理,研究者们分别给出了各自的膜蒸馏传质模型。但是,由于模型中含有的大量参数均需通过实验获得,且对实验系统及实验条件依赖性较强,目前尚无法提出具有普适性的传质模型。

因此,为预测热电制冷与膜蒸馏过程耦合后的理

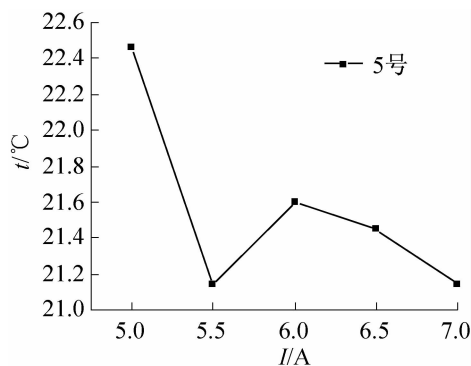


图10 不同工作电流下5号测点温度变化图

Fig. 10 Temperature variation chart of the No. 5 measuring point under different working currents

论膜通量,采用空气隙膜蒸馏淡化苦咸水实验^[9]中得到的膜通量与温差的关系曲线(参见图11),结合上述热电制冷与膜蒸馏过程的匹配分析,对膜蒸馏通量进行预测。

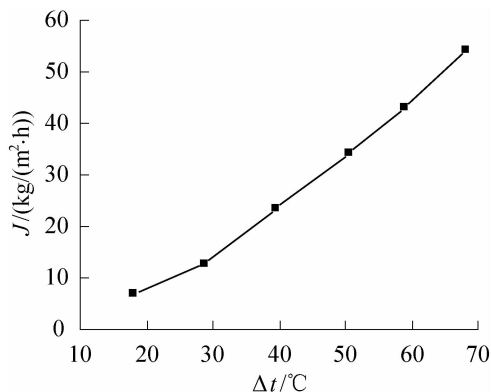


图11 膜蒸馏通量随温差的变化趋势

Fig. 11 Membrane distillation flux along with the temperature difference

当单片热电制冷器工作电流为5.5A,工作电压为12.0V时,4片热电制冷器并联可提供348.4W制冷量。根据膜蒸馏过程与热电制冷的匹配分析,可计算出相匹配的膜蒸馏过程预计理论膜蒸馏通量约为40kg/(m²·h),膜两侧冷热端温差约为56.7℃,膜热侧平均水温为77.8℃。

5 结论

与原有的空气隙膜蒸馏系统相比,采用热电制冷的空气隙膜蒸馏系统没有复杂的机械设备和管路系统,系统小型化;不采用制冷剂,不存在环境影响;制冷迅速、调节简便,易根据太阳能辐射变化随时调节工况。对空气隙膜蒸馏过程匹配热电制冷系统的研究分析表明:

1)在膜蒸馏过程中匹配热电制冷后,热电制冷

系统运行的最佳工况具备以下三点要求:1)在确保制冷量的同时具有较高的制冷效率;2)制冷面温度尽可能低;3)热电制冷器热端产热量尽可能高,便于回收再利用。

2)热电制冷膜蒸馏冷腔的制冷响应时间短,明显优越于机械式制冷。将其应用于膜蒸馏系统,可以减少制冷准备时间,相应的会增加分离提纯时间,进而增加日产水量。

3)在热电制冷系统热端散热强度满足要求的情况下,被冷却介质工况的变化会改变热电制冷器的运行工况,进而影响制冷面的制冷温度。

4)在实验设定工况下,当热电制冷器工作电流为5.5A时,热电制冷量为87.1W,制冷效率为1.3。热电制冷与膜蒸馏过程耦合后,4片并联运行预测可产生的理论蒸馏通量为40kg/(m²·h)。由此可见,将热电制冷应用于小型膜蒸馏组件中可获得较高经济效益。

本文受内蒙古自然科学基金项目(2010ZD09)资助。
(The project was supported by the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Province(No. 2010ZD09).)

参考文献

- [1] 吕晓龙. 膜蒸馏过程探讨[J]. 膜科学与技术, 2010, 30(3): 1-10. (Lv Xiaolong. Discuss about membrane distillation[J]. Membrane Science and Technology, 2010, 30(3): 1-10.)
- [2] 李嵩, 田瑞, 陈修怀. 高通量空气隙膜蒸馏系统的传热传质模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(11): 2060-2063. (Li Song, Tian Rui, Chen Xiuhuai. Heat and mass transfer model for a high-flux air gap membrane distillation system[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2007, 47(11): 2060-2063.)
- [3] 何燕, 聂宏飞, 张洪兴. 半导体制冷研究概述[J]. 工业技术, 2009, 24: 53-56. (He Yan, Nie Hongfei, Zhang Hongxing. Overview of semiconductor refrigeration research[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009, 24: 53-56.)
- [4] 王莹, 庞云凤, 殷刚. 太阳能半导体制冷性能改进的技术策略[J]. 节能技术, 2010, 1: 47-50. (Wang Ying, Pang Yunfeng, Yin Gang. Technical Strategies of Improving Performance of Solar Semiconductor Refrigeration[J]. Energy Conservation Technology, 2010, 1: 47-50.)
- [5] 罗斌, 代彦军. 太阳能半导体冰箱的性能分析[J]. 制冷学报, 2006, 27(5): 7-10. (Luo Bin, Dai Yanjun. Performance Analysis on a Solar Thermoelectric Refrigerator[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(5): 7-10.)

- [6] 贾立庄,杨晓宏,田瑞. 新型多层并接式膜组件的设计研究[J]. 膜科学与技术, 2011, 31(1): 101-104. (Jia Lizhuang, Yang Xiaohong, Tian Rui. New multi-parallel type membrane module design study[J]. Membrane Science and Technology, 2011, 31(1): 101-104.)
- [7] R W Schofield, A G Fane, C J D Fell. Heat and mass transfer in membrane distillation[J]. J. Membr. SCI., 1987, 33(3): 299-313.
- [8] liu G L, Zhu C, Cheung C S, et al. Theoretical and experimental studies on air gap membrane distillation[J]. Heat and mass transfer, 1998, 34(4): 329-335.
- [9] 高虹. 空气隙膜蒸馏传热传质过程机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2009.
- [10] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [11] 周敬雯, 邓帅, 代彦军, 等. 一种利用半导体热电效应的空调床的性能研究及其评价[J]. 制冷学报, 2012, 33(3): 14-21. (Zhou Jingwen, Deng Shuai, Dai Yanjun, et al. Research and Evaluation for a Bed Air-conditioner by Semiconductor Thermoelectric Effect[J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(3): 14-21.)
- [12] 马淑娟. 层叠式膜组件 PTFE 膜渗透性能及膜污染实验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2011.

通信作者简介

杨晓宏, 女(1971-), 副教授, 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 13848188275, E-mail: yxh1109@ yahoo. cn。研究方向: 太阳能膜分离技术中的传热传质强化。

About the corresponding author

Yang Xiaohong(1971-), female, Associate Professor, College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, 13848188275. E-mail: yxh1109@ yahoo. cn. Research fields: Heat and mass transfer enhancement in solar membrane separation technology.