



毛细力驱动海水淡化

章先涛^①, 江浩庆^③, 阚伟民^{②*}, 郑李坤^②, 程婷^①, 陈燕鸣^①, 胡雪蛟^{①④*}

① 武汉大学动力与机械学院, 武汉 430072;

② 广东电网公司电力科学研究院, 广州 510080;

③ 武汉大学化学与分子科学学院, 武汉 430072;

④ 水力机械过渡过程教育部重点实验室, 武汉 430072

*E-mail: kanweiming2000@163.com; xjhu@whu.edu.cn

收稿日期: 2014-10-23; 接受日期: 2015-03-19

国家自然科学基金(批准号: 50906064)、教育部博士点基金(批准号: 20100141110022)和苏州市基础研究基金(批准号: SYG201132)资助项目

摘要 报道了一种新型毛细力驱动海水淡化系统。系统类似打开的环路热管, 以毛细芯提供的毛细力为驱动力, 抽取海水进入毛细芯发生汽液相变, 产生的蒸汽进入冷凝器冷凝成淡水。实验结果表明, 使用有效受热面积为 50.24 cm^2 的蒸发器, 在壁面温度为 40°C 时, 淡水产量 91.8 g/h , 产水含盐约 30 mg/L , 水质超过饮用水标准。毛细芯中的弯液面可以自适应外界热源, 在 33°C ~ 56°C 间都能正常运行(产水温度 30°C)。由于广泛的温度适应性, 特别是低温下的海水淡化和物质提纯能力, 使得该方法在低品位余热利用等领域具有很大的优势和潜力。

关键词
毛细力
热管
海水淡化
余热回收

1 引言

地球表面尽管超过 $2/3$ 都被水覆盖, 但约 99.3% 的水被盐碱化^[1]。淡水资源不足, 已成为人们日益关注的问题^[2,3]。海水淡化提供了一种不受限制且稳定的淡水补充途径^[4,5], 是解决天然淡水资源缺乏的最具前景的方法之一^[6]。

目前海水淡化的方法主要可以分成两大类: 膜法(如反渗透法)和热法(如多级闪蒸法)。膜法需要消耗巨大的电力或轴功^[7], 而热法则存在内部动力消耗大、高温热源使用效率低下和系统结构庞大等缺点。以多级闪蒸为例, 由于淡化蒸汽和不凝气体不间断地产生并共存于闪蒸腔室中, 会破坏闪蒸腔室中的真空间, 过重的负荷被转移给了真空设备; 另一方面,

闪蒸蒸汽由于混有不凝气体, 冷凝面积要远大于纯蒸汽冷凝所需的换热面积^[8], 使得淡化设备体积过于庞大。由于海水淡化投资大, 耗能高, 阻碍了大规模海水淡化的推广利用。发展低成本、低能耗、环境友好的海水淡化技术具有重要意义^[9]。

本文提出了一类新型的毛细力驱动海水淡化系统。系统结构类似一个开路的环路热管, 可以利用低品位的余热, 实现非外力作用下的低温蒸发, 达到使海水脱盐淡化的目的^[10]。相比于传统的热法海水淡化系统(通常的运行温度为 $70\text{--}100^\circ\text{C}$ ^[11]), 本文提出的毛细法海水淡化系统实现了在 $33\text{--}56^\circ\text{C}$ 自适应运行。根据热力学第二定律, 热源温度越低, 可用能越少, 因此新的海水淡化系统极大地提高了能源利用的经济性。

引用格式: 章先涛, 江浩庆, 阚伟民, 等. 毛细力驱动海水淡化. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 654~660
Zhang X T, Jiang H Q, Kan W M, et al. Capillary-driven seawater desalination (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 654~660, doi: 10.1360/N092014-00053

2 系统结构和原理

本文提出的毛细力驱动海水淡化系统, 其基本结构类似于一个开环的环路热管。环路热管^[12,13]是一种以多孔芯产生的毛细力来驱动, 并利用工质相变和连续工质循环来传递热量的高效被动式换热元件, 具备长时间运行的高可靠性和负荷变化时的自适应性^[14,15]。图 1(a)是常见环路热管的基本结构, 主要由补偿室、蒸发器和冷凝器及相应管线组成。工质在蒸发器的毛细多孔芯内吸热蒸发, 蒸汽进入冷凝器凝结成液体, 由于蒸发和凝结相变的温差比较小, 实现了低温差条件下的高效传热。凝结以后的液体在毛细力的作用下抽吸回到蒸发器, 完成工质循环, 不需要消耗额外的泵功^[16]。本文提出的海水淡化系统则是一个开路的环路热管, 如图 1(b)所示。当向蒸发器表面加以足够大的热量, 海水将在毛细芯中发生相变并产生蒸汽, 产生的蒸汽流入冷凝器中冷凝, 充分具备环路热管小温差传热的优势。与传统环路热管不同的是, 冷凝以后的是淡水, 在重力作用下流出系统; 而给蒸发器补充的则是海水, 在毛细力的作用下上升并进入多孔芯。

海水蒸发过程中, 相变弯液面液相侧盐分会越来越多, 若不能及时排出, 将会导致结晶堵塞孔隙的严重后果。盐分从毛细孔中排出主要通过扩散作用进行, 因为蒸发界面液相侧盐分浓度高, 与吸液通道间存在浓度梯度, 根据 Fick 定律, 盐分会从高浓度向低浓度方向迁移。实验中需要确保吸液通道内的盐分浓度在合理的范围内, 使得蒸汽产生量与盐分迁移速率匹配。吸液通道内盐分的浓度由浓缩液的排出速度控制, 通过调节补液(海水)与浓缩液间的水位差 ΔH_{CF} , 将吸液通道中的浓缩液按一定的速度排出系统。

图 2 是毛细驱动海水淡化系统的实验系统, 其中图 2(a)是系统结构图, 图 2(b)是实物照片。实验过程中, 蒸发器竖直放置, 补偿室位于蒸发器的正上方。这样布置有两个目的: 1) 由于汽液密度差, 吸液通道中溢出的残余不凝气体和漏热形成的气泡会自发地流入补偿室中; 2) 由于重力作用, 毛细芯避免了运行过程中烧干的潜在危险。补偿室连接有一个真空泵, 用于充液前系统抽真空以及运行时除去补偿室内不凝气体。储液罐用于缓冲和调节在运行过程中可能的压力冲击。系统使用的蒸发器横截面如图

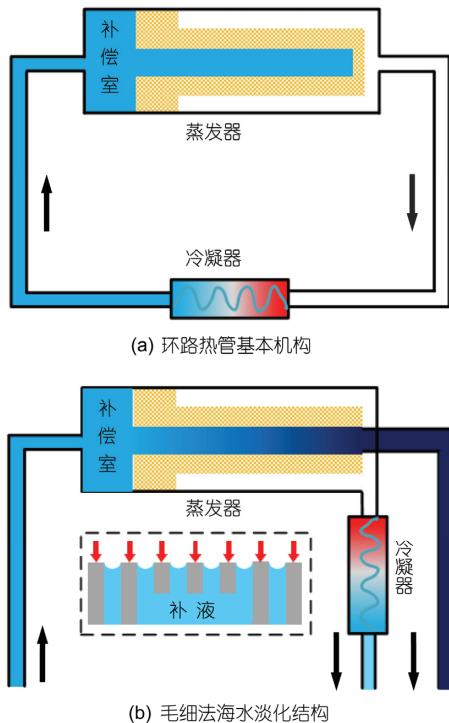


图 1 (网络版彩图)系统结构原理

(a) 环路热管结构原理; (b) 毛细法海水淡化结构原理

2(c)所示, 它是一内置毛细芯的海军黄铜管。毛细芯是系统最核心结构, 其性能直接关系到系统运行特性^[17], 本文中使用毛细芯由镍粉烧结而成, 孔隙率 $\varepsilon=60\%$, 渗透率 $k=2.98 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, 有效尺寸为 $l \times D = 50 \text{ mm} \times \Phi 30 \text{ mm}$, 其扫描电子显微镜(SEM)微观结构如图 2(d)。

为了达到系统启动运行的条件, 系统的充液通过以下步骤完成。首先用真空泵为补偿室和储液室建立一个足够大的低压, 从管线中吸入足够的液体, 其中补液管线和浓缩液管线吸入海水, 而淡水管线吸入自来水, 直到补偿室和储液室中液位达到图 2(a)所示的水位, 并满足系统的水力学平衡。由于毛细芯具有一定的突破压力, 不会有液体从吸液通道流入蒸汽侧。当所有这些步骤完成后, 关闭真空泵; 仅当运行过程中补偿室内不断累积的不凝气体对补偿室中液位有明显影响并可能危及到系统补液时, 真空泵才会再次开启。海水的蒸发相变温度与毛细芯所处压力有很大关系, 压力越低, 蒸发温度就越低, 主要由海水管线、浓缩液管线、淡水管线的竖直高度决定。

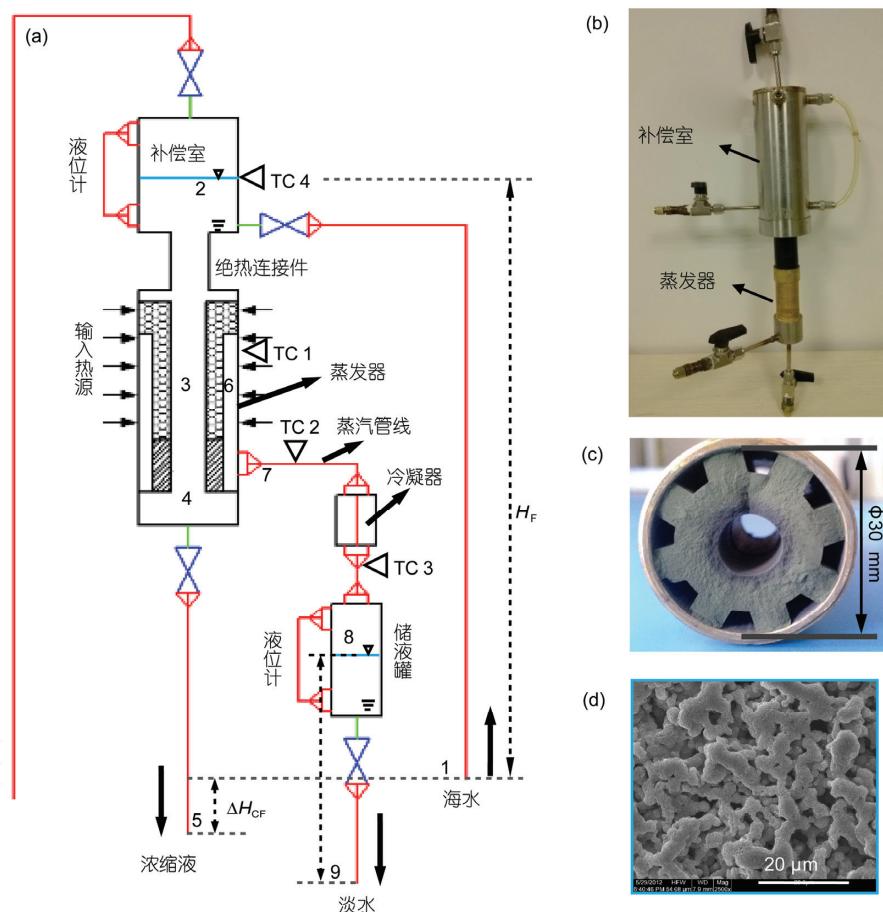


图 2 (网络版彩图)毛细力驱动海水淡化实验系统

(a) 系统结构简图; (b) 实验装置外观; (c) 毛细芯宏观结构; (d) 毛细芯微观结构

3 实验方法

为了测试毛细力驱动海水淡化系统的性能特性, 使用浓度为 16900 mg/L 的 NaCl 水溶液来模拟海水。作为一个实施例, 运行高度 $H_F = H_P = 10.0 \text{ m}$. 实验中, 采用两根 $\Phi 8 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的加热棒安装在马鞍状的铝基块内来模拟低温热源。通过调节输入电压来调节加热功率, 功率示数由功率表读取。模拟热源和蒸发器外包裹厚 8 mm 的玻璃石棉绝热材料。冷凝器使用 $L \times W \times H = 180 \text{ mm} \times 78 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$ 竖直放置的板式换热器, 冷凝段布置在蒸发段下部, 蒸汽自上而下流入冷凝器冷凝成淡水沿管路流出。这种布置方式冷凝段沿程压损较小(重力辅助), 蒸发温度低。冷却水逆流布置, 进口温度 25°C .

四个标定误差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的 K 型热电偶用来记录系统的温度, 计数频率为 0.2 Hz , 各测点位置如图 2(a)

中 Δ 标志处, 其中 TC1 用来测量蒸发器外表面温度, 即热源温度; TC2 安装在蒸汽出口管路上用来记录蒸汽温度, 即蒸发温度; TC3 用于记录冷凝器出口温度, 即冷凝温度; TC4 则用于监测补偿室温度的变化, 即蒸发器的进水温度。采用 DDSJ-308A 电导率仪来测试海水、浓缩液和产水的水质, 以溶解性总固体(TDS)含量来评估水质好坏。测量误差 $\pm 0.01 \text{ g}$ 的天平测量产水速率, 每 30 min 测量一次, 共测试 3 次取平均值。

4 结果与讨论

4.1 传热与水动力学过程

图 3 给出实验系统工作时毛细芯的传热传质过程示意图, 包括海水受热蒸发, 毛细芯抽吸海水补液以及由于蒸发带来的盐分堆积和盐分由蒸发界面向吸液通道的扩散过程。图 4 给出了毛细力驱动海水淡

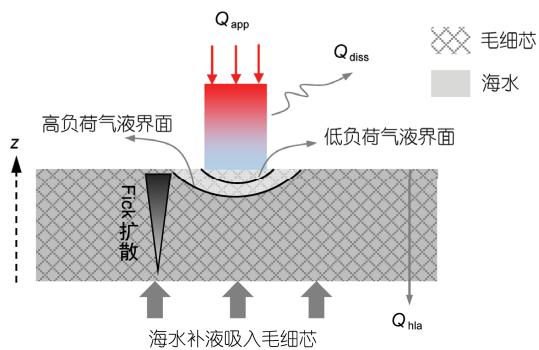


图 3 (网络版彩图)蒸发器内毛细芯传热传质分析

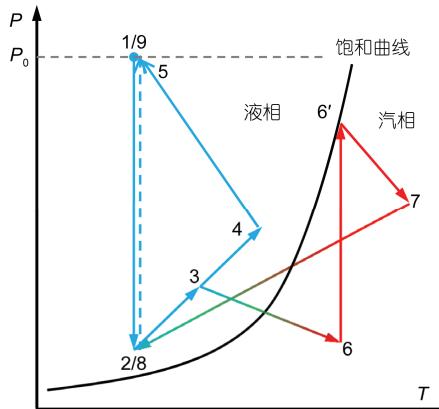


图 4 (网络版彩图)系统稳态运行时的温压图

化系统稳态运行时关键位置的压力-温度示意图。图 4 中的数字与图 2(a)中实验装置中的物理位置点相对应。曲线 1-2-3-4-5 是海水侧的状态过程，包括海水抽吸和浓缩液排放。由于系统不可避免的出现热泄露，当海水流过吸液通道时经历了沿程的加热过程，依次表现出点 3 和 4 的状态，而 4-5 是一个逐渐冷却的过程。3-6-6'-7-8-9 是海水蒸发-冷凝成淡水并流出系统的过程。

施加给蒸发器的热量 Q_{app} ，主要部分(Q_{evap})用于加热毛细芯中的海水并产生蒸汽，另有小部分热量(Q_{diss})散失到环境中。蒸发器内热平衡方程可以写为

$$Q_{app} = Q_{evap} + Q_{diss}. \quad (1)$$

海水蒸发发生在毛细芯弯液界面处，由点 6 等温变化到点 6'。蒸发器壳体温度高于饱和蒸汽温度 6'，当蒸汽流过蒸汽移出槽道，压力下降并被进一步加热至过热状态，点 7，蒸汽由饱和状态加热到过热，其吸收热量 Q_{sh} 。

补偿室和吸液通道中海水为液态，点 3，其压力

和温度都较毛细芯蒸发界面汽相侧低。毛细芯内外侧的温度差异引起部分热量由蒸发侧泄露到补偿室或吸液通道中，包括通过毛细芯热泄露 Q_{hla} 和通过蒸发器与补偿室的连接件引起的侧壁导热量 Q_{hhr} 。蒸发器向补偿室的热泄露平衡关系式：

$$Q_{evap} = Q_{sh} + Q_{hla} + Q_{hhr} + \dot{m}h_{fg}, \quad (2)$$

式中， \dot{m} 是海水蒸发量， h_{fg} 是水的汽化潜热。

海水淡化的热力学效率定义为

$$\eta = \frac{\dot{m}h_{fg}}{Q_{app}}. \quad (3)$$

系统的正常启动和稳定运行需要满足两个条件：

1) 驱动力足够大，其中驱动力包括两部分：汽液界面产生的毛细力 ΔP_C 和 3-8 间的静压力差 ΔP_g ，驱动力需要足以克服工质从吸液通道到汇入储液罐过程中包括相变在内的所有压损 ΔP_{tol} 。主要包括海水流过毛细芯受到的 Darcy 阻力 ΔP_{wick} (3-6)、蒸汽从产生到移出的压损 $\Delta P_{channel}$ (6'-7) 以及流过冷凝器的压损 ΔP_{con} (7-8)。即需要下列关系式成立：

$$\Delta P_C + \Delta P_g \geq \Delta P_{wick} + \Delta P_{channel} + \Delta P_{con}. \quad (4)$$

海水沸腾时，汽化核心气泡形成和毛细抽吸海水补液同时存在，两种现象组合一起影响毛细芯内的沸腾换热过程^[18]。Zhao 和 Liao^[19]实验表明随着热负荷增加，气液界面逐渐向毛细芯内部移动。毛细芯能产生的毛细驱动力 ΔP_C 由 Young-Laplace 方程确定

$$\Delta P_C = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \quad (5)$$

式中， σ 是海水的表面张力， θ 为接触角， r 是有效毛细半径。随着热负荷 Q_{app} 的增加，海水蒸发-冷凝侧总压损 ΔP_{tol} 增加。根据(4)式，毛细抽吸力 ΔP_C 需相应增加以满足系统水动力学平衡。Young-Laplace 方程(5)预示弯液面有效直径逐渐缩小，即气液界面向毛细芯内侧移动，如图 5 所示，气液界面内移半径减少以适应更大的流动阻力。该过程使毛细驱动海水淡化在负荷变动时具有主动适应能力。

2) 浓缩液驱动高程差 ΔH_{CF} 足够大，以保证足够

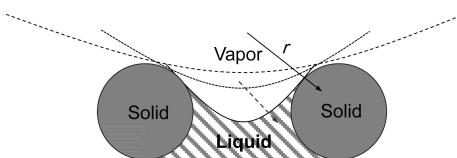


图 5 弯液面自适应热源负荷变化

的浓缩液流速和防止盐分在蒸发界面析出。本文实验中使用的“海水”为氯化钠和去离子水配成的模拟海水，不存在结垢的问题。

毛细芯中溶质扩散主要包括^[20]: 对流迁移和水动力弥散。其中对流迁入毛细芯的溶质通量 $J_v = \varepsilon u_z C_m$ ，水动力弥散质扩散通量 $J_z = -\varepsilon D_L (\partial C / \partial z)$ 。式中， ε 是毛细芯孔隙率； u_z 是海水补水速率； C_m 海水补液平均浓度； D_L 是毛细芯内水动力弥散系数，可取 $D_L = D_0 \tau + \alpha u_z^n$ ^[21]， D_0 是盐分在广域水域中扩散系数； τ 是毛细芯的迂曲率(表示多孔体通道两端直线长度与通道真实长度的比值)， $\tau < 1$ ； α 是弥散率； n 近似值一般取 1。毛细驱动海水淡化正常运行时，毛细芯内溶质对流迁入与水动力弥散扩散量相等。通过调节补液(海水)与浓缩液间的水位差 ΔH_{CF} (图 2)，将吸液通道中的浓缩液按一定的速度排出系统。

当系统在较低温度下运行，即 H_F 比较大时，可近似认为

$$\Delta H_{CF} = \frac{8\lambda H_F}{\pi g d^5} (V_1^2 + V_5^2), \quad (6)$$

式中， λ 是沿程阻力系数， g 是重力加速度， d 是管径， V_1 和 V_5 分别是海水和浓缩液的体积流量。显然，蒸发量或淡水产量 $V_9 = V_1 - V_5$ 。蒸发界面处的溶质传递平衡，有

$$V_9 C_3 = k (C_6 - C_3), \quad (7)$$

式中， k 是对流传质系数。海水浓缩过程溶质守恒，有

$$V_1 C_1 = V_5 C_3. \quad (8)$$

为防止毛细芯内蒸发浓度 C_6 过高，发生结晶析出，联立(6)~(8)式可知

$$\frac{\Delta H_{CF}}{H_F} > \frac{8\lambda V_9^2}{\pi g d^5} (1 + 2\alpha + 2\alpha^2), \quad (9)$$

其中 $\alpha = C_1 / \left(\frac{k C_s}{k + V_9} - C_1 \right)$ ， C_s 为饱和溶解度。实际海水的成分相当复杂，可能需要借助一定方法来解决低溶解度盐分析出的问题。

4.2 稳态实验测试结果

图 6 给出了施加 40℃ 稳定热源时，各测试点在 2 h 内的热行为曲线。系统启动仅用了约 300 s，系统启动平稳。稳定运行时，热负荷 $Q = 80$ W，补偿室温度 TC3 约为 30℃。沿淡水管线流出的冷凝水平均产水

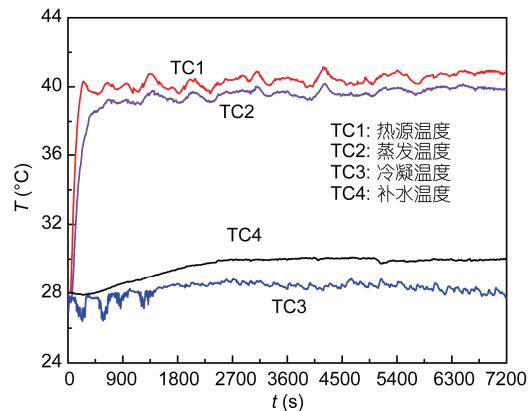


图 6 (网络版彩图)40℃稳定热源条件下系统测试结果

速率为 91.8 g/h。按(3)式计算得到在 80 W 热负荷下，毛细驱动海水淡化第一效率为 75.9%。

稳态运行时，模拟海水的 TDS 为 16900 mg/L，产水的 TDS 含量约为 30 mg/L，而此时，测得的浓缩液 TDS 高达 23000 mg/L。一般认为当水中盐分含量低于 500 mg/L 时是适合饮用的^[1]，毛细法海水淡化产品品质远超过饮用标准。

在多级闪蒸海水淡化器中，为了获取高质量的产水，往往需要在闪蒸腔室中安装多级捕沫装置。毛细法海水淡化技术在未设置任何附属捕沫设备仍能有这么好的产水品质，很可能的原因是发生在微纳米尺度上的蒸发/沸腾蒸汽不会像在自由液面那样，卷吸携带较多未蒸发的液相雾滴。

4.3 系统变工况特性

通过变工况实验，能够获取系统的有效工作区间以及系统稳定性等重要信息。当热源温度发生变动时，为达到该热源温度下新的平衡产水量，系统会在一定范围内自动响应热源温度的变化。

图 7 给出了热源温度从 33℃ 变化到 56℃ 时系统的运行情况。对应的输入功率从 20 变化到 160 W，每次增加 20 W。从图中可以看出，开路的环路热管表现出了与普通环路热管相似的运行特性和稳定性。证实了毛细法海水淡化技术的运行可靠性和稳定性。目前，常规的蒸馏法海水淡化系统，利用的蒸汽温度为 70℃ ~100℃^[11]，图 7 证明毛细驱动海水淡化技术可以利用更低的余热温度，当外界余热温度仅 33℃ 依然可以回收利用，转化为淡水资源，并且可以通过毛细芯内弯液面曲率变化自适应外界热源的变化。

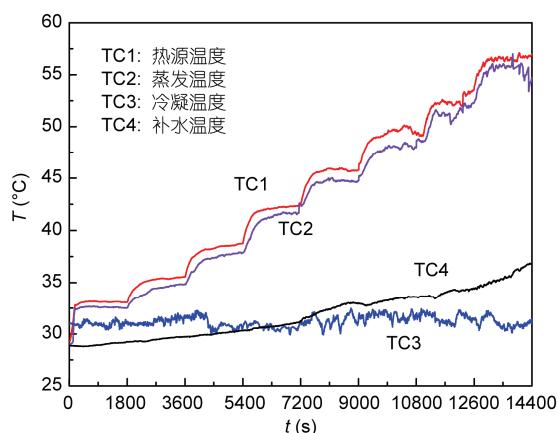


图7 (网络版彩图)变温热源条件下系统测试结果

5 结论

本文将热管自驱动和小温差的原理优势应用到海水淡化，工作时只需要在进口补充足量的海水，就可以依靠外界的低温余热实现海水蒸发，并冷凝成

高品质的淡水。本文提出的海水淡化方法具有如下优势：

1) 温度低。实验表明可利用的余热温度能低至33℃，并且可以在一定的热源温度范围内自适应，而在此之前热法海水淡化热源温度基本上都在70℃以上，极大地提高了能源利用的经济性。

2) 耗能少。毛细力海水淡化主要依靠毛细力驱动运行，除不凝气的真空设备只是偶尔间歇性启动，相对常规热法，显著节约了电能。

3) 体积小。毛细力海水淡化中是纯蒸汽冷凝(蒸汽与不凝气由毛细芯隔离)，冷凝换热系数大大提高。对于相同产水量的淡化系统，毛细法的冷凝面积可以比多级闪蒸小1~2个数量级，且内部不需要安装捕沫装置等辅助结构，设备成本明显降低。

毛细力驱动海水淡化自适应低温热负荷的特点能充分回收包括热电厂汽轮机排汽在内的极低品位、几无做功能力的能量，同时将海水转变成淡水资源。毛细力驱动海水淡化技术可能成为一种有重要影响力的新型海水淡化方法。

参考文献

- 1 Qtaishat M R, Banat F. Desalination by solar powered membrane distillation systems. *Desalination*, 2013, 308: 186–197
- 2 Shannon M A, Bohn P W, Elimelech M, et al. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 2008, 452: 301–310
- 3 Gude V G, Nirmalakhandan N, Deng S. Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renew Sust Energ Rev*, 2010, 14: 2641–2654
- 4 Tofiqhy M A, Mohammadi T. Salty water desalination using carbon nanotube sheets. *Desalination*, 2010, 258: 182–186
- 5 Elimelech M, Phillip W A. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *Science*, 2011, 333: 712–717
- 6 Cohen-tanugi D, Grossman J C. Water desalination across nanoporous graphene. *Nano Lett*, 2012, 12: 3602–3608
- 7 Charcosset C. A review of membrane processes and renewable energies for desalination. *Desalination*, 2009, 245: 214–231
- 8 Zhong L, Ma X H, Wang S F, et al. Effects of surface free energy and nanostructures on dropwise condensation. *Chem Eng J*, 2010, 156: 546–552
- 9 Schwarzer K, Vieira D A Silva E, et al. A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production. *Desalination*, 2009, 248: 204–211
- 10 胡雪蛟, 杜润庭, 王相宇, 等. 一种低温余热海水淡化系统. 中国, CN101830531A, 2010-9-15
- 11 Gude V G, Nirmalakhandan N. Desalination at low temperatures and low pressures. *Desalination*, 2009, 244: 239–247
- 12 Maidanik J F, Vershinin S V, Kholodov V F, et al. Heat transfer apparatus. U S Patent, 4515209, 1985
- 13 Maydanik Y F. Loop heat pipes. *Appl Therm Eng*, 2005, 25: 635–657
- 14 盖东兴, 刘志春, 刘伟, 等. 平板型 mLHP 实验研究. 制冷学报, 2009, 30: 26–31
- 15 陈彬彬, 刘志春, 刘伟, 等. 平板式不锈钢-氨环路热管的实验研究. 工程热物理学报, 2012, 10: 1751–1754
- 16 Ku J. Operating characteristics of loop heat pipes. *SAE Trans*, 1999, 108: 503–519
- 17 李金旺, 邹勇, 程林. 环路热管毛细芯热物性实验研究. 中国电机工程学报, 2010, 17: 57–61
- 18 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论. 北京: 科学出版社, 1995. 299–307
- 19 Zhao T, Liao Q. On capillary-driven flow and phase-change heat transfer in a porous structure heated by a finned surface: measurements

- and modeling. *Int J Heat Mass Tran*, 2000, 43: 1141–55
20 仵彦卿. 多孔介质渗流与污染物迁移数学模型. 北京: 科学出版社, 2002. 214–232
21 陈丽湘. 土壤次生盐渍化及其防治的模型与实验研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2009

Capillary-driven seawater desalination

ZHANG XianTao¹, JIANG HaoQing³, KAN WeiMin², ZHENG LiKun², CHENG Ting¹,
CHEN YanMing¹ & HU XueJiao^{1,4}

¹ School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

² Electric Power Research Institute of Guangdong, Guangzhou 510080, China;

³ College of Chemistry and Molecular Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

⁴ Moe Key Laboratory of Hydrodynamic Transients, Wuhan 430072, China

We demonstrate a novel capillary-driven seawater desalination system. The essence of the system is an open loop heat pipe. Seawater is evaporated at the outer surface of the wick structure of the “heat pipe”, where a capillary pressure is developed as the driving force to ensure the continuous operation of the system. The produced vapor is then condensed into fresh water in a condenser. The difference from a regular heat pipe is that the evaporator is not fed back with the condensed water, but with seawater instead. With a heat source at 40°C, the fresh water production rate is achieved up to 91.8 g/h for an effective evaporation area of 50.24 cm². The TDS (total dissolvable solids) of the produced water is less than 30 mg/L, far beyond the standard for drinking water. For wide operation temperature adaptability, particularly, at low temperatures, the presented desalination technique may have big potentials for the use of low-cost and low-grade heat energy to produce fresh water.

capillary force, heat pipe, desalination, waste heat harvesting

doi: 10.1360/N092014-00053