

Open Heat Pipe for Desalination with Waste Heat

Ting Cheng^{1*}, Xiantao Zhang¹, Weiming Kang², Xiaoqing Xiao², Lili Fan²

¹MOE Key Laboratory of Hydrodynamic Transients, School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan

²Southern Electric Power Research Institute, Guangzhou

Email: *tingcheng@whu.edu.cn

Received: Aug. 15th, 2012; revised: Aug. 29th, 2012; accepted: Sep. 12th, 2012

Abstract: To improve energy efficiency, condensing heat recovery is taken out with a novel method in this work. Open heat pipe is first put forward to heat the seawater and obtain the fresh water. A loop heat pipe is tested by opening way in experiment, and the result shows low temperature in the evaporation. Without input energy, the driving force of the system is mainly by the capillary force. The second law efficiency of this method is depended on the performance ratio and the phase change temperature a lot.

Keywords: Open Heat Pipe; Waste Heat; Capillary Force; Desalination

开式热管低温海水淡化的余热回收技术

程 婷^{1*}, 章先涛¹, 阚伟民², 肖小清², 范立莉²

¹武汉大学动力与机械学院, 水力机械过渡过程教育部重点实验室, 武汉

²广东电网公司电力科学研究院, 广州

Email: *tingcheng@whu.edu.cn

收稿日期: 2012年8月15日; 修回日期: 2012年8月29日; 录用日期: 2012年9月12日

摘 要: 为提高电厂能源效率需改善其冷凝热的利用, 本文提出开式热管回收冷凝热的余热进行海水淡化的方法。实验研究中将环路热管变为开式热管实现水的低温相变, 系统运行时的驱动力为多孔材料中汽液界面的毛细力。理论上随着海水浓缩程度的提高; 蒸发与冷凝温度差的减小, 此系统的热力学第二效率随之提高。

关键词: 开式热管; 毛细力; 低温余热; 海水淡化

1. 引言

全球余热资源丰富, 利用潜力大、分布广, 部分余热温度高且在载热体流量稳定, 具有良好的利用条件。电厂余热能量巨大, 发电系统是一个能量转换的工厂, 内部存在各种能级, 为余热利用提供了很高的自由度。目前, 大型火电厂发电效率为40%左右, 其中50%以上的热能主要通过锅炉烟囱和汽轮机凝汽器的循环冷却水释散到环境中。而核电站不及35%热能转化为电能, 其余的均变为废热^[1]。这不仅浪费了日趋紧张的化石能源, 更加大了环境污染的负荷。从

根本上缓解这种现象, 其途径之一即是充分利用电厂不可避免的余热, 提高燃料的综合利用效率。目前针对电厂节能和低温余热利用的有效方式主要包括: 热泵技术、养殖业、烟气余热利用等。这部分的余热通过热泵、制冷系统、低沸点工质动力系统活作为生活用水予以利用^[2]。现今, 国内开展其余热利用的电厂较少, 仅占火电厂总数的16%。其中, 87%的电厂主要利用方式是水产品养殖, 其利用量少, 且效率十分低下^[3]。

国内沿海电厂中除余热能量浪费严重的问题之外其淡水资源的缺乏、生产成本低, 使得寻求新的海水淡化方案成为其另一重大需求。针对这一具

*通讯作者。

体情况可利用电厂的余热能量为海水淡化工艺提供能量, 以实现能源的高效利用并解决电厂余热、淡水资源两大问题。目前虽有众多海水淡化技术的研究成果以及余热利用的方案, 但能同时解决两个问题的方案尚未出现, 本文研究工作首次提出毛细力自驱动的低温海水淡化技术, 实现余热的低温低品质能量作为海水淡化技术中生成淡水的能量来源, 提高电厂能源的利用效率。

2. 毛细力驱动低温相变的海水淡化原理

本文提出的海水淡化装置是一种开式热管结构如图 1 所示, 携带余热能量的蒸汽或液工质作为系统热源, 直接冲刷蒸发器毛细芯所接触管壁的外壁面将热量传递给毛细芯, 毛细芯中的海水加热后并在芯内发生汽液相变。蒸发器吸收的热量一方面转化为液体相变的汽化潜热, 另一方面转化为对液体的抽吸能量, 把经过预处理和除不凝气的海水从除氧器吸入蒸发器。一部分海水在蒸发器内蒸发, 变成蒸汽进入冷凝器冷却为水。系统中的冷凝器具有与蒸发器相匹配的散热能力, 迅速将蒸汽冷凝成淡水保持蒸发器蒸汽腔的压力; 另一部分海水, 盐分浓度升高在其进出口高度差产生的压力下在虹吸作用下从蒸发器中排出。

毛细抽吸力及相变压差是系统运行的驱动力, 因此系统运行状况与各处的压力与工质的温度密切相关, 如图 2 所示, 系统压降是由蒸汽流动压降和液体流动压降组成: 液体压力初始为大气压, 经过进口管道高度差降压后到达除氧器中, 液体由毛细芯的毛细抽吸力从除氧器流入毛细芯中, 消耗了除氧器至毛细芯的管道压降以及毛细芯中的压降。在毛细芯弯曲汽液界面处液体相变为气体的同时发生压力突变, 其后汽体流过毛细芯的蒸汽槽道和蒸发室至冷凝器管道压头逐渐降低, 在冷凝器中冷凝为液体后经出口管道后液体压力遂升至大气压流出系统。

3. 实验的结果与可行性讨论

本实验的目的为蒸发器汽腔的汽相压力低于液体温度对应饱和蒸汽压, 利用余热能量相变即可发生在蒸汽室所处低温下, 开式热管能够稳定运行。本实验装置由毛细芯蒸发器、冷凝器、除氧器组成的开式热管系统、数据采集系统、辅助加热系统组成, 工质使用蒸馏水。由 4 个铜 - 康铜 T 型热电偶来检测系统

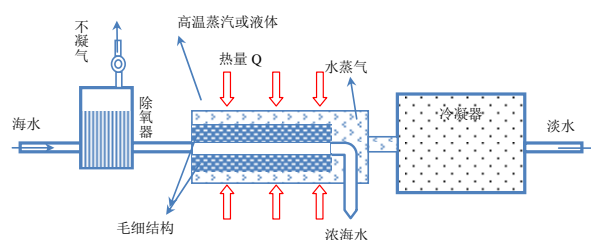
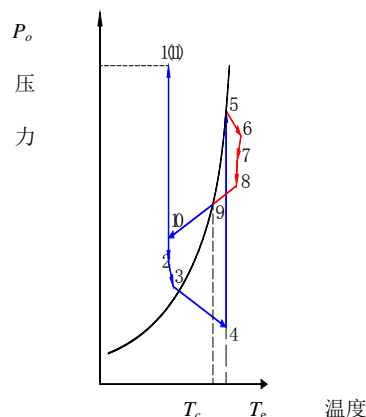


Figure 1. Schematic diagram of the desalination system
图 1. 海水淡化系统结构示意图



1. 液体进口; 2. 除氧器出口; 3. 毛细芯吸液芯中心; 4. 毛细芯相变界面液体侧; 5. 毛细芯蒸发界面气体侧; 6. 蒸汽槽出口; 7. 蒸汽管出口; 8. 冷凝器界面; 9. 冷凝器出口; 10. 液体出口。

Figure 2. Pressure drop and the temperature of the system
图 2. 系统运行压强 - 温度分析图

各主要区域及环境温度, 所有热电偶标定后的测温误差为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 各测点位置见图 3。辅助加热系统采用 2 根加热棒安装在 $9\text{ cm} \times 4.5\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的铝块的作为模拟热源。模拟热源及蒸发室外包裹了石棉绝热材料。测试中进液口与蒸发器高度差为 8.8 m , 在除氧器中降压为 15 KPa (由压力计测量所得)。系统运用毛细芯的抽吸力作为动力, 而毛细中不凝气的堆积易使得毛细力失效进而使得系统运行失败, 因而液体中溶解的不凝气不可避免, 在运行中不凝气由除氧器装置预先从液体中抽取出。实验前的准备工作是由真空泵将装置中充灌已除过不凝气的纯净水, 装置充灌满液体后(充灌量 100%)启动辅助加热系统和冷凝器开始实验测试。

辅助加热装置输入功率为 30 W 时数据采集系统收集了实验装置运行 108 min 的温度数据如图 4 所示。装置的启动需要的时间仅仅 6 min , 由蒸发器出口温度可知蒸发器中相变温度稳定在 40°C 左右, 且采集出口处的液体流量得到平均出水速度为 0.010 g/s , 整个

实验装置运行较稳定，装置的可行性得到验证。

4. 热力学效率的理论分析

现有的热法海水淡化技术主要为相变过程，其中相变过程水的汽化潜热耗能巨大，致使热法方法的热力学第一效率低，因此人们较为关注其热力学第二定律效率及成本。Abdulnasser A. Mabrouk 等人^[4]对几种常见的海水淡化过程的热效率进行分析得到数据如表 1。可知热法海水淡化技术的热力学第二定律效率较低且成本偏高。

依据图 4 实验测试数据，即蒸发温度为 40℃，冷凝器中部温度为 27℃ 的情况下，计算此新方法的热力学实验装置运行较稳定，装置的可行性得到验证。学效率如图 5(a)，其效率随着浓缩程度的提高有明显提高，当浓缩程度提高并接近结晶浓度时其热力学第二定律效率达到约 4.5%。此外此法的效率随着相变温度变化，如图 5(b)当冷凝相变温度接近蒸发相变温度时热力学效率得到提高，因此提高本法热力学第二效率的

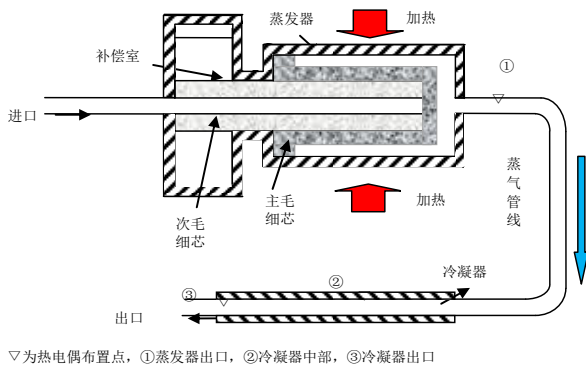
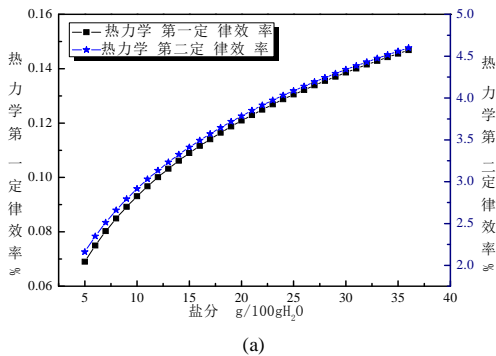


Figure 3. Schematic diagram of the experimental system
图 3. 实验系统结构示意图



关键是提高冷凝器的换热能力即是提高冷凝时的相变温度。

5. 结论

余热能量的有效合理利用是提高电厂能源利用效率的途径之一，本文提出的开式热管进行海水淡化的方法，是余热综合利用降低电厂运行成本的新思路。此海水淡化技术其原理中所需热源是低温低品质余热能量，只在系统启动前充灌准备过程中需要输入一定泵功，以及运行过程中抽吸不凝气需要极少量泵功，而现今已有的各种海水淡化技术则需要提供高品质能量使得系统运行。因此，本文提出的以低品质的余热能量输入的海水淡化方法可实现节能减排降低成本，

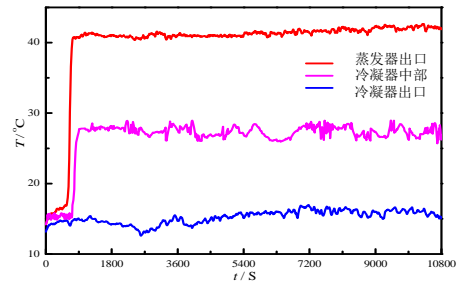


Figure 4. The temperature curve of the running system
图 4. 实验装置运行中的温度曲线

Table 1. Comparison of several desalination technologies
表 1. 几种海水淡化技术的比较

海水淡化技术	多级闪蒸 (MSF) 5000 m ³ /day	机械压缩蒸馏 (MEE-TVC) 1200 m ³ /day	热力蒸汽压缩 (MEE-MVC) 1500 m ³ /day
输入的能量	热、电	电	热、电
热力学第二定律效率	1.87	2.16	5.75
成本(\$/m ³)	2.64	3.4	1.7

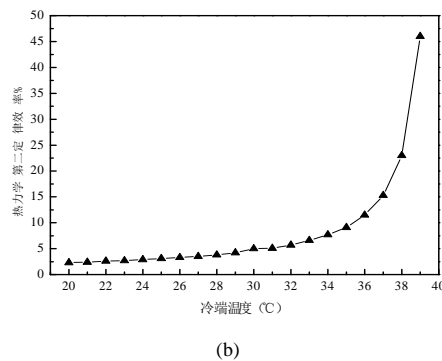


Figure 5. Thermodynamic efficiency analysis: (a) First and second Law of Thermodynamics; (b) Relationship between the thermodynamics efficiency and the temperature of the radiation
图 5. 热力学效率分析: (a)热力学第一及第二定律效率; (b)热力学第二效率与冷端温度的关系

具有很好的余热利用性。实验测试中利用低温加热开式热管得到其稳定运行的数据，证实了此法的可行性。在测试工况下此法的热力学第二定律效率可接近 5%。理论上随着海水浓缩程度的提高；蒸发与冷凝温度差的减小，此系统的热力学第二效率随之提高。

参考文献 (References)

- [1] 贺益英, 赵懿珺. 电厂循环冷却水余热高效利用的关键问题[J]. 能源与环境, 2008, 6: 27-29.
- [2] 赵钦新, 王宇峰, 王学斌等. 我国余热利用现状与技术进展[J]. 工业锅炉, 2009, 5: 8-15.
- [3] 贺益英. 关于火, 核电厂循环冷却水的余热利用问题[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(4): 315-320.
- [4] A. A. Mabrouk, A. Nafey and H. Fath. Thermoeconomic analysis of some existing desalination processes. Desalination, 2007, 205(1): 354-373.