

单效蒸馏海水淡化装置热力性能实验研究

冯东东¹ 张凤鸣¹ 苏闯建¹ 陈顺权¹ 旷万军²

¹(广州中国科学院先进技术研究所 广东省膜材料和膜分离重点实验室 广州 511458)

²(深圳市沃尔奔达新能源股份有限公司 深圳 518103)

摘 要 板式低温蒸馏海水淡化技术是远洋船舶的重要淡水制备方法, 文章根据板式低温蒸馏的热力学原理, 设计并制造了一台蒸馏海水淡化装置, 并以产水率为优化目的进行了相关实验研究。结果表明: 热源水入口温度和流量是影响系统产水率的重要参数, 产水率随热源水入口温度(60~74℃)和流量(2 000~3 900 kg/h)的增大基本呈线性增大的趋势; 进料水流量存在最优值(150 kg/h 左右), 低于最优值时, 产水率随进料水流量增大而增大, 超过最优值后, 进料水流量并不能显著提高产水率, 甚至导致产水率下降, 相关实验数据对海水淡化装置的优化设计提供了数据支持。

关键词 单效; 蒸馏; 海水淡化; 板式换热器

中图分类号 TB 75 文献标志码 A

An Experimental Study on Thermal Performance of a Single Effect Distillation Desalination Device

FENG Dongdong¹ ZHANG Fengming¹ SU Chuangjian¹ CHEN Shunquan¹ KUANG Wanjun²

¹(Guangdong Key Laboratory of Membrane Materials and Membrane Separation, Guangzhou Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China)

²(Shenzhen Verypower New Energy Co., Ltd, Shenzhen 518103, China)

Abstract Plate heat exchanger (PHE) freshwater generators are widely applied at ocean vessels for freshwater supply. In this paper, based on the thermodynamics principle of PHE, a distillation desalination device was designed and manufactured. Water production rate of the investigated PHE device was tested to obtain an optimized setting. The experimental results showed that, the heat source water temperature at inlet and flow rate are the two major factors that affect the freshwater generator performance. Basically, freshwater production rate is linearly with the increase of heat source water inlet temperature increases (60-74℃) and flow (2 000-3 900 kg/h). Feed water flow has an optimal value of about 150 kg/h, and the water production rate increases with the feed water flow below the optimal value. Feed water flow did not increase the rate of water production significantly while the feed water flow over the optimal value, and even led to the decrease of the

收稿日期: 2016-08-01 修回日期: 2016-11-26

基金项目: 广东省产学研合作项目(2016B090918037); 深圳市技术开发项目(CXZZ20150528141008015); 广东省中国科学院全面战略合作项目(2013B091100003); 南沙区技术开发项目(2015KF013)

作者简介: 冯东东, 硕士, 研究方向为低温蒸馏水质净化技术; 张凤鸣(通讯作者), 博士, 研究方向为低温蒸馏水质净化技术, E-mail: fm.zhang@giat.ac.cn; 苏闯建, 硕士研究生, 研究方向为低温蒸馏水质净化技术; 陈顺权, 博士, 研究方向为低温多效蒸馏水质净化技术及膜材料及膜分离技术; 旷万军, 本科, 研究方向为船舶余热海水淡化系统。

water production rate. The obtained data can provide empirical reference for the design and optimization of PHE devices.

Keywords single effect; distillation; desalination; plate heat exchanger

1 引言

利用低温蒸馏原理进行海水淡化是远洋船舶获取淡水的重要途径^[1]。国外很多船舶辅机供应商研发生产低温蒸馏海水淡化装置(又称造水机),如瑞典的阿法拉伐(Alfa Laval)集团、德国GEA集团、芬兰的瓦锡兰集团(Wartsila)和日本的SASAKURA公司等^[2]。从海水淡化装置的主体结构形式看,主要有管壳式蒸馏器和板式蒸馏器两种。相比之下,板式蒸馏器具有换热系数较高、结构紧凑、可拆卸维护等优点,市场占有率逐步提高^[3]。目前,板式蒸馏海水淡化装置为国外厂商技术垄断,国内一些研究机构正在开展低温蒸馏海水淡化装置的原理验证和样机试制实验工作,也有一些文献针对国外海水淡化装置产品的使用管理和故障分析进行讨论^[4-6]。

韩旭^[7]建立了小型低温单效蒸馏海水淡化装置的热力计算模型,考察了热源水温度、蒸发温度、海水进料温度等与造水成本的关系,初步分析系统的经济性。王晓娟等^[8]对海水淡化装置的引射器进行数值模拟和实验研究,得到引射器结构形式和流体物性对其性能的影响关系。兴连祺^[9]对小型单效板式蒸馏海水淡化装置进行实验研究,通过实验考察进料流量和加热水流量等因素对淡水产量、淡水回收率、装置热效率等装置性能指标的影响。裴晓斌^[10]对单效蒸馏海水淡化装置进行了整体结构设计,并对丝网除沫结构进行实验筛选。前述文献对板式蒸馏海水淡化装置的设计和实验研究与海水淡化装置的实际工况有较大偏差,如系统热力学模型未研究产水量的影响因素,系统真空度较低(实验绝对压

力30~50 kPa,对应蒸发温度在70℃以上,不符合低温蒸发范畴)及热源采用蒸汽(蒸汽作为热源是大型海水淡化装置常用方式,小型低温蒸馏海水淡化装置广泛应用于热水作为热源的场合)等,相关设计和实验资料仍待完善。

本文根据板式低温蒸馏原理及船舶造水辅机实际运行工况,设计一台热水驱动的单效蒸馏海水淡化装置实验装置^[11,12],通过稳态工况的热力性能实验,掌握海水淡化装置的产水率、热效率等关键参数及其主要影响因素,为板式蒸馏海水淡化装置设计和运行优化提供参考。

2 板式蒸馏海水淡化实验装置

装置主要由蒸馏器(板式蒸发器和冷凝器)、引射器、热源水管路、冷却水管路和淡水管路等组成,蒸馏器主要设计参数见表1,系统流程如图1所示。经过盐度调配后的模拟海水通入冷凝器,作为蒸汽凝结时的冷却水。经冷凝器预热后的盐水小部分通过节流装置进入蒸发器

表1 蒸馏器主要设计参数表

Table 1 Distiller main design parameter

设计项目	参数值
冷侧介质	海水
热侧介质	软水/淡水
冷侧设计温度(℃)	20~50
热侧设计温度(℃)	65~95
蒸发器换热面积(m ²)	5.88
冷凝器换热面积(m ²)	6.02
蒸发/冷凝布液孔径 φ(mm)	8
产水量(kg/h)	80
蒸发温度(℃)	40~70

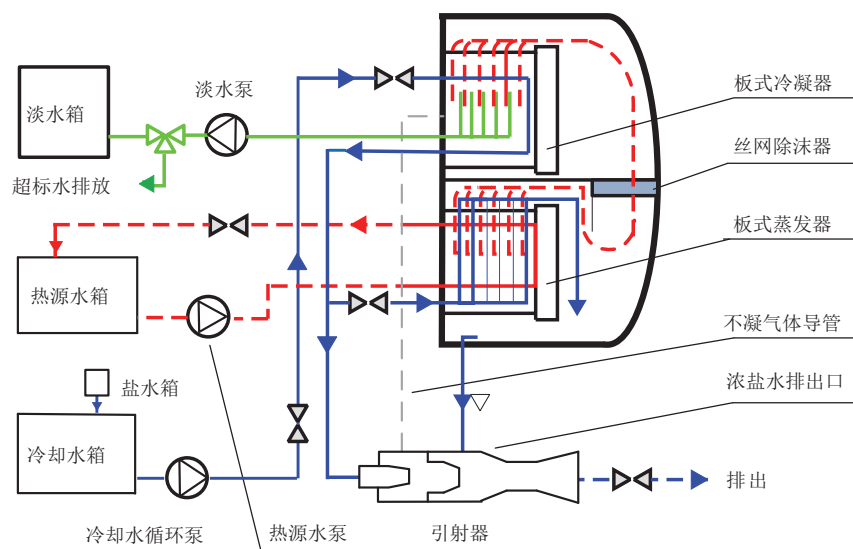


图1 低温蒸馏海水淡化实验装置流程图

Fig. 1 Distillation desalination system flow chart

被加热达到饱和温度，产生蒸汽。蒸发产生的热蒸汽向上运动，蒸汽中的微小含盐液滴被丝网除沫器捕获，在重力作用下汇集到蒸馏装置底部，连同未蒸发的盐水一起通过引射器排出。纯净的蒸汽在冷凝器中凝结成淡水，同时，通过连接管抽除海水淡化装置内不凝性气体，使蒸馏器内维持稳定的真空蒸馏环境。通过淡水泵输送到淡水箱，若水质检测不达标，则排放。热水在蒸馏器换热后返回热水箱继续加热，循环使用。实验装置主要管路安装有温度和流量传感器、压力传感器以及控制阀门。装置整体结构如图2所示。



图2 蒸馏器主体装置图

Fig. 2 Local structure of distillation desalination system

实验过程中冷却水流量保持稳定，蒸馏器内真空度维持在7~10 kPa。配制冷却盐水含盐量

35 000 ppm，产水水质标准为 ≤ 10 ppm (TDS (Total Dissolved Solids, 溶解性固体总量) 计测得)，超标水直接排放，不计入淡水产量。通过改变系统热源水流量、热源水入口温度、进料水流量等参数，得到系统产水率的变化规律。

3 实验结果及分析

3.1 热源水温度对系统产水率的影响

通过调节热水箱内的水温，进而改变蒸馏器的热水入口温度，得到稳态工况下的产水率变化情况。不同进料水流量下，系统产水率随热水入口温度的变化规律如图3所示。从图3可知，在温度低于 65°C 时，系统产水率较低，随着热水入口温度的升高，产水率快速增大。总体上，产水率随热水入口温度的升高呈现增速趋缓逐渐稳定，总量持续增大的趋势。分析其原因在于，热水入口温度较低时，系统蒸馏热负荷较低，蒸发温度与冷却水温差较小，蒸汽生成量少，表现为产水率较小。随着热水入口温度的升高，热负荷快速增大，蒸发器内蒸汽生成量逐渐增多，产水率增大。

热源水入口温度超过 70°C 以后, 不同进料水流量下的废水浓缩比都超过 2.0。浓缩比的增大会导致蒸发器内含盐度升高, 存在加剧装置化学腐蚀和降低产水水质的风险, 热源水入口温度应控制在 $65^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 。

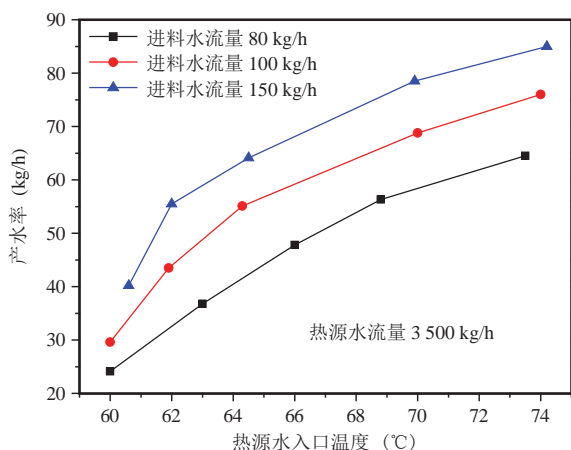


图 3 热源水入口温度对系统产水率的影响

Fig. 3 Effect of heat source water inlet temperature on the system water production rate

3.2 进料水流量对海水淡化装置产水率的影响

进料水是冷却水通过冷凝器预热后分流进入蒸发器的一部分。进料水一部分蒸发产生蒸汽, 剩余部分浓盐水由引射器抽出。在热源水入口温度和流量稳定时, 不同进料水流量对应系统产水率变化如图 4 所示。由图 4 可知, 蒸馏器热负荷较大时, 产水率随进料水流量的增大而逐渐增大, 但在进料水流量超过 150 kg/h 后增速变慢。蒸馏热负荷较低时, 产水率随进水流量的增大呈现先增大后减小的现象。

实验工况下的蒸馏器换热面积不变, 给定热源水入口温度和流量、冷却水流量和温度稳定。分析图 4 中出现的进料水流量拐点的主要原因是, 进料水在蒸发器内吸收高温热源水的对流换热热量, 一部分用于将全部进料水加热至系统真空度对应下的饱和温度, 另一部分用于提供蒸汽生成过程的潜热。进料水流量较小时, 蒸发器内的流体分布不均匀, 换热面积未被充分利用, 蒸

发过程处于未饱和状态, 产水率随进料水流量增大而增大。进料水流量逐渐增大, 蒸发器内换热面积得到充分利用, 此时产水率达到最大值。继续增大进料水流量, 由于热负荷限制, 其产水量增长较少。进料水流量超过蒸馏器设计工况后, 进料水在吸热升温阶段消耗热量较多, 导致汽化潜热所需热量不足, 大部分热量被浓盐水带走, 实际产水率下降。因此, 进料水流量是海水淡化装置实际运行过程中的重要参数, 最优进料水流量需要根据海水淡化装置蒸发器换热面积和热源水入口温度、流量、换热系数等参数共同确定。

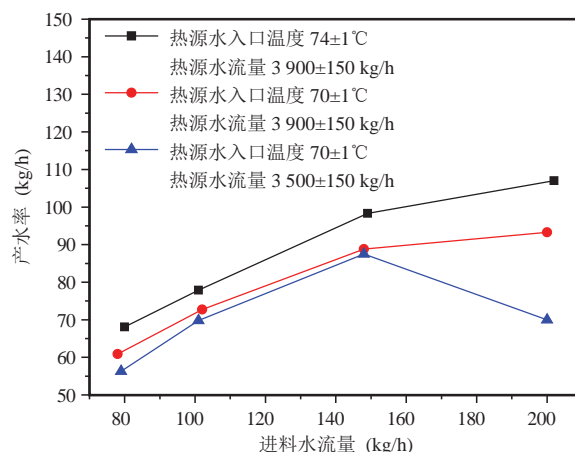


图 4 进料水流量对系统产水率的影响

Fig. 4 Effect of feed water flow on the water production rate

3.3 热源水流量对系统产水率的影响

不同热源水流量下系统产水率的变化曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出, 同一热源水入口温度下, 随着热源水流量的增大, 系统产水率基本呈线性增大趋势。热源水入口温度较低时, 产水率随热源水流量增长的曲线斜率较大, 随着热源水入口温度的升高, 产水率增长速度减小。

分析其原因在于, 在热源水入口温度、冷却水流量和温度、换热面积、系统真空度等条件都稳定时, 热源水流量直接决定蒸馏器的最大热负荷, 热源水流量的增大为蒸馏器提供更多热量, 从而生成更多蒸汽。热源水流量相同, 而入口温度不同时, 出现的产水率增长速度变化, 可能

原因是,较高的入口温度形成较大的热量供给,受蒸馏器换热面积和进料水流量限制,换热不充分,热量利用率降低,导致产水率增长趋缓。

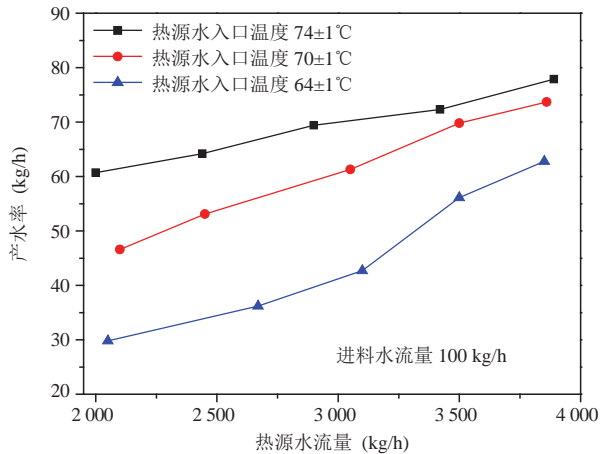


图5 热源水流量对系统产水率的影响

Fig. 5 Effect of heat source water flow on the water production rate

热源水流量超过 3 500 kg/h 后,不同热源水入口温度下的系统废水浓缩比均超过 2.0,同样考虑到浓缩比的增大会加剧装置化学腐蚀和降低产水水质的风险,热源水流量应当与蒸馏器换热面积相匹配,满足其设计工况条件,并在实验条件下进行优化。

4 结论

(1) 热源水入口温度是影响蒸馏海水淡化装置产水率的重要因素:系统产水率随热源水入口温度的升高基本呈线性增长趋势,以产水率为目的的系统优化应提高热源水入口温度和流量。

(2) 热源水流量对蒸馏海水淡化装置产水率的影响:随着热源水流量的增大,系统产水率基本呈线性增大趋势,且在热源水入口温度较低时,产水率随热源水流量增长的曲线斜率较大。

(3) 进料水流量对系统产水率的影响存在中间最优值。在最优值之前,进料水流量的增大能够提高系统产水率;在超过最优值之后,进料水

流量并不能提高产水率,甚至导致产水率下降。以产水率为目的的系统优化应根据海水淡化装置蒸馏器设计工况和运行条件确定合适的进料水流量范围。

本文分析总结了三种主要变量对海水淡化装置产水率的性能影响,得到提高海水淡化装置产水率的优化途径。根据海水淡化装置的蒸馏原理,冷却水温度、流量和系统真空度等参数对系统产水性能也会存在影响,以及以提升产水比和降低能耗为目的的系统优化等可作为后续研究优化的方向。

参考文献

- [1] 陈金增. 船舶海水淡化及节能技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [2] 苗超, 谢春刚, 冯厚军, 等. 船用海水淡化技术发展现状与研究建议 [J]. 船舶工程, 2011, 33(6): 6-9.
- [3] Cioccolanti L, Savoretti A, Renzi M, et al. Comparison of different operation modes of a single effect thermal desalination plant using waste heat from m-CHP units [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 646-657.
- [4] 潘树成. 船舶蒸馏装置的管理 [J]. 天津航海, 2014, 4: 34-35.
- [5] 张新营. 某型船用海水淡化装置故障分析及排除 [J]. 中国修船, 2011, 24(4): 21-23.
- [6] 董庆丰, 鹿佳, 唐然. 板式蒸馏造水机产水量优化研究 [J]. 中国修船, 2014, 27(5): 40-44.
- [7] 韩旭. 小型船舶余热海水淡化系统性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [8] 王晓娟, 宋绍忠, 王银涛, 等. 船舶真空海水淡化装置引射器喷嘴直径对引射特性影响研究 [J]. 船舶工程, 2012, 34(6): 23-74.
- [9] 兴连祺. 小型单效低温沸腾海水淡化机的实验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [10] 裴晓斌. 船舶余热低温蒸馏海水淡化装置设计及试验 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [11] 冯东东, 张凤鸣, 吴沛衡, 等. 船用低温蒸馏海水淡化装置二级引射器的数值模拟 [J]. 集成技术, 2016, 5(1): 85-90.
- [12] 冯东东, 岳鹏飞, 张凤鸣, 等. 船用蒸馏造水机设计分析 [J]. 化工进展, 2016, 35(4): 1056-1061.