

文章编号:0254-0096(2016)02-0511-05

带肋片多效管式海水淡化装置的实验研究

姚 洋¹, 陈志莉^{1,2}, 郑宏飞³, 于 涛¹

(1. 后勤工程学院国防建筑规划与环境工程系, 重庆 401311; 2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072;
3. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 设计一种带肋片多效管式海水淡化装置并利用模拟热源对装置进行实验研究。实验中对系统稳态产水性能进行测试, 给出系统在不同运行温度、压力下的产水速率和性能系数。实验结果表明: 装置小时产水量随运行温度升高而增大, 80 ℃时小时产水量为 0.59 kg/h; 对装置进行抽真空后装置的小时产水量增加明显, 在运行温度为 70 ℃压力为 0.31 kPa 时, 小时产水量最大为 1.19 kg/h; 装置的性能系数最高达 1.5, 定功率运行 10 h, 产水量最高为 8.58 kg。

关键词: 海水淡化; 太阳能; 多效管式; 肋片

中图分类号: TK519

文献标识码: A

0 引 言

与盘式海水淡化装置相比, 管式海水淡化装置因具有结构紧凑、承压性好、产水率高等特点受到国内外学者的关注。Ahsan 等^[1-3]对其进行了理论研究, 建立了理论模型并与实验进行对比, 结果表明预测值与观测值相差不大, 模型可很好地预测装置产水量。郑宏飞等^[4]在单效基础上提出了多效管式的概念, 并对比研究了不同效数对装置产水性能的影响。陈志莉等^[5]针对三效管式海水淡化装置进行了更加深入的研究, 分析装置的热质传递规律, 提出了一组新的传热传质关系式。前期研究发现, 限制多效管式淡化装置传热性能进一步提高的原因大多为管壁与外界环境之间的传热是对流和辐射, 该热阻比蒸发传热热阻大得多, 制约了装置散热速度。因此为了提高整个装置的热量传递效率, 需对外管壁进行传热强化处理, 增加管壁与外界环境的传热速度。增加肋片有助于提高物体表面传热系数, 其原因在于因增加了传热面积, 从而减小了管壁与环境的传热热阻。

本文在前期研究的基础上, 研制出一种新型的带肋片多效管式海水淡化装置。通过实验研究该装置稳态产水性能, 得到装置运行最优工艺参数,

促进管式海水淡化装置的研发与应用。

1 装置结构与运行原理

1.1 装置的结构

带肋片多效管式海水淡化装置的结构如图 1 所示。装置材料采用 304 不锈钢, 整个蒸馏器分为三级结构, 共由 6 根不锈钢管按管径由小到大逐级嵌套构成, 6 根不锈钢管的直径分别为 63、76、102、114、133、179 mm。三级盛水槽储水量由里到外分别为 4.66、5.05、5.82 kg, 三级水槽蒸发水面面积分别为 0.08、0.14、0.13 m²。外管壁上表面设有肋片, 肋片为对称分布共 20 个, 每个肋片垂直于管壁, 肋片长度为 2 m, 肋片高度为 50 mm, 厚度为 20 mm。

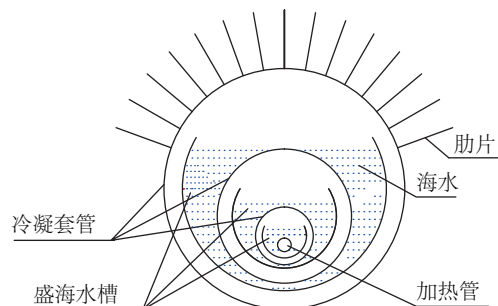


图1 装置结构示意图

Fig. 1 Sketch diagram of the three-effect tubular still

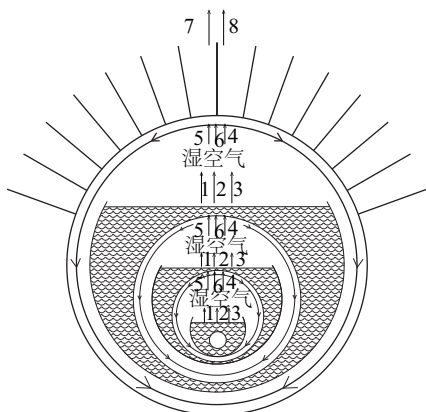
收稿日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51106177); 中国博士后科学基金一等资助项目(2013M540208); 重庆市重点自然科学基金项目(cstc2015jcyjbx0059)

通信作者: 陈志莉(1971—), 女, 博士、教授, 主要从事水处理理论与技术方面的研究。1012262034@qq.com

1.2 装置的运行原理

装置运行原理如图 2 所示,通过换热管将太阳能或工业废热能传递到一级海水中,海水预热产生水蒸气,水蒸气与介质气体混合成湿空气,湿空气与壁面接触冷凝产生淡水,淡水依靠自身重力沿管壁下滑最后流入收集瓶中。能量通过蒸发、对流和辐射的形式从水面传递到湿空气,湿空气中的能量通过辐射、对流和冷凝的形式传递到管壁,二级海水通过管壁吸收能量温度升高产生水蒸气,依次类推,最后系统的能量通过壁面以对流和辐射的形式释放到环境中。



1. 水面蒸发传热 2. 水面对流传热 3. 水面辐射传热
4. 湿空气对流传热 5. 湿空气辐射传热 6. 冷凝传热
7. 壁面对流传热 8. 壁面辐射传热

图 2 装置运行原理图

Fig. 2 Process of energy transfer inside the three-effect tubular still

2 实验研究

2.1 常压定温实验研究

采用恒温电加热水浴来自动控制加热水温,通过换热管给管式蒸馏器供热,同时将运行温度控制在恒定温度 60、70、80 ℃。当各级温度稳定,即认为三效管式蒸馏器达到稳定状态,对蒸馏器 1 h 的产水量进行测定,重复测定 3 次,取平均值,可得蒸馏器在常压定温下的小时产水量。

2.2 定功率加热实验研究

采用电加热棒加热的供热方式,通过变压器调节加热棒的输出功率,对带肋片三效管式蒸馏器分别进行 100、200、300、400 W 功率下的加热实验,实

验从开始加热到停止加热共计 10 h,实验在室内进行,室内环境温度稳定在 25 ℃。实验过程中,对于蒸馏器的产水性能进行测试,可得到蒸馏器的小时产水量。

2.3 负压定温实验研究

采用恒温水浴供热的方式,使三效管式蒸馏器运行温度稳定在 60、70 和 80 ℃。使蒸馏器在不同负压下工作,其中负压最大取每个运行温度所对应的饱和蒸汽压。不同温度条件对应的饱和蒸汽压值及蒸馏器运行压力如表 1 所示。

表 1 不同运行温度下运行压力实验方案

Table 1 The values of saturation vapor pressure at different temperatures and working pressures

温度/ ℃	饱和蒸汽压/ kPa	蒸馏器运行压力/kPa			
		压力 1	压力 2	压力 3	压力 4
60	20	70	50	30	20
70	31	80	60	40	31
80	47	80	70	60	50

注:真空度=标准大气压-运行压力,标准大气压为 1.01×10^5 MPa。

2.4 数据记录与处理

在装置的一级、二级、三级盛水槽、外壁上下及肋片端部设有温度检测器用于记录各测点的温度变化。其中在不同的 3 个肋片上设有温度检测器,计算时以平均值作为结果。实验每隔 30 分钟记录一次各布点温度值。采用天平对系统每小时的产水量进行测定。实验采用静态试验,装置进入稳态前产水相对较少,认为稳态时装置蒸发面基本保持不变。

3 结果与分析

3.1 运行温度

3.1.1 稳态时各级温度分布变化

图 3 所示,为稳态时在不同运行温度下装置内各级海水温度的变化,可看出随着级数的增加海水温度降低。在运行温度为 60 ℃时,三级水温最低为 43 ℃,传热量与传热温差成正比,与传热热阻成反比;随着运行温度的升高,传热量增大,各级水温升高,但各级温差基本保持不变,因此传热热阻减小。

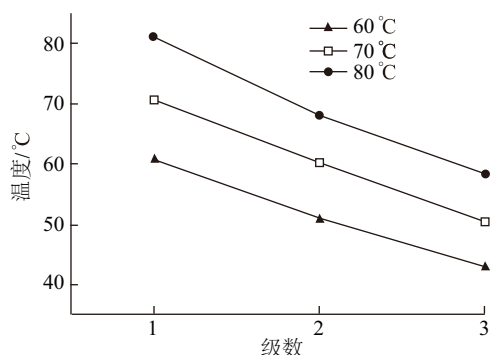


图3 不同运行温度下装置各级温度变化

Fig. 3 The temperature variation of the different running temperature

3.1.2 稳态时小时产水量的变化

装置稳态时小时产水量是衡量装置性能的主要指标,装置小时产水量如图4所示。从图4可知,带肋片三效管式蒸馏器在稳态下的小时产水量与运行温度呈线性关系,随着运行温度的升高,蒸馏器的小时产水量随之提高,最大值出现在运行温度为80 °C时,产水量为0.59 kg/h。这是因为随着运行温度的升高,海水的蒸发加速,有利于蒸馏器的产水,因此欲提高装置的产水性能,升高装置的运行温度是一个较好的办法。

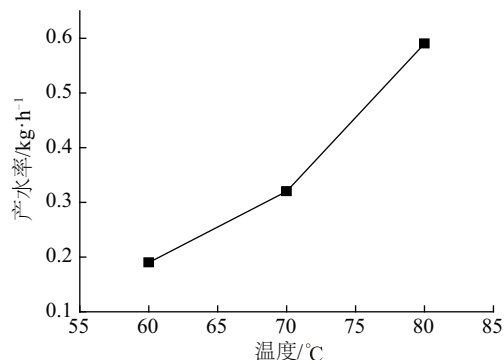


图4 运行温度与蒸馏器小时产水量之间的变化曲线

Fig. 4 The relation curve of the running temperature and the water yield per hour

3.2 运行压力

对装置进行抽真空处理可提高装置的产水率。在实际操作中发现在运行压力接近大气压的情况下,装置产水率与未抽真空的装置相比增加不明显;在运行压力接近运行温度对应的饱和压力下,系统产水率明显增大,但为保证装置一直处于饱和压力状态,需不定时对装置进行抽真空处理,

因此能耗增大。在不考虑能耗的情况下,图5所示为带肋片三效管式蒸馏器在运行温度为60、70、80 °C时,在不同运行压力下的小时产水量。从图5中可知,在相同温度下,随着系统运行压力的降低,产水率提高。这是由于随着运行压力的降低,装置内不凝结气体减少,从而提高了水蒸气传递速率。在相同运行压力下,随着运行温度的升高,装置的小时产水量增大。这是由于运行温度的升高气化潜热降低,蒸发所需能量减少,且因温度升高,系统输入能量增加,从而加快了蒸发速度。在运行温度为70 °C、运行压力为0.31 kPa时,小时产水量达到最大,为1.19 kg/h。

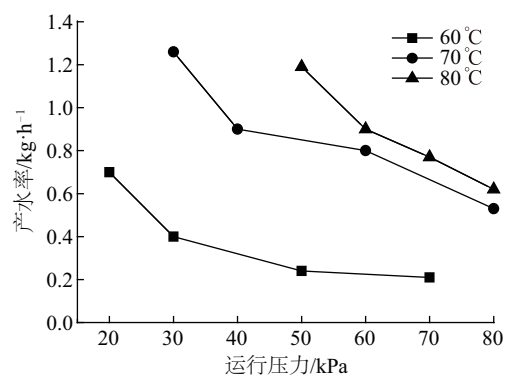


图5 不同运行温度及不同运行压力下装置的小时产水量

Fig. 5 The water yield per hour in different working pressures and at different running temperatures

3.3 输入功率

图6所示为装置在不同加热功率下(100、200、300、400 W),小时产水量的变化情况。从图6可知,在低功率(100、200 W)加热时,系统小时产水量升高缓慢,经加热10 h,装置小时产水量分别为0.16

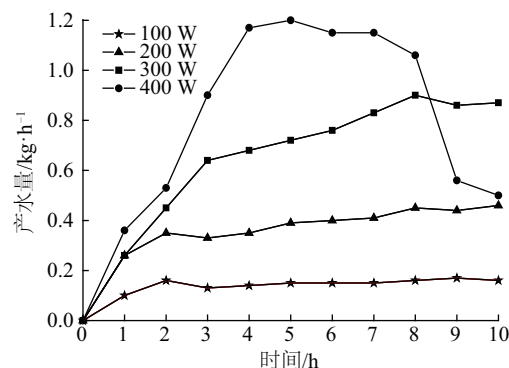


图6 不同功率下的装置小时产水量变化曲线

Fig. 6 The relation curves of the water yield per hour and the time at different output powers

和 0.48 kg/h。当功率增至 300 W 以上(300、400 W)时,系统小时产水量升高明显,其中最大值出现在 400 W 加热 5 h 时,为 1.21 kg/h。值得注意的是:装置采用 400 W 加热过程中小时产水量在加热 5 h 后随着加热时间的延长反而下降,这是由于随着蒸发量的增大,装置内海水逐渐减少且水面下降,加热 5 h 后一级水面下降到换热管以下,换热管与海水的换热效率下降,导致装置产水减少。

3.4 装置的性能分析

性能系数(PR)是衡量三效管式海水淡化蒸馏器性能的重要指标。性能系数越大,蒸馏器的性能越好,能量利用率越高。蒸馏器的性能系数可通过式(1)来计算。蒸馏器在不同加热功率下的累计产水量及蒸馏器性能系数如表 2 所示。

$$\eta_{PR} = \frac{m \times h_{fg}}{Q} = \frac{m \times h_{fg}}{Pt} \quad (1)$$

式中, m —— 累计 10 h 的产水量, kg; h_{fg} —— 标准大气压下蒸发潜热, 2257.6 kJ/kg; Q —— 输入到装置内的热量, kJ; P —— 加热功率, kW; t —— 加热时, 10 h, 36000 s。

表 2 定功率加热条件下蒸馏器产水量及性能系数

Table 2 The total water yields and corresponding performance coefficient at fixed heating power

加热 功率/W	累计 产水量/kg	性能 系数	加热 功率/W	累计 产水量/kg	性能 系数
100	1.47	0.9	300	6.97	1.5
200	3.84	1.2	400	8.58	1.3

从表 2 可知,随着加热功率的增大,蒸馏器的产水量随之增大;在 300 W 前,蒸馏器的性能系数随加热功率的增大而增大;当加热功率为 300 W 时,蒸馏器的性能系数最高,为 1.5;当蒸馏器的加热功率为 400 W 时,其性能系数反而下降,这是由于 400 W 时蒸馏器内水温较高,水蒸气产生速率较大,而冷凝速率受冷凝面积的限制而未增加很多,以致水蒸气不能完全被冷凝,淡化器的产水量下降,从而导致淡化器性能系数降低。

5 结 论

为了改善管式海水淡化装置传热效率,提高装置性能,本文在分析了前期管式淡化装置传热传质

机理的基础上,提出一种带肋片式三效管式海水淡化装置,该装置通过提高外管壁与环境的传热系数从而改善整个装置的传热效率。实验研究发现:

1) 装置稳态小时产水量与运行温度基本成正线性变化,当运行温度为 80 ℃时,小时产水量达到最高,为 0.59 kg/h。

2) 通过给装置抽真空可提高装置的产水率,在相同运行温度下,运行压力减小产水率增大。产水率最高值在运行温度为 70 ℃、运行压力为 0.31 kPa 时达到,为 1.19 kg/h。但为了维持运行压力恒定,需对装置不定时进行抽真空处理,会增加能耗。因此针对能源供应不足的地区(如岛礁)应采用常压操作,对淡水需求较大且能耗充足地区可采用真空操作。

3) 在高功率(300、400 W)输入条件下,装置的小时产水量提高较快,400 W 加热 5 h 后小时产水量达到最大,为 1.21 kg/h。5 h 后由于装置内海水有限,因此小时产水量随着加热时间的延长而下降。

4) 通过对装置加热 10 h 的性能分析发现在加热功率为 300 W 时装置性能最高约为 1.5。

[参考文献]

- [1] Ahsan A, Fukuhara T. Mass and heat transfer model of Tubular Solar Still[J]. Solar Energy, 2010, 84(7): 1147—1156.
- [2] Ahsan A, Islam K M S, Fukuhara T, et al. Experimental study on evaporation, condensation and production of a new Tubular Solar Still[J]. Desalination, 2010, 260(1): 172—179.
- [3] Ahsan A, Fukuhara T. Condensation mass transfer in unsaturated humid air inside Tubular Solar Still[J]. Hydraulic Engineering, 2009, 53(2): 97—102.
- [4] Zheng Hongfei, Chang Zehui, Chen Zhili, et al. Experimental investigation and performance analysis on a group of multi-effect tubular solar desalination devices[J]. Desalination, 2013, 311(2): 62—68.
- [5] Chen Zhili, Yao Yang, Zheng Zihang, et al. Analysis of the characteristics of heat and mass transfer of a three-effect tubular solar still and experimental research[J]. Desalination, 2013, 330(12): 42—48.

EXPERIMENTAL STUDY OF MULTI-EFFECT TUBULAR DESALINATION STILL WITH FINS

Yao Yang¹, Chen Zhili^{1,2}, Zheng Hongfei³, Yu Tao¹

(1. *The College of the Department of Defense Building Planning and Environment Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China*; 2. *The college of Environmental Science and Engineering School, Tianjin University, Tianjin 300072, China*;
3. *The College of Mechanics and Automobile School, Beijing Technological University, Beijing 401311, China*)

Abstract: A multi-effect tubular desalination still with fins was designed and a simulated heat source was used in the experimental research. The water production performance in steady status was tested in the experiment so as to figure out the water yield and performance coefficients in different temperatures and pressures. The results show that the water yield per hour increases as the temperature rises, reaching 0.59 kg/h when the temperature is 80 °C; The water yield per hour has a significant increase after vacuumizing the still, reaching 1.19 kg/h when the temperature is 70 °C and the pressure is 0.31 kPa; and that the maximum performance coefficient is about 1.5 and the maximum water yield is 8.58 kg when the still runs for 10 hours at a fixed power.

Keywords: desalination; solar energy; multi-effect tubular; fin