

Numerical Simulation of Multi-Effect Distillation/Multi-Stage Flash Desalination System Powered by Solar Energy: Part 1

—Modeling and the Distillatory Structure Parameters Determining under the Design Conditions

Shiming Xu¹, Xiajing Cui¹, Shunquan Chen², Ruxu Du²

¹Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, School of Energy and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian

²Guangzhou Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou
Email: xsming@dlut.edu.cn, cytheriachoi@126.com

Received: May 10th, 2012; revised: May 22nd, 2012; accepted: Jun. 8th, 2012

Abstract: According to the variation regulation of the solar radiation intensity with time, the dynamic mathematic models of the down-flow five effect distillation/flash desalination system powered by solar energy were developed. Under the design conditions which the solar radiation intensity is 730 W/m^2 , the brine temperature is 25°C and the desalination capacity is 10 ton per day, the static design calculation for the system had be done and the heat loads and the structure parameters of each distillatory in the system were determined. The results lay the foundations of the design and simulation for the system.

Keywords: Solar Energy; Desalination; Multi-Effect Falling Film Evaporation

多效蒸馏/多级闪蒸太阳能海水淡化系统数值模拟：第 1 部分

——模型建立及设计工况下换热设备结构参数确定

徐士鸣¹, 崔夏菁¹, 陈顺全², 杜如虚²

¹大连理工大学能源与动力学院, 教育部海洋能及节能重点实验室, 大连

²中国科学院广州先进技术研究所, 广州

Email: xsming@dlut.edu.cn, cytheriachoi@126.com

收稿日期: 2012 年 5 月 10 日; 修回日期: 2012 年 5 月 22 日; 录用日期: 2012 年 6 月 8 日

摘要: 根据太阳能辐射随时间的变化规律, 建立了热水驱动的顺流五效蒸馏/闪蒸太阳能海水淡化系统动态数学模型, 并对在太阳能辐射强度为 730 W/m^2 , 海水平均温度为 25°C 条件下, 日产淡水量达到 10 吨的太阳能海水淡化系统进行静态设计计算, 确定每效海水蒸馏器设计负荷及结构参数, 为太阳能海水淡化系统设计和动态模拟奠定基础。

关键词: 太阳能; 海水淡化; 多效降膜蒸发

1. 引言

随着我国淡水资源日益短缺, 海水淡化已成为解决淡水资源短缺的重要途径之一。常规的海水淡化需要消耗大量不可再生化石能源, 且不可避免地对环境产生污染。使用清洁、可再生能源进行海水淡化将引

领海水淡化技术发展方向。利用太阳能从海水(苦咸水)中制取淡水, 是解决缺乏淡水资源的岛屿或荒漠地区淡水供应问题的重要途径之一^[1]。太阳能海水淡化主要有多效蒸馏法, 多级闪蒸法, 蒸汽压缩蒸馏法, 膜蒸馏, 增湿-去湿淡化过程等方法。其中, 低温多效

蒸馏技术具有操作温度低，系统热利用系数高，耗功小^[2,3]等显著的优势，尤其是与小温差降膜蒸发、滴状冷凝、多级回热等先进技术相结合的海水淡化装置具有更高的能量利用效率和更大的产水率。

与常规能源不同的是太阳能随时间而变，导致太阳能海水淡化系统内工作参数均随时间而变，而这些工作参数直接影响太阳能海水淡化系统运行特性。因此，研究太阳能多效蒸馏海水淡化系统动态特性，了解并掌握太阳能海水淡化系统工作参数的变化规律，对太阳能海水淡化技术的发展具有非常重要的意义。

目前对太阳能海水淡化系统的研究还比较少且大都是基于实验研究^[4,5]，运用数值模拟的方法比较少见。Ali M. El-Nashar^[6]对太阳能多效蒸馏海水淡化系统进行了比较深入的研究，并编制程序模拟计算了一套稳定工作的多效蒸馏器的参数，结果和实验数据很好的吻合，但是没有跟太阳能系统结合起来。郑宏飞^[7]等人已经在太阳能海水淡化技术方面做了比较深入的探讨，其主要工作是对太阳能集热系统参数进行优化，对海水淡化系统的参数变化规律没有过多提及。王国建^[8]等人在一种竖管降膜 - 横管冷凝的太阳能海水淡化装置的基础上，通过实验研究了循环热水进口温度及海水流率对产水率的影响。

本文针对我们提出的一套利用太阳能驱动的顺流五效蒸馏/四级闪蒸的海水淡化系统，建立动态数学模型。在给定的设计工况下通过静态热力计算，得到系统内各换热设备在设计工况下的工作参数，并根据这些参数对换热设备进行换热计算，确定各效蒸馏器的换热面积及管束排布方式，为系统设计和动态模拟奠定基础。文中的数学模型是基于质量守恒和能量守

恒原理建立的，这一建模的方法适用于其它效数、其它流型的太阳能海水淡化系统的设计计算和数值模拟的模型建立。但文中具体的数学方程式只适用于顺流五效蒸馏/四级闪蒸的海水淡化系统。对于不同类型的太阳能海水淡化系统，数学模型中的具体方程会有差别，应按具体情况并根据文中给出的方法进行分析。

2. 多效蒸馏/多级闪蒸流程

多效蒸馏/多级闪蒸太阳能海水淡化装置由太阳能集/蓄热子系统和多效蒸馏/多级闪蒸海水淡化子系统组成。系统内蒸馏器全部采用水平管外降膜蒸发方式来强化蒸馏过程热、质传递。顺流五效蒸馏/四级闪蒸太阳能海水淡化装置流程简图如图 1 所示。

2.1. 太阳能集/蓄热子系统

太阳能集/蓄热子系统包括真空管(或平板)太阳能集热器、蓄热水箱、循环水泵和管路等，水作为传热和储热介质。

真空管(或平板)太阳能集热器吸收太阳辐射加热其内部的水，当水温达到设定温度后，启动热水循环泵，被太阳能加热的热水流入蓄热水箱，蓄热水箱内的水温逐渐升高。当水温升高到设定值后，冷却海水泵开启，分流出的用于淡化的海水经换热器加热后淋漓在海水淡化子系统首效蒸馏器的水平管外，进行降膜蒸发，热水流经水平管内放出热量用于管外海水蒸发。热水经换热器温度进一步降低后进入太阳能集热器吸收太阳能，然后流入蓄热水箱。热水在太阳能集热器，蓄热水箱和太阳能海水淡化子系统之间进行循环流动，直至热水温度降低到不足以驱动海水淡化子系统为止。

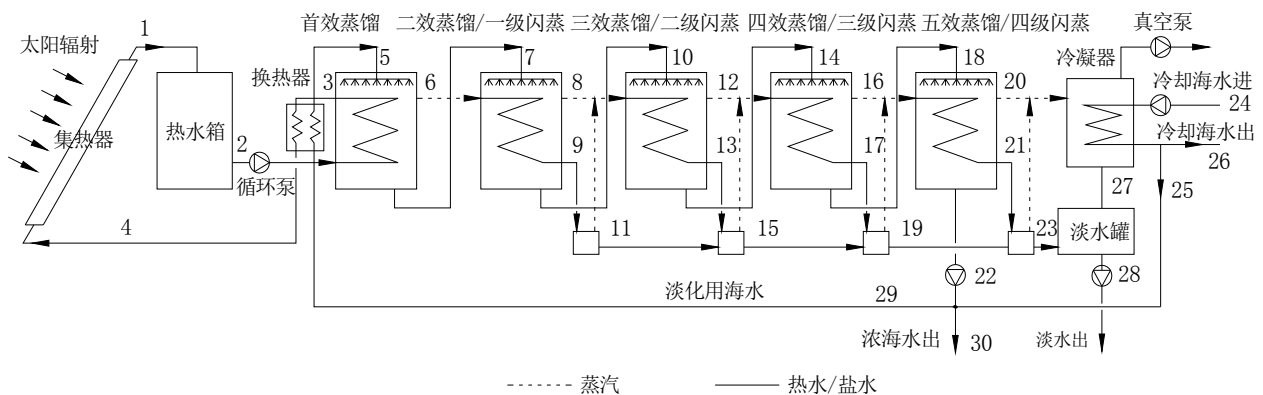


Figure 1. The working flow of the down-flow five effect distillation/flash desalination system powered by solar
图 1. 顺流五效蒸馏/闪蒸太阳能海水淡化装置流程简图

2.2. 多级闪蒸/多效蒸馏海水淡化子系统

为了简化太阳能海水淡化系统，采用立式顺流海水淡化流程。海水在重力和压差的作用下依次流过各效蒸馏器，而不需要在各效蒸馏器间设置海水循环泵。这样设计的不利之处是海水流量逐效递减，相邻两效间有海水和淡水闪蒸现象，导致蒸馏器热负荷逐效递增。

首效蒸馏器由太阳能加热的热水提供热量。淡化用海水先经海水/热水换热器加热到近饱和温度后进入首效蒸馏器并淋漓在水平管束上，与管束内热水换热而产生的蒸汽作为二效蒸馏器热源。由于效间存在压力差，前一效蒸馏器出来的饱和海水及凝结水流入后一效蒸馏器时，因压力降低而产生闪蒸现象。因此，如图 1 所设计的海水淡化系统各效蒸馏器内产生的蒸汽和凝结水量逐效递增，最末效蒸馏器内产生的蒸汽及上一效蒸馏器内凝结的水一起进入冷凝器内被冷却海水冷凝并流入淡水罐，最后被淡水泵抽出。浓海水用泵抽出部分与新海水混合再次进入首效蒸馏器以增加水平管外海水喷淋密度，其余部分排放。从冷凝器出口的冷却海水中分出部分，并经过滤处理后与部分浓海水混合作为淡化用海水。

3. 系统数值分析模型建立

3.1. 系统建模假设

- 1) 忽略散热损失；
- 2) 忽略流体流动损失；
- 3) 热水箱内热水温度处处均匀；
- 4) 忽略由于液柱高差变化所引起的压力差；
- 5) 忽略因盐分变化所引起的海水沸点变化，热物性参数按纯水计算；
- 6) 忽略各换热设备的热容。

3.2. 太阳能集热器模型

τ 时刻太阳能辐射量用式(1)计算，其中太阳能直射辐射量 $[I_d(\tau)]$ 和散射辐射量 $[I_b(\tau)]$ 计算方法见文献[9]。

$$I_s(\tau) = R_b I_b(\tau) + R_d I_d(\tau) + \rho R_p [I_b(\tau) + I_d(\tau)] \quad (1)$$

式中， $I_s(\tau)$ —— τ 时刻单位面积上太阳辐射强度， $W \cdot m^{-2}$ ； R ——修正因子； ρ ——地面平均反射率。

τ 时刻太阳能集热器效率 $[\eta_s(\tau)]$ 为^[10]，

$$\eta_s(\tau) = \eta_0 - a_1 (T_{hw} - T_{amb}) / I_s(\tau) - a_2 I_s(\tau) ((T_{hw} - T_{amb}) / I_s(\tau))^2 \quad (2)$$

式中， η_0 ——集热器光学效率； a_1 、 a_2 ——系数； T_{hw} ——集热管内热水平均温度， $^{\circ}C$ ； T_{amb} ——环境温度， $^{\circ}C$ 。

τ 时刻太阳能集热器集热量为，

$$Q_s(\tau) = \eta_s(\tau) I_s(\tau) A / 1000 \quad (3)$$

式中， A ——集热器有效集热面积， m^2 。

从有太阳辐射时刻(τ_0)到 τ 时刻，太阳能集热器收集的太阳能量为，

$$Q_{solar} = \int_{\tau_0}^{\tau} Q_s(\tau) d\tau \quad (4)$$

3.3. 蓄热水箱模型

$$Q_s(\tau) = 4.18 \dot{m}_{p,hw} [T_1(\tau) - T_4(\tau)] \quad (5)$$

$$Q_{des}(\tau) = 4.18 \dot{m}_{p,hw} [T_2(\tau) - T_4(\tau)] \quad (6)$$

式中， $Q_{des}(\tau)$ —— τ 时刻淡化海水所需的热负荷， kW ； $\dot{m}_{p,hw}$ ——热水循环泵流量， kg/s 。

蓄热水箱内热水温度变化，

$$4.18 M_{hw} \frac{dT_2(\tau)}{d\tau} = Q_s(\tau) - Q_{des}(\tau) \quad (7)$$

式中， M_{hw} ——蓄热水箱内充注的水量， kg 。

在 $\tau + \Delta\tau$ 时间内热水箱内温度变化为，

$$\Delta T_2 = \dot{m}_{p,hw} [T_1(\tau) - T_2(\tau)] \Delta\tau / M_{hw} \quad (8)$$

3.4. 多效蒸馏/多级闪蒸模型

3.4.1. 首效蒸馏模型

将海水/热水换热器和首效蒸馏器作为一个总体， τ 时刻，首效蒸馏能量和质量守恒方程为，

$$Q_{des}^1(\tau) = Q_{des}(\tau) = \dot{m}_6^v(\tau) h_6^v(\tau) + \dot{m}_{sw,7}(\tau) h_{sw,7}(\tau) - \dot{m}_{sw,29}(\tau) h_{sw,29}(\tau) \quad (9)$$

$$\dot{m}_{sw,7}(\tau) = \dot{m}_{sw,29}(\tau) - \dot{m}_6^v(\tau) \quad (10)$$

$$\dot{m}_{sw,29}(\tau) = (1 + \beta) \dot{m}_{sw,25}(\tau) \quad (11)$$

$$h_{sw,29}(\tau) = [\beta h_{sw,22}(\tau) + h_{sw,25}(\tau)] / (1 + \beta) \quad (12)$$

设海水/热水换热器热端温差为 $5^{\circ}C$ ，即，

$T_5(\tau) = T_3(\tau) - 5^{\circ}C$ ，海水/热水交换器能量守恒方程

为,

$$\begin{aligned} Q_{exh}(\tau) &= 4.18\dot{m}_{p,hw}[T_3(\tau) - T_4(\tau)] \\ &= 4.18\dot{m}_{sw,29}(\tau)[T_5(\tau) - T_{29}(\tau)] \end{aligned} \quad (13)$$

则,

$$T_4(\tau) = T_3(\tau) - \dot{m}_{sw,29}(\tau)[T_4(\tau) - T_{29}(\tau)] / \dot{m}_{p,hw} \quad (14)$$

3.4.2. 二效蒸馏器/一级闪蒸模型

由于效间的压差作用, 首效蒸馏器出来的饱和海水进入二效蒸馏器后因压力降低会产生闪蒸现象。由于闪蒸是蒸馏器内部发生, 按“黑箱”模型考虑, τ 时刻, 二效蒸馏/一级闪蒸能量和质量守恒方程为,

$$\begin{aligned} Q_{des}^2(\tau) &= \dot{m}_6^v(\tau)[h_6^v(\tau) - h_9^l(\tau)] = \dot{m}_8^v(\tau)h_8^v(\tau) \\ &+ \dot{m}_{sw,10}(\tau)h_{sw,10}(\tau) - \dot{m}_{sw,7}(\tau)h_{sw,7}(\tau) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\dot{m}_{sw,10}(\tau) = \dot{m}_{sw,7}(\tau) - \dot{m}_8^v(\tau) \quad (16)$$

3.4.3. 三效蒸馏器/二级闪蒸模型

按照太阳能海水淡化流程设计, 从此效开始, 上一效排出的冷凝水因减压而出现闪蒸, 闪蒸出的蒸汽作为本效的热源利用。将本级冷凝水闪蒸罐与本效蒸馏器作为一体, τ 时刻, 三效蒸馏/二级闪蒸能量和质量守恒方程为,

$$\begin{aligned} Q_{des}^3(\tau) &= \dot{m}_8^v(\tau)[h_8^v(\tau) - h_{13}^l(\tau)] \\ &+ \dot{m}_9^l(\tau)h_9^l(\tau) - \dot{m}_{11}^l(\tau)h_{11}^l(\tau) \\ &= \dot{m}_{12}^v(\tau)h_{12}^v(\tau) + \dot{m}_{sw,14}(\tau)h_{sw,14}(\tau) \\ &- \dot{m}_{sw,10}(\tau)h_{sw,10}(\tau) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{13}^l(\tau) &= \dot{m}_8^v(\tau) \\ &+ \dot{m}_9^l(\tau)[h_9^l(\tau) - h_{11}^l(\tau)] / [h_{11}^v(\tau) - h_{11}^l(\tau)] \end{aligned} \quad (18)$$

其中, $h_{13}^l(\tau) = h_{11}^l(\tau)$, $\dot{m}_9^l(\tau) = \dot{m}_6^v(\tau)$, $\dot{m}_{13}^l(\tau) + \dot{m}_{11}^l(\tau) = \dot{m}_8^v(\tau) + \dot{m}_9^l(\tau)$ 。

3.4.4. 四效蒸馏器/三级闪蒸模型

类似地将本级冷凝水闪蒸罐与本效蒸馏器作为一体, τ 时刻, 四效蒸馏/三级闪蒸能量和质量守恒方程为,

$$\begin{aligned} Q_{des}^4(\tau) &= \dot{m}_{12}^v(\tau)[h_{12}^v(\tau) - h_{17}^l(\tau)] \\ &+ [\dot{m}_{11}^l(\tau) + \dot{m}_{13}^l(\tau)]h_{13}^l(\tau) - \dot{m}_{15}^l(\tau)h_{15}^l(\tau) \\ &= \dot{m}_{16}^v(\tau)h_{16}^v(\tau) + \dot{m}_{sw,18}(\tau)h_{sw,18}(\tau) \\ &- \dot{m}_{sw,14}(\tau)h_{sw,14}(\tau) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{17}^l(\tau) &= \dot{m}_{12}^v(\tau) + [\dot{m}_{11}^l(\tau) + \dot{m}_{13}^l(\tau)] \\ &[h_{13}^l(\tau) - h_{15}^l(\tau)] / [h_{15}^v(\tau) - h_{15}^l(\tau)] \end{aligned} \quad (20)$$

其中, $h_{15}^l(\tau) = h_{17}^l(\tau)$,

$$\dot{m}_{17}^l(\tau) + \dot{m}_{15}^l(\tau) = \dot{m}_{12}^v(\tau) + \dot{m}_{11}^l(\tau) + \dot{m}_{13}^l(\tau)。$$

3.4.5. 五效蒸馏器/四级闪蒸模型

类似地将本级冷凝水闪蒸罐与本效蒸馏器作为一体, τ 时刻, 五效蒸馏/四级闪蒸能量和质量守恒方程为,

$$\begin{aligned} Q_{des}^5(\tau) &= \dot{m}_{16}^v(\tau)[h_{16}^v(\tau) - h_{21}^l(\tau)] \\ &+ [\dot{m}_{15}^l(\tau) + \dot{m}_{17}^l(\tau)]h_{15}^l(\tau) - \dot{m}_{19}^l(\tau)h_{19}^l(\tau) \\ &= \dot{m}_{20}^v(\tau)h_{20}^v(\tau) + \dot{m}_{sw,22}(\tau)h_{sw,22}(\tau) \\ &- \dot{m}_{sw,18}(\tau)h_{sw,18}(\tau) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{21}^l(\tau) &= \dot{m}_{16}^v(\tau) + [\dot{m}_{15}^l(\tau) + \dot{m}_{17}^l(\tau)] \\ &[h_{15}^l(\tau) - h_{19}^l(\tau)] / [h_{19}^v(\tau) - h_{19}^l(\tau)] \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $h_{19}^l(\tau) = h_{21}^l(\tau)$,

$$\dot{m}_{19}^l(\tau) + \dot{m}_{21}^l(\tau) = \dot{m}_{16}^v(\tau) + \dot{m}_{15}^l(\tau) + \dot{m}_{17}^l(\tau)。$$

3.4.6. 冷凝器/淡水罐模型

将末级冷凝水闪蒸罐与冷凝器作为一体, τ 时刻, 其能量和质量守恒方程为,

$$\begin{aligned} Q_{con}(\tau) &= 4.18\dot{m}_{p,sw}[T_{26}(\tau) - T_{24}] \\ &= \dot{m}_{20}^v(\tau)h_{20}^v(\tau) + [\dot{m}_{19}^l(\tau) + \dot{m}_{21}^l(\tau)]h_{19}^l(\tau) \\ &- \dot{m}_{28}^l(\tau)h_{28}^l(\tau) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\dot{m}_{28}^l(\tau) = \dot{m}_{20}^v(\tau) + \dot{m}_{19}^l(\tau) + \dot{m}_{21}^l(\tau) \quad (24)$$

式中, $\dot{m}_{p,sw}$ ——海水泵流量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

从有太阳辐射时刻(τ_0)到 τ 时刻, 太阳能海水淡化系统总产淡水量,

$$M_{des} = \int_{\tau_0}^{\tau} \dot{m}_{28}(\tau) d\tau \quad (25)$$

太阳能海水淡化系统总能量、质量守恒是检验上述模型计算正确与否的判据。即, τ 时刻, 能量守恒

$$\begin{aligned} Q_{des}(\tau) &= \dot{m}_{sw,30}(\tau)h_{sw,30}(\tau) + \dot{m}_{28}^l(\tau)h_{28}^l(\tau) \\ &+ [\dot{m}_{p,sw} - \dot{m}_{sw,25}(\tau)]h_{sw,26}(\tau) - \dot{m}_{p,sw}h_{sw,24} \end{aligned} \quad (26)$$

其中, $h_{sw,30}(\tau) = h_{sw,22}(\tau)$, $h_{sw,25}(\tau) = h_{sw,26}(\tau)$ 质量守恒

$$\dot{m}_{sw,30}(\tau) = \dot{m}_{sw,22}(\tau) - \beta\dot{m}_{sw,25}(\tau) \quad (27)$$

$$\dot{m}_{sw,25}(\tau) = \dot{m}_{sw,30}(\tau) + \dot{m}_{28}^l(\tau) \quad (28)$$

$$\dot{m}_{sw,25}(\tau)\xi_{25} = \dot{m}_{sw,30}(\tau)\xi_{30} \quad (29)$$

式中， ξ ——海水中盐质量分数。

海水淡化浓缩比 ψ 为，

$$\psi = \dot{m}_{sw,25}(\tau) / \dot{m}_{sw,30}(\tau) = \xi_{30} / \xi_{25} \quad (30)$$

以上各式中， h ——比热， $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ； \dot{m} ——质量流量， $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ； β ——浓海水再循环比；下标： sw ——海水，1-30——图 1 中的位置点；上标： l ——水， v ——蒸汽。

4. 系统设计工况计算

4.1. 系统循环热力计算

尽管太阳辐射能量随时间而变，导致太阳能海水

淡化系统运行参数也随时间而变。但包括集热、换热设备在内的太阳能海水淡化系统必须按某一固定工况来设计。该设计工况下海水循环热力计算值是系统内所有设备设计或选型的基础。

五效蒸馏/四级闪蒸太阳能海水淡化系统设计工况参数如表 1 所列，根据节 2 给出的计算模型(稳态计算)，得到设计工况下各效工作参数，如表 2 所列。根据表 2 的数据对五效蒸馏/四级闪蒸太阳能海水淡化系统各效换热设备进行换热设计计算，确定各效换热设备结构参数，然后才能对随时间变化的太阳能海水淡化系统进行数值模拟。

采用真空管太阳能集热器，其集热效率参数为 $\eta_0 = 0.572$ ， $a_1 = 0.995$ ， $a_2 = 0.002$ ，设计工况下的集热器效率为 0.5173；选定热水循环泵流量为 13,000 kg/h ，

Table 1. The given parameters of the solar desalination system
表 1. 太阳能海水淡化系统设计参数

项目	太阳能辐射强度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	产水量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	热水进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却海水进/出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷凝温度/ $^{\circ}\text{C}$	效间温差/ $^{\circ}\text{C}$	浓缩比
数值	730	1200	65	25/30	33	5	2.0

Table 2. The operating parameters of each distillatory in the solar desalination system under the given conditions
表 2. 设计工况下太阳能海水淡化系统各级/效换热设备工作参数

项目	位置点	压力/ kPa	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	比焓/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	流量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	负荷/ kW
海水/ 热水换热器	热水进	3	57.9	984.2	240.65	13,000	119.25
	热水出	4	50	988	209.3	13,000	
	海水进	29	101.3	31.5	995.1	4800	
	海水出	5	52.9	986.6	219.75	4800	
首效蒸馏器	热水进	2	65	980.5	275.6	13,000	107.25
	蒸汽出	6	14.29	53	0.097	2597.3	
二效蒸馏/ 一级闪蒸	海水出	7	53	986.6	221.8	4638.3	106.7
	蒸汽出	8	11.15	48	0.0766	2588.5	
	凝水出	9	14.29	53	986.6	221.8	
三效蒸馏/ 二级闪蒸	海水出	10	48	988.9	200.9	4436.9	134.6
	凝水出	11	11.15	48	988.9	200.9	
	蒸汽出	12	8.63	43	0.0607	2579.8	
	凝水出	13	11.15	48	988.9	200.9	
四效蒸馏/ 三级闪蒸	海水出	14	43	991.0	180.0	4196.3	162.7
	凝水出	15	8.63	43	991.0	180.0	
	蒸汽出	16	6.6	38	0.047	2570.9	
	凝水出	17	8.63	43	991.0	180.0	
五效蒸馏/ 四级闪蒸	海水出	18	38	992.9	159.1	3917.1	190.7
	凝水出	19	38	992.9	159.1	598.5	
	蒸汽出	20	5	33	0.0366	2561.9	
	凝水出	21	6.6	38	992.9	159.14	
冷凝器/ 淡水罐	海水出	22	33	994.7	138.24	3600	218.6
	凝水进	23	33	994.7	138.24	875.2	
	海水进	24	101.3	25	997	104.8	
海水	海水出	26	30	995.7	125.7	35,300	-
	淡水出	28	33	994.7	138.24	1200	
海水	海水进	25	30	995.7	125.7	2400	-
	海水出	30	33	994.7	138.24	1200	

浓海水再循环比 $\beta = 1$ 。经静态设计计算(结果见表 2), 设计工况下海水淡化系统所需的总热负荷为 226.5 kW(其中海水/热水换热器热负荷 119.25 kW, 首效蒸馏器热负荷 107.25 kW); 计算所得的太阳能集热面积为 600 m²; 冷却海水泵流量为 37,700 kg/h。

4.2. 换热设备换热设计计算

根据表 2 给出的各效水平管降膜蒸馏器进出口参数以及热负荷, 可以对各效蒸馏器进行换热设计计算。

水平管降膜蒸发因管壁内外均发生相变, 管外侧液体膜状流动有利于蒸汽与液相分离, 因而具有较高的换热系数。第 i 效蒸馏器换热负荷为,

$$Q_{des}^i = K_i A_i \Delta T_i \quad (31)$$

第 i 效蒸馏器总传热系数为

$$\frac{1}{K_i} = \left(R_i + \frac{1}{\alpha_{i,in}} \right) \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + \left(R_o + \frac{1}{\alpha_{i,out}} \right) \quad (32)$$

式中, $\alpha_{i,in}, \alpha_{i,out}$ ——第 i 效蒸馏器换热管内、外侧换热系数, W·m⁻²·°C⁻¹; R_i, R_o ——管内外壁面污垢热阻, 取 $R_i = R_o = 0.00009 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{W}^{-1}$; d_i, d_o ——换热管内、外径, m。

4.2.1. 管外换热系数

1) 水平管束外降膜蒸发换热系数

文献[11]给出了第 i 效蒸馏器水平管束外降膜蒸发换热系数($\alpha_{i,out}$)计算式为,

$$\alpha_{i,out} = 0.032 \left(\frac{\lambda_L^3 g}{\nu_L^2} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{4\Gamma_i}{\mu_L} \right)^{0.3367} \text{Pr}^{0.4629} \quad (33)$$

式中, g ——重力加速度, m·s⁻²; λ_L ——导热系数, W·m⁻¹K⁻¹; ν_L ——运动黏度, m²·s⁻¹; Γ_i ——第 i 效蒸馏器水平管外海水喷淋密度, kg·m⁻¹·s⁻¹; μ_L ——动力黏度, Pa·s; Pr ——普朗特常数。

$\alpha_{i,out}$ 主要受水平管外海水喷淋密(Γ)度影响, 对于采用等管列数的水平管降膜蒸馏器, 各效喷淋密度是逐级降低的。另外, 当太阳能辐射强度发生变化时, 不仅各效蒸馏器热负荷将发生变化, 其喷淋密度也会发生变化, 导致 $\alpha_{i,out}$ 值也随时间而变。

2) 水平管束外冷凝换热系数

冷凝器管束外换热特点为冷凝换热, 文献[1]给出

的水平管束外冷凝换热系数计算式为,

$$\alpha_{out} = 0.725 \left[\frac{gr\rho_l^2\lambda_l^3}{\mu_l d_o N (T_{sat} - T_w)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (34)$$

式中, r ——汽化潜热, kJ·kg⁻¹; λ_l ——凝结水导热系数, W·m⁻¹·°C⁻¹; μ_l ——凝结水黏度, Pa·s; T_{sat} ——冷凝温度, °C; T_w ——管壁温度, °C; N ——受冷凝液滴影响的管排数, 错排布置情况下, 受冷凝液滴影响的管排数为总管排数的二分之一。

4.2.2. 管内换热系数

1) 首效蒸馏器及冷凝器

首效蒸馏器采用热水加热, 而冷凝器采用海水冷却。管内对流换热系数关联式为,

$$Nu_i = 0.023 \text{Re}_i^{0.8} \text{Pr}_i^n \quad (35)$$

式中, 加热流体时, $n = 0.4$; 冷却流体时, $n = 0.3$ 。

$$\alpha_i = \frac{\lambda_l Nu_i}{d_i} \quad (36)$$

2) 第 $i(i \geq 2)$ 效蒸馏器

第 $i(i \geq 2)$ 效蒸馏器以低压蒸汽为热源, 水平管内是蒸汽凝结换热过程。文献[12]在实验研究的基础上给出了一组关系式如下:

$$\alpha_{i,in} = 0.555 \left\{ \frac{\lambda_l^3 \rho_l (\rho_l - \rho_v) g \left[r + \frac{3}{8} c_{pl} (T_s - T_w) \right]}{[\mu_l d_i (T_s - T_w)]} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (37)$$

式中, c_{pl} ——水定压比热, W·kg⁻¹·°C⁻¹; ρ ——密度, kg·m⁻³; λ_l ——液体导热系数, W·m⁻¹K⁻¹; r ——蒸汽冷凝潜热, kJ·kg⁻¹; T_s ——饱和蒸汽温度, °C; 下标: l ——水; v ——蒸汽。

4.3. 各效蒸馏器换热面积确定

根据 4.2 节给出的蒸馏器换热管内外换热系数计算式以及(31)式, 第 i 效蒸馏器换热面积为,

$$A_i = Q_{des}^i / K_i \Delta T_i \quad (38)$$

根据设计给定的换热管长和管列数, 则各效蒸馏器的换热管取整数的管排数为,

$$n_i = A_i / (\pi d_m L N) \quad (39)$$

式中, d_m ——管中径, m; L ——有效管长, m; N ——管排数。

Table 3. Main structural parameters of each distillatory in the solar desalination system
表 3. 太阳能海水淡化装置各换热设备主要结构参数

换热器	$\Gamma/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	$\alpha_{i,\text{in}}/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	$\alpha_{i,\text{out}}/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	$K/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	A/m^2	实际换热管数	实际换热面积/ m^2
首效	0.07469	6548	10,088	2143	7.9	6.335	7 × 13	6.94
第二效	0.07182	10,484	9492	3245	5	6.575	7 × 13	6.94
第三效	0.06832	10,204	8873	3140	5	8.575	9 × 13	8.93
第四效	0.06421	9905	8226	3025	5	10.75	11 × 13	10.91
第五效	0.05949	9332	7534	2868	5	13.3	14 × 13	13.89
冷凝器	-	6204	8504	2022	5.1	21.2	18 × 16	21.98
总计						66.735	912	69.59

5. 换热器结构参数确定

选用规格为 $\text{Ø}19\times 1\text{ mm}$ 的耐海水腐蚀铝合金管作为换热管，其导热系数为 $170\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ 。对于首效蒸馏器和冷凝器，管内流动采用多流程，流速根据换热管排布结构确定；对于其它蒸馏器，管内蒸汽冷凝为单流程。除冷凝器外全部换热管按顺排排列，有效换热管长为 1.35 m ，管列数为 13；冷凝器管列为错排，管列数为 16。根据表 2 计算所得的设计工况下五效蒸馏/四级闪蒸太阳能海水淡化系统各效换热设备工作参数，以及 3.2 给出的换热设备换热设计计算式，计算得到的各效换热设备主要结构参数如表 3 所列。经过换热管排布，首效蒸馏器热水按一排管为一流程，冷凝器冷却水按两排管为一流程设计，管内流速分别为 $1.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；海水淡化装置实际换热管总根数为 912，总换热面积为 69.59 m^2 。

6. 结论

1) 针对淡水资源缺乏但太阳能资源较丰富的海岛和西北地区，提出了采用太阳能进行海水/苦咸水淡化方案。为了简化太阳能海水淡化系统，降低投资费用，提高产水率，提出利用太阳能加热热水驱动五效蒸馏/四级闪蒸顺流海水淡化系统，并根据太阳能动态特性建立海水淡化循环的动态数学模型和换热计算模型。

2) 以系统日产 10 吨淡水为目标，对太阳能海水淡化系统进行静态设计计算，确定太阳能海水淡化系统内各设备的结构尺寸：太阳能有效集热面积为 600

m^2 ，热水循环泵和冷却海水泵流量分别为 $13,000\text{ kg/h}$ 和 $37,700\text{ kg/h}$ ，海水淡化装置总换热面积为 69.59 m^2 ，并按设计计算结果对各效蒸馏器换热管束进行布置，从而为下一步太阳能海水淡化系统的数值模拟奠定基础。

参考文献 (References)

- [1] 郑宏飞, 何开岩, 陈子乾. 太阳能海水淡化技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 3.
- [2] 于开录, 吕庆春, 阮国岭. 低温多效蒸馏海水淡化工程与技术进展[J]. 中国给水排水, 2008, 24(22): 82-85.
- [3] 孙家广, 杨长青. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 26-28.
- [4] A. M. A. Dayem. Experimental and numerical performance of a multi-effect condensation-evaporation solar water distillation system. Energy, 2006, 31(14): 2710-2727.
- [5] L. Y. Zhang, H. F. Zheng and Y. Y. Wu. Experimental study on a horizontal tube falling film evaporation and closed circulation solar desalination system. Renewable Energy, 2003, 28(8): 1187-1199.
- [6] A. M. El-Nashar, A. A. Qamhiyeh. Simulation of the steady-state operation of a multi-effect stack seawater distillation unit. Desalination, 1995, 101(3): 231-243.
- [7] 陈子乾, 郑宏飞, 马朝臣等. 低温多效太阳能海水淡化装置最优集热系统的匹配研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 672-677.
- [8] 王国建, 李戡洪. 一种竖管降膜蒸发太阳能海水淡化装置的实验研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(5): 469-472.
- [9] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2004: 9-46.
- [10] E. Zambolin, D. Del Col. Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. Solar Energy, 2010, 84: 1385-1393.
- [11] 任显龙. 横管降膜蒸发传热试验研究[D]. 大连理工大学, 2008.
- [12] 许莉, 王世昌, 王宇新等. 水平管薄膜蒸发传热系数[J]. 化工学报, 2003, 54(3): 299-304.