

## 回热对竖管式太阳能海水淡化装置性能的影响

常泽辉<sup>1,2</sup>, 李文龙<sup>1</sup>, 宋姍琦<sup>3</sup>, 刘 洋<sup>1</sup>, 李瑞晨<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古工业大学风能太阳能利用技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010051; 3. 天津大学理学院, 天津 300350)

**摘 要:** 针对管式太阳能海水淡化装置淡水产量较低的问题,提出一种新的具有回热功能的竖管式太阳能海水淡化装置,通过建立装置内部传热传质关系,得到竖管式太阳能海水淡化装置理论淡水产量预测计算方法,分别对单效和两效淡化装置在回热和非回热运行条件下,定温运行工况时的淡水产量、进料海水温度等进行试验研究。结果表明,运行温度为80℃,两效淡化装置在回热运行条件下,淡水产量比非回热运行条件时增加13.32%,单效淡化装置在回热运行条件下,淡水产量比非回热运行条件时增加32.83%,进料海水温度明显升高,装置淡水产量试验测试值与理论计算值趋势一致,吻合度较好。

**关键词:** 管式; 海水淡化; 回热; 太阳能

**中图分类号:** TK513.5

**文献标识码:** A

## 0 引 言

太阳能海水淡化技术是缓解沿海地区及偏远海岛居民安全饮水匮乏的有效途径之一。太阳能蒸馏海水淡化技术以其结构简单、运行要求不高、造价低廉等优点适用于分布式淡水制备,因而受到国内外研究学者的关注。但传统太阳能蒸馏装置效率多在30%~45%,淡水产量少于 $5\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ <sup>[1]</sup>,究其原因,一方面是由于从太阳能集热系统到海水淡化系统连接管路冗长、热损失大;另一方面,海水蒸发冷凝热质传递距离较大,导致热阻增加,影响了淡水产量。

鉴于此,Tiwari<sup>[2]</sup>设计一种管式太阳能海水蒸馏器,给出了其内部能量关系式。Arunkumar等<sup>[3]</sup>对复合多全面槽式聚光管式蒸馏装置性能进行研究,装置最大淡水产量可达7.8 L/d。谢 果等<sup>[4]</sup>提出一种负压运行工况下连续补水的管式海水蒸馏方法以提高该类装置的淡水产量,负压运行时产水量比常压时增加22.5%,并在实验数据分析基础上给出负压修正的空腔传质计算关系式。肖红升等<sup>[5]</sup>设计多级回热小型太阳能海水淡化装置,研究高压和常

压状态下装置的淡水制水量和太阳能利用效率,结果表明装置单位面积淡水产量为2.14 kg/h。Elashmawy<sup>[6]</sup>在实际天气条件下对3种不同的管式太阳能蒸馏器性能展开研究,结果表明带有跟踪系统的管式蒸馏装置具有较好的应用潜力,淡水产量可提高676%,适用于偏远地区家庭户用。郑宏飞等<sup>[7]</sup>提出一种多效横管式太阳能蒸馏淡水生产装置,通过多次回收蒸汽凝结潜热提高装置的淡水产量和性能系数,三效装置最大性能系数可达1.7。陈志莉等<sup>[8,9]</sup>通过在外层套筒添加肋片和蒸发面使用亲水改性材料来增强管式太阳能海水蒸馏器的传热传质机理,进而增大装置淡水产量。

上述研究较少涉及减小装置内部蒸发面与冷凝面之间距离以及利用蒸汽冷凝潜热对进料原水进行回热等强化装置热质传递机理的方法。本文在前期研究的基础上,提出一种具有回热功能的竖管式太阳能蒸馏海水淡化装置,给出该类型装置淡水产量的理论计算方法,试验研究回热装置和非回热装置淡水产量、进料海水温度、冷凝温度等的变化规律,并与理论淡水产量计算值进行对比分析。

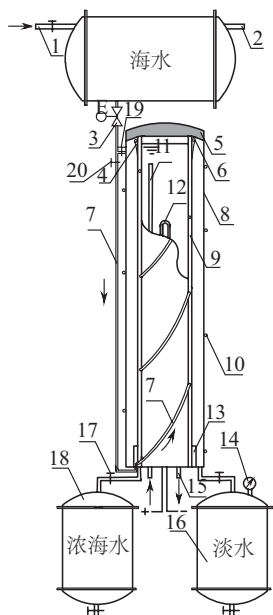
收稿日期: 2018-01-15

基金项目: 内蒙古工业大学风能太阳能利用技术省部共建教育部重点实验室开放基金(201511); 国家自然科学基金(51666013); 内蒙古自然科学基金(2013MS0704; 2015MS0545); 内蒙古自治区“草原英才”工程青年创新人才资助项目(一层次)

通信作者: 常泽辉(1978—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事太阳能热利用技术方面的研究。changzehui@163.com

## 1 竖管式太阳能海水淡化装置

本文对单效和两效竖管式太阳能海水淡化装置性能展开研究。单效海水淡化装置结构原理如图1所示。装置由两根同心嵌套的不锈钢管件组成,管件内部形成的空间即为蒸发冷凝腔,海水储水箱位于装置上方,淡水收集罐和浓海水收集罐位于装置下方。



1. 海水进口 2. 溢水管 3. 流量计 4. 分水器 5. 保温层  
6. 水膜 7. 输水管 8. 冷凝套筒 9. 加热水箱 10. 回热管路  
11. 热水进管 12. 电加热器 13. 挡水板 14. 压力表  
15. 热水出管 16. 浓海水收集罐 17. 阀门 18. 淡水收集罐  
19. 回热管路阀门 20. 非回热管路阀门

图1 竖管式太阳能海水淡化系统原理图

Fig. 1 Schematic drawing of the vertical tubular solar seawater desalination system

装置工作原理为:海水从储水箱通过输水管进入位于淡化装置内部加热水箱顶端的分水器,然后以水膜的形式沿加热水箱外壁面从上往下流动,当加热水箱内水体温度被太阳能集热系统加热升高时,热量通过水箱壁面以传导形式传递给海水水膜,水膜受热产生水蒸气,水蒸气遇到温度较低的套筒内壁面而凝结生成淡水,凝结潜热随之释放。对于两效淡化装置,凝结潜热会被第二效的海海水水膜吸收,以同样方式继续凝结生成淡水,淡水沿套筒内壁面流到装置底部进入淡水收集罐中,未蒸发

的海水水膜以浓海水的形式排出装置外,通过回热管路阀门和非回热管路阀门的交替开闭实现装置回热与非回热运行状态的切换。

与其他管式太阳能海水淡化系统相比,该装置具有以下优点:①装置竖直放置,尽可能减小蒸发面与冷凝面之间的距离,从而减小装置蒸发冷凝热阻;②装置的热源位于蒸发冷凝腔内部,无需对其进行保温处理,散热损失小;③回热管路中的进料海水吸收了套筒外壁面热量,增大了其内部蒸发冷凝温差,进而使装置淡水产量增加。

## 2 装置淡水产量理论预测计算

### 2.1 淡化装置内部传热传质机理分析

单效太阳能海水淡化装置内部水蒸气与干空气传热传质过程如图2所示。加热水箱内盛满淡水,吸收太阳能集热系统传递的能量后温度升高,热量以传导形式传递给水箱外壁面海水水膜,水膜吸热后以辐射、对流和蒸发的形式与干空气换热,蒸发冷凝腔内水蒸气在套筒内壁面凝结生成淡水,同时释放出凝结潜热,该热量以辐射和对流形式散失到环境中。对于两效太阳能海水淡化装置而言,第二效海水会吸收第一效释放的凝结潜热,使装置的热能利用效率提高,淡水产量增大。

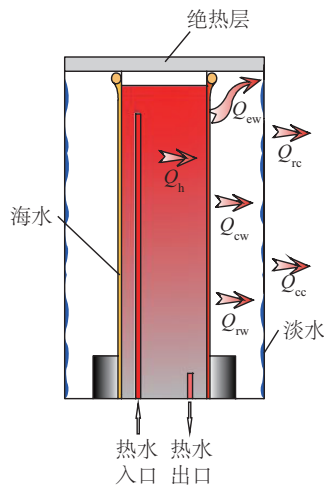


图2 单效淡化装置内传热传质过程

Fig. 2 Heat and mass transfer processes in the single-effect desalination device

### 2.2 淡化装置内部传热传质机理分析

淡化装置工作过程中,假设内部工作介质由水

蒸气 and 干空气混合而成。当达到加热温度并稳定运行时,蒸发冷凝腔内水蒸气假设为饱和状态,则竖管式太阳能海水淡化装置内部自然对流换热过程可采用式(1)加以描述:

$$Ra = Gr \times Pr \quad (1)$$

式中,  $Ra$  ——瑞利数;  $Gr$  ——格拉晓夫数;  $Pr$  ——普朗特数。

在装置内部蒸发冷凝面之间,除温度差之外,还存在水蒸气的浓度差,由于水蒸气密度小于空气密度,所以装置内的蒸发传质势必会促进传热过程,故需对式(1)中的格拉晓夫数进行修正,计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$Gr' = \frac{l^3 \times \rho^2 \times g}{\mu_m^2} \times \left( \frac{M_c' T_c}{M_e' T_e} - 1 \right) \quad (2)$$

$$M' = M_a \frac{p_a}{p_T} + M_w \frac{p_w}{p_T} \quad (3)$$

式中,  $l$  ——装置蒸发冷凝腔的特征尺寸, m;  $\rho$  ——混合气体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\mu_m$  ——混合气体的动力黏度, (N·s)/m<sup>2</sup>;  $M'$  ——水蒸气的摩尔质量;  $T$  ——温度; 下标 e、c 分别表示蒸发面和冷凝面;  $p_T$  ——装置内湿空气的总压力, 大小与环境大气压相同, 即  $p_T = 101.3$  kPa;  $p$  ——平均压力, Pa;  $M_a$  ——干空气摩尔质量,  $M_a = 28.96$  g/mol;  $M_w$  ——水蒸气摩尔质量,  $M_w = 18$  g/mol, 下标 a、w 分别代表干空气和水蒸气。

而式(1)中的普朗特数可通过式(4)计算:

$$Pr = \frac{c_p \mu_m}{k} \quad (4)$$

$$c_p = 0.9992 \times 10^3 + 1.4339 \times 10^{-1} T_{av} + 1.101 \times 10^{-4} T_{av}^2 - 6.7581 \times 10^{-8} T_{av}^3 \quad (5)$$

$$k = 0.024 + 0.7673 \times 10^{-4} T_{av} \quad (6)$$

$$\mu_m = A_0 + A_1 t_{av} + A_2 t_{av}^2 + A_3 t_{av}^3 + A_4 t_{av}^4 \quad (7)$$

式中,  $c_p$  ——蒸发冷凝腔内水蒸气的质量定压热容, J/(kg·K);  $k$  ——工作介质的热导率, W/(m·K)。

水蒸气密度的计算式为:

$$\rho = B_0 + B_1 t_{av} + B_2 t_{av}^2 + B_3 t_{av}^3 \quad (8)$$

式中,  $t_{av}$  ——蒸发面和冷凝面温度的平均值, K;  $t_{av}$  ——蒸发面和冷凝面温度的平均值, °C。

装置内对流传热系数  $h_c$  可由式(9)进行计算:

$$h_c = \frac{k}{l} \times C \times Ra^n \quad (9)$$

式中,  $C$ 、 $n$  ——经验常数, 可由实验数据拟合得

到, 本文中取  $C = 0.15$ ,  $n = 0.29$ <sup>[11]</sup>。

式(7)、式(8)中的参数取值见表 1。

表 1 式(7)、式(8)中参数取值表

Table 1 The value of the coefficients in Eqs.(7) and Eqs.(8)

式(7)	式(8)
$A_0 = 1.69 \times 10^{-5}$	$B_0 = 1.30$
$A_1 = 9.152 \times 10^{-8}$	$B_1 = -6.04 \times 10^{-3}$
$A_2 = -2.16 \times 10^{-9}$	$B_2 = 4.70 \times 10^{-5}$
$A_3 = 3.14 \times 10^{-11}$	$B_3 = -5.76 \times 10^{-7}$
$A_4 = -2.64 \times 10^{-13}$	—

装置内部对流换热系数  $h_c$  与传质系数  $h_m$  之间存在如式(10)所示关系, 则装置内对流传质系数可用式(11)表示。

$$\frac{h_c}{h_m} = \frac{k}{D_{a-w}} (Le)^n \quad (10)$$

$$h_m = \frac{h_c}{\rho C_p Le^{1-n}} \quad (11)$$

式中,  $Le$  ——刘易斯数;  $D_{a-w}$  ——水蒸气在干空气中的质扩散系数, m<sup>2</sup>/s。

根据式(11)即可计算出竖管式太阳能海水淡化装置理论淡水产量预测值  $G$  为:

$$G = h_m A_w (\rho_e - \rho_c) \quad (12)$$

### 3 淡化装置试验测试系统

单效竖管式太阳能海水淡化装置由两根不锈钢筒件构成, 材质为 304, 直径分别为 102 和 159 mm, 长度分别为 970 和 980 mm, 顶部保温层厚度为 10 mm。两效淡化装置由 3 根不锈钢筒构成, 材质为 304, 直径分别为 102、159、220 mm, 长度分别为 970、980、990 mm。试验中, 用自来水代替海水, 电加热代替太阳能。加热水箱中水体由电加热器供能, 加热温度由自动温控仪调节, 进水流量由微型流量计测量, 沿装置高度在蒸发面和冷凝面等距在上、中、下位置安装 3 个 K 型热电偶, 误差为 ±0.5 °C, 其测量平均值为蒸发温度或冷凝温度, 其值由温度巡检仪实时采集。淡水产量用精密电子称测量, 误差为 ±0.1 g。装置内部压力由盒式压力计测量, 精度为 ±1.0 kPa。

在试验测量前, 分别对微型流量计、K 型热电偶、盒式压力计和电子称进行校核。试验测试台实物如图 3 所示。





图3 两效竖管式太阳能海水淡化装置性能测试系统

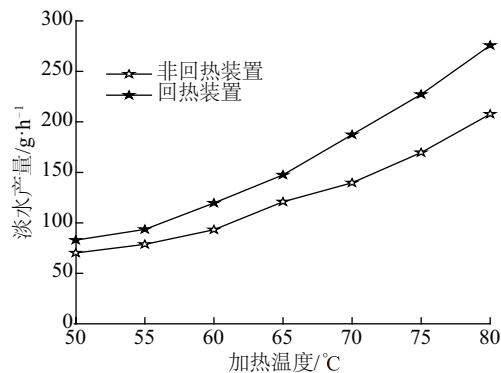
Fig. 3 Photograph of the experimental set-up of double-effect vertical tubular solar seawater desalination device

## 4 结果及分析

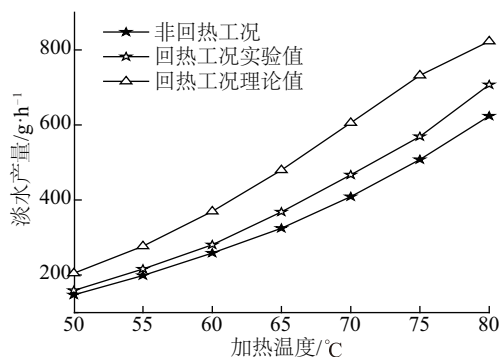
试验中,分别对单效和两效太阳能海水淡化装置在回热运行工况和非回热运行工况时,恒定加热温度条件下的淡水产量、冷凝温度、进料海水温度等进行试验测试和分析,同时将两效太阳能海水淡化装置在回热工况运行时试验测试淡水产量与理论计算淡水产量进行对比研究。为了提高测试精度,在室内对装置性能进行测试。加热水箱温度为装置运行温度,即第一效海水降膜蒸发温度。运行温度分别设定为 50、55、60、65、70、75、80  $^{\circ}\text{C}$ ,每组测试温度稳定运行 2 h,2 个淡化装置淡水产量随运行温度变化曲线如图 4 所示。

从图 4 可看出,单效淡化装置和两效淡化装置淡水产量均随运行温度的升高而增大。在相同加热温度条件下,装置在回热运行工况时的淡水产量大于非回热时。单效淡化装置在运行温度为 80  $^{\circ}\text{C}$  时,回热运行工况淡水产量为 275.84 g/h,比非回热运行工况时淡水产量增加 32.83%。两效淡化装置在运行温度为 80  $^{\circ}\text{C}$  时,回热运行工况时淡水产量为 707.06 g/h,比非回热运行工况淡水产量增加 13.32%,且为同样运行工况单效装置淡水产量的 2.56 倍。分析其原因:一方面,在回热运行工况下,进水管路中的进料海水吸收了套筒外壁面的热量而升温,相比较非回热运行工况时低温进料海水达到运行温度所需加热时间短,进而使装置有效蒸发面积更大,同时也增大了装置外层套筒与对应水膜之间蒸发冷凝温差,使蒸发冷凝腔内热质传递驱动力增大,最终使装置淡水产量增大;另一方面,两效淡化装置总的蒸发面积大于单效淡化装置总的蒸

发面积,而且对水蒸气的凝结潜热进行再次利用,所以两效淡化装置淡水产量大于单效淡化装置淡水产量。



a. 单效淡化装置



b. 两效淡化装置

图4 单效/两效淡化装置淡水产量随运行温度变化

Fig. 4 Variation of the distillation rate with different heating temperature of single-effect/double-effect desalination device

从图 4 还可看出,两效淡化装置在回热运行工况时理论计算值和试验测量值随加热温度的变化趋势一致。当加热温度为 50~80  $^{\circ}\text{C}$  时,理论计算值与试验测试值误差为 16.38%~29.07%。究其原因,主要是由于理论计算时对装置内部气体介质进行了理想化假设,同时随着装置运行温度的升高,海水受热蒸发产生的蒸汽压增大,阻碍了水蒸气的蒸发冷凝过程。上述结论也可由 2 个装置在回热运行工况和非回热运行工况时进料海水温度变化曲线加以解释,如图 5 所示。

从图 5 可看出,2 个装置的回热管路中进料海水随加热温度的升高而增大,表明回热管路的设置可有效吸收外层套筒壁面的热量,单效装置在回热运行时进水温度最高可升至 65.07  $^{\circ}\text{C}$ ,比非回热运行时升高 39.09  $^{\circ}\text{C}$ ,则其在加热水箱外壁面温升达到加热温度所需时间缩短,这对于增加装置淡水产

量是有益的。两效淡化装置第二效冷凝温度在回热运行工况和非回热运行工况下随加热温度的变化曲线如图 6 所示。

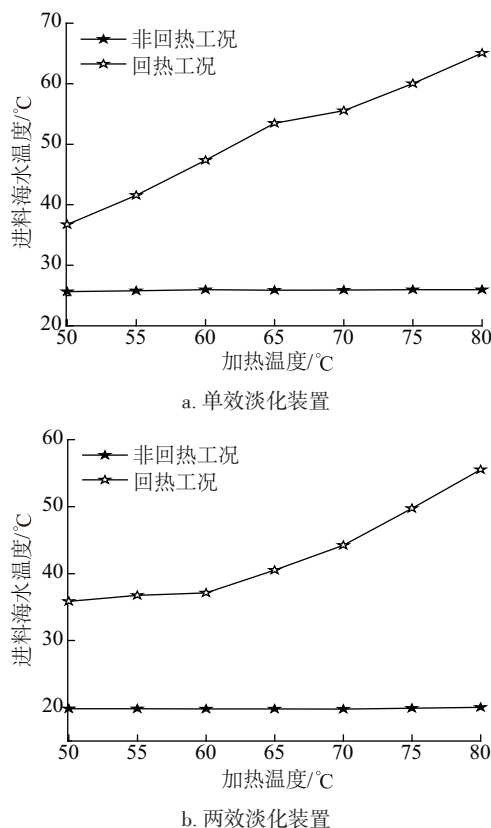


图5 单效/两效淡化装置进料海水温度随加热温度变化

Fig. 5 Variation of the feed water temperature with heating temperature of single-effect/double-effect device

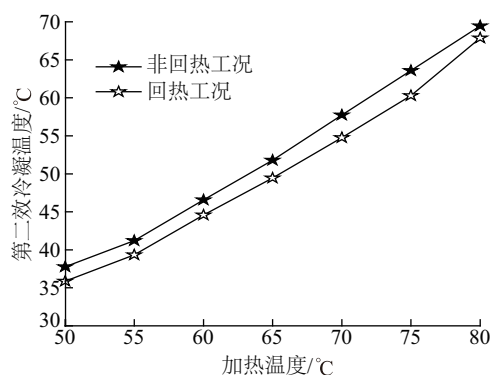


图6 两效淡化装置第二效冷凝温度随加热温度变化

Fig. 6 Variation of the second-effect condensation temperature with heating temperature of double-effect desalination device

从图 6 可看出,两效淡化装置第二效冷凝温度(外层套筒温度)随加热温度的升高而增大,且非回热运行工况下第二效冷凝温度比回热运行工况下

高,在加热温度为 80 ℃时,二者相差约 2 ℃。说明回热管路中海水有效吸收了第二效中水蒸气的凝结潜热,同时也增大了装置内蒸发冷凝温差,强化了传热传质驱动力,进而增大了装置的淡水产量。

## 5 结 论

本文提出一种新型具有回热功能的竖管式太阳能海水淡化装置,建立其内部传热传质关系式,得到该类型装置淡水产量理论计算方法。在室内对回热运行工况和非回热运行工况下,单效淡化装置和两效淡化装置淡水产量、进料海水温度、冷凝温度等随加热温度变化规律展开研究,得到以下结论:

1)对于单效淡化装置和两效淡化装置,在回热运行工况下淡水产量均比非回热运行工况下多,加热温度为 80 ℃时,回热运行工况下单效淡化装置淡水产量比非回热运行工况下增加 32.83%,两效淡化装置增加了 13.32%。

2)2 个装置在回热运行工况下,进料海水温度均升高,当加热温度为 80 ℃时,单效装置和两效装置在回热运行工况下进水温度分别为 67.05 ℃和 55.52 ℃,比非回热运行工况下升高了 39.09 ℃和 35.50 ℃。两效淡化装置的第二效冷凝温度在回热运行工况下比非回热运行工况降低了约 2 ℃,说明回热可有效降低竖管式蒸馏淡化装置的外层套筒冷凝温度,增大装置内蒸发冷凝温差,强化传热传质驱动力。

3)两效淡化装置理论计算淡水产量与试验测试淡水产量随加热温度变化趋势一致,在加热温度为 50~80 ℃时,两者误差范围在 16.38%~29.07%内。

## [参考文献]

- [1] Durkaieswaran P, Kalidasa Murugavel K. Various special design of single basin passive solar still—A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 49: 1048—1060.
- [2] Tiwari G N. Nocturnal water production by tubular solar stills using waste heat to preheat brine[J]. Desalination, 1988, 69: 309—318.
- [3] Arunkumar T, Velraj R, Denkenberger D, et al. Effect of heat removal on tubular solar desalting system[J]. Desalination, 2016, 379: 24—33.
- [4] 谢 果, 孙立成, 莫政宇, 等. 负压条件管式太阳能

- 蒸馏空腔的传热传质特性[J]. 化工学报, 2017, 68(3): 889—894.
- [4] Xie Guo, Sun Licheng, Mo Zhenyu, et al. Mass and heat transfer characteristics of tubular solar still under vacuum condition [J]. CIESC Journal, 2017, 68(3): 889—894.
- [5] 肖红升, 刘振华, 王登锋. 多级回热式小型太阳能海水淡化系统的性能优化研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(11): 2916—2920.
- [5] Xiao Hongsheng, Liu Zhenhua, Wang Dengfeng. Optimization study of a small-size solar sea-water desalination system with multi-effect evaporating and heat recovery [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2016, 37(11): 2916—2920.
- [6] Elashmawy Mohamed. An experimental investigation of a parabolic concentrator solar tracking system integrated with a tubular solar still [J]. Desalination, 2017, 411: 1—8.
- [7] 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: 62—68.
- [8] 姚 洋, 陈志莉, 郑宏飞, 等. 带肋片多效管式海水淡化装置的实验研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(2): 511—515.
- [8] Yao Yang, Chen Zhili, Zheng Hongfei, et al. Experimental study of multi-effect tubular desalination still with fins [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2016, 37(2): 511—515.
- [9] 于 涛, 陈志莉, 杨 毅, 等. 管式蒸馏海水淡化的热质传递强化研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(3): 559—563.
- [9] Yu Tao, Chen Zhili, Yao Yang, et al. Study on intensified heat and mass transfer of tubular distillation desalination [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2016, 37(3): 559—563.
- [10] Sharpley Boelter. Evaporation of water into quiescent air from a one-foot diameter surface [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1938, 30(2): 1125—1131.
- [11] Batri A. Nusselt Rayleigh correlations for design of industrial elements: Experimental and numerical investigation of natural convection in tilted square air filled enclosures [J]. Energy Conversion & Management, 2008, 49(4): 771—782.

## EFFECT OF PERFORMANCE OF VERTICAL TUBULAR SOLAR SEAWATER DESALINATION DEVICE WITH HEAT RECOVERY

Chang Zehui<sup>1,2</sup>, Li Wenlong<sup>1</sup>, Song Shanqi<sup>3</sup>, Liu Yang<sup>1</sup>, Li Ruichen<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Key Laboratory of Wind and Solar Power Energy Utilization Technology Ministry of Education and Inner Mongolia Construction, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051 China; 3. School of Science, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** This paper presents a novel vertical tubular solar seawater desalination device with heat recovery, with an aim to overcome the major drawbacks of lower productivity of tubular solar seawater desalination device. The heat and mass transfer process within the device is illustrated and the prediction of water production is derived. An experimental investigation was carried out to study the water yield and the feed water temperature of the single-effect and double-effect devices under heat recovery and non heat recovery process, respectively. The results indicated that when the operating temperature is 80 °C, the water yield of the double-effect device under heat recovery process is 13.32% higher than that of the device under non heat recovery process. In addition, the water yield of the single-effect device under heat recovery process is 32.83% higher than that of the device under non heat recovery process. The feed water temperature of the devices can be enhanced obviously. The numerical results have been calculated and a consistent agreement with the experimental results.

**Keywords:** tubular; seawater desalination; heat recovery; solar energy