

引用格式: Li Jinping, Deng Congcong, Ye Heli, *et al.* Analysis of Heat Loss at Night of Solar Water Heater with All-glass Evacuated Tube[J]. Journal of Gansu Sciences, 2020, 32(5): 69-74. [李金平, 邓聪聪, 叶何立, 等. 全玻璃真空管型太阳热水器夜间热损试验分析[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(5): 69-74.]  
doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2020.05.014.

# 全玻璃真空管型太阳热水器夜间热损试验分析

李金平<sup>1,2,3,4</sup>, 邓聪聪<sup>1,2,3,4</sup>, 叶何立<sup>1,2,3,4</sup>, 黄娟娟<sup>1,2,3,4</sup>, 王春龙<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点试验室, 甘肃 兰州 730050;

3. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 甘肃 兰州 730050;

4. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要** 对于集热蓄热一体的全玻璃真空管型太阳热水器, 夜间热损影响其连续稳定地为用户供能。为此, 以一套30支规格为 $\Phi 58\text{ mm} \times 1800\text{ mm}$ 的全玻璃真空管型太阳热水器为研究对象, 试验研究了连续10 d内20:00—07:00热水器蓄热水箱和真空管内的温度变化, 研究了蓄热水箱、真空管以及热水器的夜间热损, 分析了蓄热水箱初始水温、真空管初始水温、环境温度、环境风速对热水器夜间热损的影响, 通过多元线性回归分析得到了夜间热损的影响因素关系式, 该式表明: 在夜间平均环境温度为 $-5.5 \sim 14.6\text{ }^\circ\text{C}$ 、平均环境风速为 $0.7 \sim 3.7\text{ m/s}$ 的情况下, 蓄热水箱初始水温每增加 $1\text{ }^\circ\text{C}$ , 热水器夜间热损增加 $0.10\text{ MJ}$ ; 真空管初始水温每增加 $1\text{ }^\circ\text{C}$ , 热水器夜间热损增加 $0.21\text{ MJ}$ ; 平均环境温度每增加 $1\text{ }^\circ\text{C}$ , 热水器夜间热损减少 $0.16\text{ MJ}$ ; 平均环境风速每增加 $1\text{ m/s}$ , 热水器夜间热损增加 $0.12\text{ MJ}$ 。该式拟合优度 $R^2$ 为 $0.994$ , 可有效预测每日太阳热水器的夜间热损。

**关键词** 全玻璃真空管型太阳热水器; 热损; 多因素分析

中图分类号: TK519

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2020)05-0069-06

全玻璃真空管型太阳热水器是一种结构紧凑、性能优良的太阳热水器, 具有良好的经济性和节能环保性<sup>[1-3]</sup>, 是目前应用最广的太阳能集热装置<sup>[4-6]</sup>。国内外很多学者对其集放热性能和热损失进行了研究。在集放热性能方面, Johane等<sup>[7]</sup>利用实验和三维数值模拟进行研究, 发现太阳能集热管倾角对热水器内流动模式、能量转换效率和水箱内分层有显著的影响。闫素英等<sup>[8-9]</sup>通过实验和模拟相结合的方法研究了辐照强度和安装倾角等对全玻璃真空管型太阳热水器的影响。张涛等<sup>[10-11]</sup>研究了安装角度、管径管长、集热水箱直径、导流板和反光板加装等对太阳热水器对流换热过程的影响。Zambolin等<sup>[12]</sup>研究了太阳辐射量、环境温度、风速、流体温度、流量对太阳热水器热性能的影响情况。高岩等<sup>[13]</sup>利用模拟仿真的方法初步给出了太阳集热器

容量对热系统性能的影响。Mahbulul等<sup>[14]</sup>研究使用纳米流体作为传热流体来提高太阳热水器的效率。在热损失方面, 孟秀清等<sup>[15]</sup>推导了全玻璃真空太阳集热管的3种传热形式, 并且计算了全玻璃真空集热管的热损。李同等<sup>[16]</sup>数值模拟了10:00—14:00时段真空管型太阳热水器内的流动与换热, 研究了气候和技术参数对真空管型太阳热水器性能的影响, 发现集热管管长的增加会导致热水器效率的下降, 还发现辐射散热损失是全玻璃真空管型太阳热水器的主要热损失方式。刘慧芳等<sup>[17]</sup>通过试验测量了装满乙二醇防冻液的全玻璃真空管太阳能集热器夜间静止时的温度, 用一个集热器进出口温度的算数平均值近似代替集热器液体温度计算了夜间散热量及热损失系数, 分析了真空管集热器夜间热损失特性及其变化规律。

收稿日期: 2019-03-27; 修回日期: 2019-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(81676094), 甘肃省国际科技合作专项(1604YKCA009), 兰州市人才创新创业项目(2017-RG-34)

作者简介: 李金平(1977-), 男, 宁夏中宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进可再生能源系统。E-mail: lijinp77@163.com

综上所述,目前关于全玻璃真空管型太阳热水器的研究已有很多,而关于夜间热损的试验研究还很少,多因素对热损的影响规律还未有文章报道。而夜间热损的大小会影响集热蓄热一体的太阳热水器连续稳定地为用户供能,为此试验研究了夜间竖管被动式全玻璃真空管型太阳热水器各部件的热损以及蓄热水箱初始水温、真空管初始水温、环境温度、环境风速对热水器夜间热损的影响,拟合出多元线性回归方

程,对预测太阳热水器夜间热损有一定的指导意义。

## 1 试验装置

以甘肃省兰州市的一套 30 支管的竖管式全玻璃真空管型太阳热水器作为试验对象。热水器朝南正南放置,集热面与地面夹角  $45^\circ$ 。试验台组件安装符合 GB/T 18708-2002《家用太阳热水系统热性能试验方法》<sup>[18]</sup> 的要求,组件参数详见表 1。

表 1 试验台组件及技术参数

Table 1 Testbed components and technical parameters

名称	规格型号	数量	其他
全玻璃真空管型太阳热水器	真空管 30 支,外径 58 mm,内径 47 mm,长度 1800 mm	1 套	水箱容积 250 L,外径 460 mm,内径 360 mm,长度 2 540 mm
温度传感器	Pt100 热电阻	7 个	量程: $-50 \sim 100^\circ\text{C}$ ,精度: A 级, $\pm 0.15^\circ\text{C}$
风速传感器	FC-2A3	1 台	量程: $0 \sim 30\text{ m/s}$ ,精度: $\pm 5\%$
太阳辐射仪	TBQ-2-B	1 台	量程: $0 \sim 2\,000\text{ W/m}^2$ ,灵敏度: $11.710\ \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$
数据采集仪	Agilent 34970A	1 台	

## 2 试验测试及结果计算

### 2.1 试验测试过程

试验测试时间为 2018 年 3 月 29 日—2018 年 4 月 7 日,共 10 d。在整个测试期,热水器内水不循环。热水器内的温度传感器布置方式如图 1 所示,蓄热水箱轴线的中心、中心以上 120 mm 和中心以下 120 mm 各安放 1 支 Pt100 用来测量水箱中层、上层和下层的水温,在真空管(左 15)距管口 300 mm、900 mm、1 500 mm 处<sup>[19]</sup>的中心位置各固定 1 支 Pt100 用来测量真空管上层、中层和下层的水温。

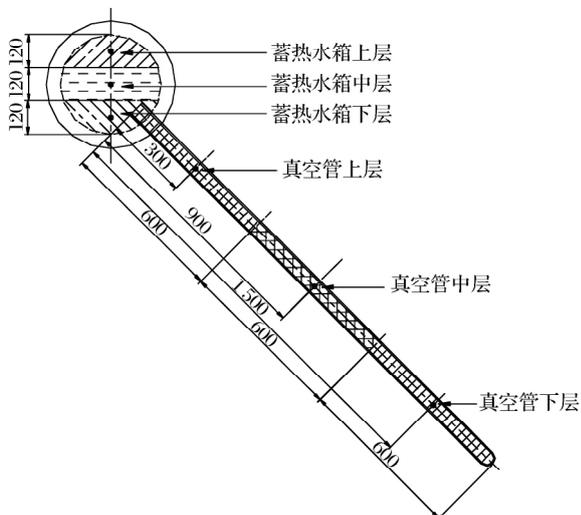


图 1 热水器内温度传感器的布置图(单位:mm)

Fig.1 Layout of temperature sensor in water heaters (unit:mm)

试验开始前将太阳热水器清洗干净,然后充满水。在试验过程中,对太阳辐射、环境温度、环境风速以及蓄热水箱和真空管内不同位置的温度等进行测量,试验数据由 Agilent 34970A 数据采集仪 24 h 自动采集和记录,间隔为 10 s。夜间热损的计算时间为晚上 20:00 到次日早上 07:00。

### 2.2 试验结果计算

全玻璃真空管型太阳热水器的夜间热损包含以下 2 个部分:

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{tank}} + Q_{\text{tube}}, \quad (1)$$

其中:  $Q_{\text{loss}}$  为热水器的夜间热损(J);  $Q_{\text{tank}}$  为蓄热水箱的夜间热损(J);  $Q_{\text{tube}}$  为真空管的夜间热损(J)。

为了计算蓄热水箱与真空管的夜间热损,考虑到夜间蓄热水箱与真空管内水的温度分层明显,温度自下而上依次升高,自然对流减弱,因此假设它们中的水是静止的,则蓄热水箱的夜间热损为

$$Q_{\text{tank}} = \sum_{i=1}^3 c_{1i} m_{1i} (t_{b1i} - t_{e1i}), \quad (2)$$

其中:  $i=1, 2, 3$  分别表示蓄热水箱的上层、中层和下层;  $c_{1i}$  为蓄热水箱某层水的比热容 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ];  $m_{1i}$  为蓄热水箱某层水的质量(kg);  $t_{b1i}$  为夜间蓄热水箱某层水的初始温度( $^\circ\text{C}$ );  $t_{e1i}$  为夜间蓄热水箱某层水的最终温度( $^\circ\text{C}$ )。

同理,真空管的夜间热损为

$$Q_{\text{tube}} = \sum_{j=1}^3 n c_{2j} m_{2j} (t_{b2j} - t_{e2j}), \quad (3)$$

其中:  $j=1, 2, 3$  分别表示真空管的上层、中层和下

层;  $n$  为真空管的数量, 选取  $n = 30$ ;  $c_{2j}$  为真空管某层水的比热容 [ $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ];  $m_{2j}$  为真空管某层水的质量 ( $kg$ );  $t_{b2j}$  为夜间真空管某层水的初始温度 ( $^\circ C$ );  $t_{e2j}$  为夜间真空管某层水的最终温度 ( $^\circ C$ )。

此外, 在分析过程中当用一个温度表示热水器蓄热水箱和真空管内的温度时, 蓄热水箱内的温度由测得的水箱上、中、下层的温度根据体积加权得到, 真空管内的温度由测得的真空管上、中、下层的温度根据体积加权得到。

### 3 结果与分析

#### 3.1 夜间蓄热水箱和真空管内的温度变化

为了解全玻璃真空管型太阳能热水器内的温度变化趋势, 选取试验期前 3 d 进行研究, 热水器内温度、环境温度和太阳辐射的变化情况如图 2 所示。

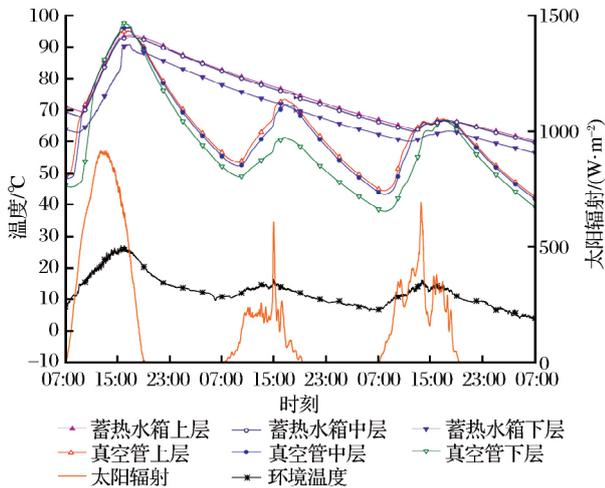


图 2 太阳能热水器内的温度变化

Fig.2 Temperature changes in solar water heaters

由图 2 可知, 尽管每天热水器蓄热水箱和真空管内的初始温度不同, 但夜间其下降趋势基本一致。因此选取 2018 年 4 月 5 日作为典型日进行分析, 该天夜间热水器内温度变化如图 3 所示。

由图 3 可知, 夜间蓄热水箱内的温度总是高于真空管内的温度, 蓄热水箱和真空管内部均产生了温度分层现象。其中水箱上层与中层的温度相近, 而下层温度明显偏低。这是由于随着热水器与外界环境换热过程的进行, 水箱内的温度发生了变化, 产生了密度差, 在浮升力的作用下热水上升冷水下降, 水箱内部形成了温度分层。与此同时, 水箱下层始终向真空管传递热量, 导致水箱下层温度明显低于水箱中上层, 而真空管中上层温度高于真空管下层。

热水器蓄热水箱和真空管连续 10 个夜间的温降如图 4 所示。平均环境温度、平均环境风速为夜

间 (20:00—07:00) 环境温度、环境风速的算术平均值, 初始水温为 20:00 时蓄热水箱和真空管内水的温度, 温降为初始温度和最终温度的差值。

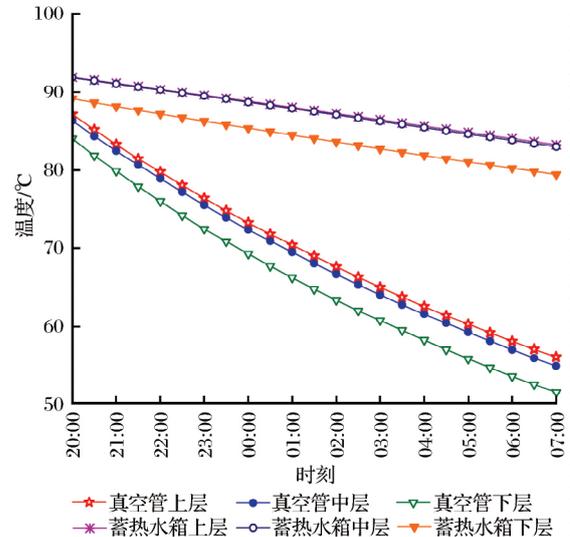


图 3 夜间热水器内的温度变化

Fig.3 Temperature changes in water heaters at night

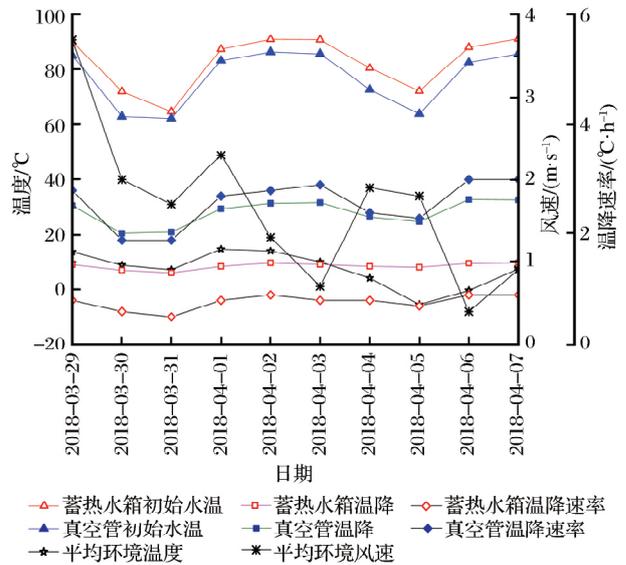


图 4 夜间热水器的温降

Fig.4 Temperature cooling in water heaters at night

从图 4 中可以得到, 蓄热水箱温降为  $6 \sim 10^\circ C$ , 真空管温降为  $20 \sim 33^\circ C$ 。蓄热水箱的温降速率为  $0.5 \sim 0.9^\circ C/h$ , 真空管的温降速率为  $1.9 \sim 3.0^\circ C/h$ , 同一个夜间真空管的温降速率是水箱温降速率的 3 倍多。

#### 3.2 夜间蓄热水箱和真空管温降影响因素分析

为了有效预测多个因素对夜间温降的影响, 采用多元线性变量回归方程对数据进行处理, 分析蓄热水箱初始水温  $t_{b1}$ 、平均环境温度  $t_{as(av)}$  和平均环境风速

$u_{av}$  对蓄热水箱夜间温降  $\Delta t_{b1}$  的影响以及真空管初始水温  $t_{b2}$ 、平均环境温度  $t_{as(av)}$  和平均环境风速  $u_{av}$  对真空管夜间温降  $\Delta t_{b2}$  的影响,得到的关系式为

$$\Delta t_{b1} = -2.20 + 0.13t_{b1} - 0.06t_{as(av)} + 0.01u_{av}, \quad (4)$$

该回归方程的拟合优度  $R^2$  为 0.969, 标准误差为  $0.26\text{ }^\circ\text{C}$ , 弃真概率为  $6.35 \times 10^{-5}$ 。

$$\Delta t_{b2} = -8.34 + 0.50t_{b2} - 0.24t_{as(av)} + 0.03u_{av}, \quad (5)$$

该回归方程的拟合优度  $R^2$  为 0.998, 标准误差为  $0.21\text{ }^\circ\text{C}$ , 弃真概率为  $5.32 \times 10^{-9}$ 。

由式(4)和式(5)可知,在其他条件不变的情况下,单一因素变化对热水器蓄热水箱和真空管夜间温降的影响如下:蓄热水箱初始水温每增加  $1\text{ }^\circ\text{C}$ ,其夜间温降增加  $0.13\text{ }^\circ\text{C}$ ;真空管初始水温每增加  $1\text{ }^\circ\text{C}$ ,其夜间温降增加  $0.50\text{ }^\circ\text{C}$ ;平均环境温度每增加  $1\text{ }^\circ\text{C}$ ,蓄热水箱夜间温降减少  $0.06\text{ }^\circ\text{C}$ ,真空管夜间温降减少  $0.24\text{ }^\circ\text{C}$ ;平均环境风速每增加  $1\text{ m/s}$ ,蓄热水箱夜间温降增加  $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ ,真空管夜间温降增加  $0.03\text{ }^\circ\text{C}$ 。

为验证式(4)和式(5)的准确性,将试验期之后 4 d 的试验数据代入公式得到预测值,与实测值进行比较,结果见表 2。

表 2 实测值与预测值的对比结果

Table 2 Comparison between the measured values and predicted values

日期	实测值/ $^\circ\text{C}$		预测值/ $^\circ\text{C}$		偏差/ $\%$	
	$\Delta t_{b1}$	$\Delta t_{b2}$	$\Delta t_{b1}$	$\Delta t_{b2}$	$\Delta t_{b1}$	$\Delta t_{b2}$
2018-04-08	9.6	31.9	9.0	32.4	-6.2	1.6
2018-04-09	9.7	31.5	9.0	32.1	-7.2	1.9
2018-04-10	7.7	25.0	7.3	25.7	-5.2	2.8
2018-04-11	8.3	27.7	8.0	28.6	-3.6	3.2
均值	8.8	29.0	8.3	29.7	-5.6	2.4

注: $\Delta t_{b1}$ 为蓄热水箱夜间温降( $^\circ\text{C}$ ); $\Delta t_{b2}$ 为真空管夜间温降( $^\circ\text{C}$ )。下同。

### 3.3 夜间热水器热损影响因素分析

根据试验数据,利用公式(1)~(3)计算蓄热水箱、真空管以及热水器的夜间热损,结果如图 5 所示。太阳能热水器蓄热水箱容量 250 L,真空管容量 90 L,热水器总容量为 340 L,水箱容量占热水器总容量的 73.5%,真空管占 26.5%。蓄热水箱夜间热损占热水器热损的 44.1%~47.9%,真空管夜间热损占 52.1%~55.9%。

试验期 10 个夜间蓄热水箱初始水温  $t_{b1}$ 、真空管初始水温  $t_{b2}$ 、平均环境温度  $t_{as(av)}$ 、平均环境风速  $u_{av}$  以及热水器的夜间热损  $Q_{\text{loss}}$  如表 3 所列。从表 3

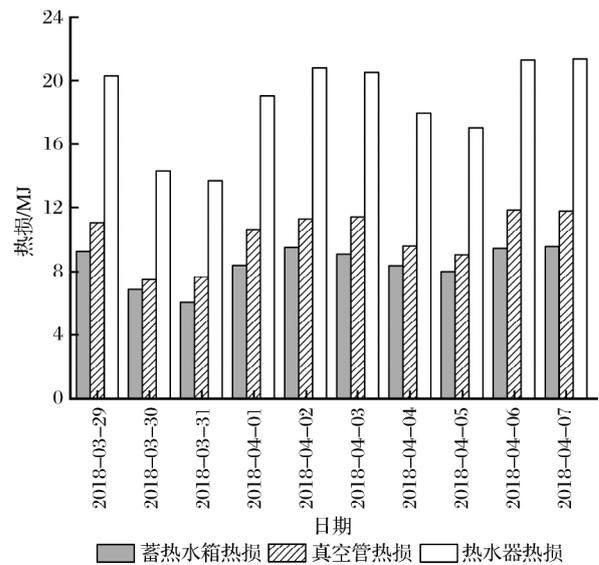


图 5 热水器的夜间热损

Fig.5 Heat loss in water heaters at night

表 3 热水器的夜间热损

Table 3 Heat loss in water heaters at night

日期	$t_{b1}$ / $^\circ\text{C}$	$t_{b2}$ / $^\circ\text{C}$	$t_{as(av)}$ / $^\circ\text{C}$	$u_{av}$ / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_{\text{loss}}$ / $\text{MJ}$
2018-03-29	90.4	85.3	13.6	3.7	20.30
2018-03-30	72.1	63.0	8.7	2.0	14.33
2018-03-31	64.8	62.3	7.0	1.7	13.72
2018-04-01	87.7	83.4	14.6	2.3	19.02
2018-04-02	91.2	86.6	13.9	1.3	20.78
2018-04-03	91.1	85.9	9.9	0.7	20.50
2018-04-04	80.6	72.7	4.0	1.9	17.95
2018-04-05	72.2	64.0	-5.5	1.8	17.03
2018-04-06	88.4	82.7	-0.4	0.4	21.27
2018-04-07	91.4	86.0	7.4	0.9	21.33

注: $t_{b1}$ 为夜间蓄热水箱初始水温( $^\circ\text{C}$ ); $t_{b2}$ 为夜间真空管初始水温( $^\circ\text{C}$ ); $t_{as(av)}$ 为夜间平均环境温度( $^\circ\text{C}$ ); $u_{av}$ 为夜间平均环境风速( $\text{m/s}$ ); $Q_{\text{loss}}$ 为热水器的夜间热损( $\text{MJ}$ )。下同。

中可以看出,当蓄热水箱和真空管的初始水温较高时,热水器夜间热损较大,当环境温度较低、环境风速较大时,热水器夜间热损也较大。

采用多元线性回归分析蓄热水箱初始水温、真空管初始水温、平均环境温度和平均环境风速对热水器夜间热损的影响,得到的关系式为

$$Q_{\text{loss}} = -4.93 + 0.10t_{b1} + 0.21t_{b2} - 0.16t_{as(av)} + 0.12u_{av}, \quad (6)$$

该回归方程的拟合优度  $R^2$  为 0.994, 标准误差为  $0.29\text{ MJ}$ , 弃真概率为  $9.23 \times 10^{-6}$ 。

由式(6)可知,在其他条件不变的情况下,单一因素变化对热水器夜间热损的影响如下:蓄热水箱初始

水温每增加 1 °C,热水器夜间热损增加 0.10 MJ;真空管初始水温每增加 1 °C,热水器夜间热损增加 0.21 MJ;平均环境温度每增加 1 °C,热水器夜间热损减少 0.16 MJ;平均环境风速每增加 1 m/s,热水器夜间热损增加 0.12 MJ。

为了验证式(6)的准确性,将试验期之后 4 d 的试验数据代入式(6)得到预测值,与实际计算值进行比较,结果见表 4。

表 4 计算值与预测值的对比结果

Table 4 Comparison between the calculated values and predicted values

日期	计算值 $Q_{\text{loss}}/\text{MJ}$	预测值 $Q_{\text{loss}}/\text{MJ}$	偏差 /%
2018-04-08	21.19	20.72	-2.3
2018-04-09	21.20	20.62	-2.8
2018-04-10	16.93	16.65	-1.7
2018-04-11	18.38	18.33	-0.3
均值	19.42	19.08	-1.8

从表 4 中可看出,预测值与计算值的偏差都在 3.0% 以下,平均偏差也不足 2.0%,这说明式(6)能够有效预测每日太阳能热水器的夜间热损。

## 4 结论

试验研究了全玻璃真空管型太阳能热水器蓄热水箱和真空管内的温度变化及热损情况,采用多元线性回归分析了多因素对温降和热损的影响,得出以下主要结论:

(1) 蓄热水箱夜间热损约占热水器热损的 45%,真空管夜间热损约占 55%。真空管的温降速率是水箱温降速率的 3 倍多。蓄热水箱和真空管内存在明显的温度分层。

(2) 根据多元线性回归分析可以得到,在其他条件不变的情况下,单一因素变化对夜间热水器蓄热水箱和真空管温降的影响如下:蓄热水箱初始水温每增加 1 °C,其夜间温降增加 0.13 °C;真空管初始水温每增加 1 °C,其夜间温降增加 0.50 °C;平均环境温度每增加 1 °C,蓄热水箱夜间温降减少 0.06 °C,真空管夜间温降减少 0.24 °C;平均环境风速每增加 1 m/s,蓄热水箱夜间温降增加 0.01 °C,真空管夜间温降增加 0.03 °C。

(3) 根据多元线性回归分析可以得到,在其他条件不变的情况下,单一因素变化对热水器夜间热损的影响如下:蓄热水箱初始水温每增加 1 °C,热水

器夜间热损增加 0.10 MJ;真空管初始水温每增加 1 °C,热水器夜间热损增加 0.21 MJ;平均环境温度每增加 1 °C,热水器夜间热损减少 0.16 MJ;平均环境风速每增加 1 m/s,热水器夜间热损增加 0.12 MJ。

## 参考文献:

- [1] Ahmet Ozsoy, Vahit Corumlu. Thermal Performance of a Thermosyphon Heat Pipe Evacuated Tube Solar Collector Using Silver-water Nanofluid for Commercial Applications[J]. Renewable Energy, 2018, 122: 26-34.
- [2] Sabiha M A, Saidur R, Saad Mekhilef, et al. Progress and Latest Developments of Evacuated Tube Solar Collectors[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, (51): 1038-1054.
- [3] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 第 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.
- [4] 韩延民, 代彦军, 王如竹. 基于 TRNSYS 的太阳能集热系统能量转化分析与优化[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(增刊 1): 57-60.
- [5] 艾宁, 樊建华, 李育敏. 全玻璃真空管型太阳能热水器内流场的 CFD 模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(10): 1195-1199.
- [6] 高岩, 蔺新星, 张昕宇, 等. 两种全玻璃真空管型太阳集热器集热系统动态特性比较[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1461-1467.
- [7] Johane Bracamonte, José Parada, Jesús Dimas. Effect of the Collector Tilt Angle on Thermal Efficiency and Stratification of Passive Water in Glass Evacuated Tube Solar Water Heater[J]. Applied Energy, 2015, 155: 648-659.
- [8] 闫素英, 田瑞, 于文艳, 等. 全玻璃真空太阳能热水器内流场的影响因素分析[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(4): 641-643.
- [9] 闫素英, 田瑞, 于文艳, 等. 玻璃真空管内插热管式太阳能热水系统热性能研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(8): 1037-1042.
- [10] 张涛, 韩吉田, 闫素英, 等. 太阳能真空管对流换热的模拟和实验研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(9): 2027-2031.
- [11] 张涛, 韩吉田, 田瑞, 等. 全玻璃真空管太阳能集热器对流换热试验与模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 206-212.
- [12] Zambolin E, Del Col D. Experimental Analysis of Thermal Performance of Flat Plate and Evacuated Tube Solar Collectors in Stationary Standard and Daily Conditions[J]. Solar Energy, 2010, 84(8): 1382-1396.
- [13] 高岩, 陈艳红, 范蕊, 等. 太阳能集热器容量对热系统性能影响的研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 374-379.
- [14] Mahbulul I M, Mohammed Mumtaz A Khan, Nasiru I Ibrahim, et al. Carbon Nanotube Nanofluid in Enhancing the Efficiency of Evacuated Tube Solar Collector[J]. Renewable Energy, 2018, 121: 36-44.
- [15] 孟秀清, 苗建明, 吕余敏, 等. 全玻璃真空集热管热损计算与分析[J]. 太阳能, 2013, (1): 13-17.

- [16] 李同,陶汉中,蒋川.真空管型太阳热水器传热特性的数值分析[J].太阳能学报,2017,38(5):1247-1253.
- [17] 刘慧芳,董建锴,姜益强,等.严寒地区真空管集热器夜间热损失实验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(2):164-169.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.家用太阳能热水系统热性能试验方法:GB/T 18708-2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.全玻璃真空太阳集热管:GB/T 17049-2005[S].北京:中国标准出版社,2005.

## Analysis of Heat Loss at Night of Solar Water Heater with All-glass Evacuated Tube

Li Jinping<sup>1,2,3,4</sup>, Deng Congcong<sup>1,2,3,4</sup>, Ye Heli<sup>1,2,3,4</sup>, Huang Juanjuan<sup>1,2,3,4</sup>, Wang Chunlong<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Gansu Province, Lanzhou 730050, China;

3. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou 730050, China;

4. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract** For the all-glass evacuated tube solar water heater integrating heat collection and storage, its heat loss at night affects continuous and stable power supply for users. Therefore, a set of 30  $\Phi 58 \text{ mm} \times 1800 \text{ mm}$  of all-glass evacuated tube solar water heaters as the object tested the temperature changes in the heat storage water tanks and the evacuated tubes from 20:00pm to 07:00am in consecutive 10 days and the heat loss at night in heat storage water tanks, evacuated tubes and the heaters. The effect of the initial water temperature of heat storage water tank, the initial water temperature of evacuated tube, environment temperature, and environmental wind speed on the heat loss at night in heater were also tested. The relation of influencing factors of the heat loss at night were obtained by multiple linear regression. The relation showed that when the average ambient temperature at night was  $-5.5-14.6 \text{ }^\circ\text{C}$  and the average ambient wind speed was  $0.7-3.7 \text{ m/s}$ , the heat loss at night in heater increased by  $0.1 \text{ MJ}$  with the growth of the initial water temperature of the heat storage water tank by  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , and by  $0.21 \text{ MJ}$  of the heat loss at night in heater with the rise of the initial water temperature of evacuated tube by  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ . For every  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  increase in the average ambient temperature, the heat loss in heater at night decreased by  $0.16 \text{ MJ}$ . For every  $1 \text{ m/s}$  increase in the average ambient wind speed, the heat loss at night increased by  $0.12 \text{ MJ}$ . With the goodness of fit  $R^2$  of  $0.994$ , this relation can effectively predict the heat loss of solar water heater at night.

**Key words** All-glass evacuated tube solar water heater; Heat loss; Multivariate analysis

(本文责编:冯 婷)