

# 不同积尘形态下平板集热器换热性能试验研究

李安桂, 张婉卿, 史丙金, 李 成, 侯 祎

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 对平板型太阳能集热器表面积尘进行测试, 分析了积尘对其系统性能的影响。研究表明, 在同等外界条件下, 以集热器表面积尘量  $11.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  为例, 系统得热量显著下降, 集热效率下降了 17.40%。通过试验测试, 分析了松散和粘结两种积尘状态下不同积尘量对系统集热性能的影响。在具有相同积尘量的条件下, 粘结状态积尘对集热性能的影响高于松散状态积尘。在积尘初期系统集热效率下降速度较快, 而后逐渐变缓。该研究对太阳能集热器积尘进行定期清洁、提高换热效率具有参考意义。

**关键词:** 平板型太阳能集热器; 积尘; 集热性能; 现场测试

中图分类号: TK513.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0722-08

## Experimental study on heat exchange performance of flat-plate solar collectors with different dust accumulation forms

LI Angui, ZHANG Wanqing, SHI Bingjin, LI Cheng, HOU Yi

(School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Solar collectors are the key components in the solar collector system, in which thermal performance determines the efficiency of solar heating system. In order to investigate the effect of natural dust on the performance of flat-plate collector, the filed tests are performed on the solar collectors under the same circumstance with the dust and cleaning conditions of the glass cover surface. The results show that compared with the cleaned collector, a dust density of  $11.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  corresponds to a 17.40% reduction in thermal collection performance. Furthermore, contrast test is conducted to illustrate the effect of different dust forms on collector performance. With loose dust solar collector, the collector with cohesive dust exerts bigger influence on thermal performance in solar heating system. It is found that the collector performance decreases fast at the beginning of the dust accumulation and then gradually slows down. This study can provide a reference in formulating cleaning strategies of collector and improving the heat transfer efficiency of solar heating system.

**Key words:** flat-plate solar collector; dust accumulation; collector performance; field test

在太阳能与建筑一体化应用中, 平板型太阳能集热器作为太阳能集热系统的关键部件, 其热性能受到外界和自身因素等多方面影响。为了提高平板集热器的集热效率, 季杰等<sup>[1]</sup>提出了一种新型太阳能平板集热器, 可同时实现加热空气与水两种工作模式, 其太阳能光热转换效率均大幅提高。但在日常使用过程中, 由于集热器盖板表面积尘等不利因素的存在, 影响了集热系统性能, 甚至缩短了集热器的使用年限。其中, 集热器表面积尘对太阳能集热系统性能的影响主要体现在积尘密度、灰尘组成、粒径分布以及环境因素等方面<sup>[2-5]</sup>。

多年来, 人们对集热器积尘问题进行了一系

列研究。El-Shobokshy 等<sup>[6]</sup>通过室内试验研究了五种不同物理属性的灰尘在集热器表面的沉积, 发现细小颗粒对集热器性能的影响要大于粗大颗粒。Hottel 等<sup>[7]</sup>认为雨水对积尘自然冲刷会导致玻璃盖板的透光率下降。Imad 等<sup>[8]</sup>通过对四台 20 W 的太阳能光伏光热集热器积尘进行实测, 研究了平板集热器清洗频率对输出功率的影响, 结果表明随着清洗频率的降低系统输出功率逐渐降低。Cabanillas 和 Munguia<sup>[9]</sup>通过试验测试研究了太阳能光伏板积尘对系统效能的影响, 并且分析了灰尘粒径分布对输出功率的影响。李念平等<sup>[10]</sup>研究发现积尘不仅会降低集热器的瞬时效率, 同时也会降低其所能达到的最高效率和最高温度。马

收稿日期: 2017-11-14

修改稿日期: 2018-08-30

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目 (2016KTCL01-13)

第一作者: 李安桂(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 建筑通风空调气流组织、地下空间环境工程保障技术、太阳能建筑一体化等领域。E-mail: liag@xauat.edu.cn.

俊<sup>[11]</sup>提出了积尘遮挡系数与积尘效率下降度以评价对集热系统性能的影响。在积尘初期,两个指标均随积尘量的增加变化较快。

总结现有研究成果发现,前人的研究主要专注于集热器本身积尘问题,而对于系统的换热性能研究较少。本研究以西安气候条件为例,对平板型太阳能集热系统进行了测试,分析了集热器表面积尘对平板型太阳能集热系统性能的影响,为集热器运行维护管理提供了参考依据。

## 1 试验装置及测试内容

### 1.1 试验系统

本次测试所选用的平板太阳能热水系统位于西安市区某7层楼楼顶,周围主要包括一条商业街道和部分教学楼等。系统主要包括:平板集热器、储热水箱、循环管路三部分,见图1<sup>[12]</sup>。集热器按照西安地区全年最佳倾角 $26^\circ$ ,正南朝向安装<sup>[13]</sup>,盖板表面作为积尘载体。试验所用仪器如下:

IMP数据采集系统:型号SI35951H,通道数为20,数据最小存储周期为5 s。

铜—康铜T型热电偶温度传感器:测试范围 $-35\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,精度范围 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

喷雾器:模拟降雨,以获得粘结状态积尘。

电子天平:AW220型,测量精度为0.1 mg。

通道气象站数据采集:型号HOBO Weather Station Logger 15,记录测试地点当天环境参数。

本试验平板集热器型号为P-G/0.60-L/CK-1.81-1,其主要部件包括:玻璃盖板、吸热板、保温层和外壳。其中玻璃盖板尺寸为 $2\,000\times 1\,000\times 95\text{ mm}$ ,超白布纹钢化玻璃材质,透光率为92%;吸热板为管板式铝制结构,吸收率和发射率分别为95%、5%;保温层采用玻璃纤维制品,厚度50 mm,导热系数为 $0.045\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

### 1.2 测试内容

本试验主要采用热电偶数据采集系统实时监测平板太阳能热水系统各关键测点的温度,并记录测试日的天气情况。

(1)测试参数:集热板表面温度、防冻液进出口温度、储热水箱内水温,测试地点当天环境参数,包括环境温度、风速风向等。

(2)测点布置:平板集热器表面热电偶采用胶布粘合,承压水箱进水管及防冻液循环管路内热电偶采用插孔方式布置,即将管路开小孔插入热电偶探头,使其直接与测试介质接触,并做好密封措施。

A、B两组热水系统测点布置如图2所示,两组集热器分别命名为A(左)和B(右)。其中A1、B1为冷水进口温度;A2、B2为储热水箱内热水温度;A3、B3为循环工质入口温度;A4、B4为循环工质出口温度;A5、A6、A7、A8、B5、B6、B7、B8为集热器表面温度;测点9、10、11为环境温度,其安装位置为距离集热器1.5~10 m内且高于地面1 m的遮阳通风处<sup>[14]</sup>。

积尘称量:以干燥纸巾擦取玻璃盖板表面灰尘,积尘质量为纸巾擦取前后质量差的绝对值。

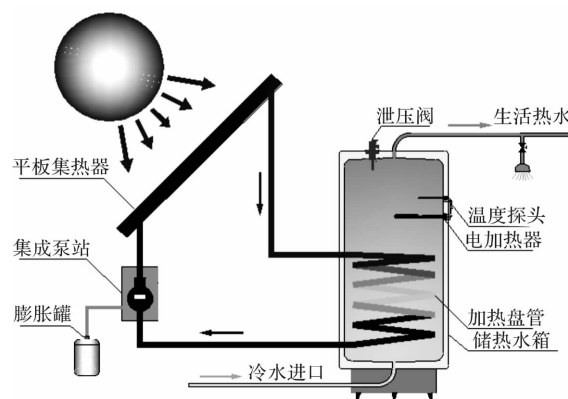


图1 平板太阳能热水系统

Fig. 1 Solar hot water system with flat-plate collector

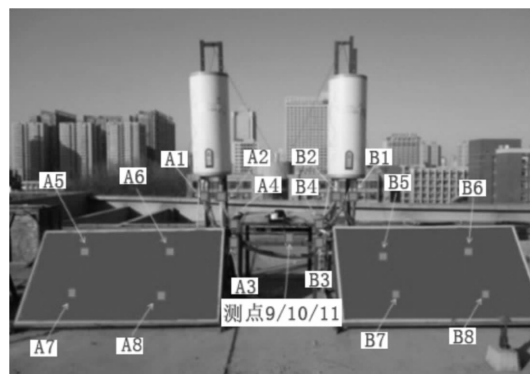


图2 测试系统测点布置图

Fig. 2 Layout of measuring points in test system

## 2 理论分析

### 2.1 积尘对集热系统性能的影响

由光的传播定律可知,入射到积尘集热器表面的太阳光线会发生反射、吸收和透射现象。其中太阳光线一部分照射到积尘表面,另一部分则入射到玻璃盖板表面。由于积尘表面凹凸不平,入射光线会发生漫反射现象;而集热器玻璃盖板表面较光滑,故入射光线会发生镜面反射,如图3所示。

平板型集热器实际运行中涉及到的内部传热过程主要包含盖板外表面与天空的辐射和对流传

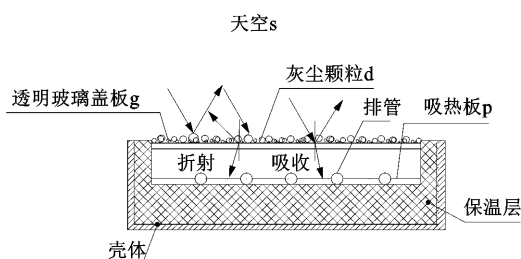


图3 积尘平板集热器盖板表面光线传播原理图

Fig.3 Schematic of light propagation in flat-plate collector with dust accumulation

热,以及盖板内表面和吸热板之间的自然对流、辐射传热以及夹层空气的导热等。由于积尘热阻的影响,在盖板积尘与清洁状态下,集热器顶部总热阻也存在差异,可分别表示为如下两种形式。

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{h_{sg}} + \frac{\delta_g}{\lambda_g} + \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{1}{h_{gp}} \quad (1)$$

$$R_d = \frac{1}{K_d} = \frac{1}{h_{sd}} + \frac{\delta_d}{\lambda_d} + R_{c,dg} + \frac{\delta_g}{\lambda_g} + \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{1}{h_{gp}} \quad (2)$$

其中:  $R$ 、 $R_d$  为清洁/积尘状态下集热器顶部总热阻,  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ;  $K$ 、 $K_d$  为清洁/积尘状态下集热器顶部传热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $\frac{1}{h_{sg}}$ 、 $\frac{1}{h_{sd}}$ 、 $\frac{1}{h_{gp}}$  为天空与透明玻璃盖板、天空与灰尘、透明玻璃盖板与吸热板之间的辐射对流复合换热热阻,  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ;  $\frac{\delta_g}{\lambda_g}$ 、 $\frac{\delta_d}{\lambda_d}$ 、 $\frac{\delta_a}{\lambda_a}$  为透明玻璃盖板热阻、灰尘热阻、夹层空气热阻,  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ;  $R_{c,dg}$  为灰尘与透明玻璃盖板间的接触热阻,  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。各项热阻计算公式详见参考文献[15]。

总的说来,积尘对集热系统性能的影响主要体现在以下两个方面:一方面获得足够的太阳辐射是保证效率的基本前提。由于积尘的遮挡效应,减少了集热器获得的有效太阳辐射量;另一方面由于积尘的存在增加了集热器总热阻,从而减少了集热器对外界环境散失的热量。但由于积尘增加的热阻较集热器顶部总热阻而言相对较小,对外界环境散热的影响不大。因此,由于积尘的影响最终将导致集热器集热效率下降。

## 2.2 不同积尘形态对集热系统性能的影响

在灰尘形成初期,由于自然降落的影响灰尘颗粒之间呈松散状态,均匀铺在盖板表面。这种状态的积尘易被风力吹除,称为松散积尘。由于灰尘颗粒具有吸水性,当积尘表面附近湿度较高,或因昼夜温差较大出现露水时,灰尘颗粒被水分湿润后粘附在一起,原本松散的灰尘呈粘结状态分布。故粘结状态的灰尘厚度、粒径均大于松散

状态。两种积尘形态对比如图4所示,灰尘经直径为1mm的过滤网筛选,初始粒径均为1mm。由于积尘属于非透明固体颗粒,无论是松散还是粘结状态都会对太阳入射光线造成阻挡,使得原本可以到达盖板表面的光线发生漫反射,减少了集热器表面可接收的太阳辐射能。

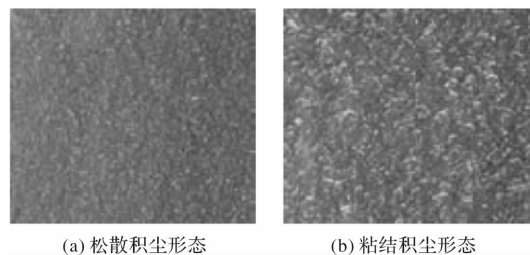


图4 集热器盖板表面松散与粘结积尘形态对比图

Fig.4 Comparison of loose and cohesive dust forms on the glass cover of flat-plate collector

## 3 结果与讨论

### 3.1 两组集热器性能校核对比分析

图5(a)所示为第一次测试A、B两组集热器盖板表面温度和环境温度,均取逐时平均值。由图可知,在A、B两组集热器盖板全部保持清洁的状态下,两组集热器盖板表面温度变化趋势基本一致。随着太阳辐射强度增加,集热器吸收的辐射能增加,集热板表面温度也逐渐上升。当太阳辐射强度逐渐下降,盖板表面温度在16:00之后也开始下降。由图5(b)可以看出A、B两组集热器表面温度的比值保持在0.96~1.06之间,统计测量数据发现两组温度比值的平均值为1.02,而平均差值为0.62℃。

图6(a)所示为第二次测试A、B两组集热器盖板表面温度和环境温度,温度变化趋势与第一次测试基本一致。随着集热板吸收的辐射能增加,集热板表面温度逐渐上升,在15:40之后开始下降。由图6(b)可以看出A、B两组集热器表面温度的比值保持在0.94~1.06之间,统计测量数据发现两组集热器表面温度比值的平均值为1.04,而平均差值为0.33℃。

综合对比图5和图6可知,A、B两组集热器在两测试日内的平均温度为40.98℃,而平均差值为0.48℃,即两组集热器表面温度偏差仅为1.17%。因此就集热器表面温度变化而言,两组集热器性能具有较高的相似程度,可以作为对比试验。

### 3.2 积尘/清洁状态下集热器性能对比试验

为进行集热器积尘/清洁对比试验,试验中A

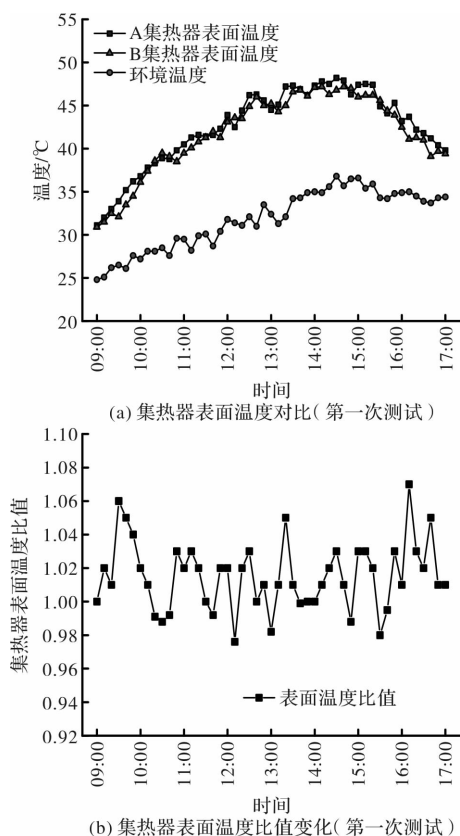


图5 集热器表面温度对比(第一次测试)

Fig. 5 Comparison of surface temperature of collector  
(The first test)

组系统盖板保持为无积尘状态, B组为积尘状态, 同时测定并记录两组系统储水箱内水温、循环工质进出口温度以及集热器表面温度. 测试日天气条件晴, 气温  $17\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 东北风微风.

图7(a)为储热水箱内水温变化, 由图可知在集热器表面清洁(A)与积尘(B)两种状态下, 储热水箱内水温变化趋势基本一致, 但温度大小存在差异. 两组储热水箱内温差如图7(b)所示, 在储热初期温差较小, 上午9点A组最低温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, B组为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右. 到上午10点左右温差逐渐变大, 而后基本维持在 $3\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动. 随着测试的进行, 集热器表面接收太阳辐射量不断累积, 至下午15点左右达到最大值, 此时水箱内水温也达到最高值, 无积尘的A组温度最高达 $43.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而积尘的B组温度最高仅为 $38.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 两组水温最大值之差为 $4.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 由统计数据可知, A、B两组储热水箱内水温差值的平均值约为 $3.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 可见集热器积尘显著降低了储热水箱水温. 在下午15点左右, 随着太阳辐射强度下降, 同时伴随着储热水箱通过边壁向外界散热, 水温呈缓慢下降的趋势.

图8(a)、图8(b)所示为集热器循环工质进出

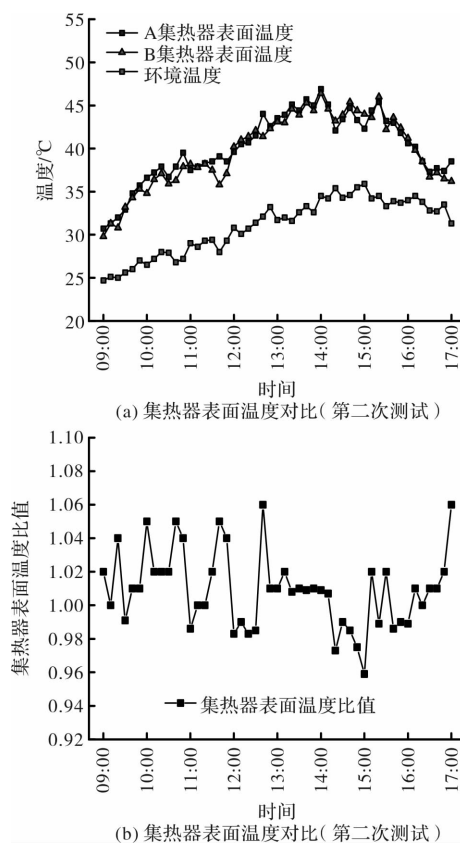


图6 集热器表面温度对比(第二次测试)

Fig. 6 Comparison of surface temperature of collector  
(The second test)

口温度, 由图8可知在集热器表面清洁(A)与积尘(B)状态下, A、B两组系统的循环工质温度变化整体趋势仍大致相同, 并且与文献[16]中所述趋势相吻合. A组循环工质温度整体略高于B组, 且先达到最高温度. A组在14:40左右达到最高温度 $63.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而B组则是在14:50左右达到最高温度 $59.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 随着太阳辐射强度下降, 循环工质温度在16:00之后开始持续下降. 由图8c可以看出两组循环工质各自进出口温差的变化, 温差越大表明换热越强烈. 统计测量数据发现, A、B两组工质温差平均值分别为 $5.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $4.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 两者的差值为 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 均出现在接近正午时刻, 与文献[16]所述相一致. 图8(d)为A、B两组系统循环工质对应的进出口温度差值, 由图可知两组系统入口温差大致在 $-2\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均差值为 $4.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而出口温差在 $1\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均差值为 $3.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 由此可以得出积尘对循环工质入口温度影响大于对出口温度的影响.

图9(a)所示为两组集热器盖板表面温度和环境温度, 由图可知在清洁与积尘状态下, A、B两组集热器表面温度变化趋势大致相同, 随各自系统内循环工质温度变化. A组表面温度在14:40

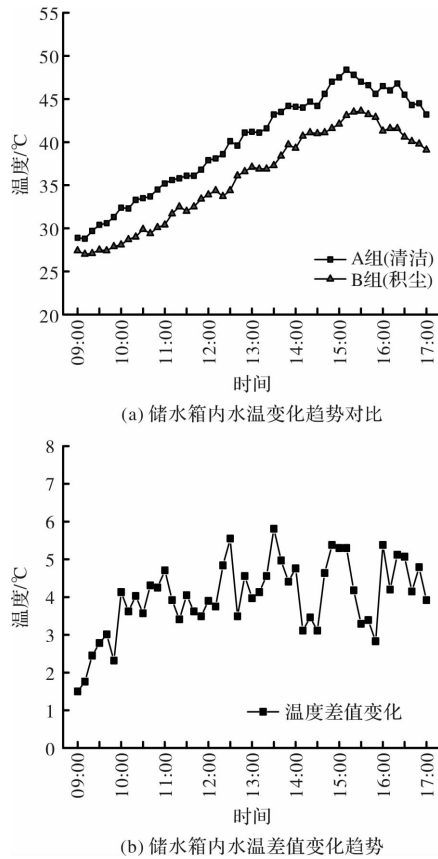


图7 储水箱内水温和温差变化

Fig. 7 Comparison of water temperature and temperature difference in the storage tank

左右达到最高值 48.57 °C, B 组表面温度在 14:50 左右达到最高值 43.81 °C, 与循环工质达到最高温度对应的时刻一致. 并且 A、B 两组集热器表面温度均在 15:40 之后开始有明显下降. 对比图 9(a)和图 8(a)、图 8(b)可以得出, 盖板表面温度更依赖于循环工质温度的变化, 而与环境温度之间关联不大, 与文献[17]中结论相类似. 由图 9(b)可以看出, A、B 两组集热器表面温差的逐时差值在 0~8 °C 范围内变化, 统计测量数据发现, 两组集热器表面温度的平均值分别为 A 组 41.57 °C, B 组 36.83 °C, 两者平均温差值为 4.74 °C, 故积尘降低了集热器表面温度.

### 3.3 集热器积尘对系统效率的影响

综合 A 组(清洁状态)、B 组(积尘状态)测试结果可以得出: 两组储热水箱内水温最大值之差为 4.76 °C, 平均差值约为 3.99 °C; 两组集热器循环工质温度的最大值之差为 4.39 °C, 进口处平均温差为 4.07 °C, 出口处平均温差为 3.42 °C; 两组集热器表面温度最大值之差为 4.75 °C, 平均差值为 4.74 °C. 并且三组测试结果都表明, B 组测点的温度最大值出现时刻均晚于 A 组测点, 推迟约 15 min 左右. 由以上分析可知, 积尘对系统各测

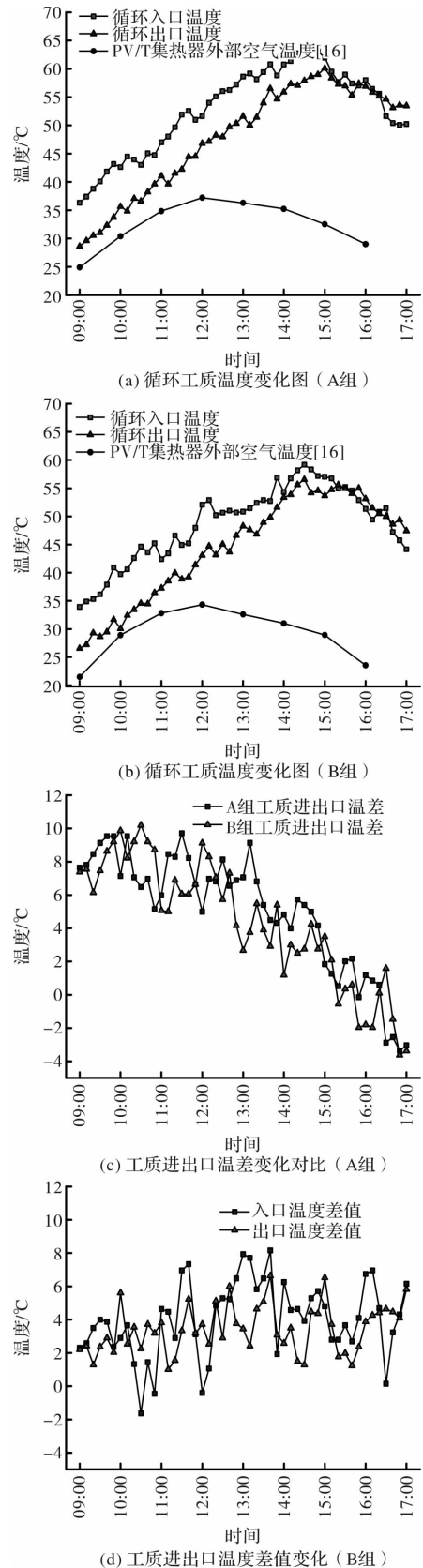


图8 两组集热器循环工质进出口温度变化

Fig. 8 Comparison of import/export temperature of circulating fluid between two groups of collectors

点温度存在不同程度的影响, 以储热水箱内水温为基准, 对系统效率的影响可按如下方法计算. 两组水箱内储水体积均为 100 L, 初始温度  $t_0$  均为

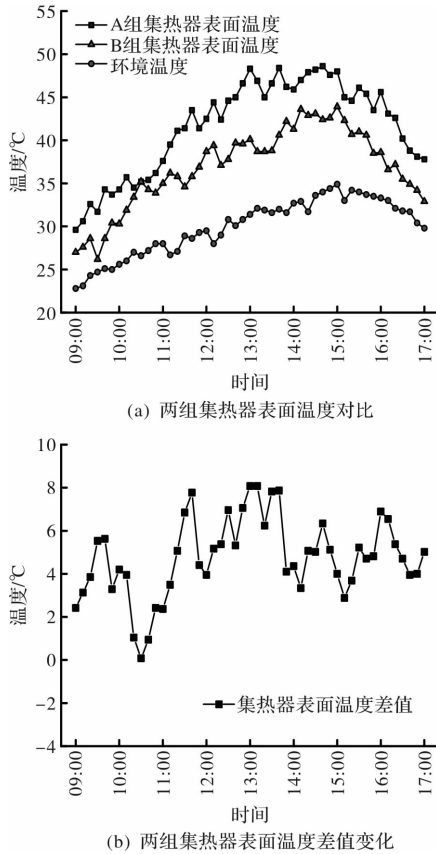


图9 两组集热器表面温度变化

Fig. 9 Comparison of surface temperature of collector between two groups of collectors

20.83 °C. 以系统得热量  $Q$  与集热器采光表面太阳辐照量  $H$  的比值表示系统热效率, 计算如下:

A 组: 得热量:  $Q_a = \rho_w C p_w V (t_A - t_0)$ , 热效率  $\eta_A = Q_a / H_A$ ; B 组: 得热量:  $Q_b = \rho_w C p_w V (t_B - t_0)$ , 热效率  $\eta_B = Q_b / H_B$ . 式中,  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C p_w$  为水的比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $V$  为储热水箱体积,  $\text{m}^3$ ;  $t_A$ 、 $t_B$  为 A、B 两组水箱内热水温度, °C. 定义  $\xi = 1 - \eta_B / \eta_A$  为系统集热性能下降值, 表征积尘对平板太阳能热水系统集热性能的影响程度. 两组系统在相同外界条件下测试, 有  $H_A = H_B$ , 故集热器集热性能下降率可表示为

$$\xi = 1 - \eta_B / \eta_A = 1 - (t_B - t_0) / (t_A - t_0) \quad (3)$$

集热器集热性能下降率随测试时间的变化趋势如图 10 所示. 由于在上午 10 时之前太阳辐射强度较小, 在 9~10 时系统集热性能较弱. 随着时间的推移, 太阳辐射强度不断增加. 此外集热器表面积尘量也在不断增加, 减少了集热器获得的有效太阳辐射量, 但由于灰尘粒径微小, 且测试日内集热器表面二次积尘量有限, 太阳辐射强度增加引起的系统热效率增大程度远远大于该时间段内二次飘尘的累积作用, 故热水系统集热性能总

体上呈现上升的趋势, 系统集热性能下降率  $\xi$  值逐渐变小并最终在 20% 左右波动.

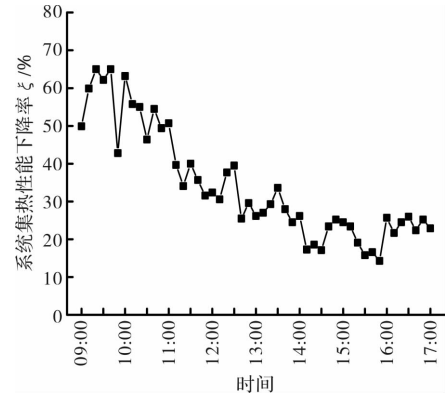


图10 系统集热性能下降率变化趋势图

Fig. 10 Trend of the descent rate in collector performance

定义试验结束前的最后五次数据平均值为当日测试的最终水温  $t_e$ , 以  $t_e$  为基准代入公式(3), 得到系统最终得热量对应的集热性能下降率.

$$\xi_{\text{avg}} = 1 - (t_{eB} - t_0) / (t_{eA} - t_0) \quad (4)$$

式中: 取  $t_A = t_{eA} = 38.01$  °C,  $t_B = t_{eB} = 35.02$  °C. 得到试验结束时  $\xi_{\text{avg}} = 17.40\%$ . 试验结束后, 擦取 B 组集热器表面积尘并称量, 称量结果为  $11.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . 即在集热器表面积尘量为  $11.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  时, 系统集热性能下降了 17.40%. 故太阳能平板集热器积尘对系统集热性能影响十分显著, 不容忽视.

### 3.4 不同积尘量和积尘形态的测试结果分析

#### 3.4.1 灰尘松散状态积尘

本文采用人工布尘的方法, 首先选择路边积累的细小扬尘, 并用直径为 1 mm 的过滤网进行筛选, 以保证初始灰尘粒径为 1 mm. 实验人员站在平板集热器上风向处, 在其上方约 1 m 处均匀布尘, 使灰尘在风力和重力的作用下自然降落至集热器玻璃盖板表面, 得到松散状态的积尘. 布尘完毕后清洁 A 组系统的玻璃盖板至无尘状态, B 组盖板不做处理. 共选取其中五种工况, 对应不同的积尘量. 记录水箱内初始温度(°C), 同样选取试验结束前最后五次采集数据的平均值作为最终水温, 根据公式(4)得到五种工况下的集热性能下降率, 如表 1 所示. 根据表 1 所得结果, 可以得到不同积尘量与集热性能下降率之间的关系, 如图 11 所示.

由图 11 可拟合出松散状态积尘量  $\omega_s$  与集热性能下降率  $\xi$  之间函数关系如公式(5)所示:

$$\xi = 31.8507 \times [1 - \exp(-0.07158\omega_s)] \quad (5)$$

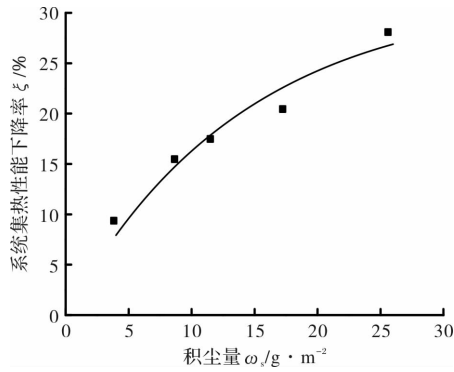


图 11 松散状态积尘量与集热性能下降关系

Fig. 11 Relationship between the amount of loose dust and the decrease of collector performance

其中, 相关系数的平方( $R^2$ )为 0.94. 由拟合曲线可以看出, 积尘降低了平板太阳能集热器的集热效率, 且集热性能下降率随着积尘量的增加不断增大. 曲线斜率开始较大后逐渐减小, 因此在积尘初期对系统集热性能的影响最大.

#### 3.4.2 灰尘粘结状态积尘

采用前述松散积尘的方法布尘后, 在集热器盖板正上方约 2 m 处用喷雾器雾状喷水, 水滴自然下落至玻璃盖板表面, 与积尘接触后自然风干, 得到粘结状态的积尘. 选取其中五种工况, 对应不同的积尘量. 记录试验开始时的水箱初始水温,

计算得到五种工况下的集热性能下降率, 如表 2 所示. 根据表 2 所得结果, 可得到不同积尘量与集热性能下降率之间的关系, 见图 12.

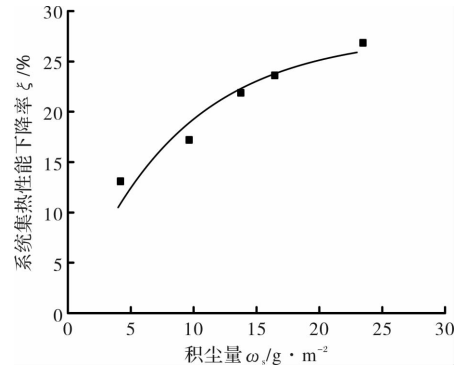


图 12 粘结状态积尘量与集热性能下降关系

Fig. 12 Relationship between the amount of cohesive dust and decrease of collector performance

由图 12 可拟合出粘结状态积尘量  $\omega_s$  与集热性能下降率  $\xi$  之间函数关系如公式(6)所示:

$$\xi = 27.6751 \times [1 - \exp(-0.1191\omega_s)] \quad (6)$$

其中, 相关系数的平方( $R^2$ )为 0.92. 由拟合曲线可以得出, 灰尘粘结积尘与松散积尘具有相似的变化趋势, 粘结积尘同样降低了平板太阳能集热器的集热效率, 曲线斜率开始较大之后逐渐减小, 且集热性能下降率随着积尘量的增加不断地增大.

表 1 松散状态不同工况试验结果

Tab. 1 Experimental results of loose dust under different operating conditions

积尘工况	积尘量 $\omega_s / g \cdot m^{-2}$	初始水温 $t_0 / ^\circ C$	最终水温 $t_{eA} / ^\circ C$	最终水温 $t_{eB} / ^\circ C$	集热性能下降率 $\xi / \%$
1	3.810	17.67	30.14	28.98	9.330
2	8.650	16.25	29.02	27.04	15.45
3	11.58	20.83	38.01	35.02	17.40
4	17.23	13.49	20.21	18.84	20.33
5	25.61	14.85	21.25	19.45	28.12

表 2 粘结状态不同工况试验结果

Tab. 2 Experimental results of bonded dust under different operating conditions

积尘工况	积尘量 $\omega_s / g \cdot m^{-2}$	初始水温 $t_0 / ^\circ C$	最终水温 $t_{eA} / ^\circ C$	最终水温 $t_{eB} / ^\circ C$	集热性能下降率 $\xi / \%$
1	4.110	18.54	31.88	30.15	12.97
2	9.650	17.15	32.51	29.87	17.19
3	13.73	17.82	28.55	26.21	21.81
4	16.45	15.33	24.37	22.24	23.56
5	23.51	13.75	20.18	18.45	26.91

#### 3.4.3 不同积尘状态对集热性能的对比分析

由图 11、12 可以发现两种状态的积尘都会使集热性能下降, 且具有相似的下降趋势, 集热性能下降速度都是先快后慢, 因此要注意积尘初期对系统集热性能的影响.

对比两种积尘状态的测试结果如图 13 所示.

在相同积尘量情况下, 粘结状态的集热性能总是不同程度的低于松散状态. 其原因可归结为, 粘结状态的灰尘厚度、粒径均不同程度大于松散状态, 进而加剧了系统集热性能下降.

因此, 要更加重视集热器表面的粘结积尘, 当有露水或小雨出现时, 容易形成粘结积尘, 需

注意及时清理。

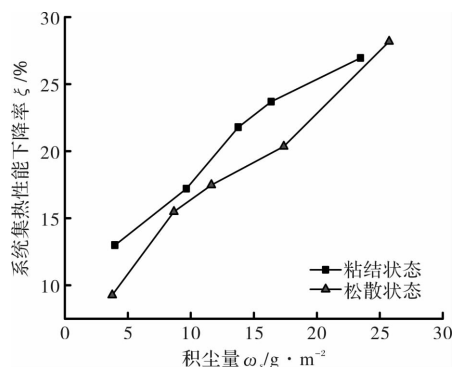


图 13 两种积尘状态测试结果对比

Fig. 13 Comparison of test results between two dust forms

## 4 结论

针对太阳能热水系统积尘进行了现场测试,探究了平板型集热器表面积尘对太阳能集热系统性能的影响,通过试验研究得到以下结论:

(1)在同等外界条件下,以集热器表面积尘量  $11.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  为例,系统得热量显著减少,集热性能下降了  $17.40\%$ ,可见集热器表面积尘对其系统集热性能产生了显著影响。

(2)在松散状态与粘结状态积尘下,分别以五种积尘量工况为基础,得到了不同积尘形态下积尘量与集热性能下降率之间的关系,对太阳能集热系统性能的预测与提高换热效率具有一定的参考意义。

(3)无论何种积尘状态,都存在集热性能下降率随积尘量增大而增大的关系,在积尘初期增长速度较大而后变缓。在相同积尘量情况下,粘结状态积尘的系统集热性能要低于松散状态积尘。雨后积尘形成了粘结现象,进一步降低了系统集热性能。

## 参考文献 References

- [1] 季杰,马进伟,孙炜,等. 一种新型双效太阳能平板集热器的光热性能研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(10):1470-1474.  
JI Jie, MA Jinwei, SUN Wei, et al. Study of thermal performance of a novel dual-function flat plate solar collector[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(10):1470-1474.
- [2] PAUDYAL B R, SHAKYA S R. Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: a case study of Kathmandu[J]. Solar Energy, 2016, 135:103-110.
- [3] SAID S AM, WALWIL HM. Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance[J]. Solar Energy, 2014, 107:328-337.
- [4] LU H, LU L, WANG Y. Numerical investigation of dust pollution on a solar photovoltaic (PV) system

- mounted on an isolated building[J]. Applied Energy, 2016, 180:27-36.
- [5] MEKHILEF S, SAIDUR R, KAMALISARVESTANI M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells[J]. Renew Sustain Energy Rev 2012, 16(5):2920-2925.
- [6] El-Shobokshy M S, HUSSEIN F M. Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells[J]. Solar Energy, 1993, 51(6):505-511.
- [7] HOTTEL H C, WOERTZ B B. The performance of flat-plate solar-heat collectors[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1942, 64(64):91-104.
- [8] A N Imad Jwad Khadhim, Imad Jalil Mehdi, Imad Mutab Muhsson. Periodic cleaning effect on the output power of solar panels[C]//2nd Scientific Conference. Karbala, Iraq: Karbala University, 2014, 116-122.
- [9] CABANILLAS RE, MUNGUIA H. Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules[J]. Renew Sustain Energy, 2011, 3(4):3124.
- [10] 李念平, 马俊, 刘刚, 等. 平板型太阳能集热器表面积尘对其热性能影响的分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(7):1197-1201.  
LI Nianping, MA Jun, LIU Gang, et al. Analysis of the effect of dust accumulation on thermal properties of flat plate solar collectors[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(7):1197-1201.
- [11] 马俊. 积尘对平板型太阳能集热器性能影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
MA Jun. Study on the effect of the performance of flat solar collector by dust[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [12] 侯伟. 积尘对平板型太阳能集热系统性能的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
HOU Yi. The effect of dust accumulation on plate-type solar collectors[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.
- [13] 杨金焕, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(7):1032-1036.  
YANG Jinhuan, MAO Jiajun, CHEN Zhonghua. Calculation of solar radiation on variously oriented tilted surface and optimum tilt angle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(7):1032-1036.
- [14] 全国太阳能标准化技术委员会. 家用太阳能热水系统储水箱技术要求: GB/T 28746-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
National Solar Standardization Technical Committee. Technical requirements for domestic solar water storage system: GB/T 28746-2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [15] HOLMAN J P. Heat transfer [M]. New York: McGraw-hill, 1986:393-394.
- [16] AHMED O K, MOHAMMED Z A. Dust effect on the performance of the hybrid PV/Thermal collector [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2017, 3(3):114-122.
- [17] ADINOYI M J, SAID S A M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules[J]. Renewable Energy, 2013, 60(60):633-636.

(编辑 沈波)