

大气降尘及降水对平板集热器盖板透过率影响的实验研究

王 敏^{1,2}, 李博佳², 徐 伟², 李先庭¹, 张昕宇³, 王博渊²

(1. 清华大学建筑科学技术系, 北京 100084; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013;

3. 国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京), 北京 100013)

摘 要: 平板集热器盖板透过率受大气降尘量的影响下降,进而影响其集热效果,针对该问题对北京地区自然条件下大气降尘、降水量对0°、40°、90°倾角盖板透过率的变化规律进行为期12个月的实验,总结回归出大气降尘、降水综合作用下不同倾角盖板透过率变化的经验公式,公式计算值与实验值的偏差小于6%。以此为基础建议北京地区的太阳能供暖系统在运行期间逐月清洁,全年运行的太阳能热水系统在每年的12月份~次年5月份逐月清洁,以保证系统的实际使用效果。

关键词: 降尘; 降水; 太阳集热器; 盖板透过率; 集热器维护保养

中图分类号: TK511

文献标识码: A

0 引 言

根据国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京)的检测数据统计,太阳能集热系统现场检测的平均运行效率为0.2~0.4,而相同工况下实验室检测的集热器瞬时效率为0.4~0.6。其中,大气降尘导致盖板透过率降低,进而导致集热效率下降,是主要影响因素之一。大气降尘降低盖板透过率的程度受地理位置和气候类型的影响,并与倾角和朝向有关。在气候湿润地区,降雨和降雪对集热器有“自清洁”作用,降尘对集热器盖板透过率影响不大,在美国纽约,每天都清洁的太阳辐射表与2个月不清洁的太阳辐射表相比,辐照度测试结果相差不到1%^[1]。然而在中东的阿联酋等干旱少雨地区,太阳集热器1 a不清洁,热性能会下降40%^[2]。北非的埃及地区不同倾角和朝向的玻璃放置7个月后透过率下降了52.5%~12.4%^[3]。我国的研究显示,平板型太阳集热器在兰州地区自然放置3个月后热性能下降9.69%^[4],在西安地区自然放置12 d后透

过率下降12.3%^[5],在深圳地区积尘量为4.05 g/m²时,集热量下降2%~3%^[6]。

本文在分析大气降尘、降水影响透过率机理的基础上,对北京地区大气降尘量、不同倾角玻璃片透过率变化进行为期12个月的实验,总结大气降尘、降水对盖板透过率影响的全年变化规律,回归出不同倾角盖板透过率与大气降尘量、24 h降水量的经验公式,进而得到不同倾角集热器在应用时全年集热效率受降尘、降水的影响规律,以及应采取的清洁维护策略。

1 大气降尘、降水影响透过率的机理分析

平板型太阳集热器的工作原理可表述为,涂有选择性吸收涂层的集热板吸收透过玻璃盖板的太阳辐射升温,并将热量传递给排管中的传热工质,传热工质吸收热量,温度升高,最后经出口集管流出,将热量带出集热器。其各部分的换热过程如图1所示。

收稿日期: 2016-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0700400)

通信作者: 王 敏(1983—),女,博士研究生、高级工程师,主要从事太阳能热利用方面的研究。minwangbeijing@yahoo.com

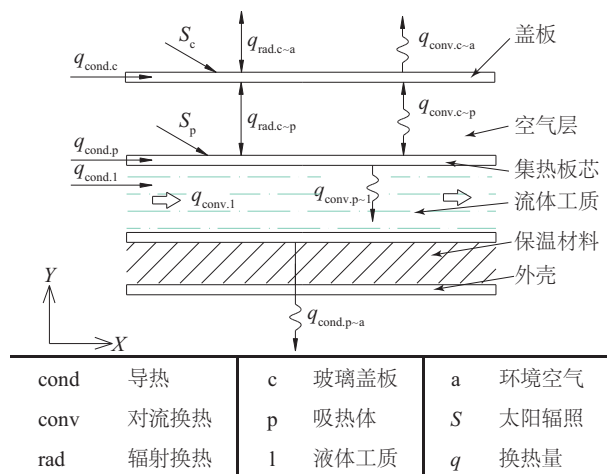


图1 平板型太阳集热器传热过程

Fig. 1 Schema of heat transfer in flat-plate solar collector

根据上述工作原理,集热器盖板透过率是影响集热器得热的重要参数,透过率下降将直接减少集热板吸收的热量,最终导致集热量与集热效率下降。实际运行中,玻璃盖板透过率受大气降尘与降水作用的共同影响,其作用机理可表述为质量为 d 的大气降尘落在集热器盖板上,经过降水量为 r 的雨水冲刷后,在透过率为 τ_c 的干净玻璃盖板表面形成一层透过率为 τ_d 的积尘,使得透过率下降至 $\tau_m = \tau_c \cdot \tau_d$ 。

为确定大气降尘量 d 、降水量 r 对玻璃盖板透过率 τ_m 的影响规律,进而得到集热效率的变化幅度,本研究对北京地区自然环境下的大气降尘量、降水量以及盖板透过率变化进行实验研究。

2 实验介绍

2.1 实验地点

本文的盖板透过率实验在北京市顺义区一座3层建筑的屋面进行,周围无高层建筑遮挡,无明显污染物来源。实验地点北纬 40° ,东经 11° ,平均海拔 35 m,距离北京中心城区约 50 km。气候特征为夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春、秋季短促。全年降水的 75% 集中在夏季。累年平均降水量 571.3 mm,1 月份的平均气温为 -4°C ,月降水量为 2.8 mm,7 月份平均气温为 26.3°C ,平均月降水量为 177 mm。

2.2 实验方法

本文实验包括大气降尘量测量、盖板透过率测量 2 部分。实验时间为 2015 年 4 月~2016 年 3 月,共计 12 个月。透过率实验与大气降尘实验每月同时进行,放置和取回实验试片的时间精确到 0.1 d。实验还同期记录大气降水数据^[7]。大气降尘量实验与透过率实验的方法如下:

1) 大气降尘量

实验按照中国国家标准 GB/T 15265—94《环境空气-降尘的测定-重量法》^[8]进行,采用乙二醇水溶液($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ 纯试剂 100 mL 和纯净水 100 mL 混合)放入内径 15 cm,高 30 cm 玻璃集尘缸进行收集液的湿法采样,用重量法测量环境空气中的降尘。每 30 ± 2 天收集一次灰尘液体,放入坩埚内经蒸发、 105°C 恒温烘干、常温冷却称重后用分析天平称量质量。大气降尘实验地点及设备见图 2。

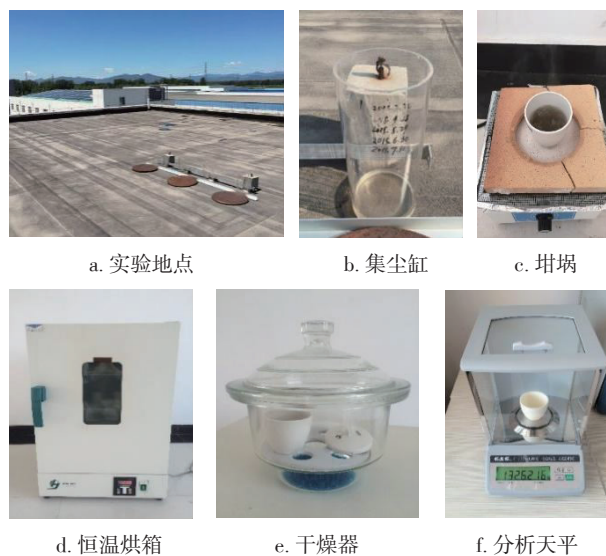


图2 大气降尘实验地点及设备

Fig. 2 Spot and equipment of dustfall experiment

降尘量的计算方法为:

$$d = \frac{w_1 - w_0 - w_c}{s \times n} \times 30 \times 10^4 \quad (1)$$

式中, d ——降尘量, $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot 30 \text{ d})$; w_1 ——坩埚、乙二醇灰尘溶液蒸发并在 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 干燥恒重后的质量, g; w_0 ——坩埚在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 干燥后的质量, g; w_c ——乙二醇水溶液蒸发并在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 干燥恒重后的质量, g; s ——集尘缸开口面积, cm^2 ; n ——采样时间, 0.1 d。

2) 盖板透过率实验

以 50 mm×50 mm×3 mm 尺寸的玻璃试片代替平板集热器盖板。玻璃试片按 0°、40°、90°这 3 个角度放置。每个月测试当月透过率变化和自首月放置至实验当月的累积透过率变化,分别测试 2 个玻璃试片。如图 3 所示,透过率用分光光度计测量,每个玻璃片的透过率测试 2 遍,以减小试验误差。

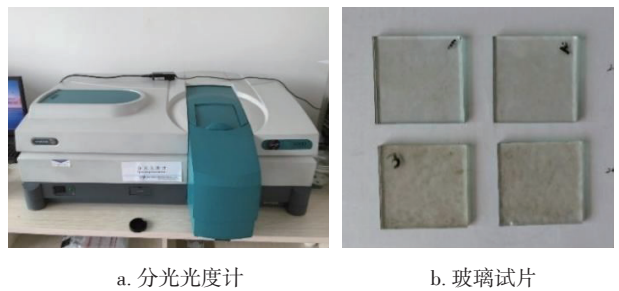


图3 分光光度计及玻璃试片

Fig. 3 Spectrophotometer and testing samples

表1 测试仪器列表

Table 1 Test instrument list

| 项目 | 设备名称 | 型号 | 量程 | 分辨率 | 测量精度 |
|----------------|-------|-----------|-------------|---------|---------|
| 降尘量 <i>d</i> | 分析天平 | JJ224BC | 0~220 g | 0.1 mg | ±0.2 mg |
| 集尘缸内径 <i>L</i> | 游标卡尺 | — | 0~150 mm | 0.02 mm | — |
| 透过率 <i>τ</i> | 分光光度计 | Cary-5000 | 300~2500 nm | 0.0001 | 0.0008 |

测量灰尘溶液质量所用的分析天平精度为 0.2 mg,按正态分布考虑,取置信概率 $p=95.45\%$,对应的包含因子 $k=2$ 。其测量结果的标准不确定度 $u(w)$ 为 0.1 mg。实验中测得的集尘量最小约 40 mg,则其测量结果的相对不确定度 $U(w)$ 为 0.25%。

因此,根据式(2)计算得到的降尘量 d 的相对合成不确定度 $U(d)=0.25\%$ 。

2.3.2 透过率的不确定度

测量透过率 τ 使用的分光光度计精度为 0.0008,按正态分布考虑,取置信概率 $p=95.45\%$,对应的包含因子 $k=2$,其测量结果的标准不确定度 $u(\tau)$ 为 0.0004。实验中测得的最小透过率约为 0.6,则其测量结果的相对不确定度 $U(\tau)$ 为 0.0667%。

3 实验结果

根据图 4 所示实验结果可看出,实验地点全年

2.3 不确定度分析

实验使用的测量仪器主要包括分析天平、游标卡尺、分光光度计,其主要参数见表 1。

2.3.1 大气降尘量的不确定度

大气降尘量的相对合成不确定度由式(2)计算:

$$U(d)=\sqrt{U(s)^2+U(w)^2}$$
 (2)

式中, $U(d)$ ——大气降尘量的合成不确定度; $U(s)$ ——集尘缸开口面积的不确定度; $U(w)$ ——灰尘溶液质量的不确定度。

测量集尘缸内径所用游标卡尺的分辨力为 0.02 mm,按平均分布考虑,取置信概率 $p=95\%$,对应的包含因子 $k=1.65$ 。集尘缸内径 L 测量值为 139 mm,其测量结果的标准不确定度 $u(L)$ 为 0.006 mm,相对不确定度 $U(L)$ 为 0.0044%。由测量的内径计算集尘缸开口面积,相对不确定度 $U(s)$ 为 0.0062%。

大气降尘总量为 58.653 t/(km²·30 d),其中 4 月份降尘最多为 9.718 t/(km²·30 d);9 月份降尘最少为 2.254 t/(km²·30 d)。全年降水季节性变化明显,冬季(12 月份~次年 3 月份)基本无降水,夏季(7~9 月份)降水丰富,其中 7 月份全年降水最多。

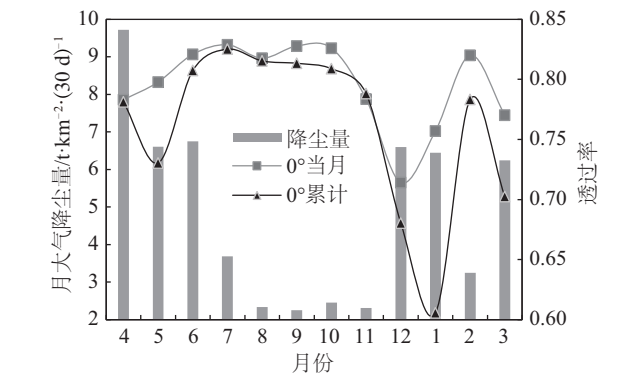


图4 月降尘量与水平面透过率

Fig. 4 Result of monthly dust fall and transmittance on horizontal surface

玻璃试片透过率在大气降尘与降水的共同影响下,大体呈季节性变化规律,即每年的12月份~次年3月份,大气降尘量大且降水量少,透过率随降尘量的增大而降低的趋势较为明显(2月份除外);7~9月份,大气降尘量小且降水量大,透过率变化很小且数值较高,相对变化值最大仅为1.9%;10~11月份为第1过渡季,大气降尘量与降水量都相对较小,透过率下降缓慢;4~6月份为第2过渡季,大气降尘量与降水量都相对较大,透过率波动较大。

综合全年实验数据,6月份和2月份累计透过率与上月相比出现明显回升,但降水总量并无明显变化,需进一步分析降水强度的影响。图5柱状图标示的数字是每月24 h降水量的最大值,可以看出6月份和2月份的24 h最大降水量分别是12.1和7.3 mm,其中2月份的7.3 mm是12 h降水量。而5月份和1月份的24 h降水量分别是3.0和0.7 mm。气象学上将12 h降水 $5 \text{ mm} < r_{12} < 15 \text{ mm}$,24 h降水 $10 \text{ mm} < r_{24} < 25 \text{ mm}$ 的降水过程称为中雨, $15 \text{ mm} \leq r_{12} < 30 \text{ mm}$, $25 \text{ mm} \leq r_{24} < 50 \text{ mm}$ 的降水过程称为大雨。由此,6月份和2月份的透过率上升可归因于当月发生了强度较大的降水。由于月总降水量并不能体现降水强度,在分析大气降尘、降水对玻璃盖板透过率影响时,用24 h最大降水量 r_{24} 代替月总降水量更为合理。

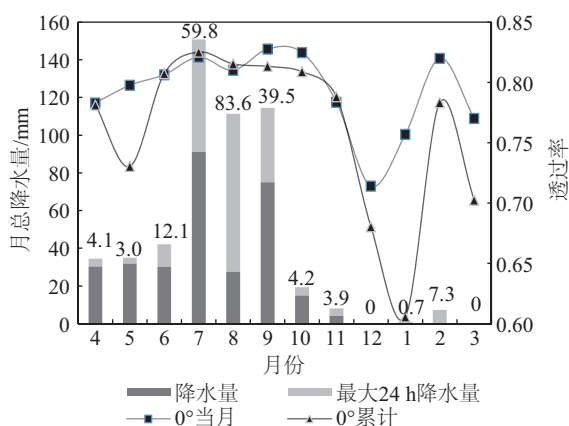


图5 月降水量与水平面透过率

Fig. 5 Result of monthly rainfall and transmittance on horizontal surface

实验期间,0°、40°、90°玻璃试片的当月透过率与累计透过率变化见图6和图7,干净状态下玻璃试片 $\tau_m = 0.8497$ 。试片的透过率下降程度随倾角 θ

的增大而减小,变化趋势为非线性。40°透过率与0°透过率较相近。

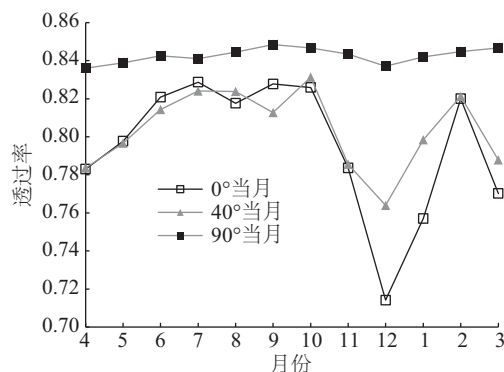


图6 不同倾角的当月透过率变化

Fig. 6 Result of monthly transmittance on different tilted surface

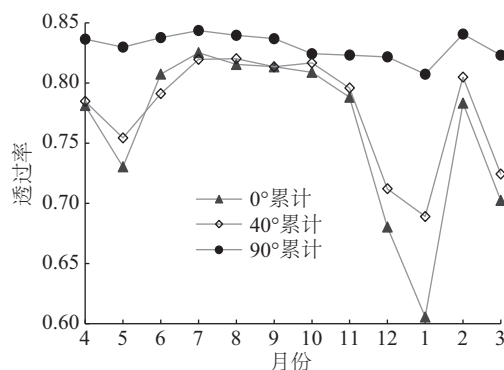


图7 不同倾角的累计透过率变化

Fig. 7 Result of accumulated transmittance on different tilted surface

4 大气降尘量、24 h降水量与透过率的关系分析

总结实验规律发现,随着大气降尘的累积,玻璃试片透过率逐渐降低,然而其降幅随玻璃试片表面灰尘的增加而下降,近似于负指数的幂函数关系式。因此,对水平面的实验数据进行回归,得到的关系式为:

$$\tau_m = \tau_c \cdot e^{-0.0194D_{r,n}} \quad (3)$$

$$D_{r,n}(0) = d_d R_n (R_1 R_2 \cdots R_{n-1} + R_2 R_3 \cdots R_{n-1} + \cdots + R_{n-2} R_{n-1} + 1) \quad (4)$$

式中, $D_{r,n}(0)$ ——0°表面受降水影响的综合降尘量, t/km^2 ; d_d ——计算期内大气降尘日平均值, t/km^2 ; R ——降水作用因子,表示该次降水后留在试片上降尘量的百分比。

通过分析实验数据发现,该因子大小 R 与降水强度有关,若用 24 h 降水量 r_{24} 表征降水强度,当 $r_{24} < 3 \text{ mm}$ 时,其对积尘的冲刷作用并不显著,而 $r_{24} > 7 \text{ mm}$ 时,由于积尘基本已被冲刷殆尽,此时降水强度继续增大对留在玻璃试片上的灰尘量影响也不再显著。因此用分段函数回归降水强度对降水作用因子的影响,对应的 R 值可按表 2 线性插值得到。

| 表 2 降水因子 R 取值表 | | | | |
|-----------------------------|---|---|------|------|
| Table 2 Rainfall factor R | | | | |
| r_{24} | 0 | 3 | 7 | >7 |
| R | 1 | 1 | 0.12 | 0.12 |

在式(4)基础上对 40° 和 90° 倾角的透过率数据进行回归,得到的关系式为:

$$D_{r,n}(\theta) = (0.84 \cos \theta + 0.16) D_{r,n}(0) \tag{5}$$

根据前述实验中测得的北京地区逐月大气降尘量与降水量数据,结合式(3)~式(5)对玻璃试片透过率变化情况进行计算,可得 0° 、 40° 、 90° 的玻璃试片透过率计算值,将计算值与实验值进行对比(见图 8),可以看出二者的相对误差小于 6%。因此该经验公式能较好地拟合自然状态下降尘降水等环境因素对集热器盖板透过率的影响,拟合结果计算较为准确,可用于进一步分析研究中。

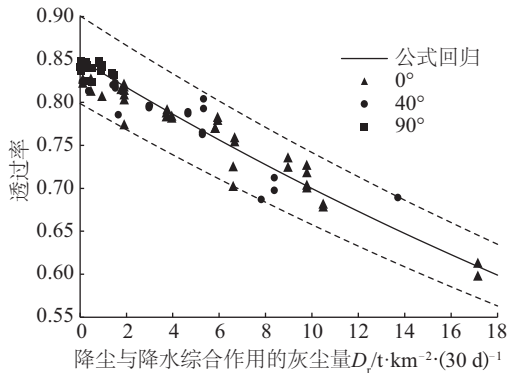


图8 实验数据与公式回归数据的比较
Fig. 8 Comparison of regress data and experimental data

5 大气降尘量、降水量对平板集热器应用的影响

根据本文的实验结果(见图 9)可看出,安装在北京地区应用的太阳集热器,每年 12 月份~次年

5 月份集热器盖板透过率下降较大。当安装倾角为 40° 时,自然状态下 1 a 未清洁的集热器,盖板透过率月最大降幅为 18.9%。其中,11 月份~次年 3 月份透过率下降最多,平均下降 12.3%,7~9 月份透过率下降最小,平均下降 3.8%。

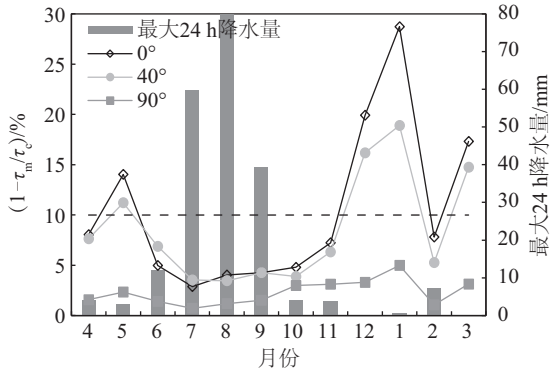
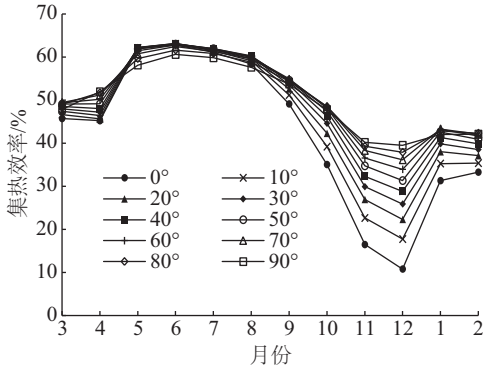
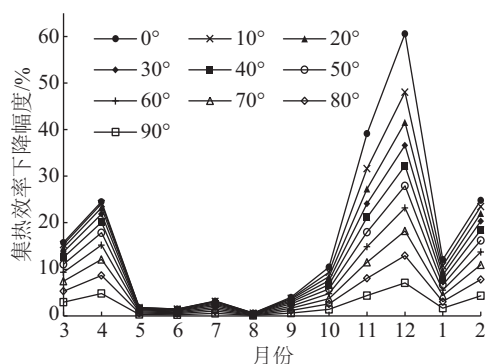


图9 北京地区自然状态下盖板透过率的下降率
Fig. 9 Transmittance decreasing rate in Beijing under nature dust fall

当集热器与建筑结合应用时,安装倾角受建筑条件的限制而不同。根据式(3)~式(5)可计算出集热器盖板在不同安装倾角 θ 下,透过率受大气降尘及降水的全年变化规律。进一步在透过率变化规律的基础上,本文利用太阳集热器热性能模型计算了平板型集热器在实验期间的逐月集热效率及受降尘及降水影响的集热效率下降率。如图 10 所示,集热器的安装倾角越小,集热效率受降尘降水作用影响程度越大。当 $\theta < 50^\circ$ 时,北京地区 12 月份~次年 5 月份的平均集热效率相对于清洁状态下下降超过 10%,进而影响太阳能集热系统冬季的应用效果。因此,在北京地区应用太阳集热器,应在 12 月份~次年 5 月份维护盖板清洁,尤其安装倾角 $\theta < 50^\circ$ 的太阳集热系统,推荐在运行期间逐月清洁集热器表面灰尘。



a. 平板型太阳集热器集热效率变化



b. 平板型太阳集热器集热效率下降率

图 10 北京地区不同倾角的平板型太阳集热器集热效率变化及与清洁状态相比的集热效率下降率

Fig. 10 Flat-plate solar collector efficiency of different tilted angles and decreasing rate comparing with clean state in Beijing

6 结 论

通过大气降尘、降水影响透过率的机理分析,以及对北京地区大气降尘量、不同倾角玻璃片透过率变化的实验研究,得到以下结论:

1)集热器盖板的透过率变化受大气降尘和降水双因素共同影响。每年的 12 月份~次年 3 月份,大气降尘量大且降水量少,透过率降低趋势明显;7~9 月份,受降水影响,透过率变化较小;10~11 月份大气降尘量较小,透过率变化不大;4~6 月份为过渡季,透过率波动较大。

2)用最大 24 h 降水量代替月总降水量分析其对透过率的影响更为合理。

3)降水量、降尘量与盖板透过率的关系可由式(3)~式(5)表示,利用该经验公式计算的玻璃试片透过率与实验值相比,偏差在 6%以内,计算结果较为准确。

4)安装倾角小于 50°平板型太阳能集热系统,其受大气降尘及降水影响,在每年的 12 月份~次年 5 月份的平均集热效率相对于清洁状态下超过 10%。因此建议在每年的 12 月份~次年 5 月份期间对太阳集热器逐月进行清洁,以提高集热系统集热量,保证太阳能热利用系统的实际使用效果。

5)上述结论基于实验结果的定量回归得到,大气降尘与降水对平板型集热器盖板透过率的影响

规律及对集热效率的影响结果可用于与北京地区气候类似的地区。对于其他地区,可采用本研究的实验方法,得出适用于当地气候条件的大气降尘与降水对平板型集热器盖板透过率的影响规律,进而得出对集热效率的影响结果。

[参考文献]

- [1] Michalsky J J, Perez R, Stewart R, et al. Design and development of rotating shadowband radiometer solar radiation/daylight network [J]. Solar Energy, 1988, 41 (6): 577—581.
- [2] El-Nashar A M. Seasonal effect of dust deposition on a field of evacuated tube collectors on the performance of a solar desalination plant [J]. Desalination, 2009, 239 (1): 66—81.
- [3] Elminir H K, Ghitass A E, Hamid R H, et al. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47 (18-19): 3192—3203.
- [4] 刘建波. 太阳集热器热性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [4] Liu Jianbo. A research for the thermal performance of solar collector [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [5] 侯 祎, 李安桂. 自然积尘对平板太阳集热器热性能影响研究 [J]. 建筑科学, 2015, 31(4): 68—71.
- [5] Hou Yi, Li Angui. Influence of dust accumulation on performance of flat-plate solar collector [J]. Building Science, 2015, 31(4): 68—71.
- [6] 马 俊. 积尘对平板型太阳集热器性能影响的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [6] Ma Jun. Study on the effect of the performance of flat plate solar collector [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [7] 国家气象信息中心. 中国气象数据网 [EB/OL]. <http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0012.0001.html>, 2016-03-31.
- [7] National Meteorology Data Center. China Meteorology Data Center [EB/OL]. <http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0012.0001.html>, 2016-03-31.
- [8] GB/T 15265—94, 环境空气-降尘的测定-重量法 [S].
- [8] GB/T 15265—94, Ambient air- Determination of dustfall-Gravimetric method [S].

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF DUSTFALL AND RAINFALL TO COVER TRANSMITTANCE OF FLAT-PLATE SOLAR COLLECTORS

Wang Min^{1,2}, Li Bojia², Xu Wei², Li Xianting¹, Zhang Xinyu³, Wang Boyuan²

(1. *Department of Building Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;*

3. *National Center for Quality Supervision and Testing of Solar Water Heating Systems (Beijing), Beijing 100013, China)*

Abstract: Nature dustfall influences on transmittance of flat-plate solar collectors cover and will furtherly influences on its working efficiency. Based on this, 12 months experimental studies on flat-plate solar collectors cover transmittance reduction by accumulated dustfall and rainfall was investigated in Beijing. An accuracy of 6% empirical formula with tilt angle was developed, which could be used to make maintenance strategy of solar thermal system operating in Beijing or other areas with similar climate.

Keywords: dust; rainfall; solar collector; cover transmittance; maintenance strategy of solar collectors