

不同吸热涂层平板集热器的热性能衰减研究

杨鲁伟¹, 李 明^{1,2}, 高文峰², 徐永锋², 王 伟¹, 韩友华¹

(1. 云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明 650500; 2. 云南师范大学太阳能研究所, 昆明 650500)

摘 要: 为分析不同吸热涂层平板集热器的热性能衰减,以蓝膜、阳极氧化和黑铬集热器为研究对象,基于太阳集热器热性能测试平台,对集热器热性能及空晒老化性能进行测试。分别测试吸热涂层样品的吸收比和发射比,分析空晒前后平板集热器吸收比、发射比和瞬时效率的变化情况及影响因素。研究表明:在温度约为18℃的工况下,蓝膜集热器热性能为75.5%,黑铬为73.4%,阳极氧化为69.3%,吸热涂层的光学性能是影响平板集热器热性能的主要因素。平板集热器瞬时效率、吸收比和发射比变化情况的依存关系为 $\Delta\eta \approx 9.553\Delta\alpha - 1.213\Delta\varepsilon_p$,该式可衡量平板集热器的热性能衰减度。通过空晒老化性能实验可知,提高平板集热器吸热涂层的抗腐蚀、抗氧化能力,可延长集热器的使用寿命。

关键词: 平板太阳能集热器; 太阳能吸收涂层; 热性能; 吸收比; 发射比

中图分类号: TK519

文献标志码: A

0 引 言

平板集热器因其具有结构简单、价格低廉、使用寿命长等优点,在供暖和太阳能中低温热利用等方面应用广泛。平板集热器种类很多,本文选用蓝膜、黑铬和阳极氧化3种平板集热器进行实验研究。国内外学者^[1-2]给出了平板集热器的研究进展和热性能测试方法。陈广明等^[3]对比了3种集热器的热性能,指出聚合材料平板集热器质量更轻、效率高的优势。国内外学者^[4-5]分析了太阳集热器热性能的影响因素。Sadasuke等^[6]对非稳态条件与控制流量下的平板型空气集热器进行了研究,得出了流量、风速等因素的变化对集热器出口温度的影响。李念平等^[7]实验分析了积尘对平板集热器瞬时效率的影响,给出积尘量和效率变化值之间的关系。周凡等^[8]得出缩小管间距、增大管直径是提高平板集热器抗冻性能的方法,并验证了所提出的平板集热器冷冻数学模型的正确性。

目前对平板集热器热性能衰减影响因素的研究多局限于编程模拟,且对不同吸热涂层的新、老化平板集热器热性能的研究较少,因此有必要根据实验过程针对不同吸热涂层的新、老化平板集热器热性能进行实验测试和理论分析,研究不同种类平板集热器空晒前后热性能的衰减及影响因素。本文对新、老化蓝膜、阳极氧化

和黑铬3种平板集热器进行实验研究,分析不同吸热涂层的光学性能对平板集热器热性能的影响。

1 测试样品与方法

实验所用蓝膜、阳极氧化和黑铬3种平板集热器的结构完全相同,基本结构如图1所示。

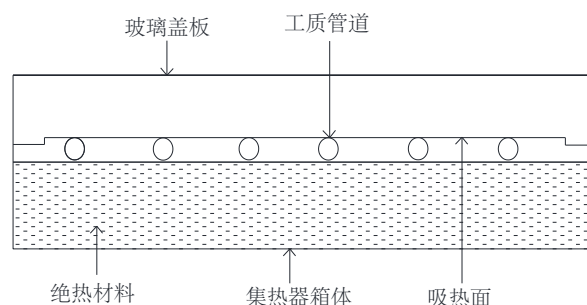


图1 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram

透明面盖通常由玻璃制造,其作用是让太阳辐射透过并且减少对流和热辐射损失。吸热涂层可吸收入射的太阳辐射能,并把能量传递给工质。箱体有支撑和固定的作用,为减少热量损失通常会加装绝热材料。表1、表2列出3种平板集热器的参数。根据GB/T 4271—2007^[9],分别对3种平板集热器的热性能进行测试。测

收稿日期: 2017-08-29

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAA02B00); 中国-老挝可再生能源开发与利用联合实验室(2015DFA60120)

通信作者: 李 明(1964—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能光热、光伏及制冷方面的研究。lmllldy@126.com

试中 6 块平板集热器的总面积均为 2 m²,工质为水,流量为 0.04 kg/s,测试地点为昆明市云南师范大学太阳能研究所,测试时间为 2017 年 5~6 月份。

表 1 平板集热器相同参数

Table 1 Same parameters of flat-plate collector	
名称	参数
尺寸/mm	2000×1000×80
总面积/m ²	2
集管材质	铜管(2根)
支管材质	铜管(7根)
集管直径/mm	22×0.6
支管直径/mm	10×0.5
背面保温材料/mm	玻璃纤维棉 30
侧面保温材料/mm	乙烯条 25
边框	铝型材
背板/mm	彩钢板 0.31
盖板/mm	超白布纹钢化玻璃 3.2
防漏材质	专用皮条

表 2 平板集热器不同参数

Table 2 Different parameters of flat-plate collector			
参数	蓝膜	阳极氧化	黑铬
吸收比/%	96~98	94~97	95~97
发射比/%	约 5	约 13	约 10

目前针对平板集热器热性能的测试研究,国内外最常用的是稳态测试方法,稳态测试方法对各项指标有严格要求。测试的必要条件为工作状态的集热器处于准稳态,非准稳态下的实验数据不能用于计算平板集热器的瞬时效率。表 3 给出了实验周期内测量参数的偏差范围,当参数处于此范围内时,可判定集热器处于稳态工况。在实验期间,周围环境的风速应不高于 4 m/s。稳态数据点的实验周期应该包括至少 12 min 的预备期和至少 12 min 的稳态测试期。

表 3 实验参数范围

Table 3 Scope of experimental parameters		
参数	参数范围	允许偏离范围
太阳辐照度/W·m ⁻²	≥700	±50
环境空气温度/℃	14~23	±1
工质质量流量/kg·s ⁻¹	0.04	±1%
进口工质温度/℃	18~58	±0.1

测试系统主要有平板集热器、制冷罐、冷水机组、管道阀门、恒温水箱、加热器、循环水泵和数据采集设备等,该系统如图 2 所示。图 3 为系统的部分设备实物图。

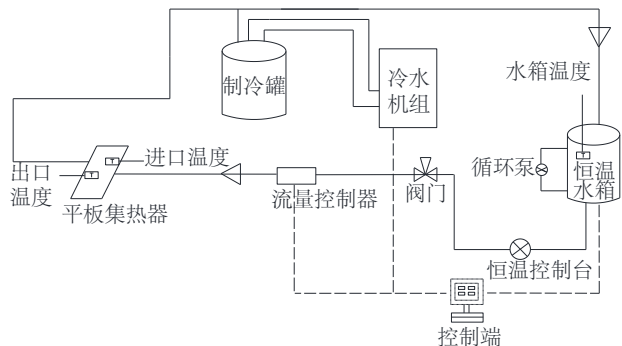


图 2 系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of system

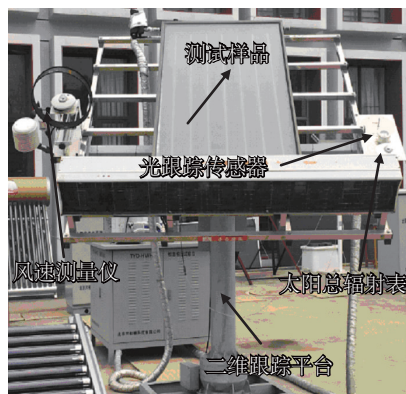


图 3 系统实物图

Fig. 3 Physical image of system

2 热性能计算

2.1 瞬时效率

平板集热器的热性能测试是基于稳态工况条件下,描述其传热过程,建立测试的数学模型。入射到集热器上的太阳辐射能等于工质带走的热能与集热器散失到周围环境的热能之和。根据此原理,建立在测试条件下的热平衡方程^[10]。

在稳态工况下平板集热器的有效能量输出应当等于吸收的辐射能与热损失之差:

$$Q = A_c [G - U_L (T_{p,m} - T_a)] \quad (1)$$

式中, Q ——集热器获得的有用功率, W。

工质获得的有效功率也可由式(2)计算:

$$Q = mc_f \Delta T \quad (2)$$

式中, m ——工质的质量流量, kg/s; c_f ——集热器进出

口传热工质平均温度的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ΔT ——集热器进出口工质的温度之差, $^\circ C$ 。

以集热器总面积 A_c 为参考时, 接收的太阳辐射功率为 $A_c G$, 则集热器瞬时效率为:

$$\eta = \frac{Q}{A_c G} = \frac{mc_i \Delta T}{A_c G} \quad (3)$$

式中, η ——平板型太阳能集热器的瞬时效率; A_c ——集热器的总面积, m^2 ; G ——瞬时太阳辐射量, W/m^2 。

瞬时效率 η 也可由归一化温差 T_i^* 的函数来表示:

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L T_i^* \quad (4)$$

$$T_i^* = \frac{t_i - t_a}{G} \quad (5)$$

式中, F_R ——集热器的热迁移因子; $(\tau\alpha)_e$ ——面盖透射率和吸热面吸收比的乘积; U_L ——总热损系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; T_i^* ——归一化温差, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$; t_i ——集热器进口处的工质温度, $^\circ C$; t_a ——集热器周围环境的温度, $^\circ C$ 。

假设 U_L 、 F_R 和 $(\tau\alpha)_e$ 是常数, 则由式(4)和式(5)可看出, 以 η 为纵坐标, T_i^* 为横坐标的曲线是一条直线, 直线的截距等于 $F_R(\tau\alpha)_e$, 斜率为 $-F_R U_L$ 。在测试过程中, 已知工质的质量流量 m , 集热器进出口工质的温差和瞬时太阳辐射能, 用式(3)可求出瞬时效率, 再根据环境温度 t_a 和归一化温差 T_i^* , 可按式(4)整理出效率曲线。

2.2 总热损失系数

平板集热器的热损失主要是由顶部辐射对流热损、底部和边缘导热热损 3 部分组成。利用总热损失系数^[11]可简化集热器的计算。集热器顶部热损失系数的计算公式为:

$$U_t = \left(\frac{1}{h_{p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{c-a} + h_{r,c-a}} \right)^{-1} \quad (6)$$

式中, U_t ——顶部热损失系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_{p-c} ——吸热涂层面板与面盖之间的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; $h_{r,p-c}$ ——吸热涂层面板到面盖的辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; h_{c-a} ——面盖与环境之间的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; $h_{r,c-a}$ ——面盖到环境的辐射换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

底部热损失系数的计算公式为:

$$U_b = \frac{k}{L} \quad (7)$$

式中, U_b ——底部热损失系数, $W/(m^2 \cdot K)$; k ——底部绝热材料的导热系数, $W/(m \cdot K)$; L ——底部绝热层厚度, m 。

边缘热损失系数的关系式为:

$$U_e = \left(\frac{k}{L} \right)_e \left(\frac{A_e}{A_c} \right) \quad (8)$$

式中, $(k/L)_e$ ——边缘绝热材料导热系数与厚度之比; A_e/A_c ——集热器 4 个侧壁总面积与集热器面积之比, 当比值很小时, U_e 可忽略; U_e ——边缘热损失系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

所以, 平板集热器的总热损失系数为:

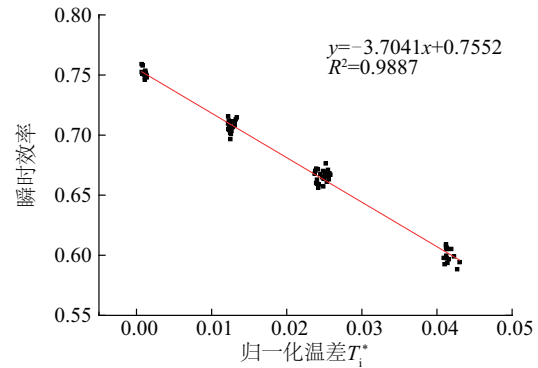
$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (9)$$

式中, U_L ——总热损失系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

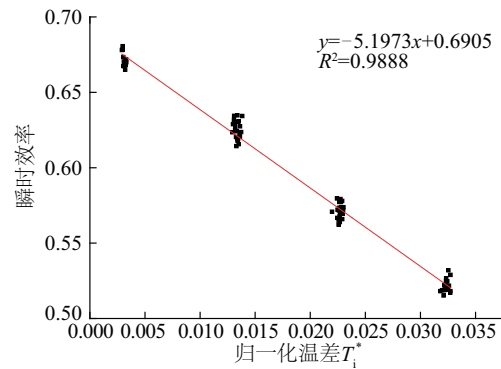
3 结果分析与讨论

3.1 集热器瞬时效率

利用 Origin 软件对 4 个稳态工况的数据进行拟合, 而曲线拟合度通常是由决定系数 R^2 来说明拟合的优劣。 R^2 越接近 1, 说明相关方程式的参考价值越高; R^2 越接近于 0, 说明相关方程式的参考价值越低。蓝膜平板集热器归一化温差对应的瞬时效率曲线图, 如图 4 所示。



a. 新蓝膜



b. 老化蓝膜

图4 蓝膜平板集热器瞬时效率曲线图

Fig. 4 Instantaneous efficiency curve images of blue film flat-plate collector

图4中2条曲线的决定系数均接近1,说明以上方程式对曲线的拟合度较高。由图4可知:新蓝膜平板集热器的最高瞬时效率为75.5%;老化蓝膜平板集热器的最高瞬时效率为69.1%,瞬时效率下降了6.4%,说明蓝膜集热器老化后对热性能的影响最高。同样地,阳极氧化平板集热器归一化温差对应的瞬时效率曲线图,如图5所示。

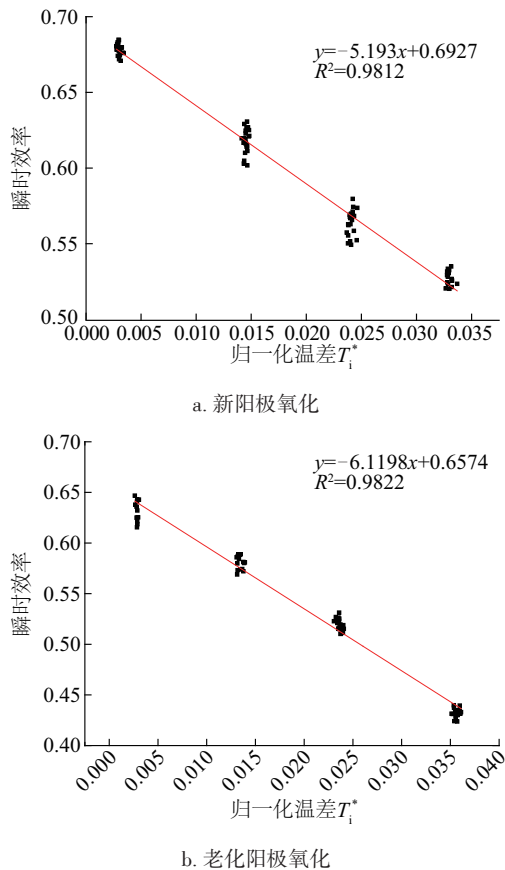


图5 阳极氧化平板集热器瞬时效率曲线图

Fig. 5 Instantaneous efficiency curve images of anode oxidation flat-plate collector

由图5可知:新阳极氧化平板集热器的最高瞬时效率为69.3%;老化阳极氧化平板集热器的最高瞬时效率为65.7%,阳极氧化平板集热器在自然环境中发生老化,瞬时效率下降了3.6%,说明阳极氧化集热器老化后对热性能的影响较低。黑铬平板集热器归一化温差对应的瞬时效率曲线图,如图6所示。

由图6可知:新黑铬平板集热器的最高瞬时效率为73.4%;老化黑铬平板集热器的最高瞬时效率为67.1%,黑铬平板集热器经空晒后老化,瞬时效率下降了6.3%,说明黑铬集热器老化后对热性能的影响较高。

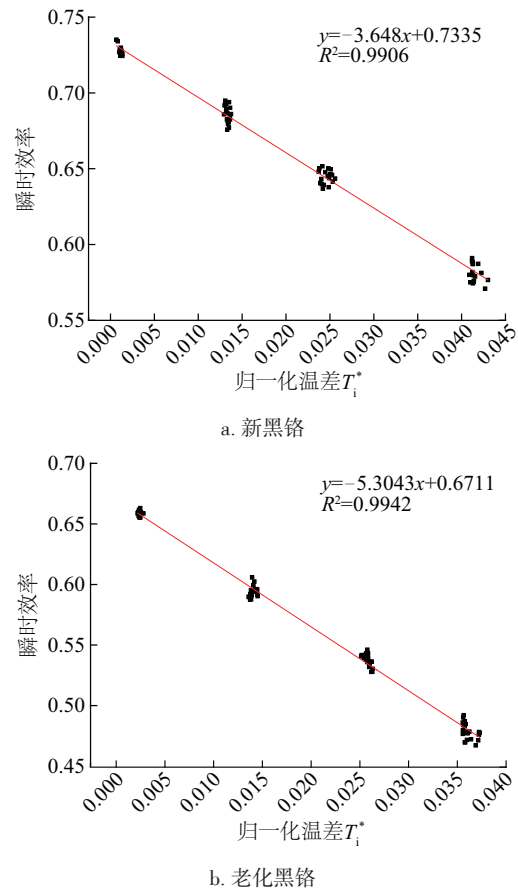


图6 黑铬平板集热器瞬时效率曲线图

Fig. 6 Instantaneous efficiency curve images of black chrome flat-plate collector

综合图4~图6,说明平板集热器的工作温度越高,瞬时集热效率越低。表4对比了3种平板集热器的各项性能指标。

表4 3种平板集热器的性能对比

Table 4 Performance comparison of three flat-plate collector

集热器种类	瞬时效率	热损系数	热性能衰减度
蓝膜	最高	次之	最高
阳极氧化	最低	最高	最低
黑铬	次之	最低	次之

下文从吸热涂层的吸收比和发射比讨论不同种类平板集热器热性能的降低。

3.2 吸热涂层吸收比和发射比

吸热涂层的光学性能是影响平板集热器热性能的重要因素。虽然波长为300~1200 nm的光谱集中了约80%的太阳辐射能^[12],但测试涂层的吸收比波长区间为200~2500 nm。为分析不同吸热涂层平板集热器老化后的热性能,分别测试蓝膜、阳极氧化和黑铬3种吸热

涂层材料的吸收比和发射比。为减少由取样带来的实验误差,随机从吸热涂层材料的不同位置截取 5 块样品分别进行测试。同时,在选取材料样品的过程中发现,只有老化蓝膜平板集热器的膜层出现一些点状脱落现象,而其他平板集热器经过检查未发现膜层脱落。

样品的吸收比是由分光光度计按照相关规定测量得出的,发射比按照材料法向发射比规定在 80 ℃的条件下进行测试。由于测试样品的大小和形状基本相同,所以在样品图 7 中各涂层材料仅给出一块样品。表 5 给出了各涂层材料样品吸收比和发射比的平均值。

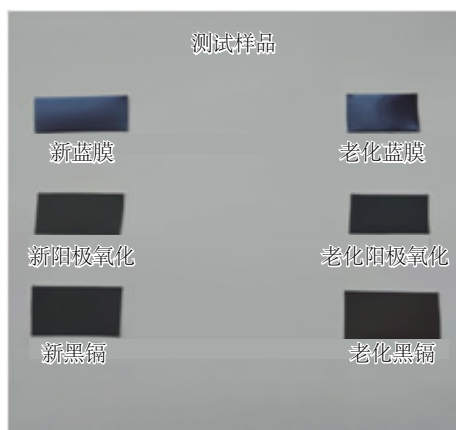


图 7 不同平板集热器吸热涂层样品

Fig. 7 Samples of heat-absorbing coating for different flat-plate collectors

表 5 不同吸热涂层材料的吸收比和发射比

Table 5 Absorptivity and emissivity of different heat-absorbing coating materials

涂层名称	吸收比(平均值)/%	发射比(平均值)/%
新蓝膜	93.88	6.40
老化蓝膜	92.88	9.00
新阳极氧化	94.21	19.80
老化阳极氧化	93.30	24.00
新黑铬	93.84	8.80
老化黑铬	92.79	12.20

由表 5 可看出:3 种平板集热器吸热涂层材料的吸收比差值约为 1%,但发射比差距较大。吸热涂层材料的吸收比和发射比是影响平板集热器热性能的主要因素,而且当不同平板集热器吸热涂层的吸收比差值较小时,涂层的发射比过高会严重降低吸热涂层的光学性能。

为找出平板集热器热性能的降低与老化吸热涂层

光学性能之间的关系,在 2016 年 10 月份~2017 年 5 月份将平板集热器放置在户外环境下进行空晒,3 种平板集热器的热性能都有不同程度的衰减。表 6 分别列出了 3 种老化和新平板集热器之间热性能参数的变化量。

表 6 3 种平板集热器热性能参数的差值

Table 6 Differences of thermal performance parameters of three kinds of flat-plate collectors

集热器名称	瞬时效率差/%	吸收比差/%	发射比差/%
新/老化蓝膜	6.4	1.00	2.60
新/老化阳极氧化	3.6	0.91	4.20
新/老化黑铬	6.3	1.05	3.40

对表 6 中蓝膜集热器和阳极氧化集热器的 3 种参数差值进行拟合,将瞬时效率差记为 $\Delta\eta$,将吸收比差记为 $\Delta\alpha$,将发射比差记为 $\Delta\varepsilon_p$,通过计算得出一次函数关系式:

$$\Delta\eta \approx 9.553\Delta\alpha - 1.212\Delta\varepsilon_p \quad (10)$$

吸收比差的系数数值较大,这与平板集热器热性能主要依赖吸热涂层的吸收比的结论相吻合。将黑铬平板集热器吸收比差和发射比差代入式(10)进行验证,得出瞬时效率差约为 5.9%。代入式(10)得出的瞬时效率差与实验测试得出的瞬时效率差这二者的绝对误差为 0.4%,相对误差为 6.3%,相对误差较小,说明拟合得出的公式对研究蓝膜、阳极氧化和黑铬这 3 种平板集热器热性能的衰减是适用的。

根据上述实验分析说明,蓝膜平板集热器的热性能最高,这种吸热涂层虽然制造成本较高,耐腐蚀性和与基板的结合力度较差,使用寿命较短,但其制备工艺基本不会产生污染,也是光学性能较高的一种吸热涂层。阳极氧化平板集热器的热性能最低,这种吸热涂层制造成本较低,但其耐腐蚀性和与基板的结合力度较好,使用寿命次之。黑铬平板集热器的热性能次之,耐腐蚀性居中,但其使用寿命较长,与基板的结合力度较高,这种吸热涂层的制备工艺会产生污染水源的重金属离子,导致生产成本增大。

3 种平板集热器空晒老化后热性能衰减的原因稍有不同。蓝膜吸热涂层与基板的结合力较低,取样时可看到有腐蚀痕迹。涂层被腐蚀露出基板和产生杂质,导致其对红外波长的光谱吸收下降;吸热涂层表面粗糙度增加和化学成分的变化,导致高温时的热辐射增强,以

上原因造成蓝膜集热器热性能的降低。黑铬涂层与基板的结合力一般,取样时未看到腐蚀痕迹,可能是由于涂层被氧化或腐蚀改变了其表面的分子结构,所以才使其对相同波段的太阳光谱吸收减弱,增大了高温时的热辐射,降低了黑铬集热器的热性能。阳极氧化涂层抗腐蚀能力较强,其表面的多孔氧化层分子结构较为稳定,但在高温高压环境下涂层表面会产生微小裂纹,导致涂层光学性能下降,降低了阳极氧化集热器的热性能。

4 结 论

本文针对蓝膜、阳极氧化和黑铬3种平板集热器的热性能在昆明地区进行了户外测试和空晒老化实验,研究以上平板集热器空晒前后的热性能,通过实验分析得出:

1)蓝膜集热器瞬时效率为75.5%,其热性能的衰减度为6.4%;黑铬集热器瞬时效率为73.4%,其热性能的衰减度为6.3%;阳极氧化瞬时效率为69.3%,其热性能的衰减度为3.6%。

2)根据实验数据,拟合得出平板集热器热性能、吸收比和发射比三者变化量的依存关系为: $\Delta\eta \approx 9.553\Delta\alpha - 1.212\Delta\varepsilon_p$,该公式可用来衡量不同平板集热器热性能衰减度的大小。

3)在稳定平板集热器吸热涂层高吸收比和低发射比的基础上,提高涂层的抗腐蚀、抗氧化能力和与基板的结合力,可以延长集热器的使用寿命。

〔参考文献〕

- [1] PANDEY K M, CHAURASIYA R. A review on analysis and development of solar flat plate collector[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2017, 67: 641-650.
- [2] 侯宏娟,王志锋,杨勇平. 太阳集热器热性能测试方法研究进展[J]. 太阳能学报, 2009, 30(8): 1043-1048.
HOU H J, WANG Z F, YANG Y P. Development performance test methods for solar collector[J]. Acta energiae solaris sinica, 2009, 30(8): 1043-1048.
- [3] CHEN G, DOROSHENKO A, KOLTUN P, et al. Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors[J]. Solar energy, 2015, 115: 577-588.
- [4] HUSSEIN H M S, MOHAMAD M A, EL-ASFOURI A S. Theoretical analysis of laminar-film condensation heat transfer inside inclined wickless heat pipes flat-plate solar collector[J]. Renewable energy, 2001, 23(3): 525-535.
- [5] 高留花,赵军,高腾. 吸热板参数对平板太阳集热器热性能的影响[J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 2054-2059.
GAO L H, ZHAO J, GAO T. Effect of absorber plate parameter on thermal performance of flat plate solar collector[J]. Acta energiae solaris sinica, 2014, 35(10): 2054-2059.
- [6] ITO S, KASHIMA M, MIURA N. Thermal performance of solar air collectors[J]. Journal of solar energy engineering, 2003, 128(3): 354-359.
- [7] 李念平,马俊,刘刚,等. 平板型太阳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 N P, MA J, LIU G, 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.
- [8] ZHOU F, JI J, CAI J Y, et al. Experimental and numerical study of the freezing process of flat-plate solar collector[J]. Applied thermal engineering, 2017, 118: 773-784.
- [9] GB/T 4271—2007, 太阳能集热器热性能试验方法[S].
GB/T 4271-2007, Test methods for the thermal performance of solar collectors[S].
- [10] 张鹤飞,俞金娣,赵承龙,等. 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: 111.
ZHANG H F, YU J D, ZHAO C L, et al. Theory of solar thermal conversion and computer simulation [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004: 111.
- [11] 孔祥强,林琳,李瑛,等. 平板太阳集热器热性能模拟分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(8): 1404-1409.
KONG X Q, LIN L, LI Y, et al. Simulation of thermal performance of flat-plate solar collectors[J]. Acta energiae solaris sinica, 2013, 34(8): 1404-1409.
- [12] SHI Y Y, NA H Y. The design, preparation and evaluation of the solar spectral selective absorbing film system design, preparation and evaluation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 15-16.

RESEARCH ON ATTENUATION OF THERMAL PERFORMANCE OF FLAT-PLATE SOLAR COLLECTORS WITH DIFFERENT HEAT-ABSORBING COATINGS

Yang Luwei¹, Li Ming^{1,2}, Gao Wenfeng², Xu Yongfeng², Wang Wei¹, Han Youhua¹

(1. School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: To analyze the attenuation of thermal performance of flat-plate solar collectors (FPSCs), the thermal performance of different FPSCs were researched in the present study. Based on the solar collectors testing platform, the thermal performances and exposure aging properties of different flat-plate solar collectors (FPSCs) with different coatings (the blue-film coating, the anode oxidizing coating or the black chromium coating) were tested. And emissivity and absorptivity of the heat-absorbing coating for different FPSCs were also tested. Meanwhile, the variation relationship about absorptivity, emissivity, and instantaneous efficiency were given. And the influence factors of thermal performance of different FPSCs were analyzed. It was shown that the thermal performance of the blue-film coating FPSC is 75.5%, the black chromium coating is 73.4%, and the anode oxidizing coating FPSC is 69.3% in approximate temperature of 18 °C. Furthermore, the optical performance of heat-absorbing coating is the main factor of influencing thermal performance of FPSCs. The relational expression among instantaneous efficiency, absorptivity and emissivity is: $\Delta\eta \approx 9.553\Delta\alpha - 1.213\Delta\varepsilon_p$. This equation can be used to calculate the attenuation of thermal performance of FPSC. The results of exposure aging experiment showed the service life of FPSCs can be improved by increasing abilities of the anti-corrosion and anti-oxidation abilities of coating.

Keywords: flat solar collectors; solar selective absorbing coatings; thermal performance; absorptivity; emissivity