

Test Method for the Thermal Performance of Medium Temperature Solar Collector

Lei Zhang, Conghui Wang, Bojia Li, Min Wang, Tao He, Xinyu Zhang*, Ruicheng Zheng

National Center for Quality Supervision and Testing of Solar Water Heating Systems (Beijing), China Academy of Building Research, Beijing
Email: zxyhit@163.com

Received: Dec. 8th, 2016; accepted: Dec. 25th, 2016; published: Dec. 28th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on Chinese national standard "Test methods for the thermal performance of solar collectors GB/T4271" and test results from two different types of medium temperature solar collector, the test method for the thermal performance of medium temperature solar collector was suggested, and the expression for the thermal performance of medium temperature solar collector was given. The method will guide the thermal performance test for medium temperature solar collector.

Keywords

Medium Temperature Solar Collector, Thermal Performance

中温太阳能集热器热性能测试方法研究

张磊, 王聪辉, 李博佳, 王敏, 何涛, 张昕宇*, 郑瑞澄

中国建筑科学研究院国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京), 北京
Email: zxyhit@163.com

收稿日期: 2016年12月8日; 录用日期: 2016年12月25日; 发布日期: 2016年12月28日

*通讯作者。

文章引用: 张磊, 王聪辉, 李博佳, 王敏, 何涛, 张昕宇, 郑瑞澄. 中温太阳能集热器热性能测试方法研究[J]. 可持续能源, 2016, 6(6): 112-121. <http://dx.doi.org/10.12677/se.2016.66012>

摘要

在《太阳能集热器热性能试验方法》GB/T 4271的基础上, 结合对两台不同类型的中温真空管型太阳能集热器的测试数据, 提出了中温太阳能集热器的热性能测试方法的建议, 给出了中温太阳能集热器的热性能结果表达方式, 可以用于指导中温太阳能集热器热性能的测试。

关键词

中温太阳能集热器, 热性能

1. 引言

随着我国太阳能热利用产业的快速发展, 太阳能热利用已经由低温应用向中高温领域拓展。目前, 已有不少企业和科研单位在研究开发、生产工作温度在 100℃ 以上的中温太阳能集热器, 并且已经有相当数量的中温太阳能集热器应用在空调、工业系统工程中。中温太阳能集热器的热性能与系统的性能密切相关, 因此评价中温太阳能集热器热性能就显得非常重要。目前国内关于太阳能集热器热性能测试所用的标准为《太阳能集热器热性能试验方法》GB/T 4271 [1], 该标准规定了平板集热器的最高进口温度不高于 70℃, 真空管集热器的最高进口温度比环境温度高 40℃, 由于中温太阳能集热器的工作温度均高于 100℃, 本文将在 GB/T 4271 [1]基础上, 参照新修订的国际标准 ISO 9806:2013 [2], 结合国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京)的测试经验, 给出一种可以准确测试中温集热器热性能的方法。

2. 太阳能集热器热性能测试原理与方法

2.1. 太阳能集热器瞬时效率的计算

太阳能集热器瞬时效率是指在稳态条件下, 特定时间间隔内由传热工质从特定的集热器面积上带走的能量与同一时间间隔内入射在该集热器面积上的太阳能之比, 亦即集热器实际获得的有用功率与集热器接收的太阳辐射功率之比。

实际获得的有用功率 Q 由式(1)计算:

$$Q = mc_f \Delta T \quad (1)$$

式中, c_f ——为与平均工质温度相对应的比热值, 单位: J/(kg·℃);

m ——为工质的流量, 单位: kg/s;

ΔT ——工质的温升, 单位: ℃。

法向入射时, 集热器接收的太阳辐射功率 J 为:

$$J = AG \quad (2)$$

式中, A ——为太阳能集热器的面积, 可以是总面积 A_G , 也可以是采光面积 A_a , 单位: m²;

G ——为集热器平面上的太阳辐照度, 单位: W/m²。

由此, 太阳能集热器瞬时效率 η 为:

$$\eta = \frac{Q}{AG} \quad (3)$$

2.2. 稳态太阳能集热器热性能测试及效率表示方法

2.2.1. 稳态试验条件

根据公式(1)~(3)，为了确定太阳能集热器的效率，需要对集热器面积，集热器采光面总辐照度，散射辐照度，集热器周围空气的温度和风速，传热工质流量和集热器出口温度进行测量。

GB/T 4271 [1]对测试期间以上参数变化提出了要求。具体如下：

1) 总辐照度 G 不得小于 700 W/m^2 ，总辐照度的变化小于 $\pm 50 \text{ W/m}^2$ ，散射辐照度 G_d 不应大于总辐照度的 30%。

2) 集热器周围空气风速的准确度应为 $\pm 0.5 \text{ m/s}$ 。测试期间，集热器周围的环境平均风速应小于 4 m/s 。

3) 传热工质的流量应根据集热器面积设定在 $0.02 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右。在每个测试周期内，流量应稳定在设定值的 $\pm 1\%$ 以内。不同测试周期的流量变化应不超过设定值的 $\pm 10\%$ 。测试周期的概念见 2.2.2。

4) 最低进口温度控制在与环境温度之差在 $\pm 3 \text{ K}$ 以内，最高进口温度设定在 70°C (平板型太阳能集热器) 和 80°C (真空管型太阳能集热器)，中间两个进口温度均匀地取在上述低温与高温之间。

GB/T 4271 [1]对于稳态工况进行了定义，以上各个试验参数偏离它们在试验周期内的平均值不超过表 1 规定的范围，则可以认为在给定的试验周期内集热器处于稳态工况，ISO 9806:2013 [2]对于稳态工况的规定也与此类似。

对于测试用传感器的要求如下：

1) 采用 ISO 9060 [3]中规定的一级总辐射表来测量来自太阳和天空的全部辐射。

2) 环境空气风速的测量准确度应为 $\pm 0.5 \text{ m/s}$ 。

3) 测量工质流量的准确度应为 $\pm 1\%$ 。

4) 测量集热器周围空气温度和集热器进、出口传热工质温度的准确度应为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

2.2.2. 测试步骤

根据 GB/T 4271 [1]的要求，太阳能集热器测试应在晴朗的天气条件下进行，相应的测试条件满足表 1 的要求，试验结果有效。

在集热器的正常工作温度范围内，平板型太阳能集热器和真空管型太阳能集热器最低点进口温度取在与环境温度之差在 $\pm 3 \text{ K}$ 以内，平板型太阳能集热器最高进口温度设定在 70°C 左右，真空管型太阳能集热器最高进口温度应高于环境温度 40°C 。中间的两个工质进口温度均匀地取在上述低温与高温之间。中温太阳能集热器的工作温度均在 100°C 以上，其最高温度工作温度的选取应为集热器制造厂商的明示的最高工作温度。

GB/T 4271 [1]规定，对于每个工质进口温度，至少取四个独立的稳态数据点。稳态数据点的测试周期应包括至少 12 分钟的预备期和至少 12 分钟的稳态测量期。四个稳态数据点是否满足中温太阳能集热器的热性能评价，将通过试验数据进行验证。

Table 1. Permitted range for measured parameters during test period

表 1. 试验周期内测量参数的允许偏离范围

参数	平均值允许偏离范围
太阳辐照度	$\pm 50 \text{ W/m}^2$
环境空气温度	$\pm 1 \text{ K}$
环境风速	$< 4 \text{ m/s}$
工质质量流量	$\pm 1\%$
集热器进、出口工质温度	$\pm 0.1^\circ\text{C}$

2.2.3. 太阳能集热器效率的表示方法

在 GB/T 4271 [1]和 ISO 9806:2013 [2]中规定集热器的瞬时效率应利用最小二乘法进行曲线拟合得出, 应根据拟合的紧密程度来选择一次拟合或二次拟合。只有在 a_2 为负数时, 不选用二次拟合, 是因为 a_2 为负数时, 从能量平衡角度与实际情况不符。

以归一化温差 T^* 为参考的瞬时效率方程公式为:

一次拟合:

$$\eta = \eta_0 - UT^* \quad (4)$$

或二次拟合:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T^* - a_2 G T^{*2} \quad (5)$$

式中, η ——集热器瞬时效率, 无量纲;

η_0 ——集热器瞬时效率截距, 无量纲;

U ——集热器总热损系数, 单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

T^* ——归一化温差, 单位: $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ 。

a_1 ——以 T^* 为参考的系数, 单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

a_2 ——以 T^* 为参考的系数, 单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^2)$ 。

当使用集热器进口温度 t_i 时, 归一化温差 T^* 可表示为:

$$T_i^* = \frac{t_i - t_a}{G} \quad (6)$$

当使用传热工质平均温度 t_m 时, 归一化温差 T^* 可表示为:

$$T_m^* = \frac{t_m - t_a}{G} \quad (7)$$

式中, $t_m = t_i + \frac{\Delta T}{2}$

在《平板型太阳能集热器》GB/T 6424-2007 [4]和《真空管型太阳能集热器》GB/T 17581-2007 [5]中规定集热器要根据 η_0 和 U 来评定太阳能集热器的性能, 对于平板型太阳能集热器, 要求 η_0 应不低于 0.72 和 U 应不大于 $6.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; 对于真空管型太阳能集热器, 无反射器集热器 η_0 应不低于 0.60 和 U 应不大于 $3.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 来判定是否合格, 有反射器集热器 η_0 应不低于 0.50 和 U 应不大于 $2.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, 具体如表 2 所示, 因此在低温集热器热性能测试时均采用一次拟合。目前市场上各个检测机构的报告也是给出一次拟合的太阳能集热器效率曲线。

2.3. 动态太阳能集热器效率表示方法

因为稳态测试方法对于实验过程中天气条件要求比较高, 因此在 EN 12975-2: 2006 [6]中除了稳态测试方法, 还有提出了一种对测试条件稳定性要求不高的太阳能集热器热性能动态测试方法。表 3 给出了动态测试和稳态测试方法对试验条件要求的差别[7]。

从表 2 可以看出, 动态测试对太阳辐照度的限制大大放宽, 对总辐照度的偏差和散射辐射占总辐射比例均没有限制。而且整个测试过程至少要满足 4 个典型日(1 天晴朗、1 天多云和 2 天多云间晴)的气象条件才能完成。

动态法太阳能集热器的瞬时效率方程公式为:

Table 2. Requirement for the thermal performance of solar collector
表 2. 太阳能集热器热性能的技术要求

集热器类型	技术要求
平板型太阳能集热器	$\eta_0 \geq 0.72$; $U \leq 6.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$
真空管型太阳能集热器	无反射器: $\eta_0 \geq 0.60$; $U \leq 3.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$
	有反射器: $\eta_0 \geq 0.50$; $U \leq 2.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$

Table 3. Test condition comparison between dynamic and stable test method
表 3. 动态测试和稳态测试的试验条件要求对比

参数	稳态测试		动态测试	
	条件	偏差范围	条件	范围
太阳总辐照度	>700 W/m ²	±50 W/m ²	>300 W/m ²	×
散射辐射的比例	<30%	×	×	×
环境温度	×	±1 K	×	×
环境风速	<4 m/s	×	×	×
集热器进口温度	测试要求温度	±0.1 K	测试要求温度	±1 K
工质流量	0.02 kg/(s·m ²)	±1%	0.02 kg/(s·m ²)	±1%

×——表示对此项无特殊要求。

$$\eta = \eta_b \frac{G_b}{G} + \eta_d \frac{G_d}{G} + c_6 u - c_1 \frac{t-t_a}{G} - c_2 G \left(\frac{t-t_a}{G} \right)^2 - c_3 \frac{t-t_a}{G} - c_4 \frac{E_L - \sigma T_a^4}{G} - c_5 \frac{1}{G} \cdot \frac{dt_m}{dt} \quad (8)$$

式中, η_b ——直射辐射集热器效率值, 无量纲;

η_d ——散射辐射集热器效率值, 无量纲;

c_1 ——集热器进出口平均温度等于环境温度时的热损系数, 单位: W/(m²·K);

c_2 ——集热器热损的温度相关参数, 单位: W/(m²·K²);

c_3 ——集热器热损的风速相关参数, 单位: J/(m³·K);

c_4 ——集热器热损的长波辐射相关参数, 无量纲;

c_5 ——单位面积的有效热容, 单位: J/(m²·K);

c_6 ——集热器效率曲线截距的风速相关参数, 单位: s/m;

$\frac{dt_m}{dt}$ ——温度的变化率, 无量纲。

根据国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京)的多年测试经验, 要满足动态的测试条件, 周期大约 2~3 个月, 而采用稳态测试法, 一个晴朗的天气即可完成一台太阳能集热器的热性能测试实验。

2.4. 稳态与动态太阳能集热器热性能测试方法比较

国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京)的研究成果[7]表明: 对于给定的工况, 太阳能集热器的稳态测试方法和动态测试方法对于太阳能集热器的热性能表征差别不大。为提高测试效率, 本研究采用稳态法进行太阳能集热器热性能测试。

3. 中温太阳能集热器热性能测试数据分析

选取热管式真空管型中温太阳能集热器和 U 形管式真空管型中温太阳能集热器作为研究对象。

3.1. 热管式真空管型中温太阳能集热器

选择的热管式真空管型中温太阳能集热器规格为 $\Phi 100 \times 2000 \times 6$ ，集热器采光面积为 1.20 m^2 ，集热器总面积为 1.58 m^2 。

该集热器共测试 8 个工况，其中 1~5 工况满足 GB/T 4271 [1] 要求，进口温度控制在 $22.6^\circ\text{C} \sim 71.7^\circ\text{C}$ 之间，均匀选取 5 个测试点，此外还进行了 3 个工况的测试，集热器进口温度分别为 86.5°C 、 100.6°C 和 126.1°C 。

按照 GB/T 4271 [1] 的规定，分别使用一次拟合和二次拟合方法得出太阳能集热器的热性能效率曲线，如图 1 所示。

一次拟合效率方程为：

$$\eta = 0.674 - 2.310T^* \quad (R^2 = 0.962) \quad (9)$$

二次拟合效率方程为：

$$\eta = 0.665 - 1.231T^* - 0.013GT^{*2} \quad (R^2 = 0.972) \quad (10)$$

将测试工况点带入方程 9 和 10，并与实测值进行比较，得到图 2。

从图 1 和图 2 可以看出，按照 GB/T 4271 标准规定工况计算，一次拟合和二次拟合效率曲线拟合程度 R^2 均较好，两种拟合方法集热效率计算值与实测值偏差较小，可以准确的表达中温太阳能集热器热性能。

对全部测试数据，分别使用一次拟合和二次拟合方法得出太阳能集热器的热性能效率曲线，如图 3 所示。

一次拟合效率方程为：

$$\eta = 0.724 - 3.788T^* \quad (R^2 = 0.965) \quad (11)$$

二次拟合效率方程为：

$$\eta = 0.672 - 1.229T^* - 0.022GT^{*2} \quad (R^2 = 0.996) \quad (12)$$

将测试工况点带入方程 11 和 12，并与实测值进行比较，得到图 4。

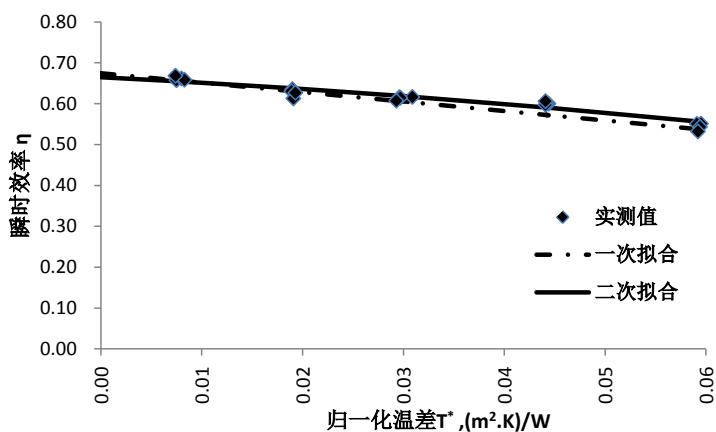


Figure 1. Thermal performance curve for heat pipe evacuated tube solar collector according to GB/T 4271

图 1. 按 GB/T 4271 规定工况拟合热管式真空管型太阳能集热器效率曲线图

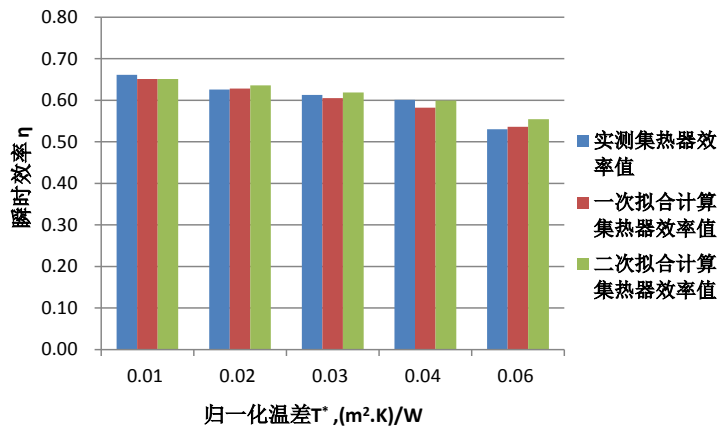


Figure 2. The thermal performance deviation of heat pipe evacuated tube solar collector according to GB/T4271

图 2. 按 GB/T 4271 规定工况计算热管式真空管型太阳能集热器效率偏差

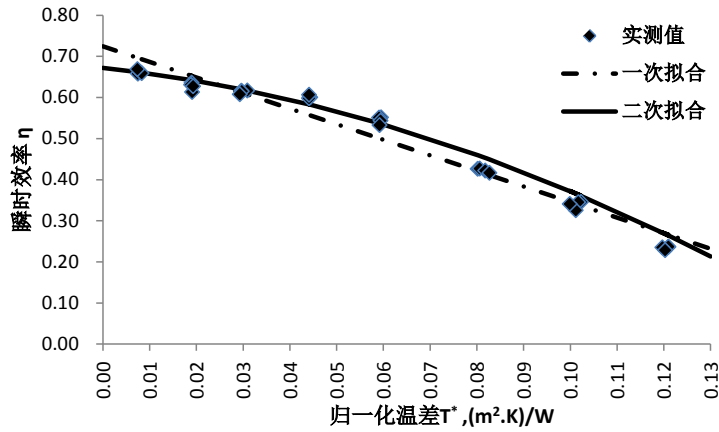


Figure 3. Thermal performance curve for heat pipe evacuated tube solar collector

图 3. 热管式真空管型中温太阳能集热器曲线图

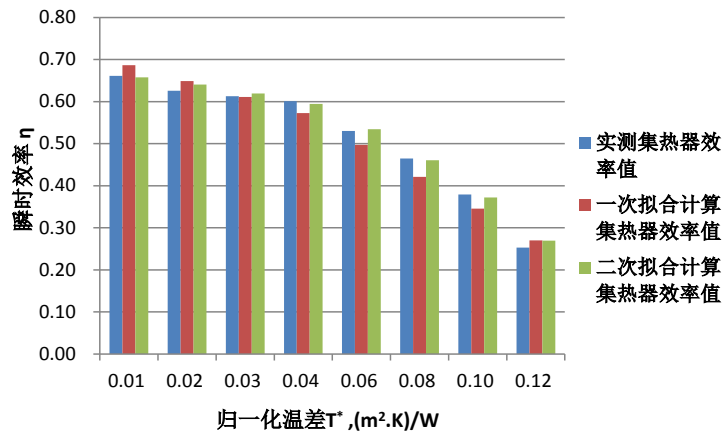


Figure 4. The efficiency deviation between test value and calculated result for heat pipe evacuated tube solar collector

图 4. 热管式真空管型中温太阳能集热器效率与测试值偏差

从图 3 和图 4 可以看出,二次拟合效率曲线的拟合程度 R^2 大于一次拟合曲线,一次拟合的计算结果与实测值偏差最大为 9.5%,二次拟合的计算结果与实测值的最大偏差为 6.7%,明显小于一次拟合计算结果与实测值的偏差,以上分析表明,对于热管式真空管型中温太阳能集热器应采用二次拟合的处理方法来获得中温太阳能集热器热性能效率曲线。

3.2. U 形管式真空管型中温太阳能集热器

选择的 U 形管式真空管型中温太阳能集热器规格为 $\Phi 58 \times 1800 \times 16$,集热器采光面积为 1.58 m^2 ,集热器总面积为 2.20 m^2 。

该集热器共测试 8 个工况,其中 1~4 工况满足 GB/T 4271 [1]要求,进口温度控制在 $7.2^\circ\text{C} \sim 57.7^\circ\text{C}$ 之间,均匀选取 4 个测试点,此外还进行了 4 个工况的测试,集热器进口温度分别为 71.6°C 、 86.6°C 、 100.1°C 和 117.7°C 。

按照 GB/T 4271 [1]的规定,分别使用一次拟合和二次拟合方法得出太阳能集热器的热性能效率曲线,如图 5 所示。

一次拟合效率方程为:

$$\eta = 0.735 - 1.581T^* \quad (R^2 = 1.000) \quad (13)$$

二次拟合效率方程为:

$$\eta = 0.735 - 1.316T^* - 0.006GT^{*2} \quad (R^2 = 1.000) \quad (14)$$

将测试工况点带入方程 13 和 14,并与实测值进行比较,得到图 6。

从图 5 和图 6 可以看出,按照 GB/T 4271 标准规定工况计算,一次拟合和二次拟合效率曲线拟合程度 R^2 均为 1,两种拟合方法计算值与实测值偏差较小,在 GB/T 4271 [1]规定的工况下,两种方法均可以准确的表示集热器热性能。

对全部测试数据,分别使用一次拟合和二次拟合方法得出太阳能集热器的热性能效率曲线,如图 7 所示。

一次拟合效率方程为:

$$\eta = 0.777 - 3.339T^* \quad (R^2 = 0.965) \quad (15)$$

二次拟合效率方程为:

$$\eta = 0.736 - 0.735T^* - 0.025GT^{*2} \quad (R^2 = 0.996) \quad (16)$$

将测试工况点带入方程 15 和 16,并与实测值进行比较,得到图 8。

从图 7 和图 8 可以看出,二次拟合效率曲线的拟合程度 R^2 大于一次拟合曲线,一次拟合的计算结果与实测值最大偏差为 9.1%,二次拟合的计算结果与实测值的最大偏差为 3.9%,明显小于一次拟合偏差,以上分析表明,对于 U 形管式真空管型中温太阳能集热器应采用二次拟合的方法来获得中温太阳能集热器热性能效率曲线。

4. 结论

通过以上的实验数据分析表明,在 GB/T 4271 [1]的基础上,做如下调整可以用于中温集热器的热性能测试和评价,具体为:

- 1) 中温太阳能集热器测试至少五个工况,其中测试进口温度大于 100°C 的工况应不少于两个;
- 2) 采用二次拟合的方式对中温集热器的热效率测试值进行拟合。

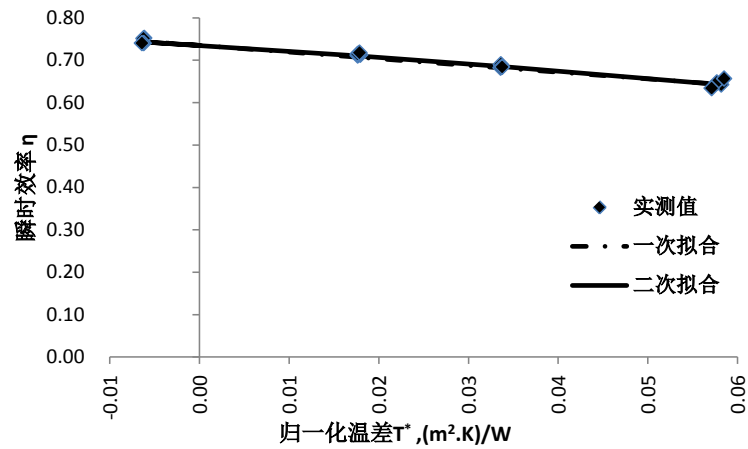


Figure 5. Thermal performance curve of U type evacuated tube solar collector according to GB/T 4271

图 5. 按 GB/T 4271 规定工况拟合的 U 形管真空管型中温太阳能集热器效率曲线图

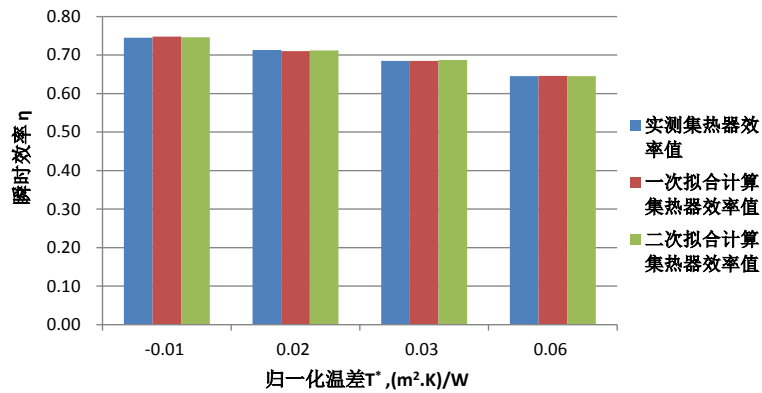


Figure 6. The thermal performance deviation of U type evacuated tube solar collector according to GB/T 4271

图 6. 按 GB/T 4271 规定工况计算 U 形管真空管型中温太阳能集热器效率偏差

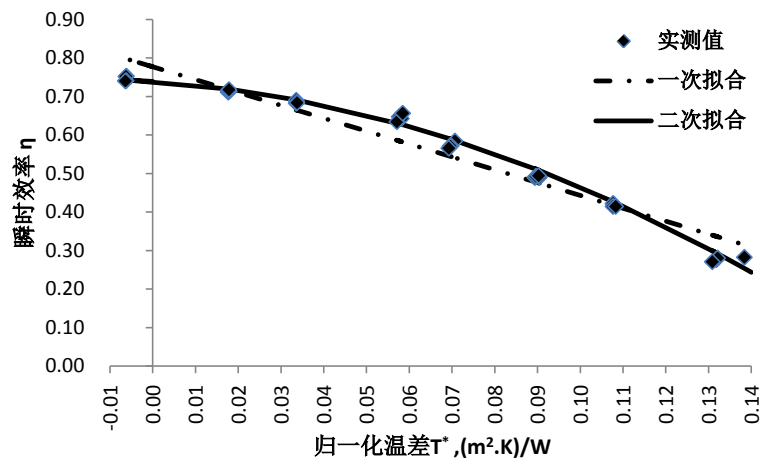


Figure 7. Thermal performance curve of U type evacuated tube solar collector

图 7. U 形管式真空管型中温太阳能集热器曲线图

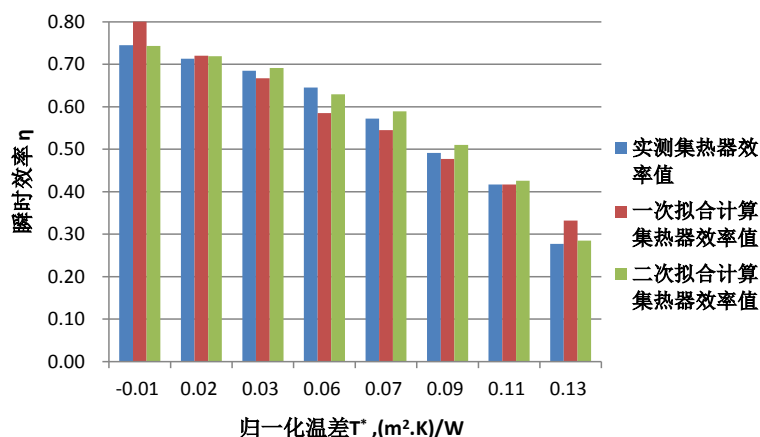


Figure 8. The efficiency deviation between test value and calculated result for U type evacuated tube solar collector

图 8. U 形管式真空管型中温太阳能集热器效率与测试值偏差

本次试验的对象是热管式真空管型中温太阳能集热器和 U 形管真空管型中温太阳能集热器，是否适用于其他类型的中温太阳能集热器还需要进一步验证。

致 谢

本文的研究内容受到了国家重点研发计划课题“藏区和西北高原地区太阳能供暖应用技术研究”(2016YFC0700405)的资助，同时对国家太阳能热水器质量监督检验中心(北京)黄祝连，邓昱等人的辛勤工作表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 国家质量监督检验总局. GB/T 4271-2007 太阳能集热器热性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [2] ISO 9806:2013. Solar Energy—Solar Thermal Collectors—Test Methods.
- [3] ISO 9060:1990. Solar Energy—Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation.
- [4] 国家质量监督检验总局. GB/T 6424-2007 平板型太阳能集热器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [5] 国家质量监督检验总局. GB/T 17581-2007 真空管型太阳能集热器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [6] EN 12975-2:2006. Thermal Solar Systems and Components—Solar Collectors—Part 2: Test Methods.
- [7] 孙峙峰. 太阳集热器热性能稳态与动态测试方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2006.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：se@hanspub.org