

# GRLM

## 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟标准

T/GRLM 08-2015

---

### 太阳能中温空气集热器热性能 测试方法

Test methods for the thermal performance of medium temperature  
solar air collectors

2015-12-29 发布

2016-01-29 实施

---

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟 发布

# 目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 符号与单位.....	2
5 集热器安装与场所要求.....	2
6 试验系统.....	2
7 测量.....	4
8 室外稳态效率试验与计算.....	6
9 集热器入射角修正系数试验与计算.....	10
10 时间常数试验.....	11
11 集热器两端压降试验.....	12
12 空气泄漏量试验.....	13
13 稳态效率—流量试验.....	13
14 高温性能试验.....	13
15 太阳能中温空气集热器热性能检测报告.....	14
附 录 A.....	16
附 录 B.....	18
附 录 C.....	29

# 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由国家太阳能光热产业技术创新战略联盟提出。

本标准由国家太阳能光热产业技术创新战略联盟标准化技术专家组归口。

本标准起草单位：云南师范大学太阳能研究所、云南省太阳能光热工程技术中心、中国科学院电工研究所、中国标准化研究院、广东五星太阳能股份有限公司、上海交通大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、北京清华阳光能源开发有限责任公司、东莞市康达机电工程有限公司、湖北贵族真空科技股份有限公司、皇明太阳能集团有限公司、江苏省产品质量监督检验研究院、北京四季沐歌太阳能技术集团有限公司、南京工业大学、山东力诺新材料有限公司。

本标准起草人：李明、高文峰、罗熙、徐永锋、王云峰、闫崇强、原郭丰、王志峰、李兴、徐立、王庚、唐文学、代彦军、魏秀东、李旭光、周福云、周生宣、赵玉磊、操恺、王树怀、凌祥、李业博。

本标准为首次发布。

# 太阳能中温空气集热器热性能测试方法

## 1 范围

本标准规定了太阳能中温(100℃~250℃)空气集热器热性能测试方法。

本标准还规定了太阳能中温空气集热器的工作温度不低于 100℃。

本标准适用于利用太阳辐射加热、有透明盖板、传热流体为空气的只有单一入口和单一出口的平板型太阳能中温空气集热器。

本标准适用于以空气为传热流体的只有单一入口和单一出口的,全玻璃真空管型太阳能中温空气集热器。

本标准适用于有多个进出口,采用外部管道将多个进口和出口联接等效于单一进口和单一出口的太阳能中温空气集热器。

本标准适用于具有以上特征的非跟踪聚光型的中温空气集热器。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用必不可少。凡标注日期的引用文件,仅标注日期的版本适用于本标准,不标注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本标准。

GB 3100 国际单位制及其应用 (SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units)

GB/T 4271 太阳能集热器热性能试验方法 (Test methods for the thermal performance of solar collectors)

GB/T 6424 平板型太阳能空气集热器 (Flat plate solar collectors)

GB/T 12936 太阳能热利用术语 (Solar energy-Thermal application-Terminology)

GB/T 17049 全玻璃真空太阳集热管 (All-glass evacuated solar collector tubes)

GB/T 17581 真空管型太阳能空气集热器 (Evacuated tube solar collectors)

GB/T 26974 平板型太阳能集热器吸热体技术要求 (Specification for absorber of flat plate solar collector)

GB/T 26976 太阳能空气集热器技术条件 (Specifications of solar air collectors)

GB/T 26977 太阳能空气集热器热性能试验方法 (Test methods for the thermal performance of solar air collectors)

JJG 458 总辐射表 (Pyranometer)

JJF 1032 光学辐射计量名词及定义 (Terminology and Definition for Optical Radiation Measurements)

ISO 9060 太阳能用于测量总辐射和直接辐射的测量仪表技术要求与分类 (Solar energy-Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation)

ISO 9488 太阳能术语 (Solar energy-Vocabulary)

EN 12975 太阳集热系统及集热部件 (Thermal solar systems and components-solar collectors)

ANSI/ASHRAE STANDARD 93 太阳能集热器的热性能测试方法 (Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors)

## 3 术语和定义

GB 3100、GB/T 4271、GB/T 6424、GB/T 12936、GB/T 17049、GB/T 17581、GB/T 26974、

GB/T 26976、GB/T 26977、JJG 458、JJG 1032、ISO 9060、ISO 9488、EN 12975 和 ANSI/ASHRAE STANDARD 93 等标准界定的术语和定义适用于本标准。

## 4 符号与单位

本标准使用的符号及单位见附录 A。

## 5 集热器安装与场所要求

### 5.1 集热器安装

#### 5.1.1 试验台架

试验台架安装位置应确保试验期间没有周边物体遮挡集热器，且试验台架自身也不遮挡集热器的采光面，不影响集热器背面，侧面和集热器进出口的隔热保温。台架应采用开放式结构，不影响空气沿集热器自由流动。试验台架的高度应确保安装其上的集热器的最低边离地面距离不小于 0.5 m。若试验台架安装在屋顶，则台架距屋顶边缘应大于 2 m。

试验台架可手动或自动跟踪太阳方位角或高度角。

#### 5.1.2 倾角

对于仅跟踪太阳方位角的试验台架，安装集热器时应使其采光面与水平面的倾角为当地纬度 $\pm 5^\circ$ ，但应不小于 $30^\circ$ 。

#### 5.1.3 方位

采用手动或自动方式跟踪太阳方位角。

### 5.2 集热器安装场所要求

- 试验期间，不应有任何阴影投射到集热器采光面上；
- 试验场所周围应无反射比大于 0.2 的物体。试验期间，周围物体表面不应有明显的太阳辐射反射到集热器上，天空内不应有遮挡阳光直射集热器的物体；
- 邻近集热器物体的表面温度应接近环境空气温度，避免周围物体热（红外）辐射对集热器的影响；
- 集热器应安装在风能够自由通过其采光面、背面和侧面的地方，与采光面平行的平均风速应保持在 8.3.2 所规定的范围内，必要时，应采用风机达到此风速。

## 6 试验系统

### 6.1 试验台架

图 1 为集热器试验台架。

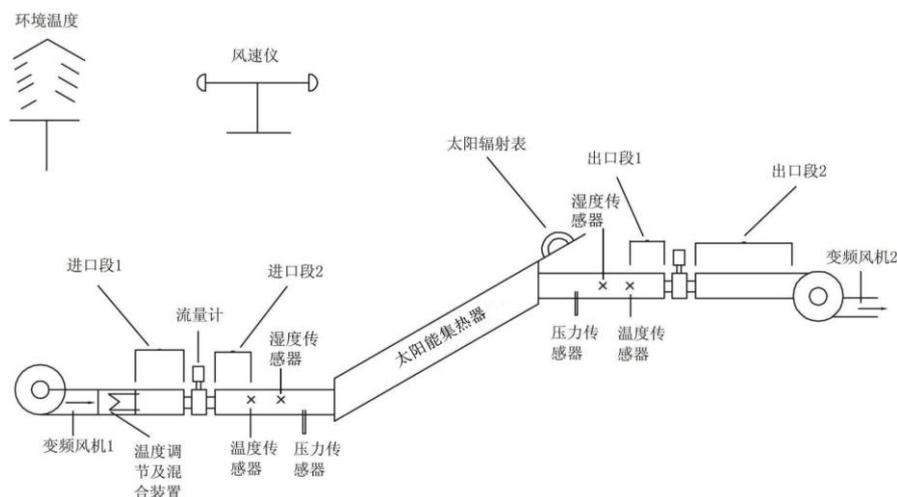


图 1 集热器试验台架

## 6.2 传热流体流体

在试验期间空气工作的温度和湿度范围内，传热流体密度按式(1)计算：

$$\rho_{ma} = \rho_{da} + \rho_v = \frac{p_{ma} - p_v}{R_d T} + \frac{p_v}{R T} = \frac{p}{R T} \left[ 1 - \frac{R_v - R_d}{R} \frac{\phi p_s(t)}{p_{ma}} \right] \dots\dots\dots(1)$$

$p_s(t)$ 可从热物理性质表中查取，也可由拟合公式(2)计算得到：

$$p_s(t) = \exp(6.42 + 7.2 \times 10^{-2} \times t - 2.71 \times 10^{-4} \times t^2 + 7.23 \times 10^{-7} \times t^3) \dots\dots\dots(2)$$

$R_{da}=287\text{J}/(\text{kg K})$ ， $R_v=461.52\text{J}/(\text{kg K})$ ，式(1)可写为：

$$\rho_{ma} = \frac{p_{ma}}{R_{da} T} \left[ 1 - 0.378 \frac{\phi p_s(t)}{p_{ma}} \right] \dots\dots\dots(3)$$

湿空气的比定压热容  $c_{pma}$  按式(4)计算：

$$c_{pma} = X_{da} c_{pda} + X_v c_{pv} = \frac{c_{pda}}{1 + d(t)} \left[ 1 + d(t) \frac{c_{pv}}{c_{pda}} \right] \dots\dots\dots(4)$$

式(4)中：

$$d(t) = \frac{X_v}{X_{da}} = 0.622 \frac{\phi p_s(t)}{p_{ma} - \phi p_s(t)} \dots\dots\dots(5)$$

而  $c_{pda}$ 、 $c_{pv}$  可从干空气和水蒸气的热物理性质表查得，也可按下述拟合公式计算得出：

$$c_{pda} = 1.00687 \times 10^3 - 8.722 \times 10^{-2} \times t + 1.236 \times 10^{-4} \times t^2 \dots\dots\dots(6)$$

$$c_{pv} = 1.853 \times 10^3 + 1.0 \times 10^{-4} \times t \dots\dots\dots(7)$$

在确定集热器热效率曲线、时间常数和入射角修正系数的实验过程中，空气质量流量应保持一致。

## 6.3 管道

### 6.3.1 管道保温

管道外层需作良好的保温及防湿处理。保温材料厚度不低于 40mm，导热系数不大于 0.05W/(m·℃)，保温材料应能承受 400℃ 温度。

### 6.3.2 管道间距

从空气温度调节器出口到集热器进口之间的管道应保持最短，以减少环境对传热流体进口温度的影响，但应充分考虑进口段及各种传感器位置对空气流动的影响。

### 6.3.3 管道隔热

温度、压力及流量的测量点和集热器进出口之间的管道应采用隔热和防晒反射涂层进行保护。

### 6.3.4 管道密封

空气的泄漏对流量测量有很大影响，应密封除集热器外的所有联接处。

### 6.3.5 空气过滤器

在流量计或风机的入口前安装空气过滤器。

## 6.4 风机及流量控制装置

### 6.4.1 风机及流量控制装置安装

在图 1 所示测试系统的进出口位置安装风机，进风口风机 1 工作时，模拟集热器正压工况，出风口风机 2 工作时，模拟集热器负压工况。应根据集热器工作特性，选择合适风机模拟正确工况。

### 6.4.2 风机

安装在集热器试验回路中的风机，应不影响集热器温度控制或温度测量。

### 6.4.3 流量控制装置

试验期间,任何工况时,流量控制装置应能维持流量稳定,控制空气流量在±3%以内变化。

## 6.5 温湿度调节系统

采用温湿度调节系统,保证集热器进口温度和湿度恒定,避免集热器进口温湿度漂移。

## 7 测量

### 7.1 太阳辐射测量

#### 7.1.1 总辐射测量

应使用符合 ISO 9060 规定的一级总辐射表测量太阳辐射值。

##### 7.1.1.1 防止温度梯度影响

数据采集前,总辐射表应放置典型试验位置至少 30min,确保总辐射表与所处环境达到热平衡。

##### 7.1.1.2 防止湿气影响

采取适当措施防止湿气在总辐射表上凝结而影响测量。总辐射表应带有易于检验的干燥剂,每次测量前后都应对干燥剂进行观察,确认其有效。

##### 7.1.1.3 总辐射表的室外安装

总辐射表的安装应与集热器采光口平行,两平面平行度相差小于±1°。试验期间,总辐射表不得遮挡集热器采光口。总辐射表应安装在能够接受到与集热器相同直射、散射和反射太阳辐射的地方。

室外试验时,应将总辐射表座体及其外露导线保护起来,以防被太阳晒热。减少集热器对总辐射表的反射和再辐射。

##### 7.1.1.4 总辐射表校准周期

总辐射表应根据 JJG458 的规定进行校准。在标定周期内总辐射表的年稳定性达不到 GB/T 19565 的规定时,应增加总辐射表的校准次数或更换总辐射表。

#### 7.1.2 直接日射入射角测量

直接日射入射角可用日晷测量,日晷应安装在集热器平面的一侧。

直接日射入射角  $\theta$  也可由太阳时角  $\omega$ 、集热器倾角  $\beta$ 、集热器方位角  $\gamma$  和试验地的纬度  $\varphi$  计算,按式(8)计算:

$$\cos \theta = (\sin \delta \sin \varphi \cos \beta) - (\sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) + (\cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega) + (\cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega) + (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega) \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中:

一年中第  $n$  天的太阳赤纬  $\delta$  计算如下:

$$\delta = 23.45 \sin [360n(284 \dots\dots\dots) \quad \dots\dots\dots(9)$$

### 7.2 热辐射测量

热辐射在一定程度上影响集热器性能,试验过程中应在集热器采光口平面一侧的中间位置安装地球辐射表以测定集热器采光面的热辐照度。

### 7.3 温度测量

#### 7.3.1 温度测量传感器

集热器试验中温度传感器的工作温度范围为 0℃~400℃,温度传感器感应端应装有防热辐射装置,传感器的准确度及精度如表 1 所示。

表 1 测温传感器的准确度与精度

	准确度	精度
温度	±0.5℃	±0.2℃
温度差	±0.1℃	±0.1℃

注：热电偶和热电堆式温度传感器的时间常数应该小于 1s；电阻式温度传感器的时间常数应该小于 10s。

### 7.3.2 传热流体进出口温度测量

#### 7.3.2.1 测量准确度

集热器传热流体进出口温度的测量准确度应为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ；传热流体进出口温度差准确度应为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

#### 7.3.2.2 传感器的安装

温度传感器的安装位置应距集热器进出口不大于 200 mm，如果温度传感器的安装位置与集热器的距离超过 200 mm，应采取措施确保温度传感器与集热器的安装距离不影响空气温度测量。通过加强管路保温措施确保温度传感器与集热器间的温度变化不超过  $0.3^{\circ}\text{C}$ 。温度传感器的安装如图 2 所示，在空气进出口管道内等间距均匀布置 8 根温度传感器为一组的测温系统，确保每组测温系统在空气管道横截面的中心位置。为减少测温传感器对流体流速影响，可选择尺寸较小温度传感器，或根据空气管道直径选择测温传感器数量。为保证测温精度，应考虑测温传感器因辐射换热引起的测量误差。试验期间应确保进出口空气管道内的温度传感器测量值变化不超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

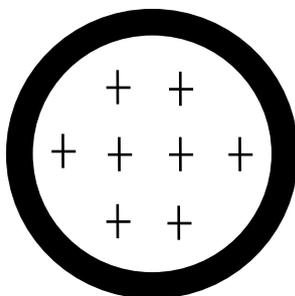


图 2 集热器进出口温度传感器安装位置示意图

### 7.3.3 环境空气温度测量

#### 7.3.3.1 测量准确度

环境空气温度的测量准确度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。

#### 7.3.3.2 传感器的安装

室外试验时，环境温度传感器应安置在距被测集热器 10m 以内的白色百叶箱中，百叶箱底边应高出地面 1.25 m，百叶箱门开口朝北。

### 7.3.4 空气加热装置的温度测量

采用空气加热装置加热空气，确保集热器进口处空气温度的变化不会超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

## 7.4 湿度测量

### 7.4.1 测量准确度

空气进出口湿度的测量准确度应为 $\pm 3\% \text{RH}$ 。

### 7.4.2 传感器的安装

湿度传感器安装在空气进出口处。

## 7.5 空气质量流量测量

### 7.5.1 测量仪器

采用质量流量计或体积流量计测量空气流量，为防止温度对流量计内电路的影响，流量计输出端应做隔热处理。体积流量计的测量值，可利用公式(1)换算为质量流量。

### 7.5.2 测量准确度

空气流量的测量准确度应为 $\pm 3\%$ 。

### 7.5.3 流量计的安装

流量计的安装如图 1 所示。为保证测量准确度，其进口段 1 和出口段 1 的长度应不小于

5D, 进口段 2 和出口段 2 应不小于 3D。

#### 7.6 风速测量

室外试验时, 空气流速很少为常数, 应取试验期间的平均风速, 空气流速测量的准确度应为 $\pm 0.5\text{m/s}$ 。

#### 7.7 时间间隔测量准确度

时间间隔的测量准确度应为 $\pm 0.2\%$ 。

#### 7.8 集热器面积的测量

集热器面积(总面积、采光面积、吸热体面积或轮廓采光面积)的测量准确度应为 $\pm 0.1\%$ 。

#### 7.9 测量仪器及数据记录仪的要求

测量仪器及测量系统的最小刻度不应超出规定准确度的两倍。

数据处理技术或电子积分仪的准确度应等于或优于测量值的 $\pm 1.0\%$ 。

模拟和数字记录仪的准确度应等于或优于总量程的 $\pm 0.5\%$ , 时间常数应等于或小于 1s。峰值信号指示应在总量程的 50%~100%之间。

### 8 室外稳态效率试验与计算

#### 8.1 试验装置

集热器的安装应符合第 5 章的规定, 试验回路连接应符合第 7 章的规定。空气从进口流入集热器, 出口流出, 也可根据生产厂家要求确定集热器内的空气流向。

#### 8.2 集热器试验前处理

试验前应对集热器进行外观检查, 并做好记录。

试验前应对集热器采光面的盖板表面、真空管表面或反射器表面进行彻底清洁。

如果集热器部件有水汽, 应使用热空气在集热器中循环一段时间, 烘干隔热材料和集热器外壳。如果进行该项处理, 应在检测报告中加以说明。

#### 8.3 试验条件

##### 8.3.1 总辐照度

试验期间, 集热器采光面上的总辐照度应不小于  $700\text{W/m}^2$ , 散射辐射值不能超过总辐照值的 20%。稳态辐射条件是在 10min 内或两倍集热器时间常数的时间内, 集热器采光面上的总辐照度变化应不大于 $\pm 50\text{W/m}^2$ 。

##### 8.3.2 风速

试验期间, 非盖板型集热器在 30min 内或两倍集热器时间常数内, 玻璃盖板型集热器在 60min 内或四倍集热器时间常数内, 取数值较大者, 测试台架周围的环境风速在  $2\text{m/s}$ ~ $4\text{m/s}$  范围内。

##### 8.3.3 环境温度和湿度

试验期间, 测试台架周围环境温度应在  $15^\circ\text{C}$ ~ $30^\circ\text{C}$  度范围内, 每个试验工况期间环境温度的变化不大于 $\pm 2^\circ\text{C}$ , 空气湿度应不高于 80%RH。

##### 8.3.4 传热流体质量流量

流体质量流量应为生产厂家推荐的流量值, 若厂家未推荐流量值, 在单位总面积  $A_c$  时, 取空气质量流量为  $0.01\text{kg}/(\text{s m}^2)$ , 因太阳能空气集热器的效率函数比采用液态流体的集热器更加依赖流体质量流量, 对空气集热器在质量流为  $0.03\text{kg}/(\text{s m}^2)$  工况下的性能进行测试。

##### 8.3.5 直接日射入射角

调整集热器, 使其采光面保持与直接入射角的偏差不大于 $\pm 2.5^\circ$ 。

#### 8.4 试验数据采集

为测定集热器效率特性, 试验应在晴朗天气条件下集热器的工作温度范围内进行。对于数据点的选取, 应在集热器工作温度范围内至少取四个间隔均匀的进口温度。

为获得  $\eta_0$ ，第一个工况的进口温度与环境空气温度之差在  $\pm 5^\circ\text{C}$  以内，由集热器最高工作温度来确定第四工况集热器的进口温度，且第四工况下集热器的入口温度不能低于  $120^\circ\text{C}$ 。在最低进口温度与最高进口温度之间均匀选取其他两个进口温度，使得四个工况下集热器的进口温度均匀分布。

对每个空气进口温度至少取四个独立的数据点，每个瞬态效率点的测定时间间隔应不少于 3min。

试验期间，应按 8.5 中所规定的项目进行测量。在上述时间间隔内，每分钟至少一次定时采集 8.5 中 b)、c)、d)、e)、f)、g)、h)、i)、j) 测量参数的数据，以其算术平均值作为该参数的测定值。

### 8.5 测量参数

应对以下参数进行测量：

- a) 集热器总面积  $A_G$ 、吸热体面积  $A_A$ 、采光面积  $A_a$  和轮廓采光面积  $A_c$ ；
- b) 集热器采光面上总辐照度  $G$ ；
- c) 集热器采光面上散射辐照度  $G_d$ ；
- d) 直接日射入射角  $\theta$ （通常由计算得出，也可实验测量）；
- e) 环境风速  $u$ ；
- f) 环境空气温度  $t_a$ ；
- g) 空气进口平均温度  $t_i$ ；
- h) 空气出口平均温度  $t_e$ ；
- i) 空气质量流量  $\dot{m}$ ；
- j) 进出口空气相对湿度  $\phi$ 。

### 8.6 试验周期（稳态）

稳态数据点的试验周期应包括至少 12 min 的预备期和至少 12 min 的稳态测量期。

如果试验参数偏离它们在试验周期内的平均值不超过表 2 规定的范围，则可认为在给定试验周期内集热器处于稳态工况。

表 2 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
总辐照度	$\pm 50\text{W}/\text{m}^2$
环境空气温度	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
空气质量流量	$\pm 3\%$
集热器进口空气温度	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
进出口空气湿度	$\pm 3\% \text{RH}$

### 8.7 试验结果

应对测量结果进行整理，形成一组满足稳态运行试验条件的数据点。

### 8.8 集热器效率的计算

集热器效率按式(10)进行计算：

$$\eta = (A_a/A_G)F_R \left[ (\tau\alpha)_e - U_L \frac{(t_i - t_a)}{G} \right] = \dot{m}C_{pma}(t_e - t_i)/A_G G \dots\dots\dots (10)$$

测量计算过程中，应考虑空气泄漏对集热器效率的影响。

若集热器在正压下工作时，泄漏流量  $\dot{m}_L$  为进出口流量之差为：

$$\dot{m}_L = \dot{m}_e - \dot{m}_i \dots\dots\dots (11)$$

当集热器在负压下工作时，部分环境空气会被吸入集热器内，有用能计算公式为：

$$q_u = \dot{m}_e h_e - (\dot{m}_i h_i - \dot{m}_L h_a) \dots\dots\dots (12)$$

若忽略集热器中与环境空气中的湿度差别，假定热容为常数，式(12)可表示为：

$$q_u = \dot{m}_e C_A (t_e - t_i) + (\dot{m}_e - \dot{m}_i) C_A (t_i - t_a) \dots\dots\dots(13)$$

式(11)中的流量  $\dot{m}_i$  应为式(14):

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e + (\dot{m}_e - \dot{m}_i)(t_i - t_a) / (t_e - t_i) \dots\dots\dots(14)$$

集热器在正压下工作时, 存在部分热空气泄漏, 减少有用能, 增加集热器热损, 但上述公式仍适用, 式中  $\dot{m}_i$  为负值。

### 8.8.1 集热器接收的太阳辐射功率计算

对于单层玻璃平板型集热器, 入射角小于或等于 30°, 不需使用入射角修正系数对集热器接收的太阳能进行修正; 对于真空管型集热器, 入射角小于或等于 10°, 不需使用入射角修正系数对集热器接收的太阳能进行修正。

测试时, 可根据生产厂家的要求, 采用总面积、采光面积、吸热体面积和轮廓采光面积其中的一个面积或者几个面积作为参考面积进行测试; 当生产厂家无要求时, 实验室可根据实际情况确定。

#### 8.8.1.1 以集热器总面积为参考

当以集热器总面积为参考时, 集热器接收的太阳辐射功率为  $A_G G$ , 效率为:

$$\eta_G = \frac{Q}{A_G G} \dots\dots\dots(15)$$

#### 8.8.1.2 以集热器采光面积为参考

以采光面积为参考时, 集热器接收的太阳辐射功率为  $A_a G$ , 效率为:

$$\eta_G = \frac{Q}{A_a G} \dots\dots\dots(16)$$

#### 8.8.1.3 以集热器吸热体面积为参考

以吸热体面积为参考时, 集热器接收的太阳辐射功率为  $A_A G$ , 效率为:

$$\eta_G = \frac{Q}{A_A G} \dots\dots\dots(17)$$

#### 8.8.1.4 以集热器轮廓采光面积为参考

以轮廓采光面积为参考时, 集热器接收的太阳辐射功率为  $A_c G$ , 效率为:

$$\eta_G = \frac{Q}{A_c G} \dots\dots\dots(18)$$

### 8.8.2 归一化温差

瞬态效率  $\eta$  (或  $\bar{\eta}$ ) 由归一化温差  $T^*$  的函数图形方式表示。

当使用传热流体平均温度  $t_m$  时, 归一化温差为:

$$T_m^* = \frac{t_m - t_a}{G} \dots\dots\dots(19)$$

其中

$$t_m = t_i + \frac{\Delta T}{2} \dots\dots\dots(20)$$

当使用集热器进口温度  $t_i$  时, 归一化温差为:

$$T_i^* = \frac{t_i - t_a}{G} \dots\dots\dots(21)$$

### 8.8.3 瞬态效率的结果表示

瞬态效率  $\eta$  (或  $\bar{\eta}$ ) 的图形应利用最小二乘法进行曲线拟合得出, 由式(22)或式(23)获得瞬态效率曲线:

$$\eta = \eta_0 - aT^* - aG(T^*) \dots\dots\dots(22)$$

或  $\eta = \eta_0 - UT^* \dots\dots\dots(23)$

应根据拟合的紧密程度来选择一次或二次曲线。如果  $a_2$  的计算值是负数，则不应选用二次拟合。

试验条件应记录在附录 B 给出的数据表格内，利用二次拟合结果绘制曲线图时， $G$  应取  $800 \text{ W/m}^2$ 。

对于平板型集热器，在散射辐照度大于总辐照度 30% 条件下测得的数据点，应采用附录 C 中给出的方法修正到等效法向日射辐照度。若散射辐照度小于 30%，则可以忽略其影响。对于真空管型集热器，则不必考虑散射太阳辐照对集热器效率的影响。

### 8.8.3.1 基于集热器总面积的瞬态效率

若用归一化温差  $T_m^*$  可得公式(24)和(25):

$$\bar{\eta}_G = \bar{\eta}_{0G} - \bar{U}_G \frac{t_m - t_a}{G} \dots\dots\dots(24)$$

或  $\bar{\eta}_G = \bar{\eta}_{0G} - \bar{a}_{1G} \frac{t_m - t_a}{G} - \bar{a}_{2G} G \left( \frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(25)$

式中:  $\bar{\eta}_G = \frac{\dot{Q}}{A_G G} \dots\dots\dots(26)$

若用归一化温差  $T_i^*$ ，瞬态效率公式为:

$$\eta_G = \eta_{0G} - U_G \frac{t_i - t_a}{G} \dots\dots\dots(27)$$

或  $\eta_G = \eta_{0G} - a_{1G} \frac{t_i - t_a}{G} - a_{2G} G \left( \frac{t_i - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(28)$

式中:  $\eta_G = \frac{\dot{Q}}{A_G G} \dots\dots\dots(29)$

### 8.8.3.2 基于集热器采光面积的瞬态效率

以归一化温差  $T_m^*$  为参考的瞬态效率公式为:

$$\bar{\eta}_a = \bar{\eta}_{0a} - \bar{U}_a \frac{t_m - t_a}{G} \dots\dots\dots(30)$$

或  $\bar{\eta}_a = \bar{\eta}_{0a} - \bar{a}_{1a} \frac{t_m - t_a}{G} - \bar{a}_{2a} G \left( \frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(31)$

式中:  $\bar{\eta}_a = \frac{\dot{Q}}{A_a G} \dots\dots\dots(32)$

若用归一化温差  $T_i^*$ ，瞬态效率公式为:

$$\eta_a = \eta_{0a} - U_a \frac{t_i - t_a}{G} \dots\dots\dots(33)$$

或  $\eta_a = \eta_{0a} - a_{1a} \frac{t_i - t_a}{G} - a_{2a} G \left( \frac{t_i - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(34)$

式中:  $\eta_a = \frac{\dot{Q}}{A_a G} \dots\dots\dots(35)$

### 8.8.3.3 基于集热器吸热体面积的瞬态效率

以归一化温差  $T_m^*$  为参考的瞬态效率公式为:

$$\bar{\eta}_A = \bar{\eta}_{0A} - \bar{U}_A \frac{t_m - t_a}{G} \dots\dots\dots(36)$$

或 
$$\bar{\eta}_A = \bar{\eta}_{0A} - \bar{a}_{1A} \frac{t_m - t_a}{G} - \bar{a}_{2A} G \left( \frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(37)$$

式中: 
$$\bar{\eta}_A = \frac{\dot{Q}}{A_A G} \dots\dots\dots(38)$$

若用归一化温差  $T_i^*$ , 瞬态效率公式为:

$$\eta_A = \eta_{0A} - U_A \frac{t_i - t_a}{G} \dots\dots\dots(39)$$

或 
$$\eta_A = \eta_{0A} - a_{1A} \frac{t_i - t_a}{G} - a_{2A} G \left( \frac{t_i - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(40)$$

式中: 
$$\eta_A = \frac{\dot{Q}}{A_A G} \dots\dots\dots(41)$$

### 8.8.3.4 基于集热器轮廓采光面积的瞬态效率

以归一化温差  $T_m^*$  为参考的瞬态效率公式为:

$$\bar{\eta}_C = \bar{\eta}_{0C} - \bar{U}_C \frac{t_m - t_a}{G} \dots\dots\dots(42)$$

或 
$$\bar{\eta}_C = \bar{\eta}_{0C} - \bar{a}_{1C} \frac{t_m - t_a}{G} - \bar{a}_{2C} G \left( \frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(43)$$

式中: 
$$\bar{\eta}_C = \frac{\dot{Q}}{A_c G} \dots\dots\dots(44)$$

若用归一化温差  $T_i^*$ , 瞬态效率公式为:

$$\eta_C = \eta_{0C} - U_C \frac{t_i - t_a}{G} \dots\dots\dots(45)$$

或 
$$\eta_C = \eta_{0C} - a_{1C} \frac{t_i - t_a}{G} - a_{2C} G \left( \frac{t_i - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(46)$$

式中: 
$$\eta_C = \frac{\dot{Q}}{A_c G} \dots\dots\dots(47)$$

## 9 集热器入射角修正系数试验与计算

### 9.1 概述

若在式(15)中引入入射角修正系数  $K_\theta$ , 则集热器的瞬态效率公式为:

$$\eta_G = \eta_{0G} K_\theta - U_G \frac{t_i - t_a}{G} \dots\dots\dots(48)$$

### 9.2 试验基本要求

调整集热器, 使其采光面保持与直接入射角的偏差不大于  $\pm 2.5^\circ$ 。

### 9.3 试验方法

#### 9.3.1 室内模拟光源试验

该方法适用于太阳模拟器下的室内试验, 也适用于可移动式试验台(可随意跟踪太阳方位角)的室外试验。

对平板型集热器进行四种试验条件的方位调节, 这四种调节使试验入射角与直接日射的角度分别约为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ 。建议数据应在一天内采集完毕。

对真空管型集热器应分别测定真空太阳集热管南北向排列时的入射角修正系数  $K_{\theta,N-S}$  和真空太阳集热管东西向排列时的入射角修正系数  $K_{\theta,W-E}$ , 应使真空太阳集热管分别沿南北向排列和沿东西向排列。调节集热器试验台架使入射角分别为:  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ 。建议数据应在一天内采集完毕。

根据 8.4 的规定分别测定集热器每个入射角的效率值。

对于每个数据点，传热流体的进口温度应接近环境空气温度（两者差值应在  $\pm 5^\circ\text{C}$  以内）。

### 9.3.2 室外太阳光照试验

该方法适用于集热器不能根据直接日射进行方位角的调节（除倾斜角的调节外），使用固定式试验台的室外试验。

对于每个数据点，传热流体的进口温度应接近环境空气温度（两者差值应在  $\pm 5^\circ\text{C}$  以内）。应成对测量效率值，每一对中包含一个正午前的效率值和一个正午后的效率值。对于这两个数据点，集热器与太阳光束之间的平均入射角应相同，给定入射角的集热器效率应为每对效率值的平均值。

根据 8.4 的规定进行效率值的测定。与试验方法 1 相同，应在入射角为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  的情况下采集数据。

### 9.4 集热器入射角修正系数计算

由于流体进口温度非常接近环境空气温度，所以  $t_i - t_a \approx 0$ 。  $K_\theta$  与效率之间的关系为：

$$K_\theta = \frac{\eta_{0,\theta}}{\eta_{0,n}} \dots\dots\dots(49)$$

式中：

$\eta_{0,\theta}$ —— $t_i = t_a$  时，入射角  $\theta$  下测定的瞬态效率值；

$\eta_{0,n}$ —— $t_i = t_a$  时，法向入射时测定的瞬态效率值， $\eta_{0,n}$  可由效率曲线在  $y$  轴上的截距获得。将计算结果标绘在  $K_\theta - \theta$  图上，得到太阳能集热器入射角修正系数  $K_\theta$  随入射角  $\theta$  的变化曲线。

## 10 时间常数试验

### 10.1 时间常数的定义与计算公式

采用如下瞬态方程表示集热器的瞬态行为：

$$\frac{C_A}{A_a} \frac{dt}{dT} = F_R G(\tau\alpha)_e - F_R U_L (t_i - T_a) - \frac{\dot{m}c_{pma}}{A_a} (t_e - t_i) \dots\dots\dots(50)$$

假设集热器采光面上总辐照度  $G$  值开始时为 0，测试开始后突然增加，直到稳定，此瞬态变化过程中， $(\tau\alpha)_e$ 、 $U_L$ 、 $t_a$ 、 $c_{pma}$  和  $\dot{m}$  视为常数，有：

$$\frac{dt}{dT} = K \frac{dt_e}{dT} \dots\dots\dots(51)$$

式中：

$$K = \frac{\dot{m}c_{pma}}{F'U_L A_a} \left[ \frac{F'}{F_R} - 1 \right] \dots\dots\dots(52)$$

$K$  为一个无量纲因子，称作集热器的时间常数，其含义为集热器进出口的瞬态温度差值从零增加到稳态温度差值的 0.632 所用的时间。可由式(53)计算得出。

$$t_{e,t} - t_i = 0.632(t_{e,ss} - t_i) \dots\dots\dots(53)$$

式中， $t_i$  为集热器进口空气温度， $t_{e,t}$  为  $t$  时刻集热器出口空气温度， $t_{e,ss}$  为集热器出口稳态温度。

### 10.2 时间常数试验

#### 10.2.1 试验条件

在集热器上方 10cm 处，用遮阳罩板遮挡住采光面上的太阳辐射，保证集热器入口处的流体温度  $t_i$  尽可能与环境温度接近，差值在  $\pm 5^\circ\text{C}$  以内，空气质量流量为  $0.01\text{kg}/(\text{s m}^2)$ ，总辐照度不小于  $700\text{W}/\text{m}^2$ 。

#### 10.2.2 试验过程

当达到稳态时，移去遮阳罩板并继续测量直到再次达到稳态。对于该项试验，当流体出口温度的变化小于每分钟 $0.1^{\circ}\text{C}$ 时，即可认为达到稳态。

此时应对下列参数进行测量：

- (a)集热器流体进口温度 $t_i$ ；
- (b)集热器流体出口温度 $t_e$ ；
- (c)环境空气温度 $t_a$ 。

### 10.3 试验结果

集热器时间常数的计算参照公式(53)。需要绘出两稳态间过渡过程中集热器流体出口温度与入口温度之差( $t_e-t_i$ )随时间的变化曲线，从初始稳态开始，在更高温度下的第二次稳态结束。

## 11 集热器两端压降试验

集热器两端压降是太阳能热利用系统设计中的重要参数，测试使用的流体应与集热器正常使用时相同。

### 11.1 试验装置

根据第 5 章的规定安装集热器，传热流体应从进口流入集热器，出口流出，在集热器进、出口选择适当管道进行装配。图 3 为压降测试试验装置，压力测试端头有四个外部测压孔，测压孔接在集热器的管道上，且与集热器内部联通，测压点位置应尽量靠近集热器进出口。测压孔的直径不应超过壁厚的 40%或不超过 1.6mm，取数值最小者，管和孔的内壁表面应光滑无卷边。

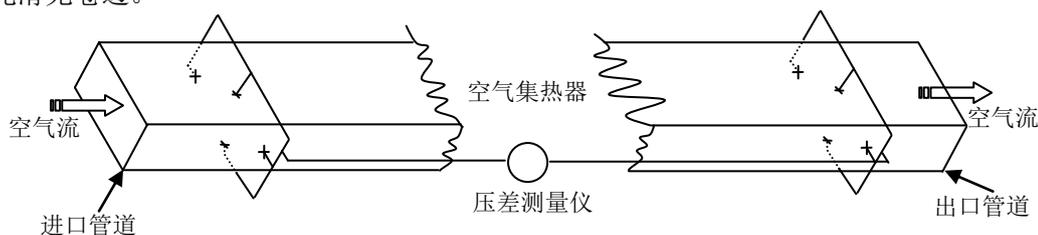


图 3 集热器两端压力降落试验装置

### 11.2 试验条件

试验过程中，集热器应工作于生产厂家推荐的压力条件下。若厂家未推荐压力值，工作于负压下的集热器，集热器入口端压力应低于环境压力；工作于正压下的集热器，则集热器出口端压力至高于环境压力。

在均匀间隔内测量 5 个数据点。

### 11.3 测量参数

- 集热器进口温度  $t_i$ ；
- 流体的质量流量  $\dot{m}$ ；
- 集热器进出口压降  $\Delta p$ 。

### 11.4 测量仪器精度要求

- 流量应恒定在标称值的  $\pm 1\%$  以内；
- 传热流体的进口温度应恒定在  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  以内。

### 11.5 由测量装置引起的压降

应对压力测量装置进行零点校准，避免装置自身引起压降带来的测量误差。

### 11.6 试验结果

给出集热器进出口两端压力降落随流体质量流量的变化曲线。

## 12 空气泄漏量试验

### 12.1 试验条件

试验过程中，管道联接处应采取较好的密封措施，尽量减少空气泄漏量。流体质量流量应为生产厂家推荐的流量值，若厂家未推荐流量值，在单位总面积  $A_c$  时，取空气质量流量为  $0.01\text{kg}/(\text{s m}^2)$  进行试验。集热器空气泄漏量（包含测试系统）应小于额定工作流量的  $0.5\%$ ，或者为  $0.0083\text{g/s}$ ，取数值最大值，测量仪器的准确度为  $\pm 3\%$ 。

### 12.2 试验要求

集热器空气泄漏量试验是针对集热器所有管道系统进行的，泄漏量测试系统应介于集热器进口流量测试位置的前端和集热器出口流量测试位置的后端，测量包括温度、压力和流量等所有测试系统在内的空气泄漏量。

### 12.3 试验装置

集热器空气泄漏量试验装置由风机、流量控制阀门和直管组成。在集热器进出口直管上安装压力测试管道，压力管道通过压力表联接用于测量集热器空气泄漏量的流量，安装位置必须满足第12.2节的规定，试验装置图4所示。

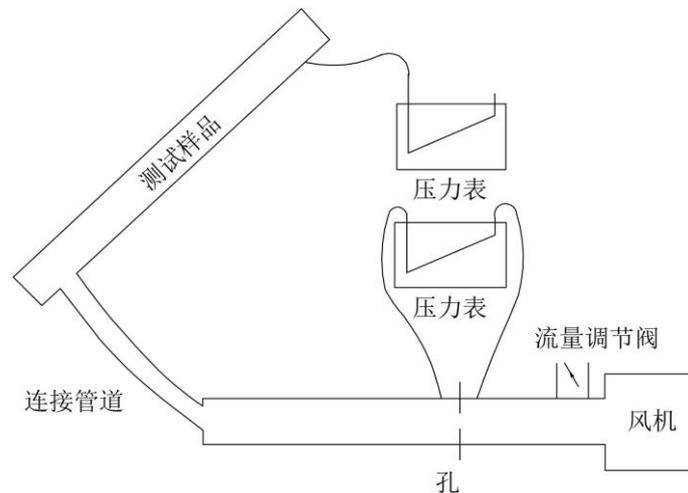


图4 集热器空气泄漏量试验装置

### 12.4 试验过程

集热器空气泄漏量试验装置如图4所示。试验过程中，应让集热器在环境空气温度下达到热平衡后再测试泄漏量，确保集热器的工作压力介于零与厂家规定的额定工作压力之间，若厂家未明确说明，试验过程中应确保集热器进出口压差在  $0\text{Pa} \sim 250\text{Pa}$  范围内，或至少保证四个试验工况的集热器进出口压差在  $0\text{Pa} \sim 250\text{Pa}$  范围内。为确保空气泄漏量曲线绘制的准确性，试验过程中，集热器的压力应在其工作压力范围内均匀取值。

### 12.5 试验结果

绘制出集热器空气泄漏量随工作压力变化曲线。

## 13 稳态效率—流量试验

在集热器设计的最小流量与最大流量间（包括最小流量与最大流量）均匀取 5 个额定流量值进行稳态效率测试，按第 8 章方法进行试验，得到不同  $\dot{m}$  下的  $\eta$  值，绘制  $\eta-\dot{m}$  曲线。

## 14 高温性能试验

### 14.1 空晒

真空管型集热器按照 GB/T 17581 规定的内容进行。

平板型太阳能集热器按照 GB/T 6424 规定的内容进行。

#### 14.2 高温试验

根据 14.1 试验结果，确定集热器最高空晒温度，以集热器最高空晒温度作为集热器进口温度，测试集热器的耐高温性能，可利用空气加热装置加热达到实验条件，实验过程的空气流量取厂家推荐值，若厂家未推荐流量值，在单位总面积  $A_g$  时，取空气质量流量为  $0.01\text{kg}/(\text{s m}^2)$ 。

#### 14.3 外观检查

真空管型集热器试验前与高温试验后的外观检查按照 GB/T 17581 规定的内容进行。

平板型集热器试验前与高温试验后的外观检查按照 GB/T 6424 规定的内容进行。

#### 14.4 吸收涂层

真空管型集热器试验前涂层性能与高温试验后的吸收涂层衰减检查按照 GB/T 17049 规定的内容进行。

平板型集热器试验前涂层性能与高温试验后的吸收涂层衰减检查按照 GB/T 6424 规定的内容进行。

#### 14.5 透射比

真空管型集热器试验前与高温试验后的透射比按照 GB/T 17049 规定的内容进行。

平板型集热器试验前与高温试验后的透射比按照 GB/T 6424 规定的内容进行。

#### 14.6 压力降落

耐温试验后，压力降落按第 11 章规定的内容进行。

#### 14.7 空气泄漏量

耐温试验后，空气泄漏量按 12 章规定的内容进行。

### 15 太阳能中温空气集热器热性能检测报告

太阳能中温空气集热器热性能检测报告格式见附录 B。

## 附录 A

(规范性附录)

### 符号和单位

表 A.1 为本标准使用的符号和单位。

**表 A.1 符号和单位**

符号	意义	单位
$A_A$	集热器的吸热体面积	$m^2$
$A_a$	集热器的采光面积	$m^2$
$A_c$	集热器的轮廓采光面积	$m^2$
$A_G$	集热器总面积	$m^2$
$\alpha_1$	以 $T_i^*$ 为参考的系数	1
$\alpha_2$	以 $T_i^*$ 为参考的系数	1
$C_A$	集热器的有效热容	$J/^\circ C$
$c_{pda}$	干空气比热容	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
$c_{pma}$	湿空气比热容	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
$c_{pV}$	水蒸气的比热容	$J/(kg \cdot ^\circ C)$
$D$	管道内径	mm
$d(t)$	含湿量	g/kg(干空气)
$F'$	集热器效率因子	1
$F_R$	集热器热转移因子	1
$G$	总辐照度	$W/m^2$
$G_b$	直射辐照度	$W/m^2$
$G_d$	散射辐照度	$W/m^2$
$h$	空气的焓	kJ/kg
$K_\theta$	入射角修正系数	1
$m$	空气质量	kg
$\dot{m}$	空气质量流量	$kg/(m^2 \cdot s)$
$p_{ma}$	湿空气压力	Pa
$p_s(t)$	对应于温度 $t$ 的水蒸气饱和压力	Pa
$p_v$	水蒸气分气压力	Pa
$\dot{Q}$	从集热器获得的有用功	W
$\dot{Q}_L$	集热器损失功率	W
$R_{da}$	干空气气体常数	1

表 A.1 (续)

符号	意义	单位
$R_V$	水蒸气气体常数	J/(kg·°C)
$X_V$	水蒸气的质量分数	1
$X_{da}$	干空气的质量分数	1
$t_a$	环境或周围空气温度	°C
$t_e$	集热器出口空气温度	°C
$t_{e,t}$	$t$ 时刻集热器出口空气温度	°C
$t_{e,ss}$	稳态时集热器出口空气温度	°C
$K$	集热器时间常数	1
$T_i^*$	归一化温差= $(t_i-t_a)/G$	(m <sup>2</sup> ·°C)/W
$t_i$	集热器进口空气温度	°C
$T_m^*$	归一化温差= $(t_m-t_a)/G$	(m <sup>2</sup> ·°C)/W
$t_m$	空气平均温度	°C
$U$	以 $T_i^*$ 为参考的集热器热损系数	(m <sup>2</sup> ·°C)/W
$u$	环境或周围空气风速	m/s
$\bar{u}$	以 $T_m^*$ 为参考的集热器热损系数	W/(m <sup>2</sup> ·°C)
$U_L$	具有均匀吸热体温度 $t_m$ 的集热器总热损系数	W/(m <sup>2</sup> ·°C)
$\Delta t$	时间间隔	s
$\Delta T$	流体进、出口温差( $t_e-t_i$ )	°C
$\beta$	相对于水平面的倾角	°
$\theta$	直接日射入射角	°
$\lambda$	太阳辐射波长	μm
$\sigma$	斯蒂芬-玻尔兹曼常数	W/(m <sup>2</sup> ·°C)
$\rho_{ma}$	湿空气的密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{da}$	干空气的密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_V$	水蒸气的密度	kg/m <sup>3</sup>
$\eta$	以 $T_i^*$ 为参考的集热器热效率	1
$\bar{\eta}$	以 $T_m^*$ 为参考的集热器热效率	1
$\eta_0$	$T_i^*=0$ 时的 $\eta$	1
$\bar{\eta}_0$	$T_m^*=0$ 时的 $\eta$	1
$\phi$	空气相对湿度	1
$(\tau\alpha)_e$	有效透射吸收积	1
$(\tau\alpha)_{ed}$	散射的有效透射吸收积	1
$(\tau\alpha)_{en}$	在法向入射下直射的有效透射吸收积	1
$(\tau\alpha)_{e\theta}$	在入射角为 $\theta$ 下直接日射的有效透射吸收积	1

## 附录 B

(资料性附录)

太阳能中温空气集热器热性能检测报告格式



## 注 意 事 项

- 1.报告无“检验报告专用章”或检验单位公章无效。
- 2.复制报告未重新加盖“检验报告专用章”或检验单位公章无效。
- 3.报告无主检、审核、批准人签章无效。
- 4.报告涂改无效。
- 5.对检验报告若有异议，应于收到报告之日起十五日内向检验单位提出，逾期不予受理。
- 6.一般情况，委托单位仅对来样负责。

## 检测报告

报告编号：

共 页 第 页

样品编号：		检测地点：	
产品名称：		出厂编号：	
		生产日期：	
委托单位：		型号规格：	
		商标：	
生产单位：		送样数量：	
		送样日期：	
检测类别：		检测时间：	
检测依据：			
委托单位地址：			
检测用仪器、装置：			
检测项目：			
检 测 结 论			

批准：

审核：

主检：

## 检测报告

报告编号:

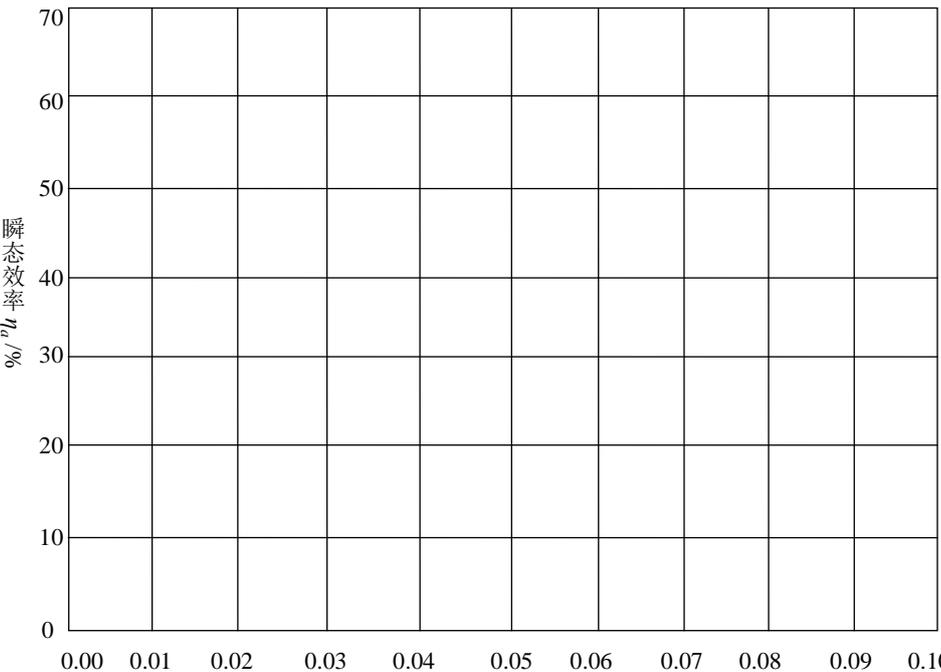
共 页 第 页

样品编号:		检测地点:	
检测项目:	外观检查		
检测前样品外观描述			
检测完毕样品外观描述			
检测项目:	空晒		
环境温度		风速	
辐照度		空晒温度	
检测项目	透射比		
空晒试验前盖板玻璃或真空管罩管玻璃			
高温试验后盖板玻璃或真空管罩管玻璃			
检测项目	吸收比		
空晒试验前盖板玻璃或真空管罩管玻璃			
高温试验后盖板玻璃或真空管罩管玻璃			
检测项目	压力降落（空晒试验前）		
环境温度		风速	
辐照度		质量流量	
进口压力		出口压力	
检测项目	压力降落（高温试验后）		
环境温度		风速	
辐照度		质量流量	
进口压力		出口压力	
检测项目	质量泄漏量（空晒试验前）		
环境温度		风速	
辐照度		压力降落	
进口质量流量		出口质量流量	
检测项目	质量泄漏量（高温试验后）		
环境温度		风速	
辐照度		压力降落	
进口质量流量		出口质量流量	

## 检测报告

报告编号:

共 页 第 页

样品编号:		检测地点:	
检测项目:	瞬态效率曲线 (基于采光面积, 进口温度)		
<p style="text-align: center;">基于采光面积 <math>A_a</math> 和集热器进口温度 <math>t_i</math> 的瞬态效率曲线 (线性拟合)</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright; margin-right: 10px;">瞬态效率 %/η</div>  </div> <p style="text-align: center;">基于进口温度的归一化温差 <math>T_i^*/[(m^2 \text{ k})/W]</math></p> <p>该集热器瞬态效率曲线方程为: <math>\eta_a = \eta_0 - U T_i^*</math></p> <p>式中:</p> <p><math>T_i^* = (t_i - t_a) / G</math></p> <p><math>t_i</math>——流体进口温度, °C;</p> <p><math>t_a</math>——环境温度, °C;</p> <p><math>G</math>——集热器采光面上总辐照度, <math>W/m^2</math>。</p>			

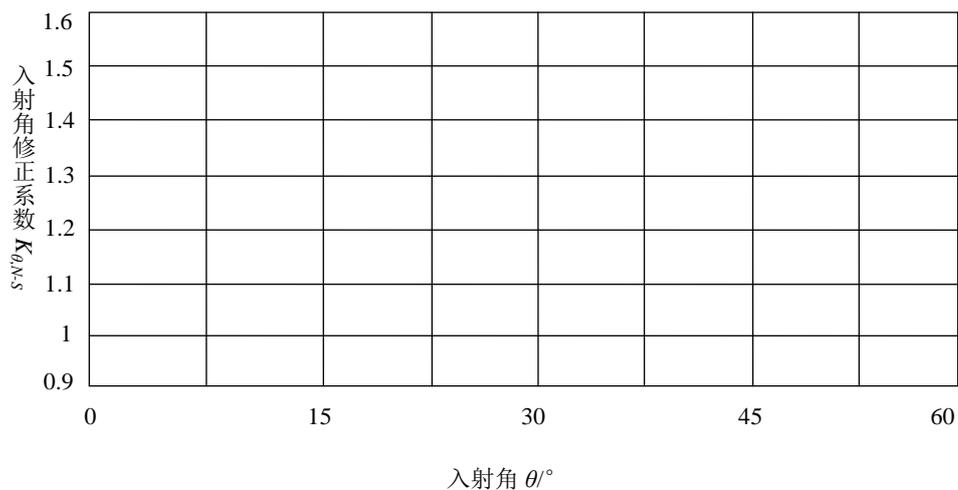
## 检测报告

报告编号:

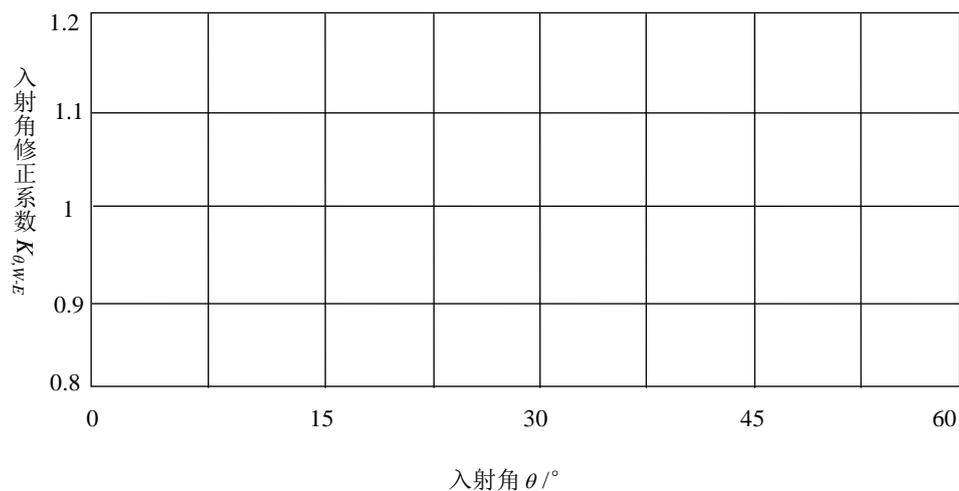
共 页 第 页

样品编号:		检测地点:	
检测项目:	入射角修正系数		
入射角 $\theta$	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$
修正系数 $K_{\theta,N-S}$	1		
修正系数 $K_{\theta,W-E}$	1		

入射角修正系数曲线



南北向排列时入射角为  $50^\circ$  时的入射角修正系数  $K_{\theta,N-S} = \underline{\hspace{2cm}}$



东西向排列时入射角度为  $50^\circ$  时的入射角修正系数  $K_{\theta,W-E} = \underline{\hspace{2cm}}$

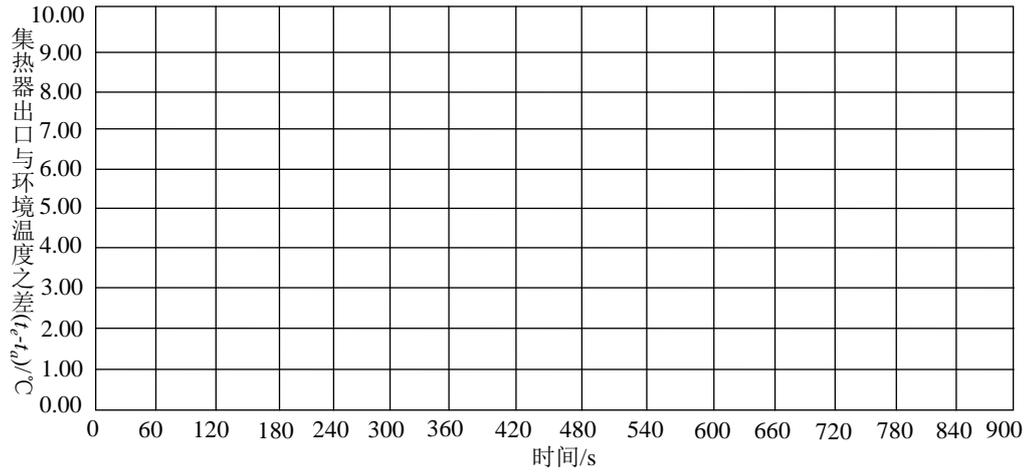
## 检测报告

报告编号:

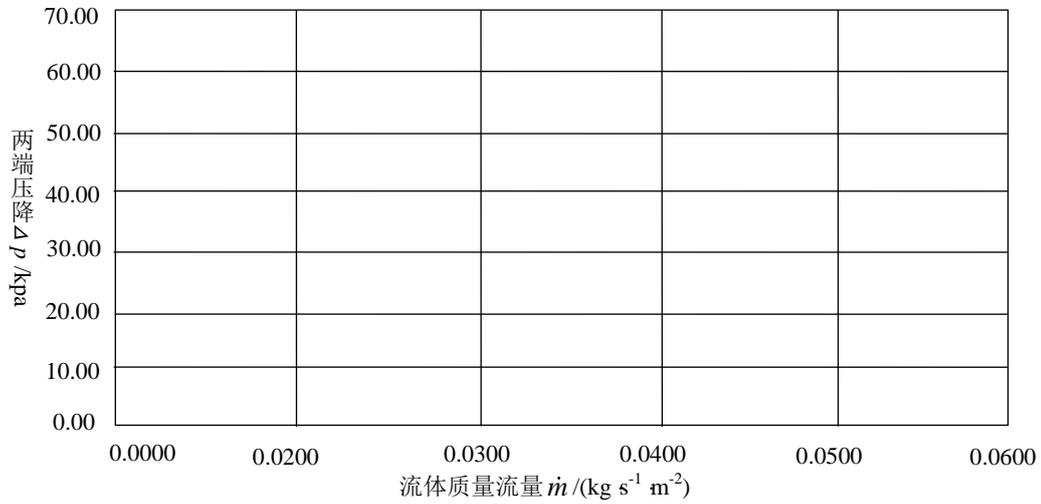
共 页 第 页

样品编号:		检测地点:	
检测项目:	时间常数		
时间常数 $\tau_c$			单位
			s

集热器出口温度  $t_e$  与环境温度  $t_a$  之差  $(t_e - t_a)$  与时间的关系曲线



两端压降  $\Delta p$  与质量流量  $\dot{m}$  的关系曲线



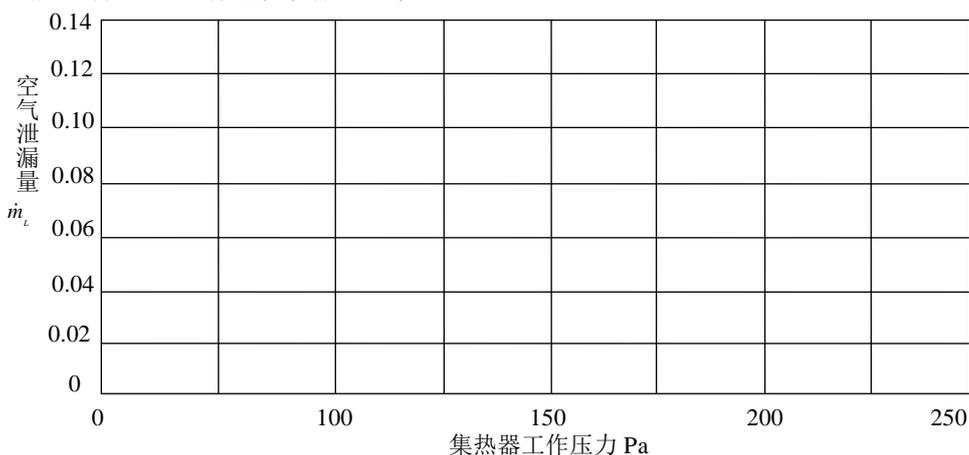
## 检测报告

报告编号:

共 页 第 页

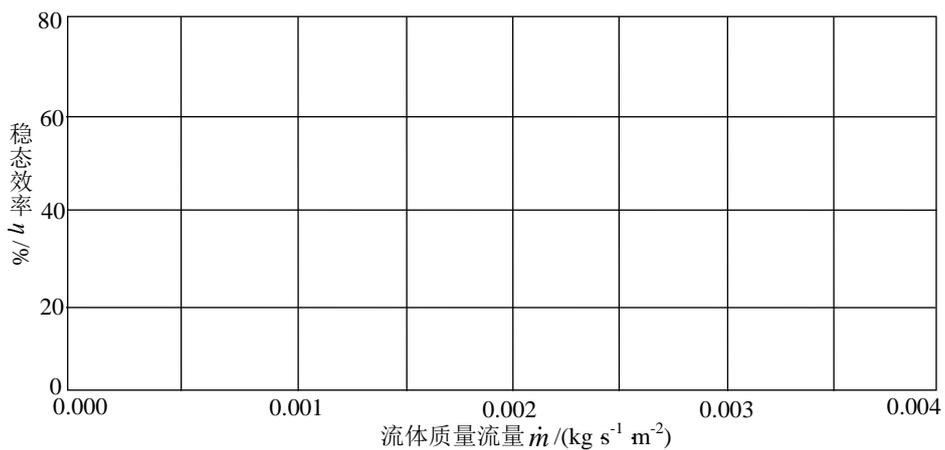
样品编号:		检测地点:	
检测项目:	空气泄漏量		
集热器总面积 $A_G$	$m^2$	集热器工作压力	Pa
厂家推荐空气质量流量	$kg/(m^2 s)$	空气泄漏量 $\dot{m}_L$	$kg/(m^2 s)$

空气泄漏量-集热器工作压力变化曲线



检验项目:	稳态效率-流体质量流量试验			
流体质量流量 $\dot{m}/(kg s^{-1} m^{-2})$				
稳态效率 $\eta/\%$				

稳态效率-流体质量流量曲线



# 检测报告

报告编号:

共 页 第 页

样品编号:			
样 品 描 述(平板型太阳能空气集热器)			
集热器:			
盖板材料:			
盖板层数:	层		
盖板厚度:	mm		
采光面积尺寸:	mm	采光面积:	m <sup>2</sup>
总面积尺寸:	mm	总面积:	m <sup>2</sup>
传热流体:			
吸热体材料:			

# 检测报告

报告编号:

共 页 第 页

样品编号:		
样 品 描 述(真空管型太阳能空气集热器)		
集热管根数:	根	
排列方式:		
采光面积:	m <sup>2</sup>	
总面积:	m <sup>2</sup>	
罩玻璃管:	外径:	mm
	结构尺寸:	mm
反射器:		
传热流体:		
吸热体涂层:		

## 附录 C

(规范性附录)

集热器特性

### C.1 总论

在稳态条件下运行的集热器热性能可以用传热流体平均温度  $t_m$  或集热器进口温度  $t_i$  的函数来表示。集热器总面积、吸热体面积、采光面积和轮廓采光面积都可以用作计算热效率的基准面积。

#### C.1.1 采用集热器进出口平均温度的基本方程

在稳态条件下运行的太阳能集热器的热性能，作为集热器进出口平均温度  $t_m$  和集热器总面积  $A_G$  的函数，可以用下列关系式加以描述：

$$\frac{\dot{Q}}{A_G} = F'(\tau\alpha)_e G - F'U_L(t_m - t_a) \dots\dots\dots(C.1)$$

或者依据直接测量参数表示：

$$\frac{\dot{Q}}{A_G} = \dot{m}c_f \frac{t_e - t_i}{A_G} \dots\dots\dots(C.2)$$

集热器热效率则可以由下式给出：

$$\bar{\eta}_G = \frac{\dot{Q}}{A_G G} = F'(\tau\alpha)_e - \frac{F'U_L(t_m - t_a)}{G} = \dot{m}c_f \frac{t_e - t_i}{A_G} \dots\dots\dots(C.3)$$

式(C.3)表示：如果太阳能集热器的效率曲线是依据  $(t_m - t_a)/G$  而绘制的，假若  $U_L$  是一个常数，那么效率曲线将是一条直线。直线的斜率将等于  $F'U_L$ ，直线在  $y$  轴上的截距将等于  $F'(\tau\alpha)_e$ 。

实际上， $U_L$  不是一个常数，而是吸热板温度和环境空气温度的函数。尽管式(C.3)可以适合许多太阳能集热器，但有些集热器可能需要使用更高次的方程来说明这些影响。建议  $U_L$  的变化由一个包含  $(t_m - t_a)$  的线性关系式来代表，那么允许：

$$F'U_L = b + c(t_m - t_a) \dots\dots\dots(C.4)$$

此处  $b$  和  $c$  都是系数，式(C.1)变成：

$$\frac{\dot{Q}}{A_G} = F'(\tau\alpha)_e G - b(t_m - t_a) - c(t_m - t_a)^2 \dots\dots\dots(C.5)$$

或者以效率的形式表示为：

$$\eta_G = F'(\tau\alpha)_e - b \frac{t_m - t_a}{G} - c \frac{(t_m - t_a)^2}{G} \dots\dots\dots(C.6)$$

就式(C.6)来说，如果画出效率值对  $(t_m - t_a)/G$  的关系曲线，则将是一条二次曲线。

式(C.3)和式(C.6)可以用与 C.1 中给出的形式上一致的符号在此写出。对于传热流体平均温度  $t_m$  和总面积  $A_G$ ，瞬态效率方程是：

$$\bar{\eta}_G = F'(\tau\alpha)_e - F'U_L \frac{t_m - t_a}{G} \dots\dots\dots(C.7)$$

和

$$\bar{\eta}_G = F'(\tau\alpha)_e - \bar{a}_{1G} \frac{t_m - t_a}{G} - \bar{a}_{2G} G \left( \frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(C.8)$$

对于传热流体平均温度  $t_m$  和吸热体面积  $A_A$ ，瞬态热效率方程可由式(C.7)和式(C.8)推出，即：

$$\bar{\eta}_A = \bar{\eta}_G \frac{A_G}{A_A} \dots\dots\dots(C.9)$$

对于传热流体平均温度  $t_m$  和采光面积  $A_a$ ，瞬态热效率方程可由式(C.7)和式(C.8)推出，即：

$$\bar{\eta}_a = \bar{\eta}_G \frac{A_G}{A_a} \dots\dots\dots(C.10)$$

对于传热流体平均温度  $t_m$  和采光面积  $A_c$ ，瞬态热效率方程可由式(C.7)和式(C.8)推出，即：

$$\bar{\eta}_c = \bar{\eta}_G \frac{A_G}{A_c} \dots\dots\dots(C.11)$$

### C.1.2 采用集热器进口温度的基本方程

在稳态条件下的太阳能集热器热性能，作为集热器进口温度  $t_i$  和集热器总面积  $A_G$  的函数，可以用下列关系式加以描述：

$$\frac{\dot{Q}}{A_G} = F_R(\tau\alpha)_e G - F_R U_L (t_i - t_a) \dots\dots\dots(C.12)$$

或根据式(C.2)中给出测得的参数来表示：

$$\frac{\dot{Q}}{A_G} = \dot{m} c_f \frac{t_e - t_i}{A_G} \dots\dots\dots(C.13)$$

则集热器热效率由下式给出：

$$\eta_G = \frac{\dot{Q}}{A_G G} = F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L (t_i - t_a) / G = \dot{m} c_f \frac{t_e - t_i}{A_G G} \dots\dots\dots(C.14)$$

式(C.12)表示：如果画出太阳能集热器效率对  $(t_i - t_a)/G$  的曲线，假若  $U_L$  是常数，那么效率曲线是一条直线，直线的斜率将等于  $F_R U_L$ ，同时直线在  $y$  轴上的截距将等于  $F_R(\tau\alpha)_e$ 。已经在 C.1.1 中提到， $U_L$  不是常数而是吸热板温度和环境温度的函数。采用与 C.1.1 中相似的过程，可以用一个二次方程来表示瞬态效率  $\eta_G$ 。

对于集热器进口温度  $t_i$  和总面积  $A_G$ ，瞬态热效率方程是：

$$\eta_G = F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{t_i - t_a}{G} \dots\dots\dots(C.15)$$

同时

$$\eta_G = F_R(\tau\alpha)_e - a_{1G} \frac{t_i - t_a}{G} - a_{2G} G \left( \frac{t_i - t_a}{G} \right)^2 \dots\dots\dots(C.16)$$

对于集热器进口温度  $t_i$  和吸热体面积  $A_a$ ，则瞬态热效率方程可由方程式(C.15)和式(C.16)推出，即：

$$\eta_a = \eta_G \frac{A_G}{A_a} \dots\dots\dots(C.17)$$

对于集热器进口温度  $t_i$  和采光面积  $A_a$ ，瞬态热效率方程可由式(C.15)和式(C.16)推出，即：

$$\eta_a = \eta_G \frac{A_G}{A_a} \dots\dots\dots(C.18)$$

对于集热器进口温度  $t_i$  和采光面积  $A_c$ ，瞬态热效率方程可由式(C.15)和式(C.16)推出，即：

$$\eta_c = \eta_G \frac{A_G}{A_c} \dots\dots\dots(C.19)$$

### C.1.3 热性能试验数据的转换

对于集热器进出口平均温度  $t_m$  和集热器总面积  $A_G$ ，集热器瞬态热效率方程的线性形式是由式(C.7)描述的，即：

$$\bar{\eta}_G = F'(\tau\alpha)_e - F' U_L \frac{t_m - t_a}{G} \dots\dots\dots(C.20)$$

对于集热器进口温度  $t_i$  和总面积  $A_G$ ，式(C.12)同样是相应的瞬态热效率线性方程，即：

$$\eta_G = F_R(\tau\alpha)_e - F_R U_L \frac{t_i - t_a}{G} \dots\dots\dots(C.21)$$

如果传热流体流量  $\dot{m}$  是已知的，假设流体通过集热器的温升为线性，则式(C.12)在  $y$  轴上的截距  $F_R(\tau\alpha)_e$  和斜率  $F_R U_L$  与式(C.7)相对应的数值  $F'(\tau\alpha)_e$  和  $F'U_L$  可通过下列公式建立联系：

$$F_R(\tau\alpha)_e = F'(\tau\alpha)_e \left( \frac{\zeta}{\zeta + \frac{F'U_L}{2}} \right) \dots\dots\dots(C.22)$$

$$F_R(\tau\alpha)_e = F'(\tau\alpha)_e \left( \frac{\zeta}{\zeta + \frac{F'U_L}{2}} \right) \dots\dots\dots(C.23)$$

式中：

$$\zeta = \frac{\dot{m}c_f}{A_G} \dots\dots\dots(C.24)$$

可以用式(C.21)和式(C.22)来将一组性能特性转换成另一组性能特性。

### C.2 集热器时间常数

太阳能集热器瞬态运行的控制方程可表示如下：

$$C \frac{dt_m}{A_G dt_i} = F'G(\tau\alpha)_e - F'U_L(t_m - t_a) - \frac{\dot{m}c_f}{A_G}(t_e - t_i) \dots\dots\dots(C.25)$$

如果：

- a) 太阳辐照  $G$  或进口温度  $t_i$  突然改变后保持恒定；
- b)  $(\tau\alpha)_e$ 、 $U_L$ 、 $t_a$ 、 $\dot{m}$  和  $c_f$  在很短的时间内可看作常数；
- c) 传热流体出口温度随时间的变化率与传热流体平均温度随时间的变化率有关联。那么下式成立：

$$\frac{dt_m}{dt} = K \frac{dt_e}{dt} \dots\dots\dots(C.26)$$

其中：

$$K = \left( \frac{\dot{m}c_f}{F'U_L A_G} \right) \left( \frac{F'}{F_R} - 1 \right) \dots\dots\dots(C.27)$$

那么式(C.22)可以求解，给出传热流体出口温度作为时间的函数形式：

$$\frac{F'G(\tau\alpha)_e - F'U_L(t_m - t_a) - \frac{\dot{m}c_f}{A_G}(t_{e,i} - t_i)}{F'G(\tau\alpha)_e - F'U_L(t_m - t_a) - \frac{\dot{m}c_f}{A_G}(t_{e,i} - t_i)} = e^{\left( \frac{\dot{m}c_f}{KC} t \right)} \dots\dots\dots(C.28)$$

参量  $KC/\dot{m}c_f$  被认为是时间常数。

注：这个条款中包括的方程都是以  $t_m$  和  $A_G$  为参数给出的。这些方程也可以用  $t_i$ 、 $A_A$  或  $t_i$ 、 $A_a$  或  $t_i$ 、 $A_c$  给出。相互转换的方法在 C.1 中给出。

### C.3 散射辐照度

散射辐照度对集热器效率的影响取决于集热器盖板系统和它的透射特性。对于大多数的太阳能集热器，散射辐照度的投射比要比太阳直射辐射的透射比低，所以集热器效率随着散射日射百分比的增大而减小。

### C.4 入射角的影响

平板型集热器盖板的透射比是随着入射角的增大而减小，造成这种情况与盖板材料的光

学性能有关，光线以大入射角入射时，吸热体受到遮挡。综合结果是随着入射角增大，集热器效率减小。

### C.5 等效法向太阳辐射

对于太阳能加热系统计算模型，集热器性能通常由下式表示：

$$\dot{Q} = A_G [\bar{\eta}_{ob} K_\theta G_b + \bar{\eta}_{od} G_d - \bar{U}(t_m - t_d)] \dots\dots\dots (C.29)$$

这里  $\bar{\eta}_{ob}$  和  $\bar{\eta}_{od}$  分别是直接太阳辐射和散射太阳辐射的  $F(\tau\alpha)_e$  值，并且直射辐照度  $G_b$  和散射辐照度  $G_d$  在模型中为每一个时间段都应计算出来。

一个相似的探讨就是进行集热器室外试验。室外通常有些散射辐射。集热器试验时，入射角修正系数可以通过移动集热器基本保持一致。如果集热器的光学性质是已知的，那么简单的集热器性能特性可以通过在不同散射和直射辐照条件下进行的试验来获得，其中每一个试验点的等效法向辐照度  $G'_n$  用以下关系式计算：

$$G'_n = \frac{(\tau\alpha)_{ed} G_b + (\tau\alpha)_{od} G_d}{(\tau\alpha)_{en}} \dots\dots\dots (C.30)$$

### C.6 风的影响

在低风速情况下，集热器上部会形成一个热空气隔热层而减少热损失，因此最好在风速超过 2m/s 的条件下进行集热器的热性能测试。