



中华人民共和国国家标准

GB/T 4271—XXXX
代替 GB/T 4271-2007

太阳能集热器性能试验方法

Test methods for solar collectors

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

（征求意见稿）

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 录

前 言..... III

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 总则..... 5

6 液体流道的耐压测试..... 7

7 空气泄露率测试（仅适用于空气集热器）..... 8

8 破裂性能（仅适用于空气集热器）..... 9

9 标准滞止温度..... 9

10 曝晒和半曝晒..... 11

11 外热冲击..... 12

12 内热冲击（仅适用于液体加热集热器）..... 13

13 淋雨..... 13

14 耐冻..... 15

15 正/负压机械载荷..... 16

16 耐撞击..... 18

17 脉冲压力..... 19

18 最终检验..... 19

19 测试报告..... 20

20 热性能..... 20

21 集热器的安装和位置..... 22

22 仪器仪表..... 23

23 测试安装..... 26

24 热性能测试方法..... 30

25 集热器参数的计算..... 36

26 确定有效热容量和时间常数..... 40

27 测定入射角修正系数（IAM）..... 42

28 压力降落..... 45

附录 A（规范性附录） 检测报告..... 47

附录 B（规范性附录） 稳态和准动态模型..... 48

附录 C（规范性附录） 水的密度和热容..... 49

附录 D（资料性附录） 太阳能集热器测试标准不确定度评估..... 50

附录 E（资料性附录） 速度加权平均温度测量..... 53

附录 F（资料性附录） 材料明细..... 54

附录 G（资料性附录） 集热器热性能参数的面积转换..... 55

图 1 太阳能空气集热器漏风率测量装置示意图..... 8

图 2 淋雨测试集热器和喷嘴的位置..... 14

图 3 平板式集热器(带中间压条)的喷淋区域..... 15

图 4 真空管集热器的喷淋区域..... 15

图 5 安装附件和连接点的说明 17

图 6 封闭测试循环回路示例 27

图 7 封闭测试循环回路示例 28

图 8 与大气相通的集热器测试配置示例 29

图 9 ϑ_m - ϑ_a 与 G_{hem} 的关系 34

图 10 G_b 与 θ 34

图 11 G_d 与 G_{hem} 34

图 12 风速和 G_{hem} 35

图 13 ϑ_a - ϑ_{sky} 与 G_{hem} 35

图 14 ϑ_m - ϑ_a 和风速 u 36

图 15 集热器时间常数 41

图 16 与测定 IAM 有关的对称的平面和角度 42

图 17 空气集热器压力降落的测量 46

图 E.1 传感器布置图 53

图 E.2 温度传感器示例 53

表 1 试验项目顺序表 5

表 2 用于曝晒试验和热冲击的气候参考条件 12

表 3 冰球质量和试验速度 18

表 4 测量参数的最大标准不确定度 25

表 5 试验中测量的参数 32

表 6 一个测试周期内的参数变化允许值 33

表 7 标准报告条件 39

表 8 集热器输出功率 40

表 9 权重因子值 41

表 F.1 材料 54

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替GB/T 4271-2007《太阳能集热器热性能试验方法》。

本文件与GB/T 4271-2007相比主要技术内容变化为：

- a) 拓展了适用集热器的类型（本版第1章）
- b) 增加了液体流道的耐压测试（本版第6章）
- c) 增加了空气集热器泄漏率测试（本版第7章）
- d) 增加了空气集热器破裂性能测试（本版第8章）
- e) 增加了标准滞止温度测试（本版第9章）
- f) 增加了曝晒和半曝晒测试（本版第10章）
- g) 增加了外热冲击测试（本版第11章）
- h) 增加了内热冲击测试（本版第12章）
- i) 增加了淋雨测试（本版第13章）
- j) 增加了耐冻测试（本版第14章）
- k) 增加了正/负压机械载荷测试（本版第15章）
- l) 增加了耐撞击测试（本版第16章）
- m) 增加了脉冲压力（本版第17章）
- n) 增加了直射辐射参数测量（本版22.3）
- o) 增加了空气集热器热性能测试（本版23.2、25.2）
- p) 增加了槽式、蝶式、菲涅尔等跟踪聚焦集热器和热电联产集热器热性能测试（本版24.1）
- q) 取消对集热器最高进口温度的要求，仅保留对集热器最低进口温度的要求（本版24.4）
- r) 增加了集热器的输出功率（本版25.3）
- s) 增加了空气集热器入射角修正系数、压力降落测试（本版27.3.2、28.3）

本文件的附录A、附录B、附录C为规范性附录，附录D、附录E、附录F、附录G为资料性附录。

本文件由全国太阳能标准化技术委员会（SAC/TC402）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件于1984年首次发布，2000年第一次修订，2007年第二次修订。

太阳能集热器性能试验方法

1 范围

本文件规定了使用各类工质的太阳能集热器耐久性、可靠性、安全性及热性能的测试方法。本文件的测试方法适用于实验室测试和现场测试。

本文件适用于液体工质集热器、空气集热器、太阳能光伏光热集热器和槽式、蝶式、菲涅尔等跟踪聚焦集热器，以及使用外部电源保证正常安全运行的太阳能集热器。电气安全及与发电直接相关的性能不在本文件的范围内。

本文件不适用于集热和蓄热无法分开的太阳能集热器。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 3100 国际单位制及其应用

GB/T 6424 平板型太阳能集热器

GB/T 12936 太阳能热利用术语

GB/T 17049 全玻璃真空太阳集热管

GB/T 17581 真空管型太阳能集热器

GB/T 19141 家用太阳能热水系统技术条件

GB/T 19565 总辐射表

GB/T 19775 玻璃-金属封接式热管真空太阳集热管

GB/T 26974 平板型太阳能集热器吸热体技术要求

GB/T 28745 家用太阳能热水系统储水箱试验方法

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 9488:1999 太阳能术语（Solar energy—vocabulary）

ISO 9806:2017 太阳能—太阳能集热器—测试方法（Solar energy — Solar thermal collectors — Test methods）

3 术语和定义

GB 3100、GB/T 6424、GB/T 12936、GB/T 17581、GB/T 19141、ISO 9488:1999、ISO 9060和ISO 9806确立的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

纵向平面 longitudinal plane

垂直于集热器平面和聚光轴的平面，或平面双轴几何图形的最大对称线。

3.2

最高工作温度 maximum operating temperature

厂商规定的在集热器或系统正常工作时允许的最高温度。

3.3

排气 outgassing

材料曝晒在高温下释放气体的过程，和/或减压的过程。

3.4

反射器 reflector

可反射太阳辐射的表面。

3.5

横向平面 transversal plane

垂直于集热器平面和聚光轴法线的平面，或平面双轴几何图形的最短对称线。

3.6

触发温度 trigger temperature

达到安全运行保护条件而使控制装置启动的温度值。

4 符号与单位

下列符号适用于本文件。

A_G	集热器总面积	m^2
a_1	热损失系数	$W/(m^2 \cdot K)$
a_2	温度相关的热损系数	$W/(m^2 \cdot K^2)$
a_3	风速相关的热损系数	$J/(m^3 \cdot K)$
a_4	天空温度相关的热损系数	—
a_5	有效热容	$J/(m^2 \cdot K)$
a_6	零损失效率的风速	s/m
a_7	风速相关的红外辐射交换系数	$W/(m^2 \cdot K^4)$
a_8	辐射损失	$W/(m^2 \cdot K^4)$
b_u	集热器效率系数(风相关)	s/m
C	集热器的有效热容	J/K
C_R	几何聚光比	—

c_f	传热工质的比热容	J/(kg·K)
$c_{f,i}$	集热器进口传热工质的比热容	J/(kg·K)
$c_{f,e}$	集热器出口传热工质的比热容	J/(kg·K)
$c_{f,a}$	环境空气的比热容	J/(kg·K)
E_L	长波辐照度($\lambda>3\mu\text{m}$)	W/m ²
G_{hem}	半球日射辐照度	W/m ²
G_S	用于计算标准停滞温度的半球日射辐照度	W/m ²
G_m	平均半球日射辐照度	W/m ²
$G' \quad '$	净辐照度	W/m ²
G_b	直射辐照度	W/m ²
G_d	散射辐照度	W/m ²
H	曝晒试验时集热器表面上的累计辐照量	MJ/m ²
$K_{\text{hem}}(\theta_L, \theta_T)$	基于半球日射辐照度的入射角修正系数	—
$K_b(\theta_L, \theta_T)$	基于直射辐照度的入射角修正系数	—
$K_{\theta L}$	纵向平面上的入射角修正系数	—
$K_{\theta T}$	横向平面上的入射角修正系数	—
K_d	基于散射日射辐射的入射角修正系数	—
\dot{m}	传热工质的质量流量	kg/s
\dot{m}_{min}	性能测试的最小质量流量	kg/h
\dot{m}_{max}	性能测试的最大质量流量	kg/h
\dot{m}_e	下游气体的质量流量	kg/s
\dot{m}_i	上游气体的质量流量	kg/s
\dot{m}_l	泄漏气体的质量流量	kg/s
$p_{f,e}$	太阳能集热器出口传热工质(空气)的静压	Pa
$p_{f,i}$	太阳能集热器进口传热工质(空气)的静压	Pa
p_{abs}	环境空气的绝对压力	Pa
Q	集热器的得热量	W
Q_{Peak}	峰值得热量。当 $G_b=850\text{W/m}^2, G_d=150\text{W/m}^2$ 和 $\vartheta_m-\vartheta_a=0\text{K}$ 时, 集热器的得热量	W
R_D	水蒸气的气体常数	461.4 J/(kg·K)
R_L	空气的气体常数	287.1 J/(kg·K)
T	绝对温度	K
t	时间	s
U	环境空气流速	m/s
u'	降低环境空气流速 $u'=u-3\text{m/s}$	m/s
U	参考 $(\vartheta_m-\vartheta_a)/G_{\text{hem}}$ 测量的集热器总热损系数	W/(m ² ·K)
V_f	集热器的工质容量	m ³

V	体积流量	m^3/s
V_e	太阳能集热器出口处的体积流量	m^3/s
V_i	太阳能集热器进口处的体积流量	m^3/s
V_l	泄露的体积流量	m^3/s
W_{peak}	峰值功率	W
W	集热器输出功率	W
$X_{W,a}$	环境空气的含水量	kg水/kg干空气
$X_{W,e}$	太阳能集热器出口处空气的含水量	kg水/kg干空气
$X_{W,i}$	太阳能集热器进口处空气的含水量	kg水/kg干空气
Δp	工质进、出口的压力差	Pa
Δt	时间间隔	s
ΔT	工质进、出口的温差($\vartheta_e - \vartheta_{in}$)	K
γ	太阳方位角	°
η_b	基于直射辐照度 G_b 的集热器效率	—
η_{hem}	基于半球向辐照度 G_{hem} 的集热器效率	—
$\eta_{0,b}$	基于直射辐照度 G_b 的集热器效率截距($\vartheta_m - \vartheta_a = 0\text{K}$ 的 η_b)	—
$\eta_{0,\text{hem}}$	基于半球向辐照度 G_{hem} 的集热器效率截距($\vartheta_m - \vartheta_a = 0\text{K}$ 的 η_{hem})	—
$\eta_{\text{hem}, \dot{m}_i}$	参考质量流量 \dot{m}_i 的集热器效率	—
θ	入射角	°
θ_L	纵向入射角 θ : 集热器法线平面与射入纵向平面光束之间的角度	°
θ_T	横向入射角 θ : 集热器法线平面与射入横向平面光束之间的角度	°
ϑ_a	环境温度	°C
ϑ_{am}	实测环境温度	°C
ϑ_{as}	对应标准滞止温度的环境温度	°C
ϑ_e	集热器出口温度	°C
ϑ_i	集热器进口温度	°C
ϑ_m	传热工质的平均温度	°C
$\vartheta_{\text{max_op}}$	最高工作温度	°C
ϑ_{stg}	标准滞止温度	°C
ϑ_{sky}	大气或天空温度	°C
$\vartheta_{\text{trigger}}$	启动安全控制动作的触发温度	°C
$\vartheta_{m,\text{th}}$	体积流量加权平均温度	°C
$\vartheta_{\text{mp},e}$	下游空气质量流量计处的工质温度	°C
$\vartheta_{\text{mp},i}$	上游空气质量流量计处的工质温度	°C

ϑ_{sm}	吸热体的平均温度	℃
λ	波长	μm
ρ	传热工质密度	kg/m ³
ρ_l	空气密度	kg/m ³
σ	斯蒂芬-玻耳兹曼常数	W/(m ² ·K ⁴)
τ_c	集热器时间常数	s
τ	透射比	—
$(\tau\alpha)$	透射比和吸收比的乘积	—

5 总则

5.1 测试顺序

太阳能集热器的全性能测试包括耐久性和热性能测试，测试顺序应按表 1 规定。试验顺序可以根据需要调整，也可按要求仅对单个项目进行测试。对于某些测试，必须进行预处理或半曝晒试验，具体要求见第 10 章。对于全性能试验和单个项目试验，宜按第 18 章的最终检查结果作为测试结论。

表 1 试验项目顺序表

章 节	试验项目
第 7 章	空气泄露率 f
第 8 章	破裂 f
第 9 章	标准滞止温度
第 10 章	曝晒 b
第 11 章	外热冲击 b
第 12 章	内热冲击 b,e
第 13 章	淋雨 f
第 14 章	耐冻 c,f
第 6 章	耐压 a,d,e
第 15 章	机械荷载 f
第 16 章	耐撞击 g
第 17 章	脉冲压力 h
第 18 章	最终检查
第 20—27 章	热性能 i
第 28 章	压力降落
a 对于聚合物材料吸热体的集热器，应在标准滞止温度条件下进行该项实验。	
b 外热冲击和内热冲击试验可结合曝晒试验进行	
c 适用于声明具备耐冻功能的集热器和热管集热器	
d 仅适用于液体加热集热器，最终检查前的最后一项测试	
e 集热器流道包含聚合物（包括密封材料）时，应先完成半曝晒试验	
f 本试验进行前，应先完成半曝晒试验，对于传热工质直接接触聚合物的材料，应在标准滞止温度条件下进行本项试验	
g 盖板为聚合物时，该试验进行前，应先完成一半的曝晒试验	

- | |
|--|
| <p>h 仅适用于承压式集热器</p> <p>i 对于热管集热器，热性能试验前应进行曝晒试验</p> |
|--|

5.2 特定属性集热器的测试

5.2.1 概述

5.1 的测试顺序适用于当前大多数产品。本文件也适用于一些带有特定结构特征的集热器的性能测试。

5.2.2 采用外部或内部电源及采用主被动措施确保正常运行和自我保护的集热器

5.2.2.1 概述

对此类集热器的测试应在正常运行条件下进行，测试应能适当的表征其在正在运行条件下的性能，和/或集热器在标准运行条件过程中保护自身免受重大故障影响的能力。所有测试均应使用厂商提供的集热器设备(跟踪装置、泵、传感器等)，并使用厂商指定的外部电源。厂商应明确说明设备的保护特性，并明确说明设备是否需要外部能源才能运行。为驱动工质循环、保持集热器正常运行的循环泵或风机，不被确认为集热器的组成部分。

5.2.2.2 使用外部或内部电源的集热器

应对集热器正常运行的总功耗进行评估，并在试验报告中以适当的方式注明。

5.2.2.3 使用主动或被动措施进行自我保护的集热器

保护系统可以是主动的(如执行器、电机和其他设备)，也可以是被动的(如使用热反应材料或其他设计措施)。厂商应提供控制设定值和控制参数。所有耐久性测试应按照本条款进行，在不激活自我保护系统条件下，尽可能接近这些临界值。必要时，集热器应采用适当的工质和合适流量进行测试。以上测试条件应优先于本文件后续章节规定的测试条件。

在附加测试中，在本文件规定的实验条件的临界值下，每一项自我保护功能应至少检查两次。

对于使用外部电源进行自保护的装置，假定在正常运行和超过自保护临界值后的 5 分钟后，电源应持续供电。应检查系统是否能及时保护集热器，即使连续完全停电至少一小时后，系统仍然可以保护集热器。

如果以上方法都不适用，则应确定一个替代测试方案，验证在正常运行条件下以及在必须启动自我保护的情况下，所有主动和被动的运行功能均可以发挥作用。

5.2.2.4 报告

使用外部电源以及主动或被动措施正常运行并自我保护的集热器，应在附录 A 的相应条款处描述并体现在报告中。如果在测试中使用循环工质，则应说明工质的流量、温度和持续时间。

5.2.3 太阳能光伏光热集热器

5.2.3.1 概述

热电联供太阳能集热器的耐久性和热性能测试与其他类型太阳能集热器要求相同。热性能测试应在热和电同时稳态输出，且发电量最大的条件下进行。耐久性测试时，发电设备不应连接到任何负载(系统开路)，避免集热器被冷却，并模拟集热器最不利的工作条件。

5.2.3.2 报告

在试验报告中应详细说明发电设备，同时给出各个测试过程中的发电运行模式。

5.2.4 风和/或红外敏感集热器 (WISC)

5.2.4.1 概述

有些类型的集热器对风和/或热辐射敏感。通常这类集热器的吸热体或传热工质与环境密切接触。典型的集热器如无盖板聚合物集热器，太阳能光伏光热集热器或空气集热器。

5.2.5 立面集热器

5.2.5.1 概述

根据厂家的说明，集热器工作倾角在 75° 以上确认为立面集热器。

5.2.6 空气和液体加热的集热器

5.2.6.1 概述

设计工质为液体加热和空气加热的集热器，可以在明确定义集热器功能的条件下，同时进行两种工质的性能测试，也可以单独进行。

空气和液体加热集热器的耐久性和热性能测试与其他类型太阳能集热器要求相同。对于热性能测试，应符合 5.2.6.2 或 5.2.6.3 要求：

5.2.6.2 液体加热集热器的热性能测试条件

当测试集热器为液体加热集热器时，作为空气集热器工作的部件应按厂商指定的工作流量运行，进口温度应接近环境温度。

5.2.6.3 空气加热集热器的热性能测试条件

当测试集热器为空气加热集热器时，作为液体加热集热器的部件应按厂商指定的工作流速操作，进口温度应接近环境温度。

6 液体流道的耐压测试

6.1 目的

本测试用于评估集热器工质通道最大工作压力，该值由厂商给出。

6.2 非聚合物材料流体通道

6.2.1 设备和方法

该设备由液压或气动压力源、安全阀、放气阀和标准不确定度优于 5% 的压力表组成。打压前，利用放气阀排空流道内的空气，然后在常温下向流道内充满工质并加压至试验压力。当集热器流体通道内的压力升高到测试压力后，流体通道应通过隔离阀从压力源隔离。在测试期间，流体通道应与压力源保持隔离，并观察流体通道内的压力。

6.2.2 试验条件

流体通道应在环境温度为 5°C ~ 35°C 范围内测试压力并且远离光线。试验压力应为厂商提供的集热器最大工作压力的 $1.5 \pm 5\%$ 。测试压力应保持至少 15 分钟。

6.3 聚合物材料流体通道

6.3.1 设备和方法

聚物流体通道的耐压测试应在标准滞止温度下进行。测试装置由液压或气动压力源、将流体通道加热到所需测试温度的设备组成。流体通道应在测试前保持测试温度至少 30 分钟，或在整个测试期间

保持测试温度至少 30 分钟。测试压力值应稳定维持在 $\pm 5\%$ 的范围内。

选择下列方法之一：

- a)将流体管道浸入恒温水浴中，使用压缩空气或墨水作为测试介质。
- b)连接温度和压力控制的液体回路。
- c)在太阳模拟器或在自然辐射下加热集热器，并使用工质作为测试介质。

6.3.2 试验条件

测试温度按厂商指定的最大运行温度或标准滞止温度，两者取较大者。对于在滞止状态下(按 5.2.2.3 测试)承受大气压力并进行排气的系统，测试温度应为厂商指定的最大运行温度。测试压力应该是厂商指定的集热器最大工作压力的 1.5 倍。测试压力应保持至少 1 小时。

6.4 结果和报告

应检查流体通道是否有泄漏、膨胀和变形。对于非聚物流体通道，如果压力损失 $\Delta p > 5\%$ 或达到 17kPa，以两者中的较大值为准，并观察到泄露的液滴，则说明发生了泄漏；对于聚物流体通道，如果观察到液滴或漏气，则说明发生了泄漏。应在报告中说明结果，具体如附录 A 所述。

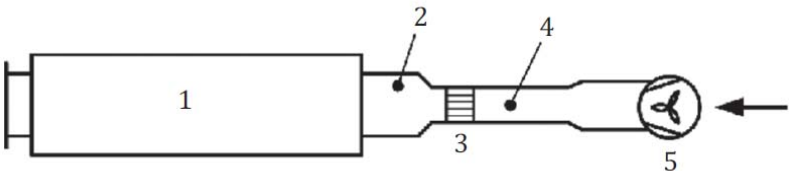
7 空气泄露率测试（仅适用于空气集热器）

7.1 目的

本测试是为了量化空气集热器的泄漏量。有些集热器的设计并不适用气密性测试，例如，与环境相通的集热器。

7.2 设备和方法

采用体积流量计测试空气集热器的气密性，如图 1 所示。由被测集热器以外的泄漏量应从集热器测试结果中扣除。



- 1 太阳能空气集热器
- 2 压力计
- 3 流量计
- 4 温度传感器
- 5 风机

图 1 太阳能空气集热器漏风率测量装置示意图

7.3 测试条件

除一个出口外，其余管道都应密封。管道应与体积流量计和可调速风机连接。使用压差测量装置测量管道与环境之间的压差。

测试包括正压和负压泄漏率。试验应分别以正压和负压进行。体积流量计测量标准不确定度应优于 $\pm 2\%$ ，压差测量装置的精度应优于 $\pm 10\text{Pa}$ 。

对于聚物流体通道，应在厂商指定的最大工作温度下测试。

7.4 结果和报告

应按附录 A 的要求给出结果报告。

8 破裂性能（仅适用于空气集热器）

8.1 目的

本测试的目的是确定空气集热器及其风管的耐压能力。

8.2 设备和方法

8.2.1 概述

试验装置与空气集热器气密性测试相似，测量设备的精度应符合 7.3 要求。变频风机应能够提供适合的正负压。

试验应在环境温度条件下进行。如果传热介质与聚合物材料直接接触，测试应在标准滞止温度下进行。集热器可以采用下列方法之一进行加热：

- a)在工质回路中连接加热器，封闭集热器出口前，在集热器内循环热空气。
- b)在室内太阳模拟器下加热集热器。
- c)在室外自然光下加热集热器。

8.2.2 闭式集热器

试验程序如下：

- a)将压力表安装在集热器出口端，密封良好，流量计和压力调节器安装在进口端。
- b)确保空气供应可提供适合的正压和负压。
- c)将压力调节器设置为环境压力，压力表读数为零。
- d)如果在非环境温度下进行测试，则集热器应按 8.2.1 规定的方法进行加热。
- e)启动空气供应，打开调节阀，直至达到厂商指定的集热器最大(正负)工作压力的 1.5 倍，并保持 10 分钟。
- f)检查集热器并记录是否有结构性损坏。

8.2.3 开式集热器

试验程序如下：

- a)在没有空气通过集热器的情况下，压力表读数为零。
- b)启动空气供应，增加到由厂商指定最大流量的 1.5 倍，持续超过 15 秒。集热器在正常使用的配置下测试，大气压力下的环境空气将被吸入集热器。
- c)气流应保持不少于 10 分钟。10 分钟后，在保持气流速度的同时，检查集热器是否有扭曲和破裂。

8.3 结果和报告

应按附录 A 的规定给出结果报告。

9 标准滞止温度

9.1 目的

本条款提供了两种方法(9.3 和 9.4)确定集热器的标准滞止温度，即在强太阳辐射和环境温度下，集

热器没有热输出时的集热器温度。确定标准滞止温度 ϑ_{stg} 的关联条件为：太阳辐照度 $G_s=1000\text{W/m}^2$ 和环境温度 $\vartheta_{\text{as}}=30^\circ\text{C}$ 。标准滞止温度适用于以下测试：

- 槽式、蝶式、菲涅尔等跟踪聚焦集热器不进行该项目测试（同第 10、11、12、13、14 章）。
- 聚合物吸热体的集热器耐压测试（见 6.3）；
- 聚物流体通道的空气集热器气密性测试（见第 7 章）；
- 聚合材料的空气集热器破裂性能测试（见第 8 章）；
- 曝晒试验（见第 10 章）。

9.2 滞止状态测试

滞止状态的测试要求如下：集热器应安装在室外或太阳模拟器下。液体加热集热器不应充注工质。除一个管道口外，其它管道口都应密封，以防止空气自然循环冷却。应将温度传感器安装在吸热体温度最高处，固定牢靠。传感器应避免受到太阳辐射。如集热器有测温管，则应将温度传感器安装在测温管处，并确保良好的接触热传导。也可以采取如下的固定位置：平板集热器和直流式真空管集热器，取吸热体三分之二高度和二分之一宽度处。带热管的真空管集热器，该位置位于热管的冷凝端。对于某些真空管集热器，可在一个为减少热损失而顶部有合理保温的单管上测量标准滞止温度，以模拟一个完整的集热器。如果以上措施均不适用，则应另行合理确定传感器安装位置。

背部没有保温的集热器应安装在一个暗色的非金属表面($\alpha>80\%$)上，以产生最不利条件下的最高温度。

自我保护型集热器应在温度达到 $0.95\vartheta_{\text{trigger}}$ 和 $\vartheta_{\text{trigger}}$ 时，能够按照 5.2.2.3 的规定。实现自我保护。

9.3 标准滞止温度的测量和计算

集热器应在滞止状态下进行测试，并进行温度测量。应在测试报告中给出温度传感器的安装位置。

在稳定的滞止状态下，集热器至少曝晒 1.5 小时，平均环境空气流速小于 1m/s 。当太阳辐照度 G_m 在 $1000\text{W/m}^2\pm 100\text{W/m}^2$ ，环境温度 ϑ_{am} 在 $30^\circ\text{C}\pm 10^\circ\text{C}$ 范围内，则达到稳态条件。

集热器稳态滞止条件下，当 $(\vartheta_{\text{sm}}-\vartheta_{\text{am}})/G_m$ 近似保持不变时，选定参数(G_s 和 ϑ_{as})的标准滞止温度由公式(1)计算：

$$\vartheta_{\text{stg}} = \vartheta_{\text{as}} + \frac{G_s}{G_m} (\vartheta_{\text{sm}} - \vartheta_{\text{am}}) \quad (1)$$

集热器的标准滞止温度定义为测量周期 1h 内 ϑ_{stg} 的平均值。平均值是最大时间间隔为 1 分钟的单个温度点的平均值。

9.4 通过效率参数确定标准滞止温度

根据定义，在滞止条件下，集热器处于热平衡状态，没有热量输出，滞止温度定义为集热器效率等于零时的集热器吸热体温度 ϑ_{abs} 。在辐照度 $G_s=1000\text{W/m}^2$ 和环境温度 $\vartheta_{\text{as}}=30^\circ\text{C}$ 时，通过公式(2)计算标准滞止温度 ϑ_{stg} 。

$$\vartheta_{\text{stg}} = 1,2 \cdot \left(\vartheta_{\text{as}} + \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4\eta_{0,\text{hem}} a_2 G_s}}{2a_2} \right) \quad (2)$$

参数“1.2”是热性能测试中 2m/s - 4m/s 风速的补偿系数。对于准动态测试， $(\eta_{0,\text{hem}} \cdot 1000\text{W/m}^2)$ 可以用 $\{\eta_{0,\text{b}} \cdot [K_b(0,0) \cdot 850\text{W/m}^2 + K_d \cdot 150\text{W/m}^2]\}$ 来代替。这种方法是集热器效率公式外推到热输出为零的状态得到的。为确保热性能公式依然有效，在 $G>800\text{W/m}^2$ ，功率输出 $Q \leq Q_{\text{peak}}/2$ 时，该公式有效，否则该公式不适用。

对于其它天气条件的 G'_s 和 ϑ'_{am} ，用公式(3)计算标准滞止温度：

$$\vartheta_{stg}(G'_s, \vartheta'_{am}) = \vartheta'_{am} + \frac{G'_s}{1000}(\vartheta_{stg} - 30) \quad (3)$$

9.5 结果和报告

在结果报告中，给出标准滞止温度(见附录 A)。

10 曝晒和半曝晒

10.1 目的

曝晒测试提供了一个简单的可靠性测试程序，给出(或模拟)集热器在实际使用过程中可能发生的运行条件，对集热器进行预处理，便于重现测试结果。为满足某些性能测试要求，定义了半曝晒测试程序。曝晒测试始终包括半曝晒测试。

应选择表 2 中定义的一种气候类型进行测试。C 类气候条件用于特殊目的，可以根据需要进行自定义。使用三个不同的方法来进行测试。三种方法的结果具有可比性。每次曝晒和半曝晒测试均在室外滞止状态下开始(见 10.2)，然后选择三种测试方法中的一种方法进行测试。

10.2 初始室外曝晒

任何气候条件下，集热器应安装在室外，处于滞止状态下(见第 9 章)、进行为期至少 30 天(或半曝晒 15 天)的测试。当与厂商的说明一致时，倾角应在 30-60° 之间。如果与厂商说明不一致，则倾角应尽可能接近这个范围。对于立面集热器，50%的初始室外曝晒应在集热器垂直安装下进行。集热器应至少每周进行一次外观检查，并按照第 17 章规定，将任何损坏记录与测试结果一起写入报告。

10.3 方法 1

环境空气温度记录的标准不确定度应为 1K，采用的辐射表应满足 ISO 9060 的要求，采用 I 级或以上级别的总辐照表。至少每 5 分钟记录一次辐照度和平均环境温度。

集热器曝晒至最小辐照量 H 应满足表 2 要求。初始室外曝晒时间可通过环境空气温度和总辐照度的测量数据计算确定。

辐照度和环境空气温度满足表 2 要求条件下，集热器应连续曝晒至少 32 小时(半曝晒时间为 16 小时)。对于同一台集热器，可以接受满足第 9 章测试条件的结果。曝晒时间应由至少 30 分钟的时间段组成。如果对上述数据进行相应测量，应包括初始室外曝晒时间。

使用太阳模拟器的室内曝晒可达到 32 小时或 16 小时和/或达到 30 或 15 天室外照射。它的周期最长为 8 小时。如果一个周期超过 8 小时，则只按 8 小时计算。每个循环之间应至少间隔 4 个小时，以使集热器冷却到接近环境温度。使用的日射辐照模拟器的特性应与 20.2.2 相同。对于非 WISC 的集热器，只需要考虑短波长范围内的光谱。集热器应至少每周进行一次外观检查，按照第 17 章规定，将任何损坏记录与测试结果一起写入报告。

10.4 方法 2

在初始室外曝晒后，将集热器连接到回路中，使用适宜的循环工质，工质在滞止温度和集热器最大工作压力下应保持液态。集热器在工质温度为 $\vartheta_m = \vartheta_{stg}(G_{s,\vartheta}) + 10^\circ\text{C}$ ，最大的流量条件下循环运行。根据第 9 章选择的气候等级，此时的 $\vartheta_{stg}(G_{s,\vartheta})$ 应作为滞止温度计算结果。在该流量和温度下系统最多运行 8 小时，然后关闭循环泵至少 4 小时。再继续循环，直到达到选定的气候等级的条件。

应每天目视检查集热器并记录其外观变化。

本方法不适用于热管集热器。

10.5 方法3

在初始室外曝晒后，将集热器安装在温度可控的太阳模拟器下，在滞止状态下(见 9.2)进行测试。调配太阳模拟器输出，使集热器上 6 个均匀分布点的平均辐照度大于表 2 所选气候等级的平均值，太阳辐照在集热器采光面上的变化不大于 20%。环境温度应高于选定的气候等级的温度。在试验条件下运行系统，模拟器最多运行 8 小时，然后关闭至少 4 小时。按试验条件进行周期运行循环，直至达到选定的气候级别的值。

每天目视检查集热器并记录其外观变化。

10.6 测试条件

应使用表 2 给出的参考条件，给出的值是测试的最小值。气候等级由集热器厂商选择。

表 2 用于曝晒试验和热冲击的气候参考条件

气候条件	气候等级数值			
	C级 单独定义	B级 晴天	A级 大晴天	A+级 极好晴天
曝晒32h（或半曝晒16h）的集热器平面总辐照度 G_{hem} 最小值，环境温度 ϑ_a 最小值. a	G_x $\vartheta_{a,x}$	900W/m ² 15℃	1000W/m ² 20℃	1100W/m ² 40℃
至少30天曝晒的集热器平面累计太阳辐照量 H	H_x	540MJ/m ²	600MJ/m ²	700MJ/m ²
至少15天半曝晒的集热器平面累计太阳辐照量 H	$H_x/2$	270MJ/m ²	300MJ/m ²	350MJ/m ²
a: 对于热冲击试验，该值可看做是1h内的平均值。				

10.7 结果和报告

结果包括选定的气候等级、测量的辐照度和温度等级，应按附录 A 中要求、报告所有观察到的测试结果。

11 外热冲击

11.1 目的

集热器有时会在阳光明媚的热天遭遇突如其来的暴风雨，造成严重的外部热冲击。该测试旨在评估集热器能够承受这种热冲击而不发生故障的能力。

采用钢化玻璃的集热器被认为符合这一要求，不需要进行测试。

11.2 设备和方法

集热器应在滞止状态下工作，或按照曝晒试验方法 2 的规定将集热器连接到流体回路。对于空气集热器，应防止水从进口和出口处渗入。

在集热器前面使用均匀分布的水流喷射集热器。
集热器应进行两次外热冲击测试。

11.3 测试条件

集热器应在如表 2 所述选定的气候条件下曝晒,或能够在持续 1 小时的时间段内达到第 9 章规定的集热器温度,然后喷淋至少 5 分钟的水。

具有过热保护功能的集热器,应在接近触发温度但集热器过热保护功能尚未启动的情况下运行一个小时,然后持续喷水至少 15 分钟。

喷水的温度应当维持在 10℃ 和 25℃ 之间,且喷淋量大于 0.03kg/s 每平方米集热器总面积。

11.4 结果和报告

结果应按附录 A 中的要求进行报告。

12 内热冲击（仅适用于液体加热集热器）

12.1 目的

集热器有时会在阳光明媚的晴天突然吸入低温的传热工质,造成内部热冲击,例如,在停止运行一段时间后,当集热器处于滞止温度时,设备重新投入运行。该测试旨在评估集热器承受这种热冲击而不发生故障的能力。

12.2 设备和方法

集热器应安装在室外或在辐照模拟器下。集热器不应充注工质。除其中一个出口外,所有流体通道都应该密封,允许空气在吸热体中自由膨胀。其中一个密封流体管道应通过截止阀与传热工质源连接。

集热器应进行两次内热冲击测试。

本测试不适用于全玻璃真空管型太阳能集热器。

12.3 测试条件

集热器应在如表 2 所述选定的气候条件下曝晒,或能够在持续 1 小时的时间段内达到第 9 章规定的集热器温度,然后通入低温传热工质至少 5 分钟。对于所有的集热器类型,应确保工质完全充满集热器。

具有过热保护功能的集热器,应在接近触发温度但集热器过热保护功能未启动的情况下运行一个小时,然后充入低温传热工质至少 5 分钟。

传热工质的温度应低于 25℃。工质流量应是热性能测试的最大流量,或至少为 0.02kg/s 每平方米集热器总面积(除非厂商另有规定)。

12.4 结果和报告

结果应按附录 A 中的要求进行报告。

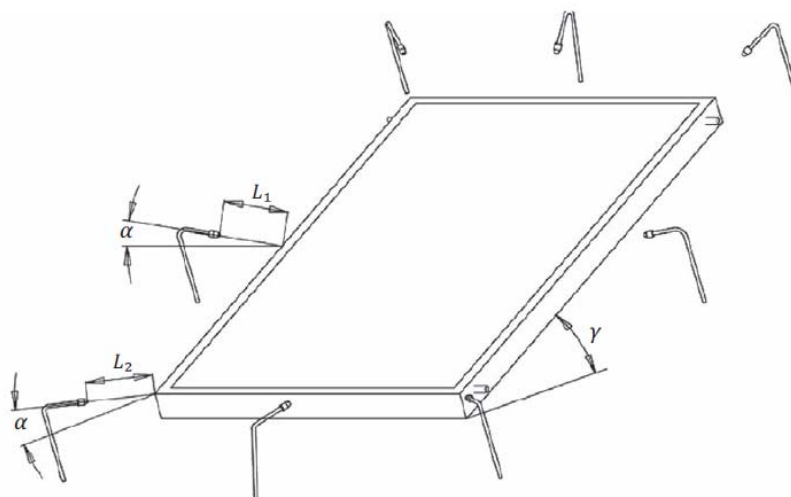
13 淋雨

13.1 目的

本测试的目的是评估集热器承受自然雨水或喷淋而不进水和不被损坏的能力,预估其性能或使用寿命是否有明显下降。

13.2 设备和方法

集热器应安装在一个开放的框架上，并按厂商指定的最小角度安装。专门安装在屋顶结构中的集热器应安装在模拟屋顶上，并对其背面进行保护。集热器和喷嘴的位置如图 2 所示。



L_1, L_2 : 250 mm

α : 喷嘴与集热器表面角度为 30°

γ : 厂商推荐的最小水平倾角，如果没有指定，则用 30° 角度。

图 2 淋雨测试集热器和喷嘴的位置

如果该测试装置不适用，则采用另一种类似装置，使喷嘴对集热器结构的所有可能易受损坏或雨水浸入的暴露点(例如，跟踪槽形抛物面集热器的电机)进行喷淋。

集热器应在避光条件下($G < 200 \text{ W/m}^2$)进行测试，并将集热器流道通过 $55^\circ\text{C} (\pm 5\text{K})$ 的工质循环保持温热。空气集热器应放置在没有强制气流的室温环境下。集热器在以上试验条件下应至少稳定 1 个小时。然后对集热器喷淋 4 个小时，喷淋结束后保持避光直到最终检查。

应在喷淋后 72 小时内检查集热器的渗水性(见第 18 章)，再进行耐撞击和机械载荷测试。最终检查前应保持集热器避光，但不需再保持热度。集热器的存放方式不应影响试验结果，并应避免不必要的搬运。

13.3 测试条件

所需要的喷嘴如下所示：

- 完整的锥形喷射；
- 每个喷嘴的质量流量为 $2 \text{ kg/min} (\pm 0.5 \text{ kg/min})$ ；
- 喷淋角度 $60^\circ \pm 5^\circ$ ；
- 水滴大小 $> 150 \mu\text{m}$ ，根据喷嘴厂商的技术信息选用；
- 每一个喷嘴处的水压应保持在 $300 \text{ kPa} (\pm 50 \text{ kPa})$ 。喷头的位置应保证：

如果可以，喷头的位置应按如下要求布置：

- 集热器箱体的每一个拐角和每个面都能被直接喷淋，如图 2 所示。
- 至少图 3 所示的集热器(带中间压条的平板集热器)每个区域都能被直接喷淋；
- 至少图 4 所示的集热器(真空管集热器)每个区域都被直接喷淋；
- 喷嘴与集热器平面形成 $30^\circ (\pm 5^\circ)$ 的角度；
- 喷淋头距离集热器 $250 \text{ mm} (\pm 50 \text{ mm})$ ；

—两个喷嘴之间的最大距离为 150 厘米。如无法满足，应安装额外的喷头。

集热器中间压条和其它可能渗水的结构也应进行喷淋。增加的额外喷头应放置在距离集热器 400mm 至 600mm 之间，不要求 30° 的喷淋角度。

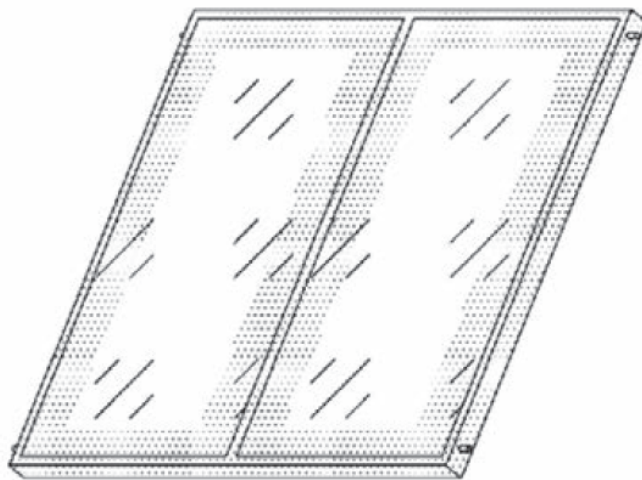


图 3 平板式集热器 (带中间压条) 的喷淋区域

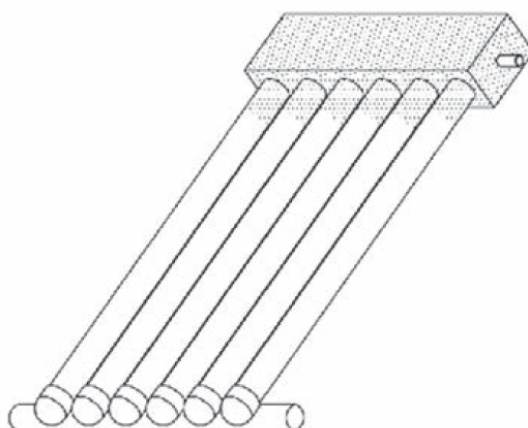


图 4 真空管集热器的喷淋区域

13.4 结果和报告

结果按附录 A 中的要求进行报告。

14 耐冻

14.1 目的

该测试的目的是评估集热器承受冰冻而不被损坏的能力。本测试仅适用于声明具有抗冻性能的集热器和含有热管的集热器。适用于 5.2.2.3 规定的自我保护集热器。使用有结冰危险的添加液体、如热管中有此类液体的集热器，应测试其抗冻性。

根据集热器类型，可选用以下的一种或两种方法。

14.2 耐冻性集热器

14.2.1 概述

集热器应安装在冷库中。集热器应安装正确，被完全封闭，并按厂商建议的水平方向最小倾斜角放置。

14.2.1.1 具有排空防冻保护的集热器

在每个测试循环周期之前，集热器应充水 10 分钟，然后用厂商安装的设备排水 5 分钟。应在集热器管道的最低点安装温度传感器，以监测存留水的温度。

14.2.1.2 防冻集热器

集热器应在工作压力下充满水。每个循环结束时，集热器应在工作压力下重新充满水。整个测试过程中都应监测水温。

14.2.2 测试条件

设定测试温度为 -20°C (或按厂商指定的温度)，每个周期至少为一个小时。然后将集热器解冻、环境温度至少达到传感器温度 $+10^{\circ}\text{C}$ ，保持至少 1 个小时。如此重复循环测试三次。

14.3 热管集热器

14.3.1 概述

所有热管集热器都应进行此测试。应至少选择 6 根热管进行耐冻测试。作为完整集热器的一部分，在耐冻测试之前，这些热管应至少完成半曝晒测试。至少应保留一根热管作为对照样品，以便与测试样品进行比较。可能需要破坏集热器的部分结构(真空管、集热器外壳等)来取出热管。测试应在人工气候室中进行，可按设定进行持续一定次数的冻-溶循环。此外，还可以使用低温工质循环进行冷冻。然后，应在完整的集热器上进行测试。

14.3.2 测试条件

所有热管的详细初始检查应有如下记录：

- 热管各部件的形状(圆形、椭圆形、圆柱形、圆锥形等)和外形尺寸；
- 所有测试样品要拍照记录。

至少一根热管对应一个温度传感器，以确保温度测量的准确性。温度传感器应使用适当的方式紧贴热管冷凝端下部安装，保证热接触良好，并在热管内的所有工质冷凝且热管保持倾斜位置时，温度传感器能准确测量冷凝介质的温度。温度传感器显示的温度代表热管内工质的温度。

在不破坏集热器的情况下，无法将热管与真空管分离，可以直接用真空管进行测试。在另外一台测试样品上，将冷凝器钻孔打开，以便插入温度传感器至靠近热管传热工质的位置。

热管应在建议的最高倾斜角度进行测试。测试温度最低为 -20°C (或厂商指定的温度)，每个周期至少为一个小时。然后将集热器解冻到不低于 $+10^{\circ}\text{C}$ ，保持至少 1 个小时。如此重复循环测试十次。

所有样品都要做详细的最终检验，包括拍照记录。

14.3.3 结果和报告

结果应按附录 A 中的要求报告。

15 正/负压机械载荷

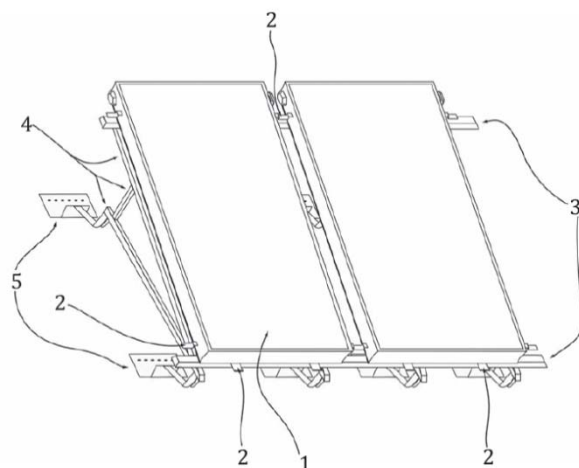
15.1 目的

机械载荷测试是为了评估集热器及其连接点抵抗由风或雪引起的正压力载荷的能力，和由风引起的负压或升力的能力。集热器的安装附件不做测试。

15.2 设备和方法

15.2.1 安装

应使用厂商提供的设备安装集热器。用安装附件连接到集热器固定件上（见图 5），然后将安装附件固定到测试台架上，试验台架应该是刚性的。做为集热器一部分的防水板或密封组件，应与集热器一同进行测试。



- 1 集热器
- 2 固定件(与测试结果相关)
- 3 用于测试的安装附件(固定在测试平台上，但与测试结果无关)
- 4 支撑腿(无需测试)
- 5 屋顶挂钩(无需测试)

图 5 安装附件和连接点的说明

15.2.2 载荷的测试方法

可使用不同方法对集热器施加均匀分布的正面载荷和背向载荷，如下所示：

——箔纸和砂砾、沙子或水：集热器水平放置，上面覆盖一层箔纸。在集热器上方放置一个高度足以容纳所需砂砾、沙子或水的框架。砂砾、沙子或水应均匀地分布在框架内，以产生均匀的荷载，直到达到所需的高度。

——吸盘：用机械驱动的吸盘均匀分布作用在集热器表面。吸盘不应阻碍因机械荷载引起的集热器盖板的移动。

——空气压力：集热器安装在测试平台中，可以从正面或背面施加正压或负压，例如，使用气垫或其他方法。

根据集热器的类型，也可选择其它更合适的方法，只要保证压力均匀的分布在整個集热器总面积上。测试方法应在测试报告中说明。

15.2.3 跟踪型集热器或特殊类型的集热器

如果上述方法不适用(例如，跟踪型槽式集热器)，实验室应按照 5.2 设计特定的合适程序来进行机械载荷测试。根据厂商的说明，当通过控制系统保护集热器避免受到风或雪的荷载，则应检查相应的控制功能。应该清晰地描述测试装置、过程以及测试结果。

15.3 测试条件

测试压力最大按 500Pa 的步长逐步增加。参考面积是集热器的总面积。每个步长的测试压力至少保持 5 分钟。每一次负载施加后都应全部释放，并记录永久变形量及其对应的负载值，永久变形量应与测试开始时的集热器状态进行比较。

15.4 结果和报告

结果应在附录 A 中按要求进行报告。

16 耐撞击

16.1 目的

该测试的目的是评估集热器在承受冰雹撞击时的受影响程度。

16.2 试验方法

可使用冰球或钢球两种方法进行试验。

测试过程包括一系列对集热器的撞击。每次撞击包含四个具有相同冲击强度的撞击。对于冰球，撞击强度由球的直径和速度决定，见表 3。对于钢球，则根据 16.5，冲击强度由下落高度决定。

表 3 冰球质量和试验速度

标称直径（mm）	质量（g±5%）	试验速度（m/s±5%）
15	1.63	17.8
25	7.53	23.0
35	20.7	27.2
45	43.9	30.7

撞击过程中逐步增加强度。对于第一组撞击，应该使用厂商指定的最小冰球直径或厂商指定的钢球最小落差。

应根据 16.3 选择撞击点。

对于真空管集热器，按如下要求：如有一根真空管破裂，应使用另一根真空管进行重复测试。如果第二根真空管也出现损坏，则认定该项测试未通过。

如果含有工质的吸热体能够被冰雹直接击中，则集热器应在常压下充满工质。

16.3 冲击位置

a)带玻璃盖板平板集热器：撞击点应位于从集热器的可见玻璃盖板拐角至 75mm 的半径范围内。对于同一系列相同冰球直径或相同高度的钢球撞击时，应选择集热器的不同拐角。

b)真空管集热器：每个冰球直径或撞击高度，随机选取 4 支真空管进行测试。两支撞击真空管上部，两支撞击真空管下部。撞击点应为从上部可见端往下和从下部可见端往上最大 75mm 距离内，并在垂直于真空管表面的中心位置撞击，撞击方向应与真空管轴线垂直。

c)不能明确划分为 a)或 b)类的集热器：实验室确定四个具有代表性的撞击点，撞击前应确定撞击点的坐标。

16.4 方法一：用冰球进行耐冲击试验

16.4.1 仪器

16.4.1.1 存储容器，用于储存低于-4℃的冰球。

16.4.1.2 刚性框架，用于支撑集热器，使被撞击表面垂直于冰球路径；支撑架应足够坚硬，以便在冲击时可以忽略支架变形或偏差。

16.4.1.3 秤，用于称量冰球的质量，标准不确定度为±2%。

16.4.1.4 发射装置，能够发射 16.4.2 所描述的冰球。

16.4.1.5 冰球速度测量装置，误差为 $\pm 1\text{m/s}$ 。速度传感器至集热器表面的距离应不超过 1 米。

16.4.2 冰球，由水制成，无任何添加物质。冰球内应无气泡，也没有肉眼可见的裂缝，冰球直径详见表 3。

16.4.3 测试过程中使用冰球的具体说明：

- a) 将球放入容器中，至少 1 小时后再使用。
- b) 确保所有可能与冰球接触的发射器表面都接近室温。
- c) 室温下在刚架上安装集热器。
- d) 从容器中取出冰球到撞击集热器，时间应小于 60 秒。
- e) 按要求撞击集热器表面。在撞击点检查集热器，并注意所有损坏及对集热器的可见影响。

16.5 方法二：钢球耐冲击试验

集热器应垂直或水平安装在支架上。以便在冲击时可以忽略支架变形或偏差。

钢球应采用模拟冰雹冲击的方式撞击。如果集热器是水平安装的，则钢球垂直下落撞击，或者如果集热器垂直安装，则通过钟摆水平下落撞击。这两种情况下，落点的高度都是释放点与撞击点所在平面之间的垂直距离。

按该方法进行试验，钢球的质量为 $150\text{g} \pm 10\text{g}$ ，下落高度分别为：0.4m，0.6m，0.8m，1.0m，1.2m，1.4m，1.6m，1.8m，2.0m。

16.6 结果和报告

结果应按附录 A 中要求的进行报告

17 脉冲压力

17.1 目的

该测试的目的是评估集热器在承受压力变化时的受影响程度。该项目仅适用于承压集热器。

17.2 测试方法

将集热器连接到耐压试验装置上，对集热器注水加压至额定工作压力 $100\% \pm 5\%$ ，保持 5 min，检查集热器是否有渗漏等异常现象。

将集热器连接到脉冲压力试验装置上，按如下要求进行试验：

- a) 脉冲压力：集热器流道内注入环境温度的水；排空集热器流道内空气，按额定工作压力的 15% 到 $(100\% \pm 5\%)$ 之间的数值交替对集热器流道加压。
- b) 频率：每分钟 25~60 次。
- c) 循环次数：8 万次，每加压 1 万次结束时，将压力至少维持在额定工作压力 10 min，目测集热器流道无明显变形，再进行下面的循环试验。

脉冲压力试验完成后目测集热器流道焊缝应无渗漏，应无明显变形和开裂。

17.3 结果和报告

结果应在附录 A 中按要求进行报告。

18 最终检验

18.1 目的

最终检验的意图是记录集热器的结构和材料，即在测试结束后，如集热器不再用于其它测试，对集热器的状况进行评估。在最终检验时，需要按附件 F 要求检查集热器的材料明细。

18.2 测试方法

集热器应在实验室条件，即非工作条件下，在遮光、室温下拆卸和检查，最终检验应被视为一种破坏性测试方法，因此为最终检查。

按附录 A 中的要求描述集热器。所提供的信息应与厂商的信息进行核对。

按附录 A 中的要求，将所有的缺陷和异常记录在案，并在适用的情况下根据以下的要点进行评级。

0 没有问题

性能、耐久性、安全性和外观不受上述测试的影响，并且在预期寿命期内保持稳定。

玻璃盖板无可见的脱气性变色或污点。

1 轻微问题

主要出现外观、视觉方面的缺陷。耐久性和安全性在预期寿命期内保持稳定。玻璃盖板有轻微可见的脱气性变色。

但永久性结露和连续不断的缺陷应视为主要问题。

2 重要问题

发现或能够预见在性能、耐久性、安全性或外观等方面出现严重的失效。玻璃盖板有明显的脱气性变色。

所有发现的轻微问题或重大问题都应拍照记录下来。

重要失效的评级是强制性的（如适用），包括（但不限于）：

- 玻璃盖板破裂或边框永久性变形；
- 流道泄漏；
- 所有导致吸热体与玻璃盖板出现接触的永久变形；
- 集热器固定点或集热器框体出现断裂或严重变形；
- 真空消失，气体填充失效；
- 吸热体涂层消失；
- 在透明盖板内部有水凝结，或集热器内存水超过 25ml。

18.3 结果和报告

结果应按附录 A 的要求报告。

19 测试报告

按附录 A 的格式完成测试报告。

20 热性能

20.1 概述

太阳能集热器的热性能测试至少应包括集热器在不同工况条件下的得热量(见第 24 章)，集热器的入射角修正系数(见第 27 章)和集热器有效热容的计算(见第 26 章)。这三组参数是计算集热器得热量所必需的。

本文件还提供了确定其他重要参数的方法，如压力降落和时间常数。

如果集热器面积小于 1 平方米，则应将足够数量的集热器连接在一起，提供总面积至少 1 平方米的

集热器进行测试。

热性能测试方法有两种：稳态法和准动态法。这两种方法的测试结果是等效的，并提供了参数之间相互转换的方法。

热性能测试可以在室外测试设备上进行，也可以在使用太阳模拟器的室内测试平台上进行。

20.2 使用太阳模拟器

20.2.1 概述

集热器的热性能受直射和散射太阳辐射的影响。因此，只有模拟太阳辐射近似法线光束入射到集热器表面的太阳模拟器可用于热性能测试。

在实践中，很难模拟产生均匀光束的太阳辐射，因此必须在集热器的总面积上测量平均的辐照度。

20.2.2 用于热性能测试的太阳模拟器

热性能测试使用的太阳模拟器应具有下列特性：

灯具应能在集热器总面积上产生至少 700W/m^2 以上平均辐照度。所有测量必须在达到稳定的工作条件后才可以开始。

在任何时候，集热器总面积上任意一点的辐照度与平均辐照度相差不应超过 15%。模拟器的准直度应使至少 80% 模拟光线的入射角位于集热器入射角修正系数的变化不超过法向入射角 2% 的范围内。典型的平板集热器，集热器上任意一点接收到的光线至少有 80% 是从一个与该点对角为 60° 或更小角度的区域内发射出来，则能够满足上述情况。有关入射角修正系数测试的准直度附加要求见 20.2.3。

辐照度 G 应在测试报告中以表格形式列出，在集热器总面积上测量的最大网格间距为 150mm。应在吸热体的平面内测量辐照度 G_{hem} 。

模拟太阳辐射的光谱分布应近似于大气质量 1.5 时的太阳光谱分布。太阳模拟器的光谱质量的测量应在集热器的表面上进行，测量波长范围 $0.3\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ ，并以 $0.1\mu\text{m}$ 或更小的波段宽度测定。集热器的热辐射不应超过环境空气温度下黑体辐射的 5%。

初始光谱测定应在灯具完全打开后进行。应测量集热器平面的红外线热辐射（波长大于 $2.5\mu\text{m}$ 小于 $4\mu\text{m}$ ）。

应检查光谱的差异对 $(\tau\alpha)$ 的影响。如果模拟器下 $(\tau\alpha)$ 的有效值和大气光学质量为 1.5 时太阳光谱下的有效值相差超过 $\pm 1\%$ ，则应修正测试结果。

$$(\tau\alpha)_{\text{eff}} = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{3\mu\text{m}} \tau(\lambda)\alpha(\lambda)G(\lambda)d\lambda}{\int_{0.3\mu\text{m}}^{3\mu\text{m}} G(\lambda)d\lambda} \quad (4)$$

在模拟器下测量的零热损失效率修正如式（5）所示：

$$\eta_{0,\text{hem}} = \eta_{0,\text{hem,measured}} \frac{(\tau\alpha)_{\text{eff};G=AM1,5}}{(\tau\alpha)_{\text{eff};G=\text{Simulator}}} \quad (5)$$

或者，集热器的峰值效率可在室外测试。如果室外测试的峰值效率与模拟器测量的峰值效率值差异超过 $\pm 1\%$ ，则应进行修正。

WISC 集热器的室内测试和室外测试的主要区别是长波热辐射。在模拟器中的长波辐照度不得高于 50W/m^2 (通常户外是 100W/m^2)。

在测试过程中的辐照度波动应小于 $\pm 1\%$ 。

20.2.3 用于测量入射角修正系数的太阳模拟器

为了测量入射角修正系数，只有满足 20.2.2 中所有的要求，才能使用太阳模拟器。

准直度要求如下：集热器上任意一点接收到的光线至少 90% 是从一个与该点夹角为 20° 或更小角度的区域内发射出来的。

太阳辐照度和准直度在集热器总面积上的测量最大网格间距为 150mm。

21 集热器的安装和位置

21.1 概述

集热器应按厂商指定的方式安装。除非另有说明，否则采用开放式安装结构，允许空气在集热器的前、后和两侧自由流动。

只适用于屋顶/墙壁的集热器，应根据厂商的说明安装，并将原始部件(如闪光组件)安装在模拟的屋顶/墙壁结构上，在该结构中，集热器的后部防风且没有附加保温。

被指定安装在带有保温结构上的集热器(如设计靠墙的集热器,游泳池集热器,WISC 集热器,等)应安装在保温背板上，保温材料的导热系数为 $1 \pm 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，表面涂抹为亚光白色，且背面通风。必须在测试报告中清楚地描述如何使用这种保温材料，并声明性能测试结果是在额外使用了有保温背板的情况下测试得到。可以采用 30mm 厚的聚苯乙烯泡沫板作为保温。

对于现场组装、未预先提供尺寸的集热器，应检查是否可实现与性能测试关联的流动方式和流速。

集热器应安装在离地面不少于 0.5 米的地方。热空气流，如沿建筑物墙壁上升的热气流，不允许通过集热器。在建筑物的屋顶上测试集热器时，集热器应距离屋顶边缘至少 2 米。

21.2 集热器的室外定位

在计算太阳辐射入射角时，应考虑集热器与赤道面的方位角偏差。集热器方位可以较大的偏离赤道面，但这样会导致太阳光照的非对称分布。

21.3 太阳直射辐射的遮挡

试验台的位置应确保集热器和辐照表在测试期间不被遮挡。

21.4 散射和反射太阳辐照度

为了分析室外试验结果，假定太阳辐照度不是直接来自太阳，而是以半球形式在各个方向等量发射到集热器上的。集热器应位于周围建筑或表面没有明显太阳辐射的地方，以及视场中无明显障碍物。在集热器的视野中要避免有面积广阔的玻璃、金属或水。减少对集热器背面的反射也很重要，特别是对于真空管集热器。大多数粗糙表面，如草地、风化混凝土或碎屑的反射率通常都很低，所以在集热器测试过程中不会产生任何问题。

在太阳模拟器中，模拟光束仅近似于直接日射辐照度，因此必须使反射辐照度最小化。可以通过在测试室内涂上深色的低反射率涂料来实现。

在集热器性能测试中使用的背板太阳反射率不应超过 20%。

21.5 热辐射

某些集热器的热性能对热辐照度特别敏感。靠近集热器的表面温度应尽可能接近周围环境的温度，以尽量减少热辐射的影响。如，在室外测试的集热器，周围应不能有烟囱、冷却塔或热排气口。在室内模拟器测试中，集热器应屏蔽发热表面，如散热器、空调管道和机械装置，以及冷表面，如窗户和外墙。集热器前后的遮挡都很重要。

21.6 周围风速

许多集热器的热性能对周围的空气速度很敏感。为了最大限度地提高测量的复现性，安装的集热器应便于空气可以自由通过其采光口、背面和侧面。

专为与建筑物一体化而设计的集热器，其背部可以免受风的干扰，如有，应与测试结果一起写入报告。

在距离集热器正面 50mm 以上，平行于集热器前端的周围空气速度应达到 24.3.3.2 中规定的范围，但须符合表 6 中规定的公差。如果这些条件在自然条件下无法实现，则应使用人工风机。

22 仪器仪表

22.1 太阳辐射测量

22.1.1 总辐照表

22.1.1.1 概述

按照 ISO 9060 的规定，应使用满足 ISO 9060 的 I 级或更高级别的总辐照表测量半球向太阳辐射。用装有遮光环的 I 级或以上的总辐照表测量短波漫辐射。

对于高聚光比的集热器 ($CR > 3$)，按照 ISO 9060 的规定，应使用 I 级或更高级别的直射辐照表测量法向直射辐照度 (DNI)。辐射表应安装在单独的太阳跟踪装置上。辐射表的视场应不超过 6° 弧度。跟踪器上安装的跟踪装置误差不应超过 $\pm 0.5^\circ$ 。

直射和散射辐照度应分别通过 $G_b = DNI \cdot \cos(\theta)$ 和 $G_d = G_{hem} - G_b$ 进行计算。

22.1.1.2 辐照表的安装

总辐照表安装位置应能接收集热器平面上的直射、散射和反射辐照度。总辐照表的传感器应与集热器平面相同，偏差小于 1° 。在测试期间集热器区域内不能出现阴影。还应注意防止能量从太阳能集热器反射到日射辐照表上。日射辐照表本体和连接器的连线应遮蔽，以使其尽可能少的受到太阳照射而发热，带来对测试结果的影响。

22.1.1.3 直接太阳辐射入射角的测量

通过计算或者使用精度等于或高于 $\pm 1^\circ$ 的太阳位置传感器确定入射角。如采用 CPC 等非成像固定式集热器，应在集热器直射光接收范围内安装直射辐射表。

22.2 热辐射测量

22.2.1 概述

如有需要，应使用安装在集热器平面上的总辐照表测量长波辐射(EL)。热辐射标准不确定度为 $10\text{W}/\text{m}^2$ 。

22.2.2 室外热辐射的测量

总辐照表应安装在集热器一侧中间高度的位置。

22.2.3 室内热辐射的测量

总辐照表应通风良好，以减少太阳能或太阳模拟器的影响。应尽量减少短波辐射的影响。

22.3 直射辐射测量

22.3.1 概述

槽式、蝶式、菲涅尔等跟踪聚焦集热器应使用直射辐射表测量直射辐照度。

22.3.2 直射辐射的测量

在测试期间集热器区域内不能出现阴影。还应注意防止能量从太阳能集热器反射到直射辐照表上。

直射辐照表本体和连接器的连线应遮蔽，以使其尽可能少的受到太阳照射而发热，带来对测试结果的影响。

22.4 温度测量

22.4.1 概述

热性能测试需要三个温度传感器。它们是集热器进口工质温度，集热器出口工质温度，以及环境空气温度。温度测量精度和测量环境不同，因此用于温度测量的传感器和相关设备可能有所差异。

22.4.2 传热工质温度（液体加热集热器）

22.4.2.1 精度要求

集热器进口和出口之间温差(ΔT)的标准不确定度 $<0.05K$ ，精度优于 1%。

22.4.2.2 传感器的安装

传热工质温度传感器应安装在距离集热器进、出口不超过 200mm 的位置，并在传感器上下游管道周围安装保温材料。如果需要将传感器放置在距离集热器超过 200mm 的地方，需验证对工质温度的测量不受影响。为确保工质在测温位置充分混合，应在传感器的上游设置弯曲管道、孔板或工质的混合装置。传感器探头应指向工质来向（防止传感器附近的气体积存）。

22.4.3 体积流量加权平均温度 $\vartheta_{m,th}$ (空气集热器)

22.4.3.1 概述

体积流量加权平均温度描述了由体积流量、热容和密度加权温度确定的风道内平均温度。

如果来自通风设备管道的温度大于环境温度， $\vartheta > \vartheta_a$ ，则会产生温度分布，因此，由于通风管道的热损失，也会产生温度和热容的分布，以及管道内流速的分布，加权平均温度 $\vartheta_{m,th,in}$ 和 $\vartheta_{m,th,out}$ 代表空气集热器热量平衡的温度。

$$\vartheta_{m,th} = \frac{\iint \vartheta(x,y) v(x,y) \rho(x,y) c(x,y) dx dy}{\iint v(x,y) \rho(x,y) c(x,y) dx dy} \quad (6)$$

由于密度和热容的影响较小，可以化简为式(7)：

$$\vartheta_{m,th} = \frac{1}{Av_m} \iint \vartheta(x,y) v(x,y) dx dy \quad (7)$$

在通道横截面上，流动分布应合理均匀。应设计使用合适的温度测量方法使通道截面上的温度梯度达到平衡。例如，在通风通道中引入细孔网可以使气流分布均匀。在通道内均匀分布温度传感器(用阿基米德螺线)，可以确定热平均温度。

22.4.3.2 精度要求

测量传热工质进口温度的传感器标准不确定度为 $\pm 0.2K$ 。为了确定温度漂移不随时间变化，温度信号的分辨率要求为 $\pm 0.04K$ 。

22.4.3.3 传感器的安装

传热工质温度传感器应安装在距离集热器进出口不超过 200mm 的位置，并在传感器上下游管道周围安装保温材料。如果需要将传感器放置在距离集热器 200mm 以上的地方，需验证工质温度的测量不受影响。可以通过重新计算进口和出口温度差来确认。附录 E 给出了传感器配置示例。

22.4.3.4 传热工质温差(ΔT)的测定

测量集热器出口和进口之间温差(ΔT)的标准不确定度为 $\pm 0.2K$ 。温差传感器 ΔT 应在相应的流量范围和温度范围内校准。

22.4.4 环境空气温度的测量

22.4.4.1 精度要求

测量环境空气温度的标准不确定度优于 0.5K。

22.4.4.2 安装传感器

室外测量的传感器应放置在一个喷白漆、通风良好（最好有强制通风）的防护罩内，来遮挡太阳直射和反射的影响。防护罩本身应遮阳并放置在集热器中间的高度，但至少高出地面 1 米，以确保其不受地面加热的影响。防护罩应放置在距离集热器不超过 10 米的地方。

如果使用风机在集热器上方吹风，应测量风机出风口的温度并确保其温度与环境空气温度偏差小于 ±2K。

22.5 流量测量

22.5.1 质量流量的测量(液体)

质量流量测量的标准不确定度应在测量值的±1%范围内。流量计应经过校准，校准使用的工质流速和温度应包含热性能测试的范围。

22.5.2 集热器工质流量测量(空气集热器)

质量流量测量的标准不确定度应在测量值±2%的范围内。通过压力和温度的确定，可以将体积流量转换为质量流量，如式(8)所示。

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho_1$$

(8)

密度 ρ_1 按式（9）计算：

$$\rho_1 = \frac{(1\,000 + X_W)}{(1\,000 \cdot R_L + X_W \cdot R_D)} \cdot \frac{(p_{\text{abs}} + p_f)}{(v_{\text{mp}} + 273,15)}$$

(9)

各测量参数的最大标准不确定度要求见表 4.

表 4 测量参数的最大标准不确定度

参数	测量值	标准不确定度
V	体积流量	± 1%
ϑ_{m}	环境空气温度	± 1K
P_{abs}	环境空气的绝对压力	± 50Pa
\dot{m}	质量流量	± 2%

确定流量的方法可采用差压法(孔板、文丘里管或层流元件)或机械方法(涡街气体流量计)。由于空气中含水量引起的测量误差较大，所以热测量方法不适用。

22.6 集热器上方空气速度测量

22.6.1 概述

环境风速与集热器上方风速的关系取决于测试设备的位置，因此环境风速不是集热器测试的有用参数。通过使用集热器上方测量的空气速度，可以清楚地定义测试的条件。风速测试点应被验证可在测试过程中与经过集热器上方平均风速有直接关联的合适位置。

22.6.2 精度要求

测量集热器上方风速的标准不确定度应小于 0.5m/s。应考虑到大多数风速计的起动值在 0.5m/s 和 1m/s 之间。在室外条件下，周围的环境风速通常不是恒定的。因此，可通过采样值的算术平均值或通过测试期间的时间积分测量平均风速。

22.6.2.1 集热器上方风速测试的传感器安装

22.6.2.1.1 概述

环境风速或人工风机用于测试过程中产生平行于集热器表面的风速。由于集热器一端与另一端的风速可能不同，因此需要检查集热器区域内风速的均匀性。在集热器平面上方 50mm 处，及整个集热器区域内等间距位置，使用手持风速计进行风速测量，然后确定平均值。湍流度应始终在 15% - 40% 的范围内。然后应在一个经验证与在测试过程中通过集热器上方平均风速有直接关联的合适位置连续检测风速，并考虑周围空气速度的影响。传感器不应被挡风，也不能在集热器上有阴影。

对于没有背部保温的集热器和没有安装在模拟屋顶表面的集热器，应在集热器前后表面调整和测量风速。应考虑集热器前、后表面平均空气速度的数据相关性。

22.7 时间测量

时间测量的标准不确定度小于 0.2%。

22.8 湿度测量（仅适用于空气集热器）

当用空气作为传热工质时，需要其含水率才能正确地测定空气的比热容。湿度 X_w 应为 25℃ 温度下，精确到 ± 0.001 (kg 水/kg 干空气)。

22.9 集热器尺寸

集热器尺寸的测量标准不确定度应优于 0.3%。如果集热器是聚合物材料，面积测量应在集热器温度为 $20^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ，工作压力下进行。如果测量的集热器面积与厂商说明的面积偏差在 1% 以内，则报告中使用厂商说明的面积，并用于效率的计算。如果大于 1%，则应使用测得的集热器面积。

23 测试安装

23.1 液体加热集热器

23.1.1 概述

液体加热集热器的测试系统原理图，如图 6 所示。

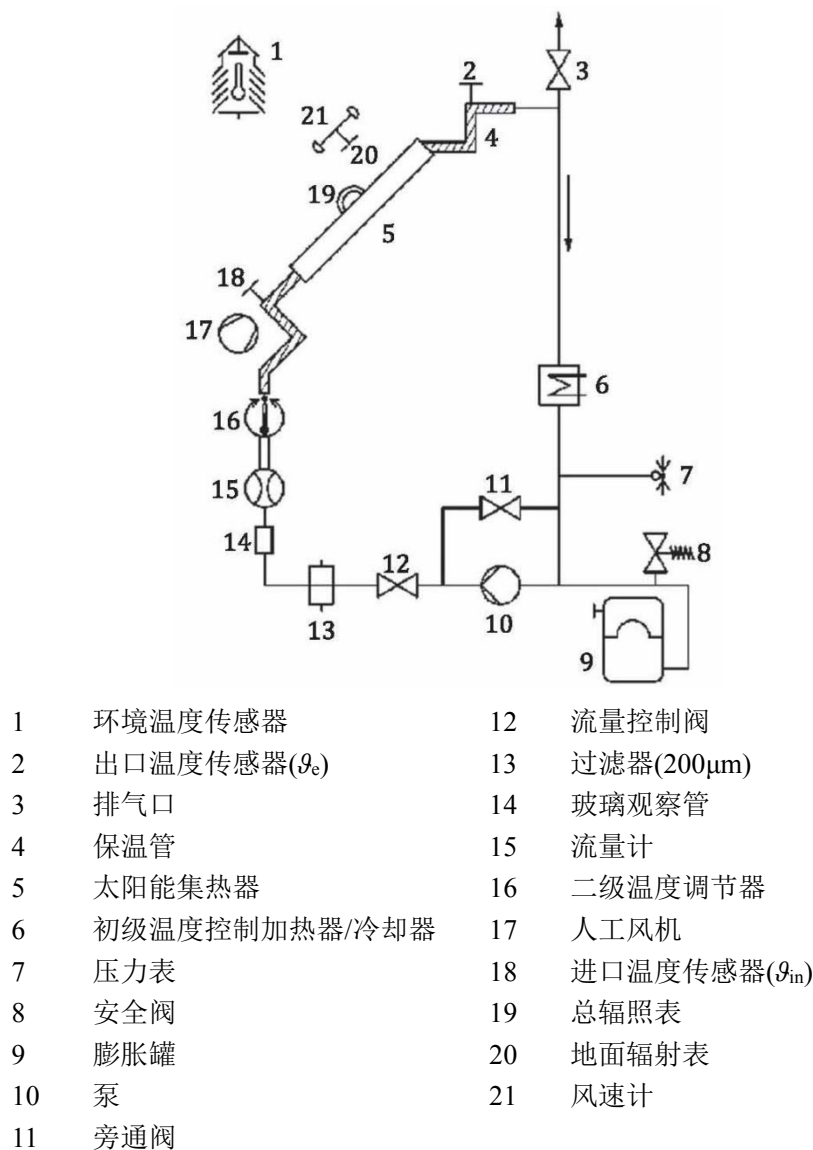


图 6 封闭测试循环回路示例

23.1.2 传热工质

用于集热器测试的传热工质可以是水或集热器厂商指定的工质。传热工质的比热和密度应当使用测试温度 $\pm 1\%$ 范围内的值。水的相关参数可参见附录 C。

23.1.3 管路和配件

23.1.3.1 传热工质为水时

管路应进行保温，最大限度减少温度测量点与集热器进出口之间传递的热量。

集热器管路内的空气和杂质应排除干净。

23.1.3.2 传热工质为厂家指定工质

管路和管件的选择、安装，应注意循环工质的密封要求，采用焊接或法兰连接或其他良好密封的方式。选择合适的耐高温保温材料对管路进行保温。

23.1.4 泵和流量控制装置

循环泵应放在集热器试验回路中，其产生的热量散失在循环工质中，而不影响集热器进口温度的控制和工质温度的测量。在测试温度范围内，任意进口温度情况下，泵和流量控制器应能保证通过集热器

的质量或体积流量稳定在 1%以内。

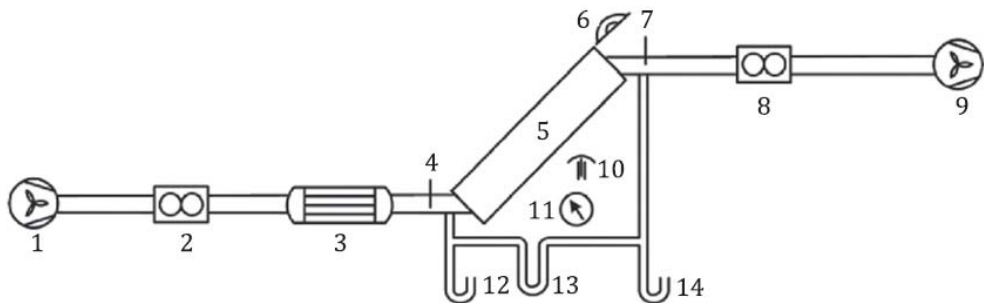
23.2 空气集热器

23.2.1 概述

- 区分不同类型的空气集热器：
- 在闭式空气回路(闭式环路)中运行的空气集热器。
- 吸入环境空气的空气集热器。经过吸热体或通过有孔玻璃盖板吸入空气的渗透型集热器。
- 与环境相通的空气集热器，在特定的进口处吸入环境空气。

23.2.2 闭式循环回路

闭式循环集热器应按图 7 所示回路进行测试。应使用两个流量计，集热器进、出口各安装一个。集热器应在大气压力下进行测试，可通过在两端各使用一台风机来实现。在两个风机之间，有一个可以调节空气流量的地方。

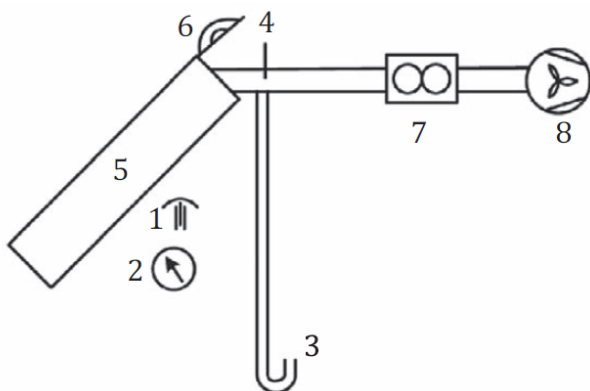


1	风机	8	流量计
2	流量计	9	风机
3	空气电加热器	10	环境温度传感器(ϑ_a)
4	进口温度传感器(ϑ_{in})	11	周围空气的绝对压力表(p_{abs})
5	太阳能空气集热器	12	进口压力表($p_{f,i}$)
6	总辐照表(G)	13	压差($\Delta p=p_{f,i}-p_{f,e}$)
7	出口温度传感器(ϑ_e)	14	出口压力表($p_{f,e}$)

图 7 封闭测试循环回路示例

23.2.3 与大气相通的测试回路

在集热器的出口测量与大气相通的空气集热器的流量。集热器进口温度与环境温度一致。与大气相通的集热器测试系统示例见图 8。



- 1 环境温度传感器(ϑ_a)
- 2 周围空气的绝对压力表(p_{abs})
- 3 压力表($p_{r,e}$)
- 4 出口温度传感器(ϑ_e)
- 5 太阳能空气集热器
- 6 总辐照表(G)
- 7 流量计 $\left[\dot{m}_e = f(\dot{V}_e, \vartheta_{mp,e}, rH_e, p_e) \right]$
- 8 风机

图 8 与大气相通的集热器测试配置示例

23.2.4 传热工质

每个测量点的空气比热容需要通过温度和湿度确定。可通过 22.3.3 中给出的方法计算工质温度。按 22.4.2 所述的方法计算密度。

23.2.5 测试管路

集热器上游和下游的风管应分别与集热器进口和出口的横截面尺寸相同。集热器内部的气流分布对正确评估集热器的性能非常重要。集热器内部的气流形态主要取决于管道系统和集热器之间的连接(特别是靠近集热器进口的隔板)。标准测试时只测试一个集热器模块，这可能与实际安装方式不符。

为使整个集热器内达到均匀的空气流动形态，在进行集热器测试时，厂商应在每个集热器的进出口使用规则分布的管道。可以用一种盒子，进、出口都有金属网，气流可以很好的分布，这样使得集热器的中轴线到边缘，从进口到出口存在均匀的气流。进口和出口温度传感器以及集热器进口和出口管道均应保温，使热损小于 $\pm 0.2\text{W/K}$ 。过滤器应放置在上游流量测量装置和风机处(过滤器尺寸为 $200\mu\text{m}$ 即可)。

应注意漏气对集热器热性能测量准确性的影响。在进行性能测量之前，应该对进、出口测试管道系统进行气密性测试。与第 7 章中描述的方法应相同。在 250Pa 压力下，任何部件的泄漏率都不能超过 $2\text{m}^3/\text{h}$ 。

23.2.6 风机和流量控制装置

风机应置于集热器测试回路中，其产生的热量可消散在工质中，既不影响进口温度，也不影响通过集热器工质的温升测量的位置。在测试温度范围内，任意进口温度情况下，风机和流量控制器应能保证通过集热器的流量稳定在 $\pm 1.5\%$ 以内。

23.2.7 空气预处理装置

在测试期间，空气预处理装置应使进入太阳能集热器传热工质的干球温度保持在测试设定值的 $\pm 1.0\text{K}$ 。集热器获得的热量通过工质进口和出口瞬时温度计算得出，进口温度的微小变化会导致热量计算的误差。因此，避免集热器进口温度的变化非常重要。

23.2.8 湿度比

传热工质为空气，且在负压情况下测试时，其湿度应等于测试台周围空气的湿度。

注：测量和控制不同测点的湿度很重要，尤其重要的是要避免在测试循环回路中出现冷凝现象。

24 热性能测试方法

24.1 概述

太阳能集热器的热性能测试应按照本文件规定方法进行。

对于热电联产的集热器，发电运行模式(如开路或短路)对热性能有影响的应在报告中说明。

对于聚光式集热器，适用下列情况：

- 无透明盖板的聚光集热器，聚光比 $C_R < 10$ 的应视为 WISC 集热器；
- 带有透明盖板的聚光集热器，聚光比 $C_R < 3$ 的应视为其他类型玻璃集热器。
- 对于带有透明盖板的聚光集热器，聚光比 $C_R > 3$ 的，可忽略风速的影响；
- 对于真空式聚光集热器，不论聚光比 C_R 多少，可以忽略风速的影响。
- 高聚光比跟踪集热器的热性能通常采用准动态测试方法进行测试。如果考虑到直射辐照度和散射辐照度之间的区别，可以使用稳态法。准动态试验应遵循 25.1.3 所述的要求和参数。

24.2 集热器的预处理

集热器应在辐照度 $700\text{W}/\text{m}^2$ 以上、环境温度大于 10°C 的条件下达到滞止状态下(见 9.2)运行至少 5 小时。半曝晒或曝晒测试足以满足预处理的要求。如果集热器带有防止滞止的装置，则 5.2.2 适用。

对于所有的热性能测试，集热器盖板、反射器和真空管都应进行彻底清洗。如果集热器上有湿气，可通过高温传热工质循环，直到集热器充分干燥为止。如果预处理采用了该方式，应将其与测试结果一起在报告中说明。

24.3 测试条件

24.3.1 概述

应采用根据厂商推荐的传热流动模式，并在测试报告中说明。

24.3.2 流量

如果推荐的工质流量接近层流和湍流之间的过渡区域，可能会导致内部传热系数的不稳定和集热器效率测量的变化。对于这种集热器，需要使用更高的流量，但在测试结果中应明确说明这一点。

在每个测试期间，流量应保持稳定，满足表 6 的要求(稳态)或者变化不超过设置值 $\pm 2\%$ (准动态)，且不同测试工况之间的偏差不应超过设置值的 $\pm 5\%$ 。

24.3.2.1 液体集热器的流量

液体集热器的流量设置为每平方米 $0.02\text{kg}/\text{s}$ 左右。如果该流量不在厂商指定的流量范围内，则应选择厂商指定范围内的合理流量。

24.3.2.2 空气集热器的流量

工质流量应尽可能接近厂商指定的最大、最小和中间的流量。

对于独立工作的集热器(例如集成 PV 给风机供电和作为流量控制器)，应给出产生的体积流量与辐照度的关系图。

24.3.2.3 槽式、蝶式、菲涅尔等跟踪聚焦集热器的流量

槽式、蝶式、菲涅尔等跟踪聚焦集热器应选择厂商指定范围内的合理流量。

24.3.3 稳态法

24.3.3.1 概述

集热器平面内太阳直接辐射的入射角应该在入射角调节器的变化不超过法向入射 $\pm 2\%$ 的范围内。集热器测试过程中散射辐照度应始终小于 30%。

在测试时，集热器平面上的总辐照度应始终大于 700W/m^2 。

24.3.3.2 与集热器平面平行的风速

对于带玻璃盖板的集热器，在测试期间考虑集热器上方的空间变化和时间变化，与集热器表面平行的风速平均值应为 $3\text{m/s} \pm 1\text{m/s}$ 。

WISC 集热器应在与集热器表面平行的三个平均风速条件下测试： $<1\text{m/s}$ ， $1.5 \pm 0.5\text{m/s}$ 和 $3 \pm 0.5\text{m/s}$ 。

24.3.3.3 空气集热器

数据点应至少有 4 个工质进口温度均匀分布在集热器指定的工作温度范围内。如果可能，为了获得一个准确的测定值 $\eta_{0,\text{hem}}$ ，应当选择一个和环境空气温度偏差在 $\pm 3\text{K}$ 的进口温度。

对于与大气相通的集热器，进口温度等于环境温度。

应在大气压力下测量空气集热器 [即 $(p_i + p_e)/2 = p_{\text{abs}}$ ， $\dot{m}_i = \dot{m}_e$]，使体积流量泄漏最小。

24.3.4 准动态试验

考虑集热器的空间变化和测试期间的时间变化，周围空气速度的平均值应小于 4m/s 。

对于带有玻璃盖板的集热器，考虑到集热器的空间变化和测试期间的时间变化，平行于集热器平面的空气速度应为 $3\text{m/s} \pm 1\text{m/s}$ 。对于 WISC 集热器，应该在 0m/s 到 4m/s 的整个风速范围内进行测量。必要时可使用风机以达到足够的风速。

24.4 测试过程

24.4.1 概述

集热器应在厂商指定的整个工作温度范围内进行测试。进口温度应始终保持在露点温度以上，避免吸热体上出现水凝结现象。如有可能，应选择一个进口温度，使集热器平均温度与周围环境空气温度偏差在 $\pm 3\text{K}$ 以内。

测试过程中，应按 24.5 中的规定进行参数测量。

24.4.2 液体集热器的稳态测试

应测试至少四个集热器工作温度范围内均匀分布的进口温度，每个进口温度应至少采集四个独立的数据点。用太阳模拟器测试时，每个工质进口温度至少要采集两个独立的数据点。

24.4.3 空气集热器的稳态测试

集热器应在其工作温度范围和规定的质量流量范围内进行测试。

24.4.4 WISC 集热器的稳态测试

集热器的稳态测试在工作温度范围内，应至少包括三个均匀分布的进口温度。每组数据(进口温度和风速)至少应采集 4 个独立的数据点，得到 36 个数据点。用太阳模拟器测试时，每个工质进口温度至少要采集两个独立的数据点，得到 18 个数据点。

24.4.5 准动态测试

在集热器的工作温度范围内，应获得满足以下要求的至少四个均匀分布的进口温度数据点。

天气条件应如 24.6.2 所述，天气类型 1 到 4。选择第二和第三进口温度，使集热器内的平均工质温度均匀分布在集热器最低和最高工作范围之间。

每个测试工况完成后应改变进口温度，不同测试工况之间变化的数据可不记录在测试数据表中。在每个测试工况中，进口温度应控制稳定在 $\pm 1\text{k}$ 以内。

24.5 测量

24.5.1 概述

根据所选择的测试方法，应按表 5 选择测量的参数。

表 5 试验中测量的参数

参数	稳态测试 液体集热器	稳态测试 空气集热器	WISC 集热器和 准动态测试
总辐照度	X	X	X
散射辐照度（仅室外测试）	X	X	X
太阳直射入射角（仅室外；该角度也可能通过计算得到）	X	X	X
风速	X	X	X
环境温度	X	X	X
集热器进口和出口温度	X	X	X
传热工质流量	X	—	X
环境空气露点温度	—	X	—
集热器进口和出口空气（相对）湿度	—	X	—
集热器进口工质质量流量（仅闭式回路系统）	—	X	—
集热器出口工质质量流量	—	X	—
集热器进口和出口工质的静压力	—	X	—
环境空气的绝对压力	—	X	—
集热器平面长波热辐射	—	—	X (仅 WISC 集热器)

24.5.2 太阳辐照模拟器测试期间的附加测量

24.5.2.1 模拟太阳辐照度的测量

集热器平面上辐照度测量的最大网格间距为 150mm。数据分析采用简单平均法计算出空间均值。

24.5.2.2 测量模拟器热辐射

在太阳模拟器中的热辐射通常可能比户外的热辐射高。因此，应对其进行测量，以确保其不超过 20.2.2 所规定的限值。

当模拟器发生可能影响热辐射的变化时，应确定集热器试验平面的平均热辐射。集热器测试平面上的平均热辐射应与集热器的测试结果一起进行报告。

24.5.2.3 模拟器内环境空气温度

应测量模拟器内环境空气温度 ϑ_a ，如必要可采集几个温度取平均值。温度传感器应加以遮挡，以减少辐射热交换。风机出口处的温度传感器数据用于计算集热器的热性能。

24.5.3 数据采集要求

数据测量的时间间隔应不大于 10 秒。平均值的记录时间间隔应不大于 30 秒。对于室外测试，每个数据都应对应一个时间点，以计算太阳辐射入射到集热器上的角度。

24.6 测试周期

24.6.1 稳态测试

当所有实验参数均满足表 6 中规定的偏差范围，则认为集热器达到稳态工作条件。检测周期至少是集热器时间常数的 4 倍(时间常数已知)，或者液体加热集热器不小于 15 分钟(时间常数未知)。

空气加热集热器的检测周期应在 20 分钟以上。

表 6 一个测试周期内的参数变化允许值

参数	与平均值的允许偏差	
	液体加热集热器	空气集热器
总辐照度	$\pm 50 \text{ W/m}^2$	
热辐照度 (仅 WISC 集热器)	$\pm 20 \text{ W/m}^2$	
环境温度	$\pm 1,5 \text{ K}$	
工质质量流量	$\pm 1 \%$	$\pm 2 \%$
集热器进口工质温度	$\pm 0,1 \text{ K}$	$\pm 1,5 \text{ K}$
集热器出口工质温度	$\pm 0,4 \text{ K}$	$\pm 1,5 \text{ K}$
周围环境风速	$\pm 1,0 \text{ m/s}$ 与设定值的偏差	

24.6.2 准动态测试

24.6.2.1 概述

测试周期由 4 到 5 个工况(天)组成。天数取决于测试场地的天气情况。数据记录应包含所有运行的关键条件(足够的可变性和动态范围)数据，用于解耦集热器参数。可以通过改变集热器设计范围内的进口温度来实现。如果在 4 至 5 天的试验之后记录了足够的数据，则应按照 25.1.3 中给出的方法来计算这些数据。

24.6.2.2 描述测试工况

每个测试工况的最小时间为 3 个小时。测试工况的时间不需要连续，可以由多个非连续的部分组成，最小时间长度为 30 分钟。

测试日类型 1

η_0 测试工况——应当在晴朗的天气条件下进行。测试工况所包含入射角从 60° 到直射辐照度修正系数与法向入射的值相差不超过 2% (见 27.2.2)。

测试日类型 2

在多云、少云和晴朗的条件下，应至少进行一次试验。该测试可以作为 η_0 测试条件或更高温度条件的测试工况。

测试日类型 3(1-2 天)

在包括晴天条件在内的平均工作温度条件下的测量。

测试日类型 4

在包括晴天条件在内的高温条件下进行测量。

测试日类型 1 和测试日类型 2 适用于聚光比 $CR > 20$ 的集热器。测试工况的修改必须在测试报告中说明和解释。

24.6.2.3 测试数据评估

为确保集热器的初始状态不影响测试参数，分析中不包括相当于四倍集热器时间常数(如时间已知)的时间段或 15 分钟时间段(如时间常数未知)的进口温度和风速（仅 WISC 集热器）数据。为了能够清楚的表示不同测试参数之间的关系，包括动态测试范围的可靠参数和集热器参数解耦，需用理想化的图表形式表达。绘制这些图表用于识别测试参数的好坏。

图 9 显示 $\vartheta_m - \vartheta_a$ 与 G_{hem} 的关系，用以检查 η_0 测试条件下和更高的进口温度的条件下的数据是否足够。这些数据可提供识别 $\eta_{0,b}$ 和集热器热损的必要信息。

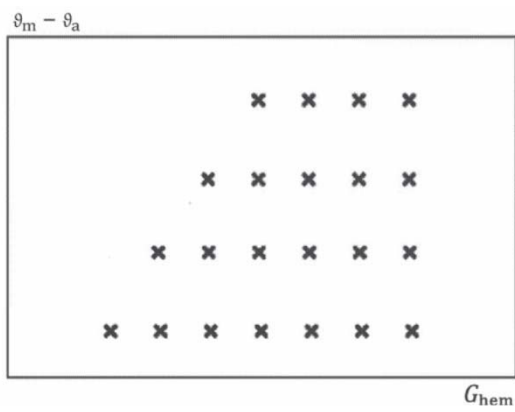


图 9 $G_m - G_a$ 与 G_{hem} 的关系

图 10 和图 11 显示在直射辐射高入射角和低入射角情况下是否有足够的数据来确定 $K_b(\theta_L, \theta_t)$ ，和在高散射辐射水平下，是否有足够的数据来确定 K_d 。

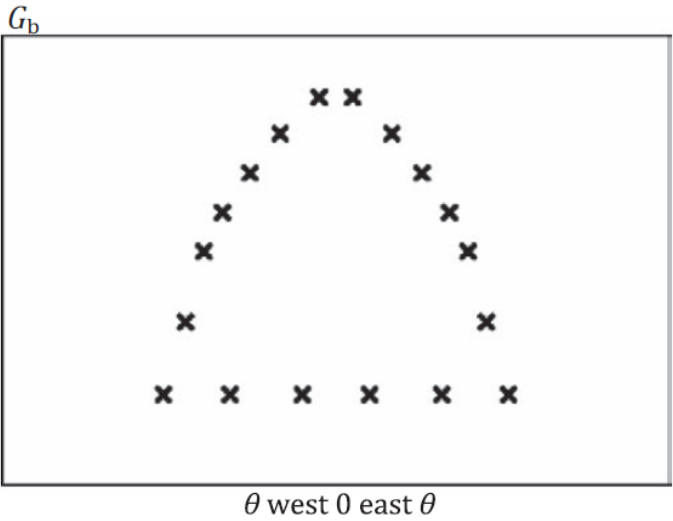


图 10 G_b 与 θ

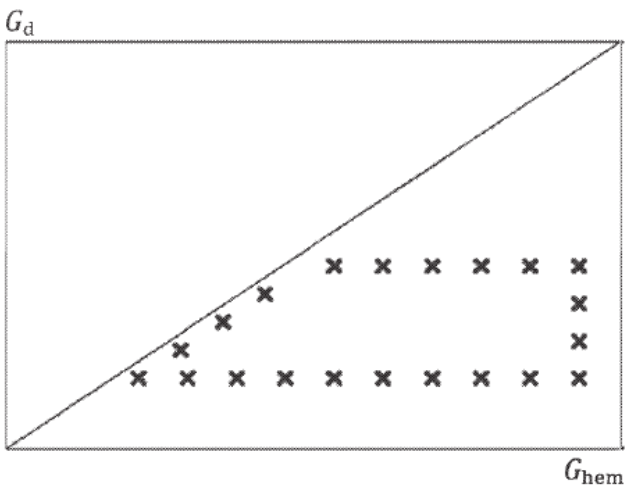


图 11 G_d 与 G_{hem}

对于 WISC 集热器，图 12 显示了风速与 G_{hem} 的理想分布，图 13 显示了天空温度与 G_{hem} 的理想分布，应考虑 24.3.4 中所述的风速。

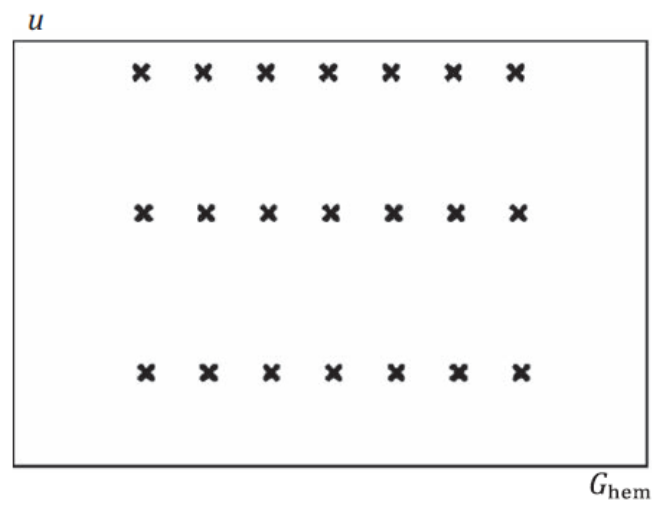


图 12 风速和 G_{hem}

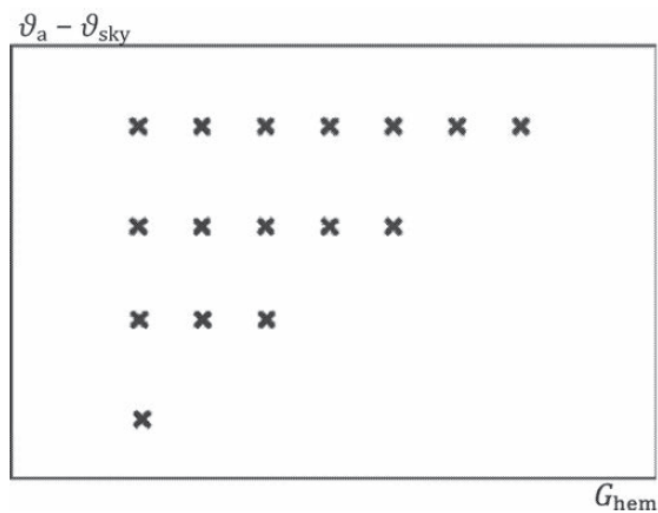
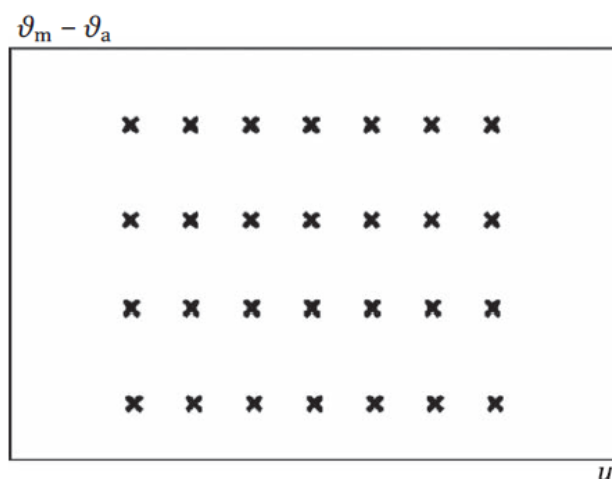


图 13 $\theta_a - \theta_{\text{sky}}$ 与 G_{hem}

在自然风下测试的集热器，图 14 显示 $\theta_m - \theta_a$ 和风速 u 的理想分布。

图 14 $\vartheta_m - \vartheta_a$ 和风速 u

25 集热器参数的计算

25.1 液体加热集热器

25.1.1 概述

有用得热量 Q 的计算见公式 (10):

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_f \Delta T \quad (10)$$

应使用与工质平均温度相关的 c_f 值。如果体积流量 \dot{m} 直接从流量计获得, 则密度应与流量计内的工质温度对应。

有用得热量 Q 的计算模型如 25.1.2 和 25.1.3 描述。如果模型不适用, 应使用集热器性能测试的数据表。

在性能测试过程中, 使用降低的风速 $u' = u - 3 \text{ m/s}$ 对提取的得热量进行建模, 从而考虑到所需的周围风速。

25.1.2 液体加热集热器的稳态试验方法

有用得热量的模型如下式(11)所示:

$$\dot{Q} = A_G \left[\begin{aligned} &\eta_{0,\text{hem}} G_{\text{hem}} - a_1 (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_2 (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - a_3 u' (\vartheta_m - \vartheta_a) + \\ &a_4 (E_L - \sigma T_a^4) - a_6 u' G_{\text{hem}} - a_7 u' (E_L - \sigma T_a^4) - a_8 (\vartheta_m - \vartheta_a)^4 \end{aligned} \right] \quad (11)$$

其中:

$$a_4 = \eta_{0,\text{hem}} \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad \text{and} \quad a_6 = \eta_{0,\text{hem}} b_u \quad \text{and} \quad a_7 = \eta_{0,\text{hem}} b_u \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad (12)$$

如果 (ε/α) 的值通过其它测量途径已知, 则可用于有用得热量的模型。在测试报告中应给出相应的数据参考。本文件以前版本定义参数也可用于公式(12)。

25.1.2.1 集热器接收的太阳能

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，可以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几个面积做为参考面积进行测试；当生产厂家无要求时，实验室可以根据实际情况确定。当检测数据用于国际交流时，可以采用总面积、采光面积或吸热体面积中的任意一个面积做为参考面积进行测试：

a) 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 $A_G G$ ，故式(13)为：

$$\eta_G = \frac{\dot{Q}}{A_G G} \quad (13)$$

b) 以集热器采光面积为参考

当以集热器采光面积为参考时，集热器接收的太阳辐射功率为 $A_a G$ ，故式(14)为：

$$\eta_a = \frac{\dot{Q}}{A_a G} \quad (14)$$

c) 以集热器吸热体面积为参考

当以集热器吸热体面积为参考时，集热器接收的太阳辐射功率为 $A_A G$ ，故式(15)为：

$$\eta_A = \frac{\dot{Q}}{A_A G} \quad (15)$$

d) 以集热器轮廓采光面积为参考

当以集热器轮廓采光面积为参考时，集热器接收的太阳辐射功率为 $A_c G$ ，故式(16)为：

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}}{A_c G} \quad (16)$$

25.1.2.2 归一化温差

瞬时效率 η 由归一化温差 ϑ^* 的函数图形方式表示出来。

当使用传热工质平均温度 ϑ_m 时，

$$\vartheta_m = \vartheta_i + \frac{\Delta\vartheta}{2} \quad (17)$$

归一化温差为：

$$\vartheta_m^* = \frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{G} \quad (18)$$

25.1.2.3 瞬时效率的结果表示

瞬时效率 η 的图形应利用最小二乘法进行曲线拟合得出，由下式(19)或式(20)获得瞬时效率曲线：

$$\eta = \eta_0 - a_1 \vartheta^* - a_2 G (\vartheta^*)^2 \quad (19)$$

或

$$\eta = \eta_0 - U \vartheta^* \quad (20)$$

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 C 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 W/m^2 。

对于平板型集热器，在散射太阳辐照度大于总辐照度 30% 条件下测得的数据点，应采用附录 D 中给出的方法修正到等效法向日射辐照度。若散射太阳辐照度小于 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。

以下条款为集热器面积（总面积、采光面积、吸热体面积、轮廓采光面积）和归一化温差 ϑ_m^* 相组合的四种情况提供了瞬时效率的计算式。

a) 基于集热器总面积和归一化温差 ϑ_m^* 的瞬时效率

$$\eta_G = \eta_{0G} - a_{1G} \vartheta_m^* - a_{2G} G (\vartheta_m^*)^2 \quad (21)$$

或

$$\eta_G = \eta_{0G} - U_G \vartheta_m^* \quad (22)$$

b) 基于集热器采光面积和归一化温差 ϑ_m^* 的瞬时效率

$$\eta_a = \eta_{0a} - a_{1a} \vartheta_m^* - a_{2a} G (\vartheta_m^*)^2 \quad (23)$$

或

$$\eta_a = \eta_{0a} - U_a \vartheta_m^* \quad (24)$$

c) 基于集热器吸热体面积和归一化温差 ϑ_m^* 的瞬时效率

$$\eta_A = \eta_{0A} - a_{1A} \vartheta_m^* - a_{2A} G (\vartheta_m^*)^2 \quad (25)$$

或

$$\eta_A = \eta_{0A} - U_A \vartheta_m^* \quad (26)$$

d) 基于集热器轮廓采光面积和归一化温差 ϑ_m^* 的瞬时效率

$$\eta_c = \eta_{0c} - a_{1c} \vartheta_m^* - a_{2c} G (\vartheta_m^*)^2 \quad (27)$$

或

$$\eta_c = \eta_{0c} - U_a \vartheta_m^* \quad (28)$$

25.1.3 液体集热器的准动态试验方法

有用得热量的计算模型如下式(29)所示:

$$\dot{Q} = A_G \left[\eta_{0,b} K_b (\theta_L, \theta_T) G_b + \eta_{0,b} K_d G_d - a_1 (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_2 (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - a_3 u' (\vartheta_m - \vartheta_a) + a_4 (E_L - \sigma T_a^4) - a_5 (d\vartheta_m/dt) - a_6 u' G - a_7 u' (E_L - \sigma T_a^4) - a_8 (\vartheta_m - \vartheta_a)^4 \right] \quad (29)$$

对于聚光比 $CR < 20$ 的集热器, 必须使用已被确定量值的参数 $\eta_{0,b}$, $K_\theta(\theta_L, \theta_T)$, K_d 及系数 a_1 , a_2 和 a_5 , 参数 a_8 可设置为 0。

对于聚光比 $CR > 20$ 的集热器, 可以将 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_6 、 a_7 和 K_d 参数设为零, a_5 必须使用被确定后的值。

对于使用人工风机实现 2m/s~4m/s 风速测试的平板集热器, 系数 a_3 、 a_4 、 a_6 、 a_7 可设为 0。

对于 WISC 集热器或具有聚光比的集热器, 可以将参数 a_8 设置为 0。

25.1.4 数据分析

对实测数据点进行统计最小二乘曲线拟合, 计算出所需的性能参数。如果这些参数有负值, 或者没有统计学意义[即, T 比值(参数值/参数值标准差) < 3], 公式(11)或(29)中该参数应设置为 0, 并再次进行数据处理。在结果表(附录 A)中, 这个参数应该用 0 表示。在任何情况下, 都不能在不重复进行数据分析和不重新拟合其他参数时, 将参数设置为 0。如果计算出的 a_5 值是负值, 则用由 26.3 的方法确定的有效热容除以集热器总面积 A_G 的值来代替。

25.2 闭式空气集热器稳态测试方法

25.2.1 概述

有用得热量的计算模型如下式(30)所示:

$$\dot{Q} = (\dot{m}_e \cdot c_{f,e} \cdot \vartheta_e) - (\dot{m}_i \cdot c_{f,i} \cdot \vartheta_i) - [(\dot{m}_e - \dot{m}_i) \cdot c_{f,a} \cdot \vartheta_a] \quad (30)$$

应使用与工质进口温度, 出口温度, 环境温度相对应的 $c_{f,e}$ 值。如果 \dot{m} 是从体积流量计测得, 则需要根据流量计中工质的温度确定密度。

必要时, 使用集热器性能的测量数据表。

注: 如果测量是在正压力下进行, 因为泄漏的体积流量的气体对应确切温度不清楚, 公式(14)有一个不确定点。在正压下, 体积泄漏流量的温度取决于泄露位置在集热器进口还是出口部分。

25.2.2 闭式空气集热器的稳态试验方法

闭式空气集热器的稳态测试方法可参照液体集热器稳态试验方法(见 25.1)。

25.2.3 与大气相通空气集热器稳态试验方法

有用得热量的计算模型如下式(31)所示：

$$\dot{Q} = A_G G \eta_{hem, \dot{m}_i} \tag{31}$$

集热器效率 η_{hem, \dot{m}_i} 取决于质量流量 \dot{m}_i ，因此应按厂商规定流量范围内的最小、平均、和最大流量进行集热器效率的测试。

25.2.4 与大气相通 WISC 空气集热器稳态试验方法

集热器上获得的太阳能 $A_G G$ 以及集热器的有用得热量 \dot{Q} ，如公式(32)：

$$\dot{Q} = A_G \left[G + \frac{\varepsilon}{\alpha} (E_L - \sigma T_a^4) \right] (\eta_{hem, \dot{m}_i} - b_{u, \dot{m}_i} u) \tag{32}$$

集热器效率参数取决于质量流量，因此应按厂商规定流量范围内的最小、平均、和最大流量进行集热器效率的测试。

25.3 标准报告条件（SRC）

集热器的输出(数据表和图形)应以与测试方法单一对应的形式按表 7 中定义的气候标准报告条件 (SRC)给出。所有的计算均使用测量分析模型。

表 7 标准报告条件

气候条件	晴朗 （蓝色天空）	多云 （朦胧天空）	阴天 （灰色天空）
G_b	850 W/m²	440 W/m²	0 W/m²
G_d	150 W/m²	260 W/m²	400 W/m²
ϑ_a	20°C	20°C	20°C
$E_{L-\sigma} \cdot \vartheta_a^4$ ^a	-100 W/m²	-50 W/m²	0 W/m²
u ^a	1,3 m/s	1,3 m/s	1,3 m/s
$d\vartheta_m/dt$ ^b	0 K/s	0 K/s	0 K/s
a 仅适用 WISC 集热器 b 仅适用于准动态测试			

注：由于有效天空辐射温度比环境空气温度低，通常情况下($E_L-\sigma \cdot \vartheta_a^4$)是个负值。晴空条件下，净长波辐照度-100W/m²对应 $\vartheta_a=20^\circ\text{C}$ 和 $\vartheta_{sky}=0^\circ\text{C}$ 。

为实现结果表达的完全一致,应确定参数 K_d 和 $\eta_{0,b}$ ，如果没有，使用附录 B 中给出的公式。

热性能结果应以集热器的平均工质温度和环境温度的最大温差进行显示，最大温差为 30K。最小温差为-10K。需要说明的是，被测集热器参数仅适用于此范围。

对于所有集热器，应使用气候标准报告条件(SRC)的晴天条件、在温差 $\vartheta_m-\vartheta_a=0$ 及入射角为 0° 条件下计算峰值功率 W_{peak} 。

集热器输出功率的结果应在数据表中给出，未测量的数据应按公式（33）进行计算。

$$W = AG\eta_G \quad (33)$$

表 8 集热器输出功率

温差 (K)	总辐照度 (W/m ²)		
$\vartheta_m - \vartheta_a$	400	700	1000
10			
30			
50			
注：表格中的总辐照度为集热器实际安装角度的数值。			

25.4 标准不确定性

集热器测量参数的标准不确定度分析可参照附录 D。

25.5 参考面积转换

除了用总面积表示集热器的热性能参数外，如果需要用其它面积表示，可参照附录 G 给出的转换方法计算。

26 确定有效热容量和时间常数

26.1 概述

有效热容和时间常数是描述集热器瞬时性能的重要参数。集热器可以认为是在不同的温度下诸多部件的组合物。当集热器运行时，每个集热器部件对运行条件的响应有所不同，因此有必要将集热器作为一个整体考虑其有效热容量。

很明显，有效热容量和时间常数可能取决于集热器的工作条件，而且量值不是简单唯一的。为此，应选用下列指定测试条件中的一种方法。有效热容和时间常数的测量应使用与集热器效率测试相同的流量。

26.2 利用太阳辐照测量有效热容量

按照 23.4 中的要求安装和运行集热器。将集热器遮盖避免受到太阳辐射（自然光或模拟器）。进口工质温度设置为近似环境温度 $\vartheta_{in} \approx \vartheta_a$ ，直到达到稳态条件 ($\vartheta_{ex} \approx \vartheta_{in}$)。在进口温度稳定在环境温度 ϑ_a 时，快速移除集热器遮盖物，直到工质出口温度变化小于 0.5K/min，即认为再次达到稳定状态。

集热器在稳态 1 和稳态 2 之间的瞬时表现可由公式(34) 描述：

$$C \frac{d\vartheta_m}{dt} = A \cdot \eta_{0,hem} \cdot G - \dot{m} \cdot c_f \cdot \Delta T - A_G \cdot U \cdot (\vartheta_m - \vartheta_a) \quad (34)$$

对这两个稳态之间的时间进行积分，得到集热器热容的公式如下：

$$C = \frac{A_G \cdot \eta_{0,hem} \int_{t_1}^{t_2} G dt - \dot{m} \cdot c_f \int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt - A_G \cdot U \left[\int_{t_1}^{t_2} (\vartheta_{in} - \vartheta_a) dt + \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt \right]}{(\vartheta_{m2} - \vartheta_{m1})} \quad (35)$$

26.3 利用准动态方法测量有效热容

以 a_s 为模型、并等于 C/A 的有效热容是集热器模型必须有的部分，与集热器的所有其它参数同时确定。

测试数据应包括变化幅度大的太阳辐射，从而使集热器热容变化比较显著。通常在测试日类型 2，多云天气条件下，出现 $d\vartheta_m/dt$ 超过 $\pm 0.005\text{K/s}$ ，可满足所需的测试条件。如果条件不能满足，可在测试日类型 2 条件下，增加部分多云天气条件的测试来确定。

26.4 确定有效热容的计算方法

集热器的有效热容 C 是组成集热器的各元件(玻璃、吸热体、所含工质和保温材料)的总热容 $m_i c_i$ 之和，用一个通用因子 p_i 进行加权计算，如式 (36)：

$$C = \sum_i p_i \cdot m_i \cdot c_i$$

(36)

权重因子 p_i (介于 0 和 1 之间)表示某些元素只部分影响集热器的热惰性。 p_i 的值如表 9 所示。

表 9 权重因子值

部件	p_i
吸热体	1
保温	0,5
传热工质	1
外层玻璃盖板	$0,01 \cdot a_1$
第二层玻璃盖板	$0,2 \cdot a_1$

与传热工质(液体或空气)直接接触的集热器所有部件应取加权因子 $p_i=1$ 。

26.5 测量集热器的时间常数

26.1 的测试方法用于确定时间常数。

绘制集热器出口温度与环境温度($\vartheta_e - \vartheta_a$)温差与时间的关系图，从初始稳态状态开始，直到达到第二个稳态(参见图 15)。。

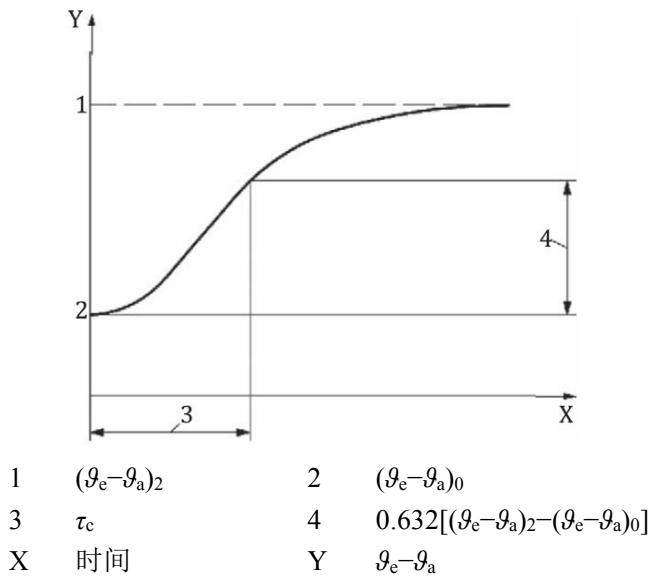


图 15 集热器时间常数

集热器的时间常数 τ_c 定义为：移除集热器遮盖物后，集热器出口温度与环境温度的温差从 $(\vartheta_e - \vartheta_a)_0$ 上升到 $(\vartheta_e - \vartheta_a)_2$ 的 0.632 倍所消耗的时间。

另外，也可以在集热器冷却期间确定时间常数，即通过倒转 26.1 中的测试方法进行测量。则集热器的时间常数就是从辐照度隔断（遮蔽）后到集热器出口温升下降至初始温升值 63.2% 所消耗的时间。

27 测定入射角修正系数（IAM）

27.1 概述

集热器的热性能是在法向入射情况下进行测试的。应单独确定集热器的入射角修正系数，以计算任意入射角度下集热器的热性能。槽式、蝶式、菲涅尔等跟踪聚焦集热器不进行该项目测试。

27.2 建模

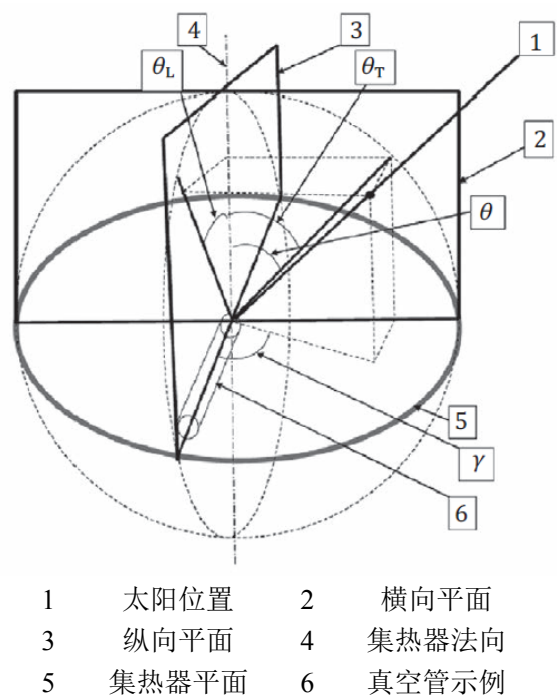
入射角修正系数定义为：给定入射角时的峰值效率与法向入射时峰值效率的比值。公式分别如式 (37)，(38)：

$$K_b(\theta_L, \theta_T) = \frac{\eta_{0,b}(\theta_L, \theta_T)}{\eta_{0,b}} \tag{37}$$

$$K_{hem}(\theta_L, \theta_T) = \frac{\eta_{0,hem}(\theta_L, \theta_T)}{\eta_{0,hem}} \tag{38}$$

某些类型的集热器无法在法向入射条件下测试其热性能，可将另外一个入射角作为参考角度进行热性能测试。在测试报告中应清楚地描述这种偏差模型，以防止在使用任何模拟工具时出现计算错误。

纵向平面(指标 L)平行于集热器的光轴，横向平面(指标 T)垂直于光轴。角 θ_L 和 θ_T 分别为入射角 θ_i (给出球面坐标系)在纵向和横向平面上的投影，见图 16。



- | | | | |
|---|-------|---|-------|
| 1 | 太阳位置 | 2 | 横向平面 |
| 3 | 纵向平面 | 4 | 集热器法向 |
| 5 | 集热器平面 | 6 | 真空管示例 |

图 16 与测定 IAM 有关的对称的平面和角度

θ , θ_L , θ_T 之间的相关关系见公式(39)和(40):

$$\theta_L(\theta, \gamma) = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\theta) \cos(\gamma)}{\cos(\theta)} \right) \quad (39)$$

$$\theta_T(\theta, \gamma) = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\theta) \sin(\gamma)}{\cos(\theta)} \right) \quad (40)$$

θ_L , θ_T 为投影到两个对称平面上的入射角, 则

$$\tan^2 \theta = \tan^2 \theta_L + \tan^2 \theta_T \quad (41)$$

对于大多数集热器来说, 入射角修正系数近似等于如图 16 所示的集热器两个垂直交互平面上入射角修正系数的乘积。

$$K_{\text{hem}}(\theta_L, \theta_T) = K_{\text{hem}}(\theta_L, 0) \cdot K_{\text{hem}}(0, \theta_T) \quad (42)$$

这两个入射角修正系数的函数需要确定。对于入射角的影响与入射方向是对称性的集热器, 只需要测量一个方向上的入射角修正系数即可。

根据集热器的类型, 可以使用一些描述入射角修正系数的标准函数, 如式(43)所示的 Ambrosetti 函数:

$$K(\theta) = 1 - \tan^{\kappa} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (43)$$

但是, 对于很多的集热器结构类型, 简单的函数并不适合描述入射角修正系数。在这些情况下, 应每隔 10° 列出入射角修正系数表, 如有必要, 间隔角度可小于 10° 。

θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$K(\theta)$	$K(0)$	$K(10)$	$K(20)$	$K(30)$	$K(40)$	$K(50)$	$K(60)$	$K(70)$	$K(80)$	$K(90)$

对于任意入射角 θ 的入射角修正系数可以通过表格和公式 (44) 的近似线性化法进行插值查找。

$$K(\theta) = \left[K \left(\left\lfloor \frac{\theta}{10} \right\rfloor \cdot 10 \right) \left(\left\lfloor \frac{\theta + 10}{10} \right\rfloor - \frac{\theta}{10} \right) + K \left(\left\lfloor \frac{\theta}{10} \right\rfloor \cdot 10 + 10 \right) \left(\frac{\theta}{10} - \left\lfloor \frac{\theta}{10} \right\rfloor \right) \right] \quad (44)$$

其中, 开口括号表示取整到下一个整数。

对于大多数集热器, $K(0^\circ) = 1$, $K(90^\circ) = 0$; 但是, 对于某些特殊设计的集热器, 可能还有其它的安装固定点 (使得集热器入射角偏离 $0-90^\circ$ 范围)。对于非对称集热器, 入射角修正系数表应扩展到 $\theta = -90^\circ$ 到 $\theta = +90^\circ$ 。

27.2.1 稳态

对于稳态测试, 公式 (11) 用入射角修正系数 $K_{\text{hem}}(\theta_L, \theta_T)$ 修正后如式 (45) 所示:

$$\dot{Q} = A_G \left[\eta_{0,\text{hem}} G_{\text{hem}} K_{\text{hem}}(\theta_L, \theta_T) - a_1 (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_2 (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - a_3 u' (\vartheta_m - \vartheta_a) + a_4 (E_L - \sigma T_a^4) - a_6 u' G - a_7 u' (E_L - \sigma T_a^4) - a_8 (\vartheta_m - \vartheta_a)^4 \right] \quad (45)$$

27.2.2 准动态

直射辐射入射角修正系数 $K_b(\theta_L, \theta_T)$ 和散射辐射入射角修正系数 K_d , 是集热器模型中必须有的部分。 K_d 可认为是集热器的一个常数。这些参数可以和所有其他的集热器参数一起确定。

27.3 测试方法

27.3.1 稳态液体加热集热器

27.3.1.1 概述

集热器运行条件(流量、风速等)与热性能测试时相似。传热工质的平均温度与环境温度的温差应尽可能控制在 $\pm 1K$ 。按照 24.4.2 进行效率测试。测试时集热器采光面上的散射辐照度应始终小于 30%。在每个工况测试期间, 应使集热器方位保持在所测试入射角的 $\pm 2^\circ$ 内。

对于光学非对称集热器, 在测试其中一个平面的入射角修正系数时, 另一个平面内的入射角修正系数应保持在与法向入射角修正系数相差不超过 2% 的范围内。

应注意入射角修正系数的测量不会受非对称倾斜角度的影响。应特别注意, 由于很小的偏差会引起相当大的测量误差, 因此应将日射辐照表准确地放置在集热器的平面内。

应至少测试 20° 和 70° 之间两个不同的入射角度。对于具有特殊光学性能的集热器, 建议对两个以上的角度进行测试。

使用以下两种方法中的一种测试入射角修正系数 IAM。

27.3.1.2 方法一

本方法适用于使用具有 20.2.3 所述特性的太阳模拟器进行室内测试, 或使用两轴可移动测试架进行室外测试, 使集热器的朝向根据入射的太阳辐射方向任意调整。

集热器应在不同固定角度的稳定条件下运行, 以达到稳定的瞬时效率。

27.3.1.3 方法二

该方法适用于室外使用固定测试架进行测试, 在固定测试架上集热器除倾角外不能任意调整方向。

集热器效率的确定方法是: 在太阳正午前取一个效率值, 在太阳正午后取第二个效率值。这两个数据点的集热器与太阳直射光之间的平均入射角相同。该入射角的集热器效率应等于两个值的平均值。

27.3.2 空气集热器

空气集热器入射角的修正系数可以采用液体集热器的方法进行测量。使用集热器效率测试时三种流量中的一种进行入射角修正系数的测试。

27.4 集热器入射角修正系数的计算

无论采用哪种测试方法, 每个入射角的集热器热效率都应确定。使用公式(11)重新计算热性能 $\eta_{\text{hem}}(\theta_L, \theta_T)$, 匹配 η_0 的条件, 给定 $\eta_{0,\text{hem}}(\theta_L, \theta_T)$ 。然后除以法向入射的热效率, 得到入射角度修正系数。

$$K_{\text{hem}}(\theta_L, \theta_T) = \frac{\eta_{\text{hem}}(\theta_L, \theta_T)}{\eta_{0,\text{hem}}} \quad (46)$$

27.5 报告

入射角修正系数的结果应在数据表中给出, 在纵向和横向方向每隔 10° 对应一个结果, 如有必要, 间隔角度可小于 10° 。未测量的数据应采用入射角修正系数测试数学模型进行计算(见 27.2)。

θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$K_L(\theta)$										
$K_T(\theta)$										

计算所用的数学模型应在试验报告中说明。为了防止误解，应说明结果属纵向和横向方向。
对于稳态测试，散射入射角修正系数常数 K_d 应按式(附录 B.3)进行确定，并在试验报告中注明。

28 压力降落

28.1 概述

对于太阳能系统的设计，集热器的压力降落是一个重要参数。可用任意工质进行测试，但应与压力降落测试结果相对应。测试时工质的标准温度应为(20±2)℃。如采用其他温度，应与测试结果一起说明。
传热工质的流动方式应符合厂商的说明。应特别注意的是，在集热器的进、出口端口选择适当的管道配件，以防止产生不必要的额外压力降落。在整个测试过程中，应遮蔽集热器以防止太阳照射。
压力降落应该根据不同的流量来确定，流量值应该包括实际运行中可能使用的流量范围。在流量范围内，至少要进行五次测量。在每个测试点，压力达到稳定状态后应至少保持 5 分钟。

28.2 液体集热器

28.2.1 设备和方法

和集热器效率测试相比，压力降落测试所需的仪器较少，但仍需要将集热器安装在符合 22 章要求的测试回路中。
应按照第 23 章的规定测试以下数据：
a) 集热器进口工质温度；
b) 工质流量；
c) 集热器进、出口连接处传热工质的压力降落。
集热器压力降落测试仪表的标准测量不确定度为 5%或±10Pa，以较高者为准。

28.2.2 连接件压力降落

用于测量工质压力的连接件本身可能导致压力降落。应将集热器从测试回路中取出，将连接件直接连接并进行重复测试，对压力降落进行零点检查。由测试设备引起的压力降落应在进行集热器压力降落测试时修正。

28.2.3 测试条件

测试应在工作压力下进行，压力保持相对恒定。流量应保持在测试值的±1%内。

28.3 空气集热器

28.3.1 设备和方法

测量装置应安装在集热器的上游和下游，如图 17 所示。将集热器从测试回路中取出，将连接件直接连接并进行重复测试，对压力降落进行零点检查。由连接件引起的压力降落应进行集热器压力降落的修正。
对于与大气相通的集热器，进口的压力一直等于大气压力。
在集热器联集箱内应有四个压力测量点，如图 17 所示。测试回路中的压力和太阳能集热器的压力降落应从静态测压孔使用压力计或差压计测量。管道内表面的取压孔边缘应无毛刺。取压孔直径不应超过壁厚的 40%或 1.6mm。应规定进入集热器工质的绝对压力。
空气集热器的静态压力降落和集热器的上游或下游静压仪器测量精度为±10Pa。

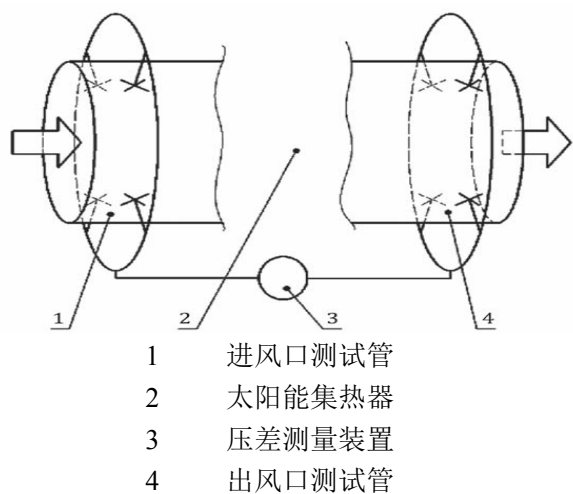


图 17 空气集热器压力降落的测量

28.4 结果和报告

压力降落应以表格形式给出，并以工质流量函数的形式在图形上给出。使用附录 A 中给出的格式表格。

对于大多数集热器，其压力降落可以近似为二阶多项式函数，如式(47)所示：

$$\Delta p = a\dot{V} + b\dot{V}^2 \tag{47}$$

参数 a 和 b 应通过不同流量下测得的压力降落数据用最小二乘法拟合得到。如果这个简单模型不适用，则测试报告中应列出测得的压力降落数据。

附 录 A
(规范性附录)
检测报告

检 验 报 告

TEST REPORT

报告编号

产品名称

Name of Project

委托单位

Client

生产单位

Manufacture

检验类别

Test Category

实验室名称

注 意 事 项

NOTICE

1. 报告无“检验鉴定章”无效;
Test report is invalid without the “Stamp of test report” on it.
2. 复制报告未重新加盖“检验鉴定章”无效;
Duplication of test report is invalid without the “Stamp of test report” on it.
3. 报告无主检、审核、批准签字无效（仲裁检验报告应增加审定签字）;
Test report is invalid without the signatures of the persons for chief test, verification and approval. The test report for arbitration should be added the signature of the person for verification on it.
4. 报告涂改无效;
Test report is invalid if altered.
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;
Different opinions about test report should be reported to the test department within 15 days from the date of receiving the test report.
6. 一般情况，委托检验仅对来样负责。
In general, for entrusted tests the responsibilities are undertaken for the delivered samples only.

地址:

ADD:

业务电话 (Business TEL):

投诉电话 (Complaint TEL):

传真 (FAX):

邮政编码 (Postcode) :

E-mail:

实验室名称

报告编号 (No.):第 页 共 70 页 (Page of)

样品编号:			
样品名称:		规格型号:	
		商 标:	
委托单位:		出厂编号:	
		生产日期:	
生产单位:		送样数量:	
		送样日期:	
委托单位地址:		检验日期:	
		检验类别:	
检验依据:			
检测地点:			
检验设备:			
检验项目:			
检验结论:	<div>检验鉴定章</div> <div>签发日期:</div>		

批 准:Approval

审 核:Verification

主 检:Chief tester

实验室名称

报告编号 (No.): 第 页 共 70 页 (Page of)

样品编号:	
检验项目	检验结果
耐压	当试验压力为 MPa 时, 传热工质无泄漏、膨胀和变形。
空气泄漏率 (仅适用于空气集热器)	泄漏率曲线已给出, 见第 页。
破裂性能 (仅适用于空气集热器)	无扭曲和破裂。
标准滞止温度	环境温度为 30℃, 总辐照度为 1000W/m ² , 标准滞止温度 ϑ_{stg} = 。
曝晒	无开裂、破损和变形。
外热冲击	无裂纹、变形、水凝结和浸水现象。
内热冲击 (仅适用于液体加热集热器)	无损坏。
淋雨	无渗水和损坏。
耐冻	无泄漏和破损, 部件与工质无冻结。
正/负压机械载荷	正压为 Pa 时, 集热器无损坏和明显变形。 负压为 Pa 时, 集热器无损坏和明显变形。
耐撞击	全玻璃真空太阳集热管均无损坏。
脉冲压力	在 万次脉冲压力试验后, 流道焊缝无渗漏, 无变形和开裂。

实验室名称

报告编号 (No.): 第 页 共 70 页 (Page of)

样品编号:	
检验项目	检验结果
最终检查	<p>0 没有问题</p> <p>性能、耐久性、安全性和外观不受上述测试的影响，并且在预期寿命期内保持稳定。</p> <p>玻璃盖板无可见的脱气性变色或污点。</p> <p>1 轻微问题</p> <p>主要出现外观、视觉方面的缺陷。耐久性和安全性在预期寿命期内保持稳定。玻璃盖板有轻微可见的脱气性变色。</p> <p>但永久性结露和连续不断的缺陷应视为主要问题。</p> <p>2 重要问题</p> <p>发现或能够预见在性能、耐久性、安全性或外观等方面出现严重的失效。玻璃盖板有明显的脱气性变色。</p>
热性能	<p>该集热器基于进出口温度和采光面积瞬时效率曲线方程为：</p> $\eta_a = \eta_{0a} - a_{1a}\vartheta_m^* - a_{2a}G(\vartheta_m^*)^2,$ <p>该集热器基于进出口温度和采光面积瞬时效率曲线方程为：</p> $\eta_G = \eta_{0G} - a_{1G}\vartheta_m^* - a_{2G}G(\vartheta_m^*)^2,$ <p>详见第 页；</p> <p>输出功率已给出，详见第 页；</p> <p>时间常数 $\tau_c =$ s</p> <p>已作出 $(\vartheta_c - \vartheta_a)$ 随时间变化的曲线，</p> <p>详见第 页；</p> <p>已给出入射角修正系数随入射角 θ 的变化曲线，详见第 页。</p>
压力降落	压力降落曲线已给出，详见第 页。

实验室名称

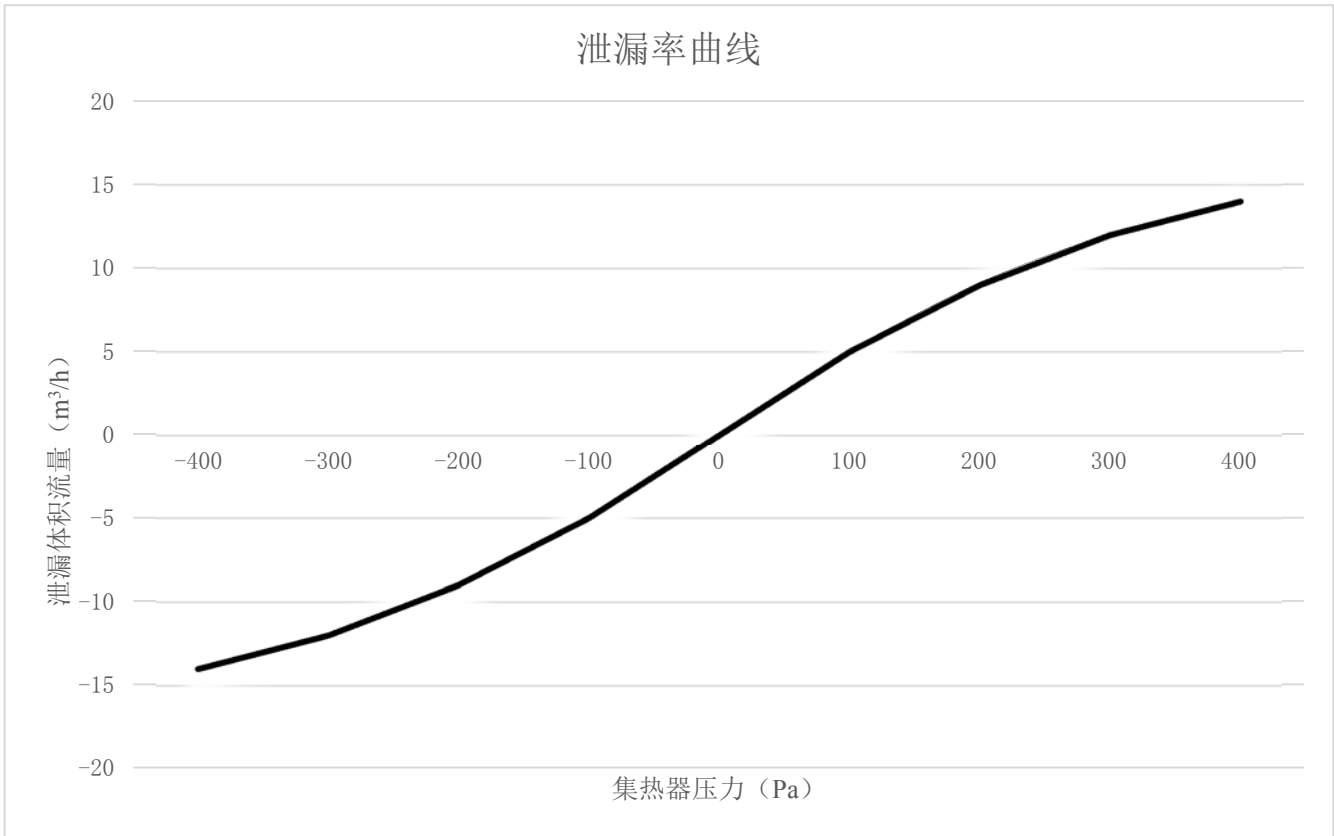
报告编号 (No.):

第 页 共 70 页 (Page of)

样品编号:

检验项目:

空气泄漏率



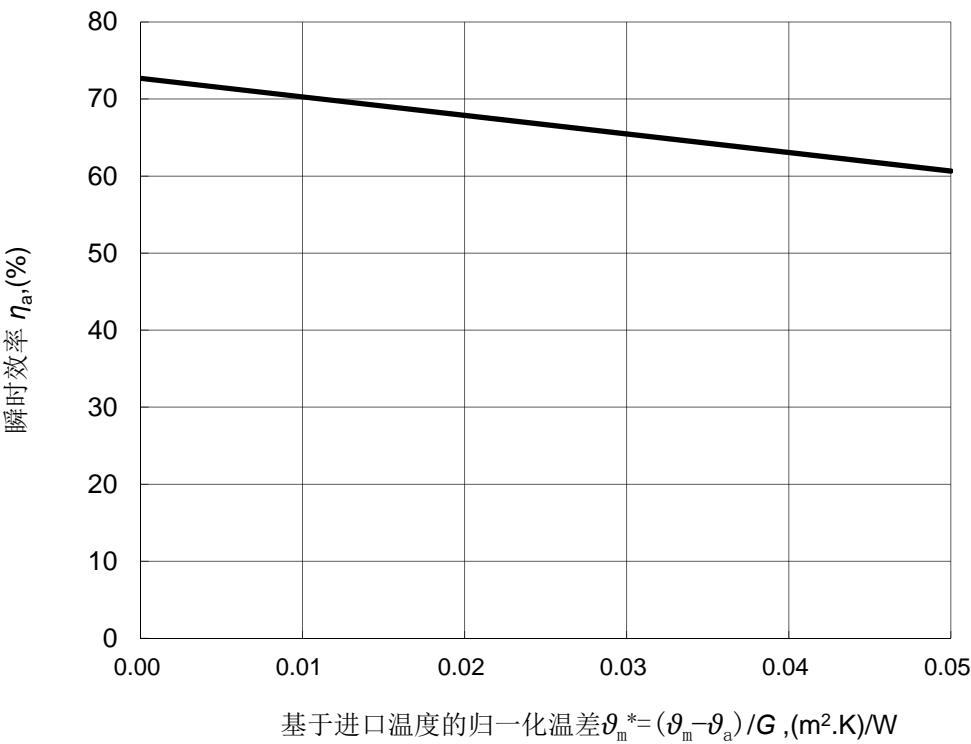
(以下空白)

实验室名称

报告编号 (No.): 第 页 共 70 页 (Page of)

样品编号:	
检验项目:	瞬时效率曲线 (基于采光面积, 进出口温度)

基于采光面积 A_a 和集热器进口温度 ϑ_m 的瞬时效率曲线(线性拟合)



该集热器瞬时效率曲线方程为: $\eta_a = \eta_{0a} - a_{1a}\vartheta_m^* - a_{2a}G(\vartheta_m^*)^2$

式中: $\vartheta_m^* = (\vartheta_m - \vartheta_a) / G$;

ϑ_m : 工质进口温度, $^{\circ}\text{C}$;

ϑ_a : 环境温度, $^{\circ}\text{C}$;

G : 集热器采光面上总日射辐照度, W/m^2 。

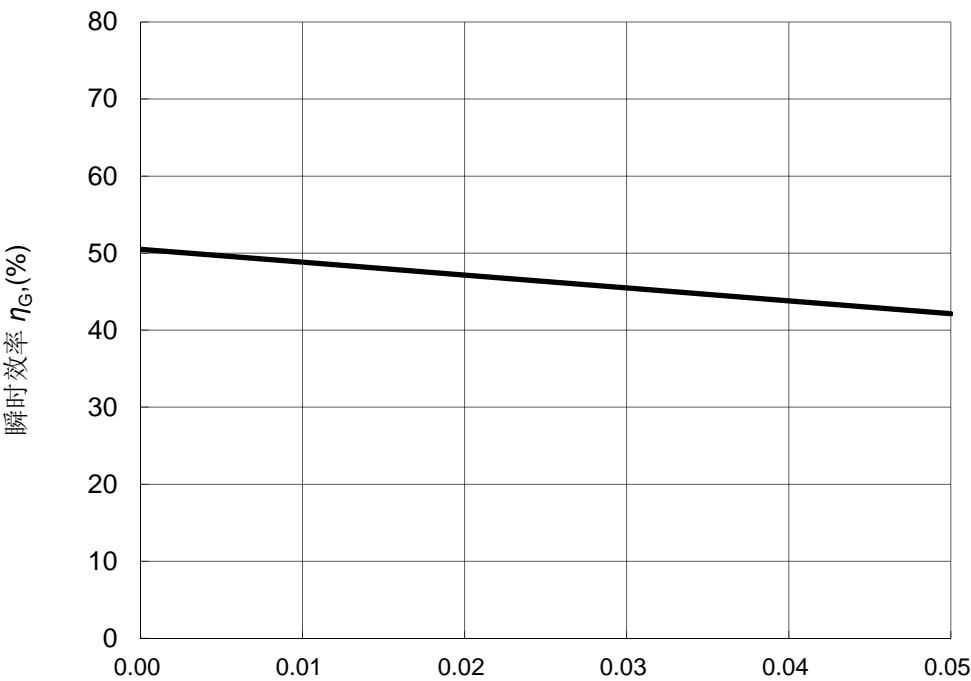
(以下空白)

实验室名称

报告编号 (No.): 第 页 共 70 页 (Page of)

样品编号:	
检验项目:	瞬时效率曲线 (基于总面积, 进出口温度)

基于总面积 A_G 和集热器进口温度 ϑ_m 的瞬时效率曲线(线性拟合)



基于进口温度的归一化温差 $\vartheta_m^*=(\vartheta_m-\vartheta_a)/G$,(m².K)/W

该集热器瞬时效率曲线方程为: $\eta_G = \eta_{0G} - a_{1G}\vartheta_m^* - a_{2G}G(\vartheta_m^*)^2$

式中: $\vartheta_m^* = (\vartheta_m - \vartheta_a) / G$;

ϑ_m : 工质进口温度, °C;

ϑ_a : 环境温度, °C;

G : 集热器采光面上总日射辐照度, W/m²。

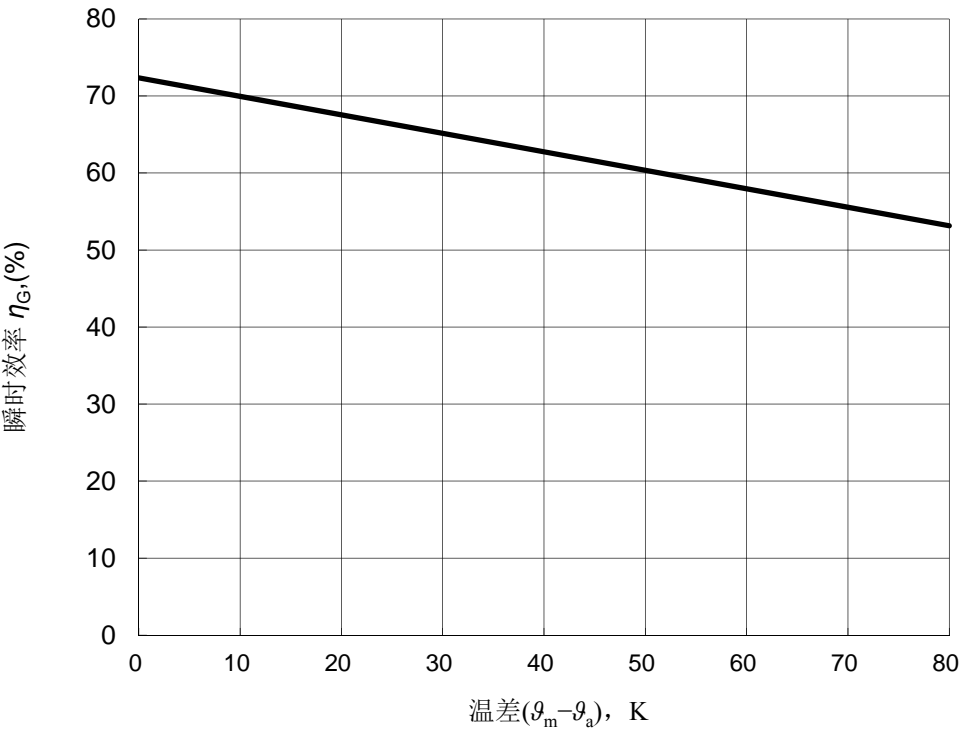
(以下空白)

实验室名称

报告编号 (No.):

第 页 共 70 页 (Page of)

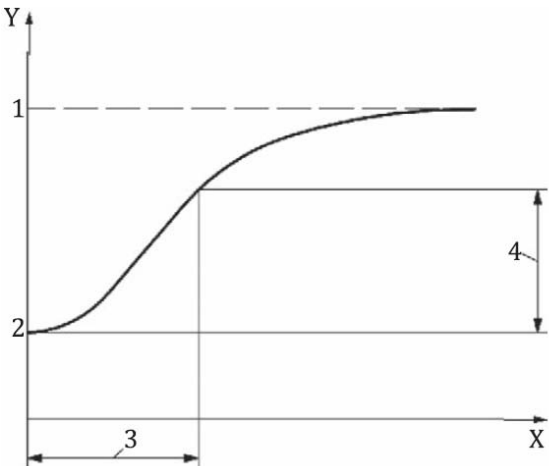
样品编号:	
检验项目:	集热器输出功率



$\theta_m - \theta_a$ (°C)	辐照度 (W/m²)		
	400	700	1000
10			
30			
50			

实验室名称

报告编号 (No.): 第 页 共 70 页 (Page of)

样品编号:															
检验项目:	时间常数														
时间常数 τ_c		单位													
		s													
<p>集热器出口温度 ϑ_e 与环境温度 ϑ_a 之差 $(\vartheta_e - \vartheta_a)$ 与时间的关系曲线</p> <div><table><tr><td>1</td><td>$(\vartheta_e - \vartheta_a)_2$</td><td>2</td><td>$(\vartheta_e - \vartheta_a)_0$</td></tr><tr><td>3</td><td>τ_c</td><td>4</td><td>$0.632[(\vartheta_e - \vartheta_a)_2 - (\vartheta_e - \vartheta_a)_0]$</td></tr><tr><td>X</td><td>时间</td><td>Y</td><td>$\vartheta_e - \vartheta_a$</td></tr></table></div>				1	$(\vartheta_e - \vartheta_a)_2$	2	$(\vartheta_e - \vartheta_a)_0$	3	τ_c	4	$0.632[(\vartheta_e - \vartheta_a)_2 - (\vartheta_e - \vartheta_a)_0]$	X	时间	Y	$\vartheta_e - \vartheta_a$
1	$(\vartheta_e - \vartheta_a)_2$	2	$(\vartheta_e - \vartheta_a)_0$												
3	τ_c	4	$0.632[(\vartheta_e - \vartheta_a)_2 - (\vartheta_e - \vartheta_a)_0]$												
X	时间	Y	$\vartheta_e - \vartheta_a$												
检验项目:	压力降落														

实验室名称

报告编号 (No.):第 页 共 70 页 (Page of)

样品编号:										
检验项目:	入射角修正系数									
入射角 θ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
纵向修正系数 $K_{\theta,L}$	1									
横向修正系数 $K_{\theta,T}$	1									
入射角修正系数曲线										

实验室名称

报告编号 (No.): 第 页 共 70 页 (Page of)

样品编号:	
样 品 描 述 (真空管型太阳能集热器)	
样品名称:	
集热器类型:	
集热管根数:	根
排列方式:	
采光面积:	m ²
总面积:	m ²
罩玻璃管:	外径: mm
	结构尺寸: mm
相邻太阳集热管的中心距: mm	
反射器:	
传热工质:	
样 品 描 述 (平板型太阳能集热器)	
样品名称:	
集热器类型:	
盖板材料:	盖板层数:
采光面长 (mm):	总长 (mm):
采光面宽 (mm):	总宽 (mm):
采光面积 (m ²):	总面积 (m ²):
集热器厚度 (mm):	
吸热体基材:	吸热体厚度 (mm):
涂层工艺:	传热工质:

以下空白

附 录 B
(规范性附录)
稳态和准动态模型

集热器类型（带盖板的集热器或WISC集热器）和使用的测试方法（稳态法，或者准动态法）决定了需采用不同的数学模型来描述液体工质集热器的热性能，。本附录给出了了两种模型之间的区别。

稳态【见公式（11）】和准动态【见公式（13）】两种基本模型的参数对比，假设基于高辐射低散射条件下的稳态可被接受，则使用公式（B-1）和（B-2）得出两种方法相关参数的转换：

$$K_{hem}(\theta_L, \theta_T) \approx K_b(\theta_L, \theta_T) \quad (B-1)$$

$$\eta_{0,hem} G \approx \eta_{0,b} G_b + \eta_{0,d} G_d K_d \quad (B-2)$$

为了推导出 K_d ，假定测得半球向的入射角修正系数 $K_{hem}(\theta, \gamma)$ 近似等于 $K_b(\theta, \gamma)$ ， $K_b(\theta, \gamma)$ ，为集热器视界内半球向的平均值。基于以上假设，入射角修正系数在长度和宽度上按轴线对称分布，因此，计算范围减小至四分之一球向。对于不对称的入射角修正系数，则需要考虑整个半球形的范围。

K_d 可以通过离散值求平均的方法得到，在四分之一球体半径范围内，每增加 10° ，获得一个离散值，制成表格，通过式（B-3）计算：

$$K_d = \frac{1}{W} \sum_{\substack{\theta, \gamma=0^\circ \\ steps=10^\circ}}^{90^\circ} K_b(\theta, \gamma) \sin(\theta) \cdot \cos(\gamma) \quad (B-3)$$

式中 W 是 $K_b(\theta, \gamma)=1$ 时的参照数值，在其他入射角度下， W 表达式为（B-4）：

$$W = \sum_{\substack{\theta, \gamma=0^\circ \\ steps=10^\circ}}^{90^\circ} \sin(\theta) \cdot \cos(\gamma) \quad (B-4)$$

使用公式（B-3）定义的 K_d ，兼容稳态和准动态测试，根据测得的 $\eta_{0,hem}$ 计算得到晴天条件下的 $\eta_{0,b}$ ，用公式（B-5）

$$\eta_{0,b} = \frac{\eta_{0,hem}}{0.85 + K_E \times 0.15} \quad (B-5)$$

附 录 C
(规范性附录)
水的密度和热容

公式 (C-1) 和 (C-2) 用于 0~180℃ 温度范围内、压力 12bars 以内的液态工质，计算水的密度和热容量，

$$\rho(\vartheta) = y_0 + y_1 \cdot \vartheta + y_2 \cdot \vartheta^2 + y_3 \cdot \vartheta^3 + y_4 \cdot \vartheta^4 + y_5 \cdot \vartheta^5 \quad (\text{C-1})$$

其中

$$y_0 = 99985 (\text{kg} / \text{m}^3)$$

$$y_1 = 5332 \times 10^{-2} (\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{K})$$

$$y_2 = -7564 \times 10^{-3} (\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{K}^2)$$

$$y_3 = -4323 \times 10^{-5} (\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{K}^3)$$

$$y_4 = -1673 \times 10^{-7} (\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{K}^4)$$

$$y_5 = -2447 \times 10^{-10} (\text{kg} / \text{m}^3 \cdot \text{K}^5)$$

并且

$$c_p(\vartheta) = z_0 + z_1 \cdot \vartheta + z_2 \cdot \vartheta^2 + z_3 \cdot \vartheta^3 + z_4 \cdot \vartheta^4 + z_5 \cdot \vartheta^5 + z_6 \cdot \vartheta^6 \quad (\text{C-2})$$

其中：

$$z_0 = 42184 (\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K})$$

$$z_1 = -28218 \times 10^{-3} (\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}^2)$$

$$z_2 = 73478 \times 10^{-5} (\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}^3)$$

$$z_3 = -94712 \times 10^{-7} (\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}^4)$$

$$z_4 = 72869 \times 10^{-9} (\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}^5)$$

$$z_5 = -28098 \times 10^{-11} (\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}^6)$$

$$z_6 = 44008 \times 10^{-14} (\text{kJ} / \text{kg} \cdot \text{K}^7)$$

附 录 D (资料性附录)

太阳能集热器测试标准不确定度评估

D.1 概述

本附录提供了根据现有国际标准测试集热器性能结果的不确定度评估一般性导则,实验室经常会被要求在其认可范围和产品认证方案中提供测试数值结果的不确定度。本附录的目的不是规定是否需要或者在哪些案例中需进行必要的不确定度计算。

本导则的关注点仅在于集热器效率测试,原因为:a)效率是用户最关心的结果。b)计算的独特性:因为效率测试的最终结果不是单个的测量值,而是通过大量的原始测量数据加工得到的。

需要注意的是所建议的方法只是用于评估不确定度的可能途径之一、而还有其他可用的途径。选择使用科学合理的方法来分析计算不确定度、适合情况下遵照认证部门的建议、是每个实验室的责任义务。关于不确定度的其他确定方法参见参考文献 1、3 和 5。

D.2 集热器效率测试的不确定因素

太阳能集热器测量的主要目标就是通过测量特定条件下的参数得到瞬态集热效率。假设集热器的性能可以通过单节点 M-参数单点稳态模型来表示,稳态或准稳态模型都适用:

$$\eta = c_1 p_1 + c_2 p_2 + \cdots + c_M p_M \quad (\text{D-1})$$

其中

η ——是瞬间集热效率

p_1, p_2, \cdots, p_N ——测试数据;

c_1, c_2, \cdots, c_N ——通过测试所得的集热器特征性常数

考虑稳态测试模型,则对应式(D-1)中, $M = 3, c_1 = \eta_0, c_2 = U_1, c_3 = U_2, p_1 = 1, p_2 = (T_m - T_a)/G$ 和 $p_3 = (T_m - T_a)^2/G$ 。

在实验期间,采集并记录太阳能辐照值,大气环境温度,集热器进出口温度等数据,根据采集所得数据,计算每个观察点对应的参数值 $\eta, p_1, p_2, \cdots, p_M$ 。一般情况下,实际的测试实验过程形成一组 j 个观察点,相对应于每一个 j 测试点的参数就是 $\eta_j, p_{1j}, p_{2j}, \cdots, p_{Mj}$ 。

为了确定不确定度,需要计算各观测点的标准合成不确定度 $u(\eta_j), u(p_{1j}), u(p_{2j}), \cdots, u(p_{Mj})$ 。需要注意的是,实际过程中各不确定度 $u(\eta_j), u(p_{1j}), u(p_{2j}), \cdots, u(p_{Mj})$ 总是不稳定的,同样所有观察点的不确定度也是不稳定的,但是每个测试点都有它自己的标准偏差。

计算每个测试点的标准误差(标准平方不确定度),需要遵循以下基本原则(ISO GUM:2008)。

- a) 实验数据中的标准不确定度可以分为 A 类和 B 类。根据 ISO GUM, A 类不确定度是由实验测量数据引起, B 类则是其他因素造成的。
- b) 测量值 s 的不确定度 $u(s)$ 是由特征值的误差造成的 B 类不确定度和由取样数据波动造成的 A 类不确定度共同组成。如果有一个以上的不确定度独立源(A 类或 B 类),则最终不确定度用公式(D-2)表示:

$$u = (\sum_k u_k^2)^{1/2} \quad (\text{D-2})$$

- c) B类不确定度是整个测试中各种不确定因素的共同结果，如传感器、数据记录仪等测量仪器产生的测量误差引起不确定度。相关信息可以从精准度或其他与设备相关的技术数据中获得。
- d) 实际上，A类不确定度取决于具体的测量条件，表明了测试过程中测量值的波动性。A类不确定度来自于实测数据的统计分析，在稳态计算模型中，数学期望值 S 就是 I 次重复观察点 $s_i (i=1 \cdots I)$ 的算术平均值，并且 A 类不确定度就是平均值的标准偏差，见公式 (D-3)：

$$s = \frac{\sum_{i=1}^I s_i}{I} \text{ 和 } u_A(s) = \left[\frac{\sum_{i=1}^I (s_i - s)^2}{I(I-1)} \right]^{1/2} \quad (\text{D-3})$$

在准动态计算模型中没有可以用于计算的重复测量值，不确定度 $u_A(s)$ 等于零。

- e) 合成标准不确定度是指通过若干其他测量数据得到的标准不确定度。多数情况下，测量值 Y 是通过 P 个直接测量值 X_1, X_2, \dots, X_P 根据一定的函数关系得到 $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_P)$ 。根据误差传播规律， y 值的标准测量不确定度就可以用式 (D-4) 表示：

$$u(y) = \left[\sum_{i=1}^P \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (u(x_i))^2 + 2 \sum_{i=1}^{P-1} \sum_{j=i+1}^P \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \text{cov}(x_i, x_j) \right]^{1/2} \quad (\text{D-4})$$

例如，集热器的瞬时集热效率 η 是从测试间接得到的值，是由辐照量 G ，流体质量流量 m ，进出口温差 ΔT ，集热面积 A 和对应流体的比热容 c_f 决定的。在这种情况下，每个瞬态效率值 η_i 的标准不确定度 $u(\eta_i)$ 是通过各个基本测量值的合成标准不确定度来确定的，考虑了各基本测量值之间的关系。

D.3 效率测试结果的拟合回归与不确定度分析

数据分析过程中，采用最小二乘法进行拟合回归，目的是得到公式 (D-1) 中 J 个观察点特征常数 c_1, c_2, \dots, c_M 的最佳精度值。

然而在实际中，各个观察点的典型偏差几乎都不相同且不是常数，但每个数据点有自己的标准偏差 σ_j ，这样就可以用加权最小二乘法 (WLS) 进行处理，该方法不仅考虑到测量数据，还考虑到这些数据的不确定度。而最好的相似评估模型参数可以通过最小化 χ^2 分布函数 (D-5) 来确定。

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^J \frac{[\eta_j - (c_1 p_{1,j} + c_2 p_{2,j} + \dots + c_M p_{M,j})]^2}{u_j^2} \quad (\text{D-5})$$

u_j^2 是公式 D-6 的方差：

$$\eta_j - (c_1 p_{1,j} + c_2 p_{2,j} + \dots + c_M p_{M,j}) \quad (\text{D-6})$$

$$u_j^2 = [\eta_j - (c_1 p_{1,j} + c_2 p_{2,j} + \dots + c_M p_{M,j})]^2 = [u(\eta_j)]^2 + c_1^2 [u(p_{1,j})]^2 + \dots + c_M^2 [u(p_{M,j})]^2$$

由于公式 D-5 是非线性方程，通过最小化 χ^2 分布函数来获得系数 c_1, c_2, \dots, c_M 和他们的不确定度是很复杂的。所以，我们的策略是找到数值化不确定度。下边给出了 M -参数模型的方法。

假设 K 为 $J \times M$ 矩阵， $k_{j,m}$ 是指考虑了不确定度加权的实测数据 (p_1, p_2, \dots, p_M) 与不确定度的比值，

如公式 D-7 所示:

$$k_{j,m} = \frac{P_{m,j}}{u_j}, K = \begin{bmatrix} \frac{P_{1,1}}{u_1} & \dots & \frac{P_{1,M}}{u_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{P_{1,J}}{u_J} & \dots & \frac{P_{M,J}}{u_J} \end{bmatrix} \quad (\text{D-7})$$

假设 L 为一个矢量, 阶长为 J , l_j 是由 η_j 与其不确定度 u_j 的比值, 如公式 D-8 所示:

$$I_j = \frac{\eta_j}{u_j}, L = \begin{bmatrix} \eta_1 / u_1 \\ \vdots \\ \eta_J / u_J \end{bmatrix} \quad (\text{D-8})$$

最小二乘法模型方程可以写为公式 D-9:

$$(K^T \cdot K) \cdot C = K^T \cdot L \quad (\text{D-9})$$

其中 C 是由参数组成的矢量, 计算方差 u_j^2 时, 需要已知系数 c_1, c_2, \dots, c_M , 解决方法是以最小二乘法计算得到的数值为初始值, 该值在公式 D-6 中用来计算 $u_j^2, J = 1 \dots J$ 、矩阵 K 和矢量 L 。公式 D-9 给出了新的系数 c_1, c_2, \dots, c_M , 然而使用标准最小二乘法获得的该值与使用初始值计算的 u_j^2 没有显著差别。

此外, $Z = INV(K^T \cdot K)$ 为一个矩阵, 其对角线元素 $z_{k,k}$ 是标准不确定度 (方差) 的平方, 非对角线元素 $z_{k,l} = z_{l,k}, k \neq l$ 是回归系数的协方差:

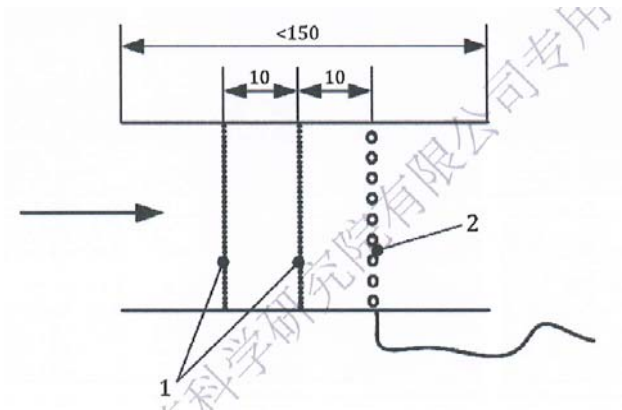
$$u(c_m) = \sqrt{z_{m,m}}, m = 1, \dots, M \quad (\text{D-10})$$

$$Cov(c_k, c_l) = z_{k,l} = z_{l,k}, k = 1, \dots, M \quad l = 1, \dots, M \quad \text{且 } k \neq l \quad (\text{D-11})$$

需要注意的是, 如果要在下一阶段使用公式(D-1)和公式(D-4)计算预测值 η 的不确定度 $u(\eta)$, 则需要知道拟合系数之间的协方差。

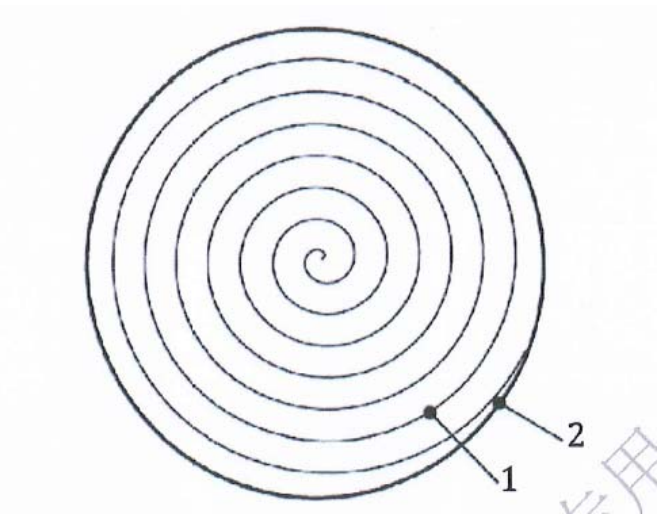
附录 E
(资料性附录)
速度加权平均温度测量

测量平均值的温度传感器应均匀分布在阿基米德螺线的整个横截面内(如图E. 1和图E. 2)。风道内的平均温度 ϑ_m 由传感器测量。传感器前10mm处装有两个网格状过滤网。两个网的间隔为10mm。空气分布均匀时，平均温度 ϑ_m 就等于热空气平均温度 $\vartheta_{m,t}$ 。



图中
1. 流动调节卡套
2. 温度传感器

图 E. 1 传感器布置图



图中
1. 温度传感器
2. 隔热管道

图 E. 2 温度传感器示例

校准建议：传感器安装在空气通道内，可进行全量程校准。温度的均匀性要求是温差 $<0.2\text{ K}$ 。可使用在平均温度传感器后面适当位置的空气旋流器，通过在流动通道中测量至少12个温度点来实现。测量点的选择应能够代表相应面积的温度。

附 录 F
(资料性附录)
材料明细

集热器材料明细包括材料的使用，部件在生命周期结束后可再利用或可循环的性能，使用可再利用或可再循环的材料，可升级优化性能，包括核心部件的可再利用能力、可修复性、可循环性，和组件的可识别性、可重复利用能力、再循环能力。对于太阳能集热器，主要方面是材料的数量，可修复性和再循环能力。所有材料总重>0.1kg时需要填写表F.1。遮雨与固定材料不需要列出。

表 F.1 材料

材料	描述	单个集热器中的重量 (kg)	可识别性 标记(Y/N)	再循环中 可分离性 (Y/N)	可替换部件（标明每部分的重量）	
五金
	...					
玻璃	...					
	...					
塑料	...					
	...					
保温	...					
	...					
密封	...					
	...					
其他	...					
	...					
<p>可识别性/标记：指材料能否被简单识别出？比如五金和玻璃具有可识别性；塑料需要标记。</p> <p>分离性：指材料在使用结束后能否简单的从其他材料上分离开且纯度达到95%以上？（使用螺丝刀和锤子等简单的机械操作，不需要特定的分离过程就可以实现分离）</p> <p>可替换部件：非专业人员在没有专业技能的情况下，使用常见家用工具（如螺丝刀、锤子等）在30min之内可以替换的部件。</p> <p>例如 双层玻璃真空管</p>						

附 录 G
(资料性附录)
集热器热性能参数的面积转换

在之前的标准和一些认证方案中，热性能参数使用吸热体面积 (absorber area) A_{abs} 和轮廓采光面积 (aperture area) A_{ap} 来表示，而不是用总面积 A_G 。对于所有的性能参数 $p \in \{\eta_0, \eta_b, \eta_{\square em}, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8\}$ ，公式G-1用来将面积X下的性能参数转换成面积Y的性能参数：

$$P_X = P_Y \frac{A_Y}{A_X} \quad (G-1)$$

参数 $K_b(\theta_L, \theta_T), K_{HEM}(\theta_L, \theta_T), K_d$ 与面积无关，不需要转换。
