

ICS 27.160

F 12



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

槽式太阳能集热管热损系数测试方法

Test method for heat loss coefficient of parabolic trough solar
receiver tube

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(征求意见稿)

20XX-X-X 发布

20XX-X-X 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	2
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 仪器	4
4.1 温度测量仪器	4
4.2 电功率测量仪器	4
4.3 尺寸测量仪器	4
5 测试平台	4
5.1 测试平台构成	4
5.2 支撑架	5
5.3 温度控制系统	5
5.4 温度与功率测试系统	6
6 测试条件	6
6.1 环境空气温度	6
6.2 吸热管内壁面温度均匀性	6
6.3 周边环境要求	6
6.4 测试温度选取	6
6.5 数据采集周期	6
6.6 测试周期	6
7 测试步骤	7
7.1 测试前的准备	7
7.2 电加热器安装	7
7.3 温度传感器安装	7
7.4 安装均温管	7
7.5 检查环境温度	8
7.6 设定采样频率	8
7.7 开启加热	8
7.8 调节温度	8
7.9 测试数据采集	8
8 热损系数测试数据处理	8
8.1 玻璃管外壁面平均温度	8
8.2 吸热管内壁面平均温度	9
8.3 环境空气平均温度	9
8.4 热损系数(HL)计算	9
8.5 不确定度分析	10
8.6 热损系数拟合公式与插值	10
9 检测报告	11
附 录 A (规范性附录) 检测报告格式模板	12
参 考 文 献	16

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

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：

槽式太阳能集热管热损系数测试方法

1 范围

本文件规定了稳态热平衡方法测试线聚焦太阳能集热系统及其发电系统中使用的槽式太阳能集热管热损系数的仪器、测试平台、测试条件、测试步骤、测试数据处理和检测报告。

本文件适用于抛物面槽式太阳能热发电系统、线性菲涅耳式太阳能热发电系统及中低温线聚焦太阳能集热系统中使用的槽式太阳能集热管。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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/T 12936 太阳能热利用术语

GB/T 26972 聚光型太阳能热发电术语

GB/T 27418 测量不确定度评定和表示

3 术语和定义

GB/T 12936、GB/T 26972界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

太阳选择性吸收涂层 solar selective absorbing coating

具有高的太阳吸收比和低的红外发射比的涂层。

3.2

吸热管 absorber tube

外表面带有太阳选择性吸收涂层，用于吸收太阳辐射并将其转化为管内流体热能的金属管。

3.3

槽式太阳能集热管 parabolic trough solar receiver tube

与抛物面槽式聚光器、线性菲涅耳式聚光器相配合的集热管。一般为双端开口的真空集热管，主要包括玻璃管、吸热管、真空夹层和用于轴向伸缩的缓冲部件（一般为波纹管）组成。

3.4

测试周期 test period

对于每个测定的温度点，维持准稳态的时间。

3.5

热损系数 heat loss coefficient

给定温度条件下槽式太阳能集热管单位长度的热损失功率值。

注：单位为瓦每米（W/m）。

3.6

主加热器 main heater

放置在吸热管内的杆式电加热器。

3.7

辅助加热器 assistant heater

用于加热槽式太阳能集热管端部的盘式电加热器。

3.8

均温管 even temperature tube

放置于吸热管内、具有高导热系数的金属管。

4 仪器

4.1 温度测量仪器

4.1.1 用于测量吸热管内壁面和均温管外壁面的所有温度传感器的不确定度应不超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，精度应不低于所测温度的 $\pm 0.4\%$ 或 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的最大值。

4.1.2 用于测量环境空气和玻璃管外壁面的各温度传感器的不确定度应不超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，精度应不低于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

4.1.3 所有温度测量仪器应定期进行校准。

4.2 电功率测量仪器

电功率测量仪器应定期进行校准。用于测量各电加热器的功率仪表的精度应不低于实际度数的5%。

4.3 尺寸测量仪器

4.3.1 长度测量仪器精度应不低于 $\pm 1\text{mm}$ 。

4.3.2 测量吸热管直径的仪器精度应不低于 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

4.3.3 测量吸热管长度的仪器应从吸热管内部插入，从一端测量到另一端。

5 测试平台

5.1 测试平台构成

槽式太阳能集热管热损系数测试平台一般应包括支撑架、温度控制系统、温度与功率测试系统三部分。其结构示意图如图1所示。

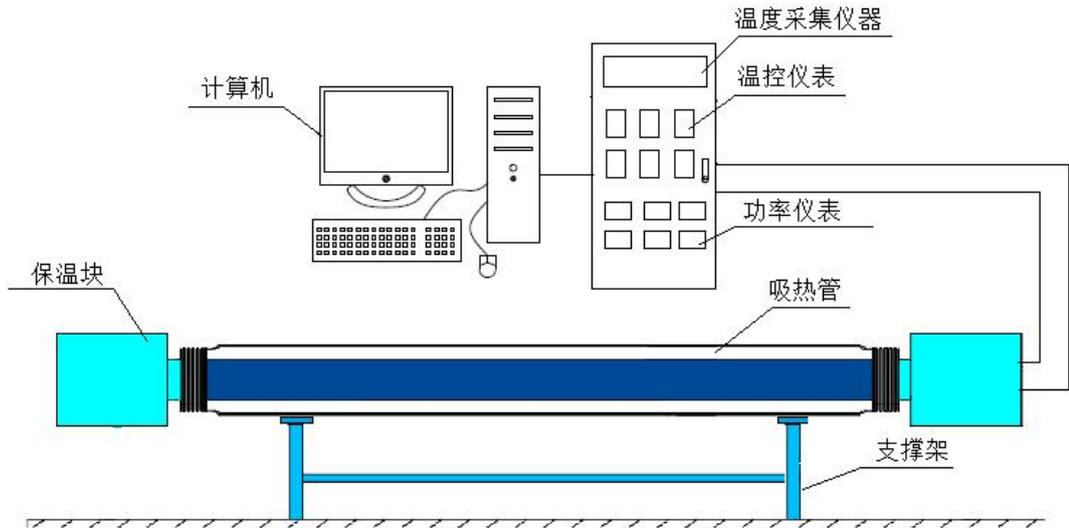


图 1 槽式太阳能集热管热损系数测试平台示意图

5.2 支撑架

5.2.1 支撑架要求稳固，水平放置。支撑槽式太阳能集热管的位置应避开其两端的波纹管，宜支撑在槽式太阳能集热管的玻璃管上，允许吸热管在测试过程中的膨胀伸缩。

5.2.2 支撑架宜具有在长度方向上可调节的功能，可测试不同长度尺寸的槽式太阳能集热管。

5.3 温度控制系统

5.3.1 温度控制系统包括控制柜、温控仪表、主加热器、辅助加热器、均温管、保温块等。

5.3.2 槽式太阳能集热管加热应采用 2 个相同的主加热器和 4 个相同的辅助加热器。按照放置位置划分，放置在吸热管内加热辅助加热器称为内辅助加热器，放置在吸热管端部外加热的辅助加热器称为外辅助加热器，单个辅助加热器长度建议不超过吸热管端部到波纹管中心位置的距离，其电加热功率范围推荐为 100W-300W。主加热器在长度方向上分为实际加热区域和非加热区域，其中，非加热区域用于放置内、外辅助加热器，实际加热区域长度要求不超过吸热管总长度的 50% 与内辅助加热器长度之差，其电加热功率推荐范围为 1-3kW/m。各加热器布置具体位置可参考槽式太阳能集热管加热与测温点布置示意图，如图 2 所示。

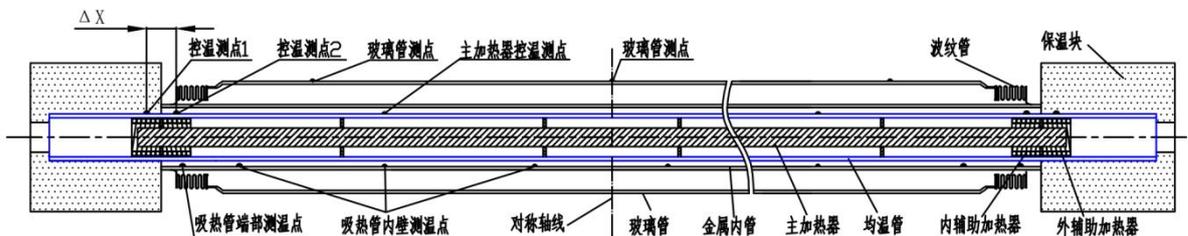


图 2 槽式太阳能集热管加热与测温点布置示意图

5.3.3 采用 2 根壁厚应不小于 2mm、长度大于主加热器总长度的均温管放置在吸热管内，均温管宜采用导热系数高的金属管以实现周向和轴向快速热传导，维持吸热管的温度均匀。

5.3.4 槽式太阳能集热管两端各设有保温块，用于均温管端部保温。保温块厚度至少使得保温材料表面温度不高于 60℃，防止烫伤操作人员。

5.3.5 温度控制由温控仪表实现，该温控仪表要求具有自动调节温度的功能。采用温控仪表控制电加热器的功率和温度，每个电加热器都有温度传感器与之对应，温度传感器测得的温度值反馈给温控仪表来实现对电加热器的输出功率的控制。

5.4 温度与功率测试系统

5.4.1 温度与功率测试系统包括温度传感器、温度采集设备、功率仪表及测试系统软件等。

5.4.2 温度传感器应与被测表面良好接触，用于控制加热温度的温度传感器应放置在均温管上相对应的电加热器中心位置。用于测量吸热管内壁温度的温度传感器应至少 6 个，在吸热管轴向需均匀分布，且以吸热管中心为对称轴对称分布；在距离吸热管两端不超过 50mm 范围的内壁面处也各需放置 1 个温度传感器，用于控制端部轴向温度梯度，使得端部温度也接近吸热管平均温度。用于测量吸热管的每个温度传感器要求在均温管之间放置防辐射罩，减少均温管对温度传感器的直接热辐射干扰。测试玻璃管外壁温度推荐 3 个温度传感器，其中一个温度传感器应位于吸热管中心位置，其余温度传感器位置以吸热管中心为对称轴对称分布。测量环境空气温度需要至少 1 个温度传感器。具体各温度传感器布置可参考示意图 2。

5.4.3 采用 6 个功率仪表分别测量 2 个主电加热器和 4 个辅助电加热器的电功率值。

5.4.4 温度采集设备负责采集各温度传感器温度数值，功率仪表采集各加热器的输出功率数值，并由测试系统软件进行温度和功率数据储存与处理。

6 测试条件

6.1 环境温度

槽式太阳能集热管热损系数测试时宜在室内进行测试，在测试期间，环境温度应在 20℃±10℃范围内。

6.2 吸热管内壁面温度均匀性

槽式太阳能集热管热损系数测试进入稳态测试期时，要求用于测量吸热管内壁温度的各个温度传感器的温度值与吸热管内壁面的平均温度值之间最大偏差不超过±15℃。

6.3 周边环境要求

槽式太阳能集热管测试期间要求邻近测试平台的物体表面温度应接近环境温度，避免周围物体热辐射、阳光照射对槽式太阳能集热管热损测试的影响。

6.4 测试温度选取

槽式太阳能集热管热损系数测试时，设定的测试温度最高值应不超过其应用系统所规定的最高运行温度 30℃，测试温度间隔建议为 50℃，至少测试 5 个温度点。

6.5 数据采集周期

槽式太阳能集热管热损系数测试时，数据采集周期应不超过 20s。

6.6 测试周期（稳态）

槽式太阳能集热管热损系数测试时，稳态测试点的测试周期应包括 15 分钟的预备期和

至少15分钟的稳态测试期。如果测量的温度在15分钟预备期内偏离其平均值最大不超过表1规定的范围，则可认为达到稳态工况，进入稳态测试期。

表 1 稳态工况判据

参数	允许的最大偏离范围
环境空气温度	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
玻璃管外壁面温度	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
吸热管内壁面温度	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

7 测试步骤

7.1 测试前的准备

7.1.1 测试前槽式太阳能集热管的玻璃管表面要擦洗干净，并对槽式太阳能集热管的外观进行检查，做好是否有部件损坏或其它问题的记录。

7.1.2 在环境空气温度条件下，应测量槽式太阳能集热管外观结构尺寸及测温点位置，至少应包括以下数据：

- a) 吸热管的总长度值；
- b) 吸热管的外直径值、均温管的外直径和内直径；
- c) 吸热管内壁上、玻璃管外壁上及均温管上布置的各温度传感器测点所在位置与吸热管端部的距离值。

7.2 电加热器安装

将4个辅助加热器根据第5章的规定的相应位置固定到主加热器上。然后将2个主加热器分别插入到2个均温管中，保证主加热器底端与均温管内侧端口平齐。

7.3 温度传感器安装

7.3.1 安装用于控温的温度传感器，将各温度传感器按照第5章的规定，沿均温管轴向固定在相应位置，要求各个测点位置位于均温管的两侧面，尽量保持在同一水平面上，并与均温管壁面保持紧密接触。

7.3.2 安装用于测温的温度传感器，将各温度传感器按照第5章的规定，沿均温管轴向固定在相应位置，要求各个测点位置位于均温管的两侧面，尽量保持在同一水平面上。在各温度传感器与均温管之间应放置一层防辐射材料，减少均温管的热辐射对各温度传感器的测温精度影响。

7.3.3 用于玻璃管表面测温的温度传感器按照第5章的规定固定在玻璃管上相应位置，应采用合适的方式与玻璃表面接触紧密，各个测点位置位于玻璃管两侧面且尽量保持在同一水平面上。

7.3.4 用于测试环境空气温度的温度传感器应在距地面大于0.8m，距槽式太阳能集热管不小于1.5m且不超过2m处。

7.4 安装均温管

首先将槽式太阳能集热管放置在测试台支撑架上，然后将安装好温度传感器的均温管

放置进吸热管内，保证均温管上用于测温的温度传感器与吸热管内壁面紧密接触，并且用于测温的温度传感器位于吸热管的两侧，最后在两端安装好保温块。

7.5 检查环境温度

开启温度采集设备及测温系统软件，检查环境温度是否满足测试条件6.1的要求。

7.6 设定采样频率

设定测温系统软件的数据采集频率，记录并保存各温度传感器温度值和各电加热器的功率值。

7.7 开启加热

开启温控仪表，设定吸热管测试温度，并设定加热升温速率，推荐升温速率不超过5℃/分钟进行加热。

7.8 调节温度

调节温控仪表上的温控值，使得吸热管内壁上各测温点温度达到测试条件6.2的均匀性要求以及6.6稳态测试工况的要求。

7.9 测试数据采集

7.9.1 在6.6规定的稳态工况下采集至少15分钟的连续数据，完成该设定温度的热损系数测试。

7.9.2 重复步骤7.7-7.9，进行另一温度值下热损系数测试。

8 热损系数测试数据处理

8.1 玻璃管外壁面平均温度

8.1.1 玻璃管外壁面平均温度 (\bar{T}_g) 为各温度传感器在稳态测试周期内所测温度平均值与其对应测试距离的加权因子乘积的平均值。按公式(1)计算。

$$\bar{T}_g = \frac{\sum_i \bar{T}_{g,i} p_i}{\sum_i p_i} \dots\dots\dots (1)$$

式中，

$\bar{T}_{g,i}$ —— 为玻璃管外壁上第*i*个温度传感器在稳态测试周期内所测温度平均值，单位为摄氏度(℃)；

p_i —— 为第*i*个温度传感器对应测量距离的加权因子。

8.1.2 玻璃管外壁上各温度传感器的测量距离的加权因子按公式(2)计算。

$$p_i = \frac{c_{i-1} + c_{i+1}}{2L_{abs}} \dots\dots\dots (2)$$

式中，

c_{i-1} 和 c_{i+1} —— 分别为第*i*个温度传感器与第*i-1*个温度传感器和第*i+1*个温度传感器之间的距离，单位为米(m)；

L_{abs} —— 环境温度时吸热管的总长度，单位为米(m)。

8.1.3 对于第 1 个温度传感器，按公式 (3) 计算。

$$p_1 = \frac{c_0 + c_2 / 2}{L_{abs}} \dots\dots\dots (3)$$

式中，

c_0 ——为第 1 个温度传感器距离吸热管端部的距离，单位为米 (m)。

8.1.4 对于最后 1 个温度传感器，设其为第 N 个温度传感器，由于其与第 1 个温度传感器对称分布于玻璃管两端，因此 $p_N = p_1$ 。

8.2 吸热管内壁面平均温度

8.2.1 吸热管内壁面平均温度 (\bar{T}_{abs}) 按公式 (4) 计算。

$$\bar{T}_{abs} = \frac{\sum_i \bar{T}_{abs,i} m_i}{\sum_i m_i} \dots\dots\dots (4)$$

式中，

$\bar{T}_{abs,i}$ ——为吸热管内壁上第 i 个温度传感器在稳态测试周期内所测温度平均值，单位为度 (°C)；

m_i ——为第 i 个温度传感器对应测量距离的加权因子。

8.2.2 吸热管内壁上各温度传感器的测量距离的加权因子按公式 (5) 计算。

$$m_i = \frac{d_{i-1} + d_{i+1}}{2L_{abs}} \dots\dots\dots (5)$$

式中，

d_{i-1} 和 d_{i+1} ——分别为第 i 个温度传感器与第 i-1 个温度传感器和第 i+1 个温度传感器之间的距离 (m)。

8.2.3 对于第 1 个温度传感器，按公式 (6) 计算。

$$m_1 = \frac{d_0 + d_2 / 2}{L_{abs}} \dots\dots\dots (6)$$

式中，

d_0 ——为第 1 个温度传感器距离吸热管端部的距离，单位为米 (m)。

8.2.4 对于最后 1 个温度传感器，设其为第 N 个温度传感器，由于其与第 1 个温度传感器对称分布于吸热管两端，因此 $m_N = m_1$ 。

8.3 环境平均温度

环境平均温度 (\bar{T}_a) 为稳态测试周期内的环境温度平均值。

8.4 热损系数 (HL) 计算

8.4.1 热损系数 HL 用公式 (7) 计算：

$$HL = \frac{\sum_i Pow_i + \frac{k \cdot A}{\Delta x} (T_1 - T_2) + \frac{k \cdot A}{\Delta x} (T_4 - T_3)}{L_{abs}} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

P_{ow_i} ——为放置在吸热管内的第 i 个电加热器的输出功率值，单位为瓦 (W)；
 T_1, T_2 ——分别为吸热管一端的外辅助加热器测点温度和该端内辅助加热器测点温度值，单位为摄氏度 (°C)；
 T_3, T_4 ——分别为吸热管另一端的内辅助加热器测点温度和该端外辅助加热器测点温度值，单位为摄氏度 (°C)；
 K ——为均温管导热系数，单位为瓦每米每摄氏度 (W/(m·°C))；
 Δx ——为在均温管上外辅助加热器温度测点与内辅助加热器温度测点之间距离，单位为米 (m)，(见图 2)；
 A ——为均温管截面面积，单位为平方米 (m²)。

8.4.2 为了便于对比分析不同直径的槽式太阳能集热管热损系数，可选择采用基于吸热管外表面单位面积的热损失 HL_s 进行计算与对比，其热损失 HL_s 计算如公式 (8) 所示。

$$HL_s = \frac{HL}{D_{abs}\pi} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

HL_s ——基于吸热管外表面单位面积的热损失，单位为瓦每平方米 (W/m²)；
 D_{abs} ——吸热管外直径，单位为米 (m)；

8.5 不确定度分析

按照GB/T 27418，分析热损系数测试结果的不确定度。

8.6 热损系数拟合公式

对所测试的热损系数数据采用最小二乘法方式拟合出该槽式太阳能集热管的热损系数随温度变化的曲线。

以吸热管内壁平均温度拟合的热损系数按公式 (9) 计算。

$$HL = a \cdot \bar{T}_{abs} + b \cdot \bar{T}_{abs}^4 \dots\dots\dots (9)$$

式中，

a ——热损系数对应吸热管内壁平均温度的拟合系数，单位为瓦每米每摄氏度 (W/(m·°C))；
 b ——热损系数对应吸热管内壁平均温度四次方的拟合系数，单位为瓦每米每摄氏度的四次方 (W/(m·°C⁴))。

8.7 不同温度的热损系数取值

槽式太阳能集热管在不同温度下的热损系数取值可以通过拟合法和插值法获得。

8.7.1 拟合法

采用拟合公式 (9) 进行直接计算获得不同温度的热损系数值。

8.7.2 插值法

采用热损系数实际测试结果进行插值方式获得不同温度的热损系数值。

8.7.3 热损系数与温度关系曲线

上述两种方式中，宜根据槽式太阳能集热管所要求的运行温度范围内选取 100°C、150°C、200°C、250°C、300°C、350°C、400°C、450°C、500°C、550°C 中至少 5 个温度作为计算拟合热损系数的温度基数，并在检测报告中列出对应的热损系数值。槽式太阳能集热管的热损系数与吸热管内壁平均温度的关系曲线图绘制示例如图 3 所示。

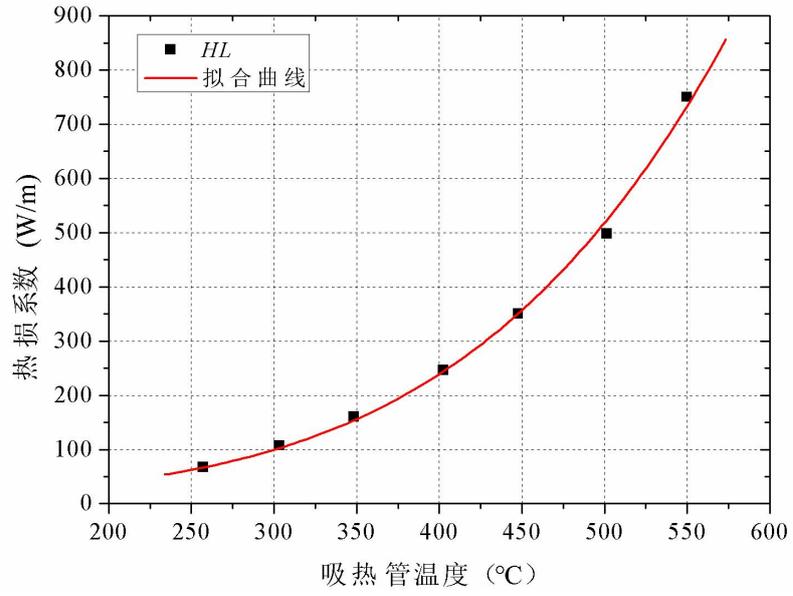


图3 槽式太阳能集热管热损系数与吸热管温度拟合曲线示例

9 检测报告

检测报告格式模板见附录A。

附录 A
(规范性附录)

检测报告格式模板

检 测 报 告

TEST REPORT

报告编号

样品名称

Name of Product _____

委托单位

Client _____

生产单位

Manufacture _____

检验类别

Test Category _____

检测单位名称

XXXX 年 XX 月 XX 日

注 意 事 项

1. 检测报告无检测单位印章无效；

Test report is invalid without the “Stamp of test report” on it.

2. 复制报告未重新加盖检验单位印章无效；

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；

Test report is invalid without the signatures of the persons for chief tester, verification and approval.

4. 报告涂改无效；

Test report is invalid if altered.

5. 对检测报告若有异议，应于收到报告之日起十五日内向检测单位提出；

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，委托检测仅对来样负责。

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）：

邮政编码（Postcode）：

电子邮箱（Email）：

检测单位名称

报告编号 (No):

第 页 / 共 页 (Page of)

样品编号			
样品名称		规格型号	
委托单位		送样日期	
		送样数量	
生产单位		生产日期	
		出厂编号	
委托单位地址		检测日期	
		检测类别	
检测依据			
检测地点			
检测设备			
检测项目			
检测结论	检测单位印章 签发日期: _____		

批 准:

审 核:

主 检:

Approval

Verification

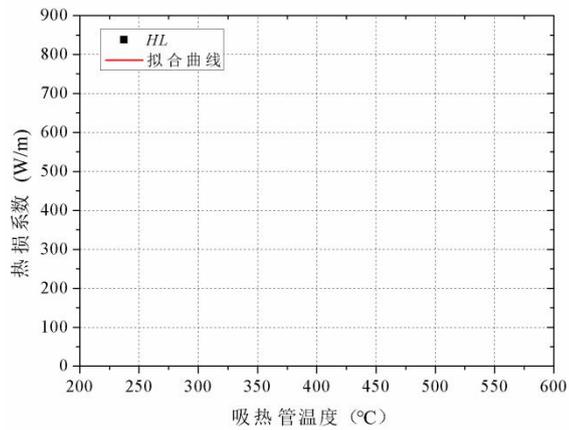
Chief Tester

检测结果

报告编号 (No.):

样品编号				
样品规格	吸热管长度		吸热管外径	
实际测试数据				
吸热管内壁面平均温度 \bar{T}_{abs} (°C)	玻璃管外壁面平均温度 \bar{T}_g (°C)	环境平均温度 T_a (°C)	热损系数 HL (W/m)	热损系数不确定度 u_{HL} (W/m)
热损系数拟合数据				

槽式太阳能集热管热损系数与吸热管温度拟合曲线图



热损系数方程

$$HL = a \times T_{abs} + b \times T_{abs}^4$$

(以下空白)

参 考 文 献

- [1] Burkholder, F. and Kutscher, C., Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-550-45633, 2009.
 - [2] Dongqiang, L. et al. An experimental study of thermal characterization of parabolic trough receivers, *Energy Conversion and Management*, 69:107-115, 2013.
 - [3] Pernpeintner, J. et al. Parabolic trough receiver heat loss and optical efficiency round robin 2015/2016. SolarPACES Abu Dhabi, 2016
-