

GRLM

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟标准

T/GRLM 10-2016

抛物面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

2016-06-23 发布

2016-07-23 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	I
1 范围	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义	1
4 原理	2
5 仪器	2
6 测试平台	2
7 实验条件	4
8 测试步骤	5
9 热损系数测试数据处理.....	7
10 抛物面槽式太阳能集热管热损系数合格参考值.....	9
附录 A	10

前 言

本标准依据《标准化工作导则 第一部分：标准的结构和编写》(GB/T 1.1-2009)给定的规则起草。

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这些专利的责任。

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归口并解释。

本标准系首次提出并制定。

本标准起草单位：中国科学院电工研究所、北京市太阳能研究所有限公司、常州龙腾光热科技股份有限公司、有研工程技术研究院有限公司、北京天瑞星光热技术有限公司、兰州大成科技股份有限公司、山东汇银新能源科技有限公司、皇明太阳能股份有限公司、中海阳能源集团股份有限公司、康达新能源设备股份有限公司、中国电力工程顾问集团有限公司。

本标准主要起草人：雷东强、王志峰、孙守建、俞科、郝雷、米菁、张秀廷、田广科、康曼、康延滨、李强、杨军峰、周福云、陈玉虹、付向东、徐立。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至国家太阳能光热产业技术创新战略联盟秘书处（地址：北京市海淀区中关村北二条6号，100190，网址：<http://www.cnste.org>，邮箱：cnste@vip.126.com）。

抛物面槽式太阳能集热管热损系数测试方法

1 范围

本标准规定了稳态热平衡方法测试热发电系统使用的传热流体温度高于 250℃的抛物面槽式太阳能集热管热损系数的原理、仪器、试验步骤、结果处理和测试报告格式。

本标准适用于太阳能热发电系统中用的抛物面槽式太阳能集热管，其他玻璃-金属内管结构的太阳能集热管可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。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 4271-2000 平板型太阳集热器热性能试验方法

GB/T 12936 太阳能热利用术语

GB/T 18974-2003 太阳集热器热性能室内试验方法

GB/T26972 聚光型太阳能热发电术语

3 术语和定义

GB/T 12936 和 GB/T26972 确立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

测试周期 test period

对于每个测定的温度点，维持稳态的时间。

3.4

热损系数 heat loss coefficient

给定温度条件下抛物面槽式太阳能集热管单位长度热损失功率值。

注：单位为 W/m。

3.5

主加热器 main heater

放置在吸热管内的杆式电加热器。

3.6

辅助加热器 assistant heater

用于加热集热管端部的盘式电加热器。

3.7

均温管 even temperature pipe

放置于集热管内、具有高导热系数的金属管。

4 原理

利用电加热方式将抛物面槽式太阳能集热管内的吸热管加热到与环境空气温度到某一设定温差。待吸热管壁面温度稳定后,维持该温差所需的电加热器输入功率即为抛物面槽式太阳能集热管在该温差下的热损功率。热损功率除以该测试温度下吸热管的总长度即为抛物面槽式太阳能集热管在该温差下的热损系数。

5 仪器

5.1 测量仪器的量程

所用的测量仪器的准确度应等于或优于读数满量程 $\pm 0.5\%$ 和 1 秒以内的时间常数。

仪表或仪表系统的最小刻度不应超出要求精密度的 2 倍。

5.2 温度测量仪器

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准确度应不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$,精度应不超过所测温度的 0.4%。

用于测量环境空气和玻璃管外壁面的各温度传感器的准确度及精密度应不超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

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

5.3 电功率测量仪器

用于测量各电加热器的功率仪表的准确度及精度为其全量程的 $\pm 0.5\%$ 。

6 测试平台

6.1 安装场所要求

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对抛物面槽式太阳能集热管的影响。

抛物面槽式太阳能集热管热损系数测试平台包括支撑架、加热与控温系统和温度与功率测试系统三部分。其结构示意图如图 1 所示。

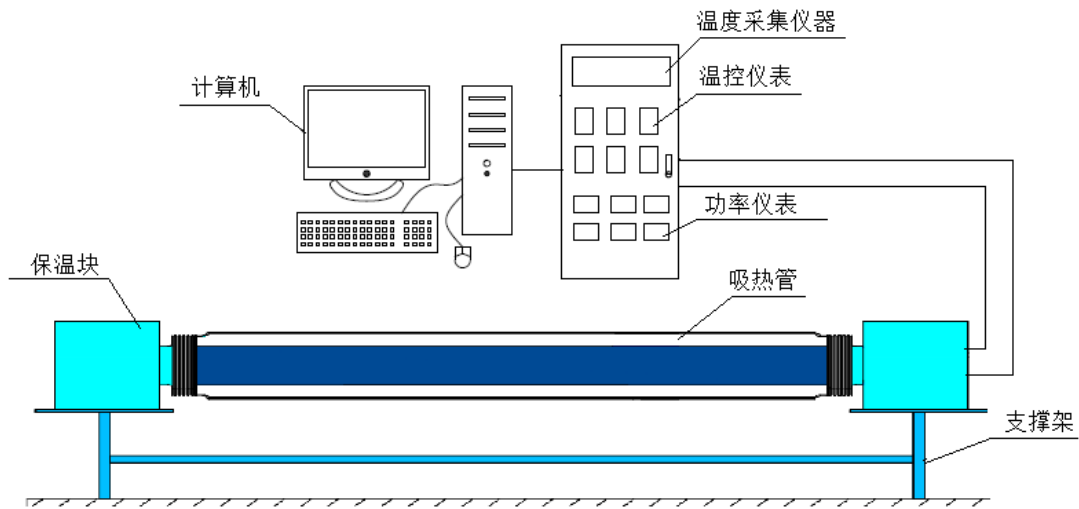


图 1 抛物面槽式太阳能集热管热损系数测试平台示意图

6.2 支撑架

支撑架要求稳固，水平放置。支撑抛物面槽式太阳能集热管的位置应避开其两端的波纹管，允许吸热管在测试过程中的膨胀伸缩。

支撑架推荐具有在长度方向上可调节的功能，可测试不同外型尺寸的抛物面槽式太阳能集热管。

6.3 加热与控温系统

加热与控温系统包括控制柜、温控仪表、主加热器、辅助加热器、均温管、保温块等。

抛物面槽式太阳能集热管加热采用 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的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推荐为吸热管总长的 1-10%，其电加热功率范围推荐为 5-10kW/m。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抛物面槽式太阳能集热管加热与测温点布置示意图，如图 2 所示。

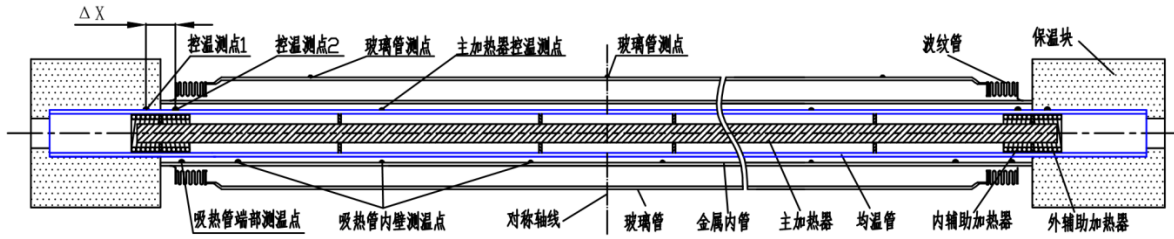


图 2 抛物面槽式太阳能集热管加热与测温点布置示意图

采用 2 根壁厚不小于 3mm、长度不低于主加热器总长度的均温管放置在吸热管内，维持吸热管的温度均匀。

抛物面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环境温度 15℃。

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。

6.4 温度与功率测试系统

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。

温度传感器要求必须与被测表面良好接触，用于控制加热温度的温度传感器需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。每个温度传感器要求与均温管之间有防辐射罩。测试玻璃管外壁温度推荐至少 3 个温度传感器，其中一个温度传感器需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。

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。

7 实验条件

7.1 测试条件

7.1.1 风速

环境风速不大于 0.5m/s。

7.1.2 环境空气温度

在测试期间，环境空气温度应在 0-25℃ 之间。

7.1.3 吸热管内壁面温度均匀性

抛物面槽式太阳能集热管热损系数测试满足稳态条件时，要求吸热管内壁面上的各个温度传感器的测量温度值与吸热管内壁面的平均温度值之间最大差别不超过±10℃。

7.1.4 周边辐射热源

抛物面槽式太阳能集热管不得受任何可影响热损测试能量平衡热源的影响，如阳光、强光辐射等。

7.1.5 测试周期

如果测量的各点温度在 15 分钟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。

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	±1℃
玻璃管外壁面温度	±1℃
吸热管内壁面温度	±0.5℃

7.2 测试温度选取

调节吸热管内壁平均温度与环境空气平均温度差别为 200℃±10℃、250℃±10℃、300℃±10℃、350℃±10℃及 400℃±10℃等 5 种条件进行热损系数测试。

8 测试步骤

8.1 测试前的准备

测试前抛物面槽式太阳能集热管的玻璃管表面要清洗干净，并对抛物面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。

测量抛物面槽式太阳能集热管外观结构尺寸及测温点位值，至少应包括以下数据：

- 1) 在室温条件下，吸热管的总长度 $L_{\text{abs}}(\text{RT})$ ，单位 m；
- 2) 在室温条件下，吸热管的外直径 $D_{\text{abs,o}}$ ，单位 m；
- 3) 吸热管的壁厚 δ ，单位 m。

8.2 安装均温管

首先将抛物面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，并且位于吸热管的两侧。在

玻璃管上固定相应温度传感器，最后在两端安装好保温块。

8.3 电加热器安装

将 4 个辅助加热器根据第 6 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。

8.4 温度传感器安装

安装用于控温的温度传感器，将各温度传感器按照第 6 章的规定，固定在均温管上相应位置，要求各个测点位置在一条直线上，并与均温管壁面保持紧密接触。

安装用于测温的温度传感器，将各温度传感器按照第 6 章的规定，固定在均温管上相应位置，要求各个测点位置在一条直线上，并使每个温度传感器能与吸热管内壁面紧密接触。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。

用于玻璃管表面测温的温度传感器按照第 6 章的规定固定在玻璃管上相应位置，要求采用合适的方式与玻璃表面接触紧密，各个测点位置位于同一直线上且处于玻璃管两侧，推荐采用片式温度传感器。

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，距抛物面槽式太阳能集热管不小于 1.5m 处，并用防辐射罩屏蔽直射辐射。

8.5 检查环境温度

开启温度采集设备及测温系统软件，检查环境空气温度是否满足测试条件 7.1.2 的要求。

8.6 设定采样频率

设定测温系统软件的数据采集频率为 5s，记录并保存各温度传感器温度值和各加热器的输出功率值。

8.7 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，开始加热。

8.8 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 7.1.3 的均匀性要求以及 7.1.5 稳态测试工况的要求。

8.9 测试数据采集

在 7.1.5 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；重复步骤 8.7-8.9，进行另一温度值下热损系数测试。

8.10 吸热管的长度测量

测量吸热管长度的误差应不超过±0.1%。

9 热损系数测试数据处理

9.1 玻璃管外壁平均温度

玻璃管外壁面平均温度 (\bar{T}_g) 为各温度传感器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,

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

式中,

$\bar{T}_{g,i}$ —— 为玻璃管外壁上第 i 个温度传感器测温度平均值 ($^{\circ}\text{C}$);

p_i —— 为第 i 个温度传感器对应测量距离的加权因子。

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,

$$p_i = \frac{d_{i-1} + d_{i+1}}{2L_{abs}(RT)} \quad (2)$$

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);

$L_{abs}(RT)$ —— 室温时吸热管的总长度 (m)。

对于第 1 个温度传感器, 其计算公式为,

$$p_1 = \frac{d_0 + d_2 / 2}{L_{abs}(RT)} \quad (3)$$

式中,

d_0 —— 为第 1 个温度传感器距离吸热管端部的距离 (m)。

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 $p_N = p_1$ 。

9.2 吸热管内壁平均温度

吸热管内壁的平均温度 (\bar{T}_{abs}) 计算如下,

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

式中,

$\bar{T}_{abs,i}$ —— 为吸热管内壁上第 i 个温度传感器测量温度平均值 ($^{\circ}\text{C}$);

M——为吸热管内壁面上全部温度传感器个数之和。

9.3 环境空气平均温度

环境空气平均温度 (\bar{T}_a) 为稳态测试周期内的环境空气温度平均值。

9.4 热损系数 HL

热损系数 (HL) 为抛物面槽式太阳能集热管在设定温差下总热损失功率值除以该测试温度条件下吸热管的实际长度, 单位为 W/m。吸热管的总热损失功率为 2 个主加热器与 2 个内辅助加热器的电加热功率值之和, 再加上由于内、外辅助加热器测点温度的不同而产生的热传导功率, 即:

$$HL = \frac{\sum_i Pow_i + \frac{k \cdot A}{\Delta x} (T_1 - T_2) + \frac{k \cdot A}{\Delta x} (T_4 - T_3)}{L_{abs}(\bar{T}_{abs})} \quad (5)$$

式中:

Pow_i ——为放置在吸热管内的第 i 个电加热器的输出功率值 (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;

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;

$L_{abs}(\bar{T}_{abs})$ ——为测试温度下吸热管的总长度 (m);

k ——为均温管导热系数 W/(m · K);

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 (m), (见图 2);

A ——为均温管截面面积 (m²)。

测试温度下吸热管的总长度计算公式为,

$$L_{abs}(T_{abs}) = L_{abs}(RT) + coef_{ss}(\bar{T}_{abs} - T_{RT}) \quad (6)$$

式中,

$L_{abs}(RT)$ ——为室温条件下吸热管的总长度 (m);

$coef_{ss}$ ——为所测试吸热管材料的线性膨胀系数 (K⁻¹)。

考虑到实验的各种误差, 热损测试结果的不确定性为 ±10W/m。

抛物面槽式太阳能集热管的热损系数, 若定义为抛物面槽式太阳能集热管在设定温差下总热损失功率值除以该测试温度条件下吸热管的外表面积, 单位为 W/m², 也可以表示为,

$$HL = \frac{\sum_i Pow_i + \frac{k \cdot A}{\Delta x} (T_1 - T_2) + \frac{k \cdot A}{\Delta x} (T_4 - T_3)}{A_{abs}(\bar{T}_{abs})} \quad (7)$$

式中,

$A_{abs}(\bar{T}_{abs})$ ——为在测试温度下吸热管外壁面的面积 (m²)。

测试温度下吸热管外壁面的面积计算公式为：

$$A_{abs}(\bar{T}_{abs}) = D_{abs,o}^2 \cdot L_{abs}(\bar{T}_{abs}) \cdot \pi / 4 \quad (8)$$

式中，

$D_{abs,o}$ ——为吸热管外径（m）。

利用上述计算公式计算可以得到在测试温度条件下，抛物面槽式太阳能集热管的热损系数值。

9.5 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可以拟合出该抛物面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与环境平均温度之差拟合的公式为，

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

上式中，

a——为热损系数对应吸热管内壁平均温度与环境平均温度之差的拟合系数（W/(m·℃)）；

b——为热损系数对应吸热管内壁平均温度与环境平均温度之差四次方的拟合系数（W/(m·℃⁴））。

以吸热管内壁平均温度拟合的公式为，

$$HL = c \cdot \bar{T}_{abs} + d \cdot \bar{T}_{abs}^4 \quad (10)$$

式中，

c——为热损系数对应吸热管内壁平均温度的拟合系数（W/(m·℃)）；

d——为热损系数对应吸热管内壁平均温度四次方的拟合系数（W/(m·℃⁴））。

9.6 测试报告

测试报告按附录 A 规定填写。

10 抛物面槽式太阳能集热管热损系数合格参考值

通过公式（9）计算并考虑了本标准所规定的测试不确定度后，如果抛物面槽式太阳能集热管热损系数符合表 2 所规定的条件时，视为该抛物面槽式太阳能集热管热损系数检测合格。

表 2 抛物面槽式太阳能集热管热损系数合格判据参考值

$\bar{T}_{abs} - \bar{T}_a$	热损系数上限 (W/m)
300	110
350	160
400	235

附录 A

(规范性附录)

测试报告

A1 测试样品记录表

测试样品记录表			
制造商		送样日期	
产品编号		测试日期	
吸热管长度		测试人	
吸热管外径		环境温度	
吸热管壁厚		测试数量	

A2 测试数据处理及计算

产品 编号	\bar{T}_{abs} (°C)	\bar{T}_g (°C)	\bar{T}_a (°C)	$\bar{T}_{abs} - \bar{T}_a$ (°C)	HL (W/m)	测试日期

A3 热损系数的表达式

分别列出采用公式 (9) 和 (10) 得到的热损系数拟合方程式及绘制的相应热损系数曲线图。