

GRLM

国家太阳能光热产业技术创新战略联盟标准

T/GRLM xx-2020

抛物面槽式吸热管热循环试验方法

Test Method for thermal cycling of Parabolic Trough Receiver Tube

(征求意见稿)

2020-xx-xx 发布

2020-xx-xx 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.....	III
1. 范围.....	1
2. 规范性引用文件.....	1
3. 术语与定义.....	1
4. 测试原理.....	2
5. 测试仪器.....	4
6. 吸热管热循环试验测试平台及场所.....	4
7. 吸热管热循环试验测试步骤.....	5
8. 热循环试验数据整理.....	5
9. 测试不确定度.....	6
10. 测试报告.....	7
11. 标志、包装、运输、贮运.....	7

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：有研工程技术研究院有限公司、中国科学院电工研究所...

本标准主要起草人：于庆河、杜淼、米菁、郝雷、李世杰、雷东强、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）。

抛物面槽式吸热管热循环试验方法

1 范围

本标准规定了抛物面槽式吸热管（以下简称吸热管）在室内进行热循环的测试试验方法及计算程序。

本标准适用于槽式太阳能热发电系统中应用的吸热管、中低温槽式太阳能热利用系统中的吸热管及其他直通式玻璃-金属内管结构的吸热管。本标准不适用于全玻璃太阳能真空吸热管、玻璃-金属封接式热管吸热管。

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 26972—2011 聚光型太阳能热发电术语

ISO 9488: 1999 太阳能术语

ElliRec Elliptical Solar Simulator Test Description, V 3.2, DLR QUARZ.

3 术语和定义

GB/T 26972—2011 和 ISO 9488: 1999 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

主加热器 main heater

放置在吸热管内的杆式电加热器。

3.2

辅助加热器 assistant heater

用于加热吸热管端部的盘式电加热器。

3.3

均温管 even temperature pipe

放置于吸热管内、具有高导热系数的金属管。

3.4

标准样管 standard sample receiver

本测试方法规定在室温条件下采用含增透膜层的玻璃外管（透光率 $\geq 95.5\%$ ）、金属内管膜层吸收率 95%左右、有效利用率为 96.5%的吸热管作为标准样管。

4 测试原理

4.1 真空度变化原理

吸热管真空夹层内的真空度的不同，残余气体的传热机理也不相同，吸热管夹层中真空度的机理有三种：

1、吸热管内真空夹层真空度高于 0.1 Pa 数量级，即吸热管内真空夹层内压力 < 0.1 Pa 时，此时夹层内的气体处于自由分子状态，分子间相互作用力极低，每个分子可视作独立状态，考虑到其离散粒子效应，在构建理论模型时，使用离散模型描述夹层内分子状态，分子相互之间碰撞热传导的次数较低，根据传热学理论，其传热公式为：

$$Q_{C.L} = \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}} \cdot a \cdot P \cdot (T_a - T_g) \quad (1)$$

γ 表示气体比热容； P 为真空夹层内压力大小； a 为气体调节系数； M 为气体摩尔质量； T_a ， T_g 分别表示金属吸热管及外玻管温度。

由于上式中第一部分仅与气体本身的状态有关，因此常使用代替上式的第一部分，并将其写作：

$$Q =_{C.L} K \cdot a \cdot P \cdot (T_a - T_g) \quad (2)$$

在该状态下，由于分子间相互碰撞的几率较低，碰撞传热的概率也较小，因此，此时吸热管的传热损失很小，属于可以忽略的情况。

2、吸热管内真空夹层的真空度在 0.1 Pa~10 Pa 时，此时分子并不完全处于离散状态，分子与分子间存在一定作用力，但作用力仍然较小，分子相互碰撞频率增加，此种介于自由分子与连续分子之间的状态称之为过渡状态或滑移分子状态。此时，使用过渡模型来描述真空夹层内的气体分子状态，则其传热公式为：

$$Q_{C.L} = \frac{2\pi D_a \cdot K_{stw} \cdot (T_a - T_g)}{D_a \ln(D_g / D_a) + B\lambda(1 + D_a / D_g)} \quad (3)$$

式中 K_{stw} 气体标准状态下的导热系数，在真空夹层内，认为其为环状空间模型， B 为分子间

相互系数，即分子在金属吸热管和外玻璃管双曲面上的温度跃迁系数， λ 为分子平均自由程。其中，分子间相互系数 B 可由下式确定：

$$B \approx \frac{9\gamma - 5}{2(\gamma + 1)} \frac{2 - a}{a} \quad (4)$$

气体分子平均自由程可由下式计算：

$$\lambda = \frac{2.331 \times 10^{-21} T_m}{P \delta^2} \quad (5)$$

式 (5) 中， T_m 表示金属吸热管与外玻璃管的平均温度，即 $T_m = \frac{1}{2}(T_a + T_g)$ ， δ 表示气体分子直径，在真空夹层中残余气体多为空气，氢气和氦气，其直径为 $\delta_{air} = 3.66 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ， $\delta_{H_2} = 2.97 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 和 $\delta_{Ar} = 3.42 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 。

3、吸热管内真空夹层真空度 $> 133.3 \text{ Pa}$ 时，环状空间内的气体分子处于连续状态，分子间碰撞几率大幅提高，相互作用力较高，碰撞散热能力也大幅提高，此时，可将真空夹层内的传热方式视为热传导。其传热公式为：

$$Q_{C.L} = \frac{2.425 k_{a-g} (T_a - T_g) \left[\frac{\text{Pr} * Ra_a}{0.86 + \text{Pr}_{a-g}} \right]^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{D_a}{D_g} \right)^{\frac{3}{5}} \right]^{\frac{5}{4}}} \quad (6)$$

式中， k_{a-g} 为气体在真空夹层内温度为 $\frac{1}{2}(T_a + T_g)$ 下的传热系数； Pr 为瑞利数， Pr_{a-g} 为温度为 $\frac{1}{2}(T_a + T_g)$ 时的瑞利数； Ra_a 为金属吸热管的瑞利数评价系数，该系数可以由下式确定：

$$Ra_a = \frac{g \beta (T_a - T_g) D_a}{\alpha \nu} \quad (7)$$

其中， β 为金属吸热管的线性体积膨胀系数。

4.2 测试原理

用电加热方式将抛物面槽式太阳能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，测量吸热管内真空度在恒温过程中的变化，恒温完成后自然冷却降温至室温，然后

再按一定速率升温至设定温度，测量吸热管内真空度的变化，获得吸热管在不热循环过程中真空度的变化规律。

5 测试仪器

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 吸热管热循环试验测试平台及场所

6.1 吸热管热循环试验测试试验台

抛物面槽式太阳能吸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。

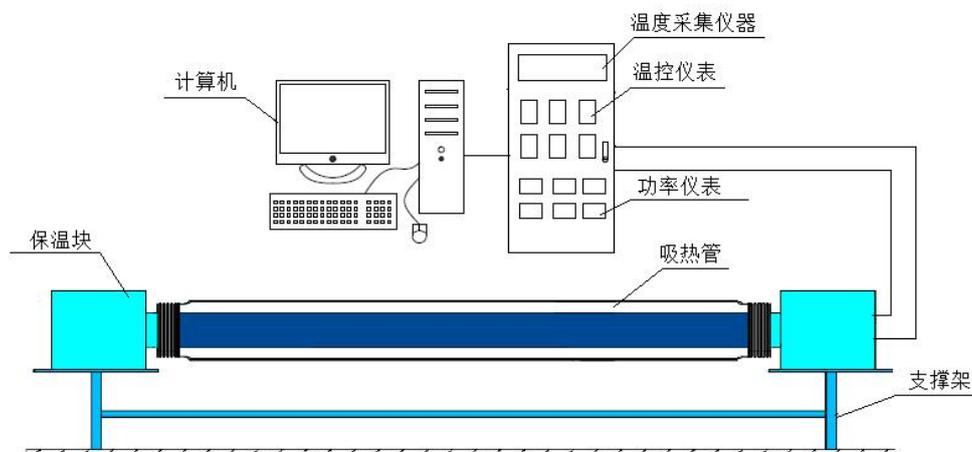


图 1 抛物面槽式太阳能吸热管热损系数测试平台示意图

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吸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，可测试不同外形尺寸的抛物面槽式太阳能吸热管。

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、主加热器组成。

6.4 试验场所

应尽可能排除和减少外界因素对测试的影响，测试应原则上满足稳态传热条件。应在风速不大于 0.5m/s 的条件下进行测定，如不能满足时应增加挡风装置。环境温度应距离吸热管位置 1m 外测得，并应避免气体热源的影响。

7 吸热管热循环试验测试步骤

7.1 吸热管安装

吸热管取样要求从生产线上随机抽取至少 2 支吸热管，在吸热管在标记编号后，放置在测试平台支架上的固定位置。

7.2 测试检查

打开控制柜和加热系统，检测是否存在问题。

7.3 测试步骤

- 1) 开启温度采集设备、真空计及测温系统软件，检查环境空气温度是否满足测试条件要求；
- 2) 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；
- 3) 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；
- 4) 采集吸热管在到达设定温度后的真空度，并记录保温一定时间后的真空度；
- 5) 维持稳态测试至少 30 分钟，然后冷却至室温，完成该设定温度的热循环试验测试；
- 6) 重复步骤 2) -步骤 5)，获得吸热管不同热循环次数后管内真空度的变化规律。

8 热循环试验数据整理

将在设定温度下，不同循环次数后管内的真空度进行采集。见下表 1。

表 1 热循环试验数据

吸热管温度(°C)	循环次数 (次)	真空度 (Pa)
250		
350		
400		
450		

9 测试不确定度

9.1 不确定度来源

测试结果的不确定度来源于随机误差和系统误差两部分。其中系统误差主要包括测试仪器、所用的真空计的精度。

9.2 不确定度的计算步骤

- 1) 根据被测量的函数式定性分析影响每个可直接测量的量 x_i 的所有误差来源；
- 2) 求出所有的直接测量的量的随机误差和系统误差；
- 3) 根据被测量的函数式求出所有的传播系数 $\left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|$ ，利用公式：

$$U_f^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2 \quad (8)$$

分别求出总的随机误差 U_A 和系统误差 U_B 。

- 4) 总误差的计算公式如下：

$$U_{total} = \pm \sqrt{U_B^2 + (2 \cdot U_A)^2} \quad (9)$$

利用上面的步骤，计算热循环测试平台的各项误差，包括温度误差和真空度误差。

9.3 精度要求

热循环试验两次重复测试不确定度要求小于 $\pm 0.4\%$ 。

温度表的测量精度要求在 $0-600^\circ\text{C}$ 范围内，精度达到 ± 0.1 ；

吸热管安装位置误差小于 $\pm 2\text{mm}$ 。

10 测试报告

测试报告应包括测试概括、基本测试信息、测试数据处理及计算、测试不确定度、评价结论及建议等。

10.1 测试概括

主要包括测试目的、测试方法、测试设备及测试对象、测试参数、测试方法及测点布置等。

10.2 测试基本信息应包括：

表 2 测试基本信息

基本测试信息			
制造商		吸热管初始真空度	
吸热管编号		送样日期	
吸热管长度		测试数量	
吸热管内管外径		测试日期	
吸热管内管壁厚		测试人	

10.3 测试数据处理及计算

表 3 热循环试验数据

吸热管温度(°C)	循环次数(次)	真空度(Pa)

10.4 评价结论及建议

结合测试结果，分析吸热管的光学效率，给成评价结论与建议。

11 标志、包装、运输和贮运

11.1 产品标志

产品上应有商标。

11.2 包装

11.2.1 包装方法应采用箱装，包装箱符合GB/T13384的规定，包装同时满足要求。

- 1) 吸热管包装箱应符合相应承重能力和耐压强度。
- 2) 吸热管两端的金属管采用木质工装固定，其长度、强度、结构应符合该规格产品尺寸等。

3) 应在包装箱内附产品说明书、随机备附件清单。

11.2.2 包装箱的标志图样应符合GB/T191的规定。

11.2.3 包装箱上还应包括以下内容：

- 1) 制造厂商和地址；
- 2) 产品名称；
- 3) 商标；
- 4) 产品标记；
- 5) 产品数量；
- 6) 外形尺寸（长*宽*高）；
- 7) 整箱的质量；
- 8) 制造日期
- 9) 生产批号

11.3 运输

产品在装卸和运输过程中，不得遭受强烈颠簸、震动、不得受潮、雨淋。包装箱顺着车体方向装卸，运输途中避热、避潮湿，防止碰伤和化学腐蚀。

11.4 贮存

产品应存放在通风、干燥的仓库内。产品不得和易燃品及化学腐蚀物品混放。
