

中华人民共和国国家标准

GB/T

太阳能光热发电用集热管通用要求与测试方法

General requirements and test methods for solar
receivers

2018--发布

20XX-X-X 实施

中华人民共和国
国家质量监督检验检疫总局发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本标准由全国太阳能光热发电标准化委员会（SAC/TC 565）提出并归口。

本标准采用翻译法等同采用 IEC TS 62862-3-3: Solar thermal electric plants Part 3-3: Systems and components - General requirements and test methods for solar receivers，标准结构和内容与 IEC TS 62862-1-2:2017 保持一致。

本标准起草单位：常州龙腾光热科技股份有限公司

本标准主要起草人：

太阳能光热发电站集热管通用要求与测试方法

1 范围

本标准规定了在采用线聚焦型集热器的太阳能光热发电站中用于吸收聚焦后的太阳辐射并将其热能传递至传热流体的太阳能集热管相关性能参数的技术要求、测试方法、耐久性和安全性。本标准中所述的集热管由一根吸热管和一根保温玻璃套管组成。

注意——本标准中所包含的大多数测试方法适用于槽式光热发电站和线性菲涅尔光热发电站中的太阳能集热管。

本标准包含了集热管技术特性、几何特性和性能参数的定义，以及光学特性、热损失和耐久性的测试方法。

2 规范性引用文件

以下文档在本文件中作为规范性文件被全部或部分引用，为本文件不可分割的一部分。对于注明日期的引用文件，仅引用该日期的版本；对于未注明日期的引用文件，则引用该文件的最新版本（包括任何修订）。

- ISO/IEC 指南 98-3:2008，测量误差——第 3 部分：测量误差的表述指南（GUM:1995）
- ISO 9211-4:2012，光学与光电——光学涂层——第 4 部分：具体测试方法
- IEC 62862-1-1，太阳能光热发电站——术语
- ISO 9488:1999，太阳能——词汇
- ISO 6270-2:2005，油漆与清漆——耐湿性的测定——第 2 部分：在冷凝水气氛中暴露试样的测试程序
- MIL-E-12397

3 术语、定义、符号和单位

本标准采用国际标准 ISO 9488 和 IEC 62862-1-1 中包含的术语、定义、符号和单位。

4 集热管的性能测试

4.1 概述

集热管作为镜场内最重要的部件之一，对整个镜场的性能有着巨大的影响。为了最好地模拟出集热管以及镜场在使用周期内的性能特性，对集热管的特性和性能进行测试非常关键。

4.2 标识与几何特性

集热管通常有产品品牌名称，并由不锈钢管的外径进行标识。另一个重要的标识参数是集热管的长度，会随着其设计对应的槽式集热器的规格而变化。

其它特性，如吸收率、发射率、透射率、真空度、不锈钢管的材料、设计温度、设计压力以及集热管对应使用的传热工质（HTF）类型等，可以从制造商处获得。

这些参数和特性也应纳入被测试的集热管报告中。

4.3 制造说明

除了第 4.2 点中的参数外，制造商还可能提供与集热管或其零部件的使用/制备相关的、用于测试目的的补充说明，譬如在光学测量之前对样品进行清洁等。这些说明如果对结果产生影响，也必须包含在测试程序中。

4.4 热损失测试

4.4.1 目的

本测试的目的在于对太阳能集热管的热学特性进行表征，包括热损失曲线的确定，以及根据测试数据对发射率进行计算（可选）。

本测试适用于采用槽式技术的太阳能光热发电站，和以此类推采用线性菲涅尔技术的太阳能光热发电站，基本上都适用于太阳能集热管是组成槽式集热器或线性菲涅尔集热器的一部分的情况。

4.4.2 集热管的安装与位置

4.4.2.1 概述

集热管在测试台上的安装方式对热损失测试的结果具有决定性的影响，因此建议按照以下章节中的说明设置测试台。测试应在室内进行，以尽可能地减少外界环境对测试样品的影响。

测量的基本原理是在稳态条件下，测量转化为散热损失能量的电能。在该条件下，热损失相当于将集热管维持在某个恒定温度所需的电功率。根据在不同温度下确定的电功率，即可获得集热管测试样品的热损失特性曲线。

测试过程可以采用不同的加热方法对集热管进行加热，例如，根据焦耳效应，通过电气加热元件，或通过附着在插入吸热管内部的铜管上的 IR 电阻加热（示例参见参考文件[6]）。

4.4.2.2 集热管的安装

待测集热管应水平安装在测试支撑架上。

4.4.3 测试方法

4.4.3.1 温度测量

应在沿集热管长度方向至少 6 个位置测量集热管温度，这 6 个测点应以集热管长度中心对称布置，测点之间的间距不超过 1 米。额外增加的测点应布置在靠近集热管两端，以控制集热管两端的温度梯度。建议采用三个传感器测量玻璃套管表面的温度，其中至少两个对称热电偶应朝下安装。

测试样品周围的空气温度必须为 $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。环境温度传感器应布置在距离样品不超过两（2）米的位置，并且应确保其不受热点或气流的影响。在测试报告中应记录环境温度传感器的位置。

所有的温度传感器必须根据工作温度范围进行校准。

每个温度传感器的平均温度的扩展不确定度应低于：

- 吸热管： $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。
- 玻璃套管： $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。
- 环境或周围空气： $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

注意：有关误差的计算，请参见 ISO9806:2013 附录 D。

注意：触点应设置适当，以确保测量的正确性。对传感器附近的影响温度梯度进行补偿的修正方法可能适用。

注意：在测量中将热电偶按压到集热管或玻璃套管上获得测量值的方法是不够的，因为热电偶会受到环境气温，集热管、玻璃套管环形部分的辐射温度，以及沿热电偶电线导热的影响，可以采用参考测量的方法来确保测量装置的有效性或对测量值进行修正。

4.4.3.2 功率测量

电热功率的测量设备准确度必须为实际读数 XW 的 1%。

4.4.3.3 测试用功率传感器必须经过校准。

数据记录频率不得低于 20 秒，记录最少次数应能确保测试具有统计学代表性。

4.4.4 测试程序

4.4.4.1 测量

应至少测量以下数据。

测试之前：

- 用卷尺测量环境温度下金属集热管吸热管的长度，准确度至少为 1 毫米。
- 用卡尺测量环境温度下吸热管的直径（内径和外径），准确度至少为 1/10 毫米。
- 用卷尺测量温度传感器的位置，准确度至少为 1 毫米，参考点为吸热管上的具体端部或具体位置。

在测试期间：

- 吸热管的温度
- 玻璃套管的温度（可选）
- 周围空气的温度
- 电阻加热器或使用的其他任何元件提供的电功率。

4.4.4.2 集热管前期检查

吸热管必须进行目视检查，并记录任何损坏。应将观察到的任何损坏记录在测试报告中。

4.4.4.3 测试条件

测试样品周围空气的温度必须为 $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。环境温度传感器应布置在距离样品不超过两米的位置放置，并且应确保其不受热点或气流的影响。

4.4.4.4 程序与测试时间

在某个运行温度下启动测试之前，应特别注意吸热管上热电偶的位置与接触的良好性：

- 在一个测量点测得的不同吸热管温度之间的最大差值不应超过所测量温度 ($^{\circ}\text{C}$) 的 4%。

对于所有测量，在稳定状态下，定义为最高测量温度与最低测量温度之差除以平均温度的温度均一性 S_T 的表达式必须为：

$$S_T = \frac{T_{\text{abs,max}} - T_{\text{abs,min}}}{T_{\text{abs,mean},^{\circ}\text{C}}} \quad (1)$$

对所有的测量，必须满足： $S_T < 0.04 * T_{\text{abs,mean}^{\circ}\text{C}}$

- 应在整个稳定状态期间遵循这个均一性标准。

一旦测量的变量达到了指定值，应等待至少 30 分钟，在此期间内，这些变量必须根据下表的稳定性要求保持稳定。在读取数据之前，应对管子两端的工艺绝热性进行检查。在该等待期间后，数据必须记录至少 15 分钟，这个记录时间段被视为一个测量点。

在等待期间以及测量点期间，应根据以下要求对测量温度的稳定性进行监测：

表 1——监测要求

要监测的参数	稳定性要求
吸热管温度	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
玻璃套管温度	--
环境温度	$20 \pm 10^{\circ}\text{C}$

- 测量策略与稳定状态

可以使用以下两种测量策略：

1. 受控加热功率

可以使用 PI 或 PID 控制器来控制电器功率输入，以便达到目标温度和稳定状态。当加热器设定点不发生变化，并且吸热管温度在至少 15 分钟期间变化低于 0.5°C 时，视为达到稳定状态。

2. 恒定加热功率

还可以采用恒定加热功率来达到准稳定状态，并且持续足够长的时间。在限定的测量时间内，各测量位置 i 对应的吸收管升温曲线 $T_{\text{abs},i}(t)$ 可以采用以下形式的指数函数进行建模。

$$T_{\text{abs},i}(t) = T_{\text{abs},i,\infty} \cdot \left(1 \pm e^{\frac{1}{\tau_i}(t+c_i)} \right).$$

$T_{\text{abs},i,\infty}$ 、 τ_i 和 c_i 为拟合参数，“+”用于降温过程，“-”用于升温过程。 $T_{\text{abs},i,\infty}$ 为从模型拟合中推导出的理论稳定状态温度。该模型仅对整个加热曲线 $T_{\text{abs},i}(t)$ 小部分合理的范围有效，其中热损失曲线和热容量的线性化会导致合理范围内的微小误差，然后通过模型拟合用作准稳态温度的修正。

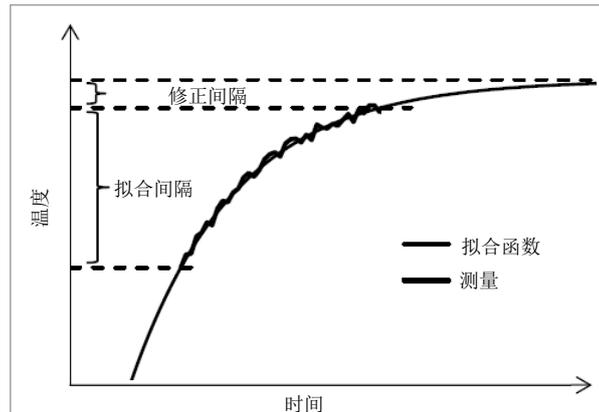


图 1：温度测量时的指数拟合

如果将拟合函数用于修正实测数据，则必须满足以下要求：

- $4K < \text{拟合间隔} < 20K$
- 修正间隔 $< 2K$
- 拟合的均方根（RMS）必须 $< 0.1K$

实际上，可以将受控加热功率策略与恒定加热功率策略相结合。

4.4.5 评估

测试完成时，必须对集热管进行检查，并且记录观察到的任何损坏。应将观察到的损坏记录在测试报告中。

4.4.6 计算

应采用测量点的平均值进行计算。

测量的不确定度应根据 ISO9806:2013 附录 D 进行计算。

4.4.6.1 热损失（HL）

集热管中的热损失系数定义为：

$$HL = \frac{\sum_i Pow_i + HL_{ends}}{L_{HCE(25^\circ C)}} \quad [W/m] \quad (2)$$

其中：

Pow_i ：发热元件消耗的电器功率 i [W]

注意：如果使用发热元件，则其应为吸热管内部所有元件之和。

HL_{ends} ：集热管端部管子两端的热损失[W/m]

注意：当系统绝热时，HL 两端可以被视为零。

注意：如果仅对集热管两端进行保温，则应计算集热管端部热损失，例如，可以按照以下方式进行计算：

GB/T

$$HL_{\text{ends}} = \frac{kA}{\Delta x}(T_1 - T_2) + \frac{kA}{\Delta x}(T_N - T_{N-1}) \quad (3)$$

其中:

$T_{1/2/N/N-1}$: 假设测量集热管端部实际温度[°C]的传感器是第 N 个传感器。如果测试平台是采用电加热元件加热的, 则选取加热铜管末端的温度传感器。

k: 铜的导热系数[W/m °C]

A: 铜管面积[m²]

Δx : 端部传感器之间的间距[m]

$L_{HCE(25^\circ\text{C})}$: 环境温度 (25°C ± 10°C) 下集热管的长度[m], 应测量集热管受光面积对应的长度。

计算集热管的平均温度时, 应考虑每一个传感器在沿吸热管长度方向上管辖范围的权重:

$$T_{\text{abs}} = \frac{\sum_i T_{\text{abs}_i} P_i}{\sum_i P_i} \quad [^\circ\text{C}] \quad (4)$$

其中:

T_{abs_i} 传感器 i 测量的吸热管温度[°C]

P_i 所使用的权重[-]

玻璃套管的平均温度为:

$$T_{\text{gl},o} = \frac{\sum_i T_{\text{gl},o_i} P_i}{\sum_i P_i} \quad (5)$$

其中:

T_{gl,o_i} : 传感器 i 测量的玻璃套管外部温度[°C]

P_i 所使用的权重[-]

用于确定吸热管和玻璃套管温度的权重可以通过以下方程确定:

$$P_i = \frac{(d_{i-1} + d_{i+1})/2}{L_{HCE}} \quad (6)$$

其中:

d_{i-1} 和 d_{i+1} : 传感器 i 分别距离传感器 i-1 和传感器 i+1 的距离。对于第一个传感器, 计算式如下:

$$P_i = \frac{(d_0 + d_2)/2}{L_{HCE(25^\circ\text{C})}} \quad (7)$$

GB/T

其中：

d_0 ：传感器距离吸热管前端的距离

对于最后一个传感器（假设共有 N 个传感器），计算式如下：

$$P_N = \frac{(d_{N-1} + d_{N+1})/2}{L_{HCE(25^\circ C)}} \quad (8)$$

其中：

d_{N+1} ：传感器距离吸热管末端的距离

从测试结果计算发射率可采用以下几个步骤计算（可选）：

首先计算吸热管外壁的温度：

$$T_{abs,o} = T_{abs,i} - \frac{HL \ln\left(\frac{r_{abs,o}}{r_{abs,i}}\right)}{2\pi k_{abs}} \quad (9)$$

其中：

HL ：集热管对应温度为 T_{abs} 时的热损失 [W/m]

$r_{abs,o}$ ：吸热管（金属管）的外径 [m]

$r_{abs,i}$ ：吸热管（金属管）的内径 [m]

k_{abs} ：吸热管的导热系数[m/°C]

$T_{abs,i}$ ：吸热管的内壁温度 [°C]（也称 T_{abs} ）

注意：吸热管的 $r_{abs,i}$ 和 $r_{abs,o}$ 数据均由制造商提供，以下方程中的玻璃管管径数据情况类似。

其次，计算玻璃套管的内壁温度：

$$T_{gl,i} = T_{gl,o} + \frac{HL \ln\left(\frac{r_{gl,o}}{r_{gl,i}}\right)}{2\pi k_{gl}} \quad (10)$$

其中：

$r_{gl,o}$ ：玻璃套管的外径 [m]

$r_{gl,i}$ ：玻璃套管的内径 [m]

k_{gl} ：玻璃套管的导热系数[m/°C]

$T_{gl,o}$ ：玻璃套管的外壁温度 [°C]

可选——一般情况下，测量点的结果通常为—对数据：集热管热损失 HL 和平均吸热管温度 T_{abs} ，这两者都有相关的不确定度 $u(HL)$ 和 $u(T_{abs})$ 。将热损失 HL 视为温度 T_{abs} 的函数有利于只将 HL 与不确定度相关联，即可以通过以下公式将温度的不确定度 $u(T_{abs})$ 和热损失的不确定度 $u(HL)$ 合并到一个热损失的联合误差 $u_c(HL)$ 中：

$$u_c^2(HL) = u^2(HL) + \left(\frac{\partial HL(T_{abs})}{\partial T_{abs}}\right)^2 \cdot u^2(T_{abs}) \quad (11)$$

譬如，偏导数 $\partial HL(T_{abs})/\partial T_{abs}$ 可以通过多项式插值确定。

4.4.6.2 热发射率（可选）

最后，通过 Forristal 方程计算吸热管的发射率：

$$\varepsilon_{abs} = \frac{HL}{2\pi r_{abs,o} \sigma (T_{abs,o(K)}^4 - T_{gl,i(K)}^4) - HL \frac{1 - \varepsilon_{gl}}{\varepsilon_{gl}} \left(\frac{r_{abs,o}}{r_{gl,i}}\right)} \quad (12)$$

其中：

ε_{gl} ：玻璃的发射率[-]

σ ：史蒂芬-玻尔兹曼常数[]

4.4.7 热损失与发射率曲线模型

采用最小二乘法通过统计拟合来计算热损失 HL 和发射率 ε 的参数，以确定下述的曲线。

4.4.7.1 热损失曲线

由测试结果推导出集热管在各工作温度 (T_{abs}) 下的热损失。热损失采用以下方程表示：

$$HL = a_1 T_{abs} + a_2 T_{abs}^4 \quad (13)$$

系数 a_1 [W/(m°C)] 和 a_2 [W/(m°C⁴)] 为拟合参数。

方程拟合的类型选择温度和温度的四次方是由集热管本身的传热机制决定的，方程中的第一项是指对流散热损失，而第二项是对环境的辐射散热损失。

注意：曲线为经验拟合曲线。

测试报告应包含根据方程（14）在 T_{abs} 测量范围内的实验点与集热管热损失的曲线。

下图给出了一个集热管热损失曲线的示例：

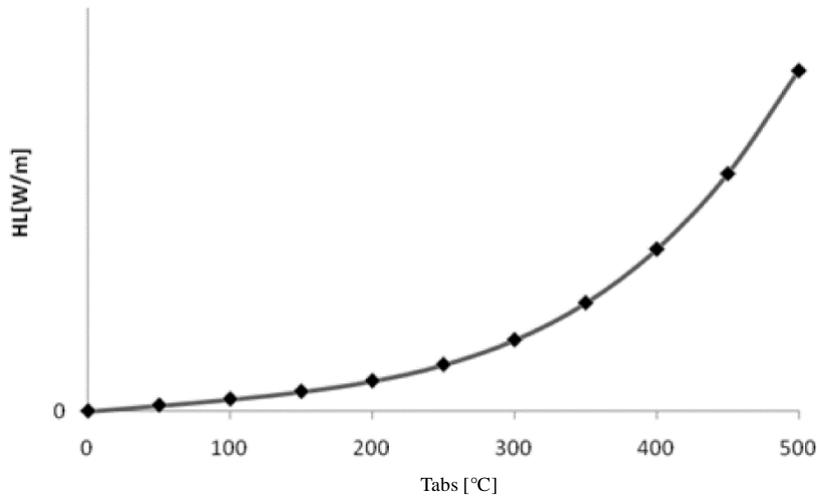


图 2——热损失曲线示例

4.4.7.2 热损失插值

可以通过插值方法获得所需温度范围的集热管热损失结果 HL (T_{abs})。导热油集热管温度的典型值为 250°C、300°C、350°C 和 400°C，熔盐集热管温度的典型值为 250°C、300°C、400°C、500°C 和 550°C。插值时应采用非扭结三次方样条[8]。

T_{abs} 和 HL 成对的测量结果以下被称为扭结。三次样条为分段定义的三阶多项式，每一个多项式在两个相邻的扭结之间确定，因此 N 个扭结对应 N-1 个多项式。多项式集要求包含多个扭结，以保证一阶导数在扭结处连续以及二阶导数在扭结处也连续。根据这些要求，多项式剩下两个自由度可以选择。因此，为选择其余两个自由度通常的做法是要求三阶导数在第二个扭结及倒数第二个扭结处均连续，这一额外的要求也被称为非扭结条件。采用内插时，插值范围不得偏离实际测量值 15K；采用外推时，插值范围不得偏离实际测量 5 K。

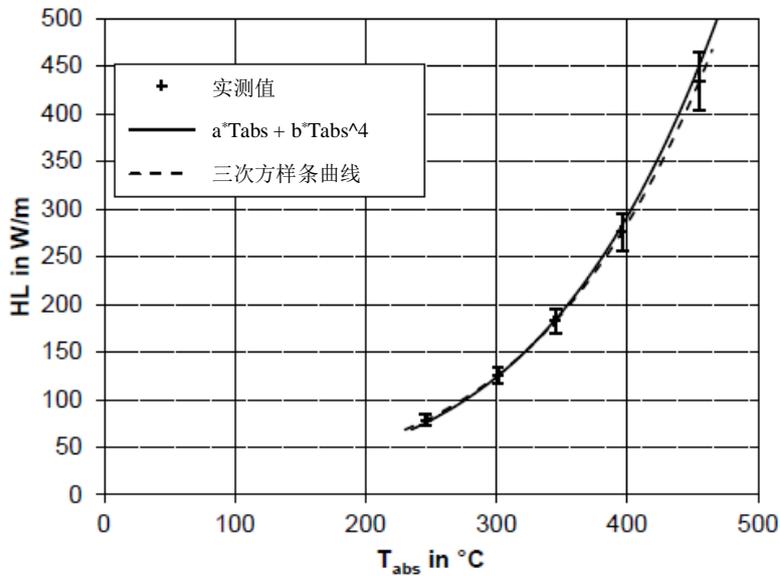


图 3: 描述热损失测量结果的典型图表

4.4.7.3 发射率曲线（可选）

由测试结果推导出集热管在各工作温度 T_{abs} 下的发射率。发射率采用以下方程表示：

$$\varepsilon_{abs} = b_1 + b_2 T_{abs}^2 \quad (14)$$

- 系数 b_1 (W/(m²·°C)) 是吸热器温度 T_{abs} 对应的发射率系数。
- 系数 b_2 (W/(m²·°C²)) 是吸热器温度平方 T_{abs}^2 对应的发射率系数。

测试报告应包含根据方程 (15) 在 T_{abs} 测量范围内的实验点与吸热管发射率的曲线。

注意：本公式不适用于低于最低测量温度的范围。测试过程应记录测量结果、测试期间的电能消耗、环境温度、吸热管及玻璃套管的平均温度。任何异常情况均应在报告中列明，并在报告中附上最终测试条件下受试样品的照片/图形。

4.4.8 测试报告

参见附录 B。

4.5 光学特性测试

本测试的目的在于对太阳能集热管进行光学特性进行表征。

本测试适用于采用槽式技术的太阳能光热发电站，和以此类推采用线性菲涅尔技术的太阳能光热发电站，基本上都适用于槽式集热器或线性菲涅尔集热器中的太阳能集热管。

4.5.1 采用分光光度计表征太阳能玻璃套管和太阳能吸热管光学特性的方法

4.5.1.1 目的

本测试的目的在于测量太阳能光热技术中所使用的材料的光谱半球向反射率和透射率，以便计算吸收率和透射率。本方法采用配备了积分球的分光光度计，同时还具体说明了通过实测光谱数据计算太阳光谱加权数据的方法。

本测试的应用范围为太阳能光热技术（槽式技术和线性菲涅尔技术）中所使用的吸收器材料，以及在同样的技术中带有或不带减反射涂层的玻璃材料。

4.5.1.2 概述

在本方法中，采用积分半球分光光度计在 300 至 2500nm 的光谱范围内对光谱近正交半球向透射率（或反射率）进行测量，并通过 IEC 62862-1-1 中定义的标准太阳光谱分布计算加权平均的太阳能透射率或吸收率。

太阳能吸收率和透射率是评估太阳能光热发电站光学效率的关键参数。本测试方法旨在提供适合于各实验室之间或同一实验室不同时间之间测量结果的比较，以及不同材料之间比较的再现性数据。

注意：对于利用直接太阳辐射的应用情况，应采用 AM（空气质量）1.5D 光谱来确定直接太阳能反射率，可使用 ASTM G173-03 AM 1.5 太阳辐射光谱分布来计算太阳能反射率。

4.5.1.3 仪表

a) 分光光度计

要求使用带有积分球的双光束或分裂分光光度计，需能够在 300 至 2500nm 的太阳能光谱范围内测量试样或材料的光谱特征。其设计应确保试样可以直接与透射和反射球形孔接触，以便入射辐射能够以接近于与试样平面垂直（小于 15°）的方向入射，这样反射辐射中的光谱分量就不会通过积分球的开孔造成损失。另外，必须防止环境光进入到积分球中。

积分球的内部涂有稳定的高反射和散射涂层，如聚四氟乙烯和 BaSO₄ 材料即可满足要求。积分球的开孔面积与球壁加上开孔面积之和的比值必须低于 4%。这一较小的开孔比例确保了采样信号在达到球形积分探测器之前保持信号的完整性，球形积分器的尺寸最好 ≥150 mm。

b) 参考样品

一般情况下，要求提供参考样品和受试样品。使用参考样品是仪器校准和受试样品校准的主要方式。

对于透射率试样（玻璃或玻璃上的减反射涂层），应使用入射辐射作为评估透射光的标准比照。对于透射率非常高的样品，要求进行基准线修正。为此，可采用陷光器、散射黑体材料或将光束屏蔽等手段实现。

4.5.1.4 试样与条件

所需试样的大小取决于积分球的尺寸。试样的尺寸必须足够大，以能够覆盖积分球的试样孔。对于曲面样品，覆盖积分球试样孔的部分基本上应为平面。在此情况下，必须使用特殊的固定器，使得曲面样品和积分球试样孔之间能够完美地调整和吻合。

4.5.1.5 测试程序

a) 测量

对于所有测量，在 30nm-2500nm 的范围内，每 10nm 必须至少记录一个值。

透射率测量：在测量透射率时，用表面涂层及光学特性与积分球壁相同的物品表面将试样孔和位于积分球背后的参考孔盖住。在不放入任何样品的情况下记录一次光谱曲线，然后再在积分球试样孔光束入口上放置样品，再记录一次光谱曲线。

计算光谱透射率时，当光束仅穿过玻璃套管的一个面，或玻璃套管的半环形切片部分时，采用以下公式：

$$\tau(\lambda) = (S_{\lambda} - Z_{\lambda}) / (100_{\lambda} - Z_{\lambda}) \quad (15)$$

GB/T

其中：

S_λ ：当样品位于光束入口时记录的信号

Z_λ ：样品光束被不透明材料遮挡时的零基准线读数

100_λ ：光束入口以上未放入样品时记录的读数线。

吸收率

要获得吸热管样品的吸收率，需要记录半球向反射光谱，然后通过从 1 中减去的方式获得，即在下式中，

$\tau_\lambda = 0$ ：

$$\alpha_\lambda + \tau_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (16)$$

反射率测量：

按照以上描述记录零基准线读数，以及将标准件放置在试样孔上时的 100% 读数。将样品放在试样孔上，记录样品的光谱反射率。将光谱分量纳入到反射率的测量中。

采用以下公式计算波长为 λ 时样品的光谱反射率 $\rho(\lambda)$ 。

$$\rho(\lambda) = [(S_\lambda - Z_\lambda) / (100_\lambda - Z_\lambda)] \rho'_\lambda \quad (17)$$

其中：

S_λ ：记录的样品读数

Z_λ ：零基准线读数

100_λ ：100% 线读数；

ρ'_λ ：波长为 λ 时经校准的标准件或参考样品的光谱反射率。

b) 太阳能吸收率与太阳能透射率的计算

太阳能透射率与太阳能吸收率按照 IEC 62862-1-1 中的以下方程根据相应的太阳光谱加权进行计算：

$$\alpha_s = \frac{\int_{300}^{2500} \alpha(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int_{300}^{2500} E(\lambda) d\lambda} \quad \tau_s = \frac{\int_{300}^{2500} \tau(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int_{300}^{2500} E(\lambda) d\lambda} \quad (18)$$

其中：

$\alpha(\lambda)$ ：光谱吸收率

$\tau(\lambda)$ ：光谱透射率

$E(\lambda)$ ：太阳光谱辐射分布。

注意——对于利用直接太阳辐射（如太阳能光热发电站）的应用情况，应采用 AM 1.5D 光谱来确定直接太阳能吸收率和透射率。

4.5.1.6 测试报告

测试报告应包括以下信息：

- 受测试材料的完整规格，如样品大小、厚度、表面轮廓（如有）等。
- 太阳能透射率、吸收率或反射率，或所有者三项，有效位数为 0.001 或 0.1%。
- 所用仪表的规格，如商业仪器的制造商名称与型号，包括修订、附录、积分球大小等。其他仪器必须详细说明，包括其对准确度的估计。
- 测量中所使用的标准件的完整规格。
- 用于计算太阳能光学性能的参考太阳光谱分布。

4.5.2 无损光学特性测试（可选）

4.5.2.1 目的

本测试的目的在于对槽式真空集热管的光学性能进行测试，沿集热管长度的不同位置测量玻璃套管的太阳能光谱透射率以及吸热管的反射率。

本方法在于获得测量的绝对值，并不依赖于与其他集热管（不管是否为商用）的比较结果。

4.5.2.2 注意：在测试之前，必须按照制造商的指示对样品进行清洁。

a) 实验室设备：

应采用具备以下技术规范的仪器对光谱反射率和光谱透射率进行准平行方向和准正交方向上测量：

- 光谱范围：每 10nm 为 300nm 至 2500nm。
- 近似正交入射：与法线呈 6° 至 15° 的入射角。
- 最小受光角 12.5mrad。

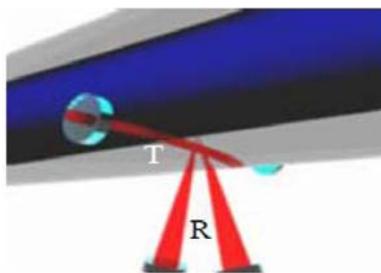


图 4——测量原理

4.5.2.3 测试条件

对于周围空气温度，不同测试点所允许的最大变化范围为 $20^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 。

将温度传感器放置在距地面最小高度为 2m 的位置，避免靠近加热源或冷却源（如通气口、外壁、热源附近等）。

4.5.2.4 程序

- 应沿集热管长度方向至少在 10 个位置测量光谱反射率和光谱透射率。

4.5.2.5 测试结果与报告

应使用以下表达式计算：

$$\alpha_s = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \rho(\lambda_i)) E(\lambda_i) \Delta\lambda_i}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda_i) \Delta\lambda_i} \quad \tau_s = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda_i) E(\lambda_i) \Delta\lambda_i}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda_i) \Delta\lambda_i} \quad (19)$$

其中：

$\rho(\lambda_i)$ ：实测光谱反射率[-]

$\tau(\lambda_i)$ ：实测光谱透射率[-]

λ_i ：实测波长[nm]

$\Delta\lambda_i$ ：相关波长的差值[nm]

$E\lambda_i$ ：直接太阳辐射 AM 1.5 D 的光谱分布（如可以使用 ISO 9845-1 或 ASTM G173 标准）。 S_{λ_i} 必须通过实测波长对应的结果进行插值确定，并应适当地将对应波长的差值进行求和。

测试报告中至少应出现以下内容：

- 关于测试条件：
 - 环境温度
 - 实测波长
 - 所用设备
 - 入射方向与法线的角度
 - 受光角
 - 太阳能吸收率与太阳能透射率
 - 用于积分的太阳光谱
 - 测量的准确度
 - 测量点的尺寸
 - 样品清洁方式

4.5.3 光学效率测试（可选）

4.5.3.1 目的

集热管光学效率测试的目的在于通过在测量期间评估流体工质流经集热管时的焓值增量来测量集热管对太阳辐射的光学吸收率，测试在一个配有日光模拟器的实验室测试台上进行。本测试为无损测试，并在一次测量中获得集热管的光学效率，包括吸收率、透射率以及集热管的有效长度。

本测试适用于技术规格和光源均匀性均与受测集热管长度和直径相符的日光模拟器，即应保证受测样品对日光模拟器的辐射有较高的拦截因子。

4.5.3.2 概述

光学效率测试是测量流体力工质吸收的能量与入射辐射的能量之比，要求使用标准样品作为测量参考件，该参考件要求是几何尺寸相似、性能稳定的任何衍生二次或工作标准的集热器。测试可以是一组几何尺寸相似样品的对比测试，测试方式为测量在环境温度下的水/水蒸汽流体的焓值变化。在测量期间，集热管总是一直接收恒定量的聚焦光辐射。

测试要求聚焦光辐射的宽度小于吸热管的直径，长于试样的整体长度，并且沿焦线长度方向的强度分布均匀。

测试评估是基于冷态集热管的，所以需要对集热管在典型工作温度下的几何尺寸变化进行修正，譬如确定因波纹管伸长或压缩以及波纹管移动所引起的集热管有效长度的变化。

4.5.3.3 仪表

日光模拟器应具有以下特征：

- 辐射范围：在实际运行中，日光模拟器应能够在集热管表面上产生至少为标称辐射 10% 的平均辐射（对于吸热管直径 $>40\text{mm}$ 的集热管，当前范围最低辐射应为 $0,5\text{ kW/m}$ 。）
- 空间均匀性：任何时候在集热管受光面积上任一点的辐射值与整个集热管长度方向上平均辐射值的差别不得超过 $\pm 10\%$ 。
- 时间稳定性：任何时候辐射值（10s 间隔内的平均值）与平均辐射率的差别均不得超过 $\pm 5\%$ 。
- 光谱：日光模拟器的辐射光谱分布应与空气质量 $\text{AM}=1.5$ 时的太阳光谱分布近似相同。

4.5.3.4 试样与条件

在测试之前，应按照制造商的说明对样品进行清洁，并按照制造商的指示安装波纹管保护罩（原装零件，如可用）。

应测量记录以下数据：

- 集热器的几何尺寸
- 集热管进口处的流体温度
- 集热管出口处的流体温度
- 传热流体的流速
- 在直射辐射计上的辐射读数
- 周围环境温度
- 玻璃套管温度（可选）

4.5.3.5 程序

测试过程包括在日光模拟器恒定照射条件下，流经受测集热管的冷流体（冷水）的焓值变化。日光模拟器光照下整个集热管长度内各光学效率值组合的测试结果，包括玻璃套管、玻璃套管涂层、吸热管涂层的性能。

将受测集热管放置在测试平台的焦线处，测量室温下流经集热管的水的焓值变化，压力损失忽略不计。对参考件集热管的焓值测量应在同一天进行，通过参考测量可以获得了光学效率的参考值。

焓值变化应在稳定状态下测量，通常应持续 5-15 分钟。

如果在测量期间，实验参数与其平均值的偏差不超过表 2 中规定的限值，则视为集热管在测量期间内处于稳定状态。为了确定是否存在稳定状态，应将每个连续 10s 内的参数平均值与测量期间（须为固定时段）的平均值进行比较。

表 2——测量期间实测参数的允许偏差

参数	与平均值的允许偏差
测试辐射	± 1 %
周围气温（室内）	± 5 K
液体质量流速	± 1.5 %
集热器进口处的流体温度	± 0.2 °C

4.5.3.6 集热管的能量输出计算

受测样品（ Q_{sample} ）和参考件（ $Q_{\text{reference}}$ ）通过下式计算光学效率的比值：

$$Q = m_{\text{wf}} * c_p(t_m) * (t_{\text{out}} - t_{\text{in}}) \quad (20)$$

$$\Gamma_{\text{sample}} = Q_{\text{sample}} / Q_{\text{reference}}$$

在测试期间，计算整个测试时间段内的平均值 r 。

在计算过程中，应使用与流体平均温度对应的比热容。如果测量的是体积流量，则密度应为体积流量计中读取流体温度的对应值。

集热管中的初始流体温度与环境温度之差不应超过 10K，否则应考虑辐射换热效应，并且热损失不可忽略。

如果参考件集热管的光学效率 $\eta_{\text{rec,opt,reference}}$ 已知，则受测样品的光学效率 $\eta_{\text{rec,opt,sample}}$ 应为：

$$\eta_{\text{rec,opt,sample}} = \Gamma_{\text{sample}} * \eta_{\text{rec,opt,reference}} \quad (21)$$

注意——由于随着温度的增加集热管会膨胀变长，因此集热管的几何长度和有效长度也会成为温度的函数发生变化。因为集热管主要是在高温条件下运行，所以可将光学效率建模为几何效应的函数。

光学效率采用以下公式近似：

$$\eta_{\text{rec,opt}} \approx \alpha \tau \psi_{\text{net}}, \quad (22)$$

其中：

ψ_{net} 为集热管的有效长度与几何长度之比 $\psi_{\text{net}} = l_{\text{active}}/l_{\text{rec}}$ 。

假设集热管的吸收率 α 与玻璃套管的透射率 τ 随着温度保持恒定，并且仅考虑正交入射的辐射，则光学效率的变化是由作为温度函数的集热管有效长度 l_{active} 和几何长度 l_{rec} 引起的。

$$\eta_{\text{rec,opt}}(T) \approx \alpha_T \frac{I_{\text{active}}(T)}{I_{\text{rec}}(T)} \quad (23)$$

4.5.3.7 测试报告

测试报告应包括以下内容：

- 对本标准的参考
- 设备说明
- 受试样品及其制备过程的描述和说明
- 参考件样品及其制备过程的描述和说明
- 测试结果：
 - 每根集热管的功率输出；
 - 基于集热管受光面积的相对光学效率 r_{sample} 数值。
- 测试装置的详情

执行人
测试装置示意图 如需要，按照客户的规定清理玻璃套管外表面的方法 波纹管罩管的描述或图片

- 日光模拟器测试

	吸收功率 (W)	流速 (kg/h)	入口水温 (°C)	环境温度 (°C)	相对于参考件的 光学效率 (-)
参考件					
受测样品					

4.6 集热管的耐久性测试

4.6.1 概述

有关太阳能集热管材料的信息参见附录 A，包括其技术特性和尺寸。

4.6.2 减反射玻璃套管涂层耐久性测试

4.6.2.1 玻璃套管表面上的静态耐磨测试

4.6.2.2 目标

耐磨测试属于加速老化测试。耐磨测试旨在模拟部件在整个使用周期内因玻璃表面的清洗、风沙或其他机械力而引起的玻璃涂层的机械磨损，本测试方法与 ISO 9211-4 类似。

本测试方法采用耐磨橡胶对干燥玻璃管进行摩擦，耐磨橡胶的类型、玻璃表面上施加的载荷以及纵向的摩擦循环等因素都有可能对减反射涂层的降解和脱落。

耐磨头以低压在玻璃表面上来回直线运行。耐磨头的材料包括橡胶矩阵内部的研磨料。一个循环定义为研磨头往复运动一次。耐磨头的运动会产生研磨条纹，从而使光线的透射受到影响。

在经摩擦的表面区域上通过测量透射率来评估处理后材料的透射率，并与原先值进行比较。

4.6.2.3 测试设备与装置

本测试为在玻璃表面上耐磨橡胶的线性往复运动，通常采用带有计数器的装置进行，在整个表面以恒定的方式实现橡胶的运动。

在每次测试循环前后，按照 5.5.1 采用 UV-VIS_NIR 分光光度计进行透射率测量。

测试设备包括：

- 受试玻璃管或玻璃片的固定器
- 附着在设备上纵向来回移动样品的耐磨橡胶固定器
- 符合 MIL-E 12397 的耐磨橡胶（直径 6mm）
- 重量/压力控制器
- 喷砂玻璃表面或砂纸 P600。
- 测试设备如图 5 所示。

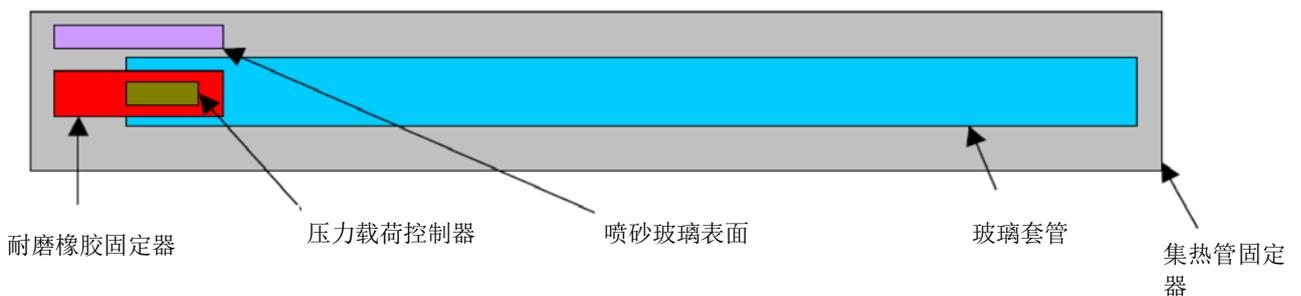


图 5——耐磨设备的草图

喷砂玻璃表面用于测试前后耐磨橡胶表面的重新修整，以便获得可重复的测试结果。

除图 5 草图外，如果使用玻璃管进行测试，则测试设备还必须能够旋转集热管（参见图 6）。旋转的结果必须为产生至少 $45 \times 40 \text{ mm}^2$ 的玻璃测试表面以供测量透射率。

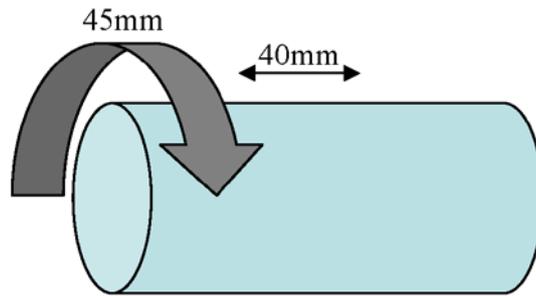


图 6——集热管玻璃管或玻璃片在耐磨设备中旋转的示意图

应将受测样品放在固定器中，确保其安装牢固。将耐磨橡胶固定器降低，使其与带有减反射涂层的玻璃表面接触，并沿垂直玻璃表面的方向上施加载荷，载荷可能因施加的力或压强而发生变化。

4.6.2.4 测试条件

在测试之前，必须按照制造商的规范对玻璃管进行清洗，同时还必须分析待处理表面的光学特性，测量试样的透射率。报告中必须载明所采用的测量方法（透射率测量标准正在研究中）。

— 程序

耐磨橡胶的制备：在每次测试之前，按照制造商的指示在喷砂玻璃表面或砂纸上制备至少 5 个循环的耐磨橡胶，其目的在于通过清除之前测试中残留在橡胶上的微粒，创造可重现的初始条件。同时还必须将研磨橡胶表面与玻璃表面平行，以便整个橡胶的底面与玻璃接触，能确保表面平行的最简单方式就是将喷砂玻璃表面直接用于制备研磨橡胶。在准备研磨橡胶后，必须将耐磨橡胶和喷砂玻璃表面上的所有松散材料去除，如采用加压空气或光滑刷子等。

磨损：在测试中，将研磨橡胶在玻璃上运动 $n=5、10、20、50$ 和 100 次循环。对于每一次循环，进行三次测试。一次循环包括两段冲程，即一个来回。

测试时，在样品表面上采用耐磨橡胶重复干磨（纵向循环方式）。在达到预定循环次数后，将集热管旋转一个角度，其所转角度对应的弧线长度与耐磨橡胶的宽度相等，然后再开始研磨。每次旋转后，在研磨之前都需要对耐磨橡胶进行重新处理。通过多次重复本程序以生成一个至少 $45 \times 40 \text{ mm}^2$ 面积，或满足透射率测量所需面积的受测区域，供透射率测量。

本测试在以下条件下进行：

- 符合 MIL-E-12397 规范（直径 6mm）或集热管制造商同意的类似规范（磨损性不降低）的耐磨橡胶。
- 最低载荷重量， $350\text{g} \pm 10\text{g}$ （可与制造商约定其他重量）。
- 最低长度为 $40\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 的纵向研磨直线距离。
- 频率：7 次循环/分钟

- 受测面积 $45 \times 40 \text{ mm}^2$ ，或满足透射率测量所需面积。
- 环境温度条件。

必须在相同受测面积的样品上进行相同次数的循环后测量透射率。

应至少在同一根集热管或同一个样片的三个不同位置进行该测试。如果为集热管，建议在两端和中间进行该测试。

4.6.2.5 评估

在相同面积的样品上进行多次循环后，处理后的表面必须通过喷头喷洒去离子水和醇类（如乙醇、异丙醇等），并用超细纤维布或棉布清理。

然后进行首次目视检查，对减反射涂层的损坏或脱落进行评估。

最后，采用与研磨前相同的方法测量透射率，对样品表面的光学性能进行评估。必须在受测面积以及所有处理后面积的中心位置测量透射率。透射率应至少在处理后的表面上重复测量三次。

测试报告中必须给出测试前后的实测透射率。

当一组循环到下一组循环的透射率不再降低时（即涂层完全脱落），整个测试即可停止。

4.6.2.6 测试报告

参见附录 A。

4.6.3 抗冲击性测试（可选）

4.6.3.1 目的

本测试的目的在于确定集热管耐受因冰雹引起的冲击影响的程度。

本测试可以采用冰球和钢球两种不同的方式进行。由于冰球和钢球因撞击而损失的能量不同，因此两种方式分别对应不同的定量目的。

冰球在冲击时会损失能量，因此冲击效果更接近冰雹，所以冰球是抗冲击性测试的首选方法。

另一方面，由于钢球不会因冲击变形而导致能量受损，所以钢球是确定冲击所产生的破坏极限的方法。

4.6.3.2 采用冰球进行的抗冲击性测试

注意——推荐采用冰球测试，因为其与冰雹冲击的实际情况更接近。

4.6.3.2.1 设备

- a) 模具应按照要求的直径采用制作圆形冰球的适当材料制成，尺寸大小如表 3 所示。
- b) 温度控制在 $-10^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 的冷冻箱。
- c) 用于在 $-4^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 的温度下储存冰球的冷冻箱。

- d) 能够按照表 3 中的所示的速度 $\pm 5\%$ 驱动冰球，并且能够在规定的冲击区域内撞击集热管的发射器。
- e) 用于支撑与冰球预计轨迹相垂直受测冲击表面的坚固框架。固定器必须足够坚固，以便减少冲击时出现的任何扭曲或变形。
- f) 用于确定冰球质量、标准误差为 $\pm 2\%$ 的秤。
- g) 用于测量冰球速度、标准误差为 $\pm 2\text{m/s}$ 的仪器。速度传感器与样品的距离不得超过 1m。

4.6.3.2.2 冰球

冰球应用水制成，并且不含任何气泡或肉眼可见的任何裂缝。冰球的直径应为 25mm，应在 $-4^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 的温度下进行测试。

表 3——冰球测试质量与速度

直径[mm]	质量[kg]	速度[m/s]	动能[J]
25	7.53	23.0	2.0

4.6.3.2.3 程序

- a) 按照测试所需尺寸，用模具和冷冻箱制作充足的冰球，包括发射器初始调试过程使用的冰球。
- b) 检查各冰球是否有裂缝，并测量其直径和质量。可接受的冰球应符合以下标准：
 - 无肉眼可见的裂缝
 - 直径在要求值的 $\pm 5\%$ 范围内
 - 质量在要求值的 $\pm 5\%$ 范围内
- c) 将球放在储存容器中，存放至少 1 小时后才可使用。
- d) 确保与冰球接触的所有发射器表面均处于环境温度。
- e) 根据步骤 (g) 发射多个测试冰球，并将发射器调整为采用速度传感器控制的发射速度，以便测量位置的冰球速度为表 3 中给定的测试速度的 $\pm 5\%$ 。
- f) 在环境温度下，在规定的固定支架中安装集热管，使其表面与冰球的轨迹相垂直。
- g) 将冰球从储存容器中取出，并将其放在发射器中。调整冲击点，并向其射击。从冰球取出模具到其撞击受测样品表面之间的时间间隔不得超过 60s。

4.6.3.2.4 测试条件

冲击点与集热管端部的玻璃金属熔封处的距离须介于 5cm 和 10cm 之间。

测试程序首先用从最低发射速度开始，或从制造商规定的速度开始。各速度的测试程序应包括四次射击，每次射击都应垂直于玻璃管的表面。

4.6.3.3 用钢球进行的抗冲击性测试（又称破坏极限量测试）

4.6.3.3.1 设备

集热管必须水平安装在支架上，支架必须足够结实，以将冲击造成的变形或偏转控制在可忽略范围内。

4.6.3.3.2 钢球

钢球质量必须为 $150\text{g} \pm 10\text{g}$ ，并且必须用于以下测试高度：0.4 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m、1.2 m、1.4 m、1.6 m、1.8 m 和 2.0 m。

4.6.3.3.3 测试条件

钢球用来模拟强烈冲击。可通过钟摆模拟水平冲击，或将钢球从规定的高度落下模拟垂直冲击，球的下落高度为下落点与冲击点所在水平面之间的垂直距离。

第一个冲击点距离集热管端部不应超过 10cm，并且每次当钢球释放时，必须移动几毫米。必须从第一个测试高度下落 10 个钢球，然后从第二个测试高度下落 10 个钢球，以此类推，直至达到最大测试高度（最大高度应符合制造商的规范，如无规定则为 2m）。管子出现一定的损坏后，或者在最大测试高度上耐受 10 个钢球的冲击后，本测试结束。

4.6.3.3.4 评估

应检查集热管是否有破损或损坏，尤其应检查吸热管颜色的变化以及/或吸气剂的状况，以便检测任何真空泄露。

检查结果必须记录在案，同时应记录钢球的下落高度或者球的撞击速度，以及造成集热管破损的撞击次数。

4.6.3.3.5 测试报告

参见附录 A。

4.6.4 冷凝测试

4.6.4.1 目的

本测试的目的在于确定持续暴露在冷凝水气氛中，太阳能集热管玻璃套管的减反射涂层（AR 涂层）的降解的可能性。

本测试旨在评估在模拟的自然气候加速老化条件下减反射层的耐候性。

本测试根据 ISO 6270-2:2005 标准执行。

4.6.4.2 测试条件

4.6.4.2.1 试样的制备

应从太阳能光热发电站的集热管供货商处获取测试样品。建议样品的尺寸为 100 mm x 100 mm，也可使用其它大于 100mm x 100mm 的尺寸，但需在测试报告中明确载明。将样品放置在测试室中，边沿朝下、凸面朝上。

测试之前，应根据 4.5 中所述的光学特性测试测量样品是否存在缺陷，以及测量样品的透射率。

测试之前，必须按照制造商的建议将样品清洁干净。

4.6.4.2.2 仪表或设备

测试设备应符合 ISO 6270-2:2005 标准第 5 节中规定的要求。设备内部应采用化学惰性材料制成，并且保温。

设备必须保存在温度恒定在 21 至 25℃ 的室内，并应配备连续温度数据采集系统。

4.6.4.2.3 程序

样品应按照 ISO 6270-2:2005 标准第 4 节和第 6 节的要求放置在恒定温度 40℃ 以及相对湿度 100% 的环境中。

4.6.4.2.4 评估与测试报告

测试报告应包括以下内容：

- 300-2500nm 波长范围内的太阳光谱加权透射率损失
- 300-2500nm 波长范围内的起始和最终透射光谱图
- 目视或显微镜检测到的降解效果。

4.6.5 外部/内部热冲击测试

目前正在制定测试程序，但尚未进行验证，且任何第三方机构也不提供。相关参考程序会在本标准的后续版本中提供。

4.6.6 热稳定性测试

4.6.6.1 目的

本测试的目的是建立一个认证程序，用于评估太阳能集热管吸热器涂层在空气和/或真空中的热稳定性。

本测试适用于采用槽式技术的太阳能光热发电站，和以此类推采用线性菲涅尔技术的太阳能光热发电站，只要都将选择性涂层应用于吸热管。

4.6.6.2 概述

本测试包括在真空和/或空气条件下将选择性涂层暴露在高温环境中（超过运行温度大约 100℃）。如果运行温度高于 400℃，则最高测试温度应得到制造商的同意（必要时，测试温度可以低于运行温度约 100℃，但在此情况下，应延长测试时间）。

太阳能光热技术中太阳能集热管的运行温度非常高，并且通常是处于真空条件运行下，这些条件都可能会在吸热管表面上产生化学和物理变化，导致光学性能的损失。热损失、太阳能吸收率和发射率均为用于描述吸热管选择性涂层稳定性或降解的参数。

4.6.6.3 无损测试

需要测试的集热管应水平安装在测试支撑架的固定器中。

使集热管达到某一温度的方法有几种。譬如，根据焦耳效应，通过电加热元件，或通过附着在插入吸热管内部的铜管上的 IR 电阻对集热管进行加热。

加热测量包括 4 个步骤：

- 以 5°C/分钟的温度加热直至达到运行温度。
- 在钢管的温度均匀后，在运行温度下保持 48 小时。
- 在 24 小时内线性加热至测试温度。
- 在达到规定次数的加热循环后，对集热管进行光学测量

冷却程序包括：

- 切断加热器电源或热源来源。
- 将集热管冷却至室温。

上述情况下的无损光学测量包括热损失测量和光学特性测量（参见对应部分）。

4.6.6.4 测试条件

测试室应适当保温或与测试室周围可能影响测量数据采集的其他电子设备保持足够的隔离。同时，所有电子设备都必须接地。

测试样品周围空气的温度必须为 $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。环境温度传感器应布置在距离样品不超过两米的位置放置，并且应确保其不受热点或气流的影响。

在等待期间以及测量期间，应根据以下要求对测量温度的稳定性进行监测：

表 4——等待期间的监测参数

要监测的参数	稳定性要求
吸热管温度	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
玻璃套管温度	$\pm 5^{\circ}\text{C}$
环境温度	$20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$

测试温度应在正常运行温度以上大约 100°C ，或本测试规定的其他温度。最高测试温度必须得到制造商的同意。

光学特性的测量将在 1000 小时后进行，或者可以以其它时间间隔进行测量，但必须在测试报告中载明。应在 1000 小时后对集热管进行热损失与光学特性的测量。

附录 A（资料性附录）测试报告格式

A.1 集热管说明（由制造商提供）

A.1.1 一般规格

制造商	
型号	
序列号	
产品类型	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 商用产品 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 原型
制造年份	

A.1.2 受试集热管的尺寸与构造参数

长度	
受光长度 工作温度下的受光长度	
吸热管外径 吸热管内径 吸热管材料	
玻璃套管的长度	
玻璃套管的外径	
玻璃套管的厚度 玻璃套管的材料	
重量	

A.1.3 光学参数与热力参数（标称温度）

吸热管的热发射率	
吸热管的太阳能吸收率	
玻璃套管的太阳能透射率	

A.1.4 运行参数

最大运行温度	
最大运行温度 环形真空的压力	

A.2 测试结果：静态耐磨测试

A.2.1 测试条件

施加的压力或重量：bar/或 g
纵向研磨直线长度：mm

GB/T

测试表面面积: mm²

环境温度: °C

A.2.2 结果

目视检查

- 初始太阳能透射率:
- 使用的测量方法:
- 最终太阳能透射率:
- 初始透射率与最终透射率的差值:
- 不确定度及计算方法:

A.3 测试结果: 抗冲击性测试: 方法 1

A.3.1 测试条件

- 球直径 (mm)
- 球质量 (g)
- 测试条件:
- 垂直冲击 (落球)
- 水平冲击 (钟摆)

A.3.2 程序

下落高度 (m) 冲击次数

A.3.3 测试结果

严重破损

A.4 测试结果: 抗冲击性测试: 方法 2

A.4.1 测试条件

- 球直径 (mm)
- 球质量 (g)
- 球速度 (m/s)

A.4.2 程序

冲击次数

A.4.3 测试结果

严重破损

A.5 耐久性测试条件与结果概述

测试	条件	耐久性	测量程序	接受标准
冷凝测试 ISO 6270-2:2005	相对湿度 100% 40±3°C	480h	测试前后的透射率	太阳光谱加权透射率损失 $\Delta\tau <$ 待定

GB/T

耐磨测试	MIL-E-12397 橡胶，最低重量 350±10g，冲程长度 1.5”，频率 7 次循环/分钟，测试表面面积 45 x 40 mm ²	200 次循环	5、10、20、100、200 次循环时的透射率。当涂层完全脱落时测量停止	待定
抗冲击性测试				

附录 B (资料性附录)

热损失测试报告

B.1 集热管说明

B.1.1 一般规格

制造商	
型号	
序列号	
产品类型	<input type="checkbox"/> 商用产品 <input type="checkbox"/> 原型
制造年份	

B.1.2 尺寸与构造参数

集热管长度	
工作温度下的集热管受光长度	
吸热管外径 吸热管内径 吸热管材料	
玻璃套管的长度	
玻璃套管的外径	
玻璃套管厚度 玻璃套管材料	
集热管重量	

B.1.3 光学与热参数

标称温度下吸热管的热发射率	°C 温度下
吸热管的太阳能吸收率	
玻璃套管的太阳能透射率	

B.1.4 运行参数

最大运行温度	
最大运行压力 环形真空的压力	

B.1.5 界面

集热管的照片	
--------	--

B.2 测试结果

GB/T

B.2.1 测试装置详情

执行人:	
测试装置示意图/说明: 确定温度传感器所在位置的距离: 如必要/适用, 按照客户的规定清理玻璃套管外表面的方法	

B.2.2 热损失测试

测试目标温度 (°C)	环境温度 T_a (°C)	吸热管平均温度 T_{abs} (°C)	吸热管温度的不确定度	玻璃套管的平均温度 T_{gl} (°C)	热损失 HL (W/m)	热损失的不确定度 u_{HL} (W/m)	吸热管发射率的计算结果	发射率的不确定度

不同吸热管温度下单元长度的热损失与相关误差的示意图

B.2.3 热损失结果对吸热管温度的线性拟合

$HL = a_1 T_{abs} + a_2 T_{abs}^4$			
参数	值	单位	不确定度
$a_1 =$			
$a_2 =$			

不同吸热管温度下计算发射率与相关误差的示意图

B.2.4 发射率数据对吸热管温度的线性拟合

$\epsilon_{abs} = b_1 + b_2 T_{abs}^2$			
参数	值	单位	误差
$b_1 =$			

GB/T

b ₂ =			
------------------	--	--	--