CSTA

太阳能光热产业技术创新战略联盟标准

T/CSTA 23—2026

太阳能热化学氢热联产装置性能测试方法

Performance test method for solar thermochemical hydrogen and heat cogeneration device

2026-11-02 发布　　2026-12-02 实施

太阳能光热产业技术创新战略联盟 发 布

目　　次

前言 II
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 总体要求 2
5 测试方法 6
6 测试报告 11
附录 A（规范性）测试仪器与计量装置信息记录表 13
附录 B（资料性）测试记录表 14

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。

本文件由太阳能光热产业技术创新战略联盟提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院大学、南京师范大学、中国石油大学（北京）、中国科学院工程热物理研究所、北京理工大学、首航高科能源技术股份有限公司、国家电投集团生产经营支持中心、青岛地铁集团有限公司。

本文件主要起草人：王宏圣、隋军、王瑞林、东晓虎、孔慧、温珍姬、刘泰秀、刘锋、马腾宇、袁建丽、赵建平、赵海天、张超宇。

本文件首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至太阳能光热产业技术创新战略联盟秘书处（邮箱：cnste@vip.126.com）。

太阳能热化学氢热联产装置性能测试方法

1 范围

本文件规定了太阳能热化学氢热联产装置性能测试的总体要求、测试方法和测试报告。

本文件适用于室内太阳模拟条件下的太阳能热化学氢热联产装置。

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/T 11062—2020 天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 太阳能热化学氢热联产装置 solar thermochemical hydrogen and heat cogeneration device

由太阳能驱动含碳燃料和水的热化学转化过程，并通过透氢膜反应器实现氢气与高温供热介质联产的装置。

3.2 累计产氢量 total hydrogen production

在规定测试工况和规定计量周期内，太阳能热化学氢热联产装置输出的氢气累计总质量。

3.3 太阳能热化学转化效率 solar thermochemical conversion efficiency

在规定测试工况和规定计量周期内，太阳能热化学氢热联产装置通过热化学反应获得的净化学能增量与输入至热化学转化环节的太阳能能量之比，以百分数表示。

3.4 装置稳定运行时长 duration of stable operation

在规定统计周期内，太阳能热化学氢热联产装置满足规定稳定运行状态判定条件的有效运行时间之和。

3.5 累计产热量 total heat output

在规定测试工况和规定计量周期内，太阳能热化学氢热联产装置透氢膜反应器滞留侧高温供热介质中水蒸气相对于装置入口水参考状态的焓增量累计值。

3.6 高位热值 higher heating value

规定量的燃料与氧气完全燃烧时所释放出的热量。在燃烧反应发生时，压力保持恒定，所有燃烧产物的温度降至与规定的反应物温度相同的温度，除燃烧中生成的水在该温度下全部冷凝为液态外，其余所有燃烧产物均为气态。

[来源：GB/T 11062—2020，3.1]

3.7 高温供热介质 high-temperature heat-supply medium

由透氢膜反应器滞留侧输出的高温混合气体，其供热组分主要为水蒸气，并可含有二氧化碳、一氧化碳、氢气、甲烷及其他气体组分。

3.8 有效太阳能输入功率 effective solar energy input power

进入太阳能接收器或气化反应器的太阳能功率。

3.9 规定计量周期 specified measurement period

在规定测试工况下，用于累计产氢量、太阳能热化学转化效率或累计产热量测定的预先确定的连续时间范围。

3.10 有效计量时段 valid measurement interval

规定计量周期内，装置满足稳定运行状态判定条件且测量数据完整、有效的连续时间段。

3.11 规定统计周期 specified statistical period

用于统计装置稳定运行时长的预先确定的连续时间范围。

4 总体要求

4.1 一般要求

4.1.1 太阳能热化学氢热联产装置性能测试应在规定的测试边界、测试环境和测试工况下进行。

4.1.2 测试边界应包括太阳能输入边界、燃料和水输入边界、透氢膜反应器渗透侧输出边界以及滞留侧高温供热介质输出边界。

4.1.3 测试前应确定测试目的、测试工况、规定计量周期、规定统计周期、数据采样间隔、热值基准和热量计算参考状态。同一组对比测试应采用相同的测试边界和数据基准。除另有规定外，本文件所述压力均为绝对压力。

4.1.4 测量仪器或计量装置的输出单位与本文件规定的计算单位不一致时，应进行单位换算。体积流量换算为质量流量时，应采用相应介质的物性参数和状态参数；采用标准状态体积流量时，应明确基准温度和基准压力。换算方法和参数应记录。

4.1.5 透氢膜反应器滞留侧和渗透侧出口流量应以出口混合气体总质量流量表示。气体组分分析仪能够测定水蒸气体积分数时，各气体组分体积分数应按湿基表示，并根据出口混合气体总质量流量、各组分体积分数及其摩尔质量确定各组分质量流量；不能测定水蒸气体积分数时，除水蒸气外的气体组成应按干基表示，水蒸气质量流量按5.4.2确定，其余气体组分质量流量应根据扣除水蒸气后的气体质量流量和干基组成确定。

4.1.6 燃料高位热值应按相应燃料适用的现行标准方法确定。装置入口水和滞留侧出口水蒸气的比焓应根据实测温度和绝对压力，由标准水和水蒸气物性数据确定，数据来源应在测试报告中注明。

4.1.7 有效太阳能输入功率应为实际进入太阳能接收器或气化反应器的太阳能功率，不应以太阳模拟器输入电功率或额定电功率代替。

4.2 测试仪器及测点布置

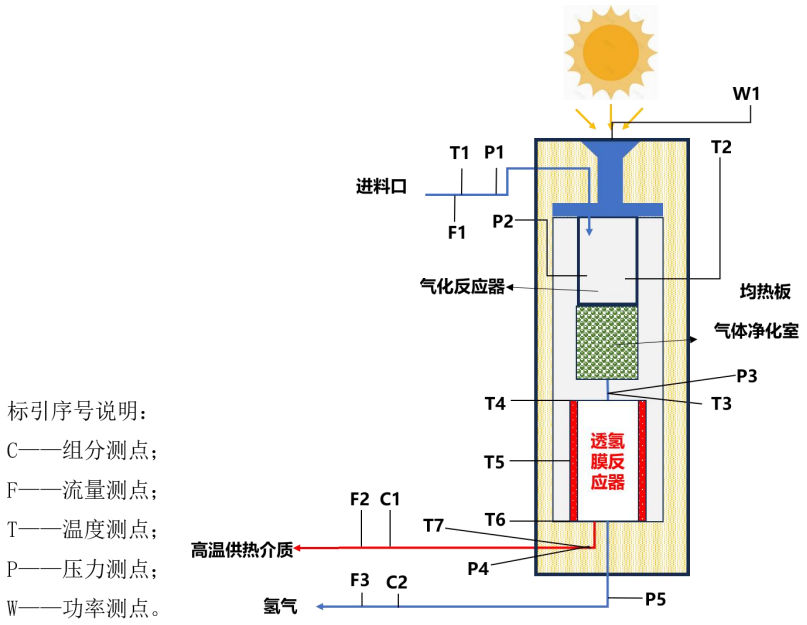
4.2.1 基本要求

主要测试仪器和计量装置的量程及最大允许误差应符合表1的规定。不同规格装置应根据被测参数的预计变化范围选择相应量程，其最大允许误差不应大于表1规定值。测点位置见图1。

表 1 主要测试仪器和计量装置技术要求

仪器或计量装置名称	基准装置量程	最大允许误差
温度传感器	0 ℃~1000 ℃	±1.0 ℃
压力传感器（P1～P4）	0 MPa~10 MPa	±0.5%FS
进料计量装置	生物质-水浆料：0 g/h～300 g/h； 甲烷：0 g/h～30 g/h	±2.0%读数
滞留侧出口质量流量计	0 g/h~300 g/h	±2.0%读数
渗透侧出口质量流量计	0 g/h~50 g/h	±2.0%读数
气体组分分析仪	各组分0%～100%	±1.0%读数
光功率计	0 kW~1 kW	±2.0%读数
环境温度传感器	0 ℃~50 ℃	±0.5 ℃
风速仪	0 m/s~5 m/s	±0.05m/s
数据采集系统计时功能	不小于规定统计周期	±0.1%测量值
压力传感器（P5）	0 MPa~0.2 MPa	±0.5%FS

注：FS表示满量程（full scale）。表中量程以4.4.2所列基准装置为例；测试不同规格装置时，应根据相应额定参数和最大测试负荷选择适宜量程。渗透侧压力测量应采用与实际工作压力范围相适应的绝对压力传感器；采用低于基准示例压力的渗透条件时，应重新选择适宜量程，并确保测量误差满足测试要求。



标引序号说明：
C——组分测点；
F——流量测点；
T——温度测点；
P——压力测点；
W——功率测点。

图 1 太阳能热化学氢热联产装置测点布置图

4.2.2 温度测量

4.2.2.1 装置温度应采用温度传感器测量。
4.2.2.2 温度测点应至少设置在装置进料口（T1）、气化反应器核心反应区域（T2）、气体净化室出口（T3）、透氢膜反应器前端（T4）、中部（T5）、尾端（T6）以及滞留侧出口（T7）。

4.2.3 压力测量

4.2.3.1 装置压力应采用压力传感器测量。
4.2.3.2 压力测点应至少设置在装置进料口（P1）、气化反应器内部（P2）、气体净化室出口（P3）、透氢膜反应器滞留侧出口（P4）以及渗透侧压力测量位置（P5）。

4.2.4 进料计量

4.2.4.1 燃料和水的进料量应采用与物料形态和进料方式相适应的计量泵、质量流量控制器或其他具有计量功能的进料装置进行计量。
4.2.4.2 装置入口进料计量点统一标记为F1。采用多个独立进料支路时，各支路应分别计量，并记录各支路的进料方式和进料量。

4.2.5 出口流量测量

4.2.5.1 透氢膜反应器滞留侧出口（F2）和渗透侧出口（F3）应分别设置质量流量计。
4.2.5.2 F2测量滞留侧高温供热介质总质量流量，F3测量渗透侧出口混合气体总质量流量。

4.2.6 气体组分测量

4.2.6.1 透氢膜反应器滞留侧出口（C1）和渗透侧出口（C2）应设置气体组分取样点，并采用气体组分分析仪测量气体组成。
4.2.6.2 测量组分应至少包括H_2、CO、CO_2、CH_4以及其他对物料衡算或性能指标计算有影响的气体组分。气体组分分析仪具备水蒸气测量能力时，应同时测量水蒸气体积分数。

4.2.7 有效太阳能输入功率测量

有效太阳能输入功率应采用光功率计测量，测点标记为W1。光功率计的测量位置应能够表征实际进入太阳能接收器或气化反应器的太阳能功率。

4.2.8 环境参数测量

4.2.8.1 环境温度应采用环境温度传感器测量，环境温度测点应设置在距装置外表面1 m～2 m、距地面1 m～1.5 m且空气自由流通的位置，并避开太阳模拟器直接辐照、装置热辐射、热排气及空调送风口。
4.2.8.2 空气流速应采用风速仪测量，测点宜设置在装置受光口、气化反应器和透氢膜反应器附近具有代表性的位置。

4.2.9 数据采集

4.2.9.1 性能测试应配置数据采集系统，同步记录温度、压力、进料量、出口流量、有效太阳能输入功率及其他连续测量参数。
4.2.9.2 数据采集系统应采用统一时间基准，并具备满足测试要求的计时功能。

4.3 测试环境要求

太阳能热化学氢热联产装置的性能测试应在环境条件相对稳定的场所进行。

a）环境空气温度应处于8 ℃～39 ℃范围内；单个有效计量时段内环境温度最大值与最小值之差不应超过4 ℃；

b）无规定强制对流条件时，装置周围空气流速平均值不应大于0.5 m/s；在单个稳定工况的数据采集期间，空气流速最大值与最小值之差不应超过0.4 m/s；

c）测试场所的通风、空调和尾气排放系统不应使气流直接吹向装置受光口、气化反应器、透氢膜反应器、连接管路和温度测点；

d）同一测试工况期间，通风、空调和尾气排放设备的运行状态应保持一致。

4.4 测试工况

4.4.1 基本要求

性能测试应按照预先确定的测试工况进行。测试工况应至少明确燃料种类和组成、进料方式及各进料支路进料量、有效太阳能输入功率、气化反应器目标反应温度、装置目标工作压力、透氢膜反应器目标工作温度、滞留侧和渗透侧压力、透氢膜两侧允许压差以及最低氢分压差。

4.4.2 额定工况

4.4.2.1 额定工况应为装置设计文件或制造商技术文件中预先确定的、用于表征装置额定性能的一组运行参数。同一型号装置的额定工况应唯一且可复现。基准装置额定工况示例见表2。

表 2 基准装置额定工况示例

参数	额定值
燃料种类	生物质、甲烷
进料方式	生物质-水浆料与甲烷分别进料
生物质进料量	20 g/h
水进料量	180 g/h
生物质-水浆料总进料量	200 g/h
甲烷进料量	20 g/h
有效太阳能输入功率	0.5 kW
气化反应器目标反应温度	800 ℃
装置反应侧工作压力	5.0 MPa
透氢膜反应器目标工作温度	允许工作温度范围：300 ℃~450 ℃ 目标工作温度：400 ℃
透氢膜反应器滞留侧压力	5.0 MPa
透氢膜反应器渗透侧压力	1 atm

注：基准装置中，生物质粉末与水混合制成浆料后采用计量泵输入，甲烷采用质量流量控制器输入。

4.4.2.2 不同规格或不同处理能力的装置，其燃料种类、进料方式、各进料支路额定进料量、有效太阳能输入功率、额定氢气输出量和额定高温供热介质输出量应根据装置设计能力确定。气化反应器目标反应温度和装置反应侧工作压力应根据装置设计文件或制造商技术文件确定；透氢膜反应器运行参数应根据膜组件设计参数确定。

4.4.2.3 额定工况参数应在测试前确定并记录，测试过程中不应根据测试结果重新确定或调整。

4.4.3 规定测试工况

4.4.3.1 为评价装置在不同负荷下的运行性能，可按额定处理能力的50%、60%、70%、80%、100%和110%设置测试工况。110%负荷测试应在装置设计允许并满足安全运行要求的条件下进行。

4.4.3.2 不同规格装置可按相同负荷率设置测试工况，各进料支路进料量和有效太阳能输入功率应根据相应额定工况确定。

5 测试方法

5.1 通用测试程序

5.1.1 测试前准备

测试前应完成下列工作：

a）核对装置技术文件，确定测试工况、规定计量周期、规定统计周期及各项设定值；

b）检查装置本体、受光口、反应器、透氢膜组件、净化单元、管路、阀门、密封件、保温层和安全附件；

c）检查燃料、水、惰性气体、吹扫气体及其他辅助介质；

d）检查测量仪器、进料计量装置、气体取样系统和数据采集系统的校准状态、零点和量程；

e）对承压系统和气体取样系统进行密封性检查；

f）确定燃料高位热值、燃料元素组成、混合进料组成和累计产热量计算参考状态；

g）确认尾气收集、气体报警、通风、泄压和紧急切断系统处于可用状态。

5.1.2 吹扫、升温和升压

5.1.2.1 应采用惰性气体置换装置及管路内空气，直至排出气体中氧气体积分数满足装置安全启动要求。

5.1.2.2 吹扫完成后，应按装置技术文件规定的升温速率和升压速率进行预热和升压。

5.1.2.3 气化反应器温度、透氢膜反应器温度及装置压力达到相应测试工况设定范围后，方可转入5.1.3规定的进料阶段。

5.1.3 进料、工况建立及工况保持

5.1.3.1 启动各进料支路。采用浆料进料时，应保持浆料组成均匀并连续输送；采用多个独立进料支路时，各支路应分别计量。

5.1.3.2 工况建立阶段，应按照4.4规定的测试工况设定各进料支路进料量、装置工作压力、有效太阳能输入功率及透氢膜反应器运行参数，并进行必要的调节，使装置达到规定的目标温度、目标压力及其他运行条件。

5.1.3.3 工况建立后，应保持燃料种类、燃料组成、进料方式、各进料支路进料量、有效太阳能输入功率、装置工作压力及透氢膜反应器运行参数等测试工况设定值不变，并保持进料和太阳能输入连续。测试期间不应发生影响稳定进料的分层、沉降、堵塞、气阻、泄漏或进料中断。

5.1.3.4 透氢膜反应器的温度、压力和压差应处于膜组件规定的工作范围内。

5.1.3.5 在测试工况设定值不变的条件下，控制系统为维持工况进行的正常调节不视为测试工况变更。装置稳定运行状态应按照5.1.4的规定进行判定。

5.1.3.6 运行过程中需要改变测试工况设定值时，应按新的测试工况重新建立运行条件，并重新按照5.1.4的规定进行稳定运行状态判定。

5.1.3.7 运行过程中发生影响稳定运行的异常时，应记录异常情况并进行处理。异常排除后，应重新按照5.1.4的规定进行稳定运行状态判定，相关时段数据应按照5.1.5的规定处理。

5.1.4 稳定运行及数据采集

5.1.4.1 装置在同一测试工况下连续满足下列条件不少于30 min时，可判定达到稳定运行状态：

a）有效太阳能输入以及所有正在运行的燃料和水进料支路连续，未发生非计划中断；

b）气化反应器核心反应区域平均温度与目标反应温度之间的偏差不应超过±20 ℃，且任一有效采样值与该时段平均温度之间的绝对偏差不应超过10 ℃；

c）透氢膜反应器前端、中部和尾端温度均处于规定工作范围内，且任一测点的有效采样值与该测点平均温度之间的绝对偏差不应超过5 ℃；

d）气化反应器内部平均压力与目标工作压力之间的相对偏差不应超过±2%，且任一有效采样值与该时段平均压力之间的相对偏差不应超过±2%；

e）各进料计量装置反馈值或依据校准关系确定的实际进料量，与相应设定值之间的相对偏差不应超过±5%；燃料和水通过同一进料装置输入时，混合物组成保持不变；

f）有效太阳能输入功率任一有效采样值与该时段平均值之间的相对偏差不应超过±5%；

g）滞留侧出口高温供热介质质量流量和渗透侧出口气体质量流量任一有效采样值与各自平均值之间的相对偏差不应超过±5%；

h）渗透侧氢气体积分数最大值与最小值之差不应超过1个百分点；

i）未发生进料中断、物料沉降、管路堵塞、气阻、介质泄漏、异常压降、异常超温、异常超压、膜组件故障、安全保护动作或非计划停机；

j）数据采集系统、进料计量装置及关键测量仪器运行正常，未出现影响测试结果有效性的数据缺失或异常。

5.1.4.2 装置达到稳定运行状态后开始正式数据采集。具体要求如下：

a）单组有效数据采集时间不应少于30 min；规定计量周期大于30 min时，应在整个规定计量周期内连续采集。

b）温度、压力、进料量、出口流量、有效太阳能输入功率、环境温度和空气流速的记录间隔不应大于60 s。

c）气体组分采样间隔应根据分析仪响应时间和分析周期确定，每组有效数据中各主要气体组分的有效测量值不应少于6个。

d）测试中断后，应重新连续满足稳定运行条件不少于30 min，方可重新开始数据采集。

e）累计产氢量、太阳能热化学转化效率和累计产热量在每个测试工况下应取得不少于3组独立有效数据。

5.1.5 数据处理

5.1.5.1 测试数据应采用统一时间基准。气体取样和分析存在传输或响应延迟时，应进行时间同步修正。

5.1.5.2 出现下列情况之一时，相应时段数据无效：

a）环境条件不符合4.3的规定；

b）测试工况发生调整；

c）发生非计划停机、安全保护动作或进料中断；

d）测试仪器或数据采集系统发生故障或数据缺失；

e）主要运行参数不符合5.1.4规定的稳定运行条件。

5.1.5.3 无效时段应记录起止时间及原因，不应计入性能指标计算。

5.1.5.4 累计产氢量、太阳能热化学转化效率和累计产热量应在同一规定计量周期内同步测定，并采用相同的有效计量时段。

5.1.6 测试结束

5.1.6.1 完成规定的测试工况和数据采集后，应按装置技术文件停止进料、降低太阳能输入并进行降压、降温和惰性气体置换。

5.1.6.2 测试结束后应检查装置状态，并记录泄漏、堵塞、膜组件异常等情况。

5.2 累计产氢量

5.2.1 测试参数

5.2.1.1 累计产氢量测试应按5.1的规定进行，计量边界包括透氢膜反应器渗透侧和滞留侧出口。

5.2.1.2 应同步测量或记录下列参数：

a）渗透侧出口混合气体总质量流量及各气体组分体积分数；

b）滞留侧出口高温供热介质总质量流量及各气体组分体积分数；

c）各有效计量时段的起止时间和持续时间。

5.2.1.3 渗透侧和滞留侧出口氢气质量流量应按4.1规定确定。采用含氢吹扫气体时，应扣除吹扫气体带入的氢气量。

5.2.2 结果计算

5.2.2.1 第i个有效计量时段内的氢气平均质量流量应为渗透侧和滞留侧氢气平均质量流量之和。

5.2.2.2 累计产氢量应按式（1）计算

$$m_{\mathrm{H_2}} = \sum_{i=1}^{n} q_{H,i} \cdot \Delta t_i \quad \text{.....(1)}$$

式中：

$m_{\mathrm{H_2}}$——累计产氢量，单位为千克（kg）；

$q_{H,i}$——第i个有效计量时段内装置各出口氢气平均质量流量之和，即渗透侧氢气平均质量流量与滞留侧氢气平均质量流量之和，单位为千克每秒（kg/s）；

Δt_i——第i个有效计量时段的时长，单位为秒（s）；

n——规定计量周期内的有效计量时段总数。

5.3 太阳能热化学转化效率

5.3.1 测试参数

太阳能热化学转化效率测试应按5.1的规定进行，并同步测量或记录下列参数：

a）各入口燃料的实际进料量、组成和高位热值；

b）有效太阳能输入功率；

c）渗透侧出口混合气体总质量流量及各气体组分体积分数；

d）滞留侧出口高温供热介质总质量流量及各气体组分体积分数；

e）采用式（3）计算时，滞留侧出口水蒸气质量流量以及入口水和出口水蒸气的温度、压力和比焓。

5.3.2 结果计算

5.3.2.1 入口燃料和出口可燃产物的化学能应统一采用高位热值计算。

5.3.2.2 入口燃料化学能应包括参与热化学转化的全部碳氢燃料；出口可燃产物化学能应包括渗透侧和滞留侧出口中的H_2、CO、CH_4及其他可燃组分。

5.3.2.3 采用多种燃料时，应分别确定各燃料的质量流量和高位热值；采用混合进料时，应根据混合物进料量和组成确定各燃料的实际进料量。

5.3.2.4 出口各可燃组分质量流量应按4.1规定确定。出口可燃产物高位热值可根据各可燃组分质量分数和相应高位热值计算，也可采用经校准的在线热值仪测定。采用含可燃组分的吹扫气体时，应扣除由吹扫气体带入出口的相应可燃组分。

5.3.2.5 采用含可燃组分的吹扫气体时，应扣除由吹扫气体带入出口的相应化学能。

5.3.2.6 太阳能热化学转化效率计算式应为：

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{products}} \cdot HHV_{\text{products}} - \dot{m}_{\text{reactants}} \cdot HHV_{\text{reactants}}}{\dot{Q}_{\text{s}}} \times 100\% \quad \text{..... (2)}$$

式中：

η——太阳能热化学转化效率，%；

$\dot{m}_{\text{products}}$——透氢膜反应器渗透侧出口和滞留侧出口中可燃产物的等效总质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

HHV_{products}——按照各可燃组分质量分数加权计算的出口可燃产物高位热值，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

$\dot{m}_{\text{reactants}}$——输入太阳能热化学氢热联产装置中参与化学转化过程的碳氢燃料的质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

$HHV_{\text{reactants}}$——输入太阳能热化学氢热联产装置碳氢燃料的高位热值，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

$\dot{Q}_{\text{s}}$——通过太阳模拟器输入装置测试边界的有效太阳能输入功率，单位为千瓦（kW）。

同时输出氢气和高温供热介质时，太阳能热化学转化效率应按式（3）计算：

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{products}} \cdot HHV_{\text{products}} - \dot{m}_{\text{reactants}} \cdot HHV_{\text{reactants}}}{\dot{Q}_{\text{s}} - \dot{m}_{\text{steam}} \Delta H} \times 100\% \quad \text{..... (3)}$$

式中：

$\dot{m}_{\text{steam}}$——集成装置出口水蒸气的质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

ΔH——集成装置入口水与出口水蒸气的比焓差，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

5.4 累计产热量

5.4.1 测试参数

5.4.1.1 累计产热量测试应按5.1的规定进行，并同步测量或记录下列参数：

a）滞留侧出口高温供热介质总质量流量及各气体组分体积分数；

b）装置入口水的温度和压力；

c）滞留侧出口水蒸气的温度和压力；

d）各有效计量时段的起止时间和持续时间。

5.4.1.2 气体组分分析仪能够测定水蒸气体积分数时，应根据高温供热介质总质量流量及各气体组分体积分数确定水蒸气质量流量；不能测定水蒸气体积分数时，应按5.4.2确定水蒸气质量流量。

5.4.1.3 装置入口水和滞留侧出口水蒸气的比焓应根据相应温度和绝对压力确定。

5.4.2 冷凝分离称量法

5.4.2.1 冷凝分离装置应由冷凝器、气液分离器和凝结水收集容器组成，并设置在滞留侧出口。冷凝器出口温度应低于出口气体的水露点，气液分离器应能够有效分离凝结水，收集过程中不应发生凝结水泄漏、夹带或明显蒸发。

5.4.2.2 测试按下列步骤进行：

a）测试前排净冷凝分离装置内残留液体，将洁净、干燥的凝结水收集容器称量并记录初始质量；

b）装置达到5.1.4规定的稳定运行状态后，启动冷凝系统，使滞留侧出口气体通过冷凝分离装置；

c）以有效计量时段的起始时刻作为凝结水收集起点，同步记录冷凝器出口温度、压力和凝结水收集时间；

d）有效计量时段结束时停止收集，将冷凝分离装置中的凝结水全部收集至称量容器，密闭并冷却至室温后称量；

e）凝结水净质量为收集容器终质量与初始质量之差；由凝结水净质量与相应有效计量时段持续时间确定该时段凝结水平均质量流量；

f）冷凝后气体中仍含有水蒸气时，应根据冷凝器出口气体温度、压力及流量确定残余水蒸气质量流量，并与凝结水平均质量流量相加，得到滞留侧出口水蒸气平均质量流量。

5.4.2.3 采用部分气流进行冷凝分离时，应同步测量冷凝支路流量和滞留侧出口总流量，并按流量比例换算为滞留侧出口水蒸气质量流量。

5.4.2.4 凝结液中存在除水以外的其他可凝组分时，应进行相应修正；不能可靠区分时，不应直接采用凝结液质量作为水蒸气质量。

5.4.3 结果计算

5.4.3.1 第i个有效计量时段的水蒸气比焓差应与该时段水蒸气平均质量流量相对应。

5.4.3.2 累计产热量应按式（4）计算：

$$Q_{\mathrm{w}}=\sum_{i=1}^{n} q_{\mathrm{w},i}\cdot\Delta H\cdot\Delta t_i \qquad (4)$$

式中：

Q_{w}——累计产热量，单位为千焦（kJ）；

$q_{\mathrm{w},i}$——第i个有效计量时段内，装置出口水蒸气的平均质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

Δt_i——第i个有效计量时段的时长，单位为秒（s）；

n——规定计量周期内的有效计量时段总数；

ΔH——与相应有效计量时段对应的装置入口水与出口水蒸气平均比焓差，单位为千焦每千克（kJ/kg），各有效计量时段的比焓差不同时，应分别代入式（4）计算。

5.5 装置稳定运行时长

5.5.1 测试要求

5.5.1.1 装置稳定运行时长测试应在规定测试工况下进行，测试前应确定规定统计周期及计时起止条件。

5.5.1.2 稳定运行状态应按5.1.4判定，仅满足稳定运行条件的时段计入稳定运行时长。

5.5.1.3 不得以短时稳定运行结果折算或外推长期稳定运行时长。

5.5.1.4 规定统计周期不小于24 h时，装置稳定运行时长不应小于8 h；装置技术文件、验收要求或合同另有规定时，从其规定。

5.5.2 计时方法

5.5.2.1 以规定统计周期的起始时刻作为计时起点，连续记录装置运行状态。

5.5.2.2 装置满足5.1.4规定的稳定运行条件时，相应时段计入稳定运行时长；不满足时，停止计入，并记录该时段的起止时间和原因。

5.5.2.3 中断原因排除后，应重新连续满足稳定运行条件不少于30 min，方可恢复计时。

5.5.2.4 同一次测试存在多个不连续稳定运行时段时，应分别记录并累计。

5.5.2.5 应记录装置故障、异常报警、安全保护动作及影响稳定运行的外部条件。

5.5.3 结果计算

装置稳定运行时长应按式（5）计算：

$$t_{\mathrm{ops}} = t_{\mathrm{tot}} - N \cdot \overline{\Delta t_{\mathrm{rep}}} \quad \text{.....(5)}$$

式中：

t_{ops}——装置稳定运行时长，单位为小时（h）；

t_{tot}——规定统计周期总时长，单位为小时（h）；

N——规定统计周期内未计入稳定运行时长的时段总数；

$\overline{\Delta t_{\mathrm{rep}}}$ ——规定统计周期内单个不计入时段的平均持续时间，单位为小时（h），应由下式计算：

$$\overline{\Delta t_{\mathrm{rep}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta t_{\mathrm{rep},i}}{N} \quad \text{.....(6)}$$

$\Delta t_{\mathrm{rep},i}$——规定统计周期内第i个不计入时段的持续时间，单位为小时（h）。

当规定统计周期内未出现不计入时段，即N=0时，装置稳定运行时长等于规定统计周期总时长，式（6）不适用。

6 测试报告

6.1 一般要求

测试报告应真实、完整地记录测试装置、测试条件、测量仪器、测试过程、数据处理方法和测试结果，并应能支持测试过程复现和结果核查。

6.2 测试基本信息

测试报告应至少包括下列基本信息：

a）测试委托方、测试机构和装置制造商；

b）装置名称、型号、编号和主要技术参数；

c）测试目的、测试地点、测试日期和测试人员；

d）测试工况名称和编号；

e）燃料种类、物态、组成、热值和进料量；

f）水进料量；

g）目标反应温度、目标工作压力和透氢膜运行条件；

h）有效太阳能输入功率；

i）规定计量周期、规定统计周期和有效数据采集时间；

j）测试环境条件。

6.3 测试仪器与计量装置

测试仪器与计量装置信息应按附录A记录。

6.4 测试数据处理及计算

6.4.1 测试过程、数据处理与结果部分应至少包括：

a）各有效计量时段的起止时间和持续时间；

b）无效时段的起止时间、持续时间和产生原因；

c）累计产氢量、太阳能热化学转化效率、装置稳定运行时长和累计产热量；

d）累计产氢量、太阳能热化学转化效率和累计产热量各组测试结果的算术平均值、最大值、最小值和标准偏差；

e）装置稳定运行时长的规定统计周期、稳定运行总时长、各不计入时段及其原因；

f）测量不确定度及其评定方法；

g）异常情况、处理措施及其对测试结果的影响；

h）采用的计算公式、物性数据来源和数据修正方法。

6.4.2 测试记录和结果汇总参见附录B；完整的时序原始数据宜以电子文件形式作为测试报告附件保存。

附录A
（规范性）

测试仪器与计量装置信息记录表

类别	仪器或装置名称及测点/用途	规格型号与量程	分辨率	准确度等级或最大允许误差	检定/校准信息及备注
温度传感器					
压力传感器					
进料计量装置					
滞留侧出口质量流量计					
渗透侧出口质量流量计					
气体组分分析仪					
光功率计					
环境温度传感器					
风速仪					
数据采集系统					
其他					

附录B
（资料性）
测试记录表

表 B.1 测试基本信息与测试工况记录表

项目	记录内容
受试装置名称	
型号/编号	
制造单位	
测试委托方	
测试机构	
测试地点	
测试日期	
测试人员	
测试目的	
测试边界说明	
测试工况编号	
测试工况名称	额定工况 / 规定测试工况
规定计量周期	
规定统计周期	
数据采样间隔	
燃料种类与物态	气态 / 液态 / 固态 / 混合
燃料组成及分析方法	
燃料高位热值及其来源	
燃料进料方式	独立进料 / 与水混合进料
燃料进料量设定值及实际值	
水进料方式	独立进料 / 与燃料混合进料
水进料量设定值及实际值	
有效太阳能输入功率设定值	
气化反应器目标反应温度	
装置目标工作压力	
透氢膜反应器目标工作温度	
透氢膜反应器滞留侧目标压力	
透氢膜反应器渗透侧目标压力	

透氢膜两侧允许压差	
最低氢分压差	
吹扫气体种类及流量	不采用 / 采用：
气体体积流量基准状态	基准温度：　　基准压力：
气体组成基准	干基 / 湿基
热值基准	高位热值；其他：
累计产热量参考状态	入口水温度：　　入口水压力：
环境条件	环境温度：　　空气流速：
其他影响测试结果的参数	
备注	

表 B. 2 测试数据记录表

	测试项目	符号	单位	数值
测试数据记录	透氢膜反应器渗透侧出口和滞留侧出口中可燃产物的等效总质量流量	$\dot{m}_{\text{products}}$	kg/s	
	出口可燃产物高位热值	HHV_{products}	kJ/kg	
	参与化学转化过程的碳氢燃料的质量流量	$\dot{m}_{reactants}$	kg/s	
	输入太阳能热化学氢热联产装置碳氢燃料的高位热值	$HHV_{\text{reactants}}$	kJ/kg	
	滞留侧出口水蒸气质量流量	$\dot{m}_{\text{steam}}$	kg/s	
	集成装置入口水与出口水蒸气的比焓差	ΔH	kJ/kg	
	有效太阳能输入功率	$\dot{Q}_{\text{s}}$	kW	
	规定统计周期总时长	t_{tot}	h	
	不计入稳定运行时长的时段总数	N	/	
	单个不计入时段的平均持续时间	$\overline{\Delta t_{\text{rep}}}$	h	
	第i个有效计量时段内，氢气平均质量流量	$q_{\text{H,i}}$	kg/s	
	第i个有效计量时段的时长	Δt_{i}	s	
	有效计量时段总数	n	/	
	第i个有效计量时段内，装置出口水蒸气的平均质量流量	$q_{w,\text{i}}$	kg/s	
测试结果	太阳能热化学转化效率	η	%	
	累计产氢量	m_{H_2}	kg	
	累计产热量	Q_w	kJ	
	装置稳定运行时长	t_{ops}	h	
备注				