

ICS xxx  
CCS F xxx

CSTA

# 太阳能光热产业技术创新战略联盟标准

T/CSTA XXXX-YYYY

---

## 太阳能热化学氢热联产装置性能测试方法

Performance Testing Methods for Solar Thermochemical Hydrogen and  
Heat Cogeneration Devices

2026-xx-xx 发布

2026-xx-xx 实施

---

太阳能光热产业技术创新战略联盟 发布

## 目 次

目 次	II
前 言	III
引 言	IV
太阳能热化学氢热联产装置性能测试方法	1
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号、代号和缩略语	2
5 装置介绍	3
5.1 工艺流程	3
5.2 装置设计图	4
5.3 装置实物	5
5.4 装置操作条件	6
6 性能指标及其测试方法	7
6.1 测试步骤	7
6.2 累计产氢量	7
6.3 太阳能热化学转化效率	8
6.4 太阳能热化学转化系统连续稳定运行时间	8
6.5 累计产热量	9
7 测试报告	10
7.1 测试概括	10
7.2 测试基本信息包括	10
7.3 测试数据处理及计算	10
附录 A（规范性）测试设备信息	11
附录 B（规范性）测试数据记录表	12
图 1 太阳能热化学氢热联产装置流程图	3
图 2 太阳能热化学氢热联产装置设计图	4
图 3 太阳能热化学氢热联产装置实物图	5
表 1 太阳能热化学氢热联产装置关键单元及推荐参数	错误！未定义书签。
表 2 太阳能热化学氢热联产装置运行操作条件参考范围	6

# 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、高峰、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。

## 引 言

为落实国家“碳达峰、碳中和”战略部署及能源绿色转型政策要求，氢能作为清洁低碳的二次能源，是能源产业低碳转型、保障能源供应稳定的重要支撑。太阳能热化学氢热联产装置可实现太阳能高效利用，同步完成绿氢制备与热能供应，是绿氢规模化生产的关键技术装备，对推动氢能产业高质量发展、保障国家能源安全具有重要作用。

当前，太阳能热化学氢热联产装置领域已建成代表性示范工程，但行业内缺乏统一的装置性能测试方法，核心性能指标无国家及行业标准支撑，导致企业、工程单位等市场主体在工程应用、成果转化、市场推广中，面临检测口径不一、技术性能无法互认、规模化落地受阻等实际难题。

为统一太阳能热化学氢热联产装置的性能测试方法，规范核心技术指标的评价与考核流程，保障不同市场主体的技术成果可验证、可对比、可推广，特制订本文件。

本文件立足太阳能热化学氢热联产产业一线应用需求，结合工程实践中的成熟技术经验，为太阳能热化学氢热联产装置的性能检测提供统一遵循，直接服务于装置研发优化、行业监管规范及项目落地实施。本文件的实施，对推动行业标准化发展、加速低碳技术规模化应用、助力“双碳”目标落地见效，具有重要意义。

# 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评价的指标体系、测试方法、计算方法及检验评价流程。本文件适用于太阳能热化学氢热联产装置的性能评价，也可适用于同类兼具制氢与供热功能的项目的技术对标及规范化管理。

## 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 2589-2020 《综合能耗计算通则》

## 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

由太阳能驱动热化学转化过程，实现氢气和水蒸气联产的装置。

### 3.2

**累计产氢量** total hydrogen production

在太阳能热化学氢热联产装置运行工况下，在规定计量周期内，太阳能热化学氢热联产装置产生的氢气质量。

**注：**规定计量周期可取一分钟、一小时、一日、一周、一月、一季度或一个典型年。

### 3.3

**太阳能热化学转化效率** efficiency of solar thermochemical conversion performance

在太阳能热化学氢热联产装置运行工况下，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的比值，以百分数表示。

### 3.4

**太阳能热化学转化系统连续稳定运行时间** duration of continuous and stable operation of the solar thermochemical conversion system

在太阳能热化学氢热联产装置实际运行场景中，排除太阳能资源天然间断性、计划内必要维护及不可抗力等非系统自身稳定性缺陷导致的停机时段后，设备持续无故障运行的累计时长。

### 3.5

**累计产热量** total heat output

在太阳能热化学氢热联产装置运行工况下，在规定计量周期内，太阳能热化学氢热联产装置对外输出的热量累计总量

**注：**规定计量周期可取一分钟、一小时、一日、一周、一月、一季度或一个典型年。

### 3.6

**高位热值** higher heating value

高位发热量是指燃料完全燃烧，并当燃烧产物中的水蒸气（包括燃料中所含水分生成的水蒸气和燃料中氢燃烧时生成的水蒸气）凝结为水时的全部反应热。

来源：GB/T 2589-2020《综合能耗计算通则》

## 4 符号、代号和缩略语

下列符号适用于本文件：

$HHV_{\text{products}}$	—太阳能热化学氢热联产装置产出燃料的高位热值，kJ/kg；
$HHV_{\text{reactants}}$	—太阳能热化学氢热联产装置输入碳氢燃料的高位热值，kJ/kg；
$m_{\text{H}_2}$	—累计产氢量，kg；
$\dot{m}_{\text{products}}$	—太阳能热化学氢热联产装置产出燃料的质量流量，kg/s；
$\dot{m}_{\text{reactants}}$	—输入系统参与化学转化过程的碳氢燃料的质量流量，kg/s；
$\dot{m}_{\text{steam}}$	—集成装置出口水蒸气的质量流量，kg/s；
$n$	—规定计量周期内的有效计量时段总数。
$N$	—太阳能热化学氢热联产装置在总运行时长内停机总次数；
$q_{\text{H},i}$	—第 <i>i</i> 个有效计量时段内，氢气平均质量流量，kg/s；
$q_{\text{w},i}$	—第 <i>i</i> 个有效计量时段内，装置出口水蒸气的平均质量流量，kg/s；
$\dot{Q}_{\text{s}}$	—热化学转化过程输入的太阳能功率，kW；
$Q_{\text{w}}$	—累计产热量，kJ；
$t_{\text{ops}}$	—太阳能热化学氢热联产装置连续稳定运行时长，h；
$t_{\text{tot}}$	—太阳能热化学氢热联产装置总运行时长，h；
$\eta$	—太阳能热化学转化效率，%；
$\Delta H$	—太阳能热化学氢热联产装置进出口水蒸气比焓差值，kJ/kg；
$\Delta t_i$	—第 <i>i</i> 个有效计量时段的时长，s；
$\Delta t_{\text{rep},i}$	—太阳能热化学氢热联产装置第 <i>i</i> 次停机所需时长，h；

$\overline{\Delta t_{rep}}$  —太阳能热化学氢热联产装置在总运行时长内单次平均停机时长，h。

## 5 装置介绍

### 5.1 工艺流程

#### 5.1.1 总体流程

太阳能热化学氢热联产装置采用预处理—气化—精制连续化工艺流程，通过多单元协同运行与工艺参数精准调控，实现碳氢燃料向高纯度氢气及高温高压蒸汽与CO<sub>2</sub>混合物的定向转化，装置产出的蒸汽与CO<sub>2</sub>混合气体具有较高焓值，可直接用于供热或稠油热采等场景，工艺流程见图1。固态或液态碳氢燃料与水混合后，经加压装置加压，与气态碳氢燃料混合后输入太阳能驱动的热化学反应器发生热化学转化反应，碳氢燃料可选用单种或多种，工艺流程可根据所选用碳氢燃料的种类做适应性调整，气化反应产物经脱酸、除灰净化处理后进入钯膜反应器，通过钯膜反应器实时分离氢气，同时推动制氢反应持续正向进行。

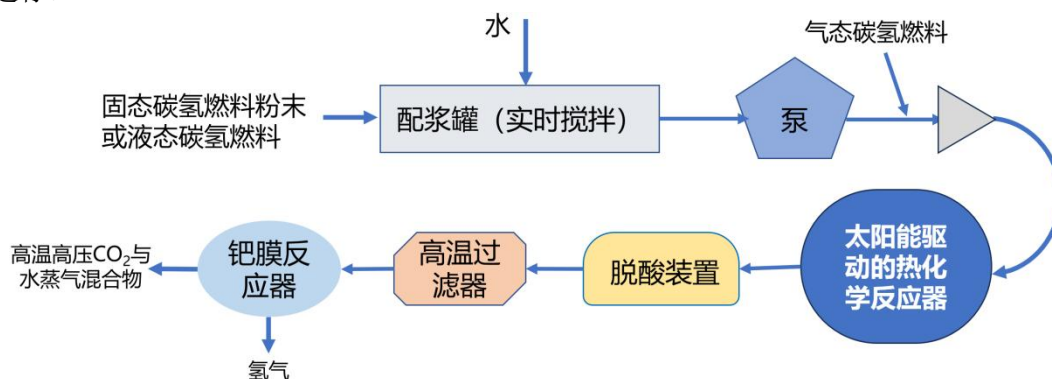


图1 太阳能热化学氢热联产装置流程图

#### 5.1.2 工艺单元要求

##### 5.1.2.1 预处理单元

预处理单元应满足不同形态碳氢燃料的进料要求，具体要求如下：

a) 固态碳氢燃料：应经破碎处理，破碎后粒径应不大于0.05 mm，满足输送稳定性要求；破碎后的物料送入配浆罐，与去离子水按比例混合，通过搅拌装置维持均质浆料状态，防止颗粒沉降分层。

b) 液态碳氢燃料：应经过滤、稳压处理，满足输送与气化反应进料要求。

c) 气态碳氢燃料：应经稳压、计量处理，满足精准配给要求。

##### 5.1.2.2 气化反应单元

预处理后的碳氢燃料浆料经加压装置加压后，与经计量装置精准配给的气态碳氢燃料混合，共同送入由太阳能供热的高温气化反应器。

气化反应过程中，水以过热蒸汽状态参与反应，协同碳氢燃料完成重整转化，推动裂解与重整反应正向进行，抑制重质组分及积碳生成。

##### 5.1.2.3 净化精制单元

净化精制单元应按脱酸、除尘、氢气分离提纯的顺序设置，具体要求如下：

a) 脱酸处理：气化反应器产出的合成气应先送入脱酸装置，采用金属氧化物脱除合成气中的 $H_2S$ 、 $HCl$ 等酸性组分。

b) 除尘处理：脱酸后的合成气应送入高温过滤装置，过滤元件孔径应不大于 $10\mu m$ ，脱除合成气中的固体颗粒物。

c) 氢气分离提纯：经净化处理的合成气送入钯膜分离反应器，反应器工作温度应控制在钯膜反应器的工作温度区间；利用钯材料对氢气的选择性溶解-扩散特性，分离提纯得到高纯氢气，分离后剩余的高温高压混合物可作为副产品输出。

## 5.2 装置设计图

太阳能热化学氢热联产装置设计工况下以聚光太阳能为核心驱动热源，室内性能测试可采用太阳能模拟光源提供等效热输入；采用碳氢燃料太阳能热化学气化转化与氢气梯级分离提纯工艺，通过钯膜对氢气的选择性实时分离，打破热化学反应的化学平衡限制，提升氢气转化率与产率，系统设计图如图2所示。太阳光入射光线可从反应器顶部入射，也可以从侧面入射。装置应设置气化反应器与钯膜原位分离反应器两大核心功能模块，两大模块的运行温度应分别匹配热化学转化与钯膜原位分离的工艺要求，其中气化反应器运行温度为 $600^{\circ}C\sim 1000^{\circ}C$ 区间，钯膜分离模块运行温度应为 $200^{\circ}C\sim 600^{\circ}C$ 区间。气化反应器产出的合成气进入钯膜分离模块前，应经除灰去酸单元处理，脱除固体杂质及对钯膜运行有害的酸性组分，保障装置连续稳定运行。装置采用集成式梯级温控方案实现全流程温度协同管控，为解决钯膜管长度方向的温度梯度问题、保障钯膜反应器内温度场均匀稳定，采用高导热性能的均热元件作为核心温控部件；均热元件应与气化反应器外壳、钯膜反应器壳体充分贴合接触，通过梯级回收气化反应器的富余热量，为钯膜反应器提供温度补偿，保证钯膜全程在额定运行温度区间内稳定工作，同时消除钯膜反应器内的温度梯度与局部热点。均热元件与设备接触面的间隙应填充高性能导热介质，消除接触热阻、构建高效热传导路径；温控集成组件外侧应封装复合保温层，形成主动梯级控温与被动保温相结合的双重温控保障机制。装置进料系统应配套设置浆料罐、浆料泵、气态碳氢燃料减压稳压单元及清水罐：其中浆料罐应配备持续运行的搅拌装置，以维持碳氢燃料与水混合物料的均匀性；浆料泵用于输送固态或液态碳氢燃料与水的混合物料；气态碳氢燃料应经减压稳压至反应压力后输送至反应系统；清水罐应满足装置启停时的使用需求。

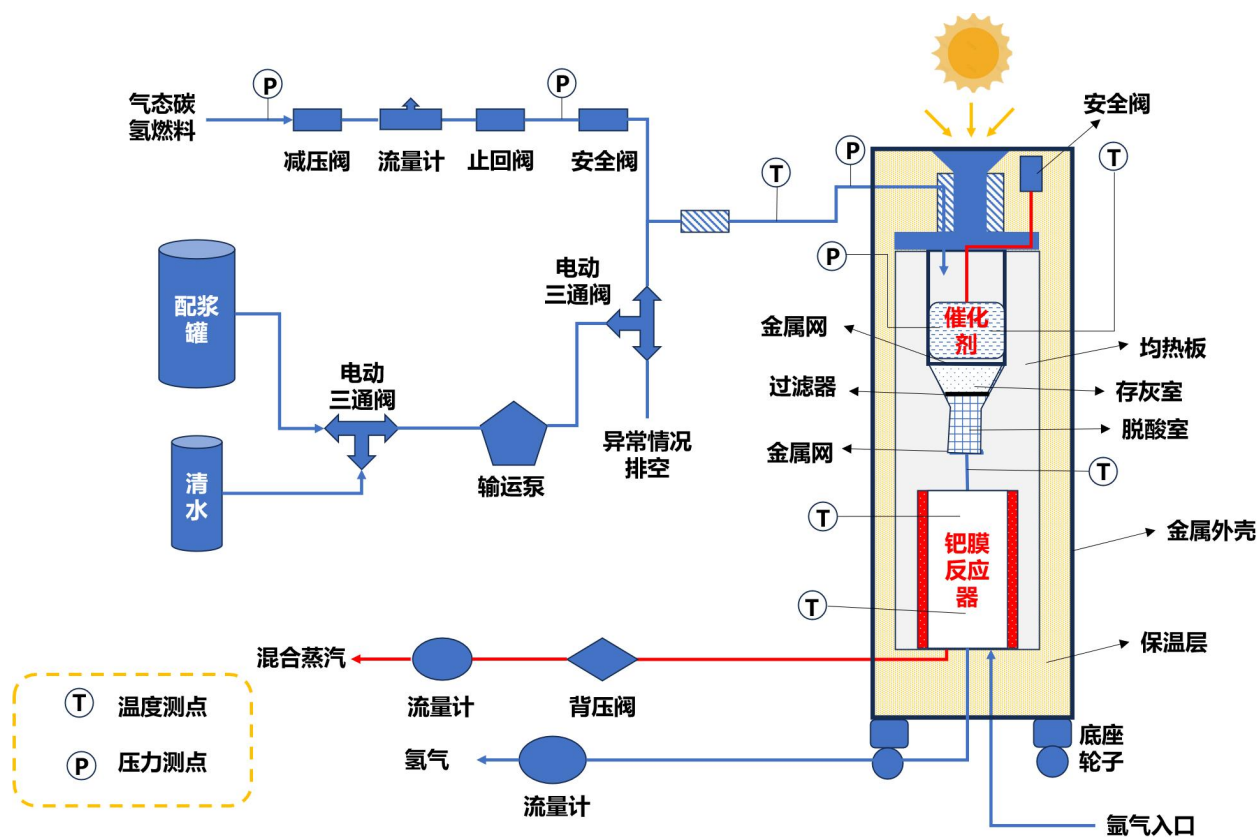


图 2 太阳能热化学氢热联产装置设计图

### 5.3 装置实物

太阳能热化学氢热联产装置实物图示见图3。装置应根据运行工况匹配对应的太阳能输入配套部件：室内运行工况下，装置上方应配套设置太阳能模拟光源（图3所示情况为室内运行工况）；室外运行工况下，装置应将太阳能模拟光源更换为导光装置，满足聚光太阳能的输入与传输要求。



图 3 太阳能热化学氢热联产装置实物图

#### 5.4 装置操作条件

装置关键反应单元及技术的推荐参数如表 1 所示。

表 1 太阳能热化学氢热联产装置关键单元及推荐参数

序号	设备名称	关键技术参数
1	热化学反应单元	最高设计压力：1-30 MPa； 最高耐受温度： $\geq 1000$ °C； 材质：耐高温高压合金
2	钨膜反应单元	最高设计压力：1-30 MPa； 最高耐受温度： $\geq 600$ °C；

	材质：钯、钯银合金、钯金合金等
--	-----------------

装置操作条件参考范围如表2所示。

表 2 太阳能热化学氢热联产装置运行操作条件参考范围

系统单元	运行变量	操作参数
原料种类及配比	碳氢燃料种类	固相：煤炭、生物质、焦炭等； 液相：汽油、柴油等； 气相：甲烷、天然气等。
	固相碳氢燃料-水质量比	1:1-1:40
	液相碳氢燃料-水质量比	1:1-1:50
	气相碳氢燃料-水质量比	1:1-1:50
气化学反应单元	反应压力	0.1-30 MPa（根据所需混合蒸汽压力而定）
	反应温度	600-1000 °C（根据所需混合蒸汽压力而定，且需与气化反应单元保持一致）
钯膜反应单元	反应压力	0.1-30 MPa
	反应温度	200~600 °C

## 6 性能指标及其测试方法

### 6.1 测试步骤

1. 测试前准备。对系统管路、各反应器及密封件的完整性和密封性进行检测，确保各设备可以正常启动。
2. 系统调试与预热。通过惰性气体排净系统内空气，进而缓慢升温到各部件的工作温度。
3. 进料与反应启动。启动进料系统，确保进料稳定。调节太阳能输入功率，维持温度在设定值附近；实时监测系统压力，确保系统压力稳定。
4. 稳定运行与数据采集。系统启动后，持续运行至各项参数稳定后进行数据采集。数据采集内容：各物料的进料质量流量、反应器温度及压力、太阳能输入功率；系统尾气流量及各组份含量等。

### 6.2 累计产氢量

累计产氢量，用于表征太阳能热化学氢热联产装置在运行过程中的产氢量。其定义为：在太阳能热化学氢热联产装置运行工况下，在规定计量周期内，太阳能热化学氢热联产装置产生的氢气质量。累计产氢量计算式为：

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

上式表示累计产氢量，其中各参数的定义及说明如下：

$m_{H_2}$ ——累计产氢量，kg；

$q_{H,i}$ ——第*i*个有效计量时段内，氢气平均质量流量，kg/s；

$\Delta t_i$ ——第*i*个有效计量时段的时长，s；

$n$ ——规定计量周期内的有效计量时段总数。

### 6.3 太阳能热化学转化效率

太阳能热化学氢热联产装置运行过程中，以氢气为热化学储能介质通过热化学转化过程制氢时，为评价其能量转换效果，定义太阳能热化学转化效率为热化学转化过程中输出的净化学能增量与该过程中输入太阳能的比值。太阳能热化学转化效率计算式为：

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

其中，各参数的定义及说明如下：

$\eta$ ——太阳能热化学转化效率，%；

$\dot{m}_{\text{products}}$ ——太阳能热化学氢热联产装置产出燃料的质量流量，kg/s；

$HHV_{\text{products}}$ ——太阳能热化学氢热联产装置产出燃料的高位热值，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，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，kJ/kg；

$\dot{Q}_s$ ——热化学转化过程输入的太阳能功率，可用模拟光源或自然光进行测试，kW；

当装置高度集成时，太阳能除驱动热化学制氢转化过程外，同时用于联产对外供热或驱油用蒸汽生产等。在计算太阳能热化学转化效率时，应从装置总太阳能输入量中，扣除非热化学制氢转化环节（即驱油用蒸汽生产或对外供热）耗用的太阳能，仅以专门驱动热化学制氢转化过程的有效太阳能输入量作为计算基数。此时太阳能热化学转化效率计算式为：

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

其中，新增参数的定义及说明如下：

$\dot{m}_{\text{steam}}$ ——集成装置出口水蒸气的质量流量，kg/s；

$\Delta H$ ——集成装置进出口水蒸气比焓差值，kJ/kg。

### 6.4 太阳能热化学转化系统连续稳定运行时间

太阳能热化学转化系统连续稳定运行时间，特指太阳能热化学氢热联产装置在实际运行工况下，排除太阳能资源天然间断性、计划内必要维护及不可抗力等非系统自身稳定性缺陷导致的停机时段后，设备持续无故障运行的累计时长。

设备运行状态要求：进料供给连续稳定，太阳能供能、能量传输、高压反应等全流程单元无故障报警、无管路/设备泄漏、无核心部件失效等异常情况。

#### 6.4.1 统计排除时段

太阳能热化学氢热联产装置的连续稳定运行受两类核心非稳定性因素影响，相关引发的停机时段需排除在统计范围外，具体包括：

1. 太阳能资源天然间断性导致的停机时段：太阳能供给依赖光照条件，夜间无光照时段、阴雨天或多云等弱光照时段，系统因能量输入不足无法维持反应单元的额定运行状态，需进入停机待命模式，此类因资源特性导致的停机时间不计入统计；

2. 计划内必要维护操作导致的停机时段：为保障系统长期安全高效运行，需定期开展的针对性维护操作，具体包括：反应腔体的积灰清理；脱酸剂更换、进料管路清洗；此类维护属于工艺运行的常规配套流程，与设备故障或工艺缺陷导致的非计划维修有本质区别，其全程耗时均不计入连续稳定运行时间。

#### 6.4.2 计入时段判定条件

为确保指标数据的准确性、可比性与科学性，计入连续稳定运行时间的时段需同时满足以下判定条件：

1. 能量输入稳定：太阳能供给稳定且达到反应所需能量，光照强度能够支撑各反应单元达到额定温度，无因能量供给不足导致的工艺参数波动；
2. 工艺运行连续：进料供给无中断，全流程工艺无临时停机、参数超限等情况，产物产出连续；
3. 设备状态正常：系统各单元无故障报警、无部件损坏、无泄漏等异常，无需开展任何非计划维修或临时应急维护；
4. 数据记录完整：运行期间关键参数实时记录完整，数据波动符合设计要求，无数据缺失或异常偏离情况；
5. 时长统计补充要求：单次系统维护时长视系统需求所定，原则上不超过12 h。

系统连续稳定运行时长计算式如下所示：

$$t_{\text{ops}} = t_{\text{tot}} - N \cdot \overline{\Delta t_{\text{rep}}} \dots\dots\dots(4)$$

其中，各参数的定义及说明如下：

$t_{\text{ops}}$ ——太阳能热化学氢热联产装置连续稳定运行时长，h；

$t_{\text{tot}}$ ——太阳能热化学氢热联产装置总运行时长，h；

$N$ ——太阳能热化学氢热联产装置在总运行时长内停机总数；

$\overline{\Delta t_{\text{rep}}}$ ——太阳能热化学氢热联产装置在总运行时长内单次平均停机时长，由  $\overline{\Delta t_{\text{rep}}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_{\text{rep},i}}{N}$  计算可

得，h；

$\Delta t_{\text{rep},i}$ ——太阳能热化学氢热联产装置统第*i*次停机所需时长，h。

#### 6.5 累计产热量

累计产热量，用于表征太阳能热化学氢热联产装置在运行过程中的装置对外产热量。其定义为：在太阳能热化学氢热联产装置运行工况下，在规定计量周期内，太阳能热化学氢热联产装置对外输出的热量累计总量。累计供热量计算式为：

$$Q_w = \sum_{i=1}^n q_{w,i} \cdot \Delta H \cdot \Delta t_i \dots\dots\dots(5)$$

上式表示累计产热量，其中各参数的定义及说明如下：

$Q_w$ ——累计产热量，kJ；

$q_{w,i}$ ——第*i*个有效计量时段内，装置出口水蒸气的平均质量流量，kg/s；

$\Delta t_i$ ——第*i*个有效计量时段的时长，s；

$n$ ——规定计量周期内的有效计量时段总数；

$\Delta H$ ——装置进出口水蒸气比焓差值，kJ/kg。

## 7 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、评价结论及建议等。

### 7.1 测试概括

主要包括测试目的、测试方法、测试参数、测试地点及测点布置等。

### 7.2 测试基本信息包括

主要包括测试设备信息、测试日期及测试人员等，测试设备信息如附录A所示。

### 7.3 测试数据处理及计算

测试数据处理及计算如附录B所示。

## 附录A

## 测试设备信息

类别	名称	规格型号	生产厂家	精确度	备注
温度测量					
压力测量					
流量测量					
组份测量					
DNI测量					
光功率测量					

## 附录B

测试数据记录表

	测试项目	符号	单位	数值
测试 数据 记录	热化学转化过程燃料产物的质量流量	$\dot{m}_{\text{products}}$	kg/s	
	热化学转化过程燃料产物的高位热值	$HHV_{\text{products}}$	kJ/kg	
	参与化学转化过程的碳氢燃料的质量流量	$\dot{m}_{\text{reactants}}$	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	
	装置出口的水蒸气质量流量	$\dot{m}_{\text{water}}$	kg/s	
	系统进出口水蒸气比焓差值	$\Delta H$	kJ/kg	
	输入太阳能热化学氢热联产装置太阳能功率	$\dot{Q}_s$	kW	
	太阳能热化学氢热联产装置总运行时长	$t_{\text{tot}}$	h	
	太阳能热化学氢热联产装置在总运行时长内停机总数	$N$	/	
	太阳能热化学氢热联产装置在总运行时长内单次平均停机时长	$\overline{\Delta t_{\text{rep}}}$	h	
	第 <i>i</i> 个有效计量时段内，氢气平均质量流量	$q_{\text{H}_2,i}$	kg/s	
	第 <i>i</i> 个有效计量时段的时长	$\Delta t_i$	s	
	规定计量周期内的有效计量时段总数	$n$	/	
	第 <i>i</i> 个有效计量时段内，装置出口水蒸气的平均质量流量	$q_{\text{w},i}$	kg/s	
测试 结果	太阳能热化学转化效率	$\eta$	%	
	累计产氢量	$m_{\text{H}_2}$	kg	
	累计产热量	$Q_w$	kJ	
	太阳能热化学氢热联产装置连续稳定运行时长	$t_{\text{ops}}$	h	
备注				