



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

## PEM 电解槽性能测试方法

Test methods for PEM electrolyzer performance

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

征求意见稿

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

目次

前 言 ..... III

1 范围 .....4

2 规范性引用文件 ..... 4

3 术语和定义 ..... 5

4 基本检查 ..... 8

5 安全测试 ..... 8

    5.1 强度测试 ..... 8

    5.2 气密性测试 ..... 9

    5.3 泄漏率试验 ..... 10

    5.4 内窜测试 ..... 10

    5.5 电气测试 ..... 11

6 性能测试 ..... 13

    6.1 测试条件 ..... 13

    6.2 测试系统 ..... 13

    6.3 测试指标 ..... 13

7 测试报告 ..... 25

附 录 A ..... 27

附 录 B ..... 28



## 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。

本文件由××××提出。

本文件由××××归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# PEM 电解槽性能测试方法

警示：实验时要对试验用介质、试验系统、试验环境的安全性以及试验操作人员的安全防护进行评估。本文件不涉及所有可能的安全问题，使用者有责任采取适当的安全、健康和保护措施，并保证符合国家有关法律法规规定的条件。

## 1 范围

本文件界定了PEM电解槽性能测试方法的术语和定义，规定了功率测试、氢气产量、氢气纯度测试、单位制氢电耗、耐压测试等性能测试方法。

本文件适用于等压式、差压式，额定产氢压力小于或等于10 MPa，单槽额定产氢量大于或等于1 m<sup>3</sup>/h的PEM电解槽的设计制造、检验检测。

额定产氢压力10 MPa以上的PEM电解槽参照执行。

额定产氢量1 m<sup>3</sup>/h以下的PEM电解槽参照执行。

注：在本文件中，除注明外，压力均指表压力。

注：本文件中的氢气、氧气体积为标准状态，即0 °C, 101.325 kPa（绝压）状态下的气体体积。

## 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 4962 氢气使用安全技术规程

GB 32311 水电解制氢系统能效限定值及能效等级

GB 50177 氢气站设计规范

GB/T 150（所有部分） 压力容器

GB/T 3634.2 氢气 第2部分：纯氢、高纯氢和超纯氢

GB/T 3836.1 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求

GB/T 3836.14 爆炸性环境 第14部分：场所分类 爆炸性气体环境

GB/T 6462 金属和氧化物覆盖层厚度测量显微镜法标准全文

GB/T 13306 标牌

GB/T 16921 金属覆盖层覆盖层厚度测量X射线光谱法

GB/T 19774 水电解制氢系统技术要求

GB/T 24499 氢气、氢能与氢能系统术语

GB/T 29729 氢系统安全的基本要求

GB/T 31563 金属覆盖层厚度测量扫描电镜法

GB/T 37562 压力型水电解制氢系统技术条件

GB/T 37563 压力型水电解制氢系统安全要求

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**PEM电解槽** proton exchange membrane (PEM) electrolyzer

以质子交换膜为电解质，以纯水为反应物，通过直流电电解水，在阴极、阳极分别产生氢气和氧气的电化学装置，包括质子交换膜、催化层、多孔传输层、双极板以及密封件等部件，通常由多层上述结构串联或并联构成的装置。

#### 3.2

**质子交换膜** proton exchange membrane

以质子为导电电荷的聚合物电解质膜。

#### 3.3

**膜电极组件** membrane electrode assembly, MEA

由质子交换膜和分别置于其两侧的阳极催化层、阴极催化层组成的组件。

#### 3.4

**多孔传输层** porous transport layer

放置在催化层和流场板之间形成电接触的多孔基层，该层允许反应物和反应产物的穿透传输。

注：多孔传输层也称为气体扩散层（gas diffusion layer, GDL）。

#### 3.5

**双极板** bipolar plate

与多孔传输层接触，起到导电、分配反应物和产物、分隔相邻电解单池的隔板。

#### 3.6

**集流板** current collector plate

用于收集、传导电解用电流的导电板。

#### 3.7

**绝缘板** insulation plate

用于隔离电解槽内部电气连接的由非导电材料制成的平板。

#### 3.8

**端板** end plate

位于电解槽两端，用于固定和支撑电解槽内部组件的结构部件。

## 3.9

**最高单电解池电压** maximum single electrolytic cell voltage

电解槽中电压最高的单电解池电压。

注：单电解池简称单池，也称电解小室。

## 3.10

**阴极** cathode electrode

质子得到电子，发生还原反应，产生氢气的电极。

注：也可称为析氢电极。

## 3.11

**阳极** anode electrode

水分子失去电子，发生氧化反应，产生氧气的电极。

注：也可称为析氧电极。

## 3.12

**内窜** internal infiltration

在电解水过程中，氢气和氧气在电解槽内部发生交叉泄漏，即氢气可能泄漏到氧气侧，或者氧气泄漏到氢气侧的现象。

## 3.13

**额定工况** rated working conditions

PEM 电解槽在制造商规定的额定压力、额定温度、额定电流下对应的运行状态。

## 3.14

**工作范围** operating range

以电解槽额定电流为基准，电解槽可安全运行的最低电流和最高电流与额定电流的比值，以百分比表示。

## 3.15

**产氢压力** hydrogen generation pressure

电解槽出口处氢气的压力。

## 3.16

**冷待机状态** cold steady state

电解槽在没有任何电输入下的状态。电解槽、反应用纯水温度与环境温度一致。

注：此时，控制和安全相关辅助设施处于运行状态，测试系统或制氢系统已完成启动前的准备工作（如置换、吹扫、补水、纯水循环、仪表预热等）。

## 3.17

**冷启动** cold startup

电解槽从冷待机状态直接通电的启动。

## 3.18

**热待机状态** hot steady state

电解槽的温度处在制造商给定的工作温度范围内，但电解槽输入电流为零的状态。该状态下，电解槽可随时输入电流再次启动。

3. 19

**热启动 hot startup**

电解槽从热待机状态直接通电的启动。

3. 20

**启动时间 startup time**

电解槽从待机状态，到额定电流的时间。

注：

冷启动时间：电解槽从冷待机状态达到某一指定状态的时间；

热启动时间：电解槽从热待机状态达到某一指定状态的时间。

3. 21

**变载速度 variable load speed**

单位时间内，电解槽阴阳极之间加载电流值占额定电流值的百分比。

3. 22

**活性面积 active area**

膜电极催化剂覆盖区域的有效反应面积。

注：阴阳极面积不一致时，以面积较小的一侧为准。

3. 23

**电流密度 current density**

电极单位活性面积上通过的电流。

3. 24

**额定电流密度 rated current density**

PEM电解槽标称产氢量对应的工作电流密度。

3. 25

**额定产氢流量 rated hydrogen generation rate**

电解槽标称的单位小时生产的标准状态下的氢气体积。

3. 26

**单电解池电压极差 maximum single cell voltage value difference**

电解槽单电解池电压最高值与最低值之差，简称单池电压极差。

3. 27

**电压效率 voltage efficiency**

电解槽在该运行条件下的热中性电压与电解槽的平均单池电压之比。

3. 28

**电流效率 current efficiency**

电解槽内发生有效电化学反应的电流与电解槽输入电流之比。



## 3.29

**直流电耗 DC power consumption**

生产单位体积氢气（标准状态下）所消耗的直流电量。

## 4 基本检查

4.1 检查 PEM 电解槽产品说明书或设计文件。

4.2 采用目测法检查 PEM 电解槽标签是否按要求粘贴在设计位置，标签的内容是否完整，清晰。

4.3 采用目视法检查 PEM 电解槽的外观结构是否完好，有无损坏、划伤等缺陷。

4.4 应对 PEM 电解槽进行极性检查。对接线端子和电气连接进行检验，确认是否符合要求。在进行正常运行试验时，用电压表检查 PEM 电解槽接线端子极性。

4.5 PEM 电解槽如有巡检线应进行检查，避免短路、断路等现象。

4.6 PEM 电解槽设置的气、水管路接口以及电气接口应符合说明书要求，满足安装运行与检修维护的需要，电气绝缘性能应符合《PEM 电解槽技术要求》第 6.3 节的有关要求。

4.7 PEM 电解槽在测试前应进行接地检查，电解槽接地电阻应小于  $4\ \Omega$ 。

## 5 安全测试

## 5.1 强度测试

试验前，应校核公用元件在试验压力下的稳定性。如不能满足稳定性要求，则应先进行泄漏检查，合格后进行强度试验。强度试验过程中，可以液压、气压或气液组合形式进行。一般应采用液压试验，对于不适宜进行液压试验的电解槽，可采用气压试验或气液组合压力试验。气压试验应按照安全生产管理的有关要求，制定安全措施、设置安全防护及监控装置，并做好全过程的安全监督与管理。

液压试验的试验压力最低值应为设计压力的 1.25 倍，气压试验或气液组合压力试验的试验压力最低值应为设计压力的 1.1 倍。

## 5.1.1 液压试验

## 5.1.1.1 试验介质

去离子水，电导率应小于或等于  $0.1\ \text{mS/m}$ ，且符合 GB/T 37562 的要求。

## 5.1.1.2 试验仪器和设备

压力传感器或压力表

## 5.1.1.3 试验步骤

a) 排净电解槽内的气体并充满去离子水，将电解槽阳极腔、阴极腔的出气口连通并安装压力传感器或压力表，封闭电解槽其它进出口；试验过程中，应保持电解槽观察表面干燥；

b) 向阳极腔和阴极腔通入去离子水，缓慢升压至设计压力，确认无泄漏后继续升压至规定的试验

压力，保压时间一般大于或等于 30 min；然后降至设计压力，保压足够时间进行检查，检查期间压力应保持不变；

c) 电解槽无渗漏，无可见的变形和异常声响为合格。

5.1.2 气压试验或气液组合压力试验

5.1.2.1 试验介质

试验所用气体应为高纯氮气，试验液体与液压试验的规定相同。

5.1.2.2 试验仪器和设备

a) 压力传感器或压力表，b) 检漏液（或其他检漏工具）。

5.1.2.3 试验步骤

- a) 将电解槽阳极腔、阴极腔的出气口连通并安装压力传感器或压力表，封闭电解槽其它进出口，对于气液组合压力试验，电解槽内可保持一定量去离子水；试验过程中，应保持电解槽观察表面干燥；
- b) 向阳极腔和阴极腔通入氮气，缓慢升压至规定试验压力的 10%，保压 5 min，对所有接头和连接部件进行初次检查；确认无泄漏后，再继续升压至规定试验压力的 50%；如无异常现象，其后按规定试验压力的 10%逐级升压，直到试验压力，保压 10 min；然后降至设计压力，保压足够时间进行检查，检查期间压力应保持不变。
- c) 电解槽无异常声响，经检漏液检查无漏气，无可见的变形为合格

5.2 气密性测试

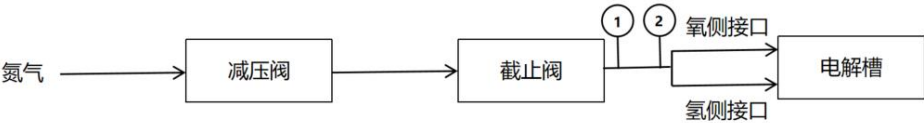
对 PEM 电解槽使用氮气进行气密性试验。气密性试验压力为设计压力，试验开始后逐渐升压，达到规定压力后，保持 30 min，应采用涂刷检漏液的方法，巡回检查所有阀门、法兰或螺纹连接处、焊缝、垫片等密封点，以无漏气为合格。

5.2.1 试验仪器和设备

a) 温度传感器或温度计，b) 检漏液（或其他检漏工具），c) 压力传感器或压力表，d) 高纯氮，e) 计时器。

5.2.2 试验步骤

将电解槽阳极腔、阴极腔的出气口连通并安装压力传感器或压力表（图 1），封闭电解槽其他进出口，向阳极腔和阴极腔通入氮气，压力稳定后关闭进气阀门。试验压力为电解槽设计压力，试验时间为 24 h，记录试验开始和结束的时间，并逐小时记录环境温度、电解槽压力。



1——压力传感器或压力表；

2——温度传感器或温度计。

图 1 气密性试验过程示意图

### 5.3 泄漏率试验

PEM 电解槽测试系统在气密性试验合格后，使用氮气进行泄漏率试验。试验压力为设计压力，试验时间为 24 h。泄漏率试验过程应认真记录系统内气体的温度、压力。分别对阳极腔、阴极腔按式 (1) 进行泄漏率计算。

$$A = \frac{100}{t} \left( 1 - \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} \right) \quad (1)$$

式中：

$A$ ——体积泄漏率，单位为百分比每小时（%/h）；

$t$ ——试验时间，单位为小时（h）；

$T_1, T_2$ ——试验开始、结束气体温度，单位为开尔文（K）；

$p_1, p_2$ ——试验开始、结束电解槽绝对压力，单位为兆帕（MPa）。

### 5.4 内窜测试

电解槽气密性试验合格后，以氮气为试验介质进行内窜试验。等压结构 PEM 电解槽在 0.2 MPa 差压下保持 10 min，差压结构 PEM 电解槽在 1.1 倍最大允许工作差压下保持 10 min。窜气速度  $X_1$  应满足制造商在技术文件中的要求。

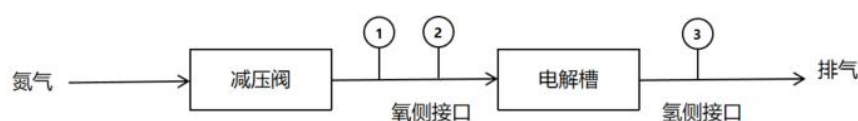
#### 5.4.1 试验仪器

a) 温度传感器或温度计，b) 高纯氮，c) 压力传感器或压力表，d) 流量计。

#### 5.4.2 试验步骤

将电解槽阳极腔进口、阴极腔出口以及冷却液腔（若有）进出口全部封住。在阳极腔的出气口接流量计，由阴极腔的进口通入氮气（图 2），缓慢调整压力至试验压力，期间保持电解槽质子交换膜两侧压力符合测试要求，试验过程中阴极腔压力应稳定不变，保持 5 min 后，在流量计上读取阴极腔向阳极腔的氮气窜气速度  $L_1$ 。

将电解槽阴极腔进口、阳极腔出口以及冷却液腔（若有）进出口全部封住。在阴极腔的出气口接流量计，由阳极腔的进口通入氮气，重复上述步骤，测得阳极腔向阴极腔的氮气窜气速度  $L_2$ 。



1——压力传感器或压力表；

- 2——温度传感器或温度计；
- 3——气体流量计。

图 2 内窜试验过程示意图

5.4.3 数据处理

相应窜气速度  $X_1$  按式（2）计算：

$$X_1 = 2 \times R \times L_1 \tag{2}$$

式中：

- $X_1$ ——阴极腔向阳极腔的窜气速度，单位为毫升每分每平方厘米， $\text{mL}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ ；
- $R$ ——修正系数， 3.74；
- $L_1$ ——阴极腔向阳极腔的氮气窜气速度，单位为毫升每分每平方厘米， $\text{mL}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$ 。

5.5 电气测试

5.5.1 绝缘电阻测试

5.5.1.1 试验仪器和设备

绝缘电阻测量仪

5.5.1.2 试验步骤

在电解槽通水测试前进行绝缘电阻测试，将绝缘电阻测量仪设置到指定的档位，维持至少 5 s 以便获得稳定的绝缘电阻读数。试验过程中，电解槽对地电阻应大于或等于 1 MΩ。

- a) 电解槽集流板与电解槽端板（设计中端板接地）；
- b) 电解槽集流板与电解槽固定点（设计中固定点接地）或其他指定接地点。

表 1 规定了绝缘电阻试验的试验电压取值。

表 1 绝缘电阻试验电压

序号	电解槽最高电压 $V_{\text{stack}}$ 的 1.5 倍/V	试验电压 $V_{\text{IR}}$ /V
1	$(V_{\text{stack}} \times 1.5) \leq 250$	250
2	$250 < (V_{\text{stack}} \times 1.5) \leq 500$	500
3	$500 < (V_{\text{stack}} \times 1.5) \leq 1000$	1000
4	$1000 < (V_{\text{stack}} \times 1.5)$	2500 <sup>a</sup>
<p><math>V_{\text{stack}}</math>——电解槽最高电压，单位为伏特（V）；</p> <p><math>V_{\text{IR}}</math>——绝缘电阻试验的试验电压，单位为伏特（V）。</p> <p>a: 当被测样品的最高电压 &gt; 667 V 时，试验电压可由制造商和买方协商确定。</p>		

5.5.1.3 数据处理

绝缘电阻值按式（3）求得：

$$R=R_x \times 10^6/V_{iR} \dots\dots\dots (3)$$

式中：  
R——绝缘电阻值计算结果，单位为欧每伏特（Ω/V）；  
R<sub>x</sub>——绝缘电阻测量仪读数，单位为兆欧（MΩ）；  
V<sub>iR</sub>——绝缘电阻试验的试验电压，单位为伏特（V）；  
绝缘电阻值的计算结果应保留小数点后一位。

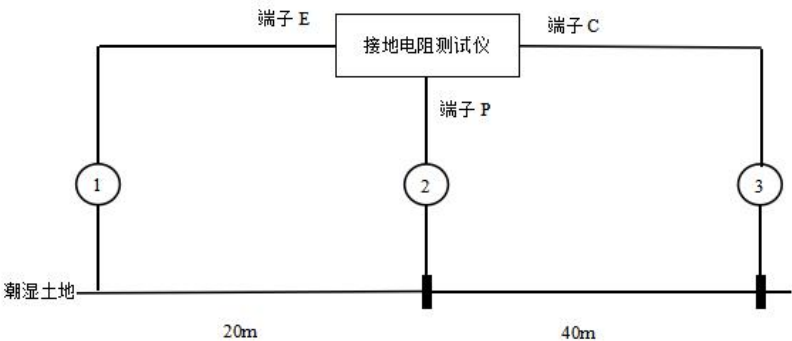
5.5.2 接地电阻测试

5.5.2.1 试验仪器和设备

接地电阻测量仪

5.5.2.2 试验步骤：

- a) 将被测地极用导线与仪器端子E连接；
- b) 在相同直线方向20 m、40 m潮湿土地处，分别插入电位探测针及电流探测针，各接于仪器端子P、C；
- c) 设置“倍率盘”倍数；
- d) 自缓至快摇动仪器手柄，达到约120 r/min，调整“测量标度盘”，指针指于零位时，读数乘以倍率标度，即为接地电阻；
- e) 按测试步骤c)、d)反复测试3~5次，取平均值；
- f) 若有其它适用仪器，可按相应仪器所规定的方法进行测试。



- 1——被测地极；
- 2——电位探测针；
- 3——电流探测针。

图3 接地电阻测试示意图

5.5.2.3 数据处理

接地电阻值按式（4）求得：

$$R = R_x \times X \quad (4)$$

式中：

$R$ ——接地电阻值计算结果，单位为欧（ $\Omega$ ）；

$R_x$ ——接地电阻测量仪读数，单位为欧（ $\Omega$ ）；

$X$ ——“倍率盘”倍率标度。

接地电阻值的计算结果应保留小数点后一位。

## 6 性能测试

### 6.1 测试条件

工作环境温度宜为5℃~45℃，相对湿度宜为1%~75%。

### 6.2 测试系统

典型测试系统应包括水/电/气管理设备，流程示意图见附录B。

### 6.3 测试指标

#### 6.3.1 循环水量

##### 6.3.1.1 试验仪器和设备

a) 水泵，b) 流量计。

##### 6.3.1.2 试验步骤

在测试系统上启动供水水泵，在额定工况与最高电解槽功率输入工况下测量供水量。

#### 6.3.2 氢中氧

##### 6.3.2.1 试验仪器和设备

气相色谱（或气体纯度分析仪）

##### 6.3.2.2 试验步骤

宜采用气相色谱或气相色谱比对过的仪表进行检测。分析仪表的量程宜为0-2 vol.% O<sub>2</sub>。须尽可能减少电解槽出口与分析仪之间的管路长度，使气体到达分析仪的响应时间尽可能短，来保证氢氧浓度可以被快速测量。

在测试系统上运行PEM电解槽，在设定工况下测量电解槽排出的氢中氧的体积百分比。

a) 试验开始前，电解槽出口水温调整到设定温度，波动值小于±3℃；

b) 开始启动操作，按设定工况加载电流值至电流、压力稳定，气液分离出口处取样，经干燥后，记录氢中氧气体浓度。

### 6.3.2.3 数据处理

氢气纯度按式（5）计算：

$$C_{H_2} = (1 - C_{xO}) \times 100 \quad (5)$$

式中：

$C_{H_2}$ ——氢气纯度，单位为百分比（%）；

$C_{xO}$ ——仪表显示氧含量值。

### 6.3.3 氧中氢

#### 6.3.3.1 试验仪器和设备

气相色谱（或气体纯度分析仪）

#### 6.3.3.2 试验步骤

宜采用气相色谱或气相色谱比对过的仪表进行检测。分析仪的量程宜为0-5 vol.%  $H_2$ 。须尽可能减少电解槽出口与分析仪之间的管路长度，使气体到达分析仪的响应时间尽可能短，来保证氢氧浓度可以被快速测量。

在测试系统上运行PEM电解槽，在设定工况下测量电解槽排出的氧中氢的体积百分比。

a) 试验开始前，电解槽出口水温调整到设定温度；

b) 开始启动操作，按设定工况加载电流值至电流、压力稳定，保证氧中氢仪表不被水淹，气液分离出口处取样，经干燥后，记录氧中氢气体浓度。

### 6.3.3.3 数据处理

氧气纯度按式（6）计算：

$$C_{O_2} = (1 - C_{xH}) \times 100 \quad (6)$$

式中：

$C_{O_2}$ ——氧气纯度，单位为百分比（%）；

$C_{xH}$ ——仪表显示氢含量值。

### 6.3.4 产氢流量

#### 6.3.4.1 试验仪器和设备

a) 氢气质量流量计（按需），b) 测试系统。

#### 6.3.4.2 试验步骤

##### 6.3.4.2.1 容积法

若现场具备条件，能安装储存氢气的压力容器，则可采用容积法测量氢气产量。具体测试系统如下图所示。

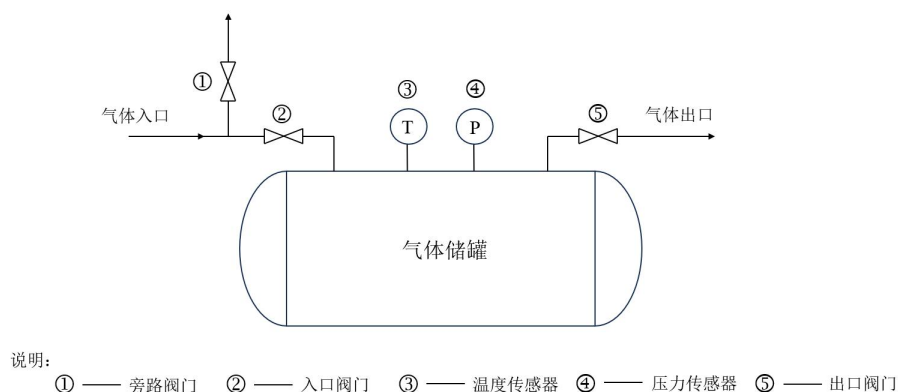


图4 容积法测试示意图

测试前应对气体储罐的容积 $V$ 进行测量，可根据设计图纸进行体积尺寸计算，或采用注水法直接测量储罐的水容积。

记录试验开始时刻 $t_{ts}$ 和此时的储罐内气体压力 $p_{ts}$ 和温度 $T_{ts}$ ，然后打开气体储罐入口阀门，关闭旁路阀门和出口阀门，开始进行气体充灌。

经过一定时间的气体充灌后，关闭气体储罐入口阀门，打开旁路阀门，将系统所产氢气引入其它旁路，记录试验结束时刻 $t_{te}$ 。

静置一段时间，待储罐内部温度均匀后记录储罐内气体压力 $p_{te}$ 和温度 $T_{te}$ 。具体静置时间与试验环境条件和储罐体积相关，根据现场实际情况确定。

根据理想气体的体积计算方法，该稳态运行过程中的平均氢气产量可由下式计算：

$$F_p = \frac{T_0 V}{p_0 (t_{te} - t_{ts})} \left( \frac{p_{te}}{T_{te}} - \frac{p_{ts}}{T_{ts}} \right) \quad (7)$$

式中：

$F_p$ ——实测产氢量，单位为立方米每小时（ $\text{m}^3/\text{h}$ ，标准状态）；

$V$ ——气体储罐的水容积，单位为立方米（ $\text{m}^3$ ）；

$T_0$ ——标准状况的气体温度，单位为开尔文（273.15 K）；

$T_{ts}$ ——试验开始时刻的储罐的气体温度，单位为开尔文（K）；

$T_{te}$ ——试验结束静置后的储罐的气体温度，单位为开尔文（K）；

$p_0$ ——标准状况的气体压力，单位为帕（101325 Pa）；

$p_{ts}$ ——试验开始时刻的储罐的气体压力，单位为帕（Pa）；

$p_{te}$ ——试验结束静置后的储罐的气体压力，单位为帕（Pa）；

$t_{ts}$ ——试验开始时刻，单位为小时（h）；



$t_{te}$ ——试验结束时刻，单位为小时（h）；

6.3.4.2.2 氢气流量计法

现场气体成分和安装条件应满足流量计测量要求。

稳态运行过程中的平均氢气产量为：

$$F_p = \frac{(F_{pe\_H_2} - F_{ps\_H_2})}{t} \tag{8}$$

式中：

$F_p$ ——实际产氢量，单位为立方米每小时（m³/h）；

$F_{ps\_H_2}$ ——试验开始时刻的氢气累积流量，单位为立方米（m³）；

$F_{pe\_H_2}$ ——试验结束时刻的氢气累积流量，单位为立方米（m³）；

$t$ ——试验时间，单位为小时（h）。

6.3.5 产氢压力

6.3.5.1 试验仪器和设备

PEM电解槽测试系统

6.3.5.2 试验步骤

- a) 将电解槽连接至PEM测试系统；
- b) 达到额定工况后，稳定15 min，记录电解槽氢侧出口附近的气体压力作为产氢压力。

6.3.6 电压-电流密度性能测试

6.3.6.1 试验仪器和设备

- a) 电流传感器，b) 电压传感器。

6.3.6.2 试验步骤

采用精度为 0.5 mm 的长度度量工具对膜电极的反应区域进行尺寸测量，计算出电极反应面积 S。将电解槽的温度和压力设定在工作范围内，测量 PEM 电解槽单池电压，取单池电压平均值 V。按照表 2 中的运行参数测试并记录单池电压平均值、电流和电流密度。

- 1) 将电解槽设定在额定温度和压力下；
- 2) 按照表 2 中的电流加载，当温度和压力同时稳定大于或等于 5 min 后，记录单池电压平均值、温度、压力。

注：推荐压力波动范围在±10 kPa 以内，单电解池电压波动范围在±10 mV 以内。

表 2 运行参数表（槽温范围：±2℃，压力范围：10%设定压力）

序号	工作电流/A	单池电压平均值/V	温度/℃	压力/MPa
----	--------	-----------	------	--------

1	标称最小电流			
2	10%额定电流			
3	25%额定电流			
4	50%额定电流			
5	75%额定电流			
6	100%额定电流			
7	...*			
8	标称最大电流			
或				
1	标称最大电流			
2	...*			
3	100%额定电流			
4	75%额定电流			
5	50%额定电流			
6	25%额定电流			
7	10%额定电流			
8	标称最小电流			

\*注：若 100%额定电流与标称最大电流跨度大于 25%额定电流，则从 100%额定电流以 10%额定电流为步长取点至标称最大电流

6.3.6.3 数据处理

a) 根据有效电极面积和记录的电流值，计算电流密度，公式如下：

$$J = \frac{I_{\text{test}}}{S} \tag{9}$$

式中：

- $J$ ——电流密度，单位为安培每平方厘米（A/cm<sup>2</sup>）；
- $I_{\text{test}}$ ——试验测量的电流平均值，单位为安培（A）；
- $S$ ——有效电极面积，单位为平方厘米（cm<sup>2</sup>）。

b) 电解槽单电压计算，公式如下：

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \tag{10}$$

式中：

$V$ ——平均单池电压，单位为伏特（V）；

$V_i$ ——第  $i$  节单池电压，单位为伏特（V）；

$n$ ——电解槽单池节数。

### 6.3.7 直流电压检测

#### 6.3.7.1 试验仪器和设备

a) 电压巡检仪，b) 电压表。

#### 6.3.7.2 试验步骤

PEM 电解槽的总直流电压用直流电压表检测，检测位置在电解槽的阳极、阴极集流板处。总电压与单池电压应在制造商规定的安全范围内。

### 6.3.8 单池电压

#### 6.3.8.1 试验仪器和设备

a) 电流传感器，b) 电压传感器，c) PEM测试系统。

#### 6.3.8.2 试验步骤

调整电解槽至待测状态，通过电压传感器测量指定单电解池电压。

### 6.3.9 直流电流检测

#### 6.3.9.1 试验仪器和设备

a) 电流传感器，b) 钳流表（按需）。

#### 6.3.9.2 试验步骤

调整 PEM 电解槽至待测状态，记录电流传感器电流值，或采用钳流表测量单根直流电供电线缆，将线缆电流值加和获得总电流。

电解槽正负极可有两种接法：一正一负接法或一正两负接法。

#### 6.3.9.3 数据处理

$$J_s = \frac{I_s}{A_s} \quad (\text{一正一负}) \quad (11)$$

$$J_s = \frac{I_s}{2 \times A_s} \quad (\text{一正两负}) \quad (12)$$

式中：

$J_s$ ——电解槽的电流密度，单位为安培每平方厘米（A/cm<sup>2</sup>）；

$I_s$ ——电解槽的输入电流，单位为安培（A）；

$A_s$ ——电解槽的单池电极活性区面积，单位为平方厘米（cm<sup>2</sup>），应标明电极活性面积的计算方法。

该面积计算方法应获得制造商和用户的共同认可，或由测试方在电解槽装配前实际测量。

注：一般认为每个单池的活性面积一样。

### 6.3.10 电解槽额定输入功率测试

#### 6.3.10.1 试验仪器和设备

a) 电流传感器，b) 电压传感器。

#### 6.3.10.2 试验步骤

在测试系统上运行 PEM 电解槽，采用电流传感器测量电解槽的总电流，采用电压传感器测量电解槽阳极、阴极端板间总电压。额定工况下施加于电解槽上的电压与电流的乘积，为电解槽额定输入功率。

a) 试验开始前，电解槽出口水温调整到设定温度；

b) 开始启动操作，加载电流至额定电流；

c) 调节电解槽产气压力至设定值，待运行稳定后，记录电解槽总电压  $V_0$ 。

#### 6.3.10.3 数据处理

电解槽电流达到额定电流对应的电解槽功率作为额定值， $P_0$

$$P_0 = V_0 \times I_0 \times 10^{-3} \quad (13)$$

式中：

$P_0$ ——电解槽额定输入功率，单位为千瓦（kW）；

$V_0$ ——电解槽总电压，单位为伏特（V）；

$I_0$ ——电解槽额定电流，单位为安培（A）。

### 6.3.11 额定电流密度下的产氢理论能耗

#### 6.3.11.1 试验仪器和设备

a) 电流表，b) 电压表。

#### 6.3.11.2 试验步骤

调整电解槽至待测状态，测取电解槽电流、电压值。

#### 6.3.11.3 数据处理

根据电解定律——任何物质在电解过程中，数量上的变化服从法拉第定律。在标准状态下，用  $2 \times 96485$  库仑电量，可电解 1 mol 水，制取 1 mol 氢气和 0.5 mol 氧气。1 mol 氢气在标准状态下的体积为  $22.43 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。故在标准状态下，制取 1  $\text{m}^3$  氢气所需理论电量为：

$$\frac{2 \times 96500 \times 1000}{3600 \times 22.43} = 2390 \quad (14)$$

根据电化学原理，当电解单池电压为热中性电压时（电解液态水的热中性电压为 1.48V），电解槽工作时不产生废热，此时的能效设定为 100%。

$$E_{th} = \frac{\Delta H}{n_e \times F} \quad (15)$$

式中：

$E_{th}$ ——热中性电压，单位为伏特（V）；

$\Delta H$ ——运行温度下电解水制氢反应的焓变，单位为焦耳每摩尔（J/mol），认为电解槽氧侧出口温度为运行温度；

$n_e$ ——参与反应的电子摩尔数，单位为摩尔（mol）；

$F$ ——法拉第常数，单位为库伦每摩尔（96485 C/mol）。

$$W = \frac{1.48 \times 2390}{1000} \quad (16)$$

式中：

1.48——热中性电压，单位为伏特（V）；

$W$ ——单位能耗值，单位为千瓦时每立方氢气（kWh/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>）。

### 6.3.12 额定电流密度下的电压效率

#### 6.3.12.1 试验仪器和设备

a) 电流传感器，b) 电压传感器。

#### 6.3.12.2 试验步骤

调整电解槽至待测状态，测取电解槽电流、电压值。

#### 6.3.12.3 数据处理

$$\eta_v = \frac{N_s \times E_{th}}{U_s} \times 100\% \quad (\text{一正一负}) \quad (17)$$

$$\eta_v = \frac{(N_s / 2) \times E_{th}}{U_s} \times 100\% \quad (\text{一正两负}) \quad (18)$$

式中：

$\eta_v$ ——电解槽的电压效率，单位为百分比（%）；

$N_s$ ——电解槽的单电解池个数，需注意电解槽内单池（小室）的串并联方式，如一正一负或一正两负；

$U_s$ ——电解槽的电压，单位为伏特（V）；

$E_{th}$ ——热中性电压，1.48 V。

### 6.3.13 额定电流密度下的产氢实际能耗

#### 6.3.13.1 试验仪器和设备

a) 电流传感器，b) 电压传感器。

#### 6.3.13.2 试验步骤

调整电解槽至待测状态，测取电解槽电流、电压值。

#### 6.3.13.3 数据处理

电解槽单位制氢的直流电耗( $W_{H2}$ )，按式（19）计算：

$$W_{H2}=IU_t/(Q_{H2}\times 10^3) \quad (19)$$

式中：

$W_{H2}$ ——单位制氢直流电耗，单位为千瓦时每立方米（kW·h/m<sup>3</sup>）；

$I$ ——电解槽的总直流电流，单位为安培（A）；

$U$ ——电解槽的总直流电压，单位为伏特（V）；

$Q_{H2}$ ——检测期间氢气产量，单位为立方米每小时（m<sup>3</sup>/h）；

$t$ ——检测时间，单位为小时（h）。

### 6.3.14 工作范围

#### 6.3.14.1 试验仪器和设备

a) 电流传感器，b) 电压传感器。

#### 6.3.14.2 试验步骤

在测试系统上运行 PEM 电解槽，将电解槽分别设定在最低电流、额定电流和最高电流下运行，分别记录电解槽电压值。最高电流、最低电流对应的电解槽输入功率与额定功率的比值为电解槽输入功率允许波动范围的上下限。

注：1. 最低电流和最高电流由制造商提供。

2. 测试过程中，氧中氢浓度不得超过停机保护阈值，应确保试验安全性。

a) 试验开始，将电解槽调整到待测试状态；

b) 开始启动操作，在制造商推荐的条件下，加载至最低电流值  $I_1$ ，电解槽运行稳定后，记录电解槽总电压  $V_1$ ；

c) 在制造商推荐的条件下，加载电流至额定电流值  $I_0$ ，电解槽运行稳定后，记录电解槽总电压  $V_0$ ；

d) 在制造商推荐的条件下，加载电流至最高电流值  $I_2$ ，电解槽运行稳定后，记录电解槽总电压  $V_2$ 。

### 6.3.14.3 数据处理

按照式 (20) 计算电解槽的功率调节范围：

$$\Delta P = \left[ \frac{P_{\min}}{P_{\text{rat}}} \times 100\%, \frac{P_{\max}}{P_{\text{rat}}} \times 100\% \right] \quad (20)$$

式中：

$\Delta P$ ——电解槽功率调节范围，单位为百分比 (%)；

$P_{\min}$ ——电解槽的最小功率输入，单位为千瓦 (kW)；

$P_{\max}$ ——电解槽的最大功率输入，单位为千瓦 (kW)；

$P_{\text{rat}}$ ——电解槽额定功率输入 (kW)，可通过下式计算：

$$P_{\text{rat}} = I_{\text{rat}} \times U_{\text{rat}} \quad (21)$$

式中：

$I_{\text{rat}}$ ——电解槽在额定工况下的额定电流，单位为安培 (A)；

$U_{\text{rat}}$ ——电解槽在额定工况下的电压，单位为伏特 (V)。

## 6.3.15 变载速率

### 6.3.15.1 试验仪器和设备

PEM 测试系统

### 6.3.15.2 试验步骤

以电解槽额定电流密度的百分比作为步长，改变电解槽的加载电流。以电解槽最高单池电压未超过警戒值的最大变载速度，作为电解槽最大变载调节速度  $v$ 。

注意：测试过程中，氧中氢浓度不得超过停机保护阈值。

### 6.3.15.3 数据处理

$$v = \frac{\Delta I}{I_0 \times t} \times 100\% \quad (22)$$

式中：

$v$ ——电解槽最大变载调节速度，单位为百分比每秒 (%/s)；

$\Delta I$ ——电解槽电流变化值，单位为安培 (A)；

$t$ ——电流变化所用时间，单位为秒 (s)；

$I_0$ ——电解槽额定运行电流密度，单位为安培每平方厘米（A/cm<sup>2</sup>）。

### 6.3.16 冷启动

#### 6.3.16.1 试验仪器和设备

a) 电流传感器，b) 电压传感器，c) 温度传感器，d) PEM 测试系统。

#### 6.3.16.2 试验步骤

a) 试验开始前，电解水制氢系统通过自然冷却或强制冷却等方式，在冷待机状态下保持 2 h 以上，该状态下电解槽入口的循环水温度与环境温度的偏差应在  $\pm 2^\circ\text{C}$  以内；

b) 试验开始前，电解水制氢系统应完成控制、安全相关辅助设施的启动以及吹扫、置换操作，循环泵处于运行状态；

c) 启动电解水制氢系统，记录发出启动指令时刻为冷启动开始时刻  $t_{s1}$ ，并以此时的电解槽入口的循环水温度为冷启动温度；

d) 启动过程按照制造商提供的启动程序自动进行，不做统一要求；

e) 试验过程中，以 1 s 或更短时间间隔分别测量电解槽的电流、电压以及系统的氧中氢浓度、氢中氧浓度；

f) 记录电解槽输入电流首次达到额定电流的时刻  $t_{s2}$ ；

g) 记录电解水制氢系统的运行温度、运行压力和输入电流同时达到额定温度、额定压力和额定电流的时刻  $t_{s3}$ ；

h) 当氧中氢浓度和氢中氧浓度分别稳定在气体纯度合格组分范围内至少 5 min 后，记录氧中氢浓度和氢中氧浓度首次同时达到合格组分范围的时刻  $t_{s4}$ ；

i) 绘制启动过程中的电流/时间曲线、氧中氢浓度/时间曲线和氢中氧浓度/时间曲线；

j) 应确保试验过程中电解槽始终处于制造商允许的安全运行范围。

### 6.3.17 热启动

#### 6.3.17.1 试验仪器和设备

a) 电流传感器，b) 电压传感器，c) 温度传感器，d) PEM 测试系统。

#### 6.3.17.2 试验步骤

a) 试验开始前，电解水制氢系统应在热待机状态下保持至少 15 min，纯水循环泵处于运行状态；

b) 启动电解水制氢系统，记录发出启动指令时刻为热启动开始时刻  $t_{s1}$ ，并以此时的电解槽入口循环水温度为热启动温度；

c) 试验过程中，以 1 s 或更短时间间隔分别测量电解槽的电流、电压以及系统的氧中氢浓度、氢中氧浓度；

d) 启动过程按照制造商提供的启动程序自动进行，不做统一要求；



- e) 记录电解槽输入电流首次达到额定电流的时刻  $t_{s2}$ ;
- f) 记录电解水制氢系统的工作温度、工作压力和输入电流同时达到额定温度、额定压力和额定电流的时刻  $t_{s3}$ ;
- g) 当氧中氢浓度和氢中氧浓度分别稳定在气体纯度合格组分范围内至少 5 min 后, 记录氧中氢浓度和氢中氧浓度首次同时达到合格组分范围的时刻  $t_{s4}$ ;
- h) 绘制启动过程中的电流/时间曲线、氧中氢浓度/时间曲线和氢中氧浓度/时间曲线;
- i) 应确保试验过程中电解槽始终处于制造商允许的安全运行范围。

### 6.3.18 冷/热启动至额定电流时间

冷/热启动至额定电流时间按式 (23) 计算:

$$\Delta t_s = t_{s2} - t_{s1} \quad (23)$$

式中:

$\Delta t_s$ ——启动时间, 单位为秒 (s);

$t_{s1}$ ——启动开始时刻;

$t_{s2}$ ——启动后电解槽首次达到额定电流的时刻。

### 6.3.19 冷/热启动至气体纯度合格时间

冷/热启动至气体纯度合格时间按式 (24) 计算:

$$\Delta t_s = t_{s3} - t_{s1} \quad (24)$$

式中:

$\Delta t_s$ ——启动时间, 单位为秒 (s);

$t_{s1}$ ——启动开始时刻;

$t_{s3}$ ——启动后氧中氢和氢中氧浓度首次达到合格气体组分范围的时刻。

### 6.3.20 衰减率

#### 6.3.20.1 试验仪器和设备

a) 电流传感器, b) 电压传感器, c) 温度传感器, d) PEM测试系统。

#### 6.3.20.2 试验步骤

在额定测试工况下, 对电解槽进行测试, 并对电解槽初始电解电压  $V_1$  及结束测试时的电解电压  $V_2$  和测试时长  $t$  进行记录, 求出电解槽平均单池电压衰减率  $\delta V_s$ 。

#### 6.3.20.3 数据处理

$$\delta V_s = 1000000 \times \frac{(V_2 - V_1)}{n \times t} \quad (25)$$

式中:

$\delta V_s$ —平均单池电压衰减率，单位为微伏特每小时 ( $\mu\text{V/h}$ )；

$V_1$ —电解槽初始测试时电解电压，单位为伏特 (V)；

$V_2$ —电解槽结束测试时电解电压，单位为伏特 (V)；

$n$ —电解槽单池节数；

$t$ —测试时间，单位为小时 (h)。

### 6.3.21 氢氧压差

#### 6.3.21.1 试验仪器和设备

a) 压力传感器或压力表，b) PEM测试系统。

#### 6.3.21.2 试验步骤

在测试系统上运行PEM电解槽，将电解槽的温度和压力设定在工作范围内，在保证设备安全的条件下，测试允许的氢侧与氧侧的最大压力差。

a) 试验开始前，电解槽出口水温调整到设定温度；

b) 开始启动操作，加载电流至额定电流，至运行稳定；

c) 调节电解槽产气压力至制造商设定值，维持氢氧两侧压力差至运行稳定，记录电解槽氢氧两侧产气压力差值。此时，氢中氧应小于或等于0.3%，氧中氢应小于或等于2%。

### 6.3.22 单池/短堆极化曲线测试

#### 6.3.22.1 试验仪器和设备

PEM测试系统

#### 6.3.22.2 试验步骤

电解槽在某工况稳定运行状态下，监测电解槽氢气出口处压力，可采用压力传感器测量。电解槽在该工况下保持各项参数稳定在允许范围之内大于或等于5 min。

将电解池/短堆安装到电解测试系统上，与测试系统连接，并设定相应的测试程序。电解槽测试前先通入去离子水，电解槽温度控制在额定工况温度（温度探头探测温度为膜电极中心位置处或电解槽出口处的温度）；待温度稳定后开始加载额定电流；调节阴阳极两侧压力/压差，活化2 h后进行稳态极化曲线测试。电流按6.3.6.2中表2进行加载，记录电压与电流值。

#### 6.3.22.3 数据处理

以电流密度对电压做*i-V*曲线。

## 7 测试报告

报告应给出以下内容：

试验日期、试验对象、所使用的标准、试验条件、所使用的方法、试验输入参数、试验输出参数以及异常现象。

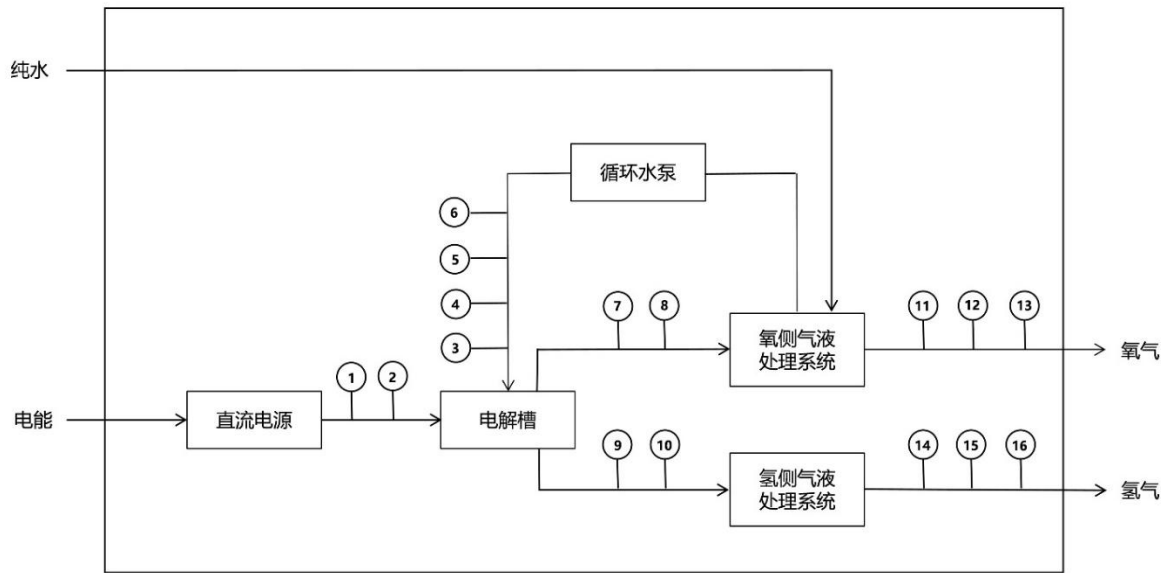
## 附 录 A

表 A. 测试仪器仪表准确度要求

序号	设备名称	计量单位	最大允许误差
1	温度计	°C	±1.0
2	温度传感器	°C	±0.5
3	压力表	kPa	±1.0% FS
4	压力传感器	kPa	±0.5% FS
5	电流传感器	A	±1.0% FS
6	电压传感器	V	±0.5% FS
7	电压巡检仪	mV	±2.0 mV
8	液体流量计	L/min	±5.0% FS
9	气体流量计	L/min	±1.0% FS
10	绝缘电阻测量仪	MΩ	±0.01
11	接地电阻测量仪	MΩ	±2% FS
12	氢中氧分析仪	—	±5.0%FS
13	氧中氢分析仪	—	±2.0% FS
14	氢气质量流量计	m³/h	±1.5% FS
15	电导率测试仪	μS/cm	±2.0% FS
16	计时器	s	±1.0

附 录 B

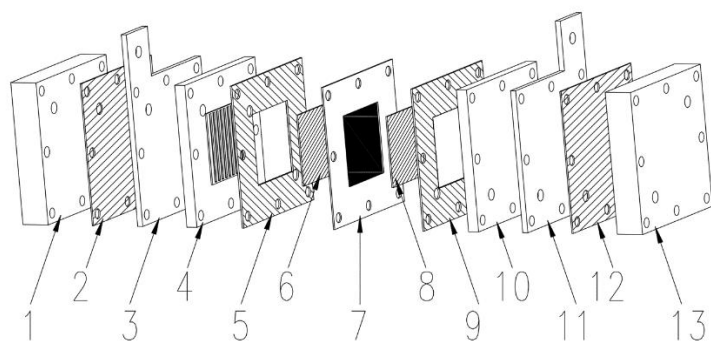
(资料性附录)



- 标引序号：
- 1——输入电流；
  - 2——输入电压；
  - 3——氧侧进口温度；
  - 4——氧侧进口压力；
  - 5——氧侧进水电导率；
  - 6——氧侧进水流量；
  - 7——氧侧出口温度；
  - 8——氧侧出口压力；
  - 9——氢侧出口温度；
  - 10——氢侧出口压力；
  - 11——氧气分离器出口压力；
  - 12——氧中氢分析仪，检测点位置或尽量靠近电解槽氧侧出口；
  - 13——氧气流量计，可按需选配；
  - 14——氢气分离器出口压力；
  - 15——氢中氧分析仪，检测点位置或尽量靠近电解槽氢侧出口；
  - 16——氢气流量计。

注：氧侧气液处理系统一般包含气液分离器、换热器、去离子器以及压力控制单元；氢侧气液处理系统一般包含气液分离器和压力控制单元，以及必要的保证氢气流量准确测量的气体处理单元。

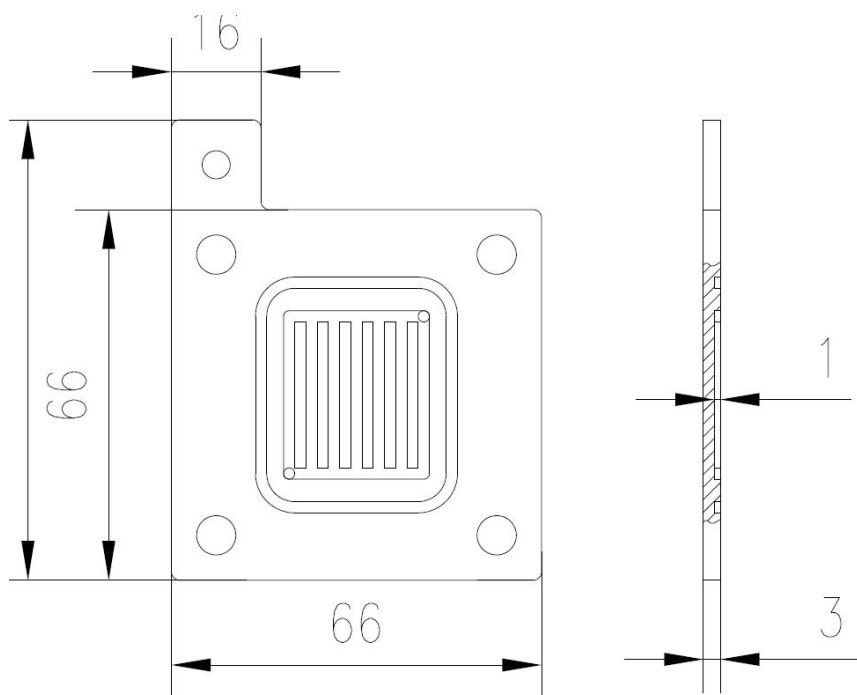
图 B. 测试流程图



标引序号：

- 1——端板；
- 2——绝缘板；
- 3——集流板；
- 4——极板；
- 5——密封件；
- 6——多孔传输层；
- 7——膜电极组件；
- 8——多孔传输层；
- 9——密封件；
- 10——极板；
- 11——集流板；
- 12——绝缘板；
- 13——端板。

图C 电解单池结构示意图



图D 电解单池流场示意