

中国城市燃气氢能发展创新联盟标准

T/CHAG 7—2023

固定式质子交换膜燃料电池堆使用寿命 测试评价方法

Evaluation method for lifetime of proton exchange membrane fuel cell
stack in stationary power generation application

2023-09-26 发布

2023-09-26 实施

中国城市燃气氢能发展创新联盟 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3. 术语与定义	1
4 测试要求及条件	2
4.1 测试对象	2
4.2 测试平台与待测对象安装	3
4.3 其他条件	4
4.4 特别规定	5
5 测试方法	5
5.1 测试规则	5
5.2 例行测试	5
5.3 CO 毒化测试	6
5.4 分工况测试	7
5.5 寿命测试结束时的发电性能测试	11
5.6 循环工况谱的确定	11
5.7 性能衰减率和燃料电池使用寿命计算	11
6 测评报告	12

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。

本文件由中国城市燃气氢能发展创新联盟提出并归口。

本文件起草单位：江苏铨德氢能源科技有限公司、佛燃能源集团股份有限公司、广东云韬氢能科技有限公司、佛山市清极能源科技有限公司、中海石油气电集团有限责任公司、深圳市燃气集团股份有限公司、佛山环境与能源研究院、北京市燃气集团有限责任公司、天津市特种设备监督检验技术研究院、上海骥翀氢能科技有限公司、上海汉翱新能源科技有限公司、上海重塑能源科技有限公司、中科润谷智慧能源科技（佛山）有限公司、武汉中极氢能源发展有限公司。

本文件主要起草人：吕青青、伍龙燕、贺丹丹、鲁亮、刘锋、王秀林、李淇、池滨、蔡信、黄世键、白帆飞、吴丹、姜斌、王锡龙、陈雪颜、李敏强、金子儿、刘洋、张晓丹、骆方、段晚儿、曾玥、姚辉超、张慧慧、卢聪、赵玉彬、杨润农、梁慕天、黄丽丽、韦晨、袁浩、沈威、王子明、隋依言、蒋鹏、易荣、张一帆、霍杰鹏。

固定式质子交换膜燃料电池堆使用寿命测试评价方法

1 范围

本标准规定了固定式质子交换膜燃料电池堆的寿命测试方法。
本标准适用于纯氢或者富氢气体条件下运行的固定式质子交换膜燃料电池堆。

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 20042.1-2017 质子交换膜燃料电池 第1部分:术语

GB/T 29838-2013 燃料电池 模块

GB/T 31886.2-2015 反应气中杂质对质子交换膜燃料电池性能影响的测试方法 第2部分:氢气中杂质

GB/T 37244-2018 质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气

GB/T 38914-2020 车用质子交换膜燃料电池堆使用寿命测试评价方法

3 术语与定义

GB/T 20042.1-2017、GB/T 29838-2013、GB/T 38914-2020 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

燃料电池堆 fuel cell stack

由单电池、隔离板、冷却板、歧管和支撑结构组成的设备,该设备通入氢气(或富氢气体)和空气进行化学反应后可转换成直流电和热。

3.2

富氢气体 hydrogen-rich gas

富氢气体是一种以氢气为主要成分的混合气体。除氢气外,还可包含 N_2 、 CO_2 、 CO 和 CH_4 气体。

3.3

纯氢气体 hydrogen

氢气纯度应不低于 99.97%,符合 GB/T 37244-2018 的规定。

3.4

工况循环 operation mode cycle

被测燃料电池对应燃料电池系统从启动到停机连续运行中燃料电池堆的工况变化历程。

3.5

电压变化率 voltage change rate

电压的变化量与完成变化所用时间的比值。本标准指不同工况下，所测基准电流下对应电压值进行线性拟合后所得公式中的斜率值。

3.6

低载电流 low load current

被测燃料电池堆对应固定式发电燃料电池系统在低载荷下燃料电池的输出电流，此电流下燃料电池堆能够长时间运行，当低于低载荷电流时，燃料电池堆无法长时间运行。

3.7

基准电流工况 reference current condition

在燃料电池寿命测评中以某特定电流为基准的工况。

3.8

固定式质子交换膜燃料电池堆使用寿命

lifetime of fuel cell stack in stationary power generation application

燃料电池堆在固定式发电燃料电池系统工况循环下从开始使用至伏安特性衰减到规定的最低程度时的累计使用时间。

4 测试要求及条件

4.1 测试对象

4.1.1 测试对象一般为单一燃料电池堆或多个燃料电池堆的组合体。

4.1.2 对于燃料电池系统中多电池堆组合的情况，可取其中一个电池堆为测试对象，也可取部分或全部电池堆组合体为测试对象，测试对象需要从系统中取出后安装于测试平台进行测试。

4.1.3 在测试平台上安装测试对象前，检查确认测试对象无外观损伤，并确认燃料电池堆符合基本安全要求，同时登记完成表 1 燃料电池堆基本信息。

表 1 燃料电池堆基本信息

待测对象基本参数:					
电堆来源	☐ 研发 ☐ 生产		电堆编号		
有效面积			节数		
巡检规格			电堆外观状态		
重量			尺寸		
待测对象与测试台对接参数:					
正负极接线方式			正负极接线规格		
电堆接口	对接方式	规格	电堆接口	对接方式	规格
阳极进堆口			阳极出堆口		
阴极进堆口			阴极出堆口		
冷却液进堆口			冷却液出堆口		
两极进气方式	☐ 顺流 ☐ 逆流		进水方式	☐ 顺流 ☐ 逆流	

4.2 测试平台与待测对象安装

4.2.1 主要测量装置及精度见表 2。

表 2 主要测量装置及精度

测量装置	精 度
湿度测量装置	不低于 $\pm 3.0\%$
温度测试装置	不低于 $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$
压力测量装置	不低于 $\pm 1.0\text{ kPa}$
燃料质量流量测量装置	不低于 $\pm 1.0\% \text{ FS}$
空气质量流量测量装置	不低于 $\pm 1.0\% \text{ FS}$
电压测量装置	不低于 $\pm 0.5\% \text{ FS}$
电流测量装置	不低于 $\pm 0.5\% \text{ FS}$

4.2.2 燃料电池堆测试平台如图 1 所示。测试设备应能按照测试程序自动调控，并记录测量数据；应具备多通道电压采集功能，能够显示和记录燃料电池堆每节燃料电池的电压；供气流量和湿度变化速度不低于测试所用工况谱中的变载速度。

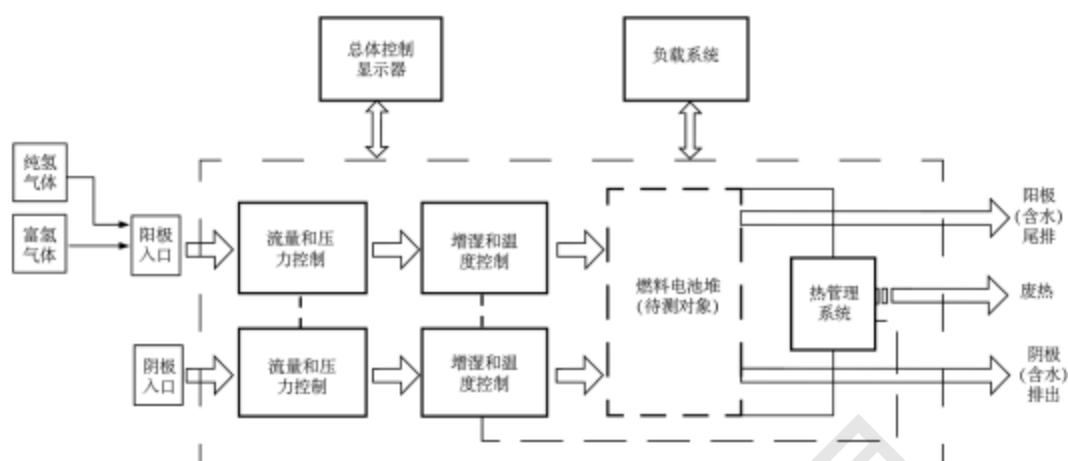


图1 燃料电池堆测试平台示意图

4.2.3 要求进气温度、湿度、压力传感器布置在燃料电池堆进气口上游 100 mm 之内及出气口下游 100 mm 之内，燃料电池堆温度传感器布置在冷却液进口上游 100 mm 之内及出口下游 100 mm 之内或燃料电池堆内部，进气流量计布置于气体增湿之前的管路。

4.2.4 完成测试设备与燃料电池堆连接后，确认燃料电池堆各接口处无泄漏，并用手持式或其他类型的氢气检测仪检查燃料电池堆的密封性。

4.3 其他条件

4.3.1 测试环境海拔不超过 1000 m，环境温度为 5℃~40℃，实验室与室外应保持通风。

4.3.2 测试所用富氢气体配比根据电堆实际工况进行实验标气的定制。

4.3.3 待测对象运行条件见表 3。

表 3 燃料电池堆运行条件

电 流 (A)	阳 极 计里比	阴 极 计里比	气体露点 (℃)	气体入堆 温度(℃)	水侧入堆 温度(℃)	水侧出堆 温度(℃)
-	-	-	60	62	65	≤72
20	2.1	4.8	60	62	65	≤72
30	1.6	2.7	60	62	65	≤72
40	1.5	2.2	60	62	65	≤72
50	1.5	2	60	62	65	≤72
60	1.5	2	60	62	65	≤72
70	1.5	2	60	62	65	≤72
80	1.5	2	60	62	65	≤72
.....						
...	1.5	2	60	62	65	≤72

注：测试过程中的最低气体用量以 100mA 时用量计算，其余电流按表格对应数据即可。

4.4 特定规定

燃料电池堆的测试评价应依据以下规定执行：

- a) 燃料电池堆低载电流：由委托方指定，或对应燃料电池平均每节电压 0.78 V 时的电流；
- b) 燃料电池堆额定电流：由委托方指定，或对应燃料电池平均每节电压 0.70 V 时的电流；
- c) 燃料电池堆基准电流：在完成初步活化后对应燃料电池平均每节电压 0.74 V 时的电流；
- d) 固定式质子交换膜燃料电池堆使用寿命的评价准则：从开始伏安曲线至最终伏安曲线，在基准电流下燃料电池平均每节电压衰减 20%。

5 测试方法

5.1 测试规则

5.1.1 要求待测对象依次完成下面各项测试，不得调整测试顺序。富氢模式的固定式质子交换膜燃料电池堆测试须在分工况测试前进行毒化测试与判定，纯氢模式的固定式质子交换膜燃料电池堆测试在完成例行测试后直接进行分工况测试即可。

5.1.2 除特别规定的情况需沟通协商外，加载和减载过程的控制方法按照各工况规定速率完成即可。当发生意外停机时，要及时降低燃料电池堆各节单电池至 0.3 V 以下。

5.1.3 下列情况之一可判定为电堆故障或寿命终结，可结束寿命测试：

- a) 燃料电池堆在额定条件下不能稳定运行 30 min；
- b) 额定电流工况下某节燃料电池电压低于 0.4 V 或者燃料电池单片电压的标准方差高于 100 mV（水淹情况除外）；
- c) 试验过程中燃料电池堆空气侧排气中氢气的体积浓度高于 0.5%。

5.2 例行测试

5.2.1 燃料电池堆活化

在纯氢模式下，按照委托方规定的方法对燃料电池堆进行活化。

5.2.2 燃料电池堆性能测试与电流参数的确定

5.2.2.1 完成活化后，进行燃料电池堆发电性能测试，阳极气体模式不变。测试中燃料电池堆的进气温度、进气湿度、进气压力、供气化学计量比、冷却液温度及冷却液压力等可参考以上操作参数表或由委托方指定。

5.2.2.2 发电性能测试方法：在开路至平均每节燃料电池电压 0.60 V 范围内，至少测量 10 个工况点，记录各工况稳定时的输出电流和电压，并记录开路电压(OCV)。在燃料电池平均单节电压 0.74 V ± 0.005 V 工况时，记录各节燃料电池电压。

5.2.2.3 由“电流-电压”测试结果，确定燃料电池堆的基准电流、低载电流和额定电流。

5.2.3 燃料电池堆稳定性考核与初始电压 V_0 的确定

5.2.3.1 在纯氢模式下，按照图 2 和表 4 进行 100 h 循环运行。工况谱为：每小时加载 27 次、低载工况运行 24 min、额定工况运行 16 min。

5.2.3.2 1 h 完成 1 个工况循环。最后一个循环结束时，按照 5.2.2 方法测试燃料电池堆发电性能，并记录基准电流下燃料电池各节电压。

5.2.3.3 利用燃料电池堆发电性能曲线，确定基准电流工况下平均单节燃料电池电压 V_0 作为寿命计算

公式中的初始电压。

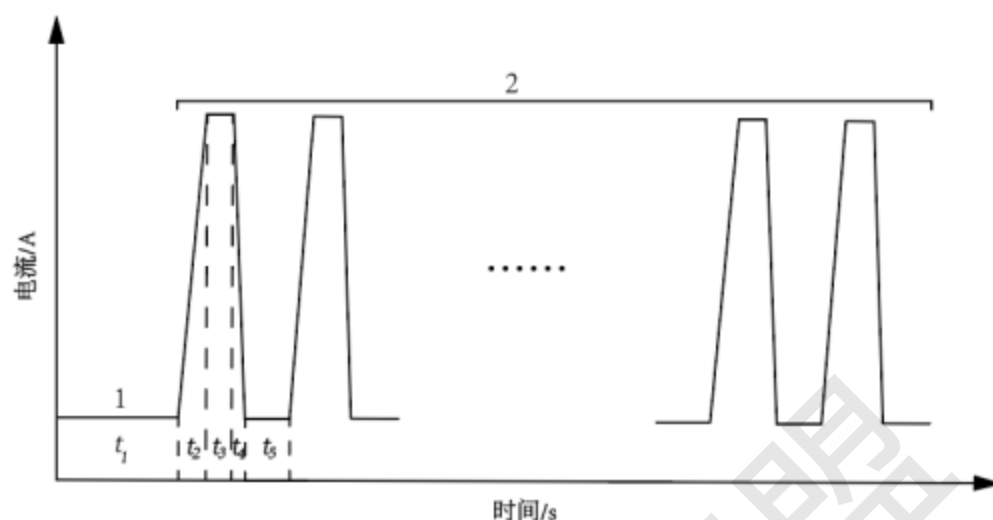


图2 用于燃料电池堆稳定性考核的参比工况谱

表4 燃料电池堆稳定性考核操作规程

步 骤	工 况	要 求	
1	起始工况	运行电流	低载电流
		停留时间 t_1	90 s
2	循环变载	计数完成变载 27 次	
		加载过程时间 t_2	30 s
		加载终点	额定电流
		额定电流点停留时间 t_3	35 s
		减载过程 t_4	15 s
		减载终点	低载电流
		低载电流点停留时间 t_5	50 s

5.3 CO 毒化测试

5.3.1 燃料电池堆毒化操作

在纯氢模式下，当燃料电池堆在额定工况下稳定运行一段时间后，打开富氢气体阀门，直至富氢气体达到实验要求后，关闭纯氢管路。实验维持其余操作不变，燃料电池堆恒电流继续运行，进入毒化测试阶段，5 min 后记录开始时间 t_0 ，并记录每小时标准工况下的电压值 V_d 。

5.3.2 燃料电池堆毒化结束条件

燃料电池堆在毒化条件下运行至下列条件之一时结束测试。结束条件如下：

- 基准电流工况下，平均单节燃料电池电压值低于基准电压值的 20%；
- 燃料电池堆在额定工况下运行至中毒电压平台区，并在该电压平台区持续运行超过 120 min，且该区域后 60 min 内电池电压最大波动范围不超出 ± 15 mV，任意 2 min 内电压平均值差异不超过 5 mV；
- 燃料电池运行至最长毒化时间 50 h。

5.3.3 毒化结果判定

燃料电池堆毒化测试结束后，根据结束条件进行以下判定：

- a) 当满足毒化测试结束条件 a 时，实验结束；
- b) 当满足毒化测试结束条件 b 或者 c 时，继续 5.4 分工况测试。

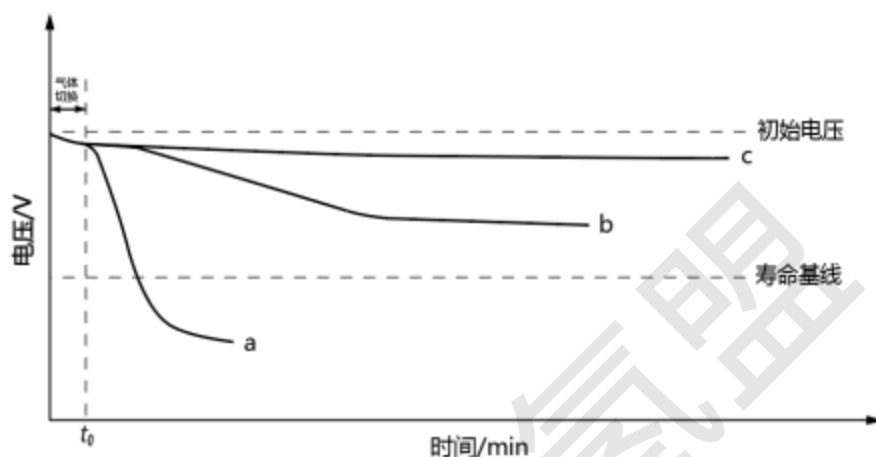


图3 燃料电池堆毒化曲线示意图

5.4 分工况测试

5.4.1 分工况测试要求

5.4.1.1 待测对象应依次完成低载工况、额定工况、变载工况等试验。

5.4.1.2 试验过程中，燃料电池堆不得进行拆装和调整紧固力，如果出现膜电极、双极板或密封件损坏，应终止寿命测试。

5.4.1.3 分工况测试过程中，基准电流工况下，平均单节燃料电池电压值低于基准电压值的 20%，实验结束。

5.4.1.4 如果发生意外停机，应及时降低燃料电池堆各节单电池至 0.3 V 以下，故障解除后可继续试验。分工况测试，适用于对燃料电池堆一般使用寿命的评价，要求不增加其他特殊控制策略。

5.4.2 低载工况

低载工况试验循环包括低载电流工况、记录基准电流工况电压；测试循环如图 4 所示，具体操作规程见表 5。

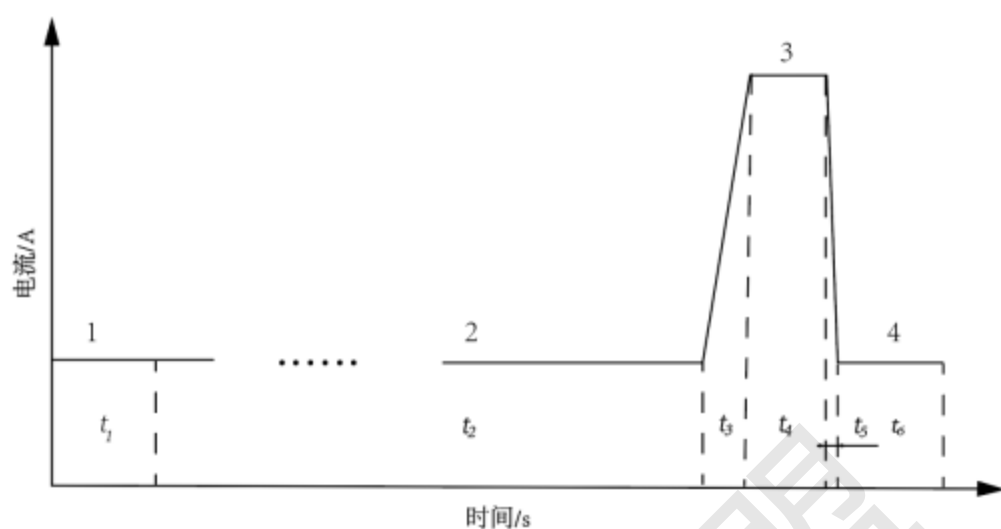


图4 燃料电池堆低载工况测试循环

表5 燃料电池堆低载工况测试循环操作规程

步 骤	工 况	要 求	
1	起始工况	运行电流	低载电流
		稳定时间 t_1	90 s
2	低载电流工况	开始计时	
		运行电流	低载电流
		运行时间 t_2	3250 s
3	基准电流工况	加载过程时间 t_3	30 s
		加载终点	基准电流
		基准电流点停留时间 t_4	90 s
		减载过程 t_5	15 s
		减载终点	低载电流
4	低载电流工况	低载电流点停留时间 t_6	90 s

以上每 1 h 为 1 个工况测试循环，每个工况至少完成 60 个循环。根据所记录基准电流工况的对应电压值，绘制“燃料电池平均单节电压-低载工况时间”图，对每个低载工况循环最后所测基准电流工况对应电压值进行线性拟合，得低载工况下的电压变化率 $V_{\text{低}}$ ，其中电压变化率 $V_{\text{低}}$ 在线性拟合公式中的相关性系数 $R^2 > 0.6$ 时为有效值。

5.4.3 额定工况

额定工况试验循环包括额定电流工况、记录基准电流工况电压；测试循环如图 5 所示，具体操作规程见表 6。

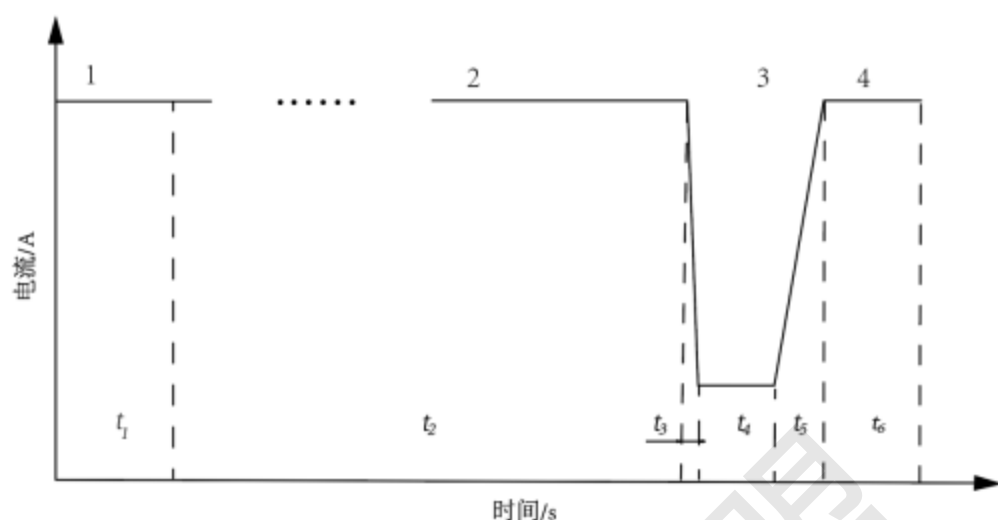


图5 燃料电池堆额定工况测试循环

表6 燃料电池堆额定工况测试循环操作规程

步 骤	工 况	要 求	
1	起始工况	运行电流	额定电流
		稳定时间 t_1	90 s
2	额定电流工况	开始计时	
		运行电流	额定电流
		运行时间 t_2	3250 s
3	基准电流工况	减载过程时间 t_3	15 s
		减载终点	基准电流
		基准电流点停留时间 t_4	90 s
		加载过程 t_5	30 s
		加载终点	额定电流
4	额定电流工况	额定电流点停留时间 t_6	90 s

以上每 1 h 为 1 个工况测试循环，每个工况至少完成 60 个循环。根据所记录基准电流工况的对应电压值，绘制“燃料电池平均单节电压-额定工况时间”图，对每个额定工况循环最后所测基准电流工况对应电压值进行线性拟合，得额定工况下的电压变化率 $V_{\text{额}}$ 。其中电压变化率 $V_{\text{额}}$ 在线性拟合公式中的相关性系数 $R^2 > 0.6$ 时为有效值。

5.4.4 变载工况

变载测试循环主要针对低载电流至额定电流的循环变载考核，并完成基准电流工况下对应电压值的记录即可，测试循环如图 6 所示，具体操作规程见表 7。

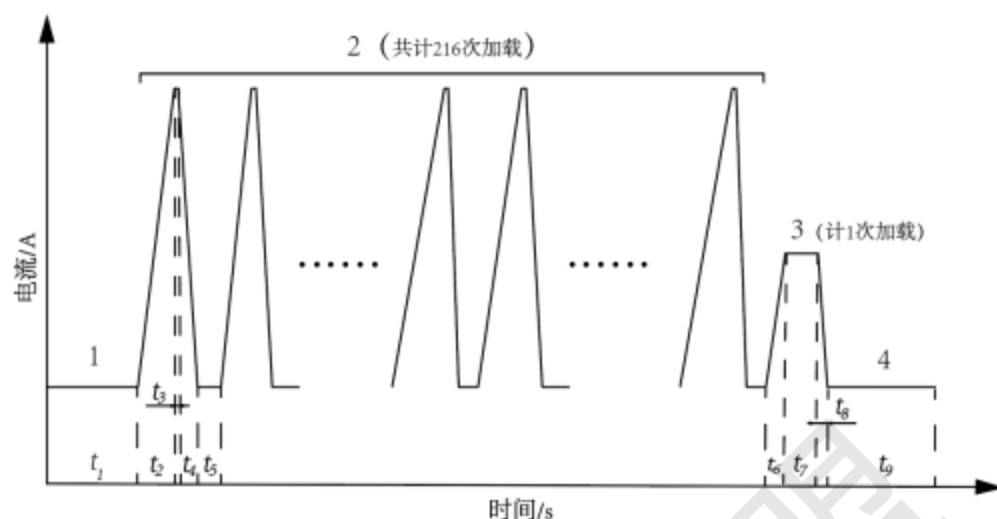


图6 燃料电池堆变载工况测试循环

表7 燃料电池堆变载工况测试循环操作规程

步骤	工况	要求	
1	起始工况	运行电流	低载电流
		停留时间 t_1	90 s
2	额定工况	开始记录加载次数	
		加载幅度	从低载电流到额定电流
		加载过程时间 t_2	30 s
		额定电流点停留时间 t_3	3 s
		减载过程 t_4	15 s
		减载终点	低载电流
		低载电流点停留时间 t_5	15 s
3	基准电流工况 (记1次加载)	条件	完成加载216次考核后
		方法	从低载工况点变载到基准电流工况，记录电压，再回低载工况点
		加载过程时间 t_6	30 s
		加载终点	基准电流
		基准电流点停留时间 t_7	90 s
		减载过程 t_8	15 s
		减载终点	低载电流
4	低载电流工况	低载电流点停留时间 t_9	200 s

每4 h完成1个测试循环，至少完成15个循环。依基准电流工况电压，绘制“燃料电池平均单节电压-变载次数”图，对每个循环最后所测基准电流工况对应电压值进行线性拟合，得到变载工况下的电压变化率 V_{Δ} ，其中电压变化率 V_{Δ} 在线性拟合公式中的相关性系数 $R^2 > 0.6$ 时为有效值。

按式(1)计算变载工况致使燃料电池电压变化率 V_1 ：

$$V_1 = V_{\text{变}} - \frac{1}{217} \left(\frac{3530}{3600} * V_{\text{低}} + \frac{738}{3600} * V_{\text{额}} \right) \dots\dots\dots(1)$$

式中：

V_1 ——变载工况致使燃料电池电压变化率，单位为伏每次（V/次）；

$V_{\text{变}}$ ——每次基准电流工况电压测量，对所测电压点做线性拟合后的斜率值，单位为伏每次（V/次）；

$V_{\text{低}}$ ——低载工况致使燃料电池电压变化率，单位为伏每小时（V/h）；

$V_{\text{额}}$ ——额定工况致使燃料电池电压变化率，单位为伏每小时（V/h）；

5.5 寿命测试结束时的发电性能测试

完成以上分工况测试后，应用与 5.2.2 相同的方法和实验条件，测试燃料电池堆发电性能，并记录基准电流下燃料电池各节电压。

5.6 循环工况谱的确定

在计算寿命指标时，可选择“参比工况谱”或“自定工况谱”，用于预测燃料电池堆在统一的循环工况谱条件下的使用寿命；“自定工况谱”，用于预测燃料电池堆在委托方指定的其他工况谱条件下的使用寿命。

5.6.1 本标准参比工况谱参数，包括以下：

a) 每小时加载次数 $n_1=27$ 次，每次加载过程 30 s，减载过程 15 s；

b) 每小时低载工况运行时间 $t_1=24$ min；

c) 每小时额定工况运行时间 $t_2=16$ min；

也可根据其他情况进行工况调整，需提供的燃料电池堆工况谱参数，包括：

a) 低载工况运行时间 t_1 (min)；

b) 加载次数 n_1 (次)、每次加载和减载过程时间 (s)；

c) 额定工况运行时间 t_2 (min)，以及其他工况出现的频次或所占时间。

要求所有工况谱所占时间的总和为 3600 ± 360 s。

5.6.2 当固定式质子交换膜燃料电池堆工况为在额定工况下长期稳定运行时，其单位时间内的运行工况不包括低载工况与变载工况，具体操作实验可参考 5.4.3 额定工况实验方法。

5.7 性能衰减率和燃料电池使用寿命计算

5.7.1 本标准参比工况谱，按式（2）计算燃料电池性能衰减率 A ：

$$A = V_1 n_1 + \frac{V_{\text{低}}}{60} t_1 + \frac{V_{\text{额}}}{60} t_2 \dots\dots\dots(2)$$

式中：

A ——燃料电池堆性能衰减率，单位为伏每小时（V/h）；

V_1 ——变载工况致使燃料电池电压变化率，单位为伏每次（V/次）；

n_1 ——每小时加载次数，单位为次每小时（次/h）；

$V_{\text{低}}$ ——低载工况致使燃料电池电压变化率，单位为伏每小时（V/h）；

t_1 ——低载工况每小时运行时间，单位为分（min）；

$V_{\text{额}}$ ——额定工况致使燃料电池电压变化率，单位为伏每小时（V/h）；

t_2 ——额定工况每小时运行时间，单位为分（min）。

5.7.2 当固定式质子交换膜燃料电池堆工况为在额定工况下长期稳定运行时，按式（3）计算燃料电池性能衰减率 A ：

$$A = V_{\text{衰}} \cdots \cdots (3)$$

式中：

A ——燃料电池堆性能衰减率，单位为伏每小时（V/h）；

$V_{\text{衰}}$ ——额定工况致使燃料电池电压变化率，单位为伏每小时（V/h）；

5.7.3 按式（4）计算燃料电池堆使用寿命 t_{LF} 范围：

$$t_{LF} \in \left[\frac{0.1 * V_0}{|A|} + 100, \frac{0.2 * V_0}{|A|} + 100 \right) \cdots \cdots (4)$$

式中：

t_{LF} ——燃料电池堆使用寿命，单位为小时（h）；

V_0 ——燃料电池堆初始电压，单位为伏（V）。

6 测评报告

实验的测试结果整理内容应包括：

- 实验所用标气成分配比表；
- 燃料电池堆额定电流及额定功率；
- 工况谱参数；
- 各工况下燃料电池堆性能变化速度；
- 在确定的工况谱下燃料电池堆使用寿命；
- “电流密度-燃料电池平均单节电压”曲线汇总图；
- 活化后各节燃料电池在基准电流下的电压分布图，给出标准方差；
- 100h 稳定性测试后各节燃料电池在基准电流下的电压分布图，给出标准方差；
- 完成全部测试后各节燃料电池在基准电流下的电压分布图，给出标准方差。