



# 中华人民共和国国家标准

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

Evaluation method for lifetime of proton exchange membrane fuel cell  
stack in vehicle application

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会

目 次

前言 ..... III

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 测试设备及条件 ..... 2

    4.1 测试对象 ..... 2

    4.2 测试平台及测试对象安装 ..... 2

    4.3 测试环境与基本要求 ..... 3

    4.4 特别规定 ..... 3

5 使用寿命测试方法 ..... 3

    5.1 总则 ..... 3

    5.2 活化、测试及稳定性考核 ..... 3

    5.3 分工况测试 ..... 5

    5.4 寿命测试结束时的发电性能测试 ..... 9

    5.5 循环工况谱的确定 ..... 10

    5.6 性能衰减率和燃料电池使用寿命计算 ..... 10

6 测评报告 ..... 11

参考文献 ..... 12

# 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。  
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这些专利的责任。  
本标准由中国电器工业协会提出。  
本标准由全国燃料电池及液流电池标准化技术委员会(SAC/TC 342)归口。

本标准起草单位:清华大学、中国科学院大连物理化学研究所、武汉理工大学、新研氢能科技有限公司、广东国鸿氢能科技有限公司、新源动力股份有限公司、南京大学、机械工业北京电工技术经济研究所、北京上电科赛睿科技有限公司、中国质量认证中心、上海神力科技有限公司、上海市质量监督检验技术研究院、航天新长征电动汽车技术有限公司、广东合即得能源科技有限公司、北京氢璞创能科技有限公司、上海重塑能源科技有限公司、上海攀业氢能源科技有限公司、上海恒劲动力科技有限公司、东莞众创新能源科技有限公司、苏州弗尔赛能源科技股份有限公司、南京东焱氢能源科技有限公司、中国船舶重工集团公司第七一二研究所、福建亚南电机有限公司、无锡市产品质量监督检验院、上海机动车检测认证技术研究中心有限公司、丰田汽车(中国)投资有限公司、北京亿华通科技股份有限公司、上海博暄能源科技有限公司、浙江高成绿能科技有限公司、山东东岳未来氢能材料有限公司。

本标准主要起草人:裴普成、衣宝廉、潘牧、齐志刚、燕希强、邢丹敏、刘建国、张亮、卢琛钰、王刚、周斌、李松丽、侯明、俞红梅、王诚、靳殷实、黄平、朱俊娥、胡哲、董辉、胡磊、徐伟强、徐加忠、顾军、叶东浩、林玉祥、陈耀、裴冯来、张倩、刘然、田丙伦、侯向理、邹业成。



# 车用质子交换膜燃料电池堆使用寿命 测试评价方法

## 1 范围

本标准规定了车用质子交换膜燃料电池堆的使用寿命测试和计算方法。

本标准适用于道路车辆和非道路车辆用质子交换膜燃料电池堆的寿命测试和评价。

注：本标准暂不考虑实验室与道路环境空气质量差异的影响。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 质子交换膜燃料电池 第1部分：术语

GB/T 23645—2009 乘用车用燃料电池发电系统测试方法

GB/T 28183—2011 客车用燃料电池发电系统测试方法

GB/T 29838—2013 燃料电池 模块

GB/T 36288—2018 燃料电池电动汽车 燃料电池堆安全要求

GB/T 37244—2018 质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气

## 3 术语和定义

GB/T 20042.1、GB/T 23645—2009、GB/T 28183—2011、GB/T 29838—2013 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**怠速电流 idling current**

被测燃料电池堆对应车载燃料电池系统在怠速工况下燃料电池堆的输出电流，此电流下燃料电池堆能够维持燃料电池系统自身工作一定时间，但对外不输出功率。

### 3.2

**额定电流 rated current**

被测燃料电池堆对应车载燃料电池系统在额定工况下燃料电池堆的输出电流，此电流下燃料电池堆能够维持运行一定时间。

### 3.3

**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。

### 3.4

**工况循环 operation mode cycle**

被测燃料电池堆对应车载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

## 车用燃料电池堆使用寿命 lifetime of fuel cell stack in vehicle application

燃料电池堆在车用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 测试设备及条件

## 4.1 测试对象

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物。所测的电池堆,内部膜电极及双极板的结构尺寸和材料与实际应用的燃料电池堆相同。

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物为测试对象。测试对象需要从系统中取出后安装于测试平台进行测试。

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 GB/T 36288—2018 的基本安全要求。

## 4.2 测试平台及测试对象安装

主要测量器件及测量精度见表 1。

表 1 主要测量器件及精度

测量器件	精度
湿度测量装置	相对湿度不低于 $\pm 3.0\%$
温度测量装置	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 $\pm 1.0\%$ FS(满量程)
空气质量流量测量装置	不低于 $\pm 1.0\%$ FS
电压测量装置	不低于 $\pm 0.5\%$ FS
电流测量装置	不低于 $\pm 0.5\%$ FS

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,并记录测量参数;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。可使用任何一方提供的测试平台,但应满足本标准要求。

要求进气温度、湿度、压力传感器布置在电池堆进气口上游 100 mm 之内,电池堆温度传感器布置在冷却液出口下游 100 mm 之内或电池堆内部,进气流量计布置于气体增湿之前的管路。如果燃料电池堆或模块外壳的特殊设计造成传感器布置位置无法达到前述位置(100 mm 范围之内),则可由测试方与委托方协商解决。

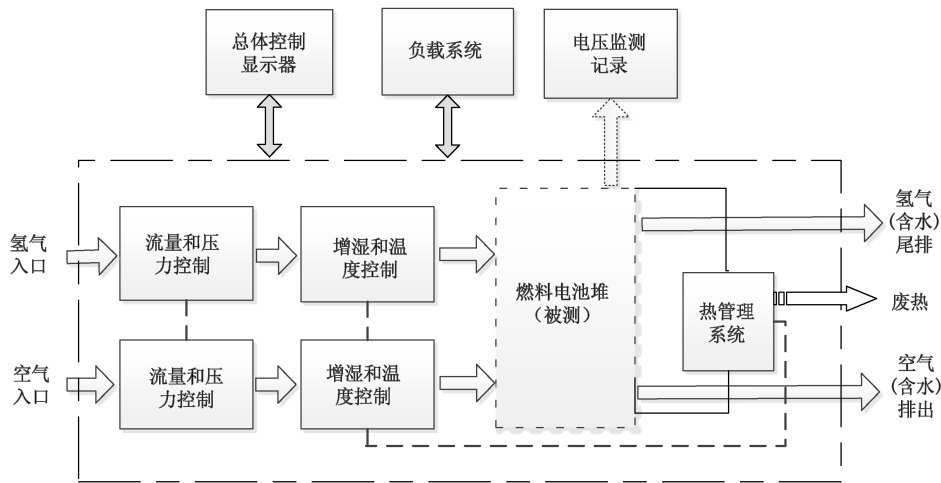


图 1 燃料电池堆测试平台示意图

完成测试设备与燃料电池堆或模块连接后,确认燃料电池堆各接口处不泄漏,并用手持式或其他类型的氢气检测仪检查燃料电池堆的氢气密封性。

4.3 测试环境与基本要求

规定测试环境条件为:海拔不超过 1 000 m,环境温度为 5℃~40℃,实验室与室外应保持通风。  
基本要求:所用氢气纯度应不低于 99.97%,符合 GB/T 37244—2018 的规定。

4.4 特别规定

燃料电池堆的测试评价应依据以下规定执行:

- 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 0.65 V 时的电流;
- 燃料电池堆怠速电流:由委托方指定,或对应燃料电池平均每节电压 0.85 V 时的电流;
- 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 0.70 V 时的电流;
- 车用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 10%。

5 使用寿命测试方法

5.1 总则

要求依次完成下面的各项测试,不得调整测试顺序。除特别规定的情况外,加载和减载过程一般按委托方要求的控制方法完成操作。当发生意外停机时,要及时降低燃料电池堆电压至各节 0.3 V 以下。  
下列情况可判定为电堆损坏或寿命终结,可结束寿命测试:

- 燃料电池堆不能稳定运行;
- 额定电流工况下某节燃料电池电压低于 0.3 V(水淹情况除外);
- 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 活化、测试及稳定性考核

5.2.1 燃料电池堆活化

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

完成活化后,测试燃料电池堆发电性能。测试中燃料电池堆进气温度、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参数由委托方指定。

发电性能测试方法:在怠速至平均每节燃料电池电压 0.60 V 范围,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 0.70 V±0.005 V 工况,记录各节燃料电池电压。

由“电流-电压”测试结果,确定燃料电池的基准电流、怠速电流和额定电流。

5.2.3 燃料电池堆稳定性考核与初始电压  $V_0$  的确定

按照图 2 和表 2 进行 100 h 运行。工况谱为:每小时启停 1 次、加载 27 次、怠速 21 min、额定工况 18 min。燃料电池堆每运行 4 h,停机休息 1 h。

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。

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。

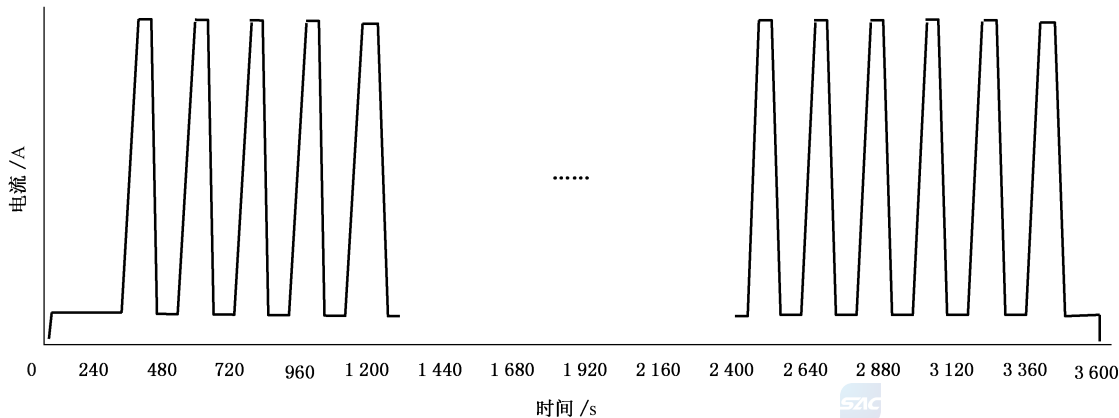


图 2 用于燃料电池堆稳定性考核的参比工况谱

表 2 燃料电池堆稳定性考核操作规程

步骤	工况	要求	
1	启动	前提条件	各节燃料电池电压<0.3 V
		过程	按委托方要求的控制方法完成启动
2	怠速	停留时间	180 s
3	循环变载	计数完成变载 27 次	
		加载过程时间	30 s
		加载终点	额定电流
		额定电流停留时间	35 s
		减载过程	16 s
		减载终点	怠速电流
		怠速停留时间	40 s
4	停机	按委托方要求的控制方法完成停机,燃料电池堆在停机后 1 min 内电压降至开路电压 50%以下	

5.3 分工况测试

5.3.1 分工况测试要求

应依次完成怠速工况、额定工况、变载工况、启停工况等试验。

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。如果发生意外停机,应及时降低燃料电池堆电压至各节 0.3 V 以下,可继续试验。

分工况的测试,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。如要预测燃料电池堆在其他特殊控制策略下的使用寿命,可参考分工况测试方法重新制定测试方法进行测试,但利用本标准所计算的使用寿命应注明其特殊条件。

5.3.2 怠速工况

怠速实验循环工况包括启动、怠速考核、测基准电流工况电压、停机过程,测试循环如图 3 所示,操作规程见表 3。

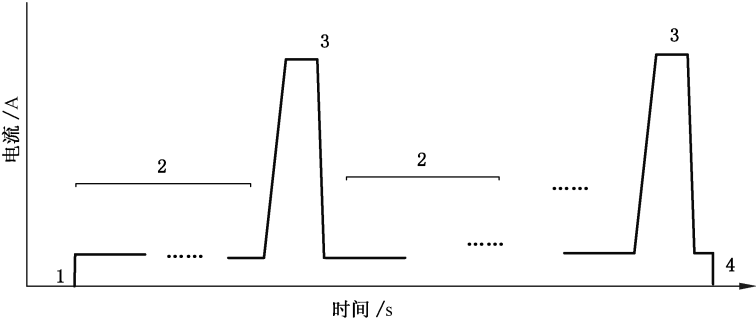


图 3 燃料电池堆怠速测试循环

表 3 燃料电池堆怠速测试循环操作规程

步骤	工况	要求	
1	启动	前提条件	各节燃料电池电压<0.3 V
		停留电流	怠速
2	怠速	开始计时	
		运行电流	怠速电流
3	基准电流工况	每隔约 1 h,从怠速加载到基准电流工况,维持 90 s,记录电压,减载至怠速工况	
4	停机	条件	怠速工况及基准电流工况连续运行 4 h
		停机及处理	按委托方要求的控制方法完成停机,燃料电池堆在停机后1 min 内电压降至开路电压 50 % 以下

每 4 h 完成 1 个测试循环,至少完成 15 个循环,每个循环停机后至少休息 1 h。

根据所记录基准电流工况的电压,绘制“燃料电池平均单节电压-怠速时间(h)”图。对每个怠速循环最后所测基准电流工况电压进行线性拟合,得电压变化率  $V'_1$ 。

按式(1)计算怠速工况致使燃料电池电压变化率  $U'_1$ :

$$U'_1 = V'_1 - \frac{V'_1}{4} \dots\dots\dots (1)$$





式中：

$U'_1$ ——怠速工况致使燃料电池电压变化率,单位为伏每小时(V/h)；

$V'_\text{怠}$ ——每个怠速循环最后所测基准电流工况电压进行线性拟合,单位为伏每小时(V/h)；

$V'_1$ ——每次启停的电压衰减率[见 5.3.5 式(4)],单位为伏每次(V/次)。

### 5.3.3 额定工况

额定工况试验循环包括启动、怠速、额定电流工况、记录基准电流工况电压、怠速-停机,测试循环如图 4 所示,具体操作规程见表 4。

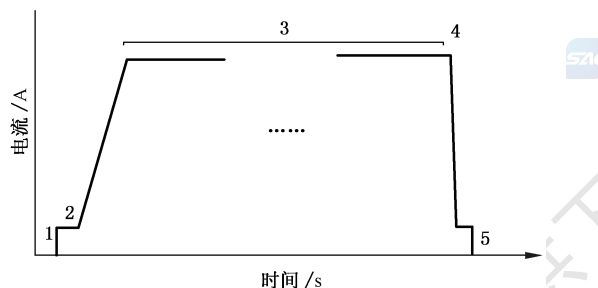


图 4 燃料电池堆额定工况测试循环

表 4 燃料电池堆额定工况测试循环操作规程

步骤	工况	要求	
1	启动	前提条件	各节燃料电池电压 $\leq 0.3$ V
		停留电流	怠速
2	怠速	停留时间	90 s
3	额定工况	开始计时	
		运行电流	额定电流
		变载过程时间	加载过程 30 s, 减载过程 16 s
4	基准电流工况	每隔约 1 h, 从额定工况变载到基准电流工况, 维持 90 s, 记录电压, 再回额定工况	
5	怠速-停机	条件	额定工况及基准电流工况连续运行 4 h
		怠速停留时间	30 s
		停机及处理	按委托方要求的控制方法完成停机, 燃料电池堆在停机后 1 min 内电压降至开路电压 50% 以下

每 4 h 完成 1 个测试循环, 至少完成 15 个循环, 每个循环停机后至少休息 1 h。

根据所记录基准电流工况的电压, 绘制“燃料电池平均单节电压-额定工况时间(h)”图, 对每个额定工况循环最后所测基准电流工况电压进行线性拟合, 得电压变化率  $V'_\text{额}$ 。

按式(2)计算额定工况致使燃料电池电压变化率  $U'_2$ ：

$$U'_2 = V'_\text{额} - \frac{V'_1}{4} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$U'_2$ ——额定工况致使燃料电池电压变化率,单位为伏每小时(V/h)；

$V'_\text{额}$ ——每个额定工况循环最后所测基准电流工况电压进行线性拟合,单位为伏每小时(V/h)；

$V'_1$  ——每次启停的电压衰减率,单位为伏每次(V/次)。

5.3.4 变载工况

变载测试循环包括启动、怠速、循环变载考核、测基准电流工况电压、停机过程,测试循环如图 5 所示,具体操作规程见表 5。

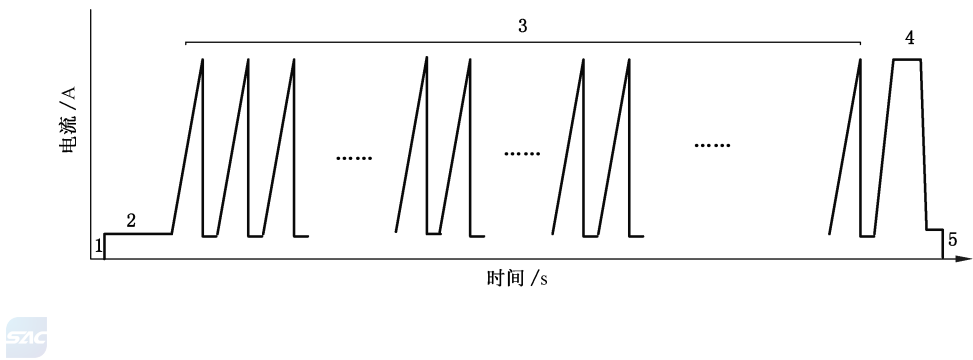


图 5 燃料电池堆变载工况测试循环

表 5 燃料电池堆变载工况测试循环操作规程

步骤	工况	要求	
1	启动	前提条件	各节燃料电池电压<0.3 V
		停留电流	怠速
2	怠速	停留时间	240 s
3	循环变载	开始记录加载次数	
		加载幅度	从怠速电流到额定电流
		加载过程时间	30 s
		额定电流停留时间	3 s
		减载过程	16 s
		减载终点	怠速电流
		怠速停留时间	15 s
4	基准电流工况 (记 1 次加载)	条件	完成加载 216 次考核
		方法	从怠速加载到基准电流工况维持 90 s,记录电压, 减载至怠速工况,怠速停留 200 s
5	停机	按委托方要求的控制方法完成停机,燃料电池堆在停机后 1 min 内电压降至开路电压 50%以下	

每 4 h 完成 1 个测试循环,至少完成 15 个循环,每个测试循环停机后至少休息 1 h。

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,每次基准电流工况电压测量代表 217 次变载,对所测电压点做线性拟合,得到电压变化率  $V'_{\text{变}}$ 。

按式(3)计算变载工况致使燃料电池电压变化率  $V'_2$ :

$$V'_2 = V'_{\text{变}} - \frac{1}{217} \left( V'_1 + \frac{3\,680 \cdot U'_1}{3\,600} + \frac{738 \cdot U'_2}{3\,600} \right) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- $V'_2$ ——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,单位为伏每次(V/次)；
- $V'_1$ ——每次启停的电压衰减率,单位为伏每次(V/次)；
- $U'_1$ ——怠速工况致使燃料电池电压变化率,单位为伏每小时(V/h)；
- $U'_2$ ——额定工况致使燃料电池电压变化率,单位为伏每小时(V/h)。

每个测试循环,对应一次启停循环。绘制“燃料电池平均单节电压-测试循环次数”图。对所测电压点做线性拟合,得到电压变化率  $V'_{\text{循环1}}$ ,单位为伏每次(V/次)。

5.3.5 启停工况

将变载测试循环中间增加 7 次启停,拆分成 8 段完成,每 30 min 左右为 1 个“启动-变载-停机”小循环,如图 6 所示。1 个完整循环的测试,包括 8 次启停、217 次加载、额定工况时间 738 s、怠速时间 3 680 s,其中最后一次加载到基准电流工况维持 90 s,记录电压。表 6 是测试循环操作规程。

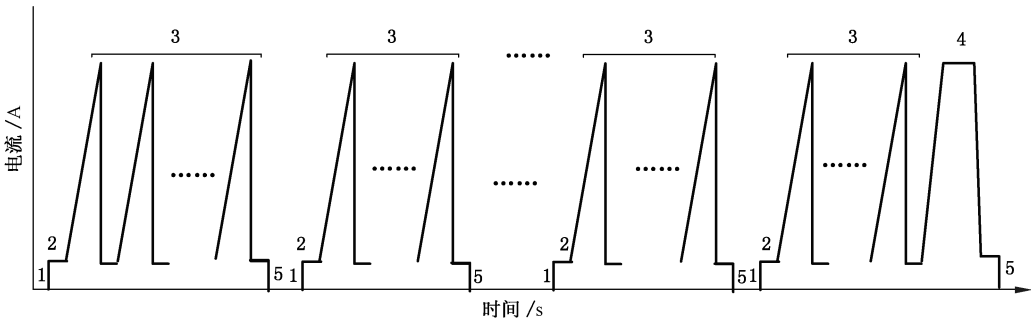


图 6 燃料电池堆启停工况测试循环

表 6 燃料电池堆启停工况测试循环操作规程

步骤	工况号	工况	要求	
第 1 小循环	1	启动	前提条件	各节燃料电池电压<0.3 V
			停留电流	怠速
	2	怠速	停留时间	30 s
	3	循环变载 (27 次)	记录加载次数	
			加载始点	怠速电流
			加载过程时间	30 s
			加载终点	额定电流
			额定电流停留时间	3 s
			减载过程	16 s
			减载终点	怠速电流
			怠速停留时间	15 s
	4	停机	按委托方要求的控制方法完成停机,燃料电池堆在停机后 1 min 内电压降至开路电压 50% 以下	

表 6（续）

步骤	工况号	工况	要求
第 2 小循环	1	启动	同上工况 1
	2	怠速	30 s
	3	循环变载 (27 次)	同上工况 3
	4	停机	同上工况 3
第 3 小循环 $m_3$ 次变载(各工况同上) 至 第 7 小循环 $m_7$ 次变载(各工况同上)			
第 8 小循环	1	启动	同上工况 1
	2	怠速	30 s
	3	循环变载 (27 次)	同上工况 3
	4	基准电流工况 (记 1 次加载)	从怠速加载到基准电流工况维持 90 s,记录电压,减载至怠速工况, 怠速停留 200 s
	5	停机	按委托方要求的控制方法完成停机,燃料电池堆在停机后 1 min 内电压降至开路电压 50%以下

每 8 个小循环为 1 个测试循环,至少完成 15 个循环,每完成一个测试循环停机休息至少 1 h。  
根据所记录基准电流工况的电压,绘制“燃料电池平均单节电压-测试循环次数”图。对所测基准电  
流工况电压点做线性拟合,得到电压变化率  $V'_{\text{循环}2}$ 。

结合 5.3.4 测试  $V'_{\text{循环}1}$  结果,用式(4)计算每次启停致使燃料电池电压变化率  $V'_1$ ：

$$V'_1 = \frac{1}{7}(V'_{\text{循环}2} - V'_{\text{循环}1}) \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- $V'_1$  ——每次启停的电压衰减率,单位为伏每次(V/次)；
- $V'_{\text{循环}2}$  ——所测基准电流工况电压点做线性拟合,单位为伏每次(V/次)；
- $V'_{\text{循环}1}$  ——变载工况下,所测电压点做线性拟合,单位为伏每次(V/次)。

5.3.6 其他工况

特指从委托方指定的驾驶循环中提取出的除上述工况外的其他具有较高频次的工况,如 60%额定  
电流、120%额定电流等稳定工况以及这些工况间的变工况。

其他稳定工况的测试方法,可参照额定工况循环测试方法;其他变工况的测试方法,可参照变载工  
况循环测试方法。



5.4 寿命测试结束时的发电性能测试

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。

## 5.5 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”。“参比工况谱”,用于预测燃料电池堆在统一的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。

参比工况谱参数,包括:

- 每小时启停次数  $n_1=1$  次;
- 每小时加载次数  $n_2=27$  次,每次加载过程 30 s 减载过程 16 s;
- 每小时怠速运行时间  $t_1=21$  min;
- 每小时额定工况运行时间  $t_2=18$  min。

委托方提供燃料电池堆工况谱参数,包括:

- 每小时启停次数  $n_1$ (次);
- 怠速运行时间  $t_1$ (min);
- 加载次数  $n_2$ (次)、每次加载和减载过程时间(s);
- 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  $3\,600\text{ s} \pm 30\text{ s}$ 。关于变载次数的统计方法,可参考机械疲劳损伤理论中的变载统计方法。

## 5.6 性能衰减率和燃料电池使用寿命计算

按式(5)计算燃料电池堆性能衰减率  $A$ :

$$A = V'_1 n_1 + V'_2 n_2 + \frac{U'_1}{60} t_1 + \frac{U'_2}{60} t_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- $A$  ——燃料电池堆性能衰减率,单位为伏每小时(V/h);
- $V'_1$  ——每次启停的电压衰减率[见 5.3.4 式(4)],单位为伏每次(V/次);
- $n_1$  ——每小时启停次数,单位为次每小时(次/h);
- $V'_2$  ——变载工况致使燃料电池电压变化率,单位为伏每次(V/次);
- $n_2$  ——每小时加载次数,单位为次每小时(次/h);
- $U'_1$  ——怠速工况致使燃料电池电压变化率,单位为伏每小时(V/h);
- $t_1$  ——每小时怠速运行时间,单位为分(min);
- $U'_2$  ——额定工况致使燃料电池电压变化率,单位为伏每小时(V/h);
- $t_2$  ——每小时额定工况运行时间,单位为分(min)。

对于更多工况情况,按式(6)计算燃料电池堆性能衰减率  $A$ :

$$A = V'_1 n_1 + V'_2 n_2 + \frac{U'_1}{60} t_1 + \frac{U'_2}{60} t_2 + \sum_{i=3} (V'_i n_i) + \frac{1}{60} \sum_{j=3} (U'_j t_j) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- $V'_i$  ——其他变工况致使燃料电池电压衰减率,单位为伏每次(V/次);
- $n_i$  ——每小时其他变工况次数,单位为次每小时(次/h);
- $U'_j$  ——其他稳定工况致使燃料电池电压衰减率,单位为伏每小时(V/h);
- $t_j$  ——每小时其他稳定工况运行时间,单位为分钟(min)。

按式(7)计算燃料电池堆使用寿命  $t_{Lf}$  范围:

$$t_{Lf} \in \left[ \frac{0.075 \times V_0}{|A|} + 100, \frac{0.1 \times V_0}{|A|} + 100 \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$t_{Lif}$ ——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

评估报告应包含以下内容：

- 电池堆型号；
- 测试条件；
- 测试单位；
- 测试时间；
- 相关人员签字。

对测试结果整理内容应包括：

- 燃料电池堆额定电流及额定功率；
- 燃料电池堆怠速电流；
- 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；
- 100 h 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。

### 参 考 文 献

- [1] 酆明,奥脱·布克斯鲍姆,哈茨·罗华克.结构抗疲劳设计.北京:机械工业出版社,1987:68-84.
- [2] 裴普成,黄海燕.一种快速评价车用燃料电池使用寿命的方法.中国发明专利 ZL200710100151.4.
- [3] Pucheng Pei, Qianfei Chang, Tian Tang. A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY. 33(14):3829-3836, 2008.
- [4] Huicui Chen, Pucheng Pei, Mancun Song. Lifetime prediction and the economic lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells. APPLIED ENERGY. 142:154-163, 2015.
- [5] Pucheng Pei, Dongfang Chen, Ziyao Wu, Peng Ren. Nonlinear methods for evaluating and online predicting the lifetime of fuel cells. APPLIED ENERGY. 254, No.113730, 15 November 2019
- [6] Amanda Collier, Haijiang Wang, Xiao Zi Yuan, et al. Degradation of polymer electrolyte membranes. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY. 31(13):1838-1854, 2006.

