



中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 44116—2024

燃料电池发动机及关键部件 耐久性试验方法

Test methods for durability of fuel cell engine and its key components

2024-05-28 发布

2024-05-28 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 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 测量参数、单位和准确度 2

5 燃料电池发动机耐久性试验方法 2

 5.1 试验要求 2

 5.2 试验方法 3

 5.3 数据处理 6

6 车用燃料电池堆耐久性试验方法 10

 6.1 试验要求 10

 6.2 试验方法 10

 6.3 数据处理 13

7 车用燃料电池膜电极耐久性试验方法 14

 7.1 试验要求 14

 7.2 试验方法 14

 7.3 数据处理 16

8 燃料电池发动机用空气压缩机耐久性试验方法 17

 8.1 试验要求 17

 8.2 试验方法 18

 8.3 数据处理 19

9 燃料电池发动机用氢气循环泵耐久性试验方法 19

 9.1 试验要求 19

 9.2 试验方法 20

 9.3 数据处理 20

附录 A(规范性) 燃料电池发动机耐久性试验流程 22

附录 B(规范性) 燃料电池发动机耐久性循环工况 23

附录 C(规范性) 燃料电池堆耐久性循环工况 26

附录 D(资料性) 膜电极测试夹具和组装要求 28

附录 E(规范性) 燃料电池膜电极耐久性循环工况 29

附录 F(资料性) 燃料电池膜电极活化运行工况和可逆损失恢复程序 31

附录 G(资料性) 燃料电池发动机保养、故障、试验不可抗力情况记录表 33

附录 H(资料性) 燃料电池发动机耐久性试验数据记录表 35

附录 I(资料性) 燃料电池堆耐久性试验数据记录表 38

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。

本文件由中华人民共和国工业和信息化部提出。

本文件由全国汽车标准化技术委员会(SAC/TC 114)归口。

本文件起草单位：中汽研新能源汽车检验中心(天津)有限公司、中国汽车技术研究中心有限公司、东风汽车集团股份有限公司、联合燃料电池系统研发(北京)有限公司、中国第一汽车股份有限公司、上海重塑能源科技有限公司、国家电投集团氢能科技发展有限公司、广州汽车集团股份有限公司、新源动力股份有限公司、同济大学、东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司、国鸿氢能科技(嘉兴)股份有限公司、未势能源科技有限公司、深圳市氢蓝时代动力科技有限公司、丰田汽车(中国)投资有限公司、宇通客车股份有限公司、襄阳达安汽车检测中心有限公司、上海机动车检测认证技术研究中心有限公司。

本文件主要起草人：郝冬、兰昊、张妍懿、史建鹏、何云堂、张剑、罗凡、王侃侃、柳邵辉、曲函师、王宇鹏、郑天雷、杨铠、翟双、韩立勇、高宇、郭温文、占文锋、邢丹敏、孙昕、马继成、陈光、侯永平、刘煜、孔红兵、刘志祥、李龙、田俊龙、崔天宇、张立森、曹桂军、闫江燕、许诺、张龙海、王丹、裴冯来。

燃料电池发动机及关键部件 耐久性试验方法

1 范围

本文件描述了燃料电池发动机、燃料电池堆、膜电极、空气压缩机、氢气循环泵的耐久性试验方法。
本文件适用于车用质子交换膜燃料电池发动机及关键部件。

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 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定
- GB/T 20042.2—2023 质子交换膜燃料电池 第2部分：电池堆通用技术条件
- GB/T 24548 燃料电池电动汽车 术语
- GB/T 24554—2022 燃料电池发动机性能试验方法
- GB/T 36288—2018 燃料电池电动汽车 燃料电池堆安全要求
- GB/T 37244 质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气

3 术语和定义

GB/T 24548 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

平均单电池电压 average cell voltage

燃料电池堆的电压与燃料电池堆单电池数量的比值。

注：如燃料电池堆中有不输出电能的单电池，则其不包含在单电池数量内。

3.3

燃料电池发动机参考电流 reference current of fuel cell engine

燃料电池发动机在耐久性试验前进行稳态特性试验时，选定的功率点对应的燃料电池堆电流。

注： P_E 为燃料电池发动机额定功率（初始值），本文件选取燃料电池发动机在 $100\%P_E$ 、 $50\%P_E$ 和 $10\%P_E$ 对应的燃料电池堆电流 I_{100} 、 I_{50} 、 I_{10} 作为参考电流。

3.3

燃料电池堆参考电流 reference current of fuel cell stack

在耐久性试验中，初始极化曲线测试中燃料电池堆对应平均单电池电压为 $0.700\text{ V} \pm 0.005\text{ V}$ 时的电流。

3.4

氢气循环系统 hydrogen recirculation system

将燃料电池堆阳极出口的流体介质循环输送至燃料电池堆阳极入口的装置。

注：一般由氢气循环泵、引射器的单个或多个组合形式构成。

4 测量参数、单位和准确度

表 1 规定了试验测量的参数、单位和准确度。

表 1 测量参数、单位和准确度要求

测量参数	单位	准确度	分辨率
时间	s	±1.0	0.1
电压	V	±0.5% FSD ^a	0.1
单电池电压	V	±0.05% FSD ^a	0.00 1
电流	A	±0.5% FSD ^a	0.1
单电池电流	A	±0.05% FSD ^a	0.001
温度	℃	±1.0	0.1
压强	kPa	±1.0	0.1
气体流量 ^b	L/min	±1.0% FSD ^a	0.1
气体流量 ^{b,c}	L/min	±1.0% FSD ^a	0.01
液体流量	L/min	±1.0% FSD ^a	0.1
相对湿度	—	±3.0%	—
电导率	μS/cm	±0.5% FSD ^a	0.001
^a FSD:最大显示或标尺的长度。 ^b 气体在温度为 0 ℃,压力为 101 325 Pa 的条件下。 ^c 针对气密性测试的要求。			

5 燃料电池发动机耐久性试验方法

5.1 试验要求

5.1.1 环境要求

试验环境符合以下要求：

- 环境温度应处于 23 ℃±5 ℃；
- 环境压力应处于 96 kPa~106 kPa 范围内。

5.1.2 燃料电池发动机要求

燃料电池发动机满足以下要求：

- 应保持燃料电池发动机出厂时的外形结构和技术参数；
- 燃料电池发动机各系统应完整；
- 燃料电池发动机应有可靠的安全保障系统；
- 燃料电池发动机的绝缘性能、气密性等涉及安全的性能应符合制造商要求；
- 燃料电池发动机的冷却剂宜采用专用防冻液。

5.1.3 试验平台及试验用氢气要求

试验平台和使用的氢气符合以下要求：

- 试验平台应提供稳定可靠的高低压电源，试验过程中燃料电池发动机的辅助系统可采用外部电源供给的方式；
- 试验平台应提供满足燃料电池发动机所需的散热条件；
- 试验平台通过 CAN 通信向燃料电池发动机发送指令的频率应不低于 10 Hz；
- 试验用氢气应符合 GB/T 37244 的规定。

5.1.4 燃料电池发动机控制要求

燃料电池发动机的控制符合以下要求。

- 试验过程中，燃料电池发动机的起动、加载、降载、停机等均由试验平台按照制造商提供的通信协议进行控制。
- 燃料电池发动机的停机时长应自试验平台发送停机指令开始计时，至下一次由试验平台发送起动指令停止计时；待燃料电池发动机的停机过程（含吹扫过程）结束后，应切断试验平台提供的高低压电源和氢气供给。

5.1.5 试验数据采集、计算要求

试验数据采集、计算满足以下要求：

- 试验数据采集频率应不低于 5 Hz；
- 循环工况试验过程中，宜每连续采集不超过 5 h 进行一次数据分段保存；
- 试验中采集的数据应至少包括燃料电池堆的电压、燃料电池堆的电流、单电池电压（若有）、环境温度和湿度、冷却液温度、辅助系统各部件的电压、辅助系统各部件的电流、氢气流量；
- 辅助系统功率应包括空气压缩机、氢气循环系统、冷却泵、控制器等部件所消耗的功率，散热器风扇和空气压缩机散热系统的功率不计入辅助系统功率内；
- 在数据处理过程中，应按照 GB/T 8170 的规定修约至小数点后 2 位，特殊说明除外。

5.2 试验方法

5.2.1 耐久性试验

5.2.1.1 试验准备阶段

试验准备阶段按照附录 A 进行以下步骤：

- a) 按照 5.2.2 对燃料电池发动机进行气密性测试，然后按照 5.2.3 进行绝缘电阻测试，测试结果应满足 5.2.6 的要求；
- b) 按照制造商的要求对燃料电池发动机进行准备和活化，但总时间不应超过 100 h；
- c) 按照 5.2.4 进行第一次稳态特性试验，按照 5.2.5 进行第一次动态响应特性试验，然后停机 2 h；
- d) 按照 5.2.4 进行第二次稳态特性试验，按照 5.2.5 进行第二次动态响应特性试验，然后使燃料电池发动机运行在怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点）。

5.2.1.2 耐久性试验阶段

完成试验准备阶段后，燃料电池发动机耐久性试验按照附录 A 进行以下步骤。

- a) 在 10 min 之内，开始按照附录 B 的循环工况进行加载，加载过程中燃料电池发动机的净输出

功率应满足 5.2.7 规定的循环工况功率公差要求。

- b) 每累计完成 5 h 循环工况(即 10 个循环工况,记为一组)后,停机 15 min。
- c) 每累计完成 20 h 循环工况(即 40 个循环工况)后,停机 5 h。
- d) 每累计完成 200 h 循环工况(即 400 个循环工况)后,进行以下步骤:
 - 1) 按照 5.2.4 进行一次稳态特性试验,按照 5.2.5 进行一次动态响应特性试验,然后停机,在热机状态下按照 5.2.3 进行绝缘电阻测试,待停机达到 5 h 后,按照 5.2.2.1 进行氢气流道气密性测试;
 - 2) 按照 5.2.8 的规定,由制造商对燃料电池发动机进行保养,保养过程的总时间不应超过 5 h,并应将保养情况记录至附录 G 的表 G.1 中;
 - 3) 保养结束后,再次按照 5.2.2.1 进行氢气流道气密性测试,按照 5.2.3 进行绝缘电阻测试,测试结果应满足 5.2.6 的要求;
 - 4) 再次按照 5.2.4 进行一次稳态特性试验,按照 5.2.5 进行一次动态响应特性试验,然后使燃料电池发动机运行在怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点)。
- e) 重复上述步骤 a)~d),直至达到 5.2.10 规定的试验终止条件后,使燃料电池发动机停机。停机后,可根据制造商要求选择是否按照 5.2.2.2 对燃料电池发动机进行整体气密性测试,完成以上步骤后,终止试验。试验过程中,如果出现燃料电池发动机故障或试验不可抗力,则按照 5.2.9 的规定进行处理,并应将相关情况记录至表 G.2 或表 G.3 中。
- f) 按照 5.3 处理试验数据,并将结果记录至附录 H 的表 H.2 中。

5.2.2 气密性测试

5.2.2.1 氢气流道气密性测试

燃料电池发动机的氢气流道气密性测试按照 GB/T 24554—2022 中 8.8.2.1 进行。

5.2.2.2 整体气密性测试

燃料电池发动机的整体气密性测试按照 GB/T 24554—2022 中 8.8.2.2 进行。

5.2.3 绝缘电阻测试

若燃料电池发动机未处于热机状态,应按照 GB/T 24554—2022 中 7.4 使燃料电池发动机达到热机状态,然后按照 GB/T 24554—2022 中 8.9 进行燃料电池发动机的绝缘电阻测试。

5.2.4 稳态特性试验

燃料电池发动机稳态特性试验按照以下步骤进行:

- a) 若燃料电池发动机未处于热机状态,则首先按照 GB/T 24554—2022 中 7.4 使其达到热机状态;
- b) 热机过程结束后,回到怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点)运行 10 s;
- c) 按照表 H.1 或表 H.2 规定的工况点进行燃料电池发动机稳态特性试验,测试平台向燃料电池系统发送加载指令,在每个工况点至少稳定运行 3 min;
- d) 每个工况点的分析数据时间长度不应少于 2 min,将试验数据记录到表 H.1 或表 H.2 中。

5.2.5 动态响应特性试验

按照 GB/T 24554—2022 中 8.4 进行燃料电池发动机动态响应特性试验。

5.2.6 试验安全要求

- 试验过程中,燃料电池发动机的安全性满足以下要求:
- 燃料电池发动机的气密性应满足制造商的要求;
 - 燃料电池发动机的正负极对地的绝缘电阻应不低于 100 Ω/V 。

5.2.7 循环工况要求

5.2.7.1 一般要求

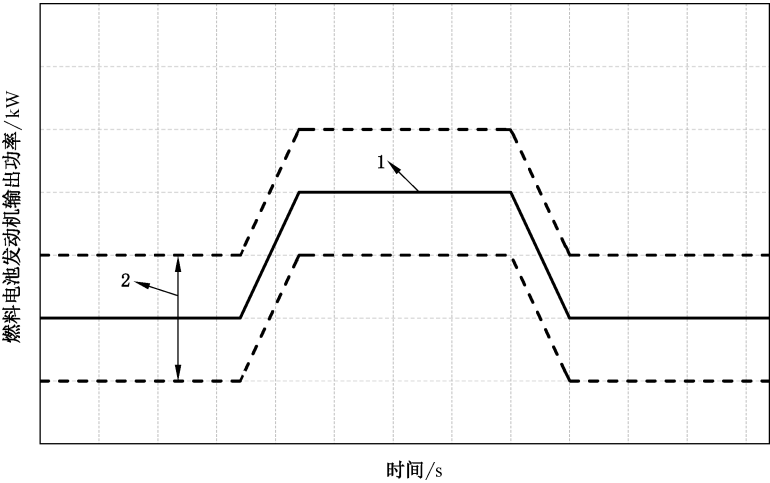
燃料电池发动机的耐久性循环工况及加载要求见附录 B。燃料电池发动机在功率加载或电流加载的方式下,均以燃料电池发动机的净输出功率作为循环工况功率公差判定对象。当燃料电池发动机的净输出功率出现衰减且无法满足 5.2.7.2 的要求时,可选用以下任一方式进行修正。

- 在试验停机期间,通过提高加载电流或加载功率的方式对循环工况进行调整,使燃料电池发动机的净输出功率满足循环工况功率公差要求。记录停机前的一组循环工况中符合公差要求的循环工况数 n 。调整后,继续进行循环工况试验,将上一组不符合公差要求的循环工况数 $(10-n)$ 加至下一组循环工况中,即连续完成 $(20-n)$ 个循环工况,试验过程中不再停机。
- 在循环工况试验期间,通过试验平台自动对提高加载电流或加载功率,使燃料电池发动机的净输出功率满足循环工况功率公差要求。

5.2.7.2 公差要求

燃料电池发动机实际功率和循环工况规定功率之间的允许公差规定为(如图 1 所示):

- 当循环工况规定的功率 P_{SET} 不大于 60 kW 时,功率公差为 ± 3 kW;
- 当循环工况规定的功率 P_{SET} 大于 60 kW 时,功率公差为 $\pm 5\% P_{SET}$ kW。



- 标引序号说明:
- 1—— 循环工况规定的功率曲线;
 - 2—— 功率公差,单位为千瓦(kW)。

图 1 基准曲线和公差

5.2.8 保养要求

燃料电池发动机的保养符合以下要求:

- 可按照制造商的要求更换燃料电池发动机的耗材,耗材包括空气滤清器、氢气过滤器、去离子器、冷却液杂质过滤器、冷却液;
- 不应更换燃料电池堆、空气压缩机、氢气循环系统、空气或氢气的增湿器、冷却泵、控制器;
- 允许变更燃料电池发动机的控制程序;
- 可按照制造商的要求对燃料电池发动机进行活化。

5.2.9 试验因故障或试验条件中断的处理要求

试验因故障或试验条件中断的处理符合以下要求。

- 1级故障,或不影响燃料电池发动机正常运行的故障。针对此类情况,可在试验停机期间,对燃料电池发动机进行维修。
- 2级故障,或影响燃料电池发动机的正常运行,且需要限制燃料电池发动机的功率输出的故障。针对此类情况,应立即停机,对燃料电池发动机进行维修,并记录停机时本组循环工况中已完成的个数 n 。维修后,继续进行循环工况试验,将本组未完成的循环工况数 $(10-n)$ 加至下一组循环工况中,即连续完成 $(20-n)$ 个循环工况,试验过程中不再停机。
- 3级故障,或燃料电池发动机必须立即停机的故障。针对此类情况,应立即停机,对燃料电池发动机进行检查,并记录停机时本组循环工况中已完成的个数 n 。如果该故障必须通过更换关键零部件(燃料电池堆、空压机、氢气循环系统、冷却泵、增湿器、控制器)后才能修复,则终止试验。如果该故障无需更换关键零部件即可修复,则维修后,继续进行循环工况试验,将本组未完成的循环工况数 $(10-n)$ 加至下一组循环工况中,即连续完成 $(20-n)$ 个循环工况,试验过程中不再停机。
- 若2级故障或3级故障出现于无维修人员在场的时段(如夜间、节假日等),应使燃料电池发动机立即停机,待维修人员到场后,按照相应的故障处理方法进行处理。
- 试验过程中,若出现因试验平台故障、恶劣天气等导致的试验中断,应记录试验中断时本组循环工况中已完成的个数 n 。再次开始试验前,允许制造商对燃料电池发动机进行检查和活化,然后继续进行循环工况试验,并将本组未完成的循环工况数 $(10-n)$ 加至下一组循环工况中,即连续完成 $(20-n)$ 个循环工况,试验过程中不再停机。

5.2.10 试验终止条件

试验过程中,达到以下任意一项条件则终止试验:

- 燃料电池发动机在参考电流 I_{100} 下的功率无法达到 $90\%P_E$;
- 在任一循环工况(1 800 s)过程中,燃料电池发动机不满足5.2.7.2规定的功率公差累积时间超过180 s,且按照5.2.7.1调整后仍无法满足要求;
- 燃料电池发动机出现3级故障,且必须更换关键部件(燃料电池堆、空气压缩机、氢气循环系统、空气或氢气的增湿器、冷却泵、控制器)后才能修复;
- 循环工况加载的累计时间超过燃料电池发动机设计寿命的10%,且不少于1 000 h时。

5.3 数据处理

5.3.1 一般要求

在耐久性试验前及循环工况试验过程中,在每个性能测试环节,稳态特性和动态响应特性试验均进行了两次,在数据处理过程中,对每项指标应统一选择第一次或第二次测试的数据进行分析,并记录在附录D中表D.3中。

5.3.2 燃料电池发动机参考电流下燃料电池堆的电压衰减速率

5.3.2.1 线性拟合法

根据所记录的稳态特性测试中燃料电池发动机参考电流所对应的燃料电池堆电压,绘制“燃料电池堆平均单电池电压(V)-循环工况运行时间(h)”图,如图 2 所示。对所测得的不同稳态特性测试后的燃料电池发动机参考电流中对应的燃料电池堆平均单电池电压进行线性拟合,如公式(1),得到平均单电池电压衰减速率 v_{ss_f} 。

$$V_{ss} = v_{ss_f} \times t_{ss} + b_{ss} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- V_{ss} —— 燃料电池发动机参考电流下燃料电池堆平均单电池电压,单位为伏特(V);
- t_{ss} —— 循环工况运行时长,单位为小时(h);
- v_{ss_f} —— 平均单电池电压衰减速率拟合值,单位为伏特每小时(V/h);
- b_{ss} —— 拟合常数项。

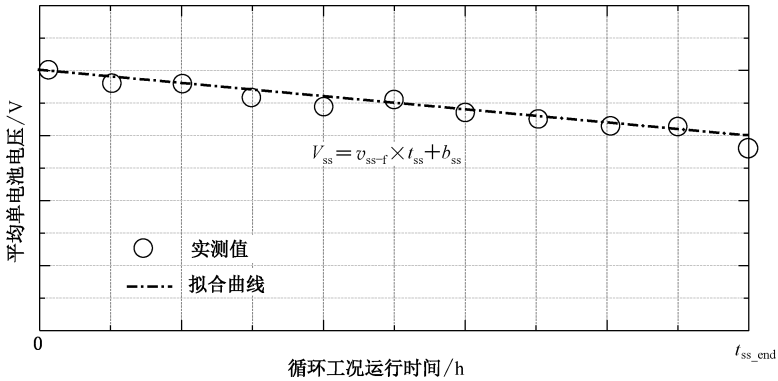


图 2 燃料电池发动机参考电流下燃料电池堆平均单电池电压(V)-循环工况运行时间(h)图

5.3.2.2 首末作差法

根据所记录的燃料电池发动机耐久性试验前和耐久性试验后,稳态特性测试中燃料电池发动机参考电流所对应的燃料电池堆平均单电池电压,按公式(2)计算:

$$v_{ss_d} = \frac{V_{ss1} - V_{ss0}}{t_{ss_end}} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- V_{ss0} —— 耐久性试验前,燃料电池发动机参考电流所对应的燃料电池堆平均单电池电压,单位为伏特(V);
- V_{ss1} —— 耐久性试验后,燃料电池发动机参考电流所对应的燃料电池堆平均单电池电压,单位为伏特(V);
- t_{ss_end} —— 循环工况运行总时长,单位为小时(h);
- v_{ss_d} —— 平均单电池电压衰减速率计算值,单位为伏特每小时(V/h)。

5.3.3 燃料电池发动机参考电流下燃料电池堆的电压衰减幅度

5.3.3.1 线性拟合法

电压衰减幅度应根据公式(3)计算:

$$\Delta V_{ss_f} = \frac{V_{ss_f} \times t_{end}}{V_{ss0}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

ΔV_{ss_f} ——线性拟合法计算得到的电压衰减幅度。

5.3.3.2 首末作差法

电压衰减幅度应根据公式(4)计算:

$$\Delta V_{ss_d} = \frac{V_{ss0} - V_{ss1}}{V_{ss0}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

ΔV_{ss_d} ——首末作差法计算得到的电压衰减幅度。

5.3.4 燃料电池发动机参考电流下的功率衰减幅度

燃料电池发动机参考电流点下的功率衰减幅度按公式(5)计算:

$$\Delta P_{FCE} = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

ΔP_{FCE} ——燃料电池发动机参考电流下的功率衰减幅度;

P_0 ——耐久性试验前,燃料电池发动机参考电流下的功率,单位为千瓦(kW);

P_1 ——耐久性试验后,燃料电池发动机参考电流下的功率,单位为千瓦(kW)。

5.3.5 燃料电池发动机参考电流下燃料电池堆的运行一致性(变异系数)

燃料电池发动机参考电流下燃料电池堆的运行一致性以变异系数表征,变异系数按公式(6)和公式(7)计算:

$$C_v = \frac{\sigma_v}{V_{mean}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{q}{n} \sum_{i=1}^{\frac{n}{q}} \left(\frac{V_i}{q} - V_{mean} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

C_v ——变异系数;

σ_v ——单电池电压标准偏差,单位为伏特(V);

V_{mean} ——燃料电池堆单电池电压平均值(不含空电池),单位为伏特(V);

q ——每个单电池电压采集通道所包含的单电池数量;

n ——燃料电池堆的单电池数量;

V_i ——燃料电池堆在参考电流运行时第*i*个单电池电压采集通道的数值,单位为伏特(V)。

5.3.6 燃料电池发动机参考电流下辅助系统的功率变化率

燃料电池发动机参考电流下辅助系统的功率变化率按公式(8)计算:

$$\Delta P_{BOP} = \frac{P_{BOP1} - P_{BOP0}}{P_{BOP0}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

ΔP_{BOP} ——燃料电池发动机辅助系统的功率变化率(负值表示功率下降,正值表示功率增加);

P_{BOP0} ——耐久性试验前,首次稳态测试中燃料电池发动机参考电流下辅助系统的功率,单位为千

瓦(kW)；

P_{BOP1} ——耐久性试验后，末次稳态测试中燃料电池发动机参考电流下辅助系统的功率，单位为千瓦(kW)。

5.3.7 燃料电池发动机的最高效率衰减幅度

基于稳态特性试验数据，按照 GB/T 24554—2022 中 B.4 对燃料电池发动机的效率进行计算。燃料电池发动机的最高效率衰减情况按公式(9)计算：

$$\Delta \eta_M = \frac{\eta_{M1} - \eta_{M0}}{\eta_{M0}} \times 100\% \dots\dots\dots (9)$$

- 式中：
- $\Delta \eta_M$ ——燃料电池发动机的最高效率衰减幅度(负值表示最高效率下降，正值表示最高效率功率增加)；
 - η_{M0} ——耐久性试验前，首次稳态测试中燃料电池发动机的最高效率；
 - η_{M1} ——耐久性试验后，末次稳态测试中燃料电池发动机的最高效率。

5.3.8 额定功率下燃料电池发动机的效率衰减幅度

额定功率下燃料电池发动机的效率按照 GB/T 24554—2022 中 B.4 进行计算。额定功率下燃料电池发动机的效率衰减幅度按公式(10)计算：

$$\Delta \eta_F = \frac{\eta_{F0} - \eta_{F1}}{\eta_{F0}} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

- 式中：
- $\Delta \eta_F$ ——额定功率下燃料电池发动机的效率衰减幅度；
 - η_{F0} ——耐久性试验前，首次稳态测试中额定功率下燃料电池发动机的效率；
 - η_{F1} ——耐久性试验后，末次稳态测试中额定功率下燃料电池发动机的效率。
- 随着试验进行，若燃料电池发动机已无法达到 $100\% P_E$ ，则仅将最后一次达到 $100\% P_E$ 时的效率作为 η_{F1} ，并记录对应的循环工况运行时长。

5.3.9 基于循环工况的燃料电池发动机动态平均效率衰减幅度

燃料电池发动机的动态平均效率按照 GB/T 24554—2022 中附录 C 进行计算。燃料电池发动机的动态平均效率的衰减幅度按公式(11)计算：

$$\Delta \bar{\eta}_{FD} = \frac{\bar{\eta}_{FD0} - \bar{\eta}_{FD1}}{\bar{\eta}_{FD0}} \times 100\% \dots\dots\dots (11)$$

- 式中：
- $\bar{\eta}_{FD}$ ——燃料电池发动机的动态平均效率衰减幅度；
 - $\bar{\eta}_{FD0}$ ——循环工况试验中，最初三个循环工况的燃料电池发动机动态平均效率；
 - $\bar{\eta}_{FD1}$ ——循环工况试验中，最后三个循环工况的燃料电池发动机动态平均效率。

5.3.10 基于循环工况的参考电流下燃料电池堆的电压衰减幅度

若燃料电池发动机采用电流加载方式，从循环工况试验的最初三个循环工况中，选取参考电流点的数据，求得各参考电流点下的燃料电池堆电压平均值，作为耐久性试验前的电压初始值 $V_{0,cycle}$ ；从循环工况试验的最后三个循环工况中，选取参考电流点的数据，求得各参考电流点下的燃料电池堆电压平均值，作为耐久性试验后的电压终末值 $V_{1,cycle}$ 。在此基础上，基于循环工况的参考电流下燃料电池堆的电压衰减幅度，根据公式(12)计算：

$$\Delta V_{c, cycle} = \frac{V_{0, cycle} - V_{1, cycle}}{V_{0, cycle}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$\Delta V_{c, cycle}$ ——基于循环工况的参考电流下燃料电池堆的电压衰减幅度；

$V_{0, cycle}$ ——循环工况试验中,最初三个循环工况的参考电流所对应的燃料电池堆电压平均值,单位为伏特(V)；

$V_{1, cycle}$ ——循环工况试验中,最后三个循环工况的参考电流所对应的燃料电池堆电压平均值,单位为伏特(V)。

6 车用燃料电池堆耐久性试验方法

6.1 试验要求

6.1.1 环境要求

试验环境符合以下要求：

- 环境温度应处于 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- 环境压力应处于 $96\text{ kPa} \sim 106\text{ kPa}$ 范围内。

6.1.2 燃料电池堆要求

制造商提供的燃料电池堆应满足以下要求：

- 样品外观完好,无开裂、变形等明显损伤；
- 满足 GB/T 36288—2018 中 5.2 的气密性安全要求和 5.3.1 的绝缘性能要求。

6.1.3 试验平台及试验用氢气要求

试验平台和使用的氢气符合以下要求：

- 试验平台提供的测试条件参数响应速率应满足压力响应速率不低于 3 kPa/s ,温度响应速率不低于 $3\text{ }^{\circ}\text{C/min}$,流量响应速率不低于 $1\text{ }000\text{ (L/min)/s}$ (气体对应 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、常压条件),电流响应速率不低于 100 A/s ；
- 试验用氢气应符合 GB/T 37244 的要求。

6.1.4 试验数据采集、计算要求

试验数据采集、计算满足以下要求：

- 试验数据采集频率应不低于 5 Hz ；
- 循环工况试验过程中,宜每连续采集不超过 5 h 进行一次数据分段保存；
- 试验中采集的数据应包括燃料电池堆的电压、燃料电池堆的电流、单电池电压、气体压力、气体温度、气体湿度、气体流量、冷却剂流量和温度等；
- 在数据处理过程中,应按照 GB/T 8170 的规定修约至小数点后 2 位,特殊说明除外。

6.2 试验方法

6.2.1 气密性试验

6.2.1.1 阳极腔向阴极腔的窜气速率

封闭燃料电池堆的阳极出口、阴极入口以及冷却液出入口,在阴极出口连接流量计,由阳极入口处

通入氮气,调整压力至 50 kPa(表压)或制造商规定值,稳定 3 min 后,记录后续 1 min 流量平均值 Q_1 。阳极腔向阴极腔的窜气速率 X_1 按照公式(13)求得:

$$X_1 = 2 \times 3.74 \times Q_1 \dots\dots\dots(13)$$

式中:
 X_1 ——阳极腔向阴极腔的窜气速率,单位为毫升每分(mL/min)(气体对应 0℃、常压条件);
 Q_1 ——测得的阳极腔向阴极腔的氮气窜气流量平均值,单位为毫升每分(mL/min)(气体对应 0℃、常压条件)。

注: 3.74 是由 GB/T 20042.2—2023 中的公式(3)计算得到。

6.2.1.2 阳极腔和阴极腔向冷却液腔的窜气速率

封闭燃料电池堆阳极出口、阴极出口以及冷却液入口,在冷却液出口处连接流量计,由阳极入口和阴极入口同时通入氮气,调整压力至允许最大工作压力,稳定 3 min 后,记录后续 1 min 流量平均值 Q_2 。阳极腔和阴极腔向冷却液腔的窜气速率 X_2 按照公式(14)求得:

$$X_2 = 2 \times 3.74 \times Q_2 \dots\dots\dots(14)$$

式中:
 X_2 ——阳极腔和阴极腔向冷却液腔的窜气速率,单位为毫升每分(mL/min)(气体对应 0℃、常压条件);
 Q_2 ——测得的阳极腔和阴极腔向冷却液腔的氮气窜气流量平均值,单位为毫升每分(mL/min)(气体对应 0℃、常压条件)。

6.2.1.3 燃料电池堆对外泄漏速率

封闭燃料电池堆阳极、阴极、冷却液出口,在阳极、阴极、冷却液入口连接流量计,由阳极、阴极和冷却液入口同时通入氮气,调整压力至允许最大工作压力,稳定 3 min 后,记录后续 1 min 流量平均值 Q_a, Q_b, Q_c ,燃料电池堆对外泄漏速率 X_3 按照公式(15)求得:

$$X_3 = 2 \times 3.74 \times (Q_a + Q_b + Q_c) \dots\dots\dots(15)$$

式中:
 X_3 ——燃料电池堆对外泄漏速率,单位为毫升每分(mL/min)(气体对应 0℃、常压条件);
 Q_a ——测得的燃料电池堆阳极入口氮气流量平均值,单位为毫升每分(mL/min)(气体对应 0℃、常压条件);
 Q_b ——测得的燃料电池堆阴极入口氮气流量平均值,单位为毫升每分(mL/min)(气体对应 0℃、常压条件);
 Q_c ——测得的燃料电池堆冷却液入口氮气流量平均值,单位为毫升每分(mL/min)(气体对应 0℃、常压条件)。

6.2.2 绝缘试验

燃料电池堆的绝缘试验按照 GB/T 20042.2—2023 中 5.9 进行。

6.2.3 极化曲线试验

极化曲线测试按以下方法进行:

- a) 按照制造商的技术要求对燃料电池堆进行活化和调整;
- b) 调节燃料电池堆试验平台参数,使燃料电池堆的进气温度、湿度、压力和冷却水出入口温度、压力处在制造商规定的范围内;
- c) 按照附录 I 中表 I.1 规定的步骤进行加载,在每个工况点,运行条件达到制造商规定后,持续运

行一段时间(当对应加载电流的平均单电池电压值高于 0.85 V 时,测试时间为每个工况点 1 min;其他工况点,测试时间为每个工况点 5 min);

- d) 按照表 I.1 规定的步骤进行降载,每个工况点持续运行 30 s,停机后按照制造商的要求进行吹扫;
- e) 测试结果按表 I.1 填写,各工况点结果取电流加载阶跃前第 11 s 至阶跃前第 40 s 之间数据的平均值。

6.2.4 耐久性试验

燃料电池堆耐久性试验应按照以下步骤进行,当发生意外停机时,应及时降低燃料电池堆电压至各单电池电压 0.3 V 以下。

- a) 按照 6.2.1 和 6.2.2 进行初始气密性、绝缘电阻测试;
- b) 按照制造商的要求对燃料电池堆进行活化和调整,但总时间不应超过 100 h;
- c) 按照 6.2.3 规定的方法对燃料电池堆进行初始极化曲线测试,加载工况点应包括燃料电池堆参考电流 I_s ,参考电流点所对应的测试条件应在其上下电流点的测试条件之间;
- d) 按照制造商的技术要求,调节燃料电池堆试验平台参数,使燃料电池堆的进气温度、湿度、压力和冷却水出入口温度、压力处在规定的范围内;
- e) 根据附录 C 循环工况进行加载,循环工况运行过程中,不应修改测试条件,且测试条件参数的公差应满足 6.2.5 的规定;
- f) 每进行 100 h(即 200 次循环工况)试验,按照 6.2.3 对燃料电池堆进行两次极化曲线测试;
- g) 继续按照循环工况进行加载,每当累计循环工况试验时间达到 200 h(即 400 次循环工况),按照制造商的要求进行活化、停机吹扫;
- h) 待燃料电池堆冷却至室温,按照 6.2.1 和 6.2.2 进行气密性、绝缘电阻测试;
- i) 重复执行步骤 d)~h);
- j) 当燃料电池堆达到 6.2.6 规定的条件时,停止试验并记录循环工况测试总时长,按照 6.2.1、6.2.2 和 6.2.3 进行燃料电池堆气密性、绝缘和极化曲线试验。

6.2.5 循环工况公差要求

6.2.5.1 压力公差要求

关于燃料电池堆气体实际压力和循环工况规定压力之间的公差要求为:

- 当循环工况规定的压力设定值小于或等于 100 kPa 时,压力公差为 ± 2 kPa;
- 当循环工况规定的压力设定值大于 100 kPa 时,压力公差为 ± 3 kPa;
- 在每个试验循环中,允许超出公差范围的累计时间不应超过 180 s。

6.2.5.2 温度公差要求

关于燃料电池堆气体实际温度和循环工况规定温度之间的公差要求为 ± 5 °C,且在每个试验循环中,允许超出公差范围的累计时间不应超过 180 s。

6.2.5.3 流量公差要求

关于燃料电池堆气体实际流量和循环工况规定流量之间的公差要求为 $\pm 2\%$ 流量设定值,且在每个试验循环中,允许超出公差范围的累计时间不应超过 180 s。

6.2.5.4 电流公差要求

关于燃料电池堆电流和循环工况规定电流之间的公差要求为 ± 1 A,且在每个试验循环中,允许超

出公差范围的累计时间不应超过 60 s。

6.2.6 试验终止条件

- 试验过程中,达到以下任意一项条件则终止试验:
- 燃料电池堆在运行过程中最低单电池电压低于制造商规定值,且按照制造商的规定进行活化和调整后仍无法满足要求;
 - 燃料电池堆的气密性或绝缘电阻不满足制造商的要求时;
 - 燃料电池堆的正负极对地的绝缘电阻低于 100 Ω/V 时;
 - 循环工况加载的累计时间超过燃料电池堆设计寿命的 10%,且不少于 1 000 h 时。

6.3 数据处理

6.3.1 燃料电池堆参考电流下的电压衰减速率(线性拟合法)

根据所记录的极化曲线测试中参考电流所对应的平均单电池电压,绘制“燃料电池堆平均单电池电压(V)-循环工况运行时间(h)”图,如图 3 所示。对所测得的不同运行时长后的参考电流中对应的平均单电池电压进行线性拟合,如公式(16),得到燃料电池堆参考电流下的电压衰减速率 v_{stack} 。

$$V_{stack} = v_{stack} \times t_{stack} + b_{stack} \dots\dots\dots (16)$$

- 式中:
- V_{stack} —— 燃料电池堆平均单电池电压,单位为伏特(V);
 - t_{stack} —— 循环工况运行时长,单位为小时(h);
 - v_{stack} —— 燃料电池堆参考电流下的电压衰减速率,单位为伏特每小时(V/h);
 - b_{stack} —— 拟合常数项。

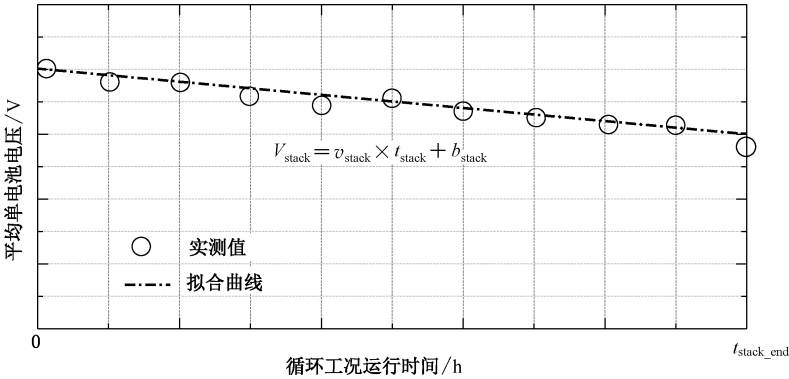


图 3 燃料电池堆平均单电池电压(V)-循环工况运行时间(h)图

6.3.2 燃料电池堆参考电流下的电压衰减幅度(线性拟合法)

电压衰减幅度应根据公式(17)计算:

$$\Delta V_{stack} = \frac{v_{stack} \times t_{stack_end}}{V_{stack0}} \times 100\% \dots\dots\dots (17)$$

- 式中:
- ΔV_{stack} —— 电压衰减幅度;
 - V_{stack0} —— 初始参考电流点对应平均单电池电压,单位为伏特(V);
 - t_{stack_end} —— 循环工况运行总时长,单位为小时(h)。

7 车用燃料电池膜电极耐久性试验方法

7.1 试验要求

7.1.1 环境要求

试验环境符合以下要求：

- 环境温度应处于 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- 环境压力应处于 $96\text{ kPa} \sim 106\text{ kPa}$ 范围内。

7.1.2 样品和夹具要求

样品和夹具符合以下要求：

- 样品应为有效活性面积 25 cm^2 的正方形膜电极，样品应无折皱、油污、破损等。
- 测试夹具和组装要求见附录 D。

7.1.3 试验数据采集、计算要求

试验数据采集、计算满足以下要求：

- 试验数据采集频率应不低于 5 Hz ；
- 循环工况试验过程中，宜每连续采集不超过 5 h 进行一次数据分段保存；
- 试验中采集的数据应包括单电池电压、单电池电流、单电池温度、气体压力、气体温度、气体湿度、气体流量等；
- 数据处理过程中，应按照 GB/T 8170 的规定修约至小数点后 2 位，特殊说明除外。

7.2 试验方法

7.2.1 单电池活化

7.2.1.1 测试条件

活化测试条件宜按照以下要求：

- 单电池温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- 相对湿度为 100% ；
- 气体流量：阳极 1.2 L/min ，阴极 3.6 L/min ；
- 出口背压： 100.0 kPa （表压）。

注：单电池活化条件也可由制造商提供，或由测试方和制造商双方协商决定。

7.2.1.2 试验方法

按照下列操作步骤对单电池进行活化：

- 按照附录 G 中表 G.1 所示工况进行单电池活化，记录升载过程中 0.6 V 运行时最后 10 s 的电流平均值 I_0 ；
- 切换至电流控制模式，按照表 G.2 所示工况以 0.2 A/cm^2 为阶跃升载，每个阶跃稳定 1 min ，直至电流达到 I_0 （对应电流密度 i ），稳定 3 min ，记录稳定阶段倒数第 11 s 至倒数第 20 s 间的单电池平均电压 U_0 ，降载至开路；
- 重复步骤 b)，相邻两次记录的 U_0 差值在 $\pm 2\text{ mV}$ 区间内活化即可结束，差值大于 $\pm 2\text{ mV}$ 即重复步骤 a)~b)。若活化运行工况已运行 3 h 以上，仍不能达到结束条件，活化结束。

7.2.2 单电池极化曲线

7.2.2.1 测试条件

- 测试条件宜按照以下要求：
- 单电池温度为 80 ℃；
 - 相对湿度范围为 30%~100%；
 - 化学计量比为阳极不高于 1.5，阴极不高于 2.5，最小计量比电流设置为 10 A(电流密度为 0.4 A/cm²)，低于 10 A 时按照 10 A 对应的流量进行测试；
 - 出口背压不高于 150.0 kPa(表压)。

7.2.2.2 试验方法

- 极化曲线测试按以下方法进行：
- a) 按照制造商的技术要求对单电池进行活化和调整；
 - b) 调节单电池试验平台参数,使进气温度、湿度、压力、单电池温度处在规定的范围内；
 - c) 按照表 2 中的运行参数对单电池进行极化曲线测试,最大电流密度对应的电压不应低于 0.550 V,额定电流密度对应的电压不应低于 0.600 V；
 - d) 停机后按照制造商的要求进行吹扫；
 - e) 极化曲线测试结果以电流升载过程为准。各工况点结果取电流阶跃前第 11 s 至第 70 s 之间数据的平均值。

表 2 极化曲线测试运行参数

序号	电流密度/(A/cm ²)	阴极气体	运行时长/min
1	0.1	空气	3
2	0.2	空气	3
3	0.6	空气	20
4	0	空气	1
5	0	氮气	直至单电池电压<0.1 V
6	0	空气	≥3(直至开路电压稳定)
7	0.2	空气	3
8	0.4	空气	3
9	0.6	空气	3
10	.....	空气	3
11	额定电流密度 i_e	空气	3
12	.....	空气	3
13	最大电流密度	空气	3
14	.....	空气	1
15	额定电流密度 i_e	空气	1
16	.....	空气	1
17	0.6	空气	1
18	0.4	空气	1
19	0.2	空气	1
20	0	空气	1

7.2.3 耐久性试验

7.2.3.1 测试条件

膜电极耐久性试验的试验条件按照 7.2.1.1 的规定。

7.2.3.2 试验方法

膜电极耐久性试验按以下步骤进行：

- a) 按照 7.2.1 对单电池进行活化；
- b) 按照 7.2.2 规定的方法对单电池进行初始极化曲线测试；
- c) 将额定电流密度 i_e ，代入附录 E 中形成膜电极耐久性循环工况，按照该循环工况进行加载；
- d) 每进行 100 h(即 200 次循环工况)试验，按照 7.2.2 进行极化曲线测试；
- e) 继续按照循环工况进行加载，每当累计循环工况试验时间达到 200 h(即 400 次循环工况)，对单电池进行可逆损失恢复，可逆损失恢复程序见附录 F；
- f) 重复执行步骤 c)～e)；
- g) 当单电池达到 7.2.4 规定的条件时，停止试验并记录循环工况测试总时长，按照 7.2.2 进行极化曲线测试。

7.2.4 试验终止条件

试验过程中，达到以下任意一项条件则终止试验：

- 单电池在运行过程中电压低于制造商规定值，且按照制造商的规定进行活化和调整后仍无法满足要求；
- 循环工况加载的累计时间超过膜电极设计寿命的 10%，且不少于 1 000 h 时；
- 其他导致耐久性试验无法进行的情况。

7.3 数据处理

7.3.1 额定电流密度下的电压衰减速率(线性拟合法)

根据所记录的极化曲线测试中额定电流密度所对应的单电池电压，绘制“单电池电压(V)-运行时间(h)”图，如图 4 所示。对所测得的不同运行时长后的额定电流密度对应的单电池电压进行线性拟合，电压衰减速率应依据公式(18)计算：

$$V_{\text{MEA}} = v_{\text{MEA}} \times t_{\text{MEA}} + b_{\text{MEA}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中：

- V_{MEA} ——单电池电压，单位为伏特(V)；
- t_{MEA} ——循环工况运行时长，单位为小时(h)；
- v_{MEA} ——电压衰减速率，单位为伏特每小时(V/h)；
- b_{MEA} ——拟合常数项。

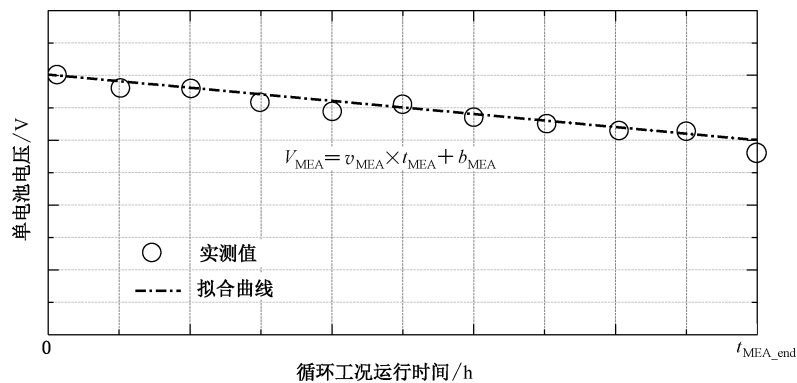


图 4 单电池电压(V)-循环工况运行时间(h)

7.3.2 额定电流密度下的电压衰减幅度(线性拟合法)

电压衰减幅度应根据公式(19)计算：

$$\Delta V_{MEA} = \frac{v_{MEA} \times t_{MEA_end}}{V_{MEA0}} \times 100\% \dots\dots\dots (19)$$

式中：

- ΔV_{MEA} ——电压衰减幅度；
- V_{MEA0} ——单电池初始极化曲线中额定电流密度对应的单电池电压,单位为伏特(V)；
- t_{MEA_end} ——循环工况运行总时长,单位为小时(h)。

注：试验结果保留小数点后 2 位。

8 燃料电池发动机用空气压缩机耐久性试验方法

8.1 试验要求

8.1.1 环境要求

- 试验环境符合以下要求：
- 环境温度应处于 23℃±5℃；
- 环境压力应处于 96 kPa~106 kPa 范围内。

8.1.2 空气压缩机要求

- 空气压缩机满足以下要求：
- 应保持空气压缩机出厂时的外形结构和技术参数；
- 空气压缩机的绝缘性能、气密性等涉及安全的性能应符合制造商要求。

8.1.3 试验平台及试验用介质要求

- 试验平台和试验用介质符合以下要求：
- 试验平台应提供稳定可靠的高低压电源；
- 试验平台应提供满足空气压缩机所需的散热条件；
- 试验平台应通过 CAN 通信对空气压缩机进行控制。

8.1.4 空气压缩机控制要求

空气压缩机的控制符合以下要求：

——试验过程中,空气压缩机的起动、加载、降载、停机等均应由试验平台按照制造商提供的通信协议进行控制。

8.1.5 试验数据采集、计算要求

试验数据采集、计算满足以下要求:

- 试验数据采样频率应不低于 5 Hz;
- 循环工况试验过程中,宜每连续采集不超过 5 h 进行一次数据分段保存;
- 试验中采集的数据应包括空气压缩机控制器的输入电流和输入电压、空气压缩机的转速、冷却液温度、气体流量、气体压力、气体温度、气体湿度等;
- 数据处理过程中,应按照 GB/T 8170 的规定修约至小数点后 2 位,特殊说明除外。

8.2 试验方法

8.2.1 耐久性试验

空压机耐久性试验按照如下步骤进行。

- a) 将空压机安装在试验平台上,冷却液流量按照产品技术文件的最小值,冷却液温度按照产品技术文件的最大值,若样品为带膨胀机的空压机,测试时将压气机出口气体直接通入或冷却后通入膨胀机入口。
- b) 待冷却液温度稳定后,按照 8.2.2 测试空压机额定工况点流量、压比、控制器输入电流、控制器输入电压。
- c) 空压机出口节气门设定为怠速工况(最低稳态工况)点对应开度。
- d) 对空压机加载转速由 0 r/min 至怠速转速再到 0 r/min 的启停循环工况,共进行 1 500 00 次。在 0 r/min 和怠速转速停留时间不低于 2 s,空压机变载加速度应不低于每秒 5 000 r/min。
- e) 空压机出口节气门设定为额定工况点对应开度。
- f) 对空压机加载转速由怠速转速到额定转速再到怠速转速的动态循环工况,共进行 500 000 次。在怠速转速和额定转速停留时间不低于 2 s,空压机变载加速度应不低于每秒 5 000 r/min。
- g) 对空压机加载至额定工况点对应的转速和压比,运行 1 000 h。
- h) 耐久每进行 200 h,可对空压机入口的空气滤清器进行保养或更换,完成之后继续进行试验。
- i) 耐久性试验前后,额定工况点测试中的各指标试验结果,均取空压机 10 min 稳定运行的平均值。

8.2.2 额定工况点工作特性试验

8.2.2.1 不带膨胀机的空压机

不带膨胀机的空压机额定工况点工作特性按照以下步骤进行测试:

- a) 将空压机安装在测试台架上,按照产品技术要求设置冷却液流量和温度;
- b) 待冷却液温度稳定后,起动空压机,并按照制造商规定的方法加载至额定工况点,稳定运行 10 min;
- c) 记录空压机的转速、流量、进口压力、出口压力、控制器输入电压、控制器输入电流,各参数的试验结果均取 10 min 稳定运行的平均值。

8.2.2.2 带膨胀机的空压机

带膨胀机的空压机额定工况点工作特性按照以下步骤进行测试。

- a) 将空压机安装在测试台架上,按照产品技术要求设置冷却液流量和温度。

- b) 待冷却液温度稳定后启动空压机至怠速转速。
- c) 在膨胀机入口通入相对湿度 95 %、温度 70 ℃、流量为压气机入口流量 90 % 的空气。
- d) 按照先提高转速再增加膨胀机入口流量的方式,继续加载空压机至额定工况点,转速加载速率按照制造商技术文件规定进行设定。加载过程中,待空压机转速稳定后,按照压气机入口流量的 90 % 设定膨胀机入口空气流量,相对湿度和温度保持不变。
- e) 保持空压机在额定工况点稳定运行 10 min。
- f) 记录空压机的转速、流量、进口压力、出口压力、控制器输入电压、控制器输入电流,各参数的试验结果均取 10 min 稳定运行的平均值。

注:运行过程中,膨胀机入口压力不得高于压气端出口压力。

8.3 数据处理

空压机耐久性试验后,功率变化幅度按照公式(20)进行计算:

$$\Delta P_{ac} = \frac{P_{ac1} - P_{ac0}}{P_{ac0}} \times 100 \% \dots\dots\dots (20)$$

式中:
 ΔP_{ac} ——空压机耐久性试验后功率变化幅度(负值表示功率下降,正值表示功率增加);
 P_{ac0} ——耐久性试验前,空压机额定流量和压比下控制器输入功率,单位为千瓦(kW);
 P_{ac1} ——耐久性试验后,空压机额定流量和压比下控制器输入功率,单位为千瓦(kW)。

9 燃料电池发动机用氢气循环泵耐久性试验方法

9.1 试验要求

9.1.1 环境要求

- 试验环境符合以下要求:
- 环境温度应处于 23 ℃ ± 5 ℃;
 - 环境压力应处于 96 kPa ~ 106 kPa 范围内。

9.1.2 氢气循环泵要求

- 氢气循环泵满足以下要求:
- 应保持氢气循环泵出厂时的外形结构和技术参数;
 - 氢气循环泵的绝缘性能、气密性等涉及安全的性能应符合制造商要求。

9.1.3 试验平台及试验用介质要求

- 试验平台和试验用介质符合以下要求:
- 试验平台应提供稳定可靠的高低压电源;
 - 试验平台应提供满足氢气循环泵所需的散热条件;
 - 试验平台应通过 CAN 通信对氢气循环泵进行控制;
 - 氢气循环泵的耐久性试验宜采用压缩空气或氢气介质;
 - 氢气循环泵额定工况点循环流量及压升试验宜采用氢气和氮气混合气介质,氮气占混合气体积的 10 %,混合气相对湿度为 95 %,混合气体温度设定为 70 ℃。

9.1.4 氢气循环泵控制要求

氢气循环泵的控制符合以下要求:

——试验过程中,氢气循环泵的启动、加载、降载、停机等均应由试验平台按照制造商提供的通信协议进行控制。

9.1.5 试验数据采集、计算要求

试验数据采集、计算满足以下要求:

- 试验数据采样频率应不低于 5 Hz;
- 循环工况试验过程中,宜每连续采集不超过 5 h 进行一次数据分段保存;
- 试验中采集的数据应包括氢气循环泵控制器的输入电流和输入电压、氢气循环泵的转速、冷却液温度、气体流量、气体压力、气体温度、气体湿度等;
- 在数据处理过程中,应按照 GB/T 8170 的规定修约至小数点后 2 位,特殊说明除外。

9.2 试验方法

9.2.1 耐久性试验

氢气循环泵的耐久性试验按照以下步骤进行:

- a) 按照 9.2.2 测试氢气循环泵的气密性,气密性应满足制造商的要求;
- b) 按照产品技术要求设置冷却液流量和温度(若有),待冷却液温度稳定后,按照 9.2.3 测试氢气循环泵的工作特性;
- c) 将氢气循环泵出口背压装置开度调节至怠速工况点对应开度,对氢气循环泵加载,转速由 0 r/min 至怠速再到 0 r/min 的启停循环工况,共进行 150 000 次;
- d) 将氢气循环泵出口背压装置开度调节至额定工况点对应开度,对氢气循环泵加载,转速由怠速转速到额定转速再到怠速转速的动态循环工况,共进行 150 000 次;
- e) 对氢气循环泵加载至额定工况点,稳定运行 1 000 h;
- f) 耐久工况加载结束后,将氢气循环泵静置 2 h 后,按照 9.2.2 测试氢气循环泵的气密性,按照 9.2.3 测试氢气循环泵的工作特性。

9.2.2 气密性试验

氢气循环泵气密性试验按照以下步骤进行:

- a) 将氢气循环泵安装在气密性测试台架上;
- b) 关闭氢气循环泵的出口(与燃料电池堆阳极入口对应);
- c) 由氢气循环泵入口(与燃料电池堆阳极出口对应)通入氢气或氦气,并调整入口压力至最大工作压力(绝压)1.5 倍,保压 5 min;
- d) 记录测量的压降值。

9.2.3 额定工况点循环流量及压升

额定工况点循环流量及压升按照以下步骤进行测试:

- a) 将氢气循环泵安装在试验平台上;
- b) 按照产品技术要求设置冷却液流量和温度(若有),待冷却液温度稳定后,启动氢气循环泵并加载;
- c) 按照制造商要求加载氢气循环泵至额定工况点,稳定运行 10 min;
- d) 记录试验数据,各参数的试验结果均取氢气循环泵 10 min 稳定运行的平均值。

9.3 数据处理

氢气循环泵耐久性试验后,功率变化幅度按照公式(21)进行计算:

$$\Delta P_{\text{hrp}} = \frac{P_{\text{hrp1}} - P_{\text{hrp0}}}{P_{\text{hrp0}}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中：

ΔP_{hrp} ——氢气循环泵耐久性试验后功率变化幅度(负值表示功率下降,正值表示功率增加)；

P_{hrp0} ——耐久性试验前,氢气循环泵额定流量和压升下氢气循环泵控制器输入功率,单位为千瓦(kW)；

P_{hrp1} ——耐久性试验后,氢气循环泵额定流量和压升下氢气循环泵控制器输入功率,单位为千瓦(kW)。

附 录 A
(规范性)

燃料电池发动机耐久性试验流程

燃料电池发动机耐久性试验流程如图 A.1 所示。

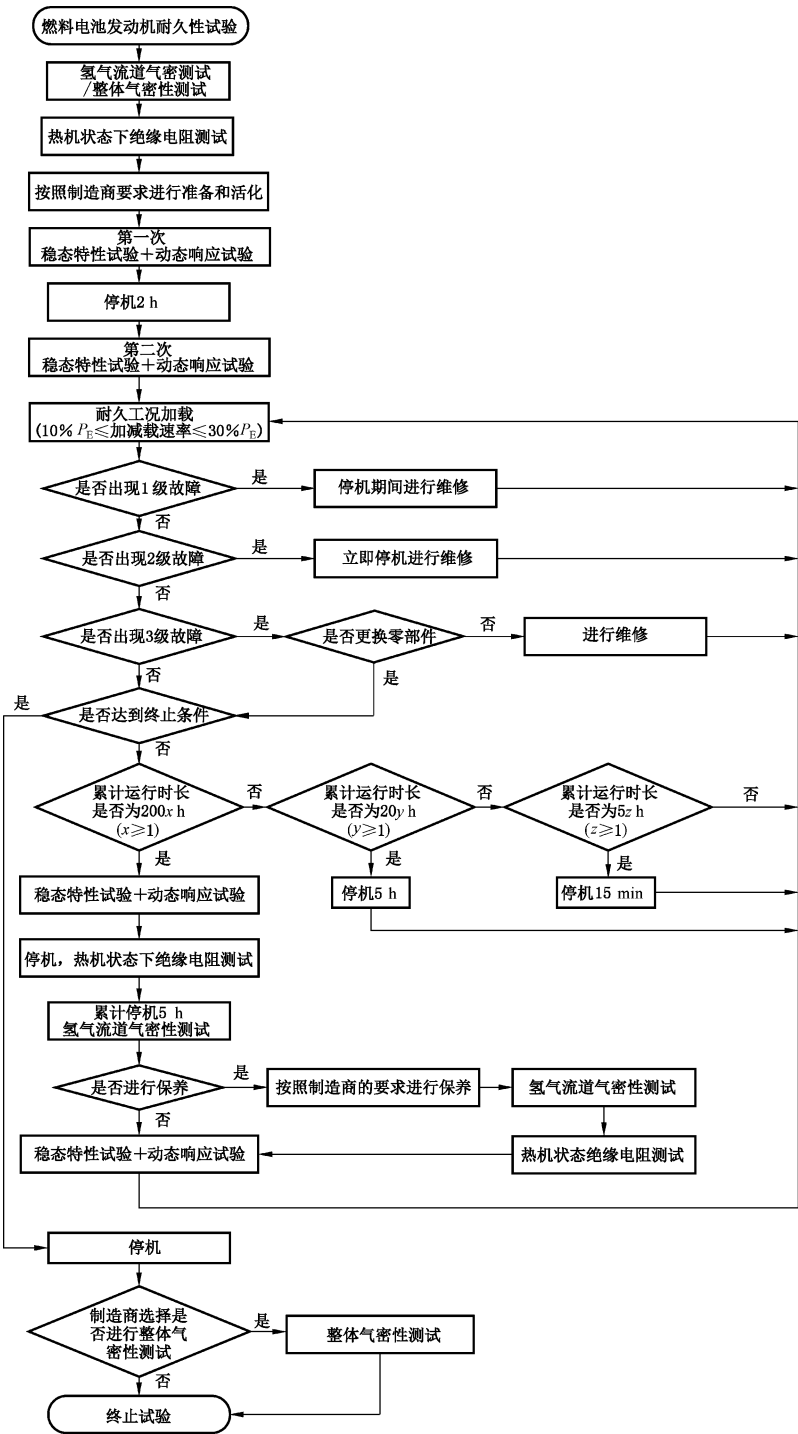


图 A.1 燃料电池发动机的耐久性试验流程图

附录 B
(规范性)

燃料电池发动机耐久性循环工况

B.1 循环工况曲线和数据

燃料电池发动机耐久性循环工况如图 B.1 和表 B.1 所示。

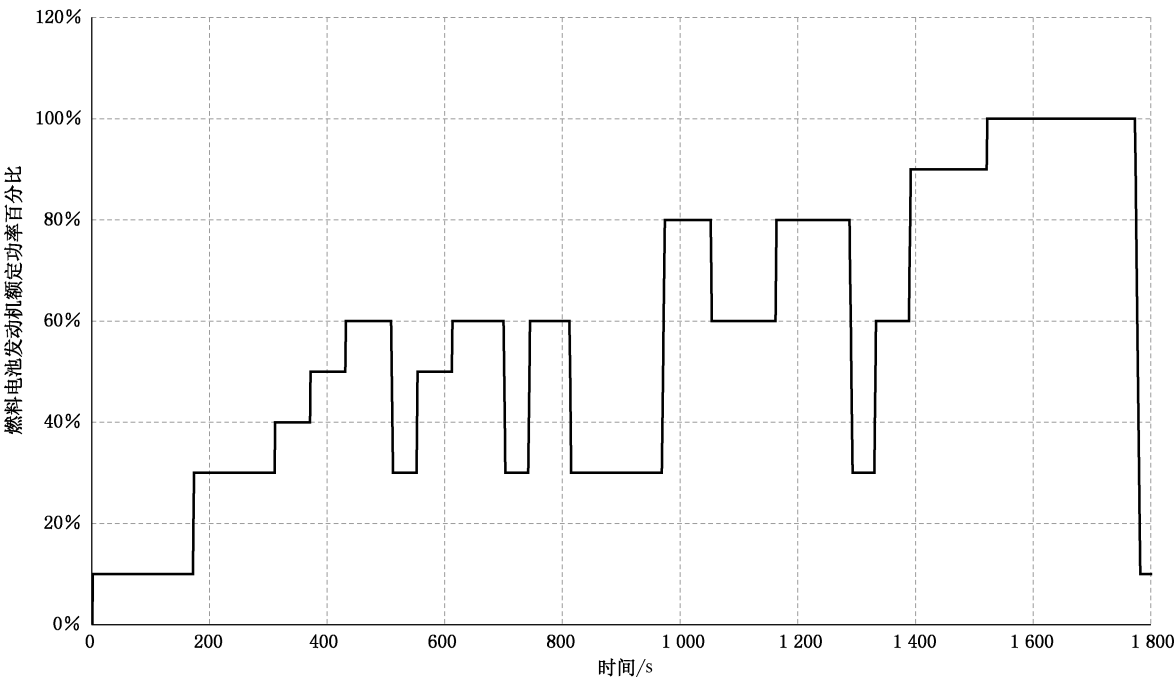


图 B.1 燃料电池发动机耐久性循环工况曲线

表 B.1 燃料电池发动机耐久性循环工况数据

步骤	加载功率 kW	持续时间 s	开始时刻 s	结束时刻 s
1	$10\%P_E$	170	0	170
2	$10\%P_E \sim 30\%P_E$	2	170	172
3	$30\%P_E$	137	172	309
4	$30\%P_E \sim 40\%P_E$	1	309	310
5	$40\%P_E$	59	310	369
6	$40\%P_E \sim 50\%P_E$	1	369	370
7	$50\%P_E$	59	370	429
8	$50\%P_E \sim 60\%P_E$	1	429	430
9	$60\%P_E$	77	430	507

表 B.1 燃料电池发动机耐久性循环工况数据（续）

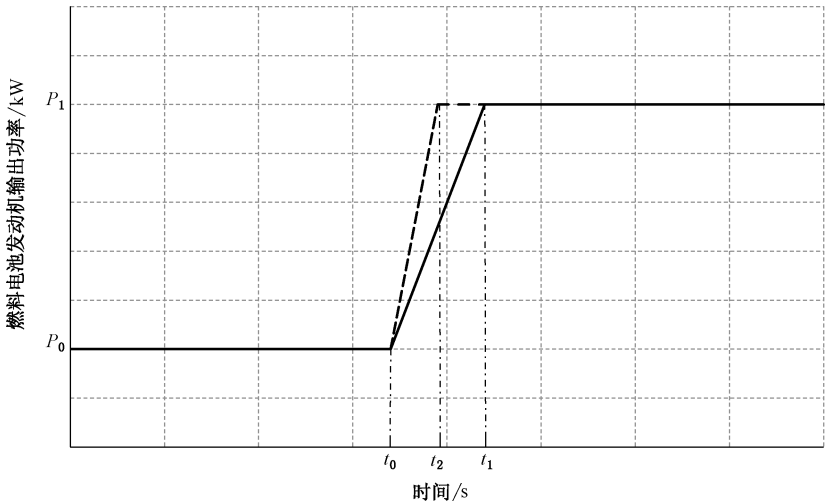
步骤	加载功率 kW	持续时间 s	开始时刻 s	结束时刻 s
10	$60\%P_E \sim 30\%P_E$	3	507	510
11	$30\%P_E$	40	510	550
12	$30\%P_E \sim 50\%P_E$	2	550	552
13	$50\%P_E$	58	552	610
14	$50\%P_E \sim 60\%P_E$	1	610	611
15	$60\%P_E$	87	611	698
16	$60\%P_E \sim 30\%P_E$	3	698	701
17	$30\%P_E$	39	701	740
18	$30\%P_E \sim 60\%P_E$	3	740	743
19	$60\%P_E$	67	743	810
20	$60\%P_E \sim 30\%P_E$	3	810	813
21	$30\%P_E$	154	813	967
22	$30\%P_E \sim 80\%P_E$	5	967	972
23	$80\%P_E$	78	972	1050
24	$80\%P_E \sim 60\%P_E$	2	1 050	1 052
25	$60\%P_E$	108	1 052	1 160
26	$60\%P_E \sim 80\%P_E$	2	1 160	1 162
27	$80\%P_E$	124	1 162	1 286
28	$80\%P_E \sim 30\%P_E$	5	1 286	1 291
29	$30\%P_E$	37	1 291	1 328
30	$30\%P_E \sim 60\%P_E$	3	1 328	1 331
31	$60\%P_E$	56	1 331	1 387
32	$60\%P_E \sim 90\%P_E$	3	1 387	1 390
33	$90\%P_E$	129	1 390	1 519
34	$90\%P_E \sim 100\%P_E$	1	1 519	1 520
35	$100\%P_E$	251	1 520	1 771
36	$100\%P_E \sim 10\%P_E$	9	1 771	1 780
37	$10\%P_E$	20	1 780	1 800

B.2 循环工况加载要求

燃料电池发动机的循环工况的加载满足以下要求：

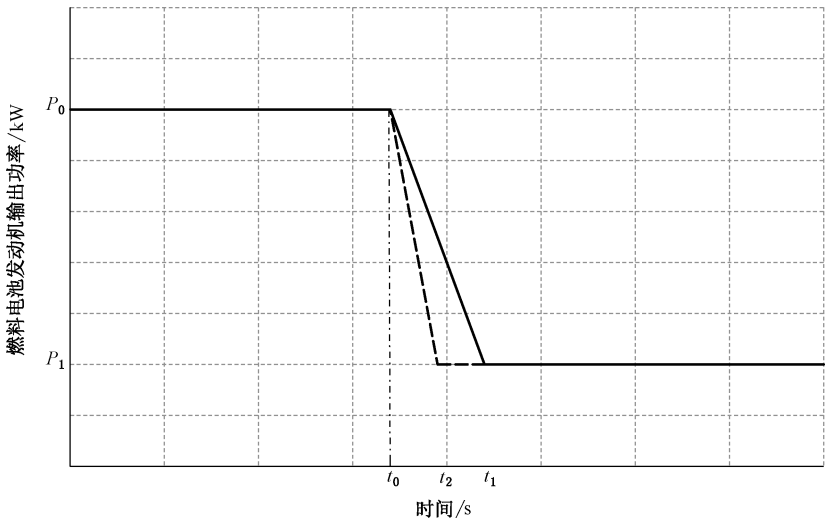
- 燃料电池发动机可采用功率加载或电流加载的方式；
- 若燃料电池发动机的最低净输出功率大于 $10\%P_E$ ，则表 B.1 中 $10\%P_E$ 工况点按燃料电池发

- 动机最低功率点运行；
- 循环工况中的功率加载和降载速率最低要求为 $10\%P_E/s$ ，可按照制造商要求提高加载或降载速率，但建议最高变载速率不超过 $30\%P_E/s$ ；
 - 若制造商提高加载或降载速率，应按如图 B.2 或图 B.3 所示的原则对 B.1 的循环工况曲线进行修改后，再进行循环工况加载，应确保修改后的单个循环工况时间也为 $1\,800\text{ s}$ 。



- 说明：
- t_0 ——功率加载的起始时间，单位为秒(s)；
 - t_1 ——原循环工况中功率加载的结束时间，单位为秒(s)；
 - t_2 ——制造商提高加载速率后功率加载的结束时间，单位为秒(s)。

图 B.2 提高加载速率示意图



- 说明：
- t_0 ——功率降载的起始时间，单位为秒(s)；
 - t_1 ——原循环工况中功率降载的结束时间，单位为秒(s)；
 - t_2 ——制造商提高降载速率后功率降载的结束时间，单位为秒(s)。

图 B.3 提高降载速率示意图

附 录 C
(规范性)

燃料电池堆耐久性循环工况

燃料电池堆耐久性循环工况如图 C.1 和表 C.1 所示。

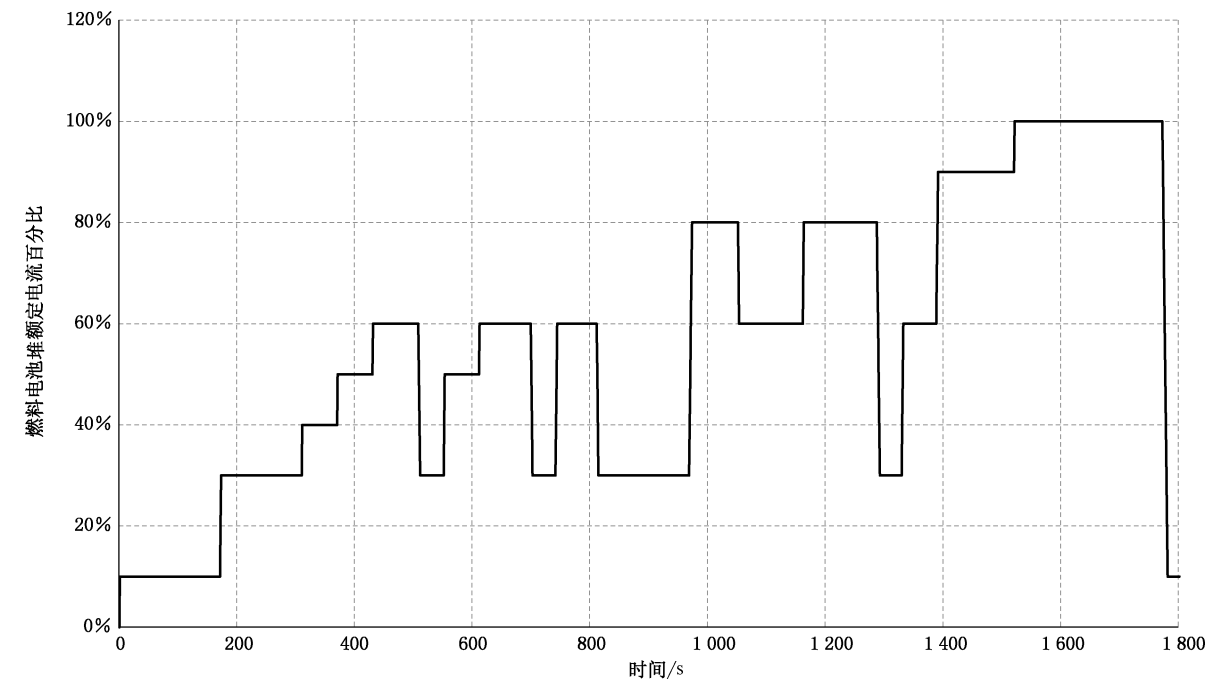


图 C.1 燃料电池堆耐久性循环工况曲线

表 C.1 燃料电池堆耐久性循环工况数据

步骤	加载电流 A	持续时间 s	开始时刻 s	结束时刻 s
1	10 % I_E	170	0	170
2	10 % $I_E \sim$ 30 % I_E	2	170	172
3	30 % I_E	137	172	309
4	30 % $I_E \sim$ 40 % I_E	1	309	310
5	40 % I_E	59	310	369
6	40 % $I_E \sim$ 50 % I_E	1	369	370
7	50 % I_E	59	370	429
8	50 % $I_E \sim$ 60 % I_E	1	429	430
9	60 % I_E	77	430	507
10	60 % $I_E \sim$ 30 % I_E	3	507	510
11	30 % I_E	40	510	550
12	30 % $I_E \sim$ 50 % I_E	2	550	552

表 C.1 燃料电池堆耐久性循环工况数据（续）

步骤	加载电流 A	持续时间 s	开始时刻 s	结束时刻 s
13	$50\%I_E$	58	552	610
14	$50\%I_E \sim 60\%I_E$	1	610	611
15	$60\%I_E$	87	611	698
16	$60\%I_E \sim 30\%I_E$	3	698	701
17	$30\%I_E$	39	701	740
18	$30\%I_E \sim 60\%I_E$	3	740	743
19	$60\%I_E$	67	743	810
20	$60\%I_E \sim 30\%I_E$	3	810	813
21	$30\%I_E$	154	813	967
22	$30\%I_E \sim 80\%I_E$	5	967	972
23	$80\%I_E$	78	972	1050
24	$80\%I_E \sim 60\%I_E$	2	1 050	1 052
25	$60\%I_E$	108	1 052	1 160
26	$60\%I_E \sim 80\%I_E$	2	1 160	1 162
27	$80\%I_E$	124	1 162	1 286
28	$80\%I_E \sim 30\%I_E$	5	1 286	1 291
29	$30\%I_E$	37	1 291	1 328
30	$30\%I_E \sim 60\%I_E$	3	1 328	1 331
31	$60\%I_E$	56	1 331	1 387
32	$60\%I_E \sim 90\%I_E$	3	1 387	1 390
33	$90\%I_E$	129	1 390	1 519
34	$90\%I_E \sim 100\%I_E$	1	1 519	1 520
35	$100\%I_E$	251	1 520	1 771
36	$100\%I_E \sim 10\%I_E$	9	1 771	1 780
37	$10\%I_E$	20	1 780	1 800

附录 D

(资料性)

膜电极测试夹具和组装要求

D.1 测试夹具

单电池测试的夹具宜满足以下要求:

- 测试夹具的主要组成结构为端板、集流板、流场板；
- 流场板为带有三蛇形流场的致密石墨板，流道宽度 0.8 mm，深度 1.0 mm，脊宽度 0.9 mm，采用面密封或线密封方式，夹具图纸见图 D.1；
- 阴阳极流场板或端板上设有温度采集点；
- 使用镀金或镀银金属集流板；
- 使用加热片、加热棒等方式进行加热；
- 使用金属端板，并将夹具的进出气路设计在端板上。

单位为毫米

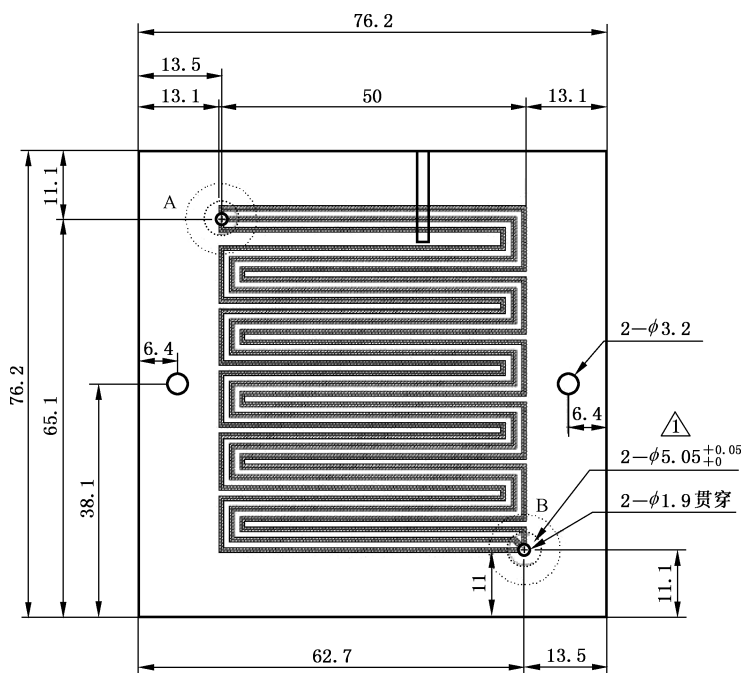


图 D.1 夹具结构图纸

D.2 单电池组装要求

单电池的组装宜满足以下要求:

- 使用螺栓紧固的单电池记录紧固扭矩密封垫片厚度,其他紧固方式的单电池记录密封垫片及紧固条件等信息;
- 单电池组装后,按照后续测试需求设置背压、流量、温度,向单电池内通入氢气和氮气,在距离单电池需检漏的各位置 1 cm 处使用氢气检漏仪检测,氢气体积分数低于 20×10^{-6} ,且将阴极气体切换为空气后,初始开路电压高于 0.9 V。

附录 E

(规范性)

燃料电池膜电极耐久性循环工况

燃料电池膜电极耐久性循环工况如图 E.1 和表 E.1 所示。

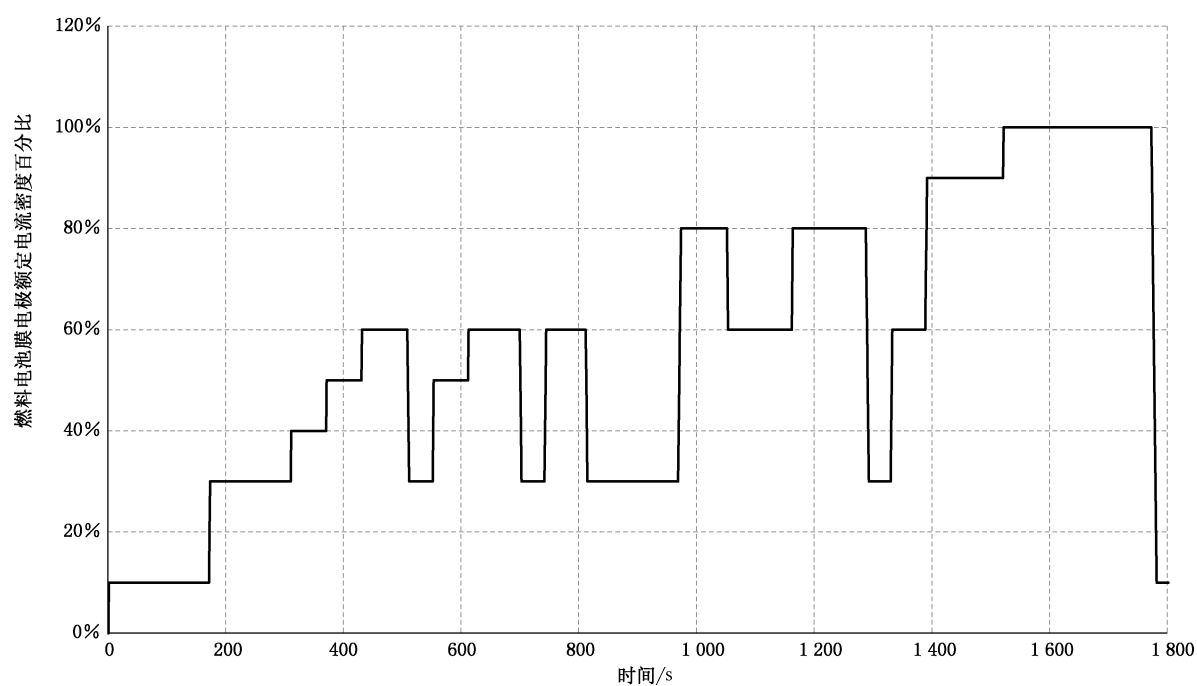


图 E.1 燃料电池膜电极耐久性循环工况曲线

表 E.1 燃料电池膜电极耐久性循环工况数据

步骤	加载电流密度 A/cm ²	持续时间 s	开始时刻 s	结束时刻 s
1	10% i_e	170	0	170
2	10% $i_e \sim 30\% i_e$	2	170	172
3	30% i_e	137	172	309
4	30% $i_e \sim 40\% i_e$	1	309	310
5	40% i_e	59	310	369
6	40% $i_e \sim 50\% i_e$	1	369	370
7	50% i_e	59	370	429
8	50% $i_e \sim 60\% i_e$	1	429	430
9	60% i_e	77	430	507
10	60% $i_e \sim 30\% i_e$	3	507	510
11	30% i_e	40	510	550
12	30% $i_e \sim 50\% i_e$	2	550	552

表 E.1 燃料电池膜电极耐久性循环工况数据（续）

步骤	加载电流密度 A/cm^2	持续时间 s	开始时刻 s	结束时刻 s
13	$50\%i_e$	58	552	610
14	$50\%i_e \sim 60\%i_e$	1	610	611
15	$60\%i_e$	87	611	698
16	$60\%i_e \sim 30\%i_e$	3	698	701
17	$30\%i_e$	39	701	740
18	$30\%i_e \sim 60\%i_e$	3	740	743
19	$60\%i_e$	67	743	810
20	$60\%i_e \sim 30\%i_e$	3	810	813
21	$30\%i_e$	154	813	967
22	$30\%i_e \sim 80\%i_e$	5	967	972
23	$80\%i_e$	78	972	1 050
24	$80\%i_e \sim 60\%i_e$	2	1 050	1 052
25	$60\%i_e$	108	1 052	1 160
26	$60\%i_e \sim 80\%i_e$	2	1 160	1 162
27	$80\%i_e$	124	1 162	1 286
28	$80\%i_e \sim 30\%i_e$	5	1 286	1 291
29	$30\%i_e$	37	1 291	1 328
30	$30\%i_e \sim 60\%i_e$	3	1 328	1 331
31	$60\%i_e$	56	1 331	1 387
32	$60\%i_e \sim 90\%i_e$	3	1 387	1 390
33	$90\%i_e$	129	1 390	1 519
34	$90\%i_e \sim 100\%i_e$	1	1 519	1 520
35	$100\%i_e$	251	1 520	1 771
36	$100\%i_e \sim 10\%i_e$	9	1 771	1 780
37	$10\%i_e$	20	1 780	1 800

附录 F
(资料性)

燃料电池膜电极活化运行工况和可逆损失恢复程序

F.1 膜电极活化运行工况

恒电压模式下的单电池活化按表 F.1 进行,恒电流模式下的单电池活化按表 F.2 进行。

表 F.1 单电池活化运行工况(恒电压模式)

序号	电压/V	运行时长/min
1	开路电压	1
2	0.90	1
3	0.85	3
4	0.80	3
5	0.75	10
6	0.70	10
7	0.65	10
8	0.60	10
9	0.55	10
10	0.50	20
11	0.55	2
12	0.60	2
13	0.65	2
14	0.70	2
15	0.75	2
16	0.80	2
17	0.85	2
18	0.90	1
19	开路电压	1

注：单电池活化工况也可由制造商提供,或由测试方和制造商双方协商决定。

表 F.2 单电池活化运行工况(恒电流模式)

序号	电流密度/(A/cm ²)	运行时长/min
1	0	以开路电压稳定为准
2	0.2	1
3	0.4	1

表 F.2 单电池活化运行工况(恒电流模式)(续)

序号	电流密度/(A/cm ²)	运行时长/min
4	0.6	1
5	.....	.....
6	<i>i</i>	3
7	.....	.....
8	0.6	1
9	0.4	1
10	0.2	1
11	0	以开路电压稳定为准

注：单电池活化工况也可由制造商提供,或由测试方和制造商双方协商决定。

F.2 膜电极可逆损失恢复程序

耐久性试验期间,膜电极可逆损失恢复程序按照表 F.3 进行。

表 F.3 可逆损失恢复程序表

序号	步骤	阳极气体	流量 L/min	阴极气体	流量 L/min	时长 s
1	N ₂ 吹扫	N ₂	1	N ₂	2	240
2	空气吹扫	无	0	空气	4	900
3	N ₂ 吹扫	N ₂	1	N ₂	2	240
4	H ₂ 吹扫	H ₂	2	无	0	600
5	氢空吹扫	H ₂	2	空气	4	5

附 录 G
(资料性)

燃料电池发动机保养、故障、试验不可抗力情况记录表

G.1 燃料电池发动机保养情况记录表

燃料电池发动机保养情况记录表如表 G.1 所示。

表 G.1 燃料电池发动机保养情况记录表

日期	保养开始时间	保养结束时间	耗材更换情况	控制程序更换情况	活化情况	保养人员	记录人

G.2 燃料电池发动机故障情况记录表

燃料电池发动机故障情况记录表如表 G.2 所示。

表 G.2 燃料电池发动机故障情况记录表

日期	故障时间	故障内容	故障等级	本组已完成循环数	已完成循环工况总时间	处理措施	修复时间	记录人

表 G.2 燃料电池发动机故障情况记录表（续）

日期	故障时间	故障内容	故障等级	本组已完成循环数	已完成循环工况总时间	处理措施	修复时间	记录人

G.3 燃料电池发动机试验不可抗力情况记录表

燃料电池发动机试验不可抗力情况记录表如表 G.3 所示。

表 G.3 燃料电池发动机试验不可抗力情况记录表

日期	试验中断时间	不可抗力情况	本组已完成循环数	已完成循环工况总时间	试验重启前处理措施	试验重启时间	记录人

附 录 H
(资料性)

燃料电池发动机耐久性试验数据记录表

H.1 稳态特性试验数据记录表

燃料电池发动机稳态特性试验数据记录表如表 H.1 和表 H.2 所示。

表 H.1 稳态特性试验(功率加载方式)数据记录表

试验日期：_____ 试验时间：_____ 已完成循环工况时长(h)：_____						
设定燃料电池 发动机功率 kW	电堆电压 V	电堆电流 A	电堆功率 kW	辅助系统功率 kW	燃料电池 发动机功率 kW	氢气流量 (标准状态) L/min
怠速(或最 低功率点)						
I_{10} 对应功率						
$10\%P_E$						
$20\%P_E$						
$30\%P_E$						
$40\%P_E$						
I_{50} 对应功率						
$50\%P_E$						
$60\%P_E$						
$70\%P_E$						
$80\%P_E$						
$90\%P_E$						
I_{100} 对应功率						
$100\%P_E$						

表 H.2 稳态特性试验(电流加载方式)数据记录表

试验日期：_____ 试验时间：_____ 已完成循环工况时长(h)：_____						
设定燃料电池 堆电流 A	电堆电压 V	电堆电流 A	电堆功率 kW	辅助系统功率 kW	燃料电池 发动机功率 kW	氢气流量 (标准状态) L/min
怠速(或最低功 率点)对应电流						

表 H.2 稳态特性试验(电流加载方式)数据记录表 (续)

试验日期：_____ 试验时间：_____ 已完成循环工况时长(h)：_____						
设定燃料电池 堆电流 A	电堆电压 V	电堆电流 A	电堆功率 kW	辅助系统功率 kW	燃料电池 发动机功率 kW	氢气流量 (标准状态) L/min
I_{10}						
20% P_E 对应电流						
30% P_E 对应电流						
40% P_E 对应电流						
I_{50}						
60% P_E 对应电流						
70% P_E 对应电流						
80% P_E 对应电流						
90% P_E 对应电流						
I_{100}						
100% P_E 对应电流						

H.2 耐久性试验结果记录表

燃料电池发动机耐久性试验结果记录如表 H.3 所示。

表 H.3 燃料电池发动机耐久性试验结果记录表

循环工况总时长(h)：_____				
指标名称			数值	单位
参考电流下燃料 电池堆的电压	参考电流 I_{100}	电压初始值 $V_{0_I_{100}}$		V
		电压终末值 $V_{1_I_{100}}$		V
	参考电流 I_{50}	电压初始值 $V_{0_I_{50}}$		V
		电压终末值 $V_{1_I_{50}}$		V
	参考电流 I_{10}	电压初始值 $V_{0_I_{10}}$		V
		电压终末值 $V_{1_I_{10}}$		V
参考电流下燃料电池堆的 电压衰减速率	线性拟合法	$v_{f_I_{100}}$		V/h
		$v_{f_I_{50}}$		V/h
		$v_{f_I_{10}}$		V/h
	首末作差法	$v_{c_I_{100}}$		V/h
		$v_{c_I_{50}}$		V/h
		$v_{c_I_{10}}$		V/h

表 H.3 燃料电池发动机耐久性试验结果记录表（续）

循环工况总时长(h): _____				
指标名称			数值	单位
参考电流下燃料电池堆的电压衰减幅度	线性拟合法	$\Delta V_{f_I_{100}}$		—
		$\Delta V_{f_I_{50}}$		—
		$\Delta V_{f_I_{10}}$		—
	首末作差法	$\Delta V_{c_I_{100}}$		—
		$\Delta V_{c_I_{50}}$		—
		$\Delta V_{c_I_{10}}$		—
参考电流下燃料电池发动机的功率	参考电流 I_{100}	功率初始值 $P_{0_I_{100}}$		kW
		功率终末值 $P_{1_I_{100}}$		kW
	参考电流 I_{50}	功率初始值 $P_{0_I_{50}}$		kW
		功率终末值 $P_{1_I_{50}}$		kW
	参考电流 I_{10}	功率初始值 $P_{0_I_{10}}$		kW
		功率终末值 $P_{1_I_{10}}$		kW
参考电流下燃料电池发动机的功率衰减幅度	参考电流 I_{100}	$\Delta P_{FCE_I_{100}}$		
	参考电流 I_{50}	$\Delta P_{FCE_I_{50}}$		
	参考电流 I_{10}	$\Delta P_{FCE_I_{10}}$		
参考电流下燃料电池堆的运行一致性(变异系数)	参考电流 I_{100}	初始值 $C_{v0_I_{100}}$		—
		终末值 $C_{v1_I_{100}}$		—
	参考电流 I_{50}	初始值 $C_{v0_I_{50}}$		—
		终末值 $C_{v1_I_{50}}$		—
	参考电流 I_{10}	初始值 $C_{v0_I_{10}}$		—
		终末值 $C_{v1_I_{10}}$		—
额定功率下辅助系统的功率变化		功率初始值 P_{BOP0}		kW
		功率终末值 P_{BOP1}		kW
		变化幅度 ΔP_{BOP}		—
额定功率下燃料电池发动机的效率衰减		效率初始值 η_{F0}		—
		效率终末值 η_{F1}		—
		衰减幅度 $\Delta \eta_F$		—
燃料电池发机动态平均效率衰减		最初三个循环工况的平均功率 $\overline{P}_{FD0}$		kW
		最后三个循环工况的平均功率 $\overline{P}_{FD1}$		kW
		效率初始值 $\overline{\eta}_{FD0}$		—
		效率终末值 $\overline{\eta}_{FD1}$		—
		衰减幅度 $\overline{\Delta \eta}_{FD}$		—

附 录 I
(资料性)

燃料电池堆耐久性试验数据记录表

燃料电池堆的极化曲线试验数据记录表如表 I.1。

表 I.1 极化曲线测试电流工况点及测试条件

试验日期：_____ 试验时间：_____ 已完成循环工况时长(h)：_____													
加载 步骤	电 流 A	电 压 V	时 间 min	流 量 L/min		入 口 压 力 kPa		入 口 温 度 ℃		露 点 温 度 ℃			冷却液出 入口温差 ℃
				阳 极	阴 极	阳 极	阴 极	阳 极	阴 极	冷却 液	阳 极	阴 极	
1	开路												
2	0.1I _E												
3	0.2I _E												
4	0.3I _E												
5	0.4I _E												
6	0.5I _E												
7	0.6I _E												
8	.....												
9	I _S												
10	.....												
11	I _E												

注：I_S为燃料电池堆参考电流。I_E为燃料电池堆额定电流。
