



中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z XXXXX—XXXX

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

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

(征求意见稿)

(本草案完成时间：2026.6.20)

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

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 1

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 8

 6.1 试验要求 9

 6.2 试验方法 9

 6.3 数据处理 11

7 车用燃料电池膜电极耐久性试验方法 12

 7.1 试验要求 12

 7.2 试验方法 12

 7.3 数据处理 15

8 燃料电池发动机用空压机耐久性试验方法 16

 8.1 试验要求 16

 8.2 试验方法 16

 8.3 数据处理 17

9 燃料电池发动机用氢气循环泵耐久性试验方法 17

 9.1 试验要求 17

 9.2 试验方法 18

 9.3 数据处理 19

附 录 A（规范性） 燃料电池发动机耐久性循环工况 20

附 录 B（规范性） 燃料电池发动机耐久性试验流程 23

附 录 C（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 24

附 录 D（资料性） 燃料电池发动机耐久性试验数据记录表 26

附 录 E（规范性） 燃料电池堆耐久性循环工况 29

附 录 F（规范性） 燃料电池膜电极耐久性循环工况 31

附 录 G（资料性） 燃料电池膜电极可逆损失恢复程序 33

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。

本文件有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：

本文件主要起草人：

燃料电池发动机及关键部件耐久性 试验方法

1 范围

本文件规定了燃料电池发动机、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 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和GB/T 28816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（膜电极）数量的比值。

3.2

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I₁₀₀、I₅₀、I₁₀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0.70 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系统，一般由氢气循环泵、喷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
单电池电压	V	±0.05% FSD ^a	0.000 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	NLPM	±1.0% FSD ^a	0.1
气体流量 ^{b,c}	NCCM	±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 气体流量对应的气体状态是 0 °C, 101 325 Pa。 ^c 针对气密性测试的要求。 ^d RD: 读数。			

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

- 试验环境应符合以下要求：
- 境温度应处于 23℃±5℃；
 - 境压力应处于 86~106 kPa 范围内。

5.1.2 燃料电池发动机要求

- 燃料电池发动机应满足以下要求：
- 应保持燃料电池发动机出厂时的外形结构和技术参数；
 - 料电池发动机各系统应完整；
 - 料电池发动机应有可靠的安全保障系统；
 - 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；
 - 料电池发动机的冷却剂宜采用去离子水。

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应符合以下要求：
- 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；
 - 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 10Hz；
 - 试验用氢气应符合 GB/T 37244 的规定要求。

5.1.4 燃料电池发动机控制要求

- 燃料电池发动机的控制应符合以下要求：
- 试验过程中，燃料电池发动机的起动、加载、降载、停机等均应由试验平台按照制造商提供的通信协议发送或接收相应指令。
 - 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动起动指令停止计时；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、计算应满足以下要求：
- 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 应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（若有）、环境温度 and 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；

——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，散热器风扇的功率不计入辅助系统功率内。

——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

试验准备阶段按照以下步骤进行：

- 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；
- 按照制造商的要求对燃料电池发动机进行活化和调整，但总时间不应超过 100 h；
- 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 小时；
- 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以下步骤进行：

- 在 10 min 之内，开始按照附录 A 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；
- 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；
- 每累计完成 20 h 循环工况（即 40 个循环工况）后，停机 5 h；
- 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：
 - 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 小时后，按照 5.2.2.1 进行氢气流道气密性测试；
 - 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，并应保养情况记录至表 C.1 中；
 - 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；
 - 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）；
- 重复上述步骤 a) 至 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 C.2 或表 C.3 中；
- 按照 5.3 处理试验数据，并将结果记录至表 D.2 中。

5.2.1.3 气密性测试

5.2.2 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 第 8.8.2.1 条进行。

5.2.3 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 第 8.8.2.2 条进行。

5.2.4 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 第 7.4 条使燃料电池发动机达到热机状态，然后按照 GB/T 24554-2022 第 8.9 条进行燃料电池发动机的绝缘电阻测试。

5.2.5 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 第 7.4 条使其达到热机状态；
- 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) 按照附录 D 中表 D.1 或表 D.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 D.1 或表 D.2 中。

5.2.6 动态响应特性试验

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

5.2.7 试验安全要求

试验过程中，燃料电池发动机的安全性应满足以下要求：

- 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低于 100 Ω/V 时。

5.2.8 循环工况要求

5.2.8.1 一般要求

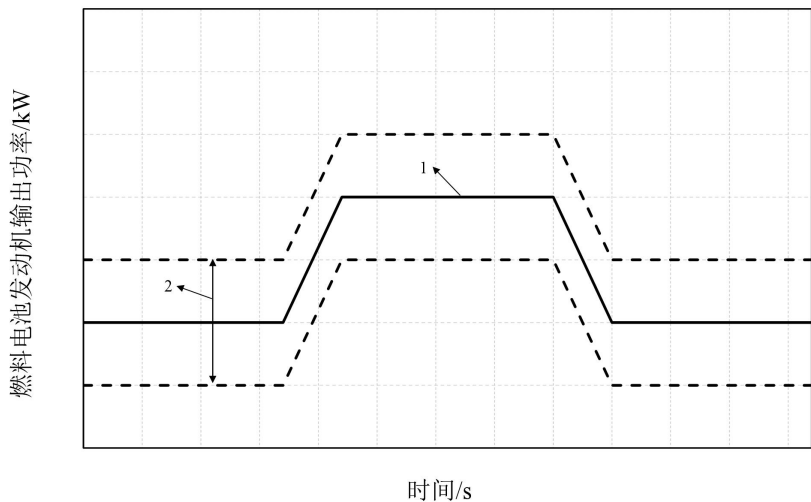
燃料电池发动机的耐久性循环工况及加载要求见附录 A。燃料电池发动机在功率加载或电流加载的方式下，均以燃料电池发动机的净输出功率作为循环工况功率公差判定对象。当燃料电池发动机的净输出功率出现衰减且无法满足 5.2.7.2 的要求时，可选用以下任一方式进行修正：

- 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。

5.2.8.2 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。



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

5.2.9 保养要求

- 燃料电池发动机的保养应符合以下要求：
- 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，不包括燃料电池堆、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；
 - 按照制造商的要求对燃料电池发动机进行活化。

5.2.10 燃料电池发动机故障分类、试验不可抗力及处理要求

- 燃料电池发动机的故障分类、试验不可抗力及处理应符合以下要求：
- 1 级故障，不影响燃料电池发动机的正常运行。针对 1 级故障，可在试验停机期间，对燃料电池发动机进行维修；
 - 2 级故障，影响燃料电池发动机的正常运行，需要限制燃料电池发动机的功率输出的情况。针对 2 级故障，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，最高级别故障，燃料电池发动机必须立即停机。针对 3 级故障，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。
 - 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，若出现因不可抗力（如试验平台故障、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。

5.2.11 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（1800s）过程中，燃料电池发动机不满足 5.2.7.2 所规定的功率公差累积时间超过 180 s；
- 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 1000 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，并记录在表 D.2 中。

5.3.2 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）—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，如式（1），得到平均单电池电压衰减速率 v 。

$$V = v_f \times t + b \quad (1)$$

式中：

- V ——燃料电池堆平均单电池电压，单位为伏特（V）；
- t ——循环工况运行时长，单位为小时（h）；
- v_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 ——初始平均单电池电压拟合值，单位为伏特（V）。

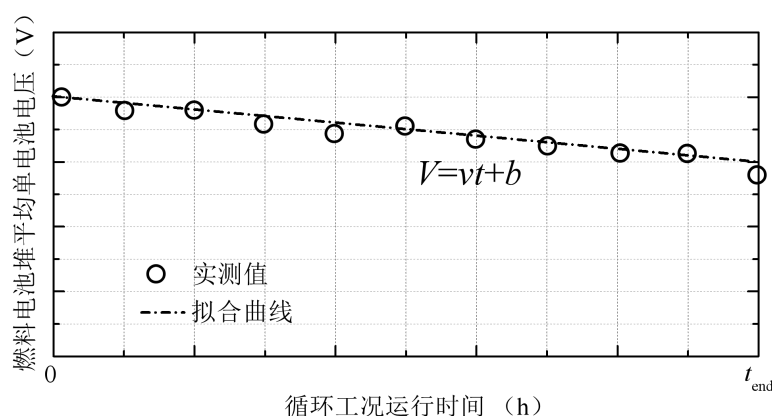


图 2 燃料电池堆电压（V）-循环工况运行时间（h）图

5.3.2.2 首末作差法

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

$$v_c = \frac{V_1 - V_0}{t_{\text{end}}} \quad (1)$$

式中：

- V_0 ——耐久试验前，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_1 ——耐久试验后，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_{end} ——循环工况运行总时长，单位为小时（h）；
 V_c ——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 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式（3）计算：

$$\Delta V_f = \frac{v_f \times t_{\text{end}}}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

ΔV_f ——电压衰减幅度。

5.3.3.2 首末作差法

电压衰减幅度应根据式（4）计算：

$$\Delta V_c = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

ΔV_c ——电压衰减幅度。

5.3.4 参考电流下燃料电池发动机的功率衰减幅度

参考电流点下燃料电池发动机的功率衰减幅度按式（5）计算：

$$\Delta P_{\text{FCE}} = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

P_{FCE} ——参考电流下燃料电池发动机的功率衰减幅度；

P_0 ——耐久试验前，参考电流下燃料电池发动机的功率，单位为千瓦（kW）；

P_1 ——耐久试验后，参考电流下燃料电池发动机的功率，单位为千瓦（kW）。

5.3.5 参考电流下燃料电池堆的运行一致性（变异系数）

参考电流下燃料电池堆的运行一致性以变异系数表征，变异系数按式（6）和式（7）计算：

$$C_V = \frac{\sigma_v}{V_{\text{mean}}} \times 100\% \quad (1)$$

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

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 参考电流下辅助系统的功率变化

燃料电池发动机辅助系统的功率增长幅度按式（8）计算：

$$\Delta P_{\text{BOP}} = \frac{P_{\text{BOP1}} - P_{\text{BOP0}}}{P_{\text{BOP0}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

ΔP_{BOP} ——燃料电池发动机辅助系统的功率变化幅度；

P_{BOP0} ——耐久试验前，首次稳态测试中参考电流下辅助系统的功率，单位为千瓦（kW）；

P_{BOP1} ——耐久试验后，末次稳态测试中参考电流下辅助系统的功率，单位为千瓦（kW）。

5.3.7 燃料电池发动机最高效率的衰减幅度

基于稳态特性试验数据，按照GB/T 24554—2022附录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式（9）计算：

$$\Delta\eta_{\text{M}} = \frac{\eta_{\text{M0}} - \eta_{\text{M1}}}{\eta_{\text{M0}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$\Delta\eta_{\text{M}}$ ——额定功率下燃料电池系统的效率衰减幅度；

η_{M0} ——耐久试验前，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附录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式（10）计算：

$$\Delta\eta_{\text{F}} = \frac{\eta_{\text{F0}} - \eta_{\text{F1}}}{\eta_{\text{F0}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$\Delta\eta_{\text{F}}$ ——额定功率下燃料电池系统的效率衰减幅度；

η_{F0} ——耐久试验前，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式（11）计算：

$$\Delta\bar{\eta}_{\text{FD}} = \frac{\bar{\eta}_{\text{FD0}} - \bar{\eta}_{\text{FD1}}}{\bar{\eta}_{\text{FD0}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$\Delta\bar{\eta}_{\text{FD}}$ ——燃料电池发动机的动态平均效率衰减幅度；

$\bar{\eta}_{\text{FD0}}$ ——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；

$\bar{\eta}_{\text{FD1}}$ ——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，作为耐久试验前的电压初始值 $V_{0,\text{cycle}}$ ；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，作为耐久试验后的电压终末值 $V_{1,\text{cycle}}$ 。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，根据式（12）计算：

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

式中：

ΔV_{c} ——电压衰减幅度；

$V_{0,\text{cycle}}$ ——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）；

$V_{1,\text{cycle}}$ ——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

试验环境应符合以下要求：

- 环境温度应处于 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ；
- 环境压力应处于 86~106 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应符合以下要求：

- 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°C/s ，流量响应速率不低于 1000 NLPM/s，电流响应速率不低于 100 A/s；
- 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、计算应满足以下要求：

- 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 应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，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：

$$X_1 = 2 \times 3.73 \times Q_1 \quad (1)$$

式中：

X_1 ——阳极腔向阴极腔的窜气速率，单位为标准毫升每分钟（NCCM）；

Q_1 ——测得的阳极腔向阴极腔的氮气窜气流量平均值，单位为标准毫升每分钟（NCCM）。

注：3.73 是由 GB/T 20042.2-2008 5.2 公式 (2) 计算获得。

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，由阳极和阴极入口处同时通入氮气，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：

$$X_2 = 2 \times 3.73 \times Q_2 \quad (1)$$

式中：

X_2 ——阳极腔和阴极腔向冷却液腔的窜气速率，单位为标准毫升每分钟（NCCM）；

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，单位为标准毫升每分钟（NCCM）。

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：

$$X_3=2 \times 3.73 \times (Q_a + Q_b + Q_c) \cdots \cdots (1)$$

式中：
 X_3 ——燃料电池堆对外泄漏速率，单位为标准毫升每分钟（NCCM）；
 Q_a ——测得的燃料电池堆阳极入口氮气流量平均值，单位为标准毫升每分钟（NCCM）；
 Q_b ——测得的燃料电池堆阴极入口氮气流量平均值，单位为标准毫升每分钟（NCCM）；
 Q_c ——测得的燃料电池堆冷却液入口氮气流量平均值，单位为标准毫升每分钟（NCCM）。

6.2.2 绝缘电阻试验

将燃料电池堆冷却液腔内充满冷却液且冷却液处于冷态不循环状态。绝缘电阻测试仪设置到1 000 V 档位，分别测量燃料电池堆正极和负极对地的绝缘电阻 R_x 。测试过程中，燃料电池堆应与试验平台绝缘。绝缘电阻值应按式（16）计算：

$$R = R_x \times 10^3 / 1\,000 \cdots \cdots (1)$$

式中：
 R ——绝缘电阻值，单位为千欧每伏特（kΩ/V）；
 R_x ——绝缘电阻测试仪读数，单位为兆欧（MΩ）。
绝缘阻值的计算结果应保留小数点后一位。

注：地，指与燃料电池堆的地为等电位的端板或壳体上的金属部件等。地的选择顺序为端板、绑带、螺栓；若前者为非金属部件，则按顺序依次选择。冷却液的电导率应记录在测试结果中，测试用冷却液的电导率应不高于5 μS/cm。

6.2.3 极化曲线试验

极化曲线测试按以下方法进行，其中 I_s 为燃料电池堆基准电流， I_E 为燃料电池堆额定电流。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。

- 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、压力处在规定的范围内；
- c) 按照表 2 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；
- d) 按照表 2 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 2 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。

表 2 极化曲线测试电流工况点及测试条件

加载步骤	电流 A	电压 V	时间 min	流量NLPM		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	0.1 I_E												
3	0.2 I_E												

4	$0.3I_E$												
5	$0.4I_E$												
6	$0.5I_E$												
7	$0.6I_E$												
8	$0.7I_E$												
9	$0.8I_E$												
10	$0.9I_E$												
11	I_S												
12	I_E												

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，如果发生意外停机时，要及时降低燃料电池堆电压至各单电池电压0.3 V以下。

- a) 按照第 6.2.1 和 6.2.2 条进行初始气密性、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) 按照第 6.2.3 条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 E 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；
- f) 每进行 100 h（即 200 次循环工况）试验，按照第 6.2.3 条对燃料电池堆进行极化曲线测试；
- 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停机和吹扫；
- h) 待燃料电池堆冷却至室温，按照第 6.2.1 和 6.2.2 条进行气密性、绝缘电阻测试；
- i) 重复执行步骤 d) ~h)；
- j) 当燃料电池堆达到第 6.2.5 条规定的条件时，停止试验并记录循环工况测试总时长，按照第 6.2.1、6.2.2 和 6.2.3 条进行燃料电池堆气密性、绝缘电阻和极化曲线测试。

6.2.5 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；
 - 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1000 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基准电流所对应的平均单电池电压，绘制“平均单电池电压（V）—运行时间（h）”图，如图3所示。对所测得的不同运行时长后的基准电流中对应的平均单电池电压进行线性拟合，如式（17），得到电压衰减速率 v 。

$$V = v \times t + b \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中：

V ——平均单电池电压，单位为伏特（V）；

t ——循环工况运行时长，单位为小时（h）；

v ——电压衰减速率，单位为伏特每小时 (V/h)；

b ——拟合常数项。

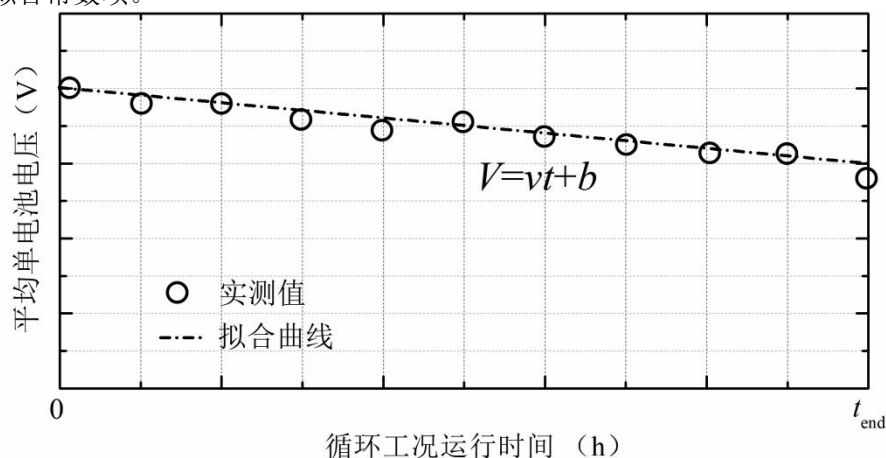


图3 平均单电池电压 (V) -循环工况运行时间 (h) 图

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式 (18) 计算：

$$\Delta V = \frac{v \times t_{\text{end}}}{V_{\text{start}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

ΔV ——电压衰减幅度；

V_{start} ——初始参考电流点对应平均单电池电压，单位为伏特 (V)；

t_{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

试验环境应符合以下要求：

——环境温度应处于 $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ；

——境压力应处于 $86 \sim 106 \text{ kPa}$ 范围内。

7.1.2 样品要求

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。

7.1.3 试验数据采集、计算要求

试验数据采集、计算应满足以下要求：

——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 应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；

——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。

7.2 试验方法

7.2.1 单电池活化

7.2.1.1 测试条件

活化测试条件应满足以下要求：

- 单电池温度为 80 ℃；
 - 对湿度为 100%RH；
 - 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：
- a) 按照表 3 所示工况进行单电池活化，记录 0.6 V 运行时最后 10 s 的电流平均值作为 I_0 ；
 - b) 切换至电流控制模式，按照每分钟 0.2 A/cm²阶跃逐渐加载电流，直至电流达到 I_0 ，稳定 3 min，记录此时单电池电压 U_0 ，降载至开路；
 - c) 重复步骤 b)，相邻两次记录的 U_0 差值在±2 mV 区间内活化即可结束，差值大于±2 mV 即重复步骤 a)~b)。若活化运行工况已运行 5 h 以上，仍不能达到结束条件，活化结束。

表 3 单电池活化运行工况

电压 V	运行时长 min
开路电压	3
0.90	1
0.85	3
0.80	3
0.75	10
0.70	10
0.65	10
0.60	10
0.55	10
0.50	20
0.55	2
0.60	2
0.65	2
0.70	2
0.75	2
0.80	2
0.85	2
0.90	2

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。

7.2.2 单电池极化曲线

7.2.2.1 测试条件

- 测试条件应满足以下要求：
- 单电池温度为 80 ℃；
 - 对湿度范围为 30%RH~100%RH；
 - 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 4 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 4 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>i_e</i>	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>i_e</i>	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

膜电极耐久性测试的测试条件按照第7.2.1.1 条的规定。

7.2.3.2 试验方法

膜电极耐久性试验按以下步骤进行：

- a) 按照第 7.2.1 条对单电池进行活化;
- b) 按照第 7.2.2 条规定的方法对单电池进行初始极化曲线测试;
- c) 将额定电流密度作为 i_E , 代入附录 F 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, 按照第 7.2.2 条进行极化曲线测试;
- 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 G;
- f) 重复执行步骤 c) ~e);
- g) 当单电池达到第 7.2.4 条规定的条件时, 停止试验并记录循环工况测试总时长, 按照第 7.2.2 条进行极化曲线测试。

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;
- 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1000 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式 (19) 计算:

$$V = v \times t + b \quad (1)$$

式中:

- V ——单电池电压, 单位为伏特 (V);
- t ——循环工况运行时长, 单位为小时 (h);
- v ——电压衰减速率, 单位为伏特每小时 (V/h);
- b ——拟合常数项。

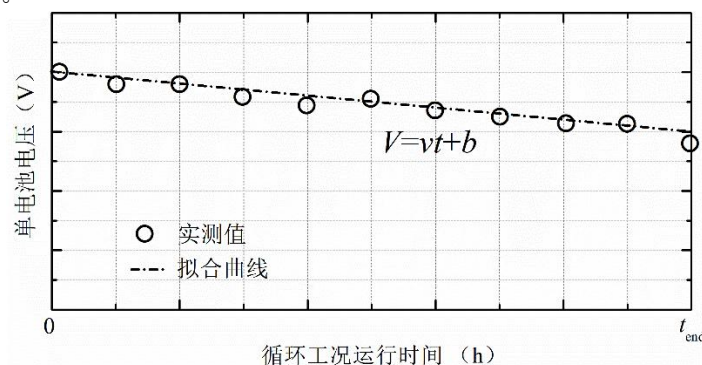


图4 单电池电压 (V) - 循环工况运行时间 (h)

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式 (20) 计算:

$$\Delta V = \frac{v \times t_{\text{end}}}{V_{\text{start}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

- ΔV ——电压衰减幅度;
- V_{start} ——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_{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压机耐久性试验方法

8.1 试验要求

8.1.1 环境要求

试验环境应符合以下要求：

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

8.1.2 空气压缩机要求

空气压缩机应满足以下要求：

- 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应符合以下要求：

- 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 通信与空气压缩机收发指令的功能。

8.1.4 空气压缩机控制要求

空气压缩机的控制应符合以下要求：

- 试验过程中，空气压缩机的起动、加载、降载、停机等均由试验平台按照制造商提供的通信协议发送或接收相应指令。

8.1.5 试验数据采集、计算要求

试验数据采集、计算应满足以下要求：

- 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 应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：

- 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；
- 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；
- 空压机出口节气门设定为怠速工况点对应开度；
- 对空压机进行加载转速由 0 rpm 至怠速转速再到 0 rpm 的启停循环工况，共进行 150000 次。在 0 rpm 和怠速转速停留时间不低于 2 s，空压机变载速率不低于 5000 r/s；
- 空压机出口节气门设定为额定工况点对应开度；
- 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 500000 次。在怠速转速和额定转速停留时间不低于 2 s，空压机变载速率不低于 5000 r/s；
- 对空压机加载至额定工况点对应的转速和压比，运行 1000 h；
- 耐久每进行 200h，可对空压机入口的空气滤清器进行保养或更换；

i) 耐久试验前后, 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:

- 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;
- 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;
- 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:

- 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;
- 待冷却液温度稳定后起动空压机至怠速转速;
- 通过外接气源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;
- 按照先提高转速再增加膨胀机入口流量的方式进行加载, 空压机加载转速稳定后, 通过外接气源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%。空压机加载速率按照制造商技术文件规定进行设置;
- 按照制造商技术文件规定加载空压机至额定工况点, 稳定运行 10 min;
- 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机出口压力。

8.3 数据处理

空压机耐久试验后, 功率变化幅度按照式 (21) 进行计算:

$$D = \frac{|P_1 - P_0|}{P_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

D ——空压机耐久试验后功率变化幅度;

P_0 ——耐久试验前, 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_1 ——耐久试验后, 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

试验环境应符合以下要求:

- 环境温度应处于 23℃ ± 5℃;
- 环境压力应处于 86~106 kPa 范围内。

9.1.2 氢气循环系统要求

氢气循环系统应满足以下要求:

- 应保持氢气循环系统出厂时的外形结构和技术参数;
- 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应符合以下要求:

- 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系统所需的散热条件；
- 试验平台应通过 CAN 通信与氢气循环系统收发指令的功能；
- 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 氢气循环系统控制要求

氢气循环泵的控制应符合以下要求：

- 试验过程中，氢气循环泵的起动、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发送或接收相应指令。

9.1.5 试验数据采集、计算要求

试验数据采集、计算应满足以下要求：

- 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 应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) 将氢气循环泵安装在试验平台上，并按照产品技术要求设置冷却液流量和温度；
- c) 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；
- d) 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 至怠速再到 0 的启停循环工况，共进行 150000 次；
- e) 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 150000 次；
- f) 对氢气循环泵加载至额定工况点，稳定运行 1000 h；
- g) 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 分钟；
- 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，起动氢气循环泵并加载；
- c) 按照制造商要求加载氢气循环系统至额定工况点，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

氢气循环泵耐久试验后，功率变化幅度按照式（22）进行计算：

$$D = \frac{|P_1 - P_0|}{P_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

D ——氢气循环泵耐久试验后功率变化幅度；

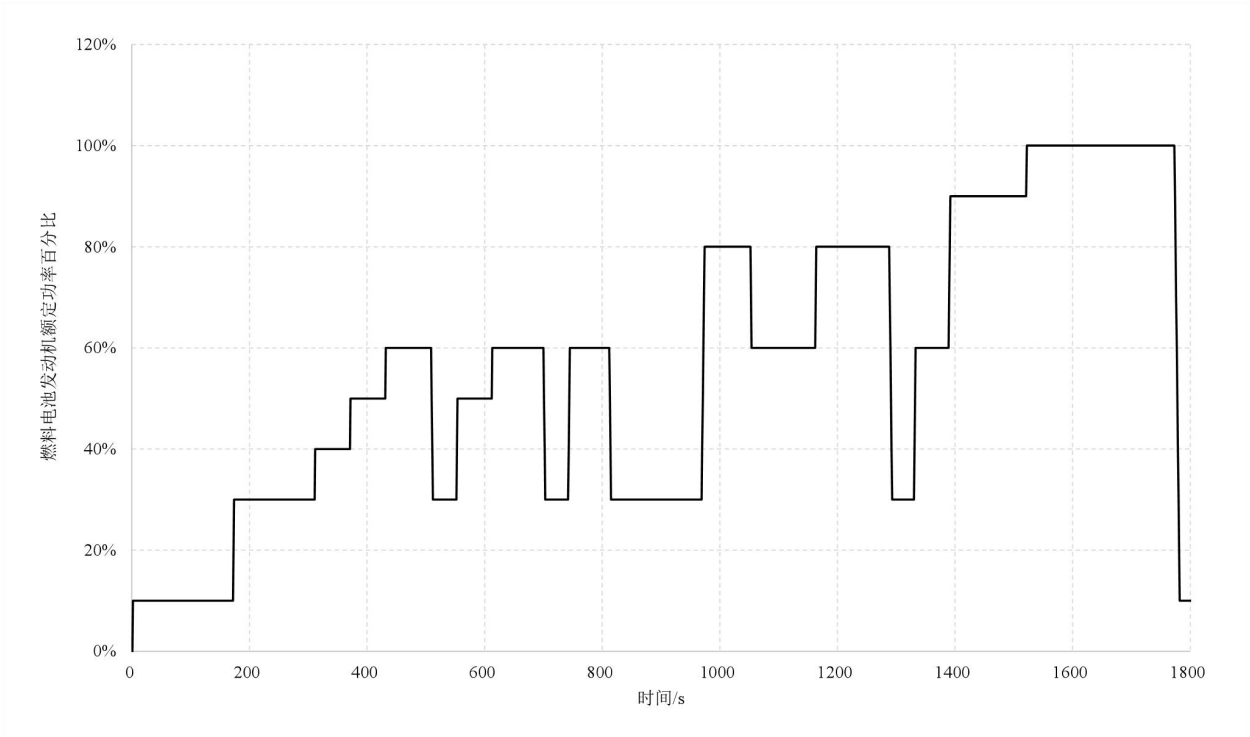
P_0 ——耐久试验前，氢气循环泵额定流量和压升下氢气循环泵控制器输入功率，单位为千瓦（kW）；

P_1 ——耐久试验后，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循环工况

A.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A. 1和表A. 1所示。

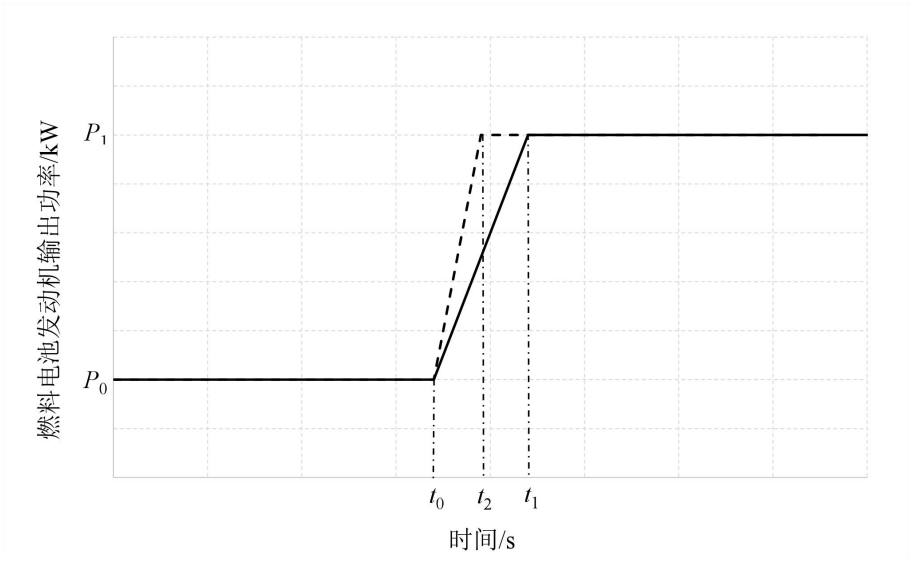


16	$60\%P_E-30\%P_E$	3	698	701
17	$30\%P_E$	39	701	740
18	$30\%P_E-60\%P_E$	3	740	743
19	$60\%P_E$	67	743	810
20	$60\%P_E-30\%P_E$	3	810	813
21	$30\%P_E$	154	813	967
22	$30\%P_E-80\%P_E$	5	967	972
23	$80\%P_E$	78	972	1050
24	$80\%P_E-60\%P_E$	2	1050	1052
25	$60\%P_E$	108	1052	1160
26	$60\%P_E-80\%P_E$	2	1160	1162
27	$80\%P_E$	124	1162	1286
28	$80\%P_E-30\%P_E$	5	1286	1291
29	$30\%P_E$	37	1291	1328
30	$30\%P_E-60\%P_E$	3	1328	1331
31	$60\%P_E$	56	1331	1387
32	$60\%P_E-90\%P_E$	3	1387	1390
33	$90\%P_E$	129	1390	1519
34	$90\%P_E-100\%P_E$	1	1519	1520
35	$100\%P_E$	251	1520	1771
36	$100\%P_E-10\%P_E$	9	1771	1780
37	$10\%P_E$	20	1780	1800

A.2 循环工况加载要求

燃料电池发动机的循环工况的加载应满足以下要求：

- 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 A.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 A.2 或图 A.3 所示的原则对附录 A.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 1800s。



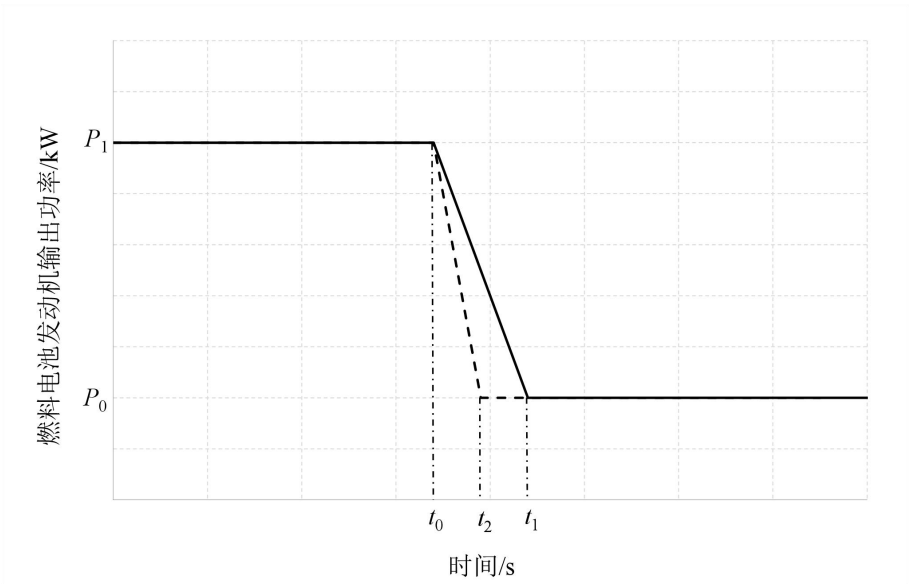
说明：

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 A. 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 A. 3 提高降载速率示意图

附录 B
(规范性)
燃料电池发动机耐久性试验流程

燃料电池发动机的耐久性试验流程如图B. 1所示。

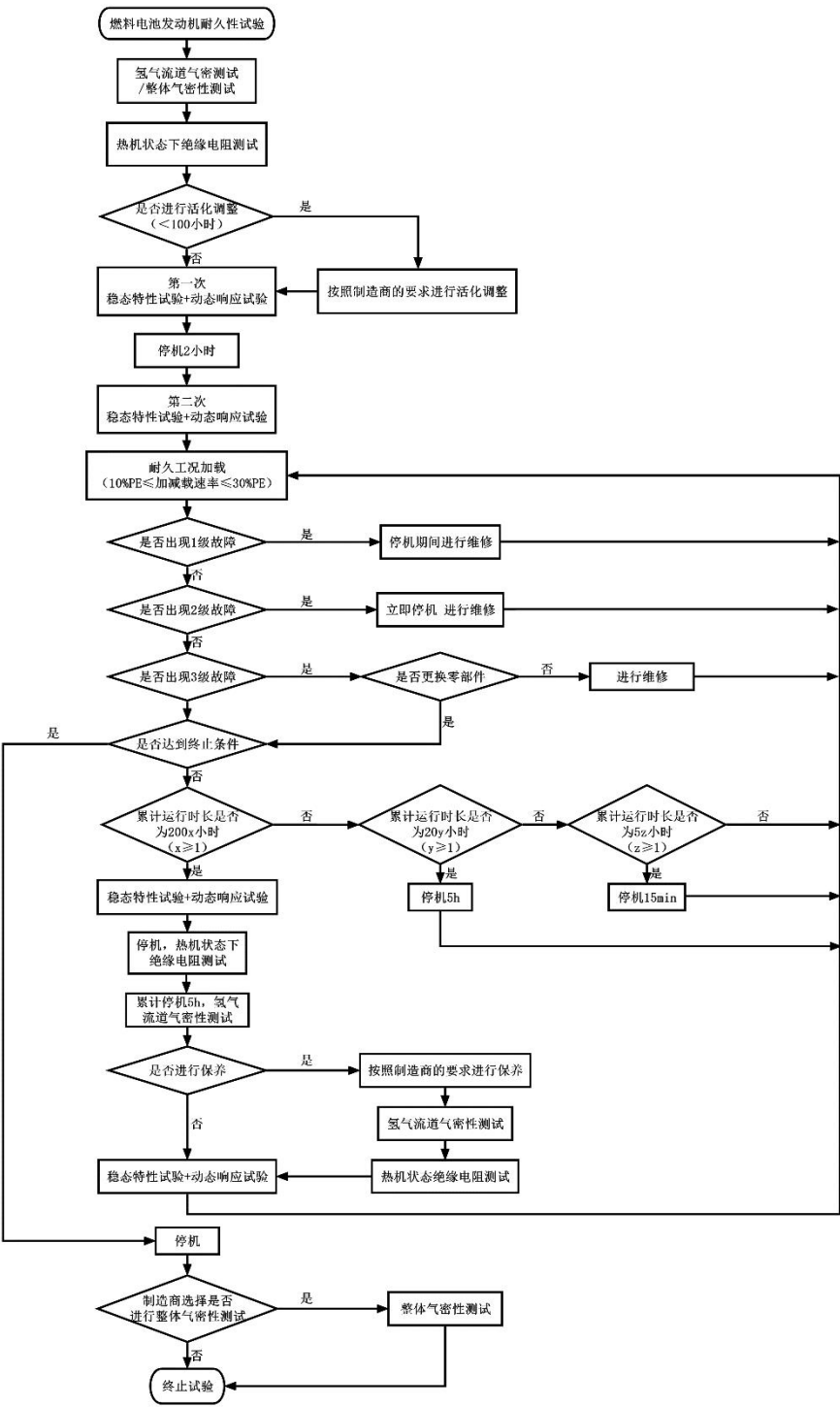


图 B. 1 燃料电池发动机的耐久性试验流程图

附 录 C
(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

C.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C. 1所示。

表 C. 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

C.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C. 2所示。

表 C. 2 燃料电池发动机的故障情况记录表

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

C.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C. 3所示。

表 C. 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 D
(资料性)
燃料电池发动机耐久性试验数据记录表

D.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D. 1和表D. 2所示。

表 D. 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 NL/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 D. 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）：_____						
设定燃料电池电堆电 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 NL/min
怠速（或最低功率 点）对应电流						
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						

D.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D. 3所示。

表 D. 3 燃料电池发动机耐久性试验结果记录表

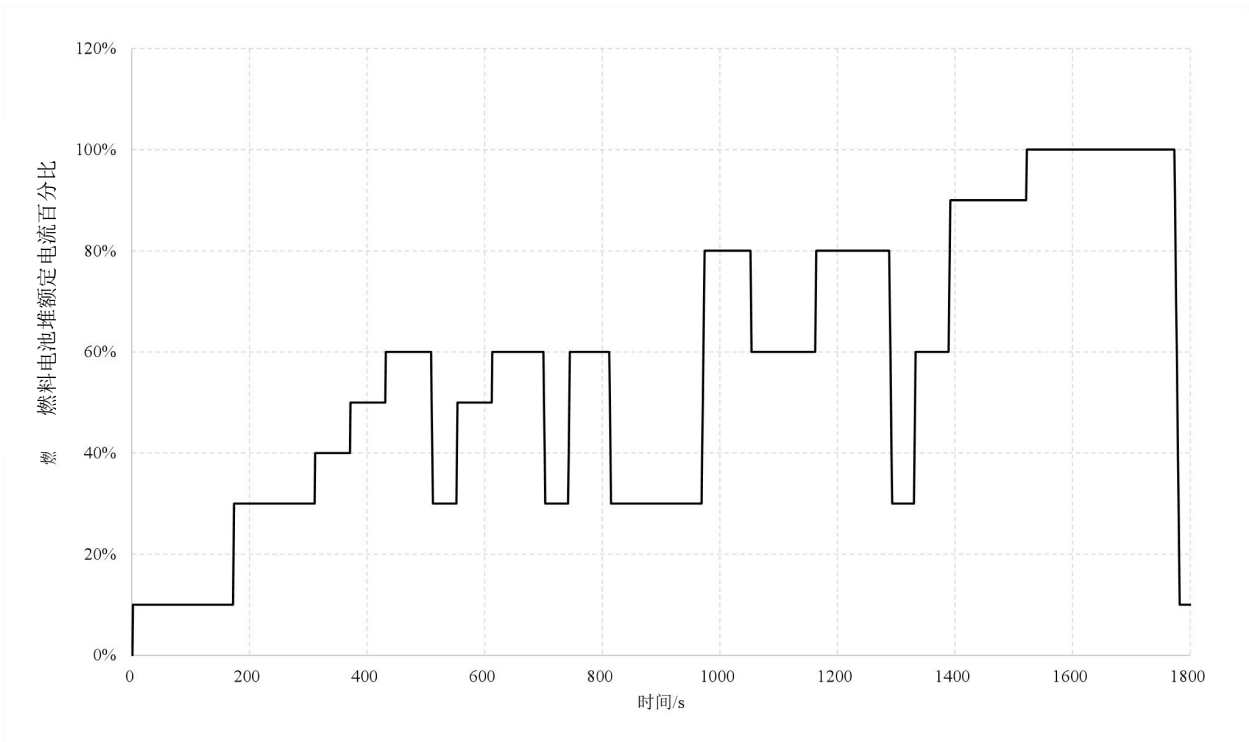
循环工况总时长（h）：_____				
指标名称			数值	单位
参考电流下燃料电池堆的电压	参考电流 I_{100}	电压初始值 V_{0_I100}		V
		电压终末值 V_{1_I100}		V
	参考电流 I_{50}	电压初始值 V_{0_I50}		V
		电压终末值 V_{1_I50}		V
	参考电流 I_{10}	电压初始值 V_{0_I10}		V
		电压终末值 V_{1_I10}		V
参考电流下燃料电池堆的电压 衰减速率	线性拟合法	v_{f_I100}		V/h
		v_{f_I50}		V/h
		v_{f_I10}		V/h
	首末作差法	v_{c_I100}		V/h
		v_{c_I50}		V/h
		v_{c_I10}		V/h
参考电流下燃料电池堆的电压 衰减幅度	线性拟合法	ΔV_{f_I100}		—
		ΔV_{f_I50}		—
		ΔV_{f_I10}		—
	首末作差法	ΔV_{c_I100}		—
		ΔV_{c_I50}		—
		ΔV_{c_I10}		—
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_I100}		kW
		功率终末值 P_{1_I100}		kW
	参考电流 I_{50}	功率初始值 P_{0_I50}		kW
		功率终末值 P_{1_I50}		kW
	参考电流 I_{10}	功率初始值 P_{0_I10}		kW
		功率终末值 P_{1_I10}		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}	ΔP_{FCE_I100}		
	参考电流 I_{50}	ΔP_{FCE_I50}		
	参考电流 I_{10}	ΔP_{FCE_I10}		
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_I100}		—
		终末值 C_{v1_I100}		—
	参考电流 I_{50}	初始值 C_{v0_I50}		—
		终末值 C_{v1_I50}		—
	参考电流 I_{10}	初始值 C_{v0_I10}		—
		终末值 C_{v1_I10}		—
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	效率初始值 $\bar{\eta}_{FD0}$		—
	效率终末值 $\bar{\eta}_{FD1}$		—
	衰减幅度 $\Delta\bar{\eta}_{FD}$		—

附 录 E
(规范性)
燃料电池堆耐久性循环工况

E.1 循环工况曲线和数据

燃料电池堆耐久性循环工况如图E. 1和表E. 1所示。



14	$50\%I_E-60\%I_E$	1	610	611
15	$60\%I_E$	87	611	698
16	$60\%I_E-30\%I_E$	3	698	701
17	$30\%I_E$	39	701	740
18	$30\%I_E-60\%I_E$	3	740	743
19	$60\%I_E$	67	743	810
20	$60\%I_E-30\%I_E$	3	810	813
21	$30\%I_E$	154	813	967
22	$30\%I_E-80\%I_E$	5	967	972
23	$80\%I_E$	78	972	1050
24	$80\%I_E-60\%I_E$	2	1050	1052
25	$60\%I_E$	108	1052	1160
26	$60\%I_E-80\%I_E$	2	1160	1162
27	$80\%I_E$	124	1162	1286
28	$80\%I_E-30\%I_E$	5	1286	1291
29	$30\%I_E$	37	1291	1328
30	$30\%I_E-60\%I_E$	3	1328	1331
31	$60\%I_E$	56	1331	1387
32	$60\%I_E-90\%I_E$	3	1387	1390
33	$90\%I_E$	129	1390	1519
34	$90\%I_E-100\%I_E$	1	1519	1520
35	$100\%I_E$	251	1520	1771
36	$100\%I_E-10\%I_E$	9	1771	1780
37	$10\%I_E$	20	1780	1800

附 录 F
(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 F.1 和表 F.1 所示。

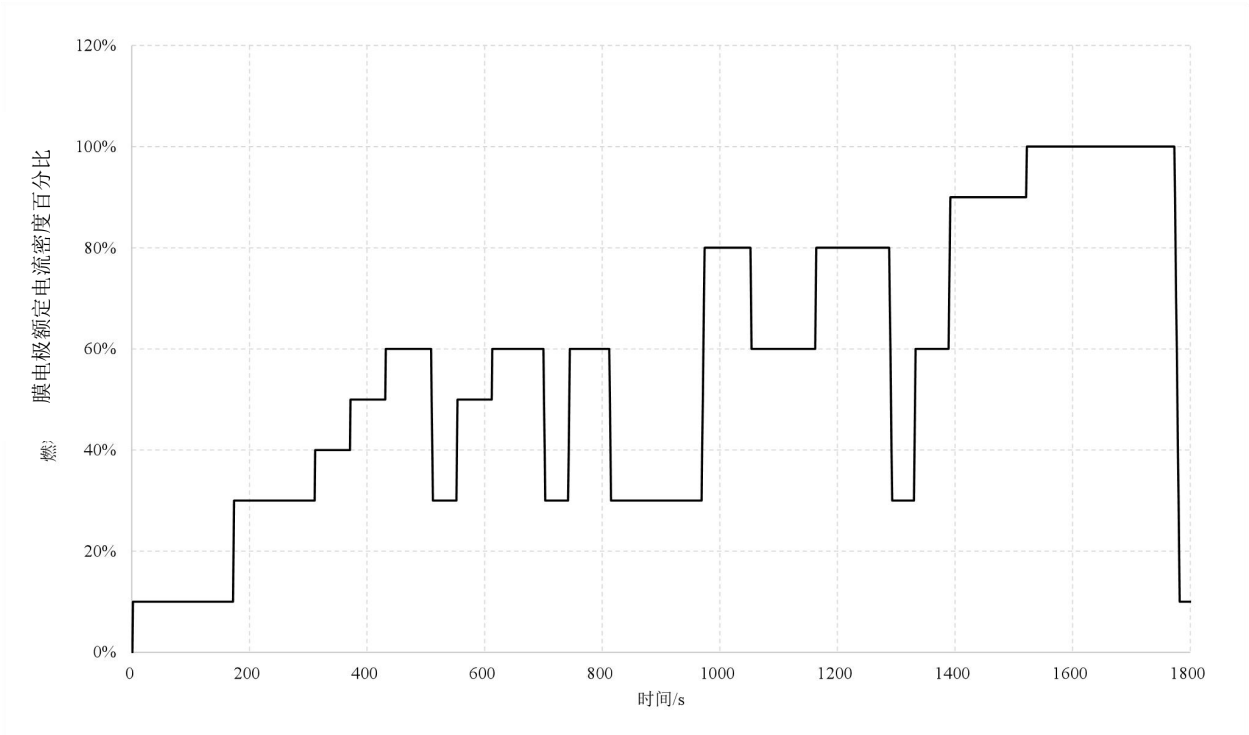


图 F.1 燃料电池膜电极耐久性循环工况曲线

表 F.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 -30% i_e	2	170	172
3	30% i_e	137	172	309
4	30% i_e -40% i_e	1	309	310
5	40% i_e	59	310	369
6	40% i_e -50% i_e	1	369	370
7	50% i_e	59	370	429
8	50% i_e -60% i_e	1	429	430
9	60% i_e	77	430	507
10	60% i_e -30% i_e	3	507	510
11	30% i_e	40	510	550
12	30% i_e -50% i_e	2	550	552
13	50% i_e	58	552	610
14	50% i_e -60% i_e	1	610	611

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
15	60% i_e	87	611	698
16	60% i_e -30% i_e	3	698	701
17	30% i_e	39	701	740
18	30% i_e -60% i_e	3	740	743
19	60% i_e	67	743	810
20	60% i_e -30% i_e	3	810	813
21	30% i_e	154	813	967
22	30% i_e -80% i_e	5	967	972
23	80% i_e	78	972	1050
24	80% i_e -60% i_e	2	1050	1052
25	60% i_e	108	1052	1160
26	60% i_e -80% i_e	2	1160	1162
27	80% i_e	124	1162	1286
28	80% i_e -30% i_e	5	1286	1291
29	30% i_e	37	1291	1328
30	30% i_e -60% i_e	3	1328	1331
31	60% i_e	56	1331	1387
32	60% i_e -90% i_e	3	1387	1390
33	90% i_e	129	1390	1519
34	90% i_e -100% i_e	1	1519	1520
35	100% i_e	251	1520	1771
36	100% i_e -10% i_e	9	1771	1780
37	10% i_e	20	1780	1800

附 录 G
(资料性)
燃料电池膜电极可逆损失恢复程序

G.1 可逆损失恢复程序

耐久性测试期间，膜电极可逆损失恢复程序按照表G.1进行。

表 G. 1 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