

ICS 43.120
CCS T 47



中华人民共和国国家标准

GB/T 24554—2022
代替 GB/T 24554—2009

燃料电池发动机性能试验方法

Performance test methods for fuel cell system

2022-12-30 发布

2023-07-01 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 I

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 试验条件 2

6 一般试验要求 3

7 预处理方法 3

8 试验方法 4

附录 A (资料性) 试验项目测试顺序 12

附录 B (规范性) 稳态试验数据处理 13

附录 C (规范性) 动态平均功率试验数据处理 15

附录 D (资料性) 燃料电池发动机边界界定框图 16

附录 E (规范性) 燃料电池堆体和功率密度测量方法 17

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。

本文件代替 GB/T 24554—2009《燃料电池发动机性能试验方法》。与 GB/T 24554—2009 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 增加了辅助系统功率规定(见 5.5)；
- b) 增加了功率加载误差要求(见 5.6)；
- c) 增加了低温(0℃以下)浸机方法(见 7.2)；
- d) 增加了高温浸机方法(见 7.3)；
- e) 增加了常温额定功率冷起动测试(见 8.1.1.3)；
- f) 增加了常温额定功率热起动试验(见 8.1.1.4)；
- g) 增加了低温冷起动特性试验(见 8.1.2)；
- h) 增加了高温运行试验(见 8.6)；
- i) 增加了动态平均效率特性试验(见 8.7)；
- j) 增加了燃料电池堆体积功率密度测试(见 8.10.2)；
- k) 更改了稳态特性试验中的功率点选择方法(见 8.5.2, 2009 年版的 7.7.2)；
- l) 更改了燃料电池发动机气密性测试(见 8.8, 2009 年版的 7.9)；
- m) 更改了绝缘电阻测试(见 8.9, 2009 年版的 7.10)；
- n) 更改了质量测试(见 8.10.1, 2009 年版的 7.11)；
- o) 删除了紧急停机功能测试(见 2009 年版的 7.8)。

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：同济大学、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、上海捷氢科技股份有限公司、上海重塑能源科技有限公司、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、襄阳达安汽车检测中心有限公司、北京氢璞创能科技有限公司、山东国创燃料电池技术创新中心有限公司、上海机动车检测认证技术研究中心有限公司、中国第一汽车股份有限公司、上汽大通汽车有限公司、重庆长安新能源汽车科技有限公司、中科院大连化学物理研究所、长城汽车股份有限公司、上海燃料电池汽车动力系统有限公司、上海神力科技有限公司、中国汽车工程研究院股份有限公司、宇通客车股份有限公司、浙江吉利新能源商用车集团有限公司、陕西汽车集团股份有限公司。

本文件主要起草人：侯永平、郝冬、兰昊、陈沛、何云堂、张妍懿、张晓丹、许诺、刘然、王丹、朱俊娥、郝富强、裴冯来、郝维健、潘相敏、韩令海、赵洪辉、安淑展、李思凡、袁昌荣、王佳、侯明、李宗、崔天宇、周斌、吴东来、蒋尚峰、马帅营、杨志刚、陈光。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

本文件于 2009 年首次发布 GB/T 24554—2009，本次为第一次修订。

燃料电池发动机性能试验方法

1 范围

本文件规定了燃料电池发动机常温起动特性、低温冷起动特性、稳态特性、动态响应特性、动态平均效率、高温运行试验、气密性测试、绝缘电阻测试、质量及功率密度测试等试验方法。

本文件适用于车用质子交换膜燃料电池发动机的测试。

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 18384 电动汽车安全要求

GB/T 24548 燃料电池电动汽车 术语

GB/T 34593—2017 燃料电池发动机氢气排放测试方法

GB/T 35178 燃料电池电动汽车 氢气消耗量 测量方法

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 界定的术语和定义适用于本文件。

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
电压	V	$\pm 0.3\% \text{FSD}^a$ 或 $\pm 1\% \text{rdg}^b$	0.1
电流 ^c	A	$\pm 0.3\% \text{FSD}$ 或 $\pm 1\% \text{rdg}^b$	0.1
温度	K	± 1	0.1
湿度		$\pm 3\%$	
质量流量	g/s	$\leq 1.0\% \text{FSD}$	
时间	s	± 0.1	0.1
质量	kg	$\leq 0.5\% \text{FSD}$	

表 1 测量参数、单位和准确度要求（续）

测量参数	单位	准确度	分辨率
绝缘阻值	MΩ	$\pm 2\% \text{ rdg} \pm 2 \text{ dgt}^d$	
压力	kPa	$\pm 0.3\% \text{ FS}$	0.001
<div>^a FSD:满量程。 ^b rdg:读数。 ^c 电流积分频率 20 Hz 或更高。 ^d dgt:分辨率数字。</div>			

5 试验条件

5.1 燃料电池发动机要求

- 燃料电池发动机应满足以下要求：
- 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要完整；
 - 燃料电池发动机要有可靠的安全保障系统。

5.2 测试前燃料电池发动机状态规定

- 测试前燃料电池发动机状态应符合以下规定：
- 冷却液加注完成；
 - 燃料电池发动机准备工作完成,接收指令即可起动。

5.3 试验平台及使用氢气要求

- 试验过程中,试验平台和使用的氢气应满足以下要求：
- a) 试验过程中燃料电池发动机的辅助系统采用外部电源供给的方式,试验平台满足所需的供电要求；
 - b) 试验平台提供满足燃料电池发动机所需的散热要求；
 - c) 试验用燃料符合 GB/T 37244 的规定要求。

5.4 测试中燃料电池发动机控制方法规定

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。

5.5 辅助系统功率规定

辅助系统功率包括空压机、冷却泵、氢循环泵、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。

5.6 试验数据采集、计算及功率加载误差要求

- 试验过程中,数据采集频率及加载误差应满足以下要求：
- a) 试验数据采集频率不低于 5 Hz。

- b) 在功率、效率等参数计算中,按 GB/T 8170 的规定修约至小数点后 2 位,特殊说明除外。
- c) 在任何测试项目中,燃料电池发动机的实际稳态加载功率误差都要满足公式(4)或者公式(5)的规定,采用公式(1)公式(2)公式(3)计算公式(4)和公式(5)中的相关参数:

$$P_{3.0\%} = 3.0\% P_{\text{设}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P_{\text{差}} = P_{\text{设}} - P_{\text{测}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta = \frac{P_{\text{差}}}{P_{\text{设}}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$P_{\text{设}}$ —— 设定的燃料电池发动机加载功率,单位为千瓦(kW);

$P_{3.0\%}$ —— 设定的燃料电池发动机加载功率 $P_{\text{设}}$ 的 3.0%,单位为千瓦(kW);

$P_{\text{测}}$ —— 燃料电池发动实际加载功率,单位为千瓦(kW);

$P_{\text{差}}$ —— 功率加载误差,单位为千瓦(kW);

δ —— 燃料电池发动机功率加载相对误差。

如果 $P_{3.0\%} > 1.0 \text{ kW}$,则燃料电池发动机功率加载满足:

$$\delta \leq 3.0\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

如果 $P_{3.0\%} < 1.0 \text{ kW}$,则燃料电池发动机功率加载满足:

$$P_{\text{差}} \leq 1.0 \text{ kW} \quad \dots\dots\dots (5)$$

6 一般试验要求

试验过程中,应遵守以下规定:

- 燃料电池发动机在测试过程中不补充冷却液及加湿用水;开始进行测试后,包括在测试过程中,不对燃料电池发动机做出任何改动;
- 如果试验没有对环境条件做特殊要求,则是指在常温环境条件下进行测试;
- 对于项目的测试顺序,参考附录 A。

7 预处理方法

7.1 常温浸机方法

浸机前应完成一次燃料电池发动机开关机过程,关闭燃料电池发动机。将燃料电池发动机(冷却液加注完成)在室温($23.0 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$)环境条件下静置,浸机时间应不少于 12 h。在浸机期间,不应燃料电池发动机做任何改动。

7.2 低温($0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下)浸机方法

在燃料电池发动机低温冷启动试验中,用于燃料电池发动机的散热器或者热交换器应置于环境舱中。

在浸机过程中,在达到设定温度前,可在环境舱降至厂商指定温度后并持续一定时间(制造商根据产品技术要求确定),进行一次开关机操作,燃料电池发动机应启动至怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点),持续时间(含启动)不超过 3 min,然后立即关闭燃料电池发动机。当环境温度达到设定温度的时候,开始计时,有效浸机时间应不少于 12 h。

在整个低温冷启动以及低温运行过程中,环境舱的温度控制在设定温度的 $\pm 2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,且低于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

注：有效浸机时间是指从环境舱的温度达到设定温度后开始计时到浸机结束所用的时间。

7.3 高温浸机方法

浸机前应完成一次燃料电池发动机开关机过程,关闭燃料电池发动机。

在燃料电池发动机高温运行试验中,用于燃料电池发动机的散热器或者热交换器应置于环境舱中。

将环境舱的温度设为 45.0 ℃,相对湿度设为 40%~90%,当环境温度达到设定温度的时候开始计时,有效浸机时间应不少于 2 h。

在整个高温浸机及高温运行过程中,环境舱的温度控制在设定温度的±2.0 ℃内。

注：有效浸机时间是指从环境舱的温度达到设定温度后开始计时到浸机结束所用的时间。

7.4 热机方法

按照制造商的使用规定,使燃料电池发动机工作在一定功率,同时监测燃料电池发动机冷却液的出口温度,燃料电池发动机冷却液的出口温度达到正常工作温度(该温度由制造商指定),即认为燃料电池发动机达到热机状态。

8 试验方法

8.1 起动特性试验

8.1.1 常温起动特性试验

8.1.1.1 常温怠速冷起动特性试验

8.1.1.1.1 试验条件

试验前燃料电池发动机处于常温环境下,按照 7.1 的浸机方法进行浸机处理。试验过程应自动进行,不应有人工干预。

8.1.1.1.2 试验步骤

按照下列程序进行试验：

- a) 按照制造商建议的起动操作步骤,测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送起动指令,起动燃料电池发动机；
- b) 燃料电池发动机起动后,在怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点)下至少持续运行 10 min；
- c) 如果不满足条件 b),需重新按照 8.1.1.1.1 和本条进行试验。

8.1.1.1.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据:冷起动时间、燃料电池堆(或燃料电池发动机)电压、燃料电池堆(或燃料电池发动机)电流等。

8.1.1.2 常温怠速热起动试验

8.1.1.2.1 试验条件

试验前燃料电池发动机按照 7.4 规定的方法进行热机,使燃料电池发动机处于热机状态,试验过程应自动进行,不应有人工干预。

8.1.1.2.2 试验步骤

按照下列程序进行试验：

- a) 热机过程结束后,停机 10 s,然后按照制造商规定的起动操作步骤,测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送起动指令,起动燃料电池发动机;
- b) 燃料电池发动机起动后,在怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点)下至少持续运行 10 min;
- c) 如果不满足条件 b),需重新按照 8.1.1.2.1 和本条进行试验。

8.1.1.2.3 试验过程中测试记录的数据

试验中测量的数据:热起动时间、燃料电池堆(或燃料电池发动机)电压、燃料电池堆(或燃料电池发动机)电流等。

8.1.1.3 常温额定功率冷起动试验

8.1.1.3.1 试验条件

试验前燃料电池发动机处于常温环境下,按照 7.1 的浸机方法进行浸机处理,使燃料电池发动机处于冷机状态。试验过程应自动进行,不应有人工干预。

8.1.1.3.2 试验步骤

按照下列程序进行试验：

- a) 按照制造商建议的起动操作步骤,测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送起动指令,起动燃料电池发动机;
- b) 测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送加载指令,加载到额定功率点后,燃料电池发动机在额定功率下至少持续运行 10 min;
- c) 如果不满足条件 b),需重新按照 8.1.1.3.1 和本条进行试验。

8.1.1.3.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据:冷起动时间、燃料电池堆(或燃料电池发动机)电压、燃料电池堆(或燃料电池发动机)电流。

8.1.1.4 常温额定功率热起动试验

8.1.1.4.1 试验条件

试验前燃料电池发动机按照 7.4 规定的方法进行热机,使燃料电池发动机处于热机状态,试验过程应自动进行,不应有人工干预。

8.1.1.4.2 试验步骤

按照下列程序进行试验：

- a) 热机过程结束后,停机 10 s,然后按照制造商建议的起动操作步骤,测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送起动指令,起动燃料电池发动机;
- b) 测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送加载指令,加载到额定功率点后,燃料电池发动机在额定功率下至少持续运行 10 min;
- c) 如果不满足条件 b),需重新按照 8.1.1.4.1 和本条进行试验。

8.1.1.4.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据：热起动时间、燃料电池堆（或燃料电池发动机）电压、燃料电池堆（或燃料电池发动机）电流。

8.1.2 低温冷起动特性试验

8.1.2.1 低温怠速冷起动试验

8.1.2.1.1 试验条件

试验前燃料电池发动机置于环境舱中，将环境舱的温度设定为规定的温度，按照 7.2 的浸机方法进行浸机处理。试验过程应自动进行，不应有人工干预。

8.1.2.1.2 试验步骤

按照下列程序进行试验：

- a) 预处理过程结束后，按照制造商建议的起动操作步骤，测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送起动指令，起动燃料电池发动机；
- b) 燃料电池发动机起动后，在怠速状态（或燃料电池发动机最低功率点）下至少持续运行 10 min；
- c) 如果不满足条件 b)，需重新按照 8.1.2.1.2 和本条进行试验。

8.1.2.1.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据：起动时间、燃料电池堆（或燃料电池发动机）的电压、燃料电池堆（或燃料电池发动机）的电流、环境温度、冷却液温度、辅助系统的电压、辅助系统的电流、氢气的消耗量。

8.1.2.2 低温额定功率冷起动试验

8.1.2.2.1 试验条件

试验前燃料电池发动机处于环境舱中，将环境舱的温度设定为规定的温度，按照 7.2 的浸机方法进行浸机处理。试验过程应自动进行，不应有人工干预。

8.1.2.2.2 试验步骤

按照下列程序进行试验：

- a) 预处理过程结束后，按照制造商建议的起动操作步骤，测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送起动指令，起动燃料电池发动机；
- b) 测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送加载指令，加载到额定功率点后燃料电池发动机在额定功率下至少持续运行 10 min；
- c) 如果不满足条件 b)，需重新按照 8.1.2.2.1 和本条进行试验。

8.1.2.2.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据：起动时间、燃料电池堆（或燃料电池发动机）的电压、燃料电池堆（或燃料电池发动机）的电流、环境温度、冷却液温度、辅助系统的电压、辅助系统的电流、氢气的消耗量。

8.2 额定功率试验

8.2.1 试验条件

试验前燃料电池发动机的状态为热机状态,试验过程应自动进行,不应有人工干预。

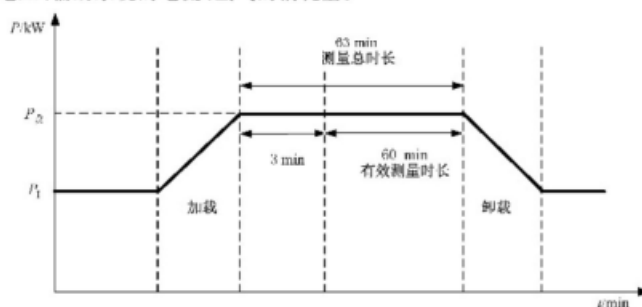
8.2.2 试验步骤

按照下列程序进行试验:

- 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;
- 测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送加载指令,加载到额定功率且以该功率持续运行 63 min(加载过程如图 1 所示);
- 以图 1 中有效测量时长 60 min 运行功率的平均值作为燃料电池发动机的额定功率(P_E)测量值(以 kW 为单位),额定功率测量值按 GB/T 8170 的规定修约至小数点后 2 位,额定功率标称值为额定功率测量值的整数部分;
- 燃料电池发动机在有效测量时长内的输出功率应始终处于 60 min 平均功率的 97%~103%,否则试验结果无效,需重新按照 8.2.1 和本条进行试验。

8.2.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据:燃料电池堆(或燃料电池发动机)的电压、燃料电池堆(或燃料电池发动机)的电流、辅助系统的电压、辅助系统的电流、氢气的消耗量。



标引符号说明:

P_E ——设定的加载功率;

P_1 ——怠速功率或最低功率点。

图 1 额定功率测量过程示意图

8.3 峰值功率试验

8.3.1 试验条件

试验前燃料电池发动机的状态为热机状态。试验过程应自动进行,不应有人工干预。

8.3.2 试验步骤

按照下列程序进行试验:

- 燃料电池发动机首先进行热机处理,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;

- b) 测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送加载指令,加载到额定功率后在该功率点至少稳定运行 10 min,然后加载到设定的峰值功率,在该功率点持续运行(时间长度由制造商指定),到达设定的时间后按照制造商规定的卸载方式进行卸载,则试验成功,否则试验结果无效,需重新按照 8.3.1 和本条进行试验。

8.3.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据:峰值功率运行的时间、燃料电池堆(或燃料电池发动机)的电压、燃料电池堆(或燃料电池发动机)的电流、辅助系统的电压、辅助系统的电流、氢气的消耗量。

8.4 动态响应特性试验

8.4.1 试验条件

试验前燃料电池发动机处于热机状态。试验过程应自动进行,不应有人工干预。

8.4.2 试验步骤

8.4.2.1 加载动态响应试验

按照下列程序进行试验:

- a) 燃料电池发动机首先进行热机处理,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;
- b) 测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送加载指令,加载到动态响应的起始功率点,在该功率点至少稳定运行 1 min;
- c) 测试平台继续向燃料电池发动机发送加载指令,直至达到动态阶跃的截止点,燃料电池发动机在该功率点至少持续运行 10 min,否则试验失败,需重新按照 8.4.1 和本条进行试验。

注:推荐选取怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点)作为动态响应的起始功率点,90% P_E 作为动态阶跃的截止点,此阶跃的响应时间作为评价燃料电池发动机的加载动态响应指标。 P_E 为燃料电池发动机额定功率。

8.4.2.2 卸载动态响应试验

按照下列程序进行试验:

- a) 燃料电池发动机首先进行热机处理,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;
- b) 测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送加载指令,加载到动态响应的起始功率点,推荐选取 90% P_E 作为动态响应的起始功率点, P_E 为燃料电池发动机额定功率,在该功率点至少稳定运行 1 min;
- c) 测试平台继续向燃料电池发动机发送卸载指令,在规定的时间内达到动态阶跃的截止点,燃料电池发动机在该功率点至少持续稳定运行 10 min,否则试验失败,需重新按照 8.4.1 和本条进行试验。

注:怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点)作为动态阶跃的截止点,此阶跃的响应时间作为评价燃料电池发动机的卸载动态响应指标。

8.4.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据:动态阶跃响应时间、燃料电池堆(或燃料电池发动机)的电压、燃料电池堆(或燃料电池发动机)的电流、辅助系统的电压、辅助系统的电流、氢气的消耗量。

8.5 稳态特性试验

8.5.1 试验条件

试验前燃料电池发动机处于热机状态。试验过程应自动进行,不应有人工干预,试验数据处理应按照附录 B 的规定。

8.5.2 试验步骤

按照下列程序进行试验:

- 在燃料电池发动机工作范围内选择以下工况点,分别是怠速状态(或燃料电池发动机最低功率点)、 $10\%P_E$ 、 $20\%P_E$ 、 $30\%P_E$ 、 $40\%P_E$ 、 $50\%P_E$ 、 $60\%P_E$ 、 $70\%P_E$ 、 $80\%P_E$ 、 $90\%P_E$;
- 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;
- 测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送加载指令,加载到预先确定的工况点(按照从低到高顺序加载),在每个工况点至少持续稳定运行 3 min;
- 每个工况点分析数据时间长度不应少于 2 min;
- 本试验项目数据处理结果包括额定功率点和峰值功率点,对于额定功率点的试验数据,采用 8.2 的额定功率试验数据;对于峰值功率点的试验数据,采用 8.3 的峰值功率试验数据,本试验项目不再重复进行,峰值功率点的分析数据时间长度取决于峰值功率试验数据时间长度;
- 如果在试验过程中试验中断,则试验需重新按照 8.5.1 和本条进行试验。

8.5.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据:燃料电池堆(或燃料电池发动机)的电压、燃料电池堆(或燃料电池发动机)电流,氢气的消耗量,辅助系统的电压、电流。

由此可得到燃料电池堆的极化特性曲线(V-I 曲线)、燃料电池堆的功率曲线、燃料电池堆的效率曲线;燃料电池发动机的功率曲线、燃料电池发动机的效率曲线、辅助系统的功率曲线等。

8.6 高温运行试验

8.6.1 试验条件

试验前燃料电池发动机置于环境舱中,将环境舱的温度设定为 $45.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,按照 7.3 的浸机方法进行浸机处理。试验过程应自动进行,不应有人工干预。

8.6.2 试验步骤

按照下列程序进行试验:

- 预处理过程结束后,按照制造商建议的启动操作步骤,测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送启动指令,启动燃料电池发动机;
- 测试平台按照 5.4 的规定向燃料电池发动机发送加载指令,加载到制造商规定的高温条件下的额定功率且以该功率持续运行 63 min(加载过程如图 1 所示);
- 燃料电池发动机在图 1 有效测量时长内的输出功率应始终处于有效测量时长 60 min 运行功率的平均值的 $95\%\sim 105\%$,否则试验结果无效,需重新按照 8.6.1 和本条进行试验。

8.6.3 试验过程中测量记录的数据

试验中测量的数据:燃料电池堆(或燃料电池发动机)的电压、电流,氢气的消耗量,辅助系统的电压、电流。

8.7 动态平均效率特性试验

按照 GB/T 34593—2017 中 5.2.2 规定的试验方法进行试验,采集燃料电池堆(或燃料电池发动机)的电压、电流、氢气流量等参数,试验进行三次,试验结果取三次平均值。试验数据处理方法按照附录 C 进行处理。

8.8 燃料电池发动机气密性测试

8.8.1 试验条件

将燃料电池发动机置于环境温度下,不加注冷却液,静置时间不少于 12 h,使燃料电池发动机处于冷机状态,按照 8.8.2 的步骤进行试验。

8.8.2 试验步骤

8.8.2.1 氢气流道气密性测试

按照下列程序进行气密性试验。

- a) 若燃料电池发动机氢气侧的工作压力大于或等于 50 kPa:关闭燃料电池堆的氢气排气端口,从氢气进气端口(燃料电池发动机氢气入口)充入氮氮混合气体(氮气浓度不低于 10%),压力设定为 50 kPa,压力稳定后关闭进气阀门,其他端口保持畅通,保压 20 min,记录压力下降值。
- b) 若燃料电池发动机氢气侧的工作压力小于 50 kPa:关闭燃料电池堆的氢气排气端口,从氢气进气端口(燃料电池发动机氢气入口)充入氮氮混合气体(氮气浓度不低于 10%),如果燃料电池堆氢气侧工作压力为 30 kPa~50 kPa,压力设定值为燃料电池堆的工作压力,如果燃料电池堆氢气侧的工作压力低于 30 kPa,则压力设定值为 30 kPa,保压 20 min,记录压力下降值。

8.8.2.2 整体气密性测试

关闭燃料电池发动机的氢气排气端口、空气排气端口和冷却液出口,同时向氢气流道、空气流道(空压机出口端后部)和冷却液流道加注氮氮混合气体(氮气浓度不低于 10%),压力均设定在正常工作压力,压力稳定后关闭进气阀门,保压 20 min,记录压力下降值。

8.9 绝缘电阻测试

冷却液处于热态,用兆欧表测量燃料电池发动机正负极分别对燃料电池发动机外表面可导电或金属接地点的绝缘电阻值。参考表 2 选择兆欧表量程。测量时,应在兆欧表指针或者显示数值达到稳定后再读数。

燃料电池发动机辅助系统部件工作电压以 B 级(电压等级应按照 GB 18384)电压运行,则应单独测量其绝缘电阻。若其内部含有高压接触器,测试绝缘电阻时接触器需处于闭合状态。用兆欧表测量其正负极分别对其外壳的绝缘电阻值。参考表 2 选择兆欧表量程。测量时,应在兆欧表指针或者显示数值达到稳定后再读数。

取燃料电池发动机和所有检测 B 级电压部件的绝缘阻值的并联阻值,作为燃料电池发动机绝缘值。

在所有性能测试项目结束后进行该项目的测试。

表 2 工作电压及兆欧表量程选择

序号	最大工作电压 U_{\max}/V	兆欧表量程/ V
1	$U_{\max} \leq 250$	500
2	$250 < U_{\max} \leq 1\,000$	1\,000

8.10 质量及功率密度测试

8.10.1 燃料电池发动机质量及质量功率密度测试

测量燃料电池发动机质量要求：燃料电池发动机结构完整、能够实现燃料电池发动机各项性能和功能，且与装车状态一致，在连接氢气源和散热器的条件下即可正常工作。燃料电池发动机边界划分如附录 D 中图 D.1 所示。

测量部件包括燃料电池模块和辅助系统的质量：

- a) 测量燃料电池发动机应包含表 3 规定的部件。

表 3 燃料电池发动机包含部件

燃料电池模块	空气供应系统	氢气供应系统	水热管理系统	控制系统	其他部件
燃料电池堆、集成外壳、轧带、固定螺杆、CVM 等	空气滤清器、消音装置、空气压缩机、中冷器、增湿器等	氢气循环泵和/或氢气引射器、氢气喷射器等	冷却泵、去离子器、PTC 等	控制器、传感器等	组成燃料电池发动机所必需的阀件、管路、线束、接头和框架等

- b) 下列部件可不计入质量测量范围：

辅助散热组件、散热器总成、水箱、冷却液及加湿用水、尾排管路、外接散热器连接的冷却管路、外接高压电缆。所带部件如与 a) 和本项规定有不同之处，应在试验报告中加以说明。

- c) 质量功率密度应以燃料电池发动机额定功率测量值[单位：千瓦(kW)]计算其质量功率密度，质量单位采用千克(kg)。

8.10.2 燃料电池堆体积功率密度测试

燃料电池堆体积功率密度测试方法应按照附录 E 进行。

附录 A
(资料性)
试验项目测试顺序

表 A.1 是推荐的试验项目测试顺序,参考执行。对于绝缘电阻测试,标准正文里面明确规定在所有性能测试之后进行,其他测试项目根据实际情况调整测试顺序。

表 A.1 试验项目测试顺序

序号	测试项目	备注
1	燃料电池发动机气密性测试	
2	常温怠速冷启动特性试验	
3	常温额定功率冷启动测试	
4	常温怠速热启动试验	
5	稳态特性试验	
6	常温额定功率热启动试验	
7	额定功率试验	
8	峰值功率试验	
9	动态响应特性试验	
10	动态平均效率特性试验	
11	低温怠速冷启动测试	
12	低温额定功率冷启动测试	
13	高温运行试验	
14	绝缘电阻测试	
15	质量及功率密度测试	

附录 B
(规范性)
稳态试验数据处理

B.1 燃料电池堆的功率

燃料电池堆功率按公式(B.1)计算:

$$P_s = U_s \cdot I_s / 1\,000 \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

P_s ——燃料电池堆功率,单位为千瓦(kW);

U_s ——燃料电池堆电压,单位为伏特(V);

I_s ——燃料电池堆电流,单位为安培(A)。

B.2 燃料电池堆效率

燃料电池堆效率按公式(B.2)计算:

$$\eta_s = \frac{1\,000 P_s}{m_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

η_s ——燃料电池堆效率;

m_{H_2} ——氢气流量,单位为克每秒(g/s);

LHV_{H_2} ——氢气低热值, 1.2×10^5 kJ/kg。

B.3 燃料电池发动机功率

如果燃料电池发动机的系统电压和电流直接测量得到,则燃料电池发动机功率按公式(B.3)计算:

$$P_F = U_F \cdot I_F / 1\,000 \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

P_F ——燃料电池发动机功率,单位为千瓦(kW);

U_F ——燃料电池发动机系统电压,单位为伏特(V);

I_F ——燃料电池发动机系统电流,单位为安培(A)。

如果燃料电池发动机的功率由燃料电池堆功率和辅助系统功率相减得到,那么燃料电池发动机功率按照公式(B.4)计算:

$$P_F = P_s - P_A \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

P_F ——燃料电池发动机功率,单位为千瓦(kW);

P_s ——燃料电池堆功率,单位为千瓦(kW);

P_A ——辅助系统功率,单位为千瓦(kW)。

B.4 燃料电池发动机效率

燃料电池发动机效率按公式(B.5)计算:

$$\eta_F = \frac{1\,000 P_F}{m_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

GB/T 24554—2022

式中：

η_F ——燃料电池发动机效率；

m_{H_2} ——氢气流量，单位为克每秒(g/s)。

附录 C

(规范性)

动态平均功率试验数据处理

C.1 燃料电池发动机实际氢气消耗量

氢气消耗量的测量方法按照 GB/T 35178 规定的方法。如果氢气以流量单位记录结果,则燃料电池发动机在某段时间内的实测氢气消耗量按公式(C.1)计算。

$$M_{H_2} = \int_{T_1}^{T_2} m_{H_2} \cdot dt \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

M_{H_2} ——燃料电池发动机实测氢气消耗量,单位为克(g);

m_{H_2} ——燃料电池发动机实测氢气流量,单位为克每秒(g/s);

T_1 ——起始时间,单位为秒(s);

T_2 ——结束时间,单位为秒(s)。

C.2 燃料电池发动机能量

燃料电池发动机的能量按照公式(C.2)计算。

$$Q_F = \int_{T_1}^{T_2} P_F \cdot dt \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

Q_F ——某段时间内燃料电池发动机能量,单位为千焦(kJ);

P_F ——燃料电池发动机功率,单位为千瓦(kW)。

C.3 燃料电池发动机动态平均效率

燃料电池发动机动态平均效率按照公式(C.3)计算。

$$\bar{\eta}_{FD} = \frac{1\,000\,Q_F}{M_{H_2} \cdot LHV_{H_2}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

Q_F ——某段时间内燃料电池发动机能量,单位为千焦(kJ);

M_{H_2} ——燃料电池发动机实测氢气消耗量,单位为克(g);

LHV_{H_2} ——氢气低热值, 1.2×10^5 kJ/kg;

$\bar{\eta}_{FD}$ ——燃料电池发动机动态平均效率。

附录 D
(资料性)
燃料电池发动机边界界定框图

图 D.1 是燃料电池发动机边界界定框图，虚拟框内为质量测量包含的部件。

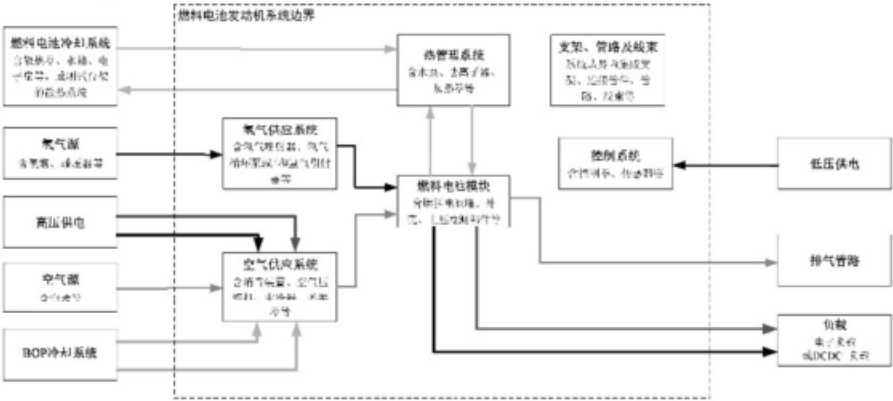


图 D.1 燃料电池发动机边界界定框图

附录 E

(规范性)

燃料电池堆体积功率密度测量方法

E.1 燃料电池堆体积 V_{stack}

完成燃料电池发动机性能试验后,制造商应对被测的燃料电池发动机进行必要的拆解,以便对燃料电池堆的体积进行测量。燃料电池堆体积测量示意图如图 E.1 所示,根据公式(E.1)计算,单位为升。其宽度 w 不包括端板、绝缘板、集流板,但应包括所有极板。并且拆解过程中不应拆解端板,防止因预紧力改变影响测量结果。

$$V_{\text{stack}} = w \times l \times h / 10^6 \quad \dots\dots\dots (\text{E.1})$$

式中:

w ——两个端板之间的宽度,单位为毫米(mm);

l ——双极板外廓长度,单位为毫米(mm);

h ——双极板外廓高度,单位为毫米(mm)。

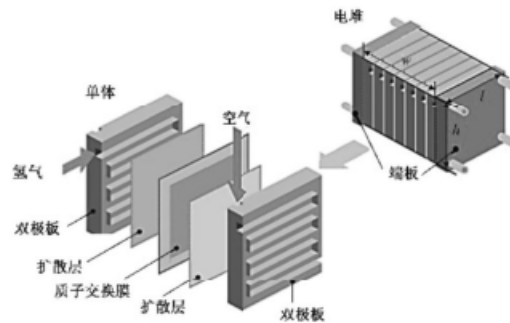
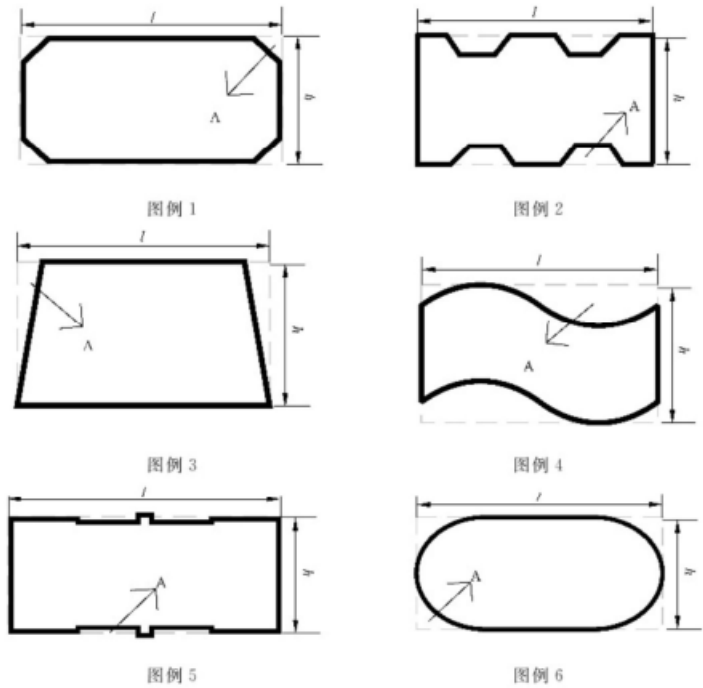


图 E.1 燃料电池堆体积测量示意图

双极板长度应测量燃料电池堆双极板长度方向的最远外廓尺寸,单位为毫米;双极板高度应测量燃料电池堆双极板高度方向的最远外廓尺寸,单位为毫米,图 E.2 枚举了可能的测量场景,其他测量场景参考执行。

其中,对于连续空白区域面积大于或等于双极板外廓面积($l \times h$)4%的部分,计算双极板面积时应去除该部分面积(氢气、空气、水路通道除外)。连续空白区域面积的计算,应由第三方检测机构基于被测试对象的双极板实物进行测量计算。



标引符号说明：
A——连续空白区域。
注：图例 5 中，用于 CVM 引线的突出点，不作为轮廓尺寸参考点。

图 E.2 燃料电池堆长度测量示意图

E.2 燃料电池堆体积功率密度 VSP_{Stack}

燃料电池堆体积功率密度 VSP_{Stack} 按照公式(E.2)计算，单位为千瓦每升(kW/L)。

$$VSP_{Stack} = P_{stack} / V_{Stack} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$