



中华人民共和国国家标准

GB/T 28817—2022/IEC/TS 62282-7-1:2017

代替 GB/T 28817—2012

聚合物电解质燃料电池单电池测试方法

Single cell test methods for polymer electrolyte fuel cell (PEFC)

[IEC/TS 62282-7-1:2017, Fuel cell technologies—Part 7-1: Test methods—Single cell performance tests for polymer electrolyte fuel cells (PEFC), IDT]

2022-03-09 发布

2022-10-01 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	Ⅲ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 通用安全要求	4
5 电池组成	4
5.1 概述	4
5.2 膜电极组件(MEA)	5
5.3 密封件	5
5.4 流场板	5
5.5 电流集流体	5
5.6 夹持端板(端板)	5
5.7 紧固件	5
5.8 温控装置	5
6 电池组装	6
6.1 装配程序	6
6.2 电池方位和气体连接	6
6.3 气密性检查	6
7 测试平台	6
7.1 必要设备	6
7.2 示意图	7
7.3 测试台控制允许的最大误差(输入试验)	7
8 测量	8
8.1 仪器精度	8
8.2 测量仪器和测量方法	8
8.3 测量单位	9
9 气体组成	10
9.1 燃料组成	10
9.2 氧化剂组成	10
10 试验准备	10
10.1 标准试验条件	10
10.2 环境条件	11
10.3 数据采集频率	11
10.4 可重复性和再现性	11
10.5 试验样品数量	11

10.6 惰性气体或测试气体进行气路气密性检查 12

10.7 初始活化和稳态检查 12

10.8 关机 12

10.9 再活化 12

11 基本性能试验方法 12

11.1 概述 12

11.2 极化曲线试验 12

11.3 稳态试验 14

11.4 长时间运行试验 14

11.5 伏安法 15

11.6 IR 测量 18

11.7 电化学阻抗谱(EIS) 20

12 性能测试方法应用 21

13 试验报告 23

13.1 概述 23

13.2 报告项目 23

13.3 试验数据描述 23

13.4 测试条件描述 23

13.5 试验电池的参数描述 23

附录 A (资料性) 流场板 25

附录 B (资料性) 电池部件定位 27

附录 C (资料性) 气密性试验 28

附录 D (资料性) 初始活化 30

附录 E (资料性) 关机 31

附录 F (资料性) 再活化 32

附录 G (资料性) 极化曲线试验补充说明 33

附录 H (规范性) 应用性能试验 35

附录 I (资料性) 极化曲线试验报告 47

附录 J (资料性) 氮氧混合气下的极化曲线 52

附录 K (资料性) 零度以下启动测试报告 53

附录 L (资料性) 启停循环测试补充 54

附录 M (资料性) 负载循环补充 55

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 28817—2012《聚合物电解质燃料电池单电池测试方法》，与 GB/T 28817—2012 相比主要技术变化如下：

- 增加了“催化层”“电解质”的术语及定义(见 3.4、3.9)；
- 删除了电池组成中气体扩散层(GDL)的内容(见 2012 年版的 5.3)；
- 修改了氢气纯度的要求(见 9.1.1, 2012 年版的 9.1.1)；
- 删除了极限电流测试、扩散增益试验、气体计量比测试、温度影响测试、压力影响测试、湿度影响测试、燃料组成测试、启动/关机循环试验、加载循环试验、过载试验、杂质影响试验(见 2012 年版的 11.4~11.11、11.13~11.15)；
- 增加了性能测试方法应用(见第 12 章)；
- 增加了应用性能试验、氨氧混合气下的极化曲线、零度以下启动测试报告(见附录 H、附录 J、附录 K)。

本文件等同采用 IEC/TS 62282-7-1:2017《燃料电池技术 第 7-1 部分：测试方法 聚合物电解质燃料电池单电池(PEFC)性能测试》，文件类型由 ISO 的技术规范调整为我国的国家标准。

本文件做了下列编辑性修改：

- 标准名称修改为“聚合物电解质燃料电池单电池测试方法”；
- 为方便标准使用，增加第一章“范围”的注释；
- 为方便标准使用，修改附录 C 名称“漏气试验”为“气密性试验”。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件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。

本文件起草单位：中国科学院大连化学物理研究所、机械工业北京电工技术经济研究所、武汉理工大学、清华大学、华北电力大学、无锡市产品质量监督检验院、中国质量认证中心、新源动力股份有限公司、中国船舶重工集团公司第七一二研究所、深圳市标准技术研究院、上海攀业氢能源科技有限公司、中国汽车技术研究中心有限公司、浙江高成绿能科技有限公司、北京长征天民高科技有限公司、南京东焱氢能源科技有限公司、上海骥翀氢能科技有限公司、全球能源互联网研究院有限公司、无锡威孚高科技集团股份有限公司、新研氢能源科技有限公司、上海神力科技有限公司、长城汽车股份有限公司保定氢能检测分公司、海卓动力(青岛)能源科技有限公司、上海捷氢科技有限公司。

本文件主要起草人：俞红梅、潘牧、刁力鹏、裴普成、刘建国、邢丹敏、陈耀、王刚、叶东浩、王益群、董辉、郝冬、侯向理、靳殷实、顾军、付宇、宋洁、徐桂芝、张义煌、齐志刚、李刘红、段志洁、谢佳平、陈沛。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 2012 年首次发布为 GB/T 28817—2012；
- 本次为第一次修订。

聚合物电解质燃料电池单电池测试方法

1 范围

本文件规定了聚合物电解质燃料电池单电池的组装、试验装置、测量仪器和测量方法、性能试验方法以及试验报告。

注：本文件中规定的聚合物电解质燃料电池单电池燃料为气态氢。

本文件适用于以下三项的评估：

- a) 聚合物电解质燃料电池膜电极组件的性能；
- b) 聚合物电解质燃料电池其他组件的材料或结构；
- c) 燃料和空气中杂质对电池性能的影响。

注：本文件仅适用于质子交换膜燃料电池，其他聚合物电解质燃料电池可参考本文件的测试内容。

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。

ISO/TS 14687-2 氢燃料 产品规范 第2部分：道路车辆用质子交换膜（PEM）燃料电池的应用
[Hydrogen fuel—Product specification—Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles]

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

阳极 anode

燃料(3.11)发生氧化反应的电极(3.8)。

3.2

催化剂 catalyst

能加速(增加速率)反应而自身不被消耗的物质。

注：催化剂降低反应的活化能，使得反应速率增加。

3.3

催化剂涂层膜 catalyst-coated membrane; CCM

[在聚合物电解质燃料电池(3.24)中]表面涂有催化层(3.4)，构成电极(3.8)的反应区域的膜。

注：另见膜电极组件(MEA)(3.19)。

3.4

催化层 catalyst layer

与膜的两侧相邻的含有催化剂(3.2)的多孔区域，通常具有离子和电子传导性。

注：催化层包括可能发生电化学反应的空间区域。

3.5

阴极 cathode

氧化剂(3.22)发生还原反应的电极(3.8)。

3.6

夹持端板 clamping plate

端板 pressure plate

用于将电池各部分压紧在一起,以保持导电性和密封性。

3.7

电流集流体 current collector

燃料电池(3.12)中从阳极(3.1)端收集电子或向阴极(3.5)端传递电子的导电部件。

3.8

电极 electrode

用于将电化学反应产生的电流导入或导出电化学电池的电子导体(或半导体)。

注:电极可以是阳极(3.1)或阴极(3.5)。

[来源:GB/T 28816—2020,3.33]

3.9

电解质 electrolyte

含有移动离子因而具有离子导电性的液态或固态物质。

注:电解质是不同燃料电池技术(如某种液体、聚合物、熔融盐、固体氧化物)的主要区分特征,它决定了有效操作温度范围。

[来源:IEC 60050-482:2004,482-02-29,有修改——修改注释]

3.10

流场板 flow plate

由金属、石墨材料或者导电聚合物(可能是碳填充的复合材料)构成的导电平板,它的表面有流道供燃料(3.11)或者氧化剂(3.22)气体供给,并与电极(3.8)有直接的电接触。

3.11

燃料 fuel

氢气或者含有氢气的气体,在阳极(3.1)发生反应。

3.12

燃料电池 fuel cell

将燃料(3.11)和氧化剂(3.22)的化学能转换为电能(直流电),并产生热和反应产物的电化学装置。

注:燃料和氧化剂通常储存在燃料电池外,当它们被消耗时输入到燃料电池中。

[来源:GB/T 28816—2020,3.43]

3.13

气体扩散电极 gas diffusion electrode;GDE

位于阳极(3.1)或阴极(3.5)侧,包含电极(3.8)的全部电子导电部分[气体扩散层(3.14)和催化层(3.4)]的部件。

3.14

气体扩散层 gas diffusion layer;GDL

放置在催化层(3.4)和流场板(3.10)之间形成电接触的多孔基层,该层允许反应物进入催化层和反应产物的排出。

注:气体扩散层也称为多孔传输层(PTL)。

[来源:GB/T 28816—2020,3.57,有修改——“流场板”取代“双极板”,删除部分注释]

3.15

密封件 gasket

阻止反应气体泄漏的密封部件。

3.16

内电阻 internal resistance

燃料电池(3.12)内部的欧姆电阻,在电流集流体(3.7)之间测量,由不同组件[电极(3.8)、电解质(3.9)、流场板(3.10)和电流集流体]的电子和离子电阻引起。

注:欧姆意指电压降和电流之间的关系服从欧姆定律。

[来源:GB/T 28816—2020,3.66,有修改——“流场板”取代“双极板”]

3.17

极限电流密度 limiting current density

在给定的测试条件下,电池的电压急剧下降至接近零时的最大电流密度。

3.18

最大许可电流密度 maximum current density

制造商规定的允许短时间运行的最高电流密度。

3.19

膜电极组件 membrane electrode assembly; MEA

聚合物电解质燃料电池(3.24)类燃料电池(3.12)的组成部分,由电解质膜和分别置于两侧的气体扩散电极(3.13)组成的组件,或者由催化剂涂层膜(3.3)和气体扩散层组成的组件。

注:膜电极组件简称膜电极。

3.20

最低电池电压 minimum cell voltage

制造商规定的可运行最低电池电压。

3.21

开路电压 open circuit voltage; OCV

燃料电池(3.12)有燃料(3.11)和氧化剂(3.22)但没有外部电流流动时的端电压。

注1:开路电压单位为伏(V)。

注2:也称为空载电压。

[来源:GB/T 28816—2020,3.117.2]

3.22

氧化剂 oxidant

氧气或者含有氧气的气体(如空气),在阴极(3.5)发生反应。

3.23

聚合物电解质 polymer electrolyte

(含有可移动离子)具有离子导电性的聚合物材料。

3.24

聚合物电解质燃料电池 polymer electrolyte fuel cell; PEFC

使用具有离子交换能力的聚合物作为电解质(3.9)的燃料电池(3.12)。

注:聚合物电解质燃料电池也被称为质子交换膜燃料电池(PEMFC)和固体聚合物燃料电池(SPEC)。

[来源:GB/T 28816—2020,3.43.7]

3.25

功率 power

单位时间内输出的电能。

3.26

功率密度 power density

功率除以电极的几何面积得到的单位面积的功率。

注：功率密度单位为瓦每平方厘米(W/cm²)。

3.27

额定电流密度 rated current density

由制造商规定的膜电极组件(3.19)或单电池(3.29)持续工作时的最大电流密度。

3.28

额定电压 rated voltage

由制造商规定的膜电极组件(3.19)或单电池(3.29)持续工作时的最小电池电压。

3.29

单电池 single cell

由一个阳极流场板(3.10)、一个膜电极组件(3.19)、一个阴极流场板(3.10)和密封件(3.15)组成的电池。

注：见附录 B 附件信息。

3.30

单电池试验 single cell test

基于一个单电池(3.29)的燃料电池(3.12)性能的试验。

[来源：GB/T 28816—2020, 3.112.5]

3.31

化学计量比 stoichiometry

供应给燃料电池的燃料(3.11)或氧化剂(3.22)气体流量与根据电流计算的化学反应需要量的比率。

注：化学计量比是 GB/T 28816—2020 中规定的燃料(或氧化剂)利用率的反比值。

4 通用安全要求

通常情况下,运行中的燃料电池使用氧化性和还原性气体,这些气体储存在高压容器中。燃料电池自身可以在加压或常压下运行。

进行单电池试验的人员应进行操作培训,并有操作单电池试验系统的经验,并应熟知安全操作规程(包括电器设备操作、化学反应、压缩气体)。安全操作一台单电池测试平台需要适当的技术培训、经验以及安全设施和设备,上述内容不在本文件的范围内。

5 电池组成

5.1 概述

通常包含以下组件：

- a) 一片膜电极组件；
- b) 密封件；
- c) 一块阳极侧的流场板和一块阴极侧的流场板；
- d) 一块阳极侧的电流集流体和一块阴极侧的电流集流体；
- e) 一块阳极侧的夹持端板和一块阴极侧的夹持端板；
- f) 电绝缘薄片；

- g) 紧固件,可能包括螺栓、弹簧和垫圈等;
- h) 温度控制装置。

5.2 膜电极组件(MEA)

电极面积应足够大以满足参数测量要求。虽然采用电极面积较大的燃料电池可能会得到与实际应用更相关的数据,但仍建议电极面积在 25 cm^2 左右。电极的活性面积应当说明。在电极面积测量方面的近似不确定度也应说明。

注:较大的活性面积下的温度、流量及/或压力等参数中的异质性能变得非常显著。

5.3 密封件

密封件材料应当与电池反应气体、各组件和反应产物以及运行温度相匹配,应能阻止气体的泄漏。

5.4 流场板

流场板应由几乎无气体渗透性、高导电性的材料制成。宜使用树脂浸渍、高密度合成石墨、聚合物/碳复合材料或者耐腐蚀的金属材料,如钛或不锈钢。如果使用金属材料,其表面应有涂层或镀层(如涂/镀金层)以减少接触电阻。流场板应当抗腐蚀,有合适的密封。

建议使用蛇形流场,设计建议的详细信息见附录 A。流场的结构应在试验报告中给出。

用于试验的流场板应进行电池运行温度的精确测量。例如,流场板的一个侧面的边缘可能会有一个用于安置温度传感器的孔,此时孔的深度应能达到流场板的中心。

如果试验的目的是评价某种特定的流道布局,则不必使用建议的流场板布局。

5.5 电流集流体

电流集流体应由具有高电导率的材料(如金属)制成。金属电流集流体可以在表面涂覆/镀上降低接触电阻的材料,如金或银;但要注意选择涂层材料,该涂层材料应与电池的组件、反应气体和产物相容。

电流集流体应有足够的厚度以减小电压降,同时应有用于导线连接的输出端。

如果金属流场板同时是电流集流体,则不再需要单独的电流集流体。

5.6 夹持端板(端板)

夹持端板(端板)应为平板且表面光滑,应具有足够的机械强度以承受螺栓紧固时产生的弯曲压力。

如果夹持端板具有导电性,应将其与电流集流体隔绝以防止发生短路。

5.7 紧固件

紧固件应具有高的机械强度,以承受电池组装和运行时产生的压力。可以使用垫片和弹簧保持作用在单电池上的压力恒定均匀。应使用经过校准的扭力扳手或其他测量仪器确定电池上的精确压力。

每次试验前后都要对夹紧压力进行测试和记录。单电池变形量不宜大于 10%。如可能,夹紧压力(量值、分布)应连续控制。

注:变形量为单电池在几何方向上的尺寸变化。

建议使用电绝缘的紧固件。

5.8 温控装置

为了使单电池保持恒温且沿流场板和通过电池方向温度分布均匀,应提供温控装置(加热或冷却)。温控装置的设计可遵循一定的温度曲线图。温控装置应能防止过热。

可以有多种方式来达到以上要求。

一种简单的方式是对流冷却和电加热夹持端板(端板)。而这种加热可以通过在极板外表面连接一个表面电阻加热器来达到。另外一种替代方式是在极板上打孔,插入一个筒形加热器。

在上述情况下,应注意保持电绝缘。

6 电池组装

6.1 装配程序

电池组装程序对电池数据的可重复性有很大的影响。下列组装操作中的一些特定过程应以文件记录下来。

- CCM 放置定位,包括阳极侧和阴极侧确认。
- 气体扩散层放置定位,包括阳极和阴极用气体扩散层确认,也包括气体扩散层面向质子交换膜和流场确认。
- 密封件/密封的安装。
- 固定装置或装配夹具的定位(如有)。
- 加压规程,例如,扩散介质压缩值、螺栓紧固次序、压缩弹簧以及最终的扭矩规定。

压力可以通过压敏纸或膜来核查。

典型的电池部件定位见附录 B。

装配后,应检查夹持端板和电流集流体之间的绝缘性。

6.2 电池方位和气体连接

电池工作时应处于适当的方位以利于产物水的排出。电池方位应记录下来。

6.3 气密性检查

电池的外部 and 内部泄漏应极少。气密性检查规程举例见附录 C。原则上,气密性检查程序包括在阳极和阴极侧注入一种惰性气体或检测气体,利用合适的压差,就可确定漏气的性质和方向。检测后,应记录最大压差、检测气体性质、漏气速率。如果发现漏气,应进行其他的测试,如鼓泡试验,来进一步描述漏气的类型和性质。

隔膜两侧的压差是非常关键的,不应超过制造商规定的最大压差。

7 测试平台

7.1 必要设备

单电池试验需要一个燃料电池测试平台,设备至少能满足以下单电池试验过程的试验参数。

- 反应气体流量的调节——测量和控制燃料电池在所要求的化学计量比下的燃料和氧化剂气体的流量。
- 反应气体湿度的控制——在气体输送给燃料电池前增湿反应气体到所需的露点。推荐增湿水的电阻率至少为 $0.1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ (或者电导率最大为 10^{-6} S/m)。增湿器与电池之间的气体传输管线应有加热,温度至少保持在露点温度 5°C 以上,以使冷凝最小。这段管线应隔热,使得热损失最小化。部分膜电极组件不需要增湿。
- 反应气体压力的控制——调节燃料电池内反应气体压力。
- 负载控制——加载以从电池得到规定的电流。负载控制应既能以恒电流模式又能以恒压模

式运行。

- e) 电池加热或冷却的控制——加热或冷却单电池达到所需运行温度。
- f) 电池电压监控和数据采集——设备在试验过程中测量和记录电池电压。
- g) 测试台控制——测试台应能够控制以上参数。
- h) 建议测试较大活性面积电池单元时使用具有自动关停安全功能的平台,并由测试系统识别危险的工作状态,并通过关闭来做出响应,以防止对燃料电池的任何损害和/或终止任何潜在的不安全情况。

7.2 示意图

图 1 为控制燃料电池试验的测试平台所需的主要子系统框架示意图。

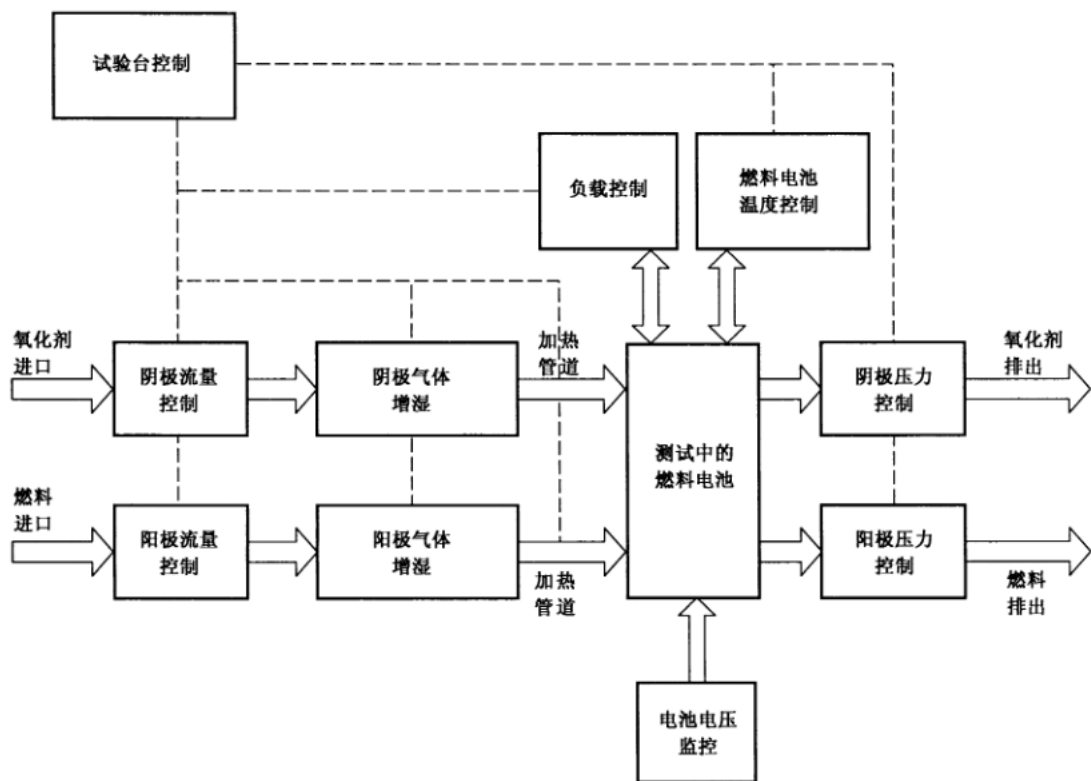


图 1 单电池试验的测试平台示意图

与增湿气体或增湿器中的水所接触的所有组件的材料应和气体或水相容,以防止材料中的杂质被萃取出来。这些材料有不锈钢和氟塑料等。

为防止不锈钢在高温纯水中浸出金属阳离子,如果不经常使用,则需要定期排干增湿器。

在杂质气体试验情况下,气体增湿系统的设计应避免试验气体杂质在进入电池之前被清除掉。

注:杂质参照 ISO/TS 14687-2。

若不进行杂质气体试验,鼓泡增湿器可以用来为燃料增湿。

若能满足本文件规定的功能要求,配置可以改变。

7.3 测试台控制允许的最大误差(输入试验)

燃料电池测试台控制允许的最大误差值为:

- a) 电流控制为预设值 $\pm 1\%$;
- b) 电压控制为预设值 $\pm 1\%$;

- c) 电池温度控制为预设值(稳态数值) $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- d) 增湿露点控制为预设值(稳态数值) $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- e) 流量控制为预设值 $\pm 5\%$;
- f) 压力控制为预设值 $\pm 3\%$ 。

8 测量

8.1 仪器精度

测试中(试验输出)测量值的最大不确定值应为:

- a) 电流 最大预期值的 $\pm 1\%$;
- b) 电压 最大预期值的 $\pm 0.5\%$;
- c) 温度 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- d) 露点 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- e) 流量 最大预期值的 $\pm 2\%$;
- f) 压力 最大预期值的 $\pm 3\%$ 。

注:低电流、电压和流量时,测量值的不确定度会非常大。

8.2 测量仪器和测量方法

8.2.1 概述

应按照测量值范围选择测量仪器。测量仪器应定期校准,以保持 8.1 中所描述的精度水平。所有的测量设备应根据制造商的说明或相关的国家或国际标准进行校准。

8.2.2 电压

电压表应和阳极与阴极的流场板或电流集流体相连,使接触电阻最小。如果电压表和阳极、阴极流场板之间,或/和阳极、阴极电流集流体输出末端间的接触电阻不可忽略,则应测量并记录该接触电阻。

8.2.3 电流

电流测量装置应连接在电池传输电流的回路上。电流测量装置可以是低阻抗的电流表;或者校准过的分流电阻器,其电压与流过的电流成正比。电流也可以通过电子负载来测量。

8.2.4 内阻

推荐的内阻测量方法为电流中断法(见 11.6.2.1)和电化学阻抗谱(EIS)法(见 11.7.5)。也可以用固定频率(通常为 1 kHz)的交流阻抗法(见 11.6.2.2),如交流毫欧姆表。在选择频率时应注意确保阻抗不包含虚数分量,并应记录毫欧姆表频率值。

为避免干扰,在使用中应注意与负载并行的外部交流信号。

这些测量设备的正、负端应分别和阴极、阳极的电流集流体输出末端相连。

8.2.5 燃料和氧化剂流量

燃料和氧化剂的流量应采用体积流量计、质量流量计或涡轮型流量计来测量。如果以上方法不适用的话,可以使用喷嘴流量计、小孔流量计或文丘里流量计。流量计的位置应在增湿器上游。

如果流量计需要压力补偿,应用紧靠流量计的上游的一个静压测量进行校正。

8.2.6 燃料和氧化剂温度

推荐使用热电偶、带传感器或热敏电阻的电阻温度计作为直接温度测量的传感器。

温度传感器应安置在紧靠单电池的上游。建议另一传感器安置于紧靠单电池的下游。

如果燃料和/或氧化剂流量计需要温度补偿,校准传感器应安装在紧靠流量计的上游。

8.2.7 电池温度

推荐使用热电偶、带传感器或热敏电阻的电阻温度计作为直接温度测量的传感器。

温度传感器宜尽可能地接近阴极活性面积中心位置。理想情况下,它应在阳极和阴极流场板中心位置(见 5.4 和附录 A)

8.2.8 燃料和氧化剂压力

优先采用校准过的压力传感器测量燃料和氧化剂压力。其他可以接受的方法包括校准过的压力计、重力仪、弹簧管或其他弹性类仪表。

静压测量端口应位于单电池的上游或下游。燃料和氧化剂压力可以在电池的上游(进口压力模式)或电池的下游(背压模式)进行控制。

性能试验前应检查连接管道以确保在工作条件下不漏气,同时避免管道中存有液态水。

如果出现压力波动,应在有效位置采取合适的减震措施。

当速度的影响可以忽略时,测量压力应为静态压力。

8.2.9 燃料和氧化剂湿度

为了测量燃料和氧化剂的湿度,根据燃料和氧化剂温度,可以采用冷镜、氧化铝、固体聚合物电阻或电容类的湿度计来测量湿度值。

湿度应以露点温度或以电池温度计算的相对湿度百分比表示。

试验开始前,湿度测量位置应位于单电池上游,或将湿度传感器置于反应气体中。如果采用空气或合成气体作为氧化剂,应测量并记录露点。

8.2.10 环境条件

应测量和记录环境温度、压力和湿度。

直接测量环境温度,宜使用带有变送器的热电偶或者带有变送器的电阻温度计。

直接测量环境压力,宜使用水银气压计。

直接测量环境湿度,宜使用湿度计。

8.3 测量单位

表 1 为测试中参数及相关测量单位。

表 1 测量参数及计量单位

参数	单位
温度	℃
燃料和氧化剂压力	kPa ^c
燃料和氧化剂露点	℃

表 1 测量参数及计量单位 (续)

参数	单位
燃料和氧化剂流量(STP ^a)	cm ³ /min, cm ³ /s
燃料和氧化剂化学计量比	—
电流	A
电流密度	A/cm ²
电压	V
输出功率	W
功率密度	W/cm ²
电池面电阻	Ω · cm ²
燃料组成 ^b	mol/mol
氧化剂组成 ^b	mol/mol
时间:小时、分、秒	h, min, s
电荷量	C
^a STP:标准温度和压力: 0 °C 和 101.325 kPa(绝对压力)。除非有特殊说明,流量均为 STP 情况下的值。 ^b 杂质可表示为 μmol/mol。 ^c 如适用,国际标准组织 ISO 宜使用绝对压力(kPa)。如果使用表压力,应说明且记为 kPa(G)。	

9 气体组成

9.1 燃料组成

9.1.1 氢气

氢燃料应符合 ISO/TS 14687-2 的规定,纯度(摩尔分数)不低于 99.97%。

9.1.2 重整气

模拟重整气可由电池或部件制造商规定。重整气的纯度及组成应由化学分析来确定。应记录化学分析的结果。

9.2 氧化剂组成

若以空气用作氧化剂,既可用大气中的空气又可用合成的空气。在使用大气空气的情况下,空气中应没有油和颗粒的存在。应记录氧化剂的组成,包括杂质的浓度。

10 试验准备

10.1 标准试验条件

试验开始前应由电池或部件制造商规定以下的标准试验条件。如果没有规定,将根据实施的试验确定条件,应记录这些试验条件。

- a) 电池温度(推荐使用阴极流场中心的温度);
- b) 燃料运行压力;
- c) 氧化剂运行压力;
- d) 燃料电池工作温度下的燃料湿度;
- e) 燃料电池工作温度下的氧化剂湿度;
- f) 燃料组成;
- g) 氧化剂组成;
- h) 燃料化学计量比;
- i) 氧化剂化学计量比;
- j) 额定电流密度;
- k) 额定电压;
- l) 最大电流密度;
- m) 最小电池电压。

性能测试应在标准试验条件下进行,除非有个别试验方法的另行规定。一种典型的试验流程如图 2 所示。

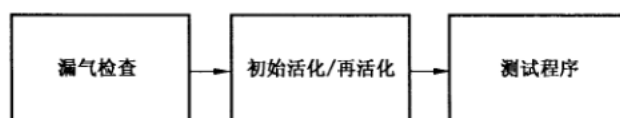


图 2 典型的试验流程图

10.2 环境条件

每次试验运行,以下环境条件均应测量:

- a) 温度;
- b) 压力;
- c) 相对湿度。

注:海拔会对空气成分产生影响。

10.3 数据采集频率

推荐使用的数据采集频率为 1 Hz,如果系统处于稳定状态,则取一个测量值作为 1 min 内的平均值(即 60 次测量的平均值)。

10.4 可重复性和再现性

根据 ISO/IEC 指南 98-3,建议在适当的时间间隔验证测量的重复性和再现性。

10.5 试验样品数量

既可以对单个样品依次测试也可以对多个样品并行测试,可重复性及可再现性只需依据 $I-V$ 曲线。测试应依次进行。如测试中断,每个测试之间,燃料电池应关机并恢复初始条件后,从常温条件下启动。

10.6 惰性气体或测试气体进行气路气密性检查

所有用于气路气密性检查的材料均应与气体管路、电池组件相匹配。单电池在电池测试台安装完成后,用惰性或测试气体进行气密性检查,并在所有连接处用液体检漏仪进行测试。

10.7 初始活化和稳态检查

新组装的电池应进行初始活化。初始活化的目的是使电池性能进入稳态,以便进行接下来的试验。

初始活化的实施应:

- a) 与 MEA 或部件制造商说明相一致;
- b) 或与试验对象制造商的提议相一致;
- c) 或与试验机构的惯例相一致。

典型的初始活化过程见附录 D。

基准极化曲线应在参考条件下测量三次,并计算每个电流密度下的平均电池电压值。为验证性能的稳定性,三次极化曲线的最大允许偏差为 5%。

10.8 关机

关机过程应使得电池进入储存状态(冷态)。关机程序的目的一般是将电池冷却到室温,同时避免在室温下电池中存有液态水。

关机过程应与 MEA 或部件制造商说明书相一致。

典型的关机过程见附录 E。

10.9 再活化

为保证 MEA 充分润湿,电池关机后重启应实施再活化过程。

再活化应依据 MEA 制造商或部件制造商的使用说明书进行。

典型的再活化过程见附录 F。

11 基本性能试验方法

11.1 概述

聚合物电解质燃料电池单电池的基本试验项目如下:

- 极化曲线测试(11.2);
- 稳态测试(11.3);
- 长期运行测试(11.4);
- 伏安法(11.5);
- 内阻(IR)测量(11.6);
- 电化学阻抗谱(EIS) (11.7)。

11.2 极化曲线试验

11.2.1 概述

本试验的目的是测量在表 2 所示的试验中定义的电池条件下的极化曲线。

注:极化曲线也被称为 I - V 或 V - I 曲线。

测量极化曲线有两种方法：恒定气体化学计量比测量法和恒定气体流量测量法。

在恒定气体化学计量比测量法中，燃料和氧化剂的化学计量比保持不变，电流在 0 至 $I_{\max}$ 范围内变化，除了电流低于 $I_{\min}$ 的数值外，燃料和氧化剂的流量都随着电流的变化而变化。这与燃料电池运行的实际情况类似。对于最小电流密度 $I_{\min}$ ，通常采用电池制造商规定的恒定的最小流量，以避免电池电压不稳定。如果没有详细说明， $I_{\min}$ 可认为是 $I_{\max}$ 的 10%。

注：由于每个电流水平的流量不同，局部的热量和水平平衡会随着电流的变化而变化。每次电流变化后，需要较长的时间才能达到一个新的稳态点。具体来说，在包括 0 A 在内的低电流值下，电池电压由于低气体流量而变得不稳定。

在恒定气体流量测量法中，燃料和氧化剂流量保持恒定，电流在 0 至 $I_{\max}$ 电流范围内变化，燃料和氧化剂的化学计量比都会随电流的变化而变化。

虽然这可能与燃料电池的实际运行情况不同，但在恒定流量下，电池的温度、压力和湿度等条件也不随电流改变而改变。

恒定气体化学计量比测量法和恒定气体流量测量法下的极化曲线测试方法分别在 11.2.2 和 11.2.3 中给出。

11.2.2 恒定气体化学计量比时的极化曲线

11.2.2.1 概述

本试验的目的是确定恒定气体化学计量比条件下改变电流密度时电池电压（以及相应的功率密度）的变化。

11.2.2.2 试验方法

在电池制造商规定的最大电流 $I_{\max}$ 下，将燃料和氧化剂流量设置为与化学计量一致。

设置电流 $I_{\max}$ 并保持恒定，直到电池电压稳定在 ± 5 mV，持续 15 min。

通过以适当的间隔改变 0 至 $I_{\max}$ 范围内的电流，得到电池在 0 至 $I_{\max}$ 的范围内的极化曲线，同时将每个电流水平上的燃料和氧化剂化学计量比保持恒定并高于规定的 $I_{\min}$ ，并记录电流变化方向。

在每个电流密度值下，电池电压稳定的最小要求为 ± 5 mV，持续 5 min。具体电流密度增量详见附录 G。本测试也可通过在 OCV 到最小电池电压范围内改变电池电压，并保持电流在 5 min 内稳定在 $\pm 2\%$ 内来完成。

建议在极化曲线试验中进行 IR 测量(11.6)。

当电流增加时，气体流量的变化应先于电流的变化。

当电流减小时，气体流量的变化应随电流的变化而变化。

在低化学计量比时，应注意设备能够将所需的气体流量控制在 7.3e) 规定的限度内，并相应地选择 $I_{\min}$ 。

11.2.3 恒定流量时的极化曲线

11.2.3.1 概述

本试验的目的是测量恒定气体流量条件下，改变电流密度时电池电压（以及相应的功率密度）的变化情况。

11.2.3.2 试验方法

将燃料和氧化剂的流量设置为最大电流密度 $I_{\max}$ 符合标准化学计量对应的流量。

设置最大电流 $I_{\max}$ 并保持,直到电池电压稳定在 $\pm 5 \text{ mV}$ 内并保持 15 min。

在保持燃料和氧化剂流量恒定的情况下,通过以适当的间隔改变在 0 到 $I_{\max}$ 范围内改变电流,得到电池的极化曲线。

在每个电流密度值下,电池电压稳定的最低要求为 $\pm 5 \text{ mV}$,持续 5 min。应记录确切的程序。典型的电流密度增量详见附录 G。

本测试也可通过改变电池电压进行,从 OCV 到最小电池电压,并允许电流稳定在 $\pm 2\%$ 内 5 min。

建议在极化曲线试验中进行内阻 IR 测量(11.6)。

11.3 稳态试验

11.3.1 概述

本测试的目的是在恒电流条件下,将所有测试输入参数定为设定值,以验证电池的输出。该试验也可在恒电压条件下进行。

11.3.2 试验方法

有两种类似的方法来进行该试验。

a) 恒电流法

将所有测试输入参数定为设定值。设定电流为额定电流密度(I_{st})并保持不变,在基于试验目的确定的时间内,电池电压稳定在 $\pm 5 \text{ mV}$ 内。记录电池电压(V_{st})。从试验结果计算出标准试验条件下的功率输出(P_{st})。

b) 恒电压法

将所有测试输入参数定为设定值。设定电压为设置值(V_{st})并保持不变,直到电池电流稳定在 $\pm 2\%$ 。记录电池电流值(I_{st})。从试验结果计算出标准试验条件下的功率输出(P_{st})。

11.4 长时间运行试验

11.4.1 概述

本试验的目的是测定电池在规定的恒定电流条件下长时间运行时的电压变化。应在测试前和测试后对电池进行检测,如需要,也应在测试期间进行检测,并在测试之后进行拆解分析,此步骤不在本文件的范围内。

诊断可能包括以下内容:

- 阳极和阴极的电化学表面积(ECA)测量(11.5.3);
- 氢渗透(11.5.2);
- 极化曲线(11.2);
- IR 测量(11.6);
- 电化学阻抗谱(11.7)。

比较这些测试结果有助于考察性能下降的原因。

11.4.2 试验方法

进行稳态试验(11.3),如需要,还可进行附加试验。

根据电池制造商规定的允许运行时间在标准试验条件下持续运行电池,建议的最小运行时间为 1 000 h。

记录电池运行期间的电池电压。如果需要,进行诊断测试。建议测试次数为每 1 000 h 进行 1 至

10 次。

在测试循环结束时,进行稳态测试(11.3),如果需要,可进行附加测试。

性能衰减以 $\mu\text{V/h}$ 表示,通过测试循环开始和结束时两个稳态测试(11.3)之间的电压降除以两个稳态测试(11.3)之间的运行时间来评估。

在稳态测试和其他测试之前进行适当的恢复程序,可以去区分暂时衰减和永久衰减。

11.5 伏安法

11.5.1 概述

伏安法作为一种诊断测试方法,可在 MEA 的使用寿命内的任一阶段对氢渗透速率以及铂催化剂在每个电极上的电化学表面积(ECA)进行量化。伏安法也可以通过污染物的吸附来确定表面覆盖面积。应使用恒电位仪,用于控制测量过程中施加的电势。

11.5.2 氢渗透试验

11.5.2.1 概述

本试验的目的是测量氢气通过膜从阳极到阴极的渗透率(透过速率)。

氢气渗透率的增加会导致性能的下降。它是由膜的衰减引起的,并可导致 MEA 的进一步劣化,包括膜,尤其是阴极活性层材料的衰减。

氢的渗透性不仅取决于膜的物理性质,还取决于气体的湿度、温度和压力。建议在一定的操作条件下进行试验。

11.5.2.2 试验方法

对电池进行活化,采用制造商建议的测试条件。

在阳极侧注入氢气[2 mL/(min/cm²)~4 mL/(min/cm²)活性面积],阴极侧注入氮气[2 mL/(min/cm²)~20 mL/(min/cm²)活性面积],在 0.1 V~0.5 V(相对于 RHE)之间对电池进行线性电位扫描,扫描速度不超过 5 mV/s。

应避免氢的析出。如果出现这种情况,则应提高最低电位。

在伏安法中,将电池端子连接到恒电位仪,并将对电极和参比电极导线连接到阳极,工作电极导线连接到阴极。

氢的渗透速率 ν_{∞} [mol/(s·cm²)]可从渗透电流密度中得到, I_{∞} (插值零电位电流密度),如公式(1)所示:

$$\nu_{\infty} = I_{\infty} / 2F \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

—— F 为法拉第常数(96 485 C/mol)。

有关说明请参见图 3。

该测试还提供了阳极和阴极之间的短路电阻,从图 3 的线性部分的斜率可得。电池应在相应的温度和压力下进行测试。

为了比较结果,温度应控制在一个固定的值。应记录试验条件。

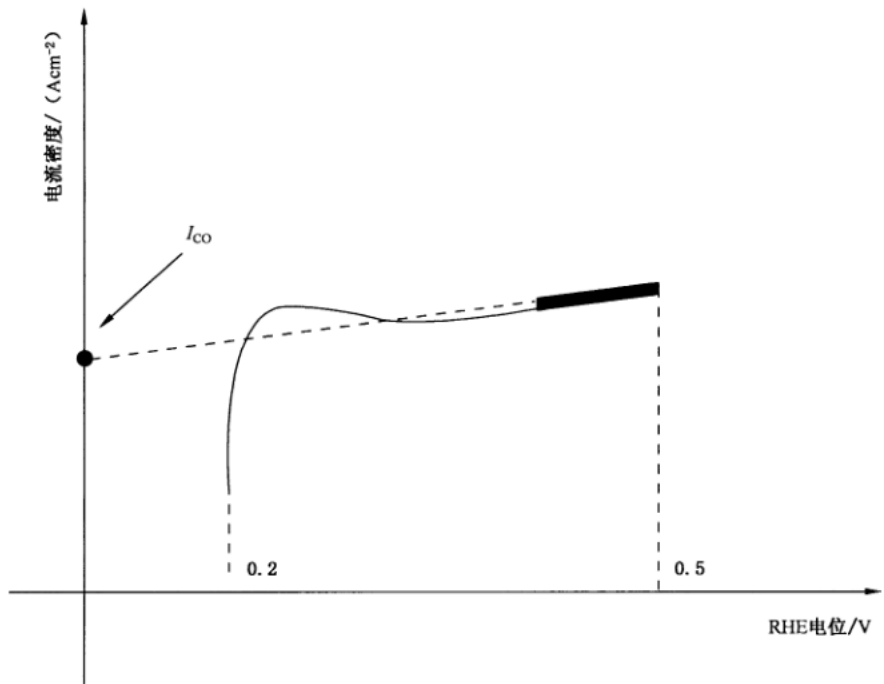


图3 氢气渗透测试

11.5.3 电化学表面积(ECA)测量

11.5.3.1 概述

本试验的目的是测定阳极和阴极电极的电化学表面积(ECA)。该测试针对铂催化剂;测定铂的电化学面积。

阴极和阳极的电化学面积都可以测量。在电化学伏安法中,测试电极为工作电极,另一电极为参比电极和对电极。

将电池端子连接至恒电位仪;工作电极连接至测试电极,对电极和参比电极连接至另一电极。

11.5.3.2 试验方法

可采用以下两个流程测试。

a) 氢的欠电位吸附(脱附)法

保持电池在制造商建议的条件下进行测试。若制造商未指定条件,建议温度在 10 ℃~80 ℃ 之间,压力为大气压至 150 kPa,气体 100%增湿。为了比较结果,所有条件应控制在一个固定的值,并记录试验条件。

试验开始前,在两个电极腔都通入氮气[4 mL/(min/cm²)活性面积],持续 30 min,以吹扫电池中的氧气。

在工作电极腔通入氮气[2 mL/(min/cm²)至 20 mL/(min/cm²)活性面积]15 min。

在对照电极/反电极上注入氢气流[2 mL/(min/cm²)至 4 mL/(min/cm²)活性面积]15 min。

选定的氮气流量下(或者无氮气流)进行伏安法测试,在电势范围 0.05 V~0.6 V(电压上限的最低值)内不同的扫描速率下进行测试,取最大的 ECA 值。

注意应选择合适的电压上下限,以尽量减少析氢和材料氧化的影响。

重复获得循环伏安曲线直到其变得稳定,并使用最后一个波形来计算 ECA。

在伏安法中,通过积分曲线下的相关面积,确定氢的脱附或吸附电荷(q_h),如图 4 所示。可以使用吸附峰面积或脱附峰面积。使用最合适的等效系数来计算 ECA,如公式(2)或公式(3)所示:

$$A_{e-Pt} = q_h / (\sigma_H \times A) \quad \dots\dots\dots (2)$$

或:

$$A_g = q_h / (\sigma_H \times L) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

A_{e-Pt} ——单位电极面积铂催化剂的 ECA,单位为平方米每平方厘米(m^2/cm^2);

q_h ——氢的脱附或吸附电荷量,单位为库仑(C);

σ_H ——铂单位有效面积的氢脱附或吸附电荷量($2.1 C/m^2$);

A ——电极的几何面积,单位为平方厘米(cm^2);

A_g ——每 1 g 铂催化剂的电化学表面积,单位为平方米每克(m^2/g);

L ——铂负载,单位为克(g)。

如果使用脱附电荷或吸附电荷,或两者的平均值,则应在报告中指出。

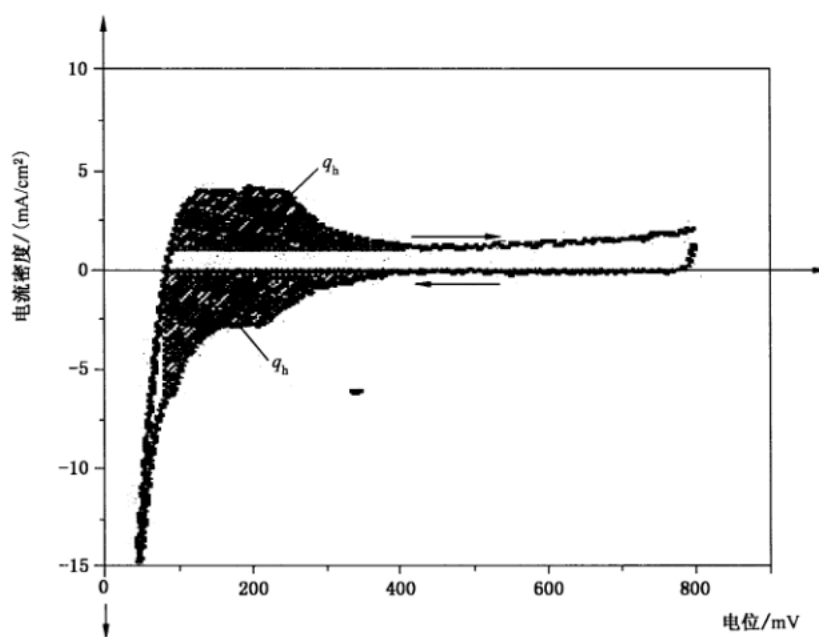


图 4 吸附/脱附电荷量(q_h)的测定

b) 一氧化碳溶出伏安法

保持电池在制造商建议的条件下进行测试。若制造商未指定条件,建议温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,压力为大气压至 150 kPa ,气体 100% 增湿。为了比较结果,所有条件应控制在一个固定的值,并记录试验条件。试验开始前,在两个电极上都注入氮气流 [$4\text{ mL}/(\text{min}/\text{cm}^2)$ 活性面积],持续 30 min ,以清除电池中的氧气。

在工作电极腔通入流速为 $2\text{ mL}/(\text{min}/\text{cm}^2)$ 至 $4\text{ mL}/(\text{min}/\text{cm}^2)$ 的氮气(99%)和一氧化碳(1%)混合气,持续 15 min 。

在对电极/参比电极上通入氢气 [$2\text{ mL}/(\text{min}/\text{cm}^2)$ 至 $4\text{ mL}/(\text{min}/\text{cm}^2)$ 活性面积]。

在选定的流量或无流量下,用氮气进行伏安法测试,在电势范围 0.05 V~0.6V(电压上限的最低值)内,在扫描速率 10 mV/s~50 mV/s 条件下进行测试。

为了减少这些测量对 ECA 的影响,应将最大电势限制在一个较低的值,以避免造成活性层的材料过度氧化。

通过积分曲线下的相关面积,确定一氧化碳脱附电荷(q_{CO}),如图 5 所示。

使用最合适的等效系数来计算 ECA,如公式(4)或公式(5)所示:

$$A_{\text{e-Pt}} = q_{\text{CO}} / (\sigma_{\text{CO}} \times A) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{或 } A_g = q_{\text{CO}} / (\sigma_{\text{CO}} \times L) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$A_{\text{e-Pt}}$ ——单位电极面积铂催化剂的 ECA,单位为平方米每平方厘米(m^2/cm^2);

q_{CO} ——一氧化碳的脱附电荷量,单位为库仑(C);

σ_{CO} ——铂单位有效面积的一氧化碳脱附电荷量($4.2 \mu\text{C}/\text{m}^2$);

A ——电极的几何面积,单位为平方厘米(cm^2);

A_g ——每 1 g 铂催化剂的电化学表面积,单位为平方米每克(m^2/g);

L ——铂载量,单位为克(g)。

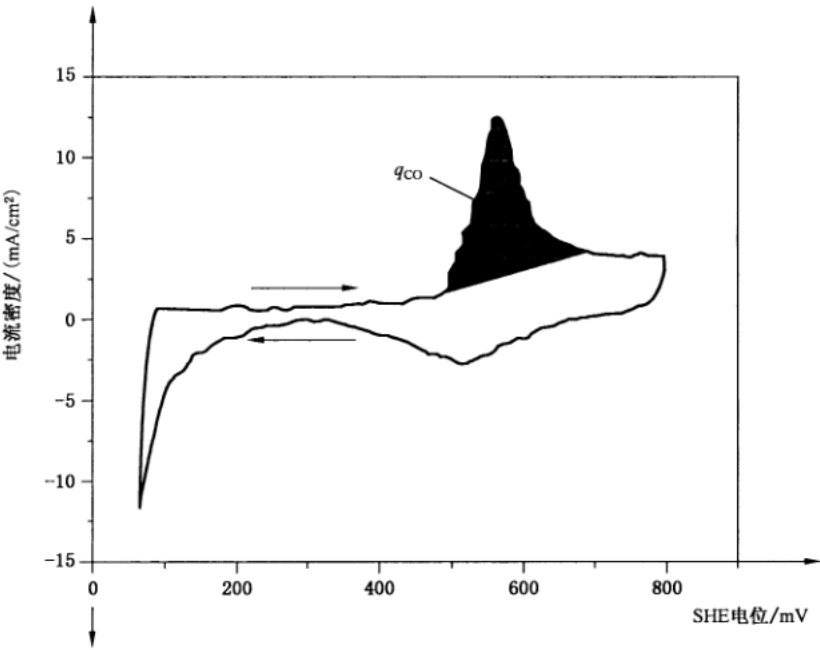


图 5 一氧化碳脱附电荷(q_{CO})的测定

11.6 IR 测量

11.6.1 概述

本试验的目的是测定不同电流密度下电池的电阻 R_{int} ,以便于对电压测量进行 IR 校正。8.2.4 中描述的测量技术可以用来进行 IR 测量。如果 IR 测量和极化曲线测量同时进行,IR 测量不应影响电池的稳态。如果 IR 测量会干扰电池的稳态,应先记录电压、电流密度值,再进行 IR 测量。极化曲线的测量根据 11.2 进行。

11.6.2 试验方法

11.6.2.1 电流中断法

本方法的原理是,当电流被中断时,电池电压的瞬时变化,即 ΔV_{CI} ,是电池内电阻的函数。

将电流密度设置为所需值,并允许电池电压达到稳定值(最低要求 ± 5 mV,持续 5 min)。

将电池电流调至零,使用示波器或类似的测量仪器监测电池电压随时间的变化,如图 6 所示。 ΔV_{CI} 是电流中断时电池电压的瞬时变化,其由电流中断前后的电池电压外推得到。

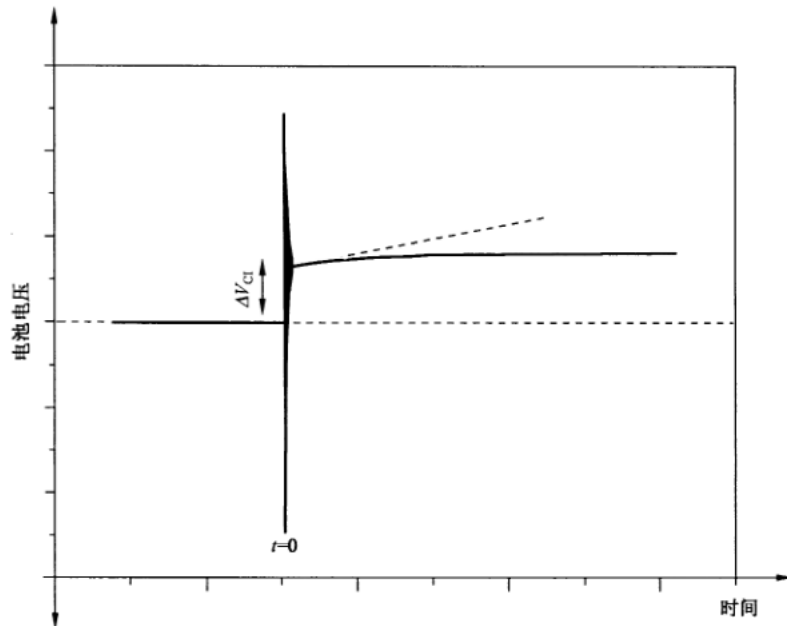


图 6 ΔV_{CI} 的测定

电池电阻 R_{int} 计算方法如公式(6)所示:

$$R_{int} = \Delta V_{CI} / I \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

R_{int} —— 电池电阻,单位为欧姆(Ω);

ΔV_{CI} —— 电池电压在电流中断时的瞬时变化,单位为伏(V);

I —— 电池电流,单位为安(A)。

面电阻 R_{ASR} 的计算如公式(7)所示:

$$R_{ASR} = R_{int} \times A \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

R_{ASR} —— 面电阻,单位为欧姆平方厘米($\Omega \cdot \text{cm}^2$);

R_{int} —— 电池电阻,单位为欧姆(Ω);

A —— 电极的几何面积,单位为平方厘米(cm^2)。

11.6.2.2 单频交流阻抗测量

将电流密度设置为所需值,并且让电池电压达到稳定值(最低要求 ± 5 mV,持续 5 min)。

将交流电阻计连接到电池上,并记录电池电阻 R_{int} 的读数。

应注明测试的条件,包括测量的交流信号的幅值和频率、电流密度、电池电压、电池温度、阳极和阴极的进气口条件(成分、湿度、温度、压力和流量)。

面电阻 R_{ASR} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) 按 11.6.2.1 中的公式计算。

11.7 电化学阻抗谱(EIS)

11.7.1 概述

电化学阻抗谱是一种电化学技术,它将电池的阻抗谱记录为交流信号频率的函数,通过传递函数分析得到的阻抗谱。

11.7.2 测试条件

进行初步试验时,应提前确定下列试验条件:

- a) 频率测量范围;
- b) 测量点数量;
- c) 恒电流法或恒电位法;
- d) 加载交流信号的幅值;
- e) 原料气(H_2/H_2 , H_2/N_2 , H_2/Air , H_2/O_2 等);
- f) 操作条件(温度、压力、湿度等)。

关于测量点的数量,最好每个对数单位绘制 5~20 个测量点,以便将其以对数形式均匀分布,使阻抗图的几何结构清晰,同时避免基本电网频率及其谐波。

11.7.3 试验方法

试验方法如下:

- a) 确定测试条件;
- b) 确认电池达到稳定状态;
- c) 将交流正弦波叠加在直流电流或电压上,并开始测量;
- d) 将交流正弦波扫到规定的频率范围内,测量每个频率的阻抗。

用于测量的交流信号的振幅应足够小,以免干扰电池的工作。

阻抗测量的有效性应加以验证,例如,可通过使用克莱默-克朗尼格(K-K)关系进行验证。

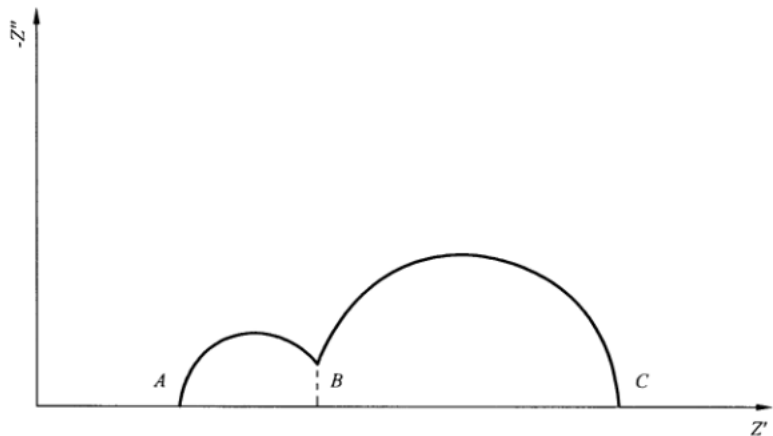
11.7.4 EIS 数据分析

测试结果应表示为复阻抗图(奈奎斯特图/科尔作图)或波特图(以被测频率对数为横坐标的阻抗图)。每单位有效面积的阻抗被绘制成图,典型的阻抗图如图 7 所示。截距 A 表示电池内的 IR 下降。其他参数可以通过为电池构造一个等效电路来得到,该电路由电路元件组成(如电阻、电容、常相位元件),表示不同的电荷转移和传质过程。在使用这种等效电路时应加以注意,并应采用其他的表征技术来加以验证。

11.7.5 电化学阻抗谱下的 IR 测量

图 7 为典型的阻抗图。

阻抗图的实轴截距一般位于 1 kHz 和 20 kHz 之间,用 A 点表示。在 A 点测得的阻抗或插值表示的 IR 降,由纯电阻阻抗组成。



标引序号说明：

A —— 高频极限阻抗；

B —— 低频极限阻抗；

A-B —— 高频阻抗弧；

B-C —— 低频阻抗弧；

Z' —— 阻抗的实部；

Z'' —— 阻抗的虚部。

图 7 典型阻抗复数坐标图

12 性能测试方法应用

第 11 章中描述的试验和测试是基本的性能测试方法，可以应用于各种特定目的的测试。根据表 2 及附录 H 对 11.2 至 11.7 中所述的基本性能测试方法进行的应用性能测试。根据本文件用户的目标，可以选择性地执行表 2 中描述的性能测试。

表 2 性能测试应用

	测试名称		目标	可应用基本测试方法	章/条
1	浓差测试			稳态；极化曲线	H.1
	1	氢浓差测试	评估阳极的扩散能力		H.1.1
	2	氧浓差测试	评估阴极的扩散能力		H.1.2
2	气体化学计量比测试			稳态；极化曲线	H.2
	1	燃料化学计量比测试	评估阳极的扩散能力		H.2.1
	2	氧化剂化学计量比测试	评估阴极的扩散能力		H.2.2
3	温度影响测试		测量电池温度对电池性能的影响	稳态；极化曲线	H.3
4	压力影响测试		测试燃料和氧化剂压力对电池性能的影响	稳态；极化曲线	H.4
5	湿度影响测试			稳态；极化曲线	H.5
	1	燃料湿度影响测试	测量燃料湿度变化对电池性能的影响		H.5.1
	2	氧化剂湿度影响测试	测量氧化剂湿度变化对电池性能的影响		H.5.2

表2 性能测试应用(续)

	测试名称		目标	可应用基本测试方法	章/条
6	极限电流测试		确定 MEA 内的传质极限	稳态;极化曲线	H.6
7	过载测试		评估电池的过载性能	稳态;极化曲线	H.7
8	零下贮存测试		研究零下贮存对电池性能的影响	稳态;极化曲线	H.8
9	零下启动测试		评估在零度以下的环境中电池的冷启动能力	稳态;极化曲线; 长期运行	H.9
10	膜溶胀试验(湿度循环测试)		评估干/湿循环条件下膜的机械强度	长期运行; 伏安法	H.10
11	开路电压(OCV)测试		在 OCV 条件下评估 MEA 的化学稳定性	稳态;极化曲线	H.11
12	氧还原反应(ORR)活性试验		使用 MEA 评估催化剂的 ORR 活性	稳态;极化曲线	H.12
13	燃料成分测试		测量重整气组成对电池性能的影响	稳态;极化曲线; 长期运行测试; 伏安法; IR; EIS	H.13
14	循环试验				H.14
	1	启动/停车循环试验	在规定的条件下测定电池启动/停车次数与电池性能关系	极化曲线; 伏安法; IR; EIS	H.14.1
	2	加载循环试验	在规定的条件下测定电压随循环加载电流密度的变化		H.14.2
	3	电位循环测试(启动/停车耐久性)	通过电位扫描循环对电池进行加速衰减测试,评估催化剂在启动/停车循环时的耐久性		H.14.3
	4	电位循环测试(负载循环耐久性)	在加速衰减条件下,通过循环电位来评估催化剂在负载循环下的耐久性		H.14.4
15	杂质影响测试				H.15
	1	对额定电流密度的影响	确定燃料或空气中的杂质对电池性能的影响,以及在额定电流密度下电池性能从损坏中恢复的程度	极化曲线; 稳态; 长期运行; 伏安法; IR; EIS	H.15.1
	2	对极化曲线的影响	确定燃料或空气中的杂质对电池极化曲线的影响		H.15.2
	3	杂质长期运行影响测试	确定燃料或空气中的杂质对燃料电池长时间运行的影响		H.15.3
极化曲线;极化曲线试验(11.2)。 稳态;稳态测试(11.3)。 长时间;长时间运行试验(11.4)。 伏安法;伏安法(11.5)。 IR;内阻(IR)测量(11.6)。 EIS;电化学阻抗谱(EIS)(11.7)。					

13 试验报告

13.1 概述

试验报告应准确、清晰、客观,提供足够信息以证明该试验所达到的目的。建议使用附录 I 中的极化曲线试验报告模板。

13.2 报告项目

报告至少应给出以下信息:

- a) 报告题目,
- b) 报告作者,
- c) 实施试验的机构,
- d) 报告日期,
- e) 标准编号/试验过程编号,
- f) 试验场所,
- g) 试验数据(见 13.3)。

13.3 试验数据描述

试验数据应包含以下信息:

- a) 试验名称,
- b) 测试条件(见 13.4),
- c) 测试数据,
- d) 试验日期和时间,
- e) 试验环境条件,
- f) 试验者的姓名与资格证,
- g) 试验电池数据(见 13.5)。

13.4 测试条件描述

测试条件应至少包含以下信息:

- a) 电池温度,
- b) 燃料与氧化剂压力,
- c) 燃料与氧化剂的露点,
- d) 燃料与氧化剂的组成,
- e) 燃料与氧化剂的化学计量比,
- f) 燃料与氧化剂的流量。

13.5 试验电池的参数描述

试验电池的参数应包含以下信息:

- a) 电极的有效面积,
- b) 产品名以及 MEA 品牌(可选),
- c) 膜的类型和厚度(可选),
- d) 阴极与阳极催化剂的类型与含量(可选),
- e) 气体流道类型(可选),
- f) 气体扩散层材料类型(可选),
- g) 组装压力(可选)。

附录 A
(资料性)
流场板

图 A.1 给出了按照技术规范设计的流场板样本,按照有效面积为 25 cm² 设计。阳极与阴极流场板与膜电极接触的表面都有一个水平蛇形单凹槽作为气流流道。推荐的流道结构如下:

- 宽:1.0 mm;
- 深:1.0 mm;
- 间隔:1.0 mm。

流场板刻有流道的面积应略小于电极的有效面积,以免膜被流道边缘切到。组装过程中也应避免膜与流道边缘直接接触。

一般情况下阴极和阳极流场板有着相同的流场结构,但它们在电池中的取向可以不同,据此可以将电池中流体流动分三种情况。

- 并流:阴极和阳极气体的流动的路线是平行的,且流动方向相同。
- 逆流:阴极和阳极气体的流动的路线是平行的,但流动方向相反。
- 错流:阴极和阳极气体的流动的路线成一定角度,一般是 90°。

图 A.2 给出了另一个按照技术规范设计的流场板例子,有效面积为 25 cm²。图 A.1 与图 A.2 的不同之处在于图 A.1 是单蛇形流道,图 A.2 是三蛇形流道。

单位为毫米

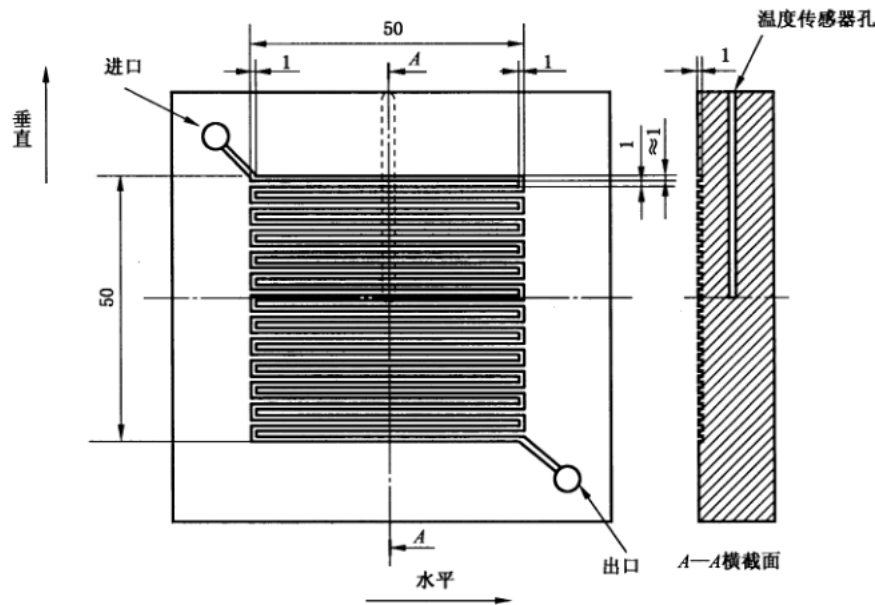


图 A.1 流场板设计(单蛇形流道)

单位为毫米

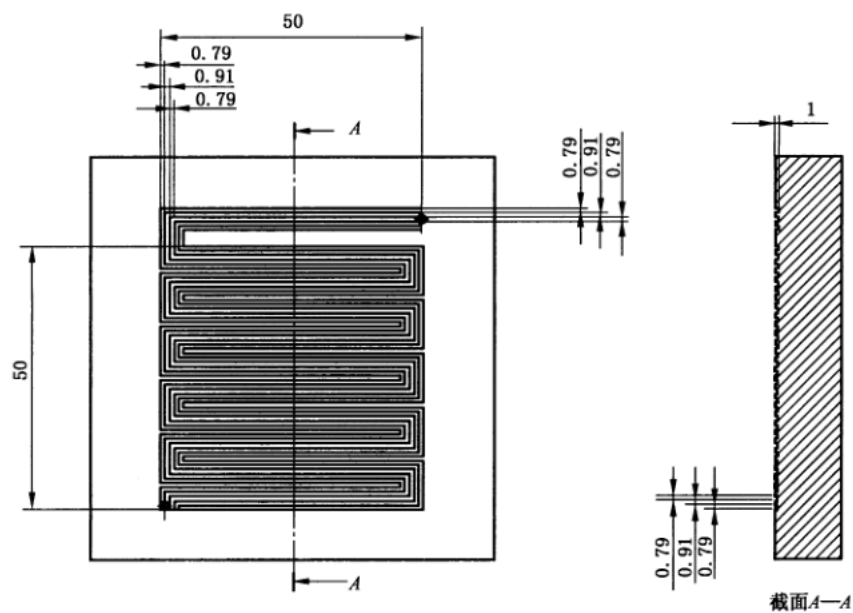


图 A.2 流场板设计(三蛇形流道)

附录 B
(资料性)
电池部件定位

图 B.1 为采用典型部件组装的单电池，这些部件采用螺栓和螺母压在一起。弹性垫圈和弹性密封件可根据需要垫在螺母上以防止松动。定位部件用可导向杆或定位针。

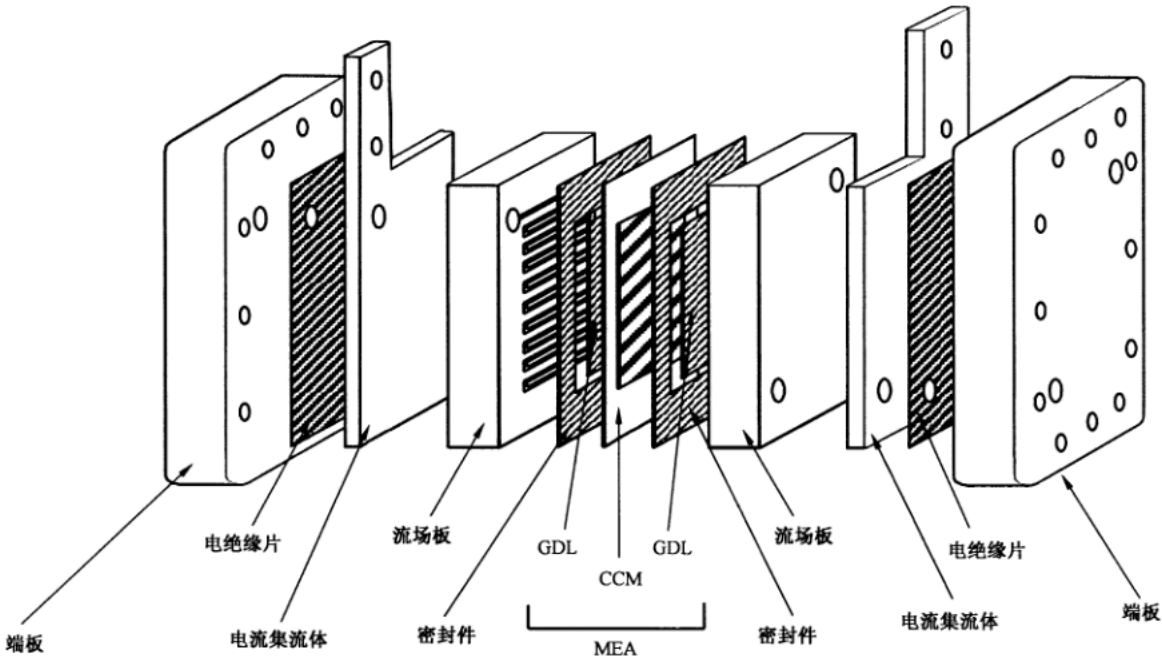


图 B.1 采用典型部件组装的单电池

附录 C

(资料性)

气密性试验

C.1 试验目的

气密性试验的目的是定量分析气体泄漏的速率。如果采用冷却液回路,可以在电池运行或测试前对电池进行检修。一般推荐采用气体回路进行气密性试验,采用的气体为惰性气体,理想情况为室温下氮气。

C.2 测试程序

典型的气密性试验规程如下所示。

a) 程序 1:

向阳极和阴极均通入氮气,设置背压为接近 0 kPa(G),然后关闭阳极和阴极气体的出口阀门。第一步,向阳极一侧施加至 50 kPa(G)的压力(或者最高运行压力的 150%),同时向阴极一侧施加至 30 kPa(G)的压力(或者最高运行压力的 125%)。关闭阳极和阴极气体的入口阀门,将气体密封在电池内。使电池在这种状态下保持 10 min,并分别监测阳极和阴极的压力。

第二步,向阴极一侧施加至 50 kPa(G)的压力(或者最高运行压力的 150%),同时向阳极一侧施加至 30 kPa(G)的压力(或者最高运行压力的 125%)。关闭阳极和阴极气体的入口阀门,将气体密封在电池内。使电池在这种状态下保持 10 min,并分别监测阳极和阴极的压力。

在上述操作中,阳极和阴极的压力 10 min 后的变化均应小于 5 kPa(G)。

在第一步中,如果阳极侧的压力降低,并且阴极侧的压力升高,则表明气体穿透膜。在第二步中,如果阴极气体压力降低,并且阳极气体压力升高,则表明气体从相反方向穿透膜。如果任一侧的压力下降与另一侧不相关,则发生了一端外漏。如果两边的压力均降低,很可能发生了外部泄漏。

b) 程序 2:

向阳极和阴极均通入氮气,设置背压为接近 0 kPa(G),然后关闭阳极和阴极气体的出口阀。第一步,向阳极和阴极侧同时加压至 30 kPa(G)。关闭阳极和阴极气体的入口阀,将气体密封在电池内。使电池在这种状态下保持 10 min,并分别监测阳极和阴极的压力。记录电池的漏气情况。

第二步,向阳极侧加压至 30 kPa(G),同时阴极侧为 0 kPa(G),关闭阳极和阴极气体的入口阀,将气体密封在电池内。使电池在这种状态下保持 10 min,并分别监测阳极和阴极的压力。记录由阳极向阴极侧的气体穿透情况。

第三步,向阴极侧加压至 30 kPa(G),同时阳极侧为 0 kPa(G),关闭阳极和阴极气体的入口阀,将气体密封在电池内。使电池在这种状态下保持 10 min,并分别监测阳极和阴极的压力。记录由阴极向阳极侧的气体穿透情况。

在上述步骤中,10 min 后阳极和阴极侧的压力下降均应小于 5 kPa(G)。

注:如果电池在更高压力下运行,测试压力通常与试验压力应大体上相等。

c) 程序 3:

关闭气体出口,向电池内通入气体以升高压力。当电池两侧压力达到一定值,如 300 kPa(或者是最大压力的 150%),随着压力升高,不断降低气体流量。当压力达到恒定时,此时的气体流量为电池的外表漏气速率。恒定时的压力的波动不超过 ± 10 kPa。

随后,一侧气室内的压力降至大气压,同时关闭出气口,而另一侧的出气口保持打开。在出口关闭的腔室内通入气体,使压力达到一定值(如 130 kPa)时再缓慢增加压力,此时气体流量随压力增加而减小,则定义压力不再增加时的质量流量为内部泄漏速率。恒定时的压力的波动不超过 ± 5 kPa。

附录 D

(资料性)

初始活化

以下介绍四种有关初始活化规程的例子,作为替代 MEA 供应商的初始活化程序。

a) 程序 A

- 1) 建立测试台以运行电池。
- 2) 用吹扫气体(如氮气)吹扫阳极和阴极。流量与其后试验中所用流量相同,吹扫直至电池彻底吹扫干净为止。
- 3) 采用电池加热器或者其他合适的加热方法加热电池至 80 °C。通入完全润湿的氮气,流量与其后试验中所用流量相同。加热过程中,保持电池温度,进出口气体管路温度始终高于气体露点,避免系统中的水发生冷凝。
- 4) 待电池温度和气体湿度稳定后,按照合适的化学计量比通入完全润湿的反应气体,例如,以电流密度为 1 000 mA/cm² 为基准,通入化学计量比为 1.4 的氢气和化学计量比为 2.5 的空气。保持电池电压在 0.4 V 以上的同时,逐渐增加电池负载直至电流密度达到 1 000 mA/cm²。
- 5) 保持电池负载(电流密度)在 1 000 mA/cm²,按照化学计量比为 1.4 的氢气和 2.5 的空气,直至电池电压波动范围在小于 5 mV 的情况下持续时间超过 5 h。满足了该判据则意味着电池初始活化完成。

b) 程序 B

按照其后试验中采用的标准运行条件,向电池内通入纯氢气,使电池在开路电压下运行 15 min,然后在 600 mV 下运行 75 min,然后运行 3 个循环:保持在 850 mV 下运行 20 min;紧接着在 600 mV 下运行 30 min。整个初始活化时间接近 4 h。

c) 程序 C

启动试验台运行电池。按其后试验中的标准运行条件设定。在恒定电压模式下,稳定在 500 mV 下 5 min,在恒定气体流量下运行 I/V 循环,从 800 mV 到 300 mV 以 50 mV 的步长扫描,每个步长停留 10 s,从 300 mV 到 800 mV 返回时采用相同的速度和时间阶跃。维持电池电压在 500 mV 下 5 min。运行该循环直至在 5 min 内 500 mV 下电流密度变化低于 ± 10 mA/cm²,其后的 3 个循环的电流密度波动低于 ± 10 mA/cm²。

d) 程序 D

按标准试验条件给定的运行温度和气体条件下以恒电流模式运行电池。保持电池电压高于 500 mV,以每步 100 mA/cm² 或者每秒不超过 10 mA/cm² 的速率增加电流密度,直到达到初始活化的电流密度。电池初始活化电流密度要么达到选定条件下 500 mV 时的最大电流密度或者达到测试规定的目标电流密度。活化过程应至少持续 24 h,在试验开始前的最后 4 h,电池的电压波动要小于 ± 5 mV。

附录 E

(资料性)

关机

下面介绍典型的关机流程。

- a) 按照极化曲线阶跃值的相反步骤降低电负载值(也就是,保持气体流量的同时降低电流密度从 $I_{\max}$ 到 0)。关掉电子负载。
- b) 用增湿的氮气以最低极化曲线负载时的流量[4 mL/(min/cm²)活性面积]吹扫阳极和阴极直到电池冷却到室温。冷却期间,确保电池温度和气体管道温度始终高于气体露点温度避免系统中的水冷凝。
- c) 当电池达到环境温度时,改用干燥的氮气吹扫阳极和阴极 5 min 至 10 min(这一步可选,取决于膜所需的最终保湿程度)。
- d) 断开电池,关闭阳极和阴极进出口。

附录 F

(资料性)

再活化

下面介绍典型再活化的规程。

a) 程序 A

- 1) 重复附录 D 程序 A 中的第 1 到第 5 步。对于第 5 步来说 1 h 应足够电池活化稳定。
- 2) 执行规定的试验条件,保持该试验条件直至电池活化稳定。

b) 程序 B

- 1) 向电池中通入完全增湿的气体 1 h,其中氢气化学计量比为 1.4,氧化剂化学计量比为 2.5。
加热电池到 80 ℃,工作电流为 400 mA/cm²。
- 2) 在上述条件下运行电池 4 h;当电压平衡时电池活化完毕。

附录 G

(资料性)

极化曲线试验补充说明

在极化曲线测试中典型的电流密度增量如下所示。

如果预期的最大电流密度已知(如,制造商提供或者预先测量),按照表 G.1 选择电流增量步长。

表 G.1 已知最大电流时电流密度的增量

步骤	预期最大电流密度的百分数/%
0	0(OCV)
1	2
2	5
3	10
4	20
5	30
6	50
7	70
8	90
9	100

如果进行 Tafel 斜率分析,低电流部分可根据需要多取点。

如果最大电流密度未知,利用表 G.2 给定的电流密度增量。

表 G.2 最大电流密度未知时电流密度的增量

步骤	电流密度/(A/cm ²)	停留时间/s
0	0(OCV)	30
1	0.02	60
2	0.03	60
3	0.04	120
4	0.06	120
5	0.08	120
6	0.1	120
7	0.2	120
8	0.4	120
9	0.6	120
10	0.8	120
11	1.0	120

表 G.2 最大电流密度未知时电流密度的增量（续）

步骤	电流密度/(A/cm ²)	停留时间/s
12	1.2	120
13	1.4	120
14	1.6	120
15	1.8	120
16	2.0	120
注：当达到最大电流密度或者电池电压下降到低于 0.3 V 或者制造商规定的最小电压值应停止试验（为了避免对电池部件带来不可逆损坏）。		

附录 H

(规范性)

应用性能试验

H.1 浓差试验

H.1.1 氢气浓差试验

H.1.1.1 概述

本试验的目的是评估阳极的扩散能力。通过氢气扩散浓差测试评价实际使用中用重整气(氢气、二氧化碳、氮气及其他杂质的混合气)作为燃料的 MEA 的性能。

本试验可采用两种方法中的一种:恒定气体流量或者恒定气体化学计量比。两者在 11.2.2 和 11.2.3 中分别描述。一旦选定了一种方法,整个试验过程中都应使用同一种方法。试验应按下述流程进行。

H.1.1.2 试验方法

首先,以所需的流量、增湿和压力使用氢作为电池阳极侧的燃料。氢气中的一氧化碳浓度应在 ISO 14687-2 规定的浓度或以下。

用选定的方法测量氢和氧化剂(空气或氧气)的极化曲线。

接下来,使用氢气和氮气混合物作为燃料。在这里,氮表示改造后的混合气体中的非氢成分,其组成由制造商指定。

用所选方法获得氢-氮混合物和氧化剂(空气或氧气)的极化曲线,并将氢的极化曲线与气体混合物的极化曲线进行比较。

注:使用氮气而不是二氧化碳的原因是,二氧化碳可以产生微量的一氧化碳,这些一氧化碳是由二氧化碳与氢气的反应形成的,一氧化碳会损害阳极。本测试目的是评估阳极的扩散能力。

H.1.2 氧气浓差试验

H.1.2.1 概述

本试验的目的是评价阴极的扩散能力。氧气扩散浓差测试用来评价在实际应用中以空气为氧化剂的 MEA 的性能。

本试验可采用两种方法中的一种:恒定气体流量或恒定气体化学计量比。两者在 11.2.2 和 11.2.3 中分别描述。一旦选定一种方法,整个试验过程中都应使用同一种方法。试验应按下述流程。

H.1.2.2 试验方法

用选定的方法测量极化曲线。

然后,用氧气代替空气,采用同样流量、增湿以及压力,采用选定方法测量极化曲线。

比较氧气和空气的极化曲线。

使用氧气造成的气体泄漏可导致快速放热事件、硬件损坏,并可能造成人身伤害。

氧气系统需要根据特殊要求进行设计和清理。

79%摩尔分数的氮和 21%摩尔分数的氧的混合物可以用来减弱氧浓度对扩散和动力学的影响,参见附录 J。

H.2 气体计量比测试

H.2.1 燃料计量比测试

H.2.1.1 概述

本试验的目的是评价阳极的扩散性能,与 H.1.1 的氢气扩散浓差试验相同。

H.2.1.2 试验方法

在标准试验条件下按规定设置电流密度。在标准试验条件下把氧化剂化学计量比设置为给定值的一至四倍。根据电池制造商规定的一定范围内改变燃料流量,记录电池电压。

做本试验应非常小心,因为本试验有意使阳极供气不足。供气不足会导致阳极的不可逆损坏。

H.2.2 氧化剂计量比测试

H.2.2.1 概述

本试验的目的是评价阴极的扩散性能。如 H.1.2 氧气浓差试验一样,试验应按下述流程进行。

H.2.2.2 试验方法

在标准试验条件下按规定设置电流密度。在标准试验条件下把燃料化学计量比设置为给定值的一至两倍。根据电池制造商规定的一定范围内改变氧化剂流量,记录电池电压。

做本试验应非常小心,因为本试验有意使阴极供气不足。

H.3 温度影响测试

H.3.1 概述

本试验的目的是测量电池温度对电池性能的影响。温度通常会影响电极反应速率和电解质的电导率。

H.3.2 试验方法

按电池制造商规定设置电池温度为 $T_1, T_2, \dots, T_n, T_1, T_2, \dots, T_n$, 由制造商提供, T_n 是最高运行温度。

同时,通过增加或降低露点和进气温度,保持阴、阳极在燃料电池运行温度恒定时的相对湿度。

在每个温度水平上,测量电池的极化曲线。试验过程可参见 11.2。

H.4 压力影响测试

H.4.1 概述

本试验的目的是测量燃料和氧化剂压力对电池性能的影响。试验中应非常谨慎地保持膜两侧的压力差为恒定值。高压增加反应气体的密度,从而增加电极反应速率。

H.4.2 试验方法

按电池制造商规定设置燃料或氧化剂压力为 $p_1, p_2, \dots, p_n, p_1, p_2, \dots, p_n$ 由制造商提供, p_n 是最高运行压力。

同时,相应调整另一种气体压力以保持二者的压差值恒定。在每一压力水平上,测量电池的极化曲

线。试验过程可参见 11.2.2 或 11.2.3。

进行本试验要非常小心,以免损害电池或膜。试验者应对膜的渗透迹象保持警惕,如可导致内燃的针孔。

H.5 湿度影响测试

H.5.1 燃料湿度影响测试

H.5.1.1 概述

本试验的目的是测量燃料的不同湿度对电池性能的影响。燃料的湿度通常会影响电解质的电导率和阳极的气体扩散。

本试验可采用两种方法中的一种:恒定气体化学计量比或恒定气体流量。两者在 11.2.2 和 11.2.3 中分别描述。一旦选择了一种方法,整个试验过程中都应使用同一种方法。本试验应按下述流程进行。

H.5.1.2 试验方法

在标准状态下设置氧化剂湿度。根据相应的露点温度设置几个不同的燃料湿度,获取相应的极化曲线。

H.5.2 氧化剂湿度影响测试

H.5.2.1 概述

本试验的目的是测量氧化剂的不同湿度对电池性能的影响。氧化剂湿度通常会影响电解质的电导率和气体向阴极的扩散。

本试验可采用两种方法中的一种:恒定气体流量或恒定气体化学计量比。两者在 11.2.2 和 11.2.3 中分别描述。一旦选择了一种方法,整个试验过程中都应使用同一种方法。本试验应按下述流程进行。

H.5.2.2 试验方法

在标准状态下设置燃料湿度。根据相应的露点温度设置几个不同的氧化剂湿度,获取相应的极化曲线。

H.6 极限电流测试

H.6.1 概述

气体通过电极的扩散速率对 MEA 的性能有重要影响。极限电流密度的大小是 MEA 气体扩散能力的指标。本试验的目的是评价电池中 MEA 的传质极限。

H.6.2 试验方法

根据电池制造商规定的额定电流密度下标准化学计量比设定燃料和氧化剂的流量。保持燃料和氧化剂化学计量比恒定,小幅度逐步增加电流(即逐步增加燃料和氧化剂流量),记录每一步电池电压。当电压迅速地降低到接近于 0 V 时(但不为 0 V),记录下电流值,并迅速减小电流以免损害 MEA。

把电压值外推至 0 V 时的电流作为极限电流。

采用本方法,应谨慎操作以避免电压降到 0 V 或以下,可能对 MEA 造成不可逆的损害。同时应采用能够承受极限电流的电线。

H.7 过载试验

H.7.1 概述

根据燃料电池的应用(如车辆应用),可能需要短时间的过载操作,电池的过载耐久性(过载量和持续时间)受到催化剂活性和电极的气体扩散能力的影响。

本试验的目的是评价电池的电过载耐久性。

H.7.2 试验方法

设置电流在额定电流与电池制造商规定的极限电流之间。

根据设定的电流,按照标准化学计量比设置燃料与氧化剂流量。按照电池制造商规定的时间段运行电池,或直到电池电压降至电池制造商指定的值为止。在电池运行过程中记录电池电压。

如有必要,可通过更改设置的电流值重复上述测试步骤。

电池制造商规定的最小电池电压应不会对 MEA 造成不可逆转损坏。

H.8 零下贮存试验

H.8.1 概述

本试验的目的是研究在零下温度下贮存对性能衰减的影响。由于关机后 MEA 中的剩余水分含量对冻融循环导致的性能衰减有显著影响,因此建议采用模拟燃料电池系统实际运行的停车程序进行此测试。

H.8.2 试验方法

在制造商指定的标准测试条件下操作电池。根据 11.2 和 11.6 分别测量极化曲线和内阻。使用制造商指定的停车程序关闭电池。将燃料电池置于人工气候室中,在零度以下储存。

根据零下储存协议要求设置温度,保持至少 12 h。

将电池置于标准测试条件下,并保持至少 12 h。

在标准试验条件下,根据制造商要求操作电池,并分别按照 11.2 和 11.6 测量极化曲线和内电阻。

重复上述步骤两次。

性能衰减可以通过对比试验前后的极化曲线和内阻来确定。

H.9 零下启动测试

H.9.1 概述本试验的目的是评估低温环境下电池的冷启动能力

电池的冷启动能力受 MEA 中残留的水分含量、电池关机后的 GDLs 和流场板影响,因此建议采用不同的关机过程进行冷启动,以确定合适的冷启动关机程序。

H.9.2 试验方法

在标准测试条件下操作电池。

使用制造商指定的关闭程序关闭电池。如无指定程序,可参考附录 E 中提供的例子。

将燃料电池置于人工气候室中,在零度以下启动。

根据零下启动协议的要求设置燃料电池温度,并保持温度至少 12 h。

按照制造商的规定,在低于零度的温度下启动气候室中的电池。有必要控制输出电流,使电池电压不低于制造商规定的电压,如果没有规定,则不低于 0.3 V,以避免对电池元件造成不必要的损坏。

在零下温度下,以制造商规定的额定电压运行电池 10 min。

重复上述步骤两次。

在标准测试条件下,根据 11.2 和 11.6 检测电池。

注:用于零下启动测试的测试报告模板示例见附录 k。

H.10 膜溶胀试验(湿度循环试验)

H.10.1 概述

本试验的目的是评估膜在湿度循环试验中的机械耐久性。

H.10.2 测试条件

试样尺寸(可渗透截面):10 cm² 至 50 cm²(依据电池几何形状确定);

样品设置:单电池(MEA 和流场板);

样本数量: $N=3$;

温度:80 ℃;

环境气体:空气(也可使用氮气);

相对湿度:0%~150%;

注:通过将增湿器温度设置在电池温度之上,可获得超过 100%的相对湿度。在这种情况下,液态水将在电池内通过冷凝形成。

循环:4 min(干 2 min,湿 2 min);

流量:在正常情况下,25 cm² 电极的典型流量,如阴阳极均为 2 L/min(在正常情况下);

测量气体渗透频率:最初每 67 h(1 000 个循环)。每增加 24 h(360 个循环)检测一次泄漏率。

H.10.3 试验方法

使用能使干湿管路自动切换的设备,干湿管路连接处有三通阀。

建议监测出口处相对湿度的变化。

定期向多边环境协定双方提供具有不同湿度水平的空气(或氮气)。

每隔 24 h 用氢气替换一侧来测量气体渗透。渗透水平应采用气相色谱法或氢气渗透法(11.5.2)测定。

当氢渗透率(交叉电流)超过初始值的 10 倍或完成 20,000 个循环时,测试即完成,以较早的时间为准。试验过程中应测量高频电阻。

H.11 开路电压(OCV)测试

H.11.1 概述

本试验的目的是评估 MEA 在 OCV 条件下的化学降解。

H.11.2 测试条件

温度:90 ℃;

气体压力:大气压;

相对湿度:30%;
阳极:氢气;
阴极:空气。

H.11.3 试验方法

按照 11.5.2 进行氢渗透试验。
在上述测试条件下启动 OCV 测试。
在测试过程中持续监测电压。每隔 10 h~100 h 进行一次诊断试验,测量氢气渗透泄漏(80 ℃)。
在临时测量时,按要求测量阳极和阴极出口的氟化物浓度。

注:测量 F 离子浓度时,建议采用离子选择电极(ISE)、电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)和液相色谱(LC)方法。
当氢渗透速率超过其初始值的 10 倍或达到 500 h 时终止试验,以较早的时间为准。
经测试后,可对 MEA 做以下分析:

- 膜厚度测量;
- 膜内铂带观察;
- 膜分子量和分子结构的变化。

H.12 氧还原反应(ORR)活性试验

H.12.1 概述

本试验的目的是利用 MEA 评估阴极的 ORR 活性。

H.12.2 试验条件

温度:80 ℃;
气压:150 kPa(abs)(或大气压);
相对湿度:100%;
阳极:氢气;
阴极:氧气。

H.12.3 试验方法

按照 11.5.3 和 11.5.2 分别进行 ECA 试验和氢气渗透试验,测量电化学表面积和渗透电流密度。
根据以下步骤测量极化曲线和电池内阻(IR)(见图 H.1):
1) 在接通氧气前,确保电池电压在 0 V 附近超过 30 s,以确保可重复测量铂表面;
2) 用氧气置换氮气,保持电池在 OCV 状态 2 min;
3) 着重测量较低电流密度下的极化曲线和内阻。
计算各电流密度下的无内阻电压,计算如公式(H.1)所示:

$$V_{\text{IR-free}} = V_{\text{measured}} + R_{\text{ASR}} \times I \quad \dots\dots\dots(\text{H.1})$$

式中:
 $V_{\text{IR-free}}$ ——无内阻电压,单位为伏(V);
 V_{measured} ——实测电压,单位为伏(V);
 R_{ASR} ——测得的面电阻,单位为欧姆平方厘米($\Omega \cdot \text{cm}^2$);
 I ——应用电流密度,单位为安每平方厘米(A/cm^2)。

总电流密度计算如公式(H.2)所示：

$$I_{\text{total}} = I + I_{\text{coc}} \quad \dots\dots\dots (\text{H.2})$$

式中：

I_{total} ——应用电流密度和渗透电流密度的和，单位为安每平方厘米(A/cm²)；

I_{coc} ——渗透电流密度，单位为安每平方厘米(A/cm²)。

绘制一个塔菲尔图，横轴为总电流密度，纵轴为无内阻 IR-free 电压(参见图 H.2)。通过插值或外推得到塔菲尔图在 0.9 V(IR-free 无内阻)处的总电流密度。

注：选择该方法是为了尽量减少与质子和氧有关的传递损失，同时，控制氧化铂对 ORR 影响的再现性。

阴极每克铂催化剂(A/g)的质量活性计算如公式(H.3)所示：

$$A_{\text{mass}} = I_{0.9 \text{ V}} / L_{\text{Pt}} \quad \dots\dots\dots (\text{H.3})$$

式中：

A_{mass} ——阴极的质量活性，单位为安每克(A/g)；

$I_{0.9 \text{ V}}$ ——0.9 V(无内阻电压)下的总电流密度，单位为安每平方厘米(A/cm²)；

L_{Pt} ——阴极的铂负载，单位为克每平方厘米(g/cm²)。

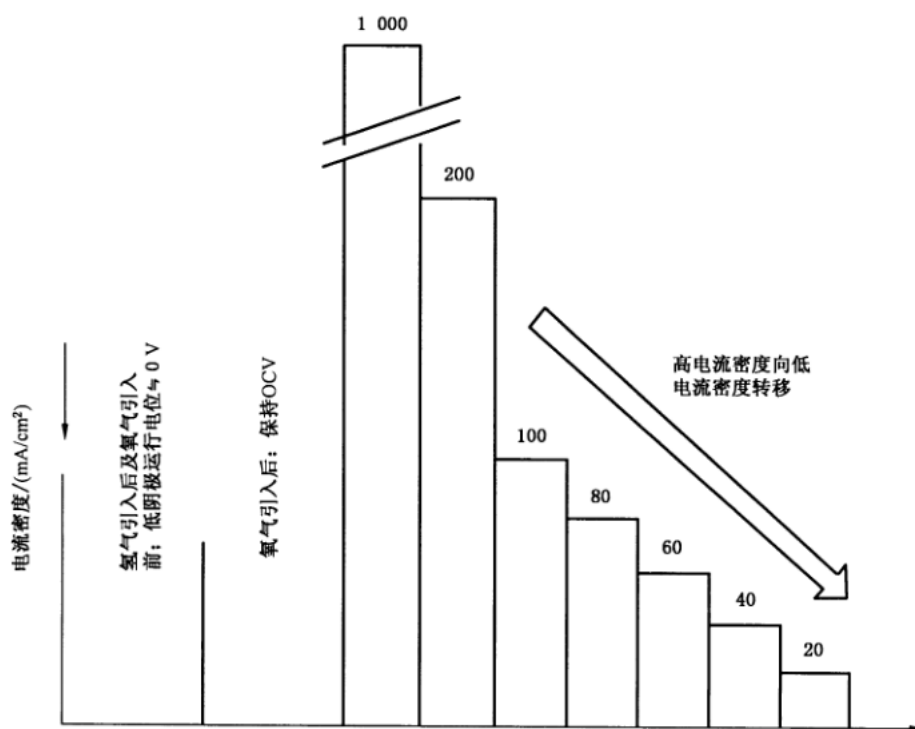


图 H.1 ORR 活性测试程序

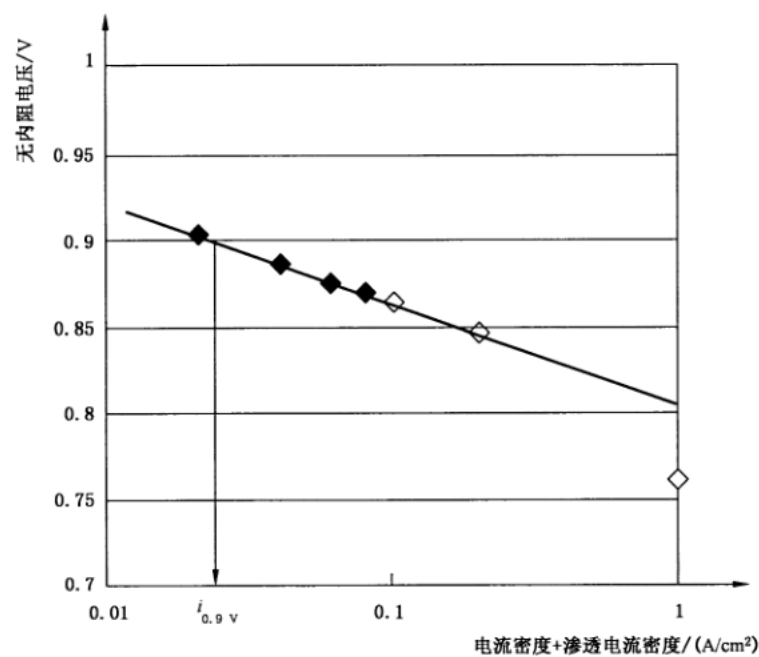


图 H.2 塔菲尔图示例

H.13 燃料组成测试

H.13.1 概述

本试验的目的是测试重整气的组成对电池性能的影响。本试验用来测定电极对不同类型燃料气的耐受程度。重整气通常包括氢气、一氧化碳和惰性气体如二氧化碳、氮气；各组分含量取决于原料和重整方法的差异。惰性气体通常会影响到氢气向电极的扩散。

本测试可以使用两种方法：恒定气体流量或恒定气体化学计量比。两者在 11.2.1 和 11.2.2 中分别描述。一旦选择了一种方法，整个试验过程中都应使用同一种方法。本试验应按下述流程进行。

H.13.2 试验方法

采用标准的燃料气体，用选定的方法测量得到极化曲线。然后把标准燃料气改成另一种具有不同组成的燃料气体。用选定的方法测量极化曲线。

H.14 循环测试

H.14.1 启动/停车循环测试

H.14.1.1 概述

启动/停车循环试验的目的是测定在规定条件下电池运行的性能变化，该变化情况是启动/停车次数的函数。该试验可作为特定运行条件下应用的 MEA 寿命的特定试验。

气流和温度控制也可以作为本试验的一部分。

负载的启动/停车工况以及运行时间由电池制造商规定。典型的启动/停车循环工况及运行时间见附录 L。

H.14.1.2 试验方法

当电池在 100% 负载(额定电流密度)下运行一定时间后,关闭负载(开路)一段时间,然后加载,100% 负载运行。重复该过程,记录电压。

每个循环的性能衰减可以通过电压降除以循环数来计算。

燃料电池在开路电压下长时间运行会加剧电极材料性能下降。

H.14.2 加载循环试验

H.14.2.1 概述

加载循环试验的目的是测定在规定条件下燃料电池运行的电压变化,该变化是电流密度对时间的动态函数。该试验可作为特定运行条件下应用的 MEA 寿命的特定试验。典型的负载工况及运行时间见附录 M。

H.14.2.2 试验方法

当电池在 100% 负载(额定电流密度)下运行一定时间后,保持气体的化学计量比恒定,将负载从 100% 降为部分负载运行一定时间,负载配置以及运行时间由电池制造商指定。

然后将负载再次升至 100%。重复该过程,记录电压。每个循环的性能衰减可以通过电压降除以循环数来计算。

H.14.3 电位循环试验(启动/停车耐久性)

H.14.3.1 概述

电位循环试验的目的是通过在加速条件下循环电位来评估催化剂对启动和停车的循环耐久性。

H.14.3.2 测试条件

温度:80 ℃;

气压:大气压;

相对湿度:100%;

阳极:氢气;

阴极:氮气。

H.14.3.3 试验方法

按照 11.5.3 进行 ECA 测试,测量电化学表面积。

电压图是可重复的,使用图 H.3 所示的试验条件和方案开始电位循环试验。

在试验过程中,适当间隔进行 ORR 活性试验(H.12)、极化曲线测量(11.2)和 ECA 测量(11.5.3)。

继续测试直至电化学表面积下降到预定值(例如达到初始值的 40%)或预定的循环数(例如 60 000 个循环)。

根据需要测量阴极出口的二氧化碳排放量。

试验结束后,对 MEA 进行催化剂载体的腐蚀、催化剂的洗脱/氧化程度、催化剂颗粒直径的变化等分析。

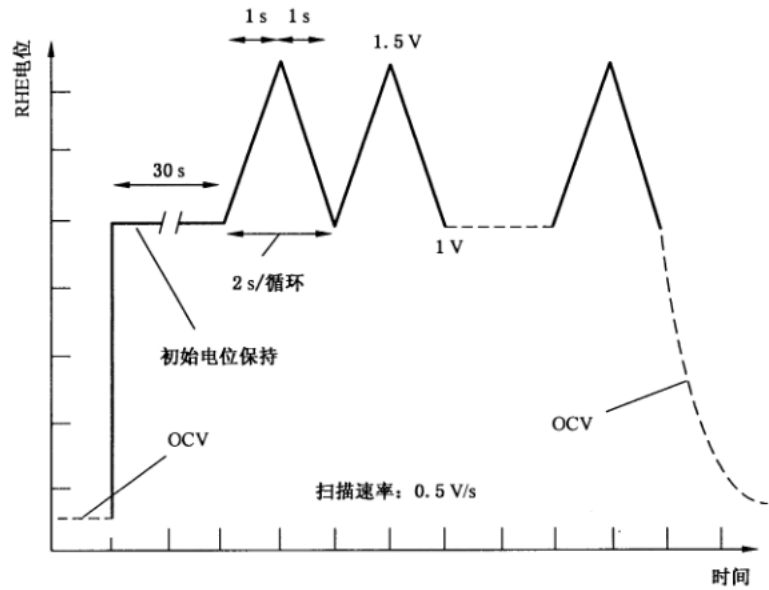


图 H.3 电位循环试验(启动/停车耐久性)

H.14.4 电位循环试验(加载循环耐久性)

H.14.4.1 概述

本试验的目的是通过在加速条件下进行电位循环试验来评估催化剂在加载循环中的耐久性。

H.14.4.2 测试条件

温度:80 ℃;
气体压力:大气压;
相对湿度:100%;
阳极:氢气;
阴极:氮气。

H.14.4.3 试验方法

按照 11.5.3 测量 ECA 值。一旦电压图是可重复的,则使用图 H.4 所示的测试条件和规则开始一个电位循环测试。在试验过程中,适当间隔进行 ORR 活性试验(H.12)、极化曲线测量和 ECA 测量(11.5.3)。

继续测试,直到 ECA 降到初始值的 50%或预定的循环数为止。

试验结束后,对 MEA 进行催化剂载体的腐蚀、催化剂的洗脱/氧化程度、催化剂颗粒直径的变化等分析。

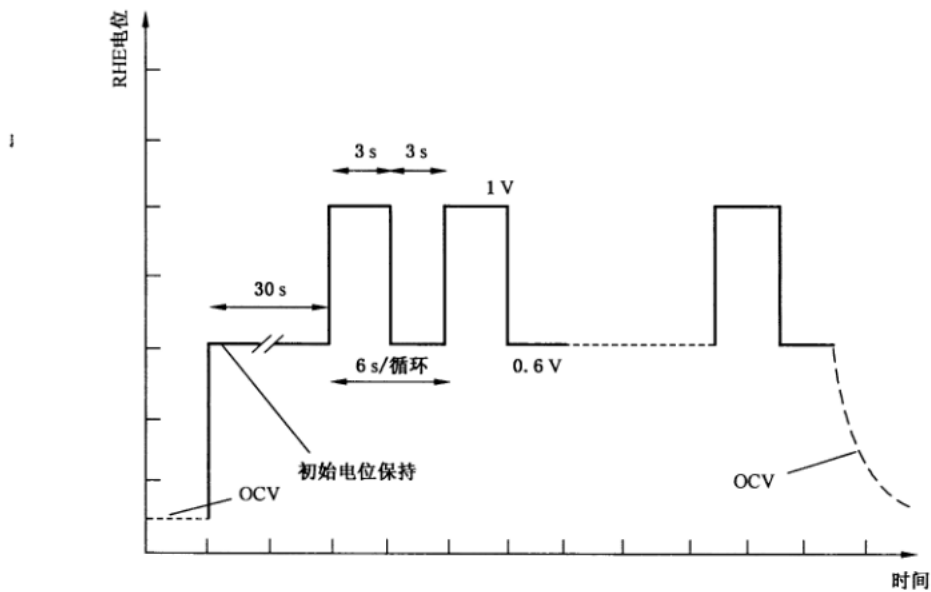


图 H.4 电位循环试验(加载循环耐久性)

H.15 杂质影响试验

H.15.1 额定电流密度下的影响

H.15.1.1 通则

本试验的目的是测定燃料中的杂质对电池性能的影响，并测定电池在额定电流密度下性能损失的恢复情况。电池使用含杂质燃料进行稳态运行试验。

本试验应在不同杂质含量的燃料或空气中进行，以测定杂质对电池性能的影响，以及不造成影响的最高杂质含量。

建议在试验之前和之后使用 ECA 测量(11.5.3)进行电化学诊断。

注：氢气中的杂质参见 ISO 14687-2。

H.15.1.2 试验方法

使用洁净燃料和洁净空气在额定电流密度下运行电池直至电压稳定在±5 mV 之间持续 15 min。

将洁净燃料(或空气)换为含有电池制造商规定的种类和数量的杂质的燃料(或空气)。

运行电池直至电压稳定在±5 mV 之间持续 15 min，记录电压。

然后将含有杂质的燃料(或空气)更换为洁净燃料(或空气)。

运行电池直至电压稳定在±5 mV 之间持续 15 min，记录电压。

可根据洁净气体和污染气体操作间电池电压的差异来评估耐受性，可逆性则可根据洁净反应物下初始值和最终值之间的差异来确定。

硫化氢等杂质可能会与测试台的部件(例如供气管和密封件)暴露的表面发生反应。宜确保测试台材料与所用杂质相容。在测试后，管道需要用惰性气体或纯氢冲洗，以尽量减少杂质的存在，以便进一步测试。

H.15.2 对极化曲线的影响

H.15.2.1 通则

本试验的目的是测定燃料(或空气)中杂质对电池极化曲线的影响。本试验应在不同杂质含量的燃料或空气上进行,以测定杂质对电池性能的影响,以及不造成影响的最高杂质含量。

H.15.2.2 试验方法

使用恒定流量或恒定气体化学计量比的洁净燃料和洁净空气,分别按照与 11.2.2 或 11.2.3 相同的方法测量极化曲线。

将洁净燃料(或空气)更换为含有杂质的燃料(或空气),采用与前面的相同的方法测量电池极化曲线。

H.15.3 杂质长期影响试验

H.15.3.1 通则

本试验的目的是确定燃料或空气中的杂质对燃料电池长期运行的影响。

为了研究杂质在长期运行中的累积效应,应使用 11.3.2a)(稳态试验)或 11.2(极化曲线试验)中的额定电流密度确定的最高杂质水平或不影响电池性能的最低水平的燃料或空气进行该试验。

H.15.3.2 试验方法

使用洁净燃料和洁净空气在额定电流密度下运行电池直至电压稳定在 ± 5 mV 之间持续 15 min。

将洁净燃料(或空气)换为含有电池制造商规定的种类和数量的杂质的燃料(或空气)。

对于运输应用,电池运行至少 1 000 h,对于固定应用,电池运行至少 5 000 h。

记录操作过程中的电池电压。如果需要,在标准试验条件下定期测得电池的极化曲线和内阻。

极化曲线和内阻测量的基本方法分别参见 11.2 与 11.6。

平均性能衰减可按 11.4 所述进行计算。建议增加试验循环次数和持续时间。

附 录 I
(资料性)
极化曲线试验报告

I.1 概述

极化曲线测试报告模板如下。

I.2 一般信息

I.2.1 测试报告的一般信息

测试报告参考资料/识别	
测试报告题目	
作者	

I.2.2 测试相关的一般信息

测试序号		测试日期	
测试版本		测试执行公司	
测试需求公司		测试地点	
测试次数		测试电池/设备	

I.3 引言

- 供作者参考：
- 测试实施过程和测试程序的选择及原因；
 - 测试者和顾客之间约定的测试方案，可能包括验收标准；
 - 测试报告或测试中用到的其他文件(专业术语文件，符号统一等)。

I.4 测试目的及范围

测试目的为测定特定操作条件下 PEFC 单电池的极化曲线。

电池的测试范围为开路电压至由以下条件决定的最高电流密度：

- 电池组分的特性；
- 预期的应用范围；
- 测试方法。

测试目的的量化：

- 聚合物电解质燃料电池单电池的一般性能；
- PEFC 组件，如 MEAs 或 MEAs 的组件，以及流场板的材料与设计。

本测试所考虑的操作条件：

- 科学领域采用的标准条件；
- 所预期的应用。

I.5 电池组件描述

电池制造商	
电池模型	
待测试产品或物品	
产品编码	
测试对象识别码	

燃料电池:流场材料	
燃料电池:流场设计	
燃料电池:有效面积	
密封圈类型	
密封圈厚度	
电流集流体材料	
电池紧固力	
加热/冷却系统	
电池方位(纵向或横向)*	
气体流向(并流,对流等)	
* 如果需要,可附加图片便于理解。	

MEA 组件(是/否,3 层,5 层,7 层)	
电极	
气体扩散层(厚度,类型)	
催化层(担量,组成)	
膜(厚度,类型)	

最低电池电压(V)	
阳极和阴极间最大压差(kPa)	
制造商建议的空气计量比	

制造商提供的电池或 MEA 的补充说明或信息。

I.6 背景信息

作者需简要描述电池的测试信息,包括所有诊断性测试、特殊或基本测试及其相应的顺序标识。

I.7 测试方案描述

为便于对测试结果的理解,测试报告中应对所使用的测试设备和方案进行详细描述,包括传感器类

型、位置以及特殊装置(如加热/冷却和增湿子系统)。

I.8 操作条件,输入及输出的描述

表 I.1 及表 I.2 列举了测试中需控制的所有输入值和输出值。测量不确定度和抽样率也需记录。测试者需将每个测试的输入值栏填写完整。

表 I.1 测试输入参数

输入参数	描述	单位	输入值	测量不确定度	抽样率(Hz)	可控精确度
i	电流密度(i = 实际电流/活性面积)	A/cm ²				
T_c	电池温度	℃				
X_{fuel}	燃料组分	%	—			
X_{ox}	氧化剂组分	%	—			
p_{Air}	氧化剂在电池进口或出口的背压 ^c	kPa				
p_{H_2}	燃料气在电池进口或出口的背压 ^c	kPa				
Q_{fuel}	燃料流量 ^a (标准状态下)	cm ³ /min				
Q_{ox}	氧化剂流量 ^a (标准状态下)	cm ³ /min				
$Q_{\text{fuel, min}}$	燃料最小流量	cm ³ /min				
$Q_{\text{ox, min}}$	氧化剂最小流量	cm ³ /min				
λ_{fuel}	燃料化学计量比	无量纲	—	—		
λ_{ox}	空气化学计量比	无量纲	—	—		
RH_{ox}	氧化剂相对湿度 ^b	%				
RH_{fuel}	燃料气相对湿度 ^b	%				
T_{ox}	氧化剂露点	℃				
T_{fuel}	燃料露点	℃				
Tb_{fuel}	燃料沸点	℃				
Tb_{ox}	氧化剂沸点	℃				
Tl_{fuel}	燃料管线温度	℃				
Tl_{ox}	氧化剂管线温度	℃				
p_{amb}	环境压力	kPa				
RH_{amb}	环境相对湿度	%				
^a $Q\lambda_{\text{fuel}}$ 和 $Q\lambda_{\text{ox}}$ 分别是燃料和氧化剂化学计量比控制的体积流量。测试时实际的体积流量是化学计量比控制的流量,除非该值小于最小流量: $Q_{\text{fuel, min}}$ 和 $Q_{\text{ox, min}}$ 。 ^b 相对湿度基于电池温度计算得出。 ^c 报告中应说明所选择的可选项,以及电池进出口压力是否控制在稳定值。						

表 I.2 测试输出参数

输出参数	描述	单位	仪器不确定度	抽样率/Hz
V	电池电压	V		
P	电池功率密度	W/cm ²	计算结果	
注：在测试是基于改变电压的情况下(电压变动范围为 OCV 至最小电池电压),I 为输出参数。				

I.9 测试过程及结果

I.9.1 启动及活化的描述

- 宜包含下述信息(见表 I.3)：
- 条件设定的详细描述；
 - 测量值(与启动及活化相关的描述、表格或图表)。

表 I.3 启动及活化期间的电池性能

停留时间/min	电流密度/(A/cm ²)	最后 XX min 的平均电池电压/V； 标准偏差/V	平均电池功率密度/(W/cm ²)

表格中宜包含测试过程中的主要输入和输出值,以便对主要结果的解释。

对于极化曲线: $I, V, T_c, p_{oxl}, p_{fuel}, Q_{ox}, Q_{fuel}, RH_{ox}, RH_{fuel}$ (或与相对湿度有关的输入参数), t (时间)。

采用平均值并标示出标准偏差。

I.9.2 关机的描述(如有)

宜包含关机过程的详细描述。

I.9.3 测试过程及结果的描述

- 宜包含下述信息(见表 I.4)：
- 若在活化后、设定 OCV 条件前需增加测试步骤,宜写明测试条件(初始输入参数)；
 - 测量值(测试期间输入参数及输出参数的描述和图表)(如包含极化曲线的停留时间、电流密度、电池电压及功率的表格)。

表 I.4 测试过程中的电池性能

停留时间/min	电流密度/(A/cm ²)	电池平均电压/V (±2 标准偏差*)	电池平均功率/(W/cm ²) (±2 标准偏差*)
* 参见 ISO/IEC 指南 98-3 测定不确定度。			

表格中宜附加以下测试过程中的主要输入和输出值,以便对主要结果的解释:

$T_c, p_{oxl}, p_{fuel}, Q_{ox}, Q_{fuel}, RH_{ox}, RH_{fuel}$ (或与相对湿度有关的输入参数), t (时间)。

I.9.4 测试过程的偏差

宜记录任何测试过程中由测试者或仪器产生的偏差。

I.10 数据后处理

宜详细描述任何由试验数据计算而来的参数的计算过程。

I.11 结论与验收标准

测试结果评价宜参考测试目的和验收标准。

附 录 J
(资料性)

氮氧混合气下的极化曲线

阴极气体为氮氧混合气(79%氮气,21%氧气)所测出的极化曲线可为扩散介质中的传质效率提供诊断性信息。由于氧在氮气中的扩散速率显著高于其在空气中的扩散速率,因此传质极限会在更高的电流密度下产生。对空气中及氮氧混合气中电池性能(见图 J.1 中的例子)的比较,可用于鉴别传质极限的本质与来源,如 GDL 或催化层水淹。

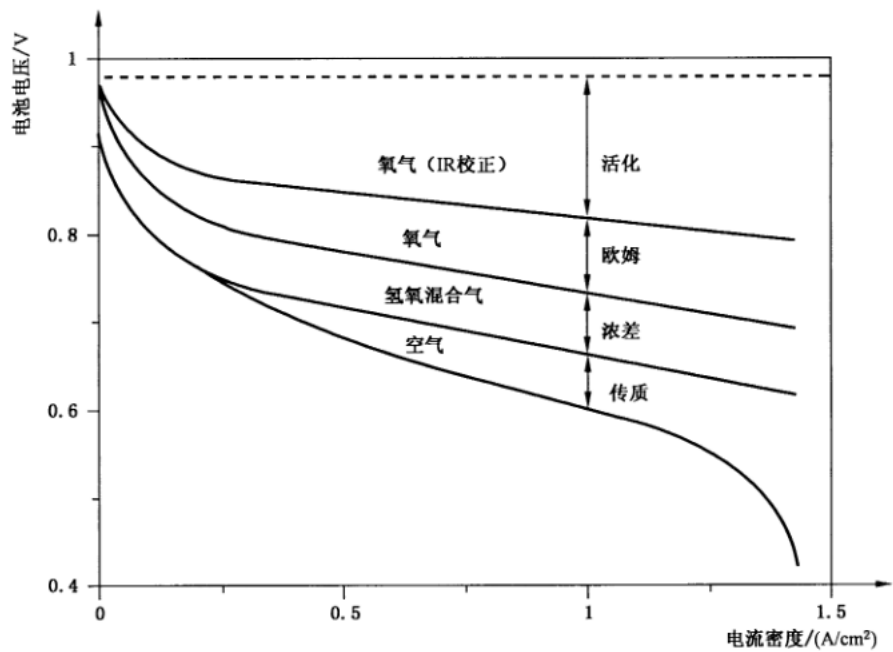


图 J.1 由氧气、氮氧混合气与空气下极化曲线的对比所得出的极化区间

附 录 K
(资料性)
零度以下启动测试报告

零度以下启动测试报告模板如下(见表 K.1 和表 K.2):

表 K.1 零度以下启动过程中的能量消耗、气体消耗及热平衡数据

项目	参数	测量值
零度以下启动时间	启动时间	
零度以下启动过程中的能量消耗	外部电能输入	
	外部热量输入	
气体消耗	燃料流量	
	氧化剂流量	
	进出口燃料温度差	
	进出口氧化剂温度差	

表 K.2 零度以下启动前后电池性能对比

参数		零度以下启动前	零度以下启动后	差异率%
安全性参数				
1	漏气			
2	渗氢			
操作参数				
1	额定输出功率			
2	峰值输出功率			

附 录 L
(资料性)
启停循环测试补充

典型的启停循环工况和运行时间如下：

循环遵循如下过程：

- a) 停止阶段=0 A/cm² 下停留 15 min；
- b) 启动阶段= I_{st} (A/cm²) 下停留 15 min (I_{st} : 额定电流密度)。

需要注意的是, 电流密度应逐步增高以防出现明显的电压降。电流应按照如下方式由 0 增至 I_{st} ：

- a) 25% I_{st} (A/cm²) 下停留 10 s；
- b) 50% I_{st} (A/cm²) 下停留 10 s；
- c) 75% I_{st} (A/cm²) 下停留 10 s；
- d) I_{st} (A/cm²) 下停留 14 min 30 s。

该步骤的停留时间取决于测试的具体目标以及特定的停止标准：固定的时间范围或固定的性能损失(如输出功率, 负载电压或开路电压)。

除特定的停止标准外, 当电池电压低于 0.3 V 或制造商规定的最低电压时, 测试应终止(气体、温控及负载均关闭), 以防对电池组件造成不可逆的损害。

附录 M
(资料性)
负载循环补充

典型的负载循环工况和测试时间如下：
建议该工况下选用两种电流密度，使电池在其间运行：一个为动态工况，持续时间 1 min，另一个为相对稳态工况，持续时间为 1 h。
开始循环测试前，为稳定操作条件，首次高功率阶段的电流密度应设定为 I_{st} (额定电流密度)。之后按照图 M.1 和图 M.2 两种电流密度工况中的一种进行负载循环测试。

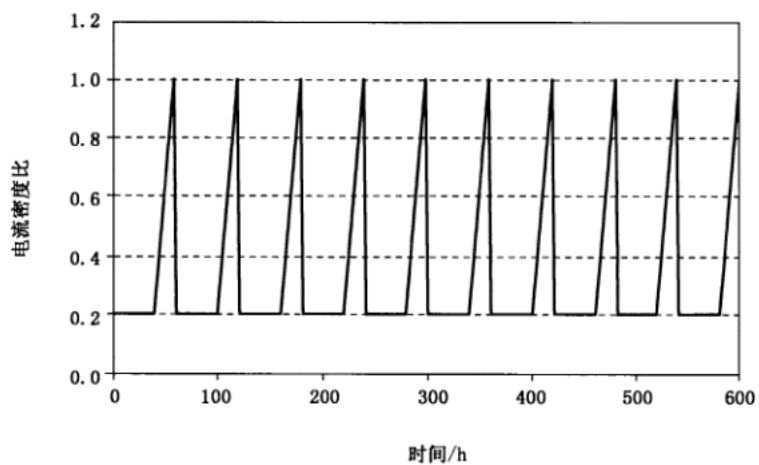


图 M.1 动态负载循环工况

该工况分为两部分：低电流密度区 = $0.2I_{st}$, 40 s；高电流密度区 = 电流密度由 $0.2I_{st}$ 升至 I_{st} , 20 s。

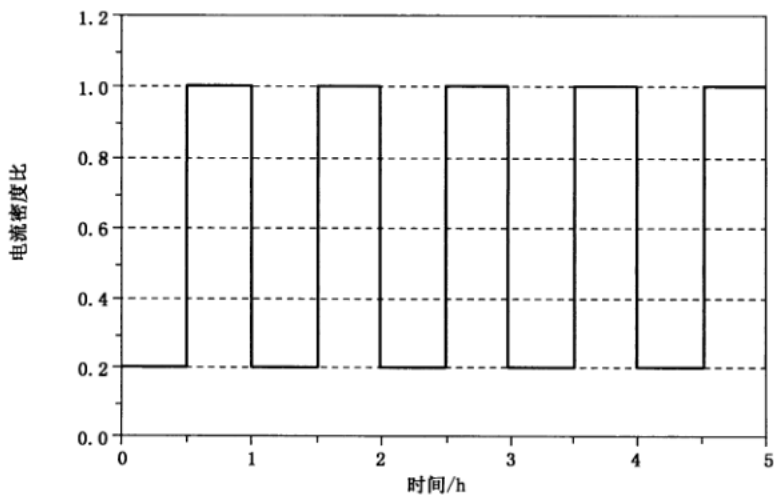


图 M.2 动态负载循环二

该工况分为两部分:低电流密度区 $=0.2I_{st}$ (A/cm^2) ($0.2I_{st}:I_{st}$ 的 20%), 30 min; 高电流密度区 $=I_{st}$, 30 min。

运行时间由运行条件和特定应用决定,可设定在 500 h 到 10 000 h 之间。

除规定的运行时间外,终止标准也可取决于测试目的,如设定的可接受性能损失(包括输出功率、低功率或高功率下的电压、或开路电压)。

除特定的停止标准外,当电池电压低于 0.3 V 或制造商规定的最低电压时,测试应终止(气体、温控及负载均关闭),以防对电池组件造成不可逆的损害。

若该测试为基于电压变化的形式(电压变化范围为 OCV 至最低电池电压),则 I 为输出参数。

图 M.3 所示为基于市内行驶情况所需的实际工况。满功率(100%功率)点取决于初始功率校准曲线及预定的电池极限和/或测试标准的设定。部分功率点可由该曲线决定,并在测试中按其对应的电流情况运行。

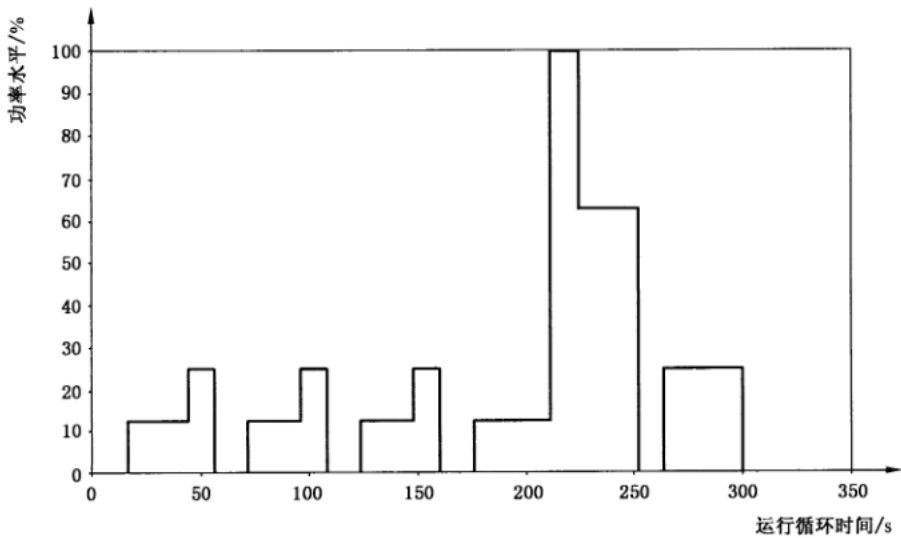


图 M.3 基于道路车辆工况的动态负载循环

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准

聚合物电解质燃料电池单电池测试方法
GB/T 28817—2022/IEC/TS 62282-7-1:2017

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

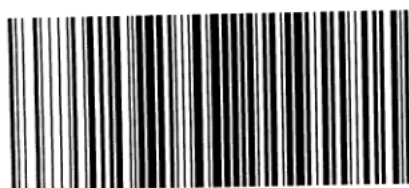
*

开本 880×1230 1/16 印张 4 字数 116 千字
2022年3月第一版 2022年3月第一次印刷

*

书号: 155066·1-69629 定价 68.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 28817-2022



码上扫一扫 正版服务到

