



中华人民共和国国家标准

GB/T 34582—2017/IEC TS 62282-7-2:2014

固体氧化物燃料电池单电池和 电池堆性能试验方法

Single cell and stack performance test methods for solid oxide fuel cells (SOFC)

[IEC TS 62282-7-2:2014, Fuel cell technologies—
Part 7-2: Test method—Single cell and stack performance
tests methods for solid oxide fuel cells (SOFC), IDT]

2017-09-29 发布

2018-04-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和符号	2
3.1 术语和定义	2
3.2 符号	4
4 常规安全条件	5
5 单电池/堆组合单元	5
6 测试系统	5
6.1 测试系统中的子系统	5
6.1.1 概述	5
6.1.2 阳极气体控制子系统	6
6.1.3 阴极气体控制子系统	6
6.1.4 单电池/堆组合单元温度控制子系统	6
6.1.5 输出功率控制子系统	6
6.1.6 测量与数据采集子系统	6
6.1.7 安全子系统	6
6.1.8 机械载荷控制子系统(机械载荷)	7
6.1.9 阳极与阴极的气体的压力控制子系统	7
6.1.10 测试系统控制子系统	7
6.2 测试系统的控制项的最大偏差	7
7 仪器与测量方法	7
7.1 概述	7
7.2 仪器不确定度	7
7.3 阳极气体	8
7.3.1 阳极气体流量	8
7.3.2 阳极气体成分	8
7.3.3 阳极气体温度	8
7.3.4 阳极气体压力	9
7.3.5 阳极尾气流量	9
7.3.6 阳极尾气成分	9
7.3.7 阳极尾气温度	9
7.3.8 阳极尾气压力	9
7.4 阴极气体	9
7.4.1 阴极气体流量	9
7.4.2 阴极气体成分	10
7.4.3 阴极气体温度	10

- 7.4.4 阴极气体压力 10
- 7.4.5 阴极尾气流量 10
- 7.4.6 阴极尾气成分 10
- 7.4.7 阴极尾气温度 10
- 7.4.8 阴极尾气压力 10
- 7.5 输出电压 11
- 7.6 输出电流 11
- 7.7 单电池/堆组合单元温度 11
- 7.8 机械载荷 11
- 7.9 总阻抗 11
- 7.10 环境条件 11
- 8 测试准备 11
 - 8.1 概述 11
 - 8.2 标准测试条件和测试范围 11
 - 8.3 阳极气体及阴极气体成分与杂质 12
 - 8.4 测试程序的基础 12
 - 8.5 单电池/堆组合单元活化条件的确认 12
 - 8.6 稳定状态判据的确认 12
 - 8.7 数据采集方法 12
- 9 测试步骤 13
 - 9.1 准备 13
 - 9.2 起始活化 13
 - 9.3 测试终止 13
- 10 性能测试 13
 - 10.1 额定功率测试 13
 - 10.1.1 目的 13
 - 10.1.2 测试方法 13
 - 10.1.3 结果报告 13
 - 10.2 电流-电压特性测试 14
 - 10.2.1 目的 14
 - 10.2.2 测试方法 14
 - 10.2.3 结果报告 14
 - 10.3 有效燃料利用率相关性测试 14
 - 10.3.1 目的 14
 - 10.3.2 测试方法 14
 - 10.3.3 结果报告 15
 - 10.4 耐久性测试 15
 - 10.4.1 目的 15
 - 10.4.2 测试方法 15
 - 10.4.3 结果报告 16
 - 10.5 热循环耐久性测试 16
 - 10.5.1 目的 16

10.5.2	测试方法	16
10.5.3	结果报告	17
10.6	内部重整性能测试	17
10.6.1	目的	17
10.6.2	测试方法	17
10.6.3	结果报告	17
10.7	电阻成分确认测试	18
10.7.1	目的	18
10.7.2	测试方法	18
10.7.3	结果报告	18
11	测试报告	19
11.1	概述	19
11.2	报告项目	19
11.3	测试单元数据描述	19
11.4	测试条件描述	20
11.5	测试数据描述	20
11.6	不确定度评估	20
附录 A (资料性附录)	单电池/堆组合单元示例	21
附录 B (资料性附录)	有效燃料利用率计算	22
附录 C (资料性附录)	有效氧气利用率计算	24
附录 D (资料性附录)	I - V 特性测试中电压滞后的最大宽度	26
附录 E (资料性附录)	在恒定有效燃料利用率情况下的电流-电压特性测试	27
附录 F (资料性附录)	测试报告(模板)	28
附录 G (资料性附录)	确定仪器不确定度的方法	34
	参考文献	35

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用翻译法等同采用 IEC TS 62282-7-2:2014《燃料电池技术 第 7-2 部分:测试方法 固体氧化物燃料电池(SOFC)单电池和电池堆性能测试》。

与本标准中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下:

——GB/T 5274—2008 气体分析 校准用混合气体的制备 称量法(ISO 6142:2001, IDT)

——GB/T 5275.7—2014 气体分析 动态体积法制备校准用混合气体 第 7 部分:热式质量流量控制器(ISO 6145-7:2009, IDT)

——GB/T 10628—2008 气体分析 校准混合气组成的测定和校验 比较法(ISO 6143:2001, IDT)

——GB/T 12700—1990 石油产品和烃类化合物 硫含量的测定 Wickbold 燃烧法(ISO 4260:1987, IDT)

——GB/T 13277.1—2008 压缩空气 第 1 部分:污染物净化等级(ISO 8573-1:2001, MOD)

——GB/T 16839.1—1997 热电偶 第 1 部分:分度表(idt IEC 60584-1:1995)

——GB/T 16839.2—1997 热电偶 第 2 部分:允差(idt IEC 60584-2:1982)

——GB/T 18404—2001 铠装热电偶电缆及铠装热电偶(idt IEC 61515:1995)

——GB/T 27759—2011 流体流量测量 不确定度评定程序(ISO 5168:2005, IDT)

——GB/T 27894(所有部分) 天然气 在一定不确定度下用气相色谱法测定组成[ISO 6974(所有部分)]

——GB/T 28816—2012 燃料电池 术语(IEC TS 62282-1:2010, IDT)

为了便于使用,本标准作了下列编辑性修改:

——修改了标准名称;

——10.7.3 中增加了注“典型的固体氧化物燃料电池负数阻抗谱图参见图 2”;

——11.6 中增加了注“参见附录 G”。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国燃料电池及液流电池标准化技术委员会(SAC/TC 342)归口。

本标准起草单位:中国矿业大学、上海交通大学、众宇氢能技术(荆州)有限公司、苏州华清京昆新能源科技有限公司、广东合即得能源科技有限公司、上海市质量监督检验技术研究院、机械工业北京电工技术经济研究所、中国科学院大连化学物理研究所、安徽省质量和标准化研究院、哈尔滨工业大学、清华大学、武汉理工大学、北京群菱能源科技有限公司、吉世尔(合肥)能源科技有限公司、华中科技大学。

本标准主要起草人:王绍荣、屠恒勇、韩敏芳、齐志刚、孙再洪、黄平、李松丽、卢琛钰、程谟杰、李赏、衣宝廉、胡慧庆、熊岳平、陈晨、李霞、张进滨、谢斌、李箭。

固体氧化物燃料电池单电池和 电池堆性能试验方法

1 范围

本标准规定了针对固体氧化物燃料电池单电池和电池堆(以下简称单电池/堆)组合单元的测试系统、仪器与测试方法,用于测试固体氧化物燃料电池单电池/堆的性能。

本标准不适用于小型钮扣电池。小型钮扣电池可被用于固体氧化物燃料电池材料测试,不能提供燃料利用率测量的实现方法。

本标准用于单电池/堆制造商与系统开发商之间商业交易中的数据交换,或用于采集单电池/堆的数据以评估基于此单电池/堆的系统的性能。本标准的使用者可从中选择一些适合他们目的的项目来执行测试。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60584-1 热电偶 第1部分:EMF规范及容差(Thermocouples—Part 1: EMF specifications and tolerances)

IEC 60584-2 热电偶 第2部分:允差(Thermocouples—Part 2: Tolerances)

IEC 60584-3 热电偶 第3部分:延长与补偿电缆—公差与鉴定系统(Thermocouples—Part 3: Extension and compensating cables—Tolerances and identification system)

IEC 61515 铠装热电偶电缆及铠装热电偶(Mineral insulated thermocouple cables and thermocouples)

IEC TS 62282-1:2013 燃料电池技术 第1部分:术语(Fuel cell technologies—Part 1: Terminology)

ISO 4260 石油产品和烃类化合物 硫含量的确定 Wickbold 燃烧法(Petroleum products and hydrocarbons—Determination of sulfur content—Wickbold combustion method)

ISO 5168 流体流量测量 不确定度评定程序(Measurement of fluid flow—Procedures for the evaluation of uncertainties)

ISO 6141 气体分析 标定气体与混合气体的合格证书要求(Gas analysis—Requirements for certificates for calibration gases and gas mixtures)

ISO 6142 气体分析 较准用混合气体的制备 称量法(Gas analysis—Preparation of calibration gas mixtures—Gravimetric method)

ISO 6143 气体分析 确定并检验标定用混合气体成分的比较方法(Gas analysis—Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures)

ISO 6145-7 气体分析 动态体积法制备较准用混合气体 第7部分:热式质量流量控制器(Gas analysis—Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods—Part 7: Thermal mass-flow controllers)

ISO 6974(所有部分) 天然气 在一定不确定度下用气相色谱法测定组成(Natural gas—Deter-

mination of composition with defined uncertainty by gas chromatography)

ISO 7066-2 流量测量装置校准与使用方面的不确定度的评估 第2部分:非线性校准关系(Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices—Part 2: Non-linear calibration relationships)

ISO 8573-1 压缩空气 第1部分:污染物和净化等级(Compressed air—Part 1: Contaminants and purity classes)

ISO 8756 空气质量 温度、压强与湿度数据处理(Air quality—Handling of temperature, pressure and humidity data)

ISO 12185 原油与石油产品 密度测定 振荡U型管法(Crude petroleum and petroleum products—Determination of density—Oscillating U-tube method)

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

IEC TS 62282-1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

单电池/堆组合单元 cell/stack assembly unit

单元包括单个电池或堆、供气部件、集流体部件,以及发电试验所需的其他外围设备。

3.1.2

活性电极面积 active electrode area

发生电化学反应的电极几何面积。

注:通常指阳极与阴极面积中的较小者。

3.1.3

电流密度 current density

电流除以活性电极面积。

3.1.4

平均电池电压 average cell voltage

单电池/堆组合单元的电压除以该单元中串联的单电池数。

3.1.5

标准温度和压力 normal temperature and pressure; NTP

分别是 0 °C 与 101.325 kPa。

3.1.6

阳极气体 anode gas

提供给单电池/堆组合单元阳极入口的气体。

注:该气体属于下述分类中的一种:

- a) 纯氢或以氢气作为主要成分的含水蒸气或氮气的混合气体;
- b) 固体氧化物燃料电池原燃料,如甲烷或煤油,预混水蒸气或空气进行重整得到的重整气;
- c) 包含氢气、水蒸气、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、氮气等为主要成分的模拟重整气;
- d) 甲烷、酒精和其他燃料,它们可以直接以纯物质形式提供或与水蒸气混合、空气混合、水蒸气及空气混合后提供。

3.1.7

阴极气体 cathode gas

提供给单电池/堆的阴极入口的气体。

注：氧气和氮气是其主要成分。

3.1.8

集流体 current collector

在燃料电池中收集阳极侧电子或向阴极侧提供电子的导电材料。

3.1.9

稳定状态 stable state

单电池/堆组合单元的一种状态,在该状态下单元的任一控制参数与输出电压或输出电流足够稳定并保持在公差范围内。

3.1.10

理论电流 theoretical current

以阳极气体或阴极气体在电化学反应中完全消耗时所应当达到的电流除以单元内串联的单电池数。

3.1.11

有效燃料利用率 effective fuel utilization

单电池/堆组合单元的实际输出电流除以基于燃料流量的理论电流。

注 1: 导致实际电流小于最佳电流的因素包括单电池/堆组合单元内电子传导引起的损耗、气体泄漏,以及阳极气体的无反应通过。

注 2: 有效燃料利用率的计算方法在附录 B 中给出。

3.1.12

有效氧气利用率 effective oxygen utilization

单电池/堆组合单元的实际输出电流除以基于氧气流量的理论电流。

注: 有效氧气利用率的计算方法在附录 C 中给出。

3.1.13

最大有效燃料利用率 maximum effective fuel utilization

在可接受的衰减率前提下,单电池/堆单元能够运行的最高有效燃料利用率。

注: 可接受的衰减率指标通常由开发商提供。

3.1.14

最小单电池/堆组合单元电压 minimum cell/stack assembly unit voltage

制造商规定的最低的单电池/堆组合单元电压。

3.1.15

开路电压 open circuit voltage; OCV

燃料电池有阳极气(燃料)和阴极气(氧化剂)但没有外部电流时的端电压。

注: 也称为无负载电压。

3.1.16

功率密度 power density

单电池/堆组合单元的功率除以其有效电极面积。

注: 功率密度由电压与电流密度相乘获得($P_d = V \times J$, 其中 J 是电流密度)。

3.1.17

总阻抗 total impedance

由欧姆电阻、活化极化和浓差效应所导致的与频率有关的损失。

3.1.18

总电阻 total resistance

总阻抗低频极限时的实部,其相当于 $I-V$ 曲线的切线斜率。

3.1.19

化学计量比 stoichiometric ratio

单位时间内流过的反应气体摩尔数除以电化学反应所需要的摩尔数。

注：术语“化学计量比”为“反应气体利用率”的倒数。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

表 1 定义了本标准中使用的符号与单位。

表 1 符号

符号	定义	单位
a	仪器说明书中标明的误差极限	**
f_a	阳极气体流量	L/min(NTP)
f_c	阴极气体流量	L/min(NTP)
f_j	阳极气体中第 j 个成分的流量	L/min(NTP)
I	电流	A
J	电流密度	A/cm ²
n	转移电子数	
N	串联的单电池数	
p_a	阳极气体的绝对压力	kPa
p_c	阴极气体的绝对压力	kPa
P	输出功率	W
P_d	输出功率密度	W/cm ²
t	时间	s, min, h
T_{op}	单电池/堆组合单元的工作温度	°C
u_1	所有仪器的组合标准不确定度	**
$u_{1,i}$	第 i 个仪器的标准不确定度	**
U_f	有效燃料利用率	%
U_{O_2}	有效氧气利用率	%
U_1	扩展的仪器不确定度	**
V	电压	V
x_i	组分 i 的归一化摩尔分数	mol%
x_i^*	组分 i 的非归一化摩尔分数	mol%
ζ_j	碳氢化合物组分 j 的碳氢化合物转化率	%

**此处的单位取决于各说明书。

4 常规安全条件

运行中的燃料电池使用氧化性气体和可燃性气体。这些气体通常储存在高压容器内,燃料电池本身可能在高于大气压下运行。进行单电池/堆组合单元测试的人员应接受训练并具备测试系统的操作经验,特别是在涉及电气设备和具有反应活性的压缩气体的安全规程方面。

测试人员负责收集并遵循所有的现行安全规范,还应具备与测试系统、设施、燃料(特别注意压缩气体)以及废弃物相关的普遍认可的工程实践经验。

测试时使用的材料应与反应气体的存储和使用相匹配,应遵守涉及氢气、碳氢化合物以及一氧化碳的地方安全规范与标准。

总之,安全地操作测试台需要适当的技术训练与经验,还需配备安全设施与设备,所有这些都不在本标准的范围之内。

5 单电池/堆组合单元

一个单电池/堆组合单元包括一个单电池或堆、气体供应、电流引线以及发电测试所需的其他设备。还应具备单个或多个温度和电压测量点,一套电流引出点,所有这些都应由制造商明确说明。

一个单电池/堆组合单元的边界界面包括阳极进气口、阴极进气口、温度测量点、电流引出点、电压测量点以及机械载荷着力点,参见附录 A。

一些单电池/堆组合单元可能因为电池的构造而没有阳极排气口或阴极排气口。在这种情况下,气体流场形式及其材料应依据制造商推荐的方法确定,机械载荷施加方法也应基于制造商的建议。不应超过制造商提供的最高工作温度。

如果单电池/堆制造商没有明确单电池/堆组合单元中的其他部件,在测试报告中至少应当描述如下事项:

- a) 用于测试的外围部件的材料与尺寸;
- b) 阳极与阴极气体的流道结构与流动方向;
- c) 温度测量、机械载荷施加、电压测量以及电流引出的位置;
- d) 机械载荷的大小;
- e) 组合单元构造及其组合方法。

6 测试系统

6.1 测试系统中的子系统

6.1.1 概述

如图 1 所示,测试系统包括阳极气体控制子系统、阴极气体控制子系统、单电池/堆组合单元温度控制子系统、输出功率控制子系统、测量与数据采集子系统以及安全子系统。此外还可能包括机械载荷控制子系统、阳极气体与阴极气体压力控制子系统和/或一个根据需要而设置的能控制整个测试系统的控制子系统。

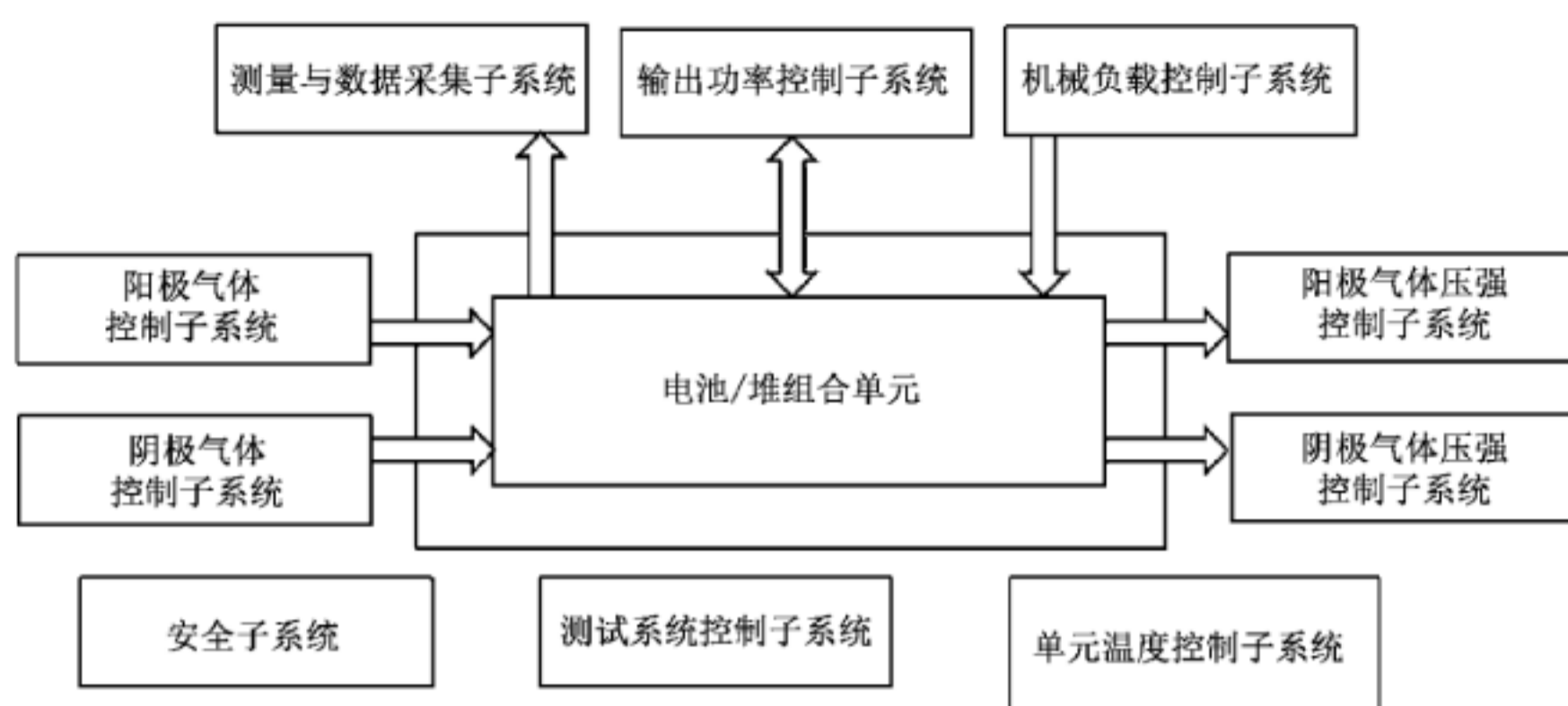


图 1 测试系统

6.1.2 阳极气体控制子系统

阳极气体控制子系统控制供应给单电池/堆组合单元的阳极气体的流量、成分以及温度。如果要保持整个管路中气体成分稳定,需要考虑管路的材料、温度、内径以及长度。如有必要,管路需加热和/或绝热保温,以防水蒸气凝结。

应注意防止其他现象,比如碳沉积,以及气流中不希望有的物质(如铬)的挥发与迁移。

6.1.3 阴极气体控制子系统

阴极气体控制子系统控制供应给单电池/堆组合单元的阴极气体的流量、成分以及温度。

应注意防止其他现象,比如气流中不希望有的物质(如铬)的挥发与迁移。

6.1.4 单电池/堆组合单元温度控制子系统

单电池/堆组合单元温度控制子系统至少控制电炉温度或单元温度,以维持运行温度。电炉应适当选择,保证温度分布在规定的容差水平内。应尽量减少电炉供热时产生的电噪音。为了简单和安全起见,假设所有的测试系统都使用电炉。

6.1.5 输出功率控制子系统

输出功率控制子系统控制单电池/堆组合单元的输出电流或输出电压。

6.1.6 测量与数据采集子系统

测量与数据采集子系统通过规定的方法采集并记录单电池/堆组合单元温度、电流、电压、阳极气体流量、阴极气体流量,并选择性地记录环境状态(室温、相对湿度以及大气压)。如有需要,也可通过规定的方法采集并记录施加于电池的机械载荷、阴极气体和阳极气体的温度、成分和压力;阳极与阴极尾气的流量、成分、温度和压力;以及单电池/堆组合单元的阻抗数据等。

6.1.7 安全子系统

安全子系统对测试系统的故障起到探测与报警的作用,故障的判断是基于预设的参数和阈值。如果其检测到严重故障,它将自动在测试系统中建立起安全状态。阳极应该应用诸如氮气之类的惰性气体来吹扫,其也可以含有低于可燃极限浓度的氢气。

6.1.8 机械载荷控制子系统(机械载荷)

作为选项,机械载荷控制子系统用来调节机械载荷,增加单电池/堆组合单元内组件之间的接触。该子系统应满足在测试条件下需要施加的机械载荷,并在长期运行时保持该荷载。

6.1.9 阳极与阴极的气体的压力控制子系统

作为客户选项,阳极与阴极气体的气压控制子系统通过使用背压控制阀等来调节所用气体的压力。

6.1.10 测试系统控制子系统

测试系统控制子系统为每个控制子系统与数据采集子系统提供整体控制。

6.2 测试系统的控制项的最大偏差

测试系统中的每一控制项的最大偏差应控制在如下范围内:

在电流控制情况下: 电流:额定值的 $\pm 1\%$

在电压控制情况下: 电压:设定值的 $\pm 1\%$

温度: 设定值的 $\pm 1.0\%$

注 1: 温度偏差小于设定点 $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 利于获得好的重现性。

阳极与阴极气体流量: 额定值的 $\pm 1\%$

阳极气体成分: 对于 H_2 、 N_2 , $\pm 2.0\text{ mol}\%$

对于 CO 、 CO_2 、 CH_4 , $\pm 2.0\text{ mol}\%$

对于 H_2O (水蒸气浓度), $\pm 5.0\text{ mol}\%$

在鼓泡/喷雾加湿时: 露点温度 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$

注 2: 在水蒸气浓度大于 $10\text{ mol}\%$ 时,鼓泡系统(喷雾)可能导致更高的不确定度。

阴极气体成分: 目标氧气浓度的 $\pm 1.0\text{ mol}\%$

当阳极气体与阴极气体的压力需要控制时,阳极气体与阴极气体的压力控制在:

额定状态的 $\pm 1\%$ (当额定条件的压力等于或大于 0.3 MPa 时)

3 kPa (当额定条件的压力小于 0.3 MPa 时)

7 仪器与测量方法

7.1 概述

测量仪器应满足 7.2 的要求。至少应测量阳极与阴极气体的流量和成分,以及单电池/堆组合单元的温度、电压和电流。其他的测量应基于测试参数和/或测试条件。7.3 和 7.4 所述的一些参数在单电池/堆组合单元没有阳极或阴极尾气出口的情况下可能是不可测试的。

7.2 仪器不确定度

校准时每个测量仪器的扩展不确定度(包含因子 $k=2$)或从仪器等级评估获得的扩展不确定度需符合如下的要求:

注: 包含因子的定义参见 ISO/IEC 指南 98-3。

电流: 额定值的 $\pm 1\%$

电压: 开路电压的 $\pm 0.5\%$

温度: 读数的 $\pm 1.0\%$

阳极与阴极气体的流量: 额定值的 $\pm 2\%$

阳极与阴极气体的压力:	读数的±1%
阳极气体成分:	对于 H ₂ 、H ₂ O、N ₂ , ±2 mol%
	对于 CO、CO ₂ 、CH ₄ , ±1 mol%
阴极气体成分:	O ₂ 浓度的±0.3 mol%(以 N ₂ 稀释)

7.3 阳极气体

7.3.1 阳极气体流量

阳极气体流量应用质量流量计、体积流量计或涡轮型流量计测量。选择流量计时应考虑到所供应气体的种类、流量范围以及流量计的允许不确定度。当测量是基于体积时,应通过测量流量计附近的气体温度与压力或气体密度来换算成质量流量。干气体的测量不确定度应参照 ISO 5168、ISO/TR 7066-1¹⁾ 或 ISO 7066-2 进行评估。

7.3.2 阳极气体成分

阳极气体的成分应当在进行单电池/堆组合单元性能测试时进行分析。如果这不现实,可在与电池性能测试同样条件的准备阶段进行分析。

当阳极气体是下述 a)~d) 的情形供给时,且如果气体输送管线内没有反应器,比如重整器,从而确信在成分方面没有显著改变时,其成分可以用气体供应商发布的成分表,以及从每一流量计中得到的值来进行计算,参照 ISO 6145-7:

- a) 供给单一成分气体,如氢气;
- b) 供给已知成分的混合气体;
- c) 阳极气体是使用多个流量计,以可控方式提供的混合组分气体;
- d) 阳极气体是以 b) 和 c) 的组合方式所提供的气体。

应在单电池/堆组合单元的阳极气体进口对阳极气体进行取样并使用红外光谱仪、质谱仪、气相色谱仪或类似的设备进行分析。气体样品应以成分改变最小化的方式从其取样地点转移到分析地点。因此,应认真选择样品管的材料、温度、直径以及长度,以使气体在样品管中的成分改变最小。必要时,应加热以避免水蒸气的凝结。

如果水蒸气可能影响测量,去除气体样品中的水分或用氩气或相似的惰性气体稀释气体样品。

气体成分 *i* 的这种分析的结果,表达为 x_i^* (mol%)(非归一化浓度),应使用式(1)进行归一化以获得归一化浓度 x_i (mol%):

$$x_i = 100 \frac{x_i^*}{\sum_w x_w^*} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$\sum_w x_w^*$ ——分析中所有组分气体的非归一化浓度的总和。

气体分析仪应使用已知质量比的标准气体校准。

测量的不确定度应根据 ISO 6974 系列、ISO 6141、ISO 6142 或 ISO 6143 评估。

7.3.3 阳极气体温度

气体温度应在单电池/堆组合单元的阳极气体进气口处测量,所使用的热电偶或铠装热电偶及其延长导线的类型和种类应符合 IEC 60584-1、IEC 60584-2、IEC 60584-3 或 IEC 1515。当有诸如重整器之类的反应器时,反应器出口的气体温度也应测量。

1) 已撤销。

注：管壁的温度和气流本体的温度可能有显著差异。

如果难以在电池性能测试期间测量气体温度，阳极气体温度应在性能测试的准备期间在与性能测试相同的条件下测量。

7.3.4 阳极气体压力

阳极气体压力应在单电池/堆组合单元的阳极气体进气口的上游用校准的压力传感器、压力计、波尔东管(Bourdon tube)或类似的仪器测量。测量仪器的设置要考虑到管路内的任何压力损失、管路温度以及其他因素，应使不确定度最小化。测量期间应注意防止水蒸气的凝结。方法之一是在测量气体压力时在靠近测量仪器的气管中注入非常少量的干燥氮气或类似气体。

7.3.5 阳极尾气流量

阳极尾气流量应在采用某种方式防止水的凝结影响阳极气流的稳定性的情况下，或从气流中去除水分之后，使用质量流量计、体积流量计或涡轮式流量计进行测量。当测量是基于体积时，应通过测量流量计附近的气体温度与压力或气体密度来转换成质量流量。作为替代方法，阳极尾气流量可通过精确添加少量阳极尾气中不含的气体作为示踪气体，从阳极尾气组分浓度、示踪气体浓度与示踪气体流量计算得到。气体分析仪应使用已知质量比的标准气体进行标定。测量的不确定度应根据 ISO 6974 系列、ISO 6141、ISO 6142 或 ISO 6143 进行评估。

出于安全与环境考虑，尾气应小心处理，因其可能还含有氢气、一氧化碳和碳氢化合物。

7.3.6 阳极尾气成分

阳极尾气应在单电池/堆组合单元的阳极排气口附近采样。样品应用红外分光光度计、质谱仪、气相色谱仪或类似仪器分析。如果水蒸气影响测量效果，从气体样品中去除水分或用氩气之类的气体稀释样品。测量时，应注意选择管路材料、温度、内径以及管长以确保管内气体成分没有任何明显的改变。特别是，如有必要，应加热管路以防止管内水蒸气凝结。气体分析仪应使用已知质量比的标准气体进行标定。

7.3.7 阳极尾气温度

气体温度应在单电池/堆组合单元的阳极排气口附近测量，选择的热电偶或铠装热电偶以及延长线的类型与种类应符合 IEC 1515、IEC 60584-1、IEC 60584-2、IEC 60584-3。如果在电池性能测试期间难以测量气体温度，阳极尾气温度应在性能测试的准备期间在与性能测试相同的条件下进行测量。

注：管壁的温度和气流本体的温度可能显著不同。

7.3.8 阳极尾气压力

阳极尾气压力应用压力传感器、压力计、波尔东管或类似的仪器在单电池/堆组合单元的阳极排气口的下游进行测量。测量仪器的设置应考虑管路内的任何压力损失、管路(气体)温度以及其他因素，应使不确定度最小化。测量期间应注意防止水蒸气的凝结。方法之一是测量压力时在靠近测量仪器的管路注入非常少量的干燥氮气或类似气体。

7.4 阴极气体

7.4.1 阴极气体流量

阴极气体流量应用质量流量计、体积流量计或涡轮型流量计来测量，当测量是基于体积时，应通过测量流量计附近的气体温度与压力或气体密度来转换成质量流量。流量计的选择应考虑到预期的流量

范围和流量计的许可的不确定度。不确定度应根据 ISO 5168、ISO/TR 7066-1²⁾ 或 ISO 7066-2 进行评估。

7.4.2 阴极气体成分

对于阴极气体成分,氧气浓度应使用气相色谱仪或氧气浓度计测量。阴极气体可以是清洁的(无油)压缩空气或瓶装气体。如果使用瓶装混合气体,可使用气体制造商发布的成分证书上的数值。仪器不确定度应根据 ISO 6974 系列,ISO 6141、ISO 6142、ISO 6143 或 ISO 6145-7 进行评估。

如有必要测量湿度,应在控制气体温度以防止水蒸气凝结的情况下,使用露点计、水分计或气相色谱仪进行测量。

7.4.3 阴极气体温度

气体温度应在单电池/堆组合单元的阴极气体进气口附近测量,使用的热电偶或铠装热电偶以及延长导线的类型与种类应符合 IEC 60584-1、IEC 60584-2、IEC 60584-3 或 IEC 61515。

注:管壁温度和气流本体之间的温度可能有显著差异。

如果难于在电池性能测试期间测量气体温度,阴极气体温度应在性能测试的准备期间在与性能测试相同的条件下测量。

7.4.4 阴极气体压力

阴极气体压力应在单电池/堆组合单元的阴极气体进气口的上游用压力传感器、压力计、波尔东管或类似的仪器测量。测量仪器的设置应考虑到管路内的任何压力损失、管路温度以及其他因素,应使不确定度最小。

7.4.5 阴极尾气流量

阴极尾气流量应在尾气冷却之后使用质量流量计、体积流量计或涡轮式流量计进行测量。当测量是基于体积时,应通过测量流量计附近的气体温度与压力或气体密度来转换成质量流量。流量计的选择应考虑到预期的流量范围和允许的仪器不确定度。仪器不确定度应根据 ISO 6974 系列、ISO 6141、ISO 6142、ISO 6143 或 ISO 6145-7 进行评估。

7.4.6 阴极尾气成分

对于阴极尾气成分,氧气浓度应在气体冷却之后使用气相色谱仪或氧气浓度计测量。如有必要测量极低的水汽浓度,应在调控气体温度以防水蒸气凝结的条件下,使用露点计、水分计或气相色谱仪进行测量。

7.4.7 阴极尾气温度

阴极尾气温度应在单电池/堆组合单元的阴极排气口附近测量,选择的热电偶或铠装热电偶以及延长导线的类型与种类应符合 IEC 60584-1、IEC 60584-2、IEC 60584-3 或 IEC 61515。如果在电池性能测试期间难以测量气体温度,阴极尾气温度应在性能测试的准备期间在与性能测试相同的条件下进行测量。

注:管壁温度和气流本体之间的温度可能有显著差异。

7.4.8 阴极尾气压力

阴极尾气压力应使用压力传感器、压力计、波尔东管或类似的仪器在单电池/堆组合单元的阴极排

2) 已撤销。

气口的下游进行测量。测量仪器的设置方式应考虑到管路内的任何压力损失、管路(气体)温度以及其他因素,应使不确定度最小。

7.5 输出电压

电压表应连接到如第 5 章述的电压测量点。依此测量的电压应视为单电池/堆的电压。连接电缆在测试条件下应经久耐用。应注意连接处的热电势。

7.6 输出电流

输出电流的测量应使用恒流计,或连接到第 5 章所述的电流引出点的电子负载和/或位于电路中的分流电阻之类的电流传感器,其输出发送到测量/记录仪器。连接电缆的材料与几何尺寸选择,应考虑到测试条件和电缆内的可能的电压降。

7.7 单电池/堆组合单元温度

合适的热电偶或铠装热电偶以及外部引线的类型与种类应依照 IEC 60584-1、IEC 60584-2、IEC 60584-3 或 IEC 61515 进行选择。热电偶应置于第 5 章所述的温度测量点并与测量用记录器或类似仪器连接。当有多个测量点时,单电池/堆组合单元温度及其分布应按制造商推荐的计算方法获得。

7.8 机械载荷

应测量按制造商推荐施加的机械载荷。

7.9 总阻抗

单电池/堆组合单元的总阻抗应通过交流阻抗法或电流中断法进行测量。应使用适当的测量导线以确保在整个测量的频率范围内得到高质量的数据。

7.10 环境条件

在定义环境条件时,应测量环境温度、大气压强以及相对湿度。采样间隔时间应是 ISO 8756 中的规定值或更短。

8 测试准备

8.1 概述

应确定待测单电池/堆组合单元的类型、样品数量、测试参数以及测试条件。

应检查每个测量仪器的最后校准日期,在校准情况下的或从仪器等级估算的不确定度,以及不确定度与环境条件的相关性,以评估仪器的不确定度。应设定校准的方法与校准周期,以及仪器的更换周期,以确保测量的不确定度没有增加。

应确认阳极与阴极气体的成分及其主要杂质。如第 7 章所述,气体成分与温度应预先测试,以确保气体成分稳定在预期的不确定度之内,且所供应气体的温度没有影响单电池/堆单元温度。再次,测试程序、测试条件、稳定状态的判断标准等,应基于预测试结果和其他因素来确定。

8.2 标准测试条件和测试范围

针对如下参数,应审阅制造商推荐的标准测试条件与典型测试范围,以确定测试条件和范围:

- a) 单电池/堆组合单元温度;
- b) 许可的单电池/堆组合单元温度分布(如果有多个测量点);

- c) 阳极气体流量;
- d) 阳极气体成分;
- e) 阳极气体压力;
- f) 阴极气体流量;
- g) 阴极气体成分;
- h) 阴极气体压力;
- i) 有效燃料利用率;
- j) 有效氧气利用率;
- k) 电流或电流密度;
- l) 最低单电池/堆组合单元电压;
- m) 最小单电池/堆组合单元电流(在恒定有效燃料利用率情况下;最小操作负载下,更多信息参见附录 E);
- n) 最大单电池/堆组合单元电流(在恒定有效燃料利用率情况下);超过此值可能由于过度衰减而导致单电池/堆组合单元损坏;
- o) 机械载荷。

8.3 阳极气体及阴极气体成分与杂质

如果使用多种气体来配制阳极气体,则各原料气体的纯度等级或成分以及主要杂质应依据相应的气体生产商公布的成分表或通过分析加以核实。当阳极气体由液态燃料制得时,应通过燃料制造商公布的成分表或依照 ISO 12185 或 ISO 4260 进行分析来核实其密度、其碳、氢、氧含量以及诸如硫之类的杂质含量。

阴极气体的纯度或成分与主要杂质应依据气体生产商公布的成分表或通过分析加以核实。如果使用压缩机,应根据 ISO 8573-1 确保压缩空气中没有油与颗粒。

每一核对或分析的结果应记录在测试报告中。

8.4 测试程序的基础

测试的起始条件,诸如加热速率、升温过程中的环境条件、阳极状态(即氧化镍还原为镍的程度)和测试终止条件,诸如冷却速率、降温过程中的环境状态等,应基于制造商的推荐或预测试结果设定。

8.5 单电池/堆组合单元活化条件的确认

单电池/堆组合单元的活化条件应基于制造商推荐的活化条件以及预测试来确定,以确保测试时的输出漂移不明显。

8.6 稳定状态判据的确认

应确定单电池/堆组合单元的输出电流或输出电压的允许偏差,而稳定状态的判断标准应通过预测试和其他方法来确定。

稳定状态的判断标准应在测试报告中注明。

8.7 数据采集方法

当考虑每个测试参数的变化范围与每个测量仪器的采样速率等诸如此类的问题时,应进行预测试,以确定采样间隔时间以及采样数量和测量的次数。采样间隔时间(例如 1 s)应足够短以便以足够的时间分辨率观察测量参数的变化。应确定单个测量的采样数与重复次数,以使总的测量周期远大于每个测量参数显著变化时的周期。

9 测试步骤

9.1 准备

测试应按如下步骤准备：

- a) 检查每个控制或测量子系统的可能泄漏。有许多方法用于泄漏测试，如压力保持法和氦气泄漏探测法。方法的选择取决于所使用的设备。测试设备操作的合理性应通过将其性能与 7.2 规定的参数对比来进行核实；
- b) 根据制造商推荐的组装方法与步骤，准备一个由电池、气体通路、连接板、集流体、绝缘体以及其他部件组成的单电池/堆组合单元。在连接单电池/堆与测试台之前，测量阴极与阳极电流引出点之间的电阻来检测是否短路。测量电池电压监测点之间的电阻来确定是否电绝缘。测量电池之间的电阻。这些测量值不应显示短路，且应与制造商规定的值相近；
- c) 将单电池/堆组合单元放于温度控制子系统中，然后连接电压测量、电流引出线、装上机械载荷、热电偶，并连接气体输入与排出管。连接导线到相应的子系统。确保热电偶与单电池/堆之间的绝缘。机械载荷与单电池/堆之间也应绝缘；
- d) 检查气体管路连接是否泄漏[见 9.1.a)]；
- e) 如有需要，核实线路对地绝缘。建议在连接输出控制子系统或测量子系统之前检查电绝缘。此外，应核实连接处布线的合理性；
- f) 当以上工作均完成后，检查测量子系统是否运行正常。

9.2 起始活化

单电池/堆组合单元应在 8.4 所述的升温速率与环境条件下启动并经过阳极还原与活化之后运行至稳定状态。

9.3 测试终止

终止步骤应在 8.4 所确定的降温速率与环境条件下启动。除非另有规定，应在使用者基于预测试结果或制造商的指导而确定的条件下进行降温。降温期间，保持空气极的空气流并用氮气(或其他惰性气体)稀释的氢气流通过燃料极。此燃料极混合气体中的氢气浓度应低于爆炸下限。

10 性能测试

10.1 额定功率测试

10.1.1 目的

本测试的目的是测量并核实在额定条件下单电池/堆组合单元的输出。

10.1.2 测试方法

所有的控制参数应设置在额定条件下，在单电池/堆组合单元到达稳定状态后，应以某一采样间隔反复测量电压、电流和其他控制参数直到采样数与测量次数达到 8.7 所述的要求。测量的平均值应是测量的值。作为选项，应包含测量的标准偏差。

10.1.3 结果报告

测量结果将被用来计算额定功率输出并与电压、电流以及其他表示测试条件的测量值一起记录在

测试报告中。

10.2 电流-电压特性测试

10.2.1 目的

测试的目的是确定电流-电压特性曲线与温度、压力、气体成分、气体流量或有效气体利用率的相关性。

10.2.2 测试方法

10.2.2.1 恒定流量下的测试

需要测试相关性的控制参数应设置在其起始值,同时阳极气体与阴极气体流量以及其他控制参数应设置为测试条件规定的值。单电池/堆单元应在开路条件下运行到稳定状态后,通过阶梯式改变电流或电压或以恒定速率扫描来测量电流-电压(I - V)特性。测量之后,控制参数设置为下一值并在 8.2 中规定的测量范围内重复测量:

- a) 当阶梯式改变电流进行测试时,单电池/堆组合单元应在每个电流值下达到稳定状态(温度和电压),并且在每一步,测量应按 8.7 所述的采样间隔在该步时间段内反复进行,这些测量的平均值应是其对应电流下的测量值;
- b) 当使用电流扫描测量时,扫描速率的确定应保证电压滞后的最大宽度不超过稳定状态的电压偏差;
- c) 当采用控制电压时,步骤 a)或 b)分别采用阶梯电压或电压扫描进行。

注:电压滞后的最大宽度的意思参见附录 D 所释。

10.2.2.2 在恒定的有效燃料和/或氧气利用率,或恒定的化学计量比下测试

需要测试相关性的控制参数设置在其起始值而有效燃料利用率和/或有效氧气利用率及其他控制参数应设置在 8.2 中给出的测试运行条件下。单电池/堆单元应在制造商规定的最小电流下运行直到稳定状态。通过阶梯式改变电流或电压测量电流-电压特性。单电池/堆单元应在每一步运行到稳定状态,在该步期间内,按 8.7 所述的采样速率进行反复测量。这些测量的平均值应是那一步的测量值。测量之后,控制参数设置为下一个值并在 8.2 所规定的测量范围内反复测量。

附录 E 给出了在恒定有效燃料利用率情况下的 I - V 特性测试的记录示例。

10.2.3 结果报告

测试结果应以二维图描述,其中横轴代表电流密度或有效燃料利用率,或二者的组合,而纵轴代表单电池/堆组合单元的电压。此图与其他测试条件应包括在测试报告中。电池堆电压也可代之以所测的各个电池电压或平均电池电压,对电流密度作图。作为选项,测量的标准偏差也可包括在报告之内。

10.3 有效燃料利用率相关性测试

10.3.1 目的

本测试的目的是研究单电池/堆组合单元性能与有效燃料利用率的相关性,并在不同运行条件下确认最大的有效燃料利用率。

10.3.2 测试方法

10.3.2.1 概述

最大燃料利用率,以及其实现的运行条件应从制造商获得或由制造商与评估者之间磋商确定。

测试应通过在恒定电流情况下降低阳极气体流量或在恒定阳极气体流量情况下增加电流来进行。

10.3.2.2 在恒定电流下测试

应执行下述步骤：

- a) 将单电池/堆组合单元设置于 8.2 规定的测试条件下,运行,确认其达到稳定状态;
- b) 阶梯式地降低阳极气体流量直到单电池/堆组合单元达到制造商确定的最大有效燃料利用率。对于每一步,确保电压达到稳定状态并记录;
- c) 当燃料利用率达到最大有效值时,使阳极气体流量阶梯式地增加并恢复到初始值并记录电压。该电压与试验前的电压进行对比,可以提供依据得以判断最大燃料利用率是否能够在该单电池/堆组合单元上实现,哪怕只是很短时间,这一点与 10.4 所述不同。

10.3.2.3 在恒定阳极气体流量下测试

应执行下述步骤：

- a) 设置单电池/堆组合单元到规定的测试条件下,运行,确认其达到稳定状态;
- b) 阶梯式地增加电流直到单电池/堆组合单元达到最大有效燃料利用率。对于每一步,确保电压达到稳定状态并记录;
- c) 当燃料利用率达到最大有效值时,使电流阶梯式地减小,恢复到初始值并记录电压。该电压与试验前的电压进行对比,可以得到该单电池/堆组合单元在短时间内达到最大燃料利用率的信息。这与 10.4 所述不同。

中止测试的判据应通过预测试或与制造商磋商而预先确定,旨在防止单电池/堆组合单元的性能衰减或损坏。

10.3.3 结果报告

测试结果以二维图表示,按 10.3.2.2 的测试条件,横轴表示为有效燃料利用率,或阳极气体流量与有效燃料利用率二者的组合;如按 10.3.2.3 的测试条件,横轴为有效燃料利用率,或电流密度与有效燃料利用率二者的结合,而纵轴代表单电池/堆组合单元电压。此图与其他测试条件应包括在测试报告中。

电池堆单元电压可用平均电池电压替代,实测的各电池电压也可以和电流密度作图。

10.4 耐久性测试

10.4.1 目的

本测试的目的是评估单电池/堆组合单元在长期处于某一测试条件下的性能衰减,以及检验温度、电流、气体成分、气体中的杂质以及其他因素对单电池/堆组合单元耐久性的影响。

10.4.2 测试方法

10.4.2.1 概述

本测试应在测试期间保持测试条件恒定的条件下进行,既可以是测试恒电流下的单电池/堆单元电压变化,也可以是与总电阻一起测量电压的变化,总电阻应通过 10.2 中的 $I-V$ 曲线或 10.7 中的阻抗谱在一确定时间期间测试(100 h~500 h)。

10.4.2.2 电压变化测试

将所有的控制参数设置在规定的测试条件下,并按固定的时间间隔测量单电池/堆组合单元电压。所测得的值将用来获得整个测试期间或某个特定时间段的电压变化速率。

10.4.2.3 电压和总电阻变化测试

该测试可以在 10.4.2.2 的测试期间进行。使用如下方法来测量总电阻:

- a) 从 0 电流到 8.2 所定义的最大电流值之间测量完整的 $I-V$ 特性曲线,或在某一固定电流值附近测量局部的 $I-V$ 性能,二者的测量方式按照 10.2 中所述;
- b) 通过在固定电流值附近连接 $I-V$ 曲线上的两点,得到该电流值下 $I-V$ 曲线的近似切线及其斜率,以此斜率为总电阻;
在固定电流值附近选点时需要仔细,如果 $I-V$ 曲线的曲率大,选点需要更靠近固定电流值。电压、电流测量的不确定度需要尽可能地小;
- c) 测量 $I-V$ 曲线之后,将测试条件回归到初始值,并测量电压直到下一个测量周期;
- d) 在整个测试期间以一定的时间间隔重复这一测量。

测量结果应用来计算整个测试期间或测试期间内的特定时间段的电压变化速率与总电阻变化速率。在总电阻测量时也可以测量如 10.7 所述的总阻抗。

10.4.3 结果报告

在 10.4.2.2 情况下,结果应以二维图表示,其中横轴表示时间,纵轴表示电压。测试报告应包括此图与电压变化率和测试条件。在 10.4.2.3 情况下,纵轴将表示电压与总电阻,测试报告应包括此图与电压变化率、总电阻变化率和测试条件。

电池堆组合单元电压可以代之以平均电池电压,作为替代方法,实测的电池电压也可对时间作图。

注:这些测量结果也可以表示为面积比电阻(或阻抗)。在此,面积比电阻(阻抗)等于测得的电阻(阻抗)乘以活性电极面积。

10.5 热循环耐久性测试

10.5.1 目的

本测试的目的是评估单电池/堆组合单元的热循环耐久性。热循环条件应在制造商指定的范围内。

10.5.2 测试方法

10.5.2.1 概述

对于本测试,如下测试条件应事先从制造商得到或通过制造商和评估者之间的磋商确定。

运行温度应是标准测试条件下的温度:

- a) 热循环次数;
- b) 冷却速率;
- c) 升温速率;
- d) 最低温度;
- e) 运行温度下的运行条件;
- f) 保持运行温度的时间;
- g) 保持最低温度的时间;
- h) 总的测试周期;

i) 在升温和冷却条件下,以及最低温度时的气体流量与成分。

10.5.2.2 测试步骤

根据以上测试条件,应选择测量在运行温度下的单电池/堆组合单元电压变化或选择同时测量总电阻和单电池/堆组合单元电压。当测量总电阻时,依照 10.4.2.3 的方法,应在规定的时间段内测量电压。当完成某一运行温度时段后,应使单电池/堆组合单元处于开路状态,在规定条件下降温至最低温度,并且在最低温度保持所要求的时间。其后在规定条件下升温至运行温度,按上述方法重复以前的测量。

这些测量应反复进行并达到规定的次数。所得结果应用来计算在整个测试期间或测试期间的特定时间段的电压变化率与总电阻变化率。

10.5.3 结果报告

测试结果应以二维图表示,其横坐标代表时间(a)或循环次数(b)。测试条件也应包括在测试报告中。

如果是情况(a),纵坐标应是单元电压、总电阻(可选)与温度。

如果是情况(b),纵坐标应是电压和总电阻(可选)。

10.6 内部重整性能测试

10.6.1 目的

本测试目的是在开路状态或额定条件下,评价单电池/堆组合单元对阳极气体中的诸如甲烷之类的碳氢化合物的内部重整性能。

10.6.2 测试方法

10.6.2.1 概述

该测试应根据制造商的推荐,或者在制造商和评估者之间就单电池/堆组合单元对碳氢化合物的内部重整能力进行磋商之后进行,某些单电池/堆单元可能不具备该能力。

注:含碳氢化合物的阳极气体可能发生许多复杂的反应,取决于其成分和热力学平衡,这些反应可能会影响单电池/堆的温度梯度。

本测试适用于阳极气体和阳极尾气的采样过程中未混入阴极气体或阴极尾气的情形。

10.6.2.2 测试步骤

应将含有碳氢化合物(HC)的阳极气体提供给单电池/堆组合单元。在开路状态或额定条件下达到稳定状态后,应分析阳极气体与阳极尾气的成分,并将其用来计算体现内部重整特性的碳氢化合物(HC)转换率。

某一特定碳氢化合物(HC_j)的碳氢化合物转换率 ζ_j (%)按如下方法计算:

$$\zeta_j (\%) = 100(f_{HC_j, in} - f_{HC_j, out}) / f_{HC_j, in} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$f_{HC_j, in}$ 与 $f_{HC_j, out}$ 分别代表在阳极气体入口与出口的碳氢化合物 HC_j 的流量。它们分别由阳极气体流量及碳氢化合物 HC_j 浓度,以及阳极尾气流量及其碳氢化合物 HC_j 浓度计算得到。

10.6.3 结果报告

测试报告应记述阳极气体与阳极尾气的成分和流量以及碳氢化合物 HC 转换率,并附上测试

条件。

10.7 电阻成分确认测试

10.7.1 目的

本测试的主要目的是确定和评估单电池/堆组合单元总电阻中的欧姆和非欧姆成分。

10.7.2 测试方法

10.7.2.1 概述

单电池/堆组合单元的电阻成分的拆分应采用交流阻抗谱方法或电流中断法。

10.7.2.2 电化学交流阻抗方法

如下测试条件应通过预测试事先确定：

a) 频率的测量范围：

当画复数阻抗谱图(图 2)时,最高频率点应大体等同于 A 点,而最低频率点应大体等同于 C 点。

b) 测量点数：

在频率的每个数量级内取 4 至 20 个点(如果可能,其对数均匀分布),以便足够清楚地识别阻抗谱图的形状。尽可能避开电网频率的基频与谐频。

测试应按如下步骤进行：

a) 设置测试条件；

b) 确认已达到稳定状态；

c) 将正弦交流信号叠加到直流电流或电压上并开始测量,在规定的频率范围内扫描正弦交流波并测量在每个频率的阻抗。

用于测量的交流信号的振幅应足以激活电池并不使其过度极化。作用在每个电池上的振幅可通过将整个电压振幅除以串联电池数目而获得。作为一个选项,阻抗谱的有效性应使用克拉莫-克若尼(KK)关系或 Z-hit 之类的验证关系进行检验。

10.7.2.3 电流中断法

当采用此法时,电流中断特性与采样速率应通过预测试确认,以保证该测试能够对单电池/堆组合单元的目标特性进行评估。测量应在确信单元在测试条件下处于稳定状态后进行。

10.7.3 结果报告

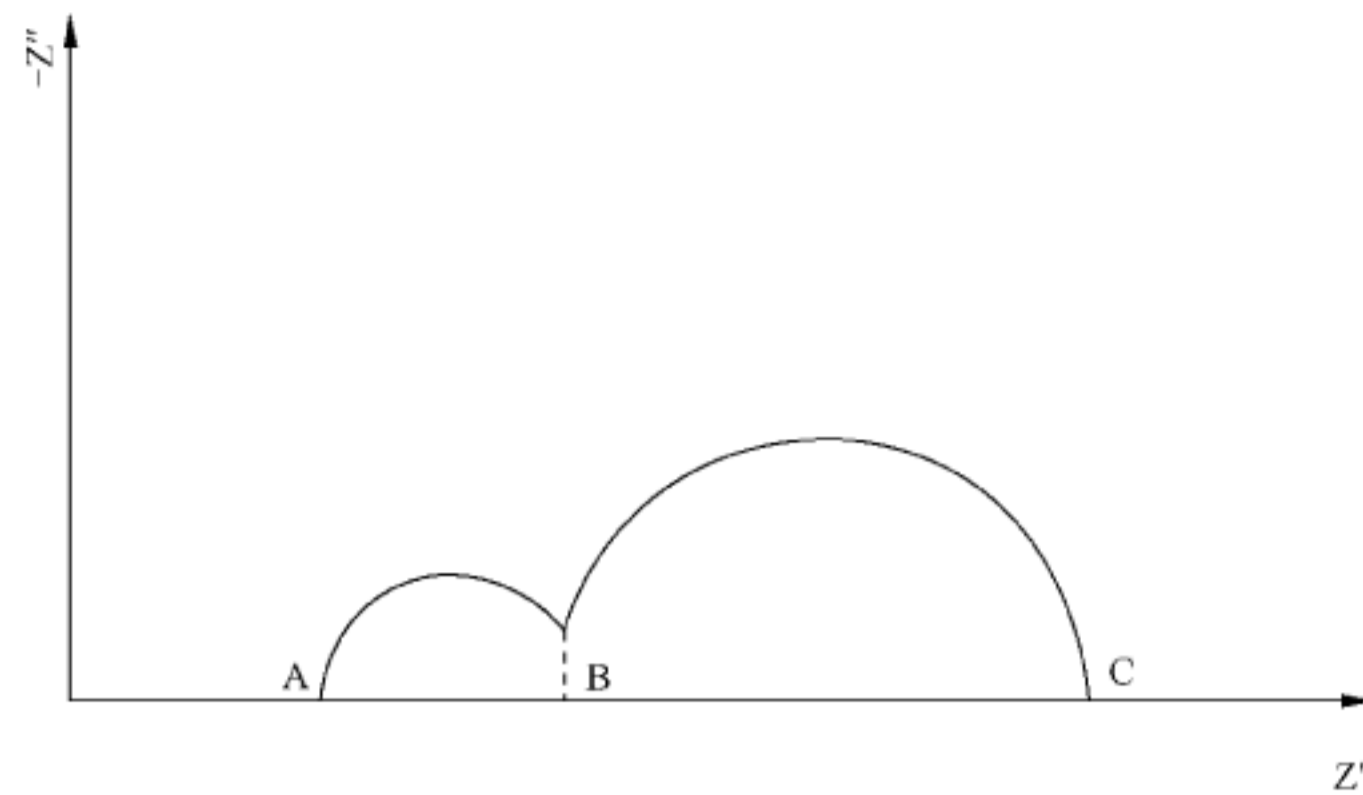
a) 交流阻抗谱方法

测试结果应表示为复数阻抗谱图,又称 Cole-Cole 谱图(标明特征频率)或 Bode 图(阻抗成分对测量频率的对数作图)。应以 3.1.2 定义的活性面积计算得到单位面积的阻抗而作图。

注:典型的固体氧化物燃料电池负数阻抗谱图参见图 2。

b) 电流中断法

电流断开之前与之后记录的电流(密度)和电压响应波形,应对时间轴作图。应适当选择采样速率,使其足以分辨欧姆电阻成分。这样获得的欧姆电阻及其测试条件应包括在测试报告中。



说明：

- A —— 高频端阻抗；
- C —— 低频端阻抗；
- A~B —— 高频弧阻抗；
- B~C —— 低频弧阻抗；
- Z' —— 阻抗谱实部；
- Z'' —— 阻抗谱虚部。

注：这些结果也可以用单位面积电阻(或阻抗)表示。这里，单位面积电阻(或阻抗)等于测得的电阻(或阻抗)与活性电极面积的乘积。

图 2 典型的固体氧化物燃料电池复数阻抗谱图

11 测试报告

11.1 概述

测试报告应准确、清晰并客观地表达出充分的信息以证明测试的所有目的已经达到。附录 F 给出了建议采用的测试报告模板。

11.2 报告项目

报告至少包括如下信息：

- a) 报告题目；
- b) 报告作者；
- c) 报告日期；
- d) 测试报告参考号或编号；
- e) 测试地点和(开始)日期/时间；
- f) 使用的测试平台；
- g) 测试单元数据(见 11.3)；
- h) 测试条件(见 11.4)；
- i) 测试数据(见 11.5)。

11.3 测试单元数据描述

测试单元数据应至少包括如下信息：

- a) 产品名称与单元的品牌名称；

- b) 活性电极面积；
- c) 单电池数目(总数、串联数、并联数)；
- d) 电池材料与厚度(若已知),以及电池编号；
- e) 电池堆材料(若已知)；
- f) 单元几何尺寸；
- g) 温度测量点和机械载荷施加位置。

11.4 测试条件描述

测试条件描述至少包括如下信息：

- a) 测试人姓名；
- b) 仪器及其校准记录；
- c) 测试步骤；
- d) 活化条件；
- e) 稳定态判据；
- f) 数据采集方法；
- g) 气体纯度和杂质；
- h) 测试平台布局。

11.5 测试数据描述

测试数据应包括如下信息：

- a) 测试名称；
- b) 测试运行条件；
- c) 测试结果；
- d) 环境条件；
- e) 不确定度评估(见 11.6)。

11.6 不确定度评估

仪器的不确定度应予报告。如有必要,测量误差和/或由测量误差和仪器的不确定度计算得到的测量的不确定度也应予报告。

注：参见附录 G。

附录 A
(资料性附录)
单电池/堆组合单元示例

本标准说明书描述的单电池/堆组合单元的示例性结构与测试边界条件如图 A.1 所示。

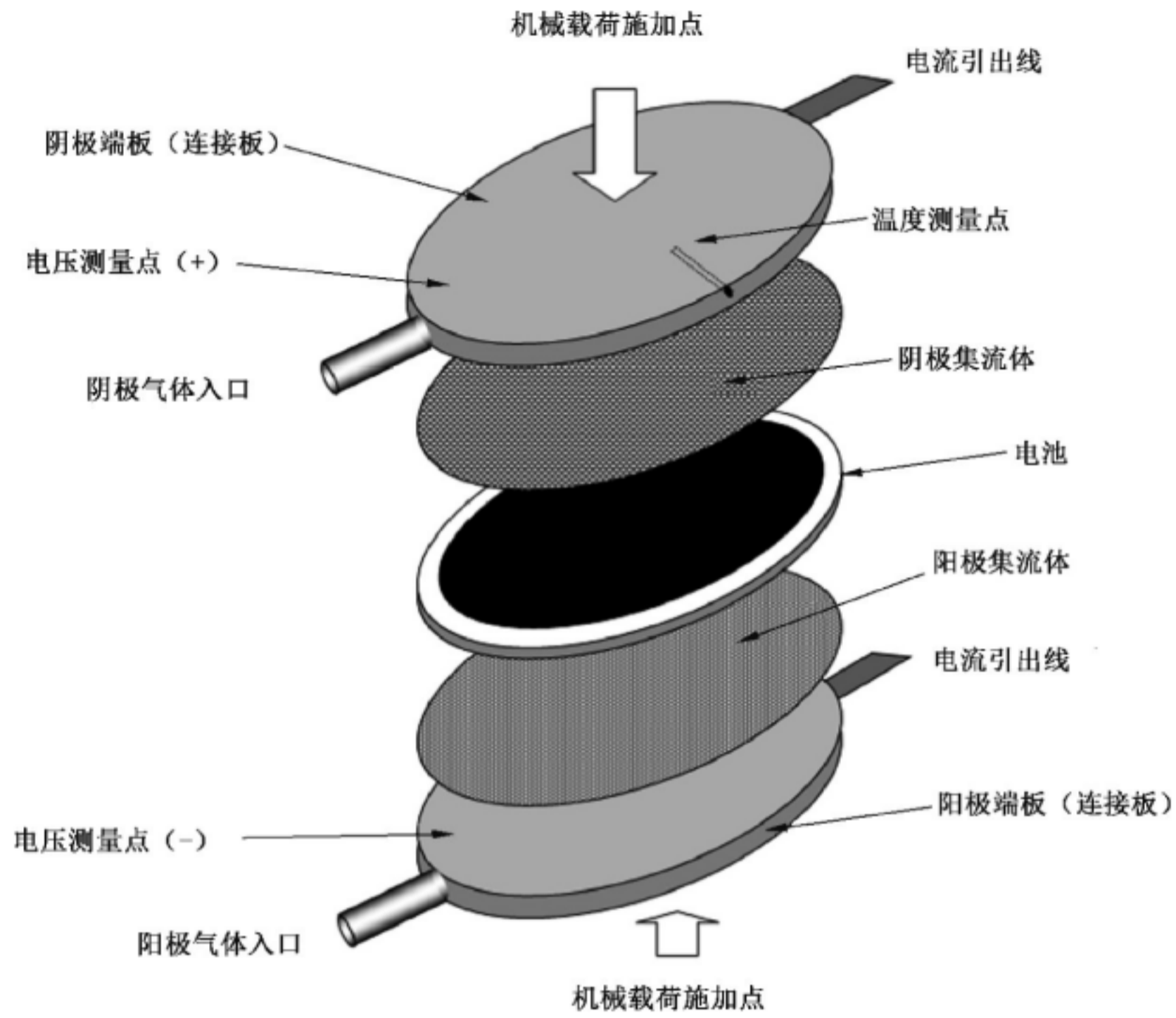


图 A.1 单电池/堆组合单元示例

在图 A.1 中,阴极集流体和阳极集流体也分别起阴极气体流道和阳极气体流道的作用,尾气分别从各自的集流体的圆周边上流出。

注:如果可能的话,测量集流体上的电压以排除(连接板-集流体之间)接触电阻产生的电压。

附录 B
(资料性附录)
有效燃料利用率计算

本附录用于指导计算 3.1.11 中定义的有效燃料利用率。

B.1 计算方法

在性能测试中,阳极气体供应流量为 f_a [L/min(NTP)]。阳极气体中每种燃料成分的流量表达为 f_j [L/min(NTP)] ($j = H_2, CO, CH_4, \dots, C_p H_q O_r$), 其中 $C_p H_q O_r$ 是通用燃料的化学式。在分析阳极气体成分时,应使用式(B.1)由每种燃料成分的摩尔分数 x_j (mol%) 和 f_a 计算 f_j 。

$$f_j = \frac{x_j}{100} \times f_a \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

在下面的例子中,假定 N 个电池串联在一起,且燃料在各电池之间分配均匀。假定提供的燃料气体完全消耗于电化学反应,3.1.10 中定义的理论电流 $I_{理论}$ (A) 应依据式(B.2)计算得出:

$$I_{理论} = \frac{P_{st}}{R \times T_{st} \times 60 \times 1\,000} \times F \times \left[\frac{\sum_j n_j \times f_j}{N} \right]$$

$$= \frac{101\,325 \times 96\,485}{8.314\,51 \times 273.15 \times 60 \times 1\,000} \times \left[\frac{\sum_j n_j f_j}{N} \right] = 71.74 \times \left[\frac{\sum_j n_j f_j}{N} \right]$$

\dots\dots\dots (B.2)

式中:

- P_{st} —— 标准大气压 (101 325 N · m⁻²);
- R —— 气体常数 (8.314 4 J · mol⁻¹ · K⁻¹);
- T_{st} —— 标准温度 (273.15 K);
- F —— 法拉第常数 (96 485 C/mol);
- n_j —— 燃料成分 j 的一个分子发生电化学反应时转移的电子数;
- N —— 串联的单电池数。

对于代表性燃料,其电子转移数 n_j 由式(B.3)~式(B.6)确定,并汇总于表 B.1 中。

对于通用成分 $C_p H_q O_r$, n_j 等于 $4(p + q/4 - r/2)$

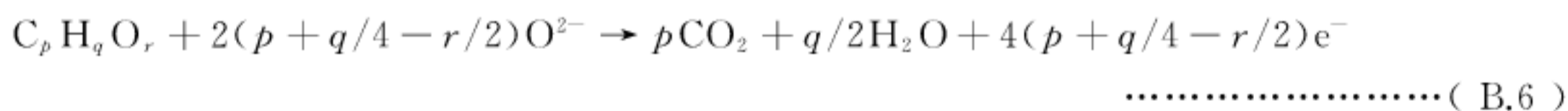
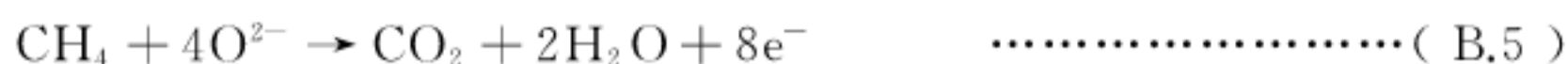


表 B.1 代表性燃料的 n_j

燃料	n_j
H ₂	2
CO	2

表 B.1 (续)

燃料	n_j
CH ₄	8
C _p H _q O _r	4(p+q/4-r/2)

测得每一电池或者单电池/堆组合单元的电流输出, 表达为 $I_{\text{测量}}$ 。有效燃料利用率 $U_f(\%)$ 则可由式(B.7)计算得出。

$$U_f = \frac{I_{\text{测量}}}{I_{\text{理论}}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

B.2 计算例子

B.2.1 由阳极气体成分与流量计算

作为阳极气体成分分析结果, 归一化的阳极气体摩尔分数 x_j 假定如表 B.2 所示。假定阳极气体流量 f_a 是 0.500 L/min(NTP)。阳极气体中的燃料组分 H₂、CO、CH₄ 的流量, f_j , 用式(B.1)计算, 分别为 0.281、0.047、0.003 L/min(NTP)。然后, 每一个 $n_j f_j$ 相加得到 $\sum n_j f_j$, 所以 $\sum n_j f_j = 0.562 + 0.094 + 0.024 = 0.680$ L/min(NTP)。因此, 如果 $N = 10$ 个电池, 用式(B.2)得到 $I_{\text{理论}} = 71.74 \times 0.680 / 10 = 4.88$ A。

假定电池堆测试时实际输出电流是 3.90 A, 即 $I_{\text{测量}}$ 等于 3.90 A。那么, 可用式(B.7)计算有效燃料利用率, 即 $U_f = \frac{3.90}{4.88} \times 100\% = 80\%$ 。

表 B.2 阳极气体成分, 每一燃料组分的流量 f_j 以及 $n_j f_j$

组分	$x_j / \text{mol}\%$	$f_j / [\text{L}/\text{min}(\text{NTP})]$	$n_j f_j / [\text{L}/\text{min}(\text{NTP})]$
H ₂	56.1	56.1/100 × 0.500 = 0.281	2 × 0.281 = 0.562
H ₂ O	27.1		
CO	9.3	9.3/100 × 0.500 = 0.047	2 × 0.047 = 0.094
CO ₂	7.1		
CH ₄	0.5	0.5/100 × 0.500 = 0.003	8 × 0.003 = 0.024

B.2.2 从供给的 H₂ 和 H₂O 的流量进行计算

假定通过控制每一气体流量来向阳极供给 H₂ 和 H₂O。同时假定 40 个电池的电池堆由 4 组并联而成, 每组串联 10 个电池。对该电池堆进行性能测试。假设 H₂ 流量 f_j 和输出电流分别为 3.00 L/min(NTP) 和 32.3 A。

由式(B.2)计算, $I_{\text{理论}} = 71.74 \times (2 \times 3.00) / 10 = 43.0$ A。因此, 如果 $I_{\text{测量}} = 32.3$ A, 则有效燃料利用率可从式(B.7)计算为 $U_f = \frac{32.3}{43.0} \times 100\% = 75.1\%$ 。

注: 并联的组数对计算不产生影响。

附 录 C
(资料性附录)
有效氧气利用率计算

本附录用于指导计算 3.1.12 中定义的有效氧气利用率。

C.1 计算方法

在一性能测试中,以流量 f_c [L/min(NTP)] 供应阴极气体。氧气流量 f_{O_2} [L/min(NTP)] 应利用式(C.1)由阴极气体中的氧气摩尔分数 x_{O_2} (mol%) 计算。

$$f_{O_2} = \frac{x_{O_2}}{100} \times f_c \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

假定阴极气体均匀地分布在 N 个电池串联的电池堆中,且氧气在电化学反应中完全消耗,则3.1.10中定义的理论电流 $I_{理论}$ 应由式(C.2)计算:

$$I_{理论} = \frac{P_{st}}{R \times T_{st} \times 60 \times 1\,000} \times F \times \frac{n_{O_2} \times f_{O_2}}{N}$$

$$= \frac{101\,325}{8.314\,51 \times 273.15 \times 60 \times 1\,000} \times 96\,485 \times \frac{n_{O_2} \times f_{O_2}}{N} = 287.0 \times \frac{f_{O_2}}{N}$$

\dots\dots\dots (C.2)

式中:

- P_{st} ——标准大气压(101 325 N · m⁻²);
- R ——气体常数 (8.314 4 J · mol⁻¹ · K⁻¹);
- T_{st} ——标准温度(273.15 K);
- F ——法拉第常数(96 485 C/mol);
- n_{O_2} ——氧气 1 分子被电化学还原时的电子转移数目,如式(C.3)所示, $n_{O_2} = 4$;
- N ——串联的电池数。



测得的每一电池或者整个单电池/堆组合单元的电流输出为 $I_{测量}$ 。有效氧气利用率即 U_{O_2} (%) 则可由式(C.4)计算得出。

$$U_{O_2} = \frac{I_{测量}}{I_{理论}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

C.2 计算实例

在一性能测试中,假定阴极气体流量, f_c 是 1.50 L/min(NTP),假定有 $N = 10$ 个电池串联于电池堆中,且气体组分如表 C.1 所示。

利用式(C.1)与式(C.2)可分别得到 $f_{O_2} = 0.314$ L/min(NTP),且 $I_{理论} = 9.01$ A。当电池堆性能测试的实际输出电流为 2.70 A 时, $I_{测量}$ 等于 2.70 A。因此,有效氧气利用率可利用式(C.4)计算为 $U_{O_2} = 2.70/9.01 \times 100\% = 30\%$ 。

表 C.1 阴极气体成分, f_{O_2} 和 $I_{理论}$

组分	$x_i / \text{mol } \%$	$f_{O_2} / [\text{L}/\text{min}(\text{NTP})]$	$I_{理论} / \text{A}$
O ₂	20.95	$20.95/100 \times 1.50 = 0.314$	$287.0 \times 0.314 / 10 = 9.01$
N ₂	79.05		

附录 D

(资料性附录)

I-V 特性测试中电压滞后的最大宽度

当用 10.2.2.1 b)所述的电流扫描方法进行 *I-V* 特性测试时,因为滞后,测量电压可能因扫描速率的不同而不同,如图 D.1 示例所示。因此,应确定合理的扫描速率,以便使电压滞后的最大宽度小于 6.2 中定义的允许最大电压变化值。

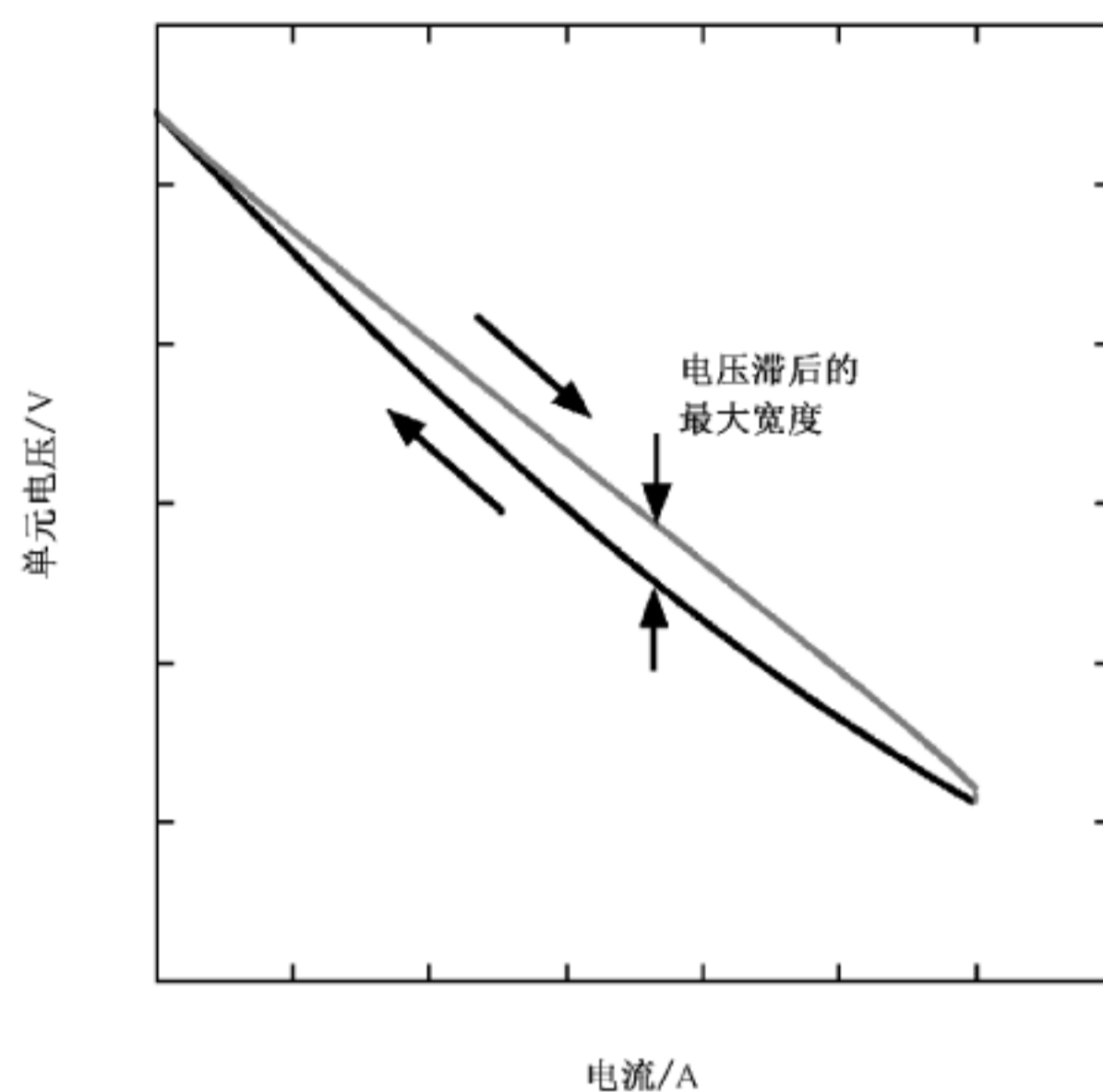


图 D.1 *I-V* 特性测试中在给定的电流扫描速率下电压滞后的最大宽度

附录 E

(资料性附录)

在恒定有效燃料利用率情况下的电流-电压特性测试

为了保持测试中有效燃料利用率和/或有效氧气利用率恒定,燃料和/或氧气的流量需要随电流变化而改变,电池/堆单元的电压-电流依存性也相应地不同于恒定气体流量下的 $I-V$ 曲线。图 E.1 中给出了单元电压、电流和氢气流量之间的这类变化的例子。

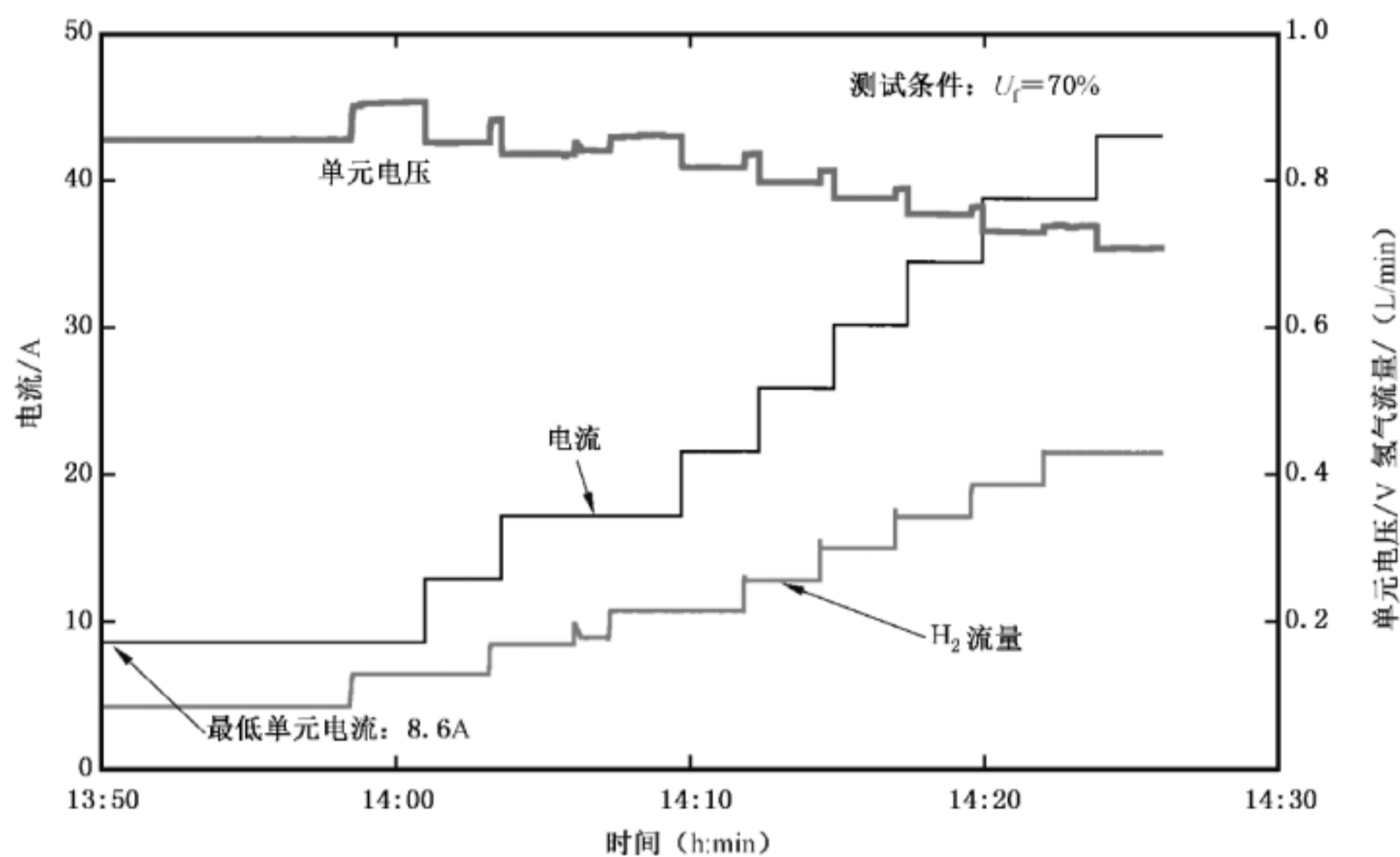


图 E.1 在恒定有效燃料利用率情况下的电流-电压特性测试的数据示例

当在恒定有效燃料利用率情况下测试 $I-V$ 特性时,初始时测试单元应保持在 8.2 m) 所定义的最小单电池/堆组合单元电流。

在低电流值情况下,电压因为低气体流量而变得不稳定。所以,应确定最小单电池/堆组合单元电流以避免出现此类不稳定电压。

附 录 F
(资料性附录)
测试报告(模板)

下面给出一些报告范例,内容包括一般信息、测试单元数据描述、测试条件,以及本标准正文中所述的每一项测试的测试报告。对作者的提示用斜体字表示,不要写在报告中。F.4、F.5、F.6、F.7 和 F.8 中所列出的“仪器不确定度”的认定方法见附录 G。

F.1 一般信息

测试报告题目	
报告作者	
报告日期	
测试报告参考号/编号	
测试地点	
测试开始日期/时间	
测试平台	

F.2 测试单元数据描述

单元的产品名称与商标名称	
活性电极面积	
电池数量(总数、串联数、并联数)	
单元序列号	
单元几何尺寸	
电解质与电极的材料和厚度	<i>如果已知</i>

如果下列数据不能从厂家获得,也应报告

单电池/堆组合单元的构型和组装方法	
外围部件的材料和几何形状	
阳极与阴极气体流道形状与气流方向	
温度测量点	
机械载荷(单位)及其施加点	
电压测量点	
电流引出点	
最小电池电压(单位)	

F.3 测试条件

测试人姓名	
仪器及其校准记录	
测试步骤	
活化条件	
稳定态判据	
数据采集方法	
气体纯度与杂质	
机械载荷	

F.4 额定功率测试

操作条件

输入	数值(单位)	仪器不确定度(单位)	测量误差(标准偏差)(单位)
f_a			
f_c			
p_a			
p_c			
T_{op}			

测试结果:

输出	数值(单位)	仪器不确定度(单位)	测量误差(标准偏差)(单位)
OCV			
V			
I			
P			

数据平均方法应说明

F.5 电流-电压特征测试

操作条件

输入	数值(单位)
f_a (或其范围,对应 10.2.2.2)	
f_c (或其范围,对应 10.2.2.2)	
p_a	
p_c	
T_{op}	
U_f (对应 10.2.2.2)	
U_{O_2} (对应 10.2.2.2)	

测试结果

输出	数值(单位)	仪器不确定度(单位)	测量误差(标准偏差)(单位)
OCV			

应给出 I-V 曲线(见 10.2.3)

F.6 有效燃料利用率相关性测试

初始操作条件

输入	数值(单位)
f_a	
f_c	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I	

预备信息

预期的最大燃料利用率	/%
------------	----

测试结果

输出	值(单位)	仪器不确定度(单位)	测量误差(标准偏差)(单位)
OCV			

对应 10.3.2.2

步骤 #	f_a (单位)	V(单位)	$U_i/\%$
0			
1			
2			
3			
m			

应给出 $U_i(f_a)$ -V 曲线,其可以替代上述的表(见 10.3.3)

对应 10.3.2.3

步骤 #	I (单位)	V(单位)	$U_i/\%$
0			
1			
2			
3			
m			

$U_i(I)$ -V 曲线应给出,其可以替代上述的表(见 10.3.3)

F.7 耐久性测试

操作条件:

输入	数值(单位)
f_a	
U_i	
f_c	
U_{O_2}	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I	

测试结果：

输入	数值(单位)	仪器不确定度(单位)	测量误差(标准偏差)(单位)
OCV(开始)			
OCV(结束)			
t (结束)			

其他测试结果应以二维图画出(见 10.4.3)

F.8 热循环耐受性测试

测试条件

降温速率	
升温速率	
最低温度	
操作温度下的保温时间	
最低温度下的保温时间	
升温时的气体成分	
升温时的气体流量	
降温时的气体成分	
降温时的气体流量	
最低温度时的气体成分	
最低温度时的气体流量	

操作条件

输入	数值(单位)
f_a	
f_c	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I	

测试结果

输出	数值(单位)	仪器不确定度(单位)	测量误差(标准偏差)(单位)
OCV(开始)			
OCV(结束)			

其他结果应按 10.5.3 所述给出

F.9 内重整性能测试

操作条件

输入	数值(单位)
f_a	
f_c	
U_f	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I	

测试结果

输出	数值(单位)
OCV	
阳极尾气成分	
阳极尾气流量	
HC 转化率	/%

F.10 电阻成分确认测试

操作条件

输入	数值(单位)
f_a	
f_c	
p_a	
p_c	
T_{op}	
I 或 V	
频率范围	
操作模式(恒流或恒压)	
幅值	

测试结果

输出	数值(单位)
总电阻	
欧姆电阻	

根据不同的测试方法,应附上相应的图(见 10.7.3)

附录 G

(资料性附录)

确定仪器不确定度的方法

仪器不确定度, U_1 , 可以通过使用可追溯性标准仪器的校准来得到。进一步信息参阅 ISO/IEC 指南 98-3。

也可以从仪器的误差极限($\pm a$)来得到, 假设在误差极限范围内概率均匀分布, 则

$$U_1 = 2u_1 = 2 \frac{a}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (G.1)$$

式中:

u_1 ——仪器的标准不确定度。

有些测试使用多台仪器(例如, 对于电流测量, 可能联合使用电流传感器和数字电压记录仪), 标准不确定度可由下式得到(假定仪器之间没有关联性):

$$u_1^2 = \sum u_{1,i}^2 \dots\dots\dots (G.2)$$

式中:

$u_{1,i}$ ——第 i 个仪器的标准不确定度。因此,

$$U_1 = 2u_1 = 2(\sum u_{1,i}^2)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (G.3)$$

参 考 文 献

- [1] GB/T 4889—2008 数据的统计处理和解释 正态分布均值和方差的估计与检验 (ISO 2854-1976,MOD)
- [2] GB/T 6592—2010 电工和电子测量设备性能表示 (IEC 60359:2001,IDT)
- [3] GB/T 29820.1—2013 流量测量装置校准和使用不确定度的评估 第1部分:线性校准关系 (ISO/TR 7066-1:1997,MOD)
- [4] GB/T 29838—2013 燃料电池 模块 (IEC 62282-2:2012,MOD)
- [5] IEC 60352 (all parts) Solderless connections
- [6] IEC 60512-1-1 Connectors for electronic equipment—Tests and measurements—Part 1-1: General examination—Test 1a: Visual examination
- [7] IEC 60512-8-1 Connectors for electronic equipment—Tests and measurements—Part 8-1: Static load tests (fixed connectors)—Test 8a: Static load, transverse
- [8] IEC 60512-8-2 Connectors for electronic equipment—Tests and measurements—Part 8-2: Static load tests (fixed connectors)—Test 8b: Static load, axial
- [9] ISO/IEC Guide 98-3 Uncertainty of measurement—Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)
- [10] ISO 2602 Statistical interpretation of test results—Estimation of the mean—Confidence interval
- [11] ISO 4677-1 Atmospheres for conditioning and testing—Determination of relative humidity—Part 1: Aspirated psychrometer method
- [12] ISO 4677-2 Atmospheres for conditioning and testing—Determination of relative humidity—Part 2: Whirling psychrometer method
- [13] ISO 14687 (all parts) Hydrogen fuel—Product specification
- [14] Fuel Cells Testing, Safety & Quality Assurance (FCTESQA), Polarisation curve for a SOFC single cell test, Test Module TM SOFC M01 (30 April 2010)
- [15] TSOTRIDIS, G., PODIAS, A., WINKLER, W. and SCAGLIOTTI, M., eds., The Fuel Cells Testing & Standardisation Network, Fuel Cells Glossary, EUR22295 EN (June 2006)
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
固 体 氧 化 物 燃 料 电 池 单 电 池 和
电 池 堆 性 能 试 验 方 法

GB/T 34582—2017/IEC TS 62282-7-2:2014

*

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.org.cn

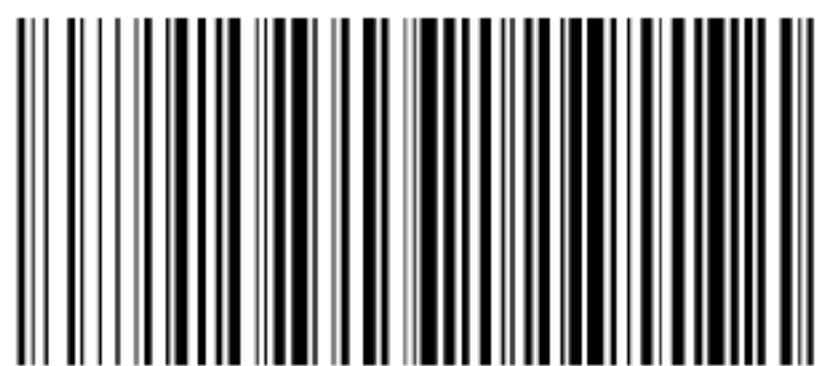
服务热线:400-168-0010

2017年10月第一版

*

书号:155066·1-57739

版权专有 侵权必究



GB/T 34582-2017