

中国可再生能源学会标准

T/CRES0028-2025

阴离子交换膜燃料电池 第一部分 阴离子
交换膜性能测试方法

Anion exchange membrane fuel cell
Part 1 Anion exchange membrane performance test methods

2025-03-31 发布

2025-04-30 实施

中国可再生能源学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 厚度均匀性测试	3
6 OH ⁻ 离子电导率测试	3
7 离子交换容量测试	4
8 透气率测试	5
9 电化学渗氢电流测试	6
10 拉伸性能测试	6
11 溶胀率测试	9
12 吸水率测试	10
13 碱稳定性测试	11

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由惠州亿纬氢能有限公司提出。

本文件由中国可再生能源学会归口。

本文件起草单位：惠州亿纬氢能有限公司、北京新研创能科技有限公司、武汉大学、中国科学院大连化学物理研究所、中科嘉鸿（佛山市）新能源科技有限公司、北京航空航天大学、中国科学技术大学、新研氢能科技有限公司。

本文件主要起草人：汪瀛、齐志刚、庄林、王素力、杨林林、卢善富、吴亮、闫永臣。

本文件在执行过程中的意见建议请反馈至中国可再生能源学会标准化工作办公室。

阴离子交换膜燃料电池 第一部分 阴离子交换膜性能测试方法

1 范围

本文件规定了传导氢氧根（OH⁻）的阴离子交换膜的术语、定义、测试方法、数据处理及测试报告等。

本文件适用于传导OH⁻的阴离子交换膜，可应用于水电解制氢、燃料电池、CO₂还原等电化学设备。

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，标注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不标注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1040.3 塑料拉伸性能的测定 第3部分：薄膜和薄片的试验条件 (ISO 527-3: 1995, IDT)

GB/T 28816 燃料电池 术语

GB/T 20042.3 质子交换膜燃料电池 第3部分：质子交换膜测试方法

3 术语和定义

GB/T 28816 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

氢氧根离子电导率 OH⁻ ion conductivity

OH⁻离子在膜内迁移速率的大小，是电阻率的倒数，用来衡量膜OH⁻离子的传导能力，单位为 S/cm。

3.2

离子交换容量 ion exchange capacity (IEC)

单位质量干膜所含离子基团的量，单位为 mmol/g。

3.3

拉伸强度 tensile strength

在给定温度、湿度和拉伸速度下，在膜试样上施加拉伸力，试样断裂前所承受的最大拉伸力与试样的横截面面积的比值，单位为 MPa。

3.4

弹性模量 elastic modulus

阴离子交换膜应力应变曲线直线部分的斜率，单位为 MPa。

注：推荐应力应变曲线上应变分别为 $\epsilon_1=0.5\%$ 和 $\epsilon_2=2.5\%$ 的两个点的斜率为弹性模量。

3.5

断裂拉伸应变 tensile strain at break

试样发生断裂时原始标距单位长度的百分增量，单位为 %。

3.6

气体透过率 gas permeation rate

在恒定温度和单位压力差下，单位时间内稳定透过试样单位面积的气体体积，单位为立方厘米每平方米天帕 [$\text{cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{Pa})$]。

3.7

气体透过系数 gas permeation coefficient

在恒定温度和单位压力差下，单位时间内稳定透过试样单位厚度、单位面积的气体体积，单位为立方厘米厘米每平方米秒帕[$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]。

3.8

吸水率 water uptake

给定温度下单位质量干膜的吸水质量百分量，单位为 wt%。

3.9

溶胀率 swelling rate

相对于干膜在横向、纵向和厚度方向的尺寸变化百分量，单位为 %。

3.10

碱稳定性 alkaline stability

在给定温度和碱浓度下处理一定时间后，阴离子交换膜的IEC和OH⁻离子电导率的百分变化量，单位为 %。

4 符号

本文件中使用的符号、含义与单位见表 1。

表 1 符号、含义与单位

符号	含义	单位
R	膜的厚度极差	μm
d	膜的平均厚度	μm
RS	膜厚度的相对标准偏差	%
σ	膜的拉伸强度	MPa
σ_{TD}	平行于膜卷轴方向膜的拉伸强度	MPa
σ_{MD}	垂直于膜卷轴方向膜的拉伸强度	MPa
E	膜的弹性模量	MPa
E_{TD}	平行于膜卷轴方向膜的拉伸弹性模量	MPa
E_{MD}	垂直于膜卷轴方向膜的拉伸弹性模量	MPa
ε_{b}	膜的断裂拉伸应变	%
ε_{TD}	平行于膜卷轴方向膜的断裂拉伸应变	%
ε_{MD}	垂直于膜卷轴方向膜的断裂拉伸应变	%
IEC	膜的离子交换容量	mmol/g
i_{cross}	膜的渗氢电流密度	mA/cm^2
ΔL	膜的横（纵）向尺寸变化率	%
Δd	膜的厚度变化率	%
Δm	膜的吸水率	%
ΔC	膜的 IEC 变化率	%

$\Delta\lambda$	膜的离子电导率变化率	%
-----------------	------------	---

5 厚度均匀性测试

5.1 测试仪器

5.1.1 测厚仪：精度不低于 0.1 μm 。

5.1.2 卡尺：精度不低于 0.02 mm，用于测试膜的长度和宽度。

5.2 样品准备与状态调节

5.2.1 样品准备

样品可以为正方形或圆形，有效面积至少为100 cm^2 。样品应无折皱、缺陷和破损。

5.2.2 样品状态调节

样品在温度为23 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为50% \pm 10%条件下放置4 h以上。

5.3 测试步骤

5.3.1 测量前应校准测厚仪的零点，且在每个试样测量后应重新检查其零点。

5.3.2 将测量头平缓放下，避免样品变形。测试过程测试头施加在样品表面的强度在 0.7 N/cm^2 -2 N/cm^2 之间选取。

5.3.3 在23 $^{\circ}\text{C} \pm 2$ $^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为50% \pm 10%的恒温恒湿环境中进行测试。每100 cm^2 的测试点不少于30个，且均匀分布，测试点距离样品边缘应大于5 mm。每组样品至少3个。

5.4 数据处理

样品的厚度均匀性用厚度最大值与最小值之差以及相对标准偏差表示。

厚度极差按式（1）计算：

$$R = d_{\max} - d_{\min} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

R —— 膜的厚度极差，单位为微米（ μm ）；

d_{\max} —— 测量区域内膜的厚度测量最大值，单位为微米（ μm ）；

d_{\min} —— 测量区域内膜的厚度测量最小值，单位为微米（ μm ）。

平均厚度按式（2）计算：

$$d = \sum_{i=1}^n d_i / n \dots\dots\dots (2)$$

式中：

d —— 膜的平均厚度，单位为微米（ μm ）；

d_i —— 某一点膜的厚度测量值，单位为微米（ μm ）；

n —— 测量数据点数。

厚度相对标准偏差按式（3）计算：

$$RS = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d)^2}{n-1}}}{d} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中

RS —— 膜厚度的相对标准偏差，单位为百分比（%）；

d_i —— 某一点膜的厚度测量值，单位为微米（ μm ）；

d —— 膜的平均厚度，单位为微米（ μm ）；

n —— 测量数据点数。

6 OH⁻离子电导率测试

6.1 测试仪器

6.1.1 螺旋测微器：精度不低于 0.1 μm 。

6.1.2 卡尺：精度不低于 0.01 mm。

6.1.3 电化学测试阻抗仪：阻抗频率范围为 1 Hz-1 MHz。

6.1.4 测试系统：该系统由温湿度控制测试腔体，电化学工作站，离子电导率测试装置等组成，可以实现阴离子交换膜在不同温度、湿度下的离子电导率测试。

6.2 样品准备与状态调节

6.2.1 样品准备

裁切 10 mm×45 mm的膜作为样品。将样品放入1 M KOH 溶液中，在80 °C下离子交换24 h。完成后用去离子水洗涤至中性，并保存在80 °C的去离子水中。

6.2.2 样品状态调节

开始测试前，将交换为氢氧根型且洗至中性的膜材于80 °C下水浴处理8 h，然后移至干净的测量平台上，于30 s内快速测量阴离子交换膜厚度与宽度，分别取三处测试的平均值为宽度a、厚度b。每组样品至少取3个点。然后再基于离子电导率测试装置，在电解过电势 $\leq 2\text{V}$ 的范围内，通直流电进行电解，将碳酸（氢）根转化为OH⁻。

6.3 测试步骤

6.3.1 测试装置组装

6.3.1.1 采用四电极探针法测试，按照GB/T 20042.3《质子交换膜燃料电池 第3部分：质子交换膜测试方法》组装测试装置。

6.3.1.2 测试夹具与温湿度控制系统连接完成后，通N₂（99.999%，下同）吹扫，两侧流速均设定为500 SCCM。增湿条件设定为100% RH，保证管线的温度比测试装置温度高5 °C；实际测试温度依据需求进行设定。然后启动温湿度装置，等达到设定的条件后开始电解过程，全程保持N₂吹扫，气体流量不变。

6.3.2 电解

通直流电对膜材进行电解处理，在 $\leq 2\text{ V}$ 的电势下电解至平衡，判断依据为电解电势于1 h内变化值小于10 mV。

6.3.3 电化学交流阻抗（EIS）测试

电解平衡后进行 EIS 测试，选择电流扰动模式，频率范围为 1 Hz-1 MHz，扰动幅度为 1-5 mA。

6.4 数据处理

在测得的阻抗谱图中，从谱线的低频部分与实轴的交点读取膜样品的阻抗值 R ，根据式（4）计算出样品的 in-plane 离子电导率：

$$\sigma = l/(a \times b \times R) \dots \dots \dots (4)$$

式中：

σ —— 为样品的 in-plane 离子电导率，单位为西门子每厘米（S/cm）；

l —— 为中间两个电极间的距离，单位为厘米（cm）；

a —— 为膜样品的宽度，单位为厘米（cm）；

b —— 为膜样品的厚度，单位为厘米（cm）；

R —— 为膜样品的测量阻抗，单位为欧姆（ Ω ）。

7 离子交换容量测试

7.1 测试仪器

7.1.1 电位滴定仪：精度不小于 0.1 mV。

7.1.2 电子分析天平：精度不低于 0.1 mg。

7.2 样品准备

将待测试膜样品裁剪成特定尺寸大小（5 cm×5 cm）。

7.3 测试步骤

7.3.1 OH⁻离子交换

称取膜材料样品 0.4 g-0.6 g，浸泡于 200 mL 1 M KOH 溶液中，在 80 °C 水浴中离子交换 24 h。把膜中的阴离子交换成氢氧根离子，得到 OH 型的膜。若膜本身为氢氧根离子型，则不需要进行此过程。

7.3.2 Cl⁻离子交换

将上述氢氧根离子型的膜取出，将其浸泡于 200 mL 的 1 M NaCl 溶液中，在 80 °C 下水浴中离子交换 24 h。

7.3.3 NO₃⁻离子交换

将上述氯离子型膜材取出，用去离子水充分洗涤，以确保膜上残留的 NaCl 完全去除。用滤纸吸干膜表面的水分，放置于 200 mL 的 0.1 M NaNO₃ (V₁) 溶液中，在 80 °C 下离子交换 24 h，将膜中的氯离子完全交换到 NaNO₃ 溶液中。

7.3.4 滴定氯离子（电位滴定）

向滴定杯中加入 10 mL 充分浸泡了氯离子型膜材的 NaNO₃ (V₂) 溶液，用 0.01 M AgNO₃ 标准溶液进行滴定，直至达到滴定终点，平行滴定 3 次，取平均值，记录消耗的 AgNO₃ 溶液的体积，记为 V_{AgNO₃}。

7.3.5 称重

最后将膜取出用去离子水充分洗涤，在 80 °C 烘箱中干燥 24 h，移至干燥器中冷却至室温后，快速称量（30 s 内完成），前后两次称量之差小于 0.2 mg，所得干膜质量记为 m_{dry}。

7.4 数据处理

IEC 计算见式（5）：

$$IEC_{NO_3^-} = \frac{n_{NO_3^-}}{m_{dryNO_3^-}} = \frac{n_{Cl^-}}{m_{dryNO_3^-}} = \frac{1000C_{AgNO_3} \times V_{AgNO_3} \times \frac{V_1}{V_2}}{m_{dryNO_3^-}} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$IEC_{NO_3^-}$ —— 为 NO₃⁻ 型膜材的离子交换容量，单位为毫摩尔每克（mmol/g）；

C_{AgNO_3} —— 为标定的 AgNO₃ 溶液的准确浓度，单位为摩尔每升（mol/L）；

V_{AgNO_3} —— 为滴定氯离子消耗的 AgNO₃ 溶液的体积，单位为升（L）；

V_1 —— 为用于浸泡氯型膜的 NaNO₃ 溶液体积，单位为升（L）；

V_2 —— 为参与电位滴定的 NaNO₃ 溶液体积，单位为升（L）；

$m_{dryNO_3^-}$ —— 为滴定烘干后干态的膜（NO₃⁻）的质量，单位为克（g）。

注：取 3 组样品为一组，计算出平均值作为测试结果。

8 透气率测试

按照 GB/T 20042.3 规定的方法进行测试。

9 电化学渗氢电流测试

9.1 测试仪器

9.1.1 温湿度控制系统：阳极（H₂）气体流量为 250 SCCM，阴极（N₂）气体流量为 500 SCCM，背压为 0 kPa。

9.1.2 电化学工作站：电压测试范围 0 V-0.5 V，扫速 2 mV/s。

9.2 样品准备

9.2.1 由 40% Pt/C 催化剂搭配阴离子交换树脂溶液进行制浆，每毫升浆料中含 4 mg Pt/C 和 1 mg 聚合物，CCM 两面 Pt 载量均为 0.4 mg/cm²。

9.2.2 离子交换膜表面喷涂催化剂得到催化剂涂覆膜（CCM），制备双面催化层对称的 CCM，离子膜全尺寸为 7 cm×7 cm，中间活性区域为 5 cm×5 cm，活性面积之外的四周做密封处理。

9.2.3 将试样浸泡于装有 1M KOH 溶液的烧杯中，80 °C 水浴处理 24 h 至离子交换充分，使试样离子形式为 OH⁻。

9.3 测试步骤

9.3.1 测试装置组装

9.3.1.1 把 CCM 和气体扩散层等组件组装在单电池中，压强在 0.5 MPa-1.2 MPa 范围。

9.3.1.2 氢氮吹扫：阳极氢气流量为 250 SCCM，阴极氮气流量为 500 SCCM，两种气体均 100% RH 增湿，具体温度依据实际情况进行设定（为避免水蒸气在电池进出口管线中冷凝，管线设定温度一般高于单电池温度 5 °C）。

9.3.2 渗氢电流测试

氢氮测试：阳极氢气流量为 250 SCCM，阴极氮气流量为 500 SCCM；电压测试范围 0 V-0.5 V（vs RHE），扫描速度 1-2 mV/s，测试背压可依据实际需求进行调节。阴极接工作电极，阳极接对电极与参比电极。

9.4 数据处理

从氢渗透曲线平台部分读取电流值（一般取 0.4 V 左右的电流值），按照式（6）计算膜电极的透氢电流密度：

$$i_{\text{cross}} = I_{\text{cross}}/S_{\text{MEA}} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

i_{cross} —— 膜电极样品的透氢电流密度，单位为毫安每平方厘米（mA/cm²）；

I_{cross} —— 从电化学方法测试的氢渗透曲线平台部分读取的电流值，单位为安（mA）；

S_{MEA} —— 膜电极样品的有效面积，单位为平方厘米（cm²）。

10 拉伸性能测试

10.1 测试仪器

10.1.1 试验机：任何能满足本章测试要求的试验机均可。

10.1.2 试验夹具：试验夹具不应引起试样在夹具处断裂。施加负荷时，应满足试样的纵轴与通过夹具中心线的拉伸方向重合。

10.1.3 测厚仪：精度不低于 0.1 μm。

10.1.4 卡尺：精度不低于 0.02 mm，用于测试膜的长度和宽度。

10.2 样品准备与状态调节

10.2.1 样品准备

10.2.1.1 样品应沿材料纵向和横向分别等间隔裁取，根据 GB/T 1040.3 规定的方法裁成一定尺寸的哑铃或长条形状。样品边缘应平滑无缺口，可用低倍放大镜检查缺口，舍去边缘有缺陷的样品。

10.2.1.2 样品按每个测试方向为一组，每组样品数应满足3次有效测试的要求。

10.2.1.3 按样品尺寸要求准确打印或画出标线。此标线应对样品不产生任何影响。

10.2.1.4 测试前将试样浸泡于1 M NaHCO_3 溶液中，80 °C 下水浴处理24 h至离子交换充分，使离子形式完全转换为 HCO_3^- 。然后用去离子水清洗干净膜材，将膜材置于80 °C下烘干后即可进行拉伸测试。

10.2.2 样品状态调节

样品应在温度为 $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ ，相对湿度为 $50\% \pm 10\%$ 的恒温恒湿条件下，放置至少4 h。

10.3 测试方法

10.3.1 形状与尺寸

应优先选用宽度为25 mm-38 mm、长度不小于150 mm的哑铃型试样(i型试样，见图1)，试样中部应有间隔为50 mm的两条平行标线，有些薄膜材料断裂时有很高的伸长量，可能超过试验机的行程限度，此时，允许把夹具间的初始距离减少到50 mm。

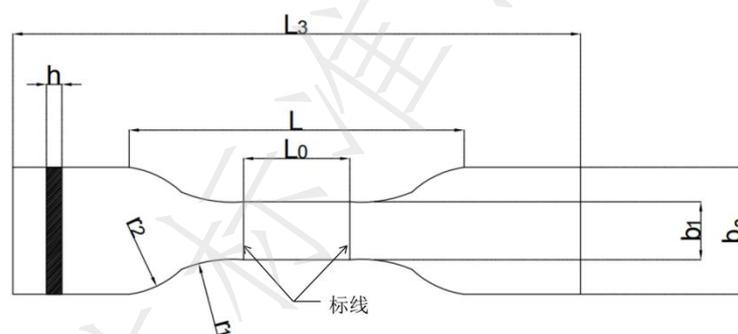


图1 i型试样

b_1 —— 窄平行部分宽度（计算取用宽度）；

b_2 —— 端部宽度；

h —— 端部厚度；

L_0 —— 标距长度；

L —— 夹具间的初始距离；

L_3 —— 总长度；

r_1 —— 小半径；

r_2 —— 大半径。

对于机织布或者无纺布类型的增强型阴离子交换膜，选用宽度为10 mm-25 mm，长度不小于150 mm的长条试样(即 ii 型试样，见图2)，试样中部应有间隔为50 mm的两条平行标线。

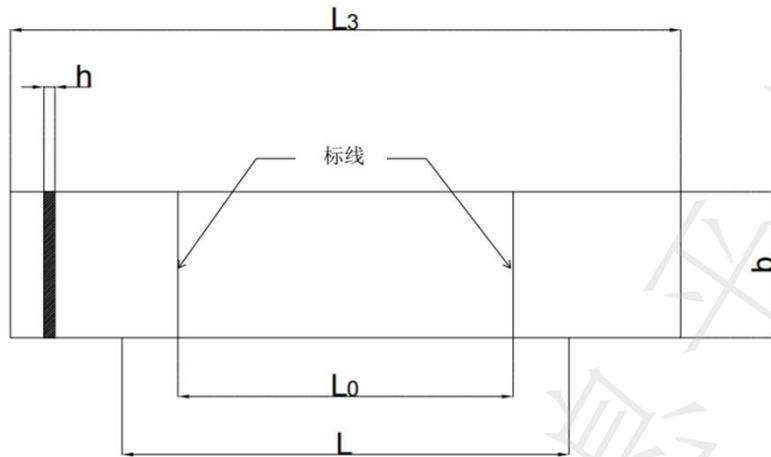


图2 ii型试样

- b —— 宽度（计算取用宽度）；
- h —— 厚度；
- L_0 —— 标距长度；
- L —— 夹具间的初始距离；
- L_3 —— 总长度。

10.3.2 测试步骤

10.3.2.1 在温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 $50\% \pm 10\%$ 的恒温恒湿条件下，测量样品厚度及宽度。每个样品的厚度及宽度应在标距内测量3个点，取其平均值。厚度测量精确度为 $\pm 0.2\%$ ，宽度测量精确度为 $\pm 0.5\%$ 。

10.3.2.2 将样品置于试验夹具中，使样品纵轴与上、下夹具中心连线相重合，并将其夹紧（图3）。

10.3.2.3 测试速度：测定拉伸强度和断裂伸长率时可以采用不同的拉伸速度，在 $50\text{ mm/min} - 200\text{ mm/min}$ 范围内选取。对于每种拉伸速度，应分别适用单独的试样。

10.3.2.4 样品断裂后，读取相应的负荷值。若样品断裂在标线以外的部位时，该次测试无效。

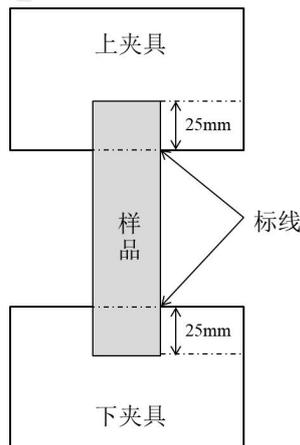


图3 样品的加持方式

10.4 数据处理

10.4.1 拉伸强度

10.4.1.1 i型试样

根据拉伸应力-应变曲线及膜样品初始的厚度、宽度数据，应按式(7)计算膜的拉伸强度：

$$\sigma = F/(b_1 \times d) \dots\dots\dots (7)$$

式中:

σ —— 膜的最大拉伸强度, 单位为兆帕 (MPa);

F —— 最大负荷, 单位为牛 (N);

b_1 —— 样品宽度, 单位为毫米 (mm);

d —— 样品厚度, 单位为毫米 (mm)。

注: 取3个样品为一组, 计算出平均值为测试结果。

10.4.1.2 ii型试样

根据拉伸应力-应变曲线及膜样品初始的厚度、宽度数据, 按式(8)计算膜的拉伸强度:

$$\sigma = F/(b \times d) \dots\dots\dots (8)$$

式中:

σ —— 膜的最大拉伸强度, 单位为兆帕 (MPa);

F —— 最大负荷, 单位为牛 (N);

b —— 样品宽度, 单位为毫米 (mm);

d —— 样品厚度, 单位为毫米 (mm)。

注: 取3个样品为一组, 计算出平均值为测试结果。

根据标距, 按式(9)计算膜试样的断裂拉伸应变:

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta L_0}{L_0} \times 100\% \dots\dots\dots (9)$$

式中:

ε_b —— 膜试样的断裂拉伸应变, 单位为百分比 (%);

L_0 —— 膜试样的标距, 单位为毫米 (mm);

ΔL_0 —— 膜试样标记间长度的增量, 单位为毫米 (mm)。

注: 取3个样品为一组, 计算出平均值作为测试结果。

10.4.2 弹性模量

根据两个规定的应变值按式(10)计算弹性模量:

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

E —— 弹性模量, 单位为兆帕 (MPa);

σ_1 —— 应变值 $\varepsilon_1=0.5\%$ 时测量的应力, 单位为兆帕 (MPa);

σ_2 —— 应变值 $\varepsilon_2=2.5\%$ 时测量的应力, 单位为兆帕 (MPa)。

注: 取3个样品为一组, 计算出平均值作为测试结果。

11 溶胀率测试

11.1 测试仪器

11.1.1 测厚仪: 精度不低于 0.1 μm 。

11.1.2 卡尺: 精度不低于 0.02 mm, 用于测试膜的长度和宽度。

11.1.3 恒温水浴设备: 温度控制精度为 ± 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 。

11.2 样品准备与调节

11.2.1 样品准备

沿着平行于膜卷轴方向截取长×宽= 40 mm×20 mm 的样条作为横向尺寸变化率的测试样条；沿着垂直于膜卷轴方向截取长×宽= 40 mm×20 mm 的样条作为纵向尺寸变化率的测试样条。样品数量至少为3个，应无折皱、缺陷和破损。

11.2.2 样品状态调节

测试样品应在温度为23 ℃±2 ℃，相对湿度为50%±10%的恒温恒湿条件下，放置至少4 h。

11.3 测试步骤

11.3.1 在温度为23 ℃±2 ℃，相对湿度为 50%±10% 的恒温恒湿条件下，用卡尺测量样品的初始长度 L_0 ，用测厚仪测试样品的厚度 d_0 。

11.3.2 将样品浸泡在装有1 M KOH溶液的烧杯中，80 ℃下离子交换24 h，得到氢氧根离子型的膜，再用去离子水冲洗膜表面残余的碱液（若膜本身为氢氧根离子型，则不需要进行这一过程）。

11.3.3 将上述样品放入温度为80 ℃的水浴环境中保持至少8 h。然后将样品从恒温水浴环境中取出，平铺于测量平台上，并于30 s内快速完成长度 L_1 和厚度 d_1 的测量。

11.4 数据处理

根据试样在横向和纵向方向的长度数据，应按照式(11)计算样品的横向纵向尺寸变化率：

$$\Delta L = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- ΔL —— 横（纵）向变化率，单位为百分比（%）；
- L_1 —— 样品在恒温水浴浸泡后的尺寸，单位为毫米（mm）；
- L_0 —— 样品的初始尺寸，单位为毫米（mm）。

根据试样厚度数据，按照式(12)计算样品的横向变化率和纵向尺寸变化率：

$$\Delta d = \frac{d_1 - d_0}{d_0} \times 100\% \dots\dots\dots (12)$$

式中：

- Δd —— 厚度变化率，单位为百分比（%）；
- d_1 —— 样品在恒温水浴浸泡后的厚度尺寸，单位为微米（ μm ）；
- d_0 —— 样品的初始厚度尺寸，单位为微米（ μm ）。

注：取3个样品为一组，计算出平均值作为测试结果。

12 吸水率测试

12.1 测试仪器

- 12.1.1 分析天平：分度值为0.1 mg。
- 12.1.2 烘箱：能控制在 80 ℃±0.2 ℃。
- 12.1.3 恒温水浴设备：温度控制精度为±0.2 ℃。

12.2 样品准备与状态调节

12.2.1 样品准备

截取边长50 mm ±1 mm的方形或直径为50 mm ±1 mm的圆形试样作为待测样品。样品数量至少为3个，应无折皱缺陷和破损。

12.2.2 样品状态调节

样品在温度为23 ℃±2 ℃，相对湿度为50%±10%条件下放置4 h以上。

12.3 测试步骤

12.3.1 将样品于 80 °C 下浸泡在装有 1M KOH 溶液的烧杯中，离子交换 24 h，得到氢氧根离子型的膜，再用去离子水清洗（若膜本身为氢氧型离子，则不需要进行这一过程）。

12.3.2 用去离子水将上述得到的膜表面上残留的碱液洗掉，浸泡在去离子水中，80 °C 水浴处理 8 h，使膜充分吸水，将样品从恒温水浴中取出，用滤纸吸干膜表面的水分后，立即放入分析天平称取湿态膜的质量，记为 m_1 。测试温度也可由委托方和测试方协商确定。

12.3.3 将湿态的膜放在烘箱中于 80 °C 干燥 24 h 保证其充分烘干，移至干燥器中冷却至室温后，快速称量，至恒重，前后两次称量之差小于 0.2 mg，所得干膜质量记为 m_0 。

12.4 数据处理

按照式(13)计算：

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \dots \dots \dots (13)$$

式中：

Δm —— 吸水率，单位为百分比（%）；

m_1 —— 湿态膜的质量，单位为克（g）；

m_0 —— 干态膜的质量，单位为克（g）。

13 碱稳定性测试

13.1 测试仪器

13.1.1 电位滴定仪：精度不低于 0.1 mV。

13.1.2 分析天平：精度不低于 0.1 mg。

13.1.3 电化学测试阻抗仪：阻抗频率范围为 1 Hz - 1 MHz。

13.2 样品准备

13.2.1 离子交换容量测试样品要求：裁切 10 mm×45 mm 的膜作为样品。样品数量至少为 3 组，应无折皱缺陷和破损。

13.2.2 离子交换容量测试样品要求：裁切 5 cm×5 cm 的膜作为样品。样品数量至少为 3 组，应无折皱缺陷和破损。

13.3 测试步骤

13.3.1 对样品进行离子交换容量测试和 OH 离子电导率测试，分别得到初始 C_0 和 λ_0 。

13.3.2 将样品在 5 M KOH 溶液中，80 °C 下浸泡 1000 h 或以上（测试时间可根据需求而定），取 100 h、200 h、500 h、1000 h 等时间节点进行测试。

13.3.3 上述样品进行离子交换容量测试（取出后用去离子水清洗至中性，然后直接从 7.3.2 开始操作）和 OH 离子电导率测试（具体操作见第 5 部分），分别得到 C_1 和 λ_1 。

13.4 数据处理

按式(14)计算 IEC 的变化率：

$$\Delta C = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100\% \dots \dots \dots (14)$$

式中：

ΔC —— 试样 IEC 的变化率，单位为百分比（%）；

C_1 —— 试样处理后的 IEC，单位为毫摩尔每克（mmol/g）；

C_0 —— 试样的初始 IEC，单位为毫摩尔每克（mmol/g）。

按式(15)计算离子电导率变化率:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0} \times 100\% \dots \dots \dots (15)$$

式中:

- $\Delta\lambda$ —— 试样离子电导率的变化率, 单位为百分比 (%);
- λ_1 —— 试样处理后的离子电导率, 单位为西门子每厘米 (S/cm);
- λ_0 —— 试样的初始离子电导率, 单位为西门子每厘米 (S/cm)。



中国团体标准