

三氟苯乙酮改性膜的电解水性能研究

王 薪^{1*}, 王翠艳¹, 林俊尧¹, 黄瑛达²

(1.忻州师范学院化学系, 山西 忻州 034000;

2.中国科学院山西煤炭化学研究所, 山西 太原 030001)

摘要:针对碱性电解槽耐久性提升难题,借助超酸催化策略,在聚(三苯基-冠醚-哌啶)膜体系中引入三氟苯乙酮单体,同步优化膜的尺寸溶胀特性与耐碱稳定性。相较于 PDTP-30 膜,PDTP-30-15 膜在 80°C 时吸水率降低 64.8%,拉伸强度提升 56%;在 80°C、1 mol/L KOH 中浸泡 1 500 h 后,氢氧根电导率保留率高达 88%。PDTP-30-15 膜在 2.04 V 电压下可实现 2 000 mA/cm² 电流密度,且在 80°C、1 mol/L KOH、250 mA/cm² 工况下稳定运行 210 h,电压衰减率仅 0.9 mV/h,为高效稳定膜材料的设计开发提供了新路径,助力碱性电解水技术的发展突破。

关键词:碱性电解水;阴离子交换膜;三氟苯乙酮;吸水溶胀率;耐碱稳定性

中图分类号:O631.3;TQ317.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)05-0130-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.023

Trifluoroacetophenone-modified membranes for alkaline water electrolysis: performance investigation

WANG Xin^{1*}, WANG Cui-yan¹, LIN Jun-yao¹, HUANG Ying-da²

(1.Department of Chemistry, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, China;

2.Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China)

Abstract:To address the challenge of improving the durability of alkaline electrolyzers, a superacid-catalyzed strategy was employed to introduce a trifluoroacetophenone monomer into the poly (triphenyl-crown ether-piperidine) membrane system, simultaneously optimizing the membrane's dimensional swelling characteristics and alkaline stability. Compared with the PDTP-30 membrane, the PDTP-30-15 membrane shows a 64.8% reduction in water absorption at 80°C and a 56% increase in tensile strength. After soaking in 1 mol/L KOH at 80°C for 1 500 h, the hydroxide conductivity retention rate of the PDTP-30-15 membrane reached as high as 88%. The PDTP-30-15 membrane achieved a current density of 2 000 mA/cm² at 2.04 V. Moreover, it operated stably for 210 h under the conditions of 80°C, 1 mol/L KOH, and 250 mA/cm², with a decay rate of only 0.9 mV/h. This study provides a new approach for the design and development of high-efficiency and stable membrane materials, facilitating the breakthrough development of alkaline water electrolysis technology.

Key words: alkaline water electrolysis; anion exchange membrane; trifluoroacetophenone; water uptake and swelling ratio; alkaline stability

采用膜电极 (MEA) 结构的阴离子交换膜电解水 (AEMWE) 是一种颇具发展前景的电解水技术^[1-3]。阴离子交换膜 (AEMs) 作为 MEA 的核心部件,一方面需将阴极产生的 OH⁻ 传输到阳极参与反应,另一方面要分隔阴极产生的 H₂ 和阳极产生的 O₂,避免气体互窜引发安全隐患^[4-6]。当前, AEMs 的离子传导率、尺寸溶胀性、耐碱稳定性以及机械性能等方面的问题,是制约电解槽性能提升的关键因素^[7-8]。

近年来,超酸催化制备聚芳烷膜的研究备受关

注,该方法具有反应简单易控、无需金属催化剂参与,且所得聚合物碱稳定性优异等优点^[9-11]。然而,相关研究仍面临诸多挑战,Olsson 等^[9]合成的 PTPipQ1 特性粘度仅为 0.39 dL/g,致使膜在 20°C 时吸水率高达 145% (质量分数);尽管后续通过引入长烷基链降低吸水率并提高了电导率,但烷基链上 β 氢的存在削弱了膜的碱性稳定性。Olsson 等^[10]尝试部分季铵化来降低膜 PBPipQs 的离子交换容量 (IEC),但因过高吸水率导致膜材料软化,OH⁻ 电导率降低。后续通过原位交联得到膜

收稿日期:2025-07-21;修回日期:2026-03-07

基金项目:2024 年第三批博士来晋工作奖励 (Z20250071);山西省基础研究计划资助项目 (202503021212253);忻州师范学院大学生创新创业训练计划项目 (2025X097)

作者简介:王薪 (1992-),男,博士,讲师,研究方向为离子交换膜材料,通讯联系人,243868023@qq.com。

PBPipQ64-C34% (IEC = 2.26 meq/g), 虽在 80℃ 时实现 102% 吸水率与 122 mS/cm 的 OH⁻ 电导率, 但交联烷基链扭曲哌啶环结构, 加速离子损失, 降低霍夫曼开环 β 氢消除反应活化能, 致使碱性稳定性显著降低。以上研究中 AEMs 的制备方法和步骤繁杂, 交联度较难控制。因此, 如何通过简便方法设计出兼具适宜吸水溶胀率与优异耐碱稳定性的 AEMs 并应用于 AEMWE 体系, 已成为一个亟待解决的关键问题。

本研究基于前期制备的含亲水性冠醚单元的聚(三苯基哌啶)膜 PDTP-30^[12], 采用简单可控的超酸催化引入三氟苯乙酮单体。系统地探究该单体对膜材料吸水溶胀性、离子导电性、机械性能和碱性稳定性等性能的影响规律, 并对 AEMs 的降解机理进行分析。尤为重要的是, 对比分析了膜 PDTP-30 及其改性膜在电解槽实际运行工况下的性能表现, 为 AEMs 的优化设计与性能提升提供重要依据。

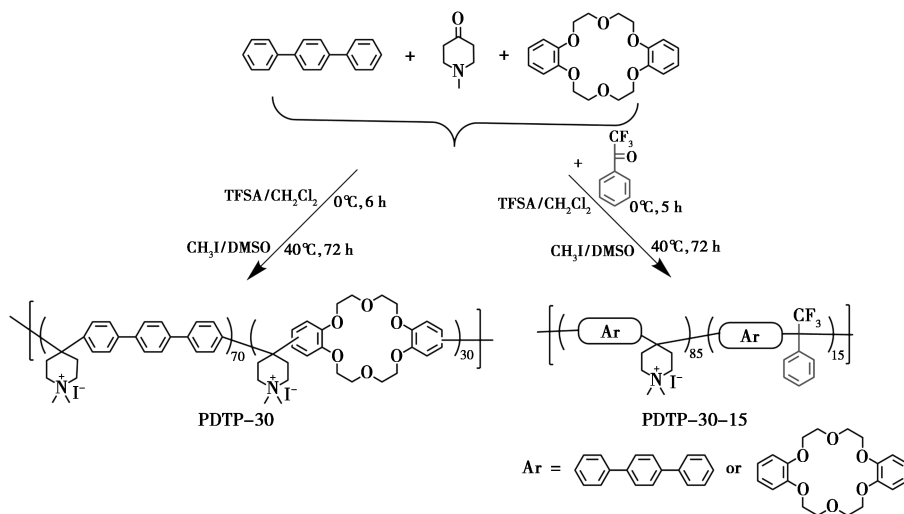


图1 共聚物 PDTP-30 和 PDTP-30-15 的合成路线

1.2.2 PDTP-30-15 共聚物的合成

为降低膜 PDTP-30 的吸水溶胀率, 在超酸催化聚合过程中引入了适量的三氟苯乙酮单体。共聚物 PDTP-30-15 的合成及后处理方法与 PDTP-30 的制备方法一致, 合成方法如图 1 所示, 仅调整单体用量: 三氟苯乙酮(0.21 mL, 1.5 mmol) 和 *N*-甲基-4-哌啶酮(1.0 mL, 8.5 mmol), 反应时间为 5 h, 其他条件保持不变。

1.2.3 PDTP-30 和 PDTP-30-15 膜的制备

将共聚物(I⁻形式)完全溶解于 DMSO 中, 配制成固含量为 8% 的铸膜液, 然后浇铸在水平的玻璃板上, 并置于 60℃ 烘箱中干燥过夜, 全程关闭鼓风

1 实验

1.1 材料与仪器

对三联苯(99%)、*N*-甲基-4-哌啶酮(98%)、二苯并-18-冠-6(DE, 98%)、三氟苯乙酮(98%)、三氟甲磺酸(TFSA, 99%)、三氟乙酸(TFA, 99%) 和碘甲烷(CH₃I, 99.5%), Alfa Aesar; 二氯甲烷(CH₂Cl₂)、二甲基亚砷(DMSO)、氢氧化钾(KOH), 均为分析纯, 安耐吉试剂有限公司生产。

核磁共振波谱仪(Bruker DPX-400), 电化学工作站(Bio-Logic VSP-300), 热重分析仪(HTG, 北京恒久实验设备), 万能拉伸机(CMT4502, 美特斯工业系统有限公司), 商用电解槽测试设备(CT-4008-5V10A-FA, Neware Technology Limited)。

1.2 PDTP-30 和 PDTP-30-15 膜的制备

1.2.1 PDTP-30 共聚物的合成

PDTP-30 共聚物的制备参考文献[12], 合成方法如图 1 所示。

机。氯离子(Cl⁻)或氢氧根型(OH⁻)的膜是通过将 I⁻形式的膜浸泡于 80℃ 下 1 mol/L KCl 或 1 mol/L KOH 溶液中持续交换 24 h 而得。膜的厚度均在 45~50 μm 之间。

1.3 膜的结构表征与基本性能测试

1.3.1 核磁共振氢谱(¹HNMR)

取 20 mg 的样品完全溶解于氘代二甲基亚砷(DMSO-*d*₆)和 10% TFA 混合溶剂中, 通过核磁共振波谱仪(400 MHz)表征聚合物的结构。

1.3.2 特性粘度(η)

将待测聚合物完全溶解于 DMSO 中, 配制成 5 个浓度不同的待测样品, 然后在 30℃ 下使用 0.5~

0.6 mm 的乌氏粘度计测定。为了减小实验误差,每个样品测试 3 次。计算公式如式(1)、式(2)所示。

$$\eta_{\text{inh}} = \ln(t_1/t_2)/c \quad (1)$$

$$\eta_{\text{red}} = (t_1/t_2 - 1)/c \quad (2)$$

其中, t_1 指浓度为 c 的聚合物溶液的流出时间, min; t_2 指空白样品的流出时间, min; η 是通过将 η_{red} 和 η_{inh} 外推到 $c=0$ 时, 计算与 y 轴的截距来获得。

1.3.3 吸水率(WU)和溶胀率(SR)

WU 和 SR 是指 OH^- 形式的干膜在不同温度(20~80℃)下溶胀前后质量和长度的变化率。将多个 2 cm×2 cm 的膜浸泡于不同温度的去离子水(DI)中, 浸泡时间均为 24 h 保证膜的完全溶胀, 取出膜后用滤纸快速擦干其表面的水分, 在分析天平上称重并记录膜的重量(W_{wet})和长度(L_{wet})。最后将膜置于 80℃ 烘箱中烘干, 记录得到的干膜的重量(W_{dry})和长度(L_{dry})。为了减小实验误差, 每个膜样品测试 3 次。WU 和 SR 计算公式如式(3)、式(4)所示。

$$WU = [(W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}})/W_{\text{dry}}] \times 100\% \quad (3)$$

$$SR = [(L_{\text{wet}} - L_{\text{dry}})/L_{\text{dry}}] \times 100\% \quad (4)$$

1.3.4 实验离子交换容量(IEC_{exp})

采用标准返滴定法测定 AEMs 的 IEC_{exp} 。将 OH^- 形式的膜浸入 0.01 mol/L HCl 溶液中, 24 h 后用 0.01 mol/L NaOH 标准溶液进行滴定, 记录消耗的标准溶液 NaOH 的体积。每种膜样品均进行 3 次平行测试。计算公式如式(5)所示。

$$IEC_{\text{exp}} = (V_{\text{HCl}} \times c_{\text{HCl}} - V_{\text{NaOH}} \times c_{\text{NaOH}})/W_{\text{dry}} \quad (5)$$

其中, c_{HCl} 和 c_{NaOH} 指标准溶液的浓度, mol/L; V_{HCl} 和 V_{NaOH} 指标准溶液的体积, mL。

1.3.5 离子传导率(σ)

将大小为 1 cm×4 cm 的 AEMs 固定在 Teflon 模具中, 并置于不同温度(20~80℃)的 DI 水中, 使用 Bio-Logic VSP-300 型电化学工作站进行测试。通过记录膜电阻来计算膜的 σ , 公式如式(6)所示。

$$\sigma = d/AR \quad (6)$$

其中, d 为两个参比电极之间的距离, 0.7 cm; A 为膜样品的横截面积, cm^2 ; R 为膜样品的电阻, Ω 。

1.3.6 热稳定性(TGA)

取 10 mg 干燥的膜样品装入坩埚, 在 N_2 气氛下, 升温速率为 10℃/min, 测试温度范围 100~750℃, 使用北京恒久实验设备 HTG 型热重分析仪进行测试。

1.3.7 机械性能

AEMs 机械性能测试包括膜的拉伸强度和断裂

伸长率。将膜裁成 1 cm×4 cm 的大小, 通过 CMT4502 型万能拉伸机以 5 mm/min 拉伸速率进行测试。

1.3.8 碱性稳定性

将 AEMs 置于 80℃、1 mol/L KOH 溶液中, 每隔 3 天更换一次新配制的 KOH 溶液。隔一定时间取出膜并多次冲洗确保膜表面无残留物, 对膜电导率和 $^1\text{HNMR}$ 进行测试并分析降解机制。

1.4 AEMWE 的性能测试

采用催化剂涂层基底(CCS)法制备 MEA(有效面积为 4 cm^2), 包括阳极和阴极催化层的制备^[13-14]。对于阳极, 将 IrO_2 粉末、DI 水和异丙醇混合并超声 30 min, 使其均匀分散, 随后均匀喷涂于镍泡沫(Ni foam)上, 将获得的 Ni foam 在管式炉中 450℃ 下持续焙烧 2 h, 最后测试 IrO_2 负载量约为 2 mg/cm^2 ; 对于阴极, 将 Pt/C 催化剂、DI 水、异丙醇和离聚物(5%)混合并超声 30 min, 接着均匀喷涂至商用碳纸, Pt 和离聚物负载量分别为 1.5 mg/cm^2 和 1.00 mg/cm^2 。

1.4.1 极化曲线的测试

电解池由线性单路径蛇形管的 Ni 流场板、MEA 和氟橡胶垫圈组成^[15]。获得第一条极化曲线前, 将电池在 50 mA/cm^2 (60℃, 1 mol/L KOH) 下运行 30 min 以达到稳定状态。最后, 在 1 mol/L KOH 溶液以 40 mL/min 的流速循环下获得极化曲线。

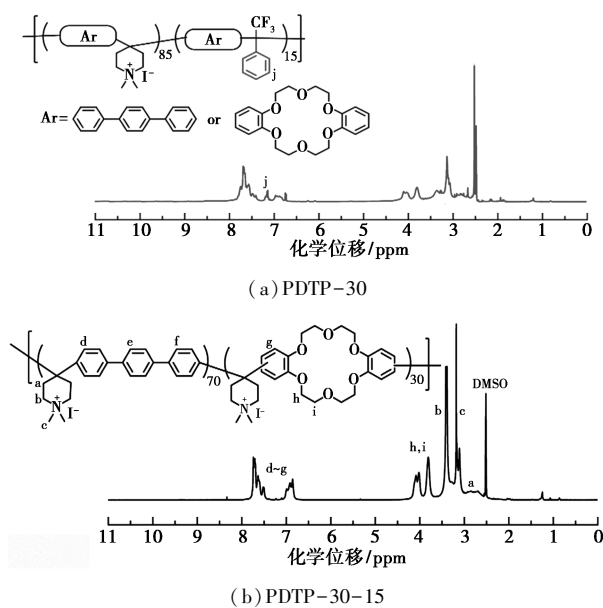
1.4.2 耐久性测试

在 80℃、1 mol/L KOH 和 250 mA/cm^2 的电流密度下, 测试不同 MEA 的电解槽耐久性。

2 结果与讨论

2.1 共聚物的 $^1\text{HNMR}$ 分析

共聚物 PDTP-30 和 PDTP-30-15 的 $^1\text{HNMR}$ 如图 2 所示。7.30~8.00 ppm 和 6.50~7.00 ppm 处的信号归属于聚合物骨架的芳香质子。所有共聚物在 3.85~4.20 ppm 处均呈现特征峰, 对应 DE 链段的氧乙烯质子(H_h 和 H_i), 表明亲水性冠醚基团已成功地引入聚合物主链^[16]。此外, N,N -二甲基哌啶鎓(DMP)阳离子的特征信号出现在 2.90、3.15 ppm 和 3.40 ppm。通过比较 $\text{H}_{h,i}$ 和 H_{d-g} 之间的积分面积可知, 主链中 DE 单元含量与进料比保持一致。共聚物 PDTP-30-15 中出现新的信号峰(H_j), 该峰对应三氟苯乙酮单体苯环上氢原子, 这一结果直接证明了目标共聚物的成功制备。

图2 共聚物¹H NMR谱图

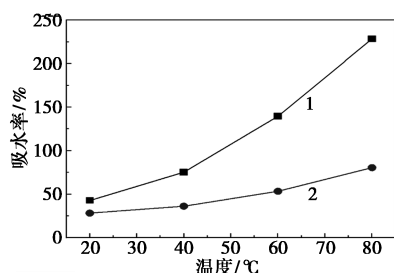
2.2 膜的吸水率和溶胀率

表1列出了OH⁻形式在20℃下的基本性质,包括IEC值、*WU*、*SR*、 σ 和 η 。*IEC*实验值与¹H NMR获得的理论值接近,表明聚合物的成功制备及离子交换较完全。

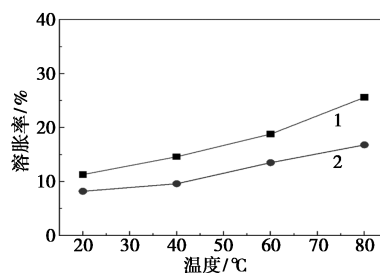
表1 膜PDTP-30和PDTP-30-15的性能

膜	离子交换容量/ (meq·g ⁻¹)		吸水 率/%	溶胀 率/%	OH ⁻ 电导率/ (mS·cm ⁻¹)	特性 粘度/ (dL·g ⁻¹)
	理论值	实验值				
PDTP-30	2.37	2.45	46.2	11.5	42.4	0.8
PDTP-30-15	2.00	2.02	28.2	8.2	40.2	1.5

考虑到碱性电解槽通常在60~80℃工况下运行,研究了温度对膜*WU*和*SR*的影响,如图3所示。温度升高对膜的*WU*和*SR*呈现显著影响:膜PDTP-30的吸水率从20℃时的46.2%上升至80℃时的228.5%,同时80℃时溶胀率达25.6%。然而,引入15 mol%三氟苯乙酮制备的膜PDTP-30-15,在80℃时吸水率仅为80.5%,较膜PDTP-30降低64.8%。*WU*的显著下降不仅有助于提升膜的离子



(a) 吸水率与温度的函数关系



(b) 溶胀率与温度的函数关系

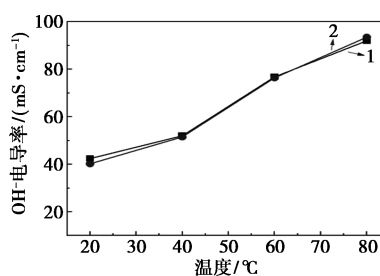
1—PDTP-30;2—PDTP-30-15

图3 OH⁻形式膜吸水率和溶胀率与温度的函数关系

传导率,还对改善其机械性能具有重要意义。

2.3 膜的离子传导率

OH⁻电导率是决定AEMs在碱性电化学设备中应用的关键参数。对AEMs在不同温度水中的OH⁻电导率进行测试,结果如图4所示。研究发现,高温能够促进离子在膜内的快速传输,显著增强氢氧化物扩散能力^[17-18]。在20℃条件下,膜PDTP-30的OH⁻电导率略高于膜PDTP-30-15,这归因于前者较高的*IEC*;而当温度升至80℃时,膜PDTP-30的OH⁻电导率为92 mS/cm,反而低于膜PDTP-30-15。这是由于PDTP-30在高温下吸水溶胀率过高,导致离子浓度显著降低,进而削弱了离子传导效率。



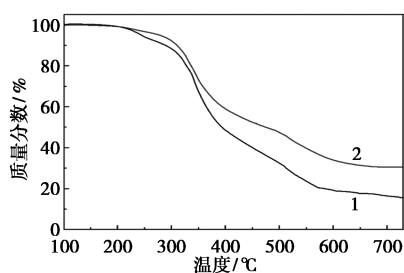
1—PDTP-30;2—PDTP-30-15

图4 OH⁻形式膜的电导率与温度的函数关系

2.4 膜的热稳定性和机械性能

通过热重分析(TGA)对膜在N₂气氛下的热稳定性进行测试,如图5所示。在200~750℃的升温过程中,干燥的膜呈现出典型的两阶段降解特征:第1次降解在240℃,归因于哌啶基的分解^[19-20];第2次降解出现在350℃附近,对应聚合物主链及链中冠醚单元的分解^[16,21]。以上两种膜均满足在AEMWE系统的实际应用需求。

作为AEMWE的隔膜,良好的机械性能对于确保电解槽运行过程中AEMs的完整性、防止气体互



1—PDTP-30;2—PDTP-30-15

图 5 膜的 TGA 曲线

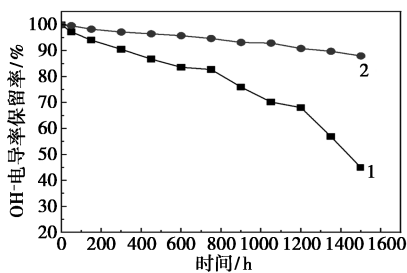
串,以及决定电解槽的耐久性至关重要,特别是在完全水合状态下的碱性溶液中^[12,15]。因此,在室温、全湿条件下对膜的机械性能进行了测试,如表 2 所示。相较于膜 PDTP-30,膜 PDTP-30-15 因引入 15 mmol% 的三氟苯乙酮,不仅提高了聚合物的特性粘度,同时降低了膜的吸水溶胀率,进而使该膜的拉伸强度和断裂伸长率均得到提高。

表 2 膜的机械性能

膜	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
PDTP-30	18.4±0.5	14.5±0.3
PDTP-30-15	28.7±0.2	17.6±0.2

2.5 膜的碱稳定性

研究表明,AEMs 的碱性稳定性对 AEMWE 的耐久性能起着决定性作用^[22]。通过记录 OH⁻ 电导率随浸泡时间的变化来分析膜的碱性稳定性。如图 6 所示,随着膜在 80°C 1 mol/L KOH 溶液中浸泡时间的增加,OH⁻ 电导率均呈现下降趋势。测试 1 500 h 后,膜 PDTP-30 展现出较差的碱性稳定性,OH⁻ 电导率保留率仅为 45%。然而,添加了三氟苯乙酮单体的膜 PDTP-30-15 表现出色,其 OH⁻ 电导率保留率高达 88%。这一优异性能得益于共聚物粘度的提升以及适中的吸水率。



1—PDTP-30;2—PDTP-30-15

图 6 膜的碱稳定性曲线(80°C,1 mol/L KOH)

为深入探究膜的降解机制,通过 ¹HNMR 光谱对老化的 AEMs 进行评估。由图 7 可知,对于老化

后的 PDTP-30 膜,在 9.6 ppm 处出现新的信号峰,该信号归属于质子化的叔胺,同时在 4.9、5.3 ppm 和 6.5 ppm 处出现了一组对应于乙烯基质子的新信号,这表明哌啶基发生了 Hofmann 消除反应^[9-10,12,22]。此外,由于降解产物(叔胺)的形成,位于 3.1 ppm 和 3.5 ppm 处的甲基质子的强度减弱,且部分移至 2.9 ppm。由此可见,哌啶基的降解主要以 Hofmann 消除为主,同时伴有少量的 α-碳上的亲核取代反应。值得注意的是,当引入 15 mmol% 的三氟苯乙酮后,老化的膜 PDTP-30-15 未出现明显的降解,说明其对膜的降解起到了有效的抑制作用。

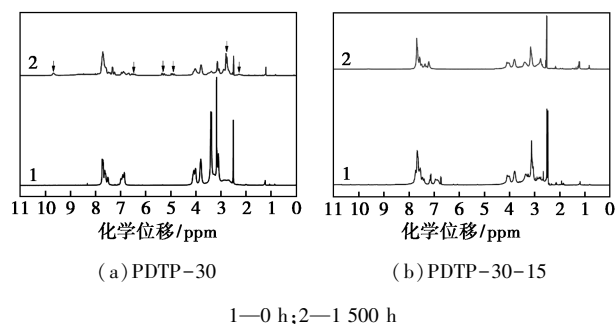
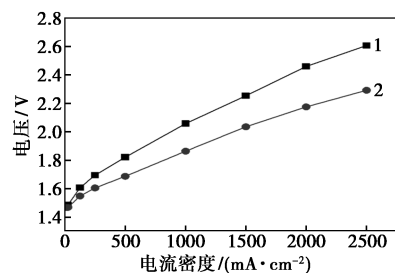


图 7 1 500 h 碱稳定性测试后 ¹H NMR 谱图

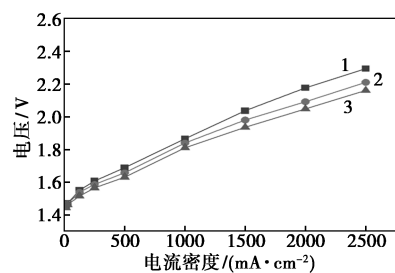
2.6 膜的电解水性能

AEMWE 的性能是衡量 AEMs 性能优劣的关键指标。如图 8(a) 所示,在 60°C、1 mol/L KOH 条件下,膜 PDTP-30-15 展现出较优异的电池性能。当电流密度为 2 000 mA/cm² 时,膜 PDTP-30-15 对应



1—PDTP-30;2—PDTP-30-15

(a) 膜在 60°C、1 mol/L KOH 中的极化曲线



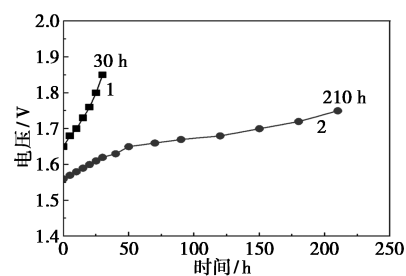
1—60°C;2—70°C;3—80°C

(b) 膜 PDTP-30-15 的电压与温度的函数关系

图 8 膜的初始性能

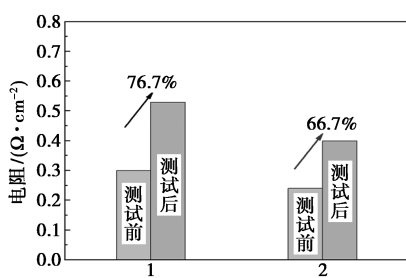
的电压为 2.17 V, 明显低于膜 PDTP-30 的电压 (2.46 V)。随后, 对膜 PDTP-30-15 的电压随温度变化情况进行测试, 如图 8(b) 所示。当温度从 60℃ 升至 80℃ 时, 电压从 2.17 V 降至 2.04 V, 这一变化趋势与膜的 OH⁻ 电导率随温度变化规律一致。

AEMWE 的耐久性是其工业化应用的最大挑战。因此, 在 80℃、1 mol/L KOH 和 250 mA/cm² 电流密度条件下, 对膜的耐久性进行测试, 如图 9 所示。测试发现, 膜 PDTP-30 的电池电压随时间显著上升, 仅运行 30 h 后, 电压从 1.65 V 急剧攀升至 1.85 V, 其衰减率高达 6.67 mV/h, 电池的高频电阻 (HFR) 值增加了 76.7%。然而, 膜 PDTP-30-15 的电池电压则随运行时间缓慢增长, 运行 210 h 后, 电压从 1.56 V 缓慢升至 1.75 V, 衰减率仅为 0.9 mV/h, 电池的 HFR 值增加了 66.7%, 这与膜 PDTP-30-15 优异的异位耐碱稳定性相符。



1—PDTP-30; 2—PDTP-30-15

(a) 膜在 80℃、250 mA/cm² 下的耐久性



1—PDTP-30; 2—PDTP-30-15

(b) 测试前后膜 HFR 值的变化

图 9 膜的耐久性性能

3 结论

通过简单易控的超酸催化反应, 成功地将三氟苯乙酮单体引入聚(三苯基-冠醚-哌啶)膜中, 进而制备出适用于 AEMWE 体系的 PDTP-30-15 膜。与 PDTP-30 膜相比, PDTP-30-15 膜具有更高的机械性能和优异的耐碱稳定性。关键是, PDTP-30-15 膜在 2.04 V 电压下实现 2 000 mA/cm² 的电流密度, 且在 80℃、1 mol/L KOH 和 250 mA/cm² 电

密度的工况条件下, 可持续运行 210 h, 其运行时长达到了 PDTP-30 膜的 7 倍。

参考文献

- [1] 李丹枫, 褚晓萌, 刘磊. 绿氢领域电解水制氢聚合物膜材料研究进展及发展建议[J]. 科学通报, 2022, 67(27): 3282-3295.
- [2] Lawand K, Sampathkumar S, Mury Z, *et al.* Membrane electrode assembly simulation of anion exchange membrane water electrolysis[J]. Journal of Power Sources, 2024, 595: 234047.
- [3] Xu Q, Zhang L, Zhang J, *et al.* Anion exchange membrane water electrolyzer: Electrode design, lab-scaled testing system and performance evaluation[J]. Energy Chem, 2022, 4(5): 100087.
- [4] 冯江涵, 宋轶. 阴离子交换膜电解池的研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(7): 3501-3509.
- [5] Smolinka T, Bergmann H, Garcke J, *et al.* Electrochemical power sources: Fundamentals, systems, and application: Hydrogen production by water electrolysis[M]. Amsterdam: Elsevier, 2022.
- [6] López-Fernández E, Sacedón C, Gil-Rostra J, *et al.* Recent advances in alkaline exchange membrane water electrolysis and electrode manufacturing[J]. Molecules, 2021, 26(21): 6326.
- [7] Li C, Baek J. The promise of hydrogen production from alkaline anion exchange membrane electrolyzers[J]. Nano Energy, 2021, 87: 106162.
- [8] Li G, Motz A, Bae C, *et al.* Durability of anion exchange membrane water electrolyzers[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14: 3393-3419.
- [9] Olsson J, Pham T, Jannasch P. Poly(arylene piperidinium) hydroxide ion exchange membranes: Synthesis, alkaline stability, and conductivity[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28: 1702758.
- [10] Olsson J, Pham T, Jannasch P. Tuning poly(arylene piperidinium) anion-exchange membranes by copolymerization, partial quaternization and crosslinking[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 578: 183-195.
- [11] Lu C, Long C, Li Y, *et al.* Chemically stable poly(meta-terphenyl piperidinium) with highly conductive side chain for alkaline fuel cell membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2020, 598: 117797.
- [12] Wang X, Qiao X, Liu S, *et al.* Poly(terphenyl piperidinium) containing hydrophilic crown ether units in main chains as anion exchange membranes for alkaline fuel cells and water electrolyzers[J]. Journal of Membrane Science, 2022, 653: 120558.
- [13] Chen Q, Huang Y, Hu X, *et al.* A novel ion-solvating polymer electrolyte based on imidazole-containing polymers for alkaline water electrolysis[J]. Journal of Membrane Science, 2023, 668: 121186.
- [14] Wang X, Huang Y, He M, *et al.* Poly(biphenyl piperidinium) anion exchange membranes for alkaline water electrolyzers: The effect of nonionic pendant groups[J]. ACS Applied Energy Materials, 2023, 6(21): 11396-11407.

(下转第 143 页)