文章编号： 1008-9357(2026)05-0466-09 DOI： 10.14133/j.cnki.1008-9357.20260507001

高性能聚芳基哌啶阴离子交换膜的制备及其碱性水电解应用

卢宇阳， 李嘉明， 尤莹雪， 汪 瀛
（惠州亿纬氢能有限公司，广东 惠州 516000）

摘 要： 以对三联苯和*N*-甲基-4-哌啶酮为反应单体，分别引入对三氟甲基苯乙酮（*p*-TFE）、间三氟甲基苯乙酮（*m*-TFE）、邻三氟甲基苯乙酮（*o*-TFE）为功能单体，经超酸催化聚合反应得到了3种不同侧链取代位置的聚芳基哌啶聚合物（PTTP），分别命名为*p*-PTTP、*m*-PTTP、*o*-PTTP；采用碘甲烷分别对*p*-PTTP、*m*-PTTP、*o*-PTTP进行季铵化改性，制备了一系列侧链型聚芳基哌啶（QPTTP）阴离子交换膜（AEMs），依次命名为*p*-QPTTP、*m*-QPTTP、*o*-QPTTP。系统表征了AEMs的化学结构、力学性能与离子传导能力，并将性能最优的膜应用于阴离子交换膜电解槽测试。结果表明，通过调控侧链取代位置，膜的离子交换容量、吸水率和溶胀率得到了优化，利用疏水侧链的自聚集效应诱导膜形成微相分离结构，构建高效离子传输通道。在80 ℃下，*m*-QPTTP膜的OH^-电导率达172.5 mS/cm；在80 ℃、3 mol/L KOH溶液中浸泡2 000 h后，离子电导率保持率为80.9%，表现出优异的碱稳定性；在60 ℃、1 mol/L KOH溶液及1.0 A/cm^{2}电流密度下，电压为1.65 V，并可稳定运行超过250 h，表现出优异的长期稳定性。

关键词： 阴离子交换膜；侧链型；聚芳基哌啶；碱稳定性；电解槽
中图分类号： TQ425.21 **文献标志码：** A

Preparation of High-Performance Poly(aryl piperidinium) Anion Exchange Membranes and Their Application in Alkaline Water Electrolysis

LU Yuyang, LI Jiaming, YOU Yingxue, WANG Ying
（Huizhou EVE Hydrogen Energy Co., Ltd., Huizhou 516000, Guangdong, China）

Abstract: Using *p*-terphenyl and *N*-methyl-4-piperidinone as the fundamental monomers, 4-(trifluoromethyl) acetophenone (*p*-TFE), 3-(trifluoromethyl)acetophenone (*m*-TFE), and 2-(trifluoromethyl)acetophenone (*o*-TFE) were introduced individually as functional comonomers and three side-chain-type poly(aryl piperidine) (PTTP) polymers with varied substituent configurations, namely *p*-PTTP, *m*-PTTP, and *o*-PTTP, were synthesized via superacid-catalyzed polymerization. Subsequent quaternization with methyl iodide yielded a series of side-chain-type PTTP anion exchange membranes (AEMs), namely *p*-QPTTP, *m*-QPTTP, and *o*-QPTTP, respectively. The resultant AEMs were systematically characterized in terms of chemical structure, mechanical performance, and ionic conductivity. The optimal membrane sample was further assembled

收稿日期： 2026-05-07
基金项目： 产业基础再造和制造业高质量发展专项137项目（CEIEC-2025-ZM02-0009）
作者简介： 卢宇阳（2000—），女，湖北孝感人，工程师，主要研究方向为阴离子交换膜以及水电解技术。E-mail: B18070@eveholdings.com
通信联系人： 汪 瀛，E-mail: ywang@eveholdings.com
引用格式： 卢宇阳，李嘉明，尤莹雪，汪 瀛. 高性能聚芳基哌啶阴离子交换膜的制备及其碱性水电解应用[J]. 功能高分子学报，2026，39(5)：466-474.
Citation: LU Yuyang, LI Jiaming, YOU Yingxue, WANG Ying. Preparation of High-Performance Poly(aryl piperidinium) Anion Exchange Membranes and Their Application in Alkaline Water Electrolysis [J]. Journal of Functional Polymers, 2026, 39(5): 466-474.

and tested in an anion exchange membrane electrolyzer. Results indicate that precise regulation of the side-chain substitution position effectively optimizes the ion exchange capacity, water uptake, and swelling ratio of the as-prepared membranes. The self-aggregation behavior of hydrophobic trifluoromethyl-containing side chains induces the formation of distinct microphase-separated morphologies, which construct continuous and efficient ion transport channels within the membrane matrix. Notably, the meta-substituted *m*-QPTTP membrane exhibits a high OH^- conductivity of 172.5 mS/cm at 80 ℃. After long-term alkaline aging in 3 mol/L KOH solution at 80 ℃ for 2000 h, the membrane maintains a conductivity retention rate of 80.9%, verifying its outstanding alkaline stability. When operated in 1 mol/L KOH solution at 60 ℃ under a current density of 1.0 A/cm^2, the *m*-QPTTP-based electrolyzer achieves a low voltage of 1.65 V and exhibits robust long-term operational durability with stable electrolysis performance for more than 250 h.

Key words: anion exchange membrane;　side-chain type;　poly(aryl piperidinium);　alkaline stability;　electrolyzer

氢气因零碳排放特性及高能量密度正日益被视为支撑未来低碳能源体系的关键载体之一[1]。然而, 当前全球氢气供应仍高度依赖化石能源, 其中以天然气重整为主的“灰氢”占比(质量分数)超过 95%, 该过程不仅消耗大量不可再生资源, 更伴随二氧化碳排放, 加剧温室效应与空气污染[2]。在此背景下, 水电解制氢技术凭借其清洁高效的优势, 成为实现绿色转型的重要突破口。

在水电解制氢技术中, 阴离子交换膜水电解(AEMWE)因可使用非贵金属催化剂、避免高浓度碱液腐蚀和气体交叉渗透而受到广泛关注[3]。阴离子交换膜(AEMs)作为阴离子交换膜水电解的核心部件, 需同时满足高离子电导率、优异的化学稳定性、良好的力学性能、出色的尺寸稳定性以及可靠的成膜性。现阶段常通过提高离子交换容量(IEC)或构建连续离子通道来提升离子传导能力[4], 而碱稳定性不足仍是阻碍该技术商业化落地的主要难题[5], 引入不含杂原子的主链与杂环阳离子是解决该问题的有效策略[6,7]。鉴于吸水率对离子传导和尺寸稳定性存在双重效应, 需统筹调控各项性能[8], 推动膜材料综合性能协同优化。

聚芳基型阴离子交换膜是目前综合性能最优异的阴离子交换膜之一, 其离子电导率已接近质子交换膜(PEMs)水平, 且水电解性能优异[9, 10]。此外, 由于聚芳基型阴离子交换膜的主链中不含极性基团, 因此相较于聚芳基醚型阴离子交换膜, 它们具有更优异的碱稳定性[11]。尽管如此, 聚芳基型阴离子交换膜的高离子电导率通常依赖于高离子交换容量, 但高 IEC 往往引发过高吸水率和溶胀率, 导致阴离子交换膜的湿态力学性能下降。近年来, 大量研究致力于缓解上述矛盾。Caielli 等[12] 通过设计交联或支化结构, 可以在平衡离子交换容量的条件下提高阴离子交换膜的尺寸稳定性。化学交联虽能改善阴离子交换膜的力学性能, 但往往过度抑制吸水会导致离子传导率降低[13]。支化策略则通过含多个反应位点的单体直接参与聚合, 可提高聚合物分子量, 从而赋予阴离子交换膜更好的力学性能, 同时, 溶胀率和吸水率也会显著降低[14-17]。Lee 课题组[18] 引入 1,3,5-三苯基苯单体开发了一种支化型聚芳基哌啶阴离子交换膜, 与具有相似离子交换容量的线性阴离子交换膜相比, 其溶胀率明显降低。然而, 该策略在聚合过程中易发生过度交联[19], 导致规模化合成的可控性不足。

本研究以对三联苯(TP)和 *N*-甲基-4-哌啶酮(NM4P)为反应单体, 分别以对三氟甲基苯乙酮(*p*-TFE)、间三氟甲基苯乙酮(*m*-TFE)、邻三氟甲基苯乙酮(*o*-TFE)为功能单体, 经过超酸催化聚合反应合成了 3 种具有不同 CF_3 取代位置的侧链型聚芳基哌啶聚合物(PTTP), 分别命名为 *p*-PTTP、*m*-PTTP 和 *o*-PTTP。以 PTTP 和碘甲烷为原料, 通过季铵化反应制备了一系列侧链型聚芳基哌啶(QPTTP)阴离子交换膜。本研究通过在聚合物主链中引入疏水侧链, 适度降低离子交换容量以限制阴离子交换膜的吸水率, 从而提升其尺寸稳定性。同时, 引入疏水侧链有助于构建高效的离子传输通道, 促进离子传导。其中, 以三氟甲基苯基为侧链的阴离子交换膜表现出优异的综合性能, 兼具优异的尺寸稳定性、高离子电导率以及良好的碱稳定性。

1　实验部分

1.1　原料与试剂

TP(w≥98%)、NM4P(w≥98%)、三氟甲磺酸(CF_3SO_3H, w≥99.5%)、三氟乙酸(CF_3COOH, w≥99.5%)、碘甲烷(CH_3I)、氢氧化钾(KOH)、氯化钠(NaCl)、碳酸氢钾($KHCO_3$)、二氯甲烷(CH_2Cl_2)、二甲基亚砜

(DMSO)、*p*-TFE(*w*≥98%)、*m*-TFE(*w*≥98%)、乙酸乙酯: 安徽泽升科技股份有限公司; *o*-TFE(*w*≥98%): 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 铬酸钾、硝酸银: 国药集团化学试剂有限公司; 超纯水: 电阻率不小于 18.25 MΩ·cm(25 ℃), 自制。

1.2 样品的制备

1.2.1 PTTP 的合成 3 种反应单体经超酸缩聚合成了具有不同 CF_3 取代位置的 PTTP, 其合成路线如图 1 所示。以 *p*-PTTP 为例: 将 TP(33.8 g)和 NM4P(16.0 g)分散于 CH_2Cl_2(50 mL)中, 于 0 ℃ 依次滴加三氟乙酸(11.4 mL)和三氟甲磺酸(120 mL)。反应 30 min 后滴加 *p*-TFE(6.7 g), 升温至 10 ℃ 并继续反应 4 h, 得到黏稠混合液。将混合液缓慢倒入去离子水中, 沉淀析出, 所得固体依次用 0.5 mol/L $KHCO_3$ 溶液和去离子水各洗涤 3 次, 经真空干燥后, 得到目标产物 *p*-PTTP, 其中, *p*-TFE 共聚单元的摩尔分数为 20%。*m*-PTTP 和 *o*-PTTP 的制备步骤同 *p*-PTTP。

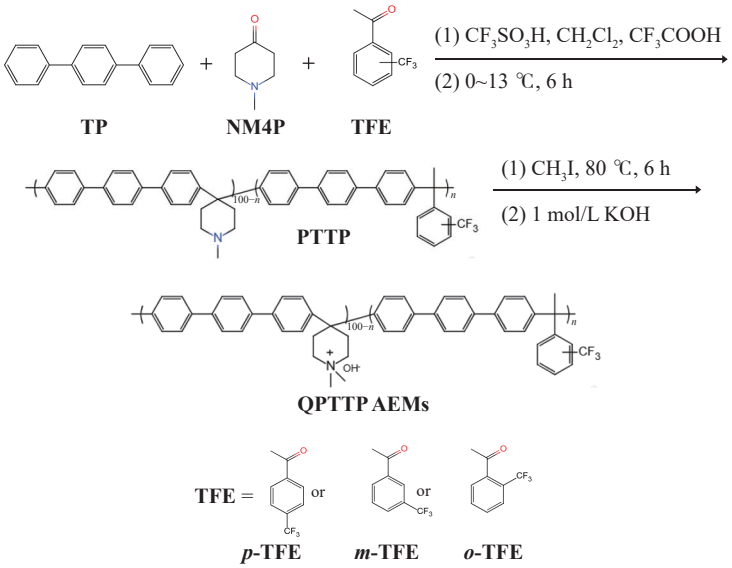


图 1 QPTTP AEMs 的制备过程

Fig. 1 Procedure for preparing QPTTP AEMs

1.2.2 QPTTP 阴离子交换膜的制备 以 PTTP 和 CH_3I 为原料, 通过 Menshutkin 反应制备了 QPTTP, 其合成路线如图 1 所示。将 20.0 g PTTP 溶于 100 mL DMSO 中, 于 80 ℃ 搅拌至完全溶解后, 加入 10.0 g CH_3I 避光反应 6 h。反应结束后, 将混合液倒入乙酸乙酯中沉淀出产物, 并用乙酸乙酯洗涤 2 次, 经真空干燥后得到 QPTTP。

将 QPTTP 溶于 DMSO 中, 配制成质量分数为 20% 的溶液, 过滤后涂布于基板上, 60 ℃ 干燥 8 h, 得到 I^- 型阴离子交换膜。将所得 I^-型阴离子交换膜置于 60 ℃ 的 1 mol/L KOH 溶液中浸泡 24 h, 随后用去离子水洗至中性, 得到 OH^-型阴离子交换膜。

作为对照样, 当没有添加 TFE 时, 得到的目标产物标记为 PPT, 相应的阴离子交换膜标记为 QAPPT 膜。

1.3 样品的表征

核磁共振氢谱(^{1}H-NMR): 采用 Bruker Avance NEO 400 MHz 型核磁共振波谱仪(德国 Bruker 公司)测试, 以氘代二甲基亚砜(DMSO-d_6)为溶剂, 体系中加入体积分数为 5% 的三氟乙酸; 原子力显微镜(AFM): 采用 Dimension Icon 型原子力显微镜(德国 Bruker 公司)在常温下采集图像, 轻敲模式, 扫描区域为 500 nm×500 nm; 力学拉伸: 使用 TSKL-S-500 N 型微机控制双柱拉力试验机(苏州天氏库力精密仪器有限公司)进行测试, 试样有效尺寸为 10 mm×50 mm, 拉伸速率为 50 mm/min。

1.4 样品的性能测试

1.4.1 离子交换容量 理论离子交换容量(IEC_{theo}, 单位 mmol/g)表示每 1 g 阴离子交换膜中可交换离子的物质的量, 通过公式(1)计算:

$$IEC_{theo} = 1\,000n/M \tag{1}$$

其中: n 为可交换基团的物质的量, M 为重复单元的分子量。

用 Mohr 滴定法测定实际离子交换容量(IEC$_{exp}$, 单位 mmol/g)。将样品置于 60 ℃、1 mol/L NaCl 溶液中浸泡 24 h, 用超纯水洗涤 3 次, 并在 80 ℃ 下干燥, 记录干燥样品的质量(m_{dry}); 然后将样品置于 0.1 mol/L $NaNO_3$ 溶液中浸泡 72 h。以 K_2CrO_4 为指示剂, 用 0.01 mol/L $AgNO_3$ 溶液平行滴定 3 次, 取均值。IEC$_{exp}$ 通过公式(2)计算:

$$IEC_{exp} = \frac{c_{AgNO_3} V_{AgNO_3}}{m_{dry}} \tag{2}$$

其中: c_{AgNO_3}、V_{AgNO_3} 分别为 $AgNO_3$ 溶液的浓度、滴定体积。

1.4.2　溶胀率(SR)　将样品于 80 ℃ 干燥后, 记录其长度(L_{dry}), 接着将样品浸泡在不同温度的超纯水中 2 h, 记录样品的长度(L_{wet})。溶胀率通过公式(3)计算:

$$SR=\frac{L_{wet}-L_{dry}}{L_{dry}}\times 100\% \tag{3}$$

1.4.3　吸水率(WU)　将样品浸泡在不同温度的超纯水中 2 h, 记录样品在不同温度下的质量(m_w), 并在 80 ℃ 下进行干燥, 记录样品的质量(m_d)。吸水率与水合数(λ)通过公式(4, 5)计算:

$$WU = \frac{m_w - m_d}{m_d}\times 100\% \tag{4}$$

$$\lambda = \frac{1\,000WU}{18IEC} \tag{5}$$

1.4.4　离子电导率(σ)　采用 ZIVE SP5 型电化学工作站(韩国 WonATech 公司)测试电化学阻抗谱(EIS), 频率区间 0.1 Hz～1.0 MHz。在 30～80 ℃ 温度范围内测定样品膜的电阻(R), 并据此计算膜的离子电导率。

$$\sigma = \frac{1\,000l}{RS}$$

其中: l 为电极之间的距离, S 为膜的横截面积。

1.4.5　碱稳定性　将样品置于 80 ℃ 的 3 mol/L KOH 溶液中浸泡 2 000 h, 每隔 100 h 或 500 h 取出, 测定其在 80 ℃ 下的离子电导率, 并计算其与初始离子电导率的比值。

1.4.6　水电解稳定性　将阴离子交换膜与气体扩散电极组装为电解槽, 于 60 ℃ 的 1 mol/L KOH 溶液中进行水电解稳定性测试。阳极为 $NiFe_2O_4$ 催化剂(0.5 mg/cm^2), 阴极为 Pt/C 催化剂(w(Pt)=40%, 0.3 mg/cm^2)。记录不同电流密度下的电压, 并在 1 A/cm^2 下监测电压随时间的变化, 评估其水电解稳定性。

2　结果与讨论

2.1　结构表征

样品的^{1}H-NMR 谱图如图 2 所示, 化学位移 7.0～8.0 处为芳香氢的特征信号, 2.0～4.0 处为甲基氢以及哌啶环上亚甲基氢的特征信号, 3.0～3.2 处为哌啶阳离子上甲基氢的特征信号[20], 证明成功制备了 QAPPT、*p*-QPTTP、*m*-QPTTP 和 *o*-QPTTP。

2.2　形态特征

采用 AFM 对阴离子交换膜的微观形貌进行表征(图 3), 以探究其离子电导率和微相分离之间的关系。图中的暗区和亮区分别对应亲水和疏水相[21]。AFM 图像显示, QAPPT 膜的亲水相和疏水相之间对比度较低, 表明其微相分离程度较弱。相比之下, 引入含氟疏水侧链的 QPTTP 膜均呈现出明显的微相分离形貌, 亲水相呈现规整的蠕虫状, 这是由于疏水侧链的引入, 促使亲疏水区域相互聚集并形成离子通道。

2.3　性能分析

阴离子交换膜样品的 IEC 如表 1 所示, 各样品的实测 IEC 和理论 IEC 接近, 表明季铵化程度较为完全[22]。阴离子交换膜样品的 WU 和 SR 测试结果见表 1 和图 4。与 QAPPT 膜相比, QPTTP 膜的溶胀率显著降低, 归

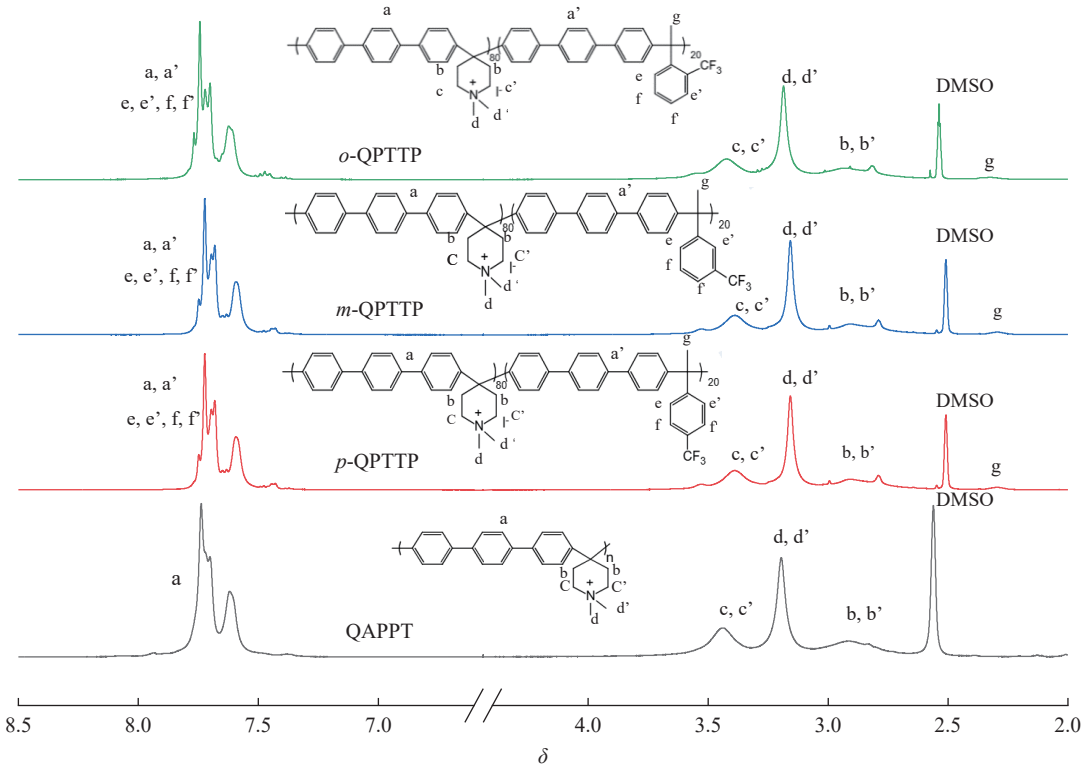


图 2 样品的^{1}H-NMR 谱图

Fig. 2 ^{1}H-NMR spectra of samples

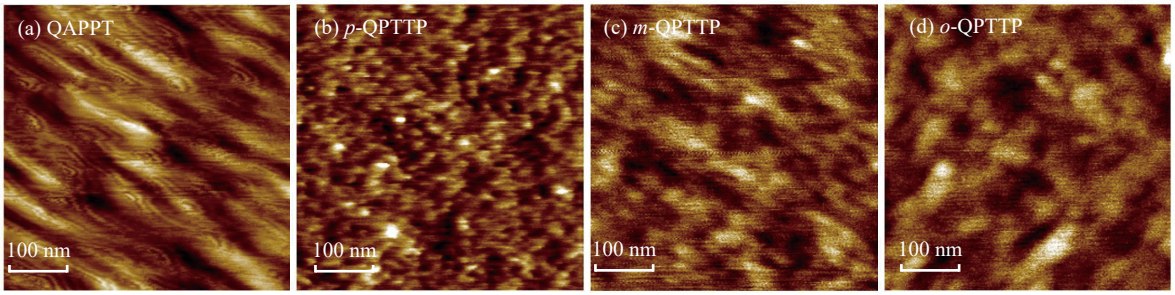


图 3 AEMs 样品的 AFM 图像

Fig. 3 AFM images of AEMs samples

表 1 AEM 样品的 IEC、WU、SR、λ 和 σ

Table 1 IEC, WU, SR, λ and σ of AEM samples

Sample	IEC_{theo}/(mmol·g^{-1})	IEC_{exp}/(mmol·g^{-1})	WU/%	SR/%	λ	σ/(mS·cm^{-1})
QAPPT	2.57	2.40±0.09	252.2±5.7	29.7±1.3	58.3	160.1
p-QPTTP	2.08	1.96±0.04	144.5±3.5	20.9±0.9	40.9	162.1
m-QPTTP	2.10	2.01±0.06	183.5±8.7	24.3±1.2	50.7	172.5
o-QPTTP	2.06	1.99±0.04	102.0±2.5	13.0±0.5	28.5	141.4

WU, SR, λ and σ are measured at 80 °C

因于含氟疏水侧链的引入降低了 IEC, 减少了和季铵阳离子结合的水分子数, 从而提升了阴离子交换膜的尺寸稳定性。

阴离子交换膜样品在不同温度下的 OH^-电导率如图 5 所示, 随着温度升高, 分子热运动增强, 离子传输速率增加, 离子电导率升高。值得注意的是, 尽管 *p*-QPTTP 膜和 *m*-QPTTP 膜的 IEC 略低于 QAPPT 膜的相应值, 其离子电导率却更高, 这主要归因于对位/间位苯环结构及氟化基团的引入有效增强了 QPTTP 膜的微相

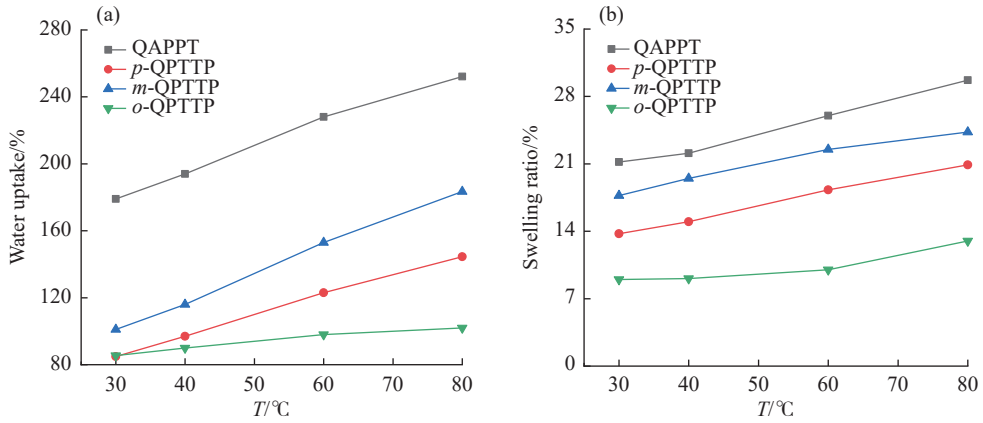


图 4　AEM 样品的(a)吸水率和(b)溶胀率随温度的变化

Fig. 4　(a) Water uptake and (b) swelling ratio of AEM samples as a function of temperature

分离程度, 从而构建了更为连续的离子传输通道[23]。在 AFM 相图中(图 3), *p*-QPTTP 膜与 *m*-QPTTP 膜均呈现出更为清晰的亲/疏水微相分离形貌, 其中, *m*-QPTTP 膜在 80 ℃ 下具有最高的 OH^-电导率(172.5 mS/cm)。然而, *o*-QPTTP 膜虽呈现更明显的团簇形貌, 但离子电导率远低于其他膜。这是由于 AFM 测试在非饱和水合状态(相对湿度低于 100%)下进行, 而实际湿态条件下, *o*-QPTTP 膜的 λ 小于 30, 低于其他膜, 而水作为 OH^-传导的关键介质, 含水量的不足会限制 OH^-迁移, 进而导致 *o*-QPTTP 膜的离子电导率降低[24]。此外, *o*-QPTTP 膜的团簇整体呈现分散孤岛状, 限制了亲水区域的连通性, 使得离子电导率下降[25]。

2.4　力学性能

阴离子交换膜样品的力学性能对电解槽长期运行稳定性至关重要。在阴离子交换膜分子结构中引入含苯环侧链后, 其拉伸强度显著提高。如图 6 所示, QPTTP 膜的拉伸强度为 33～42 MPa, 高于 QAPPT 膜的 32 MPa, 而断裂伸长率(30%～42%)低于 QAPPT 膜的 45%, 表明苯环侧链的引入在提高 QPTTP 膜拉伸强度的同时, 会一定程度上降低其柔韧性。其中, 间位接枝三氟甲基的 *m*-QPTTP 膜因其分子链自由体积较大, 有效减缓了刚性苯环引入的负面影响, 其断裂伸长率与 QAPPT 基本持平。优异的力学性能使 QPTTP 膜能耐受电解过程的动态应力, 与脆性阴离子交换膜相比, 具有更好的耐久性[26]。此外, 3 种 QPTTP 膜的断裂伸长率均高于 30%, 优于商业化的 FAA-3 series 和 Sustainion ® X37-50 [27], 满足实际应用要求。

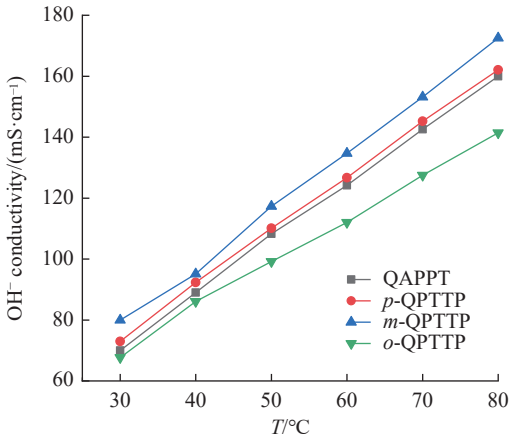


图 5　AEM 样品在不同温度下的 OH^-电导率

Fig. 5　OH^- conductivity of AEM samples measured at different temperatures

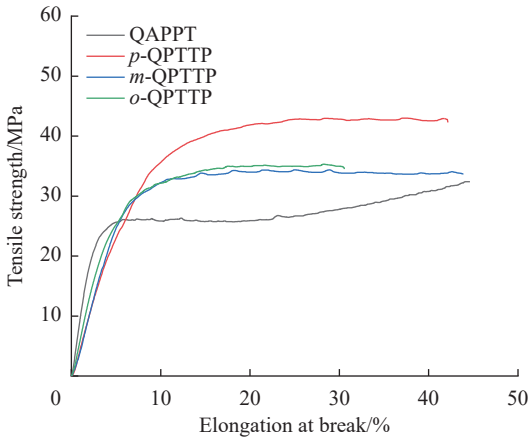


图 6　AEM 样品在干燥状态下的力学性能

Fig. 6　Mechanical properties of AEM samples in the dry state

2.5　碱稳定性

由于 *m*-QPTTP 膜表现出更优的离子电导率和综合性能, 本文主要对比 *m*-QPTTP 膜和 QAPPT 膜的碱稳定性(图 7(a))。2000 h 后, QAPPT 膜的 OH^-电导率下降至 117.8 mS/cm(离子电导率保持率为 73.6%), 而 *m*-QPTTP 膜的 OH^-电导率在相同条件下仍保持在 139.5 mS/cm(离子电导率保持率高达 80.9%), 表现出更优的

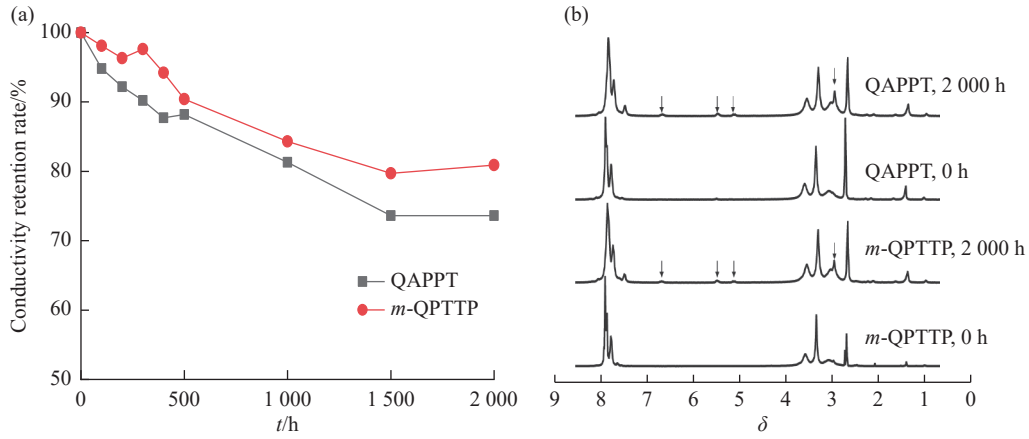


图 7 (a)样品在碱稳定性测试后的 OH^-电导率保持率;(b)样品在碱稳定性测试前后的^{1}H-NMR 谱图

Fig. 7 (a)OH^- conductivity retention rate of samples after alkaline stability test; (b)^{1}H-NMR spectra of samples before and after alkaline stability test

碱稳定性,这归因于其较低的 IEC 和含氟基团的存在[25]。图 7(b)显示,经 2000 h 的碱稳定性测试后,QAPPT 膜和 *m*-QPTTP 膜在化学位移 4.9、5.3 及 6.5 处检测到新的吸收峰,归属于哌啶环发生霍夫曼消除反应后生成的双键特征峰,此外,2.8 处的新信号可能源于离子交换基团甲基的化学位移变化[16]。通过对比阳离子特征峰面积的变化,计算得到 QAPPT 膜的阳离子降解率为 17%,而 *m*-QPTTP 膜的阳离子降解率为 11%,进一步证实侧链型 *m*-QPTTP 膜具有更好的碱稳定性。

2.6 水电解性能

QAPPT 膜和 QPTTP 膜的线性扫描伏安曲线如图 8 所示。电压随着电流密度的增加而升高。在相同电流密度条件下,*p*-QPTTP 膜和 *m*-QPTTP 膜的电压均低于 QAPPT 膜的相应值,其中 *m*-QPTTP 膜的水电解性能最优,在 1.0 A/cm^2 时电压仅为 1.65 V,这主要归因于 *m*-QPTTP 膜的离子电导率最高。而 *o*-QPTTP 膜的电压最高,与其较低的离子电导率一致[28]。

此外,针对膜材料在真实电解工况下的服役可靠性,本研究进行了水电解稳定性测试,结果如图 9 所示。*m*-QPTTP 膜在恒电流模式下运行 250 h,电压为 1.72 V,电压衰减速率为 0.08 mV/h;QAPPT 膜在相同运行条件下,电压为 1.74 V,电压衰减速率为 0.10 mV/h。上述结果表明,*m*-QPTTP 膜的稳定性略优于 QAPPT 膜。目前仅进行了 250 h 的短期稳定性测试,在实际应用中,还需要进行更长时间的测试和稳定性评估。

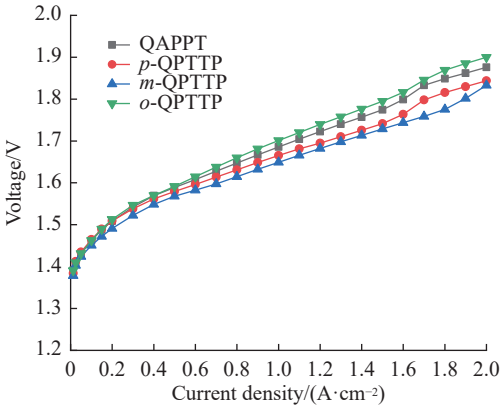


图 8 AEM 样品的线性扫描伏安曲线

Fig. 8 Linear sweep voltammetry curves of AEM samples

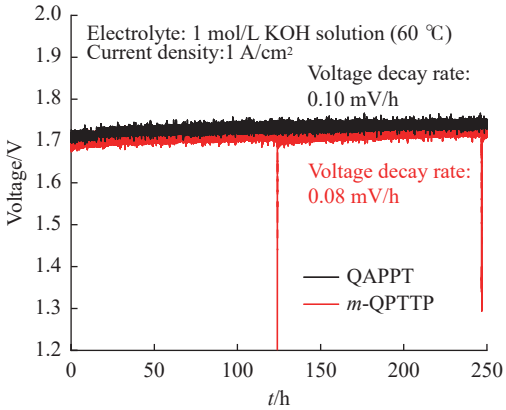


图 9 AEM 样品的水电解稳定性测试

Fig. 9 Water electrolysis durability test of AEM samples

3 结 论

(1)*m*-QPTTP 膜具有清晰的微相分离形貌,在 80 ℃ 时 OH^-电导率高达 172.5 mS/cm。

(2)在 80 ℃、3 mol/L KOH 溶液中连续浸泡 2 000 h 后, *m*-QPTTP 膜的 OH^-电导率仍维持在 139.5 mS/cm, 离子电导率保持率为 80.9%, 表明其具有优异的碱稳定性。

(3)在 60 ℃、1 mol/L KOH 溶液及 1.0 A/cm^2 电流密度下, *m*-QPTTP 膜的电压为 1.65 V, 且在长达 250 h 的运行过程中电压衰减速率仅为 0.08 mV/h, 表现出良好的长期运行稳定性。

参考文献:

[1] LIU W, GENG Z, GUO S, LIU L Y, ZHAO L Y, QU C X, XIA Q H, CAI H, ZHAO X Y, ZHU J G, CHEN J, JIN L M, ZHANG C M. Hydrogen-bonding enhanced anion exchange membrane for high performance alkaline water electrolysis [J]. Advanced Energy Materials, 2025, 15(42): e03110.

[2] ZHANG D B, HAO W L, LI J Y, LI J D, YANG Y P. Anion exchange membranes from microporous poly (arylene piperidinium)-based polymers containing spirobifluorene structure [J]. Polymer, 2025, 320: 128117.

[3] DU N Y, ROY C, PEACH R, TURNBULL M, THIELE S, BOCK C. Anion-exchange membrane water electrolyzers [J]. Chemical Reviews, 2022, 122(13): 11830-11895.

[4] GONG S T, HAN L, ZHANG X L, JIN Q, HE G H, ZHANG F X. Adjusting the perfluorinated side chain length in dual-grafted anion exchange membranes for high performance fuel cells [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12(7): 4184-4194.

[5] OLSSON J S, PHAM T H, JANNASCH P. Poly (arylene piperidinium) hydroxide ion exchange membranes: Synthesis, alkaline stability, and conductivity [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(2): 1702758.

[6] MOHANTY A D, TIGNOR S E, KRAUSE J A, CHOE Y K, BAE C. Systematic alkaline stability study of polymer backbones for anion exchange membrane applications [J]. Macromolecules, 2016, 49(9): 3361-3372.

[7] ZHANG K Y, YU W S, GE X L, WU L, XU T W. DFT insight of hydroxide degradation pathways for heterocyclic quaternary ammonium cations in anion exchange membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2023, 678: 121672.

[8] WAN L, XU Z, XU Q, PANG M B, LIN D C, LIU J, WANG B G. Key components and design strategy of the membrane electrode assembly for alkaline water electrolysis [J]. Energy & Environmental Science, 2023, 16(4): 1384-1430.

[9] CAIELLI T, FERRARI A R, STUCCHI D, FERRARA C, CAPRÌ A, GATTO I, BAGLIO V, PANCALDI A, SASSELLA A, ZAPPIA S, SCHIERONI A G, MUSTARELLI P. Poly (biphenyl-piperidinium)/poly (biphenyl-trifluoroacetophenone) random and block copolymers enabling highly stable anion exchange membranes for water electrolysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 508: 160825.

[10] JEON S, KANG H W, MIN K, LEE W, MAENG H, PARK C H, KIM T H. Hyperbranched-type anion exchange membranes with electrostatic interactions for high performance anion exchange membrane water electrolysis [J]. Journal of Membrane Science, 2025, 726: 124050.

[11] MA Y C, HU C, YI G Q, JIANG Z T, SU X Y, LIU Q L, LEE J Y, LEE S Y, LEE Y M, ZHANG Q G. Durable multiblock poly (biphenyl alkylene) anion exchange membranes with microphase separation for hydrogen energy conversion [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(41): e202311509.

[12] CAIELLI T, FERRARI A R, BONIZZONI S, SEDIVA E, CAPRÌ A, SANTORO M, GATTO I, BAGLIO V, MUSTARELLI P. Synthesis, characterization and water electrolyzer cell tests of poly (biphenyl piperidinium) anion exchange membranes [J]. Journal of Power Sources, 2023, 557: 232532.

[13] 丁梦茹, 苏王天慧, 周维阳, 王磊, 李香丹. 交联型哌啶功能化聚芳醚阴离子交换膜的制备与性能 [J]. 功能高分子学报, 2022, 35(4): 379-386.
DING M R, SU W T H, ZHOU W Y, WANG L, LI X D. Preparation and properties of cross-linked piperidine functionalized polyarylether anion exchange membranes [J]. Journal of Functional Polymers, 2022, 35(4): 379-386.

[14] DU X M, ZHANG H Y, YUAN Y J, WANG Z. Constructing micro-phase separation structure to improve the performance of anion-exchange membrane based on poly (aryl piperidinium) cross-linked membranes [J]. Journal of Power Sources, 2021, 487: 229429.

[15] LI X F, ZHANG B, GUO J, CHEN Y H, DAI L, ZHENG J F, LI S H, ZHANG S B. High-strength, ultra-thin anion exchange membranes with a branched structure toward alkaline membrane fuel cells [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(20): 10738-10747.

[16] WANG J J, GAO W T, CHOO Y S L, CAI Z H, ZHANG Q G, ZHU A M, LIU Q L. Highly conductive branched poly (aryl piperidinium) anion exchange membranes with robust chemical stability [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 629: 377-387.

[17] 房梓榆, 刘莹莹, 陆陈宝, 朱金辉, 柯长春, 庄小东. 超支化芘基聚芳基哌啶阴离子交换膜及其碱性电解水应用[J]. 功能高分子学报, 2024, 37(4): 277-286.
FANG Z Y, LIU Y Y, LU C B, ZHU J H, KE C H, ZHUANG X D. Hyperbranched pyrenyl poly(aryl piperidinium) anion-exchange membrane and its application in alkaline water electrolysis[J]. Journal of Functional Polymers, 2024, 37(4): 277-286.

[18] HU C, KANG N Y, KANG H W, LEE J Y, ZHANG X H, LEE Y J, JUNG S W, PARK J H, KIM M G, YOO S J, LEE S Y, PARK C H, LEE Y M. Triptycene branched poly (aryl-*co*-aryl piperidinium) electrolytes for alkaline anion exchange membrane fuel cells and water electrolyzers[J]. Angewandte Chemie, 2024, 136(3): e202316697.

[19] SU X, NAN S B, WEI W, XU S C, HE R H. Highly conductive and robustly stable anion exchange membranes with a star-branched crosslinking structure[J]. Journal of Membrane Science, 2023, 683: 121843.

[20] WANG J H, ZHAO Y, SETZLER B P, ROIAS-CARBONELL S, YEHUDA C B, AMEL A, PAGE M, WANG L, HU K, SHI L, GOTTESFEID S, XU B J, YAN Y S. Poly (aryl piperidinium) membranes and ionomers for hydroxide exchange membrane fuel cells[J]. Nature Energy, 2019, 4(5): 392-398.

[21] TIAN Z Y, ZHANG H Z, NIU X X, LIU Y, LIU X, LI W J. Efficient and stable water electrolysis for hydrogen production using multi-cations-grafted poly (arylene piperidinium)-based anion exchange membranes[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2026, 198: 152711.

[22] LU Y Y, FAN H M, REN R J, WANG M H, DENG C W, YANG Q, LIU Y, XIAO L, ZHUANG L, HAN J J. Advanced cross-linked anion exchange membranes from acetal ethylene vinyl alcohol copolymer and quaternary ammonium poly (vinyl benzyl chloride) for fuel cell application[J]. Renewable Energy, 2025, 240: 122224.

[23] LIU F H, LIN C X, HU E N, YANG Q, ZHANG Q G, ZHU A M, LIU Q L. Anion exchange membranes with well-developed conductive channels: Effect of the functional groups[J]. Journal of Membrane Science, 2018, 564: 298-307.

[24] ZHENG Y W, ASH U, PANDEY R P, OZIOKO A G, PONCE-GONZÁLEZ J, HANDL M, WEISSBACH T, VARCOE J R, HOLDCROFT S, LIBERATORE M W, HIESGEN R, DEKEL D R. Water uptake study of anion exchange membranes[J]. Macromolecules, 2018, 51(9): 3264-3278.

[25] LIM H, HAN G H, LEE D H, SHIN G, CHOI J C, AHN S H, PARK T. Fluorine-containing poly (fluorene)-based anion exchange membrane with high hydroxide conductivity and physicochemical stability for water electrolysis[J]. Small, 2024, 20(32): 2400031.

[26] WANG L Q, WANG J, GUAN S, WANG Z M, YUE R F, QIU H Y, CAO X Y, LIU T, LIU T, FENG Y F, CHE Z Z, BAI F Q, ZHANG J F, YIN Y, GUIVER M D. Dual-scale-patterned anion exchange membrane with coupled interface for durable water electrolysis[J]. Advanced Materials, 2026, 38(16): e21844.

[27] WIJAYA G H A, IM K S, NAM S Y. Advancements in commercial anion exchange membranes: A review of membrane properties in water electrolysis applications[J]. Desalination and Water Treatment, 2024, 320: 100605.

[28] WANG X Q, FANG Z Y, ZHANG M, XIE S L, DONG X, LIU P, WANG S S, CHENG F L, XU T W. Macromolecular crosslinked poly (aryl piperidinium)-based anion exchange membranes with enhanced ion conduction for water electrolysis[J]. Journal of Membrane Science, 2024, 700: 122717.

（责任编辑：王吉晶）