

# 基于无C=O基主链的双功能侧链阴离子交换膜

刘晋武<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1</sup>, 张 扬<sup>1\*</sup>, 鞠 佳<sup>1</sup>, 崔 珺<sup>2</sup>, 张 帆<sup>1\*</sup>

(1. 辽宁石油化工大学 石油化工学院, 抚顺 113001;

2. 沈阳工学院 生命工程学院, 抚顺 113000)

**摘要:** 为进一步提升阴离子交换膜(AEMs)在高浓度热碱性环境下的综合性能,本研究将疏水-亲水双功能侧链“并联”引入无吸电子C=O基聚芳醚主链,构建新型结构阴离子交换膜。无吸电子C=O基聚芳醚可有效避免主链降解,疏水-亲水双功能侧链可协同优化离子传输通道并提供空间保护作用,二者协同提升膜的综合性能。研究表明亲-疏水侧链长度均为6个碳时,膜PEAM-QC6H6的综合性能最佳。此时,膜的溶胀率为9.0%(80℃),拉伸强度为38.9 MPa,80℃时OH<sup>-</sup>离子电导率高达140.3 mS/cm,且在4 mol/L KOH、80℃条件下浸泡1500 h后,电导率保持率达92.4%。此外,PEAM-QC6H6组装的单电池功率密度高达1.18 W/cm<sup>2</sup>(80℃)。该研究为开发高性能阴离子交换膜提供了新思路。

**关键词:** 无C=O基聚芳醚; 疏水-亲水双功能侧链; 阴离子交换膜; 离子电导率; 碱性稳定性; 单电池性能

**中图分类号:** TQ028; TM912.1 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-8924(2026)02-0112-07

**doi:** 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2026.02.012

阴离子交换膜燃料电池(AEMFCs)具有氧还原反应速率快、适用非贵金属催化剂及燃料渗透率低等特点,因而备受关注,成为研究热点<sup>[1]</sup>。然而,作为AEMFCs的核心组件,AEMs在实际应用中仍面临离子电导率偏低与耐碱稳定性不足的挑战<sup>[2-3]</sup>。其中,聚合物主链的化学稳定性是决定其碱性稳定性的关键。研究表明,常用的聚芳醚类主链(聚芳醚砜和聚芳醚酮等),在接枝阳离子基团后,受其主链中吸电子基团(如C=O、SO<sub>2</sub>)的促进作用,会受到OH<sup>-</sup>的亲核攻击而发生主链醚裂解<sup>[4]</sup>。为

此,研究人员开发了无醚键聚合物,可有效防止主链降解,但这类材料需要特殊单体、贵金属催化剂和复杂的合成工艺,限制了其实际应用<sup>[5-7]</sup>。为解决以上问题,本课题组前期通过Leuckart反应有效消除了导致芳醚裂解的吸电子连接基团(C=O),成功制备了无吸电子C=O基聚芳醚主链。这种膜即使在苛刻条件下(4 mol/L KOH, 80℃),主链仍未发生降解,显著提高了膜的碱性稳定性<sup>[8]</sup>。

另一方面,AEMs的微观结构对其传质性能至关重要。受Nafion膜中微相分离结构的启发,在主

收稿日期: 2025-12-15; 修改稿收到日期: 2026-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(22408144); 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(青年项目)(JYTQN2023347, JYTQN2023350); 辽宁省科技计划联合计划(自然科学基金-面上项目)(2025-MSLH-458, 2025-MSLH-459); 辽宁石油化工大学引进人才科研启动基金资助项目(2023XJL-010, 2023XJL-011)

第一作者简介: 刘晋武(1998-),男,山西忻州人,硕士,从事阴离子交换膜研究。\*通讯作者,张 扬,E-mail: zhangyang@lnpu.edu.cn; 张 帆,E-mail: ZhangFan53371534@163.com

引用本文: 刘晋武,刘畅,张 扬,等. 基于无C=O基主链的双功能侧链阴离子交换膜[J]. 膜科学与技术,2026,46(2):112-118.

Citation: Liu J W, Liu C, Zhang Y, et al. Bifunctional side chain anion exchange membranes with C=O-free backbone [J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2026, 46(2): 112-118.

链上接枝亲水离子侧链,可有效提高膜的离子电导率<sup>[9]</sup>。但单亲水侧链难以实现理想的亲/疏水相分离,导致离子传输通道不连贯<sup>[10-12]</sup>。虽然,多阳离子侧链结构可通过局部提高功能离子基团密度,极大促进相分离,但过高的离子交换容量(IEC)会增大膜溶胀率,降低机械强度和碱稳定性<sup>[13-14]</sup>。

基于以上分析,本研究提出一种新型的膜结构设计策略:以自制的无吸电子C=O基聚芳醚为主链,首先通过侧氨基基点接枝含己基间隔的阳离子亲水侧链,随后在同一氮原子上“并联”引入不同长度(4、6和8个碳)的疏水烷基链,构建疏水-亲水双功能侧链结构。疏水链的引入可增强亲-疏水微相分离结构,优化离子传输通道。其协同无吸电子C=O基主链的高耐碱性,使膜具有优异的综合性能。

## 1 实验

### 1.1 材料与试剂

双酚A(BPA)、双(4-氟苯基)甲酮(BDF)、1-溴丁烷、1-溴己烷、1,6-二溴己烷和1-溴辛烷,均购自阿拉丁试剂有限公司;二甲基亚砜(DMSO)、*N,N'*-二甲基乙酰胺(DMAc)和三甲胺醇溶液(33%),购自国药集团化学试剂有限公司;碳酸钾(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)、甲苯、甲醇、甲酸、盐酸(HCl, 37%)和乙醇,购自天津化学试剂三厂;氢氧化钾(KOH)、氢氧化钠(NaOH)、丙酮和甲酰胺,购自天津市大茂化学试剂厂。

### 1.2 膜制备

#### 1.2.1 6-Br-TMA的制备

将30 mmol 1,6-二溴己烷溶于50 mL丙酮中。随后,向混合液中缓慢滴加120 mmol三甲胺醇溶液(质量分数33%)。混合均匀后,将反应液在室温下搅拌24 h,得到白色悬浮液。过滤除去白色固体后,将滤液旋转蒸发去除丙酮,得到有机相混合物。在分液漏斗中进行分离后,将分离出的下层液体用乙酸乙酯洗涤数次。最后,将产物在60℃下真空干燥24 h,得到亲水性单阳离子侧链6-Br-TMA,其产率为82.5%。

#### 1.2.2 无吸电子C=O基聚芳醚主链(PEAM)的制备

首先,通过芳香亲核取代缩聚反应制备聚芳醚酮(PAEC)共聚物:将BPA(2.282 g)、BDF(2.182 g)、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(1.728 g)、20 mL DMAc和15 mL甲苯

加入干燥的100 mL三口烧瓶中(烧瓶配有Dean-Stark接收器和氮气入口)。将反应液在160℃下搅拌反应4 h,同时利用甲苯共沸脱除体系中生成的水分,随后将甲苯蒸馏除去。之后,在氮气氛围下,将反应温度缓慢升至175℃,继续反应12 h。待反应液冷却至室温后,将其溶解于10 mL DMAc中,并加入过量无水甲醇沉淀。用去离子水洗涤多次后,将所得产物在80℃真空条件下干燥24 h即得聚芳醚酮共聚物。

然后,通过Leuckart反应改性PAEC制备PEAM:将1 g PAEC溶于装有20 mL DMAc的250 mL三口烧瓶中。随后,加入5 mL甲酰胺,并油浴加热至160℃。接着,在混合液中逐滴加入4.5 mL甲酸,连续搅拌20 h。冷却至室温后,将所得反应液用乙醇沉淀并洗涤三次。将所得固体产物重新加入250 mL三口烧瓶中,加入50 mL乙醇,随后逐滴加入100 mL 15%(质量分数)HCl溶液,并将混合物在80℃下搅拌72 h。冷却至室温后,过滤得到产物,并用30%(质量分数)KOH溶液和去离子水洗涤至中性。最后,将产物在60℃真空下干燥12 h得到PEAM。

#### 1.2.3 接枝疏水-亲水双功能侧链的无吸电子C=O基聚芳醚AEM的制备

通过Menschutkin反应接枝双功能侧链:将PEAM溶解于DMSO中配制成4%(质量分数)的溶液。待完全溶解后,加入等物质的量的6-Br-TMA和30 mg NaOH,在60℃下磁力搅拌15 h。随后,在向反应液中加入等物质的量的1-溴丁烷(或1-溴己烷或1-溴辛烷)和30 mg NaOH,继续搅拌15 h,以生成PEAM-QC<sub>6</sub>H<sub>x</sub>(*x*=4, 6或8)溶液。将反应液过滤并流延到水平玻璃板上,60℃真空干燥72 h后,将膜从玻璃板上剥离,并在室温下浸入1 mol/L KOH溶液中48 h进行离子交换。合成路线如图1所示。

### 1.3 表征与测试

使用核磁共振氢谱(<sup>1</sup>H NMR, Varian Unity Inova 500)(以DMSO-*d*<sub>6</sub>为溶剂)对产物化学结构进行表征;使用透射电子显微镜(TEM, JEM-2100F)观测膜样品微观形貌,测试前将膜材料用碘离子染色,后经LEICA UC6+UC7超薄切片机制成厚度约60 nm的薄片,并附于铜网上;使用拉伸电子万能试验机(SANS CMT8102)研究湿膜的机械性能,拉伸速度为5 mm/min。

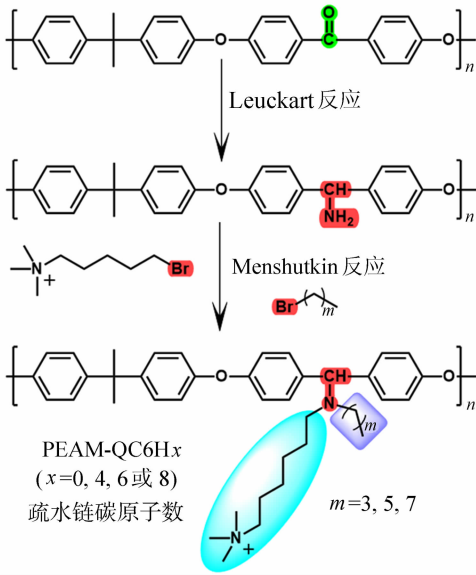


图 1 PEAM-QC6H<sub>x</sub>( $x=0, 4, 6$  或  $8$ ) 膜的合成路线  
Fig. 1 Synthesis route for PEAM-QC6H<sub>x</sub>  
( $x=0, 4, 6$  或  $8$ )

膜样品离子交换容量(反滴定法)、含水率(WU)、溶胀率(SR)的测定方法参考前期工作<sup>[15]</sup>。采用四电极交流阻抗分析仪(Ivium Technologies A08001)测试膜样品的 OH<sup>-</sup> 离子电导率,测试频率为  $1\sim 10^5$  Hz;通过记录膜样品经高浓度热碱溶液( $80\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $4\text{ mol/L KOH}$ )处理后,拉伸强度和 OH<sup>-</sup> 离子电导率的剩余量来评估其碱性稳定性。

使用 890e 燃料电池测试系统(Scribner Associates Co.)测试单电池性能。膜电极组件(MEA)采用喷涂法制备:黏结剂为 PEAM-QC6H<sub>6</sub>,分散剂为异丙醇,MEA 的有效面积为  $5\text{ cm}^2$ , Pt 载量为  $0.4\text{ mg/cm}^2$ 。测试条件为: $80\text{ }^\circ\text{C}$ , H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 的相对湿度为  $100\%$ ,流速为  $1.0\text{ L/min}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 化学结构与微观形貌

6-Br-TMA 的 <sup>1</sup>H NMR 谱图如图 2(a)所示,位于约  $3.0$  处的峰归属于季铵基团上的甲基质子,  $3.4\sim 3.5$  附近的峰对应于 -CH<sub>2</sub>Br 和与季铵相连的 -CH<sub>2</sub>QA 质子,而  $1.2\sim 1.8$  范围内出现的多重峰则属于 6-Br-TMA 分子中其余亚甲基(-CH<sub>2</sub>-)上的质子。以上证明 6-Br-TMA 已成功合成。无吸电子 C=O 基聚芳醚主链(PEAM)的红外谱图见图 2(b),与 PAEK 的谱图对比,PEAM 谱图中位于  $1660\text{ cm}^{-1}$  处的 C=O 特征峰完全消失,而在

$3380\text{ cm}^{-1}$  和  $3310\text{ cm}^{-1}$  附近出现 -NH<sub>2</sub> 基团的振动峰,说明 C=O 完全转化为 -NH<sub>2</sub>。

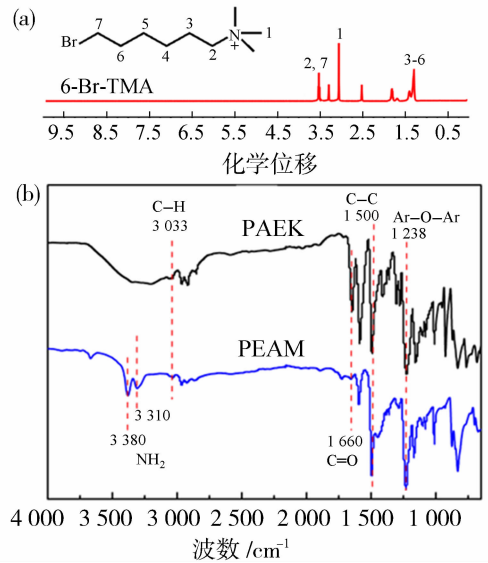
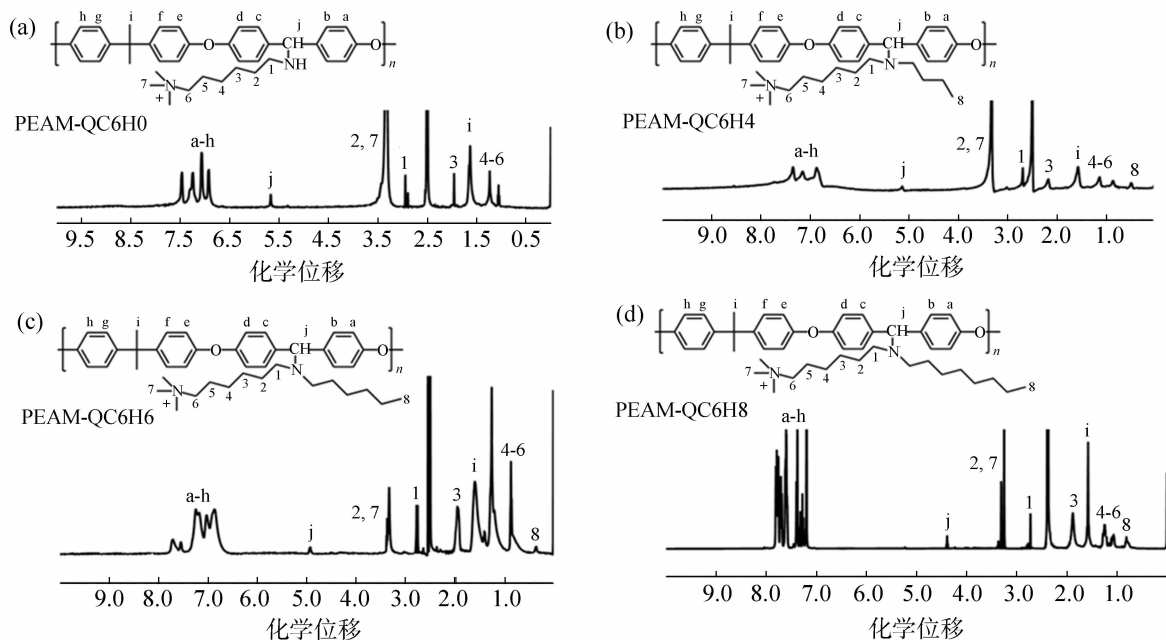
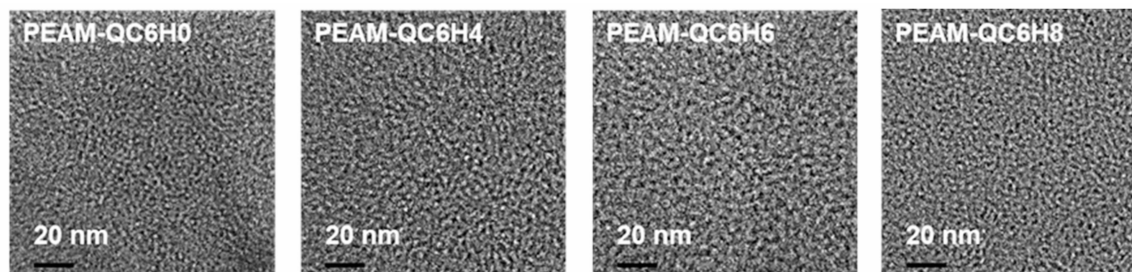


图 2 6-Br-TMA 的 <sup>1</sup>H NMR 谱图(a);  
PEAM 的 FTIR 谱图(b)

Fig. 2 <sup>1</sup>H NMR spectra of 6-Br-TMA (a);  
FTIR spectra of PEAM (b)

PEAM-QC6H<sub>x</sub>( $x=0, 4, 6$  和  $8$ )的核磁氢谱图如图 3 所示。各峰对应的位置均已标出: $6.9\sim 7.7$ 附近的特征峰归属于苯环质子峰。 $1.1\sim 2.0$ 附近, $3.0$  和  $3.3$  附近的特征峰则归属于亲水阳离子侧链特征峰。与 PEAM-QC6H<sub>0</sub> 相比,由于疏水侧链的供电子效应,PEAM-QC6H<sub>x</sub>( $x=4, 6$  和  $8$ )谱图中,与 N 原子相连的亚甲基质子峰的化学位移向高场移动。此外,在 PEAM-QC6H<sub>x</sub>( $x=4, 6$  和  $8$ )谱图中均出现疏水链末端甲基质子峰 H8( $0.5\sim 1$ 附近)。说明疏水-亲水双功能侧链已成功接枝到无吸电子 C=O 基聚芳醚主链上。

图 4 为 PEAM-QC6H<sub>x</sub>( $x=0, 4, 6$  和  $8$ )膜的微观形貌。TEM 图像显示,所有膜均呈现明显的亮-暗相分离结构,其中亮区为疏水主链与疏水侧链聚集区,暗区为亲水离子簇。且双功能侧链膜与单亲水侧链膜(PEAM-QC6H<sub>0</sub>)相比,具有更清晰的微相分离结构。说明疏水侧链的引入,增强了主链与亲水区域的分离,进一步促进微相分离的形成。但过长的疏水链(C8)会使疏水区域过度聚集,导致亲水区连通性下降。疏水链长度为 6 的膜(PEAM-QC6H<sub>6</sub>)具有最佳的微相分离结构,形成了更均匀、更连续的亲水区。表明双功能侧链可有效调控并优化离子传输通道。

图3 PEAM-QC6H<sub>x</sub> 的<sup>1</sup>H NMR 谱图Fig. 3 <sup>1</sup>H NMR spectra of PEAM-QC6H<sub>x</sub>图4 PEAM-QC6H<sub>x</sub> 膜的 TEM 图像Fig. 4 TEM image of PEAM-QC6H<sub>x</sub> AEMs

## 2.2 膜理化性能

表1列出了疏水-亲水双功能侧链 AEMs 的含水率和溶胀率数据。从表中可以看出,随着“并联”双功能侧链中疏水链长度的增加,膜的含水率和溶胀率均呈现下降趋势。其中,疏水链长度为6个碳时,PEAM-QC6H6膜的含水率为29.5%(80℃),溶胀率为9.0%(80℃),低于PEAM-QC6H0膜(即未接枝疏水链)。这种趋势可以归因于疏水链的引入增加了膜的疏水性,限制了水分子的渗透和链的扩张,提高了膜的尺寸稳定性。

进一步探究了疏水侧链长度对双功能侧链膜机械性能的影响。由表1可知,随着引入的疏水链长度的增加,膜的拉伸强度增加,而断裂伸长率减小。这是因为,疏水侧链的引入增强了聚合物链间的相互作用与缠结,提升了膜的刚性。但过长的疏水链(C8)可能导致链段运动受阻,柔性下降,致使断裂伸长率

降低。值得注意的是,所有双功能侧链膜的拉伸强度均大于36 MPa,断裂伸长率均大于15%,说明双功能侧链可在增强刚性的同时仍保持链段柔性。

## 2.3 离子电导率

离子电导率是 AEMs 的核心性能指标。从图5可以看出,随着“并联”双功能侧链中疏水链长度的增加,膜离子电导率先增高后降低。这是因为疏水链过短(C4)时微相分离不充分,过长(C8)时则可能阻碍离子簇的连通性,均不利于离子传输。适度的疏水侧链(C6)有助于形成更连续、更高效的亲水离子通道。当疏水链长度为6个碳时,膜的离子电导率达到最佳值(140.3 mS/cm, 80℃),比疏水链长度为0碳时高约24.7%。分析表明,双功能侧链可通过增强微相分离、优化离子通道连通性,促进离子传输,使膜在保持较低溶胀的同时,实现了较高的离子电导率。

表1 PEAM-QC6H<sub>x</sub>膜的理化性能

Table 1 Physicochemical properties of PEAM-QC6H<sub>x</sub> AEMs

膜样品	理论 IEC/ (mmol · g <sup>-1</sup> )	实际 IEC/ (mmol · g <sup>-1</sup> )	WU/%		SR/%		TS/MPa	E <sub>b</sub> /%
			30 °C	80 °C	30 °C	80 °C		
PEAM-QC6H0	1.81	1.8	26.5	38.7	8.5	10.6	33.4	21.23
PEAM-QC6H4	1.65	1.63	23.1	34.2	7.7	9.5	36.9	20.0
PEAM-QC6H6	1.58	1.57	20.8	29.5	7.0	9.0	38.9	18.3
PEAM-QC6H8	1.51	1.52	18.3	26.1	5.8	8.2	43.7	15.2

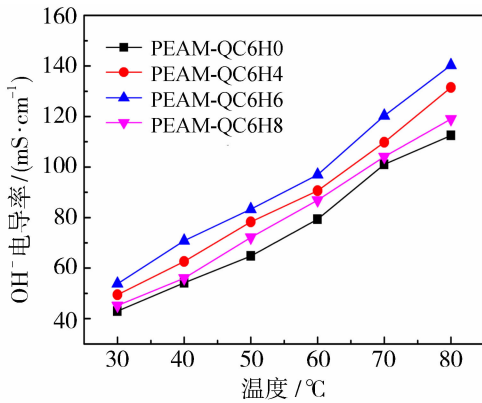


图5 PEAM-QC6H<sub>x</sub>膜的OH<sup>-</sup>电导率

Fig. 5 OH<sup>-</sup> conductivity of PEAM-QC6H<sub>x</sub> AEMs

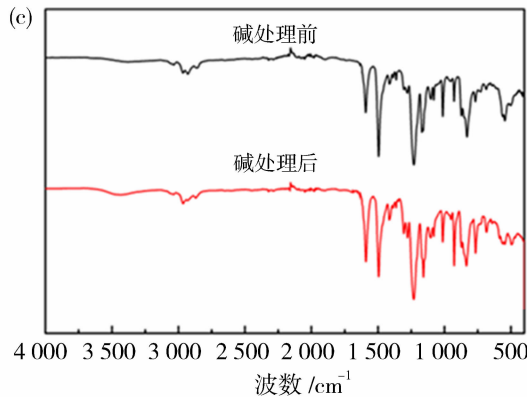
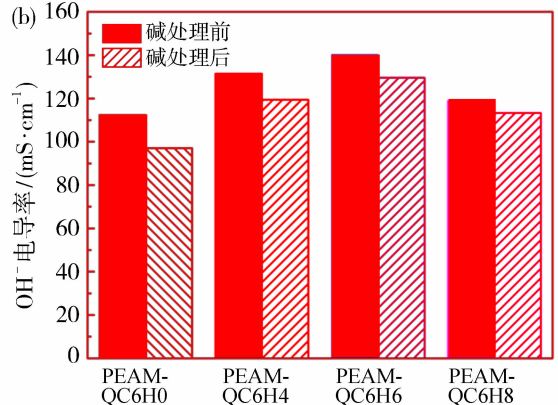
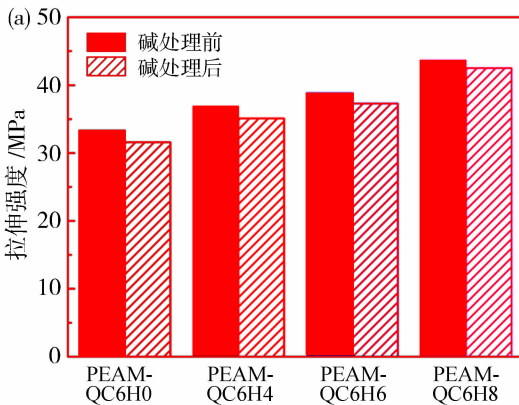


图6 PEAM-QC6H<sub>x</sub>膜的稳定性测试:拉伸强度(a);电导率(b);PEAM-QC6H6 红外光谱(c)

Fig. 6 Alkaline stability tests of PEAM-QC6H<sub>x</sub> AEMs ; tensile strength (a); conductivity (b); FTIR of PEAM-QC6H6 (c)

### 2.4 碱稳定性

图6展示了PEAM-QC6H<sub>x</sub>膜的耐碱性。由图6(a)可知,经碱处理后(4 mol/L KOH, 80 °C, 1 500 h),所有PEAM-QC6H<sub>x</sub>膜拉伸强度的损失率小于6%,说明主链未发生降解,这归因于无吸电子C=O基主链优异的碱稳定性。此外,由图6(b)可知,随着疏水侧链长度增加,膜的碱稳定性逐渐提高,碱处理后,PEAM-QC6H8膜的离子电导率保持率达到95.2%。这是因为,疏水链的引入可以产生空间位阻效应,减少β-H暴露,有效缓解OH<sup>-</sup>的亲核攻击。以上分析表明,无吸电子C=O基主链协同双功能侧链可使膜具有杰出的碱稳定性。泡碱

前后 PEAM-QC6H6 膜的红外谱图见图 6(c)。由图可知,红外光谱图中碱处理前后主链结构特征峰无明显变化,进一步说明主链化学结构在苛刻碱处理条件下仍保持完整。

## 2.5 单电池性能

选取综合性能最佳的 PEAM-QC6H6 材料进行单电池性能测试。测试结果显示,采用 PEAM-QC6H6 组装的单电池开路电压为 1.01 V,说明该膜致密性良好,燃料渗透率较低。电池的最大峰值功率密度达到  $1.18 \text{ W/cm}^2$  ( $80 \text{ }^\circ\text{C}$ )。这一优异的单电池性能主要归因于 PEAM-QC6H6 较高的离子电导率以及更优的微观相分离结构,从而有效促进了离子与水的传输。

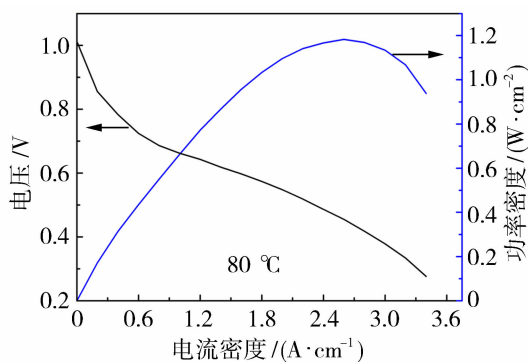


图7 PEAM-QC6H6 的单电池性能

Fig. 7 Single-cell performance of PEAM-QC6H6

## 3 结论

为进一步提高碱性燃料电池用阴离子交换膜的综合性能,本研究提出了一种创新的分子设计策略:采用无吸电子C=O基聚芳醚为主链,并通过接枝疏水-亲水双功能侧链进行结构优化。功能侧链的引入有效调控了膜的微相分离结构,从而优化了离子传输通道,使膜 PEAM-QC6H6 在低溶胀率 ( $80 \text{ }^\circ\text{C}$  下仅为 9.0%) 下,仍能实现高达  $140.3 \text{ mS/cm}$  的  $\text{OH}^-$  离子电导率 ( $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 和单电池性能 ( $1.18 \text{ W/cm}^2$ ,  $4 \text{ mol/L KOH}$ ,  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ )。同时,稳定的主链结构与双功能侧链产生的空间位阻效应协同作用,显著增强了膜的耐碱稳定性,使其在苛刻条件下 ( $4 \text{ mol/L KOH}$ ,  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 浸泡 1500 h 后,电导率保持率仍高达 92.4%。

## 参考文献:

[1] Dekel D R. Review of cell performance in anion exchange membrane fuel cells[J]. J Power Sources,

2018, 375(1): 158-169.

- [2] Merle G, Wessling M, Nijmeijer K. Anion exchange membranes for alkaline fuel cells: A review [J]. J Membr Sci, 2011, 377(1/2): 1-35.
- [3] Ge X, Zhang F, Wu L, *et al.* Current challenges and perspectives of polymer electrolyte membranes [J]. Macromolecules, 2022, 55(9): 3773-3787.
- [4] Miyanishi S, Yamaguchi T. Analysis of the degradation mechanism of the polyarylene ether anion-exchange membrane for alkaline fuel cell and water-splitting cell applications[J]. New J Chem, 2017, 41(15): 8036-8044.
- [5] Hibbs M R, Fujimoto C H, Cornelius C J. Synthesis and characterization of poly(phenylene)-based anion exchange membranes for alkaline fuel cells [J]. Macromolecules, 2009, 42(21): 8316-8321.
- [6] Donat-Bouillud A, Levesque I, Tao T. Light-emitting diodes from fluorene-based pi-conjugated polymers[J]. Chem Mater, 2000, 12(7): 1931-1936.
- [7] Havelka-Rivard P A, Nagai K, Freeman B D. Synthesis and characterization of poly{[1,1'-biphenyl]-4,4'-diyl[2,2,2-trifluoro-1-(trifluoromethyl) ethylidene]} [J]. Macromolecules, 1999, 32(19): 6418-6424.
- [8] Zhang F, Li T T, Chen W T, *et al.* High-performance anion exchange membranes with para-type cations on electron-withdrawing C=O links free backbone[J]. Macromolecules, 2020, 53(24): 10988-10997.
- [9] Jannasch P, Weiber E A. Configuring anion-exchange membranes for high conductivity and alkaline stability by using cationic polymers with tailored side chains[J]. Macromol Chem Phys, 2016, 217(9): 1108-1118.
- [10] Dang H S, Weiber E A, Jannasch P. Poly(phenylene oxide) functionalized with quaternary ammonium groups via flexible alkyl spacers for high-performance anion exchange membranes [J]. J Mater Chem A, 2015, 3(10): 5280-5284.
- [11] Gao L, He G, Pan Y. Poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) containing imidazolium-terminated long side chains as hydroxide exchange membranes with improved conductivity[J]. J Membr Sci, 2016, 518(1): 159-167.
- [12] Lin X, Varcoe J R, Poynton S D. Alkaline polymer electrolytes containing pendant dimethylimidazolium groups for alkaline membrane fuel cells[J]. J Mater Chem A, 2013, 1(24): 7262-7269.
- [13] Ran J, Ding L, Chu C, *et al.* Highly conductive and stabilized side-chain-type anion exchange membranes:

- Ideal alternatives for alkaline fuel cell applications[J]. *J Mater Chem A*, 2018, 6(34): 17101-17110.
- [14] Liu L, Yan X, Gao L, *et al.* Long-branched and densely functionalized anion exchange membranes for fuel cells[J]. *J Membr Sci*, 2019, 581(1): 82-92.
- [15] Zhang F, Li T T, Chen W T, *et al.* Electron-donating C-NH<sub>2</sub> link backbone for highly alkaline and mechanical stable anion exchange membranes [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(8): 10490-10499.

## Bifunctional side chain anion exchange membranes with C=O-free backbone

LIU Jinwu<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>,  
JU Jia<sup>1</sup>, CUI Jun<sup>2</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>

- (1. College of Petrochemical Technology, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China;  
2. College of Life Engineering, Shenyang Institute of Technology, Fushun 113000, China)

**Abstract:** To enhance the overall performance of anion exchange membranes (AEMs) under harsh, hot alkaline conditions, a novel membrane architecture was designed by integrating hydrophobic-hydrophilic dual-functional side chains in a parallel configuration onto a C=O-free poly(arylene ether) backbone. The C=O-free backbone was employed to mitigate alkaline-induced backbone degradation, while the dual-functional side chains were intended to synergistically facilitate the formation of efficient ion-conducting pathways and provide steric protection for the cationic groups. AEMs with varying side chain lengths were synthesized and characterized. The membrane incorporating hexyl chains for both functionalities (PEAM-QC6H6) demonstrated the most balanced property profile. It exhibited a low swelling ratio of 9.0% at 80 °C, a tensile strength of 38.9 MPa, and a high hydroxide conductivity of 140.3 mS/cm at 80 °C. Remarkably, it retained 92.4% of its initial conductivity after being immersed in 4 mol/L KOH at 80 °C for 1 500 hours. Furthermore, a H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> fuel cell assembled with the PEAM-QC6H6 membrane achieved a peak power density of 1.18 W/cm<sup>2</sup> at 80 °C. This work provides a promising strategy for the molecular design of durable, high-performance AEMs.

**Key words:** C=O-free poly(arylene ether); hydrophobic-hydrophilic dual-functional side chains; anion exchange membrane; ionic conductivity; alkaline stability; single-cell performance

(上接第 102 页)

incorporating NiO as active catalytic component into the matrix of carbon membrane. Thermogravimetric analysis, infrared spectroscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction were employed to systematically investigate the thermal stability, functional group structure, component distribution and microstructure of the membrane materials. The effect of NiO amount on the separation performance and the hydrogen production performance of resultant catalytic carbon membranes was investigated. The results showed that when the NiO loading is 0.8%, the prepared catalytic carbon membrane exhibited a H<sub>2</sub> permeability of 554.92 Barrer and a H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> selectivity of 42.39. Under reaction conditions at 320 °C and ambient pressure, the membrane reactor achieved a methanol conversion of 99.88% and a hydrogen yield of 53.68%, demonstrating a significant synergistic enhancement between reaction and separation.

**Key words:** NiO; carbon membrane; gas separation; membrane reactor; methanol-to-hydrogen