

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.06.003

## 织物型 PPS 隔膜服役中的结构变化

苏坤梅<sup>1</sup>, 冯炳超<sup>1</sup>, 刘文磊<sup>2</sup>, 李振环<sup>2</sup>

(1. 天津工业大学 化学工程与技术学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300387)

**摘要:** 针对聚苯硫醚(PPS)隔膜在碱性水电解槽服役过程中出现的隔膜工作效率降低和能耗变大的问题, 通过分析不同服役时间 PPS 织物隔膜的形貌变化、热性能、元素含量和价态变化、红外光谱、力学性能、亲疏水性能以及隔膜电阻等, 研究碱性电解水制氢过程中 PPS 织物隔膜的变化, 解析其机理。结果表明: PPS 隔膜在电解制氢服役过程中发生 C—S—C 键的断裂与脱硫; 随着服役时间的增长, PPS 织物隔膜纤维表面更加粗糙, 甚至出现裂痕, 隔膜的亲水性变差, 氢氧根离子传输速率变慢, 热稳定性以及结晶性能逐渐减弱, 而隔膜阻抗与拉伸强度随之增大; PPS-8 织物隔膜中 S 元素原子分数为 4.9%, S/C 比为 5.85, 水接触角为 101.33°, 热失重质量保持率达到 47.53%, 隔膜内阻为 8.236  $\Omega$ 。

**关键词:** 聚苯硫醚制氢隔膜; 服役; 阻抗; 电解脱硫

中图分类号: TQ340.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)05-0015-06

## Structure changes in service of fabric-based PPS diaphragms

SU Kunmei<sup>1</sup>, FENG Bingchao<sup>1</sup>, LIU Wenlei<sup>2</sup>, LI Zhenhuan<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of decreased diaphragm working efficiency and increased energy consumption of polyphenylene sulfide (PPS) diaphragms during their service in alkaline water electrolyzers, the changes in PPS fabric diaphragms during the alkaline water electrolysis for hydrogen production process were investigated, and their underlying mechanisms were clarified, by analyzing the morphological changes, thermal properties, elemental content and valence state changes, infrared spectra, mechanical properties, hydrophilic-hydrophobic properties, and impedance of PPS fabric diaphragms with different service durations. The results show that C—S—C bond breaking and desulfurization of the PPS diaphragm occurs during the electrolytic hydrogen production service. As the service time increased, the surface of PPS fabric diaphragms becomes rougher and cracked, the hydrophilicity of the diaphragm deteriorates, the hydroxide ion transport rate slows down, the thermal stability and crystallization performance are gradually weakened, while the diaphragm impedance and tensile strength are correspondingly increased. For the PPS-8 fabric diaphragm, the atomic fraction of S element is 4.9%, the S/C ratio is 5.85, the water contact angle is 101.33°, the mass retention rate in thermogravimetry reaches 47.53%, and the internal diaphragm impedance is 8.236  $\Omega$ .

**Key words:** polyphenylene sulfide(PPS)hydrogen production separator; service; impedance; electrolytic desulfurization

随着经济和社会的迅速发展, 能源需求不断增长, 环境污染越来越严重, 因此, 清洁能源的需求迫在眉睫<sup>[1-2]</sup>。氢能具有洁净高效和应用场景丰富的特点, 是最优的二次能源载体, 已成为全球能源技术革命和转型发展的重大战略方向<sup>[2-4]</sup>。水电解制氢是一种清

洁、高效和大规模产氢的重要手段, 目前电解水制氢技术主要有 3 类: 碱性电解水(AWE)<sup>[5-8]</sup>、质子交换膜电解水(PEM, 固体聚合物电解槽)<sup>[9-11]</sup>、阴离子交换膜电解水(AEMS)<sup>[12-14]</sup>。在纯水介质中, 质子交换膜电解水具有电解电流密度大、效率高和响应速度快等优

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(21878231); 天津市自然科学基金重点项目(19JCZDJC37300)

通信作者: 苏坤梅(1977—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为生物质转化。E-mail: sukunmei@tiangong.edu.cn

势,但需用贵金属催化剂(阴极 Pt、阳极  $\text{IrO}_2$  等)及钛基双极板<sup>[15-16]</sup>,另外质子交换膜的价格昂贵,催化剂价格昂贵且易于被毒化,降低其催化活性<sup>[17]</sup>。阴离子交换膜优点在于成本低且高度的稳定性,但关于阴离子交换膜用于电解的研究较少,目前处于实验室测试阶段,且阴离子交换膜会发生降解,不能长时间工作<sup>[18]</sup>。与上述2种介质体系相比,碱性水溶液电解制氢技术成熟,安全系数高、制氢成本低,在行业中占主导地位,是目前大规模制氢的主要手段。在碱性介质中,可利用廉价的非贵金属(Fe、Co及Ni等)为催化剂,因而碱性水溶液电解水具有成本低、环境友好、易操作、经济实惠等优点,适用于大规模制氢且备受关注<sup>[19-21]</sup>。

隔膜是水电解制氢装置的核心组件和关键材料,直接影响了水电解装置的能耗、气体纯度、电解稳定性及安全性等,隔膜的作用主要有2个:①分离氢气和氧气;②传输羟基离子或氢离子形成内部通路<sup>[22-24]</sup>。碱性水溶液电解制氢的商业化隔膜为石棉布、聚苯硫醚(PPS)编织物、聚合物复合隔膜等<sup>[25]</sup>。石棉隔膜在高温强碱性溶液中不耐腐蚀,有高致癌性等劣势,已逐步被PPS编织物取代<sup>[26]</sup>。聚合物复合隔膜通常是以PPS单纤维物为基底,匀称地涂有聚合物和氧化锆的混合物<sup>[27]</sup>,隔气性好,能耗低,性能也相对稳定,但造价昂贵,对于涂敷聚合物的配比和涂敷工艺有很大要求。

PPS隔膜具有优良的抗碱性能与耐热性能,但在电解制氢长时间服役过程中,隔膜会出现能耗增大,电解效率降低的现象,影响了PPS隔膜在氢能领域的发展。因此,本课题组针对PPS织物隔膜在碱性水溶液电解槽服役过程出现的问题,收集了不同服役时间的PPS电解制氢隔膜。通过分析不同服役时间PPS隔膜的形貌变化、热性能、元素含量和价态变化、红外光谱、力学性能、亲疏水性能以及隔膜电阻,研究碱性电解水制氢过程对PPS纤维隔膜的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 原料、试剂与设备

主要原料与试剂:PPS纤维织物隔膜(服役2年、5年、8年);氢氧化钾,分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司;乙醇,分析纯,天津风船化学试剂科技有限公司;镍片电极、铂片电极(99%),上海楚兮实业公司;H型电解槽,天津艾达恒晟科技发展有限公司。上述试剂购买后未经进一步纯化处理,直接使用。

主要设备:CHI660E型电化学工作站,上海辰华仪器有限公司;冲孔器,长沙江梦科技有限公司;

Nicolet iS50型傅里叶红外光谱分析仪,美国赛默飞世尔科技公司;Gemini SEM 500型场发射电子显微镜,英国卡尔蔡司公司;TG 209F3 Tarsus型热重分析仪,德国耐驰制造有限公司;CMT 4506型机电通用测试机,山东万辰试验机有限公司;DSA-100型动态接触角测量仪,德国克吕士公司。

### 1.2 聚苯硫醚纤维隔膜的预处理

收集不同服役时间的PPS织物隔膜,将服役时间不同的PPS隔膜放在去离子水中于80℃煮沸2h,再冷却至室温后,用乙醇和去离子水分别彻底冲洗,将处理后的PPS隔膜于60℃干燥12h以上。

### 1.3 PPS织物隔膜的表征

(1)热稳定性测试(TG):采用TG 209F3 Tarsus型热重分析仪,在氮气气氛中对PPS隔膜进行热稳定性分析,温度范围为30~800℃,加热速率为10℃/min,得到热失重曲线。

(2)热分析测试(DSC):采用DSC 204F1型差示扫描量热仪,在氮气气氛下对PPS隔膜进行热性能分析,温度范围为室温~320℃,加热/降温速率为10℃/min。

(3)傅里叶红外光谱(FTIR)表征:采用Nicolet iS50型傅里叶变换红外光谱仪对服役时间不同的PPS隔膜进行傅里叶变换红外光谱分析,采用KBr压片法制样,扫描波数范围为400~4000  $\text{cm}^{-1}$ 。

(4)X射线光电子能谱(XPS)表征:采用NEXSA型X射线光电子能谱仪检测不同服役时间的PPS隔膜的化学组成与键能进行分析,测试光谱范围:0~1500 eV。

(5)接触角(WCA)测试:采用DSA 30S型动态接触角测量仪对不同服役时间的PPS隔膜表面的亲疏水性进行分析。

(6)热场发射扫描电子显微镜(SEM):采用Gemini SEM500型热场发射扫描电子显微镜观察服役时间不同的PPS隔膜的表面形貌。

(7)力学性能测试:采用CMT 4506型机电通用测试机测量不同服役时间的PPS隔膜抗拉强度,测试前将充分干燥的PPS织物拆解成单纱线,取长度为4cm的单纱线用于力学强度测试,拉伸速率为15 mm/min,夹持距离为20 mm。

### 1.4 PPS隔膜的电化学性能测试

由于电化学阻抗法采用小幅度交流信号,可以降低电极极化,测定面电阻更精确,因此,本文采用两电极体系测试PPS织物隔膜的电化学性能。阳极采用镍电极(10 cm × 15 cm,厚0.2 mm),阴极采用铂电极,镍电极面积小于铂电极面积,有效电极面积为0.1 cm ×

0.15 cm × 2 = 0.03 cm<sup>2</sup>。将 2 个内径为 3 cm、玻璃壁厚为 2.5 mm、高度为 75 mm 的 H 型玻璃电解池用铁架子固定,中间开口膜的直径为 16 mm,在电极孔两侧分别插入镍电极与铂电极,将 CHI660E 型电化学工作站中的工作电极与参比电极连接镍电极,对电极连接铂电极。测量时将 PPS 隔膜夹入开口膜处,用铁夹子固定,扭紧夹子螺丝,在两侧玻璃电解池分别盛入质量分数为 30% 的 KOH 溶液,通过能奎斯特图拟合不同服役时间的 PPS 织物隔膜阻抗。组装 H 型电解槽,在 CHI760E 型电化学工作站上对 PPS 织物隔膜的电化学阻抗谱(EIS)进行试验,测试频率范围为 10<sup>5</sup>~1 Hz,振幅为 5 mV。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SEM 分析

图 1 所示为不同服役年限 PPS 隔膜 SEM 照片。

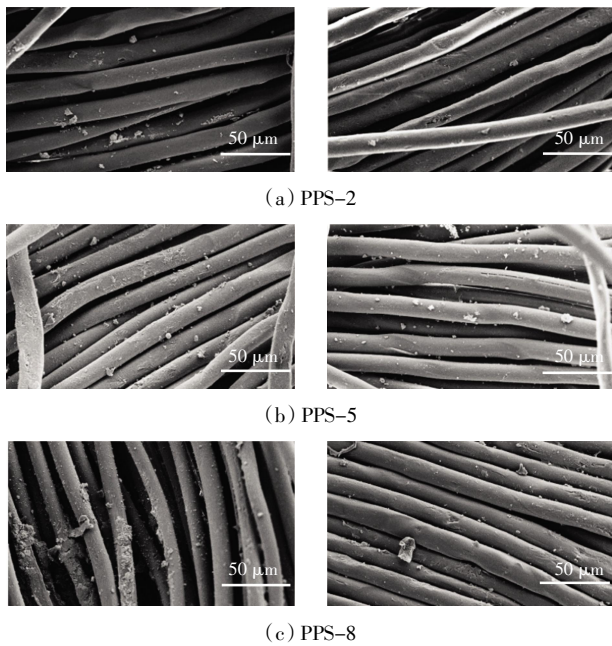


图 1 不同服役年限的 PPS 隔膜电镜图

Fig.1 Electron microscopic images of PPS diaphragms of different service durations

由图 1 可知,服役年限越长的 PPS 织物隔膜其纤维表面越粗糙,甚至出现裂痕,PPS 纤维表面破损严重,而服役年限越短的隔膜,表面越光滑。

### 2.2 热性能分析

3 种不同服役年限的 PPS 织物型隔膜的热失重曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,8 年服役的 PPS 织物型隔膜残余质量仅为 47.53%,而服役 5 年和 2 年的织物型隔膜残余

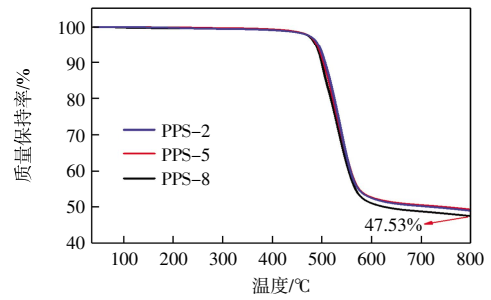


图 2 不同服役年限的 PPS 隔膜热失重曲线

Fig.2 TG curves of PPS diaphragms for different service durations

质量分别为 49.00%和 49.33%。由此表明,PPS 织物型隔膜在长期电解制氢使用过程中,PPS 织物隔膜高温分解残余质量变少,热稳定性变差,可能发生了纤维表层脱硫,隔膜纤维中聚合物分子链断裂,导致隔膜热稳定性下降。不同服役年限的 PPS 织物隔膜的 DSC 曲线如图 3 所示。

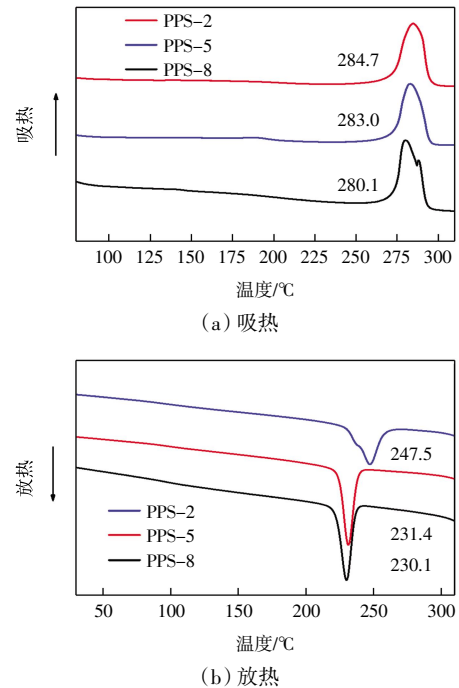


图 3 不同服役年限 PPS 隔膜的 DSC 曲线

Fig.3 DSC curves of PPS diaphragms of different service durations

由图 3 可以看出,使用年限为 8 年的 PPS 隔膜熔点为 280.1 °C,结晶温度为 230.1 °C,低于其他 2 种年限服役隔膜,表明随着服役时间的增长,PPS 织物隔膜的熔点以及结晶点都在降低。这可能是由于在电解槽服役过程中 PPS 隔膜发生脱硫,PPS 少部分分子链断裂,导致其熔点和结晶温度均下降。

### 2.3 XPS 分析

为了进一步确定织物型 PPS 隔膜中的原子分数

变化以及 S 价态结构变化,通过 XPS 对服役后的隔膜进行分析,不同服役年限 PPS 隔膜的 S2p 和总 XPS 谱图如图 4 所示,隔膜中所含元素的原子分数及 S/C 元素比如表 1 所示。

由图 4 和表 1 可知,PPS-8 隔膜中 S 元素含量最低,同时随着隔膜服役年限的增长,S/C 比例逐渐降低。S 元素含量降低说明 PPS 隔膜在电解制氢过程中发生了脱硫反应。结合图 2 TG 热失重结果可知,电解使

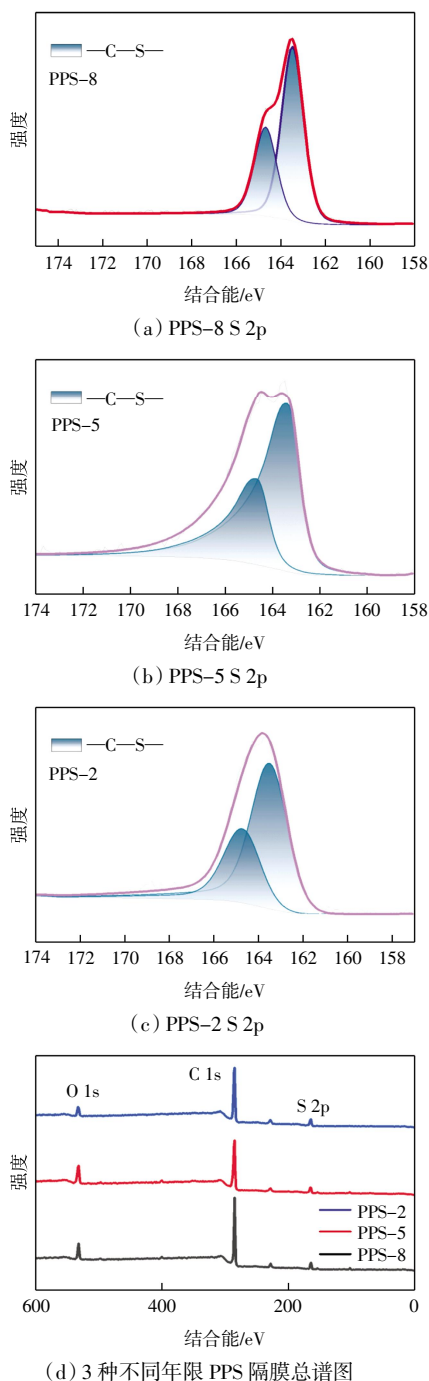


图 4 不同服役年限 PPS 隔膜的 S 2p 和总 XPS 谱图  
Fig.4 S 2p and total XPS spectra of PPS diaphragms of different service durations

表 1 不同服役年限 PPS 隔膜的原子分数及元素比

Tab.1 Atomic fraction and elemental ratios of PPS diaphragms of different service durations

材料	原子分数/%			S/C 元素比
	C	O	S	
PPS-8	83.80	11.30	4.90	5.85
PPS-5	79.57	14.93	5.50	6.91
PPS-2	86.17	7.75	6.07	7.04

C—S—C 部分分子链发生断裂,导致 PPS 隔膜热稳定性降低,隔膜纤维表面形貌出现破损划痕也与之有关。

## 2.4 FTIR 分析

为进一步分析 PPS 织物隔膜的化学结构变化,测试不同服役年限的 PPS 织物隔膜红外谱图,结果如图 5 所示。

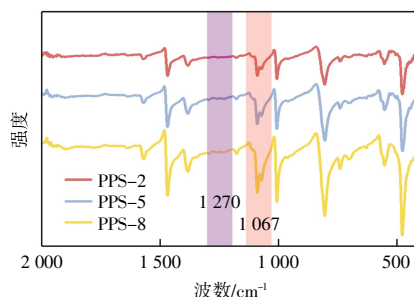


图 5 不同服役年限 PPS 隔膜的红外谱图

Fig.5 Infrared spectra of PPS diaphragms of different service durations

由图 5 可知,由于红外谱图 3 600~3 200  $\text{cm}^{-1}$  处没有 O—H 强宽峰,所以数据从 2 000~400  $\text{cm}^{-1}$  开始,多为苯环 C—H 振动和 C=C 振动引起的波峰,而 1 272~1 210  $\text{cm}^{-1}$  处没有出现芳香醚峰,表明聚苯硫醚中没有出现 C—O—C 氧化交联,而 1 067  $\text{cm}^{-1}$  和 1 320  $\text{cm}^{-1}$  处也没有出现 S=O 和 O=S=O 峰,说明硫醚键没有被氧化成亚砷和砷键。由此更加可以确定,导致 PPS 隔膜热失重残余质量变低的原因是 S 键的断裂与流失,这使得 PPS 隔膜结构变得不稳定,热稳定性变弱,导致其 TG 残余质量降低。

## 2.5 力学性能分析

为分析电解制氢过程对 PPS 织物隔膜力学性能的影响,对不同服役年限的 PPS 隔膜进行拉伸断裂测试,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,PPS-8 拉伸应力达到 127 MPa,应变达到 453%,远大于其他 2 种服役年限的 PPS 织物,表明随着隔膜服役时间的增长,PPS 隔膜纤维的拉伸强度逐渐增大。

## 2.6 亲水性分析

为了分析 PPS 隔膜的亲水性,对不同服役年限的

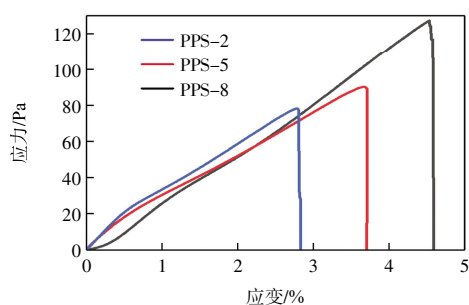


图 6 不同服役年限 PPS 隔膜的应力应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of PPS diaphragms of different service durations

PPS 隔膜进行接触角测试,结果如图 7 所示。

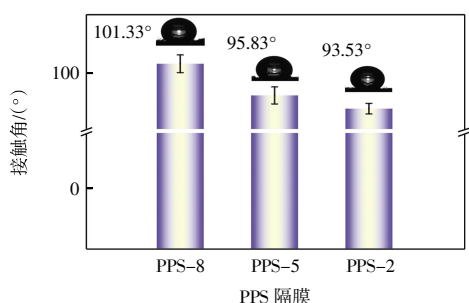


图 7 不同服役年限 PPS 隔膜的接触角

Fig.7 Contact angles of PPS diaphragms of different service durations

由图 7 可知,PPS-8 接触角为  $101.33^\circ$ , PPS-5 接触角为  $95.83^\circ$ , PPS-2 接触角为  $93.53^\circ$ 。这是由于在电解制氢过程中 PPS 隔膜脱硫, S 的流失会降低 PPS 分子的极性, 随着服役年限的增长, PPS 隔膜亲水性逐渐下降, 这会导致隔膜传递氢氧根离子的能力越来越弱, 降低氢氧根离子的传输速率, 影响隔膜在电解制氢设备中的制氢效率。

### 2.7 电化学性能分析

为分析碱性电解水制氢过程对 PPS 织物隔膜内阻影响, 对不同服役时间的 PPS 隔膜进行电化学性能测试, 其交流阻抗谱图如图 8 所示。

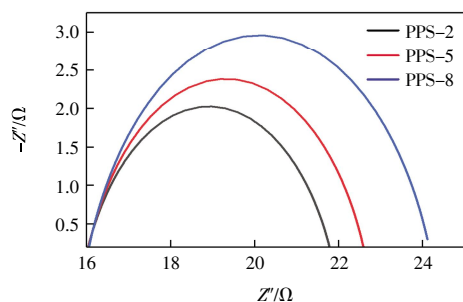


图 8 不同服役时间 PPS 隔膜的交流阻抗

Fig.8 AC impedance of PPS diaphragms of different service durations

内阻是碱性电解水制氢隔膜的一个重要参数, 代表制氢隔膜传导氢氧根离子的传输速率。由图 8 可知, 服役时间为 PPS-8 的内阻  $R_i$  为  $8.236 \Omega$ , PPS-5 的  $R_i$  为  $6.688 \Omega$ , PPS-2 的  $R_i$  为  $5.913 \Omega$ , 表明隔膜电阻随着服役年限的增长, 隔膜电阻逐渐变大。这是由于隔膜发生脱硫反应, 隔膜的亲水性变差, 氢氧根离子传输速率变慢。

## 3 结论

本文针对 PPS 织物隔膜在碱性水溶液电解槽服役过程出现的问题, 收集了不同服役时间的 PPS 电解制氢隔膜, 对其形貌变化、热性能、元素含量和价态变化、红外光谱、力学性能、亲疏水性能以及隔膜电阻进行分析, 结果表明:

(1) PPS 织物隔膜在电解制氢服役过程中发生 C—S—C 的断裂与脱硫, 隔膜的亲水性变差, 氢氧根离子传输速率变慢。随着电解制氢服役时间的增长, PPS 织物隔膜的热稳定性以及结晶性能逐渐减弱, 阻抗也随之增大。

(2) PPS-8 织物隔膜中 S 元素原子分数为 4.9%, S/C 比为 5.85, TG 质量保持率为 47.53%, 低于其他 2 种服役年限较短的 PPS 织物隔膜; 而水接触角为  $101.33^\circ$ , 隔膜内阻为  $8.236 \Omega$ , 高于其他 2 种 PPS 织物隔膜。

(3) 亟需开发一种在电解制氢过程中不易被电解脱硫的 PPS 纤维隔膜, 以延长其工作寿命, 避免能耗损失。

### 参考文献:

- [1] KHAN M A, ZHAO H B, ZOU W W, et al. Recent progresses in electrocatalysts for water electrolysis[J]. *Electrochemical Energy Reviews*, 2018, 1(4): 483-530.
- [2] LI X, ZHAO L L, YU J Y, et al. Water splitting: From electrode to green energy system[J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12(1): 131.
- [3] ANANTHARAJ S, EDE S R, SAKTHIKUMAR K, et al. Recent trends and perspectives in electrochemical water splitting with an emphasis on sulfide, selenide, and phosphide catalysts of Fe, Co, and Ni: A review[J]. *ACS Catalysis*, 2016, 6(12): 8069-8097.
- [4] ZOU X X, ZHANG Y. Noble metal-free hydrogen evolution catalysts for water splitting[J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(15): 5148-5180.
- [5] MANABE A, KASHIWASE M, HASHIMOTO T, et al. Basic study of alkaline water electrolysis[J]. *Electrochimica Acta*,

- 2013, 100: 249–256.
- [6] MARINI S, SALVI P, NELLI P, et al. Advanced alkaline water electrolysis[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 82: 384–391.
- [7] SANTOS D M F, SEQUEIRA C A C, FIGUEIREDO J L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis[J]. *Química Nova*, 2013, 36(8): 1176–1193.
- [8] 万磊, 徐子昂, 王培灿, 等. 电解水制氢的耐碱离子膜研究进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(3): 1556–1568.  
WAN L, XU Z A, WANG P C, et al. Progress of alkaline-resistant ion membranes for hydrogen production by water electrolysis[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(3): 1556–1568(in Chinese).
- [9] MILLET P, MBEMBA N, GRIGORIEV S A, et al. Electrochemical performances of PEM water electrolysis cells and perspectives[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(6): 4134–4142.
- [10] MILLET P, DRAGOE D, GRIGORIEV S, et al. GenHyPEM: A research program on PEM water electrolysis supported by the European Commission[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(11): 4974–4982.
- [11] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(2): 146–152.  
YU H M, SHAO Z G, HOU M, et al. Hydrogen production by water electrolysis: Progress and suggestions[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(2): 146–152 (in Chinese).
- [12] FAID A Y, XIE L, BARNETT A O, et al. Effect of anion exchange ionomer content on electrode performance in AEM water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(53): 28272–28284.
- [13] PAVEL C C, CECCONI F, EMILIANI C, et al. Highly efficient platinum group metal free based membrane-electrode assembly for anion exchange membrane water electrolysis[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, 53(5): 1378–1381.
- [14] LENG Y J, CHEN G, MENDOZA A J, et al. Solid-state water electrolysis with an alkaline membrane[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(22): 9054–9057.
- [15] CARMO M, FRITZ D L, MERGEL J, et al. A comprehensive review on PEM water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(12): 4901–4934.
- [16] KLOSE C, SAATKAMP T, MÜNCHINGER A, et al. All-hydrocarbon MEA for PEM water electrolysis combining low hydrogen crossover and high efficiency[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(14): 1903995.
- [17] WEI G Q, XU L, HUANG C D, et al. SPE water electrolysis with SPEEK/PES blend membrane[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(15): 7778–7783.
- [18] VINCENT I, BESSARABOV D. Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 1690–1704.
- [19] ANWAR S, KHAN F, ZHANG Y H, et al. Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(63): 32284–32317.
- [20] SHIVA KUMAR S, HIMABINDU V. Hydrogen production by PEM water electrolysis: A review[J]. *Materials Science for Energy Technologies*, 2019, 2(3): 442–454.
- [21] VIDAS L, CASTRO R. Recent developments on hydrogen production technologies: State-of-the-art review with a focus on green-electrolysis[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(23): 11363.
- [22] GANLEY J C. High temperature and pressure alkaline electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(9): 3604–3611.
- [23] APPLEBY A J, CREPY G, JACQUELIN J. High efficiency water electrolysis in alkaline solution[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1978, 3(1): 21–37.
- [24] ZENG K, ZHANG D K. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(3): 307–326.
- [25] LEE H I, MEHDI M, KIM S K, et al. Advanced Zirfon-type porous separator for a high-rate alkaline electrolyser operating in a dynamic mode[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 616: 118541.
- [26] ROSA V M, SANTOS M B F, DA SILVA E P. New materials for water electrolysis diaphragms[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1995, 20(9): 697–700.
- [27] SCHALENBACH M, LUEKE W, STOLTEN D. Hydrogen diffusivity and electrolyte permeability of the zirfon PERL separator for alkaline water electrolysis[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 163(14): 1480–1488.

#### 本文引文格式:

苏坤梅, 冯炳超, 刘文磊, 等. 织物型 PPS 隔膜服役中的结构变化[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(6): 15–20.

SU K M, FENG B H, LIU W L, et al. Structure changes in service of fabric-based PPS diaphragms[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(6): 15–20(in Chinese).

(责任编辑:程晓英)