

带有支撑层的一体式再生燃料电池 新结构及性能分析

刘洋, 邱殿凯, 彭林法, 林赫

(上海交通大学机械与动力工程学院, 200240, 上海)

摘要: 针对一体式再生燃料电池(URFC)双向性能低的问题,以多孔传输层(PTL)与催化剂涂覆膜(CCM)之间界面接触为切入点,提出一种包含支撑层的新型 URFC 结构,并对 PTL 结构参数进行优化。通过极化曲线和电化学阻抗谱分析了不同结构 URFC 的性能。实验发现:钛毡纤维结构细密化有利于提升 URFC 双向性能,当电流密度为 1.5 A/cm^2 时,带有支撑层的 URFC 相比传统 URFC,在燃料电池模式下电压上升了 69 mV,在电解槽模式下电压下降了 12 mV;新结构 URFC 具有更小的接触阻抗及质子传输阻抗,比燃料电池模式的高频阻抗下降了 16.2%。压敏纸实验和电镜测试表明,支撑层可以使催化层与 PTL 之间的宏观接触应力分布更加均匀,改善了钛纤维与催化层之间界面的微观接触状态,有利于提高电子传输效率及反应动力。研究可为一体式再生燃料电池结构设计及优化提供参考。

关键词: 一体式再生燃料电池;结构设计;多孔传输层;支撑层

中图分类号: TK91 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202307010 **文章编号:** 0253-987X(2023)07-0111-09

Novel Structure Design and Performance Analysis of Unitized Regenerative Fuel Cell with Support Layer

LIU Yang, QIU Diankai, PENG Linfa, LIN He

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Unitized regenerative fuel cell (URFC) has always been limited by its unsatisfactory polarization performance. To address this problem, in this paper, a novel URFC structure design with support layer (SL) is proposed with the interface contact between porous transport layer (PTL) and catalyst coated membrane (CCM) as the starting point, and PTL structure parameters are optimized. Polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) are referred to for analyses on the performance of URFCs with different structures. It is found by experiment that the densification of the fiber structure for titanium felt is beneficial to improve the polarization performance of URFC. The novel URFC structure with a support layer offers a voltage rise of 69 mV in FC mode and a voltage drop of 12 mV in WE mode at 1.5 A/cm^2 compared with those of traditional URFC. Furthermore, the novel URFC structure facilitates the reduction of contact and proton transfer impedance, while decreasing the high frequency impedance (HFR) by 16.2% in FC mode. Through pressure-sensitive paper experiments and electron microscope

test, it is demonstrated that the novel structure could result in a more uniform macroscopic contact stress distribution between CCM and PTL and a better microscopic contact state at the interface between titanium fibers and CCM, which is beneficial to improve the electron transfer efficiency and reaction kinetics. This study provides reference for the structural design and optimization of URFC.

Keywords: unitized regenerative fuel cell; structural design; porous transport layer; support layer

随着“双碳”目标的确立,氢能作为绿色清洁能源具有极大的发展潜力。一体式再生燃料电池(URFC)是一种将燃料电池(FC)与电解槽(WE)耦合的电化学装置,并可实现 FC 模式与 WE 模式间自由切换^[1]。FC 模式中,阳极通入氢气,阴极通入氧气,可获得直流电源;WE 模式中,阴阳极外部施加直流电源,同时在阳极侧通入去离子水,可分别生成氢气及氧气^[2]。URFC 具有高比能量、快速启动等优势,在分布式储能、电网调峰、长续航动力系统等领域均有突出表现^[3-5],成为美国、欧洲等国家和地区的研究热点^[6]。

URFC 基本组成结构如图 1 所示,由双极板(BP)、多孔传输层(PTL)、催化层(CL)、质子交换膜(PEM)组成^[7]。URFC 不同模式的阴、阳极位置不同,通常将 FC 模式的阳极(WE 模式的阴极)、FC 模式的阴极(WE 模式的阳极)分别定义为氢侧和氧侧。PTL 作为 URFC 的关键部件,承担着气液两相传输、结构支撑、电荷传递的作用^[8],同时需要满足 URFC 双向模式的功能及寿命需求^[9]。

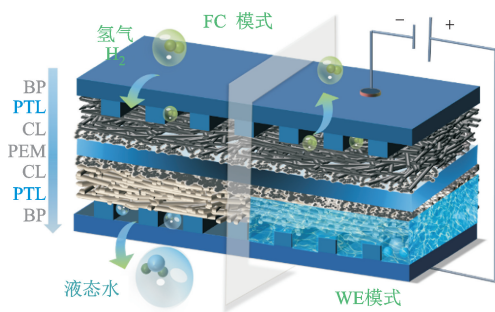


图 1 URFC 的基本组成结构

Fig. 1 URFC fundamental structure

目前 PTL 的材料主要为碳基多孔层和钛基多孔层。碳基多孔层已广泛应用于燃料电池,但却无法满足 URFC 电解模式的高电位、长寿命要求。Li 等^[10]对双侧 PTL 采用碳纸的 URFC 进行“发电-电解”循环试验,发现其循环效率由 45% 下降到 31.9%,表明基于两侧碳纸的 URFC 存在严重的寿命衰减问题。Song 等^[11]指出 URFC 在 WE 模式的

高电位环境中,氧原子及羟基自由基这类具有活性的含氧基团会使碳纸发生腐蚀。利用 IrO_2/Ti 粉在碳纸表面微孔层(MPL)外侧做保护层,延长了碳纸的使用寿命,但是仍存在高频阻抗(Z_{HFR})升高及性能衰减的问题。Huang 等^[12]将碳纸 MPL 上的碳黑颗粒替换成 TiN 颗粒,经过(FC: 0.7 V; WE: 1.5 V)循环实验发现,URFC 性能衰减程度下降,但是在高电流密度下的耐久测试仍有待考证,并且 TiN-MPL 制作工艺复杂。因此,碳基多孔层很难满足 URFC 严峻工况下的长寿命需求。

钛基多孔层拥有比碳基更强的抗氧化特性^[13],有望替代碳纸广泛应用于 URFC^[14]。然而,基于钛毡的 URFC 在 FC 模式下的性能普遍偏低^[10,12,15-16],无法满足高转换率需求,这是由于钛毡相比碳纸的表面粗糙度更大,材料强度更高,致使钛毡与催化剂涂覆膜(CCM)之间接触性较差。因此,诸多学者对适合钛基多孔层参数进行了探究。Rozain 等^[17]使用烧结钛粉作为电解槽的 PTL,在 80℃ 下运行 1 000 h 后其性能没有明显的衰减(电压衰减率约 27 mV/h),这证实钛基多孔层拥有较高的稳定性。Hwang 等^[16]用钛毡作为氧侧 PTL,分析了钛毡不同物性参数(孔隙率及纤维直径)对 URFC 性能的影响,实验发现纤维直径对 FC 性能的影响远大于对 WE 性能的影响。Ito 等^[18]通过实验的方式探究了 PTL 孔隙率及孔径参数对电解槽性能的影响,结果表明减小 PTL 孔径有利于提高 PEM 电解槽性能。Lettenmeier 等^[19]通过离子喷涂工艺在钛毡表面制作 MPL,以增加钛毡与 CCM 之间的接触性,使得 WE 性能显著提升。然而,基于钛基多孔层的 URFC 性能相比碳基多孔层仍存在差距。因此,优化钛基多孔层的结构参数,改善 URFC 电堆结构,成为提升 URFC 双向极化性能的关键途径之一。

本文针对钛基多孔层 URFC 双向性能低的问题,以 PTL 与 CCM 之间界面接触为切入点,提出一种包含支撑层的新型 URFC 结构。基于新型 URFC,优化 PTL 结构参数,以提高 URFC 双向工作效率。首先,依据 PTL 的不同结构参数,制定

URFC 实验对比方案,并制备相应 URFC 单电池;其次,通过极化曲线、电化学阻抗谱(EIS)对比分析了 URFC 的方案设计及性能差异原因;最后,利用压敏纸测试验证 CCM 与 PTL 之间的宏观接触应力,并从微观角度揭示界面接触对 URFC 性能影响机制。本研究可为一体式再生燃料电池 PTL 的结构设计与优化提供参考。

1 实验方法

1.1 URFC 单电池制备

如图 2(a)所示,传统 URFC 电池结构包括 BP、CCM、PTL、PTFE 边框及绝缘组件,其中双侧 PTL 多为软质多孔材料。本文提出一种包含支撑层的新型 URFC 结构,如图 2(b)所示,在氢侧布置软质(碳)PTL、支撑层(SL),氧侧布置硬质(钛)PTL,通过增加支撑层使 URFC 内部压力分布更加均匀,提升 URFC 双向性能。

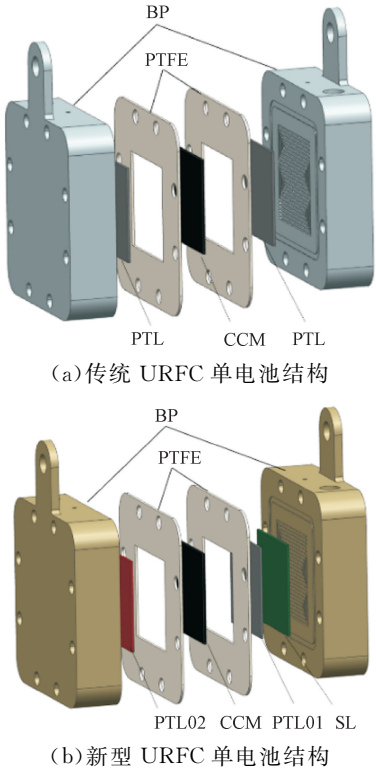


图 2 URFC 单电池结构

Fig. 2 URFC single cell structure

本研究试制中,CCM 的氧电极采用铈黑及铂黑的混合催化剂,氢电极采用质量分数为 60%的铂碳催化剂。催化剂浆料分散后喷涂在质子交换膜(Nafion 212,Dupont)两侧。极板由钛板铣削而成,有效反应区域为矩形,表面为 5 通道蛇形流场,反应

面积为 16 cm²。为了减小极板表面接触电阻,利用磁控溅射技术在极板表面涂覆贵金属涂层。边框材料为 PTFE,控制其厚度使 PTL 压缩率为 20%,夹在 CCM 两侧,同时起到密封及定位的作用^[20]。单电池装配完成后需进行气密性检测及绝缘检测。

1.2 PTL 材料选择

为了优化 PTL 的材料及结构,提升新型 URFC 的性能,本研究选择了 3 种 PTL:PTL01 为碳纸(TGP-H-060,TORAY)、PTL02 为钛毡(TI400,BELGIUM)、PTL03 为钛毡(TiFF-400,浙江新源科技),PTL02 的纤维直径和孔径均小于 PTL03。支撑层为不锈钢毡(FE-1000,嘉亿兴电子科技)。

利用激光共聚焦电子显微镜(VK-X200,KEY-ENCE)对 PTL 及支撑层(SL)表层分别进行形貌观测,结构参数如表 1 所示,形貌特征如图 3 所示。PTL03 的钛纤维比较粗大,约为 PTL02 的 3 倍,且纤维分布稀疏,导致其表面粗糙度相对较高。另外,支撑层纤维直径为 15 μm,孔径约为 100 μm,纤维细密化程度较高,接近碳纸。

表 1 PTL 及支撑层主要物性参数

Table 1 The physical parameters of PTL and SL

参数	PTL01	PTL02	PTL03	SL
纤维直径/μm	7	15	45	15
孔隙率/%	70	70	70	80
孔径/μm	80	80	155	100
微孔层	有	无	无	无
涂层		Pt	Pt	Pt

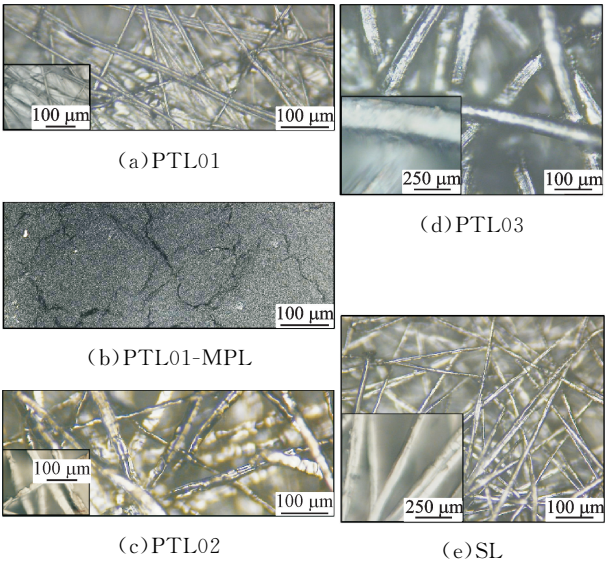


图 3 PTL 和 SL 的形貌特征

Fig. 3 Morphological features of PTL and SL

本研究设计了 4 种 PTL 组合形式,如表 2 所示。

其中,A、B 用于对比 PTL 类型对 URFC 性能的影响;B、C 用于对比支撑层对 URFC 性能的影响;B、D 用于对比 PTL 参数对 URFC 性能的影响。按表 2 所示的 PTL 类型,完成 4 种 URFC 单电池试制。

表 2 URFC 单电池不同形式组合方案

Table 2 URFC combination scheme

组合	氧侧	氢侧
A	碳纸 PTL01	碳纸
B	钛毡 PTL02	碳纸
C	钛毡 PTL02	碳纸+支撑层
D	钛毡 PTL03	碳纸

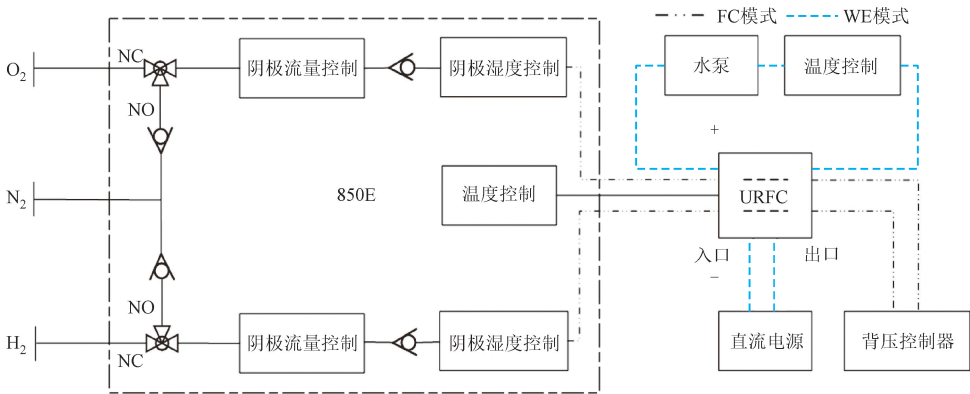


图 4 URFC 双模式极化性能测试系统

Fig. 4 URFC dual-mode polarization performance experimental system

1.3.2 电化学阻抗谱测试

为探究界面接触对 URFC 内部阻抗的影响,利用电化学工作站(885PSTAT)扫描电流的模式对 URFC 进行阻抗测试,频率范围为 0.1~3 000 Hz,并根据 Randles 等效电路^[21],拟合电化学阻抗谱(EIS),分析阻抗变化。

1.3.3 压力分布测试

为表征 URFC 内部 CCM 表面宏观接触应力分布,通过压敏纸(0.5~2.5 MPa,FUJIFILM)进行实验测试。压敏纸会对作用于其表面的压力产生作用,并根据压力的大小产生深浅不一的颜色。将压敏纸置于 URFC 氢侧 CCM 与 PTL 之间。URFC 单电池装配扭矩为 5 N·m,装配完成后静置 10 min,取出压敏纸观察。

1.3.4 SEM 电镜与 EDS 分析

通过扫描电子显微镜(SEM)对拆下的 PTL 进行表面形貌观测,并通过元素能谱分析(EDS)对表面颗粒进行元素分析,研究界面压力对催化层的影响。

1.3 测试方法及参数

1.3.1 极化性能测试及参数

为表征不同 URFC 的极化性能,采用 850E (SCRIBNER)燃料电池测试系统对单电池进行测试,测试系统如图 4 所示。在 FC 模式下,URFC 工作温度设置为 65℃,氧侧入口湿度控制在 60%,氢侧入口湿度控制在 100%,氢气和氧气计量比分别设置为 1.8、2.0,两侧背压控制在 100 kPa。在 WE 模式下,URFC 直流输入由可编程电源(IT6723C,ITECH)提供。URFC 氧侧去离子水温度由恒温槽(0520,CNSHP)控制在 75℃,去离子水流量为 20 mL/min。

2 结果与分析

2.1 URFC 极化性能分析

极化曲线是 URFC 的重要评价指标,可分为活化极化、欧姆极化、传质极化 3 部分。随着电流密度的增大,FC 模式下表现为电压降低,WE 模式下表现为电压升高。

图 5 展示了不同组合形式 URFC 在 FC、WE 模式下的极化曲线及转换率(η_{RTE}),转化率表达如下

$$\eta_{\text{RTE}} = \frac{V_{\text{FC}}}{V_{\text{WE}}}$$

(1)

式中: V_{FC} 、 V_{WE} 分别为 FC、WE 模式下的电压。

由图 5(a)可见,A 组合采用传统碳基 PTL,URFC 在双模式均表现出优异的性能,转换率最高;对于钛基 PTL,B 组合在电流密度为 1.5 A/cm² 时 η_{RTE} 为 32.4%,较 A 组合转化率下降,较 D 组合双模式性能显著提升。这是因为,B 组合中 PTL02 多孔层相比 A 组合 PTL01 纤维更加稀疏,相比 D 组合 PTL03 纤维更加致密(如图 3 所示),更小纤维直径及

孔径尺寸的 PTL 有利于 URFC 的水气传输及界面接触。

相比采用传统 URFC 结构的 B 组合,本研究提出采用支撑层的 C 组合具有更高的转换率,如图 5(b)所示。在电流密度为 1.5 A/cm^2 时, η_{RTE} 可达 38.0% ,此时对比 B、C 两组合的 URFC 极化曲线,发现 FC 模式中 C 组合较 B 组合电压升高 69 mV ,WE 模式中 C 组合较 B 组合电压下降 12 mV 。这表明支撑层使得 URFC 极化性能提升,并且这种影响随电流密度的增大更加明显。因此,PTL 多孔纤维结构细密化有利于提升 URFC 双向性能,同时本研究提出的支撑层新结构对于界面优化,改善 URFC 性能具有重要意义。

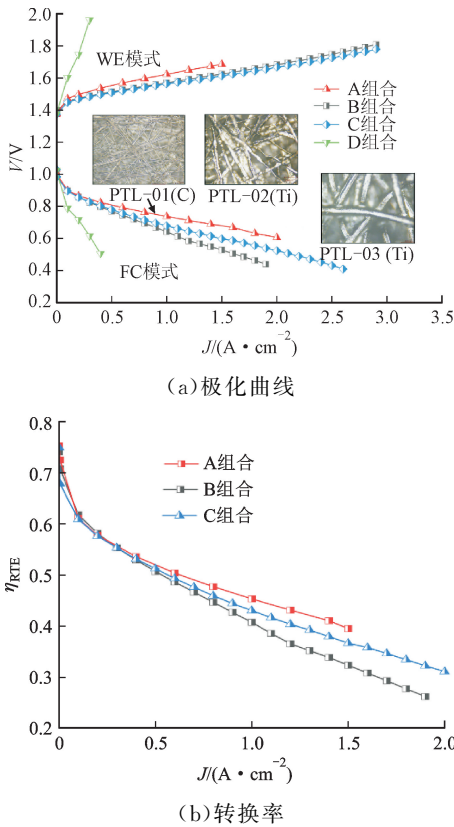


图 5 不同组合形式下 URFC 性能曲线
Fig. 5 The performance curve of URFC at different combinations

2.2 电化学阻抗谱(EIS)分析

为探究支撑层使 URFC 双向性能提升的具体原因,本小节对比了 URFC 在 FC 和 WE 模式下的 EIS。图 6 为不同电流密度下 C 组合 URFC 的 EIS 结果,可以看到 FC 模式中,高频阻抗基本保持不变,总阻抗随着电流密度增加而逐渐降低,这是因为

电荷传递阻抗随电流密度的增加而逐渐减小;WE 模式中,随着电流密度增大,左侧圆半径逐渐降低,说明电荷传递阻抗逐渐降低,右侧圆半径逐渐增大,说明扩散阻抗逐渐增大。图 7 展示了电流密度为 1.0 A/cm^2 时不同组合 URFC 的 EIS 结果。FC 模式中,B 组合最右侧出现小圆弧,这说明 B 组合在电流密度为 1.0 A/cm^2 时开始出现较小的扩散阻抗;C 组合大圆弧半径降低,这说明 C 组合的电荷转移阻抗降低,这是因为支撑层改变了 URFC 内部催化层与 PTL 之间的接触状态。为进一步探究支撑层对 URFC 内部接触的影响,对其高频阻抗展开具体分析。

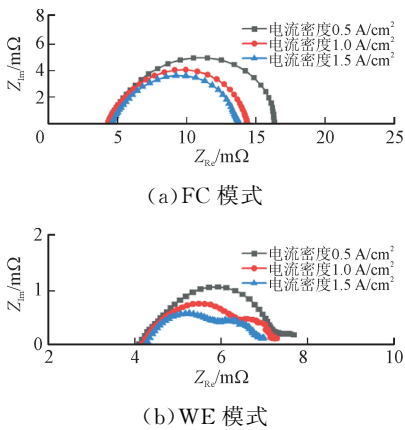


图 6 URFC 在不同电流密度下的 EIS
Fig. 6 URFC EIS at different current densities

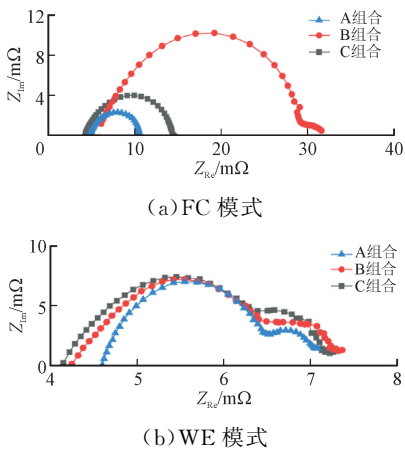


图 7 不同组合形式下 URFC 的 EIS
Fig. 7 EIS of URFC at different combinations

高频阻抗主要取决于内部欧姆电阻、双电层电容及质子传导阻抗,其中质子传导率和膜内水含量呈正相关^[22]。对比 A、B、C 3 种组合 URFC 的高频阻抗,结果如图 8 所示。WE 模式中,B、C 组合的高

频阻抗明显双 A 组合低,这是因为钛毡比碳纸的体电导率更低;C 组合的高频阻抗比 B 组合低 2%,这是因为 C 组合的支撑层提高了界面导电率。FC 模式中,其高频阻抗比 WE 模式偏高,这是因为 FC 氧侧输入为氧气,CCM 内部水含量相对较少,导致其质子传导阻抗更高。需要特别注意的是,本研究提出的采用支撑层的 C 组合在电流密度为 0.5 A/cm^2 时比 B 组合高频阻抗低 16.2%。这是因为支撑层降低了 PTL 表层纤维与 CCM 之间的间隙,有利于降低接触阻抗及质子传导阻抗。这说明支撑层对降低高频阻抗有显著作用。

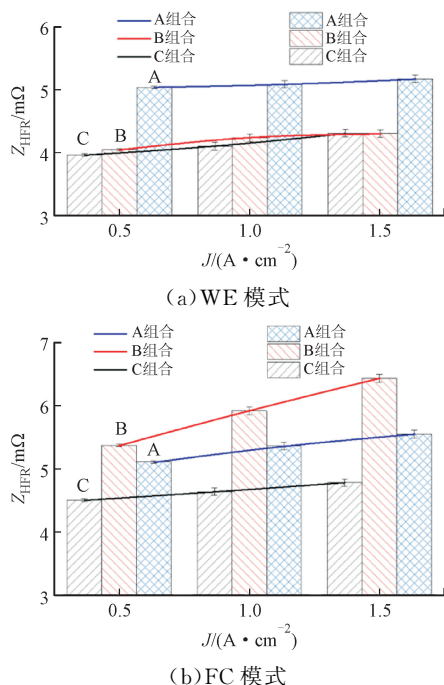


图 8 不同组合形式 URFC 不同电流密度的高频阻抗
Fig. 8 High frequency impedance of URFC at different current densities

2.3 URFC 界面接触分析

2.3.1 宏观应力分布

为了探究支撑层对 URFC 内部应力分布的影响,采用压敏纸对 CCM 与 PTL 之间的界面压力进行测量。如图 9(a)所示,B 组合压敏纸测试结果呈现出红白相间的条纹状,红色表示 CCM 表面受到了流道脊的充分挤压,而白色则表示与流道槽接触不充分。这是因为 PTL01 为碳基结构,机械强度较低,难以支撑其与 CCM 紧密接触。而增加支撑层后,压敏纸测试结果呈现出均匀有致的红色,如图 9(b)所示,说明硬质支撑层可以更好地将来流道脊的压力均匀传递到碳纸表层,使 CCM 与 PTL 之间接触应力的分布更加均匀。

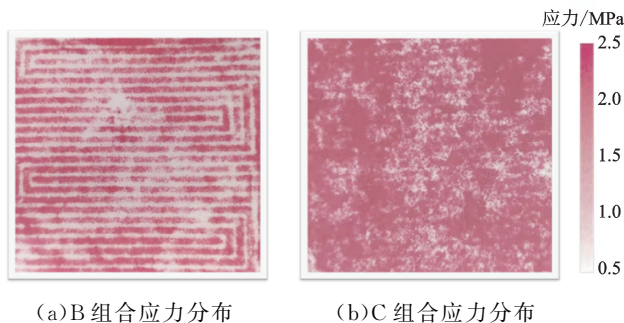


图 9 URFC 内部应力分布

Fig. 9 Stress distribution inside the URFC

2.3.2 微观接触状态

针对 2.3.1 小节的应力分布结果,本小节将从微观层面进一步探究支撑层对 URFC 的影响,描述 CCM 与 PTL 之间不同的接触状态产生的电子传输路径。由于析氢反应动力优于析氧反应^[23],即电荷转移突破限制取决于析氧反应,因此主要针对 URFC 的氧侧界面进行分析,其接触状态如图 10 所示。

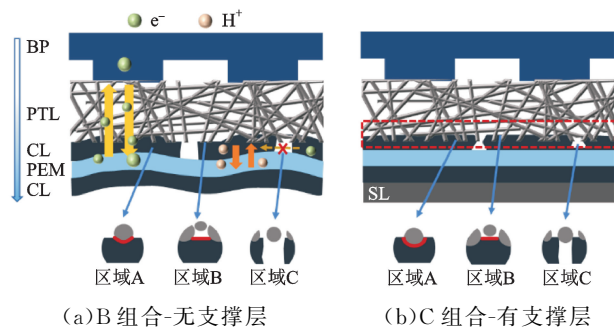


图 10 URFC 氧侧接触状态

Fig. 10 URFC oxygen-side contact states

B 组合 CCM 被挤压成波浪形,增加了其与 PTL 接触状态的复杂性,如图 10(a)所示。在平面方向,电子传输方式在不同界面区域(CCM-PTL)存在差异,分别为:与导电纤维接触的区域 A,其中三相界面产生的电子可直接通过纤维转移到 PTL,电子转移迅速;未与纤维接触的区域 B,产生的电子只能先在平面方向移动,电子转移速度相对缓慢;以及催化层(CL)裂缝所对应的区域 C,在厚度方向及平面方向均不能传导电子,阻碍析氧反应发生。此外,随着反应进行,质子在催化剂表面积聚,加剧析氧反应发生的能垒^[24]。区域 A 因传导电子迅速,增加了此区域物质消耗,从而改变了此区域物质浓度梯度,即降低了析氧反应能垒,导致区域 A 的析氧反应动力大于其他区域^[25],因此,提升区域 A 的占比是提升 URFC 双向性能的关键。值得注意的是,B 组

合 CCM 未与 PTL 紧密接触,不利于电子传导。与之相反,支撑层使 C 组合 CCM 表面更加平整,使其孔隙减小,缩短裂缝距离,导致部分区域 B、区域 C 向区域 A 发生转变,如图 10(b)所示。上述分析表明,支撑层有利于促使 A 区域所占比例提升,C 组合 URFC 的析氧反应动力强于 B 组合。

图 11 为 URFC 氧侧 PTL 扫描电镜(SEM)图及能谱分析(EDS)图。由 SEM 图可见,B 组合的钛

毡表层纤维黏附了黑色颗粒,并以条纹状相间分布,这说明流道“脊-槽”特征对 PTL 施加的应力不同,造成 CCM 表面黏附颗粒的位置存在差异。而 C 组合的钛毡表层均匀布满了颗粒,证实支撑层使界面接触更加紧密,这与 2.3.1 小节中应力分布相符,同时间接证实了支撑层影响界面接触状态的机制。为进一步定性颗粒属性,利用 EDS 对颗粒进行元素分析,结果证实黑色颗粒为 Pt 颗粒,如图 11(d)、11(h)所示。

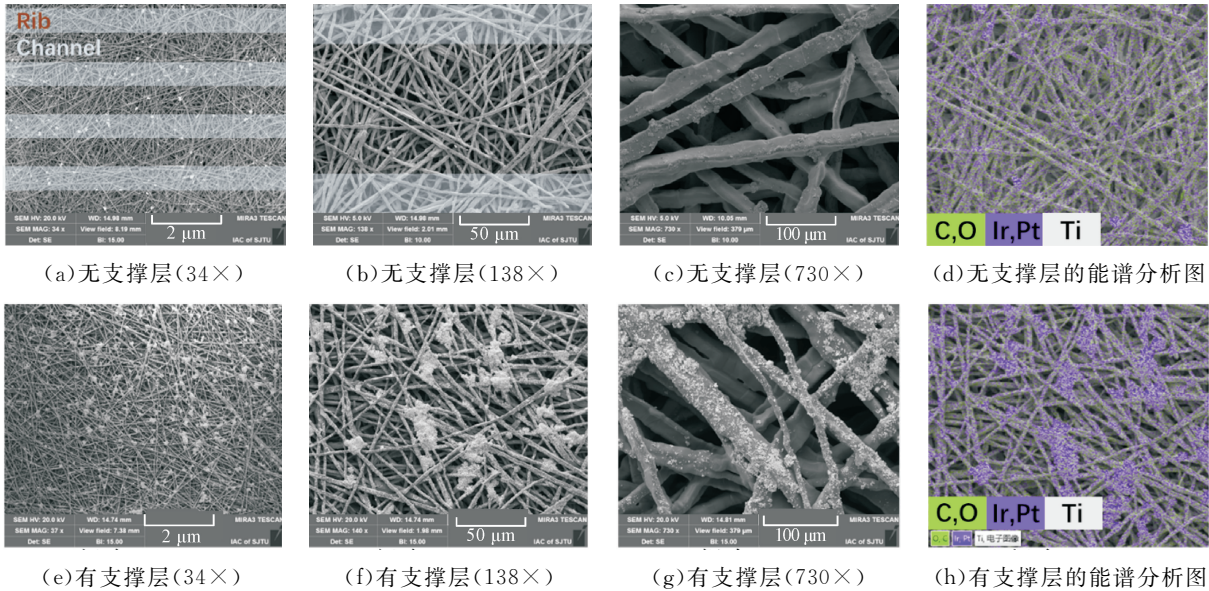


图 11 URFC 氧侧 PTL02 扫描电镜图及能谱分析图

Fig. 11 The SEM and EDS for PTL02 on the oxygen side of URFC

3 结 论

(1)针对不同结构参数钛毡,通过对比 URFC 极化性能,发现钛毡纤维结构细密化有利于提升 URFC 双向性能。当电流密度为 1.5 A/cm^2 时, URFC 转换效率可达 32.4%。

(2)提出在氧侧流场与 PTL 之间增加支撑层的 URFC 新型设计。新设计 URFC 在双模式下均表现出优异的性能:电流密度为 1.5 A/cm^2 时,FC 模式电压提升 69 mV,WE 模式电压下降 12 mV,转换率可达 38.0%。通过 EIS 表征:当电流密度为 0.5 A/cm^2 时,FC 模式高频阻抗下降 16.2%。支撑层有利于降低接触阻抗及质子传输阻抗,对于 URFC 性能改善具有重要意义。

(3)通过压敏纸测试压力分布,证实支撑层可以使 CCM 与 PTL 之间的接触应力分布更加均匀,从而弥补流道槽特征导致界面之间接触不足的问题。在微观上,支撑层可以改变钛毡纤维与 CL 的接触状态,使两者之间的接触面积增大,进而提升电化

反应动力,这是导致 URFC 性能提升的主要原因。

本研究中界面接触应力通过压敏纸测得,可能会影响电池内部实际接触状态,通过数值模拟、微观光学成像观测等手段可使得研究内容更加充实、直接。此外,探究过程中发现,在钛基 PTL 的一侧制作微孔层或可能进一步提升 URFC 的双向性能,这将在后续的研究工作中继续展开。

参考文献:

[1] WANG Yifei, LEUNG D Y C, XUAN Jin, et al. A review on unitized regenerative fuel cell technologies: part A unitized regenerative proton exchange membrane fuel cells [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 961-977.

[2] 郑天龙, 欧明玉, 徐松 等. 一体式可再生燃料电池双功能氧催化剂的研究进展 [J/OL]. 电化学: 1-28 [2022-08-01]. <http://doi.org/10.13208/j.electrochem.2205301>.

ZHENG Tianlong, OU Mingyu, XU Song, et al. Recent progress of bifunctional electrocatalysts for oxygen elec-

- trodes in unitized regenerative fuel cells [J/OL]. Journal of Electrochemistry; 1-28[2022-08-01]. <http://doi.org/10.13208/j.electrochem.2205301>.
- [3] SADHASIVAM T, DHANABALAN K, ROH S H, et al. A comprehensive review on unitized regenerative fuel cells: crucial challenges and developments [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(7): 4415-4433.
- [4] PU Zonghua, ZHANG Gaixia, HASSANPOUR A, et al. Regenerative fuel cells: recent progress, challenges, perspectives and their applications for space energy system [J]. Applied Energy, 2021, 283: 116376.
- [5] 何丽美, 王开科, 曹岗林, 等. 采用可逆质子交换膜燃料电池/膨胀机的综合能源系统性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 97-105.
- HE Limei, WANG Kaike, CAO Ganglin, et al. Integrated energy system based on reversible proton exchange membrane fuel cell and expander [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 97-105.
- [6] PAUL B, ANDREWS J. PEM unitised reversible/regenerative hydrogen fuel cell systems: state of the art and technical challenges [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 585-599.
- [7] DIHRAB S S, SOPIAN K, ALGHOUL M A, et al. Review of the membrane and bipolar plates materials for conventional and unitized regenerative fuel cells [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(6/7): 1663-1668.
- [8] 马晓锋, 张舒涵, 何勇, 等. PEM 电解水制氢技术的研究现状与应用展望 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 420-427.
- MA Xiaofeng, ZHANG Shuhan, HE Yong, et al. Research status and application prospect of PEM electrolysis water technology for hydrogen production [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(6): 420-427.
- [9] VINCENT I, LEE E C, KIM H M. Solutions to the water flooding problem for unitized regenerative fuel cells: status and perspectives [J]. RSC Advances, 2020, 10(29): 16844-16860.
- [10] LI Ping'an, QIU Diankai, PENG Linfa, et al. Analysis of degradation mechanism in unitized regenerative fuel cell under the cyclic operation [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115210.
- [11] SONG Shidong, ZHANG Huamin, MA Xiaoping, et al. Bifunctional oxygen electrode with corrosion-resistant gas diffusion layer for unitized regenerative fuel cell [J]. Electrochemistry Communications, 2006, 8(3): 399-405.
- [12] HUANG Shengyang, GANESAN P, JUNG H Y, et al. Development of supported bifunctional oxygen electrocatalysts and corrosion-resistant gas diffusion layer for unitized regenerative fuel cell applications [J]. Journal of Power Sources, 2012, 198: 23-29.
- [13] ROCA-AYATS M, GARCÍA G, GALANTE J L, et al. Electrocatalytic stability of Ti based-supported Pt₃Ir nanoparticles for unitized regenerative fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(10): 5477-5484.
- [14] 徐滨, 王锐, 苏伟, 等. 质子交换膜电解水技术关键材料的研究进展与展望 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(11): 3510-3520.
- XU Bin, WANG Rui, SU Wei, et al. Research progress and prospect of key materials of proton exchange membrane water electrolysis [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(11): 3510-3520.
- [15] HWANG C M, ISHIDA M, ITO H, et al. Effect of titanium powder loading in gas diffusion layer of a polymer electrolyte unitized reversible fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2012, 202: 108-113.
- [16] HWANG C M, ISHIDA M, ITO H, et al. Influence of properties of gas diffusion layers on the performance of polymer electrolyte-based unitized reversible fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(2): 1740-1753.
- [17] ROZAIN C, MAYOUSSE E, GUILLET N, et al. Influence of Iridium oxide loadings on the performance of PEM water electrolysis cells: part II advanced oxygen electrodes [J]. Applied Catalysis B Environmental, 2016, 182: 123-131.
- [18] ITO H, MAEDA T, NAKANO A, et al. Experimental study on porous current collectors of PEM electrolyzers [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(9): 7418-7428.
- [19] LETTENMEIER P, KOLB S, BURGGRAF F, et al. Towards developing a backing layer for proton exchange membrane electrolyzers [J]. Journal of Power Sources, 2016, 311: 153-158.
- [20] 李平安, 邱殿凯, 沈水云, 等. 一体式再生燃料电池的性能衰减研究 [J]. 电源技术, 2021, 45(6): 749-752, 796.
- LI Ping'an, QIU Diankai, SHEN Shuiyun, et al. Analysis of degradation issues in unitized regenerative fuel cell [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(6): 749-752, 796.
- [21] MAINKA J, MARANZANA G, DILLET J, et al. On the estimation of high frequency parameters of proton

- exchange membrane fuel cells via electrochemical impedance spectroscopy [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 253: 381-391.
- [22] KUSOGLU A, WEBER A Z. New insights into perfluorinated sulfonic-acid ionomers [J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(3): 987-1104.
- [23] WEI Chao, RAO R R, PENG Jiayu, et al. Recommended practices and benchmark activity for hydrogen and oxygen electrocatalysis in water splitting and fuel cells [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(31): 1806296.
- [24] YANG Gaoqiang, YU Shule, KANG Zhenye, et al. Building electron/proton nanohighways for full utilization of water splitting catalysts [J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(16): 1903871.
- [25] MO Jingke, KANG Zhenye, RETTERER S T, et al. Discovery of true electrochemical reactions for ultra-high catalyst mass activity in water splitting [J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1600690.

(编辑 亢列梅)