

文章编号:1006-3471(2013)01-0053-06

离子交换-电沉积法制备高 Pt 利用率多孔电极

陈四国, 丁 炜, 齐学强, 李 莉, 邓子华, 魏子栋*

(重庆大学 输配电装备及系统安全新技术国家重点实验室, 化学化工学院, 重庆 400044)

摘要: 采用离子交换-电沉积的方法(Ion-Exchange/Electrodeposition, IEE)制备了一种高 Pt 利用率催化电极, 对所制备电极的表面形貌、催化活性及单电池性能用线性扫描伏安(LSV)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)和单电池测试进行了表征. 结果表明, 通过电极制备工艺和离子交换-电沉积参数的调控, 能够消除碳载体表面官能团的影响, 使铂阳离子只与全氟磺酸树脂(Nafion)上的 H^+ 进行交换. 在无铂离子的电解质中, 将被交换的铂阳离子还原到与 Nafion 接触的碳载体上, 使每一个铂纳米粒子都处于气体多孔电极的三相界面上, 有效地调控铂纳米粒子的尺寸和分散度. 单电池测试表明, 以铂载量为 $0.014 \text{ mg}_P \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 IEE 电极组装的电池的输出功率与铂载量为 $0.3 \text{ mg}_P \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 Nafion 粘接 Pt/C 电极相当.

关键词: 燃料电池; 离子交换-电沉积; 铂利用率

中图分类号: O646

文献标识码: A

质子交换膜燃料电池(PEMFC)是一种新型高效的能量转换装置, 可广泛作为电动汽车以及便携式电子产品的电源, 具有环境友好、能量转换效率高、可靠性好及燃料来源广泛等优点^[1], 是当今世界各国研发的热点之一, 从实验室研究到示范运行已取得了长足的进步. 然而居高不下的成本一直是阻碍其实现商业化的核心问题之一. 其高成本主要源自贵金属催化剂铂的大量使用. 铂的价格昂贵, 资源匮乏, 而目前仍未找到催化活性和稳定性与之相媲美的非铂催化剂, 如何大幅度地降低铂的用量显得十分迫切^[2-3].

当前 PEMFC 中铂载量高的原因主要有两个, 一是铂自身的催化剂活性较低, 二是 PEMFC 催化层中铂的实际利用率较低. 传统的 PEMFC 催化层通常由 Pt/C 催化剂、全氟磺酸树脂(Nafion)和溶剂等组分随机混合而成. 一方面, 绝大部分催化剂由于无法同时连接到质子、电子和 O_2 传递通道而被浪费^[4-6]; 另一方面, 这种随机混合很难平衡催化层的质子、电子和 O_2 传递能力, 改善某一种传递能力通常要以牺牲其它传递能力为代价^[7-15].

采用直接电沉积的方法^[8, 10, 16], 在含铂离子的水溶液中, 将铂选择性地沉积在既有电子通道, 又有气体传输通道的与质子膜接触的载体上, 显示了

比传统的以全氟磺酸树脂粘接 Pt/C 催化电极更高的催化剂利用率. 然而, 在直接电沉积过程中, 由于成核过电压和浓度扩散的存在, 铂的电化学继续沉积总是优先选择电解质溶液优先到达、且已经存在的铂晶粒上, 形成电沉积过程晶粒快速生长, 导致所沉积的铂晶粒粗大. 此外, 随着铂在电极上的沉积, 由于其优异的催化析氢能力, 电极上将大量析出氢气. 析氢反应将导致铂的沉积效率大大降低, 更为严重的是, 附着在电极上的氢气泡会完全阻止电解质与基体电极的接触, 在氢气泡逸出之前, 电沉积无法继续进行, 电沉积成为时断时续的不确定过程; 另则造成电极/溶液界面的 pH 值升高、电解质局部水解以及水解产物对催化剂的覆盖或者对电极微孔的堵塞, 恶化电极性能^[10, 17].

Thompson 等^[18]以 Nafion 粘接的多孔碳电极为基础, 采用离子交换方法先将铂阳离子交换到 Nafion 中磺酸基的 H^+ 上, 在无铂离子的电解质中, 将铂阳离子电化学还原至与 Nafion 接触的碳载体上, 通过 Nafion 含量和离子交换-电沉积循环次数调控铂纳米粒子的表面分布和晶粒大小. 这样, 在保留电化学沉积方法优点的同时, 克服了由直接电化学沉积铂所导致的铂颗粒粗大、析氢和水解等一系列问题. 但是, 该方法忽视了碳载体表面的一

COOH 和—OH 也能参与铂阳离子之间的离子交换^[9],这些铂阳离子电化学还原后在水溶液电解质中还能被利用,但是在质子交换膜燃料电池中,由于 Nafion 固体电解质的不可流动性,凡不与 Nafion 电解质接触的铂纳米粒子就不能参与燃料电池反应.因此,通过这种方法制备催化电极的催化剂利用率仍然不高.

针对上述 IEE 方法中存在的碳载体表面官能团参与离子交换反应、催化剂利用率低的问题,我们提出首先通过聚四氟乙烯(PTFE)憎水处理消除碳载体表面官能团的影响,再刷涂 Nafion 电解质构筑具有完整电子通道、气体通道和质子通道的气体多孔电极;然后通过离子交换法先将铂阳离子交换到气体多孔电极的 Nafion 上;最后,在无铂离子的电解质中,通过电化学还原的方法,将所交换的铂阳离子还原到与 Nafion 接触的碳载体上,从而有可能使每一个铂纳米粒子都处在多孔电极的三相界面上.

1 实 验

1.1 无负载气体多孔电极的制备

Nafion 粘接气体多孔电极(Nafion-bonded electrode):按 Nafion:Vulcan XC-72 碳粉为 1:30 (by mass)称取 Nafion(质量浓度为 0.1%)和碳粉,加入少量无水乙醇,超声波振荡混合均匀后涂布于平整处理后的碳纸上,60 °C 烘干.

聚四氟乙烯(PTFE)粘接气体多孔电极的制备(PTFE-bonded electrode):按 PTFE:Vulcan XC-72 碳粉为 1:3 (by mass)称取 PTFE(10%质量浓度)和碳粉,加入少量无水乙醇,超声波振荡混合均匀后涂布于平整处理后的碳纸上,60 °C 烘干,然后在马弗炉 345 °C 焙烧 30 min.

Nafion 涂覆气体多孔电极(Nafion-coated electrode):分多次将 0.5% Nafion 溶液涂覆于 PTFE 粘接气体多孔电极上,60 °C 下烘干,前后两次质量差,可得到不同 Nafion 含量的 Nafion 涂覆气体多孔电极.

1.2 离子交换-电沉积催化电极

IEE 电极的制备过程如图 1 所示,将无负载气体多孔电极浸入 0.05 mol·L⁻¹ 的二氯四氨合铂水溶液中,50 °C 浸泡 2 h,取出用超纯水清洗干净;然后,采用三电极体系,以离子交换后的电极为工作电极,铂环电极为对电极,银/氯化银电极为参比电极.在 0.2 mol·L⁻¹ 的硫酸溶液中,-0.8 V 条件下电化学还原 120 s,该电极用超纯水清洗干净.经多次 IEE 过程,制得不同铂含量的 IEE 电极.

1.3 催化剂电极表征

电化学测试在 AutolabPGSTAT30 电化学工作站上进行,IEE 电极为工作电极,Ag/AgCl 电极为参比电极,铂环电极为对电极,0.5 mol·L⁻¹ 硫酸溶液为电解液,所有测试均在室温下进行.

催化电极的表面形貌和晶粒大小分别在美国 FE 公司的场发射扫描电镜(FEI Nova 400, FEI, USA)和场发射透射电镜(Tecnai GF2, FEI, USA)观察与测量.

催化电极铂含量通过高温灰化、王水溶解、定容及 SnCl₂ 显色后在北京普析通用仪器公司 Tu-1901 型分光光度计上测定吸光度,确定铂含量.

1.4 膜电极(MEA)及单电池测试

传统 Pt/C 电极的制备(CPE):将商业化 Pt/C 催化剂(40% Pt/C, by mass, Jonhson-Matthey In. UK):Nafion 溶液(按固态 Nafion 含量计算)按 3:1 (by mass)加入无水乙醇溶液中,超声波振荡 10

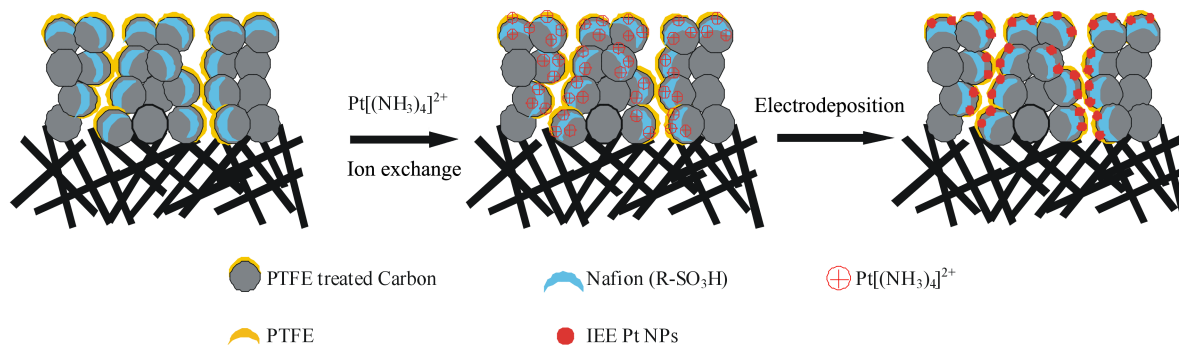


图 1 离子交换-电沉积(IEE)过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ion-exchange/electrodeposition (IEE)

min, 用微量移液器将催化剂混合物均匀地滴涂在气体扩散电极上, 60 °C 干燥 30 min.

膜电极的组件(MEA): 先用 3 ~ 5% 的双氧水将 Nafion112 膜在 80 °C 下处理 30 min, 再在 80 °C 的 0.5 mol·L⁻¹ 硫酸溶液中处理 30 min, 完毕后用去离子水洗涤干净备用. 然后将 CPE 电极和 IEE 电极分别置于预处理后的 Nafion112 膜两侧, 137 °C 和 5 MPa 热压 150 s 得 MEA 组件.

单电池测试在燃料电池测试系统 (Fuel Cell Technologies, Inc., USA) 上进行, 电池工作温度 70 °C, 纯氢为燃料, 纯氧为氧化剂, 阳极和阴极背压均为 0.2 MPa.

2 结果与讨论

在 IEE 过程中, 不仅 Nafion 磺酸基上的 H⁺ 会与铂阳离子进行离子交换, 碳载体表面的官能团 (—COOH 和 —OH) 也会参与离子交换反应, 因此需先对碳载体进行适当的处理以消除碳表面官能团的影响. 图 2A 为不同方法制备的基底电极经 4 次 IEE 后的氧还原极化曲线, 其中电极 a 为含有微量 Nafion 的 Nafion 粘接多孔碳电极, 电极 b 为 PTFE 粘接多孔碳电极, 电极 c 为在电极 b 上刷涂 Nafion 后的多孔碳电极, 三种电极上的碳载量都控制在 1 mg·cm⁻². 从三种电极在 4 次 IEE 后的氧还原极化曲线可以看出, 电极 a 表现出最高的氧还原催化活性. 电极 a 中的 Nafion 含量很少, 其主要作用是粘接电极防止碳粉脱落, 因此可以认为电极 a

中与铂阳离子进行离子交换反应的主要是碳表面官能团—COOH 和—OH 上的 H⁺. 而这些铂阳离子在电化学还原后虽然在水溶液电解质中表现出很好的氧还原催化活性, 但是一旦应用到质子交换膜燃料电池中, 由于 Nafion 固体电解质的不可流动性, 这些不与 Nafion 电解质接触的铂纳米粒子就不能被燃料电池反应所利用. 为了屏蔽碳表面官能团—COOH 和—OH 上 H⁺ 与铂阳离子的离子交换反应, 首先对碳载体进行了 PTFE 憎水处理形成完全疏水的电极 b, 然后再在电极 b 上涂覆一层 Nafion 电解质形成 Nafion 涂覆电极 c. 图 2 中曲线 b 分别为电极 b 在 IEE 前的 CV 曲线和 4 次 IEE 后的氧还原极化曲线. 对比电极 a 和 b 在交换前后的 CV 曲线和氧还原极化曲线可以看出, 经 PTFE 憎水处理后, 电极 b 的双电层明显减小, 基本上呈一条直线, 且经过 4 次 IEE 后电极 b 基本没有氧还原催化活性, 表明对电极 b 的 PTFE 憎水化处理有效地屏蔽了碳表面官能团的影响. 虽然其中可能会有少量未被影响, 故电极 c 中进行的离子交换反应主要发生在 Nafion 磺酸基中的 H⁺ 上. 而在随后的电沉积步骤中, 只有与有碳粒组成的电子通道相接触的 Nafion 磺酸基上的铂离子才能被还原出来, 因此可以认为电极 c 中每一个还原后的铂纳米粒子都可能处于既有电子通道, 又有质子传输通道和气体传输通道 (寄生在憎水的电子通道旁) 的三相界面上, 均能被以 Nafion 膜为电解质的燃料电池

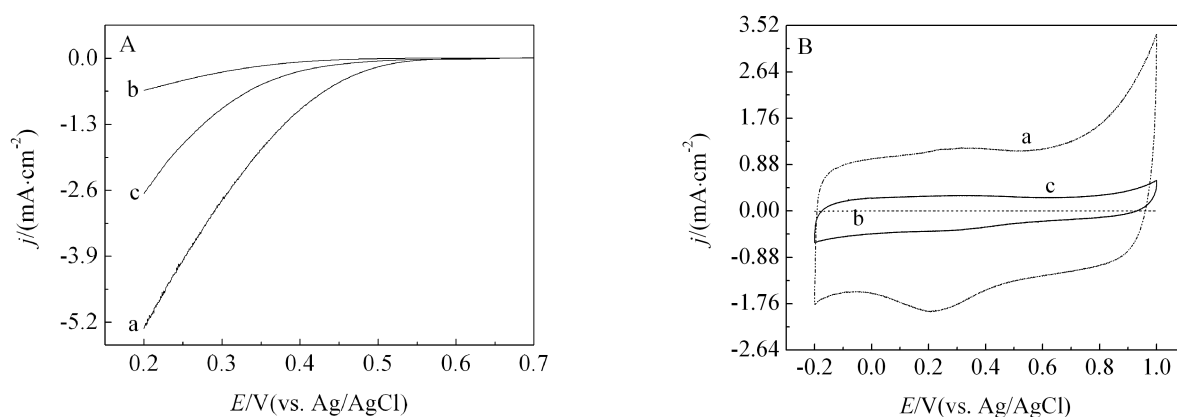


图 2 A. 三种基底电极经 4 次 IEE 后在 0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 溶液中的 ORR 极化曲线(扫描速率 2 mV·s⁻¹); B. 三种基底电极在 0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 溶液中的 CV 曲线(扫描速率 50 mV·s⁻¹)

电极: a. Nafion 粘接电极; b. PTFE 粘接电极; c. Nafion 涂覆后的电极 b

Fig. 2 A. Linear sweep voltammograms of Electrodes a, b and c after 4 IEE cycles recorded in a 0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄ solution (sweep rate: 2 mV·s⁻¹); B. Cyclic voltammograms of Electrodes a, b and c before IEE recorded in a 0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄ solution(sweep rate: 50 mV·s⁻¹)

Electrode: a. Nafion-bonded electrode; b. PTFE-treated electrode; c. Nafion-coated Electrode b

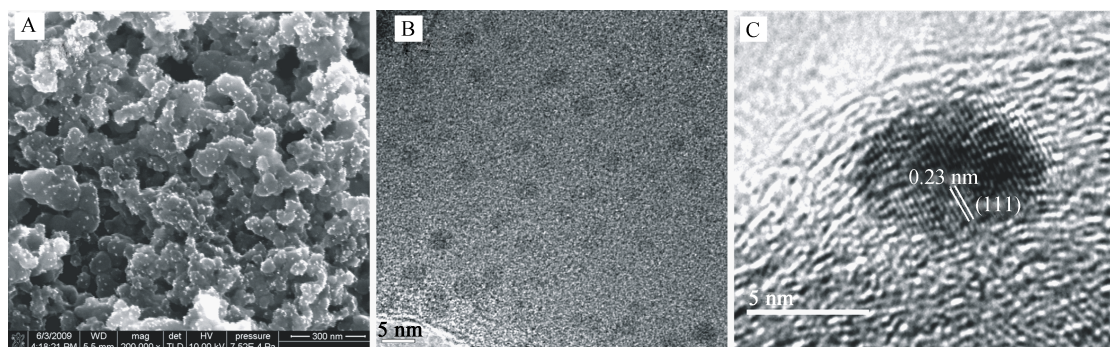


图3 经4次IEE交换后Nafion涂覆电极的SEM(A), TEM(B)和HRTEM(C)电镜照片

Fig. 3 SEM(A), TEM (B) and HRTEM (C) images of Nafion-coated electrode after 4 IEE cycles

反应所利用。

图3分别为Nafion涂覆电极(电极c)经4次IEE后的SEM、TEM和HRTEM电镜照片,其碳载量为 $1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, Nafion含量为 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。从SEM和TEM照片可以看出,IEE方法制备的铂纳米粒子粒径细小,且均匀地分散在多孔电极中。说明通过IEE方法可以获得均匀分布且粒径较小的铂纳米粒子。HRTEM照片显示IEE方法制备的铂纳米粒子的晶面间距为 0.23 nm , 主要以 $\text{Pt}(111)$ 晶面的形式存在。

图4A为以Nafion涂覆电极(电极c)为基底经不同IEE循环次数后所制备催化电极在氧气饱和和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 溶液中的氧还原极化曲线,扫描速率为 $2 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中碳载量为 $1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, Nafion含量 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。从图中可以看出,IEE电极的氧还电流随IEE循环次数的增加而逐渐增加,当交换次数增至6次时,其氧还原电流随IEE循环次数的增加基本上不再增加。IEE循环次数为2次时(图4B),电极表面的铂纳米粒子数量较少,粒径较小(约为 2.5 nm)。随IEE循环次数的增加,铂纳米粒子的数量和粒径大小逐渐增加,当IEE循环次数为4次时,铂纳米粒子的粒径约为 4 nm (图4C)。当IEE循环次数增至6次时,铂纳米粒子的晶粒较大,约为 7 nm (图4D)。因此通过多次IEE,就可以获得较高活性的铂纳米粒子。IEE循环次数太多,会导致粒径过大,催化剂比表面积降低,造成贵金属铂的浪费。

为了测试IEE方法制备的催化电极在聚合物电解质燃料电池环境下的催化性能和催化剂利用率,分别考察了以Nafion涂覆电极(电极c)为基底制备的IEE电极作为燃料电池阳极和阴极时的单

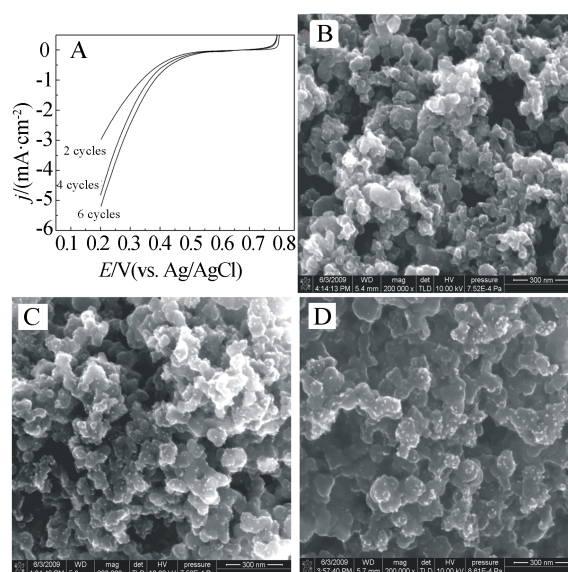


图4 不同IEE循环后制备载Pt电极在氧气饱和和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ 溶液中的氧还原极化曲线(A)和SEM照片(B. 2次; C. 4次; D. 6次)

Fig. 4 LSV curves of IEE Pt electrode in O_2 -saturated $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ prepared with different IEE cycles (A) and SEM images (B. 2 IEE cycles; C. 4 IEE cycles; D. 6 IEE cycles)

电池性能,并与传统的Nafion粘接Pt/C电极(CPE)进行了比较,如图5所示。其中碳载量为 $1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, Nafion含量为 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, IEE循环4次。从图5可以看出,以IEE电极为阳极,铂载量为 $0.014 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,其最大功率密度为 $700 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$,与CPE电极铂载量 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的最大功率密度相当,远高于相同铂载量下CPE电极的 $315 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。参见图3,IEE方法获得的铂粒子并非对氧还原有很高活性的高指数晶面晶体^[20],IEE方法制备的催化电极在燃料电池环境下有更高的铂催

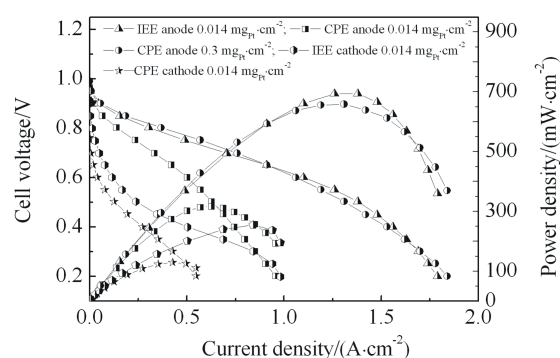


图 5 以 CPE 电极和 IEE 电极分别为阳极和阴极组装单电池的极化曲线和功率密度曲线

测试条件: $T_{\text{cell}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 背压: $P_{\text{O}_2} = 200\text{ kPa}$, $P_{\text{H}_2} = 200\text{ kPa}$; O_2 和 H_2 流速为 $200\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (标况下)

Fig. 5 Cell performance of the MEA assembled with CPE electrode as an anode and IEE a cathode
Test conditions: $T_{\text{cell}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; backpressure: $P_{\text{O}_2} = 200\text{ kPa}$, $P_{\text{H}_2} = 200\text{ kPa}$; O_2 and H_2 gases flowing at both $200\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (standard state)

剂利用率. 在相同的铂载量下, 当 IEE 电极作为燃料电池阴极时, 其最大功率密度为 $254\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$, 与作为阳极时相比其功率密度显著降低. 主要原因是由于其阴极还原反应动力学速度较氢氧化速率更慢, 需要更多的催化中心. 要想获得更大的功率密度, 需要增加阴极铂载量. 过高铂载量阴极是没有前途的, 应考虑非贵金属催化剂. 显然, IEE 方法非常适合作为超低铂燃料电池阳极的制备技术.

3 结 论

采用离子交换-电沉积方法, 通过电极制备工艺和沉积参数的调控, 能够将铂纳米粒子直接沉积在气体多孔电极的三相界面上, 有效调控铂纳米粒子的尺寸、形状和分散度. 采用 IEE 方法制备的催化电极具有很高的催化剂利用率, 在相同的催化剂载量下, 以 IEE 电极组装单电池的最大功率是传统 Nafion 粘接 Pt/C 电极的 2.2 倍. IEE 方法制备的超低铂、高利用率氢阳极尤为可行.

参考文献(References):

[1] Maruyama J, Abe I. Structure control of a carbon-based noble-metal-free fuel cell cathode catalyst leading to high power output[J]. Chemical Communications, 2007, 27: 2879-2881.
[2] Wen Z H, Liu J, Li J H. Core/Shell Pt/C nanoparticles embedded in mesoporous carbon as a methanol-tolerant cath-

ode catalyst in direct methanol fuel cells [J]. Advanced Materials, 2008, 20(4): 743-747.

- [3] Wen Z H, Wang Q, Li J H. Template synthesis of aligned carbon nanotube arrays using glucose as a carbon source: Pt decoration of inner and outer nanotube surfaces for fuel-cell catalysts[J]. Advanced Functional Materials, 2008, 18(6): 959-964.
[4] Gamburzev S, Appleby A J. Recent progress in performance improvement of the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)[J]. Journal of Power Sources, 2002, 107(1): 5-12.
[5] Passalacqua E, Lufrano F, Squadrito G, et al. Nafion content in the catalyst layer of polymer electrolyte fuel cells: Effects on structure and performance[J]. Electrochimica Acta, 2001, 46(6): 799-805.
[6] Wei Z D, Ran H B, Liu X A, et al. Numerical analysis of Pt utilization in PEMFC catalyst layer using random cluster model[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(15): 3091-3096.
[7] Ioselevich A, Komyshev A, Lehnert W. Phase segregation of $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$ ($0.6 < x < 1$) in non-equilibrium reduction processes[J]. Solid State Ionics, 130(3/4): 221-228.
[8] Kim H S, Subramanian N P, Popov B N. Preparation of PEM fuel cell electrodes using pulse electrodeposition[J]. Journal of Power Sources, 2004, 138(1/2): 14-24.
[9] Ye F, Chen L, Li J J, et al. Shape-controlled fabrication of platinum electrocatalyst by pulse electrodeposition[J]. Electrochemistry Communications, 2008, 10(3): 476-479.
[10] Wei Z D, Chen S G, Liu Y, et al. Electrodepositing Pt by modulated pulse current on a nafion-bonded carbon substrate as an electrode for PEMFC[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2007, 111(42): 15456-15463.
[11] Talor E J, Anderson E B, Vilambi N R K. Preparation of high-platinum-utilization gas diffusion electrodes for proton exchange-membrane fuel cells [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1992, 139(5): L45-L46.
[12] Xi J Y, Wang J S, Yu L H, et al. Facile approach to enhance the Pt utilization and CO-tolerance of Pt/C catalysts by physically mixing with transition-metal oxide nanoparticles[J]. Chemical Communications, 2007, 16: 1656-1658.
[13] Tang J M, Jensen K, Waje M, et al. High performance hydrogen fuel cells with ultralow Pt loading carbon nanotube thin film catalysts[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2007, 111(48): 17901-17904.
[14] Xiao W, Jin X B, Deng Y, et al. Three-phase interlines electrochemically driven into insulator compounds: A

- penetration model and its verification by electroreduction of solid AgCl[J]. Chemistry-A European Journal, 2007, 13(2): 604-612.
- [15] Chen S G, Wei Z D, Li H, et al. High Pt utilization PEM-FC electrode obtained by alternative ion-exchange/electrodeposition[J]. Chemical Communications, 2010, 46: 8782-8784.
- [16] Lee J S, Seo J S, Han K K, Kim H S. Preparation of low Pt loading electrodes on Nafion (Na⁺)-bonded carbon layer with galvanostatic pulses for PEMFC application[J]. Journal of Power Sources, 2006, 163(1): 349-356
- [17] 刘勇(Liu Y), 魏子栋(Wei Z D), 陈四国(Chen S G), et al. PEMFC electrodes platinized by modulated pulse current electrodeposition[J]. Acta Physico-Chimica Sinica (物理化学学报), 2007, 23(4): 521-525.
- [18] Thompson S D, Jordan L R, Forsyth M. Platinum electrodeposition for polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Electrochimica Acta, 2001, 46(10/11): 1657- 1663.
- [19] Shao Y Y, Yin G P, Wang J J, et al. Multi-walled carbon nanotubes based Pt electrodes prepared with in situ ion exchange method for oxygen reduction[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(1): 47-53.
- [20] Tian N, Zhou Z Y, Sun S G, et al. Synthesis of tetrahedral platinum nanocrystals with high-index facets and high electro-oxidation activity[J]. Science, 2007, 316 (5825): 732-735.

Porous Electrodes with High Pt Utilization Obtained by Ion-Exchange/Electrodeposition

CHEN Si-guo, DING Wei, QI Xue-qiang, LI Li, DENG Zi-hua, WEI Zi-dong*

(The State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Department of Chemistry, College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: We report a novel method based on ion-exchange/electrodeposition(IEE) for constructing high Pt utilization porous electrodes. The electrode prepared using IEE was assessed by linear sweep voltammetry(LSV), scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and single cell test. The preliminary results show that the undesired ion-exchange between Pt anion and surface functional group in carbon black can be eliminated through the electrode preparation process, and every Pt particle prepared by IEE is expected to be deposited on the three-phase reaction zone and thus can be fully utilized in fuel cell reactions. The Pt particle size, shape and distribution obtained by IEE can be controlled by modulating the IEE technique and cycles. The power output of the MEA employing a Pt/C electrode prepared by IEE with a Pt loading of 0.014 mg_R·cm⁻² is equivalent to that employing a conventional Nafion-bonded Pt/C electrode with a Pt loading of 0.3 mg_R·cm⁻².

Key words: fuel cells; ion-exchange/electrodeposition; Pt utilization