[Article]

doi: 10.3866/PKU.WHXB201605101

www.whxb.pku.edu.cn

阴极 Pt 负载量和背压对 PEMFC 性能的协同影响规律

孟优权¹ 王 超¹ 张卿雷¹ 沈水云¹ 朱凤鹃¹ 杨 宏² 章俊良^{1,*}⁽¹⁾上海交通大学燃料电池研究所, 上海 200240;⁽²⁾Department of Chemical & Biomolecular Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA)

摘要: 结合静态模型计算和实验测试, 从活化过电势、欧姆损失和浓差过电势三个方面量化分析了阴极 Pt 负载量和背压协同对质子膜燃料电池(PEMFC)性能的影响规律。考察了阴极 Pt 负载量为 0.1、0.2、0.4 mg·cm⁻², 背压为 100、150、200 kPa 条件下的燃料电池性能。通过比较发现, 在上述条件任意组合下, 随着电流密度增加, 活化过电势、欧姆损失和浓差过电势逐渐加大, 直接影响燃料电池性能; 但在相同背压条件下, 随着电流密度增加, 低 Pt 负载量时的浓差过电势比高 Pt 负载量时增加得更快; 同时发现, 背压增加对提高燃料电池的性能有帮助, 但背压增加对低 Pt 负载量比对高 Pt 负载量效果更明显。因此对于低 Pt 燃料电池, 应适当提高运行背压以优化其性能。本文对上述实验结果的产生机理进行了探讨, 并期望该结果能对低 Pt/超低 Pt 燃料电池的设计及性能优化提供参考与借鉴。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 阴极 Pt 负载量; 背压; 极化曲线; 过电势

中图分类号: O646

The Effects of Cathode Platinum Loading and Operating Backpressure on PEMFC Performance

MENG You-Quan¹ WANG Chao¹ ZHANG Qing-Lei¹ SHEN Shui-Yun¹ZHU Feng-Juan¹ YANG Hong² ZHANG Jun-Liang^{1,*}⁽¹⁾Institute of Fuel Cells, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China;⁽²⁾Department of Chemical & Biomolecular Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA)

Abstract: By combining theoretical calculations with experimental data, this study quantified the effects of both cathode Pt loading and operating backpressure on polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) performance, in terms of the kinetic, ohmic and transport losses. Pt loadings of 0.1, 0.2 and 0.4 mg·cm⁻² were investigated at backpressure values of 100, 150 and 200 kPa, respectively. The results indicate that, under all conditions, the kinetic, ohmic and transport losses all increased with the increase in current density. However, under the equivalent backpressure the transport loss of a PEMFC decreased with the increase of Pt loading. It was also found that increasing the operating backpressure improved the cell performance, and this enhancement in performance was more pronounced at a lower Pt loading. This result indicates an appropriate increase in operating backpressure should benefit the performance of a low-Pt loading PEMFC. Finally, the mechanism responsible for the observed phenomena was discussed. This study is expected to be helpful in the design and performance optimization of PEMFCs with low or ultra-low Pt loadings.

Key Words: PEMFC; Cathode Pt loading; Backpressure; Polarization curve; Overpotential

Received: March 24, 2016; Revised: May 9, 2016; Published on Web: May 10, 2016.

*Corresponding author. Email: junliang.zhang@sjtu.edu.cn; Tel: +86-21-34207439.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (21373135, 21533005) and Science Foundation of Ministry of Education of China (413064).

国家自然科学基金(21373135, 21533005)和中国教育部科学基金(413064)资助项目

© Editorial office of *Acta Physico-Chimica Sinica*

1 引言

随着化石能源危机及其所导致的环境污染日趋严重, 人们对能替代化石燃料的新型能源需求愈加强烈。质子交换膜燃料电池直接将燃料的化学能转化为电能, 相对于传统热力发电装置减少了中间能量转化的过程, 其实际能量转化效率可达40%–60%^[1], 同时其生成物为水, 减少了常规化石燃料CO₂、SO₂及NO_x等对环境的污染。目前质子交换膜燃料电池已逐渐开始应用于新能源汽车动力系统, 日本丰田最近推出的Mirai燃料电池汽车(FCV)^[2], 续航里程达650 km, 同时3 min完成单次氢燃料补给, 使质子交换膜燃料电池的应用成为可能。质子交换膜燃料电池以其高效率低污染的特质引起各国学者的研究兴趣, 具有很好的应用前景。

影响质子交换膜燃料电池商业化的一个重要因素就是采用贵金属Pt作为催化剂, 价格昂贵。因此, 降低贵金属Pt在电极上的负载量^[3–5], 开发低Pt高性能的燃料电池膜电极(MEA)^[6–8]势在必行, 但对低Pt的MEA的研究多为微观结构和制备方法的创新, 低Pt燃料电池的性能分析较简单。此外, 电极的使用寿命和性能衰减^[9]是另一个亟需解决的问题。

作为车用燃料电池, 质子交换膜燃料电池要能够适应多变的操作环境和条件。低气体湿度^[10,11]导致较低的电极反应速率和较高的质子膜电阻; 提高温度不仅能够减少水的凝结, 增强物质传输, 并且可以提高电极的催化活性^[11]; 增大气体压力能够增大交换电流密度进而提高燃料电池的性能, 但同时也会增加功耗^[12–15]。

鉴于此, 本文在前人研究的基础上, 通过PEMFC静态模型理论计算与实验结果的对比分析, 计算得到活化过电势、欧姆损失和浓差过电势, 分析了三种损失分别在电池不同放电条件下的变化趋势以及各自在总过电势中的比例变化, 从电池极化的角度量化地分析了不同阴极Pt负载量和背压对电池性能的协同影响规律, 期望能给低Pt/超低Pt燃料电池的设计及性能优化提高参考与借鉴。

2 PEMFC静态模型理论

质子交换膜燃料电池的输出电压:

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{Nernst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{con}} \quad (1)$$

上式(1)中, V_{cell} 是单电池实际的输出电压。 E_{Nernst} 是处于平衡状态时的可逆电势, 可由能斯特方程求解^[16]得到。 η_{act} 是活化(电化学极化)过电势, 是由于电化学反应的存在, 使其电极电势与平衡态相比发生了偏移, 其值直接与电化学反应速率有关。 η_{ohm} 是欧姆损失。 η_{con} 是浓差过电势, 源于反应界面浓度与本体浓度之间形成的浓度差。

根据能斯特方程可得到 E_{Nernst} , 标准参考温度 T_{ref} 为25 °C。

$$E_{\text{Nernst}} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F}(T - T_{\text{ref}}) + \frac{RT}{2F} \left(\ln \frac{P_{\text{H}_2}}{P_{\text{H}_2}^*} + \frac{1}{2} \ln \frac{P_{\text{O}_2}}{P_{\text{O}_2}^*} \right) \quad (2)$$

式(2)中, ΔG 是吉布斯自由能的变化量(J·mol⁻¹); ΔS 是热力学熵的变化量(J·mol⁻¹·K⁻¹); T 是电池的工作温度(°C); P_{H_2} 和 P_{O_2} 分别是氢气(阳极)和氧气(阴极)的分压(kPa); $P_{\text{H}_2}^* = P_{\text{O}_2}^* = 101.325$ kPa; F 是法拉第常数; R 是理想气体常数(8.314 J·K⁻¹·mol⁻¹)。

活化过电势 η_{act} 包括阳极过电势 η_{acta} 和阴极过电势 η_{actc} 。阳极侧燃料为纯氢气, 由于氢气电化学反应速率比氧气电化学反应还原速率快三个数量级以上, 因此可忽略阳极过电势^[17], 得到只涉及电化学反应极化的电池电压(E)与电流密度(i)的理想关系曲线^[18]。

$$i = 0.21 m_{\text{Pt}} A_s k j_{0.9} \text{e}^{-\frac{anF}{RT}(E - 0.9)} \quad (3)$$

式(3)中, i 是以空气作为氧化剂电池工作时的电流密度(mA·cm⁻²); m_{Pt} 是阴极Pt负载量(mg·cm⁻²); A_s 是阴极Pt电催化催化的活性比面积(ECSA); 0.21表征空气中O₂的摩尔含量分数; 其中系数 k 的取值因O₂分压而变化, 当空气侧背压为100、150和200 kPa时, k 分别为0.5、1和1.5; $j_{0.9}$ 是在氧还原反应(ORR)测试条件下, 经欧姆压降补偿后, 电池电压为0.9 V时对应的单位Pt表面的真实电流密度(mA·cm⁻²); a 为对称系数, n 为电子转移量, anF/RT 可由Tafel斜率求得。

$$P_{\text{O}_2} = 0.21(P_{\text{ca}} - P_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (4)$$

$$P_{\text{H}_2} = P_{\text{an}} - P_{\text{H}_2\text{O}} \quad (5)$$

上式中, P_{an} 和 P_{ca} 分别为阳极和阴极的背压。

欧姆极化发生的原因是由于燃料电池电解质内离子流的电阻、电极材料内电子流的电阻, 以及各相邻部件间的接触电阻。由于电解质与电极材料都遵循欧姆定律, 因此欧姆损失可以表示为

如下方程:

$$\eta_{\text{ohm}} = i \times \text{HFR} \quad (6)$$

式(6)中, HFR可表示燃料电池在运行时的欧姆电阻值, 包含电池内质子导电电阻、电子导电电阻及各部件间的接触电阻等。

浓差过电势发生的原因是随着电化学反应的进行, 电极表面的反应气体消耗, 造成电极表面与双极板流道内的反应物浓度存在明显的差异。

3 实验条件

电池 MEA 组件中阳极采用铂质量分数为 29% 的商业铂碳催化剂制备, 阴极采用铂质量分数为 46% 的商业铂碳催化剂, 质子交换膜为 NR-211 (DuPont™), 流道为蛇形流场。

为了探讨不同阴极 Pt 负载量和不同背压对电池性能的影响, 阳极 Pt 负载量恒定为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 实验所设计的条件如表 1 所示。

性能测试采用燃料电池工作站 850e (Scribner Associates Inc.)。电池测试气量为: 阴、阳极气体化学计量比均为 2, 气体相对湿度均为 100%。电池温度操作温度 80°C 。

4 结果及讨论

4.1 实验结果

如图 1 所示, (a)图、(b)图和(c)图分别展示了阴极 Pt 负载量为 0.1、0.2、0.4 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 单池分别在 100、150 和 200 kPa 条件下对应的极化曲线(实线)和功率曲线(空心)。在 $0-400 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 电流密度范围内, 表现为电池电压随电流密度的增加呈对数下降, 电化学极化表现显著; 当电流密度大于 $400 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 欧姆极化和浓差极化作用越来越明显。

图 2 展示了阴极 Pt 负载量为 0.1、0.2、0.4 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 单池在 100、150、200 kPa 条件下欧姆电阻值。本文中在相对湿度 $\text{RH} = 100\%$ 条件下, 质子交换膜含水率高, 测得电池 HFR 数值在相同 Pt 负载量和背压条件下随电流的增大相对稳定且波动范

图1 不同阴极 Pt 负载量的电池在不同背压下的极化曲线
Fig.1 Polarization curves of various cathode Pt loading under different backpressures

80°C , $\text{RH}100\%/100\%$ and stoichiometric ratio 2/2

围在 3% 以内。利用式(6)可以得到欧姆损失 η_{ohm} 。

图 3 表示阴极 Pt 负载量 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 背压 150 kPa 的条件下的氧还原反应 Tafel 测试曲线。其中 j 为 Pt 表面上的真实电流密度 ($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$), 由图 3 得到当欧姆压降补偿后的电压 ($E_{\text{iR-free}}$) 为 0.9 V 时, Pt 表面上的真实电流密度 $j_{0.9} = 0.1338 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 根据 Tafel 斜率可得到式(3)中的 anF/RT 。结合式(3)得到活化过电势 (η_{act})。结合式(1)得到浓差过电势 (η_{con})。

4.2 结果分析

为了考察阴极 Pt 负载量和背压对质子膜燃料

表 1 实验控制条件

Table 1 Experiment conditions

Sample	$m_{\text{Pt}}/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$	P/kPa					
		1#, ca	1#, an	2#, ca	2#, an	3#, ca	3#, an
1#	0.1	100	100	150	150	200	200
2#	0.2	100	100	150	150	200	200
3#	0.4	100	100	150	150	200	200

图2 不同阴极Pt负载量的电池在不同背压时的欧姆电阻

Fig.2 Ohmic resistance of various cathode Pt loading under different backpressures

80 °C, RH100%/100% and stoichiometric ratio 2/2

图3 阴极商业催化剂的Tafel曲线

Fig.3 Tafel curve of the cathode commercial catalyst

80 °C, RH100%/100% and stoichiometric ratio 2/9.5

电池性能的影响规律，本文对不同放电条件下活化过电势、欧姆损失和浓差过电势的变化趋势进行了分析，结果如图4所示。

如图4(a)，表示阴极Pt负载量 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，背压150 kPa的条件下测试得到的极化曲线和过电势分布。其中， V_{cell} 表示燃料电池的输出电压。随着电流密度的增大，活化过电势、欧姆损失、浓差过电势都增大。为定量描述三者随着电流密度增大的变化趋势，令活化过电势、欧姆损失、浓差过电势之和为总过电势 η ，分别计算 η_{act}/η 、 η_{ohm}/η 、 η_{con}/η ，结果如图4(b)所示。电流密度50–1600 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间， η_{act}/η 减小， η_{ohm}/η 、 η_{con}/η 增大。 η_{act}/η 从98.9%降到66.8%， η_{ohm}/η 从1.0%增大到17.0%， η_{con}/η 从0.1%增大到16.2%，即活化过电势随电流密度的增大主导作用下降，欧姆损失和浓差过电势的作用逐渐增大，与文献¹⁹中的结果相一致。三者中，活化过电势所占的比例最大，电流

图4 三种过电势随电流密度的变化趋势

Fig.4 Three kinds of voltage evolving trend over current density

80 °C, RH100%/100% and stoichiometric ratio 2/2

密度为1600 $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时，活化过电势占总和的66.8%。

4.2.1 活化过电势分析

图5(a)表示背压150 kPa条件下阴极Pt负载量对燃料电池电化学过电势的影响，由图可知提高阴极Pt负载量，可以明显降低活化过电势。阴极Pt负载量 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 较 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的活化过电势降幅在29.3 mV。Pt负载量的提高使得Pt表面的真实电流密度减小，从而活化过电势减小。图5(b)表示阴极Pt负载量 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时背压对燃料电池活化过电势的影响，提高背压，活化过电势下降。背压200 kPa比100 kPa的活化过电势减小18.7 mV。提高背压能够提高反应气体的分压，氧气还原速率随之提高，有利于活化过电势的减小。

4.2.2 欧姆过电势分析

图6(a)表示背压150 kPa条件下阴极Pt负载量对燃料电池欧姆损失的影响，随着电流密度的增大，欧姆损失呈线性增长。因为在阴极和阳极燃料气体保持100%相对湿度情况下，电池的电阻基本恒定，如图2所示。图6(b)表示阴极Pt负载量

图5 阴极Pt负载量和背压对活化过电势的影响

Fig.5 Effect of cathode Pt loading and backpressure on activation polarization losses

80 °C, RH100%/100% and stoichiometric ratio 2/2

0.1 mg·cm⁻²时背压对燃料电池欧姆损失的影响, 提高电池背压并不能降低电池的电阻(如图2), 提高电荷的传导能力, 所以欧姆损失与背压无关, 100 kPa与200 kPa时欧姆损失保持一致。

4.2.3 浓差过电势分析

图7(a)表示背压为100 kPa时阴极Pt负载量对燃料电池浓差过电势的影响。从图中可看出, 在0–1600 mA·cm⁻²范围内, 浓差过电势随电流密度

快速增长。同时, 阴极Pt负载量的降低也会增大浓差过电势。以电流密度1600 mA·cm⁻²为例, 当阴极Pt负载量由0.4 mg·cm⁻²降至0.1 mg·cm⁻²时, 浓差过电势增加54 mV。当背压为200 kPa时, 改变阴极Pt负载量对燃料电池浓差过电势的影响程度发生变化(图7(b))。电流密度为1600 mA·cm⁻²时, 阴极Pt负载量由0.4 mg·cm⁻²降至0.1 mg·cm⁻², 其浓差过电势增加43 mV。对比上述两图发

图6 阴极Pt负载量和背压对欧姆损失的影响

Fig.6 Effect of cathode Pt loading and backpressure on Ohmic losses

80 °C, RH100%/100% and stoichiometric ratio 2/2

图7 阴极Pt负载量对浓差过电势的影响

Fig.7 Effect of cathode Pt loading on concentration polarization losses

80 °C, RH100%/100% and stoichiometric ratio 2/2

现, 当背压较低时, 浓差过电势对阴极Pt负载量变化更加敏感, 即低背压时Pt负载量的降低会使燃料电池性能大幅下降。较低的Pt负载量意味着更低的电化学活性面积(A_{Pt}), 因此在相同的表观电流密度($1600 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)下, 低Pt膜电极的Pt表面上具有更高的真实电流密度(j), 使局域传质阻力加重, 以致产生更为明显的浓差极化。具体关系如式(7)所示。其中 i 是表观电流密度, A_{MEA} 是MEA几何面积。在未来燃料电池商业化进程中, 开发低Pt/超低Pt燃料电池应考虑如何提高电极的局域传质效率, 以降低浓差极化的影响。

$$j \times A_{Pt} = i \times A_{MEA} \quad (7)$$

图8(a)表示阴极Pt负载量为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时不同背压对燃料电池浓差过电势的影响。图中看出, 与图7趋势相似, 浓差过电势增长迅速。随着背压的增大, 浓差过电势有所下降。电流密度为 $1600 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 背压100 kPa较200 kPa的浓差过电势高25.1 mV。图8(b)表示阴极Pt负载量 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时不同背压对燃料电池浓差过电势的影响。电流密度为 $1600 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 背压100 kPa较

200 kPa的浓差过电势高14 mV。对比上述两图发现, 当阴极Pt负载量较低时, 浓差过电势对背压变化更加敏感, 即低Pt燃料电池工作时提高背压对其性能的提高更明显。作为车载燃料电池, 选取合适的背压, 提高催化层的传质效率, 对其动力性能的改善至关重要。

5 结论

通过将实验数据与静态模型理论相结合, 计算得到电池的活化过电势、欧姆损失和浓差过电势。燃料电池的性能与阴极Pt负载量和背压存在密切关系。其中, 活化过电势的主导作用随电流密度增大而逐渐减弱, 浓差过电势的作用逐渐明显。与高背压相比较, 低背压时, 浓差过电势对Pt负载量变化更敏感; 与高Pt负载量相比较, 低Pt负载量时, 浓差过电势对背压变化更敏感。即在低背压低Pt负载量条件下, 燃料电池的浓差极化损失更严重, 其原因主要归结为氧气在阴极中Pt表面的局域传质阻力因Pt负载量的降低而增大。开发低Pt/超低Pt燃料电池应考虑如何加强电极的传质, 选取合适的背压, 以降低浓差极化的影响, 提高大电流密度时的燃料电池性能。

References

- (1) Shang, M. F.; Duan, P. Q.; Zhao, T. T.; Tang, W. C.; Lin, R.; Huang, Y. Y.; Wang, J. Q. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2015**, *31* (8), 1609. [尚明丰, 段佩权, 赵天天, 唐文超, 林 瑞, 黄宇营, 王建强. 物理化学学报, **2015**, *31* (8), 1609.] doi: 10.3866/PKU.WHXB201505252
- (2) Wang, H. J.; Cheng, J.; Zhang, R. Y.; Wang, P. J.; Ren, Y. Q.; Xu, S. S. *Thermal Power Generation* **2016**, *45* (3), 1. [王洪建, 程 健, 张瑞云, 王鹏杰, 任永强, 许世森. 热力发电, **2016**, *45* (3), 1.] doi: 10.3969/j.issn.1002-3364.2016.03.001
- (3) Owejan, J. P.; Owejan, J. E.; Gu, W. B. *J. Electrochem. Soc.* **2013**, *160* (8), F824. doi: 10.1149/2.072308jes
- (4) Fofana, D.; Natarajan, S. K.; Bénard, P.; Hamelin, J. *ISRN Electrochemistry* **2013**, *2013*, 174834. doi: 10.1155/2013/174834
- (5) Wilson, M. S.; Valerio, J. A.; Gottesfeld, S. *Electrochimica Acta* **1995**, *40* (3), 355. doi: 10.1016/0013-4686(94)00272-3
- (6) Yu, H. R.; Baricci, A.; Roller, J.; Wang, Y.; Casalegno, A.; Mustain, W. E.; Maric, R. *ECS Trans.* **2015**, *69* (17), 487. doi: 10.1149/06917.0487ecst
- (7) Çögenli, M. S.; Mukerjee, S.; Yurtcan, A. B. *Fuel Cells* **2015**, *15* (2), 288. doi: 10.1002/fuce.201400062
- (8) Yu, H. R.; Roller, J. M.; Mustain, W. E.; Maric, R. *J. Power Sources* **2015**, *283*, 84. doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.02.101
- (9) Wu, J.; Yuan, X. Z.; Martin, J. J. Wang, H. J.; Zhang, J. J. J.

图8 背压对浓差过电势的影响

Fig.8 Effect of backpressure on concentration polarization losses

80 °C, RH100%/100% and stoichiometric ratio 2/2

- Power Sources* **2008**, 184 (1), 104. doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.06.006
- (10) Zhang, J. L.; Tang, Y. H.; Song, C. J.; Xia, Z. T.; Li, H.; Wang, H. J.; Zhang, J. J. *Electrochimica Acta* **2008**, 53(16), 5315. doi: 10.1016/j.electacta.2008.02.074
- (11) Ozen, D. N.; Timurkutluk, B.; Altinisik, K. *Renew Sust. Energ. Rev.* **2016**, 59, 1298. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.040
- (12) Murthy, M.; Esayian, M.; Lee, W. K.; Van Zee, J. W. *J. Electrochem. Soc.* **2003**, 150 (1), A29. doi: 10.1149/1.1522383
- (13) Zhang, J. J.; Song, C. J.; Zhang, J. L.; Baker, R.; Zhang, L. *J. Electroanal. Chem.* **2013**, 688, 130. doi: 10.1016/j.jelechem.2012.09.033
- (14) Wang, L.; Husar, A.; Zhou, T. H.; Liu, H. T. *Int. J. Hydrog. Energy* **2003**, 28 (11), 1263. doi: 10.1016/S0360-3199(02)00284-7
- (15) Wang, L.; Liu, H. T. *J. Power Sources* **2004**, 134 (2), 185. doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.03.055
- (16) Corrêa, J. M.; Farret, F. A.; Canha, L. N.; Simões, M. G. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2004**, 51 (5), 1103. doi: 10.1109/TIE.2004.834972
- (17) Cao, D. X.; Wang, G. L.; Lü, Y. Z. *Fuel Cell System*, 1st ed.; Beihang University Press: Beijing, 2009; pp 45–46. [曹殿学, 王贵领, 吕艳卓. 燃料电池系统. 第一版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 45–46.]
- (18) Bard, A. J.; Faulkner, L. R. *Electrochemical Methods Fundamentals and Applications*, 2nd ed.; Chemical Industry Press: Beijing, 2005; pp 69–70; translated by Shao, Y. H., Zhu, G. Y., Dong, X. D., Zhang, B. L. [Bard, A. J.; Faulkner L. R. 电化学方法原理和应用. 第二版. 邵元华, 朱果逸, 董献堆, 张柏林, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 69–70.]
- (19) Kocha, S. S. Principles of MEA Preparation. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470974001.f303047/pdf> (accessed Dec 10, 2015).