

Co-N-C 纳米复合材料氧还原反应性能分析

牛福, 栾惟然

山东交通学院汽车工程学院, 山东 济南 250357

摘要:为研究质子交换膜燃料电池阴极催化剂氧还原反应(oxygen reduction reaction, ORR)性能,采用模板法、水热法和高温热解还原制备 Co-N-C 纳米复合材料;采用循环伏安法和线性扫描伏安法,结合三电极测试体系分析不同硝酸钴质量、煅烧温度下催化剂样品的 ORR 性能,并将 Pt-C 催化剂作为标准催化剂进行对比。试验结果表明:Co-N-C 催化剂最佳煅烧温度为 900 °C;硝酸钴质量为 50 mg、煅烧温度为 900 °C 时的催化剂 Co-N-C-50-900 的半波电位及扩散控制区极限电流密度更接近标准催化剂,ORR 性能较好;催化过程以 4 电子反应为主,该催化剂制备方法简单便捷,成本较低,且符合催化剂 ORR 要求。

关键词:燃料电池;催化剂;氧还原反应;煅烧温度;半波电位

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)06-0054-06

引用格式:牛福, 栾惟然. Co-N-C 纳米复合材料氧还原反应性能分析[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(6):54-59.

NIU Fu, LUAN Weiran. Analysis of the oxygen reduction reaction performance of Co-N-C nanocomposite materials[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(6):54-59.

0 引言

质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)燃料电池是一种高效、清洁的能量转换装置,燃料电池阴极需要高性能的氧还原反应(oxygen reduction reaction, ORR)催化剂^[1-2]。铂族金属(platinum group metals, PGMs)的 ORR 性能高,可用作 PEM 燃料电池阴极催化剂,但 PGMs 生产成本约占 PEM 燃料电池总成本的一半,限制了 PGMs 的大规模应用^[3-5]。过渡金属掺杂氮碳(即 M-N-C,其中 M 代表 Fe、Co、Mn、Sn 等金属)催化剂具有资源丰富、价格低廉和易制备等优势,是 PGMs 催化剂的良好替代品,但由于其在酸性介质中 ORR 性能减弱,反应速率缓慢,催化性能不高,同时在实际应用中耐用性较差,限制了其广泛应用^[6-9]。研究表明形成原子级分散的 M-N-C 位点并使催化剂比表面积最大是提高催化剂 ORR 性能的有效途径^[10-13]。单原子 Fe-N-C 催化剂的 ORR 性能较好,但在 PEM 燃料电池酸性环境中容易被氧化,加快降解速率^[14-18]。采用不催化芬顿(Fenton)反应的金属(如 Co、Ni、Mn 等)替代 Fe 可有效解决这一问题,其中关于金属 Co 的研究较多,研究结果表明 Co-N-C 催化剂的 ORR 性能较差,为了提高 Co-N-C 催化剂的 ORR 性能,可以增加比表面积上 Co-N 位点数^[19-20]。

增大催化剂前驱体中 Co 的质量分数会导致形成 Co 纳米颗粒,该颗粒减弱催化剂 ORR 性能,并消耗原本可用于形成 Co-N 位点的 Co 原子^[21]。Co、N 和 C 的构型是影响 Co-N-C 催化剂 ORR 性能的关键因素,与催化剂比表面积密切相关^[22-23]。通常催化剂比表面积越大,催化性能越好,但比表面积过大,会使电化学反应过程中容易发生团聚,导致催化性能和稳定性急剧下降^[24]。

堆叠的纳米颗粒组成的微球因其多孔结构有助于增加反应物质量、电子转移和内部性能位点的可及

收稿日期:2024-10-23

基金项目:山东交通学院校级科研基金项目(Z202004)

第一作者简介:牛福(1990—),男,济南人,工学硕士,讲师,主要研究方向为燃料电池低铂催化剂的开发,E-mail:jtuniufu123@163.com。

性,可有效增强催化剂耐久性,并在较长时间内保持其催化效率;同时制备多孔材料所需的模板制作技术也取得了较大进展,目前研究表明 SiO₂ 模板是制备多孔材料的一种高效途径^[25]。由于燃料电池为酸性环境,PGMs 更适合酸性环境,耐久性更强,但过渡金属酸性环境下耐久性差,为了对比 PGMs 和 M-N-C 的 ORR 性能,本文中选取 KOH 溶液为反应介质,结合模板法、水热法和高温热解还原法,以 SiO₂ 纳米球为模板,制备具有多孔结构的 Co-N-C 纳米复合材料催化剂,并采用三电极测试体系,对比分析碱性介质中不同硝酸钴质量、煅烧温度的催化剂 ORR 性能,确定催化剂中最佳硝酸钴质量及煅烧温度,结果表明该催化剂制备方法简单可控,催化剂 ORR 性能较好,具有良好的应用前景,为催化剂的制备提供参考。

1 催化剂制备及性能测试

1.1 催化剂制备

1.1.1 SiO₂ 纳米球

取 4.5 mL 正硅酸乙酯(tetraethyl orthosilicate, TEOS)放入干净的烧杯中,分别加入 61.5 mL 乙醇和 24.75 mL 超纯水,使用磁力搅拌器搅拌 10 min 后,滴加 9 mL 氨水,继续搅拌 2 h 后,将反应的沉淀物过滤并用超纯水和乙醇将沉淀物充分洗涤干净,在温度为 80 °C 的环境中干燥 12 h 后,转入马弗炉中在温度为 500 °C 煅烧 5 h,得到 SiO₂ 纳米球。

1.1.2 钴掺杂氮碳催化剂

制备的催化剂记为 Co-N-C-*m-t*,其中 Co-N-C 为钴掺杂氮碳催化剂,*m* 为以 mg 为单位的硝酸钴质量的数值,*t* 为以 °C 为单位的催化剂样品煅烧温度的数值。典型水热工艺如下:将 5.0 g 双氰胺、3.43 g 葡萄糖、30 mg SiO₂ 纳米球和 *m* mg 硝酸钴共溶于 38 mL 溶液中(其中水 28 mL,乙醇 10 mL),水浴 60 °C 搅拌 30 min,然后将所得混合溶液倒入 100 mL 高压反应釜中,180 °C 保温 4 h;将沉淀物使用超纯水和乙醇洗涤和过滤后,放入真空干燥箱中 60 °C 烘干 12 h;将烘干后的褐黑色沉淀物研磨均匀,并放入真空管式炉中,通入氮气,先以 2 °C/min 的升温速率将真空管式炉温度升至 300 °C,保温 2 h,再以 5 °C/min 的升温速率升至 700 °C,保温 1 h,自然降温,得到黑色粉末状催化剂样品;为了去除残留的 SiO₂,将黑色粉末状催化剂样品放入浓度为 2 mol/L 的 NaOH 溶液中,80 °C 搅拌 24 h,再次洗涤、过滤和干燥,得到 Co-N-C-*m-700*。当 *t* 分别为 800、900、1 000,可依次制得 Co-N-C-*m-800*、Co-N-C-*m-900*、Co-N-C-*m-1000* 催化剂。

1.2 物理性能表征和电化学测试方法

1.2.1 物理性能表征

设置 ZEISS Sigma 500 型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)参数:超高压(extra high tension, EHT)为 3.00 kV,Data zone 信息栏中(即 signal A)选择适合大部分样品的 SE2 探头,清晰成像时的物镜焦距(work distance, WD)为 5.8 mm,在不同倍率下观察制备催化剂形貌。

1.2.2 电化学测试方法

采用电化学工作站进行电化学测试,电解液为浓度为 0.1 mol/L 的 KOH 溶液,采用典型的三电极测试体系,参比电极为 Ag/AgCl 电极,对电极为铂片,工作电极为直径为 5 mm 的旋转环盘电极。为了方便与之前的研究作比较,将在电极上加载的工作电压转化为可逆氢电极(reversible hydrogen electrode, RHE)电压 U_{RHE} ,表达式为

$$\{U_{\text{RHE}}\} = \{U_{\text{A}}\} + 0.159\text{pH} + 0.1989, \quad (1)$$

式中: $\{U_{\text{RHE}}\}$ 为以 V 为单位的 U_{RHE} 的数值; $\{U_{\text{A}}\}$ 为以 V 为单位的 Ag/AgCl 电极电压 U_{A} 的数值;pH 为浓度为 0.1 mol/L 的 KOH 溶液在室温时的酸碱度,本文中 pH=13。

1.2.3 工作电极制备

将 4 mg Co-N-C-*m-t* 催化剂溶于 1 mL 混合溶液中(包含 710 μL 去离子水、240 μL 异丙醇和 50 μL 质量分数为 5% 的 Nafion 溶液),超声分散均匀,直至可见黑色悬浮溶液;取 10 μL 溶液滴加到旋转环盘电极上,常温环境干燥后,催化剂单位面积负载质量为 200 μg/cm²。

1.3 催化 ORR 性能表征

1.3.1 静态 ORR 性能

采用循环伏安法(cyclic voltammetry, CV)获取催化剂样品静态 ORR 性能,通常依据氮气、氧气饱和环境下的 CV 曲线有无明显还原峰进行评价。若该极限电流密度有明显峰值,说明发生了氧还原反应, ORR 性能好。CV 电位扫描速率为 50 mV/s,由式(1)计算 $U_{\text{RHE}} = 0.07 \sim 1.10 \text{ V}$ 。

1.3.2 动态 ORR 性能

采用线性扫描伏安法(linear sweep voltammetry, LSV)获取催化剂样品动态 ORR 性能,通常是由高电位向低电位进行扫描。ORR 反应速率主要受本征动力学速率和电解液中氧气的扩散速率影响。典型的 LSV 曲线分为动力学控制区、混合动力区和扩散控制区。

通常采用扩散控制区极限电流密度 J_{kh} (即扩散控制区最大电流密度)和半波电位(即扩散控制区极限电流密度的一半所对应的电位)评价动态 ORR 性能。半波电位越大,极限电流密度越大,催化剂 ORR 性能越好。由式(1)计算 $U_{\text{RHE}} = 0.1 \sim 1.0 \text{ V}$,工作电极转速为 1 600 r/min 时,分析催化剂样品煅烧温度和硝酸钴质量对催化剂 ORR 性能的影响。实测电流密度 J 与扩散控制区电流密度 J_{d} 、动力学控制区电流密度 J_{k} 的关系式为:

$$\{J\}^{-1} = \{J_{\text{d}}\}^{-1} + \{J_{\text{k}}\}^{-1} = (\{B\} \{\omega\}^{1/2})^{-1} + \{J_{\text{k}}\}^{-1}, \quad (2)$$

式中: $\{J\}$ 、 $\{J_{\text{d}}\}$ 、 $\{J_{\text{k}}\}$ 分别为以 A/cm^2 为单位的 J 、 J_{d} 、 J_{k} 的数值; $\{B\} = 0.62n\{F\}\{C_{\text{o}}\}\{D_{\text{o}}\}^{2/3}\{\nu\}^{-1/6}$,其中 $\{F\}$ 为以 C/mol 为单位的法拉第常数 F 的数值, $\{F\} = 96\,500$; $\{C_{\text{o}}\}$ 为以 mol/cm^3 为单位的氧气浓度 C_{o} 的数值,浓度为 0.1 mol/L 的 KOH 溶液中 $\{C_{\text{o}}\} = 1.2$; $\{D_{\text{o}}\}$ 为以 cm^2/s 为单位的氧气扩散系数 D_{o} 的数值,浓度为 0.1 mol/L 的 KOH 溶液中 $\{D_{\text{o}}\} = 1.9 \times 10^{-5}$; $\{\nu\}$ 为以 cm^2/s 为单位的电解液黏度 ν 的数值,浓度为 0.1 mol/L 的 KOH 溶液中 $\{\nu\} = 0.01$; $\{\omega\}$ 为以 rad/s 为单位的工作电极角速度 ω 的数值; n 为氧还原过程中电子转移数。根据不同转速下的 LSV 曲线,通过 Koutecky-Levich (K-L) 方程^[26]对 J^{-1} 和 $\omega^{-1/2}$ 进行线性拟合,可计算氧还原过程中电子转移数 n 。

2 测试结果与分析

2.1 催化剂物理表征结果

采用 SEM 观察 SiO_2 纳米球和去除 SiO_2 模板后的 Co-N-C-50-900 催化剂,如图 1 所示。由图 1 可知: SiO_2 纳米球直径约为 400 nm;去除 SiO_2 模板后的 Co-N-C-50-900 催化剂可提供更多的 ORR 性能位点,提高材料的催化性能。

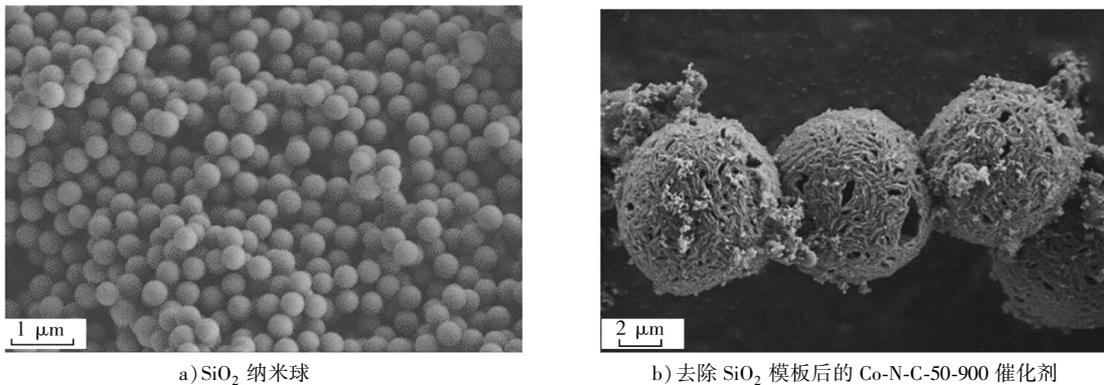


图 1 SiO_2 纳米球和 Co-N-C-50-900 催化剂的 SEM 图

2.2 催化剂电化学性能分析

采用浓度为 0.1 mol/L 的 KOH 电解质溶液研究 Co-N-C- m - t 催化剂的 ORR 性能。分析实测电流密

度不考虑电流方向,以绝对值进行分析。以 Co-N-C-50-900 催化剂为例,采用 CV 方法,氮气饱和及氧气饱和环境下 Co-N-C-50-900 催化剂的 CV 曲线对比如图 2 所示。工作电极转速为 1 600 r/min 时,采用 Pt 的质量分数为 20% 的 Pt-C 催化剂作为标准催化剂,结合 LSV 方法分析 Co-N-C-30 催化剂在不同的煅烧温度下的 LSV 曲线如图 3 所示,Co-N-C-50-900 催化剂和标准催化剂的 LSV 曲线对比如图 4 所示。

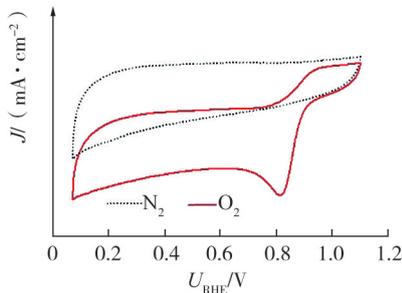


图 2 Co-N-C-50-900 催化剂 CV 曲线

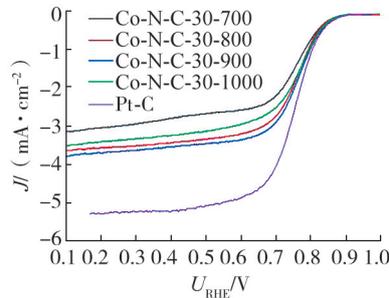


图 3 各催化剂 LSV 曲线对比

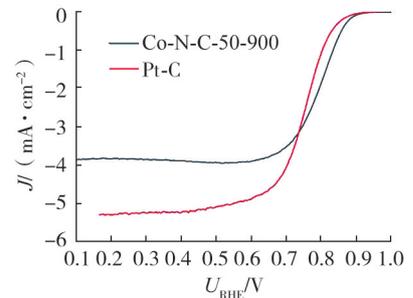


图 4 Co-N-C-50-900 和标准催化剂 LSV 曲线对比

由图 2 可知:氮气饱和时,Co-N-C-50-900 催化剂没有明显的还原峰变化,整体比较平稳;在氧气饱和和电解液环境下,Co-N-C-50-900 催化剂具有显著的还原峰,确认溶解在电解液中的氧气在旋转环盘电极表面发生了还原反应,催化剂 ORR 性能良好。

由图 3 可知:对比标准催化剂和 Co-N-C-30 在煅烧温度分别为 700、800、900、1 000 °C 时的催化剂 ORR 性能,发现 Co-N-C-30-900 催化剂的实测电流密度变化趋势最接近标准催化剂,ORR 性能最好,本文中催化剂最佳煅烧温度为 900 °C。

由图 4 可知:Co-N-C-50-900 催化剂半波电位较高,扩散控制区极限电流密度 J_{kh} 略低于标准催化剂,说明 Co-N-C-50-900 催化剂具有较好的 ORR 性能。

各催化剂的动态 ORR 性能如表 1 所示。由表 1 可知:Co-N-C-30 催化剂最佳热解温度为 900 °C;Co-N-C-50-900 催化剂优于 Co-N-C-30-900 催化剂的 ORR 性能,更接近标准催化剂。

在碱性溶液中,催化剂还原反应有 4 电子和 2 电子两种反应过程。4 电子反应过程将 O_2 还原,得到 OH^- ,2 电子反应生成过氧化物,不利于燃料电池阴极催化剂 ORR 性能。Co-N-C-50-900 催化剂在不同工作电极转速下的 LSV 曲线如图 5 所示,通过 Koutecky-Levich 方程拟合计算不同转速下 $J^{-1}-\omega^{-1/2}$ 曲线(即 K-L 曲线), U_{RHE} 分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 V 时,Co-N-C-50-900 催化剂的 K-L 拟合曲线如图 6 所示。

表 1 不同催化剂的动态 ORR 性能测试结果

催化剂	半波电位/V	$J_{kh}/(mA \cdot cm^{-2})$
Co-N-C-30-700	0.741	3.448
Co-N-C-30-800	0.755	4.083
Co-N-C-30-900	0.759	4.182
Co-N-C-30-1000	0.755	3.925
Co-N-C-50-900	0.799	4.700
标准催化剂	0.817	5.293

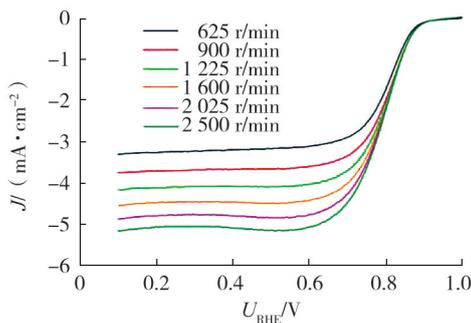


图 5 不同转速下 Co-N-C-50-900 的 LSV 曲线对比

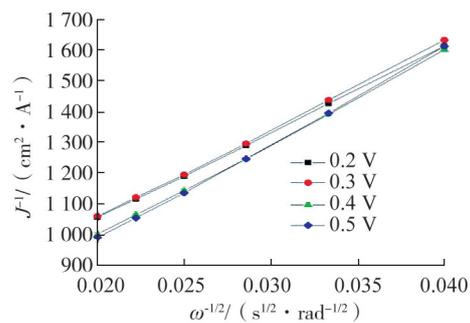


图 6 Co-N-C-50-900 催化剂的 K-L 拟合曲线

由图5可知:Co-N-C-50-900催化剂工作电极转速越高,电流密度越大,ORR性能越好;随着 U_{RHE} 逐渐增大,电流密度逐渐减小,在 U_{RHE} 为0.9 V时,电流密度几乎为0,说明此时反应结束。

由图6可知:不同工作电压下的曲线都有较好的拟合度;随着 U_{RHE} 增大,电子转移数逐渐增多, U_{RHE} 分别为0.2、0.3、0.4、0.5 V时,Co-N-C-50-900的电子转移数分别为3.65、3.70、3.74、3.79;催化剂氧还原反应过程以4电子反应为主,符合燃料电池阴极催化剂氧还原反应的要求。

3 结论

1)通过模板法、水热法和高温热解还原策略制备Co-N-C催化剂,该催化剂结构具有较大的比表面积,能够为氧还原反应提供较多的Co-N位点。

2)在碱性电解液中,该催化剂硝酸钴质量为50 mg,煅烧温度为900 °C,制备的Co-N-C-50-900催化剂的半波电位及扩散控制区极限电流密度接近标准催化剂,氧还原反应性能较优。

3)Co-N-C-50-900催化剂氧还原反应过程以4电子反应为主,满足燃料电池阴极催化剂氧还原反应的要求。

参考文献:

- [1] FENG J, LIANG Y Y, WANG H L, et al. Engineering manganese oxide/nanocarbon hybrid materials for oxygen reduction electrocatalysis[J]. *Nano Research*, 2012, 5(10): 718–725.
- [2] ZHANG Z P, SUN J T, WANG F, et al. Efficient oxygen reduction reaction (ORR) catalysts based on single iron atoms dispersed on a hierarchically structured porous carbon framework[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(29): 9038–9043.
- [3] CHEN S, WEI Z, QI X, et al. Nanostructured polyaniline-decorated Pt/C@PANI core-shell catalyst with enhanced durability and activity[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, 134(32): 13252–13255.
- [4] ZHANG J, SASAKI K, SUTTER E, et al. Stabilization of platinum oxygen-reduction electrocatalysts using gold clusters[J]. *Science*, 2007, 315(26): 220–222.
- [5] DAIMON H, YAMAZAKI SI, ASAMI M, et al. A strategy for drastic improvement in the durability of Pt/C and PtCo/C alloy catalysts for the oxygen reduction reaction by melamine surface modification[J]. *ACS Catalysis*, 2022, 12(15): 8976–8985.
- [6] TANG T, DING L, JIANG Z, et al. Advanced transition metal/nitrogen/carbon-based electrocatalysts for fuel cell applications[J]. *Science China Chemistry*, 2020, 63(11): 1517–1542.
- [7] CHEN G B, LU R H, LI C Z, et al. Hierarchically porous carbons with highly curved surfaces for hosting single metal FeN₄ sites as outstanding oxygen reduction catalysts[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(32): 2300907.
- [8] ZHANG P Y, WANG Y C, YOU Y Z, et al. Generation pathway of hydroxyl radical in Fe/N/C-based oxygen reduction electrocatalysts under acidic media[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2021, 12(32): 7797–7803.
- [9] OSMIERI L, ESCUDERO-CID R, MONTEVERDE VIDELA A H A, et al. Performance of a Fe-N-C catalyst for the oxygen reduction reaction in direct methanol fuel cell: cathode formulation optimization and short-term durability[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017(201): 253–265.
- [10] CHUNG H T, CULLEN D A, HIGGINS D, et al. Direct atomic-level insight into the active sites of a high-performance PGM-free ORR catalyst[J]. *Science*, 2017, 357(6350): 479–484.
- [11] CHEN M J, HE Y H, SPENDELOW J S, et al. Atomically dispersed metal catalysts for oxygen reduction[J]. *ACS Energy Letters*, 2019, 4(7): 1619–1633.
- [12] CHEN Y J, JI S F, CHEN C, et al. Single-Atom catalysts: synthetic strategies and electrochemical applications[J]. *Joule*, 2018, 2(7): 1242–1264.
- [13] ZITTOLO A, GOELLNER V, ARMEL V, et al. Identification of catalytic sites for oxygen reduction in iron-and nitrogen-doped graphene materials[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(9): 937–942.
- [14] MA Q L, JIN H H, ZHU J W, et al. Stabilizing Fe-N-C catalysts as model for oxygen reduction reaction[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(23): 2102209.

- [15] ASSET T, ATANASSOV P. Iron-nitrogen-carbon catalysts for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Joule*, 2020, 4(1): 33–44.
- [16] PARK S, HER M, SHIN H, et al. Maximizing the active site densities of single-atomic Fe-N-C electrocatalysts for high-performance anion membrane fuel cells[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2021, 4(2): 1459–1466.
- [17] MEHMOOD A, GONG M J, JAOUEN F, et al. High loading of single atomic iron sites in Fe-NC oxygen reduction catalysts for proton exchange membrane fuel cells[J]. *Nature Catalysis*, 2022(5): 311–323.
- [18] LIU S Y, MEYER Q, JIA C, et al. Operando deconvolution of the degradation mechanisms of iron-nitrogen-carbon catalysts in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, 16: 3792–3802.
- [19] WANG X X, PRABHAKARAN V, HE Y H, et al. Iron-free cathode catalysts for proton-exchange-membrane fuel cells: cobalt catalysts and the peroxide mitigation approach[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(31): 1805126.
- [20] ZITOLO A, RANJBAR-SAHRAIE N, MINEVA T, et al. Identification of catalytic sites in cobalt-nitrogen-carbon materials for the oxygen reduction reaction[J]. *Nature Communications*, 2017(8): 957.
- [21] WANG X X, CULLEN D A, PAN Y T, et al. Nitrogen-coordinated single cobalt atom catalysts for oxygen reduction in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(11): 1706758.
- [22] WEI C, SUN S N, MANDLER D, et al. Approaches for measuring the surface areas of metal oxide electrocatalysts for determining their intrinsic electrocatalytic activity[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(9): 2518–2534.
- [23] WU M G, WANG Y Q, WEI Z X, et al. Ternary doped porous carbon nanofibers with excellent ORR and OER performance for zinc-air batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(23): 10918–10925.
- [24] ZHANG Y L, GOH K, ZHAO L, et al. Advanced non-noble materials in bifunctional catalysts for ORR and OER toward aqueous metal-air batteries[J]. *Nanoscale*, 2020, 42: 21534–21559.
- [25] HUANG H J, WANG Q, WEI Q L, et al. Nitrogen doped mesoporous carbon derived from copolymer and supporting cobalt oxide for oxygen reduction reaction in alkaline media[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(18): 6072–6084.
- [26] LIU B W, LIU F, LU D S, et al. Metal-organic framework assembly derived hierarchically ordered porous carbon for oxygen reduction in both alkaline and acidic media[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 430: 132762.

Analysis of the oxygen reduction reaction performance of Co-N-C nanocomposite materials

NIU Fu, LUAN Weiran

School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: In order to study the oxygen reduction reaction (ORR) performance of the cathode catalyst of proton exchange membrane fuel cells, Co-N-C nanocomposites are prepared by template method, hydrothermal method and high temperature pyrolysis reduction. The ORR performance of the catalyst samples at different cobalt nitrate mass and calcination temperatures is studied by cyclic voltammetry and linear scanning voltammetry with a three-electrode testing system, and the Pt-C catalyst is used as the standard catalyst for comparison. The experimental results show that the optimal calcination temperature of Co-N-C catalyst is 900 °C; the half-wave potential and the limiting current density of the diffusion-controlled region of the Co-N-C-50-900 with a cobalt nitrate mass of 50 mg and calcination temperature of 900 °C are to those of the standard catalyst, and the ORR performance is better; the catalytic process is dominated by 4-electron reaction, and the preparation method of catalyst is simple and convenient, with the low cost and meets the requirements of ORR for catalysts.

Keywords: fuel cell; catalyst; oxygen reduction reaction; calcination temperature; half-wave potential

(责任编辑:胡晓燕)