

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.003

锌-空气电池钴氮共掺杂多孔碳催化剂制备

白宏图¹, 董德蕊², 王朝琳¹, 杨春强³, 徐昊⁴, 吴优政², 刘一名², 杨培霞²

(1. 中国航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨, 150066; 2. 哈尔滨工业大学 化工与化学学院, 黑龙江 哈尔滨, 150001; 3. 黑龙江省实验中学, 黑龙江 哈尔滨, 150001; 4. 内蒙古工业大学 化工学院, 内蒙古 呼和浩特, 010051)

摘要: 金属原子易团聚和缺乏介孔/大孔结构, 是目前制约氧还原催化性能的主要瓶颈。为了解决上述问题, 本文利用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)作为前驱体, 分别以 $Zn_2(OH)_2CO_3$ 和 Co-邻菲罗啉络合物作为造孔模板和钴源, 通过两步热解法制备了具有分级多孔结构的钴氮共掺杂多孔碳催化剂(HPCo-N-C)。系统研究了 HPCo-N-C 催化剂形貌及结构组成, 结果表明邻菲罗啉配位剂的引入有效避免了金属团聚的发生; 而 $Zn_2(OH)_2CO_3$ 造孔模板则促进了分级多孔结构的构建, 有利于活性位点暴露与传质进行。HPCo-N-C 催化剂在碱性电解液中的半波电位和动力学电流密度分别达到 0.877 V 和 $31.23 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 基于 HPCo-N-C 催化剂组装的锌-空气电池的开路电压明显高于商用 Pt/C 组装的锌-空气电池, 展现出良好的氧还原催化性能与广阔的应用潜力。

关键词: 锌-空气电池; 钴氮共掺杂碳; 分级多孔结构

中图分类号: TQ152; TG156.1 文献标志码: A

Preparation of cobalt-nitrogen Co-doped porous carbon catalysts in zinc-air battery

BAI Hongtu¹, DONG Derui², WANG Zhaolin¹, YANG Chunqiang³, XU Hao⁴,
WU Youzheng², LIU Yiming², YANG Peixia²

(1. Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd. of Aviation Industry Corporation of China, Harbin 150066, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Heilongjiang Experimental High School, Harbin 150001, China; 4. College of Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: The aggregation of metal atoms and the lack of meso-/macroporous structures are currently the main bottlenecks limiting the performance of oxygen reduction catalysts. To address these issues, this work utilized polyvinylpyrrolidone (PVP) as a precursor, with $Zn_2(OH)_2CO_3$ and Co-phenanthroline complex serving as the pore-forming template and cobalt source, respectively. Through a two-step pyrolysis method, a HPCo-N-C catalyst with a hierarchical porous structure was prepared. The morphology and structural composition of HPCo-N-C were systematically investigated. Results show that the introduction of the o-phenanthroline ligand effectively prevents metal agglomeration, while the $Zn_2(OH)_2CO_3$ pore-forming template promotes the formation of a hierarchical porous structure, facilitating active site exposure and mass transfer. The HPCo-N-C catalyst achieves a half-wave

收稿日期: 2026-01-29 修回日期: 2026-03-09

作者简介: 白宏图(1984—), 男, 本科, 高工, 研究方向为应用化学, e-mail: baihongtu@avic.com

通信作者: 杨培霞(1970—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电催化、表面处理, e-mail: yangpeixia@hit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(22278097)

引用信息: 白宏图, 董德蕊, 王朝琳, 等. 锌-空气电池钴氮共掺杂多孔碳催化剂制备[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 20-26.

BAI Hongtu, DONG Derui, WANG Zhaolin, et al. Preparation of cobalt-nitrogen Co-doped porous carbon catalysts in zinc-air battery[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 20-26.

potential of 0.877 V and a kinetic current density of $31.23 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ in alkaline electrolyte. Furthermore, the zinc-air battery assembled with the HPCo-N-C catalyst exhibits a significantly higher open-circuit voltage than that assembled with commercial Pt/C, which demonstrate excellent oxygen reduction catalytic performance and promise application potential.

Keywords: zinc-air battery; cobalt-nitrogen Co-doped carbon; hierarchically porous structure

锌-空气电池具有高能量密度、无污染及资源丰富、成本低廉等特点,在能源转换装置中表现出巨大的商业化潜力^[1-3]。过渡金属氮掺杂碳基催化剂已经被广泛应用于锌-空气电池中,以提高其电池性能和稳定性^[4-5]。研发者利用过渡金属(Fe、Co、Mn等)与碳源和氮源混合,在高温条件下进行热处理即可得到过渡金属-氮共掺杂碳基催化剂(M-N-C)^[6-7]。通过调控氮源和碳源的比例、选择不同的预处理条件等方法,能够有效地控制活性中心的数量和分布,提高催化剂的活性和效率^[8-10]。近年来,Fe-N-C催化剂受到了研究人员的广泛关注,而Co-N-C催化剂由于其催化活性低于Fe-N-C催化剂致使其研究较少^[7,11]。但Co-N-C催化剂因其弱Fenton反应特性,在氧还原反应(ORR)中表现为四电子转移路径,从而具备在未来取代Fe-N-C催化剂的巨大发展潜力^[12-13]。

近年来,Co-N-C催化剂的发展取得了长足进步。例如,Qin等^[14]采用表面原子吸附-闪热(FH)策略,合成了一种具有五氮配位钴原子(Co-N₅位点)的CoN₅/PCNF催化剂,该催化剂具有良好的ORR动力学特性和优异的四电子选择性。中科院煤化所陈丽芳等^[15]通过碱金属引导配位调控的方法,成功制备了具有Co-N₄位点的Co-N-C催化剂,其在氢氧化物阴离子交换膜燃料电池(AEMFC)中展现出良好性能。尽管如此,目前报道的大部分Co-N-C催化剂主要以微孔结构为主,缺乏足够的介孔和大孔结构,严重制约了活性位点的充分暴露与传质过程的顺利进行;并且在热解过程中极易发生钴原子的团聚现象,从而造成低活性金属纳米颗粒的形成。

针对上述问题,本文利用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)作为前驱体,分别以Zn₂(OH)₂CO₃和Co-邻菲罗啉络合物作为造孔模板和钴源,通过两步热解法制备了具有分级多孔结构的HPCo-N-C催化剂。该方法有效避免了金属团聚的发生,并促进了活性位点暴露与传质进行。本文研究了催化剂形貌、结构、组成以及催化活性和稳定性,并在此基础上组装并测试了锌-空气电池。

1 材料与试剂

所用试剂均为分析纯。碱式碳酸锌(Zn₂(OH)₂CO₃)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、六水合硝酸钴(Co(NO₃)₂·6H₂O)、邻菲罗啉(Phen)均为阿拉丁试剂公司生产。实验用水为18.25 MΩ·cm的去离子水,实验室自制。

2 实验

2.1 材料制备

HPNC载体制备:在研钵中均匀研磨2 g 聚乙烯吡咯烷酮(PVP)和不同质量(0、0.5、1、1.5和2 g)的Zn₂(OH)₂CO₃。随后将获得的混合物放置于氢/氩混合气(体积比5:95)中,升温速率为5 °C/min,升温至910 °C并在该温度下保温1 h得到HPNC载体。

HPCo-N-C催化剂制备:将40 mg的HPNC载体加入到含有8.7 mg邻菲罗啉(Phen)、3.5 mg Co(NO₃)₂·6H₂O的水/乙醇混合溶液(体积比2:1)中,持续搅拌30 min。随后在80 °C下继续搅拌20 h。待充分干燥后,将获得的上述混合物放置于氢/氩混合气(体积比5:95)中,升温速率为5 °C/min,加热至800 °C并在该温度下保温1 h。冷却后分别用1 mol/L的HCl溶液和去离子水多次洗涤所得产物,干燥后即得到HPCo-N-C催化剂。采用相同步骤制备了不含Zn₂(OH)₂CO₃的Co-N-C@PVP对照组。

2.2 电化学测试

所有电化学性能测试均在三电极体系下完成,参比电极为汞/氧化汞电极,工作电极为负载有一定量制备催化剂的旋转圆盘电极,对电极为石墨片,测试所用的电解液为0.1 mol/L的KOH。每次测试前分别用氧气和氮气向0.1 mol/L的KOH溶液通气至少30 min,使其溶液中氧气或氮气饱和。

工作电极制备:向2.5 mg催化剂中滴加180 μL异丙醇、300 μL蒸馏水、20 μL Nafion溶液,经过超声处理后获得催化剂墨水;使用移液枪移取一定量催化剂墨水并均匀地滴在清洁玻碳电极上。实验合成催化剂的移取量为18 μL,商业Pt/C的移取量为9 μL。

2.3 锌-空气电池组装

阳极为打磨后的锌板，空气阴极为负载有催化剂的泡沫镍。空气阴极的制备方法如下：将2.5 mg 催化剂、1.0 mg乙炔黑、4 mg活性炭、8 μL Nafion 溶液和200 μL异丙醇混合，超声处理30 min以形成均匀的催化剂浆料；将泡沫镍在高浓度盐酸中处理10 min后洗涤并冷风干燥，随后将浆料滴涂到泡沫镍表面并晾干。在锌空气电池的空气阴极侧还需贴上防水透气膜，液态锌-空气电池电解质为6 mol/L的KOH溶液。

3 结果与分析

3.1 Zn₂(OH)₂CO₃ 模板添加量优化

保持PVP加入量不变，探究不同Zn₂(OH)₂CO₃模板添加量(0、1、1.5和2 g)对催化剂结构和性能的影响规律。扫描电子显微镜照片显示，随着Zn₂(OH)₂CO₃添加量逐渐增加，HPNC载体表面的孔隙结构愈发明显(如图1所示)。当Zn₂(OH)₂CO₃添加量达到1 g及以上时，HPNC载体呈现显著的分级多孔结构。

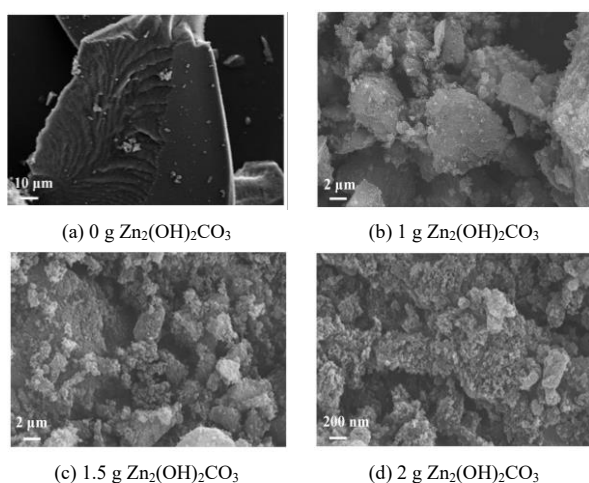


图1 加入不同含量模板剂制备的HPNC载体的SEM图像
Fig.1 SEM images of the HPNC prepared with different template agents

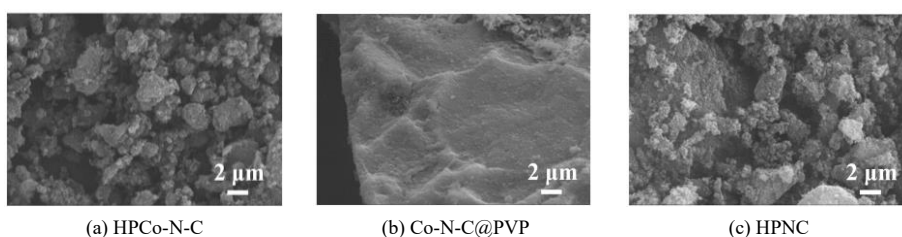


图2 不同催化剂的SEM图像
Fig.2 SEM images of different catalysts

3.2 HPCo-N-C 催化剂物理表征

图2为HPCo-N-C、Co-N-C@PVP和HPNC的SEM图像。测试结果表明，无造孔模板的Co-N-C@PVP表面较为光滑且无明显多孔结构，相比之下HPNC和HPCo-N-C表面均呈现显著多孔结构。由此可见，加入Zn₂(OH)₂CO₃有利于分级多孔结构的构建。

X射线衍射(XRD)谱图显示(图3(a))，HPCo-N-C仅在24°和43°附近存在衍射峰，分别对应石墨碳的(002)和(101)晶面^[16]，图像中没有观察到金属钴及其化合物的明显结晶态衍射峰，说明HPCo-N-C在制备过程中未发生金属团聚现象。此外，拉曼光谱(图3(b))表明HPCo-N-C中D峰和G峰的强度比值(I_D/I_G) HPCo-N-C具有丰富的缺陷结构^[17]，这可能源于Zn₂(OH)₂CO₃模板的作用，而丰富的缺陷结构有利于提高催化剂的催化活性。

氮气吸脱附测试结果显示，HPCo-N-C比表面积为1 047.54 m²·g⁻¹，明显高于Co-N-C@PVP催化剂(1.39 m²·g⁻¹)。此外如图4所示，HPCo-N-C曲线在相对压力较低时具有急剧上升的趋势，表明催化剂内部存在微孔结构；HPCo-N-C在中等相对压力区域则表现出明显迟滞环，说明存在介孔结构；当相对压力较高时，HPCo-N-C展现出上升趋势，这可能与大孔结构有关^[18]。而孔径分布图(图5)也验证了上述分析，证明HPCo-N-C在微孔、介孔和大孔区域内均具有孔结构分布。由此可见，HPCo-N-C具有非常显著的微孔-介孔-大孔分级多孔结构。

利用X-射线光电子能谱(XPS)对合成催化剂的元素组成进行了测试分析。测试结果表明，HPCo-N-C和Co-N-C@PVP中含有Co、C、N、O元素成分，HPNC载体中含有C、N、O元素成分。HPCo-N-C催化剂的氮原子百分含量为4.62%，显著高于Co-N-C@PVP(2.03%)和HPNC(2.66%)，表明造孔模板和Phen的加入能够有效避免氮源分解损失，而较高氮含量有利于更多Co-N_x活性位点形成。催化剂的N 1s谱图分峰结果显示(图6)，HPCo-N-C、Co-N-C@PVP

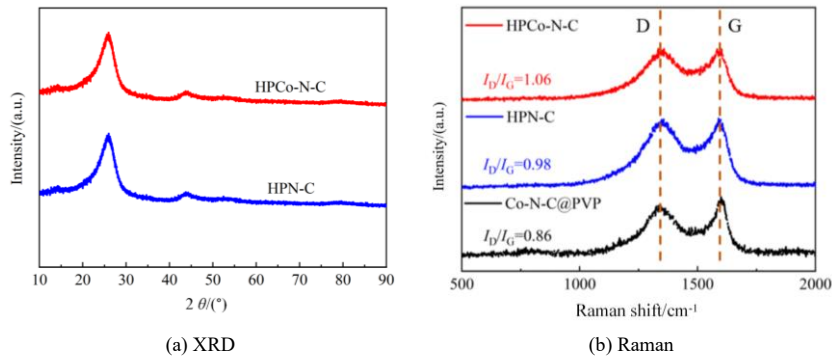


图3 HPCo-N-C的XRD和Raman谱图

Fig.3 XRD patterns and Raman spectra of HPCo-N-C

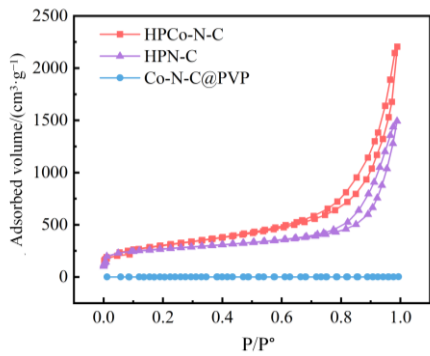


图4 HPCo-N-C和其他催化剂的氮气吸脱附曲线

Fig.4 N₂ adsorption-desorption isotherms of HPCo-N-C and other catalysts

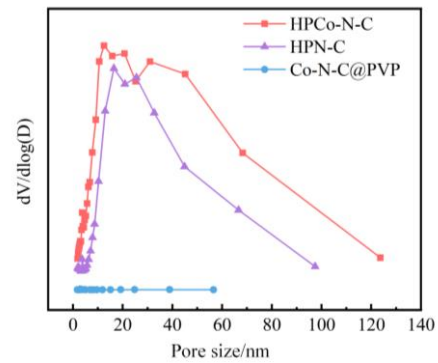
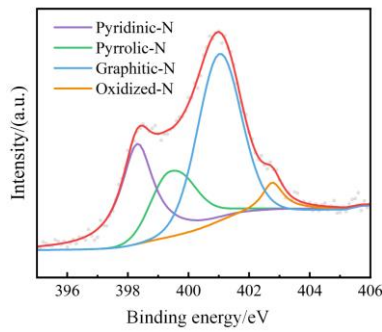
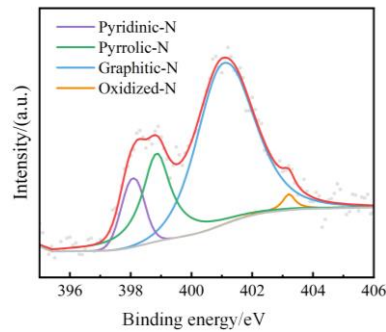


图5 HPCo-N-C和其他催化剂的孔径分布

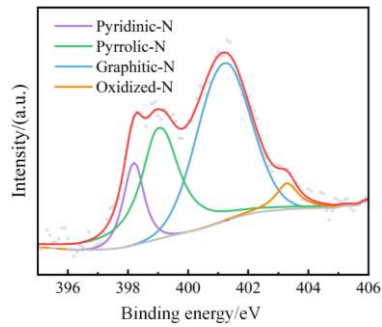
Fig.5 Pore size distributions of HPCo-N-C and other catalysts



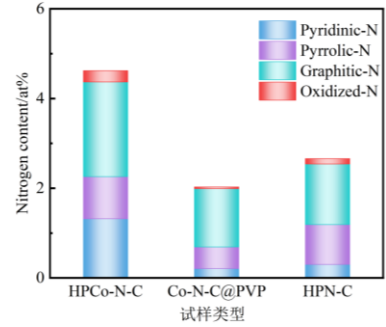
(a) HPCo-N-C



(b) Co-N-C@PVP



(c) HPN-C



(d) 催化剂氮含量分布

图6 不同催化剂的XPS N1s图谱和氮含量分布

Fig.6 XPS N1s spectrum and nitrogen content distribution of different catalysts

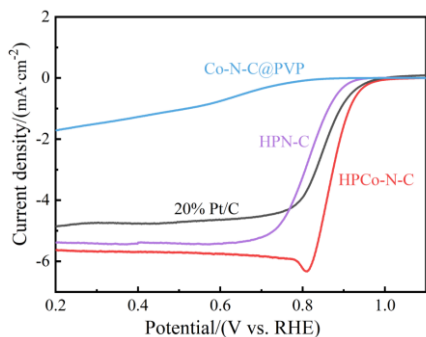
和HPNC中的氮元素主要以吡啶N、吡咯N、石墨N和氧化N这4种形式存在。如图6所示, HPCo-N-C中吡啶N所占百分比为1.32%, 远高于Co-N-C@PVP (0.21%)和HPN-C (0.3%)。

文献报道普遍认为吡啶N能够锚定Co原子^[19-20], 从而形成高活性Co-N_x位点, 因此可以推测HPCo-N-C催化剂的Co-N_x活性位点密度远高于Co-N-C@PVP对照组。

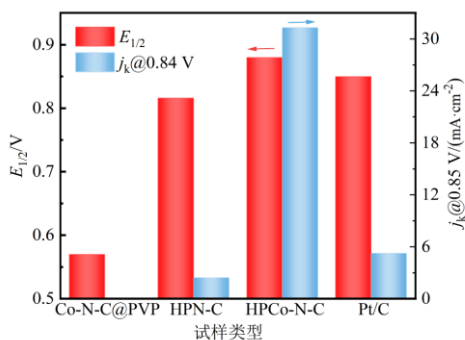
3.3 HPCo-N-C 催化剂氧还原性能

通过线性扫描伏安法(LSV)测试HPCo-N-C、Co-N-C@PVP、HPNC和商用Pt/C催化剂的ORR活性。HPCo-N-C催化剂的起始电位(E_{onset})、半波电位($E_{1/2}$)、极限扩散电流密度(j_L)分别为0.952 V、0.877 V和5.64 mA·cm⁻², 均明显高于Co-N-C@PVP、HPN-C和商业Pt/C(图7)。

如图7所示, HPCo-N-C催化剂在0.8 V时的动力学电流密度(j_k)为31.23 mA·cm⁻², 远高于HPN-C (2.44 mA·cm⁻²)、Co-N-C@PVP(0.039 mA·cm⁻²)和商业Pt/C(5.25 mA·cm⁻²)。综上所述, 得益于高载量位点和微孔-介孔-大孔结构的构建, HPCo-N-C催化剂在碱性电解液中展现出良好的氧还原催化活性。



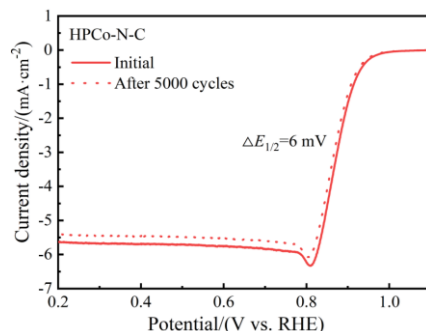
(a) LSV 曲线



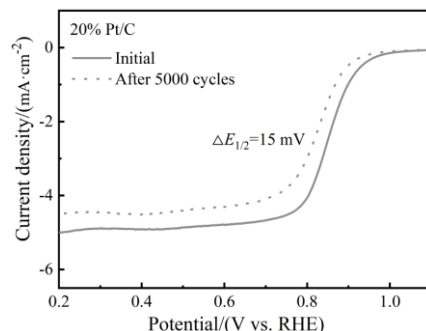
(b) 动力学电流密度

图7 不同催化剂的 LSV 曲线和 0.8 V 下的动力学电流密度
Fig.7 LSV curves and kinetic current density at 0.8 V of different catalysts

除了催化活性, 稳定性也是评价氧还原催化剂的另一项重要指标。本文利用加速老化测试了HPCo-N-C和Pt/C商用催化剂在碱性电解液中的稳定性。如图8所示, 在经过5 000圈CV扫描后, HPCo-N-C催化剂的半波电位仅衰减了6 mV, 而商用Pt/C催化剂的半波电位在5 000圈后损失了15 mV, 这表明HPCo-N-C催化剂具有比Pt/C更加理想的稳定性。



(a) HPCo-N-C 催化剂



(b) Pt/C 催化剂

图8 不同催化剂的稳定性

Fig.8 Stability of different catalysts

3.4 基于 HPCo-N-C 催化剂的锌-空气电池性能

以6 mol/L的KOH溶液为电解质, 分别以HPCo-N-C和Pt/C催化剂负载的泡沫镍为空气阴极, 打磨后的锌板作为阳极组装锌-空气电池(图9)。图10为万用表测试下的HPCo-N-C基锌-空气电池的开路电压(1.46 V), 图11为电化学工作站测试下的电池开路电压, 基于HPCo-N-C催化剂组装的锌-空气电池的开路电压为1.466 V, 明显高于Pt/C商用催化剂组装的锌-空气电池(1.411 V)。此外, 以HPCo-N-C为阴极催化剂, 组装了两块相同的锌-空气电池。两块串联的HPCo-N-C基锌-空气电池能够成功为校徽灯牌(工作电压为3 V)供电, 验证了HPCo-N-C基锌-空气电池的实用性(图12)。上述结果证明了HPCo-N-C催化剂在锌-空气电池中展现出良好的氧还原催化性能, 展现出一定的实际应用前景。

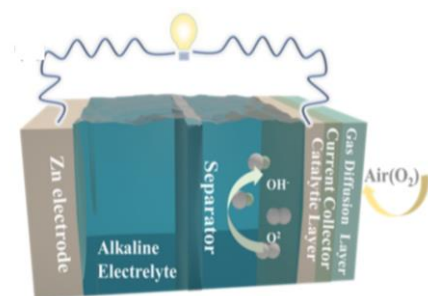


图9 HPCo-N-C 基锌空气电池的模型

Fig.9 Model of HPCo-N-C-based Zn-air battery



图10 万用表测 HPCo-N-C 基锌空气电池的开路电压

Fig.10 Open-circuit voltage of HPCo-N-C based zinc-air battery measured by multimeter

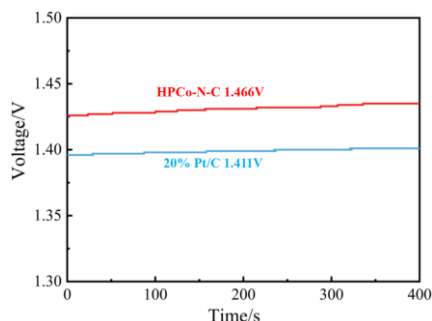


图11 电化学工作站测 HPCo-N-C 基锌空气电池的开路电压

Fig.11 Open-circuit voltage of HPCo-N-C based zinc-air battery measured by electrochemical workstation

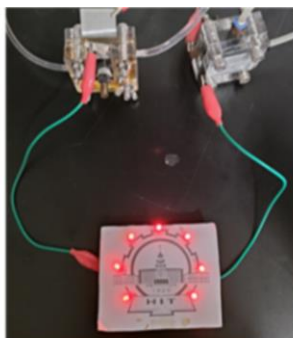


图12 HPCo-N-C 基锌空气电池为 LED 灯泡供电

Fig.12 LED light bulbs powered by HPCo-N-C based zinc-air battery

4 结论

本文利用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)作为前驱体,分别以 $Zn_2(OH)_2CO_3$ 和Co-邻菲罗啉络合物作为造孔模板和钴源,通过两步热解法制备了具有分级多孔结构的HPCo-N-C催化剂,在有效避免金属团聚发生的同时促进了活性位点暴露与传质进行。HPCo-N-C催化剂在碱性电解液中展现出良好的氧还原催化活性与稳定性,半波电位和动力学电流密度分别达到0.877 V和 $31.23 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。基于HPCo-N-C催化剂组装的锌-空气电池的开路电压也明显高于商用Pt/C组装的锌-空气电池,表现出显著的应用潜力。

参考文献

- [1] ARIF M B, KHEAWHOM S, DUBAS S T. Polyelectrolyte complex membranes as a selective zincate separator for secondary zinc-air battery[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74: 109425.
- [2] 张美霞, 吴王平, 王芹芹. 电沉积镍镍薄膜电催化剂及其析氢性能[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(12): 136-144.
- [3] 李勇, 朱思达, 赵坤, 等. 碱水电解用 NiPOH-RuO₂ 催化电极的析氢析氧反应研究[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(12): 10-18.
- [4] ZHANG Y, XU X, YANG Y, et al. Photo-responsive Fe single-atom dispersed FeNC-C₃N₄ electrocatalysts with schottky heterojunction for photo-enhanced zinc-air batteries[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2026, 702: 138982.
- [5] WU W F, YAN X, ZHAN Y. Recent progress of electrolytes and electrocatalysts in neutral aqueous zinc-air batteries[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138608.
- [6] 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.
- [7] SHEN H, YANG L, WU Y, et al. Influence of activating and supporting oxygen in M-N-C electrocatalysts for oxygen reduction[J]. Electrochimica Acta, 2023, 466: 143001.
- [8] FENG Z, MA Y, LI Y, et al. Charge-compensated co-doping of graphdiyne with boron and nitrogen to form metal-free electrocatalysts for the oxygen reduction reaction[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2020, 22(3): 1493-1501.
- [9] LUO Z, LI X, ZHOU T, et al. Engineering energy level of FeN₄ sites via dual-atom site construction toward efficient

- oxygen reduction[J]. *Small*, 2023, 19(12): 2205283.
- [10] 刘扬, 张靖佳, 王红霞, 等. M(M=Fe,Co,Mn)-N-C 催化剂用于燃料电池的氧化还原反应[J]. *电池工业*, 2021, 25(6): 308-316.
- [11] YUAN L, MIAO Z, SUI X, et al. Janus effect of FeCo dual atom catalyst with Co as active center in acidic oxygen reduction reaction[J]. *Nature Communicatons*, 2025, 16: 627284.
- [12] SUN M, JIANG Y, SONG H, et al. Efficient ORR facilitated by Co single atoms bridged with nitrides[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(34): 2504982.
- [13] HU H, WANG J, LIAO K, et al. Clarifying the active structure and reaction mechanism of atomically dispersed metal and nonmetal sites with enhanced activity for oxygen reduction reaction[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37: 2416126.
- [14] LUO Q, WANG K, ZHANG Q, et al. Tailoring single-atom coordination environments in carbon nanofibers via flash heating for highly efficient bifunctional oxygen electrocatalysis [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(1): 202413369.
- [15] HUANG M, ZHU X, SHI W, et al. Manipulating the coordination dice: alkali metals directed synthesis of Co-N-C catalysts with CoN₄ sites[J]. *Science Advances*, 2025, 11: 6658.
- [16] LU X, LI Y, YANG P, et al. Atomically dispersed Fe-N-C catalyst with densely exposed Fe-N₄ active sites for enhanced oxygen reduction reaction[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 149529.
- [17] 李春艳, 张蕊, 巴笑杰, 等. 氮掺杂多孔碳包覆铁纳米粒子催化剂用于高效碱性介质中氧还原反应[J]. *电化学*, 2023, 29(5): 2210241.
- [18] LIU L, WU Y, WANG H, et al. Pore-edge graphitic nitride-dominant hierarchically porous carbons for boosting oxygen reduction catalysis[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2024, 8(9): 2050-2058.
- [19] XU H, LI R, LI Y, et al. Research progress of atomically dispersed iron, nitrogen co-coordinated carbon catalysts for oxygen reduction: a mini-review[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 13: 13675.
- [20] XU H, XIAO L, YANG P, et al. Solvent environment engineering to synthesize Fe-N-C nanocubes with densely Fe-N_x sites as oxygen reduction catalysts for Zn-air battery[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 638: 242-251.

上接 19 页

- 2000, 132: 143-151.
- [18] ZHANG R G, TU Q, LI X R, et al. Template-free preparation of α -Ni(OH)₂ nanosphere as high-performance electrode material for advanced supercapacitor[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(13): 2216.
- [19] KRISHNAMURTHY P, MAIYALAGAN T, PANOMSUWAN G, et al. Iron-doped nickel hydroxide nanosheets as efficient electrocatalysts in electrochemical water splitting[J]. *Catalysts*, 2023, 13(7): 1095.
- [20] XIAO H, SHIN H, GODDARD III W A. Synergy between Fe and Ni in the optimal performance of (Ni, Fe)OOH catalysts for the oxygen evolution reaction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(23): E5261-E5268.
- [21] HAN Y B, WU J R, TANG L Q, et al. Self-adaption of Zn introduced Ni-Fe layered double hydroxide for efficient and durable oxygen evolution reaction electrocatalysis[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 610: 155288.
- [22] SANG Y, DING G F, GUO Z X, et al. Facile synthesis of amorphous bimetallic hydroxide on Fe-doped Ni₃S₂ as an active electrocatalyst for oxygen evolution reaction[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 919: 165855.