磷铁渣高效回收制备磷酸铁和 Fe/P 碳基氧还原催化剂的研究①

王慧洁[1]，吴一览[2]，贾中悦[3]，诸葛祥群[1]，罗鲲[1]
（1.常州大学 材料科学与工程学院，江苏 常州 213164；2.浙江大有实业有限公司，浙江 杭州 310000；3.常州威斯顿机器人科技有限公司，江苏 常州 213125）

摘　要：以磷铁渣为原料，采用酸浸法提取 Fe、P 元素合成电池级磷酸铁；同时引入活性炭和碳纳米管对浸出液中残留 Fe、P 元素进行吸附富集，经焙烧制备得高性能 Fe/P 氧还原催化剂（FP-6）。结果表明，FP-6 催化剂在 0.1 mol/L KOH 溶液中半波电位达到 −0.037 V（vs.Hg/HgO），具有优良的氧还原催化活性；用作锌空气电池正极催化剂时，电池比容量可达 780 mAh/g，功率密度为 121 mW/cm^2，且在 5 mA/cm^{2}高电流密度下可稳定循环 182 h。本研究为磷铁渣高效回收与资源化再利用提供了低成本、可持续开发的新思路。

关键词：磷铁渣；磷酸铁；Fe/P 碳基催化剂；锌空气电池；酸浸
中图分类号：TF111　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.018
文章编号：0253-6099(2026)01-0108-06

Synthesis of Iron Phosphate and Fe/P Carbon-Based Oxygen Reduction Catalyst for Efficient Recycling of Iron Phosphate Slag

WANG Huijie[1], WU Yilan[2], JIA Zhongyue[3], ZHUGE Xiangqun[1], LUO Kun[1]
(1.*School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou* 213164, *Jiangsu, China*; 2.*Zhejiang Dayou Industrial Co., Ltd., Hangzhou* 310000, *Zhejiang, China*; 3.*Changzhou Wisdom Robot Technology Co. Ltd., Changzhou* 213125, *Jiangsu, China*)

Abstract: With iron phosphate slag as raw material, Fe and P elements were extracted by acid leaching, which was then used to synthesize battery-grade iron phosphate. Meanwhile, activated carbon and carbon nanotubes were introduced to adsorb the residual Fe and P elements in the leachate, and then high-performance Fe/P oxygen reduction catalysts (FP-6) were prepared by calcination. The results show that the FP-6 catalyst exhibits a half-wave potential of −0.037 V (vs. Hg/HgO) in 0.1 mol/L KOH solution, demonstrating excellent oxygen reduction catalytic activity. With FP-6 as the cathode catalyst, the zinc-air batteries can deliver a specific capacity of 780 mAh/g and a power density of 121 mW/cm^2, and stably cycle for 182 h at a high current density of 5 mA/cm^2. This study provides a low-cost and sustainable approach for efficient recycling of iron phosphate slag and resource utilization.

Key words: phosphorus iron slag; iron phosphate; Fe/P carbon-based catalyst; zinc-air battery; acid leaching

磷铁渣含有铁、磷和氟等元素，长期堆放会污染土壤和水体，威胁生态环境和人类健康。磷铁渣高值化利用对缓解磷矿资源逐渐枯竭的压力具有重要意义[1]。目前，磷铁渣主要用于制备磷酸盐和添加剂，但这些应用通常仅利用磷元素，且替代性较强。通过充分回收铁和磷元素，可以高效利用磷铁渣，不仅有助于推动废弃物的资源化转化，还能为生产提供低成本、简便的工艺途径。活性炭（AC）作为一种常见的吸附材料，广泛应用于废液处理[2-4]。采用活性炭吸附废液中残留铁和磷，能够有效提高铁、磷回收率，但回收的铁、磷需要经过解析才能重新用来制备磷酸铁。本文设计了一种创新性方法，将磷铁渣化学法制备磷酸铁

① **收稿日期**：2025-09-03
基金项目：国家自然科学基金（52474431）
作者简介：王慧洁（2000—），女，江苏盐城人，硕士，研究方向为磷铁矿回收。E-mail:544673079@qq.com
通信作者：罗鲲（1966—），男，辽宁沈阳人，博士，教授，硕士研究生导师，主要从事电化学储能和电池材料回收研究。E-mail:luokun@cczu.edu.cn

的残液进行 AC 和碳纳米管(MWNTs)吸附处理,固液分离后热处理含有 Fe、P 离子的碳材料,得到碳基催化剂。该方法在磷铁渣高值化利用领域具有显著优势,既成功合成了电池级磷酸铁,又同步制备出兼具优异性能与成本优势的 ORR 碳基催化剂,展现出良好的经济性与广阔的应用潜力。

1 实验

1.1　实验试剂及设备

实验试剂包括硝酸[65.0%~68.0%(质量分数,下同),分析纯]、硫酸(85%,分析纯)、盐酸(37%,分析纯)、磷酸(85%,分析纯)、异丙醇(不低于 99.7%,分析纯)、乙醇(不低于 99.8%,分析纯)、活性炭(分析纯)、全氟树脂(Nafion,5%,分析纯)、碳纳米管(99.9%,工业纯)、乙酸锌(不低于 99.0%,分析纯)、氢氧化钾(不低于90.0%,化学纯)。

磷铁渣来源于云南弥勒市磷电化工厂有限责任公司。

实验仪器包括 X 射线衍射仪(XRD,Rigaku SmartLab)、场发射扫描电子显微镜(FESEM,Hitachi SU8010)、X 射线光电子能谱仪(XPS,Thermo Scientific K-Alpha)、拉曼光谱仪(DXR2,Thermo Scientific)和电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,PerkinElmer Avio 500)。

1.2　磷酸铁及铁磷催化剂制备

磷酸铁制备:经过前期探索实验,确定硝酸酸浸率更高,这里采用硝酸进行酸浸实验。将磷铁渣破碎,过 74 μm 筛得到磷铁渣粉末。取 10 g 筛后样品,在硝酸浓度 6 mol/L、温度 90 ℃、时间 4 h、固液比 1∶20 条件下进行酸浸实验。向所得酸浸溶液中添加适量磷酸,调整溶液中铁、磷物质的量比至 1∶1,再加入 2 mol/L NaOH 溶液调节体系 pH 值至 1。所得沉淀经分离、洗涤、干燥,于 650 ℃热处理,得到电池级磷酸铁。

铁磷催化剂制备:向 10 mL 废液中加入 0.1 g AC 与 0.1 mg MWNTs,于室温下分别搅拌 30、60、90 min,以吸附残留的 Fe、P 离子。将吸附后的固相样品离心分离,于 60 ℃鼓风干燥箱中干燥 12 h,随后在 N_2 气氛下于 800 ℃热解 3 h,制得铁磷碳基催化剂,分别命名为 FP-3、FP-6 与 FP-9。

磷酸铁及铁磷催化剂制备具体实验流程见图 1。



图 1　实验流程

Fig. 1　Experiment flowchart

1.3　电化学测试

电化学测试通过电化学工作站(CHI760E)与旋转环盘电极(RRDE,ALS RRDE-3A)耦合进行。循环伏安法(CV)测试在 5 mV/s 的扫描速率下进行,相同扫描速率下,进行旋转圆盘电极(RDE)线性扫描伏安法(LSV)测试,电压窗口为-0.6~0.2 V[5]。

1.4　锌空气电池的组装

水系锌-空气电池的阳极采用锌板(大于 99.9%),电解质为 0.2 mol/L $Zn(Ac)_2$ 和 6.0 mol/L KOH,负载着 FP-6 催化剂的疏水碳纸作为空气阴极。称取催化剂 FP-6,分别加入 100 μL 5% Nafion 溶液、975 μL 异丙醇及 975 uL 去离子水,超声处理 30 min,得到阴极浆料。将制备好的阴极浆料均匀涂敷在 1.5 cm×2 cm 的碳纸上,每片碳纸的负载量为 0.4 mg/cm^2,60 ℃干燥处理 8 h,由此得到水系锌-空气电池空气阴极。同理可制备 FP-3 和 FP-9 空气阴极。

2　实验结果与讨论

2.1　酸浸制备磷酸铁

图 2 为磷铁渣的 XRD 图谱,可以发现其峰主要对应于 Fe_2P 的(111)、(210)和 FeP 的(011)、(211)晶面。

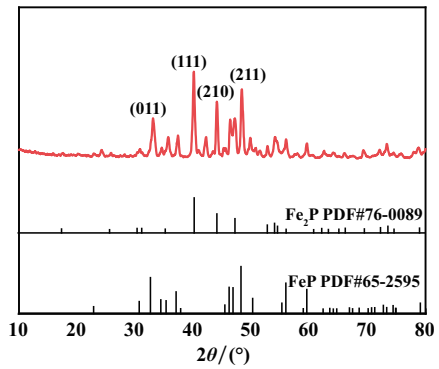


图 2　磷铁渣 XRD 图谱

Fig. 2　XRD spectra of iron phosphate slag

图 3 为磷酸铁 XRD 图谱。由图 3 可知,合成的磷酸铁晶型完整,且纯度较高,无任何杂峰。

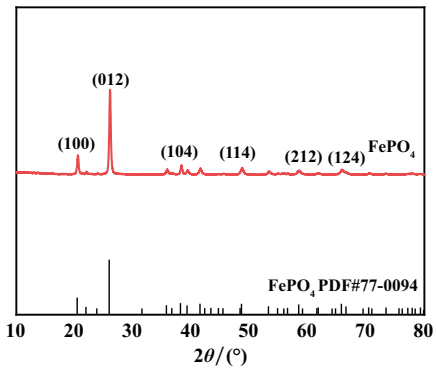


图 3 磷酸铁 XRD 图谱

Fig. 3 XRD spectra of iron phosphate

对磷酸铁进行元素分析,所得结果见表 1。由表 1 可知,Fe 含量 36.25%、P 含量 20.47%,Fe/P 物质的量比为 0.98,满足 HG/T 4701—2021 标准要求。此外,Na、Mn、Ti 等杂质元素含量均处于较低水平,符合标准限值要求。上述分析证实,通过优化酸浸条件,可实现磷铁渣中铁、磷元素的高效回收,并成功制备出质量符合电池级应用要求的磷酸铁材料。

表 1 磷酸铁与电池级磷酸铁元素指标对比(质量分数)

Table 1 Comparison of elemental indicators between generated iron phosphate and battery-grade iron phosphate %

项目	Fe	P	Fe/P	Na	Mn	Ti
$FePO_4$产品	36.25	20.47	0.98	0.18	0.05	0.12
HG/T 4701—2021	35.7~36.7	20.0~21.1	0.96~1.0	≤0.2	≤0.1	≤0.18

2.2 催化剂的结构表征

图 4 为 FP-6 催化剂的 SEM-EDS 图像。由图 4 可知,FP-6 催化剂在活性炭基体微孔和纳米管结构中生长出均匀分布的纳米颗粒,形成覆盖完整的催化活性界面。C、O、P、Fe 这 4 种元素在材料中均匀分布。其中,C 元素均匀分散有助于构建三维导电网络,提高材料的导电性与结构稳定性;O 元素主要分布于颗粒表面,对应金属氧化物或含氧官能团,可增强材料表面亲水性及界面反应活性;P 与 Fe 元素的均匀分布表明二者在碳骨架中实现有效掺杂与分散,有利于形成高活性催化位点,从而提升电化学性能[6-10]。上述元素分布均匀表明 FP-6 具有优异的组成均一性与结构稳定性,增强了其在应用中的潜力。

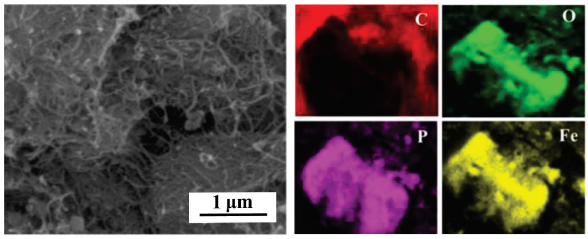


图 4 FP-6 催化剂 SEM-EDS 图像

Fig. 4 SEM and EDS images of FP-6

不同处理时间下 FP 催化剂 XRD 图谱见图 5。位于 26.4°的衍射峰归属于石墨的(002)晶面,表明碳载体具有较高的石墨化结构。此外,40.2°、44.2°和 47.3°处的衍射峰分别归属于 Fe_2P 的(111)、(201)和(210)晶面,证实了 Fe_2P 晶相的成功形成。图 6 为不同处理时间下 FP 催化剂拉曼光谱图。处理时间 60 min 时,D 带(约 1 350 cm^{-1})与 G 带(约1 580 cm^{-1})的强度比(I_D/I_G)为 0.93,表现出较好的有序度。这表明处理时间 60 min 时,材料的结构有序性最优,且电催化性能最佳。

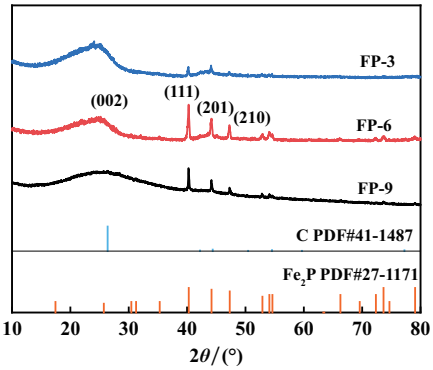


图 5 不同处理时间下 FP 催化剂的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD spectra of FP catalysts after different treating time

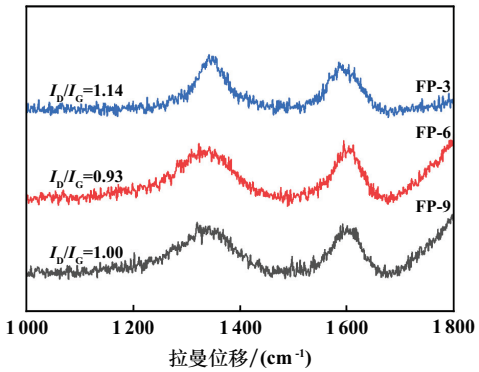


图 6 不同处理时间下 FP 催化剂的拉曼光谱图

Fig. 6 Raman analysis of FP catalysts after different treating time

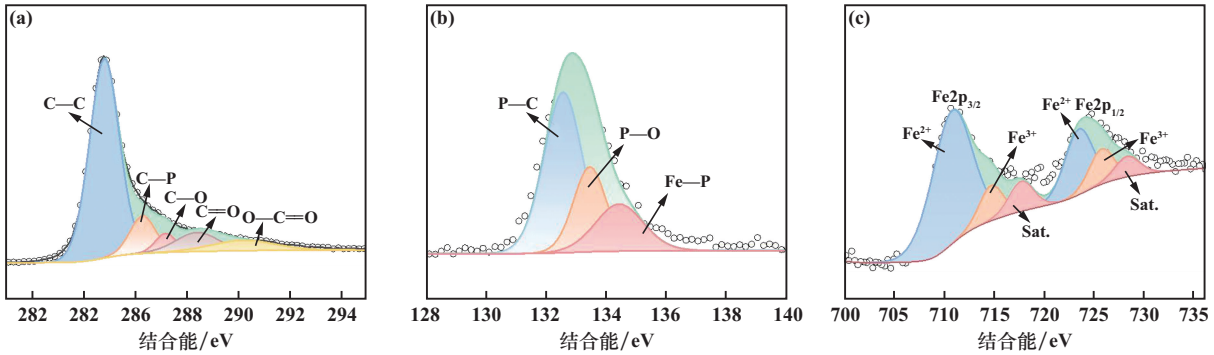
图 7 展示了 FP-6 催化剂的 XPS 光谱。由图 7(a)可知,FP-6 的 C1s 信号拟合的五个峰分别位于284.8、286.3、287.1、288.4 和 290.1 eV,分别对应C—C、C—P、C—O、C═O 和 O—C═O 键[11-13]。由图 7(b)可知,FP-6 的 XPS P2p 三个峰分别位于 134.3、133.5 和 132.6 eV,分别对应 Fe—P、P—O 和 P—C[14-15]。说明 FP-6 中的 P 以 $Fe_3(PO_4)_2$、Fe_2P 形式存在,磷化物的

存在有助于提升材料的电导性和催化活性[16]。由图 7(c)可知,在 $Fe2p_{3/2}$(710.7 eV)和 $Fe2p_{1/2}$(723.4 eV)的峰对应 Fe^{2+},在 $Fe2p_{3/2}$(714.6 eV)和 $Fe2p_{1/2}$(725.6 eV)的峰对应 Fe^{3+},$Fe2p_{3/2}$(717.6 eV)和 $Fe2p_{1/2}$(728.3 eV)对应 Fe 的两个卫星峰[17-18]。FP-6 表面有多种铁活性位点,这为 ORR 提供了协同催化作用。

2.3　FP 电催化性能

图 8 为不同处理时间下 FP 催化剂电催化性能曲线。FP-6 峰面积明显大于 FP-3 和 FP-9,表明其具有较强的 ORR 催化活性。FP-6 的半波电位为-0.037 V,略低于 FP-9 的半波电位(-0.022 V),但高于 FP-3 的半波电位(-0.042 V),表明 FP-6 在氧还原反应(ORR)中具有较优的催化性能。进一步对比 3 种催化剂 Tafel 斜率,FP-6 的 Tafel 斜率为 101.26 mV/dec,相较于 FP-9(106.48 mV/dec)和 FP-3(113.60 mV/dec),FP-6 在电化学反应中显示出更快的反应动力学,指示其在 ORR 过程中的电荷转移效率较高。

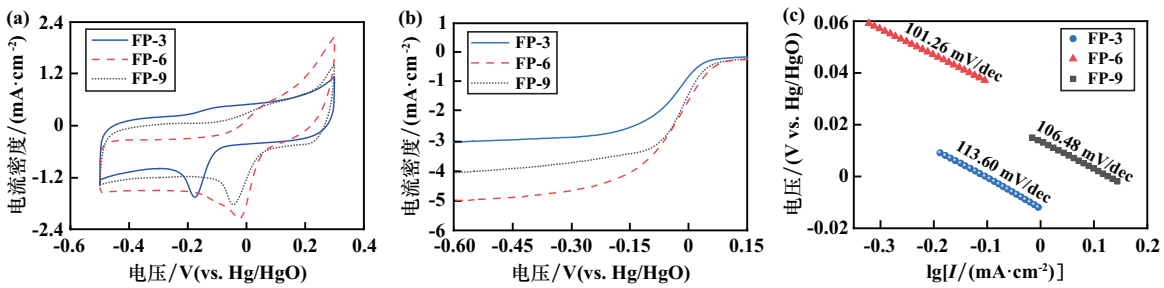
不同转速下 FP 催化剂电催化性能曲线见图 9。通过旋转圆盘电极(RDE)对 FP-6 进行了分析,400~1 600 r/min 范围内,极限电流密度随着旋转速率的增加而增大,图 9(a)中插图显示了 FP-6 的 Koutecky-Levich(K-L)图拟合结果,表明 FP-6 采用 4 电子转移路径,电子转移数为 3.7,与旋转环盘电极(RRDE)测试结果一致,在-0.4 V(Hg/HgO)时电子转移数为 3.7,同时,FP-6 的过氧化氢产率仅为 16%。进一步验证其为 4 电子转移催化剂。



(a) C1s;(b) P2p;(c) Fe2p

图 7　FP-6 的 XPS 图谱

Fig. 7　XPS spectra of FP-6



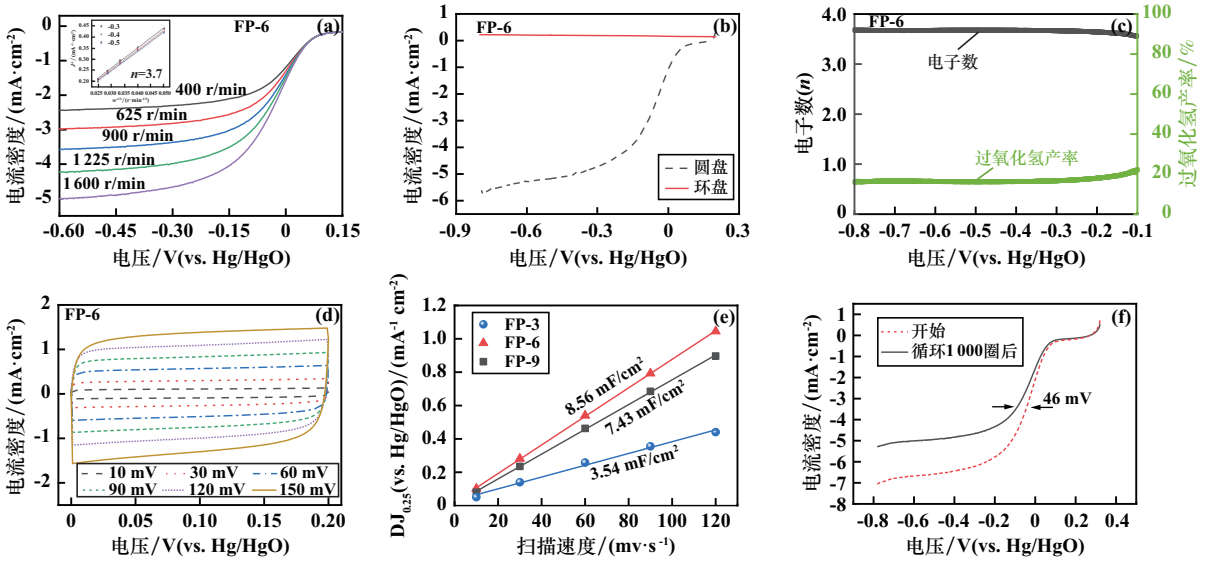
(a) CV 曲线;(b) 氧还原线性扫描 CV 曲线;(c) Tafel 图

图 8　不同处理时间下 FP 催化剂电催化性能曲线

Fig. 8　Electrocatalytic performance of FP catalysts after different treating time

电化学活性表面积(ECSA)测试显示 FP-6 具有较大的峰面积,说明其比表面积较大。FP-3、FP-6 和 FP-9 的双电层电容分别为 3.54、8.56 和 7.43 mF/cm^2,表明在 800 ℃热处理后,FP-6 催化剂的比表面积得到了显著增加。经过 1 000 次循环测试后,过电位仅增加了 46 mV,表明 FP-6 具有较好的循环稳定性。

为验证 FP-3、FP-6 和 FP-9 催化剂在氧还原反应(ORR)中的催化活性,分别将其应用于可充电锌空气电池(ZABs)阴极,相关性能分析结果见图 10。使用 FP-6 催化剂的 ZABs 在开路电压(OCP)测试中达到了 1.41 V,高于使用 FP-3(1.30 V)和 FP-9(1.40 V)催化剂的 ZABs,FP-6 催化剂的 ZABs 在 0.76 V 峰值功率密度为 121 mW/cm^2,高于 FP-3(97 mW/cm^2)和 FP-9(117 mW/cm^2)催化剂的 ZABs,在不同放电电流密度(1~30 mA/cm^2)的速率性能测试中,采用 FP-6 催化剂的 ZABs 略高于 FP-3 和 FP-9 催化剂。

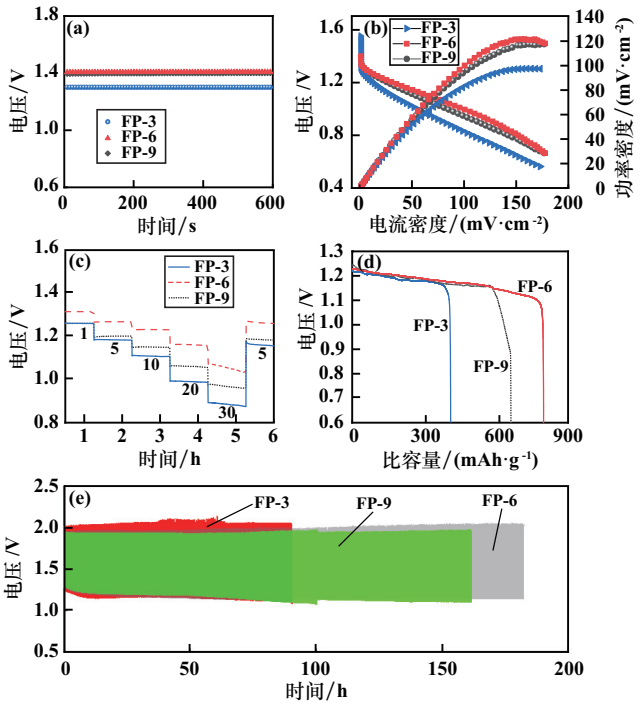


(a) LSV 曲线;(b) RRDE 极化曲线;(c) 电子转移数及 H_2O_2 产量曲线;(d) ECSA 曲线;(e) C_{dl} 曲线;(f) LSV 曲线

图 9 不同转速下 FP 催化剂电催化性能曲线

Fig. 9 Electrochemical performance of FP catalysts by different rotating speed

此外,3 种样品在 5 mA/cm² 时的放电比容量也显示出相同的趋势,FP-6 催化剂的 ZABs 比容量为 780 mAh/g,明显高于 FP-9(647 mAh/g)和 FP-3(400 mAh/g),在 5 mA/cm² 电流密度下,基于 FP-6 的 ZABs显示出更窄的充放电间隙,最大循环寿命为 182 h,而基于 FP-3 和 FP-9 的 ZABs 的最大循环寿命分别为 90 和 161 h,凸显了 FP-6 在 ORR 性能上的优势。



(a) 5 mA/cm²下开路电位(OCP)值;(b) 放电极化和功率密度;(c) 倍率性能;(d) 比容量;(e) 放电/充电循环曲线

图 10 FP 催化剂的锌空气电池性能图谱

Fig. 10 Electrochemical performance of zinc-air batteries employing of FP catalysts

3 结论

1) 经酸浸和液相反应从废旧磷铁渣中高效制备磷酸铁,获得了晶型完整、纯度较高的磷酸铁。

2) 结合活性炭吸附技术回收废液中的铁和磷元素,经热处理制备的碳基催化剂 FP-6 在 0.1 mol/L KOH 溶液中展现出优异的氧还原反应(ORR)性能,半波电位达到−0.037 V。

3) FP-6 催化剂在锌空气电池中表现出良好的电化学性能,比容量可达 780 mAh/g,功率密度为 121 mW/cm²,并在高电流密度 5 mA/cm² 下实现长达 182 h 的循环稳定性。

参考文献(References):

[1] LIU X Y, LIU X M, ZHANG Z Q. Application of yellow phosphorus slag in resource recovery and environmental remediation: A review[J]. Journal of Environmental Management, 2024,349:119397.

[2] KHATER D, ALKHABBAS M, AL-MA'ABREH A M. Adsorption of Pb, Cu, and Ni ions on activated carbon prepared from oak cupules: kinetics and thermodynamics studies[J]. Molecules, 2024,29(11):2489.

[3] LI B Z, WU H Y, ZHANG C, et al. Dual functional Fe/AC for treating phenol solutions by adsorption coupled with dry catalytic oxidation technology[J]. Desalination and Water Treatment, 2019,165:148-162.

[4] OSMAN N S, ALI U F M, GOPINATH S C, et al. Bio-removal of lead (II) ions under optimal condition by zinc chloride-impregnated activated carbon from brown alga[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2025,15(17):23967-23977.

[5] LIU Y F, ZHUGE X Q, LIU T, et al. Cold-plasma activation conver-

ting conductive agent in spent Li-ion batteries to bifunctional oxygen reduction/evolution electrocatalyst for zinc-air batteries[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024,665:793-800.

[6] 胡美世,陈靖,罗骏,等. 富镍钴铁浸出液除杂及磷酸铁制备研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):97-102.
HU Meishi, CHEN Jing, LUO Jun, et al. Purification of nickel-cobalt-iron rich leachate and preparation of iron phosphate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):97-102.

[7] 赵雨婷,周自圆,刘志启,等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料酸浸液除杂及同步回收 $FePO_4$研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):96-99.
ZHAO Yuting, ZHOU Ziyuan, LIU Zhiqi, et al. Simultaneous removal of impurities and recovery of $FePO_4$ from acid leaching solution of cathode materials from spent lithium iron phosphate batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):96-99.

[8] HAN J X, BIAN J J, SUN C W. Recent advances in single-atom electrocatalysts for oxygen reduction reaction[J]. Research, 2020,2020:9512763.

[9] YIN H B, YUAN P F, LU B A, et al. Phosphorus-driven electron delocalization on edge-type FeN_4 active sites for oxygen reduction in acid medium[J]. ACS Catalysis, 2021,11(20):12754-12762.

[10] LI J C, ZHONG H, XU M J, et al. Boosting the activity of Fe-N_x moieties in Fe-N-C electrocatalysts *via* phosphorus doping for oxygen reduction reaction[J]. Science China Materials, 2020,63(6):965-971.

[11] WANG J B, ZHANG Y N, GUO X, et al. FeCo/N-co-doped 3D carbon nanofibers as efficient bifunctional oxygen electrocatalyst for Zn-air batteries[J]. Nanoscale, 2023,15(2):625-630.

[12] NOROUZI N, CHOUDHURY F A, EL-KADERI H M. Iron phosphide doped, porous carbon as an efficient electrocatalyst for oxygen reduction reaction[J]. ACS Applied Energy Materials, 2020,3(3):2537-2546.

[13] CHEN Y J, SHI Z H, WANG Z H, et al. Yolk-shell Fe@ FeNx nanoparticles decorated N-doped mesoporous carbon as highly active electrocatalyst for oxygen reduction reactions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020,829:154558.

[14] ZHOU B L, YAN F, LI X J, et al. An interpenetrating porous organic polymer as a precursor for FeP/Fe_2P-embedded porous carbon toward a pH-universal ORR catalyst[J]. Chem Sus Chem, 2019,12(4):915-923.

[15] ZHAO S, WANG C Y, HAN G Q, et al. Ni-Fe-P/Co-W: Nested heterostructures and multi-transition metal synergistic effect optimizing overall water splitting performance[J]. Applied Surface Science, 2024,662:160133.

[16] LIU C C, CHEN H Y, JHONG H P, et al. In-situ growth of iron phosphide encapsulated by carbon nanotubes decorated with zeolitic imidazolate framework-8 for enhancing oxygen reduction reaction[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(39):17367-17378.

[17] JIN H H, ZHOU H, JI P X, et al. ZIF-8/$LiFePO_4$ derived Fe-N-P Co-doped carbon nanotube encapsulated Fe_2P nanoparticles for efficient oxygen reduction and Zn-air batteries[J]. Nano Research, 2020,13(3):818-823.

[18] XUE D X, YU F J, YING Q, et al. Phosphate-assisted dispersion of iron phosphide in carbon nanosheets towards efficient and durable ORR catalysts in acidic and alkaline media[J]. Chem Cat Chem, 2021,13(20):4431-4441.

引用本文:王慧洁,吴一览,贾中悦,等. 磷铁渣高效回收制备磷酸铁和 Fe/P 碳基氧还原催化剂的研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):108-113.
WANG Huijie, WU Yilan, JIA Zhongyue, et al. Synthesis of iron phosphate and Fe/P carbon-based oxygen reduction catalyst for efficient recycling of iron phosphate slag [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):108-113.

(上接第 107 页)

[7] 冯博,郭宇涛,王涛,等. 氧化剂在刺槐豆胶浮选分离方铅矿和闪锌矿中的作用及机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020,51(1):1-7.
FENG Bo,GUO Yutao,WANG Tao,et al. Role and mechanism of oxidizer in flotation separation of galena and sphalerite using locust bean gum as depressant[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020,51(1):1-7.

[8] 朱环宇. 铅锌浮选分离中新型闪锌矿抑制剂的性能及机理研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2023.
ZHU Huanyu. Study on the performance and mechanism of novel sphalerite depressant in lead-zinc flotation separation[D]. WUhan: Wuhan Institute of Technology, 2023.

[9] 梁家荣,杨业国,丘海峰,等. 广西某硫化铅锌矿浮选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2024(6):46-49.
LIANG Jiarong, YANG Yeguo, QIU Haifeng, et al. Flotation separation of lead-zinc sulfide ore in Guangxi[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024(6):46-49.

[10] 朱环宇,刘华,杨丙桥,等. 铅锌分离中 HEDP 对活化闪锌矿的抑制性能及机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5):145-152.
ZHU Huanyu, LIU Hua, YANG Bingqiao, et al. Study on depressing performance and mechanism of HEDP on activated sphalerite in the separation of lead and zinc[J]. Nonferrous Metals Mieral Processing Section, 2023(5):145-152.

[11] PAN Z C, LIU Z C, XIONG J J, et al. Application and depression mechanism of sodium sulfite on galena-pyrite mixed concentrate flotation separation: Huize Lead-Zinc Mine, China, as an example[J]. Minerals Engineering, 2022,185:107696.

[12] FENG J C, YANG B Q, ZHU H Y, et al. The utilization of 2-phosphonobutane-1,2,4-tricarboxylic acid (PBTCA) as a novel sphalerite depressant in the selective flotation of galena from sphalerite[J]. Applied Surface Science, 2021,569:150950.

[13] 周艳飞,王建安,沈发明,等. 某高氧化率硫化铅锌矿混合浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):78-81.
ZHOU Yanfei, WANG Jian'an, SHEN Faming, et al. Experimental study on bulk flotation of highly oxidized lead-zinc sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):78-81.

引用本文:陈忠玉,刘强,赵冠飞,等. 低碱条件下铅锌硫化矿浮选分离及机理研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):102-107.
CHEN Zhongyu, LIU Qiang, ZHAO Guanfei, et al. Flotation separation and its mechanism of lead-zinc sulfide ore under low-alkali conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):102-107.