

利用 γ 射线辐射技术在泡沫镍表面原位生长 $\text{FeO}(\text{OH})$ 用于高效电催化析氧反应

吴茂生¹ 张凯^{2,4} 颜伟^{2,4} 张明星³ 吴国忠^{1,2,4}

¹ (上海科技大学 上海 201210)

² (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

³ (苏州大学放射医学与辐射防护国家重点实验室 放射医学及交叉研究院(RAD-X) 江苏省高等学校医学协同创新中心 苏州 215123)

⁴ (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 羟基氧化物是析氧反应(OER)中稳定的活性相,本研究采用 γ 射线诱导的辐射合成策略,协同活化、氧化还原和刻蚀等多重效应,在泡沫镍(NF)表面原位合成含氧空位的 $\text{FeO}(\text{OH})$ 催化剂。电化学测试表明, $\text{FeO}(\text{OH})$ 催化剂拥有卓越的电催化OER性能,在1 mol/L KOH电解液中,对比传统水热合成的 $\text{FeO}(\text{OH})$,在10 mA/cm²电流密度下实现了266 mV的OER过电位,并在200 mA/cm²电流密度下具有超100 h水分解稳定性。在模拟海水溶液中(1 mol/L KOH + 0.5 mol/L NaCl),该催化剂也表现出优异的电催化OER性能(307 mV@10 mA/cm²和50 h@1 000 mA/cm²)。本研究采用辐射技术在NF表面原位合成含氧空位过渡金属化合物,为设计用于水/海水分解的高性能水分解电催化剂提供新思路。

关键词 γ 射线,辐射合成, $\text{FeO}(\text{OH})$,析氧反应(OER)

中图分类号 TL99, O611.621

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0009

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0009

引用该文:

吴茂生,张凯,颜伟,等.利用 γ 射线辐射技术在泡沫镍表面原位生长 $\text{FeO}(\text{OH})$ 用于高效电催化析氧反应[J].辐射研究与辐射工艺学报,XXXX,XX(X):XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0009.

WU Maosheng, ZHANG Kai, YAN Wei, *et al.* In situ growth of $\text{FeO}(\text{OH})$ on nickel foam via γ ray irradiation for efficient electrocatalytic oxygen evolution reaction[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0009.



In situ growth of $\text{FeO}(\text{OH})$ on nickel foam via γ ray irradiation for efficient electrocatalytic

基金资助: 国家自然科学基金(22176194)、科学挑战专题基金(TZ2018004)和新型海水提铀材料设计制备及性能验证研究项目

第一作者: 吴茂生,男,1999年12月出生,2021年6月于南华大学获学士学位,目前在上海科技大学攻读硕士学位,主要从事无机材料的辐射合成

通信作者: 吴国忠,研究员, E-mail: wuguozhong@sinap.ac.cn; 张明星,副教授, E-mail: zhangmx10@lzu.edu.cn

收稿日期: 初稿 2026-01-17; 修回 2026-03-04

Supported by National Natural Science Foundation of China (22176194), the Science Challenge Project (TZ2018004), and the Design, Preparation and Performance Verification of New Uranium Extraction Materials from Seawater

First author: WU Maosheng (male) born in December 1999, obtained a bachelor's degree from University of South China in June 2021, and is currently pursuing a master's degree at ShanghaiTech University, mainly engaged in radiation synthesis of inorganic materials

Corresponding author: WU Guozhong, researcher, E-mail: wuguozhong@sinap.ac.cn; ZHANG Mingxing, associate professor, E-mail: zhangmx10@lzu.edu.cn

Received 17 January 2026; accepted 04 March 2026

oxygen evolution reaction

WU Maosheng¹ ZHANG Kai^{2,4} YAN Wei^{2,4} ZHANG Mingxing³ WU Guozhong^{1,2,4}¹(ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)²(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)³(State Key Laboratory of Radiation Medicine and Protection, School for Radiological and Interdisciplinary Sciences (RAD-X) and Collaborative Innovation Center of Medicine of Jiangsu Higher Education Institutions, Soochow University, Suzhou 215123, China)⁴(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT Oxyhydroxide is regarded as a stable active substance in the oxygen evolution reaction (OER). In this study, a radiation synthesis strategy induced by γ ray was employed to synergistically activate, oxidize-reduce, and etch effects, and *in situ* synthesize FeO(OH) catalysts with oxygen vacancies on the surface of foam nickel (NF). Electrochemical tests demonstrated that this FeO(OH) catalyst has outstanding electrocatalysis OER performance. Compared with the traditional hydrothermal synthesis of FeO(OH), in 1 mol/L KOH electrolyte, it achieved an OER overpotential of 266 mV at a current density of 10 mA/cm², and exhibited over 100 hours stability at a current density of 200 mA/cm². In the simulated seawater solution (1 mol/L KOH + 0.5 mol/L NaCl), the catalyst also exhibits excellent electrocatalytic OER performance (307 mV@10 mA/cm² and 50 h@1 000 mA/cm²). This study utilized radiation technology to *in situ* synthesize transition metal compounds with oxygen vacancies on the surface of NF, providing a new idea for designing high-performance water/seawater decomposition electrocatalysts.

KEYWORDS γ ray, Radiation synthesis, FeO(OH), Oxygen evolution reaction (OER)

CLC TL99, O611.621

电化学水分解产氢（和氧）是一项清洁、高效且可持续的化石燃料替代策略，因为水既是电解唯一起始分子，也是氢循环最终产物^[1]，但缓慢的四电子析氧反应（OER）动力学严重制约电解水制氢的大规模应用，迫切需要新技术开发更高效/经济的电催化剂，以加速OER动力学并确保长时间稳定运行^[2]。

在众多OER催化剂中，过渡金属基(Fe、Co、Ni等)氧化物、氢氧化物、羟基氧化物、硫族(S、Se、Te)化合物和磷化物因其低成本和高活性一直被广泛关注^[3-7]。其中，FeO(OH)作为一种OER活性和稳定性优异的材料，在电催化水分解领域拥有广阔应用前景。传统的FeO(OH)合成依赖水热反应，面临高温高压、反应时间长、操作流程复杂等问题。在先前报道中，通过水热法制备FeO(OH)表现出较高过电位(355 mV@10 mA/cm²、373 mV@20 mA/cm²)^[8]，通过水热-共沉淀法制备FeO(OH)也表现出不理想的OER活性(390 mV@10 mA/cm²、485 mV@20 mA/cm²)^[9]。

近年来，电离辐射合成技术因其快速便捷、无需加热等优点，在无机材料合成领域受到广泛关注。通过高能射线引发辐射化学过程，可实现

无机材料的晶核形成与晶体生长动态调控，从而获得特定结晶度与形貌的纳米结构^[10-12]。除此之外，在水溶液体系中，通过还原高价金属化合物前驱体，可形成低价或零价无机纳米颗粒。例如，Li等^[13]通过 γ 射线辐射还原制备胶体银、胶体金纳米粒子，与化学还原相比，辐射还原制备的胶体银、胶体金纳米粒子具有更高分散浓度与更窄粒径分布；Kanjiro等^[14]利用 γ 射线辐射还原Rh²⁺和Ag⁺的混合溶液，得到粒径分布均匀的Rh@Ag纳米团簇；靳笑天等^[15]采用 γ 射线辐射制备了氧化锌(ZnO)及不同金属(Mg、Li、Al、Ga、Ni、Fe)掺杂的ZnO纳米材料，用于提升光电器件电子传输层(ETL)性能，相比传统溶胶-凝胶法， γ 射线辐射合成的ZnO拥有更低带隙(2.90~3.19 eV)。此外，本课题组通过辐射技术在泡沫镍(NF)表面原位生成NiMoO₄电极材料，该材料拥有疏松且稳定的结构，可提供丰富活性位点，降低电荷转移电阻，表现出优异的电化学动力学性能：在1 A/g电流密度下，比电容高达586.1 C/g，经过10 000次充放电循环后，比电容的容量保持率为91.6%，显示出良好的循环稳定性^[16]。

在这项研究中，我们采用 γ 射线诱导的辐射合

成策略,在常温、常压下成功实现NF表面原位合成含氧空位FeO(OH)/NF-Rad催化剂,同时,采用传统水热法^[17]合成FeO(OH)/NF-Hyd催化剂。电化学测试表明, γ 射线辐射合成的含氧空位FeO(OH)/NF-Rad催化剂显示出更卓越的电催化OER性能,即:在10 mA/cm²电流密度下,FeO(OH)/NF-Rad拥有266 mV的过电势,明显低于FeO(OH)/NF-Hyd(297 mV),并在模拟海水溶液(1 mol/L KOH + 0.5 mol/L NaCl)中也表现出优异的电催化OER性能(307 mV@10 mA/cm²和50 h@1 000 mA/cm²)。本研究通过 γ 射线实现OER电催化剂的可控合成,并引入适量氧空位,为面向多场景应用及工业化需求的催化剂设计提供了新思路。

1 材料与方法

1.1 材料

泡沫镍(NF,面密度:320 g/m²)购自天津艾维信化工科技有限公司,丙酮(CH₃COCH₃,AR,99.5%)、盐酸(HCl,AR,38.0%)、无水乙醇(CH₃CH₂OH,AR,99.7%)、七水合硫酸亚铁(II)(FeSO₄·7H₂O,AR,99.0%)、六水合氯化铁(III)(FeCl₃·6H₂O,AR,99.0%)、尿素(CO(NH₂)₂,99.0%,AR)和氟化铵(NH₄F,AR,96.0%)均购自国药集团化学试剂有限公司,所有化学试剂均没有进一步纯化,实验用水为去离子水。

1.2 方法

1.2.1 材料合成

FeO(OH)/NF-Rad的合成:首先,用1 mol/L HCl和CH₃COCH₃分别将NF(4 cm×2 cm×0.1 cm)超声清洗10 min,随后用去离子水多次冲洗以去除表面杂质。其次,将6 mmol NH₄F、6 mmol CO(NH₂)₂和6 mmol FeSO₄·7H₂O溶于50 mL去离子水中,搅拌后形成均匀溶液。最后,将上述预处理的NF和溶液转移至60 mL西林瓶中,在⁶⁰Co源产生的 γ 射线辐照下,控制累计吸收剂量为300 kGy(剂量率:2.78 Gy/s),具体的合成流程如图1(a)所示。反应完成后,用无水乙醇和去离子水分别洗涤FeO(OH)/NF-Rad,并在60 °C下真空干燥过夜。

FeO(OH)/NF-Hyd的合成: NF的处理方法同

上。根据先前文献报道^[17],将0.5 mol/L六水合三氯化铁(FeCl₃·6H₂O)溶液和预处理的NF加入特氟龙内衬高压反应釜中,在120 °C下保持12 h,具体合成流程如图1(b)所示。当反应完成后,用无水乙醇和去离子水洗涤FeO(OH)/NF-Hyd,并在60 °C下真空干燥过夜。

1.2.2 材料表征

采用衍射仪(XRD, Bruker, D8 ADVANCE)在Cu K α 辐射($\lambda=0.154$ nm)下进行X射线粉末衍射。采用扫描电子显微镜(SEM, ZEISS, MERLIN COMPACT)和透射电子显微镜(TEM, FEI Company, Tecnai G2 F20 S-TWIN)对催化剂的微观结构进行表征,在SEM测试中,进行能量色散光谱仪(EDS, OXFORD, INCA)谱图采集。采用电子顺磁共振波谱仪(EPR, Bruker, EMX plus-9.5/12)在100 kHz场调制和100 G扫描宽度下进行未成对电子指纹信息检测。采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, Thermo Fisher Scientific, Nicolet iS50)收集红外光谱,频率范围为400~4 000 cm⁻¹。

1.2.3 电化学性能测试

所有电化学性能测试均在电化学工作站(PARSTAT 4000 A)常规三电极系统上进行。以Hg/HgO作为参比电极,FeO(OH)/NF-Rad或FeO(OH)/NF-Hyd(1 cm×1 cm×0.1 cm)作为工作电极,石墨棒作为对电极。电解液为1 mol/L KOH,将实验所得电势($E_{\text{Hg/HgO}}$)转换为可逆氢电极(E_{RHE})电势,公式为式(1)。

$$E_{\text{RHE}} = E_{\text{Hg/HgO}} + 0.059 \times \text{pH} + 0.098 \quad (1)$$

经过50圈循环伏安(CV)测试(扫描速率:50 mV/s)稳定析氧电流后,以2 mV/s的扫描速率测试线性扫描伏安(LSV)曲线,根据式(2)分析过电势(η)和Tafel斜率(b)。

$$\eta = a + b \lg(j) \quad (2)$$

式中: j 是电流密度, a 代表Tafel经验常数。

在0.01 Hz~100 kHz频率范围内,过电位为0.423 V(vs. Hg/HgO)时进行电化学阻抗谱(EIS)测试。

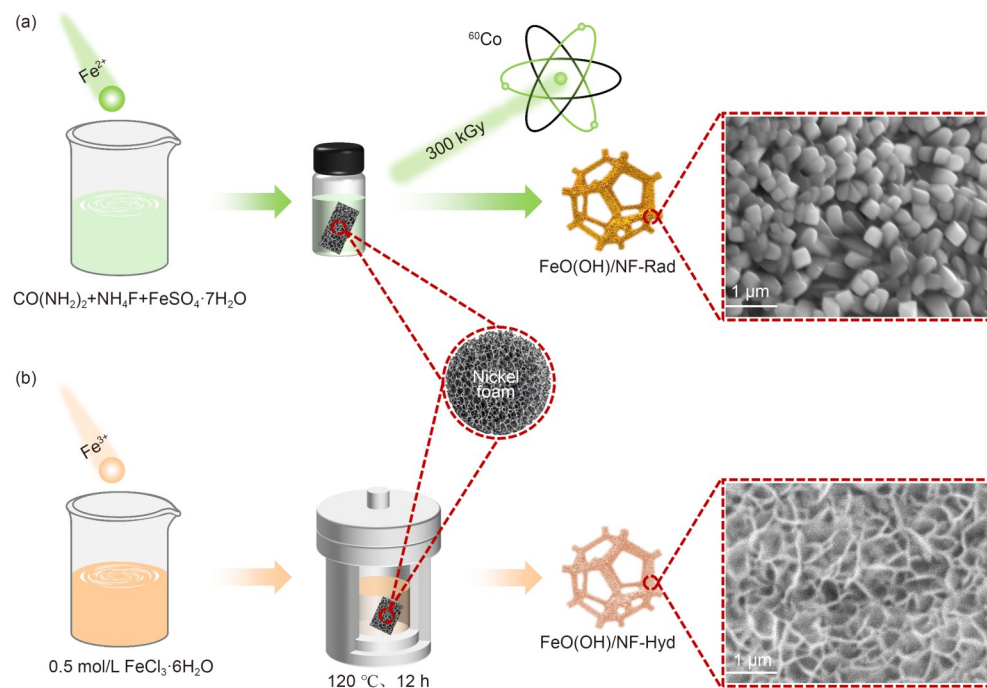


图1 FeO(OH)/NF-Rad(a)和FeO(OH)/NF-Hyd(b)的合成示意图
Fig.1 Schematic diagram of the synthesis of FeO(OH)/NF-Rad (a) and FeO(OH)/NF-Hyd (b)

2 结果与讨论

2.1 材料的物理表征

通过 XRD 对 FeO(OH)/NF-Rad 和 FeO(OH)/NF-Hyd 进行物相和成分分析, 所有材料的 XRD 光谱(图 2(a))与 FeO(OH)标准晶相(PDF#34-1266)相符。FTIR(图 2(b))进一步证实材料的成功合成, 对于两种催化剂, 在 3433 cm^{-1} 处吸收峰是物理吸附 H_2O 或材料结构中 $-\text{OH}$ 基团 $\text{O}-\text{H}$ 伸缩振动, 这通常表现为一个宽而强的吸收带。 1628 cm^{-1} 处吸收峰则归属于吸附 H_2O 的 $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ 弯曲振动, 848 cm^{-1} 处吸收峰归属于 $\text{Fe}-\text{O}-\text{H}$ 面内弯曲振动, 而 700 cm^{-1} 和 503 cm^{-1} 处两个吸收峰则归属于 $\text{Fe}-\text{O}$

伸缩振动。值得注意的是, 在 650 cm^{-1} 附近吸收峰差异可能源自水热合成过程中 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 水解产生微量多晶相 FeO(OH)以及 Cl^- 干扰, 这些特征吸收峰的存在表明材料成功合成^[18-20]。

EPR 测试(图 2(c))可明显观察到在 $g=2.003$ 处有特征峰, 这表明辐射合成 FeO(OH)/NF-Rad 中氧空位的存在, 该氧空位的产生归因于辐射刻蚀效应, γ 射线与反应体系间通过康普顿效应进行能量转移, 产生高能次级电子, 高能次级电子将能量传递给氧原子使其获得足够动能而脱离晶格束缚, 从而形成氧空位^[21]。氧空位可显著调控材料的电子结构, 使催化剂暴露更多活性位点, 从而增强其电催化活性, 这对于电催化水分解中需要快速电荷转移的 OER 过程至关重要^[22-23]。

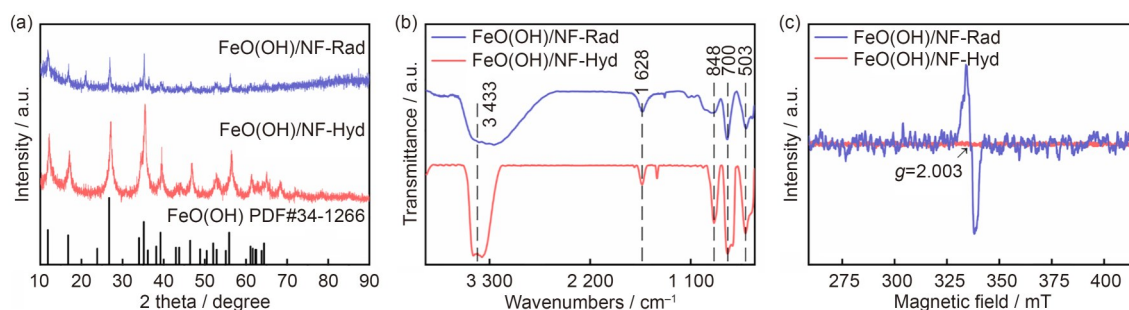


图2 (a)FeO(OH)/NF-Rad和FeO(OH)/NF-Hyd的XRD图;(b)FeO(OH)/NF-Rad和FeO(OH)/NF-Hyd的FT-IR光谱;
 (c)FeO(OH)/NF-Rad和FeO(OH)/NF-Hyd的EPR谱

Fig.2 (a) XRD pattern of FeO(OH)/NF-Rad and FeO(OH)/NF-Hyd; (b) FT-IR spectrum of FeO(OH)/NF-Rad and FeO(OH)/NF-Hyd; (c) EPR spectrum of FeO(OH)/NF-Rad and FeO(OH)/NF-Hyd

通过SEM对样品微观形貌进行分析，SEM图像(图3(a))显示，多面体 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 表面布满褶皱，这种结构有助于暴露丰富的电化学吸附活性位点。TEM图像(图3(b)、(c))进一步分析 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的微观形貌，高分辨TEM(HR-TEM)图像(图3(e))显示出0.206 nm的晶面间距，对应于 $\text{FeO}(\text{OH})$ 的(510)晶面，证明了材料的成功合成。此外，EDS图谱(图3(d))显示Fe和O元素

均匀分布在整個材料结构中，Ni元素则归因于NF基底。 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的接触角测试(图3(f))显示水滴在材料表面迅速铺展，表明其理想的亲水表面及较高表面能，这有利于电解质迅速渗透和气体快速释放。与 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 不同的是，传统水热法合成的 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ 由不规则纳米片无序堆叠在NF表面，并伴随严重团聚(图4(a))，EDS如图4(b)所示。

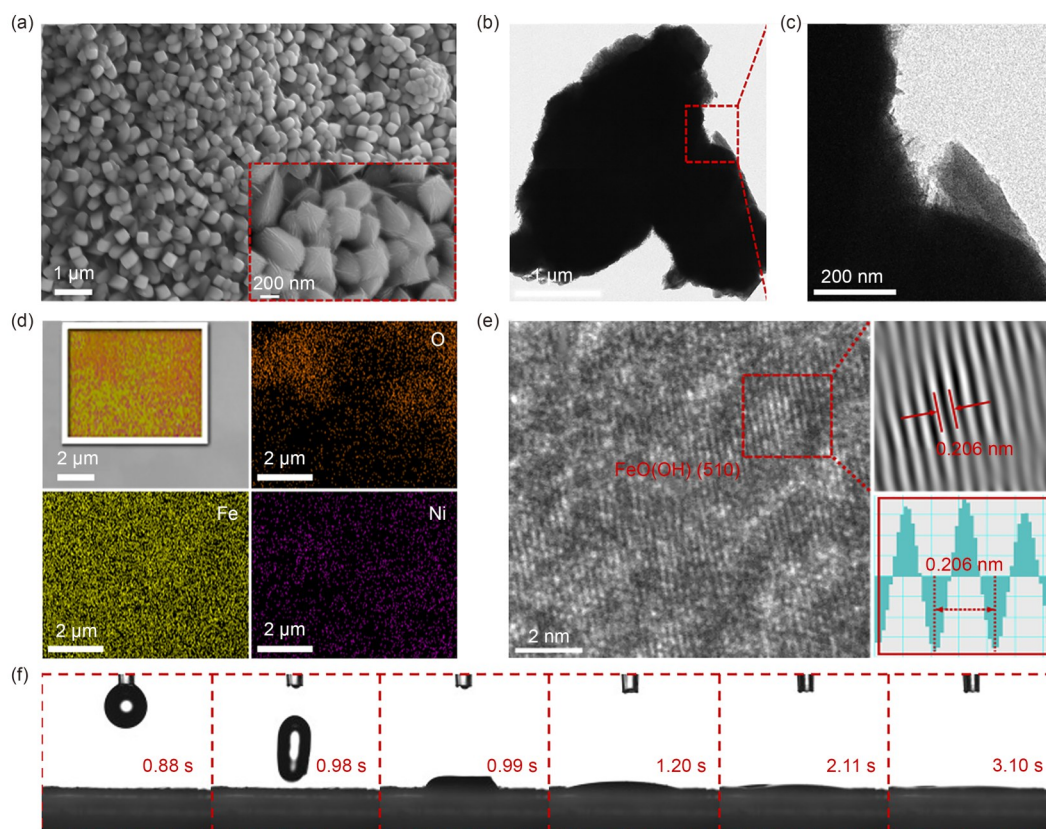


图3 (a) $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的SEM图像,和(b,c)TEM图像;(d) $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的EDS,和(e)HR-TEM图像;
(f) $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的接触角测试

Fig.3 (a) SEM image of $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$, and (b,c) TEM image; (d) EDS of $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$, and (e) HR-TEM image;
(f) Contact angle measurement of $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$

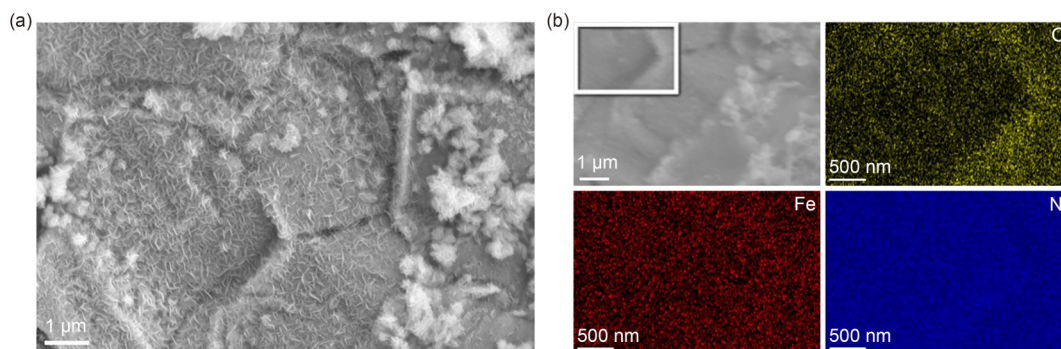


图4 (a) $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ 的SEM图像和(b)EDS
Fig.4 (a) SEM image of $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$, and (b) EDS

2.2 碱性介质中的OER性能

使用三电极系统在 1 mol/L KOH 电解液中评估催化剂的电催化 OER 性能, FeO(OH)/NF-Rad 极化曲线显示出比 FeO(OH)/NF-Hyd 更卓越的催化活性(图 5(a))。FeO(OH)/NF-Rad 在 10 mA/cm² 电流密度下过电位为 266 mV, 而 FeO(OH)/NF-Hyd 过电位则为 297 mV, 此外, FeO(OH)/NF-Rad 在 20 mA/cm² 和 100 mA/cm² 电流密度下分别提供 287 mV 和 392 mV 的过电位(图 5(b))。为进一步研究其 OER 反应动力学, 从极化曲线中提取 Tafel 斜率, 相比于 FeO(OH)/NF-Hyd (82.82 mV/dec),

FeO(OH)/NF-Rad 的 Tafel 斜率低至 63.03 mV/dec (图 5(c))。低过电位和 Tafel 斜率归因于 γ 射线诱导辐射合成 FeO(OH)/NF-Rad 的过程中氧空位的引入, 这些氧空位优化了 OER 过程中 $\bullet\text{OH} \rightarrow \bullet\text{O}$ 的反应历程, 降低反应能垒, 加快反应动力学^[24]。

为深入了解 FeO(OH)/NF-Rad 比 FeO(OH)/NF-Hyd 更高 OER 活性的原因, 通过测量不同扫描速率下的 CV 曲线(图 5(d), (e))来间接获得双电层电容(C_{dl})以检验催化剂的电化学活性位点数。FeO(OH)/NF-Rad 的 C_{dl} 为 2.30 mF/cm², 高于 FeO(OH)/NF-Hyd (1.52 mF/cm²) (图 5(f)), 这表明 FeO(OH)/NF-Rad 拥有更多的催化反应活性位点。

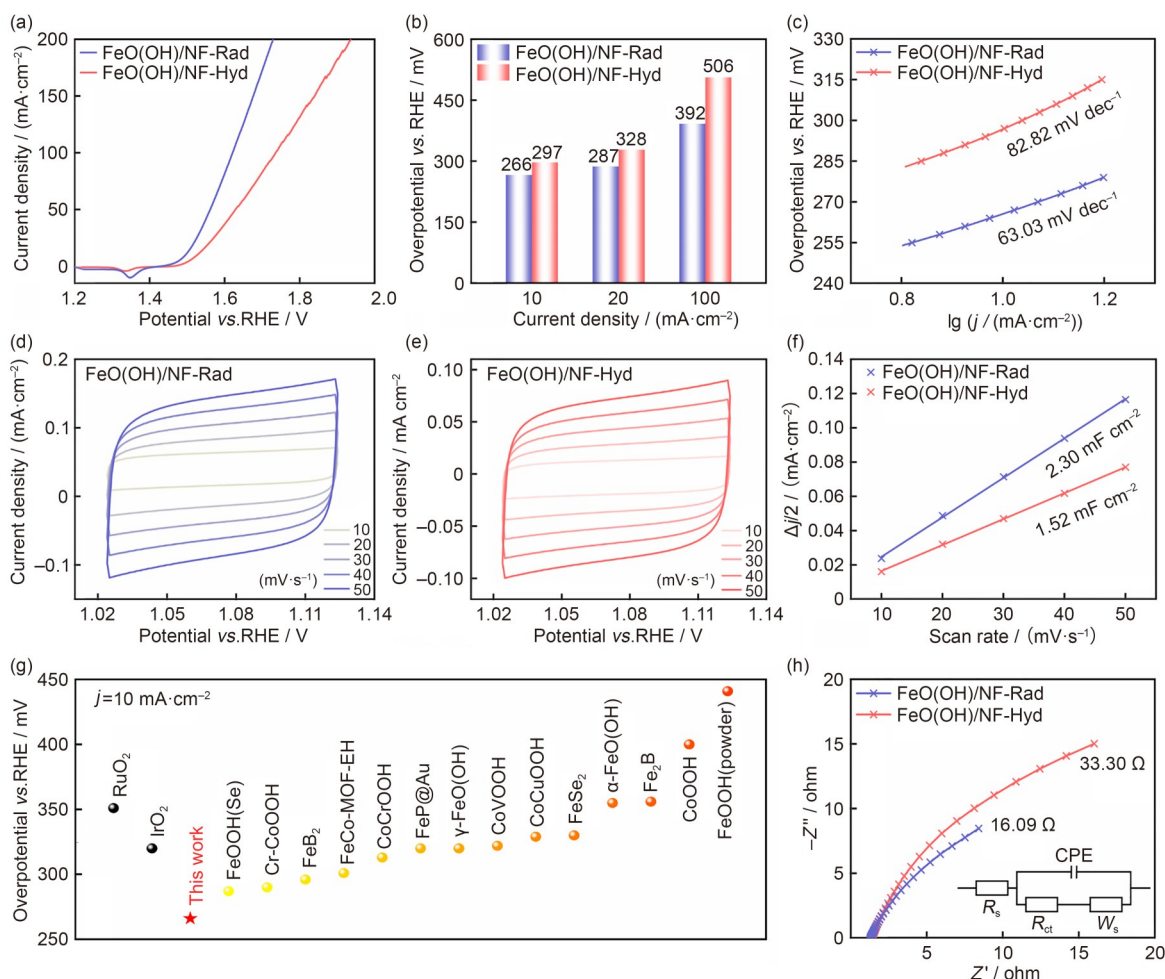


图 5 在 1 mol/L KOH 电解液中对 FeO(OH)/NF-Rad 和 FeO(OH)/NF-Hyd 的电化学 OER 性能测试: (a) 极化曲线; (b) η_{10} 、 η_{20} 和 η_{100} 的比较; (c) 塔菲尔斜率; (d) FeO(OH)/NF-Rad 和 (e) FeO(OH)/NF-Hyd 的 CV 曲线; (f) 双电层电容; (g) 在 10 mA/cm²@1 mol/L KOH 条件下, FeO(OH)/NF-Rad 与商用 RuO₂、IrO₂、以及部分文献报道的 Fe 基或 Fe、Co 和 Ni 的羟基氧化物过电位比较; (h) 奈奎斯特图(彩色见网络版)

Fig.5 Electrochemical OER performance tests of FeO(OH)/NF-Rad and FeO(OH)/NF-Hyd in 1 mol/L KOH electrolyte : (a) polarization curves; (b) comparison of η_{10} , η_{20} , and η_{100} ; (c) tafel slope; CV curves of (d) FeO(OH)/NF-Rad and (e) FeO(OH)/NF-Hyd; (f) double-layer capacitance; (g) comparison of the overpotential of FeO(OH)/NF-Rad with those of commercial RuO₂, IrO₂, and some Fe-based or Fe, Co, and Ni oxyhydroxide reported in the literature at 10 mA cm⁻²@1 mol/L KOH; (h) nyquist plots (color online)

考虑到相同电流密度下 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 比 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ 、商用 RuO_2 (351 mV)、 IrO_2 (320 mV)、以及部分文献报道的同类型催化剂(Fe基或Fe、Co、Ni的羟基氧化物)更优异的OER催化活性(图5(g))^[8,25-31],进一步采用EIS技术研究其电荷转移电阻(R_{ct}),用于评估催化剂的本征动力学活性。 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的 R_{ct} 值(16.09 Ω)远小于 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ (33.30 Ω)(图5(h)),这表明 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 在固-液界面拥有更快电荷转移速率,即更快的催化反应速率。

除上述OER催化活性测试外,稳定性是判断催化剂是否具有实际应用价值的重要指标之一,它反映了催化剂在长时间使用下保持活性的能力。通

过在1.0 mol/L KOH电解液中应用计时电流法(CA)和对比多次CV循环前后极化曲线的偏离程度来进行稳定性评估。 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的极化曲线(图6(a))在10 000圈CV循环后仍能与初始状态得到较好保持,而 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ 则表现出明显偏离(图6(b)),表明其活性在循环过程中明显下降。此外,CA测试(图6(c))表明,在200 mA/cm²电流密度下运行100 h后,可观察到 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 电流密度保持稳定,而 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ 长时间解水性能严重衰减。以上稳定性测试数据表明,通过 γ 射线诱导辐射合成的 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 作为OER催化剂有着卓越的长时间运行能力,展现出良好的实际应用前景。

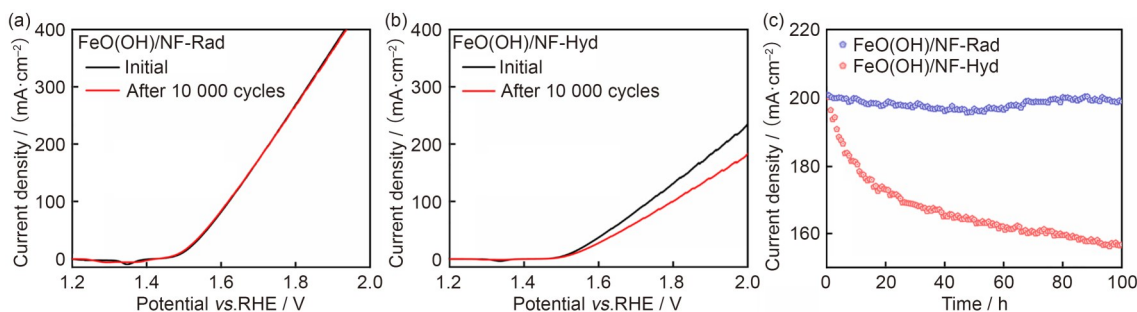


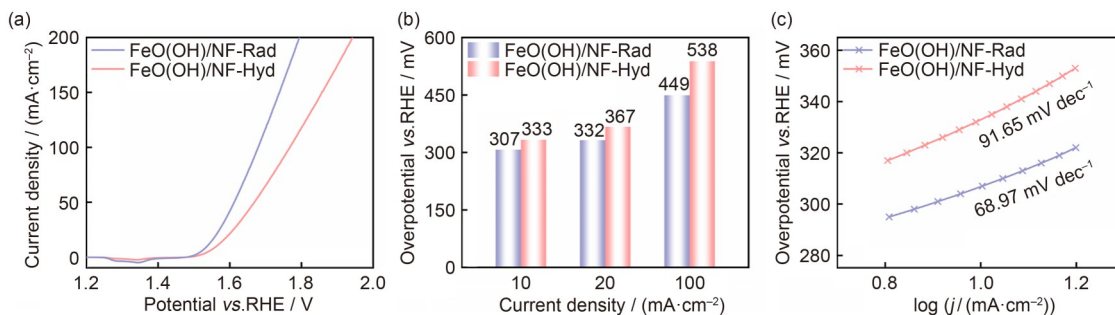
图6 (a) $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 和(b) $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ 在10 000次CV循环前后的极化曲线;
(c)在200 mA/cm²@100 h下长时间水分解稳定性测试

Fig.6 Polarization curves of (a) $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ and (b) $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ before and after 10 000 CV cycles;
(c) long-term water splitting stability test at 200 mA/cm²@100 h

2.3 模拟海水电解

考虑到 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的多场景应用潜力,在模拟海水电解液(1 mol/L KOH+0.5 mol/L NaCl)中进一步评估其OER性能。 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 在10 mA/cm²电流密度下过电位仅为307 mV,显著低于 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ (333 mV)(图7(a)、(b))。同时, $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的Tafel斜率(图7(c))为68.97 mV/dec, 低于 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ (91.65 mV/dec)。稳定性测试中, $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 的极化曲线(图7(e))在10 000圈CV扫描后基本得

到保持, $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Hyd}$ 则明显偏移(图7(f))。为了进一步探究 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 在实际工业应用中的潜力,进行高电流密度(1 000 mA/cm²)模拟海水电解测试,结果显示, $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 在1 000 mA/cm²电流密度下运行50 h后,曲线仍较好维持(图7 d),这表明通过 γ 射线诱导辐射合成的 $\text{FeO}(\text{OH})/\text{NF-Rad}$ 具有出色的耐氯腐蚀与结构稳定性,其在工业级OER中有着较好潜力,未来的研究可聚焦于真实海水或含更高Cl⁻浓度的模拟海水电解液体系中长时间水分解稳定性评估。



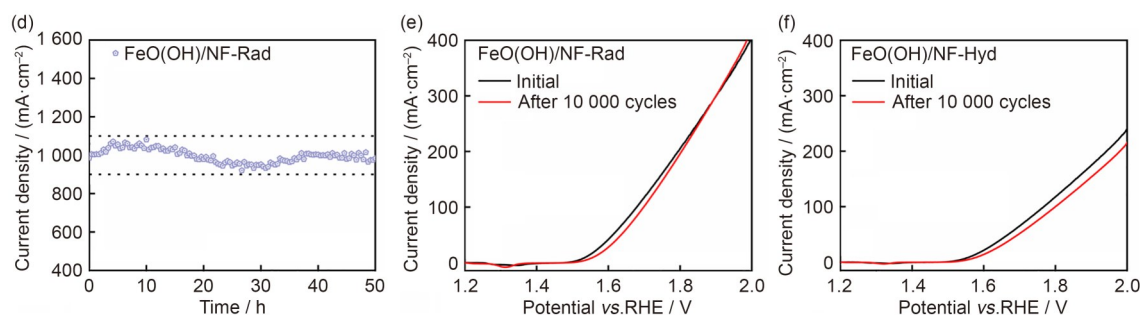


图7 在模拟海水电解液(1 mol/L KOH + 0.5 mol/L NaCl)中对FeO(OH)/NF-Rad和FeO(OH)/NF-Hyd的电化学OER性能测试:(a)极化曲线;(b) η_{10} 、 η_{20} 和 η_{100} 的比较;(c)塔菲尔斜率;(d)在1 000 mA/cm²@50 h下的长时间水分解稳定性测试;(e)FeO(OH)/NF-Rad和(f)FeO(OH)/NF-Hyd在10 000次CV循环前后的极化曲线(彩色见网络版)

Fig.7 Electrochemical OER performance tests of FeO(OH)/NF-Rad and FeO(OH)/NF-Hyd in simulated seawater electrolyte (1 mol/L KOH + 0.5 mol/L NaCl): (a) polarization curves; (b) comparison of η_{10} , η_{20} , and η_{100} ; (c) tafel slope; (d) long-term water splitting stability test at 1 000 mA/cm²@50 h; polarization curves of (e) FeO(OH)/NF-Rad and (f) FeO(OH)/NF-Hyd before and after 10 000 CV cycles (color online)

3 结论

采用 γ 射线诱导的辐射合成策略,成功在泡沫镍表面原位制备了含氧空位FeO(OH)/NF-Rad电解水催化剂。该催化剂具有较低的过电位(266 mV)和较小的Tafel斜率(63.03 mV/dec),并展现出优异的长时电解水稳定性。其OER活性优于多数已报道的Fe基及Fe/Co/Ni等过渡金属基羟基氧化物催化剂,该催化剂在模拟海水电解中也表现出良好的催化性能(307 mV@10 mA/cm²和50 h@1 000 mA/cm²)。这为设计高性能、低成本且适用于复杂电解质环境的OER催化剂提供了新思路。

作者贡献声明 吴茂生、张凯设计实验方案并撰写初稿;吴茂生、颜伟进行了实验;张凯、颜伟对实验数据进行了表征和分析;吴国忠、张明星对初稿进行了修改。所有作者均已阅读并同意稿件最终版本的内容。

参考文献

- Gray H B. Powering the planet with solar fuel[J]. *Nature Chemistry*, 2009, **1**(1): 7. DOI: 10.1038/nchem.141.
 - Song J J, Wei C, Huang Z F, *et al.* A review on fundamentals for designing oxygen evolution electrocatalysts[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, **49**(7): 2196-2214. DOI: 10.1039/c9cs00607a.
 - 周蒙, 朱志军, 唐建国. 电沉积铁钴镍基催化剂及其氧析出性能的研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2023, **36**(2): 53-58. DOI: 10.19728/j. issn1672-6634.2022050006.
- ZHOU Meng, ZHU Zhijun, TANG Jianguo. Electrodeposition preparation of iron cobalt nickel-based

catalyst and application in oxygen evolution reaction[J]. *Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition)*, 2023, **36**(2): 53-58. DOI: 10.19728/j. issn1672-6634.2022050006.

- Wu T Z, Sun S N, Song J J, *et al.* Iron-facilitated dynamic active-site generation on spinel CoAl₂O₄ with self-termination of surface reconstruction for water oxidation [J]. *Nature Catalysis*, 2019, **2**(9): 763-772. DOI: 10.1038/s41929-019-0325-4.
- Nie J H, Shi J H, Li L, *et al.* Anion-mediated rapid and direct synthesis of FeNiOOH for robust water oxidation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, **35**(5): 2414493. DOI: 10.1002/adfm.202414493.
- Jiang J, Su H, Song S J, *et al.* W-doped FeNi₂S₄/Ni₃S₂/NF with interfacial effect as efficient bifunctional electrocatalyst for overall water splitting[J]. *Nano Research*, 2023, **16**(10): 12116-12125. DOI: 10.1007/s12274-023-5453-0.
- Yu F, Zhou H Q, Huang Y F, *et al.* High-performance bifunctional porous non-noble metal phosphide catalyst for overall water splitting[J]. *Nature Communications*, 2018, **9**: 2551. DOI: 10.1038/s41467-018-04746-z.
- Adak M K, Basak H K, Chakraborty B. Establishing the oxygen evolution reaction pathway on iron-oxy-hydroxide through electro-kinetic study[J]. *Catalysis Today*, 2025, **446**: 115124. DOI: 10.1016/j.cattod.2024.115124.
- Lee J, Lee H, Lim B. Chemical transformation of iron alkoxide nanosheets to FeOOH nanoparticles for highly active and stable oxygen evolution electrocatalysts[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018, **58**: 100-104. DOI: 10.1016/j.jiec.2017.09.013.

- 10 Čuba V, Pavelková T, Bárta J, *et al.* Preparation of inorganic crystalline compounds induced by ionizing, UV and laser radiations[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2012, **81**(9): 1411-1416. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2011.12.020.
- 11 Singh A, Pandey A, Luthra V. Modulating electrical, structural and thermoluminescence properties of γ -ray irradiated nanocrystalline $\text{Zn}_{0.99}\text{M}_{0.01}\text{O}$ ($\text{M} = \text{Al/Gd}$) [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, **152**: 69-74. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.06.050.
- 12 Yoshida K, Sonobe T, Zen H S, *et al.* Effect of microwave irradiation on the electronic structure of ZnO [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2015, **83**: 47-51. DOI: 10.1016/j.jpcs.2015.03.013.
- 13 Li T H, Park H G, Choi S H. γ -Irradiation-induced preparation of Ag and Au nanoparticles and their characterizations[J]. Materials Chemistry and Physics, 2007, **105**(2 - 3): 325-330. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2007.04.069.
- 14 Torigoe K, Remita H, Beaunier P, *et al.* Radiation-induced reduction of mixed silver and rhodium ionic aqueous solution[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, **64**(3): 215-222. DOI: 10.1016/S0969-806X(01)00453-4.
- 15 靳笑天, 张伟, 闫佳慧, 等. γ 辐射制备掺杂 ZnO 纳米材料及其作为电子传输层的应用研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, **43**(5): 050201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0031.
JIN Xiaotian, ZHANG Wei, YAN Jiahui, *et al.* Study on the γ -radiation preparation of doped ZnO nanomaterials and their application as electron transport layers[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, **43**(5): 050201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0031.
- 16 张凯, 颜伟, 吴茂生, 等. 利用 γ 辐照在泡沫镍表面原位合成高循环稳定性及高比电容超级电容器 NiMoO_4 正极材料[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(6): 060206. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0090.
ZHANG Kai, YAN Wei, WU Maosheng, *et al.* In situ synthesis of NiMoO_4 cathode with high cycle stability and high specific capacitance for supercapacitors on nickel foam via gamma irradiation[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(6): 060206. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0090.
- 17 Yang M, Li Y X, Jiang M, *et al.* Identifying phase-dependent electrochemical stripping performance of FeOOH nanorod: evidence from kinetic simulation and analyte - material interactions[J]. Small, 2020, **16**(7): 1906830. DOI: 10.1002/smll.201906830.
- 18 Morterra C, Mirra C, Borello E. IR spectroscopic study of pyridine adsorption onto α - FeOOH (goethite) [J]. Materials Chemistry and Physics, 1984, **10**(2): 139 - 154. DOI: 10.1016/0254-0584(84)90043-9.
- 19 Ding X B, Song X W, Boily J F. Identification of fluoride and phosphate binding sites at FeOOH surfaces[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012, **116**(41): 21939 - 21947. DOI: 10.1021/jp3083776.
- 20 Yusan S, Akyil Erenturk S. Adsorption equilibrium and kinetics of U(VI) on beta type of akaganeite[J]. Desalination, 2010, **263**(1 - 3): 233-239. DOI: 10.1016/j.desal.2010.06.064.
- 21 彭静, 郝燕, 魏根栓. 辐射化学基础教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2015.
PENG Jing, HAO Yan, WEI Genshuan. Basic course of radiation chemistry[M]. Beijing: Peking University Press, 2015.
- 22 Xie Z H, Liu Y B, Zhou X X, *et al.* Oxygen vacancy enriched CeO_x supported CuNC aerogel for oxygen evolution reaction in alkaline media[J]. New Journal of Chemistry, 2026, **50**(8): 3748-3753. DOI: 10.1039/d5nj04489h.
- 23 Hu J, Li S W, Chu J Y, *et al.* Understanding the phase-induced electrocatalytic oxygen evolution reaction activity on FeOOH nanostructures[J]. ACS Catalysis, 2019, **9**(12): 10705 - 10711. DOI: 10.1021/acscatal.9b03876.
- 24 Wang Y W, University T N, Zhang X, *et al.* Ultrafine Ni-doped FeOOH nanoparticles with rich oxygen vacancies to promote oxygen evolution[J]. Langmuir, 2025, **41**(15): 9941-9949. DOI: 10.1021/acs.langmuir.5c00457.
- 25 Tang L, Xia M H, Cao S Y, *et al.* Operando identification of active sites in Co-Cr oxyhydroxide oxygen evolution electrocatalysts[J]. Nano Energy, 2022, **101**: 107562. DOI:10.1016/j.nanoen.2022.107562.
- 26 Tian J Y, Jiang F L, Yuan D Q, *et al.* Electric-field assisted In Situ hydrolysis of bulk metal - organic frameworks (MOFs) into ultrathin metal oxyhydroxide nanosheets for efficient oxygen evolution[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020, **59**(31): 13101 - 13108. DOI: 10.1002/anie.202004420.
- 27 Jia H N, Yao N, Liao Z C, *et al.* Understanding the role of spin state in cobalt oxyhydroxides for water oxidation[J].

- Angewandte Chemie International Edition, 2024, **63**(47): e202408005. DOI: 10.1002/anie.202408005.
- 28 Niu S, Jiang W J, Wei Z X, *et al.* Se-doping activates FeOOH for cost-effective and efficient electrochemical water oxidation[J]. Journal of the American Chemical Society, 2019, **141**(17): 7005-7013. DOI: 10.1021/jacs.9b01214.
- 29 Li H X, Zhou Q, Liu F Y, *et al.* Biomimetic design of ultrathin edge-riched FeOOH@Carbon nanotubes as high-efficiency electrocatalysts for water splitting[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, **255**: 117755. DOI: 10.1016/j.apcatb.2019.117755.
- 30 Gao R, Zhang H, Yan D P. Iron diselenide nanoplatelets: Stable and efficient water-electrolysis catalysts[J]. Nano Energy, 2017, **31**: 90-95. DOI: 10.1016/j.nanoen.2016.11.021.
- 31 Masud J, Umapathi S, Ashokaan N, *et al.* Iron phosphide nanoparticles as an efficient electrocatalyst for the OER in alkaline solution[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, **4**(25): 9750-9754. DOI: 10.1039/c6ta04025j.