

# Fe 纳米粒子的电化学形貌调控及其电催化性能研究

周容平<sup>1</sup>, 郭忠龙<sup>2</sup>, 殷博<sup>2,3,4</sup>, 朱继华<sup>2,3,4\*</sup>

(1. 青海师范大学学生就业指导中心, 青海 西宁 810016; 2. 青海师范大学化学化工学院, 青海 西宁 810016;  
3. 青海省环境功能材料先进技术与应用重点实验室, 青海 西宁 810016;  
4. 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810016)

**摘要:**采用电化学循环伏安法和恒电位沉积法成功制备出不同形貌的过渡金属 Fe 基纳米粒子催化剂, 并深入探讨了 Fe 基纳米粒子表面电沉积的早期生长过程及机制, 同时利用扫描电子显微镜、电化学阻抗谱等技术对材料的结构及性能进行了表征测试。恒电位法制备得到的 Fe 纳米粒子分布均匀且具有立方体结构, 其修饰的玻碳电极电活性面积达到 1.485 cm<sup>2</sup>, 是裸玻碳电极的 22 倍。对邻苯二酚 (CC) 和对苯二酚 (HQ) 的电催化性能实验表明, 恒电位法制备得到的 Fe 纳米粒子修饰电极对 HQ 和 CC 的氧化峰电流信号明显高于循环伏安法制备的 Fe 纳米粒子修饰电极, 同时恒电位法得到的 Fe 纳米粒子修饰电极对两种酚类物质的氧化电位更低。

**关键词:** Fe 纳米粒子; 电沉积; 形貌控制; 恒电位法; 电催化

中图分类号: TB383.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)08-0170-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.08.030

## Electrochemical shape control and electrocatalytic performance of Fe nanocatalysts

ZHOU Rong-ping<sup>1</sup>, GUO Zhong-long<sup>2</sup>, YIN Bo<sup>2,3,4</sup>, ZHU Ji-hua<sup>2,3,4\*</sup>

(1. Student Career Guidance Center, Qinghai Normal University, Xining 810016, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Qinghai Normal University, Xining 810016, China; 3. Qinghai Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Application of Environmental Functional Materials, Xining 810016, China; 4. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810016, China)

**Abstract:** Fe-based nanoparticles catalysts with different morphology are successfully prepared via electrochemical cyclic voltammetry and potentiostatic deposition methods. The early growth process and mechanism of surface electrodeposition of Fe-based nanoparticles are thoroughly investigated. The structure and properties of the catalysts are characterized by means of techniques such as scanning electron microscopy and electrochemical impedance spectroscopy. Fe nanoparticles prepared via the potentiostatic deposition method distribute uniformly and have a cubic structure. The active surface area of the glassy carbon electrode modified with these nanoparticles reaches 1.485 cm<sup>2</sup>, which is 22 times that of the bare glassy carbon electrode. Electrochemical catalytic performance experiments on catechol and hydroquinone show that the oxidation peak current of catechol and hydroquinone for the electrode modified with Fe nanoparticles prepared by the potentiostatic deposition method is significantly higher than that of the electrode modified with Fe nanoparticles prepared by electrochemical cyclic voltammetry method. Moreover, the oxidation potential of catechol and hydroquinone by the electrode modified with Fe nanoparticles prepared by the potentiostatic deposition method is lower.

**Key words:** Fe nanoparticles; electrodeposition; morphology control; potentiostatic method; electrocatalysis

金属纳米材料由于具有小尺寸效应、表面效应等特殊的物理化学性质在光学、电子、催化和传感等领域受到了广泛的关注<sup>[1-2]</sup>, 凭借其高比表面积、优异的电子传输能力和可调控的催化活性, 在催化领域具有巨大的发展潜力<sup>[3]</sup>。此外, 金属纳米材料催化活性高、成本低、易于制备, 在燃料电池和光化学等方面也发挥着重要作用。金属纳米催化剂的性能与催化剂的颗粒尺寸密切相关, 纳米催化剂的粒径

相对于块状材料而言, 尺寸显著降低, 表面原子显著增多, 表面原子的配位不饱和度增大, 表面缺陷大大增加, 这些因素都有利于催化反应的发生。处于材料表面的金属原子表面能也明显升高, 表面的原子更容易发生氧化与聚集。一般来说, 金属纳米催化剂的催化活性可以通过以下两个途径来提高: 其一, 改变金属纳米催化剂的成分, 即改变化学组成和电子结构; 其二, 改变金属纳米催化剂表面的原子排列

收稿日期: 2024-11-07; 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 青海省科技厅应用基础研究计划项目 (2024-ZJ-777); 青海师范大学中青年科研基金资助项目 (KJQN2022012)

作者简介: 周容平 (1991-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电化学相关的研究, 779440198@qq.com; 朱继华 (1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事有机功能材料、纳米探针相关的研究, 通讯联系人, zhjh511@126.com。

结构,即通过形貌控制合成来实现表面几何结构的调节,这也是当前纳米科技技术的一个重要的前沿研究领域。催化剂作用的关键是其表面原子与反应分子之间的相互作用。因此,若能通过形貌控制来制备出具有开放表面原子排列结构的金属纳米催化剂,将可以显著提高催化剂的活性和选择性。

过渡金属(Fe、Co、Ni等)纳米材料可以提供丰富的活性位点和良好的导电性能,在光化学、电催化以及癌症治疗等生物学方面具有非常大的前景<sup>[4-6]</sup>。过渡金属纳米材料的电催化性能与其晶体结构、形貌、尺寸等因素密切相关。因此,通过精确控制合成条件,可以优化过渡金属纳米材料的电催化性能。例如,通过调整合成条件可以得到不同晶体结构的 MnO<sub>2</sub> 纳米材料,这些材料在析氢性能上表现出显著的性能,揭示了电催化性能与 MnO<sub>2</sub> 结构之间的关系,为进一步提升过渡金属纳米材料的电催化性能提供了思路<sup>[7]</sup>。过渡金属纳米材料的合成方法有胶体法、溶胶-凝胶法、水热法、气相沉积法和电化学沉积法等<sup>[8-10]</sup>。其中电化学方法具有独特的优势,可通过阴极还原来制备金属纳米粒子或者薄膜,是纳米粒子形状控制合成的重要方法。可以通过改变沉积条件(如成核电位、成核时间、生长电位及沉积液浓度等)达到精确调节纳米晶体各个晶面生长速度的目的,所得到的负载有过渡金属的电极可直接用于电催化研究。此外,电沉积时由于过渡金属纳米粒子被固定在电极表面,能够显著消除金属纳米材料的团聚,因而在制备过程中无需加入稳定剂,更利于催化性能的研究。

因此,了解过渡金属电沉积过程中的成核和生长机理并通过形貌控制来合成过渡金属纳米催化剂具有重要意义。尽管近年来已取得了一些进展,但制备具有尺寸和形状可调节特性的过渡金属纳米粒子仍然具有挑战性<sup>[11-12]</sup>。韦露等<sup>[13]</sup>系统研究了铁在3种低共熔溶剂中的电沉积行为以及过电位等对铁沉积物形貌的影响,发现在低共熔溶剂 DES1 和 DES2 中,过电位对铁沉积物形貌没有明显影响,但在 DES3 中过电位对铁纳米粒子的形貌有显著影响。但未能对其形貌进行调控,未能实现通过形貌控制来提升铁纳米粒子的性能。

苯酚类物质是许多工业化学品、染料和药物的重要原料,但是具有较大的毒性,对环境和人体健康可能产生负面影响。过渡金属纳米材料可以提供丰富的活性位点和良好的导电性能,从而加速苯酚类物质的转化速率<sup>[14]</sup>。此外,过渡金属纳米材料还可

以通过调控其形貌、结构和组成等因素,进一步优化其电催化性能,提高苯酚类物质的降解效率和选择性。本文运用电化学循环伏安法和恒电位沉积法,在玻碳电极表面成功制备出具有不同形貌的 Fe 纳米粒子,并研究了 Fe 纳米材料的形貌对邻苯二酚和对苯二酚催化性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

铁氰化钾、氢氧化钠、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、乙醇,分析纯,上海泰坦科技股份有限公司;硫酸亚铁、无水硫酸钠、对苯二酚、邻苯二酚,分析纯,北京伊诺凯科技有限公司。

扫描电子显微镜(ZEISS,德国);超纯水制备仪(优普 UPT-II 型,中国);电化学工作站 CHI660E(上海辰华仪器有限公司)。电化学实验中采用三电极体系,玻碳电极为工作电极,铂丝电极为对电极,饱和甘汞电极为参比电极。

### 1.2 实验过程

#### 1.2.1 裸电极的预处理

先将玻碳电极( $d = 3 \text{ mm}$ )用金相砂纸打磨后,再用  $1.0$ 、 $0.3 \text{ }\mu\text{m}$  和  $0.05 \text{ }\mu\text{m}$  的抛光粉(氧化铝抛光粉)抛光,使其成镜面,每次抛光后用二次蒸馏水冲洗超声一次,然后用乙醇和二次蒸馏水依次超声清洗,每次  $5 \text{ min}$ 。最后用二次蒸馏水淋洗,在铁氰化钾溶液中循环伏安表征合格后备用。

#### 1.2.2 裸电极活性面积的计算

通过 Randles-Sevcik equation 方程研究了玻碳电极的电活性面积,公式为:

$$I_p = 2.69 \times 10^{-5} AD^{1/2} n^{3/2} V^{1/2} C$$

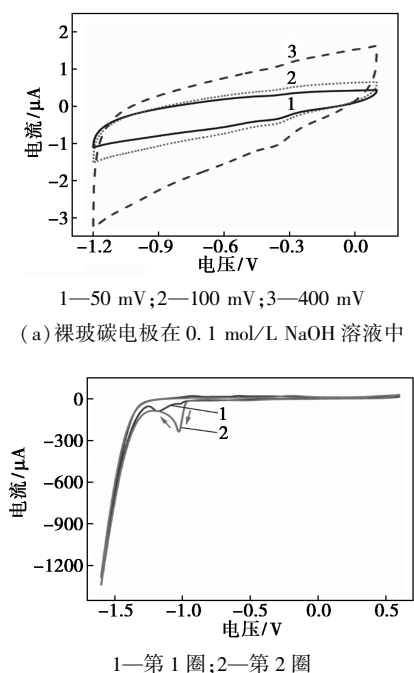
其中, $A$  为电极电活性面积,  $\text{cm}^2$ ;  $D$  为溶液中探针分子的扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $n$  为探针分子反应的电子数;  $V$  为电位扫描速率,  $\text{V}/\text{s}$ ;  $C$  为探针分子的浓度,  $\text{mol}/\text{L}$ 。本文利用  $1.0 \text{ mM}$  铁氰化钾溶液作为探针分子溶液来研究玻碳电极的电活性面积。

## 2 结果与讨论

电化学沉积法作为一种重要的材料制备技术,在制备 Fe 纳米粒子方面显示出巨大的潜力和优势。通过控制电化学反应条件以及调节电沉积参数,可以实现对 Fe 纳米粒子尺寸、形貌和结构的调控。电化学循环伏安和恒电位沉积法是两种常见的电化学沉积法,本文采用这两种电化学沉积法实现 Fe 纳米粒子在玻碳电极表面的沉积。

## 2.1 循环伏安法制备 Fe 纳米粒子

将裸玻碳电极用抛光粉抛光并超声清洗,在铁氰化钾溶液中循环伏安表征合格后备用。为了除去可能存在于电极表面的杂质,本文将表征合格的玻碳电极置于 0.1 mol/L NaOH 溶液中进行循环伏安扫描,扫描电位范围为 -1.2~0.1 V,如图 1(a)所示。从图中可以看出,在 -0.3 V 左右出现了微弱的还原峰,为溶液中溶解氧的还原峰。图中并没有其他氧化还原峰出现,说明该玻碳电极已处理干净。在含有 0.02 mol/L FeSO<sub>4</sub> 和 0.1 mol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的沉积液中通氮气 10 min 除去沉积液中的溶解氧,再利用循环伏安法沉积 Fe 纳米粒子,如图 1(b)所示。在第 1 圈的电位负向扫描过程中,当电位扫描至 -1.2 V 左右时出现了较弱的还原峰,对应 Fe<sup>2+</sup> 在玻碳电极上的还原,少量 Fe 晶核在玻碳电极表面发生了沉积;之后阴极电流迅速增大,这主要是因为 Fe<sup>2+</sup> 很难在洁净的电极表面沉积,需要较大的沉积过电位。从第 2 圈的电位扫描过程中发现,Fe<sup>2+</sup> 的起始还原电位提前至 -1.025 V 左右,对应 Fe<sup>2+</sup> 在电极表面 Fe 晶核上的还原,这说明 Fe<sup>2+</sup> 在 Fe 晶核上沉积所需的过电位值明显低于其在玻碳电极表面沉积所需的过电位值。因此,利用循环伏安法在裸玻碳电极表面成功制备出 Fe 纳米粒子,该方法制备得到的 Fe 纳米粒子命名为 Fe-1 纳米粒子。



(a) 裸玻碳电极在 0.1 mol/L NaOH 溶液中  
(b) 裸玻碳电极在含有 0.02 mol/L FeSO<sub>4</sub> 和 0.1 mol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 沉积液 (pH 3.5) 中,扫速:50 mV/s

图 1 循环伏安图

循环伏安法沉积 Fe 纳米粒子时,每一周的沉积过程都要经历电位由正到负的变化,这对纳米材料特定晶面的生长极为不利,且在过大的沉积电位下不利于所形成晶种的稳定生长。因此需要寻找一个合适的电位,在该电位下 Fe<sup>2+</sup> 既能够在裸玻碳电极表面成核,但其成核时间又不会太过短暂。

## 2.2 恒电位法制备 Fe 纳米粒子

恒电位法是在恒定电位下使金属前驱体在电极表面发生沉积,该技术具有高纯度、高均匀性和高精密度等优点,能够在电极表面制备出具有优异性能的催化剂<sup>[15-16]</sup>。通过实验发现 -1.025 V 是一个较为合适的沉积电位,图 2 为采用恒电位法在 -1.025 V 电位下的沉积曲线。基于沉积曲线斜率的变化将该生长阶段大致分为 2 个阶段:(1) a~b 阶段为 Fe<sup>2+</sup> 在玻碳电极表面成核以及 Fe<sup>2+</sup> 在 Fe 晶核表面快速生长的阶段,该阶段属于扩散控制的阶段。t<sub>a</sub> 处时在电极表面首次出现成核现象,沉积反应最为剧烈,因此产生的沉积电流最强。随后由于 Fe 晶核在经过初级阶段的成长后已由微小的晶粒长成具有一定体积和表面积的较大的晶粒。随着晶粒的增加,其表面积逐渐增大。电极表面附近沉积液中所能提供的 Fe<sup>2+</sup> 离子浓度已经不能完全满足反应的要求,需要从较远处的溶液中通过扩散来弥补,而扩散的 Fe<sup>2+</sup> 并不能完全弥补相应的浓度“空缺”,因此出现沉积电流逐渐下降的趋势。(2) b~c 阶段为极限扩散控制的阶段,电极附近区域沉积液中的 Fe<sup>2+</sup> 被消耗殆尽,沉积所需的 Fe<sup>2+</sup> 离子完全由本体沉积液中通过扩散过程来提供,故在该阶段的沉积过程中,还原电流维持在一个较低但稳定的电流值上。因此,该方法在玻碳电极表面沉积 Fe 纳米粒子时,晶核形成的电位适中,成核之后的生长过程也较稳定,有利于特定晶面的生长,将该方法制备得到的 Fe 纳米粒子命名为 Fe-2 纳米粒子。

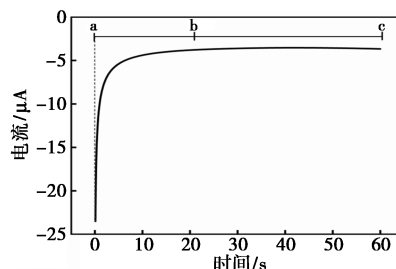
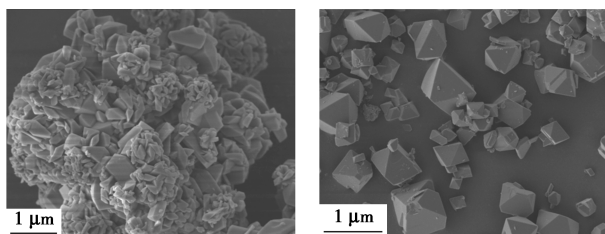


图 2 裸玻碳电极在含有 0.02 mol/L FeSO<sub>4</sub> 和 0.1 mol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的沉积液 (pH=3.5) 中的恒电位沉积曲线

## 2.3 形貌表征

为了更直观地研究所制备材料的形貌特征及颗

粒分布情况,采用扫描电子显微镜(SEM)对材料进行了表征,如图3所示。从图3(a)中可以看出,循环伏安法制备的 Fe-1 纳米材料呈片状结构,分布不够均匀,发生了明显的团聚现象。从该图中可以看出该材料各晶面平整度不是很好,这主要是出于其沉积过程是一个沉积电位不断变化的过程,而变化的沉积电位不利于单一晶面的完美生长,更容易产生台阶或者缺陷。从图3(b)中可以看出,恒电位法制备的 Fe-2 纳米颗粒具有类似于立方体的结构,颗粒分布比较均匀,未出现团聚现象。与 Fe-1 纳米材料相比,Fe-2 纳米材料各晶面平整度较好,且不存在表面起伏和坑洼的现象。

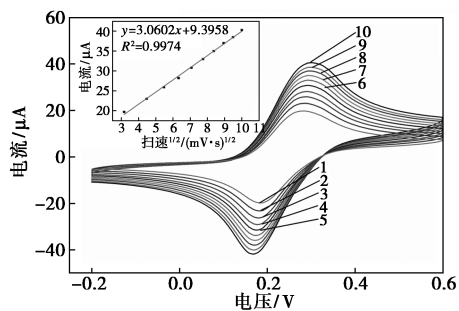


(a) Fe-1 纳米粒子修饰电极 (b) Fe-2 纳米粒子修饰电极

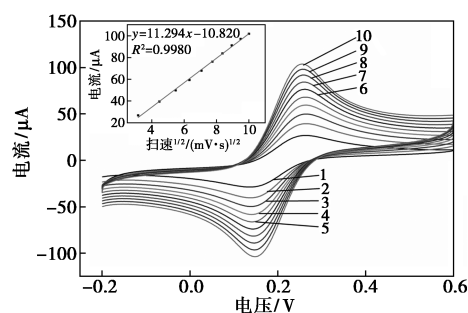
图3 纳米粒子的 SEM 图

## 2.4 修饰电极表面积的计算

利用 Randles-Sevcik equation 方程研究了两种 Fe 纳米粒子修饰的玻碳电极电活性面积。通过对氧化峰电流和扫描速度之间关系的研究,发现修饰电极在铁氰化钾溶液中的氧化峰电流与扫速的平方根之间存在一定的线性关系,如图4所示。这说明探针分子在该修饰电极表面上的电化学反应也属于典型的扩散控制过程<sup>[17]</sup>。根据曲线斜率计算得到 Fe-1 纳米粒子修饰的裸玻碳电极电活性面积为  $0.163 \text{ cm}^2$ , Fe-2 纳米粒子修饰的玻碳电极电活性面积为  $1.485 \text{ cm}^2$ ,均远大于裸玻碳电极的电活性面积( $0.067 \text{ cm}^2$ )。可以看出这两种修饰电极的电活性面积都要比未修饰任何纳米材料的裸电极电活性面积大地多。因此,可以推断采用恒电位法制备的 Fe-2 纳米粒子修饰电极具有更好的电催化性能。



(a) Fe-1 纳米材料修饰电极



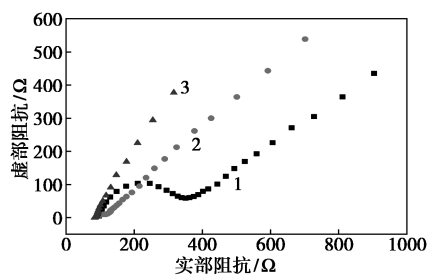
(b) Fe-2 纳米材料修饰电极

1—10 mV/s; 2—20 mV/s; 3—30 mV/s; 4—40 mV/s; 5—50 mV/s; 6—60 mV/s; 7—70 mV/s; 8—80 mV/s; 9—90 mV/s; 10—100 mV/s

图4 修饰电极在  $1.0 \text{ mM}$  铁氰化钾溶液中的循环伏安图,插图为对应修饰电极在  $1.0 \text{ mM}$  铁氰化钾溶液中的循环伏安峰电流和扫速的关系

## 2.5 修饰电极的电催化性能研究

电化学阻抗谱(EIS)常用来研究电极材料的电子转移能力。本文借助 EIS 对不同修饰电极表面的导电能力进行了表征。图5是裸电极和两种修饰电极在铁氰化钾溶液中的交流阻抗图。从图中可以看出,裸电极在高频区表现出明显的半圆图形,说明该电极表面的界面电子转移电阻较大;Fe-1 纳米粒子修饰电极和 Fe-2 纳米粒子修饰电极在高频区电阻效应不明显,说明裸玻碳电极修饰 Fe 纳米粒子后导电性明显增加,加快了电子在其表面的传递速率,因此修饰电极具有更好的导电性能。对比两种修饰电极,发现恒电位法制备的 Fe-2 纳米粒子修饰电极在高频区电阻效应最小,具有最好的导电性能。

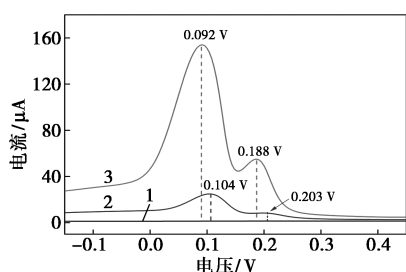


1—裸电极; 2—Fe-1 修饰电极; 3—Fe-2 修饰电极

图5 不同电极在  $5.0 \text{ mM}$  铁氰化钾溶液中的阻抗图

过渡金属纳米材料可以提供丰富的活性位点和良好的电催化性能,可以加速苯酚类物质的转化速率。邻苯二酚(Catechol, CC)和对苯二酚(Hydroquinone, HQ)是两种常用的化学药品原料,其结构非常相似,导致二者的电化学信号非常接近,一般情况下很难将二者分离开来。为了研究两种 Fe 纳米材料的电催化性能,采用电化学方法研究了两种修饰电极在

含有  $1.0 \mu\text{M}$  CC 和 HQ 的 PBS 缓冲液中的电化学行为,如图 6 所示。从图中可以看出裸电极在该缓冲溶液中无法检测到两种酚类物质的电化学信号, Fe-1 修饰电极在  $0.104 \text{ V}$  的位置出现了较强的信号,为 HQ 的氧化峰,在  $0.203 \text{ V}$  的位置出现的微弱信号为 CC 的氧化峰;而 Fe-2 修饰电极对 CC 和 HQ 具有明显的电化学信号,且对 CC 和 HQ 的氧化电位均小于 Fe-1 修饰电极,分别在  $0.092 \text{ V}$  和  $0.188 \text{ V}$  出现了 HQ 和 CC 的氧化峰。说明 Fe-2 修饰电极对两种苯酚类物质具有优异的电催化性能,且优于 Fe-1 修饰电极对两种苯酚类物质的催化性能。



1—裸电极;2—Fe-1 修饰电极;3—Fe-2 修饰电极

图 6 不同电极在含有  $1.0 \mu\text{M}$  CC 和  $1.0 \mu\text{M}$  HQ 的 PBS 缓冲溶液中的差示脉冲伏安图

### 3 结论

利用电化学循环伏安法和恒电位法制备得到不同形貌的 Fe 纳米材料,并研究了不同形貌的纳米材料对酚类物质催化性能的影响。通过对两种沉积过程的研究,发现循环伏安法在沉积 Fe 纳米粒子时,成核时间太过短暂,且在过大的沉积电位下不利于所形成晶种的稳定生长,制备得到的 Fe-1 纳米粒子分布不够均匀,且颗粒间发生了明显的团聚现象。恒电位法得到的 Fe-2 纳米粒子分布均匀且具有立方体结构,说明该方法更适用于 Fe 纳米颗粒的生长。通过对修饰电极的活性面积计算,可以得出 Fe-2 纳米粒子修饰电极具有最大的活性面积,其活性面积是 Fe-1 纳米粒子修饰电极的 9 倍。同时,修饰电极的导电性研究表明,Fe-2 纳米粒子的导电性最好,电子转移率最大。此外,通过研究不同修饰电极其对邻苯二酚和对苯二酚的电催化性能,发现 Fe-2 纳米粒子修饰电极对酚类物质表现出明显的电化学信号,且氧化电位更小,说明恒电位法制备的 Fe 纳米粒子对酚类物质具有更好的电催化性能。但是,过渡金属纳米材料在电催化领域还面临着一些挑战和问题,例如,如何进一步提高其催化效

率和稳定性,以及如何降低其生产成本等,这些问题需要不断探索和研究,以实现过渡金属纳米材料在电催化领域的广泛应用和可持续发展。

### 参考文献

- [1] Xia Y, Xiong Y, Lim B, *et al.* Shape-controlled synthesis of metal nanocrystals: Simple chemistry meets complex physics? [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2009, 48(1): 60-103.
- [2] Ruditskiy A, Peng H, Xia Y. Shape-controlled metal nanocrystals for heterogeneous catalysis [J]. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2016, 7: 327-348.
- [3] Xia Z, Guo S. Strain engineering of metal-based nanomaterials for energy electrocatalysis [J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(12): 3265-3278.
- [4] Strach M, Mantella V, Pankhurst J, *et al.* Insights into reaction intermediates to predict synthetic pathways for shape-controlled metal nanocrystals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141(41): 16312-16322.
- [5] Liang H, Guo J, Shi Y, *et al.* Porous yolk-shell Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles with controlled exposure of highly active Fe(0) for cancer therapy [J]. *Biomaterials*, 2021, 268: 120530.
- [6] 姚依璇, 鲁长波, 张洪伟, 等. [Fe] 在环氧化物选择性开环反应中的催化性能 [J]. *高等学校化学学报*, 2023, 44(8): 182-189.
- [7] Subramaniam T, Balarabe I, Harshini S, *et al.* The effect of the crystallographic form of MnO<sub>2</sub> on the kinetics of oxygen reduction and evolution reaction [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 303: 127845.
- [8] Sharapa D, Doronkin D, Studt F, *et al.* Moving frontiers in transition metal catalysis: Synthesis, characterization and modeling [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(26): 1807381.
- [9] Azfar A, Kasim M, Lokman I, *et al.* Comparative study on photocatalytic activity of transition metals (Ag and Ni)-doped ZnO nanomaterials synthesized via sol-gel method [J]. *Royal Society Open Science*, 2020, 7(2): 191590.
- [10] Maduraiveeran G, Sasidharan M, Jin W. Earth-abundant transition metal and metal oxide nanomaterials: Synthesis and electrochemical applications [J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 106: 100574.
- [11] 徐志勇, 赵文波, 柴牧原, 等. 微/纳米过渡金属氧化物的液相合成及其应用 [J]. *化工新型材料*, 2019, 47(4): 38-42.
- [12] Ahmadi M, Zabihi O, Jeon S, *et al.* 2D transition metal dichalcogenide nanomaterials: Advances, opportunities, and challenges in multi-functional polymer nanocomposites [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(3): 845-883.
- [13] 韦露, 毛宇杰, 赵新生, 等. 基于低共熔溶剂电沉积铁纳米晶体: 过电位、氢键给体对形貌的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(3): 873-878.
- [14] Dehmani Y, Dridi D, Lamhasni T, *et al.* Review of phenol adsorption on transition metal oxides and other adsorbents [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49: 102965.
- [15] Winter E, Schmidt T, Trabesinger S. Potentiostatic lithium plating as a fast method for electrolyte evaluation in lithium metal batteries [J]. *Electrochimica Acta*, 2023, 439: 141547.
- [16] Lin C, Ding K, Chou K. Direct electrodeposition of micropatterned Prussian blue films on indium tin oxide/polyethylene terephthalate substrate by electrostatic field-assisted potentiostatic and pulse potentiostatic deposition methods [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 342: 226-232.
- [17] Mamme M, Deconinck J, Ustaroz J. Transition between kinetic and diffusion control during the initial stages of electrochemical growth using numerical modelling [J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 258: 662-668. ■