

·教育与教学·

聚合物量子点的制备及其对Zn-MnO₂正极性能的改性 ——一个大学化学综合实验设计

邓雅婷 杨宗献* 魏济时*

(河南大学化学与分子科学学院 开封 475004)

摘要: 融合材料合成、表征与性能测试于一体,设计了一个适合高年级本科生的大学化学综合实验。以聚乙烯亚胺(polyethyleneimine, PEI)和对苯二酚为原料,在水相体系中通过自组装和交联制备具有荧光特性的氨基聚合物量子点(amino polymer dots, APDs),并采用紫外-可见吸收光谱、荧光光谱和红外光谱等光谱手段以及透射电子显微镜等对其光学特性和结构特征进行表征。进一步将APDs包覆于 δ -MnO₂表面构建复合正极材料,组装Zn-MnO₂电池,通过循环伏安、恒流充放电等电化学测试方法,探究APDs对电极材料比容量、倍率性能及循环稳定性的影响。本实验将聚合物量子点的合成、表征与应用引入本科教学,有助于学生理解界面调控对储能性能的优化机制,并系统训练学生的材料制备、仪器操作与数据分析等综合实践能力。

关键词: 聚合物量子点; Zn-MnO₂ 电池; 电化学; 综合实验; 实验教学

Preparation of Polymer Quantum Dots and Their Modification of Zn-MnO₂ Cathode Performance —A Comprehensive Experimental Design for Undergraduate Chemistry

DENG Ya-ting, YANG Zong-xian*, WEI Ji-shi*

(College of Chemistry and Molecular Sciences, Henan University, Kaifeng 475004)

Abstract: This experiment integrates material synthesis, characterization, and performance testing into a comprehensive undergraduate chemistry laboratory designed for senior students to conduct. In this study, polyethyleneimine (PEI) and hydroquinone were used as raw materials to prepare fluorescent amino polymer dots (APDs) through self-assembly and cross-linking in an aqueous system. The optical and structural characteristics of the APDs were investigated using ultraviolet-visible absorption spectroscopy, fluorescence spectroscopy, infrared spectroscopy, and transmission electron microscopy. Subsequently, APDs were coated on the surface of δ -MnO₂ to construct a composite cathode material, and Zn-MnO₂ batteries were assembled accordingly. Electrochemical measurements, including cyclic voltammetry and galvanostatic charge-discharge tests, were performed to investigate the effects of the APDs on the specific capacity, rate performance, and cycling stability of the cathode material. This experiment integrates the synthesis, characterization, and application of polymer quantum dots into undergraduate teaching, which helps students understand the optimization mechanism of interface regulation on energy storage performance and systematically trains their comprehensive practical abilities in material preparation,

河南大学高分子研究专辑; 2026-01-30 收稿, 2026-03-12 录用, 2026-05-28 网络出版

基金项目: 国家自然科学基金(基金号 12505285, 22308086), 国家资助博士后研究人员计划C档资助(项目号 GZC20240394), 河南省自然科学基金青年项目(基金号 252300423684)

* 通信联系人: 杨宗献, E-mail: yangzx@henu.edu.cn; 魏济时, E-mail: ecjsw@henu.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.055

instrument operation, and data analysis.

Keywords: Polymer quantum dots; Zn-MnO₂ batteries; Electrochemistry; Comprehensive experiment; Laboratory teaching

引用: 邓雅婷, 杨宗献, 魏济时. 聚合物量子点的制备及其对 Zn-MnO₂ 正极性能的改性: 一个大学化学综合实验设计. 高分子通报, 2026, 39(7), 1260–1268.

Citation: Deng, Y. T.; Yang, Z. X.; Wei, J. S. Preparation of polymer quantum dots and their modification of Zn-MnO₂ cathode performance—a comprehensive experimental design for undergraduate chemistry. *Polym. Bull. (in Chinese)*, 2026, 39(7), 1260–1268.

随着能源化学与材料科学的快速发展, 将具有代表性的前沿研究成果转化为本科实验教学内容, 对于激发学生兴趣、培养创新思维至关重要^[1-3]。水系锌离子电池因其安全性高、成本低和环境友好等优点, 成为本实验引入的储能研究对象^[4]。其中, 资源丰富且结构稳定的 δ -MnO₂作为一种典型的锌离子电池正极材料, 在充放电循环过程中容易出现结构退化与容量衰减的问题, 限制了其进一步的应用^[5-7]。因此, 通过简单可行的界面调控手段改善 δ -MnO₂电极材料性能, 为本科综合实验提供了良好的教学切入点。

聚合物量子点(PDs)作为一种新兴的纳米修饰材料, 具有结构尺寸可控、表面官能团丰富等特性, 不仅表现出良好的光学特性, 而且可通过分子结构设计实验功能化调控, 因而适合在教学实验中进行系统表征与讨论。将聚合物量子点引入电极材料界面, 在不改变其他主体的前提下实现界面改性^[8], 有助于学生直观理解界面调控对电化学性能的影响, 为材料合成与性能研究相结合的本科实验教学提供了典型案例^[9,10]。

基于上述背景, 本实验将纳米材料界面改性这一研究热点设计成一个适合高年级本科生的大学化学综合实验。学生以PEI和对苯二酚为原料, 亲手制备富含氨基的聚合物量子点(APDs)^[11,12], 并对其光学性质与结构特性进行系统表征; 进一步将APDs包覆于 δ -MnO₂表面, 组装电池并通过电化学性能测试验证改性效果。该实验涵盖材料合成、光谱分析、显微观察及电化学性能测试等多个环节, 有助于学生理解材料结构、界面调控与电化学性能之间的内在联系, 并提升综合实验与科学分析能力。

1 实验部分

1.1 实验目的

本实验通过设计制备APDs, 并探究其在电化学领域的实际应用, 帮助学生系统地理解聚合物功能材料在储能体系中的作用机制, 具体包括掌握以PEI为原料制备APDs的基本合成方法, 同时理解水相中合成APDs的反应原理; 学习并应用多种手段对APDs的结构与性能进行表征分析, 例如紫外-可见吸收光谱、红外光谱和荧光光谱等; 之后通过构建APDs-MnO₂复合材料并与未改进的 δ -MnO₂进行对比测试, 帮助学生理解APDs包覆对 δ -MnO₂电化学性能的影响, 引导学生思考聚合物量子点在电化学材料改性中的潜在应用价值, 培养学生将基础化学原理与实际应用问题相结合的能力。

1.2 实验原理

原料PEI中富含多级氨基官能团(伯胺、仲胺和叔胺), 具有较高的化学反应活性、良好的水溶性和分子柔性, 可在溶液体系中作为反应的基本骨架和功能性载体。对苯二酚作为交联与结构调控单元, 主要通过多位点氢键作用与PEI中的一NH/—NH₂基团发生相互作用, 诱导形成非共价交联的聚合物量子点^[13,14]。反应过程中, 对苯二酚不仅参与构建分子间弱相互作用, 还促进PEI链弯曲收缩和局部构象重排, 使原本线性或支化的PEI分子逐渐发生限区域聚集和纳米尺度的组装, 最终形成形貌较为均匀受限的APDs^[15,16]。以支化PEI分子为代表的合成机理如图1所示。此外, 所制备的APDs可通过强静电相互作用与 δ -MnO₂实现有效复合^[17], 为后续界面调控与电化学性能优化奠定基础。

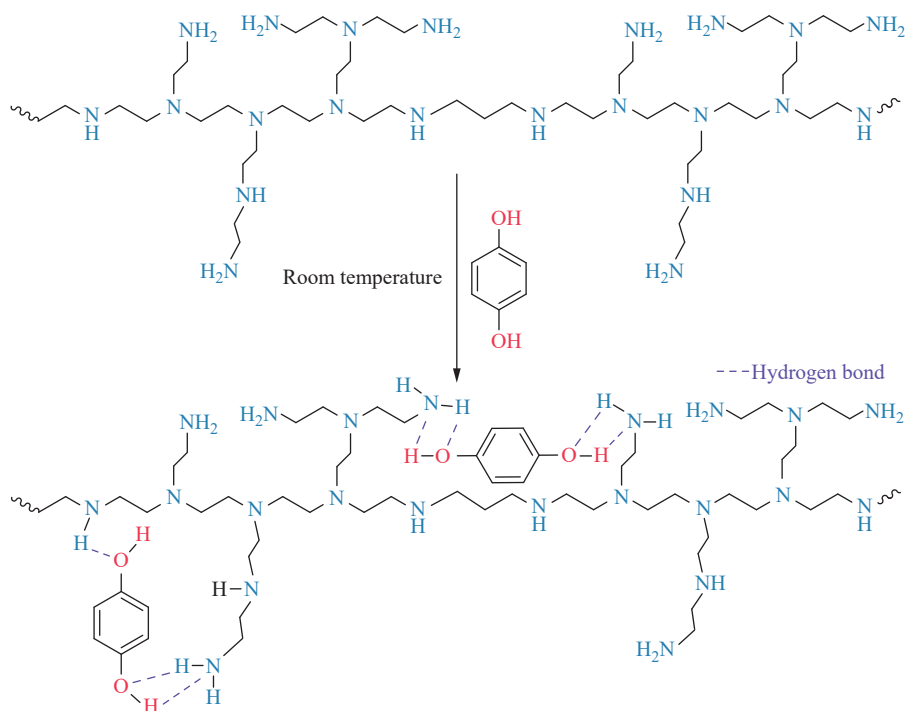


图1 支化PEI与对苯二酚构筑APDs的合成机理示意图

Figure 1 Schematic diagram of the synthetic mechanism for the construction of APDs using branched PEI and hydroquinone

1.3 实验试剂与仪器

聚乙烯亚胺(PEI, Macklin, 99%, MW=1800, 上海麦克林生化科技股份有限公司), 对苯二酚(天力, 98%, 天津市天力化学试剂有限公司), 蒸馏水(AR, 三毛水业有限公司), δ -MnO₂、硫酸锰(MnSO₄)、磷酸二氢钠(99%, 上海毕得医药科技有限公司), *N*-甲基-2-吡咯烷酮(NMP, AR, 广东省高纯化学试剂工程技术研究中心), 硫酸锌(ZnSO₄, 99%, 上海皓鸿生物医药科技有限公司), 聚偏氟乙烯(PVDF, 阿科玛 HSV900, 广东科纳化学试剂有限公司), 乙炔黑(0012306, 深圳科晶智达科技有限公司), 铝箔(30 μ m, 99.99%)和钛箔(20 μ m, 99.99%, 昆山盛世景新材料有限公司), 玻璃纤维隔膜(孔径2.7 μ m, Whatman GF/D, 深圳博森格科技有限公司)。

电子天平(型号PR224ZH/E, 奥豪斯仪器(常州)有限公司), 烧杯、量筒(10、100 mL, 四川蜀玻(集团)有限责任公司), 旋转蒸发仪(型号RE-2000B, 上海亚荣生化仪器厂), 真空冷冻干燥机(型号YTLG-10B, 上海叶拓科技有限公司), 高速离心机(型号TG16-WS, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司), 匀浆机(型号MSK-SFM-12M, 合肥科晶材料技术有限公司), 真空干燥箱(型号DZF-

6050, 上海精宏实验设备有限公司), 高分辨率投射电子显微镜(型号JEM-2100F, 日本电子株式会社), 傅里叶变换红外光谱仪(型号VERTEX 70, 德国布鲁克光谱仪器公司), 紫外-可见分光光度计(型号TU-1805PC, 北京普析通用仪器有限责任公司), 高灵敏荧光延迟磷光测试光谱仪(型号FluoroMax+, 堀场制作所), Zeta电位分析仪(型号Zetasizer Nano ZS90, 英国马尔文帕纳科公司), 手动切片机(型号MSK-T10)和纽扣电池封装机(型号MSK-110)深圳科晶智达科技有限公司, 电化学工作站(型号CHI 660E, 上海辰华仪器有限公司), 恒温电池箱(型号BLC-300, 上海博翎仪器设备有限公司), 高性能电池检测系统(型号CT4008, 深圳新威新能源技术有限公司)。

1.4 实验步骤

1.4.1 APDs的制备

首先, 称取0.25 g的PEI溶于20 mL的蒸馏水中, 制备均匀的PEI稀水溶液; 随后, 再制备0.5 mL浓度为1 mg/mL的对苯二酚水溶液备用; 将制备好的对苯二酚水溶液, 在持续搅拌的条件下, 逐滴加入含PEI稀水溶液中, 并在室温下搅拌6 h, 反应过程中, 颜色从无色透明变为棕红色, 又变成橘黄色。反应完成后, 使用旋转蒸发仪(转速为80 r·min⁻¹,

水浴温度为70 °C)浓缩所得溶液。然后使用冷冻真空干燥机干燥24 h后,得到橘黄色黏稠的APDs。

1.4.2 APDs与 δ -MnO₂的复合

称取70 mg的 δ -MnO₂粉末分散至10 mL蒸馏水中,形成均匀分散液;再称取10 mg APDs溶于5 mL蒸馏水中,制备APDs水溶液。然后将APDs水溶液缓慢滴加至 δ -MnO₂分散液中,室温下以500 r/min的转速持续搅拌7 h,使二者充分复合。反应结束后,通过离心并用蒸馏水洗涤2~3次除去未复合组分,最后80 °C真空条件下干燥12 h,得到APDs-MnO₂。

1.4.3 表征测试

配制浓度为2 mg/mL的APDs水溶液,采用紫外-可见吸收光谱仪、傅里叶变换红外光谱仪和荧光光谱仪,对APDs的光学性质进行系统表征。Tauc曲线计算式如下^[18]:

$$(ah\nu)^2 = B(h\nu - E_g) \quad (1)$$

其中, α 为吸收系数, $h\nu$ 为光子能量, h 为普朗克常数 $=4.1356676969 \times 10^{-15}$ eV·s, ν 为入射光子频率, B 为常数, E_g 表示半导体禁带宽度(带隙)。

将样品APDs与 δ -MnO₂分散于蒸馏水中,超声处理,得均一的悬浮液,采用Zeta电位分析仪对水悬浊液中颗粒的表面电荷进行测试。此外,将APDs、 δ -MnO₂和APDs-MnO₂分别分散至水溶液中,通过高分辨率投射电子显微镜(HRTEM)观察其微观形貌与结构特征。通过制备扣式电池对材料的电化学性能进行表征。将 δ -MnO₂和APDs-MnO₂作为活性物质,以7:2:1(δ -MnO₂:PVDF:乙炔黑)和8:2(APDs-MnO₂:乙炔黑)的质量比,混合材料放置研钵中研磨0.5 h,再以NMP为溶剂(15~18滴)使用匀浆机制备成均匀的浆料,将所得浆料以75 μ m的厚度均匀涂覆在钛箔表面并在110 °C真空干燥箱中干燥8 h后制备正极极片(正极片的活性物质负载量为1.0~1.5 mg/cm²)。之后,以锌箔为负极,正、负极片均用极片裁片机裁剪为 ϕ 12 mm的圆片,用 ϕ 16 mm的Whatman GF/D做隔膜,并以2 mol·L⁻¹ ZnSO₄, 0.2 mol·L⁻¹ MnSO₄, 0.05 mol·L⁻¹ NaH₂PO₄水溶液为电解液^[19],组装扣式电池并进行电化学性能测试,各组电池测试条件均保持一致。

2 实验结果与分析

2.1 APDs的光谱特性观察与表征

为了观察APDs与原料PEI的不同之处,对两者的水溶液在自然光线以及紫外灯光照射下的显色情况做了对比,结果如图2所示。PEI自然光和紫外光照射条件下均显无色透明,而APDs在自然光线下显示出浅黄色,在紫外灯照射下显黄绿色荧光^[11]。

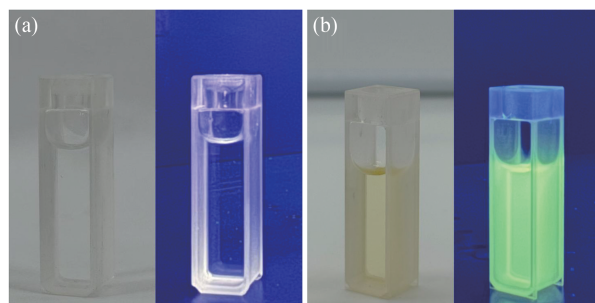


图2 (a) PEI和(b) APDs在自然光条件(左)及紫外灯照射条件(右)下的显色对比图

Figure 2 Photographs of (a) PEI and (b) APDs under natural light (left) and under UV light irradiation (right)

进一步通过光谱测试对合成的APDs的组成与特性进行表征。紫外-可见吸收光谱(图3a)显示,APDs在230和385 nm处呈现2个特征吸收峰,前者归属于对苯二酚芳香环结构的 π - π^* 跃迁,后者则来自PEI表面氨基($-\text{NH}_2$)的 n - π^* 跃迁^[20]。由于APDs的光学响应不仅源于聚合物骨架本身,还受到表面官能团与局域电子结构的显著调控,因此2个吸收峰的同时出现可证实对苯二酚与PEI之间存在稳定的分子间相互作用。根据吸收光谱数据,学生可尝试通过Tauc方程(公式1)估算APDs的光学带隙(图3b)。尽管APDs不属于严格意义上的晶态半导体,仍可得到约2.73 eV的表观光学带隙,反映出其内部的 π 共轭结构,以及表面态共同作用下的能极差。

荧光光谱(图3c)显示,APDs表现出明显的激发依赖型发射行为。当激发波长由短波长向长波长增加时,APDs的荧光发射峰强度先增强后减弱。这一现象与表面态主导的发光机制有关,说明APDs中存在多种能级分布的表面态^[21]。在较短至中等波长范围内,入射光子能量能够有效匹

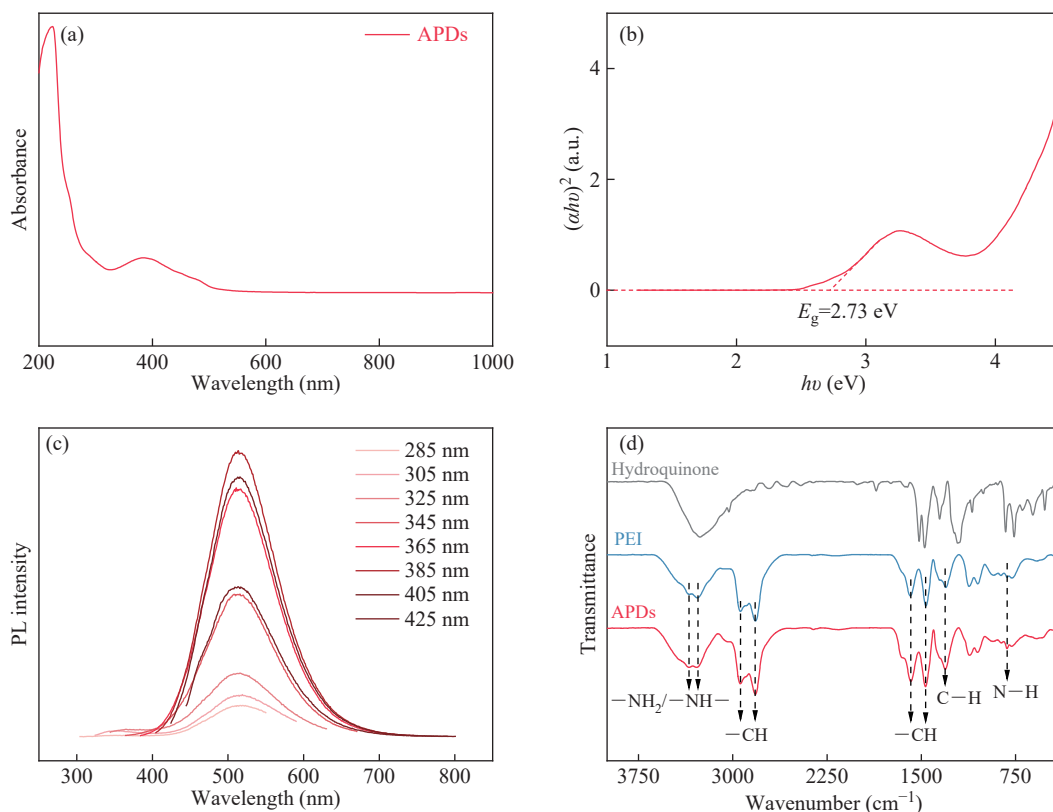


图3 APDs的组成与特性测试表征: (a) UV-Vis吸收光谱; (b)基于Tauc方程估算的表观光学带隙; (c) PL光谱; (d) FTIR光谱
Figure 3 Composition and property characterization of APDs: (a) UV-Vis absorption spectrum of APDs; (b) Apparent optical band gap estimated from the Tauc plot; (c) Photoluminescence (PL) emission spectrum; (d) Fourier transform infrared (FTIR) spectra

配并激发数量较多、分布密集的高能级表面态, 荧光强度随之增强; 而波长进一步增大时, 激发光能量降低, 仅能激发部分低能级表面态, 同时非辐射跃迁与能量耗散过程增强, 荧光辐射复合概率下降, 引起荧光强度减弱。这种激发依赖型发射行为进一步说明, 对苯二酚与PEI之间的多位点氢键相互作用构建了能级分布丰富的表面态, 为APDs的荧光发射提供了结构基础。

红外吸收光谱图(图3d)显示, APDs与PEI主要特征吸收峰的位置基本一致, 没有观察到新的特征峰出现, 也未观察到明确归属于对苯二酚的特征吸收峰, 说明在合成过程中并未引入新的共价键特征吸收峰^[22], 同时合成反应是在室温水溶液中进行的, 过程中并未引入催化剂和强氧化剂, 反应条件温和, 表明对苯二酚并未以共价键的方式参与聚合反应, 而是通过羟基与聚乙烯亚胺多级氨基之间的氢键相互作用, 调控聚合物链段的空间构型并诱导其限域聚集, 最终形成尺寸受限、表面富含多级氨基的APDs^[23]。

2.2 APDs及APDs-MnO₂形貌特征观察

通过高分辨透射电子显微镜(high-resolution

transmission electron microscope, HRTEM) 和 Zeta 电位测试, 引导学生直观观察材料的纳米结构, 并理解其复合的驱动力。

采用高分辨率透射电子显微镜分别对APDs、 δ -MnO₂ 和APDs-MnO₂ 的形貌进行了分析, 从图4(a)中可以看出, 所制备的APDs呈近球形纳米颗粒, 尺寸分布较为均匀, 直径主要集中在10~20 nm之间, 这正是量子点的典型尺寸特征。原始的 δ -MnO₂ (图4b)呈现为球形, 表面略有粗糙。对比图4(c)与4(b), 学生可以清晰地看到, APDs-MnO₂ 的表面变得更为粗糙, 其边缘及表面附着有一层较浅的、非晶态的包覆层。这些现象直接证明, APDs以柔性包覆层的形式存在于 δ -MnO₂ 表面。

测试了APDs与 δ -MnO₂ 在水溶液中的Zeta 电位以探究两者能够自发复合的原因。APDs与 δ -MnO₂ 表面的官能团在水溶液中会发生解离或离子吸附, 使颗粒表面获得静电荷, 并诱导溶液中带相反电荷的离子在其表面富集, 形成电双层结构, 而表现出可测量的Zeta 电位^[24]。测试结果表明, APDs的表面电位约为+0.03 mV, 呈微弱的

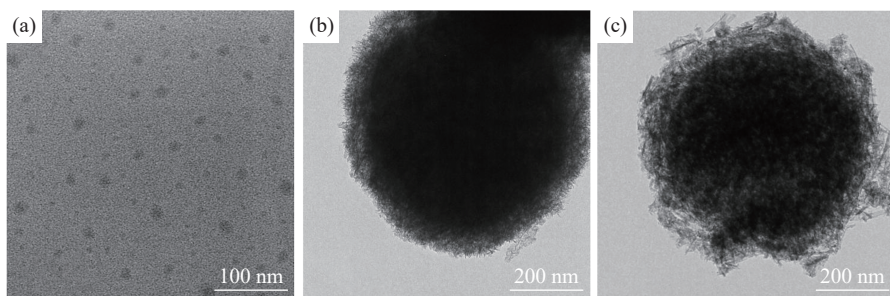


图4 HRTEM图像:(a) APDs, (b) δ -MnO₂, (c) APDs-MnO₂

Figure 4 HRTEM images: (a) APDs, (b) δ -MnO₂, (c) APDs-MnO₂

电正性。 δ -MnO₂的表面电位约为-11.37 mV, 呈明显的电负性(图5)。一般而言, 带有相反电荷的纳米颗粒在溶液中会因静电作用而相互吸引。APDs (正电性) 与 δ -MnO₂ (负电性) 之间存在的显著电势差, 为二者的紧密结合提供了强烈的静电吸引驱动力。这从原理上解释了为何APDs能够均匀、稳定地包覆在 δ -MnO₂表面。

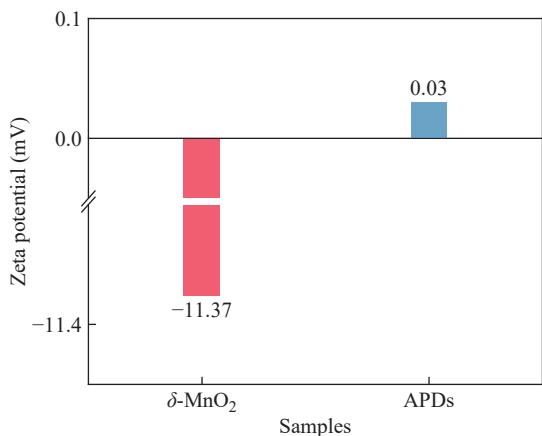


图5 APDs和 δ -MnO₂在水分散液中(质量浓度均为1 mg/mL)的Zeta电位对比

Figure 5 Comparison of zeta potentials of APDs and δ -MnO₂ in aqueous dispersions (both at mass concentration of 1 mg/mL)

2.3 δ -MnO₂和APDs-MnO₂的电化学性能测试及对比

为直观理解APDs包覆对 δ -MnO₂电化学行为的改善作用, 并使学生掌握测试和评估电极材料性能的方法, 分别以 δ -MnO₂和APDs-MnO₂为正极组装锌离子电池并对其进行电化学性能测试。

通过电化学工作站获得电池的循环伏安(CV)曲线, 图6(a)所示。在0.2 mV/s的扫速下, APDs-MnO₂呈现可逆的2对氧化(1.57 V/1.62 V)还原(1.23 V/1.36 V)峰, 而 δ -MnO₂仅在1.63 V处有1个氧化峰, 说明APDs-MnO₂具有更强的Zn²⁺/H⁺氧化还原可逆性和更小的电压极化, 证实APDs包

覆有助于降低充放电过程中的能量损失、改善反应动力学。恒流充放电(GCD)测试结果显示, 在1 A/g的电流密度下, APDs-MnO₂具有241 mAh/g的比容量, 显著高于 δ -MnO₂的177 mAh/g(图6b), 证明APDs包覆能够显著提升电极材料的储锌能力。

倍率性能测试结果如图6(c)所示。在0.5、1.0、2.0和5.0 A/g的电流密度下, APDs-MnO₂的比容量分别为247、241、212和150 mAh/g, 均高于 δ -MnO₂的217、177、101和28 mAh/g。这充分说明, APDs包覆有助于改善离子传输动力学及提高材料结构稳定性, 使其在高倍率充放电时保持高比容量。APDs-MnO₂和 δ -MnO₂的长循环性能(图6d)显示, 在1 A/g下循环200圈后, APDs-MnO₂和 δ -MnO₂的可逆容量分别为255和154 mAh/g, 通过容量保持率计算式: 容量保持率=(第n圈放电容量/初始放电容量)×100%, 计算得到APDs-MnO₂和 δ -MnO₂的保持率分别为97%和79%, 证实APDs包覆能有效提高电极材料的循环稳定性。

综合上述对比, 学生可以得出明确结论: 与原始 δ -MnO₂相比, APDs-MnO₂在反应可逆性、比容量、倍率性能和循环稳定性方面均优于未修饰的 δ -MnO₂。这一结果说明, APDs作为功能性包覆层能够优化电极材料的电化学性能, 也体现了该实验在帮助学生理解界面调控作用、训练综合分析能力方面的科学与教学价值。

3 实验组织过程与安排

本实验建议安排5学时, 分4次完成。具体安排如下:

第1次(1学时), APDs的合成与初步纯化, 材料干燥, 预习下一次实验内容。

第2次(2~3学时), APDs的光谱表征(UV-Vis, PL, FTIR), APDs-MnO₂复合材料的制备及其干燥。

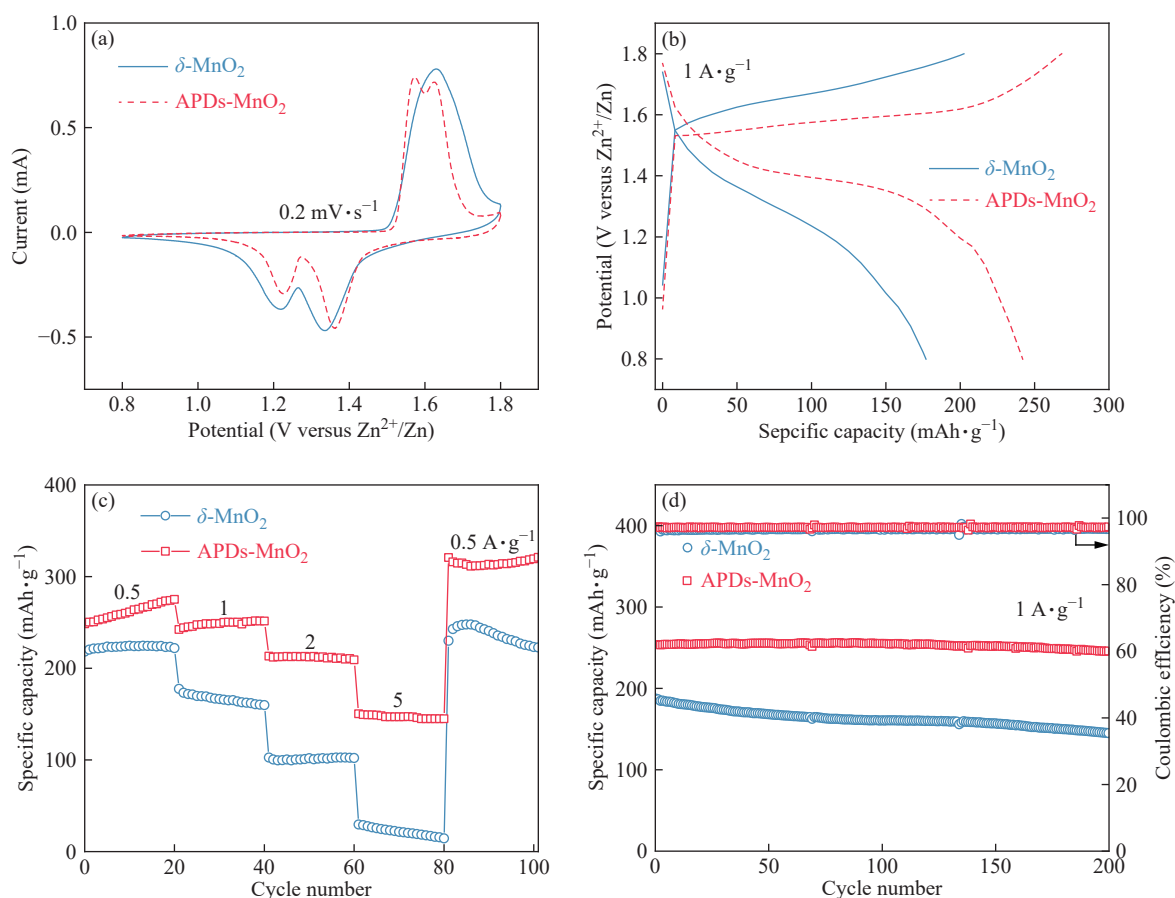


图6 $\delta\text{-MnO}_2$ 和APDs- MnO_2 的电化学性能:(a) $0.2 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 扫速下的CV曲线;(b) $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 的电流密度下的GCD曲线;(c)倍率性能;(d) $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 的电流密度下的长循环性能

Figure 6 Electrochemical properties of $\delta\text{-MnO}_2$ and APDs- MnO_2 : (a) CV of $\delta\text{-MnO}_2$ and APDs- MnO_2 at a scan rate of $0.2 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) GCD curves at a current density of $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$; (c) Rate performance; (d) Long-term cycling performance at a current density of $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$

第3次(4学时), APDs与 $\delta\text{-MnO}_2$ 的形貌表征及其Zeta电位测试, 电极制备、电池组装及电化学性能测试。

第4次(5学时), 数据处理、结果分析讨论及实验报告撰写。

预习要求学生需提前了解聚合物和聚合物量子点的区别; 掌握光谱学表征、透射电子显微镜、Zeta电位测试以及电化学测试的原理及其分析方法, 并熟悉Tauc曲线的绘制与带隙计算方法。

实验实施方式如下: 实验由教师讲解实验原理、实验具体操作及注意事项, 答疑解惑后, 分组进行实验, 每组3~5人, 实验期间鼓励学生有任何问题及时讨论沟通并向老师反馈。

实验结束后, 学生总结、分析处理、绘制实验数据, 参考论文格式撰写实验报告。

评分标准如下: 以预习报告和实验报告质量为评判基础, 结合实验过程中学生实验操作规范

性及问题解决能力, 思考题完成情况等多方面进行综合评估。

4 实验注意事项

(1) 实验过程中均需要穿好实验服、戴好防护手套, 避免实验室内有害药品以及溶剂对身体和皮肤造成伤害。

(2) 实验过程中使用的仪器和装置使用前均需要清理干净, 以防止环境及其残余药品对产物的污染。

(3) 制备电池浆料时需要合理控制浆料的黏稠度, 同时, 制作电池全过程使用胶头镊子进行组装, 电极片尽可能居中放置, 保证隔膜的分隔作用。

(4) 电池测试时注意仪器的使用方法及其参数设置。

(5) 实验结束后注意整理所用仪器设备以及

药品,整理桌面,打扫实验室。

5 思考题

聚合物量子点与传统碳量子点和聚合物在结构和调控方式上有何本质区别?

对苯二酚在APDs形成过程中起到哪些关键作用? 其是否参与了共价反应? 请结合光谱结果说明。

APDs包覆 δ -MnO₂后,电极的比容量、倍率性能和循环稳定性均得到提升,其可能的界面调控机制可能是什么? 参考其他文献进行进一步分析。

若将APDs引入其他电极材料改性上,其调控作用是否仍然有效? 请简要分析可能的适用性与局限性。

6 结语

通过设计“聚合物量子点制备—表征—应用—性能测试”的完整实验过程,将能源材料领域的前沿课题转化为本科生可操作的综合性实验。学生不仅学习了聚合物量子点的合成方法、光谱表征手段及电化学测试流程,还在此过程中逐渐掌握实验方案理解、数据处理与结果分析等基本科研技能,实现了从基础实验操作向科研思维训练的过渡。同时,在实验内容设计上,本实验内容兼具创新性与探索性。一方面,以PEI为前驱体,引入桥连体对苯二酚构筑了APDs,帮助引导学生理解高分子结构纳米尺度调控的作用机制,另一方面,通过对APDs结构、光学特性以及机理进行研究,加深学生对先进高分子纳米材料结构—性能关系的理解。此外,将该APDs引入到 δ -MnO₂正极材料表面,有效地提升其电化学性能。这一过程扩展了聚合物量子点在光学领域之外的功能扩展,激发了学生对化学与材料交叉学科的研究兴趣,为后续开展创新性研究奠定基础。

参考文献

- 1 刘利娟,王雄雷. 废旧热固性不饱和聚酯树脂可控催化降解制备水凝胶: 大学化学综合实验设计. 大学化学, **2024**, 39(11), 313–318.
- 2 Deng, Y. T.; Wang, W. S.; Aslam, T.; Wang, M. R.; Sun, Z. Q.; Sun, R. R.; Yang, Z. X.; Wang, L.; Zhang, Y. Q.; Gao, H. S.; Wei, J. S.; Bai, Y. Three-in-one: integrating polymer dots and δ -MnO₂ for powerful Zn-Mn batteries. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(33), e26256.
- 3 邓萌,夏衍,郭正虹,闫红强,方征平. 工程应用型大学“高分子物理”课程数智化教学初探. 高分子通报, **2026**, 39(1), 178–184.
- 4 程耀波,刘国珏,吴晋,魏春光. 双离子掺杂MnO₂对水系锌离子电池电性能的增强机制. 无机盐工业, **2026**, 58(6), 23–28.
- 5 刘高乐,邹嘉升,李阳,刘立亭,王行柱,闫磊. 钐掺杂 δ -MnO₂正极材料的构建及其在水系锌离子电池中的研究; 第三届光电材料与器件国际研讨会, 中国广西桂林, **2025**.
- 6 Ding, Y. X.; Zhu, K. M.; Jin, H. Q.; Gao, W. X.; Wang, B.; Bian, S.; He, R.; Wang, J. H.; Yang, H.; Denis, K.; Yu, X. F.; Zhi, C. Y.; Peng, C. Synergistic molecular engineering strategies for enhancing diffusion kinetics and interfacial stability of the δ -MnO₂ cathode in aqueous zinc-ion batteries. *Carbon Energy*, **2025**, 7(8), e70014.
- 7 Xie, D. M.; Wang, Y.; Tian, L. W.; Huang, H. J.; Sun, J. Y.; Kim, D. W.; Zhao, J. C.; Mao, J. F. Dual-functional Ca-ion-doped layered δ -MnO₂ cathode for high-performance aqueous zinc-ion batteries. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(4), 2413993.
- 8 苏凯宇,叶宇琛,李艳丽,叶先科,皮红. 多孔聚合物涂层制备技术的研究进展. 高分子通报, **2026**, 39(2), 199–212.
- 9 刘雄,刘芳菲,吐尔逊·阿不都热依木,张玉. 聚苯胺的界面聚合及其电化学性能测试: 推荐一个高分子化学综合实验. 广东化工, **2023**, 50(4), 214–216.
- 10 谭占鳌,李明华,王文立,孙振宇. 钙钛矿/有机串联叠层光伏器件的制备及性能表征: 推荐一个大学化学研究型综合实验. 大学化学, **2025**, 40(2), 312–319.
- 11 Wei, J. S.; Ding, C.; Zhang, P.; Ding, H.; Niu, X. Q.; Ma, Y. Y.; Li, C.; Wang, Y. G.; Xiong, H. M. Robust negative electrode materials derived from carbon dots and porous hydrogels for high-performance hybrid supercapacitors. *Adv. Mater.*, **2019**, 31(5), 1806197.
- 12 肖钰,孙万虹,张平,李海玲. 聚吡咯基纳米线复合材料的制备及其性能研究进展. 高分子通报, **2026**, 39(2), 213–224.
- 13 徐凌云,梅啸,裴子慧,王梅,徐颖,王文宝,史琪,姚志刚. 固态月桂酰氨基酸类分子间氢键作用及组装结构的对比研究. 化学研究与应用, **2025**, 37(8), 2253–2260.
- 14 刘青青,潘向强,张正彪,朱秀林. 氢键诱导的可控自由基聚合. 高分子通报, **2015**, (10), 66–73.
- 15 陈贇,王浩,丁兆阳,谢晶. 荧光聚合物量子点检测孔雀石绿的应用. 水产学报, **2025**, 49(12), 188–198.
- 16 许汪洋,杨同坤,李良晔,李豪,孙琪真. 基于量子点掺杂聚合物光纤的温度传感研究. 量子电子学报,

- 2025**, 42(4), 526–536.
- 17 Yang, K.; Hu, Y. Y.; Li, L. Y.; Cui, L. L.; He, L.; Wang, S. J.; Zhao, J. W.; Song, Y. F. First high-nuclearity mixed-valence polyoxometalate with hierarchical interconnected Zn^{2+} migration channels as an advanced cathode material in aqueous zinc-ion battery. *Nano Energy*, **2020**, 74, 104851.
- 18 张勇. 确定半导体禁带宽度的光谱方法. *发光学报*, **2025**, 46(7), 1271–1282.
- 19 Chen, M. F.; Yang, M.; Han, X.; Chen, J. Z.; Zhang, P. X.; Wong, C. P. Suppressing rampant and vertical deposition of cathode intermediate product *via* pH regulation toward large-capacity and high-durability Zn/MnO_2 batteries. *Adv. Mater.*, **2024**, 36(4), 2304997.
- 20 强娜, 梁浩, 解芳, 陶海霞, 李险峰, 刘立芳. 一种新型聚乙烯亚胺(PEI)载体的制备及表征. *高分子通报*, **2015**, (4), 74–80.
- 21 卢庆闯, 蔡武, 帅丰平, 任博闻, 罗振扬, 罗艳龙. 具有荧光响应性能的高强韧超分子聚氨酯材料的构筑与防伪应用. *高分子通报*, **2026**, 39(2), 250–262.
- 22 薄禄薇, 徐阳, 裴锴. 超支化聚硅氧烷改性耐高温热固性聚酰亚胺胶黏剂的设计及其性能研究. *高分子通报*, **2025**, 38(10), 1490–1499.
- 23 吕亚非. 氢键型超分子聚合物的合成、结构与应用. *高分子通报*, **2005**, 18(3), 100–108.
- 24 王如意, 陈苗, 成功, 张高文. 无皂乳液聚合法制备非球形聚苯乙烯粒子研究. *高分子通报*, **2015**, 28(2), 52–57.