

石墨烯的绿色制备、表征及典型应用综合型实验

王楠, 王芹, 王宏, 陈芳, 刘敏, 朱丽华*

华中科技大学化学与化工学院, 武汉 430074

摘要: 石墨烯具有优异的光电性能, 在“碳中和”相关技术领域有巨大的应用潜力。最近, 我们开发了一种采用过硫酸钾为磨剂机械化学制备边缘羟基化石墨烯的绿色新方法, 产物兼具石墨烯本征性能佳和水中分散性好的特点; 制备过程不需要使用有机溶剂, 能耗低, 产生的废弃物量少且无毒。本文将该科研成果转化, 设计了一个石墨烯的制备、表征及应用的综合型实验, 利用多种仪器分析方法研究石墨烯的结构及光电性能, 并与文献报道的研究结果进行了对比分析, 不仅锻炼了学生综合运用知识解决实际问题的能力, 而且有助于激发学生的创新思维, 培养“绿色化学”意识。

关键词: 双碳; 综合实验; 绿色化学; 石墨烯制备; 仪器分析

中图分类号: G64; O6

A Comprehensive Experiment on the Green Preparation, Characterization, and Applications of Graphene

Nan Wang, Qin Wang, Hong Wang, Fang Chen, Min Liu, Lihua Zhu *

School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China.

Abstract: Graphene exhibits excellent optical and electrical properties. Therefore, it presents remarkable potential application in “carbon neutral” technologies. We have recently developed a green mechanochemical method for preparation of edge-selectively hydroxylated graphene nanosheets using persulfate as the milling reagent. The as-prepared graphene exhibited the typical intrinsic properties of graphene and good dispersity in water. The preparation process did not require organic solvents, it involved low energy consumption, and produced little eco-friendly waste. Based on the aforementioned study, we designed an experiment on the green preparation, characterization, and applications of graphene. Various instrumental analytical methods were used to explore the structure and physicochemical properties of graphene and the applications of graphene as an energy storage material. We also compared the properties of the as-prepared graphene with those of graphene samples previously reported in the literature. This experiment should cultivate student ability to comprehensively use basic chemistry knowledge to solve real-life problems, stimulate their innovative thinking, and cultivate their “green chemistry” consciousness.

Key Words: Double carbon; Comprehensive experiment; Green chemistry; Graphene preparation; Instrumental analysis

“双碳”目标是我国基于构建人类命运共同体的战略高度做出的重大决策, 是实现中华民族永续发展的必然选择。“双碳”战略既涉及能源结构的优化调整, 又涉及能源利用效率的提升与节能减排等技术的发展。石墨烯作为21世纪战略新兴材料, 具有优异的导电性、热传导能力和力学性能,

收稿: 2022-11-23; 录用: 2023-01-05; 网络发表: 2023-02-10

*通讯作者, Email: lh Zhu63@hust.edu.cn

基金资助: 华中科技大学教学研究项目(202222, 2021109); 湖北省高等学校省级教学研究项目(2022061)

在新能源电池、电采暖、光热转化、润滑油、建筑、服装等领域的“节能减碳”方面有突出表现，在“碳中和”相关技术领域有巨大的应用潜力^[1-3]。

将石墨烯的制备、表征及应用引入实验课堂，让学生亲身感受明星材料的制备、表征及性能测试，激发学生对科技前沿的兴趣；通过引导学生思考如何将石墨转化为石墨烯以及结构与性能之间的关系，培养学生的创新思维能力和科研素养^[3-10]。目前，实验教学涉及的石墨烯主要有两类：氧化石墨烯(GO)^[3-7]和还原态氧化石墨烯(rGO)^[8-10]。其中，前者是以石墨为原料，采用传统或改进的Hummers法将其氧化剥离为GO；后者是利用还原剂或高温退火法将GO还原为rGO。然而，上述制备过程需使用大量的强氧化剂(如KMnO₄)、强酸(H₂SO₄、HClO₄、H₃PO₄)和/或有毒还原剂(水合肼、硼氢化钠)等，实验安全风险大，产生的废弃物多、回收难，污染大。另外，制备过程耗时较长，仅GO的制备就需要8 h以上，不利于开展实验教学。

我们开发了一种过硫酸盐辅助机械化学法制备边缘羟基化石墨烯(EHG)^[11,12]，反应在常温常压下进行球磨反应2 h，再以水为分散介质辅以超声0.5 h，得到少层EHG(厚度为2–6 nm)的产率高达70%；含氧官能团主要位于石墨烯的边缘，面内共轭结构受破坏程度极小，产物兼具石墨烯本征性能佳和水中分散性好的特点；此外，制备1 g石墨烯消耗的机械能约为2200–5300 kJ，产生的废弃物主要是无毒的硫酸盐，约为13.6–34.3 g，二者均低于文献值(分别为13000–16000 kJ·g⁻¹和269 kg·kg⁻¹)^[12]，因此，该方法是一种绿色、高效的制备方法。本文将上述研究成果转化为实验教学内容，让学生参与功能化石墨烯的制备过程，通过测试石墨烯的电化学和光热转化性能，了解石墨烯在能量转化与存储等方面的应用以及石墨烯在“节能减碳”领域的贡献。

1 实验目的

通过文献检索，了解石墨烯在助力“双碳”目标实现的相关领域之应用、石墨烯的制备和表征方法；掌握过硫酸盐辅助机械化学法制备石墨烯的原理、方法及表征手段；培养学生灵活运用多学科知识解决实际化学问题的能力。

2 实验原理

石墨烯层间的 π - π 堆叠作用和范德华力作用，导致其易团聚，难以分散在水或其他常见溶剂中，严重制约了其应用。在石墨烯结构中引入含氧官能团如羟基、羧基、环氧基可提高其亲水性，为进一步剥离、功能化提供了可能。目前，常采用氧化-还原法制备水溶性石墨烯^[3-10]，即先采用传统或改进的Hummers法制备GO，再利用还原剂或高温热处理将GO还原为rGO。但是，该法制得的石墨烯存在纳米级的孔洞或结构缺陷，面内共轭结构难以完全恢复^[13]。有研究报道^[14-16]，在高转速(500 r·min⁻¹)、长时间(12–48 h)的高能机械球磨下，石墨碳-碳键被破坏生成相应的碳自由基/离子，在干冰^[14]、草酸^[15]、SO₃^[16]等磨剂作用下可生成边缘羧基化或磺酸化石墨烯，其电导率高于GO，但后续仍需采用600 °C以上的高温热处理进一步提升其导电性。

本实验参考我们的专利技术和研究成果^[11,12]，选择过二硫酸盐(PDS)为磨剂制备石墨烯。由于PDS的O—O键能(140 kJ·mol⁻¹)比石墨C—C键能(710 kJ·mol⁻¹)低^[17,18]，在球磨能量低至6 kJ·g⁻¹，过二硫酸盐即可分解为硫酸根自由基(SO₄^{•-})^[19,20]；而SO₄^{•-}是一种选择性高、氧化能力强的活性氧自由基，可通过自发的夺电子反应进攻石墨碳，后续OH⁻加成在石墨边缘引入羟基；在此球磨条件下，机械力主要以剪切力为主，促使石墨片层之间横向滑动、剥离，对石墨烯面内共轭结构破坏较小。此外，PDS的分解产物硫酸根无毒、易溶于水，且对石墨具有插层作用。机械化学反应结束，将粗产物分散在水中洗去硫酸根，然后超声0.5 h，即可制得石墨烯分散液。该方法的反应示意图如图1所示。

采用多种仪器分析方法对石墨烯的形貌、晶型结构、组成、缺陷状态、光学性能等进行表征；采用电化学循环伏安法和光热转化实验评价其在能量转化与存储领域的应用。

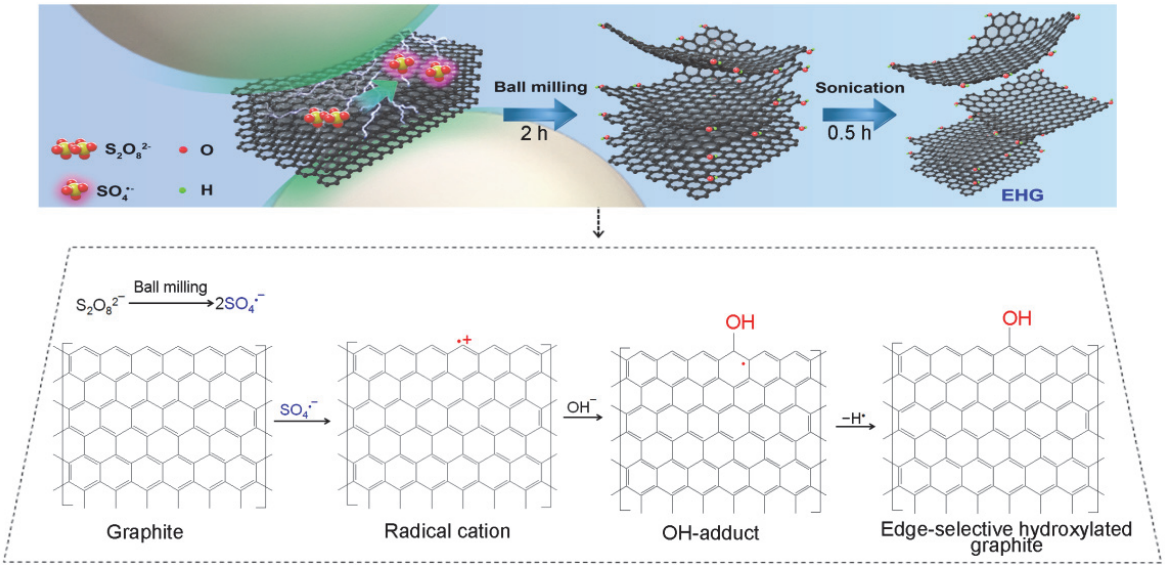


图1 过硫酸盐介导的机械化学法制备边缘羟基化石墨烯的示意图^[12]

3 实验教学内容、安排及组织形式

本综合实验涉及纳米材料制备、微观结构表征、储能性能评价等内容(表1), 适合在“双碳”相关学科(如化学、材料、能源等)高年级开设。除石墨烯的制备外, 其他实验内容可根据教学平台硬件条件自由替换或组合, 实验课堂学时灵活多变(4–14学时), 满足不同专业、不同知识背景学生的教学需求。

表1 实验教学内容及学时安排

教学环节	课程内容	建议学时
课外预习	设计实验方案	课外4周
方案研讨会	确定实验方案	1
实验操作	I) 石墨烯的制备及晶型测定	4
	II) 形貌、Raman光谱和热重测试	3
	III) UV-Vis、光热转化性能测试	2
	IV) 电化学循环伏安法测试	3
成果报告会	归纳总结实验成果, 分享经验与教训	1

本实验建议采用项目式教学法, 将学生分为6–8名成员组成的项目组, 教学内容可分为4个环节: 第1–4周, 布置项目任务, 引导学生分析问题, 课外查阅文献, 完成实验方案设计; 第5周, 实验方案研讨会, 项目组在课堂上汇报实验设计方案, 师生共同探讨, 确定实验方案; 第6–7周, 实验操作环节, 项目组成员合作完成整个实验; 第8–9周, 撰写实验报告和PPT, 举行成果报告会, 分享实验结果和经验, 教师点评总结, 提升教学质量。此外, 考虑到球磨机械化学反应耗时2 h, 在此期间可向学生介绍表征石墨烯的形貌、结构、性能的典型仪器分析方法与技术的原理及操作事项, 为后续开展的相关实验内容做准备。

4 实验内容

4.1 主要试剂和仪器

鳞片石墨(325目, 直径约50–800 μm, 厚度约1–150 μm; 简记为GF), 购于Sigma-Aldrich; 过二

硫酸钾($K_2S_2O_8$)和 N,N -二甲基甲酰胺(DMF)均为分析纯, 购于国药集团化学试剂有限公司; Nafion溶液购于阿拉丁试剂公司。

行星式球磨机(YXQM-4L, 长沙米琪仪器设备有限公司), KQ-200KDE超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司), 真空干燥箱(DZF-6030A, 上海蓝豹实验仪器有限公司), BS210S电子分析天平(北京赛多利斯有限公司), 紫外-可见分光光度计(Cary 60, 美国安捷伦科技有限公司), INVENIO R傅立叶变换红外光谱仪(FT-IR, 德国Bruker公司), D8 Advance X射线衍射仪(XRD, 德国Bruker公司), DXR激光共聚焦显微拉曼光谱仪(Raman, 美国赛默飞世尔科技公司), 原子力显微镜(AFM, SPM-9700, 日本岛津公司), 热重分析仪(TGA, STA 449 F3, 德国耐驰仪器有限公司)等。

4.2 石墨烯的制备和产率测定

参考专利及文献报道的方法^[11,12], 将定量GF (2.55 g)和 $K_2S_2O_8$ (0.20 g)加入到直径为7.2 cm、深度为7.75 cm、容量为250 mL的球磨罐(氧化锆或不锈钢材质)中, 加入数颗直径为1.5 cm的磨球, 球与料的质量比约为40:1。设置球磨转速为350 $r \cdot min^{-1}$, 球磨时间为2 h, 开启球磨反应。反应结束后, 将产物转移至500 mL烧杯, 加入适量蒸馏水, 用玻棒搅拌后静置, 待产物沉降后, 倾倒掉上层清液, 如此清洗数次至无 SO_4^{2-} 残留(钡盐检验)。将粗产物分散在100 mL中, 超声0.5 h, 即得到EHG分散液。若不使用 $K_2S_2O_8$ 为磨剂, 直接球磨处理GF得到的产物简记为m-GF。

将石墨烯分散液定量稀释至合适浓度, 转入石英比色皿中, 在紫外-可见分光光度计上测定其吸收光谱曲线(200–900 nm)。根据文献报道的质量消光系数($\alpha = 3210 L \cdot g^{-1} \cdot m^{-1}$), 计算石墨烯分散液的浓度, 进而计算其产率。

4.3 石墨烯的基本理化性质表征

采用原子力显微镜观察石墨烯的厚度。将石墨烯分散液稀释至光学透明, 滴于云母片上, 在60 °C下真空干燥, 采用AFM轻敲模式测试。

鉴于部分测试需要使用固体粉末, 将部分石墨烯分散液过滤至滤膜上, 在60 °C下真空干燥, 备用。采用XRD测试石墨烯固体粉末的晶型, 测试条件为: Cu K_α 射线源($\lambda = 0.15416$ nm, 外施加电压为40 kV, 电流为40 mA), 扫描范围为 $2\theta = 10^\circ - 80^\circ$ 。在热重测试中, 称取5 mg左右样品至坩埚中, 在 N_2 (28 $mL \cdot min^{-1}$)氛围下测试热失重曲线, 温度范围为0–900 °C, 升温速度为10 °C $\cdot min^{-1}$ 。采用激光共聚焦显微拉曼光谱仪, 在激光器波长532 nm、激光功率5 mW、曝光时间3 s、曝光3次的条件下, 测试其Raman光谱。

4.4 电化学循环伏安实验

称取约1 mg石墨烯固体, 分散于475 μL DMF溶剂中, 再加入25 μL Nafion溶液, 超声分散0.5 h, 之后用DMF稀释10倍。取上述稀释后的50 μL 石墨烯试液滴于5 mm $\times$ 5 mm电极表面, 于60 °C下烘干, 得到石墨烯修饰电极。在支持电解质为1 $mol \cdot L^{-1}$ 的 H_2SO_4 溶液中, 以甘汞电极为参比电极、Pt丝电极为对电极组成的三电极体系中, 测试石墨烯修饰电极的循环伏安曲线。

4.5 光热转化实验

移取2.0 mL适量稀释的石墨烯分散液(浓度约25 $mg \cdot L^{-1}$), 加入到石英比色皿中, 记录其在808 nm的吸光度; 之后, 将数显温度仪的探头插入到分散液中, 采用808 nm激光器为光源(光斑直径约1 cm), 设置激光功率为1 $W \cdot m^{-2}$, 开启激光光源, 每隔1 min记录分散液的温度 T , 待温度上升至最大值 T_{max} 后, 停止测试。

5 主要实验结果与讨论

5.1 石墨烯的产率及水中稳定性

石墨烯中的碳原子为 sp^2 杂化, 且形成离域大 π 键, 在紫外-可见-近红外区域具有较宽的吸收, 其特征吸收峰位于270 nm, 若其面内共轭结构被破坏, 则会引起吸收范围和吸收峰蓝移。图2a对比了EHG和GO的紫外-可见吸收光谱曲线。在200–950 nm范围内, EHG均有吸收, 在268 nm处出现最大

吸收峰,与rGO的特征吸收峰类似^[21],对应于石墨烯大 π 离域结构中的 $\pi-\pi^*$ 跃迁;而GO的最大吸收峰位于230 nm,且在波长>500 nm时吸收较微弱,表明其共轭结构受破坏程度较大。从二者的分散液的照片(图2a插图)也可看出,EHG分散液为黑色,而GO为棕黄色,进一步表明EHG对光的吸收范围更广。根据实验测得的EHG在660 nm处的吸光度及文献^[12]报道的EHG的质量吸光系数(图2b),计算得到石墨烯的产率。通过与文献^[12]报道的产率(约为65%)对比,讨论可能是哪些实验条件/操作引起了产率变化。

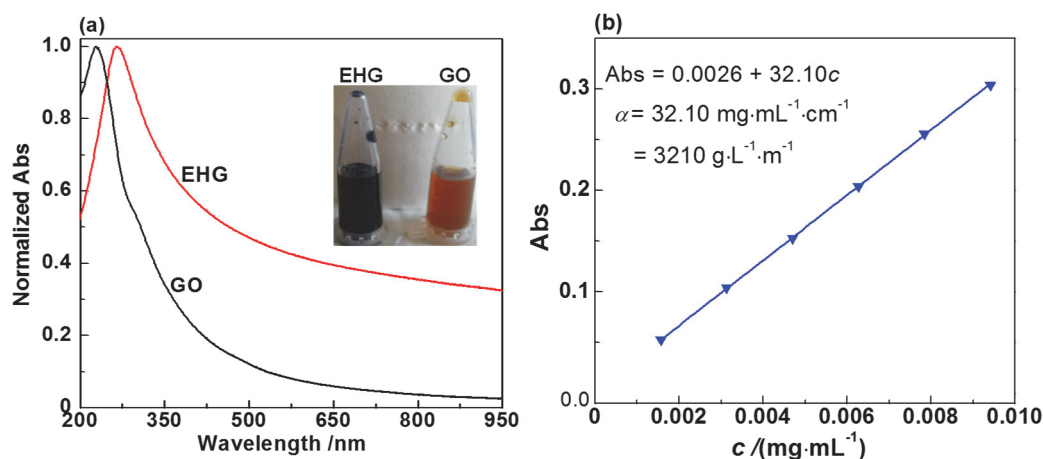


图2 (a) EHG、GO水分散液的吸收光谱曲线,内插图为二者的照片;
(b) 文献^[12]测试的EHG水分散液的标准曲线(检测波长为660 nm)

电子版为彩图

将EHG、m-GF和GO放置一定时间(>2 h),发现m-GF几乎全部沉降至容器底部,而EHG和GO则未出现明显变化。进一步,可采用紫外-可见分光光度计测试,通过对比石墨烯分散液在最大吸收波长处的吸光度随放置时间的变化,定量评价EHG和GO分散液的稳定性。由此可知,EHG具有类似于GO的良好分散性,但EHG含有的面内缺陷较少。

5.2 石墨烯的形貌、晶型及缺陷表征

将石墨烯分散液滴涂在云母片上,待溶剂挥发干,利用AFM测试其厚度。图3对比了EHG和GO的AFM图,二者的横向尺寸均为微米级,厚度分别约为3 nm和4.5 nm,表明EHG比GO的厚度更薄,含有约4层石墨烯。此外,EHG表面十分平整,而GO表面出现很多褶皱,主要是由丰富的含氧官能团引起的^[22]。由此可知,本方法制备的石墨烯中含氧官能团较少。

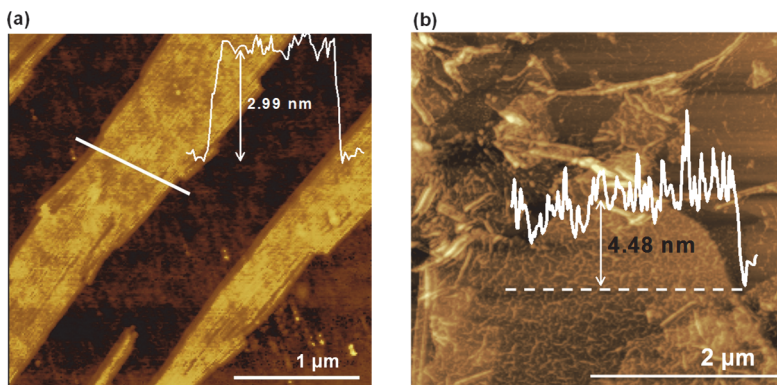


图3 EHG (a)和GO (b)的AFM图

图4a对比了EHG、GF、m-GF和GO的XRD图。鳞片石墨(即GF)在 26.4° 处的衍射峰为石墨的002晶面峰,对应的层间距为0.34 nm。若不使用 $K_2S_2O_8$ 为磨剂,直接用球磨处理GF得到的m-GF,其位于 26.4° 衍射峰较GF更强,表明 $350\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 球磨处理2h并未破坏石墨的结构,反而增强了其结晶度。相反,使用 $K_2S_2O_8$ 共磨制备的EHG在 26.4° 处的衍射峰强度显著降低,半峰宽由0.3增至0.9,且向较低衍射角方向移动约 0.5° ,表明石墨烯的晶型变差、层间距增大,但在 10.9° 并未观察到GO的特征衍射峰,表面EHG仍保留了石墨烯的本质结构。

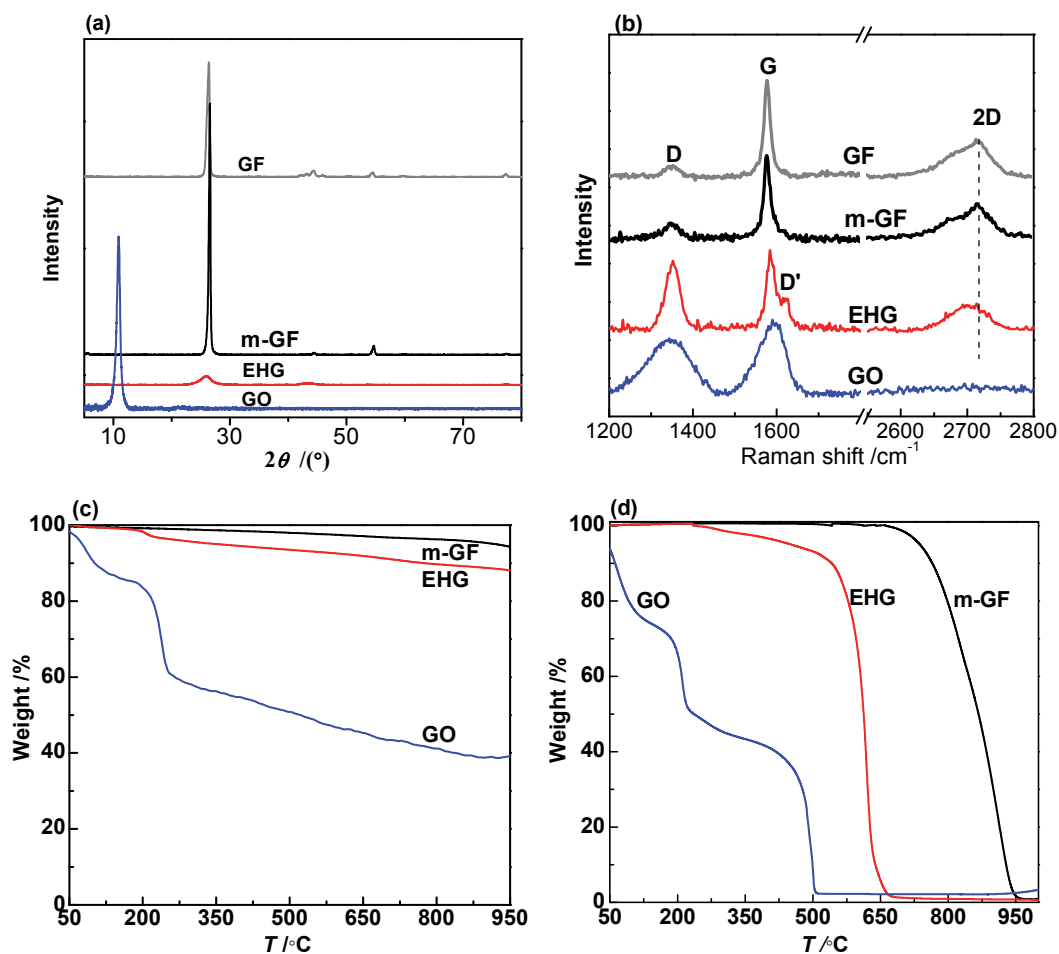


图4 石墨和石墨烯的XRD衍射图(a)、Raman光谱图(b), 以及氮气(c)和空气(d)氛围下的热重曲线

图4b对比了上述4种样品的Raman光谱图。GF和m-GF的Raman光谱曲线类似, 在 1350 、 1580 和 2720 cm^{-1} 出现了石墨的特征D峰、G峰和2D峰; 而EHG的D峰强度显著增加, 且在 1620 cm^{-1} 处出现了G峰的肩膀峰(即D'峰)。G峰对应 sp^2 杂化C原子共轭结构的面内伸缩振动, D峰是由 A_{1g} 振动模式引起的, 一般将D峰与G峰的强度的比值(即 I_D/I_G)表征石墨烯的无序化程度^[23]。EHG的 I_D/I_G 为0.98, 大于GF (0.10)和m-GF (0.17), 表明 $K_2S_2O_8$ 辅助球磨法在石墨烯上引入了含氧官能团, 增加了其无序化程度。GO与上述三个样品的Raman光谱图差异较大, D峰与G峰明显变宽, 且G峰向高波数移动了 16 cm^{-1} , 而D'峰消失或与G峰重叠, 表明GO的缺陷含量更高。Eckmann等报道, I_D/I_G 可反映石墨烯的缺陷类型, I_D/I_G 约为13时, 主要为 sp^3 杂化引起的缺陷; I_D/I_G 约为7时, 缺陷主要是面内空洞; I_D/I_G 为3.5时, 缺陷类型主要为边缘缺陷^[24]。经计算, EHG的 I_D/I_G 值约为2.4, 表明其缺陷主要位于石墨烯的边缘。

石墨烯的缺陷程度会影响其热稳定性。如图4c所示,在 N_2 气氛下,与m-GF相比,EHG在200–900 °C的失重略有增加,表明其结构中缺陷量增加。但是,即使在900 °C高温下,EHG的失重率仍不足15%。相反,对照样品GO在900 °C的失重率约为60%。在空气气氛下,m-GF的失重起始温度(T_i)和终点温度(T_c)分别约为650和950 °C,至950 °C几乎分解完全;HG的 T_i 和 T_c 分别提前至250和680 °C,而GO的 T_i 和 T_c 更低,在500 °C以内就完全分解了。这些结果表明EHG较GO具有更高的热稳定性,这可能源于其面内共轭结构未被破坏。

5.3 石墨烯的光热转化性能

作为一种光热转化材料,石墨烯可将吸收的光能转化为热能储存起来,在太阳能转化与存储领域有潜在应用。采用808 nm激光照射EHG水分散液(808 nm处吸光度约为0.8,浓度约为 $25 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$),随光照时间延长,EHG分散液的温度逐渐由室温(29.3 °C)上升至最大值45.8 °C,温度变化($\Delta T_{\text{max, EHG}}$)约16.4 °C;不含EHG的水溶液在相同光照条件下,温度仅升高1.4 °C(图5a),由此可知含EHG体系的温度变化是溶剂体系的11.7倍(图5b)。作为对照,含 $25 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ GO的水分散液的温度变化仅为空白溶剂体系的1.5倍,显著低于EHG体系,这是由于GO在808 nm处几乎无吸收,而EHG对808 nm的光具有较强的吸收能力(图2a)。此外,Dai等报道将纳米级GO还原处理制备得到的rGO,其在808 nm的吸光能力和光热转化性能均优于GO(图5b和5c)^[25],但rGO体系的温度变化仅为空白溶剂体系的2.8倍,低于EHG体系(11.7倍),可能是由于还原处理无法完全恢复石墨烯的共轭结构,削弱了其光热性能;而EHG具有较完整的面内共轭结构,因而显示了优异的光热转化性能。

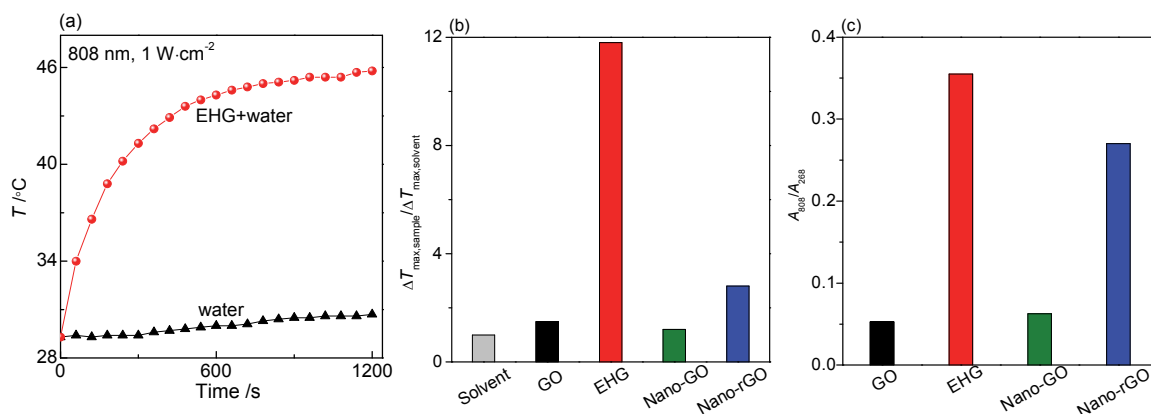


图5 (a) 808 nm激光照射下, EHG水分散液和空白水溶液的温度变化曲线; (b) 相对于空白溶剂体系, EHG、GO及文献^[25]报道的纳米级GO (Nano-GO)、Nano-rGO体系在808 nm激光照射下的温度变化 ($\Delta T_{\text{max, EHG}}/\Delta T_{\text{max, solvent}}$); (c) 分散液在808和268 nm处的吸光度比值(A_{808}/A_{268})

5.4 石墨烯的电化学性能

据报道^[11,12],当PDS与GF质量比为14时,制得的EHG的电导率为 $100 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$,比GO ($2.76 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$)高近5个数量级,且比文献报道^[14,15]的机械化学法制得的边缘羧基化石墨烯分别高9000和8倍,表明EHG具有良好的导电性。本实验在 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 支持电解质中,测定了EHG与m-GF修饰电极的循环伏安曲线。如图6a所示,与m-GF修饰电极相比,EHG修饰电极在0.4 V附近出现了一对氧化还原峰,对应EGH边缘羟基引起的氧化还原反应^[12]。当扫描速率由1增至 $500 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$, EHG修饰电极的电流密度逐渐增大(图6b)。根据循环伏安曲线测试结果和公式(1),可计算电极的质量比电容(C_m , $\text{F}\cdot\text{g}^{-1}$),

$$C_m = \frac{1}{m(V_2 - V_1)} \int_{V_1}^{V_2} (I/v) dV \quad (1)$$

其中, m 为电极上沉积的石墨烯的质量(g), v 为扫描速率($V \cdot s^{-1}$), V_1 和 V_2 分别是循环伏安法电位窗口的高、低电位值, I 为测得的电流值(A)。图6c为EHG在不同扫描速率下的质量比电容, 当扫描速率由1增至100 $mV \cdot s^{-1}$, 质量比电容逐渐减小; 当扫描速率增至500 $mV \cdot s^{-1}$, 质量比电容几乎维持在100 $F \cdot g^{-1}$, 是m-GF修饰电极的8倍。本文使用的石墨原料GF的厚度约为1–150 μm , 直接球磨处理几乎为改变石墨的晶型和缺陷结构(图4a和b); 然而, 过硫酸盐辅助球磨法制备的EHG厚度约为3 nm, 且其边缘存在含氧官能团(图3a和图4b)。随着石墨烯片层厚度变薄, 其比表面积增加, 电子传输速率增大, 因此EGH的质量比电容显比m-GF更高。

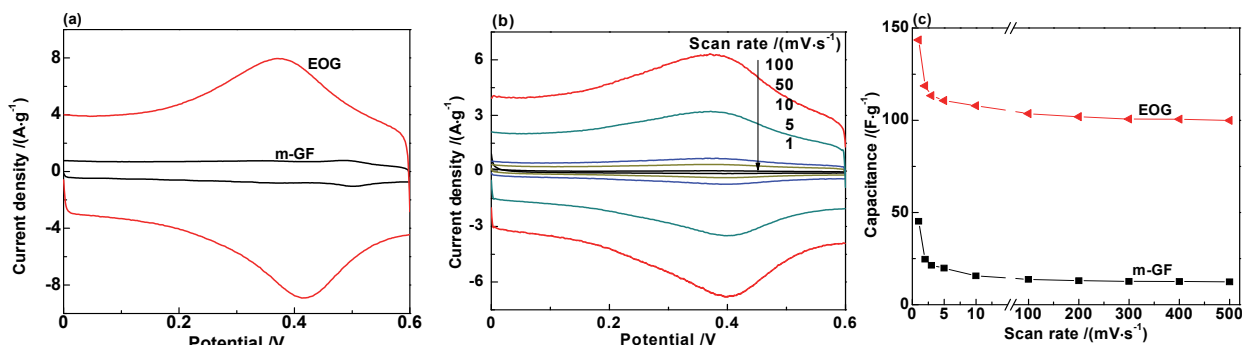


图6 球磨后的鳞片石墨(m-GF)及制备石墨烯(EHG)修饰电极在电位扫描速率为100 $mV \cdot s^{-1}$ (a) 及不同扫速下(b)的循环伏安曲线; (c) 电位扫描速率对m-GF及EHG修饰电极的质量比电容的影响

6 实验成果总结及教学拓展

实验课后, 要求以小组为单位, 归纳EHG、m-GF和GO三种材料的制备原理、结构特点、水中分散性、光吸收行为、光热转化性能及电化学性能, 分析石墨烯的结构对其性能的影响, 培养学生的科研思维方法; 总结使用到的石墨烯的表征方法及原理, 还有哪些仪器分析方法可用于测试石墨烯的光、电等性能, 并进一步延伸到其他碳材料或二维材料, 拓展学生的知识视野; 查阅5–8篇国内外关于石墨烯制备的文献, 并与本文的制备方法作对比, 分析各自的优缺点, 增强学生对本工作的认同感及对于国家科技进步的自豪感; 查阅石墨烯在能源转化与存储领域的典型应用案例, 让学生了解石墨烯在“碳中和”领域的潜在应用, 根植“双碳”理念和使命。

7 结语

本文基于前沿科研成果开发了一个关于石墨烯的绿色制备、表征及光电性能的综合型实验。通过本实验, 可使学生更好地了解石墨烯的结构与其性能之间的关系, 熟悉多种仪器分析方法研究材料特别是碳材料的结构与性能的方法, 激发学生对科技前沿的兴趣, 培养科研素养和实践能力。此外, 借助本实验还能引导学生关注石墨烯在“双碳”领域中的应用, 培养其社会责任感。

参 考 文 献

- [1] 郑哲雄, 朱一帆, 康炜瑄, 戴麟懿, 刘洪志, 马子凡. 大学化学, 2018, 33 (5), 72.
- [2] 张安琪, 陈萌. 大学化学, 2014, 29 (1), 49.
- [3] 徐玲, 魏恒伟, 魏灵灵, 马艺, 王晓明, 焦桓. 大学化学, 2021, 36 (3), 1912042.
- [4] 黄微, 李婉, 刘卫, 刘济红, 田红军. 大学化学, 2014, 29 (3), 21.
- [5] 鞠虹, 段进卓, 李焰. 实验技术与管理, 2022, 39 (5) 138.
- [6] 戴春燕, 李小宝, 孙丽丽, 朱林华. 广东化工, 2017, 44 (13), 272.

- [7] 杨凤, 郭勇, 马洪, 阳萌. 实验科学与技术, **2018**, 35 (11), 58.
- [8] 李一峻, 邱晓航, 韩杰, 何尚锦. 大学化学, **2019**, 34 (10), 90.
- [9] 谢爱娟, 武嘉奕, 罗士平, 薛冰, 马江权, 周国平, 李群. 实验技术与管理, **2018**, 35 (11), 58.
- [10] 张莉, 刘自强. 科技风, **2022**, No. 2, 72.
- [11] 王楠, 黄翠玉, 朱丽华, 陈满堂, 侯大姣. 一种高水溶性石墨烯的制备方法: 中国, ZL20181040407740.5. 2021-09-17.
- [12] Huang, C.; Lin, J.; Tang, H.; Wang, Q.; Majima, T.; Wang, N.; Luo, Z.; Zhu, L. *ChemSusChem* **2022**, e202201496.
- [13] Zhu, Y.; James, D. K.; Tour, J. M. *Adv. Mater.* **2012**, 24, 4924.
- [14] Jeon, I. Y.; Shin, Y. R.; Sohn, G. J.; Choi, H. J.; Bae, S. Y.; Mahmood, J.; Jung, S. M.; Seo, J. M.; Kim, M. J.; Chang, D. W.; *et al. Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2012**, 109, 5588.
- [15] Lin, T.; Chen, J.; Bi, H.; Wan, D.; Huang, F.; Xie X.; Jiang, M. *J. Mater. Chem. A* **2013**, 1, 500.
- [16] Jeon, I.; Choi, H.; Jung, S.; Seo, J.; Kim, M.; Dai, L.; Baek, J. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, 135, 1386.
- [17] Kolthoff, I. M.; Miller, I. K. *J. Am. Chem. Soc.* **1951**, 73, 3055.
- [18] Chen, N.; Yang, R. T. *J. Phys. Chem. A* **1998**, 102, 6348.
- [19] Huang, A.; Zhang, Z.; Wang, N.; Zhu, L.; Zou, J. *J. Hazard. Mater.* **2016**, 302, 158.
- [20] Wang, N.; Lv, H.; Zhou, Y.; Zhu, L.; Hu, Y.; Majima, T.; Tang, H. *Environ. Sci. Technol.* **2019**, 53, 8302.
- [21] Su, R.; Lin, S. F.; Chen, D. Q.; Chen, G. H. *J. Phys. Chem. C* **2014**, 118, 12520.
- [22] Li, Z.; Kinloch, I. A.; Young, R. J.; Novoselov, K. S.; Anagnostopoulos, G.; Parthenios, J.; Galiotis, C.; Papagelis, K.; Lu, C.; Britnell, L. *ACS Nano* **2015**, 9, 3917.
- [23] 牛青芳, 艾欣, 王奕璇, 贺方玖, 罗彼, 梁文婷, 董川. 应用化学, **2022**, 39 (7), 1129.
- [24] Eckmann, A.; Felten, A.; Mishchenko, A.; Britnell, L.; Krupke, R.; Novoselov K. S.; Casiraghi, C. *Nano Lett.* **2012**, 12, 3925.
- [25] Robinson, J. T.; Tabakman, S. M.; Liang, Y.; Wang, H.; Casalongue, H. S.; Vinh, D.; Dai, H. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, 133, 6825.