

·教育与教学·

柔性超级电容器的原位快速集成及应用

——高分子综合实验项目设计

刘汉超¹ 单雪影² 李锦春^{1*}

(常州大学¹材料科学与工程学院²安全科学与工程学院 常州 213164)

摘要: 针对传统超级电容器制备过程复杂、耗时较长、难以在有限课时内完成的问题,设计了一项面向高分子专业的综合性实验项目——“柔性超级电容器的原位快速集成及应用”。实验利用醛胺缩合反应实现了反应体系的快速凝胶化,在室温下 5 min 内完成溶胶—凝胶转变,并通过原位集成构建超级电容器,最高比电容达 105.4 F/g,显著提升了教学效率。实验内容涵盖水凝胶合成、器件组装、性能测试及应用演示,融合了高分子化学、高分子物理与电化学等多学科知识。通过合理的实施方案,培养了学生的动手能力、分析能力与跨学科思维,增强了学生对学科前沿的认知,取得了良好的教学效果。

关键词: 实验设计; 教学方法; 超级电容器; 水凝胶; 原位集成

In Situ Rapid Integration and Applications of Flexible Supercapacitors —Design of a Comprehensive Polymer Experiment Project

LIU Han-chao¹, SHAN Xue-ying², LI Jin-chun^{1*}

(¹School of Materials Science and Engineering, ²School of Safety Science and Engineering,
Changzhou University, Changzhou 213164)

Abstract: To overcome the drawbacks of conventional supercapacitor preparation, which involves complicated and time-consuming procedures that are difficult to complete within limited class hours, a comprehensive laboratory project entitled “*in situ* rapid integration and applications of flexible supercapacitors” is developed for undergraduate students majoring in polymer science and engineering. The experiment employs aldehyde-amine condensation to achieve rapid sol-gel transition within 5 min at room temperature, and the supercapacitor is further constructed *via in situ* integration, delivering a specific capacitance of up to 105.4 F/g, which greatly improves the efficiency of experimental teaching. The project covers hydrogel synthesis, device assembly, performance measurement and application demonstration, integrating interdisciplinary knowledge of polymer chemistry, polymer physics and electrochemistry. Through systematic implementation, students’ practical skills, analytical ability and interdisciplinary thinking are cultivated, and the understanding of cutting-edge developments in related fields is enhanced, demonstrating favorable teaching effects.

Keywords: Experimental design; Teaching methodology; Supercapacitor; Hydrogel; *In situ* integration

引用: 刘汉超, 单雪影, 李锦春. 柔性超级电容器的原位快速集成及应用: 高分子综合实验项目设计. 高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.329

2025-11-12 收稿, 2026-03-16 录用

基金项目: 江苏省高等学校教育信息化研究课题(项目号 2023JSETKT051)

* 通讯联系人: 李锦春, E-mail: lijinchun88@163.com

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.329

Citation: Liu, H. C.; Shan, X. Y.; Li, J. C. *In situ* rapid integration and applications of flexible supercapacitors—design of a comprehensive polymer experiment project. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.329

常州,作为中国新兴的“新能源之都”,凭借前瞻布局与全产业链生态闭环,已成为全球新能源产业的核心高地。在新能源储能体系中,超级电容器因功率密度高、充放电速度快、循环寿命长、使用温度范围宽及绿色环保等优势,已成为柔性电子、智能穿戴、分布式储能等领域的重要研究方向^[1]。与传统电池相比,柔性超级电容器能够适应弯曲、折叠等复杂形变,结构设计灵活,更符合新一代电子器件轻量化、柔性化的发展趋势,在便携式设备、物联网终端、智能传感等场景中展现出重要应用价值^[2]。随着高性能储能器件的技术迭代,对超级电容器电解质、电极等各个功能模块的性能要求正在不断提升,对相关人才的需求也日益迫切。然而,作为一个典型的学科交叉领域,储能器件的结构设计与材料制备通常需要多学科技术的汇集,如材料科学、电子与电气技术、机械制造、环境科学等。这不仅对大学课程教学改革提出了新的挑战,也对本科教育促进新质生产力的发展提出了新的要求。如今,在新能源、新材料等战略性新兴产业高速发展的背景下,如何在立足本学科的同时,结合地方产业优势,对课程进行有针对性的设计,为教学课堂注入新的活力,促使学生对学科产生新的认识,并基于本专业对学科交叉产生发散性思考,便成为值得探究的课题。

我校高分子科学与工程专业,作为国家级特色专业,多年来始终坚持理论教学与工程实践的结合,注重创新精神和工程实践能力的培养。近年来,背靠常州地方新能源产业优势,专业开设了相关理论课程。然而,在可以使学生获得第一手经验的实验课程方面,如何立足高分子本专业,同时进行跨专业的实验设计,仍是亟待解决的问题。造成这一现状的原因在于,大多数储能器件的制备周期较长,实验课程的课堂时间通常难以覆盖器件的“制备—测试—应用”的完整条线。以水凝胶超级电容器为例,聚合物电解质需要通过单体的聚合反应制得。得到聚电解质后,又需要将电极与电解质进行集成、封装,整个过程需消耗几个小时^[3,4]。例如,在利用聚苯胺导电水凝胶构

建超级电容器的化学实验项目中,反应体系的聚合过程需要8 h以上的时间^[5]。此外,若涉及特殊条件下的聚合反应,如紫外光引发、高温引发等,则会对实验设备、实验安全和课时提出更加苛刻的要求。因此,在有限的课时总量以及现有设备下,此类实验课程难以有效开展。

针对上述问题,笔者设计了“柔性超级电容器的原位快速集成及应用”高分子专业实验。实验内容包括水凝胶电解质的原位快速制备、超级电容器的原位集成以及电容器的性能测试。该实验利用醛胺缩合反应,实现了体系的快速凝胶,并进行超级电容器的原位集成,将传统4~8 h的制备流程缩短至1.5 h,在有限的课程时间内,完成了从材料制备到性能测试及应用演示的完整教学过程。本实验不仅巩固了有机化学、高分子化学、高分子物理等课程的基础知识,还培养了学生动手能力和分析问题的能力。通过该实验设计,激发了学生立足高分子专业,突破学科边界、探索未知领域的热情,促使学生在新工科和产业升级的大背景下,对高分子专业产生新的认识。

1 实验目的

掌握水凝胶电解质的制备方法、制备原理以及性能调控的手段,巩固有机化学、高分子化学、高分子物理等理论知识;掌握超级电容器的结构构成以及性能测试方法,熟悉高分子材料在前沿储能器件中的关键作用与应用价值,更新对高分子材料功能化发展方向的认知,拓展、丰富学生在新能源与新材料交叉领域的专业视野与自我发展路径。

2 实验原理

利用戊二醛与聚烯丙基胺盐酸盐之间醛基与氨基的缩合反应,构成聚合物网络,形成水凝胶电解质(图1)。由于醛胺缩合具有较低的活化能,体系快速凝胶,水凝胶网络中的氢离子与氯离子赋予水凝胶导电性;进一步地,通过在体系中加入四氟硼酸锂,调节水凝胶的电导率。利用该反应体系的快速凝胶的特性,可在电极之间通过原

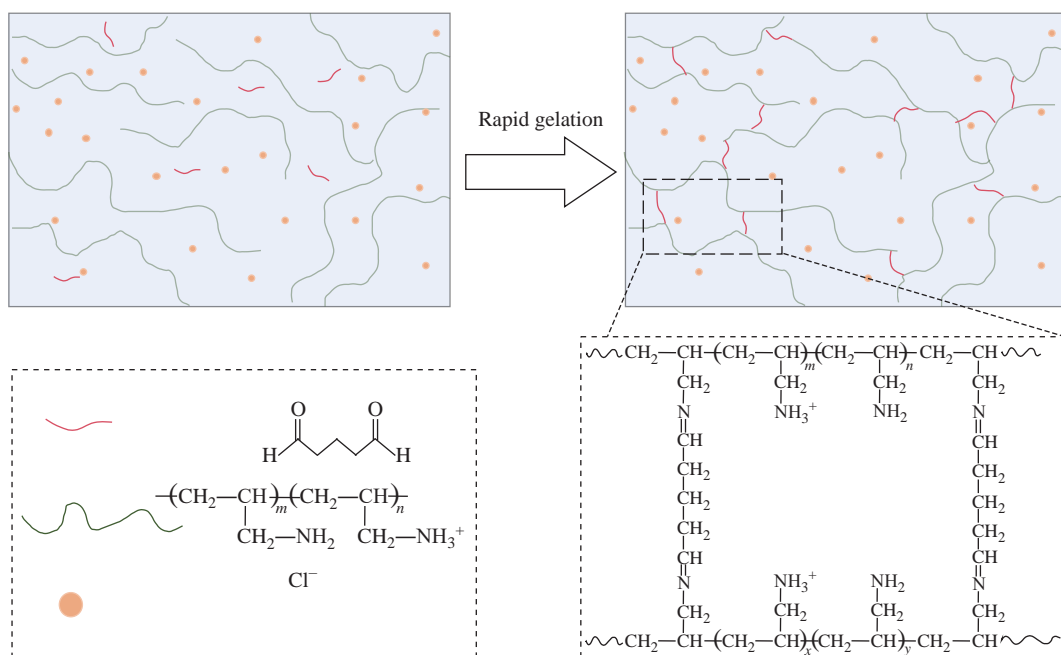


图1 GA与PAH反应示意图

Figure 1 Schematic illustration of the reaction between GA and PAH

位聚合, 实现超级电容器的原位集成。

3 实验内容

3.1 实验材料与仪器

聚烯丙基胺盐酸盐 (PAH, $M_w=1.8 \times 10^4$), 购自湖北健楚生物医药有限公司; 戊二醛 (GA, 25% 的水溶液)、四氟硼酸锂 (LiBF_4 , AR)、*N*-甲基吡咯烷酮 (NMP, AR), 均购自阿拉丁试剂(上海)有限公司; 活性炭 (AC, YEC-8A) 购自益环炭素化工有限公司; 导电炭黑购自 TIMCAL Graphite & Carbon 公司; 聚偏氟乙烯 (HSV900@PVDF), 购自阿科玛公司; 去离子水为实验室自制。

Cary 50 紫外分光光度计, 购自安捷伦科技有限公司; CHI650E 电化学工作站, 购自上海辰华仪器有限公司。

3.2 水凝胶与柔性超级电容器的制备

水凝胶的制备是以 PAH 和 GA 为反应物, 以 LiBF_4 为导电物质, 在水溶液中通过醛胺缩合制备导电水凝胶。具体配方和步骤如下: 将 0.5 g PAH 和一定量的 LiBF_4 溶解在 2 mL 去离子水中形成前驱液。加入 GA 溶液, 快速搅拌 1 min 后, 室温下静置, 得到水凝胶。

柔性超级电容器的制备过程如下: 首先将活性炭、导电炭黑和聚偏氟乙烯以 8:1:1 的质量比在 NMP 中混合, 经机械搅拌和超声后, 将所得浆料

涂覆在方形石墨纸上, 在 90 °C 真空条件下干燥 10 h, 制得边长为 10 mm 的电极, 电极材料的质量负载约为 2.5 mg。之后, 将前驱液注入预先用胶带密封的两个电极之间的间隙中, 待前驱液凝胶后, 即可拆除胶带, 得到超级电容器。为帮助学生了解体系中各组分的功效, 将 GA 用量及 LiBF_4 用量设置为 2 个变量。具体配方见表 1。

表1 反应体系配方

Table 1 Formulation of the reaction system

体系编号	$m(\text{PAH})$ (g)	$m(\text{GA})$ (g)	$m(\text{LiBF}_4)$ (g)	$V(\text{H}_2\text{O})$ (mL)
1	0.5	0.15	0	2
2	0.5	0.35	0	2
3	0.5	0.15	0.05	2

3.3 性能测试

紫外-可见吸收光谱测试: 以超纯水为参比扣除背景基线, 将前驱液加入石英比色皿中, 在 200~400 nm 波长范围进行连续扫描, 每隔 5 min 测试 1 次, 记录不同反应时间下的吸收光谱图。

循环伏安曲线 (CV) 测试: 在 0~1.0 V 电压窗口内进行 CV 测试, 扫描速率为 60 mV/s, 循环扫描 10 次以保证曲线稳定, 记录有效循环曲线。

恒电流充放电 (GCD) 测试: 在 0~1.0 V 电压窗口、0.4 A/g 电流密度下进行恒电流充放电测试, 每个样品测试次数为 10 次。记录充放电曲线以

计算相关电化学性能参数。

4 实验设计

本实验设有3部分,具体内容和对应的教学目标如图2所示。在第一部分中,学生自由分组,每4人为1组,分别记为组A、组B和组C。其间,需精确称量PAH、GA、LiBF₄等组分,并通过搅拌形成均相的前驱液。每组学生对完成表1中的一组体系的配制,每一体系配制2份。例如,组A负责配制2份体系1,组B和组C分别配制2份体系2和3。第二部分中,将配制好的前驱液静置于常温下反应,通过PAH分子链上的一NH₃⁺水解出的氨基与GA上的醛基进行缩合反应,形成水凝胶。其间,将其中一份反应体系进行紫外吸收光谱测试,追踪反应期间分子结构的变化;另一份反应体系则被注射到电极片之间,原位形成水凝胶电解质。在此部分中,学生需要分工协作,通过

宏观观察以及微观结构表征,证明反应成功发生,并且完成电容器的原位集成。第三部分则是对制备的超级电容器进行测试,研究GA与LiBF₄加入量对电容器性能的影响。

5 实验步骤

5.1 水凝胶电解质的制备

按照前文所述,配制反应前驱液。需要注意的是,由于醛胺缩合反应速度较快,因此在加入GA之后,需要快速将体系搅拌均匀。在反应期间,PAH与GA通过氨基与醛基的缩合形成亚胺键,进而形成网络结构。通过图3(a)中紫外吸收光谱可以看出,在270~290 nm处亚胺键对应的紫外吸收峰强度随反应进行出现快速增强。同时,如图3(b)所示,置于瓶中前驱液也在5 min内形成不流动的凝胶。通过观察、对比1~3体系的凝胶时间,得到GA加入量与LiBF₄加入量对凝胶时间

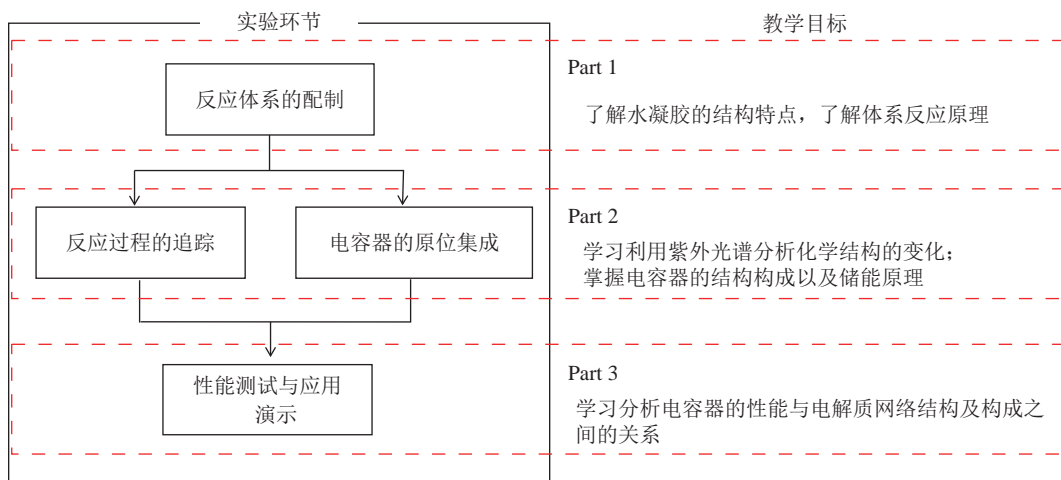


图2 实验环节与教学目标

Figure 2 Experimental procedures and educational objectives

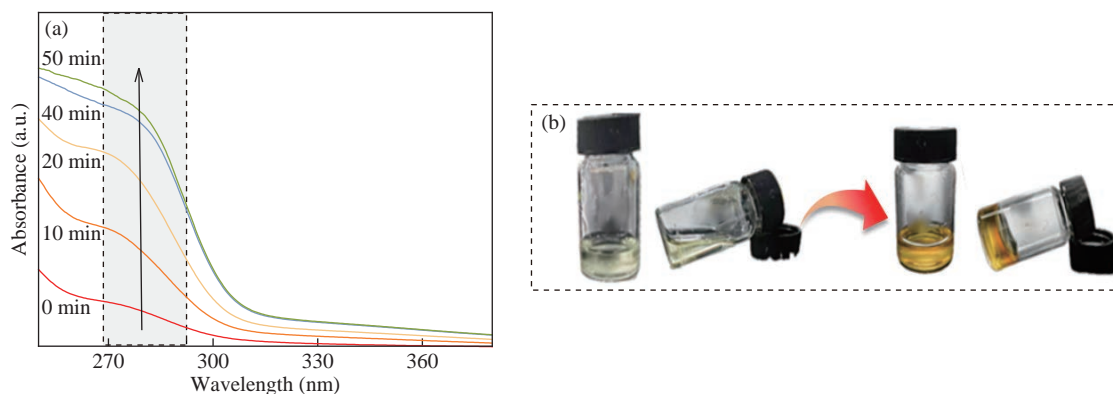


图3 (a)凝胶过程中体系的紫外光谱图;(b)体系凝胶前后的状态变化

Figure 3 (a) UV spectra of the system during the gelation process; (b) State of the system before and after gelation

的影响: GA加入量的增加会为PAH分子链间提供更多的反应位点,进而显著提升体系的凝胶速度;而LiBF₄的加入则会导致体系pH降低,进而阻碍-NH₃⁺水解,体系中氨基数量减少,从而降低凝胶速度。

5.2 柔性超级电容器的原位集成

将提前制备好的两片柔性石墨电极底面和侧面进行封装,之后,将配制好的前驱液滴加到两片电极之间,置于常温下保存。凝胶前,电极片表面被水溶液良好浸润。凝胶后,水凝胶与电极片紧密粘接在一起,构成电容器(图4)。

5.3 柔性超级电容器的性能测试

首先,对超级电容器中水凝胶电解质的电导率 σ 依据公式(1)进行计算:

$$\sigma = \frac{L}{S \times R} \quad (1)$$

式中, L 为水凝胶的厚度, m; R 为电阻, Ω ; S 为电

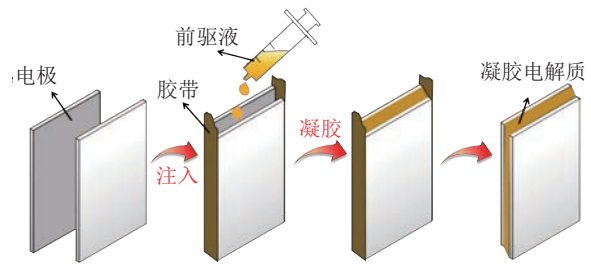


图4 原位集成超级电容器的过程示意图

Figure 4 Schematic of *in situ* integration of supercapacitors

极片的有效面积, m²。

由图5(a)可见,3号样品的电导率显著高于1号样品。这表明, LiBF₄的加入使得可迁移离子浓度大幅提高,显著增强了水凝胶的离子导电能力。之后,对由1~3号水凝胶原位集成的电容器进行循环伏安法测试和恒电流充放电测试。如图5(b)所示,1~3号水凝胶组成的电容器的CV曲线保持准矩形形状,表明水凝胶具有良好的离子电导率,

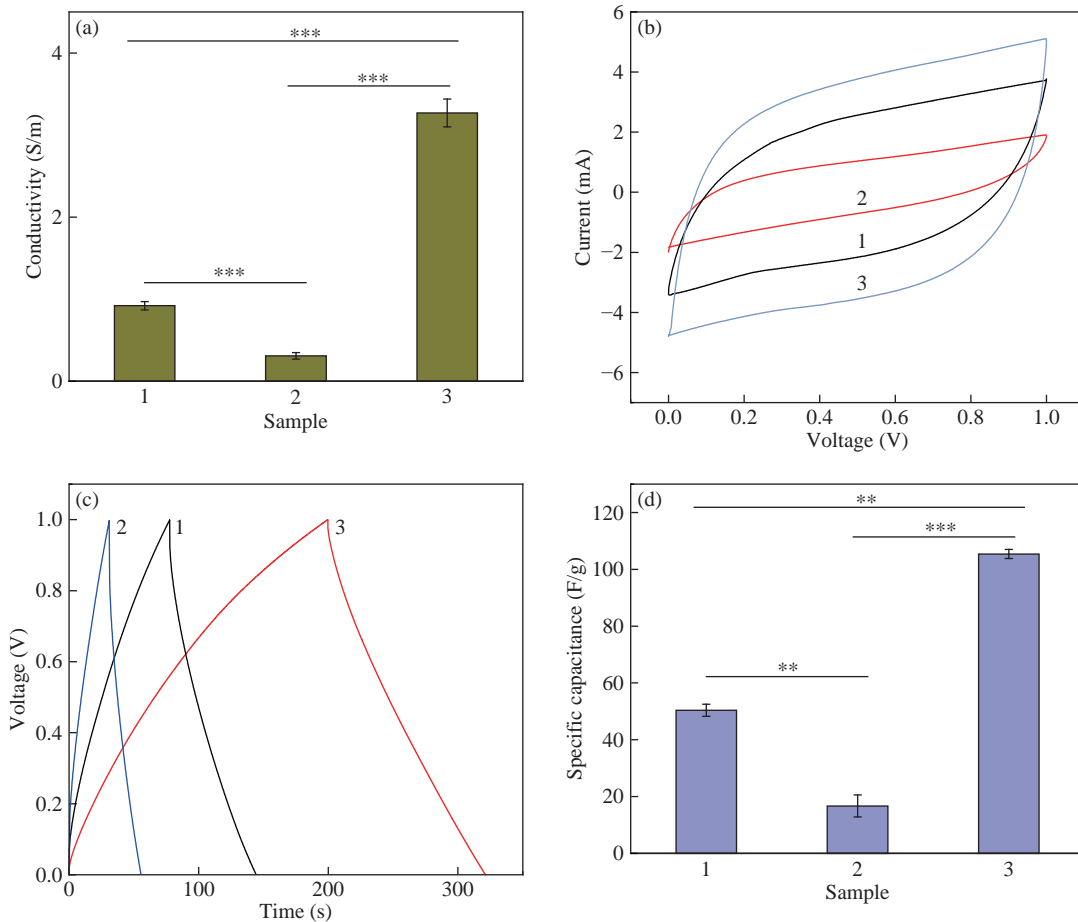


图5 表1中1~3号水凝胶构成的电容器的(a)电导率,(b) CV曲线,(c) GCD曲线以及(d)比电容对比。其中,统计学差异用*表示 (** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

Figure 5 (a) Conductivity, (b) CV curves, (c) GCD curves, and (d) comparison of specific capacitance of supercapacitors constructed from hydrogels 1-3 in Table 1. Intergroup statistical significance analysis was denoted by *(** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$)

并且与电极的界面具有良好的接触。对比各电容器的CV曲线积分面积可以看出,3号具有更高的电容^[6~8]。这一结论也可通过GCD测试验证。如图5(c)所示,3号水凝胶组成的电容器的放电时间长于1号,而2号则表现出最短的放电时间。根据以上结果,通过公式(2)对各个电容器的比电容 C_{sp} 进行计算:

$$C_{sp} = \frac{2I}{m(dV/dt)} \quad (2)$$

式中, I 为放电电流, m 为电极片上活性物质的质量, dV/dt 为放电曲线的斜率。

经计算,得出1、2、3号凝胶组成的电容器的比电容分别为50.4、16.7和105.4 F/g。由图5(d)可见,3组样品的比电容具有显著的差异性。以上结果表明,更高的GA加入量提高了网络交联密度,阻碍了离子传输;而更高的 LiBF_4 含量则提升了离子浓度,增加了电导率,进而提高了比电容。

5.4 柔性超级电容器的应用演示

对柔性超级电容器进行充电,之后,将电容器和灯泡连接成闭合回路,点亮灯泡。由于电容器的电极和电解质均为柔性材料,且电解质与电极之间具有牢固的粘接,因此,该电容器可以在弯折的情况下保持电流稳定输出(图6)。

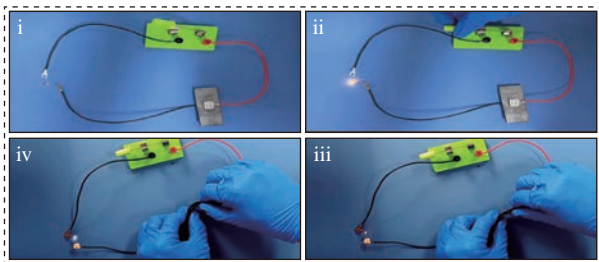


图6 超级电容器在变形过程中持续点亮灯泡的照片

Figure 6 Photographs of the supercapacitor continuously illuminating a bulb during the deformation process

6 实验特色

相较于采用传统教学方式的经典高分子综合实验项目,此项目不仅使学生得以接触学科前沿、体会学科交叉,还具备以下显著优势/特点:

(1)高效地完成了一次较为完整的学科交叉实验项目。如前文所述,超级电容器的制备过程通常复杂、耗时,因此,如何提高制备效率,在有限的课堂时间内,尽可能保证实验的完整性,并同时保证学生的参与度,是首先要解决的问题。

在本实验项目中,利用PAH与GA之间醛胺缩合的快速反应特性,高效制备了水凝胶电解质。室温下,体系最快5 min即可凝胶,显著提升了教学效率。同时,利用快速反应特性,本实验舍弃了传统电容器制备过程中先合成电解质,再进行组装集成的工艺,采用原位聚合的方法,在电极片之间直接形成水凝胶电解质。这不仅实现了实验教学的高效化,同时可以保证电解质与电极片之间形成有效粘接,降低电阻,保证了实验的成功率。在1.5 h的实验课程中,除去原理及步骤讲解所需的时间,学生们基本都在具体的实验操作中进行思考、协作和交流,整个实验教学过程完整且紧凑。

(2)立足高分子专业实现对学科边界的探索。本实验项目为高分子专业实验,因此,本实验的出发点在于,立足高分子专业,在对学科前沿及边界的探索过程中,丰富学生对专业的认知,增强学生对专业及自身发展的信心。在分子专业的教学培养中,基础的高分子知识框架需要依托经典、典型的高分子材料来进行构建。例如,提及高分子材料的结晶行为,通常会基于聚丙烯进行授课;涉及高分子材料的增塑,则会将聚氯乙烯的增塑作为案例。在以往的高分子专业实验中,需要通过对这类传统、典型材料进行结构测试及性能剖析以加深学生对理论课程的理解。长此以往,学生对高分子材料的直观认知难免被限制在有限的传统材料中,进而形成惯性思维,对专业的宽度和广度认知不足。该实验项目中,通过体系组分设计,不仅带动学生复习、回顾了反应物浓度、聚合反应速率、网络交联密度、席夫碱结构的形成条件及相关特点等高分子化学、高分子物理以及有机化学中的知识,而且通过性能对比,直观地将高分子材料结构变化与电容器性能之间建立联系,引导学生认识高分子专业知识在新领域、新行业中的重要性。同时,也为学生打开了原本较为闭塞的对自身发展前景的预设,提升了学生对专业的认可度。

(3)从宏观到微观,从结构到性能,引导学生主动思考,提升课堂趣味性。实验过程中,学生可以观察到多种实验现象。例如,在反应过程中,前驱液黏度逐渐升高,同时,由无色透明逐渐转变为黄色。凝胶后,体系不再流动,颜色进一步变深。学生在观察到上述现象后,会自发相互沟

通,形成讨论。此时,应鼓励学生提出与实验相关的问题,并引导学生对问题进行回答。例如“溶液的黏度逐渐上升,这一现象表明什么”“为什么体系会出现颜色的变化;颜色变化来自什么结构”等。通过此环节,可以更自然地引导学生对实验现象背后的原理进行思考,帮助学生以往知识进行回顾。当学生们通过关联紫外光谱中亚胺键吸收峰强度的升高速率与体系宏观黏度和颜色的变化过程,认识到是醛胺缩合形成的席夫碱结构导致体系发生宏观性状改变时,对以往有机化学的相关知识点便形成了有效的巩固。在实验过程中,有学生进行了更深层次的思考,提出为什么容易水解的席夫碱结构在现在的体系中却能稳定存在。带着这个问题引导学生对影响亚胺键稳定性的因素进行阐述,指明PAH上丰富的氨基侧链可以构成多重交联点,进而对亚胺键起到稳定作用^[9,10],从而引导学生在经典有机化学、高分子化学的基础上,通过查阅文献的方式,丰富、更新自己的知识体系。

在实验过程中,体系由液态转变为凝胶态,在宏观现象上帮助学生直观地感受反应过程。另一方面,通过对体系进行紫外吸收光谱测试,可以跟踪反应物微观结构或基团的变化。通过绘制谱图,学生可以对反应不同时间的体系中亚胺键的吸收强度进行对比,与实验过程中观察到的宏观现象进行联系,进而构建对反应体系的全面了解。同时,通过对不同体系进行电导率、比电容等性能的对比,并将性能与交联密度、亚胺键浓度、离子浓度等结构和组分变化进行关联,便可以对高分子材料“结构决定性能-性能反映结构”的普遍规律形成深层次的理解,培养学生未来学习和实践中分析、解决专业问题的能力。

通过以问代讲、以主动思考替代被动灌输的教学模式,学生的积极性得到了显著提升,在课后的作业中,也更积极主动地表述自己对整个实验过程的理解。尽管有些表述的专业性仍显不足,但可以看出学生进行了主动的思考,对关键问题进行了理解和分析,基本达到了实验设计的目的。然而,必须说明的是,本实验仅设置了GA和LiBF₄两个单一变量,未探究两者协同作用对性能的影响。这一不足拟在后续实验设计中进行完善。同时,由于GA具有一定的毒性,本实验也存在一定的风险。在进行实验教学时,须严格执行实验

安全守则,强调并监督手套和护目镜的正确使用。

7 综合素质与责任意识培养

为培养全面发展的高素质人才,除了增强学生的实践能力和创新意识,本科实验教学改革的另一项重要任务,是引导学生建立对国家科技发展的责任感和使命感。首先,帮助学生根植“科技报国”理想,强化使命担当。超级电容器作为新型高效储能器件,是支撑新能源、电动汽车、智能电网等国家战略性新兴产业发展的关键技术之一。课程开篇即引导学生认识该技术在实现“双碳”目标、保障国家能源安全中的重要作用,激发学生投身国家急需关键领域研究的责任感与使命感,引导学生思考“我能为国家解决什么问题”,将个人发展融入国家科技自立自强的大局。第二,弘扬“精益求精”的工匠精神与科学素养。超级电容器的性能高度依赖于材料制备的精确控制和组装工艺的规范性。实验要求学生一丝不苟地执行操作规程,精确记录数据,培养其严谨求实、精益求精的科学态度和工匠精神。性能测试环节要求对原始数据进行严格处理和分析,强调实验数据的真实可靠是科学研究的基石。通过引导学生对比不同工艺参数下的性能差异,理解“失之毫厘,谬以千里”的道理,深化对科研诚信重要性的认识。第三,践行“绿色低碳”发展理念,培育生态意识。在电解质选择(如本课程所采用的水凝胶电解质)等环节,引导学生关注环境友好型材料和工艺的开发,理解绿色化学原则在新能源技术中的具体应用。实验过程中产生的化学废液、废弃电极材料等,严格按照实验室安全与环保规定进行回收和处理。通过实践操作,将“绿色低碳”的理念内化为学生的自觉行动,强化可持续发展意识。

8 结语

以“柔性超级电容器的原位快速集成及应用”为内容,构建了一套面向本科生的综合性实验教学体系。通过将水凝胶电解质的快速合成、器件原位组装与性能评测等实践转化为阶梯式实验任务,实现高分子专业知识与储能技术的有机结合,高效地实现课程内容的设计与推进,使学生在有限的课时内,亲身参与新能源存储技术的探索过程,掌握学科发展动态与研究范式。课程改革贯

彻“以学生为中心”的理念,教师角色转型为引导者与协作者,通过启发式提问、分组协作和自主探究,激发学生创新潜能,帮助学生锻炼综合实践能力,更通过团队合作体验“科技攻关”的持久成就感。期待借力教学改革的迭代推进,使高分子综合实验深度融入新时代理工科人才培养体系,成为学生主动探索、乐于实践、终身受益的实验课程。

参考文献

- 1 Banerjee, S.; Mordina, B.; Sinha, P.; Kar, K. K. Recent advancement of supercapacitors: a current era of supercapacitor devices through the development of electrical double layer, pseudo and their hybrid supercapacitor electrodes. *J. Energy Storage*, **2025**, 108, 115075.
- 2 Molahalli, V.; Chaithrashree, K.; Singh, M. K.; Agrawal, M.; Krishnan, S. G.; Hegde, G. Past decade of supercapacitor research—lessons learned for future innovations. *J. Energy Storage*, **2023**, 70, 108062.
- 3 伍红雨, 肖海, 曾向东, 赵晓昱. 导电水凝胶材料研究进展及在超级电容器的应用. *材料导报*, **2024**, 38(19), 238–245.
- 4 Wan, X. J.; Song, H. Q.; Hu, F.; Xu, B.; Wu, Z. Y.; Wang, J. W. Highly stable flexible supercapacitors enabled by dual-network polyampholyte hydrogel without additional electrolyte additives. *Chem. Eng. J.*, **2023**, 458, 141460.
- 5 牛丽丽, 张丽, 王培, 刘彦彬, 张彦, 樊静. 改进型综合化学实验设计: 聚苯胺导电水凝胶的制备与表征. *高分子通报*, **2022**, (9), 74–80.
- 6 Gao, C. X.; Gao, Z. C.; Wei, Y. Q.; Luo, N.; Liu, Y.; Huo, P. F. Flexible wood enhanced poly(acrylic acid-co-acrylamide)/quaternized gelatin hydrogel electrolytes for high-energy-density supercapacitors. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, 15(2), 2951–2960.
- 7 Lin, X. B.; Wang, M. Y.; Zhao, J. C.; Wu, X. F.; Xie, J. X.; Yang, J. H. Super-tough and self-healable all-cellulose-based electrolyte for fast degradable quasi-solid-state supercapacitor. *Carbohydr. Polym.*, **2023**, 304, 120502.
- 8 王萍银, 李亮亮, 陈涛, 田瑶珠. 自修复高分子材料用于柔性电子器件的研究进展. *高分子通报*, **2020**, (11), 31–37.
- 9 Chen, Y. X.; Wu, G. C.; Chen, B. B.; Qu, H.; Jiao, T. Y.; Li, Y. T.; Ge, C. Q.; Zhang, C.; Liang, L. X.; Zeng, X. Q.; Cao, X. Y.; Wang, Q.; Li, H. Self-assembly of a purely covalent cage with homochirality by imine formation in water. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, 60(34), 18815–18820.
- 10 Tong, W. J.; Gao, C. Y.; Möhwald, H. Manipulating the properties of polyelectrolyte microcapsules by glutaraldehyde cross-linking. *Chem. Mater.*, **2005**, 17(18), 4610–4616.