

磷酸化细菌纤维素隔膜在水系锌离子电池中应用的研究型综合性化学实验

赵睿波, 叶遥路, 叶欢*

华中农业大学化学学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年1月20日; 录用日期: 2026年2月7日; 发布日期: 2026年2月24日

摘要

针对新能源储能领域对高性能、安全环保电池材料的迫切需求, 本工作结合水系锌离子电池前沿研究进展与高校化学实验教学特点, 设计并实施了一个面向本科生的研究型综合实验——磷酸化细菌纤维素隔膜设计制备及其在水系锌离子电池中的应用。实验以环境友好的细菌纤维素为原料, 通过磷酸化改性制备得到PBC隔膜, 并采用傅里叶变换红外光谱和扫描电子显微镜对其化学结构和微观形貌进行表征。进一步, 将PBC隔膜组装为对称电池、半电池和全电池, 利用电化学工作站和电池测试系统对其电化学性能进行系统评估, 包括对称电池循环稳定性、半电池库仑效率、全电池循环伏安及长循环性能, 并通过驱动LED灯演示其实际应用效果。本实验将生物质材料改性、物理表征、电化学测试与应用验证有机结合, 贯穿设计-制备-表征-性能-应用的完整研究链条, 有助于培养学生的多学科知识融合能力与综合科研素养。通过在教学全过程中融入绿色化学理念与实验安全意识, 本设计不仅强化了学生的实践与创新能力, 也引导其树立面向可持续发展的科学价值观。

关键词

磷酸化细菌纤维素, 水系锌离子电池, 隔膜, 综合化学实验, 电化学性能

Research-Oriented Comprehensive Chemistry Experiment: Phosphorylated Bacterial Cellulose Separators Applied in Aqueous Zinc-Ion Batteries

Ruibo Zhao, Yaolu Ye, Huan Ye*

College of Chemistry, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei

*通讯作者。

文章引用: 赵睿波, 叶遥路, 叶欢. 磷酸化细菌纤维素隔膜在水系锌离子电池中应用的研究型综合性化学实验[J]. 物理化学进展, 2026, 15(1): 51-61. DOI: 10.12677/japc.2026.151006

Abstract

In response to the urgent demand for high-performance, green, and safe battery materials in the field of new energy storage, this work integrates recent advances in aqueous zinc-ion battery research with the characteristics of university-level chemistry laboratory teaching. It designs and implements a research-oriented comprehensive experiment for undergraduates that focuses on the preparation of phosphorylated bacterial cellulose (PBC) separators and their application in aqueous zinc-ion batteries. Using environmentally friendly bacterial cellulose as the raw material, PBC separators are prepared via phosphorylation modification, and their chemical structure and microscopic morphology are characterized by Fourier-transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy. Furthermore, the PBC separator is assembled into symmetric cells, half-cells, and full cells. Their electrochemical performance is systematically evaluated using an electrochemical workstation and a battery testing system, including cycling stability of symmetric cells, coulombic efficiency of half-cells, cyclic voltammetry, and long-term cycling performance of full cells. Practical application is demonstrated by powering an LED light. This experiment integrates biomass material modification, physical characterization, electrochemical testing, and application validation, covering the complete research chain of design, preparation, characterization, performance, and application. It helps cultivate interdisciplinary knowledge integration and comprehensive research competence of students. By incorporating green chemistry principles and laboratory safety awareness throughout the teaching process, this design not only strengthens practical and innovative abilities of students but also guides them to establish a sustainability-oriented scientific values system.

Keywords

Phosphorylated Bacterial Cellulose, Aqueous Zinc-Ion Batteries, Separator, Comprehensive Chemistry Experiment, Electrochemical Performance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

化学是一门以实验为基础的科学，化学实验教学在培养学生实践操作能力、创新思维以及综合科学素养方面具有不可替代的重要作用。综合化学实验作为衔接基础实验教学与前沿科学研究的桥梁，将科研成果转化为教学内容，有助于提高学生的综合能力与研究兴趣[1]。在全球能源危机与环境问题日益严峻的背景下，开发绿色、高效、安全的新型储能技术已成为学术界和工业界共同关注的焦点。水系锌离子电池[2]因其资源丰富、成本低廉、安全性高和环境友好等优势，被视为未来大规模储能领域中极具前景的技术方向之一。然而，水系锌离子电池在实际应用中仍面临锌枝晶生长[3]、电极腐蚀钝化和析氢副反应等一系列挑战，这些已成为制约其性能提升与产业化推广的关键瓶颈。

隔膜作为电池系统的核心组成部分，在抑制锌枝晶生长[4]和提高电池循环稳定性方面起着重要作用。近年来，天然纤维素类材料凭借其可再生、可生物降解和良好的生物相容性等独特优势[5][6]，在电池隔膜研究中受到广泛关注。细菌纤维素(BC)作为一种新型天然纤维素材料，具有高结晶度、高孔隙率和优异的热稳定性，能够较好地满足高性能电池隔膜的需求[7]。通过化学改性可进一步赋予细菌纤维素新的

功能特性,例如磷酸化改性能够引入磷酸基团[8],增强隔膜的亲水性和离子传导能力,同时有效抑制锌枝晶的生长。

基于此,本实验以细菌纤维素为原料,通过磷酸化改性制备磷酸化细菌纤维素(PBC)隔膜,系统研究其结构特征与电化学性能,并将其应用于水系锌离子电池中,构建一个集材料制备、结构表征与性能测试于一体的综合性化学实验[9]。该实验内容涵盖材料化学、电化学与分析化学等多学科知识,不仅有助于学生了解学科前沿动态,还能有效培养其科研思维与创新能力。

2. 实验教学安排

本综合化学实验面向应用化学、材料化学等专业的大学三年级学生设计,计划学时为32学时,采用小组合作形式开展,每组3~4人。实验开始前,学生需通过文献调研、教学视频学习等方式,预先掌握细菌纤维素改性基本原理、水系锌离子电池工作机理及相关表征与测试方法。在实验过程中,学生需独立完成PBC隔膜的制备、电池组装及性能测试等关键操作。实验结束后,各小组需系统整理数据、撰写实验报告,并就实验结果展开分析与讨论,最终通过小组汇报展示实验成果。

为提升教学的系统性与灵活性,本实验采用模块化教学设计,将整体内容划分为以下四个循序渐进的模块:

- ① 细菌纤维素的预处理与磷酸化改性;
- ② 隔膜的结构表征与物理化学性能分析;
- ③ 水系锌离子电池的组装;
- ④ 电池的电化学性能测试与评估。

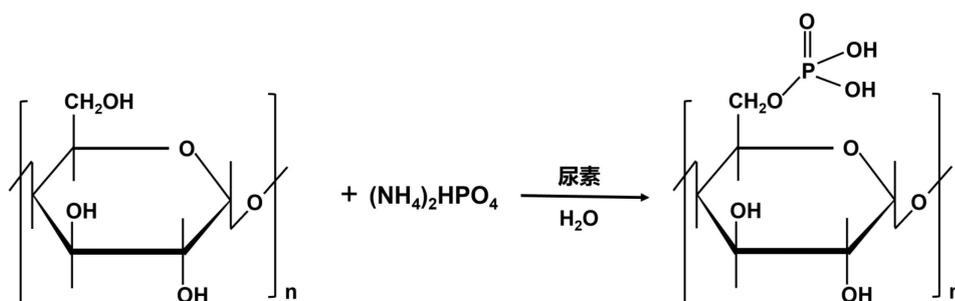
各模块既可独立实施,也可根据教学目标与学生基础进行灵活组合。该设计既有助于教师系统性组织教学,也能适应不同层次学生的学习需求,实现教学内容与过程的优化整合。

考虑到实验效率与教学实际需求,将耗时较长的干燥过程(如隔膜制备中的80℃/24h干燥)及全电池长循环测试(如800次循环测试)由助教提前完成,为学生提供预处理样品及历史测试数据用于对比分析;学生重点完成磷酸化改性关键步骤、电池组装、短时间电化学性能测试(如循环伏安测试、100圈以内充放电测试)等核心操作,在保证教学效果的前提下,避免学生陷入重复性耗时操作,集中精力掌握关键实验技能与研究方法。

3. 实验部分

3.1. 实验原理

细菌纤维素的磷酸化改性是实现其功能化的重要途径。其核心原理在于磷酸化试剂(如磷酸氢二铵)与纤维素分子链上的羟基发生酯化反应[10],从而在纤维素骨架上引入磷酸基团,反应过程可由以下方程式表示:



经过磷酸化改性后, PBC 因引入大量带负电荷的磷酸基团, 在结构和性能上表现出显著优势: 一方面, 磷酸基团可通过静电作用促进锌离子迁移[11], 有效抑制锌枝晶的生长; 另一方面, 磷酸基团的引入显著提升了隔膜的亲水性及热稳定性, 有助于增强水系锌离子电池的安全性能和循环寿命。

进一步地, 在高温条件下, PBC 中的磷酸基团可通过脱水反应生成磷酸, 随后磷酸发生聚合形成聚磷酸: 聚磷酸可催化纤维素脱水, 促使其转化为高温稳定的炭层。该炭层可形成物理阻隔, 有效隔绝空气, 从而实现隔膜的阻燃功能[12]。基于这一特性, PBC 材料也可拓展应用于锂电池、钠电池等储能体系, 展现出良好的应用潜力。

3.2. 实验试剂与仪器

3.2.1. 实验试剂

细菌纤维素匀浆(固含量 0.8%, 桂林奇宏科技有限公司), 磷酸氢二铵(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司), 尿素(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司), 硫酸锌(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司), 碘化锂(分析纯, 麦克林生化科技有限公司), 无水乙醇(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司), 锌片(纯度 $\geq 99.9\%$, 国药集团化学试剂有限公司), 活性炭 YP80F(可乐丽公司), 科琴黑(99.99%, 国泰华荣有限公司), 异丙醇(98%, 国药集团化学试剂有限公司)、聚四氟乙烯乳液(PTFE, 分析纯, 广东烛光新能源科技有限公司)。

3.2.2. 实验仪器

电子天平(BT25S, 北京赛多利斯仪器有限公司), 磁力搅拌器(MS5S, 江苏群安仪器有限公司), 电热鼓风干燥箱(DHG-9240, 巩义市予华仪器有限责任公司), 高速离心机(TG16-WS, 湖南凯达科学仪器有限公司), 冲片机(MSK-T10, 合肥科晶材料技术有限公司), 玛瑙研钵, 傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)(Is50, 赛默飞世尔科技公司), 扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)(SU8000, 日立高新技术国际贸易有限公司), 手动卧式对辊机(BNP-DGM100B, 深圳市博纳普自动化科技有限公司), 电化学工作站(CHI760E, 上海辰华仪器有限公司), 电池测试系统(CT4008Tn, 深圳新威尔电子科技有限公司), 纽扣电池封装机(MSK-510, 合肥科晶材料技术有限公司)。

3.3. 材料制备

3.3.1. 细菌纤维素隔膜的制备

称取 30 mg 细菌纤维素水分散液, 置于 100 mL 烧杯中, 加入去离子水至 30 g, 使用均质机搅拌成质量浓度为 0.1% 的细菌纤维素均质悬浮液(均质机运行时转速较高, 需确保样品容器固定牢固, 防止容器脱落或样品飞溅)。随后对悬浮液进行真空抽滤, 得到细菌纤维素湿膜。将湿膜浸于无水乙醇中处理 2 h, 再装入自封袋内, 在袋体上方放置金属重物压实, 一同放入 80°C 鼓风烘箱中干燥 24 h, 最终得到细菌纤维素隔膜。

3.3.2. 磷酸化细菌纤维素隔膜的制备

准确称取 73.32 mg 的磷酸氢二铵、888 mg 尿素与 60 mg 细菌纤维素, 置于 100 mL 烧杯中, 加入 20 mL 去离子水搅拌 20 min。将烧杯放入 80°C 鼓风烘箱中干燥 12 h 以去除水分。将干燥后的混合物转于油浴中, 于 150°C 反应 20 min 完成磷酸化改性(实验需在通风橱内进行, 操作人员佩戴防护口罩与手套, 防止氨气吸入及皮肤接触, 反应过程中时刻观察油浴温度)。反应结束后, 向产物中加入 40 mL 去离子水, 搅拌后转移至 500 mL 烧杯中, 补充去离子水至总体积 300 mL, 在 50°C 水浴下加热 8 h。冷却至室温后, 将样品分装至离心管中, 在 8000 r·min⁻¹ 的条件下离心 10 min, 离心结束后弃去上清液。重复上述去离子水洗涤与离心步骤, 直至滤液电导率低于 3 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

将洗涤后的磷酸化细菌纤维素经均质机搅拌分散为悬浮液，真空抽滤得到湿膜。湿膜经无水乙醇浸泡 2 h 后，置入自封袋中，表面放置金属重物压实，于 80℃ 鼓风烘箱干燥 24 h，最终制得磷酸化细菌纤维素隔膜。

3.4. 隔膜性能表征

3.4.1. 傅里叶变换红外光谱分析

将 BC 膜和 PBC 膜剪碎，于室温下采用傅里叶变换红外光谱仪进行测试，扫描范围为 5000~550 cm^{-1} ，累计扫描 32 次。通过对比两种隔膜的红外光谱特征峰，分析其化学键组成变化。

3.4.2. 扫描电子显微镜形貌表征

分别将 BC 隔膜与 PBC 隔膜置于真空干燥箱中充分干燥后，裁剪为细条状并固定于导电胶表面，随后采用扫描电子显微镜观察其表面微观形貌。

3.5. 隔膜电化学性能分析

3.5.1. 锌对称电池的组装与循环稳定性测试

在冲片机上压出 $\Phi 10$ mm 的锌片和 $\Phi 12$ mm 细菌纤维素隔膜和磷酸化细菌纤维素隔膜。以锌片作为正负极，隔膜置于中间，滴加 2 M ZnSO_4 水溶液作为电解液，按照负极壳→锌片→隔膜→电解液→锌片→垫片→弹片→正极壳的顺序组装纽扣型对称电池。

使用新威电池测试系统，在 $1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $1 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下进行恒电流充放电循环测试，记录电压曲线，分析极化电压变化及循环稳定性，评估隔膜对电池长循环性能的影响。

3.5.2. 锌不对称电池的组装与库仑效率测试

以锌片为负极、铜片为正极，采用 BC 或 PBC 隔膜，2 M ZnSO_4 水溶液为电解液，按照负极壳→锌片→隔膜→电解液→铜片→垫片→弹片→正极壳的顺序组装 $\text{Zn}||\text{Cu}$ 半电池。

在新威电池测试系统上，以 $1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $1 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下进行恒电流充放电测试，记录库仑效率，分析不同隔膜对锌沉积/溶解可逆性的影响。

3.5.3. 全电池组装和性能测试

将活性炭 YP80F、科琴黑与 PTFE 按质量比 7:2:1 混合，加入适量异丙醇研磨成均匀浆料，经对辊机压制厚度为 0.09 cm 的片材。使用冲片机裁切为 $\Phi 10$ mm 的极片，于 60℃ 鼓风烘箱干燥 12 h，制得活性炭正极。以锌片为负极，活性炭极片为正极，2 M ZnSO_4 和 0.2 M LiI 的混合水溶液为电解液，分别采用 BC 或 PBC 作为隔膜，按照负极壳→锌片→隔膜→电解液→正极极片→垫片→弹片→正极壳的顺序组装纽扣全电池。

采用 CHI760E 电化学工作站，在 0.6~1.6 V 电压范围内以 $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫描速率对全电池进行循环伏安测试，通过分析所得 CV 曲线中氧化还原峰的数量、位置及峰电位差，评估电极反应的可逆性。在新威电池测试系统上，在 0.6~1.6 V 电压区间内，采用恒电流充放电法评估全电池的循环稳定性。最后通过点亮 LED 灯演示电池的实际应用效果。

3.6. 实验废弃物处理规范

3.6.1. 固态废弃物处理

金属类废弃物：实验后拆解的锌片、铜片等金属电极，需先去除表面附着的电解液残渣与隔膜碎片，用去离子水冲洗干净后置于真空干燥箱中干燥至恒重，分类放入标注“废旧金属回收-锌/铜”的专用耐

腐蚀容器中。回收的金属材料可经纯度检测后，用于后续实验的电极预处理原料，实现资源循环利用；无法重复使用的金属废料需交由学校实验室管理部门，联系专业环保机构进行熔融回收或无害化处置。

电极与隔膜类废弃物：使用后的 BC 隔膜、PBC 隔膜、活性炭正极极片及电极浆料残渣，属于沾染重金属与化学试剂的危险固体废物。需装入内衬防渗膜的专用密封袋中，袋体清晰标注“电池电极/隔膜废料 - 含锌/碳”，放置于实验室指定的危险废物暂存柜(避光、防潮、远离热源)。收集满后由专人统一移交至学校危险废物集中处置点，经分类登记后委托具备资质的单位进行高温无害化处理或资源化回收。

3.6.2. 液态废弃物处理

含重金属废液：含硫酸锌、碘化锂的电解液、隔膜洗涤废液等，因含有锌离子、锂离子等重金属离子，属于高危污染物。需收集至贴有“含重金属废液 - 锌/锂”标签的专用耐腐蚀聚乙烯存储桶中，桶口加盖密封防止挥发与泄漏。收集过程中需避免与酸性废液混合，防止产生有毒气体。废液收集至存储桶容积的 80% 后，停止收集并及时联系实验室管理部门，由专业机构采用化学沉淀法(加入适量硫化钠溶液生成重金属硫化物沉淀)或电解法处理，达标后排放或回收重金属。

有机废液：实验中使用的无水乙醇、异丙醇等有机溶剂废液，需按“醇类废液”单独收集至专用防爆存储桶中，桶身标注“有机废液 - 醇类”及收集日期。收集过程中严禁混入水分、酸性物质或氧化剂，避免发生反应引发安全事故；存储桶需放置于通风良好、远离火源与热源的防爆区域。收集完成后，由专业机构采用蒸馏精馏法进行提纯回收，无法回收的废液需进行焚烧无害化处理。

4. 结果与讨论

4.1. 隔膜的性能分析

4.1.1. 隔膜的红外分析

细菌纤维素的磷酸化改性本质是纤维素分子链中的羟基与磷酸基团发生酯化反应，从而在结构中引入磷酸官能团。为验证改性效果，本研究采用傅里叶变换红外光谱对原始细菌纤维素(BC)及磷酸化细菌纤维素(PBC)进行了结构表征，结果如图 1 所示。由红外光谱可知，PBC 在 $920\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ 及 1250 cm^{-1} 处分别出现明显的特征吸收峰，分别归属于 P-O 键、P=O 键的伸缩振动，表明磷酸基团已成功接枝至纤维素骨架上。相较之下，BC 谱图中未见相应特征峰。这一结果证实，通过磷酸氢二铵改性处理，实现了细菌纤维素的磷酸化结构修饰。

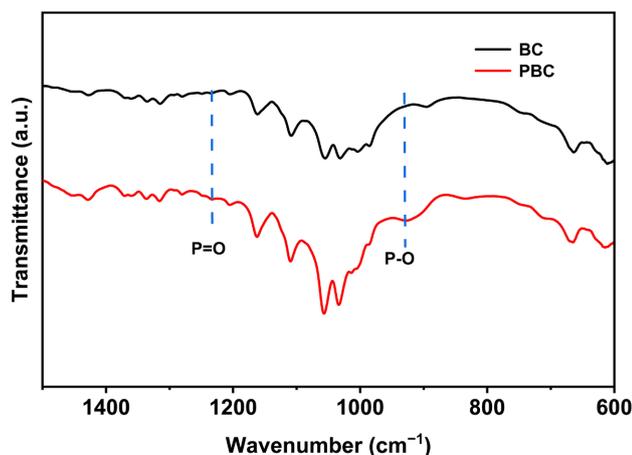


Figure 1. FT-IR spectra of BC and PBC

图 1. BC 和 PBC 的 FT-IR 谱

4.1.2. 扫描电子显微镜分析

为进一步考察磷酸化改性对隔膜微观结构的影响,分别对 BC 隔膜和 PBC 隔膜进行了扫描电子显微镜(SEM)形貌分析,结果如图 2 所示。如图中所示,未经改性的 BC 隔膜表面结构较为松散、孔隙分布不均,而经磷酸化改性后的 PBC 隔膜则表现出更为均匀、致密的多孔网络结构。该形貌变化的成因主要源于磷酸化过程中引入的磷酸基团:一方面,磷酸基团所携带的负电荷因静电排斥作用削弱了纤维素分子链间的氢键作用[13];另一方面,这些作用力的减弱导致纤维素微纤部分断裂,促使形成尺寸更小、分布更为均匀的孔隙。该结构有助于为 Zn^{2+} 提供规整且连续的传输通道,从而提升离子迁移速率与电池的整体电化学性能。

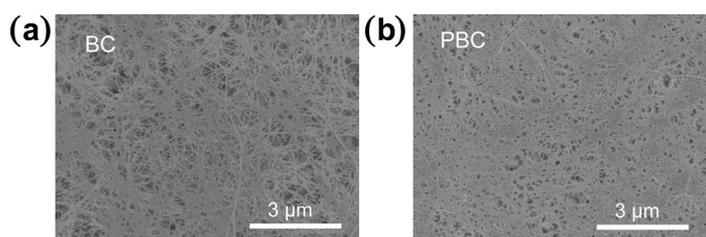


Figure 2. SEM images of (a) BC and (b) PBC separators
图 2. (a) BC 和(b) PBC 隔膜的 SEM 图

4.2. 电化学性能分析

4.2.1. 锌对称电池循环性能测试

为评估不同隔膜对锌沉积/溶解行为的影响,在 $1\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 电流密度和 $1\text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{cm}^{-2}$ 容量条件下,对分别采用 BC 隔膜与 PBC 隔膜的 $Zn||Zn$ 对称电池进行了恒电流充放电循环测试,所得电压-时间曲线如图 3 所示。结果显示,两种隔膜对应的循环稳定性存在显著差异。使用 BC 隔膜的电池在循环至 121 h 后发生短路,主要原因可归纳为以下两方面:其一,隔膜表面丰富的羟基易与电解液发生副反应,增加界面阻抗,导致循环性能恶化;其二,其较差的电解液浸润性引起锌沉积不均匀,促使枝晶生长并最终刺穿隔膜,造成电池失效。相比之下,采用 PBC 隔膜的电池可稳定循环超过 400 h,且循环过程中的电极电势维持在较低水平。

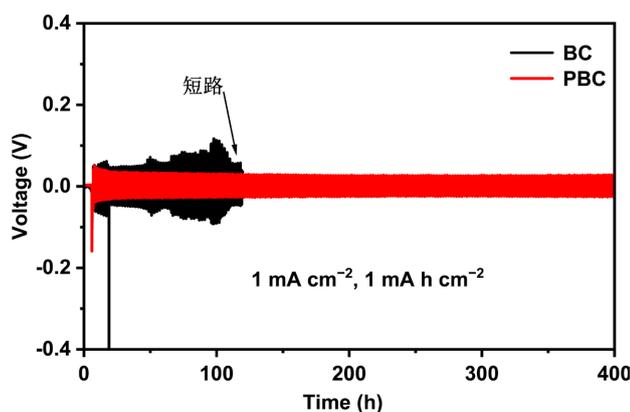


Figure 3. Cycling performance of $Zn||Zn$ symmetric batteries with BC and PBC separators at $1\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ and $1\text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{cm}^{-2}$

图 3. 采用 BC 和 PBC 隔膜的 $Zn||Zn$ 对称电池 $1\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, $1\text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的循环性能

PBC 隔膜的优秀性能主要源于其磷酸酯结构带来的多重功能：首先，磷酸基团的空间位阻效应可屏蔽部分表面羟基活性，减少副反应发生；其次，磷酸化结构提升了隔膜的亲水性与电解液相容性，进一步抑制了副产物的生成；更为重要的是，磷酸基团可通过路易斯酸碱作用吸附于锌负极表面，形成富含 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ 的致密界面层，该层可有效均匀电极表面电流分布，从而显著抑制锌枝晶的生长。上述协同作用使得对称电池表现出更低的极化电势，减少副反应并提升循环稳定性，综合验证了 PBC 隔膜在水系锌离子电池中的实用潜力。

4.2.2. 锌不对称电池库仑效率测试

为考察不同隔膜对锌沉积/溶解可逆性的影响，组装了以锌为负极、铜为正极的 $\text{Zn}||\text{Cu}$ 半电池，并在 $1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 电流密度与 $1 \text{ mA h}\cdot\text{cm}^{-2}$ 容量条件下进行了恒电流充放电测试。图 4 展示了采用 BC 隔膜与 PBC 隔膜电池的电压 - 容量曲线对比结果。

由图可见，采用 PBC 隔膜的电池在第 1、25、50 和 100 圈的充放电曲线具有更高的重叠度，表明其电极反应具有更好的可逆性。此外，PBC 隔膜对应的成核过电位为 42 mV ，显著低于 BC 隔膜电池的 72 mV ，说明 PBC 隔膜能够提供更为丰富的 Zn^{2+} 成核位点[14]，从而促进锌的均匀沉积。这一特性有助于抑制锌枝晶的形成，降低枝晶刺穿隔膜的风险，进而提升电池的循环稳定性与安全性。

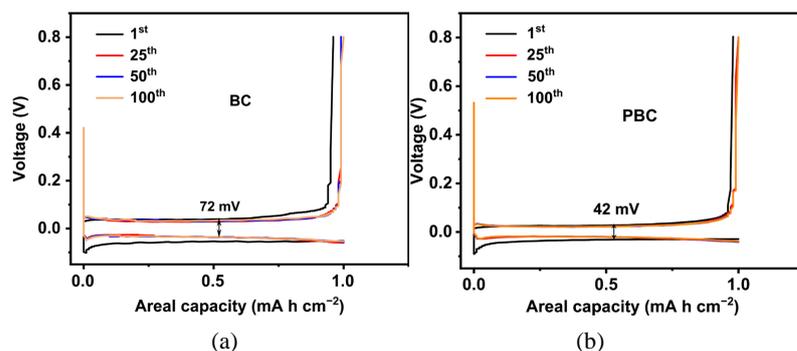


Figure 4. Galvanostatic charge-discharge curves of $\text{Zn}||\text{Cu}$ half-cells

图 4. $\text{Zn}||\text{Cu}$ 半电池恒流充放电曲线

4.2.3. 全电池电化学测试

为系统评价隔膜在实际电池体系中的作用，本研究以活性炭为正极、锌片为负极， $30 \mu\text{L } 2 \text{ mol L}^{-1} \text{ ZnSO}_4$ 与 $0.2 \text{ mol L}^{-1} \text{ LiI}$ 为电解液，分别组装基于 BC 与 PBC 隔膜的全电池，并在 $-0.6 \sim 1.6 \text{ V}$ 电压范围内以 $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫速进行循环伏安(CV)测试，结果如图 5 所示。使用 PBC 隔膜的电池表现出更高的峰电流，表明 Zn^{2+} 在其体系中具有更快的迁移和反应动力学。

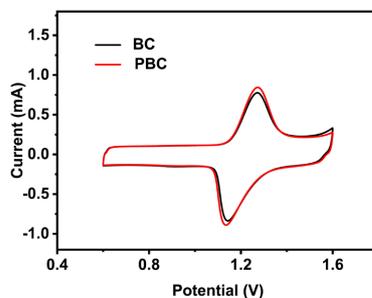


Figure 5. Cyclic voltammetry curves of full cells with BC and PBC separators

图 5. 采用 BC 和 PBC 隔膜的全电池的循环伏安曲线

这一性能提升主要归因于 PBC 隔膜具有更高的离子电导率，可为单位时间内电极表面提供更多的 Zn^{2+} ，从而增强反应效率；同时，PBC 隔膜中磷酸基团与水分子之间形成的强氢键网络能够有效抑制水分解等副反应[15] [16]。以上协同机制共同提升了全电池的电荷转移速率与电化学可逆性。

在 1 Ag^{-1} 电流密度下对两种全电池进行恒流充放电测试，结果如图 6 所示。基于 PBC 隔膜的电池初始放电比容量为 $96.17 \text{ mA h g}^{-1}$ ，随后逐渐上升并稳定在 200 mA h g^{-1} ，显著高于 BC 隔膜电池(180 mA h g^{-1})。这一容量提升主要归因于 PBC 隔膜以下几方面优势：更高的离子电导率促进了 Zn^{2+} 的快速迁移；其均匀致密的多孔结构提高了活性物质利用率；同时，磷酸基团通过抑制水的分解副反应，使得更多电子参与锌与活性炭之间的反应，从而有效提升了电池容量。

此外，在 800 次循环后，采用 PBC 隔膜的电池库仑效率仍接近 100%，表现出优异的循环稳定性。这主要得益于磷酸基团在锌负极表面形成的均匀界面层，该层能够有效引导锌的均匀沉积，显著抑制枝晶生长，从而维持电极结构的完整性与反应的可逆性。

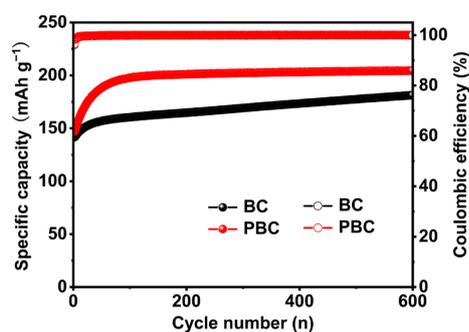


Figure 6. Cycling performance of full cells with BC and PBC separators at 1 Ag^{-1}
图 6. 采用 BC 和 PBC 隔膜的全电池在 1 Ag^{-1} 下的循环性能

为验证所制备电池的实际应用潜力，本研究进一步开展了点亮 LED 灯的演示测试。如图 7 所示，基于 PBC 隔膜的全电池可成功驱动 LED 灯并保持稳定发光，直观体现了该电池体系在实际工作条件下的可靠性与持续供电能力。该结果进一步表明，本实验所设计的磷酸化细菌纤维素隔膜及其对应电池体系，具备良好的实用化基础，显示出在新一代绿色储能器件中的应用前景。

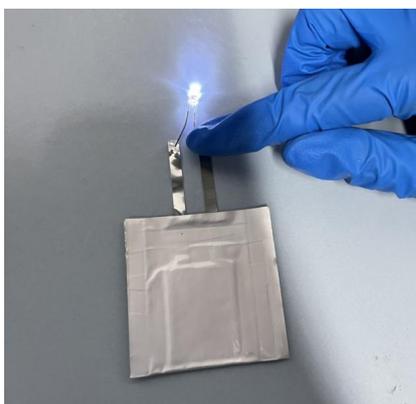


Figure 7. Aqueous zinc-ion full cells assembled with PBC separators successfully power a green LED lamp for continuous illumination
图 7. 采用 PBC 隔膜组装的水系锌离子全电池成功驱动绿色 LED 灯持续发光

5. 结语

通过开展本综合化学实验, 学生系统掌握了生物材料改性、电池组装及电化学测试等基础实验技能, 并学习运用多种表征方法分析材料结构与性能之间的内在关联, 有效提升了数据处理与科学研究的能力。在实验中, 学生通过对 BC 与 PBC 隔膜性能的对比分析, 深入理解了材料化学修饰对电池电化学行为的影响机制, 进一步激发了其探索兴趣与创新思维。本实验注重绿色化学理念的融入, 选用可再生细菌纤维素作为原料, 优化实验流程以减少试剂消耗, 在提升学生实验操作规范的同时, 也强化了其环保意识与实验室安全责任感。以磷酸化细菌纤维素隔膜在水系锌离子电池中的应用为主线, 本实验成功将学科前沿与实验教学紧密结合, 构建了涵盖材料制备、结构表征和性能测试的一体化综合实验体系。实验内容涉及材料化学、电化学、分析化学等多学科知识, 具有较强的综合性与前沿性, 有助于学生跨学科思维与创新能力的培养。教学实践表明, 本实验不仅有效提升了学生的动手能力与科学素养, 也引导其形成绿色、可持续的科研价值观。未来可进一步对该实验方案进行拓展与深化, 例如探索不同磷酸化程度对隔膜性能的影响, 或尝试其他功能化改性途径, 从而持续完善实验教学体系, 为培养具备创新精神与实践能力的高素质化学人才提供有力支撑。

参考文献

- [1] 吴兴隆, 吕红艳, 杜苗, 等. 锌-二氧化锰锌离子电池: 一个研究型综合性化学实验的设计与实践[J]. 大学化学, 2023, 38(9): 234-241.
- [2] Huang, Y., Liu, W., Lin, C., Hou, Q. and Nie, S. (2024) Advances in Application of Sustainable Lignocellulosic Materials for High-Performance Aqueous Zinc-Ion Batteries. *Nano Energy*, **123**, Article ID: 109416. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.109416>
- [3] Yang, X., Zhang, Z., Wu, M., Guo, Z. and Zheng, Z. (2023) Reshaping Zinc Plating/Stripping Behavior by Interfacial Water Bonding for High-Utilization-Rate Zinc Batteries. *Advanced Materials*, **35**, Article ID: 2303550. <https://doi.org/10.1002/adma.202303550>
- [4] Zheng, Z., Ye, H. and Guo, Z. (2024) Bacterial Cellulose Applications in Electrochemical Energy Storage Devices. *Advanced Materials*, **37**, Article ID: 2412908. <https://doi.org/10.1002/adma.202412908>
- [5] Zhou, L., Zhang, G., Guo, J., Liu, S., Chang, Y., Zhang, Y., et al. (2025) Electrostatic-Immobilized Polyiodides via Bifunctional Quaternary Ammonium Binder for Shuttle-Free and Ultra-Stable Zn-I₂ Batteries. *Advanced Functional Materials*, **36**, e13527. <https://doi.org/10.1002/adfm.202513527>
- [6] Ye, Y., Zhou, Y., Ye, H. and Cao, F. (2025) Realizing Interfacial Coupled Electron/Ion Transport through Reducing the Interfacial Oxygen Density of Carbon Skeletons for High-Performance Lithium Metal Anodes. *Journal of Energy Chemistry*, **101**, 744-750. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2024.09.063>
- [7] 李欣. 高性能水系锌离子电池细菌纤维素隔膜的制备及改性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [8] 张凯. 细菌纤维素纤维复合隔膜的制备及结构性能研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2023.
- [9] 刘文旭, 韩峰, 刘钰涵, 刘骅驿, 韩文天, 古晓斌, 张昕, 刘瑶. 基于简单非稠环电子受体的有机太阳能电池制备与表征——推荐一个综合化学实验[J]. 大学化学, 2025, 41: 2509033.
- [10] 孟祥美. 木片筛渣功能化改性及其吸附性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- [11] 汪俊锋. 锌负极多功能界面层的原位构建及其电化学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- [12] Li, T., Li, H., Wei, J., Sun, G., Sun, F., Xu, H., et al. (2025) A Durable Flame Retardant System of Phosphate with Hydroxyl Groups and Cross-Linking Agent for Cotton Fabrics. *Polymer Degradation and Stability*, **242**, Article ID: 111655. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111655>
- [13] Meel, A.K. and Mogurampelly, S. (2025) Molecular Simulations of ssDNA/ssRNA in [BMIM][PF6] Ionic Liquid: A Novel Biopolymer Electrolyte for Rechargeable Battery Applications. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **27**, 15367-15375. <https://doi.org/10.1039/d5cp01833a>
- [14] Zhu, M., Wang, H., Wang, H., Li, C., Chen, D., Wang, K., et al. (2023) A Fluorinated Solid-State-Electrolyte Interface Layer Guiding Fast Zinc-Ion Oriented Deposition in Aqueous Zinc-Ion Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, **136**, e202316904. <https://doi.org/10.1002/ange.202316904>

-
- [15] Selvam, S.P., Kamalakannan, S., Maiyelvaganan, K.R., Prakash, M., Gopi, S., Mahajan, H., *et al.* (2024) Experimental Insights and DFT Analysis of Metal-Free DNA Nanocatalyst with Enhanced Hydrogen Evolution via Phosphate-Mediated Proton Acceptance. *International Journal of Hydrogen Energy*, **51**, 1558-1576. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.254>
- [16] Pei, L.H., Xu, D.M., Luo, Y.Z., Guo, S.J., Liu, D.R., Jiang, S.J., *et al.* (2025) Zinc Single-Atom Catalysts Encapsulated in Hierarchical Porous Bio-Carbon Synergistically Enhances Fast Iodine Conversion and Efficient Polyiodide Confinement for Zn-I₂ Batteries. *Advanced Materials*, **37**, Article ID: 2420005. <https://doi.org/10.1002/adma.202420005>