

## “高分子凝聚态结构”项目式教学——揭秘锂离子电池隔膜

唐雯<sup>1</sup>, 隋璐宇<sup>1</sup>, 陈倩<sup>1</sup>, 邵俊<sup>1,\*</sup>, 彭信文<sup>1,\*</sup>, 姜建文<sup>1</sup>, 陈水亮<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江西师范大学化学与材料学院, 南昌 330022

<sup>2</sup>江西师范大学化学工程学院, 南昌 330022

**摘要:** 近年来电动车火灾事故频发, 这些事故多与锂离子电池隔膜有关。以“揭秘锂离子电池隔膜”为项目式教学主题, 开展大学“高分子结构与性能”课程“高分子凝聚态结构”的教学。学生通过完成明确锂离子电池工作原理、掌握锂离子电池隔膜作用和性能、探究隔膜类型及制备工艺、设计制备和改进电池隔膜等多个项目任务, 理解并掌握高分子不同凝聚态结构的特征、高分子结晶的形成与熔融、高分子取向态, 并构建成型工艺-凝聚态结构-物理性能之间的联系, 设计方案提升电池性能, 强化学生团队协作及沟通表达能力, 培养其严谨的科学思维、创新意识和学科核心素养。

**关键词:** 项目式教学; 高分子结构与性能; 凝聚态结构; 锂离子电池; 电池隔膜

**中图分类号:** G64; O6

## Project-based Teaching of “the Condensed State of Polymers”: Unveiling the Lithium-Ion Battery Separator

Wen Tang<sup>1</sup>, Luyu Sui<sup>1</sup>, Qian Chen<sup>1</sup>, Jun Shao<sup>1,\*</sup>, Xinwen Peng<sup>1,\*</sup>, Jianwen Jiang<sup>1</sup>,  
Shuiliang Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Chemistry and Materials, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China.

<sup>2</sup> College of Chemical Engineering, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China.

**Abstract:** In recent years, electric vehicle fire incidents have been increasingly reported, with many of these accidents being associated with lithium-ion battery separators. This study implemented “Unveiling the Lithium-ion Battery Separator” as a project-based teaching theme for the “Condensed State of Polymers” chapter in the “Polymer Structure and Properties” course. Through completing multiple project tasks, students gained comprehensive understanding of lithium-ion battery operation principles, separator functions and performance characteristics, separator types and manufacturing processes, as well as separator design and performance enhancement. The project facilitated students’ comprehension of various condensed states of polymers, including polymer crystallization formation and melting, polymer orientation, and the interrelationships among processing techniques, condensed states, and physical properties. This teaching approach effectively enhanced students’ teamwork and communication skills while cultivating rigorous scientific thinking, innovation awareness, and core subject competencies.

**Key Words:** Project-based teaching; Polymer structure and property; Condensed matter structure;  
Lithium-ion battery; Battery separator

收稿: 2024-12-23; 录用: 2025-04-03; 网络发表: 2025-07-10

\*通讯作者, Emails: jun.shao@jxnu.edu.cn (邵俊); xinwenpeng@jxnu.edu.cn (彭信文)

基金资助: 江西省普通本科高等教育教学改革研究课题(JXJG-23-2-43); 江西师范大学教改课题(JXSDJG2313, JXSDJG1755); 江西师范大学第三批课程思政示范重点项目

## 1 项目主题内容分析

2024年以来,我国各地发生多起电动车起火事故,这些事故多与锂离子电池隔膜的受热失效密切相关<sup>[1-3]</sup>。“电池隔膜”是锂离子电池中的一个重要组成部分,它的功能是隔离电池内部正负极,防止正负极直接接触造成短路,同时允许锂离子通过,完成电池的充放电过程。当前市面上的锂离子电池隔膜材料以高分子为主。“高分子凝聚态结构”是材料化学专业主干课程“高分子结构与性能”第二章教学内容<sup>[4]</sup>,其是“结构-运动-性能”课程教学主线中“结构”这一环节的重要组成部分。在以往教学过程中,本章内容存在理论与实践脱节的问题,虽然教学内容涵盖聚合物各种凝聚态结构(如晶态、非晶态、液晶态、取向和织态结构),但学生缺乏实践来验证理论知识,导致对凝聚态结构的理解和掌握不深入;此外,当前的教学过于依赖传统授课方式,缺乏师生互动和创新,难以提高学生参与度和学习兴趣。材料化学专业大学三年级的学生,经过两年半的学习,已掌握高分子化学的基本概念、原理,同时具备一定实验操作能力和数据处理能力,能够运用所学知识进行相应材料制备和性能测试。另外,学生对日益更新的高分子产品及知识充满好奇,这种好奇心是教学中探索精神的重要驱动力。

项目式教学通常采用多样化的教学方法,如团队合作、案例研究和实践操作等,增强学生的实践能力和创新思维。有研究表明<sup>[5-7]</sup>,项目式教学可提高学生学习兴趣和参与度,实现知识迁移并强化理论理解。因此,在“高分子的凝聚态结构”教学过程中,开展了“分析锂离子电池隔膜凝聚态结构、掌握电池隔膜的性能与要求、制备隔膜材料和优化隔膜性能”等一系列关键驱动性任务实践项目式教学。

## 2 项目教学目标

(1) 学习锂离子电池相关知识,了解锂离子电池隔膜工作原理,理解电池安全的重要性,分析锂离子电池隔膜凝聚态结构,强化对高分子凝聚态结构,如结晶态、非晶态、取向态等及织态结构的认识和理解。

(2) 通过对锂离子电池隔膜使用过程中性能要求的理解,深化高分子凝聚态结构对性能影响的理解,构建结构与性能的关联。

(3) 通过对电池隔膜性能要求和制备工艺的学习,掌握不同高分子凝聚态结构的制备工艺,建立成型工艺与凝聚态结构的关联。

(4) 基于对高分子链结构、凝聚态结构、高分子成型-结构-性能间关联的知识,设计分子结构、成型工艺,制备具有特定凝聚态结构及优良综合性能的电池隔膜材料,理解理论知识在科技前沿中的重要作用,实现知识迁移,培养科学探究精神和创新意识。

## 3 项目任务及教学流程

“揭秘锂离子电池隔膜”项目在理论教学上计划安排4个课时,实践课程安排4个课时,实践课程需要同学结合实验课程中相应的实验来完成项目任务。具体的师生活动和设计意图如表1所示。在开展各项目任务的过程中,教师与学生及时沟通并进行必要的协助和指导<sup>[7]</sup>。

## 4 项目实施过程及学生学习成果

### 4.1 情境引入,进行项目拆解,确定项目分工

【情境引入】观看关于南京“2.23”火灾事故报道(如图1),以及近期关于电动车火灾的事故报道,在进行防火安全教育的同时,对火灾事故形成的原因进行深入剖析。

【学生活动】学生通过观看南京“2.23”火灾事故视频,以及其他电动车引起的火灾事故视频,分析火灾可能的成因。

表1 “揭秘锂离子电池隔膜”项目式教学流程

项目任务	驱动性问题	学生活动	教师支持	设计意图
任务1: 情境引入, 进行项目拆解, 明确项目任务	与日常生活相关联的锂离子电池隔膜是怎样的?	1. 展开讨论, 分组 2. 项目拆解、确定各小组项目主题任务	1. 创设问题情境, 激发学生开展项目的兴趣 2. 进行任务拆解, 明确各小组任务	将生活中的安全事故作为典型案例进行深入剖析, 构建生活与课程的联系
任务2: 明确电池工作原理和组成, 分析电池隔膜凝聚态结构	锂离子电池隔膜与凝聚态结构有什么关联?	1. 小组查阅相关资料和文献 2. 分析锂离子电池工作原理、电池结构 3. 梳理锂离子电池隔膜中的凝聚态结构	1. 组织学生查阅资料, 引导自主、合作学习 2. 通过对锂离子电池隔膜的深入分析, 引导学生对隔膜材料中的凝聚态进行总结	通过资料检索和查阅, 培养信息处理能力; 通过汇报展示, 培养合作与沟通能力; 通过利用理论知识分析实际问题, 培养知识迁移能力
任务3: 掌握锂离子电池隔膜在电池运行过程中的作用和性能要求	隔膜在锂离子电池中有何作用? 隔膜需要满足哪些性能才能保证电池温度运行? 这些性能与凝聚态结构观有什么关联?	1. 基于对锂离子电池工作原理的理解, 梳理电池隔膜的作用和性能要求 2. 进一步理解高分子凝聚态结构与材料性能间的联系	1. 引导学生总结作为电池隔膜的性能基本需求 2. 提炼关键知识, 将高分子、凝聚态结构和性能关联起来, 深化结构与性能关联的理解	通过梳理电池隔膜的性能要求, 加强学生对高分子结构相关知识的理解和掌握; 建立结构与性能的关联, 激发学生对前沿科技的探究热情和兴趣
任务4: 结合隔膜的性能要求, 探究锂离子电池隔膜的类型及制备工艺	锂离子电池隔膜有哪些种类? 如何制备这些具有特殊凝聚态结构的隔膜材料?	1. 查阅资料, 收集整理有关锂离子电池隔膜的类型及制备工艺 2. 总结高分子结晶的形成过程和取向态结构的制备工艺	1. 明确内容, 使学生准确收集与整理信息, 为任务5和6厘清思路 2. 对学生汇报进行总结, 建立成型工艺与凝聚态结构间的联系	通过总结电池隔膜的类型和成型工艺, 加深对拉伸与取向态结构的联系, 构建成型工艺与凝聚态结构的关联
任务5: 根据高分子成型-结构-性能间的关联, 筛选材料, 探索其制备电池隔膜的成型工艺, 制备隔膜材料	根据电池隔膜的性能要求, 如何筛选原料? 如何制备聚合物材料? 如何制备锂离子电池隔膜?	1. 结合隔膜性能要求及作用、凝聚态结构与性能的基本规律, 筛选原材料及聚合工艺 2. 根据凝聚态结构与成型工艺间的关联, 探索电池隔膜制备工艺	1. 提供研究思路与支持, 引导学生思考探究 2. 展开实验探究, 理解凝聚态结构形成过程 3. 引导学生建立成型-结构-性能间的关联	根据现有理论知识, 梳理问题、设计实验方案、开展实验探究, 培养学生分析和解决问题的能力
任务6: 电池组装, 电池性能检测	如何将材料结构与性能结合? 如何评价材料的应用效果?	1. 分析材料结构与性能的联系 2. 将隔膜组装到电池中, 检测电池性能	1. 为学生提供性能检测手段及分析帮助 2. 为电池运行及性能测试提供实践环境	通过隔膜性能的检测、电池的组装、电池性能的检测, 将理论知识与实际应用联系起来
任务7: 不同电池运行的性能对比	学生设计并制备的电池隔膜与市售的电池隔膜性能有何差异? 可能的原因是什么?	1. 将制备的电池隔膜性能与市面上隔膜进行对比 2. 分析导致性能差异的各种原因	1. 开展对比实验探究 2. 帮助学生分析实验结果 3. 引导学生深度思考, 培养科学素养	通过实验结果对比分析引导学生更好地掌握理论知识, 培养创新思维及科学素养
任务8: 电池性能优化	如何优化实验方案, 以获得性能更好的电池隔膜材料?	1. 分析电池运行结果, 隔膜形貌及结构差异 2. 提出优化电池隔膜性能的技术方案	1. 引导学生分析导致电池性能差异的原因 2. 引导思考电池性能优化方案	引导学生深入思考, 培养创新思维, 强化理论知识的迁移



图1 情境引入资料图片

【教师支持】情景引入素材选择学生熟知且贴近其日常生活的事件与话题，在提高学生安全意识的同时，激发学生的学习兴趣与探究热情。

【学生交流讨论】根据展示内容，学生针对自己感兴趣或有疑点的地方进行交流讨论，讨论锂离子电池中各种可能的起火原因，并逐渐过渡到与高分子凝聚态结构关联。

【教师与学生共同总结】针对锂离子电池，电池热失控是引起着火和爆炸的常见原因之一，这种热失控主要起始于电池的负极SEI(固体电解质界面膜)膜分解，紧接着隔膜受热发生变形或损坏，并导致负极与正极直接接触，引发电池短路，造成电解液受热爆炸及燃烧，并最终蔓延到整个电池组，形成严重的热失控状态，从而造成火灾事故。另外，当锂离子在电极间移动时，会经历电化学反应沉积，并产生锂枝晶，其会对隔膜造成穿孔破坏，并引发短路<sup>[1-3]</sup>。在电池运行过程中隔膜起到非常关键的作用，而隔膜主要是高分子材料。因此选择电池隔膜和高分子的凝聚态结构作为教学主题，既与教学内容契合，又体现高分子结构与性能这一门课程在生产中的应用价值。

【师生交流讨论】锂离子电池隔膜性能与高分子凝聚态结构有密切关联，因此将该项目式教学主题定为揭秘锂离子电池隔膜。欲全面了解锂离子电池隔膜与高分子凝聚态之间的关联，将该项目式教学拆分为7个主题，先理论后实践，逐层深入。即明确电池工作原理，分析电池隔膜材料中的凝聚态结构；掌握隔膜在锂离子电池运行过程中的作用和性能要求，建立结构与性能间的联系；结合锂离子电池隔膜的性能要求，探究隔膜的类型及制备工艺，掌握成型工艺与凝聚态结构的关联；根据高分子成型-结构-性能间的关联，设计分子结构，探索隔膜成型工艺，制备隔膜材料；电池组装及性能测试；将市售电池隔膜组装电池，进行电池性能检测，并与设计的电池进行性能对比；剖析电池性能差异，隔膜性能优化。

#### 4.2 明确电池工作原理和组成，分析电池隔膜凝聚态结构

【学生活动】汇报电池的工作原理，锂离子电池是一种通过锂离子在电池正负极间往复运输实现电能和化学能转换的移动储能设备，主要组成部分包括正极、负极、电解液和隔膜。锂离子电池工作原理如图2所示。在充电过程中，在电压作用下，锂离子从正极脱出通过电解液迁移到负极并与负极表面聚集的电子结合生成金属锂，实现了从电能向化学能的转变；当电池接外电路放电时，锂离子自发地从负极脱出通过电解液回到正极，同时电子由负极通过外电路流向正极形成闭合回路对外放电，实现了化学能到电能的转变，上述充放电过程可循环进行<sup>[8]</sup>。

【教师提问】了解了锂离子电池工作原理及电池基本结构后，我们发现电池的热稳定性和安全性与隔膜密切相关，而隔膜多为高分子材料，隔膜表面主要为多孔结构，这些多孔薄隔膜形成了哪些凝聚态结构？这些结构与锂离子电池隔膜材料的性能有什么关系？

【学生交流讨论】根据学生汇报内容，针对电池隔膜中所包含的高分子凝聚态结构进行交流讨论，采用“你问我答”的形式展开，加深对高分子凝聚态结构的理解。

【教师与学生共同总结】电池隔膜与高分子凝聚态结构之间存在密切关联，因制备方式不同，电池隔膜中可包含取向、结晶、非晶、介晶等凝聚态结构。凝聚态不同结构及形貌可导致隔膜材料

性能发生变化。因此电池性能需要考虑隔膜凝聚态结构的影响。以此引入下个主题任务：凝聚态结构对性能的影响。

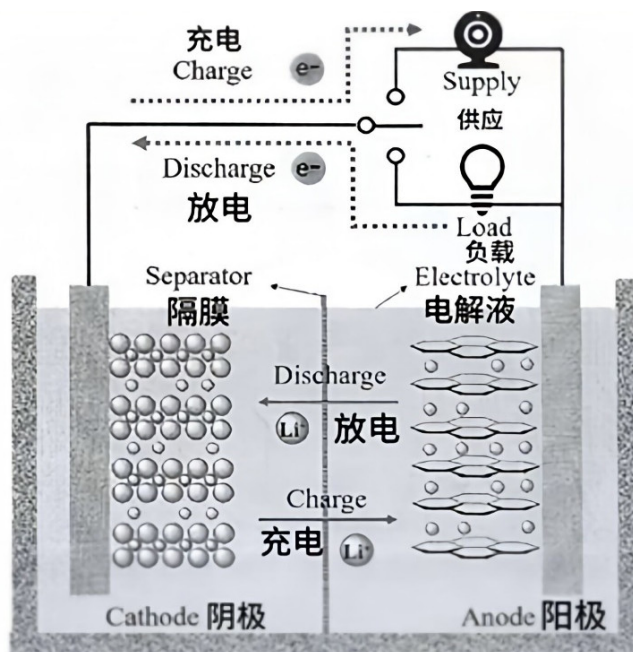


图2 锂离子电池结构及工作原理示意图<sup>[8]</sup>

#### 4.3 掌握隔膜在锂离子电池运行过程中的作用和性能要求，建立结构与性能的联系

【课堂导入】在任务2中了解到锂离子电池工作原理，并知晓隔膜在电池中的作用，接下来探究隔膜在锂离子电池运行过程中的作用，作为隔膜材料，其有哪些性能要求？

【学生任务】① 任务主题：深入探究锂离子电池隔膜在电池运行过程中的作用及性能要求。② 任务要求：a) 阐述隔膜在锂离子电池充放电过程中的作用；分析隔膜对电池性能(如容量、循环寿命、安全性等)的影响(作用探究)。b) 总结作为锂离子电池隔膜材料应具备的性能要求(如化学稳定性、机械强度、透气性等)；解释这些性能要求对电池性能的重要性(性能要求分析)。③ 任务形式：3-5人为一组，小组合作完成一份书面报告和汇报PPT。④ 时间要求：a) 书面报告和汇报PPT提交日期；b) 汇报分享时间。⑤ 注意事项：a) 查阅相关文献资料，确保信息的准确性和全面性；b) 书面报告和汇报PPT应逻辑清晰，语言流畅，引用规范；c) 汇报分享时应表达清晰。

【学生活动】学生在课堂上通过PPT汇报的形式先对隔膜在锂离子电池中所起的作用进行归纳和阐述。主要有两点：一是将电池的正极和负极隔开，二是为锂离子在正极和负极之间的传输提供通道。其次对隔膜性能要求与凝聚态结构之间的关系进行梳理，如隔膜的耐温性与聚合物结晶的熔融温度密切相关，而尺寸稳定性与结晶含量有关，聚合物的韧性与分子链结构有关。

【教师总结】锂离子电池由电极、电解液和隔膜组成，在这些关键组件中，隔膜必不可少，用来隔离正极和负极以防止短路；同时，隔膜还需要允许锂离子通过，以实现完整通路。此外，隔膜还具有以下作用：保持电池结构稳定，隔膜需要具有一定机械强度，以维持电池结构稳定；抑制锂枝晶生长，以防止电池短路和热失控。这里面涉及的很多性能都与高分子凝聚态结构相关，如高分子材料由无定形态转变为结晶形态后，其电化学稳定性提高，更不易发生溶胀，膨胀系数减小，绝缘性能提升。隔膜形成结晶态或取向态后，其耐温性能提高，力学强度提高；双轴取向后的隔膜材料韧性提高。

【学生活动】学生对电池隔膜的性能要求进行分享，如绝缘性、电化学稳定性、适宜孔径、电

解液润湿性和热稳定性等。

【教师归纳总结】电池隔膜的性能要求见表2。电池隔膜的这些性能可以通过控制材料凝聚态结构实现。如何制备获得凝聚态结构不同的材料呢？由此引入下一个主题任务。

表2 锂离子电池隔膜的性能要求说明

隔膜性能要求	性能说明
绝缘性	隔离正负极以提高安全性
电化学稳定性	不发生溶胀、膨胀系数小、不与电解液发生反应
孔隙率	较高的孔隙率以满足离子导电的需求
电解液润湿性	使隔膜有效吸收电解液，降低隔膜与两极间的界面电阻，提高离子电导率
热稳定性	耐高温，具有较高的熔断隔离性
力学韧性	电池在组装过程中需要挤压和拉伸，在此过程中不能出现断裂和破损

#### 4.4 探究隔膜的类型及制备工艺，掌握成型工艺与凝聚态结构的关联

【课堂引入】基于对电池隔膜作用和性能要求的了解，让学生从电池隔膜类型和隔膜制备工艺两方面展开文献调研，小组查阅、收集、整理资料，并展开实验探究为任务5的开展奠定基础。

【学生活动】根据锂离子电池隔膜结构特点和制备工艺，可分为微孔聚烯烃膜、改性聚烯烃膜、无纺布隔膜、涂层复合膜、纳米纤维膜等。学生查阅收集不同电池隔膜的类型，总结如表3所示。

表3 电池隔膜的类型及制备工艺

隔膜类型	制备工艺及特点
微孔聚烯烃膜	根据制备工艺不同可分为聚丙烯(PP)单层膜、聚乙烯(PE)单层膜和PP/PE/PP三层复合膜等，这些聚烯烃微孔膜具有性能优、化学稳定性好、成本低等特点
改性聚烯烃膜	PE和PP隔膜对电解质的亲和性、耐温性和润湿性较差，通过在单层聚烯烃隔膜上引入亲液性、耐高温等材料，再在微孔膜表面接枝亲水性单体或改变电解质中溶剂种类等，以获得性能优异的隔膜
无纺布隔膜	采用特制纤维进行定向或随机排列，其结构呈网状，再通过机械、热粘或化学交联等方法加固而成
涂层复合膜	以干法、湿法以及非织造布为基材，在基材上涂覆陶瓷颗粒层或复合聚合物层，根据涂层的成分不同可分为有机涂层、无机涂层、有机/无机杂化涂层、原位复合膜等
纳米纤维膜	以聚合物为原料，采用高压静电纺丝法制备得到具有多孔结构的纳米纤维膜，制备工艺简单，纤维强度高，孔隙率可调控

【衔接深入】基于所收集的电池隔膜类型，探究不同电池隔膜的制备工艺，对电池隔膜的制备、凝聚态结构及性能研究有更深刻的理解。

【学生活动】详细阐述隔膜的制备工艺，有拉伸、静电纺丝、涂覆和热压等。

拉伸分为干法拉伸和湿法拉伸，其制备工艺流程图见图3。其中干法工艺——熔融挤出拉伸工艺分为单向拉伸和双向拉伸。单向拉伸可制备单层PP微孔膜、单层PE微孔膜、多层PP复合膜和PP/PE/PP三层复合膜等，双向拉伸干法工艺主要制备单层PP微孔膜<sup>[9]</sup>。双向拉伸工艺流程：先将 $\beta$ 成核剂加入到PP熔体中形成 $\beta$ 晶， $\beta$ 晶在拉伸过程中转变为 $\alpha$ 晶。由于PP不同晶相间有密度差，晶相转变时发生收缩并形成微孔。

静电纺丝工艺(见图4)，通过在高压静电场下使溶液在喷丝口形成射流，射流在激发过程中被劈裂分散成细丝，最后在收集装置上收集纤维，得到由聚合物纤维膜。该工艺制备的膜材料比表面积

大、孔隙率高，能够吸收更多电解质，具有高离子电导率和良好电化学性能。

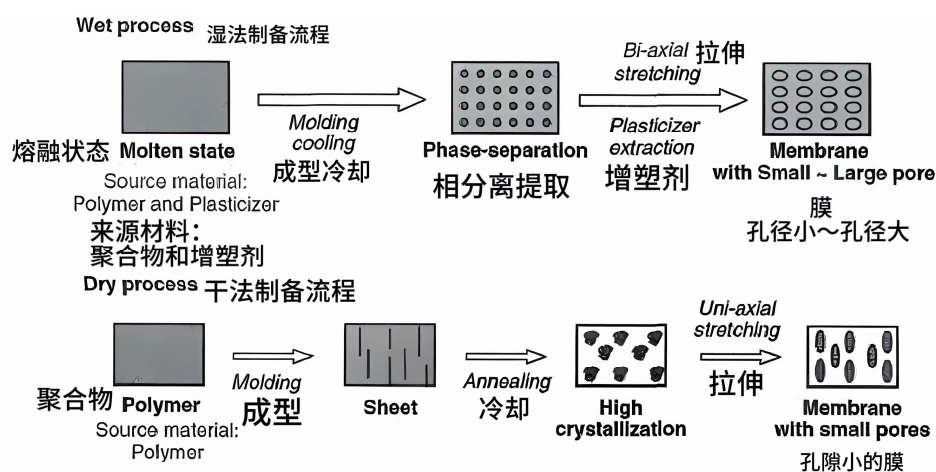


图3 微孔膜的干法和湿法制备工艺流程<sup>[8]</sup>

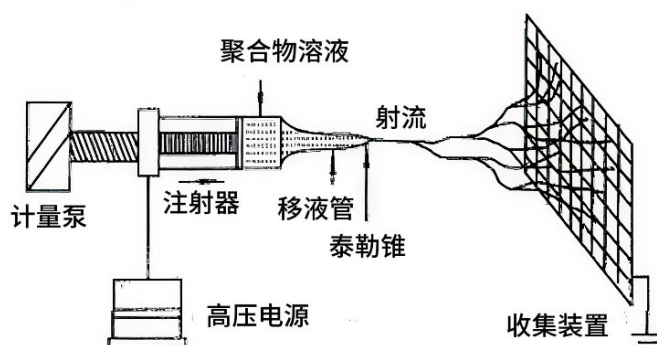


图4 静电纺丝制备工艺流程<sup>[10]</sup>

【资料总结】总结锂离子电池隔膜制备工艺，其中的核心工艺为微孔制备技术，根据工艺的不同主要分为干法牵伸(熔融拉伸)、湿法牵伸(热致相分离)、纺丝和相转化工艺。

【教师总结】以上隔膜制备工艺中，大多涉及到牵伸，牵伸是制备聚合物取向态结构的主要方法。如聚合物在经过单轴拉伸，双轴拉伸、高压静电场牵伸及高速气流牵伸过程中均获得具有取向结构的材料。如在单轴拉伸工艺中，挤出的流延膜中先部分形成结晶，经热处理后，结晶变完善。在后期热拉伸过程中，无定形分子链或链段被拉伸取向，形成微孔，通过拉伸倍数控制得到具有不同微孔尺寸的薄膜在高压静电场作用下，聚合物分子链被极度拉伸，形成高度取向的纳米及微米纤维。由于纤维较细，在电场运动后期形成不规则鞭动，纤维整体以杂乱无序的形式落到收集装置上，纤维之间形成微孔。

#### 4.5 设计高分子结构，制备高分子隔膜材料，探索成型工艺

【教师提问】基于对锂离子电池的工作原理、隔膜的作用、性能要求、类型及制备工艺等知识的掌握，以及高分子成型-结构-性能间的关联，如何设计性能优良的锂离子电池隔膜材料(既保证锂离子通过速率又能阻止电解液渗透，还耐高温)?

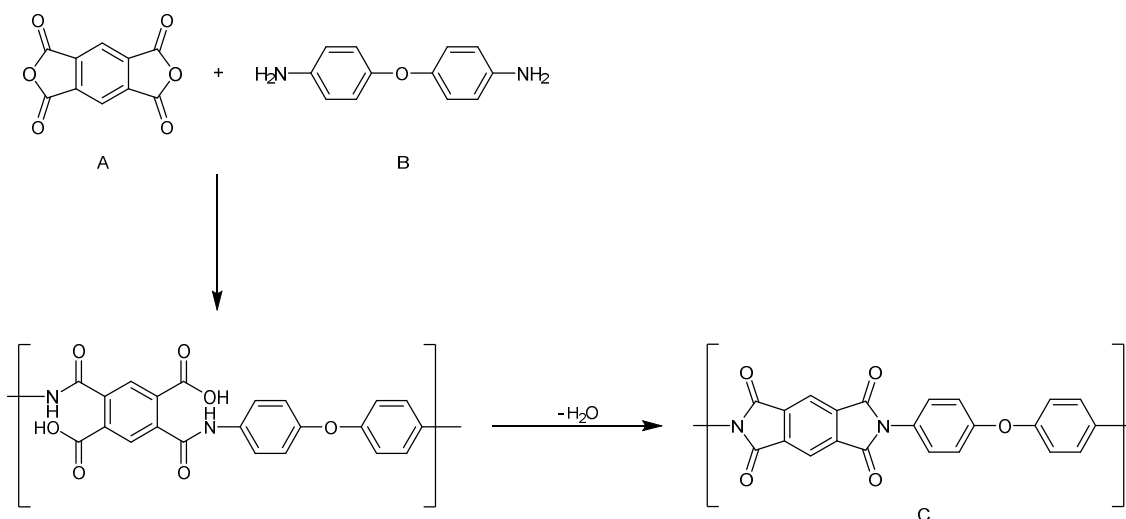
【教师支持】提供相关文献，进行实践分组，在小组开展实验设计过程中提供指导。

【学生活动】分四个小组依次开展对“锂离子通过速率大、电池循环寿命长、耐热温度高电池隔膜材料”的实验设计，并进行实践探究。各组任务划分情况见表4。

表4 锂离子电池隔膜材料制备及性能检测任务分组

分组情况	具体任务
第一组	材料结构设计与合成, 纳米纤维膜制备
第二组	纳米纤维膜性能检测, 电池组装, 电池性能评估
第三组	对照组, 以市售电池隔膜为基础组装电池, 电池运行性能评估
第四组	性能优化组, 比较第二、三组的电池性能, 提出PI电池隔膜性能优化方案, 结果验证

【学生实践】第一小组经查阅资料和小组讨论, 考虑到作为锂离子电池隔膜, 除力学性能和热稳定性外, 还需考虑电化学稳定性、电解液润湿性和介电常数等, 而这些特性主要取决于聚合物类型和分子结构。聚酰亚胺(PI)结构中的亚胺环具有极性且环中氮原子含孤电子对, 这有助于提升隔膜与电解液之间的亲和性, 酰亚胺环可显著提高材料耐热温度和力学强度, 此外PI还具有优良的抗腐蚀性能, 是一种优良的锂离子电池隔膜材料<sup>[11]</sup>, 因此采用二酐和二胺为原料制备聚酰亚胺, 其单体结构及聚合过程如图5所示。

图5 (A) 二酐结构; (B) 二胺结构; (C) PI的聚合机制<sup>[11]</sup>

文献调研发现, PI熔点高难加工, 且难溶于多数有机溶剂, 无法采用常规成型方法得到隔膜材料。结合对隔膜性能的要求及对PI结构和性能的理解, 设计出PI纳米纤维膜制备工艺<sup>[12,13]</sup>, 具体实验流程路线见表5。

表5 学生运用静电纺丝法制备聚酰亚胺纤维膜的实验设计方案

步骤流程	具体操作
第1步: 合成PI前驱体溶液	以均苯四甲酸二酐和4,4'-二氨基二苯醚为单体, 采用低温溶液缩聚法合成聚酰亚胺前驱体——聚酰胺酸(PAA)溶液
第2步: 纺丝工艺控制	将PAA溶液电纺丝成型, 控制溶液浓度、纺丝电压、接收距离和挤出速度等成型工艺, 控制纤维尺寸和尺寸分布
第3步: 纳米纤维收集	采用往复运动喷头收集装置, 增加纤维膜的收集面积, 使厚度更加均匀
第4步: 热亚胺化处理	将PAA纳米纤维膜在高温炉中热亚胺化, 获得有酰亚胺结构的PI纳米纤维

【结果展示】第二组学生对第一组制备的PI纳米纤维膜进行测试，并展示测试结果。静电纺丝过程如图6A,B所示。其中图6B可见纤维在高压电场中从喷丝口拔出的状态。制备的PI纤维膜SEM照片如图6C所示。将第一组的PI纤维膜与第三组采购的市售celgard电池隔膜(即PP隔膜)SEM照片(见图6D)进行对比。从图7可看出，与市售的celgard膜相比，第一组制备的PI纤维膜具有更大的孔径。

将制备的PI纤维膜经热压后，用于制备电池隔膜使用，并组装成软包电池(图7A)。电池运行的充放电测试结果见图8B，通过和第三组的celgard膜的充放电测试结果进行对比，发现当前制备的PI隔膜，电池充放电性能较celgard膜差(图7C)。但隔膜的耐热温度远高于celgard膜，见图7D。PI隔膜在常温下虽然存储模量较celgard隔膜低，但当温度高于60 °C，PI隔膜存储模量明显高于celgard隔膜。这表明PI隔膜具有更好的高温热力学稳定性。

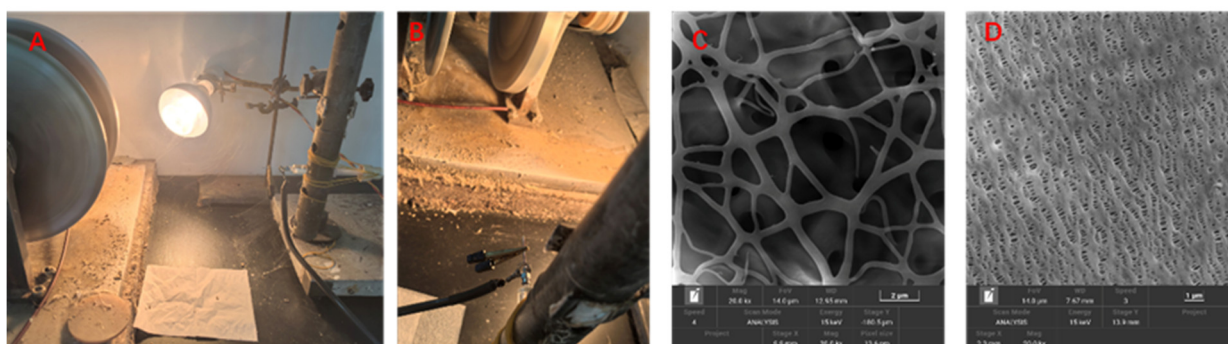


图6 (A) PI纤维膜的制备过程; (B) 喷丝口射流激发过程; (C) PI膜SEM照片; (D) celgard膜SEM照片

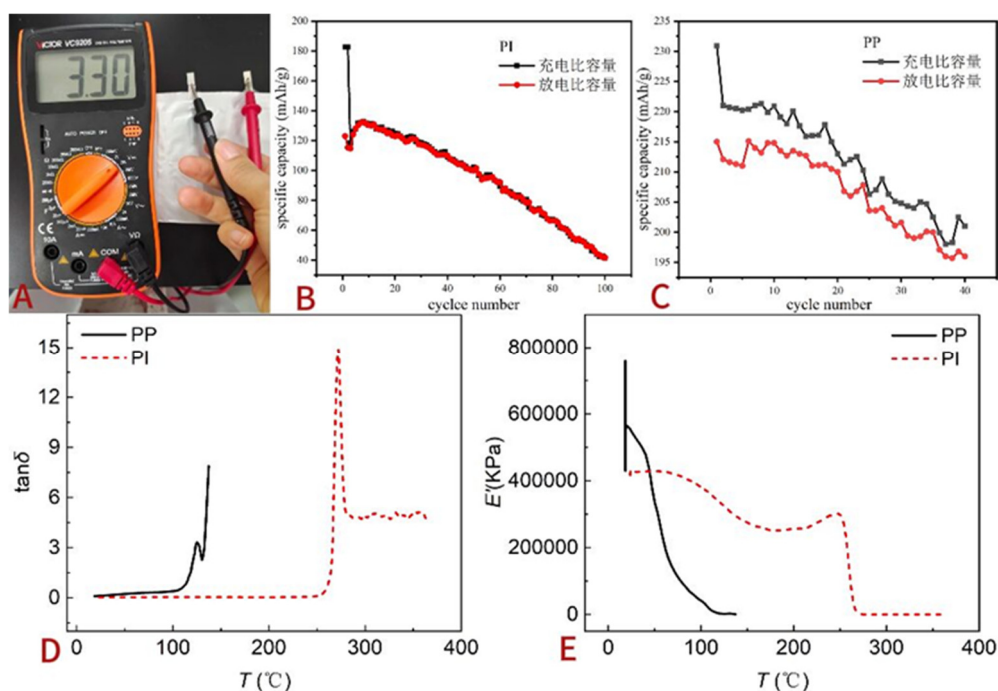


图7 (A) 软包电池; (B) PI隔膜充放电测试结果; (C) celgard膜(PP)充放电测试结果; (D) PI膜与celgard膜(PP)损耗峰对比图; (E) PI膜与celgard膜(PP)存储模量对比图

【教师总结】通过实验设计、材料制备、测试检验和性能对比发现，celgard膜的损耗峰在120 °C附近，而PI隔膜的损耗峰在250 °C，可知PI隔膜的耐热温度更高。在同等条件下，对比两种隔膜存储模量(见图7E)可知，PI隔膜的力学强度更大，说明其机械稳定性更好。但PI隔膜组装的电池充放电容

量低，性能较差。

#### 4.6 电池隔膜的性能优化

【教师支持】教师对学生所做工作表示肯定，并就初步制备的PI隔膜和celgard膜的损耗峰、充放电等相关测试结果进行分析。引导学生对PI隔膜进行优化改进。初步制备的电池隔膜体现了高分子结构与性能在锂离子电池中的重要作用<sup>[10]</sup>。但需要注意锂离子电池的性能优劣主要取决于材料形貌与结构，最初制备的PI隔膜存在孔径过大，对锂离子电池的运行与性能产生一定影响。

【学生实践】改进静电纺丝工艺，如调节溶液浓度、纺丝时间、电压大小和接收距离等纺丝参数，获得更均匀的孔隙结构，通过查阅文献，还可采用多层叠加的方式，减小纤维孔隙率等<sup>[14,15]</sup>，学生从多角度对PI隔膜性能进行优化设计，开展实践探究。

【成果展示】将隔膜进行多次叠加优化改进后，对隔膜进行充放电测试检验，结果见图8(大部分改善后的电池性能数据具有相似性，其他方案的电池性能测试数据不再重复展示)。可看出，优化后PI隔膜运行稳定性提高，具有比celgard膜更好的充放电性能。

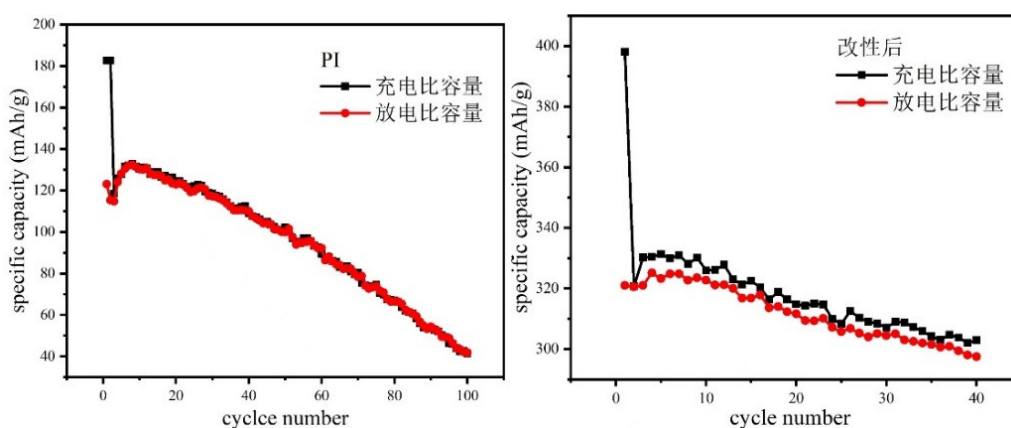


图8 优化前后PI膜充放电测试结果

【教师总结】优化后的PI隔膜充放电性能明显提升，学生对高分子结构的性能与结构关联方面有更深的理解。在整个实验设计、材料制备、性能检测、效果分析、方案优化、效果评估等过程中，培养了学生科学思维和实践探究能力。

## 5 项目教学评价及反思

本项目以“揭秘锂离子电池隔膜”为主题，展开分析锂离子电池隔膜凝聚态结构、总结电池隔膜制备工艺、设计隔膜制备路线、制备和改进隔膜性能等系列探究。在教学实践之后，本研究依据课后习题和问卷调查对教学效果、认可度和有效性进行了检验和分析。

课后共设置了14道习题，10道客观题和4道主观题。客观题包括单选和多选题。主观题包含简答和论述，简答题共3道，每道题10分，论述题20分。设置课后习题主要检验学生对教学内容的理解和掌握程度，因此习题内容以电池隔膜为主题，以教学内容为基础，试题难度由易到难逐渐过渡。前13道习题主要检验学生对电池隔膜涉及到的有关高分子凝聚态结构知识的理解和掌握程度，最后一道论述题是开放性问题，主要检验经过项目式学习后，是否能根据所学内容对实际问题进行分析与解决，并给出合理解决方案，同时也能了解学生对高分子凝聚态结构的相关内容是否有更深刻的认识。

课后习题学生的得分结果列于表6中，学生总成绩平均值为77.3分。从每道题得分情况进行分析，前10道题以聚合物结晶过程、结晶结构模型和取向态结构相关知识为主，第4和第8题以锂离子电池工作原理和组成部分为素材进行考查，第9、10题结合电池隔膜的相关内容对学生进行检验。从

得分情况看,学生对教学知识内容的掌握情况较好,但未能将项目开展中的问题与教学知识内容充分结合,由此可看出在完成任务1的过程中,学生未完全理解所探究问题与内容的意义,这可能是不同小组完成的任务不同,对于其他小组汇报的内容由于时间有限,可能没有理解和掌握到位。第11至13题为简答题,涉及到电池隔膜性能和制备的相关习题,例如考查取向态结构、聚合物内聚能密度与材料性能关系和耐热高分子材料分子结构特点等,学生对这三道题的作答情况较好,说明学生积极参与各项任务,学习取得良好效果。最后一道开放性习题,学生作答情况良好,基本上能根据所学对合成的高分子材料的性能进行优化改良,说明学生在本次项目式教学实践过程中有一定收获。

表6 课后习题每道题的平均成绩

题号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	总分
平均分	3.9	4.5	4.7	2.9	3.9	4.2	4.5	5	4.5	2.5	8.4	8.8	6.1	13.3	77.3

问卷调查以李克特五级量表(非常同意、同意、不一定、不同意、非常不同意)设计了12个问题来分析学生对项目式教学的认可度和实施的有效性。量表内容包括五个维度。(1) 知识与能力维度:学生对知识的掌握和运用程度;(2) 兴趣与参与维度:学生对本此项目式学习内容的兴趣程度与参与意愿;(3) 思维与创新维度:学生分析研究问题的深度与广度以及学生提出自己的想法与解决问题的能力;(4) 语言与沟通维度:学生与小组成员和教师的交流讨论以及成果汇报情况;(5) 情感与态度维度:学生对学习内容、学习方式和科学研究的态度以及对研究的热爱程度<sup>[16]</sup>。

问卷信度和效度用软件SPSS26.0进行分析,结果见表7、表8,效度分析结果见表9。

表7 总量表信度分析

Cronbach's Alpha	项数
0.950	12

表8 量表各维度信度检验分析

维度	Cronbach's Alpha	项数
知识与能力	0.731	2
兴趣与参与	0.799	3
思维与创新	0.858	3
语言与沟通	0.680	2
情感与态度	0.737	2

表9 量表效度分析

KMO 取样适切性量数	巴特利特球形度检验		
	近似卡方	自由度	显著性
0.734	251.772	66	0.000

从表7和表8的问卷结果可知,总量表信度系数为0.950,说明量表有较好的信度,各维度信度系数多数大于0.7,反映量表中各项数据基本合理,量表稳定性和一致性较好,因此可信度较高。根据表9可知,参照项目式教学影响的KMO检验值为0.734,巴特利特球形检验的显著性水平小于0.001,符合其要求,说明问卷效度较好。

问卷调查(图9)结果显示,平均值最高分为“兴趣与参与”维度,因为本项目教学内容与主题贴近学生实际生活,能更好地激发学生的探究兴趣,并且学生之间良好的合作关系,使学生在任务完成过程中积极参与,参与感也较强。但“情感与态度”维度的平均分最低,可能是学生对项目式教学形式的接触较少,对这种教学形式比较陌生,对这种教学形式还保持中立的态度,并且开展项目活动,时间有限,不能完全激起学生未来从事这方面研究的信心和对该领域的探究热情。其实,整个教学活动中还是存在师生互动不足和欠缺对学生思维调动等问题。因此,教师需要加强学生对教学形式的认知,增加师生互动,调动学生思维,通过介绍教学形式、分享案例,让学生了解其优势;合理规划时间,确保项目连贯性;增加互动环节,如小组讨论、成果展示,激发学生兴趣;运用启发式提问,引导主动思考;鼓励学生自主探索,培养其创新精神;另外,还需要精简活动内容,突出重点,确保学生在有限时间内充分参与,提升探究热情与信心。总之,本次项目式教学过程中,学生在项目活动过程中感受到了高分子凝聚态结构在其中的重要作用,为理解高分子材料的性能和应用奠定了一定基础,同时通过项目式教学的开展,学生体会到理论与实践是紧密相结合的,并且夯实了其学科的基础知识。



图9 问卷调查各维度平均值分析结果图

### 参 考 文 献

- [1] 王兵. 车用锂离子电池热失控规律及预警方法研究[博士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2021.
- [2] Feng, X. N.; Ouyang, M. G.; Liu, X.; Lu, L. G.; Xia, Y.; He, X. M. *Energy Storage Mater.* **2018**, *10*, 246.
- [3] Wang, Z.; Yang, H.; Li, Y.; Wang, G.; Wang, J. J. *Hazard. Mater.* **2019**, *379*, 120730.
- [4] 陈义旺, 胡婷, 谈利承, 周魏华. 高分子物理. 北京: 科学出版社, 2018: 31–60.
- [5] 姜建文, 杨宇航, 管华. 化学教育(中英文), **2022**, *43* (18), 98.
- [6] 罗亚, 万常峰, 姜建文. 化学教育(中英文), **2024**, *45* (2), 43.
- [7] 吕昭月, 陈哲昊, 倪一, 罗锻斌, 洪显峰. 大学化学, **2024**, *39* (11), 304.
- [8] 孔鲁诗. 聚酰亚胺纳米纤维的微结构调控、表面无机功能化及应用研究[博士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [9] 储健, 虞鑫海, 王丽华. 合成技术及应用, **2020**, *35* (2), 24.
- [10] 黄友桥, 管道安. 船电技术, **2011**, *31* (1), 26.
- [11] 王阳. 聚酰亚胺基锂离子电池隔膜的制备及其性能研究[硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [12] Wang, L. L.; Liu, F.; Shao, W. L.; Cui S. Z.; Zhao Y. M.; Zhou, Y. M.; He, J. X. *Compos. Commun.* **2019**, *16*, 150.
- [13] Wang, X. D.; Hu, Y.; Li, L.; Fang, H. Y.; Fan, X.; Li, S. F. *e-Polymers* **2019**, *19* (1), 470.
- [14] 徐佳军, 潘捷苗, 陈亮, 程亚军. 高分子通报, **2020**, (12), 63.
- [15] 王振华, 彭代冲, 孙克宁. 化工学报, **2018**, *69* (1), 282.
- [16] 林海慧, 钟鸣, 陈水亮. 化学教育(中英文), **2024**, *45* (24), 21.