

前沿应用技术在高分子材料实验课程中的创新融合： 界面蒸发水凝胶综合实验设计

顾万诚

扬州大学，江苏 扬州 225009

DOI: 10.61369/ETR.2026260031

摘 要： 随着高分子材料的持续发展，其在制备、原理和应用等方面的创新研究成果层出不穷。为了保持教育教学与时俱进，且与实际社会需求相结合，本文将前沿应用技术创新融入于本科高分子材料与工程实验课中，设计了一种界面蒸发水凝胶的综合实验。实验内容涵盖水凝胶设计、制备、表征及应用测试全过程，不仅强化了学生对高分子化学、高分子物理等基础理论的理解，还培养了其自主科研能力，为学生后续科研或工作奠定了基础。

关 键 词： 实验设计；高分子材料；水凝胶；前沿教学

Innovative Integration of Cutting-Edge Application Technologies in Polymer Material Experiment Course: Comprehensive Experiment Design of Hydrogels for Interfacial Evaporation

Gu Wancheng

Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009

Abstract： With the development of polymer materials, innovative research achievements in their preparation, principles, and applications have continuously emerged. To keep education and teaching aligned with the times and integrated with practical requirements, this study incorporates novel application technologies into an undergraduate experiment course on polymer materials and engineering, which designs a comprehensive experiment on hydrogels for interfacial evaporation. The experiment contains the entire process of hydrogel design, preparation, characterization, and application. It not only strengthens students' understanding of fundamental theories such as polymer chemistry and polymer physics but also cultivates their independent research capabilities, laying a solid foundation for their future scientific research or professional work.

Keywords： experiment design; polymer materials; hydrogels; cutting-edge teaching

引言

随着人口增长和工业化发展，水资源短缺已成为全球化危机之一，而海水淡化则可有效缓解该危机^[1]。其中，新兴的太阳能驱动界面蒸发技术因其清洁、可持续优势而受到广泛关注^[2,3]，即利用气-液界面的光热材料将太阳能转换为热能使海水局部升温，从而实现蒸馏法海水淡化，显著提高蒸发效率^[4,5]。

水凝胶是通过物理或化学交联形成的三维网络状亲水聚合物材料，具有多孔结构和高吸水能力^[6]，确保了海水在其内部的快速自发传输能力。在水凝胶合成过程中，通过掺杂高吸光性的碳材料或聚合物材料，可以赋予其优异的光热转换性能^[7]。更重要的是，水凝胶通过表层与水分子形成氢键，破坏了原本水分子间的氢键网络，使水分子体相中的氢键作用减弱，产生大量中间水，从而显著降低海水的蒸发焓，促进海水蒸发^[8-11]。因此，水凝胶被认为是应用于太阳能驱动界面蒸发技术的理想材料。

在高分子材料与工程本科生课程体系，仅有关于凝胶材料及相关缩聚交联反应教学内容，并未直接涉及水凝胶。然而，近年来水凝胶发展迅速，应用前景广阔，已成为高分子材料中的一个重要分支^[12]，可作为一项重要的教学内容。因此，将其融入高分子材料实验课程中，对于学生学习和掌握其合成制备、分析表征、性质原理和相关应用具有重要意义，并可以促进将课堂内容与实际需求相结合，加深学生对高分子材料的认识。

一、实验目的

本综合实验设计作为前沿应用技术在高分子材料与工程实验课中的融合创新内容，重点学习界面蒸发水凝胶的设计制备、表征分析及应用测试等。教学内容涉及高分子物理、高分子化学以及聚合物研究方法等核心课程：

(1) 将学生掌握的核心课程理论知识与实践操作相联系，夯实学生对于高分子材料的认识，培养学生从实际应用的角度，识别与分析高分子材料的工程问题。

(2) 在实验过程中，锻炼学生实践动手、仪器操作、数据整理分析以及总结汇报能力，全方位提高学生自主科研水平。

(3) 拓宽学生知识面，了解前沿技术的基本概念、原理、制备、性质及相关应用，为学生从事相关研究或工作提供入门知识和技术基础。

(4) 促进学生了解我国高分子材料发展历程及高分子材料在国家发展和社会需求中起到的作用，激发学生科研兴趣和不畏艰难、克服技术壁垒的科研精神。

二、实验原理

水凝胶合成包括物理和化学交联两种方法。物理交联是通过离子配位、氢键、或链缠结等非共价作用构建水凝胶网络，具有可逆性（图1a）。例如冻融法诱导聚乙烯醇结晶微区交联、 Ca^{2+} 诱导海藻酸钠离子交联等。化学交联则通过共价键将聚合物链构筑为永久性三维网络，例如利用 γ 射线、高能电子束或紫外线等辐射手段诱导水凝胶分子形成自由基相互交联；或通过戊二醛、环氧氯丙烷等与水凝胶的活性基团发生缩合反应，形成不可逆交联点（图1b）。

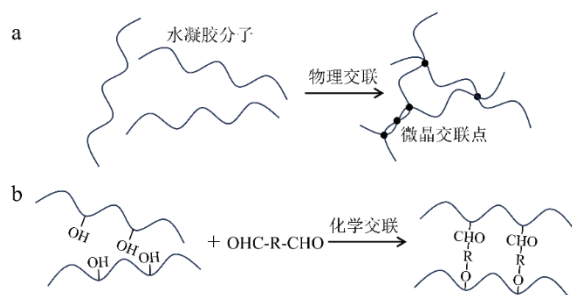


图1 水凝胶的物理交联(a)和化学交联(b)示意图

三、实验内容

1. 实验原料

盐酸多巴胺、Tris、聚乙烯醇（PVA1799）、氯化钠、甘油、化学交联剂等均为商业化实验原料，使用前未经其他处理；去离子水为实验室纯水机自制。

2. 实验仪器

实验仪器主要包括磁力搅拌器、油浴锅、电子天平、冷冻干燥机、扫描电子显微镜、傅里叶红外光谱仪、差示扫描量热仪、

视频光学接触角测量仪、手持红外热成像仪、UV-vis-NIR 吸收光谱、氙灯光源等。

3. 实验步骤

(1) 界面蒸发水凝胶的制备

将0.4g 盐酸多巴胺与0.2g Tris 依次加入至200mL 去离子水中，磁力搅拌反应6h 后获得聚多巴胺，抽滤烘干待用。随后将5g 聚乙烯醇、20g 甘油和一定量的聚多巴胺依次加入至25g 去离子水中，并置于120℃油浴锅中持续搅拌反应5h 获得水凝胶溶液。最后，通过物理或化学交联方式制得水凝胶。(a) 物理交联：将水凝胶溶液浇筑于模具中，置于-20℃冰箱中冷冻6h，随后在室温下解冻0.5h，获得水凝胶；(b) 化学交联：向水凝胶溶液中加入0.1g 化学交联剂，搅拌均匀后浇筑于模具中，在室温下交联6h 获得水凝胶。

(2) 界面蒸发水凝胶的表征

将水凝胶冷冻干燥后，裁剪为 $0.5 \times 0.5 \times 0.3 \text{ cm}^3$ 的小块试样，分别通过扫描电镜、EDS 能谱仪和红外光谱仪表征水凝胶的结构成分。用视频光学接触角测量仪测定水凝胶表面水接触角，并结合高速摄像机观察 $5 \mu\text{L}$ 去离子水滴入水凝胶表面的扩散和吸附过程。通过 UV-vis-NIR 吸收光谱测试水凝胶的吸光率，并通过氙灯模拟一个太阳光强下，水凝胶表面温度变化情况，温度由红外热成像仪测得。通过差示扫描量热仪分别分析计算纯水和凝胶中水的蒸发焓。

(3) 界面蒸发水凝胶的界面蒸发性能测试

如图2所示，在模拟界面蒸发过程中，将水凝胶置于聚苯乙烯泡沫上面组成蒸发器装置。其中，泡沫起隔热和漂浮作用。将海盐溶解于水中，制备盐度为3.5wt% 的模拟海水。用氙灯模拟一个太阳光强度的阳光，采用红外热成像仪连续监测水凝胶温度。利用与计算机连接的精密天平跟踪整个界面蒸发过程中的实时质量变化。蒸发试验在25℃室温和40% 相对湿度下进行。实验中蒸发速率通过 $v=m/st$ 计算，其中 m 为海水质量损失即蒸发量， s 为辐照面积， t 为蒸发时间。

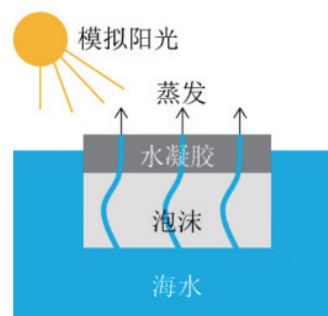


图2 界面蒸发测试示意图

四、实验设计

1. 实验准备工作

根据实验课学生人数对学生分组，每组4-6人，自行分工协作。提前半个月安排学生了解学习水凝胶的基本概念、原理、制

备方法、分析测试手段以及在界面蒸发领域的应用，并根据所学内容，每组自行设计撰写实验方案和计划内容，明确各组员分工。

2. 实验安排与内容

(1) 基本概念与方法讲解(1学时)：综合学生的实验方案和计划内容，对一般性理论知识和实验方法进行讲解，包括水凝胶的合成原理、制备方法、分析表征和蒸发性能测试等，并提醒实验过程中注意事项。

(2) 水凝胶的制备(6学时)：指导学生选择不同的物理和化学交联方法，制备水凝胶(各占2学时，共4学时)，从而掌握水凝胶不同的制备方法。同时，安排学生自行调整原料种类、原料配比或合成工艺中的一种参数，使学生深入理解配方工艺对水凝胶合成的影响(2学时)。

(3) 水凝胶的表征(4学时)：指导学生通过扫描电镜观察水凝胶结构形貌，采用红外光谱分析水凝胶成分和化学基团，利用 UV-vis-NIR 吸收光谱仪测试水凝胶光吸收率，采用差示扫描量热仪量化水分子蒸发焓，运用视频光学接触角测量仪表征水凝胶浸润性，通过手持红外热成像仪测试水凝胶的光热转换性能(3学时)。除了指导学生如何操作仪器和提醒注意事项外，在表征测试结束后，进一步教导学生如何对获得的结果进行数据处理、科学作图以及讨论分析，完善学生的独立科研能力(1学时)。

(4) 水凝胶的界面蒸发性能测试(3学时)：指导学生自主搭建界面蒸发性能测试的实验装置，包括氙灯光源设置、蒸发器装配、人工海水配制、环境温湿度控制、蒸发量称量记录，随后开展实验。在完成实验后，讲解蒸发速率计算方法，促进学生深入理解界面蒸发的原理和应用前景。

(5) 实验报告与汇报(2学时)：学生根据此前的实验经历和结果，按小组制作 PPT 进行汇报，指导教师点评并提问，锻炼学生的总结归纳和汇报能力。

五、教学建议

本实验设计不仅可以锻炼高分子材料与工程专业本科生的动手实践能力，强化对所学理论知识的理解，还让学生提前了解学习前沿应用技术。因此，建议作为高年级本科生课程内容，需已学习高分子物理、高分子化学、聚合物研究方法等基础理论课，后续可与本科毕设相连接，锻炼本科生的独立科研能力。

实验准备阶段，安排学生查阅文献和思考，一方面可以提升学生自主学习和文献检索能力，另一方面可以使更加熟悉本实验的研究背景和现状、基本理论、试验方法。同时，学生可自主设计一些除本实验以外的实验方法。

实验开展阶段，除讲解基本的实验原理、操作方法和注意事项以外，融入思政元素，介绍本实验所针对的背景需求、我国发展历程以及社会经济效益，激发学生学习兴趣和不畏艰难、克服技术壁垒的科研精神。

实验完成阶段，采用多元化考评方式，结合学生文献调研、实验方案设计、小组协调配合、实验操作、实验报告撰写和总结汇报等，全方位锻炼学生自主科研能力，强化学生在本实验中的收获与提升。

六、结语

本文将前沿应用技术创新融合于高分子材料实验课程中，系统设计了一种界面蒸发水凝胶实验。通过聚多巴胺与聚乙烯醇复合制备了一种水凝胶，利用其光热转换、水传输和蒸发焓调控等特性，实现了太阳能驱动界面蒸发应用。在实验中，通过查阅文献、实验方案设计、实验操作、实验报告撰写和总结汇报等过程，全方位锻炼了学生的自主科研能力，强化了学生对基础理论的理解。此外，通过思政元素的融入，激发学生的科研兴趣和精神，强化学生的收获与提升。

参考文献

- [1] 赵才甫. 膜法海淡系统中的增压泵应用分析[J]. 通用机械, 2015, 07: 69-71.
- [2] Y Pang, J Zhang, R Ma, et al. Solar-thermal water evaporation: a review[J]. ACS Energy Letters, 2020, 5(2): 437-456.
- [3] 孙梦茜, 陈志莉, 陈黎等. 太阳能驱动界面蒸发海水淡化技术研究进展[J]. 太阳能学报, 2024, 45(08): 423-431.
- [4] R Djellabi, L Noreen, V-D Dao, et al. Recent advances and challenges of emerging solar-driven steam and the contribution of photocatalytic effect[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431: 134024.
- [5] Z Zhu, H Zheng, H Kong, et al. Passive solar desalination towards high efficiency and salt rejection via a reverse-evaporating water layer of millimetre-scale thickness[J]. Nature Water, 2023, 1(9): 790-799.
- [6] X Zhao, X Chen, H Yuk, et al. Soft materials by design: unconventional polymer networks give extreme properties[J]. Chemical Reviews, 2021, 121(8): 4309-4372.
- [7] 韩月, 黎娜, 张畅等. 超浸润光热材料在太阳能海水淡化中的应用进展[J]. 中国表面工程, 2024, 37(06): 79-99.
- [8] S Mao, M a H Johir, C Onggowarsito, et al. Recent developments of hydrogel based solar water purification technology[J]. Materials Advances, 2022, 3(3): 1322-1340.
- [9] L Wang, J Lin, Y Li, et al. Interfacial charge transfer weakens hydrogen bonds between water molecules to accelerate solar water evaporation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(14): 7662-7669.
- [10] W Li, J Li, L Ding, et al. Interfacial Assembled Hydrogel Evaporator for Highly Efficient Thermal Management and Photothermal Coupled Water Splitting Reaction[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(52): 2411387.
- [11] Y Tian, R Song, Y Li, et al. Biomimetic Structural Design of Fabric for Low-Cost, Scalable, and Highly Efficient Off-Grid Solar-Driven Water Purification[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(19): 2309470.
- [12] 纪倩, 于小健, 周怡雯等. 高分子医用材料设计性实验教学探索—以“光固化3D打印立体网络水凝胶支架”为例[J]. 高分子通报, 2024, 37(6): 836-845.