

·教育与教学·

前沿技术融入本科实验教学： 微流体操控在聚合物实验中的应用

傅雪薇*

(四川大学高分子科学与工程学院, 高分子材料工程国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 为了进一步培养本科生的实践创新能力, 面向高分子科学与工程专业高年级本科生设计了高分子微流体和相分离协同调控纤维表面微纳结构的前沿实验。实验结合了纤维表面高分子微流体产生的瑞利不稳定性现象, 以及反溶剂诱导的相分离过程, 实现了尺寸和孔结构均可控的纺锤节纤维连续化制备。实验教学过程中, 学生不仅熟悉了微流控技术的基本原理和发展动态, 还全程参与了溶液制备、微流体控制、相分离过程控制以及集水性能测试等实验环节, 掌握了高分子微纳加工技术和形貌结构表征方法。该实验教学很好地促进了学生对高分子物理、流变学、高分子成型加工等不同学科基础知识的融会贯通, 有效培养了学生的创新思维、科研潜力和团队协作能力。

关键词: 前沿实验教学; 微流控; 高分子相分离; 孔结构调控; 高分子微纳加工

Integrating Cutting-edge Technology into Undergraduate Experimental Teaching: Application of Microfluidics in Polymer Experiments

FU Xue-wei*

(College of Polymer Science and Engineering, State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To further cultivate the practical innovation ability of undergraduate students majoring in polymer science and engineering, an innovation experiment was designed for senior undergraduate students, which combined microfluidics and phase separation for polymeric fluids on fibers. The experiment harnessed the Rayleigh-Plateau instability phenomenon generated by polymeric microfluids on the surface of fibers and the antisolvent-induced phase separation process, to achieve the continuous preparation of spindle-knot fibers with controllable size and pore structure. During the experimental teaching process, students not only familiarized themselves with the basic principles and development trends of microfluidic technology, but also participated in the entire experimental process including solution preparation, microfluidic control, phase separation process control, and water collection performance testing. As a result, they understood and mastered polymer micro-/nano-fabrication technology and morphology characterization methods. This experimental teaching has effectively promoted students to integrate basic knowledge in different disciplines such as polymer physics, rheology, and polymer molding and processing, and effectively cultivated their innovative thinking, research potential, and teamwork ability.

Keywords: Innovation experimental teaching; Microfluidics; Polymer phase separation; Pore structure control; Polymer micro-/nano-fabrication

引用: 傅雪薇. 前沿技术融入本科实验教学: 微流体操控在聚合物实验中的应用. 高分子通报, 2025, 38(5),

2024-09-25 收稿, 2024-11-29 录用, 2025-01-07 网络出版

* 通信联系人: 傅雪薇, E-mail: xuewei.fu@scu.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2025.24.266

817–824.

Citation: Fu, X. W. Integrating cutting-edge technology into undergraduate experimental teaching: application of microfluidics in polymer experiments. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2025, 38(5), 817–824.

在新能源、生物医疗、航空航天等高科技浪潮中,高分子材料学科作为材料科学的重要分支,正以前所未有的速度发展。面对这一广阔领域,高分子材料学科的教育愈发注重对学生实践创新能力的培养。这是因为高分子材料的研发与应用不仅需要深厚的理论基础,更依赖于不断的实验探索和技术创新。实践创新能力不仅是指学生能够将所学理论知识应用于解决实际问题的能力,更涵盖了创新思维、团队协作以及持续学习等多方面的综合素养^[1]。它要求学生能够敏锐洞察科技前沿,勇于挑战传统观念,敢于尝试新方法、新技术,从而在材料设计、制备、表征及性能优化等方面实现突破^[2]。

目前,针对本科生实践创新能力的培养主要依赖实验教学、科研项目和竞赛活动等方式。其中,实验教学不仅能够帮助学生直观理解抽象的理论概念,更是培养学生创新思维、实践能力和科学素养的关键途径。当前的高分子实验教学与课堂内容相辅相成,主要包括高分子化学实验、高分子物理实验和专业实验等。以高分子化学实验为例,其课程内容是建立在物理化学实验和有机化学实验基础上的,课程内容包含悬浮聚合、乳液聚合、缩聚动力学实验等^[3],目的是培养学生实验能力并熟悉聚合反应过程,从而进一步巩固理论知识。在学习上述实验课程后,学生能够掌握基本的实验技巧,系统感知高分子材料结构与性能的理论知识。目前的实验教学往往侧重于基础技能的掌握和验证性实验的完成,这对学生专业知识和实验技能的培养尤为重要,为学生将来独立设计和开展实验打下坚实基础。但如何使学生(尤其是高年级本科生)从知识和实践层面较早地接触高分子学科前沿,从而充分激发他们对科学研究的兴趣,培养创新思维、批判性思考能力、科研潜力和知识综合运用能力^[4,5],则需探索更多的实验教学模式。综上,为了培养适应未来科学研究的后备人才,我们亟需改革实验教学模式,增加探究性、设计性和前沿性实验内容,鼓励高年级本科生主动探索未知,参与科研实践,从而有效提升其科研设计、数据分析、论文撰写及团队

协作能力。

针对上述问题,四川大学高分子科学与工程学院于近期开设了高分子前沿实验课程,其独特的“分散式”创新实验教学模式为高年级本科生提供了先进开放、自由选题的科研平台^[6]。该前沿实验课程设于每学年秋季学期,包含了4个独立的前沿开放实验项目,共计32学时。笔者作为其中一个实验项目负责人,将高分子材料加工过程中涉及的形态结构演变和构效关系与微流控前沿技术进行跨学科交叉融合,设计了简易的高分子微流体和相分离协同控制装置,为学生提供了材料设计加工、结构性能表征和应用展示综合实验平台,旨在通过该实验教学使高年级本科生较早地接触前沿科学技术,激发他们的科研积极性。同时打破传统学科界限,通过高分子微流体和相分离过程控制、材料结构表征以及高分子微纳纤维集水性能测试等途径,使学生在实验中接触到高分子材料、流变学、高分子成型加工等不同领域的知识和方法,更加有效地培养他们的综合能力和创新意识。

1 实验教学设计

1.1 实验目的

(1)掌握中英文文献检索和阅读方法,了解高分子微流体控制和相分离控制的基本原理和研究进展。

(2)运用高分子物理和流变学等基础知识,控制高分子一维微流体的组成、流动过程和相分离过程。

(3)熟悉高分子微纳纤维的结构表征方法,以及纤维的集水性能测试方法。

(4)通过实验设计和实施,培养学生的创新思维,引导职业规划,了解学科前景,全面提高学生自主发现和解决问题的能力。

1.2 实验装置和试剂

材料和实验试剂:尼龙纤维(直径约50 μm ,江苏瑞祥化工有限公司)、聚偏氟乙烯(PVDF, HSV-900,法国Arkema公司)、*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF,上海阿拉丁试剂有限公司)。

实验仪器: 自制微流体和相分离协同控制装置(见图 1)、电子天平、加湿器、高清摄像机。该自制装置是由注射器(用于装载高分子溶液)、直径为 0.3~2 mm 的微管以及纤维牵引和收卷装置组装而成。

1.3 实验方法

1.3.1 高分子溶液制备

以 PVDF 溶液为例, 将 PVDF 粉末与 DMF 溶剂在室温下通过磁力搅拌混合 5 h, 以获得均匀的 PVDF 溶液。PVDF 溶液的固含量控制为 6 wt%~14 wt%。

1.3.2 基于尼龙纤维的高分子一维微流体操控和相分离控制

首先, 将尼龙纤维穿过不同尺寸的微管道, 再将制备好的 PVDF 溶液注入注射器内。通过控制收集筒的转速, 将尼龙纤维以恒定速度从 PVDF 溶液中抽出(抽丝速度在 0.5~2.5 cm/s 范围内调整)。由于固液粘附和瑞利不稳定性影响, 一维微流体在被拉出的过程中自发形成纺锤节状的微液滴。然后, 将纺锤节状微滴拉入温度可控(25、60 和 80 °C)的水浴中, 通过反溶剂诱导微流体发生相分离。最后将纺锤节纤维在 60 °C 下干燥 5 min, 最终获得具有多孔纺锤节结构的纤维样品。

1.3.3 材料表征与性能测试

通过扫描电子显微镜(SEM, Hillsboro, OR)对纺锤节纤维的形貌和微观结构进行表征。为了对水收集过程进行可视化研究, 将一根长度为 15 cm 的纤维放置在相对湿度为 90% 的雾流中, 同时使

用高清摄像机(深圳海悦电子有限公司)对液滴的收集过程进行可视化采集。关于液滴生长动力学研究, 将十根长度为 10 cm 的纺锤节纤维均匀放置在定制的支架上, 将支架固定在精密电子天平(0.1 mg, BSA124S-CW Sartorius)上, 放置于饱和雾流中(相对湿度为 90%)以收集液滴, 实时记录液滴成核、生长和再生长过程中的质量和形态变化。

2 实验教学过程

本实验课程面向高分子科学与工程专业三年级和四年级本科生, 共计 10 学时, 实验教学过程如图 2 所示。实验采用分组方式进行, 每组 4~5 名学生。课前准备阶段主要由教师讲解和学生文献调研部分组成, 使学生主动学习并熟悉微流控技术的相关概念和学科发展动态, 与之前所学的高分子物理和流变学知识建立关联。在教师引导下, 学生思考探索有效控制一维高分子微流体的新方法, 找到造成微流体收缩现象的根本原因, 从而探索出在微纳纤维表面稳定微流体的关键所在。在实验教学过程中上, 教师将进一步引导学生思考纤维表面微纳结构的调控方法及其潜在的应用场景。在教师指导下, 学生完成实验方案的撰写和修改任务, 并依据方案进行实验操作、结果分析和总结。

2.1 教师讲解和学生调研阶段(2 学时)

在课前准备阶段, 教师需为学生讲授文献检索方法, 要求学生围绕微流控技术进行文献查阅和总结, 使学生主动预习并熟悉微流控相关背景

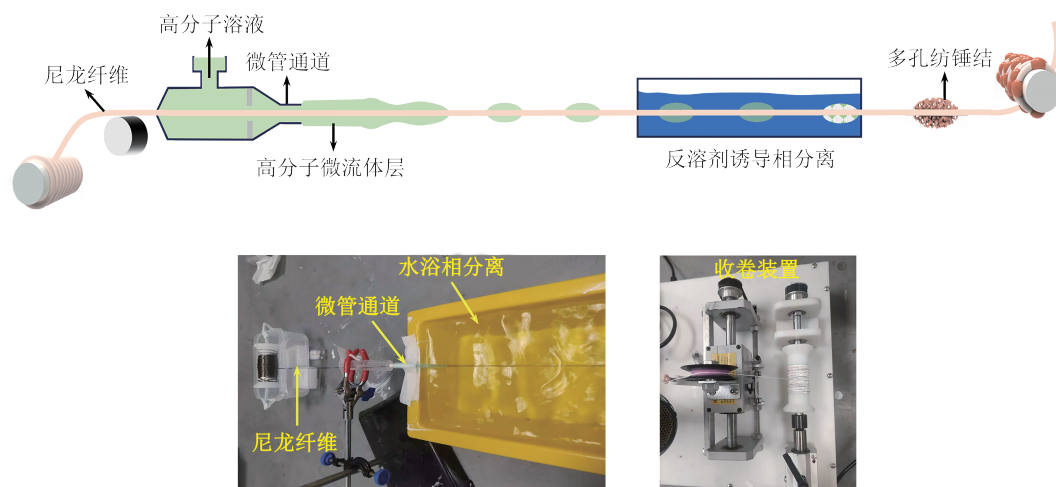


图 1 基于高分子纤维的一维微流体和相分离协同控制装置

Figure 1 The homemade setup for manipulating the phase separation process of 1D polymeric microfluid based on nylon fibers

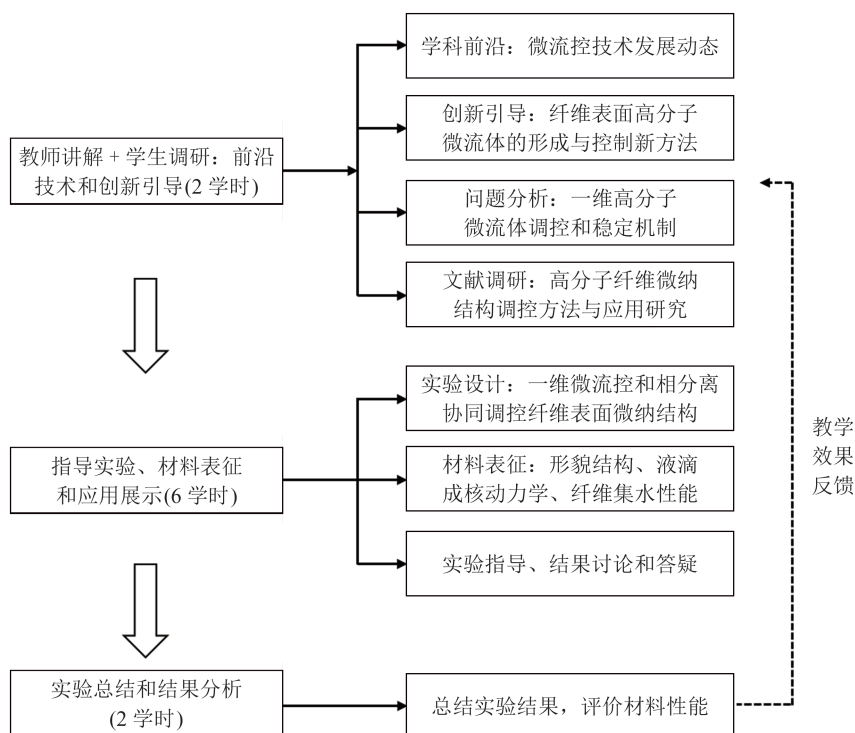


图2 实验教学流程

Figure 2 Scheme of the teaching process

知识, 锻炼他们的知识获取和自主学习能力。传统意义上, 微流控是指在微纳管道中(直径为数十到数百微米)精准操控微流体或微液滴的技术^[7]。在学生掌握基本概念后, 教师详细讲解微流体和宏观流体的不同物理特性, 如表界面效应对微流体的流动产生更为显著的影响, 进而引导并鼓励学生思考除了在一维流道里进行微流体或微液滴控制, 是否可以在任意表面, 如二维平面、一维纤维表面等很好地控制微流体的形态和流动。该部分内容可以与经典高分子加工技术, 例如狭缝涂覆、旋涂、浸涂等进行关联, 这不仅可以帮助学生强化理解上述加工技术控制和稳定微流体的基本原理, 还培养了学生的思维发散能力。随后, 教师将通过提问和小组讨论的方式, 引导学生思考如何在给定场景下(如高分子纤维表面), 对现有的微流控技术进行方法创新, 如何在一维高分子纤维表面形成、操纵并稳定微流体, 以及如何进一步在纤维表面构筑可控的微纳结构, 并思考其意义和潜在的应用场景。

2.2 实验设计和操作阶段(6学时)

学生通过文献阅读和自主讨论, 设计完善实验方案, 并在教师指导下进行实验。要求每组学生完成高分子溶液制备、微管中的流体控制、纤

维搭接和收集, 以及纤维集水性能测试的工作。在实验初期阶段, 学生将配置好的溶液注入不同直径的微管中, 并借助牵引装置从中牵引出纤维。随着微管和纤维尺寸、溶液浓度以及牵引速度的变化, 学生观察到纤维表面的流体会呈现不同的形态。此时教师需及时引导学生思考产生该现象背后的原因, 并为学生讲解瑞利不稳定性的基本含义^[8], 然后鼓励学生从界面粘附的角度思考并提出抑制微流体瑞利不稳定性的可行方法。虽然瑞利不稳定性会造成微流体在纤维表面形成不均一的涂层结构, 但是教师需引导学生从另外的视角思考, 是否可能利用一维微流体瑞利不稳定性现象, 在纤维表面构筑特殊的微纳结构, 从而制备功能高分子纤维。教师可鼓励学生从大自然中获取灵感, 引导他们思考表面具有微液滴的纤维与现实生活的联系, 激发他们的想象力。再通过介绍蜘蛛丝上的纺锤节结构及其在蜘蛛捕食、集水等生命活动上的特殊功能, 引导学生将表面形成微液滴的纤维与蜘蛛丝进行关联, 从而引出仿生学的概念, 并要求学生思考怎样借助微流体的瑞利不稳定性现象, 结合高分子相分离技术^[9], 在纤维表面构筑具有多孔微纳结构的纺锤节, 从而提高纺锤节纤维的集水性能。

学生通过改变高分子溶液浓度、微管尺寸、纤维牵引速度和相分离发生条件, 摸索出合适的加工条件, 从而不断优化改进实验方案, 获得具有形态结构可控的纺锤节纤维。在制备好纺锤节纤维后, 教师为学生演示如何对其进行形貌结构表征和集水性能测试。学生使用 SEM 观察纺锤节纤维的表/截面微观形貌; 利用加湿器生成人造雾流, 并使用高速摄像机捕获纤维的动态集水过程, 同时记录液滴质量随时间的变化过程, 计算液滴的成核生长动力学。

2.3 实验总结和结果分析(2学时)

要求学生针对实验中发现的特殊现象, 进行分组讨论和分析其原因, 并提出相应的解决方案。典型的特殊现象主要有: (1) 纤维表面不挂液; (2) 纤维表面的纺锤节呈现不对称的几何特征; (3) 经反溶剂处理的纺锤节表面呈现无孔的致密结构。通过组内讨论和教师引导, 学生提出造成上述特殊现象的科学猜想, 并通过反复调控实验条件提出解决方案。学生提出的解决方案有: 增加高分子溶液黏度以克服重力导致的掉液或液滴变形; 减小反溶剂浴与针头距离, 以缩短相分离发生时间。还有其他解决方案, 由于篇幅所限, 此处不再赘述。此过程不仅锻炼了学生主动思考、发现并解决问题的能力, 还培养了他们的团队协作能力。学生在多次摸索实验条件后, 找到加工参数对纺锤节纤维微纳结构的调控规律, 并评估其对纤维集水性能的影响, 最终独立完成实验报告。

3 实验结果分析

3.1 纤维表面纺锤节形成控制

为帮助学生直观观察高分子微流体受瑞利不稳定性现象而在纤维表面产生液滴收缩聚集的现象, 首先采用 SEM 对不同加工条件下的纤维样品进行表征。如图 3 所示, 在较低 PVDF 含量下 (低于 6%), 由于较弱的分子量缠结效应和粘弹行为, 纤维表面没有形成较为明显的纺锤结构。随着 PVDF 溶液固含量的增加, 纺锤节的尺寸和间距同样逐步增加。当提高纤维的拉伸速度, 纺锤节的尺寸和间距均随之增加。这一结果进一步表明了高分子溶液的粘弹行为对纺锤体形成有重要影响。通过对足够多 SEM 图像的统计分析, 可以发现随着 PVDF 浓度增加, 纺锤节的长度 (328~604 μm) 和高度 (111~343 μm) 均明显增加。此外, 两个纺锤节之间的间距逐渐从 360 μm 扩大至 743 μm 。这种变化趋势是 PVDF 分子链的缠结效应和流体层厚度增加导致的。此外, 当牵引速度从 0.5 cm/s 增加至 2.5 cm/s 时, 纺锤节的几何尺寸表现出先增长再趋于稳定的趋势。这是由于牵引速度的增加会导致纤维表面的液体层厚度增加。

3.2 纺锤液滴的相分离过程控制

为了强化纺锤节纤维的集水能力, 在纤维拉伸过程中引入水浴反溶剂来诱导 PVDF 纺锤体发生微相分离, 从而形成丰富的多孔结构^[10]。如图 4 所示, 在 60 $^{\circ}\text{C}$ 反溶剂处理条件下, 样品展现

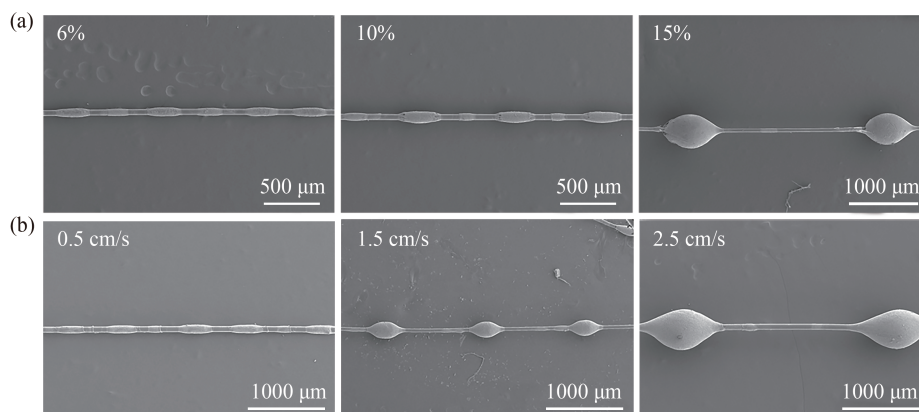


图 3 (a)不同 PVDF 溶液浓度所对应的纺锤节纤维 SEM 图像(纤维拉伸速度均为 1.5 cm/s);(b)不同纤维拉伸速度所对应的纺锤节纤维 SEM 图像(PVDF 浓度均为 10%)

Figure 3 (a) SEM images of the spindle-knot fibers fabricated with PVDF solutions with varying solid contents (drawing rate was fixed at 1.5 cm/s); (b) SEM images of the spindle-knot fibers fabricated with varying drawing rates (PVDF solid content was fixed at 10%)

出最丰富的孔结构,而25和80 °C处理条件下的样品孔结构较少。这表明,将水浴温度从25 °C提高到60 °C有利于产生丰富的孔结构,然而当溶剂温度过高(高于80 °C)时,溶剂与非溶剂之间的相互扩散过于剧烈,从而在纺锤节微流体表面形成阻挡层,限制了进一步的相分离过程,最终抑制纺锤节孔结构的形成。

3.3 集水性能研究

如图5(a)所示,相较于25和80 °C相分离条件下制备的样品(PS-25和PS-80),60 °C条件下制备的样品(PS-60)积累的液滴体积最大(2.35 mm),PS-25和PS-80收集的液滴平均最大直径分别为1.57和1.79 mm,均小于PS-60。这表明PS-60具备最为优良的液滴收集能力。纺锤节的孔径也遵循相同的趋势;其中,PS-60的孔径最大(1.2 μm),而PS-25和PS-80的孔径分别为0.6和0.7 μm。这些

结果表明,集水性能与孔径尺寸呈正向关联。此外,还通过统计SEM图像,计算了单位面积表面孔隙密度。PS-60样品的表面孔隙密度为 $9.6 \times 10^5 \text{ mm}^{-2}$,高于PS-25和PS-80(分别为 2.6×10^5 和 $3.2 \times 10^5 \text{ mm}^{-2}$)。该结果进一步表明了孔隙率与收集的液滴尺寸之间的正相关性。因此,我们可以推测孔径和孔隙率的增加提高了纺锤节的表面粗糙度和比表面积,促进了液滴在冷凝过程中的成核和生长,并增强了液滴的悬浮能力。

为了研究集水动力学,学生通过高速摄像机捕捉液滴的动态生长过程,同时记录集水过程中的重量增长曲线。如图5(b)所示,随着时间的推移,水蒸气首先在纺锤节表面发生冷凝和成核,伴随着小液滴聚集并生长成较大的液滴。有趣的是,在生长过程中,小液滴合并形成的大液滴悬浮在两个大纺锤节之间,最终在重力作用下从纤

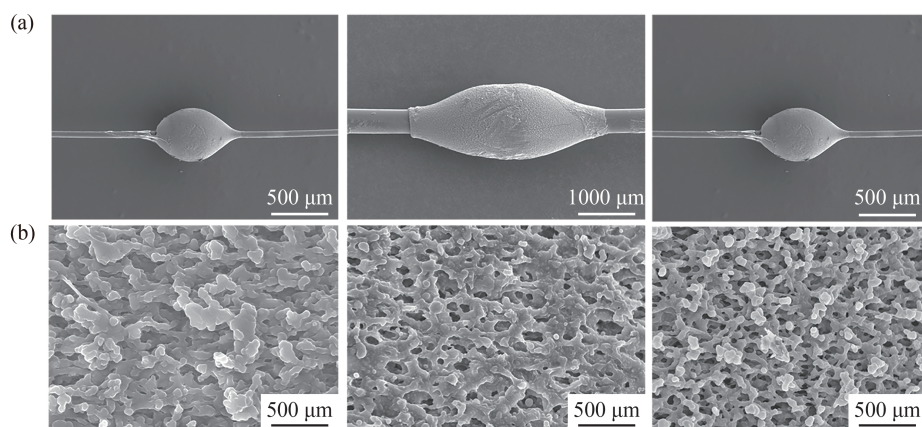


图4 (a)不同相分离条件处理的纺锤节纤维SEM图像,从左至右分别为25、60和80 °C水浴下诱导发生相分离;(b) a图对应的纺锤节孔结构

Figure 4 (a) SEM images of the spindle-knot fibers treated with different phase separation temperatures (from left to right: 25, 60, and 80 °C); (b) The corresponding SEM images of the spindle-knot

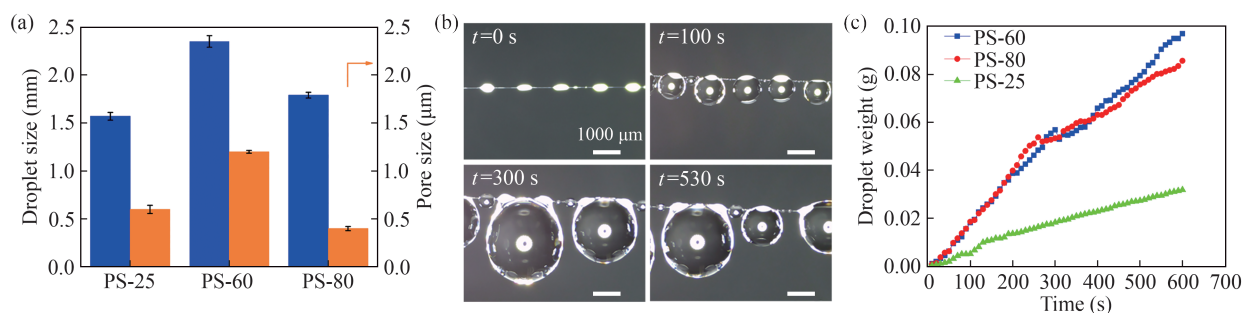


图5 (a)集水过程中,水滴最大尺寸和纺锤节平均孔径尺寸的总结;(b)90%相对湿度下,液滴在纤维表面随时间的演化过程;(c)不同样品的集水过程曲线

Figure 5 (a) Summary of the maximum droplet size and the average pore size of different spindle-knot fibers during water collection; (b) Photographs of the droplet collection process at different time periods at 90% R.H.; (c) Droplet growth curves versus time for different spindle-knot fibers

维表面落下。集水质量增长曲线如图 5(c) 所示。集水过程可划分四个阶段: 成核、生长、下落和再生长。PS-60 的初始液滴成核质量为 1.1 mg, 高于 PS-25 和 PS-80 (分别为 0.8 和 0.9 mg)。在液滴生长的第二阶段, PS-60 的生长过程明显快于其他两组样品, 这证实了多孔结构在提高集水性能方面的积极作用。生长曲线的斜率在 300 s 左右发生了显著变化, 这是液滴的下落和集水速度的减缓造成的。PS-60 在下落前的最大液滴质量达到 57.1 mg。相比之下, PS-25 和 PS-80 分别在 220 和 260 s 达到该位置, 最大液滴质量分别对应于 41.2 和 53.4 mg。PS-60 在 300 s 后显示出液滴的快速再生能力, 使其在 600 s 时总质量达到 97.3 mg, 而 PS-25 和 PS-80 在 600 s 时的液滴收集质量分别为 70.2 和 86.1 mg。

3.4 其他应用探索

除了将该纺锤节纤维用于集水之外, 学生还利用该纤维独特的微纳结构和优良的力学性能, 尝试将其用于可编程的图案化微纳结构加工。将纤维阵列放置或嵌入二甲基硅氧烷 (PDMS) 基底中, 待 PDMS 固化后, 纤维阵列可以固定在 PDMS 表面, 以构筑可编程的微纳图案(图 6a)。如图 6(b)

和 6(c) 所示, 在移除纤维阵列后, 成功复制了规则的互穿纺锤节结构。更有趣的是, 纤维上的多孔纺锤节可以通过外力滑动进行重新排列, 形成致密的纺锤节纤维。这使得我们可以进一步构筑更高层次的形状, 例如, 可以将致密的纺锤节纤维制成圆形或螺旋形(图 6d), 这些形状可能在过滤、生物技术和药物输送等领域有重要的应用前景。该部分应用不仅锻炼了学生的实践能力, 还充分激发了他们的创新思维和科学探索精神。

4 教学效果评价

本次实验教学选课人数为 13 人, 对其文献调研报告和实验报告进行了考核, 以考察学生的学习效果。如图 7(a) 所示, 分数在 80 分以上的学生达到了 11 人, 占比为 84.6%; 其中有 2 位同学不仅实验完成度高, 对实验结果的分析也全面准确, 分数达到 95 分以上, 说明该实验教学整体上取得了良好的教学效果, 学生对微流控技术的基本原理和相关发展动态掌握较为全面, 对纤维表面的流体操控方法、实验现象以及实验数据均有较为深刻的分析和理解。课程结束后对学生进行了教学评估问卷调查, 统计结果如图 7(b) 所示。约

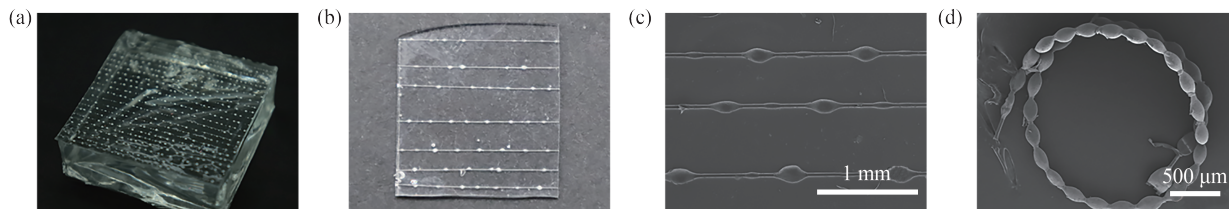


图 6 (a) 将纺锤节纤维图案化嵌入聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 表面; (b) 植入纺锤节阵列的 PDMS 基底照片; (c) 移除纺锤节纤维后 PDMS 表面的 SEM 图像; (d) 将纺锤节纤维排成圆形的 SEM 图像

Figure 6 (a) Photograph of the PDMS embedded with the spindle-knot fibers; (b) Photograph of the nanopatterned PDMS after the fiber removal; (c) SEM image of the nanopatterned PDMS; (d) SEM image of the curved spindle-knot fiber

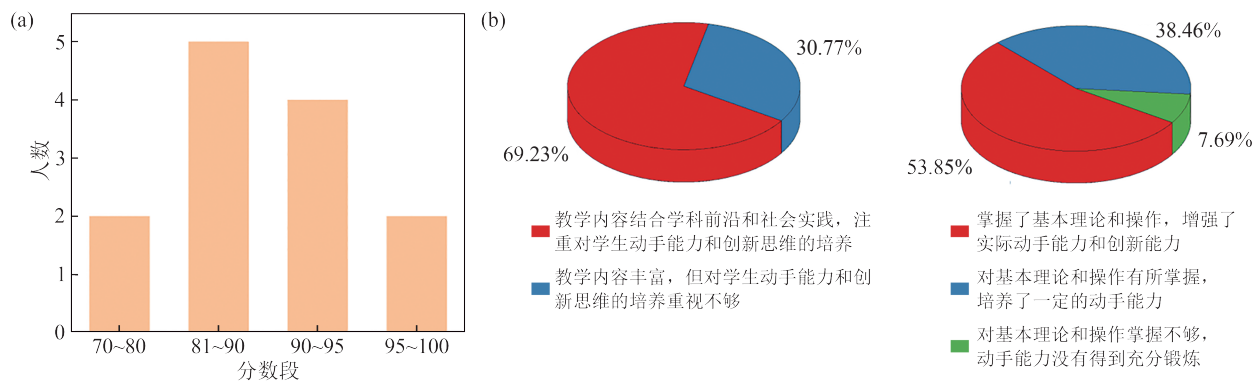


图 7 (a) 实验教学考核分数段统计; (b) 教学效果反馈统计图

Figure 7 (a) Statistics of the students' final grades; (b) Pie charts of the questionnaire results

53.85%的学生认为通过该课程的学习,其实际动手和创新能力得到了明显提高;38.46%的学生表示其动手能力得到了一定的提升,仅有7.69%的学生反映对课程的理论和基本操作掌握不够,动手能力没有得到充分锻炼。

该实验教学使高年级本科生能够尽早接触前沿科学技术,激发学习积极性和科学研究兴趣,充分锻炼他们对高分子物理、流变学和高分子成型加工等基础知识的综合运用能力、实践能力和团队协作能力。通过理论和实践结合,学生熟练掌握了高分子微纳加工方法,更加深入地理解高分子相分离和微流体的调控方法。在实验教学中,学生对实验环节中观察到的现象表现出极大好奇心,积极与教师和团队成员探讨。在教师的不断引导下,学生自主提出将所制备的纺锤节纤维用于图案化模板,展现出较强的创新思考能力。因此,本实验教学有效提升了学生的综合创新实践能力,取得了良好的教学效果。

5 总结

针对高分子前沿实验课程,设计了一种将纤维表面微流体操控与高分子相分离结合的创新实验。通过对加工条件和相分离过程控制,调控纤维表面纺锤节微纳结构,并基于该策略展现了纺锤节纤维在集水和图案化模板方面的应用优势。该实验课程将最新的科学研究成果融入实验教学中,培养了学生对新兴科学技术的兴趣,促进了学生对高分子物理、流变学、高分子成型加工等多学科基础知识的理解,使学生的实践和创新能力得到显著提升,为培养复合型、创新型人才奠定了基础。

参考文献

- 1 孙鹏飞,沈清明,钱妍,李美星,范曲立. 高分子专业课程设计探索与实践——发光共轭聚合物的设计与信息显示应用. *高分子通报*, **2024**, 37(3), 405–412.
- 2 高焱,耿纪莹,包旭. 应用型高校创新人才培养路径探索与实践. *科教导刊*, **2024**, 17, 27–29.
- 3 房海秋,崔树辉. 化学实验课程的教改探究与实践——以“高分子球晶的制备及形态分析”为例. *当代化工研究*, **2023**, 5, 143–145.
- 4 张巧玲,刘有智,杜桂丽,王香梅. 高分子实验教学改革的几点探索. *高分子通报*, **2010**, (7), 107–110.
- 5 杨乐,钱浩,陈珺,陈晶玲,杜振波. 新工科背景下充分利用大型仪器设备的高分子实验教学设计与实践. *高分子通报*, **2022**, (9), 126–132.
- 6 罗锋,李震,李洁华,谭鸿. 浅谈工科本科生科研兴趣和创新能力培养:以四川大学高分子科学与工程学院高分子专业建设为例. *教育教学论坛*, **2020**, (50), 67–68.
- 7 Whitesides, G. M. The origins and the future of microfluidics. *Nature*, **2006**, 442(7101), 368–373.
- 8 Zhou, Y.; Williams, R. J. R.; Ramaprabhu, P.; Groom, M.; Thornber, B.; Hillier, A.; Mostert, W.; Rollin, B.; Balachandar, S.; Powell, P. D.; Mahalov, A.; Attal, N. Rayleigh–Taylor and Richtmyer–meshkov instabilities: a journey through scales. *Phys. D Nonlinear Phenom.*, **2021**, 423, 132838.
- 9 Yang, G. Z.; Liu, Y.; Jin, S.; Hui, Y.; Wang, X.; Xu, L. T.; Chen, D.; Weitz, D.; Zhao, C. X. Phase separation-induced nanoprecipitation for making polymer nanoparticles with high drug loading. *Aggregate*, **2023**, 4(2), e314.
- 10 Kong, X.; Shu, G. M.; Lu, X. L.; Wu, C. R.; Gai, Y. Manipulating membrane surface porosity via deep insight into surfactants during nonsolvent induced phase separation. *J. Membr. Sci.*, **2020**, 611, 118358.