

·教育与教学·

高分子专业综合实验的设计与探索 ——以聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯塑料基 复合材料的配方设计为例

伍斌 石朋 邵凤 苗继斌 李丹 杨斌 夏茹 钱家盛*

(安徽大学化学化工学院 绿色高分子材料安徽省重点实验室 化学化工国家级
实验教学示范中心(安徽大学) 合肥 230601)

摘要: 安徽大学高分子材料与工程专业教学团队在安徽省高校协同创新项目的实施和研究生培养过程中,根据项目内容和进展情况,以可降解塑料(以聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)为例)的配方设计和加工工艺为基础,探索了如何在本科实验教学中,针对高分子材料与工程专业的学生开设专业综合型实验项目:PBAT基可降解复合材料的设计、制备与性能研究。通过同时引入聚合物-聚合物之间和聚合物-无机填料之间的界面问题,以及AI辅助配方设计,探索了如何更好地将课程思政育人和目标导向型教学模式融入人才培养过程,从而培养学生解决可降解聚合物材料加工过程中复杂工程问题的能力。

关键词: 高分子专业综合实验;可降解高分子材料;知识图谱;目标导向

Design and Exploration of Polymer Comprehensive Experiments —Taking the Formula Design of Polybutylene Adipate/Terephthalate Based Composite Materials as an Example

WU Bin, SHI Peng, SHAO Feng, MIAO Ji-bin, LI Dan, YANG Bin, XIA Ru, QIAN Jia-sheng*

(School of Chemistry & Chemical Engineering, Key Laboratory of Environment-friendly Polymer Materials,
Anhui University, National Experimental Teaching Demonstration Center for Chemistry and
Chemical Engineering (Anhui University), Hefei 230601)

Abstract: The teaching team of the polymer materials and engineering of Anhui University explored how to set up a comprehensive professional experimental project for students of this major: the design, preparation and performance research of PBAT-based degradable composite materials. The items was based on the collaborative innovation project of Anhui Province's universities and the formulation design and processing technology of degradable plastics (such as PBAT) was used as an example, during which the postgraduate was trained meanwhile. The interfacial issues between polymer-polymer and polymer-inorganic fillers, as well as AI-assisted formulation design, were introduced simultaneously. The research detected how to integrate course ideological and political education and objective-oriented teaching models into the talent cultivation process, thereby cultivating students' ability to solve complex engineering

2025-12-28 收稿, 2026-02-11 录用, 2026-04-14 网络出版

基金项目: 安徽省研究生教育质量工程项目(钱家盛研究生名师工作室, 项目号 2023yjsmsgzs006), 安徽省省级质量工程重大委托项目(项目号 2023jujxwt003), 安徽省高等学校省级质量工程教学研究一般项目(项目号 2024jyxm0062), 安徽大学教学研究重大项目(项目号 2025xjjyzd005), 安徽大学校级质量工程教育教学研究一般项目(项目号 2024xjzlgc341, 2025xjzzyq012)

* 通信联系人: 钱家盛, E-mail: 89022@ahu.edu.cn

doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.25.381

problems in the processing of degradable polymer materials.

Keywords: Polymer comprehensive experiment; Biodegradable polymer materials; Knowledge graph; Objectives oriented

引用: 伍斌, 石朋, 邵风, 苗继斌, 李丹, 杨斌, 夏茹, 钱家盛. 高分子专业综合实验的设计与探索: 以聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯塑料基复合材料的配方设计为例. 高分子通报, 2026, 39(5), 849–854.

Citation: Wu, B.; Shi, P.; Shao, F.; Miao, J. B.; Li, D.; Yang, B.; Xia, R.; Qian, J. S. Design and exploration of polymer comprehensive experiments—taking the formula design of polybutylene adipate/terephthalate based composite materials as an example. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2026, 39(5), 849–854.

随着工程专业认证工作的不断推进, 实践教学在工科专业人才培养中占据越来越重要的地位^[1]。在高分子材料与工程专业的人才培养过程中, 专业综合实验是在本专业学生完成高分子化学实验、高分子物理实验和高分子成型加工实验学习的前提下, 对之前所学理论知识、实验方案设计以及动手操作等综合能力运用的考察, 是学生在进行毕业论文和毕业设计之前必不可少的环节^[2,3]。在目前专业综合实验的开设中, 大部分学校还是聚焦于聚合物的合成与表征^[4,5], 属于高分子合成与高分子化学的范畴。其原因是受限于加工设备台套数的不足以及操作安全的影响, 鲜少有高校开设高分子成型加工类的专业综合实验^[6,7]。但显然, 作为与工程实践生产距离最近的高分子成型加工实验, 对于学生解决复杂工程问题能力的锻炼价值最大^[8]: 不仅可以检验学生对

于高分子及其复合材料理论知识的掌握程度, 还可以检验其设备操作的熟练程度、相关表征仪器的使用以及物料成本的核算等综合能力的培养。同时, 可降解材料作为战略新材料的重要组成部分, 对其加工工艺和配方设计的研究可以引导学生了解国家“双碳”目标, 树立绿色可持续发展理念, 理解生态文明建设的重要意义, 激发服务国家重大战略的使命感。

基于此种情况, 安徽大学高分子材料与工程专业教学团队在安徽省高校协同创新项目研究过程中, 积极将项目的研究成果进行转化, 在分子专业综合实验课程教学中设计了选做实验: 聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)基可降解复合材料的设计、制备与性能研究。在前期项目研究和先修课程的基础上, 首先构建了项目的知识图谱(如图1所示)。针对PBAT在使用过程中强

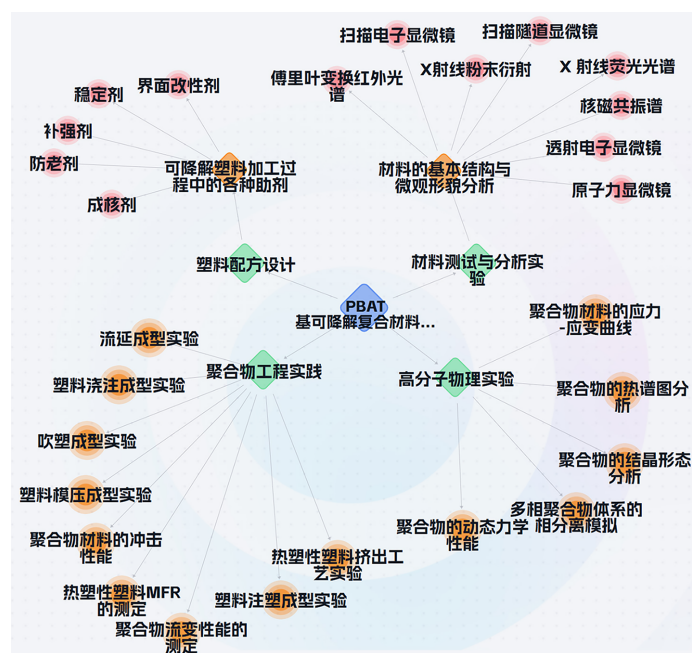


图1 基于先修课程构建的项目知识图谱

Figure 1 Project knowledge graph constructed based on preparatory courses

度和模量的不足以及成本较高等问题,分别选择聚合物和无机填料,引导学生对其进行共混改性,同时引入AI辅助进行配方和工艺设计。通过扫描电镜、X射线衍射仪、热失重分析仪、示差扫描量热仪、动态热机械分析仪、偏光显微镜以及电子万能试验机等仪器设备,研究复合材料的微观结构及其与性能之间的构效关系;探究聚合物-聚合物之间以及聚合物-无机填料之间的相界面结构对复合材料性能的影响;培养学生的创新性发散思维,以及数据分析能力、发现问题和解决问题的能力。知识图谱贯穿于整个实验过程,其功能包括:(1)在方案设计阶段,根据知识图谱梳理已学过的高分子相关专业知识,通过对所学专业知识的综合与整理,初步设计实验配方并付诸实施;(2)在实验数据分析阶段,根据知识图谱和AI辅助工具,判断已有的实验结果与实验方案中各组分的对应关系,并利用已有的实验结果初步建立界面结构与材料性能之间的对应关系;(3)在实验方案的优化阶段,配合知识图谱,在前期实验结果的基础上,针对复合材料某一项或者某几项性能的提升,作出下一步实验方案的优化。

1 实验内容

1.1 实验方案设计

在实验开展之前,每组学生(4人1组,1人为组长)首先进行文献研究和市场需求现状的调研,了解目前PBAT塑料在使用过程中存在的问题以及现有的改性方法,并针对某一个具体问题(如强度、模量以及成本等)提出解决方法,经过小组成员和指导老师讨论后提出意见和建议,设计出完整的具有良好可行性的实验方案,包括需要使用的原料、加工所需的设备以及测试所需的仪器。在此过程中,教师引导学生融入可持续发展的理念,不仅让学生掌握可降解塑料配方设计的专业知识和科研技能,同时引导他们深刻理解国家对可降解塑料材料的战略规划及产业发展趋势。

目前实验室可提供的聚合物材料为聚乳酸(PLA)和玉米淀粉,无机填料为碳酸钙(CaCO_3)、白炭黑(SiO_2)和钛白粉(TiO_2)以及界面相容剂、表面改性剂等。在配方设计过程中,各小组组长可以充分发挥各位同学的主观能动性,对各位组员合理分工,并做好团队的协调和统筹工作,最后形成本小组课题的开题报告并进行口头答辩,

由指导老师对其进行打分。文献调研和方案设计的部分可结合教学实际,以线上线下结合的方式完成,同时引入基于机器学习(ML)给出的关联大数据库(如Polymer Property Database, Cambridge Structural Database(CSD), Polymer Database (Polymer Databank)等)^[9]:首先通过对可降解塑料配方所需的原料、组分配比、加工工艺等条件进行筛选,拟出初步的实验方案;其次,利用我校与北京欧贝尔软件技术开发有限公司合作开发的塑料改性剂的制备及性能仿真教学软件对该配方进行实践,确立最优的设计配方和实验工艺;最后,通过执行实验进行复合材料的制备及性能研究,并将材料的性能与预设产物的性能进行比较。这部分内容设计8个学时完成。

与传统塑料(包括聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯等)的成型加工相比,可降解塑料的配方设计、加工工艺、所用设备相同点和不同点如下:

根据材料设计性能的不同,二者均需加入各类助剂,且使用的高速混合机、双螺杆挤出机、注塑机、平板硫化机等设备相同。

为保证可降解塑料在加工过程中的稳定性,所用的双螺杆挤出机与传统塑料加工所用的挤出机相比,在螺杆设计、冷却、干燥等工段的设计上有所区别;在实验方案中引入界面设计的概念,引导学生思考不同基体之间相界面的结构对材料性能的影响,包括聚合物-聚合物、聚合物-填料之间相界面的设计、表征及其与复合材料性能的关联。

1.2 实验操作

根据学生选择体系的不同,本部分内容分别以PBAT/PLA和PBAT/ CaCO_3 2种复合材料体系为例,来描述实验的过程。这部分内容设计为24学时。

1.2.1 PBAT/PLA复合材料的制备

按照本课题组前期的研究结果^[10],将不同质量比的PBAT和PLA混合后,直接在双螺杆挤出机中挤出造粒,将得到的塑料粒子注塑成型,利用万能试验机对复合材料的力学性能进行测试,并根据此结果,选定PBAT和PLA的最佳配比。

在此最佳配比工艺条件下,加入界面相容剂,通过控制其添加量来调控PBAT/PLA复合材料的力学性能,并得到界面相容剂的最佳添加量。

除了力学性能,利用扫描电子显微镜(SEM)、

X射线衍射(XRD)、热重分析(TGA)、示差扫描量热法(DSC)、动态热机械分析(DMA)、偏光显微镜(POM)等手段来测试复合材料的微观形貌、结晶形态、热稳定性和动态力学性能,研究材料的宏观力学性能与其微观结构和相界面结构之间的构效关系,特别是复合材料的玻璃化转变与两相聚合物之间相容性的关联问题。其实验流程如图2所示。

1.2.2 PBAT/CaCO₃复合材料的制备

首先将CaCO₃在80℃下烘4h进行活化,然后利用表面改性剂对CaCO₃进行表面改性,这部分操作在高速混合机中进行^[11],探讨CaCO₃表面改性的条件优化,包括反应时间、反应温度和改性剂的用量等。

按照设计的方案,将PBAT与改性CaCO₃在双螺杆挤出机中共混挤出,同时做一组PBAT/未改性CaCO₃复合材料样品作为空白对照,将样品挤出造粒后注塑,得到样条进行测试。研究材料的宏观力学性能与其微观结构和相界面结构之间的构效关系,特别是表面改性前后CaCO₃与PBAT之间界面相容性的问题,其实验流程如图3所示。

样品注塑成型以后,对样品进行微观形貌和宏观性能的测试,并对结果进行分析后再次进行讨论。将实测的实验结果与AI助手给出的预测结果进行比较,并将结果反馈给AI助手以完善数据库,同时再次对配方设计中的不足进行优化,直至获得较为理想的性能,以形成复合材料配方设计的完整闭环。通过对样品表征结果的分析与讨论,探讨复合材料不同组分间界面结构对样品性能的影响,建立二者之间的构效关系。在对数据进行讨论的过程中,教师的角色定位主要是引导学生对数据进行深入的分析,逐步提高学生对复合材料界面结构的认识及其对复合材料性能的重要影响。具体过程如图4所示。

1.3 实验设备和实验操作安全

高分子专业实验室拥有双螺杆挤出机2台,转矩流变仪2台,平台硫化机4台,高速混合机4台,开炼机4台,注塑机3台,吹塑机1台,设备台套数可同时满足4组学生同时开展实验工作。在实验操作安全方面,我们也做了完备的措施,主要包括:(1)实验开始之前,首先对实验课程进行必要的安全教育,包括自身安全防护教育、防烫

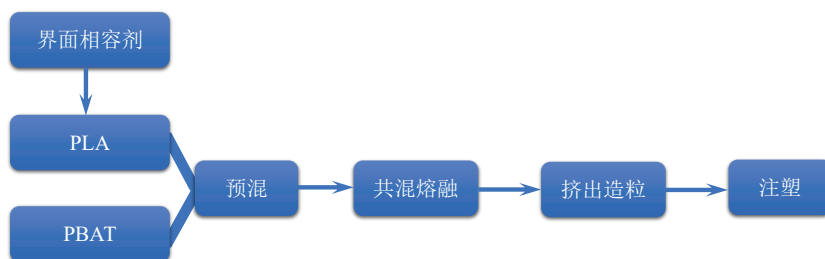


图2 PBAT/PLA复合材料的制备流程

Figure 2 Fabrication process of PBAT/PLA composites

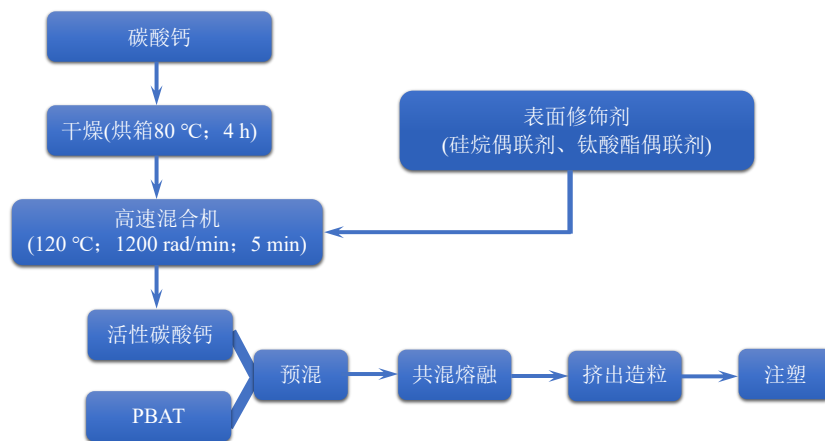


图3 PBAT/CaCO₃复合材料的制备流程

Figure 3 Fabrication process of PBAT/CaCO₃ composites

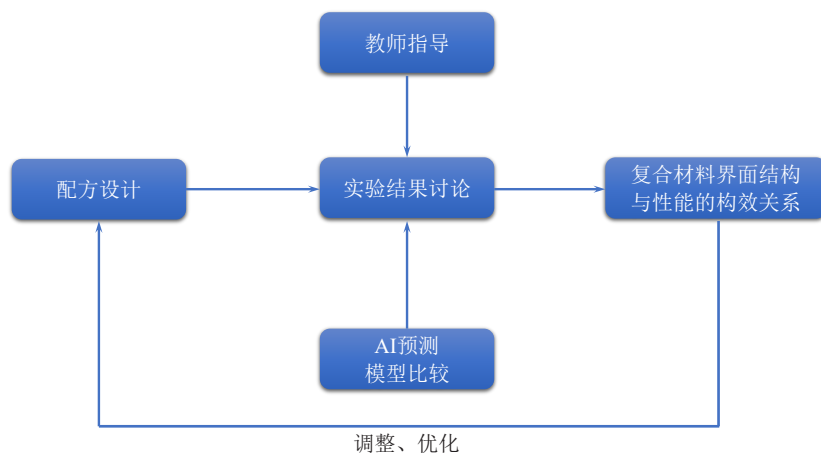


图4 配方设计的调整和优化过程

Figure 4 The process of adjusting and optimizing the formulation design

伤、防夹伤、防机械伤害以及紧急停机等教育；(2) 实验实施过程中，安全防护措施包括：在防护眼镜外加戴防护面罩，穿阻燃材质面料工作服，配备专用的防砸防滑安全鞋，操作高温部件时佩戴耐高温手套，依据使用物料的性质佩戴合适的安全防护口罩；(3) 实验过程中保证至少2位同学同时在场操作，指导教师全程跟踪指导实验操作，并做好紧急情况下的应急预案，确保实验操作的安全。

2 课题考核与教学效果

2.1 实验报告撰写与答辩

实验以得到优化的PBAT复合材料的配方设计为目的，整个实验教学的闭环完成以后，由各小组对体系的数据进行分析和完善，并撰写结题答辩PPT与结题报告。结题报告以安徽大学本科毕业论文的格式作参照，内容包括文献综述、样品制备与表征、结果与讨论以及结论4个部分。在结题报告中，每一组学生可以共享本组实验的测试结果，但结题报告由每位同学独立完成撰写。

结题答辩人员由指导老师从除开题答辩的同学以外的组员中随机抽取，答辩流程参考本科毕业论文的答辩流程：内容讲解7 min，指导老师提问5 min。答辩环节由随机抽取的学生单独进行汇报，提问环节则是所有团队成员上台进行问题回答。答辩结束后，指导老师根据汇报内容和答辩表现给出评分与反馈，各组学生需根据此对结题报告进行修改并同时提交电子版和纸质版材料，作为专业综合实验课程考核的重要依据。

2.2 实验考核

课程考核主要分为以下几个部分：

(1) 开题考核，根据培养方案的要求，依据学生开题报告和开题答辩的情况进行打分，该部分内容主要是对学生文献总结和方案设计的能力进行考核，占比30%。

(2) 过程考核，由指导老师对学生在实验过程中的参与度、仪器设备操作熟练程度、各组员之间的团队协作情况、考勤情况等进行打分，该部分内容占比40%。

(3) 结题考核，根据结题报告撰写的质量，结题答辩的表现以及组长为各组员的打分情况进行评判，该部分内容占比30%。

2.3 教学效果

安徽大学高分子材料与工程专业秉承工程专业认证“持续改进”的核心理念，在前期科研项目研究结果的基础上，本学期将该项目增添为“高分子专业综合实验”的选做项目，取得的教学效果如下：(1) 在课程达成度评价报告中，选做该实验项目的同学，平均课程目标达成得分(0.88)，明显高于全班同学的平均得分(0.85)，说明该实验项目的设立可以为毕业要求的达成提供有力支撑；(2) 对学生的口头问答式调查也显示，选做该项目的同学明显实验热情更高，尤其是团队合作更加紧密，配合更加默契。

3 结语

专业综合型实验是提高学生的综合素质，培养学生的创新实践能力以及解决复杂工程问题的重要手段，也是对学生前置课程学习效果的检验。高分子专业综合型实验的设计依托高分子化学实验、高分子物理实验和高分子材料成型加工实验，

以具有优异力学性能和较大实际使用价值的可降解聚合物复合材料的配方设计为目的,通过共混、挤出、注塑等工艺以及对样品机械性能和微观形貌的表征,探讨了配方体系中不同组分之间形成的界面结构对复合材料的性能影响。在配方和工艺设计过程中引入AI手段进行辅助,探索了AI赋能实验教学改革的新思路。通过这样的教学过程,可以引导学生对可降解塑料的配方设计进行有层次的思考,提高了学生对塑料配方设计的分析能力和解决复杂工程问题的能力。

参考文献

- 1 叶龙,于梦琪,韩德霞,韩洋,殷航,贾慧珍,马哲.前沿研究驱动的高分子综合性实验设计与实践:以可拉伸聚合物光伏电池的制备与表征为例. 高分子通报, 2025, 38(9), 1439–1450.
- 2 陈珺,钱浩,赵青华,杨乐,陈晓闽.多层次高分子专业综合实验教学体系构建与探索. 高分子通报, 2020, (7), 60–65.
- 3 施燕琴,马猛,陈思,吴波震,王旭.多样化高分子专业大综合实验改革探索研究. 高分子通报, 2017, (2), 88–93.
- 4 刘坤,张夏聪,苏新艳,闫家涛.高分子材料与工程专业综合设计型实验教学探索. 教育教学论坛, 2024, (24), 110–113.
- 5 方正军,易兵,李靖,邬峰.基于新工科理念的高分子材料专业综合教学实验探索. 实验室研究与探索, 2020, 39(10), 208–211.
- 6 徐睿杰,雷彩红,董智贤.基于应用案例的《塑料材料与配方设计》教学实践探索. 高分子通报, 2021, (11), 100–103.
- 7 刁岫,郑耀臣,崔孟忠,王慧敏,辛志荣,王雪,古雅楠.基于专业认证的高分子材料与工程实验的综合性设计实践. 高分子通报, 2022, (2), 80–85.
- 8 苗继斌,杨斌,夏茹,钱家盛.基于目标导向型教学模式的设计型高分子成型加工实验的探索. 高分子通报, 2022, (4), 94–97.
- 9 谢丹,陈凤青,姜柏羽,肖友华,刘丽娜,戴进峰.基于知识图谱与AI赋能高分子化学的数智化教学思考. 高分子通报, 2025, 38(5), 837–843.
- 10 石朋. PLA/PBAT复合材料的制备及性能研究. 安徽大学硕士学位论文, 2024.
- 11 张潜. PBAT基生物降解材料的制备与性能研究. 安徽大学硕士学位论文, 2023.