

大学化学虚拟仿真实验教学建设

——以水性聚氨酯聚合及超临界连续发泡虚拟仿真实验为例

滕鑫, 唐颂超, 杨晓玲, 庄启昕*

华东理工大学材料科学与工程学院, 材料类国家级实验教学示范中心, 上海 200237

摘要: 介绍了水性聚氨酯聚合及超临界连续发泡虚拟仿真实验教学方法。通过三维虚拟仿真技术呈现复杂聚合物合成过程, 使学生可以在直观、生动的场景中进行实验, 实现真实的实验教学效果, 而且在有限的时间内, 可进行多次筛选设计实验, 大幅度提高了实验效率。此教学方法同时解决了聚合实验材料有毒性危险、实验溶剂不易回收以及实验成本高等问题。此教学方法经过学生实际操作实践后, 取得了良好成效。

关键词: 虚拟仿真实验; 实验教学; 筛选设计; 高分子材料

中图分类号: G64; O6; TP 399

Construction of Virtual Simulation Experiment Teaching in University Chemistry Discipline: Waterborne Polyurethane Polymerization and Supercritical Continuous Foaming as an Example

Xin Teng, Songchao Tang, Xiaoling Yang, Qixin Zhuang *

National Material Experimental Teaching Demonstration Center, School of Materials Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: This paper introduces the teaching method of waterborne polyurethane polymerization and the virtual simulation experiment of supercritical continuous foaming. Using 3D virtual simulation technology to present the complex process of polymer synthesis, so that students can conduct experiments in intuitive and vivid scenes, and realize the real experimental teaching effect. Multiple screening design experiments can be carried out in the limited time, which greatly improves the experimental efficiency. This teaching method also solves the problems of toxic risk of polymerization experimental materials, difficult recovery of experimental solvents and high experimental cost. This teaching method has achieved good results after practice to students.

Key Words: Virtual simulation experiment; Experimental teaching; Screening design; Polymer materials

1 前言

1.1 研究背景

聚氨酯材料在当下被广泛应用于家居、建筑、日用品、交通及家电等领域。其中水性聚氨酯更是由于其优异的轻量化、更低的导热系数、更高的强重比以及降噪缓震等特性, 广泛应用于各个行业。聚合及超临界连续发泡更是材料学科中研究较深的经典内容, 也是材料类专业本科生必须要掌握的专业基础知识, 相关研究对接国家新材料重大发展战略需求。对于材料类专业本科生而言, 水

性聚氨酯聚合及超临界连续发泡实验由于其本身高实践性的特点,能够加深学生对聚合物合成以及成型加工原理的了解认识,同时培养学生的实践操作与判断聚氨酯配方合理性的创新能力。目前各大高校受限于各种特殊情况的发生,依托传统实验室实践的教学方式已无法满足师生的真实需求。同时,该实验所需条件严苛,聚合实验材料有毒性危险,操作不当容易造成伤亡事故。且实验溶剂不易回收、实验成本高。此外,水性聚氨酯的制备过程时间跨度长,尤其在后期的成型发泡过程中,各组分微小的变化都会得到不同状态的产品,需要的时间、药品的量非常庞大,实验门槛较高。因此,如何将人工智能、互联网、虚拟仿真等技术运用于此课程的实验教学,满足线上教学的需求,同时突破现实实验条件限制,高效安全地开展实验教学,切实提升学生实践水平,是当前高校实验教学普遍面临的挑战。

1.2 虚拟仿真实验的优势

虚拟仿真实验通过对实验设备及材料进行模拟仿真,学生在电脑端或移动端通过互联网登录系统,在高度逼真的环境下对各种虚拟仪器、虚拟元器件进行人机交互操作^[1]。同时,系统能实现实验资料的提供、实验考核的实现、实验报告的提交、实验结果的批改和实验指导、答疑与交流等管理功能。与传统实验方式相比,虚拟仿真实验教学过程更加灵活,设备配置大多仅在电脑端或移动数据端即可实现,旨在能够让学生在安全的环境下更加具有自主性地进行课外拓展试验^[2],对采用线上授课方式的学生具有很大优势,并且更加能够帮助学生实现设计能力的自我提升^[3]。因此,虚拟仿真实验通过为学生提供沉浸式较强的虚拟环境,依托人机交互技术提升学生的积极性和创造性,为解决传统实验存在的弊端、完善实验教学体系、专业教学改革提供了新方法、新思路。目前国内许多高校都建立了虚拟仿真实验室,例如北京大学依据光学位置追踪系统构建的沉浸式虚拟现实展示交互实验室、清华大学材料快速成型技术方面的虚拟仿真实验室、北京化工大学化工安全与装备虚拟仿真实验教学中心等,都已实现了虚实结合,切实提高实践教学效果的目的。

2 水性聚氨酯聚合及超临界连续发泡虚拟仿真实验教学构建

2.1 实验教学目的

为突破水性聚氨酯制备过程实验条件严苛、时间跨度长、场地面积要求大、部分高危化学品操作不当易造成伤亡事故等实体实验教学的瓶颈,推动教育信息化改革,华东理工大学材料类国家级实验教学示范中心实验教学团队开发了一套具有自主知识产权的适合本科实验教学的虚拟仿真实验教学系统《水性聚氨酯聚合及超临界连续发泡虚拟仿真实验》(软著登字第5972290)。虚拟仿真实验项目的构建,一方面应用新型信息技术安全有效地开展实验教学,另一方面也是材料学院实验教学改革和发展的一次探索。本仿真实验项目运用其他高分子材料对水性聚氨酯进行改性提高综合性能。利用现有的丙烯酸树脂、环氧树脂、有机硅等材料对其改性的研究,可以短时间让本专业学生对如何提升聚氨酯这类产品的力学性能有初步的理解^[4]。将最新科研成果融入教学,拓展学生视野,深化实验内容,极大地提高了学生对材料学科的兴趣。该平台可有效节约教学成本,提高学生学习效率,改善实验教学质量,提高其综合实验能力。

本仿真实验项目的目的主要包括以下方面:通过实验使学生了解聚氨酯的制备步骤以及实验操作步骤;尝试各种配方设计,摆脱实际实验条件限制,加深理解各组分的作用;为学有余力的学生提供反复操作、提升的平台,深刻理解聚氨酯泡沫的制备原理及各原料配方对泡沫性能的影响;了解水性聚氨酯成膜原理及实验过程中脱膜的操作;了解聚氨酯发泡工程化过程,了解不同配方的发泡过程在模具内部的变化;结合思想政治教育目标,激发学习研究兴趣、扩展视野、培养创新精神,彰显勤奋求实、教书育人意义;为社会相关材料类企业人员免费提供专业化的虚拟仿真实验平台,对接好学校与企业之间的人才通道。

2.2 仿真实验教学环境搭建

在本项目中,虚拟仿真实验的进行以教学管理平台为支撑,通过构建教学管理平台并将其数据

接口与仿真实验内容进行对接,使得用户得以通过如电脑、手机等终端来对项目进行查阅与操作^[5]。同时,教学管理平台设置了较为人性化的智能操作引导,以及在用户进行虚拟仿真实验过后自动评估分析与检测的自动批改模块,旨在能够让用户在任何时间进行自主的虚拟仿真实验,提升本项目的开放式服务体验。为保障平台能够拥有较为优秀的交互性与拓展性,本项目教学管理平台的构建共分为五层,分别是数据层、支撑层、服务层、仿真层以及应用层^[6]。系统架构如图1所示。

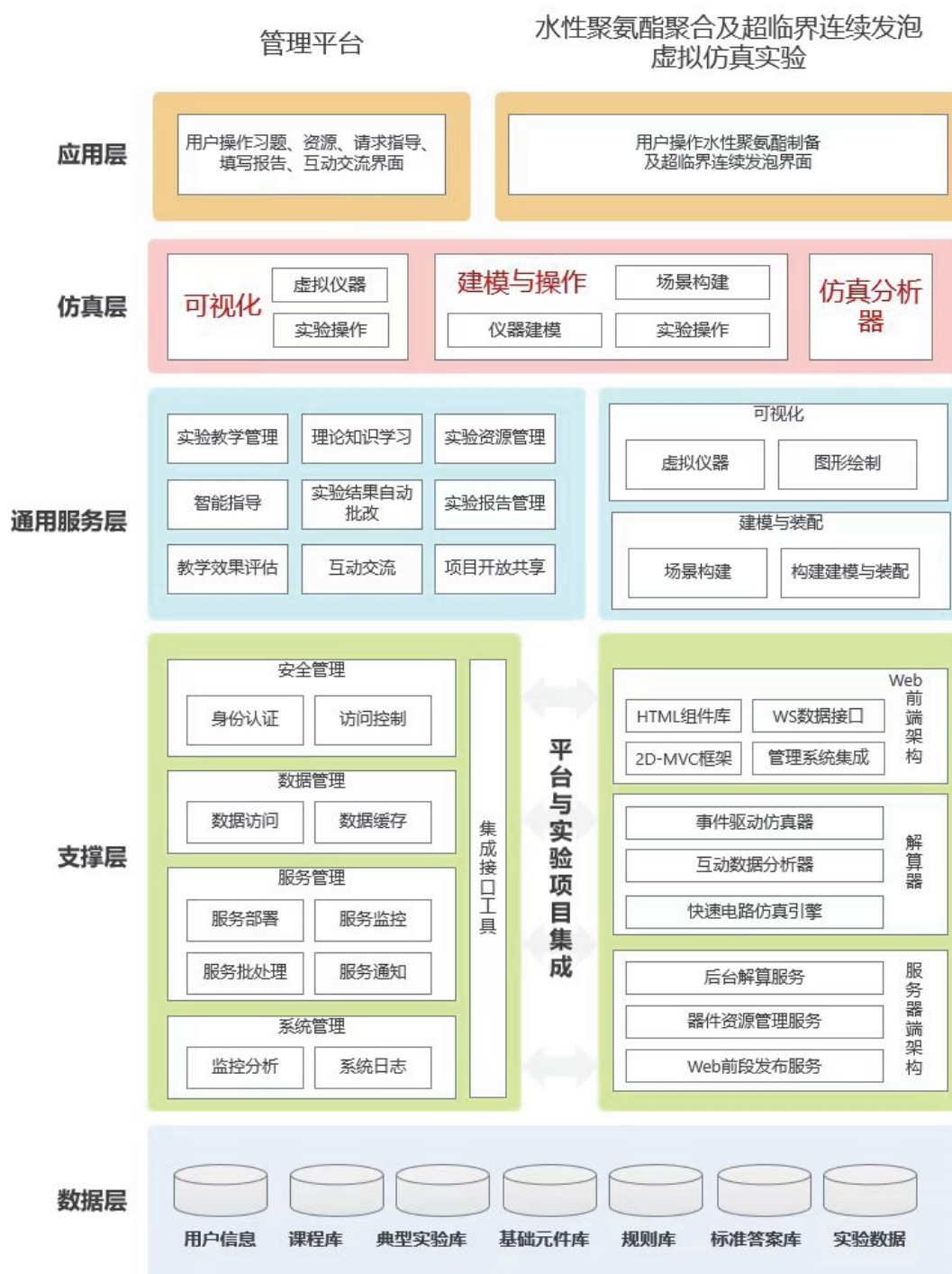


图1 系统架构图

2.3 仿真实验教学内容

本实验分为制备无水丙酮、制备聚氨酯、聚氨酯乳化、聚氨酯成膜、聚氨酯发泡五个模块进行。在构建虚拟仿真教学实验内容过程中采用了Unity3D、3D Studio Max、Visual Studio等相关工具及软件进行开发，以达到在虚拟仿真实验过程中模拟真实实验原理的效果，实验项目架构如图2所示。

实验的核心要素包括五个部分，第一部分是了解水性聚氨酯制备原理，以及对于其制备方法的选择^[7]。第二部分是熟练操作该程序并用于实际配方设计。第三部分是深刻理解聚氨酯泡沫的制备原理，并掌握各制备材料对聚氨酯泡沫性能的影响^[8]。第四部分为了解水性聚氨酯成膜原理及各参数对成膜过程的影响。成膜原理可分为三个阶段，第一阶段聚合物乳液水分蒸发，同时乳液粒子紧密堆积，使得乳液粒子的空隙被填充；第二阶段经过水分蒸发导致聚合物乳液粒子保护层逐渐被破坏，并导致粒子变形，同时粒子间界面消失；第三阶段乳液粒子中聚合物靠近同时链端相互扩散，线团结构得以融合并产生连续的聚合物涂层^[9]。第五部分为了解聚氨酯产品发泡生产的工程化过程。

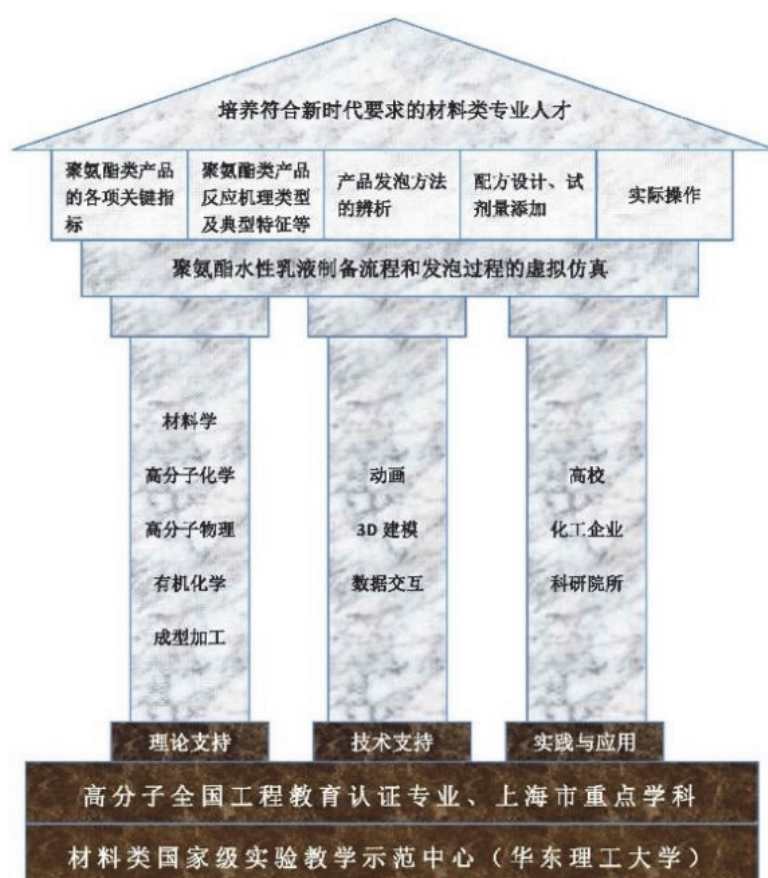


图2 实验项目架构

2.4 系统设计与实验学习过程

在仿真平台上，虚拟仿真实验教学一共设置了4个系统，包括：视频预习演示、学习、习题考核和实验报告。其中视频预习系统类似于实验教材，有实验目的、原理、操作步骤、注意事项等。首先让学生通过实验全过程的教学录像来对实验步骤有初步的了解与认知；其后通过仿真平台的学习系统，在例如文字指引、语音指引等智能化引导的帮助下，对学生的虚拟仿真实验操作进行引导；习题考核系统为无任何提示地进行主观题目解答^[10]，答题结束后系统根据答题关键字对照预设答案自动给出分数；最后通过报告系统来将虚拟仿真实验的过程、目的、结果以及对结果数据的分析与评估进行归纳整理最终出具实验报告以供教师进行评阅^[11]。实验学习过程如图3、4所示。

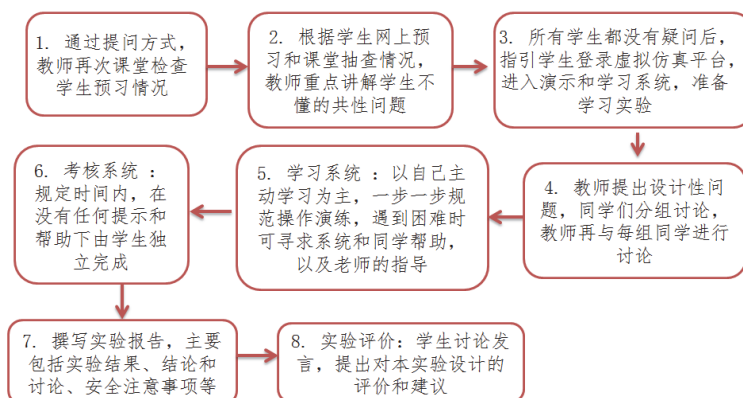


图3 实验学习过程



图4 实验学习过程演示

3 虚拟仿真实验教学考核及实施成效

3.1 教学考核标准

本仿真实验项目中课程考核遵循工程教育认证的基本要求, 主要面向高分子材料与工程、材料科学与工程等专业本科三年级学生, 兼顾应用化学专业学生和其他从事化工材料生产的社会学习者, 前修课程为有机化学、高分子化学、高分子化学实验^[12,13]。课程考核特点是过程评价与结果评价并重, 既能反映学生的知识掌握情况, 也关注学生的科学探究能力与价值观等素质^[14]。对于学生的学习成果, 分别以预计阶段、操作阶段、实验的结果、最终出具的实践报告这四个维度进行综合评价^[15]。具体实验课程评价体系、考核要求、评分细则和比例见图5、6。

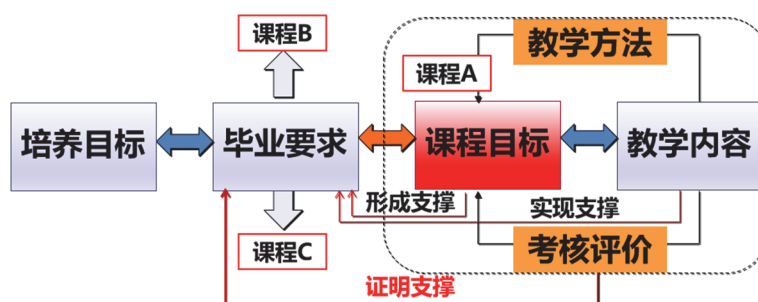


图5 实验课程评价体系

考核要求	考核内容		评分细则
实验预习 (20%)	预习问题一		0-10
	预习问题二		0-10
实验操作 (30%)	整体实验完成	点击提示超过 10 次	20
		点击提示未超过 10 次	30
实验结果(20%)	确定最佳方案		0-20
实验报告 (10%)	实验目的、原理、实验操作步骤、实验数据记录与处理、实验结果和结论、注意事项、对实验的评价和建议等是否完整		0-5
	对实验结果的分析、讨论是否充分		0-5
聚氨酯习题解答(20%)	通过整套流程的学习, 最终考察对聚氨酯知识的理解, 各个组分的应用情况等		0-20
总分(100%)			100

图6 虚拟仿真实验考核要求以及评分细则表

3.2 教学实施成效

本仿真实验项目于2021年10月在国家虚拟仿真实验教学课程共享平台(<https://www.ilab-x.com/>)正式上线, 基于虚拟仿真实验平台进行的学习需要4学时, 第1学时学习水性聚氨酯乳液的制备过程, 第2学时学习水性聚氨酯乳化过程, 第3学时学习水性聚氨酯成膜的过程, 第4学时学习聚氨酯泡沫塑料发泡过程, 掌握聚氨酯系列实验。在整个过程中, 学生在操作提示下进行操作。实验过程中如果遇到困难无法进行下去, 可以点击提示按钮, 由系统进行点亮处理并引导学生进行正确的操作步骤。

学生必须正确完成前一步操作,才能进行后一步骤的实验操作。值得一提的是,实验分为相对独立的五个模块,学生可以单独进行各个模块实验。实验结束后,学生需要完成系统给出的五道主观题目,结合自己的实验过程及配方,提交答案,同时提交一份实验报告。截至2023年1月,实验浏览量已达1.4万余人次,共有5405名学生进行实验;平均实验用时24 min,学生中实验成绩达到60分以上的有5513人,占总人数比98.3%。成绩达到85分以上的有2907人,占总人数比53.8%。

在完成实验的学生中,经过描述性统计,其中成绩最低者为64分,成绩最高者为95分,中位数79分,具体分析结果如表1所示。

表1 描述性统计指标

平均值±标准差	方差	25分位数	中位数	75分位数	标准误差	均值95% CI (LL)	均值95% CI (UL)	IQR	峰度	偏度	变异系数(CV)
78.990 ± 6.895	47.538	74.000	79.000	84.000	0.488	78.034	79.946	10.000	-0.522	0.016	8.729%

CI (LL)为统计区间下限, CI (UL)为统计区间上限, 上限和下限构成一个区间, 这个区间涵盖所有样本的95%;

IQR表示全体数据的离散程度。这几个指标都是用来参照, 读者可以用来审查数据是否具有足够的可靠性

本次成绩统计仅以学生最后一次实验成绩作为纳入标准,其中不少同学首次实验成绩均不理想,但经过多次学习并通过虚拟仿真平台实践后,最后成功达到优秀。如图7所示,学生通过反复实践的结果充分证实了虚拟仿真实验教学对于学生解决高分子材料领域问题能力提升有帮助作用。

101730745	包汇	复材171	75
101730752	包汇	复材172	76
101730760	包汇	复材171	79
101730743	蔡丹	复材171	92
101730762	蔡丹	复材171	73
101730705	蔡丹	复材171	77
101730705	蔡丹	复材172	79
10161212	曾涛	复材171	79
10161215	曾涛	复材172	88
10161211	曾涛	复材171	75
101730713	曾涛	复材171	83
101730882	陈静	复材171	73
101730707	陈静	复材171	77
101730701	陈静	复材171	84
101730702	陈静	复材171	75

图7 学生多次实践记录

4 结语

以现有传统实验教学课程作为基础,构建虚拟仿真实验课程并运用其他高分子材料对水性聚氨酯进行改性提高综合性能。可以将繁琐的对聚氨酯材料改性方面的知识,融入到虚拟实验教学当中,让学生可以在较短时间内通过虚拟仿真实验来增强对相关知识的理解。实验内容包括制备无水丙酮、制备聚氨酯、聚氨酯乳化、聚氨酯成膜、聚氨酯发泡,主要面向高分子材料与工程、材料科学与工程等专业本科三年级学生,兼顾应用化学专业学生和其他从事化工材料生产的社会学习者。根据实际使用效果,反映出虚拟仿真实验教学可以帮助本专业的学生解决专业领域的实际问题,特别是对聚氨酯材料性能改性方面的能力提升有着很强的辅助作用,通过虚拟仿真实验教学帮助学生拓展视野,通过反复的设计配方来深化实验内容,学生学习的效率及兴趣得到了显著提高。同时可以有效突破高危化学实验过程中的种种弊端,满足线上教学要求,更好地达到实验教学效果。

参 考 文 献

- [1] 范伟. 佳木斯大学学报(自然科学版), **2006**, No. 2, 204.
- [2] 杨雪, 刘英杰, 阚宝朋. 中国电化教育, **2008**, No. 10, 103.
- [3] 张妍霞, 周海骏, 郭伟杰, 李世云, 刘文. 冶金与材料, **2019**, 39 (5), 184.
- [4] 姬志敏. 西部地区中学虚拟仿真实验教学效果研究[硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [5] 黄盟. 三维虚拟仿真实验系统交互设计研究[硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [6] 张光远, 龚迪, 王坤. 实验技术与管理, **2020**, 37 (12), 149.
- [7] 汤伟伟, 鲍俊杰. 化工文摘, **2009**, No. 5, 42.
- [8] 张鹤, 聂麟童, 张龙. 东北水利水电, **2018**, 36 (12), 32.
- [9] 马兴元, 蒋坤, 郭勇生, 吴泽. 中国皮革, **2012**, 41 (13), 56.
- [10] 韩洁. 科学咨询(教育科研), **2021**, No. 7, 291.
- [11] 岳利可, 高文志, 梁兴雨, 许之兴. 实验室科学, **2021**, 24 (6), 41.
- [12] 中国工程教育专业认证协会. 工程教育认证标准. [2022-12-13]. <https://www.ceeaa.org.cn/gcjyzyrzh/rzcxjbz/gcjyrbz/tybz/index.html>
- [13] 中国工程教育专业认证协会. 材料类专业补充标准. [2022-12-13].
<https://www.ceeaa.org.cn/gcjyzyrzh/rzcxjbz/gcjyrbz/18gzylybcbz/clyz/index.html>
- [14] 许飞, 聂志妍, 金磊, 陈林军, 张晴雯. 中国免疫学杂志, **2021**, 37 (2), 231.
- [15] 龙渡江. 现代职业教育, **2020**, No. 9, 34.