

• 教学 •

“一心一环,育人为本” ——聚酯合成虚拟仿真实验的设计与实现

朱冰洁,史同娜,施镇江,吴文华*

(东华大学材料科学与工程国家级实验教学示范中心,上海 201620)

摘要: 为培养具有工程实践和创新能力的新时代人才,以大型综合性、设计性必修课程聚酯合成实验为载体,采用 3D 建模、数字仿真、虚拟现实等技术,设计并建立了“一心一环,育人为本”聚酯合成虚拟仿真实验。以学生个性化学习为中心,通过层次递进、闭环学习的教学内容和方法,让学生在“拆”、“玩”、“拟”、“创”中完成学习,激发学生的学习兴趣,从根本上培养学生创新思维和工程实践能力;充分发挥学生的主动性,助力提高实验教学质量。

关键词: 虚拟仿真; 个性化学习; 实验教学; 聚酯合成

“One Centre-One Ring, Education-oriented” —Design and Implementation of Virtual Simulation Experiment for Polyester Synthesis

ZHU Bing-jie, SHI Tong-na, SHI Zhen-jiang, WU Wen-hua*

(National Experimental Teaching Demonstration Center for Materials Science and Engineering,
Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to cultivate new age talents with the ability of engineering practice and innovation, the project takes the large-scale and design-oriented experiment of polyester synthetic as the carrier, and adopts the techniques of 3D modeling, digital simulation, virtual reality and so on. The virtual simulation experiment of polyester synthesis with “One Centre-One Ring, education-oriented” was designed and established. Taking students’ individual learning as the center, through the teaching contents and methods of hierarchical progressive and closed-loop learning, students can complete their study in “disassembling”, “playing”, “imitating” and “creating”, and stimulate their interest in learning, cultivating students’ innovative thinking and engineering practice ability, giving full play to students’ initiative, helping to improve the quality of experimental teaching.

Keywords: Virtual simulation; Personalized learning; Experimental teaching; Polyester synthesis

当前,世界百年未有之大变局加速演进,中华民族伟大复兴进入关键时期^[1]。全球范围内新一轮科技革命和产业变革蓬勃兴起,国家产业结构调整改变了人才需求结构,学生工程实践能力和

创新能力越来越受到行业企业的高度关注^[2,3]。

《大型材料加工实验》是东华大学材料类高分子专业核心实验课程之一,是对学生进行工程训练和工艺设计的大型综合性、设计性实验必修课

收稿:2022-10-31;修回:2022-12-20

基金项目:上海高等学校一流本科课程虚拟仿真实验项目

作者简介:朱冰洁(1987-),女,工学硕士,实验师,研究方向为教学改革探索、信息化教学模式创新、多媒体实验教学、智能信息管理等方面的研究。E-mail:zhubingjie@dhu.edu.cn;Tel:15618506225

* 通讯联系人:吴文华(1968-),男,正高级实验师,材料科学与工程国家级实验教学示范中心常务副主任,主要从事实验教学与管理、高分子成型加工研究。E-mail:clxx@dhu.edu.cn;Tel:13564724699

doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2023.09.011

程,是培养学生专业技术、工程实践和创新能力的
主要手段。该课程中的“聚酯合成及性能表征实
验”是高分子材料学科中的重要实验,是“涤纶”纤
维原料制备的关键步骤,也是纤维产品设计的重要
环节。“聚酯合成及性能表征实验”包含了“高
分子化学”、“高分子物理”、“聚合物成型原理”、
“聚合物生产设备”等许多高分子材料专业必修课
程的知识点,其中关键的知识点“酯化反应”、“缩
聚反应”,是每个高分子专业学生必须掌握的“经
典”知识。在真实聚酯合成实验中,存在危险性
大、实验耗时长、操作要求高以及因特种设备学
生无法使用等问题,很多高校不具备开设该实验
的条件,限制了学生专业能力的培养。

(1)环境风险高——聚合反应需在高温高压
条件下进行,单体在高压系统中反应时若泄漏,易
发生火灾、爆炸等安全问题;实验过程中,一旦操
作不当发生故障,或配料比控制不当,都有可能引
起爆炸等危险^[4]。

(2)操作要求高——聚合反应中所使用的聚
合釜设备,需要持有“特种作业操作证”方可使用,
而学生并不具备该操作条件,因此在真实实验中
存在“做不了”的问题,多以观看老师操作演示为
主,无法亲身体会该实验过程,对深入学习造成较
大障碍。

(3)实验消耗高——真实实验中由于聚合实
验原料消耗大、运行能耗高、维护保养贵、实验耗
时长、实验固废多等,很难满足每一个学生都能亲
自完整操作,而且实验操作过程复杂,涉及百余步
骤的高压高温设定及各种阀门控制,学生在真实
实验中,根本“做不到”每个人都能熟悉完整的实
验流程。

(4)时空限制严——在真实实验中,学生必须
在有限的时间和受限的空间内完成该课程的学习;
整个聚合反应是在密闭的环境中进行的,并且
由于该实验的高危性,不允许学生在真实实验中
“试错”,没有足够的参数调节、反复试验,也就导
致学生其实并“做不好”这个实验,不能透彻了解
反应机理、反应过程,限制了学生创新思维和创新
能力的培养。

鉴于以上真实实验中“三高一严”问题,依托
东华大学材料科学与工程国家级实验教学示范中
心和纤维材料改性国家重点实验室,结合多年实
验教学经验和“海量”科研数据支持,设计制作了

“聚酯合成虚拟仿真实验”,并在《大型材料加工实
验》中实施运用。

1 “一心一环”虚拟仿真实验设计

“聚酯合成虚拟仿真实验”通过虚拟仿真对实
体实验进行模拟,打造“一心一环”学习体系,以学
生个性化学习为中心,通过知识输入、加工整理、
建立体系、内化输出的闭环系统,促进学生自主性
学习、深入化学习、探究式学习,充分调动学生参
与实验的积极性,培养学生的自我探索能力和自主
创新意识,也提高了学生综合运用知识解决实际
问题的能力。

1.1 构建个性学习、能力导出的教学体系

人才培养是教育的核心问题,是高等学校的
基本职能,也是其发展的根本动力^[5]。但在传统
实验教学中,主要是教师指导和演示操作,学生被
动接受,缺乏学习主动性,参与实验的积极性不
高,自主学习能力不强^[6,7]。结合当今社会的飞速
发展,亟需设计建立一些以学生使用学习为中心,
既符合学生学习特性,又满足高校人才培养要求
的实验课程^[8,9]。透过新时代差异显著、个性分明
的学生学习特性分析^[10],本实验项目选择高分子
材料专业中高必要性且高危险性的聚合釜作为实
验对象,以“酯化反应”、“缩聚反应”等经典聚合原
理知识为基础,虚拟拆装聚合设备、虚拟闯关安全
隐患、虚拟操作聚合实验和虚拟设计聚酯合成为
实验内容,构建出以学生个性化学习为中心,培养
学生创新思维和工程实践能力的聚酯合成虚拟仿
真实验(图1)。

1.2 构建闭环学习、全程促进的教学方法

知识的传输不是一步到位的,不是通过老师
单向输出、学生单向输入就能完成知识的理解与
学习。学习知识必须要有自己的理解和内化的过
程,经过思考理解内化到自己大脑的外界信息才
叫做知识^[11]。学习是一个过程,一个不断迭代、进
化的过程,通过知识输入、加工整理、建立体系、内
化输出形成一个闭环学习,最终把书本知识、理论
知识、老师讲授知识转化吸收成为自己理解并能
熟悉运用的知识^[12]。

在聚酯合成虚拟仿真实验中,通过创新教学手
段,依托“互联网+”在线教学平台^[13],采用线上线
下一体化学习流程,以学生为主体,老师为引导,全
程促进,经历闭环学习四环节,深入学习流程图2
所示。

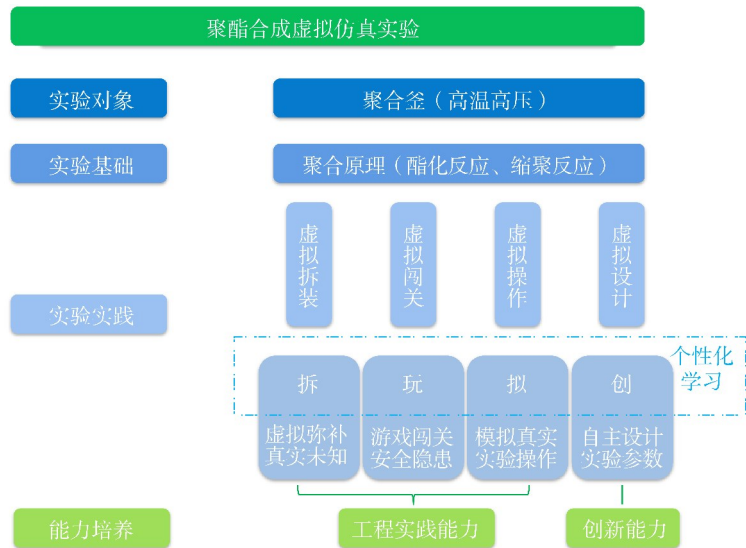


图 1 聚酯合成虚拟仿真实验教学体系

Figure 1 Polyester synthesis virtual simulation experiment teaching system

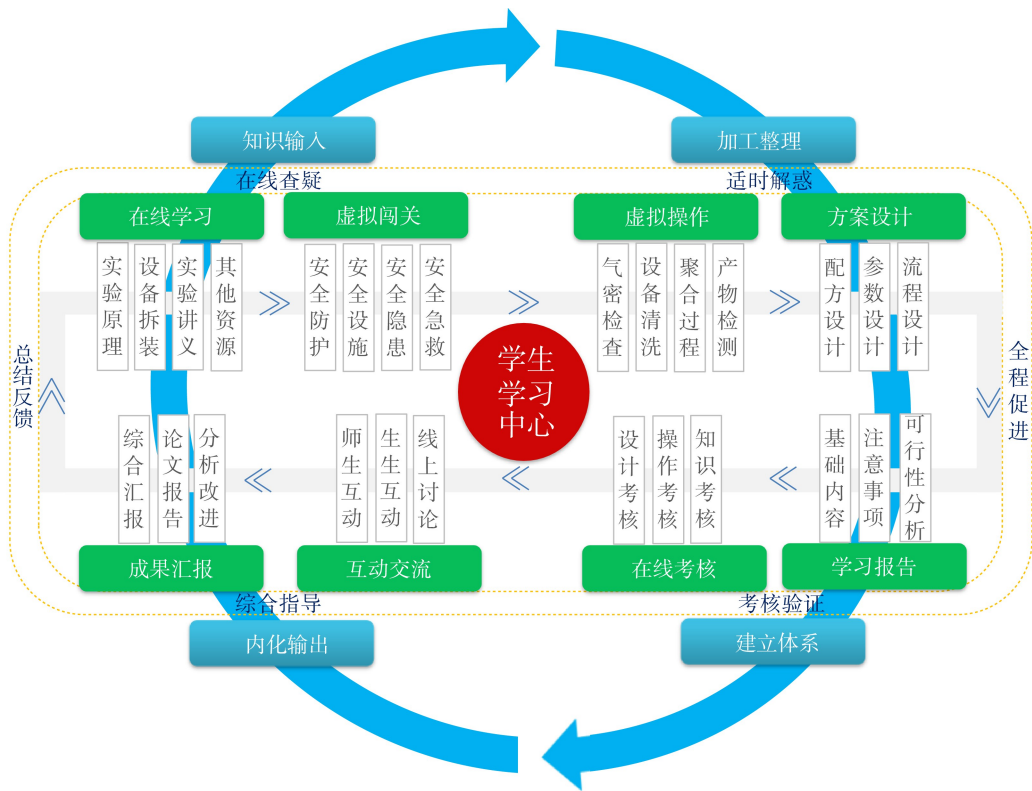


图 2 “一心一环”虚拟仿真实验教学流程

Figure 2 “One Centre-One Ring” virtual simulation experiment teaching process

(1)环节一——知识输入:学生在实验课前使用虚拟仿真实验系统自主预习,通过可视化原理、虚拟拆装聚合设备等,学习聚合反应机理,掌握聚合设备、方法及其特点,结合理论课程,将理论知识灵活应用到聚合实验中,避免其进入实验室后

盲目地、机械地、甚至不知所措地做实验。同时,将实验安全知识贯穿于整个虚拟实验中,从基本安全防护到突发状况处理,学生通过虚拟闯关间接接触实验隐患,真正了解并认识到实验安全的重要性,重视实验防护,全面提高安全意识。学生

通过主动学习该实验中的各类知识,完成闭环学习第一环节的知识输入。老师在该环节中可以随时查看学生在线学习的情况,及时发现学生的易错点、疑点、难点,便于在后续的线下课堂中有针对性地进行教学指导。

(2) 环节二——加工整理:学生根据实验任务和要求,在虚拟实验中可自主调节原料配比、聚合温度、反应时间、搅拌速度等重要实验预设参数,设计聚合工艺流程,通过人机互动模式进行实验模拟,加深对实验原理及实验过程的理解,在反复练习中加深思考,将前期输入的知识进一步消化整理。老师在学生创新设计环节中,给予鼓励与帮助,适时进行指导,帮助学生发现解决问题、归纳总结规律,更好地培养学生综合探究能力和实验创新能力。

(3) 环节三——建立体系:学生通过输入学习、加工整理环节的积累,结合高分子物理、高分子化学的专业基础理论知识,将实验内容细化、分解、汇总、整理,完成学习报告,并在学习报告中初步分析实验中各类影响因素、遇到的问题等,进行实验各设计方案可行性分析,逐渐形成该实验知识体系。再通过在线考核,对自己所学知识及运用情况进行评价检测,老师也通过多方位考核结果对每位学生的学习情况深入了解^[14]。

(4) 环节四——内化输出:学生在线下实体实

验中通过动手体验,深入理解专业理论课上所讲的高分子材料合成工艺、高分子材料成型加工技术等知识,将所学知识在实际中得以运用,实现内化输出。观察和分析实验中酯化阶段、预缩聚阶段及缩聚阶段等不同实验阶段的变化,控制不同温度、压力、出水速度、酯化时间、抽真空速度、抽真空度及搅拌速度等,产生不同的实验结果,测试制得的成品的结构和性能。将实验结果分析讨论,并向老师进行成果汇报,积极改进创新,进一步完善知识体系。老师在该环节中综合指导学生实验,着力培养学生的工程实践能力;并结合前面三个环节的陪伴促进学习,及时总结反馈,持续改进该教学内容及方法。

1.3 构建层次递进、创新育人的教学内容

虚拟仿真实验学习内容充分考虑学生学习特性和教学策略的融入,重视育人为本,梯度设计了四大模块实验内容,层层深入学习。

(1) 实验介绍为基础模块,主要为原理知识和设备结构认知;采用直接酯化法,以对苯二甲酸(TPA)和乙二醇(EG)为原料合成对苯二甲酸乙二醇酯(PET)。聚酯合成过程主要分为酯化阶段(示意图1)和缩聚阶段(示意图2)。酯化阶段是指 TPA 与 EG 进行酯化反应,生成对苯二甲酸乙二酯(BHET)。缩聚过程中生成的 BHET 在催化剂作用下发生缩聚反应生成 PET。

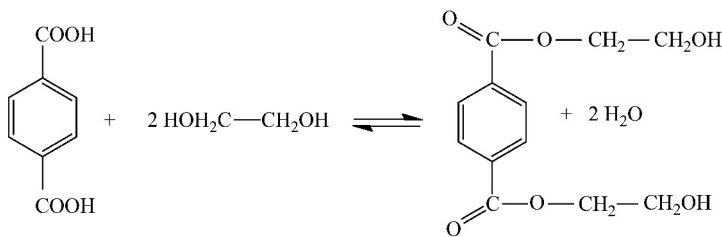


示意图 1 聚酯合成酯化阶段

Scheme 1 Esterification of polyester

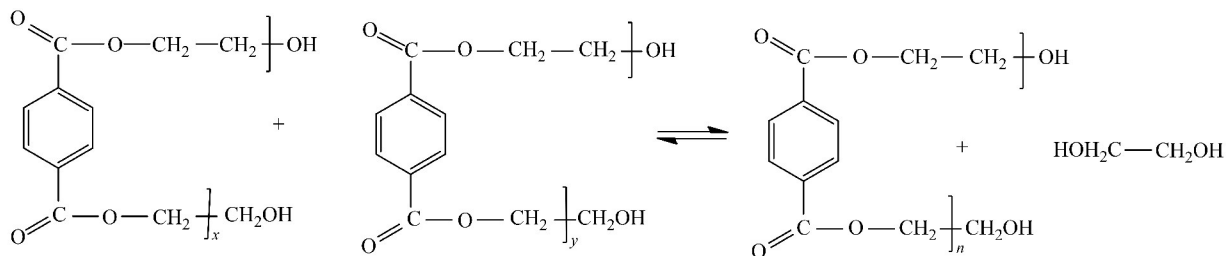


示意图 2 聚酯合成缩聚阶段

Scheme 2 Condensation polymerization of polyester

(2)实验安全为引导模块,让学生在安全环境中了解实验原理和所用设备,学习实验相关的安全知识,避免在线下实验时出现安全问题。

(3)实验操作为核心模块,融合了方案设计与流程操作的相关知识点,建立了由实验配方设计、实验安全应变处理、工艺参数设计组成的聚合工艺数据仿真模型,学生可自主设置实验参数,进行虚拟操作。得到产物后,进入测试环节,采用凝胶色谱仪进行聚酯的分子量测定,判定实验是否成功。学生在该部分的学习中进一步深入了解聚合相关知识。

(4)实验考核为验证模块,通过前三层次的学习,考核学生的线上学习成果。学生的每一步虚拟操作都有相应的实验记录与评分结果,检验其是否正确规范地完成了聚酯合成实验,并结合虚拟课件中的“理论考核”部分,查看学生掌握各类知识点的情况,评判是否具备线下实验资格。

运用该虚拟仿真实验实现了实验原理学习、设备原理结构认知、方案设计等学习内容;既有理论模块,又有实践模块;既有学习部分,又有考核部分;既重视知识原理,又强化动手操作,完成实验教学多层次、多维度的训练。学生经历认知—理解—积累—创造 4 个阶段的学习,从认知型、操作型上升到创新型、综合型(图 3)。

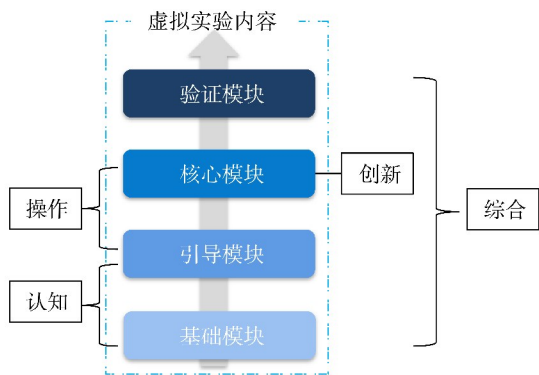


图3 层次构建学习内容模块

Figure 3 Multi-level construction of learning content modules

2 虚拟实验平台的建设

2.1 技术支持

虚拟实验平台使用仿真开发端提供的工具集进行 3D 建模,实现算法、图元和工艺的组态,对仿真程序中的工况和评分进行配置。所有建模数据保存在数据库中,并可以独立导出文件。

教师通过仿真程序教师端(Client/Server 架构,简称 CS 架构),管理学生和试题,对仿真系统进行部署和维护。教师端通过网络通讯程序,与运行在学生电脑的仿真程序学员端进行通讯,实现学员端仿真程序的启动和控制^[15]。

学员端的应用管理程序负责提供智能评分、工况管理、仿真程序生命周期管理等服务,并提供这些服务对仿真运行平台的访问功能。仿真运行平台创建仿真数据和计算单元,实现和维护仿真算法逻辑的运行。运行平台向应用管理程序提供仿真运算的实时结果。

教师和学生可以访问管理平台(Browser/Server 架构,简称 BS 架构),进行基础信息(应用统计、访问统计和考试成绩等)的数据访问。管理平台也具备仿真程序教师端的功能^[16]。

2.2 功能模块

遵循“虚实结合、以虚补实、以虚促实”的原则,充分利用数字仿真、虚拟现实等信息技术,以学生学习为中心,让学生在“拆”“拟”“玩”“创”中实现个性化学习,激发学生的学习兴趣,有效提高实验教学质量。

该虚拟仿真实验主要涵盖四大模块:实验认知、实验安全、实验操作和实验考核,学生根据需要选择各个模块进行相关学习(图 4)。

(1)“拆”解实验知识

在实验介绍模块,开发了可视化原理和聚合设备内部设计内容,学生可以像“看电影”一样通过可视化原理视频学习本实验的聚合原理、分子结构等;通过设备拆装模式,让学生可以像“搭积木”似地完成真实实验所做不了的拆装实验,完成聚合反应釜的拆卸和组装,深入学习反应设备的运行原理(图 5)。

(2)“玩”通安全闯关

将实验安全知识贯穿于整个虚拟实验中,模拟真实安全隐患,让学生在轻松“玩”乐的环境中,通过“游戏闯关”形式间接接触实验安全危险,从基本安全防护到突发状况处理;提高兴趣的同时,真正了解并认识到实验安全的重要性,重视实验防护,全面增强安全意识(图 6)。

(3)模“拟”真实操作

由于聚酯合成真实实验消耗高、耗时长,真实实验操作部分需至少 16 h 才能完成,学生很难完整地学习整个聚酯合成操作,更不可能多次反复



图 4 “聚酯合成虚拟仿真实验”四大模块

Figure 4 Four modules of “polyeter synthesis virtual simulation experiment”

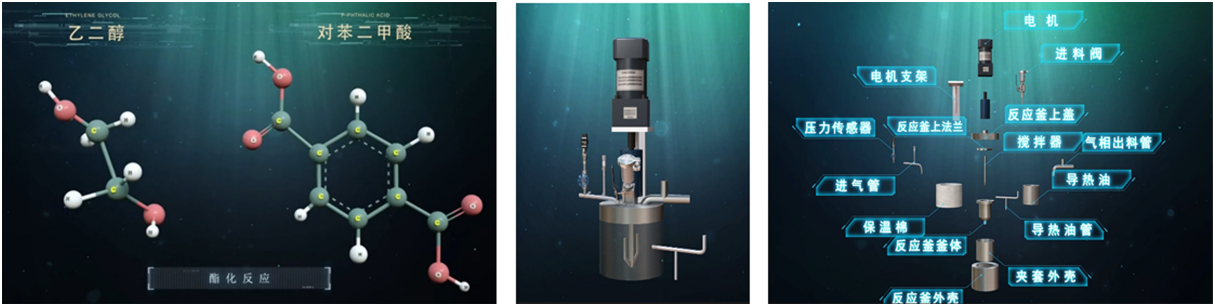


图 5 虚拟实验——原理、设备内容

Figure 5 Virtual experiment—principles, equipment content

操作来深入学习,提升实验技能。但在虚拟实验中,学生可以根据自身学习进度,随时随地进行虚拟实验。通过反复多次模拟真实聚合操作,逐渐提升实验熟悉程度,深度掌握实验操作技能,从模拟结果中归纳总结实验规律,着力提高其工程实践能力(图 7)。

(4)“创”新设计探究

该虚拟仿真实验通过积累多年的实验教学经验和科研数据,建立了“数据仿真模型”,开发了不同层次的设计板块。首先,学生可根据实验任务和要求,自主调节原料配比、聚合温度、反应时间、搅拌速度等重要实验预设参数,探索研究实验中的各类影响因素;其次,学生可自主设计聚合工艺流程,通过人机互动模式进行实验过程模拟,在虚拟环境中大胆试错,查看不同工艺流程带来的各

类现象及风险等,在未来真实实验中起到良好的指导及警示作用;最后,根据学生自主设计的参数及工艺得到不同的实验结果,进一步验证方案设计可行性,多方位培养学生综合探究能力和实验创新能力(图 8)。

(5)“全”面考核评价

对照工程教育专业认证理念和标准,创新建立了“线上学习-线下操作-双项评分系统”,打破了传统偏主观的实验教学考核模式。在线上学习考核中,从“理论知识”、“虚拟操作”、“创新设计”三方面来评价学生的综合学习能力;在线下实际操作中记录线下学习评分;最终将线上线下成绩汇总评分,对学生的学习过程和学习效果进行客观综合评价(图 9)。

在整个实验教学过程中,学生反复学习和操

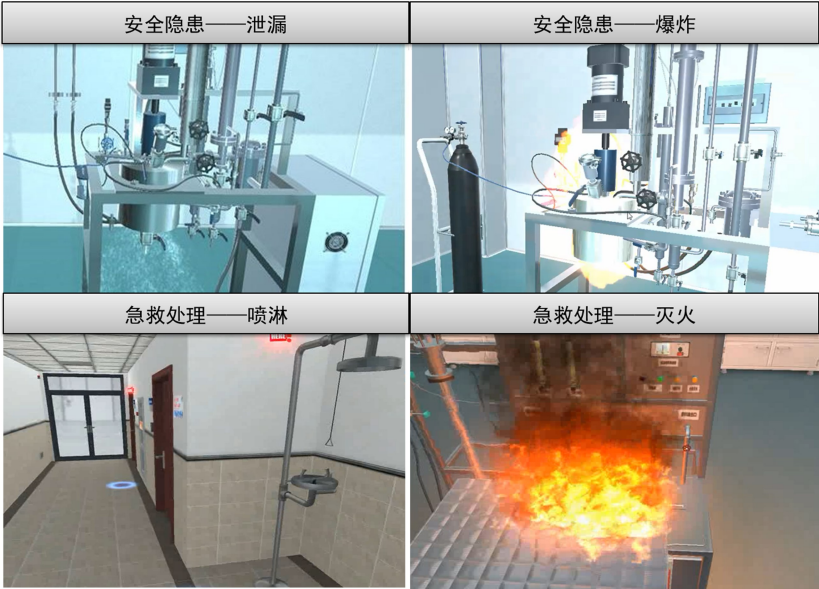


图 6 虚拟实验——实验安全内容

Figure 6 Virtual experiment—safety content

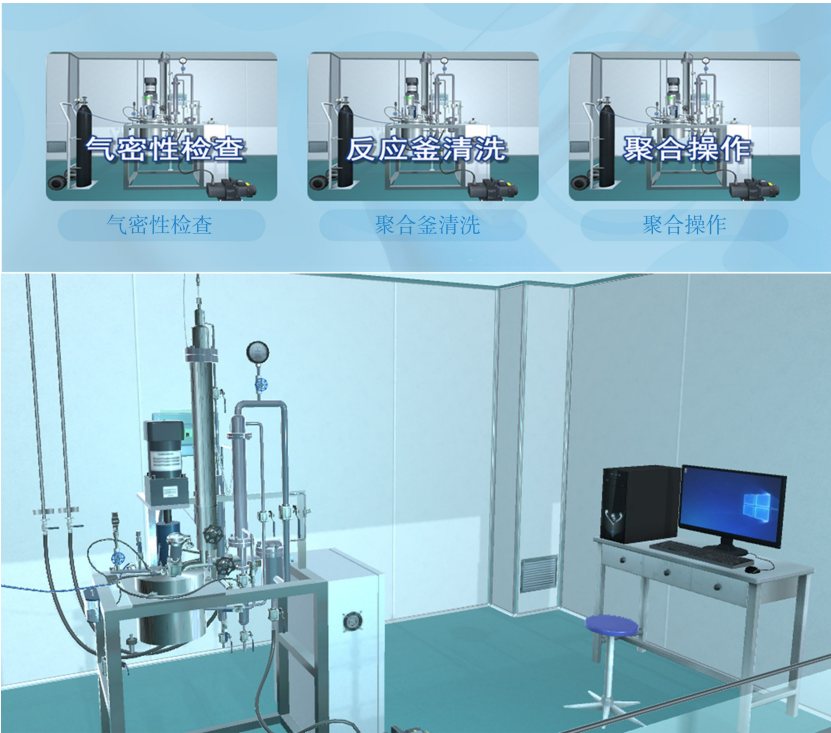


图 7 虚拟实验——操作内容

Figure 7 Virtual experiment—operation contents

作虚拟仿真实验,多学多练,帮助学生巩固和掌握实验理论知识、实验技巧和数据分析,了解各实验参数对聚合成功率的影响。结合工程管理和社会经济相关知识,使学生掌握聚酯合成过程中涉及

原料选取、工艺设计与优化、产品分析和市场开发等方面的专业知识,让学生了解聚合生产对社会、健康、安全的影响,明确专业目标,树立社会责任感。

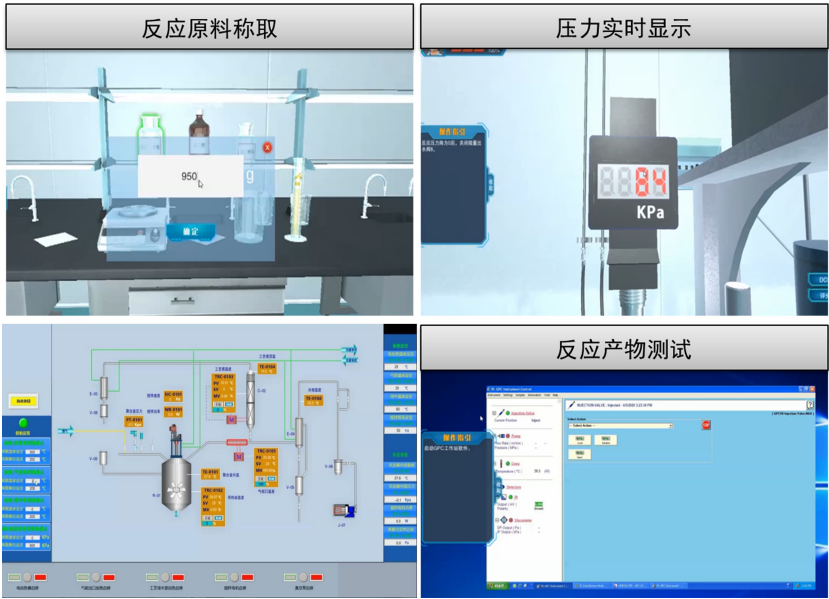


图 8 虚拟实验——设计内容

Figure 8 Virtual experiment—design content

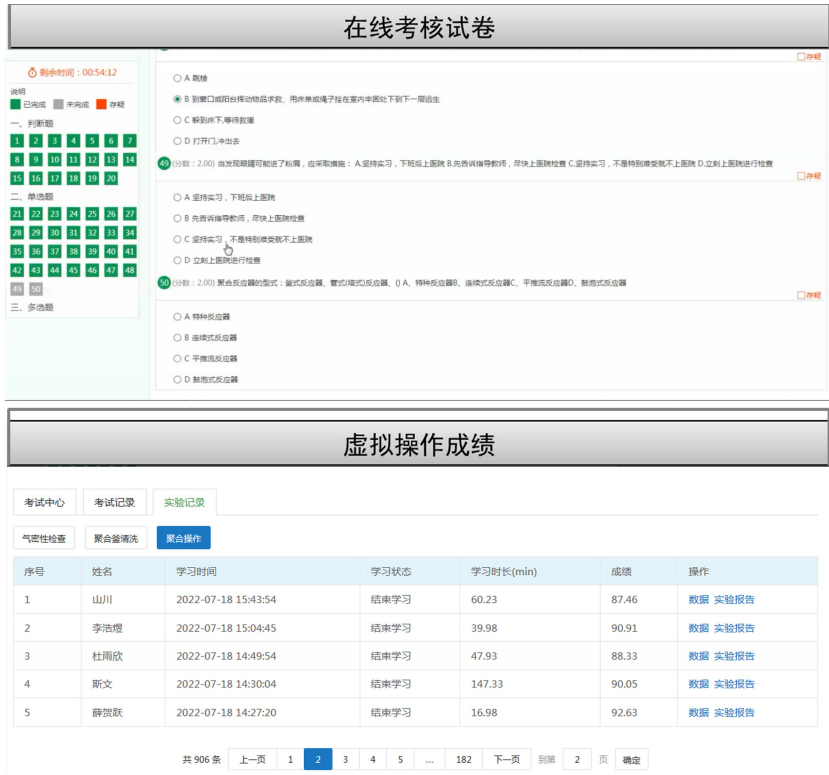


图 9 虚拟实验——考核内容

Figure 9 Virtual experiment—assessment content

3 结语

文中介绍了“一心一环，育人为本”聚酯合成虚拟仿真实验的建设与实施,设计构建了个性学习、能力导出的教学体系,闭环学习、全程促进的

教学方法和层次递进、创新育人的教学内容,并在《大型材料加工实验》课程中应用实施,将课程知识性与趣味性有机结合,实现了学生个性化学习,在培养学生创新思维、工程实践能力方面效果明显,提升了实践教学质量和水平。

参考文献:

- [1] 齐卫平, 樊士博. 统筹中华民族伟大复兴战略全局和世界百年未有之大变局的战略意蕴. 思想理论教育, **2021**, (2), 4-11.
- [2] 秦俊, 肖静. 基于 OBE 理念的高校创新型工程人才的培养路径. 武汉理工大学学报(社会科学版), **2021**, 34(4), 149-153.
- [3] 范家璐, 宋延杰, 杨涛, 柴天佑. 依托引智基地培养具有跨学科研究能力的创新型工程科技人才. 高等工程教育研究, **2020**, (6), 50-56.
- [4] 张悦, 景国勋, 张凯. 聚合釜爆炸事故树模糊数学分析法研究. 安全与环境学报, **2010**, 10(2), 171-174.
- [5] 陈明选, 苏珊. STEAM 教育视角下教育技术学人才培养的思考. 电化教育研究, **2019**, 40(3), 27-33.
- [6] 段海娟, 陈兵. 土木工程材料研究性实验教学的探索与实践. 实验室研究与探索, **2020**, 39(6), 203-206.
- [7] 贾永霞. 创新性实验教学的探究与实践. 实验室研究与探索, **2018**, 37(12), 206-208.
- [8] 陈霄. 系统性应用人才培养的理念转型及突破路径. 教育理论与实践, **2018**, 38(27), 3-5.
- [9] 樊英杰. 以工程思维能力培养为导向的大学物理实验教学改革与创新. 实验室研究与探索, **2021**, 40(4), 171-175.
- [10] 朱冰洁, 史同娜, 施镇江, 朱娟娟, 许佳丽, 朱蕾, 杨伟, 谢卫民, 吴文华. “金字塔”式网络学习平台构建与学习行为分析. 实验技术与管理, **2021**, 38(8), 208-212.
- [11] 林毓锜. 试论学习路径与升华型学习及其启示. 高等教育研究, **2015**, 36(11), 12-18.
- [12] 李怡然, 夏元清. 基于云控制的闭环 OBE 在线教学模式探索. 实验室研究与探索, **2021**, 40(7), 149-153.
- [13] 吴文华, 朱冰洁, 施镇江, 朱娟娟, 郑伟龙, 许佳丽, 朱蕾, 谢卫民, 史同娜. 构建“B+X”实验教学体系 多维度促进材料类人才培养. 实验技术与管理, **2020**, 37(6), 24-28.
- [14] 史同娜, 朱冰洁, 杨伟, 施镇江, 谢卫民, 吴文华. 基于“互联网+”实验教学新模式下“评分树”考核体系的构建. 实验技术与管理, **2019**, 36(2), 53-57.
- [15] 杨旭, 胡晓龙, 宋丽丽, 栗俊广, 望运滔, 白艳红. 虚拟仿真实验平台助力白酒酿造工艺实践教学. 食品与发酵工业, **2021**, 47(5), 309-314.
- [16] 丁永兰, 彭圣明. 化学试剂安全取用与突发事故处置三维虚拟仿真实验的开发与应用. 中国多媒体与网络教学学报(上旬刊), **2021**, (1), 5-7.