



“新工科”背景下能源与动力工程专业实验 教学改革与实践

陆志艳, 廖丽芳, 邱恺培, 吴诗勇, 刘霞, 孙贤波, 许建良*

(华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要: “新工科”背景下, 能源与动力工程专业立足国家能源战略需求, 立志于培养高素质创新专业人才, 其实验教学在人才创新和实践能力培养方面发挥着重要作用。该文通过挖掘实验课程思政元素、结合优质视频资源、突出项目特色和推进“信息化”建设 4 个举措改革教学内容和教学模式, 通过优化考核方式和多途径反馈教学效果落实持续改进机制, 在培养能源清洁利用领域创新人才方面取得了显著的效果, 有效提升了实验教学质量。

关键词: 新工科; 教学改革; 课程思政; 信息化; 持续改进

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20240200](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20240200)

Reform and Practice of Experimental Teaching of Energy and Power Engineering under the Background of New Engineering

LU Zhiyan, LIAO Lifang, QIU Kaipei, WU Shiyong, LIU Xia, SUN Xianbo, XU Jianliang*

(School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: In the context of the new engineering, the major of energy and power engineering is based on the national energy strategy demand, aiming to cultivate high-quality innovative professionals, and experimental teaching plays an important role in cultivating talent innovation and practical abilities. This major has reformed teaching content and methods through four measures of exploring ideological and political elements in experimental courses, integrating high-quality video resources, highlighting project characteristics, and promoting informatization construction, and implements the continuous improvement mechanism through optimized assessment methods and multi-channel feedback of teaching effect. It has achieved remarkable results in cultivating innovative talents in the field of clean energy utilization and significantly improved the quality of experimental teaching.

Key words: new engineering education; teaching reform; curriculum ideology; informatization; continuous improvement

2017 年教育部推出新工科建设的战略举措^[1-3], 新工科专业重视培养实践能力强、创新能力强, 具有国际竞争力的复合型人才, 指导高等教育创新变革。一流大学、一流学科、一流专业建设又是中国高等教育领域的又一国家战略^[4-5]。高水平、多层次、系统化实验教学在一流学科、一流专业建设方面发挥着重要作用, 在一定程度上反映了人才培养和科学研究水平^[6-8]。

华东理工大学能源与动力工程专业 2019 年入选首批国家一流专业, 聚焦能源清洁高效利用的

国家重大战略需求, 立志于培养高素质创新专业人才。该专业由 1952 年建校时设立的“燃料工学”专业发展沿革而来, 先后经历了煤化工、城市燃气工程等专业发展阶段, 2003 年根据专业特色和学科发展需要, 建立“热能与动力工程专业”, 2013 年更名为“能源与动力工程专业”, 通过能源、化工、机械交叉融合, 形成了能源清洁高效转化的专业特色^[9]。能源与动力工程专业实验教学的开展对于培养学生的实践能力和创新能力至关重要, 是锻炼学生理论联系实际能力的重

收稿日期: 2024-04-17

作者简介: 陆志艳, 硕士, 实验师, 主要从事实验室建设与管理方面的研究。E-mail: zylu@ecust.edu.cn

* 通信作者: 许建良, 博士, 副教授, 主要从事气化炉多相湍流反应流动及新型煤气化技术开发方面的研究。E-mail: xujl@ecust.edu.cn

要途径,在工程认证和建设国家级一流学科方面发挥着重要作用。“新工科”背景下,专业实验课程重构教学内容,整合优势资源,依托资源与环境实验教学中心,贯彻“产出导向,学生中心、持续改进”的工程教育理念^[10-11]和新工科 2.0 教育理念^[12-13],支撑“厚基础、强实践、重创新”的创新人才培养。

1 能源与动力工程专业实验教学现状

专业实验课程在人才培养体系中占据着十分重要的地位,能够使学生将理论知识和实践技能深度融合,是培养学生创新思维,解决问题能力的关键环节。然而,回顾过往的实验课程设计与实施过程,我们不难发现其中存在诸多不足之处;如课程设置上基础验证型实验偏多,缺少综合设计型和探索型实验,特别是工程类实验,不利于培养学生的工程实践能力和创新能力;教学模式上过度依赖指导教师演示,学生单纯模仿和执行,剥夺学生自主设计实验方案,探究实验过程的机会;课程内容上缺少思政元素的融入,无法实现对学生价值观的引领和道德熏陶,不利于学生形成健全的人格和高尚的情操。这些因素成为制约“一流”本科人才培养质量提升的关键,因此迫切需要更为深入和全面的教学改革。

我们积极响应工程认证的新要求,重新修订

教学大纲与课程培养目标,对教学内容进行优化,融合多媒体手段进而探索出多元化的教学模式和方法,新增富有挑战性的实验内容,融入节能减排、“双碳”战略的思政元素,完成专业实验课程质量的大幅度提升。能源与动力工程专业实验课程在原有两门必修实验课程“能源与动力专业基础实验”和“能源与动力工程专业实验”的基础上,新增能源转化系统及其仿真实验课程,同时增加专业基础和专业实验的项目数量,优化实验内容,增加实验总学时数,调整后的专业实验课程内容如表 1 所示(按实验类型罗列)。改革之后的专业实验课程旨在通过实践锻炼,使学生掌握能源清洁高效转化领域的实验研究方法和实验技能,将所学的传热学、燃烧学、流体力学、制冷技术、锅炉原理、能源转化工程与工艺、汽轮机原理等核心课程基本原理应用到解决能源与动力工程领域复杂的实际工程问题中,使学生具备较强的分析、设计能力和工程实践能力,为进一步从事能源清洁高效转化及相关领域科学研究活动打下实验基础。除此之外,我们拥有健全的专业实验室管理制度,已建立系统化的实验评分方案,出版 2 本实验教材。能源与动力工程专业建有虚拟仿真实验室和创新实践平台,总用房面积 895 m²,拥有先进仪器、完备的实验室安全建设设施,为能源与动力工程专业实验课程和创新实验的开展提供场所与设备保障。

表 1 专业实验课程内容简介

实验类型	实验项目名称	实验内容
基础规范型	含碳固体原料的工业分析	测定含碳原料特性的主要指标,指导能源综合利用加工
	含碳固体原料中碳和氢含量的测定	
	含碳固体原料中氮含量测定	
	含碳固体原料中全硫含量测定	
综合设计型	含碳固体原料着火点测定	通过温升曲线变化来确定着火点,涉及火灾、爆炸等事故案例分享,加强学生的工程伦理和安全教育
	含碳固体原料发热量测定	测定含碳固体原料的发热量,为热量平衡计算提供基础数据
	含碳固体原料灰熔融性测定	分析四个熔融特征温度,指导排渣工艺的选择
	水煤浆流变特性测定	水煤浆是气流床气化的进料方式之一,通过测定其不同温度和浓度下,黏度随剪切速率的变化曲线,了解其流动特性
	粉体摩擦特性测试	粉煤是另一种气流床气化的进料方式,测定粉体的剪切性质,了解工程中经常遇到的原料输送和储存的问题
	导热系数测定	测定材料的导热系数,并研究样品厚度、压力、测试温度的影响
	温度测定与热电偶标定	通过测量热电动势偏差标定热电偶,拓展到反应器中热电偶的使用问题
制冷压缩机性能测试	测试标准工况和空调工况下制冷压缩机的制冷效果,掌握制冷量、能效比等计算方法,评价制冷压缩机的性能	

表1(续)

实验类型	实验项目名称	实验内容
	可视化锅炉水循环实验	观察锅炉并列上升管中汽液两相的流动状态,了解自然水循环中的常见故障,引导学生探究锅炉中介质流动和温度变化规律
	流动可视化风动实验	通过二氧化碳吹扫烟气,在可视化窗口设计一些流体模型,观察模型周围气体的流动方式,直观感受流线、迹线,边界层等概念,加深流体力学知识点学习
	蒸汽轮机发电实验	操作蒸汽轮机发电实验系统,用热力学第一定律和朗肯循环规律计算锅炉的传热率、汽轮机功率及发电效率等
	固体燃料和液体燃料的元素分析 含碳固体材料的比表面积和孔结构测试	利用大型仪器分析含碳原料的元素组成、比表面积与孔结构
研究探索型	生物质流化床热解冷态模拟实验	观察流态化的实验现象,建立对流态化过程的感性认识;测定流化气速与压降的关系曲线,掌握流化床的压降分布特征
	生物质热解制合成气	搭建生物质热解装置,收集液相和气相产物,进行产物和产率分析,了解生物质资源化的有效途径
	气固两相流颗粒速度、浓度测量	观察典型反应器内气固两相流动特征,测定颗粒速度和浓度,分析反应器内颗粒分布规律
	CO ₂ 吸附与催化转化固定床评价实验	采用固定床装置进行CO ₂ 吸附与催化转化实验,评价吸附转化效果,了解国家“双碳”战略

2 教学内容和教学模式改革与实践

2.1 能力导向,优化教学内容,挖掘思政元素

在新工科建设的背景下,本专业致力于培养能源清洁利用领域的能够解决实际工程问题的复合型、复合型人才,因此实验课程除了让学生掌握实验原理、实验技能和方法,巩固理论知识,更重要的是培养学生将专业知识应用到解决实际问题的能力。通过实验课程学习,激发学生思考,引导学生参与设计和研究,让学生通过实验提升实践能力。积极优化和更新实验内容,让学生自行设计实验方案,得到有效结论,培养学生的高阶思维和创新能力。

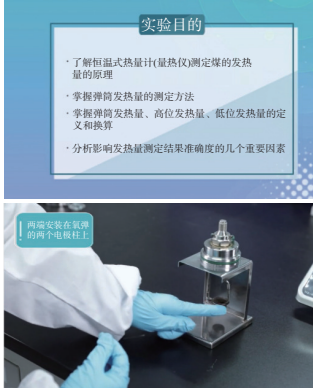
实验课程以能力导向理念修订了教学大纲,落实以“生”为本的思想。专业实验教学资料如表2所示。教学过程中学生以小组形式正确开展实验,通过数据分析得到有效结论。老师会设计开放题,考察学生的应用能力而非知识点的机械记忆。以基础规范型实验为例,原实验内容为简单的分析实验,仅对原料的组分(水分、灰分、挥发分、固定碳、发热量、元素等)进行仪器测定,改革之后,增加了通过对含碳原料特性指标的分析,引导学生根据原料性质选择合适的能源利用方式的内容。新增了工程类实验项目,部分新增的实验装置如图1所示。图1(a)为“蒸汽轮机发电实验”的装置,该实验将理论课学到的热力学、能量转化及发电原理与实际操作结合,要求

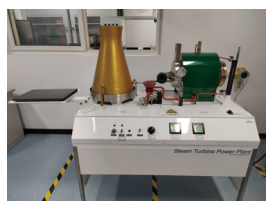
学生对实验过程中的工况进行判断,遇到设备故障、数据异常等情况学会排查和解决,从中锻炼解决实际问题的能力。图1(b)为“制冷压缩机性能测试实验”的装置,该实验在原理讲解部分引导学生思考制冷和自热过程的区别,制冷剂的选择与环境关系,加深学生对制冷技术的理解。在实验过程中指导教师设置局部故障,让学生排查问题来考察其实际解决问题的能力。最后,学生自行选择工况,通过设计参数,评价制冷压缩机的制冷效果。图1(c)为“生物质流化床热解冷态模拟实验”的装置,该实验使学生了解流态化形式和流化床运行原理,要求学生在实验过程中自行探索合理操作条件。图1(d)为“可视化锅炉水循环实验”的装置,该实验采用面阵红外测温仪监测锅炉内的循环水的温度和流动。实验过程中,学生通过对功率的控制,实现正常的自然循环工况以及循环停滞和循环倒流工况,强化学生对自然水循环技术的理解,了解工业领域锅炉的安全运行。实验教学上增加举例讲解红外测温技术在燃煤锅炉及煤气化炉等炉膛外壁面温度的测量,以此拓宽红外测温技术在本专业的应用。

教育部《高等学校课程思政建设指导纲要》指出,实践类课程要注重学思结合、知行统一,增强学生的创新精神和善于解决问题的实践能力^[14]。本课程积极推进思政元素融入专业实验教学,落实立德树人的根本任务^[15-16],思政内容从能源革命、节能减排和“双碳”战略方面切入,

结合能源与动力工程专业人才培养目标,制定了实验课程思政建设的培养目标:以学生为中心,面向国家重大需求,培养具有爱国主义情感和民族自豪感,秉持严谨实验态度和科学精神,勇于探索,践行社会责任,积极投身节能减排、绿色低碳领域的专业人才。

表 2 专业实验教学资料

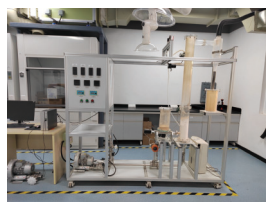
课程资料归档	视频资料举例
① 教学大纲 ② 教学日历 ③ 课程教案 ④ 实验安排表 ⑤ 指导教师团队 ⑥ 平时成绩登记表 ⑦ 分项成绩登记表 ⑧ 最终成绩登记表 ⑨ 实验报告评分标准 ⑩ 实验考试题库 ⑪ 课程目标达成度及持续改进报告 附表1 实验室安全教育 附表2 安全教育试题空白试卷 附表3 安全教育试题答案 附表4 安全测试成绩	



(a) 蒸汽轮机发电系统



(b) 制冷压缩机性能测试平台



(c) 流化床冷态模拟实验台



(d) 多管水循环工业锅炉实验台

图 1 新增实验装置

实验过程中,强调原始数据的真实、完整记录,培养学生精益求精的态度和遵守科学依据的良好品质。将煤炭、生物质、其他含碳原料的利用途径及新能源技术的应用、能源化工系各教科研组的研究方向、成果等融入实验教学中,为学生树立专业自信,激发学生投身本专业的热情。以“中国能源战略”为讨论话题,向学生普及提升煤炭清洁高效利用的手段和途径,强调绿色低碳发展,使学生更深刻地理解我国能源政策的制定,理解中国以煤炭为主的能源消费结构和低

碳、可持续发展之间的矛盾,从而深刻领会加快能源转型的必要性和先进性。在“制冷压缩机性能测试”实验中,启发学生思考氟利昂制冷剂造成的温室效应,继而从节能减排、可持续发展以及美丽中国入手,在授课过程中引导学生从自身专业出发,致力于开发性能更好、环保性更强的新兴制冷剂。

2.2 结合优质视频资源,打造线上线下混合式教学“金课”

2018年8月22日,教育部发布《关于贯彻落实新时代全国高等学校本科教育工作会议精神的通 知 》,强调各高校要全面梳理各课程教学内容,淘汰“水课”,打造“金课”^[17]。“金课”的原则是贯彻以学生中心、产出导向、持续改进的理念,要求提升课程的高阶性,突出课程的创新性,增加课程的挑战度,核心是培养学生的综合素养与高阶思维能力^[18]。

本课程采用线上线下混合教学模式,改变传统线下教学以教师演示、学生复制操作的教学模式弊端,借助于MOOC视频和线下教学结合的方式,学生可以自主反复学习实验原理和操作视频,从而将更多的实验室时间用在探索改变实验条件和实际应用上。教师给出研究探索型实验课题,引导学生自主设计实验方案,挖掘学生分析实验现象,提出独到见解和有效解决问题的能力,训练他们以科研思维模式去审视问题,鼓励学生大胆探究、勇于探索、不断优化实验方案和提出质疑,提高独立思考的能力,赋予学生更多的自主权和探索空间,激发他们主动参与科研活动。

对于每个实验项目录制一段原理讲解和操作视频,以短视频的形式发布在课程网站上,让学生在开展实验时提前了解操作步骤和注意事项,节省指导教师在课堂上的重复讲解和演示步骤的时间,将这一部分时间改为小组讨论,确定实验方案。以“含碳固体原料灰熔融性测定”为例,学生需要自行设计实验方案,选择不同的添加剂改变煤灰的熔融温度,并讨论不同原料用在实际排渣工业中需要考虑的问题。通过线上线下混合教学模式,让学生在课程中有更多的自主权,更能调动学生的积极性。教学资料如教学大纲、安全培训PPT、各实验项目资料和视频均放在课程网站上,学生可以自行浏览和重复观看,结合实训操作,不断加深和巩固每个实验要点。课程网

站的建设也方便学生参与创新实验、毕业论文等环节时复习相关实验知识和操作。

2.3 “碳中和”背景下,突出“能源化工”特色优势

资源与环境工程学院在2021年建立“碳中和未来技术学院”,本课程紧紧围绕含碳原料的清洁利用和转化,立足学校特色“整体煤气化联合循环”技术布局实验项目,以“生物质流化床热解冷态模拟实验”为例,使学生掌握生物质热解工艺流程,了解生物质资源化利用的有效途径和产业发展的困境,树立新时代“零碳”能源观。以“CO₂吸附与催化转化固定床评价实验”为例,通过对催化剂及工艺参数的选择,提高CO₂转化为高附加值化工品的转化率,帮助学生了解碳转化前沿技术,更加深刻地理解国家双碳目标的有效解决途径,准确把握双碳目标的深刻内涵和重要意义。上述两项实验装置均由教学团队自行设计研发,为科研反哺教学的典型案例,充分体现“能源化工”特色。

能源与动力工程专业一直坚持科教融合,根据行业最新发展方向,结合教学团队承担的科研任务,设计了更多的创新实验项目,帮助有科研兴趣的学生进一步拓展学习。以“含碳固体原料中全硫含量测定”为例,开发了“高温固硫催化剂的制备及固硫效果研究”创新实验项目,要求学生通过化学方法制备高性能的固硫催化剂,以此减少原料燃烧阶段的硫排放,考察不同钙硫比、燃烧温度、催化剂添加量对于催化剂固硫效果的影响。通过该实验,学生会利用X射线衍射分析和X射线光电子能谱分析进行催化剂表征,掌握采用热重分析评价催化燃烧效果,探索脱硫新工艺。以“生物质热解制合成气”为基础,开发了“生物质微波催化裂解一体化制氢”的创新实验项目,使学生学习生物质微波热解制氢工艺,要求学生制备不同负载量的Ni/SiC催化剂,借助气相色谱分析氢气产率,并考虑催化剂的成本,重复利用和有效回收问题,将对学生的工程意识和应用能力培养融入创新实验教学中,切实培养学生的工程实践能力。

2.4 建设VR虚拟仿真平台,虚实结合,推进“信息化”建设

推进“虚拟仿真实验教学2.0”建设、强化“实验空间平台”应用等被明确列入《教育部高

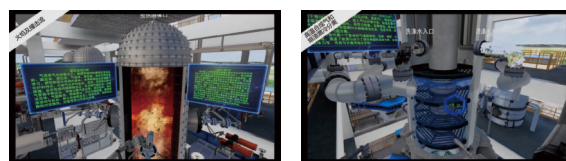
等教育司2022年工作要点》。本专业开设“能源转化系统及仿真”虚拟仿真实验课程,包括燃气蒸汽联合循环电站仿真和多喷嘴对置式水煤浆气化装置虚拟现实(virtual reality, VR)实验,仿真实验课程可以还原危险系数高的实验现场,模拟更多受外部条件限制的实验,以数字化助力提升人才培养能力^[19-21]。

2.4.1 燃气蒸汽联合循环电站仿真

燃气蒸汽联合循环电站仿真以燃气-蒸汽联合循环系统的模拟操作为主要教学内容,要求学生掌握燃气电站的主要流程,燃气轮机核心部件(空气压缩机、燃烧室、透平系统和余热锅炉)的设备结构和工作原理,建立相应的数学模型对设备的运行进行仿真,从而对其工艺、设备进行全方位认识,通过对燃气轮机和汽轮机提升负荷的实际工况模拟操作,提高学生的工程实践能力;通过对典型故障工况的分析和解决,提高学生的应变能力。

2.4.2 多喷嘴对置式水煤浆气化装置虚拟现实VR实验

华东理工大学洁净煤所拥有具有自主知识产权的大型煤气化技术——多喷嘴对置式水煤浆气化技术,VR实验项目由此设计而成(实验操作界面如图2所示,该项目使学生在安全的环境下体验危险系数高、有毒有害、易燃易爆、高温高压^[22]、超大型装置的真实操作,再现装置运行现场,展现多喷嘴对置式水煤浆气化装置设备布置、工艺流程,提高学生对主要设备结构和装置操作的认知。该实验项目的成功开发和应用,是本专业科研成果向实践教学转化的典型案例,显著提升了学生的工程实践能力。



(a) 高温合成气和熔渣激冷分离

(b) 火焰及撞击流

图2 VR实验操作界面

3 闭环反馈,落实专业实验持续改进机制

本专业构建实验教学反馈和持续改进机制,已建立科学合理的成绩评价标准和教学评价标准。在考核方式上,每位指导教师考核12~15名

学生,采取一对一考核,指导教师对实验相关知识和具体操作进行提问,考核学生是否能够清晰地做出正确的回答及规范地操作实验设备。通过阐述对相关实验的见解,锻炼了学生的口头表达能力,指导老师也可以在面对面的沟通中掌握教学效果,对学生的回答提供有效建议。

除了通过面对面考核的形式获得对课程的评价外,指导教师预习阶段发布测试题,便于了解学生的实验预习情况,实验结束后,发布思考题,让学生通过文献查阅回答问题,培养学生的文献检索能力,为后续从事科研工作奠定基础。

课程结束,发布调查问卷,对每一位指导教师的实验课分为不同项目,让学生进行打分,如重点难点的讲述、安全操作的强调等,从多角度评价教学效果。通过学生反馈、达成度评价、同行评价发现实验教学中的不足,汇总改进意见并落实持续改进措施,建立闭环,有助于实验教学质量提升。

4 教学改革成效

通过能源与动力工程专业实验教学改革与实践,本专业的实验教学质量得到了显著提升。目前已建立一支专业知识能力强、工程实践经验丰富的实验教学团队,固有成员 18 名,其中教授 3 名、副教授 5 名、副研究员 1 名、高级工程师 1 名、讲师 5 名、工程师 1 名、实验师 2 名。课程实行小班化教学,指导教师每次指导学生 15~18 人,每组学生 2~3 人,重复指导实验 5~8 次,实验课程总时数累计 7 200 学时/年。能源与动力专业基础实验于 2020 年获批学校在线课程建设项目,2022 年获批校重点课程建设,均已结题。能源与动力工程专业于 2022 年通过了教育部工程认证,实验教学在其中起到了重要支撑。三门实验课程每年的学生评教分数均在 96 分以上,得到了学生的良好评价和反馈。目前已制作总时长约 380 min 的课程视频。通过实验教学改革,能源与动力工程专业的本科生实验技能和创新能力得到了显著提升,实验教学向大学生创新创业训练计划和各类科创竞赛延伸,每年能源与动力工程专业学生参与大创项目 20 余项,近三年获得“中国国际‘互联网+’大学生创新创业大赛”“全国大学生节能减排社会实践与科技竞赛”等国家级、省

部级奖项 10 余项,这些成绩充分体现了实验教学改革成效。

5 结束语

“新工科”建设背景下,能源与动力工程专业通过重构实验内容,优化整合实验资源,形成了特色鲜明的教学培养模式,有力支撑了一流学科建设和人才培养。在今后的教学实践中,本专业实验教学将紧跟学科发展和科研前沿,进一步推进课程持续改进方案,将工程案例、思政元素、科研成果有机结合,整合成线上资源。加大过程考核力度,将学生对实验方案的设计和展示完成情况作为平时成绩的重要体现。在实验内容方面,进一步增加工程类实验比例,增加光伏、风力发电等新能源实验项目,与时俱进。在凝练课程思政案例方面,充分挖掘能源转型、碳减排方面的思政元素,讲好中国能源故事,将思政元素和实验内容有机融合,全面提升立德树人的水平。通过以上措施,努力提高学生的工程实践能力,锻炼学生的创新思维,培养新时代绿色工程类人才。

参考文献

- [1] 陈航,郑雷,刘同亮,等.“双碳”背景下环境设计专业多学科交叉人才的培养[J].实验室研究与探索,2022,41(8):253-255.
- [2] 王旗,林平,张德华.面向新工科的电工电子实验教学体系改革研究与创新实践[J].实验室研究与探索,2023,42(6):277-281.
- [3] 田文,吉俊懿,刘长军,等.新工科时代化工原理实验线上线下混合式教学[J].实验科学与技术,2023,21(2):89-91.
- [4] 张凤祥,焉晓明,阮雪花,等.能源化工专业拔尖创新人才培养的实践与思考[J].化工高等教育,2023,40(4):17-21.
- [5] 张宇晴,周彦波,李剑.华东理工大学“双一流”建设的回顾与展望[J].化工高等教育,2022,39(5):40-44.
- [6] 姜喜迪,仲淑娟,杜莉莉.面向新工科支撑一流学科建设的实验中心建设与开放[J].实验室研究与探索,2022,41(6):173-177.
- [7] 朱宝忠,孙运兰,何岩峰,等.新工科背景下能源与动力工程专业实践教学的探索与研究[J].高教学刊,2020(2):70-74.

(下转第 73 页)