

新工科背景下三阶递进-虚实融合-项目驱动的物理化学实验教学改革与实践

王爽 赵永华^{*} 王欢

辽宁工业大学 化学环境工程学院, 中国·辽宁 锦州 121001

摘要: 物理化学实验是应用化学专业一门承上启下的核心实践课程, 其教学质量直接影响学生理论联系实际的能力、科学研究素养与创新思维的培养。虽然现有课程的教学目标、毕业要求支撑及过程性考核已规范化, 然而新工科背景下, 在实验结构、前沿内容、创新能力培养及评价体系等方面仍显不足。鉴于此, 本文提出“基础-综合-设计”三阶能力递进目标, 配套建设模块化的教学内容, 施行“虚实结合、项目驱动”的混合教学模式, 并建立多元过程性评价体系, 推动课程从“技能验证”向“科研素养”范式转型。将本课程打造为一个能激发科研兴趣、训练科研思维、锻造创新能力的综合平台, 为培育能应对复杂工程挑战的卓越化学人才夯实实践根基。

关键词: 物理化学实验; 教学改革; 科研素养; 创新能力; 综合评价

Deepen the reform of physical chemistry experiment teaching: Build a new integrated cultivation model centered on scientific research literacy and innovation ability

Wang Shuang, Zhao Yonghua^{*}, Wang Huan

School of Chemical & Environmental Engineering, Liaoning University of Technology, China Liaoning Jinzhou 121001

Abstract: Physical chemistry experiment is a core practical course that bridges the gap between theory and practice for the Applied Chemistry major. Its teaching quality directly affects students' ability to connect theory with practice, their scientific research literacy and the cultivation of innovative thinking. Although the current teaching objectives, support for graduation requirements and process assessment of the course have been standardized, there are still deficiencies in terms of experimental structure, cutting-edge content, the cultivation of innovation ability and the evaluation system under the background of new engineering. In view of this, this paper proposes a three-stage ability progression goal of "basic - comprehensive - design", builds modular teaching content, implements a "virtual-real combination, project-driven" hybrid teaching model, and establishes a multi-dimensional process evaluation system to promote the transformation of the course from a "skill verification" to a "research literacy" paradigm. This course will be developed into a comprehensive platform that can stimulate research interest, train research thinking and forge innovation ability, laying a solid practical foundation for cultivating outstanding chemical talents who can cope with complex engineering challenges.

Keywords: Physical chemistry experiment; Teaching reform; Scientific research literacy; Innovation ability; Comprehensive evaluation

0 引言

物理化学实验是化学学科人才培养体系中不可或缺的关键环节, 是连接宏观化学现象与微观理论原理的坚实桥梁, 是培养学生实证精神、科学思维与创新实践能力的核心载体。当前教学实践的普遍范式: 课程目标明确指向巩固知识、训练技能与培养素质, 并精准对接工程教育认证中的毕业要求; 所选的本课程是十个实验项目, 如“液体饱和蒸汽压的测定”“乙酸乙酯皂化反应级数及速率常数

的测定”等均为历经时间检验的经典内容, 覆盖了热力学、动力学、电化学、表面与胶体化学等物理化学主干理论领域; 将预习、操作与报告三个环节均纳入评分, 并制定了细致量化的等级标准。这一传统体系在确保学生掌握基本实验技能、深化对理论理解方面, 发挥了不可替代的作用, 其系统性与规范性值得肯定。

然而新时代对高素质创新型、复合型人才的需求, 以批判和发展的眼光重新审视这一传统体系, 它正面

面临着前所未有的挑战。首先本实验课程的问题体现在实验类型结构的失衡,现有课程中验证性实验与综合性实验各占一半,但全然缺失了设计性与研究性实验的环节。这种结构可能导致学生在多数情况下习惯于被动操作,学习过程更像是对已知结论的复核,而非对未知世界的探索,从而在一定程度上抑制了学生主动发现问题、设计实验方案科研能力的培养。其次,教学内容虽经典但略显传统与封闭,实验项目与当代化学研究的前沿领域(如新能源材料、纳米生物技术、绿色可持续化学等)以及现实工业生产中的复杂工程问题关联度不强,这可能导致课程内容对学生缺乏足够学习驱动力。再次,从能力培养的维度看,现有大纲虽明确提出“提高学生的实验研究能力和科学素质”的高层目标,但在具体的教学实施与评价环节,仍更多地聚焦于操作规范性、数据记录与处理等基础技能,而对于创新及独立研究能力如何通过具体实验项目进行有效训练和科学评估,其路径设计与评价标准均显得相对模糊和薄弱。最后,在教学模式与技术融合上,仍以“两人一组”的线下实体操作为绝对主导,对于虚拟仿真、在线开放课程、数字化学习平台等现代教育技术的应用尚未给予充分重视,未能有效利用这些技术手段来突破时空限制、提升预习效率、深化原理理解或模拟复杂实验。

因此,理化学实验教学的改革,绝非对传统体系的简单否定或全盘推翻,而应是在“继承经典、强化基础”之上的“创新发展、提质增效”。我们旨在构建一个以学生发展为中心、以科研素养与创新能力培养为导向、能力培养呈阶梯式递进的全新教学体系,从而推动该课程从一门以技能验证和知识巩固为主要目标的传统课程,成功转型为一个能够有效激发创新潜能、系统塑造科学精神的综合性实践教育平台。

1 教学改革的理念与目标

物理化学实验教学改革的核心理念是实现三个根本性的转变,一是实现学生角色从“被动验证者”向“主动探究者”的转变,通过增加探究性环节,引导学生体验从提出问题、文献调研到设计方案、得出结论的完整科学研究过程;其二,是实现培养重心从“单一操作技能”向“综合科研素养”的转变,在夯实实验技能的同时强调科学思维的训练(如逻辑推理、模型构建与验证)、现代数据处理能力的提升(如专业软件应用、误差理论与不确定性分析)以及学术交流能力(如报告撰写、口头答辩)的培养;其三,是实现教学场域从“封闭固定的课堂”向“开放多元的学习空间”的转变,充分利用线上资源与虚拟平

台,拓展学习的广度与深度,培养学生的自主学习和终身学习能力。

基于上述核心理念,我们需要对原有的课程教学目标进行细化、深化与升级,形成一个更具层次性、可观测、可衡量的新目标体系。学生在完成本课程后,应达成以下三个维度的能力与素养。在知识与技能维度,学生应能系统掌握物理化学核心实验方法与技术的原理与要点,能够独立、规范、熟练地操作常用实验仪器,并理解其工作原理;具备准确完整地记录原始数据的能力,并能运用数学工具和软件对数据进行处理与分析。在过程与方法维度,学生有效协作完成综合性实验;进行文献检索与综述,并设计出合理、可行的实验研究方案的能力;能够运用所学的物理化学理论对实验现象进行合理解释,对实验数据进行深入分析,辨识并评估误差来源得出令人信服的科学结论。在情感、态度与价值观维度,学生应能养成严谨求实、精益求精、探索创新的科学态度与坚韧不拔的科学精神;牢固树立“安全第一、环保先行”的强烈实验意识与社会责任感的形成;在团队协作中学会有效沟通、合理分工与相互尊重,并恪守学术规范与科研伦理。

2 教学内容与教学模式的改革

理念与目标的更新可以通过具体的教学内容与教学模式的革新来落地。为此,我们提出以下系统性的改革实施方案。构建“基础-综合-设计”三层次能力递进的教学内容体系。打破原有课程十个实验平行排列的格局,按照学生能力形成的客观规律,将实验项目重组为三个相互衔接、逐层提升的教学层次。第一层次:基础验证层旨在夯实学科基础,规范操作技能。选具代表性的经典验证性实验,如《液体饱和蒸汽压的测定》《中和热及解离热的测定》以及《铅-锡二组分金属相图的绘制》。改革的关键在于变革教学引导方式。要求学生在预习时,不仅要明确实验步骤,更要深入思考“为何选择此种测量方法而非他法?实验的关键控制点和可能的误差来源何在?”等问题,从而将单纯的技能模仿提升为对实验设计思想的理解与反思。第二层次是综合应用层旨在促进知识融会贯通,提升解决问题能力。对现有的综合性实验进行优化整合,并注入前沿与应用元素,使其更具挑战性和趣味性。例如,将《溶液吸附法测定吸附分子横截面积》与《溶液表面张力及吸附分子横截面积的测定》整合为一个名为“表面活性剂吸附行为的多方法对比研究”的专题项目,让学生使用两种不同的物理化学方法研究同一系列溶液,通过对两组实验结果的交叉验证、比较分析与深入讨论,深刻领会朗格

缪尔单分子层吸附模型的适用条件、优势及其局限性。再如,在《过氧化氢的催化分解》实验中,可提供多种类型的催化剂(如固态 MnO_2 、均相 Fe^{3+} 离子,以及生物酶催化剂),引导学生设计对比实验,探究催化剂的相态、浓度等因素对反应速率的影响,并初步关联均相催化与多相催化的机理差异,将动力学知识应用于实际催化体系的分析。第三层次,设计研究层旨在激发创新潜能,模拟科研全过程。这是改革力度最大的层次,计划开设 1 至 2 个主题式设计实验。教师结合自身科研方向与学科前沿,发布若干开放性的研究主题,如“光催化降解有机污染物的动力学模型拟合与效率比较”等。学生以 3-4 人组成项目小组,在学期初选定主题,随后利用整个学期的大部分时间,自主进行文献调研、方案论证、实验实施、数据分析和成果总结。教师的角色从“指挥官”转变为“资源提供者”,主要任务是对学生的实验方案进行安全性与可行性评估,并在他们遇到困难时给予必要的启发和指导。

为支撑上述教学内容,特别是保障设计研究层的高效实施,必须对传统教学模式进行技术赋能与模式创新。深度引入虚拟仿真实验,针对部分高危(如高温、高压)、高成本或现象瞬态的实体实验,开发或引进高保真的虚拟仿真实验项目。例如,对于《铅-锡二组分金属相图的绘制》实验,学生可在虚拟环境中安全地进行合金的熔融、冷却曲线的测量,并动态观察相图是如何由一组步冷曲线构建而成的,这极大地深化了对相图物理意义的理解。学生在进行实体实验前,必须完成相应的虚拟仿真操作并在线考核,这不仅能预演流程、排查隐患,更能将宝贵的实体实验时间集中于对关键现象的观察与深层问题的思考上。构建模块化线上教学资源库,依托学校的网络教学平台,建设本课程的小规模限制性在线课程。资源库应包含但不限于:每个实验的导学视频、仪器操作规范演示动画、数据处理软件(如 Origin)应用教程、典型案例分析、相关领域的经典与前沿文献链接,以及安全知识微课程。这些资源为学生,特别是参与设计性实验的学生,提供了按需索取的知识工具箱,有力支持了他们的自主探究与个性化学习。全面推行项目式学习模式,学期伊始即发布项目指南,学生团队在教师的指导下,历经开题报告、中期检查、期末结题等完整的科研训练环节。课程结束时,举办“物理化学实验学术研讨会”,各小组以学术海报展示或口头报告的形式汇报其研究成果,并接受由课程组教师乃至相关专业教师组成的“评审委员会”的提问与点评。这一过程不仅是对学生项目工作的总结性评价,更是对其

学术表达、临场应变及学术交流能力的极佳锻炼,高度模拟了真实的科研工作环境。

3 考核评价体系的优化

为全面反映学生新的教学体系下的成长,必须对原有评价方式进行深刻改革,建立一个更能体现学生学习过程、努力程度与能力增长的综合性评价体系。实施“多元化、过程性、增值性”评价方案,建议将课程的总成绩构成调整如下,过程性评价(占总成绩 50%):此部分着重评价学生在学习过程中的投入与进步。预习与线上学习(15%):包括预习报告的质量、虚拟仿真实验的完成度与测试成绩,以及在线资源的访问与学习情况。实验操作与科学实践(20%):评价标准超越“操作规范”,延伸至实验过程中的问题意识、面对异常现象的应对策略、实验设计的微调能力、安全与环保习惯,以及团队协作的有效性。课堂参与与讨论(15%):鼓励学生在实验讲解、小组讨论、中期汇报中积极提问、发表见解,评价其思维的活跃度与深度。项目成果评价(占总成绩 30%):此部分专门考核学生在设计研究层的综合表现。设计性实验研究报告/论文(20%):从选题意义、文献调研、方案创新性、数据可靠性、分析深度、结论正确性及报告规范性等多个维度进行综合评定。期末项目答辩/海报展示(10%):评价其成果凝练能力、PPT/海报制作水平、口头表达能力及回答问题的逻辑性与准确性。终结性评价(占总成绩 20%):此部分关注最终成果的质量。实验报告质量(20%):对基础层和综合层的实验报告进行评价。鼓励在报告中增设“深度反思”“拓展探究设想”或“不确定度分析”等栏目,引导学生超越简单的数据计算,进行更深层次的科学思考。细化评价标准,推行“能力达成度”分析。为保障评价的公正性与科学性,特别是对于项目式学习项目,需要为“设计研究层”的实验制定详细的评价量表。该量表应清晰界定“优秀、良好、合格、不合格”各级别在“文献应用、方案设计、数据质量、分析深度、创新性、表达与协作”等关键维度上的具体表现标准。在课程结束后,教学团队应依据评价数据,对课程教学目标以及所支撑的毕业要求指标点的达成情况进行定量与定性相结合的分析,形成“课程目标达成度评价报告”,从而实现以评价促改进的闭环教学质量保障。

4 改革实施的保障条件与预期成效分析

本次改革的顺利实施依赖于以下几个关键保障,一是师资队伍转型与提升,改革对教师提出了更高要求。教师不仅需要具备精湛的实验教学能力,更需要拥有开阔的

科研视野和丰富的项目指导经验。因此,必须建立常态化的教学发展机制,通过定期开展教学研讨会、工作坊、跨学科交流以及鼓励教师将科研前沿转化为教学案例,促进教师团队从“实验指导员”向“科研导师”的角色成功转型。二是教学资源的持续投入与更新:学校需在经费上给予支持,用于更新部分陈旧仪器设备,采购或自主开发高质量的虚拟仿真实验软件,并设立“开放实验基金”以支持学生设计性实验中所产生的材料与测试费用。同时,实验室管理应推行预约制与开放制,为学生的探究性学习提供灵活的时间与空间保障。三是安全文化的强化与制度建设:随着学生自主实验的增加,安全风险管理的复杂度也随之上升。必须建立更为严格、细化的实验室安全准入制度、风险评估流程与应急预案。所有学生在进入设计性实验阶段前,必须通过高级别的安全知识考试,并签署安全承诺书,确保“安全第一”的原则贯穿于改革的全过程。

基于上述改革方案与保障措施,我们预期本课程将取得以下显著成效,学生学习动机与主体性的显著增强:丰富多样的实验内容、充满挑战的项目式学习项目以及自主探究的学习方式,将有效激发学生的内在学习兴趣与科研热情,变“要我学”为“我要学”。通过体验近乎真实的科研全流程,学生将初步掌握科学研究的基本范式,其发现问题、分析问题与解决问题的能力,以及团队协作与学术交流能力将得到系统性、全方位的提升。理论知识理解与应用能力的深度融合,“在做中学,在研中悟”的模式,使得抽象的物理化学原理转变为解决具体问题的有力工具,极大地促进了学生对理论知识的深层理解与迁移应用能力。高质量教学成果的持续产出:优秀的课程设计性实验项目,可以进一步孵化成为“大学生创新创业训练计划”项目,部分高质量的研究报告经修改后有望形成学术论文或申请专利,实现教学与科研的良性互动与反哺。

5 结语

综上所述,物理化学实验教学的深化改革是一项关乎人才培养质量的战略性工程,它要求我们以高度的责任感和前瞻性的视野,在充分肯定和继承传统教学优势的基础上,勇于进行自我革新。本文所提出的以“理念转变为先导、目标重构为纲领、内容与模式改革为核心、评价体系优化为保障”的一揽子改革方案,旨在系统性地解决当前物理化学实验教学中存在的结构性矛盾与发展瓶颈。通过构建“基础-综合-设计”三层次能力递进的教学内容,并辅以“线上线下、虚实结合”的混合教学模式与多元化过程性评价体系,我们致力于将物理化学实验课程从一门

侧重于技能训练与知识验证的传统课程,彻底转型为一个能够有效激发学生创新潜能、系统塑造其科研思维与综合素养、为其未来学术生涯或工程职业生涯奠定坚实基础卓越的实践教学平台。这项改革的成功实施,不仅将显著提升应用化学专业的人才培养质量,也为理工科同类实验课程的教学改革提供了可资借鉴的路径与范式。

参考文献:

- [1] 王旭珍,贾翠英,王新平等.以学生为中心,构建物理化学实验教学新体系[J].实验技术与管理,2008,25(11):20-23.
- [2] 钟登华.新工科建设的内涵与行动[J].高等工程教育研究,2017(03):1-6.
- [3] 林健.面向未来的中国新工科建设[J].清华大学教育研究,2017,38(02):26-35.
- [4] 赵萌,巩运兰.多层次物理化学实验教学体系构建[J].天津化工,2025,39(02):183-185.
- [5] 王琛,王雪薇,樊红霞等.基于紫外-可见吸收光谱仪DIY组装的物理化学实验教学改革的[J].化学教育(中英文),2025,46(12):24-30.
- [6] 李迎迎,蒋志敏,戴平等.“虚实结合+翻转课堂”在“物理化学实验”教学中的探索与实践[J].化工时刊,2025,39(04):102-105.
- [7] 刘绪,刘城芳,黄杰等.物理化学实验教学改革创新实践[J].大学化学,2024,39(08):112-118.
- [8] 蒙丽丽,李媛媛,李猛等.基于OBE理念的物理化学实验教学改革的探索与实践[J].教育教学论坛,2022,(17):121-124.
- [9] 郑伏琴,张万富,陈卫等.新工科背景下理论知识与实验知识融合的实验教学知识体系的构建——以物理化学实验教学改革的为例[J].广东化工,2022,(14):227-229.
- [10] 王玮,刘天宇,张金涛.地方应用型本科院校物理化学实验教学改革的探索[J].化工时刊,2022,(01):39-40.
- [11] 刘洋,丁治英,李文章等.基于物理化学实验课程教学孵化大学生创新创业项目的应用实践[J].广东化工,2022,(16):244-245+255.
- [12] 邓玲娟,张知侠.改革物理化学实验教学模式提升教学效果[J].实验室科学,2022,(04):119-121.
- [13] 苗常青,石玉芳,赵三虎等.研究性“物理化学实验”教学模式创新分析[J].现代盐化工,2022,(03):114-116.
- [14] 周亭,李文静,王芳珠等.多层次一体化物理化学

实验教学模式的构建与探索[J]. 广东化工, 2022,(09):201-202.

[15] 茹婷婷, 金石. “虚拟实验微课程”在“物理化学实验”教学中的应用研究——以“蔗糖水解反应动力学”实验为例[J]. 黑龙江教育(理论与实践), 2022,(02):76-77.

基金项目: 2022 年辽宁工业大学新工科背景下化工专业人才培养模式的构建与探索(xjg2022021)。

作者简介: 王爽(1995-), 女, 内蒙古通辽人, 工

学博士, 辽宁工业大学化学与环境工程学院, 讲师, 硕士生导师, 研究方向: 主要从事新型二维材料(MOFs、LDH)电催化析氢研究。

通讯作者: 赵永华(1978-), 男, 辽宁朝阳人, 工学博士, 辽宁工业大学化学与环境工程学院院长, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 主要从事有机化合物重整制氢研究。