

新工科背景下材料类实验课程教学改革与实践 ——以高熵合金设计与表征为例

宁家龙, 贾胧哲, 卢双燕, 黄伊琳, 陈珊珊, 秦颐鸣, 方黎阳*

南宁学院交通运输学院, 交通新技术及材料应用广西高校工程研究中心, 广西 南宁

收稿日期: 2026年4月17日; 录用日期: 2026年6月29日; 发布日期: 2026年7月7日

摘要

在新工科“交叉融合、跨界整合、创新驱动”理念指引下, 本文针对材料类实验教学存在的内容滞后、流程固化、体系割裂、评价单一等问题, 以高熵合金设计与表征为实践载体, 开展实验课程改革探索。研究重构“知识、能力、素养”三位一体教学目标, 搭建递进式模块化实验内容, 采用“问题链”牵引教学模式, 建立覆盖教学全流程的多元化过程性评价机制, 形成“基础训练-综合应用-创新探究”三层次螺旋递进的实验教学体系。实践证明, 改革有效弥补传统实验教学短板, 提升学生工程实践能力、科研思维与创新素养, 推动教育目标从知识传授向能力与素养培育转变, 为新工科材料类卓越工程人才培养提供可借鉴、可推广的实践方案。

关键词

新工科, 材料类实验教学, 教学改革, 高熵合金, 问题链教学

Teaching Reform and Practice of Materials Experiment Courses under the Background of Emerging Engineering Education

—Taking High-Entropy Alloy Design and Characterization as an Example

Jialong Ning, Longzhe Jia, Shuangyan Lu, Yilin Huang, Shanshan Chen, Yiming Qin,
Liyang Fang*

Guangxi Engineering Research Center for New Technology and Material Application of Transportation, College
of Traffic and Transportation, Nanning University, Nanning Guangxi

*通讯作者。

文章引用: 宁家龙, 贾胧哲, 卢双燕, 黄伊琳, 陈珊珊, 秦颐鸣, 方黎阳. 新工科背景下材料类实验课程教学改革与实践[J]. 职业教育发展, 2026, 15(7): 107-115. DOI: 10.12677/ve.2026.157285

Abstract

Guided by the core concepts of “interdisciplinary integration, cross-border integration and innovation-driven” in emerging engineering education, this paper carries out the teaching reform exploration of materials experiment courses aiming at the prominent problems existing in current materials experiment teaching, such as lack of cutting-edge nature, solidified process, fragmented curriculum system and single evaluation method. Taking the design and characterization of high-entropy alloys as the practical carrier, this study reconstructs the advanced teaching goal of the trinity of “knowledge, ability and quality”, builds a progressive modular experiment content, innovates the teaching mode driven by “problem chain”, and establishes a diversified process evaluation mechanism covering the whole process. Finally, an experimental teaching system with three-level spiral progression of “basic training - comprehensive application - innovative inquiry” is constructed. The practical results show that the reform mode effectively makes up for the shortcomings of traditional experimental teaching, significantly improves students’ engineering practice ability, scientific research thinking and innovation quality, and successfully realizes the transformation of educational objectives from knowledge imparting to ability and quality cultivation. It provides a feasible and popular practical reference for the cultivation of outstanding engineering talents in materials under the background of emerging engineering education.

Keywords

Emerging Engineering Education, Materials Experiment Teaching, Teaching Reform, High-Entropy Alloys, Problem Chain Teaching

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2017年2月20日,教育部高等教育司发布《关于开展新工科研究与实践的通知》¹,2018年9月17日,教育部、工业和信息化部、中国工程院发布《关于加快建设发展新工科实施卓越工程师教育培养计划2.0的意见》,旨在推进新工科建设,强调主动应对新一轮科技革命与产业变革,加快工程教育改革创新,培养具备工程实践、跨界整合与原始创新能力的复合型高层次科技人才[1]-[3]。新工科以“交叉融合、跨界整合、创新驱动”为核心理念,要求打破学科壁垒,融合产业前沿、工程情境与基础理论教学[4]。

材料科学与工程是典型的应用导向型基础学科,覆盖民用包装、汽车工业、航空航天、热防护系统等众多领域。材料领域的技术突破,直接支撑制造业转型升级。实验课程在材料专业人才培养中占据关键位置,承担着训练动手能力、塑造科学思维、培育创新意识的重要任务。

本研究立足新工科建设要求,结合材料专业教学特点,以高熵合金设计与表征为前沿教学载体,探索材料类实验课程改革路径。通过搭建模块化、递进式实验内容,运用问题链驱动的教学组织方式,完善全流程多元评价机制,构建“基础训练-综合应用-创新探究”三层次螺旋递进教学体系,提升学生工程实践能力、系统思维与创新意识,为新工科材料类卓越人才培养提供可复制、可推广的实践范式。

¹http://www.moe.gov.cn/s78/A08/tongzhi/201702/t20170223_297158.html

从教育学角度来看, 这项研究主要以建构主义学习理论和体验式学习理论为支撑。建构主义认为, 知识不是被动接收的, 而是学习者在与环境互动的过程中主动建立起来的[5]。维果茨基提出的最近发展区理论, 也为问题链的设计提供了认知层面的依据[6]。本研究设置的四层问题链, 从工程问题到材料原理, 再到微观机制、实验验证, 形成了一步步向上的认知脚手架, 也符合布鲁纳螺旋式课程的理念, 帮助学生在解决问题的过程中, 真正理解高熵合金成分、工艺、组织与性能之间的内在联系。

Kolb 的体验式学习理论把学习分成四个阶段: 具体体验、反思观察、抽象概括、主动实验[7]。本研究设计的六个教学模块, 刚好和这一循环对应。模块一、二偏向抽象概括, 模块三到五侧重具体体验与反思观察, 模块六则对应主动实验, 整体形成从知识输入到能力输出的完整学习闭环。

在教学目标设计上, 我们借鉴了 OBE 成果导向教育的思路[8], 以知识、能力、素养三位一体为目标, 反向设计教学活动和评价方式。评价体系里, 实验操作对应知识与技能目标, 数据分析报告对应科研能力目标, 小组答辩和组内互评对应综合素养目标, 让目标、活动、评价三者保持一致。

和传统 PBL 教学相比, 本研究的问题链结构更清晰、层次更递进, 能有效减轻初学者的认知压力。和 CDIO 模式相比, 本研究更贴合材料科学实验的学科特点, 把工程全流程理念融入成分设计、工艺调控、组织表征、性能评价这套材料研究范式。和翻转课堂相比, 本研究在课堂环节更突出真实实验操作与问题驱动的深度结合。这种吸收多种教学模式优势、贴合学科特点定制的做法, 让整个研究具备更强的理论解释力和实践指导意义。

2. 现状与困境

近年项目式学习、虚拟仿真实验、翻转课堂等方式逐步进入工科实验教学。部分学者将虚拟仿真技术用于高危、高成本实验场景, 部分院校在电气、机械、化工等专业推行项目式或产出导向教学。刘金库等将虚拟仿真技术融入工程实验教学, 有效破解高危、高成本实验难题, 但改革多局限于单一技术与单一实验环节, 未能形成跨课程的系统性体系[9]; 赵建勇等在电气工程实验中推行 PBL 与翻转课堂, 虽提升了学生实践能力, 但仍停留在单门课程优化, 课程壁垒依然突出[10]; 陆紫生在机械类综合实验中开展项目式教学改革, 证实其对创新能力的促进作用, 却存在评价维度单一、过程性激励不足的问题[11]; 肖赛金等在化工实验教学中实施产出导向改革, 增强了学生工程素养, 但教学内容前沿性与产业贴合度仍有待提升[12]。

这些尝试在局部环节取得成效, 但大多停留在单一手段或单门课程优化, 难以形成系统性、跨课程的教学体系。对照新工科建设标准, 当前材料类实验教学仍存在明显短板。

第一、教学内容前沿性不足, 缺少真实工程情境。现有实验以经典验证性项目为主, 基础扎实, 但与高熵合金、增材制造、机器学习辅助设计等前沿方向结合不够紧密, 也较少对接选材、极端环境服役等复杂工程问题。学生按固定步骤完成操作, 很难体会材料研究对国家重大需求与产业发展的实际价值。

第二、教学流程程式化明显, 学生自主探究空间有限。实验指导书对步骤、参数规定细致, 学生只需按流程操作。这种模式压缩了实验设计、参数选择、独立判断的空间, 不利于批判性思维与创新能力培养, 难以实现从操作执行者到方案设计者的转变。

第三、课程体系壁垒明显, 系统工程思维培养不足。材料制备、组织分析、性能测试等实验课程相对独立, 缺少贯穿性项目主线。学生难以在同一项目中完整经历“成分设计-工艺调控-组织表征-性能评价”的材料研究全流程, 系统思维与复杂工程问题解决能力得不到充分锻炼。

第四、评价体系维度单一, 对创新过程激励不足。传统评价偏重实验报告规范性与数据一致性, 对方案设计、异常分析、失败归因等创新探索缺少有效考察。结果导向的评价方式, 一定程度上降低学生尝试与探索的积极性。

如何把产业对高性能材料的需求、材料科学前沿研究范式与本科实验教学深度融合，构建兼顾基础夯实、产业对接与创新激发的系统性实验教学模式，仍是需要持续探索的重要课题。

3. 教学改革方案设计

3.1. 教学目标

结合新工科人才培养要求，将传统“知识传授 + 技能训练”目标，升级为“知识、能力、素养”三位一体的高阶目标体系。具体设定如表 1 所示。

Table 1. Teaching objectives of the high-entropy alloy course

表 1. 高熵合金课程教学目标表

目标维度	要求
知识目标	掌握高熵合金四大效应、相结构分析方法
能力目标	具备从“问题提出→实验设计→数据分析→结论提炼”的科研能力
素养目标	培养工程伦理意识与材料选型的工程思维

从知识层面来看，可以让学生掌握高熵合金核心效应与相结构分析方法，理解高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应与鸡尾酒效应的内涵，熟悉 XRD、EPMA 等材料表征技术的原理与应用。

从能力层面来看，学生可以形成完整科研工作链条，能够完成文献调研、问题凝练、成分与工艺方案设计、实验实施、数据采集、结构与性能关联分析、结论提炼与方案优化等工作，可独立操作电弧熔炼炉、X 射线衍射仪、电子探针等关键设备。

从素养层面来看，有助于培养学生树立严谨的科学态度与工程伦理意识，恪守学术诚信；建立“成分 - 工艺 - 组织 - 性能 - 成本”一体化材料设计思维；在团队协作与项目汇报中提升沟通表达与组织协调能力。

三维目标共同发力，让学生不仅理解高熵合金与传统合金的设计差异，更能把握多主元合金相稳定与性能调控机理，初步形成材料创新意识与科研实践能力。

3.2. 教学内容模块化设计

以高熵合金为核心载体，把实验内容拆分为六个衔接紧密、逐层提升的教学模块，实现理论与实践、操作与设计、个人学习与团队协作的深度融合。具体安排如表 2 所示。

Table 2. Modular arrangement of experiment teaching for high-entropy alloys

表 2. 高熵合金实验教学模块化安排表

模块	内容	学时	教学形式
模块一	理论导入：高熵合金概述与发展背景	4	课堂讲授 + 文献研读
模块二	合金设计：成分选择与配比计算	2	小组讨论 + 计算练习
模块三	样品制备：熔炼、切割、研磨抛光	8	实验操作(分组轮转)
模块四	组织表征：OM、XRD、EPMA 操作与分析	8	仪器实操 + 数据处理
模块五	性能测试：密度、硬度和强度测试	8	实验操作 + 误差分析
模块六	综合汇报：结果分析与小组答辩	6	PPT 汇报 + 互评

模块一主要是聚焦高熵合金理论与背景，通过课堂讲授与文献研读完成知识导入。模块二围绕合金成分选择与配比计算，以小组讨论与计算练习为主。模块三开展样品制备训练，完成熔炼、切割、研磨

抛光等操作。模块四进行组织表征,学习 OM、XRD、EPMA 设备使用与数据分析。模块五开展密度、硬度、强度等性能测试,同步进行误差分析。模块六以综合汇报收尾,完成结果分析与小组答辩。

前两个模块侧重知识输入与方案规划,锻炼文献调研与自主设计能力。中间三个模块为实操环节,采用分组轮转保证每位学生充分上手,把“现象-机理-分析”逻辑融入训练过程。收尾模块强化数据处理、报告撰写与口头表达,通过互评与质询加深对实验整体的理解。

3.3. “问题链”驱动教学设计

为彻底改变学生“按步骤做实验、被动接受知识”的传统状态,以递进式问题链为核心牵引,贯穿实验教学全流程,引导学生主动思考、自主探究、深度参与,在解决真实问题的过程中完成知识建构与能力提升。设计的核心问题链如图 1 所示。

围绕工程问题、材料原理、微观机制、实验验证四个层次设计问题链,以环环相扣的问题驱动,将知识、技能与能力有机串联。学生始终带着问题学、围绕问题做、针对问题思,从而实现从学会操作到学会研究的根本转变。

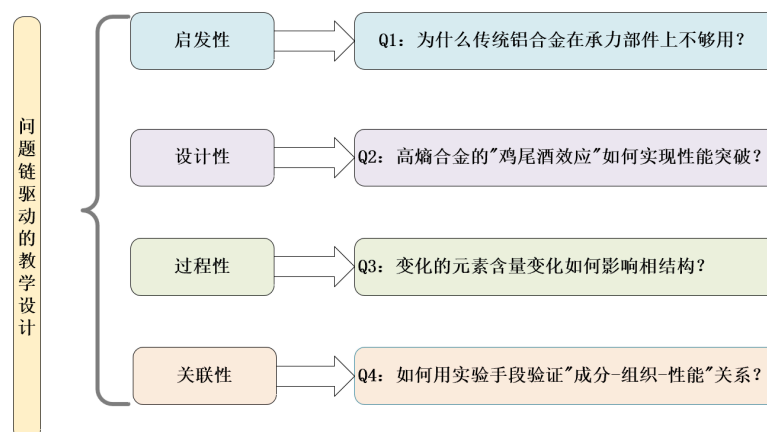


Figure 1. Design framework of high-entropy alloy experiment teaching driven by problem chain
图 1. 问题链驱动的高熵合金实验教学设计框架

4. 教学实施过程

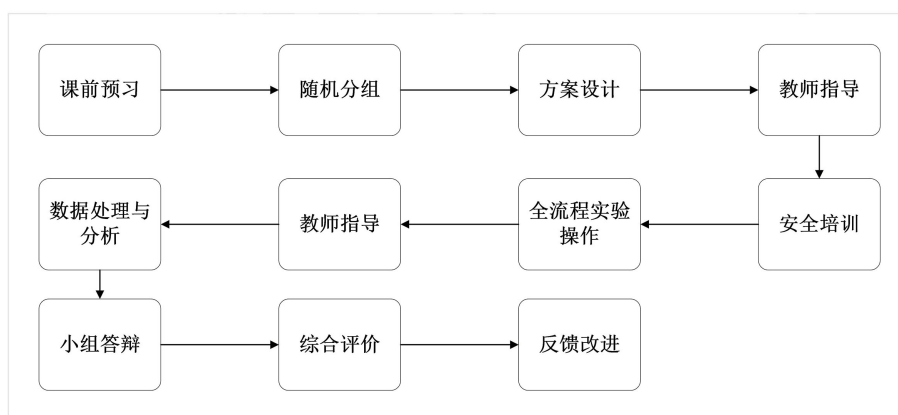


Figure 2. Implementation process of experiment teaching driven by problem chain
图 2. 基于问题链驱动的实验教学实施流程

为保障教学质量与实施效率,研究构建“课前准备-课中实施-课后提升”的完整教学实施路径,如图2所示,并通过明确小组分工、递进式问题引导、全过程实时指导,确保学生深度参与实验各环节。小组采用固定角色与轮换机制相结合的方式,保证每位学生均能参与方案设计、设备操作、数据分析与成果汇报,实现能力全面锻炼。教学全程以工程问题为起点,以层层递进的问题链引导学生自主思考、自主探究,逐步建立“成分-工艺-组织-性能”的关联思维,真正实现从操作训练到科研能力培养的转变。

4.1. 课前准备

教师提前一周通过线上平台发布预习任务,要求学生阅读近五年高熵合金相关文献,理解合金设计原则、制备工艺、表征方法与性能标准;结合专业基础课程完成预习思考,撰写简要预习报告;通过线上资源熟悉大型仪器操作规范与安全要点,为实验开展做好理论准备。

学生以5人为单位进行异质分组,兼顾学习基础、动手能力与表达能力,保证各组整体水平均衡。每组设置组长、操作员、数据分析师、文献调研员、汇报员等岗位,实行角色轮换,确保全员参与各环节工作。

各组围绕成分配比变量,自主确定元素含量梯度方案,完成成分计算、工艺参数选择、步骤规划与仪器预约,形成完整实验设计。教师逐一审核方案,纠正科学性、安全性与逻辑性问题,协助优化方案,保障实验顺利开展。

4.2. 课中实施

实验开始前,教师统一开展安全培训,强调高温设备、精密仪器与化学试剂的使用规范和应急处理方法,强化安全意识。在教师示范与指导下,各组按优化方案依次完成合金熔炼、样品切割、研磨抛光、金相观察、XRD分析、EPMA测试、力学性能测试等全流程操作,实现理论、设计、制备、表征、测试一体化训练。

教师全程巡回指导,以提问与启发为主,帮助学生建立从现象观察、数据获取到问题分析、机理探究、方案优化的完整科研逻辑。面对异常数据、操作误差与设备故障,引导学生自主排查原因、提出解决办法,提升问题处理能力。组内分工明确、轮流操作精密仪器,共同记录原始数据,及时交流实验现象与问题,避免部分学生被动旁观。小组协作同时提升实验效率,培养沟通能力、协作意识与责任担当。

4.3. 数据处理与汇报

各组整理实验原始数据,使用Origin、Jade、Photoshop等软件绘制成分-性能曲线、金相组织图、XRD图谱、EPMA面分布图等,开展系统数据处理、误差分析与规律总结。结合文献理论讨论实验结果,形成规范、完整的数据分析报告。

课程组织小组答辩,每组用20分钟展示实验设计、过程、数据、结论与创新点,接受8分钟师生质询。围绕方案合理性、数据可靠性、结论科学性与改进方向展开交流。教师现场点评总结,指出优势与不足,给出改进建议,促进全体学生共同提升。

5. 教学效果评价

为改善传统实验考核重结果、轻过程,重报告、轻能力,重统一、轻创新的问题,本研究构建多元化、过程化、能力导向的综合评价体系,把评价贯穿教学全程,全面衡量操作技能、数据分析、创新思维、团队协作与表达沟通能力。采用“过程考核+结果考核+互评考核”相结合的方式,设置4项核心考核指标,权重分配科学合理,突出过程性与综合性,如表3所示。

Table 3. Comprehensive evaluation indexes and weights of the experiment course**表 3.** 实验课程综合评价指标及权重

评价指标	权重	评价内容
实验操作	40%	实验流程规范性；设备操作熟练度；安全意识与执行情况；实验现象观察与记录完整性；异常问题主动排查与处理能力
数据分析报告	35%	数据处理准确性；图表绘制规范度；结果分析深度；误差分析合理性；结论逻辑性与科学性；报告撰写严谨性
小组答辩	15%	PPT 制作质量；汇报表达清晰度；实验思路阐述完整性；问题应答逻辑性；批判性思维与创新观点呈现
组内互评	10%	团队协作配合度；分工任务完成质量；沟通交流主动性；责任意识与参与度；对小组整体贡献度

实施过程采用实时记录方式，教师对实验操作、课堂表现、问题解决与参与度进行打分与文字记录，保证过程评价客观可追溯。数据分析报告与小组答辩采用标准化评分细则，从科学性、逻辑性、规范性、创新性等维度量化评分，减少主观偏差。组内实行匿名互评，剔除极端值后取平均，真实反映协作效果。

考核结束后，为每位学生提供量化成绩与定性评语结合的综合反馈，明确优势与改进方向，形成“教学-评价-反馈-改进”的闭环机制，助力学生持续提升。实践表明，多元评价体系有效激发学生参与热情与探究动力，能更全面客观反映综合实验能力，对教学质量提升起到明显推动作用。

6. 改革经验与反思

本次改革以真实科研项目为载体，把高熵合金设计、制备、表征、性能评价完整流程引入课堂，让学生以科研工作者身份参与课题全过程，学习代入感与参与度明显提升。递进式问题链引导学生从实验现象深入微观机制，帮助建立“成分-组织-性能”的内在关联，强化科研思维与工程分析能力。多元化过程评价兼顾操作、分析、表达与协作，推动知识、能力、素养同步发展。

但受条件限制，电弧熔炼炉等关键设备数量有限，只能采用分组轮转的方式开展教学，整体实验周期会相应拉长。如表 4 所示，EPMA 等大型精密仪器操作步骤复杂，学习门槛偏高，不少学生在有限课时内很难独立完成全部测试流程。目前实验内容仍以常规组织观察与力学性能测试为主，高温、腐蚀等贴近工程实际的拓展模块相对欠缺。

Table 4. Requirements for the implementation of high-entropy alloy experiment course**表 4.** 高熵合金实验课程教学实施条件要求

条件类别	具体要求	说明
核心设备	电弧熔炼炉 ≥ 2 台、XRD ≥ 2 台、EPMA ≥ 1 台	支持 2~3 组同时实验；不足时可结合虚拟仿真补偿
师资配置	师生比不高于 1:15	教师需具备材料科学背景及实验教学组织能力
课时安排	总学时 36	建议连续 8~10 周，每周 3~4 学时
软件平台	线上教学平台 + Origin/Jade 等分析软件	支持课前预习与数据处理；可用免费替代方案
配套制度	安全培训、仪器预约、耗材经费保障	需教务部门在排课与实验室管理方面配套支持
辅助手段	虚拟仿真预训练平台	缓解设备不足，降低学习门槛

后续可以引入虚拟仿真平台，让学生先进行线上预演与反复练习，缓解实体设备不足带来的限制。在此基础上增设高温性能、腐蚀性能等工程应用模块，进一步拉近教学与产业需求的距离。同时持续优化分组与轮转安排，逐步建成虚实结合、层次清晰的实验教学体系。

这一模式在推广过程中也会遇到一些现实问题。一是经费压力，高熵合金相关实验耗材成本偏高，可通过校企合作争取原料支持，借助虚拟仿真减少实体试错开销。二是大班教学压力，学生人数超过 30 人后，轮转效率明显下降，可采用“核心实验 + 可选拓展”的弹性安排，把部分验证性内容放到虚拟仿真中完成。三是学生基础参差不齐，可提供分层学习资源，采用异质分组和梯度问题链，对基础薄弱学生进行针对性辅导。四是评价标准难以统一，可制定详细评分细则，开展教师统一评分培训，采用多人评分取平均的方式降低主观偏差。

这些问题并不是本教学模式特有的困难，而是实验教学改革中普遍存在的共性问题。从实际运行情况来看，只要做好制度设计、资源统筹和教学组织优化，多数挑战都能得到有效缓解。

7. 模型的适应性与变体探讨

为提升模式的可推广性，需要结合不同实验课程特点做灵活调整。问题链驱动和模块化设计是本模式的核心，强调以问题为牵引、以模块为载体、以能力为目标，整体框架通用性强，可迁移到多类材料实验课程中。

以“材料力学性能”实验为例，可重新设计适配的问题链。第一层从工程问题切入：同一构件在室温和高温下为什么会出现不同的断裂形式。第二层聚焦材料原理：温度怎样影响位错运动和相变过程。第三层深入微观机制：断口上的韧窝、解理面、沿晶断裂分别对应怎样的材料变化。第四层落脚实验验证：怎样设计不同温度下的拉伸实验来检验相关机理。对应模块可设为理论导入、试样制备、室温与高温测试、断口分析、综合汇报五个部分，延续“理论 - 设计 - 实验 - 分析 - 综合”的递进思路，实现框架复用、内容定制。

不同院校可根据自身条件选用两种实施方案。标准版适合设备齐全、课时充足(不少于 36 学时)的院校，完整保留六大模块与四层问题链。精简版适合设备有限、课时紧张(20~28 学时)的院校，将模块一、二合并为理论导入与方案设计(4~6 学时)，部分重复操作改为虚拟仿真练习，综合汇报简化为小组内部交流。两种方案均保留问题链牵引、模块化递进、多元化评价的核心结构，保证教学理念一致。

问题链可按梯度设计：基础层面向全体学生，侧重基本概念与规范操作；进阶层侧重数据分析与规律总结；挑战层鼓励创新实验设计与机理深度探究。三个层次在同一实验中同步设置，学生可依据自身能力选择完成，兼顾不同水平学生的学习需求，实现因材施教。

8. 结论

本研究围绕新工科对材料类卓越工程人才的培养要求，针对实验教学内容滞后、流程固化、体系割裂、评价单一等问题，以高熵合金设计与表征为实践载体，构建“知识、能力、素养”三位一体教学目标，设计模块化递进式实验内容，采用问题链驱动教学模式，建立多元化过程性评价机制，形成“基础训练 - 综合应用 - 创新探究”三层次螺旋递进的实验教学新模式。

教学实践证明，改革方案有效解决传统实验教学突出问题，明显提升学生工程实践、科研思维与创新意识，实现教育目标从知识传授向能力培养、素养培育的转变，契合新工科人才培养核心要求。研究同时总结改革经验与不足，提出引入虚拟仿真平台、丰富工程拓展实验、优化教学流程等改进方向。

本次改革为新工科背景下材料类实验课程系统性改革提供可复制、可推广的实践范式，对提升材料专业人才培养质量、助力制造业高质量发展具有现实意义。后续将持续优化教学方案，完善虚实结合教学体系，强化实验教学与产业前沿、科研实际的深度衔接，为材料行业培养更多复合型卓越工程人才。

基金项目

广西科技计划项目(桂科 XT2600870041、2025GXNSFBA069161)、广西高等教育本科教学改革工程

项目(2025XJJGA30)、南宁学院教学质量与改革工程项目(2026-JTXY-ZHKC03)、南宁市“邕江计划”青年人才专项(RC20250201)。

参考文献

- [1] 胡波, 冯辉, 韩伟力, 等. 加快新工科建设, 推进工程教育改革创新——“综合性高校工程教育发展战略研讨会”综述[J]. 复旦教育论坛, 2017, 15(2): 20-27+2.
- [2] 教育部 工业和信息化部 中国工程院关于加快建设发展新工科实施卓越工程师教育培养计划 2.0 的意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5443530.htm, 2018-09-17.
- [3] 龙玉珠, 严克桃, 熊华玉. 跨学科教育改革: 构建交叉学科学生能力培养的新模式[J]. 创新教育研究, 2025, 13(2): 98-104.
- [4] 周珂, 赵志毅, 李虹. “学科交叉、产教融合”工程能力培养模式探索[J]. 高等工程教育研究, 2019(3): 33-39.
- [5] 何克抗. 建构主义的教学模式、教学方法与教学设计[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 1997(5): 74-81.
- [6] 骈扬, 余胜泉. 面向知识结构化的最近发展区建模[J]. 武汉大学学报(理学版), 2025, 71(5): 721-734.
- [7] 覃千钟, 魏宏聚. 教师教学经验概念化表达: 内涵、逻辑及路径——基于经验学习圈理论的视角[J]. 教育理论与实践, 2025, 45(7): 34-41.
- [8] 徐超, 佟瑞鹏, 朱红青, 等. 成果导向教育的安全工程人才培养模式与实践[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(5): 113-119.
- [9] 刘金库, 葛云晓, 黄婕, 等. 虚拟仿真实验教学课程: 数字赋能工程能力培养新模式[J]. 高等工程教育研究, 2023(3): 85-88+113.
- [10] 赵建勇, 于彦雪, 吴敏, 等. “新工科”背景下电气工程专业课程实验教学改革研究[J]. 实验科学与技术, 2024, 22(4): 25-33.
- [11] 陆紫生. 综合实验教学改革提升学生创新能力[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(12): 174-178.
- [12] 肖赛金, 黄海清, 徐丽, 等. “新工科”背景下化学工程与工艺实验教学改革[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(7): 191-195.