

面向研究生教育的透射电子显微学 教学内容改革

郭金明, 张 豪, 尚勋忠, 杨 滨

湖北大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年6月12日; 录用日期: 2025年7月18日; 发布日期: 2025年7月29日

摘 要

透射电子显微学在材料学研究生教育中极为关键, 但传统教学存在内容陈旧、脱离实践的问题。因此, 教学内容改革围绕“一纵一横”思路: 纵向依项目驱动强化科研创新, 横向借产业对接提升实践应用。改革以学生为中心, 强调自主学习与实践, 结合前沿技术、跨学科交叉案例及企业合作, 旨在培养兼具科学创新与产业应用能力的高水平综合型人才。通过优化教学内容、激发学生主观能动性 & 强化产学研结合, 为研究生教育现代化提供了实践范例。

关键词

透射电子显微学, 研究生教育, 教学内容, 主观能动性

Research on Reforming the Teaching Content of Transmission Electron Microscopy for Graduate Education

Jinming Guo, Hao Zhang, Xunzhong Shang, Bin Yang

School of Materials Science and Engineering, Hubei University, Wuhan Hubei

Received: Jun. 12th, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Jul. 29th, 2025

Abstract

Transmission electron microscopy (TEM) plays a critical role in materials science graduate education, yet conventional pedagogy suffers from outdated content and limited practical relevance. To bridge this gap, we propose a dual-axis teaching reform framework. The vertical dimension employs

project-based learning to enhance scientific innovation capabilities. The horizontal dimension integrates industry practices to develop applied professional skills. This student-centered reform fosters self-directed learning and hands-on experimentation. By incorporating cutting-edge technologies, interdisciplinary case studies, and industry partnerships, it cultivates highly skilled professionals with integrated innovative and practical capacities. Through three synergistic initiatives—curricular modernization, student agency amplification, and industry-academia-research convergence, this model provides a blueprint for transforming graduate education.

Keywords

Transmission Electron Microscopy, Graduate Education, Teaching Content, Proactive Learning

Copyright © 2025 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

研究生教育是高等教育的最高阶段，旨在培养具有独立科研能力、创新思维和实践能力的高水平复合型人才[1]。透射电子显微技术是材料专业研究生需掌握的关键内容，不仅是实现材料原子尺度结构可视化的重要技术，同时也是连接材料微观结构与其宏观性质的重要桥梁。在学术方面，透射电子显微学可加深研究生对材料科学理论的理解、提高研究生的先进实验技能；在应用方面，透射电子显微学在芯片、电池、医疗等重要领域具有广泛的应用，是解析材料原子尺度结构、分析失效原因的重要手段[2]。因此，基于透射电子显微学的材料学科高水平人才培养具有重要意义。

针对透射电子技术的教学，国内已有多所高校开设了相关课程。武汉理工大学在慕课平台上发布了《显微学》课程，涵盖透射电子显微学的基础知识及现代透射电子显微学新技术。南京大学、哈尔滨工业大学、上海交通大学等省外高校均开设了如《透射电子显微学》《显微学和谱学分析》等课程，且作为材料专业研究生的主干课程。由此可见，透射电子显微学与材料科学的结合是材料科学与工程领域研究生培养的重要组成部分。然而，传统透射电镜显微学的教学内容过度侧重基本原理与操作技能，普遍缺乏前沿性和实际应用导向性，忽视超微结构的科学理解与技术应用的有机结合[3]；且其教学思路仍以填鸭式教学为主，导致研究生的科研创新能力培养与应用实践能力脱节。因此，面向材料专业研究生教育的透射电子显微学教学内容改革势在必行。目前国内已有很多高校具有一台甚至多台透射电子显微镜设备，为透射电子显微学的实践教学提供了充分的资源保障，并提出了以应用为目的的透射电镜实践教学思路[2]、“以学生为中心”的生物电镜技术教学改革方向[3]，强调让学生自主动手进行案例分析。然而，现有的透射电子显微学教学内容，仍难以兼顾科研创新与产业应用能力培养的双重目标。

2. 教学内容优化

针对上述教学问题，我们秉持“以学生为中心”的教学理念[4]，提出了“一纵一横”的教学内容改革思路。总体方案如图1所示：纵向方面，通过独立项目研究和团队合作，夯实研究生的科学理论基础，培养研究生的科研素养与创新能力；横向方面，通过紧密对接产业需求，广泛开展企业合作，培养研究生的产业应用实践能力。主要教学目标为，要求学生能讲述透射电子镜的设备结构和原理、熟练完成多种无机透射样品制备及上机操作、独立开展基于透射电子显微学的材料科学研究，培养兼具科学创新能

力与产业应用实践能力的高水平综合型人才。

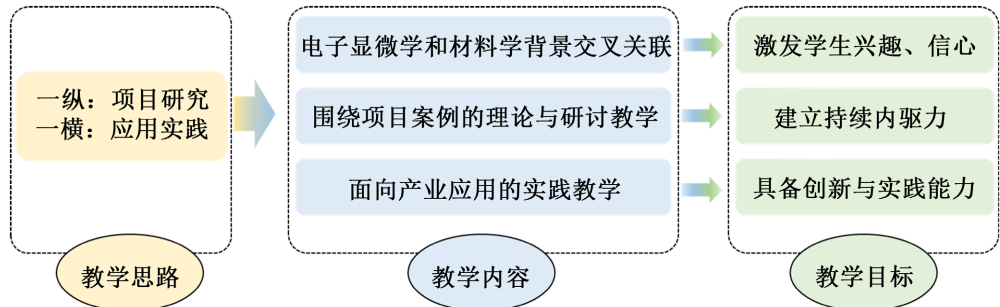


Figure 1. Overall optimization plan for the teaching content of transmission electron microscopy
图 1. 透射电子显微学教学内容优化总体方案

2.1. 纵向教学：夯实基础，培养科研创新能力

科研创新能力培养是研究生培养的核心内容，面向学生创新能力培养，我们将透射电子显微学的教学内容分为项目教学和项目研讨两大部分。

首先，项目教学方面，以科学前沿为教学主体，结合透射电镜与材料学的基础知识，融入最新研究成果与案例分析。传统的透射电镜技术教学内容主要包括透射电子显微镜的发展史及特点、电子光学基本知识、电子与固体样品的相互作用、透射电镜结构和工作原理、透射电镜样品制备和电镜操作观摩等六个方面[5]。在传统教学内容的基础上，为了充分发挥学生的主观能动性，我们以学生的研究项目为切入点，将项目教学内容进一步细分为背景介绍、案例教学和实践操作三个板块。针对背景介绍，我们将电镜的发展史与陶瓷材料的发展历程相结合，明确透射电子显微学的重要意义，包括对材料学发展的关键推动作用、对高科技产业的重要支撑作用，进而建立学生对透射电子显微学的信心，增强学生的自我效能感，从而激励他们更加积极地参与学习过程，提高学习成效。将学生在自己项目研究过程中合成的样品作为教学案例，以学生熟悉的内容为切入点，融入并详细讲解透射电镜的基本原理、表征技术与操作说明等内容，引导学生自主学习、自主钻研，充分发挥学生的主观能动性。针对案例教学，相比于传统填鸭式纯理论教学，我们将枯燥的理论教学融入学生自己的劳动成果，强调以内在学习动机为主、外在学习动机为辅的策略，不仅能激发学生的学习兴趣，同时加深了学生对基本原理、基础理论的理解和记忆，提高了教学成效。此外，我们在传统教学内容的基础上，新增了双球差校正成像技术、高角环形暗场扫描透射电子显微成像技术(HAADF-STEM)、积分差分相位衬度成像技术(iDPC-TEM)、极化矢量计算拟合方法等一系列原子尺度高分辨结构表征前沿技术、先进分析方法，进一步提高了学生对材料精细结构的认知，引导学生深入探究材料性能背后的科学本质，为学生实现原创的科学发现与材料创新做铺垫。同时，透射电子显微学作为研究材料结构的工具，合理的结构表征和分析，与材料结构的认知密切相关。基于本团队介电储能陶瓷的特色研究方向，我们将无机材料的晶体结构理论及高熵钙钛矿等最新结构，融入透射电子显微学教学内容，形成跨学科交叉教学内容[6]，促进了学生对电子与固体样品的相互作用等透射电子显微学基础理论的理解，进而使得学生能掌握透射电子显微技术的准确应用方法。针对实践操作，让学生自主表征和分析自己的项目研究样品，包括透射电镜表征样品的制备、样品的装载、样品的结构和成分表征、设备的日常维护等实践操作演练。围绕项目展开的实践训练，不仅能巩固并不断提升学生对透射电镜技术的掌握程度，同时推动了学生的科研项目研究进展，进而培养了学生的动手能力、良好的科研习惯、科研项目管理能力和科研创新能力。

其次，项目研讨方面，我们基于建构主义学习理论，充分利用当今便利的网络信息交互，突破有限

的线下教学资源限制，与国内外优秀团队广泛合作、深入交流、共同研讨，以网络云端为课堂，提高时间利用效率，以优秀的学生为师、以同学科或跨学科专家教授为师，让学生在研讨实践中发现自己的不足、汲取他人的长处，进一步丰富学生的实践经验、提升学生的科研素养与理论基础，进而构建自身对透射电子显微学的理解。一方面，基于学生自己的研究工作，联合电镜设备厂家，讨论表征过程中遇到的技术问题，提升学生的样品显微成像技术。例如：针对难以实现原子级成像的问题，学生通过与设备厂商的应用工程师交流，明确了像散对成像质量的重要影响，可以通过消像散线圈对透镜进行补偿，从而达到消除像散的结果，最终在球差电镜上获得了小于 60 皮米的空间分辨率，如图 2(a)，图 2(b)所示；针对获得的电镜照片中干扰信号多的问题，学生向设备厂家工程师请教，理解电镜照片滤波的原理，学习了多种滤波方法，成功过滤掉大部分干扰信息，得到了更准确的材料晶体结构信息，如图 2(c)所示。此外，我们联合国内外同行专家，讨论并分析学生获得的样品精细构成，提升学生对透射电子显微成像数据的解析能力，并通过研讨过程的耳濡目染，让学生不知不觉地从优秀同行身上学习严谨治学、精益求精、开拓创新等优良的科学品德和科研素养。另一方面，基于学生对透射电子显微学的充分理解，给学生提供对外交流并输出自己学习成果的平台，让学生积极参与其他科研团队的项目讨论。例如，我们与华中科技大学合作，学生根据自主拍摄的 HAADF-STEM 原子尺度高分辨图像，通过计算拟合得到的极化矢量分布规律，进而在原子尺度上证实了通过反铁电陶瓷的电滞伸缩效应有效调节了畴结构。在该项目合作的过程中，不仅巩固了学生自身的学习成果，同时促使学生对自己的学习成果进行总结归纳，使得学生能将深奥且繁杂的透射电子显微学知识融会贯通。

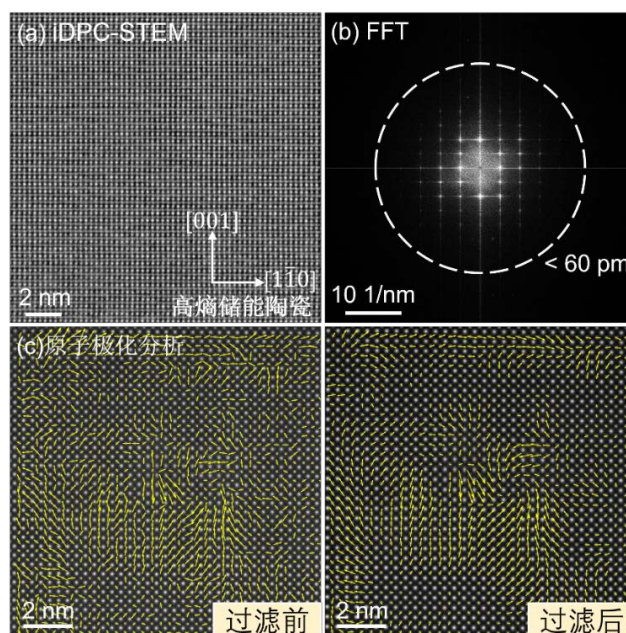


Figure 2. (a) Atomic image of the sample after eliminating astigmatism and (b) the corresponding Fast Fourier Transform (FFT) result, (c) Transmission Electron Microscopy imaging before and after filtering of interference signals

图 2. (a) 消除像散后样品的原子像与(b) 对应的快速傅里叶变换(FFT)结果, (c) 干扰信号过滤前后的透射电子显微成像

2.2. 横向教学：拓宽应用，培养多领域实践能力

服务社会是高等教育的重要目标，如何让学生能学以致用、活学活用，提高应用实践能力，是研究生培养需要解决的关键问题[7]。横向教学方面，我们以透射电镜产业链为主线，创新地引入了上下游企

业教学内容, 拓宽学生视野, 培养学生面向不同领域的应用实践能力。通过校企合作教学, 不仅有利于巩固所学的理论知识, 同时能让学生切实感受到理论知识在现实工业发展中的应用, 进而增强学生的认知和行为, 提高教学成效。

首先, 上游对接透射电镜制造商, 邀请电镜应用工程师为学生作主题报告, 讲解透射电镜设备的硬件构成和前沿技术, 主要内容包括: (1) 不同类型透射电镜硬件构成和成像原理介绍: 扫描透射电子显微镜、双球差校正透射电镜、冷冻电镜等, (2) 相关周边设备介绍: 双束聚焦离子束电镜、主动式减震台、主动式磁场消除系统等, (3) 不同透射电镜表征技术的应用场景。通过邀请电镜工程师进行主题报告的合作模式, 一方面可以让学生了解透射电镜行业的发展现状及未来的发展趋势; 另一方面, 在与企业工程师的直接接触, 让学生切实了解到作为企业工程师需要具备的个人技能、专业素养和综合素质, 为学生的就业规划指明方向[8]。

其次, 下游面向产业需求, 培养学生对不同材料的实践表征和分析能力。我们的透射电镜平台不仅向校内外科研人员开放, 同时向企业和社会开放预约测试, 积极对接国家集成电路战略及湖北省“光芯屏端网”等高科技产业, 承担企业外送样品测试任务。在服务企业和社会的过程中, 让学生以主角的身份参与企业样品的表征和分析, 拓宽了学生视野, 丰富了学生的实践经验, 增强了学生的学习自信心和内驱力。

由此可见, 纵向教学和横向教学二者相辅相成, 既互相独立也具有密切内在联系, 是一个有机结合的整体。通过基础理论和原理教学, 培养学生举一反三的能力, 可独立完成各种样品的透射电镜表征分析。通过与产业合作与交流, 从商业化产品入手, 培养学生在实际工作中发现新问题、发掘新现象、揭示新规律的能力, 为科研创新奠定基础。

3. 教学建议

3.1. 充分发挥学生的主观能动性

研究生教育的核心价值不仅在于知识的单向传递, 更在于全面塑造学生的综合能力, 包括科研创新能力、动手实践能力、项目规划能力等, 使其成为能够在专业领域内独立思考、勇于创新的高素质人才。无论是专业知识的传授, 还是综合能力的培养, 都要求充分发挥学生的主观能动性。尤其是针对具有较强实践性质的透射电镜技术, 学生个人能力的提高与其主动参与教学过程的程度密切相关。透射电镜技术不仅涉及复杂的仪器调试、样品制备, 还需要扎实的成像原理与材料学理论基础对显微图像进行解析。这种高度依赖实践的特性决定了学生必须通过自主学习与探索来掌握技术精髓。因此, 我们在教学内容设计过程中要尽可能多地提供机会, 让学生自主学习和实践, 引导学生自主思考, 不断激发学生的潜力。而且, 当学生主导的学习取得正向结果时, 极易激发学生进一步探索和研究的熱情; 即便出现困难和挫折时, 学生也能积极寻找解决办法, 不仅有利于形成解决问题的逻辑思维, 同时有利于提高应对逆境的心理素质。

3.2. 教学内容持续优化

科学是不断发展的, 面向研究生的透射电镜技术教学内容也要与时俱进、不断优化。首先, 持续关注透射电镜领域的最新研究成果和技术发展, 定期更新教学内容, 确保学生接触到最新的表征技术和分析方法。其次, 以学生研究课题为切入点, 加强跨学科交叉教学, 引入更多跨学科的前沿案例, 例如先进的能源材料、信息材料、生物材料的研究, 通过对不同材料的表征分析, 进一步提高学生对仪器操作的熟练度、加深学生对透射电子显微学基本理论的理解、提升学生的透射电镜显微成像技能水平。此外, 深化企业合作, 让学生有更多的机会和形式直接对接产业需求, 培养学生的实践能力、解决实际问题的能力。

4. 结语

透射电子显微学作为材料科学领域的核心工具，其教学改革不仅是研究生教育现代化的关键环节，更是推动科研创新与产业应用深度融合的重要抓手。我们提出的“一纵一横”教学模式，通过纵向科研能力培养与横向产业实践结合，系统解决了传统教学内容滞后、理论与实践脱节的问题。改革实践表明，以学生为中心的教学内容能够显著激发学生的学习兴趣与创新能力；以学生个人项目为切入点的跨学科案例教学和企业合作，进一步提升了学生的综合素养与就业竞争力。随着透射电镜技术的持续迭代与产业需求的动态变化，教学内容需保持与时俱进，进一步深化产学研协同育人机制，为我国培养适应新时代需求的创新型人才。

参考文献

- [1] 王战军, 张微, 于妍. 实现战略转型加快研究生教育改革发展[J]. 研究生教育研究, 2021(2): 1-6.
- [2] 魏婷, 唐静, 李金霞, 周丽绘, 蓝闽波. 强化以应用为目的的透射电镜实验教学探索[J]. 实验室研究与探索, 2023(9): 196-200.
- [3] 李艳茹, 崔新明, 李爽, 董超. 基于研究生科研及创新能力培养的生物电镜技术教学改革[J]. 基础医学教育, 2019(1): 51-53.
- [4] 粟海波, 黄炜, 余利红, 刘小珊. “以学生为中心”的多元化教学模式在生物化学教学中的应用[J]. 大学教育, 2019(8): 98-100.
- [5] 陆彦, 陈义芳, 刘巧泉, 张昌泉. 透射电镜技术研究生课程教学的现状与改革初探[J]. 山东化工, 2021(22): 211-213.
- [6] 王盛, 孙璐, 于专宗. 交叉学科建设和交叉学科研究生培养——以复旦大学生物医学研究院为例[J]. 现代教育论坛, 2021(4): 8-10.
- [7] 赵旭, 苗雨莹, 王美蓉. “新工科”背景下实验教学改革路径研究[J]. 工业和信息化教育, 2021(10): 66-70.
- [8] 罗洲飞, 苏益, 赵静, 李劲松. 高校中大型精密仪器在研究生创新能力和就业指导中的作用[J]. 创新创业理论研究与实践, 2020(6): 149-150.