

球差校正透射电子显微镜实验教学探索

王丽 宋淼 刘超强 何骏阳 陈月皎

中南大学 粉末冶金研究院, 湖南 长沙 410083

[摘要]针对学生在科研活动中使用球差透射电子显微镜时遇到的问题,文中提出将实验教学课程引入球差校正透射电子显微镜分析学的教学中,打破传统教学中以课堂为主的模式,鼓励和支持学生深入电镜实验室进行实际操作。这一举措不仅能够帮助学生更好地将理论知识与实践操作相结合,还能使他们在科研中学会有效地选择合适的透射电镜方法解决科学问题。同时,球差电镜实验教学有助于提升学生的科研技能并积累实践经验,培养具备球差校正电镜操作能力的新工科科研人才,从而推动科研院所及高校高精尖科研成果的产出。

[关键词]球差校正透射电子显微镜;实验教学;教学改革;技能培训

DOI: 10.33142/fme.v5i5.14114

中图分类号: O643.361

文献标识码: A

Exploration on Experimental Teaching of Spherical aberration Correction Transmission Electron Microscopy

WANG Li, SONG Miao, LIU Chaoqiang, HE Junyang, CHEN Yuejiao

Powder Metallurgy Institute, Central South University, Changsha, Hu'nan, 410083, China

Abstract: In response to the problems encountered by students when using aberration corrected transmission electron microscopy in scientific research activities, this article proposes to introduce experimental teaching courses into the teaching of aberration corrected transmission electron microscopy analysis, breaking the traditional classroom based teaching mode and encouraging and supporting students to go deep into the electron microscopy laboratory for practical operations. This measure can not only help students better integrate theoretical knowledge with practical operations, but also enable them to effectively choose suitable transmission electron microscopy methods to solve scientific problems in scientific research. At the same time, the experimental teaching of aberration corrected electron microscopy helps to enhance students' research skills and accumulate practical experience, cultivate new engineering research talents with aberration corrected electron microscopy operation ability, and promote the output of high-precision scientific research results in research institutes and universities.

Keywords: spherical aberration correction transmission electron microscope; experimental teaching; education reform; skill training

引言

透射电子显微镜是人类研究材料微观世界的重要工具,是材料学研究领域包括材料的形貌、结构、成分以及电子价态等方面能够进行综合性分析的重要表征手段^[1]。随着透射电子显微镜功能逐渐强大,球差校正透射电子显微镜的出现和原位样品杆的发展,结合X射线能谱分析以及电子能量损失谱分析,透射电子显微镜在揭示材料的微观结构及其演化方面展示出了其独特的高空间分辨分析能力^[2]。由于其独特的作用,几乎所有的理工科高校都配备透射电子显微镜并且开设了电子显微镜学的相关课程。但从目前实际情况而言,该类型精密的大型仪器仍然属于稀缺资源,维护成本高昂^[3]。尤其是先进的球差校正透射电镜,对操作员的理论知识以及技能水平都有着较高的要求,能够熟练操作此设备的老师和学生相对较少,从而使该课程的组织形式多以课堂教学为主。近年来,虚拟电镜^[4]被引入到课堂教学中,结合透射电镜分析实例,让学生对透射电子显微镜的构造以及测试条件,参数设计和分析等过程有更加直观的了解和认识^[5]。目前总的来说,球差

校正透射电子显微学的实验教学仍然非常有限,学生无法学以致用,学习效果仍然停留在“纸上谈兵”的阶段。这不仅降低了学生学习的积极性,也阻碍了他们利用透射电子显微镜进行样品微观组织分析的能力,无法满足实际科研需求,尤其是在原子尺度下揭示材料的微观组织演变与宏观服役行为关联的研究^[2]。这种状况严重制约了球差校正电镜的高效利用和高精尖科研成果的产出

针对上述问题,笔者依托中南大学粉末冶金研究院配置的球差校正电子显微镜,开展了实验教学的探索与改革,将球差校正电子显微学的实践与基础理论及结果分析紧密结合,旨在培养学生的实际操作技能,提升他们在透射电子显微镜相关问题上的分析与处理能力。

1 教学内容的改进

透射电子显微学是一门需要理论与实践紧密结合的课程,扎实的理论知识是有效指导实践操作的基础。因此,在具备丰富理论知识和实际操作能力的前提下,教师应系统且详细地讲解透射分析中的关键理论点,包括晶体结构、电子与物质的相互作用、电子衍射规律、高分辨成像原理

与方法,以及原子尺度的能谱分析等,以帮助学生建立完善的基础知识体系,为后续的上机实践操作奠定坚实基础。此外,教师还应重视普及当前不断发展的高精尖透射电镜装备与技术,并通过具体的实例分析,帮助学生深入理解透射电子显微分析的实际应用。

同时,在实验教学过程中,应重点强调以下内容,但不限于此:(1)样品准备,重点强调学生在实际操作中需要注意的细节,包括:①球差校正透射电子显微镜对观察区域的样品厚度要求较高,通常需控制在 50~100nm 以下;②样品不得具有磁性或易被磁化,以免损坏仪器并导致高昂的维修费用;③检测样品主要为无机物,应避免低熔点或具腐蚀性的材料;④样品需干燥且清洁,辐照后不得发生化学反应或气化。通过强调这些制样要求,教师旨在培养学生制备高质量样品的好习惯。(2)仪器校准:主要包括电子束的合轴、像散校正及球差调试等。该过程要求操作人员具备扎实的专业知识和技能,以确保操作的准确性和安全性。在进行合轴操作时,需要找到制备样品的薄区,调整放大倍数,保持样品稳定,选择合适的电子束大小和形状,并确保电子束正确聚焦。在扫描透射模式下,基于隆起图进行 A1 和 B2 像散调节时,需找到质量较好的非晶区域,并耐心将状态调节至最佳。教师通过强调电子束合轴、像散校正及球差调试的准确性和安全性,使学生能够获得高质量的(高分辨)透射电子显微图像。(3)成像拍照,尤其是在进行衍射成像拍照时,需特别注意保护 CCD 相机。在使用 CCD 相机观察感兴趣的薄区时,避免在光斑汇聚时抬起荧光屏,切勿直接旋转放大按钮。更换样品时,应严格按照正确的操作步骤调整荧光屏和光斑,以确保 CCD 相机的安全。同济大学李明芳^[6]等开放透射电镜用于本科教学,通过建立仪器预定系统、实施培训制度和仪器联网等管理措施,确保透射电镜的正常工作状态。数年来,该校尚未出现因学生操作失误而造成的仪器人为损坏事件。(4)结果分析:随着球差校正电镜技术和理论的不进步,材料原子尺度结构表征方面的一些新装备和新技术得到了逐步发展和完善。例如,贾春林教授^[7]提出的负球差系数成像技术能够检测轻元素,尤其是氧原子;高角度环形暗场像(HAADF)与高探测效率能谱仪的结合,已经能够在原子尺度上同时进行成分分析和成像;赛默飞世尔科技公司的 iDPC 技术则可以实现轻重元素的同时成像等。

然而,通过在学校和院里透射电子显微镜实验室的长期观察,笔者发现学生所掌握的知识仍然仅限于课堂所学。学生不仅缺乏对该测试分析方法的直观体验,而且在利用透射电子显微镜进行各种分析技术(如电子衍射、衍射成像、高分辨成像等)设计实验方案和分析结果方面普遍存在困难。这严重制约了学生科研能力和创新能力的提升,无法巩固对所学知识的掌握,也不利于教学效果的进一步

提升。因此,重视透射电子显微分析课程的实验教学环节,培训学生的上机操作,让每位学生通过实际操作电镜设备加深对理论知识的理解是非常重要的。这将使学生对使用球差校正电子显微镜的原因、方法及其作用和好处有更直观和深刻的认识,从而更准确地采用合适的透射电子显微分析方法解决实际科研问题。

2 教学方式的改进

在球差校正透射电子显微分析学实验教学中,为了让教师的“教”和学生的“学”能够达到有效的结合^[8],选择合适的教学方式和培训手段对课程的教学质量至关重要。针对笔者所在学校电子显微学分析课程中的难点,提出通过定期举办学术讲座、实际的上机演练、关键技术与软件培训以及提供丰富的课后交流渠道来加强该课程的实验教学。

在实验课程开设的学期内,每周或每两周举办一次学术讲座,邀请国内外透射电镜领域的专家分享先进的透射电镜技术与理论发展、样品制备以及实际案例分析等内容。通过这些讲座,学生能够充分了解电子显微领域的最新进展,提高他们在科学研究中选择适当成像技术解决具体问题的能力。同时,邀请设备厂商的工程师或技术人员对当前市场上的球差电镜设备进行介绍,让学生对球差电镜的发展、技术应用及其构造与原理有一个基本的了解。近年来,笔者曾邀请多位国内外电镜专家及知名电镜公司技术人员在中南大学进行关于透射电镜技术的线上和线下报告。例如,邀请赛默飞世尔科技公司的研究员详细介绍了高端前沿电镜技术的最新进展;日本电子公司的研究员则讲解了球差校正透射电镜技术在材料科学研究中的应用,并系统介绍了球差校正透射电镜在超高分辨率成像、高效化学微分析、轻元素探测等方面的技术特点及其在材料研究中的应用实例。此外,Gatan 公司的研究员则介绍了高速发展的原位、低剂量电子显微学表征技术的进展与应用需求,并通过实际科研应用案例,分享了 Gatan 最新的高性能原位成像解决方案和分析电镜解决方案。通过举办大量讲座,学生能够接触到更多关于透射电子显微镜的前沿信息,打破信息茧房,开阔视野,激发科研兴趣,并引导他们思考自身科研实验中的问题。这不仅丰富了学生在透射电子显微镜方面的相关知识,还增强了他们对学习球差校正透射电子显微镜的兴趣与积极性。除了举办讲座,笔者还负责组织了粉末冶金研究院举办的“先进材料微纳结构表征与研究学术研讨会”,促进从事微纳结构表征和研究的专家学者之间的交流与合作,共同探讨先进材料表征技术的前沿发展,以提升科研工作者的微纳结构表征技术水平和高性能材料研发创新能力。

同时,在实验课程开设的学期,笔者利用工作时间对学生透射电镜设备操作和实验技能培训。上机演练不仅仅是简单的操作技能培训,还包括学生独立进行案例分

析的培训。具体而言：(1) 首先要求学生根据要解决的具体问题设计实验方案，并提供理论依据。对不合理的设计及时进行纠正，并通过基础理论分析讲解不可行的原因，以加深学生的理解；(2) 在实际操作过程中，鼓励学生讲解每个操作步骤对应的理论依据，教师及时补充与实验操作相关的基础理论知识；(3) 要求学生对所获得的结果进行正确的分析和专业的描述。通过这些手段，提高学生的实际动手能力，让他们对球差校正透射电子显微镜有更直观的认识。目前，通过协同安排各类科研测试与实验教学培训，已有数名老师和具备基本操作经验的博士、研究生参与了球差电镜的上机培训，取得了很好的效果，这些参与培训的老师和学生都能在短时间内进行球差电镜的独立操作。这也促进了球差校正透射电子显微分析学实验教学课程的进一步开展，使更多有经验的师生可以对其他学生的上机培训进行指导，不仅可以使仪器的使用效率得到提高，还能扩大该实验教学课程的规模，让更多学生有机会参与到透射电子显微镜的学习中来，丰富学生的科研经历。

通过申请审核制，集中培训一些具备基本透射电镜操作经验并对球差透射电子显微镜操作有强烈学习愿望的学生。培训班可以安排在寒暑假或机时充裕的时间段进行。同时，组织关于晶体结构构建软件 Crystal Maker、电子衍射和高分辨率模拟软件 JEMS，以及透射电镜数据分析软件 Digital Micrograph 和 Velox 的培训，涵盖衍射斑标定与模拟、高分辨图像处理与分析、应变分析及能谱数据处理等基本数据分析方法。澳大利亚电镜中心联合各高校建立了“Myscope Microscopy training”平台，任何学生都可以通过该平台获取透射电镜相关的学习资料并操作虚拟电镜，从而反复练习并巩固透射电镜的理论知识与操作技能^[9]。通过这些关键技术和软件的培训，学生将逐步学会独立分析和处理各种数据，进一步丰富其科研技能。

在球差透射电子显微分析学的实验教学课程中，师生及学生之间的交流至关重要。因此，通过组建一个电镜微信群，让授课班级的学生、学校电镜教师以及其他感兴趣且有相关经验的科研人员加入，进行讨论和交流。此外，还可以建立网络讨论平台，用于分享专业书籍和学习材料。例如，推荐材料科学和电子显微学著名学者 David B. Williams 和 C. Barry Carter 的经典著作《Transmission Electron Microscopy — A Textbook for Materials Science》作为主要教材。该书分为基础概念、衍射、成像和谱学四部分，深入全面地介绍了透射电子显微镜的构造、实验技术原理及其应用^[10]。该平台可以为学生提供课后阅读和深入研究的专业资料，还可以用于分享操作经验、数据分析与处理技能，以及寻求数据分析方面的帮助。通过这些多渠道的相互交流，学生能够及时解决疑问，拓宽

学习途径，使透射电子显微分析学的课程学习更加便捷和高效。

3 总结

综上所述，通过改进教学内容和教学方式，可以有效推进球差透射电子显微分析学实验教学课程的开设，并促进电子显微课程中“教”与“学”的深度融合。改进后的课程不仅将理论教学与实际操作有机结合，还进一步拓宽了学生的知识面，使他们能够灵活运用所学知识，选择合适的分析手段解决实际科研中的具体问题。此外，系统化的培训和多渠道的交流平台为学生提供了更广泛的学习资源和支持，有助于培养具备球差透射电子显微镜操作经验的高素质新工科科研人才。这些措施的实施，将为学生科研能力和创新能力的提升奠定坚实基础，进而推动高水平科研成果的产出。

基金项目：2024 年度中南大学研究生教育教学改革项目“球差校正透射电子显微镜实验教学探索”。

【参考文献】

- [1] 李星. 浅谈电子显微学新发展及相关课程的优化改革[J]. 教育教学论坛, 2020(51): 168-170.
 - [2] 王慧. 关于《电子显微学》课程改革的探讨[J]. 教育教学论坛, 2016(41): 77-78.
 - [3] 张景怀, 巫瑞智, 孙扬, 等. 电子显微学研究生课程的教学改革探讨与实践[J]. 教育教学论坛, 2014(3): 31-32.
 - [4] 梁国弘, 靳凤民, 邹少兰, 等. 高校电子显微镜的培训学习与开放管理的探讨[J]. 广州化工, 2018, 46(13): 133-135.
 - [5] 刘辉, 喻湘华, 张云飞, 等. 浅谈透射电子显微分析在《材料研究与测试方法》课程中的教学改革[J]. 广东化工, 2021, 48(7): 268-269.
 - [6] 李明芳, 王晓岗, 许新华. 透射电子显微镜在本科开放实验教学中的应用[J]. 实验室科学, 2013, 16(5): 133-139.
 - [7] 贾春林, 米少波, 金磊. Quantitative hrtem and its application in the study of oxide materials[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(5): 26-36.
 - [8] 王皓民. “透射电子显微学”课程教学改革探索[J]. 科教导刊, 2021(22): 143-146.
 - [9] S ESWARAPPA PRAMEELA, P M MCGUIGGAN, A BRUSINI, et al. Looking at education through the microscope[J]. Nature Reviews Materials, 2020, 5(12): 865-867.
 - [10] 詹倩, 万发荣, 韩文妥. 透射电子显微学课程多模式教学[J]. 中国冶金教育, 2021(4): 8-10.
- 作者简介：王丽(1986—)，女，Helmholtz-Zentrum Hereon，材料科学与工程，中南大学，副教授。