Advances in Education 教育进展, 2025, 15(4), 1-9
Published Online April 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ae
https://doi.org/10.12677/ae.2025.154506

Hans汉斯

“虚实结合”原子级表面检测系统在金属材料实验课程中的应用

戴明杰[1]，袁　玮[2]，夏　璐[3*]，范丽霞[1]，邱　耀[1]

[1]武汉科技大学材料学部，湖北 武汉
[2]武汉科技大学分析检测中心，湖北 武汉
[3]武汉科技大学资源与环境工程学院，湖北 武汉

收稿日期：2025年2月28日；录用日期：2025年3月26日；发布日期：2025年4月2日

摘　要

本文着眼于国家重大工程和双碳目标背景下，将绿色新金属材料的原子级表面检测系统融入本科实践教学，旨在提升学生解决新金属材料表面复杂工程问题的能力。针对实验学时和经费的制约，以及设备操作的复杂性，本文提出了利用“虚拟展示 + 实际操作”构建实验课程模式，以提高金属材料学生的专业实践水平和解决复杂问题的能力。

关键词

检测系统，金属材料，实验课程

The Application of the “Virtual-Reality Integration” Atomic-Level Surface Detection System in Metallic Materials Experimental Course

Mingjie Dai[1], Wei Yuan[2], Lu Xia[3*], Lixia Fan[1], Yao Qiu[1]

[1]Faculty of Materials, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei
[2]Analycial & Testing Center, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei
[3]School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Mar. 26th, 2025; published: Apr. 2nd, 2025

[*]通讯作者。

文章引用: 戴明杰, 袁玮, 夏璐, 范丽霞, 邱耀. “虚实结合”原子级表面检测系统在金属材料实验课程中的应用[J]. 教育进展, 2025, 15(4): 1-9. DOI: 10.12677/ae.2025.154506

Abstract

This paper focuses on the background of national major projects and the dual-carbon goals, and integrates the atomic-level surface detection system for green new metal materials into undergraduate practical teaching to enhance students' ability to solve complex engineering problems of new metal material surfaces. In view of the constraints of experimental hours and funding, as well as the complexity of equipment operation, this paper proposes to build an experimental course model using "virtual display + actual operation" to improve the professional practice level and ability to solve complex problems of students majoring in metal materials.

Keywords

Detection Systems, Metallic Materials, Experimental Curriculum

1. 引言

随着国家重大工程的推进以及“双碳”目标的提出，对绿色金属材料的需求不断增加[1] [2]。将高性能钢铁材料、新能源金属、金属功能材料等的智能制造、研究方法及发展应用前景等前沿内容纳入本科课堂和实践教学中，有助于提升学生的科学研究能力、新材料开发能力以及项目管理能力，进而培养具有创新精神、创业能力和科学素养的高素质应用型人才。

原子级表面检测系统是研究金属材料表面性能的重要方法之一。该系统可提供一种施加(或不施加)电化学条件时，以原子级分辨率进行三维成像，提供样品表面真实三维形貌及表面状态在电化学作用下随空间和时间变化情况[3]-[6]。其主要由扫描探针显微镜(Scanning Probe Microscope, SPM)系统构成，包括原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)和扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM)，以及扫描电化学工作站(Scanning Electrochemical Workstation)。在实践教学过程中，引入原子级表面检测系统对新金属材料的微区形貌、微区性能进行表征，是提高学生实践能力的重要手段。通过这种先进的表征技术，学生不仅能够深刻理解表面检测表征技术在新金属材料领域的重要作用，还能有效提升他们将专业理论应用于实践的水平，增强他们发现、分析、解决复杂工程问题的能力。

本课程经过多年的实践和完善，已经形成了一套完整的教学体系，即注重培养学生应用先进表征仪器对材料进行显微分析的能力，为学生未来在材料显微结构分析领域和/或材料表面技术领域解决复杂工程问题打下坚实的基础。学生在实验课程中，需要完成原子级表面检测系统的全部操作流程，包括理论讲解、工作原理和仪器结构介绍，以及制样、组装、调试、测量、解析等实践操作。然而，由于实验学时有限和大型设备实验经费的限制，实际的实验教学过程中往往只能重点讲解原理和样品的测量与解析过程，难以让每位学生都参与到所有教学环节中。此外，考虑到原子级表面检测系统在加载电化学条件后的易损性和操作所需的高技巧、高精度，未经培训的学生通常不被允许直接操作这些设备。这种局限性导致了学生的学习兴趣下降，他们无法深刻理解原子级表面检测系统在材料科学中的重大意义。若在原子级表面检测系统中引入虚拟展示，即将设备原理过程和实物结构虚拟仿真化[7] [8]，再通过视频互动形式展现在学生面前，学生既可从原理上宏观上认知，又可从过程上细节上理解检测系统。学生学习过程

中可以重复观看，在动手实践过程中可以按需观看，能降低学习时间、空间限制，也降低了实践错误率，课堂容错性极大提高[9]。故引入虚拟展示技术可能构建出能够解决上述问题的实验课程模式。

2. 实验课程模式构建目标

构建新金属材料的原子级表面检测系统实验课程，需针对性解决施加(或不施加)电化学状态下原子级表面测量系统实际实验教学过程中，存在的实验学时和大型设备实验经费困难，以及限制于仪器本身的易损性与操作所需的高技巧、高精度等难题。在解决问题的过程中，为学生提供沉浸式的虚拟展示体系，调动学生的学习主动性，最终实现学生在保证安全的前提下，进行上机实物操作，将原子级表面检测系统拓展作为学科竞赛、毕业设计中基础检测装备，达到使用其解决材料显微结构分析领域和/或材料表面技术中复杂的工程问题的目的。

3. 实验课程的虚拟展示

在新金属材料表面检测实验课程体系中，教学现状和实际需求间存在矛盾。为了解决这一矛盾，需要对实验课所用实验设备、设备原理、教学内容以及课程体系等细节进行拆解重组，明确拟虚拟展示的实验装置和操作过程，同时理顺教学内容与实施方式间关系，构建“虚拟展示 + 实际操作”的原子级表面检测试验课程体系。本文以原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)为例，详述其实验课程模式的原理、内容及路径。

3.1. AFM 实验课程原理的虚拟展示

AFM 工作的基本原理为利用检测样品表面与细微的探针尖端之间的相互作用力(原子力)测出表面的形貌。但是传统板书或者 PPT 形式讲解，无法形象阐明原子之间作用力源于何处、如何传递、如何转化为光信号、再如何转化为电信号等细节知识。虚拟展示出原理示意图和力－光－电转换流程图，并且与实物对应，可以更好地引导学生理解其基本原理。部分虚拟展示图如图 1 所示。

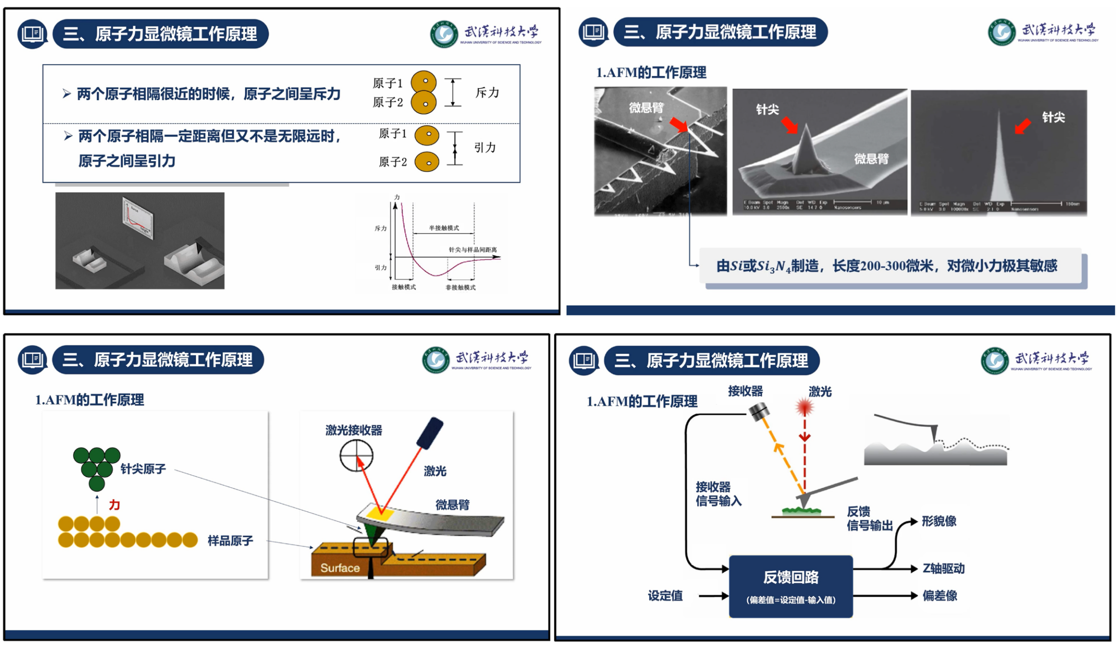

Figure 1. Screenshot of the virtual demonstration of the principle section
图 1. 原理部分的虚拟展示截图

3.2. AFM 实验课程虚拟展示的重点内容

根据 AFM 原理可知，构建 AFM 检测系统过程中，其核心内容有以下三个。

第一，“选针与装针”。由 AFM 原理可知探针与试样之间产生力的相互作用是仪器正常工作的关键，这个力学检测系统中，微悬臂的长度、宽度、弹性系数以及针尖的形状，都会影响到最终的实验结果，故要依据试样和实验的要求选择探针。AFM 的探针非常小，需要用极尖镊子将探针装夹在探测器尖端 nose 的弹簧之中，对设备上微小器件要轻拉轻拽，小心谨慎的操作，不能造成针尖折断而严重影响最终的实验结果质量。该步骤在实际操作过程中极易失误，造成微器件损伤或者探针损坏，若能对此进行多角度、多细节的虚拟展示，则会大大减少失误的可能性。

第二，“器件组装和激光调节”。AFM 中最核心的部件就是探测器和激光接收器，也是本仪器中最精密、最昂贵的部件，所以组装时极易损伤。在组装之后，调节激光点的位置，激光点要照射在微悬臂的尖端，而且其反射点要被激光接收器的接收窗口感知，探针的微悬臂、激光以及激光接收器共同构成了位置检测系统，激光反射之后的偏移量精度，直接影响到了扫描结果的质量。核心部件的操作以及激光点的设置，需要反复尝试、反复调整，若在虚拟展示过程展示操作错误的示例，并且详尽标注、多次强调正确的组装和调节过程，则可有效的提高其检测精度。

第三，“测量”。AFM 测量是通过调节软件上的各种参数控制的，而这些参数间又是会相互影响的，所以在调节参数过程中要根据已输出的图像来调节新的参数，这样整个数据传输过程其实就是 AFM 的反馈系统部分，扫描图像的质量与该部分也是密切相关的。进行测量过程虚拟展示时，将关键参数偏大、偏小及其各类极端组合所造成的后果均呈现出来，可以避免测量过程中的参数失真。

由上可知，AFM 检测系统核心操作及内容有虚拟展示的必要性，从而规避了大型设备实验经费困难，仪器本身易损与操作所需的高技巧、高精度等难题。

3.3. AFM 实验课程虚拟展示的过程

确定 AFM 系统核心之后，需将设备操作步骤详尽拆解，在教学讲解过程中，针对每一步进行虚拟展示[10]。在虚拟展示过后，针对关键点，让学生分组进行实际操作，将虚拟展示过程，落实在动手实践之中。

第一步，开机(图 2)。① 打开总电源开关；② 打开计算机主机以及显示器开关；③ 打开控制机箱电源开关；④ 打开 HEB (Head Electronics Box)的激光开关；⑤ 打开 AC Mode Controller 电源开关；⑥ 打开 PicoView 控制软件。

Figure 2. Screenshot of the virtual demonstration of the booting process
图 2. 开机过程的虚拟展示截图

第二步，选择成像模式(图 3)。① 根据样品需要，从控制软件界面中选择合适的成像模式。在 mode 选项卡中进行选择，可以选择 AC Mode 或者 Contact Mode。② 根据样品需要，从控制软件界面中 Scanner 选项卡中选择合适的扫描头型号，可以选择扫描范围为 9 μm × 9 μm 或者 90 μm × 90 μm 的扫描头。

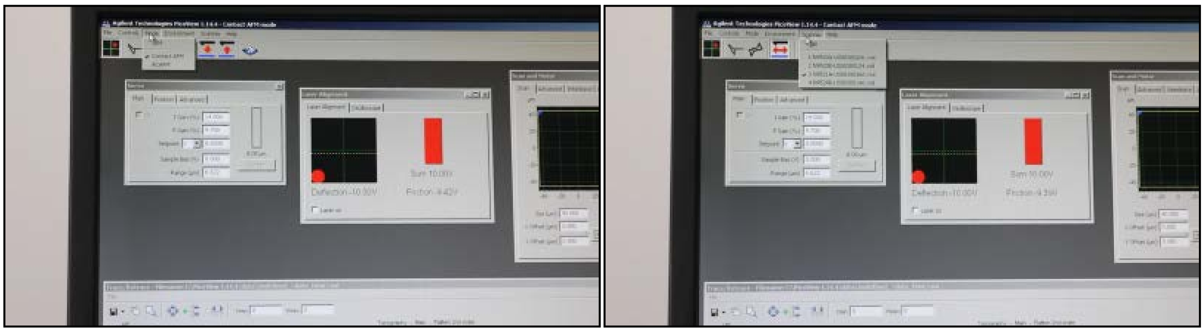

Figure3. Screenshot of the virtual demonstration of the imaging mode section
图 3. 成像模式部分的虚拟展示截图

第三步，安装探针(图 4)。① 取出扫描头，倒置放置于扫描头基座上。② 选择合适的 nose，安装在 scanner 上，需要双手同时垂直用力，以 O 型圈没入扫描头为准。③ 用一个手将弹簧钥匙(Spring Key)放入弹簧一侧，可以把弹簧翘起，另一只手用镊子夹起针尖(Probe)安装在 nose 上，弹簧一般压在针尖的 1/3~1/2 处。

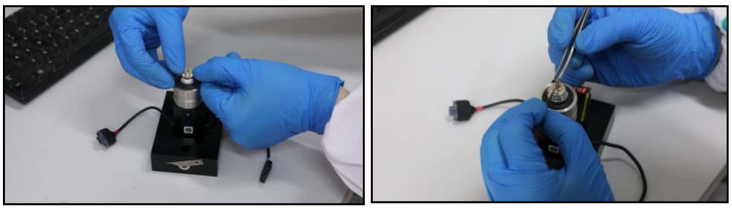

Figure 4. Screenshot of the virtual demonstration of the probe installation section
图 4. 安装探针部分的虚拟展示截图

第四步，安装组件(图 5)。① 安装扫描头，连接插线，并拧紧右下方紧固螺栓，此时扫描头下方出现红色激光。② 利用扫描头上的两个螺栓上下左右调整激光的位置，使激光对准针尖背面。③ 安装探测器，调整螺丝，使激光位置参数能够满足接触模式的要求。

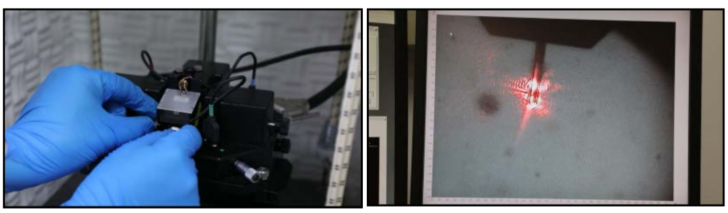

Figure 5. Screenshot of the virtual demonstration of the component installation section
图 5. 安装组件部分的虚拟展示截图

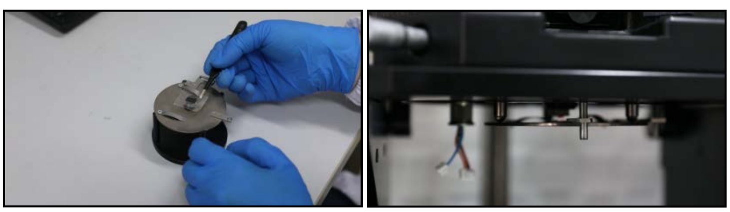

Figure 6. Screenshot of the virtual demonstration of the specimen installation section
图 6. 安装试样部分的虚拟展示截图

第五步，安装试样(图 6)。① 将事先准备好的干净镀膜磁片用镊子放在样品盘上，用压片固定好。② 将样品盘和样品整体放在扫描头的下方卡扣以及磁吸柱上。③ 安装样品时，确保针尖与样品之间有足够的距离，防止样品撞坏针尖，利用 Close 键初步逼近样品，可以缩短针尖逼近时间。

第六步，开始扫描(图 7)。① 初步设置扫描参数，如 setpoint 值，扫描速度，扫描范围，扫描次数等。② 点击 approach 按钮，针尖开始逼近试样，当针尖感应到原子间力的相互作用，并达到设置大小后，就自动停止逼近。③ 点击扫描按钮，开始扫描成像，同时在扫描过程中根据图像实时调整 I gain，P gain，Speed 等参数，从而获得高质量的图像。

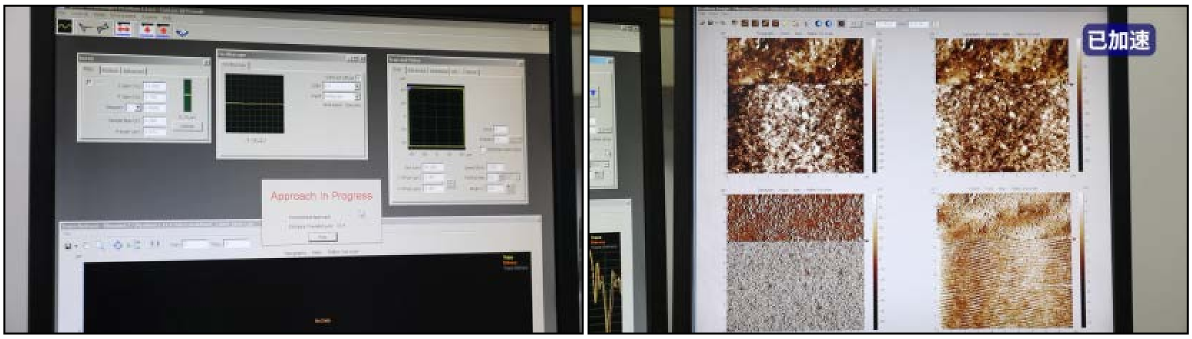

Figure 7. Screenshot of the virtual demonstration of the scanning initiation section
图 7. 开始扫描部分的虚拟展示截图

第七步，停止扫描及关机(图 8)。① 点击停止按钮，停止扫描。② 点击退针按钮数次，实现退针，同时手动操作 Open 键，手动退针。③ 关闭 PicoView 软件。④ 依次关闭 AC Mode Controller 电源，控制机箱电源，计算机电源，总电源。⑤ 取下样品台，并收拾好样品。⑥ 取下探测器，放入干燥器皿。⑦ 取下扫描头，取下针尖放回探针盒。⑧ 取下扫描头上 nose，放回干燥盒，同时将扫描头也放回干燥盒，之后放入干燥器皿。⑨ 整理实验室，把实验仪器和物品放回原处。

Figure 8. Screenshot of the virtual demonstration of the shutdown section
图 8. 停止扫描及关机部分的虚拟展示截图

3.4. AFM 实验结果虚拟演示

AFM 数据结果如何处理、如何解读也是需要关注的方面，对数据处理过程以及处理结果进行虚拟展示，要求学生学会正确解读 AFM 形成的数据图，并展示其他材料中所涉及的 AFM 结果，如图 9 所示。

同样的，AFM 结果对扫描参数敏感，不同的参数设置会导致扫描结果差异巨大，根据样品特性设置合适的参数，是 AFM 得到优质扫描图像的重要环节。图 10 以扫描速率、Gain 值、Setpoint 值等为变量，设置了几组不同的参数值，给出对应的扫描图像，并与正常扫描图像对比，以虚拟展示各种不同的实验结果间的区别。图 10(b)中 Setpoint 值偏小，使得探针－样品表面相互作用力较小，可以减少对样品的损伤，但可能无法提供足够的信号来维持稳定的图像；图 10(c)中 gain 偏大，系统对探针偏转响应更快，捕

捉更多细节，但高 Gain 值会增加系统噪声，导致图像失真；图 10(d)中 scan rate 偏大，可缩短实验时间，但快扫描速率会丢失图像细节，特别当表面起伏大时，无法捕捉细微结构。

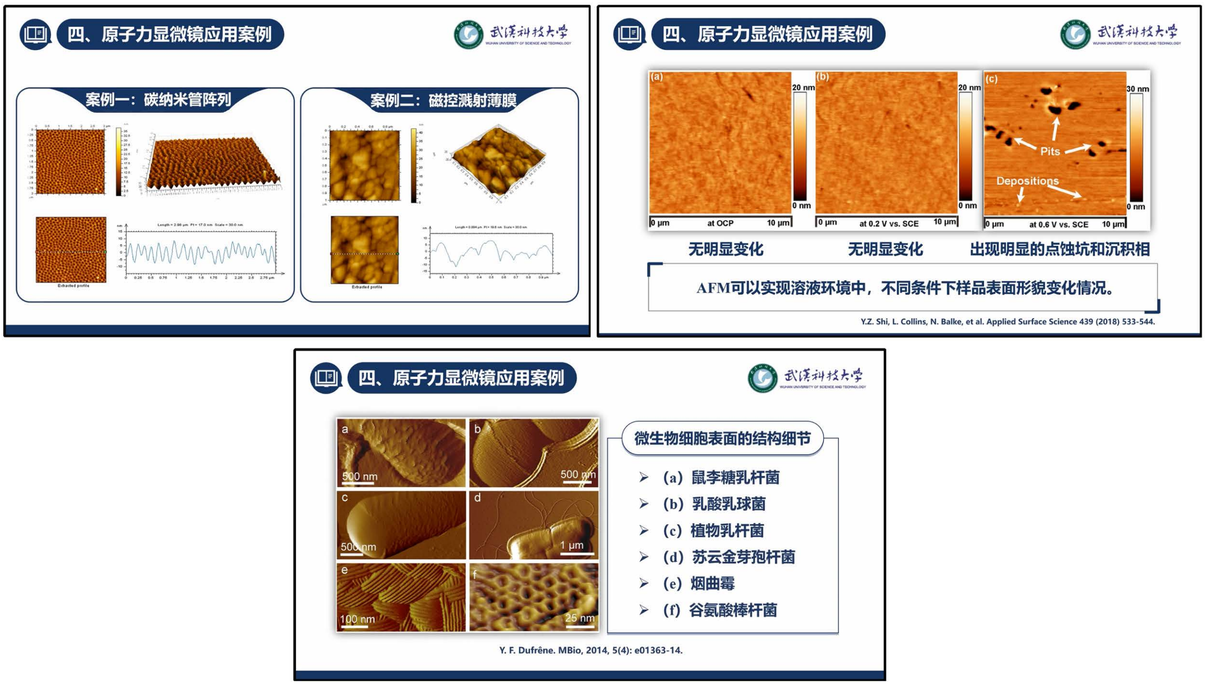

Figure 9. AFM results of different materials
图 9. 不同材料的 AFM 结果

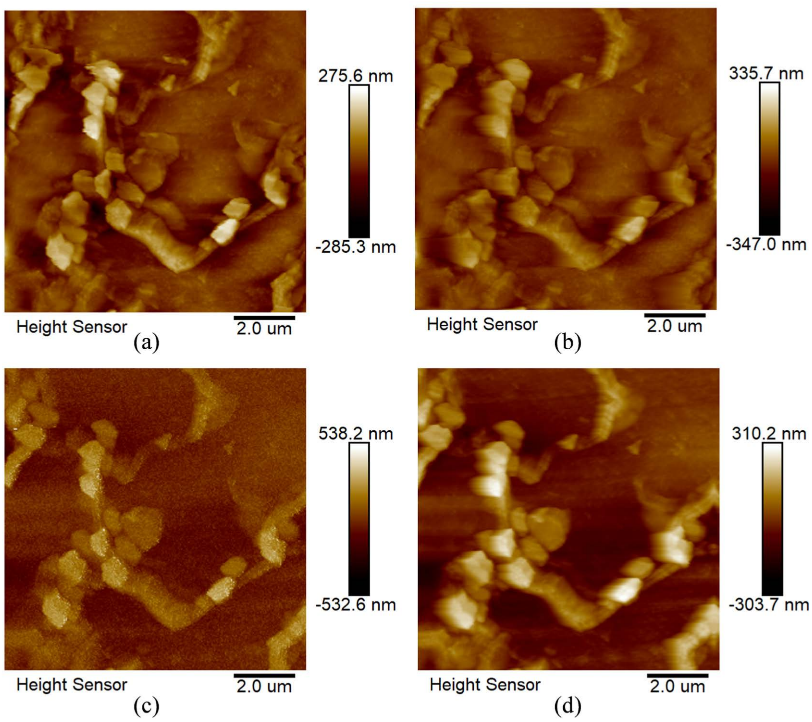

Figure 10. The AFM results of different parameters (a) normal; (b) low setpoint; (c) high gain; (d) high scan rate
图 10. 不同参数设置 AFM 结果(a) 正常参数；(b) setpoint 偏小；(c) gain 偏大；(d) scan rate 偏大

3.5. AFM 实验课程反馈机制

当实验课程结束后，学生提交实验报告，按照制定的实验教学大纲，根据各部分考核成绩与课程目标的对应情况及所占比例，完成该实验课程目标达成情况评价。再根据达成度结果，对未达成课程目标学生有针对性地加强知识巩固，并且动态微调本实验课程相关设置，以使学生更好地达到实验教学大纲的要求。

4. 实验课程模式的特色和亮点

4.1. 实验课程模式的特色

该原子级表面检测系统课程体系从“虚拟展示 + 实际操作”结合的角度，提供了实验课程中涉及的设备构造、运行原理、测量过程、表征结果等具体信息，并在学生实践过程中收集、分析学习数据，计算达成情况，并进行反馈。不仅在空间、时间、内容上拓展了课堂教学的广度和深度，解决了实物实验学时、经费不足的问题和操作人员培训周期长、效果差的难题，而且还可在熟练掌握操作规范后，拓展原子级表面检测系统的使用范围，进而提高学生在实验教学中的动手能力和创新意识。

4.2. 实验课程模式的亮点

① 构建了原子级表面检测系统仪器和操作过程的虚拟展示体系。系统中不仅展示了样品、探针、探测器、接收器和信号处理等实体结构，而且还可展示样品制备、设备组装、测试以及数据分析等操作过程。在教学过程中，学生可以完成理论分析、设备结构认知、仪器组装操作、数据解析等全过程。

② 实践了达成度评价的改进措施。以使用系统对施加(或不施加)电化学状态下的材料表面显微结构解析为目标，构建原子级表面检测系统实验课程，学生操作过程中，利用反馈与分析学生学习达成情况，便于掌握每位学生学习进度。使得学生不再局限于在实验室仪器上完成实验操作，破除了实验教学硬件、软件对实验开展的束缚，实现了实验课堂时间、空间、形式和内容上的开放共享和延伸。

③ 拓展了原子级表面检测系统在学生创新实践中的应用范围。在充分了解原子级表面检测系统运行原理、熟练操作相关设备之后，在确保安全的前提下，进行上机实物操作，鼓励学生个性化定制观测的样品。由此将系统作为学科竞赛、毕业设计中基础检测装备，以提高学生在实际实践过程中的创新能力。

5. 结论

1) 从实践教学的角度：原子级表面检测系统实验课程，从“虚拟展示 + 实际操作”角度丰富了教学形式，延伸和拓展了教学时间和空间，并可实现达成度评价，最终达到使用原子级表面检测系统解决材料表面显微结构分析领域和/或材料表面技术中复杂的工程问题的目的。

2) 从学生学习的角度：学生可以在安全、高效的基础上熟练原子级表面检测系统实践实验过程，高质量完成实践实验任务，从而提高大学生自我教育、自我管理和自我服务能力，全面提高学生创新精神和实践能力。

基金项目

教育部产学合作协同育人项目(231004382102232)；湖北省大学生创新创业训练计划项目(S202410488200)；武汉科技大学研究生教育教学改革研究项目(Yjg202434)；武汉科技大学教学研究项目(2024X040)；湖北省自然科学基金项目(2024AFC005)；湖北省高等学校实验室研究项目(HBSY2023-088)。

参考文献

[1] 杨述燕. 基于新金属材料化工耐蚀的开发与应用[J]. 世界有色金属, 2021(3): 136-137.

[2] 吴兆辉. 机械制造中新型金属材料的应用研究[J]. 科技资讯, 2022, 20(17): 58-60.

[3] 郭婷, 王丹, 姚日辉. 原子力显微镜应用于本科实验教学的探索[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(5): 165-168.

[4] 刘晶如, 李银成, 俞强. 原子力显微镜在高分子物理实验教学中的应用[J]. 电子显微学报, 2016, 35(2): 186-190.

[5] 李小云, 朱晖文, 章海军. 虚实一体的原子力显微镜实验系统[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(8): 70-73.

[6] 李英姿, 程鹏, 王文玲, 等. 基于 AFM 的物质表面结构及性质表征虚拟实验平台[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(3): 141-145.

[7] 刘文. 基于虚拟仿真技术的农业机械交互展示设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(12): 199-203+217.

[8] 罗晓霖. 数字虚拟展示技术的应用及展望[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(4): 22-24.

[9] 来航通, 吉晓民, 白晓波. 悬臂式掘进机参数变型与交互式虚拟展示[J]. 科技和产业, 2024, 24(19): 236-243.

[10] 艾勇. 新型分子器件的设计、合成与分子电导性质研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2013.