

文章编号:1005-4642(2023)07-0041-09



互联网+物理

## 扫描电子显微镜虚拟仿真实验设计与教学实践

侯廷平<sup>a</sup>, 李 钰<sup>a</sup>, 汪汝武<sup>a</sup>, 张国宏<sup>b</sup>, 王 贞<sup>b</sup>, 李 新<sup>a</sup>, 王 聪<sup>a</sup>  
(武汉科技大学 a. 理学院; b. 分析测试中心, 湖北 武汉 430080)

**摘 要:**扫描电子显微镜虚拟仿真实验与武汉科技大学优势专业紧密结合,从微观( $\mu\text{m}$  或  $\text{nm}$ )尺度研究材料的属性. 采取虚实结合的层次化实验教学,线上线下相结合的个性化实验教学模式,模块化实验环节. 采用“进阶交互式”教学方式,根据学生设定的参量提供基于真实仪器的反馈和相应的实验数据,培养学生的实验思维体系. 采取“重点过程”与“结果”相结合的多元化评价体系,深化一流仿真实验教学的内涵,提高学生的实验操作能力和专业英语水平,激发教师进行教学改革.

**关键词:**扫描电子显微镜;虚拟仿真;实验教学;材料物理

**中图分类号:**O411.3;TN16

**文献标识码:**B

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.07.008

虚拟仿真实验是基于多媒体技术、网络技术和虚拟现实技术的基础上发展起来的新型实验模式,教学过程直观、形象,知识表达科学、准确,能有效降低实验教学设备和材料的成本,进而提高实验教学效率<sup>[1]</sup>. 许多高校均在研究使用虚拟仿真实验教学<sup>[2-5]</sup>. 利用虚拟仿真技术与高校实验教学相结合,增强了实验的交互性、沉浸感和临场感,激发学生对新知识探索兴趣的同时,还能够加深学生对知识点的理解<sup>[6-10]</sup>.

2013 年,教育部高等教育司印发了《关于开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设工作的通知》(教高司函[2013]94 号),标志着虚拟仿真实验教学中心建设工作正式启动<sup>[11-13]</sup>. 目前,我国虚拟仿真实验教学工作已经由“中心建设”为主的初级普及阶段,转换为以“项目建设”为主的全面实施阶段,建设目标由“局部应用共享”发展为“大规模在线开发共享”. 虚拟仿真实验教学建设方式和建设目标的转变反映了我国对高校实验教学自身内涵发展的迫切需求,对推进高校实验教学优质资源的建设与应用具有重要意义<sup>[14-15]</sup>.

### 1 扫描电子显微镜虚仿实验教学模式及系统建设的重点与难点

扫描电子显微镜是材料物理、材料学、生物学

等相关专业的重要的分析与表征实验工具. 扫描电子显微镜是研究和检测材料的重要手段<sup>[16-17]</sup>,可用于最新科研成果微观组织分析的入门或者切入点.

武汉科技大学物理实验中心采用校企协同合作方式研发了扫描电子显微镜物相分析虚拟仿真系统. 学生通过该虚拟仿真模拟系统,可掌握扫描电子显微镜操作的基本流程和二次电子、背散射电子衍射的规律及成像特点. 在构建虚仿系统中,如何为实验实训设备更新不足或信息化管理水平落后的学校提供线上线下混合式教学途径是制约混合式课程的重点问题. 本文采用“局域网+双语虚拟仿真”信息技术手段构建了仿真系统,能够方便学生掌握扫描电子显微镜操作流程,并加深学生对工作原理的理解;在实验过程中,学生通过调节衍射仪的关键参量,缩短了与高端仪器设备的心理距离.

### 2 实验原理

#### 2.1 扫描电子显微镜成像的基本原理

扫描电子显微镜的工作原理可以简单地归纳为“光栅扫描,逐点成像”. 由电子枪发射能量为  $5\sim 35\text{ keV}$  的电子作为入射源,经过  $2\sim 3$  个电子透镜聚焦后,在样品表面按照顺序做栅网式扫描,

收稿日期:2022-08-30;修改日期:2023-01-08

基金项目:武汉科技大学 2022 年研究生教育质量工程立项建设项目(No. 武科大研发[2022]59 号);研究生质量工程项目(No. Yjg201920);武汉科技大学 2020 年一流本科课程立项建设(No. 武科大教发[2021]1 号)

作者简介:侯廷平(1979—),女,山东日照人,武汉科技大学理学院物理系教授,博士,主要从事金属材料的微观组织分析. E-mail:houtingping@wust.edu.cn

激发二次电子、背散射电子、吸收电子和 X 射线等物理信号(图 1). 这些物理信号随样品表面特征的变化而变化. 上述物理信号被相应的接收器收集, 经放大器成比例放大后, 输入显像管栅极, 同步调制显像管的电子束强度, 即得到荧光屏上的亮度. 由于电子束的位置和显像管荧光屏上电子束的位置一一对应, 因此可以得到反映样品表面形貌、成分特征的信息.

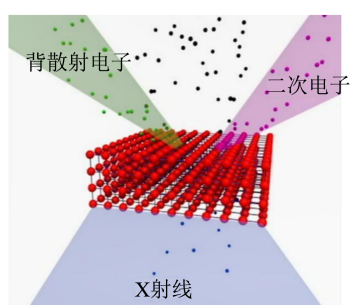


图 1 电子与材料试样作用所产生的信号

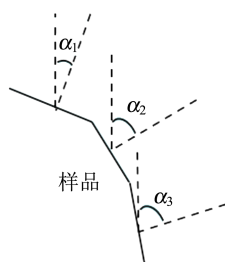
## 2.2 二次电子成像的原理

具有高能量的入射电子束与固体样品的原子核及核外电子发生作用后, 可产生多种物理信号, 如图 1 所示.

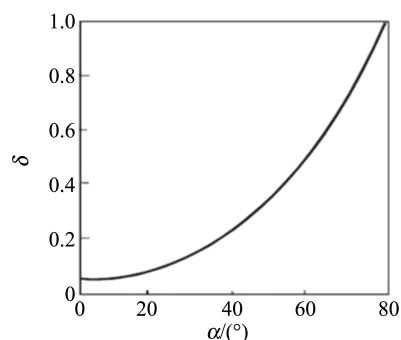
二次电子是指被入射电子轰击出来的核外电子, 其产额随原子序数的变化不大, 主要取决于表面形貌. 假设  $\alpha$  为入射电子束与样品表面法线之间的夹角[图 2(a)]. 实验证明, 当对光滑样品表面入射稳定能量大于 1 kV 的电子束时, 二次电子产额  $\delta$  与入射角  $\alpha$  的关系为[图 2(b)]

$$\delta \propto \frac{1}{\cos \alpha}.$$

如图 2(a)所示, 当  $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$  时, 二次电子产额  $\delta_1 > \delta_2 > \delta_3$ . 即入射角越小, 二次电子产额越高, 反映到显像管荧光屏上就越亮. 由此可判断样品不同区域衬度的差别. 由于作用体积的存在, 因此在端口峰和台阶突出的第二相粒子处图像较亮.



(a) 不同入射角



(b) 产额与入射角的关系

图 2 二次电子产额  $\delta$  与入射角  $\alpha$  的关系

## 2.3 背散射电子成像的原理

背散射电子是指被固体样品原子反射回来的一部分入射电子. 背散射电子的产额随原子序数的增加而增加. 因此, 利用背散射电子作为成像信号不仅能够分析形貌特征, 也可以用来显示原子序数衬度, 对成分进行定性分析.

## 2.4 特征 X 射线测元素含量的原理

特征 X 射线是原子内层电子受到激发以后在能级跃迁过程中直接释放的具有特征能量和波长的电磁波辐射(图 1). X 射线一般在试样的 500 nm~5 mm 深处发出. 通过 X 射线的特征波长即可测定样品的元素成分, 测量 X 射线的强度即可计算元素的含量.

## 3 虚拟仿真实验系统的构建

扫描电子显微镜物相分析虚拟仿真实验系统可以对块状 2 类材料进行测试, 并进行定性分析和定量分析. 具体的系统流程图见图 3. 该系统可以进行线上+线下学习、操作、反馈和考核.

扫描电子显微镜虚拟仿真实验教学系统的构建, 能够将课程理论知识和实验有机结合, 虚实结合的方式使学生不仅能够掌握相关实验的基本理论, 同时也能够培养学生实际操作、验证理论、探索新知识的能力. 双语虚仿实验系统主要由管理平台 and 系统平台 2 部分构成. 管理平台主要为教师端, 进行课程设置管理、学生管理、课程成绩管理、互动交流通知等<sup>[18-19]</sup>; 系统平台设计的重点放在了扫描电子显微镜实验的虚拟仿真上, 主要包括扫描电子显微镜的结构及工作原理、扫描电子显微镜样品的制备、扫描电子显微镜图像衬度观察、实验数据处理及分析 4 部分. 教学系统框架图如图 3 所示.

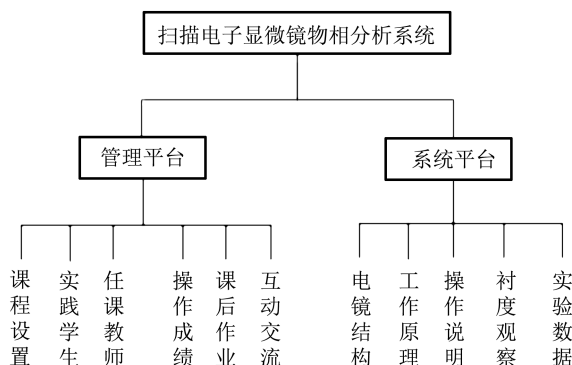


图 3 扫描电子显微镜虚拟仿真实验教学系统的框架图

实验分成二次电子和背散射电子 2 部分操作,每部分又分为形貌分析和成分分析模块,实验流程图如图 4 所示.测试过程中分别利用背散射和二次电子信号进行物相形貌观察以及化学成分分析(EDS 可提供特定区域 line scan, mapping 分析).

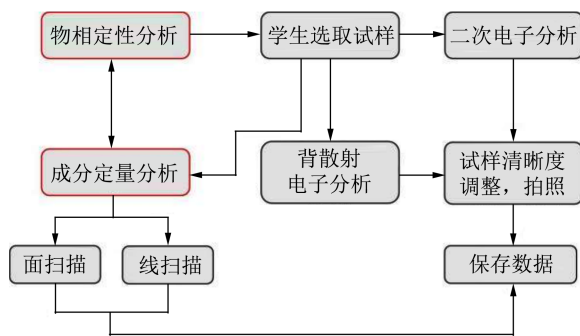


图 4 虚拟仿真实验系统的平台流程图

### 4 核心要素仿真设计

#### 4.1 在线展现材料的基本属性(形貌、成分)

实验选择全球最广泛采用的研究型仪器扫描电子显微镜,从微观( $\mu\text{m}$  或  $\text{nm}$ )尺度研究材料的形貌特征.扫描电子显微镜能够突破光学显微镜的分辨本领极限,分辨不同放大倍数的微观组织.其模拟的核心是必须掌握二次电子产额以及背散射电子产额与微观组织之间的依赖关系.操作顺序复杂且对材料专业知识要求高,需要充分考虑到属性差异导致的运行状态的可达性、可操作性等.因此,掌握微观尺度特点,判断不同区域衬度的差别,控制电子信号与微观组织的相互作用路径规划方式及工艺参量是虚拟仿真实验的核心要素.

其次,实验对应二次电子和背散射电子 2 个模块,每个模块又分为形貌分析和成分分析 2 种操作.参量包括加速电流、加速电压、真空度、放大倍数、预定义元素、粗焦距、细焦距、像散、扫描时间等,参量设置场景多(不同材料:锡球、耐磨钢、珠光体、镁质浇注料、金属氧化层以及夹杂物 6 种材料;元素周期表中所有元素),其工艺参量必须与材料的基本属性协同配合,保证形貌定性分析与成分定量检测过程稳定,要准确在线调控放大倍数及像散程度,全面、深入掌控不同材料与电子信号相互作用的差异及对应的控制方式.

#### 4.2 形貌检测过程中不同参量选择与图像清晰度仿真技术

不同材料  $\mu\text{m}$  级或  $\text{nm}$  级颗粒(或组织)所表现的特性信息差异大,影响因素多.电参量变化、放大倍数和区域(中心或边缘)差异等是多因素耦合的复杂过程;不同微观组织的路径规划方式以及工艺参量都将直接影响到尺寸统计的精度和微观组织的清晰度,上述虚拟仿真需要在掌握电子信号与样品微观组织特征作用基本规律的基础上实现建模功能.

### 5 扫描电子显微镜虚拟仿真实验教学系统的实施

#### 5.1 实验教学过程

5.1.1 虚实结合,采用能实不虚、以虚补实的方案采用虚实结合,还原真实实验场景,如图 5 所示.

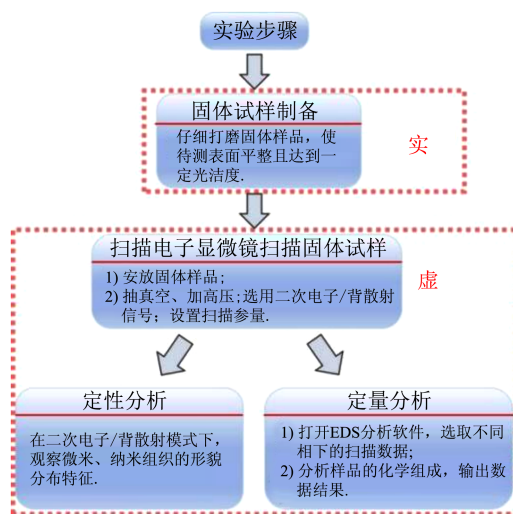


图 5 虚实结合,力争还原真实实验场景

实:在样品制备阶段,需要学生掌握制备固体样品的要点,以满足扫描电子显微镜的要求,锻炼学生的动手能力. 学生学习虚拟实验后,安排其在实验室实操完成该步骤.

虚:扫描电子显微分析部分采用虚拟仿真技术手段,多角度模拟固体样品在二次电子、背散射电子等信号下的实验实景,得到样品的形貌、结构及成分等微观特征.

实验教学过程包括:

1)了解扫描电子显微镜的结构、基本原理和工作方式. 对核心结构进行多角度展示,如图 6~7 所示. 通过对扫描电子显微镜的多角度完整复现,学生可以从不同角度观察扫描电子显微镜的外形和内部结构.

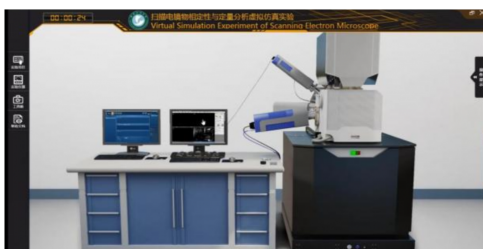


图 6 扫描电子显微镜的外部整体图



图 7 扫描电子显微镜的内部主要构造

2)突破真实仪器限制,全景式展现关键步骤. 在测试过程中,设置不同测试信号(二次电子、背散射电子等信号)观察试样的形貌、结构及成分信息. 学生选用不同的测试信号,试样的相关信息会发生相应变化,学生能够直观了解扫描电子显微镜的工作原理.

3)再现需要“注意”的实验操作场景. 在扫描电子显微镜实验操作过程中,需要注意扫描电子显微镜在运行过程中以及开始运行前,不允许打开扫描电子显微镜真空仓的门,在开启仓门取样和放样的过程中,需要先放气. 仿真实验场景中着重提示了该注意事项,如图 8 所示.



图 8 注意事项提示窗口

### 5.1.2 双语实验操作模块化方便学生针对性学习

信息技术与国际化教育教学的深度融合,打造了双语仿真实验,包括实验说明、步骤、操作、实验报告模板等. 人机互动的形式把英文思维模式贯穿到实验操作中,掌握实验技能的同时,满足学生国际化需求.

实验分成二次电子和背散射电子 2 部分操作,每部分又分为形貌分析、成分分析 2 个模块. 其中,形貌分析主要是样品的形貌特征分布情况,例如球形、长条形等,可以测出其特征尺寸;成分分析是在二次电子/背散射电子信号下样品的制备和利用能谱仪(牛津 Aztec Ultim Live 100 X)探测器进行物相定性分析(线/面扫描). 学生可以针对自己感兴趣的环节,选择其中 1 个模块学习.

### 5.1.3 实验模式与考核模式相结合,注重学习效果的反馈

采取“重点过程”与“结果”相结合的多元化评价体系.“重点过程”是针对操作过程、综合课堂表现以及实验报告撰写等多方面给出成绩.“结果”主要指实验操作结果以及报告结果(数据处理及思考题).

## 5.2 实验方法

本项目将扫描电子显微镜实验分为定性分析和定量分析 2 部分,通过这 2 部分的学习,学生掌握了物相定性和定量分析的方法.

1)在定性分析中,基于不同二次电子以及背散射信号,学生学习定性分析块体样品的形貌分布特征.

2)对固体样品的化学成分(元素分布)进行定量分析. 用 EDS 能谱仪定量分析样品表面微区成分元素,然后分析扫描 EDS(line scan 和 mapping)的统计数据,获得相应元素含量.

## 6 仿真现场操作

扫描电子显微镜虚拟仿真实验教学系统的构建,将课程理论知识和实验有机结合,并采用“进阶交互式”的教学方式,使学生在掌握基本理论的同时提高其实际操作、验证理论、探索新知识的能力。学生进入仿真现场操作模块,根据提示反复练习。现场模块主要包括扫描电子显微镜实验前的准备、开机启动、软件运行、样品制备、样品装样和换样、图像衬度观察、图片保存和数据的拷贝、

关机等。通过教学系统实现不同类型和方法的电子显微镜虚拟样品的制备、样品装样取样、放气抽气、开关电压、移动样品、对焦成像(必要时像散消除、光阑对中)、样品观察以及图片保存。通过不同参量和探测器的设置,学生加深对分辨率和景深的理解,掌握二次电子表面形貌像和背散射电子原子序数像。各个步骤中均设置智能启发式的指导功能,启发学生思考,引导学生按照正确的步骤进行操作演练。图 9 是教学系统中仪器操作的截图。

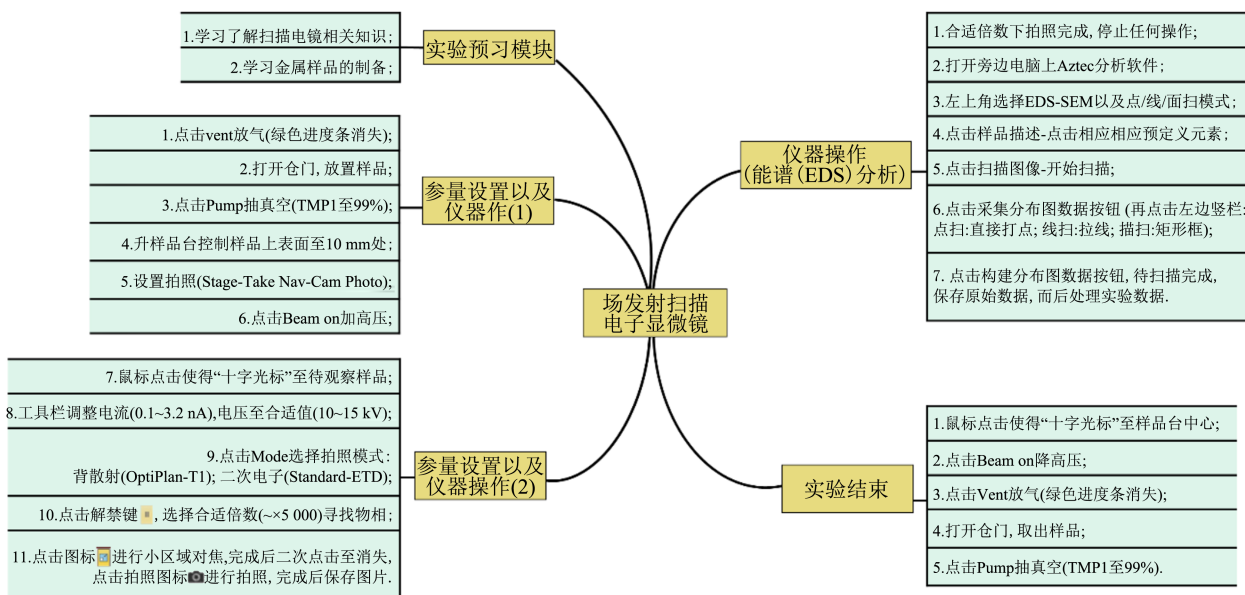


图 9 虚拟仿真系统中扫描电子显微镜样品的制备和仪器操作

基于制备好的样品进行扫描电子显微镜仿真实验形貌观察。

### 6.1 进入主界面, 选择“实验模式”

点击“开始实验”, 进入实验场景, 实验场景主窗体如图 10 所示。



图 10 实验主场景图

### 6.2 样品腔真空仓放气并放置适用于不同信号下的固体试样

打开扫描软件, 点击 Vent 键, 弹出确认框,

点击确认, 完成真空仓放气。点击真空仓仓门打开大视图(图 11), 仓门打开后, 点击放置标样以及二次电子样品(3 选 1)(图 12), 依次将样品放置到仪器操作台上。多种样品供学生选择, 学生可以根据专业背景或兴趣选择样品, 也可以选择跨专业样品。

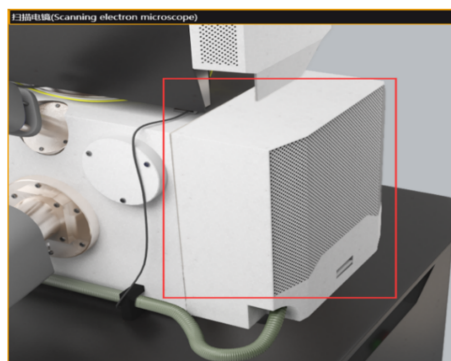


图 11 模拟仿真放置固体样品场景图

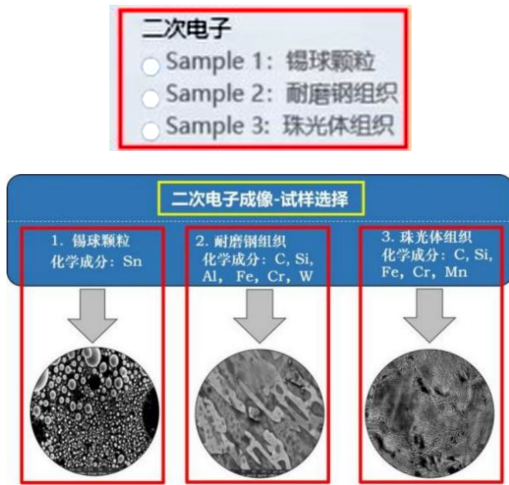


图 12 二次电子成像模式下 3 种样品的形貌及成分特征

### 6.3 抽真空,调整样品,设置拍照

待试样放样品腔后,关闭仓门. 点击 Vacuum 的 Pump 键对真空仓进行抽真空,HVG 和 TMP1 数值发生变化(HVG 从  $1.20 \times 10^5$  至  $1.00 \times 10^{-3}$ ,TMP1 从 0%至 99%,代表抽真空完成.

之后利用鼠标滚轮调整样品台高度,点击 Stage 菜单下 Take Nav-Cam Photo 键给样品台拍照(图 13). 待拍照设置完成,双击鼠标左键选中标准样品的待测区域.



图 13 调整样品台高度以及设置拍照界面场景界面

### 6.4 设置扫描参量

加速电压和电流需选择 15/10.00 kV 和 1.6 nA,否则不可进行下一步,弹出提示信息“请先调整合适的加速电压和电流”.

### 6.5 加高压,并设置二次电子模式

点击 Beam on 键完成对电子束加高压进程. 选择二次电子像模式:Standard-ETD-SE.

### 6.6 图片清晰度调整

点击自动调节亮度和对比度功能键后,找到

颗粒非边缘区域;点击“Magnification”调节放大倍数至  $30\,000\times$ ;调节 Focus 粗焦(Coarse)以获得图像清晰度;点击“X”或“Y”调节图片像散(Stigmator 中“X”“Y”);调节 Focus 细焦距“Fine”使图片清晰化(图 14). 可反复调节像散和焦距直到图片最清晰. 关于清晰度的操作,本项目设置了进阶式操作.



图 14 图像清晰度调整

### 6.7 图片拍照与数据保存

以放大  $5\,000\times$  为例,扫描速度是 30 ns. 待扫描完成,数据会自动保存在相应文件夹(见图 15).

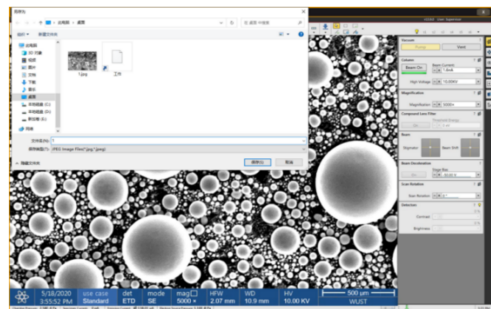


图 15 扫描完成后保存界面

### 6.8 二次电子模式下所选待测试样的形貌分析

待标准试样观察完成后,在左下角窗口中双击鼠标左键选中要观察的样品,样品台自动移动使得要观察的样品刚好在电子束下(图 16),其余步骤与 6.2~6.7 步相同,从而进行二次电子模式下所选试样的形貌分析.

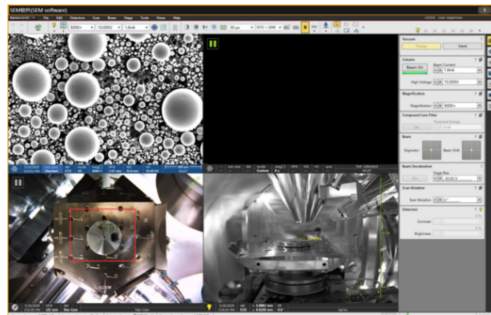


图 16 点击选取待测试样

### 6.9 将选择区域导入 EDS 能谱分析软件

EDS 分析的步骤为:

1) 选择 EDS 分析类型(EDS 可对特定区域进行 point, line scan, mapping 分析)和样品中可能存在的元素等。

2) 计算机按照给定的检索条件进行检索, 给出可能元素含量的变化趋势、元素含量以衍射谱的形式。

3) 从点扫数据列表中检出元素含量的变化(人工完成), 对面/线扫描的数据进行定性分析。

### 6.10 定量分析(面/线扫描)样品的化学组成

面扫描: 点击“扫描图片-开始”按钮获得组织相片, 之后点击分布图数据框选择需要进行面扫描的特定区域, 最后点击构建分布图数据获得含量变化趋势(图 17)。线扫描: 界面左上方选择“线扫描”模式, 获得组织相片后点击采集分布图画线进行线扫描。

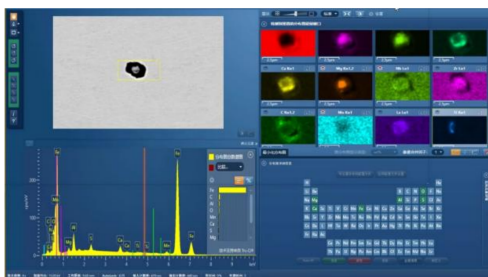


图 17 EDS 软件面/线扫描分析界面

### 6.11 数据分析

待点扫描、线扫描和面扫描结束后, 点击报告模板, 选择区报告, 保存输出实验的定性/定量分析结果。

### 6.12 二次电子信号模式下实验结束, 退出实验, 取出二次电子试样, 放置背散射试样

点击“Beam on”完成退高压。按住鼠标中间滑轮使样品台下降; 点击 Vent 等待真空仓放气; 放气完毕后, 打开真空仓, 点击取出试样(标准试样以及二次电子试样); 在背散射的试样中选择感兴趣的试样并放置; 放置完成后点击关闭仓门。

### 6.13 背散射电子模式下待测试样的形貌分析

点击真空仓的仓门打开大视图, 仓门打开后, 点击放置标样以及背散射电子样品(3 选 1, 图 18), 依次将样品放置到仪器操作台上。最后点击并关闭仓门。

试样放置完成后, 与前期操作及二次电子信

号下操作相同(6.2~6.8), 与第 5 步不同的是背散射电子信号下模式选择的组合为 OptiPlan-T1-Backscatter Electrons(图 19)。后续的物相定性/定量分析步骤同 6.9~6.12。

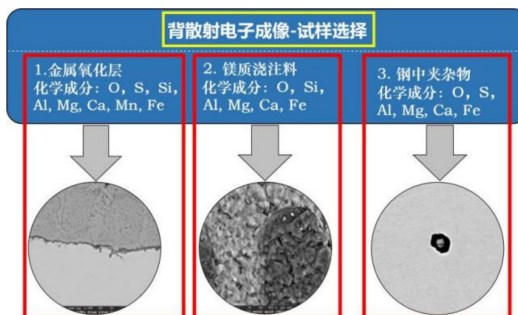


图 18 3 种样品的形貌及成分特征

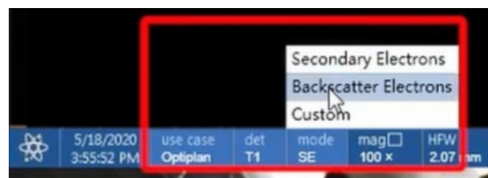


图 19 背散射电子信号下模式选择界面

### 6.14 实验结束, 退出实验

退出实验的流程同 6.12(退高压一下降样品台—Vent 放气—取出试样—关闭仓门—抽真空), 退出实验平台。

实验结束后, 会弹出对话框“操作情况反馈”(图 20)。实时的“进阶交互式”让学生体会“学然后知不足”的道理。

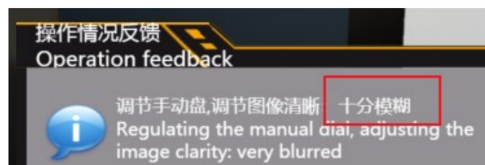


图 20 操作情况反馈

### 6.15 撰写与提交实验报告

1) 下载实验报告模板, 根据做出的实验数据

和分析结果,填写实验报告.

2) 实验报告应包括:所做的实验内容(提前预习),获得的 SEM 数据(以图片形式粘贴在报告中),对实验数据的分析和得到的结果.

3) 完成实验报告后,应及时提交,由指导教师负责批改,给出成绩.

## 7 重过程和结果的多元化评价体系

改变传统的实验课程采取出勤和实验报告相结合的单一考核方式,采取“重点过程”与“结果”相结合的多元化评价体系.“重点过程”更加关注的是学生对关键环节的把握程度,其间对学生进行的点评更能激励学生明确学习方向,解决自身问题.“结果”则是体现把握“重点过程”及“次要过程”后产生的效果,主要以分数高低来体现.所属课程的考核形式:40% 平时成绩+60% 期末成绩.作为所属课程中的重要组成部分,该实验成绩在平时成绩中占 10%.

在虚实结合教学过程中,一方面能够锻炼学生的动手能力,另一方面学生可以反复试错,不断探究.通过系统搭建的虚拟仿真设备场景,学生在三维场景中独立操作,自主设计和完成参量的设置和调整.模块化设计使学生有针对性地学习,实验报告评分机制和考核机制能够积极反馈给学生学习效果.学生通过虚拟仿真实验项目的学习,其实验操作能力和分析鉴定水平都得到了很大提高.同时,虚拟仿真实验教学实践还能够推动教师持续进行教学改革,促进国家、省一流仿真实验类课程教学得到内涵式发展.

## 8 结束语

针对传统扫描电子显微镜实验教学设备紧缺,授课方式单调,教学效果差等现状和问题,将虚拟仿真技术应用在扫描电子显微镜实验教学中,建立扫描电子显微镜虚拟仿真实验教学系统,弥补实际扫描电子显微镜实验教学的不足,切实提高扫描电子显微镜实验教学效果.采取虚实结合的层次化实验教学,学生可以在实验室制备样品,反复练习;观察仪器的内部结构,深入学习和理解实验原理,缩短了学生与高端仪器设备的心理距离,提高了学生的科研能力.采用线上线下相结合的个性化实验教学模式,将基于网络的远程教学和翻转课堂的引导式、开放式教学相结合,

让学生通过网络先自学虚拟仿真实验,然后到课堂让学生集中讨论,分享实验操作、数据分析等心得体会,激发学生的学习兴趣,极大提高了学生的实验技能.模块化实验环节将实验分成二次电子成像分析和背散射电子成像分析 2 部分,每部分又分为形貌分析(定性)和成分分析(定量)2 个模块,学生可以对某一模块反复学习.采用“进阶交互式”的教学方式能够根据学生设定的参量提供基于真实仪器的反馈和相应的真实数据,培养学生的实验思维体系.另外,该教学系统还提供了共享资源链接,例如微信公众号及电子显微镜相关网站链接等,改变了传统实验课程采取出勤和实验报告相结合的单一考核方式,采取“重点过程”与“结果”相结合的多元化评价体系,真正做到了学以致用教学目的,加深了学生对微观组织表征技能的掌握,提升了实验教学质量,激发了教师进行教学改革的动力.

## 参考文献:

- [1] 戴玉明,朱帅帅,丛园,等.材料科学基础虚拟实验教学[J].中国冶金教育,2019(1):91-93.
- [2] 忻静,孙可,邓莉,等.基于 STEM 的水质光学综合测量虚拟仿真实验[J].物理实验,2022,42(1):50-56.
- [3] 曾立,樊东鑫,陈凌珍,等.基于 MATLAB 的牛顿环虚拟仿真实验平台设计与开发[J].大学物理实验,2018,31(6):104-127.
- [4] 邵长金,周广刚,杨振清,等.从 PhET 看国内高校物理虚拟仿真实验教学项目建设[J].大学物理实验,2018,32(5):118-122.
- [5] 陈水源,郑勇平,张健敏,等.X 射线衍射及结构相变原位表征虚拟仿真实验的设计与建设[J].物理实验,2020,40(2):47-53.
- [6] 白强,肖海连,杜芳林,等.虚拟仿真技术在材料科学与工程实验教学体系中的应用[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2018,39(1):163-164.
- [7] 李艳霞,顾轶卓,李敏,等.复合材料固化工艺评价与优化虚拟仿真实验[J].实验技术与管理,2019,36(12):170-173.
- [8] 李曼,郭宇锋,顾世浦,等.MOS 场效应晶体管虚拟仿真实验教学资源建设[J].物理实验,2020,40(11):35-40.
- [9] 耿志挺,陈学军.材料力学虚拟仿真实验系统的设计与开发[J].实验室研究与探索,2019,38(5):98-101.



- [10] 林珊,陈翠霞,罗小林,等. 材料现代分析技术虚拟仿真实验教学思考[J]. 化学工程与装备, 2018(10):280-283.
- [11] 负冰,孙建林,熊小涛,等. 材料虚拟仿真实验中心建设及共享的思考与实践[J]. 实验技术与管理, 2018,35(10):197-199.
- [12] 刘秀清,葛文庆,焦学健,等. 国家级虚拟仿真实验教学中心建设与管理[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(11):225-233.
- [13] 卢艳丽,董文强,王永欣,等. 材料类专业虚拟仿真实验教学中心的建设与实践[J]. 实验室研究与探索, 2018,37(11):153-157.
- [14] 祖强,魏永军. 国家级示范性虚拟仿真实验教学项目申报策略探讨[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(9):236-238.
- [15] 王晓敏,高志强,闫晋文. 国内高校材料学科虚拟仿真实验教学的发展探究[J]. 中国大学教学, 2021(3):78-85.
- [16] 黄孝瑛. 材料微观结构的电子显微学分析[M]. 北京:冶金工业出版社, 2018:376-452.
- [17] 郭素枝. 扫描电镜技术及其应用[M]. 厦门:厦门大学出版社, 2006:5-50.
- [18] 郑超,宋立彬,王新洪,等. 材料成型及控制工程专业虚拟仿真实验室的建设与实践[J]. 实验技术与管理, 2019,36(3):261-265.
- [19] 熊小涛,孙建林,薛润东. 材料学科实验教学改革的探索与实践[J]. 实验技术与管理, 2011,28(6):265-267.

## Design and teaching practice of virtual simulation experiments for scanning electron microscope

HOU Tingping<sup>a</sup>, LI Yu<sup>a</sup>, WANG Ruwu<sup>a</sup>, ZHANG Guohong<sup>b</sup>,  
WANG Zhen<sup>b</sup>, LI Xin<sup>a</sup>, WANG Cong<sup>a</sup>

(a. School of Science; b. Analytical and Testing Center,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430080, China)

**Abstract:** The virtual simulation experiments for scanning electron microscope is closely integrated with the advantage specialty of Wuhan University of Science and Technology (Materials Science) to study the properties of materials within the micro ( $\mu\text{m}$  or  $\text{nm}$ ) scale. The combination of real and imaginary experimental teaching, online and offline personalized experimental teaching mode, modular experimental sessions were adopted. The “progressive interactive” teaching method was used to provide feedback based on real instruments and corresponding real data according to the parameters set by the students, and to cultivate students’ experimental thinking system. The virtual simulation experiment adopted a diversified evaluation system that combined “focus on process” and “results” to deepen the connotation of first class simulation experiment teaching, to improve students’ experimental operation ability and professional English level, and to stimulate teachers’ motivation for teaching reform.

**Key words:** scanning electron microscope; virtual simulation; experimental teaching; materials physics

[责任编辑:郭伟]