矿物材料相关专业的现代测试技术模块化教学改革研究
——以矿物加工工程专业《现代测试技术》模块化教学改革为例

张 旭　王雅静　王宏宇　饶 俊
河北地质大学 宝石与材料学院，河北 石家庄 050031

[摘要]针对矿物材料相关专业的《现代测试技术》课程进行了教学改革研究，研究中基于成果导向的模块化教学理念，进行《现代测试技术》课程的模块化教学设计、课程实施和课程教学评价的工作。研究结果表明，《现代测试技术》课程的模块化教学可以显著提升矿物加工工程专业学生相关知识的学达成度、增强了学生处理复合型工程的能力，同时提高了学校分析测试资源的利用效率，实现了矿物加工专业理论与实践的结合。

[关键词]现代测试技术；矿物材料；矿物加工工程；教学改革
DOI：10.33142/fme.v7i10.20712　　中图分类号：G642.0　　文献标识码：A

Research on Modular Teaching Reform of Modern Testing Technology for Mineral Materials-related Disciplines — A Case Study in the Modern Testing technology for Mineral Processing Engineering

ZHANG Xu, WANG Yajing, WANG Hongyu, RAO Jun
School of Gemology and Materials Technology, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei, 050031, China

Abstract: The article showed a research on teaching reform for the course of Modern Testing Technology, which was aimed to improve the majors related to mineral materials.This study focused on the modular teaching design, course implementation, and teaching evaluation of the Modern Testing Technology course,using an outcome-oriented modular teaching concept .The research results indicated that implementing modular teaching of the Modern Testing Technology significantly improved the achievement level of relevant knowledge among students in the mineral processing engineering. It enhanced the students ability to address complex engineering problems, the utilization of the institution's analytical resources, and the ability of integrates theoretical concepts with practice in mineral processing engineering.

Keywords: modern testing technology; mineral materials; mineral processing engineering; teaching reform

引言

矿物材料是材料科学与地质学的典型交叉专业领域，凭借本身晶体结构的多样性、物理化学的独特性以及可能广阔的应用潜力，已成为当前多功能材料研究的重要前沿方向[1,2]。其中，矿物材料晶体结构的精准调控、矿物资源的高纯分离、纳米矿物的功能化及矿物复合材料的构建等已成为国内外科学研究的热点。矿物材料的深入发展不仅为解析地球物质演化规律提供了新理论知识，也将为构建绿色低碳和可持续发展的先进材料体系贡献理论与技术基础。矿物材料与材料科学与工程、地质学、环境科学与工程、矿业工程、冶金工程和纳米科学与工程学科等多学科存在着密切联系。其中，从原子尺度的晶格缺陷到宏观尺度的服役行为的全链条科学问题，构成了对现代测试技术表征方法的迫切需求，有关现代测试技术课程在矿物材料相关学科交叉应用见表 1。《现代测试技术》是矿物材料与相关学科人才培养的核心课程，在学习仪器原理与操作技能的传授、数据解析、质量控制和跨学科问题解决能力的培养上扮演着重要的角色。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

表 1　现代测试技术课程在矿物材料相关学科交叉应用

学科名称	不同学科常用现代测试技术	具体应用方面	现代测试技术应用意义	现代测试技术应用中局限性	参考文献
材料科学与工程	X 射线衍射分析	晶体材料的结构分析、物相组成鉴定、晶粒尺寸与残余应力分析	揭示材料结构-性能关系，为材料设计和工艺优化提供依据	对非晶材料、低含量相检测能力受限，数据解析要求高	[3]
	扫描电子显微镜分析	表面形貌观察、断口分析和微观组织研究	分析材料失效机理，并优化其加工与性能	样品需导电处理，部分材料会容易受电子束损伤	[4]
	透射电子显微分析	微观结构、位错、晶界、析出相分析	揭示材料微结构本质，支撑高性能材料研发	样品制备复杂，观察区域小，设备成本高	[5,6]
	热分析	测定材料的相变温度、热稳定性、分解行为、反应动力学等	评价材料热性能，指导热处理与服役环境设计	易受升温速率、气氛影响，实验重复性要求高	[7]
地质学	X 射线荧光光谱分析	岩石、矿物主量与微量元素分析	快速获取地球化学信息，支持成因分析与矿产勘查	对轻元素灵敏度低，基体效应明显	[8]
	激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱	微区元素分析、同位素分析、成矿过程研究	重建地质历史，识别矿床形成机制	标样依赖强，定量分析复杂，设备昂贵	[9]
	电子显微探针分析	矿物化学组成分析及界面元素分布	精确测定矿物化学组成、岩矿鉴定与地质演化过程研究	分析速度不快，对样品表面要求高	[10]
环境科学与工程	气相色谱-质谱联用	挥发及半挥发性有机污染物的检测	准确识别环境中污染物及污染追踪溯源	样品前处理复杂且分析成本高	[11]
	液相色谱	水体、土壤中有机污染物分离与定量	用于复杂环境中污染物的分析及治理过程检测	对前处理条件及流动相的选择有一定要求	[12]
	电感耦合等离子体质谱	重金属及痕量元素检测	环境中有毒元素的检测及安全评估	需要严格校准以避免环境中其他元素干扰	[13,14]
冶金工程	热分析	氧化还原反应、熔融及相变过程研究	用于工业工艺优化及产品质量的把控	对实验条件有要求且需要获得代表性的样品	[7]
	扫描电子显微镜-能谱分析	金相组织、夹杂物及元素分布分析	分析冶金过程、冶金缺陷与金属组织演变	轻元素和低含量元素的分析能力有限	[15]
	X 射线光电子能谱	表面氧化态、元素价态、薄膜表面分析	研究表面反应、腐蚀行为和表面处理工艺	只能分析表层极浅区域，深度信息不足	[3,16]
	金相显微分析	晶粒大小、相组成、铸造缺陷观察	评估金属材料质量，优化热处理与加工工艺	主要提供二维信息，定量分析深度有限	[17]
纳米材料科学与工程	原子力显微镜分析	纳米表面形貌、粗糙度、力学性质测量	服务于纳米器件和生物材料研究	扫描速度慢，易受环境振动影响	[18]
	扫描隧道显微镜分析	导电表面原子级成像、表面电子态研究	用于纳米操控与原子尺度研究	仅适用于导电样品，对环境要求高	[19]
	透射电子显微镜	纳米颗粒结构、晶格条纹、界面分析	研究纳米材料内部结构与缺陷	样品制备困难，束流损伤明显	[6,20]
	红外和拉曼光谱分析	纳米材料结构、应力、缺陷与相分析	适合非破坏性检测，辅助纳米结构表征	信号弱、荧光背景干扰大，常需增强技术	[21]

《现代测试技术》课程是矿物材料及相关学科人才培养体系中的基础性课程，对推动科研创新与产业应用具有十分重要的作用。《现代测试技术》课程主要系统介绍 X 射线分析技术、电子显微分析技术、表面与化学态分析、元素与痕量分析、热分析、比表面积与孔隙表征等方法，讲解仪器原理与操作技能、测试数据处理、误差分析、质量控制与测试标准[22]。当前《现代测试技术》课程的教学实践主要以理论讲授与实验实训并重、案例驱动与问题导向结合以及线上资源与线下仪器操作互补等模式开展，形成了理论与实践结合且线上线下融合互补的教学框架。在《现代测试技术》课程教学过程中仍存在部分问题，如高端仪器设备紧缺、安全管理要求严苛、课时有限与知识密度过高之间的矛盾、课程内容难以全面兼顾地质、材料、化学、环境及冶金等跨学科领域的差异化需求等，导致学生在《现代测试技术》课程内容的学习过程中存在一定难度。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

在《现代测试技术》课程学习的具体背景下，构建模块化教学体系可以有效破解当前教学资源的约束，能够有效深化以学生为中心的教育理念[23]。《现代测试技术》模块教学体系结合样品制备-结构相分析-表面化学表征-热/力学性能测试-数据处理与质控的能力等具体内容为导向链，将分散的知识点重构为有逻辑层次递进的教学单元，实现有效学习目标与工程评估的精准映射。《现代测试技术》课程的模块化教学能够支持不同层次学生分层学习，有利于在明确学科特点的基础上促进不同学科协同发展与专业特色的优化，同时也可以提升教学过程的质量监控和持续改进能力。《现代测试技术》课程模块化教学改革的实施目的在于完善矿物材料相关学科教学制度与方法基础上，探索兼顾不同学科系统性、实践高阶性与培养专业化的创新路径，为培养具有系统思维的测试与表征人才提供坚实工业基础。

1 矿物加工工程专业对《现代测试技术》课程教学的需求分析及模块化设计

1.1 矿物加工工程有关现代测试技术的应用场景

矿物加工工程是现代工业的基础工业过程，其主要实现矿产资源开发利用中有用矿物的高效分离、目的金属的有效回收和尾矿资源的综合利用。在整个矿物加工过程中，现代测试技术能够分析矿石的矿物组成、化学元素赋存状态及晶体结构缺陷，可以在分子甚至原子层面分析物质特点，因此可以对矿物加工中如矿物的解离过程、界面化学反应原理及过程进行分析，进而为矿物加工中破碎、磨矿、浮选、磁选及矿物深加工工程单元提供系统的理论支持。在矿山资源开发的工业周期管理中，现代测试技术可以对资源-环境平衡发展提供基础的测定数据支撑，如尾矿中残存有价组分和岩石矿物选择性综合利用和尾矿中重金属或污染化学元素迁移及环境影响，对资源的可持续发展具有主要的推动作用。具体矿物加工工程相关现代测试技术的应用见表 2。

1.2 矿物加工工程专业《现代测试技术》课程学习现状及问题

《现代测试技术》课程是矿物加工工程专业的重要理论与实践课程，主要讲授矿物资源的表征技术和测试方法，包括 X 射线分析技术、电子显微分析技术、振动光谱分析技术、热分析技术、X 光电子分析技术和色谱分析技术等先进仪器的应用，以及相关测试数据的分析与解读。课程需要学生学习矿石矿物组成及元素赋存状态的分析方法，以及矿物解离行为及选矿工艺优化的关键测试技术。随着在线监测系统和大数据驱动的矿物表征等科学技术的推广和应用，课程内容需要向智能化与前沿测试技术靠拢，为培养适应现代矿物加工工程需求的人才提供了技术支持。

在《现代测试技术》课程学习过程中主要存在以下问题：首先，部分高校的课程内容更新速度较慢，与行业前沿技术发展脱节，未能全面覆盖智能化测试和分子水平表征技术等最新领域；另外，实践教学环节的设备资源不足限制了学生的操作时间与深度，进而限制了学生在高级仪器功能应用方面掌握的熟练程度；同时，课程的跨学科知识和技术的归整性不足，学生不能充分掌握物理、化学和材料科学支撑的跨学科知识，进一步限制了矿物加工工程专业学生的综合性研究能力。

总体来说，《现代测试技术》课程虽然提供了系统化的测试技术基础，但其在教学内容、实践资源以及课程设计方面仍需改进。如何实现课程的动态更新，实践教学比例的增加、跨学科知识融合和先修课程的基础学习，是优化该课程的重要方向。

表 2　矿物加工工程相关现代测试技术的应用

应用领域	研究的内容	具体测试技术	应用的意义
原矿分析	矿石的组成、化学成分和矿物的嵌布关系	X 衍射分析技术分析矿物物相晶体结构，X 荧光分析技术分析矿物成分，扫描电镜及电子探针技术分析矿物的嵌布关系	矿物加工工艺流程设计
磨矿与解离度分析	粒度分布、解离度和颗粒的形貌	激光粒度分析技术分析矿物粉体的粒级分布，扫描电镜分析矿物粉体的形貌	优化矿物粉体加工参数，调高矿物分离效果
浮选优化	矿物表面电位和药剂的吸附性能	Zeta 电位仪测定矿物表面的电位，红外光谱和拉曼光谱分析矿物颗粒与浮选药剂的物理化学关系	提高浮选药剂选择性，优化浮选过程
精矿和尾矿的检测	精矿或尾矿中成分	电感耦合等离子体质谱技术精确分析矿物中化学成分，热重分析测定产品物理性能	确保精矿品位与质量，分析尾矿的资源利用可能性
矿山资源方面	重金属污染特性、尾矿建筑材料利用潜力	原子吸收光谱、离子色谱技术分析矿山水环境中重金属含量及类型	降低环境风险，支持矿物废弃物的资源化应用

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

1.3 矿物加工工程专业《现代测试技术》课程模块设计

1.3.1 模块设计的必要性

课程模块化是指将课程内容按照教学目标、知识体系和能力需求划分为若干相对独立且相互关联的教学单元或模块[24,25]。每个模块以特定主题为核心，聚焦某一方向的知识点、技能点或实践活动。这种设计方式将复杂的学习任务系统化，用模块化的知识结构层层递进，循序渐进地提升学生的学习效果和综合能力，同时具备灵活学习的调整和扩展的特点。基于《现代测试技术》的课程和矿物加工工程专业的特点，对矿物加工工程《现代测试技术》课程进行教学模块化设计具有以下优势：（1）模块化设计有利于及时引入现代矿物加工领域的测试技术进展，如《现代测试技术》课程模块化设计可以通过设定特定技术模块、聚焦具体知识和技术、设计前沿专题和灵活扩展课程知识等多个方面，以解决课程内容更新滞后的问题。（2）将矿物加工工程实践与现代测试技术知识相结合进行模块化设计，如对矿物（如铝土矿、金矿、铁矿等）的物理化学性质进行综合分析，加强矿物的粒度分析、比表面积测定或矿物组分光谱分析等实践任务，将理论知识与实践环节逐层递进结合能够实现理论与实践的深度结合及提升学生实际操作和工程应用能力。（3）矿物加工工程专业课程《现代测试技术》采用模块化设计，可以根据模块内容合理分配教学资源、按模块需求灵活调配实验仪器集中使用数字化教学资源、对教学时间的高效利用等多个方面提高教学效率和质量。

1.3.2 模块设计原则和内容

矿物加工工程专业《现代测试技术》课程模块体系的构建，以工程教育专业认证理念为引领，紧扣本专业人才培养目标与毕业要求，统筹多重依据与原则，形成知识-能力-素养协同发展的课程架构。

矿物加工工程专业《现代测试技术》课程模块设计原则有：（1）理论与实践相结合，侧重基础理论知识讲解的同时，结合实际案例和实验操作，使学生既懂原理又能熟练应用；（2）系统性与前沿性并重，模块设置要涵盖矿物加工工程测试技术的基础方法，同时引入行业最新的测试设备和技术动态，拓宽学生视野；（3）能力培养为导向，课程设计注重培养学生的实际操作、数据分析、解决实际问题等能力；（4）模块化及递进式的结构使现代测试的知识体系更加容易理解和掌握；（5）结合企业实际案例和科研最新成果，能够实现理论知识、行业发展、科学研究等多个方面的协同培养。

矿物加工工程专业《现代测试技术》课程遵循基础理论-方法原理-仪器操作-工程应用的认知递进逻辑，结合专业特点系统构建 6 个模块化教学体系：（1）绪论模块，介绍现代测试技术的发展脉络及其在矿物加工全流程中的战略定位，确立物理特性、化学组成、微观结构与表面形貌的分类框架。（2）颗粒特征测试模块，聚焦激光粒度仪及图像分析技术，实现颗粒尺寸、形貌与组成的精准表征；（3）材料结构与成分分析模块，阐述 X 射线衍射、X 射线荧光光谱及扫描电镜-能谱联用技术，深化对矿物晶体结构、元素赋存状态及微区成分的解析能力；（4）表面性质与界面分析模块，集成 BET 比表面积测定、接触角测量、振动光谱分析及原子力显微镜（AFM），揭示矿物表面物理化学性质；（5）典型应用案例模块矿物加工及矿物材料合成实例，促进理论与实践的深度融合；（6）实验与实践模块贯穿样品制备、仪器实操、实验设计等方面，培养学生运用现代测试工具解决矿物加工复杂工程问题的综合素养与创新实践能力。

1.3.3 模块间的逻辑关系与教学计划

矿物加工工程专业《现代测试技术》课程模块体系以 OBE（Outcome-Based Education，成果导向教育）的理念为基础，遵循认知递进-能力进阶-素养内化的三层逻辑，形成从基础理论到工程实践的教学闭环链条[25]。课程的内在逻辑关系主要体现在以下具体方面：以绪论模块建立学科范式与技术分类框架，提供现代测试技术认识理论基础；从矿物材料宏观向微观逐层深入研究，展开颗粒特征测试、材料结构与成分分析和表面性质与界面分析三大核心的模块，解决物料宏观属性-物质化学结构-界面作用机理之间的科学问题，形成逻辑分明的技术方法；用典型应用案例模块将前述分散的知识点与矿物加工及矿物材料合成实践知识相互联系，完成从知识习得到实践应用的进一步跃迁；利用实验与实践模块，开展样品制备、仪器操作和综合性实验的设计，以实现理论知识与复杂工程问题解决能力的提升。在教学计划实施上，采取理论-实践、基础-综合和应用-创新的三层先后安排，理论学时着重理解现代测试技术原理与数据处理的技术规律，实验学时强化虚实结合与应用实景结合，确保各模块在知识传授上的逐层铺垫，及能力培养上的提升，最终达成知识、能力与素养三者的协同发展。课程模块化设计和教学关系图见图 1。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

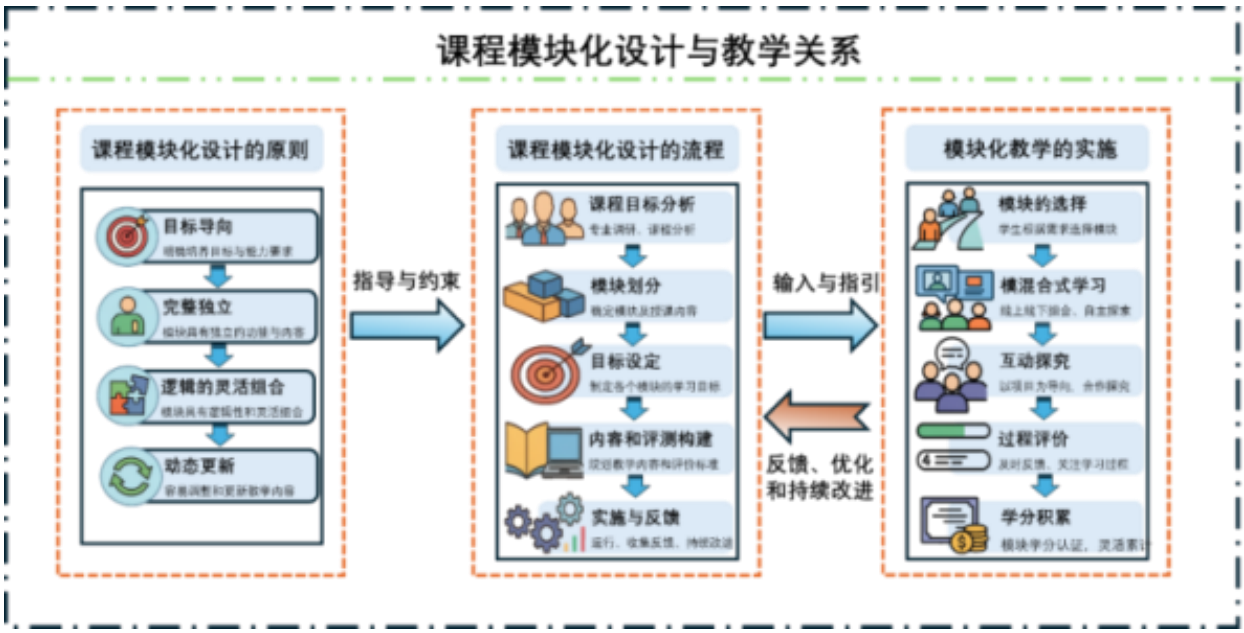


图 1　课程模块化设计和教学关系

2 矿物加工工程专业《现代测试技术》课程模块化教学效果评估与成效分析

对矿物加工工程专业《现代测试技术》课程模块化教学体系的运行逻辑与实施过程，课程的教学效果及成效可以从学习的达成度、能力培养的实效性、教学资源利用与教学模式优化和课程持续改进机制四个方面进行分析。

2.1 学习产出达成度及 OBE 的目标性达成

模块化教学显著提升了毕业要求指标点的达成度，通过绪论-颗粒-结构-表面-案例-实践的递进式认知链条，将抽象的毕业要求中运用现代测试技术解决复杂工程问题的能力进行可量化和可观测的解构。

从学习产出达成度及 OBE 的目标达成情况来看，模块化教学实现了知识结构的系统化重构和多元评价与达成度的量化。模块化设计突破了单一测试技术的限制，通过不同模块的相互衔接，引导学生构建从颗粒形貌（SEM，扫描电子显微镜）到晶体结构（XRD，X 衍射分析技术），并进一步到表面性质（Zeta 电位测定）的多方面知识关系脉络。这种系统性的认知方式使学生面对矿物加工工程的具体复杂工程问题时，能够自主制定物相鉴定-解离度分析-表面改性的项目示范性的测试方案，实现从知识记忆向工程应用的转化提升。引入多元化的评价体系，在矿物加工工程的典型应用案例模块中采用项目答辩制、在实践模块中引入操作规范性考核。通过课程模块化教学前后数据显示，实施模块化教学后，学生在测试方案设计合理性与数据结果工程解释两项指标的得分率较传统教学提升了约 20%～30%，有效解决了以往理论与实践结合较弱的痛点。

2.2 能力培养实效性及单一技术向复合型工程能力提升

模块化教学通过任务驱动与应用模拟的教学策略，有效促进了学生复杂问题解决能力和多技术整合能力的形成。典型的综合性项目，如尾矿有价组分赋存及资源利用潜力评估，要求学生串联矿物有价元素和物相分析、矿物嵌布关系、尾矿热物性等多种现代测试技术表征技术的应用和分析，模拟工业现实科研与生产流程，因而显著提升了学生的工程实践能力与方法论迁移能力。此外，课程设置中结合现代测试技术的物理化学原理加入前沿检测案例，如机器粒度分析、在线 XRF 监测和 X 射线光电选矿等新知识，使超过 85%的学生认为其对理解智能矿山检测环节具有明显帮助，反映出模块化体系在培养面向行业需求的前沿洞察力方面的作用。

2.3 教学资源利用效率的有效提高

《现代测试技术》课程的模块化教学能够实现弹性排课、学生分层教学、虚拟资源利用、和实验资源优化，有效缓和了测试仪器缺乏与课程课时受限之间的矛盾，其具体表现有以下三个方面：（1）课程单元模块的独立性可以根据实验实践教学机构的管理进行仪器预约及调整，可以分块进行理论联系实践的教学节奏；（2）网络教学与虚拟教学资源有效可以补充高级或稀缺的测试设备，如透射电镜 TEM、扫描隧道显微镜 STM、原子力显微镜等高端设

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

备的使用，可以有效保障教学内容的覆盖和教学安全；（3）课程模块有利于学生的分层考核，能够确保不同基础水平学生在不同难度的模块上获得知识和能力，有利于教学公平性与有限资源效率的兼顾。

2.4 模块化教学的持续改进及过程控制

《现代测试技术》课程的模块化教学将教学内容进行了模块化处理，使得课程单元模块成为了教学质量监控与持续改进的控制点。对于某一个独立的模块单元来说，其单元的教学反馈与评价可以使得课程的学习内容具有快速精确识别的可能，如原子力显微技术模块中往往存在实验数据难处理的情况，因此可以适当调整教学内容或增加有关原子力显微镜电子虚拟资源，进而形成基于该单元教学的持续质量改进。此外，不同单元模块的明确更有利于跨学科教师协同授课与产学研的联合指导，其在师资结构与教学深度的优化，交叉学科优势转化和系统工程分析能力的培养等多个方面具有明显的协同效应。

3 结论与展望

矿物加工工程专业的学生通过《现代测试技术》课程模块化教学改革能够在理论基础、教学方法和实践应用三个层面上强化课程教学目标的过程控制和教学结果的可评价性，进一步促进了矿物加工工程专业的学生对跨学科和复杂技术问题的解决能力的培养。以课程模块为单位，持续推进课程内容与实践前沿技术的对接，完善了基于学科评估与实践应用的结合，有利于实现该课程模块化教学的持续优化与教育目标的有效达成。

随着智能技术的迅速发展，《现代测试技术》课程将强化虚实融合实验教学体系的建设，开发更多基于实验实践情景的沉浸式学习模块。另外，进一步加强高校、研究单位和矿业企业的协同合作，以研究项目和企业案例库为基础，确保模块化内容始终与行业技术发展相匹配，持续为矿物加工及矿物材料工程行业培养具有系统思维和实践能力的新型人才。

基金项目：河北地质大学教学改革研究和实践项目“以科研思维为导向的《现代测试技术》课程教学改革与探究”（2024J53）；河北省创新创业教育改革项目“专创融合视角下高校创新创业人才‘渐进式’实践教学体系研究——以矿物加工工程专业为例”（2023cxcy130）。

[参考文献]

[1]Žibret G, Ducman V, Žibret L. Advances in Rock and Mineral Materials[J]. Materials,2025,18(24):5576.

[2]王琦,张泽朋,邓雁希.矿物材料及其复合材料的发展前景课程教学改革[J].中国冶金教育,2025(2):9-11.

[3]余圣.XRD-XPS 联合冶金催化材料微观解析创新应用[J].冶金与材料,2026,46(7):34-36.

[4]李萌,段智为.NaOH-Na_2CO_3 混合碱液刻蚀对复合材料粘接修复铝合金损伤结构的影响[J].复合材料科学与工程,2026(8):1-6.

[5]周大伟,陈留洋,刘超,等.基于双束系统的二维材料场效应晶体管 TEM 原位电学样品制备方法[J].电子显微学报,2026,45(2):150-156.

[6]罗进,刘云飞,吕忆农.用 TEM 分析材料在实验教学中的实践[J].实验室科学,2023,26(4):144-147.

[7]岳巧,李一夫,徐宝强,等.粗铅精炼除铜反应的热分析动力学[J].有色金属工程,2021,11(3):57-62.

[8]邓赛文,王祎亚,王毅民,等.中国 X 射线荧光光谱分析 65 年文献计量学研究[J].冶金分析,2025,45(9):1-14.

[9]涂湘林,张红,邓文峰,等. RESOlution 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用[J].地球化学,2011,40(1):83-98.

[10]赵文霞,胡育贤,廖成竹,等.电子探针中的 Map 图在矿物出溶体中的应用——以石榴石橄榄岩中橄榄石的矿物出溶体为例[J].中山大学学报(自然科学版),2004(5):95-97.

[11]许高双.高效液相色谱-串联质谱法同时测定土壤中 6 种大环内酯类抗生素[J].分析仪器,2026(3):48-52.

[12]王德维,徐圆,杨爽,等.磁固相萃取-高效液相色谱法检测环境水样中氟喹诺酮类抗生素残留量[J].分析科学学报,2026,42(3):334-340.

[13]Nassour C, Zacharauskas Z, Nabhani-Gebara S, etal. Development and Validation of an ICP-MS Method for the Detection of Platinum in the Lebanese Aquatic Environment[J]. Water,2022,14(17):2631.

[14]陶相博,朱婷,范战伟,等.三酸消解-ICP-OES 法测定金属矿废水 9 种重金属元素的方法研究[J].化工安全与环境,2026,39(7):81-85.

[15]丁宇升,高坤元,王华东,等.粉末冶金泡沫 Al-Si-Cu 发泡过程的微观结构演变[J].稀有金属材料与工程,2021,50(6):2134-2143.

[16]熊芬,姜思宇,吴隽,等.95%Ar+5%H2 气氛退火对 Ag/MoS2 和 Ag/BN/MoS2 薄膜形貌和结构的影响[J].人工晶体学报,2019,48(12):2186-2193.

[17]张晔宁.金相显微镜在钢材检测中实践应用[J].冶金与材料,2023,43(2):72-74.

[18]严定策,韩超,丁雨葵,等.高长径比探针在高分子纳米纤维膜原子力显微镜扫描上的应用[J].分析仪

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

器,2023(5):44-47.
[19]李晶,汪尔康.原子力显微镜及其在电化学和电分析化学中的应用[J].分析化学,1995(11):1341-1348.
[20]邹琛,汤敏,郑直,等.基于原位电子显微学的催化材料表界面活性位点设计[J].电子显微学报,2026,45(2):175-199.
[21]Alexander I. L, Bedil M., Konstantin A. D, etal. Raman and infrared studies of CdSe/CdS core/shell nanoplatelets[J]. The Journal of Physical Chemistry C,2021,125(12):6758-6766.
[22]方伟,赵雷,姜婷婷,等.《材料表征及测试技术》实验教学创新模式探讨:基于武汉科技大学材料化学专业[J].创新教育研究,2022,10(6):1218-1225.
[23]Cornford I. R. Ensuring effective learning from modular courses: a cognitive[J]. Journal of Vocational Education and Training,1997,49(2):237-251.
[24]周祖新,韩生,常光萍,等.综合化学实验模块化教学的尝试——以钛铁矿的综合利用为例[J].大学化学,2020,35(2):46-49.
[25]兰叶芳,刘登,吴海枝.《普通地质学》课程模块化教学及思维导图的应用[J].中国地质教育,2020,29(3):60-66.
作者简介：张旭（1982—），男，河北衡水人，讲师，博士，主要从事矿物加工工程、矿物材料和资源综合利用研究。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.