



# 粒度粒形仪在土力学实验教学中的应用

曹培<sup>1,2</sup>, 杨阳<sup>1,2</sup>, 张晓磊<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 如何充分利用大型仪器资源, 推动本科实验教学改革, 是大型仪器“开放共享”管理中的重要一环, 也是目前许多高校大仪管理中面临的挑战之一。结合大型仪器粒度粒形仪的工作原理和特点, 对其在本科土力学实验教学中的应用进行了有益的尝试和探索, 并取得了较好的效果, 为大型仪器在本科实验教学中的应用提供思路、积累经验。结果表明, 改进后的课程不仅内容丰富, 能够激发学生的学习兴趣, 有助于全面培养学生的动手能力和创新思维, 而且能够显著提升大型仪器的使用效益, 使其更好地为高素质人才培养服务。

**关键词:** 大型仪器; 粒度粒形仪; 实验教学; 本科生; 开放共享

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20230312](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20230312)

## Application of Particle Size and Shape Analyser in Experimental Teaching of Soil Mechanics

CAO Pei<sup>1,2</sup>, YANG Yang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaolei<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Taking full advantages of large-scale instruments to promote the reform of undergraduate experimental teaching is an important part of the “open sharing” management of large-scale instruments, and it is also one of the challenges currently faced by many universities in the management of large-scale instruments. Applying the large-scale instrument particle size and shape analyzer to the undergraduate soil mechanics experimental teaching and achieving the expected results is a beneficial attempt and exploration we have made. This provides a way and an experience for the application of large-scale instruments in undergraduate experimental teaching. The results achieved show that the improved course is not only rich in content, capable of stimulating students’ interest in learning, and conducive to comprehensively fostering students’ hands-on skills and innovative thinking, but also can significantly enhance the service efficiency of large-scale instruments, enabling them to better serve the cultivation of high-quality talents.

**Key words:** large-scale instrument; particle size and shape analyser; experimental teaching; undergraduate; opening and sharing

大型仪器设备的数量和质量是高等院校和科研院所科研实力和综合实力的重要标志之一, 也是高校创新人才培养和从事科研活动的必要物质基础。为了提高大型仪器设备的使用效益, 各大高校都在积极推进仪器设备的开放共享<sup>[1-5]</sup>。但是由于大型仪器造价昂贵、运行维护成本较高、操作使用较为复杂、数量有限等因素的制约, 仪器设备的开放共享主要面向教师和研究生的科学研究, 以科研服务为主, 而针对本科生的实验教学则较少涉及<sup>[6-8]</sup>。这种“重科研轻教学”的开放管

理方式, 不仅影响了大型仪器功能和价值的有效发挥, 而且限制了本科生接触到最前沿、最先进实验技术的机会, 不利于新型工科技术人才的培养。因此, 如何充分利用现有的大型仪器设备资源, 推动本科生实验教学的改革, 已逐渐成为本科生实验教学的热门研究课题<sup>[9-11]</sup>。

粒度粒形仪是一种基于光学成像原理快速测量颗粒大小和粒形的分析仪器, 近年来在岩土、建材、制药、食品、化工等行业中应用较为广泛。同济大学岩土及地下教育部重点实验室于 2017 年

收稿日期: 2023-06-24

基金项目: 同济大学第十五期精品实验项目(2022)。

作者简介: 曹培, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程宏观测试技术与实验教学方面的研究。E-mail:

[pcao@tongji.edu.cn](mailto:pcao@tongji.edu.cn)

引进了一台粒度粒形分析仪(型号 QICPIC),用于各种岩土材料粒度和形状参数的分析。与传统的颗粒分析方法相比,粒度粒形仪综合了经典的光学原理和现代图像信息采集技术,具有测试速度快、重复性较好、操作简便和容易掌握等诸多优点。为了丰富本科实验教学的方法和手段,提升本科生的科研能力,将粒度粒形分析仪引入本科生的实验教学,并在教学过程中进行积极探索。本文介绍了粒度粒形分析仪在我校本科生土力学实验教学中的应用情况,旨在为大型仪器在本科实验教学中的应用提供思路和经验。

## 1 QICPIC 粒度粒形仪的工作原理与特点

粒度粒形仪是基于光学成像原理和动态图像分析技术进行颗粒分析的仪器,不仅可以测量样品的颗粒粒径分布,而且可以获得每个颗粒的形状参数。它利用光束扩束器将高频脉冲光源发出的脉冲光调整为平行的脉冲光,当分散好的试样通过泵送系统流经测试区域时,脉冲光会照射在分散好的单个颗粒上,经过特殊的光学成像系统,在极短的时间内得到每个颗粒的清晰图像<sup>[12-13]</sup>。大量颗粒图像经过数据处理和统计后,即可得到试样的粒径分布结果和颗粒的形状特征。其工作原理示意图如图1所示。本实验室的 QICPIC 粒度粒形仪的测量范围为 1.0~2000.0  $\mu\text{m}$ ,采用高级脉

冲光源,脉冲间隔 $\leq 1 \text{ ns}$ ,高速成像系统具有  $2048 \times 2048$  像素的分辨率,图像采集速率最高可达 225 幅/秒,使其能在极短的时间内捕获数万至数百万个颗粒的图像,确保了测试样本的密集度和总量充足,从而使得测试结果具有代表性。

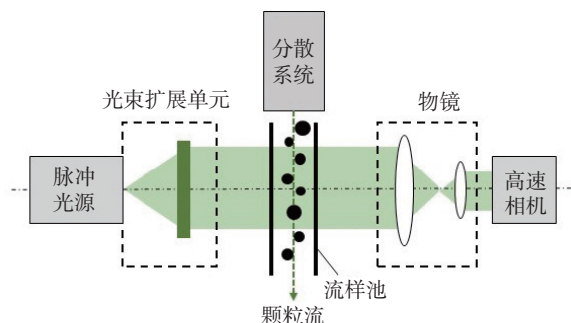


图1 QICPIC 粒度粒形仪工作原理示意图

在土工颗粒分析试验中,目前比较常用的方法有筛分法、沉降法(包括密度计法和移液管法)、激光法和动态图像分析法。其中,筛分法和沉降法是国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[14]</sup>推荐的传统粒径测量方法,也是土力学实验中常用的试验方法。而激光粒度仪法和动态图像分析法则近年来新兴的粒径测试方法,随着测试技术的不断成熟和仪器成本的降低,在岩土工程领域得到了持续的应用和推广。这几种方法的测试原理和特点如表1所示。

表1 不同粒径测试方法的基本原理和特点

试验方法	测量范围	基本原理	技术特点
筛分法	大于0.075 mm的颗粒	使颗粒通过不同尺寸的筛孔来测试粒度的大小和分布	简单、方便、易操作。受颗粒形状不规则等因素的影响,存在筛分不完全的现象
沉降法	小于0.075 mm的颗粒	Stokes定律,根据不同粒径的颗粒在液体中沉降速度不同来测试粒度的大小和分布	测试时间长、操作繁琐、重复性较差、受人为因素影响大
激光粒度仪法	可达0.1~3 500.0 $\mu\text{m}$ 甚至更宽	根据颗粒能使激光产生散射这一物理现象,测量散射光的分布规律,利用Mie散射理论计算出颗粒的粒度大小和分布	测试速度快、操作方便、重复性好,测试结果易受遮光度等因素的影响
动态图像分析法(粒度粒形仪法)	通过选择不同的镜头组合和分散方式组合获得较大的测试范围,可达1~34 000 $\mu\text{m}$ 甚至更宽	利用频闪捕捉技术,大量拍摄运动颗粒图像,通过动态测试和图像处理分析颗粒的粒度和粒形	测试速度快、操作方便、重复性好,不仅能够得到颗粒的粒径分布,而且能够获得颗粒的物理形态特征

## 2 粒度粒形仪的实验教学应用

### 2.1 实验课程现状

土力学实验是土木工程本科生必修的实践教学环节,不仅能够帮助学生加强对理论知识的理解与掌握,而且能够培养学生的动手能力、科研与创新能力。颗粒分析试验是土力学实验中重要

的基础性一环,旨在使学生掌握土颗粒的粒径划分和颗粒级配测试方法,以及根据粒径分布对土体进行分类和命名,为研究土体的物理力学性质打下基础。该项目的教学时长为2学时,教学中一直沿用的试验方法是传统的筛分法和沉降法,虽然这些方法比较成熟和完善,但同时也存在方法枯燥、理论基础比较陈旧、与现代测试技术发

展不匹配等问题,因此不能有效激发学生的学习兴趣,影响实验教学效果。由于沉降法测试时间较长,无法在有限的课时内完成操作,因此在实际的教学中学生只能进行筛分法的操作。筛分法的操作较为简单,实际教学中学生往往很快就能完成操作,动手操作时长较短,学生的参与度和获得感不高。

粒度粒形仪简单、快速的优点使其成为颗粒分析实验教学的有力补充。为了让本科生接触先进的测试分析方法,及时了解最新的学术动态,将粒度粒形仪引入了实验教学课堂,将先进测试方法和传统测试方法进行有机结合,以便有效地拓展实验教学的边界和范围,为学生提供更先进、高效的教学资源。

## 2.2 实验课程的改进与实施

根据教学方式,可将粒度粒形仪在本科实验

教学中的应用分为基础性教学和探究性教学两种形式,其中基础性教学是指面向所有本专业本科生的专业基础实验教学,以引导学生了解并掌握先进的测试技术、认识和亲身体验高端的仪器设备为教学目标,教学侧重于基础知识的奠定与实践能力的培养;而探究性教学主要面向学有余力的本科生,结合开放性实验、选修课、导师制项目和大学生创新项目等形式开展,以培养学生解决问题的能力及创新能力为教学目标,教学侧重于助力学生未来在科研领域的成长与发展。本文主要介绍粒度粒形仪在本科基础性实验教学中的应用。

在本科基础性实验教学中,综合传统颗粒分析试验方法和粒度粒形仪方法的特点,将粒度粒形仪的应用在课前预习、课堂教学和试验报告 3 个方面融入原有的教学内容,对实验教学内容进行优化设计和改进,如表 2 所示。

表 2 改进后的实验教学过程

流程阶段	教学内容		培养目标提升
	改进前	新增内容	
课前预习	实验指导书的自习	微课视频预习,包括粒度粒形仪的介绍、工作原理和实验步骤	培养学生的探索精神、思考能力和自主学习的能力
课堂教学	① 讲解演示 ② 完成筛分法操作 ③ 存在的问题和解决办法	粒度粒形仪的测试操作两种类别的土样测试组间数据共享	培养学生实验操作的规范意识、记录数据的规范意识及严谨的科学态度
试验报告	① 筛分试验测试结果 ② 成果应用	① 粒度粒形仪的测试结果 ② 两种方法测试结果差异性对比分析 ③ 不同土样测试结果对比分析 ④ 讨论分析试验中的问题	培养学生分析问题和解决问题的能力、理论联系实际的应用能力

在课前预习阶段,通过课程群发布微课程视频,让学生通过视频预习,对试验目的、试验原理、试验仪器、仪器的工作原理和使用方法、试验步骤等内容有基本的认识 and 了解,同时引导学生去思考试验中可能会存在问题,如“使用不同的测试方法对同一样品进行测试,其结果是否会产生差异?”“如果有差异,产生的原因是什么?”“影响粒度仪测试结果的因素有哪些?”等,以培养学生深入思考的意识和能力。

在课堂教学中,首先通过讲解和演示,使学生深入理解和掌握实验项目的主要内容、传统实验方法和粒度粒形仪法的操作要点和难点;其次,在老师的指导下,让学生带着问题和思考分组完成实验项目的测试。通常情况下,每个实验教学班级最多有 30 名学生,人多仪器少,因此采用分组操作,将全班学生分为 5 组,每 6 人分为

1 个大组,每大组分为 2 个小组,每 3 人 1 个小组。在学生动手操作环节,第 1 大组先进行粒度仪试验操作,而其他 4 大组同学则按小组同时进行筛分法试验操作。当一个小组操作粒度仪时,另一个小组在旁观摩,在观摩中学习和思考,在操作中思索和进步。在实验过程中,教师随时观察并记录学生的实验操作情况,并对学生在实验中的表现进行及时评价与反馈,指出存在的问题并给出改进建议。我们为学生精心准备了两种不同的土样,每个小组从中选择一种进行测试,需分别采用筛分法和粒度仪法这两种不同的方法。实验结束后,大组内进行数据共享,确保每个小组均可以获取两种不同试样的筛分法和粒度仪法的测试结果。这样可以为学生提供较为全面的数据资料,促进后期试验数据的整理与分析工作。

试验结束后,学生对得到的测试结果进行处

理分析,完成报告编写,内容不仅包括测试结果,还要对两种方法及两种土样的测试结果进行对比,对试验过程中发现的问题进行深入地分析和讨论。

改进后的实验教学,内容丰富、课时饱满,不仅能够让学生深入理解实验项目的原理、步骤、潜在影响因素及实际应用,培养其全面把握实验项目的能力,而且使学生接触到先进的测试技术,不断提升其实验技能和创新能力,为开展探究性与创新性实验开拓思路。

### 3 粒度粒形仪土力学实验教学案例和思考

#### 3.1 实验教学案例

学生利用筛分法和粒度粒形仪(QICPIC)测定的两种砂性土的颗粒大小分布曲线如图2所示。从图中可以看出,粒度粒形仪法得到的数据点数量远多于筛分法,两种方法得到的级配曲线变化趋势基本一致,但测试结果有所偏差:筛分法的测试结果偏细,粒度粒形仪法的测试结果偏粗。

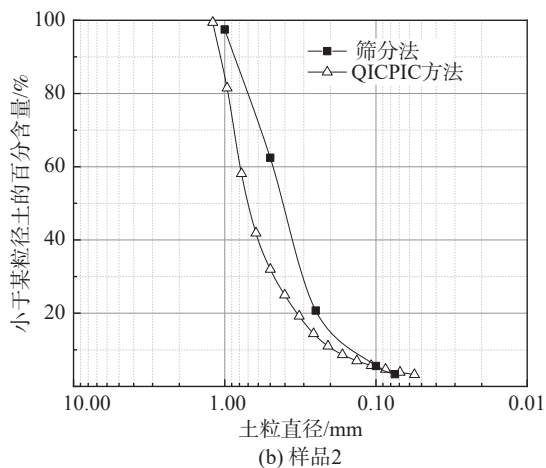
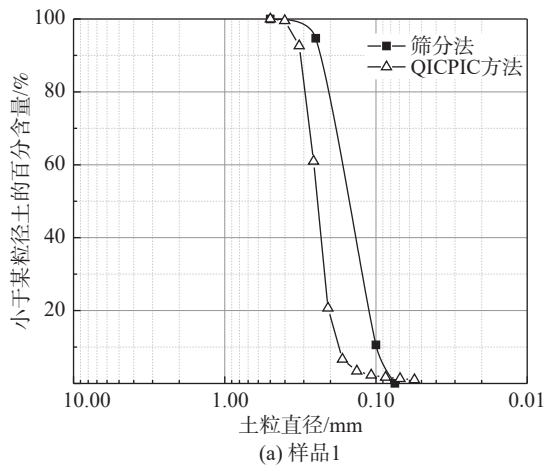


图2 筛分法与粒度粒形仪法颗粒级配对比图

两种方法测试结果的特征粒径( $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{50}$ 和 $d_{90}$ )对比情况如图3所示,可以看出两种测试结果差距明显:有效粒径 $d_{10}$ 普遍相差的较小,而 $d_{30}$ 、 $d_{50}$ 和 $d_{90}$ 则普遍相差较大;1号样由于级配比较均匀,粒径分布范围比较窄,两种方法测得的有效粒径相对误差较小。

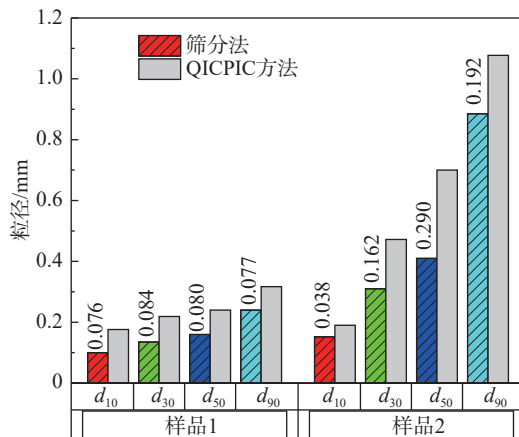


图3 筛分法与粒度仪型仪法特征粒径对比图

两种方法粒组测得的不同粒组的百分比含量对比结果如表3所示,并根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[15]</sup>中相关规定,对测试样品进行命名。从表中可以发现两种方法得到粒组含量相差较大,尤其是样品2甚至影响土的命名。

造成以上这些差异的根本原因是两种方法的测试原理不同。在筛分法中,测得颗粒的直径由其能通过的最小筛孔的孔径决定,但对于不规则土颗粒来说,在筛分振动作用下,只要颗粒在某个方向上的长度(或宽度、高度)小于筛子的孔径,就有可能通过筛孔,因此筛分测得结果可能偏小。对粒度粒形仪而言,颗粒直径是根据图像等效投影圆的半径而得,研究表明<sup>[16]</sup>不规则形状的颗粒其投影面积通常比相同体积球体的截面大,因此测量结果会偏粗。样品的粒径分布范围,对两种方法的测试误差也有影响,粒径分布范围越窄,颗粒越均匀,两种方法之间的误差越小,如样品1。

通过QICPIC,除了能够得到样品的颗粒组成外,还可以对样品进行形状分析,样品1的部分颗粒图像及对应的Feret径、球形度、长宽比、凸度等形状参数如图4所示,这些信息对于学生深入认识和准确理解土体宏观力学表现与其微观结构组成之间的关系具有极其重要的帮助。

表 3 两种方法测试结果的定量比较

试样编号	测试方法	粒组在土中所占的百分比含量/%					土样名称
		>2.000 mm	2.000~0.500 mm	0.500~0.250 mm	0.250~0.075 mm	<0.075 mm	
1	筛分法	0	0	5.28	94.68	0.04	细砂
	QICPIC	0	0	39.03	59.65	1.32	细砂
2	筛分法	0.19	37.37	41.73	17.36	3.35	中砂
	QICPIC	0	68.03	17.56	10.55	3.86	粗砂





	EQPC 197.991 μm FERET_MAX 241.003 μm FERET_MIN 189.827 μm Sphericity 0.392 Aspect ratio 0.788 Convexity 0.866 Image number 46		EQPC 204.748 μm FERET_MAX 258.708 μm FERET_MIN 199.138 μm Sphericity 0.362 Aspect ratio 0.770 Convexity 0.835 Image number 93
	EQPC 205.310 μm FERET_MAX 246.838 μm FERET_MIN 198.266 μm Sphericity 0.415 Aspect ratio 0.803 Convexity 0.872 Image number 3		EQPC 210.888 μm FERET_MAX 252.751 μm FERET_MIN 213.989 μm Sphericity 0.389 Aspect ratio 0.847 Convexity 0.854 Image number 54

图 4 样品 1 部分 QICPIC 实测颗粒图像

### 3.2 实验教学效果评价

通过教学实践发现, 粒度粒形仪的引入不仅丰富了实验教学内容, 而且拓宽了学生的科研视野, 激发起学生更浓厚的学习兴趣。通过不同的实验方法对土样的颗粒组成和形状参数进行研究, 加深了学生对于土颗粒基本组成的认识与理解, 为土力学这门应用学科的学习打下了坚实的基础。

基于对粒度粒形仪的学习和两种方法的对比分析, 学生能够对传统的实验报告进行优化和改进, 在确保实验数据处理的规范性和完整性的同时, 更聚焦于对实验结果的分析 and 讨论。这一转变不仅激发了学生的科研思维与意识, 也显著提升了学生的设计分析能力, 为学生后续学习和研究的顺利开展形成良好的助力。

为了更精准地把控学生的实验操作环节, 当前教学操作中仅提供了两种粒径组成的样品, 导致测试结果对比的丰富性不足。在后续的教学过程中, 计划适当增加样品的种类与数量, 为学生提供更加多样化的选择, 以进一步提升他们的实验分析与对比能力。

### 3.3 对大型仪器共享的作用

粒度粒形仪在本科实验教学中的应用, 虽然增加了仪器的管理和运行成本, 但是大幅增加了仪器的使用机时, 使仪器工作量逐渐饱满, 提升了大型仪器的使用效益, 充分发挥了仪器本身的

应用价值。在本科实验教学中发现问题, 能促使仪器管理员去进一步探索仪器的潜能, 进行相应的改造或优化, 提高仪器的工作性能, 反哺科研。相应地, 为了保障科研和本科实验教学的顺利进行, 对大型仪器的管理和维护也提出了更高的要求, 从而促进实验教师提升仪器管理能力和水平。

### 3.4 实验教学的思考

尽管大型仪器为教学带来了显著优势, 但同时也浮现出一些不容忽视的问题, 这些问题需要我们进行深入反思并采取有效措施加以改进。

1) 大型仪器的购置和维护成本都比较高, 而且往往台套数有限, 一旦仪器发生故障, 将直接对科研和教学活动产生不利影响。实现大型仪器在本科实验教学中的长期应用, 关键在于有效降低应用成本。所以上机操作前, 要对学生进行充分的培训, 要求学生充分熟悉操作要领后再进行操作, 并且要严格遵守操作程序。这既可以有效减少因操作不当导致的仪器损坏风险, 还有助于培养学生严谨的科学态度与规范的操作习惯。此外也要求实验老师和管理老师加强对仪器的维护保养, 通过定期检查、清洁与校准, 确保仪器始终处于最佳工作状态, 同时建立合理的零配件储备机制, 以便在仪器出现轻微故障时能够迅速响应、及时修复, 最大限度地保障科研与教学活动的连续性与高效性。

2) 在实验教学中紧跟仪器技术的革新步伐, 并维持教学内容的前沿性, 对于提升教学质量和激发学生的创新能力具有至关重要的作用。为此, 教师应保持对新技术、新仪器的敏锐感知力, 及时了解并掌握最新的仪器技术和测试手段, 加强与其他高校或科研机构在实验教学方面的交流与合作; 根据学科发展和社会需求, 灵活调整和更新实验教学内容, 将最新的仪器技术和应用案例融入实验教学体系中。即便暂时无法直接为学生提供实际操作新仪器的机会, 也可以利

用网络资源、视频资源或虚拟实验等方式,为学生提供丰富的前沿学习资源,够拓宽学生的视野,激发他们的学习兴趣和创新能力,从而全面提升学生的综合素质。

#### 4 结束语

本文充分利用实验室现有的大型仪器资源,结合粒度粒形仪的独特优势,将其应用于本科生土力学实验教学,为大型仪器在本科实验教学中的应用提供了新的视角和实践方法。通过粒度粒形仪在本科教学中的应用,极大地调动了学生的学习积极性和主动性,不仅丰富了实验教学内容的深度和广度,还拓展了学生的科研视野,为培养兼具实践能力和创新能力的高素质工科人才奠定了坚实基础。同时,此举也显著提升了大型仪器的使用效益,充分发挥了仪器的应用价值。

#### 参考文献

- [1] 辛良,陈义林,吴刚,等.大型仪器面向本科生开放提高学生创新实践能力[J].实验技术与管理,2019,36(11):294-298.
- [2] 刘时铸,曾荣华,胡小刚,等.化学类大型仪器用于本科实验教学探索[J].实验室科学,2020,23(4):195-198.
- [3] 姚青倩,卢媛,陈翠红,等.新工科背景下利用大型仪器平台的实验教学实践[J].实验室研究与探索,2022,41(5):226-229.
- [4] 齐之锴,吕俊敏,李鹏,等.大型仪器在高等学校本科教学中的应用[J].宁夏大学学报(自然科学版),2021,42(4):473-476.
- [5] 雷玉珍,王美荣,胡胜鹏,等.基于高校大型仪器的创新型人才培养实践与探索[J].实验室科学,2022,25(4):160-163.
- [6] 潘越,农春仕.浅析高校大型仪器共享平台建设中的问题及思考[J].实验技术与管理,2020,37(3):259-261.
- [7] 李哲煜,陈忠林,沈吉敏,等.大型仪器教学中培养研究生科研素质的探索[J].实验室研究与探索,2021,40(6):183-186.
- [8] 庄林岚,徐晓丽,张建,等.工程教育认证背景下本科生教学实验设计思考[J].高教学刊,2022(19):1-4.
- [9] 赵利容,施钢,曾珍.以培养和提高学生自主学习和思考能力为教学目标的实验教学设计[J].实验科学与技术,2022,20(6):61-64.
- [10] 彭宇,钱匡亮,朱斌.大型仪器 XCT 在本科生探究性与创新性实验中的应用[J].实验室研究与探索,2022,41(1):241-244.
- [11] 汤海峰,刘艳,闫国栋,等.开展线上线下混合式教学助推大型仪器面向本科生开放[J].实验技术与管理,2020,37(11):174-177.
- [12] 刘俊峰,金瑞琴,李静.QICPIC 粒度粒形分析仪及其在黄河泥沙测试中的应用研究[J].水利信息化,2013(5):40-44.
- [13] 赵旭锋,贾建军,王欣凯,等.新型动态激光粒度粒形仪分析结果的对比与评价[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(6):175-184.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [16] 马杰.激光粒度分析仪在土工颗粒分析试验中的应用[J].土工基础,2022,36(3):466-470.

编辑 钟晓