



CT 三维扫描与 3D 打印技术的矿山岩石力学 与工程实验教学中的应用研究

孙金海^{1,2}, 明 建^{1,2*}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对矿山岩石力学与工程实验教学中存在的问题, 基于 CT 三维扫描和 3D 打印机等前沿实验技术在实验教学过程中具有的优势, 构建了实验理论与实践的交叉融合教学模式, 并将其应用于矿山岩石力学与工程的实验教学。教学实践表明, 该教学模式能够有效地促进学生学习实验原理和参与实验的积极性, 强化学生对矿山岩石力学实验理论和方法的理解和掌握, 提高学生的综合实践能力, 并对矿山岩石力学与工程实验教学的设计和开展进行了研究和探索。

关键词: 矿山岩石力学; CT 扫描; 三维重构; 3D 打印

中图分类号: TD853.36

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20210509](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20210509)

Study on the Application of CT Scanning and 3D Printing Technology in Experimental Teaching of Mine Rock Mechanics

SUN Jinhai^{1,2}, MING Jian^{1,2*}

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of problems existing in the experimental teaching of the mine rock mechanics and engineering, based on the advantages of cutting-edge experimental technologies such as CT scanning and 3D printing technology, the instruction model integrating theory and practice is constructed and applied to the experimental teaching of mine rock mechanics and engineering. The teaching practice has shown that the instruction model can effectively promote the students' enthusiasm for participating in experiment and studying the experimental principle, which improves students' mastery level and comprehensive practical ability of rock mechanics experiment theory and method.

Key words: mine rock mechanics; CT scanning; 3D reconstruction; 3D printing

实验教学是高等学校培养学生实践和创新能力的有效手段, 在课程设计中力求利用实验教学环节使学生有机会接触到更多的前沿技术, 拓宽视野, 激发兴趣, 增强合作意识^[1-2]。

矿山岩石力学与工程课程是采矿工程专业开设的基础必修课程, 其课内实验内容多、实践性强。国内很多学者和实验技术人员对岩石力学相关课程的改进进行了很多有益的尝试。如在采矿工程专业的岩石力学实验教学中引入差异性教学法, 并对岩石力学试验项目进行优化组合^[3]。基于

数值试验的地矿类专业岩石力学实验教学改革的整体思路, 通过引入数值模拟把岩石破坏过程中的应力场、位移场直观地展现给学生^[4-5]。广东海洋大学将 3D 打印技术引入材料科学与工程专业实验教学过程中, 从而实现理论与实践的交叉融合^[6]。3D 打印技术被引入武汉理工大学和河南理工大学的实践和工程训练实训课程中, 有效地激发了学生的兴趣和创新能力^[7-8]。此外, 也可将两种技术相结合, 应用 CT 技术扫描重构岩石力学试件的破坏裂隙面的三维模型, 再应用 3D 打印技术制备裂隙

收稿日期: 2021-10-12; 修回日期: 2022-03-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费(FRF-OT-16-015SY)。

作者简介: 孙金海(1965-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事采矿工程与岩土工程方面的研究。

* 通信作者: 明建(1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事采矿方法和数字矿山方面的研究。E-mail: mingjian@ustb.edu.cn

面模型或具备特定破坏特征的岩样模型^[9-11]。河南理工大学将CT技术引入安全工程专业本科生的矿山岩石力学相关实验教学中,向学生讲授了受载煤岩裂隙结构演化规律^[12]。中国石油大学(华东)采用CT技术建立真实的数字岩心模型,建立其岩石孔隙网络模型,然后利用3D打印技术建立传统方法不可见的真实模型,最后将打印出的实物模型应用于本科的实验教学^[13]。东北大学将单轴压缩实验过程中的应力-应变数据和声发射信息,与试件和破裂面的三维模型集成至同一虚拟场景中,从而为学生提供一种岩石破裂演化过程的可视化手段,并实现该过程中声发射事件的动态模拟显示^[14]。有研究者将数字散斑相关方法(digital speckle correlation method, DSCM)应用于岩石力学实验的试件表面的位移和形变的观测过程中^[15-17]。

综上所述,矿山岩石力学与工程实验教学的改进方向是要设计出开放性、前沿性、创新性的实验内容^[18-20]。课程设计要将传统的演示型、验证型实验与探究型实验相结合,从而补充和完善现有的实验教学模式和内容,进而充分激发学生的主动精神和主体作用。从学生角度而言,即将相对被动的学习模式转化为更主动的和更具探索精神的学习模式。由于岩石的不可透视性,在传统的岩石力学课程中学生仅能够观察完整的受载岩样表面的裂隙形态,却无法了解完整岩样内部裂隙的具体结构。而通过采用CT技术对裂隙岩样进行扫描和三维重构,学生可以直观地观察岩样内部裂隙的形态。进而可以通过3D打印技术精确地复制裂隙模型,制备出一定数量具有相同裂隙结构的岩样模型,为进一步的学习和研究提供基础。本教学研究将高分辨X射线三维扫描成像系统、彩色石膏粉末3D打印机、岩体破裂定位及超声波测试系统和冲击动态测试与仿真系统等设备应用于矿山岩石力学与工程的实验教学过程中,力求将相对被动的学习模式转化为更主动的和更具探索精神的学习模式。

1 实验教学的原理与方法

矿山岩石力学与工程是一门具有很强理论性和实践性的专业基础课程,理论与实践相结合的教学方式一直是课程建设的着重点,本教学研究主要加强了岩石弱面性质相关的测试理论与实践的教学内容。在采矿工程实践过程中经常会遇到

节理岩体,其通常由自然形成或开挖卸荷产生。由节理引起的岩体的不连续性、非均质和各向异性,极大增加了其力学特性的复杂性。该类岩体的强度和变形特性对井下工程的稳定性具有非常重要的影响。因此本课程设计以节理岩体为研究对象,将前沿的实验技术与传统的教学目标相结合,力求拓宽学生视野,激发学生学习兴趣,提高学生科学研究能力为目的。

实验教学中首先对岩石试件施加峰前卸载过程,其后应用CT三维扫描技术对其进行扫描和重构,建立其卸荷破坏裂隙面的三维模型;再应用3D打印技术打印出模拟节理,进而制备出含节理类岩石材料试件;最后应用声发射技术和数字散斑相关方法对含节理试件进行单轴压缩实验。通过对实验过程和数据进行分析,学生能够了解含不同类型节理试件的强度和变形破裂特征。

矿山岩石力学与工程课程中原有的实验内容仅为岩石抗压、抗拉、抗剪等基础岩石力学实验。本教学研究将CT三维扫描技术和3D打印技术引入矿山岩石力学与工程实验教学过程中,加强了实验课程中理论与实践的交叉融合。将前沿技术引入实验课程,充分利用了实验室的现有条件,发挥了实验设备的优势和潜能,提高了实验课的教学效果和学生的工程实践能力,并能够启发和激励学生的创新意识和创新思维,从而满足创新型人才的培养需求。

本实验教学的开展依托北京科技大学土木与资源工程学院实验室的教学设备和设施,其中包括新建立的岩石微观分析实验室的CT三维扫描设备和彩色石膏粉末3D打印机。在该实验室建立前,教师和学生需要将岩样送至医院进行CT扫描,虽然费用较低但无法组织大量学生前往学习。实验室建立后,学生可在教学楼内进行分组教学和实验,不但提高了教学效率,还有效地降低了教学费用。而且以上设备均列入北京科技大学仪器设备共享管理平台的设备名录中,可向其他学院和学校提供服务。

2 含节理试件的建模与制备

在本教学环节,为模拟矿山井下掘进和开挖井下工程过程中围岩的卸载破坏过程,首先对试件开展加荷和峰前卸荷破坏实验,然后采用CT三

维扫描技术对卸荷破坏后的试件主裂隙面进行扫描和三维重构,再基于其三维模型应用 3D 打印技术进行打印,最后采用相似材料浇筑方法将打印出的模拟裂隙预制在类岩石材料中。

2.1 高分辨 X 射线三维扫描成像系统扫描建模

制备含节理岩体试件首先要确定节理面的形态和厚度,为精确获取岩样卸荷裂隙开度,本教学研究采用北京科技大学土木与资源工程学院的高分辨 X 射线三维扫描成像系统对不同卸荷条件下岩样进行三维扫描,然后运用软件进行模型三维重构,指导学生对岩样内部裂隙的发育特征和开度进行分析。高分辨 X 射线三维扫描成像系统及扫描结果如图 1 和图 2 所示。

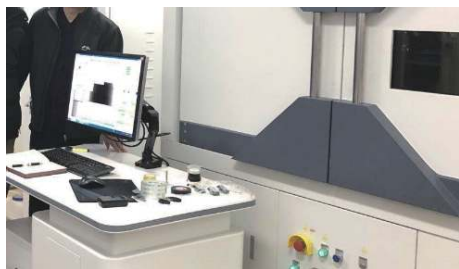
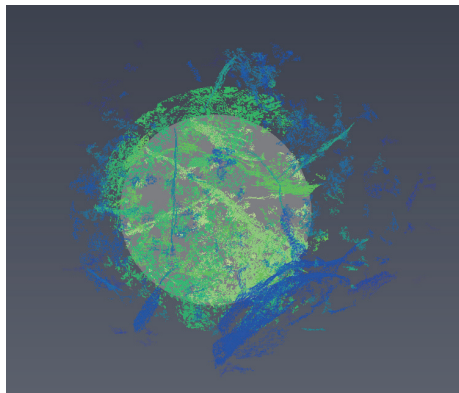
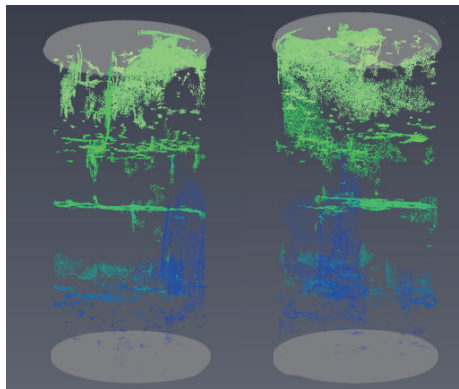


图 1 高分辨 X 射线三维扫描成像系统



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图 2 岩样卸荷裂隙的扫描结果

2.2 彩色石膏粉末 3D 打印机制作模拟节理

3D 打印技术可以更为便捷、均一地制备出类岩石材料物理模型,因而其能够在岩体力学与工程实验教学过程中发挥重要的作用。该技术已经成为快速准确地建立含复杂结构的类岩石材料物理模型的新方法。

在课程教学改革初期,教师采用熔融堆积打印方式的 3D 打印机,将 PLA 高分子塑料作为打印材料。该类打印机虽然成本低廉,但打印材料特性与岩石节理裂隙填充物的特性相差较大,从而不能完全模拟实验原型的物理力学性质。因此在后期教学中主要应用彩色石膏粉末 3D 打印机对岩石试件的卸荷破坏裂隙面进行打印制备。其实验步骤为:首先根据不同的研究目标,应用建模软件制作待打印岩样的三维数字模型并将其拷入主控机;主控机根据岩样数字模型的截面轮廓信息对打印喷头进行控制,在 3D 打印机的工作台面上平铺的打印材料对模型截面实体部分所在的位置喷射粘结剂,使该部分粉末颗粒粘结在一起;当本层打印材料粘结完毕后,3D 打印机的成型缸将下降一个分层的厚度,3D 打印机的供粉缸将一定量的打印材料粉末推至成型缸,铺平并压实,再根据数字模型下一截面的轮廓信息,有选择地喷射粘结剂建造层面。如此周而复始地送粉、铺粉和喷射粘结剂,直至打印出实体模型。打印完成后,清扫模型表面的余粉,在试件表面刷无色胶以增加试件强度。

2.3 制备含 3D 打印节理面的试件

制备含 3D 打印节理面试件的难度在于如何使模拟节理面在类岩石试件浇筑过程中不发生偏移,从而使其能够按照实验方案设计以相对准确的位置和倾角位于试件中。模具由基座、筒身和上环箍盖组成,筒身内径为 50 mm,高度为 100 mm,模拟节理面在试件中倾角为 α 。

在本教学环节中,首先指导学生将模具组装好,将模拟节理面置入模具并设定位置和倾角;然后按照设计的材料配比称量实验材料和水,将其搅拌均匀;再将设计数量的模具置于振动台上,将搅拌好的实验材料均匀倒入其中,抹平端面后振动;浇筑好的试件置入水泥砂浆养护箱 24~48 h 后,取出拆模,编号后重新送入水泥砂浆养护箱内进行养护,养护时根据井下实际环境设置养护过程的温度和湿度;养护完成后,用砂纸对试件端

面打磨处理,从而降低由于试件端部不平整对实验结果准确性的影响。

3 含节理试件强度与变形实验

在本教学环节,为了获得不同尺寸、倾角的节理对试件的力学性质和变形破坏模式的影响规律,对其进行了单轴压缩实验。在试件加载过程中,采用声发射技术监测试件内部的声发射信号和数字散斑相关方法监测试件表面位移场和应变场。

3.1 岩石破裂定位及超声波测试

为了使能够更深入地理解岩石试件的破坏过程和演化步骤,本研究将宏观力学加载实验与微观岩体声发射监测实验相结合,学生通过采集声发射信号和定位声发射事件,更加深刻地理解加载过程中试件从破坏点到破坏面过程信号的变化情况^[19]。

教学中主要应用岩体破裂定位及超声波测试系统连续地、实时地监测载荷作用下岩石试件内部微裂纹的萌生和扩展,并进行破裂定位。通过将不同加载阶段岩石试件声发射的活动特性与破裂定位信息相结合,学生能够了解岩石试件内部微裂纹萌生、扩展、成核和贯通的三维空间演化过程。学生还能够应用该系统采集和存储岩体破裂过程中的声发射信号,并对其进行解译和分析,从而确定声发射波速和破裂位置,解译结果最终通过可视化界面进行显示。该技术能够辅助研究者从岩体破裂机制的深层次角度对岩石力学问题进行研究,可应用于矿山井下工程围岩体、支护体等破裂失稳机制研究。岩体破裂定位及超声波测试系统主要构成如图3所示。

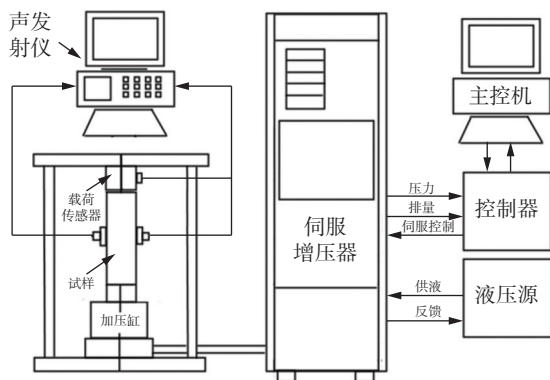


图3 常规声发射实验系统

其实验步骤为:首先指导学生使用热缩膜将试件包裹,将声发射探头涂耦合剂固定于岩石试

件表面,将试件置于实验机的压力仓内;预先给试件施加较小的轴向力,然后将围压加载至设定值,保持围岩稳定;调整试验机和声发射监测系统的初始时间,以稳定的加载速率对试件施加轴向载荷,直至试件破坏实验结束;实验过程中记录其声发射信号。试件所受的载荷和产生的声发射信号同时输入岩体破裂定位及超声波测试系统,处理后系统给出声发射信号随载荷变换的关系曲线图。

3.2 数字散斑相关方法实验

岩石力学实验课程中的部分教学内容需要观测方法具有易于实施、非接触、动态测量等特点,如观测岩石试件的局部变形和了解岩石结构的破坏过程等教学项目。随着图像分析算法和相关软件的发展,光学测量和分析技术能够在细观和微观测量领域中实现动态、无接触、高自动化和高精度地测量,应用数据处理软件获得的测量结果和分析图表快捷直观。在物理相似模拟实验教学中的应用如图4所示。



图4 巷道开挖的物理相似模拟

数字散斑相关方法实验教学中,学生首先需要在试件表面制备散斑,再将制备散斑后的试件置于加载台上,试件的压缩过程与拍摄设备同步开启,对散斑图像进行分析处理即可得到试件加载过程中的全场位移场和应变场。实验系统与光测设备如图5所示。

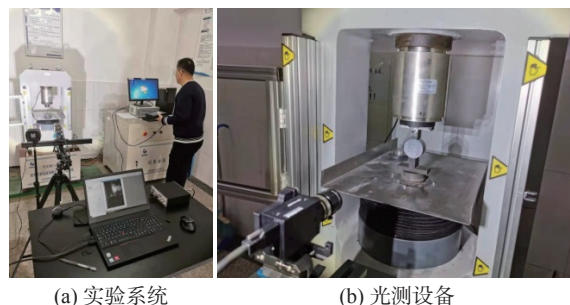


图5 实验系统与光测设备

在实验中,被测试件在压力作用下产生变形时,光测设备采集试件表面的光斑图像,数据采集卡和软件系统将变形前后的试件散斑图经模数转换为数字灰度场,图像分析算法对不同幅数字灰度场进行识别得到位移变化矢量,进而获得所需的变形场信息。实验中试件随应力-应变的演化过程(ε_1 -Lagrange 为主应变场)如图 6 所示。

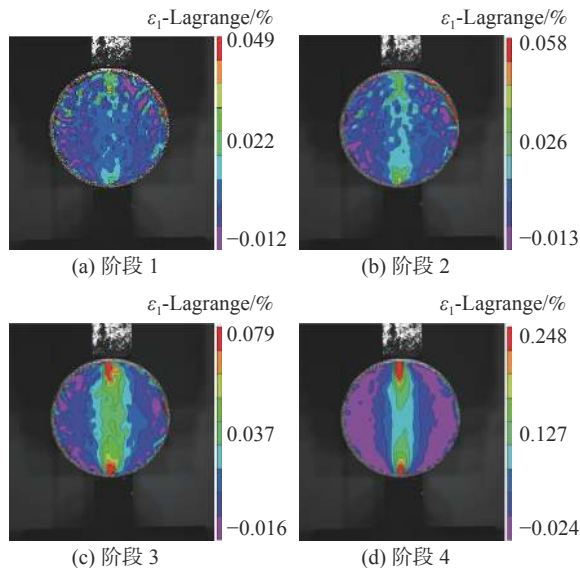


图 6 试件随应力-应变的演化过程

4 结束语

本实验课程教学设计对教育者和学生都提出了新的要求,在各项实验过程中实验教师起着重要的作用,实验教师不仅要熟练掌握各项前沿技术的应用方法,而且要着重于各项前沿的实验技术与教学内容的完美融合,将创新思维引入课堂,从而充分发挥学生对实验的主动性和创造性。教学实践表明,基于多种前沿实验技术开展的实验教学项目与其他专业课程紧密相连,能够有效提高综合实验平台的建设水平。虽然本实验教学中应用的部分实验设备的使用成本较高,但均有成本较为低廉的替代方案,只是这些替代方案将不同程度地降低教学效率和延长教学时间。本教学实践对矿山岩石力学与工程实验教学的设计和开展进行了研究和探索,随着实验教学技术的不断发展和使用成本的下降,本实验教学方案存在发展和推广前景。

参考文献

- [1] 孙金海,明建,金爱兵,等.真实与虚拟相融合的矿床开采实验教学研究[J].实验室科学,2017,20(4):130-133.
- [2] 孙金海,明建,郭瑛玮,等.矿山物联网工程实验教学探索与实践[J].实验室科学,2018,21(4):41-44.
- [3] 赵延林,万文,唐劲舟.面向采矿工程专业的岩石力学试验教学改革[J].当代教育理论与实践,2016,8(3):61-63.
- [4] 杨永康,张百胜,段东,等.基于数值试验的地矿类专业岩石力学实验教学改革[J].实验技术与管理,2018,35(6):2299-2311.
- [5] 付小敏,苏道刚,蔡国军,等.岩土力学实验教学仪器的研制与应用[J].实验室研究与探索,2011,30(3):203-205.
- [6] 安芬菊,李德荣,俞国燕,等.3D打印在工程训练中教学组织的研究[J].实验科学与技术,2018,16(2):138-140.
- [7] 谭跃刚,陈章念,张帆,等.3D打印创新教学实验室及其应用[J].实验室研究与探索,2016,35(9):246-249.
- [8] 崔二娟,吴亚辉.新工科背景下3D打印课程教学改革与实践[J].实验科学与技术,2020,18(5):115-118.
- [9] 胡成果.基于3D打印粗糙型节理试样制作及其变形破坏特性试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [10] 田威,斐志茹,韩女.基于CT扫描与3D打印技术的岩体三维重构及力学特性初探[J].岩土力学,2017,38(8):2297-2305.
- [11] 王本鑫,金爱兵,赵怡情,等.基于CT扫描的含非贯通节理3D打印试件破裂规律试验研究[J].岩土力学,2019,40(10):3920-3936.
- [12] 张平,王登科,曾凡超.CT技术在煤岩裂隙演化实验教学中的改革探讨[J].中国现代教育装备,2019,15(4):11-13.
- [13] 杨永飞,孙致学,张凯,等.基于CT扫描和3D打印可视化技术构建石油工程Solid Learning教学新模式[J].实验技术与管理,2015,32(9):64-67.
- [14] 张春明,杨天鸿.岩石破裂过程声发射动态显示虚拟现实实验教学系统[J].微型电脑应用,2020,36(17):4-7.
- [15] 马少鹏,赵永红,金观昌,等.光测方法在岩石力学实验观测中的应用述评[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1794-1799.
- [16] 李元海,刘德柱,孟庆彬,等.基于DSCM的深埋软岩隧道围岩变形与松动圈演变规律试验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(3):565-574.
- [17] 唐国丰,梁波,赵博,等.拉锚支护下软弱围岩隧道模型试验DSCM变形分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(s1):47-54.
- [18] 马建兴,马强.岩石力学实验课的教学改革研究[J].实验室科学,2011,14(2):32-34.
- [19] 张晓德,王述红,郝玉玲,等.土力学课程实验教学改革与实践[J].实验室科学,2020,23(3):133-135.
- [20] 于洋,洪鹏,刁心宏.声发射技术在岩土工程研究生实验教学过程中的应用[J].实验室研究与探索,2020,39(7):169-173.