数控雕刻技术在岩石力学教学实验中的应用案例

高祥，庞冬冬
安徽理工大学，矿业工程学院，安徽，淮南 232001
DOI:10.61369/ETI.2026070005

摘　　要： 数控雕刻技术是一种典型的“减材制造”技术，它依托高精度数控（CNC）装备，长于对异型复杂形状物理模型的灵活设计和雕刻。将数控雕刻技术引入到岩石力学教学实验中，既克服了传统岩石或混凝土模型制工序复杂、制作成本高、养护周期长等不足，又解决了“差异化、个性化”物理模型的制备的难题。不仅为岩石力学创新实验教学提供了一条低成本、高精度、高效率的制作新路径和大大拓展了创新实验选择范围，而且从模型制作、实验开展、数据处理全程参与，有利于全面提升学生的自学能力、动手能力和创新意识。

关 键 词： 数控雕刻技术；岩石力学；物理模型；实验教学

Application Cases of CNC Engraving Technology in Rock Mechanics Teaching Experiments

Gao Xiang, Pang Dongdong
College of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001

Abstract: CNC engraving technology is a typical "subtractive manufacturing" technique. Relying on high-precision CNC equipment, it excels in the flexible design and carving of physical models with complex and irregular geometries. Introducing CNC engraving technology into rock mechanics teaching experiments not only overcomes the shortcomings of traditional rock or concrete model preparation—such as complicated procedures, high production costs, and long curing cycles—but also resolves the challenge of fabricating "differentiated and customized" physical models. This approach not only provides a low-cost, high-precision, and highly efficient new pathway for innovative experimental teaching in rock mechanics and greatly expands the range of choices for innovative experiments, but also engages students throughout the entire process—from model fabrication and experiment execution to data processing—thereby comprehensively enhancing their self-learning ability, hands-on skills, and innovative awareness.

Keywords: CNC engraving technology; rock mechanics; physical model; experimental teaching

在“新工科”背景下，岩石力学的教学与实验正经历一场深刻的系统性重塑，核心是通过前沿技术赋能，构建“虚实结合、智能驱动、产教协同”的新型教学生态[1]。实验内容正发生着系统性重构，从单一的验证性实验，向更具挑战性的综合性与创新性实验拓[2]。目前，分层次、模块化科学实验设计已成为共识。有学者提出“基础性实验→综合性实验→创新性实验”的分层模式，以满足不同阶段学生的学习需求[3]。实验内容也在积极拥抱智能化，如增设智能检测技术实验，利用传感器实时监测数据[4]；或运用3D打印技术精准“复制”天然裂隙岩体进行重复性试验，为开展创新性实验教学提供了新的手段[5-6]。

随着“新工科”建设的推进，岩石力学实验教学越来越需要依托物理模型。用天然岩石制作物理模型的常规方法，存在制样工序复杂、制作成本高等问题；采用人工浇筑方式或采用3D打印技术制备物理模型，也存在养护周期长等问题。在创新实验教学中，所需物理模型不仅数量多还需具备足够的多样性。近年来，数控雕刻技术的快速发展，数控雕刻技术是通过计算机控制的刀具对天然岩石或类岩石材料进行切削、铣磨，将其加工成所需尺寸的试样。面对传统制样工序复杂等问题，数控雕刻技术提供了一条低成本、高精度的新路径。

在此背景下，引入数控雕刻技术，通过制作煤矿巷道物理模型，开展了煤矿巷道压缩破坏实验教学，可以帮助学生了解数控雕刻技术和岩石压缩实验的原理及操作方法，锻炼动手能力，培养创新思维，加深对巷道围岩破坏特征的认识，为今后从事科研及相关技术工作奠定良好基础。

作者简介：高祥（1990.04—），男，河南周口人，博士，讲师，研究方向：岩石力学。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、教学案例设计

（一）数控雕刻设备用于物理模型制作

数控雕刻机是一种高精度、高效率的全自动化数控机床，它主要由包括主体结构、驱动传动模块、主轴刀具、制冷等辅助系统，以及电气控制及辅助系统等在内的软件和硬件部分构成。数控雕刻设备如图1所示。

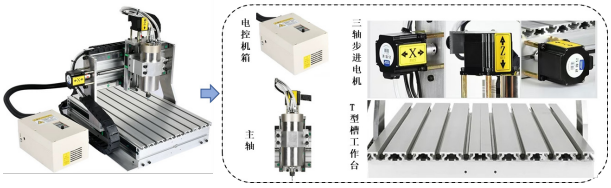
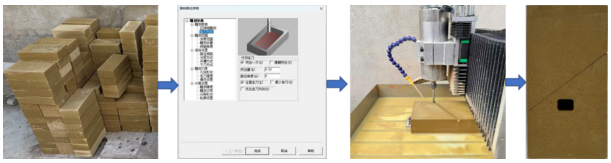


图1数控雕刻设备

利用数控雕刻机制作巷道物理模型。按照CAD软件绘制雕刻轮廓线、固定岩块、设置数控雕刻参数、雕刻机轮廓切割的流程，精加工出巷道物理模型。上述流程完成后，辅以人工精修与最终检验，从而得到可直接用于力学实验的高精度岩石物理模型。物理模型制作流程如图2所示。



(a) 岩块　(b) 刀路规划　(c) 雕刻　(d) 模型

图2 物理模型制作流程

（二）巷道物理模型破坏物理实验

对制备出的高精度岩石物理模型进行力学性能测试与监测。实验之前将试件置于夹具中对模型进行侧向位移约束，并在观察面一侧放置有机玻璃，再将固定器放入压力机加载仓。接着用压力机以速率0.5 kN/s从上方缓慢加压，直到试件发生破坏，（即压力机荷载开始下降）停止加载，缓慢卸载。实验过程中，分别通过高清相机拍摄岩石表面变形与破坏图像；用声发射装置记录岩石内部开裂声响，在试件侧面使用声发射探测器，对试件压裂过程的波形进行监测，分析各通道声发射参数变化过程以及临界失稳特征；使用数字散斑系统（DIC）监测试件监测面表面位移变化。实验结束后保存各种试验监测数据（包括应变、荷载、数字图像以及声发射参数）。综合这些数据来研究断层不同倾角下巷道围岩的变形规律和破坏特征。通过压缩破坏多种监测手段的结合，学生可以直观、全面地获取岩石的宏观力学响应与细观破坏机理，深化对岩石力学行为的理解。

二、教学案例分析

（一）巷道模型承载变形特性分析

图3为各试件应力－应变曲线。在图2中，峰值应力反映了模型承载能力的大小。由图3可以看出，试件Q1、Q2、Q3的应力－应变曲线的压密、弹性、塑性和峰后阶段特征明显；峰值应力分别为60.43 MPa、68.30 MPa、63.45 MPa。做出峰值应力随断层倾角的变化曲线如图4所示。由图4可以看出，模型承载能力受断层倾角影响，呈现出随倾角增加先上升后下降的特征，在断层倾角45°时达到最大。通过峰值应力－断层倾角变化曲线，学生可以非常直观地认识断层倾角对巷道围岩承载能力的影响效果，从而举一反三，获得类似课题的研究方法。

数字散斑（DIC）技术可方便获取模型受压后表面位移场。以模型Q2为例，基于数字散斑（DIC）监测结果绘制变形分布如图5所示。由图5可以看出，1）位移分布出现了明显分区，模型中断层下部（巷道开挖部分）位移较大，相对而言断层上部位移。提取巷道边帮点，其位移分布特征主要为越往下位移越大（见图6）。通过DIC技术，可实现模型表面位移场和应变场的可视化，有利于加深学生对岩石受压变形特征的理解，对激发学生的学习兴趣具有重要的促进意义。

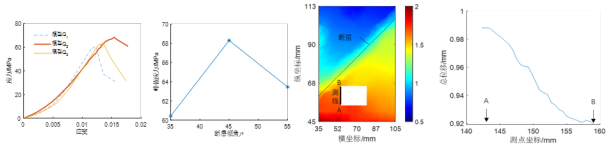


图3应力－应变曲线　图4 峰值应力－倾角曲线　图5 模型Q2总位移云图　图6测线位移分布曲线

（二）巷道模型声发射特性分析

声发射参数中的平均频率（AF值）与上升角（RA值）是表征围岩破裂机制的核心指标，其物理意义源于弹性波传播理论与断裂力学响应特征。AF值（单位：kHz）定义为声发射事件波形过阈值点频率均值，物理本质反映破裂能量释放速率——高频AF对应张拉脆性破裂，低频AF指示剪切滑移或塑性变形。RA值（单位：ms/V）表征波形上升时间与幅值之比，物理本质揭示破裂扩展速度——高RA值标志缓慢破裂过程，低RA值代表突发脆断。表1为不同倾角模型裂纹占比结果统计表。由表4可知，不同倾角的主导破坏裂隙类型不同；缓倾斜与陡倾斜（35°和55°）断层附近围岩破坏以拉伸裂隙为主导，中倾斜（45°）断层附近围岩拉伸裂隙比例明显下降。声发射AF值与RA值的分析，为学生们开展岩体破坏机理研究的一种重要途径，对培养他们从结果到原因、从现象到本质的思维习惯和探究意识具有促进意义。

表1 不同倾角模型裂纹占比结果统计表

倾角 /°	拉伸裂纹占比 /%	剪切裂纹占比 /%
35	75.77	24.23
45	55.27	44.73
55	77.68	22.32

三、教学案例效果

在“新工科”建设背景下，需要不断提高学生的综合素质和创新能力，培养具备创新精神的复合型人才[7]，这对传统实验教学模式提出了新的要求，引入新技术和新方法是推动传统岩石力学实验教学改革的重要方向。本文将数控雕刻技术引入岩石力学

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

实验教学，具有以下作用：

（1）解决了岩石力学实验教学中“差异化、个性化”物理模型的制备的难题。传统方法很难在短时间内为学生分组提供形态各异、参数可控的岩石试样。学生需年年分组、组间有所区别、届届有所创新，这种区分多通过使用不同的物理模型来实现。所需物理模型不仅数量多还需具备足够的多样性，数控雕刻制备方法能够灵活适应这一特点。

（2）强化了学生的主体地位，本教学模式改变了传统教学中由教师提供标准化试样的做法，以学生为中心，将试样的设计权和制造权交还给学生，锻炼了学生的机械操作与精密测量等动手实践能力，通过与工程现场相合设计物理模型，培养了学生学以致用的思维和理论联系实际的意识。

参考文献

[1]王清，李德顺，李寿图，等 . 新工科背景下课程引导式大学生创新能力培养 [J]. 高教学刊，2026，12 (11)：82-85.

[2]田勇，刘家魁，范超强，等 . 温度冲击作用下岩石力学实验平台建设 [J].实验技术与管理，2025,42(07):117-124.

[3]张小波，朱熙，姚池，等 . 三维结构光扫描技术在岩石结构面粗糙度评价实验教学中的应用 [J].实验室研究与探索，2021,40(09):173-177.

[4]关凯，朱万成，刘洪磊，等 . 新工科课程教学设计与实践——以东北大学应用岩石力学课程为例 [J].高教学刊，2022,8(06):71-75.

[5]杨文东，张艳美，俞然刚，等 . 复杂地质建模前处理方法在岩石力学数值实验教学中的应用 [J].实验技术与管理，2014,31(09):179-182.

[6]王述红，梁成，杨勇，等 . 应用真三维岩体建模仿真技术推进岩石力学教学改革 [J].力学与实践，2011,33(01):89-91.

[7]贾继文，刘之广，王淳 . 学科交叉背景下的实验室建设新路径 [J]. 实验技术与管理，2022，39(3)：252 - 255，259.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.