

石油工程岩石力学实验虚拟仿真教学设计

李 猛¹, 杜 娟², 徐建根¹, 户淑莉³

¹重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆

²重庆轻工职业学院药学与护理学院, 重庆

³重庆机电职业技术大学建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年11月10日; 录用日期: 2024年1月1日; 发布日期: 2024年1月9日

摘 要

岩石力学实验是石油工程、海洋油气工程专业的基础实验课程, 但物模实验存在“设备贵成本高”、“操作难周期长”、“演示直观性不足”等问题。为此, 本文拟配合“石油工程岩石力学”课程中“岩石强度理论”教学内容的授课需要, 借助现代虚拟仿真技术, 基于石油工程岩石力学理论, 理清岩石力学三轴实验设备原理, 分析岩石力学实验操作步骤, 辅之以井壁稳定科研知识, 集成于虚拟交互系统中, 达到理论、实践、创新、节约、安全有序结合的目标。有利于岩石力学实验的可重复性, 实现岩石力学实验的可观察性, 提高学生分析问题和解决问题的能力。

关键词

虚拟仿真, 石油工程, 岩石力学, 三轴实验

Virtual Simulation Teaching Design for Rock Mechanics Experiments in Petroleum Engineering

Meng Li¹, Juan Du², Jiangen Xu¹, Shuli Hu³

¹School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²School of Pharmacy and Nursing, Chongqing Vocational College of Light Industry, Chongqing

³School of Architecture Engineering, Chongqing Vocational and Technology University of Mechatronics, Chongqing

Received: Nov. 10th, 2023; accepted: Jan. 1st, 2024; published: Jan. 9th, 2024

Abstract

Rock mechanics experiments are a basic experimental course for petroleum engineering and off-

shore oil and gas engineering majors, but there are some problems in physical model experiments, such as “expensive equipment and high cost”, “difficult operation and long cycle”, and “insufficient intuitiveness of demonstration”. Therefore, this article intends to meet the teaching needs of “Rock Strength Theory” in the “Petroleum Engineering Rock Mechanics” course. With the help of modern virtual simulation technology and based on the theory of petroleum engineering rock mechanics, the principle of triaxial experimental equipment for rock mechanics is clarified, and the operational steps of rock mechanics are analyzed. With the assistance of wellbore stability research knowledge, it is integrated into a virtual interactive system to achieve the goal of orderly integration of theory, practice, innovation, economy, and safety. It is beneficial for the repeatability of rock mechanics experiments, achieving observability of rock mechanics experiments, and improving students’ ability to analyze and solve problems.

Keywords

Virtual Simulation, Petroleum Engineering, Rock Mechanics, Triaxial Experiment

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩石力学实验是石油工程、海洋油气工程专业的基础实验课程，岩石的压、拉、剪破坏是石油工程岩石力学重要的基本教学内容，与井壁稳定、水力压裂、地层出砂等息息相关。岩石力学理论公式无法呈现岩石的拉、压等破坏现象，而且，理论公式不易描述钻井过程中井壁岩石所受物理环境，包括上覆岩层压力、地层非均匀地应力以及地层的各项异性等。目前，各高校及研究院所主要借助室内岩石力学实验观测岩石的破坏形态。MTS 三轴实验设备能够较好地反映井下岩石的真实性态，但是由于该设备成本高昂(300 万)，数量有限(仅一台)，实验条件复杂，且学生众多，实验费用成本成倍增加，造成“设备贵、成本高”；岩石力学实验的整套流程应该包含岩心切割、加工(磨平)标准岩心、设备调试、三轴载荷设置、三轴位移设置、温度设置、数据传输及动态采集、实验数据后处理等，整个实验流程耗时长、耗费人力多，造成“操作难、周期长”；再者，岩心压碎之后便不能再次使用，为破坏性、不可重复性实验，且岩石节理发育、分布、方位，以及加载过程中的应力、应变情况难以观测，造成“演示直观性不足” [1] [2]。

基于有限元理论，模拟井下岩石弹性、塑性形变，仿真岩石的破碎过程，将岩石的形变、破裂过程以及相关实验结果进行可视化，对于岩石力学实验课程可以实现辅助教学，可以实现“重复性”实验，同样可以节省实验场地，解决了当前室内试验无法直接观察岩石破碎过程、无法进行重复性实验等问题。本文采用计算机虚拟仿真技术，依托虚拟仿真实验教学互联网平台，向学生提供能随时随地进行虚拟仿真实验的开放条件，可形成虚拟 3D 动画显示，且可重复操作、成本低、操作周期短。可实现石油工程岩石力学实验可视化、模拟性、协调性、优化性的目标，从而得以实现学生最广泛参与岩石力学实验教学的目的，实验的适用性明显[3] [4]。

本文拟解决物模实验因“设备贵成本高”、“操作难周期长”、“演示直观性不足”而难以开展的难题，配合石油工程岩石力学课程中“岩石强度理论”教学内容的授课需要，按照工程教育专业认证理念，依托石油与天然气工程国家级实验教学示范中心进行开发并开展实验教学工作。结合当前钻井工程

新工艺、采油工程新技术、人工智能新理论，考虑井下地温梯度、岩性分布、岩层走向，开发从岩心切割、岩心平磨、岩心加载、岩心变形到岩心破裂的石油工程岩石力学实验仿真实验教学平台，全程展现岩心制备过程以及在井下高温、高压等复杂环境下的岩心变形和破裂过程，同时在输出端实时显示岩心应力应变云图。可进行石油工程岩石力学单轴、三轴抗拉、抗压、抗剪岩等典型试验的虚拟仿真。

2. 实验教学过程

1) 实验教学过程

课前引导：实验教师利用虚拟仿真实验系统，向学生讲解本实验课程的目的与原理、学习方法与要求、课前自学的途径；安排学生实地观摩“油藏注水开发水驱油物理模拟实验”，讲解物模实验的原理、流程以及在虚拟仿真实验中的仿真情况，并提醒相关注意事项[5]。

课前预习：学生到虚拟仿真实验系统网站注册并登录系统；根据网站提供的虚拟实验系统、实验教学材料和视频资料自学实验原理、操作步骤以及考核要求等；利用实验预习模块自主练习实验操作技能；教师和学生可在“讨论反馈”模块沟通交流，教师在该模块积极回答学生遇到的实验问题。

实验考试：学生实验预习测试题达到 60 分以上者方可进行实验考试。考试过程由学生自主完成，实验系统和教师均不会提示；分为操作考试和专业理论知识测试两个环节。

成绩评定：学生根据实验操作过程中采集的图像和数据，按照提供的模版完成实验报告撰写，并提交至虚拟仿真实验系统。教师登录系统批改实验报告，提交实验成绩。系统根据考核方式成绩占比计算并发布综合实验成绩[6]。

2) 实验方法

学生通过实验教师课前引导，了解实验目的与内容、学习方法与要求，并亲历现场感受实验过程；学生课后利用网站教学资源，以“学生为中心”自主学习实验原理、操作规程、专业理论知识等；利用虚拟仿真实验平台开展实验虚拟仿真训练，通过交互式解决实验故障，聚焦“解决复杂工程问题能力”培养；预习测试、操作考试、理论测试和实验报告四维综合考核，全面培养学生知识与能力；通过“理-实-虚-体化”教学，弥补物模实验的不足，创新教学方法与评价体系，提高实验教学效果，助力专业理论教学和综合能力培养[6]，见图 1。

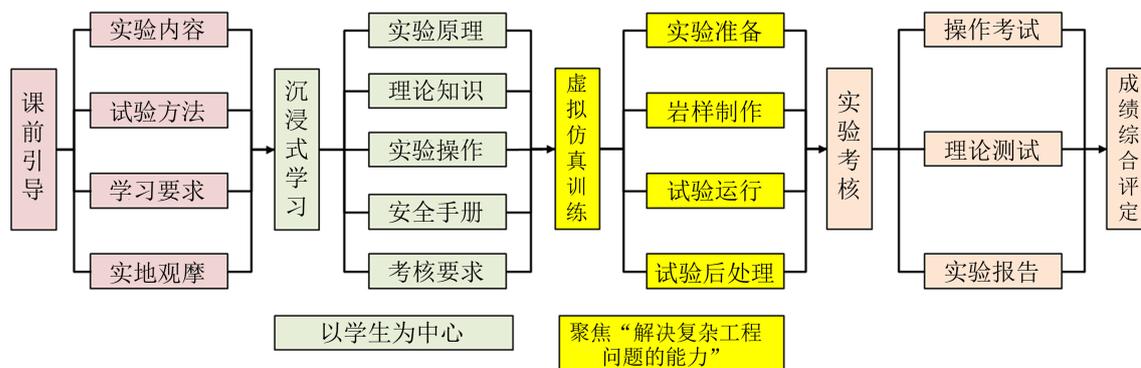


Figure 1. Flow chart of triaxial strength simulation experiment for rock mechanics in petroleum engineering
图 1. 石油工程岩石力学三轴强度仿真实验流程图

3. 交互性步骤详细说明

1) 试样准备

① 应用岩样钻取机模拟钻取岩块制成圆柱状或正方体状，见图 2，要求圆柱状试样直径为 40~60 mm、

高度为 30~50 mm，正方体状岩样边长为 40~60 mm。

② 用切磨机模拟切割出圆柱体端面，使用端面磨床抛光至端面平行，光滑。试样上下两端面应平滑且相互平行，不平行度误差不应大于 0.05 mm，用游标卡尺模拟测量误差。

③ 试样模型制作好后，模拟放入 105~110℃的烘箱中模拟烘干 24 小时(时间设定加速)，然后放置在干燥箱内备用。



Figure 2. Schematic diagram of the sample model
图 2. 试样模型示意图

2) 试样安装



Figure 3. Triaxial simulation operating system
图 3. 三轴仿真操作系统

④ 在仿真实验系统(见图 3)中的模拟压力室的底座上，依次放上不透水板、试样模型及不透水试样帽，将橡皮膜用承膜筒套在试样外，并模拟用橡皮圈将橡皮膜两端与底座及试样帽分别扎紧。

⑤ 并将活塞对准测力计和试样模型顶部。提升压力室罩上部的活塞，缓慢下放压力室罩，此时需将上部活塞与岩心样品轴线对齐，点击拧紧底座螺母。然后，模拟向压力室注入压力液，此处为模拟井下压力环境，并将活塞对准测力计和试样模型顶部。

⑥ 将离合器调至粗位，转动粗调手轮，当试样帽与活塞及测力计接近时，将离合器调至细位，改用细调手轮，使试样帽与活塞及测力计接触，装上变形指示计，将测力计和变形指示计调至零位。

⑦ 关排水阀，开周围压力阀，施加围压，模拟加热炉设置一定的温度。围压大小应于工程的实际荷载相适应，并尽可能使最大围压与井壁岩石的最大实际荷载大致相等，实验按 100、200、300、400 KPa 模拟施加。根据井深及地层温度梯度设定加热炉的温度，实验按 50、100、150、180℃ 模拟施加。

3) 试样剪切

⑧ 启动计算机，进入操作系统，双击桌面上的图标 ，启动“油气井岩石力学试验软件”(以下简

称软件), 设置剪切应变速率宜为每分钟应变 0.5%~1.0%。

⑨ 启动电动机, 合上离合器, 开始剪切模拟。试样模型每产生 1 mm 的轴向应变, 测记一次测力计读数和轴向变形值。

⑩ 当出现峰值后, 再继续剪 3%~5%轴向应变; 若测力计读数无明显减少, 则剪切至轴向应变达 15%~20%, 观察软件响应曲线变化(见图 4)。

⑪ 实验结束, 关电动机, 关周围压力阀, 关加热炉, 脱开离合器, 将离合器调至粗位, 转动粗调手轮, 将压力室降下, 打开排气孔, 排除压力室内的水, 拆卸压力室罩, 拆除试样模型, 揩干试样周围的余水, 脱去试样外的橡皮膜, 描述试样模型破坏形状。

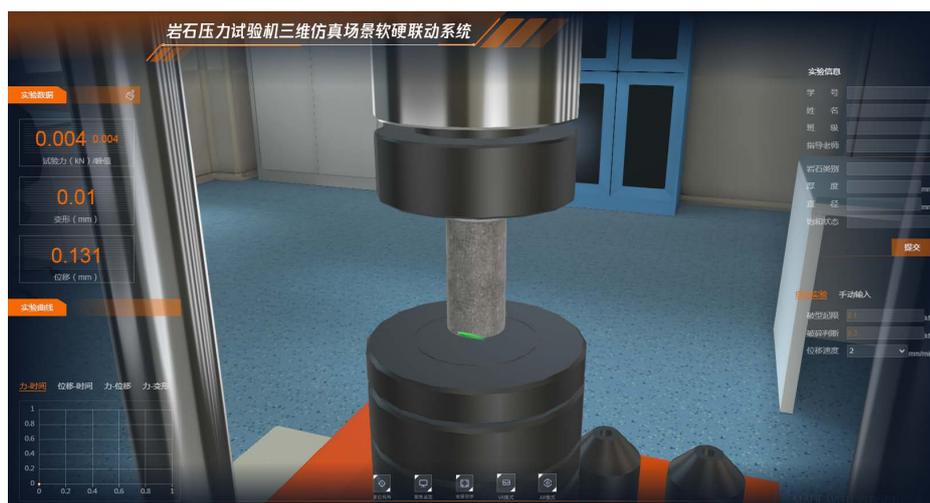


Figure 4. Rock shear experiment
图 4. 岩石剪切实验

4) 实验后处理

⑫ 设备清洗归位: 清洗实验模型及相关部件, 擦洗干净后放回原位。

⑬ 专业理论知识测试: 从专业理论知识题库中抽取 10 小题, 测试专业理论知识掌握情况。

⑭ 提交实验报告: 根据采集的实验数据和图像, 撰写实验报告, 并提交至实验系统。

4. 实验仿真教学效果评价

我校石油工程专业通过了工程教育专业认证, 本实验方案设计中充分融入工程认证理念, 助力专业理论教学效果提升的同时, 支撑工程实践能力强的应用型人才培养。

1) 一是教学理念的创新

教学理念上“以学生为中心”。以学生掌握石油工程岩石力学理论相关专业知识为中心, 设计了课前预习、自主操作练习、自主实验考试、自主分析撰写、教师过程监控的教学模式, 有效激发了学生学习的积极性和主动性。

教学内容上聚焦“解决复杂工程问题能力”培养。石油工程岩石力学三轴强度仿真实验设置了基本原理演示、专业实验实操、实验总结分析等模块, 专业实验方面设置了岩石强度与变形、岩石破裂特征和声发射活动规律的虚拟实验, 各主要环节均需要结合石油工程专业理论知识进行操作, 遇到问题后还需进行分析才能继续实验, 充分培养学生深入运用工程原理解决井壁失稳、水力压裂和油层出砂等复杂工程问题的能力[4]。

2) 二是教学方法创新

“理、虚、实”一体化的教学方式。不仅对岩石力学实验过程进行了仿真建模，同时也对岩石力学设备进行了精细化三维建模，学生可选择性自主组装调试设备模型，使学生仿真实验设备操作方面深入理解实验原理，提升学生实验创新性，提高教学效率，巩固石油工程井壁稳定与水力压裂专业理论知识，强化实验能力与实践动手能力，培养科研与创新能力和工程意识。

交互式虚拟教学。学生可以充分利用虚拟仿真实验平台的仿真训练模块开展虚拟仿真训练，该模块对每一个实验步骤均设置了交互式学习环节，对于错误操作给出提示，协助学生完成整个实验。同时，学生还可利用网站学习材料开展专业知识和实验操作技能的自主学习，并通过预习测试确保课后自主学习效果。通过交互式虚拟教学，强化学生自主学习意识，提升学生自主学习能力，提升实验教学效率。

理论与实践融合教学。学生在专业理论知识学习基础上，利用实验预习模块的水驱油原理及相关知识点的虚拟实验进一步强化理论知识学习；虚拟实验流程中设置了多选项、干扰项等环节，强化学生利用专业理论知识深入分析问题后才能完成各个实验步骤的工程意识[6]。

3) 三是评价体系创新

四维综合评价，确保知识能力全面培养。本项目从实验预习、实验操作技能、实验分析报告、专业理论知识四个维度开展考核评价，实验预习考察学生自学效果，强化自学意识和能力培养；实验操作技能考察学生实验技能，培养实践动手能力；实验报告考察学生运用专业知识分析问题、解决问题的解决复杂工程问题能力；专业理论知识测试考察学生通过实验课程对专业理论知识的掌握情况，确保实验对专业理论教学的支撑。

网络实时考核，提升教学效率。预习测试和专业理论知识测试采用网络题库随机抽题测试，系统自动批改，解决传统实验课程因“学生多、耗时长”而难以评价课前预习效果和理论知识掌握情况的难题；实验操作技能考核采用虚拟仿真平台考试模块自动实时评价，对每一操作步骤均作出评价，解决传统实验课程只能根据实验报告单一评价，难以全面评价实验操作技能的难题。

5. 结论

1) 融合仿真技术，解决实验过程可重复性差、直观性不足的问题。将石油工程岩石力学实验技术与计算机仿真新技术相融合，得到试样在加载条件下变形、破裂的全过程和相应的应力场演化情况，弥补了岩石力学实物实验的不足，实验设计安全无隐患。

2) 考虑井下工况，结合岩石力学理论进行实验模型构建。根据石油工程作业井下工况，虚拟制造岩石材料，构建岩样为复杂多面体，给定岩石的材料参数，设定边界条件，建立先进的理论模型，进行岩石变形与破坏过程数值试验。

3) 基于动态仿真结果，培养学生解决复杂工程问题的能力。结合石油工程中的岩石力学井壁稳定、水力压裂等工程问题，通过岩石力学实验虚拟仿真，预期实验结果依据设计参数和条件多变，培养学生解决复杂工程问题的能力。

基金项目

重庆市教育科学规划课题(2021-GX-031, 2021-GX-481, K23YY2150009); 重庆科技学院本科教育改革创新项目(202272, 202215); 重庆市高等职业教育教学改革研究项目(Z213007)。

参考文献

[1] 贺旭, 刘华. 虚拟仿真实验系统在分子生物学实验教学中的应用[J]. 基础医学教育, 2023, 25(7): 620-624.

<https://doi.org/10.13754/j.issn2095-1450.2023.07.14>

- [2] 刘金库, 葛云晓, 黄婕, 等. 虚拟仿真实验教学课程: 数字赋能工程能力培养新模式[J]. 高等工程教育研究, 2023(3): 85-88+113.
- [3] 李彦斌, 加鹤萍, 李赟. 行业特色高校虚拟仿真实验教学实践探索——以国家级一流课程“电力市场交易决策虚拟仿真实验”为例[J]. 教育教学论坛, 2023(16): 1-4.
- [4] 吕明珠. 液气电控制技术课程虚拟仿真实验教学系统开发与实践[J]. 机电工程技术, 2023, 52(8): 138-142.
- [5] 李曼, 杨可萌, 郭宇锋, 等. 任意横向掺杂半导体功率器件的虚拟仿真实验教学[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(4): 104-110. <https://doi.org/10.16791/j.cnki.sjg.2022.04.020>
- [6] 贾文涛, 李怡君. 高校新文科虚拟仿真实验教学的创新路径[J]. 中国高等教育, 2022(Z1): 55-57.