

“双碳”背景下岩石力学与工程课程教学改革研究与实践

李子运

重庆科技大学管理学院, 重庆

收稿日期: 2024年11月25日; 录用日期: 2024年12月23日; 发布日期: 2024年12月31日

摘要

随着碳中和及碳达峰(简称“双碳”)目标的提出,二氧化碳封存技术作为实现碳中和的重要手段之一,日益受到重视。然而,现行《岩石力学与工程》课程在碳封存和碳中和相关内容方面严重滞后,缺乏实用性与前瞻性。本文基于现有课程存在的问题,提出了基于“双碳”背景下的《岩石力学与工程》教学改革方法,旨在增强学生应对碳封存等实际问题的能力,为社会提供符合未来绿色发展需求的人才。

关键词

碳中和, 碳封存, 岩石力学, 教学改革

Research and Practice of Teaching Reform in the Course of Rock Mechanics and Engineering under the “Dual Carbon” Context

Ziyun Li

School of Management, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Nov. 25th, 2024; accepted: Dec. 23rd, 2024; published: Dec. 31st, 2024

Abstract

With the goals of carbon neutrality and peak carbon emissions (referred to as “dual carbon”) being proposed, carbon dioxide storage technology, as an important means of achieving carbon neutrality, is receiving increasing attention. However, the current *Rock Mechanics and Engineering* course lags

significantly behind in content related to carbon storage and carbon neutrality, lacking both practicality and forward-looking perspectives. This paper, based on the issues existing within the current curriculum, proposes a teaching reform method for the *Rock Mechanics and Engineering* course under the “dual carbon” context. The aim is to enhance students’ ability to address practical issues in carbon storage and to cultivate talent that meets the demands of future green development.

Keywords

Carbon Neutrality, Carbon Storage, Rock Mechanics, Teaching Reform

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

全球气候变化引发了对碳减排措施的广泛关注，中国的“双碳”目标(2030年碳达峰、2060年碳中和)确立了明确的时间框架。这一政策推动了包括碳捕集、利用与封存(CCUS)在内的减排技术的快速发展，尤其是地质封存技术，它将二氧化碳长期储存于地下岩层，并涉及多学科交叉问题，如储层力学行为、流固耦合效应和地应力变化分析。这项技术通过将二氧化碳注入地下岩层中以实现长时间封存，涉及复杂的岩石力学行为、流体力学、地应力变化以及化学反应等多个方面，跨越了传统岩石力学与工程的研究领域。然而，当前的《岩石力学与工程》课程在应对碳封存与碳中和的实际需求上存在明显的不足。课程内容更多集中于传统岩石力学的基本理论与力学方法[1]，对碳封存涉及的岩层注入、封闭性评估、诱发地震风险等前沿内容涉猎较少，缺乏对学生进行相关领域技能培养的支持。因此，现行课程无法充分满足新时代对复合型人才的需求，不利于碳封存工程领域的可持续发展。

本文旨在分析《岩石力学与工程》课程的不足之处，并提出系统的教学改革建议，着力将碳封存和碳中和的相关知识纳入教学内容，更新实验和实践环节，以期培养能够应对未来绿色发展需求的专业人才。

2. 存在的主要问题

在“双碳”目标背景下，现行《岩石力学与工程》课程存在多个方面的不足，主要表现在以下几个方面。

2.1. 课程内容缺乏前沿应用

现有课程重点讲授岩石力学的经典理论与方法，例如静态力学特性分析、岩体结构稳定性评估以及地下工程支护设计等。然而，与碳封存密切相关的前沿议题(如二氧化碳注入的流固耦合效应、封闭性评估的力学基础、地应力动态监测技术以及诱发地震的风险预测等)在课程中几乎未有涉及。这导致毕业生面对碳封存工程时，因缺乏相关领域的系统训练而难以满足项目实践的技术需求。

2.2. 教材和教学资源缺乏更新

现有的教材和教学资料尚未及时更新到碳封存的前沿内容，大多数教材内容主要聚焦于传统的岩石力学问题，缺乏对二氧化碳封存工程的系统性分析。学生难以通过教材学习到碳封存领域的实际应用，教学资源与现代碳中和发展需求之间存在显著的脱节。

2.3. 实验与实践环节匮乏

传统岩石力学课程中的实验多以岩石样品力学性能测试为主，如压缩强度测试、劈裂试验等，缺乏与碳封存工程相关的实验内容。学生没有机会通过实验了解二氧化碳在岩石中的注入过程及其对岩层物理力学性能的影响，难以培养适应碳封存需求的实践技能[2]。

2.4. 跨学科融合不足

碳封存和碳中和领域涉及化学、地质学、环境科学等多个学科。现行课程未能很好地将这些知识有机融入岩石力学教学中，学生难以全面理解二氧化碳在储层中的迁移扩散、化学反应等问题，从而缺乏跨学科综合分析和解决问题的能力。

2.5. 政策法规教育缺失

碳封存作为一种新兴的技术手段，受到国家政策和国际协议的严格监管，但现行课程中几乎没有涉及到相关的政策法规知识。学生难以从法律、政策角度理解碳封存项目的实施要求及风险管理措施。

3. 教学改革方法及内容

为解决现有《岩石力学与工程》课程中的问题[3]，本文提出了基于“双碳”目标的系统教学改革措施，具体包括以下几个方面。

3.1. 更新课程内容

建议在课程大纲中增加碳封存与碳中和技术专题，重点讲解二氧化碳捕集技术、储层岩石的力学特性分析、封闭性评价方法，以及注入过程中地应力演化的实时监测。课程可通过引入典型的碳封存工程案例(如北美和中国的深层储存项目)，详细剖析储层选择、渗透性控制、断层稳定性分析等关键技术环节，使学生能够在掌握理论知识的同时理解其在实际工程中的应用。这样既可以提升课程的前沿性和实用性，也增强了学生在碳封存领域的就业竞争力。可涵盖以下几个关键模块(图 1)：

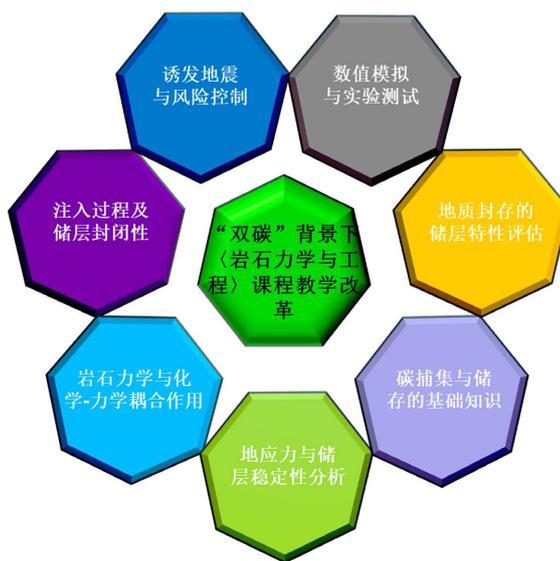


Figure 1. Teaching reform of rock mechanics and engineering course under the background of “Dual Carbon” goal

图 1. “双碳”背景下岩石力学与工程课程教学改革

1) 碳捕集与储存的基础知识。增设碳捕集与储存(CCS)技术的基础知识模块,使学生理解 CCS 的总体流程和各个阶段的具体要求。内容包括:二氧化碳的捕集技术(如燃烧前捕集、燃烧后捕集和氧燃烧捕集)、储存方法、运输方式,以及二氧化碳地质封存的背景与意义。这一模块将帮助学生建立碳封存技术的整体概念,为后续学习储层力学行为打下基础。

2) 地质封存的储层特性评估。设计详细的储层特性分析模块,以储层的物理和力学性质为核心,包括岩石的孔隙率、渗透性、密度、孔隙结构、压缩性等参数。特别关注储层的渗透性与封闭性分析,使学生理解二氧化碳在不同岩性结构中的流动与扩散行为。还可引入岩石层的选择方法,使学生掌握如何评估和选择适合封存的岩石储层。

3) 地应力与储层稳定性分析。强化地应力分析和储层稳定性模块,深入探讨储层在二氧化碳注入过程中的应力响应、压裂风险、裂缝扩展等现象。特别强调注入压力对储层力学稳定性的影响,使学生理解二氧化碳注入可能引发的地层不稳定、断层激活等安全问题。具体内容包括:地应力状态分析、岩石破坏准则、压裂及裂缝扩展机制、断层失稳等,帮助学生掌握储层稳定性评估的基本方法。

4) 岩石力学与化学-力学耦合作用。碳封存过程中二氧化碳与岩石矿物可能发生化学反应,影响岩石的力学性能。为此,课程可增加化学-力学耦合模块,介绍二氧化碳与岩石之间的化学相互作用,包括碳酸化反应生成矿物沉积和对孔隙结构的影响。该模块将结合化学与岩石力学知识,帮助学生理解化学反应对岩石强度和渗透性的影响,从而增强对碳封存长期稳定性的评估能力。

5) 注入过程及储层封闭性。详细讲解二氧化碳注入的物理过程,涵盖注入压力、注入速率、温度效应等变量对二氧化碳迁移的影响。通过封闭性评估,使学生掌握如何通过调控注入条件,防止二氧化碳通过裂隙或弱点向外泄漏。此外,进一步讨论盖层的选择和评估方法,使学生理解盖层在碳封存中的关键作用及如何保证其完整性和封闭性,确保储层的长期密封效果。

6) 诱发地震与风险控制。在实际碳封存过程中,大量二氧化碳的注入可能诱发地震活动(见图 2)。课程应增设诱发地震的风险评估模块,介绍如何通过地震监测、微地震分析等技术识别和预测诱发地震的可能性,制定适当的控制方案。具体内容包括:诱发地震的机制、储层压裂与断层激活、风险分析和监测技术等。通过该模块,学生将理解并掌握碳封存过程中诱发地震的成因及其控制方法。

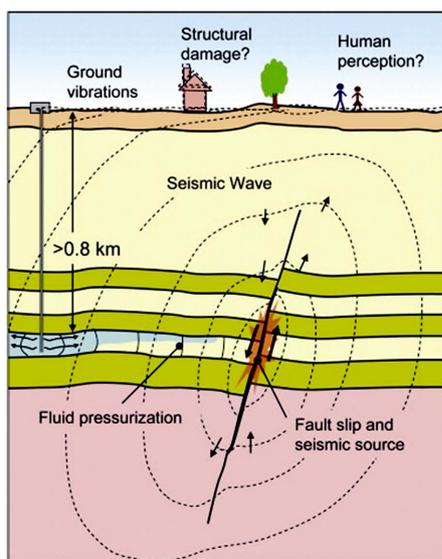


Figure 2. A diagram illustrating the reactivation of faults, wave propagation, and ground motion caused by injection

图 2. 注入引起的断层再激活、波传播和地面运动的示意图[4]

7) 数值模拟与实验测试。在数值模拟模块中,介绍如何利用仿真工具对二氧化碳注入过程进行动态模拟,包括渗流、应力场演化和化学反应等数值计算方法。重点讲解储层中流-固耦合、流-化耦合模拟的方法,帮助学生掌握数值模拟在碳封存中的应用。在实验测试方面,新增储层岩石渗透性测试、力学性质测试等实验内容,使学生可以直接接触实验室环境下的二氧化碳封存模拟[5]。

3.2. 开发新的教材和教学资源

针对教材内容滞后的现状,应优先开发或引入涵盖碳封存与碳中和核心技术及最新进展的教学资源。例如,与学界和工业界专家合作,编撰聚焦实际工程案例的实验教材,将实验环节与真实碳封存项目结合,强化学生的实践能力。同时,可借助多媒体手段(如视频记录、动态动画等),形象展示二氧化碳注入储层的过程及其力学变化,为学生提供更加直观的学习体验。

3.3. 强化实验与实践环节

设计与碳封存工程相关的实验项目,如二氧化碳注入实验、储层封闭性测试、渗透性测试、地应力测量等实验内容。通过这些实验,学生可以直接观察二氧化碳在岩石中的行为,并掌握测量和分析数据的方法。还可以引入数值模拟工具或虚拟现实(VR)技术,使学生能够在计算机模拟的虚拟环境中“操控”二氧化碳的注入过程,增加实验教学的趣味性和体验感[6]。

3.4. 引入跨学科教学模块

碳封存技术涉及化学、环境科学、地质学等多个学科的知识,为此,建议引入跨学科模块或联合教学,邀请相关学科的教师参与授课,或设置专题讲座。例如,在讨论二氧化碳注入的影响时,可以结合化学反应分析储层内部的物理化学变化;在储层稳定性分析时,结合环境科学知识分析碳封存对周边环境的影响。这样能够帮助学生在学习岩石力学的同时,培养跨学科的综合分析能力。

3.5. 项目导向的教学方法

基于“双碳”目标的实际需求,引入项目导向教学法,设计储层封闭性评估、注入安全性分析、泄漏监测系统设计等项目。学生可以通过小组合作,在解决实际问题的过程中深入理解碳封存的原理和技术难点。这类项目可以模拟真实的碳封存工程环境,提高学生的综合应用能力。此外,与企业或科研机构合作,提供真实的碳封存项目背景,让学生参与实际案例分析和方案设计。

3.6. 加入政策法规模块

增加碳封存和碳中和领域的政策法规内容,包括国内外碳市场机制、碳排放交易政策和环保法规等。通过对政策法规的学习,学生不仅能够理解技术应用的背景,还能掌握碳封存项目的实施要求和风险控制措施,为未来从事碳封存相关工作提供知识支持。以达到“卓越计划”的培养要求[7]。

4. 结语

在“双碳”目标的背景下,《岩石力学与工程》课程需要进行系统性改革,以应对新兴碳封存工程对人才的需求。本文系统分析了现行《岩石力学与工程》课程在“双碳”目标背景下存在的不足,并提出了涵盖内容更新、实验教学改革、多学科融合与政策教育等多方面的改进措施。这些改革旨在提升学生应对碳封存复杂问题的综合能力。未来,随着“双碳”政策的深入推进,我们还将进一步优化教学体系,探索多维度评价方法和跨院校协作教学模式,力争培养更多能够推动绿色技术创新的复合型人才,为碳中和战略实施提供有力支持。未来,我们将在实践中持续完善改革方案,努力打造符合新时代要求的岩

石力学与工程课程, 为实现“双碳”目标做出贡献。

基金项目

重庆科技大学 2023 年本科教育教学改革研究项目(202347)。

参考文献

- [1] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 黄倩, 潘益鑫, 彭岩岩, 等. 关联性教学在岩石力学实验课程改革中的探索[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(9): 198-201, 289.
- [3] 刘宗辉, 周东, 胡旭, 等. 岩石力学多层次实验教学体系建设探索[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(5): 140-143.
- [4] Rutqvist, J., Cappa, F., Rinaldi, A.P. and Godano, M. (2014) Modeling of Induced Seismicity and Ground Vibrations Associated with Geologic CO₂ Storage, and Assessing Their Effects on Surface Structures and Human Perception. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **24**, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.02.017>
- [5] 王斐笠, 孟凡震, 杨勇, 等. “双碳”背景下岩石力学教学改革——基于岩石实时高温剪切实验系统[J]. 高教学刊, 2024, 10(11): 121-124.
- [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(1): 89-91.
- [7] 蔚立元, 张强, 杨圣奇. 面向“卓越计划”的岩石力学课程教学改革探讨[J]. 高等建筑教育, 2016, 25(5): 75-78.