

“致密油藏高效开发及提高采收率技术”课程建设实践探索

王代刚, 王秀坤, 宋兆杰

中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京, 102249

摘要: 在国家能源安全战略与“双碳”目标的双重驱动下, 致密油作为国内最具潜力的战略性接替资源, 其高效开发与提高采收率技术的突破, 已成为实现油气核心供给自主可控的关键。本文系统阐述了以“保障国家能源安全”为根本使命、以服务“双碳”战略为创新导向的《致密油藏高效开发及提高采收率技术》研究生课程建设体系。课程以“地质工程一体化”为内核, 深度融合“多尺度多物理场耦合渗流”基础理论, 聚焦“井网—缝网—注采参数协同优化”、“有效驱替—渗吸系统构建”和“全生命周期提高采收率”三大工程核心内涵, 详细阐述了课程建设的时代背景、核心理念、内容重构、教学模式及评价体系, 旨在强力培养具备战略视野、扎实理论基础、卓越工程创新和学科协作能力的复合型人才。教学实践表明, 该课程显著提升了研究生解决复杂地质—工程耦合问题的能力。

关键词: 致密油; 多尺度; 协同优化; 高效开发; 提高采收率; 学科交叉; 复合型人才

1、引言

能源安全是关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题。当前, 我国油气对外依存度持续处于高位, 国际地缘政治风险与市场波动对我国能源供应的潜在冲击不容忽视。在此背景下, 党的二十大报告明确指出要“加强重点领域安全能力建设, 确保粮食、能源资源、重要产业链供应链安全”, “确保能源安全”。这要求我们必须将能源的饭碗牢牢端在自己手中, 大力提升国内油气勘探开发力度, 着力增强能源供应链的韧性和安全性^[1]。致密油资源作为我国非常规油气资源的重要组成部分, 其技术可采资源量巨大, 是实现国内油气增储上产、保障能源供给自主可控最具潜力的战略接替领域^[2,3]。

然而, 致密油藏普遍具有“低孔、低渗、强非均质性”的显著特征, 导致其开发面临单井产量低、递减快、最终采收率低(普遍不足10%)以及开发成本高、环境挑战大等多重世界级难题^[4]。传统的开发理论与技术体系难以满足经济高效开发的需求, 更难以适应在“双碳”目标约束下实现绿色低碳转型的新要求^[5]。因此, 必须通过理论创新、技术突破和工程实践的革命性进步, 攻克致密油高效开发与提高采收率的技术瓶颈, 这正是实现我国油气行业高水平科技自立自强的核心战场之一。

研究生教育, 是国家创新体系的重要组成部分和

人才培养的主阵地。培养能够直面国家重大需求、驾驭复杂工程系统、引领未来技术发展的复合型、创新型高端人才, 是研究生教育的核心使命。现有的《油藏工程》、《提高采收率原理》等相关课程, 其知识体系多基于常规油气藏, 教学内容与快速发展的致密油开发前沿技术和国家紧迫的战略需求存在明显脱节, 具体表现^[6]为: (1) 对国家能源安全战略的融入不够深入, 学生的使命感和责任感培养有待加强; (2) 对“地质工程一体化”、“多场耦合”等前沿理念多停留在概念介绍, 缺乏从微观机理到宏观决策的贯通性、量化教学; (3) 与人工智能、新材料、CCUS等新兴领域的交叉融合不足, 学生的知识结构难以适应未来产业变革; (4) 理论与实践结合不够紧密, 解决复杂工程问题的系统性思维和创新力训练有待提升。

因此, 对《致密油藏高效开发及提高采收率技术》课程进行根本性的改革与体系化建设, 不仅是对传统石油工程教学内容的更新升级, 更是服务国家能源安全战略、响应“双碳”目标号召、推动油气核心技术创新、实现高水平科技自立自强的必然要求和紧迫任务。本课程建设旨在构建一个“战略引领、前沿驱动、交叉融合、系统创新”的新型知识体系与育人平台, 为我国非常规油气革命的实现提供人才支撑。

2、课程建设核心内容

结合致密油藏高效开发及提高采收率技术教学的实际需要,课程核心内容主要围绕地质与工程一体化、多尺度下物理场演化、开发参数比较和提高采收率方法等环节展开,具体包括以下五个部分:

(1)地质、工程一体化。该部分主要介绍储层特征、裂缝发育、工程参数与开发效果之间的关系^[7]。实际教学过程中,重点讲解地质建模、岩石力学和流体流动等内容,使学生能够由浅入深的理解地质甜点评价、可压裂性分析和开发动态预测。

(2)多尺度及多物理场作用。针对致密油开发过程中流动机理复杂、产能影响因素较多的特点,课程从微观和宏观两个层面介绍热、流、力、化等作用过程及其相互影响。教学内容既包括表界面张力、毛细管力等微观参数,也涉及构造应力、诱导应力等宏观参数。此外,课程还结合高V区块致密油开发实际案例分析其对压裂造缝、裂缝导流、流体渗流及长期开发效果的影响,如压裂液与岩石矿物作用后裂缝表面性质和导流能力的变化^[8-10]。

(3)井网、缝网与注采参数协同优化。针对已有参数优化思路的局限性,课程注重培养研究生全局协同优化思想^[11]。结合数值模拟结果和典型区块资料,教学中对不同井网方案、裂缝形态和注采参数组合进行比较,分析其对开发效果的影响及方案取舍依据。

(4)驱替-渗吸结合提高采收率。以冀东油田致密油藏为例,课程介绍低矿化度水、纳米流体和CO₂等介质在提高采收率中的应用。结合文献调研与矿场实例,对不同注入方式下的驱替效率和渗吸表现进行比较,使学生理解相关方法的作用机理及适用条件^[12,13]。

(5)全生命周期提高采收率。教学内容覆盖勘探阶段提高采收率潜力评估、开发早期压裂增产以及中后期化学驱、气驱、热采等提高采收率技术的优选与应用^[14]。此外,教学内容还延伸至油田废弃后的土地复垦、环境修复与碳封存利用等环节,使学生对资源开发与生态治理之间的关系形成较为完整的认识。

3、教学模式与方法的创新实践

围绕课程内容设置,教学中采用案例讲授、专题研讨、模拟训练与项目实践相结合的方式。不同环节各有侧重,既用于讲清技术原理,也用于训练方案比较、结果分析和汇报表达。

(1)“战略-技术-案例”三位一体教学。围

绕各专题内容,课程先结合国家能源安全和油田开发中的实际问题说明相关技术提出的背景,再讲授提高采收率原理、技术进展及适用条件,并选取典型油田案例组织讨论。讨论的重点不放在概念罗列上,而是结合储层条件、开发阶段和现场实施条件,分析不同技术的适用范围及对应工程问题。

(2)多学科交叉融合解决复杂问题。针对致密油藏提高采收率与高效开发中的具体问题,课程在教师指导下组织学生开展技术调研、方案设计、模拟分析和汇报交流。在此过程中,根据问题需要引入人工智能、物理化学、材料科学及CCUS等相关内容,以增强对储层改造、流体作用机制和开发方案优化问题的综合分析。

(3)“虚拟仿真-数字孪生”实验平台。课程依托致密油藏开发数字孪生虚拟仿真实验平台,设置地质建模、压裂设计、生产模拟、提高采收率方案预测和碳封存评估等实验内容。教学中要求学生依据模拟结果解释开发现象,并将热一流一力一化多场耦合作用与开发效果联系起来分析。

(4)“政-产-学-研-用”协同育人机制。课程选取我国石油工业在致密油开发中的典型实践案例作为教学材料,并结合大庆油田勘探开发历程介绍“大庆精神”“铁人精神”的形成背景及现实意义。授课过程中,邀请石油石化企业技术专家参与专题讨论和项目指导,使学生能够在具体案例中接触现场需求、技术约束与方案决策过程。

4、课程考核评价体系

课程考核由过程性评价、成果性评价和综合素养评价三部分构成。评价内容既包括平时学习投入,也包括对实际问题的分析、论证与表达情况。

(1)过程性评价(50%)。主要依据专题调研汇报、算法或模拟作业、课堂讨论表现和团队项目阶段汇报进行评价,考察学生平时的投入情况,以及其对前沿文献和技术问题的跟踪、整理与应用情况。

(2)成果性评价(40%)。以综合项目最终成果为主要评判依据,重点考察方案的战略性、创新性、系统性与可行性,同时关注交叉学科知识融合深度、“双碳”目标体现情况,以及技术、经济与环境综合分析的深度。

(3)综合素养评价(10%)。通过项目答辩、小组汇报等环节,考查研究生的逻辑表达、团队协作、

批判性思维和工程伦理意识。

5、课程建设实施成效与未来展望

5.1 初步实施成效

从试点教学情况来看,课程调整后在内容组织和能力训练方面已见到一定成效。学生对致密油高效开发及提高采收率相关问题的理解,已不再停留在单项技术介绍上,而是能够结合地质条件、压裂改造效果、渗流特征及开发制度,对开发方案作较为系统的分析。结课汇报时,学生需选取典型致密油藏开发案例,对井网部署、压裂参数和注采制度进行比较,并说明方案优选的主要依据。此外,教学中也暴露出一些问题,例如部分学生在交叉知识运用、问题凝练和研究思路表达方面仍较薄弱,后续还需结合这些情况对教学内容和组织方式作进一步调整。

5.2 课程未来展望

后续授课时将针对目前《致密油藏高效开发及提高采收率技术》课程教学实践中遇到的问题进行完善:

(1) 课程内容实时更新:根据行业发展和科研进展及时调整教学内容,补充新的工程案例和研究结果,保持课程内容的适用性和前沿性。

(2) 平台拓展升级:进一步完善虚拟仿真和实践教学条件,提高案例分析、方案设计与实验训练的开展效果。

(3) 国际化拓展:在现有授课基础上适度引入国外相关课程资源和学术前沿研究内容,使学生了解不同的研究思路和方法,进一步拓宽专业视野。

6、结论

《致密油藏高效开发及提高采收率技术》课程建设,主要围绕致密油开发相关课程中内容分散、案例支撑不足和综合能力训练不够等问题,对教学内容、教学方式和考核方法进行了调整。初步教学实践表明,将地质工程协同分析、多物理场作用机理、开发参数优化和提高采收率方法纳入统一教学框架,有助于增强学生对复杂工程问题的整体认识,也有利于提升其方案分析和表达能力。后续仍需结合教学反馈,在案例库建设、平台支撑和跨学科协同教学等方面继续完善,以进一步提高课程建设质量和人才培养效果。

参考文献

[1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共

产党第二十次全国代表大会上的报告 [M]. 北京:人民出版社,2022.

[2] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景 [J]. 石油学报,2012,33(3): 343-355.

[3] 邹才能,杨智,朱如凯,等. 中国非常规油气地质学 [M]. 北京:石油工业出版社,2021.

[4] 孙龙德,邹才能,朱如凯,等. 中国致密油气藏开发理论认识与矿场实践 [J]. 石油勘探与开发,2021,48(5): 1-12.

[5] IEA. World Energy Outlook 2023[R]. Paris: International Energy Agency, 2023.

[6] 张烈辉,刘启国,李晓平,等. 碳中和背景下油气田开发工程面临的挑战与对策 [J]. 天然气工业,2022,42(1): 1-11.

[7] 李阳,薛兆杰,程奇,等. 页岩油气有效开发之道:地质工程一体化 [J]. 中国石油勘探,2021,26(1): 1-10.

[8] 康毅力,陈一健,游利军,等. 致密储层多尺度孔喉系统与流体传输机制 [J]. 石油学报,2019,40(11): 1307-1320.

[9] 郭建春,曾凡辉,王坤杰,等. 压裂液与页岩相互作用机理及对裂缝导流能力的影响 [J]. 石油勘探与开发,2017,44(6): 1-9.

[10] 姚军,张凯,曾慧,等. 页岩油藏注CO₂提高采收率机理研究进展 [J]. 石油学报,2020,41(12): 1623-1637.

[11] 刘德华,王海应,陈建勋,等. 人工智能在油气田开发中的应用现状与展望 [J]. 石油勘探与开发,2021,48(3): 1-13.

[12] 罗健辉,李宜强,王强,等. 纳米流体提高采收率技术研究进展 [J]. 石油学报,2019,40(2): 221-237.

[13] 孙金声,吕开河,白英睿,等. 智能钻井液技术研究进展与发展趋势 [J]. 石油勘探与开发,2018,45(4): 1-10.

[14] 国家能源局. 关于加快推进能源数字化智能化发展的若干意见 [Z]. 2023.

基金项目: 中国石油大学(北京)研究生教育质量与创新工程课程建设类重点项目《“非常规油气开发”专业特色课程建设》,课题编号:yjs2022012