

PETROLEUM ENGINEERING GEOLOGY

石油工程地质

师永民 张玉广 著



科学出版社

石油工程地质

师永民 张玉广 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

石油工程地质是面向石油的工程地质研究,以工程地质理论、方法为基础,针对地下油气藏特定的地质环境,从岩体、岩体物理及岩体地球物理角度揭示油气藏岩体工程内在的规律性,建立地下复杂围压条件下的三维岩体力学和应力场大小及方向分布模型,为油田矿场工程设计、实施和管理等提供决策依据。

本书可作为高等院校石油工程、石油地质和工程地质等相关专业教材,也可作为石油科研院所和生产一线从事地质、测井、物探、钻井、完井、采油、油气藏研究及管理等相关人员的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

石油工程地质 / 师永民, 张玉广著. —北京: 科学出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-03-049006-3

I. ①石… II. ①师… ②张… III. ①石油工程—工程地质—研究 IV. ①TE

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 141169 号

责任编辑: 王 运 韩 鹏 李 静 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 1 月第四次印刷 印张: 21

字数: 500 000

定价: 218.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

工程地质广泛地应用于城市建设、铁路、涵洞、桥梁、大坝、水库、矿山等工程设计和滑坡、泥石流等自然灾害研究中,作为地质学的一个重要二级学科,经过近百年的发展,已经形成了较为系统的理论体系、工作方法和技术手段。然而,工程地质在石油工程中涉足相对较少,或没有得到广泛的应用和重视。随着油田开发的深入和难采、非常规油气田的不断发现,单靠传统的石油地质和石油工程很难解决诸如套损套变、出砂防砂、复杂钻井中井壁稳定性、复杂井况完井、水力压裂、注水强度、采油工作制度、井网、井距及井排展布方向等油气勘探开发过程中遇到的难题,发展传统近地表的工程地质方法原理,将其应用到地下复杂的油气藏开采中可以弥补这方面的不足。这也是本书的初衷,希望能更好地解决油田矿场勘探开发中遇到的实际问题。

石油工程地质是一门研究与石油天然气勘探开发有关的工程地质问题的前缘交叉学科,具有很大的潜力和发展空间。它以石油地质学、地质力学、岩石力学、岩体力学、工程地质学、地球物理学、油气藏物理学、储层地质学和钻(完)井工程、采油工程及油气藏工程等多学科理论方法为基础,把三维地震叠前弹性信息和多极阵列声波等现代地球物理前沿技术手段引入到石油工程矿场应用中;又以油气藏岩体力学和地应力场为主线,以室内岩体力学测试实验为依据,以数理统计、分析与建模为手段,通过岩心测试分析、测井与地震关联,从油气藏岩体物理角度揭示石油地质与石油工程之间的内在联系。该学科可实现油气勘探开发丰富优质资源的高度共享,整合勘探与开发、地质与工程、试验与研究等工作流程与体系,改变目前传统的工作方式,从而提高勘探开发工作效率。

石油工程地质以传统的工程地质理论、方法为基础,以地应力为线索将石油地质与石油工程紧密地结合起来,明确了石油工程地质的概念、内涵和外延,创建了系统严密的油气藏岩体物理理论支撑体系,形成了配套的岩体地球物理和数值模拟系列方法与技术,实现了油气田矿场中可操作的地震、测井、钻井、完井、采油和油气藏工程的工业化应用,丰富和完善了石油地质与油气田开发理论及技术。拓展了工程地质、地震、测井等学科的应用领域,搭建了石油地质与石油工程一体化工作平台。

现代油气藏勘探开发是一个高度综合、庞大复杂的系统工程。在实际工作中,它需要多领域、多学科、多专业综合研究协同作战。为此,应以地质力学、石油地质学、石油工程、工程地质、地球物理、岩体力学、计算机科学、现代数学为基础,在储层地质建模基础上,基于地震技术的应力场建模,最终建立全油藏、全三维应力场大小及方向的分布数据体,优化钻完井、油藏工程及采油工程设计与现场实施。

本书创建了地下深处油气藏岩体复杂围岩、变温、变压等地质条件下,多孔、多相及非均质的油气藏岩体物理理论,并将钻井取心实验、测井计算与三维地震叠前弹性参数反演相结合,建立油气藏三维空间上精细岩体力学参数和非均质应力场初始数字模型。并可借此进一步精确模拟油气田开发过程中地应力场三维非稳态变化,可满足钻(完)井工程、采油

工程和油藏工程对油气藏储层参数、岩石（体）力学参数和地应力场非对称耦合匹配的量化精准要求，从而指导低渗透、难采、非常规油气藏经济有效开发。

通过建立油气藏岩体力学和三维网格应力大小及方向数字模型，结合整体压裂理论，开展随井间储层和应力场变化的全缝长压裂数值模拟，获得井筒以外人工裂缝的高度、长度及裂缝的走向。开展人工裂缝与注采井网的匹配关系研究，确定压裂井泄油区域非规则几何体形状。按照非规则泄油区域部署井网，进行整体压裂优化设计方法研究，形成难采油田直井-水平井非对称立体式井网整体压裂理论方法和系列技术。

本书突破了传统以点带面的岩石力学及地应力场研究方式，而从岩石→岩块→岩层→岩体认识点、线、面、体，避免微观代替宏观、岩块实验代表岩体的研究方式，提出油气藏岩体的新概念，通过油气藏岩体物理理论研究，借助地球物理手段实现油气藏三维应力场数值模型，获得不同井点、不同储层条件下的应力大小及方向，满足石油工程对地应力的精准要求。

实现多学科协同作战，建立起从勘探到开发整个过程的地质与工程一体化工作平台，使得围绕一个目标多个领域、多学科、多部门能在一个平台上协调工作，充分实现各项工作无缝连接，实现在油气勘探开发领域大量优质资源、信息、成果的高度共享。

今后勘探开发对象的多样性与复杂程度将不断增加，这将对地应力的研究和认识提出更高要求，并且需要更加精准的模型以满足石油工程的设计实施。目前的预测方法仅为一个尝试，虽然它提高了分辨率并完善了技术方法，但在诸如非储层段套损预测、复杂火山岩水平井改造、大段泥岩应力确定等问题上，还需开展进一步研究。

油气藏应力场研究是一个复杂的问题，本书作者十余年来做了大量的尝试性的探索，形成一系列理论和配套技术。然而对于诸如块状厚层火山岩、碳酸盐的地应力如何求取、地应力场如何更加精细准确的建立、裂缝性储层天然裂缝对应力场的影响、前期油田开发中，由于压裂高压注水等形成的动态裂缝如何求取等许多问题还存在不足，有待进一步探索提高。

面向钻（完）井工程、采油工程和油藏工程的石油工程地质研究是今后油田发展的一个研究应用热点，也是中国在强非均质、难采油气田、非常规油气藏开发方面提高国际竞争力的瓶颈技术。在勘探开发整个过程的应用中，油气藏岩体地应力研究，尤其是低渗、特低渗及非常规油气藏岩体地应力研究，应该提到与油气藏储集层物性研究同等地位上来。复杂地质条件下的油气勘探开发今后将越来越表现出工程与地质一体化研究的重要性，它迫切需要工程与地质结合的边缘交叉综合理论体系、实用技术与科研人才结合的复合型管理人才，从而形成工程与地质有机结合的组合创新。

石油工程地质所展示的成果是近20年来北京大学与大庆采油工程研究院研究群体集体智慧的结晶，主要参加人员还有王磊、赵晔、师春爱、韩松、秦小双、刘宇、吴文娟、张永平、李晓敏、王贤君、柴智、张志祥、寇彧、贺顺义、吴洛菲、郭馨蔚、熊文涛、徐蕾、杜书恒、师翔、方媛媛、盛英帅、张恩瑜、张天骥、梁帅、张志强、梁耀欢、师俊峰、王哲麟、孟辉、兰开军等。

此外，在编写过程中还得到了江同文、宋新民、杨悦、杨华、刘洪涛、李兆国、陈树民、赵杰、方庆、李宪文、靳文琦、徐启、姜洪福、方国庆、刘新菊、王小军等专家和领导的帮助与指导，在出版过程中科学出版社给予了大力的支持，在此表示深深的感谢！

师永民

2016年5月于北京大学

目 录

前言

第 1 章 石油工程地质概论	1
1.1 石油工程地质基本概念、内涵和外延	1
1.1.1 石油工程地质基本概念	1
1.1.2 石油工程地质内涵	1
1.1.3 石油工程地质外延和适用范围	2
1.1.4 石油工程地质与工程地质学的关系	3
1.1.5 石油工程地质与石油地质学的区别	3
1.1.6 石油工程地质与石油工程的关系	4
1.2 石油工程地质研究目的和任务	5
1.2.1 石油工程地质研究目的	5
1.2.2 石油工程地质的研究任务	8
1.2.3 石油工程地质的研究意义	10
1.3 石油工程地质研究内容	11
1.3.1 油气藏岩体物理与岩石强度理论	11
1.3.2 油气藏岩体力学研究	11
1.3.3 测井岩体力学参数求取	11
1.3.4 三维地震叠前弹性参数反演	11
1.3.5 多信息融合岩体三维力学模型建立	12
1.3.6 油气藏应力状态分析	12
1.3.7 构造应力场恢复模拟	13
1.3.8 初始模型建立和四维非稳态地应力场变化	13
1.3.9 钻井工程地质研究	13
1.3.10 采油工程地质研究	14
1.3.11 油藏工程地质研究	14
1.4 石油工程地质的特点和研究方法	14
1.4.1 石油工程地质的特点	14
1.4.2 石油工程地质研究方法	18
1.4.3 石油工程地质研究所采用的技术	19
1.5 国内外研究现状和发展趋势	20
1.5.1 工程地质学发展简史	20
1.5.2 相关学科发展现状	21
1.5.3 制约石油工程地质发展的瓶颈技术	25

1.5.4 石油工程地质展望	26
讨论与思考	29
第2章 油气藏岩体	30
2.1 油气藏岩体概述	30
2.1.1 工程地质学中的岩体	30
2.1.2 油气藏岩体的概念、内涵和外延	32
2.1.3 油气藏岩体与近地表岩体的异同	34
2.1.4 油气藏岩体研究方法和手段	36
2.2 油气藏岩体结构	37
2.2.1 油气藏岩体结构概述	37
2.2.2 油气藏岩体中的结构面	38
2.2.3 油气藏岩体中的结构体特征	57
2.2.4 油气藏岩体结构控制机制	62
2.2.5 油气藏岩体类型与岩体特征	64
2.3 油气藏岩体变形与破坏	68
2.3.1 油气藏岩体变形与破坏机制	68
2.3.2 油气藏岩体本构关系	72
2.3.3 油气藏岩体强度理论	77
2.3.4 岩体变形与破坏过程中尺度效应	83
2.4 油气藏岩体中裂缝扩展模型	85
2.4.1 储层岩石破裂机理	85
2.4.2 油气藏岩体破坏形式	86
2.4.3 油气藏流体对裂缝扩展模型的影响	89
2.4.4 裂缝扩展的基本模型	90
2.5 各种油气藏岩体的变形与破坏形式	93
2.5.1 砂岩油气藏的变形与破坏	93
2.5.2 砂砾岩油气藏的变形与破坏	93
2.5.3 致密砂岩油气藏的变形与破坏	93
2.5.4 页岩气藏的变形与破坏	93
2.5.5 煤层气藏的变形与破坏	94
2.5.6 碳酸盐岩油气藏的变形与破坏	94
2.5.7 火山岩油气藏的变形与破坏	94
2.5.8 变质岩油气藏的变形与破坏	94
2.5.9 储层岩石变形与破坏的基本特征	95
2.6 油气藏岩体的各向异性	96
2.6.1 油气藏地质体的各向异性	96
2.6.2 油气藏岩体力学性质的各向异性	98
讨论与思考	99

第3章 油气藏岩体力学	101
3.1 工程地质中的岩体力学概述	101
3.1.1 岩体力学概述	101
3.1.2 岩体力学研究内容	102
3.2 多孔介质储层矿物力学	102
3.2.1 矿物的解理	103
3.2.2 矿物的裂开与渗流条件的改善	105
3.2.3 矿物的弹性力学性质	106
3.2.4 矿物的硬度	107
3.3 油气储层岩石力学	108
3.3.1 油气储层岩石力学概述	108
3.3.2 钻井取心岩石力学参数测定	110
3.3.3 油气储层岩石力学特性	115
3.3.4 储层岩石力学性质表征	124
3.3.5 储层岩石力学性质影响因素	131
3.4 油气藏岩体力学	139
3.4.1 油气藏岩体力学概念	139
3.4.2 油气藏岩体力学内涵	140
3.4.3 油气藏岩体力学外延	141
3.4.4 油气藏岩体力学研究内容	142
3.4.5 油气藏岩体力学表征	142
3.4.6 油气藏岩体力学特点	144
3.5 油气藏岩体力学原位模型恢复	146
3.5.1 温度原位模型恢复	147
3.5.2 围压原位模型恢复	152
3.5.3 孔隙流体原位模型恢复	155
3.5.4 孔隙压力原位模型恢复	160
3.5.5 环境条件对岩体力学性质的影响	162
3.6 非均质油气藏岩体力学三维参数模型建立	163
3.6.1 三维岩体力学参数建模概况	164
3.6.2 多信息融合非线性数字处理	165
3.6.3 岩体力学参数三维模型建立	167
讨论与思考	168
第4章 油气藏岩体非稳态地应力场	169
4.1 油气藏岩体非稳态应力场表征	169
4.1.1 地应力在石油工程中的重要性	169
4.1.2 油气藏地应力研究的主要内容	170
4.2 油气藏应力状态分析	170
4.2.1 地应力概念	170

4.2.2	与油气藏相关的几个地应力概念	171
4.2.3	地应力场性质	174
4.3	油气藏地应力测定	177
4.3.1	油气藏地应力测量方法	177
4.3.2	油气藏矿场地应力测定	178
4.3.3	油气藏岩心地应力测定	194
4.4	地应力的影响因素	195
4.4.1	构造应力对地应力的影响	195
4.4.2	地应力随深度的变化	196
4.4.3	断层类型与地应力场的关系	196
4.4.4	不同岩性中地应力的变化规律	197
4.4.5	岩石流变性对水平应力的影响	198
4.4.6	硬地层中构造应力分量	198
4.4.7	不同岩类应力差异	198
4.4.8	孔隙压力变化对地应力的影响	199
4.4.9	地层温度对地应力的影响	201
4.4.10	地质构造形态对地应力的影响	201
4.4.11	油田开发引起地应力场的变化	203
4.5	地应力叠加与多场耦合	203
4.5.1	岩体自重产生的地应力	203
4.5.2	水平应力计算	204
4.5.3	地层孔隙压力	204
4.5.4	温度变化产生的附加应力	205
4.5.5	总原地应力	205
4.6	油气藏岩体地应力分层	206
4.6.1	地应力纵向分层特征	206
4.6.2	地应力纵向分层依据和方法	207
4.6.3	应力分层与压裂纵向延伸	209
4.6.4	应力分层与压裂效果分析	214
4.7	构造应力场恢复模拟	216
4.7.1	构造应力表达	216
4.7.2	构造应力场恢复模拟过程	217
4.7.3	构造反演恢复正演模拟	217
4.7.4	应变分析	218
4.7.5	应变量的计算	218
4.7.6	相对应变平面分布预测	220
4.8	油气藏三维应力场初始模型建立	221
4.8.1	应力场建模的方法技术	221
4.8.2	应力场建模的步骤	221

4.9 三维非稳态应力场变化有限元数值模拟	227
4.9.1 三维非稳态应力场的基本概念	227
4.9.2 多孔介质应力平衡方程和有限元方程	228
4.9.3 多相流体连续性方程和有限元方程	235
4.9.4 非稳态系统的有限元方程	237
讨论与思考	241
第5章 石油工程地质应用	242
5.1 钻井工程地质应用	242
5.1.1 钻井工程地质概述	242
5.1.2 三项压力预测	243
5.1.3 井壁稳定性预测	247
5.1.4 常规水平井轨迹优化	256
5.1.5 非常规分支水平井设计优化	259
5.2 完井地质工程应用	260
5.2.1 地应力与优化射孔	260
5.2.2 非常规页岩气完井技术	263
5.3 油气藏工程地质应用	266
5.3.1 油气藏工程地质概论	266
5.3.2 开发初期地应力与井网匹配优化设计	267
5.3.3 开发中后期综合调整与治理	271
5.4 采油工程地质应用	275
5.4.1 采油工程地质概述	275
5.4.2 油气藏压裂改造	276
5.4.3 套损套变预测与防治	299
5.4.4 油井出砂预测与防治	305
讨论与思考	314
结束语	316
参考文献	317
附录	322

第1章 石油工程地质概论

1.1 石油工程地质基本概念、内涵和外延

1.1.1 石油工程地质基本概念

石油工程地质是一门研究与石油有关的工程地质问题的学科，是为适应油气田矿场需求而逐渐兴起的一门前缘交叉学科。该学科以工程地质为基础，油气藏岩体结构、结构面和结构体物理界面特性及地球物理响应为理论支撑体系，综合钻井、取心、测井、地震等地球物理手段建立地下三维空间上岩体力学参数模型，定量模拟计算地下深处变温、变压、多孔、多相、非均质油气藏空间上任意一点三维岩体力学和地应力场大小及方向，紧密结合油气藏储集层构造、岩性、岩相、物性等特征，强化油气藏地质与工程的有机结合，指导钻井、完井、采油、油藏等石油工程设计和现场实施及油藏管理方面的工作。

从上述石油工程地质的概念可以看出，它属于工程地质范畴，可以理解为面向石油的工程地质，而不能理解为石油工程与石油地质的简单结合。将传统近地表工程地质原理和方法应用到地下油气藏中，对其加以丰富和完善，进而更好地指导油气田勘探开发和工程设计。油气藏岩体的地球物理解剖及力学场研究是其重要的研究内容。

石油工程地质概念是在油田、矿场实践需求中提出来的。近年来，随着应用地球物理和数值模拟理论与技术的发展而迅速发展，使得构建地下油气藏岩体三维空间连续变化的岩体力学参数场成为可能，并可进一步量化模拟勘探开发过程中地应力场非稳态变化过程，满足石油钻井工程、完井工程、采油工程和油气藏工程的设计与实施对储层参数、岩体力学和地应力大小及方向的量化精准要求。

1.1.2 石油工程地质内涵

石油工程地质是工程地质的一个分支，主要是开展面向石油的工程地质各项研究工作。其核心内容是：以工程地质基本理论为基础，利用岩心、测井、地震等资料，以油藏建模和模拟为手段，研究油气藏岩体三维空间上任意一点应力的方向和大小，以及随着工程条件的变化定量模拟非稳态应力场的变化过程，为钻井工程、完井工程、采油工程和油藏工程优化设计和实施提供科学依据。

在长期的油气田勘探开发和工程实践中，人们自觉和不自觉地在研究岩石力学和地应力测定、地层压力预测、测井力学参数求取等地下油气藏工程地质问题，只是没有将其提炼为一个明确的概念、系统的理论体系、工作方法或流程。一般是从岩心实验测定和测井计算出

发, 局限于井筒或井筒中的某一点; 在进行钻井实施过程中以往多考虑井周, 保证井壁稳定; 在油藏开发方案编制中用井点代表全区进行井网设计; 在大批井钻井之前无法得到油气藏整体应力场分布等。诸如此类带来的问题是: 对一个油气藏而言, 其整体应力是稳定的或者是拟稳定的, 而对于具体油气藏区块, 由于构造、储层、非均质及应力扰动, 区块内的应力大小及方向差异较大, 直接影响钻(完)井、油气藏改造以及开发方案设计, 尤其是对于非常规油气藏与火山岩、变质岩、碳酸盐和类似鄂尔多斯三叠系超低渗、大庆长垣外围特低渗零散砂体等复杂油气藏, 毫无疑问直接影响开发部署设计及开发效果。

本书针对油气田矿场开发中对地质与工程的不同需求, 紧密围绕面向石油的工程岩体力学和地应力问题, 以工程地质学、石油地质学、地质力学、地球物理学、储层地质学、岩石及岩体力学、计算机信号处理和数值模拟、油气储层改造及油气藏工程等多学科理论和方法为指导, 形成石油工程地质系统理论与方法。创建地下深处复杂围岩条件下油气藏岩体物理理论, 并通过钻井取心、测井计算与三维地震叠前弹性参数反演相结合, 建立油气藏三维空间上任意一点岩体力学数学模型和非均质应力场大小及方向数值模型。依据岩体破裂理论进行全缝长压裂数值模拟、缝网匹配与方案优化、套损套变预测与防治、出砂预测与防砂、射孔方式优化、水平井轨迹优化设计、井身结构优化、完井方式、井壁稳定性研究等。

1.1.3 石油工程地质外延和适用范围

石油工程地质是石油工程、石油地质和工程地质等学科的高度综合与交叉, 不能简单地看做是上述某几个学科的结合。它们涉及的内容既有相对的独立性, 又有相互耦合、叠加与约束的关联性; 既有区别, 又有联系。石油工程地质将传统近地表工程地质学的基本概念、原理和方法延伸到地下复杂围岩条件下的多孔介质、饱和流体油气藏中, 并紧密围绕石油工程对工程地质模型的精准需求, 以油气藏岩体物理理论为核心, 形成具有自己独特外延和适用范围的一门新的面向石油的工程地质分支学科。它聚焦了石油工程中对地下深处油气藏岩体力学和地应力场变化的精准要求, 形成一系列理论、技术和方法, 并应用到石油工程设计和实施及管理。

石油工程地质的研究对象是地下深处油气藏复杂的围压条件下, 具有高温、高压、多孔介质、多相流体、非均质的油气储层材料, 而且随着油气藏勘探开发进程的不断深入, 这种材料本身的组成、结构、构造还在不断地发生变化。可见, 石油工程地质面向的对象十分复杂。

石油工程地质既是工程地质研究目标的扩大、应用领域的延伸, 也是石油行业油气勘探开发研究角度及内容的扩充; 更是石油工程与油藏地质的有机结合。不能简单地看成是石油工程的地质, 它同其他建筑、铁路、涵洞、大坝、矿山等工程地质一样, 属于工程地质范畴, 只不过面向的对象是油气藏岩体, 包括各种结构面、结构体, 以及结构体内部各种物理特性。传统工程地质面向的对象是地表或近地表, 而石油工程地质面向的对象在地下数百米至数千米的深处, 具有多孔介质、多相流体、非均质的复杂围压条件, 与地表或近地表工程地质研究相比, 在手段和方法上具有一定的区别, 除应用岩心室内测试外, 地震和测井是其主要手段。

1.1.4 石油工程地质与工程地质学的关系

1. 工程地质学概况

工程地质学是地质学中一个应用广泛的分支学科,产生于地质学的发展和人类工程活动经验的积累。20世纪50年代,根据国家建设和大量矿山开发的需要,工程地质学从理论、方法到技术均获得较快发展。90年代,三峡大坝等大型工程建设进一步推进了工程地质学的快速发展,到目前逐渐成为较为系统、成熟的专业学科,在地质院校和矿业院校中占有重要的地位。

2. 工程地质学涉足石油领域较少

工程地质学主要研究建设地区和建筑场地中岩体、土体的空间分布规律和工程地质性质,控制这些性质的岩石、土壤成分与结构,以及在自然条件和工程作用下这些性质的变化趋势,制定岩石和土壤工程地质分类。由于各类工程建筑物的结构、作用、所在空间范围内的环境不同,所以可能发生的地质作用和工程地质问题也不同。

工程地质学的研究方法主要包括:①运用地质学理论和方法查明工程地质条件和地质现象空间分布、发展趋势;②测定岩(石、土)体物理、化学特性,测试地应力等;③利用测试数据,定量分析评价工程地质问题的计算方法;④利用相似材料和各种数理方法,再现和预测地质作用的发生、发展过程。随着计算机技术普及和发展,工程地质专家系统也在逐步建立。

目前,工程地质学分为水利水电工程地质学、道路工程地质学、采矿工程地质学、海港和海洋工程地质学和城市工程地质学等。从工程地质研究的内容、手段、技术和方法看,面向的对象是地表或近地表,很少涉及地下深处复杂的油气地质问题。在石油院校中目前还没有设置相应的专业。

3. 石油工程地质与工程地质学的关系

工程地质学主要分析和预测在自然条件和工程建筑活动中可能发生的各种地质作用和工程地质问题,如地震、滑坡、泥石流,以及诱发地震、地基沉陷、人工边坡和地下洞室围岩的变形,或因破坏、开采地下水引起的大面积地面沉降、地下采矿引起的地表塌陷,及发生的条件、过程、规模和机制等,评价它们对工程建设和地质环境造成的危害程度,以及研究制定防治不良地质作用的有效措施等。

石油工程地质主要是研究地下深处复杂环境下的油气藏岩体,目的是把当今工程地质学的理论与方法成功地应用到地下深处油气藏复杂的地质环境中去,继承和吸收工程地质学成熟的理论和方法,不断地创新发展,最终形成相对独立的专业学科。

1.1.5 石油工程地质与石油地质学的区别

石油工程地质与石油地质学、石油开发地质学在研究内容、研究目的、方法和手段及资料来源上具有一定的区别,见表1.1。

从表1.1中可以看出石油地质学主要研究的是油气藏生、储、盖、运、圈、保等,以及

与油气成藏有关的问题，主要是评价与探明油气藏，而石油工程地质主要是研究油气藏岩体力学与地应力场分布特征，为钻井、完井、油气层改造、预防套损套变和油气层出砂，以及为油气藏工程方案设计提供可靠的工程地质依据。

表 1.1 石油工程地质与工程地质学、石油地质学、石油开发地质学对照表

类别	工程地质学	石油地质学	石油开发地质学	石油工程地质
研究内容	岩土工程性质、工程动力地质作用、工程勘察理论和技术方法、区域工程地质	围绕油气成藏和富集开展生、储、盖、运、圈、保六大要素研究	小层划分与对比、流动单元、微构造、沉积微相、储层非均质及油藏流体研究	油气藏岩体力学、应力场、工程设计参数优化、指导矿场施工
研究目的	工程建筑规划、设计、施工和运行，使得工程建筑与地质环境协调	寻找有利目标区，部署探井、评价井，提交控制、预测及探明储量	早期搞清油藏地质特征，建立油藏地质模型，编制开发方案；中后期搞清剩余油分布，提出综合调整方案	为钻井、完井、压裂改造等工程设计和矿场施工提供可靠的工程地质依据
研究方法	自然历史分析方法、数学力学分析方法、模型模拟实验和工程地质类比	综合地震、物化探资料进行圈闭评价、成藏条件分析，盆地模拟，提出钻探部署井位	主要应用大量的密井网资料开展油藏精细描述、油藏地质建模、油藏数值模拟	岩心测定和测井解释的力学参数，同时结合叠前弹性参数反演、油气藏岩体力学建模，从而确定应力场大小及方向
手段和资料来源	钻井、岩心、测井、地震、试油、试采、生产动态，研究的资料来源基本相同			

1.1.6 石油工程地质与石油工程的关系

从石油工程地质与石油工程、石油地质和工程地质的异同点来看（表 1.1），其目的在于从工程地质角度为石油工程方案设计和实施提供工程地质依据。面对今后越来越多的难采储量和非常规油气开发，单靠传统的某一两个专业学科很难获得经济有效开发。图 1.1 列出

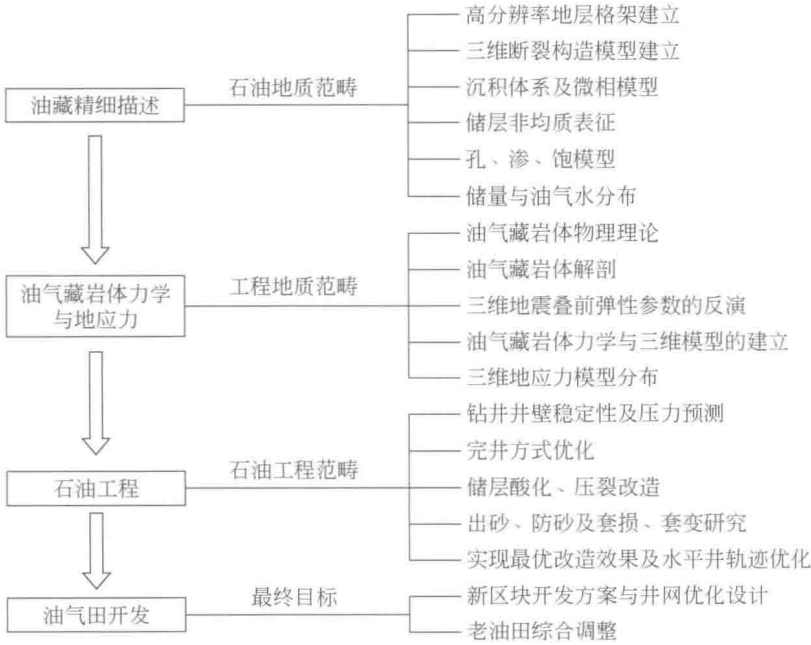


图 1.1 难采-非常规油气田及老油田今后有效开发的解决思路

了难采-非常规油气田及老油田今后有效开发的解决思路和发展方向,从中可以看出,石油工程地质扮演着承上启下的重要角色。

石油工程地质研究的核心是通过油气藏岩体物理理论,借助地震和测井等地球物理手段,进行油气藏岩体解剖,建立岩体力学和地应力场三维空间分布模型,指导钻完井工程、油藏工程和采油工程的设计与矿场实施,提高工程施工成功率。

1.2 石油工程地质研究目的和任务

1.2.1 石油工程地质研究目的

石油工程地质研究目的是从工程地质角度为石油工程优化设计和实施提供科学依据,主要体现在以下八个方面。

1. 开展油气藏岩体解剖

石油工程地质研究的对象是油气藏岩体,首先要对油气藏岩体的结构体与结构面进行识别与描述,开展油气藏岩体解剖,建立油气藏岩体结构模型。重点开展以下三个方面的工作:①对结构体的大小、形状等进行精细准确的描述;②对结构面的大小、几何形状、走向、性质、连通性、渗透性等进行详细刻画;③对结构体与结构面空间排列组合,以及其分布与相互关系进行系统描述(图1.2)。

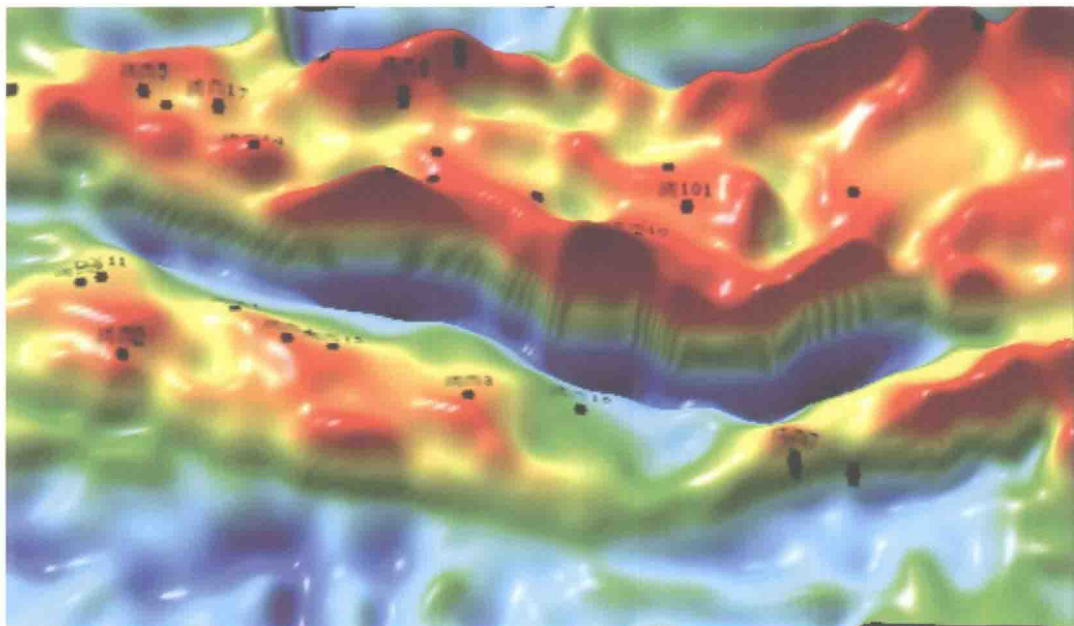


图1.2 准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系气藏岩体分布特征俯视图

2. 搞清油气藏岩体变形与破坏机理

在油气藏岩体精细描述的基础上,进一步对其变形与破坏机理进行剖析,对油气藏岩体在地下深处特定的温度、围压以及饱和流体的环境中受力变形与破坏特征(尤其是结构面的变形与破坏机理)需要进行深入了解,包括变形与破坏的机理,变形破坏程度等。

3. 建立油气藏岩体力学三维空间展布模型

非常规、特低渗、低丰度等难采油田的有效开发和低渗透油田开发中后期进一步提高采收率是今后油气田开发的一个重要方向。如何实现这些复杂地质条件下的非达西、非规则井网有效开发,人工裂缝空间展布与井网最佳匹配实现非达西有效驱动是瓶颈技术,在于综合测井、地震开展岩体力学场三维建模和应力场变化过程模拟。

在储层压裂改造中,无论是压前预测,还是压后评估,关键技术是实现随井间储层和应力场各向异性变化的压裂全缝长数值模拟,获得压裂缝缝高、缝长、裂缝面的几何形态及裂缝的走向。

4. 三维地应力场模拟计算

油气藏岩体大多是埋藏在地下岩层深处复杂围压环境下,而且是多孔介质、饱含多相流体、非均质性比较强的地质体。与近地表相比,地下深处温度、压力比近地表要大得多,并且饱和了油气水多相流体,其应力状态极其复杂。要想了解地下储层深处应力状态,必须应用多学科综合建立地应力场空间连续非稳态变化的数字模型。

油气藏非稳态应力场模拟主要研究内容包括:①油气藏应力状态分析;②油气藏矿场地应力测定和岩心实验室地应力测定;③纵向地应力分层;④构造应力场恢复模拟;⑤油气藏三维应力场初始模型建立;⑥多孔介质非均质储层材料随钻采和压裂及开发过程中应力场变化模拟等。

5. 开展钻井三项压力预测

地层孔隙压力、地层破裂压力和地层坍塌压力(即地层三项压力)是钻井设计的基础和重要依据。对于地层孔隙压力的预测主要是通过邻区邻井钻后地层孔隙压力测试和试油试采资料来计算,预测设计井。地层破裂压力则主要是利用压裂施工时或进行钻后特殊测井的检测(如偶极子阵列声波测井)的破裂压力。地层坍塌压力是由于钻井液密度的降低,井眼围岩的剪应力提高,当超过岩石的抗剪强度时,岩石将发生剪切破坏时的压力,它主要与井眼围岩的应力大小及井眼内的钻井液密度有关,是通过有效应力模拟计算或钻后全波列测井资料计算。

6. 优化完井方式

完井方式一般根据油气藏地质特征来确定,以满足油气能正常生产。依据油气藏岩体力学性质不同采取相应的完井方式。根据油气藏岩体储层特征与地应力稳定性,不但能保证正

常完井,最关键的是有利于今后油气井正常生产。例如,预测套管变形,在应力薄弱处要采取套管加厚,优化套管组合;预测易出砂的井段,采用防砂完井方式。另外,根据井筒和近井地带三维应力变化和油层状况优选射孔层段,确定射孔密度或选择定向射孔方式等,同时结合井间的三维应力变化状况,优化压裂设计。

7. 进行压前预测和压后评估

在压裂前需要对压裂施工参数进行优化,或对压裂结果进行预测,了解油气藏岩体强度特征与地应力状态,推断有无天然裂缝及其发育程度(图1.3),根据目标产量来优化压裂设计施工方案。压裂后也需要依据试油产量及微地震监测裂缝几何形态或缝网改造体积(SRV)结果等对其效果进行评估,分析应力模型是否与实际吻合,判断压裂设计是否合理等。

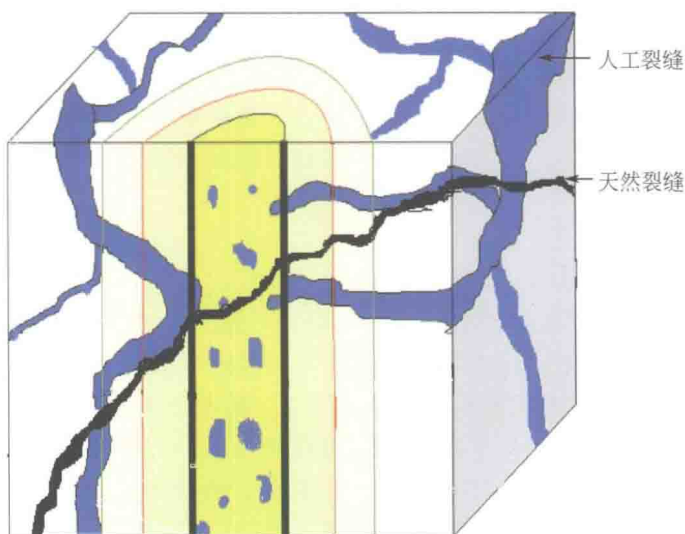


图1.3 近井地带天然裂缝和人工裂缝展布示意图

8. 油藏工程方案优化

实践证明,有些油田压裂后井网、井距与裂缝匹配较好,有效地扩大了水驱波及体积,注水开发效果好,达到了预期的目的;而有些油田压裂后井网、井距与裂缝匹配不好,开发效果不理想,后期加密调整及综合治理难度大。其中一个重要因素是无法预知地下裂缝展布的真实形态,包括天然缝、压裂缝和注采过程中产生的动态缝等,尤其是压裂中随井间储层和应力场变化的全缝长展布。全缝长的内涵是对压裂缝几何参数的定量表征,是相对于半缝长而提出来的,强调井筒两边压力缝在长度、高度和走向上分布的不对称性。全缝长的外延仅限于压裂过程中产生的裂缝,可能是多条裂缝,也可能是单条裂缝。为避免难采油田注水开发的盲目性,提高其科学性,对水力压裂过程中全缝长数值模拟理论与技术深入研究是十分迫切的。只有搞清地下裂缝的空间展布及破裂机理,控制缝高、缝长,实施整体压裂,做到裂缝三维空间展布与井网的合理匹配,建立起注水开发有效驱动体系,才能实现低渗透非