

国外油气勘探开发新进展丛书 (一)

GUO WAI YOU QI KAN TAN KAI FA XIN JIN ZHAN CONG SHU

Reservoir Stimulation

Third
Edition

油藏增产措施 (第三版)

Reservoir Stimulation

- 油田注水开发综合管理
- 油藏增产措施(第三版)
- 油藏工程手册
- 油气圈闭勘探
- 储层表征新进展

石油工业出版社

米卡尔 J. 埃克诺米德斯 著
肯尼斯 G. 诺尔特
张保平 蒋 圆 刘立云 张汝生 等译

国外油气勘探开发新进展丛书(一)

油 藏 增 产 措 施

(第三版)

[美] 米卡尔 J.埃克诺米德斯 著
肯尼斯 G.诺尔特

张保平 蒋 阗 刘立云 张汝生 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从油藏工程概念出发,认为油气藏压裂酸化的目标与作用是增产和提高最终经济采收率。书中介绍了与增产研究有关的地层表征方法;试井、岩石力学与测井三个主要部分,接着论述了水力压裂基础、水力压裂力学、压裂液化学与支撑剂、压裂压力分析与裂缝诊断、水力(酸)压裂优化设计与实施,以及最终的压后评估;同时该书也介绍了基岩酸化处理、地层伤害、基岩酸化原理与设计、酸液体系以及基岩酸化评估等内容。

本书可供从事压裂酸化研究与应用的工程技术人员和地质科学家,以及相关院校的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

油藏增产措施:第3版/(美)埃克诺米德斯(Economides, M. J.),
诺尔特(Nolte, K. G.)著;张保平等译. —北京:石油工业出版社,2002.4
(国外油气勘探开发新进展丛书;1)

书名原文:Reservoir Stimulation (Third Edition)

ISBN 7-5021-3718-1

I. 油…

II. ①埃…②诺…③张…

III. ①油藏-采收率(油气开采),提高-方法

②油层水力压裂-理论

IV. TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 015976 号

© Schlumberger 2000

All Rights Reserved. Authorised translation from
the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京乘设伟业科技排版中心排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 53.75 印张 1373 千字 印 1—1000

2002 年 4 月北京第 1 版 2002 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3718-1/TE·2718

定价: 145.00 元

“国外油气勘探开发新进展丛书”

编 委 会

主 任：罗英俊

副 主 任：刘宝和 闫存章 赵政璋 魏宜清

编 委：赵化昆 邓隆武 吴 奇 李海平

张正卿 吴国干 闫世信 岳登台

冉新权 刘德来 王元基 赵帮六

张卫国 周家尧 张仲宏

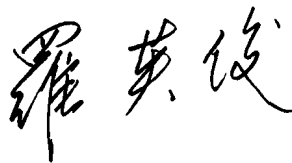
译者代序

中国石油天然气股份有限公司上市以来,油气勘探、生产取得了很大的成绩,为股份公司的发展和价值提升做出了重大贡献。同时,我们应该清醒地看到,现在面临的勘探开发对象越来越复杂,工作难度越来越大,要进一步控制投资和降低成本,实现新的发展,必须在依靠科技进步上做文章;要坚持解放思想,实事求是,用创新思维指导油气田勘探开发工作;不断吸收国外先进的勘探开发技术,为我所用,以提高股份公司整体科技水平。

为了及时了解和跟踪国外油气勘探开发的新理论、新技术、新工艺,提高中国石油天然气股份有限公司油气勘探与生产的理论和技术水平,中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司自 2001 年以来,组织了油气田勘探、开发方面的专家,对国外油气勘探开发方面的新技术、新理论、新成果进行调研。计划用 5 年左右的时间,以丛书出版的形式,系统地介绍国外油气田勘探与生产方面的理论和技术水平,以期能达到促进生产、更新知识、提高业务水平及技术水平的效果。

经过筛选,第一批翻译出版了国外最近出版的 5 本专著,即《油藏工程手册》、《油藏增产措施》(第三版)、《油田注水开发综合管理》、《油气圈闭勘探》、《储层表征新进展》。这 5 本书都是国外最新出版的权威著作,从不同的方面系统地论述了油气田勘探开发的前沿技术及发展方向,从不同的角度反应了国外油气田勘探与生产方面的现有水平和技术发展趋势。

在这套丛书的出版过程中,中国石油天然气股份有限公司有关部门和研究院所的技术人员,以及石油工业出版社做了许多工作。希望大家认认真真读好这套丛书,同时在实践中应用之,这将会对今后的工作起到一定的指导和推动作用,为搞好油田勘探开发,实施低成本战略,创造更大效益做出贡献。



2001 年 10 月

译者前言

本书由美国 John Wiley & Sons Ltd. 于 2000 年出版。该书在其第二版(国内曾于 1991 年由康德泉、李望、周春虎、向世琪等人翻译,由石油工业出版社出版)的基础上对油藏增产措施方面的内容进一步深化、扩展与提高,在很大程度上反映了 20 世纪最后 10 年间压裂酸化研究在理论、技术以及现场应用上取得的更新进展与成果。由 Ahmed S. Abou - Sayed 所撰写的题为“水力压裂,一项永远的技术”的前言对该书作出了高度的评价,认为该书是现代增产技术的经典参考资料。本书由 40 多位著名的科学家、教授与工程师合作完成,是从事油藏增产措施研究与应用的工程师与地质学家的必读之书。

该书从油藏工程概念出发,认为油气藏压裂酸化的目标与作用是增产和提高最终经济采收率。书中介绍了与增产研究有关的地层表征方法:试井、岩石力学与测井三个主要部分;论述了水力压裂基础、水力压裂力学、压裂液化学与支撑剂、压裂压力分析与裂缝诊断、水力(酸)压裂优化设计与实施,以及最终的压后评估;同时该书也介绍了地层伤害、基岩酸化原理与设计、基岩酸化处理、酸液体系以及基岩酸化评估。书中强调了在油藏增产措施研究方法上需采用多学科交叉、渗透,同样也强调了在国内油藏增产技术的研究发展必须进行压裂与油藏工程的组合研究,压裂裂缝提供了改变油气藏流动的有利手段,压裂应成为油气藏管理的重要手段之一。

全书共分 20 章,书中附有大量的实例,在重点章节后还附有 4 个附录以及 61 个旁注,更进一步地剖析了章节中的内容。同时每章都附有重要的参考文献。全书分别由何莉、王多宏翻译前言、第 1,2 章;由张保平翻译第 3,4,6 章;由蒋阒翻译第 5 章(含附录);由朱文翻译第 7 章;由刘立云翻译第 8,11(含附录),12 章及术语表;由王永辉、朱芳兰翻译第 9 章(含附录);由陈作翻译第 10 章;由张汝生翻译第 13,15,17,19,20 章;由王晓泉翻译第 14 章;由邹宏岚翻译第 16(含附录),18 章;全书由吴奇审校。

本书出版过程中得到了中国石油天然气股份有限公司副总裁、中国石油勘探与生产分公司总经理刘宝和和中国石油勘探与生产分公司副总经理闫存章的大力支持,张正卿、刘德来、张仲宏做了大量的组织工作。

译者

2001 年 2 月

版 权 声 明

本书英文书名为“Reservoir Stimulation (Third Edition)”。

本书经由美国 John Wiley & Sons, Ltd. 授权翻译出版, 中文版权归石油工业出版社所有, 侵权必究。

图字 01 - 2001 - 4510 号

目 录

前言	(1)
第1章 石油生产中的油藏增产措施	(8)
1.1 引言	(8)
1.1.1 石油生产	(8)
1.1.2 单位制	(10)
1.2 井底流入动态	(11)
1.2.1 稳定状态的 IPR	(11)
1.2.2 拟稳定状态的 IPR	(13)
1.2.3 瞬态流动(或无限边界作用)的 IPR	(14)
1.2.4 水平井生产	(15)
1.2.5 渗透率各向异性	(19)
1.3 井筒附近区域内的变异	(20)
1.3.1 表皮系数分析	(20)
1.3.2 表皮系数的组成	(21)
1.3.3 部分完井和斜井引起的表皮系数	(22)
1.3.4 射孔表皮系数	(25)
1.3.5 采油工程中的水力压裂	(27)
1.4 油管动态和节点分析	(30)
1.5 油井增产措施的决策方法	(32)
1.5.1 增产措施的经济性	(32)
1.5.2 增产措施的物理限制	(33)
1.6 优化增产计划时油藏工程应注意的事项	(34)
1.6.1 油井泄油体积的几何形状	(34)
1.6.2 油井泄油体积的特征和生产优化方案	(36)
1.7 增产的实施	(40)
1.7.1 基岩增产	(40)
1.7.2 水力压裂	(41)
第2章 油层描述:油井和油藏测试	(43)
2.1 技术的发展历程	(43)
2.1.1 赫诺半对数分析	(43)
2.1.2 双对数曲线图	(44)
2.2 试井诊断中的压力导数	(46)
2.3 从压力瞬态数据进行参数估计	(49)

2.3.1	径向流	(49)
2.3.2	线性流	(52)
2.3.3	球形流	(53)
2.3.4	双孔隙	(54)
2.3.5	井筒储存和拟稳定状态	(55)
2.4	试井解释方法	(55)
2.5	关于层状流量测量的分析	(57)
2.6	层状油藏的测试	(58)
2.6.1	选择性流入动态分析	(59)
2.6.2	多层不稳定试井数据的分析	(59)
2.7	多级井和多分支井测试	(60)
2.8	由压裂注入测试确定渗透率	(60)
2.8.1	Carter 漏失模型的应力衰减分析	(61)
2.8.2	滤饼加油藏压力降滤失模型(Mayerhofer 等人,1993)	(65)
第3章	地层特征:岩石力学	(71)
3.1	引言	(71)
3.2	基本概念	(74)
3.2.1	应力	(74)
3.2.2	应变	(75)
3.3	岩石性质	(76)
3.3.1	线性弹性	(77)
3.3.2	孔隙压力的影响	(79)
3.3.3	断裂力学	(80)
3.3.4	非弹性变形	(82)
3.3.5	破坏	(83)
3.4	岩石力学性质测试	(84)
3.4.1	岩石性质在油藏改造中的重要性	(84)
3.4.2	实验室实验	(84)
3.4.3	应力—应变曲线	(85)
3.4.4	弹性参数	(86)
3.4.5	岩石强度、屈服准则和破裂包络线	(89)
3.4.6	断裂韧性	(90)
3.5	地应力状态	(92)
3.5.1	静态下的岩石	(92)
3.5.2	构造应变	(94)
3.5.3	破坏时的岩石	(94)
3.5.4	孔隙压力的影响	(96)
3.5.5	温度的影响	(97)

3.5.6	主应力方向·····	(97)
3.5.7	井筒附近的应力·····	(97)
3.5.8	水力压裂引起的应力变化·····	(99)
3.6	就地应力测量·····	(99)
3.6.1	地应力测量在油藏增产措施中的重要性·····	(99)
3.6.2	微压裂技术 ·····	(100)
3.6.3	压裂校核技术 ·····	(105)
3.6.4	实验室技术 ·····	(105)
第4章	地质特征:测井 ·····	(107)
4.1	引言 ·····	(107)
4.2	深度 ·····	(108)
4.3	温度 ·····	(109)
4.4	与流体扩散有关的性质 ·····	(109)
4.4.1	孔隙度 ·····	(109)
4.4.2	岩性和饱和度 ·····	(111)
4.4.3	渗透率 ·····	(113)
4.4.4	孔隙压力 ·····	(117)
4.4.5	表皮系数及伤害半径 ·····	(118)
4.4.6	流体组成 ·····	(119)
4.5	与岩石变形和破裂有关的性质 ·····	(119)
4.5.1	力学性质 ·····	(119)
4.5.2	应力 ·····	(122)
4.6	分带 ·····	(130)
第5章	水力压裂基础 ·····	(133)
5.1	引言 ·····	(133)
5.1.1	什么是压裂 ·····	(133)
5.1.2	为什么要压裂? ·····	(136)
5.1.3	设计考虑与基本变量 ·····	(138)
5.1.4	变量的相互影响 ·····	(141)
5.2	就地应力 ·····	(141)
5.3	油藏工程 ·····	(142)
5.3.1	设计目标 ·····	(142)
5.3.2	复杂因素 ·····	(144)
5.3.3	油气藏对液体滤失的影响 ·····	(145)
5.4	岩石与流体力学 ·····	(145)
5.4.1	物质平衡 ·····	(145)
5.4.2	裂缝高度 ·····	(146)
5.4.3	裂缝宽度 ·····	(147)

5.4.4	流体力学与流体流动	(148)
5.4.5	断裂力学与裂缝端部效应	(148)
5.4.6	液体滤失	(150)
5.4.7	变量的敏感性与相互作用	(151)
5.5	施工泵注工序	(153)
5.5.1	液体与支撑剂选择	(153)
5.5.2	前置液量	(154)
5.5.3	支撑剂输送	(156)
5.5.4	支撑剂允许进入裂缝的可行性	(157)
5.5.5	压裂模型	(158)
5.6	经济学与实施研究	(159)
5.6.1	经济学	(159)
5.6.2	作业	(160)
附录 水力压裂设计与评估的发展		(161)
第6章 水力压裂力学		(181)
6.1	引言	(181)
6.2	早期水力压裂模拟	(182)
6.2.1	基本的压裂模拟	(182)
6.2.2	水力压裂模拟	(183)
6.3	三维和拟三维模型	(191)
6.3.1	平面三维模型	(193)
6.3.2	以单元为基础的拟三维模型	(199)
6.3.3	块体拟三维模型	(208)
6.4	滤失	(209)
6.4.1	滤饼	(210)
6.4.2	滤失带	(210)
6.4.3	油藏带	(211)
6.4.4	联合机理	(211)
6.4.5	滤失的通用模型	(212)
6.4.6	其他影响	(213)
6.5	支撑剂铺置	(214)
6.5.1	支撑剂对压裂液流变性质的影响	(214)
6.5.2	对流	(214)
6.5.3	支撑剂输送	(215)
6.6	热传递模型	(216)
6.6.1	以往的热传递模型	(216)
6.6.2	改进的热传递模型	(216)
6.7	缝端效应	(218)

6.7.1	线弹性断裂力学	(218)
6.7.2	线弹性断裂力学的延伸	(220)
6.7.3	现场校核	(222)
6.8	裂缝弯曲以及其他近井筒效应	(223)
6.8.1	井筒附近的裂缝几何形状	(223)
6.8.2	射孔与射孔偏差的影响	(223)
6.8.3	孔眼摩阻	(224)
6.8.4	裂缝弯曲	(225)
6.8.5	射孔相位不当	(226)
6.9	酸压裂	(227)
6.9.1	酸压模型的历史	(227)
6.9.2	酸反应化学计算	(227)
6.9.3	酸蚀裂缝的导流能力	(228)
6.9.4	酸压中的能量平衡	(229)
6.9.5	酸反应动力学	(229)
6.9.6	传质	(230)
6.9.7	酸反应模型	(231)
6.9.8	酸压:裂缝几何模型	(232)
6.10	多层压裂	(232)
6.11	泵注程序设计	(235)
6.12	压力历史拟合	(237)
第7章	压裂液化学和支撑剂	(239)
7.1	引言	(239)
7.2	水基液	(239)
7.3	油基液	(243)
7.4	酸基液	(244)
7.4.1	控制酸液滤失的材料和技术	(245)
7.4.2	控制酸反应速度的材料和技术	(246)
7.5	多相液	(246)
7.5.1	泡沫液	(246)
7.5.2	乳化液	(247)
7.6	添加剂	(248)
7.6.1	交联剂	(248)
7.6.2	破胶剂	(252)
7.6.3	降滤失剂	(254)
7.6.4	杀菌剂	(256)
7.6.5	稳定剂	(256)
7.6.6	表面活性剂	(257)

7.6.7 粘土稳定剂	(257)
7.7 支撑剂	(257)
7.7.1 支撑剂的物理性能	(258)
7.7.2 支撑剂分类	(259)
7.8 施工	(260)
7.8.1 混配	(260)
7.8.2 质量保证	(261)
第8章 压裂材料的性能	(263)
8.1 引言	(263)
8.2 压裂液性能表征	(263)
8.3 压裂液性能表征的基础	(264)
8.4 现场情况转换到实验室环境	(264)
8.5 稠化剂的分子性能表征	(264)
8.5.1 相对分子重量和粘度的关系	(265)
8.5.2 浓度和链重叠	(266)
8.5.3 分子重量的分布	(267)
8.5.4 不溶组分的性能表征	(267)
8.5.5 交联的反应过程和反应动力学	(267)
8.6 流变学	(268)
8.6.1 基本的流动关系	(269)
8.6.2 幂律模型	(270)
8.6.3 更完整描述流体性能的模型	(271)
8.6.4 压裂液流变性的确定	(272)
8.6.5 泡沫液和乳化液的流变性	(276)
8.6.6 粘度计几何形状对液体粘度的影响	(278)
8.6.7 使用动态振荡测量进行液体微结构性能表征	(279)
8.6.8 松弛时间和滑移	(280)
8.6.9 携砂液的流变性	(280)
8.7 支撑剂的影响	(282)
8.7.1 支撑剂输送的性能表征	(283)
8.7.2 颗粒的移动和浓度	(285)
8.8 液体滤失	(286)
8.8.1 静态液体滤失	(287)
8.8.2 动态滤失	(288)
8.8.3 裂缝内的剪切速率及它对液体滤失的影响	(289)
8.8.4 渗透率和岩心长度的影响	(289)
8.8.5 差压的影响	(290)
第9章 使用压力诊断的压裂评估	(291)

9.1 介绍	(291)
9.2 背景	(292)
9.3 水力压裂的基本原理	(293)
9.3.1 裂缝中液体流动	(293)
9.3.2 物质平衡或质量守恒	(294)
9.3.3 岩石弹性应变	(295)
9.4 泵注中的压力	(301)
9.4.1 时间变化对极限液体效率影响	(302)
9.4.2 由压力解释裂缝几何尺寸	(303)
9.4.3 控制裂缝高度延伸期的诊断	(305)
9.4.4 泵注压力分析例子	(307)
9.4.5 对非理想裂缝延伸的诊断	(309)
9.4.6 地层压力能	(315)
9.4.7 脱砂后的压力动态	(318)
9.4.8 由双对数曲线斜率进行裂缝诊断	(319)
9.4.9 近井筒效应	(320)
9.5 裂缝闭合期的分析	(325)
9.5.1 液体效率	(325)
9.5.2 基本的压降分析	(328)
9.5.3 非理想条件下的压降分析	(329)
9.5.4 一般的压降分析	(332)
9.6 裂缝闭合后的压力解释	(336)
9.6.1 在裂缝闭合后为什么会有线性和径向流	(337)
9.6.2 线性、过渡和径向流压力动态	(339)
9.6.3 微型压降测试	(340)
9.6.4 闭合前后的综合分析	(341)
9.6.5 物理和数学的描述	(342)
9.6.6 初滤失的影响	(344)
9.6.7 闭合后诊断的框架工作组成	(345)
9.6.8 闭合后分析的应用	(347)
9.6.9 现场实例	(348)
9.7 压力的数值模拟:泵注和闭合的分析结合	(351)
9.7.1 压力拟合	(351)
9.7.2 非唯一性	(351)
9.8 复杂的测试试验次序	(352)
9.8.1 评论已有的与压裂有关的资料	(352)
9.8.2 确定储层生产参数	(353)
9.8.3 定义闭合压力	(353)

9.8.4	裂缝几何形状的特征	(353)
9.8.5	确认近井筒问题	(353)
9.8.6	液体滤失特性	(353)
9.8.7	闭合后反应的评定	(353)
9.8.8	相互确认评估结果	(354)
9.8.9	进行压力的历史拟合	(354)
9.8.10	验证相反的加砂施工压力	(354)
附录	水力压裂压力分析技术的背景	(355)
第 10 章	压裂设计	(372)
10.1	简介	(372)
10.2	设计考虑	(374)
10.2.1	经济优化	(374)
10.2.2	压裂优化设计方法	(374)
10.2.3	裂缝导流能力	(375)
10.2.4	无量纲裂缝导流能力	(377)
10.2.5	非达西流影响	(379)
10.2.6	支撑剂优选	(379)
10.2.7	压裂规模	(380)
10.2.8	液体滤失	(381)
10.2.9	粘度影响	(382)
10.2.10	泵注排量	(384)
10.3	裂缝形态模拟	(384)
10.3.1	模型选择	(386)
10.3.2	地层参数来源	(386)
10.4	泵注程序	(387)
10.4.1	常规加砂程序	(389)
10.4.2	端部脱砂	(392)
10.5	多层压裂	(395)
10.5.1	限流压裂	(395)
10.5.2	分层压裂	(395)
10.5.3	穿过多层的单裂缝	(396)
10.5.4	多层油藏中的双裂缝	(396)
10.5.5	油田实例	(399)
10.6	酸压	(401)
10.6.1	酸蚀裂缝导流能力	(402)
10.6.2	酸液滤失	(404)
10.6.3	酸反应速度	(406)
10.6.4	酸压模型	(407)

10.6.5	参数敏感性·····	(407)
10.6.6	地层反应特性·····	(412)
10.6.7	加砂压裂和酸压结论·····	(412)
10.7	斜井压裂·····	(413)
10.7.1	油藏考虑·····	(414)
10.7.2	裂缝间距·····	(415)
10.7.3	汇聚流动·····	(417)
10.7.4	斜井与水平井的压裂施工·····	(418)
10.7.5	水平井实例·····	(419)
第 11 章	压裂施工 ·····	(422)
11.1	引言·····	(422)
11.2	完井·····	(422)
11.2.1	斜井和 S 型井的完井·····	(422)
11.2.2	水平井和多底井的完井·····	(423)
11.2.3	小眼井和单一井完井·····	(423)
11.2.4	层位隔离·····	(423)
11.3	射孔·····	(431)
11.3.1	背景·····	(431)
11.3.2	对坚硬岩石水力裂缝的射孔相位·····	(433)
11.3.3	其他压裂射孔考虑·····	(435)
11.3.4	裂缝及充填和大排量水充填·····	(438)
11.3.5	没有砾石充填滤网的防砂压裂·····	(439)
11.3.6	超平衡压裂·····	(439)
11.3.7	井和裂缝的连通性·····	(440)
11.4	压裂施工的地面设备·····	(440)
11.4.1	井口隔离·····	(440)
11.4.2	精制施工钢管·····	(440)
11.4.3	高压泵·····	(443)
11.4.4	混合设备·····	(444)
11.4.5	支撑剂存储和输送·····	(444)
11.4.6	必要的传感器信号·····	(445)
11.4.7	设备放置·····	(447)
11.5	井底压力测量和分析·····	(447)
11.5.1	由地面的测量计算井底压力·····	(448)
11.5.2	带存储器的井底压力表·····	(449)
11.5.3	导线传输的压力表·····	(449)
11.5.4	连续油管传输的压力计·····	(450)
11.5.5	测量选择·····	(450)