

国外油气勘探开发新进展丛书 (四)

GUOWAIYOUQIKANTANKAIFAXINJINZHANCONGSHU

Fundamental Principles of Reservoir Engineering

油藏工程基本原理

[美] 布赖恩 F. 托勒尔 著
闫建华 赵万优 马 乔 王彦军 等译

石油工业出版社

国外油气勘探开发新进展丛书(四)

油藏工程基本原理

[美] 布赖恩 F.托勒尔 著

闫建华 赵万优 马 乔 王彦军 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是一本油藏工程方面的基础性教材,详细介绍了岩石和流体性质评价方法、油藏静态特性的确定、储量计算、试井分析基本原理、流体分布和驱替机理及油气田产量预测等。

本书适用于油藏工程、开发方面的工程技术人员阅读,特别适用于石油院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

油藏工程基本原理/[美]托勒尔著;闫建华等译.
北京:石油工业出版社,2006.8
(国外油气勘探开发新进展丛书.第4辑)
书名原文:Fundamental Principles of Reservoir Engineering
ISBN 7-5021-5599-6

- I. 油…
- II. ①托…②闫
- III. 油田开发
- IV. TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 073425 号

Copyright © 2002 by the Society of Petroleum Engineers Inc. Printed in the United States of America. All rights reserved. This book, or any part thereof, cannot be reproduced in any form without written consent of the publisher.

本书经 Society of Petroleum Engineers Inc. 授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:25

字数:640 千字

定价:98.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《国外油气勘探开发新进展丛书(四)》

编 委 会

主 任：胡文瑞

副 主 任：赵政璋 张卫国

编 委：(按姓氏笔画排序)

王玉普 王连刚 闫建华 刘德来

吴 奇 杜金虎 杨能宇 张仲宏

张烈辉 郑新权 周家尧 郭万奎

咸月璞 高志强

序

为了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开发的理论和技术水平,提高整体经济效益,中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司有计划地组织有关专家对国外油气勘探开发及生产方面的新技术、新理论、新成果进行调研引进、吸收,并翻译出版,推荐给油田广大技术人员及管理干部,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目的。第一批、第二批与第三批引进 16 本专著后,产生了较好的社会效益,得到了广大读者的高度关注和认可,普遍认为翻译质量高,出版质量好,内容满足实际需要。

为了进一步搞好中国石油天然气股份有限公司石油勘探开发的科技发展事业,促进石油工业发展,我们在前三辑出版的基础上,经过多次调研、筛选,又推选出国外最新出版的 6 本专著翻译出版,即《井喷与井控手册》、《综合渗流模拟》、《油藏工程基本原理》、《气藏工程》、《油井打捞作业手册——工具、技术与经验方法》、《多分支井技术》,以期追踪国外油气田勘探开发的热点问题和切合我国油气田开发实际需要的实用技术。

在全套丛书的引进、翻译出版过程中,勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的油田工程技术人员担任该书的翻译和审校工作,使本套丛书得以高质高效地出版。希望各油田及科研院校从事于勘探、开发工作的管理人员、技术人员以及研究人员读读这套丛书,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,创造更大的效益做出贡献。

中国石油天然气股份有限公司副总裁

译者前言

油藏工程师的中心任务是确定油气地质储量、油藏驱动机理、油藏圈闭机理、一次采油油藏采收率、油藏将来采油速度及提高油藏经济采收率等。油藏工程学定义为研究提高经济采收率的预测和控制油田开发动态的理论和方法,主要运用渗流力学、油藏物理和化学等基础知识建立预测和控制油田开发过程的理论和方法,即开发动态分析的理论和方法,其对象是从油藏到井底的整个过程。数值模拟是油藏工程中最广泛应用的工具,但本书未对油藏数值模拟方程及分析方法进行探讨。本书是一本油藏工程方面的基础教材,详细介绍了岩石和流体性质评价方法,油藏静态特性的确定、储量计算、试井分析基本原理、流体分布和驱替机理及油气田产量预测等基础内容。本书在给出大量实例的同时,在主要章节还给出了习题,读者通过做习题可以进一步理解书中所介绍的原理及分析方法。

全书由闫建华组织翻译,其中:目录、附件 A、附件 B 由闫建华翻译,第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章由赵万优、徐咏梅、赵仕民翻译;第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章由闫建华、王彦军、徐咏梅翻译;第 11 章、第 12 章、第 13 章、第 14 章由马乔、赵万优、赵仕民翻译。全书由闫建华统一审校。

尽管译者付出了艰辛和努力,但由于水平所限,难免有不妥或不准确之处,恳请读者指正。

译者

2006 年 6 月

作者简介

布赖恩 F. 托勒尔 (Brian F. Towler) 是怀俄明大学石油和化学工程系副教授, 从事油藏数值模拟、水驱、石油聚集机理和递减曲线分析和研究工作。以前他是阿科石油天然气公司的高级工程师和公司 Qilmin 和 Moonie 项目组的责任油藏工程师。托勒尔在澳大利亚昆士兰大学获得化学工程博士学位, 在美国戴维斯的加利福尼亚大学完成了的博士后研究。

致 谢

许多人为完成本书做出了贡献, 但最值得感谢的是本书的编辑——William C. Miller 先生, 他不孜不倦地工作了好几年, 对许多草稿进行审查、编辑、指导。图书委员会的其他委员, 如 Allan Spivak 和 Elmond Claridge 提供了额外有用的审查。我也要感谢之情给所有在 Wyoming 大学上我的油藏机理课程的同学, 多年来他们帮助我完善了此书。我特别要提到的是 Surya Rebbapragada、Omkar Jaripatke 和 David D. Souza, 他们对书中的问题提出及解答做出了重要的贡献。

SPE 教科书系列图书

为响应石油工程师协会(SPE)董事会的建议,1972年开始出版SPE教科书系列图书。教科书系列计划确保用于石油工程领域内的大学课程的高质量教科书的实用性。这个工作是受到协会图书委员会的指导,该委员会是协会40多个有名望的委员会之一。图书委员会的委员们提供图书的技术评估,下面是本书最后准备阶段参与最多的有关人员:

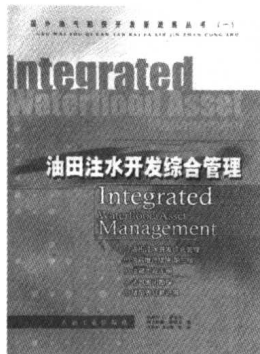
图书编辑

William C. Miller 咨询顾问,休斯顿
Allan Spivak 斯佩沃克工程公司,洛杉矶

图书委员会(2002)

Hans Juvkam - wold 得克萨斯州 A&M 大学
Ronald A. Behrens 雪佛龙—德士古公司
J. Ben Bloys 雪佛龙—德士古公司
Waldo J. Borl 德文能源开采公司
Ali Ghalambor 路易斯安那—拉菲叶特大学
Rafael Guzman BP 哥伦比亚勘探公司
Cem Sarica 塔尔萨大学
Arlie M. Skov 阿利尔 M. 斯克夫公司
Sally A. Thomas 大陆石油公司

国外油气勘探开发新进展丛书(一)



书号: 3592
定价: 56.00 元



书号: 3663
定价: 120.00 元



书号: 3700
定价: 110.00 元

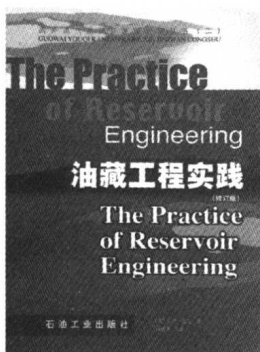


书号: 3718
定价: 145.00 元

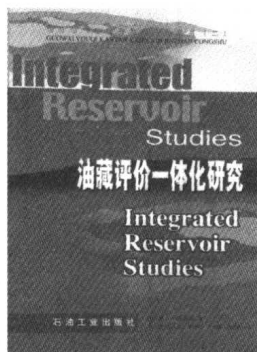


书号: 3722
定价: 90.00 元

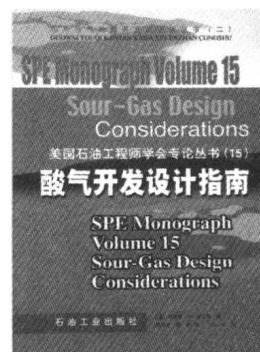
国外油气勘探开发新进展丛书(二)



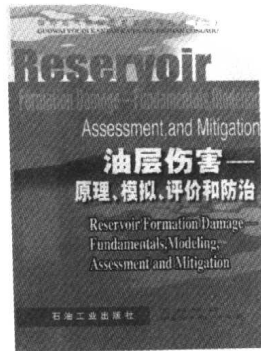
书号: 4217
定价: 96.00 元



书号: 4226
定价: 60.00 元



书号: 4352
定价: 32.00 元



书号: 4334
定价: 115.00 元

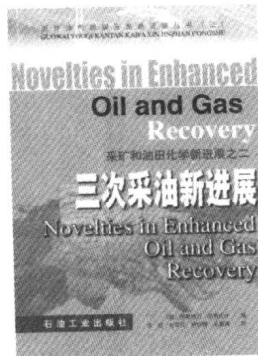


书号: 4297
定价: 28.00 元

国外油气勘探开发新进展丛书(三)



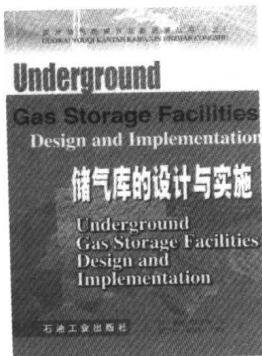
书号: 4539
定价: 120.00 元



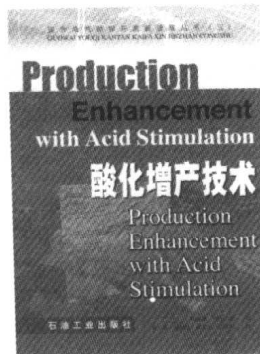
书号: 4725
定价: 88.00 元



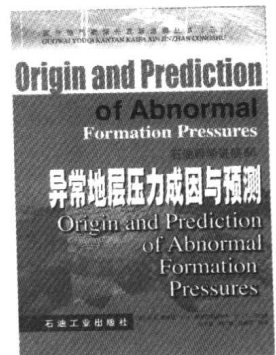
书号: 4707
定价: 60.00 元



书号: 4681
定价: 48.00 元



书号: 4689
定价: 50.00 元



书号: 4764
定价: 78.00 元

目 录

1 引言	(1)
1.1 油藏工程的历史	(1)
1.2 油藏工程师的任务	(2)
1.3 数据源	(2)
1.4 基本驱动机理	(2)
1.5 聚集机理	(4)
参考文献	(9)
2 岩石和流体性质评价	(11)
2.1 引言	(11)
2.2 岩石性质	(11)
2.3 气体性质	(21)
2.4 原油性质	(33)
2.5 水性质	(47)
习题	(49)
参考文献	(54)
3 油藏静态特征	(57)
3.1 引言	(57)
3.2 压力外推	(57)
3.3 油藏中原油密度的确定	(57)
3.4 油藏中气体密度的确定	(59)
3.5 油藏/气藏和供水区中压力外推	(59)
习题	(62)
参考文献	(63)
4 储量计算	(64)
4.1 引言	(64)
4.2 原油地质储量和天然气地质储量的计算	(64)
4.3 求和法则	(65)
4.4 计算机绘图	(67)

4.5	用虚拟点进行图型修改	(70)
4.6	用计算机确定原始原油地质储量和原始天然气地质储量	(73)
	习题	(73)
	参考文献	(76)
5	物质平衡方程	(78)
5.1	引言	(78)
5.2	物质平衡方程的历史	(78)
5.3	常规物质平衡方程的推导	(78)
5.4	物质平衡方程图解法	(82)
5.5	水驱分析图解法	(84)
5.6	驱动指数	(84)
	参考文献	(87)
6	多孔介质中单相流体的流动	(88)
6.1	引言	(88)
6.2	基本流动方程	(88)
6.3	定产求解法:有限圆形边界油藏	(89)
6.4	定产求解法:具有线性源的无限圆形边界油藏	(95)
6.5	定产求解法:具有定压外边界的有限圆形边界油藏	(98)
6.6	定压求解法:有限圆形边界油藏	(101)
6.7	变产变压的叠加求解法原理	(104)
	习题	(109)
	参考文献	(111)
7	试井分析简介	(112)
7.1	引言	(112)
7.2	定流量测试	(113)
7.3	变流量测试	(117)
7.4	定压流动测试	(121)
7.5	定产压力恢复测试	(125)
7.6	变产压力恢复测试	(129)
7.7	有限边界井的压力恢复分析	(131)
7.8	水平井试井分析	(134)
	习题	(135)
	参考文献	(140)

8 水侵	(142)
8.1 引言	(142)
8.2 Schilthuis 稳态方法	(142)
8.3 VEH 非稳态方法	(145)
8.4 用物质平衡方法确定水侵参数	(150)
8.5 Fetkovich ³ 拟稳态方法	(152)
8.6 Alton 油田实例	(155)
习题	(159)
参考文献	(166)
9 干气气藏	(168)
9.1 引言	(168)
9.2 储量和采收率	(168)
9.3 水和凝析油产量的天然气等效法	(169)
9.4 干气气藏的物质平衡分析	(169)
9.5 定容气藏的物质平衡图解法	(171)
9.6 水驱气藏	(172)
9.7 超高压气藏	(176)
9.8 水驱气藏	(179)
9.9 储气库概念	(180)
习题	(181)
参考文献	(187)
10 气/凝析气藏	(189)
10.1 引言	(189)
10.2 气/凝析气藏物质平衡方程	(190)
10.3 气/凝析气藏物质平衡图解法	(191)
10.4 利用等容衰竭(CVD)试验计算采收率	(195)
10.5 气/凝析气藏 PVT 性质确定	(198)
10.6 提高气/凝析气藏的采收率	(201)
10.7 油田实例	(202)
习题	(207)
参考文献	(211)
11 未饱和油藏	(212)
11.1 引言	(212)

11.2	储量和采收率	(213)
11.3	物质平衡方程	(213)
11.4	挥发性油藏	(220)
11.5	水驱油藏	(224)
11.6	未饱和油藏的采收率的提高	(228)
11.7	油田实例	(228)
	习题	(231)
	参考文献	(241)
12	饱和油藏	(243)
12.1	引言	(243)
12.2	采收率和提高采收率	(243)
12.3	饱和油藏的物质平衡方程	(243)
12.4	挥发性油藏	(250)
12.5	油田实例	(253)
	习题	(264)
	参考文献	(274)
13	流体分布和驱替	(276)
13.1	引言	(276)
13.2	原始流体分布	(276)
13.3	应用 Buckley – Leverett 方法确定原油的线性驱替	(280)
13.4	溶解气驱油藏的采收率	(287)
	习题	(294)
	参考文献	(302)
14	递减曲线分析	(303)
14.1	引言	(303)
14.2	历史回顾	(303)
14.3	指数递减的参数确定	(305)
14.4	调和递减的参数确定	(305)
14.5	生产曲线	(305)
14.6	双曲线递减	(306)
14.7	应用线性回归确定双曲线递减的参数	(307)
14.8	应用实例	(307)
14.9	在电子表格上应用非线性回归确定双曲线递减参数	(313)

14.10 其他应用实例	(316)
14.11 实用递减公式	(320)
习题	(320)
参考文献	(323)
附录 A 数值和表	(324)
附录 B 习题参考答案	(351)
单位换算表	(381)

1 引 言

1.1 油藏工程的历史

油藏工程是从公认的实践中成长起来的,如果油藏能分析和控制的话,油藏工程方法确实可以提高预测油/气藏的开采可预测性和准确性。第一次尝试将流体在多孔介质中流动学归纳组织起来成为一般学科,即一个分支学科,是 Muskat¹ 在 1937 年提出的。他吸取了 Fancher² 等人的研究成果, Fancher 测量分析了油藏岩石基本岩石性质(包括孔隙度和渗透率);他还吸取了 Schilthuis³ 的研究成果, Schilthuis 采集地下油气样品来测量其流体性质,并且撰写了标志性的论文,描述解释油气在油藏中流动的驱动能量。这篇论文推导出了第一个物质平衡方程,该物质平衡方程是油藏工程师用来计算原始油气地质储量的基础方法。物质平衡方程是非常有用的方程,它可以独立地用容积法估算储量。但是,使用公式还是有一定限制,只有在投产后才能应用。

在 20 世纪 40 年代早期, Buckley 和 Leverett⁵ 通过证实毛细管压力和相对渗透率在多相流动中的作用而做出了突出贡献,而 Tarner⁶ 提出了确定溶解气驱下油藏原油采收率的方程,为理解油气驱替做出了巨大贡献。Tarner 的方法是物质平衡方程的另一个重要的应用。Tarner 的方程以及 Buckley 和 Leverett 的方程后来被广泛的应用于预测油藏采收率。另外重要的进展是 Van Everdingen 与 Hurst⁷ 所做的贡献, Hurst 提出和解决了预测油藏水侵问题的方程。

在 1955 年, Moore⁹ 回顾了过去 25 年油藏工程的发展历史,并且展望了未来 25 年的趋势。但那时,他没有前瞻到就在 20 世纪 50 年代初期兴起油藏数值模拟的发展¹⁰, 而且数值模拟的应用及发展是持续性的¹¹⁻¹⁴。今天,数值模拟已成为在油藏工程中最广泛应用的工具;尽管如此,本书对油藏数值模拟方程及分析方法不做探讨。油藏数值模拟有很多优点,它采用数值化方法求解多相、多组分流动方程式而给出精确的产量预测。在数值模拟技术应用以前,使用本书研究的基本技术方法对油藏进行分析显得非常重要,这些方法包括:容积法、物质平衡法和递减曲线法。而油藏数值模拟遇到一些很大的限制。首先,需要很好的计算机设备和软件来解决方程运算问题。其次,地质储量通过物质平衡法计算比油藏数值模拟模型反推出来计算更容易,因为数值模拟仍然没有很好地解决反算问题。再者,一个油藏数值模拟模型需要很多数据,但有时有些数据可能没有。

上述这些情况并不是减小油藏数值模拟对现代油藏工程的重要作用。而是,在油藏数值模拟应用之前,应该着重采用以下描述的技术方法分析油藏。在我做油藏工程师的早期生涯中,我用了三年的时间为一家大的石油公司开发油藏数值模拟软件,这家公司有好几十个工程师全身心的做数值模拟工作。很快在那之后,我用了 5 年时间为一家小石油公司工作,在那我是唯一的油藏工程师。这家公司有一个大的油气田(Mereenie)^{15,16} 要投入开发,还有一些处于不同开采程度的小油气田需要管理。在这些年中,我们只补充了很少员工,我用了大约 50% 的时间做递减分析;用了 25% 的时间分析试井资料;用了 20% 的时间做物质平衡和体积测算分析,尽管我对这些技术方法是熟练的;而仅用 5% 的时间做数值模拟工作即可。管理层想要

的主要信息是产量预测,尽管油藏数值模拟能够更精确地计算预测产量,但采用递减曲线分析是最快和最有效的方法。

使用递减曲线法拟和历史生产数据并预测产量要追溯到1908年¹⁷。Arps¹⁸在1945年正式推广使用了这项技术,并且在1956年¹⁹又进一步发展改进了它。但当时,递减曲线法也只是纯粹的经验公式法,缺少基础理论。由于这种方法仍旧被广泛应用,Fetkovich²⁰等人以及Fetkovich²¹本人曾试图为这项技术找到坚实的理论基础。但他们的努力也让人们进一步理解了这种方法的局限性。但尽管有局限性,递减曲线法仍继续被油藏工程师们广泛应用。

1.2 油藏工程师的任务

油藏工程师的中心任务是围绕着以下问题给出答案:

- (1) 有多少油气地质储量?
- (2) 油藏的驱动机理是什么?
- (3) 油藏的圈闭机理是什么?
- (4) 一次采油的油藏采收率是什么?
- (5) 油藏的将来采油速度是多少?
- (6) 采收率如何经济性地提高?
- (7) 回答上述问题需要什么样的数据?

有两种独立的方法可用来计算油气地质储量:容积法和物质平衡法。物质平衡方程和计算出来的各种参数能够指示不同驱动机理的相关驱动强度。Buckley 和 Leverett⁵以及 Tarner⁶的驱替理论能够用于预测将来的采收率和采油速度。递减曲线模型也用来帮助预测采油速度和最终采收率。为提高油藏采收率,通常采用一些注入驱替剂的方法。其中最常用的是注水,但是注气、注蒸汽、注混合气、火烧油层、注聚合物和注表面活性剂也经常被采用。各种各样的提高原油采收率的方法取决于建立精确的油藏模型。

1.3 数据源

要采用容积法,需要的数据有孔隙度、油层厚度、流体饱和度和地层体积系数(FVF's)。前三个参数可以从测井数据和岩心数据中获得。地层体积系数的确定是通过在井底对油藏流体取样或配制油藏流体样品,之后在实验室测量油藏流体在油藏温度下的压力和体积的相关性。

要使用物质平衡法,需要的数据是油藏流体的压力/体积相关性和作为油藏压力函数的产出原油体积、产出水和产出气。生产数据应该总是精确计量。在过去,有时水产量甚至气的产量不能准确计量。因为物质平衡方程的效用是众所周知的,今天这些数据计量是准确的。要使用 Buckley - Leverett⁵的驱替理论,需要毛细管压力数据,同时使用 Tarner⁶法驱替计算,需要相对渗透率数据。这些数据从特殊岩心分析处理中得出。计算单井产量,需要油藏渗透率和井网布置方式。渗透率也是从岩心渗流实验中得到的。

1.4 基本驱动机理

油藏工程师需要知道和了解原油产出的驱动机理。主要的驱动机理是溶解气驱动、压缩驱动、气顶气驱动、水驱动、重力驱动、润湿驱动和复合驱动。

1.4.1 溶解气驱动

如果当一个油藏其油藏压力高于泡点压力时,则该油藏没有原始气顶气。当原油产出时,