



中国石油勘探开发研究院出版物

PETROLEUM PRODUCTION SYSTEMS

SECOND EDITION

油气开发系统

(第二版)

[美] Michael J. Economides

A. Daniel Hill

Christine Ehlig-Economides

Ding Zhu

著

魏晨吉 李 勇 田昌炳 李保柱 译

石油工业出版社



油气开发系统

(第二版)

[美] Michael J. Economides A. Daniel Hill

Christine Ehlig-Economides Ding Zhu

著

魏晨吉 李 勇 田昌炳 李保柱 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书多学科融合,不仅涵盖不同类型油气藏开发特征、产能评价及预测,也涉及人工举升、酸化压裂等增产措施相关内容,提供了一个油藏工程与采油工程紧密结合的视角来对整体的油气开发系统进行再认识。

本书注重理论与实践的紧密结合,适用性与可操作性强,可作为石油工程专业相关教材及油田开发人员的工作手册。

图书在版编目(CIP)数据

油气开发系统:第2版/(美)艾克诺米德斯(Economides, M. J.)等著;
魏晨吉等译. —北京:石油工业出版社,2016.1

书名原文:Petroleum Production Systems(Second Edition)

ISBN 978-7-5183-0728-9

I. 油…

II. ①艾…②魏…

III. 油气田开发-开发系统

IV. TE3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第145870号

Petroleum Production Systems, Second Edition

By Michael J. Economides, A. Daniel Hill, Christine Ehlig-Economides, Ding Zhu

ISBN:978-0-13-703158-0

Authorized translation from the English language edition, entitled PETROLEUM PRODUCTION SYSTEMS, 2E, by ECONOMIDES, MICHAEL J.; HILL, A. DANIEL; EHLIG - ECONOMIDES, CHRISTINE; ZHU, DING, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2013 Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PETROLEUM INDUSTRY PRESS Copyright © 2015

本书经 PEARSON EDUCATION ASIA LTD. 授权石油工业出版社有限公司翻译出版。版权所有,侵权必究。本书封面贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2015-6743

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

编辑部:(010)64523543 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:30

字数:768千字 印数:1—3000册

定价:160.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

译者的话

《油气开发系统》是由俄罗斯自然科学院外籍院士 Michael J. Economides, 美国工程院院士 Christine Ehlig-Economides, 美国得州农工大学 (Texas A&M University) 石油工程系主任 A. Daniel Hill 教授和 Ding Zhu 副教授合著, 第一版于 1999 年问世, 获得学术界和工业界专家普遍好评。历经十余年后, 在保证专著原有精华的基础上, 紧扣石油行业发展趋势, 新补充了许多重要内容, 第二版于 2013 年初问世, 旨在为油田开发相关工作提供一套先进的综合性方法。尤其近年来油价持续低迷, 在低油价的“新常态”下, 该书第二版的出版, 无疑是雪中送炭, 将对油气田的合理高效开发起到技术支撑, 为油气田经济效益开发提供保障。

本书最大特点是多学科融合, 内容不仅涵盖不同类型油气藏的开发特征、产能评价及预测, 也涉及人工举升、酸化压裂等增产措施相关内容, 提供了一个油藏工程与采油工程紧密结合的视角来对整体的油气开发系统进行再认识。本书注重理论知识与现场应用的紧密结合, 实用性及可操作性强, 书中例子多来自油田实例, 极具参考价值。此外, 每章后面均附有相应习题, 为巩固本章知识起到积极作用。该书不仅是美国著名的得州农工大学等石油工程专业研究生必修课程教材, 也成为了众多石油公司及油田服务公司的工作手册。因此, 本书可作为国内石油工程专业研究生教材、非石油工程专业背景工程师的培训资料, 以及具有一定专业基础的油气田开发工程及采油工程科研人员和现场操作人员的使用手册。

本书译者于 2009 年赴美国得州农工大学求学, 有幸跟随本书作者之一 A. Daniel Hill 教授学习本书, 其结构之合理、内容之丰富, 教授思路之清晰、板书之精彩, 至今历历在目。2013 年博士毕业归国参加工作后便着手翻译本书, 在单位领导与同事以及各方专家的支持与帮助下, 历时近两年终于完成该译本。另外, 休斯顿大学 (University of Houston) 秦关教授、威德福公司 (Weatherford) 杨梅女士、得州农工大学卡塔尔分校 (Texas A&M University at Qatar) 王宇赫教授在本书的出版过程中也给予了悉心指导, 在此一并表示衷心的感谢!

由于译者水平有限, 书中不足之处敬请读者批评指正。

魏晨吉

2015 年 8 月 6 日于北京

序

在过去的十年里我一直很期待这本书。该书为第一版的更新版本,我已向我的前实习生们、工程师们、同事们分发了成千上万册。本书作者同我一起工作过 25 年,工作能力卓越。同时,在石油天然气增产方面我们一直有着相同的见解,尤其是在生产管理措施方面,这些情况甚至也发生在那些我们之前认为不可能发生的地方和企业中。

该书全面地讲解了油气生产系统(也是一直倡导的“节点分析”概念),囊括了人工举升、油井诊断、基质酸化、水力压裂、防砂等方面的内容。

本书的一些重要观点如下:

(1) 为提高油田现场生产,尤其在所钻的新井无法成为最优井时,采取油井增产措施比新钻注水井更为有效。在我对法国 Yukos E&P 公司的管理中就深刻地体会了这一点,期间数据显示,在一年中停止钻新井,仅采取适当的增产措施,油田产量提高超过 15%。

(2) 在常规油藏生产中,只要能够通过天然气顶、水驱、注水得到足够的油藏压力补充,优化完井方式并不会降低最终采收率。

(3) 许多作业者无法准确描述油井生产动态,同时油井也很少在最大流动潜力下生产。本书认为合理的产量优化比盲目的完井和增产措施更为重要。尤其,我认为统一的裂缝设计(UFD),即作者的主要成果,是水力压裂设计的唯一一种条理分明的方法,而我也已经在我的所有水力压裂设计工作中成功地应用了该成果。

本书不仅提供了油田生产的最佳措施,还介绍了许多新方法的基本原理。本书涉及的内容也解释了如今非常规油气藏的开发为何如此成功。

本书恰逢其时地填补了石油天然气行业的一个技术空白。

Joe Mach

“节点分析方法”提出者

前尤科斯(俄罗斯石油公司)执行副总裁

斯伦贝谢前副总裁

前 言

自从 1994 年本书的第一版出版以来,在石油生产工作中相继出现了许多技术进展。本书的目的同第一版一样,旨在为石油生产工作提供一套相对先进且具备综合性的方法,同时可作为大学生以及毕业生的学习教材。另外,本书也可以用于非石油专业工程师的培训,以了解石油生产中的关键内容。自第一版以来出现的许多技术进步,都将在本次的第二版中予以更新。其中,水平井以及水力压裂的广泛应用给石油生产带来了全新的面貌,本部分已作了合理的更新。本书的编辑们在大学教学 and 实际石油生产中积攒了广泛的经验,我们感兴趣的领域也很好满足了本书的时效性,主要涉及范围包括经典采油工艺、试井、生产测井、人工举升、基质酸化以及水力压裂。我们已经在这些领域做了多年的努力,其中有四人作为采油工程的老师根据本书的第一版在大学课堂上教授了许多学生,同时对现场工程师进行过短期的培训,这些经验也是本书第二版的重要指导依据。

本书为实现以上目的提供了一套结构化方法。第 2~第 4 章描述了原油、两相流、气藏的流入动态;第 5 章介绍了复杂结构井,例如水平井、多分支井等,这些都是自第一版后采油工程领域出现的技术进步;第 6 章介绍了井筒附近区域的地层环境,包括地层伤害、射孔、砾石充填等;第 7 章描述了井筒流动;第 8 章描述了地面流动系统、水平管流以及水平井流动;第 9 章和第 10 章综合研究了地层和油井的流入动态随时间的关系,考虑了单井瞬态流动以及物质平衡。因此,第 1~第 10 章介绍了油藏和油井系统的相关研究。

本书第 11 章和第 12 章分别讲述了气举和机械举升,在这两种油井开采方式下,油井和油藏的诊断至关重要。第 13 章介绍了目前的诊断方法,包括试井、生产测井以及永久性井下监测装置。

根据油井诊断,我们可以判断油井是否需要采取增产措施,例如基质酸化、水力压裂、人工举升或综合采用这几种方法,或者不需要采取任何措施。第 14、第 15、第 16 章介绍了不同类型油藏的基质酸化措施;第 17、第 18 章中介绍了相关水力压裂技术;第 19 章介绍了砂处理的新方法。

为简化实际例子的描述,三种特殊油藏类型数据已在附录中给出,包括不饱和油藏、饱和油藏和气藏。这些数据在本书中都有应用。

为涵盖过去二十年来的基本采油工艺,本书的修订过程是一项巨大的工作,需要编辑者们长期的协调工作。我们也得到了许多研究生以及同事的帮助,与现场和学术机构的很多同事的交流也是本书能够完成的一个关键。Paul Bommer 博士提供了关于人工举升的很多有效材料,Chen Yang 博士提供了关于碳酸盐岩酸化的全新材料,Tom Blasingame 博士和 Chih chen 先生提供了用于压力计算、生产实例的油井数据,Tony Rose 先生绘制了所有图版,Katherine Brady 女士和 Imaran Ali 协助了本书第二版的出版工作,我们由衷地感谢这些人员的帮助。

正如第一版那样,我们感谢很多同事、学生以及我们的教授们,他们为我们的工作做出了极大的贡献。我们的学生在采油工程课上给出的反馈对本书第一版次的校订有着重要的指导

意义,非常感谢他们的建议、指正以及所作出的努力。

我们由衷感谢以下组织机构和相关人士允许本书中相关图表的出版:图 3.2,图 3.3,图 5.2,图 5.4,图 5.7,图 6.15,图 6.16,图 6.18,图 6.19,图 6.20,图 6.21,图 6.22,图 6.24,图 6.25,图 6.26,图 6.27,图 6.28,图 6.29,图 7.1,图 7.9,图 7.12,图 7.13,图 7.13,图 7.14,图 8.1,图 8.4,图 8.6,图 8.7,图 8.17,图 13.13,图 13.19,图 14.3,图 15.1,图 15.2,图 15.4,图 15.7,图 15.10,图 15.12,图 16.1,图 16.2,图 16.4,图 16.5,图 16.6,图 16.7,图 16.8,图 16.14,图 16.16,图 16.17,图 16.20,图 17.2,图 17.3,图 17.6,图 17.11,图 17.12,图 17.13,图 17.14,图 17.15,图 17.16,图 17.17,图 17.18,图 17.19,图 18.20,图 18.21,图 18.22,图 18.23,图 18.25,图 18.26,图 19.1,图 19.6,图 19.7,图 19.8,图 19.9,图 19.10,图 19.17,图 19.18,图 19.19,图 19.20,图 19.21(a),图 19.21(b)以及图 19.22,美国石油工程师协会;图 6.13,图 6.14,图 13.2,图 13.18,图 18.13,图 18.14,图 18.19,图 19.2 以及图 19.3,斯伦贝谢公司;图 6.23,图 12.5,图 12.6,图 15.3,图 15.6,图 16.17 以及图 16.19,普伦蒂斯·霍尔出版社;图 8.3,图 8.14,图 12.15,图 12.16 以及图 16.13,塞维尔科学出版社;图 4.3,图 19.12,图 19.13,图 19.14 以及图 19.15,海湾出版有限公司(休斯敦,得克萨斯州);图 13.5,图 13.6,图 13.8,图 13.9,图 13.11 以及图 13.12,哈特能源(休斯敦,得克萨斯州);图 7.11 以及图 8.5,美国化学工程学院;图 7.6 和图 7.7,美国机械工程学会;图 8.11 以及表 8.1,起重机有限公司,斯坦福,CT;图 12.8,图 12.9 以及图 12.10,德希尼布版本,巴黎,法国;图 2.3,美国矿业学院,冶金和石油工程;图 3.4,麦格劳希尔集团;图 7.10,世界石油委员会;图 12.11,贝克休斯公司;图 13.1, PennWell 出版有限公司,塔尔萨;图 13.3,岩石物理学家和测井分析家协会;图 18.16,碳水化合物陶瓷有限公司;图 12.1,图 12.2,以及图 12.7, Michael Golan 博士和 Curtis Whitson 博士;图 6.17, Kenji Furui 博士;图 8.8, James P. Brill 博士;图 15.8, Eduardo Ponce da Motta 博士;图 18.11 以及图 18.15, Harold Brannon 博士。以上图版使用均经许可,保留所有权利。

目 录

第1章 引言	(1)
1.1 简介	(1)
1.2 油气开发系统的组成	(1)
1.3 油气产能及开发系统	(7)
1.4 单位及其换算	(9)
参考文献	(11)
第2章 未饱和油藏开发动态	(12)
2.1 简介	(12)
2.2 油井稳态生产动态	(12)
2.3 未饱和油藏非稳态流	(15)
2.4 拟稳态流	(17)
2.5 不规则泄油区开发动态	(19)
2.6 流入动态关系	(22)
2.7 相渗和产水的影响	(23)
2.8 单相流入动态小结	(24)
参考文献	(24)
习题	(25)
第3章 两相流油藏开发动态	(26)
3.1 简介	(26)
3.2 饱和原油性质	(26)
3.3 油藏中两相流	(35)
3.4 两相流油藏的油相流入动态	(36)
3.5 广义 Vogel 流入动态关系式	(37)
3.6 Fetkovich 近似	(38)
参考文献	(38)
习题	(38)
第4章 天然气藏开发动态	(40)
4.1 简介	(40)
4.2 天然气常用计算公式	(43)
4.3 气井产能近似	(50)
4.4 气井非达西流产能公式	(52)
4.5 气井的不稳定流动	(55)
习题	(60)

第5章 水平井开发	(62)
5.1 简介	(62)
5.2 水平井稳态生产动态	(63)
5.3 拟稳态流	(67)
5.4 气藏中水平井的流入动态	(74)
5.5 两相流水平井的生产动态	(75)
5.6 多分支井技术	(76)
参考文献	(77)
习题	(78)
第6章 近井条件及伤害特征——表皮效应	(79)
6.1 简介	(79)
6.2 Hawkins 公式	(79)
6.3 直井和斜井表皮效应构成	(82)
6.4 不完善井和斜井表皮效应	(83)
6.5 水平井伤害表皮系数	(87)
6.6 完井表皮系数	(90)
6.7 地层伤害机理	(99)
6.8 油井作业期间地层伤害源	(102)
参考文献	(107)
习题	(108)
第7章 井筒流动动态	(110)
7.1 简介	(110)
7.2 不可压缩牛顿流体单相流	(110)
7.3 可压缩牛顿流体单相流	(118)
7.4 井筒多相流	(122)
参考文献	(142)
习题	(143)
第8章 水平井筒、井口及集输系统内流动	(145)
8.1 简介	(145)
8.2 水平管线内流动	(145)
8.3 通过油嘴的流动	(159)
8.4 地面集输系统	(165)
8.5 水平井筒内流动	(167)
参考文献	(172)
习题	(173)
第9章 油气井产能	(175)
9.1 简介	(175)
9.2 流入动态(IPR)与垂直接流动动态(VFP)	(175)

9.3	两相流油藏中的 IPR 和 VFP	(179)
9.4	气藏的 IPR 和 VFP	(180)
	习题	(181)
第 10 章	油气井产能预测	(183)
10.1	简介	(183)
10.2	非稳态流产量预测	(183)
10.3	未饱和油藏物质平衡及拟稳态下产量预测	(184)
10.4	油藏广义物质平衡方程	(186)
10.5	两相流油藏产量预测:溶解气驱	(190)
10.6	气藏物质平衡及气井动态预测	(195)
	参考文献	(197)
	习题	(197)
第 11 章	气举	(199)
11.1	简介	(199)
11.2	气举井结构	(199)
11.3	连续气举设计	(201)
11.4	多气举阀井的卸载	(206)
11.5	气举的优化设计	(207)
11.6	气举动态曲线	(210)
11.7	气举需求与时间关系	(215)
	参考文献	(217)
	习题	(217)
第 12 章	泵举升	(219)
12.1	简介	(219)
12.2	容积泵	(220)
12.3	变容积泵	(228)
12.4	气井的液体举升——活塞气举	(234)
	参考文献	(235)
	习题	(236)
第 13 章	油气井动态评价	(237)
13.1	简介	(237)
13.2	裸眼井地层评价	(237)
13.3	套管井测井	(239)
13.4	不稳定试井分析	(251)
	参考文献	(286)
	习题	(287)
第 14 章	基质酸化:酸/岩反应	(290)
14.1	简介	(290)

14.2	酸液—矿物反应的化学计算法	(292)
14.3	酸—矿物反应动力学	(296)
14.4	酸运移至矿物表面	(301)
14.5	酸反应产物的沉淀	(301)
	参考文献	(303)
	习题	(304)
第15章	砂岩酸化设计	(306)
15.1	简介	(306)
15.2	酸的选择	(306)
15.3	酸液体积与注入速率	(308)
15.4	酸液充填与转向	(325)
15.5	前置液及顶替液设计	(333)
15.6	酸液添加剂	(335)
15.7	酸化处理操作	(335)
	参考文献	(336)
	习题	(338)
第16章	碳酸盐岩酸化设计	(341)
16.1	简介	(341)
16.2	酸蚀孔洞的形成与延伸	(343)
16.3	酸蚀孔洞延伸模型	(344)
16.4	碳酸盐岩酸化设计	(351)
16.5	酸化压裂	(355)
16.6	水平井酸化	(363)
	参考文献	(364)
	习题	(366)
第17章	油气井水力压裂	(368)
17.1	简介	(368)
17.2	裂缝长度、导流能力和等效表皮效应	(370)
17.3	压裂井产能最大化的最优裂缝几何形态	(372)
17.4	常规低渗油藏的压裂井动态	(377)
17.5	非达西流动对压裂井动态的影响	(381)
17.6	致密砂岩及页岩储层压裂井动态	(385)
17.7	横向水力裂缝的阻流效应	(389)
	参考文献	(391)
	习题	(393)
第18章	水力压裂设计及实施	(395)
18.1	简介	(395)
18.2	储层压裂	(395)

18.3 裂缝几何形态 (400)

18.4 裂缝几何特征与压力需求 (405)

18.5 压裂液 (417)

18.6 支撑剂与裂缝导流能力 (422)

18.7 裂缝诊断 (425)

18.8 压裂水平井 (428)

参考文献 (432)

习题 (433)

第 19 章 防砂 (436)

19.1 简介 (436)

19.2 出砂建模 (436)

19.3 控砂管理 (446)

19.4 防砂 (447)

19.5 预防完井失败 (462)

参考文献 (463)

习题 (464)

第1章 引言

1.1 简介

石油开采涉及两个不同但紧密关联的系统,即油藏系统和人工系统。油藏系统是具有一定储存能力和流动特性的孔隙介质;人工系统通常包括井筒、井底、井口装置以及地面集输、分离和储存设施。

油气开发系统是石油工程的一部分,其目的是用经济高效的方法使产量(或石油流出井口的量)最大化。在出版本书第一版和第二版所间隔的15年内,水力压裂技术使全球的油气产量增长了10倍,成为行业内仅次于钻井的第二大预算项目。自本书第一版出版以来,相比垂直井或单一水平井复杂很多的复杂结构井也有了很大的发展,并已成为油气田开发的一个重要手段。

实际上,石油开采会同时涉及一口或多口井,石油工程中的采油工程往往关注的是特定井及其短期目标,强调生产或注入的最优化。而油藏工程的目标则更长远,主要关心采收率。因此,两者偶尔会出现矛盾,尤其当国际石油公司与国家石油公司合作时,前者关注的焦点是加速生产并使其短期利益最大化,而后者主要考虑如何平衡自身储量和长期开采战略。

采油工艺和方法的应用与石油工程的其他主要领域直接相关并相互依存,如储层评价、钻井及油藏工程,其中最为重要的一些关系概述如下:

现代储层评价通过三维地震勘探、井间测井对比及试井等方法来进行油藏综合描述,从而识别各具特色的地质流动单元,而连通的流动单元组成一个油藏。

钻井可建立重要的井身结构,且随着定向钻井技术的发展,使井身结构变得可控,包括大位移水平井、多边水平井、丛式水平井、多分支井等,这些井能更加准确地钻遇流动单元,这类井的成功完钻并非偶然,而是依靠复杂而精确的随钻测量(MWD)和随钻测井(LWD)技术。控制钻井所引起的近井地带的地层伤害是十分重要的,尤其对于长水平井来说。

广义上的油藏工程与采油工程在一定程度上存在交叉。它们在研究内容(单井与多井)和研究时间(短期与长期)上的差别通常很模糊,采油工程的研究对象单井动态可能作为油藏工程长期研究的边界条件。反过来,物质平衡计算或油藏模拟可以进一步确定和修正油井动态预测,从而提供更恰当的采油工艺决策。

在采油工程理论形成的过程中,首先必须理解控制产能的重要参数及系统特性。下面为大家列出油气开发系统中的一些定义。

1.2 油气开发系统的组成

1.2.1 油藏烃类的体积和相态

1.2.1.1 油藏

油藏由一个或几个相互连通的地质流动单元组成。虽然过去我们已经根据井的形状及汇流建立了径向流理论,但诸如三维地震勘探、测井新技术和试井方法等现代技术可更精确地描

述地质流动单元的形状及井的生产特性。这在确定储层横向和垂直边界及非均质性方面非常有效。

油藏描述通常用于确定和评价油藏的非均质程度、连通性及各向异性。随着长达数千英尺的水平井和复杂结构井的出现,准确的油藏描述变得更为重要。如图 1.1 所示,油藏中有一口直井和一口水平井,该油藏具有横向非均质性或不连续性(封闭断层)、垂向流动边界(页岩透镜体)以及各向异性(应力或渗透率)。

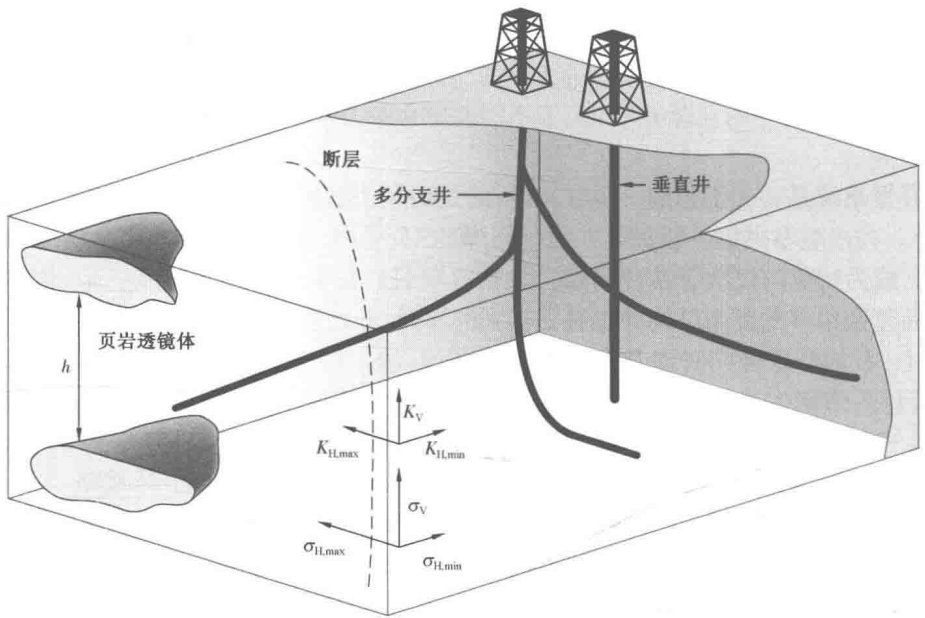


图 1.1 影响直井、水平井和复杂结构井流体动态的储层非均质性、各向异性、不连续性 & 边界

尽管准确的油藏描述和边界、非均质性及各向异性的识别对钻直井很重要,但对于只有直井开发的油藏,这些要求可以适当放宽。然而,钻复杂水平井时,对这些问题必须认真研究。横向储层不连续性(包括油井生产中的不均匀压力降)对复杂井的产量预测有很大影响,同时井眼轨迹和方位对产量也有很大影响。通常情况下,井只存在一个最优方位。

了解烃类成藏的地质历史具有一定的必要性。最好的石油工程师应该了解地质沉积过程、流体运移和聚集。油藏是背斜油藏、断块油藏还是河流相砂岩油藏,不仅影响烃含量,而且在很大程度上控制着油井生产动态。

1.2.1.2 孔隙度

石油工程的所有环节都旨在解决孔隙介质中流体的采出问题。孔隙度,可简单定义为孔隙体积 V_p 与岩石总体积 V_b 之比,即:

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} \tag{1.1}$$

孔隙度是岩石中流量的直接指标,大小一般在 0.1 ~ 0.3 之间,一般可基于实验室对油藏岩心测量或根据测井、试井等方法解释得到。孔隙度是开发方案中所需的基础数据之一,合理的孔隙度值对油藏开发可行性评价非常必要。如果油藏没有大量孔隙存在,则油藏没有必要进行开发。

1.2.1.3 油藏厚度

油藏厚度通常称为储层厚度或产层厚度,指两个稳定非渗透层之间连通的孔隙介质厚度。有时,要将含油层的厚度与下伏含水层的厚度区分开。在同一油藏多油层开发中,通常使用“油层总厚度”这一概念。此时,“油层的有效厚度”指有效渗透层的厚度。

目前通常采用测井技术来识别可能的油藏并确定其厚度范围。例如,由于砂岩与页岩在自然电位测井时响应截然不同,通过自然电位(SP)测井,可以估计储层的厚度。图 1.2 是一口井的测井曲线,明显可以看出砂岩储层的自然电位与相邻页岩层的偏差,此偏差反映了潜在含烃孔隙介质的厚度。

大小合适的有效储层厚度是油气井开采中的另一个必要条件。

1.2.1.4 流体饱和度

油气从来不是单独存在于岩石的有效孔隙体积内,而是伴随着水的存在。某些岩石属于“油湿”,意味着油分子附着在岩石表面,但更多的岩石属于“水湿”。岩石的润湿性由静电力和表面张力共同作用产生,流体注入、钻井、增产措施或其他活动以及表面活性剂的都会使润湿性发生改变,且通常带来不利的影响。如果有水存在但不流动,相应的含水饱和度称为“原生水饱和度”或“束缚水饱和度”。当含水饱和度大于该值时,水将与烃类一起流动。

石油烃是由多种组分组成的混合物,可分为油和气。随着组成、压力和温度条件的变化,任一混合物均可呈液体(油)、气体或两者混合的状态。通常油和气的概念是模糊的,生产的油、气是指总混合物经地面分离后的液态部分和气态部分,对应的压力和温度通常是“标准条件”,即(但不总是)14.7psi 和 60°F。不论处于原始油藏压力还是处于井底流动压力,在油藏中油气流动则意味着油气两相共存的状态。除了高产气井,油藏温度通常都是常数。

烃类饱和度是试井或完井前需要确定的第 3 个重要参数(前两个为孔隙度和油藏厚度)。一个经典的方法是通过测量地层电阻率来确定,目前可用多种方法进行地层电阻率测量。我们知道,地层水是良好的导体(即它们的电阻率很小),而烃类恰恰相反,因此通过测量地层电阻率就可探测烃类的存在。探测结果经适当校正,不但可以确定烃类是否存在,还可以估算出烃类的饱和度(即烃类所占据的孔隙空间比例)。图 1.2 也给出了电阻率测井曲线。结合之前描述的自然电位曲线可以看出,同一区域内的高电阻率意味着孔隙介质中烃类的存在。

在确定油田是否具有开采前景时,必须综合考虑孔隙度、油藏有效厚度和烃类饱和度,可用这些变量来评价井附近地区的含烃情况。

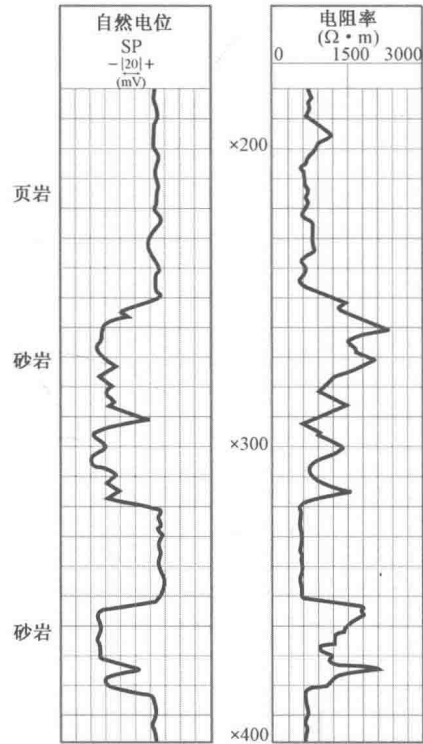


图 1.2 可区别砂岩与页岩层以及含水层与含烃层的自然电位曲线和电阻率曲线

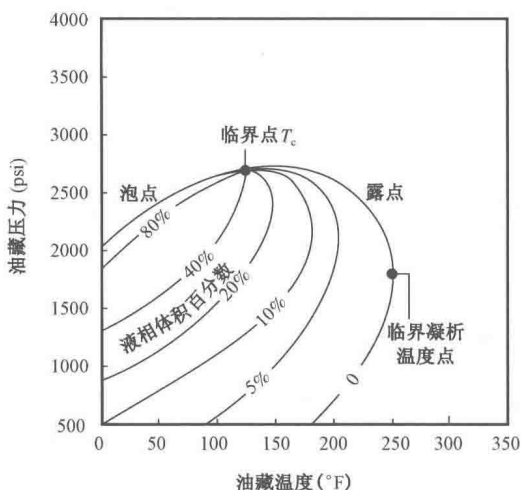


图 1.3 油田烃类相图(图中给出了泡点及露点曲线、常规相态分布线、反凝析区、临界点及临界凝析温度点)

1.2.1.5 油藏分类

所有烃类混合物都可用如图 1.3 所示的相图来描述,其是温度(x 轴)和压力(y 轴)的关系曲线。图上存在一个特殊点——临界点,在该点处,液相和气相的性质相同。对于低于临界点温度的每个温度(图 1.3 中 T_c 左边),都对一个称为“泡点压力”的压力点。当压力高于该压力时只有液相(油)存在,而低于该压力时气液共存。压力更低时(恒温下),将有更多气体逸出。油藏压力高于泡点压力的油藏称为“未饱和油藏”。

如果原始地层压力低于或等于泡点压力,或井底流压低于泡点压力(即使原始地层压力高于泡点压力)时,油藏中会有可流动的自由气形成。这类油藏称为“两相油藏”或“饱和油藏”。

当温度高于临界点温度时(图 1.3 中 T_c 的右边),两相包络线称为露点线。在其外部,流体为气体,此条件下的油藏称为“干气藏”。

两相包络线的最高温度称为“临界凝析温度”。在临界点和最高温度点之间存在一个区域,从气体饱和曲线可看出,随着压力的降低,该区域内会有液体或凝析液析出。但这一现象只能发生在一定的压力范围内,而当压力降低到一定程度后,又会发生汽化。发生这一现象的区域称为“反凝析区”,具有这一特性的油气藏则成为“凝析气藏”。

每一个油气藏都具有特定特征的相图及相应的物理和热力学性质。这些性质常常通过专业的流体取样并在实验室测量得到。石油热力学性质统称为 PVT(压力—体积—温度)特性。

1.2.1.6 面积

通过单井测试可得到油藏的孔隙度、油藏厚度、流体饱和度及压力(隐含的相态分布),但这对油藏的开发决策和开发方案制订来说还不够。结合先进的三维地震勘探和井下地震勘探技术以及试井技术,可大大增加对油藏的认识(包括厚度、孔隙度和饱和度),并检测地层的非连通区域及其位置。随着钻井数量的增多,可获得更多信息以进一步提高对油藏的特性及边界的认识。估算原始油(气)储量时,油藏面积是必不可少的参数。油藏条件下,原油体积 V_{HC} (单位 ft^3) 为:

$$V_{HC} = Ah\phi(1 - S_w) \quad (1.2)$$

式中: A 为油藏的面积, ft^2 ; h 为油藏厚度, ft ; ϕ 为孔隙度, %; S_w 为含水饱和度(因此 $1 - S_w$ 为含油饱和度)。需要注意的是,孔隙度、油藏厚度和饱和度在油藏面积范围内一般不是定值。

由式(1.2)除以原油地层体积系数 B_o 或气体地层体积系数 B_g 就可以估算出标准条件下油或气的体积。该系数是一定量的液体或气体在油藏条件下的体积与标准条件下的体积之比。因此,对于油,有:

$$N = \frac{7758Ah\phi(1 - S_w)}{B_o} \quad (1.3)$$

式中: N 单位为桶(bbl)。式(1.3)中面积的单位为英亩(acre)。对于气,有:

$$G = \frac{Ah\phi(1 - S_w)}{B_g} \quad (1.4)$$

式中: G 的单位为 ft^3 ; A 的单位为 ft^2 。

气体地层体积系数 B_g (单位为 ft^3/ft^3) 对应一个简单的体积关系,可用真实气体状态方程计算出来。气体地层体积系数远远小于1。原油地层体积系数 B_o (单位为 bbl/bbl) 不是一个简单的物理量。相反,它对应一个经验热力学关系,描述了标准状况下所释放出的天然气重新溶于液体中的天然气量(在油藏压力升高时出现)。因此,原油地层体积系数总是大于1,反映了气体溶解引起的原油体积膨胀。

读者可参阅 Muskat (1949)、Craft 和 Hawkins (Terry 修订, 1991) 及 Amyx, Bass 和 Whiting (1960) 所著的经典教科书及新版的 Dake (1978) 著作获得更多内容。本书学习要求具备一定的油藏工程基础知识。

1.2.2 渗透率

孔隙度高通常(但不总如此)意味着油藏内部的孔隙是相互连通的,因此孔隙介质为“可渗透的”。渗透率是描述孔隙介质中流体流动能力的参数。在某些岩性的岩石中(如砂岩),孔隙度越大,渗透率越高。而在其他岩性的岩石中(如白垩岩),孔隙度较大(有时甚至大于0.4),但相应的渗透率并不高。使用孔隙度与渗透率的关系式时必须十分谨慎,尤其在把某一种岩性关系式应用到其他岩性时。

渗透率的概念是由 Darcy (1856) 在一个经典实验中提出的,这一实验对石油工程及地下水力学都有重要意义。Darcy 观察到,流体通过特定孔隙介质的流量(或流速)与出入口的压差及介质的一个特性参数成正比(图 1.4)。因此:

$$\mu = \alpha K \Delta p \quad (1.5)$$

式中, K 为渗透率,是孔隙介质的一个特性参数。达西实验中使用的是水,如果改用其他黏度的流体,则渗透率必须除以黏度,其中比值 K/μ 称为流度比。

1.2.3 近井地带、砂面(井底砂面)、完井

近井地带具有非常重要的研究意义。首先,即使没有任何的人为干扰,汇流、径向流均会在井筒周围形成显著的压力降,且压降随距井的距离成对数变化,这一点将会在本书中证明。这意味着,在距井 1ft 处的压降等于 10ft 处和 100ft 处的压降。其次,所有作业(如钻井、固井和完井等)都会改变近井地带的油藏条件且通常会造成伤害,因此油藏中总压降的 90% 可能消耗在距井几英尺的区域内。

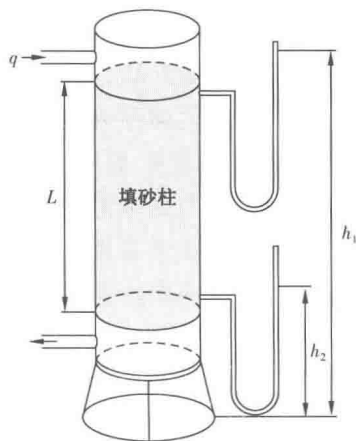


图 1.4 Darcy 实验(水在一定压差下流过填砂柱并记录压差)