

变油藏物性 渗流力学

鞠斌山 著

Variable Reservoir Property
Seepage Mechanics

石油工业出版社

变油藏物性渗流力学

鞠斌山 著

石油工业出版社

内 容 提 要

变油藏物性渗流力学是对经典渗流力学的继承和发展,是一本讲授油藏渗流系统物性变化渗流理论及应用方面最新研究进展的新书。本书主要讲述油藏渗流过程中渗流系统的物性变化机理、数学表征方法与渗流方程求解技术。针对油藏岩石和流体物性变化对渗流过程的影响等实际问题,运用理论与实践相结合的方法,揭示变油藏物性渗流的特征与规律。

本书可作为地下流体渗流相关专业的研究生和油气田开发工程领域科技工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

变油藏物性渗流力学 / 鞠斌山著.
北京:石油工业出版社, 2012.12
ISBN 978-7-5021-9428-4

I. 变…
II. 鞠…
III. 油气藏渗流力学
IV. TE312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 316935 号

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: <http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010) 64240656 发行部:(010) 64523620

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

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:11.75

字数:286 千字

定价:48.00 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

前 言

本书是建立在经典油藏渗流理论之上，着重讲述变渗流系统物性渗流理论及应用方面的知识。主要讲述油藏渗流过程中渗流系统的物性变化机理、数学模型的建立与求解技术，并针对油田开发过程中油藏岩石和流体物性变化对渗流过程的影响等实际问题，运用理论与实验或矿场实践相结合的方法，揭示变物性油藏渗流的特征与规律。近年来，尽管国内外在渗流系统物性变化领域有了一定的发展，但尚缺少一本系统地讲述该领域最新进展和相关知识的专业书。撰写本书目的是为学习地下流体渗流相关专业的研究生以及从事与该领域相关的科技工作者提供变渗流系统物性渗流领域的最新理论和应用等方面的知识。

本书采用了一个较长的书名，这是因为作者一开始就想把本书的范围划分清楚。一本关于渗流力学方面的书，应该全面包括地下渗流、工程渗流和生物渗流等领域的题材，但本书仅限于地下渗流，而且着重论述油藏中渗流系统物性变化的渗流专题。然而本书讲述的关于变渗流系统渗流理论、技术手段和研究方法同样适用于土壤、地质岩体和地下水文地质等领域的渗流问题。限定本书论题范围的一个原因是作者对涉猎自己的专长之外有所顾虑；另外一个原因是本书是一本专题性著作，如果扩大论题范围，势必显得杂乱。

把各种相关变渗流系统方面的理论和知识搜集起来，加以分类并通过经典的渗流数学模型的建立步骤来阐明相关的数学求解技巧，这不是本书的初衷。近十年来，相关渗流力学领域的教材或专著出版了多部，但本书在内容选材和文体风格上有很大的不同。本书的第一个特点是所有论题都是作者十五年来亲历研究或教学的专题，每个专题建立的数学模型、求解方法与技巧、计算机编程与软件研制等均出自作者之手。第二个特点是每章只针对一个专题，每个专题的提出均有其与相关矿场实际问题密切结合的背景。第三个特点是紧扣每个专题的科学背景和相关测试数据，在有充分依据的基础之上，谨慎进行数学表征及建模。第四个特点是在变渗流系统渗流求解手段方面特别注重解析求解和数值求解的结合，尽管本书所述论题大都涉及非线性渗流问题，面临获得解析解的困难，但仍最大限度地探求了获得解析解的可能性。对于解析手段无能为力的问题，本书采用数值求解方法，并尽可能地采用实验数据或矿场资料来验证数学模型和数值解的可靠性。以上四点也是区别于其他渗流力学著作之处。

最后要说明的是，本书尽管涉及了不少关于数理方程和非线性偏微分方程

的求解技巧，但不是一部数理方程的专著。要获取相关问题的更加系统而严谨的数学处理技巧，尚需进一步参阅应用偏微分方程方面的专著，本书仅为读者提供了进一步研究的基础和引导。

本书的完成得到了中国地质大学（北京）研究生院和北京市支持中央在京高校共建一油气田开发工程重点学科建设项目的支持，中国石油天然气集团公司科技管理部对本书出版予以资助，在此一并表示衷心感谢。

本书如存在不妥之处，欢迎读者提出宝贵的意见，敬希给予指正。

鞠斌山

2012年9月于北京

目 录

1 引言	1
1.1 变油藏物性渗流力学的研究任务、内容及意义	1
1.2 变油藏物性渗流力学的研究现状及进展	3
1.3 变油藏物性渗流力学的研究方法	8
2 变形介质油藏变形机理及油藏渗流	10
2.1 油藏岩石变形力学机制	10
2.2 油藏变形对孔、渗参数的影响	12
2.3 变形介质油藏渗流数学模型	18
2.4 变形介质油藏渗流模型解析求解技术	20
2.5 复杂非线性油藏变形渗流数值模拟及其应用	22
3 固相微粒运移机理及油藏渗流	30
3.1 油层微粒运移机理	30
3.2 运移微粒与油藏岩石物性特征	35
3.3 微粒运移对油层岩石微观孔隙和宏观物性的影响	37
3.4 伴有微粒运移的油藏渗流数学建模	48
3.5 微粒运移渗流模型解析求解技术	53
3.6 伴有微粒运移的油藏数值模拟及其应用	61
4 重质有机垢形成机理及油藏渗流	78
4.1 有机垢组成、结构和性质及堵塞机理	78
4.2 有机垢的形成对油藏岩石物性的影响	83
4.3 近井带沥青质伤害数学模拟	85
4.4 近井带有机垢油层伤害解除的数值模拟	92
5 油藏岩石润湿性和相对渗透率的变化机理及油藏渗流	103
5.1 油藏岩石润湿性和相对渗透率的变化机理	103
5.2 油藏岩石润湿性变化及其对相对渗透率曲线的影响	104
5.3 变润湿性油藏渗流模型及解析求解技术	108
5.4 变润湿性油藏数值模拟及其应用	113
6 油藏原油物理性质变化机理及油藏渗流	117
6.1 水驱开发油田原油性质变化	117
6.2 变原油黏度两相渗流数学模型及解析求解技术	127
6.3 非牛顿型原油流变性特征	134
6.4 非牛顿型原油流变性本构方程	135
6.5 非牛顿型原油渗流数学模型及解析求解技术	137

6.6 变原油黏度油藏数值模拟及应用 147

7 变渗流系统物性油藏渗流数值模拟系统 157

7.1 模拟系统的组成模块 157

7.2 模拟系统设计 158

8 变油藏物性渗流研究概括与总结 160

附录..... 162

附录 1 压力方程组系数矩阵形成 162

附录 2 石油工业常用单位换算表 164

参考文献..... 168

1 引 言

1.1 变油藏物性渗流力学的研究任务、内容及意义

1.1.1 变油藏物性渗流力学的研究任务

渗流力学是流体力学的一个分支(孔祥言, 1999), 是研究流体在多孔介质内运动规律的科学。油藏渗流是研究油、气、水在油藏岩石孔隙内流动规律的学科。油藏渗流系统是一个由油藏岩石孔隙介质及其内部流体共同组成的复杂系统。在油气田开发过程中, 流体的采出或注入是典型的复杂渗流问题, 渗流过程会使孔隙介质和流体的物性发生变化, 而孔隙介质和流体物性的变化又反过来对渗流过程产生影响。具体地说, 在油田开发过程中油藏渗流系统物性主要发生如下变化: 多种因素引起的孔隙度和渗透率的变化; 开发过程中流体的性质变化; 开发过程中岩石的润湿性和相对渗透率的变化等。变渗流系统油藏物性渗流力学的研究任务是: 研究油藏岩石孔隙介质内流体渗流过程中发生的渗流系统物理性质变化及其对渗流特征的影响。

1.1.2 变油藏物性渗流力学的研究内容

变油藏物性渗流力学以油藏渗流系统为研究对象, 通过理论分析, 研究油藏孔隙度、渗透率参数以及润湿性和流体性质变化的机理与影响因素。借助室内物理模拟和实验手段, 研究油藏渗流系统物性变化的规律。在理论和实验研究的基础上, 综合运用现代渗流理论并应用数学方法, 建立一套表征油藏渗流系统物性变化的油藏渗流模型, 利用偏微分方程的解析求解方法和数值计算技术对所建数学模型求解。具体研究内容为:

- (1) 储层微观孔喉参数的变化规律;
- (2) 地应力变化引起的孔隙度和渗透率变化机理;
- (3) 固相物质(微粒)参与流动引起的孔隙度和渗透率变化机理;
- (4) 有机垢形成机理及其引起储层伤害机理;
- (5) 油藏润湿性和相对渗透率的变化机理;
- (6) 牛顿流体和非牛顿流体性质的变化机理;
- (7) 建立充分考虑储层渗流系统物性变化的渗流数学模型, 分别定量研究储层参数、岩石润湿性和流体性质等变化对渗流过程和油田开发效果的影响。

1.1.3 变油藏物性渗流研究的必要性及意义

油藏岩石的孔隙度和渗透率变化是油藏渗流系统物性变化的最常见现象之一。在开发疏松砂岩油藏过程中, 油藏出砂和微粒运移是最常见的现象(Oefelein et al., 1964; Colmenares F J et al., 1997; Leone Joseph A et al., 1988; Doan Q et al., 1997; 邹洪岚等,

2009; 房茂军等 2012), 给开发带来了许多难题 (Anne Skjaerstein et al., 1997; Tom Schroeder et al., 1995; Vásquez A R et al., 1999)。我国东部的环渤海湾各油田中, 疏松砂岩油藏占有较大的比重 (汪正勇等, 2000; 赵晓等, 2002; 李泽华, 2002; 曾流芳等, 2002; 胡才志等, 2004; 李作侠等, 2005; 刘向君等, 2011), 其中的明化镇组、馆陶组和东营组以及部分沙河街油藏为疏松砂岩油藏; 国外也有类似的油田 (Davies D K et al., 1997; Wong G K et al., 1993; Halaturnyk R J et al., 1992)。该类油藏经过长期开发, 由于流体的长期冲刷作用及水敏和速敏等作用, 微粒在油层内部发生运移, 从而改变油藏固有的孔隙度、渗透率 (简称孔、渗) 特性, 加剧油藏非均质性。在流体长期的冲刷作用下, 油藏的孔、渗等地层参数与初期相比发生了较大的变化。疏松砂岩油层出砂 (指骨架砂粒脱离岩石孔隙表面伴随流体流入井筒) 是较为普遍的现象, 在油井近井地带出砂严重时会影响正常生产, 在远离油水井的油层内部出砂, 将在生产井和注水井之间形成“水道”或“优势渗流场”, 降低波及系数和驱油效率, 最终影响采收率。此外, 油层孔、渗参数的变化和出砂可能会影响产能, 增加修井工作量, 损坏套管, 增加作业成本。因此, 很有必要系统地研究油田开发因素引起的储层参数的变化机理和规律, 从渗流理论上研究储层参数变化及其对油田开发效果的影响。

对于欠压实油藏或异常高压油藏, 随着岩石受到的有效应力增加, 孔隙介质变密集, 颗粒的接触面积加大, 油层岩石发生变形, 严重时产生弹—塑性变形甚至塑性变形, 变形的结果使得油藏岩石的孔隙度和渗透率降低, 从而造成油层的产能下降。欠压实油藏 (蔡正旗等, 2001; 赵新民等, 2002) 和异常高压油藏 (姜伟, 1996; 刘得光, 1998; 刘三威等, 2000; 查明等, 2002; 李志等, 2002; 万晓龙等, 2004; 徐东锋等, 2011; 李军等, 2012) 在我国各大产油区均有所发现。对于低渗油藏, 岩石变形将导致储层的流动性变得更差, 进一步加剧开发难度。

黏土矿物的敏感性, 特别是黏土矿物的膨胀是引起油藏孔隙度和渗透率降低的主要原因。由于注入水与地层水的不配伍, 引起黏土矿物的膨胀, 导致储层的孔隙度减小, 渗透率降低。在油田开发过程中, 由于油藏的温度、压力和油藏流体组成的变化, 原油中的胶质和沥青质等原油重质成分可在岩石孔隙表面吸附, 在孔隙喉道处堵塞。以上问题均可造成储层伤害, 影响油井产能。

油田开发中油藏流体性质的变化, 尤其是油藏原油性质的变化是一个普遍现象。驱油过程中驱替相和被驱替相的黏度比是影响开发动态的重要因素。对于压力和温度因素对原油黏度的影响, 前人已经做了系统研究 (秦积舜等, 2001; Beal C, 1946; Beggs HD et al., 1975; Glasø O, 1980; Egbogah EO, 1990; A.M. Elsharkawy et al., 1999; Sergio E et al., 2003)。事实上, 开发过程中的其他因素也会流体性质产生影响, 许多学者对不同开发阶段的油田的原油性质进行过研究, 发现油层压力基本未变, 而原油粘度普遍升高 (鞠斌山, 等, 2001; 陈永生, 1993; 鞠斌山, 等, 2006), 油水黏度比在开发过程中变得越来越不利, 必然对油田的开发动态产生影响。在国内各大油田, 如胜利油田、大港油田和中原油田等均发现原油黏度随开发历史的延长而增大的现象 (大港油田科技丛书编委会, 1999; 鞠秀叶等, 2003; 郭元岭等, 1998; 邓玉珍等, 1996)。由此可见, 原油黏度的变化不仅仅是压力和温度的函数, 还受其他因素的影响。压力和温度是影响原

油黏度变化的常规因素,其他因素为非常规因素。目前对影响原油黏度的非常规因素研究很少,在渗流理论分析和渗流数学模型建立时均没有考虑非常规因素对原油黏度的影响。因而在此基础上发展起来的常规油藏数值模拟器很难精确模拟油田开发的历程,预测的结果和实际结果存在较大的偏差。

油藏岩石的润湿性变化也是开发过程中常见的现象 (Zhang H et al., 1997; Morrow et al., 1986; 赵云飞, 2008; 张乐, 2009), 其根本原因是由于流体的冲刷作用或者其他物质在岩石表面吸附, 改变了岩石表面的物理化学性质。润湿性变化是引起毛管力和相对渗透率变化的重要原因之一。在多相渗流理论体系中, 相对渗透率是多相渗流数学建模和驱替理论分析的理论基础。然而经典的渗流理论和渗流模型中没有考虑因油田开发因素导致润湿性变化引起的相对渗透率变化。不少数值模拟工作者 (高博禹等, 2004; 姜汉桥等, 1999; 盖英杰等, 2000), 在进行历史拟合和预测时, 采用分段处理的方法, 即在不同的含水阶段使用不同的相对渗透率曲线。该方法将导致各阶段之间的衔接出现跳跃, 与油田实际不符。因此有必要研究掌握相对渗透率的动态变化规律, 建立动态相对渗透率模型。

虽然人们已经认识到油田开发过程中油藏渗流系统物性的变化现象, 但是迄今为止, 还没有一本系统地研究油藏渗流系统物性变化机理及其对渗流规律影响方面的著作。上述问题是影响油藏渗流规律和油田开发效果的重要因素, 也是油田开发后期亟待解决的难题之一。造成油藏流场参数、流体性质和润湿性改变的原因, 既有油藏渗流场固有的因素, 也有开发过程中形成的复杂因素。为了定量表征渗流系统物性变化规律及其对渗流过程的影响, 需要在理论研究的基础上, 借助室内实验、数学建模与模拟, 系统全面地表征油田开发因素引起的渗流场及流体性质的变化规律, 这对揭示剩余油的形成规律和挖潜剩余油工作具有非同寻常的意义, 变油藏物性渗流问题研究的必要性不言而喻。

1.2 变油藏物性渗流力学的研究现状及进展

从目前国内外研究现状看, 在渗流模型中, 处理油藏渗流系统物性的常规方法为: 孔隙度被视为微可压缩的, 渗透率作为常数处理, 流体性质通常作为压力的函数, 润湿性不随开发历史变化。事实上储层渗流系统物性随着开发历史的发展而变化。开发过程中的多种因素可以引起: 孔、渗参数场及其非均质性变化; 润湿性及相对渗透率变化; 流体性质变化; 有机垢形成及储层伤害等。

1.2.1 无固体物质参与流动引起的孔、渗参数变化

1.2.1.1 变形介质油藏

多孔介质的孔、渗参数变化研究最早起源于 20 世纪上半叶, 主要研究方向是地下水渗流对地面沉降或堤坝下陷的影响, 主要从地应力变化角度研究孔隙介质的孔、渗参数变化及其引起的地面沉降或堤坝下陷。Terzaghi (1925) 最早提出了著名的有效应力概念和公式。Terzaghi (1943) 研究了弹性孔隙介质中饱和流体流动时的固结过程, 并研究了岩体应力和流体渗流的相互作用 [距渗流力学的诞生 (1856 年达西定律的建立) 87 年, 距渗流方

程的导出(1889年俄国的儒可夫斯基导出)54年]。

Biot (1954, 1956a, 1956b) 将岩土所受的全应力和孔隙流体压力作为状态变量, 建立了比较完善的固结理论, 奠定了流固耦合理论的基础。Verrujit (1969) 发展了多相饱和渗流与孔隙介质耦合的理论模型, Nikolaevsky (1996) 进一步建立了岩石骨架的有效应力、全应力和孔隙内流体的压力关系式。

Rice J R, et al. (1976), Wong S K (1988), Settla A et al. (1990), 闫丰明等 (2010) 和刘之的 (2012) 研究了油田开发因素引起储层应力变化及储层变形问题。当地层的压力下降时, 生产井的产能急剧下降, 这一现象引起了许多中外专家的关注, 其中苏联的 M.H. 斯特里诺夫和 T.B. 伊萨科夫等 (1987) 专家进行了系统的理论研究和室内岩石实验研究。他们认为在油层压力下降时, 考虑岩石发生形变是非常必要的。A.T. 戈尔布诺夫 (1987) 曾经系统地分析了变形介质油田开发过程中由于储层压力变化引起的孔、渗参数变化机理和规律, 并建立了孔、渗参数变化与储层压力关系的理想数学模型。

近年来, 国内的史连杰等 (1999) 通过室内实验测定了榆树林油田的岩心所加载的覆盖压力与孔隙度和渗透率的变化关系; 冉启全等 (1999) 将固相质点速度作为耦合变量, 初步建立了弹—塑性饱和储层中多相渗流耦合模型; 董平川等 (2000) 研究了多相流体和岩体弹—塑性变形; 杨满平、李治平等 (2003) 通过室内实验方法对砂岩的干样和束缚水条件下的岩样进行了孔、渗参数和有效应力变化关系的研究; Ju Binshan et al. (2011) 在实验基础上建立了孔、渗参数的应力敏感模型和渗流模型, 在变形孔隙介质油藏非线性渗流解析求解方法上进行了探索。目前的发展趋势是由单相流到多相流, 由岩体线性变形向非线性本构关系发展(黏弹性、弹—塑性和蠕变)。虽然国内外的许多学者对变形介质油藏进行了研究, 但是迄今为止还没有成熟的商业软件。建立变形介质油藏渗流数学模型, 研制出油田规模的复杂变形介质油藏数值模拟软件具有重要意义和广泛的应用前景。

1.2.1.2 油层黏土矿物的水敏性

黏土矿物的水敏效应会改变储层的孔隙特征和岩石的渗透率。所有类型的黏土都具有吸水特性, 有的甚至会与水发生水合作用, 产生膨胀。Neasham (1977) 将黏土按其存在形式分为三类: 分散游离黏土, 它随机附着在孔隙表面或充填在孔隙之中; 孔隙表面沉积黏土, 以相对连续或以薄层状态附着在孔隙表面上; 孔隙“桥接”黏土, 其以纤维状存在, 能够产生微小孔隙或扭曲孔隙。Almon 和 Davies (1981) 将油藏中的黏土按成分分为四类: 高岭石、蒙皂石、伊利石和绿泥石。不同的黏土对地层参数的影响机理不同: 高岭石具有微小膨胀性能; 蒙皂石是膨胀型黏土, 它含有较高的钠, 遇到淡水后能够膨胀到原来体积的几倍, 膨胀的结果导致孔隙度降低、渗透率下降以及加剧微粒释放; 伊利石能够形成多种晶体结构, 有时以不规则的纤维状结构在孔隙中生长, 当伊利石和蒙皂石同存在时也会膨胀; 绿泥石是强酸敏的, 酸处理后同铁的化合物作用, 可形成沉淀。

关于黏土矿物的水敏性研究的文献 (Khilar et al., 1983; Houseworth J E, 1991; 雷光伦等, 1994; 李东等, 1996; 李淑白等, 1998; 汪伟英等, 2001; 韩志勇等, 2008) 较多, 研究手段以室内实验为主。在渗流力学领域内, 经典的渗流数学模型没有考虑黏土膨胀, 当前的商业油藏数值模拟软件中也没有充分考虑黏土膨胀对渗流场参数和渗流过程的影响。

1.2.2 固体颗粒物质参与渗流对油层物性的影响

1.2.2.1 油层岩石微粒释放及运移研究状况

油层微粒释放、运移和滞留现象是油层微粒运移的三个环节(鞠斌山等, 2004; 李龙等, 2011)。影响储层微粒运移的因素虽然复杂多样, 但仍可以将这些因素归类为微粒因素、流体因素、油藏岩石因素和毛管力因素。

(1) 微粒因素。

黏土分为碎屑黏土和自生黏土。碎屑黏土是岩石骨架的组成部分, 产生微粒运移的可能不大; 而自生黏土附着在岩石孔隙表面或者充填在孔隙之中, 当遇到不配伍的流体时, 将会发生微粒释放。高岭石具有微小膨胀性能, 这类黏土可以释放到流体中, 也可以发生运移; 砂岩油藏岩石中的石英、长石等其他微粒也会产生微粒释放、运移和滞留现象。

(2) 流体因素。

Mungn (1965) 和 Clementz (1977) 认为: 当孔隙中存在油、气或者重质有机物附着在孔隙表面上时会抑制微粒释放。Muecke (1979) 认为微粒的润湿性和界面张力严重影响着多相渗流体系中的微粒释放。注入流体和油藏流体的配伍性是影响多相渗流系统中地层微粒释放的重要因素。Sarkan 和 Sharma (1990) 认为多相流存在时, 油层微粒释放变弱, 地层原油的存在减少了水与孔隙表面接触的机会, 从而减少了地层微粒释放的机会。

(3) 油藏岩石因素。

岩石孔隙表面具有油润湿特性时, 水与岩石孔隙表面接触的面积大大减少, 地层微粒或黏土释放到水中的量相应地减少, 地层微粒释放减轻; 若岩石孔隙表面具有水润湿特性时, 微粒释放量较大。

(4) 毛管力因素。

在多相流体系中, 毛管力对微粒起到两个方面的作用: 一是毛管力效应导致局部压力扰动, 会使微粒流动, 也会降低孔喉处微粒的“架桥”作用; 二是毛管力的扰动作用, 会使流体携带微粒流动的临界流速降低。

对于微粒的释放机理, Kartic C Khilar (1999) 从胶体力学角度和水动力学角度进行了详细论述。五种不同作用能(双电子层斥力能、伦敦—范德华吸引力能、Born 斥力能、酸基相互作用力能和水动力能)的综合作用控制着微粒在孔隙表面的动态。如果总能量为负, 体现为吸附能, 反之为排斥能。当总能量为零时, 达到微粒释放的临界条件。Khilar 和 Fogler (1999) 等人提出了微粒释放的经验模型; Gruesbeck 和 Collins (1982) 在实验研究基础上建立了水动力引起微粒释放的方程。

近年来, 许多学者运用室内实验、测井手段和动态测试等方法对岩石微粒释放及运移进行了研究。文献调研表明, 国外在该领域的研究较少, 国内研究较多。我国各大油田均有对该专题研究的报道。Priisholm S 等 (1987) 通过实验观察了固体运移物质在岩石孔隙内部的分布状态。陈金辉等 (2010) 对因储层岩石破裂诱发微粒运移造成的油层伤害进行了实验研究。国内学者的研究现状总结见表 1-2-1, 可以看出长期注水开发对储层的物性参数均产生了影响, 孔隙度变化幅度较小, 渗透率变化幅度较大, 最大变化幅度在 10 倍以上。总体趋势是: 中、高渗储层的孔、渗参数增加, 低渗储层物性变差, 不同的油田储层

参数变化存在较大的差异，同一油田不同层位其变化也会存在差异。

表 1-2-1 国内油田储层物性变化的研究现状

油田名称	作者	研究手段	结论
大庆	闫伟林等 (2002)	岩心驱替实验, 临井取心	渗透率增大范围为 5.8% ~ 301.1%, 平均增幅为 71.3%
胜利	胡杰等 (1994); 邓玉珍等 (1996, 2003); 周洪钟 (2003)	实验和测井解释等方法	孤岛油田: 物性变好; 粒度增大, 黏土矿物含量减少; 胜坨油田: 沙二段 3 油组物性变好, 沙二段 8 油组物性变差
大港	王志章 (1999); 郭莉等 (2001); 吴欣松等 (2002); 单华生等 (2004)	室内实验和测井解释等方法	开发后期孔、渗增大, 渗透率变化幅度较大, 黏土矿物和泥质减少
中原	陈亮 (1999); 杨克敏 (1999) (胡状集); 龙雨丰 (2001); 邓瑞健 (濮城 2003)	室内实验, 临井取心	濮城油田: 有的储层渗透率增大, 有的储层渗透率减小, 其中低渗层的渗透率降低; 胡状集油田: 高渗层物性变好, 低渗层变差; 文留油田: 储层物性变好
长庆	林光荣等 (2001)	压汞实验结合现场资料	马岭油田: 孔喉比减小, 物性明显变差, 渗透率平均下降了 12.96%, 孔隙度下降了 0.44%
双河/下二门	赵跃华等 (1999)	动态测试	80% 以上的砂砾岩油层物性发生了变化, 无变化的很少

1.2.2.2 纳米级颗粒型驱油剂与渗流研究状况

纳米级 (0.1 ~ 100nm) 颗粒型驱油剂在储层岩石孔隙中参与渗流具有特殊性。由于粉体材料达到纳米级尺度, 导致其表面的电子结构和晶体结构发生变化, 产生了表面效应、小尺寸效应、量子效应等特殊性能 (张立德和牟季美, 2001), 从而使其在磁性、催化、化学活性、吸附性等方面呈现特殊的性能 (柳艳等, 2008)。正因为纳米级颗粒型材料具有特殊的效应和性能, 自 20 世纪 90 年代以来, 纳米技术在许多领域得到了迅速的发展。利用纳米级颗粒材料在油层岩石孔隙表面的吸附来改变岩石的润湿性, 进而改变油、水两相的渗流特征的最早研究见诸于 2002 年 SPE 亚太地区会议的报道 (Ju Binshan et al., 2002)。许多专家看到了利用纳米材料提高驱油效率的潜在价值, 并在纳米驱油材料驱油机理方面进行了初步探索 (鞠斌山等, 2006; Skauge et al., 2010), 但是在低渗透油藏岩石孔隙中有关纳米级颗粒物质的对流、扩散、吸附、解吸、堵塞机理和渗流规律等领域仍然缺乏系统的研究。

近年来, 纳米技术在工业、农业和医疗等领域迅速发展 (Liu et al., 2009)。Ju Binshan et al. (2002) 采用实验手段研究了纳米聚硅型颗粒材料在油层岩石孔隙表面的吸附及其对岩石的润湿性和渗透率的影响, 陆先亮等 (2003) 研究了一种纳米粉体型材料在油田增强注水能力方面的应用。Suleimanov et al. (2011) 研究了粒径为 90 ~ 110nm 的非金属颗粒材料对界面张力和原油采出程度的影响。在纳米驱油理论和数学模拟方面, 鞠斌山等 (2006) 和 Ju Binshan et al. (2006) 建立了纳米硅胶体系驱油理论和亲水型纳米级颗粒悬浊液驱油的数学模型, 并预测了驱油效果。陈兴隆等 (2006) 通过实验手段研究了聚硅悬浮液对有机堵塞物的溶解作用。

在纳米驱油剂粒子和驱油剂的吸附微观观察方面,可用电子显微镜、场离子显微镜、扫描探测显微镜、光衍射仪和激光粒径仪等进行微观观测和分析。谱分析法、扫描探针显微等技术可用来研究纳米微粒的表面特征。纳米驱油颗粒在岩石孔隙表面的吸附以及在吼道处的滞留是纳米驱油的微观特征研究重点。Ju Binshan 和 Fan Tailiang (2012) 曾利用透射电镜 (TEM) 观察粒径为 10 ~ 200nm 的微粒在岩石孔隙表面的吸附特征。

近 3 年来,国内外科研人员在纳米粉体材料在纳米—微米级多孔介质内部的吸附、运移机理等领域展开了进一步的研究 (Yu et al., 2010; Kanj et al., 2009; Ju, Fan, 2009; Di et al., 2010), 对纳米驱油剂提高采收率方面的应用进行了进一步的探索 (Skauge et al., 2010; Zhang et al., 2010)。调研结果表明,在驱油剂在纳米—微米级超低渗透岩石孔隙或裂缝表面的吸附、孔隙内扩散、传质等物理化学渗流和数学模拟方法等领域缺乏系统的研究。

1.2.2.3 研究方向和发展趋势

固体物质运移可以引起储层物性发生明显的变化,改变储层的非均质性。对于疏松砂岩储层,由于微粒运移和出砂现象会在油层中形成高渗条带,严重时发展成大孔道,降低水驱效果,增加提高采收率的难度。通过示踪剂技术和注采井动态反应可以大致判断注采井之间是否形成高渗条带。然而定量确定高渗条带方位和大孔道的路径相当困难,这是今后研究的难点和发展方向。纳米级颗粒在岩石孔隙中的运移、吸附、分散等作用对渗流系统物理性质与多相渗流的影响,定量预测纳米驱油剂提高采收率幅度等问题是未来低渗透油藏提高采收率的研究方向和发展趋势之一。

1.2.3 油藏岩石润湿性及相对渗透率变化

油藏岩石的润湿性是影响油田开发动态的重要因素之一,油田开发过程中润湿性的变化必将会影响开发指标。Zh H X (1997), Morrow 和 Norman R (1986), 吴素英 (2006) 以及张乐 (2009) 的研究表明:经过长期水驱开发的油田,其润湿性和相对渗透率会发生明显变化。郭莉、窦松江等 (2001) 分析了油田注水对大港油田港东区块油层润湿性的影响。赵跃华等 (1999) 和邓玉珍 (2003) 分别对下二门油田和胜坨油田的润湿性进行了研究,结果表明:随着含水率升高,油层岩石的润湿性由偏亲水变为强亲水。在三次采油过程中,化学采油用剂在油层岩石表面的吸附可引起岩石表面的润湿性改变。Ju Binshan et al. (2002) 通过注入纳米粉体材料改变油层的润湿性,对提高油田注水能力进行了研究。赵国明等 (2003) 通过室内实验研究了一种调剖剂对油藏岩石润湿性的影响。吴诗平、鄂捷年等 (2004) 研究了沥青质在岩石孔隙表面吸附后对润湿性的影响。

考虑润湿性和相对渗透率变化的渗流理论及数学模型尚待深入研究,当前没有相应的商业油藏数值模拟软件。目前的处理方法是分段模拟 (程林松, 等, 2003), 即在不同的含水阶段采用不同的相对渗透率曲线。该方法的缺点是分段处数据不连续,产生的跳跃不符合油田实际。研制考虑润湿性和相对渗透率变化的油藏数值模拟软件对于提高油藏模拟精度具有非常重要的意义。

1.2.4 油藏流体性质变化

水驱油田开发过程中, 由于长期水洗以及水中氧对原油氧化等作用导致油层原油的黏度随着含水上升而不断提高, 原油的流动性变差。陈永生 (1993), 邓玉珍 (1996), 郭元岭 (1998), 鞠秀叶 (2002) 等人的研究表明: 在油田开发过程中, 原油相对密度、黏度等性质有增大的趋势。

影响原油性质变化的因素除了压力和温度外, 还受到含水、氧化作用等多种非常规因素的影响。对影响原油性质的因素进行分析, 建立开发过程中原油性质变化的数学模型, 对于提高水驱油预测精度和数值模拟精度具有非常重要的意义, 是今后的发展方向。

此外, 原油中的稠油属于非牛顿流体, 非牛顿流体的本构方程类型多样, 非线性效应加大了解析求解的难度。目前能获得的非牛顿渗流方程的解析解情况仍然较少, 而且求得的解析解是作了简化假设之后求得的, 并且大都是单相渗流问题。

1.2.5 有机垢的形成及储层伤害

理论上, 由沥青质胶束分散在原油中形成的石油胶体体系是不稳定的热力学系统。但经验表明, 一般的石油胶体体系在其组分和外部条件不发生变化时仍然是动力学稳定的或准稳定的。如果组分含量发生变化或开发过程中油层温度、压力、pH 值等条件变化, 就会导致胶质与沥青质聚结、沉积 (M R Islam, 1994; U K Golllapudi, 1994)。前人的研究 (M R Islam, 1994, 1995; Eric Y Sheu et al., 1995; Roberto Cimino et al., 1995; Bilheimer et al., 1949; A.Chakma et al., 1994; Lian H J et al., 1994a, 1994b) 表明, 造成胶质、沥青质的沉积是一个十分复杂的过程, 是多种因素作用的结果。

在有机沉淀造成的油层伤害数学模拟领域, Kosta J 等 (1997) 为了定量模拟计算沥青质在岩石孔隙表面沉积引起的渗透率和孔隙度下降程度, 建立了由沥青质沉积导致油层伤害的数学模型。注入化学溶剂是解除油层有机垢堵塞问题行之有效的方法 (Carter J m et al., 1994; Islam M R et al., 1989; Oguztoreli M et al., 1986)。鞠斌山等 (1999) 建立了模拟有机解堵数学模型, 并针对埕北油田的一口有机堵塞油井的化学解堵效果进行了定量模拟预测。

1.3 变油藏物性渗流力学的研究方法

1.3.1 指导思想

(1) 动态与静态相结合: 油藏渗流系统物性变化是油藏固有性质和开发因素相互作用的结果, 应采用动态与静态相结合的研究思想。

(2) 多种资料分析相结合: 对油藏渗流系统物性变化的研究, 需要的资料既涉及地质静态资料, 又涉及地球物理资料、开发动态资料和各类测试资料等。应采用多种资料综合分析, 相互验证。

(3) 多手段相结合: 综合运用理论研究、物理模拟与实验分析、数学模拟矿场分析等

手段,全面研究油藏渗流系统物性变化机理及其对渗流过程的影响。

(4) 多学科协同研究:油藏渗流系统物性变化及其对渗流的影响的研究具有综合性的特点,依靠单一的学科无法系统地对渗流系统物性变化及其对渗流的影响进行表征,涉及油气田开发地质、油层物理、油藏工程、渗流力学、应用数学和计算机应用技术等学科,因此必须运用多学科的理论和方法进行综合研究。

(5) 理论与实践相结合:本书的每个专题的提出均有其与相关矿场实际问题密切结合的背景,理论研究源于矿产中的实际问题,但将理论研究的成果应用到实际生产中去,协助解决生产中的难题,才是理论研究的最终目的。此外,理论模型和数学模型的正确性必须在生产实践中加以验证。

1.3.2 研究手段

(1) 理论研究:运用复杂多相渗流理论、物理水动力学理论和物理—化学理论研究油田开发因素引起的储层参数、润湿性和流体性质变化的原因与机理。

(2) 物理模拟:结合储层流场参数和流体性质变化的理论分析和研究,对油田的岩心和流体取样,设计相应的实验。通过室内物理实验,测定储层微观和宏观参数的变化以及相对渗透率曲线的变化,定量研究储层岩石物性和流体性质变化,总结分析油藏渗流系统物性变化的规律。

(3) 数学模拟:在理论研究和物理模拟研究成果的基础上,用近现代应用数学方法和现代渗流理论,结合流固耦合理论,建立油田开发因素引起的油藏渗流系统物性变化的渗流数学模型,采用非线性偏微分方程解析理论和数值方法对所建模型进行求解。结合油田实际问题,研究油藏岩石和流体固有物性、开发等因素对储层流场参数和流体性质的影响与变化规律及其对开发动态的影响。研制相应的油藏数值模拟软件,为油田高效开发提供理论指导和技术支持。

(4) 数学模型的应用与验证:利用实际油田资料和室内研究所得资料进行数值模拟,定量研究油藏渗流系统物性参数变化的规律及其对剩余油和开发效果的影响;与常规数值模拟(未考虑储层和流体物性变化)的结果对比分析,并与实际油田开发资料和物理模拟结果对比,验证模型的可靠性和正确性,进一步完善数学模型。

2 变形介质油藏变形机理及油藏渗流

2.1 油藏岩石变形力学机制

油藏岩石是一种固体多孔介质，由岩石骨架和孔隙两部分组成，岩石孔隙通常由流体占据，岩石骨架不仅受到固体传递的应力，而且受到孔隙内部流体的压力。有关多孔介质所受应力的研究，最早起源于 20 世纪上半叶。Terzaghi (1925) 最早研究了岩体应力和流体渗流的相互作用，他认为岩体变形是由外部载荷对应的全应力与孔隙内流体压力的共同作用来控制的，并提出了岩石骨架有效应力概念。据 Terzaghi (1943) 的专著，有效应力的表达式为：

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \bar{p} \quad (2-1-1)$$

式中 σ_{ij} 、 σ'_{ij} ——岩石单元体某一截面上的全应力和有效应力，MPa，

$\bar{p}$ ——流体系统平均压力，MPa，

δ_{ij} ——Kromeker delta 函数。

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (2-1-2)$$

为了便于描述岩石骨架所受的应力和应变的关系，引入有效应力的概念。通过有效应力原理（图 2-1-1），建立了孔隙流体压力与岩石固相骨架变形之间的联系。

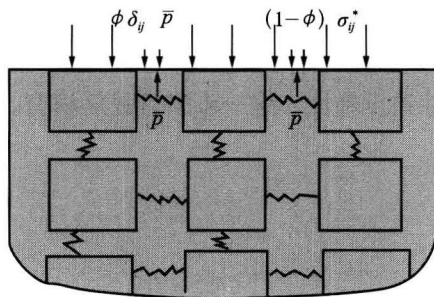


图 2-1-1 油层受力等效图

Nikolaevsky (1996) 提出了岩石骨架的应力、任一界面上的全应力和孔隙内流体的压力关系式为：

$$\sigma_{ij} = (1 - \phi) \sigma'_{ij} + \phi \delta_{ij} \bar{p} \quad (2-1-3)$$

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - \phi \delta_{ij} \bar{p}) / (1 - \phi) \quad (2-1-4)$$