



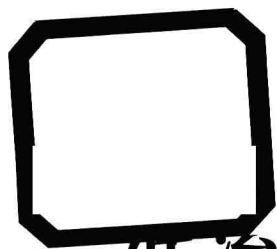
国家重大科技专项成果

低渗透油藏 非线性渗流理论与数值模拟技术

姜瑞忠 杨仁锋 著



石油工业出版社



低渗透油藏非线性渗流理论 与数值模拟技术

姜瑞忠 杨仁锋 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从低渗透油藏渗流特征、微观渗流机理入手,建立了低渗透油藏非线性渗流模型,对非线性渗流驱油理论、开发生产规律进行了研究,系统阐述了低渗透单重变形介质油藏和低渗透裂缝性油藏非线性渗流数值模拟方法,并在此基础上,对低渗透油藏注水开发井网系统进行了优化。

本书适合于从事油田开发的管理人员、研究人员以及高校师生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

低渗透油藏非线性渗流理论与数值模拟技术/姜瑞忠,杨仁锋著.
北京:石油工业出版社,2010.12

ISBN 978-7-5021-7702-7

I. 低…

II. ①姜…②杨…

III. ①低渗透油层-油田开发-非线性-渗流

②低渗透油层-油田开发-数值模拟

IV. TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 214051 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: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523579 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 9.75

字数: 246 千字

定价: 38.00 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

序

我国低渗透油田储量丰富，为完成国家石油生产任务作出了重大贡献。低渗透油田生产实践和科学实验表明，其渗流特征与中高渗透性油田有明显的不同。因而关于低渗透油层渗流规律的研究对合理有效地开发这类油田有重要意义。

渗流是流体在多孔介质中的流动，其渗流特征取决于渗流三大要素，即流体、多孔介质和渗流条件。流体可分为牛顿流体和非牛顿流体，而非牛顿流体有各种各样的。渗流流体则包含不同比例的牛顿流体和非牛顿流体，且在孔道中的分布是有序的。多孔介质的孔隙结构也多种多样，这就导致渗流规律也是各种各样的：达西线性律，具有启动压力梯度的拟线性律，无启动压力梯度的非线性律，具有启动压力梯度的非线性律……

正因为对非线性渗流规律影响的因素众多，渗流过程复杂，所以，其表达形式也是各种各样的。人们已经提出了一些非线性渗流的公式，它们各有所长。这说明，关于低渗透油层渗流的研究已进入了一个百家争鸣的繁荣期。

当我看过此书的手稿后，心中禁不住浮现出一种喜悦之情，这是一本值得看的书。作者系统地阐述了低渗透油藏非线性渗流的物理基础和力学过程，提出了新的渗流方程，并以此为基础研究了单相和油水两相渗流中的应用方法，且扩展到变形介质和裂缝介质领域以及井网优化等方面。我相信，它的出版必将给人们以启迪，它对渗流理论的发展，对更有效地开发低渗透油田具有重大的促进作用。



2010年2月20日

前 言

我国低渗透油藏分布十分广泛，储量丰富。在今后相当长的一个时期内，低渗透油藏将是我国待发现石油资源及未来开发的主体对象，研究和开发好低渗透油藏对我国石油工业今后的持续稳定发展有着十分重要的意义。

低渗透油藏与中高渗透油藏相比，在渗流特征、微观渗流机理、渗流理论以及开发生产规律等方面均存在很大不同，主要体现在低渗透油藏中存在着非线性渗流。国内外很多学者对此进行了深入研究并发表了自己的观点，但至今在低渗透油藏微观渗流机理及渗流理论方面仍没有达成一致，存在着很多分歧。本书立足于基础理论研究，对低渗透油藏的微观渗流机理进行了新的阐释，为低渗透油藏渗流理论进一步的发展奠定了基础。在深入探讨低渗透油藏微观渗流机理基础上建立了新的非线性渗流模型，并以此为基础首次系统阐述了低渗透多孔介质非线性渗流理论，给出了考虑非线性渗流后低渗透油藏的开发生产规律，旨在为低渗透油藏的高效开发提供理论指导。

目前，国内外比较成熟的油藏数值模拟技术均是以达西定律为基础的。同时，部分学者开发的基于拟启动压力梯度模型低渗透数值模拟技术，同样未能考虑渗流曲线中非线性弯曲段的影响，模拟预测结果均存在较大的误差。针对油藏数值模拟技术并没有将低渗透多孔介质特有的非线性渗流特征反映出来的问题，本书给出了非线性渗流数值模拟技术关键问题的解决方法，使得数值模拟技术能够更加准确地应用到低渗透油藏开发实践中，为低渗透油田合理井网设计与方案评价提供科学指导。

本书是作者多年科研成果的总结。本书在写作过程中得到了中国石油勘探开发研究院廊坊分院的大力支持和帮助，尤其要感谢杨正明对本书所提的建议以及所提供的帮助。王海江、刘小波、张晓亮等做了大量的前期研究工作，在此深表感谢。

本书得到了国家重大科技专项（2008ZX05013-002）和石油工业出版社的资助，在此特致以由衷的谢意。

低渗透油藏非线性渗流的研究是一项十分复杂、技术性很强的工程。由于作者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

著 者

2010年6月

目 录

第1章 低渗透油藏渗流特征	1
1.1 低渗透油藏渗流呈现非线性	1
1.2 低渗透油藏存在启动压力梯度	4
1.3 低渗透油藏存在应力敏感性	6
1.4 低渗透多孔介质的渗透率是可变的	7
1.5 低渗透多孔介质中流体流动的横截面积是变化的	7
参考文献	7
第2章 低渗透油藏非线性渗流微观机理	9
2.1 多孔介质特征	9
2.2 低渗透油藏微流动效应	12
2.3 边界层理论	18
2.4 非线性渗流微观机理探讨	23
参考文献	24
第3章 低渗透油藏低速非线性渗流模型	26
3.1 渗流模型对比总结	26
3.2 低速非线性渗流新模型	28
参考文献	42
第4章 单相非线性渗流理论	43
4.1 单相稳态渗流理论	43
4.2 单相非稳态渗流理论	46
参考文献	55
第5章 非线性油水两相渗流理论基础	56
5.1 考虑非线性渗流的活塞式水驱油理论	56
5.2 考虑非线性渗流的非活塞式水驱油理论	63
5.3 非线性渗流相对渗透率曲线计算方法及分析	69
参考文献	78
第6章 考虑非线性渗流的低渗透油藏开发生产规律	79
6.1 低渗透油藏产能分析	79
6.2 低渗透油藏产量递减规律	84
6.3 低渗透油藏水驱特征曲线	87
参考文献	92

第7章 低渗透单重变形介质油藏非线性渗流数值模拟方法	93
7.1 低渗透单重变形介质油藏非线性渗流数学模型	93
7.2 低渗透单重变形介质油藏非线性渗流模型的差分离散化方法	96
7.3 低渗透单重变形介质油藏数值模型解法研究	102
7.4 软件的可靠性验证	103
7.5 低渗透单重变形介质油藏非线性渗流数值模拟	107
参考文献	117
第8章 低渗透裂缝性油藏非线性渗流数值模拟方法	118
8.1 低渗透裂缝性油藏非线性渗流数学模型	118
8.2 低渗透裂缝性油藏非线性渗流模型差分离散化	123
8.3 软件的可靠性验证	125
8.4 低渗透裂缝性油藏非线性渗流数值模拟	127
参考文献	133
第9章 低渗透油藏注水开发井网系统优化	134
9.1 无人工裂缝井网开发效果评价	134
9.2 人工裂缝井网系统优化	135

第1章 低渗透油藏渗流特征

1.1 低渗透油藏渗流呈现非线性

低渗透油藏由不同沉积相组成,但多属于近源沉积和远源沉积。近源沉积是指储层离物源区较近,岩石颗粒并未经过长距离搬运就沉积下来。这样沉积的碎屑颗粒大小相差悬殊,分选差,不同粒径颗粒及泥岩充填在不同的孔隙之中,形成低渗透储层。远源沉积是储层离物源区较远,水流所携带的碎屑物质经长距离搬运,颗粒变细,悬浮部分增多。沉积成岩后,形成粒级细、孔隙半径小、泥质(或钙质)含量高的低渗透储层^[1]。再加上低渗透储层成岩和后生作用,使得低渗透储层孔隙极不均匀,孔喉细小,结构复杂,渗透率低,表面分子力和毛管力作用强烈,要有较大的压力梯度储层中流体才能流动,具有明显不同于中高渗油藏的渗流规律,呈非达西渗流特征。

图1-1-1是典型的低渗透油藏渗流特征曲线。从图中可以看出低渗透油藏中流体渗流呈现出以下非线性渗流规律:

(1) 当驱替压力梯度较低时,流体不能形成流动,只有当驱替压力梯度大于一定的值(图中 a 点),流体才开始流动;

(2) 驱替压力梯度继续增加,流体渗流速度在 ad 段呈下凹形曲线增加;

(3) 驱替压力梯度继续增大,渗流速度在 de 段渗流速度呈直线形增加,满足线性渗流规律。

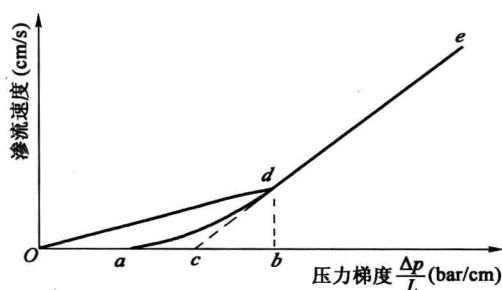


图1-1-1 低渗透非线性渗流特征曲线

图中 a 点是流体开始流动的点,称为真实启动压力梯度点; d 点是渗流特征线由曲线变为直线的点,称为临界压力梯度点; c 点是直线 de 的反向延伸与压力梯度坐标的交点,称为拟启动压力梯度点。

对于低渗透储层的非达西渗流,许多学者一直在探索启动压力梯度的机理和非达西渗流的影响因素以及建立简单适用的非达西渗流运动方程。尽管对非线性渗流机理分析有许多不同观点,但是这些观点主要从孔隙结构、孔隙结构与流体之间的相互作用、流体性质三方面来分析低速非线性渗流机理^[2,3]。

1.1.1 孔隙结构

孔隙大小、孔隙喉道几何结构及其分布都会影响储层中流体的渗流。孔隙喉道狭窄、连通性差、渗透性差是造成低渗透非线性渗流的重要因素。因为这类储层的阻力很大,致使流体的渗流速度极低,而启动压力梯度与多孔介质的渗透率紧密相关,渗透率越低,启动压力梯度越大。研究低渗透多孔介质孔隙结构有助于研究启动压力梯度对低渗透渗流产生的影

响。目前,获取储层微观孔、喉特征参数常用的是恒速压汞技术。恒速压汞技术可以将孔隙和喉道分开,实现对喉道的测量^[4]。分析压汞曲线,主要从以下几种参数的规律来描述低渗透储层的微观结构特性及其对渗流性质的影响。

1. 孔喉半径

利用恒速压汞技术研究岩心的孔隙结构结果表明:储层的喉道是决定储层物性的关键因素^[5,6]。喉道的发育程度和大小可以用喉道平均配位数和平均喉径来定量表示。通常情况下,平均配位数越少,平均喉径越小,渗透率越小,反之渗透率越大^[7]。

半径小的喉道在小压力梯度下几乎被边界层流体所充满,有效渗流空间极小,随着压力梯度增大,边界层厚度减小,更多的小喉道参与渗流。孔隙半径的大小会影响岩石的渗透率。在孔喉狭窄处,可能发生贾敏效应和卡断现象^[8,9]。渗透率与孔隙半径大小、孔隙度、迂曲度有关。岩石的平均孔隙半径越大,岩石的渗透率越高。小孔道占岩石总孔隙比例越大,岩石的渗透率越低。

主流喉道半径反映了控制主要渗流能力的半径,主流半径越大,渗流能力越大。由此可见,主流喉道半径分布规律从微观角度表明喉道半径的大小及其分布是低渗透油藏的渗流能力决定性因素。

2. 比表面积

比表面积表示岩石的分散程度,与孔隙孔道半径的分布及大小有关。岩石骨架颗粒的大小,影响岩石比表面积的大小,岩石骨架颗粒越小,其比表面积越大。渗透率是骨架颗粒直径和颗粒分选性的函数。比表面积是影响岩石渗透率的重要因素^[10]。

黄延章等学者^[11]认为,比表面积与渗透率的平方根成反比,比表面积越大,渗透率越小。岩石的比表面积越大,表明流体与固体表面之间分子力作用越强,它将影响孔隙系统中流体的分布及渗流特征。

在低渗透储层中,含铝硅盐的粘土矿物较高,且这些矿物的颗粒很细,粘土矿物粘附在孔壁上,使孔隙通道变得更加迂回曲折。粘土矿物具有很大的比表面积和自由能,又具有较大的化学活性,能优先与侵入地层的外来流体接触产生作用,这种作用的结果导致了渗流阻力的增大^[12]。

吸附理论认为:物质的比表面积越大,其吸附力越强,吸附的物质越多,流动阻力越大,渗透率越小。在低渗透储层中,由于孔喉细小、比表面积和原油边界层厚度大、贾敏效应和表面分子力作用强烈,渗透率低,其渗流规律不遵循达西定律,具有非线性型渗流特征。渗透率越低,启动压力梯度越大。

3. 渗透率

启动压力梯度与渗透率之间满足幂函数关系^[13]。岩心渗透率增大到一定值后,随着岩心空气渗透率增大,启动压力梯度逐渐减小,而且变化平稳;当岩心渗透率降低到一定值后,随着岩心空气渗透率降低,启动压力梯度急剧上升。由此可见,对于低渗透油田,地层平均渗透率对启动压力梯度的大小影响非常显著。

用恒速压汞测试方法得出的低渗透砂岩储层有效喉道、有效孔隙及孔喉比等特征参数与渗透率间具有较好的相关关系^[14]。渗透率较高的岩样,有效喉道、有效孔隙发育程度较高,孔喉比较低。

1.1.2 边界层理论

由于固体与液体的界面作用,在油层岩石孔隙的内表面,存在一个原油的边界层。在边界层内,原油的组成和性质与体相原油的差别很大,存在组分的有序变化,并有结构粘度特征和屈服值。边界层的成因主要有两个——吸附分子与固体表面分子的相互作用、吸附分子之间的相互作用。液固相互作用使得边界层内液体性质与体相液体的性质存在差异,这一观点已被许多学者在理论和实验方面证实^[15]。边界层的厚度,除了与原油本身性质有关外,还与孔道大小、驱动压力梯度等有关。

对于边界层的测量,一般的研究方法^[15~18]是通过实验测定微毛细管(直径在微米级)的流量与压差的关系,由经典的 Hagen - Poiseuille 方程计算边界层的厚度。实验表明:

(1) 边界层的厚度与压力梯度成幂指数关系,边界层厚度越大,非达西现象越明显。

(2) 边界层厚度与毛管半径、驱动压力梯度、粘度、组分等因素有关。

① 边界层厚度随着毛管半径的增大而减小,毛管半径越大,吸附边界层的厚度越小;

② 在毛管半径相同的情况下,边界层厚度随压力梯度的增大而减小,当压力梯度达到某个临界值时,吸附边界层为固化层,边界层的厚度不再随压力梯度的增大而变化;

③ 毛管半径一定时,边界层厚度随粘度增加而增大;

④ 极性组分含量越大,吸附越明显,边界层厚度越大。

低渗透油藏多孔介质最为突出的特点是孔径小、比表面积大、粘土含量较高,且表面电性强。当地层流体在较小孔隙中流动时,流体与地层岩石强烈的相互作用以及粘土矿物的分散运移、膨胀,加强了流体与固体表面之间分子力作用,使得壁面附近的流体层的性质与体相流体存在较大差异;又因为原油中常含有少量的氮氧化物,如环烷酸、沥青、胶质等表面活性物质,它们与岩石之间会产生吸附作用,出现吸附层,所以对于低渗透储层,固液界面作用强烈,液体在岩石表面的边界层的影响是不可忽视的因素。它会使渗流规律发生明显的变化,乃至偏离达西定律。

1.1.3 渗流流体

基于边界层理论,人们提出了渗流流体的新概念,认为多孔介质中流动流体分为体相流体和边界流体两部分。体相流体分布在多孔介质孔道的中轴部位,其性质不受界面现象影响。边界流体是指其性质受界面现象影响的流体,它紧靠在孔道壁形成一个边界层。边界流体的性质有其特殊的变化规律:在多孔介质的孔隙系统中,流体中某些成分与孔道壁表面产生分子力的作用,这些成分的浓度沿远离孔道壁的方向产生梯度分布。这样,边界流体的成分和性质与中轴部位的体相流体的成分性质有很大的不同,决定边界流体的性质有其特殊的变化规律。渗流流体的性质取决于体相流体的性质、边界流体的性质及流动环境条件等。

在自然界,非牛顿流体是普遍存在的,而牛顿流体仅在一定条件下才存在。在低渗透储层中,控制孔隙介质流通喉道的直径往往比较小,边界层影响显著,因而即使是水和高稀释液体在喉道中也表现为非牛顿流体的性质。徐绍良等人^[17]研究了去离子水在微毛细管中的流动,发现典型牛顿流体的去离子水表现出了非牛顿特性;李兆敏等人^[19]认为在低渗透多孔介质中流体表现为非牛顿液效应,其渗流特征符合 Bingham 流体渗流,即当剪切应力大于

屈服应力时,其流动与牛顿流体相同;贾振岐^[20]认为流体通过低渗岩心的渗流特征显示出弹性。在给定的渗流环境和条件下,具有结构的流体呈现出两个屈服值。第一个是体系开始流动的压力梯度 G_0 , 它对应于体系的静屈服值(静剪切力);第二个是开始线性流动的压力梯度 G_m , 它对应于体系的动屈服极限值(动极限剪切)。当压力梯度小于 G_0 时,体系无变形,结构也未破坏,体系内也未产生流动。当压力梯度大于 G_0 , 并小于 G_m 时,体系弹性变形,结构未破坏,流体呈现非达西流动。在该区内,结构变形与蠕变恢复相平衡,体系的粘度和动剪切应力随压力梯度的改变而变化。当压力梯度大于 G_m 时,体系塑性变形,结构破坏,流体呈现出达西流动。

1.2 低渗透油藏存在启动压力梯度

从理论上讲,流体在多孔介质内流动时,均不同程度地存在有启动压力梯度。但对于中高渗透的稀油油藏,孔道半径较大,边界层的影响较小,启动压力梯度值极小,用一般的实验手段不易观测到。但对于低渗透油层,原油边界层不可忽略,当流体流动时,除了要克服粘滞阻力外,还必须要克服边界层内固、液界面相互作用的影响。所以只有当驱替压力梯度大于一定值时,流体才能形成流动。此时的驱替压力梯度被称为启动压力梯度^[21]。

许多学者深入研究过低渗透储层存在启动压力梯度的原因、启动压力梯度的大小以及测量启动压力梯度的方法。

1.2.1 单相启动压力梯度

单相启动压力梯度的研究大多数是在实验的基础上,测定流量与压力梯度的曲线,通过采用不同的数学方法拟合曲线以确定启动压力梯度,再将启动压力梯度与渗透率、流体粘度等物性参数拟合,最后分析得到相关结论。

单相启动压力梯度实验大多采用压差—流量法,即通过测定不同驱替压差下流体通过低渗透砂岩岩心的渗流速度,求得流量与压力梯度的关系,描述流体在岩心中的渗流过程。实验设备多采用高精度恒速泵、精密压差传感器等。但在测定最小启动压力梯度时,此法受到了限制。吕程远等人^[22]采用了“毛细管平衡法”与“压差—流量法”相结合的测定方法。该方法不仅证明了低渗透岩心启动压力梯度的存在,而且可以直接测定出最小启动压力梯度值。李爱芬等人^[23]对此法又进行了稍加改进,使渗透率测量范围大大增加。

对于渗流曲线的拟合多采用分段拟合的方式,即非线性段和拟线性段分别采用不同的数学模型进行拟合。非线性多采用二次多项式进行拟合,即:

$$v = a \nabla p^2 + b \nabla p + c \quad (a, b, c \text{ 是常数}, \nabla p \text{ 是压差})$$

拟线性段多采用一次多项式拟合:

$$v = m \nabla p + n \quad (m, n \text{ 是常数}, \nabla p \text{ 是压差})$$

此外,还有其他的拟合公式^[24]。

通过实验发现,启动压力梯度与渗透率或流度成幂指数关系,渗透率越小,粘度越高,启动压力梯度越大;渗透率越大,粘度越低,启动压力梯度越小。

1.2.2 两相启动压力梯度

在单相启动压力梯度研究的基础上,部分学者研究了两相的启动压力梯度。室内驱替试验是确定启动压力梯度的直接方法,包括非稳态和稳态两种方法。非稳态法是一种非稳态渗流测压方式,通过建立低渗透岩心中液体的不稳定渗流方程并用数值有限差分的方法求解岩心的启动压力梯度。这种方法的试验条件易于控制,测定时间短,但只能测定出拟启动压力梯度点,不能测定出启动压力梯度与渗流速度的变化关系。稳态法是在岩心两端建立一定压差,测定系统稳定条件下的压差和流量,获取岩心的渗流曲线,通过数学处理方法来求取启动压力梯度。这种方法所需时间较长,且最小启动压力梯度点由试验数据外推得到,是目前常用的启动压力梯度测定方法^[25]。

苏法卿等人^[25]测量了油水两相最小启动压力梯度,通过实验发现:

(1) 油水两相最小启动压力梯度与空气渗透率呈幂函数关系。在不同含水饱和度下,各幂函数系数不同。

(2) 油水两相最小启动压力梯度随含水饱和度的升高先增大后减小。岩样含水饱和度为零(单相)时,油水两相的最小启动压力梯度最小;岩样含水饱和度为10%时,油水两相的最小启动压力梯度最大;随着含水饱和度的继续升高,油水两相的最小启动压力梯度反而逐渐减小。

(3) 不同含水饱和度下两相启动压力梯度随空气渗透率的变化幅度不同。随着空气渗透率的增大,低含水饱和度时,启动压力梯度的变化幅度小;高含水饱和度时,启动压力梯度的变化幅度大。这是由于启动压力梯度由岩石本身性质和流体性质两方面决定。当渗透率较小时,岩石本身性质起主要的作用;而当渗透率较大时,岩石本身性质起次要作用,而流体的性质起主要作用。

(4) 油水两相的启动压力梯度比单相启动压力梯度增大5~10倍。随着储层渗透率的增大,单相启动压力梯度与油水两相启动压力梯度之间的差距变小。

郝斐等人^[26]比较了单相油、水及束缚水、残余油状态下的启动压力梯度。单相渗流时,岩心的启动压力梯度较小;两相驱替时,岩心的启动压力梯度较大,即随着含水饱和度的增大,油水两相启动压力梯度逐渐增大,达到某一含水饱和度时启动压力梯度值最大。随着含水饱和度的继续增大,启动压力梯度反而逐渐减小,并认为两相启动压力梯度要比单相渗流大很多,主要是毛管力影响的结果。低渗透油藏非均质性严重,孔喉微细、变化频繁、孔喉比大,油水共同运移时贾敏效应更加显著。岩石的渗透率越低,发生贾敏效应的概率也就越大。李道品等人通过渗流微观机理研究观察到:水驱油初期,运动的油柱多是连续的,即使发生卡断,也会很快聚集,贾敏效应较弱;随着水驱的进行,连续油柱经常被卡断,产生大量的分散油珠,连续的液流变为分散的液滴,此时贾敏效应大大增加了水驱油所需要的压力,反映在渗流特征上就是增加了启动压力梯度。

邓玉珍等人^[27]提出了适合单相和油水两相渗流时的启动压力梯度模型,认为两相启动压力梯度与流度呈幂指数关系,随含水饱和度增加,启动压力梯度逐渐减小。这是因为,含水饱和度增加相当于参与流动流体的粘度降低,因此启动压力梯度减小。

邹兴等人^[28]采用非稳态驱替法进行水驱油和气驱油实验,计算出各自的相对渗透率,然后按照液体和气体启动压力梯度公式推算出相对启动压力梯度。油水两相相对启动压力梯度具有以下规律:见水后,油水两相相对启动压力梯度开始发散,随着含水饱和度的增加,

水相启动压力梯度逐渐变小,油相启动压力梯度逐渐变大;在大部分水驱阶段,油、水均按各自的规律随含水饱和度的增加而规律性地增大和减小,后期油水两相的启动压力梯度变化均偏离直线而急剧增大和减小。这充分揭示出水驱油后期的强水洗阶段驱油效率急剧变小的原因。油气两相相对启动压力梯度具有以下特征:随着含气饱和度的增加,气相相对启动压力梯度呈规律性地减小,气相相对启动压力梯度与含气饱和度之间为指数关系,在单对数坐标中为一直线,随着含气饱和度的进一步增加,气相相对启动压力梯度偏离直线规律而略有减少,油相相对启动压力梯度增大。随着含气饱和度的增加,油相相对启动压力梯度呈规律性地增大,与气相一样,与含气饱和度之间为指数关系。随含气饱和度的进一步增加,油相相对启动压力梯度偏离规律而急剧增大。

另外,还有某些学者对于低渗透储层启动压力梯度的存在性和边界层提出了质疑,认为启动压力梯度仅是一个实验假象^[29,30],边界层不存在^[31,32]。

1.3 低渗透油藏存在应力敏感性

在油气田开发过程中,随着地下流体的不断采出,岩石所受有效应力增加,使得岩石骨架颗粒变形、压缩以及结构变化,从而造成颗粒间孔隙以及喉道空间的不断减少,表现出孔隙度、渗透率随有效应力的增加而降低。这种现象就是应力敏感性。

低渗透油藏的储层由于原始渗透率和孔隙度很低,所以即使渗透率、孔隙度下降值不大,但其相对变化幅度却很大,所以对生产的影响很大,应力敏感性不可忽略。并且低渗、特低渗油藏往往富含微裂缝,更容易产生介质变形,所以应力敏感性更加严重^[33,34]。在不同的储层中,应力敏感程度差异较大,影响储层应力敏感性的主要因素有:

(1) 储层渗透率:大量研究表明,储层初始渗透率越小,那么储层渗透率随有效应力的变化越显著,储层渗透率应力敏感性越强。这是因为,渗透率的变化主要与储层的孔隙结构有关。对于低渗透岩心,其渗流通道主要是小孔道。也就是说,影响储层渗透率的平均喉道半径较小,有效应力的增加很容易造成这些小喉道的闭合,从而使得储层渗透率下降较大,所以有效应力对低渗储层渗透率的影响比较明显。相反,对于中、高渗透储层,孔隙喉道较大,有效应力的增加对这些大孔喉的影响不及对小孔喉的影响,因此有效应力对中、高渗透储层的渗透率影响不明显。

(2) 储层岩石类型:储层岩石颗粒的硬度越大,岩石越不易被压缩,其应力敏感性越弱,反之亦然。一般而言,砾岩砂岩的应力敏感性最强,岩屑砂岩的应力敏感性次之,石英砂岩的应力敏感性很弱。

(3) 胶结类型和程度:岩石胶结越好,越不易变形,渗透率和孔隙度的变化就越不明显。

(4) 液体饱和度:储层岩石饱和液体后,其孔喉表面会附着一层不可流动的液体。当岩石受到压缩时,这些不可流动层加剧了岩石渗透性能的降低。因此,含水或含油饱和度越大,其应力敏感性越强。

(5) 泥质和杂质含量:相比岩石颗粒而言,泥质和杂质是非常容易变形的,而且它们很容易堵塞孔喉,造成渗透率的明显降低。因此,泥质和杂质含量越大,储层的应力敏感性越强。

1.4 低渗透多孔介质的渗透率是可变的

多孔介质的渗透率是一个平均的统计参数,它是由许许多多大小不等的孔隙网络渗透性能构成的总和。对于高渗透储层来说,其孔隙系统主要由大孔道组成,稀油或水在其中流动时,不易监测到启动压力,即使有部分小孔道,因其所占流量的比例很小,也不易测到流量的影响。所以,用高渗透岩心作流动实验时,在流量与压力梯度的直角坐标系中,呈现为一条直线。但是对于低渗和特低渗地层来说,由于低渗透岩心的孔隙系统基本上是由小孔道组成的,在流体流动时,每个孔道都有自己的启动压力梯度,当驱动压力梯度大于某孔道的启动压力梯度时,该孔道中的流体才开始流动,使整个岩心的渗透率值有所增加。随着驱动压力梯度的不断提高,会有更多的孔道参与流动,岩心的渗透性也随之增强。因此,在低渗透岩心的流动实验中,在流量和压力梯度的直角坐标系上,呈现出的不单是一条直线,而是由一条上翘的曲线和直线两部分构成。它表示渗透率随压力梯度的提高而增大并趋于一个定值^[21]。

1.5 低渗透多孔介质中流体流动的横截面积是变化的

对于多孔介质来说,其断面上有一定的透明度,从统计的角度来看,它等于多孔介质的孔隙度。因为岩石的可压缩性很小,所以可认为透明度,即孔隙度是一个常数。

对于流体通过的横截面积来说,情况就不同了。首先,由于原油边界层的存在,实际上可供流动的横截面积小于孔道的横截面积,即小于透明度的范围。其次,流体通过的横截面积与压力梯度有关,当压力梯度很小时,流体仅沿较大孔道的中央部位流动,而较小孔道中的流体和较大孔道中边部的流体并不流动,只有压力梯度达到一定程度时,才有更多的小孔道中的流体投入流动,大孔道中也有更多的部分流体参与流动。人们称实际流动的流体占总流体的份额为流动饱和度,称流体实际流动的体积与岩心总体积之比为流动孔隙度。流动孔隙度和流动饱和度都是压力梯度的函数,并不是一个常数。

对于中、高渗透性的稀油油层,随着压力梯度的增加,流动孔隙度可以很快达到一个稳定值。但是,对于低渗透油层或稠油油层,事情就变得复杂得多,并使渗流规律发生某些变化^[21]。

参 考 文 献

- [1] 李道品,等.低渗透砂岩油田开发[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [2] 王恩志,韩小妹,黄远智.低渗岩石非线性渗流机理讨论[J].岩土力学,2003(24增刊).
- [3] 李中锋,何顺利.低渗透储层非达西渗流机理探讨[J].特种油气藏,2005,12(2).
- [4] 王瑞飞,等.特低渗透砂岩油藏储层微观孔喉特征[J].石油学报,2009,30(4).
- [5] 王学武.榆树林油田特低渗透储层微观孔隙结构特征[J].石油天然气学报,2008,30(2).
- [6] 胡志明.低渗透油藏微观孔隙结构分析[J].大庆石油学院学报,2006,30(3).
- [7] 张大伟,等.松辽盆地大情字井地区高台子油层储集层孔隙结构的微观特征[J].石油与天然气地质,2006,27(5).

- [8] 王尤富. 低渗透油层岩石启动压力梯度影响因素的试验研究 [J]. 石油天然气学报, 2006, 28 (3).
- [9] 李道品. 低渗透油田开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [10] Bear J. 多孔介质流体动力学 [M]. 李竟生, 陈崇希译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983: 97.
- [11] 黄延章, 等. 低渗透油层渗流机理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [12] 冯宇, 等. 启动压力梯度对低渗透油田开发的影响研究 [J]. 内蒙古石油化工, 2007 (11).
- [13] 郝鹏程. 低渗透油层启动压力梯度与渗透率的关系研究 [J]. 石油天然气学报, 2008, 30 (5).
- [14] 王瑞飞, 等. 特低渗透砂岩油藏储层微观孔喉特征 [J]. 石油学报, 2009, 30 (7).
- [15] 徐绍良, 岳湘安, 侯吉瑞, 等. 边界层流体对低渗透油藏渗流特性的影响 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2007, 22 (2).
- [16] 张普, 张连忠, 李文耀, 等. 边界层对低渗透非达西渗流规律影响的实验研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2008, 25 (3).
- [17] 徐绍良, 岳湘安. 低速非线性流动特性的实验研究 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2007, 31 (5).
- [18] 李中锋, 何顺利. 低渗透储层原油边界层对渗流规律的影响 [J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24 (2).
- [19] 李兆敏, 蔡国琰. 非牛顿流体力学 [M]. 北京: 石油大学出版社, 1998.
- [20] 贾振岐, 王延峰, 付俊林, 等. 低渗低速下非达西渗流特征及影响因素 [J]. 大庆石油学院学报, 25 (3).
- [21] 黄延章, 等. 低渗透油层渗流机理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [22] 吕成远, 王建, 孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2002, 29 (2).
- [23] 李爱芬, 张少辉, 刘敏, 等. 一种测定低渗油藏启动压力的新方法 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2008, 32 (1).
- [24] 韩洪宝, 程林松, 张明禄, 等. 特低渗油藏考虑启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法 [J]. 石油大学学报, 2004, 28 (6).
- [25] 苏法卿, 孙志刚, 任忠斌. 低渗透砂岩油藏油水两相最小启动压力梯度实验研究 [J]. 油气地质与采收率, 2004, 11 (4).
- [26] 郝斐, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏启动压力梯度研究 [J]. 西南石油学院学报, 2006, 28 (6).
- [27] 邓玉珍, 刘慧卿. 低渗透岩心中油水两相渗流启动压力梯度试验 [J]. 石油钻采工艺, 2006, 28 (3).
- [28] 邹兴, 吴凡, 孙黎娟, 等. 一种两相启动压力曲线的建立方法 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31 (3).
- [29] 李传亮, 杨永全. 启动压力其实并不存在 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2008, 30 (3).
- [30] 李传亮. 应科学看待低渗透储集层 [J]. 特种油气藏, 2009, 16 (4).
- [31] 薛芸, 石京平, 贺承祖, 等. 低速非达西流动机理分析 [J]. 石油勘探与开发, 2001, 28 (5).
- [32] 蒋锦良. 渗流的壁面边界效应分析 [J]. 中国科学技术大学学报, 2004 增刊.
- [33] 刀兰林, 康毅力, 等. 储层应力敏感性评价实验方法与评价指标探讨 [J]. 钻井液与完井液, 2005, 22 (3).
- [34] 蔡勇胜, 范荣菊. 渤南油田储层压力敏感性分析 [J]. 油气地质与采收率, 2003 (8).

第2章 低渗透油藏非线性渗流微观机理

2.1 多孔介质特征

储层属于多孔介质,是由岩石的颗粒、胶结物作为固体骨架和大量形态复杂的孔隙网络空间组成的,流体就是在这些细小的孔隙网络中流动。储层的物理化学性质影响流体在孔隙中的分布及渗流的特征和规律,因此在探讨低渗透油藏非线性渗流微观机理之前,首先对低渗透油藏多孔介质特征总结分析^[1]。

2.1.1 孔隙结构特征

众所周知,当研究流体在多孔介质内的流动时,不能不考虑多孔介质特征的影响。而在多孔介质的特征方面,首要的是孔隙结构。一般把油层的孔隙结构分成三种类型,即大孔粗喉型、中孔细喉型及小孔细喉型。高渗透储层的孔隙类型一般属于大孔粗喉型,大孔隙的体积占总体积的比例很大,表现在压汞曲线(毛管压力曲线)上,其排驱压力较低,曲线上有一个范围较大的“平台”,整个曲线处于靠近纵坐标和横坐标的地方。中渗透油层的孔隙类型一般属于中孔细喉型,毛细管压力曲线“平台”范围较小,排驱压力较高,整个曲线分布于距纵坐标和横坐标都比较远的地方。低渗透或特低渗透性的油层,其孔隙类型属于小孔细喉型,孔隙小,喉道细,渗透率的贡献值主要由占孔隙体积比例小的、较粗的孔道所提供。对比这三种类型的孔隙结构,可以发现:低渗透或特低渗透性储层的孔隙系统与中、高渗透层的孔隙系统显著不同,它孔隙很小,喉道很细,孔喉比也增大。孔隙结构上的差别将对其中的多相流体的分布及渗流规律产生影响,特别是对低渗透或特低渗透储层,其影响是很明显的。这个特征反映在流体饱和度上,主要表现是储层一般原始含水饱和度高,含油饱和度低,压汞实验中退汞效率低。这表明原油储量中难开采的部分占有很大比例,并且经常遇到的是早期无退汞或退汞很少,当压力降到很低,即压力梯度很大时,才开始退汞。这表明低渗透或特低渗透储层的渗流阻力很大,明显地有启动压力梯度。

从储层的粒度组成来看,低渗透砂岩的粒度组成也与中高渗透层的不同,它的主要成分是极微细的粉砂岩,且有较高的泥质含量。由此,它的孔隙结构特征主要表现为孔喉半径小,孔隙分布不均匀,经常出现双峰态分布,微孔隙的比例增大,比表面增大,孔喉比增大等特点。这种特点将明显地影响储层中各种作用力的相互关系,如粘滞力、毛管力、重力和驱动力等。同时,当流体经过这种具有低渗透孔隙结构特点的储层时,也必然会产生更多的物理化学现象,这将直接影响低渗透油层中的渗流特征和规律。

2.1.2 渗透率与孔隙介质平均孔道半径的关系

储层的渗透率取决于岩石孔隙孔道的大小,明确它们之间的这种关系有很大的实际意义,因为储层中流体的物理力学性质、粘滞力、毛管力、剪切应力(含剪切应力和极限剪

切应力)、运动阻力等,都与岩石的孔隙孔道大小有关,也就与渗透率有关。

虽然岩心的渗透率与岩心的孔隙结构(孔径分布)之间并不存在唯一性,即渗透率相同的岩心,可能具有不同的孔隙孔径分布曲线,但是如果在渗透率与其平均孔道半径之间找到某种关系,那是非常有用的。渗透率本身就是岩心中各种不同半径孔道的孔隙系统允许流体通过的一种平均的性能参数,所以,渗透率与平均孔道半径之间的关系是一种数理上性质对等的关系。

对于一个油藏或一个油田来说,毛管压力曲线的资料是很少的,而渗透率的资料则很多。如果能通过渗透率的变化来了解孔隙结构的特征,将是很有益的。利用不同渗透率岩样的毛管压力曲线,计算出其平均毛管半径,作出它们之间的关系曲线,以求出它们之间的相互关系。

根据毛管模型理论与达西定律的关系,可以得到:

$$r = \sqrt{\frac{8K}{\phi}} \quad (2-1-1)$$

式中 r ——毛管半径, μm ;

K ——渗透率, μm^2 ;

ϕ ——孔隙度, 无量纲。

这说明,在一定的沉积条件下,渗透率的平方根与平均孔道半径成正比。

对大庆、长庆、大港、青海等油田不同渗透率的 24 口井岩心压汞资料进行整理,得出孔道平均半径与渗透率的关系——在双对数坐标图上的一条直线。这表示孔隙孔道半径与渗透率之间的关系为:

$$r = AK^B \quad (2-1-2)$$

或

$$\ln r = \ln A + B \ln K$$

$$A = 0.35, B = 0.52$$

式(2-1-2)可近似地写为:

$$r = 0.35 \sqrt{K} \quad (2-1-3)$$

因此,可以根据各油田的渗透率分布曲线以及渗透率与平均孔隙半径的关系式,求出毛管半径的分布。

目前,普遍认同的低渗透油藏的渗透率上限为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,且根据实际生产特征,按照油层平均渗透率可以进一步把低渗透油田分为三类,对应由式(2-1-3)计算出的平均毛管半径如下:

第一类为一般低渗透油田,油层平均渗透率为 $(10.1 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均毛管半径为 $1.11 \sim 2.47 \mu\text{m}$ 。

第二类为特低渗透油田,油层平均渗透率为 $(1.1 \sim 10.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均毛管半径为 $0.37 \sim 1.11 \mu\text{m}$ 。

第三类为超低渗透油田,油层平均渗透率为 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均毛管半径为 $0.11 \sim 0.37 \mu\text{m}$ 。

2.1.3 渗透率与比表面积的关系

比表面积是指单位体积岩心中孔隙内表面积的总和,也称比面。它表示含油岩石的分散