



徐运亭 徐 启 郭永贵 杨正明 著

低渗透油藏渗流机理 研究及应用

POROUS FLOW
MECHANICS FOR LOW
PERMEABILITY RESERVOIRS
AND APPLICATION

石油工业出版社

低渗透油藏渗流机理 研究及应用

徐运亭 徐 启 著
郭永贵 杨正明

石油工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

低渗透油藏渗流机理研究及应用/徐运亭等著.

北京:石油工业出版社,2006.4

ISBN 7-5021-5466-3

I. 低…

II. 徐…

III. 低渗透油层—油气藏渗流力学—研究

IV. TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 024165 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

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:河北天普润印刷厂

2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:7.25

字数:125 千字 印数:1—1000 册

定价:32.00 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

QIANYAN

自从“八五”以来,我国探明的特低渗透储量越来越多,如何有效动用和开发好特低渗透油田的储量是关系到我国石油工业能否长期稳定发展的关键。

近年来的研究表明,特低渗透油田的渗流特征与中、高渗透油田的渗流特征显著不同。而正是由于其有别于中、高渗透油田的渗流特征和孔隙结构,使得原来适合中、高渗透油田的评价方法和技术在应用于特低渗透油田开发时,遇到了很大的困难。

低渗透油层中的渗流是当前渗流力学发展的重要领域,是应用性很强的基础性研究。开展低渗透油层中渗流机理、特征的深入研究对渗流学科的发展以及低渗透油田的合理开发都有重要意义。

本书是基于低渗透和裂缝性低渗透油藏在开发中所面临的实际问题,在总结前人已有成果的基础上,利用核磁共振、恒速压汞、物理模拟和油藏数值模拟技术等对低渗透油藏的渗流机理和规律进行了研究,取得了一些新认识,为更好地开发好这类油田提供理论指导。

低渗透油藏开发技术是一项涉及面很广、技术性很强的复杂庞大的系统工程。由于时间仓促及作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

本书在完成过程中得到了大庆油田采油十厂和石油勘探开发研究院廊坊分院渗流流体力学研究所各位领导和同仁的大力支持与帮助,作者特致以深深的谢意。本书对所用的资料数据尽量作了注明,但难免有不详之处,请给予谅解。

作者

2006年1月

目 录

MULU

第一章 绪论	(1)
第一节 国内外低渗透油田储量分布和成因类型	(1)
第二节 国内外低渗透油田开发现状	(6)
第三节 低渗透非达西渗流的研究现状	(10)
第二章 渗流流体新概念	(15)
第三章 吸附边界层对渗流的影响	(23)
第四章 改变吸附边界层的 MD 膜提高采收率方法研究	(36)
第五章 低渗低速非线性渗流规律研究	(42)
第一节 多孔介质的特性及其对渗流规律的影响	(42)
第二节 多孔介质中的物理化学作用及流体性质	(44)
第三节 低渗低速非线性渗流特征	(47)
第四节 低渗低速渗流的流态与准数	(57)
第六章 低渗透油藏开发生产规律及动用条件分析	(64)
第一节 低渗透储层产能分析	(64)
第二节 低渗透油藏产量递减规律及水驱特征曲线	(66)
第三节 低渗透油藏动用条件分析	(72)
第七章 低渗透油藏储量多因素分析和优选	(76)
第一节 问题的引出	(76)
第二节 可动流体百分数的测量和分级评价方法	(77)
第三节 启动压力梯度的分级评价方法	(82)
第四节 有效驱动因子的分级评价方法	(84)
第五节 喉道半径的分级评价方法	(84)
第六节 大庆扶杨未动用储量多因素分析和优选	(86)

第八章 裂缝性低渗透砂岩油藏中渗吸机理及应用 (89)

 第一节 自发渗吸实验 (89)

 第二节 自发渗吸数学模型 (92)

 第三节 驱替条件下的渗吸实验 (94)

 第四节 油藏条件渗吸效果分析 (97)

 第五节 注水吞吐井的产量递减预测 (100)

参考文献 (106)

第一章 绪 论

第一节 国内外低渗透油田储量分布和成因类型

一、国内外低渗透油田储量分布^[1,2]

(一) 国外低渗透油田储量分布

1. 国外低渗透油田分布状况

世界上低渗透油田资源十分丰富,分布范围广泛,各产油国基本上都有该类油田。在美国中部、南部、北部和东部,前苏联的前喀尔巴阡山、克拉斯诺达尔、乌拉尔—伏尔加、西西伯利亚油区和加拿大西部的阿尔伯达省,低渗透油田都有广泛的分布。随着时间的延长,小而复杂的低渗透油田的比例越来越大。例如,俄罗斯近年来在西西伯利亚地区新发现的低渗透、薄差层低效储量已占探明储量的50%以上。有的地区,低渗透砂岩油田连片分布,成为低渗油区。

1999年俄罗斯各油气区中难以开采的石油储量占剩余可采储量的40%以上,低渗透储层的储量达数百亿吨。其中,渗透率低于50mD的低渗透储量约有 150×10^8 t,占低渗透储量的90%以上,占俄罗斯可采储量的30%以上。其中60%在西西伯利亚。这些低渗透储量大部分已投入开发。目前全俄罗斯从低渗透储集层中采出的石油占全部采出油量的20%左右。低渗透储集层中石油的粘度绝大多数在10mPa·s以下,其有效厚度多数为2~10m,埋藏深度大多为1200~1400m,采出程度不高。

1998年美国低渗透油气田可采储量占全国总储量的10%~15%。据北美172个低渗透砂岩油藏的统计,渗透率一般从几毫达西到几十毫达西。其中,20~100mD的油田占这些低渗透油藏总数的60%,1~20mD的占30%,少数低于1mD,约占5%。

2. 国外低渗透油田的主要特点

从国外报道的情况看,对低渗透油田大体上可以归纳出以下几个特点^[3]:

(1)储层物性差,渗透率低。由于颗粒细、分选差、胶结物含量高,经压实和后生成岩作用使储层变得十分致密,渗透率一般小于 $0.1\mu\text{m}^2$,少数低于 $0.001\mu\text{m}^2$ (统计北美 172 个低渗透砂岩油藏的数据)。

(2)储层孔隙度一般偏低,变化幅度大。大部分为 $7\%\sim 20\%$,个别高达 28% 。

(3)原始含水饱和度较高,原油物性较好。一般含水饱和度为 $30\%\sim 40\%$,个别高达 60% (美国东堪顿油田),原油相对密度多数小于 0.85,地层粘度多数小于 $3\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

(4)油层砂泥交互,非均质性严重。由于沉积环境不稳定,砂层的厚薄变化大,层间渗透率变化大,有的砂岩泥质含量高,地层水电阻率低,给油、水层的划分带来很大困难。

(5)天然裂缝相对发育。由于岩性坚硬致密,多数存在不同程度的天然裂缝系统,一般受区域性地应力的控制而具有一定的方向性,对油田开发的效果影响较大。裂缝是油气渗透的通道,也是注水窜流的条件,且人工裂缝又大多与天然裂缝的方向一致。因此,天然裂缝是低渗透砂岩油田开发必须认真对待的因素。

(6)油层受岩性控制,水动力联系差。边底水驱动不明显,自然能量补给差,多数靠弹性和溶解气驱采油,油层产能递减快,一次采收率低,只能达到 $8\%\sim 12\%$,采用注水保持能量后,二次采收率可提高到 $25\%\sim 30\%$ 。

(7)由于渗透率低,孔隙度低,必须通过酸化压裂投产,才能获得经济价值,或必须通过压裂增产,才能提高经济效益。

(8)由于孔隙结构复杂、喉道小、泥质含量高以及各种水敏性矿物的存在,导致开采过程中易受伤害,损失产量可达 $30\%\sim 50\%$ 。因此,在整个采油工艺系列中,保护油层是至关重要的环节。

(二)国内低渗透油田储量分布

1. 国内低渗透油田分布状况

低渗透油田广泛分布在全国各个油区。截至 2000 年底,我国已探明的低渗透油田地质储量为 $52.14\times 10^8\text{t}$,占全部探明地质储量的 26.1% ;我国已经动用的低渗透油田地质储量为 $26.66\times 10^8\text{t}$,占全部已动用储量的 25.5% 。

2. 国内低渗透油田储量分布特点

(1) 目前发现的低渗透油田储层以中深埋藏深度为主。

由各油区的低渗透储层埋藏深度统计表明,目前发现的油藏以中深层为主,埋藏深度小于 1 000m 的油藏约占 5.2%,1 000~2 000m 的油藏约占 43.1%,2 000~3 000m 的油藏约占 36.2%,大于 3 000m 的油藏约占 15.5%。

(2) 低渗透储层中特低渗透及超低渗透储量占较大的比例。

根据渗透率大小,低渗透油藏可以分为三类:一类渗透率为 $(10\sim50)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,其储量占 53%;二类渗透率为 $(1\sim10)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,其储量占 38.6%;三类渗透率为 $(0.1\sim1)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,其储量占 8.4%。

(3) 国内低渗透油藏岩性以砂岩为主。

从目前探明的低渗透油藏统计,砂岩油藏占 70% 左右,砾岩油藏占 10% 左右,其余的存在于变质岩及石灰岩等特殊岩性油藏中。

3. 国内低渗透油田的地质特征

(1) 油藏类型单一。

我国低渗透油田属于常规油藏类型,以岩性油藏和构造岩性油藏为主,有 60% 以上的储量存在于上述两种类型的油藏中,主要为弹性驱动油藏。

(2) 储层物性差,孔隙度和渗透率低。

总体上看,岩屑含量高、粘土或碳酸盐胶结物较多是低渗透砂岩储层的普遍现象。据统计,低渗透油田储层平均孔隙度为 18.55%,就油层孔隙度分布而言,平均孔隙度 10%~20% 之间的油层占 36.67%,平均孔隙度大于 20% 的油层占 13.33%,其余 50% 左右油层的孔隙度小于 10%。储层渗透率一般为 $(1\sim50)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,但各个油田的情况不一。从 18 个油田 28 套油层统计,平均渗透率小于 $10\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的油层占 61%, $(1\sim20)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的油层占 21%,我国的低渗透油田一半以上的储量存在于渗透率小于 $(1\sim10)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的油藏中。

(3) 孔喉细小,溶蚀孔发育。

低渗透砂岩储层的孔隙以粒间孔隙为主,原生粒间孔隙和次生粒间孔隙都发育,但溶蚀孔隙相对较发育,另外还有微孔隙,晶间孔和裂隙孔。低渗透储层以中孔、小孔为主;喉道以管状和片状的细喉道为主,根据大量低渗透油田砂岩储层的统计,喉道半径一般小于 $1.5\mu\text{m}$,非有效孔隙体积在整个孔喉体积中所占比例较大,在 26%~65% 之间,平均 30%,直接影响储层的渗透性。

(4) 储层非均质性严重。

这主要是受水进、水退形成储层纵向上的沉积旋回规律而造成储层不同微相之间的储层物性差异。层内非均质性受沉积韵律的变化和成岩作用而表现明显的不同。

(5) 裂缝发育。

我国低渗透油田储层的裂缝大多是构造裂缝,其分布比较规则,常常成组出现。裂缝切穿深度大,产状以高角度裂缝为主,倾角大于 60° 的裂缝占裂缝总数的 70% 以上。裂缝密度受构造部位、砂岩厚度、岩性控制十分明显。低渗透油田裂缝宽度一般都很小,多数在十几到几十微米之间,裂缝的延伸长度大多小于 100m。低渗透砂岩油田裂缝孔隙度都十分小,一般小于 1%,但渗透率变化很大,从几十至上千毫达西不等。

(6) 油层原始含水饱和度高。

低渗透油藏原始含水饱和度较高,一般在 30%~50%,有的高达 60%。

(7) 储层敏感性强。

低渗透砂岩油藏储层碎屑颗粒分选差,粘土和基质含量高,成岩作用强,油层孔喉细小,容易受到各种损害。

(8) 原油性质好。

我国低渗透油田原油具有原油密度小、粘度小、含胶质和沥青少的特点,另外原油凝固点比较高、含蜡量比较高,原油密度一般为 $0.84\sim 0.86\text{g/cm}^3$,地层原油粘度一般为 $0.7\sim 8.7\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。原油性质好是低渗透油田开发的一个重要的有利因素。

二、低渗透砂岩储层成因类型^[4]

从储层的成因演化上看,低渗透储层的形成与沉积作用、成岩作用和构造作用密切相关。

根据上述不同地质因素在低渗透储层形成过程中控制作用的大小,可将低渗透砂岩储层分为原生低渗透储层、次生低渗透储层和裂缝性低渗透储层三类。

(一) 原生低渗透储层(沉积型低渗透储层)

这类储层主要受沉积作用控制。形成低渗透储层的原因在于沉积物粒度细、泥质含量高和分选差。该类储层的孔隙以沉积作用形成的原生孔隙为主,成岩作用产生的次生孔隙所占比例很少。储层一般埋藏较浅,大多未经受过强烈的成岩

作用,岩石脆性较低,裂缝相对不发育。

我国陆相沉积盆地原生低渗透储层多分布于冲积扇与三角洲前缘相。如老君庙油田 M 层低渗透砂岩储层为一套棕红色冲积扇块状砂体沉积,形成低渗透储层的原因泥质含量高、分选差。该储层砂体厚达 60~70m,平均粒径 0.18~0.14mm,分选很差,分选系数 1.8~2.7,泥质含量达 16%~21%。储层以原生孔隙为主,平均孔隙度 19.1%,平均渗透率 24mD。

大庆油田杏一区东部低渗透砂岩储层为湖盆三角洲前缘相席状砂沉积,其形成原因为岩石颗粒细、泥质含量高、分选差。

(二)次生低渗透储层(成岩型低渗透储层)

次生低渗透储层主要受成岩作用控制。这类储层原认为是常规储层,但由于机械压实作用、自生矿物充填、胶结作用及石英次生加大作用降低了孔隙度和渗透率,原生孔隙残留很少,形成致密储层(有时为非储层)。后由于有机质去羧基作用产生的酸性水使碳酸盐、沸石、长石等矿物溶蚀,产生次生孔隙,使其孔隙度和渗透率得到了提高,从而形成低渗透储层。

次生低渗透储层几乎发育于我国所有含油气盆地之中,构成了低渗透砂岩储层的主体。其中最典型的为安塞油田延长组长 6 油层^[5]。该储层原生粒间孔隙度为 35%,经压实作用、压溶作用及长石次生加大作用,孔隙度降为 17.48%;再经浊沸石、碳酸盐胶结作用,使孔隙度下降为 7.09%,其中残留的原生粒间孔仅占 1.62%,其余为微孔隙。实际上,该储层已成为致密层。后期,经浊沸石胶结物、长石和其他组分的溶蚀,使孔隙度回升到 12.94%,成为次生孔隙为主的低渗透储层。其中,浊沸石溶孔为 5.15%,长石和其他组分溶孔占 0.70%。

由上述可知,次生低渗透储层的研究,应该从成岩作用事件和成岩作用史入手,以原生孔隙的消亡和次生孔隙的分布规律为重点,进行储层预测和评价。

(三)裂缝性低渗透储层(构造型低渗透储层)

低渗透砂岩储层尤其是次生低渗透储层,岩石致密程度相应增加,脆性更大,在构造运动产生的外力作用下,易发育裂缝,形成裂缝性低渗透储层。这类储层在我国也有大量发现,诸如扶余油田扶余油层、克拉玛依油田乌尔禾油层、乾安油田、朝阳沟油田、新民油田、火烧山油田及丘陵油田等均属此类。

根据裂缝在储层中所起的作用,裂缝性储层可分为以下四类^[6]:

(1)第一类储层,裂缝提供了储层基本的孔隙度和渗透率;

- (2) 第二类储层, 裂缝提供了储层基本的渗透率;
- (3) 第三类储层, 裂缝提高了储层的渗透率;
- (4) 第四类储层, 裂缝仅起到增加储层非均质性的作用。

我国裂缝性低渗透砂岩储层一般为三、四类。即裂缝储集能力很小, 仅能起到提高局部渗透能力或增加某一方向渗透率的非均质性。这是由砂岩中裂缝的发育特点所决定的。

从成因上看, 天然裂缝可分为构造缝与非构造缝(成岩缝与沉积缝)两类。砂泥岩地层中主要发育构造缝^[7,8], 方向性明显, 受古应力场控制。构造缝产状以高角度缝($>60^\circ$)和垂直缝为主, 缝面新鲜, 很少见油迹和充填物, 说明在地下以闭合状态的潜在缝为主, 压力恢复曲线反映为单一孔隙性介质。但在人工外力诱导下这种潜在缝极易张开, 转化为开启缝。裂缝性低渗透储层的研究, 必须以裂缝研究为中心, 从岩心裂缝观察和露头调查入手, 以构造发育史及古应力场分析为基础, 结合测井及动态资料, 对储层中裂缝性质、规模、产状、地下状态、裂缝渗透率及可能对油田开采带来的后果进行详细分析, 由此建立符合实际的裂缝地质模型。

第二节 国内外低渗透油田开发现状

一、国外低渗透油田开发现状^[2]

国外低渗透油藏开发时间长, 从美国 1871 年发现著名的勃莱德福油田起, 已有 100 多年的历史了。国外油田工作人员及专家认为, 低渗透油田尤其是高压低渗透油田初期压力高、天然能量充足, 最好首先选用自然能量开采, 尽量延长无水和低含水开采期。他们一般都先利用弹性能量和溶解气驱能量开采, 但是油层产能递减快, 一次采收率低, 只能达到 $8\% \sim 15\%$ 。进入低产期时再转入注水开发, 采用注水保持能量后, 二次采收率可提高到 $25\% \sim 30\%$ 。

经过对美国、前苏联、加拿大及澳大利亚等 20 多个低渗透砂岩油田的调研发现, 天然能量以溶解气驱为主, 其次为边水驱和弹性驱。含水饱和度最高为 55% , 最低为 8% , 平均为 22.7% 。一次采收率最高为 30% (美国的快乐泉弗朗梯尔“A”油藏), 最低为 6.5% (加拿大帕宾那油田), 平均为 15.8% 。二次采收率最高为 31% (前苏联的多林纳维果德油藏), 最低为 1.5% (美国的斯普拉柏雷油田),

平均为 25.39%。据对国外油田的统计,大部分是优先利用天然能量开采,只有极少数油田投产即注水。注气也成为许多低渗透油田二次和三次开采方法,如西西伯利亚低渗透油田,采用注轻烃馏分段塞、干气段塞和气水混合物达到混相驱,驱油效率比水驱提高 13%~26%,取得了令人鼓舞的效果。斯普拉柏雷油田从 1995 年起着手进行注 CO₂ 开发可行性研究,1997 年底已完成室内研究,随即进行矿场试验,第一年采油速度达 6%。

根据国内外不同规模矿场实际,见到一定效果的三次采油方法有:混相烃驱油法、二氧化碳驱油法、水气交注、水气混注和周期注气等。据俄罗斯《石油业》2000 年报道,注气和水气混合驱油开采低渗透储层是比较有前景的。他们利用自动评价系统,对低渗透油藏的层系进行评价分析,建议对低渗透油藏进行注二氧化碳、注气态烃、周期注蒸汽驱油、热水等开发方法。

国外大量研究和实践证明:当前低渗透油田开发中,广泛应用并取得明显经济效益的主要技术,仍然是注水保持油藏能量、压裂改造油层和注气等技术;储层地质研究和保护油层措施是油田开发过程中的关键技术。

二、国内低渗透油田开发现状

通过“九五”以来的研究攻关和试验,我国对低渗透油田的开发战略决策、储层特征认识、渗流理论和钻采工艺技术等各个方面,都有了新的较大发展和提高,主要体现在以下几个方面。

(一) 开发战略决策^[9]

经过多年的实践与研究,已初步总结出了一套低渗透油田开发的战略决策原则和方法^[9],提出了低渗透砂岩油田开发模式^[10,11,12,13]。

(二) 储层特征研究^[14,15]

(1) 储层和含油性预测技术。对储层的沉积、岩性、物性等进行了系统的研究,还利用地震预测和测井资料,进行多参数逐级联合反映,预测储层分布状况和含油气程度。

(2) 储层裂缝识别研究和预测技术。利用露头 and 岩心观测、常规和成像测井、地应力测定和地质建模等技术,研究储层裂缝特征和预测储层裂缝分布。

(3) 储层孔隙结构和可动流体研究新技术。利用核磁共振新技术、恒速压汞技术研究储层微观孔隙结构和可动流体饱和度的关系。

(三) 渗流机理研究^[14,15,16,17,18,19]

(1) 非达西渗流特征。通过深入的实验研究,进一步认识了非达西渗流特征,并初步建立了非达西渗流方程,在稳态流和非稳态流方面进行了相当的研究工作,编制了相应的数值模拟软件。

(2) 流固耦合作用。通过实验和理论研究,证实了低渗透储层压力敏感性强烈,流固耦合作用对储层物性影响明显。

(3) 渗吸作用。发现渗吸作用在低渗透储层中排油作用较大,初步确定了与渗吸作用相协调的最佳驱油速度。

(四) 油田开发方法^[15]

(1) 开发方式。从生产实践中观察看出,先期注水能够保持较高的生产能力,比滞后注水具有明显的优越性。初步开展了注气方式开采试验。

(2) 油田动态特征。进一步观察研究和认识了低渗透油田注水开发后,地下压力场和流体场的分布特征和变化规律。

(3) 开发井网。通过现场生产试验和深入观察分析,进一步总结出裂缝性低渗透油田科学合理部署开发井网的方针原则和界限。

(五) 钻采工艺技术^[10,20,21,22]

(1) 为适应低渗透油田开发的需要,小井眼和水平井钻井技术都有新的发展,特别是欠平衡钻井技术对裂缝性低渗透油田开发效果十分明显。

(2) 注水工艺技术,发展了一些增注、水质处理新技术,改进了注水状况。

(3) 水力压裂技术。整体高效压裂技术有了新的发展。对裂缝性低渗透油田将压裂技术与开发井网科学地有机结合,同时可以获得较好的开发效果和经济效益。

(4) 低成本的采油工艺技术及地面建设。根据低渗透油田油井产量低的特点,试验和发展了无油管、螺杆泵、提捞以及活动采油技术,并合理地简化了地面流程。

三、影响低渗透油田开发效果的主要因素^[11,23]

(1) 油层孔喉细小,比表面积大,渗透率低。

低渗透储层由于近源沉积,碎屑物质分选程度差;或因为远源沉积,岩石颗粒

细,以及成岩压实和胶结作用,造成油层孔隙小、喉道细、比表面积大、渗透率低。低渗透油层以小—微孔隙和细—微细喉道为主,平均孔隙直径一般为 $26\sim 43\mu\text{m}$,喉道半径中值只有 $0.1\sim 2.0\mu\text{m}$,比表面积高达 $2\sim 20\text{m}^2/\text{g}$ 。储层孔喉细小和比表面积大,不仅直接形成了渗透率低的结果,而且是低渗透油层一系列开采特征的根本原因。

(2) 渗流规律不遵循达西定律,具有启动压力梯度。

低渗透储层由于孔喉细小、比表面积大、原油边界层厚度大、贾敏效应和表面分子力作用强烈,其渗流规律不遵循达西定律,具有非达西型渗流特征。渗流直线段的延长线不通过坐标原点(达西型渗流通过坐标原点),而与压力梯度轴相交,其交点即为启动压力梯度。渗透率越低,启动压力梯度越大。

(3) 弹性能量小,利用天然能量方式开采压力和产量下降快。

低渗透油田由于储层连通性差、渗流阻力大,一般边底水都不活跃,弹性能量很小。除少数异常高压油田外,弹性阶段采收率只有 $1\%\sim 2\%$,溶解气驱采收率也不高。在消耗天然能量方式开采条件下,地层压力大幅度下降,油田产量急剧递减,生产管理都非常被动。

(4) 产油能力和吸水能力很低,油井见注水效果缓慢。

低渗透油层自然生产能力很低,甚至没有自然产能,一般都要经过压裂改造后才能正式投产。即使经压裂改造,其生产能力也都很低,采油指数一般只有 $1\sim 2\text{t}/(\text{d}\cdot\text{MPa})$,仅相当于中、高渗透油层的几十分之一。

由于低渗透油层渗流阻力大,大部分能量都消耗在注水井周围,油井见注水效果程度差。在 $250\sim 300\text{m}$ 井距条件下,一般注水半年至一年后油井才能见到注水效果,见效后油井压力、产量相对保持稳定,上升现象很不明显。

(5) 油井见水后产液(油)指数大幅度下降。

由于油水粘度比和岩石润湿性等多种因素的影响,低渗透油井见水后产液(油)指数大幅度下降。当含水达到 $50\%\sim 60\%$ 时,无因次采油指数更低,只有 0.15 。低渗透油层的这种特性,对油井见水后的提液和稳产造成极大的困难。

(6) 裂缝性低渗透砂岩油田沿裂缝方向油井水窜、水淹严重。

我国带裂缝的砂岩油田其基质岩块绝大多数都是低渗透油层,构成裂缝性低渗透砂岩油田。这类油田注水井吸水能力高,沿裂缝方向的油井水窜、水淹现象十分严重。有的油田在注水井投注几天甚至几小时后,相邻的油井即遭到暴性水淹。但裂缝具有双重作用,调整、控制得当,也可取得较好的开发效果。

第三节 低渗透非达西渗流的研究现状

达西定律作为一个基本定律一直被广泛应用于油藏工程计算中,然而在生产实践中很多情况下涉及非达西渗流问题:当流体渗流速度很低或很高时,流体渗流规律会偏离达西线性渗流规律。在低渗透油气田开发中,流体渗流会出现低速非达西渗流,这种非达西渗流的特征是:当压力梯度小于某一个值时,流体不会流动,这样就存在一个大于启动压力梯度的流动区和小于启动压力梯度的静止区,二者的分区界限是变化的^[14,24]。

在国外,前苏联学者 H. Л. 布兹列夫斯基在 1924 年首先指出:在某些情况下,多孔介质中只有在超过某个起始的压力梯度时才发生液体的渗流。1951 年, B. A. 弗洛林^[25]在研究土壤中水的渗流问题时指出:在小压力梯度条件下,因岩石固体颗粒表面分子的表面作用力俘留的束缚水在狭窄的孔隙中是不流动的,并且它还妨碍自由水在与之相邻的较大孔隙中的流动,只有当驱动压力梯度增加到某个压力梯度值后,破坏了束缚水的堵塞,水才开始流动。1963 年, Miller 等人^[26]研究了水在粘土中渗流时考虑启动压力梯度的问题。1977 年,马尔哈辛^[27]从微观结构阐述了启动压力梯度产生的机理。1980 年, Pascal 等人^[28]应用有限差分法求解考虑启动压力梯度的岩土工程固结问题。

在石油渗流的条件下, Φ . A. 特列宾^[29]在 1965 年首先提出了破坏线性达西定律的问题。库萨柯夫^[30]、特列宾、列尔托夫、奥尔芬等通过不同实验发现,含有表面活性物质的原油通过很细的砂子时,渗透率急剧降低,压差不成比例地迅速增长。他们由此修正了达西定律。根据 Φ . A. 特列宾等人和 Irmay 的实验公式,得到 Требин—Irmay 定律。

1992 年, Y. S. Wu 和 Karsten Pruess 等系统叙述了多孔介质单相和多相宾汉流体的流动,从化学工程、流变学和石油工程角度出发,建立了流变模型。通过积分法求得了单相宾汉流体在等温、各向同性、均质地层中流动时考虑启动压力梯度的解析解,然后推导了用牛顿相非混相驱替非牛顿相的两相渗流时的分流量曲线,并研究了不同启动压力梯度对分流量曲线、驱替前缘饱和度的影响。另外,还研究了不同驱替速度、重力等对 B—L 方程的修正。

在国内,西安石油大学、中国科学院渗流流体力学研究所、西南石油大学、中国石油大学、大庆石油学院、长江大学等相继开展了类似的研究。

阎庆来等人^[16,17,31,32]总结了低渗透油层中单相和油水两相渗流的实验结果,提出在较低渗流速度下为非达西渗流,渗流曲线存在非线性段,渗透率越低,非线性段延伸越长,曲线曲率越小,启动压力梯度值越大;在较高渗流速度下为具有启动压力梯度的拟线性渗流。低渗透油层中油水两相渗流,油水过渡带比高渗透层要长,渗透率越低,过渡带越长,这与高渗透油层不同,也说明低渗透油层中油水两相渗流规律与高渗透层不同。

黄延章等人^[14,33]通过对大量实验资料的分析,总结给出了低渗油层中油水渗流的基本特征:当压力梯度在比较低的范围时,渗流曲线呈下凹型非达西渗流曲线;当压力梯度较大时,渗流速度呈直线增加,直线段的延伸与压力梯度轴的交点不经过坐标原点,该点称为平均启动压力梯度;渗流特征与渗透率和流体性质有关,渗透率越低或原油粘度越大,下凹型非达西曲线段延伸越长,启动压力梯度越大。他还提出了渗流流体的新概念。

姚约东和葛家理^[34]对低速渗流条件下的非线性渗流问题进行了研究,指出在低速渗流条件下,渗流速度与压力梯度呈三次方的幂函数关系,给出了非线性运动方程。在此基础上,研究了这种非线性渗流的稳定和不稳定渗流规律,建立了不稳定试井分析模型,并给出了解析解,绘制了用于试井分析的压力和压力导数曲线,分析了理论压力曲线的特征。

冯文光、葛家理^[35,36,37]通过研究发现,在柱对称的情况下,Требин—Ирмай公式可以化为线性的。通过对Требин—Ирмай公式的线性化,他们对单重介质、双重介质油藏考虑启动压力梯度的非达西低速不稳定渗流及凹型压力恢复曲线进行了研究,这也是国内对考虑启动压力梯度的低速非达西渗流试井问题最早进行的研究。之后,程时清等人^[38,39,40]也对低速非达西渗流的试井分析问题进行了研究,建立了单重介质和双重介质试井分析的有效井径模型,给出了数值解和典型曲线拟合分析方法。葛家理等人^[41]和宋付权^[42]等人也分别对考虑启动压力梯度的低速非达西渗流的不稳定压力分析问题进行了研究。李凡华和刘慈群^[24]建立了考虑流动边界随时间变化的低速非达西渗流试井分析模型,采用数值离散化方法求得了模型的解。邓英尔和刘慈群^[43]研究了低渗多孔介质中单相非定常渗流考虑活动边界的问题,建立了定产和定压条件下的渗流数学模型,应用有限差分法求解数学模型,得到了等产及等压条件下活动界面的运动规律;研究了等产量条件下的压力分布曲线与压力导数随时间变化的曲线,发现启动压力梯度越大,低渗多孔介质中的压力传播越慢;给出了等压差条件下的压力分布曲线与产液量