



国家自然科学基金 (50904076) 资助

低渗透油藏 整体压裂技术

● 吴亚红 罗明良 温庆志 编著



石油工业出版社

低渗透油藏整体压裂技术

吴亚红 罗明良 温庆志 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以经济有效地开发低渗透油藏为目标,以整体压裂为手段,详细介绍了低渗透油藏整体压裂的研究情况和现场应用。具体内容包括低渗透油藏的储层室内评价、古今构造应力场、开发井网优选、低速非达西渗流整体压裂理论模型、各种井网的整体压裂设计和水力压裂返排技术。

本书可作为水力压裂相关的现场管理人员、技术人员以及高等院校与科研院所相关专业研究生、本科生参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

低渗透油藏整体压裂技术/吴亚红,罗明良,温庆志编著.
北京:石油工业出版社,2012.11

ISBN 978-7-5021-9299-0

I. 低…

II. ①吴…②罗…③温…

III. 低渗透油气藏—压裂—技术

IV. TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 232460 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) 64523579 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 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.5

字数:269 千字

定价:40.00 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

随着勘探和开发技术的进步，我国低渗透油田已探明和可动用的地质储量在总储量中所占的比例明显增大。据初步统计，在已探明储量中，低渗透储量所占比例达60%以上。这些年来，我国发现的主要是低渗透油田，并且越来越多，如延长油田，长庆油田，新疆的火烧山油田，吐哈的丘陵和鄯善油田，三肇凹陷的朝阳沟和头台等油田，二连的哈南油田，胜利的渤南油田，吉林的新立、乾安、新民油田等。这些低渗透油田具有储层面积广、储量大、丰度低、物性差、开发难度大等特点。低渗透油田的开发已成为我国陆上石油工业稳定发展的重要潜力，是未来石油工业可持续发展的主要攻关研究方向。

水力压裂是油气井增产、水井增注的一项重要技术措施，已广泛应用于国内外低渗透油田的开发之中。随着水力压裂技术不断与其他学科交叉、渗透，目前已建立了新的压裂开发的观念和方法，由一般性的单井增产（增注）措施发展为低渗透油藏经济高效开采的整体压裂开发。

油藏整体压裂是从整个油藏出发，将人工导流裂缝的缝长、缝宽、导流能力与一定延伸方位的水力裂缝置于给定的油藏地质条件和注采井网之中，然后反馈到油藏工程和油田开发方案，从而优化井网、井距、井数及布井方位，以取得更好的开发效果和经济效益。从这个意义上说，水力压裂已从一项单纯提高单井产量的战术手段，发展成为经济有效地开采低渗透油藏不可或缺的战略措施，故整体压裂又称油田开发压裂。运用低渗透油藏的压裂开发技术，既可解决低渗透油藏开发投入与产出的矛盾，又能满足油田开发的采油速度要求，最终提高采收率。

本书涵盖了笔者近10年来在整体压裂技术方面的科研成果，希望借此著作作为我国整体压裂技术的推广应用搭建信息交流的平台，进而加快压裂技术更新的步伐，进一步提高压裂技术的适应性、针对性、前瞻性和现场可操作性。

本书在编写过程中得到了课题组全体成员的大力支持，赵仁保老师、战永平老师等参与了本书成果中的部分实验工作，硕士研究生徐希、李金禹、于姣姣、翟恒立、贾自龙、孙厚台、胡蓝霄、黄越等参与了编辑工作；同时本书的出版得到国家自然科学基金（50904076）、山东省自然科学基金

(ZR2012EEM001)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金 (BS2012HZ029)、中国博士后科学基金 (2012M510713) 的资助, 在此一并表示感谢。

由于学术水平和实际经验有限, 书中难免存在疏漏、不足, 甚至错误之处, 敬请专家学者批评指正。

编 者

2012 年 7 月

目 录

第1章 低渗透油藏整体压裂技术研究进展	1
1.1 引言	1
1.2 低渗透油藏整体压裂开发理论	1
1.3 低渗透油藏裂缝描述研究	9
1.4 低渗透油藏整体压裂技术进展	17
第2章 低渗透储层室内实验评价	23
2.1 低渗透储层敏感性评价实验概述	23
2.2 黏土矿物类型及其敏感特征	24
2.3 低渗透储层敏感性实验准备	25
2.4 低渗透储层敏感性评价实验	27
2.5 低渗透储层启动压力梯度	37
第3章 低渗透油藏古今构造应力场研究	44
3.1 研究目的及意义	44
3.2 国内外研究状况	44
3.3 研究方法	51
3.4 模拟计算	52
第4章 低渗透油藏开发井网优选	61
4.1 井网类型优选	61
4.2 井距的确定	66
第5章 低速非达西渗流整体压裂理论模型	70
5.1 低速非达西渗流新模型的建立	70
5.2 低速非达西渗流整体压裂模型的建立	72
5.3 低速非达西渗流形态判断	81
5.4 模拟软件的结构和主要功能	84
第6章 矩形井网整体压裂优化设计	86
6.1 启动压力梯度对矩形井网生产动态的影响	87
6.2 各向异性矩形井网井排距比优化	92
6.3 矩形井网裂缝参数优化	102
第7章 水平井直井联合布井整体压裂优化设计	106
7.1 水平井压裂井网优化设计	106
7.2 水平井裂缝参数优化设计	113
7.3 直井裂缝参数优化	142

第 8 章 水力压裂返排技术.....	145
8.1 水平井压裂返排工艺优化模型研究	145
8.2 压裂油井纤维控制支撑剂回流技术研究	155
参考文献.....	181

第1章 低渗透油藏整体压裂技术研究进展

随着我国东部油田已进入中高含水期，低渗透、特低渗透油田占有越来越重要的地位，已经成为我国原油稳产的重要保证。如何高效开发低渗透、特低渗透油田，成为了石油工业面临的一个攻关难题。

1.1 引言

我国低渗透油气资源十分丰富，地质储量约 $40 \times 10^8 \text{t}$ ，占全部探明地质储量的 24.5%，广泛分布于全国勘探开发的 21 个油区，其中储量在 $1 \times 10^8 \text{t}$ 以上的就有 11 个油区。但到目前为止，陆上已开发地质储量中，低渗透油气储量仅占 17.5%，在已探明未动用储量中，低渗透储量占 60.8%。近年来，新增的油气储量中，低渗透储量的比例更大。因此，对已开发的低渗透油气田如何进一步提高开发效益，对未动用的低渗透油气储量，如何尽快有效地投入开发，对保持我国石油工业持续稳定发展有着十分重要的意义。

众多研究表明，低渗透油藏的渗透率很低，油气水通道细微，流体必须有一个附加的压力梯度克服渗流阻力后才能流动，即存在启动压力现象，这导致渗流规律在一定程度上偏离了达西定律。国内外学者都对低渗透油藏启动压力现象进行过研究。黄延章提出了边界层理论，该理论很好地解释了为什么在低渗透油藏实际生产过程中，在确认没有储层伤害的情况下，即使有生产压差，也可能没有产量的问题。

低渗透油藏增产改造的有效措施之一就是水力压裂。近年来水力压裂技术得到了长足的发展，理论研究和工艺技术都有了很大进步，由过去的单井压裂发展到了现在的区块整体压裂，即以区块为对象，以采收率为目标来优化裂缝参数，从而获得最大的效益。目前的整体压裂理论都是建立在达西渗流规律基础上的，并没有考虑到低渗透非达西渗流问题，用这套理论和方法来研究具有启动压力现象的低渗透油藏显然是不合适的。建立非达西渗流的整体压裂物理模型和数学模型，对开发低渗透油藏，具有重要的现实意义。

1.2 低渗透油藏整体压裂开发理论

1.2.1 低渗透非达西渗流机理

1924 年，H. Л. 布兹列夫斯基首先提出启动压力梯度，并指出由于启动压力梯度的存在而使得渗流为非达西渗流。产生启动压力梯度的原因多种多样，对低黏度原油，在低渗透孔隙介质中渗流时，孔隙表面与液体间发生复杂的物理化学变化，存在较强的相互作用，并且渗透率越低，孔隙喉道的尺寸越小，这种作用就越大；高黏度原油在较高渗透率砂岩渗流时，流体的屈服性使得渗流同样需要相应的启动压力梯度。决定流体渗流规律的三大要素为

流体（流体的组成和物理化学性质）、多孔介质（多孔介质结构和物理化学性质）和流动状况（流动的环境、条件和流体—固体之间的相互作用）。

自从 H. Л. 布兹列夫斯基提出启动压力梯度后，全世界的学者对启动压力梯度做了大量研究工作，取得了重要的研究成果。他们运用不同的方法，建立了非达西渗流数学模型，对开发低渗透油气藏做出了重要贡献。

20 世纪 80 年代末，马尔哈辛在《油层物理化学机理》中详细介绍了流体在多孔介质渗流过程中与岩石表面发生物理化学变化的现象，从微观结构阐述了启动压力梯度产生的机理，为研究非达西渗流奠定了基础。

1992 年，Y. S. Wu 和 Karsten Pruess 等人在《宾汉非牛顿流体在多孔介质中的流动和驱替》一文中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、流变学和石油工程的角度出发，建立了流变模型，认为宾汉流体特性比较接近多孔介质中流动的流体，其流变方程为：

$$\tau = \tau_r - \mu_B \gamma \quad (1.1)$$

式中 τ ——剪切应力，Pa；

τ_r ——屈服应力，Pa；

μ_B ——表观黏度，Pa·s；

γ ——剪切速率，s⁻¹。

将流变模型中的表观黏度 μ_B 与流体在多孔介质中渗流的达西定律相结合，得到非牛顿宾汉流体在多孔介质中的渗流规律，即达西定律的修正。

黄延章等人提出了渗流流体的概念，认为渗流流体是渗流环境中的流体，包括体相流体和边界流体两部分。体相流体是指性质不受界面影响的流体，它分布在多孔介质孔道的中轴部位。边界流体是指性质受界面现象影响的流体，它紧靠在孔道上形成一个边界层。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充满了流体，流体的某些成分就可能与孔道表面的分子产生相互作用，这样，在孔道表面处流体这些成分的浓度就比远离孔道表面处的要大。这种流体成分浓度随距孔道表面距离大小的变化，将导致其物理化学性质的变化。因此，在渗流环境中，由于这种边界流体的存在及影响，使渗流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、边界流体、多孔介质的性质及流动条件。

2005 年，李中锋、何顺利从多孔介质的孔隙结构、孔隙介质与渗流流体之间的相互作用和渗流流体性质等方面阐述了低速非达西渗流产生机理的不同观点，探讨了孔隙大小、孔隙喉道的几何结构、比表面积与渗透率的关系及其对启动压力的影响，深入研究了地层水、界面张力、边界层、渗流流体性质等对非达西渗流形成的作用机制。

2006 年，刘晓旭、胡勇、朱斌等人为明确气体在低速渗流状态下的渗流规律以及产生低速非达西渗流的实质性原因，运用分子动力学、热力学和渗流力学等相关知识，基于滑脱效应和阈压效应两方面分析了气体在低速渗流状态下的渗流机理及渗流特征。研究认为，气体滑脱效应是毛细管壁处气体分子滑流和毛细管内部气体分子扩散的综合效应，是浓度场和压力场作用叠加的结果。

2007 年，赵继涛、梁冰、孙维吉等人通过对低渗透岩心气体的渗流实验研究，探讨了低渗透储层气体的渗流机理。结果表明，在低渗透储层中，气体渗流表现出明显的非达西渗流特征，并且受含水率的影响较大。在渗流克氏回归曲线上，存在两个临界点 a 、 b ，均具

有重要的意义：小临界点 a 区分了两种不同的作用机理，其位置不同，对应的渗流曲线类型也不同；临界点 b 界定了两种不同的渗流形态，临界点 b 位置高低不同，对应的渗流曲线中非线性渗流段的长短就不同。两个临界点的研究对理论分析以及现场生产均具有重要的指导意义。

1.2.2 低渗透非达西渗流的判别

1997 年，阮敏、何秋轩针对低渗透多孔介质中的渗流表现出对线性的偏离等现象进行了研究，低渗透多孔介质中，渗流往往呈现为具有拟启动压力梯度的非达西渗流形式。为了确定该渗流形式出现的条件，在实验研究的基础上，针对引起非达西渗流的主要作用机制，如流体黏度、介质渗流率、孔隙几何结构等进行了讨论，运用量纲分析方法，提出了一个综合判据——压力数 (KN)。研究表明：当 $KN > 5$ 时，低渗透多孔介质中的渗流表现为非达西渗流特征；当 $KN < 2$ 时，其渗流表现为达西渗流特征； KN 在 $2 \sim 5$ 之间，视为过渡带。

1999 年，阮敏、何秋轩研究了低渗透由达西渗流转为非达西渗流的临界点及判断方法。针对低渗透非达西渗流曲线上临界点的难以确定以及什么条件下出现非达西渗流问题，进行了较为深入的研究与分析。在大量实验研究的基础上，采用蒙特卡洛数值解法来确定临界点，克服了早期利用图版法确定临界点的不足；同时，提出一种临界参数判别法，用于判定低渗透多孔介质中的渗流形式。

姚约东、葛家理等运用量纲分析方法，将低渗透岩心渗流实验数据无量纲化，得到线性及非线性渗流的判别标准，并引用边界层理论从微观角度解释渗流实验结果，对不同的流动形态模式分别从物理和力学角度进行了解释。在启动压力梯度表示形式方面，提出超低速、低速、线性、亚高速、高速等五种非达西渗流形态。

1.2.3 考虑启动压力梯度的非达西渗流数学模型

1997 年，黄延章给出了三种描述低渗透油层非线性渗流特征的数学模型（图 1.1），并对这三种模型的优缺点进行了分析。

第一种模型， AD 段用冥律关系来描述， DE 段用直线描述，其数学方程为：

$$\begin{cases} v = 0, \left(\frac{\nabla p}{L} < a \right) \\ v = \frac{K}{\mu} \left(\frac{\nabla p}{L} - a \right)^n, \left(b > \frac{\nabla p}{L} \geq a \right) \\ v = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\nabla p}{L}, \left(\frac{\nabla p}{L} \geq b \right) \end{cases} \quad (1.2)$$

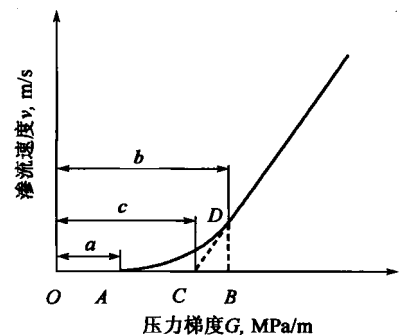


图 1.1 典型的非达西渗流关系曲线

该模型最精确，既反映了启动压力，也反映了低压力梯度时渗流不稳定的过程，还表达了较高压力梯度下充分发展的稳定渗流过程，但在数学处理上遇到较大困难，计算繁琐。

第二种模型，将直线 OD 与直线 DE 作为两种斜率的线性关系组合来描述渗流过程，其数学方程为：

$$\begin{cases} v = \left(\frac{K}{\mu}\right)_1 \cdot \frac{\nabla p}{L}, \frac{\nabla p}{L} < b \\ v = \left(\frac{K}{\mu}\right)_2 \cdot \frac{\nabla p}{L}, \frac{\nabla p}{L} \geq b \end{cases} \quad (1.3)$$

该模型没有反映出渗流过程中本质性质的启动压力问题，按照这种模型计算的经济指标比实际的偏高。

第三种模型，用带启动压力梯度的线性来描述渗流过程，其数学方程为：

$$\begin{cases} v = 0, \frac{\nabla p}{L} < c \\ v = \frac{K}{\mu} \left(\frac{\nabla p}{L} - c \right), \frac{\nabla p}{L} \geq c \end{cases} \quad (1.4)$$

该模型对于在低压力梯度时阻力较小的大孔道中的流动估计偏低，因而综合经济技术指标会偏低。

1998年2月，程时清、陈明卓在《油水两相低速非达西渗流数值模拟》一文中建立了油水两相低速非达西数学模型。基本假设：油藏中存在油水两相渗流，渗流符合低速非达西定律，地层温度不变，地层流体与岩石之间无化学反应，不考虑重力和毛管力。模型中采用块中心网格进行差分，采用IMPES方法进行数值求解。

邓英尔、刘慈群对水平井建立了考虑启动压力梯度后的两相非达西椭圆渗流模型，得到了考虑启动压力梯度的两相非达西椭圆渗流水相分流量方程、等饱和度面推进方程和见水方程。另外，邓英尔、刘慈群、王允诚建立了考虑启动压力梯度的活动边界非线性渗流数学模型。

2001年2月，宋付权、刘慈群在《低渗透多孔介质中新型渗流模型》一文中提出了三参数渗流模型：

$$\nabla p = \bar{v} \left(a_1 + \frac{a_2}{1 + a_3 v} \right) \quad (1.5)$$

三参数的物理意义为： a_1 为渗流速度很大时的流体阻力系数，在工程应用中，可近似为常规实验室测量的阻力系数 $\left(\frac{\mu}{K}\right)$ ； a_2 由原点处切线的斜率减去 a_1 得到； a_3 由流速较大时形成的

直线延长线在压力轴上的截距确定， $a_3 = \frac{\nabla p_y}{a_2}$ ，这里表征低渗透多孔介质渗流的特征参数拟启动压力梯度 ∇p_y 由 a_2 和 a_3 确定。

2001年9月，周涌沂等人从流体高速非达西渗流、流体低速非达西渗流模型以及一般的线性达西渗流模型出发，得到一个能普遍适合多种渗流的自适应渗流模型。

2002年4月，周涌沂、彭仕宓、李阳等人建立了低速非达西渗流的全隐式模拟模型，在模型中考虑了启动压力梯度的影响，油气水三相都满足低速非达西渗流规律，并考虑了重力、毛管压力的影响和流体的压缩性。

2004年，张烈辉、朱水桥、王坤等人对达西行为的描述出发点基于1901年Forchheimer提出的一个经典方程，即Forchheimer方程，利用该方程来弥补流体高速流动时达西定律的不足。在该方程中增加了一个非达西项到达西方程中，以考虑达西方程的缺陷。非达西项是非达西系数、流体密度和流速平方的乘积。在确定非达西效应时一个最重要的方面是尽可能准确地估计非达西系数，建立非达西系数的求取通式，并且该通式适用的储集层类型、渗透

率范围较大。在此基础上,进一步建立一个新型的全隐式三维气藏渗流数学模型,该模型能有效地考虑高速气体渗流时的非达西现象。

2007年,苗顺德、吴英对室内物理模拟气体驱替岩心实验数据进行处理,研究了一种确定低渗透气藏气体渗流克林肯贝尔常数和达西系数的新方法。通过回归分析实验数据,得到克林肯贝尔常数与地层平均渗透率关系式,并绘制了求解其大小的理论图版,由此建立了气水两相非达西渗流数学模型。

2008年,朱维耀、宋洪庆、何东博等人在低速非达西渗流实验研究基础上,对含水低渗透气藏气体流动特性进行了分析,并建立了含可动水、不动水和束缚水影响下的3类低速非达西渗流数学模型,推导出了气体滑脱效应和启动压力梯度分别存在和同时存在条件下的系列气井产能公式。通过实例计算,证明数学模型符合现场实际,气井产能公式可为确定不同含水条件下低渗透气藏气井合理的产能提供必要的理论依据。

1.2.4 启动压力梯度的确定方法

归纳起来,确定启动压力梯度的方法有以下6种。

1. 室内实验方法

实验证明低渗透储层的渗流呈非达西渗流特征,并且可以通过测量稳态压力和不稳态压力来求取低渗透岩心的启动压力梯度。

1998年9月,中原石油勘探开发科学研究院孙黎娟等人从考虑启动压力梯度基本渗流方程出发,推导出油层的启动压力梯度与其液体的流量呈双曲反比关系。

2000年,宋付权、刘慈群在《低渗透油藏启动压力梯度的简单测量》一文中叙述了用稳态法测定岩心的启动压力梯度。该方法测量简单,易于进行,但要稳定下来需要很长时间,费时费力,而且由于压力变化导致渗透率下降,存在一定的误差。

2001年5月宋付权、刘慈群等在实验中采取非稳态测定替代稳态测定的方法来测量流体在低渗透岩心的启动压力梯度。

胜利油田地质科学研究院吕成远等根据毛细管和连通器原理,采用“毛细管平衡法”与“压差—流量法”相结合,不仅保证了非达西渗流曲线的完整性,而且还在每块实验样品的平均渗流速度与单位黏度驱替压力梯度的关系坐标中,利用二次函数拟合实验数据点,通过二次函数曲线切线斜率和截距的变化来描述低速非达西渗透率、流体黏度、驱替压力梯度的关系以及低速非达西渗流段的渗透率与空气渗透率和单位黏度驱替压力梯度的关系,回归得到了许多经验公式。

闫庆来、肖鲁川、牟学益等分别通过单相液体渗流特征以及边界层理论等途径进行了室内实验研究,实验结果不仅显示了低渗透岩心流动所具有的非达西特殊规律,而且还得到了许多研究低渗透非达西渗流的有用结论。

邓英尔、刘慈群设计了一种新的实验方案——用非稳态实验研究低渗透介质渗流,通过室内实验测定了启动压力梯度并探讨了它对低渗透介质渗流的影响;宋付权、刘慈群、李健也采用了非稳态渗流测压方式求解了岩心的启动压力梯度。

许多学者通过实验对低渗透油藏启动压力梯度进行了不同程度的研究,也得到了不同渗透率条件下启动压力梯度的大小,但所测量的数值都偏大,有的每米甚至达到几个兆帕,如果将这些值代入达西定律,都不是很理想,无法直接应用到低渗透油田的实际开发中去。

2004 年, 苏法卿等应用高精度微量泵和高精度压差传感器, 通过实验测定了胜利油区史南油田史深 100 区块三个不同渗透率级别的低渗透砂岩样品在不同含水饱和度下油水两相的最小启动压力梯度。研究表明, 低渗透砂岩油水两相最小启动压力梯度与空气渗透率呈幂函数关系, 油水两相最小启动压力梯度比单相启动压力梯度高 5 ~ 10 倍。

2. 数值实验方法

根据油田岩心的毛管压力曲线或孔喉分布曲线, 建立 LB 模型计算的多孔介质数值结构, 进行 LB 方法的模拟计算, 得到流量—压力梯度模拟曲线, 将模拟曲线的直线段部分延长并与压力梯度轴相交得到交点的值, 即为无量纲启动压力梯度的值。通过模拟计算结果与矿场实际压力梯度结果的对比, 获得无量纲与有量纲量之间的比例系数, 则可以得到该地层的启动压力梯度。

3. 理论计算方法

1999 年 4 月, 河南石油勘探开发研究院孙明从流变学原理出发, 推导出低渗透油藏流体启动压力的理论计算方式。对于原油 (属于塑性流体), 根据 Bingham 公式孔隙度, 渗透率与毛管半径之间的关系以及塑性流体在毛管中的平均流速与毛管长度 L 、流动压差之间的关系为:

$$q = \frac{KF}{\mu} \left(\frac{\Delta p}{L} - \frac{7}{3} \tau_0 \sqrt{\frac{\phi}{2K}} \right) \quad (1.6)$$

$$v = \frac{K}{\phi \mu} \left(\frac{\Delta p}{L} - \frac{7}{3} \tau_0 \sqrt{\frac{\phi}{2K}} \right) \quad (1.7)$$

式中 q ——产量, cm^3/s ;
 K ——有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;
 F ——岩心截面积; cm^2 ;
 μ ——塑性黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;
 $\Delta p/L$ ——启动压力梯度, $10^5 \text{Pa}/\text{m}$;
 τ_0 ——极限动切应力, 10^{-1}Pa ;
 ϕ ——孔隙度;
 v ——渗流速度, cm/s 。

式 (1.6)、式 (1.7) 即为低渗透油层中单相流体的渗透规律。由此可知, 当 $\frac{\Delta p}{L} >$

$\frac{7}{3} \tau_0 \sqrt{\frac{\phi}{2K}}$ 时, 流体才发生流动, 于是可得单向渗流时的启动压力梯度计算公式:

$$\lambda = \frac{7}{3} \tau_0 \sqrt{\frac{\phi}{2K}} \quad (1.8)$$

式中 λ ——压力梯度, $10^5 \text{Pa}/\text{m}$ 。

在径向流动情况下, 具有如下关系式:

$$q = \frac{2\pi rKh}{\mu} \left(\frac{dp}{dr} - \frac{7}{3} \tau_0 \sqrt{\frac{\phi}{2K}} \right) \quad (1.9)$$

式中 r ——供油半径; cm ;

h ——油层厚度, cm 。

积分后得:

$$p = p_w + \frac{q\mu}{2\pi Kh} \ln \frac{r}{r_w} + \frac{7}{3} \tau_0 \sqrt{\frac{\phi}{2K}} (r - r_w) \quad (1.10)$$

式中 p ——距井底半径为 r 处的压力, 10^5Pa ;

p_w ——井底压力, 10^5Pa 。

于是, 径向渗流时的启动压力梯度为:

$$\lambda = \frac{7}{3} \tau_0 \sqrt{\frac{\phi}{2K}} (r - r_w) \quad (1.11)$$

2004 年, 韩洪宝等提出了求解启动压力梯度的一种新方法, 通过对实验数据进行回归计算, 获得了低渗透岩心的启动压力梯度与地层平均渗透率的幂函数关系式。

4. 生产分析方法

根据低渗透非达西渗流产能方程建立低渗透油藏的流入动态曲线 (IPR 曲线), 利用多个生产数据或试井数据来快速确定启动压力梯度。

5. 稳定试井方法

根据基本数学模型:

$$\begin{cases} \frac{d^2 p_D}{dr_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{dp_D}{dr_D} + \frac{D}{r_D} = 0 \\ \left(\frac{dp_D}{dr_D} \right) \Big|_{r_D=1} = -1 - D \\ p_D \Big|_{r_D=1} = p_{wD} \\ p_D \Big|_{r_D=r_{eD}} = 0 \end{cases} \quad (1.12)$$

式中 p_D ——无因次压力;

r_D ——无因次半径;

D ——无因次启动压力梯度;

r_{eD} ——无因次油藏外边界半径;

p_{wD} ——无因次井底压力;

Δp ——压差, MPa ;

q_{sc} ——地面产量, m^3/d 。

求解式 (1.12) 得:

$$\Delta p = \lambda (r_e - r_w) + \frac{1.842 \times 10^{-3} q_{sc} \mu B_0}{Kh} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (1.13)$$

由式 (1.13) 可知, Δp 与 q_{sc} 的关系曲线理论上应为一条不过坐标原点的直线, 即满足关系式:

$$\Delta p = a q_{sc} + b \quad (1.14)$$

直线在压力坐标上的截距 b 即为启动压力梯度。

6. 不稳定试井方法

不稳定试井方法包括曲线拟合方法、用压力恢复资料求油藏启动压力梯度、数值试井方法等。

以上 6 种确定启动压力梯度的方法能在一定程度上满足科研和现场的需要, 但也存在一

定的优点和不足。室内实验方法直观明了,可以直接进行渗流规律的研究,但是也存在着一一些缺点,如实验周期长、难以保证岩心处于地下时的自然状态、受实验条件的限制。因而可能造成较大的数据误差,数值实验方法简便快捷、参数变化范围大,但是必须依赖于地层的孔喉分布规律和一定的对比实验;理论计算方法论证清晰、思路简练,但是在实用性方面存在明显的不足;生产分析方法简便快捷,但是受生产数据的准确性影响,且必须提供井底流动压力和流量函数值;稳定试井方法提供了求解启动压力梯度的一种方法,但是在低渗透地层中开展稳定试井往往很困难,因而该方法实用性较差;不稳定试井方法反映油藏的动态变化规律,用不稳定试井方法确定启动压力梯度具有积极的现实意义。

1.2.5 考虑启动压力梯度时相对渗透率的计算方法

2000年,邓英尔等研究了考虑启动压力梯度时相对渗透率的求解方法。对现有非稳态相对渗透率计算方法(JBN方法)进行了修正。假定多孔介质是均匀的,驱动力和流体性质保持不变,相间无传质现象,油水不可压缩,不计重力和毛管力的影响,从油水相非达西运动方程出发,推导出了考虑启动压力梯度的油水相对渗透率的计算公式。将推导的计算公式应用到实验过程中,结果发现:(1)束缚水和残余油饱和度较高。(2)两相渗流区范围较窄。(3)随含水饱和度增大,油相相对渗透率递减较快,水相相对渗透率递增较慢。考虑非达西流后,计算的油相相对渗透率增大,水相相对渗透率减小,等渗点右移。

2003年,邓英尔等针对水湿和油湿岩心两种情形,分别导出了同时考虑启动压力梯度、毛管力及重力的相对渗透率公式,不受实验驱替速度较高的限制,解决了低渗透岩石非稳态相对渗透率的实验测定和计算方法问题。

2007年,董大鹏、冯文光、赵俊峰等人对现今实验室处理相对渗透率曲线的JBN方法是建立在达西定律基础上的,没有考虑启动压力梯度的影响。为解决非稳态实验中对低渗透岩心的数据处理问题,在低渗透非达西渗流理论的基础上,推导了考虑启动压力梯度的油水相对渗透率计算公式,当启动压力梯度为零时,该公式与JBN计算公式相同,可以看作是JBN方法的推广。与JBN方法相比,考虑启动压力梯度后得出的油水相对渗透率都偏小,可以看出JBN公式对低渗透储层并不适用。考虑了启动压力梯度的影响后,得出的相对渗透率曲线更符合低渗透岩心的真实驱替过程,所以更有利于油气藏工程中的计算。

1.2.6 启动压力梯度对油田开发的影响

利用启动压力梯度,可以用试算法计算合理井距、评价油藏层间动用状况、确定低渗透油藏压力波影响半径与传播时间的关系等,启动压力梯度还可以对气藏进行合理井距计算,评价气藏的动用程度,对油藏进行开发层系划分、井网部署及评价已开发油藏层间动用状况等。具有启动压力梯度的低渗透多孔介质中定常渗流的压力分布公式为:

$$p_i - p = \frac{\mu q B}{542.9 K h} \ln \frac{R_e}{r} + G(R_e - r) \quad (1.15)$$

式中 G ——启动压力梯度, 10^5 Pa/m ;

p_i ——边界处压力, 10^5 Pa/m ;

B ——体积系数;

μ ——原油黏度, 10^{-3} mPa/s 。

产量公式为:

$$q = \frac{542.9Kh[(p_i - p_w) - G(R_e - r_w)]}{\mu B \ln \frac{R_e}{r_w}} \quad (1.16)$$

式中 p_w ——井底压力, 10^5Pa 。

1999 年 5 月, 宋付权、刘慈群等在《低渗油藏中含启动压力梯度水平井生产动态》及《低渗透油藏中水平井的产能公式分析》中, 从平均质量守恒方法出发, 在椭圆坐标内分析具有启动压力梯度的低渗透油藏水平井生产动态, 分析了稳态条件下近似压力分布和产能公式以及启动压力梯度对原油生产的影响, 得出了启动压力梯度越大, 水平井产量越低, 当启动压力梯度很大时, 存在最佳水平段长度等结论。

根据 Buckley-Leverett 不混溶两相渗流理论, 考虑启动压力梯度的影响, 1998—1999 年, 中科院渗流流体研究所宋付权、邓英尔、刘慈群等人对水驱油两相流进行了分析, 得到了含启动压力梯度油藏线性水驱、径向水驱、垂直裂缝水驱和水平井油水两相渗流的解析公式, 并得到了这样的结论: 启动压力梯度的存在, 不仅增大了原油的开发难度, 还降低了原油的最终采收率; 增大注入率可以减少启动压力梯度对两相渗流的不利影响, 提高原油的最终采收率。因此, 应开发低渗透油藏, 应用小井距、大流量、大压差的注采方案。

2001 年, 黄爽英等在《引入启动压力梯度计算低渗透砂岩油藏注水见效时间》中, 考虑到传统的用导压系数计算压力波传播时间的公式没有考虑启动压力梯度的存在, 不能用来预测低渗透油田见水时间与井距的关系, 因此建立了考虑启动压力梯度的预测低渗透砂岩油藏注水见水时间模型。结果表明, 低渗透油田压力传播时间与启动压力梯度关系密切, 注水见效时间与启动压力梯度成正比, 与井距成反比, 井距对低渗透油田注水见效时间的影响非常大。

2002 年, 陈民锋、张兴焰等人在文东沙三中油藏储层性质对水驱开发规律的影响研究中也得到了类似的结果, 杨正明、刘先贵等也对此有所研究。

2008 年, 解宏伟、田世澄、赵崇等人研究流体在多孔介质内流动时, 均不同程度地存在启动压力梯度。对于高渗透性稀油油藏, 启动压力梯度对油田开发过程的影响可以忽略; 但对于低渗透油藏, 启动压力梯度显示出重要的影响, 呈现非线性渗流特征。文中利用具体油藏的实验数据, 计算了最小启动压力梯度和最大(临界)启动压力梯度, 回归出启动压力梯度与渗透率的幂函数关系式。通过回归的关系式研究了其在油田开发中的应用, 并通过流态图版判断井网适应性, 确定合理注采井距, 提出了对低渗透油藏改善开发效果具有针对性的措施。

1.3 低渗透油藏裂缝描述研究

1.3.1 地应力场与裂缝描述

到目前为止, 地应力的确定方法可以分为四大类: 一是利用资料进行定性分析, 如火山喷道、断层类型、油井井眼稳定情况、取心收获率、区域应力场、地形起伏、地质构造、震源机制等; 二是矿场应力测试, 如水力压裂应力测试, 井壁崩落地应力反演; 三是岩心测

试,如压差应变分析、波速各向异性测定、滞弹性应变分析、声发射(Kaiser效应)测定等;四是地应力计算,如地应力场有限元数值模拟、地应力测井解释、钻进参数反演等。地应力测量方法虽较多,但真正能直接测量出地应力的方法,严格来讲还没有。相对而言,水力压裂方法可给出比较可靠的最小地应力值,在一定精度范围内可视为地应力的直接测量,其他方法一般均基于形变或有关物理量来推算地应力状态,属于间接测量,其精度与所采用的反演方法密切相关。

储层天然裂缝定量预测方法的研究是油气田勘探与开发的重大难题,也是当前油气田勘探开发的前沿课题。天然裂缝不仅在碳酸盐岩、泥页岩储层中广泛分布,而且在低渗透储层中也广泛发育。对裂缝性储集层裂缝的探测、评价和定量预测是裂缝性储集层勘探开发的关键。

到目前为止,储层天然裂缝的主要识别方法有野外露头观测、岩心裂缝观测、裂缝识别测井和地震、试井和注采试验等。对裂缝评价方法的参数较多,目前还不统一,难以进行判断和对比分析。地层裂缝的预测方法主要有构造地质学、构造应力场(有限单元法等)、分形几何法、灰色评判法、神经网络法等,地质学方法发展最早,它在一定条件下能给出构造裂缝的大致分布,属于定性判别。有限单元法是日前较为成熟的方法之一,它已广泛应用于储层裂缝的定量预测之中,而分形几何法是较为新颖的方法之一,目前还不成熟,尚需进一步的研究。灰色评判、模糊评判和神经网络法则是综合利用多种信息进行推断,信息来源和判断准则是关键。

目前,国内外都在广泛开展储层裂缝的定量预测,都取得了一定的成果。美国 Spraberry 油田为研究裂缝的分布规律,在选定地区先钻几口定向取心井,准确确定裂缝的发育方向,然后垂直于主裂缝方向钻定向井,在裂缝发育段连续取心,以确定裂缝的频率和间距,再结合其他试验参数,建立了比较符合地下实际的裂缝地质模型。我国丘陵油田在研究裂缝发育规律,建立地质模型、裂缝的定量表征方法等方面都是很成功的。他们在收集了大量裂缝资料后,重点研究清楚下列问题:

- (1) 确定七项表征参数:密度、长度(延伸)、宽度、高度、斜度(倾角)、角度(方位)和深度(裂缝的井深)。
- (2) 建立三种关系:裂缝的发育程度(主要是密度)与岩性、层厚、构造部位的关系。
- (3) 研究两种性质:裂缝的力学性质和开启性质。
- (4) 评估裂缝能力:即裂缝对底层渗透率有多大贡献能力。
- (5) 探讨成因机理:包括裂缝形成的原因、时间以及演化过程等。

许多文献认为天然裂缝系统的形成和方位受岩石力学机制控制,其中古应力场以及由此形成的裂缝对裂缝性油气田的勘探具有重要意义,而现代应力场则对古构造裂缝有改造和演化变迁的作用,因此在控制裂缝发育程度的因素中,对裂缝的形成和产生起主要作用的是构造运动,在大部分情况下,构造应力对裂缝的发育程度起着最重要的控制作用,除了构造作用外,天然裂缝的发育规律还受下面几种因素的影响:

(1) 裂缝发育同构造部位的关系。研究表明,裂缝发育与构造部位关系密切,不同构造部位,其受力性质不一样,形成的裂缝类型也不同。构造曲率变化大的部位是裂缝发育的最佳部位,其次是断鼻、褶皱和断块轴向交点部位。

(2) 断层裂缝发育规律。断层发育区也是裂缝发育区,在延伸方向变化的转弯处、断层交汇处、断层端部、断层相交呈“墙脚式”组合处、两条或多条断层之间的断块或断垒