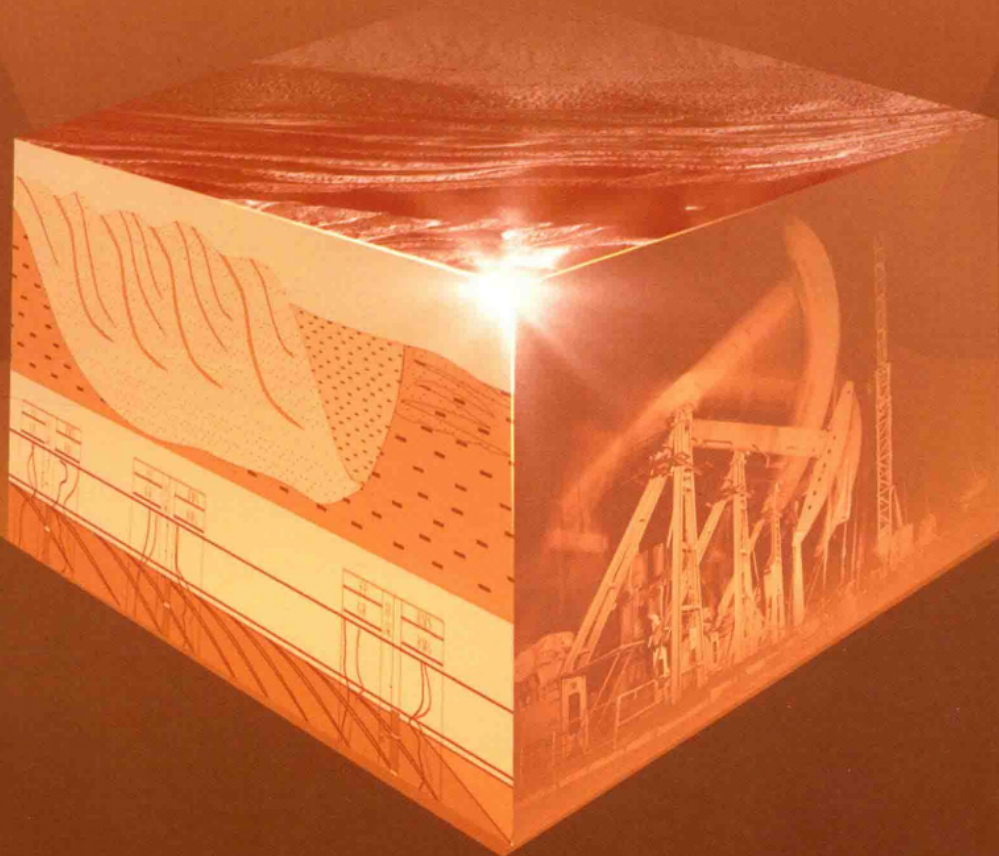


陕西省教育厅自然科学专项 (12JK0792)
西安石油大学优秀学术著作出版基金
西安石油大学科技创新基金研究项目

共同资助

低渗透油藏 非线性渗流模拟及应用

刘 顺 编著

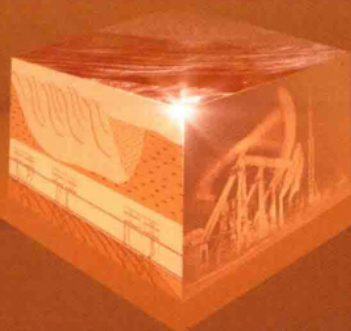


石油工业出版社

责任编辑：方子奇 蔡运权

责任校对：陈 丽

封面设计： 静田设计



ISBN 978-7-5021-9558-8



定价：29.00 元

低渗透油藏非线性渗流模拟及应用

刘 顺 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从低渗透油藏非线性渗流规律出发,在建立非线性渗流特征模式的基础上,遵循由浅入深的认识规律,详细介绍了低渗透油藏的产能评价模型、垂直井单相流及多相流 IPR 模型、水平井多相流 IPR 模型、试井解释模型,以及非线性渗流数值模拟模型,并给出了求解方法和现场应用实例。

本书可作为石油工程、石油地质、海洋石油工程、非常规油气等专业本科生、研究生参阅材料,也可供从事油气田勘探与开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透油藏非线性渗流模拟及应用/刘顺编著.

北京:石油工业出版社,2013.6

ISBN 978-7-5021-9558-8

I. 低…

II. 刘…

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(2013)第 071511 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

2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:8

字数:220 千字

定价:29.00 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

中国目前主要有层状砂岩油藏、气顶砂岩油藏、层状低渗透砂岩油藏、裂缝性低渗透砂岩油藏、断块油藏、砾岩油藏、碳酸盐岩油藏、稠油油藏等,其中低渗透油藏储量占到总油藏储量70%左右,其开采价值越来越重要。但由于其开发手段没有取得突破性进展,所以其储量动用程度很低,只有储层条件相对较好、埋藏浅、天然裂缝发育的低渗透油藏才得到开发。

低渗透油藏的渗流特征表现为非线性,其渗流规律不再遵循经典的达西定律。但目前,对低渗透油藏的描述普遍采用带启动压力梯度的渗流规律,有时甚至直接用达西定律,这显然是一种近似的表述,不符合油藏的实际渗流规律。渗流模式(运动方程的数学表达形式)是油藏流动模拟理论的基础,对于低渗透油藏尤为重要。

本书基于幂律模式、动态渗透率效应模式、带启动压力梯度模式等三种渗流模式,建立了低渗透油藏的产能评价模型、垂直井单相流及多相流IPR模型、试井解释模型、多相流动数值模拟模型,并运用解析方法和隐式格式、隐压显饱等数值方法进行求解,得到了压力响应特征和产量响应,用矿场实例进行对比分析。该研究结果无论在理论上还是在实践上,对指导低渗透储层高效开发都具有积极的指导意义。

本书主要内容取材于笔者的博士论文和硕士论文。感谢我的博士导师姚军教授、硕士导师胥元刚教授长期以来的指导,也十分感谢他们对本书成稿的支持。

本书在成稿过程中,得到了西安石油大学石油工程学院陈军斌院长等领导、专家、教授的大力支持,在此谨向他们表示衷心的感谢!

本书的出版得到陕西省教育厅自然科学专项(12JK0792)、西安石油大学优秀学术著作出版基金、西安石油大学科技创新基金研究项目的共同资助。

由于笔者水平有限,书中不妥之处,敬请各位专家、同行和广大读者提出宝贵意见。

刘 顺

2013年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究内容及关键技术	13
1.4 主要结论	14
第 2 章 低渗透油藏非线性渗流模式	16
2.1 单相渗流特征	17
2.2 幂律渗流模式	18
2.3 动态渗透率效应模式	19
2.4 低渗透油藏非线性渗流原因分析	20
2.5 小结	25
第 3 章 低渗透油藏非线性渗流产能数学模型	27
3.1 幂律模式的低渗透油藏产能	27
3.2 动态渗透率效应模式的低渗透油藏产能	29
3.3 带启动压力梯度的非达西渗流产能	30
3.4 参数敏感性分析	31
3.5 实例分析	33
3.6 小结	34
第 4 章 低渗透油藏垂直井流入动态分析	35
4.1 单相流动的流入动态	35
4.2 油、气两相流动的流入动态	37
4.3 非完善井的流入动态	40
4.4 油、气、水三相流动的流入动态	42
4.5 低渗透油藏垂直井未来流入动态曲线的预测	43
4.6 实例及分析	47
4.7 小结	52
第 5 章 低渗透油藏水平井流入动态分析	53
5.1 中高渗透油藏水平井的流入动态	53
5.2 低渗透油藏水平油井的流入动态	56
5.3 启动压力梯度对水平井渗流影响的理论分析	61
5.4 小结	62

第 6 章 低渗透油藏非线性渗流试井解释模型 63

6.1 幂律模式的弱可压缩流体不稳定渗流..... 63

6.2 动态渗透率效应模式试井解释模型..... 68

6.3 带启动压力梯度模式试井解释模型..... 71

6.4 数值试井模型论证..... 73

6.5 参数敏感性分析..... 75

6.6 应用实例..... 79

6.7 小结..... 81

第 7 章 低渗透油藏非线性渗流数值模拟 82

7.1 幂律模式的低渗透油藏数值模型..... 82

7.2 动态渗透率效应模式的低渗透油藏数值模型..... 92

7.3 带启动压力梯度的低渗透油藏数值模型..... 99

7.4 计算流程与稳定性分析 100

7.5 现场应用 103

7.6 小结 112

参考文献 114

第1章 绪 论

1.1 研究目的及意义

低渗透油田在我国油田开发中越来越重要。“九五”期间低渗透油藏储量占总油藏储量65.7%，“十五”前四年低渗透油藏储量比例高达69.5%，至2005年底，已探明石油地质储量的85%属于低渗透储量。截止到2008年底，全国累计探明低渗透石油地质储量 $141 \times 10^8 \text{ t}$ ；低渗透天然气储量 $4.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，可采储量 $2.37 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，分别占全国油气储量的49.2%和63.6%。低渗透油气产量比例，在我国油气产量构成中，地位越来越重要。2008年，全国低渗透原油产量为 $0.71 \times 10^8 \text{ t}$ ，占总产量的37.6%；低渗透天然气产量达 $320 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占总产量的42.1%。

低渗透油藏由于储层物性差、岩性变化大、孔隙结构复杂、非均质严重、天然能量弱，因而在开发过程中表现出与一般中高渗透油藏不同的开采特征：自然产能低，通常需要采取储层改造措施；天然能量不足，地层压力下降快，产量递减大；低渗透油藏见水后采油指数大幅度下降，稳产难度大；低含水期含水上升慢，中低含水期是可采储量的主要开采期；注水井吸水能力低，启动压力和注水压力高。

大量的室内实验和矿场开发表明，低渗透油藏与中高渗透油藏最显著的差异是低渗透油藏孔喉尺度细小。由于低渗透油藏流道尺寸的细小，导致了奇特的渗流现象与规律，最基本的特点是：低渗透油藏渗流是非线性的，即其渗流曲线偏离经典的达西定律曲线。因此，非常有必要进一步研究低渗透油藏的储层结构、渗流机理，制定合理的开采方式，最终达到提高低渗透油藏采收率这一目的。

以往，对低渗透油藏的认识限于储层成因、储层岩性和物性特征，以及开发特征，这使得研究所得的渗流理论实际上仍停留在宏观尺度上。同时，在开发低渗透油藏时，普遍采用带启动压力梯度的渗流规律，有时甚至直接用达西渗流规律，这显然是一种近似的表述，不符合油藏的实际渗流规律。

本书在低渗透油藏幂律模式和动态渗透率效应模式的基础上，提出一套新的能够反映实际渗流模式的低渗透油藏开发方法，为更好和更准确地开发低渗透油藏提供理论基础和技术支持。

目前，对低渗透油藏的微观描述和表达正处于初步的研究阶段，其理论基础还不完善，用实际的、更精确的渗流方法描述低渗透油藏具有广泛的应用前景。研究低渗透油藏成因、渗流等问题是一项具有重要理论意义和实用价值的工作。对应用其技术来进一步认识油藏、评价油藏，利用动态监测资料指导生产具有很强的现实意义。

本书从研究低渗透油藏的幂律非线性渗流和动态渗透率效应渗流模式入手，建立符合低渗透油藏的产能模型、试井解释模型和多相渗流数值模型，编写相应的计算程序和软件并对各渗流模式进行实例应用和分析对比。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 低渗透油藏实验研究现状

国内对低渗油藏渗流进行了大量的实验研究,得到了低渗透地层存在低速非线性渗流规律,并且对这种现象的机理进行了探索。

国内比较公认和最早的是阎庆来^[1]等人对不同流体和不同渗透率的低渗透介质所做的实验,证实了存在启动压力梯度。

1998年,邓英尔^[2]通过在毛细管模型与单分子层作用模型基础上所做的岩心流动实验,得到液体渗流为非达西类型,渗流曲线特征为凹形曲线至直线,存在(拟)启动压力梯度;非达西特征取决于多孔介质的渗透率和流体性质。在低渗透多孔介质中,固-液界面分子力为渗流具有非达西特征的主要原因;而在较高渗透率多孔介质中,它对渗流的影响可以忽略。孙黎娟^[3]利用室内实验,表明油藏启动压力梯度与其液体的流度为双曲反比例关系,二者的乘积为一常数,该常数仅与油层及通过的液体有关。

1999年,吴景春^[4]模拟渗透率 $0\sim 50\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 范围内的低渗透、特低渗透油藏岩心进行了室内渗流实验,建立起三类流体非线性渗流时的流动方程,得到低速非线性渗流是客观存在的,渗流曲线呈现非线性关系,渗流方程由非线性和线性组合而成。

2000年,姚约东^[5]经过大量的室内实验研究,发现石油渗流除了通常的线性达西流和高速紊流外,还有亚高速、低速及超低速三种新的运动形态,并且在无因次关系曲线上找到这五种流态相互转化的临界值。同年,姚约东^[6]运用无因次分析法对岩心渗流实验数据进行了分析和研究,按雷诺数大小分为三段,即超低速区、低速区及达西流区,并给出了各段的数学表达式。陈永敏^[7]、张新红^[8]、周涌沂^[9]进一步论证了存在渗流启动压力和低速渗流时出现非线性的低速非达西渗流规律。

2001年,吴凡^[10]利用天然岩心研究了不同压差条件下的气体流量和渗透率变化规律。研究表明,气体的滑脱效应是有条件的,在更低速条件下,气体的渗流具有启动压力现象,并建立了室内统计规律,即启动压力梯度与岩心的渗透率成反比。

2001年,薛芸^[11]提出了非达西现象的另一种观点:根据近代表面与胶体化学原理,液体在储层中的低速非达西流动不应归咎于流体边界层性质异常,而应归咎于岩石中胶体颗粒进入孔隙流体引起的塑性流动;气体在含水岩样中的低速非达西流动不应归咎于水膜,而应归咎于气体相渗透率滞后现象导致的水在岩样中的重新分布。

2002年,吕成远^[12]采用毛细管平衡法与传统的压差-流量法相结合,保证了非达西渗流曲线的完整性,并回归得到了经验公式。同时根据毛细管平衡法测定的最小驱替压力梯度和切线斜率法确定的非线性渗流段最大驱替压力梯度绘制了流态判定应用图版。

2004年,杨琼^[13]设计了一种非稳态渗流中测量压力的实验方法,建立了考虑启动压力梯度影响的一维低渗透岩心中液体不稳定渗流的数学模型。实验结果表明,启动压力梯度与岩心的气测渗透率之间并不存在负相关的关系;同一块岩心在初始稳定渗流速度大的情况下,岩心的启动压力梯度小。苏法卿^[14]测定了不同渗透率级别的砂岩样品油-水两相最小启动压力梯度。李忠兴^[15]绘制了启动压力梯度与渗透率关系的双对数坐标理论图版。张光明^[16]研究了压力、温度对低渗透油藏渗流特性的影响和加表面活性剂改善两相渗流的效果。

2005 年,李中铎^[17]建立了描述低渗透多孔介质非线性渗流的运动方程,给出了出现非线性的临界条件,从边界层角度对低速非达西渗流的产生进行了理论分析,认为边界层的厚度随着压力梯度的增加而减少,当压力梯度增大到一定值后,不动层为固化层,进入线性非达西流阶段。王炯^[18]在考虑启动压力的情况下,采用稳定流方法研究低渗透储层低含水期流体的渗流特征。

2006 年,邓玉珍^[19]认为低渗透储层的孔隙变尺度和微尺度效应使得其中流体流动更加复杂化,对胜利油田 26 块低渗透岩心进行室内渗流实验结果表明,在油单相渗流过程中,随着流度增大,启动压力梯度逐渐减小,当驱替流体流度增大到一定值后变化平稳,油层流度对启动压力梯度的大小影响非常显著;不同初始含水饱和度的两相最小启动压力梯度与流度均呈幂指数关系;随着含水饱和度的增加,启动压力梯度逐渐减小。通过对油水混合流体黏度进行饱和度加权,建立了统一的启动压力梯度实验模型,该模型适用于单相和油—水两相流渗流。

2006 年,王尤富^[20]研究了地层油通过岩石渗流启动压力梯度的影响。罗瑞兰^[21]认为,低渗透油气储层具有较强的渗透率应力敏感性。低渗透储层的应力敏感性一方面与受力后发生介质变形有关,另一方面与微观渗流尺度下储层中流体渗流存在启动压力梯度密切相关。闫梅^[22]对注水矛盾突出的严重非均质油藏进行了研究。

国外对低渗透油藏的实验研究比较少。

1991 年,Mei^[23]和 1997 年的 Amaral^[24]都得到了非线性流的三次方表达式,这种非线性式是通过在二维多孔介质中用数值模拟方法和归一化方法得到;1997 年,Firdaous^[25]等人用实验证实了这种三次方的正确。

2006 年,Edgar^[26]做了裂缝砂岩的气—水两相和水驱油的实验,实验时孔隙度和饱和度通过 CT 扫描得到,并且得到了三维饱和度分布图片。通过改变裂缝宽度分析了饱和度和相对渗透率的变化。毛细管力的影响在窄的裂缝中较大,并且得到了宽裂缝的油的指进。

引起非达西渗流的原因可以归结为:孔隙尺寸、孔隙喉道几何结构;固—液两相的表面作用;表面活性组分在岩石孔道表面的吸附作用;岩石格架变形;流变学性质。

1.2.2 低渗透油藏渗流规律研究现状

国内对渗流规律的研究经历了分段函数模型、连续函数模型和变渗透率模型,同时研究了辨别各渗流阶段的临界点及其流动状态特性。

1986 年,冯文光^[27]在前人研究的基础上做出全部渗流过程曲线,按沿程阻力的变化规律分为符合 Требин - Irmay 定律的薄层流、薄层流—层流过渡区、符合 Darcy 定律的层流区、符合 Forchheimer 定律的层流—紊流过渡区和紊流区五段,低速非达西渗流符合 Требин - Irmay 定律的薄层流。

1997 年,黄延章^[28,29]通过物理模型实验总结出低渗透油层渗流的基本特征:当压力梯度在比较低的范围时,渗流速度的增加呈“下凹形”非达西曲线;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称为平均启动压力梯度;渗流特征与渗透率及液体性质有关,渗透率越低或原油黏度越大,“下凹形”非达西曲线段延伸越大,启动压力梯度越大。

1998 年,阮敏^[30]以临界点作为低渗透非达西渗流由非线性渗流区向拟线性渗流区转变的标志,它界定了两种不同的渗流规律。它的确定对于准确描述低渗透非达西渗流具有重要意义。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,克服了早期利用图板

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。

1999年,阮敏,何秋轩^[31]根据低渗透非线性渗流规律的曲线特征,建立了分段函数模型。

2000年,肖鲁川^[32]等研究了特低渗透储层产生非达西渗流现象与相应的孔隙中存在边界层流体之间的关系,先将单相渗流实验后的岩心经洗油处理后用压汞法测定其毛管压力曲线,再对毛管压力曲线数据进行线性回归,最后给出了特低渗透储层有效边界层厚度的经验公式。宋付权和刘慈群^[33]以质量守恒定律为基础,推导出了用平衡法测量启动压力梯度的公式。若已知油藏参数(h, ϕ, C_i)时,采用一次开井生产一段时间后,关井测稳态井底压力或岩心端面压力的方法,可以计算出岩心或油藏的启动压力梯度;若未知油藏参数(h, ϕ, C_i)时,采用两次开井生产,两次关井测稳态井底压力或岩心生产端压力方法,可以计算出岩心和油藏的启动压力梯度。

2001年,巢华庆^[34]等对大量岩心实验数据进行研究和分析,将无因次阻力系数与无因次雷诺系数的关系曲线分为五段,其中低速非达西流动是斜率为 $-3/5$ 的直线,用指数形式得到了各种渗流运动形态的统一模式。

2001年,邓英尔^[35]提出了低渗透非线性渗流规律的连续函数模型,为使低渗透非线性渗流的研究从定性分析到定量分析奠定了基础。基于此模型建立了低渗透非线性定常和非定常渗流数学模型,导出了非线性定常渗流压力分布和产量公式,运用影响半径的概念和平均质量守恒方法导出了非线性非定常渗流压力分布和影响半径公式。姚约东^[36]用无因次分析法对低渗透岩心的渗流实验数据进行分析,得出低渗透油层渗流规律为:低于亚临界雷诺数时为非线性流,高于亚临界雷诺数时为线性流。应用边界层理论,从微观角度进一步研究这一特殊渗流现象,结果与渗流实验完全一致。

2002年,刘曰武^[37]概述和评价了确定启动压力梯度的三种方法:室内模拟实验法、数值实验方法和解释法,重点介绍了低渗透油藏试井分析确定启动压力梯度的方法和实际应用意义。

2003年,刘建军^[38]等通过室内实验,验证了低渗透多孔介质中渗流时的非线性达西特征,分析了出现非线性达西特征的原因,给出了计算拟启动压力梯度的拟达西公式。姚约东^[39]从物理和力学角度对超低速和低速两种运动形态进行了分析。在超低速渗流模式下,启动压力梯度正比于黏度的二次方,反比于流体密度和多孔介质特征尺度的三次方;低速渗流模式下,多孔介质允许流体通过的能力正比于压力梯度的平方。

2004年,智天翼^[40,41]从低渗透介质渗透率与压力梯度的关系出发建立数值模型,并对已有数值模拟器的渗透率项进行功能扩展,表明启动压力梯度越大,相同时间内的累积采油量、累积注水量越小,反之越大,启动压力梯度越大,渗流规律越偏离达西定律。

2005年,齐银^[42]对长庆油田超低渗透储层岩心的单相油渗流进行了研究,提出了一种新的低速非线性渗流的数学表达方式,相关系数大于0.99。从该方程得到的启动压力梯度值与相关文献同类岩心的启动压力梯度值接近,弥补了非线性渗流规律的一般性数学表达方式的不足。

2006年,王志伟^[43]探讨了低渗透储层非达西渗流机理及低渗透非达西渗流特征所引起的视渗透率变化。结合储层渗流特征和工程等因素研究了注水开发低渗透油藏所引起的视渗透率变化,并给出了改善低渗透储层开发效果的途径。

1.2.3 低渗透油藏试井解释现状

1. 试井技术发展概要

20 世纪 50 年代:MDH 法、Horner 法和 MBH 法^[44-46]。

20 世纪 60 年代:变产量叠加、复杂边界半对数直线段分析、常规分析方法^[47,48]。

20 世纪 70 年代:Ramey 图版,McKinley 图版,Earlougher 图版,Gringarten 图版等^[49-54]典型曲线法诞生。

20 世纪 80 年代:Bourdet 等压力导数图版、试井模型诊断技术、非牛顿流体试井等^[55-57]技术出现。

20 世纪 90 年代:试井自动拟合与智能分析技术^[58,59]。

目前:数值试井技术^[60-63]。

以上试井技术的发展主要是针对均质地层、双重孔隙介质或三重介质地层,其理论基础都是基于达西定律。

2. 低渗透油藏试井技术发展

对于低渗透油藏,由于地层的非线性渗流和介质变形等诸多因素,导致实测的压降或压力恢复曲线与目前的典型曲线无法拟合,主要特征为压力导数曲线一直上翘而见不到径向流直线段的出现。

1985 年,冯文光和葛家理^[64,65]建立了单一介质、双重孔隙介质非定常非达西低速渗流的数学模型,并用拉氏变换求出了单一介质、双重孔隙介质非定常非达西低速渗流有界地层的解。

1996 年,程时清等^[66-68]人采用有限差分方法获得低渗透油层非达西低速渗流有效井径数学模型和段塞流试井模型的数值解,绘制了无限大地层、有限封闭地层、有限定压地层等三种外边界条件的典型曲线。同登科与葛家理^[69-71]利用分形几何理论结合渗流力学建立了分形油藏非达西低速渗流的数学模型,引入了裂缝分形维数和分形指数,用拉氏变换求出了分形油藏非达西低速渗流模型无穷大地层的解及其长时渐进解。

1997 年,李凡华^[72,73]提出了具有启动压力梯度的非达西渗流的试井分析模型,得到了无限大和有界油藏的典型曲线。程时清^[74]等人在考虑了井筒存储和表皮效应的前提下,建立了双重介质油气藏低速非达西渗流有效井径试井的数学模型,采用数值反演绘制了无限大地层条件下的典型曲线。

1998 年,李治平^[75]根据最优化理论,提出了矿场试井曲线计算机自动拟合的方法,解决了计算机自动分析试井曲线的问题。宋付权^[76]基于变形介质的变化规律,建立了考虑了井筒存储效应和表皮效应的非线性基本渗流微分方程,分析了渗透率变异系数对压力反应的影响,并绘制了图版。

1999 年,宋付权^[77]考虑了低渗透油藏启动压力梯度的影响,对水驱两相渗流进行了分析,得到了线性水驱、径向水驱、垂直裂缝井及水平井两相渗流的解析公式。

2000 年,贾永禄^[78]基于低渗透油藏一般采取环化压裂以提高近井区渗透率的实际情况,建立了近井区为双孔介质达西渗流、远井区为存在启动压力梯度的低速非达西渗流的特殊复合模型,通过模型求解制作了考虑井筒储存和外边界情况的样板曲线。同年,贾永禄^[79]在引入拟体积系数、拟真实启动压力梯度的概念后,实现了气井、油井低速非达西流中试井分析方程的统一。谭雷军^[80]通过稳定流数学模型,用稳定试井确定了均质油藏的真实启动压力

梯度。

2001年,同登科^[81]研究了应力敏感地层中分形介质渗流问题的压力不稳定响应,建立了应力敏感地层分形介质的数学模型,采用 Douglas - Jones 预估—校正法获得了无限大地层有限半径井定产量生产时的数值解,给出了典型压力曲线图版。聂立新^[82]认为低渗透油藏的流体渗流具有启动压力梯度,流动边界不断扩大,建立了近似实际渗流,又不需考虑动边界的试井解释模型。周蓉^[83]利用网格自动划分技术,通过有限元计算解决了均质圆形定压油藏任意井位条件下的不稳定渗流问题,计算出井在油藏任意位置时的井底压力随时间变化的理论曲线。宋付权^[84]建立了三参数渗流模型,并对低渗透油藏中径向稳定渗流和不稳定渗流进行了分析。

2002年,程时清^[85]研究了低渗透油藏低速非达西径向渗流动边界问题,给出了积分解,发现启动压力梯度越大,井底附近压力下降越快。向开理^[86]结合分形理论和渗流理论,建立了非牛顿幂律流体低速非达西渗流的组合数学模型,模型由内区为非牛顿幂律流体低速非达西渗流、外区为非牛顿幂律流体达西渗流的同心圆组成,求出了考虑井筒储存、表皮效应及外边界影响的井底压力的拉氏空间解。

2003年,袁英同^[87]针对流体流动边界不断向外扩展是低速非达西渗流压力波传播的特点,建立了考虑井筒储存和表皮效应影响的低速非达西渗流定产量生产的固定边界数学模型,用格林函数法求出井底压力的拉普拉斯空间解。廖新维^[88]建立了基于混合 PEBI 网格的三维两相流数值试井模型。刘建军^[89]将遗传算法引入到油藏多相流体渗流的数值解法中,用以解决油藏数学模型的识别问题。刘启国^[90]建立了考虑表皮效应影响的低速非达西渗流定井底流压生产的固定边界数学模型,用格林函数法求出了流量和累积流量的拉普拉斯空间解。姚约东^[91]建立了考虑井筒储存效应、内区为达西流、外区为非达西流的不稳定复合油藏模型。在无限大地层中,其压力导数曲线再也不是 0.5 的水平线,而是一族平行的倾斜线;对于封闭地层,压力导数曲线的斜率比无穷大地层曲线的斜率大得多;对于恒压边界时,压力趋于稳定的时刻与达西流相比要晚一些。

2004年,郭永存^[92]给出了无量纲化的低渗透模型,使用差分方法进行数值模拟,并给出了一种计算动边界位置的方法。张冬丽^[93]将遗传算法用于试井解释,正问题采用数值方法求解,并对整段压力曲线进行拟合,能避免局部极小问题和提高计算速度。

2005年,曾清红^[94]针对两种典型的涉及启动压力梯度的渗流问题,给出了无量纲化的渗流控制方程、初始条件和边界条件,使用无网格方法进行数值模拟。计算结果使用 Gringarten - Bourdet 图版进行井底压力分析,也给出了计算动边界位置的方法。成绥民^[95]针对低速渗流,推导出存在启动压力梯度的非线性渗流试井分析模型,给出拉氏空间解和典型曲线理论图版。霍进^[96]建立了达西渗流和低速非达西渗流数学模型,得到拉氏空间的解析解,并绘制了新的样板曲线。参数敏感性分析表明,低渗透非达西流的启动压力梯度、层间储容比、地层系数比的变化对样板曲线变化的影响比较大,样板曲线的晚期段会出现曲线上翘,这是与达西渗流情况最明显的差别。

2005年,吕秀凤^[97,98]建立了单相流体在不稳定渗流条件下的有限元方程,考虑了井筒储存效应和表皮效应的影响。王德山^[99]利用分形理论解释了自动拟合导数法产生多解或无解的原因。针对这种情况,他提出了一种利用均匀实验设计表计算多组全局最优解的有效算法。戴卫华^[100]把遗传算法应用于三重介质试井解释自动拟合中,效果很好。

2006年,郝斐^[101]根据物质平衡原理,利用牛顿迭代方法计算得到动边界在不同时刻的运

动规律,作为比较和验证,利用近似解法和解析解法研究了定产生时的储层压力分布特征和井底压力变化规律。

国外对非达西渗流试井研究的比较少,主要基于高速非达西渗流。

1998年,Nashawi^[102]在Meunier等人提出的气井非达西流公式的基础上,给出了分析压升试井数据的方法,这种方法能估算油藏渗透率和产量,同时给出了确定无限关井时间的油藏压力的图形方法。现场和模拟测试显示该方法是正确的。

2000年,Penuela^[103]对于非达西流,通过控制黏度和毛细管压力分析了阻力和拖拽力的相对影响。给出了通用的估算阻力方程式,并在此基础上,进行了建模。研究结果表明,当压力降低程度并不能产生合适的流体饱和度,即低于40%时,在井眼附近的拖拽力可以忽略,而当高冷凝饱和度时(大于50%),拖拽力将减少流体饱和度,提高气体产量,并给出了试井解释方法。

2006年,Nashawi^[104]给出了一种新的可以精确地测定井底压力的水力压裂气井的裂缝传导率和直接手段计算井眼周围裂缝的紊流大小,第一次给出了有非达西流影响的半解析方程式,并对各种参数的影响进行了分析。

Yildiz^[105]认为非达西流是影响油田产量的一个重要因素,给出了瞬时非达西流解析模型。该模型解显示半对数直线斜率不受非达西流的影响,当气体性质随压力变化后,气体非达西流动的半对数直线斜率才变化,同时给出了带表皮系数的显式方程。

Zeng^[106]给出了半解析模型,研究了无限均质油藏垂直井的非达西流影响。通过Forchheimer方程及定义非达西流系数来描述非达西渗流,用半解析模型获得了典型压升和压降曲线。当考虑非达西流时,压降导数曲线上隆更宽,而压升导数曲线上隆更陡。与Spivey非达西试井方法共同应用于现场实例,表明本文方法能更好地拟合实际数据,从而得到了更可靠的结果。

1.2.4 低渗透油藏产能分析现状

1996年,宋洪才^[107]用变分有限元方法对描述地下流体渗流的偏微分方程进行了分析,论述了能量泛函数极值的问题。

2002年,傅春华^[108]从变形介质渗流理论研究入手,建立了变形介质带启动压力梯度的非线性渗流的数学模型,得到了油井的产油量和压力计算公式,并对弹性介质达西渗流、变形介质达西渗流、弹性介质非达西渗流和变形介质非线性渗流条件下,油井产油量进行了对比分析。研究表明,在相同生产压差下,变形介质非线性渗流条件下油井产油量最低。

2002年,宋付权^[109]考虑启动压力梯度和介质变形的影响,油井的产量随启动压力梯度和介质变形系数的增大而减小,随生产压差的增大而增大,对于采油指数,则存在一个最佳压差,此时采油指数最大。

2002年,史成恩^[110]根据把井网优化按照裂缝发育的程度不同应用于长庆油区特低渗透油田的开发实践,取得了明显效果。朱维耀^[111]在稠油油藏非牛顿流体多孔介质中建立了具有启动压力梯度非牛顿流体的水平井、垂直井产能公式,分析了各种流体特征对产能影响。这些公式可较好地用于稠油油藏的开发设计评价中。

2003年,郑祥克^[112]推导出含启动压力梯度流动下的产能方程,为解析IPR曲线方法在低渗透、特低渗透油藏中的应用提供了依据。同时,对影响流入动态的主要因素进行了敏感性分析,表明在含启动压力渗流的流入动态关系式的影响因素及其作用规律与达西流有明显的差

异,论证了目前低渗透油田普遍采用大压差、密井网生产的理论基础。

2004年,杨满平^[113]把变形介质渗透率与压力的指数关系式代入低渗透单相流方程,得出采油指数和生产压差的关系。结果表明,岩石渗透率变异系数值越大,合理生产压差就越低。

2005年,王卫红^[114]推导出具有启动压力梯度的低渗透气藏气井稳定产能方程和不稳定产能方程,并提出低渗透气藏等时试井资料优化分析新方法,应用该方法不仅可以快速确定气井产能方程,评价气井产能,同时还能求出气藏的启动压力梯度、渗透率、表皮系数等物性参数。周涌沂^[115]基于渗流力学理论推导了一种新的岩石方向渗透率计算模型。

2006年,陈明强^[116]研究了变形介质带启动压力梯度低渗透油藏稳定渗流,认为低渗透油藏油井渗流场的真实压力分布具有分区域特征;在具有变形介质特征的低渗透油藏中,油井的产能随启动压力梯度和介质变形系数增大而降低,随增产激活半径和激活系数的增大而增加,随生产压差的增大而增加;同时油井产能指数随生产压差增大呈非单调增长曲线,因此对于低渗透油井生产而言,存在合理生产压差与最小生产压差。贾振岐^[117]得到了低渗透储层启动压力梯度与渗透率的幂函数关系式,确定了极限技术井距的公式,同时,渗透率越小,启动压力梯度越大。同年,贾振岐^[118]发现非线性渗流的油井指示线不是直线,而是曲线,并且在全程的渗流过程中压力消耗都很大。

2007年,寇根^[119]基于低渗透非达西和变形介质渗流理论及对流函数形态的分析,推导了低渗透线性变形油藏饱和及未饱和状态下的无因次流入动态通式。结果表明,低渗透油藏中启动压力梯度、污染程度、供给半径和平均地层压力对无因次流入动态都有较显著的影响,同时应力变化可显著改变敏感性分析结果。

总之,对低渗透产能的研究,目前主要是基于启动压力梯度(+介质变形)时的产能方程,用于指导油田调整。

1.2.5 IPR 研究现状

1. 国内 IPR 发展概况

国内对 IPR 的研究起步较晚。1986年,陈元千^[120]推导了无因次的 IPR 方程。同年,贾振岐^[121]以严格的数学方法对 Vogel 流动方程进行了推导,并给出 Vogel 方程各系数的数学表达形式。1984年,贾振岐^[122]对已有的国内外的油井 IPR 预测方法进行了总结,并给出各种开采条件下 IPR 预测方法。1999年曾亚勤等^[123]结合安塞油藏的具体实际,研究了低渗透油藏的 IPR 预测方法。1991年,周广厚^[124]针对大庆油田的地质特点和开发方式通过试验对 IPR 曲线进行了修正,使其更适合大庆油田开发的需要。1995年,黄炳光等^[125]将 IPR 曲线理论应用于水平井开采的动态分析中,给出了具体的计算方法和步骤。1997年,时烱等^[126]以不稳定渗流力学为基础,研究了单相流及具有溶解气影响的不稳定 IPR 曲线的计算方法,并给出了不稳定 IPR 曲线及定流压条件下的油井产量与生产时间的关系,并求出了相同生产时间下产量与流压的关系。1999年宋付权^[127]研究了启动压力梯度影响下的 IPR 预测方法,对开发低渗透油藏具有重要意义。2002年,郑祥克和陶永建^[128]在 Wiggins 针对达西流研究的基础上,推导出低速非达西渗流的产能方程,为 IPR 曲线法在低渗透、特低渗透油藏中的应用提供了依据。同年,史云清等^[129]针对低渗透油田普遍生产压差大、气油比高的特点,提出了多相流油井气相流入动态关系式的解析方法,并求取了相应的油、气、水相的流入动态关系式。

关于水平井油、水两相渗流理论研究方面,程林松^[130]利用有限元方法研究了水平井的

油、水两相渗流问题,获得了水平井见水时间及饱和度的分布曲线。刘慈群^[131]利用解析方法推导出水平井油、水两相渗流时的见水时间和二维饱和度分布公式。郭大立^[132,133]研究了边水和底水驱裂缝性油藏中水平井油、水两相渗流问题,利用特征线方法求解,获得了含水饱和度分布及见水时间公式。2000年,刘想平等^[134]用黑油模拟器对若干典型溶解气驱油藏进行了三维模拟计算,研究了水平井向一井流动态关系,从而得到了多点水平井非达西 IPR 方程。李远钦^[135]在获得水平井三维不稳定渗流数学模型解后,得到形式复杂,与别的产能方程完全不相似的产能方程,对水平井段上的产量分布进行了探讨。结果表明,水平井产量在井段上是非均匀分布的,因此,假设产量在井段上的均匀分布是不合理的,其产量分布受油藏边界、油层厚度、导压系数的影响,只有在拟稳定流动情况下,当油层较厚时,水平井段上的产量分布才是均匀的。

2. 国外 IPR 发展概况

国外学者在 20 世纪 80 年代曾经研究过低渗透介质渗流问题,给出了渗透率随压力梯度的变化,并得牛顿液体在低渗透介质中渗流遵循非线性渗流规律的结论,但并未给出低渗透介质渗流曲线和相应的运动方程。最早提出启动压力梯度概念的是前苏联的 B. A. 弗洛林,他提出水在致密泥岩和硬黏土中的渗流存在启动压力梯度。1989 年 W. Charles 对低渗透油藏特征进行了综述评价。

关于低渗透介质中的非达西流, Von Engelhardt 和 Tunn, Hansbo, Miller 和 Low, Mitchell 和 Younger, Wang 和 Thauvin, 都曾发现低渗透介质中的非达西现象,但目前还存在争议。

在 IPR 曲线的研究方面,国外不但早,而且该工作发展很成熟。1942 年, Evinger 和 Muskat^[136]通过对渗流方程研究指出,当在油藏中存在两相渗流时产量与压力将不会像期望的那样存在直线关系,而是一种曲线关系。1968 年, Vogel^[137]选用 21 个油田的实例数据(油藏岩石和流体性质有较大的变化范围)进行数值模拟得到一系列 IPR 关系数据,对这些数据进行无量纲化后,经回归得到了 Vogel 方程的 IPR 曲线。Vogel 最初的工作是假定流动效率为 1.0 做出的,对于受污染井和改善井并没有做出解释,1971 年 Standing^[138]在研究污染井和改善井的流入特征后,定义了流动效率,推广了 Vogel 的工作。1973 年, Fetkovich^[139]曾经建议用油井等时试井数据来评价其生产能力,他在气井产能经验方程基础上,根据对 6 个油田、40 口不同的油井生产数据分析结果,提出了 Fetkovich 方程的 IPR 关系式。1976 年, Yousaf^[140]使用两个假设油藏,做了估计和预测油井动态的 IPR 方法的对比,他的主要目的是对比 Vogel、Fetkovich、Standing 方法计算的 IPR 曲线,结果表明,用 Fetkovich 方法计算的 IPR,在给定的压力下的产量比用 Vogel 方法得到的产量高,估算的这个差值为 15%~30%。1976 年, Jones、Blount 和 Glaze^[141]通过研究用多流量短时测试预测油井流入动态,考虑到非达西流量的影响,根据 Forchheimer 方程得到一种二项式 IPR 方程。1981 年 Nind^[142]研究了含有不同渗透率的地层的 IPR 区域,研究中引用了三个渗透率依次为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 假设油井在不通产量下进行试验,建立了 IPR 曲线。1982 年, Couto^[143]基于 Vogel 和 standing 的研究,导出了在任何形状和任何枯竭程度下完善流动效果的原型泄油区域的一般 IPR 计算式。文献^[144]依据所采集的 19500 个数据点,求得两种类型的 IPR 曲线方程,在推导的过程中,考虑了地层伤害的影响。1992 年, Wiggins^[145]对油、气两相渗流拟稳态解式进行 Talor 展开,解析得到了 IPR 方程一般形式。1995 年, 布朗^[146]试着考虑当井底流压变化时由于表皮变化(受产量变化影响)而引起的流动效率的变化而得到一种 IPR 曲线方程。

对于水平井,1989年 Bendakhlia^[147]得到了多点水平井 IPR 方程。1998年 Retnanto - Economidies 得到了单点水平井 IPR 方程。1968年 Cheng^[148]得到了多点斜井 IPR 方程。Plahn^[149]通过 48 个油藏的数值模拟,研究了各向异性溶解气驱油藏中水平井的生产动态,建立起水平井无因次产量随无因次时间变化的标准曲线,用以预测各向同性油藏水平井在定压生产情况下的原油产量。

1.2.6 低渗透油藏数值模拟现状

1. 数值模拟发展概况

20 世纪 60 年代:用计算机解决油田开发上的一些较为简单的问题。

20 世纪 70 年代:在理论上黑油模型计算方法更趋成熟,D. W. Peaceman 的《油藏数值模拟基础》以及 K. Aziz 和 A. Settari 的《油藏模拟》等主要著作出版,但使用的方法一般仅限于 IMPES 及半隐式等,只能解决中小型油藏的模拟应用问题。

20 世纪 80 年代:解决不同类型油藏的数模计算方法及软件相应问世。

20 世纪 90 年代:油藏模拟软件向一体化方面发展,即向集地震、测井、油藏工程(数模)、工艺及地面集输、经济评价等为一体的大型软件方面发展。

目前:黑油模型、裂缝模型、组分模型、热采模型、化学驱模型广泛应用^[150,151]。

以上数值模拟技术的发展其理论基础也是基于达西定律。

2. 数值模拟技术发展

对低渗透油藏建立了非均质、各种渗流边界、介质变形等复杂模型,采用了差分、有限元、拟函数技术等各种方法进行了求解。

1998 年,程时清^[152]建立了油、水两相低速非达西渗流数学模型,用非达西渗流和达西渗流数学模型同时模拟某低渗透油田“九点法”注水开发井组生产动态,非达西渗流模型模拟结果与该油田实际生产动态相吻合,而达西渗流模型模拟结果与该油田实际生产动态相差很大。

1999 年,宋付权^[153]以质量守恒定律为基础,推导出了压力恢复稳态测压法求解启动压力梯度的公式,对 12 口井的计算结果分析,油藏的启动压力梯度与渗透率呈近似的双曲函数关系,即油藏的渗透率越小,启动压力梯度越大。冉启全^[154]基于流固耦合力学理论,建立了弹塑性变形油藏中多相渗流的数学模型,该模型考虑了渗流与变形的耦合作用,以及注采交变载荷作用下油藏多孔介质的弹塑性变形特征。

2000 年,刘月田^[155]把椭圆形边界油藏渗流问题看作中心带有点源的椭圆形区域的位势流动问题,它与两平行直线边界之间的源(汇)流动问题十分相似,通过相似流动替换方法,给出了椭圆形区域流动问题的解析解,并对该解在油藏工程中的应用进行了讨论。同年,刘月田^[156]利用坐标变换将各向异性渗透率圆形有界地层向一口中心井的稳定渗流问题转化为各向同性渗透率椭圆形地层向中心椭圆形井筒的流动问题。把椭圆区域流动问题划分为内、外两个区域的流动。内区域流动用保角变换方法求解,外区域流动利用相似流动替换方法求解。计算及分析证明,该解法的误差非常小。李传亮^[157]建立了双重各向异性介质的渗流数学模型,给出了它的数值模拟差分方法。

2001 年,陆熠^[158]归纳了数值模拟过程中存在的几种主要误差,提出了消除误差的办法,进一步完善了数值模拟工作体系。李淑霞^[159]对数值模拟效果的定量评价方法进行了探索,将区块综合相对误差、单井平均相对误差、瞬时相对误差和单井综合相对误差作为模拟效果评