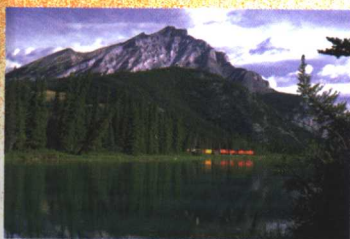


ZIYUAN HUANJING YU SHENLIU LIXUE

资源、环境与渗流力学

——第八届渗流力学学术讨论会论文集

程林松 单文文 黄世军 主编



 中国科学技术出版社

资源、环境与渗流力学

——第八届渗流力学学术讨论会论文集

程林松 单文文 黄世军 主编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

资源·环境与渗流力学:第八届渗流力学学术讨论会论文集/程林松主编. —北京:
中国科学技术出版社, 2005
ISBN 7-5046-4097-2

I. 资... II. ①程... III. 渗流力学-学术会议-文集
IV. 0357.3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 070892 号

中国科学技术出版社出版
北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081
电话:010-62103210 传真:010-62183872
[http://www.kjp books. com. cn](http://www.kjpbooks.com.cn)
科学普及出版社发行部发行
北京国防印刷厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:39.5 字数:960 千字
2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷
印数:1—200 册 定价:80.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

学术委员会

名誉主任 郭尚平 鲜学福
主任 单文文
副主任 葛家理 郎兆新 孔祥言 毛昶熙
委员 (按姓氏笔画排列)
丁留谦 马远乐 王恩志 毛昶熙 孔祥言 卢德唐
朱维耀 刘先贵 刘建军 刘慧卿 许友生 李希
郁伯铭 单文文 郎兆新 速宝玉 梁冰 崔桂香
葛家理 程林松

组织委员会

主任 程林松 单文文
委员 黄世军 罗瑞兰 薛永超 庞占喜 郭小哲 刘淑华
徐大明 王洪 刘先贵 朱维耀 尚根华 刘莉

责任编辑 肖叶 程安琦
封面设计 少华
责任校对 张林娜
责任印制 安利平
法律顾问 宋润君

序

渗流力学作为力学学科的一个分支,自 20 世纪以来取得了突飞猛进的发展。它为地下流体资源(如石油、天然气、煤层气、地热、地下水、地下卤水以及天然气水合物等)的开发,为防灾减灾(如环境污染、盐碱化、瓦斯突出和地面沉降等),为地下核废料贮存工程建筑以及其他相关工程、技术和科学领域的应用提供了重要的基础理论支持和技术应用方法。

进入 21 世纪,随着全球工业化程度的加速发展以及能源的日益衰竭,渗流力学工作者将面临更加严峻的挑战,同时也会有更多的机遇和更重的责任。能源危机、环境污染、淡水资源紧缺、地震和其他地质灾害、内陆局部地区干旱和荒漠化、沿海海水入侵和倒灌、疾病防治和农林业以及相关高新技术和生命科学发展都对渗流力学的发展和应用提出了更为复杂多样的问题。这些都要求相关研究人员和工程技术人员从发展的、全新的角度研究和应用渗流理论与应用方法。

为了交流近几年来我国多方面渗流研究的进展及其在各科学技术领域的应用,进一步推动、促进渗流力学理论的进一步发展,中国力学学会 2005 年第一届学术大会暨第八届全国渗流力学学术研讨会于 2005 年 8 月下旬在北京召开。本次会议就 21 世纪初国内渗流力学的科研成果进行交流和研讨,对今后的研究方向提出建议和展望,并为全国的渗流力学工作者提供一个广阔交流平台。

经过三轮的征文和不同行业领域专家的评审及筛选,本届会议共收录论文 114 篇,内容涉及渗流理论、研究方法、实验技术以及新的数值方法等。渗流在工农业生产中应用的较多,油气田开发、低渗透油藏和提高采收率问题等技术中的渗流也受到高度重视,水工渗流、煤层气渗流以及环境、化工和建筑等工程中的渗流的研究和应用获得了很大的发展,水资源的保护和开发、管涌和滑坡等灾害的防治、软地地基的分析等更是水工渗流关心的重点,煤层气开发的基础研究和煤层深部开采瓦斯突出的机理等问题也备受瞩目,水体污染防治和垃圾处理场的渗流分析、化学电池多孔介质中的气体扩散、固定床反应器中的流场模拟以及建筑工程中人造多孔介质渗流特性等的研究是渗流理论广泛应用于现代工程技术领域的具体范例。此外,热—流—固等多重过程的耦合研究也受到各方关注。本论文集涵盖内容丰富,学术气氛浓厚,呈现出一片学术争鸣、百花齐放的良好景象。

论文集的出版为我们提供了有关渗流理论和应用的一批重要文献资料,它将促进渗流力学工作者之间更广泛的学术交流,促进渗流学科的发展,促进渗流理论和方法在工程中更广泛和有效的应用,进一步推动我国渗流力学向更宽领域、更深层次发展,为我国全面建设小康社会作出贡献。

本次会议由中国力学学会、中国石油学会、中国地质学会、中国水力学学会等主办,由中国石油大学(北京)以及中国石油天然气集团公司和中国科学院合办的渗流流体力学研究所承办。在此我代表第八届全国渗流力学学术委员会和筹备委员会对各学会的支持和关心,对中国石油大学(北京)和渗流所表示诚挚的敬意和谢意!

本论文集承蒙中国科学技术出版社编辑出版,为保证出版质量,会议筹委会有关人员和出版社严格把关、细心审阅、认真校对、精心制作。在此,谨对编辑出版过程中付出辛勤劳动的有关人员表示衷心的感谢!

邵志平
2005年7月
26日

目 录

石油工程和油气层渗流

分形方法在多孔介质黏性指进中的应用	(1)
超低渗油藏渗流规律及其应用新探索	(5)
油田水系配制 LPS 深度调剖初探	(13)
温度、渗流对疏松砂岩井壁稳定影响规律研究	(20)
深层气藏储层变形特征及其机理研究	(25)
高温下岩石非达西渗流规律的探讨	(33)
油藏非线性渗流数值模拟系统研制	(37)
底水油藏直井开采产量计算新公式	(43)
考虑束缚水影响的变形介质气藏渗流机理研究	(46)
三重介质弹性渗流方程组的近似解	(50)
低渗透多孔介质中非线性渗流的流态与准数	(55)
油资源渗流运移聚集大规模精细并行数值模拟	(60)
泡沫复合驱中的多相流数学模型	(68)
砂岩岩心油水相对渗透率曲线分形特征的探讨	(73)
分形油藏试井分析解的相似结构	(79)
油藏低速非达西渗流的启动压力梯度的新解释法	(84)
黏弹性聚合物在不规则孔道中的驱油机理	(87)
高浓聚合物提高采收率方法研究	(93)
利用渗流方程数值解求解水平井开采问题	(100)
低渗透油藏垂直裂缝井地层压力分布曲线分析	(106)
凝析气井电磁加热方式对加热效果的影响研究	(110)
多孔介质中黏弹性聚合物溶液的渗流数学模型	(115)
注蒸汽热力采油过程中油层吸汽规律研究	(119)
氮气泡沫热力驱数值模拟研究	(124)
非均质油藏注水开发渗流数学模型研究	(130)
低渗气藏开发方式对比研究	(133)
虚拟实在及其在油藏综合分析的应用	(137)
鄂北上古生界气藏压裂工艺技术研究与应用	(143)
应用流线模型表征注采井间动态关系	(151)
聚合物增强泡沫驱油体系渗流特征及应用效果	(157)

压汞毛管压力曲线排驱压力计算方法的分析和研究·····	(161)
辽河油田欢 127 块火烧油层可行性研究·····	(167)
高非均质油藏高 104-5 区块剩余油分布数值模拟研究·····	(174)
高凝油藏储层冷伤害实验研究·····	(182)
致密砂岩气藏的时间尺度和空间尺度分析·····	(186)
稀油油藏蒸汽驱可行性研究·····	(193)
特低渗透油田活性水驱油油藏数值模拟研究·····	(198)
长庆低渗透油藏微观孔隙结构·····	(203)
薄层岩盐喷射钻井的水力模拟研究·····	(207)

岩土工程和水工渗流

水位变化条件下条形物对渗流场影响的数值模拟·····	(212)
黑石山水库地震后大坝渗流安全评价·····	(218)
怀头他拉水库地震后渗流安全评价·····	(225)
管涌与滑坡的非稳定渗流计算问题·····	(232)
地下水渗流场数值模拟技术在文物遗址保护中的应用·····	(239)
裂隙中溶质运移规律的实验研究·····	(245)
岩盐储气库水溶建腔管柱提升优化研究·····	(251)
裂隙岩体非饱和渗流模型研究简述·····	(257)
考虑颗粒随机起动的无黏性土管涌过程分析·····	(263)
有自由面渗流分析方法综述·····	(269)
边坡排水效果的有限元数值模拟·····	(273)
电厂粉煤灰场地下水渗流数值模拟·····	(279)
福华山土坝渗流性态安全评价·····	(284)
浸堆散体物料的渗流特性及其稳定性·····	(289)
我国高坝工程建设对渗流力学的挑战·····	(297)
降雨及地下水对三峡库区边坡稳定性的影响研究·····	(301)
基于原型观测的复杂土坝渗流安全评价方法·····	(307)

环境、化工和其他工程中渗流

土壤中农药类污染物运移的数值模拟·····	(314)
重金属污染物在非均质多孔介质中运移的数值模拟·····	(319)
煤矸石中重金属元素对地下水污染探讨·····	(324)
煤矸石淋滤液下渗污染地下水的数值模拟的分析·····	(329)
酸性污染河道潜水层中岩体强度的数值模拟·····	(334)
生物血液与胆汁渗流基本规律及模型·····	(339)
能源及废弃物地下处置过程中的水环境问题·····	(345)
阜新市地下水水质的模糊综合评价·····	(351)

变压吸附(PSA)技术在应用与理论研究上的进展	(354)
非线性反应色谱的移动边界解法	(359)
渗流理论用于气体多孔电极研究	(364)

实验渗流力学和计算渗流力学

CDG 物模驱油实验研究	(370)
氟在细砂土壤中迁移的动态实验及数值模拟研究	(376)
低渗透多孔介质中微生物运移能力研究	(380)
使用无网格方法计算有动边界的渗流问题	(385)
萨中萨零组油藏注水开发实验研究	(390)
北非某油田 Y 油藏渗流特性研究	(395)
用边界元方法研究复杂边界的油藏压力	(399)
低渗透储层油水两相非达西渗流特征研究	(405)
王场油田高含盐油藏水驱储层参数变化实验研究	(409)
聚合物驱微观渗流实验剩余油分布研究	(414)
聚合物驱提高采收率实验研究	(421)
数值模拟扩张流道内修正上随体麦克斯韦流体的流动	(425)
多元泡沫化学剂复合驱上浮机理及其渗流数学描述	(430)
微生物吞吐增产渗流理论及预测方法研究	(436)
高压低渗气井稳定渗流方程的建立与应用	(442)
机械振动增加油井产量机理研究	(447)
油井携砂生产出砂量预测模型的建立及应用	(453)
AMPS 共聚物溶液的性质及在多孔介质中的流动特征研究	(457)
一类新型水驱特征曲线	(462)
用微观计算分析技术研究低渗透多孔介质内流体的运动特征	(467)
高凝油渗流特征	(472)
毛细管自吸机理探讨及实验研究	(477)
聚合物溶液高速流经岩心的黏度损失室内实验研究	(484)
特低渗透油田活性水驱实验研究	(488)
微生物——聚合物联合驱油实验研究	(494)
微观实验研究 CO ₂ 非混相驱驱油机理	(499)
安塞油田王窑区注水方式室内实验研究	(502)
荷电体系错流超滤极限速率影响参数研究	(508)
分形渗透率模型对于多孔介质的应用	(514)
地热开发系统中裂缝水渗流的数值模拟研究	(521)
CO ₂ 提高采收率机理研究	(527)

多场耦合作用渗流理论

岩石破裂过程稳态、瞬态渗流特征模拟分析	(532)
三次采油阶段注入 CO_2 驱油过程中的多场耦合作用数值模拟	(539)
饱和多孔介质孔隙和骨架变形的有效应力定理	(546)
深基坑工程中流固耦合分析数值模拟研究	(552)

其 他

渗流力学的生命周期规律研究与认识	(559)
应用同步辐射光研究多孔介质细观孔隙结构	(562)
金属—有机骨架材料(MOFs)的研究进展	(567)
油气渗流、输送管流与生态环境集成系统模型	(574)
油气井工程中岩石破碎的分形效应	(581)
注水井射孔参数对流动效率的影响	(587)
斜井多井系统压力响应的有效算法	(594)
煤层气开采发展趋势及其增产技术	(598)
层间吞吐自喷采油技术研究	(602)
注水井化学调剖技术对改善油田开发效果的认识	(607)
润湿性反转剂的吸附特性研究	(611)
斜井多井系统中单井测试曲线试井分析	(616)

石油工程和油气层渗流

分形方法在多孔介质黏性指进中的应用

袁士宝^① 陈月明

(中国石油大学 东营 257061)

摘 要 本文运用随机建模、分形几何学(Fractal)、渗滤理论(Percolation)建立了孔隙空间分布的随机模型。研究了多孔介质的结构以及多孔介质中的黏性指进,使对黏性指进的认识从定性到定量迈出了一步。

关键词 黏性指进 分形 仿真

黏性指进是油藏开采过程中普遍的现象,指的是低黏度流体注入高黏度流体时产生的不均匀驱替过程^[1]。黏性指进的产生直接导致了水驱控制程度的降低、采出程度的下降以及含水的急剧上升。尽管描述该现象的方程已经很明确,但是其求解仍十分困难^[1,2]。

对黏性指进的研究最为经典的物理模型就是赫尔肖元胞^[2],在这个装置中模拟了两相流体的不稳定驱替过程。由于实际上黏性指进发生在具有高度无规性的多孔介质中,所以又有学者对赫尔肖元胞进行了改进,出现了夹珠模型以至于加入风化砂粒^[5]用以模拟实际多孔介质的模型。同时理论工作者也没停止对指进现象的探索,由于解析求解行不通,有人就探索用经验公式来描述指进现象,但是经验公式最大弊病就是不能通用,不能反映问题的实质。

分形理论的 DLA 模型为黏性指进的计算机模拟带来了转机,但是计算机模拟的时候无法考虑多孔介质的影响因素。随之又出现了在 Sierpinski 分形地毯上模拟黏性指进现象取得了较大的突破^[6],然而实际的多孔介质不都是规则的分形,正确的步骤是根据一些宏观参量(如孔隙度)先建立一个多孔介质的模型,然后考察其分形性质与模拟结果之间的关系。

1 仿真模型的建立

岩石中孔隙空间分布十分复杂,经典的渗流参数只是孔隙介质宏观平均化物理测度,不能描述孔隙的微观分布,而渗流边界的复杂情况与孔隙介质的微观分布有直接的关系,这是经典渗流理论所不能考察的。所以本研究建立的仿真模型用来研究孔隙介质的微观分布的渗流的影响。

假设实际的多孔介质是由岩石颗粒随机堆砌而成,本研究通过以上假设建立了计算机

^① 作者简介:袁士宝,1977年4月出生,在读博士研究生,研究方向是油气田开发工程。E-mail:upcysb@yahoo.com.cn

模型。在 200×400 的像素范围内以像素为基本的单元随机摆放一定大小的基质岩块,这个基质不具有渗透性,那么这些基质所形成的空间就形成了储渗空间。这个模型的特点之一就是它所形成的渗流空间是随机形成,而且孔隙情况能够直接观察到。这是和逾渗模型的不同之处。

把这个模型和物理模拟用的刻蚀玻璃模型进行比较,我们发现,如果有一个流体分子从模型的一端出发,在刻蚀玻璃模型上这一流体分子是肯定能到达另一端的,而本研究的模型存在大量的死穴,所以这个模型和实际的多孔介质模型比较接近,称为多孔介质的仿真模型(如图1)。

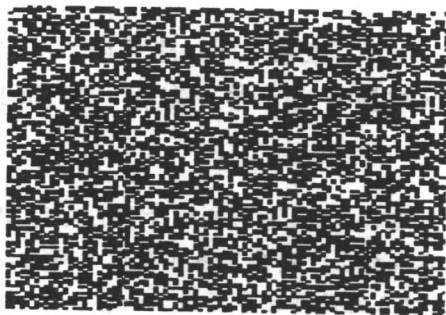


图1 多孔介质的仿真模型

模型的孔隙度定义:

$$\varphi = A_p / A_m \quad (1)$$

式中, φ 为模型孔隙度; A_p 为模型孔隙的面积; A_m 为模型总的面积。

之所以这样定义是因为模型是建立在二维平面的,这是模型与实际多孔介质不同的地方,但是不影响本研究的结论。

2 仿真驱替的理论

2.1 流体的“离散化” 为了对连续的流体进行仿真模拟,先把流体离散化为分散的流体质点,把流体在孔隙空间的流动分解成为单个流体质点在孔隙空间的运动,对于每一个个体而言其行为压力场和随机因素联合作用的结果,将流体的流动被简化成流体质点在孔隙空间内的生长过程。

2.2 模拟的规则 两相流体驱替动力学过程所满足的 Laplace 方程与 DLA 生长过程所满足的方程相类似。黏性指进是一种分形生长现象,所以这里也借鉴分形生长的 DLA 模型。这里将 DLA 模型进行改进,经典的 DLA 模型中粒子运动完全是随机的,这是与实际的流体运动是不相符的。本研究把主导流体运动的压力作为粒子运动的主要因素,随机因素次之。

定义模型长度为 L ,左端定压注入。在孔隙空间内按下式分布压力,岩石颗粒点上的压力梯度为零。

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = 0 \quad (2)$$

边界条件: $P|_{x=0} = \text{const}$

$P|_{x=L} = 0$

模型的左侧为注入端,摆放一行流体质点作为分形生长的核,注入的流体质点在驱替前缘随机行走。原则上行走的方向是与压力梯度相关的,但它不是完全决定因素,所以压力梯度大的方向上给与一个大的概率,压力梯度小的方向上给一个小的概率,各概率数相加之和为1。然后产生一个随机数,由随机数来决定粒子行走的方向。

在确定了方向之后,就以一个与黏度差有关的概率与生长核结合成为新核。随后开始下一次粒子注入过程。

成核概率定义为:

$$\gamma = \frac{M-1}{M+1} \quad (3)$$

式中, γ 为成核概率; M 为黏度比(被驱替液黏度 μ_1 与驱替液黏度 μ_2 之比)。

这一过程考虑了压力场分布、岩石颗粒的阻挡、黏度还有随机等因素。

3 仿真模型上的模拟结果

模拟的模型基本参数:

渗透率: $1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$

孔隙度: 0.35

注入孔隙体积倍数: 0.3PV

3.1 不同黏度比下的结果图像 图2分别是黏度比 M 为1和50时候的驱替图像,图中可以看出当黏度比为50的时候驱替前缘出现明显的突进现象;当黏度比为1的时候,驱替前缘界面比较平整。我们观察到即使界面平整,也只是表面上的平整,在其局部还是有明显的突进,只是没有发展而已。

突进的指性表现为起始端细小后来逐渐向前发展壮大,最后呈现一个扇形。之所以发生这种现象是因为流体被介质不断的剪切所致,这就牵扯到流体的一个特性,剪切变稀特性,也就是我们通常所说的黏度。黏度差异在两相流体驱替过程中是引起界面不稳定的主要因素。

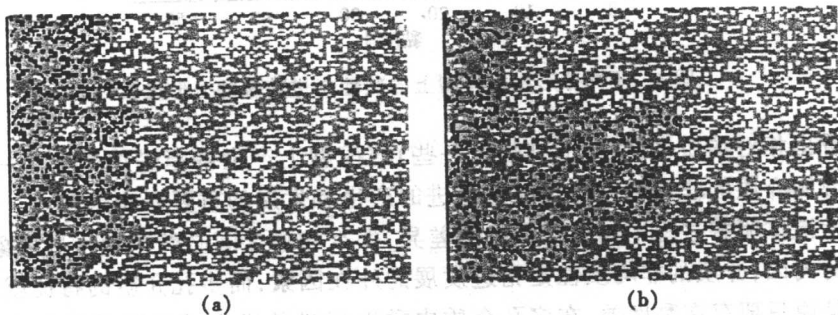


图2 黏度比为1和50时的指进图像

(a) M 为1 (b) M 为50

在分形仿真模拟驱替过程中,前面有一个粒子(水)成核后面就有一个粒子(油或水)被采出。统计粒子数就可以研究水驱油的含水率变化规律和采收率变化规律,下图3是黏度比 $M=1$,孔隙度 $\varphi=0.35$,驱替1.5倍孔隙体积时得到的效果图(图3)。

从图3看出,模拟过程的含水率和与实际情况基本一致,说明在仿真模型上的水驱油过

程模拟是可行的。

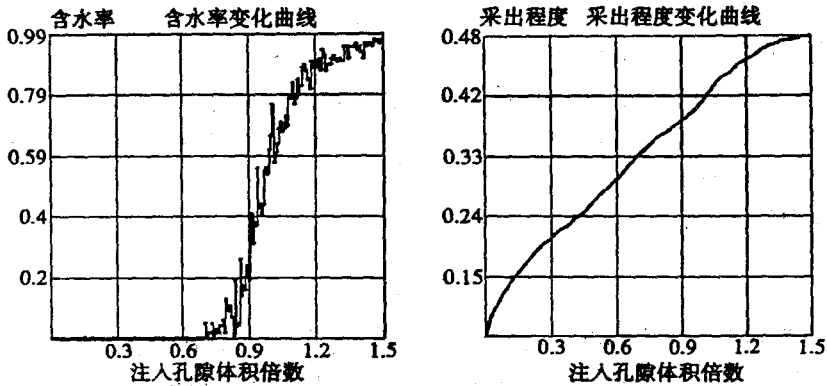


图3 模拟驱替所得含水率曲线和采出程度曲线

3.2 不同模型分形维数下的指进图像 模型分形维数是描述模型非均质性的一个重要参数。用测度关系考察模型的分形性质,我们发现模型在一定的尺度范围内具有分形的性质。选取两个宏观参数相同(主要指孔隙度、黏度比相同)但是其分形维数不同的模型进行黏性指进的模拟,然后用数盒子法测量黏性指进前缘的分形维数。结果见图4。

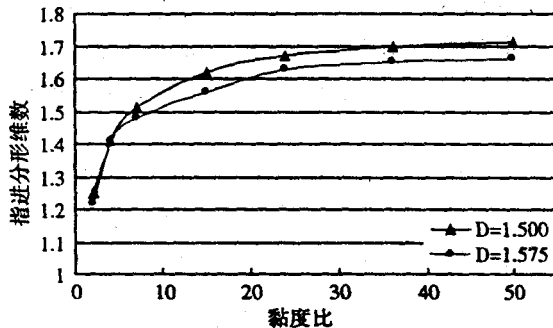


图4 不同分形维数模型上的黏性指进前缘的分形维数

结果看出相对均质(模型分形维数大一些)的模型上产生的指进维数要小一些,即相对平整。这说明介质的非均质性也是黏性指进的产生和发展的重要影响因素。

在两相流体驱替过程中如果存在黏度差异,那么它们之间必然产生指进现象,这是黏性指进产生的内因;介质的非均质性是指进发展的外在因素,而多孔介质的特征就是其非均质性。这就是说只要存在黏度差,在多孔介质中黏性指进的发生就是不可避免的。而在现场则总把黏性指进的发生归因为地层的非均质性。

3.3 观察剩余油的分布状态 我们通过驱替过后的图像放大观察剩余油的分布状态,可以看到:

- (1) 如果有两个并行发展的指突,两指交汇后中间就会包裹一片剩余油;
- (2) 砾岩油藏中不连通的盲孔较多,有的较深、较大,其中绝大部分原油不能被驱走,形成水驱剩余油;

(3) 大孔道中由于岩石表面不光滑或流线不利等条件形成残留油斑。

4 结 论

(1) 驱替流体之间的黏度差是产生黏性指进现象的内在因素,外界干扰(通常指非均质性)是产生黏性指进的触发因素。

(2) 仿真模型可以模拟黏性指进的发生和发展,可以在计算机上进行岩心的驱替模拟。在宏观参数相同的情况下分形维数大的模型相对于分形维数小的模型其储渗性能相对好一些,对两相流体驱替过程的外在扰动也相对弱一些,所以得到的黏性指进的前缘分形维数小一些。

(3) 通过仿真模拟可以直观地观察到黏性指进的发生和发展的过程,能对剩余油的形成与分布有清楚直观的认识。

参考文献

- 1 田巨平,姚凯伦.沉积岩中的分形及其在石油工业中的应用.大自然探索,1996.1:45~50
- 2 王域辉,寥淑华.分形与石油.北京:石油工业出版社,1994:183~204
- 3 杨展如编著.分形物理学[M].上海:上海科技教育出版社,1996:217~220
- 4 孙焕泉,等.胜坨油田特高含水期剩余油分布仿真模型.石油勘探与开发,2002.3:66~68
- 5 黄延章,于大森.微观渗流实验力学及其应用.北京:石油工业出版社,2001
- 6 田巨平,姚凯伦.自仿射 Sierpinski 地毯中的黏滞指进.物理学报,1999.2:193~197
- 7 Kaye B. H.,徐新阳,等译.分形漫步.沈阳:东北大学出版社,1994
- 8 Bensimon D, Kadanoff L P, Liang S. Viscous flows in two dimensions. Rev. Mod. Phys. 1996, 58: 977.

超低渗油藏渗流规律及其应用新探索

葛家理^① 涂彬 郭小哲

(中国石油大学复杂科学研究中心 北京 102249)

摘 要 本文运用力学分析建立了超低渗油藏非达西渗流的“可变附着阻力”渗流模型,之后在对渗流模型进行相似理论处理中,发现了低渗油藏渗流的双重非线性规律,经推导给出了单、双重低速非达西渗流方程以及在同时存在单、双重渗流规律时“跳跃临界点”的特殊渗流特性,进一步发现了线性与非线性流动系数物理意义的差异,由此,应用不同渗流理论方法评价某油藏的流动能力可以得出不同的结论,而且校正了可采储量。

关键词 低渗透 非达西定律 可变附着阻力 双重渗流

^① 作者简介:葛家理,1933年出生,研究方向石油工程管理与油气田开发理论。通讯地址:北京昌平石油大学复杂科学研究中心,102249;E-mail:complex@cup.edu.cn.

1 低速非达西渗流机理构思

根据近年对超低渗油藏低速渗流理论研究积累^[1,2]及创新预见路径预测^[3],形成了超低渗油藏渗流原理创新预见的科学构思,我们认为其根本理论是超低渗油藏细孔隙中存在着可变附着层形成的“粘着毛管可变附着阻力”原因,即:在超低渗油层中既使在可以流动的孔隙中也存在着管壁附近的附着层,只能在越来越加大的压力梯度下,才能使附着层流动(即使有效半径加大),由于这种可变附着阻力存在而产生非达西渗流状态。

1.1 低速非达西渗流方程 如图1所示。

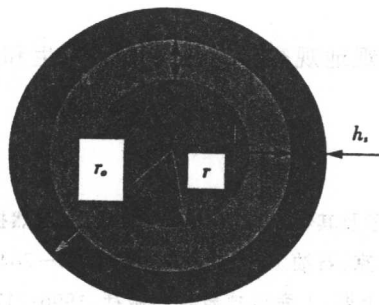


图1 低渗油藏孔隙渗流

附着层变薄方程

$$h = \overline{r_0} e^{-c_1 \text{grad} p} = (r_0 - h_s) e^{-c_1 \text{grad} p} \quad (1)$$

微毛管变半径方程:

$$r = \overline{r_0} (1 - e^{-c_1 \text{grad} p}) \quad (2)$$

渗透率 $K(r \cdot \text{grad} p) \propto \pi r^2$, 故可变渗透率方程:

$$K(r \cdot \text{grad} p) = \lambda \overline{r_0}^2 = \lambda \overline{r_0}^2 (1 - e^{-c_1 \text{grad} p})^2 \quad (3)$$

式中: r_0 为孔隙结构半径; λ 为通过系数; h_s 为不可动残余附着层厚度。

将 $e^{-c_1 \text{grad} p}$ 按麦克劳林级数展开, 仅取前两项代入式(3)得:

$$K(r) = \lambda \overline{r_0}^2 \left[1 - \left(1 - \frac{c_1 \text{grad} p}{1!} \right) \right]^2 \quad (4)$$

$$K(r) = \lambda \overline{r_0}^2 c_1^2 (\text{grad} p)^2$$

由达西定律得到:

$$v = \frac{\lambda \overline{r_0}^2 c_1^2}{\mu} (\text{grad} p)^3 \quad (5)$$

但因地层实际是不均质的, 毛管分布特征差异很大, 故将式(5)改写为:

$$v = \frac{\lambda \overline{r_0}^2 c_1^{N-1}}{\mu} (\text{grad} p)^N = a_0 (\text{grad} p)^N, \quad a_0 = \frac{\lambda \overline{r_0}^2 c_1^{N-1}}{\mu} \quad (6)$$

式(6)即为超低渗油藏低速时产生管壁附着力非线性(非达西)的渗流运动方程。

1.2 低速非达西渗流方程的力学分析 把式(6)代入 $v = \frac{q}{A\phi}$ 推导可得:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \left(\frac{q\mu}{A\phi(\lambda \overline{r_0}^2 c_1^2)} \right)^{\frac{1}{N}}, \quad \Delta P_1 = \left(\frac{q\mu}{A\phi(\lambda \overline{r_0}^2 c_1^2)} \right)^{\frac{1}{N}} \cdot \Delta L \quad (7)$$

改写为 N 次方的形式为:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \left(\frac{q\mu}{A\phi(\lambda r_0^2 c_1^2)} \right)^{\frac{1}{N}} \quad \Delta P = \left(\frac{q\mu}{A\phi(\lambda r_0^2 c_1^2)} \right)^N \cdot \Delta L \quad (8)$$

式中, $n = \frac{1}{N}$, ΔP_1 为附着阻力, 式(8)为各种流态运动方程通式。

由此, 我们提出一个新的理论观点: 地下原油渗流有三个大的“流态区域”。

(1) 附着力渗流区 (ΔP_1) (非达西区)

$n < 1$, 此时 K 实质仍为 $c_1 \text{grad} p$ 变数, 此区域是非线性区, 我们选择 $n = 1/3$ 为相对比值。

(2) 黏滞阻力区 (ΔP_2) (达西区)

线性渗流区, n 只有一个值, $n = 1$, $K = \phi \lambda r_0 c_1 = \text{常数}$ 。

(3) 惯性阻力区 (ΔP_3) (非达西区)

$n = 2$, 该区处于非线性渗流区, 但在线性区与惯性区之间有一个过渡区。

三种流态同时存在时为:

$$\Delta p_1 = \left(\frac{\mu}{\lambda c_1 r_0^2} \right)^N v^N \Delta L = \alpha_1^{\frac{1}{N}} V^{\frac{1}{N}} \Delta L$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{\alpha_0}, N = \frac{1}{n}, \Delta P_2 = \frac{\mu}{K} v \Delta L, \Delta P_3 = \alpha p v^2 \Delta L = \alpha_3 v^2 \Delta L, \Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$$\text{得到: } \Delta P = \left(\frac{\mu v}{\lambda c_1 r_0^2} \right)^N \Delta L + \frac{\mu}{K} v \Delta L$$

1.3 构造验证实验曲线 由实验数据求出每口井的 N 及 α 值, $v = \frac{q}{\phi A} = \alpha_0 \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)^N$ 两边取对数可求 N 、 α_0 , $\lg v = \lg \alpha_0 + N \lg \frac{\Delta P}{\Delta L}$, N 是直线段斜率, α_0 是直线段截距值 (见图 2 与图 3)。

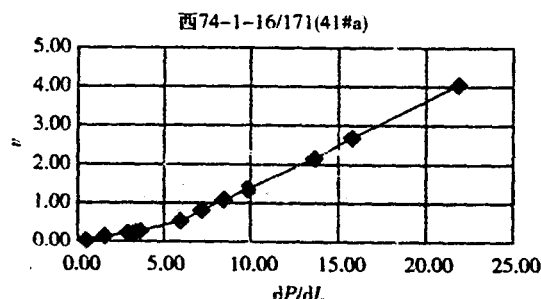


图 2 W-1 渗流规律曲线

1.4 构造相似模数方程 根据以上力学分析, 超低渗油藏低速非达西渗流力学模型为:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = \alpha^{\frac{1}{N}} V^{\frac{1}{N}} \Delta L + \frac{\mu}{K} V \Delta L \quad (9)$$

将此式两端同除以右端第一项, 无因次化得到: