

压裂开发理论与应用

张士诚 张 劲 著



石油工业出版社

压裂开发理论与应用

张士诚 张劲 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以相似理论为基础,建立了电模拟实验模型和实验方法,系统研究了五点井网和反九点井网水力压裂裂缝方位和长度与电势场分布的关系;并进行了平面物理模拟实验研究,测试了裂缝方位与驱油效率的关系,提出了按有利井网方位进行布井的重要性的依据。在数值模拟研究方面,针对常规均质和各向异性低渗透油藏,分别建立了垂直缝和水平缝整体压裂改造时地层与裂缝内的渗流模型和数值模拟模型。对天然裂缝性低渗透油田,以离散裂缝模型为基础建立了多重介质地层渗流数学模型,并讨论了裂缝性低渗透油藏整体压裂改造井网类型和裂缝参数优化。

本书可供从事压裂开发方面的科研人员及院校师生参考学习。

图书在版编目 (CIP) 数据

压裂开发理论与应用/张士诚等著.

北京:石油工业出版社,2003.12

ISBN 7-5021-4400-5

I. 压…

II. 张…

III. 油层水力压裂-研究

IV. TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 089791 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 8 25 印张 1 插页 208 千字 印 1—1500

2003 年 12 月北京第 1 版 2003 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4400-5/TE·3080

定价: 25.00 元

代 序

本书是注水开发低渗油藏整体压裂改造的专著，是作者长期从事油藏及水力压裂理论研究及工程应用的成果。书中着重讨论了如何提高已注水开发低渗透油田的效益以及尽快有效地动用低渗油气储量的方法。本书内容丰富，研究方法全面，理论与实践密切结合，是比较全面而系统的著作。

本书有以下突出特点：

(1) 采油工程的水力压裂设计与油藏工程的有关设计互相渗透融为一体。

水力压裂早已从单井的增产、增注，油—水井对应压裂发展到井组、区块的整体压裂。这种从点到面的发展过程，说明它已经从单井增产工艺发展成为影响或决定采用何种井网、井距、注采井的工作制度等一系列油藏工程的重大决策问题。因为这些水力裂缝一旦产生于油藏之中，首先是加重了油藏的非均质性，改变原有的渗流规律。减少油藏非均质性的负面影响，发挥积极作用，优化注水开发低渗油藏整体改造的效益，正是本书理论研究的主要内容，本书对如何在常规均质油藏或非均质油藏中形成的水平裂缝、垂直裂缝以及天然裂缝油藏的整体压裂改造方案，给出了切实可行的办法。

由于本书讨论的也是工程问题，必然涉及合理评价工程效益，以及工程优化问题。作者从整体压裂改造的全局出发，基于考虑到产量、压裂、注水等多种因素都会影响油藏开发的动态指标，建立了多目标优化模型，以及可以取得较好开采指标的井网密度和布井方式。

(2) 地（球）力学与油藏参数和水力裂缝参数的耦合。

在注水开发低渗油藏的整体压裂设计中，离不开油藏孔隙度、渗透率等参数及其他有关的力学参数。裂缝本身也有缝宽、导流能力、闭合压力等参数，都跟地应力、孔隙压力等有关。压裂前后随着时间的推移，所有参数都不可能保持常数，甚至会有较大的变化。参数的变化必然影响对整体改造效果的评价（包括产量，裂缝的几何尺寸、渗流能力、有效时间等）。这些参数的变化对压后生产动态的影响过去尚未全部反映到压裂设计及动态预测中，本书已包括了这方面的内容。

(3) 沿着本学科的前缘理论技术进行探索。

本书是作者多年来研究成果的总汇，其中有些工作是国外曾经做过的，作者根据中国油田实际工作要求，在新条件下又进行了新的实验论证；有的是在相同思路下，改变了条件，取得了新的研究成果，这些工作已经用于解决国内油田整体压裂中的部分实际问题。

本书还对裂缝性注水开发油藏压裂改造的理论进行了研究。在基质与裂缝的质量交换及渗流中考虑了启动压力、应力变化以及毛细管力的作用等；在改造方案研究中，得出了水力裂缝在不同天然裂缝密度时的优化长度等。另外，提出了整体压裂改造的优化思路及方法，因为设计的因素很多，以多目标为目的，提出了更为全面、切合实际的方法。

本书的出版将会引起同行们的关注和兴趣，对提高已注水开发低渗油田的效益，尽快有效地动用低渗油田储量也有所裨益。从而也会促进整体压裂理论及实践的发展。

王鸿勳

2003. 9. 4

前 言

中国已探明的低渗透油藏地质储量近 $40 \times 10^8 \text{ t}$ ，近几年新增的原油储量中，低渗透、特低渗透储量所占比例已超过 60%，对已开发的低渗透油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，对保持中国石油工业持续稳定发展有着十分重要的意义。区块整体压裂改造技术（也称为压裂开发技术）是低渗透油田高效开采的有效方法，目前整体压裂改造方案的设计方法主要采用数值模拟方法，应用的软件多为黑油模型，而研究的地层一般假设为均质或各向异性，没有考虑低渗透油藏天然裂缝的影响，以及启动压力和毛细管力等因素。在整体方案设计时注重对井网和裂缝参数的优化，忽视了对注采系统的研究；优化的目标一般为产量和采收率等单一指标，没有从低渗透油藏压裂、注水、采油的整体出发，以产量、采油速度、采收率和经济效益为目标进行多指标系统优化。因此，有必要系统、深入地开展低渗透油藏整体压裂改造方案优化设计方法研究，以提高方案设计的科学性和准确性。

本书首先以相似理论为基础，建立了电模拟实验模型和实验方法，开展了整体压裂改造电模拟实验研究，系统研究了五点井网和反九点井网水力裂缝方位和长度与电势场分布的关系；开展了平面物理模拟实验研究，测试了裂缝方位与驱油效率的关系，提出了按有利井网方位进行布井的重要性和依据。在数值模拟研究方面，针对常规均质和各向异性低渗透油藏，分别建立了垂直缝和水平缝整体压裂改造时地层与裂缝内的渗流模型和数值模拟模型；以提高低渗透油藏整体开发效益为目标，应用模糊积分评判方法建立了整体压裂改造方案多目标、非线性综合优化决策方法。结合具体低渗透油田的开发，开展了井网类型、裂缝参数、注采压力差等参数优化，以及多参数、多目标综合决策，现场实施取得了较好的增产效果和经济效益。对天然裂缝性低渗透油田，以离散裂缝模型为基础建立了多重介质地层渗流数学模型，考虑了启动压力、毛细管力的影响以及渗透率、孔隙度随压力的变化关系，应用有限元方法进行求解，研究了天然裂缝方位、密度等对开采指标的影响，在此基础上讨论了裂缝性低渗透油藏整体压裂改造井网类型和裂缝参数优化。

本书在编写过程中始终得到石油大学（北京）李秀生教授和王鸿勋教授的指导和帮助，全书由王鸿勋教授审核，在此向两位老师表示衷心感谢！同时还要感谢大庆油田井下作业公司、大庆油田采油工艺研究院和青海油田采油三厂各位合作同仁为本书提供的现场应用资料！

压裂开发理论与技术在中国已研究和实施多年，本书内容主要来自石油大学（北京）压裂研究室和作者近几年的科研成果。由于作者的研究领域和水平有限，难免存在不足或错误之处，敬请读者提出批评和修改意见。

作者

2003 年 6 月

目 录

第1章 概述	(1)
1 1 压裂开发的目的是与意义	(1)
1 2 国内外研究现状	(2)
1 3 天然裂缝性油藏数值模拟研究新进展	(4)
1 4 本书主要内容	(12)
第2章 低渗透油藏整体压裂改造实验研究	(13)
2 1 电模拟实验研究	(13)
2 2 平面物理模拟实验研究	(22)
第3章 均质与各向异性油藏整体压裂改造数值模拟研究	(27)
3 1 整体压裂改造数值模拟研究——垂直裂缝	(27)
3 2 整体压裂改造数值模拟研究——水平裂缝	(37)
第4章 整体压裂改造方案优化设计方法	(47)
4 1 经济评价方法	(47)
4 2 压裂方案决策优化方法	(51)
4 3 整体优化多目标方案设计	(53)
4 4 多目标非线性整体方案优化设计实例	(54)
第5章 整体压裂改造技术工程应用	(60)
5 1 青海七个泉油田整体压裂改造方案设计	(60)
5 2 大庆长垣内部油田密井网压裂裂缝参数优化	(75)
第6章 低渗透裂缝性油藏整体压裂改造数值模拟研究	(81)
6 1 引言	(81)
6 2 裂缝性油藏渗流控制方程	(81)
6 3 初值、边值条件	(83)
6 4 有限元离散	(84)
6.5 系数的近似	(85)
6 6 程序设计	(86)
6 7 结果验证	(87)
6.8 相关公式	(91)
第7章 裂缝性致密油藏整体改造方案研究	(93)
7 1 天然裂缝性致密油藏与常规油藏计算结果对比	(94)
7 2 天然裂缝条数对开发动态的影响	(102)
7 3 启动压力对开发指标的影响	(108)
7 4 毛细管力对开发指标的影响	(111)
7.5 天然裂缝渗透率与基质渗透率的比值对开发指标的影响	(113)
7 6 裂缝性致密油藏井网布置与裂缝参数优化	(116)
参考文献	(122)
主要符号表	(126)

第 1 章 概 述

区块整体压裂改造技术是低渗透油田高效开采的有效方法，目前整体压裂改造方案的设计方法主要采用数值模拟方法，应用的软件多为黑油模型，而研究的地层一般假设为均质或各向异性，没有考虑低渗透油藏天然裂缝的影响，以及启动压力和毛细管力等因素。在整体方案设计时注重对井网和裂缝参数的优化，忽视了对注采系统的研究；优化的目标一般为产量和采收率等单一指标，没有从低渗透油藏压裂、注水、采油整体出发，以产量、采油速度、采收率 and 经济效益为目标进行多指标系统优化。因此，有必要系统深入地开展低渗透油藏整体压裂改造方案优化设计方法研究，以提高方案设计的科学性和准确性。

1.1 压裂开发的目的是与意义

中国低渗透油气资源十分丰富，截至 1996 年底已探明低渗透油田（油藏）共 285 个（不包括原地矿部油田），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%^[1]。近年来，新增的油气储量中，低渗透储量的比例更大，以中国石油天然气股份有限公司为例，虽然历年探明储量幅度较大，但低渗透、特低渗透比例也很大（如表 1—1）。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，对保持中国石油工业持续稳定发展有着十分重要的意义。

表 1—1 1997～2001 年中国石油天然气股份有限公司探明储量表

时间	探明储量 (10^8t)	低渗透、特低渗透储量所占比例 (%)
1997	5.2	75
1998	4.8	70
1999	3.7	65
2000	4.2	46
2001	4.5	69

注：资料来源于中国石油天然气集团公司（CNPC）信息和经济研究中心“CNPC 科技发展战略研究项目论证材料”。

目前制约低渗透储层开发的关键问题是已掌握的开发技术难以使此类油田得到经济高效地开发，表现为投入开发的大部分低渗透油田采油速度低、采收率低，随着含水的上升，采油指数和采液指数下降等。虽然对低渗透油田的开发采取了一些与之相适应的配套工艺技术，也取得了一定成绩，但是，由于对影响开发效果的一些关键因素认识不清，且缺乏系统综合的研究，因而导致此类油藏的开发具有一定的风险性和盲目性，同时由于低渗透油层天然裂缝的存在，其开发特征不同于常规油藏，因此研究低渗透油藏的开发技术至关重要。

近 20 年来，国外在低渗透油气田理论研究和勘探开发工艺技术研究及应用等方面均有

显著进展。在勘探程度高的美国,低渗透油气田可采储量占全国总可采储量的 10%~15%,而前苏联 1971~1988 年间低渗透油藏储量也增加了 2.3 倍,达到总储量的 42.5%。从 20 世纪 80 年代开始,国内在总结吸收了国外低渗透油田开发经验的基础上,对适应中国低渗透油藏的开采机理进行了较为深入的研究,提出了“低渗透油藏整体压裂改造技术”。“八五”以来,成功地开发了一批低渗透油田,掌握了一套低渗透油田的开采工艺技术和规律,但从整体上讲,低渗透油田开发成本高,经济效益差,大量探明的低渗透油气资源难以动用,已动用的开发状况又不理想,低渗透油田的开发水平同中高渗透油田相比还有很大差距。已开发的低渗透油田平均采收率仅为 21.3%,采出程度为 70%,分别比全国平均值低 8.9%和 13.4%。有 50 多个低渗透油田(区块)的开采速度小于 0.5%,这样的低速低效油田地质储量约为 $3.2 \times 10^8 \text{ t}$,其平均采油速度只有 0.27%,预测最终采收率只有 15.5%。

低渗透油田储层物性差,非均质性强,开发难度大,经济效益差,因此,加强低渗透油气藏渗流机理研究,加强开发与开采新工艺技术研究,不断提高低渗透油气田开发水平,获得最佳经济效益,乃是当今石油工业发展的当务之急。

中国低渗透油藏的种类很多,按照地层渗透率的大小可以分为:(1)常规低渗透油藏 [$K = (10 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$]:如大庆朝阳沟油田、胜利渤南油田、青海尕斯库勒油田、长庆马岭等油田;(2)特低渗透油田 [$K = (1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$]:如大庆榆树林油田,胜利牛庄油田,吉林新民、乾安等油田;(3)致密油田 [$K = (0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$]:如长庆安塞油田、新疆八区(乌尔禾)等油田。从储层物性看可以分为:孔隙型和孔隙—裂缝型油藏。有些油藏比较均质,但更多的存在渗透率各向异性,而对裂缝型低渗透油藏往往由于裂缝方位的影响导致开采效益差别很大。由于低渗透油藏储层物性的复杂性,必然要求对目前普遍应用的整体压裂改造技术(也称压裂开发技术)进行系统研究,以期对不同类型的低渗透油藏提出相应的开发模式,以提高开采效益和开发水平。

因此,本书将针对中国低渗透油田储层物性差、非均质性强、产能低及开发经济效益差等特点,在充分借鉴国内外已有研究成果及开发经验的基础上,深入研究不同类型低渗透油田的整体压裂改造方案设计方法。从储层的地质特征出发,研究合理的井网类型、井网方位、整体压裂改造裂缝参数优化、注采系统参数设计等方法,并以提高采油速度和经济效益为目标研究各类低渗透油藏的压裂开发技术,从而为低渗透油田投入高速高效开发提供一整套油藏工程和采油工程优化设计方案。

1.2 国内外研究现状

低渗透油藏的开发主要通过水力压裂提高单井产能,以注水保持地层能量,油水井压裂后油藏内的渗流机理和动态变化在很大程度上取决于水力裂缝的参数和方位,油井产量(初期产量、稳定时间和累积采出量等)除与水力裂缝参数有关外,还与注水强度、井网格局等因素有关^[2]。低渗透油田的开发不同于常规油田在于水力裂缝作用的双重性,一方面水力裂缝的存在提高了油水井的增产增注能力,另一方面却加剧了地层的非均质性。当裂缝方位不利时可能会导致油井过早水淹,降低开采效益。而水力裂缝的方位是受地层最小主应力控制的,对某一具体区块,最小主应力的方向是一定的,因而水力裂缝的方位也是一定的。但是在不同的井网方位条件下,水力裂缝的方位将可能处于有利或不利方位,所产生的开发效果却是截然不同的。因此,在低渗透油田开发中,首先要根据裂缝的方位确定出合理的井网方

位，在此基础上优化井网类型和井网密度，然后优化裂缝长度、导流能力和相应的注采压力差，最终以经济效益为目标进行整体方案优化设计，提出合理的开发方案，指导油田生产。

1.2.1 国内研究现状

国内外对有关低渗透油藏（区块）整体压裂改造的研究最早可以追溯到 20 世纪 50 年代，但是，在理论和应用上有所突破还是在 90 年代以后，其中有代表性的文献简述如下。

1993 年，石油大学（北京）杨能宇在硕士论文“注水开发油田整体压裂改造水力裂缝参数对采收率的影响研究”中^[3]，利用电解模型和数值模拟方法研究了五点井网整体压裂改造后，水力裂缝参数和裂缝方位对产量和采收率的影响。这篇论文体现了五点井网水力裂缝参数在井网中的优化的思想，是国内最早体现“整体压裂优化设计”的论文之一。在建模中采用把裂缝宽度放大，导流能力减小的等效渗流阻力法处理裂缝系统，把油藏和裂缝作为同一体系来考虑，使用二维两相油藏数值模拟方法。

1997 年，石油大学（北京）陈志海在硕士论文“低渗油田压注采水力裂缝参数优化研究”中^[4]，建立了三维两相非均质油藏数值模拟模型和二维两相水力裂缝模拟模型，利用裂缝和地层交界处的压力和流量相等原则实现了两个模型之间的连接，计算时分别求解裂缝和地层内的压力和饱和度分布，更真实地反映了裂缝的存在对低渗透油藏开采动态的影响。编制了带有多条人工裂缝的油藏数值模拟生产预测程序，并利用此程序研究五点井网和反九点井网单元，在不同的压裂方式下，水力裂缝参数对油井产量、水井注入量、无水采收率和最终采收率等的影响。

2000 年，石油大学（北京）王永跃在硕士论文“压注采整体方案设计经济评价与优化研究”中^[5]，使用低渗透油藏整体压裂改造数值模拟计算结果，建立了整体方案评价经济模型，结合大庆油田某区块对压裂、注水、采油整体方案进行了优化设计。

中国石油勘探开发研究院廊坊分院压裂酸化研究中心在整体压裂改造和水力压裂生产动态预测方面也开展了研究工作。20 世纪 90 年代中期在吐哈鄯善油田，通过对黑油模型的改造，对五点井网计算单元进行了生产预测，以压裂后油井产量、无水期采收率和最终采收率等为指标，优化了水力裂缝参数，现场实施取得了很好的增产效果和经济效益。

2000 年中油股份公司勘探与生产分公司和廊坊分院压裂酸化研究中心在长庆靖安油田南部 ZJ60 试验区开展了矩形井网试验^①，应用黑油模型研究了各种井网类型下的开采指标，提出采用 960m×360m 的矩形井网开采，现场实施后取得了较好的增产效果和经济效益。

从国内发表的文献来看，有关压裂井产量预测和整体压裂改造的研究与应用经历了以下的发展过程：

- （1）压裂井产量预测，由单井预测发展到相互干扰的多井预测；
- （2）地层内的流体渗流，由仅考虑单相的纯油流发展到考虑油水两相的流动；
- （3）研究的油藏，由无限大地层发展到有限封闭边界，再发展到五点井网和反九点井网计算单元；
- （4）压裂方式由单井压裂增产发展到区块整体压裂改造，评价方法由简单的以产量为目标发展到以经济效益和整体开发效果为目标。

① 资料来自中国石油勘探开发研究院廊坊分院压裂酸化研究中心，低渗透油藏开发压裂技术研究，“九五”科技攻关项目成果报告，2001 年 11 月。

1.2.2 国外研究现状

国外对压裂后人工裂缝（主要是垂直缝）对油藏动态影响的研究比较早。方法主要是实验和数值模拟计算，从研究方法上可以很明显地分为两个阶段两种类型。20 世纪 60 年代以前主要用电解模型实验方法，通过测定电位值，确定渗流场的变化，再计算扫油效率。60 年代后，随着计算机技术的发展，多采用数值模拟计算方法。具有代表性的研究成果如下。

1978 年，Holditch 等人^[6]发表了“在低渗透气藏开发中的井距和缝长的优化”，这是最早公开讨论裂缝缝长和井距优化问题的论文之一。文中提出的优化模型主要包括由 Geertsma 和 De Klerk 提出的垂直缝缝长计算模型，Gringarten 等人提出的油藏动态解析解油藏模型和计算现金赢利值的经济模型，利用此优化模型分别对低渗透、中渗透和高渗透气藏进行了计算，较为详细地提供了一套在低渗透气藏中对缝长和井距的优化方法。

1985 年，Britt^[7]在“中渗透油藏油井压裂的最优化”一文中用二维三相模型分析了人工裂缝对五点井网单元水驱采收率的影响。结果表明：裂缝处于不利方位时，其半长超过异号井距的 25%将对水驱采收率产生不利影响。考虑采油、注水井都压裂时，总缝长超过井距的 50%就会影响最终采收率。

1988 年，D N Meehan 等人^[8]发表了“储集层非均质性与裂缝方位对裂缝长度和井距优化的影响”，该文指出若裂缝长度与井距相比很小，裂缝方位将不会产生井间干扰；并给出了考虑裂缝方位的均匀流裂缝解，证明当井间干扰很大时，均匀流裂缝模型不适用；文中最后用数值模拟方法证实当井距和裂缝长度之比小于 2 时，了解裂缝方位是很重要的。文中研究的是单相气藏。

1991 年，Koneplyov 和 Zazovsky^[9]在“面积注水油藏油井压裂后水驱油的数值模拟”一文中系统地研究了多井压裂时裂缝方位、长度、导流能力等对水驱动态的影响。在研究中考虑了压裂后投产初期油井排液和压裂液侵入带的影响。采用二维两相油藏数值模型，计算了线状（排状）布井注采井网中一口井和多井压裂时，裂缝处于不同方位，对油井生产动态的影响。

1995 年，D N Meenhan^[10]发表的“在非均质气藏中缝长和井距的优化”文章中，利用数值模拟方法研究了地层有限封闭地层中心一口压裂气井非均质性对采气井生产动态的影响，指出井距和水力裂缝的长度是影响低渗透非均质气藏开发的主要因素。得出油藏的非均质性、渗透率的各向异性对非均质气藏开发具有重要影响，并进行了定量描述。通过经济模型对井距和缝长进行优化，对具体的区块进行模拟计算，得出了最优的布井和压裂施工方案。

由此可见，国外的研究成果可以归纳如下：

- (1) 考虑了油气藏的非均质性，但以单相气藏研究的较多；
- (2) 油藏边界考虑五点法布井或有限边界中心一口井；
- (3) 研究集中于中高渗油气藏或低渗透气藏。

总结国内外的研究现状不难看出：在低渗透油藏整体压裂改造的研究方面，主要侧重于均质油藏和各向异性油藏，对非均质和裂缝性油藏整体方案的设计方法却研究的很少，也没有形成系统的理论，这正是本书所要论述的主要问题。

1.3 天然裂缝性油藏数值模拟研究新进展

流体在裂缝性介质中的流动规律研究，已经发展了近 40 年。连续介质渗流理论发展比

较成熟,但它却难以描述裂缝岩体所固有的力学特性。非连续介质裂缝网络渗流理论模型虽然可确切描述裂缝性油藏的空间结构及其渗流特性,但却很难在实际中直接应用,其原因主要是:

(1) 现有技术条件下,要查清裂缝性油藏中每一条裂缝的长度、开度、密度等裂缝信息几乎是不可能的;

(2) 由于大小裂缝混杂,形成裂缝网络,裂缝的交叉点众多,因而形成的计算节点及相应的数据庞大,难以实现运算。

Richard O Baker^{[11][12]}对 Spraberry Trend 天然裂缝性地层进行了大量的试验,认为假定天然裂缝性地层的渗透率为常数是错误的。天然裂缝性地层的渗透性对地层应力的变化非常敏感。如注水速度快,地层压力增大,则有利于天然裂缝的开启,使地层的渗透性大大增加;反之,注水速度慢,地层压力小,则不利于天然裂缝的开启,地层的渗透性几乎不增加。长期注水能在地层中产生非常长的裂缝系统,注入的水在裂缝系统中的运移也非常快,同时有利于油藏中的短裂缝相互连接,从而扩展了裂缝系统。但一旦注水停止,裂缝将闭合导致裂缝系统的连通性降低。

天然裂缝性地层的油藏特点及模拟方法与传统的、单孔隙均匀连续油藏有很大的不同,不仅需要表征天然裂缝和基质的本质特性,而且要表征基质和天然裂缝之间的相互作用。天然裂缝的渗透性、连通性和分布是确定控制油藏采收率的主要因素。天然裂缝的表征包括定义各种参数(如:天然裂缝的间距、长度、方向、孔隙率、连通性、缝隙以及渗透性等),天然裂缝性地层代表着高度各向异性系统。在这种地层中,几乎不可能用三维均匀系统的模型来表征地层中流体的流动以及地层压力的变化状况。发展新方法、引入新的表征手段已经成为新的研究方向和关注的热点。

1.3.1 裂缝性油藏物理模型及数学描述

经过多年对天然裂缝性地层特性的研究,通过实验及生产实践,人们对描述流体在含裂缝的多孔介质中的单相流动和多相流动的模型积累了较为丰富的经验。这个领域的开创性工作当属 Barenblatt^[13]等人在 1960 年做出的。他们提出了以唯象学为基础的双孔模型。1963 年 Warren 和 Root^[14]提出了一个基于 Barenblatt 模型的简化模型应用于油层模拟,使得 Barenblatt 的工作得到了广泛的注意;1969 年 Kazemi^[15]和 1976 年 De Swaan^[16]提出的裂缝和基质之间的不稳定流动;1976 年 Crawford^[17]认为在实际试井工程中的瞬态压力梯度变化是双孔介质相互作用特征的表现;1984 年 Bourdet^[18]在用压力导数法进行试井解释时,进一步证实了油层的特性。1990 年 Chang^[19]基于分形概念提出了裂缝性油藏的分形模型。

1.3.1.1 等效孔隙介质模型

这一模型将裂缝等效为孔隙,使得原问题变得简单易处理。但这一模型未能考虑裂缝的局部特性以及裂缝与孔隙之间的物质交换。因此难以模拟裂缝孔隙体的重要特征。刘漪厚在对吉林扶余油田做详细深入的研究后发现,该油田区域裂缝系统中的裂缝具有明显的统一走向,属平行裂缝,难以形成相互连通的网络裂缝系统。忽略了饱和度、势能和压缩性在基质和裂缝中的差异,把裂缝看成只影响流体导流能力的因素。因此在建立等效裂缝模型时,只将裂缝对渗透率的影响附加给界面渗透率,取得了较好的结果。

1.3.1.2 离散裂缝网络模型

利用裂缝的位置、长度、密度、开度及强度等参数和裂缝间的连通状态构筑离散裂缝网络模型。该模型能揭示流体在裂缝中的流动局部细节,与真实情况比较接近。大多数现有离

散模型都不考虑基质与裂缝之间的流体交换。

1 3 1 3 双重介质模型

Warren 和 Root^[14]在 Barenblatt^[13]模型基础上将其进一步简化和发展,提出了著名的双重介质模型。该模型对裂缝性油藏所做的基本假设如下:

(1) 含原生孔隙的基岩被划分成均匀各向同性、大小相同的、排列整齐的方块,且漂浮于裂缝系统中,如图 1—1 所示。

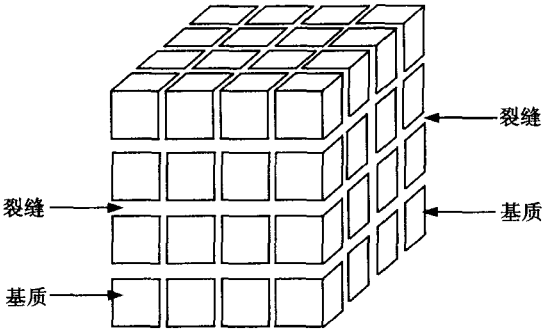


图 1—1 Warren Root 模型

(2) 所有次生孔隙由一连续的、均匀的正交裂缝系统来代替。每条裂缝的方向与渗透率的主轴平行,垂直主轴方向的裂缝宽度相同,不同的裂缝宽度模拟油藏各向异性的程度。

(3) 原生和次生的孔隙就其本身是复杂的各向异性,但仍被认为是均匀的,流体流动仅发生在原生和次生孔隙之间,在含原生孔隙的基岩中不发生流动。

对数学描述而言,用两种单相体系——裂缝和基质岩块的叠加来描述双重介

质油藏,空间中每点都有两种压力:裂缝中的平均流体压力 p_1 ,该点附近基质岩块中的流体平均压力 p_2 。在假定流体为单相微可压缩且在两个流场中均满足 Darcy 定律、忽略重力影响的条件下,建立了双重介质模型中单相微可压缩流体的渗流方程,在处理裂缝与基质的连接时引入窜流项。

Warren-Root 给出了无限大地层单井流动的解析解。由此模型得出的压力与时间的对数关系呈现出两条平行直线,而不是在常规油藏中得出的一条直线。由于 Warren-Root 模型假设从基质向裂缝的流动是拟稳定的流动,Warren-Root 模型又称为拟稳定双重介质模型。当裂缝的渗透率与基质的渗透率之比相当大但是有限值时,Warren-Root 模型能给出较为合理的结果^[28]。而当基质岩块的尺寸比较大,或在基质中的渗透率虽然足够小,但不能忽略在其中的液体流动,也即不满足上述条件,则 Warren-Root 模型就难以给出精确的结果。Fung^[20]、Gilman 和 Kazem^[21~24]、Litvak^[25]、Sonier^[26]、Dutra^[27]、Gupta^[28]等提出了多相流双重介质模型,并对交换函数做出了各种各样的修正。

Kazem^[21]模型将裂缝网络简化为一组均匀间隔的水平基基层,而裂缝组就等价于基质之间的空间,如图 1—2 所示。

Kazem^[21]为其模型所做的假设如下:

- (1) 只考虑单相流。
- (2) 油藏基质中的渗透率非常低,但储量高;而裂缝中的储量小,但渗透率高,基质只向裂

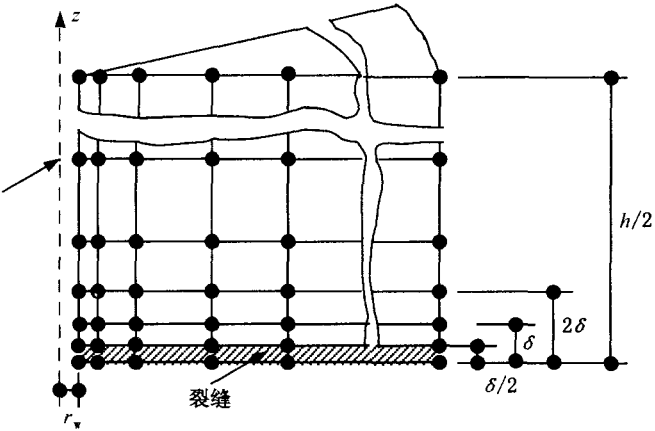


图 1—2 Kazem^[21]模型

缝中流动，流体由裂缝流入井筒。

- (3) 流体仅沿径向和垂直方向流动。
- (4) 流动处于不稳定状态。
- (5) 油藏是水平的，裂缝和基质均认为是均匀各向同性的。
- (6) 地层无限大，且井处于其中心。

Kazemi 用此模型分析了压力瞬时变化的情况（压力降落和压力恢复）。当基质的垂向渗透率比较高，或者基质的厚度比较薄，则可认为在基质中的流动处于稳定流状态，由此所得到的结果与 Warren-Root 模型的结果非常接近。

De Swaan 模型^[16]扩展了 Warren-Root 模型，提出了非稳定双重介质模型（如图 1—3 所示）。基本假设如下：

- (1) 油藏流体压缩性很小，粘度恒定，且忽略整个油藏内的压力变化；
- (2) 油藏是各向同性、存在天然裂缝，厚度均匀；
- (3) 该系统结构是由一组平行裂缝所分开的水平基岩层，基岩和裂缝都是均匀的；
- (4) 基岩中的流动是一维不稳定的（不同于 Warren-Root 模型）；
- (5) 所有裂缝的产量恒定。

当基质岩块尺寸比较大或者其渗透率没有表现出更高的各向异性，在基质中的流动就不是一维的，而是多维的。在这种情况下，该模型就不适用了。

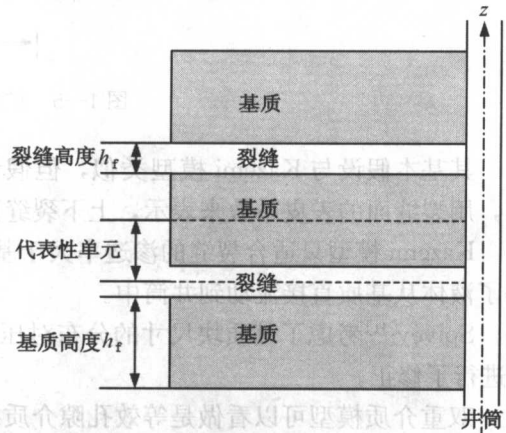


图 1—3 De Swaan 模型

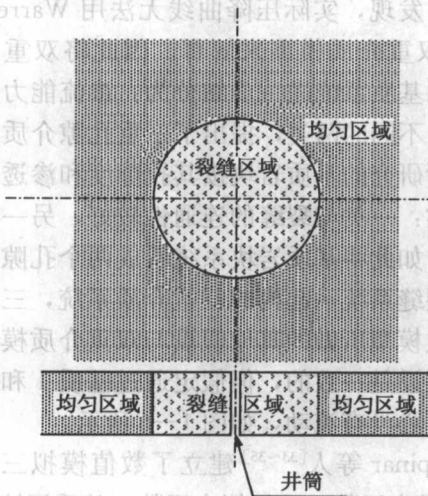


图 1—4 Prado 复合模型

De Swaan-Kazemi 的模型非常类似 Warren-Root 模型，只是在前者的模型中，假定在基质中存在液体的瞬态流动，而后的模型却假定只存在拟稳定流。De Swaan-Kazemi 模型给出的半对数无量纲井底压降—无量纲时间之间的图像呈现三段直线关系，第一和第三段直线相互平行，这两段直线分别对应裂缝和整个系统的性质，而第二段直线表明从裂缝到整个系统的性质的过渡，其斜率是第一、第三段直线斜率的一半。

Prado 模型^[29]将裂缝性油藏简化为近井筒处 Warren-Root 模型，在远处为等效的均匀介质，构筑了一复合模型如图 1—4 所示。在基本控制方程的推导中忽略了毛细管力和重力的影响，

利用 Everdigen 和 Hurst 的 Laplace 变换方法，得出了问题的解析解。

Piyush C. Shah 模型^[30]是对 Kazemi 模型的扩展，如图 1—5 所示。

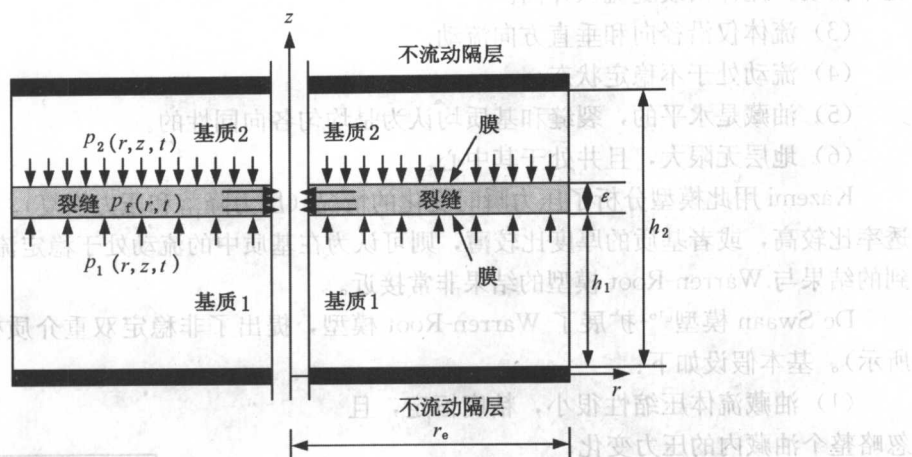


图 1—5 扩展的 Kazemi 模型

其基本假设与 Kazemi 模型类似，但假设从基质流入裂缝通过裂缝面时，存在表面阻力，用裂缝面的表皮系数来表示，上下裂缝面的表皮系数可能不同。

Kazemi 模型只适合裂缝的渗透率大于基质的渗透率，或者井筒表皮因子比较大从而阻碍了液体从基质直接流动到井筒中。

Spivey^[31]考虑了基质块尺寸的分布对压降的影响，对 Warren-Roof 模型的两个参数 λ ， ω 进行了修正。

双重介质模型可以看做是等效孔隙介质模型和离散裂缝网络模型的折中。

1.3.1.4 三重孔隙介质模型

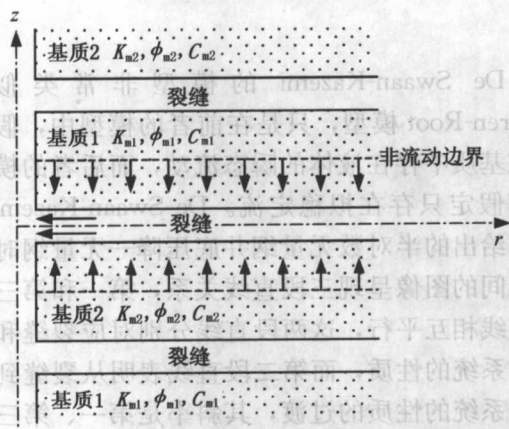


图 1—6 三重介质模型

Abdassah 和 Ershaghi^[32]在对测井数据分析时发现，实际压降曲线无法用 Warren-Roof 的双重介质模型来解释。因此将双重介质模型的基质系统进一步细分为：渗流能力和储集能力不同的两类，提出了三重孔隙介质模型。将所研究的基质岩块按其孔隙度和渗透率分成两类：一类与裂缝的连通性较好，另一类则较差。如此将基质岩块系统看成两个孔隙系统，与裂缝系统一起构成三重介质系统，三重孔隙介质模型所做的其他假设与双重介质模型的基本假设是一致的，但假定通过基质 1 和基质 2 的中心没有流动，如图 1—6 所示。

Gurpinar 等人^[33~35]建立了数值模拟三重介质模型的多项流所需要的特殊多项流函数：相对渗透率函数、毛细管力函数、基质压缩性函数以及裂缝的压缩性函数关系，给出了数值模拟的实例。

1.3.1.5 双孔双渗模型

Deruyck 和 Bourdet^[36]提出的双孔双渗模型是将油藏分为裂缝系统和基质系统，与双孔基质模型不同之处是将基质也看成是渗流的空间，即油气不仅从基质向裂缝中渗流，同时在

基质内也进行流动，流体同时从裂缝和基质流入井底。

1 3 1 6 双重裂缝介质模型

Ghamdi 和 Ershaghi^[37]对裂缝进行了细致深入的研究，提出了双重裂缝介质模型。其模型将裂缝系统分成了两类：显裂缝和微裂缝。认为微裂缝的作用一是作为油气从基质与显裂缝渗流的渠道，二是和显裂缝一起作为油气从生产井渗流的通道，是影响裂缝性油藏生产能力的一个主要因素。

1 3 1 7 分形模型

常规模型把裂缝油藏当作双重介质，这类模型对于定性解释压力恢复曲线的三段性是成功的，但在定量解释方面却遇到许多困难。为了解决定量解释方面的矛盾，Abdassah 和 Ershaghi^[32]提出了三孔隙度模型和随机生成裂缝网络模型。这些模型对于复杂问题的描述有了一定程度的改进，但是始终未能摆脱认为裂缝是稠密而可以充满空间这一传统思想的束缚。因而这些模型始终无法处理（在裂缝性油藏中）裂缝具有多标度、连通性差且空间分布无序的情形。

天然裂缝油藏的很多特征，像标度、裂缝的密度和范围有显著的可变性。这些特征是由与材料的初始脆性相关联的断裂过程所诱导的。而这些问题已被广泛地研究，表明断裂过程导致分形体的出现。

Chang 和 Yortsos^[19]对双重介质模型进行了重大的修改。他们第一次将模型中的裂缝网络看成是分形体系，即将裂缝油藏的导流体系或导流通道看成是分形体系，建立了裂缝油藏压力瞬变的分形模型，如图 1—7 所示。该理论包含了旧理论的所有内容，但可以很好地解释许多新问题。同时他们研究了分形裂缝网络嵌入到欧几里得岩块中微可压缩流体的不稳定流动，对于这种情况还对扩散方程进行了修正。

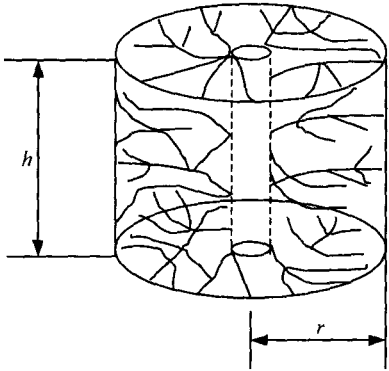


图 1—7 裂缝性油藏的分形

Beier^[38,39]给出了 Chang 和 Yortsos 模型的推广。Beier 模型特别应用到包括分形渗透网的圆柱对称油藏中的牛顿流体，选择了分形油藏压力不稳定方程在形式上需要井眼附近的渗透率和孔隙度的估计。适当的选择无量纲变量，可以证明 Beier 导出的无量纲方程与 Chang 和 Yortsos 所解的方程极为相似，他们之间的主要差别在于无量纲变量的定义不同。

Chakrabarty^[40]建立了分形油藏单相微可压非牛顿幂率流的径向流模型，得到了无限油藏线源井的实空间解析解和有限半径井的拉氏空间解及长时和短时的渐近解。

Acuna^[41,42]应用 Chang 和 Yortsos 的分形模型分析单井压力瞬态变化情况，Pertamina^[44]忽略了表皮效应和井筒储容的影响，扩展了 Chang 和 Yortsos 的分形模型，使之能分析多井干扰测井问题。

Dyah Rini R 等人^[35]用分维数表示裂缝性油藏的非均匀性，建立多相径向流的分形模型。该模型仍然假设油藏系统是由含有大量流体并具有较低渗透率的基质和高渗透率但体积较小的裂缝所构成的。Dyah Rini R 等人的分形模型假设在基质中的孔隙率为零，所有的存储空间是裂缝，且在油藏中的主要流动仅发生在裂缝中，忽略了毛细管力和重力的影响，同时假设不存在气锥和水锥。

李凡华和刘慈群⁴⁴从广义对流扩散方程出发,给出了分形油藏在 Laplace 空间中的通解,并分别得出了等压边界条件下和封闭不渗透边界条件下的解。

1.3.2 裂缝性地层数值模拟方法

建立数学模型是进行数值模拟的基础。当然在建立数学模型之前,必须对所研究问题的物理过程有清楚的认识,根据研究对象应遵循的物理规律(如质量守恒定律、动量守恒定律以及能量守恒定律等),同时做出一些合理的假设(舍去次要变量),推导出物理模型的数学控制方程并给出初始、边界条件,从而构成完整的数学模型。

数学模型建立后,如何有效求解数学模型的微分控制方程,目前主要有两种方法:一是解析法,另一种是数值方法。

裂缝油藏流动方程的解析解一般仅限于一些流动是径向轴对称的单相或两相流,边界条件一般是无限大等简单情况。在模拟裂缝基质之间的流体流动时,通常在质量守恒方程中加入一个源或汇函数来表达。在某些模型中,此函数以一种隐式或半隐式的形式表示成各个相依参数的一个函数,需从内部算得,源函数本身是解的一部分。其他模型则要求源或汇函数应事先通过在岩样上的实验室研究、单岩块模拟或通过生产史拟合确定,并作为输入数据提供给模型^{45]}。

对于双孔弹性介质,即使在最简单的边界条件和初始条件下,也很难得到其解析解。因此,利用数值方法(有限元、边界元或有限差分等)来求解就成为必然。

1.3.2.1 有限差分法

有限差分方法是油藏数值模拟中应用最早、最广泛的一种数学模型离散化方法。这种方法的基本原理就是用差商来近似微商,从而用差分方程代替数学模型中的偏微分方程和问题的初始、边值条件,将原问题的偏微分方程组简化成代数方程组。

Kazemi^{46]}对空间变量进行变量变换,用等效有限边界条件代替无限大边界条件,给出了单相流动的差分方程。

Rossen^{47]}将基质和裂缝分别处理成源和汇,这些源和汇是基质岩块、流体性质(包括裂缝饱和度、定义边界条件的压力)的函数,给出了一个三维三相流动的数值模型,并在数值求解时,将基质向裂缝中的流动处理成半隐式的,从而使得计算裂缝的流体接触面的位置和压力大小的过程是稳定的。

Kazemi^{48, 49]}对基质和裂缝之间的流体交换用拟稳定源函数和汇函数(与势差成正比)来表示,推导出裂缝油藏中油水两相流动的三维多井差分方程。并应用于裂缝油藏中有五口井的情况^{45]}。

Gilman 和 Kazemi^{22, 23]}基于 Warren-Root 模型,同时考虑了粘性力、毛细管力和重力的影响,推导出三维三相流的有限差分数值模型,该模型可同时计算出流量和井筒压力以及任一点裂缝和基质流体的饱和度及压力。Thomas^{56]}也提出类似 Kazemi 等的数值模型。

为避免求解迭代中出现的稳定性问题,Kazemi^{30]}用半隐式有限差分展开来近似流动方程,而 Rossen^{29]}在压力和饱和度计算时采用半隐式源项。Gilman 和 Kazemi^{22]}改进了 Kazemi^{30]}的半隐式方法,用裂缝中的未知量消去基质中的未知量,推导出全隐式差分方程。

Dean^{26]}基于均匀介质模型、双重介质模型、双孔双渗模型推导出三维三相双渗的黑油模型的有限差分方程,并对同一参数分别给出了不同模型的计算结果。结果表明三种模型有较大差别,均匀单孔模型的采收率小于双重介质模型和双孔双渗模型;双孔双渗模型的注水采收率大大高于双重介质模型的注水采收率。

Sonier^[51 52]考虑了基质和裂缝之间流体交换的动态重力效应,并以基质和裂缝的饱和度以及基质岩块的高度为未知量来构筑基质和裂缝之间流体的交换函数,基于 Warren-Root 模型以及双孔双渗模型,建立了黑油模型的全隐式差分方程,其数值模拟结果显示考虑重力和不考虑重力有很大差别。

Dyah Rini R 等人^[35]基于分形模型,利用有限差分方法,给出了裂缝性油藏的单井径向多相流的数值结果。

对离散方程,基本上都采用 Newton-Raphson 迭代方法来求解。

1.3.2.2 有限元法

Aifantis^[53]提出了双孔弹性孔隙的最初构想,给出了相应的数学公式和数值计算方法。其数学基础是 Crochet、Naghdi^[54]和 Atkin、Crane^[55]的混合理论。该理论认为,在混合介质中的各组分表现出来的物理特性、热力特性、水力特性和力学特性等与混合物表现的相应特性有明显的差异,各组分服从其原有的控制方程。有限元方法由于其能适应各种边界形状,受到较为广泛的应用。

将有限元方法应用于裂缝性油藏,必须将其均匀化以便得到一等效的连续体,从而可方便地为这一等效连续体建立起应变张量和渗透率。

白矛和刘天泉^[56]采用三维有限元模型计算双孔弹性介质的变形及流固耦合问题。在这一模型中,假定基质中的流体和裂缝中的流体为相互独立的连续体,且都处于流动状态,用交换函数描述他们的流体交换。对基质和裂缝分别建立流动方程,两方程通过源汇项耦合。因而裂缝中流体的流失意味着基质孔隙中流体的增加。

程林松等^[57]在空间离散上利用三维有限元方法,得出了裂缝性底水油藏水平井的数值模拟结果。

黎水泉等^[58]基于双重介质模型,考虑了流体和基质骨架的耦合作用,以裂缝和基质的压力及位移为基本未知量建立了控制方程流固耦合的有限元计算格式。

1.3.2.3 边界元法

边界积分方程以其独特的优势在数值方法中占有一席之地。边界元法与有限元法比较,边界元解法需要处理的空间维数少了一维,这使得输入数据量大幅度减少,网格划分和重新调整较为方便,最后形成的代数方程组规模也小得多,从而计算时间大大缩短。边界元法所包含的近似只在表面,作为权函数的基本解是严格满足问题的微分方程的,而且基本解的奇异性将使最后形成的代数方程组的系数矩阵中对角线和近对角线元素的值远大于其他元素的值。这些特点使边界元法计算的精度大大提高,特别适合处理场量变化梯度很大的问题,尤其是在无限体中含有埋入裂纹。现在,边界元法的发展已涉及工程和科学的很多领域,几乎可以解决所有有限元法能够解决的问题。

Lough^[59 60]和 Jensen^[61]在模拟复杂裂缝系统时,假设在网格块中的裂缝垂直于网格块的底面,从而使网格块的渗透率张量由微观各向异性简化为宏观各向异性,即每个网格块的 9 个渗透率张量简化成 5 个。然后利用周期性边界条件,无需在基质中进行离散,即可用边界元求解出每个网格块的渗透率张量。

1.3.3 存在的问题

低渗透裂缝性油藏一般都表现为低渗透的特性,通常需要采用注水开发。采用何种方式注水一直是人们关注的问题。当沿天然裂缝方向布井注水时,在注水井压力提高后,油井经常发生暴性水淹,即使有的油水井跨距很大,注入压力并不很高,但仍可在几十天或几个月