

Physical Simulation of Fractured
Petroleum Reservoir Development

裂缝性油藏开发 物理模拟

刘月田 郑文宽 丁祖鹏 刘 剑 著



科学出版社

国家自然科学基金面上项目 (51374222)

国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2015CB250905) 资助

国家重大专项 (2017ZX05032004-002)

裂缝性油藏开发物理模拟

Physical Simulation of Fractured Petroleum Reservoir Development

刘月田 郑文宽 丁祖鹏 刘 剑 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

油藏物理模拟方法的不断发展对于油气田合理高效开发研究具有重要意义。本书主要针对裂缝性油藏的非均质和各向异性特点,介绍作者近年来在裂缝性油藏物理模拟方面的研究成果。本书内容分为两部分,第一部分从第1章到第4章,主要是裂缝性油藏物理模拟的方法原理,包括裂缝性油藏渗流机理分析及物理模拟相似理论、裂缝性油藏物理模型制作及测试方法;第二部分从第5章到第7章,主要是裂缝性油藏物理模拟方法在实际油藏中的应用。

本书适合从事油气田开发与相关专业研究的高校师生,以及科研院所、油田企业的技术和管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

裂缝性油藏开发物理模拟 / 刘月田等著. —北京: 科学出版社, 2017. 10
ISBN 978-7-03-054220-5

I. ①裂… II. ①刘… III. ①裂缝性油气藏-油田开发-物理模拟
IV. ①TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 206042 号

责任编辑: 焦 健 / 责任校对: 张小霞
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 10 月第一次印刷 印张: 17

字数: 388 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

本书主要针对裂缝性油藏的非均质性和各向异性特点，介绍裂缝性油藏开发的物理模拟方法及应用。

物理实验是油气田开发研究的主要手段之一。但是，裂缝性油藏岩石介质及流体流动的复杂性，给裂缝性油藏物理建模与实验造成较大困难，其物理实验方法尚有许多不成熟之处，难以满足裂缝性油藏开发研究的需要。尤其是实际裂缝性油藏开发过程模拟，因为无法保证实验模型的非均质性和各向异性与实际油藏相似，所以物理模拟往往难以实现。

裂缝性油藏在世界石油储量和产量中均占有很大比重，研究建立更为先进、科学的裂缝性油藏物理模拟方法，有利于裂缝性油藏合理高效开发研究，因而具有重要意义。

本书主要总结了作者近年来在裂缝性油藏物理模拟研究方面的成果。全书共分7章，涵盖两部分内容。第1章至第4章是裂缝性油藏物理模拟的方法原理，包括裂缝性油藏渗流机理分析及物理模拟相似理论、裂缝性油藏物理模型制作及测试方法。在这部分中，采用“离散化”的思想，建立了可实现物性分布定量化的大尺度裂缝性油藏物理模型制作方法，以及相关实验理论和测试方法。应用该方法可以构建任意尺度、任意形状和任意物性分布的物理模型，定量化模拟目标油藏的非均质性；可以精确控制物理模型中的裂缝分布参数，包括方向、密度等，形成各向异性三维裂缝网络，定量化模拟目标油藏的各向异性。第5章至第7章是裂缝性油藏物理模拟方法在实际油藏的应用。在这部分中，为了让读者较全面地了解物理模拟方法在实际油藏研究中的作用以及与其他研究方法的协同使用过程，本书在实际应用章节中尽可能完整地保留了实际油藏研究项目的内容。

参加本书相关研究工作的还有研究生张勇、敖坤、杨志成、高超、李二鹏、赵义强、刘泽华、张海茹等，研究生秦佳正参与了全书内容的编辑整理工作；还有许多参与和关心本书工作的同志，在此一并表示衷心的感谢。

特别感谢中国石油辽河油田公司、中海油研究总院的领导、专家和同行，他们在多方面为本书的撰写提供了非常大的帮助和支持。

裂缝性油藏物理模拟研究涉及范围比较广，内容比较多，本书仅介绍了作者近年来的研究成果，还有许多其他人的研究成果在本书中尚未涉及，而且随着科学技术的进步，裂缝性油藏物理模拟技术也在不断发展。因此，希望通过本书与同行专家进行交流，以期有助于裂缝性油藏物理模拟方法和技术的进一步发展。由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2017年1月于北京

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 裂缝性油藏基本特征	1
1.1.1 裂缝性油藏及其开发特点	1
1.1.2 裂缝性油藏介质基本参数	1
1.1.3 裂缝性油藏渗流基本原理	2
1.2 裂缝性油藏物理模拟研究进展	3
1.2.1 物理模拟在油藏开发研究中的重要性	3
1.2.2 国内外裂缝性油藏物理模拟研究进展	4
1.2.3 裂缝性油藏物理模型制作方法研究进展	5
1.2.4 目前存在问题	8
第2章 裂缝性油藏开发模拟相似理论	9
2.1 相似准则基本理论	9
2.1.1 相似三定理	9
2.1.2 无因次方程	10
2.2 油藏物理模拟相似理论简介	10
2.3 裂缝性渗流介质水驱油相似准则	11
2.3.1 简化及假设	11
2.3.2 建立渗流数学模型	11
2.3.3 相似准则详细推导过程	15
2.3.4 相似准则的严格表述	18
第3章 裂缝性渗流介质制作方法研究	19
3.1 单裂缝渗流介质精细制作方法	19
3.1.1 制作原理	19
3.1.2 制作方法	19
3.1.3 胶点对裂缝渗透率影响研究及优化	22
3.1.4 方法验证	23
3.2 三维大尺度裂缝性渗流介质制作方法	26
3.2.1 制作原理	26
3.2.2 岩块粘接方式	27
3.2.3 物性控制方法	35
3.2.4 可重复性验证	36
3.3 原理模型渗流实验研究	37

3.3.1	生产数据分析	38
3.3.2	压力数据分析	41
3.3.3	水驱油物理实验结论与认识	42
第4章	裂缝性油藏物理模型制作方法	44
4.1	物理模型参数的确定	44
4.1.1	油藏参数获得及典型化处理	44
4.1.2	相似准则的应用	50
4.1.3	基于相似准则的特殊油藏参数处理	53
4.2	物理模型制作配套技术	58
4.2.1	井筒内置方法	58
4.2.2	井筒封堵方法	61
4.2.3	油水饱和度测试方法	66
4.3	物理模型制作过程	68
第5章	潜山裂缝性油藏复杂结构井开采机理研究	70
5.1	油藏概况及研究内容	70
5.1.1	兴古7油藏概况	70
5.1.2	复杂结构井适应性分析	71
5.1.3	研究内容	74
5.1.4	研究方法	74
5.1.5	技术路线	74
5.2	裂缝性油藏渗流理论分析	75
5.2.1	油藏渗流综合受力分析	75
5.2.2	重力分异作用下的临界注采压差理论分析	77
5.2.3	渗吸作用与注采速度的关系	78
5.3	三维裂缝性各向异性渗流模型制作	78
5.3.1	油藏物性参数及计算方法	79
5.3.2	模型岩体的制作	81
5.3.3	实验流体的选择	85
5.3.4	渗吸现象的相似	85
5.3.5	相似性设计总结	87
5.4	水平井、鱼骨井分层、交错部署驱替规律物理模拟研究	90
5.4.1	水平井交错注采驱替规律研究	90
5.4.2	水平井叠置注采驱替规律研究	99
5.4.3	水平井分层注采驱替规律研究	101
5.4.4	鱼骨井注水驱替规律研究	111
5.5	油藏开发指标物理模拟定量预测	112
5.5.1	定量预测方法	112
5.5.2	井距对油藏开发影响的预测分析	116

5.5.3 注采压差对油藏开发影响的预测分析	120
5.6 复杂结构井井型及注采井网数值模拟研究	127
5.6.1 数值模型的建立	127
5.6.2 水平井水平段合理长度研究	128
5.6.3 不同部位注水机理研究	128
5.6.4 鱼骨井合理分支角度研究	129
5.6.5 鱼骨井合理分支数与合理分支长度研究	130
5.7 总结与认识	131
5.7.1 主要研究成果	131
5.7.2 主要结论	132
第6章 潜山裂缝性油藏井网优选及开发调整研究	134
6.1 油藏概况及研究内容	134
6.1.1 边台潜山油藏地质概况	134
6.1.2 现阶段油藏开发特征	135
6.1.3 研究内容与技术路线	135
6.1.4 关键技术	136
6.2 边台潜山油藏整体地质建模	137
6.2.1 三维地质模型的建立	137
6.2.2 边台潜山裂缝预测	140
6.3 合适井型井网优选数值模拟研究	143
6.3.1 地质模型参数	143
6.3.2 基础井网设计及井网筛选原则	144
6.3.3 优势井型筛选	145
6.3.4 井距优选	151
6.3.5 优选结果与分析	158
6.4 三维裂缝各向异性渗流物理模型制作	158
6.4.1 边台油藏物性参数	158
6.4.2 模型岩体的制作	159
6.4.3 实验流体的选择	163
6.4.4 相似性设计总结	163
6.5 驱替规律物理模拟研究	164
6.5.1 复杂结构井注采驱替规律研究	164
6.5.2 直井-复杂结构井注采规律研究	177
6.5.3 直井-直井注水开采规律研究	181
6.5.4 不同井型注水开发指标对比	183
6.6 边台潜山油藏整体数值模拟研究	185
6.6.1 三维模型数据准备	185
6.6.2 网格系统建立	188

6.6.3	动态数据处理	189
6.6.4	井史数据的整理	189
6.6.5	断层封闭性的分析处理	189
6.6.6	油藏开发历史拟合	189
6.6.7	剩余油分布研究	191
6.7	开发调整方案设计	193
6.7.1	调整方案设计原则	193
6.7.2	有利调整区域选取	194
6.7.3	调整措施研究与方案设计	195
6.7.4	开发调整方案预测与效果评价	199
6.7.5	经济效益评估	201
6.8	总结及认识	202
第7章	潜山裂缝稠油油藏开发方式优选研究	204
7.1	油藏概况及研究内容	204
7.1.1	油藏概况	204
7.1.2	研究内容	207
7.1.3	技术路线	208
7.2	微观渗流机理实验岩样选取	208
7.3	基质微观渗流机理研究	210
7.3.1	拟启动压力梯度测试	210
7.3.2	基质可流动流量下限测试	214
7.3.3	成果应用	216
7.4	裂缝微观渗流机理研究	218
7.4.1	实验原理	218
7.4.2	实验仪器	218
7.4.3	实验用岩心	218
7.4.4	实验流程	219
7.4.5	实验结果统计及结论	220
7.5	油水两相基质裂缝耦合渗流规律研究	221
7.5.1	实验原理	221
7.5.2	实验仪器	222
7.5.3	实验模型	222
7.5.4	实验流程	223
7.5.5	实验结果统计及结论	223
7.6	大尺度裂缝性各向异性渗流模型制作	225
7.6.1	油藏物性参数的确定	225
7.6.2	物理模型参数选取	227
7.6.3	模型油水饱和度分布测试方法	232

7.6.4 大尺度物理模型建造过程	232
7.7 不同开发方式开发规律物理模拟研究	234
7.7.1 宏观开发实验研究测试方案	235
7.7.2 水平井立体注采井网优选	240
7.7.3 水平井定向井混合立体注采井网优选	247
7.7.4 不同开发方式优选	253
7.7.5 本节小结	257
7.8 总结与认识	258
7.8.1 微观渗流机理研究	258
7.8.2 宏观开发实验研究	258
参考文献	260

第1章 绪 论

随着裂缝性油藏开发遇到的问题越来越复杂，提高原油采收率工作的难度也越来越大，因此需要开展复杂条件下的油藏物理模拟研究，研究油藏开采机理和提高采收率的新方法，为油田高效开发提供依据。本章主要介绍裂缝性油藏基本特征，以及裂缝性油藏物理模拟研究进展。

1.1 裂缝性油藏基本特征

1.1.1 裂缝性油藏及其开发特点

裂缝性油藏是储层中普遍发育天然裂缝或人工裂缝的一类特殊油藏。我国裂缝性油藏探明地质储量大于 4.5×10^9 t，占总探明储量 30% 以上，在石油储量中占有很大比重。目前，我国裂缝性油藏年产已超过 1.6×10^7 t，且呈逐年增长趋势。裂缝性油藏勘探开发已成为我国“十三五”乃至更长远规划中产量接替、持续发展的重要组成部分，在石油工业中占有越发重要的地位。

水驱是裂缝性油藏的常规开发方式（刘子良等，2003；王乃举，1999），然而由于裂缝性油藏岩性复杂，储层具有强非均质性和各向异性特征，其渗流物理特征异常复杂。不同区域间的裂缝连通性差异很大，导致油井产量差异很大，注水开发时，部分油井见水快，含水率上升迅速，极易水窜或暴性水淹，基质中原油难以采出，导致裂缝性油藏原油采收率普遍较低，开发效果差（刘漪厚，1997）。裂缝性油藏最终采收率一般不超过 25%（Jack and Sun，2003），开发效果远不及常规砂岩油藏。正是由于裂缝性油藏的地质特征和渗流规律都具有特殊的复杂性，其许多微观渗流机理、宏观开发规律尚不清楚，因此需要对裂缝性油藏进行深入研究，以便准确把握裂缝性油藏的开发过程、改善其开发效果。

1.1.2 裂缝性油藏介质基本参数

不同于用单一孔隙介质描述的普通砂岩油藏，裂缝性油藏由具有一般孔隙结构的基质岩块和分割岩块的裂缝系统组成，通常使用双重介质表征（范·高尔-拉特，1989）。包含单条裂缝的储层微元如图 1.1 所示。裂缝性油藏研究中常用的物性参数如下所述。

1. 裂缝性油藏孔隙度

1) 基质孔隙度

基质孔隙度 ϕ_1 为基质孔隙体积与岩石总体积（基质加裂缝）之比。结合图 1.1，基质孔隙度可表达为式（1.1）：

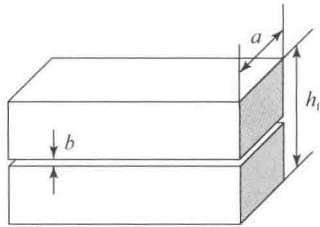


图 1.1 含单条裂缝的储层微元示意图

$$\phi_1 = (1 - b/h_f) \times \phi_m \quad (1.1)$$

式中, ϕ_1 为基质孔隙度, %; b 为裂缝张开度, μm ; h_f 为裂缝性岩心厚度, μm ; ϕ_m 为基质岩石孔隙度 (基质孔隙体积与基质体积之比), %。图 1.1 中 a 为裂缝长度, μm 。

2) 裂缝孔隙度

裂缝孔隙即裂缝空间, 裂缝孔隙度 ϕ_2 为裂缝孔隙体积与岩石总体积之比。

3) 总孔隙度

裂缝性油藏具有双重孔隙度, 总孔隙度 ϕ_1 可表示为式 (1.2):

$$\phi_1 = \phi_1 + \phi_2 \quad (1.2)$$

2. 裂缝性油藏渗透率

1) 裂缝内蕴渗透率

裂缝内蕴渗透率表征单一裂缝对流体的导流能力, 流动截面为图 1.1 中 $a \times b$ 截面, 与裂缝周围基质无关。裂缝内蕴渗透率 K_{ff} 可表示为式 (1.3):

$$K_{ff} = b^2/12 \quad (1.3)$$

2) 裂缝等效渗透率

裂缝等效渗透率即裂缝对整个储层微元导流能力的贡献量, 流动截面为图 1.1 中 $a \times h_f$ 截面。裂缝常规渗透率 K_f 可表示为式 (1.4):

$$K_f = b^3/12h_f \quad (1.4)$$

3) 总体渗透率

总体渗透率表征含裂缝的储层微元流体总导流能力, 总体渗透率 K_1 是裂缝导流能力 K_f 与基质导流能力 K_m 简单相加, 见式 (1.5):

$$K_1 = K_f + K_m \quad (1.5)$$

1.1.3 裂缝性油藏渗流基本原理

在裂缝性油藏中, 由于裂缝和基质两大系统的储集空间特征不同, 其渗流特征与驱替机理也存在较大差别 (李亚军等, 2011)。

裂缝系统主要靠外部驱动压差进行排油, 由于裂缝张开度远大于一般孔隙尺寸, 因此可忽略毛管压力作用, 而且束缚水及残余油饱和度很低, 水驱油过程近似活塞式, 流体流动符合达西定律。主要有两大特征: ①对于理想裂缝系统, 油水相对渗透率与含水饱和度接近线性关系。尽管实际油藏中存在着不同张开度且相互连通的裂缝系统, 但与常规油水

相对渗透率曲线相比仍有明显不同。②在垂向驱替过程中,重力作用不可忽略。其可减缓含水率的快速上升并抑制驱替过程的非活塞性,从而提高波及体积和驱油效率。

基质系统是一个储渗条件差异很大、分布关系复杂的集合体,其渗流及驱替过程主要有三大特征:①对于储层润湿性以亲水为主的裂缝性油藏,基质系统依靠毛管压力的渗吸作用排油是区别于裂缝系统的本质性特征,更是不同于常规砂岩油藏的主要渗流特征及驱替机理。该过程只有借助裂缝系统的渗流通道并且当含水率在一定范围内才能得以进行。②基质系统依靠外部驱动压差进行的排油也在微裂缝发育的次生孔隙中进行。当基质系统与裂缝系统间存在压差时,就会发生物质交换,即窜流。③基质系统的水驱油过程在理想状态下是可以发生的,但在裂缝性油藏实际开发以及数值模拟过程中,裂缝和基质两套系统所需压力梯度相差很大。在两者共存的条件下,裂缝系统处于主导地位,基质系统水驱油过程难以发生。

1.2 裂缝性油藏物理模拟研究进展

1.2.1 物理模拟在油藏开发研究中的重要性

油藏物理模拟可以分为“基本机理模拟”和“按比例相似模拟”两种。基本机理模拟是用实际(模拟)油藏岩石和流体进行实验,模拟油藏的一个单元或一个过程,可以不按比例或部分按比例进行机理实验。基本机理模拟研究对于理解一些油藏开采机理起着重要作用。基本机理模拟研究结果不能直接用于油田,但是可以通过数值模拟扩展到油田开发方案设计和开采前景预测。

按比例相似模拟的物理模型是根据相似原理设计出来的。在模型设计、实验操作、数据处理,以及用实验结果来解释油藏原型等各个研究阶段都离不开相似理论指导。按比例相似物理模型与油藏原型之间,油藏大小、流体性质和岩石物性都按比例给定,不同力的比例在油藏原型和物理模型中是相同的。按比例相似模拟的结果可以直接用于油田。

物理模拟研究是数值模拟研究的基础,所有的数学模型都是通过物理模型建立起来的,特别是准备采用一种新的生产方式时,物理机理还不清楚或尚不肯定时,必须用物理模型去研究。物理模拟除了能与数值模拟方法一样,对机理已经很清楚的物理过程进行研究外,更擅长对机理还不清楚的各种现象进行研究,寻找规律和普遍性。

裂缝性油气藏的基本特点是油气水等流体在油气藏中的运动主要通过裂缝完成,裂缝系统的渗流特征和渗流过程直接决定着油气藏的开发效果。裂缝分布具有非均匀性和各向异性,裂缝在不同区域的发育程度(包括裂缝密度和裂缝宽度)不同就造成裂缝分布的非均匀性,而由于地层应力等因素的影响,裂缝的方位具有特定的方向性,从而形成裂缝分布的各向异性。为保证裂缝性油气田开发取得较好效果,必须考虑裂缝介质的非均质性和各向异性,对油气藏内流体的渗流机理和规律进行深入研究。为此,研究人员一直尝试用物理实验方法对裂缝性油藏渗流与开发过程进行定量模拟和预测,即根据相似原理把实际油藏按比例缩小,通过小模型实验直观地观察和测试分析裂缝性油藏渗流与开发过程特征

及规律。然而, 此前尚未发现成功的裂缝性油藏渗流与开发过程定量物理模拟和预测研究报告。主要原因是难以定量控制裂缝孔渗等参数(王家禄等, 2009), 或无法形成三维裂缝网络(Qasem *et al.*, 2008), 或没有考虑基质裂缝间渗吸耦合作用(Hao *et al.*, 2008), 或未曾解决井筒几何相似问题(关文龙等, 2003)。

研究建立新型水驱裂缝性油藏定量物理模拟及预测方法, 并结合数值模拟、油藏工程等方法, 研究各种裂缝性油藏水驱渗流规律与合理开发方法, 对裂缝性油藏宏观决策制定与合理高效开发具有重要意义。

1.2.2 国内外裂缝性油藏物理模拟研究进展

油藏开发研究可分为微观机理研究和开发过程研究。微观机理研究主要研究物质运动变化的原因, 分析和阐述内在的作用原理, 为说明问题或解释现象提供理论支撑。通过微观机理研究, 可以掌握油藏内流体运动及岩石介质变化的基本规律。开发过程研究主要研究各种基本规律和影响因素综合作用下油藏内物质运动变化的过程、特征和现象。通过开发过程研究, 可以直接模拟预测实际油藏的油水运动过程及开发效果, 为实际油藏开发提供直接依据。主要研究进展包括如下几个方面。

(1) 单裂缝单相渗流微观机理研究。裂缝性介质渗流研究首先从单裂缝入手, 人们采用光滑的平行玻璃板裂缝和厚有机玻璃板模型进行裂缝流体渗流实验。通过单裂缝单相流体实验研究, 建立了立方定律(Snow, 1965)。在此基础上, 分析了裂缝中不同流态的渗流特征, 验证了立方定律的有效性及其适用范围(Persoff and Pruess, 1995; 叶自桐等, 1998), 并逐渐考虑了流体流动状态、裂缝张开度、裂缝壁面粗糙性、基岩的渗透性等因素, 对立方定律进行了修正, 研究结果为进一步认识裂缝渗流规律提供了基础和依据, 同时也发展了室内单裂缝单相渗流实验方法。

(2) 单裂缝两相渗流机理物理实验研究。其主要是针对石灰岩裂缝、天然花岗岩裂缝、平行平板裂缝、天然凝灰岩裂缝(刘建军等, 2004), 通过拟稳态驱替实验和两相渗流实验, 研究毛细管力-饱和度和相对渗透率-饱和度(或毛细管力)的函数关系; 裂缝网络系统物理模拟研究丰富了对裂缝系统的研究, 主要是用岩块组成的单裂缝和正交裂缝介质模型对油水相对渗透率、重力和毛细管力对岩块渗吸的影响、水驱油机理进行了研究(姚飞等, 2008)。

Reitsma 和 Kueper (1994)、Persoff 和 Pruess (1995)、叶自桐等 (1998) 采用不同岩性的岩石, 如石灰岩、天然凝灰岩、天然花岗岩制作的裂缝模型进行了油水驱替实验。叶自桐等 (1998)、Reitsma 和 Kueper (1994) 采用的是 Brooks-Corey 和 Van Genuchten 拟合模型, 且拟合方法相同; 而叶自桐等 (1998) 将裂缝总体积也进行了拟合, 这是其束缚水饱和度拟合效果更好的原因。但是, 利用实验所得关系式进行非恒定渗流计算时, 结果会有所偏差。Romm (1966)、周波等 (2006) 通过测电阻率确定了平行平板裂缝模型中的流体饱和度, 并且对不同流体密度、注入速率时油水运移特征进行了分析。

(3) 裂缝性油藏油水运移和渗吸规律物理模拟。国内外学者利用物理模拟方法对油水运移规律和渗吸效果的影响因素进行了研究, 物理模拟所用裂缝介质模型主要包括天然露

头岩石水力造缝模型和裂缝地层仿真模型（郭尚平、黄延章，1990）。研究表明，水驱油的影响因素主要有模型的拓扑结构、几何参数和裂缝的相关参数（包括裂缝方向、长度和位置）（康永尚等，2003）；渗吸效果的影响因素包括流体参数（注入水流动速度、油水黏度比和初始含水饱和度）和岩石润湿性等岩石参数（王家禄等，2009）。采用平行板裂缝（刘建军等，2004）、真实岩心微观模型（赵阳等，2002）、玻璃微珠模型（张发强等，2003）、光蚀刻渗流介质模型（吴建发等，2004），对裂缝微观水驱油机理、残余油形成机理，以及裂缝不同形态时的油气运移过程和方式、油水运动分布特征进行了研究。

1.2.3 裂缝性油藏物理模型制作方法研究进展

在实验室内研究裂缝性油藏渗流机理与开发过程，其基础及关键在于如何制作合适的裂缝性介质模型，此前常见的有如下9种实验室裂缝性介质制作方法。

1. 裂缝性储层岩心薄片模型

对实际裂缝性储层进行钻井取心，将裂缝性岩心加工制作成含裂缝薄片模型（唐玄等，2006），如图1.2所示。该方法的优点在于裂缝形状和物性接近实际油藏。

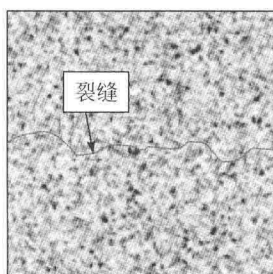


图1.2 裂缝性储层岩心薄片模型示意图

2. 岩石薄板刻画裂缝模型

将天然岩石加工成二维薄板，在岩石薄板上刻画裂缝，制作成裂缝性二维岩石薄板模型（刘建军等，2004），如图1.3所示。该方法的优点在于制作工艺及实验难度相对较小，可定性模拟油藏中平行裂缝网络对注采井宏观渗流开发规律的影响。

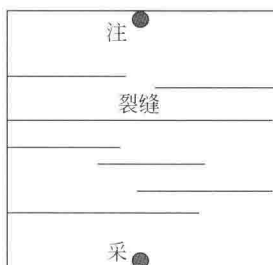


图1.3 二维岩石薄板模型刻画裂缝示意图

3. 裂缝性填砂模型

首先制作填砂模型，再通过拉伸、挤压造缝，制作裂缝性填砂模型 (Adibhatla and Monhanty, 2008)，如图 1.4 所示。该方法的优点在于能根据实际地质变形特点和初始变形条件，模拟出变形中应力场的分布情况，从而模拟出实际油田的构造。

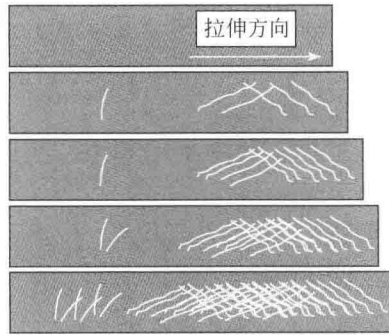


图 1.4 填砂模型拉伸造缝示意图

4. 支撑剂支撑造缝模型

首先制作填砂模型，然后在模型层间铺置压裂支撑剂来支撑造缝，如图 1.5 所示，用以模拟实际油藏水平压裂缝 (Wu and Pruess, 1988)。该方法的优点在于可实现对裂缝张开度进行定量控制。

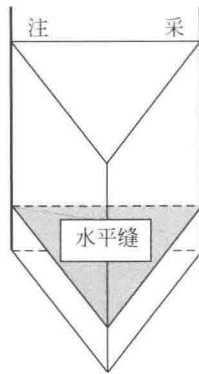


图 1.5 支撑剂支撑造缝模型示意图

5. 平板裂缝模型

将岩石加工成 2 个平板型岩块，再将 2 个平板型岩块对叠，制作平板裂缝模型 (Wu et al., 2004)，如图 1.6 所示。该方法的优点在于裂缝方向、裂缝张开度和裂缝孔渗等物性定量可控。

6. 机械力造缝模型

通过机械设备向岩心施加围向力和轴向力，通过控制使应力在岩心某点集中，使岩心产生压裂缝 (李秀莲等, 2007)，如图 1.7 所示。该方法的优点在于可模拟实际储层裂缝

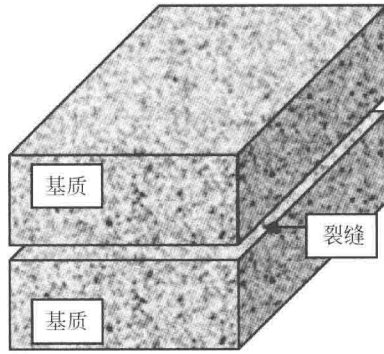


图 1.6 平板裂缝模型示意图

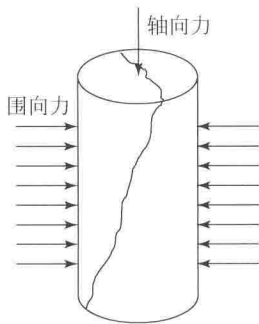


图 1.7 应力造缝模型示意图

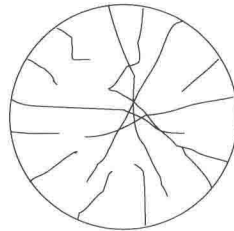


图 1.8 岩心热裂缝模型示意图

形成机理和形成过程。

7. 热力造缝模型

将岩心高温加热，再突然冷却，岩心内外温差使岩心破裂产生裂缝（姚飞等，2008），如图 1.8 所示。该方法的优点在于可以模拟地层注水时热裂缝形成机理和形成过程。

8. 裂缝性光蚀刻玻璃板模型

选用表面平整的玻璃板，利用光蚀刻技术在玻璃板表面刻画裂缝网络（康永尚等，2003），如图 1.9 所示。该方法的优点在于可制作裂缝网络，模拟油藏宏观油水运移及驱替过程。

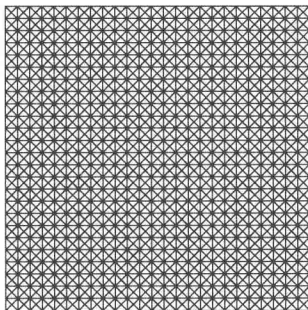


图 1.9 光蚀刻裂缝网络模型示意图

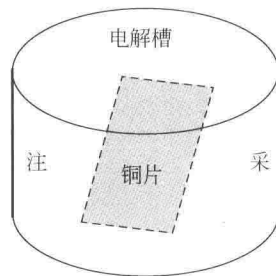


图 1.10 电模拟裂缝模型示意图

9. 电模拟裂缝模型

利用水电相似原理,用电解水槽模拟渗流介质,用带电压两极模拟注采井,用薄铜片模拟高渗裂缝条带(周德华等,2003),如图1.10所示。该方法的优点在于简单易行、成本较低、可有效模拟裂缝高渗特性。

1.2.4 目前存在问题

长久以来,国内外的各研究学者在进行裂缝性油藏物理模拟研究时,取得了很多突破和进步,但也存在以下问题亟待解决。

(1) 目前裂缝性渗流介质制作方法或不能精细定量控制单裂缝各种物性参数,或难以定量控制孔渗等参数以建立非均质的物理模型,或无法形成各向异性裂缝三维网络,或没有考虑基质裂缝间渗吸耦合作用。为了深入研究裂缝性油藏渗流机理与开发方式,需要制作三维物性分布定量化裂缝性介质模型。

(2) 目前缺少裂缝性油藏定量物理模拟方法相关研究,需推导建立水驱裂缝性油藏定量物理模拟相似准则体系,建立裂缝性介质模型渗流实验配套测试技术。基于相似准则体系、裂缝性介质模型制作技术和实验测试技术,建立完整的裂缝性油藏定量物理模拟方法。