

国家科技重大专项课题(2011ZX05013006)资助

Mechanism of Leakage and Interporosity Flow
of Injected Fluid in Low Permeability Oil Reservoir

低渗透油田

注入流体渗漏和窜流机理研究

刘建军 陈淑利 纪佑军 裴桂红 李奎澍 著



科学出版社

国家科技重大专项课题(2011ZX05013006)资助

低渗透油田注入流体渗漏 和窜流机理研究

刘建军 陈淑利 纪佑军 裴桂红 李峯澍 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

高压注水开采是低渗透油田主要的开采方式,注入水沿隔夹层及断层窜流和渗漏使注水达不到预期效果,严重影响开发效果。本书针对导致窜流的主要因素,通过实验研究、理论建模和数值模拟的方法,从渗流-损伤耦合理论出发,建立考虑隔夹层渗流损伤的力学模型,通过对实际区块渗漏和窜流的数值模拟,对影响窜流、渗漏的主要因素进行敏感性分析,并给出窜流、渗漏的防控措施。

本书可供石油工程、地质工程、岩土工程、地下工程等专业的科研人员、设计和施工人员,以及高等院校的教师、研究生、本科生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透油田注入流体渗漏和窜流机理研究 / 刘建军等著. —北京: 科学出版社, 2015.9

ISBN 978-7-03-042925-4

I. ①低… II. ①刘… III. ①低渗透油层-注入井-漏油-研究
②低渗透油层-注入井-窜流(油气开采)-研究 IV. ①TE33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 309701 号

责任编辑: 罗 莉 / 责任校对: 陈 靖

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年9月第一版 开本: 720×1000 B5

2015年9月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 200千字

定价: 99.00元

前 言

高压注水开采是低渗透油田主要的开采方式,注入水沿隔夹层及断层窜流和渗漏使注水达不到预期效果,严重影响开发效果。本书针对导致窜流的主要因素,通过实验研究、理论建模和数值模拟的方法,从渗流-损伤耦合理论出发,建立考虑隔夹层渗流损伤的力学模型,通过数值模拟,对影响窜流、渗漏的主要因素进行敏感性分析,并给出窜流、渗漏的防控措施。研究成果对于提高低渗透油田注水开发效果等具有重要的理论意义和应用价值。

全书包括六个部分:一是通过实验研究,测定低渗透油田储层和隔层岩石的岩石力学及渗流力学参数,比较隔夹层和储层岩石物理力学性质的差异;二是考虑有效应力对地层渗透率、孔隙度的影响,将有效应力与孔隙度、渗透率的关系定义到材料本构中,借助有限元分析软件 Abaqus 对可能导致窜流的主要影响因素进行数值模拟,分析开发过程中隔层孔渗参数的变化规律以及由此引起的隔夹层窜流、渗漏情况;三是考虑渗流-损伤耦合作用,通过数值模拟研究在高压注水过程中,隔层发生塑性损伤的机理和过程;四是通过 MATLAB 软件编制综合评价渗漏窜流影响因素的分析程序,并对主要影响因素进行敏感性分析;五是考虑裂缝的各向异性特征,研究不同形态天然裂缝及人工裂缝对地层渗流场的影响,分析其对注入流体在地层内流动情况的影响;最后以大庆油田某实际区块为研究对象,考虑隔夹层渗流损伤作用,对油田开发过程进行数值模拟,给出隔夹层渗漏窜流的数值模拟结果,分析其主要规律。

本书内容主要来自于作者近五年来所完成的一系列科研项目成果。包括国家科技重大专项课题(2011ZX05013006)、国家自然科学基金资助项目(51174170)和中国石油大庆油田勘探开发研究院、中国石化胜利油田分公司孤东采油厂等企业协作项目等。科研工作得到了大庆油田勘探开发研究院、中国科学院渗流流体力学研究所、中国科学院武汉岩土力学研究所、武汉轻工大学、油气藏地质及开发工程国家重点实验室的大力支持,在此表示衷心的感谢!

另外,本书的出版,得到了西南石油大学地球科学与技术学院“地质资源与地质工程”学科建设项目和国家科技重大专项课题(2011ZX05013006)的资助。

由于注入流体渗漏和窜流研究的许多方面还处于探索阶段,加之著者水平有限,书中难免有缺点和疏漏,恳请读者批评指正。

作 者

2015 年 4 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 国内外研究现状	1
1.1.1 环空窜流方面的研究	2
1.1.2 层间窜流方面的研究	2
1.1.3 沿断层或裂缝窜流	4
1.1.4 流体注入对地层力学参数扰动研究	5
1.2 主要研究内容与技术路线	6
第2章 储层及隔夹层岩石力学实验研究	8
2.1 实验设备与岩芯	8
2.2 岩石物理力学实验	10
2.2.1 岩芯孔隙度和渗透率	10
2.2.2 岩石力学实验	10
2.2.3 岩石应力敏感性实验	13
2.2.4 不同含水情况下的泥岩力学实验	15
第3章 注入流体渗漏及窜流的数学模型及敏感性分析	20
3.1 注入流体渗漏及窜流的影响因素分析	20
3.2 注入流体渗漏及窜流的数学模型	21
3.2.1 渗流场数学方程	21
3.2.2 应力场数学方程	23
3.2.3 渗流-损伤耦合方程	25
3.3 考虑渗流-损伤的渗漏窜流敏感性分析	30
3.3.1 孔隙度、渗透率演化对渗漏窜流的影响分析	30
3.3.2 隔夹层损伤对渗漏窜流的影响分析	34
3.3.3 综合参数对窜流的敏感性分析	37
3.3.4 裂缝形态对窜流的影响分析	41
3.3.5 环空窜流影响分析	50
3.4 本章小结	52

第4章 低渗透油田地应力场数值模拟	53
4.1 地应力场反演模型	53
4.1.1 地应力反演的基本原理	53
4.1.2 基于遗传算法的地应力反演方法	56
4.1.3 基于遗传算法的初始地应力反演模型及算例验证	59
4.2 实际区块地应力场数值模拟	63
4.2.1 地质模型的建立	63
4.2.2 实际区块地应力场反演	65
4.2.3 基于反演的地质模型应力分析	66
4.2.4 射孔部位对套管应力的影响	79
4.2.5 岩层含水饱和度对套管应力的影响	88
4.3 本章小结	92
第5章 M11 区块渗漏及窜流数值模拟	94
5.1 渗漏及窜流数值模拟研究	94
5.1.1 不含夹层模型	94
5.1.2 含夹层无裂缝模型	98
5.1.3 含夹层及裂缝模型	103
5.2 M11 区块历史拟合	107
5.2.1 夹层孔隙度	110
5.2.2 油井流压	116
5.2.3 日注水量	122
5.2.4 注水井流动压力	128
5.3 M11 区块渗漏、窜流防控方法	134
第6章 S382 区块断层渗漏及窜流研究	136
6.1 S382 区块渗漏和窜流数值模拟	136
6.1.1 S382 区块数值模型	136
6.1.2 S382 区块历史拟合	137
6.2 S382 区块断层窜流影响因素分析	140
6.2.1 油井流动压力	140
6.2.2 日注水量	144
6.2.3 注水井流动压力	149
6.3 S382 区块断层渗漏、窜流防控方法	152
主要参考文献	154
索引	157

第1章 绪 论

低渗透油田在我国石油开发中有着重要意义。我国发现的低渗透油田占新发现油藏的一半以上,而低渗透油田产能建设的规模则占到油田产能建设规模总量的70%以上,低渗透油田已经成为石油开发建设的主战场。但是低渗透油田的天然能量一般不足,靠自然消耗方式难以维系开采,国内对于这样的油田一般采用注水开发。高压注水是低渗透油田增产的有效措施。对注水开发油田来说,良好的注水驱油效果是油田稳产的基础。

可开发的低渗透油田一般微裂缝发育,裂缝是油藏的主要渗流通道。在开发过程中,注入流体很容易沿着裂缝渗漏或窜流到相邻其他层位,造成窜漏。实际现场资料也表明,注入流体和采出流体质量不平衡的现象经常发生,这种现象是高压注入的流体渗漏或窜流到其他层位造成的。注入流体渗漏和窜流导致开发目的层能量得不到有效补充,注入的部分流体起不到驱替效果,降低了注水开发的效果。因此,通过研究,揭示注入流体渗漏、窜流的力学机理和基本规律,对提高注水开发效果、提高油田采收率具有十分重要的理论意义和实际应用价值。

1.1 国内外研究现状

围绕低渗透油田注入流体渗漏、窜流问题,国内外已经开展了较多的理论研究、现场测试等工作。已有研究成果表明,注入流体渗漏、窜流的形式主要包括以下三种:

一是环空窜流。原因主要为层间封固不良,而致高压流体沿着套管窜入低压层,比如固井时本来就产生了裂缝,一旦注入流体,即有可能发生窜流,或者固井质量不好,在高压注水时引发窜流情况发生。

二是层间窜流。主要是指通过储层间隔层、弱渗透层等途径发生的窜流现象。

三是沿断层或者裂缝窜流。储层在天然状态下,未经过人工造缝过程,注入流体沿着如断层、溶洞、基质裂缝等流走;实施压裂后,人工裂缝可能会成为各种潜在窜流的通道,致使流体经由人工裂缝的途径发生窜流,也有可能是在高压注采时由于地层孔隙压力改变而使得先前闭合的断层或者裂缝开启,形成窜流通道。

围绕以上三种类型的渗漏和窜流现象,国内外开展了相关研究工作。

1.1.1 环空窜流方面的研究

环空窜流是指井内水泥环封隔失效而引起的窜流现象。环空窜流发生有两个必要条件:一是窜流动力,即层间压差;二是窜流途径。窜流途径的形成有多种原因。

张兴国等(2006)对环空窜流原因进行了详细研究。其原因主要分两个方面:一是水泥石本体的原因,包括泥浆窜槽、地层流体窜槽、自由水通道、水泥化裂缝、水泥石破碎解体等;二是来自于固井两个界面的原因,主要包括套管、地层表面油湿、微环隙、地层流体动态干扰、界面胶结破坏等。

杜伟程、黄柏宗(1997)对环空窜流理论及相应防窜措施进行了研究,指出套管、水泥环和地层间的微裂缝和微环隙是造成窜流的原因。微裂缝是水泥环不能很好与套管胶结造成的,而微环隙则是存在于地层之间或者水泥环内产生的微小通道。他们提出使用合成橡胶粉、添加海绵铁等有效措施防窜。

吴铭德(1987)建立了多层油藏的单井模型,模型中假设各层之间有良好的非渗透隔层,各层的厚度、孔隙度、渗透率、表皮系数、地层压力、排油半径等参数可以不同,对该模型建立相应的方程,然后进行拉普拉斯变换,在拉普拉斯空间内求解后,应用斯坦夫算法求得井下压力和流量随时间变化的规律。研究结果如图 1.1 所示。

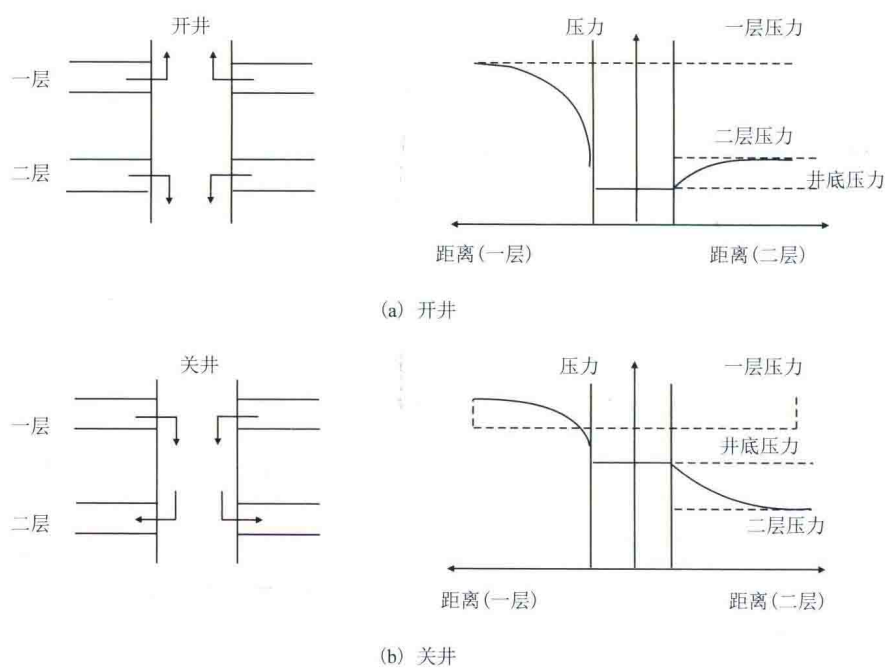


图 1.1 井内窜流说明(压力分析)(吴铭德, 1987)

1.1.2 层间窜流方面的研究

层间窜流指通过储层间隔层、弱渗透层等途径发生的窜流现象。

在隔层窜流研究方面,吴德铭等(1994)对层间窜流也进行了研究,研究表明:两层之压差越大,井下窜流越严重;井口产量越小,窜流也越严重(因为井口产量小时,井底压力相对较高,易发生窜流);高压层的渗透性越好,其表皮系数越小,井下窜流越严重。有层间窜流的多层油藏常有层间窜流现象。例如,隔层具有一定的渗透性、隔层之厚度及特性的横向变异等,均可能为层间窜流提供条件。在碳酸盐岩地层中,高渗透层之间常以致密灰岩作为隔层,致密灰岩中的裂缝可为层间窜流提供条件。

曲兆峰(2006)对多层段窜槽井水泥封窜技术进行研究,随着油田进入高含水后期,层间矛盾逐渐加大,异常高压层逐渐变多,层间压差也越来越大。注水井分层段测压资料表明单井平均层间压差达 4 MPa。层间压差的存在,致使钻井后固井质量不好,大段窜槽井增多。

孙泽辉等(2003)用数值模拟的方法,建立了二维地质模型,对隔层窜流现象进行了研究。他们首先通过研究得出第二胶结面是窜流发生的主要途径,然后对中间层已经被压开,但上下层尚未破裂时的情况进行模拟。因为此时层间压差最大,隔层最容易破坏。模拟结果显示隔层的高抗压强度使得窜流现象此时会发生在第二胶结面上,继而进一步分析了在平衡压裂与常规压裂方式下,针对不同隔层厚度的第二胶结面的抗剪切强度,分别得出两种工艺下不发生层间窜流的最小厚度要求。如图 1.2 所示。

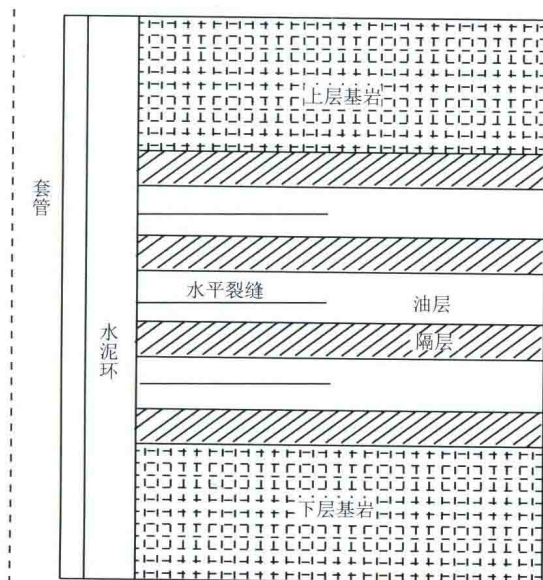


图 1.2 隔层窜流模型示意图(孙泽辉等, 2003)

在隔层渗漏方面的研究,曾昭英等(2002)研究了具有一定渗透率夹层对低渗透油层开发效果的影响,建立了在高渗层与低渗层之间存在具有一定渗透性夹层的数学模型,然后给出5种工况,通过数值模拟的方法,得出低渗层开发中存在某夹层在垂直方向上的渗透率的界限值,而其对于窜流量的影响是非常明显的。研究结果表明,在相同的注采方式下,同时假设渗透率不变,如果低渗透层厚度较小,则低渗透层最终的含油饱和度也会较低;但是也存在某个垂直方向渗透率,在大于这个值后,使得计算所得的窜流量在低渗透层的储量,以及生产井产量和低渗透层产量的比例中占有较大值。

在对层间窜流量计算方面有如下的研究:戴涛等(2002)通过将窜流量视为源汇项的方法,建立了拟三维数值模型,通过窜流量研究了层间窜流问题;并将结果与Eclipse等商业油藏模拟软件的结果进行对比,证明了其处理方法的有效性。程林松等也曾通过将层间窜流情况简化为激动层汇项与反应层源项的办法简化计算,求得窜流量。

1.1.3 沿断层或裂缝窜流

1. 在断层窜流研究方面

断层状态分为闭合与张开两个状态。在闭合状态下断层能够成为储层的封闭界限,起到封隔油层的作用;而在张开状态下,断层则会成为流体疏导途径,形成窜流途径。童亨茂(1998)从地质构造方面,以岩石力学、流体力学各项参数为研究对象,定量分析了断层开启与封闭的条件,并提出了断层封闭性的分析办法。

由于断层情况比较特殊,在数值模拟中对它的研究方法,有通过特别单元进行研究的,但是这种方法计算成本较高,且处理办法麻烦,因此也常用研究高渗带的办法进行处理。

王博等(2008)将断层处理为高渗透性材料,分别研究断层倾向、走向、渗透率以及和断层相隔不同距离时,断层对于地下渗流场的影响。

2. 在裂缝窜流研究方面

压裂缝大致分为两种,一为水平裂缝,一为垂直裂缝。两种裂缝致窜流主要原因不尽相同。水平裂缝致窜主要是因为裂缝水平贯入地层,高压的注入流体使得地层内层间压差增大,有可能导致隔层破坏而致窜流;垂直裂缝则主要是由于裂缝在垂直方向上扩展时,可能贯穿上下隔层,导致窜流。在对水平裂缝的研究方面,魏明臻等(1999)对小黑油模型的油藏数值模拟程序进行改造,将裂缝及油藏作为一个整体系统,并将裂缝处理为具有高渗透性的区域,

对大庆油田的密井网水平缝压裂区块的见水时间、含水变化、含水率、油井产量及采收率变化进行了研究。

低渗透油田窜流问题涉及的问题众多,如前所述,对于窜流问题的分析,虽然比较丰富,但是大多局限于二维问题的分析,且多是从井产量等数据方面进行解释,少有从力学角度进行分析;且大多局限于概念模型,还没有结合实际开发区块开展研究的相关报道,与实际油田开发还有不少的差距。随着计算技术的高速发展以及相关理论研究的深化,有必要针对油田具体开发区块开展低渗透油田注入流体层间窜流和渗漏方面的研究工作。

1.1.4 流体注入对地层力学参数扰动的研究

贾俊山、魏明(2002)对孤东油田注水开发基本规律进行了研究。孤东油田馆陶组上段产液、产油能力变化符合稠油油田的基本变化规律,即在注水开发过程中,随着含水上升,油层含水饱和度不断增大,油相渗透率逐渐下降,采油指数减小;而水相渗透率逐渐上升,采水指数和采液指数不断增大,特别是高含水期以后,采液指数增长更快。在油田注水开发过程中,随含水指数和含水饱和度的增大,水相渗透率增大,流动阻力减小,油层吸水指数逐渐增加,油层吸水能力增强。每米吸水指数和每米视吸水指数虽然数值不同,但随含水上升和注入倍数的增大而增大的规律是一致的。随着累积注水量的增加,含水饱和度增大,水相渗透率增大,渗流阻力降低。注水 0.6 倍孔隙体积、含水率 80% 以后,吸水指数上升速度加快。

初期吸水剖面资料统计表明,纵向各均质段吸水强度与渗透率有一定关系,随渗透率增大,吸水强度增加。但随着累积注水量的增大,渗透率的影响逐渐减小,各均质段吸水强度差异减小。平面水淹,注水前,边部油井过早见水,油藏边部不同程度水淹。油田主力开发层系油水关系比较复杂,具多个油水界面。油水边界附近油井油层射孔位置偏低,致使油井投产后很快见水。注水后,油井见水快,油层平面水淹面积迅速扩大。层内水淹,油层非均质类型不同,其水淹特点不同。层内见水状况受渗透率纵向分布控制,高渗透段首先被注入水波及动用,表现出单个油层动用是一个从高渗透段到中低渗透段的发展变化过程,也就是动用厚度逐渐增加的过程。

何满潮等(2008)对深井泥岩吸水特性实验进行研究,在高地应力与水的作用下,岩体强度损伤明显。特别是湿度条件变化时,软岩的性质与状态会发生很大的变化,体积膨胀,强度降低。此时因水造成的强度损伤比力学因素造成的损伤更为严重。

国内外对岩石与水相互作用问题的研究中,对含水岩石力学特性、水对岩石动力学特性的影响、水-岩化学作用的力学效应、岩石遇水后的微观结构特

征与软化机制、吸水膨胀变形及变形时效特性等研究比较多。通过对泥岩的吸水实验,得出了泥岩在整个吸水过程中吸水速率随时间的变化。吸水初期比较快,随着时间增加,吸水速率减慢,趋于常数。泥岩孔隙的几何形状、大小、分布及其相互连通关系,决定其吸水量的大小与吸水速率的快慢。孔隙率大的岩样吸水量大,吸水速率相对高;孔隙率小的岩样吸水量小,吸水速率相对低。孔隙通道有效半径大,吸水速率相对高;孔隙通道有效半径小,吸水速率相对低。矿物含量与种类是岩石吸水的主要影响因素之一,同类型泥岩中,黏土矿物含量高则吸水量小,吸水速率低;黏土矿物含量低则吸水量大,吸水速率高。

国内外在低渗透油田开发研究中,对多层油藏中存在的问题进行了相关研究,如深井泥岩吸水特性实验研究、多层段窜槽井水泥封窜技术研究、注水开发基本规律等研究,得出了一些有意义的结论,对高压注水低渗透油田的合理开发具有一定的理论指导意义。但是相关研究中,对注水开发中泥岩吸水及泥岩层的渗漏和窜流方面的研究几乎是空白。因此,考虑泥岩渗透性研究渗漏窜流机理对于油田开发具有重要意义。

1.2 主要研究内容与技术路线

本书首先通过室内岩石孔隙度、渗透率和岩石物理力学参数的实验研究,给出储层岩石的渗流和变形力学特性;基于岩石力学、渗流力学、损伤力学的理论,建立考虑储层及隔夹层物性演化的渗流-损伤耦合力学模型;通过数值计算,对低渗透油田注水开发过程中可能存在的几种主要窜流情况进行数值模拟,求得其应力场、渗流场分布及窜流量大小,研究低渗透油田注入流体层间窜流和渗漏的力学机理,给出在不同注采参数及地层条件下的窜流和渗漏规律,为优化注采工艺参数、提高注水开发效果、降低成本、节约资源提供可靠的理论指导。

主要研究内容包括:

(1) 选取区域内典型的泥岩,进行不同含水率下的室内实验,获取不同含水率下泥岩的弹性模量、抗压强度、黏聚力、内摩擦角、蠕变特征、吸水膨胀特征等力学参数及渗透率、孔隙率、饱和度等渗流参数。

(2) 建立根据套管变形数据反演套变点地层应力和变形的反演模型,根据现场统计的实际套变情况,反演套变处的地层应力分布情况和地层变形情况。

(3) 对整个区域进行综合地质调查,弄清楚各地层的基本地质属性、区域内断层的分布情况及各地层的层间集合情况。在此基础上建立整个区块的 Petrel 地质模型,对其中的断层及层间结合进行精细建模,并转化为有限元模型。

(4) 针对典型的高压注水方案,基于流-固耦合理论,进行整个区域内流

固耦合计算,得出整个区域内的压力场分布情况、油水饱和度分布情况和整个区域内的地层变形趋势;在此基础上,选取典型的井组进行精细分析,获取井组内压力场分布、油水饱和度分布和地层变形情况。

(5) 将每种可能的渗漏、窜层及沿断层流走情况作为一种工况,进行多工况组合计算;以压力、油水饱和度、地层变形数据的计算值与监测值(或反演值)之间的残差最小为优化目标,以工况组合为优化变量,建立优化模型,研究高效的优化算法,对该优化模型进行求解,寻找与监测数据差异最小的工况组合。

(6) 总结发生渗漏、窜层、沿断层流失时的地层条件、生产参数等方面的基本规律,对不同类型油藏发生渗漏、窜层、沿断层流失的可能性进行预测,并提出预防措施。

技术路线如图 1.3 所示。

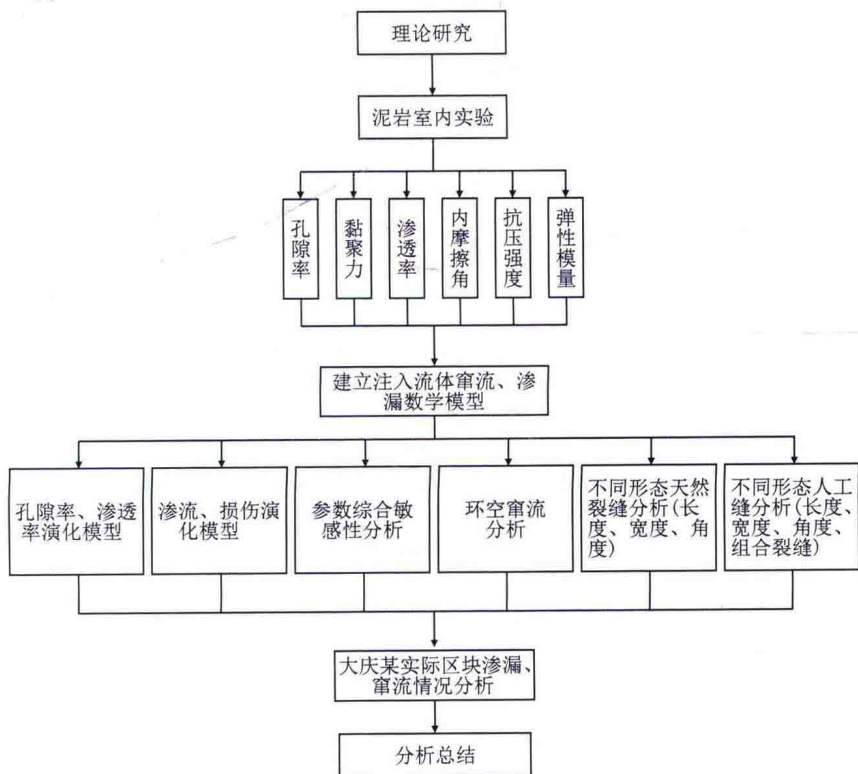


图 1.3 主要技术路线

第 2 章 储层及隔夹层岩石力学实验研究

隔夹层物理力学性质及其与储层的差异大小是影响窜流和渗漏的重要内在指标。本章通过室内实验,对储层以及隔夹层的岩石力学性质、孔隙度、渗透率等物理力学参数进行测定,得到隔夹层和储层岩芯的全过程应力-应变曲线、孔渗参数的应力敏感性曲线,为下一步数值计算和理论分析提供实验数据支撑。

2.1 实验设备与岩芯

实验项目主要包括:不同含水率下泥岩弹性模量、抗压强度、黏聚力、内摩擦角、蠕变特性、吸水膨胀特性等力学参数及渗透率、孔隙度、饱和度等渗流



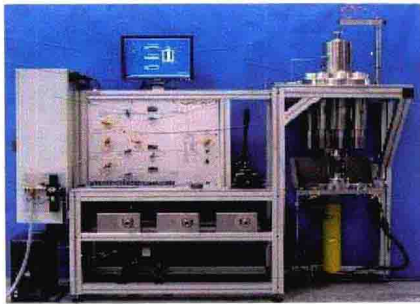
(a) 岩石三轴试验机



(b) 高温高压岩石多参数测定仪



(c) 岩石流变试验机



(d) 岩石多场耦合流变仪

图 2.1 主要仪器

参数的实验研究。所有实验均在油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学)进行,所采用的仪器包括:岩石三轴实验机、岩石流变实验机、高温高压岩石多参数测定仪等。主要仪器如图 2.1 所示。

实验所用岩芯,共有两批。第一批岩芯来自头台油田 M11、M111 的泥岩和泥质砂岩岩芯共 11 块,均为标准岩芯;来自榆树林油田 S381 井、S14 井的泥岩和砂岩岩芯共 10 块。第一次试样中头台油田的 11 块岩芯,共有 4 块岩芯用来测试应力敏感性,分别为 1#、3#、4# 和 10# 岩芯,其余 2#、5#、6#、7#、8#、9#、11# 岩芯用来测试岩芯的力学参数。由于泥岩岩芯钻取困难,根据实验性质,将获得的岩芯先测孔隙度和气测渗透率,然后再进行加载实验和浸水实验。实际实验岩芯共 30 块,部分岩芯样品如图 2.2 所示。



(a)



(b)

图 2.2 部分岩芯样本

第二批岩芯共有 10 块,分别取自 S381 和 S382 井的扶余油层和杨大城子油层。由于泥岩岩芯获取困难,所以大部分为粉砂质泥岩岩芯。比较纯的泥岩岩芯共 4 块。所取岩芯的主要信息如表 2.1 所示。

表 2.1 部分岩芯主要信息

井名	编号	取样深度/m	层位	岩性
S382	2-1	1 695.14	扶余油层	粉砂质泥岩
	2-2	1 706.23	扶余油层	细砂岩
	2-3	1 884.80	杨大城子	泥岩
	2-4	1 888.70	杨大城子	粉砂岩
	2-5	1 899.34	杨大城子	粉砂质泥岩
	2-6	1 909.24	杨大城子	粉砂岩
S381	2-7	1 898.20	杨大城子	泥岩
	2-8	1 914.40	杨大城子	泥质粉砂岩
	2-9	2 113.50	杨大城子	泥岩
	2-10	2 135.11	杨大城子	泥质粉砂岩

2.2 岩石物理力学实验

2.2.1 岩芯孔隙度和渗透率

实验测得第一批岩芯孔隙度和渗透率结果如表 2.2 所示。由于所取岩芯为非纯泥岩岩芯，从测试结果看，1-4#、1-5#、1-6#、1-11# 岩芯的孔隙度小于 6%，渗透率低于 0.05 mD，可将这 4 块岩芯视为隔夹层岩芯。其余为泥质砂岩。

表 2.2 岩芯孔隙度、渗透率测试结果

编号	孔隙度/%	渗透率/mD	岩性
1-1	8.2	0.152	泥岩粉砂岩
1-2	6.5	0.061	粉砂质泥岩
1-3	11.7	0.516	泥质粉砂岩
1-4	4.4	0.005	泥岩
1-5	1.8	0.001	泥岩
1-6	3.2	0.011	泥岩
1-8	9.3	0.084	粉砂质泥岩
1-9	11.5	0.144	泥质粉砂岩
1-10	11.1	0.238	泥质粉砂岩
1-11	3.2	0.007	泥岩
2-1	8.4	0.326	粉砂质泥岩
2-2	11.7	0.413	泥质细砂岩
2-3	2.1	0.002	泥岩
2-4	10.8	0.162	泥质粉砂岩
2-5	6.6	0.091	粉砂质泥岩
2-6	7.2	0.318	泥质粉砂岩
2-7	1.9	0.005	泥岩
2-8	7.5	0.247	泥质粉砂岩
2-9	2.8	0.013	泥岩
2-10	9.4	0.174	泥质粉砂岩

2.2.2 岩石力学实验

图 2.3~ 图 2.8 分别为岩芯 1-2#、1-5#、1-6#、1-8#、1-9#、1-11# 岩芯在不同围压下的应力-应变曲线。从岩石全程应力-应变曲线,可得弹性模量、泊松比、抗压强度、黏聚力和内摩擦角等参数。

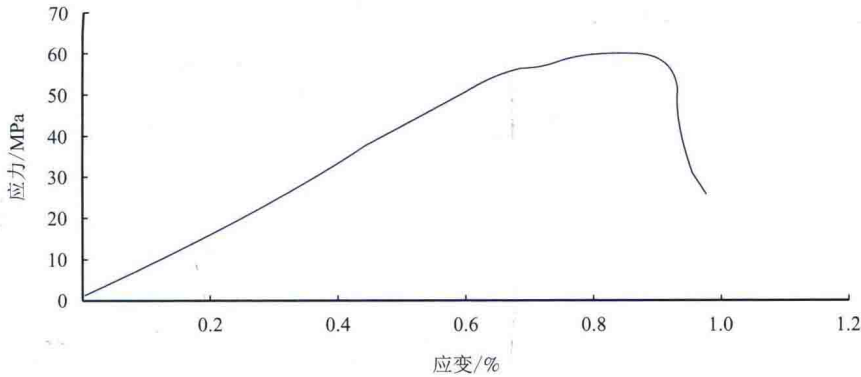


图 2.3 岩芯 1-2# 在 15.6 MPa 时的应力-应变曲线

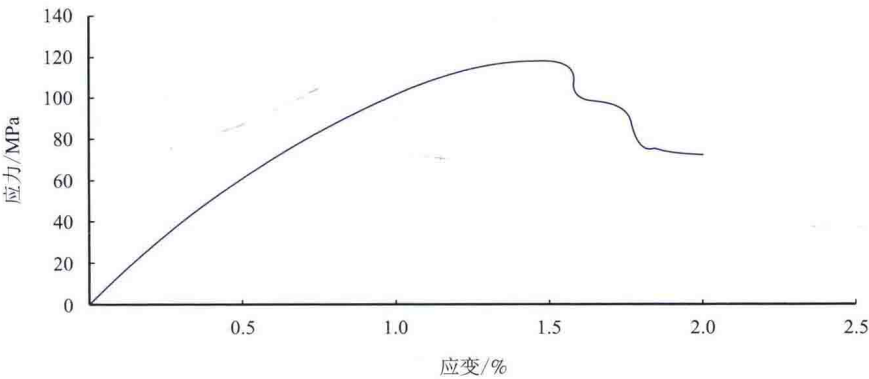


图 2.4 1-5# 岩芯在围压 26.0 MPa 时的应力-应变曲线

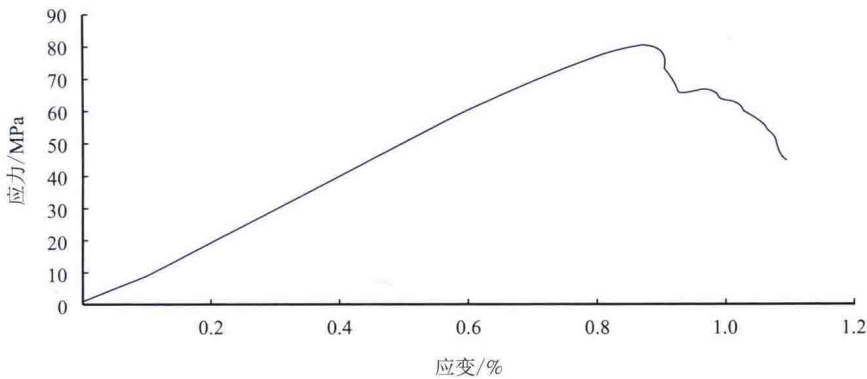


图 2.5 1-6# 岩芯在围压 15.6 MPa 时的应力-应变曲线