

低渗透储层

裂缝表征与预测



范存辉 秦启荣 郭旭升 / 著
胡东风 周吉羚 范增辉



科学出版社

低渗透储层裂缝表征与预测

范存辉 秦启荣 郭旭升 著
胡东风 周吉羚 范增辉

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍低渗透储层裂缝表征与预测的基本理论、方法及应用。全书分为两篇，第一篇为低渗透储层裂缝表征与预测方法；第二篇为低渗透储层裂缝表征与预测典型实例解剖，主要以四川盆地、吐哈盆地、松辽盆地等典型区块低渗透油气储层为例，详细介绍页岩气藏、致密砂岩气藏等低渗透油气储层裂缝类型、识别、描述、预测等方面的最新研究成果，尤其在非常规的页岩气藏裂缝表征与预测方面做出了卓有成效的研究与总结。

本书将低渗透储层裂缝研究的理论与实践有机结合，系统地总结低渗透储层裂缝表征与预测的基本思路、方法与技术，具有较强的针对性和实用性。

本书可供从事页岩气、致密砂岩气等非常规油气储层勘探、开发的人员参考，也可供相关高等院校师生、科研院所研究人员、现场工程技术人员等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透储层裂缝表征与预测 / 范存辉等著. —北京：科学出版社，2018.6

ISBN 978-7-03-057786-3

I. ①低… II. ①范… III. ①低渗透油层—裂隙储集层—研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第126525号

责任编辑：罗 莉 / 责任校对：彭 映
责任印制：罗 科 / 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

*

2018年6月第一版 开本：787×1092 1/16

2018年6月第一次印刷 印张：15 3/4

字数：379 392

定价：148.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

本书编委会

范存辉	秦启荣	郭旭升	胡东风	周吉羚	范增辉
朱梦月	王喜华	罗振华	胡明	钟城	黄为
谢佳彤	李治	何顺	刘志毅	张羽	程伦星
王瀚	罗彤彤	方昉	王时林	王晓蕾	毛凯兰
卢丹阳	戈薪雨				

前 言

低渗透储层往往具有渗透率低、孔隙度低、喉道窄、流体渗透能力差、产能低等特点，其中裂缝的存在对该类储层的改善起到了至关重要的作用。低渗透储层裂缝的研究水平和研究程度，很大程度上将影响油气田的勘探开发效果，尤其目前页岩气、致密砂岩气等非常规油气资源的勘探力度逐渐增大，这些非常规油气藏的勘探开发对裂缝的发育分布更为关注。

本书主要以作者近年来对低渗透储层裂缝的相关研究成果为基础，结合目前裂缝研究的技术方法及研究进展，系统介绍低渗透储层裂缝表征与预测的基本理论、技术方法及应用。全书主要分为两篇，第一篇为低渗透储层裂缝表征与预测方法，着重介绍低渗透储层类型划分、成因机理、发育特征及对开发的影响、裂缝表征参数及裂缝预测技术方法等；第二篇为低渗透储层裂缝表征与预测典型实例解剖，主要以四川盆地页岩气藏、吐哈盆地致密砂岩油气藏、松辽盆地砂岩油藏等典型低渗透油气储层为例，详细介绍不同地质背景下低渗透储层裂缝的类型、裂缝识别方法、发育程度表征、产状及期次研究、裂缝综合预测等方面的最新研究成果。本书将低渗透储层裂缝研究的理论与实践有机结合，系统地总结低渗透储层裂缝表征与预测的基本思路、方法与技术，具有较强的针对性和实用性。

本书由西南石油大学地球科学与技术学院范存辉、秦启荣，中国石油化工股份有限公司勘探分公司郭旭升、胡东风等创作，在创作过程中得到中国石油化工股份有限公司勘探分公司、油气藏地质及开发工程国家重点实验室（成都理工大学和西南石油大学）、中国石油化工股份有限公司西南油气分公司勘探开发研究院、中国石油天然气股份有限公司大庆油田有限责任公司勘探开发研究院油藏评价室等单位专家、领导的大力支持与指导；西南石油大学地球科学与技术学院领导、专家和各位同事也对本书的出版提供了帮助；西南石油大学朱梦月、钟城、黄为、刘志毅、程伦星、王瀚等研究生也参与了书稿编撰、图件清绘等工作，在此表示衷心的感谢。

本书受油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金（成都理工大学）（编号：PLC20180404）、国家科技重大专项（编号：2017ZX05036-003-003）资助出版，由于笔者水平有限，本书难免存在不足之处，恳请广大读者不吝赐教，批评指正。

2018年4月

目 录

第一篇 低渗透储层裂缝表征与预测方法

第 1 章 绪论	3
1.1 低渗透储层在油气储层领域的地位	3
1.1.1 低渗透储层的概念	3
1.1.2 低渗透储层勘探开发现状	3
1.2 低渗透储层裂缝的国内外研究现状	4
1.2.1 国外研究现状	4
1.2.2 国内研究现状	5
第 2 章 低渗透储层裂缝类型及成因机理研究	7
2.1 裂缝的概念和分类	7
2.1.1 裂缝的概念	7
2.1.2 裂缝的分类	7
2.2 裂缝的基本表示方法	11
2.2.1 裂缝方位玫瑰花图表示法	11
2.2.2 裂缝产状的吴氏网图表示法	11
2.2.3 裂缝特征的直方图表示法	11
2.3 裂缝发育的力学机理	12
2.3.1 应力和应变	12
2.3.2 岩石破裂过程	16
2.3.3 裂缝型式	17
2.3.4 格里菲斯裂纹和前兆微裂缝带	18
第 3 章 低渗透储层裂缝发育特征及对油气开发的影响	19
3.1 裂缝的发育特征	19
3.1.1 延伸长度	19
3.1.2 延伸长度	20
3.1.3 宽度	21
3.1.4 密度	23
3.1.5 产状	26
3.1.6 力学性质	27
3.1.7 充填物	28
3.2 裂缝发育的主控因素	28

3.2.1	岩性	28
3.2.2	岩层厚度	30
3.2.3	构造部位	31
3.2.4	构造应力	33
3.3	裂缝对油田开发的影响	34
3.3.1	裂缝对井网部署的影响	34
3.3.2	裂缝对注水的影响	35
3.3.3	对人工压裂改造的影响	36
第4章	低渗透储层裂缝表征	37
4.1	裂缝野外露头分析与表征	37
4.1.1	露头裂缝的识别	37
4.1.2	露头裂缝的研究内容	37
4.2	岩心裂缝分析与表征	39
4.2.1	岩心裂缝的识别	39
4.2.2	岩心裂缝的研究内容	40
4.3	裂缝的测井识别与表征	42
4.3.1	测井资料对裂缝的识别	42
4.3.2	测井资料识别裂缝的方法及测量参数	44
4.4	裂缝的实验分析与表征	47
4.4.1	镜下观察	47
4.4.2	岩石破裂的有关实验	48
4.4.3	裂缝期次的研究	50
4.5	裂缝的生产动态分析与表征	52
4.5.1	钻井分析	53
4.5.2	示踪剂分析	53
4.5.3	压裂曲线分析	54
4.5.4	试井分析	54
4.5.5	注水分析	54
4.5.6	油田生产分析	54
第5章	低渗透储层裂缝预测技术	56
5.1	地质类比预测技术	56
5.2	构造应力场数值模拟技术	57
5.3	曲率法预测技术	60
5.4	地震预测技术	62
5.4.1	基于叠后纵波预测裂缝	62
5.4.2	纵波方位各向异性预测裂缝	65
5.4.3	横波分裂预测裂缝	66

5.4.4	垂直地震剖面技术预测裂缝	66
5.4.5	转换波裂缝预测	67
5.4.6	基于地震资料预测裂缝	67
5.4.7	方位 AVO 分析方法检测裂缝	68
5.4.8	纵波 QVAZ 裂缝预测	68
5.4.9	横波分裂裂缝预测技术	69
5.4.10	纹理属性裂缝预测	69
5.4.11	叠前裂缝预测	70
5.4.12	地震资料裂缝预测可靠性分析	71
5.4.13	基于各向异性介质理论裂缝预测	71
5.4.14	方差分析法裂缝预测	71
5.4.15	边缘检测分析法裂缝预测	71
5.4.16	层间地震信息差异分析法裂缝预测	72
5.4.17	地震预测压力分析法裂缝预测	72
5.4.18	多波多分量地震属性裂缝预测	73
5.4.19	地震与测井综合裂缝预测	73
5.4.20	微地震监测裂缝技术	74
5.5	非线性预测技术	74
5.5.1	相空间的重建	74
5.5.2	储集层裂缝关联维分析	75
5.5.3	储集层裂缝突变理论预测技术	77
5.6	裂缝性储层建模	78
5.6.1	等效连续模型	80
5.6.2	离散裂缝网络模型	80
5.6.3	复合模型	81

第二篇 低渗透储层裂缝表征与预测典型实例解剖

第 6 章	DS 地区五峰组-龙马溪组页岩裂缝表征与预测	87
6.1	DS 地区地质概况	87
6.2	裂缝发育特征表征	87
6.2.1	地表裂缝发育特征	87
6.2.2	井下裂缝发育特征	93
6.2.3	构造演化期次及演化模式探讨	96
6.3	裂缝分布规律预测	103
6.3.1	基于构造应力场三维数值模拟裂缝预测	103
6.3.2	基于地震数据体裂缝预测	116
6.4	裂缝对页岩含气性的影响	117

第 7 章 吐哈盆地巴喀地区八道湾组裂缝表征与预测 ·····	119
7.1 地质概况·····	119
7.1.1 区域概况·····	119
7.1.2 构造特征·····	120
7.1.3 储层基本特征·····	123
7.2 裂缝发育特征·····	125
7.2.1 裂缝类型·····	125
7.2.2 裂缝发育程度·····	127
7.2.3 裂缝产状及期次·····	131
7.3 裂缝发育规律综合预测·····	136
7.3.1 古构造应力场模拟预测裂缝·····	136
7.3.2 分形预测·····	139
7.3.3 基于地震数据体的裂缝预测·····	141
7.3.4 裂缝综合预测与评价·····	143
7.3.5 裂缝预测与评价效果分析·····	145
第 8 章 四川盆地大邑构造须家河组致密储层裂缝表征与预测 ·····	147
8.1 地质概况·····	147
8.1.1 区域概况·····	147
8.1.2 构造位置·····	148
8.1.3 地层及岩性特征·····	149
8.1.4 储层基本特征·····	150
8.2 裂缝发育特征·····	151
8.2.1 裂缝类型·····	151
8.2.2 裂缝发育程度·····	153
8.2.3 裂缝产状及期次·····	157
8.2.4 露头裂缝与岩心裂缝的差异·····	168
8.3 裂缝发育规律综合预测·····	169
8.3.1 有限元古构造应力场的裂缝预测·····	169
8.3.2 地震曲率预测裂缝·····	171
8.3.3 3Dmove 裂缝预测·····	172
8.3.4 地震叠前 AVA 分析裂缝预测·····	173
第 9 章 CK 地区下寒武统页岩储层裂缝表征与预测 ·····	176
9.1 CK 地区地质概况·····	176
9.2 裂缝发育特征表征·····	177
9.2.1 裂缝类型·····	177
9.2.2 裂缝发育程度·····	179
9.2.3 CK 地区构造应力场分析·····	182

9.2.4 应力场对页岩裂缝形成的影响·····	187
9.3 裂缝的分布规律预测·····	187
9.3.1 有限元应力场模拟的基本思路·····	187
9.3.2 构造力学模型及其建立依据·····	189
9.3.3 岩体破裂特征及裂缝预测·····	195
9.3.4 岩体破裂特征分析·····	197
9.3.5 裂缝发育程度预测·····	201
9.3.6 裂缝类型及方位预测·····	203
第 10 章 杏树岗扶余油层裂缝性储层表征与预测 ·····	205
10.1 地质概况·····	205
10.1.1 区域概况·····	205
10.1.2 构造特征·····	206
10.1.3 地层及岩性特征·····	206
10.1.4 构造演化特征·····	208
10.2 裂缝特征·····	208
10.2.1 裂缝类型·····	208
10.2.2 裂缝产状、期次及发育模式·····	210
10.2.3 常规测井识别裂缝·····	212
10.3 裂缝性储层建模·····	217
10.3.1 构造模型·····	217
10.3.2 岩相模型·····	218
10.3.3 基质物性模型·····	220
10.3.4 裂缝模型·····	222
主要参考文献 ·····	230

第一篇 低渗透储层裂缝表征与预测方法

第1章 绪 论

1.1 低渗透储层在油气储层领域的地位

1.1.1 低渗透储层的概念

不同时期,不同国家对于低渗透的定义差别较大。总体来说,低渗透是一个相对的概念,由各个国家在不同时期根据资源状况和技术经济条件而划定,至今没有统一的划分界限和定义。苏联 M. JI. 苏尔古伊耶夫和 IO.B. 热托夫(1993)等将储层渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏划分为低渗透油藏。我国低渗透储层划分方案,最早由罗蛰潭和王允诚(1986)提出,他们将渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层定义为低渗透储层。1990 年底,在石油工程会议上,把低渗透储层的渗透率上限确定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。1992 年,在西安举办的国际低渗透油气藏会议上,把低渗透储层的渗透率上限定为 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,下限定为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。唐曾熊(1994)在其著作中,以划分油藏分类的标准,将低渗透储层的渗透率范围定为 $10 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。1997 年,在中国石油天然气总公司发布的中华人民共和国石油天然气行业标准《油气储层评价方法》中,将砂岩含油储层低渗透的范围规定为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \leq K < 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,砂岩含气储层低渗透的范围规定为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \leq K < 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

1.1.2 低渗透储层勘探开发现状

1998 年,据美国报道,北美 172 个低渗透油藏的可采储量占全国总储量的 10%,其中包括最早于 1920 年开始投产的北贝尔邦克油田,以及著名的小牛塘油田、北斯坦利油田等。1999 年,俄罗斯《石油业》报道其国内低渗透储层的储量达数百亿吨,渗透率低于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 储层中的储量达 150 亿 t,占俄罗斯可采储量 30%以上,而且大部分已经投入开发,其中包括世界上知名的低渗透油田——费德罗夫油田。根据国内的数据统计,我国已经探明的低渗透油藏储量大约占全国总探明储量的 23%,其中 87%为低渗透砂岩油藏。近年来新增探明油气资源量中,非常规油气藏的比重也在逐年上升,其中低渗透油气储量就占 60%以上。

多年来的油气勘探实践表明,低渗透油气藏是中国含油气盆地中一种重要的油气藏类型。这类油藏的探明地质储量已经超过 40 亿 t,超过目前探明油气资源总量的 1/3;另据有关专家预测,在中国超过 130 亿 t 的剩余油气资源量中,约有 60%的油气资源量分布与低渗透储层有关。因此,低渗透油气藏的勘探开发在中国石油工业中的地位越来越重要。如何有效地勘探、合理地动用与高效地开发这些低渗透油气藏,对中国石油工业的持续稳

定发展以及增强中国能源安全供应的保障能力,确保国家安全与经济协调、持续快速发展具有长远的战略意义。目前,对低渗透储层的研究多集中于低渗透的致密砂岩和碳酸盐岩储层,随着非常规油气藏的勘探开发,致密砾岩类、火成岩类、泥页岩类储层的研究也越来越受到重视。

低渗透储层是我国沉积盆地中一种重要的油气储集层类型。目前,我国低渗透储量的动用程度不高,其产能约占我国目前年油气总产能的 1/5,低渗透储层是我国陆上油气田增储上产的重要领域和勘探开发热点,已成为制约我国石油工业发展的主要地质因素之一。从我国已投产的低渗透油气藏的开发情况来看,开发效果普遍不理想,其采油速度一般为 0.107%~1.53%,平均为 1.05%,标定的平均采收率为 23.5%,最终采出程度为 20%~30%。虽然经过了连续多年攻关,在某些开采工艺技术方面取得了许多进展,如整体压裂改造配套技术、水平井开采技术等,但由于低渗透油气储层特殊复杂的地质条件及其渗流特征,其开发难度极大,开发效果仍然有待进一步提高。因此,如何合理地动用和高效地开发这类低渗透油气藏,一直是我国石油工业所面临的重大课题,对增强我国能源安全供应的保障能力,确保国家安全与经济协调、持续快速发展意义十分重大。尤其随着我国东部以中高渗透层为主的老油田逐渐进入中高含水期开采,提高对这类油气藏的整体研究水平和开发水平,对我国石油工业的持续稳定发展具有长远的战略意义。

1.2 低渗透储层裂缝的国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

早在 20 世纪 20 年代,国外就已经对岩石中的天然裂缝进行了研究,以苏联、美国、法国为代表的一批学者建立了岩石力学理论、岩体力学理论和断裂力学理论,这些理论形成了初期裂缝研究的指导思想,并为裂缝研究指明了方向。

20 世纪 60 年代,随着石油行业对储层裂缝的研究,许多学者陆续地发表了很多储层裂缝的研究成果。例如, Murry (1968) 从构造自身的结构特征出发,探讨构造形变(如褶皱和断层)和裂缝发育分布的关系,运用几何的方法导出了剖面曲率与裂缝参数之间的关系,这是最早对裂缝进行定量研究的记录。同时,在岩石力学理论和方法的指导下,一些学者把岩石力学的方法引入到石油储层裂缝的研究中来,他们利用岩石声发射实验来研究裂缝的形成期次、形成时的强度等。

20 世纪 70 年代, Mandelbrot (1973) 在法兰西学院讲课时,首次提出了分维和分形几何的设想,国外学者也逐渐把分形几何学的理论引入储层裂缝的研究领域。(多重)分形理论的引入,使得储层裂缝研究方法更加丰富,最早从理论上证明分形理论可用于碳酸盐岩地区裂缝的研究,并介绍了用分形理论建立裂缝分布的实际模型。随后, Hirata (1989)、Blin-Lacroix 等 (1990) 又把这一理论用于其他岩性裂缝的研究,并在断层几何形态的描述、裂缝参数与裂缝长度、宽度、密度和平面分布等研究方面取得了较大进展。

20 世纪 80 年代到 21 世纪初,随着石油工业的发展,裂缝研究的理论和方法得到了

迅速的发展。例如, 90年代, Tsvankin (1995) 利用多波资料研究了岩性、物性、裂缝方位、裂缝密度等参数; Ata 等 (1995) 对转换波进行旋转处理, 对平行或者垂直于裂缝走向的快横波和慢横波进行分离, 并利用两种快慢横波在传播时间和地震波振幅方面的差异来确定裂缝的密度和方向。该时期形成了一套比较完整的储层裂缝研究理论和方法, 并开始对裂缝的预测进行研究, 但该时期的裂缝预测方法并不完善, 主要是对裂缝进行定性的预测, 对裂缝定量预测方面没有大的突破。以上研究都存在一个问题, 即研究所用的理论和方法多借鉴于其他行业, 没充分考虑本行业的特殊性, 所以存在一定的局限。

从 21 世纪开始, 由于石油天然气行业的迅速发展, 带动了裂缝研究的迅速发展, 虽然裂缝研究在理论上没有大的突破, 但在技术水平和手段上有明显的突破。测井、地震手段的引入, 为裂缝研究提供了新的技术手段。

裂缝预测方面, 主要采用构造主曲率法、二维有限元法及随机模拟法, 这三种方法都是从构造变形特征来探讨构造的主曲率与裂缝关系, 然后建立裂缝岩体的力学模型, 探讨构造变形与裂缝参数间的关系; 从构造应力场入手, 应用岩石破裂理论和数值模拟方法, 建立应变能、破裂率与裂缝发育分布之间的定量化预测模型; 应用多元统计方法进行三维空间单元体综合类比预测。除此之外, 随着地震数据精度的提高, 利用地震数据进行裂缝预测也开始被研究者所采用。但在地质认识的前提下, 定性或半定量地预测裂缝的发育分布, 是当今研究裂缝的主要方法; 但关于裂缝参数的定量表征, 如裂缝密度和裂缝参数的定量预测仍然是一个难题。

1.2.2 国内研究现状

国内早在 20 世纪 50 年代就有对裂缝研究的记录。国家在对四川盆地进行第一次普查的时候, 地质工作者就对盆地内裂缝的基本特征进行了初步的描述, 并提出了运用构造特征研究裂缝的方法。

60 年代至 70 年代, 国内石油天然气行业发展速度很慢, 在储层裂缝研究方面没有取得太多成果, 但在工程地质及煤田地质的裂缝研究方面, 尤其是浅层及地表裂缝的研究方面, 国内的研究者们取得了一些认识。

直到 80 年代, 由于国内石油天然气行业的蓬勃发展, 带动了国内学者对裂缝的研究, 但该时期国内对裂缝的研究水平较低, 研究手段较少。

随着与国际接轨, 大量国外先进设备和仪器进入国内, 国内许多学者在裂缝研究方面取得了优秀的成果。徐中英 (1981) 在对四川碳酸盐裂缝型储层的研究中, 利用主曲率法对构造裂缝进行研究; 曾锦光等 (1982) 根据岩石破裂准则, 从构造应力场入手, 对裂缝的发育分布规律进行了研究; 谭延栋 (1987) 利用测井资料对裂缝参数进行研究; 穆龙新 (1995) 结合地质资料和生产资料对裂缝储层建立地质模型。

90 年代开始, 国外石油天然气行业在对储层裂缝的研究方面取得了快速发展, 例如 Ata 等 (1995) 通过对接收到的转换波进行旋转处理, 分离出与裂缝走向平行或者垂直传播的快横波和慢横波, 并利用两种快慢横波在传播时间和地震波振幅的差异来确定裂缝的密度和方向。伴随着这一潮流, 国内石油天然气行业各方面技术也逐渐发展成熟。主

要表现在两个方面,一方面是对国外理论和技术的引进越来越多,例如非线性理论方法检测和识别地下裂缝技术在国内开始发展;应用 Kaiser 实验来判断古构造应力大小和方向,以及判断裂缝期次和确定裂缝形成时构造应力场强度。另一方面是国内许多学者在对裂缝的研究过程中取得了越来越多的成果,例如赵阳升等(2001)在对煤层裂缝研究后指出,小尺寸岩体与大尺寸岩体裂缝数存在一种相似性;窦齐丰等(2003)对柴达木盆地南翼山储层裂缝进行了预测,指出裂缝发育与构造及断层有着直接关系。

21 世纪开始,更多的学者意识到裂缝研究的重要性,尤其是对低渗透和致密重视程度的提高,更加地使得裂缝研究成为热点。有关裂缝性储层及储层裂缝的研究理论和技术方法层出不穷,例如地质法、测井方法、地震预测方法等,又比如神经网络、模糊聚类、灰色评判、有限元、分形分维等。王允诚(1992)、王志章(1999)、张景和(2001)、陈必孝等(2003)、许同海(2005)等在储层裂缝特征描述与裂缝定量预测技术方面做了许多探索性的工作,提出了许多新的研究方法;何光明等(1993)、颜其彬等(1994)、张吉昌等(1996)对分形理论在裂缝方面的应用进行了更深层次的研究,使储层裂缝研究迈上了新的台阶。总体上看,国内在裂缝研究方面还处于探索和发展阶段,还没有形成一套解决此类问题的系统的理论和方法。

近年来,不同研究者分别从侧面和正面对裂缝研究进行攻关,通过对野外露头、岩心、地震、测井、录井和测试等资料综合分析,结合多种研究手段,寻找裂缝的主要控制因素,在地质规律认识的基础上,得出对裂缝定性和半定量的认识,直到达到裂缝的定量认识成为裂缝研究和预测的发展方向。根据裂缝性低渗透油气藏的勘探与开发需求,在近一段时期内,低渗透储层裂缝研究需要解决的几个关键科学问题是:

(1) 不同构造类型与非均质性岩层裂缝分布的定量模型的建立,这是深入认识裂缝地下分布规律以及指导裂缝井间定量预测的基础。

(2) 地质-测井-地震相结合的裂缝综合研究与定量评价方法,这是综合利用油气田资料定量评价地下裂缝参数及其分布的有效手段。

(3) 高精度裂缝及其渗流网络定量预测与评价系统的建立,这是正确认识低渗透油气藏渗流规律及指导开发方案部署的地质依据。

(4) 高精度的裂缝性储层地质建模,这是进行低渗透油气藏数值模拟以及进行开发方案优化的基础。

(5) 油田注水开发过程中的裂缝动态参数的评价与预测,这是低渗透油气田开发中晚期方案调整的地质理论依据。

(6) 裂缝与基质孔隙之间流体相互作用关系研究,这是合理确定低渗透油气藏开采方式,提高采收率的重要参考依据。

(7) 天然裂缝与人工裂缝的相互耦合关系研究,这是优化压裂设计以及指导井网优化的地质理论依据。

(8) 裂缝非均质性与储层基质非均质性的相互匹配关系研究,这是解决低渗透储层储集和渗流两套非均质性系统,合理划分低渗透油气藏开发基本单元的有效途径。

第2章 低渗透储层裂缝类型及成因机理研究

2.1 裂缝的概念和分类

2.1.1 裂缝的概念

裂缝是一种很普遍的自然现象，其定义有多种。裂缝研究已经有 100 多年的历史，人们从不同角度对“裂缝”这一术语进行了定义。有些定义是纯描述性的（Dennis, 1967），有些则是从力学角度定义的（Pollard et al, 1988）。因为本书论述天然裂缝对储集层的影响，所以本书对裂缝的定义限制在储层的范围内。

储层裂缝是指由于构造变形作用或物理成岩作用在岩石中形成的没有明显位移的面状不连续体。储层裂缝按其成因、规模、产状、孔渗、动态特征等可以划分出多种类型，每种类型都从不同的侧面反映了裂缝的不同特征。

2.1.2 裂缝的分类

储层构造裂缝分类方法很多，根据研究需要按成因、力学性质、开度等进行分类（表 2-1、表 2-2）。

表 2-1 裂缝分类依据一

描述角度	类别	分类准则	
成因分类	构造裂缝	由构造应力作用形成	
	天然裂缝	成岩裂缝	由成岩作用形成
		风化裂缝	由风化作用形成
		人工裂缝	
	钻井诱导缝	由钻井扰动形成	
水力压裂缝	由水力压裂增产形成		
力学性质	张性裂缝	岩石受到拉伸作用发生张性破裂形成的，其方向性较强，延伸长度较大，宽度较大	
	剪切裂缝	岩石受到剪切作用的结果，这类裂缝通常是闭合的	
倾角	垂直缝	与层理面交角 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$	
	高角度缝	与层理面交角 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$	
	低角度缝	与层理面交角 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$	
	水平缝	与层理面交角 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$	