



中国石油大学(北京)学术专著系列

低渗透砂岩储层 裂缝的形成与分布

曾联波/著



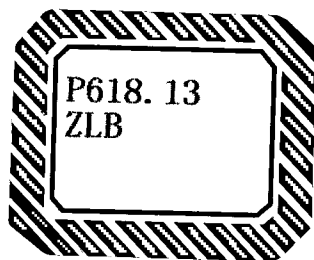
科学出版社

www.sciencep.com

中国石油大学(北京)学术专著系列

低渗透砂岩储层裂缝的 形成与分布

曾联波 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在介绍低渗透砂岩储层地质特征与成因的基础上,从地表露头、岩心、薄片及实验等实际资料入手,采用地质、地球物理和动态相结合的研究方法,从地表到地下、从宏观到微观、从静态到动态,对不同构造类型低渗透砂岩储层裂缝的成因类型、形成机理、分布特征及其发育规律进行了系统的论述,对裂缝在低渗透砂岩油藏注水开发中的应用进行了分析。

本书可供从事低渗透砂岩储层勘探和开发的科研人员、生产管理人员和高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布/曾联波著. —北京:科学出版社, 2008

(中国石油大学(北京)学术专著系列)

ISBN 978-7-03-021523-9

I. 低… II. 曾… III. ①低渗透油层-裂隙储集层-形成②低渗透油层-裂隙储集层-分布规律 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 043284 号

责任编辑:谢洪源等/责任校对:张小霞

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

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>

北京佳信达艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年4月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2008年4月第一次印刷 印张: 11 1/4 插页: 6

印数: 1—1 200 字数: 213 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书序

大学是以追求和传播真理为目的，并为社会文明进步和人类素质提高产生重要影响力和推动力的教育机构和学术组织。1953年，为适应国民经济和石油工业发展需求，北京石油学院在清华大学石油系并吸收北京大学、天津大学等院校力量的基础上创立，成为新中国第一所石油高等院校。1960年成为全国重点大学。历经1969年迁校山东改称华东石油学院，1981年又在北京办学，数次搬迁，几易其名。在半个多世纪的历史征程中，几代石大人秉承追求真理、实事求是的科学精神，在曲折中奋进，在奋进中实现了一次次跨越。目前，学校已成为石油特色鲜明，以工为主，多学科协调发展的“211工程”建设的全国重点大学。2006年12月，学校进入“国家优势学科创新平台”高校行列。

学校在发展历程中，有着深厚的学术记忆。学术记忆是一种历史的责任，也是人类科学技术发展的坐标。许多专家学者把智慧的涓涓细流，汇聚到人类学术发展的历史长河之中。据学校的史料记载：1953年建校之初，在专业课中有90%的课程采用前苏联等国的教材和学术研究成果。广大教师不断消化吸收国外先进技术，并深入石油厂矿进行学术探索。到1956年，编辑整理出学术研究成果和教学用书65种。1956年4月，北京石油学院第一次科学报告会成功召开，活跃了全院的学术气氛。1957~1966年，由于受到全国形势的影响，学校的学术研究在曲折中前进。然而许多教师继续深入石油生产第一线，进行技术革新和科学研究。到1964年，学院的科研物质条件逐渐改善，学术研究成果以及译著得到出版。党的十一届三中全会之后，科学研究被提到应有的中心位置，学术交流活动也日趋活跃，同时社会科学研究成果也在逐年增多。1986年起，学校设立科研基金，学术探索的氛围更加浓厚。学校始终以国家战略需求为使命，进入“十一五”之后，学校科学研究继续走“产学研相结合”的道路，尤其重视基础和应用基础研究。“十一五”以来学校的科研实力和学术水平明显提高，成为石油与石化工业的应用基础理论研究和超前储备技术研究以及科技信息和学术交流的主要基地。

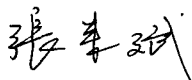
在追溯学校学术记忆的过程中，我们感受到了石大学者的学术风采。石大学者不但传道授业解惑，而且以人类进步和民族复兴为己任，做经世济时、关乎国家发展的大学问，写心存天下、裨益民生的大文章。在半个世纪的发展历程中，石大学者历经磨难、不言放弃，发扬了石油人“实事求是、艰苦奋斗”的优良作风，创造了不凡的学术成就。

学术事业的发展有如长江大河，前浪后浪，滔滔不绝，又如薪火传承，代代相继，火焰愈盛。后人做学问，总要了解前人已经做过的工作，继承前人的成就和经验，在此基础上继续前进。为了更好地反映学校科研与学术水平，凸显石油科技特色，弘扬科学精神，积淀学术财富，学校从 2007 年开始，建立“中国石油大学（北京）学术专著出版基金”，专款资助教师们以科学研究成果为基础的优秀学术专著的出版，形成《中国石油大学（北京）学术专著系列》丛书。受学校资助出版的第一部专著，均经过初审评议、校外同行评议、校学术委员会评审等程序，确保所出版专著的学术水平和学术价值。学术专著的出版覆盖学校所有的研究领域。可以说，学术专著的出版为科学研究的先行者提供了积淀、总结科学发展的平台，也为科学研究的后来者提供了传承科学成果和学术思想的重要文字载体。

石大一代代优秀的专家学者，在人类学术事业发展尤其是石油石化科学技术的发展中确立了一个个坐标，并且在不断产生着引领学术前沿的新军，他们形成了一道亮丽的风景线。“莫道桑榆晚，为霞尚满天”。我们期待着更多优秀的学术著作，在园丁们灯下伏案或电脑键盘的敲击声中诞生，展现在我们眼前的一定是石大寥廓辽远、星光灿烂的学术天地。

祝愿这套专著系列伴随新世纪的脚步，不断迈向新的高度！

中国石油大学（北京）校长



2008 年 3 月 31 日

前 言

近年来的油气勘探和开发实践表明,低渗透砂岩储层是我国陆相沉积盆地中一种重要的油气储集层类型,它们广泛分布在我国各含油气盆地的不同时代地层中。由于低渗透砂岩储层的成岩作用强烈,岩石致密,岩石的脆性程度加大,因而它们在强烈的成岩作用过程中和后期的构造应力作用下容易产生成岩裂缝与构造裂缝而成为裂缝性储集层。裂缝是低渗透砂岩储层油气的有效储集空间和主要渗流通道,影响着低渗透砂岩油气藏的开发方案部署和开发效果,从而使这类油气藏的开发难度很大。目前,我国低渗透储量的动用程度较低,已开发的低渗透砂岩油藏的效果普遍不理想。因此,低渗透砂岩储层裂缝研究对扩大低渗透储量的动用程度,改善低渗透油藏的开发效果,提高其整体开发水平具有重要的理论和现实意义。尤其随着我国东部以中高渗透层为主的主力油田逐渐进入中高含水期开采,如何高效合理地开发这些裂缝性低渗透砂岩油气藏,还对我国石油工业的持续稳定发展具有长远的战略意义。

早在“七五”期间,我国在新疆、吐哈、吉林、大庆、江汉等油区发现了一批低渗透砂岩油田,如火烧山油田、丘陵油田、朝阳沟油田等。这类低渗透油田按照常规的反九点注采井网开发,其含水上升快,水淹水窜严重,产量递减快,水驱效果很差。通过综合分析后认为,与储层中发育的高角度裂缝有关。因此,在“八五”期间,中国石油天然气集团公司科技局在“中国油气储层评价研究”重大攻关项目中新设立了“储层构造裂缝识别与定量预测技术”二级课题(课题编号 85-103-02),由中国石油大学(北京)构造地质学科田崇鲁教授负责并组织实施,在新疆火烧山油田以及吉林大安、新立等油田开展工作。从此,作者开始了长达 15 年的储层裂缝识别、描述与定量预测方面的系统研究工作。10 多年来,作者先后承担了国家自然科学基金项目、石油科技中青年创新基金项目与风险创新基金项目、中国石油天然气集团公司“九五”、“十五”攻关项目及重点基础研究项目、中国石油天然气股份公司重大专项以及油田委托项目 10 多项,并作为主要贡献者完成了中国石油天然气总公司“八五”、“九五”重点科技攻关项目以及油田委托项目多项。作者先后对我国松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、吐哈盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地和塔里木盆地等 12 个油区不同构造类型的典型低渗透油气藏的裂缝和地应力分布进行了重点解剖和系统对比研究,储层岩性涉及砂岩、泥岩、灰岩、白云岩、火山岩和变质岩,其中以低渗透砂岩储层为主。既有为低渗透油气田勘探与开发方案部署而进行的裂缝及地应力

分布规律研究,也有为中晚期开发方案调整而进行的裂缝性油藏精细描述和裂缝渗流系统评价。目前,“储层裂缝形成、分布及预测”以及“构造应力场分析与应用”已成为我校构造地质学科稳定而又特色鲜明的主要研究方向之一。

本书是在作者从“八五”期间以来承担的系列低渗透砂岩储层裂缝研究课题成果的基础上,选择具有代表性的典型油气田实例,通过对我国东部盆地、中部盆地和西部盆地三种不同构造类型低渗透砂岩储层裂缝的系统对比分析撰写而成的。本书依据大量野外相似露头、钻井、岩心、薄片、实验分析、测井和动态等资料,在简要介绍我国典型低渗透砂岩储层地质特征与形成机理的基础上,以四川盆地川西拗陷南部地区、鄂尔多斯盆地和松辽盆地台肇地区为具体实例,对我国三种主要构造类型低渗透砂岩储层裂缝的成因类型、宏观裂缝与微观裂缝地质特征、形成机理及其分布控制因素等方面内容进行了系统的阐述,并对裂缝在低渗透砂岩油藏井网部署、注水管理与压裂改造等方面的开发应用问题进行了讨论,对深入认识我国低渗透砂岩储层裂缝的成因机制、分布特征、发育规律及其对低渗透砂岩油藏注水开发的影响等方面具有参考价值。

在多年的研究和本书的编写过程中,一直得到田崇鲁教授、李德同教授、文世鹏教授的指导,得到王铁冠院士、戴金星院士、马瑾院士、漆家福教授、朱筱敏教授、方朝亮教授、王尚旭教授、金之钧教授、汤良杰教授、王贵文教授、康永尚教授、李忠兴教授、孙宝佃教授、刘洪涛高工、史成恩高工、高春宇高工、杨跃明高工、李跃纲高工、赵继勇高工、王永康高工、熊维亮高工、廖保方高工、张吉昌高工、肖秋生高工、宋波高工、慈兴华高工、李先平高工、邓海成高工、杨桥副教授、童亨茂副教授等人的支持、指导和帮助,得到张贵斌、王正国、叶庆国、王成刚、周天伟、李彦录等研究生的帮助,在此表示衷心的感谢。

在低渗透砂岩油气储层的勘探和开发中,裂缝分布规律的研究和预测是一项世界性的难题,目前在国内外尚属探索性的新课题,研究难度大,目前还没有成熟的技术和方法可以借鉴。同时,由于作者水平和掌握的资料有限,书中肯定有许多不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2007年12月于北京

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 低渗透储层勘探开发现状	1
1.2 储层裂缝与裂缝性储层的基本概念	2
1.3 储层裂缝的国内外研究现状	3
第 2 章 低渗透砂岩储层的地质特征与成因	5
2.1 低渗透砂岩储层的基本地质特征	5
2.2 低渗透砂岩储层的形成机理	13
第 3 章 低渗透砂岩储层裂缝的成因类型	18
3.1 低渗透砂岩储层裂缝的力学成因类型及其形成地质条件	18
3.2 低渗透砂岩储层裂缝的地质分类	22
3.3 低渗透砂岩储层裂缝形成的实验研究	27
第 4 章 挤压构造区低渗透砂岩储层的裂缝形成与分布	33
4.1 地质概况	33
4.2 储层裂缝类型及成因	40
4.3 储层裂缝的分布规律	50
第 5 章 稳定构造区低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布	60
5.1 鄂尔多斯盆地地质概况	60
5.2 储层裂缝类型及成因	65
5.3 储层裂缝的分布规律	75
第 6 章 伸展构造区低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布	87
6.1 台肇地区地质概况	87
6.2 储层裂缝类型及成因	92
6.3 储层裂缝的分布规律	94
第 7 章 低渗透砂岩储层裂缝发育的影响因素	101
7.1 裂缝与岩性关系	101
7.2 裂缝与层厚的关系	103
7.3 裂缝与沉积微相关系	105
7.4 裂缝与构造的关系	106

7.5	裂缝与应力的关系	111
7.6	孔隙流体对裂缝形成的影响	113
7.7	岩层非均质性对裂缝形成的影响	115
7.8	早期裂缝对后期裂缝的影响	122
第8章	前陆盆地异常高压成因机理及其对裂缝形成的影响	125
8.1	库车拗陷异常高压的形成机理	125
8.2	川西拗陷异常高压的形成机理	134
8.3	异常高压对裂缝形成的影响	140
第9章	裂缝对低渗透砂岩油藏开发的影响	141
9.1	裂缝对井网部署的影响	141
9.2	裂缝对注水的影响	148
9.3	对人工压裂改造的影响	156
主要参考文献		160
图版		

第 1 章 绪 论

1.1 低渗透储层勘探开发现状

低渗透储层一般是指储层基质的空气渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的含油气储集层（李道品，1997）。低渗透储层是我国陆相沉积盆地中一种重要的油气储集层类型，其储量占我国目前探明油气资源总储量的 1/3 以上，占“九五”期间以来探明油气资源总储量的 3/4 左右，其中 70%~80% 为低渗透砂岩储层。全国陆地发现并探明的低渗透油气田有 285 个，它们广泛分布在各含油气盆地的 21 个油区。其地质储量超过 1 亿 t 的油区有 11 个，其中储量最多的为新疆，达 6 亿 t，其余依次为大庆、胜利、吉林、辽河、大港、中原、延长、长庆、吐哈和华北等油区（刘振武等，2003）。从低渗透储量的分布区域来看，松辽盆地的两江地区、渤海湾、鄂尔多斯盆地、四川盆地、新疆深层以及柴达木与酒泉盆地是我国 6 个主要低渗透储层分布地区。

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，预计到 2010 年将达到 1/3 以上。低渗透储层是我国陆上油气田“九五”期间以来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“九五”期间和“十五”期间的连续 10 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，使得其开发难度极大，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。

由于受沉积、成岩和后期构造作用的影响，使得低渗透储层非均质性严重，裂缝普遍发育（李道品，1997；袁士义等，2004；蒋凌志等，2004）。裂缝性低渗透储层约占低渗透储层总数量的 80% 以上。储层中除了在沉积和成岩过程中形成的与层面近平行的成岩裂缝外，还发育大量在构造应力场作用下由于脆性变形形成的高角度构造裂缝。裂缝是低渗透砂岩储层油气的有效储集空间和主要渗流通道，它们控制了低渗透砂岩储层油气的渗流规律以及在注水开发过程中的流

体运动规律,是低渗透砂岩油气藏开发方案选择和开发井网部署的重要地质基础。因此,开展低渗透砂岩储层裂缝的形成、分布及预测研究,对提高低渗透油气藏的勘探与开发水平具有十分重要的理论和实际意义。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,还将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 储层裂缝与裂缝性储层的基本概念

天然裂缝是指由于变形作用或物理成岩作用形成的、在岩石中天然存在的宏观面状不连续 (Nelson, 1985)。从广义上讲,在地质历史时期中,在非构造作用力和构造应力作用下产生的各种破裂构造都可称之为天然裂缝。从狭义上讲,天然裂缝主要是指储层在沉积以后的成岩作用和后期构造变动中形成的节理和微断裂,前者可以称之为节理型裂缝 (jointed-fracture),后者可以称之为断层型裂缝 (faulted-fracture) (曾联波等, 1999)。本书所研究的裂缝是指狭义上的裂缝,而且主要是节理型裂缝的范畴,即相当于构造地质学中的节理术语。

节理型裂缝的裂缝面两侧没有明显的错动,裂缝的形成与分布受岩层控制,因而裂缝在岩层内发育。断层型裂缝主要表现为剪切裂缝,在岩心或地表露头上观察,沿破裂面两侧有微小的错动位移。断层型裂缝又可以分为穿层裂缝和顺层裂缝两类,前者主要表现为高角度裂缝,切割层理面,具有与正断层或逆断层相似的特征;后者主要表现为顺岩层面分布的近水平滑脱裂缝,一般在泥岩层发育,具有明显的擦痕,与顺层断层的特征相同。断层型裂缝一般发育在构造作用相对较强的伸展型盆地和挤压型盆地,其规模相对较大,而裂缝密度相对较小;节理型裂缝普遍发育在不同构造类型的不同岩性中,具有透入性分布的特点,是天然裂缝的主要类型。

低渗透砂岩储层由于岩石致密,脆性大,它们在强烈的成岩作用过程中以及在后期的构造作用下裂缝普遍发育,成为裂缝性低渗透储层。所谓裂缝性储层 (fractured reservoir) 是指天然存在的裂缝对储集层内流体的流动具有重要影响或预测具有重要影响的储集层。这种影响既可以是增强储集层的渗透率和 (或) 孔隙度,也可以是增强储集层渗透率的非均质性 (Nelson, 1985)。储层中裂缝的作用可分为四类:

- 1) 裂缝提供了储层基本的孔隙度和渗透率;
- 2) 裂缝提供了储层基本的渗透率;
- 3) 裂缝提高了储层的渗透率;
- 4) 裂缝造成了储层强烈的非均质性。

根据上述裂缝在低渗透砂岩储层中的储集和渗流作用,可以相应地将裂缝性

储集层划分为以下4种类型:

第一类为纯裂缝型,裂缝在储集和渗流方面都起主导作用;

第二类为孔隙-裂缝型,裂缝在渗流方面起主导作用;

第三类为裂缝-孔隙型,裂缝提高了本身可生产的低渗透储集层的渗透率;

第四类为孔隙型,裂缝主要是增强了储集层渗透率的非均质性。

在变质岩、火成岩、泥灰岩和碳酸盐岩中通常为1)类和2)类;而在低渗透砂砾岩储层中一般为3)类和4)类,裂缝的孔隙度通常小于0.5%,但裂缝的渗透率一般要比储层基质的渗透率高1~2个数量级。

1.3 储层裂缝的国内外研究现状

对裂缝的研究大致可以分为2个主要阶段。第一个阶段是20世纪80年代以前的漫长岁月,主要是从构造地质学的角度,从野外地表露头入手,对裂缝(节理)的类型、成因机制、分布特征及其构造变形意义进行了大量研究。尤其是20世纪70年代断裂力学理论的提出和应用,在节理的几何学、运动学和节理作用的力学方面进行了大量研究,并从均匀介质的线弹性破裂理论出发,提出了节理扩展的3种模式、节理间距剪切滞后模式、应力障碍模式、起始模型、延伸能量平衡模式等,它们目前广泛应用于工程建筑以及有限元的计算中。David、Pollard、Aydin (1988)把在这阶段100多年的研究进展情况进行了较详细的总结和归纳。

第二个阶段是20世纪80年代以来,随着国内外大量裂缝型油气藏的发现和开发,从生产实际需要出发开展的裂缝研究。最早主要是针对碳酸盐岩储层开展的,而对低渗透砂岩储层的裂缝研究,主要从“八五”期间开始的,并随着重视程度的提高不断加大了研究力度。裂缝参数描述与定量预测是这一轮裂缝研究的核心,经过20多年的研究,相继提出了裂缝研究的地质方法、地球物理方法、动态方法、实验方法和数值模拟方法(William, 1997; Stephen, 1997; 李道品, 1997; Peter, 1999; 曾大乾等, 2003)。

储层裂缝研究的地质方法主要包括地面露头区裂缝调查、岩心裂缝的观察与描述、显微薄片的微观裂缝观察与描述,如裂缝间距指数法、分形几何法、Monte Carlo法等(Cmexoba, 1986; Nelson, 1985; Velde & Duboes, 1990; Narr, 1991; Howard & Nolen-Hoeksema, 1991; Lorenz et al., 1991; Narr & Suppe, 1991; Gillespie & Howard, 1993; Barion, 1995; 穆龙新, 1999)。地球物理方法包括FMS、FMI、井下声波电视、地层倾角测井及其DCA异常检测等成像测井系列、碳酸盐储层裂缝识别的常规测井系列以及VSP、相干体分析、纵波各向异性等地震裂缝检测(Schumberger, 1990, 1996; 谭廷栋, 1990; 谈

德辉等, 1996; 李善军等, 1997; 卢颖忠等, 1998; 陈必孝等, 2003; 周灿灿, 2003)。动态方法包括干扰试井、示踪剂分析、注水动态分析、压力分析等 (Van Golf-Racht, 1992; Gringarten, 1990)。实验方法包括古地磁分析、荧光分析、岩石声发射测试、包裹体分析、CT 扫描分析、岩心分析、图像分析、高温高压三轴岩石力学试验等。数值模拟方法主要有构造主曲率法、二维和三维有限元方法 (Ramstad, 1977; William, 1997)、加载模拟法 (Engelder, 1985) 与随机模拟方法等 (Rives & Razack, 1992; Wu et al., 1995)。裂缝的分布与发育受岩性、岩层厚度、构造和应力等多种因素控制 (Narr, 1991; Cruikshank et al., 1995; Castaing, 1997; Finkbeiner et al., 1997; Catherine et al., 1997; Ji et al., 1998; Bai et al., 2000; Chad et al., 2003; Hood et al., 2003)。从影响裂缝发育的岩性和构造应力等因素入手, 在构造应力场数值模拟的基础上, 结合岩石破裂准则和岩心裂缝标定, 判断岩石是否达到破裂及其发育程度, 是目前定量预测裂缝分布规律的最有效途径 (William, 1997; 曾联波, 1998; 丁中一等, 1998; 宋惠珍, 2000; Wong, 2003)。该预测方法的理论是可行的, 其预测结果的可信性主要取决于地质模型、力学模型和力学模型的建立。目前的模型都是以相对均质体来建立的, 所应用的岩石破裂准则也是基于均质体建立的 (Renshaw et al., 1994; Gross, 1995; Malama et al., 1997; Turcotte et al., 2003), 没有考虑早期裂缝和岩层非均质性的影响, 从而影响了裂缝的预测精度。因此, 建立适合低渗透储层强烈非均质性的地质模型和破裂模型, 对正确认识裂缝的地下发育规律, 提高低渗透储层裂缝的预测精度具有十分重要的意义。

根据裂缝性低渗透砂岩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藏渗流规律, 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, 这是低渗透油田开发中晚期方案调整和注水开发管理的地质理论依据; 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藏流速和采油速度, 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 低渗透砂岩储层的地质特征与成因

2.1 低渗透砂岩储层的基本地质特征

根据储层基质的平均渗透率大小,并参照储层的微观孔隙结构及其开发特征,低渗透砂岩储层可以划分为常规低渗透砂岩储层($10 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、特低渗透砂岩储层($1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)和超低渗透砂岩储层($0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)三种类型(李道品,1997)。基质渗透率低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩层超过了油层的物性下限,划分为非储层,但其仍然可以作为非常规天然气储层(吴胜和等,1998)。

和中高渗透砂岩储层一样,低渗透砂岩储层具有陆相沉积的普遍特点,河流-三角洲相砂体仍占主体。但由于其独特的沉积、成岩和构造作用的影响,低渗透砂岩储层又具有其典型的地质特征,主要表现为沉积物成熟度低、孔喉半径小、储层物性差、压力敏感性强、裂缝发育和非均质性强等方面。通过对我国三种不同类型盆地 10 多个典型低渗透砂岩储层的对比分析,它们普遍具有以下 8 方面的基本地质特征。

1. 岩石学特征

我国低渗透砂岩储层的一个显著特点就是矿物成熟度和结构成熟度比较低,主要表现为长石和岩屑的含量普遍较高,黏土或碳酸岩胶结物含量较多,岩石类型一般为长石砂岩和岩屑砂岩,石英砂岩少见。岩石颗粒的粒度分布范围较宽,颗粒大小差异较大,分选和磨圆较差,颗粒之间多表现为线接触。岩石的这些特点使沉积物在成岩早期容易发生机械压实作用,从而大大降低了岩石的孔隙空间,使储层变得致密,物性较差。

例如,根据鄂尔多斯盆地安塞南部的薄片分析,砂岩主要为细粒—中粒长石砂岩,主要粒径 $0.1 \sim 0.35\text{mm}$,最大 $0.3 \sim 0.5\text{mm}$,分选程度中—好,磨圆度中等,以次棱状为主,支撑类型为颗粒型,接触方式为线性,胶结类型主要以薄膜-孔隙型,其次为孔隙、再生型(图 2-1),岩石的颗粒结构反映储层经过了强烈的压实作用,使岩石变得致密。岩石成分以长石为主,占 $47.0\% \sim 57.2\%$,平均 51.5% ;其次是石英,占 $17.8\% \sim 25.0\%$,平均 20.3% ;另外,绿泥石和



图 2-1 特低渗透长石砂岩，石英颗粒次生加大，长石溶蚀，颗粒线接触（显微照片， $\times 100$ 倍，长 6¹，S111 井）

浊沸石含量较高，并有少量火山岩屑、变质岩屑和泥岩（表 2-1）。

表 2-1 S130 井区薄片分析结果（长庆油田研究院，2003）

碎屑成分/%					填隙物成分/%					
石英	长石	火成岩屑	变质岩屑	泥岩	水云母	绿泥石	方解石	浊沸石	硅质	长石质
19.10	51.30	2.20	7.63	5.83	0.13	4.33	1.33	5.40	1.50	0.33

2. 储层孔隙结构特征

由于沉积以后的强烈成岩作用，我国低渗透砂岩储层的孔隙类型通常表现为粒间孔发育，包括原生粒间孔和次生粒间溶蚀孔。在特低渗透和超低渗透砂岩储层甚至以次生孔隙为主。次生孔隙的类型包括粒间残余-溶蚀孔、粒间溶孔、超大溶孔、粒内溶孔、粒缘溶孔及铸模孔、晶内溶孔、晶间溶孔、微裂隙溶孔以及微孔隙。微孔隙主要分布在杂基、易溶胶结物及颗粒中，其孔径细小，它们的普遍发育使低渗透砂岩储层原始含水饱和度高以及油水过渡带变宽。

低渗透砂岩储层的孔隙小，平均孔隙直径大多从小于 $10\sim 40\mu\text{m}$ 不等。孔隙多见三角形、四边形、多边形或长条状孔，在粉砂岩以及泥质含量高和成岩作用强的砂岩中，蜂窝状孔、星点状和长条状孔隙更为常见。喉道很细，以管状和片状为主，喉道中值半径一般小于 $1.5\mu\text{m}$ 。孔隙和孔喉一般以中、小孔隙和中细喉道组合的孔隙系统为主。储层的孔隙结构较差，因而毛细管压力高，在水湿储层中，束缚水饱和度也高，不仅降低了油水在储层中的流动能力，而且还使储层在测井曲线上表现出低电阻率油层的特点，给油气水层的测井解释带来很大困难。

例如，根据显微薄片、铸体薄片和扫描电镜分析，鄂尔多斯盆地安塞南部地

区低渗透砂岩储层的储集空间主要有残余原生粒间孔、长石溶孔、沸石溶孔、岩屑溶孔等孔隙类型（图 2-2~图 2-6）。薄片上孔隙的面孔率为 1.4%~6.4%，平均为 3.4%；孔径为 6~30 μm ，平均为 15.9 μm （表 2-2）。根据压汞资料分析，岩石的喉道分选差，微孔隙喉道发育，最大孔喉半径为 1.61~2.49 μm ，中值半径为 0.075~0.205 μm ，平均为 0.14175 μm ，微孔隙约占储层储集空间的 30%。孔隙结构较差，退汞效率比较低，分布在 21.6%~41.3%，平均为 35.3%（图 2-7）。压汞分析还表明岩石的毛管压力比较高，如 W100-38 井 5 块样品测试的压汞中值压力分布在 3.5902~9.7701MPa，平均为 5.9288MPa。



图 2-2 S130 井细砂岩原生粒间孔
($\times 100$ 倍)

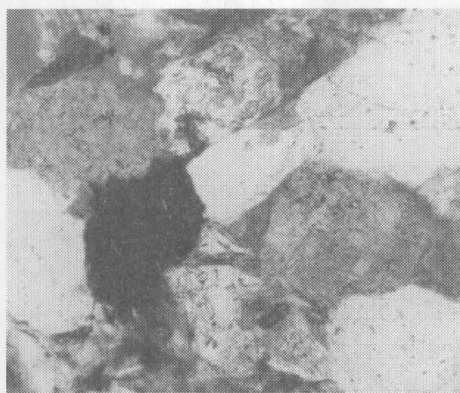


图 2-3 S130 区块长石砂岩中的长石溶孔
($\times 100$ 倍)

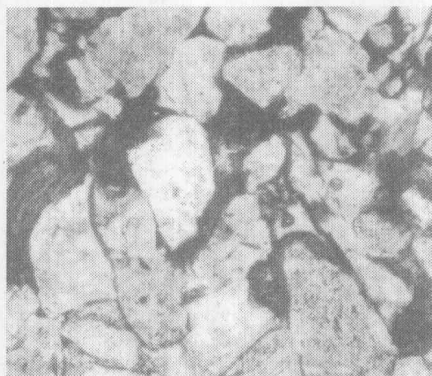


图 2-4 S130 沸石溶蚀孔隙含油
($\times 100$ 倍)

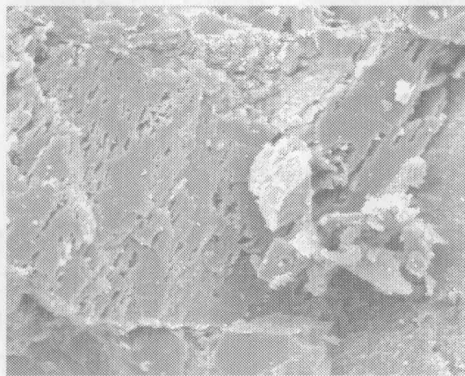


图 2-5 岩屑内差异溶蚀与粒内溶孔
($\times 5000$ 倍)

表 2-2 S130 井区储层的孔隙类型（长庆油田研究院，2003）

序号	孔隙类型/%						面孔率/%	平均孔径/ μm
	粒间孔	长石溶孔	岩屑溶孔	沸石溶孔	微裂隙	破裂孔		
1	0.9	0.4	0.1	0.5	—	—	1.9	10
2	1.2	0.2	—	0.4	0.2	—	2	10
3	0.8	0.8	—	0.2	0.4	—	2.2	10
4	—	1.8	0.2	0.6	—	0.2	3.8	8
5	4.9	1.2	0.1	—	—	0.2	6.4	10
6	1.8	0.4	0.1	0.8	0.2	0.4	3.7	20
平均	1.77	0.80	0.08	0.42	0.13	0.13	3.33	11.33

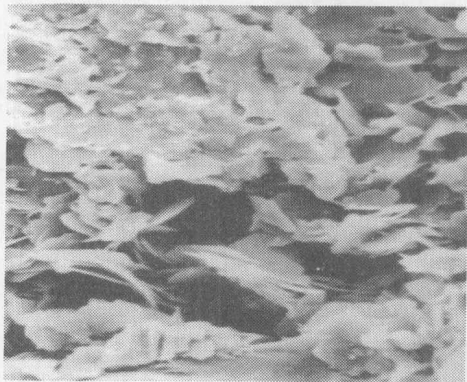


图 2-6 片状绿泥石散布于粒间孔中
(×10000 倍)

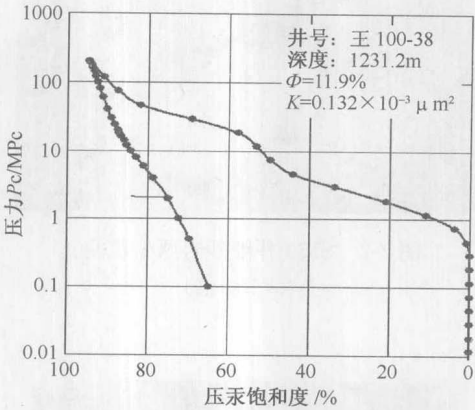


图 2-7 W100-38 井长 6 油层压汞曲线

3. 储层物性特征

低渗透砂岩储层表现出的根本特征就是中低孔隙度和低渗透率。我国典型低渗透砂岩储层基质的孔隙度一般小于 20%，大多数小于 15%，基质渗透率大多数小于 $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从三类低渗透储层的储量分布来看，常规低渗透储层的储量约占 47%，特低渗透储层约占 39%，超低渗透储层约占 14%（李道品，1997），反映我国低渗透储层中，特低渗透和超低渗透储层所占比重较大，它们广泛分布在各含油气盆地中。我国主要的低渗透天然气砂岩储层的基质孔隙度一般小于 10%，基质渗透率大多数小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ （蒋凌志等，2004）。