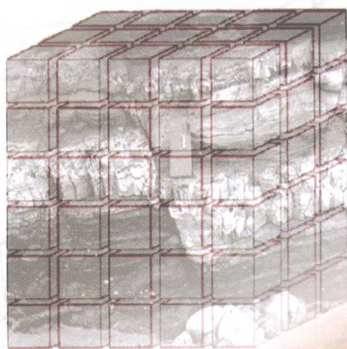




《沉积模式与地质模型新进展丛书》之四

储层裂缝预测研究

穆龙新 赵国良 田中元 原瑞娥 许安著 著



《沉积模式与地质模型新进展丛书》之四

储层裂缝预测研究

穆龙新 赵国良 田中元 原瑞娥 许安著 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面系统地总结了国内外储层（包括砂岩和碳酸盐岩储层）裂缝识别和预测的各种方法，深入分析了裂缝及裂缝性储层的特征和成因机理。特别值得指出的是，本书比较全面地阐述了我国裂缝性砂岩油田裂缝的主要特征及其研究方法，在裂缝识别、描述、预测及建模等方面都反映了裂缝研究的最新成果。

本书可供从事储层裂缝研究、油藏描述和地质理论研究的专业研究人员、油田勘探开发工作者及相关专业的高校师生参考和借鉴。

图书在版编目 (CIP) 数据

储层裂缝预测研究/穆龙新等著.

北京:石油工业出版社,2009.9

沉积模式与地质模型新进展丛书;4

ISBN 978-7-5021-6896-4

I. 储…

II. 穆…

III. 裂隙储集层-油气藏-预测-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 182343 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523594

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

850×1168 毫米 开本:1/32 印张:11.75

字数:315 千字 印数:1—1500 册

定价:45.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《沉积模式与地质模型新进展丛书》

编委会

主任：穆龙新

委员：贾爱林 郑小武 于兴河

周丽清 赵国良 田中原

秘书：赵国良


序

最近这些年，沉积模式与地质模型的定量研究是石油开发地质领域中最重大的发展之一。近年来我国油田开发正面临着从易开发区向难开发区、从部分高含水向全面进入高含水、从储采基本平衡向不平衡过渡的严峻形势，迫使我们更加全面深入地研究储集层三维分布规律。当前地下水分布情况发生了巨大的变化，呈现出高度分散，局部集中，剩余油多分布在差、薄、边部位，开采难度增大等新特点，而造成这些特点的主要原因是由于储集层内部的各种非均质性及复杂的构造断层切割所造成的。因此为了搞清高含水期老油田地下剩余油分布规律和进一步提高滚动勘探开发工作水平，需要更加精细的油藏描述，建立精细的三维定量地质模型，发展一套适应开发中晚期的现代精细油藏描述技术，这是我们深度开发老油田，提高采收率的基础和关键。

这些年作者一直从事这方面的研究工作，特别是“八五”、“九五”期间承担了国家和中国石油天然气总公司科技攻关项目——露头储集层和现代沉积研究以及储集层预测方法、低渗透储集层裂缝研究、精细油藏描述等大型研究项目。在储集层精细预测的基础理论、预测方法、地质知识库、原型模型、地质统计学，尤其在随机模拟方法、油藏描述等方面做了深入细致的研究工作，取得了一系列的成果，丰富和发展了沉积模式和地质模型的研究理论和方法。这套丛书就是在全面总结国内外沉积模式与地质模型的基础上，针对我国陆相储集层特点，按沉积类型深入论述了沉积模式与地质模型的建模方法、高含水油藏精细研究以及储集层裂缝预测等方面的新理论、新技术和新方法，阐述了各种方法的应用条件、适用范围，以期对我国储集层精细建模和油藏描述工作的提高起到指导和促进作用。同时，还介绍了露头储

集层和现代沉积、裂缝研究和油藏描述的现状，特别是在定量沉积模式、储集层精细研究、地质建模、储集层预测、高含水油藏精细描述和裂缝研究方面的最新成果。

总之，这套丛书抓住了当前石油工业生产和研究的热门和难点，选材好，而且作者水平高，相信这是一套高水平的专业科技丛书。

A handwritten signature in black ink, consisting of several stylized, overlapping strokes that form a unique, cursive-like mark.

2003年5月

前 言

随着世界石油天然气资源的不断开发利用，油气勘探开发的方向逐渐由常规油气藏转向特殊油气藏，其中裂缝性储层油气储量的勘探开发显得尤为重要。据统计，裂缝性储层油气产量占整个石油天然气产量的一半以上，是 21 世纪石油增储上产的重要领域之一。裂缝性油气藏如中东的 Asmari 和 Bangestan 裂缝性碳酸盐岩储层、中亚的缝洞型碳酸盐岩储层、美洲的白垩系裂缝储层、北海的白垩系储层以及美国得克萨斯州 Sperapery 特低渗裂缝性砂岩储层等，在当今世界油气生产中起着举足轻重的作用。据美国能源部预测：在 2030 年以前，美国国内一半以上的天然气产量将来自裂缝性储层。如何提高裂缝油气藏的勘探开发效益，是当今石油地质研究的重大课题之一。

我国华北的裂缝型潜山油藏、四川缝洞型碳酸盐岩和裂缝性碎屑岩气藏、塔里木盆地奥陶系缝洞型地层岩性油气藏、鄂尔多斯盆地的裂缝性油气藏等都是我国的重要油气生产基地。尤其是这些年来发现的具有裂缝的碎屑岩油田（主要是低渗透砂岩油田）越来越多，如新疆的火烧山油田，吐哈的丘陵、鄯善油田，长庆的安塞油田，胜利的渤海油田，大庆的朝阳沟油田，吉林的新立、乾安、新民油田等等，几乎每个大油区都有裂缝性砂岩油田的存在，遍布全国。初步统计全国约有 18 个裂缝性砂岩油田，且以低渗透油田为主，表 0-1 是我国几个裂缝比较发育油田的简要数据表。

人们对裂缝在油田开发中重要性的认识是一个逐渐深入的过程，特别是我国对碎屑岩油田裂缝作用的认识更是走过了一个曲折的道路。早在 20 世纪 50 年代，我国就发现了玉门石油沟裂缝性油田，但 1955 年正式投入开发时并没认识到这是一个裂缝性

砂岩油田。依靠溶解气等天然能量驱动，1959年生产达到历史最高水平，日产原油为188.2t，随后产量迅速下滑，至1964年产量锐减到62.9t/d，6年内年平均递减率为16.7%。六七十年代大搞注水试验，发现了裂缝对注水的控制作用，遂开展了裂缝方面的研究工作，研究出了一套沿裂缝注水的方式。进入八九十年代，油藏内部注采关系日趋复杂，遂进行了几次大规模的综合调整治理，进一步加强了对裂缝的研究，提高了认识程度，使油田保持了持续稳定的局面。

表 0-1 我国主要裂缝性油田基本数据表

油田名称	面积 (km ²)	储量 (10 ⁴ t)	渗透率 (mD)	孔隙度 (%)	厚度 (m)	裂缝密度 (条/m)	裂缝最大切深 (m)	岩性	油藏类型
火焰山	40.7	6741	12.5	16.5	9.5	0.47	2	泥粉砂岩	显裂缝型
丘陵	33.6	4500	31.9	13.7	35	1.2	2	中细砂岩	潜裂缝型
老君庙 (M层)	17.1	5332	24	17.8	25.2	0.6	<0.50	中细砂岩	微裂缝型
安塞	206	10561	1.29	12.4	12.2	很少	<0.60	粉细砂岩	潜裂缝型
朝阳沟	328.5	18000	15	15	8.8	0.13	<1.60	粉细砂岩	微裂缝型
扶余	84	13240	180	25	10.3	0.48		粉细砂岩	微裂缝型
新立	38.2	3816	20	16.3	7.9	0.211		细砂岩	潜裂缝型
乾安	27.0	1988	5.48	15.9	7.6	0.70		粉砂岩	微裂缝型
新民	59.8	2965	5.4	15.2	8.6	0.056		粉砂岩	微裂缝型

与玉门石油沟油田走过的认识历程相似，不管是东部吉林的扶余油田，还是西部新疆火烧山油田，砂岩油田储层裂缝的重要性都是在油田全面注水开发以后才为人们所认识。尤其新疆火烧山油田，由于在开发前对裂缝影响估计不足，油田投入全面注水开发后，裂缝引起了严重的水窜和暴性水淹。投产三年多，采出程度只有4.98%，综合含水为53.3%，年含水上率为

8.56%，有91.3%的采油井见水。这一系列有裂缝的低渗透砂岩油田开发的经验教训使人们对砂岩裂缝重要性的认识提高到一个新水平：即裂缝不仅决定了注水效果，而且控制了层系划分和井网布置，从而直接决定了油田开发效果的好坏。因此，裂缝性砂岩油田投入开发前就要对裂缝高度重视，正确认识和研究裂缝是裂缝性砂岩油田开发成败的关键因素之一。

随着研究的深入，人们还发现砂岩裂缝与碳酸盐岩裂缝有许多重要区别，其开发特征也有所不同。砂岩裂缝与碳酸盐岩裂缝主要区别如下：

(1) 砂岩裂缝多为构造成因的张性缝和剪性缝；而碳酸盐岩裂缝既有构造成因的张性缝、剪性缝，又有成岩作用或两者结合形成的溶洞、溶孔、缝合线、微裂缝等。

(2) 砂岩裂缝一般缝面清楚，产状稳定，长度大，具有明显的方向性；而碳酸盐岩裂缝在地下常有一定开度，长度不大，宽度大。

(3) 原始状态下多数低渗透砂岩裂缝是闭合的，属微裂缝或潜裂缝，裂缝宽度在孔隙直径的数量级内，因此裂缝不是主要的储油空间和运移的通道；而碳酸盐岩裂缝则相反。

(4) 砂岩裂缝由于在地下闭合，无明显的分界面，裂缝和岩石反差极小，因此测井曲线上难以判别；但碳酸盐岩裂缝有一定开度，泥浆水易于浸入，裂缝和岩石反差强，测井曲线反映明显，易于判别。

(5) 裂缝具有可变性。砂岩裂缝经常在油田开发初期，不易发现其作用，但投入注水和压裂后，尤其当注水压力超过裂缝破裂压力后，裂缝的影响才暴露出来，因此它对开发有两重性作用，需要研究利用和限制它；而碳酸盐岩裂缝经常既是储集空间，又是运移通道，在开发过程中基本不变化，因而所采取的对策也不相同。

从油田开采动态反应来看，裂缝性油田的裂缝作用，可分为三种类型：

第一类为强烈型（显裂缝型）：在开采动态中裂缝反应明显，作用强烈，其主要表现是钻井过程中钻井液漏失严重，压力恢复曲线具有明显双重介质特征，有效渗透率明显高于空气渗透率，油井初产能力变化幅度极大，注入水推进速度特别快，油井水窜、水淹十分严重等。如火烧山油田，油井初期产量相当高，有裂缝显示的井，一般可达到 30~40t/d，最高达 100t/d，同时水窜、水淹也十分严重，据 93 口见注入水的油井统计，注入水推进速度平均每天为 3.1m，最快达 9.2m，油井见水后，累计产油 100t，含水上升 61%。

第二类为中等型（微裂缝型）：裂缝的作用主要表现为注水后引起裂缝方向的油井极易发生水窜、水淹现象，如吉林的扶余油田。

第三类为微弱型（潜裂缝型）：这类裂缝在原始状态下处于闭合状态，其特征及表现和正常砂岩油田相似，但在外力（如压裂、注水等）长期作用下，这些潜在的微细裂缝可能张开发挥作用。如新立油田，在长达 6 年多的注水时间里没有发现水窜和暴性水淹现象，含水上升也较慢。开采 6 年采出程度 10.5%，含水只有 27.796%。该油田反九点井网的井排方向与裂缝成 22.5° 夹角，可以观察到这个方向注水井排上的油井含水上升略快于其他方向上的油井。1988 年底这个方向上的油井见水的有 57 口，占井数的 58.8%，综合含水为 58.8%。而其他油井中见水的只有 19 口，占井数的 9%，综合含水为 7.8%。全油田有水淹井 5 口，都在这个方向上。可以看出裂缝方向上的渗透率略高于正交方向。然而到 1990—1991 年，含水上升的情况有明显变化。其他方向上油井见水的明显增多，而且见水井含水上升速度比上述注水井排方向上油井更高。1990 年注水井排上含水大于 60% 的油井有 26 口，一年内含水由 70% 上升到 78%；但其他方向上含水大于 60% 的有 16 口井，含水由 62.6% 上升到 82.3%。与此同时，注水井开始大量出现隔层破裂吸水现象。1990 年测吸水剖面 50 口井，竟有 27 口发现隔层吸水，吸水量占注入量的

33.9%。1989年以前每年新增套变井数约12口，1990年猛增至25口；1990年底共有套变井89口，其中注水井55口，占注水井总数的58%。动态的转折明显与注水压力超过裂缝延伸压力有关，油田的注水压力是逐年增高的，从1984年的4.4MPa逐渐提高到1990年的11.6MPa。该油田压裂资料计算的裂缝延伸压力梯度为0.0167MPa/m。按油层顶界一般深度1100m计算，裂缝延伸压力为18.4MPa。显然油田开发初期油层部位注水压力是低于裂缝延伸压力的。目前折算1100m井深注水压力为22.6MPa，超过裂缝延伸压力3.2MPa，扣除摩擦阻也超过临界值了。其转折大约在1989—1990年，正好与上述变化相对应。

以上情况说明新立油田初期开发效果所以好，主要原因是注水压力低于裂缝延伸压力，微裂缝只起了方向性补充渗透率的作用而没有张力和串连起来。该油田井排方向与裂缝方向成 22.5° 夹角，对延缓注水井排上油井含水上升有好作用，但它是在低注水压力的背景上起作用的。井排方向扭转后不能适应微裂缝张开以后的储层，失去改为线状注水的条件，这是它的弱点。

正由于裂缝性油田具有许多特殊性，因此裂缝性油气藏勘探开发的最大难点就是对储层中裂缝发育程度、分布规律和对渗流作用的预测。应该说，储层裂缝的研究在国内外都起步较晚。20世纪60年代，在美国西部白垩系储层和中东油气产层中发现天然裂缝后，在世界范围内掀起了裂缝研究的热潮，其中，1968年，G. H. Murry将构造横剖面看作弯曲的“梁”，用几何方法导出了剖面曲率值与裂缝孔隙度之间的计算公式，开始了裂缝定量研究的先河。20世纪80年代初，T. D. 范高尔-拉特才撰写了关于裂缝油藏工程的专著，基本形成了裂缝型储层研究的理论和方法，但这些专著却不是针对裂缝本身的研究。20世纪70年代，分形（多重分形）理论的引入，丰富了储集体裂缝研究的方法。尤其是近年来裂缝探测技术的快速发展，如FML（微电阻率成像测井）、FIL（裂缝识别测井）和FMS（地层微扫描测井）等技术极大地推动了裂缝识别和预测的深入开展。

目前，储层裂缝的识别和预测正在改变以往裂缝识别过程中采用单一技术和方法的不足，大力发展综合应用地震和测井技术识别和预测裂缝的方法，不断深化构造应力场的研究，建立裂缝与各种构造之间的模型关系，综合运用构造应力场分析和相关实验来预测裂缝，进一步研究应用非线性理论预测裂缝的具体方法，从而大幅提高裂缝识别与预测的精度，并不断向裂缝研究的定量化方向发展，同时在预测三维空间的裂缝渗流规律和分布模式方面也有了长足的进展。

虽然国内外在裂缝研究方面有了很大发展，也给予了高度的重视，投入了大量的人力和物力，但由于储层裂缝分布的复杂性和随机性，又缺乏有效的探测和预测手段，因此对裂缝发育分布研究不准确，使油气井钻探和油气田开发方案达不到预期目的，而造成的直接和间接的损失难以完全统计。如克拉玛依的小拐油田，因对裂缝预测研究认识不足，油田建设投入的数十亿元资金基本上全部落空。

因此，研究人员迫切需要一些专门论述储层裂缝识别和预测方法方面的专著以指导自己的研究工作，提高其研究水平，但是到目前为止，国内专门系统全面地论述储层裂缝识别和预测方法方面的书还很少，而论述碳酸盐岩裂缝和介绍裂缝性油田情况的书籍较多，真正把各种识别和预测储层裂缝的方法系统全面地总结出来的专著极少。有鉴于此，本书首次全面系统地总结了国内外储层（包括砂岩和碳酸盐岩储层）裂缝识别和预测的各种方法，深入分析了裂缝及裂缝性储层的特征和成因机理，详细介绍了国内外储层裂缝研究的历史和发展趋势，尤其是裂缝地质建模及其软件的介绍都是目前国内外最新的研究成果。特别值得指出的是，本书比较全面地总结了我国砂岩油田裂缝的主要特征和各种研究方法，注意了对裂缝研究方面新技术、新方法的介绍，特别是对构造裂缝的表征技术，贯穿了这些年作者在研究裂缝过程中探索出的一些新思想，反映了最新的裂缝研究成果。相信会对有志于从事储层裂缝研究和裂缝渗流研究的技术人员和学生起到

帮助和指导作用。

本书在编写过程中得到了许多专家和同事的大力帮助，尤其是张李平等人所做的大量调研工作以及郑晓东、林金逞、吴向红等人提供的一些有益素材不仅使我们更进一步掌握了目前世界裂缝研究的现状，而且也丰富了本书的一些内容。在此一并表示衷心感谢！

作者

2007年4月

目 录

第一章 裂缝及裂缝性储层	(1)
第一节 储层裂缝类型及特征	(1)
一、裂缝的定义	(1)
二、裂缝类型及特征	(1)
第二节 裂缝形成的力学机制	(7)
一、应力分析	(7)
二、应力—变形关系	(10)
三、应力、应变与破裂的关系	(13)
四、岩石破裂过程的一般特征和格里菲斯裂纹	(14)
五、裂缝的扩展形式	(16)
六、岩性和围压对变形特征和破裂扩展的影响	(16)
第三节 裂缝性储层及其特征	(18)
一、裂缝性储层的定义	(18)
二、裂缝性储层的分类	(19)
三、各类储层主要特征	(23)
第四节 裂缝发育的主要控制因素	(27)
一、岩性	(27)
二、层厚	(29)
三、构造部位	(30)
四、应力	(31)
第五节 裂缝对油田开发的影响	(32)
一、裂缝对油气井生产能力的影响	(33)
二、裂缝对注水效果的影响	(33)
三、裂缝对油气藏分布规律的影响	(35)
第六节 我国裂缝性油田的裂缝特征	(36)

一、成因上以构造裂缝为主	(36)
二、产状上以高角度缝为主	(36)
三、方位上与所处盆地的构造体制有明显的关系	(37)
四、裂缝发育程度受构造部位、层厚和岩性控制明显	(38)
五、裂缝规模总体较小	(40)
六、以闭合缝为主	(41)
七、裂缝孔渗较小以增加储层导流能力为主	(41)
八、动态上油井自然产能低但后期作用明显	(42)
第二章 储层裂缝研究方法和裂缝识别	(43)
第一节 储层裂缝研究历史和发展趋势	(43)
一、储层裂缝研究发展史	(43)
二、国外储层裂缝研究的主要方法和特点	(44)
三、我国储层裂缝研究的主要方法及特点	(46)
四、储层裂缝研究现状和发展趋势	(50)
第二节 裂缝研究的主要方法和流程	(52)
一、裂缝研究的主要方法	(52)
二、裂缝研究的复杂性	(56)
三、裂缝研究的主要技术路线和评价内容	(57)
第三节 岩心和露头裂缝观测方法	(59)
一、岩心裂缝观测方法及内容	(59)
二、露头裂缝观测方法及内容	(63)
三、裂缝观测资料的分析整理	(65)
第四节 裂缝的动态识别标志	(67)
一、钻井显示	(68)
二、试井显示	(68)
三、压裂曲线显示	(69)
四、注水显示	(69)
五、油田生产显示	(69)
第五节 利用储层物性数据间的异常关系间接判断	(69)

裂缝的存在	(70)
一、岩心孔隙度与渗透率关系	(70)
二、全岩心的垂直与水平渗透率关系	(71)
三、岩心渗透率与试井渗透率	(71)
四、通过分析孔隙度间接判断裂缝的存在	(71)
第六节 利用岩石力学特征确定应力和预测裂缝	(72)
一、岩石声发射实验与裂缝形成期次、强度的关系 ..	(72)
二、受载岩石破裂试验与形成构造裂缝和断裂的关系	(72)
三、利用岩石应力特征确定就地三向应力的大小	(73)
四、用古地磁方法确定岩心在地层中方向	(74)
五、其他确定地层中天然裂缝及应力分布的方法	(74)
第三章 裂缝表征参数及其确定方法	(76)
第一节 裂缝密度	(76)
一、概念	(76)
二、裂缝间距指数法确定构造裂缝密度	(77)
三、利用裂缝与层厚的关系求构造裂缝密度或间距 ..	(81)
四、利用裂缝的切穿深度求构造裂缝密度或间距	(84)
五、利用地层倾角估计裂缝密度	(85)
六、利用裂缝与断裂的关系估计裂缝密度	(85)
七、利用构造曲率法或裂缝数值模拟方法计算裂缝密度	(86)
八、分形方法求取裂缝密度	(87)
九、利用示踪剂计算裂缝参数	(88)
十、微观裂缝密度及其确定方法	(90)
第二节 裂缝延伸长度	(91)
一、基本方程建立的假设条件	(92)
二、基本方程	(92)
三、裂缝三维延伸模型的解	(94)
四、结果分析	(97)

五、裂缝切穿深度	(97)
第三节 裂缝宽度	(98)
一、岩石模拟实验法	(98)
二、根据裂缝的体积压缩系数计算	(99)
三、利用有限元数值模拟方法计算裂缝宽度	(100)
四、利用净应力和裂缝渗透率之间的关系预测裂缝宽度	(103)
第四节 裂缝倾角	(107)
第五节 裂缝方位	(108)
第四章 裂缝孔隙度和渗透率及其确定方法	(111)
第一节 孔隙度	(111)
一、体积法	(111)
二、开度法	(113)
三、曲率法	(113)
四、面积法	(113)
五、裂缝体积密度法	(114)
六、测井法	(115)
七、试井法	(120)
八、综合法	(121)
第二节 渗透率	(121)
一、渗透率计算方法	(121)
二、理论计算法	(125)
三、数值模拟法	(126)
四、构造变形法	(128)
五、经验估计法	(128)
六、开度法	(129)
七、图版法	(129)
八、面积法	(130)
九、根据生产测井和试井资料确定渗透率	(131)
十、动态资料约束下的渗透率计算方法	(133)