

天然裂缝性 储集层地质分析

R.A. 纳尔逊

石油工业出版社

054799

天然裂缝性储集层地质分析

R.A. 纳尔逊

柳广第 朱筱敏 译

郝石生 校

5238/01



200289348



石油工业出版社

内 容 提 要

本书是海湾出版公司出版的石油地质与石油工程丛书之一。全书共分六章，重点介绍利用地质、岩石力学和岩石物性资料预测和评价裂缝性储集层的原理和方法。本书首先介绍了裂缝性储集层评价的主要内容，然后对断裂力学的有关内容和裂缝性油气藏管理的主要内容进行了讨论，最后介绍了裂缝储集层分析方法及资料收集方法。

本书的序言、前言及第一章、第二章和第三章由柳广第同志翻译，第四章、第五章、第六章及附录由朱筱敏同志翻译，全书由郝石生同志校订。

Nelson, Ronald A

Geologic analysis of naturally fractured reservoirs

Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1985

天然裂缝性储集层地质分析

R. A. 纳尔逊

柳广第 朱筱敏 译

郝石生 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀吴海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本9³/₈印张 244千字 印 1—1,500

1991年6月北京第1版 1991年6月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0497-6/TE·476

定价：2.50元

序 言

所有沉积岩最常见的一种特征，其成因或许并不归因于任何一种沉积作用，这一特征就是裂缝（有时也用破裂、裂隙、节理或其它一些术语命名岩石中的这种近于呈面状的不连续）。沉积岩中裂缝的存在与相、岩性、组构、孔隙度和年代无关。诚然，裂缝的丰度和类型可能受层状岩石的上述参数所控制，但处处存在的裂缝仅是应力超过岩石破裂强度而产生的结果。

某些导致天然裂缝形成的应力差异是由压实作用、脱水作用、热梯度、成岩过程中的体积变化或构造事件产生的。人造裂缝是指人工诱导的裂缝（如为提高井的产量而诱导的裂缝），或者是指某些其它活动（如采石和建设）的副作用产生的裂缝。实际上，所有沉积岩都含有裂缝并且是多种天然成因的裂缝。

自从第二次世界大战后中东某些油田的开发以来，人们已认识到高裂缝的油气储集层在经济上的重要性。此后，在诸如破裂过程（岩石力学）、如何在地下人工产生裂缝（石油工程）、了解裂缝与特定地质特征之间的关系（构造地质学）以及在某些情况下远距离地探测裂缝的存在（测井）等方面，地球科学工作者们积累了丰富的知识。我们甚至学会了将油井出乎意料的高产解释为裂缝存在造成的，或将井出乎意料的低产归因为缺少裂缝。换言之，我们对裂缝性岩体有了深入的了解并积累了丰富的知识和精尖的技术。

一个并非专家的人如何利用裂缝岩体的已有知识发现更多的含油气储集层并从中开采出更多的油气呢？

在本书中，R.A.纳尔逊总结了这些已有知识的有关内容（他本人对此做出了重大贡献），并告诉我们如何将它们有效地

应用到裂缝性油气藏的勘探和开发中去。过去所极其缺少的，正是这样一种有效的方法。

D.W.斯特恩斯
俄克拉荷马大学（诺曼）

前 言

在地质和工程文献中,每年都发表许多有关裂缝的研究成果。这些成果包括这样一些内容,如裂缝间距、裂缝的形成、裂缝孔隙度、裂缝渗透率、裂缝发育的时间、裂缝系统的遥感探测(井眼的、地面的和地下的)、用裂缝作用作为应变机理、以裂缝作为应力的指示和相对塑性的度量以及裂缝分布的统计方法等。所有这些都是一个最终目标的重要组成部分,这一最终目标就是评价和预测天然裂缝系统对地下流体流动(小范围)和随后的油藏动态(大范围)的综合影响。人们希望这一切的最终成果是对油气藏的有效管理。

本书试图为研究裂缝性储集层的学者提供一本原始资料集,包括对裂缝岩体性质感兴趣的大学师生以及肩负裂缝性储集层评价这一艰巨任务的有经验的工业地质学家和工程师。

本书试图为以具体地评价和预测裂缝性储集层性质及一般地评价和预测非均质储集层性质为目的的研究者提供一种全面的方法。这里将主要利用地质的、岩石物性的和岩石力学的资料。本书与该学科已出版的其他著作的区别在于,它为裂缝性储集层的评价提供了一种岩石资料方法。特别地,本书在适当的情况下,将引用详细的测井和传统工程方法,但不做详细的讨论。这些内容在Aguilera(1980)、Reiss(1980)和Van Golf-Racht(1982)的著作中有充分的论述。同样,断裂力学的详细内容可参考Jaeger和Cook(1980)的著作。

对于裂缝性储集层,勘探和评价是不能分开的。对于这类储集层,搞清正在寻找什么样的储集性能和已发现了什么样的储集性能是头等重要的。这就是第一章讨论的储集潜力早期勘探评价和估计的意义所在。

在任何正常的和成功的油气勘探中，必须具备六个必要因素：

- (1) 油气来源；
- (2) 圈闭；
- (3) 储集岩；
- (4) 封闭条件；
- (5) 事件发生的适当时间；
- (6) 便于勘探。

当然，只有两个因素即储集岩和事件发生的适当时间对裂缝性储集层的影响不同于正常勘探。

在裂缝性储集层中，天然裂缝系统提供了总储集性的全部或一部分。因此，任何一种有助于发现足够多的，有利于增强储集性的天然地下裂缝的技术都将是一种有生命力的勘探手段。这些技术中的一部分可用于寻找地下裂缝，而另一部分可用于定量评价裂缝系统的有关储集性能。这些将在第一章、第四章和第六章中讨论。

裂缝发育时间与流体运移时间的关系可能是极其重要的。当然，油气运移之后在地下存在天然开启裂缝是重要的，这样在开采过程中它们有助于提高储集层的孔隙度和渗透率。然而，特别是在那些裂缝既提供了主要孔隙度又提供了主要渗透率的储集层（见第三章）中，裂缝必然是在油气运移同时或之前形成的。这样裂缝就成了油气进入储集层的通道。在裂缝对流体流动起阻碍作用的储集层（某些变形裂缝或矿化裂缝）中，流体运移以后形成的裂缝对于流体充满储集岩基质是有利的。

这样，最有价值的勘探技术是那些能阐明变形事件和储集层成岩历史相对于运移高峰先后顺序的技术。Trémolières（1981）、Narr和Currie（1982）的著作及本书的第一章和第六章讨论了这些技术中的一部分。

裂缝性储集层非常复杂，其评价也很困难。这类储集层的有效评价和预测要求尽早地认识天然裂缝系统所起的作用并掌握收

集和分析有关资料的系统方法。我希望本书将有助于读者更好地理解这样一种作用和逐步掌握这样一种方法。

R. A. 纳尔逊

目 录

序言

前言

第一章 裂缝性储集层的评价, 导论	(1)
§1 引言	(1)
§2 评价的基本类型	(3)
§3 研究的一般程序	(6)
§4 裂缝系统的成因	(6)
§5 影响油藏动态的裂缝性质	(27)
§6 裂缝与基质孔隙度的联系	(88)
第二章 断裂力学概述	(106)
§1 应力和应变	(106)
§2 有关破裂的一些概念	(111)
§3 破裂准则的类型	(116)
§4 概念和准则的应用	(121)
第三章 油气藏管理	(123)
§1 裂缝性储集层的分类	(123)
§2 裂缝性油气藏管理策略	(130)
第四章 探测和预测裂缝的分布与密度	(134)
§1 探测方法	(134)
§2 地下裂缝间距的预测	(142)
第五章 非均质储集层分析	(158)
§1 缝合线	(158)
§2 非均质储集层渗透率张量的确定	(180)
§3 储集层模拟中的统计数据	(203)
§4 裂缝性储集层的增产措施	(218)
第六章 岩石资料的收集和分析	(223)
§1 岩芯和露头分析	(223)
§2 裂缝系统性质定量化的压力和生产分析	(243)

§ 3 地质学中的数值模拟.....	(245)
附录A 已发表的裂缝油气田一览表.....	(247)
附录B 裂缝系统的自然生产控制.....	(256)
附录C 平均技术.....	(268)
参考文献	(269)
符号说明	(289)

第一章 裂缝性储集层的评价：导论

仅发现裂缝是不够的。

§ 1 引言

裂缝性储集层非常复杂并且很难评价。这类储集层的有效评价和预测要求尽早地认识天然裂缝系统的作用并掌握收集和分析有关资料的系统方法。然而，应时刻注意使分析和评价的程度与所提出的特定问题相符合。否则很容易陷入对细节和资料的获取而忽略了经济问题。

1.1 问题

过去十年间，人们研究地表及地下岩层中天然裂缝的兴趣大大地增加了。这一兴趣的产生有两方面的原因，即关于天然裂缝系统对地下流体流动影响的工业知识的增多和天然裂缝在开发中起重要作用的油气田的大量发现。

由于在预测、评价和表征上的困难，对于进行恰当的分析，裂缝性储集层具有许多其本身固有的障碍。这些障碍来源下面一些问题：

1. 普遍缺少深入的定量方法来描述和表征高度非均质性储集层。
2. 地质学家和工程师在识别裂缝及其分布规律上的失败。
3. 描述裂缝分布和形态的方法过于简单。

不仅存在这些障碍，而且许多天然裂缝的探测技术也使用不当或根本未用。尽管这些技术的大多数确实有效，但仅靠它们却很少有重要意义，甚至可能掩盖评价的真实结果。谨记，仅发现裂缝是不够的。

探测地下裂缝或预测它们的分布确实只是全面评价一个裂缝性储集层的开端和最基本的一步。经济地开发裂缝性油气藏的关键在于：

1. 在钻探费用的基础上评价可采储量。
2. 预测有利井位及井随时间的动态。
3. 取得充足的岩石和裂缝资料以进行上述计算。

这些关键因素中的第三个将是本书的基本主题。作者将说明可以用于裂缝性储集层评价的岩石资料的范围。这些资料对于充分解答其它两个因素是必要的：评价可采储量及预测井位和动态。本书将不单立章节具体地论述后两个主题，因为它们要求的理论基础不同。因此，本书应被认为是一个资料库，由此可做出主要的经济和工程决策。

1.2 定义

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（Ranalli和Gale, 1976）。定义的范围一般反映了作者的不同兴趣。因为本书论述天然裂缝对储集岩的影响，所以本书的定义在这里限制在储集层的范围内。

储集层裂缝是指由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。为便于实用，假定它们起初是开启的，但后来可以被矿物充填。因此，它们既可能有利于岩石内流体的流动，也可能不利于岩石内流体的流动。这样一个广义的定义可使本书讨论由于大量裂缝的存在而产生的流体流动的非均质性，而不管裂缝形成和扩展的力学差异如何（是张性还是剪性、是I型还是II型、是裂缝还是微断层等）。这一定义也使我们有可能处理各种裂缝形态对流体流动的影响。例如，我们既可以考察高渗透性的开启裂缝对油藏动态的影响，也可以考虑低渗透性的变形裂缝造成的岩石渗透率的强烈非均质性。

储集层裂缝的定义是一个广义的定义，而“裂缝性储集层”的定义比这更广。因为天然裂缝系统对一次、二次和三次采油中

的油藏动态有多种影响，并且要在这些影响明显地显示于生产数据上之前很久就对它们进行预测，所以有必要给裂缝性储集层下一个便于应用的定义。裂缝性储集层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据预测具有重要影响的储集层，这种影响既可以是增加储集层的渗透率和（或）孔隙度，也可以是增强储集层渗透率的非均质性。修饰词“据预测具有重要影响”在使用上是重要的，这是因为定量评价一个裂缝性储集层所需要的资料必须在油气藏开发历史的早期进行收集。因此，我们必须经常预测这一重要影响，并且在经生产历史证实之前把该地层看成是裂缝性储集层。

本章其余部分将以一种合乎逻辑和有用的顺序讨论几个在定量分析裂缝性储集层中必须进行评价的关键性问题：成因、性质和裂缝与基质的相互影响，最后是储集层的分类（第三章）。

§ 2 评价的基本类型

对于裂缝性储集层，勘探和开发不能与评价相分开。搞清正在寻找什么样的储集性能和已经发现了什么样的储集性能是头等重要的。在裂缝性储集层分析中，需要提出三种基本的评价类型（Nelson, 1982）。这三类评价的复杂程度、所需资料的数量和完成评价所需的时间依次增加，即：

1. 确定和预测储集层总体性质的早期勘探评价。
2. 经济潜力评价（储量和流动速度等）。
3. 为开发设计和详细的储集层模拟而进行的评价。

它们是几类截然不同的评价，需要不同数量的定性和定量资料。此外，这些评价一般在一个油田或探区历史的不同时期进行。

2.1 早期勘探评价

从经济上讲，最常用、通常也是最关键的裂缝评价是那些早在勘探阶段进行的评价。这些评价的目的是更好地确定有关的参

数并确定或预测一个新发现油气田中储集层的性质。这些评价只涉及对构造和地层层序的一般了解（岩石物性和力学性质）、非专门用于裂缝评价的测井系列和少量的岩芯和试井数据。这一阶段进行的评价至多是定性的，或许称为推测比真正的评价更为合适。

然而在钻探初期，这种评价经常决定着是否能发现一个远景区带。例如在利比亚的Amal油田，早期一口钻入寒武系地层的井所取的岩芯表明，该层只有渗透性裂缝，而基质对于储集层内流体的流动和储存没有重要贡献（第一类裂缝性储集层，见第三章）。因为人们对这类裂缝性储集层经常持怀疑态度，所以钻探时就会特别谨慎，其中也包括放弃钻探的可能性。但这里的裂缝系统是褶皱有关的（构造成因），因而应该在100 000英亩的构造闭合范围内广泛发育，并且整个800英尺厚的石英岩应作为一个整体发生破裂。如果了解这些，就可以预测出这一发现的巨大潜力（1044百万桶油）。

早期勘探评价最常用的资料有：

1. 有关构造形态的一般地质和地球物理资料。
2. 地层剖面高质量的岩性描述。
3. 有关岩石或相似岩性的力学资料。
4. 根据邻区资料或测井资料解释出的基质特征。
5. 钻杆试井（DST）和原始潜在（IP）流速。
6. 岩芯分析（标准的或全岩芯的）。
7. 井下声波电视（BHTV）或其它裂缝探测测井。

2.2 经济潜力评价

当证明了裂缝是构成储集层总体性质的必要部分并具备了更多的定量资料之后则应进行经济潜力评价。这一评价的目的是估计储量和流速以便更精确地确定储集层的潜在价值。

这时，裂缝间距和宽度的估计变得更加重要，同时要了解裂缝孔隙度与基质孔隙度的相互影响。在被模拟的深度上，裂缝和基质内相对流动的实验室估计也是重要的。

除早期勘探阶段的资料外，其它信息应包括：

(1) 压力测试延伸的时间。

(2) 三维全岩芯渗透率分析（尽可能定向）、井下声波电视或各种裂缝探测测井。

(3) 在模拟深度和衰竭开采条件下基质和裂缝性质的实验数据。

(4) 裂缝与基质相互影响的估计。

2.3 为开发设计和模拟而进行的评价

在一个大油田的全面开发过程中，为了达到最佳的采收率或经济效果，必须评价几种开发方案。油藏模拟是一个重要的手段：利用计算机辅助数学模型研究不同油层压力条件下的组成动态和流速。为裂缝性油藏建立这种模型，需要最详细的裂缝定量分析。这不仅包括裂缝性质和型式的统计分析，而且包括对裂缝在储集层内三维分布的详细了解。这就需要对大量岩芯进行详细的描述和记录。这种以详细的油藏模拟为目的的深入分析只是近期才在大公司内进行，并且由于它所需要的费用高、时间长，这种分析只适用于最大的和最复杂的储集层。

开发设计评价中最常用的资料有：

(1) 生产层上下几个层位的详细构造图。

(2) 详细的岩芯描述，包括岩性、矿物成分、结构以及裂缝的分布、方位和形态的详细记录。

(3) 三维全岩芯分析，油田上至少有一口定向取芯井。

(4) 有关岩芯样品的力学数据。

(5) 长期的流动试井和多井试井。

(6) 所有井的井下声波电视资料，特别是未取芯井。

(7) 储集层原始地层应力状态的估计。

(8) 在模拟深度和衰竭条件下，基质和裂缝性质的实验室资料。

(9) 裂缝和基质相互影响的实验室资料。

§ 3 研究的一般程序

一般地，裂缝性储集层比常规储集层更难评价。业已证明，形成一种专门的研究程序是有用的。这一程序首先包括对裂缝系统成因的解释。由此可对裂缝几何形态和分布的可预测性有所了解。研究的第二个阶段包括分别确定基质流动系统和裂缝流动系统的岩石物性参数，这将为预测因基质和裂缝系统特征的横向变化或因环境条件（深度、孔隙压力的衰减、流动方向等）的改变而引起的不同深度、不同构造位置上储集层响应的变化提供依据。第三是评价基质和裂缝孔隙度系统的相互影响（串流）以估计油藏的总可采储量。研究的最后一个阶段是在裂缝系统所提供的储集层特征的基础上对储集层进行分类。在分类中应突出关系最密切的裂缝系统特征并考虑潜在产能问题。

研究的顺序是重要的，若储集层质量差，研究工作在任何时候都可中止。例如，从成因上解释，认为起初发现的裂缝系统的分布区域有限，则可以认为进一步的评价和资料收集是不必要的。以后三节将讨论这一评价程序的前三个阶段。第四个阶段（储集层分类）将在第三章（油气藏管理）中讨论。

§ 4 裂缝系统的成因

研究裂缝系统的成因必须首先了解裂缝的倾角、形态、走向（如果存在的话）、相对丰度及裂缝组系之间的角度关系等资料。这些资料可以通过全直径岩芯（定向的或常规的）、井下声波电视或其它定向较差的测井方法获得，然后将它们应用于裂缝成因的经验模式中。现有的裂缝成因模式包括构造的和以成岩作用为主的（Stearns和Friedman, 1972; Nelson, 1979）。只有当裂缝资料能很好地与某一种成因模式吻合时，才能对裂缝的分布做出有效的推断和解释。

裂缝系统成因的解释涉及一种专门的综合地质和岩石力学方法。一般假定，天然裂缝的型式反映发生破裂时的局部应力状

态，并且地下岩石的破裂方式在性质上与实验室在模拟环境条件下对相当岩石的试验类似。以实验室得到的裂缝型式为依据（Handin和Hager, 1975），根据推断的发生破裂时的古应力场和应变分布可以对天然裂缝型式做出解释。一般地，任何能反映应力和应变场的有关变形的物理模型和数学模型，经不同程度的外推，都可以作为裂缝分布模型（Hafner, 1951；Odé, 1957）。

作为对Stearns和Friedman（1972）提出的分类的发展，利用天然裂缝系统的成因分类可以将复杂的天然裂缝系统分解成几种不同成因的成分的叠合。这种分解可以使构造的描述（Friedman, 1969；Friedman和Stearns, 1971）以及利用裂缝资料对与裂缝有关的储集性的预测（McCaleb和Willingham, 1967；Stearns和Friedman, 1972）变得更易于处理。

Stearns和Friedman（1972）将裂缝分成实验室实验中观察到的裂缝和在露头 and 地下环境中观察到的裂缝两大类。他们的分类，加上本书的修正，构成了裂缝模式的一个有用的基础（表1-1）。对Stearns和Friedman分类的主要修正是增加了两类天然裂缝：收缩裂缝和与表面有关的裂缝。对实验裂缝分类的一个小的修正是增加了一类在形态和方位上与扩张裂缝（extension fracture）相似但形成时具有不同的应力状态和岩石强度的裂缝：拉张裂缝（tension fracture）。

表1-1 实验裂缝和天然裂缝的分类

实验裂缝的分类	
1.	剪裂缝
2.	扩张裂缝
3.	拉张裂缝
天然裂缝的分类	
1.	构造裂缝（由表面力形成）
2.	区域裂缝（由表面力形成）
3.	收缩裂缝（由体积力形成）
4.	与表面有关的裂缝（由体积力形成）