

裂缝性油气储集层勘探的 基本理论与方法

〔苏〕E.M.斯麦霍夫著

石油工业出版社

裂缝性油气储集层勘探的基本理论与方法

石油工业出版社

裂缝性油气储集层勘探的 基本理论与方法

〔苏〕 E.M. 斯麦霍夫 著

陈定宝 曾志琼 吴丽芸 译

石油工业出版社

Е.М.СМЕХОВ
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПОИСКОВ ТРЕЩИННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ
И ГАЗА
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
ЛЕНИНГРАД. 1974

•
裂缝性油气储集层勘探的基本理论与方法

〔苏〕Е.М.斯麦霍夫著
陈定宝 曾志琼 吴丽芸 译

*
石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
妙峰山印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*
787×1092毫米 32开本 7¹/₂印张 164千字 印1—2,520
1985年4月北京第1版 1985年4月北京第1次印刷
书号: 15037·2551 定价: 1.60元

序 言

裂缝性油气储集层问题在现代具有很大的科学及实际意义。这个问题之所以重要是因为裂缝性储集层油气田在苏联及其国外比重逐日增长。这种油田的数量还将一如既往地继续增长，因为有愈来愈多的碳酸盐岩油气藏投入勘探与开发，而碳酸盐岩固有的特点就是其油气藏常由这种或那种类型的裂缝性储集层组成。

在所研究的问题中，重要问题之一是对划分及预测裂缝性储集层的方法进行研究。它是一个实际意义很大的问题。这方面的研究表明：只有在知道了岩石构造裂缝的发育规律后才有可能制定出裂缝性储集层油气藏普查与勘探的准则。

对岩石裂缝分布及其在岩石储集性质方面产生的影响进行了研究，通过某些肉眼观察的地质研究成果，目前对这种明题已找到了确切的答案。这些工作实际上已超出了“纯”地质研究工作领域以外。由于广泛地、综合地利用了地下水动力及矿场地球物理资料，同时还应用了数理统计法中各项原则，通过地质研究，一系列紧密结合实际的问题已接近于解决。

例如，根据对非均质裂缝性储集层渗流问题的研究成果已经查明：包含各组分（即由直接地质观察成果确定的各裂间参数）的张量完成了达西公式中渗透率的作用。

研究储集层毛细管通道及微毛细管孔隙之间的关系表缝：“束缚”水在储集层中的存在不是分子引力的结果，而是

毛细管力及“尽头”孔隙(“ТУПИКОВЫЕ” ПОРЫ。取得了这些资料,当然,就可以使我们对储集层的含油饱和度及采收率作出更客观的评价。

在本著作中还进行了一些对比工作,它们是薄片法的理论基础。根据对比成果采用相应公式对不同几何形态的裂缝组系以及无规律裂缝可以确定出它们的裂缝体积密度,裂隙率及裂缝渗透率。

书中还介绍了裂缝性油气储集层学说的基本理论以及确定这种储集层储油物性的方法。专用一章讨论了裂缝性储集层中油气可采储量计算方法的特点,并阐明了计算时采用的参数的依据。与此同时还以苏联不同油气田为例,介绍了采用上述方法计算储量的实例。

作者在本书中力图能够总结出他所知的一切有关裂缝性储集层问题的资料。书中介绍了近几年来作者领导下的研究人员(全苏石油地质勘探研究所)对裂缝性储集层进行研究的结果。

在讨论裂缝性储集层的某些问题时,作者参考了以下研究人员的著作: А. Атанасов, К. Б. Аширов, А. Бан, Г. И. Баренблатт, В. М. Бортницкая, А. Д. Везирвая, Б. Ю. Вендельштейн, Р. Вeneвая, В. Вычев, М. В. Гзовский, Щ. К. Гиматулинов, В. Н. Дахнов, В. М. Добрынин, М. А. Жданов, Ю. П. Желтов, И. Зелинский, З. С. Ибрагимов, М. К. Калинин, И. А. Конюхов, Р. С. Колыстыянский, Ф. И. Котяхов, А. И. Кринари, Д. Н. Кузьмичев, В. Н. Майдебор, Г. А. Максимович, Л. Г. Наказкая, А. М. Нечай, Е. Падушинский, Е. Н. Пермяков, М. В. Раи, В. Д. Скарятин, Д. С. Соколов, Г. И. Теодорович, В. И

Троепольский, Б.А.Тхостов, А.А.Ханин, Г.В.Чарушин, В.Н.Щелкачев等。从以上研究人员著作中引用的资料大大地充实了裂缝储集层问题研究现状的认识。

本书原稿经过地质-矿物科学博士И.С.Грамберг审阅, 他提出了许多改进本书的宝贵意见, 深表感谢!

目 录

序 言

第一章 岩石裂缝	1
一、当前对裂缝产生与形成机理的认识	1
二、裂缝分类及其在岩石中的分布特点	6
三、论岩石裂缝参数	10
第二章 岩石裂缝发育的规律	26
一、岩石裂缝在局部构造上的发育规律	26
二、岩性因素在岩石裂缝发育中的作用	36
三、岩石裂缝在断裂破坏带的发育规律	54
第三章 裂缝性油气储集层学说的基本原理	61
一、当前对裂缝储集层(储集层结构)最大概率模 型的认识	61
二、裂缝储集层的术语和分类	69
三、裂缝性岩石的渗流特点	85
四、沉积后产生的各种次生作用对裂缝储集层形 成的影响	103
五、岩石的孔洞和岩溶洞及其在裂缝储集层储集 空间形成中的作用	113
六、岩石的缝合线及其在裂缝储集层储集空间形 成中的作用	121
第四章 确定裂缝性岩石储集性能及物理性能 的方法	126

一、地质法及岩石学法	126
二、实验室法	141
三、地球物理法	146
四、水动力法	170
第五章 裂缝储集层油(气)可采储量计算的特点	179
一、裂缝储集层油(气)可采储量计算方法的基本 特点	179
二、计算裂缝储集层油(气)储量时各种参数的 确定及其依据	184
三、裂缝储集层石油可采储量计算的经验	203
四、裂缝储集层中石油地质储量的计算	215
结论	217
参考文献	221

第一章 岩石裂缝

一、当前对裂缝产生与形成机理的认识

当前对岩石中裂缝的产生和形成的机理，存在着各种不同而且常常是对立的认识。许多研究者早就指明，岩石裂缝与地质构造之间存在着一定的关系。已有资料证明，地表广泛发育的河谷水文网的方向与裂缝方向密切相关。观察成果表明，大规模溶岩的形成与裂缝伸延方向一致，而且经常就沿裂缝发育。

有些研究人员〔257和其他〕认为。裂缝是岩石构成的基本要素之一，它成线形，在岩石中分布普遍而广泛。这些研究者将裂缝划为二种类型：内生的（原生的，成岩的，非构造的）和外成的（次生的，构造的）。

其中第一种裂缝——内生的——分布在地台区和褶皱区，其方向垂直于层理，密度则与岩石的厚度和岩性成分有关。在这些裂缝中一般可分为北北东 10° 和西北西 280° 二组体系。这些裂缝与层理面垂直，但并不从一个层系穿到另一层系。总的说来，根据上述“内生”〔人们认为它是原生的或成岩的（非构造的）〕裂缝的特点，实际上它仍应属于构造缝的范畴，它们具有构造缝固有的一切特性，这种裂缝可能是区域性的。

此外，以后〔258〕著作又分出行星裂缝（受地球引力影响而形成的裂缝——译注），其方向与局部构造的应力无关，而与行星现象有关系。这种裂缝是垂直的，它们在几何形态

上组成了规则的岩块体系。最大的行星裂缝为深大断裂，这些断裂常常深延至地幔部分。

行星裂缝反映在地形上的方向线早期称为区域断裂线(М.Хоббс, 1911年)。以后, Р.Зондер (1938年)又将这种裂缝与局部构造有关的裂缝区别开来。根据这些意见, 这种被称为区域断裂的裂缝就应是介于深大断裂和岩石中广泛分布的一般性裂缝之间的中间型裂缝。

正如С.С.Шульц所指出的随着局部构造的形成, 早期的行星裂缝失去了其规则的几何网形态。对于这种行星裂缝网的认识, 其他研究者也有发展。例如, 根据Г.Л.Поспелов[201]的看法, 岩石裂缝可分为二种类型: 第一种裂缝, 其方向和形成的机理与褶皱的局部作用有关; 第二种裂缝则与褶皱和地层产状要素无关。

按照Г.Л.Поспелов的意见, 第二种裂缝具有全球性的特点, 这种全球性特点就是它们构成了地壳的“网格”型结构。他将这种“网格”型裂缝分为小网格裂缝(它在露头上确定)和大网格裂缝(它由延伸距离较大, 而且彼此相距较远的裂缝交错带组成)。由这种裂缝结构形成的背景, 以后在其上发育了不同规模的断裂破坏带。网格状裂缝构造贯穿了整个沉积层, 较新地层从较老地层继承了它。据此可以认为: 与断裂破坏带相比裂缝的年龄相对较老。

Д.М.Паркер[264]对美国纽约州断裂很少的古生带石灰岩和砂岩进行了系统研究, 他认为这里正断层形成的时间比裂缝晚。根据他的资料, 裂缝是“最早时期岩石断裂作用的第一批产物”。因此, 他否认裂缝是和褶皱相伴同时产生的。他认为褶皱破坏了裂缝具有的典型垂直状态。

某些研究者指出, 新生裂缝在不同成因的沉积岩发展过

程中都可出现，它们常常产生于岩石的次生变化过程中。这些次生变化和物质的溶解作用以及新生矿物的结晶作用有关。

很多研究者得出结论，古老岩石中的裂缝，不管是裂缝密度还是其空间方位，在较新的沉积中都有反映，甚至在地层不整合时也是如此。

在认识裂缝成因方面，有关新构造运动的活动，它们的继承性和现代情况等十分重要。根据区域裂缝发育资料，对此问题详细研究后就更清楚了。区域性裂缝体系不仅充满于基岩中，而且以同样的走向方位进入到覆于其上的灵生系（第三纪以后）沉积中。大家知道，在兰州就有这样的例子，那里元古代地层中的裂缝组系与覆于其上的黄土[182]中的相一致。在滨波罗的海沿岸（拉脱维亚）也有类似的资料。那里在淤积和冰碛沉积层内确定的区域性裂缝组系是从基岩中继承来的。

区域裂缝发育的显著特点就是其主要裂缝组系在方位方面具有规律性。俄罗斯地台是一个明显实例，那里在从乌拉尔山脉到波罗的广大区域里拥有二组区域裂缝组系：正交的——近于纬线和近于经线的裂缝系列；和斜交的——北-西方向和北-东方向的裂缝系列。从裂缝数量看，北-西系列占优势，其次是北-东方向。此种情况不仅俄罗斯地台有，而且在俄罗斯地台以外的地区也有。

对库尔干金属矿床的石灰岩、白云岩和页岩中的裂缝进行了研究。根据研究资料可以判断在裂缝方向和岩石层理方向之间有一种规律关系。这里已经查明[177]：裂缝产生于褶皱过程中（褶皱伴生缝）及进一步的构造断裂变形运动中。А.Х.Сикандер[216]的意见正好相反，他研究了加拿大圣劳

伦斯湾西海岸下古生代岩石的裂缝，他的结论认为：在成因上裂缝和局部褶皱的形态，以及与褶皱变形运动之间没有任何联系。根据他的假定裂缝形成的时间要晚一些。

有些研究者〔217和其他〕认为，所存在的成岩和构造两种类型裂缝随着时间的推移而融合在一起。他们推测：在没有任何构造因素的影响下，岩石中产生的次生变化也可以形成裂缝。在〔29〕著作中也有类似的看法，书中认为：在裂缝性油藏形成过程中，起主要作用的是所谓“石油扯裂”裂缝。作者推测：渗透到碳酸盐岩层中的石油积极地“扯裂”地层，因而造成了裂缝。

因此，从所引证的资料看，关于裂缝产生的假设存在有三种互不相同的意见：褶皱前产生的裂缝；与褶皱同时产生的裂缝以及在褶皱后产生的裂缝。其中与褶皱同时产生的裂缝是最普遍的假说。

鉴于需要确定在岩石储集性上究竟什么裂缝在起作用，因此确定岩石裂缝这一名词的概念是很重要的。对于这一名词地质学家们有极为不同的认识。一些人认为岩石裂缝就是地壳中所有大小不同的断裂变形，其中包括巨大的（深大断裂，逆掩断层）和小型断裂（一般正断层和逆断层），它们都伴有岩层位移。而另一些人则认为，不仅上述岩层变形形式是岩石裂缝，而且地层没有明显位移的岩石小裂缝（微裂缝）也是岩石裂缝。在地质著作中还可以遇到劈理也属于岩石裂缝的说法。

据此可以得出结论，很多研究者对“岩石裂缝”这个术语的理解都是认为：“岩石裂缝”包括了地壳中大小及成因极为不同的各种断裂变形。

研究所有各种断裂变形并不是本书的任务，我们必须指

出在油气储集层的形成方面深大断裂、逆掩断层，一般正断层和逆断层的作用是很有限的，因为这些岩石断裂形式不可能对储集层的结构产生重大影响，尤其是不可能对储集层的孔隙度和渗透率产生重大影响。

下面介绍现代关于岩石裂缝的各种看法，目的是为了确定裂缝在形成岩石储集性质方面究竟起何作用。

大家知道，裂缝广泛而普遍地发育于所有岩性不同的岩层中，其中包括变质岩和火成岩。根据裂缝的成因可将其分为构造的和非构造的二种。第一种占绝大多数，这种裂缝的构造成因可用下列两点来证明：第一点就是裂缝联结成为组系，它们在几何形态上形成了比较规则的网格形，第二点则为裂缝与构造内部产生的变形特点有密切关系，它们分为与最大张力有关的张裂缝和由最大的切向应力引起的剪切裂缝二种。显然，劈理也应认为是构造裂缝的一种，其形成条件目前还不十分清楚。

非构造（原生）裂缝的特点是：形成多边形网格，在极短距离内方向就有变化。常常尖灭，常被围岩和上覆岩石的物质所充填。它们的形成主要取决于后期的成岩作用和后成作用，在沉积物压实、失水及岩石体积缩小过程中产生。

在地面露头上，在矿井坑道里，以及在井中取出的岩心上用肉眼能够观察到的裂缝，习惯称为大裂缝。

肉眼观察结果表明，大裂缝沿着微裂缝选择性地发育，在地下深处微裂缝的张开度为一到几十微米，很少超过50微米。用显微镜观察时，微裂缝张开度的上限假定等于100微米。К.Крейчи-Граф[137]早就发现了这种裂缝在石油运移中所起的作用，他指出：“任何流体运移的通道都是小裂缝，甚至是微不足道的微裂缝，这些缝与地层位移可能并没有关

系……”。

关于裂缝张开度有下面一些看法：众所周知，地球不仅在过去的地质年代中，而且在现在都遭受着具周期性的各种构造运动。这些构造运动引起了地壳变形，而变形则促使早先形成的裂缝发生周期性的张开和闭合。人们推测，岩石中裂缝大概在任何时候都不会完全是闭合的。

Н.А.Кудрявцев[142]正确地指出：“应当认为裂缝张开只是局部现象或在某些裂缝的个别部分存在。在岩石中细小裂缝要多得多，它们勉强可以看到（如在薄片中可以观察到），但这并不妨碍石油沿其流动”。

根据构造裂缝的形态特征（长度及与层理的相互关系），把裂缝分为二级：第一级切割了岩性成分不同的地层组系，第二级通常仅限于在一个地层内或仅限于在某几个岩性成分相同的地层内存在。

在任何地质条件下（地台或褶皱）一切岩石所特有的上述裂缝类型都应称之为岩石裂缝。至于深大断裂、平移断层、正断层和逆断层，它们是不同的种类的断裂错动，对这些断裂错动保持它们原有的名称比较适当，因为这些名称和它们的内容完全相适应。

二、裂缝分类及其在岩石中的分布特点

裂缝分类可以各种各样（根据结构和成因特点等），但它们相互之间并不矛盾。它们各自用不同观点分析裂缝，并且互补不足之处。

应当提醒的是：所谓裂缝指的是岩层中的断裂（岩层完整性的破坏），这种断裂有的完全没有位移，有的位移很小。而我们所称的“岩石裂缝性”则包括了使地壳某部分遭

受破坏的所有裂缝的总和。

在地表或地表附近各种外成作用的力量促使岩石内部性质发生变化，由此形成的裂缝称为非构造（原生）裂缝。这种裂缝的产生与沉积物转变为岩石时的体积缩小有关。它常在产状水平的岩层中显露出来，而且常被以后的构造裂缝所遮蔽。在层理面上原生裂缝形成多边形网格。这种裂缝的数量随着地层变薄而增大。

最近，〔28〕著作中建议将地震缝（自然的和人工的）归于非构造缝的范畴。这些地震裂缝产生在地壳表面30~40米深处，它们是由地震弹性波振动和人工爆炸引起的。根据这种意见，地震缝和构造缝两者的关系就只是：“构造是缝形成的后果，而不是缝形成的原因”（?! —Е.Смехов）。

原生裂缝可分为成岩缝（在沉积岩中）和收缩缝（在喷发岩和侵入岩中）。

构造裂缝分为张裂缝（正应力）和剪切裂缝（切应力）。而剪切缝很可能是在劈理出现之前（或同时）产生的。

为了对比说明裂缝分类的特点，下面引用了某些研究者的裂缝分类。例如，在〔173〕著作中提议采用下列断裂分类体系：没有位移的断裂——裂缝，劈理；有位移的断裂——小型的和巨大的断裂；区域断裂——深大断裂带和错动变质带。

根据前喀尔巴阡拗陷地区地下岩心和露头上岩石裂缝的研究结果，〔126〕著作认为裂缝可分为三种基本类型：层裂缝——不超出相同岩性地层的范围；局部缝——切割了不同岩性成分的地层；和区域缝——超出了局部构造的范围。

在地表露头上常常可观察到规则的裂缝组系。有人推测，这种规则的裂缝组系在地下深处不存在。这种意见否定

了把地表裂缝资料推断用于深部岩石的可能性，所以我们认为其根据不充分。

根据达格斯坦白垩纪碳酸盐岩及其含油气远景的研究资料，在著作〔35〕中建议，可根据裂缝形成的相对时间对裂缝进行分类：成岩裂缝（褶皱前形成）；构造缝（与褶皱同时及在褶皱后形成），风化裂缝（侵蚀后形成）。这种裂缝分类符合于现代划分裂缝的观点。

有些研究者〔56〕对顿聂茨山岭北-西边缘上白垩纪沉积中的裂缝进行了分类，他们提出可根据裂缝方位相对于岩石产状要素的特征来划分裂缝。据此可分为：倾向裂缝（占绝大多数），走向裂缝和层理缝。

对发育于西-西伯利亚的低地沉积盖层中的裂缝，〔171〕著作将其分为以下几种类型：构造的，地震的，成岩的和成岩—构造的。

对伏尔加格勒区泥盆纪和石炭纪沉积中的产油层，〔146〕著作提出了下列粗略的裂缝分类：沉积作用的——水平缝、缝合线、常被泥质物质所充填；成岩作用的——各种方向的裂缝；构造作用的——垂直缝。

这里还应当提及石工们（克里米亚地区）采用的裂缝技术名称：亏损（层理缝），槽沟（垂直张开缝），暗的（肉眼不可见裂缝），斜的（斜交层理缝）。在阿登（法国）对于岩石是否容易破裂，是根据垂直页理面的面上是否存在解理来判断的，它被人们称为《郎格烈因》（俄文由英文音译而来，英文原文为Longrain，直译为“长雨”，即纵沟、纵线之意——译注）。

总的说来，必须指出的是由于裂缝分布太普遍，以致在地质制图时经常被人们忽略。在不同层次或层系交界面附近

裂缝特别多。在自然界观察到的裂缝其复杂性和不均一性常常比模拟试验时采用的理想裂缝模型要大得多。

〔150〕著作的研究者常常企图使自然界现象服从于已知的规律，企图在裂缝组系中找到而在实际上并不存在的规律。十有九次他常常不能确定出裂缝是张力产生的还是压力产生的。然而，必须指出裂缝总是伴随褶皱产生。因此根据褶皱形成的相对时间也就可以确定出某种裂缝的产生时间。

在一般情况下裂缝可以分为连续裂缝和不连续裂缝。第一种裂缝常常在剖面中切割了整套岩层。而不连续^①裂缝则到处都有。由于在岩石的非均质性和均质性之间存在着许多不同程度的过渡情况，因而常常给裂缝分类造成困难。例如，在分析某一局部构造的基本要素时（其中当然也包括对裂缝的分析）可能认为裂缝的物理性质是非均质的。但是在从区域范围内对这些资料进行统计分析时，又可能认为它并不是非均质的。

在进行裂缝分类及确定其分布特点时，一些研究者采用了均匀（不均匀）和均质（非均质）等术语，而且常常作为同义词来理解它们。其实这些术语的概念区别很大。例如，均质（非均质）说明的是岩石本身整体的性质，而均匀（不均匀）则专指组成岩石的颗粒大小及其物质成分，以及组成颗粒的物质成分之间相互的非均质性。显然，Л.Мюллер在这个问题上是正确的，他指出：在岩石形成过程中产生了原生非均质性，而后来则形成了“获得”的非均质性〔176〕。将此转用于裂缝就可以说明原生的裂缝具有原生的非均质性，而构造缝则具有“获得”的非均质性。

①原文为 Непрерывные，根据文意改为 прерывистые——译注。