

裂缝性致密油气储集层

王允诚 等 编著

地质出版社

裂缝性致密油气储集层

王允诚 等 编 著

地 质 出 版 社

(京)新登字085号

内 容 简 介

裂缝性致密油气储集层包含了致密基质和裂缝空间两个难度很大的研究课题。本书系统地介绍了裂缝性致密油气储集层的研究方法及其原理,并列举了应用实例。书中所涉及的内容包括:裂缝性岩石的物理性质、裂缝分布规律及研究方法、地球物理测井及油气井测试技术、裂缝性致密油气藏的诊断和描述、成岩作用、数理统计方法和储量计算等。本书自成一套实用的、综合的研究思路和系统,与国内外同类著作有较大的差异,更适合于我国的实际情况。本书可供从事裂缝性致密油气藏研究的地质学家和工程师参考,也可作为高等院校大学生和硕士生的参考教材。

裂缝性致密油气储集层

王允诚 等 编 著

责任编辑:韩效亭

地质出版社出版发行

(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:16.25 字数:384000
1992年7月北京第一版·1992年7月北京第一次印刷

印数:1—830册 定价:10.75元

ISBN 7-116-01009-2/P·862

前 言

裂缝性致密油气储集层是石油地质学家和油藏工程学家感兴趣的研究对象。它综合了当前在油气储集层研究课题中的两个难题——致密基质和裂缝空间。这两个题目的研究历史都还比较短，一直到70年代国外才有专著发表。到目前为止，苏联、美国、加拿大、法国等都有这方面的专著发表。

我们课题组自80年代开始系统地进行了裂缝性致密油气储集层的课题研究，主要工作的区域是四川盆地、松辽盆地（深层）以及陕甘宁、新疆、华北等地区。自1980年以来，我们课题组连续进行了“六·五”、“七·五”两轮国家项目的攻关。但也只能说在裂缝性致密油气储集层的研究方面取得了一些微小的进展。

与国外研究不同，我们课题组的指导思想是：以四性研究为主线，静态和动态相结合，地质和工程相结合，常规地质研究和计算机处理相结合，将地震、测井、地质、工程等方面的资料综合起来进行研究，把各种有关裂缝性致密油气储集层的信息综合起来寻找其规律性。这本书的编写思想就是建立在这样一个基础上的。

全书共分九章。前五章是裂缝性致密油气储集层的岩性、物性、电性、测试的四性研究；第六、七、八章是用数学方法和应用计算机对裂缝性致密油气储集层进行诊断和描述，这些方法是我们课题组成员根据我国的裂缝性致密油气储集层的特点自己搞的一些软件和系统，大都已进行过现场实践，并证明这些软件和系统的效果是比较好的；最后一章是储量计算方法的介绍。

经过多年来的实践，我们建立了一套有关裂缝性致密油气储集层研究和评价的方法和系统。虽然这样做涉及的学科面很广，从而必须要有一个各方面专家组成的小组才能开展工作，但我们现在尽可能地向定量化方向发展，使各项研究的结果都尽可能通过计算机运算反映出来，以提供勘探和开发方面的决策。此外，对于裂缝性致密砂岩储集层的研究来说相对成熟一些，因此本书中许多资料是反映这方面内容的，而裂缝性致密碳酸盐岩储集层的研究方法，也基本上有相同的模式。

这本书是由我所领导的油气储集层研究课题组的成员共同完成的。为了使真正在这方面有工作经验、且从事较长时间研究工作的同志，有机会将其认识和体会表达出来，我们采取了根据各人专长分章编写的原则。其中周文同志编写第二章，朱永铭同志编写第三章，童孝华同志编写第四章，陆正元同志编写第五章，董伟、何鹏两同志合编第六章，蒋建平同志编写第七章，罗雨田同志编写第八章。其它各部分和全书最终的审改和统稿由我担任。由于其中许多同志是第一次编写书稿，因此，在整个编写过程中，难免有这样或那样的缺点和错误，我想可以将这本书抛出来引起众多专家的讨论，使得有更多更好的著作相继发表，为推动我国的重要油气资源之一——裂缝性致密油气储集层的研究和发展作出应有的贡献。

成都地质学院
油气储集层研究课题组

王允诚

1990年12月8日

目 录

第一章 裂缝性致密油气储集层的岩石物理性质	王允诚 (1)
一、利用岩石薄片鉴定裂缝参数	(1)
二、实验室岩心测试方法	(2)
(一) 流体饱和法和压汞法	(3)
(二) 流体饱和法及铸体薄片法	(3)
(三) 有裂缝样品和无裂缝样品对比	(4)
三、储集层的裂缝孔隙度和渗透率	(4)
(一) Murray 的方法(1968)	(4)
(二) 徐中英的方法(1981)	(5)
四、裂缝性储集层岩石的压缩系数	(6)
五、裂缝性储集层的相对渗透率	(8)
(一) 求取裂缝-基质系统相对渗透率的理论方法	(8)
(二) 实验室测定的相对渗透率	(11)
(三) 裂缝型储集层的相对渗透率	(12)
(四) 裂缝-溶洞介质的相对渗透率	(13)
六、裂缝性储集层的渗吸作用	(14)
七、裂缝性油气藏的流体饱和度	(17)
(一) 自生自储型的情况	(18)
(二) 先形成裂缝系统后形成油气藏的情况	(18)
(三) 先形成油气藏后形成裂缝系统的情况	(19)
八、基质的特殊分析技术	(19)
(一) 渗吸法	(19)
(二) 半渗透隔板法	(20)
(三) 地层条件下的孔隙度和渗透率测定	(21)
(四) 地层条件下的孔分布测定	(23)
第二章 裂缝的分布规律及研究方法	周 文 (26)
一、实验室研究地下裂缝	(26)
(一) 镜下观察	(26)
(二) 岩石破裂的有关实验	(26)
(三) 裂缝充填物的稳定同位素及包裹体研究	(29)
二、岩心裂缝调查	(34)
(一) 裂缝宽度	(34)
(二) 裂缝的间距	(35)
(三) 裂缝密度	(35)
(四) 裂缝的产状	(36)
(五) 裂缝的充填情况	(36)

(六) 裂缝的溶蚀改造情况	(36)
(七) 观察结果的解释	(36)
(八) 岩心裂缝调查法的规模相关性讨论	(38)
(九) 利用岩心裂缝资料预测地下裂缝密度	(38)
三、地面裂缝调查法	(40)
(一) 地面裂缝的各种参数	(40)
(二) 裂缝的成因及其形成的地质条件	(40)
(三) 裂缝的有效性	(40)
(四) 应力场的恢复	(40)
(五) 实例分析	(40)
四、利用曲率评价构造裂缝	(43)
(一) 曲率法的基本理论	(43)
(二) 曲率值的确定方法	(44)
五、利用地应力资料评价地下裂缝	(51)
(一) 基本应力状态	(51)
(二) 地应力的估算方法	(52)
六、断裂作用研究	(56)
(一) 拉张盆地正断层与断裂裂缝带的关系	(56)
(二) 正断层伴生的裂缝带宽度	(59)
(三) 挤压盆地发育的逆断层与断裂裂缝带的关系	(60)
(四) 断层作用带评价	(61)
第三章 致密砂岩储集层的成岩作用	朱永铭 (66)
一、导致碎屑岩致密储集层形成的成岩作用	(66)
(一) 压实作用	(66)
(二) 压溶作用	(67)
(三) 自生粘土的形成和粘土杂基的充填	(67)
(四) 胶结作用	(69)
二、致密砂岩的孔隙类型	(74)
(一) 孔隙	(74)
(二) 微孔隙	(75)
(三) 裂隙和裂缝	(75)
(四) 裂缝和次生孔隙的形成机制	(76)
三、控制砂岩成岩作用的方向和速率的因素	(78)
(一) 砂岩的原始成分和结构	(78)
(二) 孔隙水的化学成分和地球化学演化	(79)
(三) 孔隙度和渗透率	(79)
(四) 有机组分的化学性质及其演化	(80)
(五) 温度和地温梯度	(80)
(六) 埋藏速度及过程	(80)
(七) 区域性构造运动	(81)
四、砂岩成岩作用演化阶段的划分	(81)
(一) 利用岩石学资料确定砂岩共生序列	(81)

(二) 利用矿物稳定同位素资料	(84)
(三) 利用自生矿物气液包裹体的温度测定	(84)
(四) 利用有机地球化学分析指标	(85)
五、实例——川西北地区上三叠统须家河组致密砂岩的成岩阶段划分	(85)
(一) 浅埋藏成岩作用阶段	(86)
(二) 中埋藏成岩作用阶段	(88)
(三) 深埋藏-较深埋藏成岩作用阶段	(88)
(四) 印支期表生成岩作用阶段	(88)
(五) 印支期后埋藏成岩作用阶段	(88)
第四章 现代试井方法在裂缝性储集层评价中的应用.....童孝华	(90)
一、现代试井解释的基本原理及方法	(90)
(一) 试井曲线流动阶段的划分	(90)
(二) 早期流动阶段	(91)
(三) 中期流动阶段	(94)
(四) 晚期流动阶段	(97)
(五) 现代试井分析的一般步骤	(99)
(六) 利用现代试井解释识别裂缝性油藏的方法	(99)
二、裂缝性储集层的地质模型及试井简化解释模型	(102)
(一) 致密砂岩油藏裂缝性储集层的地质模型	(102)
(二) 碳酸盐岩裂缝性储集层的地质模型	(104)
(三) 裂缝性储集层的简化解释模型	(105)
三、裂缝性储集层评价中现代试井分析方法的解释应用	(107)
(一) 裂缝性储集层试井曲线的解释	(108)
(二) 实例分析	(110)
第五章 测井资料在裂缝性储集层研究中的应用.....陆正元	(117)
一、裂缝性储集层的测井响应特征	(117)
(一) 电阻率测井响应	(117)
(二) 声波测井响应	(117)
(三) 中子测井响应	(119)
(四) 密度测井响应	(119)
(五) 岩性测井响应	(119)
(六) 电磁波测井响应	(120)
(七) 裂缝识别测井响应	(120)
二、利用测井资料研究裂缝产状	(121)
(一) 水平缝(低角度缝)的测井特征	(121)
(二) 垂直缝(高角度缝)的测井特征	(121)
(三) 斜交缝和网状缝的测井特征	(121)
三、裂缝性储集层的综合识别	(123)
(一) 排除不均一灰岩层干扰	(125)
(二) 裂缝性储集层的识别标志	(128)
(三) 缝洞储集层识别的定量研究	(134)
四、显示高自然伽玛的裂缝性储集层	(134)

(一) 原生吸附型	(134)
(二) 后生沉淀型	(135)
第六章 裂缝性致密砂岩储集层描述	董 伟、何 鹏 (137)
一、研究现状与方向	(137)
二、储集层描述方法介绍	(138)
(一) 地震储集层描述	(138)
(二) 钻井、测井储集层描述	(141)
(三) 储集层的沉积相描述	(146)
(四) 综合储集层描述	(148)
三、参数选择和分类评价标准	(148)
四、油藏描述的计算机技术	(149)
(一) 数据管理	(150)
(二) 克里金技术	(150)
(三) 不连续地质面的等值线画法	(154)
(四) 计算机绘图	(156)
五、裂缝系统的定量描述	(158)
(一) 构造曲率的计算机算法	(158)
(二) 构造裂缝的应力法分析	(163)
六、实例	(167)
第七章 数理统计方法在裂缝性储集层中的应用	蒋建平 (175)
一、Monte Carlo 法及其应用	(175)
(一) 构造随机变量的分布函数	(176)
(二) 随机数的产生	(177)
(三) 抽样模拟计算	(177)
(四) Monte Carlo 法在储集层研究中的应用	(178)
二、趋势面分析	(180)
(一) 趋势面分析的数学模型和基本步骤	(181)
(二) 趋势面的拟合程度	(182)
(三) 利用趋势面分析研究区域性裂缝分布	(182)
三、聚类分析	(183)
(一) 相似性度量	(183)
(二) 聚类方法和步骤	(184)
(三) 利用聚类分析对低渗透储集层分类	(186)
四、判别分析	(187)
(一) 线性判别函数的建立	(187)
(二) 判据确定和样品归类	(189)
(三) 判别函数的显著性检验	(189)
(四) 判别分析在缝洞储集层识别中的应用	(191)
五、回归分析	(192)
(一) 多元线性回归分析的数学模型	(192)
(二) 多元回归方程的检验	(193)
(三) 逐步回归分析	(194)

(四) 储油物性参数的回归分析	(196)
第八章 裂缝性致密油气储集层的诊断系统	罗雨田 (199)
一、区域裂缝性致密油气储集层的诊断	(199)
(一) 问题的提出	(199)
(二) 3-D 真深度构造形迹场	(199)
(三) 储集层评价参数的提取	(203)
(四) 实例分析	(208)
二、致密气藏的诊断系统	(209)
(一) 致密气藏的综合诊断流程	(209)
(二) 孔隙演化控制因素的提取	(211)
(三) 地球物理储集层模型	(215)
(四) 地球物理气藏检测模型	(221)
(五) 地质统计模型	(222)
第九章 裂缝性油气藏的储量计算	王允诚 (225)
一、裂缝性油藏的产油机制	(225)
二、裂缝性储集层的储集类型	(226)
三、裂缝性油气藏容积法储量计算	(228)
四、物质平衡法	(231)
(一) 溶解气驱油藏	(231)
(二) 气顶驱动油藏	(232)
(三) 弹性驱动油藏	(233)
(四) 水驱油藏	(233)
(五) 综合驱动油藏	(241)
(六) 封闭型气驱气藏	(241)
(七) 水驱气藏	(243)
(八) 凝析气藏	(243)
(九) 考虑容积变化的气藏储量计算	(246)
五、用压力平衡原理计算天然气储量	(246)
参考文献	(249)

第一章 裂缝性致密油气储集层的岩石物理性质

在实际工作中,取心所得到的常常是储集层的致密基质,它只有很低的孔隙度和渗透率。而在裂缝性致密油气储集层中往往可获得高产油气流,这是因为裂缝起着主控因素所致。用动态资料求得的地层平均参数要比岩心实测数据大几个数量级。因此,对于本书所讨论的储集层类型,在研究其岩石物理性质时,要分别注意裂缝和基质两个特点。必须强调的是,小岩样(甚至包括全直径样品)不能完全代表整个储集层的孔隙空间特征,正确的研究方法是既研究整个储集层的裂缝参数的分布,又对基质物性进行研究,两者叠加起来,便可清晰地掌握整个储集层的孔隙空间分布。

一、利用岩石薄片鉴定裂缝参数

这是由全苏地质勘探科学研究所提出的方法,简称薄片法。它是在显微镜下直接测定裂缝张开度、薄片面上裂缝的长度以及裂缝的面积。根据 E.M.Cmexoba 等(1962)提出的公式来计算裂缝参数,包括:

$$\text{裂缝率 } \Phi_f = \frac{b_m l}{S}$$

$$\text{裂缝体积密度 } V_{fd} = 1.57 \frac{l}{S}$$

$$\text{裂缝面积密度 } A_{fd} = \frac{l}{S}$$

$$\text{裂缝渗透率 } K_f = \frac{A b_m^3 l}{S}$$

式中 A ——系数,它的数值大小取决于岩石中裂缝组系的几何形状,取值见表1-1;
 b_m ——薄片上实测的裂缝宽度,mm; l ——薄片中的裂缝长度,mm; S ——薄片面积,mm²。

法国学者T.D.Van Golf-Racht所著的裂缝油藏工程基础一书(1982)中,认为具有足够数量的薄片时,这种方法有足够的精度。他认为裂缝孔隙度的估算可表达为

$$\Phi_f = \frac{\text{裂缝体积}}{\text{总体积}} = \frac{\text{裂缝面积} \times \text{宽度}}{\text{总体积}}$$

在图 1-1 简化的情况下,有

$$\Phi_f = \frac{b_m \times \cos \alpha \times a \times h / \cos \alpha}{L \times a \times h} = \frac{b_m}{L} = \frac{b_m \times a}{S}$$

对于 n 根互相平行的裂缝(属于一个裂缝系统)

表 1-1 常见裂缝组系的 A 系数值(据 Cmexoba, 1969)

裂 缝 组 系 的 几 何 形 态	$A \times 10^6$
只有一组平行(对层面而言)的裂缝组系	3.42
两组相互垂直正交的裂缝组系	1.71
三组相互垂直的裂缝组系	2.28
紊乱分布的裂缝	1.71
薄片面与岩石中发育的裂缝垂直正交	8.45

$$\Phi_f = \frac{n \times b_m \times a}{S} = b_m \times A_{fD} = b_m \frac{l}{S}$$

式中 L —— 岩块长度, mm; a —— 岩块宽度, mm; h —— 岩块高度, mm; b_m —— 薄片上测定的裂缝张开度, mm; A_{fD} —— 裂缝面积密度, $1/\text{mm}$ 。

应用薄片裂缝统计也可以估算出裂缝渗透率, 对于具有同一方向的单组裂缝, 有

$$K_f = \frac{b^3}{12} A_{fD} = \frac{b^2}{12} \Phi_f$$

当裂缝在薄片上的方向是随机分布时, 有

$$K_f = A \frac{b_m^3 l}{S}$$

这与 Cmexoba 所提出的公式是完全一样的。

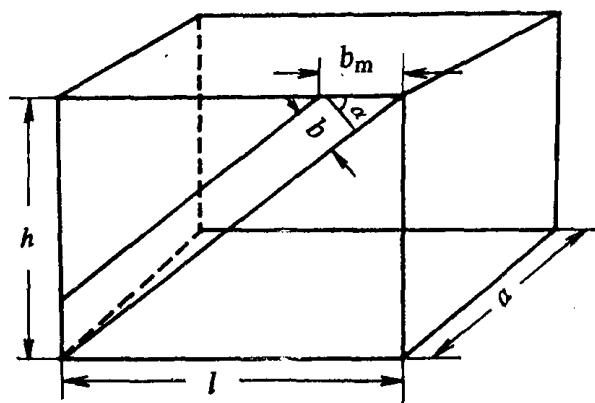


图 1-1 岩块中裂缝的简单示意图

二、实验室岩心测试方法

用岩心测试方法求得的是裂缝和基质孔隙度或渗透率的总和。通常需要用两种方法进行对比后, 才能粗略地区分出两者的数值。

(一) 流体饱和法和压汞法

用流体饱和法（煤油法或氢气法）测定样品的孔隙度后，同一样品洗净烘干后再做压汞试验。由于裂缝的张开度一般都大于致密基质的最大连通孔喉半径，因此，压汞曲线的初始值即为相应的裂缝体积（图 1-2）。此时有

$$\Phi_f = S_{Hg0} \times \Phi_t / 100$$

在压汞曲线的纵坐标上可查出注入压力 P_{Hg0} ，则有

$$b = \frac{7.5}{P_{Hg0}}$$

于是

$$K_f = \frac{b^2}{12} \Phi_t$$

式中 S_{Hg0} ——在压汞曲线初始段处于与横坐标重叠部分的注入汞饱和度，%；
 P_{Hg0} ——压汞时的初始注入压力，Pa； Φ_t ——流体饱和法测定的孔隙度，%； S_t ——以流体饱和法测定的孔隙度作为总孔隙度，100%。

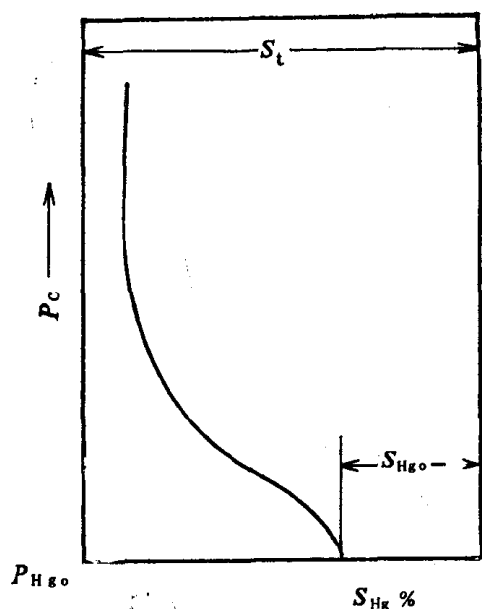


图 1-2 流体饱和法和压汞法求裂缝孔隙度

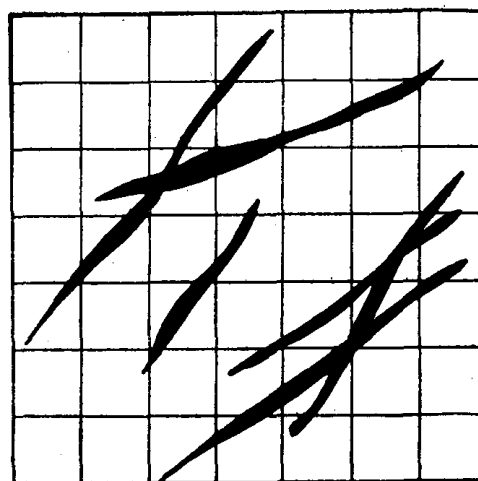


图 1-3 用网格法确定裂缝的面孔率

(二) 流体饱和法及铸体薄片法

此法是先用流体饱和法求取样品的总孔隙度，再将样品洗净烘干后注入染色环氧树脂或有机玻璃，然后在小柱塞样品上平行切取 3—5 块铸体薄片进行观察，用 Perez-Rosales (1967, 1969) 所介绍的网格法测定其裂缝面孔率（图 1-3），然后可计算出裂缝孔隙度。即

$$\Phi_f = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_{fi} \times h_i \times S}{hS}$$

式中 n ——铸体薄片数； Φ_{fi} ——每个铸体薄片的面孔率，%； h_i ——每个铸体薄片代表的岩样长度，cm； h ——样品总长度，cm； S ——样品截面积，cm²。

其中

$$\phi_{ii} = \left(\frac{L_p}{L_t} \right)_i$$

式中 L_p ——在裂缝孔隙区内的网格线长度； L_t ——网格线的总长度。

在测量出平均裂缝宽度后，可算出裂缝渗透率。

(三) 有裂缝样品和无裂缝样品对比

用同一深度的两块样品进行对比，其中一块样品含有裂缝，另一块样品无裂缝，此时有

$$\Phi_i = \Phi_i - \Phi_m$$

式中 Φ_i ——有裂缝样品的孔隙度，%； Φ_m ——无裂缝样品的孔隙度，%。同时据 Parsons 公式，有

$$K_i = K_m + K_f = K_m + \frac{b_a^3 \cos^2 \alpha}{12A} + \frac{b_b^3 \cos^2 \beta}{12B}$$

式中 K_i ——有裂缝样品的总渗透率； K_m ——无裂缝样品的渗透率； b_a 、 b_b ——a、b 两组裂缝的宽度； α 、 β ——分别为 a、b 两组裂缝之间的宽度； A 、 B ——裂缝间距（裂缝在 a、b 两组裂缝之间的垂直距离）。

除上述方法外，地质矿产部无锡中心实验室曾使用含裂缝岩块吸入有色染料流体，然后用全息摄影方法来求裂缝孔隙度。此外，近期 C-T 扫描的应用，使得求取岩块的裂缝孔隙度增加了更精确、更有效的手段。

三、储集层的裂缝孔隙度和渗透率

这是使用构造地质资料测算整个储集层在弯曲后形成张裂缝而所得到的裂缝孔隙度和渗透率。一般来说，这种方法适用于由于挤压而形成的构造。现在常用的有两种方法。

(一) Murray 的方法 (1968)

这是 Murray (1968) 对 Williston 盆地泥盆系的 Sanish 油田所采用的方法。该油田的含油剖面是由上部页岩、白云质泥岩，下部页岩和白云质砂岩所组成。平均孔隙度为 5—6%，平均渗透率小于 0.1mD。油井生产的种种迹象表明产能是受裂缝控制的。

Murray 的方法：取岩层受拉张力产生弯曲裂开后的一个单元（图1-4），此时该单元的裂缝孔隙度可据图上的几何形态计算出来（Y轴垂直于X-Z平面），即

$$\Phi_i = \frac{\frac{1}{2}(2RT + T^2)\Delta\theta - T\Delta S}{\frac{1}{2}(2RT + T^2)\Delta\theta}$$

式中 T ——中性面以上岩层的厚度，m； R ——曲率半径，m； $\Delta\theta$ ——岩层弯曲后所形成裂缝间隔之间的夹角，(°)； ΔS ——半径为 R 、夹角为 $\Delta\theta$ 时的弧长，m。

因为 $\Delta S = R\Delta\theta$ ，所以上式可简化为

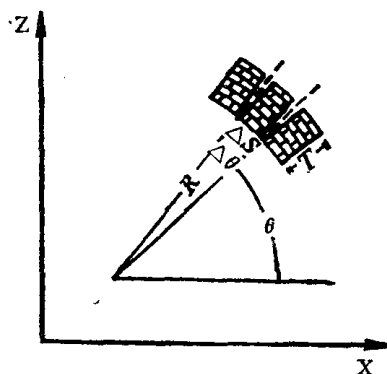


图 1-4 岩层弯曲后断裂的单元

$$\Phi_t = \frac{T}{2R + T}$$

在 X-Z 坐标系中, 岩层倾角还可以用 dZ/dX 来表示。当岩层倾角较小, T 相对于 R 很小时, 二阶导数 d^2Z/dX^2 代表了该岩层 (X, Z) 点的曲率。于是有

$$R = \frac{1}{\frac{d^2Z}{dX^2}}$$

所以最后得

$$\Phi_t = \frac{T \cdot \frac{d^2Z}{dX^2}}{2 + T \cdot \frac{d^2Z}{dX^2}}$$

这样, 裂缝孔隙度就成为岩层厚度和曲率的函数了。同样道理, 裂缝渗透率为

$$K_t = 4.9 \times 10^{11} \left(T \frac{d^2Z}{dX^2} \right)^3$$

上述渗透率公式假设裂缝间隔为 0.1524m。如果与实际不符时, 公式需要作相应的调整。

(二) 徐中英的方法 (1981)

徐中英 (四川石油管理局石油勘探开发研究院) 于 1981 年提出了拱曲体的理论, 并可由此求出岩层的裂缝孔隙度。

设有一岩块长为 a 、宽为 b , 高或厚为 $2d$, 其体积 $V = 2abd$ (图 1-5)。

当这一岩块向上拱曲时, 中性面以上受拉张力, 中性面以下受挤压力, 只有中性面上不受力而保持原长度 a 。设岩块拱曲后顶圆柱面的曲率半径为 R , 则中性面以上岩块的体积变为

$$V_c = \frac{abd(2R-d)}{2(R-d)}$$

由于裂缝的形成, 使体积增大, 其增量为

$$\begin{aligned} \Delta V_c &= V_c - \frac{1}{2}V \\ &= \frac{abd(2R-d)}{2(R-d)} - abd \\ &= \frac{ab\dot{a}^2}{2(R-d)} \end{aligned}$$

于是, 裂缝孔隙度为

$$\begin{aligned} \Phi_t &= \frac{\Delta V_c}{V_c} \times 100\% \\ &= \frac{d}{2R-d} \times 100\% \end{aligned}$$

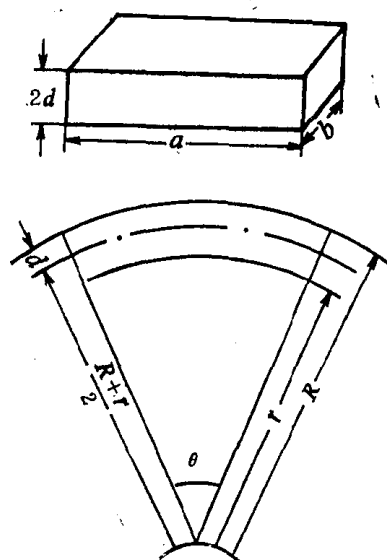


图 1-5 岩石拱曲及曲率

曲率半径 R 的求法有多种。在本书第二章将作进一步论述。

四、裂缝性储集层岩石的压缩系数

这方面的资料很少，1964 年苏联学者 Горьунов, А.Т. 等曾对裂缝性砂岩和石灰岩样品进行过实验研究（图 1-6 和 图 1-7）。共做了 10 块样品，其中 5 块样品是人工裂缝（1-5 号），另 5 块样品有天然裂缝（6—10 号）。基质的渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

当实验中所采用的围限压力由 3 MPa 增加到 30 MPa 时，无论是在有人工裂缝的岩石中，还是在有天然裂缝的岩石中，其渗透率的降低十分明显。其中 2 号、5 号、6 号 3 个样品，围限压力在升高后又下降，由于裂缝在受压力后不再恢复，其渗透率也不能恢复。

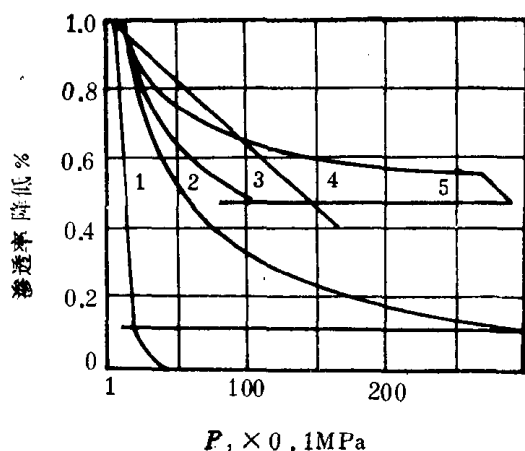


图 1-6 裂缝砂岩的渗透率和围限压力的关系
(据 A. Т. Горьунов)

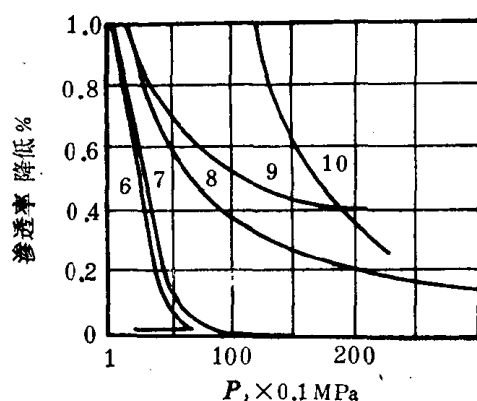


图 1-7 裂缝石灰岩的渗透率和围限压力的关系
(据 A. Т. Горьунов)

其中 1 号样品，裂缝宽度由 $33 \mu\text{m}$ 减小到 $7 \mu\text{m}$ ，裂缝渗透率由 $49 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降低到 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ （图 1-8），2 号样品的裂缝宽度由 $30 \mu\text{m}$ 减小到 $5 \mu\text{m}$ ，裂缝渗透率由 $12 \times$

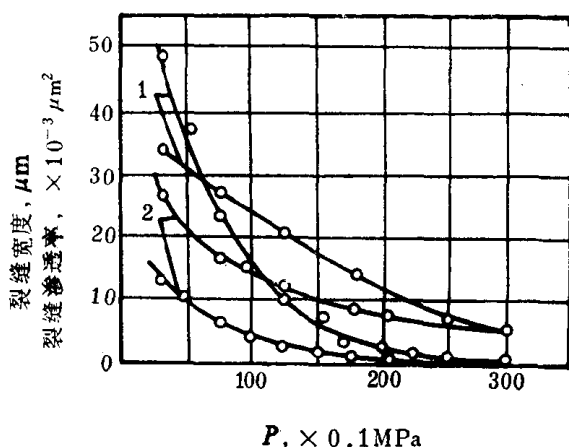


图 1-8 当 P_0 和 ΔP 等于常数时裂缝渗透率与裂缝宽度同岩层压力的关系
1-2 样品号；细线表示裂缝宽度，粗线表示裂缝渗透率

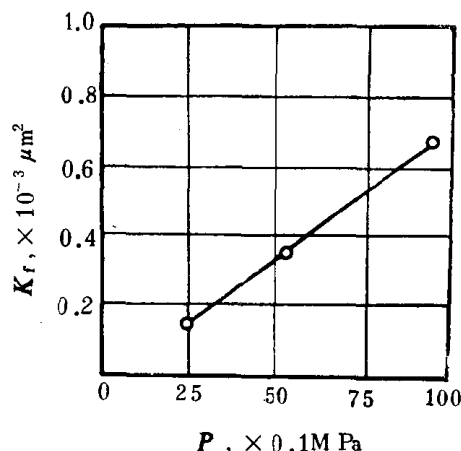


图 1-9 $P = \text{常数}$ (10.5 MPa) 时，裂缝渗透率 K_r 与孔隙压力的关系

$10^{-3}\mu\text{m}^2$ 降低到 $0.2 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

当在裂缝中建立孔隙压力时，如果围限压力固定为 10.5MPa，则裂缝渗透率随孔隙压力的增加而增加（图 1-9）。考虑到实际地质条件，裂缝宽度及渗透率的变化是随有效应力（上覆岩层压力减去裂缝孔隙压力）变化而变化的，所以又对有效应力与裂缝宽度的关系进行了模拟实验，发现裂缝在相当于埋深 400m 的有效应力的作用下，裂缝宽度可由 $28\mu\text{m}$ 下降到 $16.5\mu\text{m}$ ，即下降 41%，而当埋深超过 400m 时，裂缝宽度基本稳定（图 1-10），但裂缝渗透率则要到大约埋深为 800m 以下时，才能保持恒定（图 1-11）。

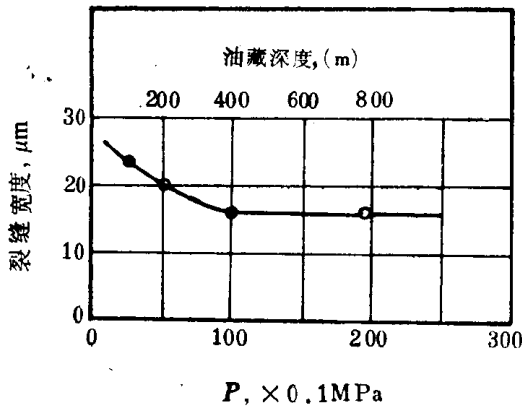


图 1-10 地层条件下裂缝宽度变化曲线

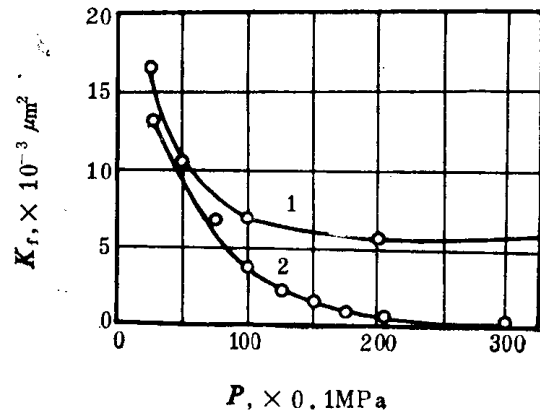


图 1-11 当 $\Delta P = \text{常数}$ (10.5 MPa) 时，裂缝渗透率 K_r 与净上覆压力的关系
1— P_p 的变化适合地质条件时；2— $P_p = \text{常数}$ 时

1 号样品的裂缝空间压缩系数为 $2.6 \times 10^{-2} 1/\text{MPa}$ ，压缩后的裂缝孔隙度只有原来的 21.2%；而 2 号样品的裂缝空间压缩系数为 $2.78 \times 10^{-2} 1/\text{MPa}$ ，压缩后的裂缝孔隙度是原来的 16.7%。由这些很难获取的极少的样品的实验结果可以看出：①裂缝性岩石的裂缝空间压缩系数远大于一般储集岩的孔隙压缩系数；②当埋深大于 400m 之后，其裂缝宽度趋于稳定。要注意的是：在运用上述参数时，必须注意实际的地质条件，如裂缝中是否有充填物、裂缝的原始张开度和其中的流体压力等因素。

Jones, F.G. (1975) 提出了计算裂缝体积压缩系数的公式，即

$$C_{pf} = \frac{1}{\frac{\Phi_f}{\Phi_{ft}}} \cdot \frac{d\left(\frac{\Phi_f}{\Phi_{ft}}\right)}{dP_{eff}} = \frac{63.8421}{P_{eff} \lg \frac{P_{eff}}{P_t}}$$

式中 C_{pf} ——裂缝体积的压缩系数， $1/\text{MPa}$ ； P_{eff} ——有效上覆压力（上覆岩层压力减去裂缝中的流体压力），MPa； P_t ——裂缝中的流体压力，MPa。

裂缝-基质系统岩石的总压缩系数为

$$C_t = C_o \left(\frac{\Phi_f S_{of} + \Phi_m S_{om}}{\Phi_m + \Phi_f} \right) + C_w \left(\frac{\Phi_f S_{wf} + \Phi_m S_{wm}}{\Phi_m + \Phi_f} \right) + C_g \left(\frac{\Phi_f S_{gf} + \Phi_m S_{gm}}{\Phi_m + \Phi_f} \right) + C_{pm} + C_{pf}$$

式中 C_o 、 C_w 、 C_g 和 C_p 分别为油、水、气和孔隙空间的压缩系数； S_o 、 S_w 和 S_g 分别为油、水、气的饱和度；下标 f 为裂缝，m 为基质。

五、裂缝性储集层的相对渗透率

由于储集岩中所具有的裂缝往往不能代表整个裂缝性油（气）藏的实际情况。因此，对于裂缝性储集层来说，通常要求得整个油藏或气藏的有代表性的相对渗透率。下面将分别介绍求取相对渗透率的理论方法和现场资料处理方法。

（一）求取裂缝-基质系统相对渗透率的理论方法

计算裂缝-基质系统相对渗透率的理论模型如图 1-12 所示。Braester(1972) 首先指出了他所提出的方法的四个基本原则，即①在裂缝油藏中，裂缝和基质之间具有流体的交换；②流体可以从裂缝到基质再回到裂缝进行循环；③相对渗透率是裂缝和基质中流体饱和度的函数；④可以认为整个过程是基质岩块和裂缝两个区域中的连续流动。

根据上述基本原则，油、水两相的相对渗透率是随裂缝中的含水饱和度变化而变化的。并可求得对水或对油的相对渗透率的最大值和最小值（图 1-13）。

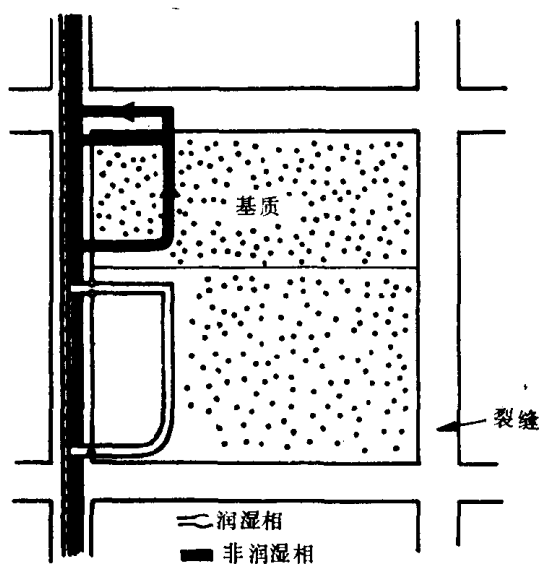


图 1-12 润湿相和非润湿相在基质和裂缝之间流动过程的示意图
(Braester, 经 AIME 同意)

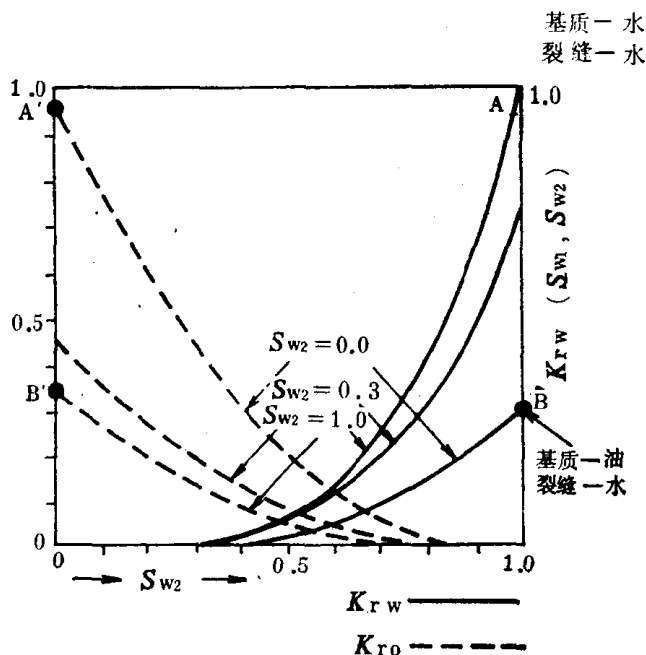


图 1-13 裂缝油藏单元的相对渗透率
(Braester, 经 AIME 同意)

裂缝-基质系统对油和对水的相对渗透率的计算式如下：

$$K_{ro} = \left[\frac{K_f}{K} + \left(1 - \frac{K_f}{K} \right) (1 - S_{w1}^2) (1 - S_{w1})^2 \right] (1 - S_{w2})^2 (1 - S_{w2}^2)$$

$$K_{rw} = \left[\frac{K_f}{K} + \left(1 - \frac{K_f}{K} \right) S_{w2}^2 \right] \cdot S_{w2}^4$$

式中 K_{ro} 和 K_{rw} ——分别为对油和对水的相对渗透率； K 和 K_f ——分别为裂缝性岩石的绝对渗透率和裂缝渗透率； S_{w1} 和 S_{w2} ——分别为基质和裂缝中的含水饱和度。