

## 前 言

裂缝油藏的近期历史是与油藏工程师应用仅适用于常规油藏的经典方法设计和预测这类油藏时所碰到的困难密切联系在一起的。

近二十年中所发表的许多篇文章和研究成果，提出了描述和控制单相流和多相流在裂缝油藏中的流动以及与基质和裂缝之间相互作用的原则和规律。为了在统一的概念下综合现有的已发表的材料，我尝试写出了一本能开辟石油科学和流体力学新领域的书。读者若依靠处理观测的资料来评价裂缝，通过其特殊的开采机理来考察向井的流动动态以及分析油田开采中的油藏动态，则可在本书中找到所必需的一些手段。

在建立了控制裂缝油藏中动力现象的一些新的原则和规律以后，工程师或地质师将不必再应用常规油藏的方法去解决这种特殊类型的油田中的问题。在作天然裂缝油藏的非定态试井分析时，必须避免应用仅适应于经压裂而产生裂缝的井的方法，因为二者的流动条件是完全不同的。当裂缝油藏主要是在重力和毛细管力的控制之下开采时（考虑所有与吸渗过程和排驱过程有关的蕴涵关系在内），把简单的常规驱动（水驱和/或溶解气驱）用作基本的驱动也是不能接受的。为了更好的理解各种概念，本书中给出的材料遵循着油藏分析的现代大纲。这样，第一部分致力于油藏描述；第二部分是向单井的流动；而第三部分则是裂缝油藏中的流动机理。

第一部分详尽地讨论了裂缝的产生、裂缝的探测以及靠恰当地处理各类资料来描述裂缝的方法。

裂缝中的流动和基质-裂缝系统中的同时流动是径向对称流动的基础，这些内容将在第二部分中具体展开。

在第三部分中，在对气-油-水三相的一个统一的人手方法下，给出了复杂的流动机理和各种新的概念，在这里，重力和毛细管力的作用显示出水驱或溶解气驱这些经典的开采机理在裂缝中完全变更了。

在本书为中国的大学生、工程师和科学工作者出版之际，我希望其中所包含的材料将对大学生或对参加裂缝油藏开采和设计的地质师和工程师们有一定参考价值。

我希望我的中国同事们将会和我一样发现，当应用了本书中给出的现代概念以后，将可避免把常规油藏评价方法代替特殊的裂缝油藏评价方法时所出现的差错。

最后，我希望通过在本书中发展的科学基本原理，将促进中国在天然裂缝油藏领域作出进一步的科学贡献。

我愿借此机会感谢所有有助于本书的翻译和出版的诸位，特别是感谢陈钟祥教授的卓越帮助。

教授，工程学博士  
T. D. 范 高尔夫-拉特  
特隆特汉姆，1986

## Preface

The recent history of fractured reservoir is very much associated to difficulties of reservoir engineers to design and predict these reservoirs by the classic procedure used in conventional reservoirs.

The single papers and studies developed in the last two decades have developed principles and laws which describe and govern the flow in fractured reservoir and the interaction between matrix and fractures in single or multiphase flow. In order to integrate the existing published material in a unique global concept, I have tried to present it as a book which could open a new scientific area in Petroleum Science and Fluid Mechanics. In this book the reader may find the necessary tools for the evaluation of fractures by processing the observed data, examining the flow behaviour towards a well and analysing reservoir behaviour during the entire life of a field, through its specific production mechanisms.

By establishing new principles and laws which govern the dynamic phenomena in fractured reservoirs, an engineer or geologist will no longer be constrained to use the conventional reservoir procedures in order to solve any problem in this special kind of field. The use of procedures valid for fractured wells (by stimulation) in the case of well-transient analysis for a natural fractured reservoir has to be avoided, since the conditions of flow are completely different. It is also unacceptable to use simple conventional drives (water-drive and/or solution-gas drive) as basic drives when the fractured reservoir is producing mainly under the control of gravity-capillary forces, including all implications related to imbibition and drainage processes. For a better understanding of various concepts, The material here presented is along the modern outlines of reservoir analysis. Thus, the first part is devoted to reservoir description, the second part to flow towards a well, and, the third part to the flow mechanism in a fractured reservoir.

The generation of fractures, Their detection and the procedure to describe them by appropriate processing of all types of information is discussed in detail in the first part.

The flow in fractures, as well as the simultaneous flow of matrix-fracture systems is at the basis of radial-symmetrical flow which is developed in detail in the second part.

In the third part, the complex flow mechanism and new concepts are presented in a unitarian approach for the three phases, gas-oil-water, where the role of gravitational and capillary forces show that the classic production

mechanism as water drive or solution gas-drive are completely modified in a fractured reservoir.

With the book published for Chinese students, engineers and scientists, it is my desire that the material contained will be of use either for the education of students in Universities or for geologists and engineers involved in fractured reservoir production operations and design.

I hope that our Chinese colleagues will find out, as I myself did, that using the modern concepts presented in this book it becomes possible to avoid errors occurring when conventional reservoir appraisals are applied instead of specific fractured reservoir methods and procedures.

Finally, I hope that through Scientific basis developed in this book, further Chinese scientific contribution in the field of Naturally Fractured Reservoir will be encouraged.

I would like to take this opportunity to thank all those who helped with the translation and presentation of the book and in particular to prof. Chen. Zhongxiang for his outstanding help.

Prof. Dr. Ing. T. van Golf-Racht  
Trondheim, 1986.

# 目 录

## 第一部分 油藏描述

<b>第一章 地质基础</b> .....	( 1 )
1.1. 引言 .....	( 2 )
1.2. 破裂的地质条件 .....	( 3 )
1.3. 模拟破裂的地质模型 .....	( 13 )
1.4. 缝合化和节理作用的影响 .....	( 17 )
1.5. 破裂作用的定量评价 .....	( 22 )
符号表 .....	( 29 )
参考文献 .....	( 30 )
<b>第二章 裂缝的探测与评价</b> .....	( 31 )
2.1. 分类和定义 .....	( 31 )
2.2. 裂缝的基本参数 .....	( 33 )
2.3. 破裂作用的直接评价 .....	( 41 )
2.4. 数据处理 .....	( 53 )
2.5. 破裂研究的应用 .....	( 62 )
符号表 .....	( 70 )
参考文献 .....	( 70 )
<b>第三章 裂缝油藏开采实例</b> .....	( 71 )
3.1. 裂缝性碳酸盐岩油藏 .....	( 71 )
3.2. 裂缝性粉砂岩、砂岩油藏 .....	( 84 )
3.3. 裂缝性页岩油藏 .....	( 88 )
3.4. 裂缝性《基底》油藏 .....	( 92 )
参考文献 .....	( 96 )
<b>第四章 岩石的物理性质</b> .....	( 97 )
4.1. 引言 .....	( 97 )
4.2. 孔隙度 .....	( 97 )
4.3. 渗透率 .....	( 102 )
4.4. 关于基本参数 ( $K$ , $\Phi$ , $S_{wi}$ ) 的讨论 .....	( 115 )
4.5. 裂缝岩石的压缩性 .....	( 128 )
4.6. 裂缝油藏中的相对渗透率 .....	( 134 )
4.7. 毛细管压力曲线 .....	( 148 )
符号表 .....	( 158 )
参考文献 .....	( 161 )

<b>第五章 测井与裂缝评价的关系</b> .....	(163)
5.1. 引言 .....	(163)
5.2. 岩性测井 .....	(163)
5.3. 井径测井 .....	(164)
5.4. 井温测井 .....	(165)
5.5. 电阻率测井 .....	(166)
5.6. 倾角测井 .....	(169)
5.7. 孔隙度测井 .....	(172)
5.8. 井下电视 .....	(180)
5.9. 讨论 .....	(182)
5.10. 定量解释 .....	(184)
符号表 .....	(186)
参考文献 .....	(187)

### 第二部分 油气井动力学：均质流体向一口井的流动

<b>第六章 无孔隙裂缝岩石中流体向一口井的流动</b> .....	(189)
6.1. 均质液体的定律 .....	(189)
6.2. 均质流体通过裂缝网络流向一口井的定常流动 .....	(196)
6.3. 裂缝油藏中气体的流动 .....	(214)
6.4. 无孔隙裂缝网络中的非定常流动 .....	(219)
符号表 .....	(222)
参考文献 .....	(223)
<b>第七章 双重孔隙裂缝油藏中的向井流动</b> .....	(224)
7.1. 基本流动方程 .....	(225)
7.2. Warren和Root模型的讨论 .....	(238)
7.3. 对POLLARD方法的讨论 .....	(257)
符号表 .....	(263)
参考文献 .....	(263)
<b>第八章 向一口井流动的一些特殊问题</b> .....	(264)
8.1. 引言 .....	(264)
8.2. 井间干扰 .....	(264)
8.3. 裂缝油藏中各向异性的估算 .....	(272)
8.4. 用于分析向单井流动的样板曲线的应用 .....	(283)
符号表 .....	(286)
参考文献 .....	(286)

### 第三部分 油藏动力学

<b>第九章 单个基质岩块中的流体驱替过程</b> .....	(287)
9.1. 引言 .....	(287)

9.2.对基质流体驱替的简化动力学方法 .....	(288)
9.3.研究基质岩块中流体驱替过程简化的物理方法 .....	(297)
9.4.单个岩块吸渗驱替的概念和实验 .....	(306)
9.5.单个岩块流体驱替的其它方面研究 .....	(328)
9.6.从单个岩块中采油:理论方法 .....	(331)
符号表 .....	(338)
参考文献 .....	(340)
<b>第十章 裂缝油藏的采油机理 .....</b>	<b>(341)</b>
10.1.引言 .....	(341)
10.2.衰减期间的油藏描述 .....	(342)
10.3.油藏分带与采油机理的关系 .....	(346)
10.4.裂缝油藏的特定情况 .....	(369)
符号表 .....	(375)
参考文献 .....	(376)
<b>第十一章 裂缝油藏的数值模拟 .....</b>	<b>(377)</b>
11.1.引言 .....	(377)
11.2.相流动模拟 .....	(378)
11.3.组分模型 .....	(392)
符号表 .....	(395)
参考文献 .....	(396)
<b>第十二章 裂缝油藏实例 .....</b>	<b>(397)</b>
12.1.某些裂缝油藏的基础资料和历史 .....	(397)
12.2.简化的油藏算例 .....	(403)
符号表 .....	(438)
参考文献 .....	(438)
<b>附录 单位换算表 .....</b>	<b>(439)</b>

# 第一部分 油藏描述

用现代油藏工程语言，油藏描述是指应用各种方法，把有关油藏岩石和流体的局部基础资料的总体外推到整个油藏。

由于裂缝油藏不同于常规油藏，对它的描述必须体现出它自身的特点。其中之一就是破裂过程与地质作用之间的相互关系，这将在第一章中广泛地讨论。与岩石力学性质和应力类型有关的破裂条件有助于评价裂隙高度发育的地区，这种评价可以通过数学模型应用油藏模拟来加以改进。

裂隙的探测、评价及处理是裂缝油藏描述过程中的另一个基本步骤。有关裂隙密度、破裂强度的所有参数以及数据处理的各种方法，在第二章中作了详细的讨论。自第三章中展开了大量的油田实例以后，第四章中主要讨论的课题仍是对物理性质的定量评价。该章十分详尽地讨论了裂缝孔隙度和渗透率的评价、它们之间的相互关系以及等价的理想几何模型与这些参数的关系。根据双重孔隙油藏岩石的观点，重新研究了特殊的岩石性质，诸如毛细管压力和相对渗透率等。

为了完善在岩样上直接测得的结果，在第五章中通过各种测井的间接测定来检测裂隙。

包含在这五章中的全部材料，定义了各种基本物理参数，指出了评价这些参数的方法。这些方法可在裂缝油藏描述中进一步应用。

## 第一章 地质基础

裂缝性油藏的地质研究，需要对破裂的形成过程与该阶段中发生的地质事件之间的关系进行研究。它包括正确的破裂理论的精心推导，及对裂缝性油藏特征的正确判断。岩石破裂绝大多数具有构造成因，它在褶皱层中发展与断层作用或与节理的类型有关。有时它也可以是成岩作用和固结作用的速率差异而引起。

一般说来，对裂缝形成过程的认识近来已从经验方法发展到更为科学的方法。因此，对油藏描述和建立油藏模型是有益的。

但是要记住，评价破裂作用要比评价一般油藏中的孔隙度和渗透率复杂得多。事实上，裂缝的形成取决于岩石材料的机械应力的类型以及岩石的性质。因此，破裂的结果诸如裂缝的张开、大小、分布和方向等将与应力、岩石类型（脆性的或韧性的）、结构状态、深度（上覆压力）、岩性以及岩层的厚度等有关。

本章研究形成裂缝的地质条件，它包括岩石力学性质与地质事件（断层作用，褶皱作用等）的关系，以及岩石特性和变化与裂缝形成的关系。为了建立一个有根据的裂缝性油藏的地质模型，仔细考察了各种地质作用和破裂的发展。所取得的成果对进一步开展这方

面的研究提供了可能。

## 1.1. 引言

在对裂缝现象进行详细分析之前，定义某些术语和详细作出一些基本的陈述是必要的。

### 1.1.1. 什么是裂缝？

按照不同的观点能给出各种定义，但从严格的地质力学的观点看，裂缝是失去结合力的表面。因为破裂指的是导致给定的物质失去结合力的过程，于是裂缝是破裂的结果。一般说来，发生相对位移的裂缝可定义为断层，而没有发生显著位移的裂缝可定义为节理（图1.1）。

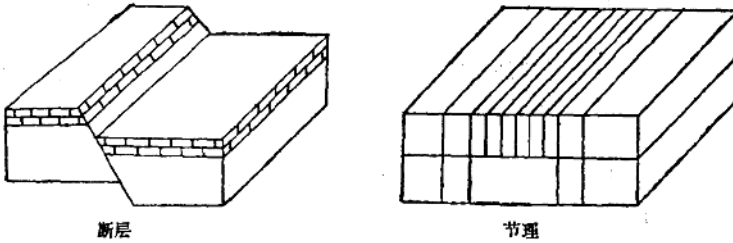


图 1.1 断层和节理的示意图

裂缝还可以以一般的方式定义为把岩层沿着裂纹、裂隙、节理或任何一种面破裂为碎块的间断，而沿着间断没有平行于间断面的位移。

基本上，一个裂缝究竟被称为节理还是断层，主要取决于研究的尺度，但一般说来，被称为裂缝的东西相当于节理。

### 1.1.2. 裂缝的成因

把破裂定义为：沿着一个失去了结合力的面把物质分割为各个的离散部分。对地壳的沉积岩推断这个过程是更为复杂的<sup>[2]</sup>。这是由于在油藏破裂的发育中，地质环境起着决定性的作用。

在一个油藏（图1.2）的a、b、c三个层中，岩层b可以在比a层c层更低的应力下失去结合力，因此，当b破裂时，a层和c层却能经得住更大的应力负荷而不生成裂缝。这时，虽然单一b层是破裂了，然而就整个沉积层段的总体行为而言，可认为是没有破裂。

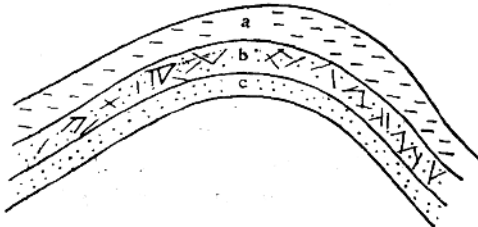


图 1.2 非裂缝层a和c以及两层间的裂缝层b

Stearns和Friedman<sup>[2]</sup>提出两种裂缝类型，即在成因上与褶皱有关的裂缝和与区域构造有关的裂缝（区域性裂缝）。

裂缝的成因及与构造作用之间的关系特别是关于破裂强度对储层捕集油气的重要性，在文献中已有过许多讨论。



Hodgson<sup>(3)</sup>根据在亚利桑那州和犹他州进行的节理研究，摒弃了节理和褶皱有关的成因理论。他相信节理是在沉积成岩作用的早期，由于一天两次的地球固体潮引起的疲劳而形成的。

Price<sup>(4)</sup>提到，虽然在许多更近代的沉积物中观察到节理，但难以相信早期形成的节理能在沉积以后的压实和成岩作用的过程后还能存在。

Cook<sup>(5)</sup>从在 Sidney 盆地的沉积物上进行的的研究中得出结论，早期形成的节理能在以后诸如埋藏和固结的地质阶段中保持下来。

Harris<sup>(6)</sup>在分析了裂缝密度和层厚之间的关系以后，支持它们之间有直接关联的看法。

可以作出结论：构造与破裂的关系，一定与把裂缝分成不同的两类有联系，因为野外观察表明：

a. 与构造有关的裂缝是这样一些裂缝，它们表现出在被观察的整个区域上有一致的方向性和规律性，这种与构造的关系指的是局部褶皱前的特征。

b. 与构造无关的裂缝是指那些不规则的或弯曲的不连续的断裂，它们没有方向上的一致性。这种裂缝和各种表面特征（滑坡、重力滑动片等）有关。

## 1.2. 破裂的地质条件

根据对一些裂缝油藏生产史的考察<sup>(2)</sup>，裂缝油藏预计最可能出现在发生过有利的构造运动的低孔隙度的脆性储集层中。在这种情况下，生成的裂缝很大并且延伸很广，因此称之为粗裂缝。如果岩石脆性较差而且粒间孔隙度高，裂缝的范围通常是有限的且张开度较小，因此，称为微裂缝或裂缝。

裂缝的产生原因是由于降低了岩石的结合力而导致的应力减小，它归因于各种地质因素，如：

a. 形成褶皱和断层时的地壳变动；

b. 覆盖层的深度侵蚀，将通过各个薄弱面形成一个差异应力；

c. 当岩石属于页岩或泥质砂岩时，由于失水而引起的岩石体积的收缩；

d. 火成岩在温度变化时体积的收缩。

外因 → 内因 起作用

### 1.2.1. 岩石的力学性质与破裂的关系

#### 1.2.1.1. 基本方程

在油藏条件下，一个单元岩石体积是处在由上覆岩层（地静）压力、围岩压力、流体（孔隙）压力，此外还有大地构造力所引起的应力状态之中。通常采用由三个法向来表示力的方法，并把这三个法向量称为主应力，分量  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  分别是最大的、中间的和最小的应力（图1.3）。通常在这三个应力中，垂直应力  $\sigma_1$  再现了上覆岩层引起的应力，而水平应力  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  可以作为压应力或张应力。

作用在垂直于  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  平面上的正应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$  的关系，可表示为最大主应力  $\sigma_1$  的方向和 AB 面之间夹角  $\varphi$  的一个函数（图1.4）。作用在三角棱柱体 ABC 上力的平衡可由如下计算：

求解在方向 n 和 t 上的力的平衡

$$\sum_i F_{i,u} = 0; \quad \sum_i F_{i,t} = 0$$

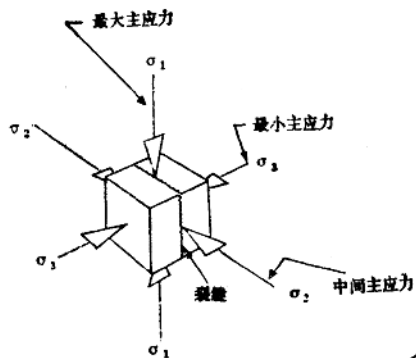


图 1.3 应力单元及首先形成破裂的面

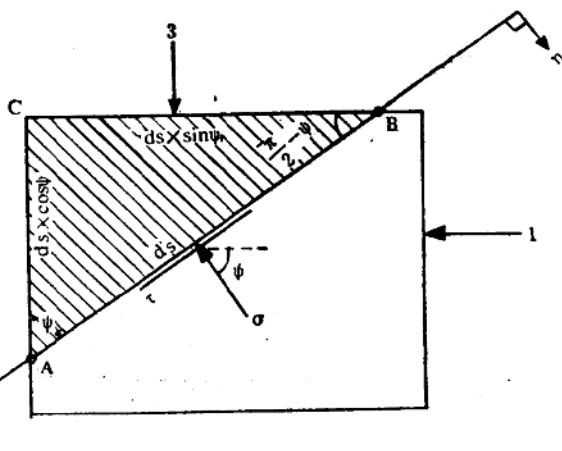


图 1.4  $\sigma$ 和 $\tau$ 在 $\psi$ 角平面上 (King Hubert<sup>(7)</sup>, 经AAPG同意)

可得在 $n$ 方向上

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\psi + \tau_{3,1} \sin 2\psi \quad (1.1)$$

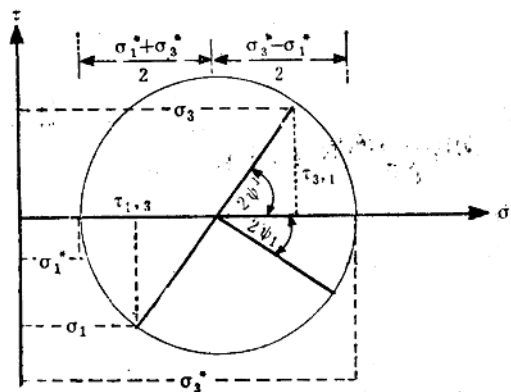


图 1.5 在方向为 $\psi$ 的平面上, 正应力 $\sigma$ 和剪切应力 $\tau$ 的摩尔图 (King Hubert<sup>(7)</sup>, 经AAPG同意)

在 $t$ 方向上

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\psi + \tau_{3,1} \cos 2\psi \quad (1.2)$$

应用摩尔图(图1.5), 根据角 $\psi$ 的变化, 方程1.1和方程1.2可改写为(作用在主平面上的)主应力 $\sigma_1^*$ 和 $\sigma_3^*$ 的一个函数, 方向由 $\psi_1$ 和 $\psi = \psi_2 = \psi_1 + 90^\circ$ 表示。

如果主应力的方向 $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 以及主应力 $\sigma_1^*$ 和 $\sigma_3^*$ 为已知, 则方程1.1和1.2将变为

$$\sigma = \frac{\sigma_1^* + \sigma_3^*}{2} + \frac{\sigma_1^* - \sigma_3^*}{2} \cos 2\psi' \quad (1.1')$$

$$\tau = \frac{\sigma_1^* - \sigma_3^*}{2} \sin 2\psi' \quad (1.2')$$

其中  $\psi = \psi_1 + \psi'$

$$(1.3)$$

为了确定 $\tau$ 与 $\sigma$ 的关系, 有必要参考一下实验结果, 它表明剪应力通过下列方程与正应力成正比:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} (\phi_1 + 45^\circ) \quad (1.4)$$

式中 $\phi$ 是材料的内摩擦系数。应用摩尔包络线计算，断裂将发生在倾角为 $45^\circ + \phi/2$ 的平面上，因为沙层的内摩擦角 $\phi = 30^\circ$ ，正常的断层将有 $60^\circ$ 的倾角，在各种地质著作<sup>[2,7,8]</sup>中对这一观察现象进行了讨论。

对于具有内摩擦角 $30^\circ$ 的砂层，当 $\sigma_1 = \sigma_3$ 时破裂将发生在沿着与最小主应力成 $45^\circ$ 角的一个平面上（图1.6）。在类似条件下（图1.6），如果垂直应力是常数，如果水平应力的值介于垂直应力的1/3和3倍之间，将发生断裂。

上述分析可进一步扩展到胶结岩石。通常这种预测可以在实验室中通过对岩石标本作三轴压缩实验而证实。

通过最大最小应力 $\sigma_1^*$ 和 $\sigma_3^*$ 的改变来看岩石的变化，可以观察到：在高的 $\sigma_1^*$ 值时，几乎所有的岩石都呈塑性变形，摩尔包络线变成近似地平行于 $\sigma$ 轴。在较低的压力下，大多数岩石由于脆性断裂而被破坏，支配此状态的基本方程是

$$\tau = \pm (\tau_0 + \sigma \operatorname{tg} \psi) \quad (1.4')$$

此处 $\tau_0$ 是对零法向应力的剪切力强度； $\psi$ 是摩擦角，它在 $20^\circ - 50^\circ$ 之间变化，但最常见的是在 $30^\circ$ 左右。除了盐和塑性粘土以外，这个方程对所有的地质上有兴趣的岩石都适用。

考虑了孔隙中饱和流体的作用，就有可能对上述的岩石性质的分析作出修正。在这种情形下，有效应力 $\sigma$ 应表示为总的轴向应力 $S$ 和孔隙压力 $p$ 之间的差：

$$\sigma = S - p \quad (1.5)$$

而剪应力 $\tau$ 仍与压力 $p$ 无关。事实上，压力 $p$ 并不产生剪切应力，因为它同时作用在流体和固体上，因此，在岩样三轴测试中的 $\sigma$ 对油藏岩石应力/应变提供了令人满意的模拟条件。

为了估价在油藏状态下的垂直应力，当不存在油藏的超高压时，必须以下列方程表达 $\sigma_2$ ：

$$\sigma_2 = S_2 - p = h\gamma_1 - h\gamma_w = h \times \Delta\gamma \quad (1.6)$$

如果地层断开，而且在饱和流体的孔隙中已经发展有明显的超高压，则把 $\gamma_w$ 值看成是局部的孔隙压力梯度 $G_w$ ，而不是水的密度。在异常高的孔隙压力 $p$ 的情况下，正如在北海（侏罗纪地层）和美国、墨西哥湾沿岸已观察到的那样， $\sigma_1$ 的降低可能变得很重要。

#### 1.2.1.2. 岩石材料的测试

岩石破裂试验程序采用的最普通的方法是常规的三轴实验。

实验是在圆柱形标本上进行的，它受到一个沿着圆柱体轴向作用的轴向力（最大主应力 $\sigma_1$ ）和一个方向为垂直于圆柱轴垂直指向侧向围岩的流体压力作用（因此，两个最小的应力是相等的， $\sigma_2 = \sigma_3$ ，图1.7）。

一般的程序是先加上等于围岩压力的水静压力，然后在保持围岩压力不变的情况下增加轴负荷，这种为评价变形介质而使用结合应力状态的问题在文献中已作了广泛的讨论。这种程序的主要结果是屈服强度和极限强度都随围岩压力的增大而增加。在图1.8示出一个例子，其中画出了在不同的围岩压力下应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与纵向应变 $\epsilon$ 的关系曲线。

如图所示， $\sigma_1 - \sigma_3$ 和 $\epsilon_1$ 的关系曲线的形状受围岩压力影响。在低的围岩压力下，当发生断裂时，有明显的强度降低并得到一种脆性裂缝，在高的围岩压力下，将发生大的变形而没有任何强度降低。

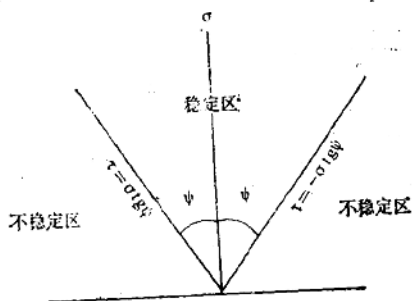


图 1.6 在砂层中裂缝平面的  $\sigma$ 、 $\tau$ 、 $\psi$  的关系

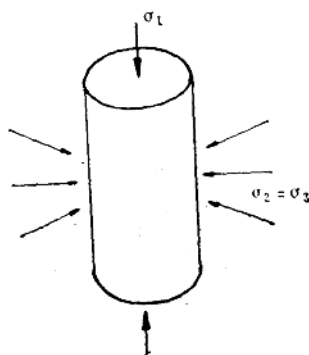


图 1.7 一个圆柱形岩样的三轴试验 (轴压  $\sigma_1$  和流体围岩压力  $\sigma_2 = \sigma_3$ )

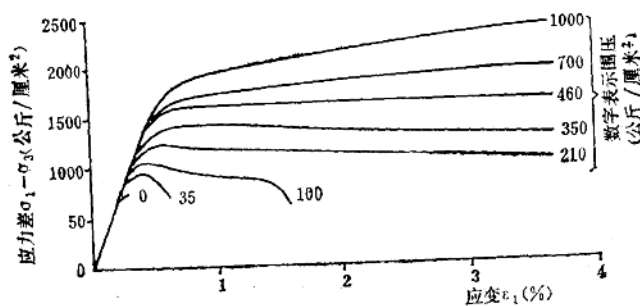


图 1.8 对不同的围岩压力下应力差  $\sigma_1 - \sigma_3$  与应变  $\epsilon$  的关系

裂缝的型式受围岩压力影响很大 (图 1.9)。如果围岩压力低 (低于 35 公斤/厘米<sup>2</sup>)，裂缝是不规则的 (图 1.9 中情况 1)。如果围岩压力超过 35 公斤/厘米<sup>2</sup> 或 100 公斤/厘米<sup>2</sup>，三轴试验结果为网状裂缝 (情况 2)。超过 200 公斤/厘米<sup>2</sup> 时，裂缝对称地相交 (情况 3)。再进一步增大围岩压力 (300—700 公斤/厘米<sup>2</sup>) 时，伴随着试样高度的显著减小，产生对称的大量的共轭裂缝。对高的围岩压力 (超过 1000 公斤/厘米<sup>2</sup>) 根本不产生裂缝。

对砂岩给出了一个关于应力方向、剪应力和裂缝之间关系的示意图 (图 1.10)。垂直和水平两个主要方向表示最大主应力 ( $\sigma_1$ ) 轴和最小主应力 ( $\sigma_3$ ) 轴，最大剪应力面与最大主应力轴成 45° 角。最大和实际剪应力之间的角 (15°) 表示内摩擦角。

### 1.2.2. 地质作用下的破裂

Stearns 和 Friedman<sup>(2)</sup> 所定义的裂缝，如果它们是处在单一应力状态下发展形成的话，可以有一个共同的成因，这类裂缝称为共轭的。在这种情况下 (图 1.11)，由于横裂缝方向与最大主应力重合，所以裂缝类型包括一个左侧剪切裂缝和一个右侧剪切裂缝。共轭剪切裂缝形成一种与裂缝面相交成 60° 的类型，这种裂缝类型重要的优越性是只要知道裂缝系统的一组方向就足以作出整个的裂缝模型和应力分布。

反之，交角为 90° 的正交裂缝将是由于一个以上的单一应力状态所造成的，甚至不排除对两组裂缝的破裂有共同的地质成因。

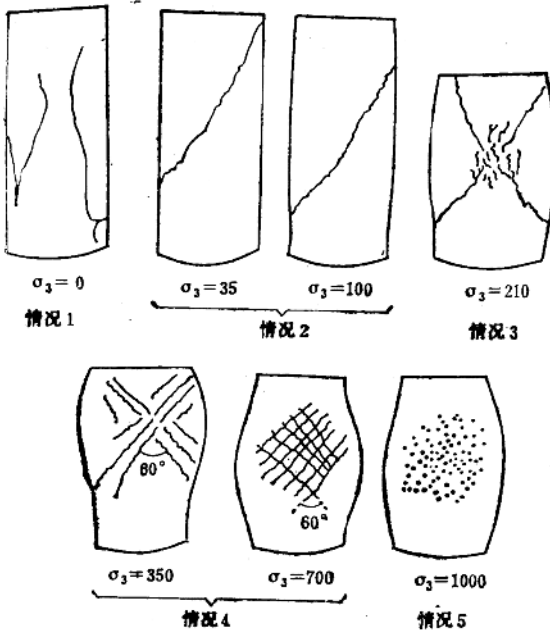


图 1.9 在不同围岩压力 $\sigma_3$  (公斤/厘米<sup>2</sup>) 时三轴实验结果

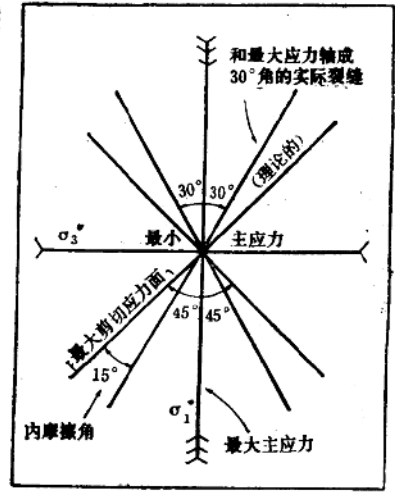


图 1.10 主应力和剪切应力示意图

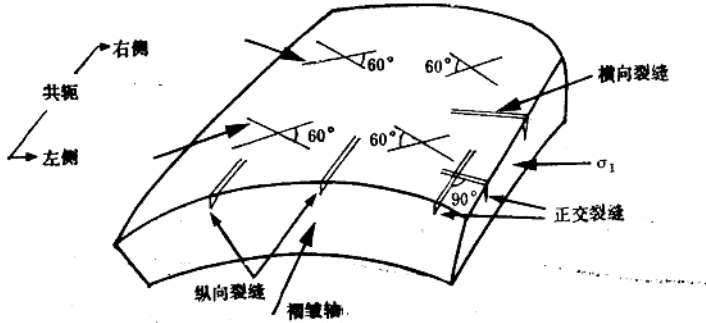


图 1.11 与褶皱轴有关的共轭和正交裂缝

### 1.2.2.1. 裂缝与断层作用的关系

为了解三个主应力 ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) 影响各种地质变形的方式, 下面给出一系列例子, 在这些例子里, 应力分布和断层、剪切裂缝有关。

情况 1: 如果主应力  $\sigma$  为垂直方向,  $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  为水平方向, 则将产生正断裂, 该处两个共轭断层形成  $60^\circ$  角, 这点表明了由于拉张而形成了正断层, 因此, 基于原先讨论的情况, 最大应力  $\sigma$  是近似地垂直的并等于上覆岩层压力, 而最小应力  $\sigma_3$  应是水平的, 这样在断裂过程中  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  之间的关系有一个变化范围, 即:

$$\sigma_3 \approx \frac{1}{2}\sigma_1 - \frac{1}{3}\sigma_1$$

情况 2：在地质年代中，当地层由于褶皱或逆掩的作用而缩短时，最低应力  $\sigma_3$  将是垂直的，而最大应力  $\sigma_1$  将是水平的（图 1.12b）。因此，在这种情况下  $\sigma_1$  的变化范围是：

$$\sigma_1 \approx 2\sigma_3 - 3\sigma_3$$

图 1.12b 上看到的结果是逆断层，它是由于  $\sigma_1$  和上覆岩层压力  $\sigma_3$  压缩结果。

情况 3：如果最大和最小主应力 ( $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ ) 均为水平的，而垂直应力是  $\sigma_2$  时，将发生不同的情况，在压缩过后将发生剪切破裂如图 1.13 所示。在这个横向延伸断裂的区域，最大和最小主应力 ( $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ ) 都是水平的，而中间应力  $\sigma_2$  是垂直的，将发生两个构成  $60^\circ$  角的断裂面（图 1.13）。下面的实例是基于野外观察得到的，并已在文献中进行了讨论：

1. 第三纪时，断层作用发生于得克萨斯和路易斯安娜州的墨西哥湾沿岸，正断层应力系统是周期的，应力上升达到破裂点。紧接着是一个松弛时期，然后又是一个压力上升时期。由于断层大多数与走向平行，最低应力的方向应平行于倾向，其数量级为上覆岩层有效压力的  $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$ 。

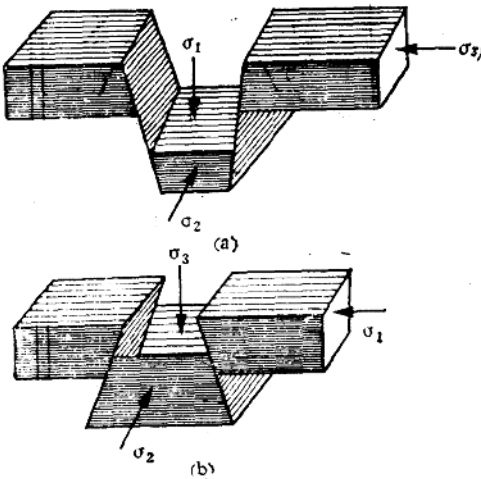


图 1.12 断层作用：(a) 拉张作用和正断层；  
(b) 逆断层和压缩作用

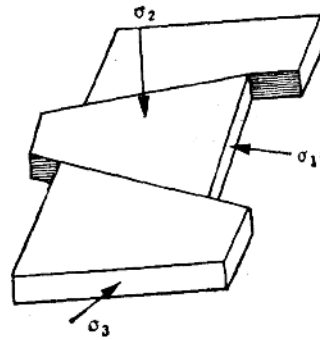


图 1.13 压缩作用和剪切断裂

2. 与此相反，在加利福尼亚最近发生过构造变形，并且目前这种变形仍在继续。可以

观察到在全球性逆掩变形下，沿着断层的滑移和上升运动仍然发生，最大主应力  $\sigma_1$  将是水平的，而有效上覆岩层的最小应力  $\sigma_3$  将是垂直的（图 1.14）。

从所考察的实例和前面检查过的情况，断层和裂缝之间的关系可概述如下<sup>(1)</sup>。

a. 和断层伴生的裂缝有着共同的应力来源；

b. 如果断层的方向已知，那么就能

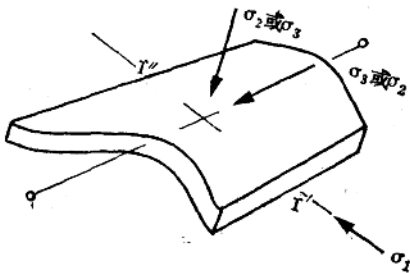


图 1.14 褶皱压缩作用

预测裂缝的方向（走向和倾向），反之，根据裂缝的方向也能决定断层的走向和倾向；

- c. 根据断层的资料来判断裂缝密度是不可能的；
- d. 所有这三种潜在裂缝的走向以及它们的交会情况都可以预测；
- e. 对于正断层来说，必须知道两条剪切裂缝的相对发育情况；
- f. 如果裂缝和断层相共轭，在两个岩块的相反方向上钻的井，有可能与许多裂缝相交。

在断层作用的过程中，如果再加上褶皱作用，则对裂缝和断层作用之间的关系判断就变得复杂了。

#### 1.2.2.2. 裂缝与褶皱作用的关系

在发生褶皱作用的情况下，裂缝不能只与一种单一状态的应力有关（如断层作用情况那样），而是与褶皱过程中发生的几种应力状态有关。

示于图1.14和图1.15的褶皱实例，代表当最大主应力平行地和垂直地作用在地层层理上的两种情况。

在图1.14上侧应力 $\sigma_1$ 只作用在地层的一个边（ $\gamma'$ ）上，而另一边 $\gamma''$ 实际上不动，因此由于压应力和张应力的结果，褶皱作用将产生一系列的裂缝。

图1.15表示 $\sigma_1$ 垂直作用的情形，这是由于盐丘上升的结果，构造隆起，储集层处在压应力和张应力的状态下。

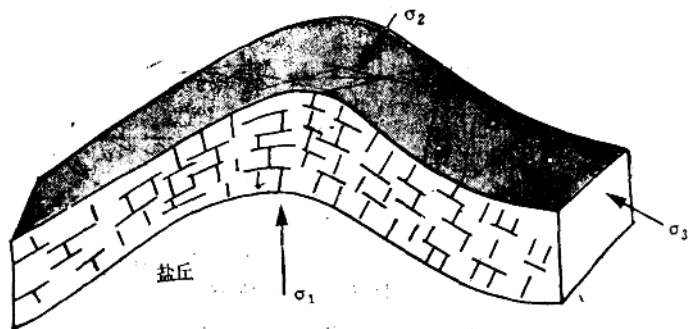


图 1.15 由于盐丘上升的褶皱作用

在褶皱过程中，在主应力分布的各种条件下，产生一系列的裂缝类型。在这些类型中，有两种类型是最重要的并描述如下：

##### a. 类型 1 (图1.16)

这种情况下，三个主应力作用于以下的方向上： $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 沿着层理面作用，而 $\sigma_2$ 垂直作用于层理面。由于最大主应力 $\sigma_1$ 的方向沿着构造倾向，将产生一系列的横向裂缝和各自的共轭裂缝。当研究褶皱构造的露头资料时，这种观察很有兴趣。根据所观察到的共轭裂缝，可以了解到当褶皱发生时 $\sigma_1$ 的方向，还可以确定 $\sigma_3$ 作用的同一层理面的法方向。于是背斜构造的倾向由 $\sigma_1$ 给出，走向由 $\sigma_3$ 给出。

##### b. 类型 2 (图1.17)

此裂缝类型与类型 1 类似， $\sigma_2$ 垂直作用于层理面，而 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 在层理面上作用，唯一不同的是最大主应力 $\sigma_1$ 作用在平行于褶皱轴的方向上。因此，结果将是一系列的共轭裂缝，它们将指出 $\sigma_1$ 沿着代表走向的纵向方向上作用，而最小主应力 $\sigma_3$ 则沿着倾向方向作用。

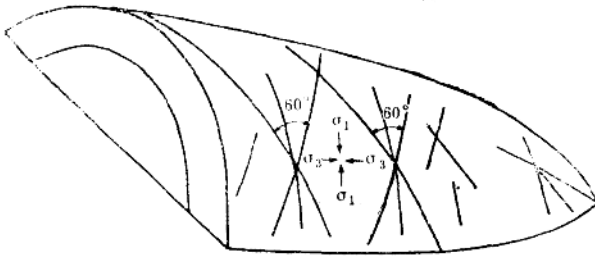


图 1.16 裂缝类型1:  $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 作用在层面上以及 $\sigma_1$ 垂直作用于层面 ( $\sigma_3$ —倾向方向;  $\sigma_1$ —走向, Stearns<sup>[2]</sup>, 经AAPG同意)

在这两种情况下,在背斜褶皱时将发生背斜的缩短和伸长,由 $\sigma_1$ 引起的缩短在类型1时将表现在倾向上,而在类型2时将在走向上,对伸长来说恰好相反。除了破裂,垂直于层面方向将不会发生诸如缩短或伸长的变化。Stearn和Friedman<sup>[2]</sup>已提到过这两种类型的一系列实例。并已作了许多观察:

(a) 此两种类型可在同一层中发育;

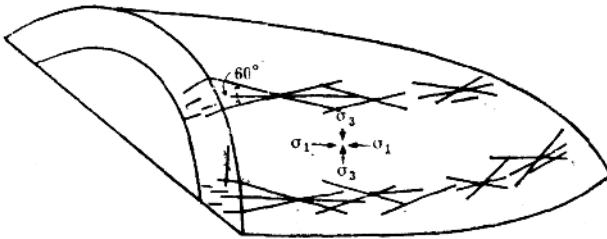


图 1.17 裂缝类型2:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 作用在层面上以及 $\sigma_3$ 垂直作用于层面 ( $\sigma_2$ —倾向方向;  $\sigma_1$ —走向, Stearns<sup>[2]</sup>经AAPG同意)

(b) 一般说来,类型1先于类型2,这意味着褶皱必须发展到足够的程度时裂缝才能产生。在这种情况下,裂缝将垂直于背斜走向;

(c) 类型1的裂缝常常象单一裂缝那样在长距离上发育,一般说来,裂缝是较大的,并具有均匀的方向性,它们可以有助于流体在大范围内运动;

(d) 类型2的裂缝长度缩短,经常在几英寸和几英尺之间变动,裂缝和褶皱轴方向一致,并经常在三个主要方向上含有裂缝;

(e) 类型1的拉裂缝可中断于侧裂缝中(左边的或右边的),剪切裂缝可中断在拉裂缝或其共轭裂缝上;

(f) 尚未证明,但看来在类型1的情况下,单一裂缝的连通有着更多的机会,但是类型2的裂缝密度对流体流动更为有效;

(g) 在与类型1的诸裂缝相交的井中,有三个可能的方向与裂缝相交,但在类型2的情况下,最有利的连通将是在平行于构造走向的方向上。

### 1.2.3. 岩石特性与破裂的关系

表示岩石屈服应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )变化与围岩应力 $\sigma_3$ 关系的变形曲线表明,对不同类型



的岩石有不同的性态，把岩石组成两类后做了实验：类型1是在破裂前可发生很大的永久应变，类型2是在后屈服区中才永久变形(图1.18)。正如所观察到的那样，类型1的岩石在高压区并未描述物质的强度，因此，Coalomb定律失效了。但是，因为几乎所有的油藏岩石都属类型2，对岩石的储层特性的破裂预测来说，Coalomb准则仍然是有效的。

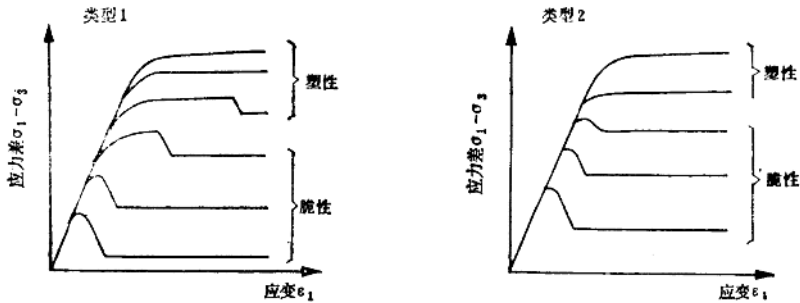


图 1.18 不同的围岩压力应变/应力曲线

### 1.2.3.1. 脆性-塑性状态的转变

正如已讨论过的那样，当围岩压力提高到很大时，一种岩石能从脆性状态转变到塑性状态，并达到永久变形而不破裂(图1.9)。从脆性状态转变到塑性状态不是突然的。一般说来可以观察到，类型2储层岩石中变形机理的变化是伴随着相应于颗粒的压碎，并沿着颗粒边界形成裂缝的碎裂流而产生的。在不同的状态下，最大应变是变化的，当处于脆性状态时，最大应变低于3%，而在塑性状态时，它超过5%。在过渡状态时，最大应变在3%—5%之间变化，岩石变形机理的测定是用检测岩样体积的差异来完成的。这些观察已显示出两种状态明显的差别，特别是低孔隙度的岩石情况。一种样品的体积增大相应于一种碎裂变形，而体积减小则表明为一种晶间的塑性流。在高孔隙度岩石情形时，主要问题是当碎裂变形时扩张现象可减小孔隙体积和改变结果。

### 1.2.3.2. 变形性质

为了在实验室里检验一种岩石，并把所得的结果用于矿场压裂动态，必须考虑很多因素，诸如以加载速率表示的时间、油藏温度、围岩压力和岩石类型。

脆性-塑性之间的关系应该主要与岩石类型相关，不同类型的岩石在类似的条件下将显示出不同的性态。

#### a. 加载速率

一般说来，应变速率减小将引起塑性的增加，然而应变速率本身就是岩石的变形机理、温度和围岩压力的一个函数。在各种情况下，实验室试验数据观察已表明，砂岩和致密的石灰岩石的长期强度变化不大。

#### b. 温度效应

Handin<sup>[10]</sup>曾详细地检验了温度的效应，他在实验室里在25℃—300℃的温度变化幅度下检验了岩石样品，在做了许多实验之后，得到的结论是：一般说来，温度的增加将伴随着屈服和极限强度的减少以及塑性的增加。温度效应在碳酸盐岩中略比在硅酸盐岩中敏感，温度对于石灰岩的效应示于(图1.19)。