

裂縫性油藏工程基础

fundamentals of fractured
reservoir engineering

上 册

BY

T.D. VAN GOLF-RACHT

新疆石油地质编辑部



裂缝性油藏工程基础

fundamentals of fractured
reservoir engineering

BY

T.D. VAN GOLF-RACHT

沈志成 仲 雍 张纪易 刘敬奎 译 仲 雍 校

(上册)

江苏工业学院图书馆
藏书章

新疆石油地质编辑部

内 容 提 要

本书是作者根据自己在欧洲和中东从事二十多年裂缝性油藏研究的丰富经验及其成果编写成的，比较全面系统地反映了近年来国外在裂缝性储层研究、油藏工程方法等方面的最新进展和成果，全书共分三个部分十二章。现分上下两册译出，上册主要论述与介绍了裂缝性储层的基础地质条件、裂缝的检测与评价、岩石物理性质及测井检测裂缝的方法等。内容充实，文字简明，对进行有关开发理论研究和矿场应用等方面均具有一定的参考使用价值。

本书可供广大地质工作者、油田地质科研人员及有关院校师生参考。

裂缝性油藏工程基础

沈志成 仲 雍 张纪易 刘敬奎 译 仲 雍 校

※

新疆石油地质编辑部出版

(克拉玛依长征新村研究中心大院)

勘探开发研究院印刷

※

开本 787 / 1092 1 / 16 印张 13¹/₈ 字数 300千字 印数 2000册

1985年 4 月第一版 1985年 4 月第一次印刷

工本费 2.00元

前 言

裂缝性油藏的历史或许已与石油本身一样久远了。1952年3月间在关于裂缝性油藏的洛杉矶专门小组讨论会上，雷沃逊(Levorsen)曾提到，“裂缝孔隙度”这一概念在1861年卓克发现之后仅仅两年即已由地质学家E·B·安德鲁斯引用，他曾写道：如果沿背斜轴部有为数众多的裂缝，则它是油气集聚的主要原因，而且已观察到在裂缝数量与产出石油量间有比例关系的规律。但一直到20世纪50年代初期，在西得克萨斯于斯普拉伯雷构造带上有了重要发现，并在中东发现了一些巨大油田时，对这类油田的兴起才开始增长起来。到50年代后期，尤其是在近二十年间，在诸如地质学、储层描述、向井的流动、油藏机理等不同领域中已有各种各样的概念发展起来。但在文献中发表的研究报告及论文只是对有限地区提出了一些单独的问题，而未将其与裂缝性储层的整体概念相联系。因此，为将已发表的既有资料与作者本人对天然裂缝性油藏的看法综合起来，试图写出一本自始至终、博涉广泛的专著，使读者可从本书找到整理观测资料用以评价裂缝所需的必要手段，考察向井流动的特性，并在某一油田的开发全过程中通过其特定的产出机理对油田动态进行分析。

建立起决定裂缝性储层中各种动力学现象的一些新的原理与法则之后，工程师与地质学家们就无须再在解决这类特殊油田的问题时局限于使用常规的油藏研究方法。对于压裂井(人工措施井)作井下不稳态流分析时有效可行的方法，在天然裂缝性储层中就必须避免使用，因为流动条件已全然不同。当裂缝性油藏的生产主要是重力—毛管力控制并包含有与吸入及排泄过程等蕴涵关系时，以简单的常规驱动机理(水驱或溶解气驱)作为基本的驱动机制也是不能接受的。为能更好地了解各种不同的看法，本书内容中也同时提出了现代油藏分析的一些要点，故而

第一部分致力于储层描述；

第二部分是向井流动问题；

第三部分则是关于裂缝性储层中的流动机理问题。

有关裂缝的生成、裂缝的检测及对各类信息作适当处理以描述裂缝的方法等在第一部份详细讨论。

对裂缝中的流动以及作为径向对称流基础的基质—裂缝系统中同时流动问题在第二部分中详细论述。

本书第三部分在研究气—油—水三相流的单一方法中提出了一些新的概念和复杂流动机理问题。在三相流动情况下，重力与毛管力的作用表明在裂缝性油藏中水驱或溶解气驱通常所起的作用已完全改变。

本书内容材料是作者本人最近20年来在欧洲及中东对裂缝性油藏的研究成果。在各种研究中已取得的成果以及不断地力求使理论与现场动态一致起来而在各种论文中提出的成果是研究裂缝性油藏特定生产机理的基础。此外，本书也引用了对各种各样的工程项目进行考察时与专家们讨论所改进的一些概念。作者很乐于提到本书第三部分的

基础乃是在伦敦与M·马斯凯特的一次会晤(1963)的结果。当时两人都在从事对西西里岛拉古扎(Rugusa)油田未来动态的评价工作。马斯凯特关于基质—裂缝中流动机理以及流量敏感性与水面推进关系的概念是第九章和第十章研究内容的基本方法。再后,于最近的10年里,作者曾有机会在一系列会议上就本书各个不同部分的天然裂缝性油藏的基本概念进行宣讲与答辩。本书的部分内容是作者在米拉诺大学地质研究所(1968—1973)授课时提出的,另一部分则是在特伦德海姆大学石油研究所(1973—1980)授课时提出的。其余部分则曾在土伦矿业学院(1972)对该校学生们并对布宜诺斯艾利斯YPF的工程师们以及对里奥热内卢Petrobras及斯塔凡吉尔Statoil等的石油工程师们讲授过。

在此期间,经现场资料与油藏特性理论预测进行比较所得的结果是令人鼓舞的,同时也使作者更加确信一部论述裂缝性油藏基础性问题的专著将会开辟出一个在石油科学与流体力学方面的崭新领域。从这一目的出发,作者将论述裂缝性油藏的基础性科研成果写成此书,供在大学里对学生授课使用并供在油田现场作业的有关地质学家及工程师们使用。

使用本书所讨论的新概念就有可能避免因不是使用特定的裂缝性储层方法而是使用常规油藏方法所发生的误差,例如将人工压裂过程的方法用于天然裂缝性储层特性评价。最后,作者也愿意提到的是,通过本书在裂缝性储层研究方面所已建立的科学基础,希望它会鼓励人们在这一科研领域中作出更多贡献。

借此机会,作者仅向在本书出版过程中曾经予帮助的所有协作者们致谢。

西奥道尔·冯·高尔—拉克特
(博士、教授)

1981年5月·于巴黎

储层描述

在当前使用的油藏工程语言中，对“储层描述”理解为是通过各种不同过程外延至整个储层范围的和储层岩石与流体有关的各种局部基本信息的总体。

由于裂隙储层与普通储层不同，故其描述就不得不涉及于其特有的性质。在这些裂隙特有的性质中，有关裂隙作用过程与地质事件之间的相互关系方面在第一章中作了广泛的讨论。裂隙作用的条件关系到岩石机械性质及应力类型，对高度裂隙化的层带评价很有用处，而且通过使用数学模型进行储层模拟也可以改善这种描述。

裂隙的检测、评价与信息处理在裂隙储层描述过程中是另一个不可或缺的步骤。在本书第二章中，对与裂隙密度和裂隙强度有关的所有参数，以及资料处理各种方法等都作了详细的讨论。继第三章内给出了若干油田实例之后，第四章主要研讨的课题仍然是在对各种物理性质进行定量性评价方面。在该章中，对裂隙孔隙度与渗透率及其相互关系、等效相关的理想化几何模型和这些参数之间的关系，都作了非常详尽细致的讨论。从双重孔隙度储层岩石着眼重新考查了诸如毛细管压力与相对渗透率等一些特殊的岩石性质。

为完善由直接测量岩石样品所取得的成果，第五章对以各种测井成果间接测定的裂隙作用作了考察。

在本书这五章内包括的内容中，定义了各种基本参数，并指出了对之进行评价的一些方法，可供在裂隙储层的描述中进一步使用。

(101)	.....	1.1
(102)	.....	1.2
(111)	.....	1.3
(121)	.....	1.4
(131)	.....	1.5
(141)	.....	1.6
(151)	.....	1.7
(161)	.....	1.8
(171)	.....	1.9
(181)	.....	1.10
(182)	.....	1.11
(183)	.....	1.12
(184)	.....	1.13
(185)	.....	1.14
(186)	.....	1.15
(187)	.....	1.16
(188)	.....	1.17
(189)	.....	1.18
(190)	.....	1.19
(191)	.....	1.20
(192)	.....	1.21
(193)	.....	1.22
(194)	.....	1.23
(195)	.....	1.24
(196)	.....	1.25
(197)	.....	1.26
(198)	.....	1.27
(199)	.....	1.28
(200)	.....	1.29

目 录

储层描述

第一章 地质基础	张纪易译	(1)
1.1. 导言		(1)
1.2. 裂缝作用的地质条件		(3)
1.3. 模拟裂缝作用的地质模式		(15)
1.4. 缝合线作用和节理的影响		(18)
1.5. 裂缝作用的定量评价		(26)
第二章 裂缝的检测与评价	仲 雍译	(36)
2.1. 裂缝的分类及其定义		(36)
2.2. 裂缝的基本参数		(38)
2.3. 断裂作用的直接评价		(48)
2.4. 数据的处理		(61)
2.5. 断裂作用研究的用途		(70)
第三章 裂缝油藏实例*	刘敬奎译	(82)
3.1. 裂缝性碳酸盐岩油藏		(82)
3.2. 裂缝性粉砂岩、砂岩油藏		(96)
3.3. 裂缝性页岩油藏		(99)
3.4. 裂缝性“基岩”油藏		(102)
第四章 岩石的物理性质	沈志成译	(108)
4.1. 引言		(108)
4.2. 孔隙度		(108)
4.3. 渗透率		(114)
4.4. 关于基本参数 (K , Φ , S_{wi}) 的讨论		(129)
4.5. 裂缝性岩石的压缩性		(144)
4.6. 裂缝性储层的相对渗透率		(151)
4.7. 毛细管压力曲线		(168)
第五章 测井与裂缝评价	沈志成译	(183)
5.1. 引言		(183)
5.2. 岩性测井		(183)
5.3. 井径测井		(184)
5.4. 井温测井		(185)
5.5. 电阻率测井		(185)
5.6. 地层倾角测井		(190)
5.7. 孔隙度测井		(193)
5.8. 井下电视		(201)
5.9. 讨论		(204)
5.10. 定量解释		(206)

第一章 地质基础

裂缝储层的地质研究要求对裂缝作用过程及其当时发生的地质事件之间的相互关系进行研究，这包括正确的裂缝形成理论的推敲、完善以及对裂缝储层中裂缝的性状的事实求是的分析判断。裂缝作用绝大多数都有其构造成因，在褶皱的地层中发育或者是和断裂活动或节理产状有关。有时，裂缝也由成岩和石化作用的速度差异造成。

一般说来，近来对裂缝作用过程的了解已从经验的进展到较为科学的探讨，从而有利于储层的描述和储层的模拟。

然而必须记住，裂缝作用的评价较之常规储层中孔隙性和渗透性的评价要复杂得多。事实上，裂缝作用取决于岩石材料的机械应力型式和岩石性质。因此，裂缝作用的结果诸如裂缝张开度、大小、分布、定向性等，都和应力及岩石类型（脆性或塑性）、构造条件、深度（覆盖层压力）、岩性、地层厚度等有关。

在本章中，考察了裂缝作用的地质条件，包括岩石力学和地质事件（断层作用、褶皱作用等）的关系以及岩石特性及其变化和裂缝作用的关系。为了建立一个真实有效的裂缝性储层地质模式，详细考察了各种地质事件和裂缝作用的发展。所得结果对进一步开展研究提供了许多可能性。

1·1·导言

在对裂缝现象进行详细分析以前，有必要规定一些术语的定义并对一些基本陈述作详细的说明。

1·1·1· 裂缝是什么？

根据不同的观点，可得出各种不同的定义，但从严格的地质力学观点来说，裂缝就是一种丧失结合力的面。因为破裂是一种导致一定物质丧失结合力的作用，所以裂缝是破裂的结果。一般来说，当一条裂缝相对地发生了位移，就可定义为一条断层；当裂缝没有产生明显的位移时，可定义为节理（图1.1）。

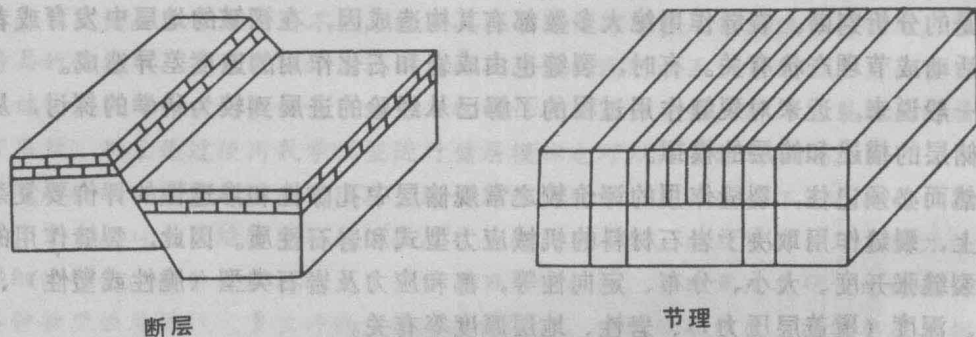
在更为普遍的情况下，也可把裂缝定义为：岩石沿裂隙、罅隙、节理或任何一种面破裂成碎块而引起的不连续性，而且沿着它们没有平行不连续面的位移。

基本上，无论把裂缝认为是节理抑或断层，取决于调查研究的尺度规模，但一般情况下，人们所指的裂缝相当于节理。

1·1·2· 裂缝的成因

将裂缝定义为由于结合力丧失，物质沿一个面分开成不连续的部分，对地壳中的沉积岩来说，要推断这一过程是较为复杂的²。这是由于在储层裂缝作用的发育中，地质环境起着至关重要的作用。

在一个储层的a、b、c三个层中(图1.2),岩层b可能在低于a和c层的应力下就丧失结合力。因此,当b层已产生裂缝时,a层和c层可能在进一步经受应力载荷后仍不产生裂缝。在这种情况下,虽然单看b层是裂缝性的,而整个沉积剖面的大部分习性仍是非裂缝性的。



1.1—断层和节理的示意图



1.2—非裂缝性层a和c,层间的裂缝性层b

裂缝成因及其与构造运动事件的关系,尤其是关于裂缝强度和它们对储层捕集油气的重要性在文献中有过很多争论。

史蒂恩斯(Stearns)和弗雷德曼²(Friedman)识别了两种裂缝,一种和褶皱作用有亲缘关系,另一种和局部构造(地区性裂缝)有关。

霍奇森³(Hodgson)根据在亚里桑那和犹大州进行的节理研究,否定了节理和褶皱之间有成因联系的理论。他认为节理是在沉积成岩作用早期因半日地潮(Semidiurnal earth tides)而产生疲劳的结果所形成的。

普赖斯⁴提到即使在若干较新的沉积物中也见有节理,认为早期形成的节理难以经过沉积后的压实和成岩作用而保存下来。

库克 (Cook) 从对谢内 (Sidny) 盆地沉积物进行的研究中得出的结论是早期形成的节理可以在较晚的地质阶段, 如埋藏和固结作用中保存下来。

哈里斯⁶在分析了裂缝密度和岩层厚度间的关系后, 支持了两者间有直接关系的看法。

在现场观察后, 对于构造和裂缝作用的关系, 必然可以总结为把裂缝划分为以下两种不同的类别¹:

a · 与构造有关的裂缝, 是在观察场所表现出定向性和规律性一致的那些裂缝。这种与构造的关系所指的是局部褶皱前的特征。

b · 与构造无关的裂缝, 包括不规则的或弯曲的不连续碎裂, 其方向不显示一致性。这种裂缝和各种表层的表面性质 (如滑坡、重力崩塌层等) 有关。

1.2. 裂缝作用的地质条件

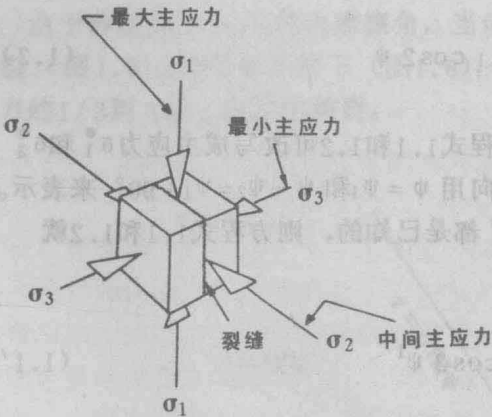
根据裂缝性储层事例历史²的调查, 裂缝性储层最可能见于发生过有利的构造事件的低孔隙度脆性储集岩中。这种情况下, 产生的裂缝是大的, 并且广泛延伸, 因此称之为巨裂缝。如果岩石脆性较小, 且有高的粒间孔隙度, 则裂缝通常延伸程度有限而且张角度也相对较小, 因此称为微裂缝或裂隙。

裂缝是作为降低岩石结合力的应力结果而产生的, 它可归因于各种地质事件, 诸如:

- a · 产生褶皱作用和断层作用的地壳变动;
- b · 覆盖层的深度侵蚀, 它将在岩石的薄弱面上造成一个差异压力;
- c · 当岩石属于页岩或泥质砂岩时, 由于水份丧失导致岩石体积收缩;
- d · 火成岩在温度变化的情况下引起岩石体积收缩。

1.2.1. 岩石力学和裂缝作用的关系

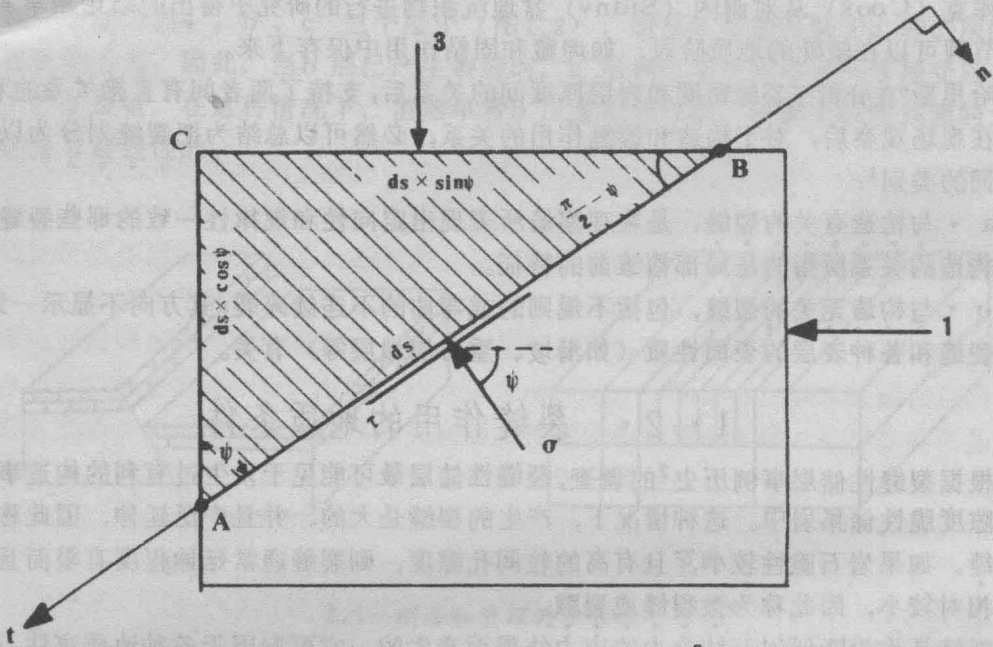
1.2.1.1. 基本方程式



1.3—应力元和将首先形成裂缝的面

在储层条件下的一个单位岩石体积是处在由覆盖层压力 (地静压力)、围压、液体 (孔隙) 压力外加构造应力引起的承压状态中。采用通常以三个垂直方向来表示力的方法并规定三条相互正交的矢量为其主应力, 分力 $\bar{\sigma}_1$ 、 $\bar{\sigma}_2$ 、 $\bar{\sigma}_3$ 分别是最大的、中等的和最低的应力 (图 1.3)。这三个应力中, 常以垂向应力 $\bar{\sigma}_1$ 再现上覆岩层引起的覆盖层压力, 而水平应力 $\bar{\sigma}_2$ 和 $\bar{\sigma}_3$ 可作为挤压力或拉张力。

法向应力 σ 和通过一个平面并垂直于 $\bar{\sigma}_1$ 和 $\bar{\sigma}_3$ 的剪切应力 τ 的关系, 可用一个在最大主应力 $\bar{\sigma}_1$ 的方向和 AB 面之间的 ψ 角的函数来表示 (图 1.4)。



1.4— σ 和 τ 在 ψ 角的一个面上 (King Hubert⁷ 据AAPG)

解答力在n和t方向上的平衡问题

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

导致在n方向上

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

和在t方向上

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

引用摩尔图解 (图1.5), 由于 ψ 角的改变, 方程式1.1和1.2可改写成主应力 σ_1^* 和 σ_3^* (作用在主要平面上) 的一个函数, 此时, 方向用 $\psi = \psi_1$ 和 $\psi = \psi_2 = \psi_1 + 90^\circ$ 来表示。

假如主要应力方向 ψ_1 、 ψ^1 及主应力 σ_1^* 和 σ_3^* 都是已知的, 则方程式1.1和1.2就变为

$$\sigma = \frac{\sigma_1^* + \sigma_3^*}{2} + \frac{\sigma_1^* - \sigma_3^*}{2} \cos 2\psi^1 \quad (1.1')$$

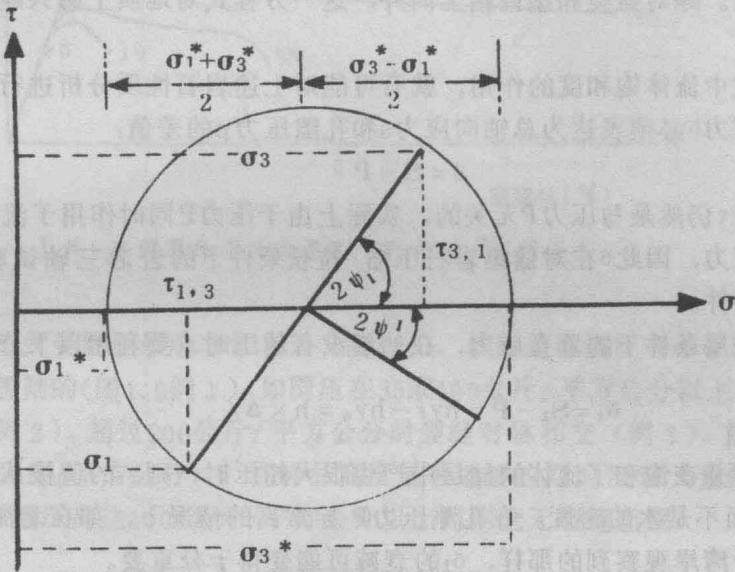
$$\tau = \frac{\sigma_1^* - \sigma_3^*}{2} \sin 2\psi^1 \quad (1.2')$$

式中
$$\psi = \psi_1 + \psi^1 \tag{1.3}$$

为了确定 τ 和 σ 的关系，必须参考通过以下方程式表示剪切应力和法向应力成正比的实验结果：

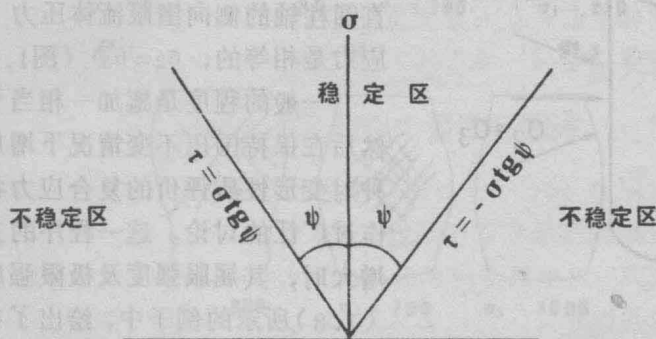
$$\frac{\tau}{\sigma} = t_g \psi = t_g (\psi_1 + 45^\circ) \tag{1.4}$$

其中 ψ 是物体的内摩擦角，用摩尔包络线计算，断裂将发生在一个成 $45^\circ + \psi/2$ 角的平面上。由于砂层有一个 $\psi = 30^\circ$ 的内摩擦角，正断层就有一个 60° 的倾斜，各种地质著作都讨论过这一观测。



1.5—在方向为 ψ 的平面上，法向应力 σ 和剪切应力 τ 的摩尔圆 (King Hubert, 据AAPG)

由于砂层有一个 30° 的内摩擦角，当 $\sigma_1 = 3\sigma_3$ 时，沿与最小主应力呈 45° 角的面将发生破裂 (图1.6)。在类似条件下 (图1.6)，如果垂直应力是一常数，水平应力之值为垂直应力的1/3到3倍，就发生破裂。



1.6—砂层中裂缝面上 σ, τ, ψ 的关系

以上分析可进一步引伸至固结岩石中，一般来说，通过对岩样的三轴加压试验的实验即可求出这一预测结果。

由于采用最大应力 σ_1^* 和最小应力 σ_3^* ，可观察到在 σ_1^* 为高值时，差不多所有岩石都发生塑性变形，且其摩尔包络线几乎变成平行于 σ 轴。在应力较低时，大多数岩石因产生脆性裂缝而破裂。支配这种状态的基本方程式是：

$$\tau = \pm (\tau_0 + \sigma \operatorname{tg} \psi) \quad (1.5)$$

其中 τ_0 是法向应力为零时的剪切应力； ψ 是摩擦角，它变化于 $20^\circ - 50^\circ$ 之间，但最常见的是 30° 左右。除对盐类和塑性粘土而外，这一方程式对地质上感兴趣的各种岩石一般是适用的。

考虑到孔隙中流体饱和度的作用，就有可能对上述岩石性质分析进行修改。在这种情况下，有效应力 σ 必须表达为总轴向应力 s 和孔隙压力 p 的差值：

$$\sigma = S - P \quad (1.6)$$

此时，剪切应力 τ 仍然是与压力 P 无关的。实际上由于压力 P 同时作用于流体和固体上而并不产生剪切应力，因此 σ 在对储集岩石压缩/拉长条件下的岩芯三轴试验中提供了令人满意的模拟条件。

为了估计储层条件下的垂直应力，在储层没有超压时，要利用以下公式表示 σ_z ：

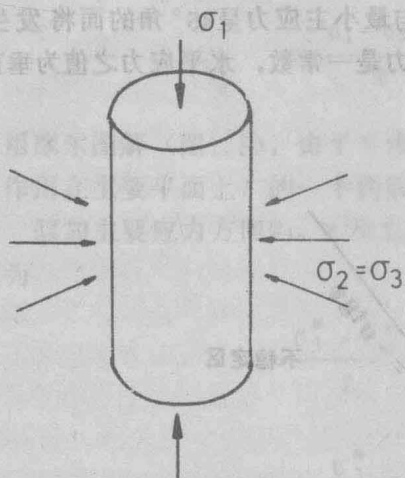
$$\sigma_z = S_z - P = h \gamma_r - h \gamma_w = h \times \Delta \gamma \quad (1.7)$$

假如地层已断开并在饱和了流体的储层中产生很大超压时，则 γ_w 的值被认为是局部的孔隙压力梯度 G_w 而不是水的密度。在孔隙压力 P 异常高的情况下，如在北海（侏罗纪地层）以及墨西哥湾观察到的那样， σ_1 的衰减可能变得十分重要。

1.2.1.2. 岩石材料试验

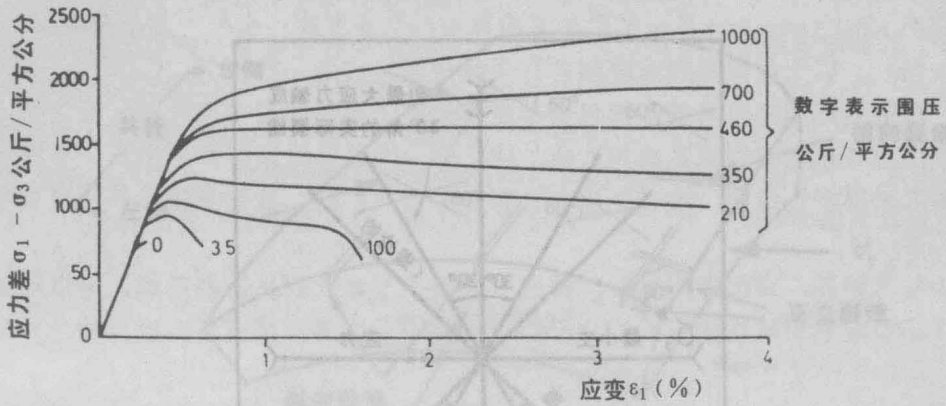
最常用的岩石裂缝试验程序是通常的三轴试验，其实验是使一个圆柱样品经受一个沿着圆柱轴作用的轴向力（最大主应力 σ_1 ）和一个直接垂直圆柱轴的侧向围限流体压力（因此，两个最小应力是相等的， $\sigma_2 = \sigma_3$ ）（图1.7）。

一般的程序是施加一相当于围压的静水压力，然后在保持围压不变情况下增加轴向的载荷。这种对变形性质评价的复合应力状态在文献中曾经作过广泛的讨论。这一程序的主要结果是当围压增大时，其屈服强度及极限强度随之增大。在图（1.8）所示的例子中，绘出了在不同的围压下应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 对于轴向应变 ϵ 的关系。



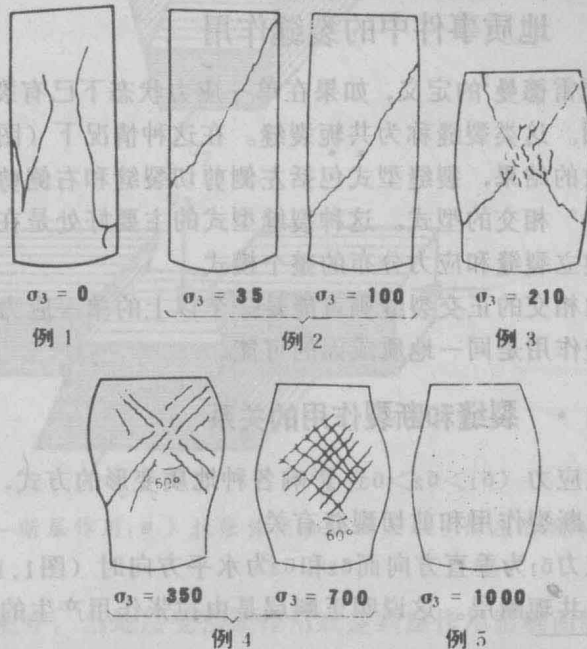
1.7—圆柱岩样的三轴试验（轴向压缩力 σ_1 和围限流体压力 $\sigma_2 = \sigma_3$ ）

该图说明, $\sigma_1 - \sigma_3$ 与 ε_1 关系曲线的形态是受围压影响的。在低围压时, 发生一条脆性裂缝并在破裂出现时有一个明显强度减低, 但当围压很高时, 则将是出现大的变形而不出现任何强度减低。



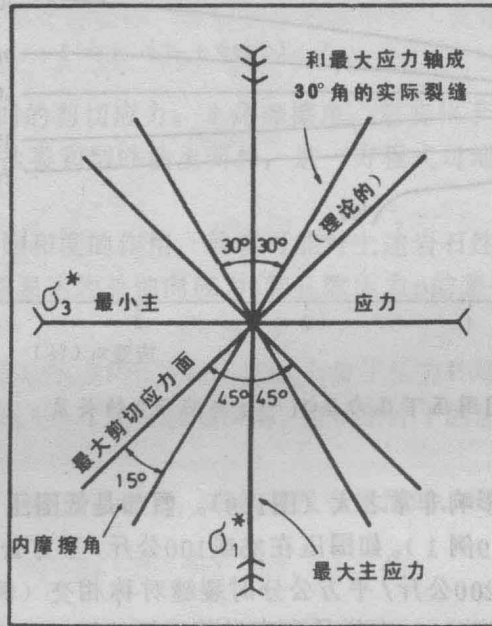
1.8—不同围压 σ_3 下压力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ 与应变 ε 的关系

裂缝的型式受围压影响非常之大 (图1.9)。假如是低围压 (小于35公斤/平方公分), 裂缝都是不规则的 (图1.9例1)。如围压在35或100公斤/平方公分以上, 三轴试验结果为网状裂缝 (例2)。超过200公斤/平方公分时裂缝对称相交 (例3)。围压进一步增加时 (300—700公斤/平方公分), 在样品高度显著缩短的同时出现大量的对称共轭裂缝 (例4)。在围压高达1000公斤/平方公分以上时则全无裂缝出现。



1.9—各种围压 σ_3 (公斤/平方公分) 时三轴试验结果

图1.10是对砂岩提供的一个关于应力方向、剪切应力和裂缝之间相互关系的示意图。垂直的和水平的两个主要方向表示最大主应力 (σ_1) 轴和最小主应力 (σ_3) 轴。最大剪切应力面和最大主应力轴夹角为 45° ，最大的和实际的剪切应力 (30°) 之间的角度 (15°) 代表内摩擦角。



1.10—主应力和剪切应力示意图

1·2·2· 地质事件中的裂缝作用

按斯蒂恩斯和弗雷德曼²的定义，如果在单一应力状态下已有裂缝发育时，则它们可能有一个共同的成因。这类裂缝称为共轭裂缝。在这种情况下（图1.11），由于最大主应力和横向裂缝一致的结果，裂缝型式包括左侧剪切裂缝和右侧剪切裂缝。共轭剪切裂缝形成的裂缝面呈 60° 相交的型式。这种裂缝型式的主要好处是在只知道裂缝体系的一组方向时，就足以建立裂缝和应力分布的整个模式。

相反，成 90° 角相交的正交裂缝则可能是一个以上的单一应力状态所产生的，但也不能排除这两组裂缝作用是同一地质成因的可能。

1·2·2·1· 裂缝和断裂作用的关系

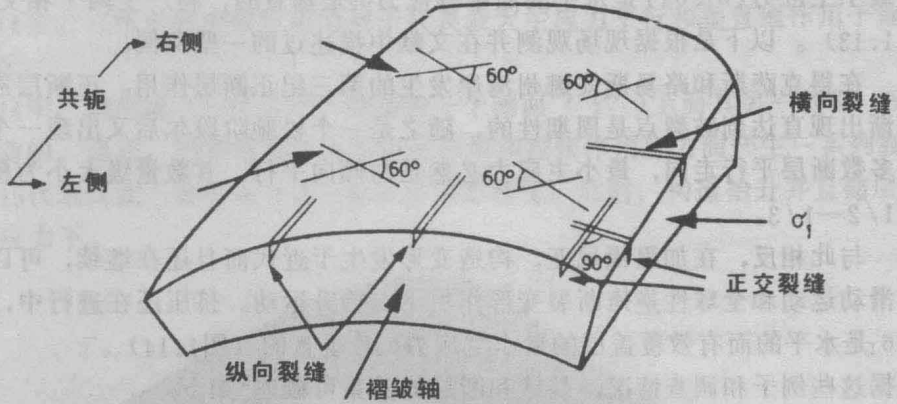
为了了解三个主应力 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) 影响各种地质变形的的方式，列举以下例子，这些例子中，应力分布与断裂作用和剪切裂缝有关。

例 1：假如主应力 σ_1 为垂直方向而 σ_2 和 σ_3 为水平方向时（图1.12），正断层作用将产生两条成 60° 交角的共轭断层。这说明正断层是由拉张作用产生的。因此，根据前面的

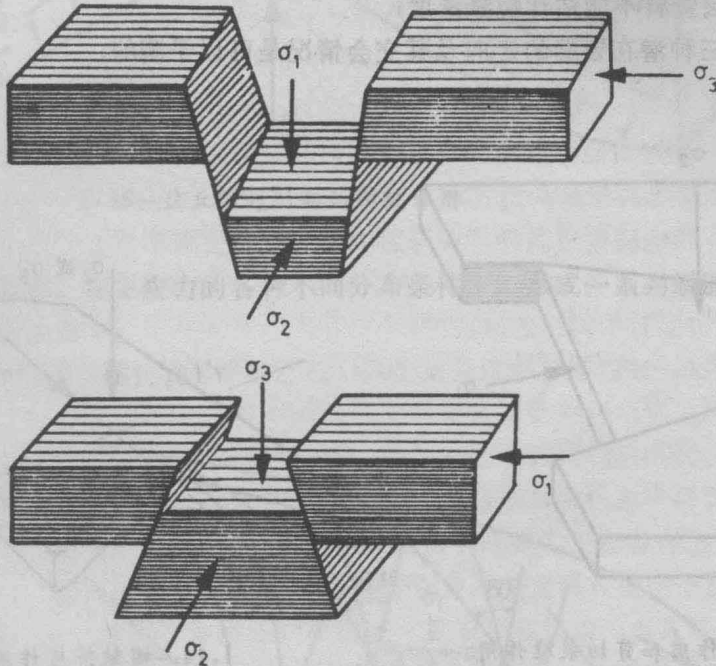
• 原文为 30° 误，应从正改为 45° —译注

讨论，最大主应力 σ_1 几乎垂直并等于覆盖层压应力，而其最小主应力 σ_3 则是水平的。这样，在裂缝作用期间 σ_1 和 σ_3 的关系有如下的变化范围：

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



1.11—共轭裂缝和正交裂缝与褶皱轴的关系



1.12—断层作用：a) 拉张作用和正断层 b) 挤压作用和逆断层

例 2：在地质历史中，当地层受褶皱作用或逆断层作用影响而缩短时，则最小主应力 σ_3 应是垂直的而最大主应力 σ_1 应是水平的（图1.12）。因此，在这种情况下 σ_1 的变化

范围是：平水呈... 式... 小... 其... 而... 式... 型... 呈... 于... 平... 且... 式... 大... 量... 岩... 材...

$$\sigma_1 \cong 2 \sigma_3 + 3 \sigma_3$$

其结果如图1.12b 中所示，逆断层作用是由于 σ_1 和覆盖层 σ_3 挤压的结果。

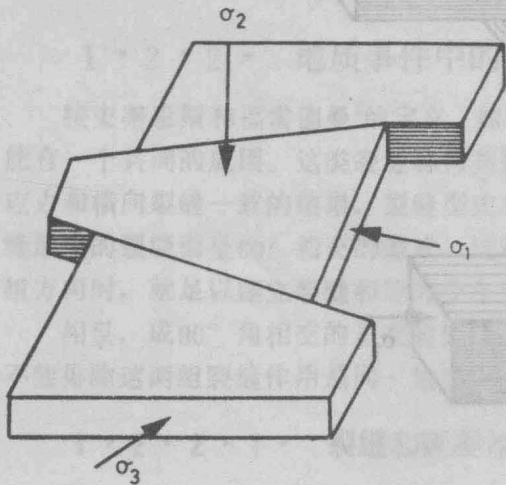
例3：如最大的和最小主应力（ σ_1 、 σ_3 ）都取水平方向而 σ_2 应力是垂直的，则将出现不同的情况。如图1.13，随挤压作用之后出现剪切裂缝作用。在平推断层作用带中，最大和最小主应力（ σ_1 、 σ_3 ）是水平的而中等应力 σ_2 是垂直的，将产生两个相交 60° 的裂缝面（图1.13）。以下是根据现场观测并在文献中描述过的一些实例。

1. 在得克萨斯和路易斯安那州湾岸发生的第三纪正断层作用。正断层应力系统从应力逐渐出现直达到破裂点是周期性的，随之是一个松弛阶段尔后又出现一个挤压阶段。由于大多数断层平行走向，最小主应力必然是与倾向平行，其数量级大小为覆盖层有效压力的 $1/2-1/3$ 。

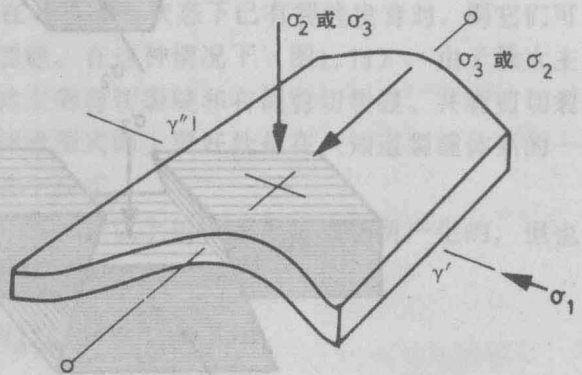
2. 与此相反，在加利福尼亚，构造变形发生于近代而且还在继续，可以观察到沿断层的滑动运动和全球性逆掩断裂变形作用下的抬升运动。挤压还在进行中，并且最大主应力 σ_1 是水平的而有效覆盖层的最小主应力 σ_3 是垂直的（图1.14）。

根据这些例子和调查情况，裂缝和断层的关系可概述¹如下：

- a. 与断层有关的裂缝有共同的应力成因；
- b. 假如断层方向已知，就可预测裂缝的方向（走向和倾向），反之，也可由裂缝的取向确定断层的走向和倾向；
- c. 根据断层资料不能估计裂缝密度；
- d. 所有这三种潜在裂缝的走向及其交会情况是可以预测的；



1.13—挤压作用和剪切裂缝作用



1.14—褶皱挤压作用

- e. 对于正断层需要了解两组剪切裂缝的相对发育情况；
 - f. 假如裂缝共轭于断层，则在两个断块相反方向所钻的井可能钻遇大量裂缝。
- 如果除断层作用以外再出现褶皱事件时，对裂缝和断层作用之间的关系了解就变