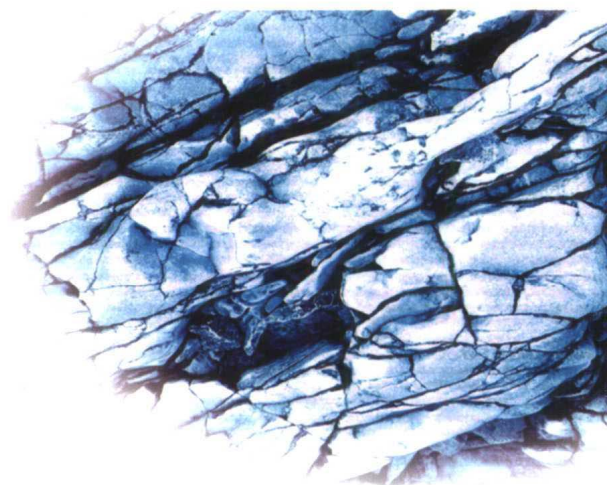


油气田

储层裂缝研究

刘建中 孙庆友 徐国明 陈凤 编著



石油工业出版社

油气田储层裂缝研究

刘建中 孙庆友 徐国明 陈 凤 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了研究油田裂缝的理论、方法和研究成果。裂缝的研究水平在很大程度上影响油田的开发水平。从布井、注水、压裂、采油、井网调整,无不需裂缝资料。近年来,在油田地层精细描述项目中,参考裂缝资料。把裂缝参数作为油田地层精细描述的层系指数已成为一种趋势。我们从应力场分析研究裂缝、岩石观察研究裂缝、岩石薄片观察研究裂缝、井壁裂缝延拓研究裂缝、地面露头认识研究裂缝、人工裂缝监测研究裂缝,多视角地介绍了油田裂缝研究的思路、方法;对裂缝研究成果在不同环境下的应用也做了介绍。相信会对油田裂缝研究有所启示。

由于现今看到的很多裂缝是在古应力场作用下形成的,本书介绍了古应力场恢复的一些理论、方法及由古应力场恢复方法研究油田裂缝的实例。

图书在版编目(CIP)数据

油气田储层裂缝研究 / 刘建中等编著.

北京:石油工业出版社,2007.10

ISBN 978-7-5021-6252-8

I. 油

II. 刘

III. 油气田-裂缝储集层-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 140753 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.25

字数: 306 千字 印数: 1—1500 册

定价: 38.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

裂缝研究在油田开发生产中有着举足轻重的作用。国内开展裂缝研究已有数十年的历史，已形成了一整套油田裂缝分类、油田裂缝研究的理论和方法。作者结合自己对油田裂缝的研究和其自身的经历，在此书中介绍了与油田裂缝有关的一些方法和理论。这些方法有的已在油田广泛使用，有的则刚刚提出；使用这些方法，不仅可以增强油田裂缝研究的能力，而且还能促进油田的开发与生产水平，并能提高油田生产的效益。

本书从断裂力学角度介绍了裂缝扩展机制，以及在不同应力条件下，应力出现的裂缝扩展及方向，以研究断层附近裂缝分布及特征。

介绍的有关研究油田裂缝的方法，特别是断块油田裂缝及人工裂缝的理论研究方法，这些在油田都有所应用。微地震人工裂缝监测方法，在油田应用广泛，国内外也均有应用，某些监测结果也得到了相当可靠的佐证，其是一个现实的、具有可行性的方法。电位法是一个理论严谨的方法，仅适用于浅层油田，在较大深度、压裂裂缝形成的电场强度远小于井间自然电场形成的电位而难以识别，精细分析裂缝形态也有相当多的不确定性。地倾斜方法是一个与目前最难确定的地层介质和塑性程度不均匀相联系的测量方法；一些介质在地下环境下，其弹性参数及其分布已很难精确地确定，塑性参数及其分布则更难确定。裂缝形态越复杂，测量结果分析越强烈依赖这些介质参数，特别是塑性参数及其分布，影响了监测结果的可用性，是一个直至目前为止还尚不成熟的方法。

作 者

2008 年 1 月

目 录

第一章 裂缝分类及成因	(1)
第一节 构造成因裂缝.....	(1)
第二节 非构造成因裂缝	(28)
第三节 人工压裂裂缝	(30)
第四节 裂缝的表示方法	(32)
第二章 天然裂缝的研究方法	(34)
第一节 岩心观测裂缝研究	(34)
第二节 野外地质考察及地面露头观测	(36)
第三节 用岩心观测方法研究油田裂缝	(50)
第四节 裂缝孔隙度、渗透率	(59)
第五节 井壁裂缝的三维延拓	(62)
第六节 应力场模拟延拓理论	(66)
第三章 微地震油田裂缝监测理论	(67)
第一节 微地震监测原理	(67)
第二节 微地震源定位	(68)
第三节 地震波传播理论	(73)
第四节 软件功能	(77)
第五节 监测误差分析	(78)
第六节 微地震人工裂缝监测方法	(82)
第四章 微地震法人工裂缝监测	(84)
第一节 人工裂缝监测及布井	(84)
第二节 人工裂缝转向及延伸监测	(86)
第三节 静态监测及油田原生裂缝	(91)
第四节 注水前缘监测及裂缝分析	(98)
第五节 水平井压裂监测.....	(102)
第六节 直立钻孔人工压裂形成多裂缝的可能性.....	(107)
第五章 电位法人工裂缝监测	(113)
第一节 稳定电场的电位分布.....	(113)
第二节 压裂后的电位分布.....	(114)
第三节 电位法测试技术.....	(119)
第四节 电位法实际测试结果.....	(121)
第五节 测试可靠性的结论.....	(124)
第六节 结束语.....	(127)
第六章 地倾斜法人工裂缝监测	(128)
第一节 地倾斜法监测人工裂缝理论.....	(128)

第二节	实际水准测试·····	(129)
第三节	用微地震监测方法确定裂缝方位·····	(130)
第四节	用地倾斜仪测定人工裂缝方向·····	(133)
第五节	裂缝在开发过程中的变化·····	(133)
第七章	油田应力场与油层裂缝的制约关系·····	(135)
第一节	古应力场与油藏形成·····	(135)
第二节	古应力场与油气勘探·····	(138)
第三节	应力值测试·····	(142)
第四节	井壁崩落应力方向测试·····	(146)
第五节	古应力场测试·····	(149)
第六节	残余应力测试·····	(154)
第七节	应力场与油田开发·····	(162)
第八章	应力场与构造裂缝·····	(173)
第一节	三维应力场数值模拟·····	(173)
第二节	应力场模拟方法·····	(173)
第三节	由应力场模拟研究裂缝·····	(174)
第四节	有限元应力场模拟结果及裂缝分析·····	(177)
第五节	古应力场恢复及不同地质时期裂缝研究·····	(178)

第一章 裂缝分类及成因

地下裂缝有多种成因，不只裂缝产状、分布和形态复杂，而且尺度也不同。按裂缝成因，可以把裂缝分为构造缝和非构造缝。裂缝又可以分为大裂缝，中、小裂缝，微裂缝；裂隙也是裂缝的一类，除了尺度小外，连通性通常较差，以非构造成因为主。

裂缝常常成群、成带分布。不同年代的地层，不同的岩石结构、岩石性质，裂缝密度也不同。裂缝走向、倾角则经常与地质年代相关，油田布井经常参考裂缝走向。因此，按地质年代划分裂缝也是一种经常使用的方法。裂缝密度分布是油田裂缝研究的主要目的，有些油田，找到了裂缝就找到了油，裂缝高密度区是最好的油井井位。有些油田作业则需要避开裂缝。不同地质时代形成的裂缝分布在同一地层中，使地下裂缝互相切割，呈网格状分布，裂缝密度分布是多期裂缝叠加的结果。

据力学性质，裂缝分为张性缝、张剪性缝、剪切缝和压剪性缝。张性缝是裂缝两盘间仅存在沿裂缝面法向拉张变形的裂缝；张剪性缝是裂缝两盘沿裂缝面法向存在拉张变形，且沿裂缝面切向存在滑动变形的裂缝；剪切缝是裂缝两盘仅存在沿裂缝面切向滑动变形的裂缝；压剪性缝是裂缝两盘沿裂缝面法向存在压缩变形，且沿裂缝面切向存在滑动变形的裂缝。

据形态类型，裂缝分为开启缝、充填缝和闭合缝。

以裂缝宽度可以把裂缝分为：大裂缝（宽度 $\geq 0.15\text{mm}$ ）、小裂缝（宽度 $0.1 \sim 0.15\text{mm}$ ）、微裂缝（宽度 $< 0.1\text{mm}$ ）。

裂缝还可以按时间分类，可以按裂缝生成的地质年代划分成不同的组、群，也可以按不同的地质构造活动期划分成不同的组、群，还可以按生油前、后划分成不同的组、群。

根据特殊需求，还可以按切割关系分组、分群，把切割裂缝和被切割裂缝分开。一般来说，被切割的裂缝是较老的裂缝。

第一节 构造成因裂缝

由构造运动、应力作用形成的裂缝为构造缝。不同地质时期存在着不同类型的构造运动及不同形式的应力作用，与之配套的裂缝形态和走向也各有不同。多期构造裂缝分布在一个地层，彼此之间相交、切割、改造，形成地下裂缝网络的骨架（图 1-1）。构造运动、应力作用是裂缝形成的外因，岩性、岩层结构是裂缝形成的内因，相互作用形成地下的裂缝网络。

一、张性构造缝的形成

张性构造缝通常是在拉张应力作用下形成的裂缝。多数岩石是脆性介质，抵抗拉张应力作用的能力相对较低，易形成张性裂缝。事实上，由于重力压实作用，地下很少出现明显的拉张应力区；多数天然张性构造裂缝是在以下 3 种特定的环境下形成的。张性裂缝也是对油田生产影响最大，最具有储油、储气潜力，以及最为油田关注的一类裂缝。

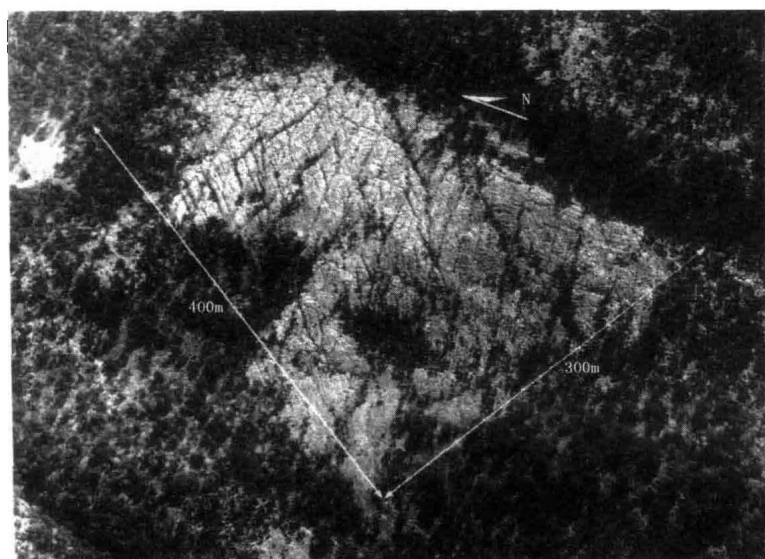
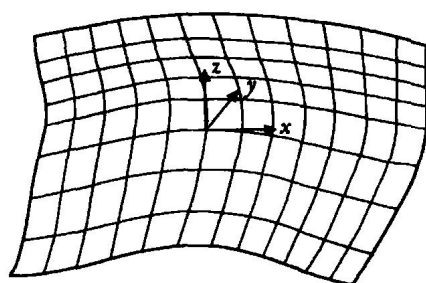


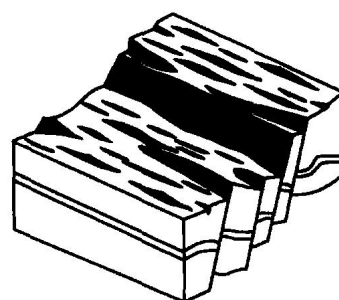
图 1-1 美国科罗拉多州国家恐龙纪念公园附近的骷髅谷露头的裂缝网络

1. 挠曲变形形成张性裂缝

在长期的强烈水平应力挤压下，岩层发生挠曲变形，挠曲轴外缘出现强烈拉张，形成张性裂缝带，走向垂直于当时的区域最大水平主应力方向。越是脆性岩石，该种成因下的张性裂缝带越显著（图 1-2）。多数显著褶皱变形区均存在此类张性裂缝带。



(a) 变形上表面



(b) 张性裂缝带

图 1-2 挠曲变形形成的张性裂缝带

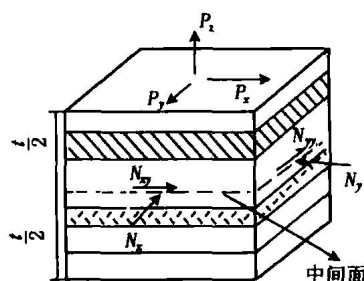


图 1-3 挠曲变形的复合材料板模型

在油田，块状地层比较少见，多见的是复合材料板地层，被研究地层是由多层彼此之间性质不同，横向均匀的岩层组成的。这个假定符合以往的地质、地球物理分层均匀模型假定，可以代表大部分上部沉积地层的真实结构。因此，复合材料板地层挠曲度分析更有其使用价值。复合材料板模型被假定为：地层由不同的平行层面组成，层面间存在着摩擦耦合，地层边界上作用着正应力和剪切应力（图 1-3）。

在上述模型及应力作用下，每一点的二维应力可以写为：

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{1}{t}N_x - \frac{E_k z}{1 - \nu_k^2} \left(\frac{\partial^2 K_x}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 K_y}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{1}{t}N_y - \frac{E_k z}{1 - \nu_k^2} \left(\frac{\partial^2 K_y}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 K_x}{\partial x^2} \right) \\ \sigma_{xy} &= \frac{1}{t}N_{xy} - \frac{E_k z}{1 - \nu_k^2} \frac{\partial K_{xy}}{\partial x \partial y}\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中， σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{xy} 是考虑挠曲变形的原地应力值； t 是地层厚度； K_x 、 K_y 、 K_{xy} 是沿 x 轴方向的曲率、 y 轴方向的曲率和扭转曲率， E_k 、 ν_k 是该层的杨氏模量和泊松比； x 、 y 是地理坐标； z 是竖直方向坐标； N_x 、 N_y 、 N_{xy} 表示 z 层的边界作用力，可以由现场应力测试结果给出。边界作用力可以写为：

$$\begin{aligned}N_x &= \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_{xx}^0 dz \\ N_y &= \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_{yy}^0 dz \\ N_{xy} &= \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_{xy}^0 dz\end{aligned}\quad (1-2)$$

式中， σ_{xx}^0 、 σ_{yy}^0 、 σ_{xy}^0 是没有考虑挠曲变形的原地应力值，引起 σ_{xx}^0 、 σ_{yy}^0 、 σ_{xy}^0 变化的主要因素是该点的挠曲程度和该点的地层厚度 t 。

另外3个应力值可以写为：

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{3}{2t} \left[\frac{t}{2} (p_x^+ - p_y^-) + D \left(\frac{\partial^3 K_x}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 K_y \partial K_x}{\partial y^2 \partial x} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{2z}{t} \right)^2 \right] + \\ &\quad \frac{2z}{t} \left(\frac{p_x^+ + p_x^-}{2} \right) + \left[\frac{3}{2} \left(\frac{2z}{t} \right)^2 - \frac{1}{2} \right] \left[\frac{p_x^+ - p_x^-}{2} \right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{3}{2t} \left[\frac{t}{2} (p_y^+ - p_x^-) + D \left(\frac{\partial^3 K_y}{\partial y^3} + \frac{\partial^2 K_x \partial K_y}{\partial x^2 \partial y} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{2z}{t} \right)^2 \right] + \\ &\quad \frac{2z}{t} \left(\frac{p_y^+ + p_y^-}{2} \right) + \left[\frac{3}{2} \left(\frac{2z}{t} \right)^2 - \frac{1}{2} \right] \left[\frac{p_y^+ - p_y^-}{2} \right] \\ \sigma_{zz} &= \sum_1^n \rho_i g h_i\end{aligned}\quad (1-3)$$

式中， p_x^+ 、 p_y^+ 、 p_x^- 、 p_y^- 是沿 x 、 y 轴地层上、下表面所受到的摩擦力； D 是弯曲刚度。

由应力张量 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{xy} 、 σ_{zz} 、 σ_{yz} 、 σ_{zx} 可以计算出该点的三向主应力，进而使用张应力准则、摩尔—库仑准则、米赛斯准则计算出该点发生裂缝的几率。该项技术适合于多层介质，并考虑了现今应力场作用，但所需要的条件也相对苛刻。

图1-4至图1-8是该技术在美国Casper山脉西侧的Goose Egg Dome（简称“GED”）区的应用。

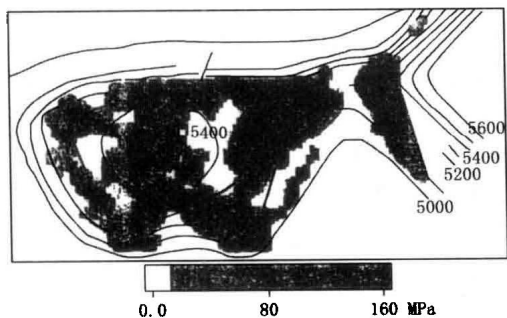


图 1-4 GED 地区研究地层上表面应力分布

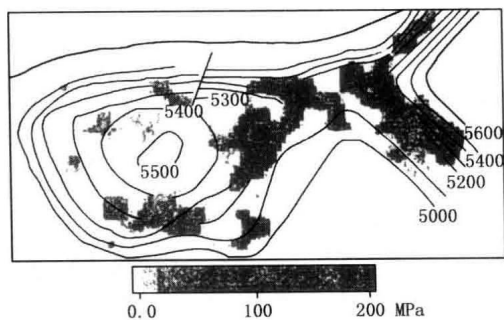


图 1-5 GED 地区研究地层下表面应力分布

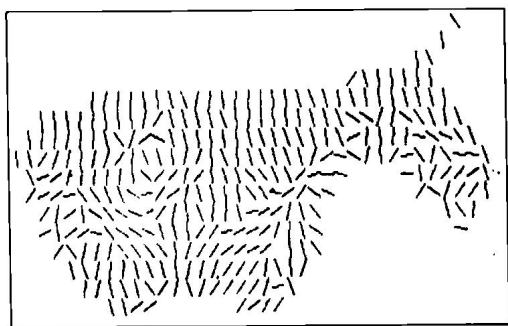


图 1-6 GED 地区最大压缩应变方向

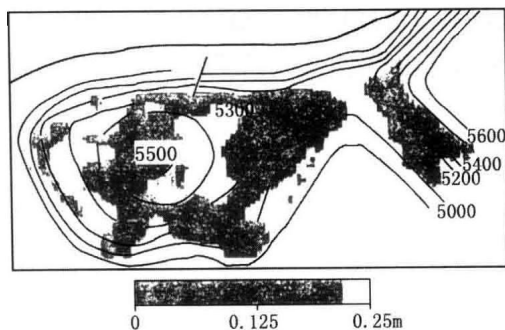


图 1-7 GED 地区研究地层上表面裂缝间距分布

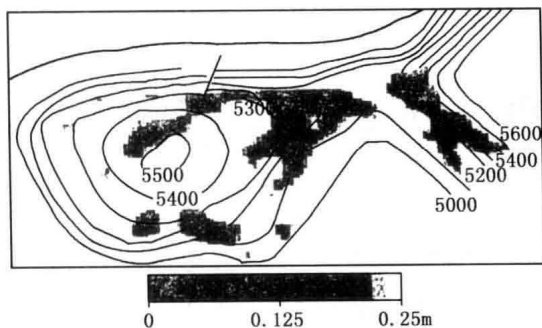


图 1-8 GED 地区研究地层下表面裂缝间距分布

油田实际应用该理论于已成岩地层时，常用所研究地层的上界面的起伏估计地层挠曲度。表征挠曲程度的曲率 K_x 、 K_y 、 K_{xy} 可以由下述方法估算：

$$K_x = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, K_y = \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}, K_{xy} = \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \quad (1-4)$$

为了对离散的油田数据进行计算，并且适应测点与邻近测点沿 x 轴、 y 轴的距离 Δh_1 、 Δh_2 、 ΔK_1 、 ΔK_2 可能彼此不等的情

况，分析过程在如下坐标系中（图 1-9）采用了不等距差分格式：

$$K_x = \frac{[W(x + \Delta K_1, y) - 2W(x, y) + W(x - \Delta K_2, y)]}{(\Delta K_1 \Delta K_2)}$$

$$K_y = \frac{[W(x, y + \Delta h_1) - 2W(x, y) + W(x, y - \Delta h_2)]}{(\Delta h_1 \Delta h_2)} \quad (1-5)$$

$$K_{xy} = \frac{W(x + \Delta K_1, y + \Delta h_2) - W(x + \Delta K_1, y - \Delta h_2) - W(x - \Delta K_2, y + \Delta h_1) + W(x - \Delta K_2, y - \Delta h_2)}{(\Delta K_1 + \Delta K_2)(\Delta h_1 + \Delta h_2)}$$

式中， $W(x, y)$ 是研究地层上界面深度，获得研究地层上界面埋深数据 $W(x, y)$ ，可

以由钻井资料给出界面深度为主，辅以地震资料所示界面深度，综合确定。若地层挠曲的主要原因是应力作用，主曲率方向应该和地层挠曲变形时的最大水平作用力方向一致，这可以作为裂缝挠曲成因的一个判据。



图 1-9 挠曲度分析时所采用的局部坐标系

由式 (1-6) 可以得出测点的主曲率：

$$\begin{vmatrix} (K_x - K_i), K_{xy} \\ K_{xy}, (K_y - K_i) \end{vmatrix} = 0, (i = 1, 2) \tag{1-6}$$

式 (1-6) 可以写为：

$$K_i = \frac{K_x + K_y \pm \sqrt{(K_x - K_y)^2 - 4K_{xy}^2}}{2} \tag{1-7}$$

如果把测点的埋深表示为负值，负凸曲率的区对应着拉张作用区（表 1-1）。

表 1-1 安一潜山表层的主曲率（计算）表

井号	最大主凸曲率 (m ⁻¹)	最小主凸曲率 (m ⁻¹)
安 93	-6.638×10 ⁻⁴	9.509×10 ⁻⁴
安 1	-1.349×10 ⁻³	1.822×10 ⁻³
安 101	-1.423×10 ⁻³	8.141×10 ⁻⁴
胜 24-11	-2.065×10 ⁻³	2.569×10 ⁻³
胜 25-12	1.531×10 ⁻³	3.136×10 ⁻³
胜 64-26	-1.613×10 ⁻³	1.273×10 ⁻³
胜 22-13	-1.396×10 ⁻³	4.353×10 ⁻⁴
胜 30-13	-7.583×10 ⁻³	2.414×10 ⁻³
安 97	-7.482×10 ⁻⁴	2.358×10 ⁻⁴
胜 22-11	1.859×10 ⁻³	9.537×10 ⁻³
胜 21-14	-3.565×10 ⁻⁴	6.662×10 ⁻⁴
安 83	-1.009×10 ⁻³	1.348×10 ⁻⁵
胜 23-11	9.567×10 ⁻⁴	5.174×10 ⁻³
胜 23-10	-5.805×10 ⁻⁴	3.976×10 ⁻⁴

K₁、K₂ 与局部坐标系 x 轴的夹角 α 可以由式 (1-8) 计算出：

$$\left. \begin{aligned} \sin 2\alpha &= \frac{2K_{xy}}{K_1 - K_2} \\ \sin^2 \alpha &= \frac{K_1 - K_x}{K_1 - K_2} \end{aligned} \right\} \tag{1-8}$$

α 角的正方向是从 x 轴正方向逆时针转动的角度。式 (1-8) 的第一式用来判断 α 角的符号，第二式用来确定 α 角的值。使用该方法，我们计算了辽河油田沈阳采油厂安一潜山的挠曲变形（表 1-1）。

由式 (1-8) 计算出的最大主曲率方向，并把该方向标在图 1-10 中，可以看出，优势方向为北北东向，该方向就是地层挠曲变形附加的最大主拉应力方向，与潜山形成时的远场最大主压应力方向一致。这一结果与外力作用下形成的平板挠曲的应力方向一致，地质研究结果表明，安一潜山由太古界鞍山群变质岩构成，以黑云母斜长片麻岩为主，夹斜长角闪岩

和混合岩，伴有燕山期煌斑岩和辉绿岩侵入，岩石脆性较强。早古生代的应力方向为近南北向压缩。水平挤压应力方向与挠曲变形方向一致，这表明地壳挠曲变形是安一潜山主要形成原因。由挠曲变形成因，可以以挠曲程度的大小，依据摩尔—库仑岩石破坏准则，给出裂缝生成函数与单井油产量的关系（图 1-11）。图 1-12 是由乌尔夫网图表示的裂缝产状，优势裂缝分布区与正北方向所夹的圆心角表示裂缝方位；与圆周的距离表示倾角，越接近圆周，裂缝面越趋于水平。

图 1-10 安一潜山最大主曲率方向

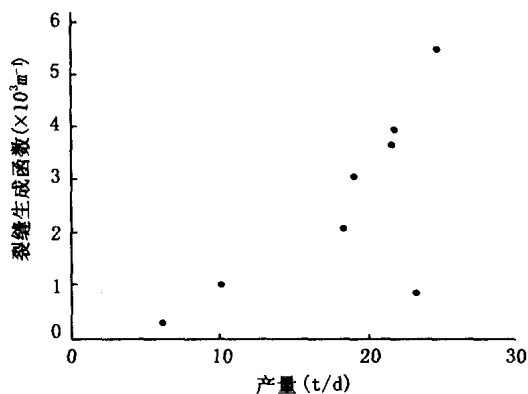


图 1-11 安一潜山裂缝生成函数与单井油产量的关系

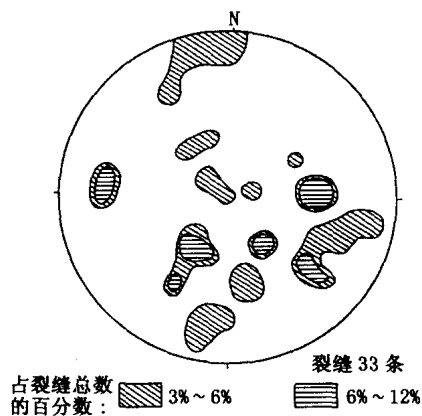


图 1-12 安 101 井邻区裂缝的优势走向

图中的裂缝以倾向和倾角表示

2. 地幔热物质上涌

地幔热物质上涌，使地壳减薄、拉张，下陷成盆地。地幔热物质上涌的上部地层，会相应拉张、下陷，形成下陷盆地和张性裂缝带。一些大型盆地，如松辽盆地的形成可能与上述作用有关。

辽河平原中，绥中—锦州—北镇—彰武一线，约有 $3^{\circ} \times 2^{\circ}$ 范围。该区地处第二沉降带，地形平坦，从南向北略有升高。大部分地区海拔由几米到几十米，最高不到 200m。中、新生代沉积厚。区域重力异常值较高，从 -5mGal 到 $+20\text{mGal}$ 。等值线走向北东，异常带多呈长条形。比较突出的是在辽河平原到辽东半岛的过渡地带有一链状正重力异常带，比其两侧的异常值明显地高出 $20 \sim 30\text{mGal}$ 。本区地壳厚度一般较薄约为 $31 \sim 32\text{km}$ ，西南薄、东北厚，其等厚度线同样是北东向，反映地壳深部构造是一个有相当规模的上地幔隆起带，而且莫霍界面平缓地由北向南略有抬高。康拉界面较平坦，南部稍浅，深度在 $17 \sim 18\text{km}$ 之间。与本地区东边链状正重力异常带相对应，该处地壳厚度比周围略薄一些，仅有 30km 左右。这个中部地区上地幔隆起带与东西两侧的地壳以陡坡或断裂相交接（图 1-13）。隆起带上面形成辽河平原沉降带，显著的拉张，形成了一系列坳陷断块盆地。

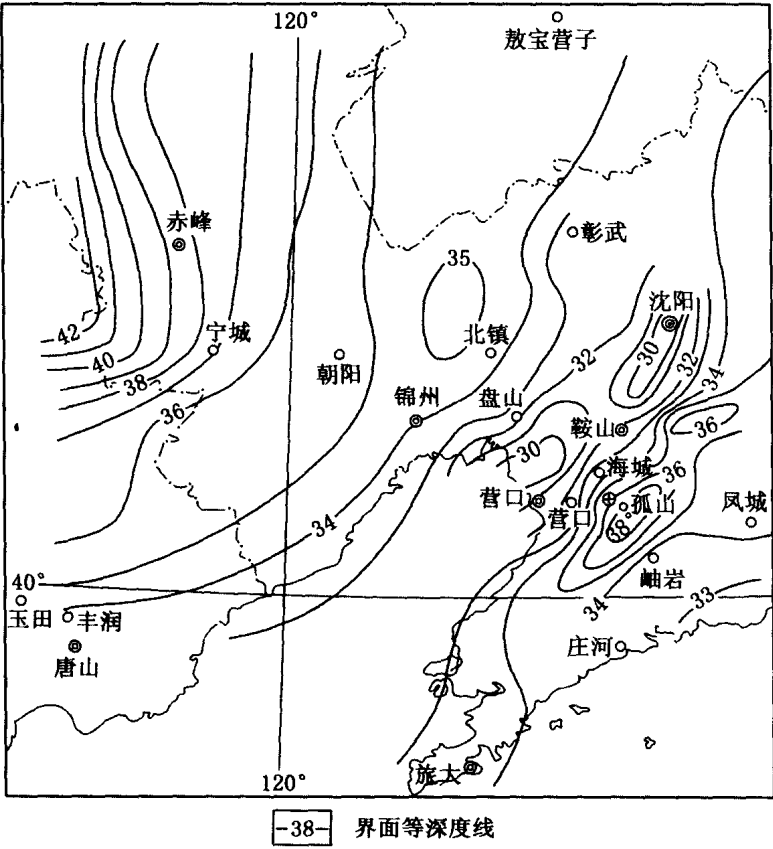


图 1-13 松辽平原地壳厚度分布

3. 剪切断层的拉张作用

在断层的正常滑动区，不会形成张性缝；但断层常存在闭锁区，闭锁区前缘会出现拉张区，形成张性缝，断层规模大，可能形成很大范围的拉张区（图 1-14）。有些小型盆地的

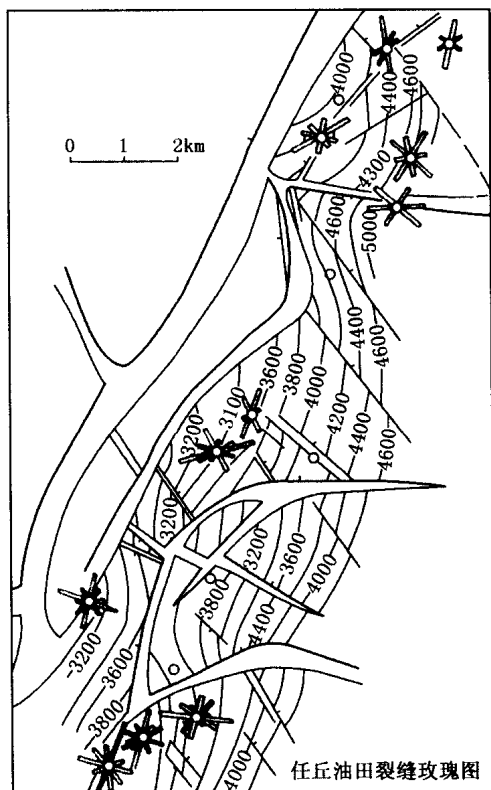


图 1-14 断层闭锁形成的拉张区

形成,可能与剪切断层闭锁区的拉张作用有关,形成所谓拉分盆地。由图 1-14 可以看出,较大的右旋平移断层和其他断层相交的位置,裂缝方向玫瑰图的长轴有明显的规律性。在相交位置的前缘,裂缝方向玫瑰图的长轴常常与邻近断层走向近于平行,显示出拉张特性。

与剪切断层活动相关的优势裂缝分布区和断层活动诱发的张应力分布区常常是一致的。由断裂力学得出的张应力分布区常常和裂缝端部联系在一起。广义的端部可以由断层相对滑动的闭锁区组成。从外观上判断,裂缝面发生转折,两条裂缝发生交汇,介质性质发生突变的位置都可能形成闭锁。由位移(或断距)分布判断闭锁区,位移渐近变小的位置是闭锁区,闭锁区的邻区则可能形成次生裂缝区,对于不同类型的断层,次生裂缝区的分布位置也有所不同。但多出现在断层滑动正方向与最大水平主应力方向夹角大于 90° 的一盘的闭锁区前缘位置(图 1-15、图 1-16、图 1-17)。

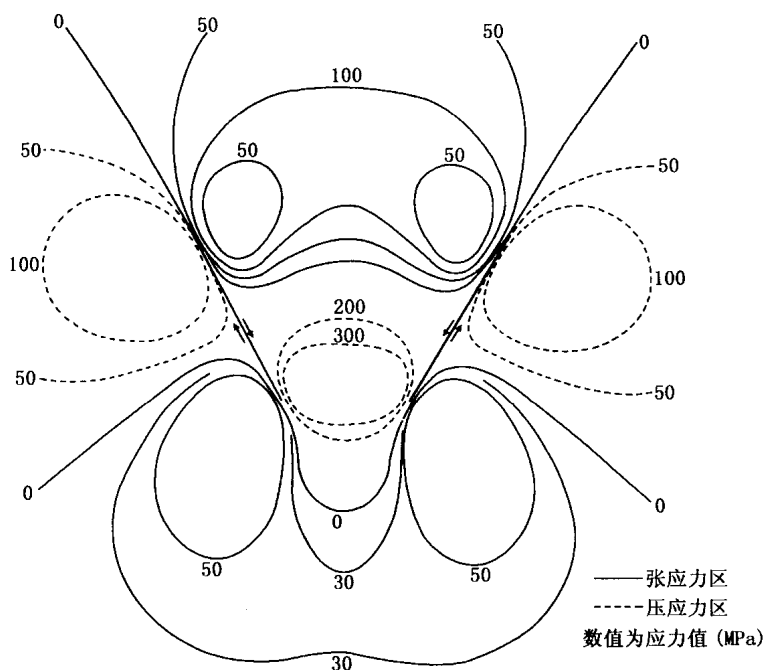


图 1-15 共轭断层蠕变滑动产生的附加应力分布

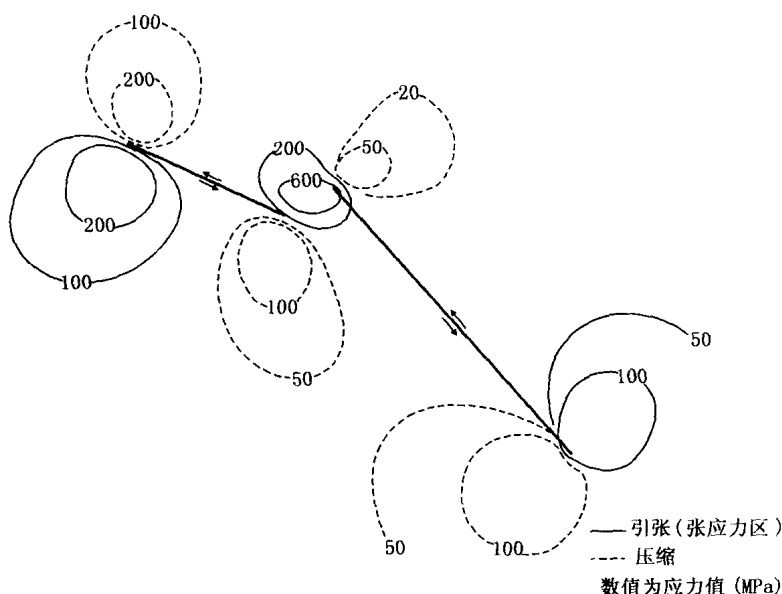


图 1-16 两条汇而不交断层不等量蠕变滑动附加的应力分布

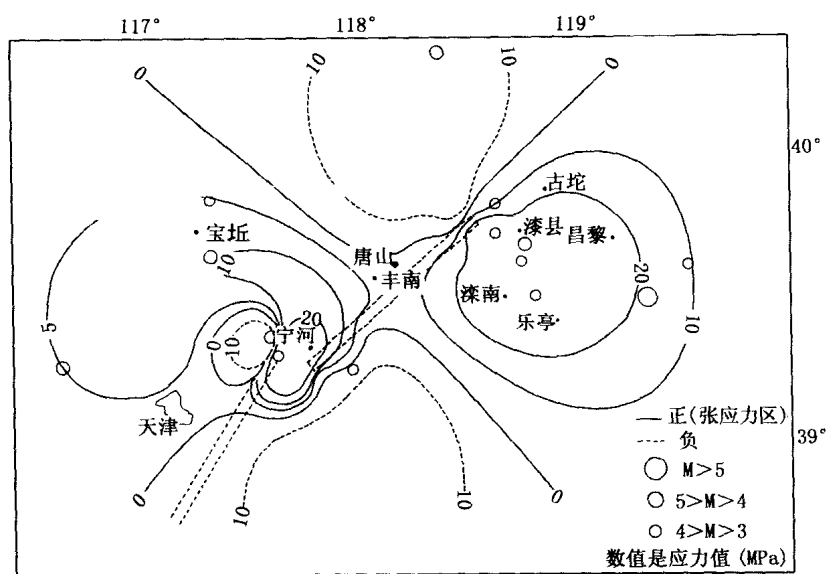


图 1-17 沧东断裂北段和唐山断裂蠕变附加的应力分布

二、断层活动成因裂缝

断层活动是裂缝的重要成因，断层活动成因裂缝一般表现为张剪性裂缝或压剪性裂缝。我国是一个地震多发国家，存在一些著名的大断层，如南北地震带、郯庐断裂带等，与这些大断裂带伴生着一些中小断裂带。这些数目众多的断裂带把中国大陆地壳分成若干个地震区。油田也存在断层切割的油田，由一些边界断层把油田分成小块，形成断块油田。这些边界断层的活动不能不影响块内的裂缝分布与形成。特别是临近边界断层的裂缝，裂缝的走向、倾斜、分布位置常常与边界断层的活动性质有关。

1. 断裂力学的基本理论

断裂力学是一个研究有缺陷、近脆性介质裂缝形成及扩展的科学。一些先天不足、后天损伤，在介质内部形成裂缝扩展核，在不同原因形成的应力作用下出现裂缝扩展。判断介质是否出现裂缝扩展的临界条件称为断裂韧性，由于断裂韧性不仅与介质性质有关，而且与裂缝扩展核尺度有关，后者很难准确给出，这影响了断裂韧性在地学领域的应用。断裂力学理论通常认为：①介质有缺陷会使其强度降低；②多数裂缝扩展是沿原有缺陷边缘出现的；③断裂韧性仅有定性意义。大的断层不宜于在裂缝尺度上研究其扩展，特别是出现扩展的临界条件。裂缝扩展方向、新裂缝出现的位置，则是断裂力学理论研究的最成功之处。仅研究断层端部的新裂缝扩展方向，断裂力学理论还是可用的。

2. 断裂力学的裂缝分类及应力位移分布

在断裂力学范畴，裂缝可以分为3类：I型裂缝、II型裂缝、III型裂缝（图1-18），其应力集中因子可以写为：

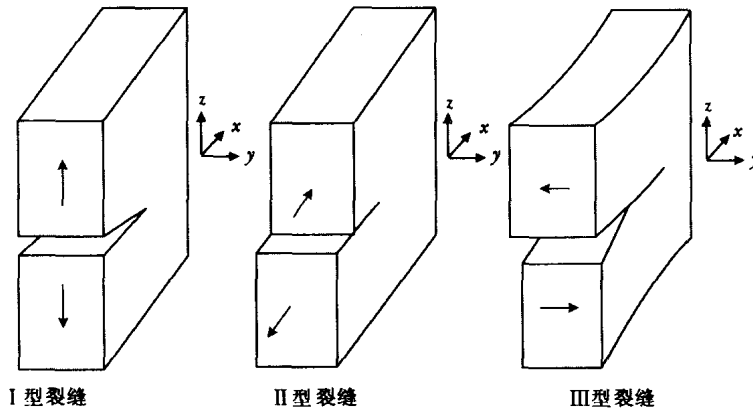


图1-18 断裂力学中的裂缝类型

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma^\infty \sqrt{\pi a} \\ K_{II} &= \tau_{xy1}^\infty \sqrt{\pi a} \\ K_{III} &= \tau_{xy2}^\infty \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中， K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 是I、II、III型裂缝的应力集中因子； a 是裂缝半长度； σ^∞ 是沿裂缝面法向的远场正应力； τ_{xy1}^∞ 是作用在法向沿 z 轴的裂缝面上，使裂缝面错动方向沿 x 轴的剪切应力； τ_{xy2}^∞ 是作用在法向沿 z 轴的裂缝面上，使裂缝面错动方向沿 y 轴的剪切应力。I型裂缝是张开型裂缝，裂缝面沿 z 轴张开，沿 x 轴方向扩展；II型裂缝是裂缝面的错动方向、扩展方向均沿 x 轴方向的裂缝；III型裂缝是裂缝面的错动方向沿 y 轴方向，扩展方向沿 x 轴方向的裂缝。

I型裂缝的端部应力可以写为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right) \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2} \theta \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

I 型裂缝的端部位移可以写为:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2m-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3}{2}\theta \right] \\ v &= \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2m+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3}{2}\theta \right] \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

II 型裂缝的端部应力可以写为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

II 型裂缝的端部位移可以写为:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2m+3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3}{2}\theta \right] \\ v &= -\frac{K_{II}}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2m-3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3}{2}\theta \right] \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} m &= 3 - 4\nu \quad (\text{平面应变}) \\ m &= (3 - \nu) / (1 + \nu) \quad (\text{平面应力}) \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

III 型裂缝的应力可以写为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \sigma_{yz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

III 型裂缝的位移可以写为:

$$W = 2 \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (1-16)$$

式中, θ 是以裂缝面方向为起点的角度; μ 是剪切模量; ν 是泊松比; r 是以裂缝端部为起点的矢径。

3. 复合裂缝开裂角研究

实际地层很少有纯 I 型、纯 II 型、纯 III 型裂缝, 多为复合型裂缝, 比如正断层和逆断层, 其滑动前缘可以看作广义的 I、II 型复合裂缝, 侧翼可以看作 I、III 型复合裂缝; 平移断层的下缘可以看作 I、III 型复合裂缝, 端部则可以看成 I、II 型复合裂缝 (图 1-19)。复合型裂缝开裂角方向的研究有重要意义, 可以用来判断断层活动形成的裂缝群的分布位置、走向、倾角。研究新裂缝出现的位置和方向有最大周向应力理论和应变能密度理论, 前者多使用在张应力条件下。在地学研究中, 被研究介质多处于压应力环境下, 常用的研究理