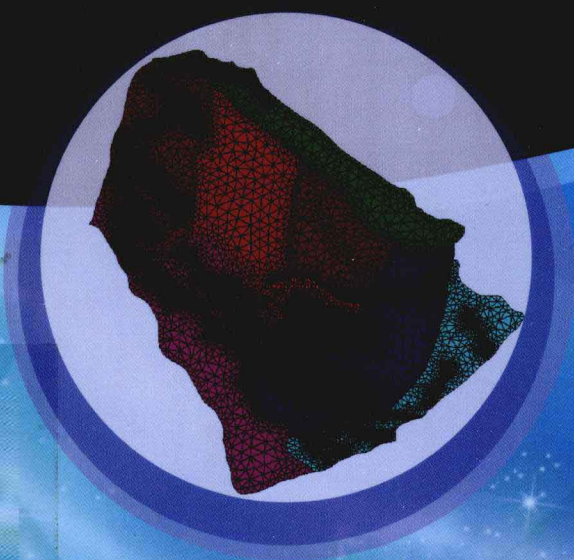


构造应力场与 有限单元法

| 宋惠珍 薛世峰 曾海容 编著 |



中国石油大学出版社

构造应力场 与 有限单元法

► 宋惠珍 薛世峰 曾海容 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

构造应力场与有限单元法/宋惠珍,薛世峰,曾海容编著. —东营:中国石油大学出版社,2011.12

ISBN 978-7-5636-3631-0

I. ①构… II. ①宋… ②薛… ③曾… III. ①构造应力场—有限元法 IV. ①P313

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 237563 号

书 名: 构造应力场与有限单元法

编 著: 宋惠珍 薛世峰 曾海容

责任编辑: 秦晓霞(电话 0532—86981532)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 180×235 印张: 14.5 字数: 289 千字

版 次: 2012 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 36.00 元

Preface

前言

本书主要来自于宋惠珍领导的中国地震局地质研究所数值模拟组 20 多年来的科学研究以及研究生论文成果,内容涵盖了地球科学、地震科学、石油科学等领域的学术理论、研究方法以及在地质、地震和石油工程问题中的应用成果,是一本交叉学科或应用学科的研究成果论著。

概括起来讲,本书将经典的数学、物理学、力学和近代的计算机科学与地质学、地震学和石油科学相结合,并致力于解决地震工程、地质工程和石油工程领域里的一系列具体问题。由此可知,本书所涉及的专业知识从抽象的数学理论和概念到宏观的对地球内部复杂实体的定性描述,形成了跨度很大的交叉学科研究领域。如此远距离学科的交叉研究必定运用模型化的研究方法,又必然突出方法论的内容,这也是本书的主要特点之一。涉猎如此广度和深度的课题,似乎令人见而生畏,但这正反映了现代科学技术发展的特征。只有借助于现代科学技术与理论的发展,人们才能综合应用多学科理论与知识,操作如此繁多的工作环节,才能去探索这样无确定解的课题。众所周知,当今在学术和工程中存在着大量不确定解的问题,这类不确定解的问题基本上需要借助于计算机试验的数值分析方法进行探索,目前计算机技术的高度发展为解决这类不存在唯一解的课题提供了强有力的技术支持,这也正是本书产生的社会背景。本书作者均从事与地球科学相关的课题研究,面临大量约束不充分的不确定解问题,在研究中总结了不少成果。因此,本书内容属于交叉学科中的一个新生增长点。

本书共有七章,除第二章外,其余六章均来自于宋惠珍和她的学生们多年研究成果(曾海容和薛世峰的博士学位论文,袁岩光和刘洁的硕士学位论文)的积累和总结,其内容涵盖了本课题组 20 世纪 80 和 90 年代及 21 世纪初的主要研究成果。本书作者宋惠珍、薛世峰和曾海容合作将这些成果加以组织、提炼并提供给同行或即将从事数值模拟研究的专家们参考。下面我们列出每章重点内容,以方便读者根据自己的需要阅读。

第一章重点介绍了典型构造应力场和有限单元法的基本概念,以及两者结合的意义、起始、发展与现状,是以后各章节研究内容的基础和起点。

第二章系统介绍了有限单元法引入的各种误差。该章第一节主要总结了前人的误差公式推导结果,论证了误差源及其对计算结果的影响,读者不必花费过多时间推导。第二节利用前人的试验实例阐述了有限单元网格划分的原则,其中包含了我们的研究成果和经验体会。这一节对从事有限单元计算与分析者具有实用价值,但具体问题还需具体分析,不能直接套用,需通过实践总结自己的经验和体会。

第三章提供了二维和三维断层的裂纹有限单元分析模型。根据断裂力学概念和固体接触问题原理,借助于有限单元中的双节点技术和裂纹尖端三角形四分之一节点单元奇异性,将宏观断层运动抽象为裂纹模型的破裂与扩展过程。通过误差分析和实际应用效果证明了本章模型的有效性,并可应用于宏观断层活动性的定量分析。

第四章论述了地表变形响应的反演分析方法。对壳内三维断层给出了反演有限单元公式,根据地表测量资料计算深部断层面上作用力,再将所求断层力代回正演有限单元公式计算出断层位移。将壳内断层剖面构造划分为均匀的矩形网格,借助于沃尔特拉(Volterra)位错模型公式,推导其反演公式,根据地表测量资料计算深部断层滑动位移或滑动速率。通过精度分析和实践检验,这两种模型均有理论意义和实用价值。

第五章叙述了与边值问题未知边界条件处理相关的方法和技术。目前,在学术领域和工程项目中存在大量未知边界条件或边界约束不充分的问题,而这也正是构造应力定量分析发展的基本阻力和首要问题,并且将长期对本领域的发展起阻碍作用。本章并未彻底解决该问题,但我们进行了一些探索,提出弹性约束可适用于求解线弹性边值问题,同时本章还提供了一些经验方法可供参考。

第六章针对裂缝储集层的裂隙系渗流问题建立了一个双节点渗流单元模型,这是在裂缝渗流场研究中首次提出的新数学模型。同时,我们还推导了流固耦合作用诱导的渗流场与应力场相互影响的有限单元公式及其解法,并应用于井孔周围和裂纹尖端应力场的计算与分析。结果表明,地下流场对构造应力场的影响不可忽略,对现场水力压裂具有理论意义和应用价值。

第七章讨论了地下流固耦合理论,并在此基础上建立了饱和油水两相渗流与孔隙介质耦合作用的数学理论模型及其有限单元公式。系统讨论了数值分析中的空间域和时间域的离散化处理、线性化处理、边界条件处理以及有限元分析方法,给出了部分有工程参考意义的结果。

以上第三至第七章中的力学模型、数学公式及其对应的计算机程序均经过算例检验和实际课题应用的检验,感兴趣的读者可向作者咨询,并欢迎给我们提出宝贵意见。

另外,在本书完成过程中,薛世峰教授的研究生田旺生、杨辉、刘传奇完成了主要的文字录入、图形绘制工作,对该书出版起了重要作用;加拿大 MANITOBA 大学的吴琼教授帮助借阅了大量资料和参考文献;袁岩光博士、刘洁博士为本书出版提供了部分资料及相关帮助。在此一并表示感谢!

编 者

2011 年 5 月

第一章 构造应力场与有限单元法概述	1
第一节 构造应力场	1
一、构造应力场的概念	1
二、典型构造模型应力场	2
三、一般构造应力场模型	9
四、构造应力场分析的观察、测量和其他方法	9
第二节 有限单元法的基本概念	11
一、概念	11
二、有限单元法的基本步骤	12
第三节 位移场的有限单元分析	23
一、概念和理论	24
二、应用	27
第四节 构造应力场有限单元分析的起始、发展与现状	28
一、有限单元法应用于构造应力场分析的起始阶段	28
二、构造应力场有限单元分析的发展和研究现状	29
三、构造应力场有限单元分析法的优缺点	31
第二章 有限单元法精度分析	37
第一节 有限单元分析的解误差	37
一、有关概念和定义	37
二、方程误差	41
三、由方程误差诱导的解误差	44
四、操作误差	47
五、关于误差分析研究的主要结果及意义	52

六、误差估计的计算机试验技术	53
七、结论	54
第二节 有限单元网格设计原理	55
一、定义	55
二、扭转试验问题	56
三、线性单元网格排列精度对比	57
四、不同单元类型网格优化解的精度对比	58
五、网格细化原则和方法	60
六、结论	63
第三节 构造应力场有限单元分析的基本步骤和精度分析	64
一、研究区域	64
二、研究目的	64
三、资料收集与现场调查	64
四、地质构造模型和边界条件	64
五、建立力学模型	65
六、选择相适应的有限单元技术	66
七、网格化	66
八、有限单元计算、分析和结果检验	67
第三章 断层的裂纹有限单元模型	71
第一节 断层的裂纹有限单元模型	71
一、断层的裂纹有限单元模型基本概念	71
二、断层的裂纹接触模型有限单元公式	72
三、断层的裂纹节理模型有限单元公式	82
第二节 两种断层裂纹单元模型的裂纹尖端奇异性处理	86
一、三角形 1/4 节点单元的奇异性	87
二、二维裂纹尖端特殊接触单元的有限单元公式和程序	92
三、三维裂纹尖端特殊接触单元和节理单元的有限单元公式和程序	94
第三节 断层裂纹有限单元模型的应用	102
一、1976 年唐山地震过程模拟与分析	102
二、逆冲断层运动特征的模拟与分析	106
三、震时地震断层面上滑动位移的计算与分析	108
第四章 地表变形响应的反演分析方法	115
第一节 三维有限单元反演的数学方法	115
一、三维有限单元反演的数学方法	115

二、理论模型试验研究	118
三、三维有限单元反演方法的初步应用	123
四、讨论与结论	129
五、计算精度	130
第二节 位错模型的一种反演方法	131
一、位错模型	131
二、反演方法	133
三、边界条件处理	134
四、计算方法	135
五、计算实例与方法检验	135
六、断层深部滑动速率反演方法的扩充和应用	138
七、反演计算精度估计	142
第三节 从构造曲面挠度反演构造应力场	142
一、褶皱构造与薄板弯曲模型	143
二、褶曲与趋势面分析方法	143
三、应用实例	145
第五章 边值问题的未知边界条件处理	149
第一节 构造剖面边界问题的处理	149
一、边界分布力转化为弹性约束力	149
二、计算步骤	154
三、结果分析与讨论	155
四、计算机程序	157
第二节 平面构造和三维构造未知边界条件的处理	157
一、平面构造应力场	157
二、三维构造应力场	162
第三节 关于未知边界条件的边值问题的讨论	164
一、意义	164
二、存在问题	165
三、发展潜力	165
第六章 地下流体场与应力场相互作用的有限单元模型	167
第一节 地下流体场的三维有限单元模型	167
一、地下渗流场的微分方程	168
二、三维非定常渗流场的有限单元分析	170

三、应用实例	172
第二节 裂隙系的渗流模型——双节点渗流单元	173
一、裂隙渗流有限单元模型	173
二、双节点渗流有限单元模型	174
三、模型检验	176
第三节 地下渗流场与应力场的耦合作用	177
一、流固耦合的控制方程	177
二、流固耦合方程的有限单元公式及程序设计	179
第四节 三维流固耦合有限单元方法的应用研究	181
一、流固耦合模型Ⅰ	181
二、流固耦合模型Ⅱ	183
三、流固耦合模型Ⅲ	186
第五节 小 结	190
第七章 油水两相流固耦合模型及有限单元数值模拟	192
第一节 饱和油水两相渗流与孔隙介质耦合作用的理论模型	193
一、岩层骨架数学模型方程	193
二、饱和油水两相渗流系统数学模型方程	194
三、饱和油水两相渗流与岩层骨架变形耦合方程的讨论与简化	196
第二节 两相流固耦合模型有限元数值分析方法	198
一、油水两相流固模型方程的 Galerkin 有限单元空间离散	199
二、时间域的差分离散及线性化处理	204
三、固相岩层介质变形计算的边界条件	206
四、两相渗流边界条件和源汇项处理	206
五、时间步长和网格尺寸	208
第三节 有限单元软件设计方法及简化的参数模型	209
一、程序设计方案与框图	210
二、流固耦合计算流程	212
三、Drucker-Prager 弹塑性材料模型	212
四、两相渗流模型参数的选择	213
五、算例分析	217

第一章 构造应力场与有限单元法概述

构造应力场与有限单元法的概念、研究方法以及二者结合的意义构成了本章的基本内容,也为以后各章学习奠定了基础。从学科属性和研究方法上看,构造应力场和有限单元法属于两个完全不同的研究领域,而本书研究的重点就是将二者结合、渗透,并产生一个新的研究领域。

第一节 构造应力场

一、构造应力场的概念

地球既受外部力作用,也受内部力作用,因此地球内部处处时时都存在力场作用。一方面,在地壳外层的岩石圈内,存在规模不同、产状各异的许多破裂带,通常称为断裂带或断层带。当作用力越过这些断裂带时,其状态参数将发生变化。另一方面,由于地球内部环境条件存在差异,在不同区域和不同深度上,岩石物理力学性质不同,如在地壳内普遍存在低速高导层,当这些不同性质和不同产状的结构受到力场的扰动时,其状态参数将发生变化,力场性质也会发生改变,造成构造区内局部的应力集中。由此可知,地球内部特别是地壳内应力分布是极不均匀的,一般来说,构造愈复杂,应力分布愈不均匀。除此之外,局部构造区的应力场状态还取决于远场力与构造空间展布之间的相对关系。所以,应力梯度不仅取决于构造几何性质和远场应力大小,更取决于远场应力方位与构造几何产状之间的组合关系。因而,当地球内部局部构造受到某种力场作用时,在其构造区域内应力场会发生畸变,即在原有应力场上叠加一个附加应力场,该附加应力场的性质和强度取决于构造空间几何性质与所受驱动力之间的匹配关系。由此可知,结构与应力是存在于地球内部受载体上的不可分割的两个方面。

综上所述,概括构造应力场定义如下:

在地球内部某一构造或某一组构造与其作用力相互作用、相互影响产生一个局部

奇异应力场,这个应力场的性质和强度决定于构造的几何性质和作用力之间的组合关系,我们称此局部奇异应力场为构造应力场。

由上述定义可知,研究构造应力场就是研究局部奇异应力场,或者说局部附加应力场。事实上,我们最感兴趣的是附加应力场,因为地球内部发生的所有事件都直接或间接地与附加应力场有关,诸如天然地震、火山喷发、海啸等。但附加应力场是无法获得的,原因有二,其一是背景应力场或基本应力场未知;其二是在地质历史中,在不同地质年代形成的不同构造相互叠加在一起,自然其不同时期的附加应力场也要相互叠加,一般情况,分离出不同时期的附加应力场是困难的。通常分析的局部奇异应力场包括附加应力场和基本应力场,但附加应力场占主导成份。

由于地球内部构造主要分布在地壳层内,通常称为地壳构造应力场或地应力场,事实上,在基底以下至上地幔仍存在深大断裂带和板块俯冲带,沿着这些活动构造带仍存在奇异应力场。因此,在本书中我们统一用构造应力场这一名词,即在地球内部任何构造区域的应力场,没有空间限制。

二、典型构造模型应力场

为了由浅入深、由易到难确切了解构造应力场的概念,我们首先从典型构造模型应力场定性分析出发,即仅给出应力场性质,了解构造应力场的基本概念。

1. 假设在均匀弹性介质的地壳内存在构造面或断层面

1) 单一断层应力场模型

图 1.1.1 表示地球内部均匀弹性介质内存在一条单一断层,在北东—南西向远场应力作用下,沿断层两盘可能发生相对位移运动,沿断层面上潜在的左旋滑动趋势将产生断层两端局部区域构造应力场,其中符号定义遵从弹性力学规定,即张为正,压为负。如此,在断层两端部区域各存在一个张应力集中区和压应力集中区,如果远场应力方位旋转 90° ,即由北东—南西向转为北西—南东向,则沿断层面上潜在的左旋滑动转为右旋滑动,从而在断层两端局部应力集中区的性质发生改变,即原来张性应力区变为压性应力区,反之亦然。

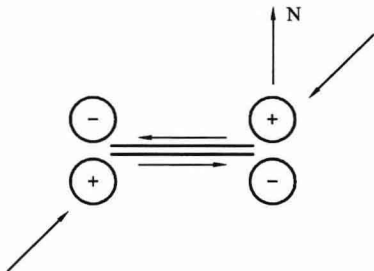


图 1.1.1 单一断层应力场模型

2) 雁列断层应力场模型

雁列断层应力场即指两雁行段之间错列区域的应力状态。图 1.1.2 表示由三个断层段组成一组雁列断层带,在北东—南西向远场应力作用下,每个断层段都可能产生左旋运动或潜在左旋滑动,于是在断层段汇而不交的区域诱导出应力集中区或应力松弛区,应力符号取决于雁列断层段排列方式和雁列断层走向与远场应力方位之间的夹角关系(指平面问题)。典型雁列断层一般包含 $n(n=2,3,\dots,n)$ 段断层, $(n-1)$ 个断层段阶梯区。图 1.1.2 包含三个断层段、两个阶梯区,如果雁列断层位于右手一侧,沿断层朝前走,当遇到下一个断层段时,若是向上抬升一个台阶,称其为左阶梯,若是向下降低一个台阶,称其为右阶梯,所以,雁列断层排列方式是由前一个断层段尾端与后一个断层段始端相对位置定义的,这个定义对识别雁列断层应力场性质至关重要。例如,图 1.1.2 中的雁列断层在北东—南西向远场应力作用下,在两阶梯区不但应力状态发生变化且应力符号相反,负号表示应力集中区,即应力代数值减小,几何值增加;正号表示应力松弛区,即应力几何值减小,代数值增加。另外,每个断层段都呈左旋运动性质,这就是说雁列断层整体走向一致,旋性一致,但沿断层走向进入阶梯区应力场性质不一定一致,如果每两断层段之间阶梯性质相同,则阶梯应力场相同,反之不同。

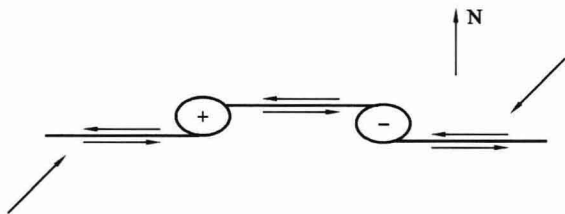


图 1.1.2 典型雁列断层应力场模型

从图 1.1.2 可以得出下列结论:左旋左阶梯区为应力松弛区,左旋右阶梯区为应力集中区;反之也成立,即右旋右阶梯区为应力松弛区,右旋左阶梯区为应力集中区。由此,我们可以给出雁列断层阶梯区应力场性质的普遍定义或判断法则:

当两雁列断层段的旋性与阶梯性质相同时,阶梯区为应力松弛区(或张应力区),反之则为应力集中区(或压应力区)。

以上仅讨论了雁列断层阶梯部位应力场性质,完全属于定性分析,如果要详细分析应力值大小,需要借助于数值分析(也有解析解法)。影响应力大小的几何参数有:雁列断层段半长度 l 、阶梯半高度 h 和两雁列段相遇时端部错列或重叠半宽度 d ;力学参数有:远场应力大小和方位,方位指远场应力与雁列断层走向夹角^[1-3]。

雁列断层应力场产生的地质地貌特征非常普遍,即拉张应力区产生构造凹陷,挤压应力区产生构造凸起,例如在现场调查中经常看到凸包和凹坑,它们往往是对应雁列断层的阶梯部位。天然大地震之后,地面上常出现呈雁列形状排列的张裂缝^[4],所

以雁列断层应力场特征在现场地质调查识别地质特征时非常有用。

另外,雁列断层应力场特征在石油勘探中具有重要意义。在拉张应力区,拉张作用持续发展演化形成拉分盆地,它被视为一种含油气盆地的成因机制,拉分盆地大小不同,但几何形态极为相似,具有菱形特征。在国内以民乐拉分盆地表现最为典型^[5](见图 1.1.3)。

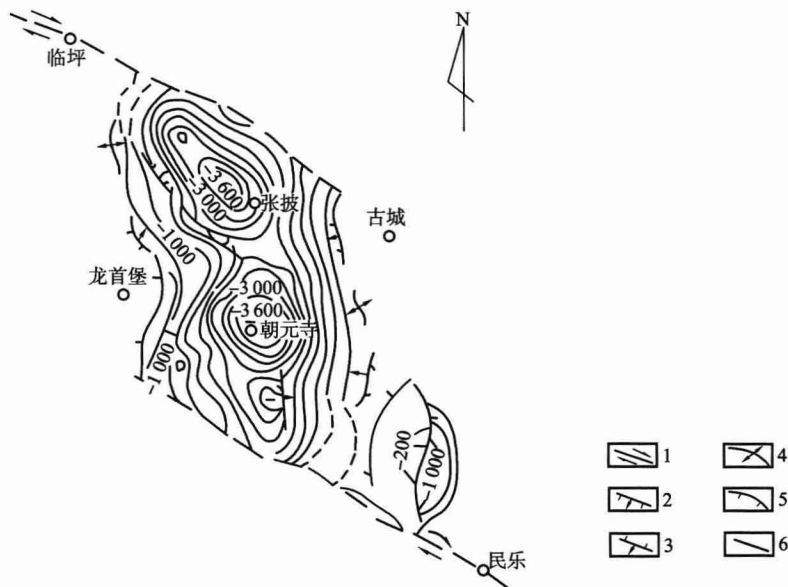


图 1.1.3 右旋右阶梯走滑雁列断层运动所形成的民乐拉分盆地

1—走滑断层;2—正断层;3—逆断层;4—背斜;5—地层尖灭线;6—地层等厚线(单位为 m)

当然,并非所有呈雁行排列的断层都能产生构造凹陷或构造凸起,或者形成拉分盆地。形成这种较大规模的构造单元需要具备各种综合因素,如几何尺寸,当 $d/l \leq 0.1$ 及 $h/l \leq 0.1$ 时,才有可能形成雁列断层应力场特征^[6],除此之外,雁列断层阶梯区域构造活动规模和性质还取决于其应力环境。

3) X 型断层应力场模型

图 1.1.4 表示在远场应力作用下 X 型断层应力场分布特征,远场主压应力轴指向断层夹角域为压应力场。X 型断裂在地壳内分布相当普遍,例如在华北平原地区,北北东向断裂与北西西向断裂交汇构成 X 型断裂,而北北东向断裂是控制华北地区强震活动的主断裂,它与华北地区统一的北东东—南西西向主压应力场匹配,构成北北东向断层呈右旋滑动,北西西向断层呈左旋滑动。

华北强震多是沿着北北东向断层发生。如 1679 年发生在北京地区三河—平谷的 8 级地震;1966 年发生在邢台的 6.8 级地震及 1976 年发生在唐山的 7.8 级地震等,这些

事件均源于这类构造应力场导致的断层运动^[7-9]。

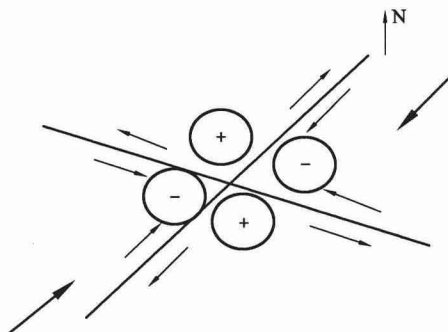


图 1.1.4 X 型断层应力场模型

4) Y 型断层应力场模型

图 1.1.5 表示 Y 型断层应力场模型,它与图 1.1.1~图 1.1.4 的断层迹线不同,后者是在地面或平行地表面的某一深度上的平面构造,即沿横向展布的断层线。Y 型断层是垂直断层走向切割的剖面构造,主断裂沿断层倾向向深部延伸,次级断裂延伸较浅,底部终止在主断裂面或其附近,形成 Y 字型断垒。这种构造是在挤压应力场作用下或在挤压环境中形成的。图 1.1.5 表示,在远场主压应力轴垂直于断层走向的条件下,沿断层面的滑动性(即逆冲还是倾滑)取决于断层面与远场主应力轴的几何关系,在断垒区即两断层夹持区域,两断层上盘向上逆冲滑动,下盘向下倾向滑动,所以在断垒区形成强的张应力场,而且越靠近交汇区张性越强,这种构造在中国西部挤压性盆地普遍存在,而且在断垒区往往形成流体储集层。如在塔里木盆地轮南地区,轮南断垒和桑塔木断垒古生代奥陶系碳酸盐岩微裂缝非常发育,成为典型的碳酸盐岩裂缝储集层。轮南奥陶系大多数灰岩高产井位于这两个断垒上,构造应力场数值模拟分析结果与探井试井符合率达 75%~80%,并在塔中碳酸盐岩储集层获得类似结果,所以 Y 型断层应力场模型在油田勘探工作中具有重要意义^[10,11]。

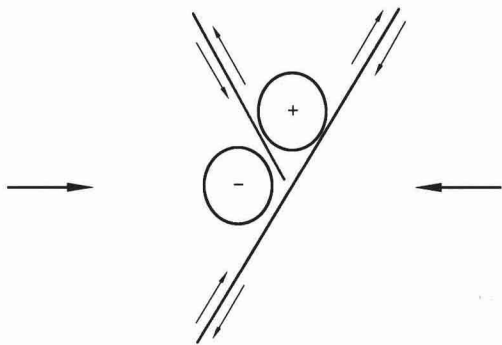


图 1.1.5 Y 型断层应力场模型

5) T 型断层应力场模型

T 型断层应力场分布特征如图 1.1.6 所示。若断层走向与远场应力方位之间的夹角关系如图所示,东西走向断层产生左旋滑动,南北走向断层产生右旋滑动,于是在两断层交汇区,或者说南北向断层终止在东西向断层或其附近,在南北向断层两侧角域内,分别存在一个压应力场和一个张应力场。

这种类型的构造和构造应力场在地壳内也普遍存在,如北京地区,北西西向的南口—孙河断裂与北北东向的南口山前断裂相遇并终止在南口山前断裂,形成近似 T 型断裂构造,而北京地区区域应力场方位为北东东—南西西,平均 $N75^{\circ}E$,因此构成南口—孙河断层为左旋滑动,南口山前断层为右旋滑动。两断层相交的北侧角域为压应力场,即应力集中区,南侧角域为张应力场,即应力松弛区,北京西部地区沿南口山前断层地震活动性与该应力场性质对应,即在南口—孙河断裂以北沿南口山前断裂地震活动强度大^[12,13]。

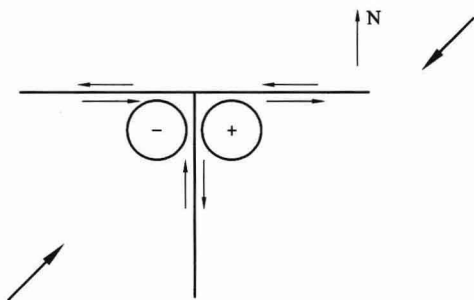


图 1.1.6 T 型断层应力场模型

2. 假设在均匀弹性介质的地壳内存在构造曲面

1) 长轴背斜褶曲构造应力场模型

图 1.1.7 为一长轴背斜构造,在垂直其长轴方位的远场应力作用下,背斜构造应力场特征如图所示,图中背向指向箭头表示主张应力场,对向指向箭头表示主压应力场。在长轴背斜顶部沿长轴发育张应力场;沿两坡底部发育挤压应力场;沿背斜两坡向上爬,压性降低,张性增加。所以在背斜顶部张应力环境内,常常发育孔隙和微裂缝,形成较好的油气储集层^[14,15]。

用弹性薄板弯曲模型模拟褶皱构造已能得到成熟的解析解和数值解,上述长轴背斜应力场性质是从弹性薄板变形及应力的基本假设获得的^[10,16]。由此出发,背斜构造应力场性质可以推广到一般的凸形构造。对于油气勘探,感兴趣的是凸形构造,包括背斜、断背斜构造,底辟构造,潜山披覆构造等,在各种类型沉积盆地中分布广泛,是油气勘探的重点区域,如松辽盆地的农安潜山、济阳拗陷的义和庄凸起、冀中拗陷的任丘古潜山、塔里木盆地的轮南古潜山等均发现了高产油气田。因此,构造应力场研究在

石油勘探中具有重要理论和实用价值。

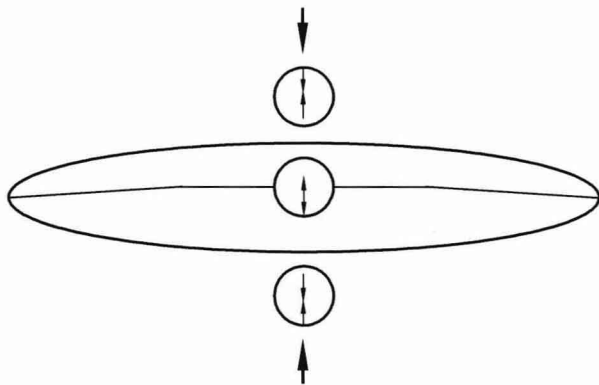


图 1.1.7 长轴背斜褶曲构造应力场模型

2) 简单褶皱地层应力场模型

图 1.1.8 为简单褶皱地层应力场特征图。图 1.1.8(a) 表示层面之间没有滑动, 层面只是岩性变化界面, 整个褶皱地层运动属于非均匀连续介质力学问题。在远场应力作用下, 褶皱地层内应力场分布如图 1.1.8(a) 所示, 阴影区是挤压应力发育区, 箭头表示张应力发育区, 在最上面地层顶部和坡底部分别发育张应力场和压应力场, 与前面长轴背斜应力场特征一致; 中间地层处于过渡状态, 没有明显的张应力区和压应力区的区别; 下面地层的顶部则出现压应力区。由此可知, 在统一远场应力作用下, 褶皱地层的相互层位不同, 其应力场分布特征不同。但若把这三层褶皱地层看作一个背斜构造(对于无相对位移地层可以这样处理), 则这个结果与厚壳模型应力场模拟分析一致^[10]。图 1.1.8(b) 表示层面之间存在相对滑动, 即当越过层面时位移不连续, 其应力场不同于图 1.1.8(a)。即对同一褶皱构造, 构造运动性质不同, 将会改变应力场分布格局。但在图 1.1.8(b) 中层面相互滑动的条件下, 每层应力场分布相同, 并与薄板弯曲模型模拟结果一致^[10](见图 1.1.7), 即每一层应力场独立对应一个薄板弯曲模型解。

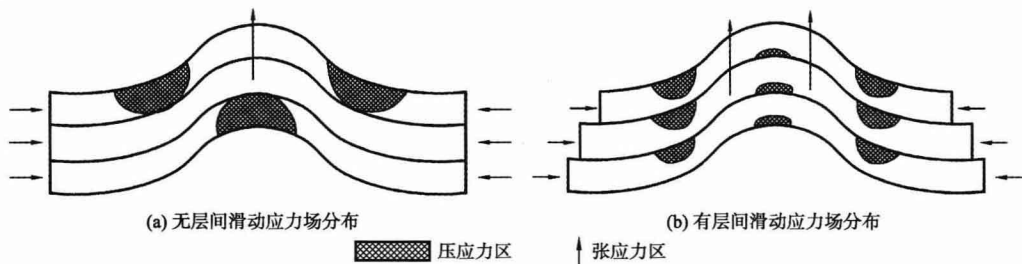


图 1.1.8 简单褶皱地层应力场特征图