

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助

YOUQIZANG XIANJIN DIYINGLICHANG
PINGJIA FANGFA JI YINGYONG

油气藏现今地应力场

评价方法及应用

周 文 闫长辉 王世泽 谢润成 等著

地质出版社

油气藏现今地应力场评价 方法及应用

周 文 闫长辉 王世泽 谢润成
张哨楠 邓虎成 单钰铭 陈 青 张银德 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书系统地概述了地应力的概念、来源、分布规律；阐述了岩石力学参数的研究方法，分析了影响岩石力学参数的地质因素；介绍了现今地应力及地应力方向的确定方法；介绍了国内外几个典型油气藏现今地应力场特征成果；介绍了现今地应力在钻完井设计、完井测试、井壁稳定性、套管损坏、水平井方位确定、压裂施工设计、破裂压力预测、压裂后效果评价、储层的应力敏感性评价、开发方案优化以及油井出砂等方面的应用。

本书内容丰富，观点明确，是油气藏现今地应力特征研究领域的重要著作。本书的出版，可望使国内油气藏现今地应力研究达到一个新的高度和水平。可供石油地质勘探、石油开发技术与研究人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

油气藏现今地应力场评价方法及应用/周文等著. —北京: 地质出版社, 2007. 6

ISBN 978 - 7 - 116 - 05311 - 3

I. 油... II. 周... III. 油气藏 - 地应力场 - 评价
IV. P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 067540 号

责任编辑: 李凯明

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)82324508 (邮购部); (010)82324576 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zhs@gph.com.cn

传 真: (010)82310759

印 刷: 北京地大彩印厂

开 本: 787 mm × 1092 mm 1/16

印 张: 11.75

字 数: 280 千字

印 数: 1—1000 册

版 次: 2007 年 6 月北京第 1 版 · 第 1 次印刷

定 价: 50.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 05311 - 3

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

地应力研究已有百余年历史,目前地应力研究广泛涉及地质、水利水电、矿山、冶金、地震、铁路、建筑及石油与天然气等部门;地应力研究在各行业中的广泛应用,也促进了地应力测量方法、技术的不断改进、发展。在石油天然气工业方面,地应力研究测量技术始于20世纪60~70年代,到目前已广泛应用于石油工程的许多领域,其已成为油气藏工程、油气勘探、钻井、完井、采油气工程方案设计不可缺少的基础数据,在开发井网的布置、钻井过程井壁的稳定性的分析、地层破裂压力的预测、定向井及水平井井身轨迹的设计与控制、油层改造措施中裂缝的方位与几何尺寸的预测、油水井套管损坏的预测及预防、油水井防砂等方面有着重要的应用。

在油气藏地应力研究方面主要向系统化和多方法相互印证方面发展。目前为止,形成的系统方法大体上可分为五大类,主要如下:①构造行迹、裂缝行迹分析法。包括构造行迹、形变分析、裂缝形迹分析,天然地震震源机制分析等。可以定性分析应力场的方向、大小和分布情况,很难进行精确的应力场研究。②实验室岩心试验技术。如差应变分析、波速各向异性测定、滞弹性应变分析、声发射测定等;岩心测量时,很难完全模拟地下条件。③测井资料计算法。井壁崩落应力方向测量,可以确定地应力方向。利用长源距数字声波测井及补偿声波测井、密度测井资料,可进行纵向地应力计算,建立纵向地应力剖面。④矿场应力测量。常用的是水力压裂应力测量,可以获得地应力大小,并定性判断地应力方向,地面电位法应力方向测量、井下微地震波法测地应力方向,套心应力解除等。这些方法可给出比较准确的地应力测量结果与定量描述应力场特点。⑤地应力模拟技术。目前模拟方法主要有物理和数学模拟两类:物理模拟是以相似理论为依据,在人工条件下,用适当的材料来模拟某些构造变形在自然界的形成过程,最常用的有泥巴模拟和光弹模拟;数学模拟是用数学力学的解析方法进行构造应力场模拟计算的,最常用的是有限单元法。这两种模拟方法都有一定的局限性,且大部分模拟只能进行弹性状态下的模拟。通过模拟可获得平面地应力分布,在模拟过程中各种方法结果的相互比较,常常会取得比较好的效果。

另一方面强调地应力在石油工程地质中的应用。目前为止,地应力场在石油工程地质中的主要应用是油气钻井工程、完井工程、致密储层改造(压裂设计、评估等)、致密油气藏开发井网部署等方面。近年有逐渐形成一门独立学科的趋势。

随着全球对天然气的需求不断增加而常规天然气储量日益减少,很多国家都重视致密砂岩天然气资源的勘探和开发,而开发致密气藏的重要手段就是水力压裂。现今地应力场研究方法及其工程地质应用研究十分必要,通过系统总结有关地应力研究的方法体系,提出致密储层有效的地应力研究方法,总结地应力在石油工程地质领域的应用,一方面可以完善现有的油气藏地应力研究理论体系,另一方面为致密砂岩气藏的勘探开发提供参考。

本书共分六章。第一章概述了地应力的有关概念、来源、分布规律，并介绍了现今地应力的确定方法以及十一种研究地应力方向的方法。第二章叙述了岩石力学参数的研究方法，以及影响岩石力学参数的地质因素分析。在第三章中用国内外典型油气藏作为实例应用前两章的方法开展地应力场特征研究。第四章介绍了地应力在钻完井设计、射孔中的应用；地应力与井壁稳定性、套管损坏、水平井方位的确定以及油井出砂的关系等。第五章重点阐述了地应力（场）在压裂施工设计、破裂压力预测、压裂后效果评价等方面的应用研究。第六章介绍了在油气开发中储层的应力敏感性、敏感性评价，以及地应力在开发方案优化等方面的应用研究。

本书能顺利完成，感谢在多年的研究工作中给予作者大力支持和帮助的许多同仁和有关的油气勘探开发公司。书中许多成果均是与这些同仁和公司一起完成的。这里向主要的协作单位表示由衷的感谢！他们是：中石化西南分公司工程研究院；中石化西南分公司测试中心；中石化华北分公司勘探开发研究院；中石油西南油气田分公司勘探开发研究院；中石油四川石油管理局勘探开发研究院。

应当指出，油气藏现今地应力场特征研究是当前学术界的前缘课题，尤其在石油工程地质应用研究方面更是目前石油界的重大课题和实践问题。本书仅从现今地应力场分布的研究方法及在石油工程中的实际应用方面进行论述，还有很多研究内容亟待丰富和完善，希望本书的出版能在地应力场研究，尤其地应力场在石油工程地质中应用方面起到抛砖引玉的作用。

作 者

2006 年 10 月 1 日

成 都

目 次

前 言

第 1 章 现今地应力场研究方法	(1)
1. 1 地应力的有关概念和来源	(1)
1. 1. 1 地应力有关概念	(1)
1. 1. 2 地应力的来源	(2)
1. 1. 3 地应力分布规律	(6)
1. 2 现今地应力的确定方法	(7)
1. 2. 1 压裂法 (HPF) 确定现今地应力	(8)
1. 2. 2 岩石声发射法 (AES) 确定现今地应力	(10)
1. 2. 3 测井法 (ADS) 估算现今地应力	(11)
1. 2. 4 差应变法测量地应力	(12)
1. 2. 5 其他地应力测量方法	(13)
1. 2. 6 地应力剖面的解释软件简介	(15)
1. 3 地应力方向的研究方法	(17)
1. 3. 1 波速各向异性法确定地应力方向	(17)
1. 3. 2 粘滞剩磁法确定主应力方向	(17)
1. 3. 3 天然地震资料确定应力场方向	(19)
1. 3. 4 根据测井资料确定应力场方向	(20)
1. 3. 5 岩心声发射方法实验确定应力场方向	(22)
1. 3. 6 根据有限元法模拟确定地应力场方向	(22)
1. 3. 7 微地震测量结果确定地应力场方向	(22)
1. 3. 8 根据 GPS 测定的地块位移方向确定地应力场方向	(24)
1. 3. 9 利用定向取心资料分析地应力场方向	(24)
1. 3. 10 其他方法	(25)
1. 4 有限元应力场模拟 (FEM) 原理	(25)
1. 4. 1 有限元的基本概念	(25)
1. 4. 2 有限元的基本理论	(26)
1. 4. 3 有限元应力场模拟的基本思路	(29)
1. 4. 4 有限元应力场模拟中的主要问题	(30)
1. 4. 5 有限元软件介绍	(31)

第2章 岩石力学参数特征研究	(33)
2.1 岩石力学参数的确定方法	(33)
2.1.1 实验室岩心测定及结果	(33)
2.1.2 测井资料确定岩石力学参数	(34)
2.2 岩石力学参数特征	(37)
2.2.1 沙溪庙组岩石力学参数特征	(37)
2.2.2 蓬莱镇组岩石力学参数特征	(42)
2.3 影响岩石力学参数的地质因素分析	(46)
第3章 地应力场特征研究实例	(48)
3.1 新场构造地应力场特征	(48)
3.1.1 沙溪庙组地应力大小确定	(48)
3.1.2 蓬莱镇组地应力大小确定	(49)
3.1.3 新场地区地应力方向确定	(52)
3.1.4 沙溪庙组气藏地应力场有限元模拟	(55)
3.1.5 蓬莱镇组气藏地应力场有限元模拟	(58)
3.2 洛带构造地应力场特征	(61)
3.2.1 蓬莱镇组气藏现今地应力场的确定	(61)
3.2.2 蓬莱镇组气藏现今地应力场有限元模拟	(65)
3.3 马井构造地应力场特征描述	(67)
3.3.1 蓬莱镇组气藏现今地应力场的确定	(67)
3.3.2 蓬莱镇组应力场有限元模拟分析	(68)
3.4 白马庙构造地应力场特征描述	(71)
3.4.1 沙溪庙组气藏现今地应力场的确定	(71)
3.4.2 沙溪庙组应力场有限元模拟分析	(72)
3.5 扎赉若尔 KT^{-1-2} 层地应力分布特征	(80)
3.5.1 压裂、测井资料确定现今地应力	(80)
3.5.2 扎赉若尔三维应力场模拟	(85)
3.6 影响现今地应力场分布特征的地质因素	(90)
3.6.1 埋深情况	(90)
3.6.2 地层岩石力学特征对地应力的影响	(94)
3.6.3 构造及断层对地应力的影响	(95)
3.6.4 沉积结构引起应力变化	(100)
第4章 地应力在钻完井工程中的应用研究	(102)
4.1 地应力在钻井设计中的应用	(102)
4.2 地应力与井壁稳定性关系	(104)

4.2.1	井壁拉张破坏	(105)
4.2.2	井壁剪切破坏	(105)
4.3	地应力与完井设计的关系	(115)
4.4	地应力与射孔方式的关系	(115)
4.4.1	地应力与射孔井段选择	(116)
4.4.2	地应力与合理射孔方式	(116)
4.5	地应力与套管损坏关系	(117)
4.6	地应力方向与水平井方位的关系	(119)
4.7	地应力在油藏出砂分析中的应用	(120)
第5章	地应力在压裂施工中的应用研究	(123)
5.1	地应力与压裂施工设计	(123)
5.1.1	地应力与压裂液的选择	(123)
5.1.2	地应力与支撑剂的选择	(124)
5.1.3	地应力与施工排量的关系	(124)
5.2	破裂压力的预测评价	(125)
5.3	地应力与压裂缝关系研究	(128)
5.3.1	地应力状态与压裂缝关系	(128)
5.3.2	地应力剖面与压裂缝关系	(131)
5.3.3	地应力状态与压裂缝特征参数	(140)
5.4	压裂后效果评价	(145)
5.5	地应力与有裂缝井的压裂关系	(149)
5.6	地应力与裂缝有效性关系	(152)
5.7	地应力场分布与整体压裂	(154)
第6章	地应力在油气开发中的应用研究	(156)
6.1	地应力与储层参数	(156)
6.1.1	应力敏感模型	(156)
6.1.2	应力敏感性评价指标	(158)
6.1.3	不同储层应力敏感性评价	(159)
6.2	地应力在油气藏开发中应用	(165)
6.2.1	地应力特征与压裂开发设计	(165)
6.2.2	地应力与渗流场的关系	(170)
6.2.3	开发方案的优化	(173)
参考文献		(176)

第1章 现今地应力场研究方法

1.1 地应力的有关概念和来源

1.1.1 地应力有关概念

(1) 地应力和现今地应力

沉积盆地中的岩层是处于三轴应力状态下的，所谓“应力状态”是指应力的大小和方向，通常采用三个法向应力来表示岩石单元的应力环境： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别代表最大、中间、最小三个主应力，相应用 σ_v 、 σ_H 、 σ_h 分别代表垂向、水平最大、水平最小主应力。按照岩石力学的规定，压应力为正，拉张力为负，剪切应力一般不做限定。

现今地应力是相对古应力而言的，是指地层目前的应力状态。古应力是地质历史时期中某时间的应力状态（包括岩石变形时的应力）。目前地应力一般是岩层在地质历史中经过多期变形、破裂后（应力集中、释放过程）到目前还“剩余”的应力。由于现今构造还在不断活动，严格来讲，现今地应力随着时间是在不断“变化”的“场”，在大部分沉积盆地中，相当一段时间内（按人类活动时间作参照系），由于变化速度小，我们认为其是相对“稳定”的。

(2) 有效应力

盆地中任何一个孔隙性岩石，其外在负荷总是被岩石骨架和孔隙流体所“承受”（Gretener, 1979 讲座）。因此，有效应力是指沉积岩石骨架所“承受”地应力。流体所“承受”的力为地层压力。

Terzaghi (1923)（引自石油工程丛书，地层压力评价）提出了著名的有效应力公式：

$$S = \sigma + P_b \quad (1-1)$$

式中： S ——岩石所“承受”地应力，MPa； σ ——岩石骨架有效应力，MPa； P_b ——岩石孔隙流体压力，MPa。

由于岩石骨架的胶结作用和颗粒间的支撑作用，使得孔隙流体不必“完全承担”其应受的那部分力（Handin, 1963）。因此，上式可以修正为：

$$S = \sigma + \alpha P_b \quad (1-2)$$

其中： α ——修正系数（也称孔隙弹性系数）。

有效应力也是矢量，有大小和方向。长期实践证明，上述公式即使对于孔隙度小于1%的结晶岩石也是适用的（Gretener, 1979 讲座）。文中如果不特别说明，所涉及的应力

均指有效应力。

1.1.2 地应力的来源

地应力的来源比较复杂,一般认为主要由上覆岩层重力、地层压力、构造活动力等方面构成。地层压力是应力的来源之一,由于对其认识清楚,有关问题不做过多介绍。

(1) 上覆岩层重力及“诱导”的水平应力

地应力上覆岩层重力,也称垂向应力(σ_v),主要取决于埋深(h)和岩石的体积密度(ρ):

$$\sigma_v = \int_0^h \rho(h) \cdot g \cdot dh - P_b(h) \quad (1-3)$$

式中: g ——重力加速度, m/s^2 ; $P_b(h)$ ——埋深 h 时的孔隙压力, MPa。

由于上述应力的垂向“挤压”作用,使得具有弹塑的岩石要发生横向变形,在地层中“受限”的情况下,上述垂向应力“诱导”出横向的水平应力。在均一的岩石内,由垂向应力引起的水平应力在各个方向上都是相同的(王平, 1992),其任意方向的正交应力(与垂直应力正交),可以由下式确定:

$$\sigma_h = \sigma_v \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)^{\frac{1}{n}} - P_b \quad (1-4)$$

式中: μ ——岩石泊松比; n ——经验常数。

如果,一个地区地层中仅存在重力及“诱导”的水平应力,在水平方向上处于相对均一应力状态。实际上,绝大部分沉积盆地中的岩石地应力测量结果,水平主应力都有不同程度的差别(Michael 等, 1900)。这说明在水平应力构成中存在其他方面的应力。

(2) 构造应力

由于地壳构造运动产生的构造应力以矢量形式叠加在重力及“诱导”的水平应力之上。如何叠加取决于构造应力的方向。不同的盆地,因处于构造活动的不同部位,其构造应力大小、方向是不同的。即使同一盆地不同的区域、不同的深度所处的构造应力状态也不同。许多情况下盆地中还存在局部构造应力问题,如岩浆侵入体影响范围、断层的错动、岩层变形派生的应力等,都使盆地内不同部位所处的应力环境变得十分复杂。一般来讲,构造应力都考虑成近水平方向叠加在原位应力之上(对于因侵入体、泥火山等引起的近垂向应力,也可以进行垂向等方向的叠加),因此在构造作用比较强烈地区,可以出现水平地应力大于垂直应力的现象。

下面以川西地区为例,说明构造应力的来源问题。中国地震局 1999 年的资料结果表明,在板块结合带是地震活动频率和强度大的地区。川西前陆盆地处于龙门山挤压活动作用的构造背景下,现今构造应力主要来源于印度板块向北俯冲,龙门山推覆构造带向东、东北推覆作用产生的力。已有的研究成果表明,地层中的水平应力差大,说明构造应力存在。据 2002 年的龙门山地区发生的地震活动资料统计,全年共发生大小不等地震 132 次,

从其分布来看（图 1-1），南部与“攀西”裂谷构造带结合的部位发生频率最多，显示现今地应力方向在川西前陆盆地南区有东偏北的趋向。向北因构造活动趋缓，地震发生频率也减少。这一资料说明，龙门山至今还在进行推覆作用，表现出南强北弱的特征。按照过鸭子河的构造剖面显示，龙门山前缘推覆断裂（关口断层）弯曲上翘在 T_3x^2 层附近，因此该区西部地应力作用强，逐渐向东降低（图 1-2）。 T_2 以下地层处于相对低推覆构造应力区。

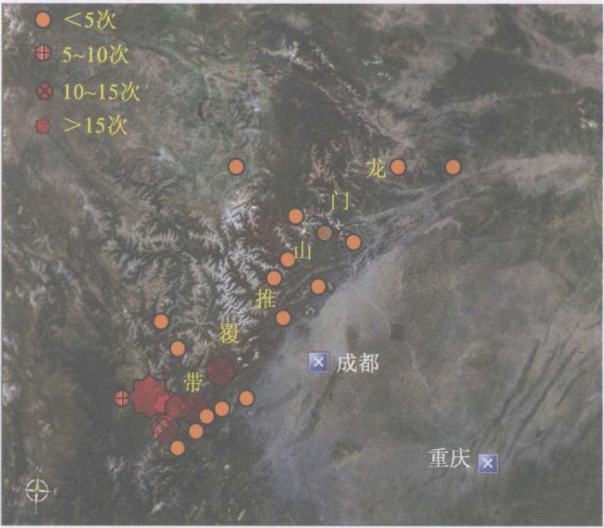


图 1-1 龙门山推覆构造带 2002 年地震分布示意图

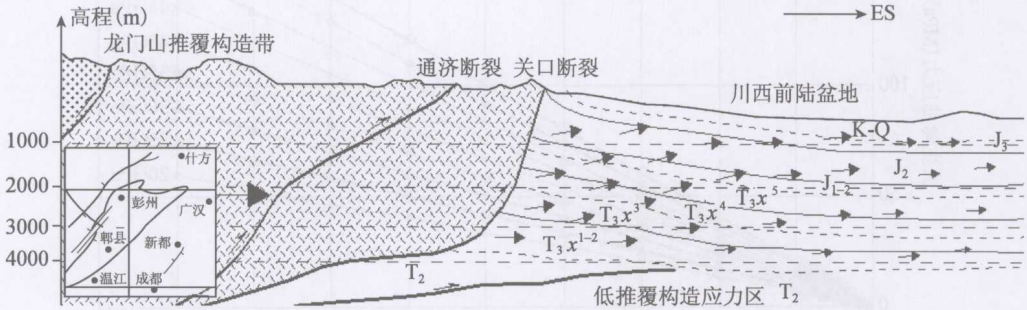


图 1-2 龙门山构造应力传递模式

(3) 地层弯曲派生的应力

由于构造应力作用，岩层弯曲，在中性面以上派生拉张应力，中性面以下为挤压应力区，应力大小与岩层弯曲程度有关（图 1-3）。评价岩层弯曲程度的指标为曲率。曲率与派生应力关系，按完全弹性条件下的关系为：

$$\sigma_n = \left(E \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{d^2 z}{dx^2} \right) / \left(1 + \frac{h}{2} \cdot \frac{d^2 z}{dx^2} \right) \quad (1-5)$$

如果考虑地下塑性情况，有：

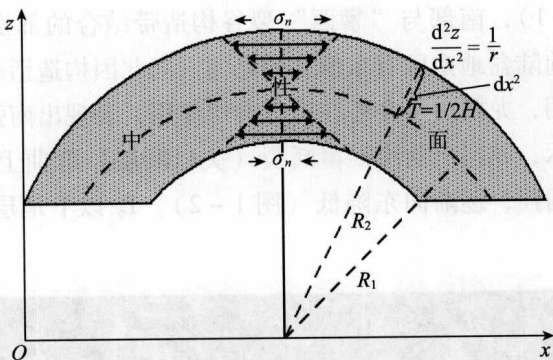


图 1-3 岩层弯曲变形派生应力分布

$$\sigma_n = \left(E \cdot e^r \cdot \frac{h}{2} \frac{d^2z}{dx^2} \right) / \left(1 + \frac{h}{2} \cdot \frac{d^2z}{dx^2} \right) \quad (1-6)$$

式中： σ_n ——弯曲派生应力，MPa； E ——弹性模量，GPa； e^r ——岩石弹塑性系数； h ——变形层厚度，m； $\frac{d^2z}{dx^2}$ ——变形曲率，1/km。

根据上式建立的派生应力与曲率关系图板（图 1-4），可以看出，在变形层厚度为 300m 条件下，随着岩层曲率值和杨氏模量增加，派生应力增加。

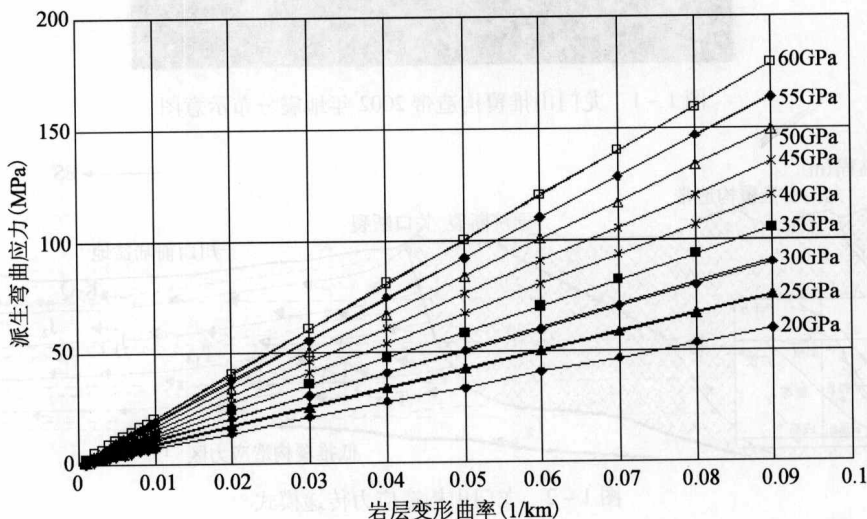


图 1-4 岩层厚度为 300m 时不同杨氏模量条件下变形派生应力

岩层厚度也对派生应力有影响，在杨氏模量为 2.0×10^4 MPa 时，不同厚度岩层条件下，曲率与派生应力关系（图 1-5）可以看出，随着厚度的增加，派生应力也增加。

纵向上变形层越靠近中性面，派生应力越小，越远派生应力越大。

当然，当变形曲率值过大时，由于超过岩石破裂值，岩石产生天然裂缝会使地层应力释放，断裂带同样如此，此时地应力（主要是派生的拉张地应力）就会“丧失”。

应力叠加问题，分两种情况考虑：

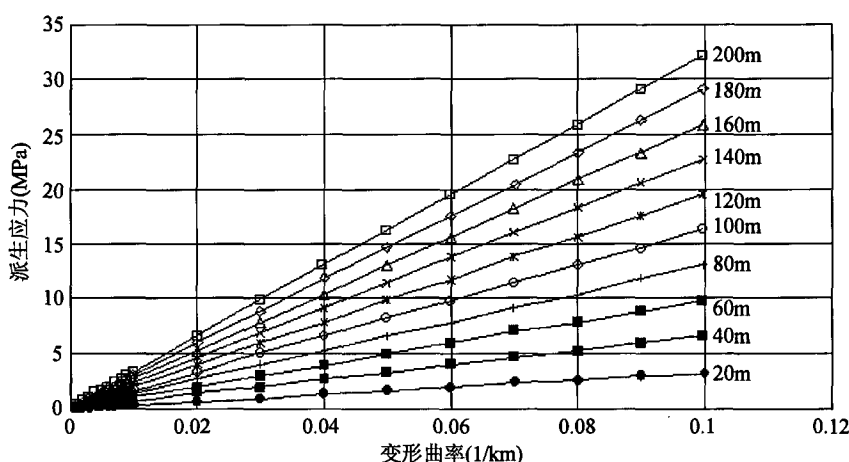


图 1-5 杨氏模量为 20GPa 时不同岩层厚度条件下派生应力

岩层位于变形层中性面上部

处于派生拉张应力区，拉张应力要叠加在现今最小地应力上。如设派生应力与最小主应力交角为 θ ($\leq 90^\circ$)，则叠加后的最小主应力 σ_3^* 为：

$$\sigma_3^* = \sigma_p \cos \theta + \sigma_3 \quad (1-7)$$

拉张区 σ_p 为“负”值，当 $\theta \neq 90^\circ$ 时，其势必抵消一部分（也可能是全部）现今最小主应力。其他应力同样可以叠加。

岩层处于变形层中性面下部

此处的派生地应力性质为压应力（正值），叠加结果，增大了最小主应力。

派生应力方向与岩层弯曲方向（一般为构造轴线方向）相垂直。

(4) 热应力作用问题

盆地中因侵入体的局部热作用、断裂带的热液影响及地层中矿物转化过程中的“释放”等，能够引起局部应力增加。钻井因泥浆的循环，在井壁形成与地层的温差，也可以造成井眼附近的应力变化，当然这种“局部应力”随时间的增加，温度差的减小而逐渐变小或“消失”。

Engelder (1993) 认为由于温差形成的附加应力分量 ($\Delta\sigma$) 为：

$$\Delta\sigma = E \cdot \alpha_t \cdot (T_1 - T_2) (1 - \mu) \quad (1-8)$$

式中： α_t ——岩石热膨胀系数； $T_1 - T_2$ ——地层中两点的温度差， $^\circ\text{C}$ ；其他符号同前。

(5) 其他应力

作为地应力的其他来源可能的方面很多。目前认识到的主要有：①塑性泥岩、盐岩、石膏的“流动”可能使地应力“软化”，造成地应力状态“趋同”，并可能达到与岩层静压力相当 (Michell 等, 1900)；②岩石中的矿相变化引起的局部应力变化，如矿物体积的改变等。

上述的应力来源，一般情况下在沉积盆地中可能是局部因素。

1.1.3 地应力分布规律

(1) 垂直应力分布

胡克和布朗 (Hoek & Brown, 1978) 总结出世界各国垂直应力分量随深度 H 的变化规律 (图 1-6), 反映出垂直地应力主要与埋深有关。实测垂直应力分量随深度呈线性增长, 其量值随不同地区而有所差异。据 Н. К. булин (1951) (转引自孙广忠, 1988) 对世界上许多矿山和盆地的实测地应力结果分析认为, 在 25 ~ 2700m 范围内, 垂直应力与随深度线性增加, 其增加率与一个地区岩层的平均密度相当。

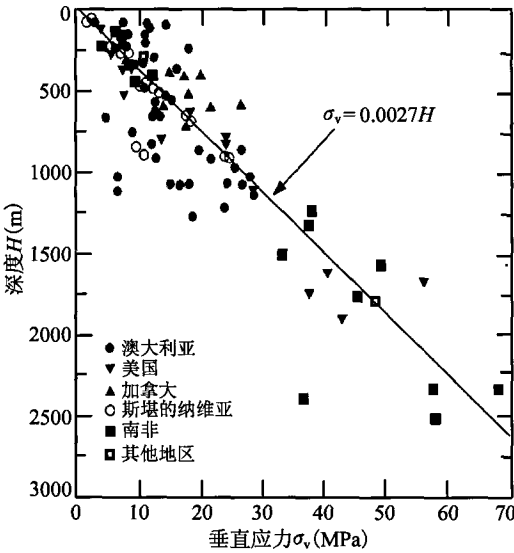


图 1-6 垂直应力与深度的关系
(Hoek & Brown, 1978)

(2) “水平”地应力

许多学者对沉积岩中水平应力进行过测量和分析。G. Herget (1951) 的统计结果表明, 水平应力可能出现三种情况 (图 1-7): ①在构造稳定的地台区, 水平应力一般小于垂直应力; ②当构造应力较小时, 水平应力主要为垂直应力产生的“诱导”应力; ③而在构造活动带或盆地周边地区水平应力一般普遍大于垂直应力。

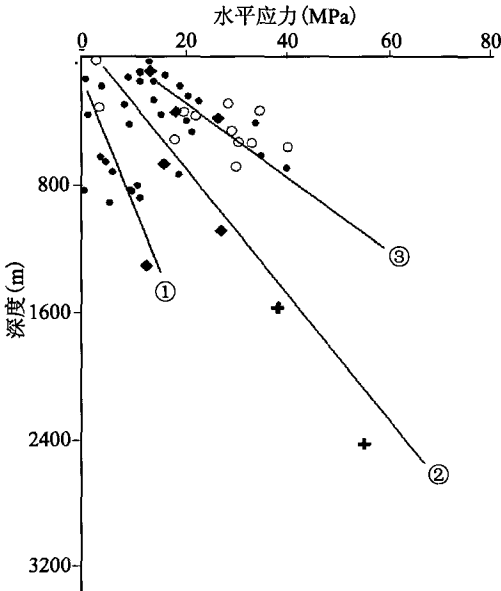


图 1-7 水平应力随深度而增加
(G. Herget, 1951)
①②③说明见正文

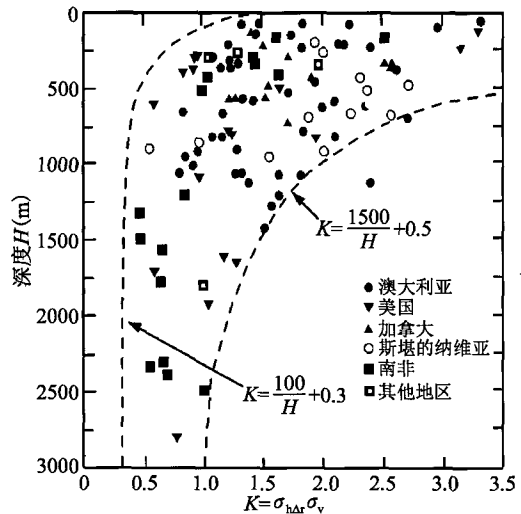


图 1-8 平均水平/垂直应力与深度关系
(Hoek & Brown, 1978)

胡克和布朗 (Hoek & Brown, 1978) 总结出的平均水平应力与垂直应力的比值 K 随深度 H 的变化规律 (图 1-8)。上述关系反映出, 在盆地浅层经常出现水平应力大于垂直应力的情况。这种现象表明, 构造等其他应力作用的存在。

上述资料说明, 沉积盆地中的水平地应力分布具有如下特点: ①水平应力随着埋深的增大而增大; ②两个水平方向在无重力以外的其他应力来源时, 两者相同。当叠加了构造应力后, 两者存在差别, 并具有方向性; ③构造活动区及浅层, 水平应力一般大于垂直应力, 而稳定地台区和深层, 水平应力小于垂直应力, 每个地区因构造、地质条件的不同这种变化可能是不同的。

(3) 地应力方向问题

一般认为地层中岩石单元的应力由垂直地应力和两个水平地应力所构成 (图 1-9)。由于地应力分布的复杂性, 使得应力单元并不是上述简单的情况, 在一些情况下, 应力与水平面有夹角关系。如北海的 Mirren 油田, 因盐丘体作用使得应力围绕盐丘体复杂分布, 造成近最大主。应力方向与水平方向呈 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 夹角 (A. C. Afghoul, 2004) (图 1-10)。

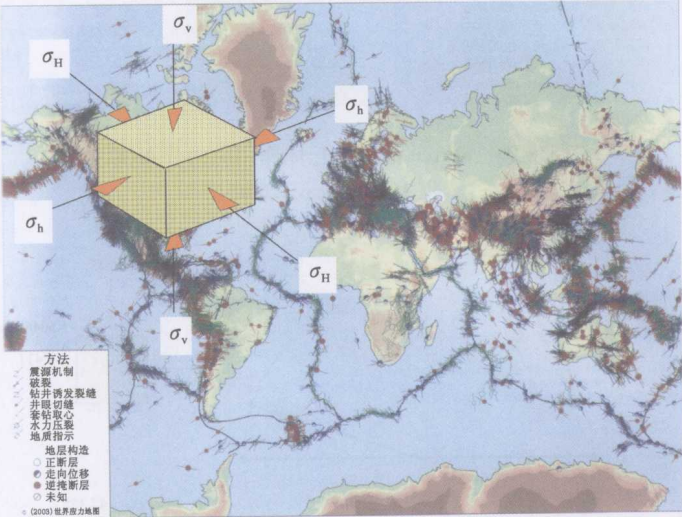


图 1-9 世界地应力方向分布及应力单元

从龙门山推覆构造带的构造行迹分析, 推覆构造作用力方向, 主体为 EW、EN、ES 方向, 川西前陆盆地中不同的构造、不同层位, 以及是否存在断层等, 都可能造成应力方向的变化。

据川西南部白马地区侏罗系蓬莱镇组地层的应力场模拟结果 (图 1-11), 近“水平”的构造应力存在 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 的倾角。这与龙门山前缘推覆断层的产状, 造成的“斜向”推覆作用有关。

1.2 现今地应力的确定方法

目前, 现今地应力研究的方法很多, 限于现场资料和目前已开展的研究工作, 主要介绍已使用的评价方法。

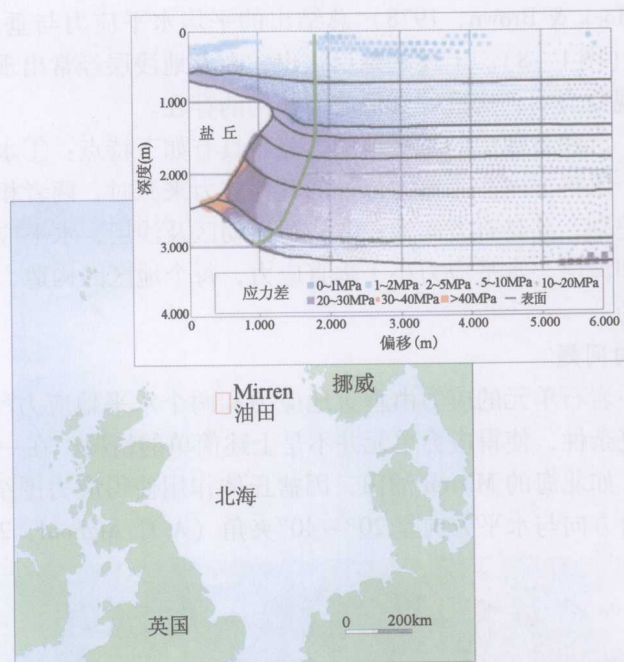


图 1-10 Mirren 油田盐丘体作用应力分布剖面
(据 A. C. Afghoul, 2004)

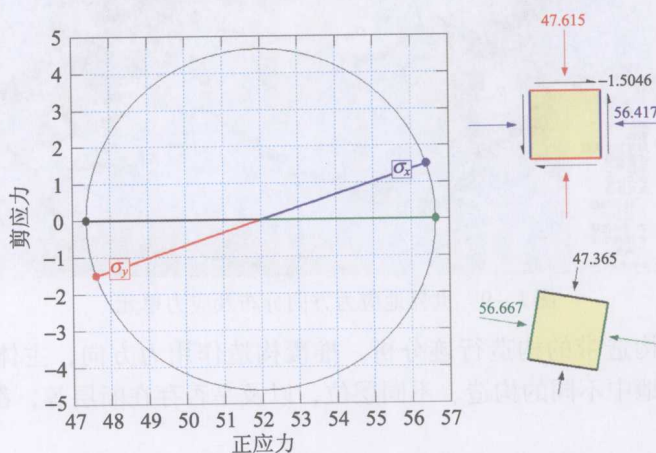


图 1-11 白马 10 井沙溪庙组砂岩顶板应力状态

1.2.1 压裂法 (HPF) 确定现今地应力

利用压裂施工资料确定地应力的方法是目前最直接、最可靠的方法之一。过施工曲线得到的典型点的特征压力值,可以确定出地应力值大小。通常微型压裂施工数据更好使用(消除了邻层,岩性变化等因素影响)。该方法通常称为 HPF 法,计算原理介绍如下。

设在完全弹性条件下,井眼平行某个主应力(一般为垂直方向)钻进时,设水平最大有效应力为 $\sigma_{\max}$; 水平最小有效应力为 $\sigma_{\min}$; 井眼液压为 P_w ; 地层压力为 P_b (图 1-12)。

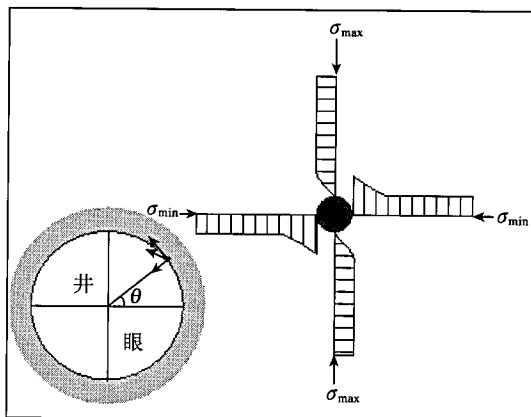


图 1-12 圆形井眼周围应力分析

周向应力为:

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \left(1 + \frac{r_a^2}{r_i^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \left(1 + 3 \frac{r_a^4}{r_i^4}\right) \cos 2\theta - P_w \frac{r_a^2}{r_i^2} \quad (1-9)$$

法向应力:

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \left(1 - \frac{r_a^2}{r_i^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \left(1 - 4 \frac{r_a^2}{r_i^2} + 3 \frac{r_a^4}{r_i^4}\right) \cos 2\theta + P_w \frac{r_a^2}{r_i^2} \quad (1-10)$$

切向应力:

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \left(1 + 2 \frac{r_a^2}{r_i^2} - 3 \frac{r_a^4}{r_i^4}\right) \sin 2\theta \quad (1-11)$$

式中 r_i ——距井眼中心的径向距离, mm; r_a ——井眼半径, mm。

对于井壁, $r_i \rightarrow r_a$, 有:

$$\sigma_r = P_w$$

$$\sigma_{\theta} = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) - 2(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cos 2\theta - P_w$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

当 $\theta = 0$ 时, σ_{θ} 为最小值, 即:

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_{\min} - \sigma_{\max} - P_w \quad (1-12)$$

如果地层中通过压裂, 在井壁出现垂直开裂时, 按最大拉应力理论, 当 $\sigma_{\theta} = -\sigma_t$ (岩石抗张强度) 时, 岩石产生破裂, 得到孔壁破裂的应力条件为:

$$\sigma_{\max} = 3\sigma_{\min} - P_w + \sigma_t \quad (1-13)$$

如果岩体内孔隙压力为 P_b , 式 (1-13) 变为:

$$\sigma_{\max} = 3\sigma_{\min} - P_w + \sigma_t - P_b \quad (1-14)$$

最小水平主应力 (或 $\sigma_{\min}$) 的确定

$$\sigma_{\min} = P_{so} + \rho \cdot h - P_b - P_m \quad (1-15)$$

式中: ρ ——压裂液密度, g/cm^3 ; h ——压裂段井深, m; P_{so} ——瞬时停泵压力, MPa;