

国外油气勘探开发新进展丛书 (三)
GUOWAI YOUQI KANTAN KAIFA XIN JINZHAN CONGSHU

Origin and Prediction of Abnormal Formation Pressures

石油科学进展 50

异常地层压力成因与预测

Origin and Prediction of Abnormal Formation Pressures

石油工业出版社

(美) G.V. 奇林格 V.A. 谢列布里亚科夫 小J.O. 罗伯逊
赵文智 柳广弟 苗继军 等译

国外油气勘探开发新进展丛书(三)

石油科学进展 50

异常地层压力成因与预测

[美]G.V. 奇林格 V.A. 谢列布里亚科夫 小 J.O. 罗伯逊
赵文智 柳广弟 苗继军 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对异常地层压力的成因、预测和分布与成岩作用,以及后生作用变化对异常地层压力的影响等作了系统论述,同时对相关的数学模型的建立等也有讨论,并提出了一些异常地层压力的预测方法。

本书可供从事油气田勘探、开发的工程技术人员使用,也可供相关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

异常地层压力成因与预测/(美)G. V. 奇林格等著;赵文智等译.

北京:石油工业出版社,2004.9

(国外油气勘探开发新进展丛书.第3辑)

书名原文:Origin and Prediction of Abnormal Formation Pressures

ISBN 7-5021-4764-0

I. 异…

II. ①奇…②赵…

III. 油层压力

IV. TE311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 086491 号

Copyright © 2002 by Elsevier Science B. V.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transcribed in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording, without the prior written permission of the publisher.

本书经 Elsevier Science B. V. 授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

著作权合同登记号图字 01-2004-3919

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

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:18.5

字数:470 千字

定价:78.00 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

《国外油气勘探开发新进展丛书(三)》

编 委 会

主 任：刘宝和

副 主 任：冉新权 张卫国

编 委：吴 奇 赵文智 刘德来 李 阳

沈 琛 张守良 阎建华 周家尧

张仲宏 李 斌 丁云宏 张烈辉

咸玥瑛

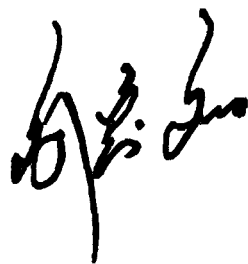
序

为了跟踪国外油气勘探开发的新理论、新技术、新工艺,提高中油股份公司油气勘探开发的理论和技术水平,提高整体经济效益,中油股份公司勘探与生产分公司有计划地组织有关专家对国外油气勘探开发及生产方面的新技术、新理论、新成果进行调研引进、吸收,并翻译出版,推荐给油田广大技术人员及管理干部,以期能达到促进生产、更新知识、提高业务水平及技术水平的目的。第一批与第二批引进 10 本专著后,产生了较好的社会效益,得到了广大读者的高度关注和认可,普遍认为翻译质量高,出版质量好,内容满足实际需要。

为了进一步搞好股份公司石油勘探开发的科技发展事业,促进石油工业发展,我们在前两辑出版的基础上,经过多次调研、筛选,又推选出国外最新出版的 6 本专著,即《计算机辅助油藏管理》、《实用油藏模拟技术》、《储气库的设计与实施》、《酸化增产技术》、《异常地层压力的成因与预测》、《三次采油新进展》,以期追踪国外油气田勘探开发的热点问题和切合我国油气田开发实际需要的实用技术。

在全套丛书的引进、翻译出版过程中,勘探与生产分公司和石油工业出版社组织了一批著名专家、教授和有丰富实践经验的油田工程技术人员担任该书的翻译和审校人,并使本套丛书得以高质高效地出版。希望各油田及科研院校从事于勘探、开发工作的管理人员、技术人员以及研究人员读读这套丛书,同时在实践中应用之,这将会对今后的工作起到一定的指导和推动作用,为搞好油田勘探开发,实施低成本战略,创造更大效益做出贡献。

中国石油天然气股份有限公司副总裁



译者前言

有关地层异常压力的研究已有 50 多年历史,但并非所有方面的机理与特征都十分清楚,并在油气田勘探时坦然面对。比如,天然气的垂向运移和气—液再分配可引起压力异常升高,在天然气大规模生成阶段可能很普遍,并可能是天然气运移的一个主要因素。

异常地层压力(Abnormal Formation Pressures)在世界各地都分布广泛,把高于或低于静水压力的孔隙流体压力称为异常地层压力。包括异常高压和异常低压两种情况,高于静水压力的压力通常称为异常高地层压力(AHFP)或超压,而低于静水压力的称为异常低地层压力(ALFP)或低异常压力。两种异常压力的成因是多方面的,可能是由物理的、化学的或两者综合因素引起的。比如,蒙脱石—伊利石转化作用可以促进或导致地层异常高压。然而,在许多情况下,由于孔隙水中缺乏钾离子和地温梯度低等因素,就不会形成异常地层高压。异常高孔隙流体压力可能是由局部和区域性的构造作用造成的。地壳板块运动、断裂、褶皱、侧向滑动和平移,断块下降所产生的挤压、盐体底辟和(或)页岩运动与天然地震等,都能影响到地层孔隙压力。

Hobson(1954)在解释异常地层压力成因时,提出了流体压力系统的宏观概念,即流体压力系统或是开放的,或是封闭的。他认为一个理想的封闭系统是指在地质历史上流体压力一直未下降的系统,而开放的系统是指过剩地层压力随着时间流逝而下降的系统。人们对地下流体异常压力形成的机制已经提出了很多假设并在实践中验证了客观存在。Clark(1961)在构造挤压的成因机制中提出了“构造超压”的概念。Dickey 等(1968)提出断层理论。Rieke 和 Chilingarian(1974)、Magara(1975)以及 Plumley(1980)分别探讨了压实作用产生不平衡异常流体压力的机制。Cilreath(1968)、Johnson 和 Bredeson(1971),则认为盐和泥的底辟作用也可以产生异常压力。另一些学者,如 Harkins 和 Baugher(1969)、Kharaka 等(1977)、Donaldson(1980)等还讨论了异常地层温度对保持异常高压所起的作用(尤其是墨西哥沿岸)。Powers(1967)、Hanshaw 和 Bredehoeft(1968)对成岩作用和后生作用期间的矿物相变进行了研究。Mckelvey 和 Milne(1962)、Hanshaw 和 Zen(1965)、Swarbrick 和 Osborne(1998)等研究了渗透压力。

有必要强调的是,50 多年以前,物理学、土壤力学与地球化学等学科对引起压力偏离静水压力的所有机理都几乎已经熟知。遗憾的是,这些石油地质学直接领域以外的知识一直未被充分关注和利用。

深入了解沉积盆地中流体压力环境与分布有助于油气的勘探与开发,因为盆地流体的流动主要与压力变化有关(Yu 和 Lerche,1996)。比如,异常低压流体封存箱就对世界油气的勘探和开发具有十分重要的意义。由异常低压形成油气圈闭这种新的圈闭类型,可能与大量上覆载荷遭受剥蚀或者由于地壳隆升及剥蚀导致局部温度变化,进而引起孔隙流体压力降低有关。油气的聚集体是烃类生成、运移、圈闭、封盖和保存作用的函数,所有这些因素都受一定热化学背景下流体运动史的影响。

本书对异常压力的成因、预测和分布与成岩作用和后生作用变化对异常压力的影响等作了系统论述,同时对相关的数学模型的建立等也有讨论,并提出了一些异常地层压力的预测方法。书中还收集了 Gurevich 等(1987)提出的一种用于对油田和区域性非静水压力和压力变化机理研究的新方法。书中还讨论了孔隙流体成因的观察、对活跃的化学成岩过程的测量,以及在沉积盆地演化过程中由上述过程所产生的质量变化的特征等,旨在提出并试图证明一个假设模型,用于解释第三系重力压实沉积盆地中砂岩孔隙水和泥岩孔隙水之间的盐度差异等。

本书翻译由赵文智统一组织。各章节主要译者和校者是:第 1、13 章,赵文智、苗继军;第 2 章,王兆云、陈振宏;第 3、5、11 章,柳广弟;第 4 章,罗平;第 6 章,刘玉石;第 7 章,李劲松;第 8、9 章,魏国齐;第 10 章,张水昌;第 12 章,张庆春、李巧云;目录和前言由陈振宏、赵文智翻译。全书由赵文智统稿和定稿。由于译者的知识水平和对英文的理解能力有限,书中谬误在所难免,故请读者见谅。

本书的翻译出版得到了石油工业出版社的大力支持。此外,本书稿在校对与校正过程中,还得到了陆洁名等人的帮助,在此一并深致谢意。

译 者

2004 年 6 月

致 谢

仅以此书献给皇太子殿下、副总理、沙特阿拉伯王国国民警卫队队长阿布杜拉·本·阿布杜拉孜孜王子殿下,感谢他为了提高人类的福利,而给予我们在工程和自然科学的各个分支学科毫无保留的支持。

前 言

该书的目的是为石油工业中工作的地质学家和工程师们提供关于与油气聚集有关的地下异常压力系统的最新认识。异常高压带或异常低压带简洁的定义就是具有某种孔隙压力梯度趋势的地带,这种压力梯度趋势偏离了特定深度范围的正常静水压力梯度趋势。

G. V. Chilingar 博士、V. Serebryakov 博士和 J. O. Robertson 博士召集了一些专家,系统地调查了关于异常压力环境的全球分布、成因和预测的自然科学和工程学方面的最新进展。这些投稿者有地质学家、地球化学家、地球物理学家和石油工程师,他们具有多年研究、策划、发现和解决不同压力环境和地下大规模压力转移现象的丰富经验。他们的成果是建立在对异常压力现象提出的思想和概念的科学细节进行严格细致地调查这一基础之上的。他们揭示了大量与这类压力系统有关的大规模运移过程的性质,以及伴生的地化和矿物学变化模式。作为石油工程师和地质学家,即使著作中提出的许多关于异常压力系统结构的关系仍只是观察性的和经验性的,我仍深信他们的探索是绝对有价值的。

为了寻找大型油气田,石油工业的勘探工作已经进入远离海岸的大陆架以外的深水环境。地层异常高压在地质学上相对晚期的沉积环境中普遍存在,必须在钻井或完井之前确定这些异常高压的规模。地下压力域复杂而危险,为了提高钻井和开发操作的安全性,需对地下压力条件进行地震勘探和先期的了解。当然,小心谨慎可以降低压力波动、井喷、公司未实现的现金流的破坏和钻井工人潜在的伤亡的风险。本书大部分章节的重点技术就是压力预测。

尽管异常压力带的这一课题源于上世纪,但是应用热动力学来解决物理化学问题目前仍处于探索中。近期发表的文章有助于重建我们关于异常压力带的形成和持续,以及产生的物理和化学现象的观念。流体流动模式的动力来自差异压实或构造应力环境、盐层的存在,以及导致孔隙水矿化度和其中的溶解气含量变化的高地温的存在。这些过程决定了地下压力的范围、完整性、区域地层分布以及成岩作用(后生作用)。异常压力带的性质随着地质时间波动,成岩演化(后生演化)史表现在水化学和相关矿物,尤其是泥质矿物的相应变化上。关于 Caspian 盆地缺乏蒙脱石向伊犁石的转化讨论很具启发性。

希望该书所提供的知识能够提高油田工作质量,激发革新性的野外和实验室研究工作,并能为地质科学家和工程师们分析性探讨提供养分。除了对异常压力常规主题的讨论,还有两章强调其他相关问题。一个重要的辅助主题是开采引起的地面沉降。地面沉降是由于流体采出引起的异常地层低压所致,页岩中的地层水流入油气开采枯竭区而导致页岩压实。另一章探讨了析析模型研究方法,该方法通过增加对可靠压力预测策略的研究来完成对异常压力的描述。

总之,本书会成为深受欢迎的新石油文献。

H. H. Rieke
美国,洛杉矶, Lafayette

目 录

1 异常地层压力简介	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 异常压力	(1)
1.3 垂向阻挡层造成异常地层压力的机理	(2)
1.4 异常压力环境中的油藏工程问题	(9)
1.5 超压环境中的经济学	(10)
1.6 小结	(11)
参考文献	(12)
2 异常地层压力的成因	(15)
2.1 引言	(15)
2.2 压实过程	(17)
2.3 压实页岩中的应力状态	(21)
2.4 压实模型	(33)
2.5 异常压力的产生和保持	(39)
2.6 异常地层压力的形成机制	(42)
2.7 结论	(48)
参考文献	(48)
3 地层流体压力分布的成因	(52)
3.1 引言	(52)
3.2 引起流体流动和压力分布的因素	(53)
3.3 两个分量叠加后的压力表示	(57)
3.4 地下流体强迫对流主要因素和相关特征	(59)
3.5 相关术语的定义	(70)
3.6 结论	(71)
参考文献	(71)
4 异常高压环境下的蒙脱石—伊利石转化	(74)
4.1 导言	(74)
4.2 讨论	(87)
4.3 总结	(89)
4.4 结论	(90)

参考文献	(90)
5 异常地层压力的评估与预测方法	(92)
5.1 前言	(92)
5.2 由不平衡压实引起的区域性异常高压的预测	(94)
5.3 由于温度变化而形成的异常压力	(96)
5.4 盆地中永久冻土区异常低压的评价与预测	(97)
5.5 上升和下降区的地层压力(沉积岩的抬升和沉降)	(98)
5.6 钻井进程中异常孔隙压力的计算	(99)
5.7 异常高压带放射性研究	(104)
5.8 脉冲中子捕获测井	(106)
5.9 泥岩水的注入—排驱机制	(110)
5.10 多种地球物理测井方法——概述	(111)
5.11 结论	(111)
参考文献	(112)
6 钻井参数	(114)
6.1 钻速	(114)
6.2 标准化钻速法(d 指数法)	(114)
6.3 钻井水力参数的影响	(117)
6.4 钻头的影响	(118)
6.5 过平衡	(118)
6.6 钻速方程	(118)
6.7 孔隙度和地层孔隙压力录井	(119)
6.8 随钻录井	(121)
6.9 扭矩	(121)
6.10 摩阻	(121)
6.11 钻井液参数	(122)
6.12 页岩岩屑参数	(124)
6.13 异常高压环境中钻井理论	(125)
参考文献	(125)
7 压力预测的地球物理方法	(128)
7.1 简介	(128)
7.2 利用地球物理资料预测异常油藏压力	(128)
7.3 经验关系	(129)
7.4 实际应用	(132)
参考文献	(145)

8 构造与超压地层	(147)
8.1 引言	(147)
8.2 断裂产生超压地层	(147)
8.3 页岩底辟作用(泥团块,泥火山).....	(152)
8.4 利用页岩相关的电阻率与密度测量预测构造运动成因的异常高压	(154)
8.5 碳酸盐储层中超压的起因与分布	(154)
8.6 结论	(157)
参考文献.....	(158)
9 含盐富气层系异常高压预测研究	(161)
9.1 前言	(161)
9.2 接近超压带的标志	(161)
9.3 超压带位置的确定	(163)
9.4 超高压地层定量预测	(167)
9.5 结论	(169)
参考文献.....	(170)
10 与超压有关的孔隙水压实化学作用.....	(171)
10.1 引言.....	(171)
10.2 概论及其限定.....	(172)
10.3 地下盐水的化学组成.....	(181)
10.4 研究流体化学性质的压实模型.....	(213)
10.5 孔隙流体的同位素研究.....	(218)
10.6 总结和结论.....	(220)
参考文献.....	(223)
11 异常低地层压力.....	(230)
11.1 引言.....	(230)
11.2 异常压力的成因.....	(231)
11.3 温度变化和剥蚀作用对孔隙压力影响的评价.....	(235)
11.4 小结.....	(240)
参考文献.....	(240)
12 地层异常高压数学模拟.....	(242)
12.1 引言.....	(242)
12.2 动态系统模拟方法.....	(242)
12.3 解析方法.....	(243)
12.4 解析模型.....	(244)
12.5 数值模型.....	(249)

12.6 区域构造和岩性模拟..... (252)

12.7 封闭层中地层压力随时间变化的数值标准和敏感性分析..... (256)

12.8 流体流动在下部地层边界保持不变时的地层压力..... (259)

12.9 油层导电函数的确定..... (265)

12.10 结论 (272)

本章使用的符号说明..... (272)

参考文献..... (273)

13 流体开采、地面沉降和储层压力间的关系 (276)

13.1 简介..... (276)

13.2 岩石的压实..... (276)

13.3 结论..... (280)

参考文献..... (281)

单位换算表..... (282)

1 异常地层压力简介

1.1 引言

由于地层中液压和构造作用的变化,地下地层流体压力(在空间内)存在很大的差异。地下孔隙间流体压力与流体静水压力差就被看作是异常地层压力。静水压力相当于目的层至水源水柱的垂直高度,有:

$$p_h = \gamma_w \cdot h \quad (1.1)$$

上式中 p_h 是静水压力,单位为 lb/ft^2 , γ_w 是水的相对密度,单位为 lb/ft^3 , h 是水柱高度,单位为 ft 。静水压力梯度为 G_h ,单位为 psi/ft , G_h 等于:

$$G_h = \gamma_w / 144 \quad (1.2)$$

如果水的相对密度为 $62.4 \text{ lb}/\text{ft}^3$,则压力梯度 $G_h = 0.433 \text{ psi}/\text{ft}$ ($0.10 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$)。

水的相对密度是其含盐度、温度以及溶解气含量的函数。因此,静水压力梯度在不同地方通常是变化的,通常认为平均静水压力梯度估计值取 $0.465 \text{ psi}/\text{ft}$ ($0.074 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$),这一估计值符合按照温度为 25°C (77°F)、氯化钠含量为 $80000 \text{ mg}/\text{L}$ 的水(Dickinson, 1953)。在正常静水压力梯度条件下,地层之间会发生流体交换(纵向)。如果有一层或多层地层纵向上为不渗透性,流体压力交换不能发生,那么在相同地质环境中正常和异常地层压力就可以同时存在。

平均总上覆(静岩压力)压力梯度是岩石(颗粒间或岩石骨架应力)及其隙间流体压力结合作用的结果,该值取 $1.0 \text{ psi}/\text{ft}$ ($0.231 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$):

$$p_{\text{ob}} = p_e + p_p \quad (1.3)$$

上式 p_{ob} 代表总的盖层压力(静岩压力),该值随深度的增加而增加; p_e 是粒与粒接触施加的应力; p_p 是(岩石)孔隙流体压力。流体静水压力梯度不可能超过总的上覆岩层负荷的压力梯度。因此,任何静水压力梯度介于 $0.465 \sim 1.0 \text{ psi}/\text{ft}$ 之间的储层被认为具有异常高压。事实上,就像 Swarbrick 和 Osborne (1998)所指出的,当沉积物孔隙度较高时($60\% \sim 70\%$),静岩压力梯度为 $0.7 \text{ psi}/\text{ft}$ 。只有在大约 1 km 深度处,这一变量才达到约 $1.0 \text{ psi}/\text{ft}$ 。

有许多因素都可以引起异常地层压力,异常压力可能高于,或低于区域正常静水压力梯度下的压力值。

1.2 异常压力

1.2.1 异常低压

在石油工业众多探井实例中,所遇到的异常低压(Subpressures 或 ALFPs)远少于异常高压。在美国的 Arkansas、阿巴拉契亚(Appalachian)山的某些地方、东科罗拉多(eastern Col-

orado)平原以及俄克拉荷马—得克萨斯(Oklahoma—Texas)狭长地区,发现异常低压的存在。别的异常低压发现地分别位于加拿大的阿尔伯达中心,俄罗斯的西伯利亚油田,以及中东干旱地区等。许多异常低压都是因为从储层中开采油气和水而人为诱发的,开采降低了孤立储层中的孔隙压力,而这样的储层又没有足够的流体流入以补偿被抽出的流体空间。在许多情况下,地层压力的减少导致地面沉降,有时会对地表构造产生巨大的破坏作用。由于流体被采出而导致的地面沉降的例子发生在:意大利的 Po Delta、委内瑞拉马拉开波湖的玻利瓦尔滨岸、田纳西的加尔维斯顿海湾、加利福尼亚长垣、日本、中国的台湾和别的地区(Chilinarian 等, 1995)。

得克萨斯州 Amarillo 附近的 Granite Wash 产油层的地层压力仅为预想的正常静水压力的二分之一。Levorsen (1967)给了一种可能的解释,即 Wichita 山东面俄克拉荷马州的 Granite Wash 地层露头的高程比 Texas 油田地表高程要低约 305m(1000ft)。中东半干旱地区的异常低压是因为地下水位非常低(有些地方达几千英尺),而静水压力梯度是从地下水位深度开始计算的。

1.2.2 异常高压

地层流体异常高压(AHFPs 或 abnormally high formation pressures)在进行过油气钻探的世界各大陆遇到过。Hunt 指出异常高压在全球约 180 个盆地都存在。例如,根据 Law 和 Spencer(1998),在美国 Gulf Coast 地区至少有 7 个地层单元具有异常高压,地层年代从侏罗纪至今均有分布。

这些流体储集层处于一种封闭的环境中,或者至少流体向外的流动是受限制的,孔隙流体承担了部分的上覆岩层负载。只有当地层被非渗透性阻挡层分隔,异常高压才会存在。这些阻挡层的成因可能是物理的、化学的或者是两者的结合(Louden, 1972)。异常高压的形成机理有很多:包括(1)压实;(2)构造挤压;(3)断层作用;(4)底辟作用;(5)异常高地温梯度;(6)矿物相变;(7)油气生成作用;(8)烃类气体沿断层的上迁作用;(9)渗透作用等。地下流体的封盖层和异常高孔隙压力区的发育机理非常复杂。上面列出的所有上述机理的任意组合以及在地质时间通道中共同作用,导致了物理化学环境的变化(Fertl, 1976)。

1.3 垂向阻挡层造成异常地层压力的机理

图 1.1 表示近似的平均地下压力梯度。沉降和压实的速率以及岩石密度决定上覆压力梯度。如图 1.1 所示,静水压力梯度为 10.5 kPa/m (0.454 psi/ft),而另一个极端静岩压力梯度为 22.6 kPa/m (1.0psi/ft)。美国 Gulf Coast 地区经受高压地质力的储层在深度超过 3000m 时地层压力梯度增加到了约 20.3kPa/m (0.9 psi/ft)。因此,在经受地质力高压的地区,流体所受压力可能高于 68MPa(约 10000psi)。正常压力梯度地层与其上高压带共存的前提条件是它们之间有分隔层存在,保证在数百万年的地质时间内,流体不能进行垂向渗透,地质高压带之上的盖层也是非渗透性的。

1.3.1 欠压实

含有大量粘土矿物的沉积物在快速沉积埋藏过程中,沉积物的欠压实就可能发生(Rubey and Hubbert, 1959; Wilson 等, 1977)。由于地层水不能完全排出,导致沉积物内部形成由溶

胀的粘土颗粒和层间水组成的松散封闭系统。

该系统中,快速沉积涉及大量泥质,砂体会被泥质包围,如果沉积物负载率很高,砂体周围泥岩的渗透性将快速降低。因此,砂体中的孔隙水就不能纵向穿过上覆的含粘土沉积物。于是,对盖层负载的支撑就被转移给孔隙间流体,地层内由于孔隙间流体受到新沉积负载而变成异常高压层。这样流体就支撑了总负载的大部分[见公式(1.3)]。

如果经受沉降的地层中地层水的运移速率与沉降率相同,负载增加形成的过剩流体压力将散佚,在沉降压实作用过程中静水压力在整个深度范围内得以保持 (Johnson 和 Bredeson, 1971)。

1.3.2 构造挤压

造山带的侧向挤压会造成异常高孔隙压力。北怀俄明(美国)白垩系泥岩遭受侧向挤压而变形,变形使得层内流体通过渗透性地层排出,地层孔隙度降低,封闭带内地层压力增高(Rubey 和 Hubbert, 1959)。在 Ventura 油田(加利福尼亚)最初钻探期间发现流体压力几乎等于上覆地层压力。断裂带和褶皱带的存在说明某些异常高压是侧向构造应力的作用引起的(Watts,1948)。据 Anderson 报道,在紧邻喜马拉雅山脉底坡褶皱带以南的巴基斯坦西部的 Potwar 高原发现了异常地层高压;在巴基斯坦西部的 Khaur 油田,异常高压也是和褶皱带联系在一起的。

在挤压力的作用下,页岩中的水会被挤进相关的储集岩中(砂岩或碳酸盐岩),造成超压(见第 8 章)。

一个地下立方体单元受 9 个分应力作用:三个主应力,即正应力 σ_i ,作用于三个垂直于坐标主轴的平面;6 个剪应力,作用于垂直于主坐标轴的立方体面, τ_i , [式(1.4),图 1.2]。这 9 个应力的张量可用下式来表达:

$$S = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Bmatrix}$$

(1.4)

若挤压作用是由于构造的水平挤压应力产生的,如褶皱作用,则最大主应力是水平方向的(σ_x),而最小主应力是垂向的(σ_z),且等于单位面积的上覆岩层载荷(p_{ob})。最大和最小有效应力可用下式表示:

$$p_{ex} = \sigma_x - p_p$$

(1.5)

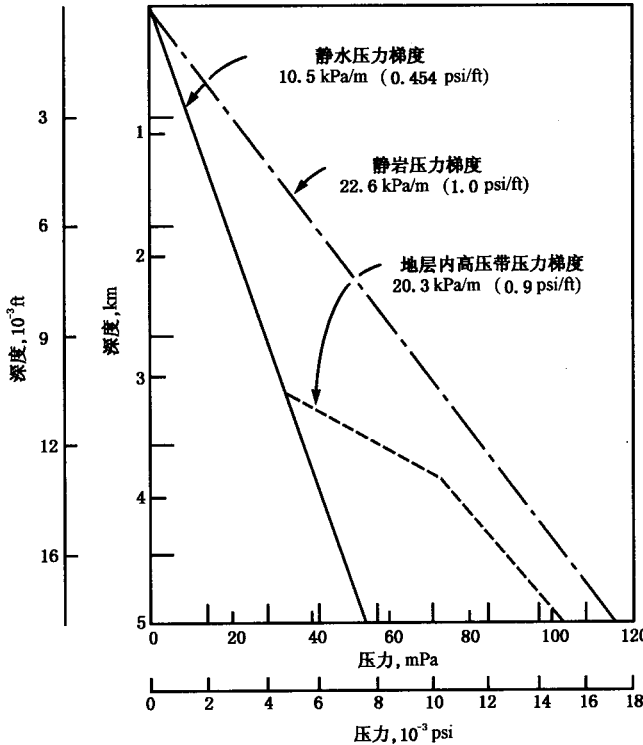


图 1.1 地质高压带中近似平均地下压力梯度图

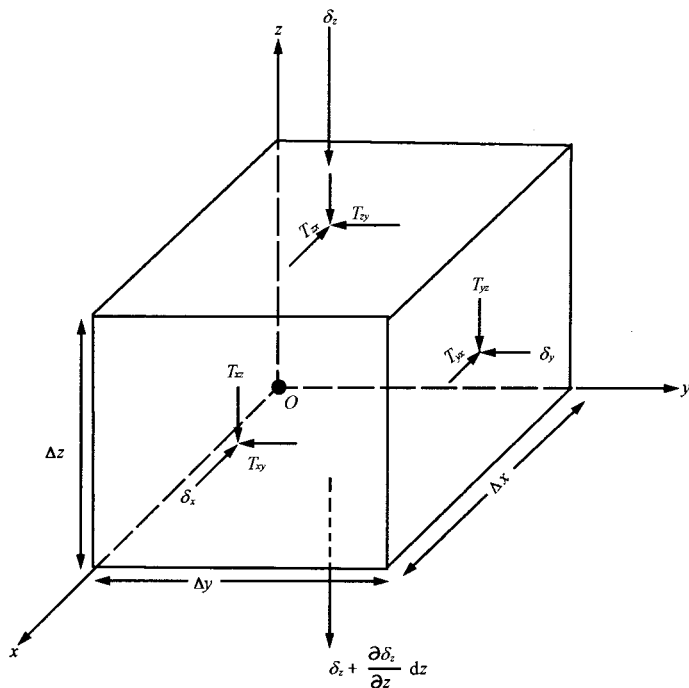


图 1.2 立方体状含泥质岩石片上的应力表示方法
正应力分量符号 σ_z , 作用于垂直 z 轴的面。 τ_{xz} 和 τ_{zy} 代表在垂直于 z 轴面而各自作用于 x 和 y 方向的剪切应力分量。 $\sigma_z + (\partial\sigma_z)/(\partial z)dz$ 是整个自由单元的垂向应力的递增变量(改编自 Rieke 和 Chilingarian, 1974, 图 52, 93 页)

$$p_{ez} = \sigma_z - p_p \quad (1.6)$$

p_p 为孔隙流体压力。若上覆压力 σ_z 固定, 且有效水平应力 p_{ex} 增长速度比孔隙压力通过裂缝从地层散失的速度更快, 那么孔隙压力将持续增长, 直至最大值, 即等于负载压力 ($p_p = \sigma_z$), p_{ex} 则等于零, σ_x 将向岩石的破裂应力增长。在这种情况下, 上覆物质就会在轻微的阻力下作细微的移动。达到这样的条件取决于两个相反作用过程的相对速率: (1) 侧向变形应力的速率 (σ_x); (2) 流体渗漏导致的压力散失速率。根据 Hubbert 和 Rubey (1959), 切向压缩应力作用在提高超压形成条件方面比构造平静的地槽中的沉积负载作用更有效。因此, 如果有效侧向挤压应力增加的速率比孔隙流体压力的散失 (通过流体的渗漏) 速率更快, 那么只有更坚固的岩石才能阻止 p_p 不等于 σ_z 。

1.3.3 断层作用

在美国路易斯安娜和得克萨斯州 Gulf Coast 地区的一些高压带明显是源于与断块伴生的同生沉积与压实作用的模式。该模式形成侧向封堵, 连同覆盖在超压带上的巨厚的页岩, 阻止了压实和别的成岩作用过程期间沉积物中孔隙流体的散失。地层水穿过粘土流动的阻力是压实过程中孔隙度和渗透率降低的结果。在高压环境中, 泥岩中水的渗透率是微乎其微的, 粘土层可以覆盖在超压地层上达几百万年之久而没有因流体穿过粘土层释放压力。显然, 泥岩层被压实到一定级别时, 孔隙度和渗透率太低, 以至流体的纵向流动被彻底限制。