

国外油气勘探开发新进展丛书 (二)
GUOWAI YOUQI KANTAN KAIFA XIN JINZHAN CONGSHU

Overpressured

Gas

Reservoirs

异常高压气藏

Overpressured

Gas

Reservoirs

石油工业出版社

〔美〕史蒂文 W. 波斯顿 罗伯特 R. 伯格 著
冉新权 李汝勇 译 谭健 校

异常高压气藏

[美] 史蒂文 W. 波斯顿 罗伯特 R. 伯格 著

冉新权 李汝勇 译

谭 健 校

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从地质学和工程应用学角度阐述了异常高压气藏的主要特征, 主要包括: 异常高压形成的地质条件, 异常高压对气藏储层参数、流体参数的影响, 储层机理及矿场实际应用方法, 并给出了许多实际应用例子。

本书可供从事油气田开发工作的有关技术人员学习、参考, 也可供石油高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

异常高压气藏 / (美) 波斯顿 (Poston, S.W.), (美) 伯格 (Berg, R.R.) 著; 冉新权等译.

北京: 石油工业出版社, 2003.7

(国外油气勘探开发新进展丛书. 第2辑)

书名原文: Overpressured Gas Reservoirs

ISBN 7-5021-4297-5

I. 异…

II. ①波…②伯…③冉…

III. 高压-气藏-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 057550 号

Copyright 1997 by the Society of Petroleum Engineers Inc. All rights reserved. This book, or any part thereof, cannot be reproduced in any form without written consent of the publisher.

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 7 印张 175 千字

2003 年 7 月北京第 1 版 2003 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-4297-5/TE·3017

定价: 28.00 元

《国外油气勘探开发新进展丛书》(二)

编 委 会

主 任：刘宝和

副 主 任：冉新权 张卫国

编 委：张正卿 刘德来 李 阳 沈 琛

何江川 阎建华 周家尧 张仲宏

李 斌 咸玥瑛 汪大锐 钟太贤

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。第一批引进的5本专著出版后，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，我们在第一辑出版的基础上，经过多次调研、筛选，又推选出国外最新出版的5本专著，即《一体化油藏研究》、《油层伤害——原理、模拟、评价和防治》、《油藏工程实践》、《异常高压气藏》、《酸气开发设计指南》，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

进入 21 世纪, 天然气工业迅猛发展, 天然气藏的勘探开发在国内也已取得重大的进展, 随着“川渝气东输”、“西气东输”等项目的启动, 全国各地陆续发现一批整装异常高压气藏, 并进入开发阶段。国内对天然气藏的开发已有几十年的历史, 积累了丰富的经验, 并已出版发表了大量科技专著。随着气藏工程理论、方法的不断深入和完善, 新的研究成果层出不穷。对异常高压气藏, 特别是整装气藏的开发, 在国内尚不多见, 希望这本关于异常高压气藏的专著能够丰富国内天然气藏开发理论和提高实际应用水平。

本书作者 S.W. 波斯顿和 R.R. 伯格均是长期从事气藏勘探开发的资深专家, 不但具有深厚的理论知识, 更具有相当丰富的实际应用经验。本书从地质学和工程应用学角度阐述了异常高压气藏的主要特征, 第一章主要讲述了异常高压形成的地质条件, 提供了异常高压形成和预测的地质背景知识; 第二、三章详细研究了异常高压对气藏的储层参数、流体参数等的影响; 第四章对异常高压气藏的储层机理进行了研究和描述, 并描述了气藏压力衰竭式开发和有水驱效应的气藏开发的动态特征, 提出有效预测最终采收率的物质平衡方法。第五章、第六章集中研究了矿场实际应用方法, 提出了用不稳定压力来推导物质平衡方程中的压力—流体性质关系所需静压的替代方法, 使物质平衡方法成为一种经济可靠的评价工具, 并应用 Becerra - Arteaga 方法, 利用早期生产资料计算天然气的原始地质储量。在本书中给出了许多实际应用例子, 对从事气田勘探开发的有关科技人员具有较高的参考价值。

由于译者水平有限, 加之异常高压气藏的勘探开发在国内尚属起步阶段, 译稿不足之处恳请读者批评指正。

译者

2002 年 11 月 25 日

SPE 丛书委员会

Waldo J. Borel, Pennzoil E&P 公司, 编辑
Alfred D. Hill, 得克萨斯奥斯汀大学, 校长
Anil K. Chopra, 阿科勘探开发工艺技术公司
Garry A. Gregory, 新技术咨询有限公司
Thomas A. Hewett, 斯坦福大学
Hans C. Juvkam Wold, 得克萨斯 A&M 大学
William C. Miller, 顾问
Susan Peterson, 哈里伯顿能源服务公司
Rajagopal Raghavan, 菲利普斯石油公司
Arlie M. Skov, 顾问
Allan Spivak, Intera 公司
Fred I. Stalkup, 阿科石油天然气公司

前 言

异常高压油气藏遍布全球的沉积盆地。这些油气藏通常产出轻质油和天然气，需要特殊的评价技术对这类油气藏进行评价。本书目的是从地质学和工程学两个角度描述这些油气藏的主要特征。第一章描述异常高压油气藏形成的地质条件。具备一定的异常高压油气藏成因方面的知识将有助于对该类油气藏的识别和预测。第二章描述异常高压对这类油气藏参数的影响，如孔隙度、渗透率、压缩性及其他对烃类的采出有重要影响的特征。第三至第六章从工程学角度来研究异常高压油气藏，并提出评价方法。这类油气藏大多是被完整地覆盖于页岩的深层部位，因此应该存在压力衰竭条件。实际上，研究异常高压油气藏的生产历史会发现普遍发生不同程度的水侵。考虑了对油气藏最终采收率预测有很大影响的水侵因素后，对物质平衡方程进行修正，来预测最终采收率。

本书提出了用短期测试压力来推导物质平衡方程中的压力—流体性质关系所需的静压替代方法。这一概念使物质平衡方程成为一种经济可行的评价手段。根据 Becerra - Arteaga 方法可以利用早期生产历史资料计算天然气的原始地质储量，该方法目前尚未被广泛使用。

感谢参加讨论以及测试本书所提出的方法和观点的众多地质工作者、工程师和学生。希望这本关于异常高压油气藏的总结能对全球的油气藏开发有所启迪。

S.W. 波斯頓

R.R. 伯格

版 权 声 明

本书英文书名为“Overpressure Gas Reservoirs”。

本书经由美国 Society of Petroleum Engineers Inc. 授权翻译出版，中文版权归石油工业出版社所有，侵权必究。

图字 01 - 2003 - 2765 号

目 录

1 异常高压的产生和成因	(1)
1.1 压力梯度	(1)
1.2 异常高压的识别	(4)
1.3 异常高压的成因	(5)
1.4 异常高压的保存	(12)
2 异常高压对储层岩石性质的影响	(15)
2.1 原生孔隙	(15)
2.2 次生孔隙	(16)
2.3 次生渗透率	(18)
2.4 由差异溶蚀形成的层状储层	(19)
2.5 储层岩石的压缩系数	(20)
2.6 地层—压缩系数相关关系	(25)
3 储层流体特征	(30)
3.1 气体偏差系数	(30)
3.2 气体压缩系数	(33)
3.3 气体粘度	(35)
4 储层机理	(38)
4.1 通用基本物质平衡方程	(38)
4.2 压力衰竭气藏	(41)
4.3 水驱气藏	(43)
5 不稳定压力在物质平衡方程中的应用	(48)
5.1 不稳定 p/z 概念的推导	(50)
5.2 不稳定 p/z 图	(52)
5.3 合理的关井时间	(55)
5.4 矿场应用	(61)
6 储量计算和动态预测	(71)
6.1 引言	(71)
6.2 Hammerlindl 一点修正法	(72)
6.3 物质平衡方程的 Ramagost/Farshad 公式	(76)

6.4 求解图法	(79)
6.5 Becerra - Arteaga 压力图法	(88)
单位换算表	(99)

1 异常高压的产生和成因

异常高压是指地下流体压力远高于正常水静力条件下的压力。当进行油气勘探时,事先具备一些关于在某一深度钻遇异常高压油气藏的可能性的知识非常重要。高于正常压力油气藏的出现会增加钻井、完井和生产作业的难度及费用。另外,进行油气藏动态预测时,必须考虑异常高压的影响。

本章简要介绍异常高压的地质成因以助读者理解这类油气藏的特征。并且对净上覆压力与岩石基质有效应力和孔隙压力产生的综合影响之间的函数关系进行了讨论,为第二章提供背景知识。

1.1 压力梯度

从地下流体的压力曲线特征可以看出有无异常压力的出现。测试压力一般以每单位面积的重力来表示,代表从井下测试点到地面井筒流体柱上升高度。如,密度为 1.0g/cm^3 的净水柱的压力梯度是 0.433psi/ft ,或在 10000ft 的深度其压力为 4330psi ;密度为 1.07g/cm^3 的盐水柱的压力梯度是 $0.433 \times 1.07 = 0.465\text{psi/ft}$,或在 10000ft 的深度其压力为 4650psi 。无论是净水还是盐水,只要水贯穿整个地层,这些压力统称为正常的流体静压。同样的,若井筒中充满密度为 0.8g/cm^3 的油时,则静压梯度为 0.346psi/ft 。当井筒充满密度为 0.1g/cm^3 的气体时,其压力梯度为 0.043psi/ft 。

应用井筒中液柱测试的压力来折算梯度是测量压力的一种简便方法。这种情况下,压力梯度不能反映一定深度下某层段的压力变化,而是指从测量点到地面的平均压力变化。以下所涉及的压力梯度往往是指井筒压力梯度。

由某一深度的上覆岩石和岩石中流体所形成的压力称为静岩压力。该压力不能方便地直接测量但容易计算。例如,在美国海湾盆地水饱和的沉积岩平均密度为 2.3g/cm^3 ,所以其静岩压力梯度为 $0.433\text{psi/ft} \times 2.3\text{g/cm}^3 = 1.0\text{psi/ft}$ 。对于整个沉积层段来说,沉积岩的密度不是固定不变的,而是随着埋深的增加,沉积岩密度从低到高,直至大于 2.6g/cm^3 。无论如何,静岩压力梯度为 1.0psi/ft 对正常沉积地层而言是一个比较可靠的近似值。图 1.1 表示了静岩压力和各种单相流的静压梯度之间的关系。对比了盐水、清水及 34°API 原油的正常流体静压梯度。异常高压发生在静岩压力梯度线和清水静压梯度线之间的区域。静

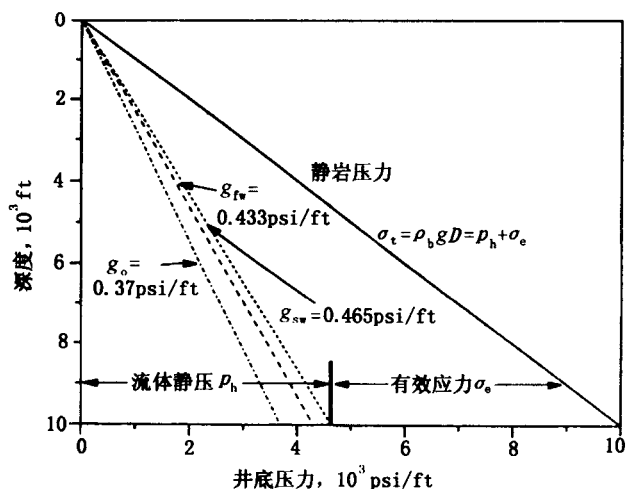


图 1.1 不同介质井筒压力梯度的定义

流体静压和有效应力之和。该术语有时定义为上覆压力。总垂直应力可以表示为:

$$\sigma_t = p + \sigma_e \quad (1.1)$$

式中 p 为流体静压力, σ_e 为作用于岩石基质的垂直有效应力。有效应力常称为净上覆压力, 是由通过粒间接触以支撑静岩压力的沉积颗粒所形成的力。所以总垂直应力是测量点的流体压力和有效应力之和。有效应力和总垂直应力一样不能直接测量, 是总垂直应力和流体压力之差。

[例 1.1] 一口气井, 在 1000ft 深度的砂岩完井。沉积体的流体环境为普通盐水, $g_{sw} = 0.465 \text{ psi/ft}$, 静岩梯度为 1.0 psi/ft 。原始条件下其净上覆应力是多少?

解: 重写方程式 (1.1):

$$\sigma_e = \sigma_t - p = 10000 \times (1 - 0.465) = 5350 \text{ psi}$$

岩压力或上覆应力 σ_t 是孔隙压力和支撑岩石基质压力之和。

图 1.2 展示了在得克萨斯州和路易斯安那州海湾盆地钻遇异常高压地层的情况。盐水静压梯度线和静岩压力梯度线组成了边界线。在深度小于 10000ft 处, 压力梯度明显增加并达到异常高压条件。这些数据说明, 沿美国墨西哥海岸可能具有广泛分布异常高压的条件。

Hubbert 和 Rubey^[2]指出单值的总垂直应力或静岩压力是

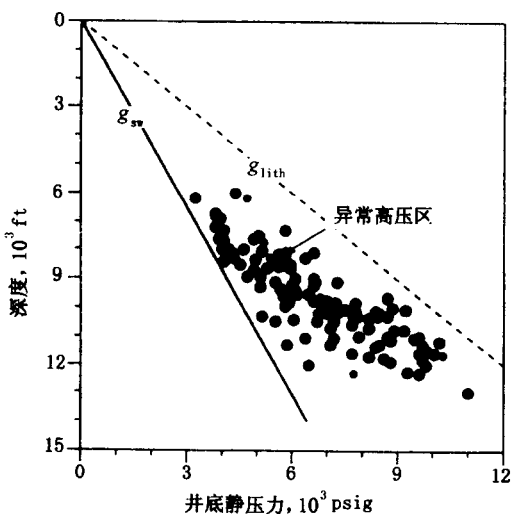


图 1.2 沿美国海湾测试的异常高压区域 (参考文献 1)

在初始条件下，作用于岩石基质上的净上覆压力或应力为 5350psi。此应力会随着气藏生产过程中孔隙压力的降低而增加。

流体压力高于正常的静水压力即称为异常高压。异常压力一词也用来表示超高压的条件，特别是在美国海湾海岸盆地。形容词异常能够指示压力是大于或小于正常压力。异常高压通常发生在地下较深处，并且，通常在出现异常高压之前均存在压力随深度迅速增加的过渡带。图 1.3 (a) 表示在异常高压情况下，过渡带之下的压力或沿高于正常静水压力的静水压力梯度线变化（线 b）或沿着高于正常静水压力梯度线继续增加（线 a）。

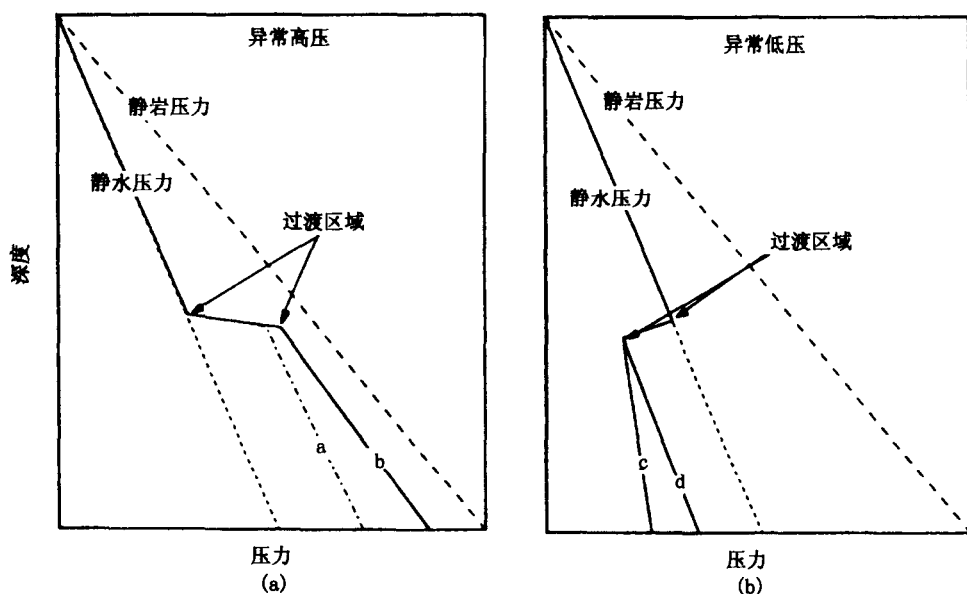


图 1.3 地下异常高压梯度 (a) 和地下异常低压的压力梯度 (b)

异常高压使有效应力降低，而总的正常应力梯度保持不变。有效应力的降低会使异常高压下的岩石强度降低。当流体压力接近静岩压力时，有效应力趋近于 0。在此点岩石由于内部产生裂缝而破裂。换言之，静岩压力是岩石能够承受而不发生破裂的最大压力。

异常低压的情况发生在山间盆地的封闭油气藏中。例如，异常低压可能沿气相压力梯度线变化。其他区域也有沿低于正常静水压力梯度线变化的异常低压。这些异常低压通常揭示了在储集层中控制压力的水层中的水动力学流动特征。图 1.3 (b) 描述异常低压的情况。异常低压可能随深度而增加，或平行于静水压力梯度线（线 d），或梯度更小（线 c）。当钻至这些低压区时，可能因钻井液潜在的漏失而发生钻井问题。

1.2 异常高压的识别

可以通过钻井、测井或在油井下套管完井后的压力测试资料识别异常高压。对将钻遇的异常高压区压力水平预测是任何钻井程序中必不可少的部分。

1.2.1 直接证据

钻杆测试(DST)和重复地层测试(RFT)常常用于测试裸眼和下套管的井筒中任何深度的流体压力。钻杆测试是由安装在钻杆底部的封闭测试器下入井筒进行的。测试工具可以通过下部打开的阀门获取地层流体样品并记录测试工具关闭后的压力响应。测试开始时,测试工具的橡胶封隔器把井筒底部与环空钻井液封隔。

在压力恢复期间,测试开始时压力迅速增加,然后以较低的速度进行压力恢复,直至达到一个稳定的压力恢复速度。测试过程结束后,打开封隔器,从井筒中回收测试工具。在地面从钻杆上取下取样器,对油、气、水的量进行测量。已知测试时间,所以回收的油、气、水量就可以折算成储集层的平均产量。

恢复阶段的压力可以由地下或地面的压力计进行记录。若可以得到稳定的压力恢复速度,则压力恢复速度可以外推至无限长关井时间^[3,4]。此外推压力代表该流动阶段流体采出之前的原始压力。

RFT与钻杆测试工具相类似。然而,RFT更小并且以电缆连接下入井筒。其优点是一次下井可以进行不同深度的多次测试,而且费时少。其主要缺点是工具尺寸小,使获取的流体量少,且泥饼可能影响连通管与井壁的密封。

当下套管、射孔和完井完成后,电缆携带的压力计可以下入指定深度。关井,测量恢复压力和关井时间。

1.2.2 间接证据

当钻遇异常高压区时,如果钻井液密度未得到及时加重,就可能会引起钻井事故。预测异常高压出现的大致深度是钻井设计的重要环节。钻井液通常由8.3lbm/gal的清水和粘土颗粒及化学添加剂混合而成,密度可达10lbm/gal,压力梯度可增加到0.52psi/ft。10lbm/gal的钻井液足够控制正常的静岩压力,避免水层中流体流入井筒,减少井眼垮塌和扩径。这种条件下通常称为“平衡钻井”。

当所钻遇的地层压力大于井筒静液柱压力时,出现欠平衡条件。如果所钻遇的异常高压层是渗透性低的页岩,由于其中的流体供给受到低渗透性约束,

将不会发生钻井事故。但若遇到渗透性水层，其渗透率足以使大量流体流动，地层流体就将流入井筒，由地层流入井筒的液体可能会把钻井液顶替出井筒。如果该井防喷器失效或压力等级不够，则会造成井喷。

作业人员采用间接参数测量来预测是否将进入异常高压区。当井快钻至异常高压层时，井筒中循环出的泥页岩碎屑，其密度常常是下降的。而在正常地质条件下，泥页岩的密度是随深度增加的。密度的下降同样也可以由测井资料获得。泥页岩的电阻率一般随深度增加。地层岩石密度的下降可以通过其电阻率的下降或传导性增加反映出来。声波测井在遇到异常高压层时表现为声波时差的增加。声波传输时间的增加对应着密度的减小。实际上，异常高压层的测井响应可以直接用地层压力校正^[5,6]。图 1.4 表示在得克萨斯南部的渐新世 Frio 地层 10000ft 钻遇异常高压时，测井声波传输时间和泥页岩导电性增加。

这种情况下，从正常情况到异常高压的过渡非常突然，异常高压区的压力梯度从 0.85psi/ft 变为 0.88psi/ft。

异常高压泥页岩层的温度有时会增加。温度的增加可以通过钻井液的温度监测获取。对沉积地层特征参数变化的解释，任何一种技术都不是完全可靠的，但在钻井过程中监测这些特征参数的变化对防止昂贵的钻井事故是有益的。当探测到了高压后，要进行下套管作业，随后，更换高密度钻井液在高压层钻进，避免浅层钻井液漏失。

当钻遇异常高压层时，地层水矿化度常常突然下降，从正常的高含盐量变淡。岩石密度下降和地层水矿化度降低，预示异常高压区域常常含有低密度页岩和低矿化度地层水（相对其埋藏深度而言）。所有这些特征揭示了异常高压的可能成因。

1.3 异常高压的成因

异常高压的成因对预测其出现，特别是在钻井稀少的盆地或新钻探区域进

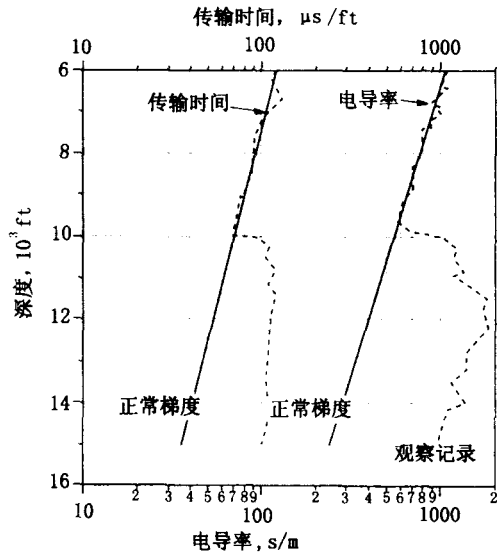


图 1.4 得克萨斯州 Frio 地层（渐新世）中泥页岩的传导率和声波时差（据参考文献 7）

行钻探是非常有益的。对其成因的理解有利于预测异常高压油气藏钻井、生产中的潜在危害。

在全球许多区域发现有异常高压案例,其深度从几百英尺到 25000ft。但地质压力主要遇到两个主要环境:近期挤压褶皱作用活跃的区域构造带和快速堆积形成的巨厚的相对年轻的沉积体。所以,异常高压很大程度上依赖于沉积体的地质历史。

异常高压形成的一个主要条件是沉积体中具有足够低渗透性的岩石,使得流体流出速度相对沉积体压力恢复速度而言小得可以忽略。因此,异常高压通常出现在以页岩为主的沉积环境。

当通常认为是由颗粒—基质支撑的有效应力传导给粒间水时,则出现高压流体。此结论由方程(1.1)假设的流体压力、有效应力和总垂直应力之间的关系式推导而来。例如,连续埋藏使上覆沉积物重量增加,从而使得总垂直应力以一个很快的速度增加,其增加速度远大于正进行压缩的孔隙介质承载能力的增加。增加的有效应力传导给粒间水,相应地增加了流体压力。正常情况下,如果埋藏浅、地层渗透性足以允许流体流动时,这部分增加了的压力,将通过流体流出沉积体而释放。然而,由于连续埋藏,颗粒胶结更加致密,孔隙空间变小。孔隙尺寸的减小,导致渗透率的降低,使粒间水不能迅速被驱向其他区域。由于过剩的流体不能被排替出去,从而使得流体压力持续增高。

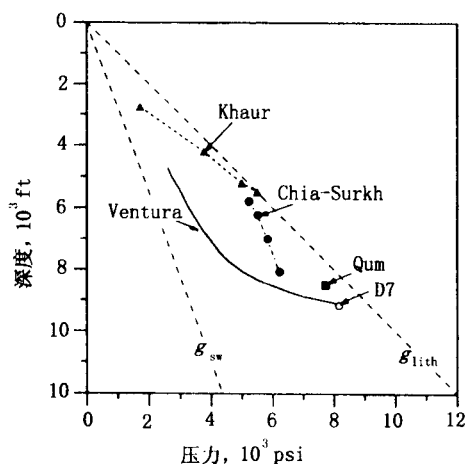


图 1.5 在挤压褶皱、断裂作用
活跃区带附近钻井记录的
异常高压 (据文献 2)

1.3.1 构造压力

一些最早期的关于异常高压的记载来自相对较新的构造运动区域,由于这类运动使地层主应力水平化,并常伴随岩石致密褶皱、逆冲断层。Hubbert 和 Rubey^[2]认为主应力是区域压应力的结果,异常高压则是由区域构造应力传递给流体所致。图 1.5 给出了北美的一个例子,加利福尼亚州南部的文图拉 (Ventura) 油田。油藏压力随深度快速增加直至接近静岩压力梯度。该区域在上新世与更新世经历了活跃的褶皱作用和断裂作用。无数的地震显示该区域构造运动至今仍在继续。在沿喜马拉雅褶皱带上伊拉克的 Khaur, Chia -