

石油科学进展 2

异常地层压力

在油气资源勘探、钻井和开采中的应用

瓦尔特 H. 费特尔著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是作者在现场观察和最新实验研究的基础上,较详细地论叙了异常地层压力的起因、分布、探测、定量评价及其在油气勘探、钻井、开采中的应用。

* * * * *

原书著者曾得到乔治V.奇林加里安和赫尔曼H.里克第三的协助。全书由徐怀大同志校订。

WALTER H. FERTL
ABNORMAL FORMATION PRESSURES
Implications to Exploration, Drilling, and production of oil
and gas Resources
ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY
Amsterdam—Oxford—New York 1976

石油科学进展 2
异常地层压力
在油气资源勘探、钻井和开采中的应用

瓦尔特H.费特尔 著
宋 秀 珍 译

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)

交 通 印 刷 厂 排 版
大厂回族自治县印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 14³/₄ 印张 365千字 印1—2,800

1982年12月北京第1版 1982年12月北京第1次印刷

书号: 15037·2348 定价: 1.55元

序 言

瓦尔特H.费特尔博士所著的这本书代表了第一部最新的实验室研究方面的成果。它结合了广泛的现场观察,涉及到有关异常地层压力的起因、探测和定量评价等广泛领域,和它们可以影响到勘探、钻井、开采和油藏工程在概念上意义深远的工艺技术和经营管理上的决策。异常地层压力的位置、探测和规模在当今日益强化找油气资源的情况下,对石油工业界去探索新的、遥远的地区,以及去测试更深的目的层的潜力上是极为重要的。

本书作者是这个学术领域内名列世界前茅的专家。他综合了已发表和未发表的资料,同时结合他个人的丰富经验,这些经验是根据世界性的野外观察和实验室资料得来的。

原稿作了很好的组织和文字说明,并且提供了对于初学者和行家们都具有明显价值的出色的和深入的处理。因此这部书应当作为工业界和学术界(包括地质家、工程师、教师和学生等等)的一部有价值的教科书和经典。它也提供了激励人们进一步思考问题的基础,并且它指出了在不同领域中进一步探索的许多线索。在这部光辉的著作中所提供的资料,对这个迅速发展的学科提供了一个出色的、清晰的和迄今为止最新的讨论,而这些资料过去是零散在遍及地球科学和(或者)石油工程杂志的文献中的。

第一章对地下异常地层压力环境的大量可能模式和起因,作了很好的介绍,同时以严密而理智的描述和定义,建立了这些原地压力条件的基本参数。与此同时,第一章还对这门学科提供了一个简要但很广泛的历史评述。

接着在第二章中紧凑地考究了泥质沉积物的压实作用。以一种简洁的形式提出了相应的资料,并结合以压实模型的数学新发展,沉积物中应力的论述,和流体经过孔隙介质的基本概念。进而,对于间隙流体化学成分的重要性及其固有的复杂程度,以及压实过程中这些溶液的性质予以特殊的关注,并且在理论概念、实验资料 and 实际现场观测的基础上予以通盘的处理。

第三章把注意力放在异常地层压力环境的定性探测和定量计算上,这种环境在地下是经常被钻头所碰到的。本书的这一部分实际上反映了作者最突出的专长。第三章集中于地球物理资料的应用,特别是利用地电法得来的资料指出地层顶面,并且在特定情况下,在钻一口井之前,预测异常地层压力的存在、深度和规模。除了对这个基本概念作一简单介绍之外,作者还对美国及其它国家的几口深井的预测以及实际碰到的高压异常提供了比较性的资料。

在第四章中,作者讨论了目前石油工业界在计算钻井过程中井下压力条件下所采用的大量的钻井指标。这些方法(包括随钻测井概念)和大量的泥浆和岩屑参数。除了这些大量的常用的高压计算方法外,作者还对他所提出的几种有兴趣的新探测方法作了坦率的讨论,并且根据现场和实验室资料作了解说。

第五章对某些根据各种测井方法提出的最好的定性和定量压力探测和计算技术作了权威性的考察。这里,作者回顾了基本的仪器响应,理论考虑,并通过经过挑选的油田实例,给出一些特定地层参数的推荐的数学分析方法。本章的一个重要部分,当然也是石油工业经营人员一个注意的中心,是涉及到应用这些技术中的限制和可能的失误。这些方法的应用并非总是简单的和直截了当的,由于未认识到的井下仪器问题、恶劣的井眼条件和不寻常的地层

特点，常常造成复杂情况。作者用这样的结论总结了这一个著名的讨论，虽然这些方法是些事后的技术，亦即在测井前井已经钻成，但是测井曲线图的解释，代表了一种探测和逼真地计算异常地层压力的最好方法。

有了这些既经成立的探测和计算高压异常的方法，作者接着编写了第六章。在这章中讨论了这些不利的井下环境对钻井和完井的影响。本章对一些基本概念（如孔隙压力和裂隙压力的关系）的基础性介绍，和“基本作法”作了很好的融和，并提出了常规的和岸外深水的钻井作业中预测压力梯度的方法。作者以考察某些有问题的、已知高压地区中的典型套管程序结束了这个讨论，另外还对固井措施和其它特定的完井和采油的考虑作了评论。本章非常合乎情理地密切联系了钻探和开采高压含硫天然气层中，意外事故设计方面的某些中肯的想法和情况，以及减荷井设计方面的重要的进展情况。

在第七章中，对当今高压储油岩中的油藏工程概念作了不惜笔墨的解说。其中包括了考察页岩水的流入、岩石的压缩性和断裂，边缘水的流入，以及超压消耗性驱动的气藏的预测。

地质学家和经理人员将会发现，第八章是根据大量现场资料的一个鼓励人们去思考的万宝囊，它关系到在正常和高压环境中，地下油气分布以及有关经济因素的评价。从考察作为深度、原地温度和压力条件函数的烃类聚集和分布开始，作者引出页岩电阻比法。现在，无论是勘探，或者是钻井活动中，这后一种方法对于作出经营决定的重要性是充分肯定的。石油工业界所采用的这个概念，在许多地区是作为一种补充性的完井指南，并且是各公司之间在“干井”的货币交易中的一个决定性因素。作者以选自得克萨斯、路易斯安那和加利福尼亚的油田研究实例，雄辩地支持了这个页岩电阻比的概念。通过它的、有价值的讨论，连同从各种来源得来的常规资料，如泥浆录井、数字测井分析以及特定野猫探区内，相继钻井的测试资料的分析，这个概念的影响就更加明显了。

在最后的第九章中，给了我们迄今为止的异常地层压力在全世界的赋存条件和评价，这些异常压力是石油工业界在全球的深井钻探，及在边远地区的野猫钻井中迄今为止所遇到的。

所有各章都写得很好，有大量的参考文献，并且附以大量精美的图解和有用的图表。本书在许多同等重要的技术领域和概念的相互关系上，以及它们对当今日益增长的要求发现和开发地球上价值高的烃类资源补充储量的多重影响上，提供了诱人的前景。

作者在从浩瀚的文献中选择精华和把它们同他自己的探索、发现和现场观测相融合上完成了一项难以置信的工作。其光辉成就就是写给这个课题的这一部书，毫无疑问也是将来的经典参考书。因此，这本书是极为重要的，而我非常高兴地把它推荐给石油工业界的勘探人员和工程人员和石油有关的政府机构、工业科学家、教员和学生等。

乔治.V.奇林加里安

美国加利福尼亚洛杉矶南加利福尼亚大学

Shahanshah Arga Mehr 皇帝陛下石油工程讲座教授

伊朗阿巴丹工艺研究所教授

目 录

第一章 异常地层压力环境	1
引 言	1
压力的概念	1
静水压力	1
积土压力	2
地层压力	2
低于正常的地层压力 (低压)	3
异常高的地层压力 (超压)	8
压力封闭	9
异常地层压力成因的概念	10
参考文献	26
第二章 泥质沉积物的压实	32
引 言	32
压实模型的提出	34
Katz和Ibrahim压实模型	35
压实作用的数学说明	36
多孔隙介质中流体的渗流	41
负载势能	43
间隙溶液化学性质对压实作用的影响	44
间隙流体化学性质	44
与海水有关的间隙溶液的组成	45
在不同负载压力下挤出溶液之化学性质的变化	48
砂岩及伴生页岩中的盐度分布	53
沉积物中的应力	54
静水压力	54
总应力场的分解	55
砂和泥质沉积物的压缩系数	58
岩石压缩性对石油储量计算的影响	61
参考文献	64
第三章 探测和估价异常地层压力的地球物理方法	69
引 言	69
地震资料分析	69
重力资料分析	77
其它地球物理方法	78
参考文献	79
第四章 利用钻井资料探测和估价异常地层压力	80
引 言	80
钻井参数	82

钻井速度	82
d指数	83
改进的 d 指数	85
钻井速度方程式	86
钻井中孔隙度和地层压力录井	88
新颖的随钻测井概念	91
扭矩	91
阻力	92
钻井泥浆参数	92
泥浆气侵	92
返出泥浆重量	94
压力井涌	95
管线温度	96
电阻率、氯离子及其它新概念	99
槽面和槽的总体积	99
灌满井眼	99
泥浆排量	100
页岩岩屑参数	100
页岩总体密度	100
页岩因子	104
页岩岩屑的体积、形状和大小	104
新颖的、各种各样的探测方法	105
页岩造浆电阻率	105
页岩造浆的渗滤速度	106
页岩水的颜色	108
湿度指数	108
岩性函数曲线	109
重碳酸盐—超压之间的关系	109
氧化还原和pH电位	111
特定的离子分布	112
限制	113
参考文献	114
第五章 地球物理测井技术预测和异常地层压力的评价	118
引言	118
电测井	118
短电位测井曲线	118
电导率曲线	122
自然电位曲线	125
页岩地层因子法	130
声速测井	131
地层密度测井	135
中子测井	136
脉冲中子测井	136
核磁共振技术	137

井下重力数据测量	138
为惯用的压力评价所推荐的测井	139
测井方法的局限性和失误	140
可能的失误	140
编绘页岩参数中的考虑	146
结论	149
参考文献	151
第六章 在超压地层中钻井和完井的基本原理	155
引言	155
孔隙压力和破裂压力关系的基本概念	155
下套管位置的选择	156
卡 钻	157
泥浆漏失	158
破裂压力梯度的预测方法	158
Hubbert 和 Willis 的方法	158
经验数据的相关关系	160
Matthews 和 Kelly 的方法	160
Eaton 法	161
Taylor 和 Smith 进行的油田资料研究	163
Macpherson 和 Berry 的方法	164
Christman 的方法	166
Anderson, Ingram 和 Zanier 的方法	168
超压地层中的典型套管程序	170
概 述	170
得克萨斯州西部特拉华盆地	171
美国墨西哥湾岸地区	172
美国中部大陆地区阿纳达科盆地	173
落基山地区	173
对注水泥工艺的说明	173
特殊的完井和采油的考虑	174
北极周围钻井的异常高永冻层回冻压力	174
水化物	175
盐、硫等的沉淀	175
对封隔液的要求	175
对套管和油管要求的一般性说明	176
对高压酸性天然气井的钻井和开采中意外情况的设计	177
救险井设计	178
参考文献	179
第七章 在异常地层压力环境中的油藏工程概念	182
引言	182
油藏机理	182
页岩水侵	182
岩石压缩系数和岩石破裂	184
边缘水侵	185

在超压衰减类型的气藏中 Hammerlindl 的预测方法	186
原始气井的潜能产量与地层水含盐量的关系	189
压力衰减和油层枯竭压力	189
参考文献	192
第八章 烃类分布的评价及在正常和异常地层压力环境中有关的经济因素	193
引言	193
深度与烃类聚集的关系	193
地层温度与烃类分布的关系	195
地层压力梯度与烃类聚集的关系	198
地层温度与压力对烃类聚集的关系	200
页岩电阻率比法——一个对于作出经济的钻井决断有价值的概念	203
完井准则	204
得克萨斯岸外油田实例	205
路易斯安那岸外油田实例	206
加利福尼亚北部油田实例	207
在美国墨西哥湾岸地区的一口野猫井上, 泥浆录井、数字测井分析 和页岩电阻率比的应用	207
高压环境中的经济学	208
参考文献	211
第九章 异常地层压力的全球分布和评价	213
引言	213
欧洲的异常地层压力环境	213
岸上区	213
欧洲岸外	216
苏联的异常地层压力环境	219
北美大陆的异常地层压力环境	220
南美的异常地层压力环境	222
非洲的异常地层压力环境	223
远东的异常地层压力环境	223
印度次大陆的异常地层压力环境	227
中东的异常地层压力环境	227
参考文献	228

第一章 异常地层压力环境

引言

许多因素都能造成与静水压力不同的异常地层压力。在有些地区，经常发生这些因素的组合，为了对异常地层压力的可能起因给以正确的看法，必须弄清楚岩石物理学和地球化学参数的重要性，及其与一定地区或盆地的地层、构造和大地构造发展史的相互关系。

由于条件可能变化很大，所以要特别小心，不能设想，根据一个已知地区的经验建立的异常地层压力的起因，就必然是一个类似条件相邻近的、而又未经钻探充分验证过的盆地的异常地层压力的起因。

压力的概念

静水压力

静水压力是由液柱的单位重量和垂直高度形成的。液柱的粗细和形状都不影响这个压力的大小。静水压力 P_{HY} ，等于液体密度平均值与其垂直高度的数学乘积，即：

$$P = \rho \cdot g \cdot D$$

式中 P ——压力；

ρ ——平均密度；

g ——重力加速度值；

D ——液柱高度。

依钻井运算术语，我们可以写为：

$$P_{HY} \text{ (磅/英寸}^2\text{)} = C \cdot MW \cdot D \quad (1.1a)$$

式中 D ——液柱垂直高度，英尺；

MW ——液体密度或泥浆重量，磅/加仑或磅/英尺³；

C ——换算系数(若 MW 为磅/加仑， $C = 0.052$ ；若 MW 为磅/英尺³， $C = 0.00695$)。

在米制里，(1.1a)式可变成：

$$P_{HY} = 0.098 \cdot MW \cdot D \quad (1.1b)$$

式中 D ——液柱垂直高度，米；

MW ——泥浆重量公斤/分米³。

静水压力梯度受液柱中溶解的固体(亦即盐)和气体的浓度以及温度梯度的变化或差异的影响。换言之，溶解的固体增加(亦即，较高的含盐浓度)，倾向于增加了正常的压力梯度，反之，溶液中气体的总量增加，而且温度较高，正常的静水压力梯度就减小。例如，假定水的矿化度是80000 ppm NaCl，温度是77°F (25°C)，则压力梯度为0.45磅/英寸²·英尺 [0.1074 公斤厘米⁻²米⁻¹]。

通常，在油气钻井时可能遇到的、典型的平均静水压力梯度，如表1.1所示。

因此，概括地说，静水压力 P (磅/英寸²·英尺)可定义为：

表1. I 典型的平均静水压力梯度

地 质 盆 地	静 水 压 力 梯 度		美 国 的 地 区
	磅/英寸 ² ·英尺	公斤厘米 ⁻² ·米 ⁻¹	
淡水和半咸水	0.433	0.1	落基山脉, 中内陆地区 湾岸地区 ^①
盐水	0.465	0.1074	

①美国部分的墨西哥湾岸地区。

$$p = 0.433 \cdot SG \quad (1.2)$$

式中 SG 是代表性的、水柱的比重。

积土压力 (Overburden pressure) *

这个压力是由所研究的上覆地层的地层基质 (岩石) 重量和孔隙空间的流体 (水、油、气) 的总重量引起的。数学上, 积土压力 (P_o) 可以表示为:

$$P_o = \frac{\text{重量 (岩石基质 + 液体)}}{\text{地区}} \\ = D[(1 - \varphi)\rho_{ma} + \varphi\rho_{fl}] \quad (1.3)$$

式中 D——柱状地质体的垂直高度, 英尺或米;

φ ——地层孔隙度, 以分数表示;

ρ_{ma} ——岩石基质的密度, 磅/英尺³或公斤/分米³;

ρ_{fl} ——液体密度, 磅/英尺³或公斤/分米³。

通常, 假设积土压力随深度均匀增加。例如, 美国墨西哥湾岸及别的地方的第三纪沉积, 平均施加于深度的积土压力梯度为 1.0 磅/英寸²·英尺 [0.23 公斤厘米⁻²·米⁻¹]。这个值相当于一个具有 2.31 克/厘米³ 平均总体密度的地层所施加的力。经验也指出, 在碎屑岩中, 可能的最大积土压力可以高达 1.35 磅/英寸²·英尺 [0.312 公斤厘米⁻²·米⁻¹]。

近几年在全世界的观测, 已经导出一个可以变化的积土压力梯度的概念, 这个概念可以用于钻井和油井完成的施工中去预测破裂压力梯度。基于沉积作用和压实作用的考虑, 人们可以认为浅层的积土压力梯度基本上小于 1.0 磅/英寸²·英尺 (0.231 公斤厘米⁻²·米⁻¹) (图 1.1)。后面这个概念及其对石油工业的实际含义将在第六章更详细的讨论。

地层压力

地层压力 (P_f) 是作用于地层孔隙空间里的流体 (地层水, 油, 气) 上的压力。在任何地质背景中, 正常地层压力都将等于地表到地下地层水的静水压头 (也即静水压力)。因此按定义, 异常地层压力就是以背离正常趋势线为特点。

在一个具体的地质环境中超过静水压力的地层压力被定义为异常高的地层压力 [高压 (Surpressures) 或译为超压], 而地层压力低于静水压力就叫做低于正常压力 [低压 (Subpressures)]。在陆地和海洋上油气资源的环球性勘探已经表明, 异常地层压力的发生是世界性的, 而高压比低压更为多见 (见第 9 章)。

图 1.2 和方程式 1.4 两者说明了这些地下压力和应力概念的关系。

$$P_o = P_f + \delta \quad (1.4)$$

式中 P_o ——积土压力 (总垂直应力, 静岩压力) ①;

* 在水力学中可译为负载压力, 土力学则译为积土压力, 又可译作上覆岩层压力。——译者

①Lithostatic pressure 译为静岩压力是和 hydrostatic pressure 静水压力的译法相一致。

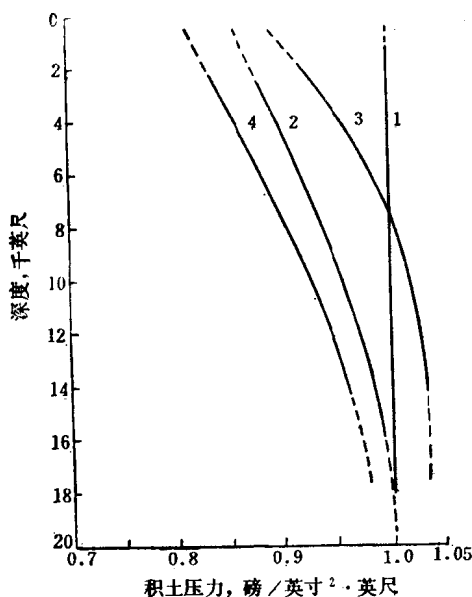


图1.1 正常情况下压实地层(页岩-砂岩层系)的复合积土负载。1—不变的梯度1.0磅/英寸²·英尺(0.231公斤厘米⁻²·米⁻¹)；2—美国墨西哥湾岸地区得克萨斯和路易斯安那；3—美国圣巴巴拉海峡，加利福尼亚；4—北海地区

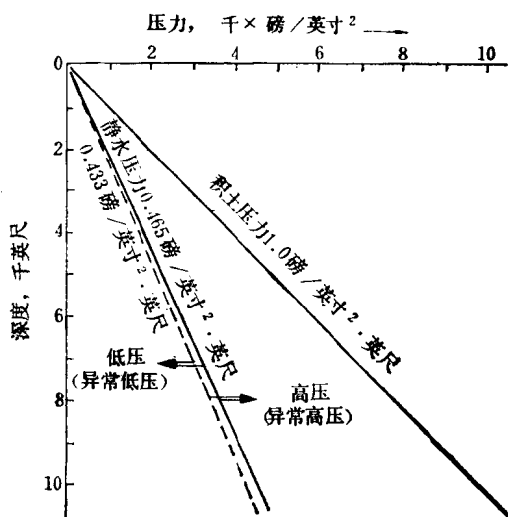


图1.2 地下压力概念

P_f ——地层压力(孔隙流体压力, 孔隙压力)；

δ ——颗粒对颗粒的压力(基质应力, 有效应力, 垂直的岩石骨架应力)。

在正常压力环境($P_f = P_{Hy}$)中, 由于颗粒对颗粒的接触, 基质应力支撑着积土负载。在这个直接的颗粒对颗粒的应力的任何缩小都将造成孔隙液体支撑着部分积土压力, 结果就是异常地层压力($P_f > P_{Hy}$), 换言之, 上覆岩层可以有效地被高的地层压力“浮起来”。

有许多因素可以引起高压及低压这样的异常地层压力。但是, 在一定的盆地更经常的是一些叠置的原因占优势, 因此, 与这个地区的地层、大地构造和地球化学历史有关。

低于正常的地层压力(低压)

世界性的经验表明, 低异常地层压力往往比高异常地层压力发生的要少。尽管如此, 在许多地区, 当钻油、气井时, 还是遇到过低压, 包括美国的得克萨斯和俄克拉何马潘汉多地区, 科罗拉多高原的部分地区, 在犹他州的云塔盆地, 阿肯色州的部分地区, 阿帕拉契亚区等等; 加拿大的中央阿尔伯达的下白垩统维金层; 在苏联巧克拉克和卡拉干地区的中新世地层; 在伊朗干燥的地区; 以及其它地方。

低异常的地层压力也可以由于从可渗透的地下地层(油、气藏)开采油、气和(或)水而人为地形成。油藏流体的大量开采可以急剧地降低地层压力(Krynine 和 Judd 1957; Marsden 和 Davis, 1967)。从根本上说, 如果没有强烈水驱补充它的话, 取出去流体, 譬如采油, 就会造成孔隙流体压力的降低。其结果, 通常产油层就会压实。

低异常的油气藏压力发生在许多衰竭的油藏中(Brighti, 1967)。有时候, 这种原地的压力降低的地面显示表现为地面沉降, 在加利福尼亚州洛杉矶附近的长滩港地区; 得克萨

斯州靠近加尔维斯顿湾的古斯溪地区；在委内瑞拉马拉开波湖上沿着博利瓦尔沿岸，以及别的地方曾经观察到这种沉降（Gilluly 和 Grant, 1949; Van der Knaap和Van der Vlies, 1967; Mayuga和Allen, 1969; Allen, 1972）。

今天，有了特殊的沉降和压实作用的监视装置，包括有：（1）精密的套管—接口—长度测量器，用以检测可能的深部压实现象；（2）压实—控制井，通过使用电缆伸长测定仪测量浅处的压实。在估计会沉降的油田里，这些数据是经过连续地监视并考察的，必要时采取有效措施，如特殊的注水，以保证不发生沉降。

在烃类开采中，地下水（潜水）的采出也可造成低压及沉降。例如，通过对意大利波河三角洲地区已经发生沉降现象（Coloi, 1967）的综合性研究表明，必须关闭几千口含甲烷气的水井，因为观测到的三角洲的巨大的地面沉降几乎全部都起因于这些井。

地下水采出的效果在美国墨西哥湾岸地区也是很出名的（Gabrysch, 1967）。在墨西哥湾岸平原的近岸地带，在几千口井抽水的淡水层中，其压头在广大区域上已经降低了几百英尺。最大的地区就是得克萨斯的休斯顿市，具有明显压头降低的总面积约计5000平方英里（12950平方公里）。1954及1959年之间，在卡蒂—休斯顿—帕萨迪纳—贝敦地区，大约有22%的泵出水，是从大泵量井段的沉积物压实得来的（Winslow 和 Wood, 1959）。当泵压头降低时，据信，夹在含水砂岩层中间的粘土层中的水排到含水层中去了。

在得克萨斯潘汉多地区，低异常地层压力梯度范围从0.36磅/英寸²·英尺（0.083公斤厘米⁻²米⁻¹）到0.39磅/英寸²·英尺（0.09公斤厘米⁻²米⁻¹），人们报道过的一个具体油田实例，在得克萨斯西北部阿马里洛—得克萨斯潘汉多油田，那里测得的压力梯度大约等于静水压力梯度的一半。其起因可能是花岗岩冲积物的产油层出露于俄克拉何马州维奇塔山区东部，其海拔大约高出海平面1000英尺（304.8米）。这个值与阿马里洛油田产层的静压头面大体相当。

类似的低压情况曾见于半干燥和干燥区的钻井工作中，那里的地下水面是很低的。例如，在中东的探井，曾经遇到水面低于地表深达几百甚至几千英尺，这种情况要求有正确的钻井设计。在这种情况下，仅仅从地下水面才开始有正常的静水压力梯度。

亚拉巴马（Alabama）地质调查所和美国地质调查所，通过对阿拉巴马的调查后指出，许多地区底层碳酸盐岩是容易沉陷的。渗坑（Sinkhole）坍塌与自然现象有关。如像豪雨，水面的季节性波动，地震，或影响风化残积物稳定性的水文地质条件的其它变化，以及人为施加的影响，如像人工排水，抽水，地震冲击和水管或下水管破裂。

渗坑的形成时常起因于残余粘土中的洞穴坍塌，它们起因于粘土剥落或者通过下伏碳酸盐岩孔洞向下迁移造成的。这种剥落及洞穴的形成起因于（或者是被促进）地下水面的降低，导致盖在基岩的通道上方的粘土失去了支持，起因于地下水面的海拔相对于残余粘土的底面的波动，起因于地表水向下运动，通过粘土中的通道或锥形凹地，到排水地点，水的流速的增加。于是在剥落处发生了坍塌，同时造成洞穴逐步向上扩大，直到上覆粘土不能支持它本身，同时在充分振动、冲击或洞穴上方超负载的地方，使粘土松动或者压了下来。

另一个有趣的研究，是讨论阿帕拉契亚地区，前宾夕法尼亚纪占统治地位的透镜体油藏（Russel, 1972），在这些油气藏中，有许多气田的流体压力是低于正常的，但有些是正常的，少数又是高于正常的。横穿大区的每一个油藏，其平均流体压力值都与正常压力值有一特定的偏差值。异常低的流体压力倾向于发生在与经受风化地区的页岩紧密伴生的透镜体油藏中。一个可能的解释就是风化作用造成页岩孔隙空间里的液压的减小，同时，这种减小是传

播到了紧邻的储油岩中。这个页岩中压力的减小可能是由于随着积土压力的降低而引起的孔隙体积增加，和粘土矿物中水的吸附作用，以及由于温度降低发生矿物转换时水的吸附作用造成的。

在俄克拉何马的某些地层压力研究中，曾经涉及到低压异常，这是俄克拉何马某些二叠纪气田和前二叠纪储油岩的一个重要特点。例如，Flores (1967) 研究的位于俄克拉何马、西马伦郡，凯斯气田的低压情况，成功地利用电测井参数去探测及评价这些异常压力情况。所用的方法包括从自然电位曲线推导出来的地层水电阻率的变化，以及 Foster 和 Whalen (1966) 为定量地评价地层压力而提出的地层因子法(图 1.3)。这些方法的原理在第五章中讨论。所列举的凯斯气田的 $0.188 \text{ 磅/英寸}^2 \cdot \text{英尺}$ ($0.043 \text{ 公斤厘米}^{-2} \cdot \text{米}^{-1}$) 压力梯度是我们遇到过的一个最低的数值。

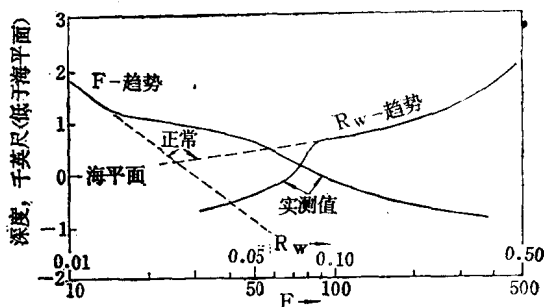


图1.3 美国俄克拉何马、西马伦郡，低压的凯斯气田，地层水电阻率 (R_w) 对地层因子(F)与深度的相互关系

最近，Breeze (1970) 在一个区域的基础上，也研究了俄克拉何马西北部的莫劳 (Morrow) 砂岩里面明显的压力关系。在这个地区莫劳组作为地质剖面被限定在阿托卡 (Atoka) 地层和密西西比地层不整合面之间；莫劳砂岩是在莫劳万 (Morrowan) 段内的可渗透相，是海侵性的透镜体，主要生产凝析油和和气。Breeze 的有趣研究的注意力，集中在从低异常到高异常地层压力的区域过渡上 (低压 $\rightarrow$ 静水压力 $\rightarrow$ 高压)。图 1.4 和 1.5 中，以一种综合比较的形式表现了这些结果，它把地层压力的变化叠置于莫劳万系等厚图及该层顶面的地下构造图之上。Breeze 提出“由于盐度差和透镜状砂岩的发育非常有利于渗透作用，很有可能渗透作用助长了这种压力分布。这样一种过程可能造成从高压异常到低压异常条件的逐步过渡”。

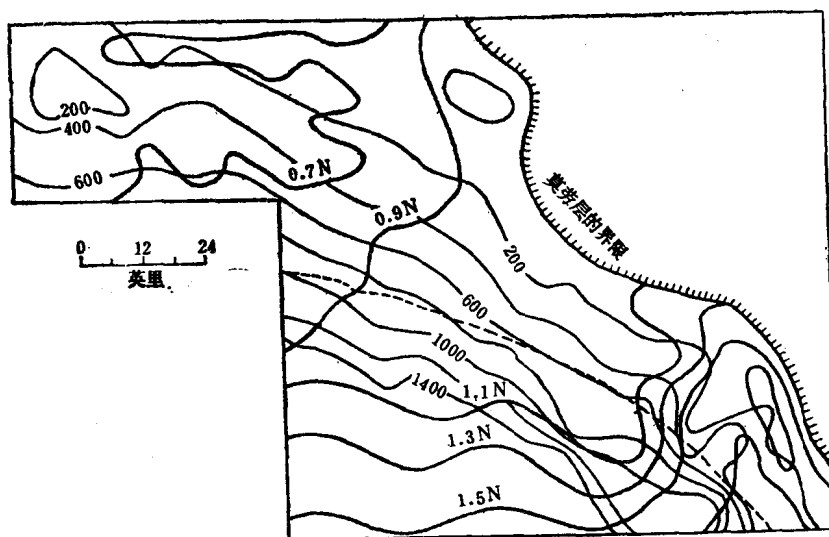


图1.4 美国俄克拉何马西北部莫劳万系等厚图和压力分布 (据Breeze 修改, 1970)
——等值线距 ---- 枢纽线 —— 压力, N = 静水压力

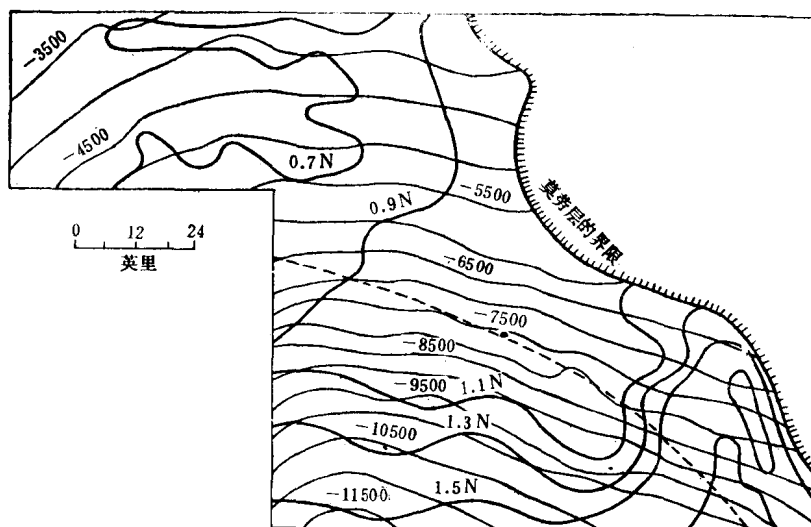


图1.5 美国俄克拉何马西北部莫劳万系顶面地下构造图与压力分布 (据 Breeze 修改, 1970)
——等值线距 ----枢纽线 ——压力, N = 静水压力

因为这个实测的压力变化的解释值得怀疑, 同样地区另一个解释 (Ferran, 1973) 考虑到由于隆起和风化 (“减压膨胀”) 以及由于沉积岩深度变化而伴生的温度降低的可能影响。这些过程 (作用) 的综合影响可以造成压力降低, 这种压力降低可以表示为一个微分方程式, 即:

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial S_w} \right)_{t,v} dS_w + \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{v,S_w} dt + \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_{t,S_w} dV \quad (1.5)$$

式中 dp ——储油岩中总的油藏压力变化;

$(\partial p / \partial S_w)_{t,v} \cdot dS_w$ ——砂岩储层中相对于含水饱和度变化而引起的孔隙压力的部分变化

这样一种饱和度的降低, 也即水从砂岩向毗邻的页岩中运动是由于这些页岩减压膨胀造成的, 而这种减压膨胀是由于随着上升去掉应力, 以及由于侵蚀作用相继地、部分地去掉上覆地层压力引起的。(图1.6) 这种“膨胀现象”, 由于去掉负载而引起的岩石膨胀的幅度取决于岩石的类型, 上覆重量的变化和地下地热机制以及经历的地质时代的长短。

$(\partial p / \partial V)_{t,S_w} \cdot dV$ = 由于砂岩储集层体积膨胀造成的孔隙体积变化所引起的部分孔隙压力变化。Ferran (1973) 认为这项可以忽略不计。

$(\partial p / \partial t)_{v,S_w} \cdot dt$ = 对应于等体积和等饱和度条件下, 温度降低所引起的孔隙压力的部分变化。孔隙空间和流体饱和度假定保持不变。

在正常到异常压力环境的过渡带中, 温度增加超过正常地温梯度是个经常看到的现象。在钻入莫劳砂岩 (图1.7) 的低压和高压环境的开采井中, 也曾经测到过类似的情况。注意, 在低异常压力的井中, 温度增加的一般较低。如果有人假定莫劳组地层在最初的条件是过热的和未充分压实的, 那么, 由于隆起和风化而引起的任何地层冷却, 都将减小孔隙压力。

这样一种概念可以从图1.8中水的压力—温度—密度图得到说明 (Barker, 1972)。请注意, 在一个隔绝的液体系统冷却的过程中, 比如说它可能是隆起和 (或) 风化造成的冷却。那么, 在这个被隔绝的体积内的压力将降低到正常的静水压力数值以下, 同样的温度降低可

了图（见图1.9和1.10）。

人们报道过，落基山、阿森奈尔井，另一个十分有趣的现场的低压观测，和一个由于注入液体引起人工的地震（Evans, 1966）。这口化学废水的处理井，钻在丹佛—朱莱斯堡盆地内，丹佛的东北，总深度12045英尺（3671米），井底在前寒武纪片麻岩里。在11002英尺（3353米）深处试井，确定的孔隙压力是4128磅/英寸²（290公斤/米²），证明它低于正常压力。Evans还提出：“这些高度破裂的储油岩坐落在低于静水流体压力情况下的陡坡上。随着油藏内部流体压力的升高，沿破裂面的摩擦阻力减小，最后，发生运动。这种弹性波能

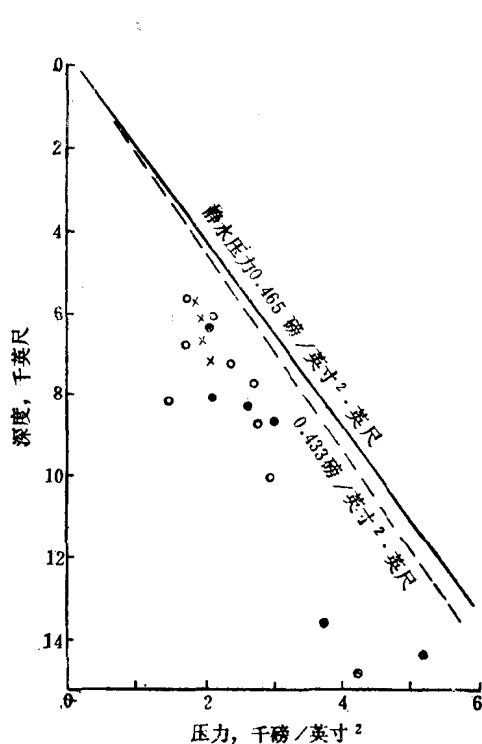


图1.10 美国俄克拉何马、阿纳达科盆地。
○—上密西西比统；×—中密西西比统；•—亨顿碳酸盐岩

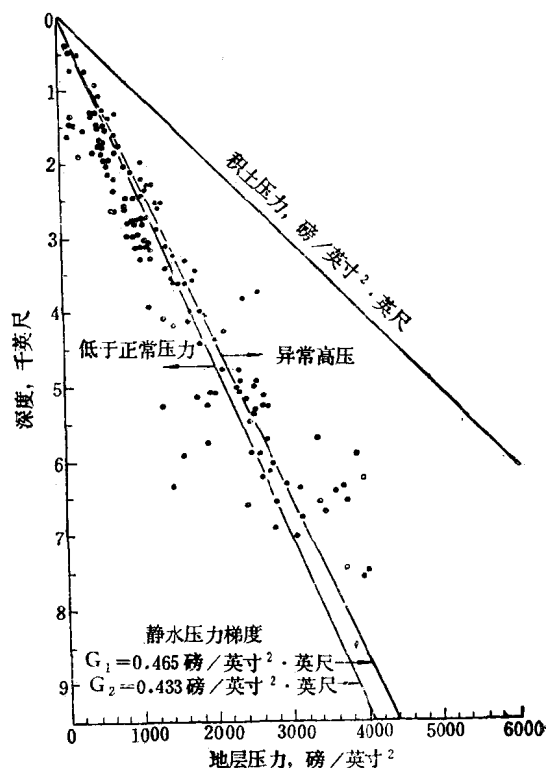


图1.11 苏联第三纪地层异常地层压力环境（据 Fertl, 1971）

量的释放，以一次地震的形式记录下来”。

在苏联的很多第三纪油、气藏中也碰到了低于正常的地层压力。低压经常发现在中中新世的储油岩里，特别是在巧克拉克（Chokrak）和卡拉干（Karagan）期。然而，这些低压的产出，随着这些油藏深度的增加而偏斜（图1.11）。苏联的研究者们曾试图把这个情况解释为构成地质层系的矿物的密度差造成的。

异常高的地层压力（超压）

在全世界，从新生代（更新世）到古老的古生代（寒武纪）地层都遇到过异常高的孔隙流体压力。

一个正常的静水压力地质环境可以设想为一个水力学上的“开放”系统；亦即，可渗透

的、流体连通的地层，容许建立和（或）重新建立静水压力条件。相反地，异常高的地层压力系统基本上是“关闭的”，它阻止了或至少大大地限制了流体的连通。这儿，积土压力，有一部分是被地层孔隙空间的流体支撑的。

压力封闭

只有被起着压力屏障作用的低渗透屏障隔开时，正常和异常地层压力可能同时存在。理论上讲，这样一个封闭可能是地壳里任何一种物质或者几种物质结合在一起，限制或阻碍大量流体的运动和通道。压力封闭的成因是物理的、化学的或者是这两者结合而引起的（Louden, 1972）。因为这种封闭的模式和成因可以是多种多样的，所以在表1.11中列举了各种可能的类型（Fertl 和 Timko, 1972）。

从这个表中可以看出，压力封闭的问题，解答了它们本身存在的三个基本问题：“什么封闭，何时封闭和如何封闭？”

表1.11 预期的地层压力封闭的类型（据Fertl 和 Timko, 1972）

封 闭 类 型	封 闭 性 质	实 例
垂直的	块状页岩和粉砂岩	美国，墨西哥湾岸
	块状盐	德国北部，策克斯坦
	无水石膏	北海、中东
	石 膏	美国、苏联
	石灰岩、泥质岩、白垩	
	白 云 岩	
横穿的	断 层	全世界
	刺穿的盐和页岩	
垂直的和横穿相结合		全世界

“什么封闭”涉及到描述的封闭物质，“何时封闭”牵涉到完成封闭时的岩石成岩作用阶段，“如何封闭”关系到盖岩的化学成分，从中发生矿物沉淀的含水层流体的类型，和占统治地位的压力和温度环境等等。

任何矿物的存在都是这些矿物种类所固有的稳定场的函数。反过来，这个稳定场又依赖于温度、压力、溶液浓度、溶液的成分等等。这个稳定场还决定了一种矿物是与环境保持平衡，还是增长，或者溶解。

通常，一个压力封闭的形成取决于许多因素，包括粘土矿物由于施加了机械负载（如像积土压力）而引起的、变形的、高度复杂的现象；作为半渗透隔板的页岩和粘土的性质；粘土矿物数量和类型；极低的页岩渗透率（ 10^{-4} 到 10^{-6} 千分达西）；水在粘土沉积物的细小间隙中的非牛顿状态；与逸散气体及有机酸的相互作用；阳离子的类型、浓度及自动扩散；溶解固体的沉淀（亦即方解石，氧化硅，长石，黄铁矿，菱铁矿等等）；水的成分和与卤水混合的可能性；以及地下压力和温度的突然变化。

所有这些因素，或者是它们的任意组合，加上考虑到地质时间因素，可以改变物理化学环境，引起作为压力封闭的这些盖岩地层里的缓慢的岩性变化。

之后，由于液体和气体不再大量地通过这种封闭，进而，氧化硅、方解石等的沉淀和胶结作用将会缓慢，直到基本上停止下来。

虽然这样的页岩由于石化作用而变硬，但它们还应该保持一些柔性（可塑性），使得这种压力封闭能“适应”小规模的地壳运动。但是较大的构造活动将会通过裂缝和节理破坏这