

保护油层专辑

第三册

石油工业部科学技术情报研究所
一九八八年十一月

35854

保护油层专辑

第三册

地层孔隙压力和破裂压力梯度的
预测及其部分应用

编译 史久光



石油工业部科学技术情报研究所

正文设计：段利君

封面设计：秋 风

保护油层专辑（第三册）

地层孔隙压力和破裂压力梯度的预测及其部分应用

开本787×1092毫米 1/16·印张57/8

字数，14万 印数，2300

1988年10月北京第一次印刷

油情(单)88026 工本费，1.20 元

编辑：石油工业部科学技术情报研究所

出版：石油工业部科学技术情报研究所

印刷：北京顺义燕华营印刷厂

发行：石油工业部科学技术情报研究所
(北京和平里七区十六号楼)

说 明

本文集选译自 1985 年出版的 N. J. Adams 著《钻井工程》的第三、四、五和六章，并补充了美国大西洋富田石油公司 (ARCO)、美国地质调查局及我国南海有关孔隙压力和破裂压力预测等方面的部分资料；对我国进行钻井设计和施工，以及保护油气层等工作有一定参考价值。本文集的出版得到石油工业部科技司的支持和帮助，特此致谢。

石油工业部科学技术情报研究所



编译者的话

地层孔隙压力和地层破裂梯度对石油勘探和生产有较重要和密切的关系已引起了人们的重视。但是国内涉及这方面的文章还较少，所以把亚当(N. J. Adams)1985年的钻井工程——一口完整井的计划方法中的第三章——孔隙压力的预测、第四章——破裂梯度的预测、第五章——套管下入深度的选择、和第六章——井眼几何形状的选择译出。

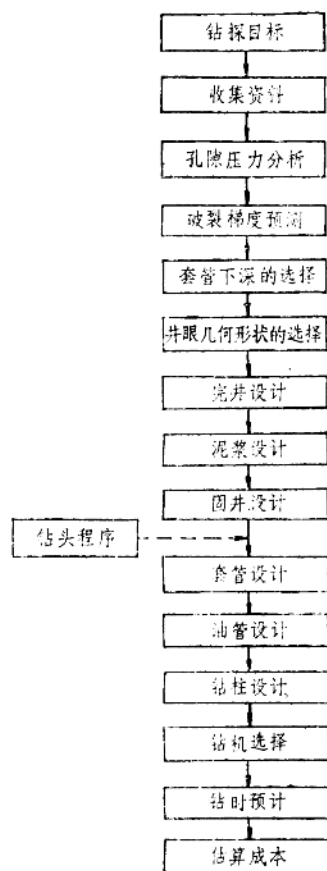
地层孔隙压力就是常说的地层压力或岩石颗粒之间孔隙内所含流体的压力。孔隙压力的研究和应用约在60年代的后期。

地层破裂压力就是对地层施加适当压力后，地层就会产生裂缝或破裂。这一问题也是在60年代后期进行研究和应用的。在钻井中经常遇到的严重井漏或固井后发现管外水泥面比预计的低得多，都可能是地层破裂的结果。我们也常对井下的生产层进行压裂作业，以提高生产量或注水量，就是利用地层破裂的这个概念。还有固结疏松砂层、酸化等就不一一涉及了。

孔隙压力用于生产方面也比较广泛，特别是预测油和水层的压力。这些层一旦被钻穿，会不会自喷(流)，是否需要人工举升，或大约什么时候需要作举升准备。对于钻井工作尤为重要，因为一口井的设计，主要的依据就是孔隙压力，有了孔隙压力就可作出全井的设计和预算。一口井的设计程序如方框图所示。

求孔隙压力的方法较多，但目前还不够完善，准确性还不够高。但是在全世界已广泛采用，特别是对探井和有些探边井和评价井用得更为普遍。求探井的孔隙压力，常依靠地震资料的解释，也要靠测井资料。所以要取得孔隙压力的资料，必须取得地震、测井和地质工作者的支持和配合。欲钻成一口有用的井，除去要求安全之外，还要节约时间和器材。成本最低，并且最大限度地少损害生产层，以期能有较高的产能和产量，并且不致于把一个本来有商业价值的油、气田，变为无商业价值或降低了它的价值，甚至无法开采。

译者在译文中作了一些补充，如图1—1。在原第三章之后附了美国大西洋富田石油公司即阿科公司(ARCO)自用的钻井(甲方)手册中与孔隙压力和破裂梯度预测有关的测井、地震和地质方面的15幅曲线图，其中包括有我国南海的孔隙压力的曲线图两张。另外在原第五章之后附了美国地质调查局关于套管下入深度、注水泥、套管试压和地层试压的资料。



译文得到海洋石油总公司领导同意出版，又获得石油部科技司和科技情报研究所支持，予以铅印发表。译文承蒙赵声振及李光征同志审阅，并提出了宝贵意见，还有很多其他同志给以帮助，一并在致致谢。文中难免有谬误之处，请读者指正。

1988年2月

目 录

一、预测地层压力	(1)
地层压力预测方法.....	(1)
异常压力的起源.....	(2)
地震分析.....	(8)
测井分析.....	(10)
附图：孔隙压力和破裂梯度的曲线图.....	(34)
二、预测地层破裂梯度	(49)
理论上予以确定.....	(49)
现场确定破裂梯度.....	(57)
三、套管下入深度的选择	(61)
套管和油管的类别.....	(61)
设计套管下入深度的步骤.....	(63)
附录：美国地质调查局关于套管的规定.....	(76)
四、井眼几何形状的选择	(77)
一般设计步骤.....	(77)
尺寸选择问题.....	(79)
套管和钻头尺寸的选择.....	(81)
钻头-套管的标准组合	(83)

地层孔隙压力和破裂压力梯度的预测及其部分应用

一、预测地层压力

地层压力可以是影响钻井作业的主要因素。如果不能恰当地测定这一压力，可以导致各式各样的钻井问题，有如漏失、井喷、卡钻、井壁的不稳定和化费大量的费用。不幸的是，不正常或异常的地层压力可能很难准确地予以确定。

在一口完整井的设计中，除去少数例外，都是以对地层压力的了解为依据进行的。正如图 1-1 所示，地层压力是井的设计中很多内容的基础。如果不对地层压力的预测给以足够的重视，那很可能对井的设计的其它技术部分是不够妥当的。

地层压力预测方法

有几种预测地层压力的方法，它们可以合理地归类如下：

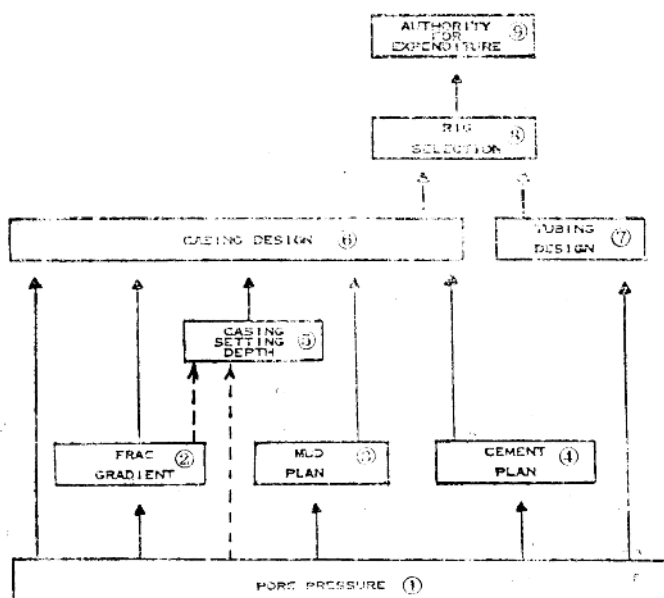


图1-1 孔隙压力对一口井的设计中一些主要内容的影响的示意图

①孔隙压力；②破裂梯度；③泥浆计划；④水泥计划；⑤套管下入深度；⑥套管设计；⑦油管设计；⑧钻机选择；⑨支付权力。

注：图中虚线系译者据套管下入深度的选择一章的内容添加的。

1. 用地震资料作区域的分析

2. 用邻井的资料进行对比

测井分析

钻井参数的评价

生产或测试资料

3. 实时评价

定性的

定量的

实时分析包含着对一口正在钻进的探井的钻井参数和测井参数进行监测。

这些技术应该给钻井工程师在正确估计地层压力时所需的手段。在最坏的情况下，一些地区无法取得邻井的资料，地震分析可以用来获得某些压力资料。建议在可能的条件下。运用各种技术，使之能对所取得的压力资料具有充分的信心。

异常压力的起源

按定义，异常压力是任何一种地层压力与某一地区和某一深度已确立的正常趋势有所不同的压力。压力低于正常时称为欠正常压力，高于正常压力时称为受地压的、超压的或称异常压力。

低于正常压力很少出现直接的井控问题，但是低于正常压力确能引起很多钻井和井的设计问题，为了避免混淆，“异常压力”这一个词将专指高于正常的压力。

地层压力就是因为岩石基体的孔隙中含有流体。这些流体的典型代表为油、气、或盐水。上覆岩层应力是由上面覆盖的基岩和流体充填的孔隙的重量形成的。岩石基体应力等于上覆岩层应力减去地层压力。在一般的计算中，上覆岩层应力梯度常假设为1.0磅/英寸²/英尺，密度为19.23 磅/加仑（约为2.3克/厘米³），即为充有流体塑性岩石的平均密度。

正常地层压力等于自然地层流体(native formation fluids)的静压头。大多数情况下，上述流体从具有密度为8.33磅/加仑（0.433磅/平方英寸）的淡水至密度为9.0磅/加仑（0.465磅/平方英寸）的盐水。但是，有些现场报告表明有一些正常地层流体密度大于9.0磅/加仑的例子。不管流体的密度，可以把正常压力地层看作是连通的液力系统，它的压力在整个系统内很容易相互勾通。

异常压力是由于没有压力相互勾通的自由。如果能相互勾通，高压就会很快消散而回复到正常压力。所以，能产生并保持异常压力，首先必须存在有压力圈闭结构。弗特尔（Fertl）和铁木科（Timko）曾列出世界范围内几种常见的圈闭密封类型（见表1-1）。

假设有一个压力圈闭，压力的来源或起因与下列各项如岩性、矿物成份、构造作用和沉积速度有关。弗特尔给出了多种现场报道的出现高压的原因（见表1-2）。本章将讨论几种原因。

沉积物的压实。正常的沉积过程包括着各种不同岩石颗粒沉积成许多的岩层。由于这些岩层继续增加深度，并增大了上覆岩石（全部岩石）的压力，下面的沉积物受到表面沉积的重量而迫使下降。这一情况下，上覆岩石的压力的定义为岩石基体压力与地层流体压力之总和。在正常钻井条件下，主要关心的是地层流体压力，因为在一定的地质条件下，流体可能流入井筒内，而岩石基体却因为具有半刚性组织性能，通常不会向井筒内移动。

岩石基体承受着不断增大的上覆岩层负载的形态，说明了在这种情况下产生的异常压力。

表1-1

地层压力圈闭的分类建议

圈闭类型	圈 闭 的 性 质	例 如
垂直型	厚层页岩和粉砂岩 大块盐岩 硬石膏 石膏 石灰岩, 泥灰岩, 白垩 白云岩	墨西哥湾, 美国 札契斯坦, 德国北部 北海, 中东 美国, 苏联
横向型	断层, 盐岩和页岩侵入体	全世界
垂直与横向的混合		全世界

表1-2

产生异常流体压力的原因

流体水压头(自流水系统)
 储层构造
 储层岩石的再受压(repressuring)
 沉积速度和沉积环境
 古压力(Paleopressures)
 构造活动
 断层
 页岩侵入(泥火山)
 盐侵入
 砂岩岩脉
 地震
 渗透现象
 岩化现象
 粘土沉积的岩化
 硫酸盐的岩化
 火山灰的岩化
 大规模区域性岩盐沉积
 永冻环境
 热力和生化原因

由于表面上的沉积以及所导致总的上覆岩层的增大, 下部岩石必然要承受这种载荷。

基岩的强度随着单个岩石颗粒之间的颗粒与颗粒接触的增加而增加。这意味着在正常沉积条件下随着深度的增加, 最终的孔隙率必然减小。这种关系能在图1—2和3中看出。如果正常的孔隙压实过程受到限制, 而不让孔隙内的流体逃逸, 基岩无法增加它的颗粒与颗粒间的接触或它的上覆岩层的支撑能力。

因为总的上覆岩层的负荷继续随着沉积而增加, 而岩石基体无法承受它的载荷, 孔隙中的流体必须开始支承部分的上覆载荷, 从而导致高于正常的流体压力(图1-4)。迁到异常高孔隙率的深度, 通常即假设为迁到异常压力的起始深度。

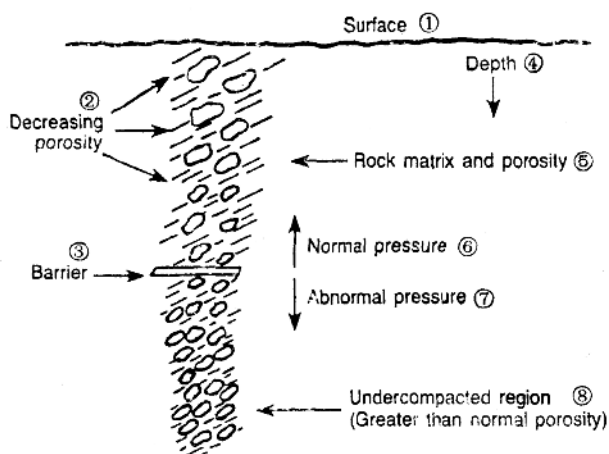


图1-2 在欠压实区产生异常孔隙压力，因为页岩基体不能支承上覆岩层的应力

①地表；②孔隙率逐渐降低；③隔离层；④深度；⑤岩石基体和孔隙率；⑥正常压力；⑦异常压力；⑧欠压实区（大于正常的孔隙率）。

在某一环境里要把一个异常压力圈闭起来就必须有一个密封结构。在连续沉积盆地，最常见的密封结构是一个低渗透率的岩石层，如一个纯净的页岩层段。页岩降低了正常流体

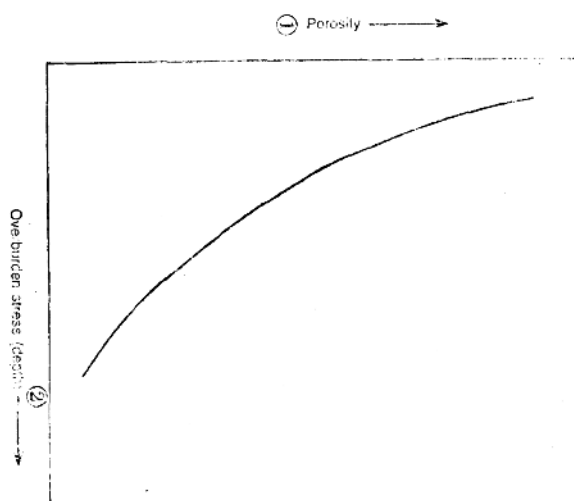


图1-3 在正常压实期间上覆岩层应力对地层孔隙率的影响

①孔隙率；②覆盖岩层应力（深度）。

的散逸，从而导致欠压实和异常的流体压力。

由于欠压实造成的地层压力，常能用一些简单的计算约略地算出来。如果假设压实不是出现在隔离层深度之下，隔离层以下的地层流体必须支承全部的上覆岩层，即岩石基体和地

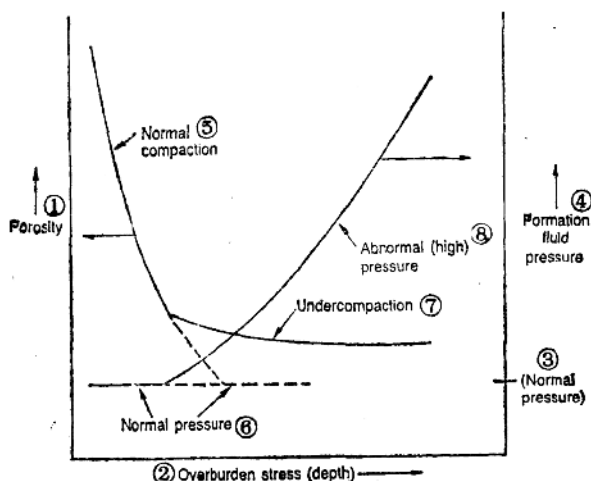


图1-4 当开始出现欠压实的深度时地层流体压力将增高至正常值之上

①孔隙率；②覆盖岩层应力(深度)；③(正常压力)；④地层流体压力；⑤正常压实；⑥正常压力；⑦欠压实；⑧异常(高)压力。

层内的流体。可用方程1.1计算：

$$P = 0.465 \text{ 磅/平方英寸/英尺 } D_B + 1.0 \text{ 磅/平方英寸/英尺 } (D_1 - D_B) \quad (1.1)$$

式中： D_1 = 隔离层下所关心的深度，英尺

D_B = 隔离层的深度，即低渗透层段，英尺

P = 在深度为 D_1 处的地层压力，磅/英寸

在式1.1中，上覆岩层的压力梯度假设为1.0磅/英寸²/英尺，而正常地层流体压力梯度为0.465磅/英寸²/英尺。

例1.1

一口井计划钻到15000英尺。在10000英尺处进入由于欠压实造成的异常压力。计算15000英尺处的预期地层压力。假设地层流体和上覆岩层应力梯度分别为0.465磅/英寸²/英尺及1.0磅/英寸²/英尺。

解：

用方程1.1来估算15000英尺处的地层压力

$$\begin{aligned} P &= 0.465 \text{ 磅/平方英寸/英尺 } D_B + 1.0 \text{ 磅/平方英寸/英尺 } (D_1 - D_B) \\ &= 0.465 \text{ 磅/平方英寸/英尺 } (10000) + 1.0 \text{ 磅/平方英寸/英尺 } (15000 - 10000) \\ &= 4650 \text{ 磅/平方英寸} + 5000 \text{ 磅/平方英寸} \\ &= 9650 \text{ 磅/平方英寸} \\ &= 12.4 \text{ 磅/加仑的当量泥浆密度 (约 } 1.48 \text{ 克/厘米}^3 \text{)} \end{aligned}$$

9650磅/英寸²的压力在15000英尺的泥浆当量为12.4磅/加仑(约1.48克/厘米³)

式1.1可以用来约略估算地层压力。但是，在隔离层之下的地层通常有某种程度的压实。

因此,在大多数情况下,不能预期式1提供精确结果。如果有必要,可以使用以式1.1为依据而进行一系列的计算,以提高该方法的精度。本文将不提供这一复杂的程序。

自流系统。如果存在有适合的构造条件,一个自流水系统可以产生异常压力。如图1-5所示,连续的含水砂层能把地层水的静水压力传导到构造的底部。构造顶部的压力在它所钻遇的深度是正常的。在构造底部的压力则相当于13.5磅/加仑(约1.6克/厘米³)。这种压力用普通技术不能预测。

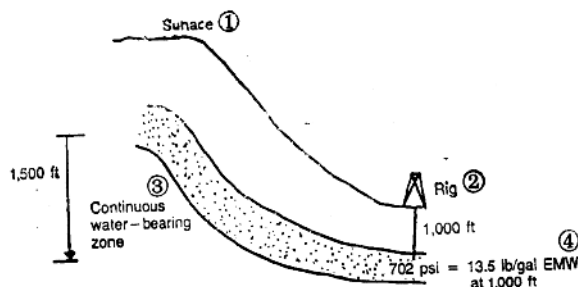


图1-5 自流水系统产生的异常压力的示意图

①地表; ②钻机; ③连续含水层; ④1000英尺处的当量泥浆密度为13磅/加仑。

上升。一个正常压力是由它所迁到的深度予以确定的。一个压力在某一特定深度是正常的,在较浅的深度就是异常的。构造运动把一部分地层抬高,如果抬高的部分中的某个地区是密封的,即在该地质时期内异常压力不能回复到正常压力,那么该上升部分能导致异常压力。当钻过一个断层而进入另一个不同的压力环境的事,也不是不常见的。在作井的设计时必须谨慎,因为断层一侧的压力可以比另一侧的高、也可以低。

图1-6表示了由于部分地层上升而产生异常压力的这样一个概念。钻6000英尺深的井段须使用12.0磅/加仑(约1.43克/厘米³)的泥浆。密封的断层防止了异常压力回复到正常压力环境。

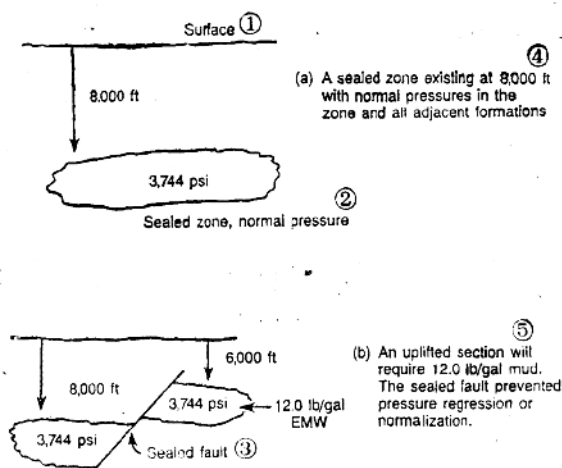


图1-6 上升和侵蚀环境可以产生异常压力

①地表; ②密闭层,正常压力; ③密封断层; ④8000英尺处有一密闭层,它及邻近的地层均为正常压力; ⑤上升部分需用12磅/加仑的泥浆,密封断层限制了压力的降低或正常化。

盐层。全世界范围内，地层压力接近于总上覆岩层应力的主要原因可能是由盐层引起的。层状盐与页岩相比时，它是独特的非渗透性的，而页岩却是半渗透性的。此外盐具有塑性，能把全部上覆岩层应力传递到下部地层。如图1-7所示，盐层以下的地层需用超过19.0磅/加仑（约2.3克/厘米³）的泥浆。

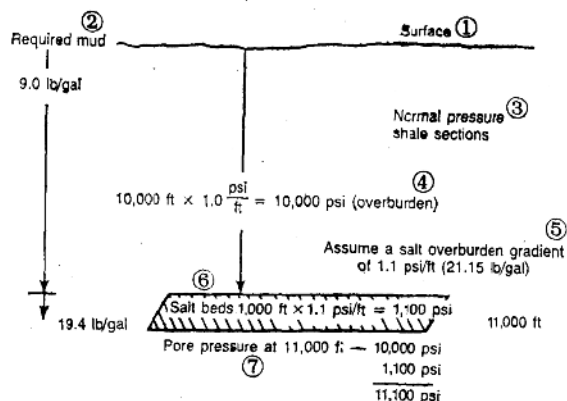


图1-7 盐层有可能把上覆岩层应力传递给盐层之下的地层

①地表；②需用的泥浆；③页岩层段正常压力；④（上覆岩层）；⑤假设上覆盐层梯度为1.1磅/英寸²/英尺（21.15磅/加仑）；⑥盐层；⑦11000英尺处的孔隙压力。

盐侵入体（盐丘）。盐侵入体又称盐丘，是由一种低剪切强度材料的密度转换(density-inversion)而造成的。由于盐所具有的可塑性，使之有可能向上“流动”。这种运动有可能使位于浅处的地层成为过压实，如图1-8所示。

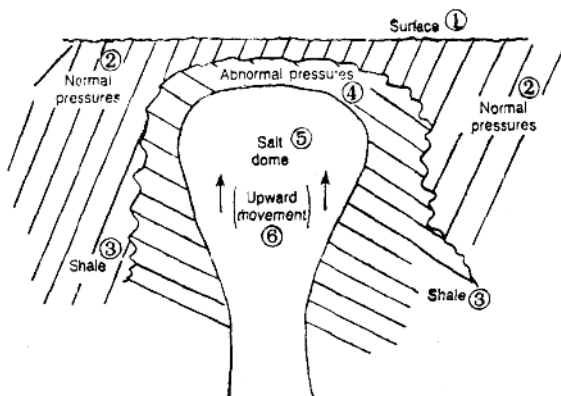


图1-8 盐丘的入侵作用在页岩层段中产生异常压力，并能防止流体运移和压力恢复到正常情况

①地表；②正常压力；③页岩；④异常压力；⑤盐丘；⑥向上运动。

密度差。具有渗透性联通的层间的流体密度差可以形成异常压力。U形管原理就是这一现象的基础。如图 1-9 所示, 一个非水平层中含有低密度的流体, 要钻开该层的高部位时需要使用高于正常密度的泥浆。出现这一现象的典型条件为, 该层的上端具有封闭机制, 它的下端却没有渗透障碍。

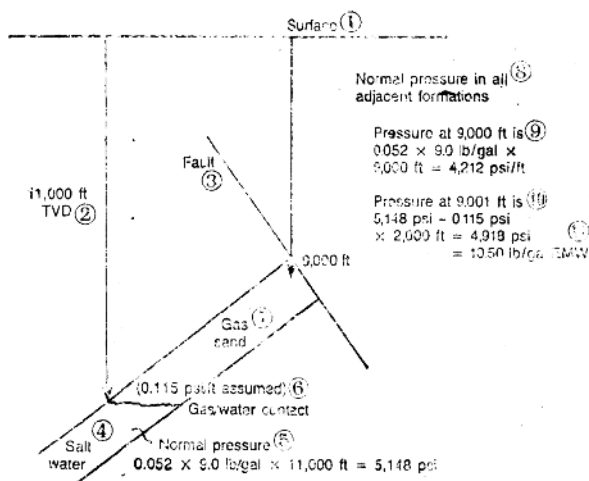


图1-9 位于9000英尺处的砂层顶部的异常压力企图平衡11000英尺的正常地层流体

①地表; ②总垂直井深; ③断层; ④盐水; ⑤正常压力; ⑥(假设为0.115磅/英寸³/英尺) 气-水接触面; ⑦含气砂层; ⑧邻近地层均为正常压力; ⑨9000英尺处的压力为; ⑩9001英尺处的压力为; ⑪当量泥浆密度。

地震分析

地球物理中的地震方法可以用来侦查有无异常压力的存在, 以及异常压力层的顶部, 还能估计该压力的高低。这一技术与声波测井相似, 只是所使用的频率和波长不同。图1-10给出了沉积岩层段预期能迁到的速度范围。

地震资料分析法是由潘尼贝克 (Pennebaker) 所归纳的基本反射分析为基础的。图1-11中SS表示地球的表面。假设放炮点O是在地面上。当将炮点处的炸药引爆后, 即产生压缩波型的声能。这种地震能量在各个方向相同的移动。声能垂直地传播并迁到地下的RR面, 随即沿着垂线OPO反射回到SS地面。从炮点也有能量沿着斜线传播并与RR面相迁(即OT线), 随即沿着TW线反射回到地面。在O和W点的检波器记录了能量往返传播所需的时间, O点与W点的水平距离为X。平均速度V可用方程(1.2)计算出来:

$$V = X^2 / (t_x^2 - t_o^2) \quad (1.2)$$

反射层的深度可用方程(1.3)求得:

$$Z = \bar{V} (t_o/2) \quad (1.3)$$

从地震剖面得到的层间速度就是层间传播时间的倒数。该倒数数值可以与深度画在一张图上, 可以表示存在有异常压力。在正常环境中, 它会显示出当出现压实时, 孔隙率就会降低。

所以传播时间应当减低。一个异常压力层在特定的深度时具有大于正常的孔隙率，从而导致较长的传播时间，图 1-12 给出了一口异常压力井的地震和声波图。本章后部还要给出地震（和声波）资料的定量解释法。

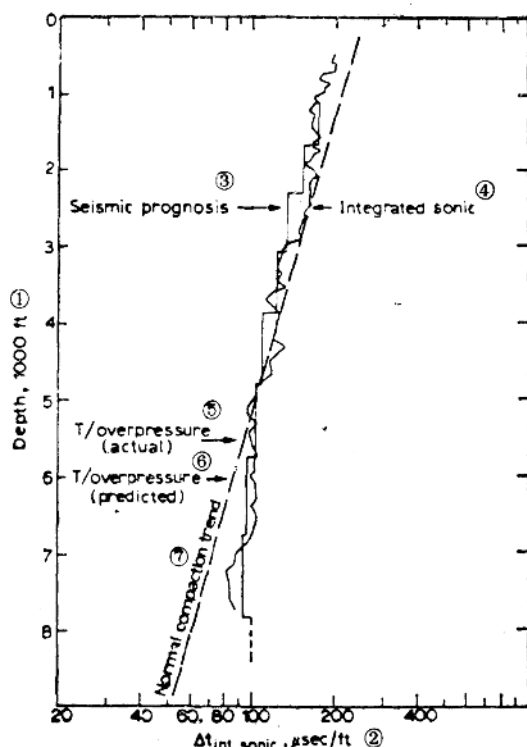


图1-12 从地震资料获得的传播时间 (transit travel time) 和一口井的实际速度数据的比较
①深度, 1000英尺; ② Δt 积分声波, 微秒/英尺; ③地震预测; ④积分声波; ⑤超压 (实际);
⑥超压 (预告); ⑦正常压实趋势线。

测 井 分 析

在邻井以及正在钻的井常用测井分析法估计孔隙压力。新的随钻测井工具以实时钻井形式进行测井分析。这一分析技术运用了异常高孔隙率对岩石性能的影响，如电导率、声波传播时间、和容积密度。这里提供电阻率（或电导率的倒数）测井和声波测井图都是以上述原理之一为依据的。可是，请注意，任何一种测井主要以孔隙率为依据而得出的反映，都可以用来作地层压力的定量计算。

起初孔隙率测井是用来测定压力的。这一测井是以整个岩样，包括岩石基质和充填有流体的孔隙的电阻率而得出的反映。如果一个具有异常高孔隙的地层（并伴随有高压）被钻穿，该岩石的电阻率将会降低，因为水的导电率比岩石基体要高。这种预期的效应可从图 1-13 看出。