

钻井工程师进修丛书·钻井工程师进修丛书



沈忠厚 编著

油井设计基础 和计算

石油工业出版社

钻井工程师进修丛书

油井设计基础和计算

沈 忠 厚 编 著

67/22/16

石 油 工 业 出 版 社

B 592876

内 容 提 要

本书是钻井工程师进修丛书的第二本。作者参考了大量国外资料，并结合我国的研究情况写成了本书。书中阐述了油井设计的基本原理和计算方法，重点介绍了平衡压力钻井技术、套管层次和下入深度设计及套管设计方法。

本书除可作为钻井工程师进修用书以外，还可作为自学者及石油院校有关专业师生的参考书。

钻井工程师进修丛书 油井设计基础和计算

沈 忠 厚 编著

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京妙峰山印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 7¹/₂ 印张 172千字 印1—1,800

1988年11月北京第1版 1988年11月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0178-0/TE·176

定价：2.00元

出版者的话

为了能使钻井工程技术人员系统学习掌握钻井基础理论知识和国内外先进钻井技术,提高工作水平,适应我国石油工业发展的需要,我们将陆续出版钻井工程师进修丛书。本书是该丛书的一本,可作为钻井工程师进修用书,也可作为大专院校有关师生和钻井技术人员的参考书。

编辑出版钻井工程师进修丛书,对于我们来说还缺乏经验,恳请读者批评指正。

前 言

油井设计是一口井钻井设计的核心部分，它的任务主要是解决钻井设计中井身结构的骨架设计，这是国外70年代在钻井领域内开设的一门新课。油井设计从保护油气层的产能出发，并以防止钻井过程中油气层受钻井液污染，保持油井寿命，满足开采过程中酸化、压裂、热采等增产措施的要求等为原则，在这些条件下进行一口井的骨架设计。国外通常由油公司来作油井设计，而由钻井承包商作油井设计以外的部分。

本书以基础理论和计算方法为主，从地层压力理论及评价技术讲起，阐述了平衡压力钻井技术、套管下入层次和下入深度设计及套管设计等基本内容。其中包括了现代科学钻井的主要技术成就和理论的应用。结合一些设计计算方法，书中给出了一定数量的例题，以便于读者学习时参考。

由于编者水平有限，加之时间仓促，有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

编者 1987年6月

于华东石油学院

目 录

第一章 地层压力理论和评价技术.....	(1)
第一节 地下各种压力的概念.....	(1)
第二节 异常压力形成的原因.....	(6)
第三节 地层压力评价技术.....	(12)
第四节 地层破裂压力.....	(30)
第二章 平衡压力钻井技术.....	(36)
第一节 平衡压力钻井技术的产生和发展.....	(36)
第二节 压差对油层损害的影响.....	(40)
第三节 气侵对泥浆柱压力的影响.....	(41)
第四节 平衡压力钻井设计.....	(45)
第五节 抽吸压力的计算.....	(49)
第三章 套管层次和下入深度设计.....	(59)
第一节 套管类型.....	(59)
第二节 设计原则和有关设计系数.....	(60)
第三节 设计方法.....	(61)
第四章 套管设计.....	(67)
第一节 套管载荷计算.....	(67)
第二节 多向载荷下套管应力状态.....	(76)
第三节 压力、温度变化对套管应力的影响.....	(80)
第四节 套管的弯曲和稳定.....	(85)
第五节 套管设计方法.....	(91)
参考文献.....	(111)

第一章 地层压力理论和评价技术

地层压力理论和评价技术对石油勘探及开发有着重要意义。在石油钻井工程中,地层压力和地层破裂压力是科学地进行油井设计和施工的基础。只有确切掌握地层压力和地层破裂压力,才能正确地进行套管程序设计,合理地确定泥浆密度,实施平衡压力钻井和采取有效措施保护油气层产能等。

近20余年来,国外提出了不少预测和检测地层压力与破裂压力的方法。这些方法在钻井技术发展中起了重要作用。

第一节 地下各种压力的概念

一、静液压力

静液压力是由液柱自身的重量所引起的压力。它的大小等于液体的重度^①与液柱垂直高度或深度的乘积,即

$$P_s = 0.098\gamma H \quad (1-1)$$

式中 P_s ——静液压力,巴;

γ ——液体密度,克/厘米³;

H ——液柱的垂直高度,米。

由上式可知,液柱的垂直高度越高,其静液压力越大。我们常用单位高度(或深度)的液柱压力,即压力梯度,来表示静液压力随高度(或深度)的变化。

$$G_s = \frac{P_s}{H} = 0.098\gamma \quad (1-2)$$

式中 G_s ——静液压力梯度,巴/米;

P_s ——静液压力,巴;

H ——液柱垂直高度,米;

γ ——液体密度,克/厘米³。

静液压力梯度的大小与液体中所溶解矿物的浓度有关,矿物浓度越高,静液压力梯度越大。

二、上覆岩层压力

地层某处的上覆岩层压力是指该处以上地层岩石基质和孔隙中流体的总重量(重力)所产生的压力,即

$$\begin{aligned} P_o &= \frac{\text{岩石骨架重量(重力)} + \text{流体重量(重力)}}{\text{面积}} \\ &= 0.098H[(1-\phi)\gamma_s + \phi\gamma] \end{aligned} \quad (1-3)$$

^①为照顾习惯和便于叙述,本书沿用了“重度”的概念,它等于密度乘以重力加速度。——编者

式中 P_0 ——上覆岩层压力, 巴;

H ——地层垂直深度, 米;

ϕ ——岩石孔隙度, %;

γ_s ——岩石骨架密度, 克/厘米³;

γ ——孔隙中流体密度, 克/厘米³。

由于沉积压实作用, 上覆岩层压力随深度增加而增大。一般沉积岩的平均密度大约为2.3克/厘米³, 沉积岩的上覆岩层压力梯度一般为0.226巴/米。在实际钻井过程中, 以钻台面作为上覆岩层压力的基准面。因此在海上钻井时, 从钻台面到海面, 海水深度和海底未固结沉积物对上覆岩层压力梯度都有影响, 实际上覆岩层压力梯度值远小于0.226巴/米。例如, 海上井的1524米深处, 上覆岩层压力梯度一般小于0.167巴/米。

上覆岩层压力还可用于下式计算:

$$P_0 = 0.098 \bar{\gamma}_s H \quad (1-4)$$

式中 P_0 ——上覆岩层压力, 巴;

$\bar{\gamma}_s$ ——沉积层平均体积密度, 克/厘米³;

H ——沉积层厚度, 米。

上覆岩层压力梯度一般分层段计算, 密度和岩性接近的层段作为一个沉积层。即

$$G_0 = \frac{\sum P_{0,i}}{\sum H_i} = \frac{\sum (0.098 \bar{\gamma}_{s,i} H_i)}{\sum H_i} \quad (1-5)$$

式中 G_0 ——上覆岩层压力梯度, 巴/米;

$P_{0,i}$ ——第*i*层段的上覆岩层压力, 巴;

H_i ——第*i*层段的厚度, 米;

$\bar{\gamma}_{s,i}$ ——第*i*层段的平均体积密度, 克/厘米³。

上式计算的是上覆岩层压力梯度的平均值。

例 一台钻机在水深143米的海上钻井, 从管汇到海水面高度为19.8米, 试计算不同层位的平均上覆岩层压力梯度。

(1) 海水深143米, 密度为1.03克/厘米³, 根据公式 (1-4)

$$P_0 = 0.098 \bar{\gamma}_s H = 0.098 \times 1.03 \times 143 = 14.44 (\text{巴})$$

考虑管汇到海水面的高度, 根据式(1-5)

$$G_0 = \frac{14.44}{19.8 + 143} = 0.0886 (\text{巴/米})$$

(2) 第一段沉积层厚度 $H_1 = 61$ 米, 密度 $\bar{\gamma}_{s,1} = 1.9$ 克/厘米³

$$P_{0,1} = 0.098 \times 1.9 \times 61 = 11.35 (\text{巴})$$

$$G_0 = \frac{14.44 + 11.35}{19.8 + 143 + 61} = 0.11 (\text{巴/米})$$

(3) 第二段沉积层厚度 $H_2 = 61$ 米, 密度 $\bar{\gamma}_{s,2} = 1.95$ 克/厘米³

$$P_{0,2} = 0.098 \times 1.95 \times 61 = 11.59 (\text{巴})$$

$$G_0 = \frac{14.44 + 11.35 + 11.59}{19.8 + 143 + 61 + 61} = 0.13 (\text{巴/米})$$

测得的体积密度越准确, 计算出来的上覆岩层压力梯度也就越准确。如果有密度测井

曲线,就能很容易地计算出每一段岩层的平均体积密度。如果没有密度测井曲线,可借助于声波测井曲线计算体积密度,不过,这是迫不得已才使用的方法。还可以使用由岩屑测出的体积密度,但这种方法不太准确,因为岩屑在环空中可能吸水膨胀,使岩石体积密度降低。

因为所有岩石都产生上覆岩层压力,所以体积密度的测取不能只局限于页岩,要计算的岩层厚度内的每一种岩石的密度都要测量,最后将这些密度值加以平均。

根据任一点的上覆岩层压力梯度可以计算出该点的上覆岩层压力。例如,某点的深度 $H = 3048$ 米,上覆岩层压力梯度 $G_s = 0.206$ 巴/米,上覆岩层压力为 $P_s = 627.89$ (巴)。

在海上,上覆岩层压力梯度曲线(不管用什么单位)的形状,都同ELOS上覆岩层压力梯度计算图上的曲线相似(图1-1)。由于总的体积密度(储集岩石种类和压实程度)、水深、钻机海拔高度和构造区域的不同,曲线的形状也各有差异。这些曲线仅用作解释和比较,如果没有补偿地层密度测井图,就不能使用某一个上覆岩层压力梯度曲线作参考。在图1-1中,曲线较明显的差别是由于水深和钻机海拔高度不同而造成的。因此应该尽可能根据一台钻机在附近的钻井资料,绘制上覆岩层压力梯度曲线,或者根据声波测井资料求上覆岩层压力梯度。

在厚岩盐层和高孔隙压力带的一个小范围内,上覆岩层压力梯度可能发生反向变化。高孔隙度的泥岩通常是异常高压层,其体积密度非常小。如果异常高压层足够厚,就可能使总的平均体积密度降低。实际上这些低密度带很薄,所以上覆岩层压力梯度的反向变化一般很小,而且发生在很小的范围内。因而异常高压层的上覆岩层压力仍然增加,但增加的速率减慢。

三、地层压力

地层压力是指岩石孔隙中流体的压力,亦称地层孔隙压力,用 P_p 表示。在各种沉积物中,正常地层压力等于从地表到地下某处连续地层水的静液压力。其值的大小与沉积环境有关,取决于孔隙内流体的密度。若地层水为淡水,则正常地层压力梯度(G_p)为 0.098 巴/米,若地层水为盐水,则正常地层压力梯度随含盐量的不同而变化,一般为 0.105 巴/米。石油钻井中遇到的地层水多数为盐水。

表1-1为不同地层水的正常地层压力梯度值。

在钻井实践中,常常会遇到实际的地层压力梯度大于或小于正常地层压力梯度的现象,即压力异常现象。超过正常地层静液压力的地层压力($P_p > P_s$)称为异常高压。而低于

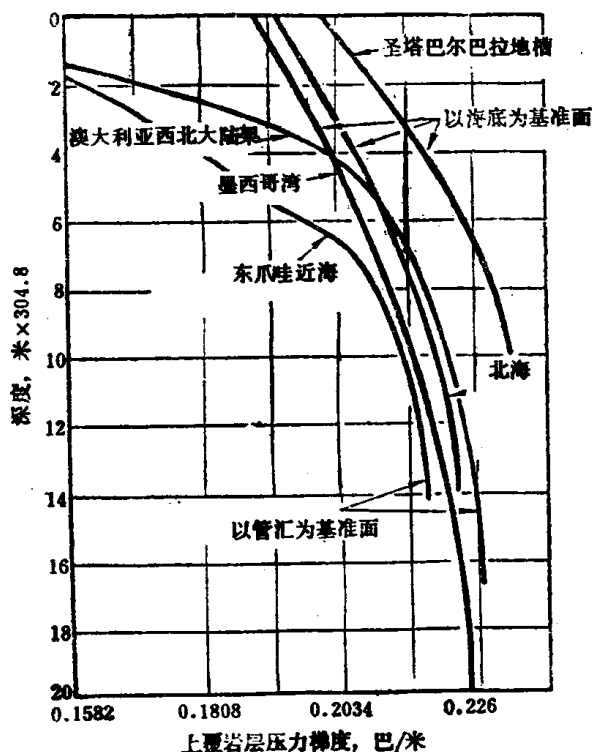


图 1-1 ELOS上覆岩层压力梯度计算曲线

表 1-1 不同矿化度地层水的静水压力

地层流体	氯离子浓度 毫克/升	ppm(NaCl)	正常地层压力梯度 巴/米	当量泥浆密度 克/厘米 ³
淡水	0	0	0.098	1.0
微咸水	6098	10062	0.0989	1.003
	12287	20273	0.099	1.010
	24921	41120	0.1004	1.024
海水	33000	54450	0.1012	1.033
盐水	37912	62554	0.1019	1.040
	51296	84638	0.1033	1.054
	64987	107228	0.1049	1.070
典型海水	65287	107709	0.1050	1.072
	79065	130457	0.1062	1.084
	93507	154286	0.1078	1.100
含盐量梯度	108373	178815	0.1095	1.117
	123604	203946	0.1107	1.130
	139320	229878	0.1124	1.147
	155440	256476	0.1140	1.163
	171905	283473	0.1154	1.178
	188895	311676	0.1171	1.195
饱和盐水	191600	316640	0.1173	1.197

正常地层静液压力的地层压力 ($P_p < P_h$) 称为异常低压。

四、地层平衡压力梯度和等效泥浆密度

在钻井中，一般都将地面管汇作为孔隙压力计算的基准点。因此，由于管汇到海平面之间的高差，钻井期间测得的孔隙压力梯度不是实际孔隙压力梯度，而是从管汇到测井深度泥浆柱要平衡的压力。

例如，海水水深137米，海水密度1.02克/厘米³，设正常孔隙压力梯度是0.1巴/米，测点深度305米（从方钻杆补心算起）。转盘方钻杆补心到海平面的高度是18.29米，到管汇的距离是1.53米。

305米深处的实际孔隙压力： $P_p = (305 - 18.29) \times 0.1 = 28.67$ (巴)

实际孔隙压力梯度： $G_p = 0.1$ 巴/米

从管汇算起的孔隙压力梯度：

$$G_B = 28.67 \div (305 - 1.5) = 0.094 \text{ (巴/米)}$$

在陆地，从管汇到地下水平面的距离为67米，水的密度是1.0克/厘米³，测量深度305米（从管汇算起）。

305米深处的实际孔隙压力： $P_p = 0.098 \times 1.0 \times (305 - 67) = 23.32$ (巴)

实际孔隙压力梯度： $G_p = 0.098$ 巴/米

从管汇算起的孔隙压力梯度： $G_B = 23.32 \div 305 = 0.076$ (巴/米)

显然，对于浅地层这个高度差是很重要的。由于这个原因，从管汇起计算的压力梯度

叫地层平衡压力梯度（用 G_b 表示）。如果采用泥浆重度的单位，它等于井眼中平衡地层压力所需的泥浆重度。上面计算的压力梯度值换算成泥浆密度，则分别为1克/厘米³和0.78克/厘米³，这就是在上述条件下平衡305米深处地层压力所需要的泥浆密度。显然没有这样轻的水基泥浆，因而在浅地层钻进时泥浆柱的压力常常接近或超过地层破裂压力，结果造成井漏，没有泥浆上返。

地层平衡压力梯度（ G_b ）是以管汇为基准的孔隙压力梯度，若以泥浆重度的单位表示，它等于平衡测量井深处的孔隙压力所需要的泥浆重度，这个泥浆重度称为当量泥浆重度或等效泥浆重度。

下面再举一例说明这些压力梯度之间的关系。

设孔隙水密度 = 1.06克/厘米³（同海水密度），水深 = 98米，空气帽 = 18.3米（海面到管汇的距离），分以下几个层位计算：

（1）在海底

$$\text{孔隙压力} = 0.98 \times 0.106 \times 98 = 10.18(\text{巴})$$

$$\text{正常地层平衡压力梯度} = 10.2 \times 10.18 + (98 + 18.3) = 0.95(\text{克/厘米}^3)$$

正常地层平衡压力梯度比实际流体压力梯度小。

（2）在915米处（管汇以下）

$$\text{孔隙压力} = 0.98 \times 0.106 \times (915 - 18.3) = 93.15(\text{巴})$$

$$\text{正常地层平衡压力梯度} = 10.2 \times 93.15 + 915 = 1.038(\text{克/厘米}^3)$$

（3）在3048米处（管汇以下）

$$\text{孔隙压力} = 0.98 \times 0.106 \times (3048 - 18.3) = 314.7(\text{巴})$$

$$\text{正常地层平衡压力梯度} = 10.2 \times 314.7 + 3048 = 1.053(\text{克/厘米}^3)$$

由以上计算可以看出，随着深度增加，正常地层平衡压力梯度越来越接近实际孔隙压力梯度。在上例中，由于孔隙压力梯度保持不变（等于静水压力梯度），正常地层平衡压力梯度等于等效泥浆重度，等效泥浆重度能平衡任一点的孔隙压力。

同样的钻井条件，而在异常地层压力情况下：

（1）在915米（管汇以下）

$$\text{孔隙压力梯度} = 1.24 \text{克/厘米}^3$$

$$\text{孔隙压力} = 0.098 \times 1.24 \times (915 - 18.3) = 108.97(\text{巴})$$

$$\text{地层平衡压力梯度} = 10.2 \times 108.97 + 915 = 1.21(\text{克/厘米}^3)$$

（2）在3048米（管汇以下）

$$\text{孔隙压力梯度} = 1.24 \text{克/厘米}^3$$

$$\text{孔隙压力} = 0.098 \times 1.24 \times (3048 - 18.3) = 368.2(\text{巴})$$

$$\text{地层平衡压力梯度} = 10.2 \times 368.2 + 3048 = 1.23(\text{克/厘米}^3)$$

在异常压力情况下，地层平衡压力梯度等于等效泥浆重度，但是它不等于正常地层平衡压力梯度。

地层破裂压力梯度也可以换算成等效泥浆重度，这对于油井设计工作是很方便的。

五、骨架应力

骨架应力是由岩石颗粒之间相互接触来支撑的那部分上覆岩层压力（亦称有效上覆岩

层压力或颗粒压力)，这部分压力是不被孔隙水所承担的。骨架应力可用下式计算：

$$\sigma = P_o - P_p \quad (1-6)$$

式中 σ ——骨架应力,巴;

P_o ——上覆岩层压力,巴;

P_p ——地层压力,巴。

上覆岩层的重力是由岩石基质(骨架)和岩石孔隙中的流体共同承担的。当骨架应力降低时,孔隙压力就增大。孔隙压力等于上覆岩层压力时,骨架应力等于零,而骨架应力等于零时可能会产生重力滑移。骨架应力是造成地层沉积压实的动力,因此只要异常高压带中的基岩应力存在,压实过程就会进行,即使速率很慢。上覆岩层压力、地层压力和骨架应力之间的关系如图1-2所示。

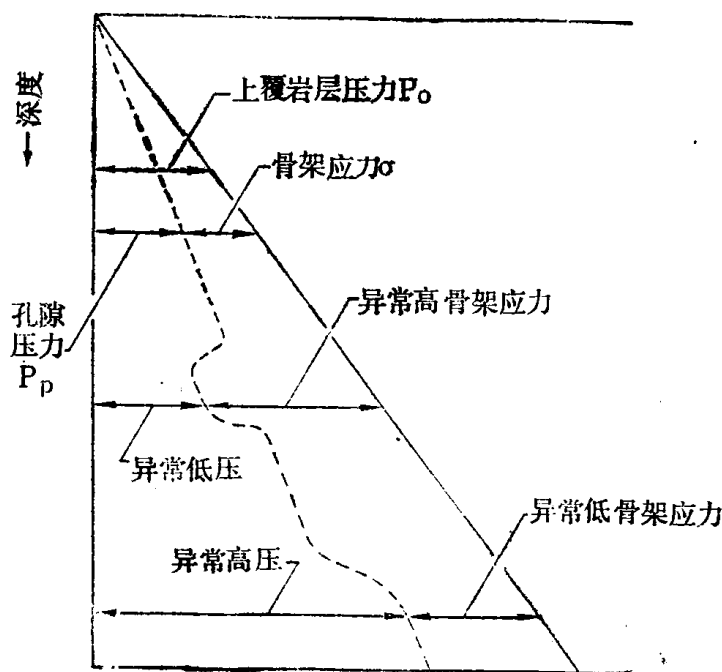


图 1-2 P_o 、 P_p 和 σ 之间的关系

第二节 异常压力形成的原因

一、异常低压

异常低压的压力梯度小于0.098巴/米,有的为0.081~0.088巴/米,有的甚至只有静液压力梯度的一半。世界各地钻井情况表明,异常低压地层比异常高压地层要少。但是,不少地区在钻井过程中还是遇上不少异常低压地层。如美国的得克萨斯州和俄克拉何马州的潘汉德尔(Panhandle)地区、科罗拉多州高地的部分地区、犹他州的尤英塔(Uinta)盆地、加拿大艾伯塔省中部下白垩统维金(Viking)地层、苏联的Chokrak和Karagan地区的第三纪中新世地层和伊朗的Arid地区都遇到过异常低压地层。

一般认为异常低压是由于从渗透性储集层中开采石油、天然气和地层水而人为造成的。大量地从地层中开采出流体之后,如果没有足够的水补充到地层中去,孔隙中的流体压力下降,而且还经常导致地层被逐渐压实的现象。美国墨西哥湾沿海地带的地下水层被数千口井打开之后,广大地区的水源头下降了几千英尺^①。面积最大的是得克萨斯州的休斯敦地区,水源头下降的面积大约有12950平方公里。从1954年至1959年,在卡蒂-休斯敦-帕萨迪纳-贝敦地区泵出水的20%左右是由于产水层的被压实而供给的。

在干旱或半干旱地区遇到了类似的异常低压地层,这些地层的地下水位很低。例如在中东地区,勘探中遇到的地下水位在地表以下几百米的地方。在这样的地区,正常的流体静液压力梯度要从地下潜水面开始。

① 因取自外国资料,故在叙述时未加换算,1英尺=0.3048米。——编者

二、异常高压

异常高压地层在世界各地广泛存在，从新生代更新统至古生代寒武系、震旦系都曾见到过。

正常的流体压力体系可以看成是一个水力学的“敞开”系统，就是说流体能够与上覆地层的流体沟通，允许建立或重新建立静液条件。与此相反，异常高的地层压力系统基本上是“封闭”的，即异常高压层和正常压力层之间有一个封闭层，阻止或至少是大大地限制着流体的沟通。封闭层可以是地壳中的一种或几种物质所组成的。压力封闭的起因可以是物理的、化学的、或者是物理和化学的综合作用。据目前所知，地层压力圈闭有表 1-2 所示的几种类型。

表 1-2 地层压力圈闭的类型

封 闭 类 型	圈 闭 的 种 类	实 例
垂 直	1. 块状页岩或粉砂岩 2. 块状岩盐 3. 硬石膏 4. 石膏 5. 石灰岩、泥灰岩、白垩 6. 白云岩	美国墨西哥湾地区 德国北部的泽克斯坦 北海、中东 美国、苏联
横 向	断 层	世界各地
垂直与横向综合		世界各地

通常认为异常高压力的上限等于上覆岩层的总重量，即与0.226巴/米的压力梯度等效。在一个区域的地层中，异常高压将接近上覆岩层压力。根据稳定性理论，它们是不能超过上覆岩层压力的。但是，在一些地区，如巴基斯坦、伊朗、巴比亚和苏联的钻井实际中，都曾遇到过比上覆岩层压力高的高压地层。有的孔隙压力梯度可以超过上覆岩层压力梯度的40%。这种超高压地层可以看作存在一种“压力桥”（图1-3）的局部化条件。覆盖在超高压地层上面的岩石的内部强度帮助上覆岩层部分地平衡超高压地层中向上的巨大作用力。

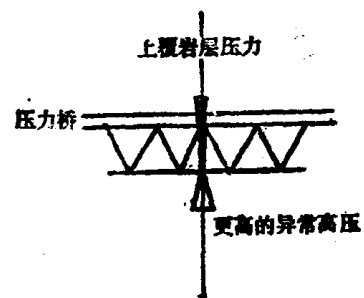


图 1-3 压力桥

形成异常高压常常是多种因素综合作用的结果。这些因素与地质作用、物理、地球化学和机械过程等有关。目前，对于一个特殊的地质区域，某一超高压环境，要确切地推究每个起因作用的大小是困难的，但是对其作一些定性的分析将有助于评价地层压力。例如，美国墨西哥湾沿岸地区形成异常高压的综合原因，正如1969年Johes所指出的那样：在墨西哥湾盆地的北面，晚第三纪三角洲和浅海沉积中形成了区域性的含水层系统，其孔隙压力、矿化度和温度不能与较老的沉积盆地进行比较。被长断层封闭的砂泥岩地层在迅速的沉降中被进一步压实，并承受异常高流体压力（为上覆岩层压力的0.95倍）。如此高的压力会使含盐地层水进入正常压力的含水层，而粘土夹层的作用就象“滤膜”一样使水变淡，稀释了接收含盐地层水的正常压力的含水层。高压和圈闭的放射热引起微晶高岭土的成岩作用而变成伊利石。结晶过程中放出的淡水不外乎两个去向，即它不是因为邻近砂层

已被压实而留在粘土中（当然这些粘土层也处在高压作用下的变化过程中），就是流入并稀释正常压力下的含水层。起“滤膜”作用的粘土层产生的渗透压力可能停止或倒转这些流动。这种渗透压力被认为是保持异常高压的主要因素。

异常高压的成因很多，一般有以下几种：

1. 沉积物的快速沉积，压实不均匀

当新沉积的泥质沉积物在水面下正经受最初的压实时，孔隙中的水与覆盖在上面的海水是连通的，所以静液压力与孔隙压力基本相等。如果这个沉积层的组成中有水化粘土，那么在吸水的水化粘土层内，粘土颗粒之间就不能直接接触。随着新的沉积层的覆盖，压实就逐渐发生。如果下沉速度很慢，该地层就逐渐适应来自上覆岩层的负荷。由于粘土颗粒被紧紧地压在一起，孔隙水被挤了出来。如果在被压实的岩石颗粒与相邻的沉积层间有大量的流体通道，随着时间的推移，孔隙压力将保持平衡。因为在压实的初始阶段，泥质沉积物有很高的孔隙度和渗透性，所以排出的液体始终沿着阻力最小的方向流动，或向压力低的砂岩层流动。在正常沉积条件下，只要孔隙流体能排出，相邻岩层的渗透性足够大，地层压力基本上就是静液压力。

上述过程能否保持平衡，决定于以下四个因素：(1)上覆沉积速度；(2)渗透性的大小；(3)孔隙体积减小的速率；(4)排出孔隙流体的能力。如果沉积速度与其他过程相比很慢，那么就能保持静液压力。如果孔隙流体通道的有效性很高（例如泥、砂互层），那么只要有一个同低压相通的砂储水层，而且水流通道有效，就能进行正常的排水，孔隙压力也将保持正常。

沉积初期，粘土的孔隙度在60~90%之间，这主要取决于粘土的类型。水化、絮凝粘土的孔隙度最高；塑性、湿粘土的孔隙度为40~50%；压实的粘土、页岩的孔隙度小于15%。从沉积开始到全部成岩，孔隙度所发生的如此巨大的变化证明，在沉积期间，必须从很厚的粘土层中排出大量的水。从理论上来看，孔隙水从压实的粘土中排出的规律如图1-4中的曲线所示。

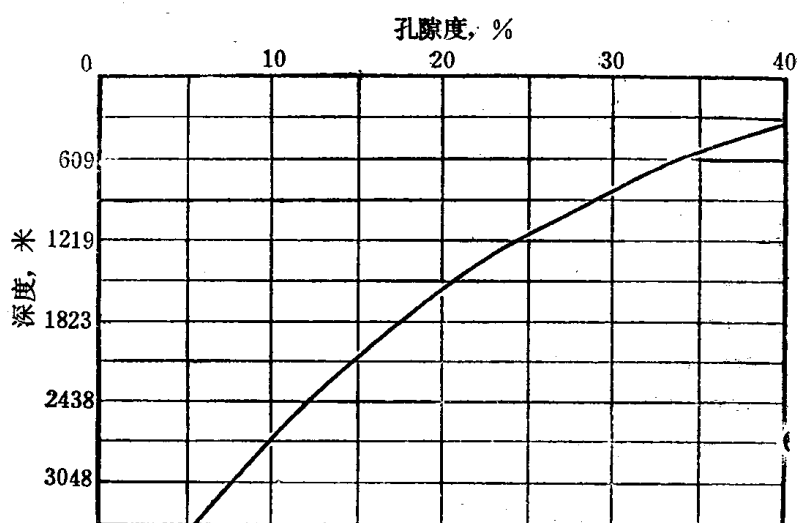


图 1-4 典型压实泥岩的孔隙度-深度关系曲线

在稳定沉积期间，若达到平衡的条件之一受到影响，则孔隙水的排出就受到妨碍。接

踵而至的是孔隙压力增大。对于每一个压实体系来说，正常泥质沉积层的沉积速度一确定，渗透性和压实速度都应相对保持不变。如果沉积速度加快，使单位面积上在单位时间内沉积的粘土数量超过平衡条件下所要求的沉积量，那么由于渗透性基本保持不变，排水过程就受到限制。因此，超过平衡条件所要求的沉积物的数量同孔隙压力的增加成正比。此外，由于过量的孔隙流体能承受增加的上覆压力，进一步的压实就受到阻碍。这样，孔隙水不仅承受静液压力，还要承受部分上覆岩层压力，因而该地层就会产生比正常压力高的异常高压。

在沉积物快速沉积的地区一般是曲型的大陆边界，特别是三角洲地区。在这些地区，沉积速度很容易超过平衡条件所要求的沉积速度，因此经常遇到异常高压地层。

在泥质岩层内存在的高孔隙压力区具有与周围正常压实的沉积层不同的性质。由于它的孔隙压力高，孔隙度也就相对的高。由于过量孔隙水的存在，其体积密度就相对的低。在正常压实地层，体积密度随着含水量减少而升高。最大体积密度是当孔隙度等于零时组成岩石的矿物的密度。实际上这个极端情况是不存在的，因为所有岩石都有一定的孔隙度。由此可以推断，如果某一岩层的密度随深度增加而减少，那么该地层中密度较低的部分就具有比密度正常部分相对高的孔隙压力。

在正常情况下，地层密度随深度的增加而增加。若按照正常情况下密度和深度的关系，将低密度等效转换为正常密度的一个相应深度，则这个深度称为等效深度。如图1-5中点A对应的深度就是等效深度。在理论上，可以假定点A排水完全停止，因此由新的沉积所产生的上覆压力就完全施加到孔隙流体上。理论上的压实曲线如曲线b所示。对曲线来说，必须假设在点A孔隙流体是一个瞬时隔离体。曲线c表示一个更容易进行压实的路线。该曲线表明：(1)沉积压实速度低于由于快速沉积所引起的上覆压力增大的速度；(2)渗透性小到使所有的孔隙水不能流动。

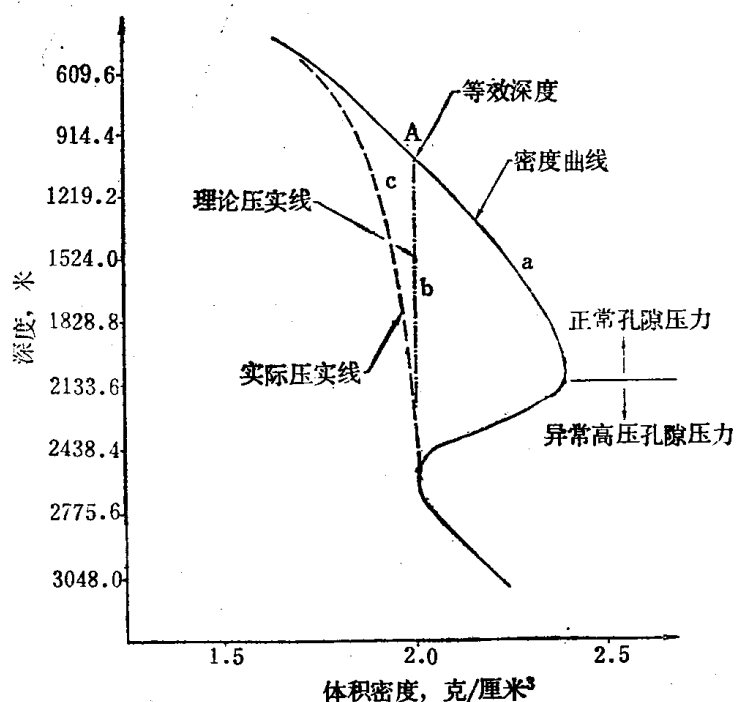


图 1-5 在异常高压层体积密度反向和理论及实际压实线

由这个过程产生的异常压力，以小于上覆岩层压力梯度的速率增加。这是因为孔隙水受到约束以后，异常压力是由新增加的上覆压力引起的缘故。岩石总有一定的渗透性，发生一些压力水漏失是正常的，特别是当压力很大的时候泄漏很容易发生。因此，在很大的深度范围内，地层压力梯度一般比上覆压力梯度要小。如果异常高压区含有一些薄的渗透性砂层，这些砂层又与低压区相连，相邻泥岩层中的水就要流到砂岩层去。与砂岩相邻的泥岩如此被压实，于是又造成泥岩层的孔隙度和渗透性的降低，限制了进一步的流动。穿

过泥岩、砂岩交界面，泥岩层的压力梯度将明显比总的压力梯度大，但是必须知道穿过渗透性岩层的压力梯度的部分改变是由泄漏引起的，这个压力梯度是相邻泥岩层的渗透性和穿过泥、砂岩交界的压力的函数。如图1-6所示。

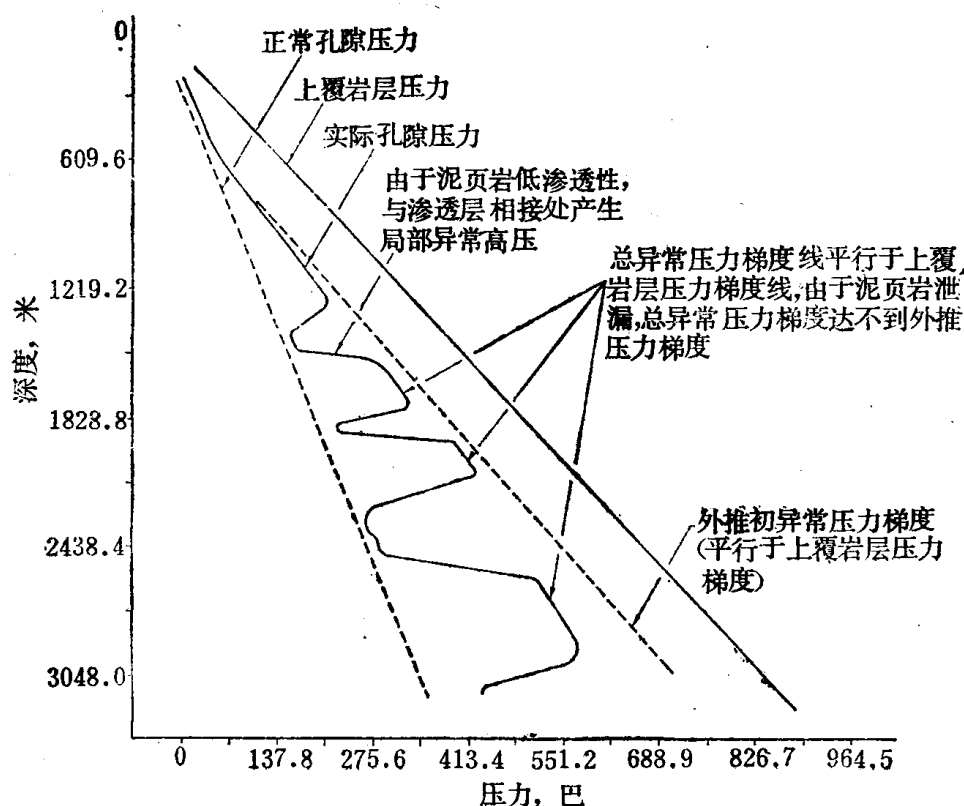


图 1-6 压实不均匀的异常高压地层的典型孔隙压力-深度曲线(总压力梯度线平行于上覆压力梯度线)

2. 渗透作用

渗透是水同溶液或稀溶液同浓溶液被一个渗透膜分开时，水自然地流进溶液或从稀溶液流进浓溶液的现象。在温度一定时，渗透压差似乎与浓度差成正比；若浓度差一定，渗透压差将随绝对温度的上升而增大。

目前已经证明，泥岩可作为一种半渗透膜。泥岩沉积物的纯度提高，半渗透膜的效率也提高。Hanshaw和Zen 1965年提出，对于异常孔隙压力的生成来说，渗透可能是一个可能的过程。他们指出，如果孔隙水中的离子被泥岩层过滤掉，当达到平衡时，渗透膜流入面上的压力常常很高。此时，盐溶液的浓度越高，平衡所需压力就越大。结果，渗透膜两边的水力势能和化学势能分别相等。理论上这种压差可达309巴。

产生的渗透压力取决于渗透膜的效率，Yanag和Law 1965年使用典型页岩样品和各种浓度溶液进行渗透试验。试验发现，产生的渗透压力远低于理论上计算出来的渗透压力。他们推测可能是由于用作半渗透膜的页岩岩样有微观细裂纹和大的孔隙，以及泥岩夹层中的孔隙喉道堵塞和非常细的硅的凝析，导致其效率降低。

1968年Jones提出，在天然条件下，通过一个简单粘土层的压力差可以超过241.08巴。就象用泵多次加压一样，通过一系列的砂泥岩互层，渗透压力随着深度逐渐增大。由渗透

作用产生的流体压力能够等于或超过由于上覆岩层重量而引起的断裂、穿刺等地质活动产生的流体压力。

关于泥岩和压实粘土层的渗透及盐的过滤作用，通过八个地区的研究已成功地与地层压力和化学异常关联起来。这类异常压力分布在新墨西哥的圣胡安盆地的许多地方、加拿大的西部盆地，加利福尼亚州的圣华金谷盆地的一部分、伊利诺斯盆地的深部二叠盆地、科罗拉多州犹他地区的帕拉多克斯盆地、新墨西哥以及世界其他地方的区域含水层系统中。

3. 构造作用

地壳的上升、下降、褶皱、断裂等地质构造运动，也是产生异常高压的重要原因。地壳的构造运动可产生很大的构造应力，而水平构造应力对异常高压的产生起着重要作用。岩石孔隙内的流体在很高的侧向挤压力的作用下必然产生异常高压。断裂后的岩层还可能沿着逆掩断层方向产生大规模的运动，覆盖在断裂后的岩层之上，大大增加了上覆负荷，从而导致异常高压。

地层沉积过程中为正常压力，后由于地壳上升，表层虽遭剥蚀，而封闭层未被破坏，地层仍保持了原始压力。但由于地层深度变浅，正常地层压力变成了异常高压（如图1-7所示）。这类异常高压在碳酸盐岩地层中常见。

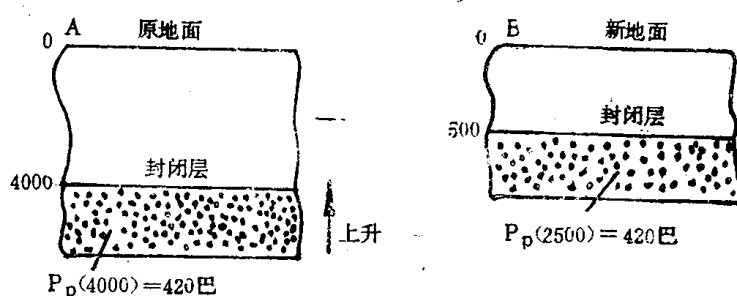


图 1-7 原始压力型异常高压

由于地壳的构造运动，地面的海拔高度不一。若供水区露在高处，则在不同位置钻入渗透层时，压力梯度各异，处于低处的井为异常高压，如图1-8。

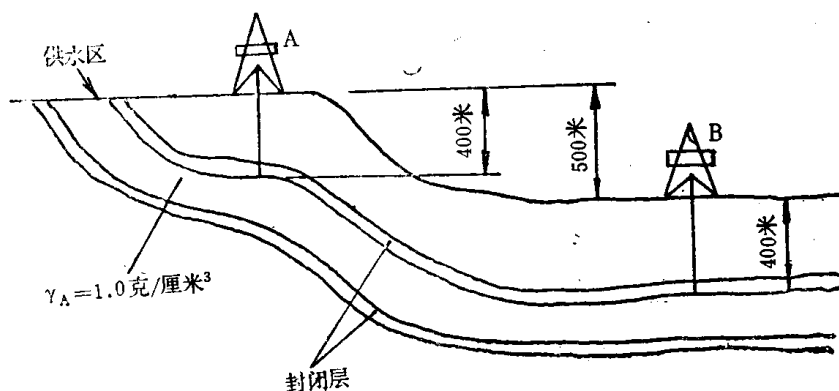


图 1-8 高供水区型异常高压