

地层压力的预测与检测技术

王笑连

(地质矿产部第二石油普查勘探指挥部)

随着石油普查的深入,以及陆地和海洋深井钻探的发展,综合性预测和检测异常地层压力,不仅成为钻井施工设计的重要依据,同时也是研究某些石油地质问题,评价油气水动力学特性,合理经济地开发超压区油气田的重要组成部分。许多实际资料表明,生油岩的生油潜力,烃的物理状态,油气聚集、运移以及油气藏的规模等都与地层压力梯度密切相关。石油地质工作者十分重视建立正常压力和异常压力环境中烃的分布与埋藏深度、地层压力、地层温度等参数之间的相关性来指导找油,提高勘探的经济效益。本文以华北地区初步开展压力预测和检测技术为例作些概述。

一、地震预测

对普查新区或老区的深部地层,在无钻井资料可供借鉴的情况下,利用地震资料预测超压地层的存在和估计异常地层压力大小是行之有效的办法。地震波传播速度与岩性、岩层压实程度及埋藏深度等因素有关,在一般情况下,地震波传播速度随着地层埋藏深度的增加而增加。在超压地层段,由于其孔隙流体压力增大和岩石密度减小,地震波传播速度随之降低,显示为低速异常。

基于上述原理,利用地震速度谱资料,取适当的深度间隔,如25米、50米或100米,分别计算出层速度 $V_{c1}, V_{c2}, V_{c3}, \dots$ 并相应求取各层的传播时间 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots$ (即 $\Delta t = 1/V_c$),在半对数座标纸上绘出深度(D)与层传播时间(Δt)的关系线。对于处于正常压力的地层, $D-\Delta t$ 关系线近似为斜线,即所谓正常压实趋势线。就华北地区第三系剖面而言,正常压力地层占大多数,而超压地层则是局部的,因此不难画出正常压实趋势线。当剖面中存在超压地层时,实测的压力趋势线将会偏离正常压实趋势线,根据偏离的位置可以确定超压地层层位。埋藏深度在4000米范围以内,其预测深度误差约为200米左右。通常,偏离幅度愈大,异常地层压力愈高。它们之间的定量关系随地区而异,因此可以依据各地区的实际资料建立本地区的压力趋势图,以估计异常地层压力。图1是开24井地震预测异常地层压力层位的实例。

尽管地震预测目前尚处于定性或半定量阶段,但它对指导普查新区或老区深部地层的钻井地质和施工设计仍有重要的意义。从长远的观点出发,随着地震勘探精度的提高,地震预测将是一门很有发展前景的技术。

二、随钻 d (dc) 指数法检测

在钻井过程中,可以根据需要随时收集泥浆参数和钻井参数,并利用袖珍计算器或诺模图迅速

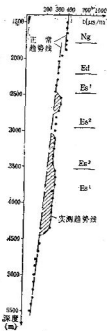


图1 开24井地震波传播速度-深度关系图

计算出 $d(d_0)$ 指数值。根据随钻 $d(d_0)$ 指数变化情况, 及时预报即将钻遇的超压地层并估计出当量泥浆比重。有:

$$V_m = K \cdot n^c (P/D)^d \quad (1)$$

式中, V_m —机械钻速, 米/小时; K —岩石可钻性系数; n —转速, 转/分; c —转速指数; P —钻压, 吨; D —钻头直径, 毫米。

当钻井条件和岩性不变时, $K=1$, $c=1$, 则 V_m 与 n 成正比, 上式可简化成:

$$V_m = n (P/D)^d \quad (2)$$

采用公制单位, 则

$$d = \frac{\log 0.0547 V_m / n}{\log 0.672 P / D}$$

式中 $0.0547 V_m / n$ 值总是小于 1, 所以 $\log 0.0547 V_m / n$ 的绝对值与 V_m 成反比。尽管影响 V_m 的因素较多, 但实践证明泥浆柱压力与地层压力间的压差在其中起着主要作用。这就有可能利用 d 指数来检测异常地层压力。通常情况, d 指数随井深而增加, 在压力过渡带和异常高压层段, 实际的 d 指数将比正常压力情况下小。为使该指数更好地反映地层压力的实际情况, 对它进行泥浆比重的校正是十分必要的, 所得的即为 d_0 指数。

$$d_0 = d \cdot r_w / r_m \quad (3)$$

式中, r_w —地层水比重, 克/厘米³; r_m —泥浆比重, 克/厘米³。

许多实际资料表明, 尽管影响 d 或 d_0 值的因素很多, 随钻计算的相邻点指数值有些波动, 但它变化的总趋势仍然受着地层压力变化的控制。

在现场随钻取全泥浆参数、钻井参数的基础上, 采用适当的算术坐标, 绘制出 d_0 -深度关系线, 根据常压地层的 d_0 变化总趋势确定正常压力趋势线, 近似为斜线; 当钻遇超压地层时, 实测 d_0 趋势线往减小方向偏离, 偏离幅度愈大, 异常地层压力就愈高。实际工作中, 一般采用简便的求地层压力的当量泥浆比重图板来估计地层压力。图 2 是开 24 井 d_0 曲线所显示的超压地层层位和估计的当量泥浆比重。应当指出, 计算地层压力的图板往往有一定的地区性限制, 最好是利用各地区实际资料进行编制。

此外, 应用伊顿公式和反算法公式也可以估计超压地层的压力梯度值(即当量泥浆比重值)。

伊顿公式:

$$G = G_0 - [(G_0 - r_m) (d_0 / d_m)^{1.2}] \quad (4)$$

反算法公式:

$$G = r_w \cdot d_{eq} / d_0 \quad (5)$$

式中, G —地层压力梯度(当量泥浆比重值); G_0 —上覆地层压力梯度(当量泥浆比重值); d_{eq} —根据正常趋势线确定的常压下的 d_0 值。

三、测井求压

在砂页岩剖面中, 泥质岩层的压实规律与砂质岩层是不同的。利用测井信息检测地层压力, 往往是通过研究泥质岩层的压力来判断并估计储集层的压力。可以用于这方面研究的测井信息有声波时

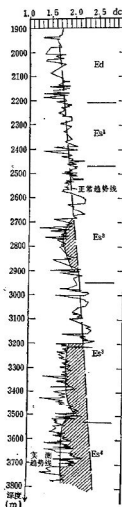


图 2 开 24 井
 d_0 -深度曲线

差、导电率(电阻率)、密度、中子、自然电位等,其中以声波时差为最佳。虽然测井求压对一口井而言,它是在钻井揭示地层之后进行的,但它所确定的超压地层层位和压力值,比较其它预测或检测手段要可靠得多。因此,用它来检验其它的预测与检测的结果,以及对邻井的预测,都将是不可缺少的重要手段。总之,地层压力预测与检测只借助于单一方法是不够的,需要借助多种方法的综合分析。

(一) 利用泥岩声波信息判断超压地层

在常压情况下,泥岩的声波时差 Δt 与深度 D 的关系式为:

$$\log(\Delta t - \Delta t_{ma}) = \log(\Delta t_0 - \Delta t_{ma}) - nD \quad (6)$$

式中, Δt —岩层声波时差,微秒/米(下同); Δt_{ma} —岩层骨架声波时差; Δt_0 —起始岩层声波时差,在一定的地区内,对特定的岩性剖面,可视为常数; D —深度,米; n —系数,与岩石的压实和弹性有关。

从(6)式可见,在半对数坐标上 Δt 与 D 虽然不属线性关系,但对于我国东部地区第三系泥质岩层, Δt 变化范围约为600—200微秒/米, Δt_{ma} 约为180微秒/米。当采用适当的纵横比例时, Δt 与 D 的关系线接近于直线,因此在实际工作中往往将它作为线性处理。图3是东明地区正常压力情况下泥岩层($\Delta t - \Delta t_{ma}$)— D 和 Δt — D 的关系线。

整个钻井剖面中,大多数地层为正常压力,而异常压力只是局部存在。因此,可以根据全井段或较长井段声波测井信息在半对数坐标纸上绘制出 Δt — D 的正常趋势线。超压地层由于其孔隙度比常压情况下大,实测的趋势线将向 Δt 增大方向偏离正常趋势线。应当注意,岩性的变化、断层面和不整合面也会引起 Δt 增大,所以必须结合区域地质资料进行综合分析,以判断超压地层的存在。

(二) 应用等效应力原理计算异常地层压力

在正常地层压力情况下,有:

$$P_0 = P_f + \sigma_a \quad (7)$$

$$P_f = P_{HY}$$

式中, P_0 —上覆地层压力,公斤/厘米²(下同); P_{HY} —静水压力; P_f —地层压力(孔隙流体压力); σ_a —正常压力下岩石颗粒间的应力。

在异常地层压力情况下,有:

$$P_0 = P_f + \sigma_a \quad (8)$$

$$P_f = P_{HY} + \Delta P$$

$$\sigma_a = \sigma_a - \Delta P$$

式中, σ_a —异常地层压力条件下的岩石颗粒间应力,公斤/厘米²; ΔP —地层压力的异常值,公斤/厘米²。

综上所述,超压地层的孔隙流体压力 P_f 比正常压力 P_{HY} 大 ΔP ,使得颗粒之间的应力减小,孔隙度增大。对某一地区的特定地层而言, P_0 和 P_{HY} 是已知的,只要找出等效于超压地层应力 σ_a ,便可计算出地层压力值 P_f 和异常压力值 ΔP 。

图4中超压地层的压力顶为 F ,深度为 D_B ,声波时

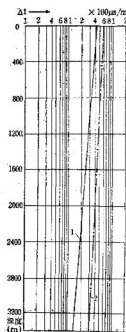


图3 正常压力场中泥岩层 $\Delta t - \Delta t_{ma}$ 与 D , Δt 与 D 的关系线

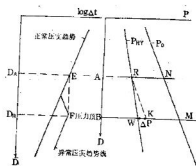


图4 $\log \Delta t - D$ 及 P_0 , $P_{HY} - D$ 关系线

差为 Δt_F 。在压力顶上方, 在正常趋势线上找到一点E, 使其 $\Delta t_E = \Delta t_F$, 深度为 D_A , 则 D_A 即为 D_B 的等效深度; D_A 处的泥岩固体颗粒间的应力 σ_A 即为 D_B 处泥岩固体颗粒间的等效应力 σ_B , 即 $\sigma_A = \sigma_B$ 。按以下公式计算 D_B 处超压地层压力 P_{IB} 和异常压力值 ΔP ;

$$P_{IB} = P_{\sigma B} - \sigma_A \quad (9)$$

$$P_{IB} = (D_B - D_A) \rho_b g + P_{HYA} \quad (10)$$

采用公制单位:

$$P_{IB} = 0.1 (D_B - D_A) \rho_b + P_{HYA}$$

$$\Delta P = P_{IB} - P_{HYB}$$

式中, $P_{\sigma B}$ —深度为 D_B 的上覆地层压力, 公斤/厘米²; P_{HYA} , P_{HYB} —深度为 D_A , D_B 的静水压力; ρ_b —岩石平均体积密度, 克/厘米³; g —重力加速度, 米/秒²。

(三) 用作图法估计异常地层压力

作图法是一种直观、实用而又简便的估计异常地层压力的方法, 它是应用等效应力原理绘制的。参见图4, 在趋势线图的右边, 建立 D — P 线性坐标, 绘出上覆地层压力线 P_σ 和静水压力线 P_{HY} 。对于第三系砂岩剖面, 如无实测的岩石体积密度、地层水比重数据, 可以采用统计的岩石平均体积密度 $\rho_b = 2.31$ 克/厘米³, $P_\sigma = 0.1 \times 2.31 \times D$; 可由测井计算的矿化度数据换算地层水比重 ($1-1.07$ 克/厘米³), $P_{HY} = 0.1 \times r_w \times D$ 。图中, 过压力顶F点作 D 轴平行线交正常趋势线的E, D_A 为 D_B 的等效深度, $\sigma_A = \sigma_B$ 。过 D_A , D_B 作两条垂直 D 轴的水平线, 分别交右图 D 轴的A、B, P_{HY} 线的R、W和 P_σ 线的N、M, 过R点作 $RR' \parallel NM$, 亦即 $RN = KM$ 。于是, 在 P 轴上读出的K点压力值即为超压地层 D_B 深度处的地层压力; 按比例读出 WK 的压力值即为地层异常压力值。

【实例】东明24号井, 井深1740米以下为下第三系砂泥岩, 在钻过3200米后, 曾多次发生井涌现象, 至3566米出现严重井涌, 泥浆比重由1.14增至1.29。

根据声波测井信息所作的趋势线 (详见图5), 分别在2650米和3230米附近开始发生正偏离, 定性判断为超压地层, 这与地震预测、 d_e 指数检测的结果非常一致 (参看图1、2, 表1)。

如图5所示, 从3230米开始地层压力逐渐增高, 压力顶为F, 井深为3550米, 等效深度点E为2740米。上覆岩层平均体积密度取2.31克/厘米³, 地层水比重根据测井所求的矿化度换算结果为1—1.03克/厘米³, 作图法求得压力顶的地层压力为462.11公斤/厘米², 异常压力为103.68公斤/厘米²。

已知渗透层是在3725.2—3751.0米, 射孔井段中部井深为3738米, 则该处的地层压力应为压力顶的地层压力 (462.11公斤/厘米²) 加上压力顶至射孔井深之间 (3550—3738米) 的静水压力值 (19.4公斤/厘米²), 即3738米处的地层压力为481.5公斤/厘米², 这与 d_e 指数计算的当量泥浆比重1.3以及测试的结果都非常接近, 见表2。

表1

方法 异常井段 (米)	地震预测	d_e 指数检测	测井判断
第一异常带	2550	2580	2650
	2900	2880	2850
第二异常带	3100	3250	3230
	3500	3553	3500
	4280		

表2

地层压力 井深 (米)	测试静压 (公斤/厘米 ²)	d_e 指数检测 (公斤/厘米 ²)	测井求压 (公斤/厘米 ²)
3738	474.67		
	480.06		
	456.13	484.9	481.5
	457.63		

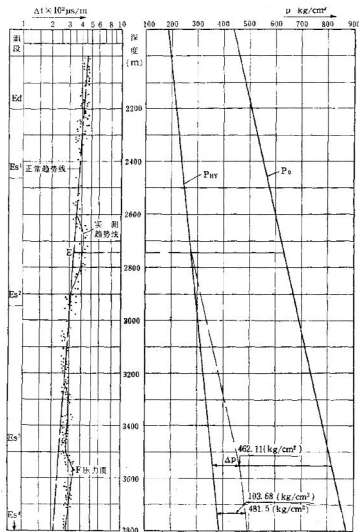


图5 开24井压实趋势线与估计地层压力图

结 语

我们应用地层压力预测和检测技术的时间不长,经验不足,还有一些问题尚待解决。本文讨论的预测与检测技术,对华北地区第三系砂泥岩剖面在沉积中形成的超压地层是适用的,并能获得良好的效果。但对低压地层或后期改造形成的超压地层不适用。同一口井,不同组段地层,由于其沉积环境、沉积条件的显著差别,可以分段作出斜率不同的正常压实趋势线。不同井同一组段地层由于井所处的构造位置和沉积条件的差别,正常压实趋势线的斜率也不甚相同。超压地层的实测压实趋势线偏离正常压实趋势线;与此同时,地层不整合面、长期沉积间断、断层通过、岩性变化以及井眼等因素的影响,也可能出现偏离现象,因此,在实际工作中必须谨慎地区别。关于对比地震剖面或钻井中得

到的地层压力资料,用于评价区域性的封闭条件和预测高产油气区的方向等问题,还需作深入研究。

(收稿日期 1982年5月8日)

参 考 文 献

- [1] 谭廷栋、刘宗诚, 1980, 用声波时差测井估计异常压力, 地球物理学报, 第23卷, 第3期。

ON PREDICTION AND DETECTION OF FORMATION PRESSURE

Wang Xiaolian

(The 2nd Headquarters of Petroleum Prospecting and Exploration, Ministry of
Geology and Mineral Resources)

Abstract

Basic principles and methods are briefly discussed for determining abnormal formation pressure and the depth at which it might occur in consideration of the peculiarity of prospecting. Herein seismic prediction before drilling, dc-index detecting in the course of drilling and well-logging evaluation after drilling etc. are included. This paper emphasizes on the determining of overpressure strata on the basis of the relationship of sonic transmission time (Δt) versus depth in argillaceous rocks, and the quick estimating the value of abnormal formation pressure by means of equivalent stress. Finally, an example of a well section cutting through sandstone and mudstone of Tertiary system is given.