

文章编号:1673-5005(2009)05-0061-07

深水探井钻前含可信度的地层孔隙压力确立方法

柯珂, 管志川, 周行

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:针对深水探井钻井可参考信息有限的特点,提出改进的计算上覆岩层压力梯度和建立时深关系的方法。利用概率统计理论,研究Eaton法中各个参数对最终结果的影响规律和相互关系,提出基于层速度的有效应力法与Eaton法联合预测地层孔隙压力的方法,建立了含有可信度的地层孔隙压力剖面,使其不再是一条单一的曲线,而是具有可信度信息的区间。可信度越大,得出的地层孔隙压力梯度区间越大,其不确定范围越大;反之,虽然压力梯度的不确定范围缩小,但其可信程度也随之降低;地层孔隙压力的异常高压程度越剧烈,其压力区间也越大。西非深水区域一口探井计算结果与实测压力值具有较好的一致性。

关键词:深水钻井; 地层孔隙压力; 不确定性; 可信度; 概率分析

中图分类号:TE 21

文献标识码:A

An approach to determining pre-drilling formation pore pressure with credibility for deep water exploration wells

KE Ke, GUAN Zhi-chuan, ZHOU Hang

(College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: For the lack of reference data from offset wells of deep water exploration well drilling, an improved approach to determining overburden pressure gradient was presented and the relationship of time and depth was established. With the probabilistic theory, the influence of each parameter on result and the interrelationship between them of Eaton model were studied. An approach to pore pressure prediction was provided by a combined methodology of Eaton model and effective-stress method using interval velocity data, and the pore pressure profile with credibility was established. This pore pressure profile is not a single curve but the interval with credibility information. Higher the credibility or the degree of overpressure, wider the interval of pore pressure gradient and the uncertainty area, otherwise, although narrower the uncertainty area, lower the credibility. The results of a well in West Africa deep water area agree well with the field test value.

Key words: deep water drilling; formation pore pressure; uncertainty; credibility; probabilistic analysis

现有的压力预测方法主要分为基于压实趋势线的经验半经验方法以及基于岩石力学和岩石物理学模型的方法^[1],得出的压力剖面均是单一的曲线。当所钻井为开发井或评价井时,具有较多的可参考邻井的地层和测井资料以及较为丰富的岩石力学和物性参数的试验数据^[2],采用岩石力学、物理学方法,能够准确地获取其力学、物理学模型中的各项参数,比经验半经验方法精度高,能对其地层及压力情况具有较为清晰的认识,具有较小的不确定性。但

是,对于大多数勘探井,尤其是预探井,由于缺乏地层信息的相关资料,若采用经验半经验方法,其中的经验系数难以确定^[3],会给结果带来较大误差;若采用岩石力学、物理学方法,其模型中的诸多参数无法准确获取,预测结果仍会存在较大的误差。因此,无论采用何种方法,其压力剖面都存在一定的不确定性,现有的单一压力曲线很难满足工程设计的求。Nobuo Mortia^[4], Sergio A. B. da Fontoura^[5]和 Q. J. Liang^[6]等提出利用概率统计理论对井壁稳定

收稿日期:2009-04-20

基金项目:国家“863”计划项目(2006AA09A106)和中国石化集团公司项目(JP0712)

作者简介:柯珂(1982-),男(汉族),湖北宜昌人,博士研究生,主要从事不确定条件下井身结构设计方面的研究。

性、地层孔隙压力和钻井液密度的不确定性进行分析,使其不再是单一的数值,而是具有概率统计信息的区间,但是并没有提出其概率统计分布的具体确定方法,都是通过人为设定分布形式进行计算和分析,其结果具有较强的主观性。笔者针对深水探井的特点,建立适用于深水钻井的上覆岩层压力和时深关系,结合传统的 Eaton 法和含有较少参数的岩石力学、物理学有效应力,提出具有可信度的地层孔隙压力确立方法。

1 深水探井上覆岩层压力梯度的确定

1.1 基于邻井密度测井资料的改进方法

当探井具有可参考的邻井密度测井资料时,可以据此通过函数拟合的方式建立连续的上覆岩层压力梯度与深度的关系^[7],

$$G_o = A + BH - C \exp(-DH). \quad (1)$$

式中, G_o 为一定深度的上覆岩层压力梯度(本文中压力梯度均采用当量钻井液密度表示), g/cm^3 ; H 为深度,km; A, B, C, D 为系数。

常规方法对上部无密度测井井段采取平均密度的方法求取上覆岩层压力梯度,

$$G_o = \frac{\rho_w H_w + \rho_o H_o + \sum_{i=1}^n \rho_{hi} \Delta H}{H_w + H_o + \sum_{i=1}^n \Delta H}. \quad (2)$$

式中, ρ_w 为海水密度, g/cm^3 ; H_w 为水深,km; ρ_o 为上部无密度测井层段平均密度, g/cm^3 ; H_o 为上部无密度测井层段厚度,km; ρ_{hi} 为一定深度的密度散点数据, g/cm^3 ; ΔH 为深度间隔,km。

由于深水钻井表层套管井段较长(大多为 500 ~ 800 m),无测井数据井段较长,采用平均密度的方法误差较大。西非深水 obo-1 井,水深 1.75 km,井深为 4.5 km,其有密度测井资料的井段为 2.59 ~ 4.50 km,上部无密度测井资料井段达 0.84 km,不同平均密度下的上覆岩层压力梯度见图 1。

Hubbert 等^[8]提出的在正常沉积压实条件下孔隙度与压实程度和埋深的关系式及地层体密度的表达式为

$$\varphi = \varphi_0 \exp(-AH), \quad (3)$$

$$\rho_b = \rho_r(1 - \varphi) + \rho_n \varphi, \quad (4)$$

将式(3)代入式(4),有

$$\frac{\rho_r - \rho_b}{\rho_r - \rho_n} = \varphi_0 \exp(-AH). \quad (5)$$

式中, φ 和 φ_0 分别为埋深为 H 和 $H = 0$ 时岩层的孔隙度,%; A 为压实系数; ρ_b, ρ_r, ρ_n 分别为岩石体、岩石骨架和孔隙流体密度, g/cm^3 。

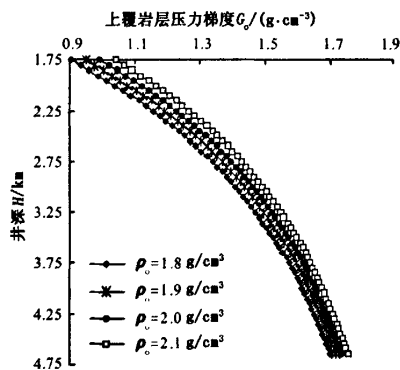


图1 不同上部地层平均密度条件下的上覆岩层压力梯度剖面

Fig.1 Overburden pressure gradient with different average density of upper formation

由于上部泥页岩正常沉积压实层段岩石骨架和流体密度变化较小,因此,式(5)可近似为岩石体密度 ρ_b 的函数,由此可得,在上部泥页岩正常压实层段,岩石体密度的对数与深度间的关系式为

$$\ln \rho_b = K_1 H + K_2. \quad (6)$$

式中, K_1 为斜率; K_2 为截距。

可以从具有地层密度测井井段中选取上部少段正常压实段的岩石体密度值,回归趋势线,然后外推出上部无密度测井资料层段的岩石体密度,此时式(2)转变为

$$G_o = \frac{\rho_w H_w + \frac{1}{K_1} [\exp(K_1 H + K_2)] |_{H_w}^{H_w+H_o} + \sum_{i=1}^n \rho_{hi} \Delta H}{H_w + H_o + \sum_{i=1}^n \Delta H}. \quad (7)$$

通过求解式(7),再按照式(1)所示函数拟合,即可得到连续的地层上覆岩层压力梯度剖面,图2为改进计算方法与平均密度法的计算结果对比。

该方法在西非深水 Akpo, JDZ-1 区块(水深 > 1 km)的 Akpo-1 井、Akpo-2 井、Akpo-3 井、obo-1 井以及安哥拉海域 Galio 和 Polutonio 油田(水深大于 400 m)的部分井进行了应用,效果良好。

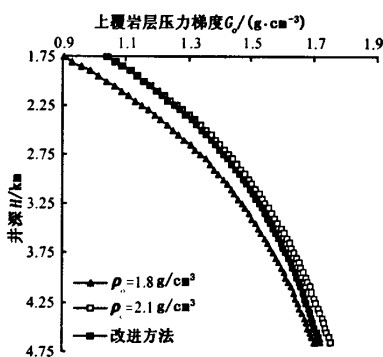


图2 改进方法与原方法计算结果对比

Fig.2 Contrast of overburden pressure gradient between improved and common method

1.2 基于层速度的上覆岩层压力梯度确立方法

对于初探井来说,由于缺乏邻井密度测井资料,无法通过上述方法进行上覆岩层压力梯度的求取。因此需通过层速度确定上覆岩层压力梯度:

$$\rho_b = \rho_{\max} - 2.11 \left(1 - \frac{v_{\text{int}}}{v_{\max}} \right) \left(1 + \frac{v_{\text{int}}}{v_{\min}} \right)^{-1} \quad (8)$$

其中

$$v_{\max} = 1.4v_0 + 3Kt, \quad v_{\min} = 0.7v_0 + 0.5Kt, \\ v_0 = v_\sigma - Kt_0, \quad K = (v_\sigma - v_{\sigma 0}) / (t - t_0).$$

式中, $\rho_{\max}$ 为岩石骨架密度,陆地及浅水常取 2.75 g/cm^3 ; v_{int} 为层速度, km/s ; $v_{\min}$ 和 $v_{\max}$ 分别为层速度最小值(一般为泥线处的层速度值)和测量最大值, km/s ; t 和 t_0 分别为某一层底面和顶面的双程旅行时间; v_σ 和 $v_{\sigma 0}$ 分别为 t 和 t_0 时刻的均方根速度。

式(8)在陆地或浅水钻井的上覆岩层压力梯度预测中应用效果较好,与利用邻井密度测井资料计算结果具有较好的一致性。但在深水钻井中,水深对上覆岩层压力的影响较大, $\rho_{\max}$ 取 2.75 g/cm^3 会使整个井段的上覆岩层压力具有较大的提升,产生误差,因此需要作进一步的修正。根据上覆岩层压力梯度随水深的变化关系可以看出,随着水深的不断增加,泥线边界处的上覆岩层压力梯度趋近于海水密度(图3,海水密度取 1.03 g/cm^3)。一般深水井水深超过 500 m ,可以根据这一特点对式(8)进行修正,得出合理的 $\rho_{\max}$ 值:

$$\rho_{\max} = \rho_{\text{sea}} + 2.11 \left(1 - \frac{v_m}{v_{\max}} \right) \left(1 + \frac{v_m}{v_{\min}} \right)^{-1}.$$

式中, ρ_{sea} 为海水密度, g/cm^3 ; v_m 为泥线处层速度值, km/s 。

再根据具有密度测井资料的改进方法进行上覆岩层压力梯度计算,得出连续的上覆岩层压力梯度

值(图4)。依据层速度的修正方法得出的上覆岩层压力与依据密度测井数据得出的结果一致。

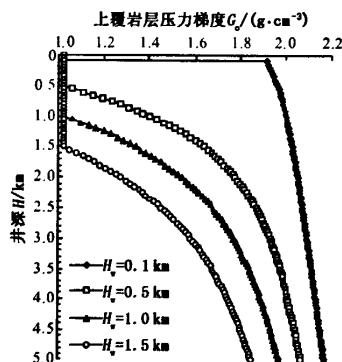


图3 不同水深时上覆岩层压力梯度剖面

Fig.3 Profile of overburden pressure gradient with different water depth

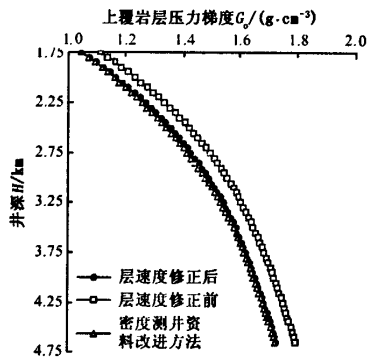


图4 修正前后预测结果对比

Fig.4 Contrast of results of modified and non-modified method

2 建立时深关系的改进方法

根据层速度数据可以建立时深关系曲线,通过对地震资料进行约束反演处理获得深度和层速度数据,若没有进行反演,特别是对资料较为缺乏的新探区,需要通过地震速度谱获取层速度^[9]。现多用二项式进行时深关系的拟合回归,由回归模型推算出的上部地层速度值和少数测量值间仍有一定的差距,回归模型推算值普遍大于测量值,且差距较大。因此,利用回归外推的数据计算时,都会造成其外推的层速度数值不能较好地应用于传统方法正常趋势线的建立或岩石力学、物理学方法中有效应力模型的建立,本文中采用类似上覆岩层压力梯度的方法,采用指数多项式进行时深关系的回归,即

$$H = A + Bt - C \exp(-Dt).$$

以西非深水区域TDZ-1区块obo-1井为例,进行

时深关系回归,如图 5,6 所示。利用指数多项式回归

的时深关系比二项式更为合理。

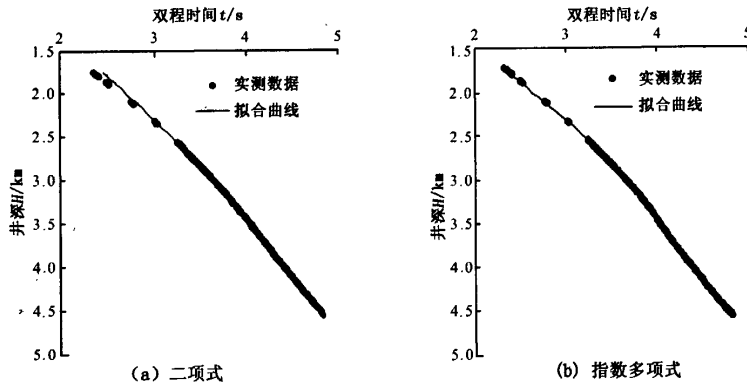


图 5 回归的时深关系

Fig.5 Regression relationship of trans-time and depth

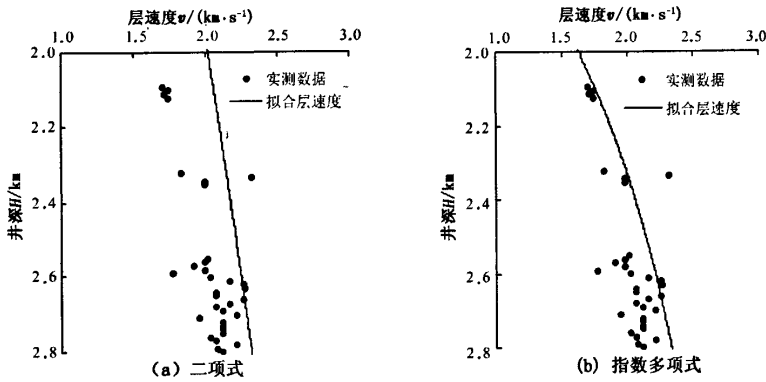


图 6 多项式回归外推层速度值与实测值比较

Fig.6 Contrast of extrapolation velocity value from regression and measurement

3 Eaton 与有效应力法联合计算方法

3.1 Eaton 法的不确定性

Eaton 法是深水钻井常用的压力检测方法^[10], 具有较好的应用效果,表达式为

$$G_p = G_o - (G_o - G_h) \left(\frac{k}{k_n} \right)^n$$

式中, G_p 为地层孔隙压力梯度; G_h 为静液压力梯度; k 为计算点测井参数值(时差、电导率、视密度); k_n 为计算点对应的正常趋势线的参数值(层速度、时差、电导率、视密度); n 为 Eaton 指数,与地区及地质年代有关。

Eaton 指数决定着预测值的准确程度。不同区域, Eaton 指数不同^[11], $G_o = 1.8 \text{ g/cm}^3$, $G_h = 1.03 \text{ g/cm}^3$, 不同 k/k_n 时地层孔隙压力随 Eaton 指数的变化如图 7 所示。精确获取 Eaton 指数在探井尤其是初探井较为困难,但是可通过一定的方法,获得一个较

小的范围,使预测结果在一可接受的范围内波动。

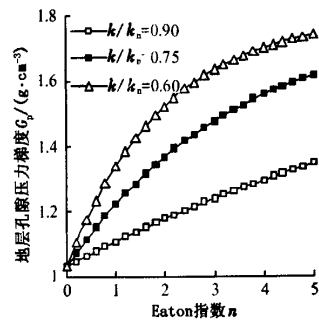


图 7 地层孔隙压力梯度随 Eaton 指数的变化

Fig.7 Variation of formation pore pressure gradient with Eaton exponent

3.2 Eaton 法与有效应力法联合

3.2.1 有效应力法预测地层孔隙压力^[12]

根据层速度资料求取时深关系,外推得到上部地层的层速度,利用上部正常压实层段的层速度和

有效应力回归二者之间的关系,根据实测层速度数据反算有效应力值,求取地层孔隙压力。

$$\begin{aligned} p_e &= p_o - \alpha p_h, \\ v &= a + cp_e - b \exp(-dp_e), \\ p_p &= (p_o - p_e)/\alpha. \end{aligned}$$

式中, p_o 为上覆岩层压力, MPa; p_h 为静液柱压力, MPa; α 为有效应力系数, 砂岩层段一般取 1^[13]; p_p 为地层孔隙压力, MPa; p_e 为垂直有效应力, MPa; v 为岩石纵波速度, km/s; a, c, b, d 为模型系数。

3.2.2 Eaton 指数的求取

将计算得到的地层孔隙压力梯度、层速度代入 Eaton 公式中, 反算 Eaton 指数,

$$n = \ln\left(\frac{G_o - G_p}{G_o - G_h}\right) / \ln\left(\frac{v_{int}}{v_n}\right),$$

其中

$$v_n = a + c(p_o - \alpha p_h) - b \exp[-d(p_o - \alpha p_h)].$$

式中, v_n 为正常压实条件下的层速度, km/s。

3.2.3 Eaton 指数分布状态的确立

对计算得出的 Eaton 指数进行统计, 选取分布形式拟合。根据 Eaton 指数的特性, 可采用正态分布、三角分布和均匀分布分别对其进行拟合, 通过分布拟合检验, 选取拟合效果最好的分布形式。

3.2.4 地层孔隙压力分布形式的求取

令 $T = \frac{v_{int}}{v_n}$, 用 X 表示 Eaton 指数变量, x 表示

Eaton 指数变量产生的随机数值。用 Y 表示变量 G_p , Y 中的随机值为 y , 则

$$y = f(x) = G_o - (G_o - G_p)T^x,$$

$$x = f^{-1}(x) = g(y) = \ln\left(\frac{G_o - y}{G_o - G_h}\right) / \ln T.$$

令 $C = 1/\ln T$, 对上式求导得

$$g'(y) = \frac{-C}{G_o - y}.$$

通过 Eaton 变量 X 的分布状态可直接获得其概率密度函数 $P_X(x)$, 根据 Eaton 指数的分布求取地层压力的分布, 不仅可以获得地层压力的分布状态, 还可以获得其分布参数^[14], 计算公式为

$$P_Y(y) = \begin{cases} P_X[g(y)] |g'(y)|, & a < y < b; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

其中

$$\begin{aligned} a &= y_{\min} = f(x)_{\min}, x \in (-\infty, +\infty); \\ b &= y_{\max} = f(x)_{\max}, x \in (-\infty, +\infty). \end{aligned}$$

(1) Eaton 指数呈正态分布时:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right].$$

地层孔隙压力的概率密度及累积概率分布为

$$\begin{aligned} P_Y(y) &= \begin{cases} \frac{-C}{(G_o - y)\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(\ln\left(\frac{G_o - y}{G_o - G_h}\right) - \mu\right)^2}{2\sigma^2}\right], \\ a < y < b; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \\ F_Y(y) &= \int_{-\infty}^{\ln\left(\frac{G_o - y}{G_o - G_h}\right)} \frac{1}{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx. \end{aligned}$$

当 Eaton 指数呈正态分布时, 地层孔隙压力为对数正态分布。

(2) Eaton 指数呈均匀分布时:

$$\begin{aligned} p(x) &= \begin{cases} \frac{1}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} < x < x_{\max}; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \\ F(x) &= \begin{cases} 0, & x < x_{\min}; \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} \leq x < x_{\max}; \\ 1, & x \geq x_{\max}. \end{cases} \end{aligned}$$

地层孔隙压力的概率密度函数和累积概率分布为

$$\begin{aligned} P_Y(y) &= \begin{cases} \frac{|-C|}{x_{\max} - x_{\min}} \frac{1}{G_o - y}, & a < y < b; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \\ F_Y(y) &= \int_{x_{\min}}^{\ln\left(\frac{G_o - y}{G_o - G_h}\right)} \frac{1}{x_{\max} - x_{\min}} dx. \end{aligned}$$

(3) Eaton 指数呈三角分布, 且 $\forall x_0 \in [x_{\min}, x_{\max}]$, 使得 $p(x_0) = p(x)_{\max}$, 则

$$\begin{aligned} p(x) &= \begin{cases} \frac{2(x - x_{\min})}{(x_0 - x_{\min})(x_{\max} - x_{\min})}, & x_{\min} \leq x \leq x_0; \\ \frac{2(x_{\max} - x)}{(x_0 - x_{\min})(x_{\max} - x_0)}, & x_0 < x \leq x_{\max}; \\ 0, & x < x_{\min}, x > x_{\max}. \end{cases} \\ F(x) &= \begin{cases} \frac{(x - x_{\min})^2}{(x_0 - x_{\min})(x_{\max} - x_{\min})}, & x_{\min} \leq x \leq x_0; \\ 1 - \frac{(x_{\max} - x)^2}{(x_{\max} - x_0)(x_{\max} - x_{\min})}, & x_0 < x \leq x_{\max}. \end{cases} \end{aligned}$$

地层孔隙压力的概率密度函数和累积概率分布为

$$\begin{aligned} P_Y(y) &= \begin{cases} \frac{2\left[\ln\left(\frac{G_o - y}{G_o - G_h}\right) - x_{\min}\right]}{(x_0 - x_{\min})(x_{\max} - x_{\min})} \frac{|-C|}{G_o - y}, & a \leq y \leq y_0; \\ \frac{2\left[x_{\max} - \ln\left(\frac{G_o - y}{G_o - G_h}\right)\right]}{(x_0 - x_{\min})(x_{\max} - x_0)} \frac{|-C|}{G_o - y}, & y_0 < y \leq b; \\ 0, & y < a, y > b. \end{cases} \end{aligned}$$

$$F_Y(y) = \begin{cases} \int_{x_{\min}}^{\ln(\frac{C_0-y}{C_0-C_h})} \frac{2(x-x_{\min})}{(x_0-x_{\min})(x_{\max}-x_{\min})} dx, & y_{\min} \leq y \leq y_0; \\ 1 - \int_{\ln(\frac{C_0-y}{C_0-C_h})}^{x_{\max}} \frac{2(x_{\max}-x)}{(x_0-x_{\min})(x_{\max}-x_{\min})} dx, & y_1 < y \leq y_{\max}. \end{cases}$$

$$y_0 = f(x_0).$$

含可信度地层孔隙压力剖面的确立见文献[15]。

4 计算实例

以西非深水 JDZ-1 区块 obo-1 探井为例进行计算,该井水深 1.75 km,补心高度 25 m,井深 4.5 km(补心深度),海水密度取 1.03 g/cm^3 ,根据已有的层速度对其进行地层孔隙压力预测。首先建立上覆岩层压力梯度剖面(图 8),随后根据有效应力法计算单一的地层孔隙压力梯度(图 9),由此反算 Eaton 指数,并对其进行统计分析(图 10),根据其统计结果采用正态分布,具有良好的拟合效果(图 11),然后根据 Eaton 指数的分布形式,求取每一深度处的地层孔隙压力梯度,最后建立含有可信度的地层孔隙压力剖面(图 12),并与实测数据进行对比。

图 12 表明,具有可信度信息的压力区间与单一曲线相比,其确立方法更多地考虑了每一深度处可能出现的地层孔隙压力值。对于工程设计人员来说,对其压力可能出现的范围进行把握,比了解单一数值更为实际和有效,设计人员能够根据其结果作出相应的应急备用方案,减少意外突发事件给钻井过程带来的影响。

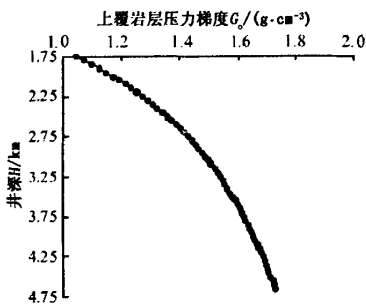


图 8 上覆岩层压力梯度

Fig. 8 Overburden pressure gradient

由图 12 可知:随着异常高压程度的增加,相同可信度条件下的压力区间随之增大;可信度越大,可信度窗口越大,压力区间越大;可信度越小,压力区间缩

小,其可靠程度也随之降低。因此,若选取可信度值较大,而使得压力区间过大不利于工程设计时,可以根据实际情况适当减小可信度或根据邻区或选择相似构造上^[16]的井对其进行评价,减小其压力区间。在实际计算过程中,应尽量获取可利用的参考资料,有效剔除误差较大的 Eaton 指数,减小其分布范围,从而减少大可信度条件下的压力区间。

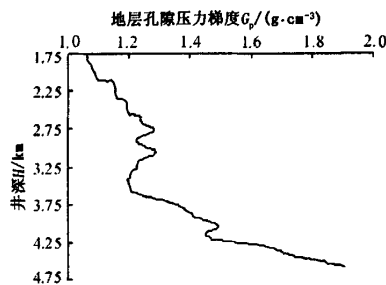


图 9 有效应力法计算结果

Fig. 9 Result from effective stress method

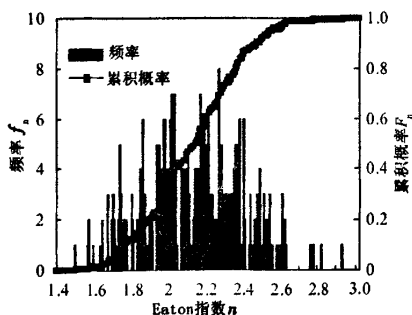


图 10 Eaton 指数统计结果

Fig. 10 Statistic result of Eaton exponent

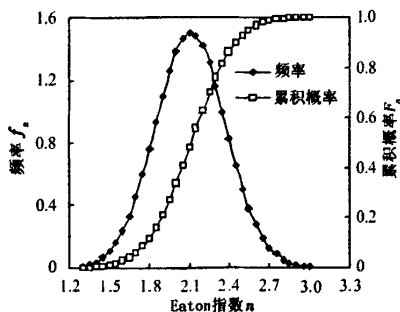


图 11 Eaton 指数拟合分布形式

Fig. 11 Distribution pattern of Eaton exponent regression

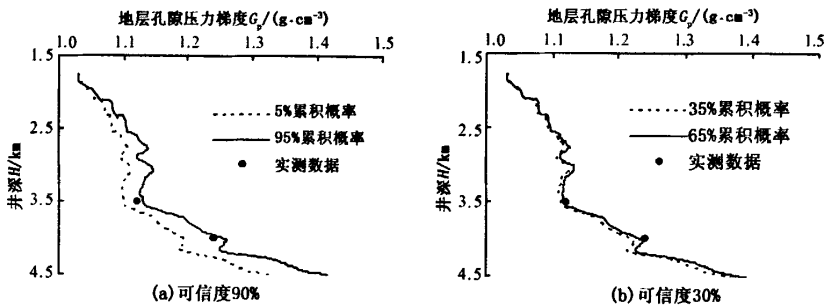


图12 不同可信度条件下地层孔隙压力剖面

Fig.12 Formation pore pressure profile with different credibility

5 结 论

(1) 改进的上覆岩层压力梯度确立方法能减少主观确定上部无测井数据井段平均密度方法给计算结果带来的误差;指数多项式时深关系较现有的二项式关系具有更好的外推效果。

(2) 探井的压力预测重点不应是确定出具体的数值,得出具有可信度信息的压力区间或压力可能波动的范围,更有利于工程设计人员把握地层压力信息。

(3) 本文中方法主要适用于砂泥岩剖面以及欠压实机制引起的异常高压,对于碳酸盐岩等海相沉积地层以及其他机制引起的异常高压地层,重点还应通过选择相似构造、参考相邻区块井或本区块邻井的测井与实测资料进行综合评价,得出其可能的压力范围,这也是进一步深入研究的内容。

参考文献:

[1] 艾池,冯福平,李洪伟. 地层压力预测技术现状及发展趋势[J]. 石油地质与工程,2007,21(6):71-76.
AI Chi, FENG Fu-ping, LI Hong-wei. Current situation and trend of formation pressure prediction[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007,21(6):71-76.

[2] 陈庭根,管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营:石油大学出版社,2001:22-41.

[3] 张传进. 初探井地层孔隙压力预测方法[J]. 石油钻探技术,2002,30(3):13-14.
ZHANG Chuan-jin. Prediction of formation pore pressure in wild cat wells[J]. Petroleum Drilling Technology, 2002,30(3):13-14.

[4] MORTIA Nobuo. Uncertainty analysis of borehole stability problems[R]. SPE 30502,1995.

[5] da FONTOURA Sergio A B, HOLZBERG Bruno B, TEIXIRA Edson C, et al. Probabilistic analysis of wellbore stability during drilling[R]. SPE 78179,2002.

[6] LIANG Q J. Application of quantitative risk analysis to pore pressure and fracture gradient prediction[R]. SPE 77354,2002.

[7] 樊洪海. 地层孔隙压力预测检测新方法研究与应用[D]. 北京:石油大学石油天然气工程学院,2001.

[8] HUBBERT M K,RUBEY W W. Role of fluid pressure in mechanics of over thrust faulting[J]. AAPG,1959,37(8):155-166.

[9] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 东营:中国石油大学出版社,2006:189-220.

[10] EATON Ben A. The equation for geopressure prediction from well logs[R]. SPE 5544, 1975.

[11] 王振峰,罗晓容. 莺琼盆地高温高压地层钻井压力预测监测技术研究[M]. 北京:石油工业出版社,2004:73-74.

[12] 樊洪海. 利用层速度预测砂泥岩地层孔隙压力单点算法模型[J]. 岩石力学与工程学报,2002,6(增刊):2037-2040.
FAN Hong-hai. Single point algorithm for pore pressure prediction of sand-shale formations using seismic interval velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,6(sup):2037-2040.

[13] 邓金根,程远方,陈勉,等. 井壁稳定预测技术[M]. 北京:石油工业出版社,2008:64.

[14] 茆诗松,程依明,濮小龙. 概率论与数理统计教程[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

[15] 管志川,柯珂,路保平. 压力不确定条件下套管层次及下深确定方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(4):71-75.
GUAN Zhi-chuan, KE Ke, LU Bao-ping. An approach to casing program design with formation pressure uncertainties[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(4):71-75.

[16] 金衍. 井壁稳定预测理论和应用研究[D]. 北京:石油大学石油天然气工程学院,2001:63-64.

(编辑 李志芬)