

利用井底压力采集短接准确计算地层压力的方法

刘永贵¹, 孔凡军², 杨海波¹, 董孟坤³, 李 明¹

(1. 大庆石油管理局钻井工程技术研究院 黑龙江 大庆 163413; 2. 大庆油田有限责任公司勘探分公司 黑龙江 大庆 163413; 3. 大庆钻井一公司 黑龙江 大庆 163413)

摘 要 介绍了现有技术情况下求取欠平衡地层压力的方法以及存在的缺点,在此基础上研制了井底压力采集短接,通过现场试验,实测出关井求压过程中井下气液两相流时的井底压力。根据常规试井理论和地层渗流理论建立一种利用实测数据计算地层压力的新方法,该方法是在井筒内建立压力平衡,采用实际测量出的平衡点的井底压力,消除了套压、立压不稳定以及钻井液密度不准带来的误差,准确计算出该井段各分层地层压力的大小。该方法非常接近实际地层压力,使关井求压计算值误差降低 4% 左右。

关键词 大庆油田;欠平衡钻井;地层压力;井底压力;采集短接;关井求压

中图分类号:TE249 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2004)06-0054-04

Precise Calculation Methods for Formation Pressure with Downhole Pressure Collection Joint/LIU Yong-gui¹, KONG Fan-jun², YANG Hai-bo¹, DONG Meng-kun³, LI Ming¹(1. Drilling Engineering Technology Institute of Daqing Petroleum Administrative Bureau, Daqing Helongjiang 163413, China; 2. Survey Branch of Daqing Oil Field Corporation, Daqing Helongjiang 163413, China; 3. Daqing First Drilling Company, Daqing Helongjiang 163413, China)

Abstract: Calculation methods of under balanced formation pressure under existing technology and its defects are introduced. Down hole pressure collection joints are development. Air/liquid double phase pressure down the well was measured during well shut off through in situ test. A new formation pressure calculation method was established based on conventional well test theory and formation transfusion theory and using measured data. The method was established on pressure balance around well wall and the down hole pressure at balance point which was actually measured. It eliminated the errors caused by unstable casing and stand pipe pressure and imprecise drilling fluid density. It can precisely calculate the formation pressures along the borehole. The calculated pressure by the method is much closed to actual pressures. The calculation errors of well shut off pressure were down about 4%.

Key words: Daqing Oilfield; under balance pressure drilling; formation pressure; down hole pressure; collection joint; well shut off pressure

地层压力是描述油气藏类型、计算地质储量、了解油气藏目前动态以及预测未来动态的一项必不可少的基础数据,尤其对于探井,准确了解地层压力,可避免钻井中出现复杂情况,探测油气储量,保护储层。目前,针对现场作业中不同的工况,确定地层压力的方法较多,但这些方法均以许多假设条件为基础,因此与实际地层压力存在一定误差。近年来,大庆油田为了勘探开发低渗透油田,应用和发展了欠平衡钻井技术,在松辽盆地北部长垣东部深层先后实施了宋深 101 井、卫深 5 井、卫深 501 井、肇深 11 井、汪深 1 井和杏深 1 井等 6 口气井的欠平衡钻井,在欠平衡钻井过程中监测地层压力先后试用 dc 指数法、西格玛法、C 指数法、标准钻速法、关井求压法

等计算方法,使计算误差逐渐降低。

1 关井求压法计算地层压力

1.1 计算方法

在大庆油田欠平衡钻井中,由于均为探井,所用的预测地层压力存在许多不确定性,所以只能作为参考。关于各种地层压力的监测方法,其计算结果误差较大,现在欠平衡钻井中主要利用关井求压法来计算地层压力,该方法分为以下两种情况。

1.1.1 开始钻进时计算地层压力的方法

在探井的欠平衡钻井中,首先使用参考的地层压力,通过公式求出欠平衡钻井液的密度,据此密度钻进,如果没有可参考的地层压力,则按下面步骤进

收稿日期 2003-12-12

作者简介 刘永贵(1973-)男(汉族)黑龙江大庆人,大庆石油管理局钻井工程技术研究院钻井工艺研究所工程师,石油工程专业,从事定向水平井、欠平衡钻井工艺技术研究工作(0459)4892607 liuyonggui@zys.dq.cnpc.com.cn;孔凡军(1962-)男(汉族)黑龙江大庆人,大庆油田有限责任公司勘探分公司副总工程师、高级工程师,钻井专业;杨海波(1971-)女(汉族)黑龙江大庆人,大庆石油管理局钻井工程技术研究院钻井工艺研究所工程师,机械工程专业。

行求取:

- (1) 确定一个关井求压时所用的钻井液密度 ρ_m ;
- (2) 当井控装置试压合格后, 将钻具下到井底, 用 ρ_m 钻井液替换井底钻井液;
- (3) 钻开水泥塞, 继续钻进 1~2 m;
- (4) 停泵关井, 求立管压力 P_d 和套管压力 P_l , 如果无立管压力和套管压力, 应该继续降低钻井液密度, 替换井内钻井液, 重新关井求压;

(5) 计算地层压力

$$P_p = P_d + 9.81 \times 10^{-3} H \rho_m \quad (1)$$

式中: P_p —— 地层压力, MPa; P_d —— 立管压力, MPa; H —— 井深, m; ρ_m —— 关井求压时所用的钻井液密度, g/cm³。

1.1.2 钻进过程中计算地层压力的方法

当钻井过程中出现溢流或者钻进加快, 要停止钻进, 关井求压, 调整钻井参数, 地层压力的求取方法如下:

- (1) 关井, 记录套压;
- (2) 在记录中查找出现溢流前的钻井液密度;
- (3) 计算地层压力

$$P_p = P_l + 9.81 \times 10^{-3} H \rho_m; \quad (2)$$

式中: P_l —— 套压, MPa。

1.2 缺点与不足

在大庆油田欠平衡钻井中都是采用关井求压法计算地层压力的, 计算结果误差较小, 但是仍然存在许多缺点和不足, 具体有以下 3 个方面。

(1) 在实际压井过程中都是采用增加附加值的方法确定压井密度, 取得一定效果的同时也存在两个弊端, 压井密度过高容易污染储层, 压井密度过低容易出现溢流, 发生复杂情况。

(2) 该计算方法只能求取关井时地层中高压层的地层压力系数, 对于地层中每个分层的地层压力系数无法确定。

(3) 大庆油田欠平衡井均为探测气井, 在欠平衡钻井中钻井液存在气液两相流, 使密度测量存在一定误差, 并且关井求压过程中气体不断上升使套压和立压很难稳定, 致使计算的地层压力误差较大, 尤其在深井中, 误差有时大大超过了井底负压值。

为了解决这些问题, 我们研制成功了井底压力采集短接, 采用实际测量的井底压力来计算地层压力, 建立一种新的计算方法。

2 井底压力采集短接

2.1 结构

由于其为自行研制的井底压力测量短接, 因此

不会影响欠平衡钻井井下钻具结构, 可直接接在钻头上或需要测量的井段。压力测试系统选用进口高精度压力传感器, 关键电子元件是自行研制和开发的。该工具的主要结构如图 1 所示。

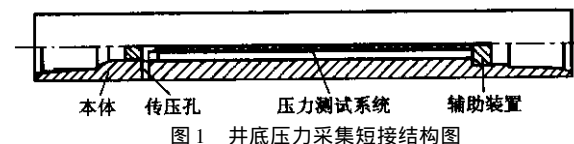


图 1 井底压力采集短接结构图

该压力采集短接的主要性能指标为: 压力量程 0~70 MPa, 压力准确度 0.05 Pa, 压力分辨率 0.02 Pa, 温度量程 0~150 °C, 温度精度 $\pm 0.5\%$, 分辨率 0.01 °C, 贮存容量 696000 点, 额定工作时间 250 天, AA 型锂电工作电压 6.5 V, 采样速率 1~3600 s。

2.2 原理

根据国外有线随钻测量系统和无线测量系统原理, 通过传压孔将井底压力传递给压力测试系统中的压力传感器, 实现自动测量、自动记录的功能。由于在欠平衡钻井过程中, 钻井液是气液两相流, 关井求压时套压和立压很难稳定, 况且计算地层压力所用的钻井液密度是井口测量的密度, 与实际的环空密度相比存在误差, 因此若采用常规计算地层压力的方法计算, 误差必定较大, 对油气勘探、欠平衡钻井作业以及保护储层极为不利。井底压力采集短接能够实时自动记录测量点环空压力, 通过关井求压, 对欠平衡钻井井筒内环空压力进行自动采集记录, 同时准确记录井口套压、立压变化, 结合钻井过程中数据资料进行综合分析、处理, 计算得出实际地层压力。这样可以确定欠平衡钻井中的各种参数是否符合设计要求, 对欠平衡钻井进行合理调整, 指导下部欠平衡钻井设计和施工。

3 现场试验

3.1 试验过程

为了验证工具的应用效果, 于 2003 年 10 月 13 日 9 时 40 分到 10 月 23 日 7 时 40 分将该井底压力采集短接应用于达深 2 井三开欠平衡井段, 应用井深 3064~3609 m, 在井底 3600 m 进行关井求压来求取该段井深的地层压力, 具体试验过程如下。

3.1.1 起下钻及钻进阶段

在 2003 年 10 月 13 日 9 时 40 分安装采集短接, 12 时 30 分开始下钻, 至井底 3060 m, 开始替换钻井液, 钻水泥塞, 于 10 月 15 日 9 时 30 分开始三开欠平衡钻进, 于 10 月 21 日 22 时钻进至井深 3609 m 发现钻头扭矩增加, 准备起钻换钻头, 在 10 月 22

日 7 时 30 分 ~ 13 时 30 分进行关井求压试验,于 10 月 23 日 7 时 40 分起钻到井口,将仪器起出。

3.1.2 关井求压阶段(井深 3600 m)

在 10 月 22 日 7 时 30 分,关闭井口防喷器和液动节流阀,开始关井求压,至 13 时 30 分打开井口防喷器和液动节流阀,试验结束。在关井过程中,时时准确记录时间、套压和立压变化情况。

4 地层压力的计算

4.1 理论分析

根据关井时井筒内建立压力平衡的原理,欠平衡钻井中地层中的高压层地层流体(该井中主要是气体)流入井筒内时使封闭的井筒内环空压力 P_{hi} 升高,当井筒内环空压力 P_{hi} 大于等于某一分层地层压力 P_{Pi} 时,井筒内钻井液就向该深度为 H_i 的地层分层渗透流失,使井筒内环空压力 P_{hi} 下降,同时造成井口套压 P_i 及立压 P_d 的相应变化,地层流体继续进入井筒内来补偿井筒内的压力损失,同时在该分层近井壁段由于钻井液的渗入使泥饼在地层孔隙中形成,阻碍了钻井液的进一步流失,重新建立了新的压力平衡体系,这样井筒内的压力进一步上升,逐渐建立各个分层的压力平衡体系,这样每个压力突变点的井筒压力 P_{hi} 就是该段井深中某个分层的的地层压力。通过对压力传感器记录的井下测点压力 $P_{测点}$ 变化情况进行分析,来确定属于每个分层的计算压力(见图 2)。

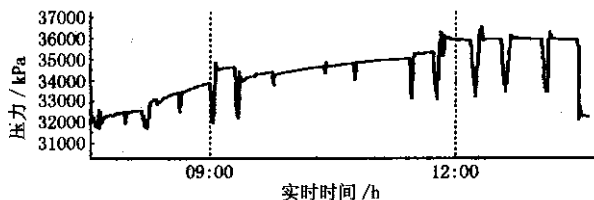


图 2 实测井底压力随时间变化曲线图

通过实测数据曲线,可以很清晰地看出不同时刻实测井底压力变化情况,在图 2 中压力曲线突然下降点为该井段某一分层地层压力 P_{Pi} 与井筒内压力平衡时的井下实测点的井底压力 $P_{测点}$ 与理论分析结果完全符合,因此可以根据实测结果计算地层压力。

4.2 计算方法

根据常规试井理论和地层渗流理论,假设条件为地层渗流为单相弱可压缩且压缩系数为常数的液体,在水平、各向同性的均质弹性孔隙介质中渗流,储层厚度不变,产量恒定,可知井筒内环空压力 $P(r, t)$ 是 r 和 t 的函数:

$$P(r, t) = P_{方数据} \frac{qvB}{345.6\pi kh} \left\{ \ln \frac{8.085\eta t}{r_w^2} + 2S \right\} \quad (3)$$

式(3)中,当 $q=0$ 时, $P(r, t) = P_p$, 该式中压力 $P(r, t)$ 是通过井底压力采集短接实际测量以后计算出来的,因此计算的地层压力是非常精确的。

4.2.1 计算公式

通过理论分析,分两种情况计算地层压力:

(1) 当计算的深度 H_i 在进气层以下,即 $H_i > H_{气}$

$$P_{Pi} = P_{hi} = P_{测点} - 9.81 \times 10^{-3} (H_{测点} - H_i) \rho_{m1} \quad (4)$$

式中: P_{Pi} ——地层中某个分层(深度 H_i)点的地层压力, MPa; P_{hi} ——井筒内深度 H_i 点压力平衡时的环空压力, MPa; $H_{测点}$ ——井底压力采集短接测量点的深度, m; ρ_{m1} ——井筒内气层以下或者钻柱内钻井液密度, g/cm^3 。

(2) 当计算的深度 H_i 在进气层以上,即 $H_i < H_{气}$

$$P_{Pi} = P_{hi} = P_{测点} - 9.81 \times 10^{-3} (H_{测点} - H_{气}) \rho_{m1} - 9.81 \times 10^{-3} (H_{气} - H_i) \rho_{m2} \quad (5)$$

式中: $H_{气}$ ——地层中含气层深度, m; ρ_{m2} ——井筒内气层以上含气钻井液密度, g/cm^3 。

由于钻井液中含气,式(4)和式(5)中 ρ_{m1} 值和 ρ_{m2} 值在井口测量不准,应该用实际测量的压力进行推算,同样根据井筒内压力平衡的原理,推导如下:

$$\begin{aligned} P_{测点i} &= P_{di} + 9.81 \times 10^{-3} H_{测点} \rho_{m1} \\ &= P_{ti} + 9.81 \times 10^{-3} (H_{测点} - H_{气}) \rho_{m1} \\ &\quad + 9.81 \times 10^{-3} H_{气} \rho_{m2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: P_{di} ——在 i 时刻压力平衡点时刻的立压值, MPa; P_{ti} ——在 i 时刻压力平衡点时刻的套压值, MPa。

由式(6)推导出钻井液密度:

$$\rho_{m1} = (P_{测点i} - P_{di}) / (9.81 \times 10^{-3} H_{测点}) \quad (7)$$

$$\rho_{m2} = [P_{测点i} - P_{ti} - 9.81 \times 10^{-3} (H_{测点} - H_{气}) \rho_{m1}] / (9.81 \times 10^{-3} H_{气}) \quad (8)$$

4.2.2 具体井深的确定

根据实测压力和井口套压、立压变化情况可判断具体井深,该井三开欠平衡钻进过程中,钻进至井深 3098 m 接单根后循环点火成功,火焰高 2 ~ 5 m,由钻井数据和地质录井监测数据推测出气测显示最好的井段为 3092 ~ 3105 m,因此可以确定该井段为含气层,也就是地层压力系数最高的层位。通过 3 种压力随时间变化对应曲线图可以看出所计算的分层地层压力位于含气层的上部或者下部,结合钻井数据和录井数据,确定该分层实际井深(见图 3)。

确定具体井深的方法为:当计算点处套压 P_i 下降幅度很大,接近于零,而立压 P_d 下降后很快恢复,表明该计算点位于含气层上部;当计算点的套压 P_i 下降后很快恢复上升,而立压 P_d 下降幅度很大,接

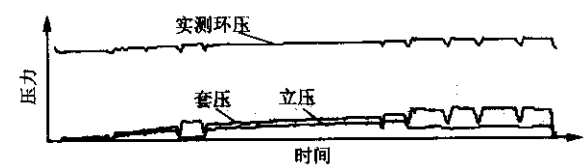


图 3 3 种压力随时间对应变化曲线图

近于零,表明该计算点位于含气层下部,当套压、立压不再继续上升,保持在一定的水平,说明此时计算得出的地层压力为高压气层井段的地层压力。

4.2.3 计算不同井深时候的地层压力

根据钻进过程中实钻数据和地质录井数据综合分析计算出不同井深的地层压力,结果如表 1 所示。

表 1 不同井深计算的地层压力表

井深/m	地层压力/MPa	井深/m	地层压力/MPa
3065	27.72	3198	31.12
3092	30.82	3202	31.16
3105	31.01	3210	30.23
3117	31.06	3600	33.94
3150	30.90		

4.3 实测计算地层压力系数与关井求压、dc 指数法计算值的比较

通过回放数据可以计算出不同井段不同井深的地层压力系数,该段井深 3064 ~ 3609 m 地层中最大的地层压力系数为 1.019 g/cm³,最小的地层压力系数为 0.9239 g/cm³。在关井求压过程中计算的最大的地层压力系数为 0.988 g/cm³。因此在钻井过程中,为了安全起见,关井求压理论计算地层压力系数要有附加值,至少应该附加 4% 以上。dc 指数法是 1965 年宾汉通过室内钻井模拟试验,假设钻井条件和岩性不变建立起来的一种计算方法,由于假设条件与实际欠平衡钻井条件和地层岩性存在很大差别,因此误差较大,高达 14%。表 2 是实测计算不同井深的地层压力系数与关井求压、dc 指数法计算的地层压力系数的对比结果。

表 2 3 种情况计算地层压力系数对比表

井深 /m	采集实测地	关井求压计算		dc 指数法计算	
	层压力系数 /(g · cm ⁻³)	地层压力系数 /(g · cm ⁻³)	误差 /%	地层压力系数 /(g · cm ⁻³)	误差 /%
3067	0.923	0.903	2.30	0.98	6.2
3090	0.923	0.905	2.10	1.05	13.7
3098	1.019	0.988	3.01	1.13	10.9
3117	1.017	0.970	3.10	1.07	5.2
3150	1.001	0.992	0.80	1.06	5.9
3200	0.993	0.980	1.30	1.12	12.8
3210	0.961	0.930	3.40	1.08	12.4
3600	0.961	0.932	3.10	1.06	10.3

4.4 应用效果

达深 2 井是大庆油田进行深层勘探的一口重要的欠平衡预探井,该井三开采用欠平衡钻进,在钻井过程中,气测显示最好的井段 3092 ~ 3105 m,采用原有关井求压法计算地层压力系数为 0.988 g/cm³。在实际应用过程中,第一次起钻时,压井钻井液密度 1.015 g/cm³时(关井求压计算的地层压力系数附加 3%)发现井口有溢流。通过起钻后利用井底压力采集短接实测计算地层压力的方法计算的地层压力系数为 1.019 g/cm³,确定第二次起钻时压井密度 1.025 g/cm³,实际表明该密度十分安全,同时也证明了实测计算地层压力系数的准确性。为了保证后续欠平衡钻井井底负压值保持设计的 2 ~ 4 MPa,适当降低了钻井液密度,在钻进至井深 3854 m 时点火成功,火焰高 2 ~ 5 m,取得了较好的勘探效果,完井单层试气效果显著。这就说明,使用该短接计算地层压力的方法是非常准确的,为大庆油田深层勘探提供了准确的地层压力数据,使后续欠平衡钻井井底负压值保持在设计水平,提高了大庆油田欠平衡钻井水平。

5 结论和认识

(1) 本文提供的方法发展完善了关井求压法,解决了该方法存在的一些缺点和不足,使关井求压计算误差降低了 4% 左右,能够计算不同井深的地层压力。

(2) 该方法是建立在井筒内压力平衡的基础上的,采用的是关井时压力平衡点实测的井底压力,理论计算与实际地层压力基本相符,计算结果准确可靠,是一种在欠平衡钻井过程中精确计算地层压力系数的新方法。

(3) 由于井底压力采集短接适用于井筒内气液多相流的钻井作业中测量井底压力,因此它不仅适用于流钻欠平衡钻井,同样也适合空气、泡沫钻井,并可进一步指导以后的现场作业。

(4) 建议继续开展欠平衡钻井随钻监测地层压力的研究,建立适合欠平衡钻井监测地层压力的理论计算方法。

参考文献:

[1] 郝俊芳,等. 平衡钻井与井控[M]. 北京:石油工业出版社, 1992.
[2] 马宗金,肖润得. 现代欠平衡钻井技术[J]. 钻采工艺, 2000, 22 (4): 22 ~ 26.
[3] 杨虎,胡军,等. 欠平衡钻井随钻试井数学模型及实用方法研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2002, 17(1): 39 ~ 41, 48.