

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn. 1001-0890. 2013. 04. 012

“液量稳定”控压钻井方法

张桂林

(中石化胜利石油工程有限公司技术装备处,山东东营 257001)

摘要:为了满足“窄密度窗口”地层安全钻井的需要,开展了“液量稳定”控压钻井技术研究。在分析井内压力关系的基础上,指出了当前控压钻井技术存在的问题与不足,提出了“液量稳定”控压钻井方法。该方法以地层压力与井底压力平衡为依据,在钻进中控制循环液量稳定,接单根时关井保持井内液量稳定,起下钻时关井并通过挤压与放出液体方式保证井内液量稳定,达到井内压力平衡要求。通过控制“液量稳定”来达到井底压力与地层压力平衡,是实现平衡压力钻井的一种有效方法。该方法在高压、超饱和、窄密度窗口盐水层钻井中获得成功,并形成了特色钻井技术。提出了实施要点与相关计算方法,为控压钻井技术的研究与应用提供了一种新思路。

关键词:控压钻井 液量稳定 平衡压力钻井 压力控制

中图分类号:TE249 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2013)04-0054-05

"Liquid Volume Stable" Managed Pressure Drilling Method

Zhang Guilin

(Department of Technology & Equipment, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257001, China)

Abstract: In order to satisfy the safety drilling requirements in “narrow density window” formation, “liquid volume stable” managed pressure drilling was investigated. Based on the analysis of wellbore pressure, problems and deficiencies of managed pressure drilling were determined, and “liquid volume stable” managed pressure drilling method was proposed. Based on the balance between formation pressure and downhole pressure, the method involves keeping stable circulation fluid volume during drilling, and pipe connection under shut-in, shut-in during trip and keeping fluid in wellbore stable by squeezing in and releasing liquid, so as to keep pressure in wellbore balanced. By controlling the “liquid volume stable” to achieve balance between bottomhole pressure and formation pressure, is an effective way to achieve balanced pressure drilling. The technique had been successfully used in high pressure, ultra saturated, narrow density window brine formation drilling, forming a special drilling technology. Key points and related calculation method had been put forward, providing a new approach for research and application of managed pressure drilling.

Key words: managed pressure drilling; stable liquid volume; balanced pressure drilling; pressure control

对于安全密度窗口窄的地层,钻井中存在非涌即漏的状况,采用常规钻井技术难以正常钻进。控压钻井技术能够对井底压力进行控制,可以用于油气层保护,也可应用于窄密度窗口地层钻井^[1-4]。但对于地层连通性好的“窄密度窗口”、“非涌即漏”型地层钻井,仍是控压钻井面临的难题。笔者经过分析井内压力,特别是对“窄密度窗口”地层钻井进行了研究,并结合了钻井现场的实际状况,提出并应用了平衡压力钻井的简单控制方法——“液量稳定”控

压钻井方法^[3]。该方法通过控制“液量稳定”来达到井底压力与地层压力的实时平衡,与目前普遍采用的回压泵增压、辅助节流控制、井底测压等方式相比,现场操作简便,方便推广应用。

收稿日期:2012-09-20;改回日期:2013-01-22。

作者简介:张桂林(1959—),男,山东寿光人,1981年毕业于胜利石油学校钻井专业,2008年获石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位,教授级高级工程师,主要从事钻井工程技术管理与研究工作。

联系方式:(0546)8555165,gcczgl@sina.com。

1 控压方案探讨

1.1 井内各压力之间的关系

控压钻井技术是指在控制井筒压力情况下进行钻井,过平衡钻井、近平衡钻井、欠平衡钻井、精细控压钻井和自动(闭环)控压钻井均属于控压钻井技术^[5]。控制井筒压力是通过控制井口套压进行的,因此要清楚井内各种压力的相互关系。

钻井过程中,井内始终有压力,其中大部分来自钻井液静液柱压力。其它还有循环流动阻力、侵入井内的地层流体压力、激动压力、抽汲压力、地面回压等。井内压力是基于 U 形管原理进行分析的,关井期间的压力见图 1。套管与立管压力紧密相关,改变套管压力可以控制井底压力,并影响到立管压力使之产生同样大小的变化^[6]。

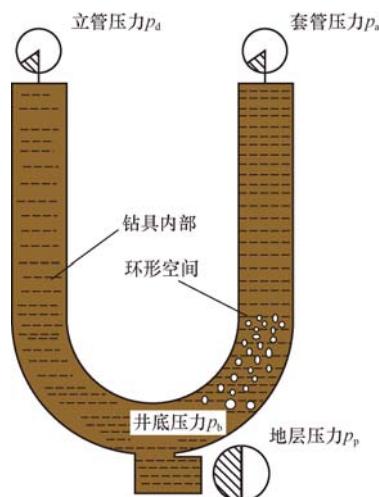


图 1 关井期间井内压力之间的关系

Fig. 1 Pressure relationship during shut-in

控压钻井过程中,井底压力随作业工况不同而变化。

控压钻进时:

$$p_b = p_{ma} + p_{la} + p_{ax} \quad (1)$$

关井起钻时:

$$p_b = p_{ma} + p_{ax} - p_{sb} \quad (2)$$

关井下钻时:

$$p_b = p_{ma} + p_{ax} + p_{sw} \quad (3)$$

式中: p_b 为井底压力, MPa; p_{ma} 为环形空间静液柱压力, MPa; p_{la} 为循环时环形空间压力损失(环空压耗), MPa; p_{ax} 为井口回压, MPa; p_{sb} 为抽汲压力, MPa; p_{sw} 为激动压力, MPa。

由式(1)—(3)可以看出:环空静液柱压力是井

底压力的主要部分,钻井各环节都对井底产生作用;井口回压也是各环节都存在的一个压力,是控压钻井中进行控制和调节的一个压力,不同工况下其值不同;不确定和难以确定的是环空压耗、抽汲压力和激动压力,且 3 个压力各有特点。环空压耗是循环时产生的持续性压力,抽汲压力和激动压力是上提钻具和下放钻具过程中产生的间断性压力。

控压钻井的不同环节,井口回压 p_{ax} 是不同的。在钻井液密度确定的情况下,井底压力的改变主要是通过调节井口回压实现的:钻进和循环过程中,一定排量下的环空压耗是一定的,要改变井底压力就应调节井口回压;接单根(立柱)过程中,环空循环压耗降为 0 MPa,须增大井口回压以补偿环空压耗;起钻中存在抽汲,须在上提钻具过程中增大井口回压;下钻过程中存在激动压力,须降低井口回压。

1.2 井底恒压控压方式

当前国内外控压钻井技术,主要是围绕井底恒压进行控压。控压钻井利用回压来控制井底压力,是基于式(1)实现的^[1]。

控制井底压力时要考虑井筒内诸多因素的影响^[2],其相应的数学表达式为:

$$p_b = f(Q, Q_g, \rho, \mu, p_{ax}, \Delta Q_{KL}, H_{KL}, T_{KL}, D_o, D_i, L, \alpha, \dots) \quad (4)$$

式中: Q, Q_g 分别为液相和气相流量; ρ 为液相密度; ΔQ_{KL} 为地层流体进入井筒量或钻井液漏失量; H_{KL} 为溢流或漏失的深度; D_o 为钻柱外径; D_i 为套管内径或裸眼井径; L 为井深; α 为井斜角。

基于式(1)进行分析,控压的目的是实现对 p_b 的精确控制。国外 Schlumberger 等公司的控压钻井系统,也是对 p_b 进行精确控制,通过节流管汇、回压泵、水力学模型和综合压力控制器协同工作,精确控制井底压力,使井底压力控制在允许范围内。

由于该控压方式研究的是井眼环空系统对井底压力的影响因素,是通过精确控制套压达到对井底压力的精确控制(精细控压),控压的依据是基于对地层压力的预测,控压值的确定是基于现有计算模型,因此井底与地层之间不可避免地存在压差。只要存在压差,对于“窄密度窗口”地层就不能完全满足安全钻井的需要。

1.3 “液量稳定”控压方式

该控压方式是为解决“窄密度窗口”地层安全钻井而进行研究的,通过控制液量稳定实现不同钻井

工况下井底压力与地层压力的实时平衡。现场应用时,无需对井眼系统的压力进行复杂计算,按常用方法大致预测出地层压力即可实施,使平衡压力钻井的计算与控制大大简化。该控制方式下,不同工况下的压力平衡基本关系如下。

钻进时:

$$p_p = p_b = p_{ma} + p_{la} + p_{ax} \quad (5)$$

接单根时:

$$p_p = p_b = p_{ma} + p_{ax} \quad (6)$$

起钻时:

$$p_p = p_b = p_{ma} + p_{ax} - p_{sb} \quad (7)$$

下钻时:

$$p_p = p_b = p_{ma} + p_{ax} + p_{sw} \quad (8)$$

式中: p_p 为地层压力, MPa。

从式(5)—(8)可以看出,“液量稳定”控压方式的原理是井底压力与地层压力平衡,核心是 $p_p = p_b$ 。钻井过程中,控制节流阀保持循环液量稳定,就能实现地层压力与井底压力的实时平衡。实际上,“液量稳定”状态是既不溢流也不漏失的状态,是井底压力与地层压力平衡的地面表现。控制液量稳定,是控制井底压力适应地层压力变化的一种被动控制,就是说要维持井底压力与地层压力的平衡。只要井口回压在安全可控范围内,就能通过控制回压达到井底压力与地层压力平衡,从而保证钻井作业安全。

2 “液量稳定”控压方式的可行性分析

分析式(5)—(8)可知,井内各种压力的确定应以地层压力 p_p 与井底压力 p_b 相等为前提。控压钻井中,环空液柱压力已经确定,需要调整与补偿的压力是循环压耗、抽汲压力和激动压力。与目前普遍采用的回压泵增压、辅助节流控制方式相比,“液量稳定”方法使现场操作简便。钻进时保持循环罐“液量稳定”,起下钻时保持井内“液量稳定”。

2.1 钻进

通过控制套压保持循环罐“液量稳定”(根据井眼容积适时补充钻井液),就能保证井底压力与地层压力平衡。对于“窄密度窗口”地层,如果井底压力与地层压力不平衡,会发生溢流或漏失,液面升高或降低,应实时增加或降低井口回压 p_{ax} 。此时,如果是油层和水层,由于液体基本不可压缩,该控制方法能保证地层流体不会侵入井内,也不会发生漏失。如果地层含气,应通过液气分离器循环排气,并根据

井口回压、返出气体等情况进行分析和调整钻井液密度,以保证液量稳定。

2.2 接单根(立柱)

接单根(立柱)的过程需要停泵、开泵,是井口压力控制的重要环节。接单根(立柱)之前,井内钻井液处于循环状态,压力处于平衡状态。停泵时循环压耗 p_{la} 降为 0,井底压力将小于地层压力。如果保持“液量稳定”,井内压力将仍处于平衡状态:钻进完后,在开泵情况下上提钻具并坐吊卡,然后在停泵的同时迅速关闭节流阀,并关井。对于油水层,由于液体基本不可压缩,关井后地层流体基本不能进入井眼,也不会漏失,此时可接单根(立柱)。如果地层流体含气,可提前适当关小节流阀增大回压,然后停泵关井,防止发生气侵。钻具中接有回压阀,钻井液不会发生倒返问题。接完单根(立柱)开泵,同时将节流阀开至钻进时的开度,井内压力基本能保持平稳,保证钻井正常进行。

2.3 起钻

起钻前,在循环状态下井内处于压力平衡状态,停泵关井后立压、套压都为 p_{ax} (大于钻进时的 p_{ax})。此时井底压力减小了 p_{sb} ,地层流体有进入井眼趋势。由于液体具有不可压缩性,实际上地层流体基本不能进入井眼,从工程角度考虑可以忽略不计。若在关井情况下向井内适当注(挤)入钻井液提高井口回压,地层流体更不能进入井眼。起钻时,采用“先注后起”的方法可以基本达到井内压力平衡、满足起钻要求。具体操作方法是:每柱钻柱上提之前,在关井状态下向环空注(挤)入将要起出钻柱体积的钻井液,然后起出钻柱,再次注(挤)入,再次起出钻柱,……。按此方法起钻,地层与井眼间基本处于压力平衡状态,不会发生溢流与井漏,保证施工安全。

2.4 下钻

下钻时,由于增加了一个作用于井底的激动压力 p_{sw} ,可能发生漏失。采取“先下后放”的方法,可以满足安全下钻要求。具体操作方法是:在关井情况下下入一柱钻柱,然后开节流阀放出与下入钻柱相应体积的钻井液并关井,再次下入钻柱,再次放出钻井液,……,直至下钻完。按此方法控制,地层与井眼间基本处于压力平衡状态。

总之,“液量稳定”控压方式在钻进与接单根(立柱)过程中井底压力与地层压力处于动态平衡状态,

是平衡压力钻井状态；起下钻过程中，每起下一柱钻柱都有钻井液的“临时漏失”，但通过下一柱钻柱的起出和下入钻柱后放出钻井液而恢复，井内压力和“井眼-地层”间流体存在“微量波动”状态。该控压方式能有效防止地层流体进入井眼，即使有少量液体“临时”进入或漏失，也不影响钻井作业的正常进行。土库曼斯坦地层压力系数 2.0 以上、超高矿化度、“非涌即漏”盐水层钻井中应用了该控压钻井方法，钻井液最高密度 2.09 kg/L，控制套压最高 5.8 MPa，实现了安全快速钻井^[3]。

3 实施要点

3.1 方案要点

井控装置 在常规钻井防喷器组合的上部安装旋转防喷器(控制头)，压力等级可与其他防喷器一致，也可按控压要求配置。根据控压钻进井段长度和控压压力，可采用常规井控管汇，也可增加专用控制流程；可采用手动控制节流阀、平板阀，也可采用液动节流阀与平板阀。

钻具组合 采用常规钻具组合，使用钻具回压阀，不使用稳定器。

钻井液 根据地层压力和地层流体性质设计钻井液，其性能应与地层及地层流体配伍，密度设计以钻进中不发生井漏、套压符合控压要求为原则。

压力控制 套压以不大于 5 MPa 为宜，采用手动或液动节流阀、平板阀控制套压。如果套压过高，应提高钻井液密度降低套压。按照钻进、开停泵各环节钻井液液量稳定控制套压，防止地层流体进入井眼。

液面检测 采用仪器监测并加强人工坐岗监测，准确监测钻井液总量。将液面监测显示器连接至节流阀操作处，通过观察液面变化操作节流阀，确保控压钻井正确实施。

阀的操作 接单根(立柱)、起下钻时，应进行节流阀、平板阀开关操作。操作要求是：关闭节流阀时，先完全关闭节流阀后再关闭其后面的平板阀；开启节流阀时，先完全开启平板阀后再开启节流阀。

3.2 操作要点

3.2.1 钻进方式转换

进入相应层位后，注意钻压和钻速变化、蹩跳钻显示，并注意钻井液性能变化和地层岩性变化，发现溢流立即关井，改用控压节流循环流程。

3.2.2 关井参数录取

关井后录取关井立压、套压，确定安全控压值；监测钻井液总量，确定控压液量基准。为方便安全操作与控制，套压不应大于 5 MPa，钻井液量应满足钻进循环需要。

3.2.3 控压参数确定

开泵循环前先完全打开节流阀后面的平板阀，在开泵的同时逐步开大节流阀，找到控压循环液面平衡点。应该力求开泵与开节流阀同步，以减小激动压力的影响。

3.2.4 控压钻进

钻进过程中，观察泥浆池中钻井液液面，按照“不涌不漏”原则操作节流阀，控制套压。若钻井液液面有升高趋势，应适当关小节流阀；若有降低趋势，应适当开大节流阀，保证“液量稳定”。

3.2.5 接单根

接单根时，在不停泵情况下上提钻具至接单根的位置并坐吊卡，然后在停泵的同时，立即关闭节流阀和后面的平板阀；接完单根后，先打开平板阀，在开泵的同时，将节流阀开至钻进时的开度恢复钻进。

3.2.6 换钻头

换钻头起钻前，在控压循环情况下向钻具内注入高密度压井液，在钻具内形成泥浆帽^[7]，使关井立压降为 0。注入压井液长度应大于 H_1 。

$$H_1 = \frac{p_{ax}}{10^{-3}(\rho_{ml} - \rho_m)g} \quad (10)$$

式中： H_1 为注入压井液在钻柱中的长度，m； ρ_{ml} 为注入压井液密度，g/cm³； ρ_m 为原钻井液密度，g/cm³。

关井起钻时，应根据起出每柱钻柱体积先注(挤)入相同体积的钻井液再起钻，以防止发生溢流。注(挤)入钻井液的性能应与钻进时的一致。

3.2.7 “管轻”现象处理

起钻后期，随着钻柱重力的减少，钻柱的浮重不足以克服井口压力造成的上顶力，将出现“管轻”现象^[8]。应根据套压和钻柱截面积计算上顶力，在确保井内钻柱不发生被顶出井口的前提下，暂停起钻。此时钻柱长度应不小于 L 。

$$L = \frac{\pi d^2}{4qg} p_{ax} \quad (11)$$

式中: L 为最小钻柱长度, m ; d 为钻柱外径, mm ; q 为钻柱线密度, kg/m ; g 为重力加速度, m/s^2 。

暂停起钻时,用控压循环法或反挤法向环空注入高密度压井液至套压降为 0,确保开井环空不外溢。之后开井起钻,连续灌入与钻进时性能一致的钻井液,直至起钻完。

若钻柱尺寸不一致,应分段计算钻柱重力,并按压力面积法计算上顶力。

3.2.8 下钻

在无溢流发生时可以开井下钻,下钻至发生溢流后再关井控压下钻。关井下钻过程中,每下完一柱钻柱开节流阀放出与下入钻柱体积相同的钻井液,以防止连续漏失。下钻完毕,恢复控压钻进。

3.2.9 完钻后起钻

完钻后,按照地层压力系数适当附加确定钻井液密度,控压循环至套压降至零,观察不漏失、不溢流方可起钻。如果中途发现溢流,可以关井循环提高钻井液密度,直至套压降为 0。

3.2.10 其他要求

连续钻进 24 h 或进尺超过 200 m 时,应考虑进行短程起下钻。短起下前至少循环 1 周,每次短起下重复老井眼长度不应少于 100 m。

起钻时,控制起钻速度。关井起钻速度不大于 0.2 m/s,开井起钻速度不大于 0.4 m/s;起钻完毕后进行正常电测。

4 结论与建议

1) “液量稳定”控压方法从地层压力与井底压力实时平衡入手,在平衡关系中将二者紧密联系起来(即 $p_p = p_b$)。该方法适合一切可应用控压钻井的地层,而且更适合“窄密度窗口”地层的控压钻井。

2) “液量稳定”方式是对循环液量进行精确控制,井口套压随地层压力变化而变化。与“微流量控制”方式的本质相同,但“微流量”控制方式对监测仪器性能、精度和质量要求高,配套设备复杂,现场实施难度大。

3) “液量稳定”控压方式减少了回压泵增压、辅助节流控制、井底测压以及进出口流量测量等系统,减少了环空循环压耗、起下钻波动压力等复杂计算,控压工艺和配套设备大大简化,现场操作方便。

4) 目前主要靠人工控制解决高压、窄密度窗口盐水层钻井问题,需要进一步研究适用于高压、窄密度窗口油气层的控压钻井技术。同时,需要完善液面监测与节流阀实时自动控制系统,提高自动化精确控制水平。

参 考 文 献

References

- [1] 周英操,杨雄文,方世良,等. PCDS- I 精细控压钻井系统研制与现场试验[J]. 石油钻探技术,2011,39(4):7-12.
Zhou Yingcao, Yang Xiongwen, Fang Shiliang, et al. Development and field test of PCDS-I precise managed pressure drilling system [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(4):7-12.
- [2] 杨雄文,周英操,方世良,等. 控压钻井分级智能控制系统设计与室内试验[J]. 石油钻探技术,2011,39(4):13-18.
Yang Xiongwen, Zhou Yingcao, Fang Shiliang, et al. Design and laboratory test of hierarchical intelligent control system for managed pressure drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(4):13-18.
- [3] 张桂林. 土库曼斯坦亚苏尔哲别油田控压钻井技术[J]. 石油钻探技术,2010,38(6):37-41.
Zhang Guolin. Application of managed pressure drilling technology in Azorse Area, Turkmenistan [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010,38(6):37-41.
- [4] 李群生,朱礼平,李果,等. 基于井下流量测量的微流量控制系统[J]. 石油钻探技术,2012,40(3):23-27.
Li Qunsheng, Zhu Liping, Li Guo, et al. Micro-flow control system based on downhole flow measurement [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012,40(3):23-27.
- [5] 周英操,崔猛,查永进. 控压钻井技术探讨与展望[J]. 石油钻探技术,2008,36(4):1-4.
Zhou Yingcao, Cui Meng, Zha Yongjin. Discussion and prospect of managed pressure drilling technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008,36(4):1-4.
- [6] 集团公司井控培训教材编写组. 钻井井控工艺技术[M]. 东营:中国石油大学出版社,2008:92-93.
Corporation well control training materials for the preparation of the group. Drilling well control technology [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008:92-93.
- [7] 孙凯,梁海波,李黔,等. 控压钻井泥浆帽设计方法研究[J]. 石油钻探技术,2011,39(1):36-39.
Sun Kai, Liang Haibo, Li Qian, et al. Research on mud cap design managed pressure drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(1):36-39.
- [8] 陈永明. 全过程欠平衡钻井中的不压井作业[J]. 石油钻探技术,2006,34(2):22-25.
Chen Yongming. No-killing operations in whole course underbalanced drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34 (2):22-25.