

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2024115

引用格式: 张桂林, 张晓林. “液量稳定”控压钻井技术研究与现场应用[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(6): 16–22.

ZHANG Guilin, ZHANG Xiaolin. Research and on-site application of “stable fluid volume” pressure control drilling technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(6): 16–22.

“液量稳定”控压钻井技术研究与现场应用

张桂林¹, 张晓林²

(1. 中石化胜利石油工程有限公司, 山东东营 257000; 2. 中石化经纬有限公司, 山东青岛 266075)

摘 要: 为了解决现有控压钻井工艺复杂和设备配套多的问题, 并实现平衡压力钻井, 从井内压力平衡的监控与认定方法入手, 分析了井内压力平衡关系和控压钻井现状, 研究了“液量稳定”控压原理、工艺与实现方法, 形成了“恒液面”自动控制技术, 实现了“液量稳定”控压钻进时的自动控制, 钻井现场液面控制精度小于 25 mm; 钻井过程中可以根据循环罐液面变化调节节流阀, 以保持“液量稳定”, 实现井底压力与地层压力的实时平衡, 进行平衡压力钻井。现场应用时, 利用 35 MPa 旋转防喷器, 以井口压力不大于 7 MPa 为原则, 采用人工手动节流控制方法顺利钻穿了压力系数大于 2.0、“零”压力窗口的盐水层和压力系数大于 1.8、“零”压力窗口的灰岩裂缝性气层, 解决了土库曼斯坦阿姆河右岸 B 区块的钻井难题。研究结果表明, 与其他控压方式相比, “液量稳定”控压钻井技术的配套设备简化, 控压工艺简单, 具有较好的现场实用性。

关键词: 液量稳定; 压力平衡; 压力控制方法; 控压钻井

中图分类号: TE249

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)06-0016-07

Research and On-Site Application of “Stable Fluid Volume” Pressure Control Drilling Technology

ZHANG Guilin¹, ZHANG Xiaolin²

(1. Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China; 2. Sinopec Matrix Corporation, Qingdao, Shandong, 266075, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex pressure control drilling technologies and excessive equipment matching and achieve balanced pressure drilling, the monitoring and identification methods of pressure balance in the well were first studied. The in-well pressure balance relationship and the state of pressure control drilling were analyzed. The pressure control principles, processes, and implementation method of “stable fluid volume” were studied, forming the “constant fluid level” automatic control technology to enable automatic control in “stable fluid volume” pressure control drilling. The fluid level control accuracy on the drilling site was maintained within 25 mm. The throttle valve could be adjusted to ensure “stable fluid volume” according to the changes in the circulating tank fluid level during drilling. This facilitated real-time balance between bottomhole pressure and formation pressure and ensured balanced pressure drilling. In on-site applications, a 35 MPa rotary blowout preventer was utilized, with a wellhead pressure not exceeding 7 MPa, and manual throttling control was adopted to successfully drill through the saltwater layer with a pressure coefficient of greater than 2.0 and zero pressure window, as well as the limestone fractured gas layer with a pressure coefficient of greater than 1.8 and zero pressure window, solving the drilling problem in Block B on the right bank of the Amu Darya River in Turkmenistan. Research has shown that compared with other pressure control methods, the supporting equipment of “stable fluid volume” pressure control drilling technology is simplified; the pressure control process is simple, and it has good on-site application value.

Key words: stable fluid volume; pressure balance; pressure control method; pressure control drilling

收稿日期: 2023-03-28; 改回日期: 2024-11-12。

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, 2003 年毕业于石油大学 (华东) 石油工程专业, 2008 年获中国石油大学 (华东) 油气井工程专业硕士学位, 正高级工程师, 主要从事钻井工程技术管理与研究工作。E-mail: gcczgl@sina.com。

控压钻井技术在 20 世纪 60 年代中期已经开始在陆地钻井作业中应用,但没有引起足够的关注。近年来,随着复杂压力系统钻井和对钻井安全的关注,该技术越来越受到钻井决策者的重视,从而得到了快速发展^[1]。目前,控压钻井技术进入了精细控压阶段,已经形成了“恒定井底压力”和“微流量”2 种控制方式:国外,斯伦贝谢公司的 DAPC 系统、哈里伯顿公司的 MPD 系统采用恒定井底压力控压方式,威德福公司的 MFC 系统为微流量控压方式;国内,中国石化的 PCDS 系统、中国石化的三参数自动控压钻井系统等属于恒定井底压力控压方式^[1-4]。与此同时,国内研究了控压钻井分级智能控制系统、多级并关节流管汇系统、自动分流管汇系统、回压调控方法及双梯度控压钻井井筒多相流动规律^[5-9]。上述研究和应用,在一定程度上解决了窄压力窗口控压钻井的问题。但是,“透镜体”盐水层、灰岩裂缝-孔洞型储层等“零”压力窗口地层地层连通性强,只有井底压力与地层压力处于实时平衡状态才能进行钻井作业,以压力变化作为控制依据钻进时,仍然发生溢流或漏失,难以满足安全高效钻井要求。因此,只有改变以压力变化作为控制依据的技术方法,才能解决“零”压力窗口的安全钻井问题。基于这种认识,笔者研究形成了以“液量稳定”作为控制依据的控压钻井技术,并在钻进高压盐水层和高压气层过程中进行了应用。

1 井内压力平衡及控制技术

1.1 井内压力关系

钻井过程中,地层压力与井底压力的关系决定着钻井能否正常进行。地层压力是地层孔隙中流体具有的压力,地层流体为油、气、水或者是其混合流体。井底压力是井内流体作用于井底的压力,其中大部分来自钻井液静液柱压力,其他还有循环流动阻力、激动压力、抽汲压力和井口回压等^[10]。地层发生漏失时能够承受的最高井底压力称为漏失压力,漏失压力与地层压力的差值称为压力窗口。控压钻井针对的是窄压力窗口地层,地层破裂压力和坍塌压力问题不突出。

控压钻井是在井内液柱压力小于地层压力情况下进行的,钻井过程中通过控制套管压力(套压)达到动态平衡,目的是保护油气层、提高钻井作业效率。若在此状态下关井,可采用 U 形管原理分析井内压力。关井后井内压力达到平衡时,井内压力关

系如图 1 所示。

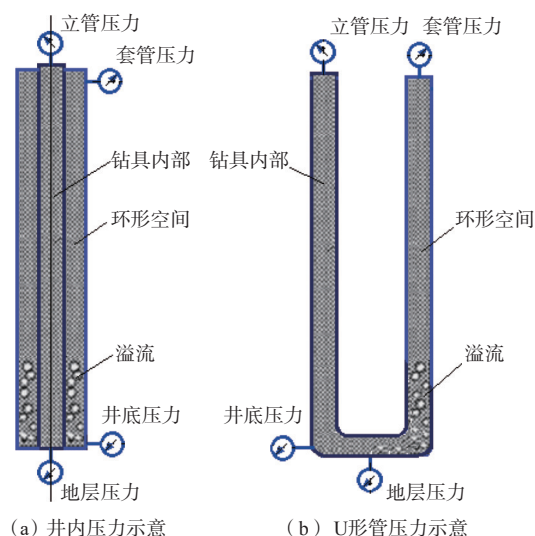


图 1 关井期间井内压力关系示意

Fig.1 Pressure relationship in well during shut-in period

井内压力关系可以表示为:

$$p_b = p_d + p_{md} = p_a + p_{ma} = p_p \quad (1)$$

式中: p_b 为井底压力, MPa; p_d 为关井立管压力(立压), MPa; p_{md} 为钻柱内静液柱压力, MPa; p_a 为环空内静液柱压力, MPa; p_{ma} 为关井套管压力, MPa; p_p 为地层压力, MPa。

井底压力与地层压力的关系决定着井内溢流、漏失或平衡等状态。套压与立压密切相关,可以通过改变套压控制井底压力,并使立压随之产生变化。控压钻井时,通过控制套压来控制井底压力,使其与地层压力相平衡,并在此状态下进行钻井作业。

1.2 压力平衡的确认

1.2.1 控压方式现状

国内外形成的“恒定井底压力”和“微流量”2 种控制方式其自身都存在固有的问题。恒定井底压力方式以实现井底压力恒定为目的,通过使用旋转防喷器、节流管汇、回压泵、流量计、随钻井底压力测量系统(PWD)等设备仪器,利用水力学模型计算水力参数,将井底压力控制在设定的范围内。这种控制方式是根据设计地层压力确定控压钻井中的井底压力,不可避免地存在预测误差,并且难以建立井底压力与各影响因素的数学模型,精确计算井底压力,钻井过程中井内压力难以达到平衡。

微流量控压方式是通过监测钻井液进出口流量进行控压的一种方式。该控压方式下,当井口返出量大于泵入量时,通过提高井口压力,提高井底压

力,限制地层流体进入井眼。该控压方式具有流量变化直观的优点,但根据流量计测量结果的变化进行判定,误差难以避免。同时,该控压方式的配套设备复杂,流量的测量控制要求高,现场实施难度大。

现有控压钻井方式难以确认压力平衡状态,不能进行精确控制。鉴于此,应研究形成井内压力关系清晰、压力平衡状态直观、设备配套简单、作业操作简便的控压钻井新方法,解决窄压力窗口地层的钻井难题。

1.2.2 压力平衡的确认

井内压力平衡是指井底压力与地层压力的平衡。平衡状态下,井内既不溢流也不漏失,循环液量既不增加也不减少。对于“零”压力窗口地层,是2个压力实时相等的状态;对于存在压力窗口的地层,则是二者的差值不大于 Δp 的状态;不平衡状态下,井下会发生溢流或漏失,循环液量将会增大或减小。因此,可以采用监测循环罐液面变化的方法,确认井内压力的平衡状态。

这种监测确认方法已经在井控工作中得到了认可。钻井队配备循环罐液面检测装置,同时人工“坐岗”监控循环液面变化,就是为了及时发现溢流和漏失,确认井内压力的平衡状态,从而采取相应的处理措施。

1.3 压力平衡控制方法

液面变化反映了井内压力的平衡状态,保持液面稳定,则能保持压力平衡。在井口压力安全可控的前提下,根据循环罐液面变化调节节流阀保持循环状态下的“液量稳定”,就能保证井内的压力平

衡。这种方法是根据液量变化而不是根据套压变化进行压力控制,控压原理与其他方法完全不同。

采用“液量稳定”方法控制井内压力,能使井内压力始终处于平衡状态,形成平衡压力钻井技术。该控制方法对预测地层压力的准确性要求不高,根据钻进中的溢流显示控制液面稳定,就能实现地层压力与井底压力的平衡。

同时,该方法不需要井底压力测量系统、进出口流量计,也不需要回压泵进行回压补偿,可以消除井底压力、井下微流量和进出口流量测量及循环摩阻计算误差对控压的影响,现场适用性强。

2 “液量稳定”控压技术

“液量稳定”控压技术适合各种压力窗口情况下井内压力平衡的控制,对于“零”压力窗口地层也更具优势、更加适用,并且设备配套简单,循环流程与控制简便。

2.1 设备组成与循环流程

常规控压方式一般都要配备旋转防喷器、钻井液进出口流量计、井下PWD系统、地面回压泵和套压监测控制系统等,设备组成与压力控制操作流程非常复杂。“液量稳定”控压方式只需旋转防喷器、节流管汇和液面监测系统就能进行平衡压力钻井,设备组成大大简化,实现了控压钻井设备配套与操作的简单化(见图2)。

控压钻进循环流程中,钻进时关闭旋转防喷器,打开循环流程的节流阀、闸(平)板阀,钻井液从

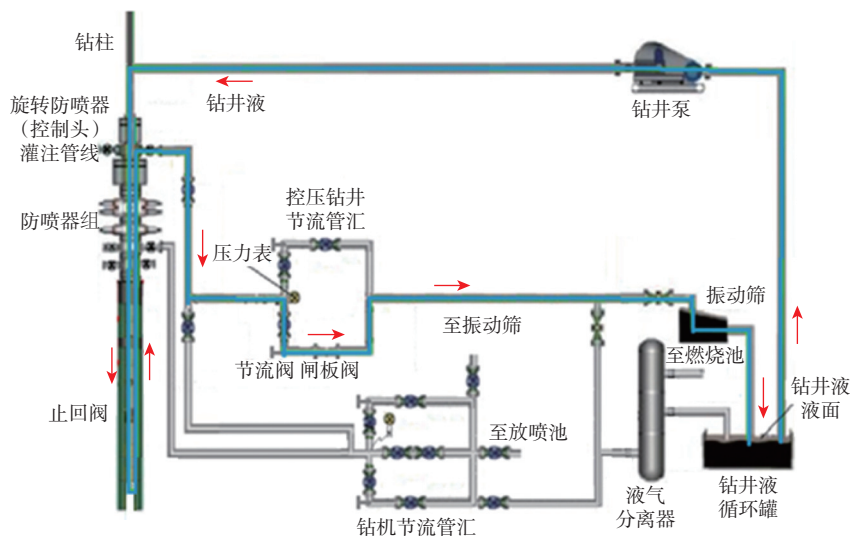


图2 控压钻进时钻井液循环流程示意

Fig.2 Drilling fluid circulation process during pressure control drilling

循环罐通过钻井泵注入井内,经钻柱内部到达井底并经井眼环形空间返至井口到达节流管汇,经节流阀后到达振动筛并返回循环罐,完成一个循环周。

循环过程中,如果未发生钻井液漏失,也未发生地层流体侵入井内造成溢流,钻井液循环罐中的液面保持稳定;否则,液面将降低或升高。钻进时套管压力的高低由地层压力与井底压力的差值引起,如果二者差值过大,导致套压超过允许值时,应提高钻井液密度、降低套压,确保安全钻进。

2.2 技术要点

“液量稳定”控压技术适用于各种复杂压力系统地层,在“零”压力窗口更具独特优势^[11-13]。在不同压力窗口地层中应用时的技术要点有所不同。

2.2.1 正(窄)压力窗口层位

井底压力与地层压力之间存在压力窗口 Δp ,但窗口较窄,不能满足近平衡钻井要求,需要采用控压钻井技术。

1) 钻进。根据循环罐液面变化调节节流阀,保持液面稳定,压力平衡关系的计算公式为:

$$p_{b\max} = p_p + \Delta p = p_{ma} + p_{la} + p_{ax} + \Delta p \quad (2)$$

式中: $p_{b\max}$ 为最大井底压力, MPa; Δp 为井底压力与地层压力的最大差值, MPa; p_{la} 为循环时井眼环形空间压力损失(环空压耗), MPa; p_{ax} 为井口回压(套压), MPa。

若钻进时套压超过允许安全值,可循环加重钻井液,降低套压。

2) 接单根(立柱)。上提钻具,停泵,关闭节流管汇,在关井情况下连接钻具。

3) 开泵。接完单根(立柱)后,开泵,同时打开节流阀,待液量稳定后,继续钻进。

4) 起钻。循环加重钻井液,将套压降至 0 MPa,井内压力达到平衡,敞井口起钻,连续灌入钻井液。若中途发生溢流,可提高钻井液密度,待压力达到平衡时再起钻;或保持套压稳定下入钻柱,每柱放出与下入钻柱排代体积相同的钻井液,下至更大深度后,再进行循环处理。

5) 下钻。开始敞井口下钻,若中途发生溢流,可保持套压稳定,边下入钻具边放出钻井液,继续下钻,或关井循环加重钻井液后敞井口下钻。

6) 恢复钻进。下钻到底后开泵循环,按“液量稳定”控压方法恢复钻进。

因存在压力窗口 Δp ,钻进时在保持循环液量稳定的情况下,套压可有 Δp 幅度的变化。

2.2.2 “零”压力窗口层位

井底压力与地层压力之间没有压力窗口($\Delta p = 0$),需要井底压力与地层压力达到平衡,才能循环与钻进。“液量稳定”控压技术能够解决这个问题,实现平衡压力钻井。

1) 钻进。控压方法与上述相同,因没有压力窗口,计算公式如下:

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

2) 接单根(立柱)。与上述方法相同。

3) 开泵。接完单根(立柱)后开泵,与上述方法相同。

4) 起钻。停泵后套管压力由钻进时的 p_{ax} 升高至 p'_{ax} ,但应在允许值以内。采用“先挤后起”灌入钻井液方式,关井带压起钻,保持井内压力平衡。起钻至出现“管轻”现象前,循环(或平推)形成重浆帽,套压降至 0 MPa 后可敞井口起钻。起钻时灌入钻井液变化曲线如图 3 所示。

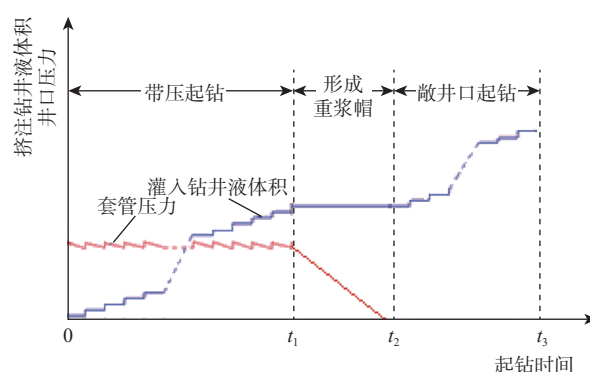


图 3 起钻“先挤后起”灌入钻井液曲线

Fig.3 Drilling fluid injection curve of "squeezing first and then pulling out"

图 3 中, 0 至 t_1 时刻为开始带压起钻“挤注”灌入钻井液阶段, 灌入总量逐步增加。挤注时套管压力有微小波动, 总体保持不变; t_1 至 t_2 时刻为处理“管轻”现象阶段, 循环加重钻井液或平推注入重浆, 形成重浆帽, 套压逐步降至 0 MPa^[14-16]; t_2 至 t_3 时刻为套压降至 0 MPa 后敞井口起钻阶段, 连续灌入钻井液。

采用“先挤后起”灌入钻井液方式, 在起出一柱钻柱前, 将与起出钻柱体积等量的钻井液注入井内使其进入地层, 随着钻柱起出又返回到井内, 处于动态平衡状态。这样, 只有钻井液暂时进入地层而没有地层流体进入井眼, 总体既无溢流又无漏失。

5) 下钻。开始下钻阶段可敞井口下钻, 下钻至

出现溢流后,采用“先下后放”逐次放出钻井液的方法,关井下钻;随着重浆帽返出完,套压升至 p'_{ax} 。下钻时返出钻井液的体积及井口压力的变化曲线如图4所示。

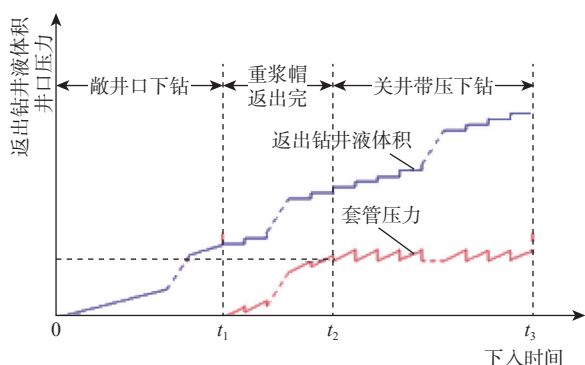


图4 下钻“先下后放”放出钻井液的曲线

Fig.4 Drilling fluid release curve of "first run and then release"

图4中,0至 t_1 时刻为无溢流敞井口下钻阶段,重浆帽钻井液返出井口; t_1 至 t_2 时刻为发生溢流关井阶段,返出重浆帽混浆钻井液; t_2 至 t_3 时刻为关井下钻阶段,返出正常密度钻井液。因压力窗口为0 MPa,下钻时套管压力波动很小。

采用“先下后放”放出钻井液的方法时,钻柱下入过程中钻井液将进入地层,进入量与下入钻柱排代体积相等。下完一柱后,打开节流阀放出与下入钻柱排代体积等量的钻井液,进入地层的钻井液又回到井内,直至下钻完。这样操作,井内压力始终处于动态平衡状态,既不会发生地层流体进入井眼,又不会发生漏失而大量消耗钻井液。

6)恢复钻进。下钻到底后,采用液量稳定控压方法恢复钻进。

因地层压力窗口 $\Delta p = 0$,液面变化直观反映了压力平衡状况。因此,控压钻进时以循环液量稳定作为控压依据,而不是根据套压变化进行控制。

2.2.3 气层或含气地层

一般认为,在气层或含气地层实施控压钻井风险很大,限制了控压钻井技术的应用。实际上,只要掌握了压力平衡控制方法和气体进入井内后的变化状态,仍然可以实施控压钻井。

1)钻进。控压方法与上述相同,应保持“最长时间”的循环状态,防止形成气体“集中段”。

2)接单根(立柱)。与上述方法相同。

3)起下钻。与“零”压力窗口层位操作方法相同,如果井内已经形成气体段时,可采用二次循

环压井法(司钻法)排除气体。

4)恢复钻进。下钻到底后,循环一周排出钻井液中的气体,然后转入“液量稳定”控压方法循环钻进。

对于气层和含气层位,只要井内压力处于平衡状态,除钻屑气和井壁扩散气外,地层气体不会继续进入井内,不影响控压钻井的实施。即使是存在液气置换问题的裂缝-孔洞型高压气层,只要重视除气、套压变化、保持循环和钻井液密度等问题,完全可以应用控压钻井技术^[13]。

从上述可知,“液量稳定”控压方式能满足不同地层流体、不同压力窗口和不同钻井工况的平衡压力控制要求,只要节流控制套压 p_{ax} ,使循环罐液量保持稳定,就能进行控压钻井。油层和水层因液体基本不可压缩很容易实施;含气地层或气层同样可以实施,能满足各类地层控压钻井的需要。

2.3 自动控制技术

为提高工艺自动化水平,研发了平衡压力钻井自动控制系统,研究了液面检测和节流阀动作的联动自动控制技术,完善了平衡压力钻井工艺,形成了钻进中的自动控制钻井技术,实现了钻进中“液量稳定”控制的自动化。

硬件控制系统采用高精度(精度2 mm)雷达液位计数据采集系统、NI-CompactRIO控制器和电液伺服系统,实时检测循环罐液面,并转化为节流阀控制指令。依据液面变化信息,通过电液伺服控制系统自动控制节流阀,保持液面恒定。与人工控制相比,自动控制方式对压力平衡的控制更加精细、准确,实时性更强,其技术要点主要包括以下几个方面:

1)发现溢流,停泵关井。

2)观察套压,确定下一步操作。如果套压在允许范围内(如不大于7 MPa),开泵节流循环,开始控压钻进;如果套压过高(如大于7 MPa),可提高钻井液密度循环一周降低套压,然后开始钻进。

3)钻进准备。启动液面监测、节流控制系统,将系统调整为自动控制状态。开泵循环,逐步增大排量至正常钻进排量,观察系统运行情况,达到循环中液面稳定状态。

4)钻进。按设计参数开始钻进,系统将根据循环罐液面变化自动调节节流阀开度,保持液面稳定,连续钻进。

接单根(立柱)、起钻灌钻井液与下钻放出钻井液时节流管汇的开关,目前尚需人工操作。

3 现场应用与自动控制试验

土库曼斯坦阿姆河右岸 B 区块的目的层是盐膏层下部的油气层, 巨厚盐膏层中夹含着压力系数 2.0 以上的高压、超高矿化度盐水层, 而目的层为压力系数大于 1.8 的裂缝-孔洞型灰岩地层, 都属于高压、“零”压力窗口层位。该区块 2008 年以前共钻井 130 口, 报废 106 口, 报废井比例达 81.54%。通过应用“液量稳定”控压钻井技术, 解决了该地区的钻井难题, 形成了配套技术。

3.1 人工手动操作

土库曼斯坦阿姆河右岸地区先后完成了 14 口井的钻井, 4 口井钻遇高压盐水层, 2 口井钻遇高压气层, 2 口井钻遇“软盐层”, 采用人工手动操作控制“液量稳定”的方式进行了控压钻井, 达到了安全钻井要求。

3.1.1 盐水层段

该地区的盐水层(该地区有 2 套盐水层)处在巨厚盐膏层的盐层中, 可能因石膏层脱水形成。第一层深度约 2 450 m, 压力系数 2.0 左右; 第二层深度约 2 750 m, 压力系数 2.1 以上。2 套盐水层压力系数不同, 需采用“专打专封”的方案, 不能一次钻穿。

为防止井漏失去循环, 钻井中调整钻井液密度至设计下限钻开盐水层, 力求首先发现溢流而不能发生漏失。钻遇盐水层发生溢流后, 立即关井并安装旋转防喷器胶芯。观察套压不大于 7 MPa 时, 节流控制循环罐液面稳定控压钻进; 若大于 7 MPa, 提高钻井液密度循环一周降低套压, 确保不漏, 并且尽可能降低套压。

4 口井钻进时套压控制在 0~6 MPa, 关井最高套压达 7.5 MPa, 施工安全顺利。同时, 还形成了盐水层“自结晶”堵漏技术。

2 口井钻遇盐水层段为“软盐层”, 采用控压方法并适当提高钻井液密度循环降温, 促使软盐层硬化固化形成井眼, 预防了软盐层蠕动卡钻问题的发生。

3.1.2 目的层段

目的层为盐膏层下部灰岩裂缝性-孔洞型高压气层, 气层深度大于 3 600 m, 压力系数大于 1.8。B-P-102D 井四开采用 $\phi 215.9$ mm 钻头钻至井深 3 784.93 m 时, 发生溢流, 压井时又发生漏失。采用常规方法处理 50 d 多, 堵漏与压井 17 次, 漏失钻井液 1 910 m³, 被迫注水泥封井, 暂时停工。

停待 295 d 后, 采用“液量稳定”方式恢复钻

进。同样, 钻井液密度调整至设计下限钻开气层, 严防漏失。发生溢流关井后, 安装旋转防喷器胶芯, 通过液气分离器流程节流循环排气点火, 控制回流钻井液“液量稳定”进行钻进, 顺利钻至井深 4 093 m 完钻, 下入 $\phi 139.7$ mm 尾管完井后, 采用 $\phi 14.3$ mm 油嘴测试, 日产天然气 102.5×10^4 m³, 伴随产出凝析油 53.5 m³。

该区块“零”压力窗口高压盐水层和高压气层的成功钻井与完井, 验证了“液量稳定”控压钻井技术的科学性与适用性。

3.2 自动控制现场试验

胜利油田胜 2-斜 105 井进行了“恒液面”自动控制现场试验。试验时, 循环排量 20 L/s, 钻井液密度 1.08 kg/L, 控制套压在 0~4.0 MPa, 液面控制精度小于 25 mm, 液量变化小于 0.50 m³, 液位控制平稳。

研究与试验证明, 该系统手动与自动控制可进行无缝切换, 切换过程中压力与液面平稳, 既能够满足窄(“零”)压力窗口地层平衡压力钻井中液位控制需要, 也满足井控安全要求, 达到了预期效果。

4 结论与建议

1) “液量稳定”控压钻井方法的井内压力平衡关系清晰、平衡状态直观、控压工艺简便, 并可大大简化相关计算。只要保持循环中液量稳定、井口压力安全可控, 就能进行平衡压力控压钻井, 具有较好的适应性。

2) “液量稳定”是井底压力与地层压力平衡的直观现象, 也是控制井底压力适应地层压力变化的结果。地层流体为油、水类液体时, 因其不可压缩, 控制平衡的方法简单直观; 地层流体为气体或含有气体时, 按照二次循环压井法(司钻法)排出溢流, 控制方法同样简单直观。

3) “液量稳定”控压钻进过程的自动控制技术使控制精度和技术水平进一步提高, 为各类窄(“零”)压力窗口地层钻井提供了自动化控压手段。

4) 建议进一步研究完善接单根(立柱)、起下钻时的自动控制方法。

参 考 文 献

References

- [1] 周英操, 刘伟. PCDS 精细控压钻井技术新进展[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 68-74.

- ZHOU Yingcao, LIU Wei. New progress on PCDS precise pressure management drilling technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 68–74.
- [2] 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.
- [3] 孔祥伟, 林元华, 邱伊婕. 微流量控压钻井中节流阀动作对环空压力的影响[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(3): 22–26.
- KONG Xiangwei, LIN Yuanhua, QIU Yijie. Effect of choke valve action on annular pressure with micro-flux control in MPD drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(3): 22–26.
- [4] 李宗清, 燕修良, 陈永明, 等. 三参数自动控压钻井系统的研制与试验[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(6): 99–103.
- LI Zongqing, YAN Xiuliang, CHEN Yongming, et al. Development and test of three-parameter automatic pressure control drilling system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(6): 99–103.
- [5] 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.
- [6] 张涛, 柳贡慧, 李军, 等. 精细控压多级并联节流管汇系统研究[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(2): 98–103.
- ZHANG Tao, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Research on multi-level parallel choke manifold system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(2): 98–103.
- [7] 郝凤亮, 徐朝阳, 马金山, 等. 控压钻井自动分流管汇系统设计与数值模拟研究[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(5): 23–29.
- XI Fengliang, XU Chaoyang, MA Jinshan, et al. Design and numerical simulation of an automatic diverter manifold in managed pressure drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(5): 23–29.
- [8] 王果. 基于三级反馈调节的控压钻井回压自动调控方法[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(4): 441–447.
- WANG Guo. Automatic backpressure control techniques of MPD drilling based on three-layer feedback regulation method[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(4): 441–447.
- [9] 蒋振新, 李军, 郭勇, 等. 井下双梯度控压钻井井筒多相流动规律[J]. *断块油气田*, 2024, 31(5): 936–944.
- JIANG Zhenxin, LI Jun, GUO Yong, et al. Multiphase flow law in wellbore during downhole dual-gradient controlled pressure drilling[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2024, 31(5): 936–944.
- [10] 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.
- Compilation Group of Well Control Training Textbooks for Group Companies. Drilling well control technology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2008: 92–93.
- [11] 张桂林. 土库曼斯坦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 Guilin. Application of managed pressure drilling technology in Azores Area, Turkmenistan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(6): 37–41.
- [12] 张桂林. “液量稳定”控压钻井方法[J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(4): 54–58.
- ZHANG Guilin. “Liquid volume stable” managed pressure drilling method[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(4): 54–58.
- [13] 张桂林. 土库曼斯坦阿姆河右岸B区块钻井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(6): 1–6.
- ZHANG Guilin. Key drilling technologies in the block B at the right bank of Amu Darya, Turkmenistan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(6): 1–6.
- [14] 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.
- [15] 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 of managed pressure drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(1): 36–39.
- [16] 彭明佳, 刘伟, 王瑛, 等. 精细控压钻井重浆帽设计及压力控制方法[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(4): 16–19.
- PENG Mingjia, LIU Wei, WANG Ying, et al. Design of heavy grout and pressure control method for fine pressure-control drilling[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(4): 16–19.

[编辑 滕春鸣]