

◀“863”计划专栏▶

用于处理深水浅层气的动力压井方法研究

徐 鹏¹ 孙宝江¹ 董玉杰² 高永海¹

(1. 中国石油大学(华东) 石油工程学院,山东 东营 257061;2. 泰山学院 经济管理系,山东 泰安 271021)

摘要:深水海底常常潜伏着大量的高压浅层气,而深水钻井过程中钻遇浅层气是十分危险的。结合动力压井方法对如何处理浅层气问题进行了研究。首先根据海上钻井工艺的技术特点,结合动力压井工艺进行了探讨,得到了深水钻井过程中处理浅层气的工艺技术。然后以此为基础,考虑有隔水管情况下井筒内的多相流动情况,建立了动力压井参数计算多相流方程,并进行了求解。计算结果表明,动力压井初期阶段,伴随着浅层气体积膨胀,动力压井排量会有所增加,当浅层气逐渐排出井筒后,钻井液排量会有所下降,直至达到稳定值。在实际的动力压井过程中,为了保证井壁的稳定性,应适时对压井排量进行调整。

关键词:深水钻井;浅层气;井喷;压井

中图分类号:TE28 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)01-0011-05

深水海底常常潜伏着大量的高压浅层气^[1-3],钻遇浅气层时,往往不仅没有技术套管,而且没有下表层套管,所以无法安装防喷器系统,而在这种情况下是十分危险的。同时,由于海水的存在,海底岩层的压实程度小于陆上(即海上地层破裂压力梯度小于陆上),海水深度越大,二者的差别越大。因此,与陆上相比,深水地层更容易被压裂。此时,利用高密度钻井液及常规的借助井口装置产生回压来平衡地层压力的压井方法就不再适用。动力压井^[4-7]作为一种非常规压井方法,并不是借助井口装置产生回压来平衡地层压力,而是借助流体循环时克服环空流动阻力所需的井底压力来达到与地层压力的平衡,这为有效解决深水地层低破裂压力梯度及高压浅层气问题提供了可能。为此,笔者根据海上钻井工艺技术特点,对用于处理深水浅层气问题的动力压井方法进行了探讨,研究了用于处理深水浅层气问题的动力压井工艺,并在此基础上考虑了有隔水管情况下井筒内的多相流动情况,建立了多相流动控制方程组,并利用该理论及计算方法对动力压井实例进行了计算和分析。

1 动力压井方法的基本原理

动力压井法是Mobil公司首先提出的一种新方法,其最早只应用于陆上压井作业。该方法作为一种非常规压井方法,其基本原理是:以一定的流量泵

入低密度压井液,使井底的流动压力等于或大于地层孔隙压力,从而阻止地层流体进一步侵入井内,达到“动压稳”状态;然后逐步替入加重压井液,以实现完全压井的目的,达到“静压稳”状态。它并不是通过使用高密度钻井液来达到压井的目的,而是通过增加排量,使流体循环时的摩阻增大,借助环空摩阻和静液压力来平衡地层压力。动力压井法的环空流动压降均匀分布在整个井身长度上,而常规压井的回压作用在整个井身的每一点上,也就是说动力压井法将产生较小的井壁压力。这个特点可以很好地解决浅层气压力高、地层破裂压力低等难题。在实际的海上作业时,可以直接采用海水做压井液,通过增大单位时间内海水的注入量来实现压井目的。

2 用于处理深水浅层气的工艺技术

2.1 浅层气检测及处理技术

受地理环境限制,海上钻井时,高密度钻井液储

收稿日期:2009-05-12; **改回日期:**2009-11-23

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“深水钻完井关键技术”(编号:2006AA09A106)部分研究内容

作者简介:徐鹏(1982—),男,山东淄博人,2005年毕业于潍坊学院计算机科学与技术专业,2008年获中国石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位,在读博士研究生,主要从事油气井岩石力学方面的研究工作。

联系方式:(0546)8393754,xupg1982@163.com

备并没有陆上那么充足。同时,由于地层破裂压力低,钻井液密度安全窗口比较窄,因此建议采用海水做压井液来处理浅层气引发的井喷事故。进行动力压井施工时,可以通过增加海水注入量来增加井筒内的环空摩阻压耗,使井底流动压力升高以平衡地层压力,从而达到压井目的。

钻进期间如果发现钻遇浅层气,应立即停止钻进,循环观察,尽可能维护井眼平衡。作业者和平台经理及有关人员,应立即评价井眼的情况,根据评价结果,按下列程序处理,同时向基地报告情况:

- 1) 如出现冒气泡、微小气流情况,可钻 3 m 新地层后再循环观察,如果气泡、气流增加,进入下步,否则继续钻进;

- 2) 如有大的气流出现,就应尽可能快地大排量注入海水压住气流,然后与基地讨论下步处理方案;

- 3) 如有极大的气流出现,危及平台和作业人员的安全时,就应释放下风下流方向的锚链,拉动相对应的锚链,向上风上流方向把平台移离井位;同时,迅速大排量泵入海水,如果极大气流得到控制,可按第 2) 步进行,否则继续大排量泵入海水。

由于海上钻井初期阶段没有安装防喷器系统,为了更好地处理浅层气问题,获得更好的压井效果,在条件允许的范围内,应尽量选择大尺寸的钻具组合。这样就可以有效缩小环空的横截面积,获得更大的环空摩阻,有利于动力压井方法的顺利实施。

在动力压井过程中,井筒内的情况是不断变化的,因此,还需要根据情况对排量进行调节,调节过程需要借助计算机模拟来完成。利用计算机充分模拟动力压井阶段井筒内压力随时间的变化状况,精确计算排量随时间变化的改变量,可以使压井过程更加合理、安全。

2.2 动力压井的一般步骤

针对深水海底高压浅层气所处位置“浅”的特点,可以采取以下步骤进行动力压井操作:

- 1) 结合现场数据,计算动力压井参数,包括压井液密度、排量、泵功率等;若地层破裂压力低,可直接采用海水做压井液;

- 2) 通过钻杆将压井液以计算好的排量或以井底压力不致超过地层破裂压力的排量泵入井内;

- 3) 压井过程中,应根据模拟计算的结果,动态调节压井液排量,以保持井壁稳定;

- 4) 浅层气完全排出井筒、成功压井后,注水泥塞封住高压浅层气地层;

- 5) 重新钻至浅气层顶部,停钻、固井,安装防喷器;

- 6) 选用密度合适的钻井液,钻穿浅层气,继续钻井作业。

如果平台着火,首要的问题是人员安全,要有秩序地安全撤离。然后组织灭火并通过打救援井处理事故。救援井钻成之后,可用酸化和压裂法使两井沟通。沟通后就可按上述步骤实施压井。

3 动力压井参数计算及多相流控制方程

3.1 动力压井参数计算

3.1.1 动力压井所需排量计算

动力压井所需排量的计算原则是:在该排量下,井内的流动循环摩阻加液柱压力略大于地层压力。初始压井液一般采用低密度液体,加大排量,以弥补密度降低所减小的液柱压力,海上压井时为了便利可直接采用海水。目前,单相流体条件下的排量计算公式已经非常完善,而对多相流动条件下排量计算公式的研究还不够深入。笔者利用多相流计算公式对动力压井排量进行计算,计算用到的基本公式如下:

$$p_{wf} = \rho_{\text{混合}} gh + \frac{f \rho_{\text{混合}} v_{\text{混合}}^2}{g R} L \quad (1)$$

$$v_{\text{混合}} = v_{zl} + v_{zg} + v_{zc} = \frac{4(q_l + q_g + q_c)}{\pi d^2} \quad (2)$$

$$\rho_{\text{混合}} = \frac{q_l \rho_l + q_g \rho_g + q_c \rho_c}{q_l + q_g + q_c} \quad (3)$$

式中, p_{wf} 为井底压力, MPa; $\rho_{\text{混合}}$ 为流体混合密度, kg/m^3 ; $v_{\text{混合}}$ 为混合流体流速, m/s ; f 为摩擦系数, 无因次; L 为流体流程, m ; R 为水力半径, m ; q_l 、 q_g 、 q_c 分别为井筒内液相、气相及固相流量, m^3/s ; d 为过流断面直径, m ; ρ_l 、 ρ_g 、 ρ_c 分别为液相、气相及固相密度, kg/m^3 。

将式(1)、(2)、(3)联立,代入井筒多相流动方程,便可求得需要的动力压井排量。

3.1.2 动力压井液密度计算

由于此处考虑多相流动情况,所以并不能像单相流动情况下那样直接给出密度计算公式。由于海底地层破裂压力低,此处只根据地层破裂压力 p_f 和浅层气压力 p_T 计算两个压井液密度极值 $\rho_l = \frac{p_f}{9.8H}$ 、

$\rho_2 = \frac{p_f}{9.8H}$, 然后取两者之中的一个作为压井液密度上限, 在该上限范围内, 选择多个密度值代入多相流动方程, 计算相应的排量, 从而根据实际情况进行参数优选。考虑到海上钻井的特殊情况, 可以直接用海水做压井液。

3.2 动力压井多相流动方程

钻穿浅层气高压地层时, 浅层气及地层中其他物质会侵入井筒内, 井筒环空中既含有浅层气、钻井液和岩屑, 也可能含有地层产出的水。因此, 在动力压井过程中, 井筒环空内为多相混合流体。

3.2.1 连续性方程

1) 井筒内环空连续性方程

气相:

$$\frac{d}{dt}(AE_g\rho_g) + \frac{d}{ds}(AE_g\rho_g v_g) = 0 \quad (4)$$

钻井液:

$$\frac{d}{dt}(AE_m\rho_m) + \frac{d}{ds}(AE_m\rho_m v_m) = 0 \quad (5)$$

岩屑:

$$\frac{d}{dt}(AE_c\rho_c) + \frac{d}{ds}(AE_c\rho_c v_c) = 0 \quad (6)$$

产出水:

$$\frac{d}{dt}(AE_w\rho_w) + \frac{d}{ds}(AE_w\rho_w v_w) = 0 \quad (7)$$

2) 隔水管段连续性方程

气相:

$$\frac{d}{dt}(A'E_g\rho_g) + \frac{d}{ds}(A'E_g\rho_g v_g) = 0 \quad (8)$$

钻井液:

$$\frac{d}{dt}(A'E_m\rho_m) + \frac{d}{ds}(A'E_m\rho_m v_m) = 0 \quad (9)$$

岩屑:

$$\frac{d}{dt}(A'E_c\rho_c) + \frac{d}{ds}(A'E_c\rho_c v_c) = 0 \quad (10)$$

产出水:

$$\frac{d}{dt}(A'E_w\rho_w) + \frac{d}{ds}(A'E_w\rho_w v_w) = 0 \quad (11)$$

3.2.2 动量方程

井筒内环空:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt}(AE_g\rho_g v_g + AE_m\rho_m v_m + AE_w\rho_w v_w + AE_c\rho_c v_c) + \\ & \frac{d}{ds}(AE_g\rho_g v_g^2 + AE_m\rho_m v_m^2 + AE_w\rho_w v_w^2 + AE_c\rho_c v_c^2) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & Ag \cos \alpha (E_g \rho_g + E_m \rho_m + E_w \rho_w + E_c \rho_c) + \\ & \frac{d(Ap)}{ds} + A \left| \frac{dp}{ds} \right|_{fr} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

隔水管:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt}(AE_g\rho_g v_g + AE_m\rho_m v_m + AE_w\rho_w v_w + AE_c\rho_c v_c) + \\ & \frac{d}{ds}(AE_g\rho_g v_g^2 + AE_m\rho_m v_m^2 + AE_w\rho_w v_w^2 + AE_c\rho_c v_c^2) + \\ & Ag \cos \alpha (E_g \rho_g + E_m \rho_m + E_w \rho_w + E_c \rho_c) + \\ & \frac{d(Ap)}{ds} + A \left| \frac{dp}{ds} \right|_{riser} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

式中, A, A' 分别为环空截面积、隔水管截面积, m^2 ; p 为压力, Pa; E_g, E_c, E_w, E_m 分别为浅层气、岩屑、产出水、钻井液的体积分数, 无量纲; v_g, v_c, v_w 和 v_m 分别为浅层气、岩屑、产出水和钻井液的上返速度, m/s ; ρ_g, ρ_c, ρ_m 和 ρ_w 分别为浅层气、岩屑、钻井液和产出水的密度, kg/m^3 ; $\left| \frac{dp}{ds} \right|_{fr}, \left| \frac{dp}{ds} \right|_{riser}$ 为井筒及隔水管段的摩擦压降; α 为井斜角, $(^\circ)$; s 为沿流动方向坐标, m 。

3.3 初始条件及边界条件

动力压井的初始条件可通过模拟溢流动态过程得到。通过模拟溢流动态过程可以得到具体的多相流分布规律, 根据分布规律可以得到该分布状态下环空各点的压力、各相的密度和各相速度等, 这些参数确定后作为压井阶段定解的初始条件(有关溢流动态模拟的问题可以参考文献[8]):

$$\begin{cases} p(i, 0) = p_{t0} \\ \rho_x(i, 0) = \rho_{tx} \\ v_x(i, 0) = v_{tx} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $p(i, 0)$ 为不同结点处 0 时刻的压力, Pa; $\rho_x(i, 0)$ 为动力压井初始时刻各相流体的密度, kg/m^3 ; $v_x(i, 0)$ 代表动力压井初始时刻各相流体的流速, m/s ; p_{t0} 、 ρ_{tx} 、 v_{tx} 为溢流动态模拟得到的各点的压力、各相的密度和速度。

动力压井边界条件为压井结束时的井筒压力及各相分布情况。压井结束时, 静液柱压力与环空摩阻之和等于浅气层压力。井筒内只有压井液, 无浅层气及其他相。

$$\begin{cases} p(H, t) = p_p + p_e \\ q_g(H, t) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, p_p 为地层压力, Pa; p_e 为压井附加压力, Pa; H

为井深, m。

3.4 方程组求解

求解方程组时, 笔者采用了有限差分迭代方法。以环空内任意两个节点 $i, i+1$ 的压力求解过程为例说明计算的具体步骤。首先对 p_i 赋初值, 然后对 p_{i+2} 进行估算, 接着得到两个压力的均值 p , 求出压力 p 下井筒内各相的特性参数, 利用多相流动模型, 计算压力梯度, 再次计算获得压力 p'_{i+2} , 检查 p_{i+2} 与 p'_{i+2} 差的绝对值是否在误差允许范围之内, 如果不在误差范围之内, 则令 p_{i+2} 等于 p'_{i+2} , 重新进行压力梯度的计算; 如果 p_{i+2} 与 p'_{i+2} 差的绝对值在误差范围之内, 则将 p'_{i+2} 作为下一个节点的压力继续进行计算, 直至计算出井底压力。重复以上步骤, 就可对下一时刻的压力进行求解。依次循环, 就可得到 t 时刻的压力场。同理, 按上述方法也可求得 $t+1, t+2, \dots$ 时刻的其他参数。

4 算例分析

由于国内深水钻井过程中, 针对浅层气问题采用动力压井法进行压井的实例较少, 因此, 笔者引用国外相关动力压井实例^[9], 利用建立的多相流动方程计算其相关压井参数, 并与现场压井数据进行对比。

事故井的基本数据为: 井深 487 m, 海水深度 549 m, 隔水管长度 570 m, 导管内、外径分别为 0.71、0.76 m, 导管长度 104 m, 钻杆内径、外径分别为 0.12、0.14 m, 钻杆长度 946 m, 井径 0.31 m, 正常钻进时的钻井液密度 $1\ 018\ kg/m^3$, 浅气层压力 13.3 MPa, 海水表面温度 21 °C。

为了方便与现场压井数据进行对比, 此处选用的动力压井液密度与现场使用的压井液密度相同。将钻井液密度作为已知量代入上述多相流动方程, 通过计算机模拟井筒内多相流动情况, 计算与该钻井液密度对应的动力压井液排量。经计算得到了排量随时间的变化曲线, 见图 1。

从图 1 可以发现, 在开始阶段动力压井排量有一个上升期。其主要原因是浅层气侵入井底后沿井筒向上扩散, 受温度、压力的影响, 气体体积迅速膨胀, 导致混合流体密度大幅下降, 因而, 动力压井开始阶段所需的钻井液排量就会增加, 于是就出现了开始阶段的上升期。当气体体积继续膨胀、即将溢出井筒时, 动力压井排量达到了最大值。随着大排

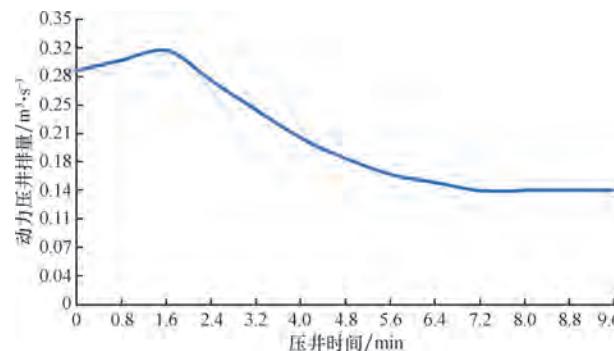


图 1 动力压井排量随时间变化的关系曲线

量钻井液注入井底, 井底压力与地层压力平衡, 不再有浅层气涌入井筒内。井筒内的残余气体也会在压井过程中被排出, 随着气体残余量的减少, 动力压井排量开始减小。当气体完全清理出井筒后, 动力压井排量不再变化, 此时, 环空摩阻和静液柱压力与地层压力达到平衡。此后, 保持该排量继续向井底泵入压井钻井液, 循环 5~6 min, 如果没有发现其他异常, 则说明压井成功。在实际压井操作时, 因发现钻遇浅层气时气体可能已分布整个井筒并已溢出, 因此, 建议取计算得到的最大排量 ($0.312\ m^3/s$) 作为动力压井开始时的钻井液排量。而现场使用的动力压井排量为 $0.291\ m^3/s$ 。计算结果与实际排量相比, 误差在 8% 以内。由此可见, 笔者建立的多相流动方程可以满足动力压井参数计算的需要, 可用于指导动力压井施工设计。

5 结论与建议

1) 通过分析动力压井方法自身的特点可知, 动力压井方法可以用于解决浅层气压力高、海底地层破裂压力低的难题, 即通过调整钻井液排量而非钻井液密度达到压井目的。

2) 海上钻井时, 为有效控制浅层气引发的井喷事故的发生, 建议在钻井初期使用大尺寸钻具, 缩小环空横截面积, 为动力压井顺利实施提供有利条件。

3) 数值模拟结果显示, 在动力压井开始阶段, 动力压井所需钻井液排量逐渐增大, 达到最大值后, 排量逐渐减小至某一定值并最终保持不变。

4) 通过与现场实例比较发现, 笔者建立的参数计算模型的计算结果较为准确, 为了保证井壁稳定性, 建议根据模拟计算结果, 适时调整压井液排量, 不推荐整个压井过程只使用一个排量值。

参 考 文 献

- [1] Adams N J, Kuhlman G G. Case history analyses of shallow gas blowouts[R]. IADC/SPE 19917, 1990.
- [2] Grinred M, Haaland O, Ellingsen B A. Shallow gas research program[R]. SPE 17256, 1988.
- [3] 孙振纯,夏月泉,徐明辉.井控技术[M].北京:石油工业出版社,1997:180-185.
- [4] Blount E M, Soeiinah E. Dynamic kill: controlling wild wells a new way[J]. World Oil, 1981, 193(5): 109-126.
- [5] 邓大伟,周开吉.动力压井法与计算方法研究[J].天然气工业, 2004, 24(9): 83-87.
- [6] 金业权,徐泓,刘振宇.动力压井法的参数设计和实施方法[J].断块油气田,2000,7(2):50-54.
- [7] 金业权,李自俊.动力压井法理论及适用条件的分析[J].石油学报,1997,18(4):106-110.
- [8] 高永海.深水油气钻探井筒多相流动与井控的研究[D].山东东营:中国石油大学(华东)石油工程学院,2007.
- [9] Koederitz W L, Beck F E, Langlinais J P, et al. Determining the feasibility of dynamic kill of shallow gas flows[R]. SPE 16691, 1987.

[审稿 王宝新]

Dynamic Well Kill Method for Shallow Gas Pockets in Deep Water

Xu Peng¹ Sun Baojiang¹ Dong Yujie² Gao Yonghai¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Department of Economics and Management, Tai Shan University, Tai'an, Shandong, 271021, China)

Abstract: There are so many shallow gas pockets with abnormal pressure underneath deep seabed, and it is dangerous to meet shallow gas during deep water drilling. In order to solve the safety problems caused by shallow gas, the dynamic kill technology was investigated. First, based on the characteristics of deep water drilling technology, the dynamic well kill was investigated, and the well kill technique for shallow gas in deep water was obtained. Second, considering multiphase flow in the well and marine riser, a multiphase flow model was build and solved by computer. The simulation calculation shows that the delivery rate would increase because of the expansion of the shallow gas at the beginning of the dynamic kill. After blowing off the shallow gas, the delivery rate would decrease and stabilize. In order to keep wellbore stability, the delivery rate of the kill mud should be adjusted accordingly.

Key words: deep water drilling; shallow gas; blowout; killing well

塔河油田复合接力举升采油工艺技术获得成功

塔河油田采油二厂油区面积 2 700 km², 原油生产的主力储层为超深层碳酸盐岩缝洞型稠油油藏, 该油藏经历了多期的构造和油气运移, 储集条件、构造条件均十分复杂。该稠油油藏埋藏深度大多在 5 400 m 以深, 具有超深、超稠、高温、高压、高黏、高矿化度和高含硫化氢的“两超五高”特点。为此, 塔河油田采用了自主研发的过电缆封隔器配合复合接力泵的复合接力举升采油工艺。该油田采用该工艺技术使一口供液不足长年间开的 T728CH 井变成日产原油 30 t 的高产井, 该井电动潜油泵下深到 4 025 m, 成为目前塔河油田稠油区块第一深抽井。

复合接力泵采油工艺是由电动潜油泵将井液举升到有杆泵的正常抽汲深度(保持有杆泵有一定的沉没度), 再由有杆泵举升至地面。过电缆封隔器配合复合接力泵采油工艺是:掺稀油通过过电缆封隔器进入地层中, 与底层的稠油混合减低稠油黏度后, 通过电动潜油泵举升到封隔器以上的套管空间, 再通过抽油泵配合掺稀降黏二次举升至地面。应用过电缆封隔器, 可实现电动潜油泵深下提高动液面, 为抽油泵生产提供连续稳定的供液。过电缆封隔器配合复合接力泵采油装置主要由电动潜油泵、过电缆封隔器、混配装置和抽油泵组成。

复合接力采油工艺技术应用获得成功, 对今后塔河油田超深特稠油井开采具有重大意义, 将有一批因为供液不足而关停、间开的油井恢复正常生产。