

深水压井节流管线内的气体交换效应分析

王志远¹, 邢廷瑞², 华美瑞³, 李红伟², 张 军²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油新疆油田分公司陆梁油田作业区, 新疆克拉玛依 834000;
3. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000)

摘 要:深水井控中压井节流管线细长, 地层侵入气体进入节流管线内会产生气体交换效应, 导致节流压力发生变化, 增大了深水井控的难度。应用多相流动模型通过数值计算和实例模拟, 从不同角度分析了深水压井节流管线内的气体交换效应, 得到节流压力的变化规律。模拟发现, 深水压井时节流管线内气体体积分数变化大且迅速, 气体交换效应明显; 节流压力随着循环流量的增大而降低, 且变化幅度随着循环流量增大而增大, 随着钻井液池增量的增大而增大; 同样钻井液池增量下, 钻进、停钻、起钻时对应的节流压力依次升高; 深水压井过程中节流压力比陆地井控节流压力变化快; 节流管线直径越小, 节流压力初始值越低, 峰值越高, 节流压力变化越大, 节流管线内气体交换效应越明显。研究结果可以更好地指导深水钻井压力控制。

关键词:深水压井 节流管线 气体交换效应 多相流动模型

中图分类号:TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)03-0019-06

Analysis on Gas Exchange Effect in Choke Line with Deepwater Well Killing

Wang Zhiyuan¹, Xing Tingrui², Hua Meirui³, Li Hongwei², Zhang Jun²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Luliang Operation Area of Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: In deepwater well control, gas exchange effect might happen when invading gas from formation flows into long and thin choke lines, which can affect the value of choke pressure significantly and increase the difficulty of well control. Therefore, it is very important to study the issue. The gas exchange effect occurring in choke lines and the choke pressure change caused by this effect were studied from different aspects with numerical simulation and case study based on multiphase flow model. The simulation indicates that gas volume fraction in choke lines varies largely and rapidly and gas exchange effect is obvious during deepwater well killing; the value of choke pressure decrease as circulation volume increases and the changes of this value rise with the increase of circulation volume; choke pressure goes up with the rise of pit gain; choke pressure of standby is larger than the choke pressure while drilling, and choke pressure while tripping was higher than that of standby; the choke pressure during deepwater well killing would change faster than that onshore; the smaller the choke line, the lower the initial choke pressure, the higher the peak value and the larger variation of the choke pressure, and the more apparent the gas exchange effect in choke line.

Key words: deepwater well killing; choke line; gas exchange effect; multiphase flow model

在深水钻探过程中, 常会遇到地层钻井液安全密度窗口狭窄、节流管线摩阻大、低温高压环境下形成水合物阻塞管线等问题^[1]。当钻遇高压气层天然气侵入井筒形成溢流后进行压井时, 侵入井筒内的气体会随压井液上返至泥线并进入节流管线内, 由于节流管线的直径较小, 加之随着气体的上返, 环空压力逐渐降低, 气体进入节流管线后体积迅速膨胀, 占据管线内大量空间, 使得节流管线内的静液压力迅速降低; 而随着侵入气体排出井外, 节流管线内的

收稿日期: 2012-12-12; 改回日期: 2013-05-07。

作者简介: 王志远(1981—), 男, 山东泰安人, 2004年毕业于石油大学(华东)石油工程专业, 2009年获中国石油大学(华东)油气井工程专业博士学位, 副教授, 硕士生导师, 主要从事油气井流体力学与工程、多相流理论、复杂条件下的井筒压力控制理论等方面的研究工作。

联系方式: (0532)86981927, wangzy1209@126.com。

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目“海洋油气井钻完井理论与工程”(编号: IRT1086)、国家自然科学基金项目“页岩气储层超临界二氧化碳压裂裂缝中支撑剂输送机理研究”(编号: 51104172)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“海洋油气钻探中的安全保障基础问题研究”(编号: 13CX05006A)资助。

气体体积分数迅速下降,又会导致节流管线内静液压力迅速回升,这种由于节流管线内气体体积分数急剧变化、导致节流管线内静液压力迅速变化的现象,称为节流管线气体交换效应。现场表现为深水井过程中节流压力的迅速变化,增加了深水井控的难度。国外 J. O. L. Nunes^[2] 和国内王志远等人^[3] 均认为,对压井中节流管线内气体交换效应及其引起的节流压力变化的现象应该引起重视。O. L. A. Santos 提出了深水井涌模型^[4] 和水平井涌计算模型^[5]; H. V. Nickens^[6] 考虑到气液两相质量及动量变化,提出了两相流模型;后来, S. Ohara^[7] 提出了比较全面的深水井涌模型; J. O. L. Nunes^[2] 提出了深水井涌解析模型。范军等人^[8] 考虑井筒与地层流体的耦合,建立了多相流方程组;李相方等人^[9] 对井涌期间的气液两相流动问题进行了深入研究;王志远等人^[10] 在井筒与油藏连续耦合的条件下,考虑油气相变,建立了井筒多相流动计算方法,较好地解决了井控过程中的多相流计算问题。

以往的研究虽然认识到气体交换效应对深水井控具有重要影响,但未针对该问题进行深入分析,其对深水井控参数的影响规律也需要进一步研究。笔者针对节流管线内的气体交换效应进行了深入研究,分析了压井排量、钻井液池增量、发生溢流时不同工况、不同节流管线直径对节流压力的影响,以及陆地与深水压井节流压力变化规律的区别,能够指导现场施工。

1 压井过程中的多相流动模型

1.1 多相流动控制方程

发生井涌后,地层流体侵入井筒,环空及节流管线中的流动为多相流动,有钻井液、岩屑和天然气。应用漂移多相流动模型对节流管线内的气体交换效应进行研究,主要控制方程包括连续性方程和动量方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(A\rho_i E_i) + \frac{\partial}{\partial s}(A\rho_i E_i v_i) = q_i \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\sum_{i=1}^3 A\rho_i E_i v_i\right) + \frac{\partial}{\partial s}\left(\sum_{i=1}^3 A\rho_i E_i v_i^2\right) + Ag\cos\alpha\left(\sum_{i=1}^3 \rho_i E_i\right) + \frac{d(Ap)}{ds} + \frac{d(AF_f)}{ds} = 0 \quad (2)$$

式中: A 为环空截面积, m^2 ; E_i 为各相的体积分数; $i=1, 2, 3$, 分别代表钻井液、岩屑和天然气; ρ_i 为各相的密度, kg/m^3 ; v_i 为各相速度, m/s ; q_i 为各相的质量流量, kg/s ; α 为井斜角, $(^\circ)$; F_f 为摩擦压降, Pa ; p 为环空压力, Pa ; s 为沿流动方向的坐标, m 。

温度场方程由环空内温度场方程和钻柱内温度场方程耦合求解得出^[11]。

环空内的温度场方程为:

$$A\rho_m v_a c_m \frac{\partial \theta_a}{\partial s} + m_a c_m \frac{\partial \theta_a}{\partial t} - 2\pi r_a U_a (\theta_e - \theta_a) + 2\pi r_p U_p (\theta_a - \theta_p) = 0 \quad (3)$$

钻柱内的温度场方程为:

$$A_p \rho_m v_p c_m \frac{\partial \theta_p}{\partial s} + m_p c_m \frac{\partial \theta_p}{\partial t} - 2\pi r_p U_p (\theta_a - \theta_p) = 0 \quad (4)$$

式中: A_p 为钻柱内横截面面积, m^2 ; c_m 为钻井液的比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; K_e 为地层的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; m_p 为钻柱内的质量流量, kg/s ; m_a 为环空内的质量流量, kg/s ; r_p 为钻柱半径, m ; r_a 为环空半径, m ; θ_p 为钻柱内的温度, $^\circ C$; θ_a 为环空内的温度, $^\circ C$; θ_e 为地层或海水的温度, $^\circ C$; U_p 为钻柱内总的传热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; v_p 为钻柱内的钻井液流速, m/s ; U_a 为环空内总的传热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; v_a 为钻柱内的钻井液流速, m/s 。

联立方程(1)~(4)求解,可得到压井过程中气体进入节流管线后不同时刻节流管线内气体体积分数与钻井液体积分数的数值,通过分析气体体积分数与钻井液体积分数随时间的变化规律,即可对节流管线内的气体交换效应进行分析。

1.2 节流管线内的摩阻计算方程

气体进入节流管线后使静液压力降低,同时也增加了节流管线内混合物的流速,使节流管线内的摩阻增加,在计算节流管线内的气体交换效应时,需要考虑摩阻的影响;同时,计算节流管线内的摩阻需要考虑不同的流型^[12]。

泡状流时的摩阻计算式为:

$$p_{fc} = \frac{2fv_{nm}^2 \rho_{nm}}{D} \quad (5)$$

段塞流及搅动流时的摩阻计算式为:

$$p_{fc} = \frac{2fv_{nm}^2 \rho_{nm} (1 - E_g)}{D} \quad (6)$$

环雾流时的摩阻计算式为:

$$p_{fc} = \frac{2fv_{sg}^2\rho_{mm}}{DE_g^2} \quad (7)$$

式中: p_{fc} 为节流管线内的摩阻, Pa; f 为摩阻系数; V_{mm} 为混合相的流速, m/s; ρ_{mm} 为混合相的密度, kg/m³; D 为节流管内径, m; E_g 为气体体积分数; v_{sg} 为气体的表观流速, m/s。

1.3 初始条件及边界条件

压井起始的初始条件即为溢流结束时刻环空各点的压力及各相的分布情况^[13], 可由控制方程结合储层的渗流方程通过数值求解得出, 压井初始条件为:

$$p_{wk}(0, j) = p_{gk}(t_n, j) \quad (8)$$

$$E_{rwk}(0, j) = E_{igk}(t_n, j) \quad (9)$$

$$v_{rwk}(0, j) = v_{igk}(t_n, j) \quad (10)$$

$$\theta_{awk}(0, j) = \theta_{aik}(t_n, j) \quad (11)$$

$$\theta_{pwk}(0, j) = \theta_{pik}(t_n, j) \quad (12)$$

式中: p_{wk} 和 p_{gk} 分别为压井开始和溢流结束时刻环空各点的压力, Pa; θ_{awk} 和 θ_{pwk} 分别为压井开始时刻环空及钻柱各点的温度, °C; θ_{aik} 和 θ_{pik} 分别为溢流结束时刻中环空及钻柱各点的温度, °C; E_{igk} 为环空各相在某一截面的体积分数; v_{igk} 为环空各相在某一截面的速度, m/s; j 为环空中的各个节点。

压井的边界条件主要是指井底的压力边界和井筒温度场边界^[14-15]。压井时保持井底压力为常压, 因此边界条件为:

$$p_b(t, 0) = p_p + p_e \quad (13)$$

$$\theta(t, j) = f_\theta(t, j) \quad (14)$$

式中: p_b 为压井时的井底压力, Pa; p_p 为地层压力, Pa; p_e 为压井过程中的附加压力, Pa; $\theta(t, j)$ 表示环空内 t 时刻 j 节点的温度, °C; f_θ 为井筒温度场函数。

2 气体交换效应规律分析

深水气侵井涌压井过程中, 细长的节流管线内的气体体积分数会迅速变化, 引起节流管线内静液压力发生急剧变化, 因而在压井过程中必须迅速及时地调节节流压力, 以弥补节流管线内的静液压力变化。气体交换效应宏观表现为压井时节流压力的变化, 因此主要通过分析节流压力的变化来研究节流管线内的气体交换效应。应用多相流动模型, 结合某深水井分析了节流管线内的气体交换效应规律, 其基础数据见表 1。

表 1 某深水井基础数据

Table 1 Basic data of a deepwater well

| 参数 | 数值 |
|---------------------------------|--|
| 井深/m | 4 000 |
| 水深/m | 1 500 |
| 套管直径/mm | 273.1(2 000~3 000 m) 244.5(3 000~3 500 m) |
| 节流管线直径/mm | 88.9 |
| 钻柱直径/mm | 127.0 |
| 隔水管内径/mm | 472.0 |
| 钻井液密度/(kg·L ⁻¹) | 1.13 |
| 钻井液屈服值/MPa | 1.5 |
| 钻井液塑性黏度/(mPa·s) | 3 |
| 排量/(L·s ⁻¹) | 30 |
| 钻头直径/mm | 215.9 |
| 储层压力/MPa | 48.6 |
| 破裂压力/MPa | 51.8 |
| 储层气相渗透率/mD | 550 |
| 海底温度/°C | 2 |
| 机械钻速/(m·h ⁻¹) | 6 |
| 产层厚度/m | 15 |
| 地温梯度/(°C·(100m) ⁻¹) | 2.7 |

2.1 节流管线内气体体积分数变化

假设压井初始条件为: 溢流 20 min, 钻井液池增量 1.65 m³, 压井液排量 15 L/s, 压井液密度 1.26 kg/L。对压井全过程进行模拟计算, 得到压井期间环空内气体体积分数的变化曲线(见图 1)。

从图 1 可以看出, 随着压井的进行, 气体逐渐脱离井底, 气体前缘的上升速度较快, 但泥线下部井筒内的气体体积分数变化不大, 而节流管线内的气体体积分数变化迅速。图 1(a)中, 压井前 25 min 内节流管线中的气体体积分数迅速增长, 因为气体越靠近井口, 所受到的压力就越小, 并且节流管线内径相对环空较小, 气体进入后会迅速膨胀, 占据节流管线内大量空间, 使得管线内的静液压力迅速降低, 而压力的降低又会进一步促使气体膨胀。图 1(a)中气体体积分数在井深 1 500 m 处突然升高, 正是气体突然进入内径较小的节流管线所致。其中, 10 min 时节流管线内的气体体积分数最大仅为 3% 左右, 而在 25 min 时管线内的最大体积分数达到 15%。图 1(b)中, 随着气体逐渐排出井口, 节流管线内的气体体积分数开始下降, 由于气体在排出过程所受的压力逐渐减小, 加上气体的“滑脱”作用, 气体速度越来越快, 所以 35~55 min 时节流管线内气体的体积分数下降迅速, 由 35 min 时的最大 16% 下降到 55 min 时的 1% 左右。

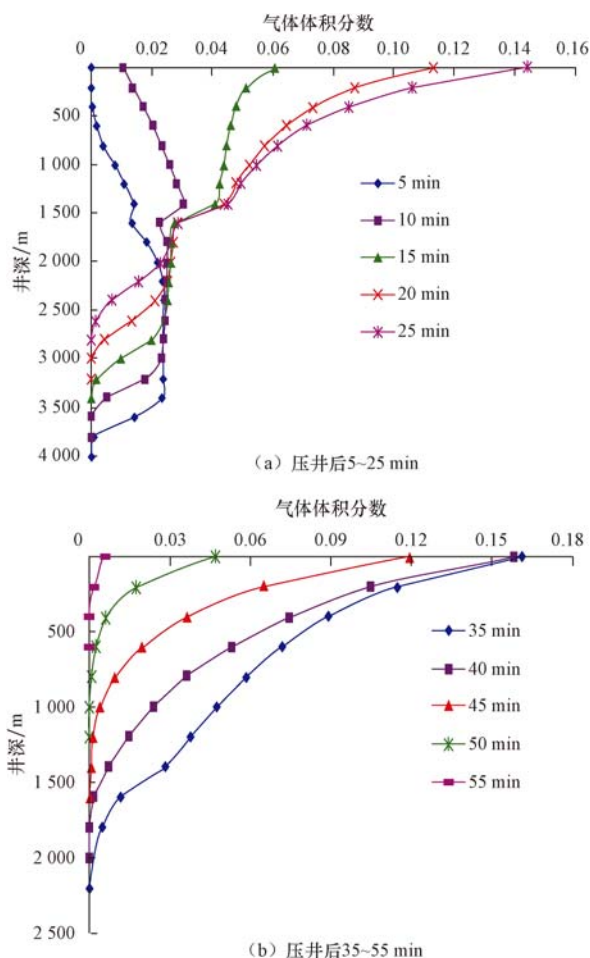


图1 不同压井期间环空内气体体积分数的变化曲线
Fig.1 Gas fraction in annulus at different time during well killing

2.2 不同压井液排量下的节流压力变化

分别用 10, 15, 20 和 25 L/s 的压井液排量实施压井, 模拟计算不同压井液排量下的节流压力变化情况, 结果如图 2 所示。

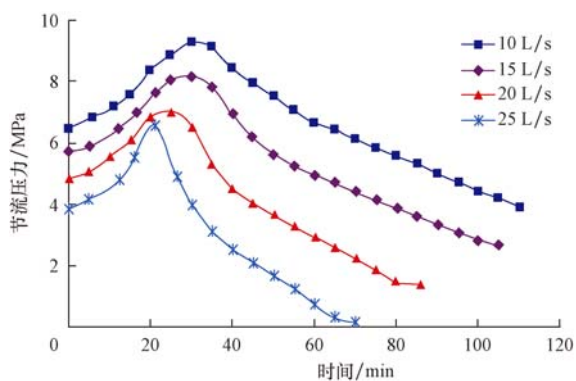


图2 不同压井液排量下节流压力随时间的变化曲线
Fig.2 Choke pressure vs. time curve at different pumping rate

从图 2 可以看出, 压井过程中保持井底压力恒定时, 节流压力会随着循环流量的增大而降低。10 L/s 循环流量下的节流压力比 25 L/s 时的节流压力升高了 3 MPa 左右, 但随着循环流速的增加, 节流压力变化幅度会增大。这种现象在陆地井控中比较少见, 主要原因是深水钻井时井口多安装在海底, 节流管线长而细, 当压井液沿节流管线上返时会产生很大的摩阻, 而且会随着流速增加而增大。在井底压力恒定时, 节流管线内摩阻越大, 节流压力就要越小, 否则会增大井底压力, 增加压裂地层的危险性。另外, 在排出环空气体的过程中, 某一循环排量下的节流压力随着时间的变化其增加速度也比较快, 主要原因是, 气体在快到井口时迅速膨胀, 从而占据节流管线内大量空间, 导致静液压力迅速降低。

2.3 不同钻井液池增量时的节流压力变化

在气侵后钻井液池增量(气侵量)依次为 2, 5 和 8 m³ 情况下, 随着压井的进行节流压力的变化规律如图 3 所示。

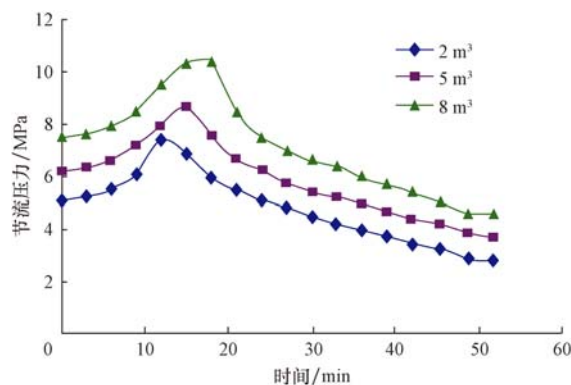


图3 不同钻井液池增量下节流压力随时间的变化曲线
Fig.3 Choke pressure vs. time curve at different pit gains

图 3 中, 随着钻井液池增量(气侵量)的增加, 节流压力逐渐增大, 而且节流压力起始值也相对较高, 钻井液池增量为 8 m³ 时的节流压力初值要比增量 2 m³ 时的大 2.5 MPa 左右。钻井液池增量, 意味着进入环空的气侵量比较大, 环空中静液压力的降低值也就比较大; 而压井过程中要保持井底压力恒定, 需要弥补环空中静液压力的损失, 钻井液池增量越大, 所需的节流压力也就高, 因此钻井液池增量大的初始节流压力比较高。同样, 钻井液池增量越大, 压井过程中进入节流管线的气体就多, 节流管线气体交换效应就越明显, 节流压力的峰值也越高。

2.4 不同工况下溢流后压井时的节流压力变化

钻进、停钻和起钻时发生溢流后进行压井, 其节

流压力的变化规律各不相同。在钻井液池增量均为 3 m^3 时,对相应节流压力的变化进行模拟计算,得出了节流压力的变化规律,见图 4。

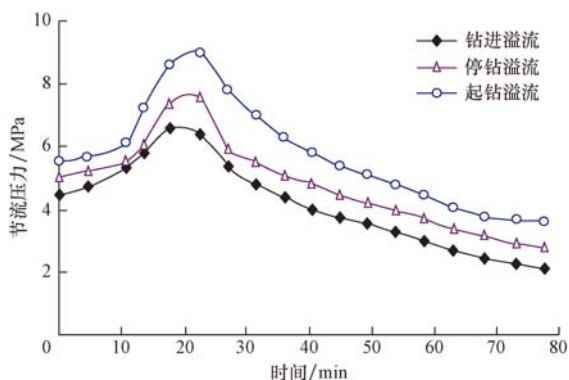


图 4 不同工况下发生溢流后压井节流压力变化曲线

Fig. 4 Choke pressure vs. time curve at different conditions

从图 4 可以看出,钻进、停钻、起钻时发生溢流后压井的节流压力依次增大。钻进工况下,钻井液不断循环,携带侵入井筒的气体向上运移,使气体比较分散,不容易聚集在井底;停钻工况下,钻井液不流动,侵入的气体相对集中在井筒的底部;起钻过程中,钻井液不断填充由于起钻而让出的空间,产生向下流动的趋势,使得侵入井筒的气体不容易分散。因此,起钻溢流情况下,压井时气体会相对集中地进入节流管线,并迅速膨胀占据节流管线内大量空间,使静液压力迅速降低,因此为保持井底压力恒定,节流压力需要迅速升高;钻进溢流情况下,相对分散的气体进入节流管线后,其膨胀则是一个渐变的过程,气体膨胀量相对较低,但是气体相对起钻溢流情况要更早地进入节流管线,所以钻进溢流情况下节流压力升高的出现时间要早,但是峰值相对较低;而停钻溢流情况下节流压力的变化,介于钻进溢流与起钻溢流情况之间。

2.5 不同节流管线直径时节流压力变化

在钻井液池增量 3 m^3 、压井排量 20 L/s 的情况下,分别对 $\phi 76.2$ 、 $\phi 101.6$ 和 $\phi 127.0 \text{ mm}$ 节流管线的节流压力变化进行了模拟计算,结果见图 5。

从图 5 可以看出,节流管线直径越小,节流压力的初始值越低,但随着压井的进行,节流压力上升得更快,峰值更高。这是因为节流管线直径越小,节流管线内的摩阻损失就越大,相当于升高了节流压力,气体未进入节流管线时所需要的节流压力相应比较低;但随着气体进入节流管线,由于直径较小,气体

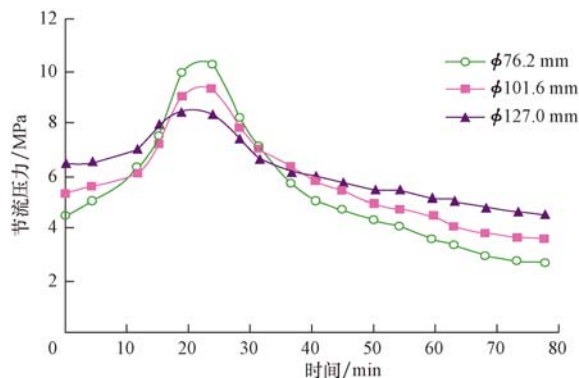


图 5 不同节流管线直径时节流压力的变化曲线

Fig. 5 Choke pressure vs. time curve at different choke line sizes

膨胀后所占据的管线长度相对较大,静液压力降低就大,因而所需要施加的节流压力就大;而随着气体逐渐排出节流管线,节流压力又会重新降低,与初始时趋势一致。因此,节流管线直径越小,节流压力变化越大,节流管线内的气体交换效应就越明显。相反,节流管线直径较大,气体未进入节流管线时,节流压力较高,气体进入后,节流压力的增量相对较小,气体排出后,节流压力的降幅也相对较小,整个过程的节流压力变化相对平缓。 $\phi 76.2 \text{ mm}$ 节流管线压力变化幅度约是 $\phi 127.0 \text{ mm}$ 节流管线压力变化幅度的 2 倍。

2.6 陆地压井与深水压井节流压力变化

深水井控与陆地井控虽然压井工艺相同,但具体压井时节流压力却存在巨大的差异。相同钻井液池增量下,深水使用 $\phi 101.6 \text{ mm}$ 节流管线与相同井身结构的陆地井压井时节流压力的对比曲线如图 6 所示。

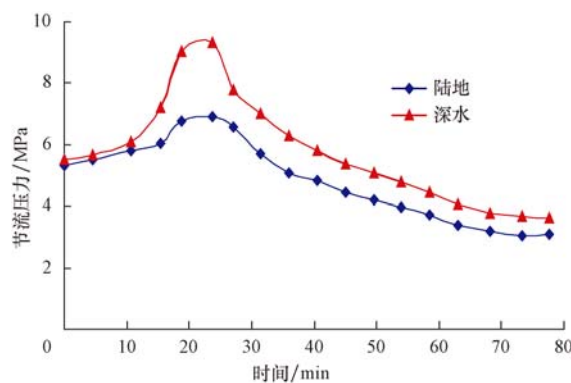


图 6 陆地及深水压井时节流压力的变化曲线

Fig. 6 Choke pressure vs. time curve at onshore or deep-water conditions

从图 6 可以看出,深水压井时的节流压力要比

陆地压井时的节流压力高,并且压力峰值要高得多,本算例下深水压井时其峰值约为陆地压井时的1.4倍,说明深水井控中节流管线气体交换效应更加明显。应特别注意,深水压井时节流阀的调节速度要比陆地压井快得多。

3 结论及建议

1) 在深水井控压井过程中,节流管线内的气体体积分数变化迅速,易产生气体交换效应。气体交换效应使得深水压井过程中节流压力的变化速度要高于陆地情况,因此在深水压井时节流压力的调整速度应比陆地压井迅速。

2) 由于气体交换效应的存在,使得节流压力对循环流量、节流管线直径、气侵量以及气侵时的钻井工况等参数的影响更加敏感,在深水压井时应综合考虑这些参数的影响。

3) 气体交换效应是复杂的多相流动过程,从理论上进行分析能够揭示其中的一些规律,对现场施工提供指导,但还需要结合室内及现场试验对所建立的理论进行校验和修正,建议在以后的研究中进行室内或现场试验,以获取和揭示更丰富的机理和规律。

参 考 文 献

References

- [1] 王言峰. 深水钻井问题综述[J]. 吐哈油气, 2009, 14(2): 167-170.
Wang Yanfeng. Overview of deepwater drilling challenge[J]. Tuha Oil & Gas, 2009, 14(2): 167-170.
- [2] Nunes J O L. Mathematical model of a gas kick in deep water scenario[R]. SPE 77253, 2002.
- [3] 王志远, 孙宝江, 高永海. 深水司钻法压井模拟计算[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 781-790.
Wang Zhiyuan, Sun Baojiang, Gao Yonghai. Simulation computation of well killing with deepwater driller's method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 781-790.
- [4] Santos O L A. A mathematical model of a gas kick when drilling in deep waters[D]. Colorado: Colorado School of Mines, 1982.
- [5] Santos O L A. Well-operations in horizontal wells[R]. SPE 21105, 1991.
- [6] Nickens H V. A dynamic computer model of a kicking well[R]. SPE 14183, 1987.
- [7] Ohara S. Improved method for selecting kick tolerance during deepwater drilling operations[D]. Louisiana: Louisiana State University, 1995.
- [8] 范军, 王西安, 韩松. 油气层渗流与井筒多相流动的耦合及应用[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(10): 154-157.
Fan Jun, Wang Xi'an, Han Song. Researches on the coupling of formation percolation and wellbore multiphase flow and its application[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(10): 154-157.
- [9] 李相方, 庄湘琦, 隋秀香. 气侵期间环空气液两相流动研究[J]. 工热物理学报, 2004, 25(1): 73-76.
Li Xiangfang, Zhuang Xiangqi, Sui Xiuxiang. Study on two-phase gas-liquid flow during gas kick[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(1): 73-76.
- [10] Wang Zhiyuan, Sun Baojiang. Multiphase flow behavior in annulus with solid gas hydrate considering nature gas hydrate phase transition[J]. Petroleum Science, 2009, 6(1): 57-63.
- [11] Kabir C S, Hasan A R. Determining circulating fluid temperature in drilling, workover, well-control operations[R]. SPE 24581, 1996.
- [12] Hasan A R, Kabir C S. A study of multiphase flow behavior in vertical wells[J]. SPE Production Engineering, 1988, 3(2): 263-272.
- [13] 高永海, 孙宝江, 王志远. 深水井涌压井方法及其适应性分析[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 45-49.
Gao Yonghai, Sun Baojiang, Wang Zhiyuan. Well killing methods for deepwater well and adaptability analysis[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 45-49.
- [14] 王志远, 孙宝江, 程海清, 等. 深水钻井井筒中天然气水合物生成区域预测[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 731-735.
Wang Zhiyuan, Sun Baojiang, Cheng Haiqing, et al. Prediction of gas hydrate formation region in the wellbore of deepwater drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 731-735.
- [15] 徐鹏, 孙宝江, 董玉杰. 用于处理深水浅层气的动力压井方法研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 11-15.
Xu Peng, Sun Baojiang, Dong Yujie. Dynamic well kill method for shallow gas pockets in deep water[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 11-15.

[编辑 滕春鸣]