

钻井井喷关井期间井筒压力变化特征

任美鹏¹, 李相方², 刘书杰¹, 王元娇¹

(1. 中海油研究总院, 北京 100027; 2. 中国石油大学石油工程学院, 北京 102249)

摘要:针对目前钻井井喷关井期间井筒压力计算值与实际关井压力差别较大的问题,将关井期间井筒压力变化分为两部分:关井初期地层流体继续侵入井筒的续流部分和气液密度差导致气体滑脱上升部分,从渗流理论和试井理论出发,考虑关井期间井筒内气体和钻井液的压缩性以及井筒的弹性,建立关井期间井筒续流模型;从气液两相流理论出发,考虑关井气体滑脱上升期间气体的膨胀、气体和钻井液压缩性、井筒弹性以及钻井液滤失等因素,建立关井期间气体滑脱模型;然后考虑关井期间井筒续流和气体滑脱综合影响,建立关井期间井筒压力计算模型,并给出基于本模型的气侵关井井筒压力读取方法。结果表明:关井初期井底压力呈指数增加,井底压力大于地层压力之后井底压力呈线性增加;关井初期井筒续流起主导作用,井底压力大于地层压力之后气体滑脱效应起主导作用。

关键词:钻井; 钻井井喷; 关井; 井筒压力; 井筒续流; 气体滑脱

中图分类号: TE 21 **文献标志码:** A

引用格式:任美鹏,李相方,刘书杰,等. 钻井井喷关井期间井筒压力变化特征[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015,39(3):113-119.

REN Meipeng, LI Xiangfang, LIU Shujie, et al. Characteristics of wellbore pressure change during shut-in after blowout [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 113-119.

Characteristics of wellbore pressure change during shut-in after blowout

REN Meipeng¹, LI Xiangfang², LIU Shujie¹, WANG Yuanjiao¹

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China;

2. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The change of wellbore pressure during the shut-in period after blowout is an important issue for well killing design and affects the wellbore safety. Two main reasons that can cause the wellbore pressure change during the shut-in were accounted, including the wellbore flow after the shut in and the gas slippage due to the density difference between gas and liquid. A wellbore afterflow model was established considering the compressibility of gas and drilling fluid and the elasticity of the wellbore, and a gas slippage model was constructed based on gas-liquid two phase flow principles. It also considered the compressibility of gas and drilling fluid and the filtration of drilling fluid in the wellbore during the shut-in. The results indicate that the bottom hole pressure increases exponentially during the initial period of shut in, but it becomes linearly when the bottom hole pressure is greater than the formation pressure. The afterflow is essential to the bottomhole pressure during the initial shut-in period, while the gas slippage prevails after the bottomhole pressure is greater than the formation pressure.

Keywords: drilling; drilling blowout; shut in; wellbore pressure; wellbore afterflow; gas slippage

随着深水石油的开发,钻井新技术和新工艺的发展需要更真实地描述关井期间井筒压力变化,从而获取更准确的井控参数,保证井喷压井过程中井筒的安全。目前研究者普遍认为,钻井井喷关井期

间,井筒压力随时间变化特征与溢流种类、地层渗透率及钻井期间欠平衡压差等有关^[1-15]。关井期间井筒续流对井筒压力变化的计算模型较多^[11-15], John^[12]建立了考虑井筒续流和气体滑脱上升关井

压力计算模型。气体滑脱上升根据连续气柱理论建立,井筒续流模型均借鉴压力恢复试井计算模型建立,其适用条件与钻井井喷关井期间压力变化差别较大,并不能准确描述关井井筒压力的变化特征。笔者从渗流力学和气液两相流理论出发,考虑井筒续流和气体滑脱上升的影响,建立关井期间井筒压力计算模型,分析关井期间井筒压力变化特征。

1 关井期间井筒压力变化过程

钻井井喷关井之后,井筒压力的变化是井筒续流效应和气体滑脱上升两部分共同作用的结果。关井期间井筒流体分布特征如图1所示。

第一部分,气侵关井初期,井底压力小于地层压力,在压差作用下,地层气体继续侵入井筒,井筒流体受到压缩,井底压力和井口压力都升高,当井底压力等于地层压力时,地层气体停止侵入井筒。将此过程称为关井期间井筒续流效应。

第二部分,地层气体密度低于钻井液的密度,气体将滑脱上升,气体所受到的压力不断降低,气体体积膨胀压缩井筒流体,导致井底压力和井口压力都上升。当井底压力大于地层压力时,由于气体继续滑脱上升,导致井底压力和井口压力进一步增大,甚至可能达到地层的破裂压力。将此过程称之为关井期间气体滑脱上升效应。

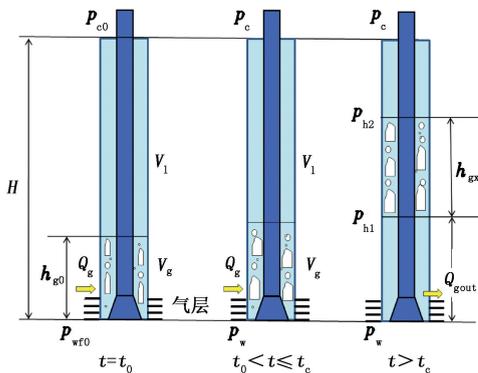


图1 关井期间井筒流体特征示意图

Fig.1 Sketch map of wellbore fluid distribution during well shut-in period

图1中, Q_g 为侵入井筒的气体流量, m^3/d ; Q_{gout} 为流出井筒的气体流量, m^3/d ; V_g 气体体积, m^3 ; V_l 为液体体积, m^3 ; t 为关井时间, h ; t_0 为关井时刻; t_c 为井底压力等于地层压力时刻; h_{g0} 为关井初期气柱高度, m ; p_{c0} 为关井初期套管压力, MPa ; p_{wf0} 为关井初期井底压力, MPa ; p_w 为关井期间井底压力, MPa ; p_{h1} 和 p_{h2} 分别为气体滑脱上升期间气液混合段下端和上端压力, MPa ; H 为井深, m 。

2 关井期间井筒压力变化模型的建立

2.1 井筒续流模型的建立

发现溢流关井时,井筒流体分布情况如图2所示, h_g 表示发现气侵溢流关井时井筒内的气体高度,其值可根据气侵量和气侵强度确定。

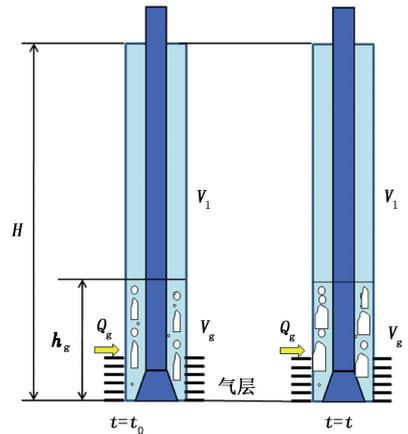


图2 关井初期井筒流体分布示意图

Fig.2 Sketch map of wellbore fluid distribution at early well shut-in

关井初期,由于井筒中的气体和钻井液都有压缩性,以及井筒本身具有弹性,地层气体继续侵入井筒,以补充被压缩部分的体积。由质量守恒定律可得,单位时间内地层流体进入井筒与井筒内流体流出井筒的差等于增加单位压力压缩井筒内流体减小的体积与井筒膨胀的体积之和,即,

$$(Q_g - Q_{gout}) B_g = 24 V_g C_g \frac{dp_w}{dt} + 24 V_l C_l \frac{dp_w}{dt} + 24 V_w C_w \frac{dp_w}{dt} \quad (1)$$

式中, C_g 为气体压缩系数, MPa^{-1} ; C_l 为液体压缩系数, MPa^{-1} ; V_w 为井筒容积, m^3 ; C_w 为井筒弹性系数, MPa^{-1} ; B_g 为气体体积系数。

气侵溢流关井初期,地面气体流量为零,并且关井初期的井底压力小于地层压力,井筒内流体不会渗透到地层中,因此式(1)中的 $Q_{gout} = 0$ 。由于井筒的弹性相比钻井液和气体压缩性小,可忽略,因此式(1)变为

$$Q_g B_g = 24 V_g C_g \frac{dp_w}{dt} + 24 V_l C_l \frac{dp_w}{dt} = 24 (V_g C_g + V_l C_l) \frac{dp_w}{dt} \quad (2)$$

分别对等式两边进行分析。

2.1.1 天然气侵入井筒速度

由渗流力学和气藏工程^[16-17]知,当钻遇含气储层时,井底负压差还没有传到地层边界,可以看作无

限大均质等厚各向同性气藏的平面径向流,此时可以用渗流数学模型得出天然气侵入井筒速度为

$$Q_g = \frac{774.6kh(p_e^2 - p_w^2)}{T\mu z \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (3)$$

式中, k 为气层有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 为气体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; h 为气层有效厚度, m ; T 为地层温度, K ; z 为天然气压缩因子; r_e 为供给边界, m ; r_w 为井眼半径, m ; p_e 为供给压力, MPa 。

2.1.2 井筒内流体的综合压缩性

井筒内钻井液的压缩系数恒定,而天然气的压缩系数随压力和温度不断变化,为了方便求解天然气的压缩系数,将式(2)右边进行如下处理,

$$24(V_g C_g + V_l C_l) \frac{dp_w}{dt} = 24[V_h(\alpha C_g + (1-\alpha)C_l) + V_H C_l] \frac{dp_w}{dt} \quad (4)$$

令 $\Delta V = V_h(\alpha C_g + (1-\alpha)C_l) + V_H C_l$, 式(4)变为

$$24(V_g C_g + V_l C_l) \frac{dp_w}{dt} = 24\Delta V \frac{dp_w}{dt} \quad (5)$$

式中, ΔV 为每变化单位压力井筒流体的体积变化量, m^3 ; α 为截面含气率。

2.1.3 井筒续流模型求解

分别将式(3)和式(5)代入式(2),得

$$\frac{774.6khB_g}{T\mu z \ln \frac{r_e}{r_w}} (p_e^2 - p_w^2) = 24\Delta V \frac{dp_w}{dt} \quad (6)$$

天然气压缩系数在续流阶段变化较小,为方便求解以上方程,假设天然气的压缩系数在续流阶段保持不变。初始条件, $t=0, p_w = p_{w0}$,其中 p_{w0} 为刚关井时的井底压力。

利用分离变量法求解式(6)得,

$$p_w = \frac{1-X}{1+X} p_e \quad (7)$$

其中

$$X = \left(\frac{p_e - p_{w0}}{p_e + p_{w0}} \right) \exp \left(\frac{2p_e t}{24\Delta V T \mu z \ln \frac{r_e}{r_w}} \right)$$

2.2 井筒内气体滑脱上升模型的建立

关井期间,钻井液停止循环流动,但是由于地层气体密度低于钻井液密度,在密度差的驱动下,气体滑脱上升,并且气体体积不断膨胀,导致井底压力和井口压力增加,由于气泡顶部和底部所受压力温度不同,其物理性质不同,气泡段两端的上升速度不同,关井一段时间后井筒流体分布如图3所示。

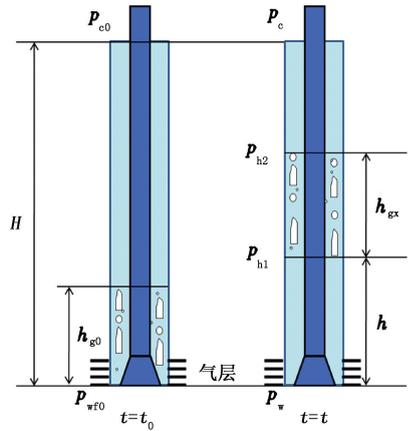


图3 关井期间气体滑脱模型示意图

Fig. 3 Sketch map of gas slippage during well shut-in period

关井 t 时间后,假设井底压力 p_w ,井口套压 p_c ,气液混合段上、下端压力 p_{h1} 和 p_{h2} ,气液混合段长 h_{gx} ,通过分析气体滑脱上升的物理过程描述可得到如下关系式。

(1) 气体膨胀增加的体积等于钻井液受压缩减小的体积与钻井液滤失到地层体积之和,根据质量守恒原理有

$$A\bar{\alpha}_x h_{gx} - A\bar{\alpha}_0 h_{g0} = C_l \Delta p V_1 + \Delta V_f \quad (8)$$

其中

$$\Delta p = \frac{(p_c + p_w)}{2} - \frac{(p_{c0} + p_{w0})}{2}$$

式中, A 为钻柱与井筒间的环空横截面积, m^2 ; $\bar{\alpha}_x$ 为气体上升 t 时间后气液两相段的平均截面含气率; $\bar{\alpha}_0$ 为刚关井时气液两相段的平均截面含气率; ΔV_f 为 t 时间内钻井液滤失到地层的体积, m^3 。

(2) 气液混合段长度 h_{gx} 。利用气泡顶端和底端的速度可得

$$\begin{cases} h_{gx} + h - h_{g0} = v_{g2} t, \\ h = v_{g1} t. \end{cases} \quad (9)$$

所以气液混合段长度为

$$h_{gx} = v_{g2} t - v_{g1} t + h_{g0} \quad (10)$$

式中, v_{g2} 和 v_{g1} 分别为气液混合段上端和下端的上升速度, m/s 。

(3) 根据流体力学知识,建立如下公式:

$$p_{h1} = p_{h2} + (\bar{\rho}_{gx} \bar{\alpha}_x + (1-\alpha_x) \rho_l) g h_{gx}, \quad (11)$$

$$p_c = p_{h2} - \rho_l g (H - h - h_{gx}), \quad (12)$$

$$p_w = p_{h1} + \rho_l g h. \quad (13)$$

(4) h_{gx} 和 h_{g0} 段的平均截面含气率的求取。关井期间气液两相流主要为泡状流和段塞流,李相方等^[18]认为对于钻井液非牛顿流体,当截面含气率大

于0.07时泡状流就转化为段塞流。

泡状流气体滑脱速度为

$$v_{gr} = 1.53 \left[\frac{g(\rho_l - \rho_g)\sigma}{\rho_l^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

段塞流气体滑脱速度为

$$v_{gr} = 0.35 \left[\frac{gd(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

则 h_{gx} 段的平均截面含气率为

$$\bar{\alpha}_x = \frac{M_g}{\bar{\rho}_{gx}(Ah_{gx})} \quad (16)$$

式中, M_g 为侵入井筒的气体质量, kg; σ 为气液表面张力, mN/m; v_{gr} 为气液间的滑脱速度, m/s; d 为套管内径, m。

(5) 井筒流体滤失到地层的体积。气侵关井之后, 当井底压力大于地层压力时, 钻井液可滤失到地层, 此时钻井液处于静止状态, 滤失为静滤失, 滤失量^[19]为

$$\Delta V_f = 0.01A' \sqrt{\frac{10k_b \left(\frac{f_{sc}}{f_{sm}} - 1 \right) \Delta p t}{\mu_l}} \quad (17)$$

式中, A' 为过滤面积, m^2 ; k_b 为滤饼的渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; f_{sc} 为滤饼中固相含量, %; f_{sm} 为钻井液中固相含量, %; Δp 为压差, MPa; t 为滤失时间, min; μ_l 为钻井液黏度, $mPa \cdot s$ 。

2.3 井筒压力综合效应模型的建立

气侵关井之后, 井筒压力的变化是井筒续流和气体滑脱上升综合效应的结果, 此物理过程可描述为: 气侵关井之后, 井筒是一个半封闭空间, 只有井筒钻遇的渗透性储层存在地层流体侵入井筒或者井筒流体渗透到储层, 则由质量守恒定律可得, 单位时间内地层流体进入井筒与井筒内流体渗入地层的体积差与气体滑脱上升膨胀增加的体积之和等于增加单位压力压缩井筒内流体减小的体积与井筒膨胀的体积之和,

$$\begin{aligned} (Q_g - Q_{gout})B_g + \Delta V_g = 24V_g C_g \frac{dp_w}{dt} + 24V_l C_l \frac{dp_w}{dt} + \\ 24V_w C_w \frac{dp_w}{dt} \end{aligned} \quad (18)$$

式中, ΔV_g 为气体滑脱上升增加体积的速度, m^3/h 。

3 关井期间井筒压力变化特征

为分析关井期间井筒压力变化特征, 采用如下溢流井的基本参数: 井深 3 000 m, 气层厚度 2 m, 渗透率分别为 10×10^{-3} 、 30×10^{-3} 、 60×10^{-3} 和 100×10^{-3}

μm^2 , 气体黏度 $0.027 mPa \cdot s$, 地层压力取 48、50 和 55 MPa, 供给半径 150 m, 井口温度 $40^\circ C$, 井底温度 $85^\circ C$, 钻井液密度 $1.5 g/cm^3$, 钻井液排量 $20 L/s$, 钻井液黏度 $20 mPa \cdot s$, 钻杆内径 0.112 m, 钻杆外径 0.127 m, 套管内径 0.244 5 m, 溢流体积分别为 1、3、5 和 $10 m^3$, 钻井液固相含量 0.05, 泥饼固相含量 0.15, 泥饼渗透率为 $1 \times 10^{-8} \mu m^2$ 。

3.1 不同模型之间的对比

关井期间不同模型下的井底压力变化曲线如图 4 所示。从图 4 可得, 关井初期, 由于综合效应的影响, 井底压力的变化特征与只考虑井筒续流效应的情况比较接近, 此时续流效应大于滑脱效应起主导作用; 当井底压力接近地层压力(48 MPa)时, 续流效应导致的井底压力比综合效应的结果低, 当井底压力大于地层压力后, 只考虑续流效应的影响, 井底压力保持不变, 而综合效应呈直线继续增加, 与滑脱效应增加的斜率近似相等, 此过程滑脱效应起主导作用。

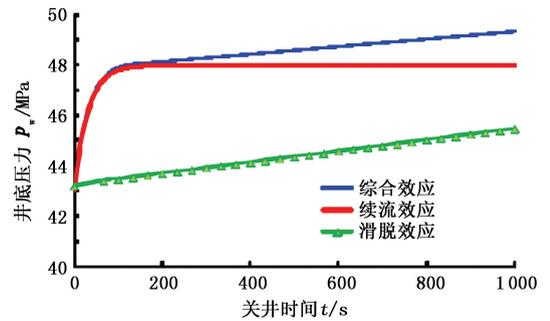


图 4 关井期间不同模型下的井底压力变化曲线
Fig. 4 Curves of bottom hole pressure change during well shut-in period

3.2 溢流体积对井筒压力的影响

溢流体积对井底压力的影响如图 5 所示。气侵

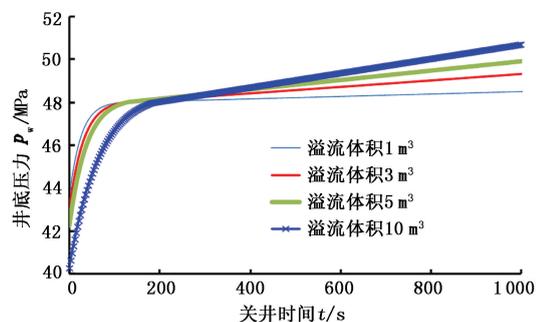


图 5 溢流体积对井底压力的影响
Fig. 5 Effect of pit gain on bottom hole pressure

关井期间, 不同溢流体积下的井底压力都先呈指数增加, 后呈线性增加。溢流体积越大, 井底压力达到地层压力的时间越长。井底压力达到地层压力后, 溢流体积越大, 井底压力呈直线增加的速度越快。

这是因为井底压力未达到地层压力之前井筒续流效应起关键作用,而井底压力大于地层压力后气体滑脱上升起关键作用,溢流体积越大,气体膨胀越快,所以井底压力增加越快。

3.3 地层渗透率对井筒压力的影响

渗透率对井底压力的影响如图6所示。气侵关井期间,不同地层渗透率下井底压力都先呈指数增加后呈线性增加的变化趋势。地层渗透率越大,井底压力达到地层压力的时间越短。井底压力达到地层压力之后,地层渗透率越小,井底压力呈直线增加的速度越快。这是因为井底压力未达到地层压力之前井筒续流效应起关键作用,而井底压力大于地层压力之后气体滑脱上升起关键作用,地层渗透率越小,井底压力达到地层压力时间越长,气体沿井筒向上运移的距离越大,气体滑脱效应越明显,井底压力增加越快。

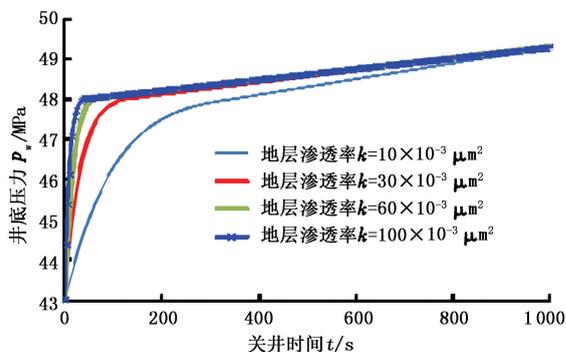


图6 渗透率对井底压力的影响

Fig.6 Effect of permeability on bottom hole pressure

3.4 气体滑脱速度对井筒压力的影响

气体滑脱速度对井底压力的影响如图7所示。

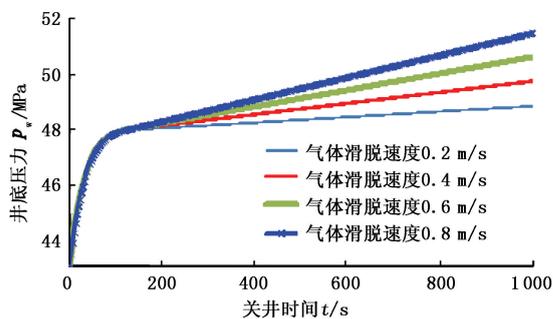


图7 气体滑脱速度对井底压力的影响

Fig.7 Effect of gas slippage velocity on bottom hole pressure

气侵关井期间,不同气体滑脱速度下井底压力先呈指数增加后呈线性增加。在井底压力未达到地层压力之前,滑脱速度对井底压力变化特征影响不大,当井底压力达到地层压力之后,气体的滑脱速度越大,

井底压力增加的越快,这是因为气体滑脱速度越大,气体单位时间内膨胀的体积越大,导致井底压力增加越多。

3.5 储层段泥饼渗透率对井筒压力的影响

泥饼渗透率对井底压力影响如图8所示。气侵关井期间,不同泥饼渗透率下井底压力呈现不同的增加趋势:在井底压力达到地层压力之前,井底压力均呈指数增加,因为此时不存在钻井液向地层的滤失,在溢流体积和地层压力等参数相同的情况下,井底压力增加是相同的;当井底压力大于地层压力之后,随泥饼渗透率的增加,井底压力增加变慢,这是因为泥饼的渗透率越大,钻井液滤失到地层的速度越快,减缓了井底压力的增加。

当泥饼的渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,井底压力达到地层压力之后不再增加,之后又继续增加,这是因为井底压力达到地层压力之后,钻井液的滤失速度大于气体滑脱上升导致的体积膨胀速度,气体滑脱不会使井底压力增加,随着气体向上运移,气体体积和上升速度的增加导致气体滑脱产生的体积膨胀速度大于钻井液的滤失速度,使井底压力又继续增加。当泥饼的渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,由于钻井液滤失速度始终大于气体滑脱上升导致的体积膨胀速度,井底压力大于地层压力之后就不再增加,之后也不会出现继续增加的现象。

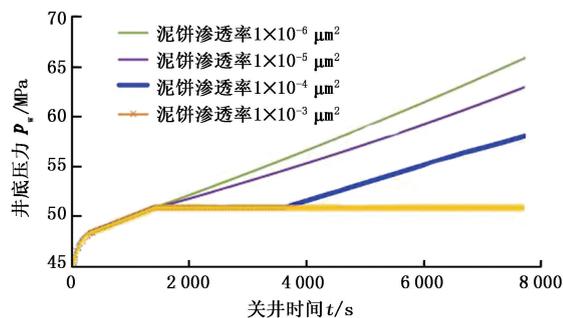


图8 泥饼渗透率对井底压力影响

Fig.8 Effect of mud cake permeability on bottom hole pressure

4 关井期间关井压力及压井参数求取

通过分析关井立管压力的变化,求取关井立管压力的读取时机,确定压井液密度等参数。

4.1 关井立管压力变化

溢流体积、地层渗透率和地层压力对关井立管压力的影响如图9所示。

从图9可得,关井立管压力随关井时间均呈先指数形式增加后线性增加。溢流体积越大,关井立

管压力从零开始增加的时间越晚,这主要是因为溢流体积越大,发现溢流时井底压力降低的越多,井底压力达到钻柱内静液柱压力的时间越长,井底压力等于地层压力的时间也越长,之后立管压力增加也越快;地层渗透率越大,关井立管压力变化越快,这主要是因为地层渗透率越大,井筒续流效应越明显,井底压力等于地层压力的时间越短,关井立管压力基本相等;地层压力越大,关井立管压力变化越快,且关井立管压力值也较大,井底压力等于地层压力的时间越长,但是差别不是很大,这主要是因为地层压力越大,井底压力恢复越慢,井筒续流效应越明显。

后,记录关井立管压力随时间变化的曲线,当出现直线段时将直线段延伸与指数段交叉,交叉点即为读取关井立管压力时刻(图10)。

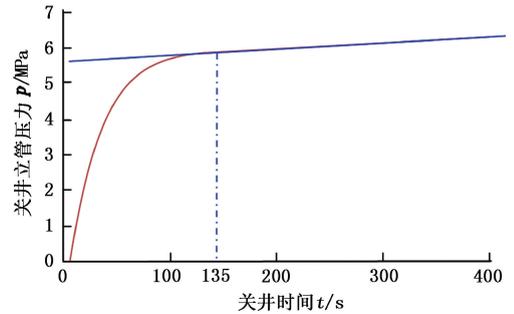


图10 关井立管压力读取时机示意图

Fig. 10 Sketch map of stable time of well shut-in drillpipe pressure

5 结论及建议

(1)关井初期井底压力呈指数增加,当井底压力大于地层压力之后,井底压力呈线性增加。关井初期井筒续流起主导作用,井底压力大于地层压力之后,气体滑脱效应起主导作用。关井期间井筒压力计算模型更接近工程实际,可更准确地描述关井井筒压力变化。

(2)钻杆压力曲线由曲线段变为直线段的拐点为关井压力读取时刻。

(3)关井之后,由于气体滑脱上升可能会导致关井压力达到地层的破裂压力威胁井筒安全,在本模型基础上进一步研究气泡全部到达井口的情况,可得出最大井涌允量及圈闭压力的计算方法,为钻井井控设计提供准确数据。

参考文献:

[1] 《钻井手册》编写组. 钻井手册[M]. 北京:石油工业出版社,2013:794-798.
 [2] 《钻井手册(甲方)》编写组. 钻井手册(甲方)[M]. 北京:石油工业出版社,1990:876-879.
 [3] 刘希圣. 钻井工艺原理[M]. 北京:石油工业出版社,1981:97-98.
 [4] GRACE R D. Blowout and well control handbook[M]. Houston: Elsevier, 2003.
 [5] JIM F. Practical well control[M]. USA: Petroleum Extension Service, 1992.
 [6] 中国石油天然气总公司劳资局. 井控技术[M]. 北京:石油工业出版社,1996:81-82.
 [7] 孙振纯. 井控技术[M]. 北京:石油工业出版社,1997:127-128.

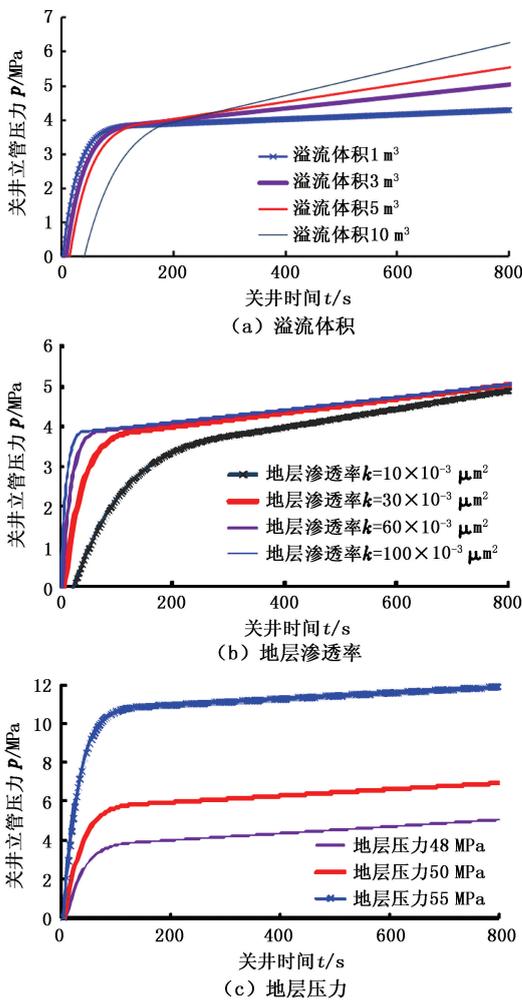


图9 溢流体积、地层渗透率和地层压力对关井立管压力影响

Fig. 9 Effects of pit gain, formation permeability and formation pressure on drillpipe pressure

4.2 关井立管压力读取时刻确定

由图9可知,当井底压力等于地层压力时,都刚好为指数段和直线的交叉点,因此可通过如下方法确定关井立管压力:在钻井井控现场,气侵关井之

- [8] 姜仁. 井控技术[M]. 东营:石油大学出版社,1990:62-64.
- [9] NEAL A. Well control problems and solutions[M]. USA: Penn Publishing Company, 1980:101-165.
- [10] 陈庭根,管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营:石油大学出版社,2000:215-248.
- [11] 刘凯,郝俊芳. 溢流和关井过程中的数学处理[J]. 石油钻采工艺,1989(5):1-7.
LIU Kai, HAO Junfang. Mathematical processing of the process of wellflow and shut-in[J]. Drilling & Production Technology, 1989(5):1-7.
- [12] JOHN B, MARTIN T, WHITE D B. Advanced influx analysis gives more information following a kick [R]. SPE 25710, 1993.
- [13] STEFAN M, SAMUEL G R, AZAR J J. Modeling of pressure buildup on a kicking well and its practical application[R]. SPE 35245,1996.
- [14] LUO Fang, STEFAN Miska. Vertical permeability determination from single well test: phase I-constant flow rate test[R]. SPE 25427, 1993.
- [15] 李相方,庄湘琦. 关井压力恢复和读取时机分析[J]. 石油学报,2002,23(5):110-112.
LI Xiangfang, ZHUANG Xiangqi. Analysis on the pressure build-up and its recording time after shut-in[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(5):110-112.
- [16] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京:石油工业出版社,2008.
- [17] 张建国,雷光伦,张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营:中国石油大学出版社,2006.
- [18] 李相方,庄湘琦,隋秀香,等. 气侵期间环空气液两相流动研究[J]. 工程热物理学报,2004,25(1):73-76.
LI Xiangfang, ZHUANG Xiangqi, SUI Xiuxiang, et al. Study on two-phase gas-liquid flow during gas kick[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(1):73-76.
- [19] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营:石油大学出版社,2001.

(编辑 李志芬)