

重力置换式漏喷同存机理研究

舒刚 孟英峰 李皋 魏纳 赵向阳 杨谋

(油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学),四川成都 610500)

摘要:裂缝性地层在钻进过程中经常出现漏喷同存的情况,造成井控困难、井下复杂情况和储层伤害。但是,漏喷同存的机理目前还处于经验描述阶段,缺少基础理论研究和模型描述。针对直井钻遇单条裂缝时由于重力置换而引起的漏喷同存问题,研究了它的发生条件和气液两相流的流动特征,分别建立了气相模型和液相模型,并通过气液分界面将这两个模型耦合起来。模型计算与试验验证表明,对漏失速率和气体溢流量影响最大的因素是缝宽,其次是压差、钻井液流变性能;通过合理调节井筒压力和改善钻井液流变性能可减缓漏失和溢流。建立的模型与实验结果吻合较好,可为实际钻井工程中处理漏喷同存提供一定的理论依据。

关键词:裂缝性储集层;漏喷同存;重力置换;机理;数学模型;实验室试验

中图分类号:TE28 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)01-0006-06

Mechanism of Mud Loss and Well Kick due to Gravity Displacement

Shu Gang Meng Yingfeng Li Gao Wei Na Zhao Xiangyang Yang Mou

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: Due to the complexity of naturally fractured formations, the occurrence of mud loss and well kick at the same caused the difficulty in well control, downhole complexity, and formation damage. At present, the mechanism of mud loss and well kick at the same is still under investigation and lack of basic theoretical investigation and model description. For the problem of mud loss and well kick due to gravity displacement in vertical well with a single fracture encountered, the occurrence reason was investigated and characteristics of two phase flow was described. Gas and liquid model were developed and coupled by gas-liquid interface. Simulation and experimental results indicate that the dominate factor affecting leakage rate and gas flow is fracture width, followed by differential pressure and drilling fluid rheological properties. The main measures of mud loss and well kick control are to adjust wellbore pressure and rheological properties. The simulation result agrees with experiment results. It can provide a theoretical basis in drilling with mud loss and well kick at the same time.

Key words: fractured reservoir; blowout-lost circulation coexistence; gravity displacement; mechanism; mathematical model; laboratory testing

对于裂缝性地层,当出现钻井液安全密度窗口为负值、多压力系统处于同一个裸眼井段或钻井作业造成井筒压力波动较大这三种情况中的某一种时,常会发生漏喷同存的情况^[1]。这将给井控带来很大困难,并造成井下复杂情况和储层伤害。目前,国内外文献主要从经验判断和经验公式、工程措施和施工程序、建立单一的漏失模型、堵漏机理和堵漏

收稿日期:2010-09-29;改回日期:2010-12-04

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“气体钻井技术与装备”(编号:2006AA06A103)和国家科技重大专项“低渗气藏特殊复杂地层高效钻井关键技术”(编号:2008ZX05022-005)联合资助

作者简介:舒刚(1985—),男,四川成都人,2009年毕业于西南石油大学石油工程专业,在读硕士研究生。

联系方式:(028)83035450, shugang1226@163.com

材料应用效果这四方面对漏喷同存的机理进行了定性半定量描述,缺少基础理论研究和模型描述^[2-5]。笔者研究的漏喷同存是指:直井钻遇裂缝性地层的单条裂缝时,天然气与井筒内的钻井液由于存在密度差而发生重力置换,即天然气进入井筒和钻井液进入裂缝同时发生的现象,可将其称为重力置换式漏喷同存。

1 漏喷同存发生条件

漏喷同存的发生应具备三个条件:1)地层有使钻井液从井眼流入地层的裂缝通道;2)当漏失量比较大时,地层中有足够大的空间容纳漏失的钻井液;3)井筒压力处于重力置换窗口^[6]。下面对重力置换窗口进行定义和分析。如图 1 所示,区域 $ABDO$ 代表裂缝面,根据井筒与地层的压力平衡关系推出漏失溢流同时发生的压力条件为:

$$p_r - p_{\text{张力}} < p_{\text{well}} < p_r + \rho_m g |AG| - p_{\text{张力}} \quad (1)$$

式中: p_{well} 为裂缝底端位置对应的井筒压力,Pa; p_r 为气层压力,Pa; $p_{\text{张力}}$ 为气液界面张力引起的毛管压力,Pa; ρ_m 为钻井液密度,kg/L。

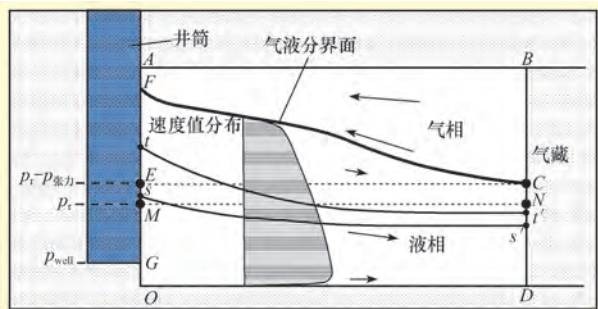


图1 裂缝性地层漏喷同存示意

Fig.1 Schematic diagram of mud loss and well kick coexistence in fissured formation

式(1)中的 $\rho_m g |AG|$ 即是重力置换窗口,较狭窄。重力置换窗口产生的原因是:相对于钻井液密度,气相密度很小可忽略,钻井液在裂缝段(如图 1 中的 AG)产生的液柱压力改变了井筒与地层的压力平衡关系。因此,当裂缝在垂向上有明显的延伸时(高陡裂缝),就比较容易容易出现漏喷同存。

2 裂缝中气液两相流动分析

气体在裂缝中流动时,由于沿垂直方向气体压力梯度很小,可认为气压只沿水平方向变化。高流速气体对气液分界面有较强的作用力,紧贴气液分

界面的液体流速将迅速下降,笔者将气液分界面简化为液流速度等于 0 的速度边界条件,这只会影响边界层内的液体,主流区的流场仍与实际流场相同。气液分界面受界面张力的影响将向上移动一段距离,如图 1 中的 ME 。假设井壁处 t 点的液体微团流动到边界线上的 t' 点, s 点的流体微团流动到 s' 点,则有如下压力关系:

$$\Delta p_{s-s'} - \Delta p_{t-t'} = \rho_m g H_{s'-t'} \quad (2)$$

式中: H 为垂向高度,m; Δp 为液体流动压降,Pa。

由式(2)可知,井壁处液体越靠近下部,流动压降越大,压降值与液体流动到边界线处的深度成正比。井壁处越靠近下部的液体,迹线越短而压降越大,所以得出结论:除去紧贴裂缝底端的液体,越靠近裂缝下部,液体的平均流速越大。

3 漏喷同存数学模型的建立

建立模型时考虑气体溢流与液体漏失的相互作用,并作如下假设:1)裂缝高度为定值,缝宽处处相等;2)裂缝面为非渗透性壁面;3)液体和气体在裂缝中流动时都不可压缩。

3.1 气相模型

气相模型如图 2 所示。

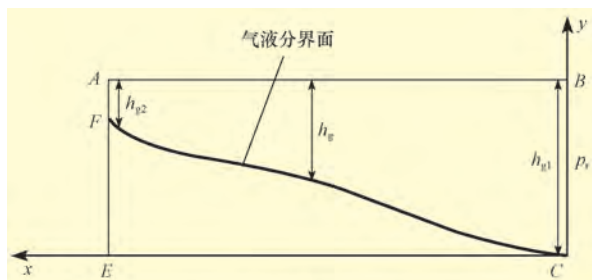


图2 气相模型

Fig.2 Gas phase model

连续性方程:

$$U_g \frac{\partial h_g}{\partial x} + h_g \frac{\partial U_g}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial (A_g \rho_g U_g^2)}{\partial x} = - \frac{\partial (A_g p_g)}{\partial x} + p_g \frac{\partial A_g}{\partial x} - \tau_i b - 2\tau_g h_g + \rho_g A_g g \frac{\partial h_g}{\partial x} \quad (4)$$

边界条件:

$$\begin{cases} x = 0, p_g = p_r \\ x = l_f, p_g = p_{\text{well}} - \rho_m g (h_f - h_{g2}) \end{cases} \quad (5)$$

对该模型化简得:

$$\frac{\partial p_g}{\partial x} = -\rho_g U_g \frac{\partial U_g}{\partial x} - \frac{\tau_i}{h_g} - \frac{2\tau_g}{b} + \rho_g g \frac{\partial h_g}{\partial x} \quad (6)$$

式中: b 为裂缝的缝宽, m ; h_f 为裂缝高度, m ; l_f 为裂缝长度, m ; h_g 为任意 x 坐标的气相高度, m ; h_{g2} 为气相的出口高度, m ; U_g 为气相速度, m/s ; ρ_g 为气相压力, Pa ; ρ_g 为气相密度, kg/L ; A_g 为裂缝截面中气相占据的面积, m^2 ; τ_i 为气液分界面的摩阻力, N/m ; τ_g 为气相与裂缝面作用产生的摩阻力, N/m 。

气相的进口高度 h_{g1} 和任意位置 x 的气相高度 h_g 的计算式为:

$$h_{g1} = h_f - \frac{p_{well} - p_r + 2\sigma \cos \theta / b}{\rho_m g} + \lambda \quad (7)$$

$$h_g = h_{g1} - \frac{\Delta p_g}{\rho_m g} + \frac{p_m}{\rho_m g} \quad (8)$$

式中: σ 为气液界面张力, N/m ; θ 为润湿角, $(^\circ)$; λ 为修正参数, m ; Δp_g 为任意 x 坐标的气相沿程压降, Pa ; p_m 为气体高速冲击气液分界面产生的动压力, Pa 。

式(7)中的 λ 是表征由于液相流动产生压降使 h_{g1} 增大的参数, 可由液相的总压降值转换得到。由于 h_g 与 Δp_g 是相互决定的关系, 因此需采用循环迭代的方法求解气相模型。解出的结果包括气液分界面坐标、气流量和气流速度。

3.2 液相模型

由于裂缝中上部液体流量对整个液体流量的贡献占小部分, 可将实际液相流场转换为简化液相流场, 如图3、图4所示, 其中 $|PE|$ 的值可由下面的经验公式确定:

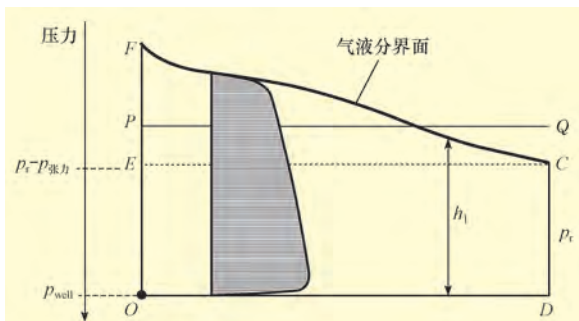


图3 实际液相流场
Fig.3 Actual liquid phase flow field

$$|PE| = \frac{|FE|}{2 + \frac{|FE|}{|EO|}} \quad (9)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

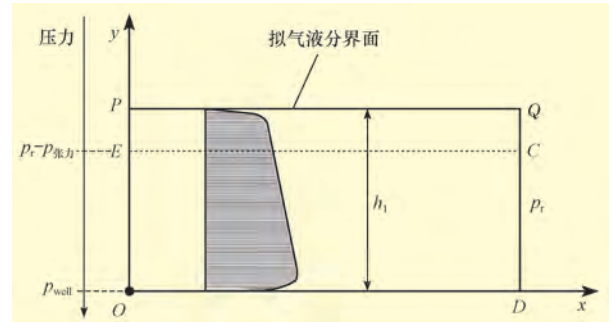


图4 转换后的简化液相流场
Fig.4 Simplified liquid phase flow field after conversion

动量方程:

$$-\frac{\partial(A_1 p_1)}{\partial x} - 2\tau_1 \Delta y + \left[b\mu_1 \frac{\partial U_1(y+\Delta y)}{\partial y} - b\mu_1 \frac{\partial U_1(y)}{\partial y} \right] = 0 \quad (11)$$

边界条件:

$$\begin{cases} x=0, p=p_{well} - \rho_m g y \\ x=l_f, p=p_r \\ y=0, U_1=0 \\ y=h_l, U_1=0 \end{cases} \quad (12)$$

对该模型化简得:

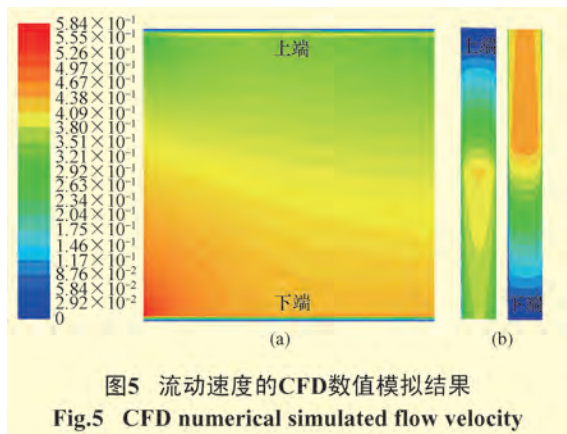
$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2} = \frac{2\tau_1}{\mu_1 b} - \frac{p_{well} - p_r - \rho_m g y}{\mu_1 l_f} \quad (13)$$

式中: U_1 为液相速度, m/s ; p_1 为液相压力, Pa ; A_1 为裂缝截面中液相占据的面积, m^2 ; τ_1 为液相与裂缝面作用产生的摩阻力, N/m ; μ_1 为液相的动力黏度, $Pa \cdot s$; h_l 为任意 x 坐标的液相高度, m 。

如图5所示, 采用 FLUENT 流体仿真软件模拟裂缝内的清水流动, 其中裂缝尺寸 $0.4 m \times 0.4 m$, 缝宽 $1.0 mm$, 进口压力为裂缝高度对应静液柱压力的 1.2 倍, 出口压力为 0 , 从左向右流动。图5(a)是平行于裂缝面的液体速度分布, 图5(b)是放大后的裂缝上下端部垂直于裂缝面的液体速度分布。从图5(b)可以看出, 裂缝上下端部边界层(蓝色至橘黄色)的厚度约为缝宽的 $5 \sim 6$ 倍, 所以它对漏失速率的影响很小。在边界层内, U_1 迅速增加到主流速度, $\partial U_1 / \partial y$ 迅速趋于稳定^[7], 图5中的模拟结果也与该分析相符。因此, $\partial^2 U_1 / \partial y^2$ 在边界层外几乎为 0 , 即 $\partial^2 U_1 / \partial y^2$ 在边界层外对流场的影响可以忽略, 因此可将式(13)中的该项略去。将幂律形式的 τ_1 带入式(13), 求解得到 U_1 为:

$$U_1 = \frac{nb}{4n+2} \left[\frac{b(p_{well} - p_r - \rho_m g y)}{2l_f K} \right]^{1/n} \quad (14)$$

式中: n 为流性指数, 无量纲; K 为稠度系数, $Pa \cdot s^n$ 。



3.3 模型中摩阻项的计算方法

3.3.1 气液分界面的摩阻

气液分界面摩阻的计算公式为:

$$\tau_i = \frac{1}{2} \rho_g f_i (U_g - U_l)^2 \quad (15)$$

Shoham 和 Taitel 通过处理大量试验数据,认为 0.014 2 是摩阻系数 f_i 的最佳估计值^[8]。 f_i 也可通过计算得到,计算方法如下^[9]:

$$Re_g^* = 1.837 \times 10^5 Re_l^{-0.184} \quad (16)$$

若 $Re_g \leq Re_g^*$, 则:

$$f_i = 0.012 + 5.179 \times 10^{-7} (Re_g - Re_g^*) \quad (17)$$

若 $Re_g > Re_g^*$, 则:

$$f_i = 0.012 + 6.736 \times 10^{-12} Re_l^{1.534} (Re_g - Re_g^*) \quad (18)$$

式中: Re_g^* 为临界气相雷诺数; Re_g 为气相雷诺数; Re_l 为液相雷诺数。

3.3.2 流体与裂缝面作用产生的摩阻

杜春常等^[10]建立了斜交平板裂缝漏失模型,将各类型液体的本构方程 $\Phi(\tau)$ 代入该模型中的平均流速公式则得到对应的液相摩阻 τ_l 。平均流速公式为:

$$U_l = \frac{b}{2\pi l_1^2} \int_0^{\tau_l} \tau \Phi(\tau) d\tau \quad (19)$$

气体可被视作动切力为 0 的宾汉流体。令宾汉流体本构方程中的 $\tau_0 = 0$, 即得到气相摩阻为:

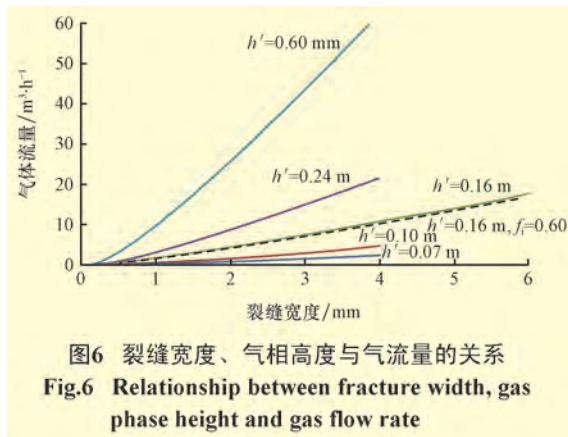
$$\tau_g = \frac{6\mu_g U_g}{b} \quad (20)$$

4 典型算例及实验验证

4.1 典型算例

定义 $h' = (h_{g1} + h_{g2})/2$ 为平均气相高度,以定

性反映气相高度。为了方便分析气流量的影响规律,设 $U_l = 0$, $h_{g1}/h_{g2} = 5$, $l_l = 0.5$, 气液分界面摩阻系数分别取 0.012 (实线) 和 0.60 (虚线), 气体的物性参数采用标准状态下甲烷的值。将不同的缝宽、进出口气相高度代入式(6)和式(8), 迭代求解得到气体流量, 结果如图 6 所示。



由图 6 可知, 气体流量随着裂缝宽度的增加大致呈线性增加, 且 h' 越大, 气流量的增加速率越大。当平均气相高度等于 0.6 m, 裂缝宽度为 4 mm 时, 气体流量甚至达到了 60 m³/h 以上, 将对钻井工程造成较大影响。虚线是 $h' = 0.16$, $f_i = 0.60$ 时的计算结果, 它却与 $h' = 0.16$, $f_i = 0.012$ 的实线几乎重合, 这说明 f_i 值即使增加 50 倍对气体流量也几乎没有影响。这是因为气液分界面的面积相对于裂缝面的面积非常小, 即使分界面剧烈波动引起 f_i 的值很大, 对应的摩阻也相对很小。由以上分析和气相模型的结构得出, 影响气体流量的实质因素是气相压力梯度、过流截面高度和宽度, 涉及到的参数有: 裂缝长度、缝宽、井筒压力、地层压力、钻井液表面张力系数、润湿角、钻井液密度、钻井液流变参数、气体密度。在满足其他工程条件的情况下, 这些影响气体溢流的参数都不容易改变, 所以试图通过单独控制溢流来改善漏喷同存是不可取的。

n 取为 0.7, K 分别为 0.2 Pa·sⁿ (实线) 和 0.8 Pa·sⁿ (虚线), $l_l = 0.5$ m, $h_l = 0.3$ m, $\rho_m = 1.0$ kg/L, 将不同的缝宽和压差代入式(14), 求解得到图 7 所示的结果。由图 7 可知, 随着压差的增加, 漏失速率迅速增长了约 100 倍, 说明压差对漏失速率的影响很大。裂缝宽度对漏失速率的影响则更大, 其值从 0.5 mm 增加到 4.0 mm, 漏失速率增长了约 1 000 倍。由图 7 的虚线可知, K 值由 0.2 Pa·sⁿ 增加到 0.8 Pa·sⁿ 时, 漏失速率整体下降了 10 倍, 对钻井工程的影响将随之大大减小。

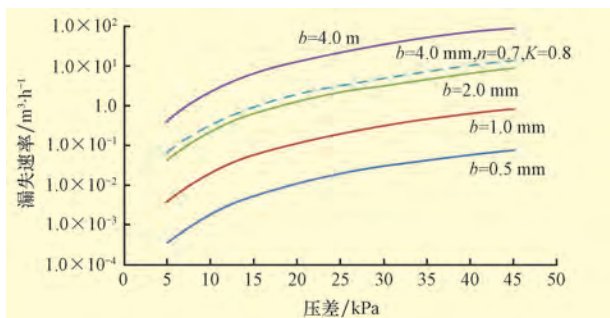


图7 不同缝宽下压差与漏失速率的关系

Fig.7 Relationship between fracture width and leak off rate

压差值取为 20 kPa, 裂缝宽度分别取为 2 mm (实线) 和 4 mm (虚线), $l_f = 0.5$ m, $h_i = 0.3$ m, $\rho_m = 1.0$ kg/L, 将不同的钻井液流变参数代入式(14), 求解得到图 8 所示的结果。从图 8 可以看出, 随 K 值增大漏失速率迅速下降, n 值越大漏失速率越小。但是 K 值增大到一定程度后, 漏失速率则下降得非常缓慢, 即存在一个适当的 K 值使漏失速率足够小。图中的虚线表明, 合理的 n 、 K 值可使大缝的漏失速率低于小缝的漏失速率。对比图 7 和图 8 可知, 漏失速度对缝宽的敏感远大于气体对缝宽的敏感。

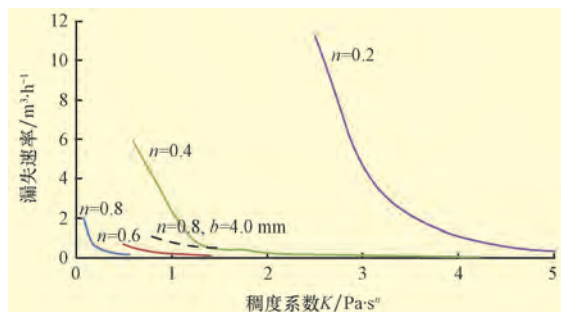


图8 钻井液流变参数与漏失速率的关系

Fig.8 Relationship between rheological parameters and leak off rate

井筒压力、 n 、 K 这三个参数都能影响漏喷同存的严重程度。井筒压力过大将使漏失速率增大, 过小则使气体溢流量增加。漏失更易引发进一步的复杂情况且处理起来困难, 而溢流相对而言有一些简单的现场处理方法, 因此井筒压力的控制原则是尽量实现轻微漏失, 可控溢流。 n 、 K 值直接影响钻井液的漏失速率, 也可通过控制钻井液流动压降来影响气液分界面的位置, 从而影响气体流量。综合前面分析可知, 相对于其它影响漏失速率的参数, 井筒压力、 n 、 K 是主观上容易改变的量, 可操作性较强。因此, 漏喷同存发生时, 除了考虑应用堵漏材料, 还应注意合理地调节井筒压力和改善钻井液的流变性能。

4.2 试验验证

采用图 9 所示的可视化试验装置进行了试验验证, 其中储气瓶模拟地层, 人工裂缝采用高度透明的有机玻璃板材料, 裂缝尺寸 0.6 m \times 0.4 m, 缝宽 0.5 mm, 流体为空气和水溶液 ($n = 0.71$ 、 $K = 0.252$ Pa \cdot s n), 井筒液柱高 1.5 m, 压差由气源压力控制。理论结果由式(6)、(7)、(8)、(9)、(14)联合迭代求解得到, 试验结果与理论结果的对比情况如图 10~12 所示。从图 10 可以看出, 模型计算的气液分界面与试验结果相符合。形成这种形态气液分界面的原因是: 气体在裂缝中流动时存在压降, 压力下降将引起气体过流截面的高度减小, 气流速度增加, 这反过来又会引起更大的压降。由图 11、图 12 可知, 气体流量、漏失速率的理论值小于实验值, 但理论值能够大致反映实际值的大小及其增长趋势。在缺少试验或现场数据的情况下, 应用模型计算出的理论值是实际值的一个较好估计值。

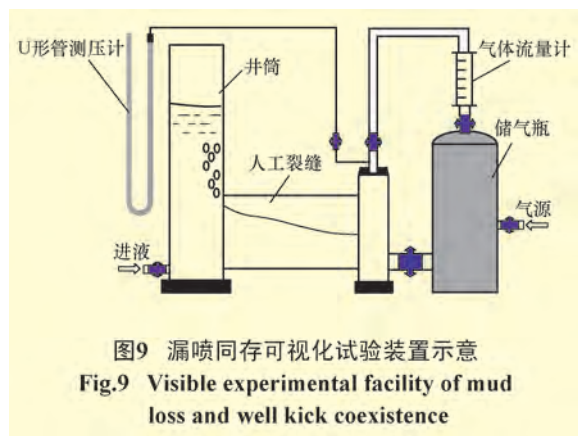


图9 漏喷同存可视化试验装置示意

Fig.9 Visible experimental facility of mud loss and well kick coexistence

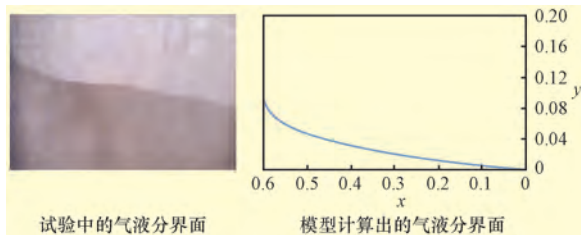


图10 气液分界面对比

Fig.10 Gas-liquid interface comparison

5 结论

1) 重力置换式漏喷同存对钻井工程危害很大, 裂缝中存在气液分界面是其重要特征。建立的模型通过气液分界面将气相和液相耦合起来, 可用于判断漏喷同存的发生条件, 计算气液分界面位置、气体

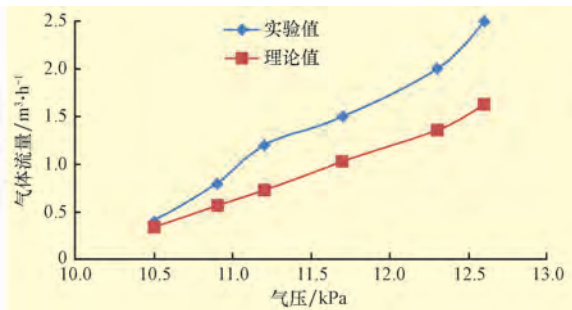


图11 气体流量对比

Fig.11 Gas flow rate comparison

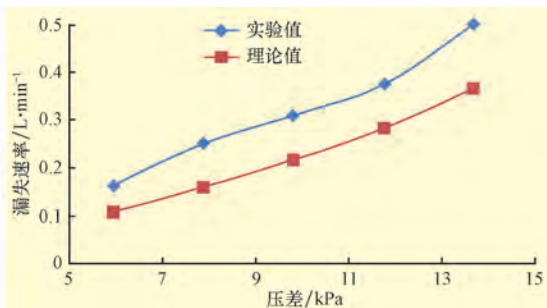


图12 漏失速率对比

Fig.12 Leak off rate comparison

溢流量、钻井液漏失速率。

2) 对漏失速率和气体溢流量影响最大的因素是缝宽,其次是压差、钻井液流变性能。漏失对缝宽的敏感远大于气体对缝宽的敏感。

3) 漏喷同存发生时,合理调节井筒压力和改善钻井液的流变性能来减轻漏失和溢流的严重程度,尽量实现轻微漏失,可控溢流。

参 考 文 献

- [1] 张蔚,廖礼. 气井喷漏同存堵漏压井技术的探讨[J]. 新疆石油天然气,2009,5(4):85-87.
Zhang Wei, Liao Li. The discussion about technology of plugging and pressing well as coexistence of blowout and leaking [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2009, 5(4): 85-87.

- [2] 曾明昌,曾时田,毛建华. 气井喷漏同存的处理技术研究[J]. 天然气工业,2005,25(6):42-44.
Zeng Mingchang, Zeng Shitian, Mao Jianhua. Treating techniques of blowout-lost circulation coexistence in gas hole drilling[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(6): 42-44.
- [3] 郑述全,欧云东,曾明昌,等. 高含硫喷漏同存气井钻井与完井工艺技术研究[J]. 天然气工业,2006,26(9):65-67.
Zheng Shuquan, Ou Yundong, Zeng Mingchang, et al. Study on drilling and completion technology applied to high sulfur-content gas wells where well kicks and losses coexist[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 65-67.
- [4] Poulsen D K. A comprehensive theoretical treatment of fracturing fluid loss[R]. SPE 18262, 1988.
- [5] Majidi R, Miska S Z, Yu M, et al. Modeling of drilling fluid losses in naturally fractured formations[R]. SPE 114630, 2008.
- [6] 胥永杰. 高陡复杂构造地应力提取方法与井漏机理研究[D]. 四川成都:西南石油学院石油工程学院,2005.
Xu Yongjie. Study on the formation stress calculation method and well leak mechanism for aloft-steep and complex structure [D]. Sichuan Chengdu: Southwest Petroleum Institute, School of Petroleum Engineering, 2005.
- [7] 谢明亮. 边界层两相流动稳定性理论与计算[D]. 浙江杭州:浙江大学航空航天学院,2007.
Xie Mingliang. Hydrodynamic stability of two phase flow in the flat plate boundary layer[D]. Zhejiang Hangzhou: Zhejiang University, School of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [8] 肖荣鸽,郭雄昂,张蕾,等. 低液量水平管气液分层流摩阻压降的计算[J]. 油气储运,2006,25(10):38-41.
Xiao Rongge, Guo Xiong'ang, Zhang Lei, et al. Research on pressure gradient in horizontal two-phase gas-liquid flows with low liquid loading[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2006, 25(10): 38-41.
- [9] Xiao J J, Shoham O. Evaluation of interfacial friction factor prediction methods for gas/liquid stratified flow [R]. SPE 22765, 1991.
- [10] 杜春常,刘文忠. 裂缝地层漏失规律研究[J]. 西南石油学院学报,1992,14(3):27-34.
Du Chunchang, Liu Wenzhong. Study of lost circulation law in creviced formation [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1992, 14(3): 27-34.

大港油田成功开展煤层气变流量注入/压降测试

目前,我国煤层气测试中存在的主要问题是注入排量不稳定,且难以控制。为此,大港油田测试公司进行了煤层气现场测试、资料解释和相关技术研究。根据试验地区——陕西韩城地区煤层气注入/压降测试的特点,加工了排量为0~3.3 L/min可调、压力为10 MPa的计量泵,设计了流量控制系统,通过变频电机可方便地控制流量,大大提高了注入排量的精度,同时可自动记录注入压力、排量、液位等信息,为资料分析评价提供了可靠依据。利用这套泵注系统,该公司在陕西韩城地区成功进行了韩3-1-053井、合试10井、合试16井的煤层气测试,完成了煤层气微破裂试验、注入/压降测试、变流量注入/压降测试、现场测试工艺方案和测试设计。这是国内首次完成变流量注入/压降测试资料的录取。