

天然气空井压井排量的一种计算方法

刘新云¹, 童振¹, 孟庆昆¹, 徐鹏¹, 石李保¹, 李威², 童飞³

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249
3. 中国石油大学胜利学院, 山东东营 257097

摘要 根据流体力学理论, 压井排量对流体摩阻具有重要影响。针对天然气空井的压井计算, 基于已有相关模型, 将压井排量作为未知数, 考虑了压井排量对摩阻的影响, 改进了空井救援压井的拟瞬态模型, 并通过数学计算软件得到压井排量的计算方法。数值计算结果表明: 压井排量随着压井液密度的增大而减小, 随着井眼尺寸的增大而增大, 随着井深的增加而减小; 实例验证的误差控制在1%以内, 表明该计算方法可以达到现场精度要求, 对后续类似井的压井作业具有一定的指导意义。

关键词 天然气井; 空井压井; 拟瞬态模型; 流体摩阻; 压井排量

中图分类号 TE21

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.32.007

A Calculation Method on Kill Rate of Killing Well in Empty Hole Filled with Nature Gas

LIU Xinyun¹, TONG Zhen¹, MENG Qingkun¹, XU Peng¹, SHI Libao¹, LI Wei², TONG Fei³

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China
2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
3. Shengli College, China University of Petroleum, Dongying 257097, Shandong Province, China

Abstract According to the fluid dynamics theory, the kill rate has an important effect on the fluid friction. So in order to calculate the kill rate of empty well control, the kill rate's effect based on previous models is considered, the quasi-transient model of rescue well killing in empty wells is improved, and a mathematical computing software is used to calculate the kill rate. The numerical calculation results show that: the kill rate has a negative relation with the density of kill fluid and the depth of the well, but has a positive relation with the size of boreholes. The validation's error is controlled with in 1%, indicating that the calculation method can achieve the field accuracy requirements, so subsequent similar wells killing can get certain guidance from this study.

Keywords natural gas well; empty well control; quasi-transient model; fluid friction; kill rate

0 引言

随着安全环保意识的不断提升, 对喷井尤其是喷空井的处理要求也越来越严格, 针对此问题, 工程上常规的处理措施是救援井压井。文献[1]中介绍关于救援井的压井排量、压井时间以及压井液体积等问题, 但未考虑压井排量对流体摩阻的影响。本文在此基础上, 将压井排量作为未知数, 并考虑在流体摩阻中, 改进空井救援井的拟瞬态模型, 经过一定的简化得到压井排量的计算方法。在对模型的求解、验证的基础上, 分析压井液密度、井眼尺寸、井深对压井排量的影响规

律。

在油气同喷的情况下, 考虑到气井井喷压井难度大, 故分析纯气井空井压井, 以压井液初次返出事故井口便成功压井为目标, 计算压井排量。

1 压井排量计算模型

从救援井中注入压井液, 压井液与侵入气在喷井井底混合, 以第一次井底混合物返至喷井井口为分析时刻点, 在喷井井身上建立坐标轴, 如图1所示, 以井口为原点, 以向下为正。

收稿日期: 2013-04-24; 修回日期: 2013-07-30

作者简介: 刘新云, 高级工程师, 研究方向为钻井工艺; 童振, 硕士研究生(共同第一作者), 研究方向为钻井流体力学, 电子信箱: tongzhen8@126.com

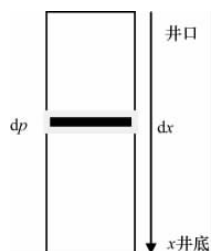
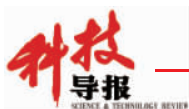


图1 井身坐标系

Fig. 1 Wellbore coordinate

在坐标 x 处取一混合物微元段 dx , 设其对应的压降为 dp , 则有

$$dp = (g+f)\rho_{\text{mix}}dx \quad (1)$$

式中, g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; f 为混合物摩阻加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; ρ_{mix} 为混合物密度, $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

相比于液体, 气体密度很小, 这里略去混合物中气体的质量, 则有

$$\rho_{\text{mix}} = \rho_m \frac{Q_m}{Q_m + Q_g} \quad (2)$$

式中, Q_m 为压井泥浆排量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; Q_g 为微元段在井底的气体喷量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; ρ_m 为压井泥浆密度, $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

这里假设气体的渗流规律符合线性渗流规律^[2], 由线性渗流规律可得井喷气体与井底压力的关系满足下式:

$$Q_g = \frac{\pi K h}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}} \frac{p_e^2 - p_w^2}{p_w} = C \frac{p_e^2 - p_w^2}{p_w} \quad (3)$$

式中, Q_g 为井底条件下的气体喷量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; p_e 为原始地层压力, MPa; p_w 为井底压力, MPa; K 为储层渗透率, D ; h 为储层厚度, m ; r_e 为边界半径, m ; r_w 为井眼半径, m ; μ 为天然气黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $C = \frac{\pi K h}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}}$, 线性渗流系数, 仅与地层及天然气物性有关。

在压井的 t 时刻, 井底压力为 $p_w(t)$, 对应井喷量为 $Q_g(t)$ 。在经过 Δt 时间后的 t_1 时刻, 微元段上升到坐标 x 处, 此时微元段所受压力为 $p(x, t_1)$ 。在不考虑气体滑脱的情况下, 其中的气体含量仍为 $Q_g(t)$, 忽略纯气柱压力减少所引起的井内压力降低, 则该微元段在 x 处所受压力与其在井底所受压力 $p_w(t)$ 近似相同, 即微元体是带着压力上返的, 因此有

$$p(x, t_1) \approx p_w(t) \quad (4)$$

式中, $p_w(t)$ 为 t 时刻时的井底压力, MPa; $p(x, t_1)$ 为 t_1 时刻时坐标为 x 处的微元段所受压力, MPa。

虽然气液混合物在上升的过程中地层温度在不断变化, 但由气体状态方程可知: 温度对体积变化的贡献不大, 尤其对于浅井, 因此这里暂不考虑温度的影响。

将式(3), (4)代入式(2)中, 可得坐标 x 处的混合物密度表达式为

$$\rho_{\text{mix}} = \frac{\rho_m Q_m}{Q_m + C \frac{p_e^2 - p^2}{p}} \quad (5)$$

由此, 任意深度, 即任意坐标处的气液混合物密度便可由式(5)唯一确定, 显然与此处气体所受压力有关。

另外, 对于混合物摩阻加速度 f , 由流经管流的相关知识^[3]可以知道: 若管流液体流量增大, 则流速增大, 摩阻压降也会增加, 而且成平方关系增加, 因此该参数与流量存在直接关系, 需建立 f 与压井液流量的关系。

由于混合物的摩阻主要集中在压井液与井身间, 因此将混合物摩阻近似为压井液与井身间的摩阻, 利用均相流体压降公式建立 f 与压井液排量的关系, 其表达式为

$$f = \frac{\lambda v^2}{2d} = \frac{8\lambda Q_m^2}{\pi^2 d^5} \quad (6)$$

式中, d 为井眼直径, m ; λ 为摩阻系数, 无量纲, 其数值与流体流态、雷诺数、相对粗糙度等有关, 对于特定的井身、一定范围的流速, 其值变化不大, 因此可将其视为常数。

将式(5)、(6)代入压降微分方程(1)中, 有

$$dp = \rho_m \frac{Q_m}{Q_m + C \frac{p_e^2 - p^2}{p}} \left(g + \frac{8\lambda Q_m^2}{\pi^2 d^5} \right) dx \quad (7)$$

在第一次井底混合物到达井口时, 对式(7)分离变量, 有

$$\left(Q_m + C \frac{p_e^2 - p^2}{p} \right) dp = \rho_m Q_m \left(g + \frac{8\lambda Q_m^2}{\pi^2 d^5} \right) dx \quad (8)$$

混合物第一次返至井口时要求井底压力大于或等于地层压力, 即取为 p_e 。由于喷井井口敞开, 故井口压力为大气压力 p_s 。对式(8)两边分别从 $p_s \sim p_e$ 、 $0 \sim H$ 积分有

$$Q_m(p_e - p_s) + C p_e^2 \ln \frac{p_e}{p_s} - \frac{C}{2}(p_e^2 - p_s^2) = \rho_m Q_m g H + \frac{8\lambda Q_m^3 \rho_m H}{\pi^2 d^5} \quad (9)$$

对式(9)移项整理, 得到关于 Q_m 的三次方程:

$$\frac{8\lambda \rho_m H}{\pi^2 d^5} Q_m^3 + (\rho_m g H - p_e + p_s) Q_m + \frac{C}{2}(p_e^2 - p_s^2) - C p_e^2 \ln \frac{p_e}{p_s} = 0 \quad (10)$$

式中 H 为井深对于这样一个三次方程, 一旦喷井的井身结构、地层参数、压井液密度确定后, 便可以通过解此方程得到 Q_m 的值。但一元三次方程根的显式很复杂, 所以这里借助 Matlab 软件计算分析。

2 实例验证

目前由于关于救援井压井的实例比较少, 这里仅以国外的某口事故井为例, 利用上述方法计算压井液排量, 并与实际压井数据进行对比。事故井的基本数据^[4]为: 井深, 792.48m; 地层压力, 8.38MPa; 井眼尺寸, 444.5mm; 地层厚度, 3.05m; 地层渗透率, 5D; 边界半径, 914.4m; 摩阻系数, 0.02; 压井液密度, $1.03\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (该井采用海水进行初次压井)。

将计算结果与实际结果进行比较, 实际现场压井过程中, 所用压井液密度为 $1003\text{kg}/\text{m}^3$, 实际压井排量为 $0.6041\text{m}^3/\text{s}$, 计算排量为 $0.6022\text{m}^3/\text{s}$, 误差范围在 1% 以内。

3 不同参数对压井排量的影响

运用本文的方程及其计算方法, 对一口深水井进行计算模拟, 观察不同参数对压井排量的影响, 得到压井液密度、井眼尺寸及喷井井深对压井排量的影响规律。计算时采用的参

数:井深,3000m;地层压力,31.5MPa;井眼尺寸,0.279m;储层厚度,10m;地层渗透率,0.5D;边界半径,900m;摩阻系数,0.015;压井液密度,1.01g·cm⁻³。

3.1 压井液密度 ρ_m 对压井排量的影响

本研究主要是通过增大排量和密度的方法提高井底流动压力,从而达到压井的目的。实际压井过程中,在不超过地层破裂压力当量密度的范围内,适当增大压井液密度将能更好地完成压井作业。图2为压井排量与压井液密度的关系曲线。如图2所示,在不改变其他条件的情况下,增大压井液密度,压井排量明显减小。所以,实际压井作业中,在不压裂地层的前提下,可以通过提高压井液密度来减小压井排量,提高压井效果。

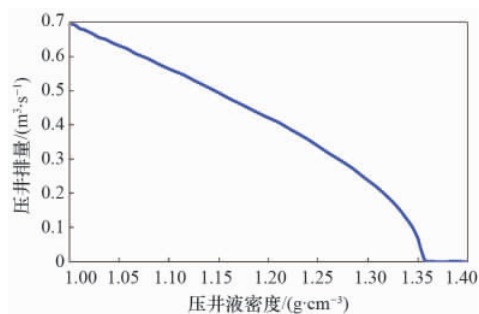


图2 排量随压井液密度变化曲线

Fig. 2 Effect of killing fluid's density on kill rate

3.2 井眼尺寸对压井排量的影响

由式(10)知井眼尺寸 d (井筒直径)也是影响压井排量的一个主要因素,井眼尺寸越大,压井液流速就越小,摩擦阻力也越小,井底流动压力也越小。所以,井眼尺寸越小,压井效果就越好。改变井眼尺寸,其他参数按实例中数据取值,分别计算所需压井排量,得到压井排量与井眼尺寸的变化关系,如图3所示。随着井眼尺寸的增加,压井所需排量也在增加,对泵的排量要求也在提高,当所需排量超出泵的安全使用范围时,此时压井方法便无法满足现场需要。

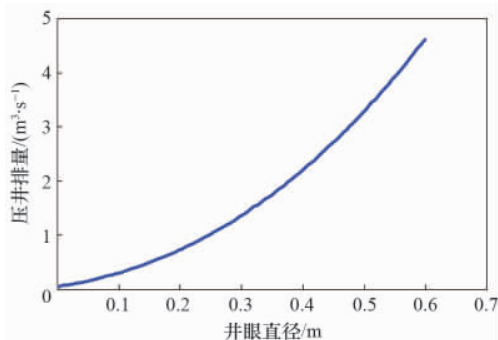


图3 排量随井眼直径变化曲线

Fig. 3 Effect of borehole's size on kill rate

3.3 喷井井深对压井排量的影响

由式(10)知喷井井深 H 会对压井排量的计算产生影响。分别取不同 H 值,其他参数按实例中数据取值,计算不同井深

处所需的压井排量,得到压井排量随喷井井深的变化关系,如图4所示。对于同一地层压力,随着喷井井深的增大,所需的压井排量逐渐变小。由文中的压降微分方程也可得出这样的结论:当喷井井深较小时,压井液产生的静水压力较小,为了平衡地层压力,所需的摩擦阻力就要增加,也就是所需的压井排量需要增加;随着喷井深度的逐渐增大,压井液产生的静水压力也会增加,那么所需的摩擦阻力就会减少,所需的压井排量也随着减小。因此,对于同一地层压力,喷井井深较小时,可能需要排量更大的泵组进行压井作业。

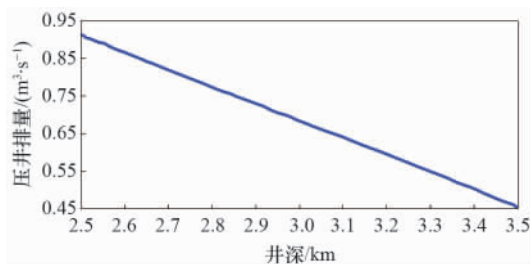


图4 排量随喷井井深变化曲线

Fig. 4 Effect of well's depth on kill rate

4 结论

① 从实实验证的结果可以看出,该计算方法的精度可以满足现场要求。② 压井排量随压井液密度的增大而减小,因此,在不压裂地层的前提下,适当提高压井液密度,可有效减小压井排量。③ 压井排量与井眼直径有关,井眼尺寸越小,摩擦阻力的影响就越明显,压井效果就越好。④ 压井排量随喷井井深的增加而减小,同样地层压力下,井喷深度越大,所需的压井排量越小,救援井压井的效果越好。

参考文献(References)

- [1] 刘凯. 天然气井空井压井拟瞬态设计理论[J]. 天然气工业, 1989, 9(4): 23-28.
Liu Kai. Natural Gas Industry, 1989, 9(4): 23-28.
- [2] 李瀚. 空井压井方法计算的完善和应用[J]. 钻采工艺, 1991, 14(1): 37-43.
Li Han. Drilling & Production Technology, 1991, 14(1): 37-43.
- [3] 钱爱东. 浅谈海上救援井钻井设计思路[J]. 科技创新导报, 2013(16): 81-83.
Qian Aidong. Science and Technology Innovation Herald, 2013(16): 81-83.
- [4] 李翠, 高德利. 救援井与事故井连通探测方法初步研究[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(3): 56-61.
Li Cui, Gao Deli. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3): 56-61.
- [5] 谢建文. 救援井技术可解决常规问题[J]. 国外油田工程, 1993(6): 14-16.
Xie Jianwen. Foreign Oil Field Engineering, 1993(6): 14-16.
- [6] 刘凯. 救援井压井设计理论初探[J]. 石油钻采工艺, 1992(1): 1-6.
Liu Kai. Oil Drilling & Production Technology, 1992(1): 1-6.
- [7] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 123-127.
Yuan Enxi. Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 123-127.
- [8] Koedentz W L, Beck F E, Langlinais J P, et al. Method for determining the feasibility of dynamic kill of shallow gas flows [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA: SPE, 1987: 27-30.

(责任编辑 赵业玲)