

Analyzing the Effect of Gas Layer Thickness on Bottom Hole Pressure

Ruidong Tao¹, Liang Zhu², Guibin Li¹, Yaoquan Liu¹, Jingguo Xu¹

¹No.3 Drilling Company, CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin

²School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan Hubei

Email: alloyer007@126.com

Received: Dec. 10th, 2015; accepted: Feb. 28th, 2016; published: Jun. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In the process of drilling of gas wells, the change of bottom hole pressure has great influence on well control. However, the influence of gas layer thickness on the bottom hole pressure was not considered currently in analyzing the factors influencing the changes of bottom hole pressure. Based on mass conservation and principle of conservation of momentum, the mathematical model of bottom pressure after invading was established. And then based on the engineering case, combined with the phase separation equations, the finite difference method is used to discuss the influential rules of gas layer thickness on the bottom hole pressure. The result shows that the bottom hole differential pressure and the stable value of B.H.P. increases while the thickness of drilling gas formation is large, which can increase the difficulty of well control. The suggestion is that rational measurement is used for early control of gas invasion to reduce the gas invasion and safe well control. The study is the completion to the understanding of gas invasion and regulation of the changes of bottom hole pressure, it provides guidance for setting up the strategy of well control.

Keywords

Bottom Hole Pressure, Drilling Thickness of Gas Formation, Well Control, Stable Value

气层厚度对井底压力的影响分析

陶瑞东¹, 朱 亮², 李贵宾¹, 柳耀泉¹, 许京国¹

¹中石油渤海钻探工程有限公司第三钻井工程公司, 天津

²长江大学石油工程学院, 湖北 武汉

作者简介: 陶瑞东(1965-), 男, 教授级高级工程师, 硕士, 现从事钻井技术工作; 通信作者: 朱亮。

Email: alloyer007@126.com

收稿日期: 2015年12月10日; 录用日期: 2016年2月28日; 发布日期: 2016年6月15日

摘 要

在气井的钻井过程中, 井底压力的变化对井控风险的影响是很大的。但目前分析影响气层井筒井底压力变化的因素时, 未考虑气层厚度对井底压力的影响。基于质量守恒和动量守恒定理, 针对井筒气侵后的实际情况, 首先建立了气侵后井底压力的计算模型, 然后联合分相流方程, 运用有限差分的方法, 以工程实例数据为基础, 讨论了打开气层厚度对井底压力的影响规律。分析结果表明, 随着钻遇气层厚度的增大, 井底压力稳定值较大, 井底压差也愈大, 最终导致井控难度加大, 建议采用合理的手段尽早侦测气侵情况, 采取措施能够减少地层气体的侵入量, 达到安全井控的目的。该研究是对气侵、井底压力变化规律认识的完善, 对现场实际井控安全操作策略的制定具有重要指导意义。

关键词

井底压力, 气层厚度, 井控, 稳定值

1. 引言

当地层气体侵入井筒后, 改变了井筒内的流动状态[1]-[3], 如果控制不当, 很有可能演变成井喷。国内外对井底压力的计算模型做了大量的研究: Nickens [4]建立了井涌井的动态模型, 该模型能够预测发生井涌时任意时刻和井深的侵入量和井底压力; Santos [5]建立了水平井发生气侵时的压力预测模型; Choe [6]建立了非稳态井控模型, 并且与 Nickens 模型、Santos 模型进行了比较, 由于复杂两相流模型不同导致二者计算出的结果较难匹配; 李相方等[7]和周照明[8]分别讨论了不同气层厚度下截面含气率和气体上升速度的变化情况以及孔隙度对气侵量的影响, 但两者都没有分析相关因素对井底压力的影响。可以说, 目前分析气侵后井底压力的影响因素尚未涉及打开气层厚度。利用实际工程数据, 对打开气层厚度与井底压力的影响关系进行分析讨论, 因此, 所开展的研究对进一步认清地层流体侵入对井底压力的影响, 做好井控工作具有重要意义和指导意义。

2. 气侵后井底压力计算模型

气侵后, 环空内的气液两相流与溢流前的钻井液单相流相比, 流动情况复杂, 计算也较为麻烦[9]。因此, 采用分相流的方法, 对气液两相流建立数学计算模型, 最后联合分相流方程进行求解。

2.1. 气相和液相控制方程

为了研究需要, 取管柱中某一微元体, 假设管柱壁上无质量变化, 且微元体的过流断面面积为 A ,

通过某一点 M 的质量变化情况如图 1 所示。

M 点的流入质量为 $A\rho_G E_G v_G dt|_{ds}$; ds 段内地层产气质量为 $q_G dt ds$; M' 点的流出质量为 $A\rho_G E_G v_G dt|_{s+ds}$; ds 段内累积质量为 $A\rho_G E_G ds$ 。

由质量守恒定理可知:

$$M \text{ 点的流入质量} + ds \text{ 段地层产气质量} = M' \text{ 点的流出质量} + ds \text{ 段内累积质量}$$

由此可以建立气相连续性方程:

$$A\rho_G E_G v_G dt|_{ds} + q_G dt ds = A\rho_G E_G v_G dt|_{s+ds} + A\rho_G E_G ds \quad (1)$$

即:

$$\frac{\partial(A\rho_G E_G)}{\partial t} + \frac{\partial(A\rho_G E_G v_G)}{\partial s} = q_G \quad (2)$$

式中: t 为气侵时间, s ; s 为井筒深度(从底部往井口), m ; A 为过流断面的面积, m^2 ; ρ_G 为气相密度, g/cm^3 ; E_G 为截面含气率, 1 ; v_G 为气相速度, m/s ; q_G 为单位长度井筒内的质量流量, $kg/(m \cdot s)$ 。

液相与气相控制方程建立的原理相同[7] [10] [11], 具体的数学模型:

$$\frac{\partial[A\rho_L(1-E_G)]}{\partial t} + \frac{\partial[A\rho_L(1-E_G)v_L]}{\partial s} = 0 \quad (3)$$

式中: ρ_L 为液相密度, g/cm^3 ; v_L 为液体真实速度, m/s 。

2.2. 气、液两相混合运动方程

由动量守恒原理可知:

$$(M' \text{ 点的动量} - M \text{ 点的动量} + ds \text{ 段累积质量产生的动量})/dt = \text{微元体所受的力}$$

建立两相混合运动方程:

$$\frac{[A\rho_G E_G v_G^2 dt|_{s+ds} + A\rho_L(1-E_G)v_L^2 dt|_{s+ds} - A\rho_G E_G v_G^2 dt|_{ds} + A\rho_L(1-E_G)v_L^2 dt|_{ds} + A\rho_L E_G v_G ds + A\rho_L(1-E_G)v_L ds]}{dt} \quad (4)$$

$$= A[(\rho_G E_G + \rho_L(1-E_G))]g \cos \alpha ds + Ap + A(p)_f$$

即

$$\frac{\partial[A\rho_G E_G v_G + A\rho_L(1-E_G)v_L]}{\partial t} + \frac{\partial[A\rho_G E_G v_G^2 + A\rho_L(1-E_G)v_L^2]}{\partial s} \quad (5)$$

$$+ A \frac{\partial p}{\partial s} + A \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)_f + A[\rho_G E_G + \rho_L(1-E_G)]g \cos \alpha = 0$$

式中: $(p)_f$ 为摩阻压力, MPa ; g 为重力加速度, m/s^2 ; $\left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)_f$ 为摩阻压力梯度, MPa/m 。

2.3. 求解方法

综上所述, 以上建立的计算模型(公式(3)、(4)、(5))均属于非线性偏微分方程, 单从方程本身求解较为困难, 因此借鉴流体力学常用的研究方法, 即有限差分法。在分析过程中, 可以将气侵发生的时刻对应到时间域, 井深对应到空间域。利用有限差分离散已建立的模型, 同时对空间域和时间域进行网格划分, 最后逐步求取空间域上的解, 直至覆盖整个时间域[12] [13]。

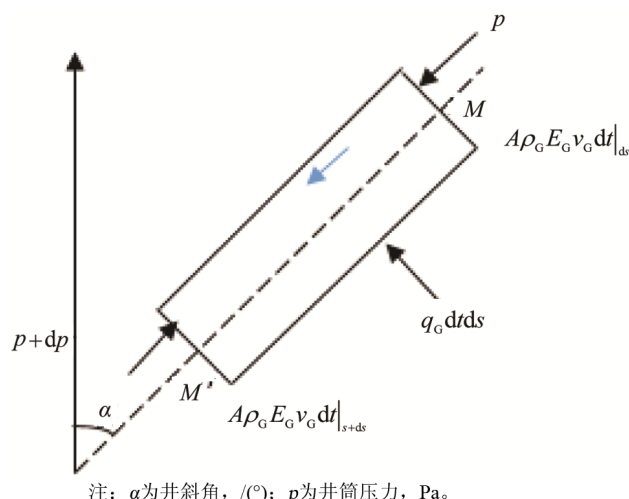


Figure 1. A physical model of body mass conservation element
图 1. 某一微元体质量守恒的物理模型

3. 工程实例

3.1. 基本参数计算

A 井是一口水平井, 在 6492~7300.29 m 进行欠平衡钻进, 施工过程中在 6492 m 和 6512 m 发生了溢流, 井身结构参数如表 1 所示。计算分析过程中需要的参数如表 2、表 3 所示。

3.2. 气层厚度对井底压力变化的影响

通过已建立的井底压力计算模型, 分别取直井段、造斜段、水平段的某一深度进行计算, 分析了井底压力与气侵时间、气层厚度的关系。取井深 5600、6492、6512 m 作为代表。在打开储层厚度分别 10、15、20 m 的情况下, 井底压力随时间的变化关系如图 2 所示。

直井段、造斜段和水平段的变化规律不尽相同。在直井段, 同一深度、不同气层厚度下, 随气侵时间的增加, 由于气侵初期气泡的压力与地层压力相当, 进入井筒后开始滑脱, 井底压力会先有瞬时增大的趋势; 而后, 随着气体在井筒运移过程中以体积膨胀为主导致井底压力逐渐减小; 最后达到稳定, 而且稳定值都比入侵前的井底压力值小。但是, 造斜段和水平段的井底压力并没有瞬时增大, 而是先保持平稳后增大, 并且水平段的短暂平稳期较造斜段长, 之后的变化规律与直井段相同, 这是由于造斜段和水平段不能类似于直井段, 在气侵之后直接进入井筒并上移, 气侵反应到地面的时间也是相对较少。

同时, 根据井底压差的概念, 井底负压差的变化规律与井底压力的变化趋势相同, 而且无论是哪个井段, 井底负压差都是随着打开气层厚度的增大而增加, 如此钻进过程中发生溢流的程度也愈大, 井控难度也随之增大。在钻井现场施工过程中, 一旦发生溢流, 及时根据井底压力计算压差, 实时调整钻井液密度, 能够在一定程度上预防进一步溢流。

另一方面, 井底压力稳定值不仅与气侵时间和井深有关, 还受钻开气层厚度的影响。钻开气层厚度越大, 暴露的面积越大, 进入井筒的气体量越大, 井底压力下降的幅度越大, 加大了井控难度; 气层厚度越小, 气体侵入量越少, 与气层厚度大的情况相比, 相当于渗透率减小, 井控相对要容易一些。因此在勘探开发中利用地震属性等方法预测气层厚度[14]-[16], 进而确定最大的钻开气层厚度, 以便计算最大井底负压差对应的钻井液密度附加值。并且越早于稳定值之前采取措施, 越利于采取井控措施, 这样可以降低发生溢流的可能性。

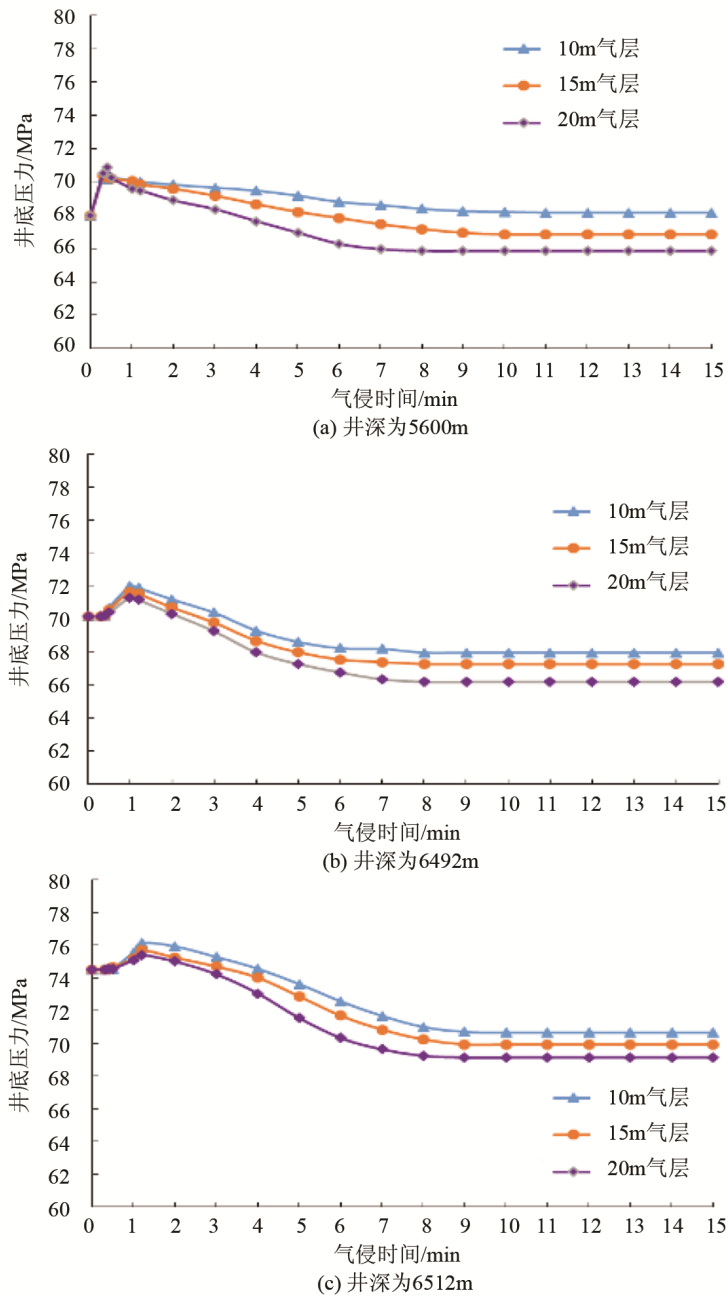


Figure 2. Relationship between gas invasion time and bottom hole pressure under different well depth and gas layer thickness
图 2. 不同井深和气层厚度下气侵时间与井底压力的关系图

Table 1. The parameters of well structure
表 1. 井身结构相关参数

开次	井眼尺寸/mm	井深/m	套管尺寸/mm	套管下深/m
一开	406.4	1499.50	273.05	1499.50
二开	241.3	6176.00	200.03	6174.25
三开	168.3	7300.29		裸眼完井

Table 2. The basic calculation parameters of Well A
表 2. A 井的基本计算参数

井深 /m	垂深 /m	地层孔隙度 /%	地层渗透率 /mD	地表温度 /°C	地温梯度 /(°C·m ⁻¹)	造斜点深度 /m	A 点深度 /m	气体黏度 /(mPa·s)
7300.29	6340.88	35.3	1.61	20	0.0233	5860	6498.08	0.02

Table 3. The relevant parameters of the well section
表 3. 研究井段的相关参数

井深/m	垂深/m	钻井液密度/(g·cm ⁻³)	地层压力/MPa	塑性黏度/(mPa·s)
5600	5600.00	1.24	71.93	21
6492	6285.91	1.08	76.16	15
6512	6287.36	1.12	76.26	17

4. 结论与认识

1) 在讨论影响气侵后井底压力变化规律时, 气层厚度是值得考虑的一个因素, 对于现场制定井控安全控制策略具有指导意义。

2) 气层厚度对应的井底压力稳定值受气侵时间与钻开气层厚度的影响, 而且随着气侵时间的推移和气层厚度的增加, 井底压力稳定值减小, 导致井底压差增大, 最终加大井控难度。

3) 如果采取相应的手段及早发现气侵并且采取井控措施, 能够减少地层气体的侵入量, 达到安全井控的目的。

基金项目

国家自然科学基金项目(51274047); 中石油渤海钻探工程有限公司科技攻关项目(DSZJ-2014-175)。

参考文献 (References)

- [1] Ansari, A.M., Sylvestre, N.D., Shoham, O., *et al.* (1990) A Comprehensive Mechanistic Model for Upward Two-Phase Flow in Wellbores. *SPE Production & Facilities*, **9**, SPE-20630-PA.
- [2] Hasan, A.R. and Kabir, C.S. (1988) Predicting Multiphase Flow Behavior in a Deviated Well. *SPE Production Engineering*, **3**, SPE-15449-PA.
- [3] Lage, C.V.M., Rommetveit, R. and Time, R.W. (2000) An Experimental and Theoretical Study of Two-Phase Flow in Horizontal or Slightly Deviated Fully Eccentric Annuli. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology*, Kuala Lumpur, 11-13 September 2000, SPE-62793-MS.
- [4] Nickens, H.V. (1987) A Dynamic Computer Model of a Kicking Well. *SPE Drilling Engineering*, **2**, 159-173. <http://dx.doi.org/10.2118/14183-PA>
- [5] Santos, O.L.A. (1991) Well-Control Operations in Horizontal Wells. *SPE Drilling Engineering*, **6**, SPE-21105-PA.
- [6] Choe, J. (2001) Advanced Two-Phase Well Control Analysis. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **40**, 39-47. <http://dx.doi.org/10.2118/01-05-02>
- [7] 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.
- [8] 周照明. 欠平衡随钻气侵规律及运移模型研究[D]: [博士学位论文]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
- [9] 谢明英. 作业井井侵期间气液流动规律研究[D]: [硕士学位论文]. 山东: 中国石油大学(华东), 2007.
- [10] 王凯. 水平井筒压力计算研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2008.
- [11] 范军, 施太和. 气井动态井控模型及计算机仿真[J]. 天然气工业, 1998, 18(4): 71-74.
- [12] 徐朝阳, 孟英峰, 魏纳, 等. 气侵过程井筒压力演变规律实验和模型[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 120-126.
- [13] 王志远, 孙宝江, 程海清. 深水井控过程中天然气水合物生成区域预测[J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 224-229.

- [14] 王利田. 大牛地气田低孔低渗气藏储层评价及含气性预测[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- [15] 杜新江, 任春玲. 利用“同相轴下拉”地震反射特征预测苏里格气田气层[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(2): 466-467, 655.
- [16] 张光荣, 卢晓敏, 孔令霞, 等. 川中潼南地区须二气藏多参数储层预测[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(S1): 12-15.

再次投稿您将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>