

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2014.01.006

渗透性砂岩地层漏失压力预测模型

邹德永¹, 赵 建¹, 郭玉龙¹, 方满宗², 管 申²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057)

摘要:为了预测渗透性砂岩地层的漏失压力,提高钻井的安全性。根据塑性流体的本构方程和毛细管渗流理论,分析了钻井液(宾汉流体)在井壁泥饼带、地层侵入带和原地层孔隙中的流动特性,分别建立了井壁有无泥饼 2 种情况下的渗漏压力计算模型。利用建立的数学模型,对崖城 13-1-A15 井压力衰竭储层段的漏失压力进行了预测,结果表明:井壁上未形成泥饼时,漏失压力当量密度为 0.613 kg/L;井壁上形成厚度 1 mm、渗透率小于 4×10^{-5} D 的泥饼时,漏失压力当量密度可提高到 1.21 kg/L 以上。崖城 13-1-A15 井钻井施工中,采用密度 1.10 kg/L 的抗高温 Versaclean 油基钻井液,没有发生井漏。建立的渗透性砂岩地层漏失压力预测模型,可为渗透性砂岩地层安全钻井提供参考。

关键词:渗透性漏失 漏失压力 高渗透地层 钻井液 数学模型 崖城 13-1-A15 井

中图分类号: TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2014)01-0033-04

A Model for Predicting Leak-off Pressure in Permeable-Sandstone Formations

Zou Deyong¹, Zhao Jian¹, Guo Yulong¹, Fang Manzong², Guan Shen²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang, Guangdong, 524057, China)

Abstract: In order to predict leak-off pressure in high-permeability sandstone formations and ensure drilling safety, through analysis of the flow characteristics of drilling fluid in mud cake zone, invaded zone and in-situ pores, two calculation models for predicting leak-off pressure were established, with or without mud cake on wellbore, according to the constitutive equation of plastic fluid and capillary percolation theory. The leak-off pressure of Well Yacheng 13-1-A15 was predicted by this model, the results indicate that leak-off pressure equivalent density was 0.613 kg/L in the case of no mud cake on the wellbore; the leak-off pressure equivalent density was 1.21 kg/L when mud cake formed on the wellbore with the thickness of 1 mm and permeability was less than 4×10^{-5} D. Lost circulation did not occur in the drilling of Well Yacheng 13-1-A15 through adoption of Versaclean high temperature oil-based plugging drilling fluids with a density of 1.10 kg/L. The prediction model for leak-off pressure could provide a theory basis for safe drilling in high-permeability sandstone formations.

Key words: permeable loss; leak-off pressure; high permeability formation; drilling fluid; mathematical model; Well YC13-1-A15

在高孔、高渗砂岩地层钻井时,渗透性漏失是一种常见的井下复杂情况^[1-2]。为预防井漏发生,必须准确预测地层漏失压力^[3]。国内对于漏失压力的确定尚无成熟的理论,比较常用的计算模型主要是基于力学的漏失压力计算模型和基于统计学的计算模型。但力学模型是在非渗漏条件下推导出来的,得到的结

收稿日期:2013-03-03; 改回日期:2013-12-05。

作者简介:邹德永(1962—),男,山东威海人,1984 年毕业于华东石油学院钻井工程专业,1988 年获石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位,2004 年获石油大学(华东)油气井工程专业博士学位,教授,博士生导师,主要从事油气井工程方面的教学与科研工作。

联系方式:(0532)86983276, zouyan@upc.edu.cn。

基金项目:中国石油大学(华东)校自主创新基金项目“导向式 PDC 钻头的导向特性研究”(编号:12CX06025A)资助。

果较实际漏失压力偏大;而统计学模型在实际应用中无法确定漏强系数 K ^[4-5]。国外,有 Eaton 模型^[6]、Anderson 预测模型^[7]、B. S. Aadnphy 等人根据力学平衡提出的简单应力桥模型^[8]以及塔尔萨大学的 R. Majidi 等人提出的模型^[9]。但这些模型对漏失压力机理的描述只停留在定性阶段,并没有从孔隙地层或裂缝地层的特征出发进行深入系统的研究,没有给出定量评价钻井液性能、漏失通道、施工参数等对井漏影响的模型^[10]。为此,笔者针对高孔、高渗砂岩地层孔隙结构和表面物理性质极为复杂的特点,根据钻井液流动的宾汉模型,建立了一种新的漏失压力模型,以预测高渗砂岩地层漏失压力,为提高钻井的安全性和经济性提供参考。

1 井壁无泥饼时的漏失压力计算模型

漏失压力是指使钻井液在渗透性地层中流动所需要的最低压力,其等于地层孔隙压力(p_p)与钻井液在地层孔隙中的流动压降(Δp_l)之和,即:

$$p_l = p_p + \Delta p_l \quad (1)$$

在钻井液向地层渗漏的过程中,固相颗粒不能有效封堵地层孔喉时,不会在近井地带形成封堵,也不会在井壁上形成泥饼。此时,漏失压力等于钻井液在近井侵入带的流动压降、地层流体在孔隙中的流动压降和地层孔隙压力之和,如图 1 所示(图 1 中, p_p 为地层孔隙压力; Δp_l , Δp_p 分别为侵入带压力降和地层孔隙压力降; μ , μ_0 分别为钻井液塑性黏度和地层流体塑性黏度; r_w , r_i , r_e 分别为井眼、侵入带以及远地层的半径)。

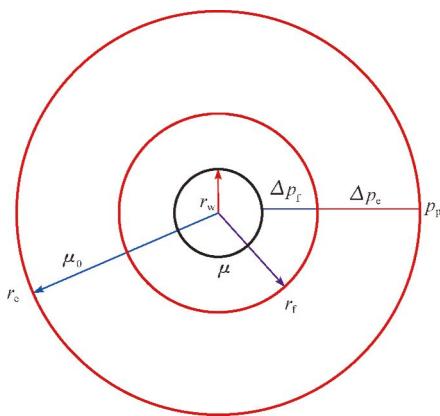


图 1 井壁无泥饼时的漏失压力
Fig. 1 Leak-off pressure without mud cake on wellbore

相对于钻井液在近井侵入带的流动压降而言,

地层流体,尤其是天然气,在地层孔隙中的流动压降很小,可以忽略不计,而钻井液向地层漏失的压差主要由钻井液在近井侵入带的流动压降所决定。

钻井液为塑性流体,因此钻井液在地层侵入带的渗流不再符合基于牛顿流体的达西定律。塑性流体在管中流动时,其切力(τ)与屈服值(τ_0)、塑性黏度(μ)、速度梯度(dv/dr)之间的关系可用宾汉公式表示。

$$\tau = \tau_0 - \mu(dv/dr) \quad (2)$$

首先考虑钻井液在岩心中的线性流动情况。可将天然岩心简化为数根毛管组成的理想化岩心模型,如图 2 所示。

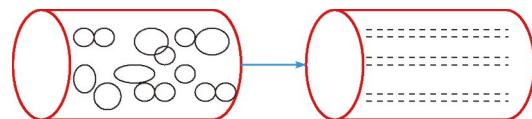


图 2 毛管束模型

Fig. 2 Model of capillary bundle

岩石的孔隙度 ϕ 、渗透率 K 与毛管半径 r 的关系为^[11]:

$$r = \sqrt{\frac{8K}{\phi}} \quad (3)$$

假设塑性流体在长度为 L 的毛管中的驱动压差为 Δp_c ,则流体驱动压力为 $\Delta p_c \pi r^2$,黏滞阻力为 $2\pi r L \tau$,流动处于层流状态时有:

$$\Delta p_c \pi r^2 = 2\pi r L \tau \quad (4)$$

将式(2)代入式(4)并整理得:

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{\Delta p_c}{2\mu L} r + \frac{\tau_0}{\mu} \quad (5)$$

对式(5)积分,并结合边界条件 $r=r_0$ 和 $v=0$ 可得:

$$v = \frac{\Delta p_c}{4\mu L} (r_0^2 - r^2) + \frac{\tau_0}{\mu} (r - r_0) \quad (6)$$

单根毛管单位时间内的流量为:

$$q_0 = \int_0^{r_0} 2\pi r v dr = \frac{\pi \Delta p_c r_0^4}{8\mu L} \left(1 - \frac{8\tau_0 L}{3\Delta p_c r_0} \right) \quad (7)$$

对一定长度的岩心,有以下关系:

$$\phi = n\pi r_0^2 \quad (8)$$

设单位面积内有 n 根半径为 r_0 的毛管构成的毛管束,则横截面面积 A 内的单位时间钻井液渗漏流量 q_f 为:

$$q_f = nAq_0 = \frac{K}{\mu} A \left(\frac{\Delta p_c}{L} - \frac{4}{3} \tau_0 \sqrt{\frac{\phi}{2K}} \right) \quad (9)$$

将钻井液在岩心中的线性流动规律推广到钻井液由井内向地层渗流的情况,并考虑孔隙的曲折性,设毛细管的迂曲度为 1.5(迂曲度据地层结构适当选取),可得:

$$q_f = \frac{2K\pi rh}{3\mu} \left(\frac{dp_c}{dr} - 4\tau_0 \sqrt{\frac{\phi}{2K}} \right) \quad (10)$$

对式(10)积分进行变换得:

$$\Delta p_c = \frac{3q_f\mu}{2\pi Kh} \ln \frac{r_f}{r_w} + 4\tau_0(r_f - r_w) \sqrt{\frac{\phi}{2K}} \quad (11)$$

式(11)即为钻井液在侵入带地层的渗流压降计算模型。

所以,井壁无泥饼情况下的地层漏失压力计算模型为:

$$p_l = p_p + \frac{3q_f\mu}{2\pi Kh} \ln \frac{r_f}{r_w} + 4\tau_0(r_f - r_w) \sqrt{\frac{\phi}{2K}} \quad (12)$$

式中: q_f 为钻井液渗漏流量, L/s; h 为漏失层厚度, m; K 为地层的渗透率, D; Δp_c 为地层侵入带压力降, MPa; μ 为钻井液塑性黏度, mPa · s; r_w 和 r_f 分别为井眼、侵入带的半径, m; τ_0 为钻井液屈服值, Pa; ϕ 为孔隙度。

2 井壁有泥饼时的漏失压力计算模型

当钻井液能在井壁上有效形成泥饼时,滤液将通过泥饼渗滤。此时,渗漏压降由 4 部分组成^[6]:滤液在外泥饼中的流动压降、滤液在封堵层(内泥饼)中的流动压降、滤液在侵入带中的流动压降和远地层流体在孔隙中的流动压降。由于泥饼渗透率很低,相对于钻井液滤液在泥饼中的流动压降而言,滤液在侵入带的流动压降和远地层流体的流动压降都很小,可以忽略不计,则钻井液向地层漏失的压差主要由钻井液在泥饼中的流动压降所决定,如图 3 所示(图 3 中, Δp 为钻井液在泥饼中的压力降; r_m , r_n 分别为形成泥饼后的井眼和封堵层的半径; 其他同图 1)。

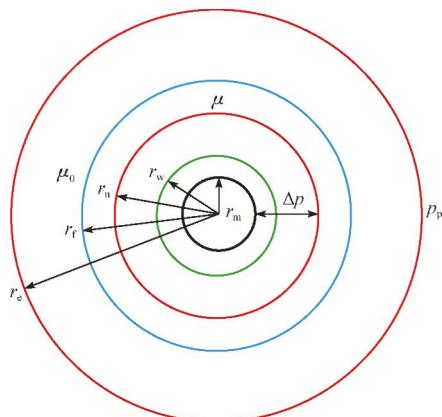


图 3 井壁有泥饼时的漏失压力

Fig. 3 Leak-off pressure with mud cake on wellbore

此时渗漏压力也可按式(12)进行计算,但由于井壁泥饼的孔隙度、渗透率无法确定,钻井液滤液也基本属于牛顿流体,所以滤液在泥饼中的流动服从达西定律,则井壁有泥饼情况下的漏失压力可按下式计算^[12]:

$$p_l = p_p + \frac{q_f}{2\pi h} \left(\frac{\mu_f}{K_m} \ln \frac{r_w}{r_m} + \frac{\mu_f}{K_n} \ln \frac{r_n}{r_w} \right) \quad (13)$$

式中: K_m 和 K_n 分别为泥饼和封堵层的渗透率, D; r_w , r_m 和 r_n 分别为原井眼、有泥饼的井眼和封堵层的半径, m; μ_f 为钻井液滤液的表观黏度, mPa · s。

3 实例分析

YC13-1-A15 井是崖城 13-1 气田的一口调整井。该井钻遇地层从上至下依次为第四系,上新统,中新统莺黄组、梅山组和三亚组,渐新统陵水组和崖城组。该井主要目的层为渐新统陵水组三段,埋深 3 885.00~3 960.00 m, 储层厚度 50.00 m。目的层岩性以中—细砂为主,局部为砂砾岩、粗砂岩。原始地层压力系数 1.00~1.10。因崖城气田生产已超过 12 年,地层压力系数降至 0.44。该井设计四开井眼尺寸为 215.9 mm, 采用抗高温油基钻井液钻进。抗高温油基钻井性能为: 密度 1.10 kg/L, 塑性黏度 16.0 mPa · s, 屈服值 6.0 Pa, 静切力 12 Pa。

设最大钻井液渗流速度为 0.2 m³/h, 钻井液侵入带半径为 0.5 m。利用式(12)计算得出陵三段最低渗漏压力当量密度为 0.613 kg/L, 发生渗透性漏失的风险极大。

为维持井壁稳定,该井钻井液密度设计为 1.10 kg/L, 大于地层漏失压力当量密度,如果不能在近井地带进行有效封堵,必然发生渗透性漏失。用式(12)计算出漏失速率可达 6.2 m³/h。

为防止发生渗透性漏失,设计在陵水组三段采用加入 CaCO₃、Liquid-Casing 等堵漏材料的抗高温 Versaclean 油基钻井液。利用式(13)计算井壁有 1 mm 泥饼、泥饼渗透率为 4×10^{-5} D 情况下的陵水组三段的漏失压力,结果见图 4。

从图 4 可以看出,在井壁上形成泥饼后的漏失压力当量密度明显提高,大于所用钻井液密度 1.10 kg/L。并且通过岩心封堵试验测得,抗高温 Versaclean 油基钻井液所形成约 1 mm 厚泥饼的渗透率最高为 4×10^{-8} D, 远小于 4×10^{-5} D。该井使用密度 1.10 kg/L 的抗高温 Versaclean 油基钻井液安全钻穿了陵三段超低压渗透性地层,没有发生漏失。

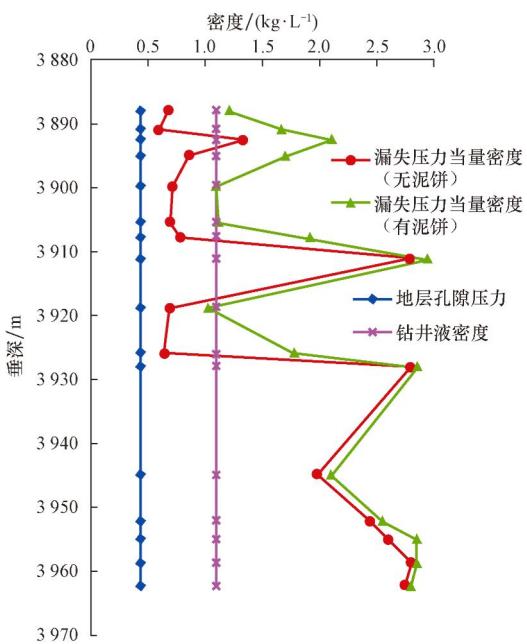


图 4 YC13-1-A15 井漏失层压力剖面
Fig. 4 Leak-off pressure profile in leakage section of Well YC13-1-A15

4 结 论

- 1) 从塑性流体本构方程出发,结合塑性流体在毛管中的渗流公式,推导了井壁有无泥饼 2 种情况下的渗透性砂岩地层渗漏压力计算模型。
- 2) 实例分析表明,所建立的漏失压力计算模型针对性较强,其预测结果可为现场施工提供重要的参考。
- 3) 在钻进渗透性砂岩地层时,选择能在井壁上形成低渗透泥饼的钻井液可以有效预防井漏的发生。
- 4) 漏失压力受地层性质、钻井液性能和施工环境等多种因素的影响,建议进一步研究漏失压力,提高预测漏失压力的精度,以指导安全钻井。

参 考 文 献

References

- [1] 唐玉响,沈建文,王佩平,等.强水敏高孔高渗储层水平井储层保护钻井液技术[J].石油钻探技术,2009,37(4):46-49.
Tang Yuxiang, Shen Jianwen, Wang Peiping, et al. Formation protection drilling fluids suitable for reservoir with high porosity, high permeability and high water sensitivity[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(4): 46-49.
- [2] 张景富,岳宏野,张德兵,等.分析与计算地层渗透性漏失漏层深度和压力的新方法[J].石油钻采工艺,2013,35(3):12-15.
Zhang Jingfu, Yue Hongye, Zhang Debing, et al. New analysis and calculation method for permeable leakage layer depth and pressure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(3): 12-15.

- Zhang Jingfu, Yue Hongye, Zhang Debing, et al. New analysis and calculation method for permeable leakage layer depth and pressure[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(3): 12-15.
- [3] 李军伟,曹式敬,宋林松,等.JZ25-1S油田水平井控制压力钻井技术[J].石油钻探技术,2013,41(2):119-122.
Li Junwei, Cao Shijing, Song Linsong, et al. Managed pressure drilling technique for horizontal wells in JZ25-1S Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 119-122.
- [4] 吕苗荣,张玉波,孙书贞,等.井漏处理系统应用软件的开发[J].断块油气田,2001,8(2):45-48.
Lv Miaorong, Zhang Yubo, Sun Shuzhen, et al. Development of well loss systematic software[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2001, 8(2): 45-48.
- [5] 朱亮,张春阳,楼一珊,等.两种漏失压力计算模型的比较分析[J].天然气工业,2008,28(12):60-61,67.
Zhu Liang, Zhang Chunyang, Lou Yishan, et al. Comparative analysis between the mechanics-based and statistics-based calculation models for leakage pressure[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(12): 60-61, 67.
- [6] 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,2000:18-19.
Chen Tinggen, Guan Zhichuan. Drilling engineering theory and technology[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2000: 18-19.
- [7] Anderson R A, Ingram D S, Zanier A M. Determining fracture pressure gradients from well logs[J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, 25(11):1259-1268.
- [8] Aadnøy B S, Belayneh M. Elasto-plastic fracturing model for wellbore stability using non-penetrating fluids[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 45(3/4):179-192.
- [9] Shahri Porde M, Zeyghami M, Majidi R. Investigation of fracture ballooning and breathing in naturally fractured reservoirs: effect of fracture deformation law; Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Abuja, July 30 – August 3, 2011[C].
- [10] 王金刚,张杰,段小康,等.漏失压力研究现状[J].中国西部科技,2012(10):29-30.
Wang Jingang, Zhang Jie, Duan Xiaokang, et al. Present study situation of pressure leakage[J]. Science and Technology of West China, 2012(10): 29-30.
- [11] 秦积舜,李爱芬.油层物理学[M].东营:石油大学出版社,2001:123-131.
Qin Jishun, Li Aifen. Physics of oil reservoir[M]. Dongying: Petroleum University Press, 2001: 123-131.
- [12] 张建国,杜殿发.油气层渗流力学[M].东营:石油大学出版社,1998:63-73.
Zhang Jianguo, Du Dianfa. Percolation mechanics of oil and gas[M]. Dongying: Petroleum University Press, 1998: 63-73.

〔编辑 刘文臣〕