

非均质碳酸盐岩油藏水平井分段酸化注酸量优化设计方法

付宣¹,李根生^{1*},崔明月²,黄中伟¹,蔡承政¹

(1.中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;
2.中国石油勘探开发研究院廊坊分院,河北廊坊 065007)

摘要: 对非均质碳酸盐岩油藏水平井进行分段酸化改造时,需充分考虑水平井渗透率非均质特性,准确评估各段伤害带半径和伤害带渗透率,以便合理设计各段注酸量。在考虑了钻井过程中井底压差、钻井液浸泡时间和渗透率分布等因素的基础上,利用达西定律推导了各段伤害带半径的计算模型;提出了基于油藏井筒耦合模型与现场实测的产液剖面来计算各段伤害带渗透率的新方法;通过现场1口实际井详细描述了基于上述模型的非均质碳酸盐岩油藏水平井分段酸化注酸量的优化设计流程。考虑水平井渗透率非均质性并结合现场实测生产数据,相比于传统的基于椭圆锥台体伤害带分布模型进行的笼统化布酸模式,新的设计思路提高了各段布酸的合理性,可有效解除储层污染、恢复油井产能。

关键词: 非均质 碳酸盐岩 水平井 分段酸化 注酸量

中图分类号: TE357.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)06-0112-04

Optimization design of acid fluid volume of staged acidizing in horizontal wells for heterogeneous carbonate reservoir

Fu Xuan¹, Li Gensheng¹, Cui Mingyue², Huang Zhongwei¹, Cai Chengzheng¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang City, Hebei Province, 065007, China)

Abstract: In order to reasonably allocate the acid fluid volume for staged acidizing in a horizontal well for heterogeneous carbonate reservoir, it is crucial to fully consider the permeability heterogeneity along the wellbore and to accurately evaluate the damage radius and damage permeability of each segment. Based on the Darcy's law, a model of damage radius was deduced with consideration of drilling bottom-hole pressure difference, soak period of drilling mud and permeability distribution. Based on reservoir-wellbore coupling model and tested inflow profile, a new approach of calculating damage permeability distribution was proposed. The process of acid fluid volume optimization for heterogeneous carbonate reservoir was illustrated by a case study on real well data. Since the influence of the permeability heterogeneity and the real production data is fully considered, the proposed design procedure can improve the reasonability of acid fluid volume allocation along the horizontal well, remove the formation pollution effectively and restore oil well productivity compared to the traditional non-specific acid allocation pattern which is based on the elliptic cone damage zone model.

Key words: heterogeneous; carbonate rock; horizontal well; staged acidizing; acid fluid volume

收稿日期: 2015-09-23。

作者简介: 付宣(1983—), 男, 河北滦县人, 在读博士研究生, 从事水平井分段完井与改造技术研究。联系电话: (010)89733988, E-mail: fuxuan1998@aliyun.com。

*通讯作者: 李根生(1961—), 男, 安徽石台人, 教授, 博士。联系电话: (010)89733935, E-mail: lig@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目“复杂油气井钻井与完井基础研究”(51221003), 中国石油集团公司“十二五”海外重大科技攻关项目“中东地区大型碳酸盐岩油藏采油工程技术研究与应用”(2011E-2502)。

非均质碳酸盐岩水平井的酸化改造常使用分段酸化方法^[1-4]。如何合理设计各段的注酸量是分段酸化的关键问题之一,而注酸量的确定主要取决于各段的伤害程度。近井地带伤害带半径和伤害带渗透率是描述伤害程度的主要参数。目前指导水平段酸化设计的伤害带半径模型主要采用的是全井段椭圆锥台体的伤害模型^[5-6],该模型仅以钻井液浸泡时间为依据,认为靠近跟端的井段钻井液与储层接触时间长,伤害半径较大,其余井段以此半径为基础逐渐递减,并未考虑沿水平井筒渗透率非均质的特性,因此采用该方法估算水平井伤害带半径并指导酸化设计时,不能准确地估计各段伤害程度,导致出现注酸量不合理等问题。此外,如何结合现场数据估算水平井各段伤害带渗透率目前尚无文献报道。

笔者针对以上问题,首先依据达西定律,在充分考虑钻井过程中井底压差、钻井液浸泡时间和储层渗透率等因素影响的前提下,总结出水平井各段伤害带半径的计算方法;之后提出了基于油藏井筒耦合模型与现场实测的产液剖面来计算各段伤害带渗透率的新方法;最后通过现场实例,描述了水平井分段酸化解近井污染时各段注酸量的设计方法,以期为非均质碳酸盐岩储层水平井分段酸化施工提供理论与设计依据。

1 伤害带半径计算模型

对于非均质油藏,由于沿水平井渗透率分布不均匀,各段的伤害带半径不仅与钻井液的浸泡时间有关,且与该段的储层渗透率有关,对此,提出了一种考虑储层渗透率分布的伤害带半径计算模型。依据达西定律,钻井液侵入储层深度的表达式为

$$\Delta L = \frac{\Delta p K \sqrt{t}}{\mu C} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,钻井过程中井眼周围的伤害深度与井底压差、储层渗透率、钻井液浸泡时间以及钻井液自身的粘度和滤失系数相关。

将前、后2段的侵入深度相除,可以得到

$$\frac{\Delta L_{n+1}}{\Delta L_n} = \frac{K_{n+1}}{K_n} \sqrt{\frac{t_{n+1}}{t_n}} \quad (2)$$

如果已知第1段侵入深度,则可通过式(2)计算后续各段的侵入深度。

伤害带半径的表达式为

$$r_d = r_w + \Delta L \quad (3)$$

2 伤害带渗透率计算方法

忽略井眼周围储层的各向异性,依据文献[5],伤害带渗透率表达式为

$$K_d = \frac{K}{1 + \frac{S_a}{\ln \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{4 \left(\frac{r_d^2}{r_w^2} + \frac{r_d}{r_w} + 1 \right)}{3}} \right]}} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,各段伤害带渗透率除与伤害带半径有关外,还要求取各段的表皮系数。一般如果近井地带受到污染,实测的产液剖面应当比理论计算的无表皮系数的产液剖面要低。因此为符合现场实际情况,需要对水平井的产液剖面进行测量^[7-9],并利用油藏井筒耦合流动模型对表皮系数进行反算。采用基于势的叠加原理和镜像反射原理的油藏井筒耦合模型^[10],在考虑各段表皮系数之后,其渗流方程的表达式为

$$AX = b \quad (5)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} \varphi_{1,1} + S_{a1} & \cdots & \varphi_{1,j} & \cdots & \varphi_{1,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{i,1} & \cdots & \varphi_{i,j} + S_{ai} & \cdots & \varphi_{i,N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{N,1} & \cdots & \varphi_{N,j} & \cdots & \varphi_{N,N} + S_{aN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X = \begin{bmatrix} q_{in,1} \\ \vdots \\ q_{in,j} \\ \vdots \\ q_{in,N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$b = \begin{bmatrix} p_e - p_{wb,1} \\ \vdots \\ p_e - p_{wb,j} \\ \vdots \\ p_e - p_{wb,N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

井筒流动压降方程为

$$p_{wb,j} - p_{wb,j-1} = \frac{32\rho f_j}{\pi^2 d_w^5} q_{w,j}^2 L_j + \frac{32\rho q_{in,j}}{\pi^2 d_w^4} q_{w,j} \quad (9)$$

当测得实际产液剖面时,可通过式(9)求出井筒各段压力,并代入式(5)即获得各段表皮系数。将计算所得的各段伤害带半径和各段表皮系数代入式(4)即可得到各段的伤害带渗透率。

3 各段注酸量计算方法

依据前人对酸化蚓孔数学模型的研究^[11-12],每

单位长度储层中的注酸量表达式为

$$\bar{v} = \pi \phi P_{vis} (r_{wh}^2 - r_w^2) \quad (10)$$

由式(10)计算注酸量时需要已知酸化半径,而酸化半径可以由酸化后的表皮系数反推得到,即

$$S = \begin{cases} \frac{K}{K_d} \ln \frac{r_d}{r_{wh}} - \ln \frac{r_d}{r_w} & r_{wh} < r_d \\ -\ln \frac{r_{wh}}{r_w} & r_{wh} > r_d \end{cases} \quad (11)$$

4 分段酸化设计流程

随着目前所钻水平段长度的不断增加,同一水平井可能钻遇不同地层,即使是同一地层在不同井段其物性也常常存在较大差异,主要体现在沿井筒渗透率分布的非均质性上。一般碳酸盐岩储层非均质性较强,针对这类储层的优化流程为:①实测水平井产液剖面及沿井筒渗透率分布;②将实测剖面代入油藏渗流与井筒耦合模型试算各段表皮系数;③依据渗透率分布、钻井时井底压差以及钻速,利用式(3)计算各段伤害带半径;④将各段伤害带半径和表皮系数代入式(4)得到伤害带渗透率;⑤确定酸化后各段目标表皮系数,将各段伤害带半径和伤害带渗透率代入式(11)得到各段酸化半径;⑥将各段酸化半径代入式(10)得到各段注酸量。

5 实例分析

以中东某碳酸盐岩油藏1口注水井为例,该井水平段垂深为2 616 m,水平段长度为801 m,距离储层底部3.88 m,水平段裸眼直径为215.9 mm,采用外径为139.7 mm打孔筛管完井,孔密为120孔/m,孔径为10 mm。该井初期为生产井,后改为注水井,2014年2月进行注水剖面测试,测试结果和渗透率分布如表1所示。储层平均厚度为17.2 m,孔隙度为25%,注水测试时储层压力为15.3 MPa,井底流压为36.3 MPa。已知各段初始测井渗透率,假设各段表皮系数为0,依据油藏井筒耦合模型可得理想注水剖面分布(图1)。由图1可以看出,由于近井伤害的影响,实测注水剖面各段均小于理想注水剖面。

将实测注水剖面代入油藏井筒耦合模型,通过试算得到沿井筒伤害带表皮系数分布(表1)。依据钻井资料,该井完井段平均钻速为13.12 m/h,61 h完钻。假设水平段跟端的伤害带半径为1 m,依据式(2)可计算其余水平段平均伤害带半径;将储层初始渗透率、伤害带半径以及伤害带表皮系数代入

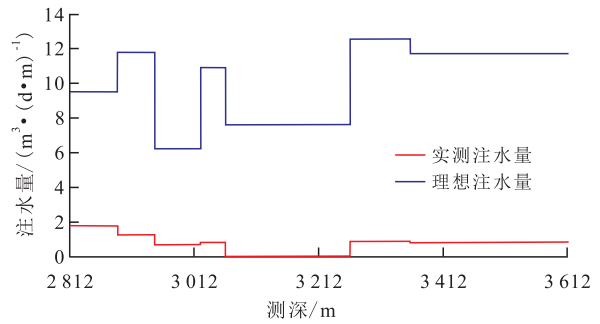


图1 水平段实测与理想注水剖面对比

Fig.1 Comparison of real and ideal injection profile

表1 注水剖面测试结果与初始测井渗透率、伤害带表皮系数分布

Table 1 Test results of injection profile and distribution of initial logging permeability and damage skin factor

段号	测深/m	水平段长度/m	实测注水量/ (m³·(d·m)⁻¹)	初始测井渗透率/ 10⁻³ μm²	伤害带表皮系数
1	2 812 ~ 2 887	75	1.79	13.4	68
2	2 887 ~ 2 947	60	1.27	17.5	134
3	2 947 ~ 3 021	74	0.72	10.6	144
4	3 021 ~ 3 061	40	0.86	16.8	198
5	3 061 ~ 3 261	200	0.05	15.9	3 100
6	3 261 ~ 3 358	97	0.92	16.9	185
7	3 358 ~ 3 613	255	0.86	16.5	191

式(4),则可计算出伤害带的渗透率(图2)。

由图2可以看出,受储层渗透率非均质性以及钻井液浸泡时间的影响,各段伤害带半径呈锯齿状分布(尤其是前4段),而非传统椭圆锥台体模型所呈现的阶梯状分布,因此按照传统椭圆锥台体模型进行估算可能会造成各段改造不均的问题;而伤害带渗透率的分布受伤害带半径影响较小,与实测的注水剖面规律一致,反映了各段近井筒地带堵塞程度的差异。因此,对于各段注酸量的设计要综合考虑伤害带渗透率和伤害带半径2个指标的影响。假设酸化后各井段的目标表皮为0(相当于污染带被解除),依据注酸量计算模型(式(10)),得到最终注

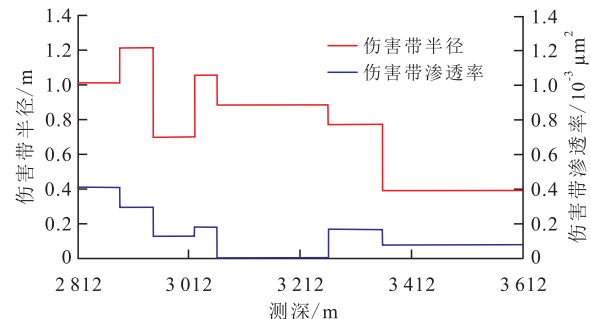


图2 伤害带半径和伤害带渗透率分布

Fig.2 Damage radius and damage permeability distribution

酸量结果(表2),可以看出,第1段和第3段由于渗透率相对较低,尽管浸泡时间较长,但单位长度注酸量并不高;第2段和第4—7段渗透率相差较小,因此单位长度注酸量基本与钻井液浸泡时间成正比相关。

表2 注酸量计算结果

Table2 Calculation results of acid fluid volume in each segment

段号	测深/m	伤害带半径/m	伤害带渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	酸化半径/m	注酸量/ m^3	单位长度注酸量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$
1	2 812~2 887	1.01	0.41	0.93	27	0.36
2	2 887~2 947	1.22	0.30	1.16	33	0.56
3	2 947~3 021	0.70	0.13	0.68	14	0.19
4	3 021~3 061	1.06	0.19	1.03	18	0.44
5	3 061~3 261	0.89	0.01	0.89	65	0.33
6	3 261~3 358	0.78	0.17	0.76	23	0.24
7	3 358~3 613	0.39	0.08	0.39	16	0.06
合计					196	

6 结束语

提出了一种考虑储层渗透率分布的伤害带半径计算模型,较之传统椭圆锥台体模型,该模型综合考虑了钻井过程中井底压差、钻井液浸泡时间和储层渗透率等因素,计算得到的伤害带半径分布更为合理准确;提出了依据水平井产液剖面结合油藏井筒耦合模型进行水平井各段伤害带渗透率估算的新方法,得到的伤害带渗透率分布更符合现场实际情况;非均质油藏水平井近井地带伤害程度与钻井液浸泡时间和渗透率分布有关,在进行分段酸化解除近井地带伤害表皮时,需综合考虑二者影响来计算各段伤害程度,合理分配各段布酸量,从而有效解除储层污染、恢复油井产能。

符号解释:

ΔL —— 钻井液侵入深度, m; Δp —— 井底压差, Pa; K —— 储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ —— 钻井液粘度, Pa·s; v —— 钻井液在储层内流动速度, m/s; C —— 钻井液滤失系数; t —— 钻井液浸泡时间, s; ΔL_{n+1} —— 第 $n+1$ 段钻井液侵入深度, m; ΔL_n —— 第 n 段钻井液侵入深度, m; K_{n+1} —— 第 $n+1$ 段渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_n —— 第 n 段渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; t_{n+1} —— 第 $n+1$ 段钻井液浸泡时间, s; t_n —— 第 n 段钻井液浸泡时间, s; r_d —— 伤害带半径, m; r_w —— 井筒半径, m; K_d —— 伤害带渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; S_a —— 表皮系数; $\varphi_{i,j}$ —— 各段势的叠加值; S_{a_j} —— 第 j 段表皮系数; $q_{m,j}$ —— 第 j 段水平段入流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; p_e —— 油层边界或泄油边界压力,

Pa; $p_{wb,j}$ —— 第 j 段水平段井壁处压力, Pa; ρ —— 流体密度, kg/m^3 ; f_j —— 第 j 段水平段摩擦系数; d_w —— 井筒直径, m; $q_{w,j}$ —— 第 j 段井筒内流量, m^3/s ; L_j —— 第 j 段井段长度, m; \bar{v} —— 单位长度储层注酸量, m^3/m ; ϕ —— 孔隙度; P_{va} —— 蚓孔延伸一定长度所需要的酸液体积的参数; r_{wh} —— 酸化半径, m; S —— 酸化后的表皮系数。

参考文献:

- [1] 郭富凤,赵立强,刘平礼,等.水平井酸化工艺技术综述[J].断块油气田,2008,15(1):117-120.
Guo Fufeng, Zhao Liqiang, Liu Pingli, et al. Overview of acidizing technology of horizontal well [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008, 15(1): 117-120.
- [2] 蔡承政,李根生,沈忠厚,等.水平井分段酸化酸压技术现状及展望[J].钻采工艺,2013,36(2):48-51.
Cai Chengzheng, Li Gensheng, Shen Zhonghou, et al. Present situation and prospect of horizontal well multistage acidizing and acid fracturing technique [J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(2): 48-51.
- [3] 肖佳林,胡韵,刘炜.碳酸盐岩储层水平井分段酸化参数优化设计研究及应用[J].中国石油和化工标准与质量,2014,(2):208-209.
Xiao Jialin, Hu Yun, Liu Wei. Optimization design and application of staged acidizing in horizontal wells for carbonate reservoir [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2014, (2): 208-209.
- [4] 艾昆,贾光亮,张会师,等.水平井分段转向酸酸化压裂技术[J].特种油气藏,2014,21(3):148-150.
Ai Kun, Jia Guangliang, Zhang Huishi, et al. Staged diverting acid fracturing in horizontal wells [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(3): 148-150.
- [5] Frick T P, Economides M J. Horizontal well damage characterization and removal [C]. SPE 21795-PA, 1993.
- [6] 曲占庆,于姣姣,温庆志,等.水平井分段酸化效果影响因素分析及优化[J].石油钻探技术,2011,39(6):63-68.
Qu Zhanqing, Yu Jiaojiao, Wen Qingzhi, et al. Analysis and optimization of influential factors on horizontal well staged acidizing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(6): 63-68.
- [7] 吴世旗,钟兴福,刘兴斌,等.水平井产出剖面测井技术及应用[J].油气井测试,2005,14(2):57-59.
Wu Shiqi, Zhong Xingfu, Liu Xingbin, et al. Tech of production profile logging in horizontal well and its application [J]. Well Testing, 2005, 14(2): 57-59.
- [8] 张世明,吴晓东,李坤,等.基于吸水剖面资料的油藏层间平均剩余油饱和度计算方法[J].油气地质与采收率,2014,21(5):98-100.
Zhang Shiming, Wu Xiaodong, Li Kun, et al. A new calculation method of inter-layer average remaining oil saturation based on water injection profile [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 98-100.

(下转第120页)