

一种新的砂岩酸化实时监测技术

邹建波 李 闽 李玉勇 王道成 卢家亭

(“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学)

邹建波等.一种新的砂岩酸化实时监测技术.天然气工业,2007,27(3):106-107.

摘 要 酸化是砂岩油气藏最有效的增产措施之一。为了酸化施工顺利进行、减小风险以及对施工过程和地层情况分析的需要,实时监测方法的研究十分重要。传统的实时监测技术都是利用测量的井口压力和注酸排量来估算酸化过程中表皮系数的变化,达到实时判断酸化效果的目的。在现有技术的基础上,提出了通过酸化过程中酸液有效作用距离和渗透率的变化来反求表皮系数的砂岩酸化实时监测方法,首先选择砂岩油气藏酸化计算的数学模型,然后编制了相应的计算程序,最后进行实例计算与分析。应用结果表明这种模拟方法是一种行之有效的实时监测新方法。

主题词 砂岩油气藏 酸化 渗透率 表皮系数 监测

一、数学模型选择

采用 Taha 等人提出的非均质砂岩油藏酸化反应数学模型,来模拟计算酸液和矿物浓度、酸液有效作用距离、孔隙度和渗透率的分布。

1. 酸浓度矿物浓度数学模型

酸沿地层径向流动反应的偏微分方程如下:

$$\begin{cases} \varphi \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial r} = -R_h \\ (1 - \varphi) \frac{\partial C_j}{\partial t} = r_j \quad (j = s, q) \end{cases} \quad (1)$$

其初始条件和边界条件为:

$$\begin{cases} C(r, 0) = 0, C_j(r, 0) = C_{0j} \\ C(r_w, t) = C_0, C_j(r_w, t) = 0 \\ C(r > R_{ef}, t) = 0, C_j(r > R_{ef}, t) = C_{0j} \end{cases} \quad (2)$$

在酸沿地层径向流动反应的偏微分方程中,酸的反应速度(R_h)和矿物溶解速度(r_j)分别为:

$$R_h = \sum_{j=1}^J \sigma_j r_g \quad (3)$$

$$-r_j = k_{rj} C (C_j - C_{irj}) \quad (j = s, q) \quad (4)$$

式中: σ_j 为第 j 种矿物的化学计量系数,为溶解 1 mol 该矿物所需酸的 mol 数。式(1)~(4)构成了求解酸浓度和矿物浓度分布数学模型。

2. 酸有效作用距离数值模型

在求得径向上的酸浓度分布以后,即可计算酸作用半径(R_{ef}),假设在酸化过程中,当酸浓度降为初

始浓度的 ϵ 倍(ϵ 由试验或经验确定,一般为 0.10),酸即失去活性变为残酸,则 t_n 时刻酸的有效作用半径为:

$$\begin{aligned} \text{若} & C_i^n = \epsilon \\ \text{则} & R_{ef}^n = r_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{若} \quad C_i^n \leq \epsilon$$

$$\text{则} \quad R_{ef}^n = r_{i-1} + \frac{r_i - r_{i-1}}{C_{i-1}^n - C_i^n} (C_{i-1}^n - \epsilon) \quad (6)$$

3. 储层孔隙度和渗透率分布模型

酸化过程中,随着酸的不断消耗,酸溶解地层岩石矿物、地层孔隙度将发生变化。利用矿物浓度的体积平衡方程可推导出 t_{n+1} 时刻、 r_i 处的孔隙度计算公式:

$$\varphi^{n+1} = \varphi + (1 - \varphi) \sum_{j=1}^J (C_{0j} - C_{ji}^{n+1}) \frac{W_j}{\rho_j} \quad (7)$$

式中: W_j 为矿物 j 的分子量; ρ_j 为矿物 j 的密度; C_{0j} 为矿物 j 的初始浓度; C_{ji}^{n+1} 为矿物 j 在 t_{n+1} 时刻 r_i 处的浓度。

酸化后渗透率的增加是由于溶解矿物后孔隙度的改变而引起的,假设渗透率的变化完全是由于孔隙度的变化而引起的,则可由 Labrid 提出的简单指数关系表示酸化后的地层渗透率:

$$K_i^{n+1} = K_0 (\varphi^{n+1} / \varphi)^L \quad (8)$$

式中: L 为经验指数,由试验及流体资料确定,常为 7。

多种可溶矿物的缓慢溶解而引起渗透率的累积变化由下式确定:

$$\frac{K_i^{n+1}}{K_0} = \exp\left(\beta \frac{\Delta\varphi^{n+1}}{\Delta\varphi_{\max}} \frac{\varphi^{n+1}}{\varphi} \frac{1-\varphi}{1-\varphi^{n+1}}\right) \quad (9)$$

式中： β 为渗透率孔隙度的特征常数，无因次； $\Delta\varphi_{\max}$ 为孔隙度最大变化值，小数； $\Delta\varphi^{n+1}$ 为孔隙度变化值，小数； $\Delta\varphi^{n+1} = \varphi - \varphi^{n+1}$ 。

4. 表皮系数的计算

求得了酸浓度和矿物浓度的分布，便可求出酸液有效作用距离以及孔隙度和渗透率的分布情况，从而利用酸液有效作用距离和渗透率求出表皮因子。具体求解公式为：

$$S(t) = \left(\frac{K_0}{K_d} - 1\right) \ln\left(\frac{r_d}{r_w}\right) \quad (10)$$

二、实例计算与分析

由于在砂岩基质酸化过程中，酸浓度分布、矿物浓度分布、孔隙度、渗透率及小层中的流量都是时间和位置的函数。因而计算过程中，不同的时刻要代入不同的参数计算。整个求解过程需要联立几个模型反复迭代求解。笔者用 Visual Basic 6.0 语言编制了相应的计算程序，可在 Windows 2000 / Windows XP 系统下运行。

程序运行时所需要的参数包括储层参数、注酸参数、酸岩反应动力学参数。此外，还需要确定各级注入酸的浓度、用量及配方。

本例是采用常规土酸酸化的 1 口井，为简便起见，暂只考虑 HF 与岩石的反应。

从图 1-a 可看出，随着酸液的注入和有效作用距离不断地增大，其值越大说明酸化的效果就越好，但是随着时间的延续，其增加的幅度逐渐变小，最终的有效作用距离为 1.2 m 左右。从图 1-b 看出，随着酸液的注入，其值也缓缓增加，这也是酸化起作用的结果。同样由图 1-c 也可看出酸化已有明显的作用，渗透率值由最初的 $25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 逐渐上升到 $280 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。最后从图 1-d 看出，随着酸化施工的进程，地层表皮系数开始不断减小，特别是在注酸刚开始阶段减小的最明显，以后随着酸液的注入，酸化的作用达到的一定的极限，表皮曲线趋于平缓，不再有明显的减小。此时，再继续注酸可能已没有什么效果了，更糟糕的是可能对地层造成二次污染，因此应该停止注酸。

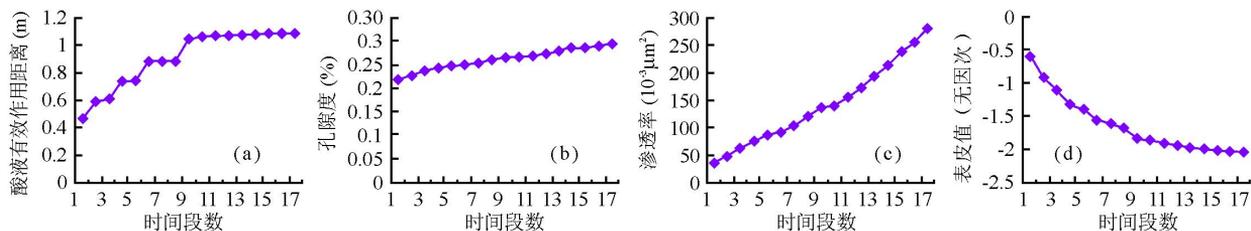


图 1 酸液有效作用距离、孔隙度、渗透率、表皮因子变化图

三、结论

(1) 运用该方法，可以计算注酸过程中的表皮因子，实时了解酸化动态，确定最佳注酸时间，帮助技术人员选择适宜的酸液配方和优化酸液用量。

(2) 不仅可以节约酸液用量，降低酸化成本，同时还可以避免由于注酸时间过长而引起的二次地层污染。

(3) 评价酸化处理效果，这为改变酸化设计采取补救措施提供依据。

参考文献

[1] 刘应学, 黄鹤, 罗洪文. 现场酸化跟踪监测技术及应用[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(4).
 [2] 王树军. 酸化实时监测与评估技术研究及应用[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(5).

[3] 沈建国, 王素兵. 四川压裂酸化技术新发展[J]. 天然气工业, 2001, 21(9).
 [4] 曹学军, 等. 压裂实时监测及诊断技术处理系统的研制与应用[J]. 天然气工业, 2002, 22(5).
 [5] PROUVOST L P, ECONOMIDES M J. Applications of real-time matrix acidizing evaluation method [J]. SPE 17156, 1998.
 [6] Ma L, JOHNS R T, Zhu D, HILL D. Fast method for real-time interpretation of variable-rate well with changing skin: application to matrix acidizing [J]. SPE 64651, 2000.
 [7] AL-DHAFAEERI A M, T · W · ENGLERT W, NASER-EL-DIN H A. Application of two methods to evaluate matrix acidizing real-time skin effect in Saudi Arabia [J]. SPE 73703, 2002.

(修改回稿日期 2006-11-10 编辑 韩晓渝)