

疏松砂岩油藏油井出砂量预测模型及应用

丛洪良 (中国科学院力学所, 北京 100080; 胜利油田有限公司临盘采油厂, 山东 临邑 251507)

盛宏至 (中国科学院力学所, 北京 100080)

[摘要] 在研究油井出砂机理的基础上, 根据液-固多相渗流条件, 应用库仑-摩尔破坏准则和达西公式, 导出了关于疏松砂岩油藏不同产液量下油井出砂量预测的数学模型。以盘二油田为例, 进行了出砂预测, 与实测含砂比相比, 平均误差小于 0.0052%。实例应用表明所给的数学模型是可行的。

[关键词] 疏松油藏; 砂岩油藏; 出砂; 数学模型; 预测

[中图分类号] TE358.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-9752 (2006) 02-0120-03

油井的出砂已经成为困扰疏松油藏生产的一个严重问题。在生产过程中, 当油井产液中含砂量过高, 井筒流动携砂能力小于地层出砂量时, 部分砂粒将会沉入井中, 并引起油井检泵作业。只有当井筒流动携砂能力大于地层出砂量, 或者二者相同时, 砂粒将被流体携带至地面, 这不仅不会造成井筒沉砂, 而且带砂生产还可以提高单井产液量。因此, 预测不同产液量下油井的出砂量, 是制定油井工作制度、预防出砂井事故的基础。

目前, 大多数有关油井出砂的预测^[1~3]基本上都是关于出砂临界井底压力或者油层是否出砂的预测, 而对于不同产液量下的出砂量预测的研究还很少。笔者在研究油井出砂机理的基础上, 根据液-固多相渗流条件, 应用达西公式, 导出了关于疏松砂岩油藏油井出砂量预测的数学模型, 并以盘二油田为例, 进行了出砂预测。

1 油井出砂量预测数学模型

按岩石力学观点, 出砂是指地层弹塑性边界处发生破坏后, 岩石介质碎屑呈现塑性膨胀。岩石破坏遵循库仑-摩尔破坏准则, 在塑性膨胀条件下有^[4]:

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \gamma \cdot \frac{v}{r} = \Lambda \theta_0 \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) \quad (1)$$

式中, θ_0 为液体剪切速率, 正比于压力梯度; Λ 为膨胀速度系数, 与径向应力 σ_r 有关; γ 为流型系数, 对于平面径向流 $\gamma = 1$, 对于球形径向流 $\gamma = 2$; v 为流体固相速度; r 为径向距离。

解方程式(1)可以得到固相速度^[4]:

$$v = \frac{C}{r^n} \quad (2)$$

式中, C 为积分常数; n 为膨胀指数, $n = \frac{\gamma + \Lambda \theta_0}{1 - \Lambda \theta_0}$ 。

有了固相速度后, 就可以应用达西定律建立油井产液量与出砂量的关系。对于裸眼砾石充填或者套管预充填砾石筛管完井, 由于地层中没有射孔孔眼, 井底附近没有流线的汇集, 流动形态可以看作为平面径向流。

对于出砂地层, 假设液-固混合相的流动遵循达西定律, 那么, 液相与固相真实速度差可以用压力梯度分量来表示:

$$\phi(w - v) = \beta \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3)$$

式中, ϕ 为孔隙度; w 为液相真实速度; $\frac{\partial p}{\partial r}$ 为压力梯度; β 为压力梯度分量系数 ($\beta < 1$), 其值由生产出砂数
据通过拟合得到; k 为地层渗透率; μ 为流体粘度。

单位油层厚度产液量 q_l 可用液相真实速度表示为:

$$q_l = 2\pi r \phi w(r) \quad (4)$$

单位油层厚度出砂量 q_s 可用固相真实速度表示为:

$$q_s = 2\pi r(1-\phi)v(r) \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3), 整理可得:

$$(1-\phi)q_l - \phi q_s = 2\pi(1-\phi)\beta \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (6)$$

对式(6)积分:

$$\int_{R_w}^{R_c} [(1-\phi)q_l - \phi q_s] \frac{1}{r} dr = 2\pi\beta(1-\phi) \frac{k}{\mu} \int_{p_w}^{p_c} dp \quad (7)$$

式中, R_w 为井眼半径; R_c 为油层供给半径; p_w 为井底压力; p_c 为供给半径处压力。

假设油层出砂半径(细小颗粒运移半径)为 R_c , 则在 $[R_w, R_c]$ 范围内地层有出砂, 所以 $q_s \neq 0$; 在 $[R_c, R_e]$ 范围内地层不出砂, 所以 $q_s = 0$ 。同时, 考虑到流体处于稳定流动, q_l 为常数。因此, 积分式(7)可以写成:

$$(1-\phi)q_l \int_{R_w}^{R_c} \frac{1}{r} dr - \phi \int_{R_w}^{R_c} q_s \frac{1}{r} dr = 2\pi\beta(1-\phi) \frac{k}{\mu} \int_{p_w}^{p_c} dp \quad (8)$$

因为 $q_s = 2\pi r(1-\phi)v(r) = 2\pi r(1-\phi) \frac{C}{r^n}$, 将之代入式(8)得:

$$(1-\phi)q_l \ln \frac{R_c}{R_w} - 2\pi\phi(1-\phi) \int_{R_w}^{R_c} \frac{C}{r^n} dr = 2\pi(1-\phi)\beta \frac{k}{\mu} (p_c - p_w) \quad (9)$$

式(9)积分并整理后, 得:

$$C = \frac{\left[q_l \ln \frac{R_c}{R_w} - 2\pi\beta \frac{k}{\mu} (p_c - p_w) \right] (1-n)}{2\pi\phi [R_c^{1-n} - R_w^{1-n}]} \quad (10)$$

所以, 在井底处油层出砂量为:

$$\begin{aligned} q_{sw} &= 2\pi R_w(1-\phi)v(R_w) = 2\pi R_w(1-\phi) \frac{C}{R_w^n} \\ &= \left\{ \frac{\phi}{(1-\phi)(1-n)} \left[\left(\frac{R_c}{R_w} \right)^{1-n} - 1 \right] \right\}^{-1} \ln \frac{R_c}{R_w} \left[q_l - \frac{2\pi\beta \frac{kh}{\mu} (p_c - p_w)}{\ln \frac{R_c}{R_w}} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

只有当油井生产压差大于临界压差时, 油井才会出砂, 所以流量 q_l 可以写成临界压差下的产液量 q_{cr} (临界产液量) 与超出临界产液量的流量 Δq 之和。平面径向流条件下, 有如下关系:

$$q_l = \Delta q_l + q_{cr} = \Delta q_l + \frac{2\pi\beta \frac{kh}{\mu} (p_c - p_{wcr})}{\ln \frac{R_c}{R_w}} \quad (12)$$

式中, p_{wcr} 为临界井底压力, 确定方法见文献[5]。

将式(12)代入式(11)得:

$$q_{sw} = \left\{ \frac{\phi}{(1-\phi)(1-n)} \left[\left(\frac{R_c}{R_w} \right)^{1-n} - 1 \right] \right\}^{-1} \ln \frac{R_c}{R_w} \left[\Delta q_l - \frac{2\pi\beta \frac{kh}{\mu} (p_w - p_{wcr})}{\ln \frac{R_c}{R_w}} \right] \quad (13)$$

上式说明了, 当 $p_w = p_{wcr}$ 时, $\Delta q_l = 0$, $q_s = 0$ 。因此油井生产时, 如果井底流压小于油层出砂临界井底压力, 那么, 油井不会出砂。

2 实际应用

应用公式(11)或式(13)可以预测油井在不同产液量下的出砂量, 从而求得含砂比。下面以胜利

油田临盘采油厂盘二油田为例进行油井出砂预测。盘二油田为复杂的断块构造,主力生产层系为沙三下亚段,油藏埋深1400~1720m,岩性为细砂质粉砂岩,胶结疏松,地下原油粘度70mPa·s,属于稠油疏松砂岩油藏。常规物性分析资料表明,油藏孔隙度为29.5%,渗透率的范围为0.276~1.6 μm^2 ,储层物性分布不均匀,层间、层内渗透率差别大,砂体厚薄不均,厚的达20m,薄的小于1m。随着油田的不断开发,地层压降不断增大,含水上升,出砂已成为影响油井产能的一个重要问题。从整个区块来看,原始地层压力为16.27MPa,到2001年6月降为10.14MPa,地层压力下降6.13MPa。目前因出砂长期停产的井有13口,影响日产油能力40t左右。

表1是应用笔者提出的出砂预测方法,对盘二油田沙三下亚段油层典型出砂井的预测结果。由表1可知,预测含砂比与实际含砂比基本相近,最大误差小于0.015%,平均误差为0.0052%,说明笔者给出的方法是可行的。

表1 典型出砂井含砂比的预测值与实际值的对比表

序号	区块	井号	产液量 /t·d ⁻¹	实际含砂比 /%	预测含砂比 /%	误差 /%
1	P2-20 块	LPP2-212	13	0.077	0.069	0.008
2		LPP2-214	12	0.024	0.026	0.002
3		LPP2-X205	22	0.033	0.033	0
4		LPP2-X215	14	0.045	0.059	0.014
5	P2-23 块	LPP2-234	15.5	0.007	0.008	0.001
6		LPP2-236	8	0.028	0.03	0.002
7		LPP2-242	20	0.02	0.031	0.011
8	P2-4 块	LPP2-X244	9	0.018	0.025	0.007
9		LPP12-12	6	0.05	0.051	0.001
10		LPP12-27	20	0.05	0.054	0.004
11		LPP12-5	18	0.041	0.052	0.011
12		LPP14-3	10	0.047	0.045	0.002

3 结 论

1) 油井的产液量大于临界产液量时,油井才会出砂,产液含砂比随着油井产液量的增大而增加。

2) 在井底流压大于临界井底压力以后,生产压差增大,井筒附近岩石破坏区变大,出砂半径相应的也增大。

3) 油井产液量比较小时,产砂比随产液量呈线性增加,但随着产液量增大到一定值后,产砂比随产液量增加的程度变缓。

[参考文献]

- [1] 朱德武. 出砂预测技术进展 [J]. 钻采工艺, 1996, 19 (6): 23~26.
- [2] 吴建平, 黎洪, 孙辉. 连续出砂预测技术的研究及应用 [J]. 油气井测试, 2002, 11 (5): 69~70.
- [3] 沈霖, 邓金根, 王金凤. 胜利油田弱胶结稠油藏岩石破坏准则及出砂预测 [J]. 断块油气田, 2001, 8 (2): 19~22.
- [4] Nikolaevskiy V N, Economides M J. The near-well state of stress and induced rock damage [J]. SPE58716, 2000.
- [5] 王勤田, 赵彦超, 杨晶等. 油井出砂临界井底流压计算模型及应用 [J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24 (2): 75~76.

[编辑] 萧雨