

文章编号: 1000-0747(2004)01-0103-03

砾石充填防砂井产能预测方法

李爱芬¹, 姚军¹, 寇永强²

(1. 石油大学(华东); 2. 中国石化集团公司胜利石油管理局井下作业公司)

摘要: 流体从砾石充填防砂井供给边缘到井筒的流动分为4部分: 从供给边缘至井筒的平面径向流, 射孔孔眼附近的球面向心流, 通过射孔孔眼的单向流, 由射孔孔眼到筛管的发散流。建立了计算各部分单相渗流的流动阻力数学模型, 并考虑紊流对井筒附近流动阻力影响。对模型求解, 研究影响产能的敏感性参数。对胜利油田某砾石充填防砂井产能计算的结果表明: 按单向流、径向流及发散流计算井筒内流动阻力的结果差别较大, 仅用单相流或径向流模型计算井筒内压降有一定误差; 防砂井压降主要出现在射孔孔眼内及其附近, 孔眼内填满地层砂时孔眼内的压降是总压降的48%, 而填满砾石时是总压降的29%, 将每个孔眼填满砾石是提高防砂井产能的根本保证。图1表2参10

关键词: 防砂; 砾石充填; 产能; 数学模型

中图分类号: TE358.1

文献标识码: A

绕丝筛管砾石充填防砂是当前疏松砂岩油藏采用的主要防砂方法之一, 对防砂井进行产能预测是防砂优化设计的重要内容。井筒附近流体的流速很高, 计算产能时不能采用常规产能计算方法, 必须考虑紊流造成的压力损失。目前虽有一些计算油井产能的方法, 但计算方法很少, 且大多进行了简化^[1,2]。本文在研究流体由地层到筛管的流动模式基础上, 推导了计算防砂井产能的较精确计算公式。

1 防砂井流动模式及产能预测模型

疏松砂岩油藏开发后, 大多数井会出砂, 在射孔孔眼以外的地层中形成一定的空腔, 砾石充填即将此部分空腔填满砾石。

砾石充填后, 若忽略油水的黏度差或油井的含水率较低, 则流体的流动可以看作单相流, 由供给边缘向井底的流动分为4部分, 总压降为:

$$p_e - p_w = (p_e - p_R) + (p_R - p_p) + (p_p - p_c) + (p_c - p_w) \quad (1)$$

各部分压降的计算方法如下。

1.1 由供给边缘到井筒附近的径向流

由供给边缘向井筒的流动为平面径向流, 由于流速很低, 可以不考虑紊流项的影响。由平面径向流公式可得此区间的压降为:

$$\begin{aligned} p_e - p_R &= \frac{q_o B_o \mu_o}{2 h} \left[\frac{1}{K_o} \ln \frac{r_e}{r_d} + \frac{1}{K_{db}} \ln \frac{r_d}{r_{c2}} \right] \\ &= \frac{q_o B_o \mu_o}{2 K_o h} \left[\ln \frac{r_e}{r_{c2}} + s_d \right] \end{aligned} \quad (2)$$

若采用供油区的平均地层压力 \bar{p} , 流动为拟稳态,

则(2)式变为^[3]:

$$\begin{aligned} \bar{p} - p_p &= \frac{q_o B_o \mu_o}{2 K_o h} \left[\ln \frac{r_e}{r_{c2}} - \frac{3}{4} + s_d \right] \\ &= \frac{q_o B_o \mu_o}{2 K_o h} \left[\ln \frac{0.472 r_e}{r_{c2}} + s_d \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $s_d = (K_o / K_{db} - 1) \ln(r_d / r_{c2})$

1.2 射孔孔眼附近的球面向心流

流体流入射孔孔眼的流动为球面向心流, 在此区域内流速很高, 因此, 应考虑紊流对流动阻力的影响。由 Forchheimer 紊流流动公式^[3], 有:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\mu_o}{K_{go}} v_o + g_o v_o^2 \quad (4)$$

对于球面向心流, $v_o = q_o B_o / (n_p h 2 r^2)$, 代入(4)式积分得:

$$\begin{aligned} p_R - p_p &= \frac{q_o B_o \mu_o}{2 n_p h K_{go}} \left[\frac{1}{r_p} - \frac{1}{R} \right] \\ &+ g_o \frac{q_o^2 B_o^2}{12 n_p^2 h^2} \left[\frac{1}{r_p^3} - \frac{1}{R^3} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

1.3 通过射孔孔眼的单向流

流体通过射孔孔眼的流动为单向流, 此时, 流体的流速为 $v_o = q_o B_o / (n_p h r_p^2)$, 代入(4)式积分得:

$$p_p - p_c = \left[\frac{\mu_o}{K_{go}} \frac{q_o B_o}{n_p h r_p^2} + g_o \left(\frac{q_o B_o}{n_p h r_p^2} \right)^2 \right] (r_{c2} - r_{c1}) \quad (6)$$

1.4 井筒内由射孔孔眼到筛管的发散流

计算筛套环形空间流动阻力的计算模型目前常用的有单相流、径向流模型。

单相流模型假设流体沿射孔孔眼的延伸部分流向筛管。因其流动面积比实际小得多,计算的压降比实际大。其流速为 $v_o = q_o B_o / (n_p h r_p^2)$, 代入(4)式积分得:

$$p_c - p_w = \left[\frac{\mu_o}{K_{go}} \frac{q_o B_o}{n_p h r_p^2} + g \left(\frac{q_o B_o}{n_p h r_p^2} \right)^2 \right] (r_{c1} - r_s) \quad (7)$$

径向流模型假设流体从套管管壁均匀沿径向流向筛管。因其流动面积比实际大得多,计算的压降偏小。任意半径 r 处的流速为 $v_o = q_o B_o / (2 rh)$, 代入(4)式分离变量积分得:

$$p_c - p_w = \frac{q_o B_o \mu_o}{2 K_{go} h} \ln \frac{r_{c1}}{r_s} + \frac{q_o^2 B_o^2 \mu_o}{4 h^2} g \left(\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_{c1}} \right) \quad (8)$$

发散流模型认为由射孔孔眼向筛管的流动既不是单向流也不是径向流,而是一种发散流。Yildiz 建立了发散流模型,通过拉氏变换得到解析解^[4,5],其计算结果用模拟筛套环形空间内流动的电模拟实验验证。发散流数学模型如下:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) + \frac{1}{r_D^2} \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} + \frac{r_s^2}{h^2} \frac{K_r}{K_f} \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} = 0 \quad (9)$$

其中 $p_D = \frac{2 h K_r}{q_o B_o \mu_o} (p - p_w)$, $r_D = r / r_s$, $z_D = z / h_p$

2 计算结果及分析

计算所用的油藏及井筒数据取自胜利油田某砾石

充填防砂油井:供油半径 100m,油层有效厚度 8m,地层油体积系数 1.125,地下原油黏度 10 mPa·s,地下原油密度 0.870g/cm³;套管外水泥环外径 219mm,套管内径 157mm,筛管外径 76.2mm,砾石的渗透率 20μm²,套管射孔相位角 60°,射孔密度 14 孔/m,射孔孔眼直径 13 mm。根据防砂前的试井资料解释结果,该井表皮系数为 0.9,油层渗透率为 0.8μm²,目前饱和度下油的相对渗透率为 0.9,防砂后以 80m³/d 产量生产的生产压差为 3.2MPa。计算结果见表 1、表 2。

表 1 砾石渗透率及流体黏度不同时各流动区域压降表

参数及计算结果		计算值			
砾石层渗透率(μm ²)	40	40	20	20*	
流体黏度(mPa·s)	5	10	10	10*	
供给边缘至井筒	1.2695	2.5390	2.5390	2.5390	
孔眼外球面向心流	0.0329	0.0652	0.1301	0.3242*	
射孔孔眼内	0.2814	0.5425	1.0740	2.6404*	
压降 (MPa)					
发散流	0.0042	0.0083	0.0166	0.0166	
筛套环形空间内					
单向流	0.0307	0.0592	0.1171	0.1171	
径向流	0.0001	0.0002	0.0004	0.0004	
总压降# (MPa)	1.588	3.155	3.760	5.520	
孔眼内压降/总压降(%)	17.7	17.2	28.6	47.8	
井筒内压降#/总压降(%)	0.262	0.263	0.442	0.301	

注:油井产量为 100m³/d; *—射孔孔眼及其外部充满地层砂,且假设松散地层砂渗透率是地层渗透率的 10 倍; #—井筒内压降按发散流计算

由表 1 知,井筒内按径向流计算的压降过小,按单向流计算的压降又偏大,都将给产量的计算造成一定误差;防砂井的总压降主要消耗于地层及射孔孔眼内。随砾石层渗透率的降低及原油黏度的增加,射孔孔眼内的压降急剧增加。

表 2 不同产量下射孔内充满地层砂或砾石时各部分的压降 (K_g = 20.0μm², μ_o = 10.0mPa·s)

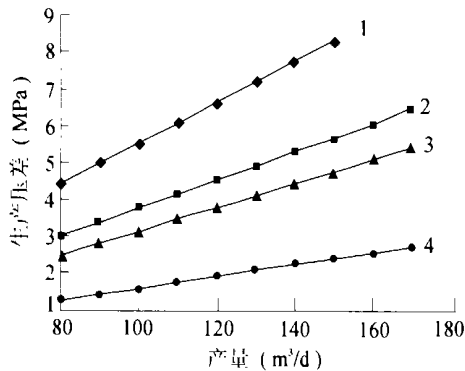
产量 (m ³ /d)	孔眼内及套管外充满地层砂时						孔眼内及套管外充满砾石时					
	地层至井筒	孔眼外向心流	孔眼内	筛套环形空间	总压降 (MPa)	孔眼内压降与总压降之比	地层至井筒	孔眼外向心流	孔眼内	筛套环形空间	总压降 (MPa)	孔眼内压降与总压降之比
80	2.031	0.259	2.108	0.013	4.411	0.48	2.031	0.104	0.855	0.013	3.003	0.28
90	2.285	0.292	2.374	0.015	4.965	0.48	2.285	0.117	0.964	0.015	3.381	0.29
100	2.539	0.324	2.640	0.017	5.520	0.48	2.539	0.130	1.074	0.017	3.760	0.29
110	2.793	0.357	2.908	0.018	6.076	0.48	2.793	0.143	1.185	0.018	4.139	0.29
120	3.047	0.389	3.176	0.020	6.631	0.48	3.047	0.156	1.296	0.020	4.519	0.29

由表 2 可知,当射孔孔眼内充满地层砂时,孔眼内压降约占总压降的 48%,而充满地层砾石时仅为 29%,且此比例与流量几乎无关。因此,将射孔孔眼填满砾石是提高防砂井产能的保证,这也是滤砂管防砂(井筒内不充填砾石)对产能影响大的主要原因。

由表 2 还可知,产量为 80m³/d 时该防砂井的总压降(3.0MPa)与实际压降(3.2MPa)相近,即计算结果与

实际基本吻合。

由图 1 可见,在相同产量条件下,流体黏度越低、砾石层渗透率越高,所需生产压差越小,当孔眼内充满地层砂时,生产压差将大大增加;在生产压差一定的情况下,射孔孔眼内未填满砾石的防砂井产量将大大降低。因此,防砂施工时应保证砾石不被杂质污染,以提高防砂井产量。



砾石层渗透率(μm^2): 1—20(射孔孔眼及其外部充满地层砂), 2—20, 3—40, 4—40; 流体黏度($\text{mPa}\cdot\text{s}$): 1—10, 2—10, 3—10, 4—5

图1 不同条件下产量与压差的关系

3 结论

本文给出了确定防砂井产能的计算方法。井筒内按单向流、径向流及发散流计算压降时, 三者结果相差较大; 当原油黏度较高、砾石层渗透率较低时, 防砂井的压降主要消耗于地层及射孔孔眼内; 射孔孔眼内填满地层砂比填满砾石时的压降大得多。

将每个射孔孔眼填满砾石, 提高砾石层渗透率, 是提高防砂井产能的根本保证。

符号注释:

p_e, p_w, p_R, p_p, p_c ——供给边缘的压力、筛管内压力、球面向心流上游边界压力和射孔孔眼流入、流出端的压力, Pa;
 q_o ——油井的地面产油量, m^3/s ; B_o ——地层油的体积系数;
 K_o, K_{ob} ——原油在油层及污染带的有效渗透率, m^2 ; μ_o ——地下原油黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; h ——油层厚度, m; r_e ——供给边缘半径, m;
 r_d ——污染带半径, m; r_{c2} ——套管外水泥环外缘半径, m; s_d ——防砂前井的表皮系数; \bar{p} ——平均地层压力, Pa; n_p ——射孔密度, 孔/m; g ——砾石层的紊流系数^[610], m^{-1} ; K_{gp} ——砾石层的有效渗透率, m^2 ; v_o ——油的流速, m/s ; R ——球面向心流供给边缘半径, 近似取沿套管轴线方向相邻两射孔距离之半, 即 $R = \sqrt{2n_p S}$, m; S ——射孔相位角, ($^\circ$); r_p ——射孔孔眼半径, m; ρ_o ——地层油的密度, kg/m^3 ; r_{c1} ——套管内侧半径, m;
 r_s ——筛管外侧半径, m; K_r, K_z ——井筒内砾石层的水平渗透率及垂向渗透率, m^2 ; p ——筛套环形空间任意半径 r 处的压力, Pa; z ——垂向高度(中间变量), m; θ ——柱坐标中的角度, ($^\circ$)。

参考文献:

- [1] 尹强, 张学超, 等. 绕丝筛管砾石充填防砂井产能预测方法探讨与应用[J]. 试采技术, 2001, 22(2): 15-17.
- [2] 李家芬, 李贵恩, 孙辉. 防砂工艺决策系统软件开发及应用[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 72-75.
- [3] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 渗流力学[M]. 东营: 石油大学出版社,

2002. 6.

- [4] Yildiz T, Langlais J P. Pressure losses across gravel packs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1991, (6): 201-211.
- [5] Yildiz T, Langlais J P. Calculation of pressure losses across gravel packs[A]. SPE 1988, 17167.
- [6] 王鸿勋. 采油工艺原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [7] 陈元千, 董宁宁. 确定高速速度系数 的方法及其相关经验公式[J]. 断块油气田, 1998, 5(6): 20-26.
- [8] 陈元千. 湍流对油井产能的影响及简单的预测方法[J]. 石油勘探与开发, 1990, 17(1): 65-71.
- [9] 黎洪, 彭苏萍. 高压气井产能评价方法研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 77-79.
- [10] 何自新, 郝玉鸿. 渗透率对气井产能方程及无阻流量的影响分析[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 46-48.

第一作者简介: 李爱芬(1962-), 女, 山东安丘人, 博士, 石油大学副教授, 主要从事油层物理、渗流机理、提高采收率及防砂等方面的教学及研究工作。地址: 山东省东营市, 石油大学石油工程学院, 邮政编码: 257062。

收稿日期: 2002-07-11 修回日期: 2003-11-26

(编辑、绘图 郭海莉)

A method of calculating productivity for gravel packed well

LI Ai-fen¹, YAO Jun¹, KOU Yong-qiang² (1. Petroleum of University, Shandong 257062, China; 2. Down Hole Service Company, Shengli Petroleum Administration, Shandong 257062, China)

Abstract: Four different flow patterns around the gravel-packed well could be divided: the radial flow from the supply boundary to well bore, the spherical flow near the perforations, the linear flow through the perforations and the diverging flow from perforations to screen. The mathematic models for resistance to a single fluid flow in each region are built, including the effect of the turbulent flow near the perforations. The sensitive parameters have been studied by the calculation, and the productivity of one gravel-packed well of Shengli Oilfield has been studied by using these models. The results show that the pressure losses in the well bore obtained using linear flow model, radial flow model and diverging flow model is difference greatly, which implies that errors will arise when using only the former two models. The pressure loss mainly occurs in the perforations. When the perforation is filled with formation sand, the pressure loss will be 48% of the total loss, while only 29% of the total pressure loss occurs when the perforation is filled with gravel. In order to improve the productivity of gravel-packed well, the perforation and its nearby region should be filled with gravels.

Key words: sand control; gravel pack; productivity; mathematical model