

► 试井与开采 ◀

# 筛管砾石充填油井产能预测研究 (I) - 基本模型

董长银<sup>1</sup> 张 琪<sup>1</sup> 陈 平<sup>2</sup>

(1. 石油大学(华东)石油工程系, 山东东营 257061; 2. 大庆石油勘探局压裂工艺研究所, 甘肃庆阳 745113)

主题词: 完井 防砂 砾石充填 产能预测 压力降 表皮系数 理论模型

摘 要: 在常规套管射孔井产能预测的基础上, 考虑射孔炮眼内的充填砾石、筛套环空砾石层以及筛管造成的附加表皮, 建立了筛管砾石充填防砂井的产能预测模型。计算分析表明, 炮眼砾石层及地层是主要压降区域, 充填后砾石层的渗透率及射孔参数是影响砾石充填井产能的主要因素。

中图分类号: TE313.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890 (2001) 01-0043-02

筛管砾石充填是当前疏松砂岩油藏采用的主要防砂措施之一, 对砾石充填井进行产能预测是砾石充填设计优化中的必要步骤之一。油井下入筛管并进行砾石充填后, 在筛套环空、射孔炮眼内填满了砾石, 形成了筛管、筛套环空砾石层和炮眼内砾石层三个附加流动阻力区 (见图 1)。笔者在常规套管射孔井的产能预测基础上, 附加考虑这些区域的流动阻力和表皮, 建立了筛管砾石充填油井的产能预测模型。另外, 在近井地带尤其是填满砾石的炮眼内, 流体流速较高, 紊流流动造成的压力损失已不可忽略, 本文对此亦作了计算。

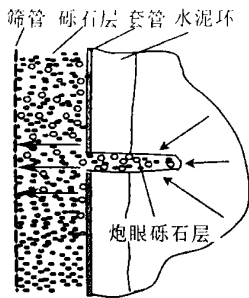


图 1 砾石层流动示意图

## 一、砾石充填附加表皮及基本模型

砾石充填造成的附加表皮分为两个部分: 射孔孔眼内的砾石层表皮和筛套环空内砾石层表皮。假设射孔炮眼形状规则, 则其中的流动为线性流, 流速为

$$v = \frac{qB}{h\rho_p\pi r_p^2} \quad (1)$$

式中  $q$ ——油井流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $B$ ——原油体积系数, 无因次;  
 $h$ ——油层射开厚度,  $\text{m}$ ;  
 $\rho_p$ ——射孔密度,  $\text{孔}/\text{m}$ ;  
 $r_p$ ——射孔炮眼半径,  $\text{m}$ 。

Fordheimer 方程给出了层流与紊流对压力梯度的影响:

$$\frac{dP}{dl} = \frac{\mu}{k} v + \beta \rho v^2 \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2), 并从  $l = 0$  到  $L_p$  将方程两端积分得到射孔炮眼中的流动压降  $\Delta P_1$ :

$$\Delta P_1 = \frac{\mu B L_p}{\pi k_g h \rho_p r_p^2} q + \frac{\beta_g B^2 L_p}{\pi^2 h^2 \rho_p^2 r_p^4} q^2 \quad (3)$$

式中  $\mu$ ——原油粘度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  
 $L_p$ ——射孔炮眼长度,  $\text{m}$ ;  
 $k_g$ ——砾石层渗透率,  $\text{m}^2$ ;  
 $\beta_g$ ——紊流速度系数,  $\text{m}^{-1}$ ;  
 $\rho$ ——原油密度,  $\text{kg}/\text{l}$ ;  
 $\Delta P_1$ ——射孔炮眼中的流动压降,  $\text{Pa}$ 。

筛套环空中的流动比较复杂, 其压降相对炮眼较小, 可以视为径向流动, 将流速  $v = \frac{qB}{2\pi r h}$  代入式 (1) 得:

$$dP = \left[ \frac{q\mu B}{2\pi k_g h} \frac{1}{r} + \beta_g \rho \frac{q^2 B^2}{4\pi^2 h^2} \frac{1}{r^2} \right] dr \quad (4)$$

将上式两端从  $r = r_{so}$  到  $r_c$  积分, 得到筛套环空砾石层流动压降  $\Delta P_2$ :

$$\Delta P_2 = \frac{q\mu B}{2\pi k_g h} \ln \frac{r_{so}}{r_c} + \frac{q^2 \beta_g B^2}{4\pi^2 h^2} \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right) \quad (5)$$

式中  $r_c$ ——套管内半径,  $\text{m}$ ;  
 $r_{so}$ ——筛管外半径,  $\text{m}$ ;  
 $\Delta P_2$ ——筛套环空砾石层流动压降,  $\text{Pa}$ 。

同理, 流体通过筛管的压降为

$$\Delta P_3 = \frac{q\mu B}{2\pi k_s h} \ln \frac{r_{so}}{r_{si}} \quad (6)$$

由供油半径到井眼之间的地层中的流动压降为

$$\Delta P_4 = \frac{q\mu B}{2\pi k_f h} \ln \frac{r_c}{r_w} + \frac{q^2 \beta \rho B^2}{4\pi^2 h^2 r_w} \quad (7)$$

因此, 从油层到井眼的总压降为

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 \quad (8)$$

根据产能指数定义

$$P_1 = \frac{q}{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4} \quad (9)$$

令  $S_1^l = \frac{k_{f1}}{k_g} \frac{2L_p}{\rho_p r_p^2}$ ,  $S_a^l = \frac{k_{f1}}{k_g} \ln \frac{r_c}{r_s}$ ,  $S_s^l = \frac{k_{f1}}{k_s} \ln \frac{r_{so}}{r_{si}}$ ,  $S_i^l = \frac{\beta_g}{\beta_l}$   
 $\frac{4BL_p r_w}{\rho_p r_p^4}$ ,  $S_1^l = \frac{\beta_g}{\beta_l} Br_w \left( \frac{1}{r_{so}} - \frac{1}{r_c} \right)$ , 以及  $D = \frac{\rho \beta_l k_{f1}}{2\pi \mu h r_w}$ , 得到拟稳  
 态流动下的砾石充填井产能公式 (上标  $l$  指层流, 上标  $i$  指紊流)。

$$P_1 = \frac{q}{\Delta P} = \frac{2\pi k_{f1} h}{\mu B \left[ \ln \frac{0.472r_c}{r_w} + (S_1^l + S_a^l + S_s^l) + q_D (1 + S_1^l + S_a^l) \right]} \quad (10)$$

- 式中  $P_1$ ——产能系数;  
 $r_{si}$ ——筛管内半径, m;  
 $S_1^l$ ——砾石充填炮眼层流表皮;  
 $S_s^l$ ——筛管层流表皮;  
 $S_1^i$ ——砾石充填炮眼紊流表皮;  
 $S_a^l$ ——筛套环空砾石层层流表皮;  
 $S_a^i$ ——筛套环空砾石层紊流表皮;  
 $q_D$ ——紊流系数。

砾石充填造成的附加层流表皮  
 $S_2^l = S_1^l + S_a^l + S_s^l \quad (11)$

造成的附加紊流表皮  
 $S_2^i = S_1^i + S_a^i \quad (12)$

## 二、射孔表皮计算

相对于裸眼井, 套管及射孔孔眼的存在改变了近井地带的流场, 进而对油井产能造成影响。射孔对产能的影响可以用射孔表皮来表示, 当射孔表皮为正时, 表示相对于裸眼井而言, 射孔降低了产能; 反之射孔增加产能。

根据已有的研究结果, 射孔紊流表皮系数  $S_p = 0^{[1]}$ 。  
 射孔层流表皮由水平流动表皮、井眼效应表皮和垂直流动表皮组成:

$$S_p^l = S_h + S_{wb} + S_v \quad (13)$$

水平流动表皮  
 $S_h = \ln \frac{r_w}{r_{we}} \quad (14)$

其中,  $r_{we}$ 为有效井眼半径, 若 0 相位射孔,  $r_{we} = \frac{L_p}{4}$ , 否则  $r_{we} = a (r_w + L_p)$ ,  $a$  仅与射孔相位有关。

井眼效应表皮  
 $S_{wb} = c_1 \text{Exp} \left( c_2 \frac{r_w}{r_w + L_p} \right) \quad (15)$

垂向流动表皮  
 $S_v = 10^4 h b^{-1} r_{pd} \quad (16)$

其中,  $r_{pd} = r_p \rho_p$ ,  $hb = \frac{1}{L_p \rho_p}$ ,  $a = a_1 \ln r_{pd} + a_2$ ,  $b = b_1 r_{pd} + b_2$ ,  $a_1, a_2, b_1, b_2$  为与射孔相位有关的常数, 其确定方法见参考文献 [1]。

综合考虑砾石充填附加表皮和射孔表皮, 套管射孔筛管砾石充填井产能指数为:

$$P_1 = \frac{q}{\Delta P} = \frac{2\pi k_{f1} h}{\mu B \left[ \ln \frac{0.472R_o}{R_w} + S_1^l + S_a^l + S_s^l + q_D (1 + S_1^l + S_a^l) \right]} \quad (17)$$

$$\begin{cases} S_1 = S_1^l + S_a^l + S_s^l + S_p^l \\ S_i = S_1^i + S_a^i + S_p^i \end{cases} \quad (18)$$

## 三、模型应用及结果分析

砾石充填产能比 ( $P_R$ ) 为砾石充填情况下与不充填情况下的产能比值, 可以用来评价砾石充填对油井产能的影响, 其计算公式如下:

$$P_R = \frac{\ln \frac{0.472r_c}{r_w} + S_p^l}{\ln \frac{0.472r_c}{r_w} + S_p^l + S_2^l + q_D (1 + S_2^l)} \quad (19)$$

例如: 某油井射开厚度 12.4m, 地层渗透率  $1.4\mu\text{m}^2$ , 90 相位射孔, 孔密 20 孔/m, 孔深 0.3m, 原油相对密度 0.88, 地下原油粘度  $10\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 生产压差 3MPa, 充填后砾石层渗透率  $45\mu\text{m}^2$ , 利用本文模型计算得到油井产油量  $27\text{t/d}$ , 产能比为 0.127。为了分析各附加阻力层对产能的影响, 计算得到:  $\Delta P_1 = 2.6325\text{MPa}$ ,  $\Delta P_2 = 0.0015\text{MPa}$ ,  $\Delta P_3 = 0.0002\text{MPa}$ ,  $\Delta P_4 = 0.4476\text{MPa}$ ,  $S_1^l = 39.66$ ,  $S_1^i = 4030.05$ ,  $S_a^l = 0.0231$ ,  $S_a^i = 0.0203$ ,  $S_s^l = 0.0030$ ,  $S_p^l = -0.9648$ ,  $S_p^i = 0$ 。可见,  $\Delta P_2, \Delta P_3$  与  $\Delta P_1, \Delta P_4$  相比非常小, 这表明砾石充填井中, 炮眼内砾石层和油藏到井眼之间的地层是主要压力损失区域, 在地层渗透率较高的情况下, 炮眼内砾石层压降相对占主要地位。

由以上分析可知, 炮眼砾石层是影响砾石充填井产能的主要区域, 因此射孔参数与砾石层渗透率对产能必定有较大影响。图 2 给出了不同砾石层渗透率及射孔参数下产能比的变化规律。

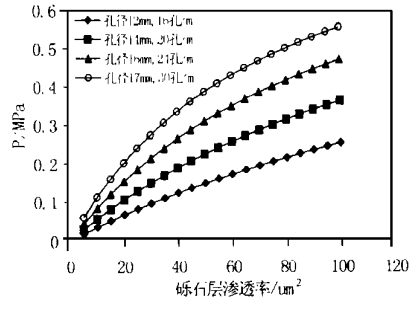


图 2 砾石充填井产能比与砾石层渗透率及射孔参数的关系  
 显然, 充填后的砾石层渗透率与射孔参数对砾石充填井产能有显著的影响, 油井产能随着砾石层渗透率的增大而增大, 同时也随着炮眼流通面积 (孔径与孔密的乘积) 的增大而增大。

## 四、结论和建议

在常规套管射孔完井产能预测的基础上, 考虑砾石充填造成的附加表皮后得到砾石充填油井的产能与压降计算模型, 不但可以用来预测油井产能, 而且可以计算各流动区域的压降以及相应的流动表皮, 为科学地进行砾石充填设计提供了重要参考依据。计算结果表明, 砾石充填井压降主要发生在炮眼砾石层及地层中, 而筛管本身造成的压降可以忽略不计。结果还表明, 砾石充填井产能随砾石层渗透率以及炮眼流通面积的增大而增大, 因此在实际的砾石充填设计及作业中, 在套管强度允

► 试井与开采 ◀

# 水侵对油井出砂的影响

张建国

(石油大学(华东)石油工程系, 山东东营 257061)

主题词: 水侵 出砂 影响 理论分析 水锁效应 岩石性质

摘要: 提出了地层出砂过程包括剪切破坏产生屈服区和砂粒运移两个阶段的概念, 分析了水侵对油井出砂的影响, 水侵加速地层出砂的原因如下: 产水能溶解砂粒之间的一部分胶结物, 使地层的胶结强度下降; 粘土膨胀, 渗透率降低; 破坏油流的连续性; 产生水锁效应, 增加油流阻力。同时, 建立了粘着力模型, 利用该模型分析了水侵量对油井出砂的影响。

中图分类号: TE358.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-0890 (2001) 01-0045-03

油井出砂是石油开采遇到重要问题之一, 每年要花费大量人力物力进行防治和研究。出砂不仅会导致油井减产或停产以及地面、井下设备磨蚀; 甚至会使用套管损坏、油井报废。出砂机理作为出砂预测和防砂的理论基础, 越来越受到人们的重视<sup>[1, 2, 3]</sup>。对于一些中高强度的地层, 油气井生产初期并不出砂, 进入中后期后才开始出砂, 例如胜利油田的滨南、东辛油区, 中原油田, 辽河油田等。其原因可能有储层压力衰减、水侵、气侵以及各种增产措施的实施等。其中, 水侵是重要的原因之一。

## 一、油井出砂过程分析

油井出砂过程大体上可分两个阶段 第一阶段由骨架砂

变成自由砂; 第二阶段自由砂运移。出砂第一阶段中应力因素(如井眼压力、原地应力状态、岩石强度等)是影响出砂的主要因素; 液力因素(如流速、渗透率、粘度以及两相或三相流动的相对渗透率等)主要表现在出砂的第二阶段, 即运移由于剪切破坏而形成的松散砂。提出上述观点可以解释现场生产过程中的下列现象: 如北海油田中等强度的地层<sup>[4]</sup>, 开始产量很高, 由于地层没有发生破坏, 并没有出砂。随着生产的进行, 由于压力衰减、水侵等原因, 使地层发生破坏, 在井眼周围产生破坏区, 产量并不高却引起出砂。

因此, 对于具有一定胶结强度的地层而言, 要实现有效防砂, 首先要防止地层发生破坏, 使出砂的必要条件得不到满足。

的情况下, 应尽量采用大孔径、高孔密射孔或补孔; 同时, 为了使充填后的砾石层保持较高的渗透率, 在砾石输送及泵入过程中, 应尽量避免砾石的破碎。这些措施都有利于获得较高的砾石充填井产能。

现场油井有时存在诸如多油层、井斜、存在污染、自由气影响等许多复杂情况, 这些复杂条件下上述基本模型需加以修正才能应用。笔者将在另文中重点讨论复杂条件下的砾石充填油井产能预测问题。

## 参 考 文 献

1 Karakas M, Tariq S M. Semi-analytical productivity models for perforated completions. SPE 18247, 1988.

2 张琪. 采油工程原理与设计. 东营: 石油大学出版社, 2000.  
3 Pucknell J K, Clifford P J. Calculation of Total Skin. SPE 23100, 1991.

## 作 者 简 介

董长银, 1976 年生。1998 年毕业于石油大学(华东)石油工程专业。现为石油大学(华东)油气田开发工程专业博士研究生。

张琪, 1936 年生。1958 年毕业于北京石油学院。现为石油大学(华东)采油研究所所长, 教授, 博士生导师。系本刊顾问。

陈平, 1970 年生。1992 年毕业于石油大学(华东)。现任长庆石油勘探局压裂工艺研究所工程师。

## Study on Productivity Prediction in Gravel-Pack Perforated Wells ( I ) - Basic Model

Dong Changyin<sup>1</sup>, Zhang Qi<sup>1</sup>, Chen Ping<sup>2</sup>

(1. Department of Petroleum Engineering, University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Fracturing Research Institute, Changqing Petroleum Exploration Administration, Qingyang, Gansu, 745113, China)

Keywords: well completion, sand control, gravel packing, productivity forecast, pressure drop, skin factor, theoretical model

Abstract: It is one of necessary steps for gravel-pack optimum design to predict the productivity of gravel-packed wells. Based on the productivity model for the perforated wells, a new model is evolved by considering the additional skins, which are caused by screen itself, gravel in perforation, and gravel between screen and casing. Meanwhile, the effect of the turbulent flow near the wellbore on the productivity is also considered. The pressure drop and corresponding skin is analyzed by case study, which also proved that the permeability of the packed gravel and perforation parameters are the key factors to affect the productivity of gravel-packed wells.