

► 试井与开采 ◀

筛管砾石充填油井产能预测研究 (II) - 复杂条件下的修正

董长银 张 琪 李志芬 曲占庆

(石油大学(华东)石油工程系, 山东东营 257061)

主题词: 完井 防砂 砾石充填 产能预测 表皮系数 理论模型

摘要: 在基本产能预测模型的基础上, 考虑砾石充填井的各种特殊情况对其进行了修正。这些特殊情况包括: 近井污染、射孔压实、地层非均质性、井斜、多油层以及自由气影响等。通过算例对修正结果进行了分析。

中图分类号: TE313.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890 (2001) 02-0054-02

一、引言

《筛管砾石充填油井产能预测研究 () ——基本模型》(见本刊 2001 年第 1 期, 编者注)一文针对单层、垂直井等理想情况建立了套管射孔筛管砾石充填油井的产能预测基本模型, 而油井实际情况有时比较复杂, 如钻井造成的近井地带污染、多油层、新井的炮眼周围存在低渗压实带等。为了使砾石充填井产能预测模型能够适用于这些复杂条件, 笔者通过计算各种情况的附加表皮等手段对其进行了修正。修正后的模型可用于以下情况: (1) 近井地带存在污染; (2) 新井中存在的射孔低渗压实带; (3) 地层非均质性; (4) 斜井; (5) 多油层, (6) 自由气影响。

二、基本模型

考虑砾石充填附加表皮和射孔表皮后, 拟稳态流动下的套管射孔筛管砾石充填井产能基本公式为:

$$P_1 = \frac{2\pi k_f h}{\mu B \left[\ln \frac{0.472 R_e}{R_w} + S_1 + q_D (1 + S_1) \right]} \quad (1)$$

$$\begin{cases} S_1 = S_1^+ + S_a^+ + S_s^+ + S_p^+ \\ S_1 = S_1^+ + S_a^+ + S_p^+ \end{cases} \quad (2)$$

式中, k_f 为地层渗透率, m^2 ; h 为油层厚度, m ; u 为原油粘度, $Pa \cdot s$; B 为原油体积系数; S_1^+ 为砾石充填炮眼层流表皮; S_a^+ 为筛管层流表皮; S_p^+ 为砾石充填炮眼紊流表皮; S_s^+ 为筛套环空砾石层层流表皮; S_a^+ 为筛套环空砾石层紊流表皮; q_D 为紊流系数。

三、复杂条件下的模型修正方法

1. 井眼附近地层污染

根据射孔深度与污染深度的关系, 井眼附近的地层污染可以分为射孔炮眼在污染区域之内和射孔炮眼穿透污染区域两种情况。当射孔炮眼在污染区域之内即未穿透污染区域时, 层

流表皮为:

$$S_d^+ = \left(\frac{k_f}{k_d - 1} \right) \left[\ln \frac{r_d}{r_w} + S_p^+ \right] \quad (3)$$

湍流表皮:

$$S_d^+ = \left[1 - \frac{r_w}{r_d} \right] \left[\frac{\beta_d}{\beta_f} (1 + S_p^+) - 1 \right] - S_p^+ \quad (4)$$

当射孔炮眼穿透污染区域时, 在式 (4) 的基础上校正孔深与井眼半径^[1]:

$$L_p^* = L_p - \left(1 - \frac{k_d}{k_f} \right) L_d \quad (5)$$

$$r_w^* = r_w + \left(1 - \frac{k_d}{k_f} \right) L_d \quad (6)$$

式中, k_d 为污染区域渗透率, m^2 ; r_d 为污染半径, m ; β_d 为污染区域紊流速度系数, m^{-1} ; L_d 为污染深度, m ; r_w 为井眼半径, m 。

2. 射孔炮眼周围的低渗压实带

射孔后在炮眼周围形成低渗的压实带, 通常在新井出砂量不大的情况下, 压实带一般不会被破坏, 这种情况下需要考虑压实带造成的流动阻力。

层流表皮:

$$S_c^+ = \frac{1}{L_p \rho_p} \left(\frac{k_f}{k_c - 1} \right) \ln \frac{r_c}{r_p} \quad (7)$$

紊流表皮:

$$S_c^+ = \frac{h}{L_p^2 \rho_p} \left(\frac{\beta_c}{\beta_f} - 1 \right) r_w \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_c} \right) \quad (8)$$

式中, ρ_p 为射孔密度, $1/m$; k_c 为压实带渗透率, m^2 ; r_c 为压实带半径, m 。

压实带渗透率及半径一般很难得到实际值, 可以根据地面试验结果确定^[2]: 正压射孔时, 压实带渗透率通常约是地层渗透率的 10%, 负压射孔时约为 40%; 压实带半径可以取 $r_c = r_p + 0.0125 (m)$ 。

3. 地层非均质性

在地层非均质性严重 ($k_t > k_v$) 的情况下, 通常采用的校正方法是修正孔密和孔眼半径:

$$\rho_p^* = \rho_p \frac{\overline{k_v}}{k_f} \quad (9)$$

$$r_p^* = \frac{r_p}{2} \left[1 + \frac{\overline{k_v}}{k_f} \right] \quad (10)$$

式中, k_v 为地层垂向渗透率, m^2 。

4. 斜井

在套管完成井中, 井眼倾斜增大了井眼与地层之间的流通面积, 实际等于增加了射开长度, 因此考虑斜井应首先校正射开厚度:

$$H_p^* = \frac{H_p}{\cos\lambda} \quad (11)$$

另外, 井眼倾斜造成附加流动表皮为^[13]:

$$S_i = - \left(\frac{\lambda^*}{41} \right)^{2.06} - \left(\frac{\lambda^*}{56} \right)^{1.865} \ln \left(\frac{h_x}{100} \right) \quad (12)$$

$$\lambda^* = \arctan \left[\frac{k_f \tan\lambda}{k_v} \right] \quad (13)$$

$$h_x = \frac{h^*}{r_w} \frac{k_f}{k_v} \quad (14)$$

式中, h^* 为井段穿过油层的垂直长度, m ; λ 为井斜角, ($^\circ$)。上式只适用于井斜角不超过 75° 的情况。

5. 多油层

对多油层的校正通常是计算各油层的平均渗透率和平均紊流速度系数:

$$k_i^* = \frac{k_i h_i}{h_i} \quad (15)$$

$$\beta_i = \left[\frac{h_i}{\beta_i} \right]^2 \quad (16)$$

式中, k_i 为第 i 小层的渗透率, m^2 ; h_i 为第 i 小层的厚度, m ; β_i 为第 i 小层的紊流速度系数, m^{-1} 。

6. 自由气的影响

自由气对产能指数的影响用 Vogel/ Fetkovitch 和 Nind 相关式校正^[4]。

(1) Vogel/ Fetkovitch 公式

$$\frac{q}{q} = 1 - (1-v) \frac{P_{wf}}{P_r} - v \left(\frac{P_{wf}}{P_r} \right)^2 \quad (17)$$

式中, q 为不考虑自由气影响时计算得到的产能, m^3/s ; q 为考虑自由气影响时计算得到的产能, m^3/s ; P_{wf} 为井底流压, Pa ; P_r 为油藏压力, Pa ; v 为常数, 对 Vogel 公式, $v = 1$; 对 Fetkovitch 公式, $v = 0.8$ 。

(2) Nind 相关式

$$\frac{q - q_b}{q - q_b} = 1 - (1-v) \frac{P_{wf}}{P_r} - v \left(\frac{P_{wf}}{P_r} \right)^2 \quad (18)$$

式中, q_b 为压差 $\Delta P = P_r - P_b$ 时的产量, m^3/s ; P_b 为泡点压力, Pa 。

四、算 例

某油井射开厚度 $12.4m$, 地层渗透率 $1.4\mu m^2$, 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 $10mPa \cdot s$, 生产压差 $3MPa$, 充填后砾石层渗透率 $45\mu m^2$ 。不考虑井眼倾斜时利用式 (1) 得到的产能为 $27t/d$ 。图 1 给出了利用本文方法计算得到了井斜角和地层非均质性对该井砾石充填后的产能的影响。曲线 A 表示不考虑地层非均质性 ($k_v/k_f = 1$) 时砾石充填后产能随井斜角的变化关系; 曲线 B 表示考

虑地层非均质性 ($k_v/k_f = 0.7$) 时油井产能随井斜角的变化关系。

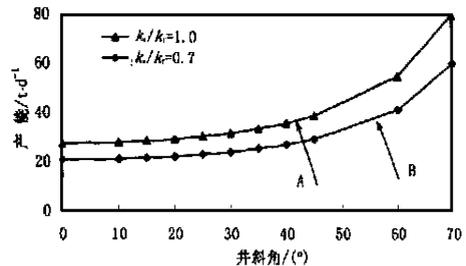


图 1 砾石充填井产能随井斜角及地层非均质性变化曲线

由图 1 可以看出, 砾石充填油井产能随井斜角的增大而增大, 当井斜角较大时, 产能随井斜角的变化更加明显。由图 1 中曲线 A 与曲线 B 比较可知, 地层非均质性对油井产能亦有较大影响, 非均质性越大 (即地层垂向渗透率与水平渗透率的比值越小), 产能越小。

因此, 在实际砾石充填井产能预测中, 上述油井的特殊条件是不能忽略的, 必须详细加以考虑。

五、几点说明

砾石充填井产能预测实际应用中, 充填后的砾石层渗透率是一个难以测量的基础数据, 因为在砾石的运输及泵送过程中, 砾石颗粒不可避免地会发生破碎而产生细砂, 细砂的存在可能大大降低砾石层的渗透性; 充填过程中的压实作用也使砾石层渗透率发生变化, 通常通过室内模拟试验加以解决。另外需要注意的是, 充填后的砾石层渗透率并不是保持不变的, 随着地层细砂的侵入, 砾石层渗透率会不同程度地降低, 而地层砂侵入砾石层的情况与砾石性质、流体物性等有关。

参 考 文 献

- McLeod H O. The Effect of Perforating Conditions on Well Performance. JPT, 1983.
- Harun Ates, Kelkar M G. Two-Phase Pressure Drop Predictions Across GravelPack. SPE 37512, 1997.
- Cinco, H, Miller F G, Ramey H J. Unsteady state pressure distribution created by a directional drilled well. JPT, 1985.
- Beggs H D. Oil System Correlations. SPE Petroleum Engineering Handbook.

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, 从事油气田开发方面的教学与科研工作。系本刊顾问。

李志芬, 1974 年生。1998 年毕业于石油大学 (华东) 石油工程系。现为石油大学 (华东) 石油工程系在读硕士研究生。

曲占庆, 1963 年生。1986 年毕业于华东石油学院。现任石油大学 (华东) 采油研究室副教授。