

文章编号: 2095—0411 (2014) 03 - 0084 - 04

压裂水平井产能计算新方法^{*}

田仁连¹, 何岩峰¹, 宋丰博², 张 凯¹, 钟 明¹

(1. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016; 2. 中原石油工程有限公司钻井四公司, 河南 濮阳 457001)

摘要: 水力压裂是水平井常见的增产措施, 准确预测压裂后水平井的产能是水平井压裂设计的重点和难点工作之一。根据势的叠加和干扰理论, 借用等效井径的概念, 建立了压裂水平井产能计算的新公式。基于此公式, 研究了存在多条裂缝时, 各个裂缝长度对水平井产能的影响。研究表明: 各个裂缝长度差异较大时, 油井的增产效果较差; 压裂水平井的增产效果, 与外侧裂缝长度关系更大。

关键词: 压裂; 水平井; 等效井径; 产能预测

中图分类号: TE 328

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2014.03.017

The New Calculation Methods on Productivity of Fractured Horizontal Wells

TIAN Ren-lian¹, HE Yan-feng¹, SONG Feng-bo², ZHANG Kai¹, ZHONG Ming¹

(1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China; 2. The Forth Drilling Company Zhongyuan Petroleum Engineering Co., LTD, Puyang 457001, China)

Abstract: Hydraulic fracturing is a common stimulation of horizontal wells, and predicting the production of horizontal wells after fracturing is one of the important and difficult work. To get a more accurate calculation method of the fracturing horizontal well production capacity, the theory of potential superposition and interference were applied, the concept of horizontal well of equivalent diameter was utilized, the new formulae for calculation of fracture in horizontal well productivity was established. Base on this formula, this paper studied the length of cracks effects on horizontal well productivity when multiple fissures exist. The results show that when the crack length difference is bigger, the well stimulation is poorer. The stimulation result is determined by lateral crack length.

Key words: fracturing; horizontal well; equivalent caliper; productivity prediction

低渗透油藏采用水平井并进行压裂完井后, 对油藏的穿透性更好且可以连接更多天然裂缝、扩大泄油面积, 从而提高采收率。然而, 对压裂后的水平井进行产能预测中, 存在一系列的问题, 其中最关键的问题则是: 裂缝长度及裂缝数目是如何影响产能的。

Norris^[1]给出了预测具有多条有限导流能力垂直裂缝的水平井产量典型曲线; Mukherjee^[2]等人预测了压裂水平井的产能, 并计算了在给定条件下需要的裂缝数目; Giger^[3]利用水电相似原理, 得到了渗透率各向异性影响下水平井与直井的产量比值; Roberts^[4]应用非达西渗流模型对致密气藏多

^{*} 收稿日期: 2014 - 02 - 20。

作者简介: 田仁连(1990—), 男, 山东聊城人, 硕士生。通讯联系人: 何岩峰(1973—), E-mail: heyanfeng@cczu.edu.cn

裂缝水平井产能进行评价, 认为井筒效应将导致产量急剧下降; Soliman^[5]等考虑了横向裂缝或纵向裂缝, 提出了定压条件下压裂水平井的产能模型。

李伟超^[6]等研究了裂缝数目、长度、高度对产能的影响规律; 张凤喜^[7]等利用电模拟实验, 研究了低渗透油藏水平井段长度、裂缝长度、裂缝条数与间距、主井筒与裂缝夹角等对产能的影响; 同年吴晓东^[8]等根据水电相似原理, 研究了裂缝参数对压裂水平井产能的影响, 并提出压裂水平井存在极限产能; 苗和平^[9]等就水平井压裂后的单缝产量预测建立了1个两维两相渗流模型。

郎兆新^[10]等人使用位势理论和叠加原理, 推导了多裂缝压裂水平井的产能计算公式, 并进行分析; 郑正福^[11]等在郎兆新的基础上, 考虑了裂缝内渗流阻力及压力损失, 对压裂水平井产能公式重

新进行了推导和修正, 并对影响压裂水平井产能的各个因素进行了对比和分析; 王立军^[12]等人引入有效缝长因子模型, 建立了任意角度裂缝水平井产能预测模型。

丁一萍^[13]等人采用渗流力学中的势的叠加和干扰理论, 推导出了压裂水平井产能计算方法。本文在其基础上, 应用水平井拟稳态产能公式和等效井径模型进行研究。得到了压裂水平井产能预测新方法。

1 水平井等效井径模型

等效井径模型是指假设在圆柱形地层中存在一口水平井和直井, 根据水平井拟稳态和直井产能公式, 令两者相等, 求得的等效井筒计算公式。

水平井拟稳态产能公式为:

$$Q_h = \frac{2\pi K_h h (p_i - p_{wf})}{\mu B \left\{ \ln \frac{r_e}{L_h} + 1 - \frac{h}{L_h} \cdot \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \cdot \ln \left[\frac{\pi r_w}{h} (1 + \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}) \sin \left(\pi \frac{z_w}{h} \right) - \frac{2h^2}{L_h^2} \cdot \frac{K_h}{K_v} \left(\frac{1}{3} - \frac{z_w}{h} + \frac{z_w^2}{h^2} \right) \right] \right\}} \quad (1)$$

直井拟稳态产能公式为:

$$Q_v = \frac{2\pi K h (p_i - p_{wf})}{\mu B \ln \left(\frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} \right)} \quad (2)$$

令 Q_h 与 Q_v 相等, 能够得到:

$$\frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} = \ln \frac{r_e}{L_h} + 1 - \frac{h}{L_h} \cdot \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \cdot \ln \left[\frac{\pi r_w}{h} (1 + \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}) \sin \pi \frac{z_w}{h} \right] - \frac{2h^2}{L_h^2} \cdot \frac{K_h}{K_v} \left(\frac{1}{3} - \frac{z_w}{h} + \frac{z_w^2}{h^2} \right) \quad (3)$$

整理的水平井拟稳态等效井径模型:

$$r_{we} = L_h \exp \left\{ -1.75 + \frac{h}{L_h} \cdot \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \cdot \ln \left[\frac{\pi r_w}{h} (1 + \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}) \sin \pi \frac{z_w}{h} \right] - \frac{2h^2}{L_h^2} \cdot \frac{K_h}{K_v} \left(\frac{1}{3} - \frac{z_w}{h} + \frac{z_w^2}{h^2} \right) \right\} \quad (4)$$

使用等效井径代入直井拟稳态产能公式:

$$Q_h = \frac{542.87 K_h h (p_i - p_{wf})}{\mu B \ln \left(\frac{r_e}{r_{we}} - \frac{3}{4} \right)} \quad (5)$$

对于同样地层中一口带有垂直裂缝的直井的拟稳态渗流可以得到:

$$Q_{vf} = \frac{2\pi K h (p_i - p_{wf})}{\mu B [\ln (r_e/x_f + 1 - \sigma(x))]} \quad (6)$$

其中:

$$\sigma(x) = 0.5 \left[(1 - x/x_f) \ln |1 - x/x_f| + (1 + x/x_f) \ln (1 + x/x_f) \right] \quad (7)$$

式中: $\sigma(x)$ ^[13]为 σ 函数; x 为方向轴坐标, m; x_f 为裂缝半长, m。

令 Q_{vf} 与 Q_h 相等, 则有:

$$r_{we} = x_f \exp [\sigma(x) - 1] + \frac{3}{4r_e} \quad (8)$$

根据 Mukherjee 的研究结果, 取 $x = 0.738x_f$ ^[2], 此时裂缝为无限导流量裂缝, 则:

$$r_{we} \approx 0.44751x_f \quad (9)$$

利用式(5)可以将水平井等效为等产量的直井; 利用式(9)可以将水力裂缝的产能用等效井径的一口直井来代替。即将无线导流能力裂缝等效为直井, 将水平井等效为等产量的直井。

2 水力压裂水平井产能

多井同时工作时, 地层中任意一点的压降应等于各井单独工作时在该点所造成的压降的代数和^[14]。利用等效井径模型, 将一条裂缝用等效的一口直井代替, 即可转化为多口井的势的叠加问题。

利用等效井径模型, 求解压裂水平井 3 条裂缝时的产能。存在 3 条裂缝时, 通过选择不同的参数, 如裂缝半长: 外侧 2 条裂缝长度可以大于中间 1 条裂缝长度; 中间 1 条裂缝长度也可以大于外侧 2 条裂缝长度之和。

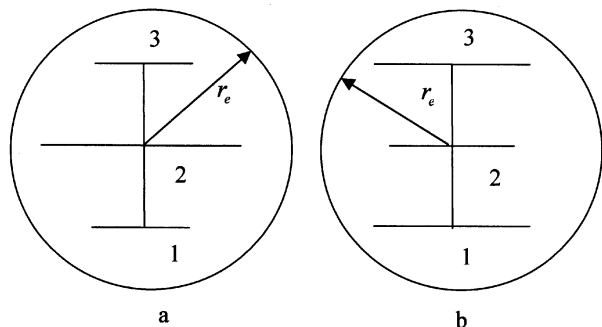


图 1 3 条裂缝系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3 fissures

以图 1b 所示选取裂缝系统。假设外侧 2 条裂缝半长相等, 半长为 x_{f1} , 产量为 q_1 ; 内侧裂缝半长为 x_{f2} , 产量为 q_2 。裂缝等间距为 d , 根据压降叠加原理, 以其中任意一条裂缝为中心, 其他裂缝都会对其产量产生影响, 同时产生压降。由式 (9), 得到每条裂缝的等效井径。

$$r_{we1} = 0.447\ 51x_{f1} \quad (10)$$

$$r_{we2} = 0.447\ 51x_{f2} \quad (11)$$

$$p_{wf} - C = \frac{\mu B}{2\pi K h} \cdot (q_1 \ln 2d r_{we1}) + q_2 \ln d \quad (12)$$

$$p_{wf} - C = \frac{\mu B}{2\pi K h} \cdot (q_1 \ln d^2 + q_2 \ln r_{we2}) \quad (13)$$

$$p_i - C = \frac{q_1 \mu B}{2\pi K h} \cdot \ln r_e \quad (14)$$

求解上述方程组, 得到 3 条裂缝水平井总产能公式:

$$q_t = \frac{\frac{2\pi K h}{\mu B} \cdot (p_i - p_{wf})}{\ln \frac{r_e}{(d^2)^{q_{r1}} (r_{we2})^{q_{r2}}}} \quad (15)$$

式中 q_{r1} 、 q_{r2} 为外侧裂缝、内侧裂缝产量与总产量的比。其中参数的选择应使 $d > 2x_{fmax}$, 才能满足方程 (19) 的应用条件。

考虑另一种情况, 即 3 条裂缝的长度各不相同时的产能。第 1 条裂缝半长为 x_{f1} , 产量为 q_1 , 第 2 条裂缝半长为 x_{f2} , 产量为 q_2 , 第 3 条裂缝半长为 x_{f3} , 产量为 q_3 。求解方程组:

$$r_{we1} = 0.447\ 51x_{f1} \quad (16)$$

$$r_{we2} = 0.447\ 51x_{f2} \quad (17)$$

$$r_{we3} = 0.447\ 51x_{f3} \quad (18)$$

$$p_{wf} - C = \frac{\mu B}{2\pi K h} (q_1 \ln (r_{we1}) + q_2 \ln d + q_3 \ln 2d) \quad (19)$$

$$p_{wf} - C = \frac{\mu B}{2\pi K h} (q_1 \ln d + q_2 \ln (r_{we2}) + q_3 \ln d) \quad (20)$$

$$p_{wf} - C = \frac{\mu B}{2\pi K h} (q_1 \ln 2d + q_2 \ln d + q_3 \ln (r_{we3})) \quad (21)$$

$$p_i - C = \frac{q_1 \mu B}{2\pi K h} \ln r_e \quad (22)$$

q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_t 具有以下关系:

$$\frac{q_2}{q_3} = \frac{\ln \frac{r_{we3}}{2d}}{\ln \frac{r_{we1}}{2d}} \cdot \frac{\ln \frac{r_{we1}}{d} + \ln 2}{\ln \frac{r_{we2}}{d}} \quad (23)$$

令 α_1 、 α_2 、 α_3 具有以下关系:

$$\alpha_1 = \frac{\ln \frac{r_{we3}}{2d}}{\ln \frac{r_{we1}}{2d}} \quad (24)$$

$$\alpha_2 = \frac{\left[\frac{\ln \frac{r_{we3}}{2d}}{\ln \frac{r_{we1}}{2d}} \right] \cdot \ln \frac{r_{we1}}{d} + \ln 2}{\ln \frac{r_{we2}}{d}} \quad (25)$$

α_3 数值为 1, 各条分裂缝与总产量之间具有以下关系:

$$q_{r1} = \frac{q_1}{q_t} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \quad (26)$$

$$q_{r2} = \frac{q_2}{q_t} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \quad (27)$$

$$q_{r3} = \frac{q_3}{q_t} = \frac{\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \quad (28)$$

求解式 (16) - 式 (30) 方程组, 就可以得到该情况下产能公式。

$$q_t = \frac{\frac{2\pi K h}{\mu B} \cdot (p_i - p_{wf})}{\ln \frac{r_e}{(r_{we1})^{q_{r1}} d^{q_{r2}} (2d)^{q_{r3}}}} \quad (29)$$

其中参数的选择应使 $d > x_{fmax}$, 才能满足方程 (34) 的应用条件。

3 缝长对产能影响

利用式 (15) 和式 (29), 分析缝长对产能的影响。

计算基础数据为 $\mu = 3.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $r_w = 0.111 \text{ m}$, 252 m , $r_e = 550 \text{ m}$, $B = 1.1$, $K_h = 1.5 \mu\text{m}^2$, $K_v = 0.15 \mu\text{m}^2$, $K = 1.5 \mu\text{m}^2$, $L_h = 600 \text{ m}$, $h = 30 \text{ m}$, $z_w = 15 \text{ m}$, $p_{wf} = 31 \text{ MPa}$, $p_i = 44 \text{ MPa}$ 。

变化裂缝半长, 利用式 (15) 计算不同裂缝长度的水平井总产量和单条裂缝产量。如图 2 所示。

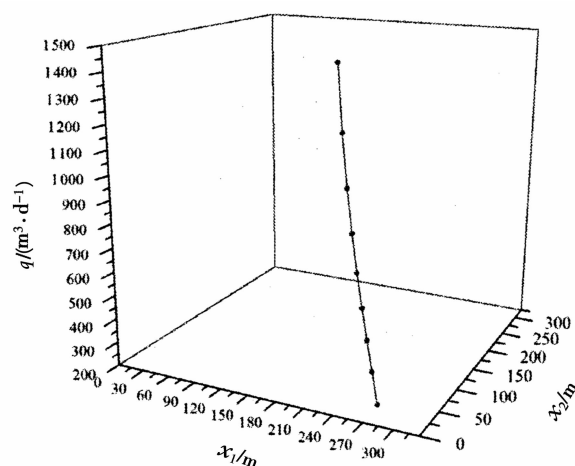


图 2 总产量与裂缝关系图

Fig. 2 Diagram of relation between total output and fissures

在裂缝长度满足 $x_f < 300 \text{ mm}$ 的条件下, 变化裂缝半长, 利用式 (15) 计算得到图 2。由图 2 可以看出: 外侧裂缝长度对产量影响较大。分析认为, 外侧裂缝流体供给充足, 产量较高。中间裂缝由于受到外侧裂缝流体严重干扰, 产量较低。因此, 对于此种模型的水平井, 应该在两端压开相对较长的裂缝, 有利于水平井总产量的提高。

变化裂缝半长, 利用式 (30) 得到的计算结果与和图 2 相比, 式 (30) 所用模型的总产量要低。3 条裂缝间缝长差异较大时, 油井增产效果不明显。这是因为裂缝在流体流动的过程中彼此之间相互影响、相互制约。

4 结 论

1) 以水平井产能机理为基础, 利用水平井等效模型和势的叠加原理, 得到了带裂缝水平井产能公式。在运算中引入水平井等效井径, 使计算过程更为简便。

2) 裂缝长度在一定范围内时, 压裂水平井的产量随着裂缝长度增加而增加, 当裂缝长度差异比较大的时候, 增产效果并不是最好, 这说明裂缝间相互干扰非常严重。由计算结果可以得出: 水平井压裂后一般存在 3 ~ 5 条裂缝, 就能保证水平井有很高的产能。

3) 不同的裂缝布局, 压裂水平井产量是不一样的。并且在进行压裂设计时, 要尽可能使外部裂缝长度大于内部裂缝长度。

参考文献:

- [1] Norris S O. Predicting oil production from a horizontal well intercepting multiple finite conductivity vertical fractures [J]. SPE Reservoir Engineering, 1976, 3 (2): 496 - 504.
- [2] Hemanta Mukherjee, Michael J, Economides. A parametric comparison of horizontal and vertical well performance [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6 (2): 209 - 216.
- [3] Giger F M. The reservoir engineering aspects of horizontal wells [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston: Society of Petroleum Engineers, 1984: 234 - 245.
- [4] Roberts B E, Engen H. Productivity of multiply fractured horizontal wells in tight gas reservoirs [C]. Offshore Europe, Aberdeen: Society of Petroleum Engineers, 1991: 133 - 142.
- [5] Soliman M Y. Fracturing horizontal wells in gas reservoirs [C]. SPE Mid - Continent Gas Symposium, Amarillo: Society of Petroleum Engineers, 1996: 103 - 117.
- [6] 李伟超, 吴晓东, 安永生, 等. 压裂水平井半解析产能预测方法在低渗透油藏中的应用 [J]. 钻采工艺, 2008, 32 (3): 41 - 43.
- [7] 张凤喜, 吴晓东, 隋先富, 等. 基于电模拟实验的低渗透油藏压裂水平井产能研究 [J]. 特种油气藏, 2009, 16 (2): 90 - 93.
- [8] 吴晓东, 隋先富, 安永生, 等. 压裂水平井电模拟实验研究 [J]. 石油学报, 2009, 30 (5): 740 - 743.
- [9] 苗和平, 王鸿勋. 水平井压后产量预测及裂缝数优选 [J]. 石油钻采工艺, 1992, 14 (6): 51 - 56.
- [10] 郎兆新, 张丽华, 程松林. 压裂水平井产能研究 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 1994, 18 (2): 43 - 46.
- [11] 宁正福, 韩树刚, 程林松, 等. 低渗透油气藏压裂水平井产能计算方法 [J]. 石油学报, 2002, 23 (2): 68 - 71.
- [12] 王立军, 张晓红, 马宁, 等. 压裂水平井裂缝与井筒成任意角度时的产能预测模型 [J]. 油气地质与采收率, 2008, 15 (6): 73 - 75.
- [13] 丁一萍, 王晓冬, 邢静. 一种压裂水平井产能计算方法 [J]. 特种油气藏, 2008, 15 (2): 64 - 68.
- [14] 张建国, 杜殿发, 侯健, 等. 油气层渗流力学 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010: 77 - 86.