

低渗透油藏垂直裂缝井产能评价新方法

黄 勇¹, 李春兰², 程林松², 黄世军²

(1. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095;
2. 中国石油大学(北京) 石油天然气工程学院, 北京 100249)

摘要: 为了更加准确预测低渗透油藏垂直裂缝井产能, 研究不同渗透率级别下的垂直裂缝井产能, 基于垂直裂缝井渗流特征, 应用位势理论, 推导了垂直裂缝井产能公式。在考虑垂直裂缝井与直井泄油半径关系的基础上, 结合新的产能公式改进了压裂直井增产倍比传统计算方法, 使垂直裂缝井增产倍比从理论上更加合理。对不同渗透率级别储层中的垂直裂缝井, 分别应用新方法和其他学者的方法进行对比, 从泄油半径、增产倍比、无因次产能随渗透率的变化结果可以看出, 产能评价新方法更符合低渗透油藏实际情况。

关键词: 垂直裂缝井; 产能; 泄油半径; 低渗透油藏; 渗透率级别; 增产倍比

中图分类号: TE348 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-9603(2010)01-0099-03

目前低渗透油藏普遍采用垂直裂缝井进行开发。通过统计长庆油田不同渗透率级别储层中垂直裂缝井的实际产能发现: 油井产能随渗透率的增加而增加, 但增加的幅度并不明显, 尤其是在渗透率相对较大的时候。而现有的垂直裂缝井产能预测方法^[1-9]的预测结果显示: 油井产能随渗透率增加几乎呈线性增加, 而且预测结果普遍偏高。目前常用的方法^[3]是利用等效井筒半径、裂缝半长和无因次裂缝导流能力关系曲线^[4-9], 根据无因次裂缝导流能力确定等效井筒半径, 计算垂直裂缝井产能。这忽略了实际泄油半径在确定等效井筒半径过程中的影响。针对评价方法的这些问题, 笔者建立了垂直裂缝井产能评价新方法并进行了应用分析。

1 垂直裂缝井产能计算方法

渗流模型做如下假设: ①上下为封闭边界, 四周为无限大油层; ②油层中心有 1 口垂直裂缝井, 裂缝高度等厚于整个油层。

根据复位势理论, 平行于 x 轴, 且与 x 轴距离为 y_0 的裂缝在整个二维平面上产生的势的分布为^[10]

$$\phi_f(x,y)=\frac{Q_{of}}{2\pi h}\operatorname{arch}\frac{1}{\sqrt{2}}\times\left\{1+\frac{x^2}{X_f^2}+\left(\frac{y_0}{X_f}-\frac{y}{X_f}\right)^2+\right.$$

$$\left.\sqrt{\left[1+\frac{x^2}{X_f^2}+\frac{(y_0-y)^2}{X_f^2}\right]^2-4\frac{x^2}{X_f^2}}\right\}^{\frac{1}{2}}+C\quad(1)$$

式中: ϕ_f 为垂直裂缝在平面上产生的势, $\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$; Q_{of} 为裂缝产能, m^3/s ; h 为油层厚度, m ; X_f 为裂缝半长, m ; C 为常量, $\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ 。

在 $(R_{evf}, 0)$ 处的势可表示为

$$\phi_{fe}(R_{evf},0)=\frac{Q_{of}}{2\pi h}\operatorname{arch}\frac{R_{evf}}{X_f}+C\quad(2)$$

式中: ϕ_{fe} 为裂缝在泄油半径处产生的势, $\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$; R_{evf} 为泄油半径, m 。

在缝端 $(X_f, 0)$ 处的势为

$$\phi_{ff}(X_f,0)=C\quad(3)$$

式中: ϕ_{ff} 为裂缝在裂缝端点处产生的势, $\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ 。

由式(2)和式(3)可得无限导流能力垂直裂缝产能公式为

$$Q_{of}=\frac{2\pi Kh(p_e-p_f)}{\mu B\operatorname{arch}\frac{R_{evf}}{X_f}}\quad(4)$$

式中: K 为渗透率, m^2 ; p_e 为泄油半径处的压力, Pa ; p_f 为裂缝缝端的压力, Pa ; μ 为原油粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; B 为原油体积系数。

若裂缝为有限导流能力裂缝, 并将裂缝内流动视为平行流, 考虑到实际情况中裂缝半长远大于井筒半径, 则有

收稿日期: 2009-10-26; 改回日期: 2009-12-25。
作者简介: 黄勇, 男, 工程师, 硕士, 从事煤层气数值模拟、煤层气排采工艺、煤层气储层改造等研究。联系电话: (010)62492157, E-mail: jeffehy@163.com。
基金项目: 国家“973”项目“高丰度煤层气富集机制及提高采收率基础研究”第六课题“煤层气开发井间干扰机理与开发方式优选”

$$p_i - p_w = \frac{Q_{of}}{2} \times \frac{\mu B X_f}{K_f h w} \quad (5)$$

式中： R_w 为井筒半径，m； p_w 为井底流压，Pa； K_f 为裂缝初始渗透率， m^2 ； w 为裂缝宽度，m。

由式(4)和式(5)可得有限导流垂直裂缝井产能公式为

$$Q_{of} = \frac{2\pi K h (p_e - p_w)}{\mu B \left(\operatorname{arch} \frac{R_{evf}}{X_f} + \frac{\pi K X_f}{K_f w} \right)} \quad (6)$$

将垂直裂缝井等效为直井，并令 $I_x = \frac{X_f}{R_{evf}}$ ， $F_{CD} = \frac{K_f w}{K X_f}$ ，则由式(6)可得

$$\frac{R_{weff}}{X_f} = \frac{\frac{1}{I_x}}{\left[\frac{1}{I_x} + \sqrt{\left(\frac{1}{I_x} \right)^2 - 1} \right] \exp \frac{\pi}{F_{CD}}} \quad (7)$$

式中： R_{weff} 为直井井筒半径，m； I_x 为裂缝穿透比； F_{CD} 为无因次裂缝导流能力。

当 $R_{evf} \gg X_f$ (一般 $R_{evf} \geq 2X_f$ 即可)，而且 F_{CD} 足够大时， $R_{weff} = \frac{X_f}{2}$ ，则式(6)可变形为

$$Q_{of} = \frac{2\pi K h (p_e - p_w)}{\mu B \ln \frac{R_{evf}}{\frac{X_f}{2}}} \quad (8)$$

式(8)即为无限导流垂直裂缝井产能公式。

2 垂直裂缝井增产倍比计算方法改进

传统的垂直裂缝井增产倍比计算方法忽略了 2 种井型泄油半径之间的差别，将压裂直井和直井的泄油半径处理为同一值。从泄油半径的角度，利用笔者推导的产能评价方法给出改进的垂直裂缝井增产倍比计算方法。

2.1 不同渗透率级别储层中的直井泄油半径之间的关系

假设在渗透率为 K^* ，流体粘度为 μ^* 的地层中有一直井的泄油半径为 R_{ev}^* ，另一渗透率为 K ，流体粘度为 μ 的地层中一直井的泄油半径为 R_{ev} ，则根据径向稳定渗流理论，以泄油半径处势梯度相等为基础，可以得到 2 种地层中泄油半径之间的关系为

$$K \mu^* R_{ev}^* \ln \frac{R_{ev}^*}{R_w} - K^* \mu R_{ev} \ln \frac{R_{ev}}{R_w} = 0 \quad (9)$$

令 $R_{ev} = x$ ，由式(9)可得

$$f(x) = K \mu^* R_{ev}^* \ln \frac{R_{ev}^*}{R_w} - K^* \mu x \ln \frac{x}{R_w} \quad (10)$$

式(10)的实根即为渗透率为 K 的油藏中的直井泄油半径。

由于 $f(x)$ 的形式较复杂，可采用牛顿近似迭代法求得 R_{ev} ，逐步迭代法的表达式为

$$x_{n+1} = x_n - \frac{2f(x_n)\Delta x}{f(x_n + \Delta x) - f(x_n - \Delta x)} \quad (11)$$

取初值 $x_0 = R_{ev}^*$ ，逐次计算 $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}$ ，当 $|x_{n+1} - x_n| \leq \xi$ 时 (ξ 为给定误差精度)， x_{n+1} 即为待求 R_{ev} 。

2.2 垂直裂缝井与直井泄油半径的关系

垂直裂缝井与直井相比，主要改变了流体的近井渗流方式；二者的泄油半径也不同。将垂直裂缝井等效为井筒半径为 R_{weff} ，泄油半径为 R_{evf} 的等效直井。若在同一井点采用一直井开采，其泄油半径为 R_{ev} 。若等效直井和直井在泄油半径处的势梯度相等，根据稳定径向渗流理论，则可得等效直井和直井泄油半径之间的关系，即

$$\frac{1}{\ln \frac{R_{evf}}{R_{weff}}} \times \frac{1}{R_{evf}} - \frac{1}{\ln \frac{R_{ev}}{R_w}} \times \frac{1}{R_{ev}} = 0 \quad (12)$$

联立式(7)和式(12)可得

$$R_{evf} \left[\ln \left(\frac{R_{evf}}{X_f} + \sqrt{\left(\frac{R_{evf}}{X_f} \right)^2 - 1} \right) + \frac{\pi K X_f}{K_f w} \right] - R_{ev} \ln \frac{R_{ev}}{R_w} = 0 \quad (13)$$

令

$$f(x) = x \left[\ln \left(\frac{x}{X_f} + \sqrt{\left(\frac{x}{X_f} \right)^2 - 1} \right) + \frac{\pi K X_f}{K_f w} \right] - R_{ev} \ln \frac{R_{ev}}{R_w} \quad (14)$$

取 $x_0 = R_{ev}$ ，参照式(11)由牛顿近似迭代法可求得 R_{evf} 。

由垂直裂缝井的等效井半径和泄油半径，可得到垂直裂缝井增产倍比的改进算法表达式，即

$$\frac{J_{vf}}{J_v} = \frac{\ln \frac{R_{ev}}{R_w}}{\ln \frac{R_{evf}}{R_{weff}}} \quad (15)$$

式中： J_{vf} 为垂直裂缝井采油指数， $m^3/(s \cdot Pa)$ ； J_v 为常规直井采油指数， $m^3/(s \cdot Pa)$ 。

3 应用分析

长庆油田某特低渗透油藏参数包括：地层原油粘度为 $2.24 mPa \cdot s$ ，平均有效厚度为 $10.81 m$ ，生产压差为 $5 MPa$ ，裂缝长度为 $125 m$ ，裂缝导流能力

为 $25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$, 原油体积系数为 1.237, 地层渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。应用笔者提出的新方法 & 文献[1-2] 对不同渗透率级别的垂直裂缝井产能进行了预测。定义无因次渗透率 (K_D) 是地层渗透率为 K 与地层渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的比值; 垂直裂缝井无因次采油指数 (J_D) 为地层渗透率为 K 时与地层渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时的垂直裂缝井的采油指数之比。

从结果可看出(图 1—图 4): ①随着渗透率的增加, 垂直裂缝井与直井泄油半径的比值逐渐减小; 渗透率相同时, 垂直裂缝井的泄油半径将大于常规直井泄油半径。②笔者改进的增产倍比方法比传统方法计算结果要小; 而且随着渗透率的增加, 二者差别减小。③应用新方法计算的无因次产能最低; 随着渗透率增加, 产能增长的幅度也最慢, 这在一定程度上解决了传统产能预测普遍偏高的问题。另外, 随着渗透率增加, 3 种方法的差别逐渐加大。④3

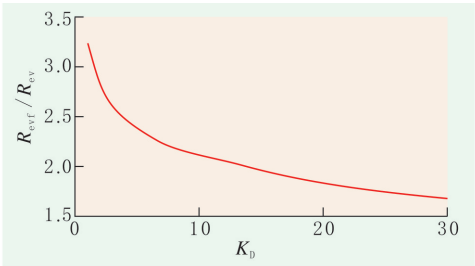


图 1 无因次泄油半径与无因次渗透率的关系

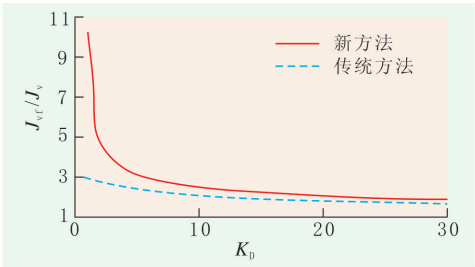


图 2 增产倍比与无因次渗透率的关系

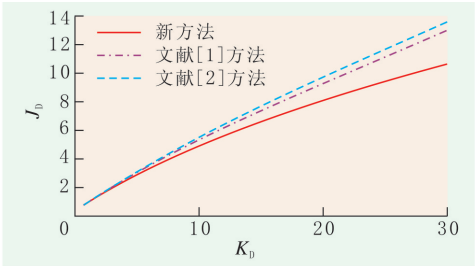


图 3 无因次采油指数与无因次渗透率的关系

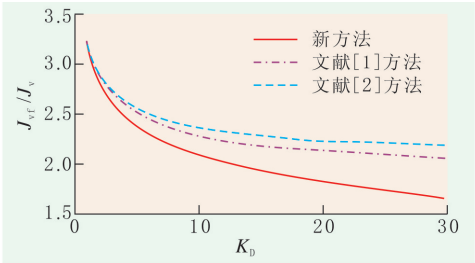


图 4 增产倍比与无因次渗透率的关系

种方法的增产倍比都随渗透率的增加而减小, 但由新方法得到的结果对渗透率的反映更为敏感。

4 结论

对不同渗透率级别储层中的垂直裂缝井, 分别应用新方法和 其他学者的方法进行对比可以看出, 产能评价新方法更符合低渗透油藏实际。从泄油半径的角度看, 渗透率越大, 垂直裂缝井相对于常规直井的优势越不明显; 垂直裂缝井适用于低渗透油藏, 与常规直井相比, 渗透率越小, 效果越好; 垂直裂缝井的产量随渗透率的增加逐渐增加, 但不呈线性增加, 增长的幅度逐渐变缓。

参考文献:

[1] Meyer B R, Jacot R H. Pseudosteady-state analysis of finite-conductivity vertical fractures[J]. SPE 95941, 2005.

[2] 蒋廷学, 单文文, 杨艳丽. 垂直裂缝井稳态产能的计算[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 61-63.

[3] 万仁溥. 水平井开采技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 165-180.

[4] 王雷, 张士诚. 压裂液返排速度对支撑剂回流量及其在裂缝内分布的影响[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(1): 101-102.

[5] 陈德春, 李文静, 李华, 等. 水力压裂水平裂缝支撑剂回采预测模型[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 92-94, 97.

[6] Prats M. Effect of vertical fractures on reservoir behavior in incompressible fluid case[R]. SPE 1575, 1961.

[7] Cinco-Ley Heber, Samaniego V. Transient pressure analysis for fractured wells[J]. SPE 7490, 1981.

[8] Cinco-Ley. Evaluation of hydraulic fracturing by transient pressure analysis methods[J]. SPE 10043, 1982.

[9] Riley M F. Analytical solutions for elliptical finite conductivity fractures[J]. SPE 22656, 1991.

[10] 郎兆新, 张丽华, 程林松. 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.