

低渗油藏不对称垂直裂缝井产能模型

熊健¹, 王小军², 吕雷³

1. 西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都 610500
2. 中国石油玉门油田分公司酒东油田作业区, 甘肃酒泉 735000
3. 中国石油长庆油田分公司第二采油厂, 甘肃庆阳 745100

摘要 油气藏改造时因地层非均质性的影响可能形成垂直裂缝不关于井筒对称, 而关于不对称垂直裂缝对油井产量影响研究较少。因此, 针对低渗油藏经压裂后产生的不对称垂直裂缝, 基于稳定流理论, 利用保角变换方法, 推导了考虑启动压力梯度影响的低渗油藏有限导流不对称垂直裂缝井产能的预测模型, 通过实例分析了多种因素对不对称垂直裂缝油井产量的影响。研究表明: 油井产量随着启动压力梯度增大呈近似线性下降, 且在相同的启动压力梯度下, 油井产量下降幅度随压差增大而减小; 当裂缝导流能力较小时, 不同裂缝长度或裂缝非对称率对油井产量影响程度差异较大, 当裂缝导流能力较大时, 不同裂缝长度或裂缝非对称率对油井产量影响程度差异较小; 裂缝长度越长, 裂缝非对称率越小, 裂缝非对称率对油井产量影响程度越大; 裂缝非对称率在(0.6, 1)范围时, 可以忽略其对油井产量的影响。

关键词 低渗油藏; 不对称垂直裂缝; 有限导流; 启动压力梯度; 裂缝非对称率

中图分类号 TE312

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.22.006

Productivity Model for Asymmetrical Vertical Fracture Well in Low-permeability Oil Reservoirs

XIONG Jian¹, WANG Xiaojun², LU Lei³

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. Jiudong Oilfield Operation District, PetroChina Yumen Oilfield Company, Jiuquan 735000, Gansu Province, China
3. No. 2 Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang 745100, Gansu Province, China

Abstract In view of the low permeability reservoir after fracturing development that can cause the asymmetrical vertical fracture, the productivity of this oil well is little information. Thus based on the steady seepage theory, with the aid of conformal transformation method, a prediction model for the finite-conductivity asymmetrical vertical fracture wells was established, and the various factors on the productivity of oil well were analyzed, under the influence of the start-up pressure gradient in the low-permeability oil reservoirs. The result shows that the decrease of productivity decreases is caused by start-up pressure gradient. In the same start-up pressure gradient, the productivity decreases with the increase of the production pressure. When the conductivity capacity of fracture becomes small, there is obviously difference for the productivity of fracture oil well in the crack length and fracture asymmetry factor. And when the conductivity capacity of fracture becomes big, there is little difference for the productivity of fracture oil well in the crack length and fracture asymmetry factor. The longer is the crack length and the less is the fracture asymmetrical factor, the greater is the productivity of the fracture oil well.

Keywords low-permeability oil reservoirs; asymmetrical vertical fracture; finite conductivity; start-up pressure gradient; fracture asymmetry factor

0 前言

目前, 水力压裂技术是油气藏储层的重要增产改造措施

之一^[1]。油井经水力压裂后, 将在较深的地层中形成垂直裂缝, 形成的垂直裂缝将改变地层的渗流条件, 使得压裂前后

收稿日期: 2013-03-12; 修回日期: 2013-04-24

基金项目: 西南石油大学研究生创新基金项目(GIFSS0701)

作者简介: 熊健, 博士, 研究方向为油气藏工程, 电子信箱: 361184163@qq.com

的产量预测模型不同。针对低渗油藏的垂直压裂井的产能评价方面研究较多,许多研究者提出多种油气藏垂直裂缝油井产量的计算模型,如:蒋廷学^[2]、张伟东等^[3]采用保角变换法建立了垂直压裂井产能模型,李生等^[4]利用椭圆流法建立了垂直裂缝井的产能模型,尹洪军等^[5]利用双线性流法建立垂直裂缝井模型,黄勇等^[6]利用位势理论推导了垂直裂缝井产能模型,熊健等^[7-9]分别利用保角变换、椭圆流及双线流法推导了垂直裂缝气井产能模型,而这些模型都是以垂直裂缝关于井筒对称的情况为前提,而实际情况中往往因为地层的应力场差异性的影响易形成不对称垂直裂缝。目前,相对于对称垂直裂缝油井产量评价方面的研究,不对称垂直裂缝井研究^[11-13]较少,且研究中未考虑到启动压力梯度影响。因此,通过应用保角变换方法,基于稳定流理论,推导出油井压裂后产生不对称垂直裂缝条件下,考虑启动压力梯度影响的低渗油藏有限导流不对称垂直裂缝井产能的预测模型,并在此基础上研究和分析各因素对产量的影响。

1 压裂井产量预测模型

根据考虑的渗流力学模型如图 1(a),其基本假设:① 压裂裂缝为垂直裂缝,沿井眼呈不对称分布;② 裂缝为有限导流能力;③ 在油藏和裂缝中均为单相流动,油藏中流动符合含启动压力梯度的达西渗流定律,裂缝中流动符合达西渗流定律;④ 不考虑地层的垂向流动及裂缝附近的污染,且油藏的上下封闭;⑤ 流体为单相、均质不可压缩牛顿流体,渗流过程中为等温,无任何特殊的物理化学现象发生。

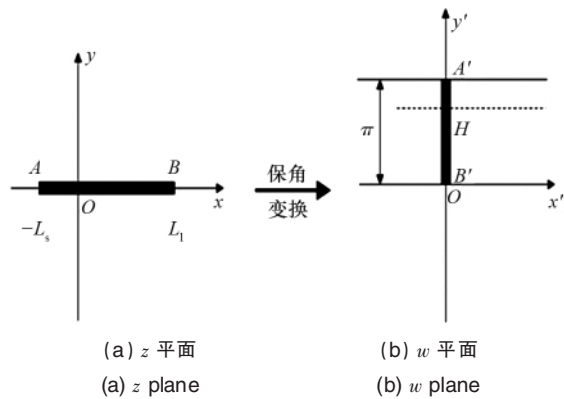


图 1 不对称垂直裂缝的保角变换示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the conformal mapping in the asymmetrical vertical fracture

如图 1(a)中,垂直裂缝沿井筒呈不对称分布,设井筒两边的长短裂缝长分别为 L_1 和 L_s , 并且在 z 平面建立 $x-y$ 坐标系,其中线段 AB 表示裂缝,点 O 表示井筒。

取保角变换^[2,9,12]:

$$Z-V=L_t \operatorname{ch}W \quad (1)$$

式中, Z,W 分别为 z 平面和 w 平面的函数, $\operatorname{ch}W=(e^W+e^{-W})/2$; V 为长短裂缝长之差的平均值, $V=(L_1-L_s)/2$; L_t 为长短裂缝长之

和的平均值, $L_t=(L_1+L_s)/2$ 。

通过变换后,图 1 中的 z 平面(图 1(a))被映射为图 1 中的 w 平面(图 1(b))。此时 z 平面中裂缝 AB 将映射为 w 平面 $A'B'$, z 平面中井筒点 O 映射为 w 平面点 H 。此时,在 z 平面内垂直压裂井复杂渗流问题将转化为在 w 平面内简单单向渗流问题。在 W 平面上渗流阻力可认为由两部分组成:一是基质单向渗流阻力(外阻),另一是裂缝中渗流阻力(内阻)。

当裂缝为无限导流能力时,结合达西定律,考虑启动压力梯度影响,推导有

$$Q_{sc}=\frac{2\pi K_i h}{B_o \mu_o} \frac{p'_e-p'_{wf}}{x'_e}=\frac{2\pi K_i h}{B_o \mu_o} \frac{p'_e-p'_{wf}}{\ln[4r_e/(L_t+L_s)]} \quad (2)$$

式中, $p'_e=p_e-\lambda x'_e$; $p'_{wf}=p_{wf}-\lambda x'_0=p_{wf}$; $x'_e=\ln \ln [4r_e/(L_t+L_s)]$; p_e 为供给压力,MPa; p_{wf} 为井底压力,MPa; Q_{sc} 为油井压裂后产量, m^3/d ; λ 为启动压力梯度,MPa/m; r_e 为泄油半径,m; μ_o 为原油的黏度, $mPa \cdot s$; B_o 为原油的体积系数; K_i 为油藏基质渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; h 为油藏的厚度,m; x'_e 为 w 平面上油藏压力为供给压力处到线段 $A'B'$ 的距离,m。

当考虑有限导流能力裂缝时,取 w 平面裂缝中微元体如图 2 所示。

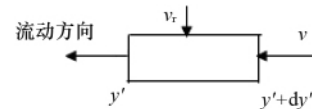


图 2 裂缝中微元体示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the micro cell in the crack

以图 1(b)中 H 点为坐标原点,以 $A'H,HB'$ 为 y' 轴。由质量守恒定律知,流出单元体的质量与流进单元体的质量相等(不考虑流体压缩性),整理归纳得

$$-\frac{K_i}{\mu_o} \frac{d^2 p}{dy'^2} - \frac{1}{2} W_f v_r = v \quad (6)$$

$$v_r = \frac{K_i}{\mu_o} \frac{p'_e - p}{\ln[4r_e/(L_t+L_s)]} \quad (7)$$

式中, v 为裂缝中渗流速度,m/s; v_r 为油藏流向裂缝的渗流速度,m/s; p 为裂缝中压力,MPa; K_i 为裂缝渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; W_f 为裂缝的宽度,m。

将式(7)代入式(6),得

$$\frac{d^2 p}{dy'^2} - \frac{2K_i}{W_f K_f \ln[4r_e/(L_t+L_s)]} p = -\frac{2K_i}{W_f K_f \ln[4r_e/(L_t+L_s)]} p'_e \quad (8)$$

边界条件为

$$\text{当 } y'=\pi \text{ 时, } \frac{dp}{dy'}=0 \quad \text{当 } y'=0 \text{ 时, } \frac{dp}{dy'}=0 \quad (9)$$

$$\text{当 } y'=\arccos[(L_s-L_1)/(L_t+L_s)] \text{ 时, } p=p_{wf} \quad (10)$$

由式(8)~式(10)构成的两个定解问题,分别求解得

$$p=p'_e - \frac{p'_e - p_{wf}}{e^{mH} + e^{-mH}} (e^{my'} + e^{-my'}) \quad 0 \leq y' \leq H \quad (11)$$

$$p=p'_e - \frac{p'_e - p_{wf}}{e^{mH} + e^{m(2\pi-H)}} (e^{my'} + e^{m(2\pi-y')}) \quad H \leq y' \leq \pi \quad (12)$$

其中,
$$m = \sqrt{\frac{2K}{W_f K_f \ln[4r_e/(L_f+L_s)]}} \quad (13)$$

$$H = \arccos[(L_f - L_s)/(L_f + L_s)] \quad (14)$$

可得低渗油藏有限导流不对称垂直裂缝井的产量计算公式,并简化有

$$Q_{sc} = 2 \frac{K_f}{B_o \mu_o} \frac{1}{2} W_f h \left(-\frac{dp}{dy'} \Big|_{H'} + \frac{dp}{dy'} \Big|_{H'} \right) = \frac{0.0864 K_f W_f h}{B_o \mu_o} \left[\frac{(p_e' - p_{wf})m}{e^{mH} + e^{-mH}} (e^{mH} - e^{-mH}) - \frac{(p_e' - p_{wf})m}{e^{mH} + e^{m(2\pi-H)}} (e^{mH} - e^{m(2\pi-H)}) \right] \quad (15)$$

当 $L_f=L_s$ 时,文中推导的低渗油藏有限导流不对称垂直裂缝井的产量计算公式(15)可简化为文献[2]中的产量计算公式。为了便于分析裂缝不对称对垂直裂缝井产量影响程度,引入非对称率 α 度量裂缝的不对称性,即

$$\alpha = L_s/L_f \quad (16)$$

为了定量描述裂缝非对称率对垂直裂缝井产量影响程度,定义

$$\varepsilon = \frac{Q_{sym} - Q_{asym}}{Q_{sym}} \times 100\% \quad (17)$$

式中, Q_{sym} 为对称垂直裂缝井产量, m^3/d ; Q_{asym} 为不对称垂直裂缝井产量, m^3/d 。

2 因素敏感性分析

根据文中推导油井压裂形成不对称垂直裂缝油井产量预测模型,并分析了各因素对油井产量的影响。模拟计算参数包括:供给半径为 300m,井半径 0.1m,油藏渗透率为 $6 \times 10^{-3} \mu m^2$,厚度为 5m,原始油藏压力 35MPa,泡点压力为 13.5MPa,原油黏度为 5mPa·s,原油体积系数为 1.114,裂缝非对称率为 0.4,裂缝长度为 200m,裂缝渗透率为 $10000 \times 10^{-3} \mu m^2$,裂缝宽度为 0.005m,生产压差 10MPa。

图 3 为启动压力梯度对油井产量的影响,图 4 为启动压力梯度对油井产量的下降幅度的影响。从图 3、图 4 可知,随着启动压力梯度增大,油井产量呈近似线性下降趋势,油井产量下降幅度随压差变化表现为压差逐渐增大对油井产量影响逐渐减弱,且在相同的启动压力梯度下,油井产量下降幅度随压差增大而减小。同时随着生产压差的增加,裂缝非对称率对油井产量影响增强。这是因为启动压力造成流体在地层中渗流产生附加阻力即黏滞阻力,它的存在降低了原油在地层中的流动,降低了油井产量;生产压差逐渐增大,用于克服启动压力梯度造成的附加压降相对减少,启动压力梯度对油井产量影响逐渐减弱。

图 5 是不同裂缝长度下裂缝导流能力对油井产量影响程度 ε 关系。从图 5 可知,随着裂缝导流能力的增大,影响程度曲线呈凹型关系,曲线是先快速下降后趋于平缓,即裂缝长度对油井产量影响程度随着导流能力增大而逐渐减弱;当裂缝导流能力较小时,裂缝长度越长,其对油井产量影响程

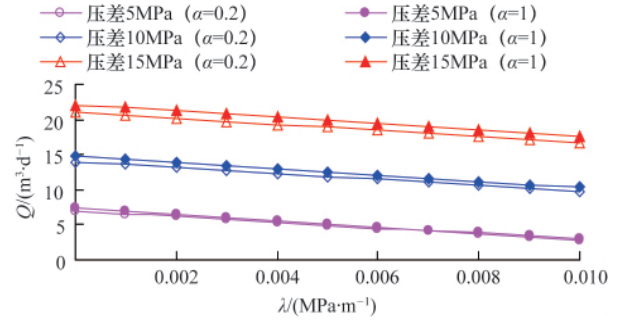


图 3 启动压力梯度对油井产量影响
Fig. 3 Start-up pressure gradient influence on the oil well production

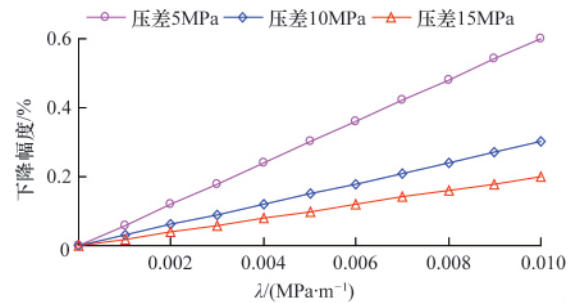


图 4 启动压力梯度对油井产量下降幅度的影响
Fig. 4 Start-up pressure gradient influence on decrease amplitude of the oil well production

度越大,随着裂缝导流能力增大,其对油井产量影响程度呈下降趋势,当裂缝导流能力增加到一定值后,不同裂缝长度对油井产量影响幅度的差异较小。说明在相同裂缝非对称率下,当裂缝导流能力较小时,不同裂缝长度对油井产量影响程度差异较大,当裂缝导流能力较大时,不同裂缝长度对油井产量影响程度差异较小。

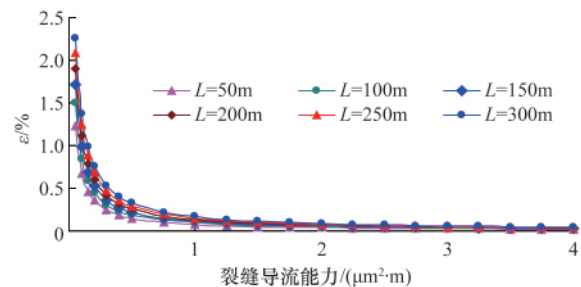


图 5 不同裂缝长度下裂缝导流能力对油井产量影响程度
Fig. 5 Fracture conductivity influence on the oil well production in the different of the crack

图 6 是不同裂缝非对称率下裂缝导流能力对油井产量影响程度关系。从图 6 可知,随着裂缝导流能力的增大,影响程度曲线呈凹型关系,曲线是先快速下降后趋于平缓,即裂缝非对称率对油井产量影响程度随着导流能力增大而逐渐减弱;当裂缝导流能力较小时,裂缝 α 越小,其对油井产量影响程度越大,随着裂缝导流能力增大,其对油井产量影响程度呈下降趋势,当裂缝导流能力增加到一定值后,不同裂缝

非对称率对油井产量影响幅度差异较小。说明在相同的裂缝长度下,当裂缝导流能力较小时,不同裂缝非对称率对油井产量影响程度差异较大,当裂缝导流能力较大时,不同裂缝非对称率对油井产量影响程度差异较小。

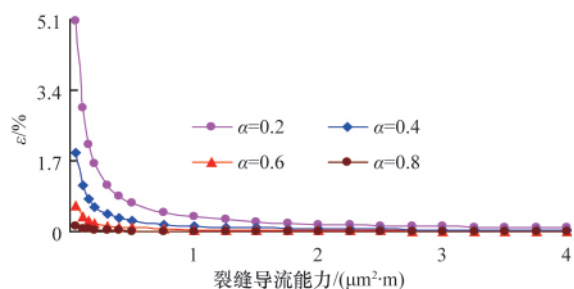


图6 不同裂缝非对称率下裂缝导流能力对油井产量影响程度

Fig. 6 Fracture conductivity influence on the oil well production in the different of fracture asymmetry factor

图7为不同裂缝长度下裂缝非对称率对油井产量影响程度。从图7可知,在相同裂缝长度下,裂缝非对称率对油井产量影响程度随裂缝 α 增大而减小;在相同裂缝非对称率下,裂缝长度越长,裂缝非对称率对油井产量影响程度越大,且裂缝非对称率对油井产量的影响程度随着裂缝长度的增加而逐渐减弱。说明裂缝长度越长,裂缝 α 越小,裂缝 α 对油井产量影响程度越大。从图中也可以看出裂缝 α 在(0.6, 1)范围时,可以忽略其对油井产量的影响。

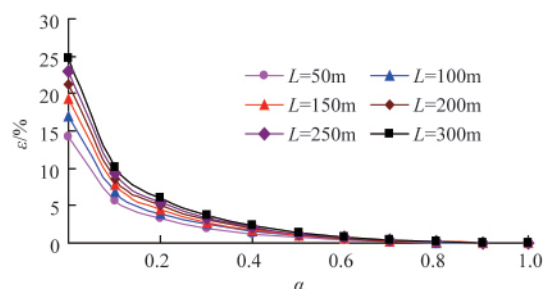


图7 不同裂缝长度下裂缝非对称率对油井产量影响程度

Fig. 7 Fracture asymmetry factor influence on the oil well production in the different of the crack

3 结论

本文利用保角变换的方法推导的油井压裂形成不对称垂直裂缝油井产量预测模型分析了各因素对油井产量的影响,得到结论如下:

(1) 油井产量随着启动压力梯度增大呈近似线性下降,且在相同的启动压力梯度下,油井产量下降幅度随压差增大而减小。

(2) 当裂缝导流能力较小时,不同裂缝长度或裂缝非对称率对油井产量影响程度差异较大,当裂缝导流能力较大时,不同裂缝长度或裂缝非对称率对油井产量影响程度差异

较小。

(3) 裂缝长度越长,裂缝非对称率越小,裂缝非对称率对油井产量影响程度越大。

参考文献 (References)

- [1] 蒋廷学, 王宝峰, 单文文, 等. 整体压裂优化方案设计的理论模式[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 58-62.
Jiang Tingxue, Wang Baofeng, Shan Wenwen, et al. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5): 58-62.
- [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.
Jiang Tingxue, Shan Wenwen, Yang Yanli. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 61-63.
- [3] 张伟东, 杨铁军, 蒋廷学, 等. 保角变换法用于计算压裂井产能 [J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(S): 81-82.
Zhang Weidong, Yang Tiejun, Jiang Tingxue, et al. Oil & Gas Recovery Technology, 2003, 10(S): 81-82.
- [4] 李生, 李霞, 曾志林, 等. 低渗透油藏垂直裂缝井产能评价 [J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 54-55.
Li Sheng, Li Xia, Zeng Zhilin, et al. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(1): 54-55.
- [5] 尹洪军, 刘宇, 付春权. 低渗透油藏压裂井产能分析 [J]. 特种油气藏, 2005, 12(2): 55-56.
Yin Hongjun, Liu Yu, Fu Chunquan. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(2): 55-56.
- [6] 黄勇, 李春兰, 程林松, 等. 低渗透油藏垂直裂缝井产能评价新方法[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(1): 99-101.
Huang Yong, Li Chunlan, Chen Linsong, et al. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(1): 99-101.
- [7] 熊健, 赵文萃, 樊松. 非线性流下低渗气藏酸压井产能方程[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(6): 49-53.
Xiong Jian, Zhao, Wenping, FAN Song. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(6): 49-53.
- [8] 熊健, 于路均, 郭平. 非线性渗流低渗气藏压裂井的产能方程[J]. 天然气与石油, 2012, 30(6): 42-45.
Xiong Jian, Yu Lujun, Guo Ping, et al. Natural Gas and Oil, 2012, 30(6): 42-45.
- [9] 熊健, 王婷, 郭平, 等. 考虑非达西效应的低渗气藏压裂井产能分析[J]. 天然气与石油, 2012, 30(1): 64-66.
Xiong Jian, Wang Ting, Guo Ping, et al. Natural Gas and Oil, 2012, 30(1): 64-66.
- [10] 熊健, 邱桃, 郭平, 等. 非线性渗流下低渗气藏压裂井产能评价[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 92-96.
Xiong Jian, Qiu Tao, Guo Ping, et al. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 92-96.
- [11] Rodriguez F, Cinco-Ley H, Samaniego-V F. Evaluation of fracture asymmetry of finite-conductivity fractured wells [J]. SPE Production Engineering, 1992, 7(2): 233-239.
- [12] 曹宝军, 李相方, 姜子杰, 等. 压裂火山岩气井不对称裂缝产能模型研究[J]. 天然气工业, 2009, 29(8): 79-81.
Cao Baojun, Li Xiangfang, Jiang Zijie, et al. Natural Gas Industry, 2009, 29(8): 79-81.
- [13] Djebbar T, Jing L, Hung N, et al. Evaluation of fracture asymmetry of finite-conductivity fractured wells [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2010, 132(1): 1-7.

(责任编辑 侯澄芝)