

# 裂缝性低渗透气藏垂直裂缝井产能分析

张绍辉 尹洪军 吕 杭 周洪亮

(大庆石油学院提高油气采收率教育部重点实验室, 大庆 163318)

**摘 要** 利用椭圆流动模型和质量守恒法,建立并求解了考虑启动压力梯度影响的裂缝性低渗透气藏有限导流垂直裂缝井不稳定渗流的数学模型。绘制了产能动态曲线,同时分析了启动压力梯度、裂缝导流能力、弹性储能比和窜流系数对产能动态曲线的影响。分析结果表明:裂缝性低渗透气藏有限导流垂直裂缝井产能动态曲线可以划分为裂缝流动阶段、窜流阶段和总的系统径向流动阶段。启动压力梯度越大,产能越低;裂缝导流能力越大,产能越高;弹性储能比越大,产能越高;窜流系数越大,发生窜流的时间越早。这对深入认识裂缝性低渗透气藏有限导流垂直裂缝井的生产动态具有重要意义。

**关键词** 低渗透 启动压力梯度 裂缝导流能力 弹性储能比 窜流系数

**中图分类号** TE312; **文献标志码** A

目前,我国松辽盆地发现的火山岩气藏多为低渗透储层,储层微裂缝发育,但自然产能非常低,普遍需要进行压裂改造才能获得工业气流。因此,研究低渗透裂缝性气藏垂直裂缝井的产能分析具有一定的现实意义。近年来,有关垂直裂缝井的产能研究较多,Prats 等人<sup>[1]</sup>相继研究了有限和无限导流垂直裂缝井的产能变化规律,取得了较好的结果。汪永利、蒋廷学等人<sup>[2]</sup>采用保角变换方法研究了气藏垂直裂缝井的稳定产能计算方法。何应付、徐联玉等人<sup>[3]</sup>研究了低渗透气藏压裂井稳定产能分析。尹洪军、刘宇、付春权等人<sup>[4]</sup>研究了低渗透油藏存在启动压力梯度条件下的有限导流垂直裂缝井产能分析。杨正明、张松等人<sup>[5]</sup>认为气井压裂后一部分气体的流动为径向流,而一部分气体为线性流,并研究了相应的产能计算方法。除此之外,还有许多学者<sup>[6,7]</sup>也研究了垂直裂缝井产能的计算问题,但这些研究没有同时考虑裂缝性气藏的渗流特性和启动压力梯度同时

存在的情况。为此,本文在 Warrerr-Root 模型的基础上,利用椭圆流动模型和质量守恒方法,研究了低速非达西渗流条件下裂缝性气藏垂直裂缝井不稳定产能的计算问题,这对深入认识低渗透气藏有限导流垂直裂缝井的生产动态具有重要意义。

## 1 数学模型的建立

当地层中存在垂直裂缝井生产时,地层中渗流场的流线发生改变,即等势线呈椭圆形状,流线为与该椭圆共轭的双曲线,如图 1 所示。

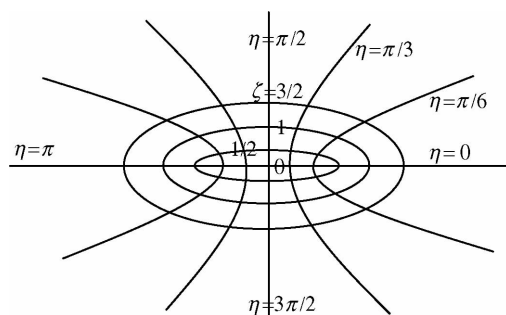


图 1 垂直裂缝井椭圆渗流示意图

为描述垂直裂缝井的椭圆流动,引入椭圆坐标系,定义:

$$x = a \cos \eta, \quad y = b \sin \eta \quad (1)$$

2010年1月18日收到 国家自然科学基金重点项目(50634020、50874023),黑龙江省高等学校科技创新团队建设计划项目(2009TD08)资助  
第一作者简介:张绍辉(1984—),男,大庆石油学院硕士研究生,研究方向:油气渗流理论与应用、提高采收率原理与技术。E-mail: zhangshaohui2003@163.com。

$$a = x_f \cosh \xi, \quad b = x_f \sinh \xi \quad (2)$$

其中:  $x, y$  为直角坐标;  $\xi, \eta$  为椭圆坐标;  $a, b$  为椭圆的长轴和短轴;  $x_f$  为裂缝的半长;  $\cosh, \sinh$  分别是双曲余弦函数和双曲正弦函数。

### 1.1 气藏中的流动

垂直裂缝井定产条件下, 裂缝性低渗透气藏弱可压缩流体平均质量守恒方程为:

$$\omega \frac{d\bar{p}_{1D}}{dt_D} + (1 - \omega) \frac{d\bar{p}_{2D}}{dt_D} = 1 \quad (3)$$

$$(1 - \omega) \frac{d\bar{p}_{2D}}{dt_D} = \lambda (\bar{p}_{1D} - \bar{p}_{2D}) \quad (4)$$

初始条件为:

$$\bar{p}_{1D} \big|_{t_D=0} = \bar{p}_{2D} \big|_{t_D=0} = 0 \quad (5)$$

内边界条件为:

$$\frac{\partial p_{1D}}{\partial \xi} \bigg|_{\xi=0} = -(1 + G_D) \quad (6)$$

外边界条件为:

$$p_{1D} \big|_{\xi=\xi_R} = 0 \quad (7)$$

各参数的定义分别为:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{jD} &= \frac{w}{2} \int_0^{\xi_R} p_{jD} \cosh(2\xi) d\xi, \quad (j = 1, 2), \\ p_D &= \frac{78.489 K_1 h}{q_g T_f} (\psi_i - \psi), \quad t_D = \frac{3.6 K_1 t}{(\phi_1 C_{i1} + \phi_2 C_{i2}) \mu x_f^2}, \\ \omega &= \frac{\phi_1 C_{i1}}{\phi_1 C_{i1} + \phi_2 C_{i2}}, \quad \lambda = \frac{\alpha K_2}{K_1} x_f^2, \quad G_D = \frac{4 K_1 x_f h}{q_g \mu B} \lambda_{B0} \end{aligned}$$

其中:  $w$  为加权因子;  $\alpha$  为形状因子;  $K$  为气藏渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $h$  为有效厚度,  $\text{m}$ ;  $\psi$  为拟压力,  $\psi(p) = \int_{p_0}^p \frac{2p}{\mu Z} dp, \text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $Z$  为压缩因子;  $T_f$  为气藏温度,  $\text{K}$ ;  $\mu$  为气体的粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\lambda_B$  为启动压力梯度,  $\text{MPa/m}$ ;  $q_g$  为气井产量,  $10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ;  $t$  为时间,  $\text{h}$ ;  $\phi$  为孔隙度;  $C_i$  为综合压缩系数,  $1/\text{MPa}$ ;  $\omega$  为弹性储能比;  $\lambda$  为窜流系数; 下标 1 代表地层裂缝系统, 下标 2 代表基质系统, 下标  $f$  代表压裂裂缝, 下标 D 代表无因次量, 下标 R 代表压力传播前缘。

### 1.2 裂缝中的流动

不考虑裂缝内流体的压缩性, 则裂缝内流体向井渗流为一维定常渗流, 进一步建立椭圆坐标系定流压条件下裂缝内稳定渗流的数学模型为:

控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_{1D}}{\partial \eta^2} + \frac{2}{F_D} \frac{\partial p_{1D}}{\partial \xi} \bigg|_{\xi=0} = 0, \quad 0 < \eta < \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

初始条件:

$$p_{1D} \big|_{t=0} = p_{1D} \big|_{t=0} = 0 \quad (9)$$

内边界条件:

$$p_{1D} \big|_{\eta=\frac{\pi}{2}} = \frac{\pi}{F_D} (1.0 + G_D) \quad (10)$$

$$\text{裂缝界面条件: } \frac{\partial p_{1D}}{\partial \eta} \bigg|_{\eta=0} = 0 \quad (11)$$

其中:  $F_D = \frac{K_f w_f}{K_1 x_f}$ ,  $w_f$  为裂缝宽度,  $\text{m}$ 。

## 2 数学模型的求解

常微分方程(3)和式(4)在初始条件式(5)下的解为:

$$\bar{p}_{1D}(t_D) = t_D + \frac{(1 - \omega)^2}{\lambda} (1 - e^{-\frac{\lambda t_D}{\omega(1 - \omega)}}) = f(t_D) \quad (12)$$

$$\bar{p}_{2D}(t_D) = \frac{\lambda}{1 - \omega} \int_0^{\bar{p}_{1D}(\tau)} \bar{p}_{1D}(\tau) e^{-\frac{\lambda(t_D - \tau)}{1 - \omega}} d\tau \quad (13)$$

垂直裂缝面和裂缝性气藏地层的连接条件为:

$$p_{1D}(\eta) = p_{1D}(0, \eta) \quad (14)$$

考虑到条件式(14), 令试探解为:

$$p_{1D} = p_{1D} \frac{\xi_R - \xi + G_D [\sinh(\xi_R) - \sinh(\xi)]}{\xi_R + G_D \sinh \xi_R} \quad (15)$$

利用试探解求解数学模型, 可分别得到考虑启动压力梯度影响的裂缝性低渗透气藏有限导流垂直裂缝井无因次裂缝压力和无因次井底压力的近似解:

$$p_{1D} = (1 + G_D) \frac{\pi \cosh(\beta \eta)}{F_D \beta \sinh(\pi \beta / 2)} \quad (16)$$

令式(16)中的  $\eta = \pi/2$ , 可得到有限导流垂直裂缝井井底的压力公式:

$$p_{wD} = (1 + G_D) \frac{\pi \cosh(\pi \beta / 2)}{F_D \beta \sinh(\pi \beta / 2)} \quad (17)$$

式(17)中:  $\beta = \sqrt{\frac{2(1 + G_D)}{F_D \xi_R + G_D \sinh \xi_R}}$ 。

通过求解地层中流体渗流的数学模型得到:

$$\begin{aligned} f(t_D) &= \frac{1}{8} [\cosh(2\xi_R) - 1] + \frac{1}{2} G_D [\sinh^2(\xi_R) \times \\ &\quad \cosh(\xi_R) - \frac{2}{3} \cosh^3(\xi_R) + \cosh(\xi_R) - \frac{1}{3}] \quad (18) \end{aligned}$$

根据 Duhamel 原理,可得到 Laplace 空间内考虑井筒储存效应和表皮效应的无因次井底压力:

$$\bar{p}_{wD}(z) = \frac{(z\bar{p}_D + S)}{z[1 + C_D z(z\bar{p}_D + S)]} \quad (19)$$

$$\bar{q}_D(z) = \frac{1}{z^2 \bar{p}_{wD}(z)} \quad (20)$$

其中:  $C_D = \frac{C}{2\pi(\phi_1 C_{r1} + \phi_2 C_{r2}) h x_f^2}$ ,  $q_D = \frac{q_g T_f}{78.489 K_1 h(\psi_i - \psi)}$ ,

$C$  为井筒储集系数,  $m^3/MPa$ 。

利用 Stethfest 法<sup>[8]</sup>对 Laplace 空间解  $\bar{q}_D$  反演,即可得到实空间无因次产量  $q_D$  和无因次时间  $t_D$  的关系,进而可绘制裂缝性低渗透气藏有限导流垂直裂缝井的产能动态曲线。

### 3 产能动态曲线分析

根据式(18)~式(20),可以获得无量纲产量和无量纲时间的双对数典型曲线。曲线的控制参数主要有  $G_D$ 、 $F_D$ 、 $\omega$  和  $\lambda$ 。下面对裂缝性低渗透气藏产能动态曲线的特征和各个参数对曲线的影响进行分析。图2为裂缝性低渗透气藏产能动态曲线。从图2中可以看出,其可以划分为3个流动阶段,即裂缝内的流动阶段(Ⅰ)、窜流阶段(Ⅱ)和总的系统径向流动阶段(Ⅲ)。在裂缝内的流动阶段,产量呈递减趋势。在窜流阶段,由于基岩系统向天然裂缝系统存在流体供给,发生窜流,产量变化趋于平缓,出现一个水平台阶,该段出现的早晚取决于基岩系统与天然裂缝系统间窜流系数的大小。在总的系统径向流动阶段,产量呈递减趋势。

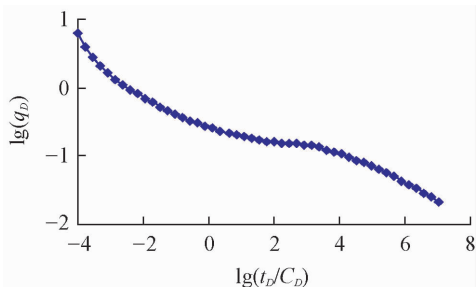


图2 裂缝性低渗透气藏产能动态曲线

图3反映了启动压力梯度( $G_D$ )对裂缝性低渗透气藏垂直裂缝井产能动态曲线的影响。计算参数为:  $F_D = 10.0$ 、 $\omega = 0.03$ 、 $\lambda = 0.001$ 、 $C_D = 0.0005$ 、 $S = 0.5$ 。从图3中可以看出,启动压力梯度对窜流阶段和总系统径向流动阶段的产能影响显著。随着时间的增长,启动压力梯度对产能影响越显著,启动压力梯度越大,产能越低。

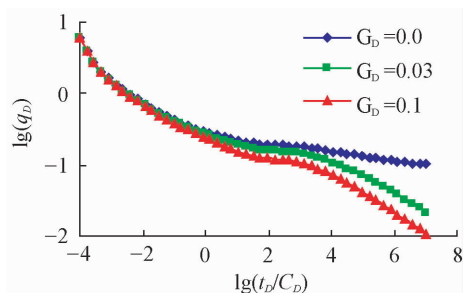


图3 启动压力梯度对产能动态曲线的影响

图4反映了无因次裂缝导流能力( $F_D$ )对裂缝性低渗透气藏垂直裂缝井产能动态曲线的影响。计算参数为:  $G_D = 0.03$ 、 $\omega = 0.03$ 、 $\lambda = 0.001$ 、 $C_D = 0.0005$ 、 $S = 0.5$ 。从图4中可以看出,裂缝导流能力对裂缝流动阶段的产能影响显著,导流能力越大,产能越高。

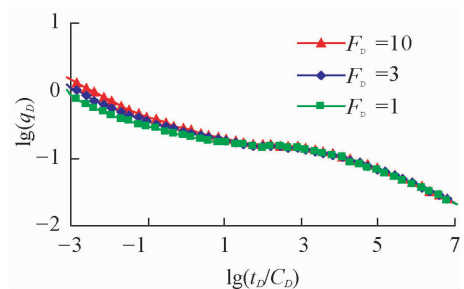


图4 无因次导流能力对产能动态曲线的影响

图5反映了弹性储能比( $\omega$ )对裂缝性低渗透气藏垂直裂缝井产能动态曲线的影响。计算参数为:  $G_D = 0.03$ 、 $F_D = 10.0$ 、 $\lambda = 0.001$ 、 $C_D = 0.0005$ 、 $S = 0.5$ 。从图5中可以看出,弹性储能比对裂缝流动阶段和窜流阶段的产能影响显著,弹性储能比越小,产能越低,减小的幅度越大。

图6反映了窜流系数( $\lambda$ )对裂缝性低渗透气藏垂直裂缝井产能动态曲线的影响。计算参数为:

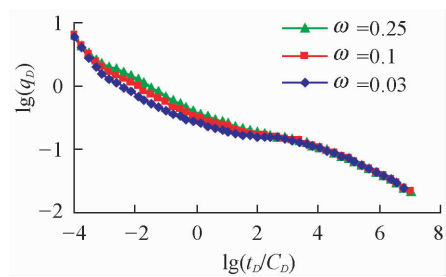


图5 弹性储能比对产能动态曲线的影响

$G_D = 0.03$ 、 $F_D = 10.0$ 、 $\omega = 0.03$ 、 $C_D = 0.0005$ 、 $S = 0.5$ 。从图6中可以看出,窜流系数主要影响窜流阶段发生的时间,窜流系数越大,窜流发生的时间越早,窜流阶段的产能也越高。

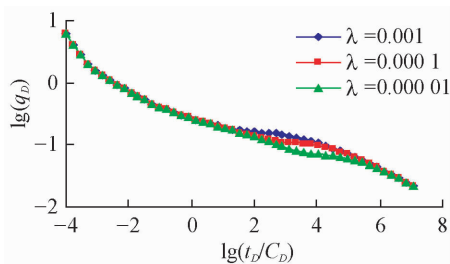


图6 窜流系数对产能动态曲线的影响

4 结论

(1) 利用椭圆流动模型和质量守恒方法,建立并求解了考虑启动压力梯度影响的裂缝性低渗透气藏垂直裂缝井不稳定渗流的数学模型,绘制并分析了产能动态曲线。

(2) 裂缝性低渗透气藏垂直裂缝井产能动态曲线划分为3个流动阶段:裂缝内的流动阶段、窜流阶段和总的系统径向流动阶段。

(3) 在压裂井生产初期,启动压力梯度对产能的影响不大;但随着生产时间的增长,启动压力梯度对产能的影响显著。启动压力梯度越大,产能越低。裂缝导流能力对裂缝流动阶段的产能影响显著,导流能力越大,产能越高。

(4) 弹性储能比对裂缝流动阶段和窜流阶段的产能影响显著。弹性储能比越大,产能越高。窜流系数对窜流阶段的产能影响显著,窜流系数越大,发生窜流的时间也越早。

参 考 文 献

1 Prats M. Effect of vertical fractures on reservoir behavior-results on oil and gas flow. SPE 593, 1963: 1119—1126

2 汪永利, 蒋廷学, 曾 斌. 气井压裂后稳态产能的计算. 石油学报, 2003; 24(4): 65—68

3 何应付, 徐联玉, 吕万一, 等. 低渗透气藏压裂井产能分析. 特种油气藏, 2006;13(5): 59—62

4 尹洪军, 刘 宇, 付春权. 低渗透油藏压裂井产能分析. 新疆石油地质, 2005; 26(3): 285—286

5 杨正明, 张 松, 张训华, 等. 气井压后稳态产能公式和压裂数值模拟研究. 天然气工业, 2003, 23(4): 74—76

6 刘慈群. 在双重孔隙介质中有限导流垂直裂缝井的非牛顿流体试井分析方法. 石油学报, 1990; 4(11): 61—67

7 韩福成, 何应付. 裂缝性低渗透油气藏压裂井压力动态特征. 特种油气藏, 2008;15(4): 63—66

8 Stehfest H. Numerical inversion of Laplace transforms. Communications of the ACM, 1970;13(1): 47—49

Productivity Analysis of Fractured Wells in the Low Permeability Naturally Fractured Gas Reservoir

ZHANG Shao-hui, YIN Hong-jun, LÜ Hang, ZHOU Hong-liang  
(Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery in the Ministry of Education,  
Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, P. R. China)

[Abstract] By using the elliptical flow model and the law of mass conservation, the mathematical model of unsteady percolation for wells with finite conductivity vertical fractures considering threshold pressure gradient in the low permeability naturally fractured gas reservoir was developed, and type curves of productivity performance were

drawn and analyzed. Influences of threshold pressure gradient, fracture conductivity, storativity ratio and interporosity flow coefficient were analyzed. Analytic results show that the type curve of productivity performance can be divided into three periods, namely, the period of fracture flow, the period of interporosity flow, the period of total radial flow. The bigger the threshold pressure gradient is, the lower the productivity is. The bigger the fracture conductivity is, the higher the productivity is. The bigger the storativity ratio is, the higher the productivity is. The bigger the interporosity flow coefficient is, the earlier the interporosity flow happens. These are of significance for in-depth understanding of the producing performance of wells with finite conductivity vertical fractures in the low permeability naturally fractured gas reservoir.

[Key words] low permeability threshold pressure gradient fracture conductivity storativity ratio interporosity flow coefficient



(上接第 1847 页)

tion of ovarian cancer cells by all-trans retinoic acid. *Oncogene*, 1998;17 (22):2839—2849

15 Wu S, Zhang D, Zhang Z P, *et al.* Critical role of both retinoid nuclear receptors and retinoid-X-receptors in mediating growth inhibition

The Effect of All-trans Retinoic Acid in the Proliferation of Human Ovarian Cancer Cells HO8910

XUE Xin, DENG Feng, LI Cun-bao<sup>1</sup>

(Biochemistry & Genetics Laboratory, Teaching & Research Section of Biochemistry and Molecular Biology<sup>1</sup>, Inner Mongolia Medical College, Huhhot 010059, P. R. China)

[Key words] To study the effect of all-trans retinoic acid (ATRA) in the proliferation of human ovarian cancer cells, HO8910 human ovarian cancer cell lines were cultured in vitro and treated with different concentrations of all-trans retinoic acid for 1, 2 or 3 days. Cell proliferation was evaluated by MTT assay. Cell cycle was analyzed by flow cytometry (FCM). The expression of retinoic acid receptor  $\alpha$  mRNA was detected by reverse transcription-polymerase chain reaction (RT-PCR). It is resulted that different concentrations of all-trans retinoic acid could inhibit the growth of HO8910 cells ( $P < 0.05$ ) in a time and dose-dependent manner.

All-trans retinoic acid increases the rates of G1 and decreases the rates of S and G2/M ( $P < 0.05$ ), and therefore, it decreases cells proliferation index ( $PI^*$ ) ( $P < 0.05$ ). It could up-regulate the expression of retinoic acid receptor  $\alpha$  mRNA ( $P < 0.05$ ), then inhibit proliferation of HO8910 cells. It is concluded that all-trans retinoic acid could inhibit the proliferation of human ovarian cancer cells HO8910, the molecular basis may be associated with the up-regulated mRNA of retinoic acid receptor  $\alpha$ .

[Key words] all-trans retinoic acid(ATRA) retinoic acid receptor  $\alpha$  cell cycle