

非线性流下变形介质油藏压裂井产能评价

熊 健¹ 吕生利²

1.西南石油大学,四川 成都 610500

2.中国石油集团工程设计有限责任公司,北京 100085

摘要:

针对变形介质低渗油藏特征,根据压裂后流体渗流变化规律,基于稳定渗流理论,建立了考虑启动压力梯度、应力敏感共同影响下的低渗油藏垂直裂缝井产能方程。在建立模型基础上,分析了启动压力梯度、渗透率变形系数、地层污染等对产能、采油指数的影响关系。研究表明:启动压力梯度和应力敏感效应使油井产能下降,随着启动压力梯度增大,油井产能下降的幅度随压差增大而减小,而随着渗透率变化系数增大,油井产能下降幅度随压差增大而增大;地层污染导致油井产能下降幅度随压差增大而增大;当生产压差较小时,启动压力梯度的影响显著,而生产压差较大时,应力敏感效应影响明显增强;在变形介质油藏实际开发中应考虑选择合理生产压差。

关键词:

非线性渗流;启动压力梯度;应力敏感;生产压差;产能方程

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2012)04-0054-04

0 前言

大量室内实验结果表明^[1-2],变形介质低渗透油藏不仅受到应力敏感效应的影响,而且受到启动压力梯度的影响,引起流体渗流特征由线性流变成非线性流,同时低渗油藏经压裂增产后,流体流动状态发生改变,这些特征都将影响到变形介质油藏产能分析。目前,部分学者已对变形介质油藏的流入动态曲线进行了深入研究。蔡明金^[3]、李晓良^[4]等人分别从非稳定流及稳定流的角度研究了启动压力梯度对低渗油藏产能的影响;罗天雨^[5-6]等人研究了应力敏感对低渗油藏产能的影响,而未考虑启动压力梯度的影响;宋付权^[7-9]等人综合研究考虑启动压力梯度和应力敏感效应对低渗油藏产能的影响;李生^[10]等人研究了启动压力梯度对低渗油藏压裂井产能影响,而未考虑应力敏

感对裂缝井产能的影响;杨勇^[11]等人研究考虑启动压力梯度和应力敏感效应的低渗油藏压裂井产能的动态变化,将裂缝等效为井的表皮,对压裂井产能预测存在近似。这些研究都忽视了变形介质油藏压裂后渗流规律变化的影响。因此,在这些研究基础上,根据压裂后流体渗流规律的变化^[12],基于稳定渗流理论,建立了考虑启动压力梯度、应力敏感共同影响下的低渗油藏垂直裂缝井产能方程,并对影响产能变化影响因素进行分析。

1 产能预测模型推导

在推导压裂井产能方程时,假设:压裂井裂缝为垂直裂缝,沿井眼对称分布;裂缝剖面为与油层厚度等高的矩形;油藏及裂缝内均为单相流动,且油藏中

收稿日期:

2012-05-19

基金项目:

国家科技重大专项(2008ZX05017-003-03);西南石油大学研究生创新基金(GIFSS0701)

作者简介:

熊 健(1986-),男,湖北荆州人,博士研究生,从事油气田开发理论及油气藏工程研究工作。

流体的流动符合达西非线性流动,流体渗流受到应力敏感效应及启动压力梯度的影响,同时裂缝为有限导流能力;裂缝区域外为椭圆流,等势线为椭圆,流线垂直椭圆族,地层形成椭圆流动;考虑地层存在污染带。

油井经压裂后,生产时在地层中形成等压椭圆柱面,直角坐标和椭圆坐标的关系为:

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

$$a=x_f \operatorname{ch} \zeta \quad b=x_f \operatorname{sh} \zeta \quad (2)$$

式中 x, y ——直角坐标;

η, ζ ——椭圆坐标;

a ——椭圆的长半轴;

b ——椭圆的短半轴;

x_f ——裂缝半长, cm。

根据稳态渗流理论,在椭圆坐标中考虑启动压力梯度^[2]渗流方程有

$$v=\frac{K}{\mu_o}\left(\frac{dp}{dy}-\lambda\right) \quad (3)$$

式中 p ——压力, MPa;

y ——长度, m;

λ ——启动压力梯度, MPa/m;

v ——渗流速度, m/s;

K ——渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

μ_o ——原油粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

对于低渗气藏,应力敏感渗透率与有效应力呈指数变化规律^[5]为

$$K=K_i \exp[-a_k(p_e-p)] \quad (4)$$

式中 a_k ——渗透率变化系数, MPa^{-1} ;

p_e ——原始地层压力, MPa。

式(3)变形为:

$$v=\frac{K_i \exp[-a_k(p_e-p)]}{\mu}\left(\frac{dp}{dy}-\lambda\right) \quad (5)$$

用椭圆坐标表示的渗流速度:

$$v=\frac{Q_o B_o}{4x_f h \operatorname{ch} \zeta} \quad (6)$$

式中 Q_o ——油井压裂后产量, cm^3/s ;

K_i ——原始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

h ——油藏厚度, cm;

B_o ——体积系数。

根据扰动椭圆的概念,用发展的矩形族来描述等压椭圆族:

$$y=\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} y \sin \eta d\eta=\frac{2b}{\pi}=\frac{2x_f \operatorname{sh} \zeta}{\pi} \quad (7)$$

$$\frac{dp}{dy}=\frac{dp}{d\zeta} \frac{d\zeta}{dy}=\frac{dp}{d\zeta} \frac{\pi}{2x_f \operatorname{ch} \zeta} \quad (8)$$

式(6)、(7)变形有:

$$\frac{Q \mu_o B_o}{4x_f K_i h \operatorname{ch} \zeta}=\exp[-a_k(p_e-p)]\left(\frac{dp}{d\zeta} \frac{\pi}{2x_f \operatorname{ch} \zeta}-\lambda\right) \quad (9)$$

式(9)变形积分有:

$$Q=\frac{2\pi K_i h}{\mu_o B_o a_k} \frac{1}{\exp(a_k p_i)} \frac{\exp\left(p_e-\frac{2a_k x_f \lambda}{\pi} \operatorname{sh} \zeta_e\right)-\exp\left(p_{wf}-\frac{2a_k x_f \lambda}{\pi} \operatorname{sh} \zeta_o\right)}{\int_{\zeta_e}^{\zeta_o} \exp\left(-\frac{2a_k x_f \lambda}{\pi} \operatorname{sh} \zeta\right) d\zeta} \quad (10)$$

考虑地层中存在一个污染带,则采用工程单位制化简有:

$$Q=\frac{542.9 K_i h}{\mu_o B_o a_k} \frac{1}{\exp(a_k p_i)} \frac{\exp\left(p_e-\frac{2a_k x_f \lambda}{\pi} \operatorname{sh} \zeta_s\right)-\exp\left(p_{wf}-\frac{2a_k x_f \lambda}{\pi} \operatorname{sh} \zeta_o\right)}{\int_{\zeta_s}^{\zeta_o} \exp\left(-\frac{2a_k x_f \lambda}{\pi} \operatorname{sh} \zeta\right) d\zeta+S} \quad (11)$$

$$S=\left(\frac{K_i}{K_s}-1\right) \int_{\zeta_s}^{\zeta_o} \exp\left(-\frac{2a_k x_f \lambda}{\pi} \operatorname{sh} \zeta\right) d\zeta \quad (12)$$

式中 $\zeta_o=0$;

$\zeta_e=\ln 2r_w/L_f$;

Q_o ——油井压裂后产量, m^3/d ;

h ——油藏厚度, m;

x_f ——裂缝半长, m;

K_i ——原始渗透率, μm^2 ;

K_s ——污染带渗透率, μm^2 ;

ζ_s ——污染带宽度。

2 影响因素分析

根据文中推导的产能预测公式(11),讨论了各因素对产能的影响。模拟计算的参数包括:裂缝半长 100 m,储层有效渗透率为 $5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,边界半径为 300 m,原始油藏压力 35 MPa,泡点压力 16.5 MPa,有效厚度 5.5 m,原油粘度为 $5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,原油体积系数 1.12,启动压力梯度 0.002 MPa/m,渗透率变化系数 0.01 MPa^{-1} ,污染带渗透率 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.1 产能影响因素

从图 1 启动压力梯度与产能的关系可以看出,随着启动压力梯度的增大,油井产能呈近似线性下降趋势,油井产能下降幅度随压差变化表现为压差逐渐增大,对油井产能影响逐渐减弱,压差越大,油井产能越大。原因为启动压力造成流体在地层中渗流产生附加阻力即粘滞阻力,降低了原油在地层中的流动和油井

产能;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,对油井产能的影响逐渐减弱。

不同渗透率变化系数与产能的关系见图2,随着渗透率变化系数的增大,油井产能降低,下降幅度随压差增加而增大,下降趋势由“线性”向“凹型”变化;压差越大,油井产能随着渗透率变化系数增大而下降的幅度越大,应力敏感效应对油井产能影响越明显,同时在地层中引起“应力污染”更严重。因为生产压差增大,造成地层中压力下降很快,引起地层中渗透率快速下降,地层中流体渗流阻力增加将导致油井产能减小,且渗透率变化系数越大表现越明显。

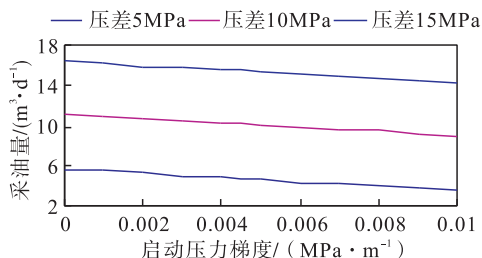


图1 启动压力梯度对油井产能的影响

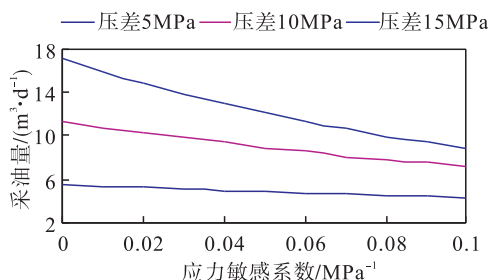


图2 应力敏感对油井产能的影响

污染带渗透率对油井产能的影响见图3,随污染带渗透率降低油井产能呈现下降趋势。但在生产压差较小时,油井产能的递减幅度较小,随着生产压差增大,油井产能的递减幅度增大,逐渐变成“凸型”下降趋势。说明随生产压差增大,污染带对油井产能影响逐渐增大,即污染带渗透率下降幅度增大,造成地层中流体的渗流阻力增大,克服污染带压降损失增多,油井产能减少。

基质渗透率对油井产能的影响见图4,地层中基质渗透率增大,油井产能呈近似线性上升趋势,油井的

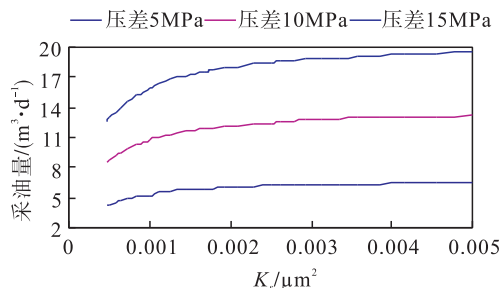


图3 污染带渗透率对油井产能的影响

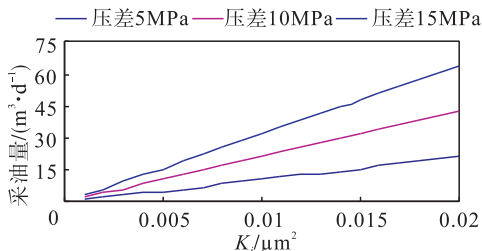


图4 基质渗透率对油井产能的影响

递增幅度随压差的增加而增加,说明基质渗透率增大,流体渗流阻力将减小,油井产能增大。

不同裂缝长度对油井产能的影响见图5,随着裂缝长度增加,油井产能呈近似线性上升趋势,油井产能递增幅度随压差的增加而增加。说明当生产压差不变时,随着裂缝长度的增加,克服附加压降将减少,油井产能增大;压差增大时,用于克服地层中渗流阻力的压降相对减少,裂缝长度对油井产能的影响逐渐增大。

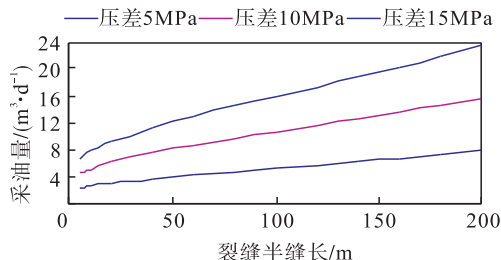


图5 裂缝半缝长对油井产能的影响

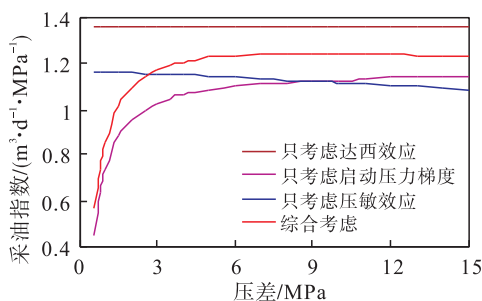


图6 不同流动时压差与采油指数的关系

2.2 采油指数影响因素

不同流动情况下生产压差与采油指数的变化关系见图6。从图6可知无论哪种流动情况,采油指数随压差的变化关系趋势不同。应力敏感效应对采油指数的影响随压差的增大而逐渐降低,启动压力梯度对采油指数影响随压差的增大先快速增大后趋于平缓,二者同时考虑时,采油指数在生产压差小时与启动压力梯度对采油指数的影响趋势相同,但在生产压差大时与启动压力梯度效应对采油指数的影响趋势相同,说明采油指数随着压差增大先逐渐增大后缓慢降低。从图6看出,综合考虑时采油指数具有最大值,所对应的压差就是合理生产压差,表示该模拟实例的合理生产压差是存在的,即9.2 MPa左右。这是因为压差较小

时,流体的渗流阻力主要是启动压力梯度时产生的附加阻力,随着压差的增大,应力敏感效应引起的“应力污染”增大,造成流体渗流附加压降更大。因此,在实际生产中,应选择合理生产压差,避免生产压差过大造成应力敏感效应引起“应力污染”严重,降低油井产能。

3 结论

a)根据压裂后流体渗流规律的变化,基于稳定渗流理论,建立了考虑启动压力梯度、应力敏感共同影响下的低渗油藏垂直裂缝井产能方程。

b)启动压力梯度和应力敏感效应使油井产能下降,随着启动压力梯度增大,油井产能下降幅度随压差增大而减小,随着渗透率变化系数增大,油井产能下降幅度随压差增大而增大,同时地层污染导致油井产能下降的幅度随压差增大而增大。

c)当生产压差较小时,启动压力梯度的影响显著;生产压差较大时,应力敏感效应的影响明显增强。油藏开发中必须考虑选择合理生产压差,避免应力敏感效应引起的“应力污染”严重。

讨[J].西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(5):161-164.

- [2] 吕成远,王 建,孙志刚.低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究[J].石油勘探与开发,2002,29(2):86-89.
- [3] 蔡明金,陈方毅,张利轩,等.考虑启动压力梯度低渗透油藏应力敏感模型研究[J].特种油气藏,2008,15(2):69-72.
- [4] 李晓良,王厉强,李 彦,等.启动压力梯度动态变化对IPR方程影响分析[J].石油钻探技术,2007,35(2):70-72.
- [5] 罗天雨,曹文江,曾 平.脱气变形介质油藏产能模型研究[J].特种油气藏,2004,11(6):54-55.
- [6] 姜 永,王新海,袁恒龙,等.低孔多裂缝气藏不稳定渗流分析[J].天然气与石油,2011,29(6):59-75.
- [7] 宋付权.变形介质低渗透油藏的产能分析[J].特种油气藏,2002,9(4):33-35.
- [8] 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):40-42.
- [9] 王厉强,王洪辉,寇秀玲,等.低渗变形介质油藏污染井酸化增产规律分析[J].石油钻探技术,2006,34(5):73-75.
- [10] 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):54-56.
- [11] 杨 勇.低渗透压敏油藏产量递减动态预测方法研究[J].大庆石油地质与开发,2008,27(3):64-67.
- [12] 刘慈群.垂直裂缝地层中流体的渗流[J].石油勘探与开发,1987,8(3):69-73.

参考文献:

- [1] 罗瑞兰,冯金德,唐明龙,等.低渗储层应力敏感评价方法探

