

文章编号:1009-9603(2019)06-0122-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.06.016

致密油藏压裂水平井Blasingame曲线分析

林旺^{1,2},范洪富¹,王少军²,闫林²,陈福利²,刘立峰²,车树芹²

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京100083;2.中国石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:致密油藏渗透率较低,需要应用水平井大规模压裂的方法才能进行有效开发,压裂后形成的基质与裂缝为2种渗流规律差异性较大的介质,需要新的产量分析模型才能适应致密油藏压裂水平井开发动态分析的需求。在对致密油藏基质与裂缝2种介质不同渗流规律研究的基础上,建立水平井多段压裂双重介质耦合产量模型,并应用有限体积法在非结构混合网格的基础上进行模型求解,同时,制作典型致密油藏压裂水平井Blasingame曲线,并对该曲线特征进行分析,将压裂水平井开发生产阶段划分成裂缝线性流、过渡流和边界控制流3个阶段;基质启动压力梯度、裂缝条数、裂缝间距和裂缝长度对Blasingame曲线有着重要的影响,该曲线在后期的边界控制流阶段随着启动压力梯度的增加而线性地平行下移,在中、前期随着裂缝条数的增加而向上分散,在中期过渡流阶段随着裂缝间距与裂缝长度的增加而向上突出,但裂缝间距对曲线的影响更显著。

关键词:致密油藏;压裂水平井;双重介质耦合产量模型;Blasingame曲线;非结构混合网格

中图分类号:TE341

文献标识码:A

Blasingame curve analysis of fractured horizontal well in tight oil reservoir

LIN Wang^{1,2}, FAN Hongfu¹, WANG Shaojun², YAN Lin², CHEN Fuli², LIU Lifeng², CHE Shuqin²

(1.School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing City, 100083, China;

2.PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: Horizontal wells with large-scale hydraulic fracturing is required for the effective development of the tight oil reservoirs due to extra-low permeability. After fracturing, there exists two porous media with quite different percolation laws, that is matrix and fracture. A new production analysis model is needed to meet the demand of dynamic analysis of fractured horizontal wells in the tight oil reservoirs. Based on the different percolation laws of the matrix and fracture in the tight oil reservoirs, a coupled production model of a multi-stage fractured horizontal well in the dual-media formation is proposed and solved by using finite volume method on the basis of unstructured hybrid grids. Meanwhile, the typical Blasingame curve of the fractured horizontal well in the tight oil reservoirs is obtained, and the characteristics of the Blasingame curve are analyzed. The development stages of the fractured horizontal well can be divided into three stages: fracture linear flow, boundary-dominated flow and transition flow. The threshold pressure gradient, fracture numbers, fracture spacing and fracture length have major effects on the Blasingame curve. Blasingame curve moves down linearly with the increase of threshold pressure gradient in the later stage of boundary-dominated flow, and disperses upward with the increase of fracture numbers in the early and middle stages, and moves up with the increase of fracture spacing and fracture length in the middle transitional flow stage, but the effect of fracture spacing on the Blasingame curves is more significant.

Key words: tight oil reservoir; fractured horizontal well; coupled production model of double-media reservoir; Blasingame curve; unstructured hybrid mesh

收稿日期:2019-08-01。

作者简介:林旺(1982—),男,广西桂林人,工程师,在读博士研究生,从事油气田开发研究。联系电话:15652239703, E-mail:linwang2010@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“致密油藏有效开发关键技术”(2016ZX05046-003),国家“973”计划“陆相致密油甜点成因机制及精细表征”(2015CB250901)。

近年来,随着美国致密油藏的有效开发,致密油藏已成为油气产量接替的主要类型^[1-3],但致密油藏物性差,渗透率极低,流体流动能力差,常规开发方法已不能进行有效开发,需要运用水平井并进行大规模压裂形成多条裂缝,利用裂缝沟通更多的储层孔隙,才能得到经济的工业油流^[4-7]。致密油藏因极低的渗透率,流体渗流不再遵循达西线性渗流规律^[8-10],但其在裂缝中的流动能力却较高,这样就形成了基质与裂缝2种渗流规律不同的介质,使整个渗流过程变得更为复杂,常规的产量分析方法无法满足现场需求。目前水平井多段压裂的产能预测^[11-15]与试井分析模型^[16-20]较多,但考虑基质与裂缝渗流规律不同的模型较少,同时,致密油藏为了节约成本所进行的试井测试,尤其是关井后进行的压力恢复测试,需要时间较长,对生产影响较大,因此,现场基本上不进行试井测试,目前的试井分析模型仅限于理论研究,不能用于油田实际生产中,对已生产一段时间的生产井进行分析的方法较少,对启动压力梯度及包括裂缝条数、裂缝间距、裂缝半长在内的裂缝参数对致密油藏压裂水平井产量变化规律的影响研究也较少。为此,笔者从基质与裂缝不同的渗流规律出发,建立考虑致密油藏基质启动压力梯度的多段压裂水平井的渗流方程,并应用有限体积法在非结构混合网格的基础上进行求解,同时,对计算结果运用Blasingame曲线的制作方法得到致密油藏压裂水平井的Blasingame曲线,并分析启动压力梯度、裂缝条数、裂缝间距和裂缝半长对Blasingame曲线的影响,为致密油藏压裂水平井开发生产动态数据的分析提供理论与技术支撑。

1 致密储层孔隙特征及渗流规律

1.1 储层孔隙特征

高渗透率储层孔隙直径大于30 μm,主体分布于30~600 μm,喉道直径主要分布于10~60 μm;中渗透率储层孔隙直径大于20 μm,主要分布于20~500 μm,喉道直径主要分布于5~40 μm;低渗透率储层孔隙直径主要分布于20~400 μm,喉道直径主要分布于2~20 μm;特低渗透率储层孔隙直径大于10 μm,主要分布于10~100 μm,喉道直径主要分布于0.1~10 μm;超低渗透率储层孔隙直径大于5 μm,主要分布于5~80 μm,喉道直径主要分布于0.02~5 μm;而致密油藏储层孔隙直径相对常规油藏急剧减小,孔隙直径总体分布于0.01~10 μm,喉道直径主要分布于0.005~1 μm,可见致密油藏

储层的孔喉尺寸相对于低、特低渗透率,甚至于超低渗透率储层来说都要小得多。

1.2 渗流规律

致密储层由于其孔喉尺寸相对于低、超低渗透率储层来说都要小得多,因此流体在其中的流动规律也会存在差异,为了研究典型的致密储层流体的渗流规律,对获得的YC20120627岩心进行平衡法测试。该岩心渗透率为0.064 mD,孔隙度为11.3%,测试用液体黏度为1.1 mPa·s。

由图1可见,当压力梯度小于0.5 MPa/cm时,流体渗流呈非线性关系;而当压力梯度大于0.5 MPa/cm时,流体渗流呈线性关系,但其拟合直线与x轴的交点偏离原点,为拟线性渗流,可以用启动压力梯度来表示,因此,致密储层基质的运动方程为:

$$\begin{cases} \bar{v} = \frac{K_m}{\mu}(\nabla p - G) & \nabla p > G \\ \bar{v} = 0 & \nabla p \leq G \end{cases} \quad (1)$$

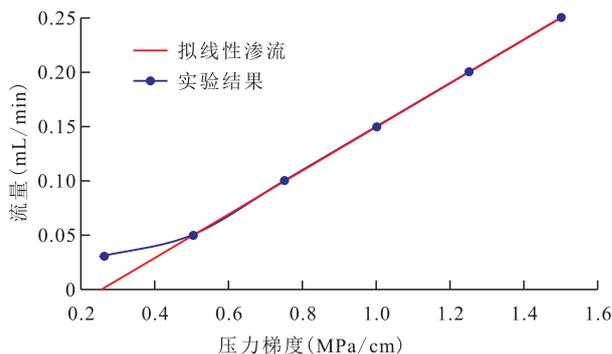


图1 致密储层典型岩心YC20120627渗流规律

Fig.1 Percolation experiment results of the typical core (YC20120627) in tight reservoir

对于压裂形成的裂缝,由于其渗透率往往高达100 mD以上,因此其渗流规律可以用常规的达西定律来描述:

$$\bar{v} = \frac{K_f}{\mu} \nabla p \quad (2)$$

2 致密油藏压裂水平井开发双重介质耦合产量模型

2.1 模型假设

假定盒状油藏长、宽、高分别为 x_e, y_e, H ,中间分布1口水平井,水平井长度为 L ,水平井与x轴平行,沿水平井均匀分布多条横向裂缝,裂缝与水平井垂直相交,水平井只在与裂缝相交的地方射孔,流体从基质流入裂缝,再由裂缝流入井筒;油藏流体为单相微可压缩流体,流动过程为等温渗流,没有其

他物理化学反应;基质中为低速非达西渗流,裂缝中为达西渗流;油藏渗流为三维渗流,油藏边界封闭。

2.2 控制方程

基质中的流体只能在基质内部流动或者流向裂缝,不能流向井筒,则其连续性方程为:

$$-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial(\rho \phi_m)}{\partial t} \quad (3)$$

裂缝中的流体可以在裂缝内部流动,也可以由基质流入裂缝,或者由裂缝流向井筒,则其连续性方程为:

$$-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] = \frac{\partial(\rho \phi_f)}{\partial t} + q_f \quad (4)$$

将基质运动方程(1)式代入基质连续性方程(3),简化后得到:

$$\begin{aligned} \nabla \left[\frac{K_m}{\mu} (\nabla p - G) \right] &= \frac{K_{mx}}{\mu} \times \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \\ &\frac{K_{mx} G C_L}{\mu} \times \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{K_{my}}{\mu} \times \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - \\ &\frac{K_{my} G C_L}{\mu} \times \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{K_{mz}}{\mu} \times \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \\ &\frac{K_{mz} G C_L}{\mu} \times \frac{\partial p}{\partial z} = \phi_m C_{tm} \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (5)$$

将裂缝的运动方程(2)式代入裂缝连续性方程(4),得到:

$$\begin{aligned} \nabla \left(\frac{K_f}{\mu} \nabla p \right) &= \frac{K_{fx}}{\mu} \times \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{K_{fy}}{\mu} \times \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \\ &\frac{K_{fz}}{\mu} \times \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \phi_f C_{tf} \frac{\partial p}{\partial t} - q_f \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 定解条件

初始条件 初始状态下油藏中各处压力相等,即:

$$p(x, y, z, t = 0) = p_i \quad (7)$$

内边界条件 井筒中流体具有无限导流能力,忽略流体在井筒中的压力损失,各条裂缝与井筒的交点处压力相等,即:

$$p_{\Omega_1} = p_{\Omega_2} = p_{\Omega_3} = \dots = p_{wf} \quad (8)$$

外边界条件 油藏外边界封闭,没有流体通过,即:

$$\frac{\partial p}{\partial n} (x, y, z \in \Omega_{外}, t) = 0 \quad (9)$$

2.4 模型求解

考虑到裂缝分布的复杂性及基质与裂缝2种介

质渗流规律的差异,用解析的方法难以得到双重介质耦合产量模型的精确解,所以采用有限体积法进行求解。为求解方便,采用拟三维网格,在x,y平面上将基质与裂缝2种介质统一划分网格,但采用的网格形式不同,基质采用非结构三角网格,而裂缝采用长条形网格,由于裂缝的宽度太小,网格尺寸与基质中的网格尺寸差距太大,因此,对于裂缝,采用导流能力等效的方法,将裂缝尺寸扩大的同时,减小裂缝的渗透率,并在基质与裂缝的过渡区适当地进行网格加密,从而使基质网格与裂缝网格进行平稳过渡(图2),这样既能灵活地刻画复杂的裂缝与基质的关系,又能适应流体在基质与裂缝中不同的流动规律。

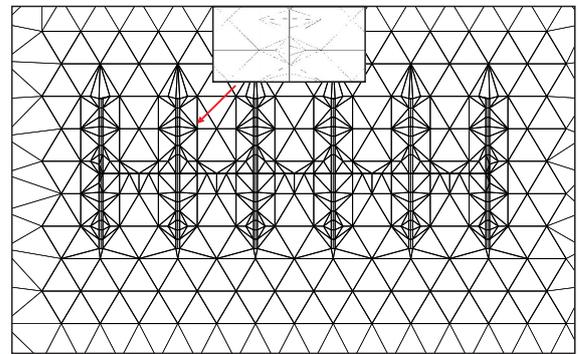


图2 网格划分平面示意

Fig.2 Mesh diagram of fractured horizontal well in XY plane

利用块中心的形式,在基质与裂缝所在网格上分别采用基质与裂缝的控制方程对单元控制体积与时间进行积分。

对基质系统:

$$\oint_{v_i} \left\{ \nabla \left[\frac{K_m}{\mu} (\nabla p - G) \right] \right\} d\Omega = \oint_{v_i} \phi_m C_{tm} \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega \quad (10)$$

对裂缝系统:

$$\oint_{v_i} \left(\frac{K_f}{\mu} \nabla p \right) d\Omega = \oint_{v_i} \phi_f C_{tf} \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega - q_f \quad (11)$$

应用 Gauss 定理,可将(10)式左边的体积分改成沿网格侧面的面积分,时间积分采用显示格式进行离散,简化整理得到基质系统的单元网格离散方程为:

$$\sum_{j=1}^{n_c} \left[\frac{K_m}{\mu} (\nabla p - G) \right]^n = \frac{v_i}{\Delta t} (\phi_m C_{tm}) (p^{n+1} - p^n) \quad (12)$$

同理,裂缝系统的单元网格离散方程为:

$$\sum_{j=1}^{n_c} \left[\frac{K_f}{\mu} (\nabla p) \right]^n = \frac{v_{if}}{\Delta t} (\phi_f C_{tf}) (p^{n+1} - p^n) - q_f^{n+1} \quad (13)$$

对每个网格运用以上的离散格式,联立并使用迭代的方法进行求解。

2.5 模型验证

为了验证模型的正确性,将模型应用于长庆油田某典型致密油藏的油井 YP10 井,对比模型计算结果与实际生产数据(图3)可以看出,两者基本吻合,说明所建模型是正确可靠的。

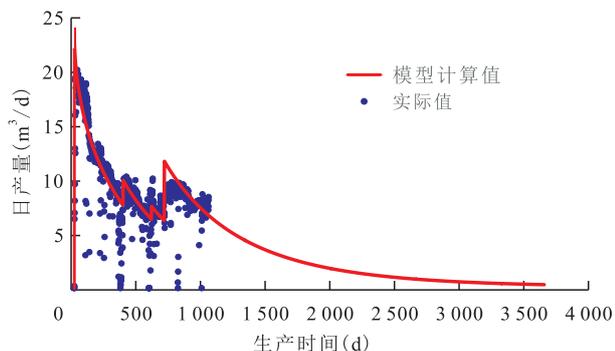


图3 YP10井模型计算结果与实际生产数据对比

Fig.3 Comparison between calculated results and field production data of Well YP10

3 Blasingame 曲线制作方法及特征分析

Blasingame 曲线使用物质平衡时间来代替实际生产时间,将变井底流压的产量曲线转换为定井底流压的生产曲线,从而能够更好地展示出生产井的流动特征,其制作方法主要包括:

物质平衡时间 根据 Blasingame 提出物质平衡时间的概念,并定义为累积产量与当前日产量的比值,其含义是以当前产量进行定产时间到当前累积产量所需要的时间,即:

$$t_c = \frac{Q_o}{q_o} \quad (14)$$

规整化产量 规整化产量定义为当前日产量除以原始地层压力与当前生产流压的差值,代表当前的生产能力,即:

$$\frac{q_o}{\nabla p} = \frac{q_o}{p_i - p_{wf}} \quad (15)$$

规整化产量积分 为了过滤掉产量曲线变化太大的噪音,Blasingame 增加了规整化产量积分的概念,定义为:

$$\left(\frac{q_o}{\nabla p}\right)_i = \frac{\int_0^{t_c} \frac{q_o}{\nabla p} dt_c}{t_c} \quad (16)$$

规整化产量积分导数 为了更好地区别不同

条件下的生产曲线,Blasingame 将规整化产量积分对物质平衡时间进行对数求导,定义为规整化产量积分导数,得到:

$$\left(\frac{q_o}{\nabla p}\right)_{id} = -\frac{d\left(\frac{q_o}{\nabla p}\right)_i}{d\ln t_c} = -\frac{d\left(\frac{q_o}{\nabla p}\right)_i}{dt_c} t_c \quad (17)$$

利用所建模型进行求解,并在此基础上使用 Blasingame 曲线制作方法,得到致密油藏压裂水平井开发的 Blasingame 曲线(图4)。从图4中可以看出,在双对数坐标上,规整化产量曲线随着物质平衡时间的增加而减小,且变化的斜率越来越大,直到斜率为-1。综合 Blasingame 3 条曲线的形态,可以较为明显地将整个生产阶段划分成前期的裂缝线性流(规整化产量积分导数曲线近似为一水平线)、中期的过渡流和后期的边界控制流(规整化产量曲线斜率为-1)3个阶段。前期的裂缝线性流阶段,裂缝之间的流体以线性的方式流向邻近的裂缝,流动阻力小,产量较为稳定;从裂缝线性流到边界控制流之间的阶段为中期的过渡流阶段,也即储层线性流阶段,此阶段裂缝控制外的区域流体线性流向裂缝控制区域,再从裂缝控制区域线性流向裂缝,从而进入井筒,随着压力降落的传递,流动的区域越来越大,阻力也越来越大,规整化产量曲线下降越来越快,直到压力降落传递到边界,进入后期的边界控制流,该阶段由于无外来能量的补给,规整化产量曲线迅速下降,斜率为-1。

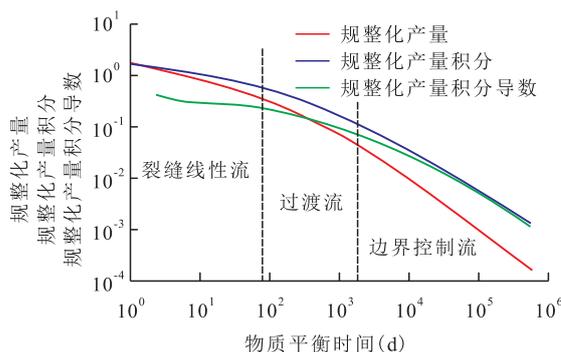


图4 致密油藏压裂水平井开发 Blasingame 曲线

Fig.4 Typical Blasingame curves of fractured horizontal well in tight oil reservoir

4 影响因素

4.1 启动压力梯度

低速非线性渗流是致密油藏基质的渗流特征,其对致密油藏的生产动态有着重要的影响(图5)。随着启动压力梯度的增加,规整化产量、规整化产

量积分和规整化产量积分导数曲线均下降,在生产初期,启动压力梯度的影响较小,而在后期边界控制流阶段,3种 Blasingame 曲线均是线性地平移下移。

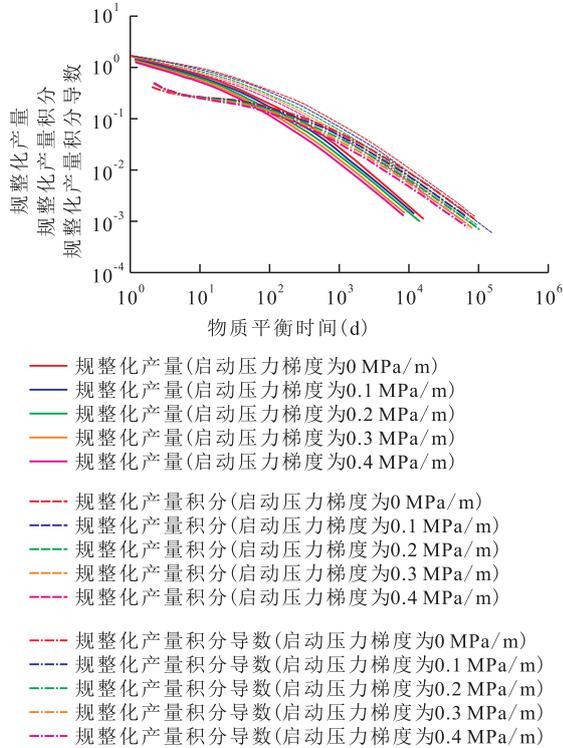


图5 启动压力梯度对Blasingame曲线的影响

Fig.5 Effect of threshold pressure gradient on the Blasingame curves

4.2 裂缝条数

致密油藏渗流能力极低,需要采用水平井并进行大规模压裂才能获得经济产油量,裂缝条数对致密油藏生产动态的影响极为重要,为了研究裂缝条数对 Blasingame 曲线的影响,在水平井长度为 1 000 m 不变的条件下,分别沿水平井均匀分布 5, 7, 9, 11 条裂缝,生产条件不变,分别制作 Blasingame 曲线(图 6)。随着裂缝条数的增加,Blasingame 曲线早、中期差异较大,后期合为一条斜率为-1的直线。同时,从规整化产量积分导数曲线来看,裂缝条数越多,前期裂缝线性流阶段越短,能越快地进入过渡流阶段,但进入边界控制流阶段的时间却差不多,也就是说,裂缝条数对后期的边界控制流影响不大,因此对动态储量的影响也不大。

4.3 裂缝间距

为了研究裂缝间距对 Blasingame 曲线的影响,在水平井长度为 1 000 m 及裂缝条数为 7 条的条件下,分别以裂缝间距为 40, 80, 120 和 160 m 沿水平井中心进行布缝,计算并制作 Blasingame 曲线(图 7)。不同裂缝间距下的 Blasingame 曲线只是在曲线

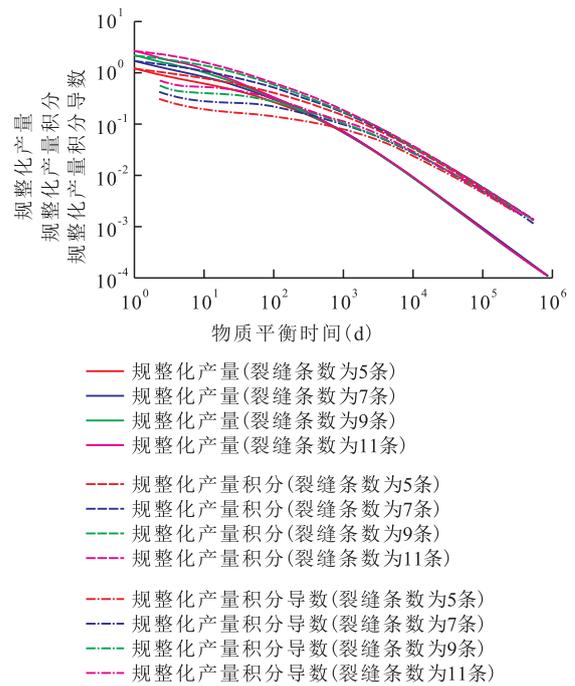


图6 裂缝条数对Blasingame曲线的影响

Fig.6 Effect of fracture number on Blasingame curves

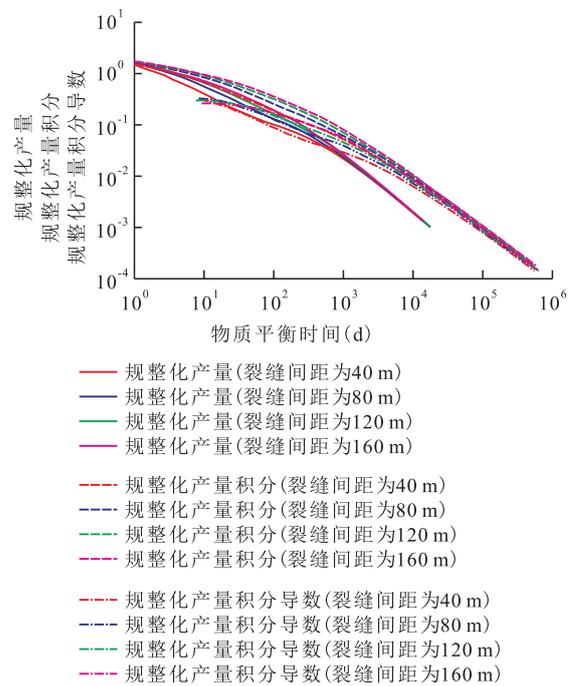


图7 裂缝间距对Blasingame曲线的影响

Fig.7 Effect of fracture spacing on Blasingame curves

中间出现分异,而在生产的开始与后期阶段,裂缝间距对 Blasingame 曲线的影响不大。裂缝间距越大,早期的裂缝线性流阶段越长,中间的过渡流阶段越短,但对于进行后期边界控制流的时间影响不大,这是因为,在裂缝条数不变的条件下,初始的单井产量为各条裂缝的产量之和,因此变化不大,同时,裂缝间距越大,各条裂缝控制的区域也就越宽,裂缝干扰发生的也就越晚,因此早期阶段时间越

长,而过渡阶段时间越短。

4.4 裂缝半长

为了研究裂缝半长对Blasingame曲线的影响,在水平井长度为1 000 m、裂缝条数为7条的条件下,分别计算并制作裂缝半长为200,300,400和500 m时的Blasingame曲线(图8)。相对于裂缝条数和裂缝间距,裂缝半长对Blasingame曲线的影响较小,不同裂缝半长的Blasingame曲线只是在生产的过渡阶段有细微的差异,而在前期与后期阶段均合并为一条曲线。随着裂缝半长的增加,在中间的过渡流阶段,曲线越往上突出,过渡流阶段越短,当裂缝半长从200 m增加到300 m时,曲线突出幅度增大;而当裂缝半长从400 m增加到500 m时,曲线突出就不明显了,2条曲线在生产的所有阶段几乎重合,这时,裂缝半长对Blasingame曲线的影响可以忽略。

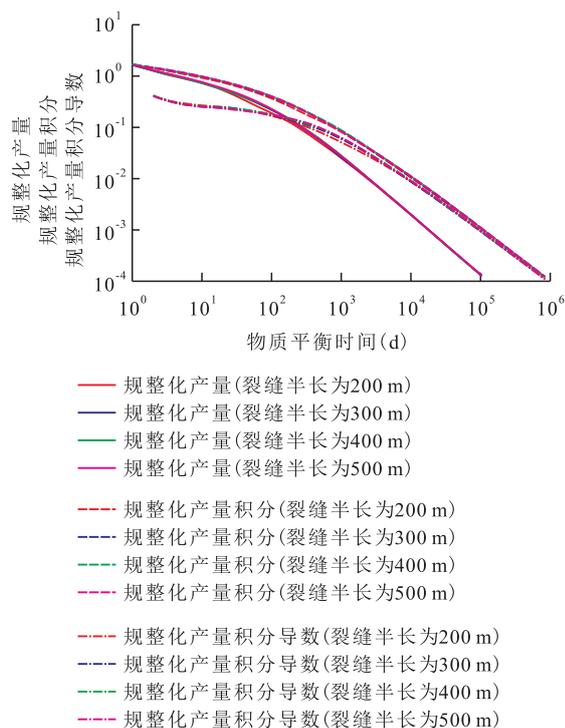


图8 裂缝半长对Blasingame曲线的影响

5 结论

通过对致密油藏低速非线性渗流及水平井大规模压裂后的渗流规律的研究,利用有限体积法与非结构混合网格,建立并求解了致密油藏压裂水平井开发产量模型;并在此基础上,利用Blasingame曲线制作方法得到了致密油藏压裂水平井开发的Blasingame曲线,将生产阶段分成前期裂缝线性流、

中期过渡流和后期边界控制流3个流动阶段;同时,对致密油藏储层的启动压力梯度及包括裂缝条数、裂缝间距和裂缝半长在内的裂缝参数对Blasingame曲线的影响进行分析,发现启动压力梯度对Blasingame曲线的影响较明显,在生产的所有阶段,都会使Blasingame曲线发生分离;而裂缝条数在前期和中期阶段使Blasingame曲线发生分离,裂缝间距和裂缝半长只在中期阶段使Blasingame曲线发生分离,裂缝条数越多、裂缝间距越小、裂缝长度越长,压裂水平井生产的过渡期越短,但对生产的边界控制流阶段几乎无影响。

符号解释

v ——渗流速度, m/s; K_m ——基质渗透率, mD; μ ——流体黏度, mPa·s; p ——压力, MPa; G ——基质启动压力梯度, MPa/m; K_f ——裂缝渗透率, mD; x_e ——油藏长度, m; y_e ——油藏宽度, m; H ——油藏高度, m; L ——水平井长度, m; ρ ——地层压力下的流体密度, g/cm³; v_x, v_y, v_z —— x, y, z 方向的渗流速度, m³/d; x, y, z ——坐标方向; ϕ_m ——基质孔隙度; t ——生产时间, d; ϕ_f ——裂缝孔隙度; q_f ——裂缝流向井筒的流量, m³; K_{mx}, K_{my}, K_{mz} —— x, y, z 方向基质渗透率, mD; C_{L1} ——流体压缩系数, 1/MPa; C_{Lm} ——基质综合压缩系数, 1/MPa; K_{fx}, K_{fy}, K_{fz} —— x, y, z 方向裂缝渗透率, mD; C_{if} ——裂缝综合压缩系数, 1/MPa; p_i ——地层原始压力, MPa; p_{11}, p_{12}, p_{13} ——第1, 2, 3条裂缝中的压力, MPa; p_{wf} ——井底流压, MPa; n ——外边界面上的外法线方向; $\Omega_{外}$ ——外边界面; v_i ——第*i*个基质单元网格体积, m³; Ω ——体积积分变量, m³; v_{if} ——第*i*个裂缝单元网格体积, m³; n_c ——相邻网格数, 个; j ——第*j*个相邻网格; t_c ——物质平衡时间, d; Q_o ——累积产量, m³; q_o ——当前日产量, m³/d。

参考文献

[1] 邹才能,张国生,杨智,等.非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J].石油勘探与开发,2013,40(4):385-399,454.
ZOU Caineng, ZHANG Guosheng, YANG Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399, 454.

[2] 杜金虎,何海清,杨涛,等.中国致密油勘探进展及面临的挑战[J].中国石油勘探,2014,19(1):1-9.
DU Jinhui, HE Haiqing, YANG Tao, et al. Progress in China's tight oil exploration and challenges [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(1): 1-9.

[3] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional

- hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 129-136.
- [4] 严向阳, 李楠, 王腾飞, 等. 美国致密油开发关键技术[J]. *科技导报*, 2015, 33(9): 100-107.
YAN Xiangyang, LI Nan, WANG Tengfei, et al. Key technologies for tight oil development in the United States [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(9): 100-107.
- [5] 张君峰, 毕海滨, 许浩, 等. 国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义[J]. *石油学报*, 2015, 36(2): 127-137.
ZHANG Junfeng, BI Haibin, XU Hao, et al. New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(2): 127-137.
- [6] 魏漪, 徐婷, 钟敏, 等. 不同基质-裂缝耦合模式下致密油生产动态特征[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(2): 83-89, 95.
WEI Yi, XU Ting, ZHONG Min, et al. Dynamic characteristics under different matrix-fracture coupling modes in tight oil reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(2): 83-89, 95.
- [7] 林森虎, 邹才能, 袁选俊, 等. 美国致密油开发现状及启示[J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(4): 25-30, 64.
LIN Senhu, ZOU Caineng, YUAN Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the united states and its implication [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(4): 25-30, 64.
- [8] 杜新龙, 康毅力, 游利军, 等. 低渗透储层微流动机理及应用进展综述[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(2): 91-96.
DU Xinlong, KANG Yili, YOU Lijun, et al. Review of micro flow mechanism and application in low-permeability reservoirs [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(2): 91-96.
- [9] 韩洪宝, 程林松, 张明禄, 等. 特低渗油藏考虑启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(6): 49-53.
HAN Hongbao, CHENG Linsong, ZHANG Minglu, et al. Physical simulation and numerical simulation of ultra-low permeability reservoir in consideration of starting pressure gradient [J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 2004, 28(6): 49-53.
- [10] 姚约东, 葛家理. 石油非达西渗流的新模式[J]. *石油钻采工艺*, 2003, 25(5): 40-42.
YAO Yuedong, GE Jialing. New pattern and its rules of oil non-Darcy flow in porous media [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2003, 25(5): 40-42.
- [11] 邹戈阳. 致密油藏压裂水平井产能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
ZOU Geyang. Study on productivity of fractured horizontal wells in tight oil reservoirs [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [12] 杨兆中, 陈倩, 李小刚. 致密油藏水平井分段多簇压裂产能预测方法[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(4): 73-77.
YANG Zhaozhong, CHEN Qian, LI Xiaogang. A method to predict productivity of multi-stage multi-cluster fractured horizontal wells in tight oil reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(4): 73-77.
- [13] 殷修杏. 低渗透油藏压裂水平井产能研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2012.
YIN Xiuxing. The research for fractured horizontal well productivity in low permeability reservoirs [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2012.
- [14] 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.
NING Zhengfu, HAN Shugang, CHENG Linsong, et al. Productivity calculation method of fractured horizontal wells in low permeability oil or gas field [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(2): 68-71.
- [15] 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.
LANG Zhaoxin, ZHANG Lihua, CHENG Linsong. Investigation on productivity of fractured horizontal well [J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science*, 1994, 18(2): 43-46.
- [16] 曾慧. 致密油藏分段压裂水平井试井解释及产能评价[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
ZENG Hui. Well test interpretation and productivity evaluation of multi-fractured horizontal wells in tight oil reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [17] 王本成. 多段压裂水平井复杂渗流理论与试井分析研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
WANG Bencheng. Research on the theory and analysis of well test for multiple-fractured horizontal well in complex oil and gas reservoirs [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [18] 樊冬艳. 基于离散裂缝模型分段压裂水平井试井理论及解释方法研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2013.
FAN Dongyan. Well test theory and interpretation method of multi-fractured horizontal wells based on the discrete fracture model [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [19] 杨宇. 水平井及压裂水平井测试分析技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2005.
YANG Yu. Welltest of horizontal well and multiply-fractured horizontal well [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.
- [20] 李军诗. 压裂水平井动态分析研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005.
LI Junshi. A study of performance analysis of horizontal wells with a single or multiple fractures [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005.