

低渗透油藏垂直裂缝井有效动用半径研究

杨金欣^{1,2},陈民锋^{1,2},屈丹^{1,2},杨子由^{1,2},毛梅芬^{1,2}

(1.油气资源与探测国家重点实验室 中国石油大学(北京),北京 102249;

2.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249)

摘要:低渗透油藏渗流阻力大,储层压裂改造是提高产油量和开发效果的有效措施。基于油井压裂改造的基本渗流特征,分析油井在弹性能量开发中的不稳定渗流过程,利用裂缝微元法及压降叠加原理,建立考虑启动压力梯度影响的不同动用半径时压裂油井产量计算方法。结合实际油藏条件,分析不同储层参数和压裂参数等对产油量的影响,以及产油量与储层中压降传播范围的变化规律,进而确定油井在裂缝延伸方向和垂直裂缝延伸方向的极限动用半径及满足经济日产油量界限条件下的有效动用半径。结果表明,对于低渗透油藏压裂改造开发,要综合考虑启动压力梯度和裂缝参数的影响,确定油井在裂缝延伸方向和垂直裂缝延伸方向的有效动用半径,才能合理部署油藏开发井网。

关键词:低渗透油藏;启动压力梯度;压裂改造;裂缝微元法;有效动用

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Study on the effective radius of vertical fractured wells in low permeability reservoirs

YANG Jinxin^{1,2}, CHEN Minfeng^{1,2}, QU Dan^{1,2}, YANG Ziyou^{1,2}, MAO Meifen^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 2.College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: Low permeability reservoirs have high seepage resistance, and the reservoir fracturing is an effective measure to improve the oil well production and development effect. Based on the basic seepage characteristics of well fracturing, the unstable seepage process of well in the elastic energy development is analyzed. By using the fracture microelement method and the superposition principle of pressure drop, a calculation method for the production of fractured wells under different radius is established under the influence of the starting pressure gradient. Combined with actual reservoir conditions, the effects of different reservoir parameters and fracturing parameters on well production, as well as the variation rules of the production and the propagation range of pressure drop in the reservoir, are analyzed. Then, the limit of the effective radius of the oil well in both parallel and vertical fractures and the effective radius that meets the economic daily oil production limit are determined. The study results show that, for the fracturing development of low-permeability reservoirs, the influence of starting pressure gradient and fracture parameters should be comprehensively considered to determine the limit range of oil wells in different directions, and so as to provide scientific basis for the effective development of such reservoirs.

Key words: low permeability reservoirs; threshold pressure gradient; fracturing reconstruction; fracture micro-element method; effective utilization

与常规油藏相比,低渗透油藏具有明显的启动压力梯度^[1-4],在开发过程中存在油井产能低和开发效果差等问题,一般采取直井压裂改造储层的方式

来提高油井产量和开发效果。如何综合考虑油藏渗流特点和压裂的影响,确定压裂井的有效动用半径,从而充分动用油藏储量,是开发井网部署的关

收稿日期:2020-06-05。

作者简介:杨金欣(1995—),男,河北邢台人,在读硕士研究生,从事油田开发系统理论方法研究工作。E-mail:yangjinxin_123@163.com。

通信作者:陈民锋(1971—),男,河南清丰人,副教授,博士。E-mail:cmflp96@126.com。

基金项目:国家科技重大专项子课题“油气资产价值评估体系研究”(2016ZX05033005-007)。

键问题。

对于低渗透油藏极限动用半径和有效开发井距的研究,大部分学者主要考虑启动压力梯度的影响,通过建立渗流方程和设置极限条件,分析压降传播规律来求解,而没有考虑油井压裂的影响^[3-5]。对于油井压裂产能方面的研究,大多数学者假设在一定条件和动用边界下,在垂直裂缝井周围地层渗流特征规律认识的基础上,建立相应的油井压裂数学模型,利用基本渗流力学理论,求解得到产能变化规律及其影响因素^[6-14],而由于一些油藏开发时间短和井网部署不完善等原因,对垂直裂缝井油藏极限动用边界的认识不明确,并且储层压裂改造后,其压力分布与常规改造近井模型存在很大差异。为此,基于垂直裂缝井基本渗流方程,利用裂缝微元法和压降叠加原理,求解地层压力,通过分析垂直裂缝井产油量与动用边界的变化关系,研究不同条件下地层压力分布规律,确定垂直裂缝井在裂缝延伸方向与垂直裂缝延伸方向的有效动用半径,以为低渗透油藏的精细开发奠定基础。

1 储量动用过程及渗流方程解

1.1 储量动用过程

压裂是改造油层的有效方法,是油井增产的有效措施。在弹性开发条件下,对于有限导流能力的垂直裂缝井,其主要流动阶段包括双线性流动、线性流动、过渡和拟径向流动4个阶段^[15-16]。

垂直裂缝井位于原点 $(0,0)$ 位置处,油井左右两侧为半缝长为 L_f 的裂缝(图1)。不同阶段的流动特点和储量动用过程如下:①双线性流动阶段。在裂缝中的线性流动和在近井地层中的线性流动同时存在,该阶段油井产量较大,压降由井筒到近井区域传播速度较快。②线性流动阶段。当裂缝导流能力较大时,裂缝附近容易出现线性流动阶段,此时地层中压力下降较快,压降传播范围扩大,地层中流体流入裂缝中。③过渡阶段。压降由近井区域逐渐向储层深部传播,由线性流动过渡到拟径向流动阶段;该阶段压降传播的范围,在沿裂缝的 x 轴距离为 x_b ,在垂直裂缝的 y 轴距离为 y_b 。④拟径向流动阶段。该阶段早期裂缝的影响已经结束,在储层深部流体呈拟径向流动,压力变化与均质油藏中常规直井(未压裂)基本相同。垂直裂缝井从双线性流动阶段到拟径向流动阶段,油井产量逐渐降低,压降由井筒向外传播的距离越来越远,相应的

压力梯度也越来越小,压力后期在平面上近似呈椭圆状分布。

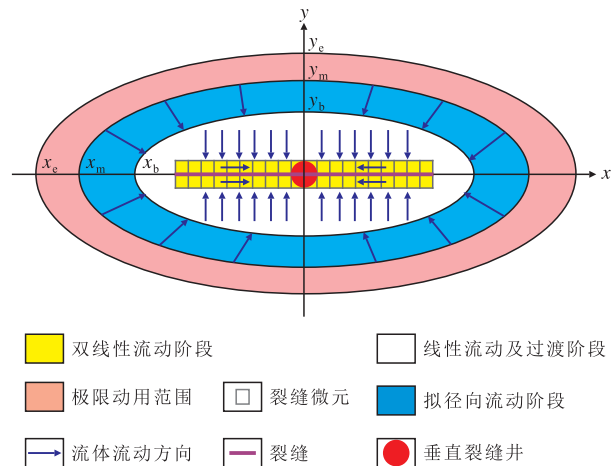


图1 垂直裂缝井不同阶段流动形态及动用边界

Fig.1 Flow patterns and drainage boundaries in different stages of vertical fractured wells

在图1中的 $(x_c, 0)$ 和 $(0, y_e)$ 处,生产压力梯度小于等于启动压力梯度,使得该处渗流速度等于0,称为极限泄油半径或极限动用半径。但在实际开发中,为了保证油藏经济极限开发效益,要使边界 $(x_b, 0)$ 和 $(0, y_b)$ 也有一定的渗流速度,该边界为有效动用半径。因此,对于经过压裂改造后的低渗透油藏开发井网设计,需要研究垂直裂缝井不同阶段产油量与压降传播范围的关系,以确定不同产油量要求下的 x 和 y 方向的有效动用半径。

1.2 考虑启动压力梯度影响的渗流方程及其解

对于垂直裂缝井不稳定渗流问题,可以采用稳态逐次逼近法^[3]处理,即对于某一时刻压力分布特征用稳态方法来描述,将压力传播的非稳态过程用一系列渐变的稳态过程来逼近。

1.2.1 基本渗流方程

对于低渗透垂直裂缝井,渗流数学模型建立的假设条件为:流体单相稳态流动;上下边界封闭,流体沿水平方向流动;裂缝对称分布,裂缝高度等于油藏厚度;流体只通过裂缝流入井筒,且各裂缝微元产油量相等。

对如图1所示的典型垂直裂缝井,根据压降叠加原理,利用裂缝微元法^[12],即在满足精度要求条件下,将裂缝左右两翼均分成 n 个微元,每个裂缝微元的流动等效为独立的平面径向流动,通过将 n 个裂缝微元产生的压降进行叠加处理,确定垂直裂缝井压力分布情况。

对于任一裂缝微元,在考虑启动压力梯度条件下,流体的渗流方程组^[17]为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right) \right] = 0 \\ r \left(\frac{\partial p}{\partial r} - G \right) \Big|_{r=r_w} = \frac{q\mu_o}{2\pi Kh} \\ p(r) \Big|_{r=r_w} = p_{wf} \end{cases} \quad (1)$$

1.2.2 地层压降求解

求解方程组(1),得到任一裂缝微元的压降表达式为:

$$p(r) - p_{wf} = \frac{q\mu_o}{2\pi Kh} \ln \frac{r}{r_w} + G(r - r_w) \quad (2)$$

左翼裂缝中任一裂缝微元 j 的中心位置坐标为 $(x_{lj}, 0)$,则第 j 个裂缝微元的坐标可以表示为 $(x_{lj}, y_{lj}) = \left(-\frac{2j-1}{2n} L_f, 0\right)$ 。同理,可得右翼裂缝第 j 个裂缝微元坐标为 $(x_{rj}, y_{rj}) = \left(\frac{2j-1}{2n} L_f, 0\right)$ 。

设整条裂缝产油量为 q ,将左翼裂缝第 j 个裂缝微元的坐标代入无限大地层任意一点的压降表达式,可得左翼裂缝上该裂缝微元在平面任意一点 (x, y) 的压降表达式:

$$p(r) - p_{wf} = \frac{q\mu_o}{4n\pi Kh} \ln \frac{r}{r_w} + \frac{G}{2n} (r - r_w) \quad (3)$$

其中:

$$r = \sqrt{\left(x + \frac{2j-1}{2n} L_f\right)^2 + y^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} p(x, y) = p_{wf} + \frac{q\mu_o}{4n\pi Kh} \sum_{j=1}^n \left[\ln \frac{\sqrt{(x-x_l)^2 + y^2}}{r_w} + \ln \frac{\sqrt{(x-x_r)^2 + y^2}}{r_w} \right] + \\ \frac{G}{2n} \sum_{j=1}^n \left[\sqrt{(x-x_l)^2 + y^2} - r_w + \sqrt{(x-x_r)^2 + y^2} - r_w \right] \end{aligned} \quad (9)$$

根据(9)式进行编程计算,可计算出整条裂缝作用下,在额定产油量时地层任意点的压力解析。

1.2.3 产油量求解

利用(9)式,通过给定不同产油量条件下,计算得到垂直裂缝井相应的动用半径。因此,可以分别

$$\sum_{j=1}^n \frac{2\pi Kh}{\mu_o} \times \frac{p_i - p_{wf} - G \left(\sqrt{(x-x_l)^2 + y^2} - r_w \right)}{n \ln \frac{\sqrt{(x-x_l)^2 + y^2}}{r_w}} + \sum_{j=1}^n \frac{2\pi Kh}{\mu_o} \times \frac{p_i - p_{wf} - G \left(\sqrt{(x-x_r)^2 + y^2} - r_w \right)}{n \ln \frac{\sqrt{(x-x_r)^2 + y^2}}{r_w}} \quad (10)$$

将左翼裂缝 n 个裂缝微元在地层任意一点的压降进行叠加,可以得到左翼裂缝 n 个裂缝微元共同作用下地层任意一点 (x, y) 处的压降表达式:

$$\begin{aligned} (p(x, y) - p_{wf}) \Big|_l = \\ \frac{q\mu_o}{4n\pi Kh} \sum_{j=1}^n \ln \frac{\sqrt{(x-x_l)^2 + y^2}}{r_w} + \\ \frac{G}{2n} \sum_{j=1}^n \left[\sqrt{(x-x_l)^2 + y^2} - r_w \right] \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

$$x_l = -\frac{2j-1}{2n} L_f \quad (6)$$

同理,可得右翼裂缝 n 个裂缝微元作用下地层任意一点的压降表达式为:

$$\begin{aligned} (p(x, y) - p_{wf}) \Big|_r = \\ \frac{q\mu_o}{4n\pi Kh} \sum_{j=1}^n \ln \frac{\sqrt{(x-x_r)^2 + y^2}}{r_w} + \\ \frac{G}{2n} \sum_{j=1}^n \left[\sqrt{(x-x_r)^2 + y^2} - r_w \right] \end{aligned} \quad (7)$$

其中:

$$x_r = \frac{2j-1}{2n} L_f \quad (8)$$

(5)式和(7)式为裂缝一侧在地层中任意一点的压降表达式,将(5)式与(7)式相加,可得在垂直裂缝井拟径向流动阶段地层任意一点的压降表达式为:

给定垂直裂缝井的 x 和 y 方向的动用半径,来反求在该动用半径下的产油量。

当给定动用半径时,该点以外的地层压力为原始地层压力;通过变换(9)式,可得在不同动用边界条件下产油量与动用半径的关系式为:

2 储量动用规律

2.1 油藏基本参数

GR油田为低渗透油藏,天然能量较充足,在开发初期满足衰竭式开发的条件。油藏基本参数包括:油藏原始地层压力为20.0 MPa,储层渗透率为3.3 mD,储层有效厚度为15.0 m,地层原油黏度为2.1 mPa·s。在实际计算分析中,主要影响因素取值区间为:启动压力梯度为0.01~0.03 MPa/m,裂缝半缝长为50~200 m,生产压差为5.0~15.0 MPa。

基于垂直裂缝井储量动用过程分析,结合(9)式—(10)式,研究不同参数条件对垂直裂缝井压力分布及动用范围的影响,确定不同条件下油藏合理

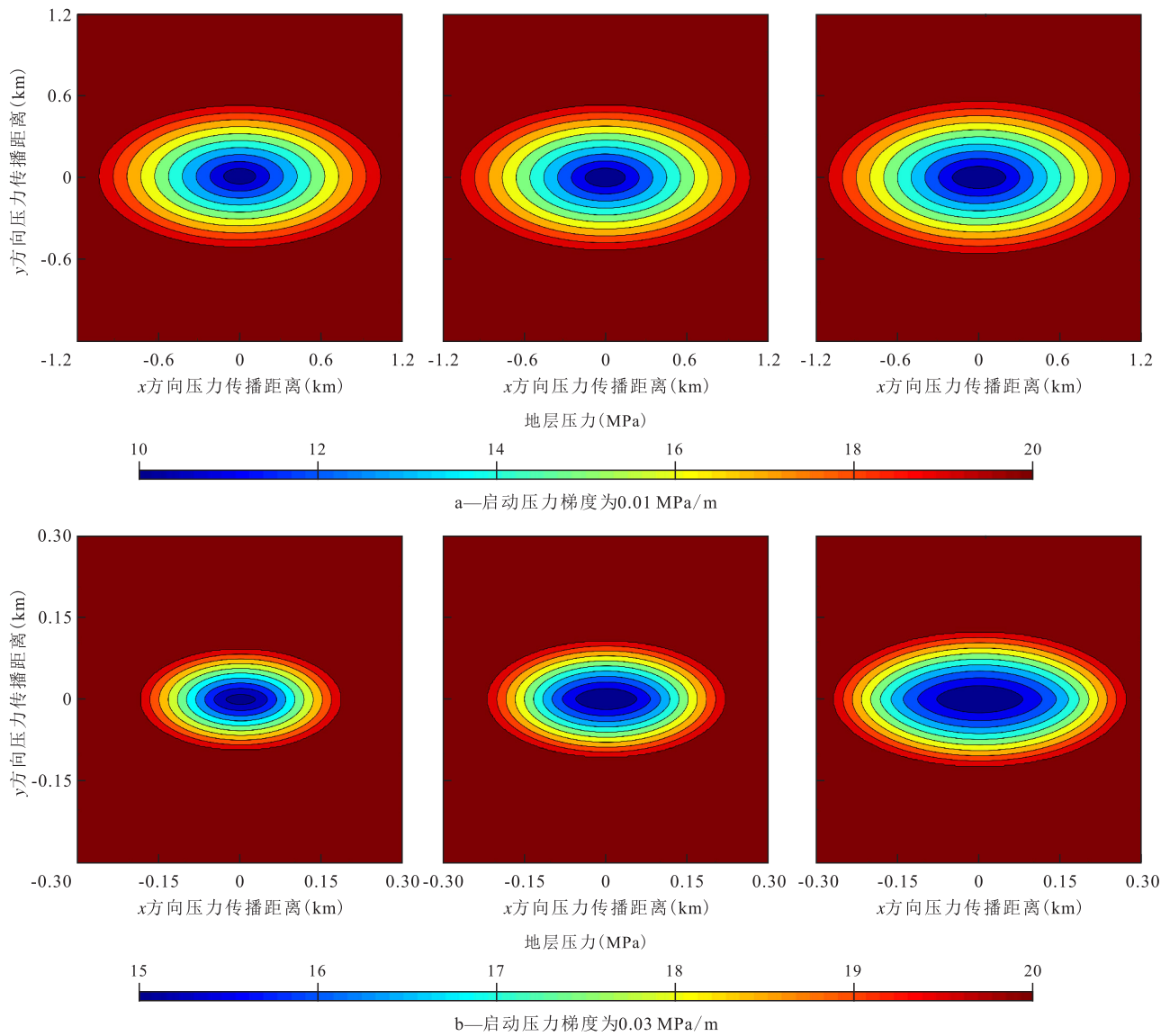
开发井距。

2.2 压力分布及储量动用状况

分析垂直裂缝井的压力分布(图2)可见:①在弹性能量开发条件下,受储层参数、启动压力梯度和裂缝半缝长的影响,垂直裂缝井压力的传播范围存在明显差异。②压力在平面上呈椭圆状分布,反映了储量的有效动用范围。③启动压力梯度越大,压力的传播范围越小,椭圆状区域内消耗的能量越大。④油井压裂的裂缝半缝长越长,垂直裂缝井压力的传播范围越大,而椭圆的形态越扁,表明在垂直裂缝延伸方向和裂缝延伸方向的动用范围差异越明显。

2.3 动用范围变化规律

针对低渗透油藏压裂改造开发的井网部署,需



图片由左到右裂缝半缝长分别为50, 100和200 m

图2 考虑启动压力梯度及裂缝半缝长影响下压力分布

Fig.2 Pressure distribution under the influence of threshold pressure gradient and half length of fracture

要研究不同条件下油藏中 x 和 y 方向的储量动用范围,来提高油田的开发效果。利用(10)式计算弹性能量开发时,不同参数条件下垂直裂缝井产油量与不同方向动用半径的关系,以深入认识储量动用范围变化规律。为消除储层厚度变化的影响,使用单位厚度日产油量(日产油量/厚度)进行分析。

由于在裂缝延伸的 x 轴上,动用半径在 $0 \sim L_f$ 内变化时,地层流体处于双线性流动阶段;而当动用半径大于半缝长时,地层流体处于拟径向流动阶段,因此不同动用半径下产油量变化趋势不同。基于GR油田开展垂直裂缝井储量动用规律研究,研究不同条件下,生产压差、启动压力梯度及裂缝半缝长对垂直裂缝井开发效果的影响。

生产压差 当生产压差为 10 MPa 时,不同裂缝半缝长和启动压力梯度下单位厚度日产油量与动用半径的关系(图3)表明:在确定的生产压差条件下,随着裂缝半缝长的增大,动用半径和单位厚度日产油量均增大;随着启动压力梯度的增大,动用半径和单位厚度日产油量均减小。在裂缝延伸的 x 方向与垂直裂缝延伸的 y 方向,动用半径变化的趋势相似,但变化幅度有一定差别;在同一动用方向上单位厚度日产油量变化趋势相似,但变化幅度有一定差别。

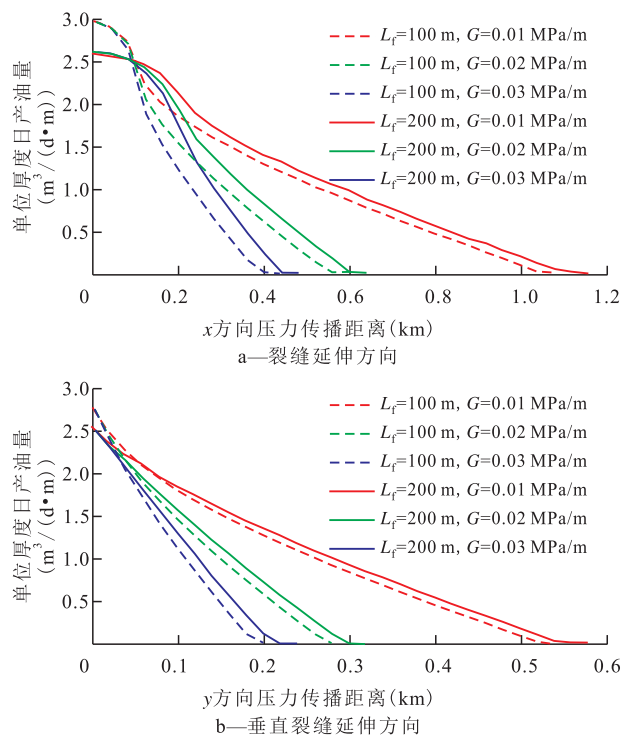


图3 生产压差为 10 MPa 时单位厚度日产油量与动用半径的关系

Fig.3 Relationship between daily oil production per unit thickness and drainage radius at a certain production pressure drop

启动压力梯度 当启动压力梯度为 0.02 MPa/m 时,由不同裂缝半缝长和生产压差下单位厚度日产油量与动用半径的关系(图4)可以看出:在确定的启动压力梯度条件下,随着裂缝半缝长的增加,动用半径和单位厚度日产油量均增大;随着生产压差的增加,动用半径和单位厚度日产油量也均增大。在裂缝延伸的 x 方向与垂直裂缝延伸的 y 方向,动用半径变化的趋势相似,但变化幅度有一定差别;在同一动用方向上单位厚度日产油量变化趋势相似,但变化幅度有一定差别。

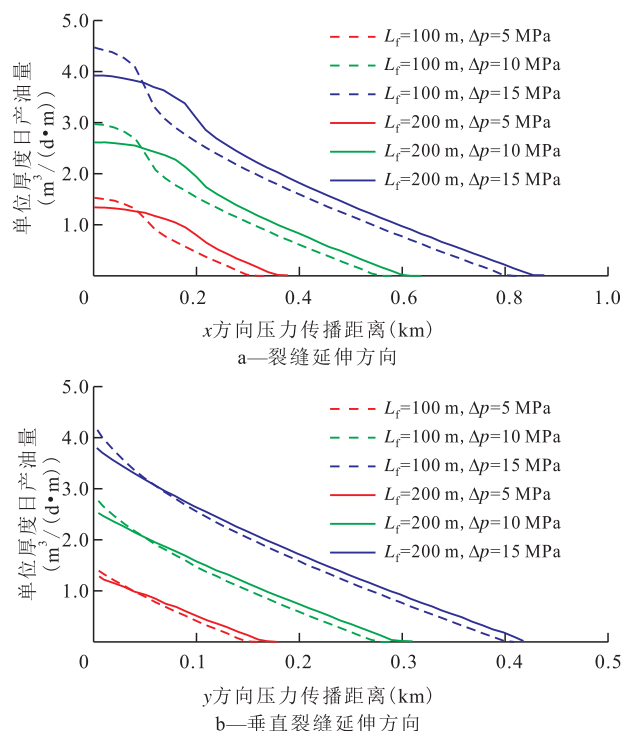


图4 启动压力梯度为 0.02 MPa/m 时单位厚度日产油量与动用半径的关系

Fig.4 Relationship between daily oil production and drainage radius at a certain threshold pressure gradient

裂缝半缝长 当裂缝半缝长为 200 m 时,由不同启动压力梯度和生产压差下单位厚度日产油量与动用半径的关系(图5)可见:在确定的裂缝半缝长条件下,随着生产压差的增加,动用半径和单位厚度日产油量均增大;随着启动压力梯度的增加,动用半径和单位厚度日产油量均减小。在裂缝延伸的 x 方向与垂直裂缝延伸的 y 方向,动用半径变化的趋势相似,但变化幅度有一定差别;在同一动用方向上单位厚度日产油量变化趋势相似,但变化幅度有一定差别。

3 油藏应用实例

根据不同条件下储量动用过程的认识,计算在

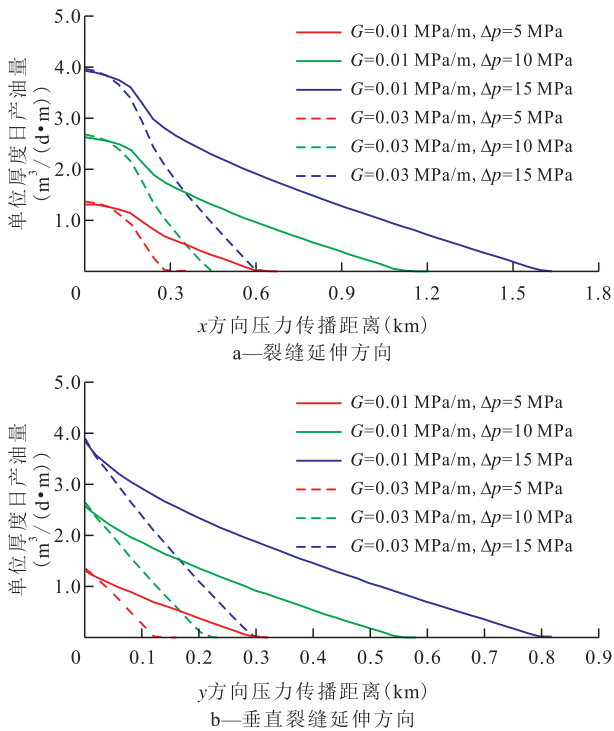


图5 裂缝半缝长为200 m时单位厚度日产油量与
动用半径的关系

Fig.5 Relationship between daily oil production and drainage radius at a certain half length of fracture

满足实际油田开发中不同经济极限日产油量界限条件下垂直裂缝井的储量有效动用范围(x 与 y 方向的有效动用半径),为实际油藏开发井网部署提供技术参考。

计算参数取值:GR油田储层渗透率为3.3 mD,有效厚度为15.0 m,地层原油黏度为2.1 mPa·s;启动压力梯度为0.02 MPa/m,裂缝半缝长为100 m,生产压差为10.0 MPa。

利用(9)式计算不同经济日产油量界限条件下垂直裂缝井储量的有效动用半径结果(图6)表明:
①当经济日产油量界限为0时,对应的储量有效动用半径较大;随着经济日产油量界限的增大,相应的储量有效动用半径逐渐减小。②由于压裂裂缝

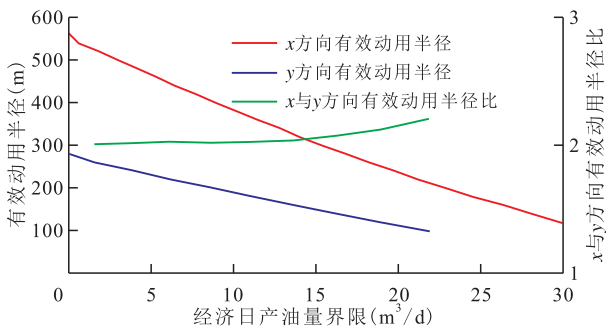


图6 经济日产油量界限与不同方向有效动用半径的关系
Fig.6 Relationship between the limit of economic daily oil production and effective radius in different directions

的影响, x 和 y 方向的有效动用半径变化趋势不同;通过对比相同条件下 x 和 y 方向有效动用半径,确定两者比值的变化范围为2~2.3,因此可以考虑实际井网中井排比控制在2.0左右。③根据GR油田开发要求,如经济日产油量界限为5.0 m³/d,则相应 x 和 y 方向的有效动用半径分别为460和230 m,可作为实际开发井网部署井距和排距的设计依据。

4 结论

低渗透油藏压裂开发过程中不同动用方向上的压力分布规律有一定差异,地层压力在平面上呈椭圆状分布。

生产压差、裂缝半缝长和启动压力梯度对储量动用范围均有不同程度的影响,且在不同因素条件下裂缝延伸方向的极限动用半径明显大于垂直裂缝延伸方向的极限动用半径;为保证油藏经济极限开发效益,在利用垂直裂缝井进行开发井网部署时,考虑实际井网井排比在2.0左右。

利用所建立的计算模型,可以快捷地确定低渗透油藏压裂改造后地层压力分布规律和给定条件下的油藏储量有效动用半径,实例分析结果表明,本文方法具有很好的实用性。

符号解释

- G ——启动压力梯度,MPa/m;
- h ——地层厚度,m;
- j ——左(右)翼裂缝中任一裂缝微元, j 为1到 n 的整数;
- K ——地层渗透率,mD;
- L_f ——裂缝半缝长,m;
- n ——左(右)翼裂缝微元均分总份数;
- p ——地层任意一点压力,MPa;
- p_i ——地层原始压力,MPa;
- p_{wf} ——井底压力,MPa;
- q ——产油量,m³/s;
- r ——地层中任意一点至裂缝微元的距离,m;
- r_w ——井筒半径,m;
- x ——地层中任意一点横坐标,m;
- x_b ——过渡阶段边界横坐标,m;
- x_e ——极限动用边界横坐标,m;
- x_{lj} ——左翼裂缝中任意一点横坐标,m;
- x_{rj} ——右翼裂缝中任意一点横坐标,m;
- x_m ——拟径向流动阶段边界横坐标,m;
- y ——地层中任意一点纵坐标,m;
- y_b ——过渡阶段边界纵坐标,m;
- y_e ——极限动用边界纵坐标,m;

y_m ——拟径向流动阶段边界纵坐标, m;
 y_{lj} ——左翼裂缝中任意一点纵坐标, m;
 y_{rj} ——右翼裂缝中任意一点纵坐标, m;
 μ_o ——地层原油黏度, mPa·s;
 Δp ——生产压差, MPa。

参考文献

- [1] 陈民锋, 王振鹏, 尹承哲, 等. 低渗透稠油油藏蒸汽吞吐开发储量动用界限[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2019, 36(3): 281-288. CHEN Minfeng, WANG Zhenpeng, YIN Chengzhe, et al. Ultimate drainage radius of cyclic steam stimulation in low-permeability heavy oil reservoirs[J]. Journal of Shenzhen University: Science & Engineering, 2019, 36(3): 281-288.
- [2] 黄延章. 低渗透油层非线性渗流特征[J]. 特种油气藏, 1997, 14(1): 9-14. HUANG Yanzhang. Nonlinear percolation feature in low permeability reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1997, 14(1): 9-14.
- [3] 陈民锋, 王兆琪, 张琪琛, 等. 启动压力影响下注采井间有效驱替规律[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2017, 34(1): 91-97. CHEN Minfeng, WANG Zhaoqi, ZHANG Qichen, et al. Effective displacement rules for interwell with threshold pressure[J]. Journal of Shenzhen University: Science & Engineering, 2017, 34(1): 91-97.
- [4] 许江文, 李建民, 郭元月, 等. 玛湖致密砾岩油藏水平井体积压裂技术探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 241-249. XU Jiangwen, LI Jianmin, GUO Yuanyue, et al. Exploration and practice of volume fracturing technology in horizontal well of Mahu tight conglomerate reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 241-249.
- [5] 张琪琛, 陈民锋, 陈璐, 等. 低渗透储层非线性渗流压力传播规律[J]. 陕西科技大学学报: 自然科学版, 2016, 34(1): 102-106, 127. ZHANG Qichen, CHEN Minfeng, CHEN Lu, et al. Transmission of pressure in low permeability reservoir with non-linear seepage[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2016, 34(1): 102-106, 127.
- [6] 陶亮, 郭建春, 李凌铎, 等. 致密油藏体积压裂水平井产能评价新方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 89-93, 127. TAO Liang, GUO Jianchun, LI Lingduo, et al. A new productivity evaluation of horizontal well with volume-fracturing in tight oil reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 89-93, 127.
- [7] 陈民锋, 陈璐, 王兆琪, 等. 近井改造对低渗透稠油油藏有效动用半径的影响[J]. 陕西科技大学学报: 自然科学版, 2016, 34(5): 103-108. CHEN Minfeng, CHEN Lu, WANG Zhaoqi, et al. The effect of near wellbore stimulation on effective drainage radius in low-permeable heavy-oil reservoirs[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2016, 34(5): 103-108.
- [8] 王宏, 赖枫鹏, 张伟, 等. 非均质低渗透气藏压裂直井产能计算[J]. 断块油气田, 2019, 26(6): 728-733. WANG Hong, LAI Fengpeng, ZHANG Wei, et al. Productivity calculating study of fracturing vertical well in low-permeability heterogeneous gas reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(6): 728-733.
- [9] 张安顺, 杨正明, 李晓山, 等. 低渗透油藏直井体积压裂改造效果评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 409-415. ZHANG Anshun, YANG Zhengming, LI Xiaoshan, et al. An evaluation method of volume fracturing effects for vertical wells in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 409-415.
- [10] 崔传智, 杨经纬, 吴忠维, 等. 高含水期五点法压裂井网的动态产能预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(3): 78-84. CUI Chuazhi, YANG Jingwei, WU Zhongwei, et al. Dynamic productivity prediction method of five-spot fractured well pattern in high water cut stage[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(3): 78-84.
- [11] 周杨, 李莉, 吴忠宝, 等. 低渗透油藏垂直裂缝井产能预测及分析[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(2): 146-150. ZHOU Yang, LI Li, WU Zhongbao, et al. Production and analysis on productivity of vertically fractured wells in low-permeability oil reservoirs [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(2): 146-150.
- [12] 谢丽沙, 胡勇, 何逸凡, 等. 考虑裂缝导流能力时效的海上压裂井产能研究[J]. 天然气与石油, 2016, 34(5): 50-55. XIE Lisha, HU Yong, HE Yifan, et al. Research on fracturing well productivity of low permeability reservoir at sea considering fracture conductivity varying over time[J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34(5): 50-55.
- [13] 徐加祥, 杨立峰, 丁云宏, 等. 致密油水平井体积压裂产能影响因素[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(1): 162-168. XU Jiexiang, YANG Lifeng, DING Yunhong, et al. Influencing factors on the productivity of the volume-fractured horizontal well in the tight oil reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(1): 162-168.
- [14] 梅丹, 胡勇, 王倩. 裂缝对气藏储层渗透率及气井产能的贡献[J]. 石油实验地质, 2019, 41(5): 769-772. MEI Dan, HU Yong, WANG Qian. Experimental study on fracture contribution to gas reservoir permeability and well capacity [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(5): 769-772.
- [15] 李晓平, 张烈辉, 刘启国. 试井分析方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009. LI Xiaoping, ZHANG Liehui, LIU Qiguo. Well test analysis method [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [16] 廖新维, 沈平平. 现代试井分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002. LIAO Xinwei, SHEN Pingping. Modern well test analysis [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [17] 程林松. 高等渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. CHENG Linsong. Advanced seepage mechanics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.