

引用格式:王瑞.低渗透油藏油水两相流动压裂井产能研究[J].油气藏评价与开发,2021,11(5):760-765.

WANG Rui. Fracturing well productivity of low permeability reservoir with taking the oil-water two phase flow into consideration[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5):760-765.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.05.014

低渗透油藏油水两相流动压裂井产能研究

王 瑞

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:低渗透油藏一般采用压裂井开发,该开发过程涉及到油水两相流动问题,目前的压裂井产能研究多考虑单相流动。在考虑储层各向异性、启动压力梯度及压裂井两相流的基础上,运用数值计算与渗流理论,给出了低渗透油藏油水两相流动的压裂井产能预测方法,并将该方法计算结果与矿场数据对比以验证压裂井产能预测方法的准确性。研究表明:在含水率一定时,随着裂缝导流能力变大,压裂井产油量增加,但增加幅度随导流能力的增加而变小。裂缝导流能力增加,累计产油量增加,当导流能力大于 $0.4 \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ 后,累计产油量增加趋势变缓。裂缝长度增加,流体流动渗流阻力降低,产油量增加。渗透率级差越大(即平面非均质性越强),压裂井产能越低,水驱开发效果越差。该研究为水驱开发井的压裂优化提供了理论支撑。

关键词:低渗透油藏;油水两相流;压裂井;产能;裂缝导流能力

中图分类号:TE31

文献标识码:A

Fracturing well productivity of low permeability reservoir with taking the oil-water two phase flow into consideration

WANG Rui

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: In general, fracturing well pattern is used for the development of low-permeability reservoir. This development process relates to the oil-water two phase flow, while the current researches on fracturing well productivity consider more about single phase flow. Based on the consideration of the reservoir anisotropy, threshold pressure gradient and oil-water two phase flow, a prediction method of fracturing well productivity is proposed by numerical method and sweep theory. And then, a contrast between the calculated results of the proposed method and field data is performed to verify the accuracy of the proposed model. The results show that when the water cut is constant, the increase of fracture conductivity results in the increase of the oil production. However, as the conductivity increases, the increase rate of the oil production decreases. The increase of the fracture conductivity also results in the increase of the cumulative oil production. When the conductivity is greater than $0.4 \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$, the cumulative oil production increases slowly. When the length of the fracture increases, the seepage resistance near the bottom decreases, so that the oil production increases. The increase of the permeability ratio indicates the planar heterogeneity becoming stronger, so that the productivity of the fractured well reduces showing a poorer water flooding effect. This study provides a theoretical basis for the optimization of the fracturing of the development well pattern by water flooding.

Keywords: low permeability reservoir, oil-water two-phase flow, fracturing well, productivity, fracture conductivity

收稿日期:2020-08-03。

作者简介:王瑞(1979—),男,硕士,高级工程师,主要从事油田开发技术方面的研究工作。地址:山东省东营市东营区聊城路2号,邮政编码:257000。E-mail: wangrui_slyt@126.com

基金项目:国家科技重大专项“平面分区均衡动用主控因素及优化调控方法研究”(2016ZX05011-002)。

关于压裂直井的产能研究可分为稳态与非稳态产能^[1-3]。对于压裂直井的稳态产能研究相对丰富,王峰等^[4]与陈映赫等^[5]考虑低速非线性渗流特征,建立了压裂直井的稳态产能模型。熊健等^[6]建立了发育有多翼裂缝的直井产能模型。何理鹏等^[7]考虑低速非线性流动与应力敏感,推导了低渗透油藏压裂直井稳态产能与流入动态方程。张政等^[8],王宏等^[9],苑志旺等^[10]考虑油藏应力敏感与启动压力梯度影响基础上,研究了压裂直井的稳态产能。朱维耀等^[11-12]在2013与2014年分别针对煤层气与页岩气的扩散、吸附特征,建立了压裂直井的稳态产能模型。以上内容均为关于压裂直井稳态产能的研究。

而对于压裂直井的非稳态研究也较丰富,JACQUES^[13]依据产量相等,将压裂直井等效为直井,再建立该等效直井的产能模型,从而获得压裂直井的产能。LUO等^[14],REN等^[15]与WAN等^[16]认为直井压裂后在井筒附近形成多条裂缝,各裂缝的长度与方位角均不相同,并建立了压裂后发育该复杂裂缝的直井井底压力分析模型。WANG等^[17]考虑油藏压力变化对储层裂缝影响,建立耦合油藏形变与流体渗流的压裂直井渗流数学模型。刘海龙等^[18]考虑储层非均质性,推导了适合致密砂岩油藏部分射开的压裂直井产能计算公式。WANG和YI^[19]考虑碳酸盐油藏溶蚀孔形态、裂缝有限导流等影响,运用Laplace变换与叠加原理,建立了压裂直井井底压力半解析模型。崔传智等^[20]运用渗流力学理论,建立了缝洞型碳酸盐岩油藏压裂直井瞬态产能分析模型。GUO等^[21]考虑致密气藏的应力敏感,建立了大型水力压裂直井的瞬态压力模型。ZHU等^[22]在考虑致密油藏裂缝与油藏基质非稳态窜流基础上,建立了大规模改造直井试井模型。以上内容均为关于压裂直井瞬态产能的研究。

从以上关于压裂直井产能与压力分析研究可知,目前的压裂直井产能研究主要为考虑油藏特性、渗流特性、裂缝发育情况、完井情况,运用稳定或者不稳定渗流理论,建立考虑各自假设、物理模型特征的压裂直井渗流数学模型。这些研究很少能用于油水两相流动情况下的压裂井产能预测。本文运用渗流力学理论与数值计算方法,给出了低渗透油藏油水两相流动的压裂井产能计算方法,并将该方法计算结果与矿场数据对比以验证本文方法的准确性。该研究为压裂井产能预测与优化提供了理论基础。

1 压裂井产能模型建立

井网压裂后,流体在储层中的流动呈现出椭圆形特征(图1),在裂缝中的流动呈现出线性流动特征。根据流体在储层与裂缝中的流动规律不同,可以将单元井网划分为2个物理渗流区域(I区与II区),其中I区为裂缝内线性流动区域,II区为储层椭圆渗流区域。在I区内,流体为高速非达西流动;在II区内,流体流动存在启动压力梯度。

为建立I区与II区耦合的油水两相渗流模型,给出如下合理假设:①油水两相流体不混溶且微可压缩;②忽略重力和毛管压力的影响;③地层温度不变,渗流过程等温;④油藏各向异性;⑤裂缝穿透整个油藏。

1.1 油藏各向异性的处理方法

MUSKAT^[23]指出,渗透率为 (K_x, K_y) 的各向异性油藏可以等效为渗透率为 K 的各向同性油藏,等效后的渗透率与等效前渗透率具有如下关系,

$$K = \sqrt{K_x K_y} \quad (1)$$

式中: K 为平均渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_x 和 K_y 分别为 x 和 y 方向上的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

1.2 I区裂缝内线性流动区域

I区为裂缝内的线性流动区域;在该区域内流体流动为高速非达西流动,描述方程如下:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu_o}{k_{fo}} v_{fo} + \zeta \rho v_{fo}^2 = \frac{\mu_o}{k_{fo}} \frac{Q_o}{w_f h} + \zeta \rho_o \left(\frac{Q_o}{w_f h} \right)^2 \quad (2)$$

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu_w}{k_{fw}} v_{fw} + \zeta \rho v_{fw}^2 = \frac{\mu_w}{k_{fw}} \frac{Q_w}{w_f h} + \zeta \rho_w \left(\frac{Q_w}{w_f h} \right)^2 \quad (3)$$

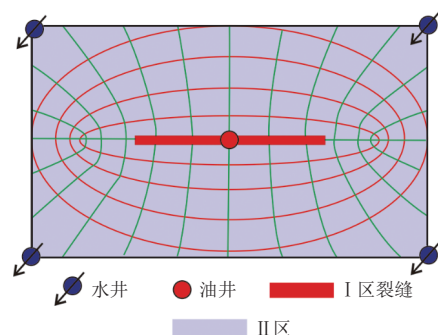


图1 垂直压裂井等压线与流线分布
Fig. 1 Distribution of isobar and streamline of vertical fracturing wells

式(2)–(3)中: p 为压力,MPa; μ_o 与 μ_w 分别为原油黏度与水黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; k_{fo} 与 k_{fw} 为裂缝油相与水相渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; v_{fo} 与 v_{fw} 为裂缝内油、水的流动速度, m/s ; ρ_o 与 ρ_w 为油、水密度, kg/m^3 ; h 为油层的厚度, m ; w_f 为裂缝的宽度, cm ; Q_o 与 Q_w 为地层条件下流过裂缝截面的油、水流量, m^3/s 。

高速非线性渗流系数 ζ 计算公式如下^[24–25]:

$$\zeta = \frac{0.005}{\sqrt{k_f \varphi}} \frac{1}{(1 - s_{fwr})^{5.5} k_{fro}(s_w)^{0.5}} \quad (4)$$

式中: φ 为孔隙度; s_{fwr} 为裂缝内束缚水饱和度; $k_{fro}(s_w)$ 为裂缝内油相相对渗透率; k_f 为裂缝绝对渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

1.3 II区为裂缝控制范围内的椭圆渗流区

压裂直井开发过程中,在储层中形成共轭等压椭圆和共轭流线双曲线(图1:红色为等压椭圆,绿色为流线双曲线)。

直角坐标和椭圆坐标的关系可以表示为:

$$\begin{cases} x = a \cos \eta, & y = b \sin \eta \\ a = x_f \cosh \xi, & b = x_f \sinh \xi \end{cases} \quad (5)$$

式中: \cosh 与 \sinh 分别为双曲余弦和双曲正弦函数; ξ 、 η 为椭圆坐标。

则II区内描述椭圆与双曲线的方程可以分别表示为:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \\ \frac{x^2}{x_f \cos^2 \eta} - \frac{y^2}{x_f \sin^2 \eta} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: a 与 b 分别为椭圆长轴与短轴的半长, m ; x_f 是裂缝半长, m 。

基于扰动椭圆,椭圆族可等效为发展矩形簇^[26]。相关参数计算如下:

$$\begin{cases} \bar{x} = x_f \cosh \xi \\ \bar{y} = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} b \sin \eta d\eta = \frac{2x_f}{\pi} \sinh \xi \end{cases} \quad (7)$$

式中: \bar{x} 与 \bar{y} 分别为矩形的长边(平均等压线方向)与短边(平均流线方向坐标)^[26], m 。

等效后的矩形内渗流偏微分方程为:

$$\begin{cases} \frac{Kk_m}{\mu_o} \left(\frac{\partial P}{\partial \bar{y}} - G \right) = v_o \\ \frac{Kk_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial P}{\partial \bar{y}} - G \right) = v_w \end{cases} \quad (8)$$

式中: k_m 为油相相对渗透率; k_{rw} 为水相相对渗透

率; G 为启动压力梯度,MPa/m。

等效的矩形过流断面流量可表示为:

$$v = \frac{QB}{4ah} = \frac{QB}{4x_f h \cosh \xi} \quad (9)$$

式中: Q 为流过断面的流量, m^3/s ; B 为体积系数, m^3/m^3 。

1.4 定解条件

1) 初始条件为:

$$\begin{cases} p(r=r_w, t=0) = p_w \\ p(\xi=\xi_e, t=0) = p_e \\ s_w(\xi, 0) = s_{wc} \end{cases} \quad (10)$$

式中: p_e 为油井井底流压,MPa; p_w 为水井井底流压,MPa; r_w 为井筒半径, m ; s_{wc} 为初始含水饱和度; ξ_e 为供给边缘半径, m 。

2) 外边界条件为:

$$p(\xi_e) = p_e \quad (11)$$

3) 内边界条件为:

$$p(r_w) = p_w \quad (12)$$

4) I区与II区的界面耦合条件:

$$p(r=x_f) = p(\xi=\xi_0) \quad (13)$$

将需要计算产量的整个时间离散,当离散时间足够小时,该离散时间段内的流动为稳态渗流^[27]。第一个离散时间段内的产油量与产水量可以通过式(2)、式(3)、式(8)及定解条件计算获得。对于第二个离散时间段,含水饱和度已经不是第一个离散时间段内的含水饱和度(s_{wc})。依据物质守恒有:第二个离散时间段内的饱和度等于第一个离散时间段内饱和度与第一个离散时间段内的存水量孔隙体积倍数之和。依据该关系,可以求得第二个离散时间段内的油藏含水饱和度,将其代入式(2)、式(3)、式(8)可以获得第二个离散时间段内的产油量与产水量。对于第三个离散时间段,求解产水量与产油量的思路与第二个离散时间段的产水量与产油量求取思路相同。直至最后一个离散时间段产油量与产水量计算完成,最终获得整个产量计算时间内的产油量与产水量。

建立的渗流数学模型包括两部分:裂缝线性流动与裂缝控制范围内的椭圆渗流。通过将椭圆等压线等效为发展的矩形,各矩形长边方向为平均等压线方向、短边为平均流线方向,等式(8)描述的是沿流线方向的流动,将裂缝控制范围内的2维椭圆渗流转化为沿着流线流动的1维渗流,缩短了程序运行成本。

2 压裂井产能模型应用

以永1沙四段永1-7井为例,该井位于沙四段砂砾岩体南部,渗透率较低($8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。因此,对该井采取了酸化压裂的措施,自1989年2月投产以来已累计产油 $3.7 \times 10^4 \text{ t}$ 。永1-7井所处位置见图2。

以生产井永1-7井为中心,再结合永1-53井、永1-22井、永1-6和永1-20井,最终构成了一个四边形井网。其中永1-7井射开了 1^2-4^2 小层,并进行了酸化压裂改造,此处选取 2^3 小层进行研究。已知注采井距为350 m,地层渗透率从压裂井到注水井间从 $4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 到 $16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 呈线性分布,启动压力梯度为0.01 MPa/m,裂缝长度与导流能力分别为150 m与 $0.4 \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,注采压差为25 MPa。利用上文所建立的压裂井产能计算方法,对永1-7井的产能进行预测。预测的理论产油量与实际产油量对比见图3。

从图3可知,随着水驱油程度的增加,地层渗流阻力逐渐减小,产液量增大;随着地层含水率的增长,产油量逐渐减小。通过将理论产油量、产液变化

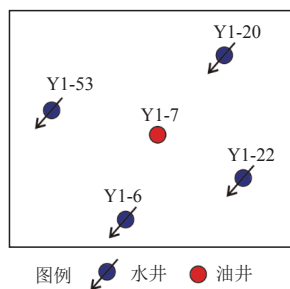


图2 永安油田东北部永1砂砾岩油藏永1-7井位置
Fig. 2 Position of Well-Y1-7 in Yong-1 glutenite reservoir of northeastern Yongan Oil Field

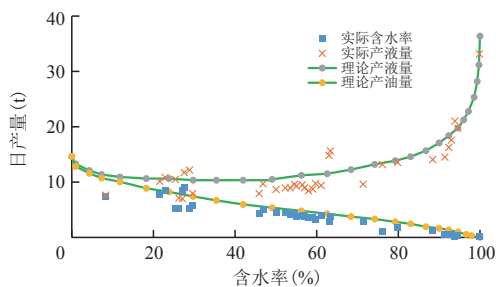


图3 永安油田东北部永1砂砾岩油藏永1-7井预测的理论产油量与实际产油量对比曲线
Fig. 3 Comparison of theoretical production and field data of Well-Y1-7 in Yong-1 glutenite reservoir of northeastern Yongan Oil Field

曲线与实际生产数据点进行对比,可以看出建立的产能预测方法计算结果与实际生产数据具有较好的一致性,证明了产能预测方法的正确性。

3 压裂井产能影响因素分析

以表1与图4中的参数为基础,采用控制变量方法,以定井底流压生产方式为前提开展裂缝导流能力、裂缝长度及储层非均质性对压裂井产能的影响研究。

3.1 裂缝导流能力对产能的影响

采取控制变量法,运用给出的油水两相流动压裂井产能计算方法,首先研究了裂缝导流能力对累积产油量的影响(图5)。通过研究可知,随着裂缝导流能力增加,累积产油量增加,但是增加的趋势慢慢

表1 压裂井产能基础参数

Table 1 Basic parameters of productivity for fracturing wells

参数	数值	参数	数值
裂缝导流能力($\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$)	0.4	注采压差(MPa)	30
储层厚度(m)	10	裂缝长度(m)	150
基质平均渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	10	注采井距(m)	300

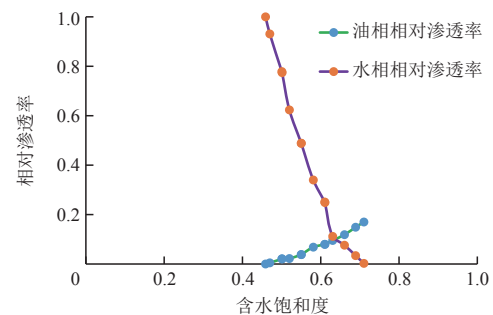


图4 相对渗透率数据
Fig. 4 Data of relative permeability

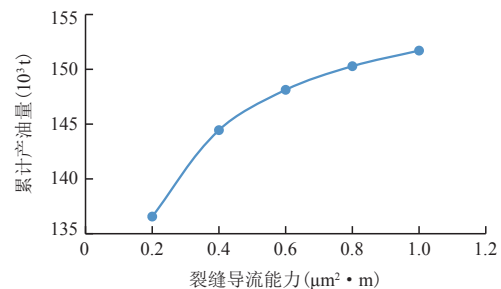


图5 导流能力对累积产油量的影响
Fig. 5 Influence of conductivity on cumulative oil production

变小。在裂缝导流能力大于 $0.4 \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$ 后,累计产油量上升的幅度明显减小。考虑该拐点值($0.4 \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$),选取导流能力分别为 $0.2, 0.4, 0.6 \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,开展裂缝导流能力对压裂井产能与含水率曲线的影响研究(图6)。从图6可以看出,同一含水率条件下,随着裂缝的导流能力越低,其产油量越小;但导流能力变大时,产油量增长幅度变小。

3.2 裂缝长度对产能的影响

采取控制变量法,运用给出的油水两相流动压裂井产能预测方法,分析了裂缝长度对压裂井产能的影响(图7)。

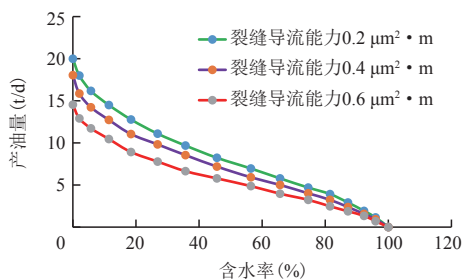


图6 导流能力对产油量与含水率关系曲线的影响

Fig. 6 Relation between production and water cut under different conductivity

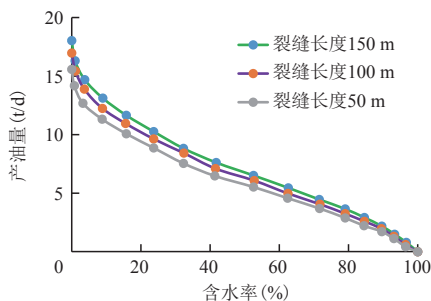


图7 裂缝长度对产油量与含水率曲线的影响

Fig. 7 Relation between production and water cut under different fracture length

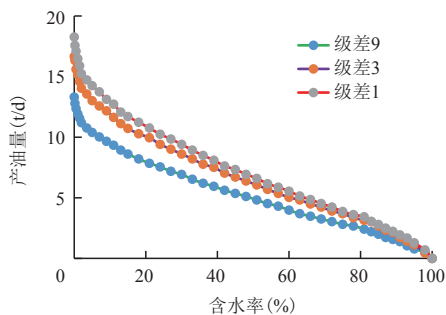


图8 渗透率级差对产油量与含水率曲线的影响

Fig. 8 Relation between production and water cut under different permeability ratio

响(图7)。从图7可知:压裂井产油量随着含水率的增长而逐渐降低,且降低趋势先快后稳定再变快,呈现出‘S’型。当在同一含水率条件下时,裂缝长度越大对应的压裂井产油量越大。裂缝长度的增加有利于降低井底附近的渗流阻力,故压裂井产油量增加。

3.3 渗透率级差对产能的影响

采取控制变量法,运用给出的油水两相流动压裂井产能预测方法,分析了非均质性(即渗透率级差)对压裂井产能的影响,见图8。由图8可知,随着渗透率级差从1增加至9,储层非均质性逐渐变强,压裂井产能降低,水驱油开发效果变小。

4 结论

1) 考虑储层各向异性、启动压力梯度及压裂井油水两相流动基础上,运用渗流理论与数值计算方法,建立了低渗透油藏油水两相流动压裂井产能预测方法。通过将该方法计算结果与矿场实际数据对比,验证了该产能预测方法的准确性。

2) 在含水率一定的条件下,裂缝导流能力越大,产油量越高;但随着导流能力变大,压裂井产油量的增加幅度变小。裂缝导流能力增加,累计产油量增加趋势变缓。裂缝长度变大,I区渗流阻力降低,压裂井产油量增加。渗透率级差增加(即储层非均质性增强)导致压裂井产能降低,水驱开发效果变差。

参考文献

- [1] 林旺,范洪富,王少军,等.致密油藏压裂水平井Blasingame曲线分析[J].油气地质与采收率,2019,26(6):122-128.
LIN Wang, FAN Hongfu, WANG Shaojun, et al. Blasingame curve analysis of fractured horizontal well in tight oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6): 122-128.
- [2] 王海栋,刘义坤.压裂裂缝充填覆膜支撑剂控水增油实验[J].油气地质与采收率,2019,26(6):136-142.
WANG Haidong, LIU Yikun. Experimental study on coated proppants packed in fractures for controlling water cut to increase oil production [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6): 136-142.
- [3] 姜瑞忠,刘秀伟,崔永正,等.非稳态窜流多段压裂水平井井底压力分析[J].油气地质与采收率,2019,26(5):86-95.
JIANG Ruizhong, LIU Xiuwei, CUI Yongzheng, et al. Bottomhole pressure analysis of multistage fractured horizontal well during unsteady crossflow [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 86-95.
- [4] 王锋,刘慧卿,吕广忠.低渗透油藏长缝压裂直井稳态产能

- 预测模型[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 84-86.
- WANG Feng, LIU Huiqing, LYU Guangzhong. Steady-state productivity prediction model for long-length fractured vertical well in low permeability oil reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 84-86
- [5] 陈映赫. 低渗透油层非达西渗流单井产能计算[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(3): 78-81.
- CHEN Yinghe. Productivity calculation for the individual well with non-darcy flow in low-permeability oil reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 78-81.
- [6] 熊健, 王小军, 吕雷. 低渗油藏不对称垂直裂缝井产能模型[J]. 科技导报, 2013, 31(22): 40-43.
- XIONG Jian, WANG Xiaojun, LYU Lei. Productivity model for asymmetrical vertical fracture well in low permeability oil reservoirs[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(22): 40-43.
- [7] 何理鹏, 宁正福, 薛永超, 等. 低渗油藏压裂直井最小流压界限求解及应用[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(3): 80-82.
- HE Lipeng, NING Zhengfu, XUE Yongchao, et al. Solution and application of minimum threshold flowing pressure of fracturing vertical well in low permeability reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(3): 80-82.
- [8] 张政, 程林松, 廉培庆, 等. 应力敏感油藏压裂直井分区模型[J]. 特种油气藏, 2010, 17(5): 77-80.
- ZHANG Zheng, CHENG Linsong, LIAN Peiqing, et al. Divisional model of fractured vertical well in stress-sensitive reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2010, 17(5): 77-80.
- [9] 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 & Gas Field, 2019, 26(6): 728-733.
- [10] 苑志旺, 郭平, 姜彬, 等. 深层火山岩气藏压裂直井复合渗流产能模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(3): 71-77.
- YUAN Zhiwang, GUO Ping, JIANG Bin, et al. Composite seepage productivity model of the fractured vertical well in deep volcanic gas reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 71-77.
- [11] 朱维耀, 岳明, 宋洪庆, 等. 考虑解吸扩散过程的煤层气压裂直井产能模型研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 953-960.
- ZHU Weiyao, YUE Ming, SONG Hongqing, et al. Productivity model of gas flow in CBM fractured reservoirs considering desorption and diffusion[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 953-960.
- [12] 朱维耀, 邓佳, 杨宝华, 等. 页岩气致密储层渗流模型及压裂直井产能分析[J]. 力学与实践, 2014, 36(2): 156-160.
- ZHU Weiyao, DENG Jia, YANG Baohua, et al. Seepage model of shale gas reservoir and productivity analysis of fractured vertical wells[J]. Mechanics in Engineering, 2014, 36(2): 156-160.
- [13] HAGOORT J. The productivity of a well completed with a vertical penny-shaped fracture[J]. SPE Journal, 2011, 16(2): 401-410.
- [14] LUO W, TANG C. Pressure-transient analysis of multiwing fractures connected to a vertical wellbore[J]. SPE Journal, 2015, 20(2): 360-367.
- [15] REN J J, GUO P. Performance of vertical fractured wells with multiple finite-conductivity fractures[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2019, 12: 978-987.
- [16] WAN Y Z, LIU Y W, LIU W C, et al. A numerical approach for pressure transient analysis of a vertical well with complex fractures[J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 32(4): 640-648.
- [17] WANG R F, GAO X H, SONG H Q, et al. Analytical modeling of coupled flow and geomechanics for vertical fractured well in tight gas reservoirs[J]. Open Physics, 2017, 15(1): 797-802.
- [18] 刘海龙, 刘传喜, 孙建芳, 等. 致密砂岩油藏部分射开压裂直井产能分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2018, 38(1): 37-44.
- LIU Hailong, LIU Chuanxi, SUN Jianfang, et al. The productivity analysis of vertical well with partial penetration fracture in tight sandstone reservoir[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2018, 38(1): 37-44.
- [19] WANG Y, YI X Y. Transient pressure behavior of a fractured vertical well with a finite-conductivity fracture in triple media carbonate reservoir[J]. Journal of Porous Media, 2017, 20(8): 707-722.
- [20] 崔传智, 吴忠维, 杨勇, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏压裂直井非稳态复合产能模型[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(1): 61-67.
- CUI Chuanzhi, WU Zhongwei, YANG Yong, et al. Unsteady compound productivity model of fractured vertical well in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 61-67.
- [21] GUO P, SUN Z, PENG C, et al. Transient-flow modeling of vertical fractured wells with multiple hydraulicfractures in stress-sensitive gas reservoirs[J]. Applied Sciences, 2019, 9: 1359-1381.
- [22] ZHU L, LIAO X, ZHAO X, et al. A study of a pressure analysis model for SRV fractured vertical wells in tight oil reservoir[J]. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 2019, 21(3): 313-314.
- [23] MUSKAT M. The flow of homogeneous fluids through porous media[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1937.
- [24] 张烈辉, 朱水桥, 王坤, 等. 高速气体非达西渗流数学模型[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(2): 165-167.
- ZHANG Liehui, ZHU Shuiqiao, WANG Kun, et al. A mathematic model for non-Darcy flow at high flow rate[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(2): 165-167.
- [25] 张茂林, 俞高明. 油气体系拟组分相平衡及物性参数计算[J]. 天然气工业, 1988, 18(4): 26-32.
- ZHANG Maolin, YU Gaoming. Pseudo-component phase equilibrium in oil and gas system and physical property parameter calculation[J]. Natural Gas Industry, 1988, 18(4): 26-32.
- [26] 邓英尔, 刘慈群, 王允诚. 垂直裂缝井两相非达西椭圆渗流特征线解、差分解及开发指标计算方法[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 83-86.
- DENG Yinger, LIU Ciqun, WANG Yuncheng. Characteristic solution and finite difference solution of two-phase percolation in the direction of normal of ellipse and calculation of development indexes[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(1): 83-86.
- [27] CUI C Z, WU Z W, WANG Z, et al. New prediction method for transient productivity of fractured five-spot patterns in low permeability reservoirs at high water cut stages[J]. Open Physics, 2018, 16(1): 499-508.

(编辑 尹淑容)