

致密油藏体积压裂水平井产量预测研究

林旺^{1,2}, 范洪富¹, 王志平², 童敏², 王少军², 刘立峰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:致密油藏水平井体积压裂后形成不同尺度的孔-缝介质,不同尺度介质中的渗流规律不同,产量预测难度大。为此,在总结前人对不同尺度介质渗流规律认识的基础上,建立致密油藏体积压裂水平井产量预测模型,并用油田实际数据对其准确性进行验证。同时,对致密油藏体积压裂水平井产量的影响因素进行分析,发现不同介质的应力敏感系数对产量的影响程度从大到小依次为次级裂缝应力敏感系数、人工主裂缝应力敏感系数、基质应力敏感系数;高速非线性系数对产量的影响较大,而启动压力梯度对产量的影响较小。

关键词:致密油藏 体积压裂 产量预测 应力敏感 启动压力梯度

中国分类号:TE357.1

文献标识码:A

Prediction on production of volume fractured horizontal well in tight reservoirs

LIN Wang^{1,2}, FAN Hongfu¹, WANG Zhiping², TONG Min², WANG Shaojun², LIU Lifeng²

(1.School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083; 2.PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083)

Abstract: Pore-fracture media with different scales are formed after volume fracturing of horizontal wells in tight reservoirs. The flow law of fluid in different scale media is different. It is difficult to predict the production. Based on summary of the previous understanding of the flow law of fluid in different scale media, the production prediction model of the volume fractured horizontal well in the tight reservoir was established, and its accuracy was proved by actual oilfield data. The influencing factors on production of the volume fractured horizontal well in the tight reservoir were analyzed. The stress sensitivity coefficients of different media was sorted based on their influence on production. From great to small, they are stress sensitivity coefficient of the secondary fracture, stress sensitivity coefficient of the main artificial fracture and stress sensitivity coefficient of the matrix. The high-speed nonlinear coefficient has great influence on the production, while the start-up pressure gradient has little influence on the production.

Key words: tight reservoirs; volume fracturing; production prediction; stress sensitivity; start-up pressure gradient

致密油藏孔喉细小,属于亚微米级-纳米级孔喉,渗流通道狭窄,颗粒小,微尺度效应明显,泄油半径小,无自然产能,开发难度大^[1-5]。针对致密油藏特征,目前中外主要采用水平井和体积压裂开发模式,通过大规模的体积压裂,形成裂缝网络,缩短流体从基质向裂缝的渗流距离,扩大接触面积,提高储层动用程度,实现资源的有效动用^[4]。

体积压裂的开发模式会使致密储层存在基质纳微米孔隙^[6-9]、人工主裂缝、天然裂缝与次级裂缝等不同尺度介质,流体渗流机理极为复杂,不同尺度的介质中渗流规律不同,在基质纳微米孔隙中是低速非达西渗流,在人工主裂缝中为高速非线性渗流,在中小尺度的天然裂缝与次级裂缝中则为达西渗流。目前,对于水平井压裂产量预测方面的研究

收稿日期:2018-07-27。

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)。

较多^[10-21],但针对致密油藏进行体积压裂后形成的多尺度、多流态复杂渗流问题考虑较少。为此,笔者通过研究水平井体积压裂后形成的多尺度、多介质、多流态耦合特征对产量的影响,建立致密油藏体积压裂水平井产量预测模型,并分析各因素对致密油藏体积压裂水平井产量的影响。

1 致密油藏渗流机理

1.1 储层应力敏感

随地层压力的降低,不同尺度孔-缝介质均发生收缩变形,且存在应力敏感效应。致密储层孔喉细小,应力敏感作用较强;对于人工裂缝,随地层压力的降低和受支撑剂失效等影响,人工裂缝发生变形或闭合,同样产生较强的应力敏感效应。目前对储层应力敏感效应的研究较多,回归关系式主要有幂律、指数和一元二次等关系式^[22-28],对于中国陆相致密储层来说,指数表达式能较好地描述致密储层应力敏感效应^[25],回归相关系数最高,其表达式为

$$K_{\omega} = K_{\omega 0} e^{-\alpha_{\omega} (p_0 - p)} \quad (1)$$

1.2 基质低速非线性渗流

中国诸多学者通过实验发现,由于致密油藏的渗透率很低,油气水赖以流动的通道细微、渗流阻力很大、液固界面的相互作用力显著,表现为一定的启动压力梯度^[29-32],致密储层基质孔喉半径一般小于1 μm,喉道细小,储层物性差,流体渗流阻力大,流体渗流符合低速非线性渗流。考虑启动压力梯度的影响,其运动学方程为

$$v = \frac{K_{\omega}}{\mu} (\nabla p - G) \quad (2)$$

1.3 裂缝高速非线性渗流

对于压裂投产井,人工主裂缝宽度一般大于0.1 mm,导流能力强,流体流速快,流体本身的惯性阻力不可忽略,流体在裂缝中的流动不仅需要克服摩擦阻力,还需要克服惯性阻力,因此流体在裂缝内渗流符合高速非线性渗流。采用Forchheimer二项式方程描述高速非线性渗流的运动学特征^[33],其运动学方程为

$$\nabla p = \frac{\mu v}{K_{\omega}} + \beta_{\omega} \rho |v| v \quad (3)$$

2 产量预测模型

2.1 物理模型

假设无限大油藏中有1口水平井经过射孔完井

后又进行体积压裂,形成网络状裂缝(图1),天然裂缝或次级裂缝与主裂缝、天然裂缝或次级裂缝之间形成交叉,由于储层岩石物性及地应力的非均质性,体积压裂后形成的裂缝无法精确描述,需将复杂缝网结构进行简化,假设人工压裂主裂缝沿水平井筒对称分布,主裂缝与水平井筒垂直,天然裂缝或次级裂缝与主裂缝垂直且与水平井筒平行,从而形成缝网模型。

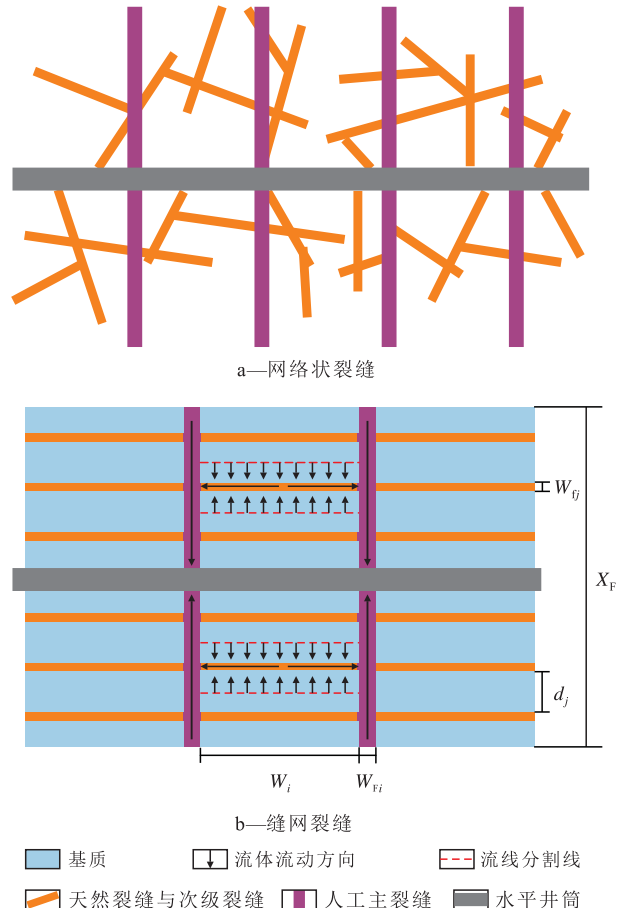


图1 复杂天然裂缝与水平井筒相交渗流物理模型

Fig.1 Physical model of complex natural fractures intersecting with horizontal wellbores

对于缝网模型,人工主裂缝沿水平井筒均匀分布,且各人工主裂缝几何、渗流参数相同,每条人工主裂缝具有相同的天然裂缝或次级裂缝,各天然裂缝或次级裂缝沿人工主裂缝均匀分布且几何、渗流参数也相同,流体从基质流向次级裂缝,然后由次级裂缝流向主裂缝,再从主裂缝流向井筒,基质、次级裂缝中的流体不直接流向井筒(图1b)。其他假设条件还包括:①储层等厚无限大。②储层孔隙介质随有效应力的变化而发生变形。③流体等温渗流,为微可压缩流体,无任何特殊的物理、化学现象发生。④裂缝具有有限导流能力,水平井具有无限导流能力。⑤忽略重力与毛管压力。⑥人工主裂

缝内流体渗流符合高速非线性渗流,天然裂缝或次级裂缝内流体符合达西渗流,基质内流体符合低速非线性渗流。流体渗流遵循质量守恒定律与势能守恒原理,不同孔缝介质间流体渗流满足交界面处流量和压力均相等的原则。

2.2 数学模型

2.2.1 流量方程

流体在人工主裂缝中的流动为平板内的平面流,在远离井筒的区域,则为平面单向流,在靠近井筒的区域,流线向井筒汇聚,为平面径向流。

人工主裂缝内平面单向流和平面径向流的流量表达式分别为

$$q_{Fa} = \frac{2W_f h X_f}{X_f - x} \times v \quad (4)$$

$$q_{Fr} = 2\pi r W_f v \quad (5)$$

天然裂缝或次级裂缝内的流体渗流可视为平面单向流,其流量表达式为

$$q_f = h W_f v \quad (6)$$

基质内流体渗流符合平面单向流,其流量表达式为

$$q_m = h d_f v \quad (7)$$

2.2.2 运动方程

根据对不同尺度介质渗流机理的研究,流体在人工主裂缝、天然裂缝或次级裂缝和致密储层基质孔喉内的渗流规律不同,其运动学方程分别为

$$\nabla p = \frac{\mu v}{K_f} + \beta_f \rho |v| v \quad (8)$$

$$v = \frac{K_f}{\mu} \nabla p \quad (9)$$

$$v = \frac{K_m}{\mu} (\nabla p - G) \quad (10)$$

2.2.3 应力敏感方程

根据对不同尺度介质应力敏感特征的研究,人工主裂缝、天然裂缝或次级裂缝、基质孔喉变形引起渗透率的应力敏感关系式分别为

$$K_m = K_{m0} e^{-\alpha_m(p_i - p_m)} \quad (11)$$

$$K_f = K_{f0} e^{-\alpha_f(p_i - p_f)} \quad (12)$$

$$K_r = K_{r0} e^{-\alpha_r(p_i - p_r)} \quad (13)$$

2.3 模型求解

假定第*i*条人工主裂缝流向井筒的流量为 q_i ,则 $q_{Fa} = q_{Fr} = q_i$;假定单条天然裂缝或次级裂缝流向人工主裂缝的流量为 q_f , N 条天然裂缝或次级裂缝同时流向人工主裂缝,则 $q_f = q_i/2N$;假定基质流向单条天然裂缝或次级裂缝的流量为 q_m ,天然裂缝或

次级裂缝中的流量由该裂缝2个侧面的基质供给,因此, $q_m = q_i/4N$ 。

水平井生产过程中,在人工主裂缝中渗流为高速非线性渗流,天然裂缝或次级裂缝为达西渗流,基质中为低速非线性渗流,考虑不同介质中流量之间的关系,将式(4)一式(7)进行转换,将流速分别用相应的流量表示,然后代入式(8)一式(10),并分别考虑基质与裂缝的应力敏感关系(式(11)一式(13))后,整理可得

$$p_i - p_{wf} = \int_{r_w}^{\frac{h}{2}} \left[\frac{q_i \mu}{2\pi K_{f0} e^{-\alpha_f(p_i - p_{wf})} W_f} \times \frac{1}{r} + \frac{\beta_f \rho q_i^2}{4\pi^2 r^2 W_f^2} \times \frac{1}{r^2} \right] dr + \int_{\frac{h}{2}}^{X_f} \left[\frac{q_i \mu (X_f - x)}{2K_{f0} e^{-\alpha_f(p_i - p_{wf})} W_f h X_f} + \frac{\beta_f \rho q_i^2 (X_f - x)^2}{4W_f^2 h^2 X_f^2} \right] dx + \int_0^{\frac{d_f}{2}} \left[\frac{q_i \mu y}{2NK_{m0} e^{-\alpha_m(p_i - p_{wf})} W_f h} \right] dy + \int_0^{\frac{d_f}{2}} \left[\frac{q_i \mu z}{2NK_{m0} e^{-\alpha_m(p_i - p_{wf})} d_f h} + G \right] dz \quad (14)$$

分离变量积分并再次整理可以得到单条人工主裂缝的产量计算式为

$$p_i - p_{wf} = \frac{q_i \mu}{2\pi K_{f0} e^{-\alpha_f(p_i - p_{wf})} W_f} \times \left(\frac{2}{h} - \frac{1}{r_w} \right) + \frac{\beta_f \rho q_i^2}{4\pi^2 r^2 W_f^2} \times \frac{1}{r^2} \times \left(\frac{2}{h^2} - \frac{1}{r_w^2} \right) - \frac{q_i \mu \left(X_f - \frac{h}{2} \right)}{2K_{f0} e^{-\alpha_f(p_i - p_{wf})} W_f h X_f} - \frac{\beta_f \rho q_i^2 \left(X_f - \frac{h}{2} \right)^2}{4W_f^2 h^2 X_f^2} + \frac{q_i \mu d_f}{4NK_{m0} e^{-\alpha_m(p_i - p_{wf})} W_f h} + \frac{q_i \mu d_f}{4NK_{m0} e^{-\alpha_m(p_i - p_{wf})} d_f h} + G \frac{d_f}{2} \quad (15)$$

根据假设条件,单井产量为所有人工主裂缝流向井筒的产量之和,即

$$q = \sum_{i=1}^n q_i \quad (16)$$

3 模型验证及产量参数敏感性分析

3.1 模型验证

研究区致密油藏为湖相沉积,平均储层厚度为13 m,平均孔隙度为9.7%,平均渗透率为0.17 mD,地层原油密度为0.826 8 g/cm³,溶解气油比为122.64,体积系数为1.335 7,地层原油粘度为0.578

mPa·s。研究区采用水平井体积压裂进行开发,水平井段长度为1 243.7~1 494.2 m,裂缝半长为272~343 m,对该区块5口井的初期产量进行计算,并与实际产量进行对比,结果(表1)显示计算平均符合率达到97.4%,由此验证产量预测模型是准确可靠的。

表1 模型验证基础数据及结果
Table1 Basic data and results verified by model

井号	水平井段长度/m	压裂段数	裂缝半长/m	产量/(m ³ ·d ⁻¹)		符合率/%
				计算值	实际值	
1	1 320.6	13	301	10.2	10.4	98.1
2	1 284.8	13	272	14.2	14.3	99.5
3	1 494.2	10	277	12.0	11.6	95.9
4	1 243.7	14	338	13.8	13.3	95.7
5	1 433.0	8	343	15.0	14.7	97.6

3.2 应力敏感系数对产量的影响

人工主裂缝、天然裂缝或次级裂缝、基质3种介质都存在应力敏感效应,3种介质的应力敏感系数对产量的影响(图2)可以看出,当井底压力较高、产量较低时,应力敏感系数对产量的影响可以忽略不计。这是因为,储层渗透率应力敏感现象的本质是渗透率随着有效压力的降低而降低,当产量较小时,储层渗流能力远远超过产量的渗流需求,渗透率的减小不足以影响到储层的渗流阻力;随着产量的增加,渗流阻力也增加,当应力敏感造成的渗透率减小不足以满足流体的渗流需求时,应力敏感系数对产量的影响随之显现出来。

致密油藏体积压裂水平井无阻流量随着储层应力敏感系数的增加而减小,但不同介质应力敏感系数对无阻流量的影响规律不同(图3)。无阻流量随着基质与人工主裂缝的应力敏感系数的增加而降低的速度先慢后快,当基质应力敏感系数小于0.2 MPa⁻¹时,对无阻流量的影响较小,当基质应力敏感系数达到0.4 MPa⁻¹时,无阻流量降低19.4%;人工主裂缝的应力敏感系数对无阻流量的影响比基质应力敏感系数对无阻流量的影响要大,当人工主裂缝应力敏感系数小于0.05 MPa⁻¹时,其对无阻流量的影响很小,当人工主裂缝应力敏感系数达到0.2 MPa⁻¹时,无阻流量降低36.9%;不同于人工主裂缝与基质应力敏感系数对无阻流量的影响,无阻流量随着天然裂缝或次级裂缝应力敏感系数的增加而降低的速度先快后慢,当天然裂缝或次级裂缝应力敏感系数从0增加到0.02 MPa⁻¹时,无阻流量降低26.9%,天然裂缝或次级裂缝应力敏感系数细微的变化就能使无阻流量产生较大变化,当天然裂缝或

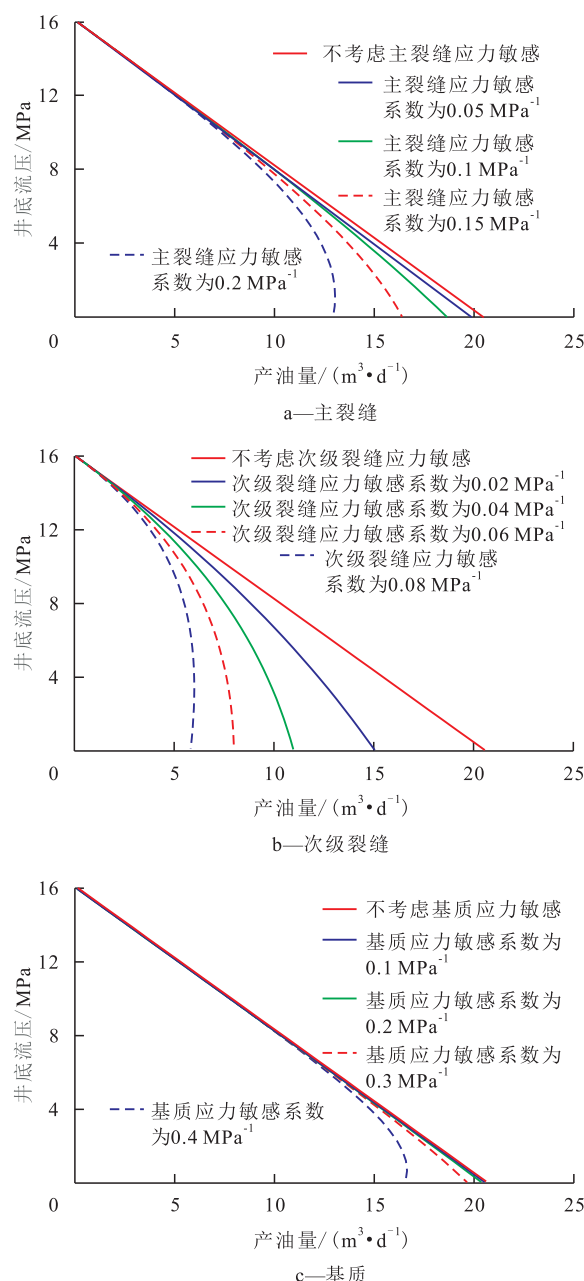


图2 不同介质应力敏感系数对产量的影响

Fig.2 Effect of different stress sensitivity coefficients of various media on production

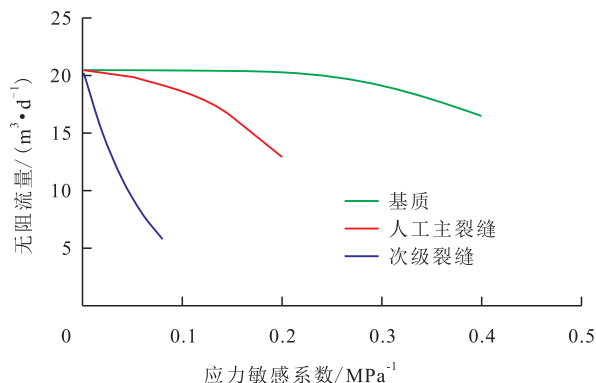


图3 不同介质应力敏感系数对无阻流量的影响

Fig.3 Effect of different stress sensitivity coefficients of various media on AOF

次级裂缝应力敏感系数达到 0.08 MPa^{-1} 时,无阻流量降低 71.7% 。由此可见,天然裂缝或次级裂缝应力敏感系数对体积压裂水平井无阻流量的影响最大,其次是人工主裂缝应力敏感系数,基质应力敏感系数对无阻流量的影响最小。

3.3 高速非线性系数对产量的影响

从高速非线性系数对无阻流量的影响(图4)可以看出,随着高速非线性系数的增加,无阻流量随之降低,降低的速度也越来越快,当高速非线性系数从 0 增至 10^{-8} m^{-1} 时,无阻流量仅降低 0.3% ,可以忽略不计,当高速非线性系数大于 10^{-8} m^{-1} 时,其对无阻流量的影响呈指数变化,当高速非线性系数增至 10^{-6} m^{-1} 时,无阻流量降低 46.4% 。由于高速非线性系数随着流量的增加而增加,当无阻流量较小时,高速非线性系数也较小,其对无阻流量的影响可以忽略不计,而当无阻流量较大时,高速非线性系数对无阻流量的影响较大。

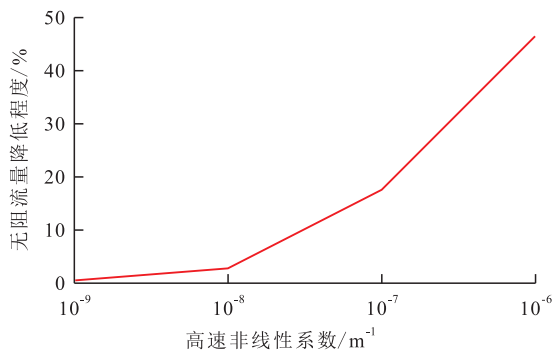


图4 高速非线性系数对无阻流量的影响
Fig.4 Effect of high-speed nonlinearity coefficient on AOF

3.4 启动压力梯度对产量的影响

由于人工主裂缝、天然裂缝与次级裂缝的渗透率较大,不存在启动压力梯度,只在基质中考虑启动压力梯度对产量的影响(图5)。致密油藏体积压裂水平井IPR曲线随基质启动压力梯度的增加而整体下移,当基质启动压力梯度增加到 0.08 MPa/m 时,无阻流量降低 2.5% ,启动压力梯度对产量的影

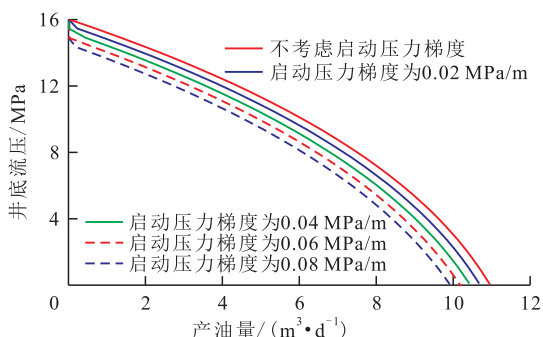


图5 启动压力梯度对产量的影响

Fig.5 Effect of start-up pressure gradient on production

响较小。

4 结论

在综合考虑不同尺度介质应力敏感、基质启动压力梯度和人工主裂缝高速非线性渗流对产量影响的基础上,建立体积压裂水平井产量预测模型,实际油田数据证明该方法是可靠可行的,为致密油藏体积压裂水平井的产量预测提供了一种有效的方法;利用该模型分析发现,高速非线性系数对产量的影响较大,而启动压力梯度对产量的影响较小,不同介质的应力敏感系数对体积压裂水平井产量的影响规律和程度不同,次级裂缝应力敏感系数对产量的影响程度最大,其次是人工主裂缝应力敏感系数,基质应力敏感系数对产量的影响程度最小,因此,可以通过改善次级裂缝中支撑剂的支撑效果,减小次级裂缝应力敏感效应,从而提高致密油藏体积压裂水平井产量。

符号解释:

K_{ω} ——介质 ω 渗透率,mD; K_{ω_0} ——介质 ω 初始渗透率,mD; α_{ω} ——介质 ω 渗透率应力敏感系数, MPa^{-1} ; p_0 ——初始压力,MPa; p ——地层压力,MPa; v ——流体流速, m/s ; μ ——地层流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; ∇p ——压力梯度, MPa/m ; G ——启动压力梯度, MPa/m ; β_{ω} ——介质 ω 高速非线性系数, m^{-1} ; ρ ——地层流体密度, g/cm^3 ; v ——流体流速, m/s ; W_i ——第 i 条与第 $i+1$ 条人工主裂缝之间的距离,m; W_{fi} ——第 i 条人工主裂缝宽度,m; j ——天然裂缝或次级裂缝序号; W_{fj} ——第 j 条天然裂缝或次级裂缝宽度,m; d_j ——第 j 条与第 $j+1$ 条天然裂缝或次级裂缝之间的距离,m; X_f ——人工主裂缝半长,m; q_{fa} ——人工主裂缝内平面单向流的流量, m^3/d ; W_f ——人工主裂缝宽度,m; h ——地层厚度,m; x,y,z,r ——人工主裂缝、天然裂缝或次级裂缝、基质积分变量; q_{fr} ——人工主裂缝内平面径向流的流量, m^3/d ; q_f ——天然裂缝或次级裂缝流向人工主裂缝的流量, m^3/d ; W_f ——天然裂缝或次级裂缝宽度,m; q_m ——基质流向天然裂缝或次级裂缝的流量, m^3/d ; d_f ——相邻2条人工主裂缝间距离,m; K_f ——人工主裂缝渗透率,mD; β_f ——人工主裂缝高速非线性系数, m^{-1} ; K_f ——天然裂缝或次级裂缝渗透率,mD; K_m ——基质渗透率,mD; K_{m_0} ——基质原始渗透率,mD; α_m ——基质渗透率应力敏感系数, MPa^{-1} ; p_i ——原始地层压力,MPa; p_m ——基质压力,MPa; K_0 ——天然裂缝或次级裂缝初始渗透率,mD; α_f ——天然裂缝或次级裂缝应力敏感系数, MPa^{-1} ; p_f ——天然裂缝或次级裂缝内压力,MPa; K_{f_0} ——人工主裂缝初始渗透率,mD; α_f ——人工主裂缝应力敏感系数, MPa^{-1} ; p_f ——人工主裂缝内压力,MPa; i ——

人工主裂缝序号; q_i ——第 i 条人工主裂缝流向井筒的流量, m^3/d ; N ——人工主裂缝对应的次级裂缝条数; p_{wf} ——第 i 条人工主裂缝井底流压, MPa ; r_w ——井筒半径, m ; d_r ——相邻 2 条天然裂缝或次级裂缝距离, m ; q ——压裂水平井总流量, m^3/d ; n ——水平井人工主裂缝条数。

参考文献:

- [1] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 343-350.
JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [2] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional oil and gas geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [3] 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.
- [4] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Type, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [5] 朱永才, 姜懿洋, 吴俊军, 等. 吉木萨尔凹陷致密油储层物性定量预测[J]. 特种油气藏, 2017, 24(4): 42-47.
ZHU Yongcai, JIANG Yiyang, WU Junjun, et al. Quantitative prediction of tight oil reservoir properties in Jumusar Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(4): 42-47.
- [6] 姚泾利, 邓秀芹, 赵彦德, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 150-158.
YAO Jingli, DENG Xiuqin, ZHAO Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150-158.
- [7] 孙兵, 刘立峰, 丁江辉. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长 7 致密油储层特征及其综合评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(4): 147-152.
SUN Bing, LIU Lifeng, DING Jianghui. Characteristics and comprehensive evaluation of Chang-7 tight oil reservoirs in Zhenbei Yanchang Formation of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing, 2017, 36(4): 147-152.
- [8] 张浩, 陈刚, 朱玉双, 等. 致密油储层微观孔隙结构定量表征: 以鄂尔多斯盆地新安边油田长 7 储层为例[J]. 石油实验地质, 2017, 39(1): 112-119.
ZHANG Hao, CHEN Gang, ZHU Yushuang, et al. Quantitative characterization of microscopic pore throat structure in tight sandstone oil reservoirs: A case study of Chang7 reservoir in Xin'anbian oil field, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(1): 112-119.
- [9] 吴凡, 孙黎娟, 何江. 孔隙度、渗透率与净覆压的规律研究和应用[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(4): 23-25.
WU Fan, SUN Lijuan, HE Jiang. The research and application of permeability, porosity and net overburden pressure laws[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1999, 21(4): 23-25.
- [10] 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.
- [11] 李笑萍. 穿过多条垂直裂缝的水平井渗流问题及压降曲线[J]. 石油学报, 1996, 17(2): 91-97.
LI Xiaoping. Fluid flow through pay zones in relation to drawdown profiles in a horizontal well intersecting several vertical fractures[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(2): 91-97.
- [12] 范子菲, 方宏长, 牛新年. 裂缝性油藏水平井稳态解产能公式研究[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(3): 52-57.
FAN Zifei, FANG Hongchang, NIU Xinnian. A steady solution formula of horizontal well productivity in a fractured reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(3): 52-57.
- [13] 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.
- [14] 李廷礼, 李春兰. 低渗油气藏压裂水平井产能电解模拟实验研究[J]. 中国海上油气, 2005, 17(6): 389-393, 397.
LI Tingli, LI Chunlan. The electrolytic simulation experiment research of fractured horizontal well's productivity in low permeability reservoirs [J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(6): 389-393, 397.
- [15] 李廷礼, 李春兰, 吴英, 等. 低渗透油藏压裂水平井产能计算方法新方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(2): 48-52.
LI Tingli, LI Chunlan, WU Ying, et al. A new way to calculate fractured horizontal well's productivity in low permeability oil reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(2): 48-52.
- [16] 徐严波, 齐桃, 杨凤波, 等. 压裂后水平井产能预测新模型[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 89-91.
XU Yanbo, QI Tao, YANG Fengbo, et al. New model for productivity test of horizontal well after hydraulic fracturing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 89-91.
- [17] 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.
- [18] 郝明强, 王晓冬, 胡永乐. 压敏性特低渗透油藏压裂水平井产能计算[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(6): 99-

104.
HAO Mingqiang, WANG Xiaodong, HU Yongle. Productivity calculation of multi-fractured horizontal well in ultra-low permeability pressure-sensitive reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2011, 35(6): 99-104.
- [19] 王志平, 朱维耀, 岳明, 等. 低、特低渗透油藏压裂水平井产能计算方法[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(7): 750-754.
WANG Zhiping, ZHU Weiyao, YUE Ming, et al. A method to predict the production of fractured horizontal wells in low/ultra-low permeability reservoirs [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(7): 750-754.
- [20] 李龙龙, 姚军, 李阳, 等. 分段多簇压裂水平井产能计算及其分布规律[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4): 457-461.
LI Longlong, YAO Jun, LI Yang, et al. Productivity calculation and distribution of staged multi-cluster fractured horizontal wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4): 457-461.
- [21] 方思冬, 战剑飞, 黄世军, 等. 致密油藏多角度裂缝压裂水平井产能计算方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 84-89.
FANG Sidong, ZHAN Jianfei, HUANG Shijun, et al. A computational method for productivity of arbitrary angular fractured horizontal well in tight oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 84-89.
- [22] 石玉江, 孙小平. 长庆致密碎屑岩储集层应力敏感性分析[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 85-87.
SHI Yujiang, SUN Xiaoping. Stress sensitivity analysis of Changqing tight clastic reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 85-87.
- [23] 宋传真, 郑荣臣. 致密低渗气藏储层应力敏感性及其对单井产能的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 47-49.
SONG Chuazhen, ZHENG Rongchen. Stress sensitivity of low-permeability tight gas reservoir and its effect on single well productivity [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(6): 47-49.
- [24] 于忠良, 熊伟, 高树生, 等. 致密储层应力敏感性及其对油田开发的影响[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 95-98.
YU Zhongliang, XIONG Wei, GAO Shusheng, et al. Stress sensitivity of tight reservoir and its influence on oilfield development [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 95-98.
- [25] 刘建军, 刘先贵. 有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响[J]. 地质力学学报, 2001, 7(1): 41-44.
LIU Jianjun, LIU Xiangui. The effect of effective pressure on porosity and permeability of low permeability porous media [J]. Journal of Geomechanics, 2001, 7(1): 41-44.
- [26] 谷建伟, 于秀玲, 马宁, 等. 考虑应力敏感的致密气藏水平井产能计算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(6): 57-62.
GU Jianwei, YU Xiuling, MA Ning, et al. Productivity calculating method of the horizontal wells in tight gas reservoirs considering the stress sensitivity [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(6): 57-62.
- [27] 刘仁静, 刘慧卿, 张红玲, 等. 低渗透储层应力敏感性及其对石油开发的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 2 697-2 702.
LIU Renjing, LIU Huiqing, ZHANG Hongling, et al. Study of stress sensitivity and its influence on oil development in low permeability reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 2 697-2 702.
- [28] 赵玉集, 王学武, 凌浩川. 致密油藏流体渗流规律实验研究[J]. 科技导报, 2014, 32(28/29): 59-63.
ZHAO Yuji, WANG Xuewu, LING Haochuan. Experimental study on the porous flow law of tight oil reservoir [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(28/29): 59-63.
- [29] 黄延章. 低渗透油层非线性渗流特征[J]. 特种油气藏, 1997, 4(1): 9-14.
HUANG Yanzhang. Nonlinear percolation feature in low permeability reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1997, 4(1): 9-14.
- [30] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
LI Daopin. Low permeability sandstone oilfield development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [31] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
HUANG Yanzhang. Percolation mechanism of low permeability reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [32] 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.
LÜ Chengyuan, WANG Jian, SUN Zhigang. An experimental study on starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 86-89.
- [33] FORCHHEIMER P F. Wasserbewegung durch Boden [J]. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1901, 45(5): 1 781-1 788.