

致密油藏多级压裂水平裂缝井不稳态产能分析

刘波涛^{1,2},李清泉³,张福祥⁴,王新海^{1,2,3},李国亮⁵,卢冲⁶,岳海玲⁷,王钊⁸

- (1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 武汉,430100; 2. 长江大学 计算机科学学院,湖北 荆州 434023;
3. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室,北京 昌平 102249; 4. 中国石油 塔里木油田分公司,新疆 库尔勒 841000;
5. 中国石油 西部钻探工程有限公司 试油公司,新疆 克拉玛依 834027; 6. 中国石油 青海油田分公司 采油一厂,青海 茫崖 816499; 7. 中国石油 长城钻探工程有限公司 地质研究院,辽宁 盘锦 124010; 8. 中国石油 伊拉克公司,北京 100724)

摘要:新疆准噶尔盆地克拉玛依油田吉木萨尔(JMSE)凹陷二叠系芦草沟组(P_2l)是致密油储层主要层位。为提高单井产能,目前多采用多级分段压裂技术。以往对于水力压裂的研究多集中于压裂缝为垂直裂缝的情况,但目前已认识的垂直裂缝模型不能解释该区块实际资料,且通过理论及实验研究表明,由于天然裂缝方位与地应力的匹配关系,该区块在实际压裂过程中易产生水平裂缝。因此,目前的研究导致该储层在实施压裂生产而形成水平裂缝时缺乏理论指导。文中基于质量守恒定律,在同时考虑启动压力梯度、压力敏感性及有限导流压裂缝的情况下,建立了双孔单渗油藏中多级压裂水平裂缝井的无因次数学模型,采用隐式差分法和共轭梯度算法对无因次模型进行求解。通过数值模拟的方法依次研究了启动压力梯度、地层非均质系数、窜流系数、压力敏感系数、压裂缝导流能力、压裂缝条数对不稳态产能的影响。研究结果表明,裂缝参数及地层参数均对产能曲线有影响,故而在优选该类油藏的压裂方案时不仅要考虑裂缝参数,还要考虑到在地层压力降落时地层参数所带来的影响。

关键词:启动压力梯度;双孔介质;多级压裂;水平裂缝;产能分析;致密油藏

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Rate transient analysis of multistage fractured wells with horizontal fractures in tight oil reservoirs

Liu Botao^{1,2}, Li Qingquan³, Zhang Fuxiang⁴, Wang Xinhai^{1,2,3}, Li Guoliang⁵, Lu Chong⁶, Yue Hailing⁷, Wang Zhao⁸

- (1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. School of Computer Science, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China; 3. Key Laboratory for Petroleum Engineering of Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China; 5. Testing Oil Company, PetroChina Western Drilling Engineering Company Limited, Karamay, Xinjiang 834027, China; 6. The 1st Oil Production Plant, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Mangya, Qinghai 816499, China; 7. Geology Research Institute, PetroChina Changcheng Drilling Engineering Company Limited, Panjin, Liaoning 124010, China; 8. PetroChina Iraqi Corporation, Beijing 100724, China)

Abstract: Permian Lucaogou Formation (P_2l) in Jimusaer (JMSE) sag of Karamay oilfield is a typical representative of tight oil reservoirs in Junggar Basin. Staged fracturing technology is commonly used to improve the productivity of single well. While previous researches were more concentrated on the cases of vertical fractures, the vertical fracture model could not explain the actual data in the blocks. At the same time, the theoretical and experimental studies show that horizontal cracks are easy to form during the process of fracturing according to the matching relationship between natural fracture azimuth and geostress. Therefore there is a lack of theoretical guidance in study area. Based on the law of conservation of mass and considerations of starting pressure gradient, pressure sensitivity and finite conductivity fractures, a dimensionless mathematical model has been set up to study the flow in the multistage horizontal fracturing fractured well in dual porosity and single permeability reservoir in this paper. And numerical solutions of the model are obtained by using implicit difference method and conjugate gradient algorithms. The effects on unsteady productivity of starting pressure gradient, formation heterogeneity coefficient, interporosity flow coefficient, pressure sensitive coefficient, conductivity and the number of cracks are studied through numerical simulation in turn. Research results show that the fracture parameters and formation parameters affect the productivity curves. So it is necessary to consider both fracture parameters and the pressure decline

收稿日期:2013-10-08;修订日期:2014-01-06。

第一作者简介:刘波涛(1980—),男,博士研究生、讲师,非常规油气开发。E-mail:liubotao920@163.com。

基金项目:“十二五”国家油气重大专项(2011ZX05015-002);国家科技重大专项(2012E-34-14);油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学)开放基金资助项目(K2013-27)。

reasonably, as choosing an appropriate fracturing scheme to obtain maximum productivity.

Key words: starting pressure gradient, double porosity media, multistage fractured, horizontal fracture, productivity analysis, tight oil reservoir

致密油已成为全球非常规石油勘探开发的新热点,其基本特征及勘探技术主要来自北美海相致密油勘探研究成果。致密油作为重要战略接替资源,勘探潜力巨大,是我国“十二五”与“十三五”期间重要的储量增长点。新疆准噶尔盆地二叠系吉木萨尔(JMSE)凹陷芦草沟组上下甜点的覆压渗透率整体小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具典型的致密油储层特征。目前,为提高单井产量多采用分段多级水力压裂技术。然而以往对于水力压裂的研究多集中于压裂缝为垂直裂缝的情况,鲜有关于多级压裂水平裂缝井模型方面研究报道,导致该区块在生产实践时缺乏相应理论指导。

1961 年, Hartsock 等人采用物理模拟方法对水平裂缝对油井动态的影响进行了研究^[1]。1974 年, Gringarten 应用格林函数法研究了均质油藏水平裂缝井动态^[2]。1987 年, Sung W Errekin 研究了水平井、水平缝、垂直缝在气田的开发中的效果对比,但文中没有给出模拟水平缝时所采用的数学模型^[3],近年又有不少国外学者就水力压裂形成水平裂缝的应力分布及施工设计进行了分析^[4-7]。1988 年衣同春利用渗流阻力法求解地层中的渗流阻力,得出压裂后产生水平缝以后的增产倍数的计算公式^[8]。王鸿勋总结了评价水平缝形成以后油井产能的两种方法,一种是将水平缝看做无限大导流能力裂缝,另一种是认为水平缝的存在相当于在地层中形成了不连续的径向渗透率^[9]。胥元刚考虑了变导流能力条件下的整体压裂优化设计方法,提出裂缝初始导流能力和导流能力衰减系数对整体压裂设计结果可能带来显著影响^[10]。2009 年,张公社等人据平面径向不稳定渗流方程和双区界面连续条件,建立了流体以恒定流量流入井筒条件下的压力降落数学模型^[11]。2010 年,任岚等人结合油藏工程理论和数值模拟技术,考虑裂缝导流能力随时间的变化和地层弹性膨胀能等因素对压后产量的影响,建立了含水油藏水平裂缝井中油藏-裂缝系统的压力方程和饱和度方程,采用有限差分法对压力方程和饱和度方程进行了离散求解^[12]。

本文基于水平裂缝井渗流特征,在考虑了启动压力梯度、地层渗透率应力敏感、地层各向异性等情况下,建立了双孔介质多级压裂水平裂缝井二维柱坐标模型,并研究了启动压力梯度、地层非均质系数、窜流系数、压裂缝导流能力、压裂缝条数等参数对非稳态产能的影响。

1 多级压裂水平裂缝井模型

在克拉玛依油田 J 字号区块分段多级压裂的开发

过程中,其经历的渗流阶段依次为:压裂缝径向流动段—地层垂向线性流段—基质向裂缝流动的窜流段—系统径向流段—边界响应段^[13]。

为方便模型的求解,作以下基本假设:① 油藏呈圆筒状,定压边界,厚度为 h ,油藏原始地层压力为 P_i ,地层为双重孔隙介质;②油井完全穿过地层,地层上、下边界不渗透,忽略重力的影响;③考虑单相流体渗流,压缩系数和孔隙度不随压力变化;④考虑压裂缝为以井筒中心为圆心的薄层圆盘,为有限导流压裂缝,地层流体仅通过天然裂缝向压裂缝流动,再通过压裂缝流入井筒,压裂缝段数为 n ,压裂缝半长为 x_f ,压裂缝高度为 W_f ,压裂缝孔隙度为 Φ_f ,压裂缝渗透率为 K_f ;⑤开井后保持定井底压力生产,考虑表皮效应。在此基础上建立理想化数学模型(图 1)。

压裂缝渗流方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r e^{-\alpha_f (p_{fi} - p_f)} \frac{\partial p_f}{\partial r} \right) + \frac{2K_{fi} e^{-\alpha_f (p_{fi} - p_f)}}{K_{fi}} \frac{\partial^2 p_f}{\partial y^2} = \frac{\mu \Phi_f C_f}{3.6 K_{fi}} \frac{\partial p_f}{\partial t} \tag{1}$$

天然裂缝渗流方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r e^{-\alpha_f (p_{fi} - p_f)} \left(\frac{\partial p_f}{\partial r} - \eta \right) \right] + \frac{\partial^2 p_f}{\partial y^2} - C_A \frac{K_{mi}}{K_{fi}} e^{-\alpha_m (p_{mi} - p_m)} (p_m - p_f) = \frac{\mu \Phi_f C_f}{3.6 K_{fi}} \frac{\partial p_m}{\partial t} \tag{2}$$

地层基质渗流方程:

$$- C_A K_{mi} e^{-\alpha_m (p_{mi} - p_m)} (p_m - p_f) = \frac{\mu \Phi_m C_m}{3.6} \frac{\partial p_m}{\partial t} \tag{3}$$

内边界条件:

$$p_{wf} = \left(p_f - S r \frac{\partial p_f}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_w} \tag{4}$$

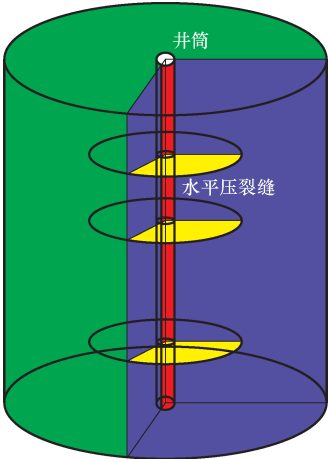


图 1 多级压裂水平裂缝井模型示意图

Fig. 1 Model of wells with multistage fractured horizontal fractures

外边界条件:

$$p|_{r=r_e}=p_i \tag{5}$$

初始条件:

$$p_{mi}=p_{fi}=p_{Fi}=p_i \tag{6}$$

同时可以写出产量计算公式:

$$q=n\frac{172.8\pi K_{Fi}H}{\mu}re^{-\alpha_F(p_F-p_{Fi})}\left(\frac{\partial p_F}{\partial r}\right)\bigg|_{r=r_w} \tag{7}$$

取无量纲量: $p_{\text{D}}=\frac{p_i-p_l}{p_i-p_{\text{wf}}}$ (l 取 F, f 或 m, 分别代表压裂缝、天然裂缝和地层基质);

$$h_{\text{D}}=\frac{h}{x_{\text{F}}};r_{\text{D}}=\frac{r}{x_{\text{F}}};t_{\text{D}}=\frac{3.6K_{\text{F}}t}{\mu x_{\text{F}}(w_{\text{f}}\Phi_{\text{F}}C_{\text{F}}+h\Phi_{\text{f}}C_{\text{f}}+h\Phi_{\text{m}}C_{\text{m}})};$$

$$\lambda_{\text{D}}=C_{\text{A}}x_{\text{F}}^2\frac{K_{\text{mi}}}{K_{\text{fi}}};\alpha_{\text{D}}=\alpha_{\text{l}}(p_i-p_{\text{wf}});$$

$$L_{\text{FD}}=\frac{K_{\text{Fi}}w_{\text{f}}}{K_{\text{fi}}x_{\text{F}}};\eta_{\text{D}}=-\frac{\eta x_{\text{F}}}{p_i-p_{\text{wf}}};$$

$$\omega_{\text{FD}}=\frac{w_{\text{F}}\Phi_{\text{F}}C_{\text{F}}}{w_{\text{F}}\Phi_{\text{F}}C_{\text{F}}+h\Phi_{\text{f}}C_{\text{f}}+h\Phi_{\text{m}}C_{\text{m}}};$$

$$\omega_{\text{D}}=\frac{h\Phi_{\text{f}}C_{\text{f}}}{w_{\text{F}}\Phi_{\text{F}}C_{\text{F}}+h\Phi_{\text{f}}C_{\text{f}}+h\Phi_{\text{m}}C_{\text{m}}};$$

$$\omega_{\text{mD}}=\frac{h\Phi_{\text{m}}C_{\text{m}}}{w_{\text{F}}\Phi_{\text{F}}C_{\text{F}}+h\Phi_{\text{f}}C_{\text{f}}+h\Phi_{\text{m}}C_{\text{m}}};$$

$$q_{\text{D}}=\frac{q\mu}{172.8\pi K_{\text{Fi}}h(p_i-p_{\text{wf}})}^{\circ}$$

上述有因次模型转化为无因次模型,则压裂缝渗流方程为:

$$\frac{1}{r_{\text{D}}}\frac{\partial}{\partial r_{\text{D}}}\left(r_{\text{D}}e^{-\alpha_{\text{FD}}p_{\text{FD}}}\frac{\partial p_{\text{FD}}}{\partial r_{\text{D}}}\right)+\frac{w_{\text{FD}}e^{-\alpha_{\text{D}}p_{\text{D}}}}{L_{\text{FD}}}\frac{\partial^2 p_{\text{D}}}{\partial y_{\text{D}}^2}=\frac{\omega_{\text{FD}}}{w_{\text{FD}}}\frac{\partial p_{\text{FD}}}{\partial t_{\text{D}}} \tag{8}$$

天然裂缝渗流方程为:

$$\frac{1}{r_{\text{D}}}\frac{\partial}{\partial r_{\text{D}}}\left[r_{\text{D}}e^{-\alpha_{\text{D}}p_{\text{D}}}\left(\frac{\partial p_{\text{D}}}{\partial r_{\text{D}}}-\eta_{\text{D}}\right)\right]+\frac{\partial^2 p_{\text{D}}}{\partial y_{\text{D}}^2}-\lambda_{\text{D}}e^{-\alpha_{\text{mD}}p_{\text{mD}}}(p_{\text{mD}}-p_{\text{D}})=\frac{L_{\text{FD}}\omega_{\text{D}}}{h_{\text{D}}w_{\text{FD}}}\frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial t_{\text{D}}} \tag{9}$$

地层基质渗流方程为:

$$-\lambda_{\text{D}}e^{-\alpha_{\text{mD}}p_{\text{mD}}}(p_{\text{mD}}-p_{\text{D}})=\frac{L_{\text{FD}}\omega_{\text{mD}}}{h_{\text{D}}w_{\text{FD}}}\frac{\partial p_{\text{mD}}}{\partial t_{\text{D}}} \tag{10}$$

内边界条件:

$$p_{\text{wFD}}=\left(p_{\text{FD}}-S r_{\text{D}}\frac{\partial p_{\text{FD}}}{\partial r_{\text{D}}}\right)\bigg|_{r_{\text{D}}=\frac{r_{\text{w}}}{x_{\text{F}}}} \tag{11}$$

外边界条件:

$$p_{\text{D}}|_{r_{\text{D}}=\frac{r_{\text{e}}}{x_{\text{F}}}}=0 \tag{12}$$

初始条件:

$$p_{\text{m}}(r_{\text{D}},t_{\text{D}}=0)=p_{\text{f}}(r_{\text{D}},t_{\text{D}}=0)=p_{\text{F}}(r_{\text{D}},t_{\text{D}}=0)=0 \tag{13}$$

同时可以写出无因次产量计算公式:

$$q_{\text{D}}=-mr_{\text{D}}e^{-\alpha_{\text{FD}}p_{\text{FD}}}\left(\frac{\partial p_{\text{FD}}}{\partial r_{\text{D}}}\right)\bigg|_{r_{\text{D}}=\frac{r_{\text{w}}}{x_{\text{F}}}} \tag{14}$$

2 数值模拟研究

2.1 地质模型

圆柱状油藏中心一口井定井底流压生产,地层为双孔单渗介质,压裂缝均匀分布于油藏内部呈水平圆盘状,且与油藏横截面是以井筒为圆心的同心圆(图 1)。

2.2 不稳态产能影响因素

采用隐式差分法,对建立起来的数学模型进行求解^[14-15],数值模拟计算所用到的参数见表 1。

基于现场实际情况及研究需要,设定了不同的启动压力梯度 η_{D} 、地层非均质系数 $K_{\text{v}}/K_{\text{h}}$ 、窜流系数 λ_{D} 、压力敏感系数 α 、压裂缝导流能力 L_{D} 、压裂缝条数 M (表 2),以研究这些因素对双孔介质油藏水平裂缝井不稳态产能的影响,计算的结果见图 2—图 6。

表 1 数值模拟主要参数

Table 1 Main parameters of numerical simulation	
参数	取值
供给半径/m	450
油层厚度/m	10
缝宽/m	0.02
裂缝半长/m	0.50
无因次弹性储容比	$\omega_{\text{FD}}=0.10;\omega_{\text{D}}=0.45;\omega_{\text{mD}}=0.45$
无因次压敏系数	$\alpha_{\text{FD}}=0.001;\alpha_{\text{D}}=0.001;\alpha_{\text{mD}}=0.002$

表 2 产能影响因素参数

Table 2 Influencing parameters of productivity			
参数	不同取值		
	①	②	③
启动压力梯度	0	0.4	0.8
地层非均质系数	0.5	1	2
窜流系数	0.000 01	0.000 1	0.001
压裂缝导流能力	8 000	10 000	12 000
压裂缝条数	4	5	6

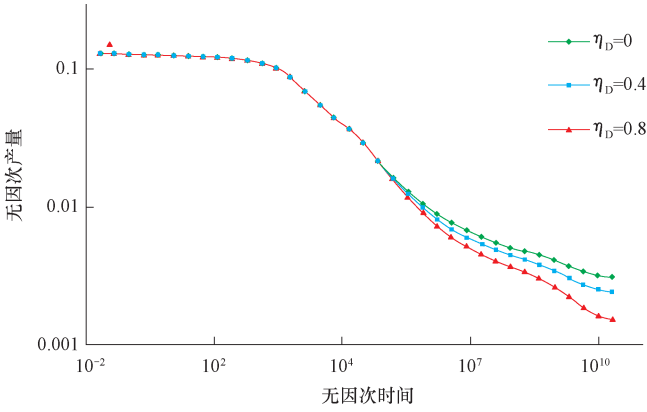


图 2 启动压力梯度对非稳态产能的影响

Fig. 2 Influences of starting pressure gradient on unsteady productivity

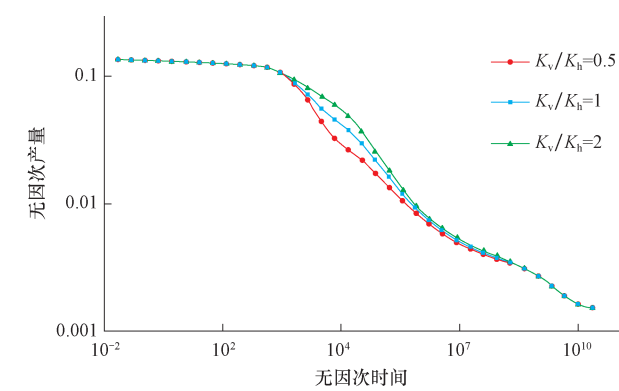


图 3 地层非均质系数对非稳态产能的影响
Fig. 3 Influence of formation heterogeneity coefficient on unsteady productivity

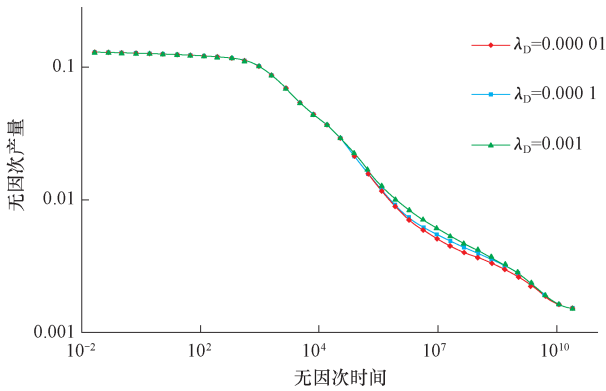


图 4 窜流系数对非稳态产能的影响
Fig. 4 Influence of interporosity flow coefficient on unsteady productivity

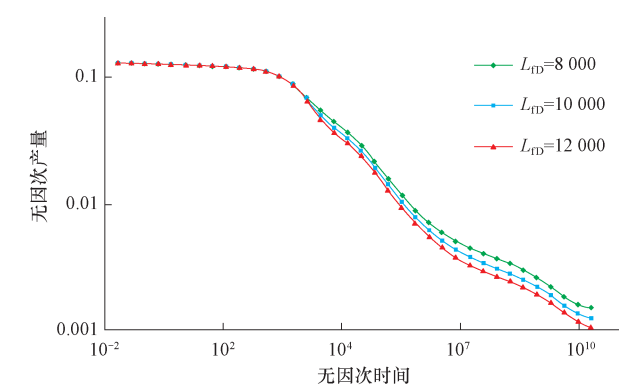


图 5 压裂缝导流能力对非稳态产能的影响
Fig. 5 Influence of fracturing fractures' conductivity on unsteady productivity

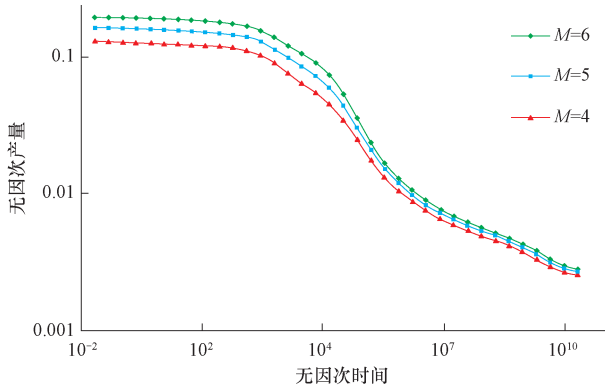


图 6 压裂缝条数对非稳态产能的影响
Fig. 6 Influence of cracks' number on unsteady productivity

从图 2—图 6 可以看出,不同的地层参数影响着产能曲线的不同阶段;启动压力梯度对初始产能影响不大,但会使压裂缝径向流动期之后的产能曲线明显下掉(图 2);地层非均质系数主要影响中间的地层垂向线性流段,地层非均质系数越大地层垂向线性流段提前出现(图 3);无因次窜流系数对初期及后期的产能无明显影响,只影响了基质向裂缝流动的窜流段,该值越大,窜流阶段出现越早(图 4);压裂缝导流系数越大地层垂向线性流段及地层径向流段产能曲线会整体下降(图 5);压裂缝数从一开始就影响产能,该值越大,产能曲线整体越上移(图 6)。

分析认为,①启动压力梯度反映了流体在地层中开始流动的难易程度。流体在储层中越容易开始流动,启动压力梯度越小,产能曲线下掉趋势越慢;地层非均质系数反映了地层垂向渗透率与径向渗透率的比值,该值越大说明垂向渗透率越大,地层垂向线性流段越早出现;窜流系数的大小,决定了窜流阶段出现的早晚,由于窜流的发生,基岩开始向天然裂缝窜流供液,从而使非稳态产能的减小趋势放缓。在实际生产过程中,产能曲线的形态在一定程度上反映了上述 3 个参

数的状况。②无因次压裂缝导流能力是压裂缝传输流体至井眼的传导能力与天然裂缝输送流体至压裂缝的传导能力的比较,其值越大表示后者的传导能力相对越弱。为了控制产能变化趋势就需要合理的无因次压裂缝导流能力,这可以通过改变支撑剂类型、支撑剂粒径、加砂浓度等因素来实现。③压裂缝数反映了压裂缝在储层中所占比例。压裂规模越大,压裂缝数越多,流体流入井筒的通道月多,产能也就越高。在生产实际中为了确定合理压裂规模,应当综合考虑压裂成本和增产潜力。

3 结论

针对水力压裂垂直裂缝模型无法解释克拉玛依油田 J 区块部分井资料的实际情况,首次引入了水力压裂水平裂缝模型,并建立了双孔油藏多级压裂水平裂缝井模型。该模型结合了油藏的实际情况,综合考虑了启动压力梯度、压敏、非均质性等因素的影响。在此基础上,通过分析地层参数和裂缝参数对非稳态产能曲线的影响,认识到启动压力梯度及裂缝参数(包括裂

缝条数)是影响该类油藏非稳态产能曲线的主要因素。虽然模型整体上符合油藏实际状况,但是未考虑多相流的情况,还有待进一步优化。

符号注释

n ——压裂缝段数;
 p_i ——原始地层系统压力,MPa;
 p_{ID} ——无因次压力,无量纲;
 p_{li} ——初始压力,MPa;
 p_l ——压力,MPa;
 p_w ——井底压力,MPa;
 q_D ——无因次产量,无量纲;
 r_D ——无因次渗流半径,无量纲;
 r_e ——供给半径,m;
 r_w ——井筒半径,m;
 r ——渗流半径,m;
 t_D ——无因次生产时间,无量纲;
 t ——生产时间,h;
 C_A ——形状因子, m^{-2} ;
 C_l ——综合压缩系数, MPa^{-1} ;
 H ——油层厚度,m;
 K_{li} ——初始渗透率, $10^{-3} \mu m^2$;
 K_l ——渗透率, $10^{-3} \mu m^2$;
 L_{FD} ——无因次压裂缝导流能力,无量纲;
 M ——水平压裂缝条数,条;
 Q ——产量, m^3/d ;
 S ——表皮系数,无量纲;
 W_{FD} ——无因次压裂缝宽度,无量纲;
 W_F ——压裂缝宽度,m;
 X_F ——压裂缝半长,m;
 ϕ_l ——孔隙度,%;
 α_{ID} ——无因次压力敏感系数,无量纲;
 α_l ——渗透率的压力敏感系数, MPa^{-1} ;
 η_D ——无因次启动压力梯度,无量纲;
 η ——启动压力梯度, MPa/m ;
 λ_D ——无因次窜流系数,无量纲;
 μ ——流体粘度, $mPa \cdot s$;
 ω_{ID} ——无因次弹性储容比,无量纲;

下角标 l 取 F,f 或 m,分别代表压裂缝、天然裂缝和地层基质。

参 考 文 献

[1] Hartsock J H, Warren J E. The effect of horizontal hydraulic fracturing on well performance[J]. SPE 61, 1961:1050 – 1056.
 [2] Gringarten A C, Ramey H J. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration, or restricted entry[J]. SPE 3819, 1974:413 – 426.

[3] Sung W, Ertkein T. Performance comparison of vertical and horizontal hydraulic fractures and horizontal boreholes in low permeability reservoirs; a numerical study[J]. SPE 87, 1987:185 – 193.
 [4] Tovar F D, Lee K J. Horizontal hydraulic fracture design for optimal well productivity in anisotropic reservoirs with different aspect ratios[J]. SPE 2061, 2013:1490 – 1499.
 [5] Yuan R, Jin Liang. Vertical or horizontal? —hydraulic fracture geometry as a make or break to a tight gas field in the Western Sichuan Basin[J]. SPE 1213, 2013:1 – 17.
 [6] Maxwell S C, Zimmer U. Evidence of horizontal hydraulic fracture at depth due to stress rotations across a thrust fault[J]. SPE 458, 2007:1 – 8.
 [7] Wright C A, Davis E J. Horizontal hydraulic fractures; oddball occurrences or practical engineering concern? [J]. SPE 1142, 1997:1 – 14.
 [8] 衣同春. 考虑地层污染时水平裂缝压裂产率比的计算[J]. 石油学报, 1988, 9(2):77 – 83.
 Yi Tongchun. Calculation of the productivity ratio for horizontally fractured wells with formations damage[J]. Acta Petrolei Sinica, 1988, 9(2):77 – 83.
 [9] 王鸿勋. 水力压裂原理[M]. 北京:石油工业出版社, 1987.
 Wang Hongxun. Hydraulic fracturing principle[M]. Beijing: petroleum Industry Press, 1987.
 [10] 胥元刚, 张琪. 变裂缝导流能力下水力压裂整体优化设计方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(2):40 – 42.
 Xu Yuangang, Zhang Qi. Overall optimizing designation method for hydraulic fracturing under variable fracture diverting capacity[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000, 19(2):40 – 42.
 [11] 张公社, 汤广才, 万小勇, 等. 水力压裂水平裂缝井产能预测新方法[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(1):121 – 123.
 Zhang Gongshe, Tang Guangcai, Wang Xiaoyong, et al. A new productive prediction method of horizontal fracture wells in hydraulic fracturing[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1):121 – 123.
 [12] 任岚, 赵金洲, 胡永全, 等. 水平裂缝井压后产量影响因素分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(4):77 – 81.
 Ren Lan, Zhao Jinzhou, Hu Yongquan, et al. Affecting factor analysis of productivity for horizontally fractured wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2010, 32(4):77 – 81.
 [13] Dominique Bourdet. 现代试井解释模型及应用[M]. 张义堂, 译. 北京:石油工业出版社, 2007:102 – 103.
 Dominique Bourdet. Modern well testing interpretation model and application[M]. Zhang Yitang translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007:102 – 103.
 [14] 张冬丽. 煤层气定向羽状水平井开采数值模拟方法研究[D]. 河北廊坊:中国科学院渗流流体力学研究所, 2004.
 Zhang Dongli. Numerical simulation method of Coalbed methane (CBM) with pinniform horizontal wells[D]. Langfang: The Chinese Academy of Sciences Institute of Seepage Fluid Mechanics, 2004.
 [15] 徐士良. 数值分析与算法[M]. 北京:机械工业出版社, 2007:68 – 71.
 Xu Shiliang. Numerical analysis and algorithm[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2007:68 – 71.