

·油气钻采工程·

## 致密油层多区体积压裂产能预测

李志强<sup>1</sup>,赵金洲<sup>1</sup>,胡永全<sup>1</sup>,任 岚<sup>1</sup>,李 宇<sup>2</sup>

(1.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;

2.中海油能源发展股份有限公司 工程技术分公司,天津 300457)

**摘要:**致密油层物性极差,天然裂缝发育,体积压裂是实现该类油层有效开发的重要手段。为研究致密油层体积压裂裂缝网设计参数对产能的影响,基于缝网形成特征,将压裂的致密油层划分为支撑主裂缝、缝网区和未压裂区,缝网区又划分为支撑次裂缝区和未支撑次裂缝区,考虑致密油非达西渗流和油层应力敏感效应,将缝网区与未压裂区简化为双重孔隙系统和单一孔隙系统,建立致密油层体积压裂产能模型,模拟分析体积压裂裂缝参数对产能的影响。研究表明:体积压裂可以大幅度提高致密油层产能,并且改造体积和支撑改造体积越大,开启天然裂缝越密,支撑主裂缝越长,支撑主裂缝、次裂缝导流能力越高,则致密油层产能越高,但存在最优值。

**关键词:**致密油 体积压裂 增产体积 缝网 双重介质 支撑裂缝 产能模拟

中图分类号:TE357.11

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)01-0134-05

## Productivity forecast of tight oil reservoirs after multi-zone stimulated reservoir volume fracturing

Li Zhiqiang<sup>1</sup>, Zhao Jinzhou<sup>1</sup>, Hu Yongquan<sup>1</sup>, Ren Lan<sup>1</sup>, Li Yu<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University,

Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China; 2.Drilling & Production Co., CNOOC Energy

Technology & Services Limited, Tianjin City, 300457, China)

**Abstract:** Tight oil reservoir is a kind of unconventional reservoir with poor permeability and well developed natural fractures. Stimulated reservoir volume (SRV) fracturing is an important means to effectively develop this kind of reservoirs. In order to study the influence of design parameters of fracture network on productivity, fractured tight oil reservoirs were divided into propped main fracture zones, fracture-network zones and unstimulated zones and the fracture-network zones were sub-divided into propped secondary fracture zone and un-propped secondary fracture zone based on the forming mechanism of fracture network. Dual pore system and single pore system were used to describe the seepage characteristics of the fracture-network zone and the unstimulated zone by taking non-Darcy seepage and stress sensitivity effect of the tight oil reservoir into consideration. Productivity model for tight oil reservoir after SRV fracturing was established, and the effects of SRV fracturing parameters on the productivity were analyzed. The research shows that the SRV fracturing can greatly improve the tight oil productivity. Tight oil reservoirs with higher productivity have larger stimulated reservoir volume and propped stimulated reservoir volume, intensive opened natural fractures, longer main fractures and higher primary and secondary fracture conductivity, but there is an optimal value.

**Key words:** tight oil; stimulated reservoir volume fracturing; stimulated reservoir volume; fracture network; dual-porosity media; propped fracture; productivity simulation

致密油是一种储层物性极差的非常规油气资源,常规的压裂单一平面裂缝模式很难实现经济开

发<sup>[1]</sup>。中国致密油储量丰富,新疆、长庆油田通过探索致密油层体积压裂方式和矿场实践<sup>[2-3]</sup>,初步实现

收稿日期:2015-11-03。

作者简介:李志强(1987—),男,四川成都人,在读博士研究生,从事非常规油气藏增产技术研究。联系电话:13880427584, E-mail:447320487@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“基于多尺度页岩复杂流动行为的动态评价模型研究”(51404204)。

了对超低渗透致密油藏的开发。天然裂缝发育的致密油层具备形成缝网的先决条件,在体积压裂过程中,随着主裂缝的延伸,天然裂缝逐渐开启,从而在主裂缝周围形成复杂的缝网。目前,对于致密油层缝网展布下的流体多相多尺度渗流机理以及相应的产能预测方法仍处于探索阶段,部分学者在考虑启动压力梯度与压敏效应基础上建立了相应的产能模型<sup>[4-6]</sup>,分析了裂缝参数对产能的影响<sup>[7-10]</sup>,但是并未对致密油层体积压裂缝网系统进行划分,也未建立相应的数值模拟模型预测压裂后产能,分析体积压裂相关参数对产能的影响,优化施工参数。为此,笔者在借鉴页岩气藏体积压裂缝网特征的基础上<sup>[11]</sup>,将致密油层改造后的储层划分为3个区,并引入双孔双渗模型进行产能预测研究,以期对致密油层缝网压裂后产能预测提供理论依据。

## 1 物理模型

页岩气藏体积压裂施工结果表明,对于天然裂缝发育、水平主应力差低的地层,在施工早期,采用低粘度压裂液、小粒径支撑剂、高排量泵注以打开天然裂缝,扩大裂缝与基质的接触面积,在施工将结束时,增加泵注压裂液粘度与支撑剂粒径,从而形成支撑主裂缝与复杂缝网的三维立体空间改造模式。然而支撑剂并不是完全铺置在整个缝网中,而是形成了部分支撑裂缝和大量未支撑裂缝,因此,依据体积压裂缝网形成特征,将致密油层划分为支撑主裂缝、缝网区与未压裂区(图1),其中缝网区由支撑次裂缝区与未支撑次裂缝区构成<sup>[12]</sup>。

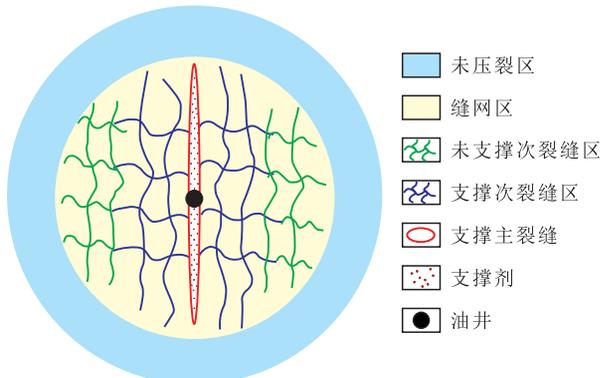


图1 致密油层多区体积压裂物理模型

Fig.1 Physical model of multi-zone volume fracturing for tight oil reservoir

## 2 产能预测模型

模型基本假设条件包括:①油藏中只有油、水

两相,且互不相溶;②油水两相在储层中的渗流为非达西渗流;③岩石和流体均微可压缩,忽略重力的影响;④主裂缝高度等于油藏厚度。

致密油层孔隙度一般小于10%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,基质覆压渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,厚度为10~80 m,油质较轻,流动性好,脆性物质含量高,天然裂缝发育,具备形成缝网的储层条件,但存在较高的启动压力梯度和较强的应力敏感性<sup>[13]</sup>。原始状态下,天然裂缝处于闭合状态,几乎对产能没有贡献,通过体积压裂开启天然裂缝并有效支撑可获得工业油气流。因此,考虑天然裂缝应力敏感效应以及储层流体非达西渗流特征,基于双重双渗连续介质模型,得到基质与裂缝系统渗流微分方程,其表达式分别为

$$\nabla \cdot \left( \frac{\rho_\alpha \delta_\alpha K K_{ra}}{\mu_\alpha} \nabla p_\alpha \right) - \tau_{\alpha mf} = \frac{\partial(\phi \rho_\alpha S_\alpha)_m}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left( \frac{\rho_\alpha \xi_\alpha K K_{ra}}{\mu_\alpha} \nabla p_\alpha \right) + \tau_{\alpha mf} - q_{\alpha well} = \frac{\partial(\phi \rho_\alpha S_\alpha)_f}{\partial t} \quad (2)$$

其中

$$\delta_\alpha = \left( 1 - \frac{G_\alpha}{\nabla p_m} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$\xi_\alpha = \left( \frac{1}{1 + \frac{\rho_\alpha v_\alpha \beta K_f}{\mu_\alpha}} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\tau_{\alpha mf} = \frac{\sigma \rho_\alpha K_m K_{ra} (p_{\alpha m} - p_{\alpha f})}{\mu_\alpha} \quad (5)$$

$$\sigma = 4 \left( \frac{1}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} + \frac{1}{L_z^2} \right) \quad (6)$$

$$q_{\alpha well} = \frac{2\pi \rho_\alpha K_f K_{ra} H}{\mu_\alpha} \times \frac{p_{\alpha f} - p_{bh}}{\ln \frac{r_c}{r_w} + s} \quad (7)$$

辅助方程为

$$\begin{cases} S_{of} = 1 - S_{\alpha f} \\ S_{om} = 1 - S_{\alpha m} \end{cases} \quad (8)$$

在生产过程中,随着致密油层孔隙压力的下降,开启的未支撑裂缝可能会逐渐闭合,导致次裂缝区导流能力下降,表现出较强的压敏效应<sup>[14-16]</sup>。致密油层渗透率随孔隙压力变化的关系式为

$$K_f = K_i \exp[-d_f(p_i - p_f)] \quad (9)$$

在体积压裂过程中,天然裂缝开启连通,可将复杂缝网等效为双重介质,人工裂缝采用等效放宽处理,裂缝等效渗透率和孔隙度方程分别为

$$K_{fe} = K_{fi} \frac{W_f}{L} \quad (10)$$

$$\phi_{fe} = \phi_{fi} \frac{W_f}{L} \quad (11)$$

式(1)一式(11)即为致密油层缝网压裂后产能预测模型,采用IMPES方法离散化求解,先求得天然裂缝压力,再代入饱和度方程求出裂缝饱和度,最后代入基质差分方程求解压力和饱和度,再转入下一时间步直到模拟完设定时间。

### 3 实例模拟分析

模拟基本参数包括:油层有效厚度为12 m,基质孔隙度为10%,裂缝孔隙度为0.1%,基质渗透率为 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,裂缝渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,地层原油密度为 $0.833 \text{ g/cm}^3$ ,地层原油体积系数为1.2,地层原油粘度为 $2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,地层水密度为 $1.0 \text{ g/cm}^3$ ,地层水体积系数为1.02,地层水粘度为 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,应力敏感系数为 $0.1 \text{ MPa}^{-1}$ ,生产压差为14 MPa,含油饱和度为66%。天然裂缝间距为5 m,支撑主裂缝导流能力为 $30 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ ,支撑次裂缝区导流能力为 $2 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ ,未支撑次裂缝区导流能力为 $0.1 \mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ ,有效支撑改造体积占总改造体积的50%。

由储层改造体积(SRV)与产油量的关系(图2)可见,单一裂缝对产油量贡献很小,也就是说常规水力压裂无法实现对致密油层的经济开发,而体积压裂可大大提高油井产能,并且储层改造体积越大,产油量越高。这主要是因为体积压裂可在一定程度上打碎地层,扩大裂缝与储层基质的接触面积,实现“人造渗透率”,使致密油层中“长距离”渗流变成“短距离”渗流,从而扩大了储层的动用程度。

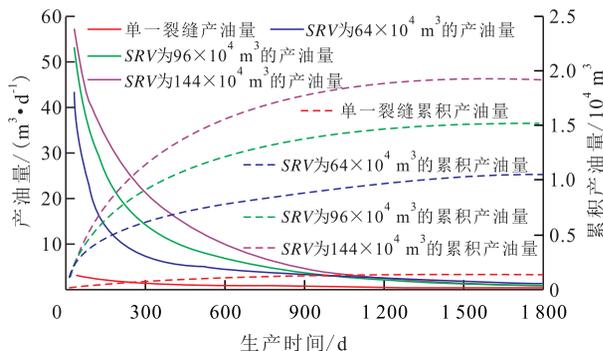


图2 致密油层改造体积对产油量的影响

Fig.2 Effect of stimulated reservoir volume of tight oil reservoir on oil production

分析支撑裂缝改造体积对产油量的影响(图3)可知,随着支撑裂缝改造体积占总改造体积的比例( $V_{\text{PSRV}}$ )的增大,产油量早期增加幅度较大而后期基本趋于一致,累积产油量几乎呈线性增加。在体积压裂过程中,支撑剂一般很难铺置在整个缝网中,

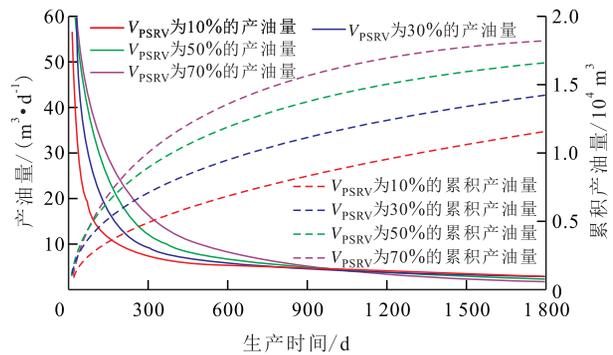


图3 支撑裂缝改造体积对产油量的影响

Fig.3 Effect of stimulated reservoir volume of propped fractures on oil production

而是铺置在主裂缝及其周围,由于支撑裂缝的导流能力和抵抗导流能力失效的能力均大于未支撑裂缝区,因此,对致密油层进行体积压裂时,应根据储层特征,通过合理的施工参数优化,尽量扩大支撑裂缝体积,才能获得较好的增产效果。

次裂缝间距( $L_{\text{SF}}$ )对产油量的影响结果(图4)表明,次裂缝间距越小,产油量越高,当次裂缝间距小于20 m时,产油量增幅较大,而当次裂缝间距大于20 m时,产油量增幅较小。缝网压裂实质上主要是由于水力裂缝与天然裂缝相交后逐渐开启,天然裂缝延伸再与其他裂缝相交,最终形成裂缝网络。因此,储层中天然裂缝的密度是评价缝网压裂改造效果的重要储层参数,可以认为打开的天然裂缝越密集,储层改造效果越好。

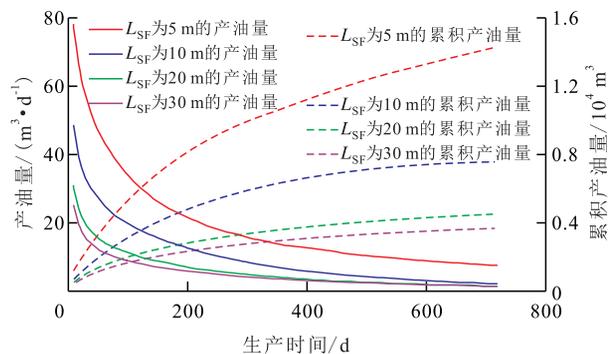


图4 次裂缝间距对产油量的影响

Fig.4 Effect of secondary fracture spacing on oil production

在体积压裂过程中,地质特征参数和施工参数将影响缝网的长度和宽度,因此,结合地质特征参数和施工参数将得到不同长度和宽度的缝网。假设长度方向为主裂缝延伸方向,缝网长度为主裂缝长度,由不同缝网规格下的产油量(图5)可知,尽管每种缝网形态总改造体积相同,但缝网规格分别为 $100 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ , $150 \text{ m} \times 270 \text{ m}$ , $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 和 $400 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 这4种组合的累积产油量却差别较大,主裂缝越长,缝网宽度越窄,则累积产油量越高,但增

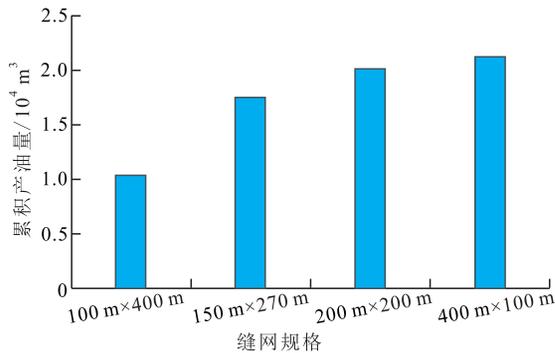


图5 缝网规格对累积产油量的影响

Fig.5 Effect of length and width of fracture network on cumulative oil production

幅变缓,最佳主裂缝长度为150~200 m,因此,进行缝网压裂时,应控制主裂缝长度,优化缝网宽度。

由图6可以看出,支撑主裂缝导流能力( $K_{fwPP}$ )、支撑次裂缝区导流能力( $K_{fwPS}$ )和未支撑次裂缝区导流能力( $K_{fwUPS}$ )均对产油量有较大影响,且随着裂缝导流能力的增加,累积产油量增加,但是增幅变缓。当支撑主裂缝导流能力大于 $30 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 时,累

积产油量变化不大;支撑次裂缝区导流能力在大于 $3 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 后,累积产油量变化也较小;而未支撑次裂缝区导流能力为 $0.9 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 时的累积产油量最大。未支撑裂缝区导流能力对产油量影响小于支撑主裂缝和支撑次裂缝区,且未支撑次裂缝区导流能力对早期产油量没有影响。这主要是由于生产早期主要是采出支撑次裂缝区控制的储量,随后才采出未支撑次裂缝区控制的储量,且未支撑次裂缝区应力敏感性较强,因此,其对产油量的影响较小。另一方面支撑剂在体积压裂过程中的运移规律比较复杂,在施工过程中,应首先采用低粘度压裂液和小粒径支撑剂,以形成一定导流能力的缝网,在施工快结束时,注入高粘度压裂液和大粒径支撑剂,以提高支撑主裂缝导流能力。但部分缝网是由于天然裂缝被剪切、错断或滑移而被激活,也具有一定的导流能力,从而整个缝网中支撑主裂缝的导流能力远高于支撑次裂缝区,而支撑次裂缝区导流能力又高于未支撑次裂缝区。

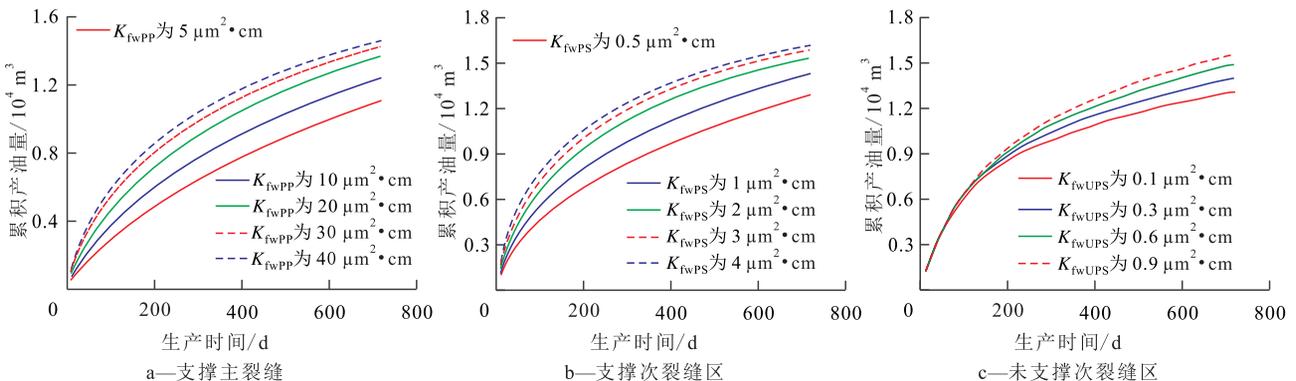


图6 支撑和未支撑裂缝区导流能力对产油量的影响

Fig.6 Effect of conductivity of propped and un-propped fractures on oil production

### 4 结论

基于致密油层体积压裂缝网形成特征,将致密油层划分为支撑主裂缝、缝网区和未压裂区,考虑致密油非达西流动和油层应力敏感性,提出采用双孔双渗模型预测致密油层体积压裂产能的方法。

体积压裂可大幅度提高油井产能,增加储层动用程度,是实现致密油层经济开发的重要手段;随着支撑裂缝改造体积的增加,产油量逐渐增加,致密油层体积压裂最重要的措施是扩大支撑裂缝改造体积;天然裂缝密度是评价致密油层压裂后产能的重要储层参数,开启天然裂缝间距越小,产油量越大;对于给定的缝网改造体积,增加主裂缝长度优于增加缝网宽度,且主裂缝长度存在最优值,应

结合储层地质特征参数和施工工艺参数优化缝网长度和宽度。

支撑剂在缝网中呈不均匀分布,支撑主裂缝导流能力远大于缝网导流能力,支撑主裂缝和支撑次裂缝区导流能力对产油量均有重要影响,而未支撑次裂缝区导流能力对产油量影响相对较小,模拟得到的支撑主裂缝和支撑次裂缝区最佳导流能力分别为 $30$ 和 $3 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。

符号解释:

$\rho$  ——地层流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 下标  $\alpha$  表示流体相, 其中,  $o$  表示油,  $w$  表示水;  $\delta$  ——低速非达西流因子;  $K$  ——渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $K_r$  ——相对渗透率;  $\mu$  ——地层流体粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $p$  ——压力,  $\text{MPa}$ ; 下标  $m$  表示基质; 下标  $f$  表示裂缝;  $\tau_{\text{anf}}$  ——基质向天然裂缝的窜流量,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $\phi$  ——孔隙

度;  $S$ ——流体饱和度;  $t$ ——时间, d;  $\xi$ ——高速非达西流因子;  $q_{\text{a well}}$ ——井产量,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $G$ ——启动压力梯度,  $\text{MPa}/\text{m}$ ;  $v$ ——人工裂缝中流体渗流速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\beta$ ——紊流速度系数,  $\text{m}^{-1}$ ;  $\sigma$ ——形状因子,  $1/\text{m}^2$ ;  $L_x, L_y$ 和 $L_z$ ——基质岩块在 $x, y$ 和 $z$ 方向上的长度,  $\text{m}$ ;  $H$ ——油层厚度,  $\text{m}$ ;  $p_{\text{bh}}$ ——井底流压,  $\text{MPa}$ ;  $r_e$ ——等效半径,  $\text{m}$ ;  $r_w$ ——井半径,  $\text{m}$ ;  $s$ ——表皮系数;  $S_{\text{of}}$ ——裂缝含油饱和度;  $S_{\text{wf}}$ ——裂缝含水饱和度;  $S_{\text{om}}$ ——基质含油饱和度;  $S_{\text{wm}}$ ——基质含水饱和度;  $K_f$ ——裂缝原始渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $d_f$ ——应力敏感系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $p_i$ ——原始地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $K_{\text{fe}}$ ——裂缝等效渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $K_{\text{fi}}$ ——裂缝真实渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $W_f$ ——裂缝宽度,  $\text{m}$ ;  $L$ ——基质岩块长度,  $\text{m}$ ;  $\phi_{\text{fe}}$ ——裂缝等效孔隙度;  $\phi_{\text{fi}}$ ——裂缝真实孔隙度。

#### 参考文献:

- [1] 王震亮.致密岩油的研究进展、存在问题和发展趋势[J].石油实验地质, 2013, 35(6): 587-595.  
Wang Zhenliang. Research progress, existing problem and development trend of tight rock oil [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6): 587-595.
- [2] Zhou Zongqiang, Mu Lijun, Li Xianwen, et al. Hybrid fracturing treatments unleash tight oil reservoirs consisting of sand shale sequences in the Changqing oilfield [C]. SPE 156179, 2012.
- [3] 章敬, 李佳琦, 史晓川, 等. 吉木萨尔凹陷致密油层压裂工艺探索与实践[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(6): 710-712.  
Zhang Jing, Li Jiaqi, Shi Xiaochuan, et al. Fracturing technology for dense oil reservoir in Jimusaer Sag: probe and practice [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(6): 710-712.
- [4] 刘波涛, 李清泉, 张福祥, 等. 致密油藏多级压裂水平裂缝井不稳态产能分析[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 138-142.  
Liu Botao, Li Qingquan, Zhang Fuxiang, et al. Rate transient analysis of multistage fractured wells with horizontal fractures in tight oil reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 138-142.
- [5] 魏漪, 宋新民, 冉启全, 等. 致密油藏压裂水平井非稳态产能预测模型[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(1): 67-72.  
Wei Yi, Song Xinmin, Ran Qiquan, et al. An unstable productivity prediction model for fractured horizontal well in tight oil reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(1): 67-72.
- [6] 朱维耀, 岳明, 高英, 等. 致密油层体积压裂非线性渗流模型及产能分析[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 248-254.  
Zhu Weiyao, Yue Ming, Gao Ying, et al. Nonlinear flow model and productivity of stimulated reservoir volume in tight oil reservoirs [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 248-254.
- [7] 彭晖, 刘玉章, 冉启全, 等. 致密油储层水平井产能影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 771-777.  
Peng Hui, Liu Yuzhang, Ran Qiquan, et al. Study on the horizontal well production in tight oil reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 771-777.
- [8] 王文东, 苏玉亮, 慕立俊, 等. 致密油藏直井体积压裂储层改造体积的影响因素[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(3): 93-97.  
Wang Wendong, Su Yuliang, Mu Lijun, et al. Influencing factors of stimulated reservoir volume of vertical wells in tight oil reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2013, 37(3): 93-97.
- [9] 王欢, 廖新维, 赵晓亮, 等. 超低渗透油藏分段多簇压裂水平井产能影响因素与渗流规律——以鄂尔多斯盆地长8超低渗透油藏为例[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 107-110.  
Wang Huan, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. A study on productivity and flow regimes of segmented multi-cluster fractured horizontal well in ultra-low permeability reservoir—a case of Chang8 ultra-low permeability reservoir in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 107-110.
- [10] 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.
- [11] 王欢, 廖新维, 赵晓亮, 等. 非常规油气藏储层体积改造模拟技术研究进展[J]. 特种油气藏, 2014, 21(2): 8-15.  
Wang Huan, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. The progress of reservoir stimulation simulation technology in unconventional oil and gas reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(2): 8-15.
- [12] Cipolla C L, Warpinski N R, Mayerhofer M J, et al. The relationship between fracture complexity, reservoir properties, and fracture-treatment design [C]. SPE 115769, 2010.
- [13] 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): 343-349.  
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): 343-349.
- [14] 薛永超, 田斌丰. 鄂尔多斯盆地长7致密油藏特征[J]. 特种油气藏, 2014, 21(3): 111-115.  
Xue Yongchao, Tian Xiaofeng. Characteristics of Chang-7 tight oil reservoir, Ordos basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(3): 111-115.
- [15] 雷刚, 王昊, 董平川, 等. 非均质致密砂岩应力敏感性的定量表征[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 90-94.  
Lei Gang, Wang Hao, Dong Pingchuan, et al. Quantitative analysis on stress sensitivity of heterogeneous tight sandstone [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 90-94.
- [16] 孟阳. WHZ油田致密储层微观特征及介质变形敏感实验[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 95-99.  
Meng Yang. Microscopic characteristics and sensitivity experiment of medium deformation in the tight reservoirs of WHZ oil-field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 95-99.

编辑 常迎梅