

不动管柱多级压裂水平井产能评价方法

徐健

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者:Email:xujian@petrochina.com.cn

项目支持:中石油大庆油田有限责任公司科技研发项目“一趟管柱多层压裂及多层测试工艺技术研究”(dqp-2018-kt-ky-010)

引用:徐健. 不动管柱多级压裂水平井产能评价方法[J]. 油气井测试,2021,30(3):52-57.

Cite: XU Jian. Productivity evaluation method of multistage fractured horizontal well with fixed string [J]. Well Testing, 2021,30(3):52-57.

摘要 为准确评价低渗透、特低渗透储层,基于水平井井身结构、压裂裂缝的形态和间距,结合不稳定渗流力学理论,得出不动管柱多级压裂油气井不稳定产能评价方法。根据储层、流体、井身结构等参数,建立不动管柱多级压裂水平井产能预测的数学模型,编制软件,计算出不同生产压力下产量随生产时间的变化曲线,以及不同生产时期下井底流动压力与产量之间的关系曲线。大庆油田现场2口井中的应用,产量变化与实际误差分别为3.7%和5.5%。该方法可有效评价储层及压裂改造效果,实现多级压裂水平油气井产能评价。

关键词 多级压裂;产能评价;水平井;产能模型;裂缝;低渗透储层

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.03.009

Productivity evaluation method of multistage fractured horizontal well with fixed string

XU Jian

Testing Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163000, China

Abstract: In order to accurately evaluate the low permeability and ultra-low permeability reservoirs, based on the horizontal well structure, fracture shape and spacing, combined with the theory of unstable seepage mechanics, the evaluation method of unstable productivity of multistage fracturing oil and gas wells with fixed string is obtained. According to the parameters of reservoir, fluid and wellbore structure, the mathematical model for productivity prediction of multistage fractured horizontal wells with fixed string is established, and the software is compiled to calculate the production curve with production time under different production pressure, as well as the relationship curve between bottom hole flow pressure and production in different production periods. This method has been applied in two wells in Daqing Oilfield, it shows that the error of production variation and actual production is 3.7% and 5.5% respectively. This method can effectively evaluate the reservoir and fracturing effect and realize the productivity evaluation of multi-stage fracturing horizontal oil and gas wells.

Keywords: multistage fracturing; capacity evaluation; horizontal well; capacity model; fracture; low permeability reservoir

我国油田开发逐渐进入到低渗透及超低渗透储层,这类油藏约占新探明储量的60%~70%^[1]。这类油藏普遍具有低孔、低渗、自然产能低等特征。不动管柱多级压裂能够改善井筒附近低渗、超低渗储层的渗透率,并且也能够改善井底附近的表皮效应。压裂技术的优点是增加了排油面积,增加了纵向和横向扫油范围,调用了常规方法难以使用的储量和剩余储量,暴露了更多的自然裂缝系统,降低成本等优点。特别是对于低渗透性储层的开发,它起着越来越重要的作用。油田多采用多级压裂水平井的技术来提高油气井产

能^[2-5],水平井压裂已是有效开发低渗透、特低渗透油藏的关键技术^[6-7]。

尽管多级压裂水平井技术已经广泛应用,但准确预测多级压裂水平井的产能仍是当前研究的难点。国内、外学者对水平井压裂产能评价方法进行了大量研究。Giger R. F.等推导了低渗透油藏压裂水平油气井的产能计算公式^[8]。Soliman M. Y.等推导了有限导流裂缝水平井的早期产能预测模型,确定了最佳裂缝数量,并分析出不等长裂缝对产能评价产生的影响^[9-10]。Hegre T. M.对同时具有水平和垂直裂缝水平井进行了产能评价,并且提出等

效井筒半径的概念^[11]。郎兆新等应用位势理论和叠加原理得出了产量和生产压差,与裂缝长度和数量的关系^[12]。程林松等、王晓冬等对分支以及复杂分支水平井进行了研究,推导了考虑不同情况下多级压裂水平油气井的产能计算公式^[13-15]。路爽等利用汇源反应和叠加原理,在偏心竖井产能公式的基础上,建立了压裂水平井产能公式^[16]。袁淋等、李旭成等、孙恩慧等也建立了多级水平压裂同时生产气和水的产能评价方法^[17]。

近年来国内多级压裂水平井产能评价研究较多^[18-20],但没有形成适合大庆油田的软件及方法。为此,建立了合适的不动管柱多级压裂油气井产能预测模型并求解,以此用来预测具有多条裂缝的压裂井的动态,对油藏进行综合、正确地评价,这对油田的发展具有重要意义。

1 理论研究

首先在基本假设的基础上建立物理模型,并对不动管柱多级压裂水平油气井建立产能预测模型。

1.1 基本假设

建立压裂后水平油气井产能预测模型之前的基本假设:

- (1) 上下均封闭、等温、不稳定渗流的均质无限层,忽略了重力的影响;
- (2) 储层和裂缝均为单相流,可满足达西定律;
- (3) 裂缝完全穿透产层,裂缝的两边相对于水平井井眼是对称的,裂缝间距可等或不等,裂缝的平面垂直于水平井井筒;
- (4) 流体先进入裂缝,然后通过裂缝进入水平井井筒;
- (5) 此处没有考虑流体直接从基质流入井筒的过程。

1.2 物理模型

以垂直裂缝为研究对象。由于裂缝长度远大于裂缝高度,裂缝渗透率远大于基质渗透率,因此不考虑基质中流体的垂直渗流过程。由于大多数水平井的水力压裂首先由液压封隔器分开,然后再进行射孔,除了射孔和压裂以外,其余与井眼的接触都是封闭的。因此,不考虑从基质到井眼的直接渗流过程,通常使用的是由基质到裂缝,再由裂缝到井筒的双性流,流动模型如图1所示,储层—裂缝—水平井的物理模型如图2所示。

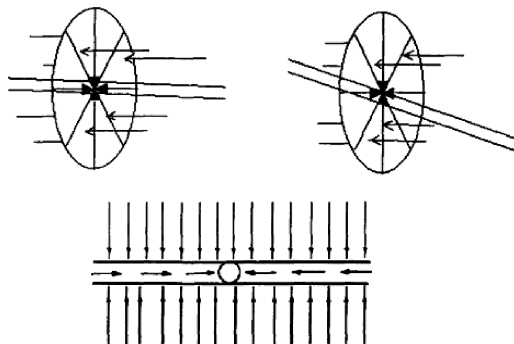


图1 压后横向、纵向、斜交裂缝流体流动模型

Fig. 1 Fluid flow model of transverse, longitudinal and oblique fractures after fracturing

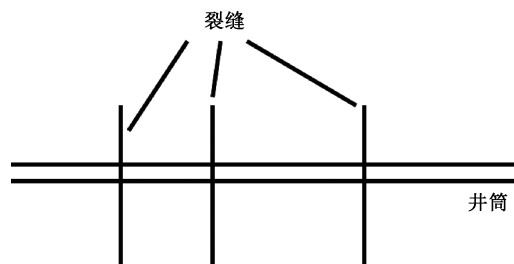


图2 储层、裂缝、水平井物理模型

Fig. 2 Physical model of reservoir, fracture and horizontal well

1.3 不动管柱多级压裂水平油气井产能预测模型

根据均匀无限大储层点汇定流量的压降公式,即

$$p_i - p(x, y, t) = \frac{q\mu}{4\pi Kh} \left[-E_i \left(-\frac{r^2}{4\eta t} \right) \right] \quad (1)$$

式中: p_i 为地层原始压力, Pa; $p(x, y, t)$ 为 t 时刻在点 (x, y) 上的压力, Pa; q 为点汇处体积流量, m^3/s ; μ 为原油黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; K 为地层渗透率, mD ; h 为产层厚度, m ; r 为流动半径, m ; η 为地层导压系数, $\text{m}^2\cdot\text{Pa}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$; t 为生产时间, s ; E_i 为指数积分函数。

当时间间隔很小的情况下,可以近似地认为在该段时间内的流量是一个定值。

在考虑体积因数情况下,将(1)式转换为直角坐标形式,即

$$p_i - p(x, y, t) = \frac{q\mu B}{4\pi Kh} \left[-E_i \left(-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{4\eta t} \right) \right] \quad (2)$$

式中: B 为地层条件下原油体积因数, 无量纲; (x_0, y_0) 为点汇坐标。

当多个平行裂缝的平面垂直于井轴时,每条裂缝都可看成是由无数多个点汇构成。将裂缝的两翼分成 n 个相等的部分,每个相等的部分都用作点汇来研究(图3)。

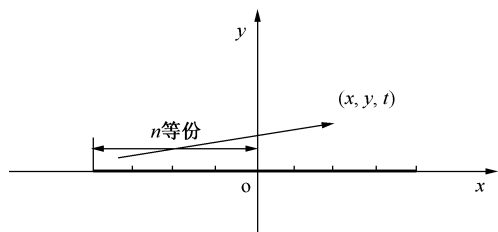


图3 裂缝平面垂直于井筒的等分图

Fig. 3 Fracture contour when fracture plane is perpendicular to wellbore

左翼裂缝第 j 个点汇中心坐标为

$$(x_{lj}, y_{lj}) = \left(-\frac{2n-2j+1}{2n}x_f, y_f \right) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

右翼裂缝第 j 个点汇中心坐标为

$$(x_{rj}, y_{rj}) = \left(\frac{2j-1}{2n}x_f, y_f \right) \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

$$p_i - p(x, y, t) \Big|_N = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^n \frac{q_{lij} \mu B}{4\pi K h} \left[-E_i \left(-\frac{\left(x + \frac{2n-2j+1}{2n}x_{fi} \right)^2 + (y - y_{fi})^2}{4\eta t} \right) \right] + \right. \\ \left. \sum_{j=1}^n \frac{q_{rij} \mu B}{4\pi K h} \left[-E_i \left(-\frac{\left(x - \frac{2j-1}{2n}x_{fi} \right)^2 + (y - y_{fi})^2}{4\eta t} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

由于人为裂缝,地层压力会重新分配。在第 i 个裂缝处产生的压差是由 N 个裂缝的左右翼上的 n 个点第 i 个裂缝的左右两端所产生的压差和。

第 i 条裂缝左尖坐标值为

$$(x_{fil}, y_{fil}) = \left(-\frac{2n-1}{2n}x_{fi}, y_{fi} \right)$$

右尖坐标值为

$$(x_{fir}, y_{fir}) = \left(\frac{2n-1}{2n}x_{fi}, y_{fi} \right)$$

将裂缝两端处的平均压力作为裂缝尖端处的压力。

$$p_i - p_{wf} = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{k=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^n \frac{q_{lkj} \mu B}{4\pi K h} \left[-E_i \left(-\frac{\left(-\frac{2n-1}{2n}x_{fi} + \frac{2n-2j+1}{2n}x_{fk} \right)^2 + (y_{fi} - y_{fk})^2}{4\eta t} \right) \right] + \right. \right. \\ \left. \sum_{j=1}^n \frac{q_{rkj} \mu B}{4\pi K h} \left[-E_i \left(-\frac{\left(-\frac{2n-1}{2n}x_{fi} - \frac{2j-1}{2n}x_{fk} \right)^2 + (y_{fi} - y_{fk})^2}{4\eta t} \right) \right] \right\} + \\ \sum_{k=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^n \frac{q_{lkj} \mu B}{4\pi K h} \left[-E_i \left(-\frac{\left(\frac{2n-1}{2n}x_{fi} + \frac{2n-2j+1}{2n}x_{fk} \right)^2 + (y_{fi} - y_{fk})^2}{4\eta t} \right) \right] + \right. \\ \left. \sum_{j=1}^n \frac{q_{rkj} \mu B}{4\pi K h} \left[-E_i \left(-\frac{\left(\frac{2n-1}{2n}x_{fi} - \frac{2j-1}{2n}x_{fk} \right)^2 + (y_{fi} - y_{fk})^2}{4\eta t} \right) \right] \right\} \right\} + \frac{q_{fi} \mu B}{2\pi K_{fi} W_{fi}} \left(\ln \frac{\sqrt{2x_{fi}h/\pi}}{r_w} + S \right) \quad (6)$$

将左翼第 j 个点汇坐标代入(2)式。据叠加原理,可以得到在 t 时间左翼 n 个点共同对地层中 (x, y) 点产生的总压降,即

$$p_i - p(x, y, t) \Big|_{\text{左}} = \sum_{j=1}^n \frac{q_{lj} \mu B}{4\pi K h} \left[-E_i \left(-\frac{\left(x + \frac{2n-2j+1}{2n}x_f \right)^2 + (y - y_f)^2}{4\eta t} \right) \right] \quad (3)$$

式中: q_{lj} 为第 j 个点汇产量, m^3/d 。

同理可得,在 t 时间,右翼裂缝 n 个点汇共同对地层中 (x, y) 点产生的总压降。

根据叠加原理,将 t 时 (x, y) 处所有裂缝压降相加,得同时产生 N 个裂缝时,在时间 t 处地层任一点 (x, y) 的总压降,即

根据面积相等可得 $\pi r_i^2 = 2x_{fi}h$,故第 i 个裂缝可以认为是一个微储层,其流动半径为 r_i ,地层厚度为 W_{fi} ,裂缝尖端压力 $p(x_{fi}, y_{fi}, t)$ 为边界压力,水平井筒内压力 p_{fwi} 为井底流压,流动模式为平面径向流动。故油气由裂缝向井筒的渗流过程可表示为

$$p(x_{fi}, y_{fi}, t) - p_{fwi} = \frac{q_{fi} \mu B}{2\pi K_{fi} W_{fi}} \left(\ln \frac{\sqrt{2x_{fi}h/\pi}}{r_w} + S \right) \quad (5)$$

不考虑井筒中的流动压差损失,裂缝底部压力大约等于井底流动压力。可得

因为除了裂缝和井筒的交点,井筒其余地方均封闭,则有

$$Q = \sum_{i=1}^N q_{fi} \tag{7}$$

式中: Q 为水平井产量, m^3/d 。

求出 t 时刻每一条裂缝的产量,再将产量代入 (4) 式中,求出在 t 时储层中任意处压力。同理,可得裂缝中每段平均压力 p_{fij} 。

2 实例应用

用文中所述不动管柱多级压裂水平井试井产能评价软件在大庆油田多级压裂水平井进行应用。

(1)井例 1 位于黑龙江省大庆市,松辽盆地东南断陷区。侧钻水平裸眼井段 3 607.4~3 290.6 m,厚度 182.8 m。压后自喷,采用 $\phi 7.94\text{ mm}$ 油嘴、三相分离器测气,油压 11.10 MPa,流压 17.87 MPa/2 950.55 m,稳定生产 970 min,日产气 73 856 m^3 。工作历史曲线(压力、产量)如图 4 和图 5 所示。

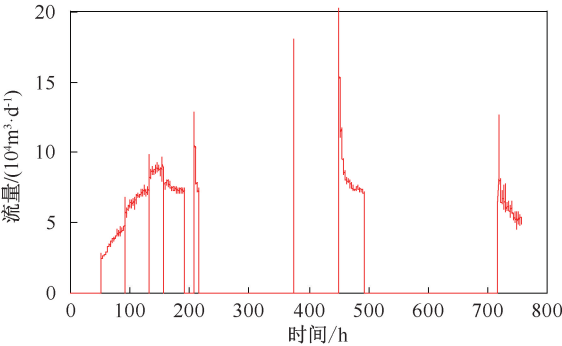


图 4 井例 1 流量历史曲线
Fig. 4 Flow history curve of well case 1

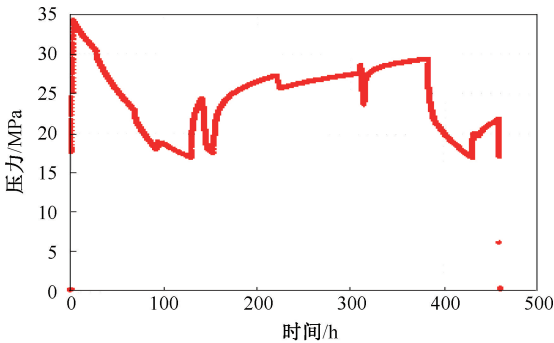


图 5 井例 1 压力历史曲线
Fig. 5 Pressure history curve of well case 1

图 6 中给出了一组不同生产时间下的 IPR 曲线,图 7 为不同生产压力的产量随时间变化的曲线。从图 7 中可以看到,当井底流压为 17.87 MPa 时,产能预测结果为 71 096 m^3/d 。实际产能为 73 856 m^3/d ,产量变化与实际产量误差 3.7%,误差较小,

符合油藏实际的地质特征。

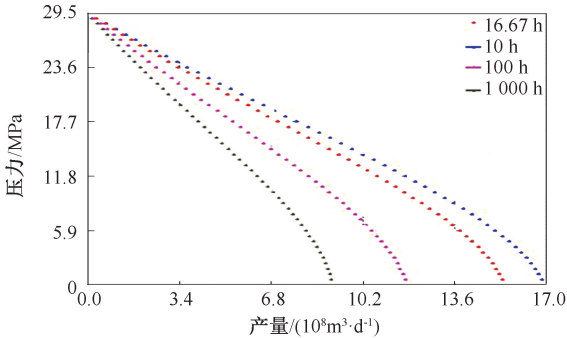


图 6 井例 1 的 IPR 曲线
Fig. 6 IPR curve of well case 1

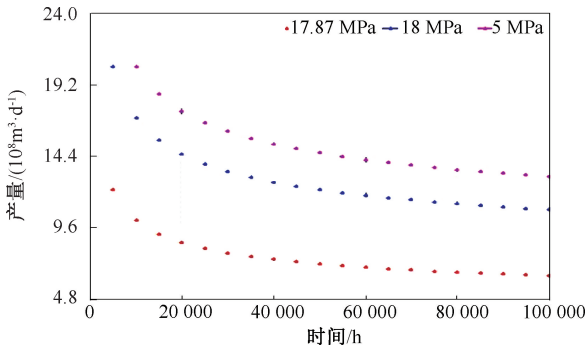


图 7 井例 1 产量递减曲线
Fig. 7 Production decline curve of well case 1

(2)井例 2 位于黑龙江省大庆市肇州县,松辽盆地徐家围子断陷。井段 4 658.0~3 799.9 m,压裂厚度 486.43 m。压后自喷,采用 $\phi 9.37\text{ mm}$ 油嘴,油压 27.89 MPa,流压 37.13 MPa/3 050 m,稳定生产 790 min,日产气 360 500 m^3 。工作历史曲线(压力、产量)如图 8、图 9 所示。

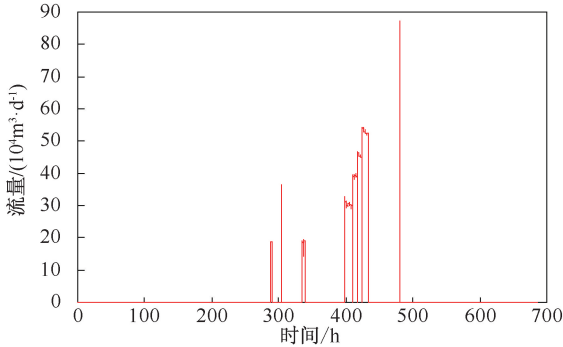


图 8 井例 2 流量历史曲线
Fig. 8 Flow history curve of well case 2

图 10 中给出了一组不同生产时间下的 IPR 曲线,图 11 为不同生产压力的产量随时间变化的曲线。从图 11 中可以看到,当井底流压为 37.13 MPa 时,产能预测结果为 385 000 m^3/d ,实际产能为 365 000 m^3/d ,产量变化与实际产量误差 5.5%。误差较小,符合油藏实际的地质特征。

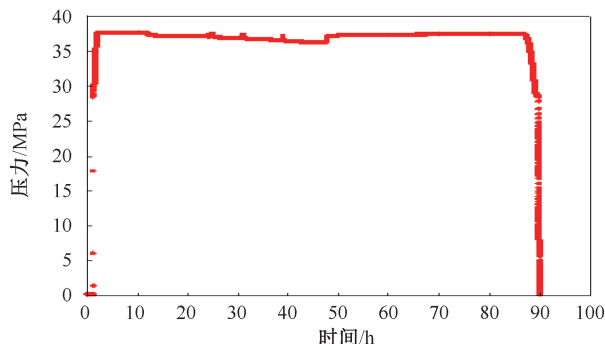


图9 井例2压力历史曲线

Fig. 9 Pressure history curve of well case 2

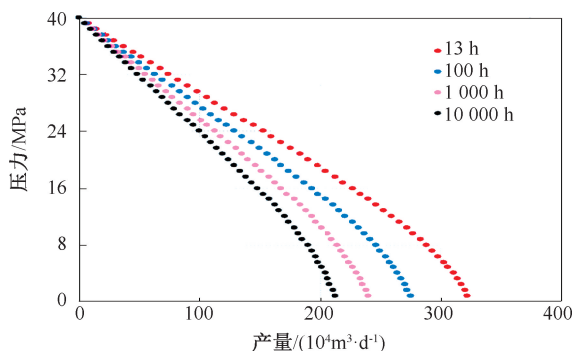


图10 井例2的IPR曲线

Fig. 10 IPR curve of well case 2

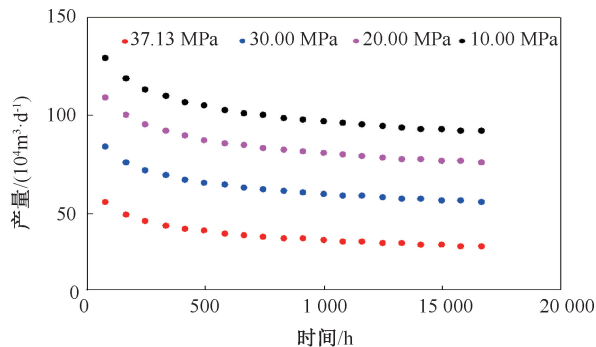


图11 井例2产量递减曲线

Fig. 11 Production decline curve of well case 2

3 结论

(1)应用不动管柱多级压裂油气井产能计算方法,利用自主研发软件计算不同生产时期产量随压力的变化曲线,以及不同生产压力下产量随生产时间的变化曲线。经实际数据资料验证,本文的试井产能计算方法求得的产量变化与实际产量误差在20%以内,符合油田实际生产情况。

(2)文中介绍的多级压裂油气井产能计算方法构建了考虑裂缝干扰和水平井筒压降的压裂水平井产能预测新模型,完善了大庆油田水平井大型多

级压裂试油气技术,对评价水平井储层及压裂改造效果具有重要意义,适用于大庆油田多级压裂水平井,实现了对压后水平井进行科学合理的产能评价。目前,该项研究在现场应用井数偏少,还需进一步推广应用。

致谢:感谢大庆油田试油试采分公司同意本文公开发表。

参考文献

- [1] 韩大匡. 关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 583-591. HAN Dakuang. Discussions on concepts, countermeasures and technical routes for the redevelopment of high water-cut oilfields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(5): 583-591.
- [2] 刘洪平, 赵彦超, 孟俊, 等. 压裂水平井产能预测方法研究综述[J]. 地质科技情报, 2015, 34(1): 131-139. LIU Hongping, ZHAO Yanchao, MENG Jun, et al. A methodologies of predicting the fractured horizontal well production [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2015, 34(1): 131-139.
- [3] 于书新, 程晓刚. 水平井多级压裂后分段测试产能评价技术及应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 13-15, 19. YU Shuxin, CHENG Xiaogang. Evaluation technology and application of segmented productivity test to horizontal well after multiplelayer fracturing [J]. Well Testing, 2017, 26(2): 13-15, 19.
- [4] 曹朋亮, 杨小松, 张一果, 等. 致密低渗气藏水平井新的产能评价“一点法”[J]. 油气井测试, 2019, 28(6): 1-8. CAO Pengliang, YANG Xiaosong, ZHANG Yiguo, et al. “Single point” productivity evaluation method for horizontal wells in tight and low permeability gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019, 28(6): 1-8.
- [5] 陈建华, 骆逸婷, 刘凯, 等. 考虑应力敏感影响的气井产能分析新方法[J]. 油气井测试, 2020, 29(2): 1-6. CHEN Jianhua, LUO Yiting, LIU Kai, et al. A new method for gas well productivity analysis considering stress sensitivity [J]. Well Testing, 2020, 29(2): 1-6.
- [6] 黄亮, 石军太, 杨柳, 等. 低渗气藏启动压力梯度实验研究及分析[J]. 断块油气田, 2016, 23(5): 610-614. HUANG LIANG, SHI JUNTAI, YANG LIU, et al. Experimental research and analysis on threshold pressure gradient in low-permeability gas reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(5): 610-614.
- [7] 康玉柱. 中国致密岩油气资源潜力及勘探方向[J]. 天然气工业, 2016, 36(10): 10-18. KANG Yuzhu. Resource potential of tight sand oil & gas

- and exploration orientation in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2016,36(10):10-18.
- [8] GIGER F M, REISS L H, JOURDAN A P. The reservoir engineering aspects of horizontal drilling [C]. *SPE* 13024, 1984.
- [9] SOLIMAN M Y, HUNT J L, RABAA A E. Fracturing aspects of horizontal wells [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1990,42(8):966-973.
- [10] SOLIMAN M Y, HUNT J L, AZARI M. Fracturing horizontal wells in gas reservoirs [J]. *SPE Production & Facilities*, 1997,14(4):277-283.
- [11] HEGRE T M. Hydraulically fractured horizontal well simulation [C]. *SPE* 35506, 1996.
- [12] 郎兆新,张丽华. 压裂水平井产能研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 1994,18(2):43-46.
- LANG Zhaoxin, ZHANG Lihua. Productivity study of fractured horizontal wells [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 1994,18(2):43-46.
- [13] 程林松,李春兰,郎兆新,等. 分支水平井产能的研究[J]. *石油学报*, 1995,16(2):49-55.
- CHENG Linsong, LI Chunlan, LANG Zhaoxin, et al. The productivity study of branch a horizontal well with multiple wells [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995,16(2):49-55.
- [14] 王晓冬,于国栋,李治平. 复杂分支水平井产能研究[J]. *石油勘探与开发*, 2006,33(6):729-733.
- WANG Xiaodong, YU Guodong, LI Zhiping. Productivity of horizontal wells with complex branches [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006,33(6):729-733.
- [15] 丁一萍,王晓冬,邢静. 一种压裂水平井产能计算方法[J]. *特种油气藏*, 2008,15(2):64-68.
- DING Yiping, WANG Xiaodong, XING Jing. A method of productivity calculation for fractured horizontal well[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2008, 15(2): 64-68.
- [16] 路爽,刘启国,杜知洋,等. 一种计算有限导流裂缝压裂水平井产能的新方法[J]. *油气藏评价与开发*, 2017,7(1):40-44.
- LU Shuang, LIU Qiguo, DU Zhiyang, et al. A new productivity calculating method of fractured horizontal wells with finite conductivity fractures [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2017,7(1):40-44.
- [17] 袁淋,李晓平,刘建军. 低渗透气藏气水同产压裂水平井产能计算方法[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(4):88-94.
- YUAN Lin, LI Xiaoping, LIU Jianjun. Productivity calculation method of fractured horizontal wells with gas-water two-phase in low permeability gas reservoirs [J]. *Lithologic Reservoir*, 2016, 28(4): 88-94.
- [18] 岳建伟,段永刚,陈伟,等. 含多条垂直裂缝的压裂气井产能研究[J]. *大庆石油地质与开发*, 2004,23(3):46-48.
- YUE Jianwei, DUAN Yonggang, CHEN Wei, et al. Study on productivity performances of horizontal fractured gas well with many vertical fractures [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2004,23(3):46-48.
- [19] 高阳,赵超,董平川,等. 致密气藏变导流能力裂缝压裂水平井不稳定渗流模型[J]. *大庆石油地质与开发*, 2015,34(6):141-147.
- GAO Yang, ZHAO Chao, DONG Pingchuan, et al. Transient flow model of fractured horizontal well with variable conductivity fractures in tight gas reservoir [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2015,34(6):141-147.
- [20] 雷刚,董睿涛,杨书,等. 致密砂岩气藏垂直压裂井拟稳态流动产能分析[J]. *大庆石油地质与开发*, 2014,33(1):170-174.
- LEI Gang, DONG Ruitao, YANG Shu, et al. Productivity analysis of the vertically fractured wells in pseudo-steady state for tight sandstone gas reservoir [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2014,33(1):170-174.

编辑 穆立婷

第一作者简介:徐健,男,1980年出生,高级工程师,2001年毕业于西南石油大学石油工程专业,现主要从事试油管理工作。电话:0459-5684292,13104592167; Email: xujian@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市让胡路区乘风街道试油试采分公司工程技术大队,邮政编码:163412。