

考虑诱导应力的压裂气井出砂预测

罗志锋, 张楠林, 赵立强

(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)

摘要:在近井地带应力分布的基础上,考虑人工裂缝诱导应力,计算得到压裂井井筒周围应力场。根据Drucker-Prage准则,计算不同生产条件下的地层稳定性系数。计算结果表明:引起地层出砂的主要因素是高生产压差引起的诱导应力,而不是气体流动造成的拖拽力;裂缝数量越多,诱导应力越大,地层越不稳定,越容易出砂;稳定性系数随渗透率增加而降低,随渗透率增加而增加的速度先快后慢,稳定性系数受孔隙度的影响不大;随着裂缝长度的增加,稳定性系数增加,出砂风险降低。考虑了生产过程中诱导应力对稳定性系数的影响,更加全面地研究出砂影响因素,为防砂设计提供理论参考。

关键词:压裂;出砂;诱导应力;稳定性系数

中图分类号:TE358 **文献标识码:**A

Sand prediction of fractured gas wells by consideration of induced stress

Luo Zhifeng, Zhang Nanlin and Zhao Liqiang

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Based on the stress distribution in the zone near the well, and by the consideration of the artificial fracture induced stress, we found out the stress field around the wellbore of the fractured wells. According to the Drucker-Prage criteria, we obtained the formation stability coefficients under the different conditions. The calculation results showed that the main factors of the formation sanding are induced stress caused by the high production pressure difference instead of the gas drag. More fractures, larger induced stress and more unstable formation made the sanding easier. Meanwhile, the formation stability coefficient decreased with the increase of the permeability, and the speed of the growth overall dropped down. However, the porosity had little impact on the formation stability coefficient. As the length of the fracture increased, the stability coefficient increased as well, on the contrary, the risk of the sanding decreased. By considering the impacts of the induced stress on the stability coefficient in the process of the production, we studied the influencing factors of the sanding comprehensively, to provide the theoretical references for the sanding control design.

Key words: fracturing, sanding, induced stress, stability coefficient

砂岩气藏开采过程中,防砂和产量提高一直是一个难以解决的矛盾。产量提高需要较大的生产压差^[1-3],在高生产压差条件下,气体流速增加,当气体流速高于一定值,储层岩石基质的胶结强度不足以固结岩石颗粒时,岩石颗粒在地层应力和气体拖拽

力的共同作用下从岩石上脱落^[4],同时高生产压差还会造成高诱导应力^[5],增加出砂风险。不同储层由于矿物颗粒粒径、粒径分布、胶结程度、埋深、岩性的不同,也具有不同的临界生产压差^[6]。出砂会给气井正常生产带来极大的负面影响,造成油管砂堵,缩短设

收稿日期:2017-06-04。

第一作者简介:罗志锋(1981—),男,副教授,博士,油气藏动态及增产改造理论与技术方面的教学与科研。

基金项目:国家自然科学基金“致密油气藏体积分酸压复杂缝网扩展延伸仿真模型研究”(51404207)。

备检修周期,降低气井寿命。

刘先珊^[7]等人基于三维颗粒流数值模型,研究了不同砂岩的力学响应,分析出砂的发生和发展的动态过程,发现气体持续作用使砂岩颗粒经受重复荷载,出砂几率增大;董长银等人^[8]基于地层岩石弹塑性变形理论,提出塑性出砂半径的预测方法,分析近井塑性区应力分布情况及影响出砂半径的敏感性因素;胡南^[9]利用测井资料计算出临界生产压差,建立适用于深层气的出砂评价标准;Papamichos^[10]、Jensen^[11]等人从微观角度研究砂岩颗粒的运动特征,提出出砂预测方法;Hoek^[12-13]等人通过室内实验、出砂机理研究揭示了孔眼附近应力和孔隙流体压力梯度对出砂的影响。

目前对出砂的研究集中在临界生产压差计算、出砂半径预测、经验公式出砂预测和室内试验模拟等方面,并取得了一定的成果,但是针对压裂井的多条人工裂缝诱导应力相互干扰研究较少。压裂施工后,产生多条裂缝,缝与缝之间相互干扰产生的诱导应力叠加,对井筒附近应力分布影响较大,不可忽略。该文建立考虑诱导应力的地层应力场模型,根据Drucker—Prage准则,引入地层稳定性系数,研究不同生产条件下地层的稳定性,为防砂设计提供参考。

1 近井地带应力分布模型

气井进行压裂施工后,产生多条人工裂缝,在生产时,人工裂缝内的流体具有较高的压力,裂缝与裂缝之间会产生诱导应力场,诱导应力场改变原地应力分布,对出砂临界生产压差影响较大。根据弹性力学平面问题的傅里叶变换,得到诱导应力场分布,进而得到近井地带应力场。

假设条件:

- 1) 储层岩石各向同性、均质,孔隙、裂缝内充满流体;
- 2) 压裂产生垂直裂缝;
- 3) 气体从裂缝壁面以线性流的形式流入裂缝。

1.1 井眼围岩应力场

压应力为正,拉应力为负,根据弹性力学理论,井眼附近应力分布为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \left(1 - \frac{r_w^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} - \frac{4r_w^2}{r^2}\right) \times \\ \quad \cos 2\theta + \tau_{xy} \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} - \frac{4r_w^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \\ \sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \\ \quad \tau_{xy} \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \\ \sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_x - \sigma_y) \left(\frac{r_w}{r}\right)^2 \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy} \left(\frac{r_w}{r}\right)^2 \sin 2\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 为极坐标下井眼附近应力,MPa; σ_x 、 σ_y 、 σ_v 、 τ_{xy} 为井筒局部坐标系下应力,Pa; r_w 为井眼半径,m; θ 为任意径向与最大主应力方向逆时针旋转的极坐标角,(°); ν 为泊松比,无因次; r 为极坐标半径,m。

1.2 气体流动摩擦拖拽力

气体从裂缝壁面流入裂缝,裂缝壁面附近压力梯度为^[14-15]:

$$\frac{dP}{dL} = \frac{Q\mu_g}{2HL_r k} \quad (2)$$

式中: P 为裂缝壁面附近压力,MPa; L 为垂直裂缝壁面的距离,m; Q 为产量, m^3/s ; μ_g 为气体黏度, $Pa \cdot s$; H 为缝高,m; L_r 为缝长,m; k 为渗透率, μm^2 。

单位长度上气体对岩石施加的摩擦拖拽力为:

$$\frac{dF}{dL} = -\frac{dP}{dL} \phi \quad (3)$$

式中: ϕ 为孔隙度,无因次; F 为气体流动摩擦拖拽力,MPa。

对上式积分,得到:

$$F = \phi \left[P_e - P_w - \frac{Q\mu_g}{2HL_r k} \left(L - \frac{W_f}{2} \right) \right] \quad (4)$$

式中: P_e 为原始地层压力,Pa; P_w 为井底流压,Pa; W_f 为缝宽,m。

产量可由式(5)计算得到^[15]:

$$Q = \frac{k_r h (P_e^2 - P_{wf}^2)}{T\mu_g Z} \left(\ln \frac{Re}{r_{wef-app}} \right) \quad (5)$$

式中: k_r 为储层渗透率, μm^2 ; h 为储层厚度,m; P_e 为泄流外边界压力,MPa; P_{wf} 为井底流压,psi; T 为储层温度,K; μ_g 为气体黏度, $mPa \cdot s$; Z 为天然气压缩系数,无因次; R_e 为泄流半径,m; $r_{wef-app}$ 为关于压裂井产量的函数,通过迭代求解得到。

1.3 诱导应力场

在生产过程中,人工裂缝内充满流体,每条裂缝内的流体都会产生诱导应力,单条裂缝诱导应力场为:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_x = \Delta p \left\{ \frac{r}{\sqrt{r_1 r_2}} \cos\left(\theta - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) + \frac{c^2 r}{\sqrt{(r_1 r_2)^3}} \sin\theta \sin\left[\frac{3}{2}(\theta_1 + \theta_2)\right] - 1 \right\} \\ \Delta\sigma_z = \Delta p \left\{ \frac{r}{\sqrt{r_1 r_2}} \cos\left(\theta - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}\right) - \frac{c^2 r}{\sqrt{(r_1 r_2)^3}} \sin\theta \sin\left[\frac{3}{2}(\theta_1 + \theta_2)\right] - 1 \right\} \\ \Delta\sigma_y = \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_z) \\ \Delta\tau_{xz} = \Delta p \frac{c^2 r}{\sqrt{(r_1 r_2)^3}} \sin\theta \cos\left[\frac{3}{2}(\theta_1 + \theta_2)\right] \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{式中: } \begin{cases} r = \sqrt{x^2 + c^2} \\ r_1 = \sqrt{x^2 + (z+c)^2} \\ r_2 = \sqrt{x^2 + (z-c)^2} \end{cases}; \begin{cases} \theta = \tan^{-1}(-x/z) \\ \theta_1 = \tan^{-1}\{-x/(z+c)\} \\ \theta_2 = \tan^{-1}\{-x/(z-c)\} \end{cases}$$

$\Delta\sigma_x$ 、 $\Delta\sigma_z$ 、 $\Delta\sigma_y$ 、 $\Delta\tau_{xz}$ 为单条裂缝产生的诱导应力,MPa; Δp 为裂缝内流体净压力,取原始孔隙流体压力与裂缝内压力之差,Pa; c 为半缝高,m; x 为裂缝面上某一点的 x 坐标; y 为裂缝面上某一点的 y 坐标; z 为裂缝面上某一点的 z 坐标。

把裂缝简化为二维平板,根据极坐标与直角坐标系坐标变换,有:

$$\begin{cases} \sigma_{r1} = \Delta\sigma_x \sin\omega + \Delta\sigma_z \cos\omega \\ \sigma_{\theta1} = \Delta\sigma_x \cos\omega - \Delta\sigma_z \sin\omega \end{cases} \quad (7)$$

式中: ω 为极坐标角,(°)。

最终井筒附近应力分布是诱导应力、气体流动拖拽力、围岩应力三者之合力:

$$\sigma_{\text{总}} = \sigma_{\text{地应力}} + F_{\text{拖拽}} + \sigma_{\text{诱导}} \quad (8)$$

式中: $\sigma_{\text{地应力}}$ 为原始有效地应力,MPa; $F_{\text{拖拽}}$ 为气体

流动拖拽力,MPa; $\sigma_{\text{诱导}}$ 为裂缝产生的诱导应力,MPa。

2 出砂预测方法

采用 Drucker—Prage 强度准则建立出砂预测方法:

$$\begin{cases} J_1 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2] \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为诱导应力、气体拖拽力、孔眼围岩应力的合力,Pa; J_1 为第一有效应力不变量,Pa; J_2 为应力偏量不变量,Pa。

定义地层稳定性系数 S 如下:

$$S = C_0 + C_1 J_1 - \sqrt{J_2} \quad (10)$$

$S > 0$,地层稳定,不出砂; $S = 0$,临界出砂状态,有轻微出砂; $S < 0$,地层破坏,出砂。

其中, C_0 取10, C_1 取0.6。

3 实例计算

有两口气井,KS2-2-10井在生产时不出砂,KS2-2-20井出砂,两口井参数见表1。

计算时假设形成对称双翼缝,设置不同的生产压差,计算得到稳定性系数、产量随生产压差的变化趋势(图1)。

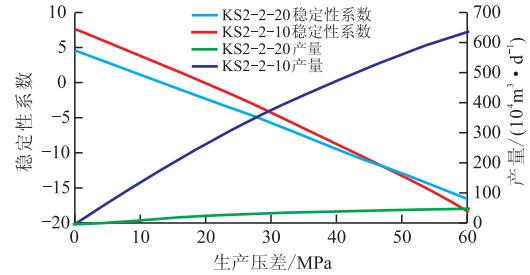


图1 稳定性系数、产量随生产压差变化曲线
Fig. 1 Variation of producing pressure drop with stability coefficients and production

表1 KS2-2-10、KS2-2-20井参数
Table 1 Parameters of well KS2-2-10 and well KS2-2-20

井号	裂缝长度/m	孔隙度,%	裂缝高度/m	泊松比	孔隙流体压力/MPa	气体相对密度	气体黏度/(mPa·s)	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
KS2-2-20	100	6.6	74	0.21	103.4	0.76	0.027	70
KS2-2-10	100	6.6	210	0.21	112.84	0.76	0.027	70

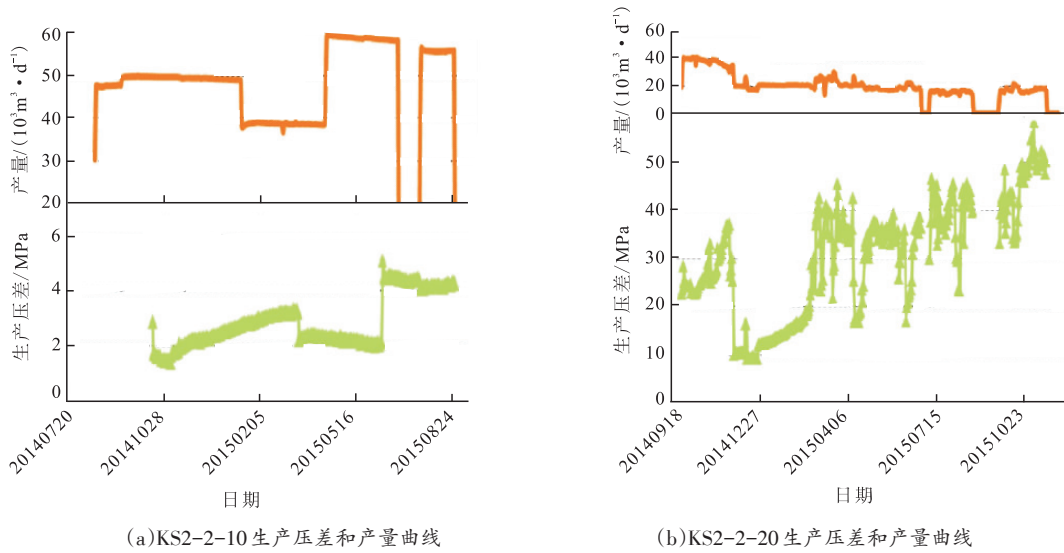


图2 现场测得生产压差和产量

Fig. 2 Measured producing pressure drop and production

根据现场测试数据,两口井实测产量和生产压差见图2。

从图1、图2可知,KS2-2-10井临界生产压差为19.8 MPa,对应产量为 $251 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,在生产过程中,KS2-2-10井生产压差长期保持在2~5 MPa,产量介于 $(30 \sim 60) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,远远低于临界生产压差;KS2-2-20井临界生产压差为13.59 MPa,对应产量为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,在生产过程中,KS2-2-20井生产压差介于20~50 MPa,产量介于 $(20 \sim 40) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实际生产压差远远高于临界生产压差。

4 出砂影响因素分析

4.1 诱导应力对地层稳定性的影响

分以下三种情况研究诱导应力对稳定性系数的影响:不考虑诱导应力,考虑诱导应力的对称双翼缝,考虑诱导应力的两对对称双翼缝。其中对称双翼缝缝高等于产层厚度,两条单缝夹角 180° ,单缝之间夹角 90° 。裂缝分布情况见图3。

基于表1所示数据,计算得到稳定性系数在不同的诱导应力下的变化规律见图4。

不考虑诱导应力时,储层岩石只受到原地应力和气体拖拽力的影响,从表2中计算得到的不同情况下两口井的临界生产压差来看,考虑诱导应力时,储层岩石还受到其它裂缝产生的诱导应力的影响,且

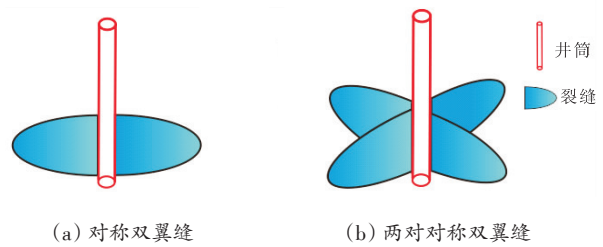


图3 裂缝分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fractures distribution

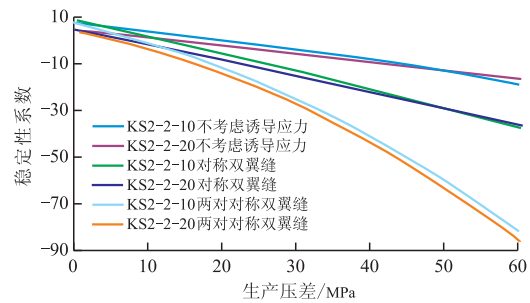


图4 不同诱导应力下稳定性系数变化规律

Fig. 4 Variation rules of stability coefficients under different induced stress

表2 不同条件下两口井生产压差

Table 2 Producing pressure drop of two wells under different conditions

井号	临界生产压差/MPa		
	不考虑诱导应力	对称双翼缝	两对对称双翼缝
KS2-2-10	17.6	11.5	9
KS2-2-20	13.57	7.45	5.12

裂缝数量越多,储层岩石受到的诱导应力越大,临界生产压差越低,岩石稳定性越低。不考虑诱导应力时稳定性系数随生产压差增加而下降的速度较慢,简化成的裂缝数量越多,稳定性系数下降越快,考虑诱导应力与否,稳定性系数下降速度都是先慢后快。

4.2 孔隙度、渗透率对地层稳定性的影响

分别设置孔隙度为0.01%~10%、渗透率为 $(0.02 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, KS2-2-10井生产压差11.5 MPa, KS2-2-20井生产压差7.45 MPa,计算得到的地层稳定性系数见图5、图6。

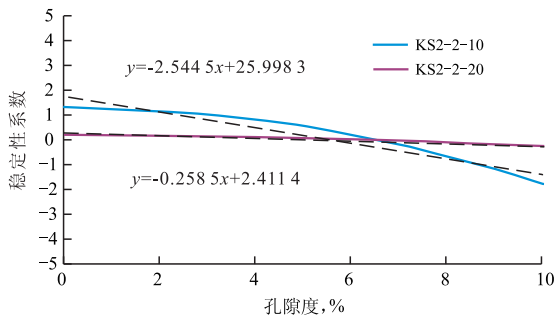


图5 稳定性系数随孔隙度变化规律

Fig. 5 Variation rules of stability coefficients with porosity

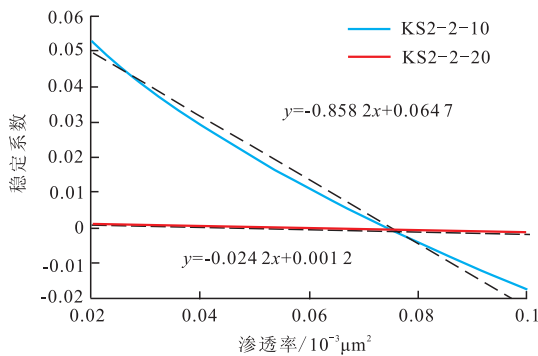


图6 稳定性系数随渗透率变化规律

Fig. 6 Variation rules of stability coefficients with permeability

稳定性系数受到孔隙度、渗透率的影响较大,总的来说,随着孔隙度、渗透率的增加,稳定性系数降低;当其他参数一定时,孔隙度、渗透率越大,气体产量越高,气体流速越快,气体拖拽力也就越大,所以地层稳定性系数降低。

4.3 裂缝长度对地层稳定性的影响

分别设置裂缝长度1~150 m,孔隙度为6.6%、

渗透率为 $70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, KS2-2-10井生产压差11.5 MPa, KS2-2-20井生产压差7.45 MPa,计算得到的地层稳定性系数见图7。

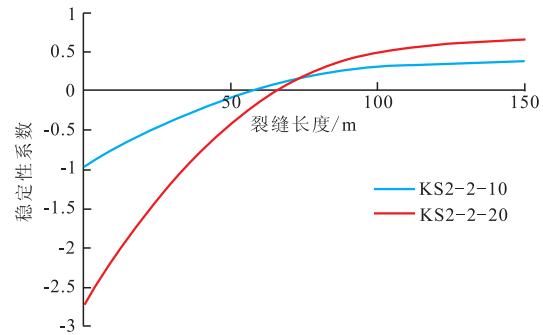


图7 稳定性系数随裂缝长度变化规律

Fig. 7 Variation rules of stability coefficients with the length of fractures

当生产压差一定时,产量随裂缝长度增加而增加,但是产量不是线性增加,单位裂缝壁面面积上的气体流速降低,气体拖拽力降低,稳定性系数随裂缝长度增加而增加。增加裂缝长度,有利于稳定性系数,降低出砂风险。

5 结论

1) 气体拖拽力对出砂有一定影响,高生产压差引起的诱导应力也是造成出砂的主要因素。

2) 诱导应力对地层稳定性系数影响较大,裂缝数量越多,产生的诱导应力越大,地层越不稳定;稳定性系数与孔隙度、渗透率呈负相关,随孔隙度、渗透率增加而减少的速度先快后慢;裂缝长度越长,地层稳定性系数越大,越不容易出砂。

3) 在一定的产量要求下,为避免储层出砂,可以适当降低生产压差,增加人工裂缝长度。

参考文献

- [1] 刘玉奎,郭肖,唐林,等.天然裂缝对气井产能影响研究[J].油气藏评价与开发,2014,4(6):25-28.
- [2] Almedeij J H, Algharaib M K. Influence of sand production on pressure drawdown in horizontal wells: Theoretical evidence[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 47 (3): 137-145.
- [3] 刘洪,刘向君,孙万里,等.水平井眼轨迹对气井出砂趋势及工作制度的影响[J].天然气工业,2006,26(12):103-105.
- [4] 王小鲁,杨万萍,严焕德,等.疏松砂岩出砂机理与出砂临界压差计算方法[J].天然气工业,2009,29(7):72-75.

- [5] 李士斌,官兵,张立刚,等.裂缝诱导应力场影响因素敏感性评价[J].油气藏评价与开发,2017,7(2):23-30.
- [6] 王彦利,陈小凡,邓生辉,等.疏松砂岩临界出砂压差的计算方法研究及应用[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(1):78-80.
- [7] 刘先珊,张林,秦鹏伟,等.不同物性的储层砂岩出砂力学响应分析[J].土木建筑与环境工程,2014,36(2):28-34.
- [8] 董长银,王爱萍.出砂水平井近井塑性区出砂半径预测研究[J].中国矿业大学学报,2012,41(4):663-668.
- [9] 胡南,夏宏泉.高陡构造异常高压深气层出砂测井预测研究[J].测井技术,2014,38(5):617-621.
- [10] Papamichos E, Vardoulakis I, Tronvoll J, et al. Volumetric sand production model and experiment[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 25(8):789-808.
- [11] Hoek P J V D, Hertogh G M M, Kooijman A P, et al. A new concept of sand production prediction: Theory and laboratory experiments[J]. Spe Drilling and Completion, 2000, 15(4):261-273.
- [12] Wang Y, Wu B. Borehole collapse and sand production evaluation: Experimental testing, analytical solutions and field implications[J]. Bmc Infectious Diseases, 2001, 12(14): 584-584.
- [13] 赵栋.考虑生产影响的气井出砂预测方法研究[D].中国石油大学,2010.
- [14] 雷征东,李相方,程时清.考虑拖曳力的出砂预测新模型及应用[J].石油钻采工艺,2006,28(1):69-72.
- [15] 李士伦.天然气工程[M].北京:石油出版社,2000.

(编辑 尹淑容)

(上接第37页)

- [8] 曲占庆,翟恒立,田相雷,等.考虑压敏效应的变启动压力梯度试验研究[J].石油钻探技术,2012,40(3):78-82.
- [9] 熊健,刘向君,陈朕,等.低渗气藏压裂井动态产能预测模型研究[J].岩性油气藏,2013,25(2):82-91.
- [10] 聂向荣,程时清,高照敏,等.一种新的低渗透气藏产能方程[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2012,2(14):96-97.
- [11] 张新,冯麟惠,王钊淼,等.考虑应力敏感储层与变启动压力梯度的低渗气藏产能方程[J].河南化工,2012,29(9-10):8-11.
- [12] 李治平,万怡姝,张喜亭.低渗透气藏气井产能评价新方法[J].天然气工业,2007,27(4):85-87.
- [13] 张烈辉,梁斌,刘启国,等.考虑滑脱效应的低渗低压气藏的气井产能方程[J].天然气工业,2009,29(1):76-78.
- [14] 张跃磊,李治平,李光涛,等.考虑启动压力梯度及滑脱效应的气井产能主控因素分析[J].石油天然气学报,2011,33(11):146-150.
- [15] 谭苗,张志全,韩鑫,等.低渗透气藏压裂井产能公式推导与分析[J].天然气与石油,2013,31(1):54-81.
- [16] 程林松.高等渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2011:57-58.
- [17] 孙来喜,李成勇,李成.低渗透气藏应力敏感与气井产量分析[J].天然气工业,2009,29(4):74-76.
- [18] 杨滨,姜汉桥,陈民锋,等.应力敏感气藏产能方程研究[J].西南石油大学学报(自然科学版)2008,30(5):158-160.
- [19] 胥洪俊,范明国,康征,等.考虑渗透率应力敏感的低渗气藏产能预测公式[J].天然气地球科学,2008,19(1):145-147.
- [20] Kinkenberg L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. Drilling and Production Practice, 1941, 2(2): 200-213.
- [21] 李治平.油气层渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2001.
- [22] 王昔彬,刘传喜.大牛地致密低渗透气藏启动压力梯度及应用[J].石油与天然气地质,2005,26(5):698-702.
- [23] 郝鹏程,向俊华,王玮.低渗透油层启动压力梯度与渗透率的关系研究[J].石油与天然气学报,2008,30(5):315-317.
- [24] 李士伦.天然气工程[M].北京:石油工业出版社,2000:117-119.
- [25] 李乐忠,李相方,何东博.考虑变启动压降低渗气藏产能方程的建立[J].油气井测试,2010,19(1):5-8.

(编辑 杨友胜)