

缝洞型油藏裂缝宽度变化预测模型及其应用

王超¹, 张强勇¹, 刘中春², 张岳¹, 李兴军¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东济南 250061; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:在缝洞型油藏中裂缝作为储集空间及渗流通道,其闭合与否对油田生产有着重要影响。以塔河缝洞型油藏为背景,对裂缝是否闭合进行预测,建立考虑内压变化的有限元力学模型,获得不同形态裂缝闭合过程及闭合规律。通过正交试验设计研究多因素对裂缝闭合的影响,并借助多元回归分析方法建立裂缝宽度随裂缝倾角、裂缝长度、侧压力系数变化的预测模型。结果表明:裂缝的长度越长、所处地层侧压力系数越大,裂缝越容易闭合;倾角对裂缝闭合的影响与所处地应力场有关,在构造应力小于垂直应力的地层中,倾角越小的裂缝越容易闭合;侧压力系数对裂缝闭合影响最大,裂缝长度次之,裂缝倾角影响最小。

关键词:缝洞型油藏; 裂缝长度; 侧压力系数; 裂缝倾角; 预测模型

中图分类号:TE 344 **文献标志码:**A

引用格式:王超,张强勇,刘中春,等. 缝洞型油藏裂缝宽度变化预测模型及其应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):86-91.

WANG Chao, ZHANG Qiangyong, LIU Zhongchun, et al. Prediction model for fracture width changes in vug-fracture oil reservoirs and its application [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1): 86-91.

Prediction model for fracture width changes in vug-fracture oil reservoirs and its application

WANG Chao¹, ZHANG Qiangyong¹, LIU Zhongchun², ZHANG Yue¹, LI Xingjun¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center of Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: In vug-fracture oil and gas reservoirs, the fractures are not only the main reservoir space, but also the seepage channels between the vugs and caves, so the opening and closure of the fractures have an important influence on oil and gas production. In order to predict the variations of the fracture width, a finite element mechanical model was established, based on the geological data from Tahe Oilfield, considering the change of internal pressure, in which the closure process of the fractures under different conditions can be simulated. The effects of various factors on the closure of fractures were analyzed via an orthogonal testing method. Based on multivariable regression analysis, a model to predict the variation of the fracture as a function of fracture dip, fracture length and lateral pressure coefficient was established. The simulation results show that fractures with a longer length and a larger lateral pressure coefficient are more vulnerable for closure. The effect of fracture dip on fracture closure can be influenced by the local stress distribution. In the strata that the tectonic stress is smaller than the vertical stress, the fractures with smaller dip are easier to close. The lateral pressure coefficient has a larger effect on the closure of fractures than that of the fracture length and fracture dip.

Keywords: vug-fracture oil reservoir; length of fracture; lateral pressure coefficient; fracture dip; prediction model

塔河油田奥陶系油藏为典型的碳酸盐岩油藏, 油藏埋深为 5 300 ~ 6 200 m, 为特大型、超深层、低丰

度的稠油油藏。缝洞型碳酸盐岩油藏储集空间主要由溶洞和裂缝两种基本结构组合而成,其中溶洞是主要储集空间,裂缝既是储集空间也是溶洞间渗流通道^[1-2]。在采油过程中随着地层压力的下降,井下大裂缝出油通道闭合,严重影响了油井的产量及油藏的采收率^[3-4]。针对缝洞型油藏裂缝闭合问题,前人做了大量研究工作,对裂缝宽度的研究主要针对有外力作用下裂缝开启的变化规律^[5-9],但对于地层压力的减小导致裂缝宽度减小的变化规律及对裂缝闭合影响因素的认识还比较模糊。笔者通过数值方法从数值模拟角度出发,采用基于有限元理论的岩石破裂分析方法,研究不同地层压力下,不同裂缝倾角、裂缝长度、侧压力系数的缝洞型裂缝的闭合过程,通过正交试验并借助多元回归分析的方法建立多因素影响下裂缝宽度变化的预测公式,分析不同影响因素对裂缝闭合的影响规律。

1 考虑内压变化的有限元力学模型

1.1 数值分析模型与计算条件

塔河油田成像测井及取心资料统计表明,裂缝以高角度缝为主,部分为垂直裂缝。高角度裂缝周围围岩是致密且坚硬的泥晶灰岩,属于碳酸盐岩^[10-14],弹性模量达到 36.3 GPa,抗压强度为 74.2 MPa,压拉比为 19.5,内摩擦角和黏聚力分别为 36.05° 和 2 MPa。影响裂缝闭合的主要因素有裂缝长度 L 、裂缝倾角 θ 和侧压力系数 K 。本文中主要考虑裂缝内压 p 变化过程中裂缝的闭合情况,考虑到裂缝受力及变形特点,采用平面应变模型进行数值计算分析。

图 1 为裂缝的数值分析模型及边界条件,在此分析模型中,裂缝处于在由上覆岩层自重产生的竖向应力 $Q = \gamma H$ (γ 取 25 kN/m³) 以及水平应力共同

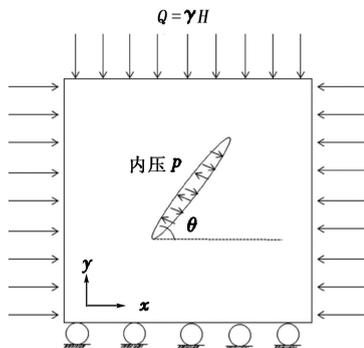


图 1 数值分析模型

Fig.1 Numerical analysis model

作用的地应力场中。水平应力与竖向应力的比值为侧压力系数。模型左右为水平应力边界条件,底面

为固定边界条件,模型通过内压 p 的不断变化研究裂缝闭合规律。

1.2 基于有限元理论的岩石破裂分析方法

采用基于有限元理论的岩石破裂分析方法^[15-16],一方面从细观力学角度考虑材料性质的非均匀性和缺陷分布的随机性,另一方面在数值方法中借助连续介质的方法实现非均匀性材料破坏过程的数值模拟。考虑岩石力学性质非均匀性分布情况,材料力学性质的统计分布密度为

$$\varphi(\alpha) = \frac{m}{\alpha_0} \left(\frac{\alpha}{\alpha_0} \right)^{m-1} \exp\left(-\frac{\alpha}{\alpha_0}\right). \quad (1)$$

式中, $\varphi(\alpha)$ 为材料力学性质的统计分布密度; α 为材料介质基元体力学性质参数; α_0 为基元体力学参数性质的平均值; m 为介质的均匀性系数,反映材料的均匀程度。

该分析方法选择带拉伸破坏准则的摩尔—库仑准则,该准则包括最大拉应力准则和摩尔—库仑准则。其主要作用是在判断单元是否发生损伤时,首先判断单元是否达到拉伸准则,若未达到,则继续对该单元使用摩尔—库仑准则判断。带拉伸破坏准则的表达式为

$$\begin{cases} \sigma_1 - \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \sigma_3 \geq \sigma_c, \sigma_1 > \sigma_c - \lambda\sigma_1; \\ \sigma_3 \leq -\sigma_1, \sigma_1 \leq \sigma_c - \lambda\sigma_1. \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ_1 和 σ_3 为主应力, MPa; ϕ 为摩擦角, (°); λ 为残余强度系数; σ_1 为抗拉强度, MPa; σ_c 为极限应力条件下单轴抗压强度, MPa。

通过以上方法可计算并动态演示裂缝闭合的整个过程。

2 裂缝闭合计算结果分析

2.1 单影响因素下裂缝闭合过程

影响裂缝闭合的主要因素为裂缝长度、裂缝倾角及侧压力系数,通过 RFPA 计算得到不同影响因素下裂缝的闭合过程,图 2、3 为不同因素下裂缝闭合过程。

由图 2、3 可以看出:采用的方法可以很好地模拟裂缝闭合的全过程;裂缝在闭合过程中,首先在裂缝两端出现应力集中区,并在裂缝周围不断扩展,导致裂缝周围压应力不断增加;随着地层压力降低,裂缝两侧位移不断增大,裂缝宽度减小,当地层压力降低到一定值时裂缝出现完全闭合,成为无效裂缝。

图 4 为不同影响因素下裂缝宽度随地层压力降幅变化关系曲线。由图 4 可以看出:裂缝宽度随着

地层压力降幅(即地层降压幅度)的增加而减小,说明地层压力下降导致裂缝闭合,当地层压力降幅增大到一定值时,裂缝宽度变为0,即裂缝闭合;当地层压力降幅保持不变时,裂缝长度越长、侧压力系数

越大、倾角越小,裂缝宽度越小,说明裂缝长度越长、侧压力系数越大,裂缝越容易产生闭合;在垂直应力大于构造应力的地层中,随着裂缝倾角的增大,裂缝因受竖向最大主应力产生的拉张作用而不易闭合。

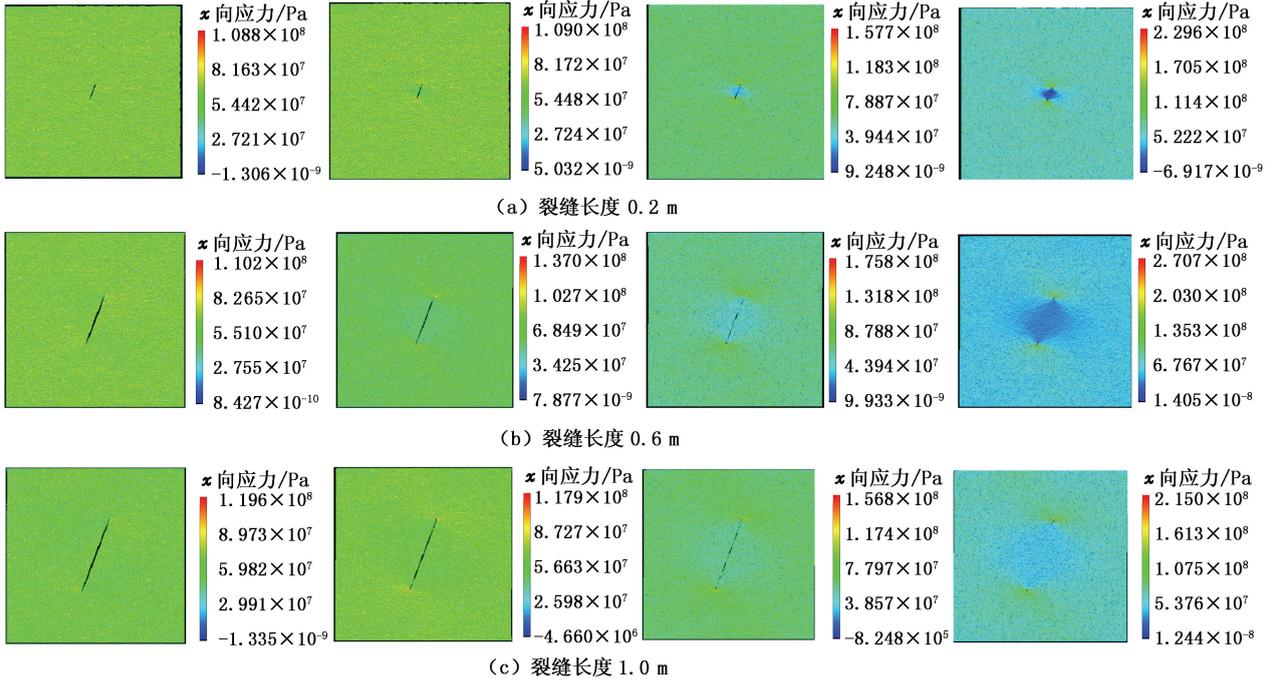


图2 不同长度裂缝闭合过程

Fig. 2 Closure process of different length fracture

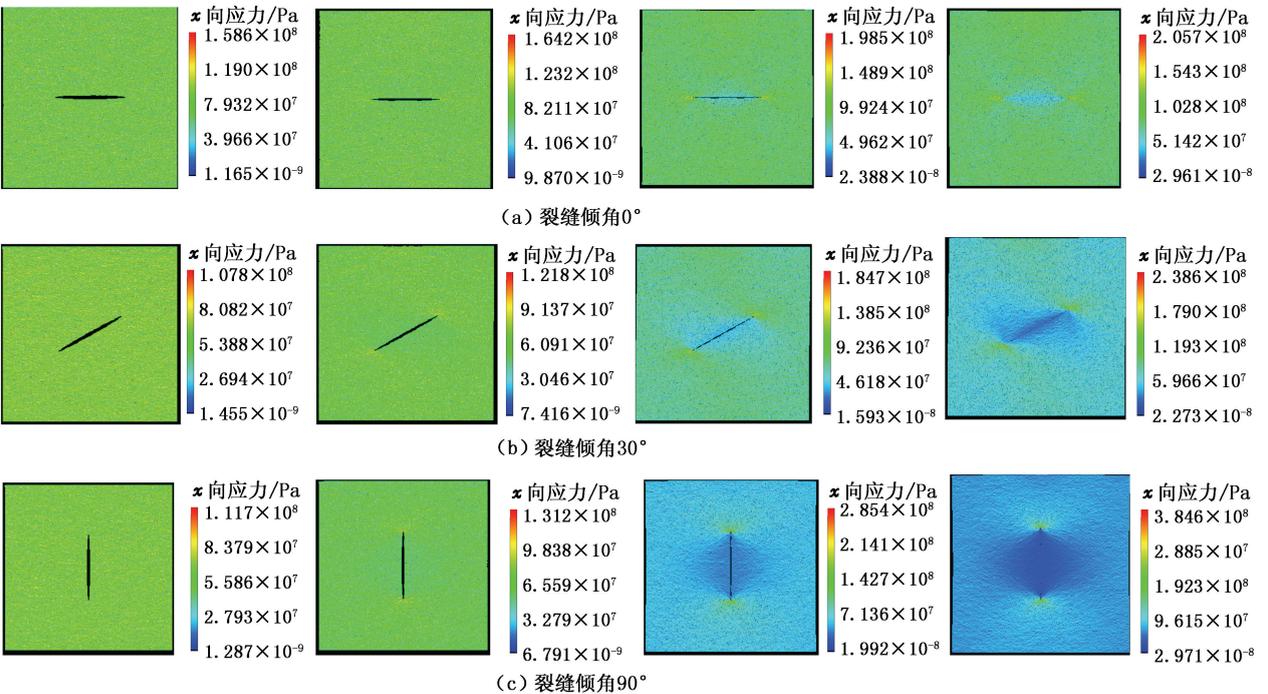


图3 不同倾角裂缝闭合过程

Fig. 3 Closure process of different angle fracture

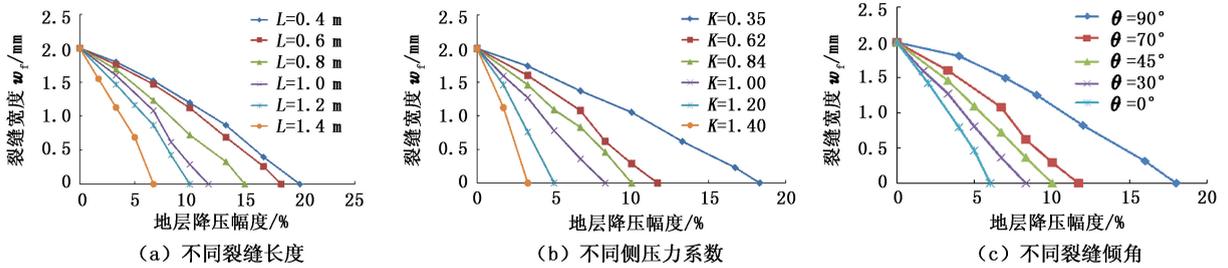


图4 不同影响因素下缝宽度随地层压力降幅变化曲线

Fig.4 Variation of fracture width with formation pressure decline under different influencing factors

2.2 裂缝缝宽变化的影响因素

对于某一特定地层,其在采油过程中地层压力

降幅不变,依次改变缝长、裂缝倾角、侧压力系数,分析各参数对缝宽变化的影响,结果如图5所示。

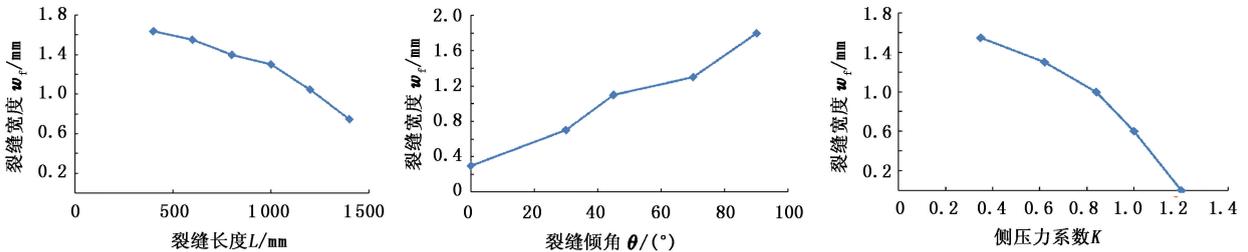


图5 裂缝宽度随不同影响因素变化曲线

Fig.5 Variation of fracture width with different influencing factors

由图5可以看出:裂缝宽度随裂缝长度和侧压力系数的增加而减小,随裂缝倾角的增大而增大。即降压速率和裂缝长度越大,倾角越小,裂缝越容易闭合。

分别采用线性式、多项式、指数式及对数式对不同影响因素与裂缝宽度关系进行拟合,并确定不同影响因素与裂缝宽度的最优关系式和变化曲线,结果见表1。

表1 裂缝宽度与各影响因素的关系式

Table 1 Relationship between fracture width and influencing factors

影响因素	关系式	相关系数	最优关系式
裂缝长度 L	$w_f = -0.0009L + 2.0595$	0.9490	二阶多项式
	$w_f = -6 \times 10^{-7}L^2 + 0.0003L + 1.6107$	0.9940	
	$w_f = 2.41e^{0.0007L}$	0.8922	
裂缝倾角 θ	$w_f = -0.658 \ln L + 5.7033$	0.8513	二阶多项式
	$w_f = 0.0162\theta + 0.2782$	0.9770	
	$w_f = 2 \times 10^{-5}\theta^2 + 0.0142\theta + 0.3023$	0.9790	
侧压力系数 K	$w_f = 0.3584e^{0.0192\theta}$	0.9360	二阶多项式
	$w_f = -1.7879K + 2.3239$	0.9350	
	$w_f = -1.7872K^2 + 0.9661K + 1.4207$	0.9650	
	$w_f = -1.148 \ln K + 0.541$	0.9326	

由表1可知,裂缝宽度与各影响因素之间存在良好的二次函数关系,分别采用二次函数可以很好地描述裂缝宽度随裂缝长度、侧压力系数和裂缝倾

角的变化关系。

3 裂缝宽度变化预测公式

3.1 正交试验设计研究多因素影响

裂缝的闭合是在多因素影响下共同作用的结果,为使试验更加高效、快速并考虑影响因素之间的关系,采用正交试验设计方法研究多因素对裂缝宽度的影响。在前期大量数值试验的基础上,考虑裂缝长度、裂缝倾角和侧压力系数3个因素,每个因素设置5个水平,正交试验设计表见表2。

对正交试验结果采用极差分析的方法,此方法具有简单、直观等特点。对不同因素对缝宽的影响进行极差计算,

$$R_j = \max(k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jm}) - \min(k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jm}). \quad (3)$$

式中, k_{jm} 为第j列因素水平对应的试验指标和的平均值; R_j 为第j列因素的极差,反映了第j列因素水平波动时试验指标的变动幅度, R_j 越大,反映该因素对试验指标的影响越大。

正交试验缝宽极差分析结果见表3。由表3可知,侧压力系数极差最大,裂缝长度极差次之,裂缝倾角最小。侧压力系数对裂缝宽度变化影响最大,裂缝长度次之,裂缝倾角最小。

表2 正交试验设计表

Table 2 Orthogonal experimental design table

组号	裂缝长度 L/m	裂缝倾角 $\theta/(\circ)$	侧压力 系数 K	裂缝宽度 w_f/mm
1	0.4	0	0.35	0.79
2	0.4	30	0.62	0.90
3	0.4	45	0.84	0.78
4	0.4	70	1.00	0.80
5	0.4	90	1.20	0.62
6	0.6	0	0.62	0.61
7	0.6	30	0.84	0.60
8	0.6	45	1.00	0.40
9	0.6	70	1.20	0.25
10	0.6	90	0.35	1.80
11	0.8	0	0.84	0.13
12	0.8	30	1.00	0.11
13	0.8	45	1.20	0.00
14	0.8	70	0.35	1.65
15	0.8	90	0.62	1.73
16	1.0	0	1.00	0.00
17	1.0	30	1.20	0.00
18	1.0	45	0.35	1.02
19	1.0	70	0.62	1.30
20	1.0	90	0.84	1.26
21	1.4	0	1.20	0.00
22	1.4	30	0.35	0.34
23	1.4	45	0.62	0.36
24	1.4	70	0.84	0.40
25	1.4	90	1.00	0.42

表3 正交试验缝宽极差分析结果

Table 3 Diversification result of fracture width in orthogonal experiment

缝宽极 差分析	影响因素		
	裂缝长度	裂缝倾角	侧压力系数
k_1	2.390	0.306	1.120
k_2	0.730	2.010	2.600
k_3	0.724	0.512	0.634
k_4	0.716	0.880	0.346
k_5	0.304	1.166	0.174
R_j	2.094	1.704	2.426

3.2 多元回归分析建立裂缝宽度变化预测公式

通过二次多项式拟合得到了裂缝宽度随裂缝长度、裂缝倾角、侧压系数等单因素变化的关系表达式,为考虑多因素联合作用对裂缝宽度变化的影响,采用多元回归分析方法建立裂缝宽度变化预测公式。

用二次函数可以较好地表达裂缝宽度与3个因素之间的关系,因此在建立多因素影响下的裂缝宽度变化预测公式时,可假设裂缝宽度 w_f 与裂缝长度 L 、裂缝倾角 θ 、侧压力系数 K 之间存在如下函数关系:

$$w_f = A_1 L^2 + A_2 L + B_1 \theta^2 + B_2 \theta + C_1 K^2 + C_2 K + D. \quad (4)$$

式中, A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 、 C_2 和 D 为待定系数。

根据式(4)以及表2的数值计算结果,通过多元回归优化求解可得到式(4)中的待定系数,获得

裂缝宽度随裂缝长度、裂缝倾角和侧压系数变化的预测公式,

$$w_f = -7.1 \times 10^{-7} L^2 + 0.0009L + 0.0001\theta^2 + 0.0004\theta - 0.5K^2 - 0.5K + 0.9. \quad (5)$$

公式(5)的相关系数达到0.92,精度较高。通过式(5)可以得到已知形态的裂缝在地层压力变化过程中裂缝宽度的变化规律。

4 工程实例应用

准确确定缝洞型油藏裂缝是否闭合是油藏开采的重要指标。将建立的裂缝宽度变化预测公式应用到塔河油田典型的开发单元中,对其中的6条裂缝进行分析,结果见表4。

表4 工程实例分析结果

Table 4 Results of project instance analysis

裂缝	缝长 L/m	倾角 $\theta/$ (\circ)	侧压力 系数 K	缝宽 w_f/mm	裂缝状态
裂缝1	1.5	90	0.62	0.99	未闭合
裂缝2	1.3	48	0.62	0.62	未闭合
裂缝3	1.6	39	0.62	0.19	未闭合
裂缝4	2.0	25	0.62	<0	闭合
裂缝5	1.8	0	0.62	<0	闭合
裂缝6	2.2	71	0.62	<0	闭合

由表4可知:裂缝1~3在内压变化过程中裂缝没有闭合,裂缝4~6发生闭合,证明在实际的油田开发过程中会产生裂缝的闭合。在塔河油田开采过程中应选择裂缝长度较短、侧压力系数较小且高角度裂缝发育的地层进行开采,避免裂缝闭合。

5 结论

(1) 在裂缝闭合过程中,裂缝两端出现应力集中区,并在裂缝周围不断扩展,导致裂缝周围压应力不断增加。随着地层压力降低,裂缝两侧位移不断增大,裂缝宽度减小,当地层压力降低到一定值时,裂缝完全闭合,成为无效裂缝。

(2) 裂缝的长度越长、所处地层侧压力系数越大,裂缝越容易闭合;倾角对裂缝闭合的影响与所处地应力场有关,在构造应力小于垂直应力的地层中,倾角越小的裂缝越容易闭合;侧压力系数对裂缝闭合影响最大,裂缝长度次之,裂缝倾角最小。应选择裂缝长度较短、侧压力系数较小且高角度裂缝发育的地层进行开采,避免裂缝闭合。

(3) 利用建立的裂缝宽度变化预测公式可对不同生产压力水平下的裂缝闭合情况进行预测,为缝洞型油藏的石油开采提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 康玉柱. 中国古生代碳酸盐岩古岩溶储集特征与油气分布[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 1-12.
KANG Yuzhu. Characteristics and distribution laws of paleokarst hydrocarbon reservoirs in palaeozoic carbonate formations in china[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 1-12.
- [2] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 115-121.
LI Yang. The theory and method for development of carbonate fracture-cavity reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121.
- [3] OKASHA T M, FUNK J J, AL-SHIWAISH A J. Evaluation of recovery efficiency and residual oil saturation of two distinct Arabian carbonate reservoirs [R]. SCA 2003-37, 1998.
- [4] ZHANG Dong, LI Aifen, YAO Jun, et al. A single-phase fluid flow pattern in a kind of fractured-vuggy media[J]. Petroleum Science and Technology, 2011, 29(10): 1030-1040.
- [5] 李大齐, 康毅力, 曾义金, 等. 缝洞型储层缝宽动态变化及其对钻井液漏失的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5): 76-81.
LI Daqi, KANG Yili, ZENG Yijin, et al. Dynamic variation of fracture width and its effects on drilling fluid lost circulation in fractured vuggy reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(5): 76-81.
- [6] 李松, 康毅力, 李大齐, 等. 缝洞型储层井壁裂缝宽度变化 ANSYS 模拟研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2): 340-346.
LI Song, KANG Yili, LI Daqi, et al. ANSYS simulation of fracture width variation in fracture-cavity reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2): 340-346.
- [7] 练章华, 康毅力, 徐进, 等. 裂缝宽度预测的有限元数值模拟[J]. 天然气工业, 2001, 21(3): 47-50.
LIAN Zhanghua, KANG Yili, XU Jin, et al. Predicting fracture width by finite element numerical simulation. [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(3): 47-50.
- [8] 练章华, 康毅力, 唐波, 等. 井壁附近垂直裂缝宽度预测[J]. 天然气工业, 2003, 23(3): 44-46.
LIAN Zhanghua, KANG Yili, TANG Bo, et al. Prediction of vertical fracture widths near borehole face of the wall. [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(3): 44-46.
- [9] 李相臣, 康毅力, 张浩, 等. 致密砂岩与井筒连通 2 条垂直裂缝宽度变化的计算机模拟[J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(4): 57-59.
LI Xiangchen, KANG Yili, ZHANG Hao, et al. Computer modeling of the changes in width of two vertical fractures in tight sand connected to borehole [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 2007, 24(4): 57-59.
- [10] 张旭东, 薛承瑾, 张焯. 塔河油田托甫台地区岩石力学参数和地应力试验研究及其应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 132-134, 138.
ZHANG Xudong, XUE Chengjin, ZHANG Ye. Research and application of rock mechanical parameters and in-situ stress in Tuofutai area of Tahe Oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(6): 132-134, 138
- [11] 罗强. 碳酸盐岩应力-应变关系与微结构分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 28(增 1): 2656-2660.
LUO Qiang. Microstructure and stress-strain relationship of carbonate rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 28(sup1): 2656-2660.
- [12] 周新桂, 陈永峻, 孙宝珊, 等. 塔里木盆地北部地层岩石力学特征及地质学意义[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 8-12.
ZHOU Xingui, CHEN Yongqiao, SUN Baoshan, et al. Rock mechanics characteristics in northern Tarim Basin and its geologic significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 8-12.
- [13] 王鹏昊, 汤良杰, 邱海峻, 等. 塔里木盆地西北地区岩石力学格架及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增 3): 101-110.
WANG Penghao, TANG Liangjie, QIU Haijun, et al. Rock mechanics framework and its geological implication in northwest Tarim Basin, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(sup3): 101-110.
- [14] JAROT S, ARIFFIN S. Characterization, pressure, and temperature influence on the compressional and shear-wave velocity in carbonate rock [J]. International Journal of Engineering and Technology, 2009, 9(10): 80-93.
- [15] 张敏思, 朱万成, 侯召松, 等. 空区顶板安全厚度和临界跨度确定的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 543-548.
ZHANG Minsi, ZHU Wancheng, HOU Zhaosong, et al. Numerical simulation for determining the safe roof thickness and critical goaf span [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 543-548.
- [16] 贾蓬, 唐春安, 王述红. 巷道层状岩层顶板破坏机理[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 11-15.
JIA Peng, TANG Chun'an, WANG Shuhong. Destroy mechanism of tunnel with stratified roof [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 11-15.

(编辑 李志芬)