

引用格式:张冰岩,陈小凡,乐平.水侵缝洞型碳酸盐岩底水油藏弹性驱动单元开采研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(2):71-75.

ZHANG B Y, CHEN X F, YUE P. Research on unit mining by elastic drive of fractured-vuggy carbonate reservoir with bottom water by water intrusion[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 71-75.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.02.012

# 水侵缝洞型碳酸盐岩底水油藏弹性驱动单元开采研究

张冰岩,陈小凡,乐平

(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:**塔河缝洞型碳酸盐岩油藏因缝洞单元多,压力系统多以及渗流单元多,使得油水关系复杂,水体能量分布不平衡。针对封闭底水单缝单洞油藏弹性驱动单元油井开展在见水前出现水侵过程研究。封闭底水单缝单洞单元存在相连的水体,流体在溶孔中发生弹性膨胀,随着开采时间进行,开采过程因油藏压力衰减导致水侵是不可避免的,某个时期开始有水侵发生,基于缝洞型油藏特征,将侵入水简化为底水处理,继续发生弹性水驱以补充地层能量的亏空。根据泊稷叶定律公式揭示油井见水前溶洞压力、溶孔中累产油增量速率随时间都呈指数递减关系,早期递减快后期递减缓慢规律,并结合油藏工程改进的物质平衡方法计算出见水前弹性驱动时期水侵量。通过分析TH12523井为例,在弹性开采阶段发生水侵,弹性与水体共同驱动,整体开采过程实测累产油量增量速率、溶洞压力随时间变化结果与油藏动态预测结果一致。

**关键词:**缝洞型碳酸盐岩;弹性开采;累产油量;水侵量;溶洞压力

中图分类号:TE344

文献标识码:A

## Research on unit mining by elastic drive of fractured-vuggy carbonate reservoir with bottom water by water intrusion

ZHANG Bingyan, CHEN Xiaofan, YUE Ping

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

**Abstract:** As Tahe fractured-vuggy carbonate reservoir has many fractured-vuggy units, pressure systems and seepage units, its oil-water relation is complex and the water body energy distribution is unbalanced. Therefore, studies on the water intrusion process before water seepage is conducted for the elastic drive unit oil wells in single fracture and single hole reservoir with closed bottom water. There exists a connected water body. The fluid expands elastically in the dissolved hole. As time goes on, the water intrusion is inevitable due to the pressure decay of the reservoir during the mining process and begins at some point. Based on the characteristics of the fracture-cavity reservoir, the intrusion water is considered as the bottom water, and the elastic water flooding continues to supply the insufficient of the formation energy. According to the Poiseuille's equation, the pressure of the karst cave before water breakthrough and the incremental rate of the cumulative oil production in the dissolved pores both decrease exponentially with time, following the rules of rapid in the early stage and slow down in the later stage. Meanwhile, combining the improved material balance method of reservoir engineering to calculate the water influx during the elastic driving period before water breakthrough. Taking well-TH12523 as an example, water intrusion occurs during its elastic mining stage, and the elasticity and the water body drive together. The actual measured incremental rate of the measured oil production and the karst pressure varied with in the whole mining process are consistent with the dynamic prediction results of the reservoir.

**Key words:** fractured-vuggy carbonate rock, elastic mining, cumulative oil production, water influx, cavern pressure

塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏为典型的缝洞型油藏,碳酸盐岩经历多期岩溶作用过程,储集体空间分布丰富多彩,储层的纵横向非均质性严重(图1),

裂缝相互切割交叉,油藏内油水系统复杂,流体流动特征变化剧烈<sup>[1-3]</sup>。缝洞型碳酸盐岩油藏储层普遍含边底水,油田在开发早期易出现见水早,见水后含水

收稿日期:2019-05-24。

第一作者简介:张冰岩(1991—),女,在读硕士研究生,从事油气田开发研究。通讯地址:四川省成都市西南石油大学,邮政编码:610500。E-mail:2065904015@qq.com

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“多层砂岩油藏多井网条件下干扰机理”(2016ZX0501002-002)。

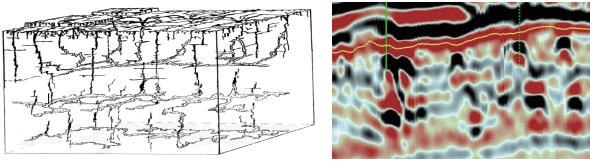


图1 碳酸盐岩缝洞型储集体发育系统

Fig. 1 Development system of fractured-vuggy carbonate reservoir

率增长过快,产量迅速递减的特征<sup>[4-6]</sup>。截至目前使用较为广泛的油藏工程方法和油田开发理论都以连续多孔介质渗流力学为基础,而缝洞型碳酸盐岩油藏中流体既出现在裂缝中的流动,也发生在溶洞中流动,而原曾以多孔介质中渗流为指导的油藏工程概念和理论方法将无法继续使用,则对油田的动态预测和控水稳油则难以有效把握,对油井动态特征错误判断使得油藏钻井成功率不高,开发效果也极其不理想,如何计算该类型储集体的生产动态特征为下一步制定开发井位部署和开发方案提供更为准确指导,是缝洞型碳酸盐岩油田开发摸索阶段中解决的难题,亟待研究专门针对缝洞型碳酸盐岩油藏开发的理论。

对含有底水并存在水侵的弹性驱动单元开采机理进行研讨,若油藏存在相连的水体,开采过程因油藏压力衰减导致水侵是不可避免的,通过泊稷叶定律,并结合改进的物质平衡方程计算,得到了定井底流压开采中单井见水前累产油量与压力随时间变化关系和侵水量。通过对该类油藏动态特征研究可以更加深入指导油田生产。

## 1 建立单元缝洞模型

塔里木盆地奥陶系缝洞型油藏处于地层较深处,地层饱和压力压差差距较大,且不存在气顶,驱动流体流动的天然能量主要包括原油膨胀、底水弹性驱动和岩石变形所释放的能量。缝洞型油藏水侵通道复杂多样,基于缝洞型油藏特征,将其简化为底水处理,假设:

1) 井通过垂直缝与溶洞相连,缝洞上部油,缝洞下部储水,洞呈圆柱状(图2)。

2) 油井开采早期主要依靠天然能量维持,生产过程中地层压力逐渐衰减,出现水侵是不可避免的,水侵后继续发生弹性水驱以补充地层能量的亏空,即溶孔里流体流动由溶洞里流体弹性膨胀释放能量

提供的。

3) 初始洞内的油水界面在缝以下,在采油过程中,油水界面渐渐向上移动,洞内的油水界面上升到溶孔之前时只产油,当油水界面上升到溶孔时,油井开始出现产水。

4) 油井定井底流压生产时只需考虑油水界面上移。

假设油井与长度为 $L$ 、溶孔半径为 $r$ (视为等效裂缝宽度)、孔隙度为 $\varphi_h$ 、断面面积为 $A$ 的垂直缝和原始容积为 $V_o$ 的洞相连,油的原始体积为 $V_{oi}$ ,水的原始体积为 $V_{wi}$ ,油的黏度为 $\mu_o$ ,原始压力为 $p_i$ ,油的压缩系数为 $C_o$ ,水的压缩系数为 $C_w$ ,某一时刻为 $t$ ,溶洞的压力为 $p$ ,井底流压为 $p_{wf}$ ,油井产量为 $q_o$ (图2)。

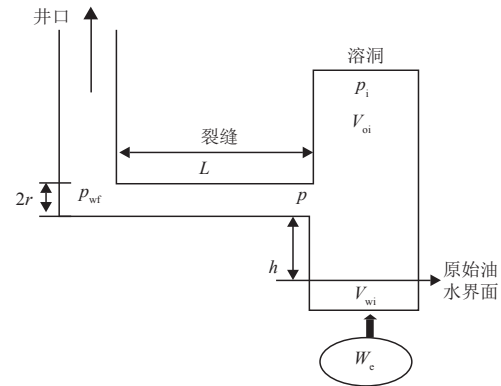


图2 缝洞型油藏

Fig. 2 Fractured-vuggy reservoir

油田开发早期时,溶洞里流体仅发生弹性膨胀驱动溶孔流体流动,生产井见水前溶孔里只有油流动,结合流体在溶孔里的运动规律<sup>[7-13]</sup>,油井见水前油的产量等于溶洞里油水弹性膨胀速度之和。

由泊稷叶定律,计算溶孔见水前油产量:

$$q_o = \frac{\pi r^4 (p - p_{wf})}{8L\mu_o} = \frac{\varphi_h A r^2 (p - p_{wf})}{8L\mu_o} \quad (1)$$

式中:  $\varphi_h = \frac{\pi r^2 L}{AL} = \frac{\pi r^2}{A}$

$$q_o = \frac{\varphi_h A r^2 (p - p_{wf})}{8L\mu_o} = -(C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w) \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

式中: $r$ 为溶孔半径(视为等效裂缝宽度),cm; $\varphi_h$ 为溶孔性岩石孔隙度; $L$ 为长度,cm; $A$ 为岩样的断面面积,cm<sup>2</sup>; $q$ 为溶孔的流量,cm<sup>3</sup>/s; $C_w$ 为地层水的压缩系数,10<sup>-4</sup> MPa<sup>-1</sup>; $C_o$ 为地层油的压缩系数,10<sup>-4</sup> MPa<sup>-1</sup>; $W_c$ 为在油藏压力降到 $p$ 时水侵量,m<sup>3</sup>。

变换得:

$$\frac{dp}{p-p_{wf}} = -\frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} \frac{1}{C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w} dt \quad (3)$$

分别对 $t$ 从 $0 \rightarrow t$ ,  $p$ 从 $p_i \rightarrow p$ 进行积分,解算溶洞里的压力,即:

$$\int_{p_i}^p \frac{1}{p-p_{wf}} dp = -\int_0^t \frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} \frac{1}{C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w} dt \quad (4)$$

计算溶洞压力为:

$$p-p_{wf} = (p_i-p_{wf})e^{-\frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} \frac{1}{C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w} t} \quad (5)$$

由(5)式得出溶洞压力变化随时间呈指数递减关系,即早期递减快后期递减缓慢。把压力的变化代人(2)式中,算出井产油量为:

$$q_o = \frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} (p_i-p_{wf})e^{-\frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} \frac{1}{C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w} t} \quad (6)$$

由(6)式看出,油井在见水前溶孔中油的流量随时间呈指数变化,即早期递减快后期递减缓慢。

对(6)式积分计算见水时累积产油量为:

$$Q_o = \int_0^t q_o dt = \int_0^t \frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} (p_i-p_{wf})e^{-\frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} \frac{1}{C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w} t} dt$$

$$= (C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w)(p_i-p_{wf}) \left(1 - e^{-\frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} \frac{1}{C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w} t}\right) \quad (7)$$

得知水的膨胀体积:

$$\Delta V_w = (C_w V_{wi} + W_c C_w)(p_i-p_{wf}) \left(1 - e^{-\frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} \frac{1}{C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w} t}\right) \quad (8)$$

随着原油不断产出,油水界面渐渐向上移,直到上升到溶孔时油井开始产水,如若初始油水界面距离溶孔为 $h$ ,截面积为 $S$ ,则:

$$(C_w V_{wi} + W_c C_w)(p_i-p_{wf}) \left(1 - e^{-\frac{\varphi_h Ar^2}{8l\mu_o} \frac{1}{C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w} t}\right) = Sh \quad (9)$$

计算出见水时间 $T$ 为:

$$T = \frac{8l\mu_o(C_o V_{oi} + C_w V_{wi} + W_c C_w)}{\varphi_h Ar^2} \times \ln\left(\frac{(C_w V_{wi} + W_c C_w)(p_i-p_{wf})}{(C_w V_{wi} + W_c C_w)(p_i-p_{wf}) - Sh}\right) \quad (10)$$

将见水时间 $T$ 分别代入式(5)、式(7)可得见水时的溶洞压力、累产油量。

计算得出见水时溶洞压力为:

$$p = p_i - \frac{Sh}{C_w V_{wi} + W_c C_w} \quad (11)$$

见水时无水采油量为:

$$Q_o = \frac{(C_w V_{wi} + C_o V_{oi} + W_c C_w)Sh}{(V_{wi} + W_c)C_w} \quad (12)$$

由于(12)式中水侵量 $W_c$ 还是未知数,无法具体计算出累采油量,下一步需要算出水侵量才能得出累采油量。

## 2 缝洞型油藏物质平衡方程

对于没有气顶气、没有注水,有底水、水侵缝洞型碳酸盐岩油藏,当油藏压力高于饱和压力时,在见水前开发阶段中有两种能量来源,弹性驱动能量和天然水驱能量,物质平衡方程式<sup>[14-15]</sup>可以简化为:

$$N_p B_o = NB_{oi} C_o (p_i - p) + W_c B_w \quad (13)$$

式中: $N$ 为动用地质储量, $10^4 \text{ m}^3$ (可在地面得到的体积量); $N_p$ 为累积产油量, $10^4 \text{ m}^3$ ;  $B_o$ 为目前油藏压力为 $p$ 时地层原油体积系数; $B_w$ 为目前压力为 $p$ 时,地层水的体积系数; $B_{oi}$ 为在原始油藏压力下,地层原油体积系数; $B_{wi}$ 为原始油藏压力下,地层水体积系数; $C_o$ 为地层油的压缩系数, $10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。

计算过程中确定的参数包括:①原油PVT数据( $p \sim B_o, B_{oi}, B_w, p \sim C_o, C_w$ ); ②地层压力的变化 $\Delta p$ ; ③原始地质储量 $N$ ; ④忽略溶洞压缩性,不考虑束缚水的影响。

物质平衡方程中,待求的参数水侵量为 $W_c$ 。

试用驱动指数表示,物质平衡方程式(13)可以归整成:

$$1 = \frac{NB_{oi} C_o (p_i - p)}{N_p B_o} + \frac{W_c B_w}{N_p B_o} \quad (14)$$

式(13)就是油井见水前综合驱动油藏的驱动指数方程,由(13)式可看出油藏的驱动指数符合归一化条件。

弹性驱动指数和天然水驱动指数分别为:

$$EDI = \frac{NB_{oi} C_o (p_i - p)}{N_p B_o} \quad (15)$$

$$W_c DI = \frac{W_c B_w}{N_p B_o} \quad (16)$$

$$W_c DI = 1 - EDI \quad (17)$$

计算出水侵量为:

$$W_c = \frac{N_p B_o W_c DI}{B_w} \quad (18)$$

联立式(12)、式(18)方程组:

$$\begin{cases} W_c = \frac{N_p B_o W_c DI}{B_w} \\ N_p = \frac{(C_w V_{wi} + C_o V_{oi} + W_c C_w)Sh}{(V_{wi} + W_c)C_w} \end{cases} \quad (19)$$

可得出水侵量:

$$W_c = \frac{\sqrt{S^2 h^2 B_o^2 + \frac{4Sh(V_{oi} C_o (B_{oi} - B_o) - \frac{3}{2} V_{wi} C_w B_o) + V_{wi}^2}{C_w}} + Sh B_o - V_{wi}}{2} \quad (20)$$

代入式(12)中,计算出见水前累产油量。

### 3 算例

设定缝洞特征参数、流体参数、原始压力和井底流压(表1),利用上述公式进行计算,得到了洞内的压力变化、油井油累计产量变化关系曲线(图3、图4)。

H井所取PVT资料为H井准确地提供了物质平衡法计算动态储量的一系列参数(表1),利用物质平衡法计算得水侵量、累产油量。H井见水时间为235 d,利用物质平衡法计算水侵量为 $2.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,累产油量为 $95.54 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,见水时溶洞压力为52.3 MPa。根据式(7)可得图3,见水前累产油量增量随时间先加快再逐渐减慢;由图4可知,见水前溶洞压力前期衰减较快后期比较缓慢。

TH12535井地质储量为 $1\ 995.7 \times 10^4 \text{ t}$ ,累采液量为 $33.0 \times 10^4 \text{ t}$ ,累计油量为 $29.8 \times 10^4 \text{ t}$ 。该井压差与累

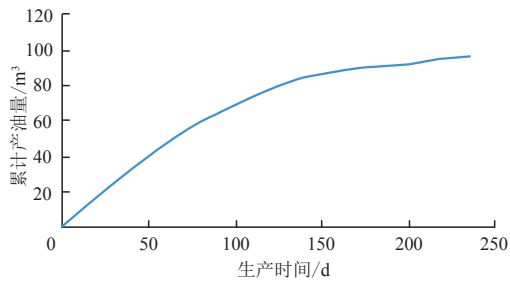


图3 油井见水前累油产量变化

Fig. 3 Variation of cumulative oil production before water breakthrough in oil well

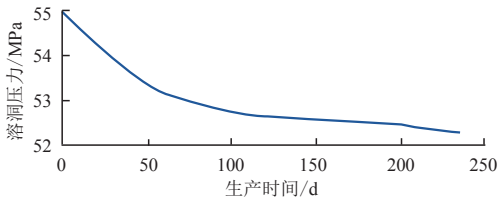


图4 油井见水前溶洞压力变化

Fig. 4 Variation of karst cave pressure before water breakthrough in oil well

计产量之间的关系大致分为两个过程(图5),第1阶段反映了封闭溶洞弹性驱动过程;第2阶段开始发生水侵,弹性与水体共同驱动,分别作该井累产油量和溶洞压力与时间的关系(图6、图7),由图6、图7可知,整体开采过程实测累产油量、溶洞压力值随时间变化与图3、图4比较相符,因此该井见水前累产油量随时间先加快再逐渐减慢,见水前溶洞压力前期衰减较快后期比较缓慢规律。

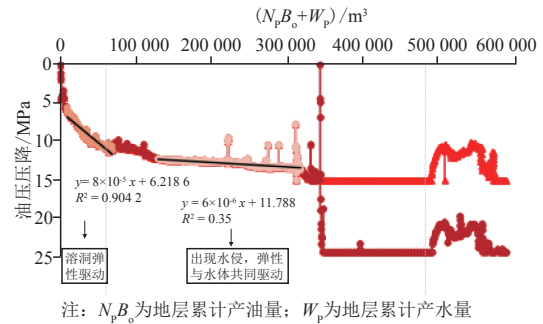


图5 TH12535井生产指示曲线分析

Fig. 5 Production indicator curve of well-TH12535

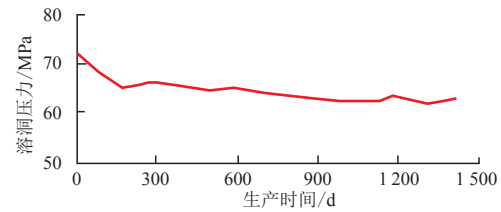


图6 TH12535井压力与时间关系

Fig. 6 Relation between pressure and time of well-TH12535

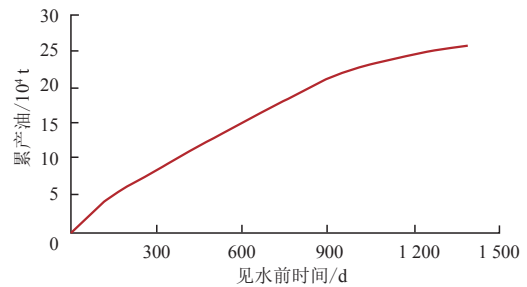


图7 TH12535井累产油与时间关系

Fig. 7 Relation between cumulative oil production and time of well-TH12535

表1 储层流体参数

Table 1 Reservoir fluid parameters

参数名	数值	参数名	数值	参数名	数值	参数名	数值
溶洞半径(R)/m	80	初始油水界面距缝底距离(h)/m	40	水的压缩系数/( $10^{-4} \text{MPa}^{-1}$ )	4	$V_{wi}/10^4 \text{m}^3$	15 000
缝长(L)/m	70	初始油水界面距缝底距离(h)/m	100	$B_o$	1.2	$V_{oi}/10^4 \text{m}^3$	4 000
溶孔半径(视为等效裂缝宽度r)/m	0.003	水的黏度/( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	1	$B_w$	1	原始地层压力/MPa	55
孔隙度( $\varphi$ )/%	1	原油压缩系数/( $10^{-4} \text{MPa}^{-1}$ )	10	$B_{oi}$	1.1	井底压力/MPa	45

## 4 结论

1) 建立封闭底水油藏弹性驱动单元开采期间含有水侵模型,利用泊稷叶定律算例揭示了在生产过程中油井见水前累产油量增加速率、溶洞压力降低速率随着时间的增加前期变化较快后期变化缓慢规律。由于该模型结构简单,存在一定的局限性,适用于单缝单洞弹性开采阶段油藏。

2) 针对缝洞型油藏缝洞型水侵通道复杂多变特征,将水侵过程中的水体简化底水体处理,弹性与水体共同驱动,根据泊稷叶公式并结合物质平衡方程,更加准确方便计算出水侵量。

### 参考文献

- [1] 张俊法,汤达祯,赵梅叶,等.一种计算单井动态储量的新方法[J].石油天然气学报,2009,31(1):96-99.  
ZHANG J F, TANG D Z, ZHAO M Y, et al. A new method for calculating single well dynamic reserves[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 96-99.
- [2] 胡向阳,权莲顺,齐得山,等.塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏溶洞充填特征[J].特种油气藏,2014,21(1):18-21.  
HU X Y, QUAN L S, QI D S, et al. Features of cavern filling in fractured/vuggy carbonate oil reservoirs, Tahe oilfield[J]. Specialty Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(1): 18-21.
- [3] 陈青,易小燕,闫长辉,等.缝洞型碳酸盐岩油藏水驱曲线特征——以塔河油田奥陶系油藏为例[J].石油与天然气地质,2010,31(1):33-37.  
CHEN Q, YI X Y, YAN C H, et al. Water drive curves of fractured-vuggy carbonate rock reservoirs: taking the Ordovician carbonate reservoirs in Tahe oilfield as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 33-37.
- [4] 刘世常,李闯,巫扬,等.计算水驱气藏地质储量和水侵量的简便方法[J].新疆石油地质,2008,29(1):88-90.  
LIU S C, LI M, WU Y, et al. Simple calculation of OGIP and water influx in gas pool by water drive process[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(1): 88-90.
- [5] 谭捷,唐海,李娜,等.塔河六区缝洞型油藏水体及水侵量计算[J].特种油气藏,2011,18(3):87-90.  
TAN J, TANG H, LI N, et al. Water body and water influx calculation for fracture-vug reservoirs in Block 6 of the Tahe oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(3): 87-90.
- [6] 郑松青,刘东,刘中春,等.塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏井控储量计算[J].新疆石油地质,2015,36(1):78-81.  
ZHENG S Q, LIU D, LIU Z C, et al. Well Controlled Reserve Calculation for Fractured-Vuggy Carbonate Reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(1): 78-81.
- [7] 赵艳艳,康志江,张宏方.单缝单洞缝洞型碳酸盐岩底水油藏弹性开采机理研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2013,28(4):51-54.  
ZHAO Y Y, KANG Z J, ZHANG H F. Study on the elastic production mechanism in fractured-vuggy carbonate reservoir of single fracture and single cave with bottom water[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2013, 28(4): 51-54.
- [8] 刘梦芸,王柏力,檀朝东.两种动态地质储量评估方法在缝洞型碳酸盐岩油藏中的应用[J].中国石油和化工,2014,21(8):58-60.  
LIU M Y, WANG B L, TAN C D. Application of two dynamic geological reserves evaluation methods in fracture-cavity carbonate reservoirs[J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2014, 21(8): 58-60.
- [9] 李勇,于清艳,李保柱,等.缝洞型有水油藏动态储量及水体大小定量评价方法[J].中国科学技术科学,2017,47(7):708-717.  
LI Y, YU Q Y, LI B Z, et al. Quantitative evaluation method of OOIP and aquifer size for fractured-caved carbonate reservoirs with active aquifer support[J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(7): 708-717.
- [10] 宋红伟,张智,任文博.缝洞型碳酸盐岩油藏物质平衡法计算储量探讨[J].天然气勘探与开发,2012,35(1):32-35.  
SONG H W, ZHANG Z, REN W B. Reserves calculation of fractured-cavity carbonate reservoirs by material balance method[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2012, 35(1): 32-35.
- [11] 李珂,张金庆,李允,等.缝洞型碳酸盐岩油藏水侵量计算方法研究[J].西部探矿工程,2008,20(11):76-78.  
LI K, ZHANG J Q, LI Y, et al. Study on calculation method of water influx in fracture-cavity carbonate reservoirs[J]. Western Exploration Engineering, 2008, 20(11): 76-78.
- [12] 张延晨,刘竟成,毛宾.异常高压气藏储量和水侵量计算新方法[J].油气田地面工程,2010,29(2):25-27.  
ZHANG Y C, LIU J C, MAO B. New calculation method of gas reservoir reserves in abnormal high pressure and water influx rate[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2010, 29(2): 25-27.
- [13] 聂明龙,方义生,焦玉卫,等.非均质碳酸盐岩气藏动静态储量计算的几个问题——以F气藏为例[J].油气藏评价与开发,2017,7(2):36-40.  
NIE M L, FANG Y S, JIAO Y W, et al. Dynamic-static analysis of heterogeneous carbonate rock gas reservoir: Taking gas reservoir F as an example[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(2): 36-40.
- [14] 陈余,付玉,岳三琪,等.裂缝性碳酸盐岩底水油藏临界产量计算研究[J].油气藏评价与开发,2016,6(2):19-23.  
CHEN Y, FU Y, YUE S Q, et al. Critical production calculation of fractured carbonate bottom water reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2016, 6(2): 19-23.
- [15] 陈军,敖耀庭,张爱华.裂缝性有水气藏水侵量预测方法[J].特种油气藏,2010,17(2):66-68.  
CHEN J, YAN Y T, ZHANG A H. Applied research of estimation of water influx in fractured gas pool with aquifer[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17(2): 66-68.

(编辑 黄颖)