

文章编号:1009-9603(2020)01-0093-08

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.01.014

致密油藏注气后储层渗流特征参数动态反演方法

刘同敬¹,第五鹏祥²,赵习森³,胡改星⁴

(1. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院,北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)理学院,北京 102249;
3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司陕西省二氧化碳地质封存与提高采收率重点实验室,陕西 西安 710075;
4. 中国石油长庆油田公司油气工艺研究院 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,陕西 西安 710018)

摘要:致密油藏在气驱开发过程中,通常由于气窜导致开发效果变差甚至停产。针对致密储层注气后储层渗流特征参数尚无成熟的理论求解方法的问题,从渗流力学原理出发,利用 Stone 模型建立油、气、水三相饱和度与相对渗透率的表征函数。分析开发动态参数和储层渗流特征参数与相对渗透率的函数关系,建立饱和度-含水率-气油比关系图版。借助该图版,实现由开发动态参数反演出储层渗流特征参数的目的。开发动态参数包括含水率和气油比;储层渗流特征参数包括地下混合液流度、储层平均渗透率和气窜通道平均渗透率等。应用该方法对实际气窜井组进行储层渗流特征参数动态反演,结果表明:反演结果与实际单井气窜特征和生产动态变化特征吻合;气窜井生产期间内的储层平均渗透率远小于未气窜井;气窜程度越高,则气窜通道平均渗透率越大,所处层位存在明显裂缝或窜流通道。

关键词:致密油藏;气窜;储层平均渗透率;气窜通道平均渗透率;动态反演

中图分类号:TE357.7

文献标识码:A

Dynamic inversion method of percolation characteristic parameters after gas injection in tight reservoirs

LIU Tongjing¹, DIWU Pengxiang², ZHAO Xisen³, HU Gaixing⁴

(1. *The Unconventional Oil and Gas Institute, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China*; 2. *College of Science, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China*; 3. *Shaanxi Key Laboratory of Carbon Dioxide Geological Sequestration and Enhanced Recovery, Shaanxi Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd., Xi'an City, Shaanxi Province, 710075, China*; 4. *National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Fields, Research Institute of Oil and Gas Technology of Changqing Oilfield Company, Xi'an City, Shaanxi Province, 710018, China*)

Abstract: In the process of gas flooding development of tight reservoirs, gas channeling usually leads to poor development performance or even shutdown. There was no mature theoretical method to calculate the percolation characteristic parameters after gas injection in the tight reservoirs. Based on the principle of percolation mechanics, the characterization functions between oil-gas-water three-phase saturations and relative permeability are established by using the Stone model. By analyzing the function relation among the dynamic parameters, the percolation characteristics parameters and relative permeability, the saturation-water cut-gas-oil ratio (GOR) relation charts are established. With the help of these charts, the percolation characteristic parameters are reversed by using dynamic development parameters. The dynamic development parameters include water cut and GOR, and the percolation characteristic parameters include the fluidity of underground mixed fluid, average reservoir permeability and average permeability of gas channeling channel. This method is applied to perform the dynamic reversion of reservoir percolation characteristics parameter in the well group with gas channeling. The

收稿日期:2019-10-30。

作者简介:刘同敬(1972—),男,山东东营人,副研究员,博士,从事油气田开发工程研究。E-mail:Liutongjing@126.com。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“低渗一致密油藏高效提高采收率新技术”(2017ZX05009-004),国家重点研发计划“CO₂驱油技术及地质封存安全监测”(2018YFB06055)。

results show that the inversion results are consistent with the characteristics of single-well gas channeling and production dynamic behavior. The average permeability of gas channeling wells during production is much lower than that of wells without gas channeling. The higher the degree of gas channeling is, the greater the average permeability of gas channeling channel will become, which indicates that there are obvious fractures or gas channeling channels in the layer.

Key words: tight oil reservoir; gas channeling; average reservoir permeability; average permeability of gas channeling channel; dynamic inversion

致密油藏气驱开发过程中,通常由于气窜导致开发效果变差甚至停产^[1-3]。及时掌握气窜对储层特征及地下流体造成的影响,对抑制气窜程度、改善气驱开发效果具有重要意义^[4-6]。目前中外对气窜对储层及流体的影响的相关研究,一致认为储层渗透率对低渗透和特低渗透油藏的影响最为显著^[7-13]。但是,气窜后的储层渗流特征参数如何变化及表征尚无理论方面的相关研究^[14-20]。

为此,从渗流力学原理出发,利用Stone模型建立油、气、水三相饱和度与相对渗透率的表征函数。通过开发动态参数和储层渗流特征参数与相对渗透率的函数关系,建立饱和度-含水率-气油比关系图版。借助该图版,实现由开发动态参数反演储层渗流特征参数的目的。其中,开发动态参数包括含水率和气油比,储层渗流特征参数包括地下混合液流量、储层平均渗透率和气窜通道平均渗透率等。由此,建立一套致密储层注气后储层渗流特征参数动态反演方法,为指导后期封堵方案设计提供依据,同时对完善致密储层渗流基础理论具有借鉴意义。

1 气窜通道渗流特征参数反演方法

1.1 三相饱和度与相对渗透率表征函数

致密油藏气驱过程中受前期水驱或地层产出水的影响,地下流体通常处于油、气、水三相共存的状态。因此,研究气窜通道渗流特征参数,首先要明确油、气、水三相饱和度与相对渗透率之间的函数关系。

目前研究三相饱和度与相对渗透率函数关系的方法中,最常见是借助油水两相和油气两相的饱和度与相对渗透率关系模型,得到水相和气相的饱和度与相对渗透率函数关系;再借助Stone模型,得到油相的饱和度与相对渗透率函数关系。通过这种方法得到的油、气、水饱和度与相对渗透率的函数关系,可以作为储层流体在油、气、水三相共存状态下的各相饱和度与相对渗透率的表征函数。

对于油气两相混合流体,油相和气相的相对渗

透率的表达式分别为:

$$K_{rog} = K_{rogmax} \left(\frac{S_o - S_{org}}{1 - S_{org} - S_{gc}} \right)^{n_{og}} \quad (1)$$

$$K_{rg} = K_{rgmax} \left(\frac{S_g - S_{gc}}{1 - S_{org} - S_{gc}} \right)^{n_g} \quad (2)$$

对于油水两相混合流体,油相和水相的相对渗透率的表达式分别为:

$$K_{row} = K_{rowmax} \left(\frac{S_o - S_{orw}}{1 - S_{wc} - S_{orw}} \right)^{n_{ow}} \quad (3)$$

$$K_{rw} = K_{rwmax} \left(\frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{orw}} \right)^{n_w} \quad (4)$$

油相的相对渗透率需要借助Stone模型来表征,其表达式为:

$$K_{ro} = S_o^* \beta_w \beta_g \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} S_o^* = \frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{wc} - S_{or} - S_{gc}} \\ \beta_w = \frac{K_{row}}{1 - S_w^*} \\ \beta_g = \frac{K_{rog}}{1 - S_g^*} \\ S_w^* = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or} - S_{gc}} \\ S_g^* = \frac{S_g - S_{gc}}{1 - S_{wc} - S_{or} - S_{gc}} \end{cases} \quad (6)$$

对于油、气、水三相混合流体,气相和水相的相对渗透率可以分别用(2)和(4)式来表征,油相的相对渗透率用(5)式来表征。

1.2 含水率与气油比表征函数

由于含水率和气油比均是相对渗透率的函数,因此,利用实际含水率和气油比,可以反求出油、气、水的相对渗透率。

含水率与相对渗透率的函数关系为:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro}}{K_{rw}} \cdot \frac{\mu_w}{\mu_o} \cdot \frac{B_w}{B_o}} \quad (7)$$

气油比与相对渗透率的函数关系为:

$$GOR = \frac{K_{rg}}{K_{ro}} \cdot \frac{\mu_o}{\mu_g} \cdot \frac{B_o}{B_g} \quad (8)$$

1.3 渗流特征参数表征函数

根据实际动态资料中的含水率和气油比,利用(7)和(8)式,可以得到油、气、水的相对渗透率和饱和度的动态反演结果。从而求解出主要地下动态参数,包括:地下混合液流量、储层平均渗透率、气窜通道平均渗透率等。

地下混合液流量的函数表达式为:

$$\frac{K_m}{\mu_m} = \frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} + \frac{K_{rg}}{\mu_g} \quad (9)$$

储层平均渗透率的函数表达式为:

$$K_m = \frac{Q_m \mu_m \left(\frac{\pi L}{2a} + \ln \frac{a}{\pi r_w} \right)}{2\pi K_m h N \Delta P} \quad (10)$$

气窜通道平均渗透率的函数表达式为:

$$K_c = \frac{\mu_m L V_g}{K_m \Delta P} \quad (11)$$

2 目标区块饱和度关系图版建立

2.1 三相饱和度与相对渗透率函数求解

根据目标区块实际油气相渗曲线和油水相渗曲线,确定出各曲线的特征值,分别代入(2),(4)和(5)式,通过拟合得到幂指数的数值分别为: $n_g=1.6$, $n_{og}=1.6$, $n_w=1.6$, $n_{ow}=2.7$ 。

因此,目标区块油气两相相对渗透率的表达式分别为:

$$K_{rg} = 0.4 \left(\frac{S_g - 0.05}{0.6} \right)^{1.6} \quad (12)$$

$$K_{rog} = \left(\frac{S_o - 0.35}{0.6} \right)^{1.6} \quad (13)$$

因此,目标区块油水两相相对渗透率的表达式分别为:

$$K_{rw} = 0.5 \left(\frac{S_w - 0.35}{0.34} \right)^{1.6} \quad (14)$$

$$K_{row} = \left(\frac{S_o - 0.31}{0.34} \right)^{2.7} \quad (15)$$

将(12)–(14)式代入(15)式,得到油、气、水三相时的油相相对渗透率的函数表达式为:

$$K_{ro} =$$

$$\frac{0.29(S_o - 0.31)}{(0.64 - S_w)(0.34 - S_g)} \left(\frac{S_o - 0.31}{0.34} \right)^{2.7} \left(\frac{S_o - 0.35}{0.6} \right)^{1.6}$$

$$(16)$$

对于目标区块,油、气、水三相共存状态下,气、水、油各相的饱和度与相对渗透率的函数表达式分别为(12),(14)和(15)式。

2.2 饱和度-含水率-气油比关系图版建立

在油、气、水三相饱和度的合理变化范围内,利用(12),(14)和(15)式,采用枚举方法,按照由小到大的顺序对各相饱和度依次赋值,即可得到相对应的油、气、水的相对渗透率。在此基础上,利用(8)和(9)式,可以求出相对应的含水率和气油比,计算结果如表1所示。

依据表1的计算结果,当含水饱和度相同时,可以得到4组关系图版,分别为:含水率与含油饱和度关系图版(图1)、气油比与含气饱和度关系图版(图2)、含气饱和度与含油饱和度关系图版(图3)、气油比与含水率关系图版(图4)。

3 目标区块渗流特征参数反演结果

借助饱和度与含水率和气油比关系图版,可以反演主要地下动态参数,具体包括3个步骤:①根据单井实际含水率和气油比的动态数据,利用关系图版查出各动态时间点对应的油、气、水三相饱和度;②根据油、气、水三相动态饱和度,求解油、气、水三相对应的相对渗透率;③根据油、气、水三相的相对渗透率,求解主要地下动态参数,包括地下混合液流量、储层平均渗透率、气窜通道平均渗透率等。

3.1 渗流特征参数动态反演结果

以目标区块发生气窜现象的1个实际井组为例,分析致密储层注气后储层渗流特征参数的动态反演结果。通过反演得到地下混合液流量、储层平均渗透率、气窜通道平均渗透率等储层渗流特征参数,这些参数均随时间变化。

XN井组共有8口生产井和1口注入井,于2012年11月投产。投产后大部分井初期含水率达100%,且随开发时间的延长,含水率居高不下,采油速度极低。因此,于2013年6月开始注入CO₂,控制水窜和含水率上升。注气初期,仅X4井出现气窜现象,截至2014年10月,X1,X2,X5,X6和X3这5口生产井又陆续出现了气窜现象。

表1 饱和度-含水率-气油比关系图版中各参数的计算结果
Table1 Calculation results of each parameter in diagram of saturation-water cut-GOR

参数 编号	赋 值 参 数			计 算			参 数	
	$S_w(f)$	$S_o(f)$	$S_g(f)$	$K_{rw}(10^{-5})$	$K_{ro}(10^{-5})$	$K_{rg}(10^{-5})$	$f_w(f)$	$GOR(f)$
1	0.351	0.598	0.051	4.5	16 000	1.4	0.004	7.3
2	0.36	0.589	0.051	180	13 000	1.4	0.154	8.4
3	0.37	0.579	0.051	540	11 000	1.4	0.394	9.9
4	0.38	0.569	0.051	1 000	9 600	1.4	0.597	11.8
5	0.39	0.559	0.051	1 600	8 000	1.4	0.738	14.1
6	0.4	0.549	0.051	2 300	6 600	1.4	0.829	17.1
7	0.41	0.539	0.051	3 100	5 400	1.4	0.888	20.8
8	0.42	0.529	0.051	4 000	4 400	1.4	0.926	25.6
9	0.43	0.519	0.051	4 900	3 500	1.4	0.951	31.9
10	0.44	0.509	0.051	6 000	2 800	1.4	0.967	40.2
11	0.45	0.499	0.051	7 100	2 200	1.4	0.978	51.2
12	0.46	0.489	0.051	8 200	1 700	1.4	0.985	66.3
13	0.47	0.479	0.051	9 400	1 300	1.4	0.990	87.3
14	0.48	0.469	0.051	11 000	960	1.4	0.994	117.2
15	0.49	0.459	0.051	12 000	700	1.4	0.996	160.8
16	0.5	0.449	0.051	14 000	500	1.4	0.997	226.3
17	0.51	0.439	0.051	15 000	340	1.4	0.998	328.5
18	0.52	0.429	0.051	16 000	230	1.4	0.999	494.6
19	0.53	0.419	0.051	18 000	140	1.4	0.999	779.0
20	0.54	0.409	0.051	20 000	87	1.4	1.000	1 298.9
21	0.55	0.399	0.051	21 000	48	1.4	1.000	2 333.4
22	0.56	0.389	0.051	23 000	24	1.4	1.000	4 644.8
23	0.57	0.379	0.051	25 000	10	1.4	1.000	10 772.6
24	0.58	0.369	0.051	27 000	3.5	1.4	1.000	32 418.5
25	0.59	0.359	0.051	29 000	0.64	1.4	1.000	177 523.6
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴
326	0.351	0.389	0.26	4.5	24	7 500	0.716	2.4E+07
327	0.36	0.38	0.26	180	11	7 500	0.996	5.6E+07
328	0.37	0.37	0.26	540	3.2	7 500	1.000	1.8E+08
329	0.38	0.36	0.26	1 000	0.56	7 500	1.000	1.0E+09
330	0.351	0.379	0.27	4.5	10	8 000	0.854	6.0E+07
331	0.36	0.37	0.27	180	3.6	8 000	0.999	1.8E+08
332	0.37	0.36	0.27	540	0.62	8 000	1.000	1.0E+09
333	0.351	0.369	0.28	4.5	3.5	8 600	0.946	1.9E+08
334	0.36	0.36	0.28	180	0.7	8 600	1.000	9.7E+08
335	0.351	0.359	0.29	4.5	0.64	9 200	0.990	1.1E+09

3.1.1 三相饱和度

根据单井实际含水率和气油比数值(未气窜井的气油比取0),利用饱和度与含水率和气油比关系图版,查出各动态时间点对应的油、气、水饱和度。

以气窜井X6井为例,从注气后的油、气、水三相饱和度的动态变化曲线(图5)看出:①在储层流体渗流特征方面,含油饱和度与含气饱和度随时间变化趋势一致,但与含水饱和度的变化趋势相反。②

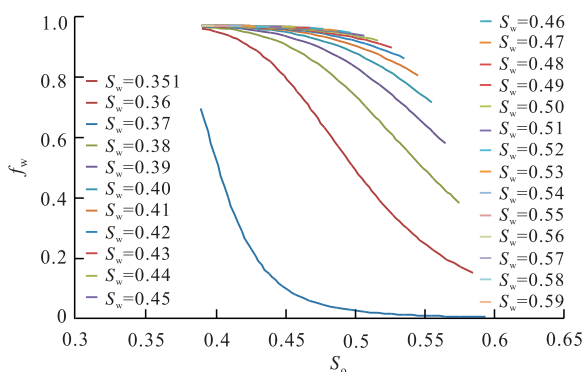


图1 含水率与含油饱和度关系图版

Fig.1 Relation chart between water cut and oil saturation

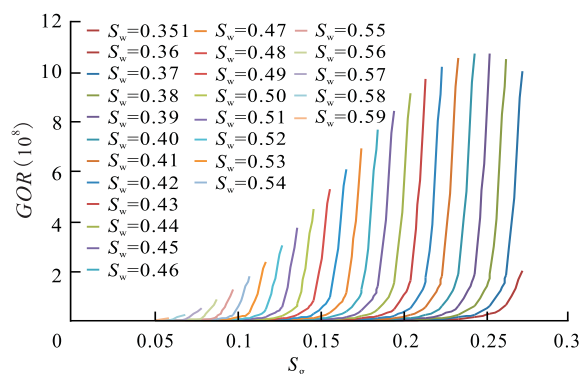


图2 气油比与含气饱和度关系图版

Fig.2 Relation chart between GOR and gas saturation

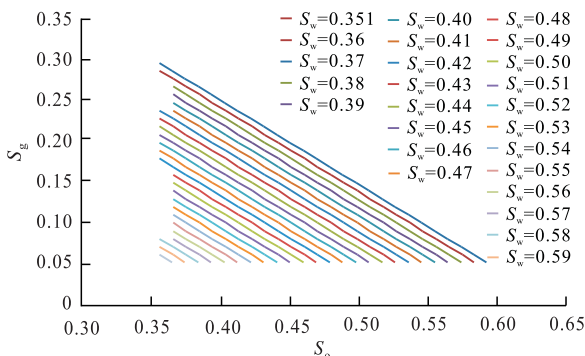


图3 含气饱和度与含油饱和度关系图版

Fig.3 Relation chart between gas saturation and oil saturation

在结合实际生产动态变化特征方面,含油饱和度与含气饱和度两者随时间的动态变化特征与气油比的动态变化特征吻合;含水饱和度随时间的动态变化特征与含水率的动态变化特征吻合。

3.1.2 地下混合液流度

从XN井组各单井生产期间地下混合液流度动态变化曲线(图6)中看出:①X7和X8这2口井的动态变化曲线明显低于其他6口气窜井。表明油井发生气窜后,地下混合液的流动能力明显增强。②气窜特征越明显,地下混合液流度曲线变化幅度越大,表明气窜速度越快,产出气体中CO₂的含量越高,地下混合液的流动能力越强。

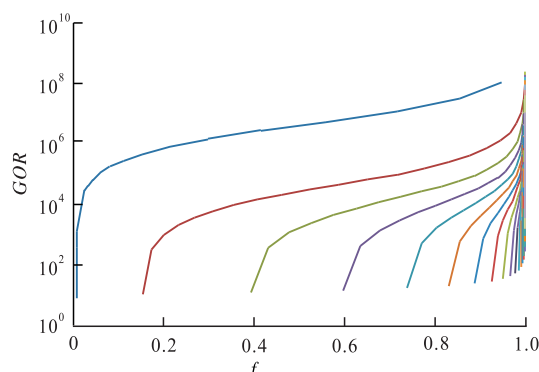
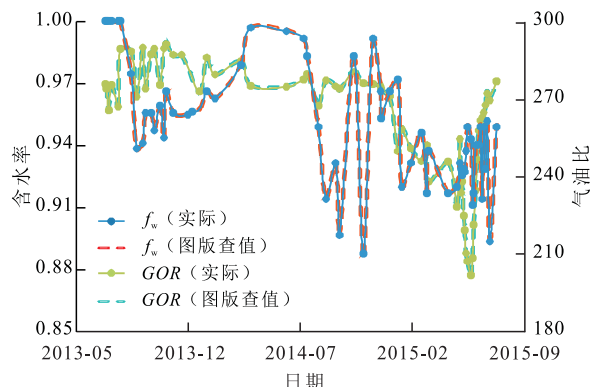
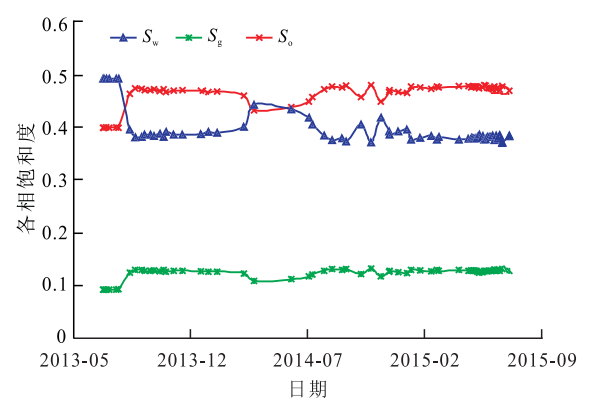


图4 气油比与含水率关系图版

Fig.4 Relation chart between GOR and water cut



a—含水率和气油比实际动态拟合曲线



b—三相饱和度反演结果

图5 X6井三相饱和度动态变化曲线

Fig.5 Dynamic variation curves of three-phase fluid saturation in Well X6

3.1.3 储层平均渗透率

从XN井组各单井生产期间储层平均渗透率动态变化曲线(图7)中看出:①注气对储层原始平均渗透率有影响;注气后,未气窜井的储层平均渗透率整体上大于气窜井。②未气窜井注气3个月后的储层平均渗透率为0.1~1 mD,接近或大于储层原始平均渗透率(0.2 mD)。表明只要不发生气窜,注气

有利于提高储层的流动能力。③气窜井注气3个月

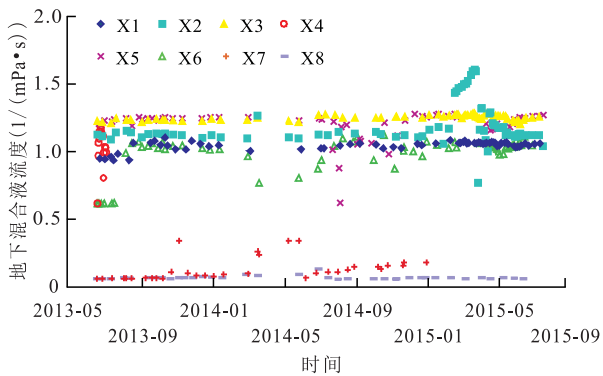


图6 XN井组各单井生产期间地下混合液流度动态变化曲线

Fig.6 Dynamic variation curves of underground mixed-fluid fluidity during production in well group XN

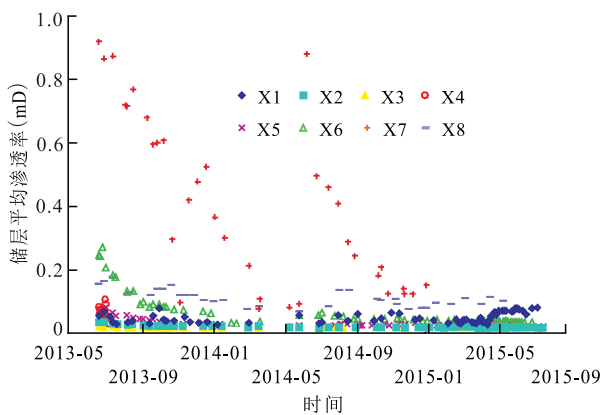


图7 XN井组各单井生产期间储层平均渗透率动态变化曲线

Fig.7 Dynamic variation curves of average reservoir permeability during production in well group XN

后的储层平均渗透率为0~0.1 mD,小于储层原始平均渗透率。表明一旦发生气窜,储层的流动能力会大幅降低。

3.1.4 气窜通道平均渗透率

从XN井组各单井生产期间气窜通道平均渗透率动态变化曲线(图8)中看出:①气窜通道平均渗透率的反演结果与单井的气窜程度一致;气窜程度越高,气窜通道平均渗透率越大;气窜程度越低,气窜通道平均渗透率越小。②X4井的气窜程度最高,气窜通道平均渗透率为1 200~2 500 mD;X6井的气窜程度次之,气窜通道平均渗透率为500~1 000 mD;X5井的气窜程度较低且变化不剧烈,气窜通道平均渗透率约为300 mD;X2井的气窜程度很低,气窜通道平均渗透率约为100 mD;X1和X3井的气窜程度最弱,气窜通道平均渗透率均小于100 mD。

3.2 渗流特征参数动态反演结果分析

根据注气后储层渗流特征参数动态反演结果,

可以得到各参数生产期间内的均值(表2)。

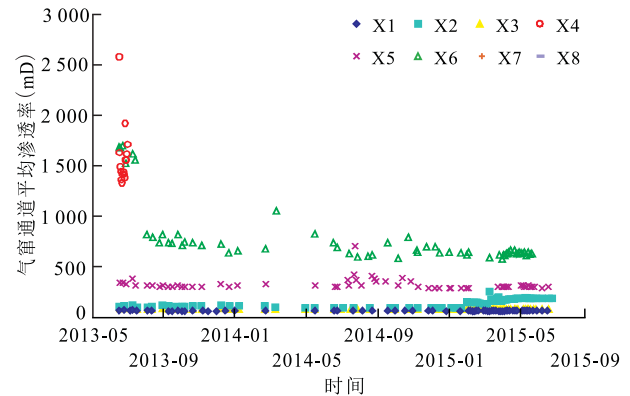


图8 XN井组各单井生产期间气窜通道平均渗透率动态变化曲线

Fig.8 Dynamic variation curves of average permeability of gas channeling channel during production in well group XN

表2 XN井组主要地下参数反演参数均值
Table2 Average inversion results of main underground parameters in well group XN

井名	混合液流度均值(1/(mPa·s))	储层渗透率均值(mD)	气窜通道渗透率均值(mD)
X1	1.06	0.037	42.19
X2	1.21	0.007	117.50
X3	1.27	0.005	59.38
X4	1.04	0.053	1 562.75
X5	1.21	0.018	301.13
X6	0.99	0.056	743.44
X7	0.12	0.406	0
X8	0.05	0.098	0

分析反演结果认为地下混合液流度均值具有以下特点:①气窜井生产期间的地下混合液流度均值远大于未气窜井生产期间的,前者约为后者的10~25倍。②各气窜井生产期间的地下混合液流度均值较接近,未气窜井生产期间的地下混合液流度均值相差较大,最大值约是最小值的2倍。储层平均渗透率均值具有以下特点:①气窜井生产期间的储层平均渗透率均值远小于未气窜井生产期间的,后者约为前者的2~80倍。②各气窜井生产期间的储层平均渗透率均值相差较大,最大值和最小值数值相差10倍以上;未气窜井生产期间的储层平均渗透率均值相差较小,最大值和最小值相差5倍以下。气窜通道平均渗透率均值具有以下特点:①各气窜井生产期间的气窜通道平均渗透率均值的差异较大,最大值和最小值相差接近40倍。②X4井气窜通道平均渗透率均值最大,气窜速度最快,表明该井所处层位存在明显裂缝或窜流通道。③X6井气窜通道平均渗透率均值较大,但产出气中CO₂含量

不高(小于15%),说明该井所处层位没有大裂缝发育,但储层的网络连通性或生产导致的井间贯通效应较好。

4 结论

基于Stone模型,建立油、气、水三相饱和度与相对渗透率的表征函数,作为反演开发动态参数和储层渗流特征参数的理论依据。开发动态参数包括含水率和气油比,储层渗流特征参数包括地下混合液流量、储层平均渗透率、气窜通道平均渗透率等。采用枚举法建立饱和度-含水率-气油比关系图版。在此基础上,依据实际单井含水率和气油比的动态数据,查出油、气、水三相的动态饱和度,求出油、气、水三相的动态相对渗透率,最终反演得到动态储层渗流特征参数。以目标区块发生气窜现象的实际井组为例,对各储层渗流特征参数进行动态反演,反演结果与实际单井气窜特征和生产动态变化特征吻合。通过对实际井组气窜时间内各储层渗流特征参数的动态变化特征和平均值大小的综合分析认为:各储层渗流特征参数的动态变化特征与单井气窜程度一致;气窜井生产期间内的储层平均渗透率远小于未气窜井;气窜程度越高,气窜通道平均渗透率越大,表明所处层位存在明显裂缝或窜流通道。

符号解释

K_{rog} ——油气两相时油相相对渗透率, f ; S_o ——含油饱和度, f ; S_{org} ——油气两相时残余油饱和度, f ; S_{gc} ——滞留气饱和度, f ; n_{og} ——油气两相时油相相对渗透率函数表达式的幂指数, f ; K_{rg} ——油气两相时气相相对渗透率, f ; S_g ——含气饱和度, f ; n_g ——油气两相时气相相对渗透率函数表达式的幂指数, f ; K_{row} ——油水两相时油相相对渗透率, f ; S_{orc} ——油水两相时残余油饱和度, f ; S_{wc} ——束缚水饱和度, f ; n_{ow} ——油水两相时油相相对渗透率函数表达式的幂指数, f ; K_{rw} ——油水两相时水相相对渗透率, f ; S_w ——含水饱和度, f ; n_w ——油水两相时水相相对渗透率函数表达式的幂指数, f ; K_o ——油、气、水三相时油相相对渗透率, f ; S_{or} ——残余油饱和度, f ; f_w ——含水率, f ; μ_w ——地下水黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_o ——地下原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; B_w ——地下水体积系数, f ; B_o ——原油体积系数, f ; GOR ——气油比, f ; μ_g ——地下气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; B_g ——气体体积系数, f ; K_m ——油、气、水三相混合液的相对渗透率, f ; μ_m ——油、气、水三相混合液的地下黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; K_m ——储层平均渗透率, D ; Q_m ——水平井产混合液量速度, g/s ; L ——油水井间距, cm ; a ——水平井压裂段间距, cm ;

r_w ——井筒半径, cm ; K_m ——油、气、水三相混合液的相对渗透率, f ; h ——储层有效厚度, cm ; N ——水平井压裂段数, f ; ΔP ——油水井间生产压差, atm ; K_c ——气窜通道平均渗透率, D ; V_g ——窜流速度, cm/s 。

参考文献

- [1] 任晓云.多元热流体气窜模式及防窜技术研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
REN Xiaoyun.The mode of gas channeling and technology of anti-channeling for multi-thermal fluid huff and puff [D].Qingdao: China University of Petroleum(East China),2016.
- [2] 郑继龙,宋志学,陈平等.气驱过程中气窜问题的室内研究与探讨[J].应用科技,2014,41(2):50-53.
ZHENG Jilong, SONG Zhixue, CHEN Ping, et al.Laboratory study on the problem of gas channeling during gas flooding [J].Applied Science and Technology, 2014,41(2):50-53.
- [3] 王业飞,高苗,谭龙,等.裂缝-基质模型CO₂混相注入提高原油采收率[J].油气地质与采收率,2018,25(5):87-92.
WANG Yefei, GAO Miao, TAN Long, et al.Experimental investigation of miscible CO₂ injection for enhanced oil recovery in fracture-matrix model [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018,25(5):87-92.
- [4] 侯刚刚.边底水油藏泡沫控水技术政策研究[D].北京:中国石油大学(北京),2017.
HOU Ganggang.Study on foam water control technology policy in edge-bottom water reservoir [D].Beijing: China University of Petroleum(Beijing),2017.
- [5] 张昱.低渗油藏中泡沫对窜流通道封堵能力的影响因素研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016.
ZHANG Yu.Study on influence factors of foam's blocking ability on flow channels in low-permeability oil reservoir [D].Beijing: China University of Petroleum(Beijing),2016.
- [6] 毕海滨,段晓文,杨兆林,等.致密油储层渗透率界定指标探讨[J].中国石油勘探,2018,23(5):57-64.
BI Haibin, DUAN Xiaowen, YANG Zhaolin, et al.Discussion on defining standards of permeability of tight oil reservoirs [J].China Petroleum Exploration, 2018,23(5):57-64.
- [7] 杨大庆,尚庆华,江绍静,等.渗透率对低渗油藏CO₂驱气窜的影响规律研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2014,36(4):137-141.
YANG Daqing, SHANG Qinghua, JIANG Shaojing, et al.A study about influence law of permeability on gas channeling of CO₂ flooding under low permeability reservoirs [J].Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014,36(4):137-141.
- [8] 韦琦,侯吉瑞,郝宏达,等.特低渗油藏CO₂驱气窜规律研究[J].石油科学通报,2019,4(2):145-153.
WEI Qi, HOU Jirui, HAO Hongda, et al.Laboratory study of CO₂ channeling characteristics in ultra-low-permeability oil reservoirs [J].Petroleum Science Bulletin, 2019,4(2):145-153.
- [9] 李承龙.特低渗油藏二氧化碳驱气窜影响因素及规律[J].特

- 种油气藏, 2018, 25(3): 82-86.
- LI Chenglong. Gas channeling influencing factors and patterns of CO₂-flooding in ultra-low permeability oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 82-86.
- [10] 乔妮. CO₂驱气窜影响因素及控制方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- QIAO Ni. Research on gas channeling factors and control methods of CO₂ flooding [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [11] 贾凯锋, 王玉霞, 王世璐, 等. 储集层非均质性对低渗透油藏CO₂驱油气窜的影响规律[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 208-212.
- JIA Kaifeng, WANG Yuxia, WANG Shilu, et al. Influences of reservoir heterogeneity on gas channeling during CO₂ flooding in low permeability reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 208-212.
- [12] 赵习森, 石立华, 王维波, 等. 非均质特低渗透油藏CO₂驱气窜规律研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2017, 39(6): 131-139.
- ZHAO Xisen, SHI Lihua, WANG Weibo, et al. CO₂ channeling sealing in ultra-low permeability reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2017, 39(6): 131-139.
- [13] 杨红, 余华贵, 江绍静, 等. 非均质性气窜对CO₂驱油影响量化实验研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2015, 28(5): 55-59.
- YANG Hong, YU Huagui, JIANG Shaojing, et al. Quantitative study of the influence of heterogeneity gas channeling on CO₂ flooding [J]. Journal of Petrochemical University, 2015, 28(5): 55-59.
- [14] 李俊键, 姜汉桥, 刘同敬. 层内突进传质扩散数学模型及求解[J]. 计算物理, 2010, 27(1): 45-50.
- LI Junjian, JIANG Hanqiao, LIU Tongjing. Tracer transport in intraformational water channeling reservoir [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2010, 27(1): 45-50.
- [15] 吕成远, 王锐, 赵淑霞, 等. 低渗透油藏CO₂非混相驱替特征曲线研究[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(5): 111-114.
- LÜ Chengyuan, WANG Rui, ZHAO Shuxia, et al. Study on displacement characteristic curve in CO₂ immiscible flooding for low permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5): 111-114.
- [16] 祝浪涛, 廖新维, 陈志明, 等. 应力敏感性低渗透油藏CO₂混相驱试井模型[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(4): 88-93.
- ZHU Langtao, LIAO Xinwei, CHEN Zhiming, et al. Well test model of CO₂ miscible flooding in the low-permeability reservoirs with stress sensitivity [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(4): 88-93.
- [17] 李承龙, 韩昊. 用灰色模糊综合评价法识别注气初期CO₂气窜通道[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(6): 116-120.
- LI Chenglong, HAN Hao. Identification of the gas channeling by grey-fuzzy complex judging method at the early stage of CO₂ flooding [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(6): 116-120.
- [18] 阎燕, 李友全, 于伟杰, 等. 低渗透油藏CO₂驱采油井试井模型[J]. 断块油气田, 2018, 25(1): 80-84.
- YAN Yan, LI Youquan, YU Weijie, et al. Well test model research for CO₂ flooding production well in low permeability reservoirs [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(1): 80-84.
- [19] 章星, 王珍珍, 王帅, 等. 可视装置中CO₂与正戊烷或原油接触特征和表征方法[J]. 石油实验地质, 2017, 39(3): 402-408.
- ZHANG Xing, WANG Zhenzhen, WANG Shuai, et al. Visual contact characteristics and characterization of the CO₂ and *n*-pentane/crude oil interface [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(3): 402-408.
- [20] 章星, 韩磊, 周栋华, 等. CO₂细管驱油实验混相动态特征表征方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(1): 122-127.
- ZHANG Xing, HAN Lei, ZHOU Donghua, et al. Characterizing method of the dynamic characteristics of CO₂ slim-tube miscible oil flooding test [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(1): 122-127.

编辑 单体珍