

顺9井区应力敏感下合理压差的初探

陶杉,徐燕东

(中国石油化工股份有限公司西北油田分公司,乌鲁木齐830011)

摘要:以塔河油田顺9井区砂岩油藏为例,采用3种不同计算方法,分别计算了低孔、低渗、含微裂缝的油藏应力敏感下合理压差,对比3种计算方法的优缺点,优选出适合顺9井区的计算方法并得出应力敏感下合理压差。结果表明:顺9井区临界压差为22.10 MPa。将此结果应用于顺9CH气举时助排深度计算,建议顺9CH气举助排深度不超过888.53 m。

关键词:应力敏感;合理压差;裂缝油藏;顺9井区;塔河油田

中图分类号:TE3

文献标识码:A

Preliminary study of reasonable pressure difference including stress sensitivity in well block Shun 9

Tao Shan, Xu Yandong

(SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Taking the sandstone reservoirs in well block Shun 9 in the Tahe Oil Field as an example, the reasonable pressure difference including stress sensitivity in reservoirs with low porosity, low permeability and microfracture is calculated with 3 different methods. The method which is most favorable for the study area is chosen after comparison. The critical pressure difference in well block Shun 9 is calculated as 22.10 MPa. The result is applied in the gas lift depth calculation in Shun 9CH, that is, under 888.53 m.

Key words: stress sensitivity; reasonable pressure difference; reservoir with fracture; well block Shun 9; Tahe Oil Field

顺9井区为低孔、低渗、可能存在微裂缝的储层。储层孔隙度主要分布在4%~10%,平均8.02%;渗透率主要介于 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.914 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在统计分析的544个样品中,约有10%的样品渗透率在 $(1 \sim 30.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,观察发现,这些样品多有裂缝存在。

许多研究表明^[1-2],低渗裂缝性储层应力敏感较强,裂缝在有效应力作用下一旦闭合就很难再次开启,导致裂缝导流能力丧失,造成损害。顺901、顺902H气举前后在相同工作制度下,产液量分别下降4.4倍、3.7倍,初步估计是由于排液导致孔隙压力降低,岩石所受有效应力增加,微裂缝闭合导致。

本文从应力敏感实验、产能计算、岩石力学计算三角度全方位考虑应力敏感对产能影响,优选出适合顺9井区的计算方法并得出应力敏感下合理压差,为实际生产作业提供可靠地理论依据。

1 室内实验法

通过现场岩心应力敏感室内试验,得到该区块

室内岩心试验模拟临界压力为2.5 MPa。假设实际渗流符合平面径向流,根据等值渗流速度的原则,将室内试验临界压力值转化成实际油藏的临界压力值,结果为32.56 MPa,转换的具体公式如下:

$$\Delta p_x = \frac{\Delta p_s}{L_s} \cdot \ln\left(\frac{r_c}{r_w}\right) \cdot r_w$$

式中: Δp_x 为实际油藏临界压力,MPa; Δp_s 为实验室模拟临界压力,MPa; L_s 为实验室岩心长度,m; r_c 为井距,m; r_w 为井筒半径,m。

2 产能判断法

王辉^[3]、许建红^[4]、王玉英^[5]推导得出含有渗透率变异系数因子 α 的油井产能与生产压差关系的公式,然后通过对压差求导计算即可求出最大采油指数对应的生产压差,既合理生产压差。式中的渗透率变异系数 α 是由Pedrosa^[6]在考虑油层压力变化导致的渗透率变化的前提下提出的概念,他认为岩石渗透率与压差变化呈现指数关系, α 可以通过室内应力敏感实验结果拟合得到,为0.108

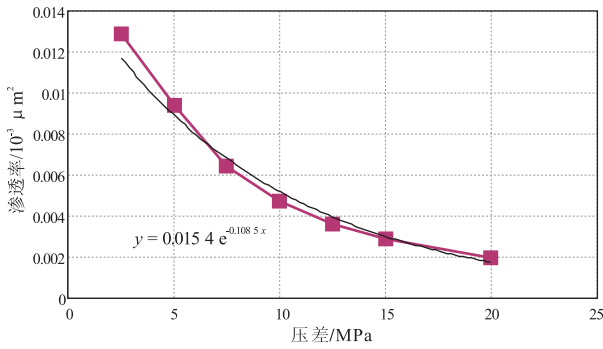


图 1 顺 9 井储层应力敏感室内实验结果

Fig. 1 Laboratory experiment result of stress sensitivity of well Shun 9

(图 1)。将该结果带入考虑变异系数因子 α 的合理产能计算中,得到临界压差为 38.4 MPa。

3 裂缝闭合临界压差法

该区块储层有裂缝存在的可能,裂缝的闭合导致该区块渗透率大幅下降,因此裂缝闭合时的临界压力值可以作为合理压差的上限。

3.1 裂缝闭合临界流体压力解析计算模型推导

目前,裂缝面临界闭合流体压力计算的解析模型主要基于 Hertz 弹性接触理论和 Drucker-prager 强度判别准则展开。基于 Hertz 弹性接触理论的模型很多,有 Greenwood 和 Willilamson、Greenwood 和 Trip、Yamada,以及 B&S 等接触模型。其中,以 B&S 接触模型最具代表性。

B&S 接触模型假设:

- (1) 裂缝面上的微凸体为半球体或球冠,且微凸体的变形面积远小于微凸体的间隔面积;
- (2) 微凸体的高度服从高斯分布或逆 z2 分布;
- (3) 微凸体各向同性;
- (4) 鉴于油气藏条件下岩石裂缝微凸体的性质,假设微凸体塑性屈服后产生理想塑性流动。

在地应力一定的情况下,作用于裂缝面的法向有效应力大小与裂缝孔隙内流体压力密切相关,引起裂缝面微凸体发生塑性屈服的临界流体压力 p_{ps} 。

$$p_{ps} = \sigma_v \cos\alpha_f + (\sigma_{H1} \sin\beta_f + \sigma_{H2} \cos\beta_f) \sin\alpha_f - \sigma_s \quad (1)$$

式(1)中, p_{ps} 为塑性屈服的临界流体压力; σ_v 、 σ_{H1} 、

σ_{H2} 分别为裂缝所受垂向应力、水平最大主应力、水平最小主应力; α_f 为裂缝倾角; β_f 为裂缝面与水平最大主应力的夹角; σ_s 为裂缝微凸体发生塑性屈服的屈服极限。

σ_s 可以根据 Drucker-Prager (德鲁克—普拉格) 屈服破坏准则计算得出,具体表达式如下:

$$F(\alpha) = H_2 J_1 + \frac{\sqrt{3}}{3} (\sigma_{fne} - \frac{v}{1-v} \sigma_{fne}) - H_1 \quad (2)$$

式(2)中, J_1 为第一应力不变量; $J_1 = \frac{1}{3} (\sigma_v + \sigma_{H1} + \sigma_{H2})$; σ_{fne} 为垂直作用于裂缝面的有效正应力; H_1 、 H_2 均为材料参数; v 为泊松比。

当 $F(\sigma) = 0$ 时,裂缝面凸体处于临界屈服状态,即 σ_{fne} 此时为裂缝微凸体发生塑性屈服的屈服极限 σ_s 。

H_1 、 H_2 一般通过与 Mohr-Coulomb 强度准则的六棱锥拟合得到。在数值计算时,参数 H_1 、 H_2 一般可由如下几个关系式计算得出:

$$H_1 = \frac{6\tau_0 \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}(3+\sin\varphi)}, H_2 = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3+\sin\varphi)}$$

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \sigma_c (\sqrt{\tan^2\varphi + 1} - \tan\varphi) \quad (3)$$

式(3)中: σ_c 为岩石的抗压强度; φ 为内摩擦角。

3.2 实例计算

2011 年 12 月 26 日对顺 901 井 5 574.5 ~ 5 583.0 m, 5 590.5 ~ 5 595.5 m 2 井段进行地层测试。结合该井的测井数据 GR、声波时差、岩石密度值,计算得出岩石的基本力学参数随深度变化值,选取测试井段的 2 深度点(5 580 m 和 5 593 m),得出的岩石的基本力学参数如表 1 所示。

将表(1)中的结果代入式(1)、(2)、(3)中,计算出在相同裂缝走向的前提下,不同裂缝倾角下的临界流体压力。而临界压差 = 地层静压力 - 临界流体压力。将静压力值代入,得到在相同裂缝走向的前提下,不同裂缝倾角下的临界压差,计算结果见图 2。

顺 9 井区裂缝展布规律目前尚不明朗,在不考虑裂缝倾角、裂缝走向对临界压差计算的影响前提下,从图 2 中可以得到井深 5580 m、5593 m 的临

表 1 岩石基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of rock

井深/m	垂向应力/MPa	水平最大应力/MPa	水平最小应力/MPa	抗压强度/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比	静压力/MPa
5 580	134.377	101.474	68.897	207.676	25.988	0.315	72.89
5 593	134.702	101.066	71.201	191.230	24.833	0.321	73.06

注:顺 901 地层测的地层压力系数为 1.33 MPa/hm,计算出井深 5 580 m 和 5 593 m 的地层静压力分别为 72.89 MPa 和 73.06 MPa。

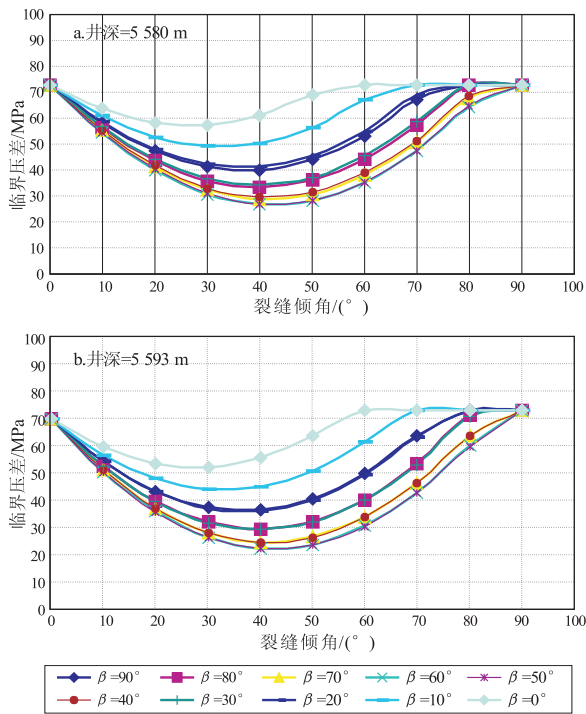


图2 相同裂缝走向时,不同裂缝倾角与临界压差的关系

Fig. 2 Relationship between different fissure angle and critical pressure difference with same fracture strike

界压差范围分别为 26.65 ~ 72.89 MPa, 22.10 ~ 73.06 MPa, 从更加保险角度考虑, 取最小值为实际测试时的临界压差。

4 效果分析

由于顺9井区为外围新区块, 渗透特征不明, 且方法1、2实验工作量较大, 因此该井区选择方法3为最终计算结果, 同时从更加安全的角度考虑, 选择顺9井区应力敏感下合理压差为22.10 MPa。

有裂缝存在的储层, 气举深度并不是越大越好, 顺9井区单井排液情况(表2)可以验证此结论。顺902H、顺901气举最大压差分别为50.04 MPa、28.03 MPa, 超过计算临界压力22.10 MPa, 气举前后在相同工作制度下, 采液指数分别下降3.7倍、4.4倍; 而顺9CH井截至目前未采取助排措施, 自喷排液过程中最大压差未超过临界压差, 采液指数下降0.21。造成此现象的原因初步估计是由于助排深度过大, 造成裂缝闭合所致。

顺902H、顺901前期由于助排深度过大, 造成裂缝闭合, 由于应力敏感的不可逆性, 所以2口井产液量无法恢复。而顺9CH未开展助排措施, 前期

表2 顺9井区单井排液情况统计

Table 2 Statistical table about fluid flowing of well block Shun 9

井号	日期	工作制度/mm	产液密度/ (g · cm ⁻³)	产液/ (m ³ · d ⁻¹)	静压/ MPa	压差/ MPa	采液指数/ (m ³ · (MPa · d) ⁻¹)	返排率/ %	采液指数 下降倍数
顺902H	2012-03-29	敞放	1.06	107.28	71.53		7.62	17.60	
顺902H	2012-04-07	气举3500	1.08	76.30	71.53	50.04	1.52	60.36	3.70
顺902H	2012-05-04	敞放	1.09	25.60	71.53		2.05	101.90	
顺902H	2012-06-20	6	1.10	26.60	71.53		2.27	132.00	
顺901	2012-01-24	敞放	1.09	20.25	71.15		1.63	75.10	
顺901	2012-01-27	气举1500	1.10	37.05	71.15	28.03	1.32	105.50	4.40
顺901	2012-02-05	敞放	1.10	4.40	71.15		0.37	111.50	
顺9CH	2012-06-30	5	1.08	64.00	72.20	17.46	3.67	55.70	
顺9CH	2012-07-07	2.5	1.09	24.00	72.20	11.72	2.90	62.10	0.21

产液下降幅度不大, 结合该井区应力敏感下合理压差22.10 MPa及地层静压, 通过计算, 顺9CH今后如果开展气举助排措施, 建议深度不超过888.53 m。

5 结论及建议

- 1) 顺9井区应力敏感合理压差计算选择裂缝闭合压差法, 即应力敏感下合理临界压差为22.10 MPa。
- 2) 有裂缝存在的储层, 气举深度并不是越大越好, 需通过计算确定合理的助排深度。
- 3) 建议顺9CH助排深度不超过888.53 m。

参考文献:

[1] 梅青, 唐洪明, 赵峰. 华北油田低渗透油藏储层保护技术研

究[J]. 西部探矿工程, 2010(4): 62-65.
 [2] 高波. 裂缝性特低渗透砂岩油层损害机理及保护技术研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
 [3] 王辉, 刘启国. 变形介质低渗透油藏的产能影响因素分析及合理压差的确定[J]. 西部探矿工程, 2010(7): 65-66.
 [4] 许建红, 马丽丽, 张晓明. 压力敏感储层的合理生产压差研究[J]. 内蒙古石油化工, 2006(11): 96-98.
 [5] 苗钱友, 李云娟. 应力敏感油藏合理工作制度的确定[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(6): 49-51.
 [6] Pedrosa O A. Pressure transient response in stress-sensitive formations[R]. SPE 15115, 1986.

(编辑 叶德燎)