

文章编号:0253-9985(2010)02-0250-05

苏北盆地桥河口油田阜二段第三砂层组 裂缝参数模拟计算

刘肖军

(中国石油化工股份有限公司 江苏油田分公司 科技处,江苏 扬州 225009)

摘要:低渗透油气藏中的储层裂缝不仅为油气储集提供了空间,而且是油气渗流的重要通道,目前对裂缝的研究多限于定性描述。准确计算裂缝的开度、密度、孔隙度和渗透率等参数是裂缝定量研究的主要内容,也为油气田开发奠定基础。基于岩石破裂准则,建立了苏北盆地桥河口油田阜二段第三砂层组造缝时期古地应力和现今地应力与裂缝参数之间的关系,通过构造解析确定了造缝时期古地应力的性质和方向,用声速法、水力压裂法和声发射法计算了现今地应力的方向和大小,将古今地应力场的数值模拟结果代入裂缝参数计算模型中,模拟计算了桥河口油田阜二段第三砂层组裂缝的开度、密度、孔隙度和渗透率。靠近主断层的构造高部位裂缝发育程度较高,不同方向裂缝渗透率的差异反映了裂缝自身的方向性,岩心统计和测井解释验证了模拟计算结果的可靠性。

关键词:地应力;裂缝孔隙度;裂缝渗透率;有限元分析;桥河口油田;苏北盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Simulation of fracture parameters in the 3rd sand unit of the Paleogene Fu-2 member in the Qiaohekou oilfield

Liu Xiaojun

(Office of Science and Technology, SINOPEC Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Fractures in low-permeability reservoirs not only provide accumulation space and also act as seepage channels. However, present research on these fractures is mostly confined to qualitative descriptions. An accurate calculation of certain fracture parameters, such as openness, density, porosity and permeability, is of great importance in fracture quantitative descriptions and also a fundamental factor for the development of oil and gas fields. This paper documents a study that tries to construct a relationship between the ancient earth stress during the fracture forming period and fracture parameters and that between the present earth stress and the parameters, determine the characters and directions of ancient earth stress through a structure analysis, and calculate the direction and strength of the present earth stress by using such means as sonic velocity, hydrofracturing, and sound emission. The results are introduced into the fracture parameter calculating model to simulate and calculate the openness, density, porosity and permeability of the fractures in the 3rd sand set of the Paleogene Fu-2 member in the Qiaohekou oilfield. It is concluded that fractures are highly developed in the structural high near the main fault and the differences in fracture permeability reflect the differences of their directions. Core statistics and log interpretation verify the correctness of the stimulation results of the model.

Key words: Qiaohekou oilfield, earth stress, fracture porosity, fracture permeability, finite element analysis

桥河口油田位于苏北盆地金湖凹陷石港断裂的上升盘,由多个断块油藏组成(图1),主要含油层有古近系阜宁组的第二、第三段和戴南组

的第一段。其中阜二段是主力含油层,储层岩石类型以砂岩为主,孔隙度、渗透率很低,物性差,裂缝是重要的油气储集空间和主要的运移通道。

收稿日期:2009-05-22。

作者简介:刘肖军(1961—),男,高级工程师,勘探技术及科技管理。

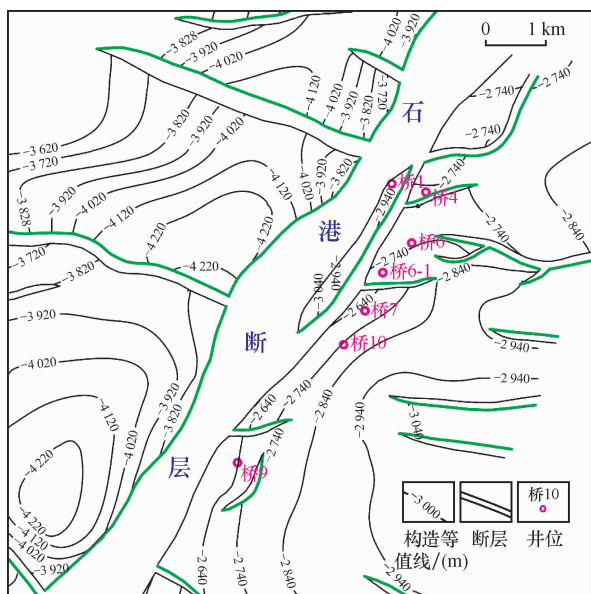


图1 桥河口油田阜二段第三砂层组顶面构造图

Fig.1 Top structure map of the 3rd sand unit of the Paleogene Fu-2 member in the Qiaohokou oilfield

研究表明,构造裂缝通常在古应力形成下产生^[1],在现今应力场中被改造,本文采用古今地应力复合的方法对桥河口油田阜二段第三砂层组储层裂缝进行了定量研究^[2,3]。对认识桥河口油田,制订有效的油田开发方案起到了重要作用。

1 裂缝计算模型

阜宁晚期的吴堡运动在桥河口地区以拉张活动为主,形成了众多的断层和裂缝,是阜宁组主要的造缝运动。桥河口油田阜二段第三砂层组现今埋深约为2 700 m,处在三轴挤压状态下,现今差地应力小,岩石没有达到破裂极限,虽不能产生新的裂缝,却改变了原有裂缝的开度、孔隙度和渗透率^[4]。基于岩石破裂准则^[5]和能量守恒原则^[6],本文建立了裂缝参数的计算模型^[7~9]。

1.1 裂缝开度计算模型

$$b_m = b - \Delta b \quad (1)$$

① 当 $\theta \neq 0$ 时,则 $D_{vf} \neq D_{lf}$,有

$$\begin{aligned} & (\sigma_3 L_1 \sin \theta + \sigma_3 L_3 \cos \theta) b^2 + [(L_1 \sin \theta + L_3 \cos \theta) J_0 \\ & + (|\varepsilon_3| - |\varepsilon_0|)(L_1^2 \sin^2 \theta + L_3^2 \cos^2 \theta) \sigma_3 \\ & - 2w_f L_1 L_3 \sin \theta \cos \theta] b + (|\varepsilon_3| - |\varepsilon_0|) \\ & (L_1^2 \sin^2 \theta + L_3^2 \cos^2 \theta) J_0 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

② 当 $\theta = 0$ 时,则 $D_{vf} = D_{lf}$,有

$$(|\varepsilon_3| - |\varepsilon_0|) \sigma_3 b + (|\varepsilon_3| - |\varepsilon_0|) J_0 = w_f b \quad (3)$$

式中: σ_1, σ_3 分别为最大主应力、最小主应力, MPa; b_m 为裂缝现今开度, m; b 为造缝期裂缝古开度, m; Δb 为现今裂缝闭合量, m; θ 为裂缝破裂角, ($^\circ$); D_{vf} 为裂缝体积密度, m^2/m^3 ; D_{lf} 为裂缝线密度, 条/m; L_1, L_3 为沿造缝期古主应力方向 σ_1, σ_3 的单元体长度, m; J_0 为裂缝表面能, J/m^2 ; w_f 为裂缝应变能密度, J/m^3 ; ε_0 为造缝期古最大主应变; ε_3 为造缝期古最小主应变。

1.2 裂缝孔隙度计算模型

$$\phi_{fm} = b_m D_{vf} \quad (4)$$

式中: ϕ_{fm} 为现今裂缝孔隙度, %。

1.3 裂缝渗透率计算模型

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} k_{fx} \\ k_{fy} \\ k_{fz} \end{bmatrix} &= \frac{b_m^3 D_{lf}}{12} \begin{bmatrix} 1 - n_{f1}^2 \\ 1 - n_{f2}^2 \\ 1 - n_{f3}^2 \end{bmatrix} \\ &= \frac{b_m^3 D_{lf}}{12} \begin{bmatrix} 1 - (\cos \alpha_{11} \sin \theta + \cos \alpha_{31} \cos \theta)^2 \\ 1 - (\cos \alpha_{12} \sin \theta + \cos \alpha_{32} \cos \theta)^2 \\ 1 - (\cos \alpha_{13} \sin \theta + \cos \alpha_{33} \cos \theta)^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: k_{fx}, k_{fy}, k_{fz} 为现今沿3个坐标轴方向的裂缝渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; n_{f1}, n_{f2}, n_{f3} 为单位法向量在3个坐标轴方向上的分量; $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}$ 为造缝期古主应力 σ_1 与3个坐标轴的夹角, ($^\circ$); $\alpha_{31}, \alpha_{32}, \alpha_{33}$ 为造缝期古主应力 σ_3 与3个坐标轴的夹角, ($^\circ$)。

2 地应力场数值模拟

2.1 地质模型

依据桥河口油田阜二段顶面构造图(图1)用 ANSYS 软件建立了桥河口油田阜二段第三砂层组三维地质模型。该模型平面上包括桥河口油田内部的多条断层和多个断块,考虑到石港断层的影响模型范围扩展到该断层的下降盘。纵向上以第三砂层组为目的层分为三层,第一层为目的层之上的阜二段以泥岩为主,第二层是第三砂层组以砂岩为主,第三层是目的层之下的地层主要为泥岩。为了便于施加外力,模型四周设置了边框。

表 1 桥河口油田阜二段岩石力学参数

Table 1 Rock mechanical parameters of the Paleogene Fu-2 member in the Qiaohekou oilfield

层		泊松比		弹性模量/GPa		密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	
		古模型	今模型	古模型	今模型	古模型	今模型
第一层	断层	0.23	0.21	5.0	5.5	2 050	2 150
	泥岩	0.21	0.19	5.2	5.7	2 060	2 160
第二层	断层	0.22	0.20	5.2	5.6	2 100	2 200
	砂岩	0.20	0.18	5.3	5.8	2 110	2 210
第三层	断层	0.21	0.19	5.2	5.7	2 070	2 170
	泥岩	0.19	0.17	5.4	5.9	2 080	2 180
边框		0.20	0.18	5.2	5.7	2 120	2 220

根据岩心样品物理测试结果,同时考虑造缝时期成岩作用较弱现今成岩作用较强的现实,选取了岩石的力学参数^[10](表 1)。

2.2 造缝期古地应力场数值模拟

构造解析结果桥河口地区阜二段经历的最强烈构造活动是阜宁期的吴堡运动,该运动表现为工区内近东西向断层的同生伸展活动和石港断层的右旋伸展走滑,形成了众多的断层和裂缝,是主要的造缝时期。该时期古构造应力场为南北向拉张,岩石在地下的抗张强度约为 4.5 MPa 左右^[11],经反复加载试验最终确定对地质模型施加南北向 6 MPa 的拉张应力,为防止颈缩变形同时施加东西方向 0.5 MPa 的拉张应力,并施加岩石的自身重力。

桥河口地区阜二段第三砂层组吴堡期古地应力场数值模拟结果,最小主应力方向为近南北向,全部为张应力,集中在 -5.3 ~ -5.7 MPa 之间,沿石港断裂带的上升盘为张应力高值区,最大值出现在桥 6 井附近,断块边缘明显小于断块内部。最大水平主应力为近东西向压应力,小于 0.5 MPa,低值区沿石港断裂带的上升盘分布,主要由岩层重力产生。

2.3 现今地应力场数值模拟

桥河口油田阜二段第三砂层组现今埋深 2 700 m 以下,处于三轴挤压状态^[12],岩心声速法测得现今最小主应力方向为北北西 340°,最大主应力方向北东东 70°。四口井水力压裂资料计算出的现今最小主应力换算到 2 700 m 深度的平均值为 32 MPa,两块岩心样品声发射试验获得现今最大主应力换算到 2 700 m 深度的平均值为 37 MPa^[13~15]。对现今地质模型施加外部力和上覆岩层重力。

现今地应力场数值模拟结果,桥河口油田阜二段第三砂层组现今最大主应力北东东向,36 ~ 41 MPa,最小主应力北北西向 31 ~ 34 MPa,沿石港断裂带的上升盘为低值区。

3 裂缝参数计算

将裂缝计算模型代入古今地应力场的模拟结果中,计算了桥河口油田阜二段第三砂层组裂缝的开度、密度、孔隙度、渗透率等参数。

3.1 裂缝开度和密度

岩石在现今地应力场中受到三轴挤压,裂缝趋于闭合,现今裂缝开度相对古裂缝开度明显变小,介于 $0.54 \times 10^{-4} \sim 0.71 \times 10^{-4}$ m 之间(图 2)。靠近石港断层为一明显的开度高值区,远离石港断层开度变小。开度最大值位于靠近石港断层的构造高部位,随着埋深增加,压应力增大,开度逐渐变小。

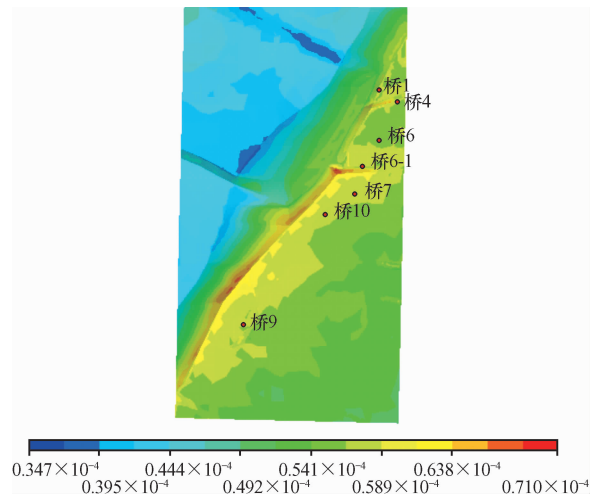


图 2 现今裂缝开度(单位:m)

Fig. 2 Present fracture openness(meter)

裂缝线密度变化较小,介于 3.5 ~ 4.0 条/m 之间(图 3)。由于现今地应力场不能形成新的裂缝,因此古地应力场下的裂缝密度与现今裂缝密度相同。

3.2 裂缝孔隙度

裂缝孔隙度介于 0.18% ~ 0.27% 之间(图 4),约为造缝时期裂缝孔隙度的三分之一,对于砂岩储层属于中等发育程度,邻近石港断层的桥 9 井、桥 10 井和桥 7 井附近为裂缝孔隙度高值区,大于 0.22%,该区域是构造高部位。远离石港断层随着构造位置的降低,裂缝孔隙度逐渐降低。

裂缝孔隙度较低对油气的储集作用较小。

3.3 裂缝渗透率

裂缝自身的方向性导致其渗透率也具有方向性,东西方向裂缝渗透率介于 $50 \times 10^{-3} \sim 105 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间(图 5),铅垂方向裂缝渗透率略小于东西方向,为 $45 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。南北方向裂缝渗透率远小于东西和铅垂方向,为 $0.001 \times 10^{-3} \sim 0.020 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 6)。裂缝渗透率的分布趋势与裂缝孔隙度和裂缝开度相同,靠近石港断层的构造高部位为高值区,远离石港断层随着构造位置的降低逐渐变为低值区。

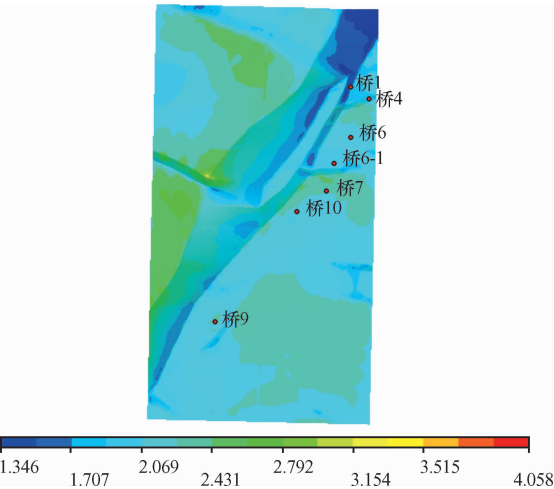


图 3 裂缝线密度(单位:条/m)

Fig. 3 Fracture density (numbers of fracture per meter)

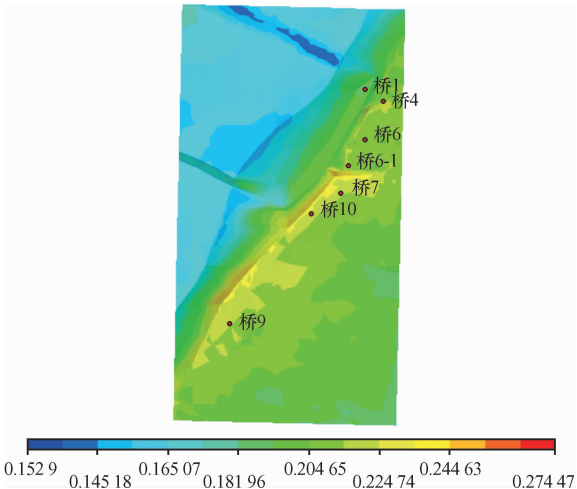


图 4 现今裂缝孔隙度(单位:%)

Fig. 4 Present fracture porosity (%)

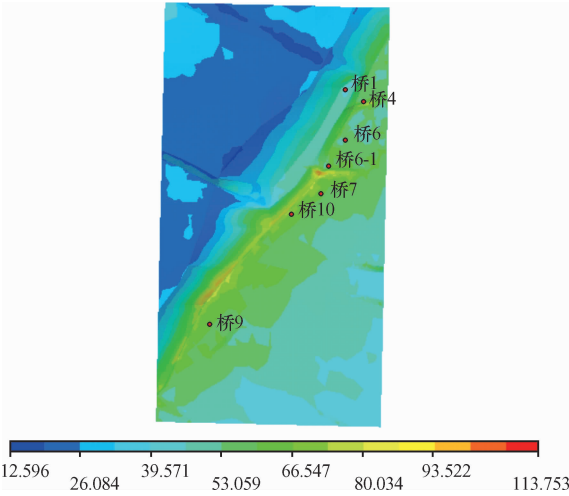


图 5 现今裂缝东西方向渗透率(单位: $10^{-3} \mu\text{m}^2$)

Fig. 5 Present fracture permeability at the E-W direction($10^{-3} \mu\text{m}^2$)

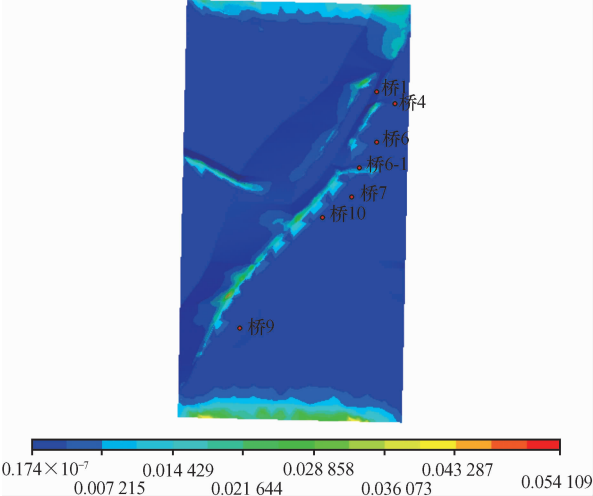


图 6 现今裂缝南北方向渗透率(单位: $10^{-3} \mu\text{m}^2$)

Fig. 6 Present fracture permeability at the S-N direction($10^{-3} \mu\text{m}^2$)

表 2 桥 6 井阜二段第三砂层组裂缝参数对比

Table 2 Correlation of fracture parameters at the 3rd sand unit of the Paleogene Fu-2 member in the Qiaohekou oilfield

深度/m	裂缝线密度/(条·m ⁻¹)			裂缝孔隙度,%			裂缝渗透率/(10 ⁻³ μm ²)			
	岩心	测井	模拟	岩心	测井	模拟	测井	模拟		
								东西向	南北向	铅垂向
2 710 ~2 760	3.0	2.0~5.0	3.4	0.25	0.2~0.8	0.22	5~35	60	0.004	50

4 计算结果分析

开度、密度、孔隙度和渗透率是描述裂缝的主要参数,这些参数的大小直接反映了裂缝的发育程度。桥河口油田阜二段第三砂层组模拟计算结果,裂缝的开度、密度、孔隙度和渗透率具有相同的变化趋势,即靠近石港断层的构造高部位为高值区,远离石港断层随着构造位置的降低逐渐变为低值区。说明靠近石港断层的构造高部位裂缝发育程度较高,远离石港断层随着构造位置的变低裂缝发育程度逐渐降低,符合地质规律。石港断层是一条长期活动的大断层,在造缝时期(吴堡期)已经存在并且强烈活动,其附近尤其是上升盘张应力集中岩石容易破裂,现今是构造高点岩石埋藏浅,压应力较小裂缝闭合程度较弱,裂缝发育程度较高。远离石港断层的构造低部位,造缝期张应力较小岩石破裂程度弱,现今埋藏深压应力大裂缝闭合程度高,裂缝发育程度较弱。

裂缝自身具有方向性,因此其开度、密度和渗透率也具有方向性。从裂缝渗透率的模拟计算结果来看,东西方向裂缝渗透率比南北方向高 3~4 个数量级,差别悬殊,说明裂缝沿东西方向的渗透性远大于南北方向。桥河口地区造缝期主要经受南北向的拉张作用,容易形成东西方向的张裂缝和北东东与北西西方向的剪裂缝,裂缝的优势走向为东西向。现今最大主压应力为近东西向,最小主压应力为近南北向,导致南北方向裂缝的闭合程度高于东西方向。裂缝渗透率在铅垂方向与东西方向为同一数量级,远大于南北方向,说明裂缝倾角较大以直立缝和高角度缝为主,与岩心观察结果相吻合(图 7)。

桥 6 井阜二段取心井段完整测井系列较全,将裂缝参数模拟计算结果与岩心统计结果和测井解释^[16]结果进行对比,三者对裂缝线密度和裂缝孔隙度的计算结果是吻合的(表 2),测井解释的

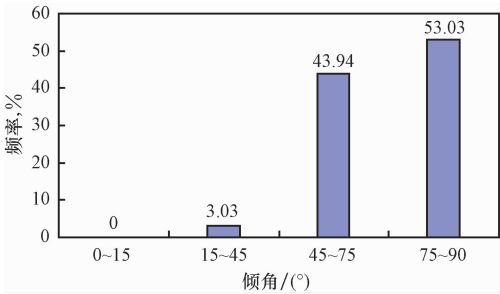


图 7 桥 6 井阜二段岩心裂缝倾角直方图
Fig. 7 Histogram showing the fracture dip angle in core samples from the Paleogene Fu-2 member in the Qiaohekou oilfield

裂缝渗透率与模拟计算的東西方向和鉛垂方向的裂缝渗透率也相吻合,从而证实桥河口油田阜二段第三砂层组裂缝参数的模拟计算结果是可信的。

参 考 文 献

1 文世鹏,李德同. 储层构造裂缝数值模拟技术[J]. 石油大学学报,1996,20(5):17~24

2 魏春光,雷茂盛,万天丰,等. 古龙_徐家围子地区营城组古构造应力场数值模拟_构造裂缝发育区带预测及对比研究[J]. 石油与天然气地质,2006,27(1):78~84

3 龚洪林,潘建国,王宏斌,等. 塔中地区碳酸盐岩裂缝综合预测技术及其应用[J]. 石油与天然气地质,2007,28(6):841~846

4 宋惠珍,贾承造,欧阳健,等. 裂缝性储集层研究理论与方法—塔里木盆地碳酸盐岩储集层裂缝预测[M]. 北京:石油工业出版社,2001:255~265

5 戴俊生,汪必峰,马占荣. 脆性低渗透砂岩破裂准则研究[J]. 新疆石油地质,2007,28(4):393~395

6 孙广忠,林文祝. 结构面闭合变形法则及岩体弹性本构方程[J]. 地质科学,1983,18(2):81~87

7 Chen M, Bai M. Modeling Stress – dependent permeability for anisotropic fractured porous rocks[J]. Rock. Mech. Min. Sci.,1998,35(8):1 113 – 1 119

8 邓攀,魏国齐,杨泳. 储层构造裂缝定量预测中地质数学模型的建立与应用研究[J]. 天然气地球科学,2006,17(4):480~484