

铜城断裂带阜二段储层应力场数值模拟及开发建议

戴俊生¹, 刘敬寿¹, 杨海盟¹, 张 艺², 汪必峰¹, 周巨标³

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油新疆油田分公司风城油田作业区, 新疆克拉玛依 834000; 3. 中国石化江苏油田分公司安徽采油厂, 安徽天长 239300)

摘要:通过裂缝形成时期古应力场数值模拟, 预测铜城断裂带阜二段储层裂缝的产状; 利用岩心声速实验以及微地震监测技术确定井点现今地应力方位; 结合压裂资料计算井点现今地应力; 通过确定岩石力学参数并建立有限元模型进行现今应力场数值模拟; 借助于裂缝产状以及现今应力场数值模拟结果, 预测储层中天然裂缝的开启压力和开启次序。结果表明, 铜城断裂带阜二段现今水平最大主应力为北东东向; 在注水过程开发中, 北东东向裂缝优先开启, 南东东向裂缝后开启; 裂缝的开启压力随裂缝走向与水平最大主应力之间的夹角增大而增大; 裂缝埋深与开启压力同样具有较好正相关性, 在构造高部位(1 850 ~ 2 350 m)裂缝的开启压力在 25 ~ 50 MPa 之间, 在构造低部位(3 300 ~ 4 000 m)裂缝的开启压力在 45 ~ 75 MPa 之间; 通过计算储层的实际破裂压力, 提出在不同区块采用不同的注水压力, 以保证油气井的高产与稳产。

关键词:裂缝性储层; 应力场; 数值模拟; 储层破裂压力; 裂缝开启压力; 铜城断裂带

中图分类号:TE 19 **文献标志码:**A

引用格式:戴俊生, 刘敬寿, 杨海盟, 等. 铜城断裂带阜二段储层应力场数值模拟及开发建议[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1):1-9.

DAI Junsheng, LIU Jingshou, YANG Haimeng, et al. Numerical simulation of stress field of Fu-2 Member in Tongcheng fault zone and development suggestions [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1):1-9.

Numerical simulation of stress field of Fu-2 Member in Tongcheng fault zone and development suggestions

DAI Junsheng¹, LIU Jingshou¹, YANG Haimeng¹, ZHANG Yi², WANG Bifeng¹, ZHOU Jubiao³

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Fengcheng Oilfield Operation Area, Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Karamay 834000, China;

3. Anhui Oil Production Plant of Jiangsu Oilfield, SINOPEC, Tianchang 239300, China)

Abstract: Based on numerical simulations of the ancient stress field of the fracture formation, the fracture occurrence of Fu-2 Member in Tongcheng fault zone was predicted. Present-time in-situ stress orientations for wells were determined using the core velocity experiment and micro seismic monitoring technology. The size of present-time in-situ stress for wells was determined by the combination of the fracturing data. Numerical simulations of the present-time stress field were carried out by ascertaining the rock mechanical parameters and establishing the finite element model. The reservoir natural fracture opening pressure and the opening sequence were predicted on the basis of fracture occurrence and present-time stress field simulation state. The results are as follows: the present-time horizontal maximum stress is NEE. Fractures with the NEE maximum stress direction open first and fractures with the SEE direction open afterwards in the process of waterflooding. Fracture opening pressure increases when the angle between the fracture direction and the maximum horizontal stress direction increases. Fracture depth and open-

收稿日期:2014-11-14

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05042-001); 中央高校基本科研业务费专项(13CX02033A)

作者简介:戴俊生(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为油气区构造解析、储层裂缝预测、构造地质学。E-mail: djsh3@163.com。

通讯作者:刘敬寿(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为储层裂缝预测、构造地质学。E-mail: liujingshou@126.com。

ing pressure also have positive correlation. Fracture opening pressure is between 25–45 MPa in the structural high part(1 850–2 350 m) and 45–75 MPa in the low part (3 300–4 000 m). It is proposed that different blocks use different injection pressures by calculating the actual reservoir breakdown pressures to ensure the high and stable production of oil and gas wells.

Keywords: fractured reservoir; stress field; numerical simulation; reservoir breakdown pressure; fracture open pressure; Tongcheng fault zone

在裂缝性储层开发过程中,裂缝的开启压力、开启次序以及储层的破裂压力是制定油气开发方案必须考虑的因素,尤其在对低渗透储层实施压裂、注水开发等措施时,准确地预测构造裂缝发育规律、储层破裂压力是提高油气采收率、经济效益的重要保证^[1-5]。合理的油气井注水压力往往不能超过油气层的破裂压力,而这一压力条件下又要保证构造裂缝充分开启,最大限度地提高油气采收效益^[1]。在构造裂缝预测方法中,基于古今应力场数值模拟技术对裂缝的定量评价方法日趋成熟,成为研究储层裂缝分布的有效手段^[6-10]。笔者综合运用古今应力场数值模拟技术,在充分考虑构造裂缝的产状、构造位置的基础上,对铜城断裂带阜二段储层裂缝的开启压力-开启次序以及储层合理注水压力进行研究。

1 区域地质概况

铜城断裂带地处江苏省金湖县境内,构造上位于苏北盆地金湖凹陷中,是划分龙岗-汉涧次凹的盆地内区带级右旋走滑断层(图 1,据文献[11]中图 1 修改)。在平面上,铜城断层表现为一条线状主位移带,主干断层两侧雁列断层发育;空间中,主断层倾向东西摇摆,出现“丝带效应”^[11-13]。该地区主力产油气层为古近系阜宁组二段储层,储层物性差,岩性以低渗透粉砂岩为主,裂缝在油气渗流中起至关重要的作用。

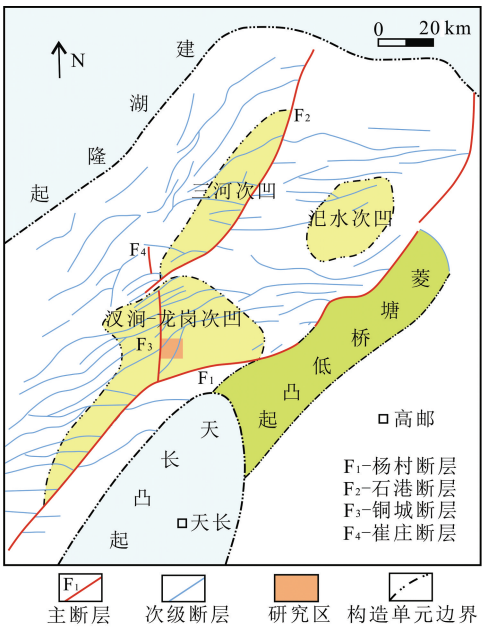


图 1 铜城断裂带构造位置

Fig.1 Structural location of Tongcheng fault zone

2 裂缝产状预测

2.1 古应力场数值模拟

通过岩心观测和测井解释可知,铜城断裂带阜二段主要发育北东东向、南东东向两组构造裂缝(图 2(a))^[14],裂缝倾角以垂直缝以及高角度斜交缝为主(87%,图 2(b)),低角度斜交缝、水平缝发育较弱(图 2(c))。

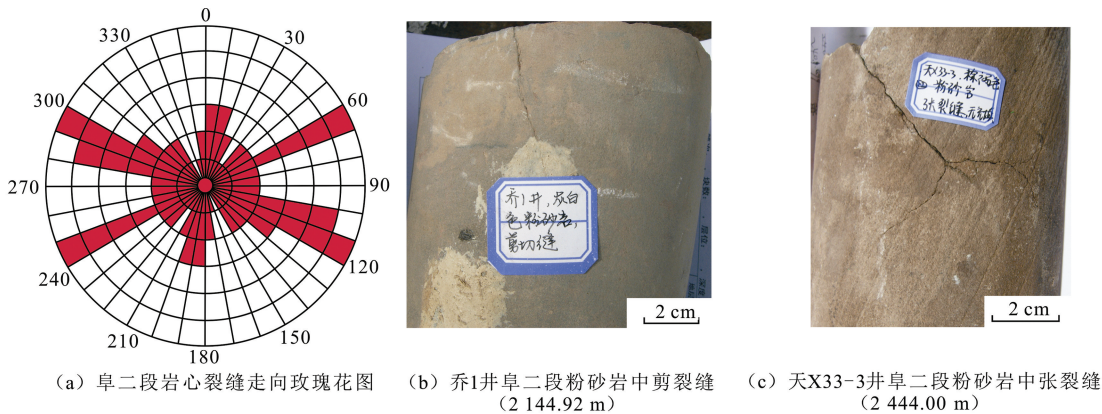


图 2 铜城断裂带阜二段岩心裂缝观测

Fig.2 Core fracture observation of Fu-2 Member in Tongcheng fault zone

通过对乔 1 井、天 X33-1 井 3 块岩样力学实验确定阜二段粉砂岩的单轴抗拉强度为 2.4 MPa,单轴抗剪强度为 6.5 MPa;铜城地区构造活动高亮点为阜宁晚期,该时期活动断裂走向为近东西向,结合岩石裂缝观测结果(图 2(a)),确定铜城断裂带吴堡运动期最小主应力方向为近南北向;古应力场大小主要采用等效古应力^[6,15]的方法确定,其原理是在满足应力类型与形成断层、裂缝的应力类型一致的前提下,以单井储层裂缝参数为约束条件,结合地应力与储层裂缝参数之间的关系^[6,10,15-16],通过不断地反演、拟合实现。最终在地质模型的南北边界施加 8.0 MPa 拉张应力,东西边界施加 1.5 MPa 拉张应力,垂向应力由 ANSYS 软件自动生成;受上覆岩层压力增大的影响,现今岩层物性变化,弹性模量变大;结合岩石力学实验结果,选取古今应力场模拟的力学参数如表 1 所示。

表 1 铜城断裂带阜二段应力场数值模拟力学参数
Table 1 Mechanical parameters of stress field simulation of Fu-2 Member in Tongcheng fault zone

岩石力学层	泊松比 μ	弹性模量 E/GPa		密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
		古	今	
砂岩层	0.15	5.6	5.7	2.21
断裂带	0.20	5.0	5.2	2.20
泥岩层	0.23	4.5	4.7	2.10
围岩	0.15	5.5	5.6	2.22

2.2 裂缝产状预测

通过古应力场数值模拟,选择库仑-莫尔破裂准则,求取裂缝的产状^[17],设裂缝形成时所在平面的单位法向矢量为 $\boldsymbol{n}$,倾角为 η ,倾向为 γ ,岩石破裂角为 α 。依据岩石破裂准则,可以得到应力场坐标系中裂缝的产状,主应力方向与大地坐标系 X - Y - Z 轴的夹角分别表示为

- ① σ_1 与 X - Y - Z 轴的夹角: α_{11} 、 α_{12} 、 α_{13} ;
- ② σ_2 与 X - Y - Z 轴的夹角: α_{21} 、 α_{22} 、 α_{23} ;
- ③ σ_3 与 X - Y - Z 轴的夹角: α_{31} 、 α_{32} 、 α_{33} 。

在应力场坐标系中,裂缝面的单位法向矢量可以表示为

$$\begin{bmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ 0 \\ \cos \alpha \end{bmatrix}. \tag{1}$$

矢量 $\boldsymbol{n}$ 在大地坐标系中 3 个分量 n_x 、 n_y 、 n_z 可以表示为

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{11} & \cos \alpha_{21} & \cos \alpha_{31} \\ \cos \alpha_{12} & \cos \alpha_{22} & \cos \alpha_{32} \\ \cos \alpha_{13} & \cos \alpha_{23} & \cos \alpha_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{bmatrix}. \tag{2}$$

依据公式(2),计算裂缝的倾角 η 、倾向 γ ,

$$\begin{cases} \tan \eta = \frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{n_z}, \\ \tan \gamma = \frac{n_x}{n_y}. \end{cases} \tag{3}$$

得到裂缝倾角 η ,

$$\eta = \arctan\left(\frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{n_z}\right). \tag{4}$$

裂缝倾向 γ 需要分象限进行讨论:

① $n_x \geq 0$ 且 $n_y > 0$,裂缝倾向为北东向,此时

$$\gamma = \arctan\left(\frac{n_x}{n_y}\right). \tag{5}$$

② $n_x \leq 0$ 且 $n_y > 0$,裂缝倾向为南东向,此时

$$\gamma = \arctan\left(\frac{n_x}{n_y}\right) + \pi. \tag{6}$$

③ $n_x < 0$ 且 $n_y \leq 0$,裂缝倾向为南西向,此时

$$\gamma = \arctan\left(\frac{n_x}{n_y}\right) + \pi. \tag{7}$$

④ $n_x \geq 0$ 且 $n_y < 0$,裂缝倾向为北西向,此时

$$\gamma = \arctan\left(\frac{n_x}{n_y}\right) + 2\pi. \tag{8}$$

利用公式(1)~(8)可以求得阜二段储层构造裂缝产状分布规律:在构造高部位,裂缝倾角小;在构造低部位,裂缝倾角大;北东东向裂缝最为发育,南东东向裂缝次之。

3 现今地应力场数值模拟

3.1 井点地应力确定

本文中主要通过岩心声速实验以及微地震监测法确定井点现今地应力的方向;通过压裂资料计算井点现今地应力的大小。

(1)岩心声速实验确定现今地应力方向

岩石在三向挤压应力作用下,当岩心脱离地下应力状态时,应力释放使岩石内部形成许多定向分布的微小裂隙,导致声波在岩心不同方向上传播速度不同,出现明显的声速各向异性。沿最大主应力方向,声波传播速度最慢;沿最小主应力方向,声波传播速度最快^[18-19]。引起岩心声速各向异性的原因有很多,一般认为岩心声速幅度差大于 3% 时^[18],声速差异性由地应力引起。

分别对乔 1 井、吴 101X1 井进行岩心声速实验,吴 101X1 井岩心相对标志线 130° 方向声速最

大,声速为 4 512 m/s;40°方向声速最小,声速为 4 077 m/s;岩心波速幅度差分别为 10.13%、13.53%,认为岩心声速实验结果可以用来确定地应力方向。在古地磁定向中,将磁偏角取为 NNW5°31',乔 1 井最小波速与标志线夹角 70°,古地磁法、岩层产状法确定最大主应力方向分别为 NE59.2°、NE50.0°;吴 101X1 井最小波速与标志线夹角 40°,古地磁法、岩层产状法确定最大主应力方向分别为 NE49.7°、NE41.8°。

(2)微地震监测确定现今地应力方向

微地震监测人工裂缝技术常用于测试深部的地应力信息,测试结果代表了地下较大范围的地应力信息,被认为是目前现今地应力测试的有效方法^[20-21]。统计研究区 3 口井 5 个层位的微地震检测报告,如图 3 所示,对天 X33-1 井微地震监测,得到阜二段(2 477.5 ~ 2 486.4 m)微震点分布。

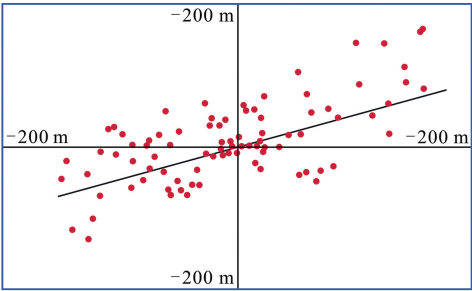


图 3 天 X33-1 井微震点分布

Fig.3 Microseismic distribution of TianX33-1 well

研究区目的层位 5 次水力压裂产生的裂缝均为张性破裂,并以垂直缝为主,由此断定铜城地区现今地应力类型为 I a 类型^[22],即最大主应力近垂直方向,中间主应力、最小主应力近水平方向,其中,最大水平主应力方向在 NEE64.5° ~ NEE81.0°之间。通过压裂施工曲线计算了不同层位的现今地应力,水平最大主应力(中间主应力)在 33.8 ~ 38.5 MPa 之间,水平最小主应力在 22.0 ~ 28.9 MPa 之间。

(3)邻区现今地应力信息

统计研究区附近卞东、闵桥、杨家坝^[23-25]以及石-桥地区不同层位的现今水平地应力信息(表 2),为合理确定本区现今地应力提供参考依据。

表 2 金湖凹陷不同地区现今地应力统计结果

Table 2 Present-time stress statistical results in different regions of Jinhu sag

层段	埋深 H/m	水平最小 主应力 σ_{hmin}/MPa	水平最大 主应力 σ_{hmax}/MPa	最大主应 力方向
卞东阜二段	1 600	28.0	38.0	WE90.0°
闵桥阜二段	1 580	28.0	38.0	NEE86.0°
杨家坝阜一段	1 600	27.7	38.1	NEE87.0°
石-桥阜二段	2 440	32.0	37.0	NEE57.5°

3.2 现今应力场数值模拟

岩石物理实验、现场监测仅能得到井点附近一定范围内的地应力信息,借助 ANSYS 软件对铜城断裂带阜二段现今地应力场进行有限元模拟。利用阜二段构造图建立研究区地质模型,模拟阜二段地层总厚度为 120 m;参考岩石力学实验结果,对不同属性的单元体赋予不同的岩石力学参数,建立研究区力学模型,如表 1 所示;结合压裂资料以及岩心声速实验,确定现今水平最大主应力为 NEE79°挤压应力,大小为 37 MPa;水平最小主应力为 NNW349°的挤压应力,大小为 25 MPa;定义模型自身的重量,为了保证模型计算收敛,在地质模型的底面施加 Z 方向的约束。

(1)现今最小主应力

阜二段现今最小主应力变化范围为 21 ~ 28 MPa;靠近断层的构造高部位表现为低值,介于 21 ~ 23 MPa 之间,在断层附近主应力的方向发生 5° ~ 10°的改变(图 4(a)、4(c))。

(2)现今中间主应力

阜二段现今中间主应力变化范围为 30 ~ 40 MPa;靠近断层的构造高部位表现为低值,介于 30 ~ 34 MPa 之间(图 4(b)、4(d))。

(3)现今最大主应力

阜二段现今最大主方向主要为垂直方向,变化范围为 33 ~ 68 MPa,这与该区阜二段地层构造高差大密切相关。

(4)现今地应力模拟结果对比验证

现今地应力场的模拟结果是裂缝开启压力和储层破裂压力准确预测的关键,对比油气井实测结果与现今应力场模拟结果,发现两者基本吻合(表 3),因此可以认为数值模拟结果反映了铜城断裂带阜二段现今地应力的实际情况。

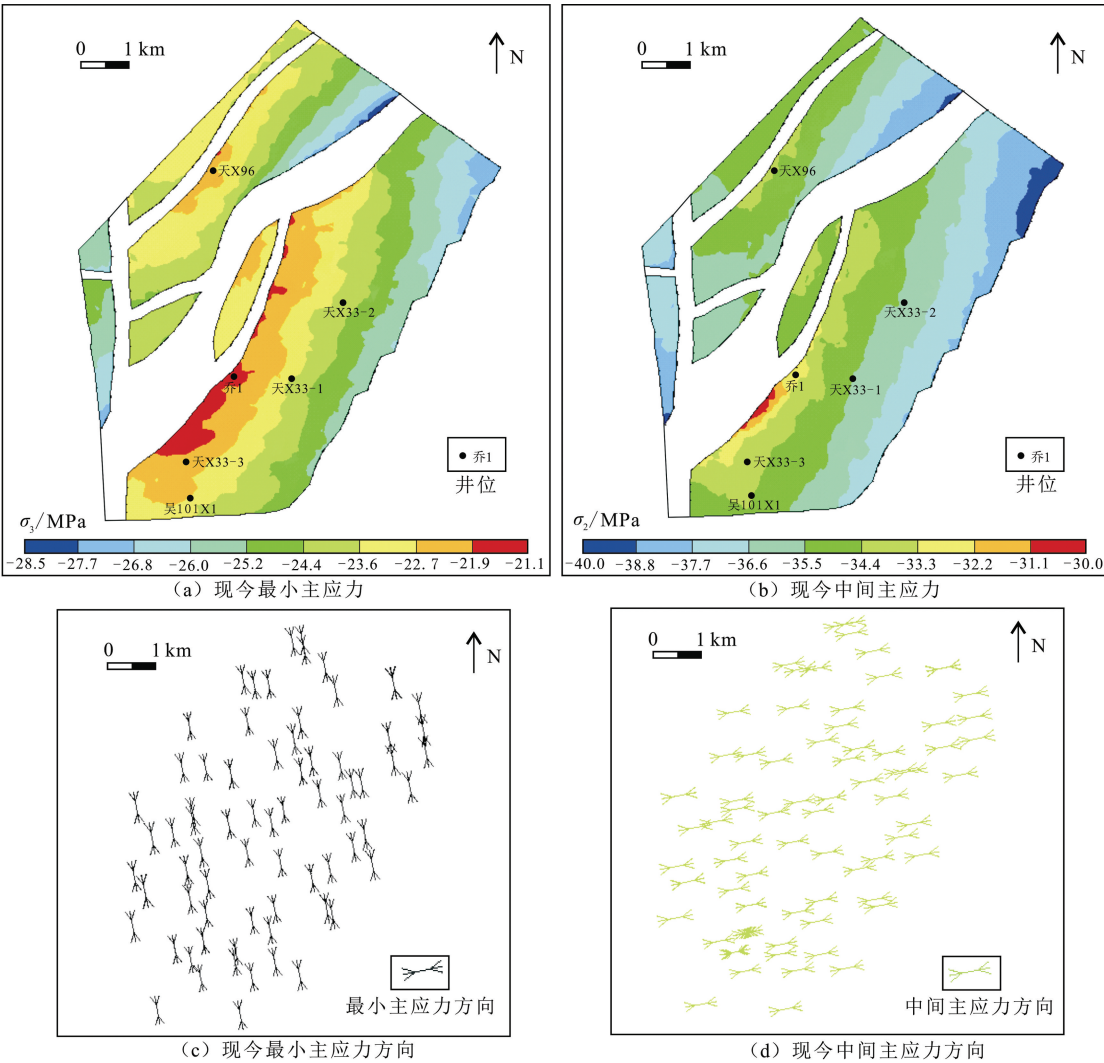


图 4 铜城断裂带阜二段现今地应力平面分布

Fig.4 Planar distribution of present-time ground stress of Fu-2 Member in Tongcheng fault zone

表 3 铜城断裂带现今应力场实测结果与数值模拟结果对比

Table 3 Measured results and numerical simulation results of present-time stress in Tongcheng fault zone

井号	平均深度 H_a/m	中间主应力				最小主应力 σ_3/MPa	
		σ_2/MPa		方向/ $(^{\circ})$		实测	模拟
		实测	模拟	实测	模拟		
天 X33-1	2275.2	37.8	36.1	73.0	79.6	28.9	24.9
天 X33-1	2005.8	37.9	35.8	66.0	79.1	26.1	24.0
天 X33-2	2610.2	33.8	36.2	—	—	22.2	24.1
天 X33-2	2805.0	38.5	37.5	—	—	22.0	24.4
天 X33-3	1740.7	—	—	81.0	79.8	—	—

4 裂缝性储层开发建议

4.1 裂缝开启压力-开启次序预测

裂缝的开启压力与裂缝的性质、产状以及现今地应力分布、孔隙压力等诸多因素密切相关,不同方向的裂缝开启压力大小不一,因此在储层实施注水开发时,裂缝开启次序也有所不同,不同方向的裂缝

开启压力 $p_k^{[1,26-27]}$ 可表示为

$$p_k = \frac{\mu}{1-\mu} H \rho_s \sin \theta + H \rho_s \cos \theta - H \rho_w + H f_{\sigma_1} \sin \theta \sin \beta + H f_{\sigma_3} \sin \theta \cos \beta. \tag{9}$$

式中, μ 为岩石泊松比; H 为构造裂缝埋藏深度,km; θ 为裂缝倾角, $(^{\circ})$; ρ_s 为岩石密度, g/cm^3 ; ρ_w 为地层水密度, g/cm^3 ; f_{σ_1} 和 f_{σ_3} 分别为现今最大和最小主

应力梯度, MPa/km; β 为裂缝走向与水平最大主应力之间的夹角, ($^{\circ}$)。

依据公式(9), 对铜城断裂带阜二段储层不同走向的构造裂缝的开启压力进行预测。受北东东向水平最大主应力的影响, 北东东向裂缝开启压力低

于南东东向裂缝, 在注水开发过程中优先开启; 裂缝的开启压力在靠近断层的构造高部位为低值, 在构造低部位为高值(图5)。根据裂缝的开启压力, 在不同油气区块确定合适的注水压力, 是提高油气采收率的有效手段。

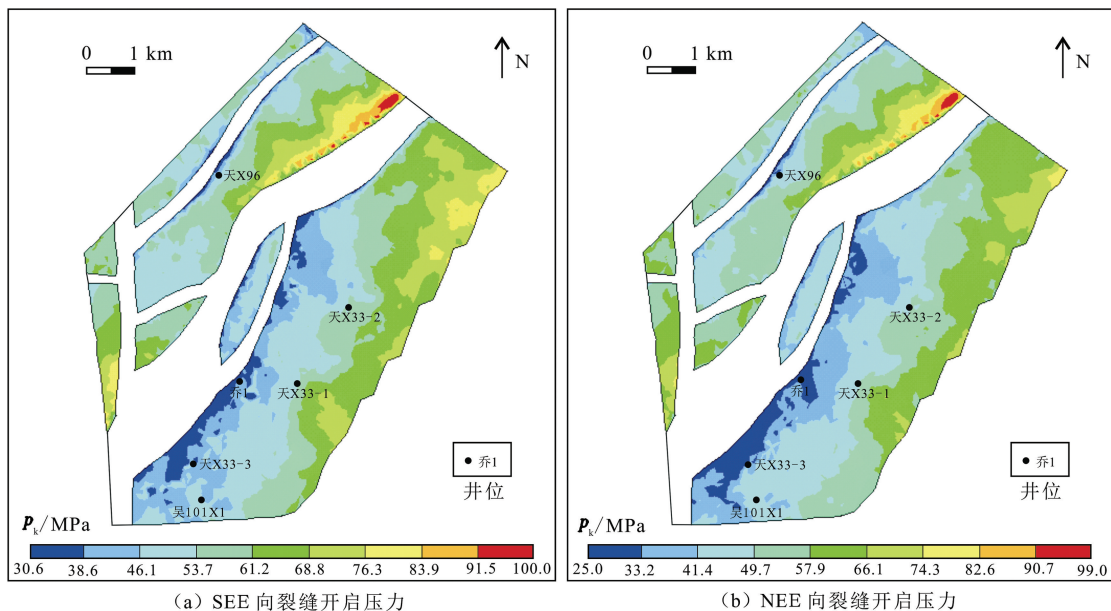


图5 阜二段裂缝开启压力平面分布

Fig.5 Planar distribution of fracture opening pressure

埋深 H 、水平最大主应力与构造裂缝走向的夹角 β 是影响裂缝开启压力的关键因素, 如图6(a)所示, 在构造高部位(1 850 ~ 2 350 m), 裂缝的开启压力在 25 ~ 50 MPa 之间; 在构造低部位(3 300 ~ 4 000 m), 裂缝的开启压力在 45 ~ 75 MPa 之间。分别求

取模型不同构造部位水平最大主应力与构造裂缝走向的夹角 β , 如图6(b)所示, 裂缝走向与水平最大主应力平行或低角度相交时($0^{\circ} \sim 5^{\circ}$), 裂缝的开启压力在 27 ~ 42 MPa 之间, 且夹角 β 越大, 裂缝的开启压力越大。

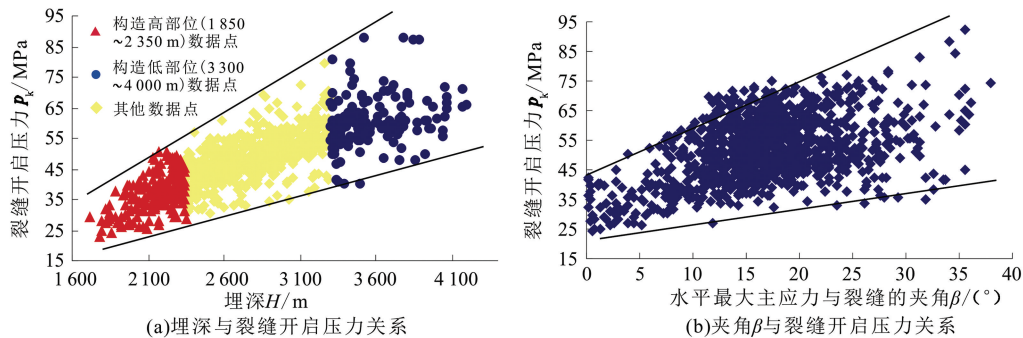


图6 裂缝埋深 H 、夹角 β 与裂缝开启压力关系

Fig.6 Relationship between fracture depth H , angle β and fracture opening pressure

4.2 储层破裂压力预测

在油气井水力压裂设计中, 依据相关理论或者经验公式预测岩石破裂压力, 有利于压裂作业实施^[28-29]。实践表明, H-W 公式适用于非渗透性岩石破裂压力的计算, H-F 公式则适用于高渗透性岩石破裂压力的计算^[29], 两个公式均与阜二段储层低

孔低渗的实际情况不相符, 笔者采用李传亮等^[29]提出的岩石破裂压力公式计算 p_b 。

$$p_b = \frac{3\sigma_h - \sigma_H + \sigma_t - 2Zp_o}{1 - O_c - 2Z} \quad (10)$$

式中, σ_h 、 σ_H 分别为最小、最大主应力, MPa; σ_t 为岩石单轴抗拉强度, MPa; p_o 为孔隙压力, MPa; Z 为孔

隙弹性常数; O_c 为岩石触点孔隙度。

公式(10)中,参数 Z 、 O_c 很难准确测量,本文中采用多井约束的方法优化反演储层破裂压力分布规律。具体思路是,将已知 6 个层位的破裂压力作为优化反演的约束条件,通过不断地反演拟合使模拟值与实测值最为接近,得到最优拟合结果,如图 7 所示。

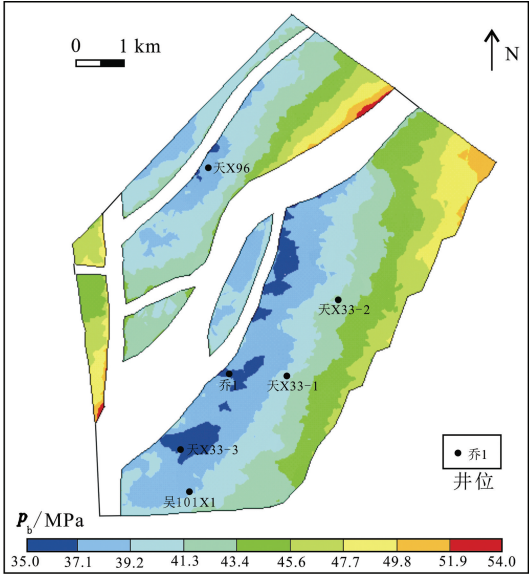


图 7 铜城断裂带阜二段储层破裂压力平面分布

Fig.7 Planar distribution of reservoir breakdown pressure of Fu-2 Member in Tongcheng fault zone

图 7 中,铜城断裂带阜二段储层的破裂压力集中分布在 35 ~ 54 MPa,在构造高部位储层破裂压力为低值,介于 40 ~ 46 MPa 之间,通过压裂实测与模拟预测结果对比(表 4),两者之间的相对误差小于 10%,认为反演结果准确可靠。

表 4 铜城断裂带阜二段储层破裂压力模拟结果验证

Table 4 Fracture pressure of simulation results of Fu-2 Member in Tongcheng fault zone

井位	平均埋深 H_a /m	实测压力 p_t /MPa	预测压力 p_b /MPa	相对误差 e /%
天 X33-1	2 005.8	36.8	38.18	3.75
天 X33-1	2 480.6	44.7	42.91	4.00
天 X33-1	2 275.2	41.7	40.12	3.79
天 X33-2	2 805.0	50.5	47.36	6.22
天 X33-2	2 610.2	47.0	43.26	7.96
天 X33-3	1 740.7	31.4	33.81	7.68

结合阜二段储层的实际埋深,依据下式可计算地下储层的实际破裂压力 p_t :

$$p_t = p_b + \rho_w g H. \tag{11}$$

目前,阜二段储层油气开发主要集中在靠近断层的构造高部位,储层埋深在 1 850 ~ 2 350 m 之间,

由公式(11)可以求得地下储层的实际破裂压力介于 53 ~ 64 MPa 之间(图 8)。

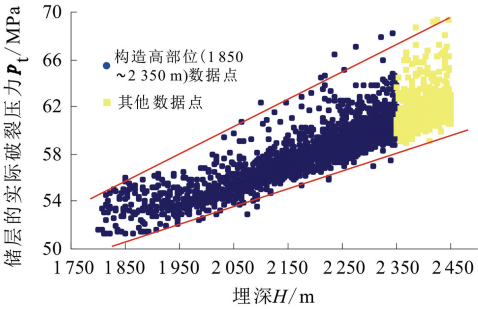


图 8 阜二段储层埋深与实际破裂压力的关系

Fig.8 Relationship between depth and practical breakdown pressure of Fu-2 Member

5 结 论

(1) 铜城断裂带现今水平最小主应力为 NNW349°方向 25 MPa 的挤压应力,水平最大主应力为 NEE79°方向 37 MPa 的挤压应力;对研究区现今地应力场数值模拟结果显示,阜二段现今水平最小主应力在 21 ~ 28 MPa 之间,水平最大主应力在 30 ~ 40 MPa 之间;在断层附近,水平主应力的方向发生 5° ~ 10°的改变。

(2) 阜二段储层裂缝的开启压力随裂缝埋深而变化,埋深越浅,裂缝的开启压力越小;水平最大主应力与裂缝走向的夹角同样影响裂缝的开启压力,且夹角越小,裂缝的开启压力越小。

(3) 以多井实测的破裂压力为目标约束条件,优化反演阜二段储层的破裂压力,结果显示,储层的破裂压力集中分布在 35 ~ 54 MPa,在构造高部位,储层破裂压力为低值,介于 40 ~ 46 MPa 之间。

(4) 铜城地区阜二段储层油气开发主要集中在地下 1 850 ~ 2 350 m 之间,储层的实际破裂压力为 53 ~ 64 MPa,在临界储层破裂压力的条件下,裂缝能够得到充分开启,因此针对不同的构造位置采用不同的注水压力是提高油气采收率的有效手段。

参考文献:

[1] 周新桂,张林炎,黄臣军. 华庆探区长 63 储层破裂压力及裂缝开启压力估测与开发建议[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(7):2812-2818.

ZHOU Xingui, ZHANG Linyan, HUANG Chenjun, et al. Estimation of formation breakdown pressure and fracture open pressure of Chang 63 low permeable reservoir in Huaqing area and development suggestions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),

- 2013,44(7):2812-2818.
- [2] HENNINGS P, ALLWARDT P, PAUL P, et al. Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia[J]. AAPG Bulletin, 2012,96(4):753-772.
 - [3] 刘惠民,张鹏飞,宋国奇,等. 鲁西地区太古界裂缝类型与发育规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(5):34-40.
LIU Huimin, ZHANG Pengfei, SONG Guoqi, et al. Fracture types and distribution of Archean rocks in west Shandong, China[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(5):34-40.
 - [4] CAPP A F, RUTQVIST J. Modeling of coupled deformation and permeability evolution during fault reactivation induced by deep underground injection of CO₂[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011,5(2):336-346.
 - [5] 全兴华,孙峰,周斌,等. 油田注水诱发应力场演化及地层活动机制研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(1):116-121.
TONG Xinghua, SUN Feng, ZHOU Bin, et al. Investigation on stress change and rock activation induced by water injection[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(1):116-121.
 - [6] 季宗镇,戴俊生,汪必峰,等. 构造裂缝多参数定量计算模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(1):24-28.
JI Zongzhen, DAI Junsheng, WANG Bifeng, et al. Multi-parameter quantitative calculation model for tectonic fracture [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(1):24-28.
 - [7] SU N, ZOU L, SHEN X, et al. Identification of fracture development period and stress field analysis based on fracture fabrics in tectonic superposition areas[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014,7(10):3983-3994.
 - [8] LIAN P Q, CHENG L S, DENG B. Simulation of ground stress field and fracture anticipation with effect of pore pressure[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2011,56(1):34-41.
 - [9] 周新桂,张林炎,屈雪峰,等. 沿河湾探区低渗透储层构造裂缝特征及分布规律定量预测[J]. 石油学报, 2009,30(2):195-200.
ZHOU Xingui, ZHANG Linyan, QU Xuefeng, et al. Characteristics and quantitative prediction of distribution laws of tectonic fractures of low-permeability reservoirs in Yanhewan area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(2):195-200.
 - [10] 冯建伟,戴俊生,马占荣,等. 低渗透砂岩裂缝参数与应力场关系理论模型[J]. 石油学报,2011,32(4):664-671.
FENG Jianwei, DAI Junsheng, MA Zhanrong, et al. The theoretical model between fracture parameters and stress field of low-permeability sandstones[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(4):664-671.
 - [11] 叶绍东. 金湖凹陷铜城断层构造特征与油气成藏[J]. 地质力学学报,2012,18(2):187-194.
YE Shaodong. Structural characteristics of Tongcheng fault and hydrocarbon accumulation in Jinhu sag[J]. Journal of Geomechanics, 2012,18(2):187-194.
 - [12] 能源,漆家福,张春峰,等. 金湖凹陷断裂特征及其石油地质意义[J]. 大地构造与成矿学,2012,36(1):16-23.
NENG Yuan, QI Jiafu, ZHANG Chunfeng, et al. Structural features of the Jinhu sag in the Subei Basin and its petroleum geological significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012,36(1):16-23.
 - [13] 能源,漆家福,张春峰,等. 金湖凹陷石港断层构造演化及油气聚集特征[J]. 石油学报,2009,30(5):667-671.
NENG Yuan, QI Jiafu, ZHANG Chunfeng, et al. Structural evolution of Shigang fault and features of hydrocarbon accumulation in Jinhu Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(5):667-671.
 - [14] 刘敬寿,戴俊生,王珂,等. 斜井岩心裂缝产状校正方法及其应用[J]. 石油学报,2015,36(1):67-73.
LIU Jingshou, DAI Junsheng, WANG Ke, et al. An approach to correct the attitudes of fracture for deviated borehole in core and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015,36(1):67-73.
 - [15] 王珂,戴俊生,张宏国,等. 裂缝性储层应力敏感性数值模拟:以库车坳陷克深气田为例[J]. 石油学报, 2014,35(1):123-133.
WANG Ke, DAI Junsheng, ZHANG Hongguo, et al. Numerical simulation of fractured reservoir stress sensitivity: a case from Kuqa depression Keshen gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014,35(1):123-133.
 - [16] 宋璠,苏妮娜,冯建伟,等. 基于摩擦效应的砂岩裂缝密度定量预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(6):1-8.
SONG Fan, SU Nina, FENG Jianwei, et al. Quantitative prediction of fracture density based on friction effect [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(6):1-8.
 - [17] 周新桂,张林炎,范昆. 含油气盆地低渗透储层构造裂缝定量预测方法和实例[J]. 天然气地球科学,

- 2007,18(3):328-333.
- ZHOU Xingui, ZHANG Linyan, FAN Kun. Methods for quantitative prediction of tectonic fractures in compact reservoirs in petroliferous basins and a case study[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007,18(3): 328-333.
- [18] 杨野. 海拉尔盆地三维地应力模拟评价研究[M]. 北京:石油工业出版社,2010:31-38.
- [19] TAKEMURA T, GOLSHANI A, ODA M, et al. Preferred orientations of open microcracks in granite and their relation with anisotropic elasticity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003,40(4):443-454.
- [20] 张景和,孙宗颀. 地应力、裂缝测试技术在石油勘探开发中的应用[M]. 北京:石油工业出版社,2001:61-63.
- [21] FAIRHURST C. Stress estimation in rock: a brief history and review[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003,40(7):957-973.
- [22] 王平. 含油气盆地构造力学原理[M]. 北京:石油工业出版社,1993:81-84.
- [23] 季宗镇,戴俊生,汪必峰. 地应力与构造裂缝参数间的定量关系[J]. *石油学报*,2010,33(1):68-72.
- Ji Zongzhen, DAI Junsheng, WANG Bifeng. Quantitative relationship between crustal stress and parameters of tectonic fracture[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010,33(1):68-72.
- [24] 王军,戴俊生,季宗镇. 储层裂缝多参数定量预测及在闵桥油田的应用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2010,32(3):51-55.
- WANG Jun, DAI Junsheng, Ji Zongzhen. The quantitative prediction of tectonic fractures of multi-parameter and its application in Minqiao oilfield[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition)*, 2010,32(3):51-55.
- [25] 刘肖军. 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[J]. *石油与天然气地质*,2010,31(2):250-254,259.
- LIU Xiaojun. Simulation of fracture parameters in the 3rd sand unit of the Paleogene Fu-2 member in the Qiaohokou oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010,31(2): 250-254, 259.
- [26] 刘洪涛,曾联波,房宝才,等. 裂缝对大庆台肇地区低渗透砂岩储层注水的影响[J]. *石油大学学报(自然科学版)*,2005,29(4):68-72.
- LIU Hongtao, ZENG Lianbo, FANG Baocai, et al. Influence of fractures on injection for low-permeability sandstone reservoir in Taizhao area, Daqing Oilfield[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2005,29(4):68-72.
- [27] 曾联波,田崇鲁. 构造应力场与低渗透油田开发[J]. *石油勘探与开发*,1998,25(3):91-93.
- ZENG Lianbo, TIAN Chonglu. Tectonic stress field and the development of low permeability oil fields[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998,25(3):91-93.
- [28] HOSSAIN M M, RAHMAN M K, RAHMAN S S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2000,27(3):129-149.
- [29] 李传亮,孔祥言. 油井压裂过程中岩石破裂压力计算公式的理论研究[J]. *石油钻采工艺*,2000,22(2):54-56.
- LI Chuanliang, KONG Xiangyan. A theoretical study on rock breakdown pressure calculation equations of fracturing process[J]. *Oil Drilling and Production Technology*, 2000,22(2):54-56.

(编辑 修荣荣)