

文章编号: 0253-2697(2018)05-0564-06 DOI:10.7623/syxb201805007

基于三维莫尔圆的裂缝有效性评价方法及应用

陆云龙 吕洪志 崔云江 陈红兵

(中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300459)

摘要:复杂储层裂缝评价是储层研究的重要内容。针对复杂储层现今裂缝有效性定量评价的难题,通过阵列声波测井、电成像测井提取的地应力及裂缝参数信息,采用基于临界应力断层假说的三维莫尔圆方法定量分析裂缝有效性的方法,通过井眼周围应力场分布特征,选取合理的地应力模型计算地层三维应力并根据成像测井拾取的裂缝倾角、倾向等属性。在此基础上根据岩石强度理论通过三维莫尔圆计算裂缝面上岩石正应力与切应力,求取岩石裂缝面上的摩擦系数,采用临界应力断层假说定量分析裂缝有效性特征。渤海地区JZ油田应用结果表明,通过三维莫尔圆计算的裂缝摩擦系数能够反映裂缝有效性的差异,与产能匹配较好,可以用于产能分析,是裂缝定量评价的一种有效手段。

关键词:裂缝;地应力;莫尔-库仑准则;三维莫尔圆;摩擦系数;产能

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Method for fracture effectiveness evaluation based on 3D Mohr Circle and its application

Lu Yunlong Lü Hongzhi Cui Yunjiang Chen Hongbing

(Tianjin Branch, CNOOC China Limited, Tianjin 300459, China)

Abstract: Fracture evaluation in complex reservoir is an important part of reservoir research. Aiming at the difficulties of quantitative evaluation on present fracture effectiveness in complex reservoir, three-dimensional Mohr Circle method based on critical stress fault hypothesis is used to quantitatively analyze fracture effectiveness using geo-stress and fracture parameters acquired by array acoustic logging and resistivity imaging logging. According to the distribution characteristics of stress field around the borehole, a reasonable geo-stress model is selected to calculate the three-dimensional stress of the layer. Moreover, fracture dips, strikes and other properties are collected through imaging logging. On this basis, according to rock strength theory, the normal stress and shear stress of rock on the fracture surface are calculated by three-dimensional Mohr Circle, so as to obtain the friction coefficient of rock fracture surface. The critical stress fault hypothesis is used to quantitatively evaluate fracture effectiveness characteristics. The application in JZ oilfield of Bohai Sea indicate that the friction coefficient calculated by three-dimensional Mohr Circle can reflect the differences in fracture effectiveness, matching well with productivity and able to be used for productivity analysis, so it is an effective method for fracture quantitative evaluation.

Key words: fracture; geo-stress; Mohr-Coulomb criterion; 3D Mohr Circle; friction coefficient; productivity

引用:陆云龙,吕洪志,崔云江,陈红兵.基于三维莫尔圆的裂缝有效性评价方法及应用[J].石油学报,2018,39(5):564-569.

Cite: LU Yunlong, LÜ Hongzhi, CUI Yunjiang, CHEN Hongbing. Method for fracture effectiveness evaluation based on 3D Mohr Circle and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(5): 564-569.

裂缝是决定复杂储层渗流能力、储层品质的关键参数,是测井地层评价的重要内容。受沉积、构造等因素影响,常规测井或单一测井技术在复杂储层裂缝有效性评价上局限性较大,因此裂缝有效性精确评价方法对于储量评价及产能预测十分重要。

利用野外露头、岩心观察、镜下观察等方法^[1]研究裂缝有效性较直观,但由于取心较少难以覆盖全油田所有井段,通常采用测井方法进行评价。基于简单裂

缝导电机理的常规测井方法^[2]可以直观判别裂缝,但受井眼环境影响,精度较低。以FMI为代表的成像测井^[3]能够描述裂缝特征,需要岩心刻度成像测井^[4],结合其他资料^[5]评价裂缝发育程度,但裂缝传导能力无法定量判别。通过Stoneley波^[6]或偶极横波反射波^[7-8]可以定性评价裂缝发育程度及延伸范围,但受地层岩性变化、井眼条件、地质构造等影响,使得裂缝评价存在多解性。利用阵列声波测井计算的弹性参

基金项目:中海石油(中国)有限公司综合科研项目“阵列声波测井精细处理及复杂储层流体判别技术研究”(YXKY-2014-TJ-03)和中国海洋石油总公司“十二五”科技重大项目“渤海典型低孔低渗油藏勘探开发关键技术与实践”(CNOOC-KJ-125-ZDXM-07-LTD-TJ-02)资助。

第一作者及通信作者:陆云龙,男,1986年9月生,2009年获中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业学士学位,2012年获中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业硕士学位,现为中海石油(中国)有限公司天津分公司工程师,主要从事测井理论研究、资料处理与解释等工作。
Email: luy15@cnooc.com.cn

数^[9-10]能够描述裂缝存在下储层岩石力学性质的变化,是对裂缝响应特征的宏观体现,无法描述每一条裂缝对储层的贡献。地层裂缝发育程度很大程度上受控于地应力的影响,因此通过地应力评价裂缝有效性是一种可行的途径。

笔者根据临界应力断层假说,通过成像、声波测井资料计算地应力与三维莫尔圆,通过正应力与切应力准确计算裂缝的摩擦系数,进而定量分析每条裂缝的有效性及对储层的贡献,实现产能预测,指导油气田高效开发。

1 井周地应力分布及参数计算

1.1 井眼应力分布及方向判别

当地层被钻开后,由于井眼内部地层被移除不再支撑远场应力,因此井眼周围应力分布发生变化,通过 Kirsch 方程^[11-12]可以描述这种分布的变化特征:

$$\sigma_{\theta\theta} = 0.5(S_{hmax} + S_{hmin} - 2p_p) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - 0.5 \cdot (S_{hmax} - S_{hmin}) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{\Delta p R^2}{r^2} - \sigma^{\Delta T} \quad (1)$$

图 1 为渤海地区 LD 油田 2 井 1 980 m 深度井周地层有效环向应力随径向深度变化应力的分布特征。从图 1 可以看出,井壁周围应力不再均匀分布,受方位与距井壁距离的影响, S_{hmin} 方向因受挤压,导致应力集中,而 S_{hmax} 方向出现应力拉伸。因此,在 S_{hmin} 方向井壁容易出现坍塌,而 S_{hmax} 方向井壁容易出现拉伸

缝,但 2 种应力现象随着径向深度的增大,应力效应迅速减小,井壁破损程度不会延伸较远,因此分析井眼周围地层特征变化是地应力方向判别较直观的方法。

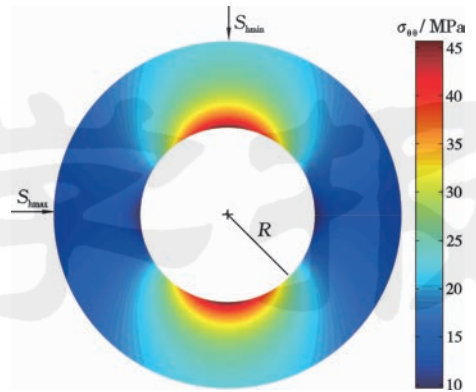


图 1 井眼周围应力分布特征

Fig. 1 Stress distribution characteristics around wellbore

井周应力变化导致井眼性质发生变化,通过不同测井方法^[13-14]能够较好地识别水平应力方向。

图 2(a)为四臂井径测井图,当 C_1 、 C_2 这 2 条井径曲线不重合时,扩径的曲线方位(根据 C_1 方位计算)代表井壁崩落方位,即 S_{hmin} 方位;图 2(b)为电成像测井图,当存在钻井诱导缝时,其方位代表 S_{hmax} 方位;图 2(c)为地应力产生的各向异性地层中偶极横波分裂示意图,通过阵列声波测井提取的快横波方位代表 S_{hmax} 方位,其中图 2(c)中虚线和实线代表不同方向的裂缝。

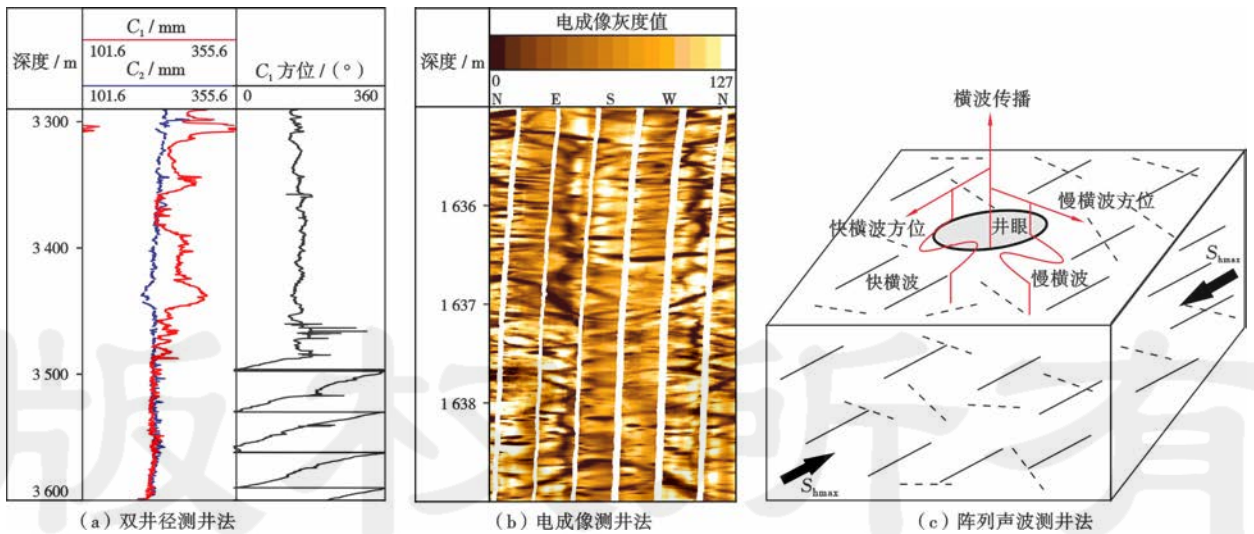


图 2 地应力方向判别方法

Fig. 2 Discrimination method of geo-stress direction

1.2 地应力计算方法

确定地应力的方法较多,利用测井资料计算地应力是一种经济、有效的计算方法。测井资料计算地应力首先根据密度曲线计算垂向应力,在此基础上根据地区地质特征选取不同的经验模型或理论模型计算水

平应力。例如渤海油田地下岩层的地应力主要由上覆岩层压力和水平方向的构造应力产生,因此可以选取黄氏模型^[15]进行计算,该模型可以解释渤海油田三向应力不等且最大水平主应力大于垂向应力的现象。垂向应力与黄氏模型计算方法为:

$$\begin{cases} S_v = \int_0^h \rho g dh \\ S_{hmax} = \frac{\nu}{1-\nu}(S_v - \alpha p_p) + \beta_H(S_v - \alpha p_p) + \alpha p_p \\ S_{hmin} = \frac{\nu}{1-\nu}(S_v - \alpha p_p) + \beta_h(S_v - \alpha p_p) + \alpha p_p \end{cases} \quad (2)$$

利用阵列声波测井资料提取的纵波、横波时差结合密度测井计算岩石力学参数,通过式(2)可以得到连续深度上地层三向应力的的大小,但由于不同地区构造应力差异较大,因此最大、最小水平主应力系数需要通过地区标定,通常采用水力压裂或岩石声发射实验确定地区应力系数大小。

1.3 岩石强度与有效应力关系

裂缝或断层的形成是地下岩石破裂的结果,破裂过程较为复杂,是作用在岩石上所有应力与岩石本身强度关系的一个综合体现,这个作用过程可以通过裂缝面上岩石承受的正应力与切应力进行描述。大多数岩石受到应力作用时,其裂缝面上正应力与切应力满足 Mohr-Coulomb 准则^[16]:

$$\tau = S_0 + \sigma_n \mu_i \quad (3)$$

当岩石在应力作用下形成裂缝后,裂缝面上岩石内

聚力较小,此时裂缝的特征受裂缝面上有效正应力与切应力相互控制,裂缝的有效性体现在摩擦系数^[17-18]上:

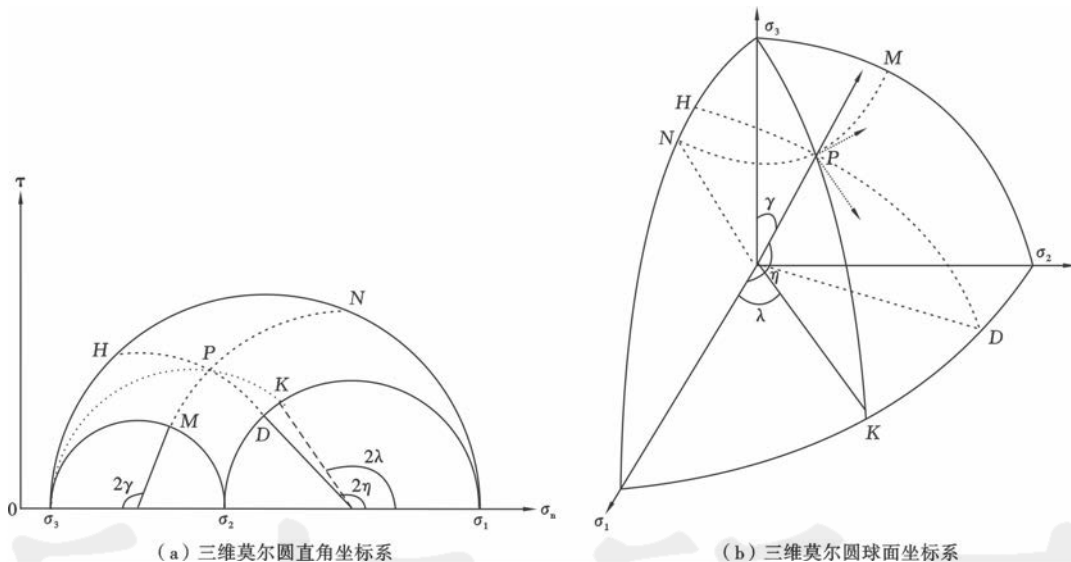
$$\mu = \tau / \sigma_n \quad (4)$$

摩擦系数反映裂缝面上裂缝可能存在的状态,直接控制着原生裂缝的变化,因此通过摩擦系数能够直观判别裂缝有效性。

2 利用三维莫尔圆分析裂缝有效性

2.1 三维莫尔圆计算方法

由式(4)可知,摩擦系数求取需要计算裂缝面上切应力与正应力,由于裂缝倾角与走向随机性较大,因此通常采用三维莫尔圆^[19-20]计算正应力与切应力(图3)。可以看出,对于任一裂缝[图3(a)],三向有效主应力(垂向地应力、最大水平主应力、最小水平主应力与孔隙压力之差) $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 定义了3个莫尔圆,该裂缝在三维莫尔圆中所处的位置P可通过裂缝面法线与最大、最小主应力轴的夹角 η, γ 进行确定,即利用 $2\eta, 2\gamma$ 先确定与2个小圆的交点,再以2个小圆的圆心为原点,原心到交点的距离为半径绘制弧线,两条弧线交点即为裂缝P在三维莫尔圆中的位置[图3(b)]。



注:P—三维莫尔圆上任意点;H、N—在 $\sigma_1 - \sigma_3$ 莫尔圆上的交点;D、K—在 $\sigma_1 - \sigma_2$ 莫尔圆上的交点;M— $\sigma_2 - \sigma_3$ 莫尔圆上的交点。

图3 任一裂缝面在三维莫尔圆位置P上的表示方法

Fig. 3 Representation method of any fracture surface at the position P of 3D Mohr Circle

可以通过有效主应力和裂缝面相对于应力场的方向计算正应力与切应力,即通过应力场坐标变换到裂缝面对应的球面坐标中进行计算确定任一裂缝所在三维莫尔圆中的位置[图3(b)]。其中裂缝产状参数(倾角、走向)通过电成像测井定量拾取,计算公式为:

$$\begin{cases} \tau = a_{11} a_{12} \sigma_1 + a_{12} a_{22} \sigma_2 + a_{13} a_{23} \sigma_3 \\ \sigma_n = a_{11}^2 \sigma_1 + a_{12}^2 \sigma_2 + a_{13}^2 \sigma_3 \end{cases} \quad (5)$$

其中, a_{ij} 为方向余弦矩阵A的元素^[13]:

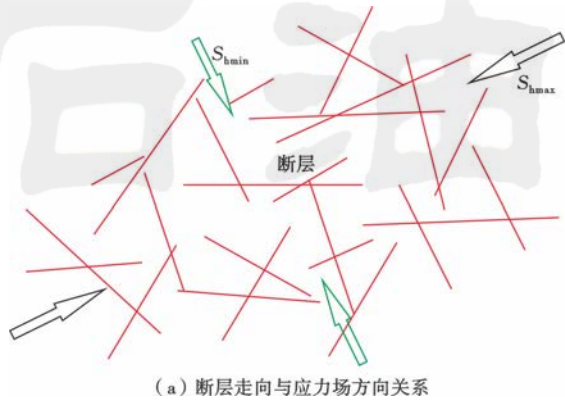
$$A = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\lambda & \cos\gamma\sin\lambda & -\sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\lambda & 0 \\ \sin\gamma\cos\lambda & \sin\gamma\sin\lambda & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

λ 通过 η, γ 进行计算:

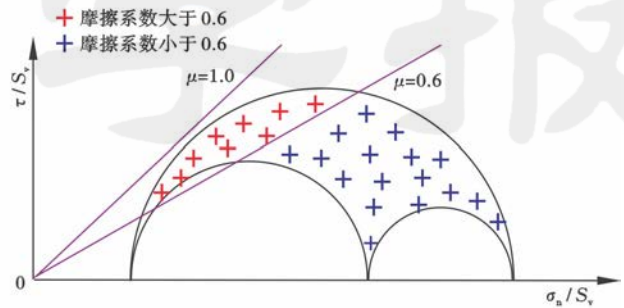
$$\lambda = \arccos\left(\frac{\cos\eta}{\sqrt{1 - \cos^2\gamma}}\right) \quad (7)$$

2.2 临界应力断层假说判别裂缝有效性

Barton 和 Zoback 等^[21-22]在研究断层封堵性及流体流动地质问题中提出了临界应力断层假说(图4)。在一定深度范围内,当地层岩性变化较小时,地层中断层与当前应力场存在不同形式的角度,水力传导断层是现今应力场中的临界应力断层,即当断层摩擦系数



(a) 断层走向与应力场方向关系



(b) 断面应力在三维莫尔圆中的分布

图4 临界应力断层假说示意

Fig. 4 Schematic of critical stress fault hypothesis

3 应用效果分析

JZ 油田为渤海地区典型的花岗岩潜山油田,该油田最大水平主应力方向为 NE—SW 向,储层裂缝较为发育。该油田地层孔隙压力为正常压力系统:

$$p_p = 0.005706d + 2.3188 \quad (8)$$

水平主应力计算中[式(2)]岩石力学参数通过阵列声波测井提取的纵、横波时差及密度测井曲线计算:

$$v = (0.5D_{TS}^2 - D_{TC}^2) / [2(D_{TS}^2 - D_{TC}^2)]$$

$$\alpha = 1 - \frac{\rho(3/D_{TC}^2 - 4/D_{TS}^2)}{\rho_{ma}(3/D_{TCma}^2 - 4/D_{TSma}^2)} \quad (9)$$

其中 ρ_{ma} 取 2.65 g/cm^3 ; D_{TCma} 、 D_{TSma} 分别取 $182 \mu\text{s/m}$ 、 $289 \mu\text{s/m}$ 。将式(8)、式(9)代入式(2), β_H 、 β_h 取地区经验值,分别为 0.68、0.25,得到 JZ 油田地层地应力值。

图5为 JZ 油田 X2 井花岗岩潜山段储层裂缝在归一化后的三维莫尔圆上的分布效果图。该井花岗岩地层埋藏深度介于 1775~1925 m,厚度为 150 m,应力变化范围较小,最大水平主应力为 51 MPa,方位为 NE65°,最小水平主应力为 22.0 MPa,垂向应力为 38.3 MPa,孔隙压力为 12.7 MPa。利用电成像测井资料拾取裂缝倾角、走向等参数,通过式(4)~式(7)得到不同裂缝在三维莫尔圆下的分布状态。从图5中可以看出,该井裂缝较为发育,但不同裂缝的传导性能存在差异,处于临界应力状态的裂缝($\mu \geq 0.6$)传导性能相对较高,而远离临界应力状态的裂缝($\mu < 0.6$)传导性能较差,因此不同裂缝对产能贡献存在较大差异。

分布在 0.6~1.0,断层处于力学活动状态;当断层摩擦系数小于 0.6 时,断层处于封闭状态。

储层裂缝可近似看作系列小型断层,裂缝面即为断层面,因此通过临界应力断层假说,根据三维莫尔圆方法定量计算裂缝有效性差异,从而分析裂缝所属状态,指导储层裂缝不同特征对产能的贡献大小。

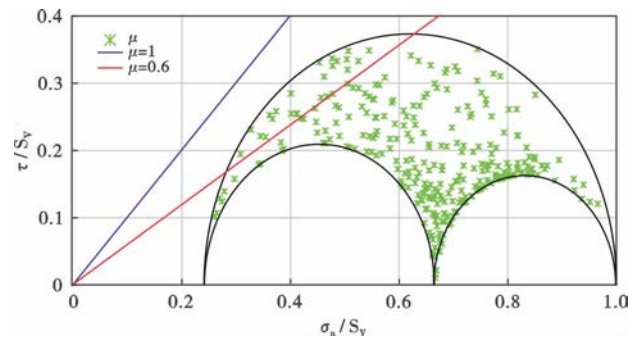


图5 X2 井花岗岩潜山裂缝在三维莫尔圆上的分布

Fig. 5 Distribution of fracture on 3D Mohr Circle for granite buried hill of Well X2

图6为 X2 井裂缝有效性评价综合解释测井图。可以看出,该井常规曲线深、浅电阻率差异较明显、密度较低(第4道—第5道),常规测井显示裂缝较为发育,电成像测井显示整口井裂缝十分发育,拾取的裂缝为中、高角度裂缝,部分井段为网状缝。该井产液剖面显示,储层产液主要集中在 2、4 小层,而 1、3 小层尽管裂缝较为发育,但产出量较低。通过三维莫尔圆计算的摩擦系数可以看出:2、4 小层,储层裂缝摩擦系数较高,部分超过 0.6,裂缝传导能力较好,产液量高;3 小层摩擦系数较低,裂缝传导能力差,甚至无产液量;1、5 小层摩擦系数总体较低,仅部分裂缝摩擦系数较高,总体产液量较低。因此通过摩擦系数能够准确反映裂缝产液贡献高低,有效评价裂缝有效性。

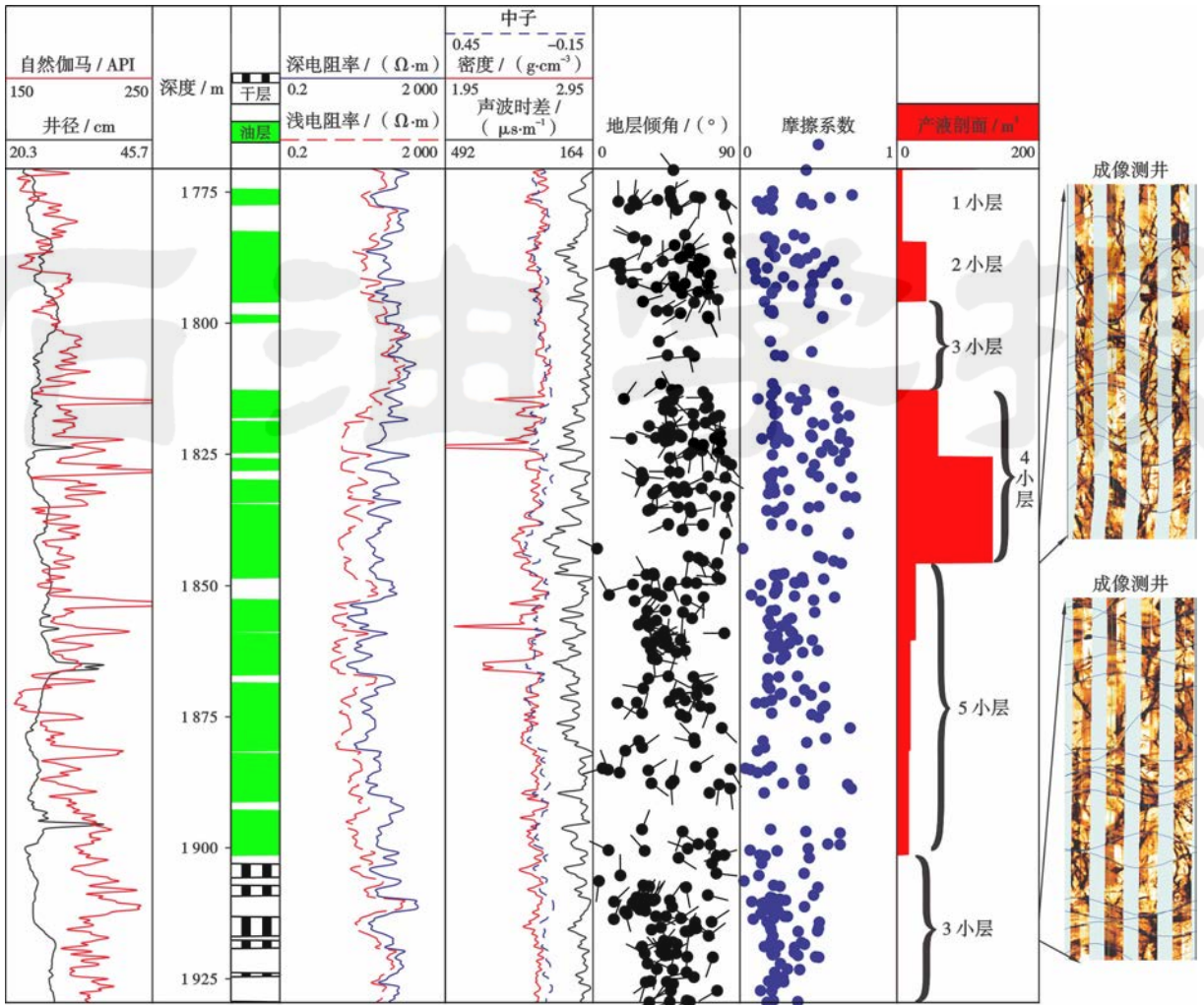


图6 X2井综合解释测井

Fig. 6 Comprehensive logging interpretation results of Well X2

产能评价是油田开发的必要环节,不同类型油田产能预测方法^[23-24]也不同。从JZ油田花岗岩潜山储层产液剖面与相应层段摩擦系数平均值交会效果图(图7)可以看出,对于该油田花岗岩潜山储层,裂缝摩擦系数与产液量具有较好的相关性,随着摩擦系数的

增大,产液量呈指数增长,因此可以利用该相关性预测其他井储层产能贡献情况。此外,当摩擦系数平均值小于0.3时,裂缝基本无产出,因此摩擦系数为0.3时为该油田产液能力的下限值。

4 结论

(1) 根据三维地应力理论及关键参数计算方法,通过引入临界应力断层假说,利用三维莫尔圆定量计算裂缝摩擦系数,将地质力学与测井解释相结合解决生产问题。

(2) 通过三维莫尔圆对储层裂缝有效性进行定量评价,分析裂缝对产能贡献程度,实现复杂储层产能预测,指导油田高效开发。

符号注释: $\sigma_{\theta 0}$ —井壁围岩有效环向应力, MPa; S_{hmax} 、 S_{hmin} —最大、最小水平主应力, MPa; p_p —地层孔隙压力, MPa; R 、 r —井眼半径、井壁以外径向深度, m; θ —与 S_{hmax} 方向的夹角, ($^{\circ}$); Δp —泥浆柱与孔隙压力之差, MPa; $\sigma^{\Delta T}$ —热应力, MPa; C_1 、 C_2 —1号极板方位与1号极板垂直方位两条井径曲线; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 —垂向有效主应

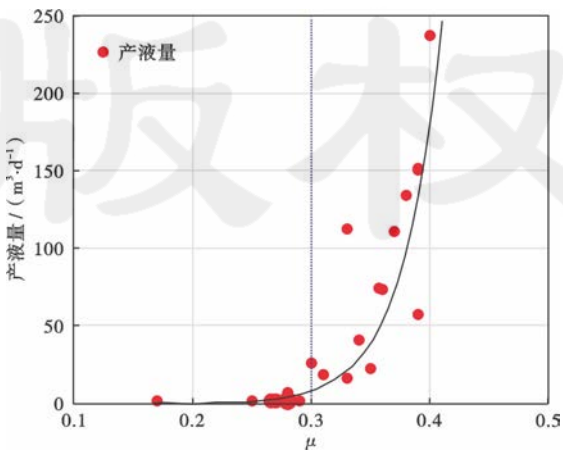


图7 摩擦系数与产液量关系

Fig. 7 Relationship between friction coefficient and fluid production

力、最大水平向有效主应力及最小水平有效主应力, MPa; S_v —垂向应力, MPa; h —厚度, m; g —重力加速度, m/s^2 ; ρ —密度, g/cm^3 ; α —Biot 系数; ν —泊松比; β_H 、 β_h —最大、最小水平主应力系数; τ —切应力, MPa; μ_i —内摩擦系数; σ_n —正应力, MPa; S_0 —内聚力, MPa; μ —摩擦系数; A —方向余弦矩阵; a_{ij} — A 的元素; λ — $\sigma_1 - \sigma_2$ 平面内裂缝走向投影与 σ_1 的夹角, ($^\circ$); d —海拔, m; D_{TC} 、 D_{TS} —地层纵、横波时差, $\mu s/m$; ρ_{ma} —岩石骨架密度, g/cm^3 ; D_{TCma} 、 D_{TSma} —地层岩石骨架纵、横波时差值, $\mu s/m$ 。

参 考 文 献

- [1] 王濡岳,丁文龙,龚大建,等. 渝东南—黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征与主控因素[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 832-845.
WANG Ruyue, DING Wenlong, GONG Dajian, et al. Development characteristics and major controlling factors of shale fractures in the Lower Cambrian Niutitang Formation, southeastern Chongqing-northern Guizhou area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7): 832-845.
- [2] 李善军,肖承文,汪涵明,等. 裂缝的双侧向测井响应的数学模型及裂缝孔隙度的定量解释[J]. 地球物理学报, 1996, 39(6): 845-852.
LI Shanjun, XIAO Chengwen, WANG Hanming, et al. Mathematical model of dual laterolog response to fracture and quantitative interpretation of fracture porosity[J]. Acta Geophysica Sinica, 1996, 39(6): 845-852.
- [3] 王晓畅,李军,张松扬,等. 基于测井资料的裂缝面孔率标定裂缝孔隙度的数值模拟及应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011, 35(2): 51-56.
WANG Xiaochang, LI Jun, ZHANG Songyang, et al. Numerical simulation and application of fracture surface porosity calibrating fracture porosity by logging data[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2011, 35(2): 51-56.
- [4] 王珂,张惠良,张荣虎,等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征及影响因素——以塔里木盆地克深2气田为例[J]. 石油学报, 2016, 37(6): 715-727.
WANG Ke, ZHANG Huiliang, ZHANG Ronghu, et al. Characteristics and influencing factors of ultra-deep tight sandstone reservoir structural fracture; a case study of Keshen-2 gas field, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 715-727.
- [5] 黄小娟,李治平,周光亮,等. 裂缝性致密砂岩储层裂缝孔隙度建模——以四川盆地平落坝构造须家河组二段储层为例[J]. 石油学报, 2017, 38(5): 570-577.
HUANG Xiaojuan, LI Zhiping, ZHOU Guangliang, et al. Fracture porosity modeling of fractured tight sandstone reservoir; a case study of the reservoir in Member 2 of Xujiache Formation, Pingluoba structure, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(5): 570-577.
- [6] TANG Xiaoming, CHENG C H. Borehole Stoneley wave propagation across permeable structures[J]. Geophysical Prospecting, 1993, 41(2): 165-187.
- [7] TANG Xiaoming, PATTERSON D J. Single-well S-wave imaging using multicomponent dipole acoustic-log data [J]. Geophysics, 2009, 74(6): 211-223.
- [8] 谭宝海,唐晓明,魏周拓,等. 随钻偶极横波远探测优势频带及反射声场[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1152-1158.
TAN Baohai, TANG Xiaoming, WEI Zhoutuo, et al. Dominant frequency band and reflected wave field of LWD dipole shear wave remote detection[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1152-1158.
- [9] 唐晓明. 含孔隙、裂隙介质弹性波动的统一理论——Biot 理论的推广[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(6): 784-795.
TANG Xiaoming. A unified theory for elastic wave propagation through porous media containing cracks—An extension of Biot's poroelastic wave theory[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(9): 1441-1452.
- [10] 吕洪志,陆云龙,崔云江,等. 改进的孔隙模型评价流体性质与裂缝孔隙度[J]. 应用声学, 2016, 35(4): 351-356.
LÜ Hongzhi, LU Yunlong, CUI Yunjiang, et al. Improved porosity model for fluid nature and fracture porosity evaluation [J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(4): 351-356.
- [11] JAEGER J C, COOK N G W. Fundamentals of rock mechanics [M]. 2nd ed. New York: Chapman and Hall, 1979.
- [12] AADNOY B S. Inversion technique to determine the in-situ stress field from fracturing data[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1990, 4(2): 127-141.
- [13] 黄继新,彭仕宓,王小军,等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 65-69.
HUANG Jixin, PENG Shimi, WANG Xiaojun, et al. Applications of imaging logging data in the research of fracture and ground stress[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 65-69.
- [14] 赵军,秦伟强,张莉,等. 偶极横波各向异性特征及其在地应力评价中的应用[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 54-57.
ZHAO Jun, QIN Weiqiang, ZHANG Li, et al. Anisotropy of dipole shear wave and its application to ground stress evaluation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 54-57.
- [15] 霍玉雁,岳喜洲,孙建孟. 测井资料在压裂设计中的应用[J]. 测井技术, 2008, 32(5): 446-450.
HUO Yuyan, YUE Xizhou, SUN Jianmeng. Application of logging data in fracturing design [J]. Well Logging Technology, 2008, 32(5): 446-450.
- [16] COULOMB C A. Sur une application des règles de maximus et minimus à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture[J]. Acad R Sci Men Mech Min Sci, 1773, 7: 343-382.
- [17] HUBBERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[R]. SPE 686, 1957.
- [18] BARTON C A, ZOBACK M D. Self-similar distribution and properties of macroscopic fractures at depth in crystalline rock in the Cajon Pass scientific drill hole [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(B4): 5181-5200.
- [19] POLLARD D D, FLETCHER R C. Fundamentals of structural geology [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2005.
- [20] JAEGER J, COOK N G W, ZIMMERMAN R. Fundamentals of rock mechanics[M]. London: Blackwell Publishing Ltd., 2007.
- [21] BARTON C A, ZOBACK M D, MOOS D. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock[J]. Geology, 1995, 23(8): 683-686.
- [22] ZOBACK M D, PESKA P. In-situ stress and rock strength in the GBRN/DOE pathfinder well, South Eugene Island, Gulf of Mexico [J]. Journal of Petroleum Technology, 1995, 47(7): 582-585.
- [23] 周明顺,范宜仁,刘志杰,等. 饶阳凹陷复杂砂岩储层产能测井预测方法[J]. 石油学报, 2017, 38(2): 208-216.
ZHOU Mingshun, FAN Yiren, LIU Zhijie, et al. Logging prediction method for productive capacity of complex sandstone reservoirs in Raoyang sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 208-216.
- [24] 林加恩,何辉,韩章英. 未出现径向流的试井典型曲线及其分析方法[J]. 石油学报, 2017, 38(5): 562-569.
LIN Jiaen, HE Hui, HAN Zhangying. Typical curves and their analysis method for well test data without radial flow response [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(5): 562-569.