

文章编号: 0253-9985(2001)03-0240-05

裂缝性油气储层定量综合评价 ——以辽河油田齐家古潜山基岩储层为例

尹志军¹, 彭仕必², 高荣杰²

(1. 石油大学, 北京 102200; 2. 辽河油田, 辽宁盘锦 124011)

摘要: 古应力值、裂缝孔隙度和裂缝分维数等3个参数能从不同侧面对储层进行表征。古应力值是从裂缝的成因方面进行分析, 通过建立地质模型, 利用一定的构造约束条件, 进行古应力场模拟计算获取最大古应力值的大小, 应力值越大, 裂缝越发育; 利用双侧向测井曲线与裂缝层段的良好对应关系, 识别出裂缝层段, 然后再通过公式计算出裂缝孔隙度; 依据裂缝发育具有分形的特点, 利用三维地震资料预测裂缝带的分布, 并用公式计算裂缝分维数, 分维数反映了裂缝发育的复杂程度, 分维数越大, 裂缝越发育。综合这3个参数对研究区裂缝储层进行评价后认为, I、II类裂缝十分发育, 且顺大断层方向呈块状排列, 形成良好储层。

关键词: 裂缝性储层; 古应力值; 裂缝孔隙度; 裂缝分维数; 综合评价

第一作者简介: 尹志军, 男, 29岁, 博士生, 石油地质

中图分类号: P618.130.2⁺1

文献标识码: A

1 概况

齐家古潜山位于辽河盆地西部凹陷西斜坡, 南临欢喜岭潜山, 北接杜家台潜山, 南北长约12 km, 东西宽3~5 km, 总面积近60 km²。从1978年6月齐2-13-7井、齐2-21-6井试油获工业油气流发现油田至今, 大致经历了早期勘探发现, 初期投产开发及注水开发的3个阶段。目前该油藏产油平均为133 t/d, 产水101 m³/d, 综合含水38.5%。

通过相似露头区调查及岩芯观测以及钻井过程中的井喷、井漏、井涌现象, 确定潜山储层为裂缝性储层。从地面裂缝的发育来看, 该区以构造缝为主, 发育4组近南北向和近东西向的裂缝。平面上不同方位、不同级别裂缝相互交错, 形成复杂的裂缝网络系统。

2 评价参数

2.1 古构造应力场

在构造及断裂系统精细解释的基础上, 通过建立地质模型, 利用一定的构造约束条件, 用有限元方法计算特定时期的构造应力场, 可以得到应力场在空间范围内的定量结果。根据岩石的脆性破裂理论, 利用数值模拟结果, 可对岩石在此应力场作

用下的裂缝的发育情况作出预测。

建立地质模型就是为模拟计算提供有关地质构造方面的必要认识及有关资料, 包括裂缝主要形成期的构造形态特征、构造演化、断层、地层等, 这是做好数值模拟的先决条件。其方法就是从基本的地质资料入手, 弄清研究区的构造发育史, 确定裂缝的主要形成期以及各时期的构造运动情况, 做出裂缝各主要发育期的构造图, 得到地质模型的基本框架, 然后再对地质体进行简化, 保留主导作用的因素, 忽略对模拟影响不大的次要因素, 以达到计算相对简便, 结论真实可靠的目的。

力学模型是根据地质模型提供的构造形态、地层岩性、断层分布来建立的。应力场模拟所需的岩石力学参数包括杨氏模量(E)、泊松比(μ)、岩石密度(ρ)、剪切模量(G)、粘聚系数(C)、内摩擦角和抗张强度等。其中前3个参数是必须的, 而后几项根据需要而确定。这些参数都是根据高温高压岩石力学实验并结合一般性实验结果而选取。

在力学模型建立的基础上, 通过边界和约束条件, 选取适当的网格参数, 进行古应力场的模拟计算。通过大量的反复调试, 直到计算结果符合已知的地质情况, 这样模拟计算得到的应力场便反映了当时的实际应力分布情况。图1所示为潜山古应力等值线图(图中等值线表示最大古应力 σ_1 的大小), 应力数值越大, 裂缝便越发育。

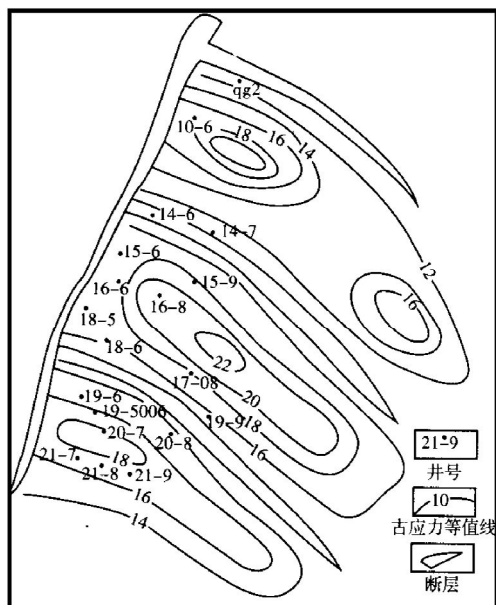


图1 潜山古应力等值线图

Fig. 1 Palaeostress contour of buried hill

2.2 裂缝孔隙度

裂缝孔隙度可以用测井资料准确求取, 先应用常规测井资料识别出裂缝层段, 然后计算裂缝孔隙度。

潜山裂缝可分为高角度裂缝、低角度裂缝和网状缝3种。应用取芯井观察到的裂缝对测井曲线进行标定后发现, 这3种裂缝在双侧向测井曲线上都有明显的响应, 在致密层高电阻率的背景上, 电阻率都有所降低。高角度裂缝电阻率曲线形态较平缓, 深浅双侧向电阻率呈正差异, 即深侧向电阻率(R_{ld})大于浅侧向电阻率(R_{ls}), 差异幅度越大, 裂缝越发育; 而低角度裂缝曲线形状尖锐, 深浅双侧向数值一般呈负差异($R_{ld} < R_{ls}$); 网状缝电阻率下降最大, 深浅双侧向电阻率值的幅度差性质取决于裂缝的组合状态。当高角度裂缝占优势时呈正差异, 当低角度裂缝占优势时呈负差异, 当二者发育较平衡时正负差异交替出现。

根据裂缝的上述响应特征, 制定了裂缝识别的定量标准。

高角度裂缝: $\lg(R_{ld})/\lg(R_{ls}) > 1.05$; 低角度裂缝: $\lg(R_{ld})/\lg(R_{ls}) < 0.95$; 网状缝: $0.95 \leq \lg(R_{ld})/\lg(R_{ls}) \leq 1$ 。

根据上述标准, 可将每口井的裂缝发育层段识别出来。

裂缝性储层属于双重介质型, 其孔隙度包括基质孔隙度和裂缝孔隙度两部分。对于裂缝性储层来说, 裂缝孔隙是其油气储集的主要空间。裂缝越

发育, 裂缝孔隙度越大, 储层的物性越好。在裂缝层段识别的基础上, 应用双侧向测井资料计算裂缝孔隙度是目前最为成熟的方法。其计算公式为

$$\Phi_f = \eta f \sqrt{R_m \left(\frac{1}{R_{ls}} - \frac{1}{R_{ld}} \right)} \quad (1)$$

式中 Φ_f 为裂缝孔隙度; ηf 为裂缝胶结指数, 取1.3; R_m 为泥浆电阻率, 须作温度校正; R_{ls} 为浅侧向电阻率; R_{ld} 为深侧向电阻率。

根据各井目的层段处理的孔隙度值, 应用条件模拟预测井间裂缝孔隙度, 作出裂缝孔隙度的平面分布(图2)。

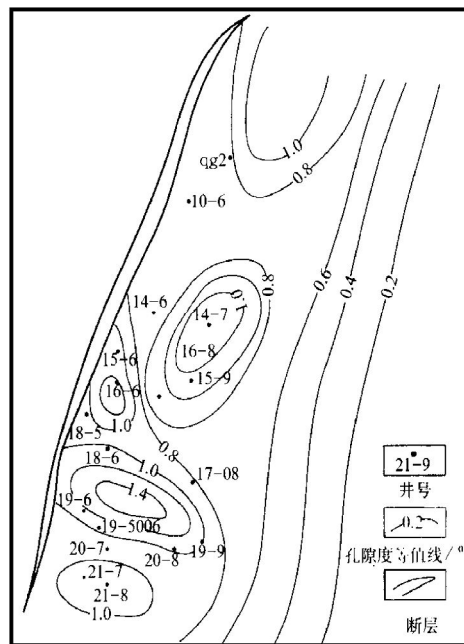


图2 潜山裂缝孔隙度等值线图

Fig. 2 Fractal porosity contour of buried hill

2.3 裂缝分维数

裂缝是岩石在应力作用下未发生明显位移的破裂。自然界中分布最为广泛的是构造裂缝, 其走向、分布和形态都受局部构造事件所控制。断层与裂缝都是应力作用的结果, 二者在成因上具有一致性, 裂缝是断层的微观表现, 断层是裂缝进一步受力的结果。研究表明, 裂缝是岩石受力破裂作用的结果, 天然裂缝系统具有自相似性, 可以用分形方法对其进行描述。

由于裂缝系统的复杂性, 导致地震反射信号极不规则, 地震道是一混沌的反射序列, 混沌运动的轨迹在相空间的某个区域内无穷次的折叠, 构成一个无穷层次的自相似结构——奇怪吸引子, 奇怪吸引子是一种分形, 其分维数可用重建相空间法计算, 计算公式为^[1]

$$C_{\varepsilon} = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1; i \neq j}^N [\theta - (\varepsilon - \|X_i - X_j\|)] \quad (2)$$

式中 N 为空间点对数目; i, j 为空间点序号; C_{ε} 为奇怪吸引子的分维数; X_i, X_j 为时间序列的点; ε 是 Heaviside 函数; θ 为与点对间距离有关的指示函数, $\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$

地震记录 $X(t)$ 是地震子波 $b(t)$ 与反射系数 $\xi(t)$ 的褶积, 即

$$X(t) = b(t) * \xi(t) \quad (3)$$

式中 $*$ 表示两个变量褶积运算关系。对上式作傅氏变换, 在频率域有

$$X(\omega) = B(\omega) * \xi(\omega) \quad (4)$$

式中 $X(\omega), B(\omega), \xi(\omega)$ 分别是地震记录 $X(t)$ 地震子波 $b(t)$ 、反射系数 $\xi(t)$ 的频谱。

显然有 $\xi(\omega) = [1/B(\omega)] * X(\omega)$

如果令 $A(\omega) = 1/B(\omega)$

则得到 $\xi(\omega) = A(\omega) * X(\omega) \quad (5)$

对上式作傅氏逆变换得

$$\xi(t) = a(t) * X(t) \quad (6)$$

其中 $a(t)$ 是 $A(\omega)$ 的时间函数, 对上式离散化得:

$$\xi = \sum X_{i-k} a_k$$

$$\text{即 } \xi = \langle X_i, A \rangle \quad (7)$$

其中 $X_i = (X_{i-N}, X_{i-N+1}, \dots, X_{i-2}, X_{i-1})$

$$A = (a_N, a_{N-1}, \dots, a_2, a_1)$$

由(7)式显然有

$$\xi_j = \langle X_j, A \rangle \quad (8)$$

(7) - (8) 得

$$\begin{aligned} \xi_i - \xi_j &= \langle X_i - X_j, A \rangle \\ &= \|X_i - X_j\| \|A\| \cos(\theta_k) \end{aligned} \quad (9)$$

式中 θ_k 为向量 $X_i - X_j$ 与向量 A 的夹角。

将(9)式改写成

$$\|X_i - X_j\| = (\xi_i - \xi_j) / [\|A\| \cos(\theta_k)] \quad (10)$$

把(10)式代入(2)式得

$$C(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1; i \neq j}^N [\theta - (\varepsilon - \frac{\xi_i - \xi_j}{\|A\| \cos(\theta_k)})] \quad (11)$$

联合(11)式和(2)式可以看出, 分维数反映了反射系数的复杂程度, 分维数越大越稳定, 裂缝越发育。

对工区三维地震资料进行裂缝分维数计算,

得到裂缝分维数的平面分布。如图3所示为工区 Inline325 测线裂缝分维数计算结果, 分维数进行了标准化处理, 位于 0~1 之间。图4为工区裂缝分维数平面分布图。

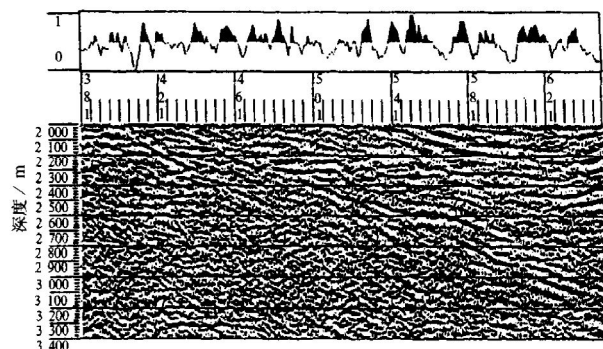


图3 Inline325 测线潜山裂缝分维数计算结果

Fig. 3 The calculated fractal dimensions of buried hill fractures along Inline 325 measure line

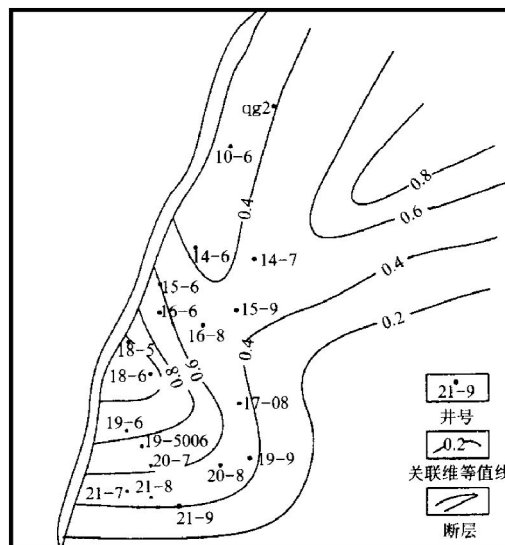


图4 潜山裂缝分维数等值线图

Fig. 4 Fractal dimension contour of buried hill fractures

3 综合评价

综合应用通过数值模拟得到的古应力值(P_f)、测井资料计算出的裂缝孔隙度(Φ_f)和三维地震资料计算出的储层裂缝分维数(C_{ε})等参数, 应用判别分析, 对储层进行分类评价。

3.1 类型划分

对于裂缝性储层, 同等情况下, 裂缝越发育, 油气产量就越高。应用工区试油和生产动态资料, 按照各产层段投产初期的平均日产油量同时结合岩芯裂缝观察, 将潜山裂缝性储层分为3类, 表1所示为3类储层的初始划分标准。

表 1 裂缝性储层初始模型划分标准
Table 1 The classification criterion of original model
of fractured reservoir

储层类型	I	II	III
平均日产油量/t	> 5	5~ 1	< 1

3.2 定量评价

根据裂缝性储层初始模型, 选取标准样本, 用古应力值 (P_f)、裂缝孔隙度 (Φ_f) 和裂缝分维数 (C_ε) 3 个参数建立不同类型储层的判别标准(表 2)。

表 2 潜山裂缝性储层定量综合评价标准
Table 2 The quantitative evaluation criterion of buried hill
fractured reservoir

储层类别	I	II	III
P_f	> 20	20~ 15	< 15
Φ_f	> 1	1~ 0.5	< 0.5
C_ε (标准化后)	> 0.7	0.7~ 0.4	< 0.4

确定了上述各类储层的分类标准后, 选取标准层段的参数, 建立起各类储层的判别函数。

I 类储层: $p = 2.344\ 56P_f + 14.276\ 43\ \Phi_f + 7.222\ 81C_\varepsilon - 11.333\ 62$
II类储层: $p = 1.774\ 52P_f + 15.884\ 41\ \Phi_f + 5.334\ 67C_\varepsilon - 9.334\ 27$
III类储层: $p = 1.538\ 44P_f + 12.776\ 35\ \Phi_f + 8.442\ 58C_\varepsilon - 9.999\ 64$

式中 p 为储层属于各类储层的判别值。

将各井裂缝层段参数分别代入上面 3 个判别函数计算, 比较 3 个判别函数值的大小, 将储层归入判别函数值最大的一类, 从而完成储层分类。这些工作都是通过自编的计算机程序自动完成的。图 5 为潜山各类裂缝储层平面分布图。

3.3 预测效果

从图 5 可以看出, 潜山 I、II 类裂缝十分发育, 形成良好的储层。顺大断层方向, I、II 类裂缝呈块状排列, 表现为典型的裂缝性油气藏特征。在构造的转折端, 由于应力集中, 裂缝也较为发育。

目前的生产井全位于 I、II 类裂缝发育带。同时根据所作的裂缝平面分布综合评价图。在 I、II

类裂缝性储层分布区域内部署了 3 口井, 目前已完钻的两口井都获得了工业油气流, 日产原油都在 20 t 以上, 说明预测结果十分可靠。

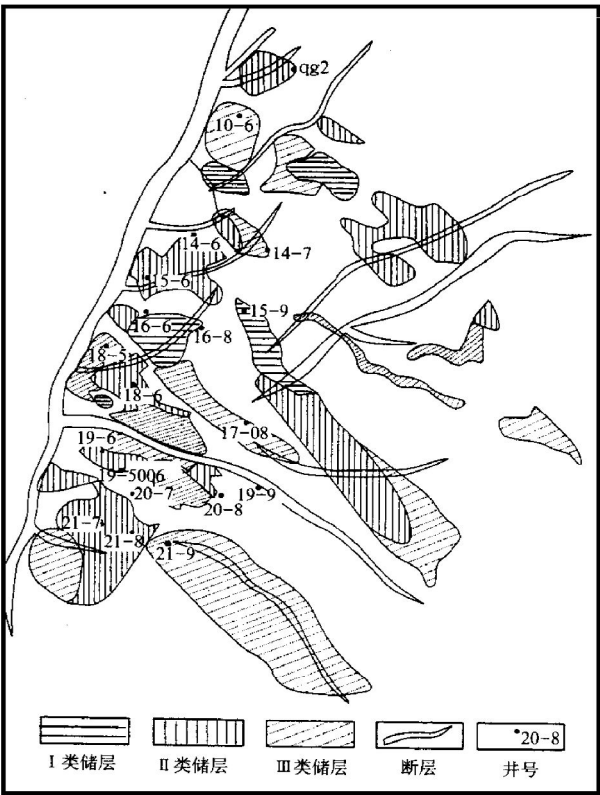


图 5 潜山裂缝性储层分类评价图
The classified evaluation of buried hill fractured reservoir

4 小结

对于裂缝性储层的评价, 本文所提取的 3 个参数, 从不同侧面对裂缝性储层进行表征。古应力值是从裂缝的成因方面对裂缝进行分析, 裂缝孔隙度充分发挥了测井资料的垂向分辨率高的优势, 直接刻画裂缝的物性特征, 而裂缝的分维数则是根据天然裂缝的宏观分形特性, 利用三维地震资料的横向连续性, 预测裂缝带的平面分布。在进行裂缝性储层的分类评价中, 根据生产动态资料建立原始分类标准, 使得储层分类具有充分的地质依据。

参 考 文 献

1 何光明, 高如曾. 分形理论在裂缝预测中的尝试[J]. 石油物探, 1993, 32(2): 11~ 13

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF FRACTURED RESERVOIR: take the basement rock reservoir of Qijia buried hill in Liaohe Oilfields as an example

Yin Zhijun¹ Peng Shimi¹ Gao Rongjie²

(1. Petroleum University, Beijing; 2. Liaohe Oilfields, Panjing, Liaoning)

Abstract: Paleostress value, fractural porosity and fracture fractal dimension could be used to demonstrate the basement rock reservoir of Qijia buried hill in Liaohe Oilfields. The paleostress value determined the development of the reservoir fractures. Use bilateral log curves to recognize fractured interval and calculate fractural porosity and then use 3-D data to predict the distribution of fractured zone. Finally use paleostress value, fractural porosity and fracture fractal dimension to evaluate fractured reservoir. The result indicates that I ~ II type fractures developed well, could form favourable reservoir.

Key words: fractured reservoir; paleostress value; fractural porosity, fracture fractal dimension; synthetic evaluation

(上接第 239 页)

大排量返排使得二氧化碳在井底迅速膨胀, 吸收大量的热, 使得近井地带油层温度快速下降, 当温度下降到临界点时石蜡、沥青开始析出并沉积在近井地带, 堵塞地层。因此, 当油层较薄时, 返排速度过

大, 有可能间接导致油层堵塞。

致谢 本文得到了采油一厂、西南石油学院、北京石油勘探开发科学研究院、郑州大学等单位的大力支持和帮助, 在此一并感谢。

THE REASON OF RESERVOIR BLOCKAGE IN CO₂ SWALLOWING-SPITTING TEST

Qian Siping¹ Du Peimin¹ Qiao Baolin¹ Zhou Xuhuang¹ Zhang Xiuqiong¹ You Xiaomiao² Mo Bing¹

(1. Research Institute of Exploration and Development, Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan;

2. Department of Science and Technology, Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan)

Abstract: In the test of CO₂ swallowing-spitting made in Zhongyuan Oilfields, a new problem of reservoir blockage near wellbore area has arisen. The test result of Wen 65-84 Well in Zhongyuan Oilfields suggests that unknown mud-like matter and inorganic matter CaCO₃ could not cause the reservoir blockage, the dialysis of heavy organic materials (paraffin, bitumen) caused by CO₂ injection and the drop down of temperature is the real reason of the reservoir blockage.

Key words: CO₂; swallowing-spitting test; heavy organic matter; oil reservoir blockage, Zhongyuan Oilfields