

文章编号: 1006-6616 (2002) 03-0279-09

松辽盆地徐家围子断陷芳深9井区 火山岩储层裂缝预测

任德生¹, 张兴洲¹, 陈树民²

(1. 吉林大学, 长春 130026; 2. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712)

摘要: 本文在松辽盆地北部徐家围子芳深9井区构造地质、石油地质及构造应力场分析的基础上, 对早白垩世嫩江组末期、晚白垩世明水组末期和现今三个构造时期在营城组火山岩地层中的构造应力场进行了三维有限元数值模拟, 进而分析了三维构造应力场在裂缝预测分析中的应用, 研究结果与构造地质、石油地质分析结论相一致, 对油气勘探开发具有指导意义。

关键词: 三维构造应力场; 岩石破裂系数; 岩石形变比能

中图分类号: P554

文献标识码: A

0 前言

地应力客观存在于地壳中, 并作用于油藏, 对油藏开发的全过程具有十分重要的影响, 尤其对于低渗透砂岩和火山岩油田, 地应力是分析构造裂缝和决定油藏开发效果的重要因素之一。

三维有限元应力场数值模拟可避免二维数值模拟分析中构造模型过于简化的不足, 模拟结果能够最大程度的逼近实际地质现象。计算结果不仅能够给出各层平面上的应力状态变化规律, 也可给出沿垂向上任意剖面的应力分布。这样的空间应力场为油田的勘探开发等提供了依据^[1,2]

1 有限元分析地质模型建立

松辽盆地是我国东北的一个大型中生代沉积盆地, 徐家围子是松辽盆地北部的一个最大的断陷区, 芳深9井区位于徐家围子断陷区, 面积约475.24km², 构造位置见图1。模型长、宽均为21.8cm。依据该地区主要断裂以及含油层埋深等值线展布形态, 自北向南依次选取7个剖面控制其基本结构构造, 各剖面地层层位划分依据该区地层划分结果选取上覆盖层、目的层(营城组火山岩)和基底共3个层位(图2)。本文主要阐述早白垩世嫩江组末期、晚

白垩世明水组末期和现今三个不同构造时期在目的层(营城组)中的构造应力场的分布规律,故三维有限元数值模拟以营城组顶界构造为基础建立相关的地质模型。

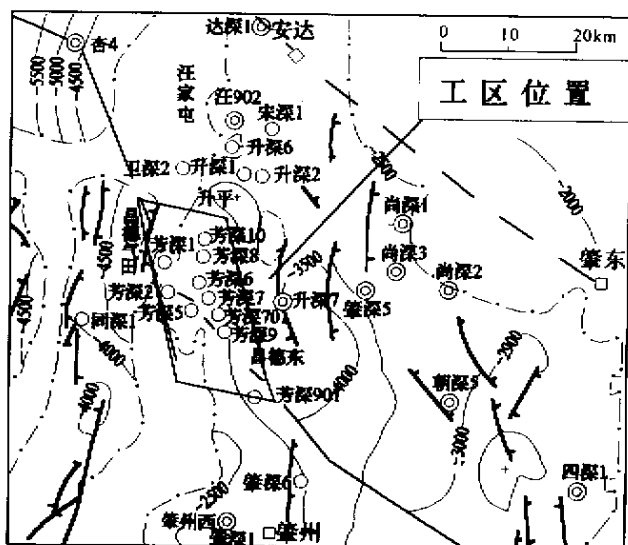


图1 松辽盆地徐家围子断陷芳深9井区构造位置图

Fig.1 The structure location map of Fangshen 9 drill area of Xujiaweizi depression in Songliao basin

2 有限元分析数学模型建立

有限元数学模拟模型的建立主要包括4个方面:一是按照有限元数值分析所要求的数学、力学规则进行单元划分,三维应力场数值分析的单元划分更为复杂,任一单元必须考虑上下、前后、左右之匹配关系;二是依据区域地质分析,确定位移边界条件,给予模型合理的边界约束;三是依据研究区在区域背景上的应力边界条件,以及研究区实测点应力状态,确定模型合理的加力条件;四是岩石力学参数的确定^[1]。除此,当研究某一目的层某一构造时期的应力参数时,垂向应力还要考虑剥去这一构造时期以后形成的地层上覆岩层重量。

2.1 模型单元划分

由于目前还没有划分复杂的三维不规则有限元网格的经验可循,作者经过长时间的反复比较试验,应用美国 Algor 公司的有限元程序 Super SAP 可得出以下单元划分方法步骤:

(1) 坐标原点选在整个模型的西北底角, Y 轴向上, X 轴向东, Z 轴向南。这样的坐标选择对施加静水压力载荷较为方便。

(2) 在两两剖面之间分别进行单元划分。单元以近似立方体为主,在必要处也可用五面体。

(3) 不同层位的地层单元给不同的颜色和组号。

(4) 在施加应力边界条件和位移边界条件后,按层进行图形、数据转换。

(5) 各层图形、数据转换正确后,即可得到完整的有限元模型。

按上述步骤,三维有限元模型划分 2118 个三维等参元, 2592 个节点(图 2)。

2.2 位移边界条件的确定

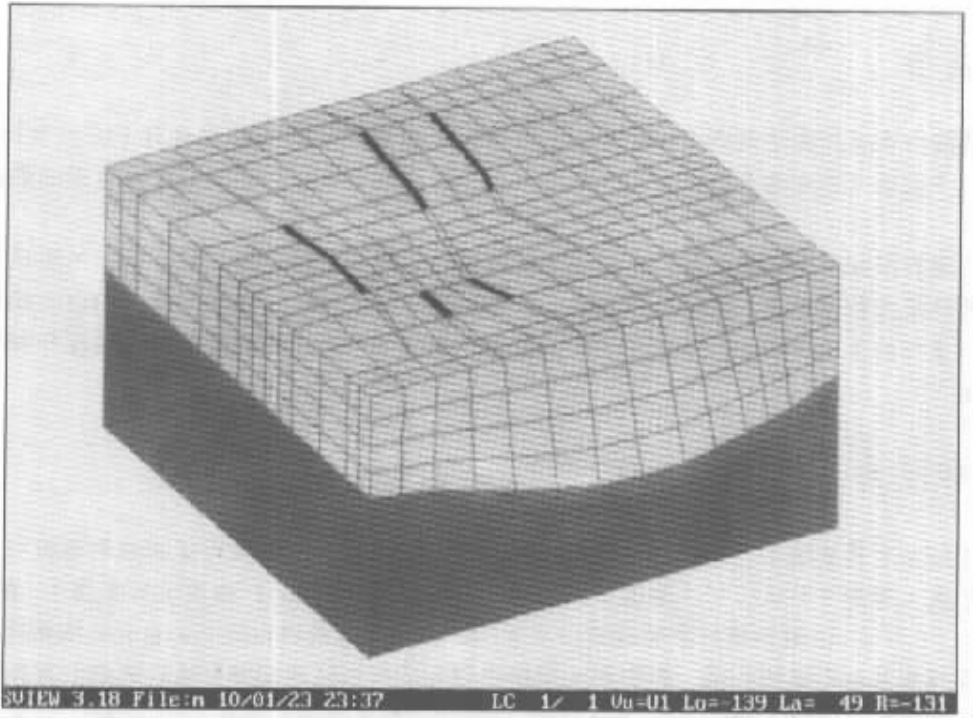


图 2 研究范围及其三维数学模型

Fig.2 Research area and its three-dimensional mathematical model

模型顶面采用自由边界条件，模型底面采用 Y 方向约束条件，并在某些点上施加 X、Z 方向约束，以保证模型没有整体的刚体平动和转动，模型四周采用应力边界条件。这种位移边界条件基本符合模型三维实体在地壳中所处的状态。

2.3 应力边界条件的确定

根据对研究区构造应力场演化的分析结果和显微构造裂隙分期配套所恢复的古构造应力场，确定早白垩世嫩江组末期最大主压应力方向为 NNW，晚白垩世明水组末期和现代最大主压应力方向为近 EW 向。重力以体力形式施加。这种加力方式基本与模型三维实体在地壳中的历史受力边界条件相吻合。施加的边界力的大小依据声发射实验结果，早白垩世嫩江组末期最大主应力值为 55MPa，晚白垩世明水组末期最大主应力值为 80~89MPa，现今最大主应力值为 23.5MPa。

2.4 岩石力学参数的确定

依据岩石实验和岩石类比所得的岩石力学参数，三维模型岩石物理力学参数如表 1。

表 1 三维模型岩石物理力学参数

Table 1 Rock physical and mechanic parameters for 3-D model

层位	弹性模量/MPa	泊松比 (μ)	密度 (ρ)/g/cm ³
上覆地层	20000	0.28	2.58
目的层	25000	0.25	2.60
基底	30000	0.24	2.62
断裂带	12000	0.3	2.41

3 计算结果分析

有限元模型建立后,运用有限元程序 Super SAP 的 SSAPOH 执行程序进行计算。经过反复对边界条件等进行调整试算,最终计算得出该区的三维构造应力场的分布。

对于八节点三维实体等参元,可用最大主压应力,最小主压应力,中间主压应力, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 等应力参数讨论目的层在空间上应力大小变化规律。这里主要讨论运用三维构造应力场有关应力参数计算出的岩石剪破裂系数以及岩石形变比能在空间变化规律,以便讨论三维构造应力场在构造裂缝预测分析中的应用。有关岩石剪破裂系数以及岩石形变比能的计算原理如下^[3-6]:

裂缝是自然界中非常普遍的现象,人们对裂缝做了大量的观测和研究,但对裂缝的识别、分类、成因等方面的认识还不太成熟。这里只研究构造裂缝,即因构造应力作用而在岩层中产生的裂缝。本文是在三维构造应力场数值模拟的基础上,根据岩石破裂准则,计算出发生破裂的地方,并引进“破裂系数”的概念,以模拟裂缝发育程度的相对大小变化。此外,还从能量角度分析裂缝发育情况,并进行两种裂缝研究方法的对比分析。

3.1 岩石剪破裂率计算

判断岩石在力的作用下是否发生剪破裂往往采用库仑剪破裂准则:

$$[\tau] = \tau_0 - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$$

其中 τ_0 为岩石的粘聚力, φ 为内摩擦角, σ_n 为剪破裂面上的正应力, $[\tau]$ 是抗剪能力。设剪破裂面上的剪应力为 τ_n , 库仑准则的实质在于:若 $\tau_n > [\tau]$, 则认为岩石发生了剪破裂;若 $\tau_n \leq [\tau]$, 则认为岩石没有发生剪破裂。

按破裂准则只能判断出是否发生了剪破裂,而不能判断破裂的发育程度。构造应力场给出不同地点的应力状态,可能有的地点尚未达到破裂状态,而另一些地方却早已超过了破裂状态。为了定量的说明某处的应力状态是否达到岩石破裂状态,这里引进“破裂系数(F)”的概念。破裂系数(F)的定义是:

$$F = |\tau_n / [\tau]|$$

显然,若某处的 $F \leq 1$, 则未发生剪破裂;若 $F > 1$, 则发生了剪破裂。同样明显的是,若 $F >> 1$ 说明早已发生了剪破裂,而 $F \ll 1$ 意味着发生剪破裂相差甚远。因此可以认为,破裂系数的大小反映了剪裂缝发育程度的相对大小和可能性,并认为 F 值大的区域比 F 值小的区域裂缝相对地要发育一些。

在含油气盆地三维构造应力场数值模拟的基础上,运用上述公式计算出目的层岩石裂缝发育程度的相对大小变化。

3.2 岩石形变比能计算

弹性变形固体内任一点元素体的应变比能用主应力表示为:

$$W = \frac{1}{2E} [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]$$

式中 E 为弹性模量, μ 为泊松比。而上式所给出的应变比能可以分为两部分,即体积改变比能(W_v)和形状改变比能(W_d):

$$W_v = \frac{1-2\mu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2$$

$$W_d = \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]$$

裂缝发育与形状改变比能有关，故这里主要分析形状改变比能。

在含油气盆地三维构造应力场数值模拟的基础上，运用上述公式计算出目的层岩石形状改变比能的相对大小变化，并认为比能高值区对应岩石破裂系数高值区，而比能低值区对应岩石破裂系数低值区。两种方法对比研究，提高分析的可靠性。

图 3 为早白垩世嫩江组末期营城组火山岩剪破裂系数等值线；图 4 为早白垩世嫩江组末期营城组火山岩层形变比能等值线。

图 5 为晚白垩世明水组末期目的层岩石剪破裂系数等值线；图 6 为晚白垩世明水组末期目的层岩石形变比能等值线。

图 7 为现今目的层岩石剪破裂系数等值线；图 8 为现今目的层岩石形变比能等值线。

由图 3、图 5、图 7 可以看出，早白垩世嫩江组末期，目的层岩石剪破裂系数高值发育区局限在芳深 9 井及其以北区域，芳深 7 井的 SSE 方向，破裂率值均大于 1.2。晚白垩世明水组末期目的层岩石剪破裂系数，较嫩江组末期的剪破裂系数（剪破裂率）有大幅度的增大。明水组末期形成的剪裂缝在芳深 9 井及其邻区都有发育，全区大面积剪破裂率都大于 1，说明这一期的构造应力场覆盖规模较大。该构造期形成裂缝发育相对密集区，集中在芳深 7 井与芳深 9 井之间，芳深 10 井以东，这些区域剪破裂率值最高可达 2.6。现今构造应力场在目的层中的岩石剪破裂系数的高值区，集中分布在芳深 7 井和芳深 9 井区，芳深 8 井的

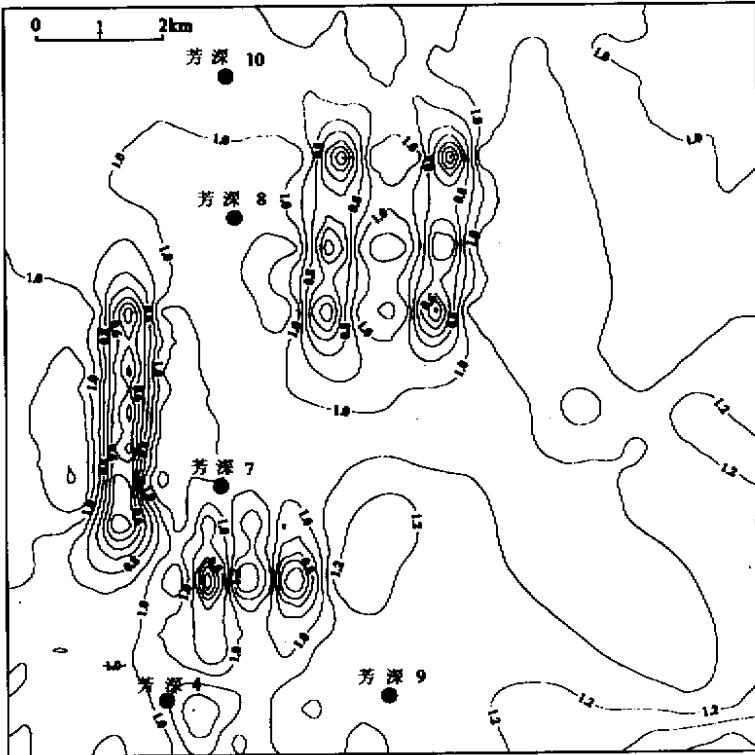


图 3 早白垩世嫩江组末期目的层岩石剪破裂系数等值线

Fig.3 Contours of rock shear fracture coefficient in target layer at Upper Nunjiang Formation of Early Cretaceous

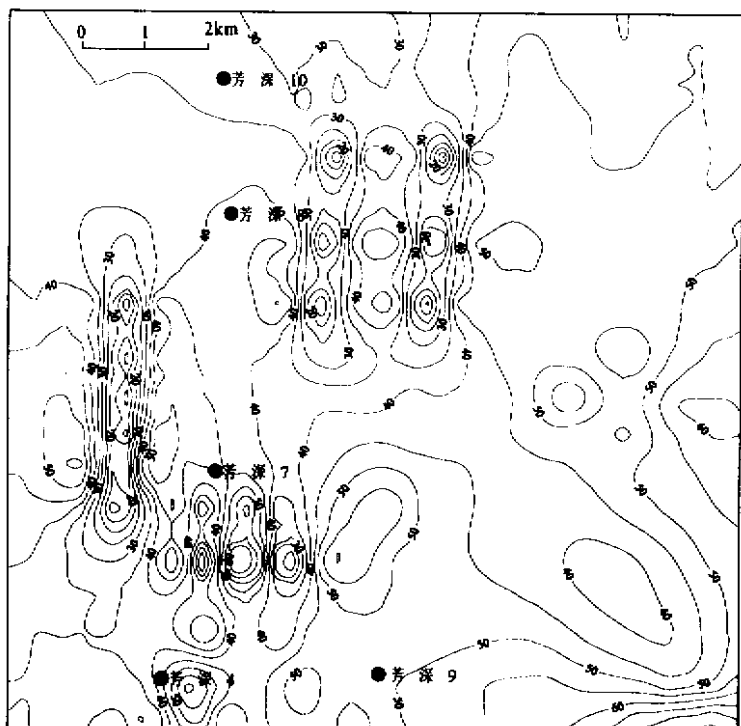


图4 早白垩世嫩江组末期目的层岩石形变比能等值线

Fig.4 Contours of rock shape deformation specific energy in target layer at Upper Nunjiang Formation of Early Cretaceous

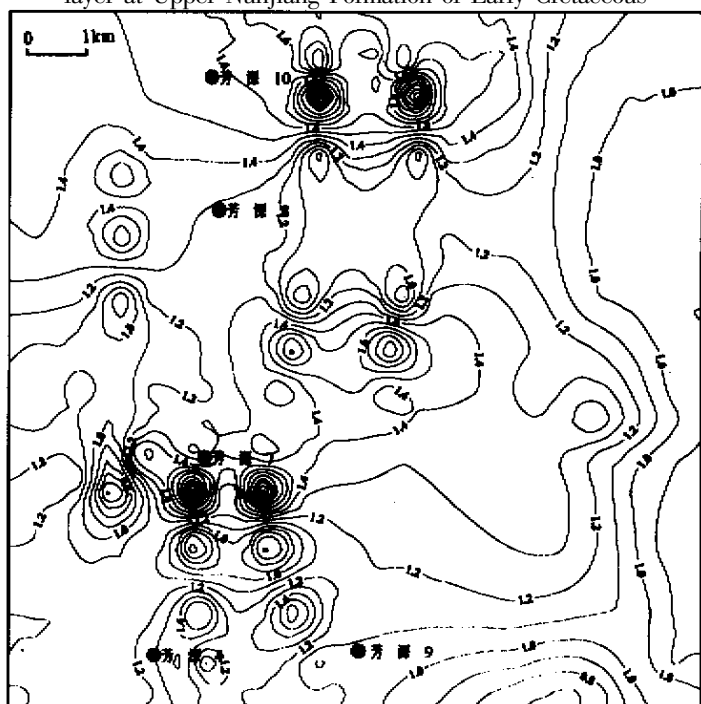


图5 晚白垩世明水组末期目的层岩石剪破裂系数等值线

Fig.5 Contours of rock shear fracture coefficient in target layer at Upper Mingshui Formation of Late Cretaceous

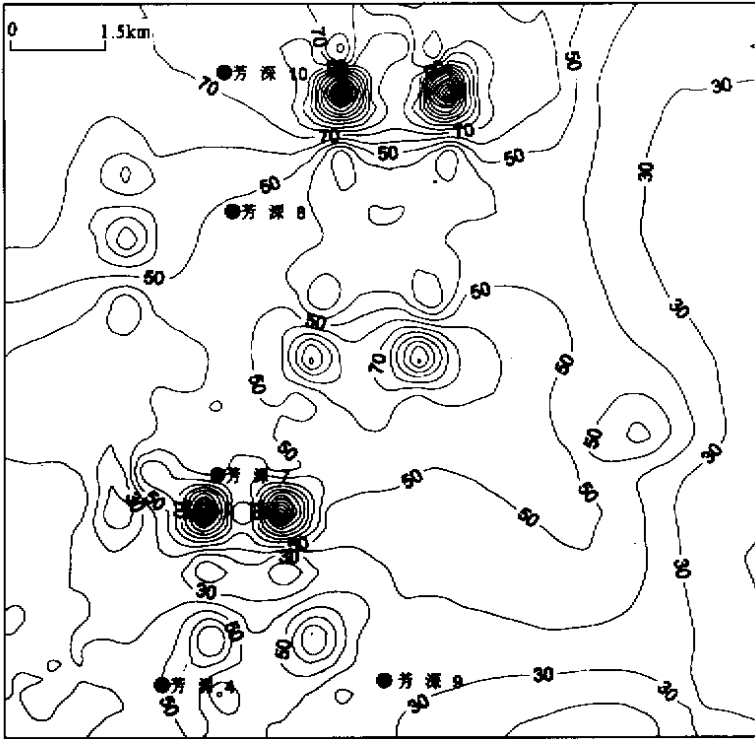


图 6 晚白垩世明水组末期目的层岩石形变比能等值线

Fig.6 Contours of rock shape deformation specific energy in target layer at Upper Mingshui Formation of Late Cretaceous

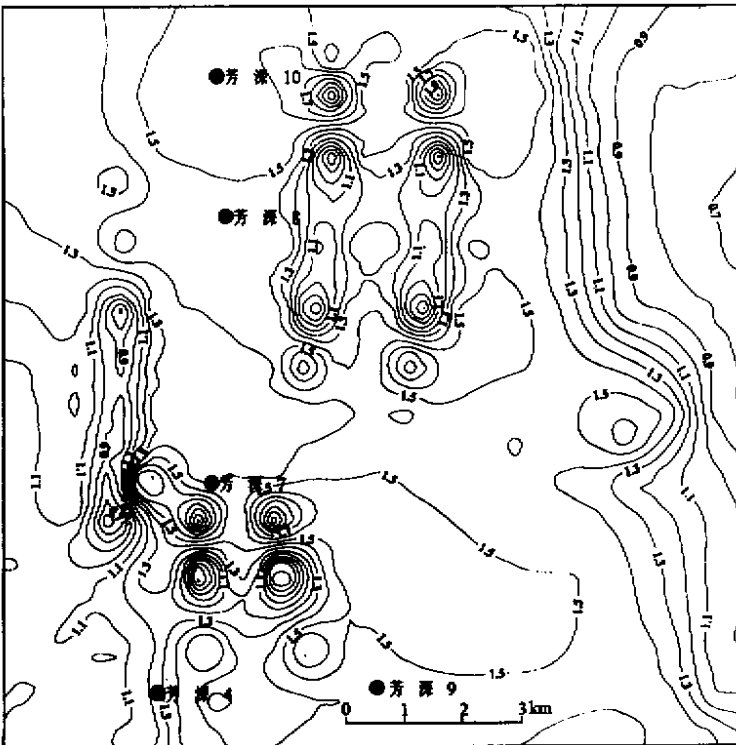


图 7 现今目的层岩石剪破裂系数等值线

Fig.7 Contours of rock shear fracture coefficient in target layer at present

东部和南东方向,芳深4井区也有所发育。

嫩江组末、明水组末和现今在目地层中的形变比能的分布具有大概相似的分布规律,不同之处是形变比能的数值不同(图4、图6、图8)。比较嫩江组末、明水组末和现今时期目的层形变比能等值线,其中明水组末期的值最大,最大值约为 $22 \times 10^4 \text{J/m}^3$;其次为嫩江组沉积末期目的层的形变比能最大值约为 $8 \times 10^4 \text{J/m}^3$;现今目的层形变比能值较小,最大值仅约为 $5 \times 10^4 \text{J/m}^3$ 。地层形变比能值的大小说明构造应力场引起的地层岩石变形的强弱,其值较大区裂缝相对较发育,由此可见由明水组末期构造应力场发生的裂缝最为发育。分析各构造时期目的层中的最大剪破裂率等值线、形变比能等值线的分布(图3、图5、图7)和生产井的产量情况对比,可以明显的看出芳深9井、芳深7井、芳深901等高产井都对应于剪破裂率的高值区和形变比能等值线的高值区。

另外,从图3~图8等值线分布可以看出,不同构造期目的层岩石剪破裂系数和岩石形变比能存在差异,而在各构造期二者之间有良好的匹配关系。总体来看,岩石形变比能低值区对应岩石剪破裂系数低值区;岩石形变比能高值区对应岩石剪破裂系数高值区;在断裂带端部岩石形变比能和岩石破裂系数多出现高值区,这与有关岩石破裂准则相一致。

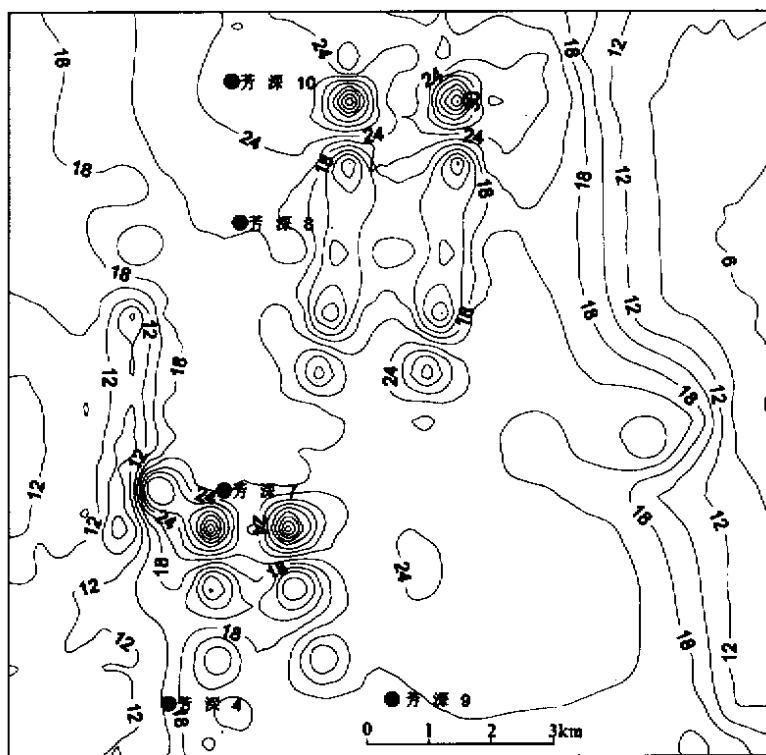


图8 现今目的层岩石形变比能等值线

Fig.8 Contours of rock shape deformation specific energy in target layer at present

4 结论

(1) 由于目的层不同构造部位的岩性、岩相等方面的差异,应力场分布不同,构造裂缝发育程度也存在明显差异性。剪破裂系数、形变比能高值区都有可能是裂缝相对发育的油气

圈闭区。

(2) 应力场与构造裂缝分析与实际生产结果相吻合，并与岩石破裂准则相一致，从量化的角度确定了油气勘探开发的有利构造区，进一步说明了研究应力场的必要性、可行性和实用性。

(3) 应力场是含油气盆地构造裂缝分析的主要动力因素之一，进行应力场研究对油气勘探开发具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 谭成轩, 王连捷, 孙宝珊, 等. 含油气盆地三维应力场数值模拟方法 [J]. 地质力学学报, 1997, 3 (1): 71 ~ 80.
- [2] 李志明, 张金珠. 地应力测量技术及其在油气勘探开发中的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [3] 谭成轩, 王连捷. 三维构造应力场数值模拟在含油气盆地构造裂缝分析中应用初探 [J]. 地球学报, 1999, 20 (4): 392 ~ 394.
- [4] Tan Chengxuan, Jin Zhijun, Zhang Mingli, et al. An approach to the present-day three-dimensional (3-D) stress field and its application to hydrocarbon migration and accumulation in the Zhangqiang depression, Liaohe Field [J]. China. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18 (9): 983 ~ 994.
- [5] Jagatilik A D. Fracture of engineering brittle materials [J]. Appl. Sci. Pub. , 1979, 59 : 116 ~ 162.
- [6] Marry G H. Quantitative fracture study—Spanish pool, Mchenize Co. , North Dakota [J]. AAPG Bulletin, 1986, 52 : 57 ~ 65.

FISSURE FORECASTING OF VOLCANIC ROCK RESERVOIR AT FANGSHENG 9 DRILL AREA OF NORTHERN SONGLIAO BASIN

REN De-sheng¹, ZHANG Xing-zhou¹, CHEN Shu-min²

(1. Earth Science College, Jilin University, Changchun, 130026; 2. Basin Institute, Exploration and Development Academy, Liaohe Oil Field Sub-Company, Panjin, 124010, China)

Abstract : On the basis of the analysis of structural geology, petroleum geology and tectonic stress field at Fangsheng 9 drill area of north Songliao basin, three-dimensional tectonic stress fields at the end of Nunjiang Formation of Early Cretaceous, the end of Mingshui Formation of Late Cretaceous and present are simulated respectively, and then we discuss their application to fissure predication. The results have a good agreement to the comprehensive conclusions from structural geology and petroleum geology, and will play a role in hydrocarbon exploration and development in the research region.

Key words : Three-dimensional tectonic stress field; rock fracture coefficient; rock shape deformation specific energy