

# 利用岩心资料估测 地下一组裂缝分布的原理和应用

尹中民<sup>1</sup> 单业华<sup>2</sup>

(1, 中国科学院长沙大地构造研究所 410013; 2, 青岛海洋大学海洋地球科学学院 266003)

**摘要:** 本文提出一种利用岩心资料估测地下一组裂缝分布的新方法。它需要事先给出裂缝分布型式, 才能找出具有给定分布型式的最佳裂缝分布, 对于估测一般不确知的地下裂缝分布, 可以依次选取不同的分布型式重复采用上述方法, 然后比较各自的最小目标函数值, 其中具有最小值的就可以认为是实际裂缝分布的最好近似。实例应用表明, 当裂缝型式选取合适, 上述方法的估测结果与实测值相近, 从而能给出实际裂缝分布的最好估测, 与 Narr 和 Lerche(1984) 的方法相比以下, 本方法适用性更广, 进而能为油田开必提供更为切合实际、复杂的储层裂缝模型。

**关键词:** 估测; 裂缝分布; 优化

**中图分类号:**                   **文献标识码:** A

裂缝间距是指相邻两条平行裂缝之间的垂直距离。它是裂缝型式的重要参数, 也是裂缝性油藏数值模拟不可缺少的输入参数<sup>[1]</sup>。露头上裂缝间距的测量一般是在与裂缝迹线垂直的测线上进行的, 但是对于地下情形, 由于有限的岩心所揭露的裂缝极少, 这么做几乎行不通。岩心上经常可以看到某些岩层尤其是厚度较大的岩层里没有发现一条裂缝, 由此并不能说明该层没有发育裂缝, 而很可能是裂缝间距远大于岩心直径。因此, 岩心观测资料的不足决定了地下裂缝分布的估测必须依赖所建立的有关裂缝分布的先验模型。

规则(或等间距)裂缝是目前研究得最透彻的一种先验模型。基于规则裂缝模型。Narr 和 Lerche<sup>[2]</sup>最早运用概率理论提出估测地下规则裂缝间距的方法。当钻井与岩层垂直时, 具有厚度  $T$  的岩层在岩心上出现裂缝的理论概率  $P$  是

$$P = \frac{D}{S} = I \cdot \frac{D}{T}$$

式中:  $D$  是岩心直径,  $S$  是裂缝间距,  $I$  是裂缝间距指数,  $I = T/S$ ,  $D \leq S$ 。大量的野外观测表明, 在小面积范围内于相同或大致相同的岩层中, 裂缝间距指数基本上保持不变<sup>[3,4]</sup>。这一经验关系成为目前估测地下裂缝分布的基础<sup>[2,5,6]</sup>。

然而, 这一估测方法只适用于规则或接近规则裂缝的情形。在自然界, 天然裂缝的发育具有从不规则分布至规则分布的趋势<sup>[3]</sup>, 因此, 规则或接近规则的裂缝毕竟是很小的一部分, 更多的是不规则裂缝。本文的旨图是研究利用岩心资料估测地下一组裂缝分布的一般原理, 然后提出一种适用性更广的估测方法。

## 1 原理

假定所考虑的这组裂缝都是平行、与岩层面垂直的, 且裂缝间距指数在岩性一致的地层中保持不变。设有  $N$  口钻井穿透过岩一致、厚度不同的  $k$  个地层, 并且都有相应地层的完好取心。对于厚度为  $T_i$  的第  $i$  个地层, 由岩心观测资料可以获知记录到 0, 1, 2, ... 条裂缝的钻井数  $N_{ij}$ 。记此层岩心上遇到裂缝的观察概率为  $P_{ij}$ , 于是有:

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{N} \quad i = 1, 2, 3, \dots; j = 0, 1, 2, \dots$$

与之相对, 我们有该层岩心上遇到裂缝的理论概率  $E_{ij}$ , 它可以由已知的裂缝分布中计算出来。 $P_{ij}$  值的大小与观察数  $N$  密切相关, 特别是在小样本的情形下, 但是随着观察数  $N$  的增大,  $P_{ij}$  值波动会越来越

小,趋近于  $E_{ij}$ 。事实上,  $P_{ij}$  值自身几乎无法提供出我们需要的有关地下裂缝分布的信息,因为它完全可能由不同的裂缝分布产生,为了能够估测裂缝分布,我们只有降低问题提出的程度——假定地下裂缝分布型式是确知的,也就是说要事先给出估测的裂缝分布型式。以下可以看出,这样的确是能够根据  $P_{ij}$  值找出具有这种分布型式的最佳裂缝分布。实际上, Narr 和 Lerche<sup>[2]</sup> 提出的估测方法的必要前提就是裂缝必须遵从规则分布的型式。

我们定义目标函数  $W$  来表征  $P_{ij}$  与  $E_{ij}$  之间的偏差:

$$W = \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^{\infty} (P_{ij} - E_{ij})^2$$

于是整个估测就变成求上式的最小值问题。许多优化方法都可以用来求解上述方程,这里我们选用模拟退火算法。模拟退火算法是一种基于 Monte Carlo 取样的随机搜索算法<sup>[7,8]</sup>。在每个叠代阶段,参数的增量是由生成函数产生的。相邻两个阶段目标函数的差值称之为能量,视为一种干扰的产物,如果能量减少,那么这种干扰就可以接受;反之,这种干扰需要判别函数决定其接受与否。于是,通过允许一些能量增加的干扰,整个叠代就可以逃脱局部最小值的束缚,达到最低能态。实际计算中,上式中裂缝数的上界不取为无穷大,而视求解需要的精度和  $P_{ij}$  值大小而定,例如下文的实例里就取为 2。

至此,求解上式的关键是如何由已知的裂缝分布来计算  $E_{ij}$ 。首先,我们引入有效直径  $D_e$  的概念,它相当于地层有效出露长度<sup>[9]</sup>,是指岩心上沿着裂缝迹线的垂直方向上地层被揭露的长度。当钻井与层垂直时,  $D_e$  等于岩心直径  $D$ ; 当不垂直时,  $D_e$  一般要大于  $D$ , 有如下计算式<sup>[9]</sup>:

$$D_e = D \cdot \sqrt{\cos^2 \psi + \left( \frac{\sin \psi}{\cos \theta} + T_i \cdot \frac{\sin(\arctg(\tan \theta \cdot \sin \psi))}{\cos \theta} \right)^2}$$

式中:  $\theta$  是地层倾角,  $\psi$  是裂缝的侧伏角,且假定钻井直立。上式右端一、二项分别与岩心直径和地层厚度相关。

为了方便计算,进一步假定裂缝产出互不相关或孤立。尽管这一假定很可能失真,但不失为真实情形的一种近似。此外,还假定裂缝分布的形态不随地层厚度变化,即在间距—密度坐标上,地层厚度的影响只是起着平移裂缝密度函数的作用,不改变其形态。

对于第  $i$  个地层,不妨令其裂缝密度函数为  $f_i$

( $x$ ), 其分布型工已确知,只有描述裂缝分布的参数待定。显然,该函数沿着一定长度的某区间进行定积分的值是该区间上遇到不少于一条裂缝的理论概率。这一概率值并不只是岩心上遇到一条裂缝的概率值,而是包含了它。例如,当规则裂缝的间距比岩心直径小两倍时,岩心上观测的裂缝数是 2,而沿长度为岩心直径的区间(即  $[0, D_e]$ ) 进行积分得到的概率值却是 1。在  $[0, D_e]$  区间上遇到不少一条裂缝的理论概率  $E_{i1}$  表示为:

$$E_{i1} = \int_0^{D_e} f_i(x) dx$$

考虑到所要求的  $E_{i1}$  是岩心上遇到具体条数裂缝的理论概率,而不是大于或等于具体裂缝数的理论概率。 $E_{i1}$  的直接计算有一定的困难,但是我们首先能够计算出岩心上遇到不少两条裂缝的理论概率  $E_{i2}$ , 然后  $E_{i1}$  与  $E_{i2}$  的差值就是  $E_{i1}$ 。令  $x_1$  和  $x_2$  是  $[0, D_e]$  上两条裂缝的位置,  $0 \leq x_1 \leq x_2 \leq D_e$ 。由于它们的产状彼此无关,它们的联合密度函数  $D(x_1, x_2)$  表示为:

$$D(x_1, x_2) = f_i(x_1) f_i(x_2 - x_1)$$

于是,  $E_{i2}$  是联合密度函数  $D(x_1, x_2)$  在  $[0, D_e]$  区间上的定积分,表示为:

$$E_{i2} = \int_0^{D_e} \int_{x_1}^{D_e} D(x_1, x_2) dx_1 dx_2$$

$$= \int_0^{D_e} f_i(x_1) dx_1 \int_{x_1}^{D_e} f_i(x_2 - x_1) dx_2$$

同样地,可以写出岩心上遇到不小于  $m$  条裂缝的理论概率值  $E_{im}$  的表达式:

$$E_{im} = \int_0^{D_e} f_i(x_1) dx_1 \int_{x_1}^{D_e} f_i(x_2 - x_1) dx_2 \cdots \int_{x_{m-1}}^{D_e} f_i(x_m - x_{m-1}) dx_m$$

上式可以用数值积分的一些方法计算出来。因而,最终就能得到岩心上遇到具体条数裂缝的理论概率:

$$E_{im} = \begin{cases} 1 - E_{i1} & (m = 1) \\ E_{i(m-1)} - E_{im} & (m \neq 1) \end{cases}$$

以上推导出估测地下平行裂缝分布的一般性理论和计算方法。整个计算过程相对复杂、耗时,但易于在计算机上实现。我们用 Turbo-Basic 语言编写了

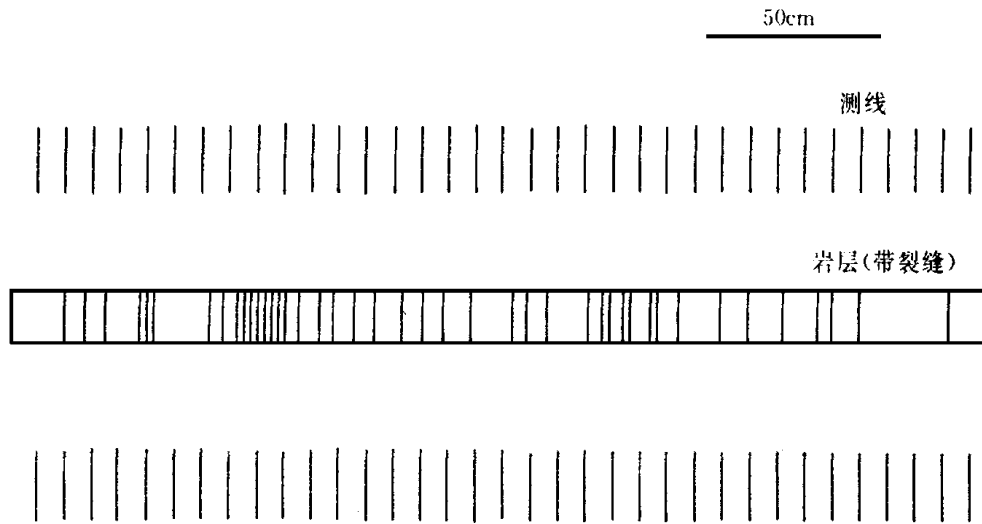


图 1 选取岩层里的裂缝示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fractures in a selected bed

有关的计算程序。该估测的大致步骤如下:

(1) 输入基本数据, 包括岩性、地层厚度、岩心上观察的裂缝数、岩心直径、裂缝产状、地层产状和钻井产状等。如果钻井与地层不直交, 那么还需要计算出有效直径。

(2) 依据岩态观察和某些先验知识, 选取适合的裂缝分布型式。裂缝分布型式的选取应以简单为准则, 诸如规则、正态、对数正态或指数分布等常见分布型式。虽然选取一些复杂的分布型式时, 能够得到非常小的最小目标函数值, 但是却增加计算时间, 事倍功半。

(3) 采用模拟退火算法来最小化目标函数, 获得具有给定分布型式的最佳裂缝分布。

鉴于绝大多数情形下地下裂缝分布是不确知的, 我们可以逐次选取不同的分布型式, 重复步骤 (3), 然后比较它们的最小目标函数值, 其中具有最小值的分布就可以认为是实际裂缝分布的最好估测。

## 2 应用

实例取自河北省西北部尚义县尚义煤矿东南 1km 和侏罗系后城组地层, 该近水平的岩层由粗砂岩组成, 厚约 22cm 被多组近直立的天然裂缝切割。这里取其中长约 3.2m 的一段露头做为检验上述方法的实例, 它只被一组走向约 56° 的天然裂缝切割 (图 1)。

图 2- 1 上, 该露头上实测的裂缝间距具有类似指数形式的分布, 即裂缝间距数目随着裂缝间距值的增大而趋于减小。裂缝间距的平均值是 7.85cm 裂缝间距指数为 2.80(表 1)。

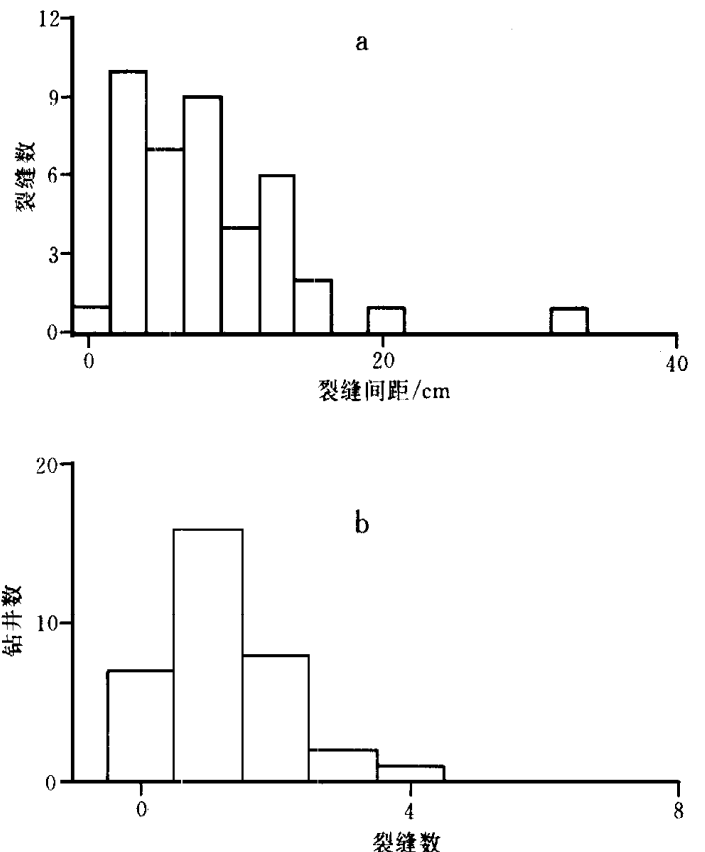


图 2 a. 实测裂缝间距分布, 总数为 41;

b. 裂缝数与钻井数关系, 钻井总数为 34

Fig. 2 a. Distribution of measured fracture spacings, having a number of 41;

b. Relationship between fracture number and well number, with the well sum total of 34

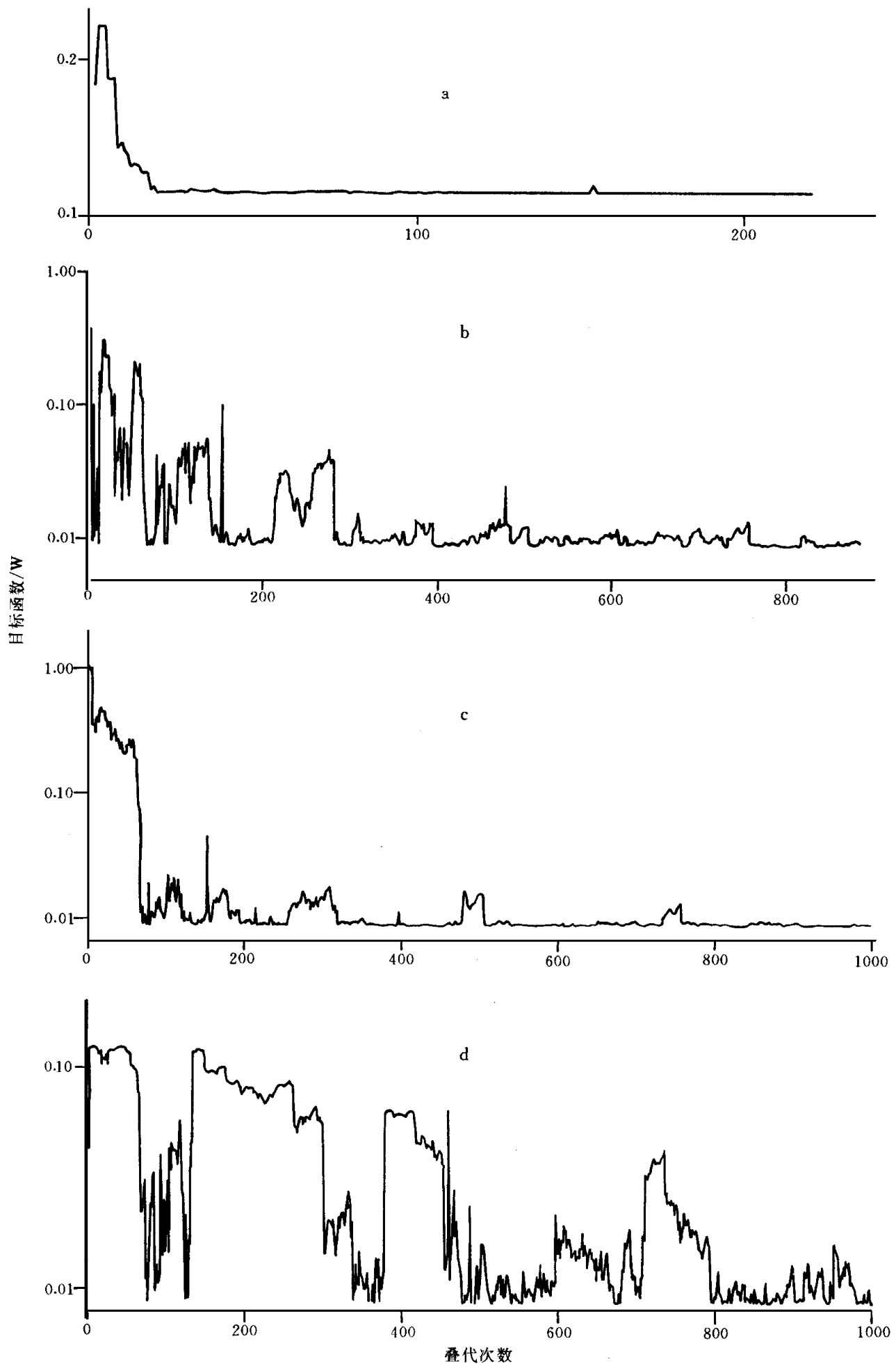


图 3 采用本文方法对具有不同分布型式的裂缝分布的估测

a. 规则分布; b. 正态分布; c. 对数正态分布; d. 指数分布

Fig. 3 Estimation of the fracture distribution with different distributive patterns using the method in this paper

表 1 具有不同分布型式的裂缝分布的估测参数与实测参数的比较

Table. 1 Comparison between the measured and estimated parameters of fracture distribution

序号	裂缝分布型式	裂缝密度函数	裂缝分布的参数		目标函数最小值
			实测	估测	
1	规则分布	$\frac{1}{T}$	$I = 2.80$	$I = 1.75$	0.113
2	正态分布	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\mu = 7.85$ $\sigma = 5.86$	$\mu = 6.43$ $\sigma = 3.21$	0.00236
3	对数正态分布	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\mu = 1.81$ $\sigma = 0.75$	$\mu = 1.52$ $\sigma = 0.76$	0.00249
4	指数分布	$\lambda e^{-\lambda x}$	$\lambda = 0.13$	$\lambda = 0.24$	0.0869

在该露头上连续、等间距地布了与岩层面垂直的 35 根测线, 彼此间距为 10cm 一共代表着 34 口钻井。根据这些钻井的岩心上遇到 0、1、2、3、4 和 5 条裂缝的观测概率(图 2- 2; 表 1)。

采用上述方法, 依次选取了规则、正态、对数正态和指数等 4 种分布型式, 其估测结果见表 1 和图 3。尽管还可以选取其它更精细的分布型式, 但是考虑到岩心观测较少, 观测概率值  $P_{ij}$  自身不太稳定, 因此这样做并没有多大的意义, 尤其是就方法的检验而言。图 3 中, 在较少的叠代次数下干扰的波动很大, 随着叠代次数增大, 逐渐变小, 趋于稳定。达到目标函数极小值所需要的叠代次数与选取的初始温度、退火方式和给定的裂缝分布型式相关。

在规则分布型式中, 估测的裂缝间距指数为 1.75, 约是实测值的 2 倍, 这样大的偏差使我们不能接受该层裂缝是规则分布的先验假设。实际上, 图 1 中的裂缝具有明显的不规则分布, 这也反映在估测结果的精度较差上。在正态、对数正态和指数型式中, 估测的参数值与实测的参数值都比较接近(表 1), 进一步说明该裂缝是不规则分布的。

在 4 种分布型式中, 规则分布的最小目标函数值最大, 而正态分布的最小, 对数正态的稍大些, 对数正态的稍大些, 最大值差不多是最小值的 50 倍。因此, 在没有限制下, 正态分布或对数正态分布可以为能够最好地描述该段地层中的裂缝分布。

### 3 结论

本文提出一种利用岩心资料估测地下平行裂缝

分布的新方法, 该方法需要事先给出裂缝分布型式, 才能找出具有给定分布型式的最佳裂缝分布。为了估测一般不确知的地下裂缝分布, 我们可以依次选取不同的分布型式重复采用上述方法, 然后比较各自的最小目标函数值, 其中具有最小值的就可以认为是实际裂缝分布的最佳近似。实例应用表明, 当裂缝型式选取得当时, 上述方法的估测结果与实测值相近, 从而能给出实际裂缝分布的最好估测。

天然裂缝广泛存在于地壳表层岩石中, 直接影响或控制着地下流动, 因此储层裂缝研究对裂缝性油藏的勘探和开发有着极其重要的意义。天然裂缝的发育一般具有从不规则分布至规则分布的趋势<sup>[4]</sup>, 就此而言, 在自然界岩石中更多见的是不规则裂缝。Narr 和 Lerche<sup>[2]</sup>的方法尽管简单, 但是适用的对象极其有限, 只是规则或接近规则的裂缝。相比之下, 本文提出的估测方法适用性更广, 进而能为油田开发提供更为切合实际、复杂的储层裂缝模型。

#### 参考文献:

[1] Von Golf- Racht T. D. Fundamentals of fractured reservoir engineering. Amsterdam, Netherlands, Elsevier Publishing Co. 1982, 710

[2] Narr, W. & Lerche I. A method for estimating subsurface fracture density in core. AAPG Bull. 1984, 68: 637~648

[3] Mc Quillan H. Small- scale fracture density in Asmari Formation of southwest Iran and its relation to brd thickness and structural setting. AAPG Bull. 1977, 57: 2367~2385

[4] Wu H. & Pollard D. D. An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness. J. Struct. Ge-

ol. 1995, 17: 887~905

- [5] Aguilera R. Determination of subsurface distance between vertical parallel natural fractures based on core data. AAPG Bull. 1988, 72: 845~851
- [6] Narr. W. Fracture density in the deep subsurface: techniques with application to Point Arguello Oil Field. AAPG Bull. 1991, 75: 1300~1323
- [7] Kirkpatrick. S. Gelatt. D. D. Jr. & Vecchi. M. P. Optimization by simulated annealing Science, 1983, 220: 67
- [8] Datta- Gupta. A. Vasco. D. E, Long. J. C. S, D'Onfro. P. S. & Rizer. W. D. Detailed characterization of a fractured limestone formation by use of stochastic inverse approaches. SPE Formation Evaluation, 1995, 133~140
- [9] 单业华, 李志安, 曾联波。估测地下天然裂缝间距指数的新方法。石油勘探与开发, 1997, 25: 74~76

## PRINCIPLE AND APPLICATION OF ESTIMATION ON THE DISTRIBUTION OF A SET OF SUBSURFACE FRACTURES BY CORE DATA

YIN Zhong-min<sup>1</sup>, SHAN Ye-hua<sup>2</sup>

(1. Changsha Institute of Geotectonics, Academia Sinica, Changsha, Hunan 410013, China;

2. College of Marine Earth Earth Sciences, Qingdao University of Oceanography, Qingdao, Shandong 266003, China)

**Abstract:** A new method to estimate the distribution of a set of subsurface fractures by core data is suggested in this paper. In order to find out optimum distribution of fractures with a given distributive pattern, the pattern must be known in advance. When estimating the distribution of generally undetermined subsurface fractures, the method mentioned above can be used repeatedly selecting different distributive patterns in turn. Then, the respective minimum target function values are compared. Among them, the one with minimum can be considered as the best approximation to practical fracture distribution. Case applications show that if fracture patterns are selected properly, the estimated results from the above-mentioned method are close to measured values; the best estimates for practical fracture distribution can be obtained thereby. **Key words** estimation; the distribution of fractures; optimization