

估测地下多组系统性裂缝间距的原理和应用

单业华

(中国地质大学, 北京 100083)

李志安

(中科院长沙大地构造研究所, 410013)

本文提出一种估测地下多组系统性裂缝间距的最优化方法, 它不需要对裂缝性岩石进行定向, 就能利用岩芯资料估测多组裂缝间距。采用理想的裂缝模型验证该方法的有效性, 发现在同一观察次数下裂缝间距之积要比单纯的裂缝间距更能准确地被估测出。最后应用它来估测鄂尔多斯地台油田南二区三叠系延长组六段储层的多组裂缝间距。

关键词 多组系统性裂缝 间距 最优化 地下岩芯 估测

第一作者简介 单业华 男 30 岁 博士 区域地质学

0 前言

1984 年, Narr 和 Lerche 根据概率理论, 提出估测一组平行、近等距裂缝间距的方法 (Narr W, Lerche L, 1984), 而对于多组裂缝间距却需要事先进行裂缝性岩石的定向, 确定裂缝组系和方向后, 才能分组进行估测。由于岩芯定向要借助于古地磁测量, 地层倾角测井等方法, 这样做十分耗时费资, 事倍功半。另一方面, 自然界岩石在更多情况下出现多组裂缝, 尤其是在我国。因此, 上述方法缺乏普遍的适用性。针对于此, 本文提出一种简便的方法, 它不需要进行岩芯定向, 就能够利用岩芯资料估测地下多组天然系统性裂缝间距。

1 原理

假定各裂缝组的裂缝都是平行、等距、与层面垂直且无限延伸的。裂缝无限延伸意味着裂缝的系统性, 各组之间没有控制关系, 不存在象 Gross (1993) 描述的系统性裂缝限制非系统性裂缝的现象, 也就是说各组裂缝的出现是彼此独立、互不相关的。为了便于论述, 以下只考虑钻井与层面垂直的情形, 而不垂直的情形则需要知道裂缝组系的方向, 由岩芯范围内沿裂缝面法线方向的岩芯长度代替岩芯直径 (单业华等, 1991)。

设在厚度为 T 的地层中存在着几组裂缝, 间距

为 $S_i (i= 1, 2, \dots, n)$ (图 1)。这里 $S_i < D$ (岩芯直径), 而当 $S_i \geq D$ 时可以直接在岩芯上测量裂缝间距。对于任意一组裂缝 i , 岩芯上理论的裂缝出现概率 (P_i) 为:

$$P_i = \frac{D}{S_i} = \frac{D}{T} I_i; I_i = \frac{T}{S_i}$$

式中 I_i 是 i 组裂缝的裂缝间距指数。通常在邻近岩性相同、厚度不等的地层中, 同一组裂缝的 I_i 值基本保持不变, 即裂缝间距与地层厚度呈线性关系。

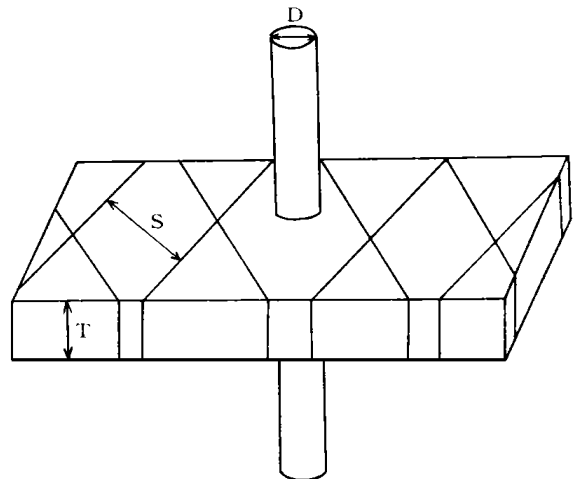


图 1 两组裂缝的情形

由于 $D < S_i$, 在岩芯上不能观察到同一组裂缝的两条裂缝

岩芯上理论的 k 条裂缝出现概率记为 $P_i(k) (k = 0, 1, \dots, n)$, 因为各组裂缝之间彼此不相关, 所以

当 n 为 2 时, 有:

$$\begin{bmatrix} P_t(0) \\ P_t(1) \\ P_t(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - P_1)(1 - P_2) \\ P_1(1 - P_2) + (1 - P_1)P_2 \\ P_1P_2 \end{bmatrix}$$

当 n 为 3 时有:

$$\begin{bmatrix} P_t(0) \\ P_t(1) \\ P_t(2) \\ P_t(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3) \\ P_1(1 - P_2)(1 - P_3) + (1 - P_1)P_2(1 - P_3) + (1 - P_1)(1 - P_2)P_3 \\ P_1P_2(1 - P_3) + P_1(1 - P_2)P_3 + (1 - P_1)P_2P_3 \\ P_1P_2P_3 \end{bmatrix}$$

当 n 为 4 时有:

$$\begin{bmatrix} P_t(0) \\ P_t(1) \\ P_t(2) \\ P_t(3) \\ P_t(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4) \\ P_1(1 - P_2)(1 - P_3)(1 - P_4) + (1 - P_1)P_2(1 - P_3)(1 - P_4) \\ + (1 - P_1)(1 - P_2)P_3(1 - P_4) + (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3)P_4 \\ P_1P_2(1 - P_3)(1 - P_4) + P_1(1 - P_2)P_3(1 - P_4) \\ + P_1(1 - P_2)(1 - P_3)P_4 + (1 - P_1)P_2P_3(1 - P_4) \\ + (1 - P_1)P_2(1 - P_3)P_4 + (1 - P_1)(1 - P_2)P_3P_4 \\ P_1P_2P_3(1 - P_4) + P_1P_2(1 - P_3)P_4 + P_1(1 - P_2)P_3P_4 + (1 - P_1)P_2P_3P_4 \\ P_1P_2P_3P_4 \end{bmatrix}$$

同样可以继续写下去。然而自然界同一处的岩层里一般很少发育超过 4 组裂缝, 因为一旦多组裂缝形成后, 后组的应力场不趋向形成新的裂缝, 而是使先存的裂缝张开或滑动。于是 n 取值不大于 4。与 $P_t(k)$ 对应, 岩芯上观察的 k 条裂缝出现概率记为 $P_o(k)$, 可以通过一口或相邻多口井岩芯上相同岩性、厚度相等的岩层中统计得到。由于裂缝间距取决于地层厚度、岩性和构造位置等因素, 实际工作中可将岩性相同或大致相同、厚度小于或等于 T 的岩层视为一类, 以便增加观察次数, 减少统计的不确定性。

理论上讲, $P_t(k)$ 与 $P_o(k)$ 之间的差值随着观察次数的增加而趋向减小。我们定义函数 Z 表示两者的差值:

$$Z = \sum_{k=1}^n \delta_k P_t(k) - P_o(k)$$

式中 δ_k 是加权系数, 使左端各项对 Z 的贡献处于同一量级的水平上。很明显, 当 k 每增加 1 时, $P_t(k)$ 和 $P_o(k)$ 都减少, 差值也减少, 并且 $P_o(k)$ 的大小直接影响着 $k(k > 1)$ 组裂缝的准确估测, 因此通过 δ_k 的调整将会提高估测的准确程度。整个估测于是转化

为一个最优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & Z = \sum_{k=0}^n \delta_k P_t(k) - P_o(k) \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq P_t(k) \leq 1 \quad (k = 0, 1, \dots, n) \\ & P_t(k) \geq P_t(k+1) \quad (k = 0, 1, \dots, n-1) \end{aligned}$$

上述问题可采用复形调优法(陈宝林, 1996)来解, 得到 n 组裂缝间距的估测值。

考虑到裂缝间距在岩性相同、厚度不等的地层中保持不变, 可以由上式的单层估测直接写出多层估测:

$$\begin{aligned} \min \quad & Z = \sum_{l=1}^m \sum_{k=0}^n \delta_k P_t(k, l) - P_o(k, l) \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq P_t(k, l) \leq 1 \quad (k = 0, 1, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m) \\ & P_t(k, l) \geq P_t(k+1, l) \quad (k = 0, 1, \dots, n-1; \\ & \quad l = 1, 2, \dots, m) \end{aligned}$$

式中 $P_t(k, l)$ 和 $P_o(k, l)$ 分别是 l 层中理论和观察的 k 条裂缝出现概率, m 是所研究的总层数。

2 检验

我们选用便于控制和生成的理想裂缝模型来检验上述方法的可行性和有效性。在理想的裂缝模型中, 各组裂缝都是严格等距、平行、与层面垂直且无限延长的, 满足前面的假设条件。这里只检验单层情形的多组裂缝间距估测方法, 地层厚度取为 25cm, 总共进行了 50cm × 50cm、50cm × 50cm、50cm × 100cm、50cm × 100cm × 150cm 不同间距的 4 组实验。当理想的裂缝模型生成后, 由 Monte Carlo 随机

取样法来产生不同的岩芯观察, 最终得到岩芯上观察的裂缝出现概率。检验的结果由估测与实测的裂缝间距之比、估测的裂缝间距指数之绝对误差和估测的裂缝间距之积与实际的裂缝间距之积的比值 3 种方式来表示。对于两组裂缝而言, 裂缝间距之积再乘上两者夹角的余弦就是裂缝岩块的面积, 当裂缝产状不明时, 裂缝间距之积可以近似地视为裂缝岩块的面积, 以下除非特别声明, 就是指这种情形。对于 3 组或更多的裂缝, 裂缝间距之积没有明确的物理意义。

2.1 实验 1 (50cm × 50cm; 图 2)

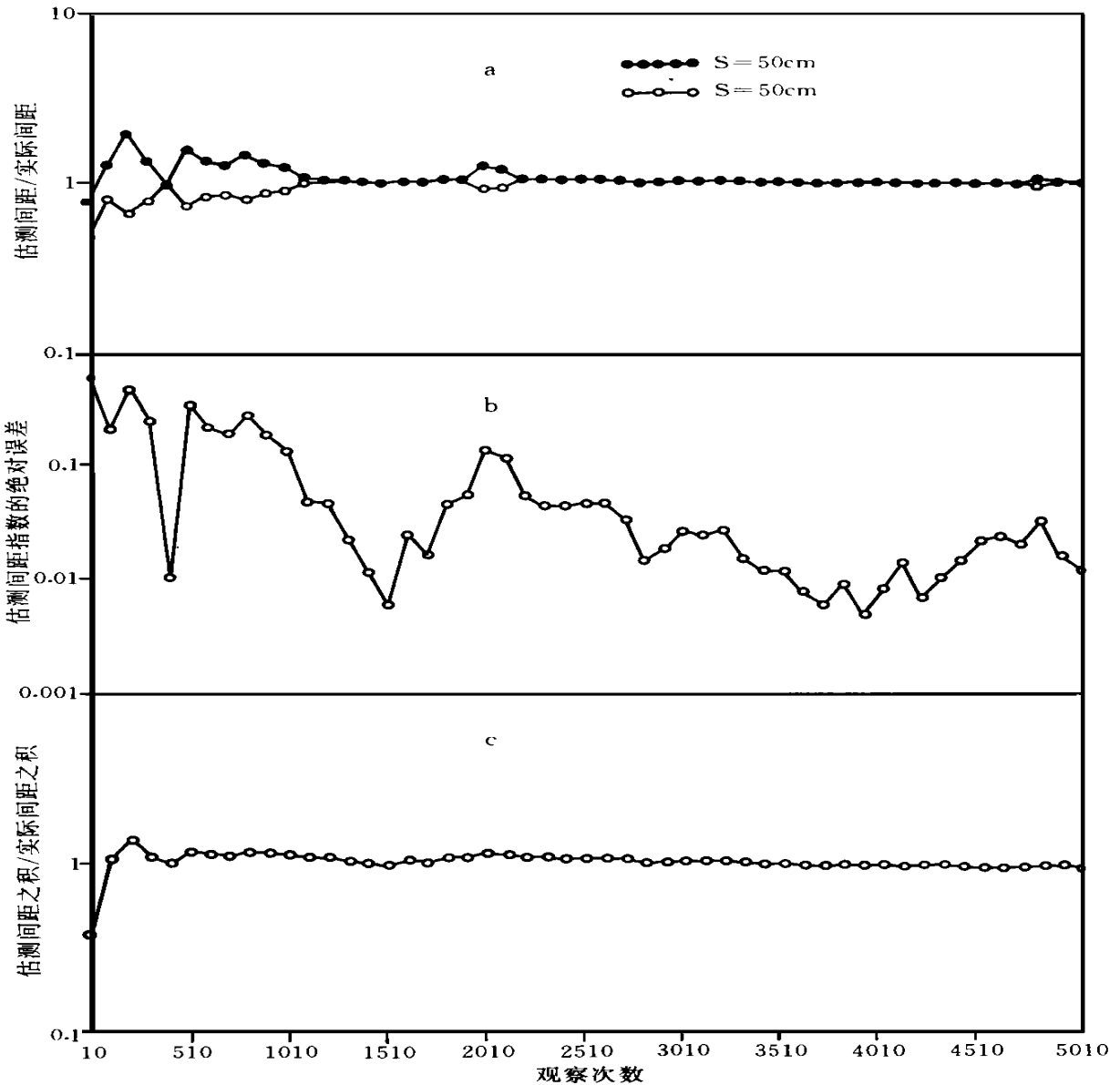


图 2 实验 1 中不同观察次数的估测结果

a. 估测的裂缝间距与实际的裂缝间距之比; b. 估测的裂缝间距指数的绝对误差; c. 估测的裂缝间距之积与实际的裂缝间距之积的比值

模型中两组裂缝正交。岩芯的观察次数对估测结果有着明显的影响, 当观察次数较小时, 估测结果波动很大, 难于得到好的估测; 随着观察次数增加, 估测结果逐渐变好, 趋向稳定, 大约以 1210 为界, 继续增加观察次数, 估测的准确程度并没有显著的改善(图 2-1)。因此实际应用时尽可能拥有多的观察, 才能提高估测的准确程度。图 2-1 中从观察次数 1810 处开始, 估测结果变差, 直至 2110 又变好。这种现象具有某种重复性, 尤其体现在估测的裂缝间距指数的绝对误差(图 2-2)上, 主要是因为 $P_r(n)$ 很小, 在一定的观察次数内易受随机取样的影

响, 会有比较明显的变化, 而它对 n 组裂缝间距的准确估测起着非常重要的作用。上述波动现象随着观察次数增加而趋向减弱(图 2-1、2)。与此不同, 裂缝岩块面积受随机取样的影响较小, 随着观察次数增多而很快平稳下来, 并且在同样的观察次数下, 裂缝岩块面积估测的准确程度要比单纯的裂缝间距估测的高。这启发我们利用小样来估测裂缝岩块面积。

2.2 实验 2(50cm × 50cm; 图 3)

模型中两组裂缝呈 45° 相交。其结果(图 3)与实验 1 的结果(图 2)相似, 只是受随机取样影响的波动现象更为突出。

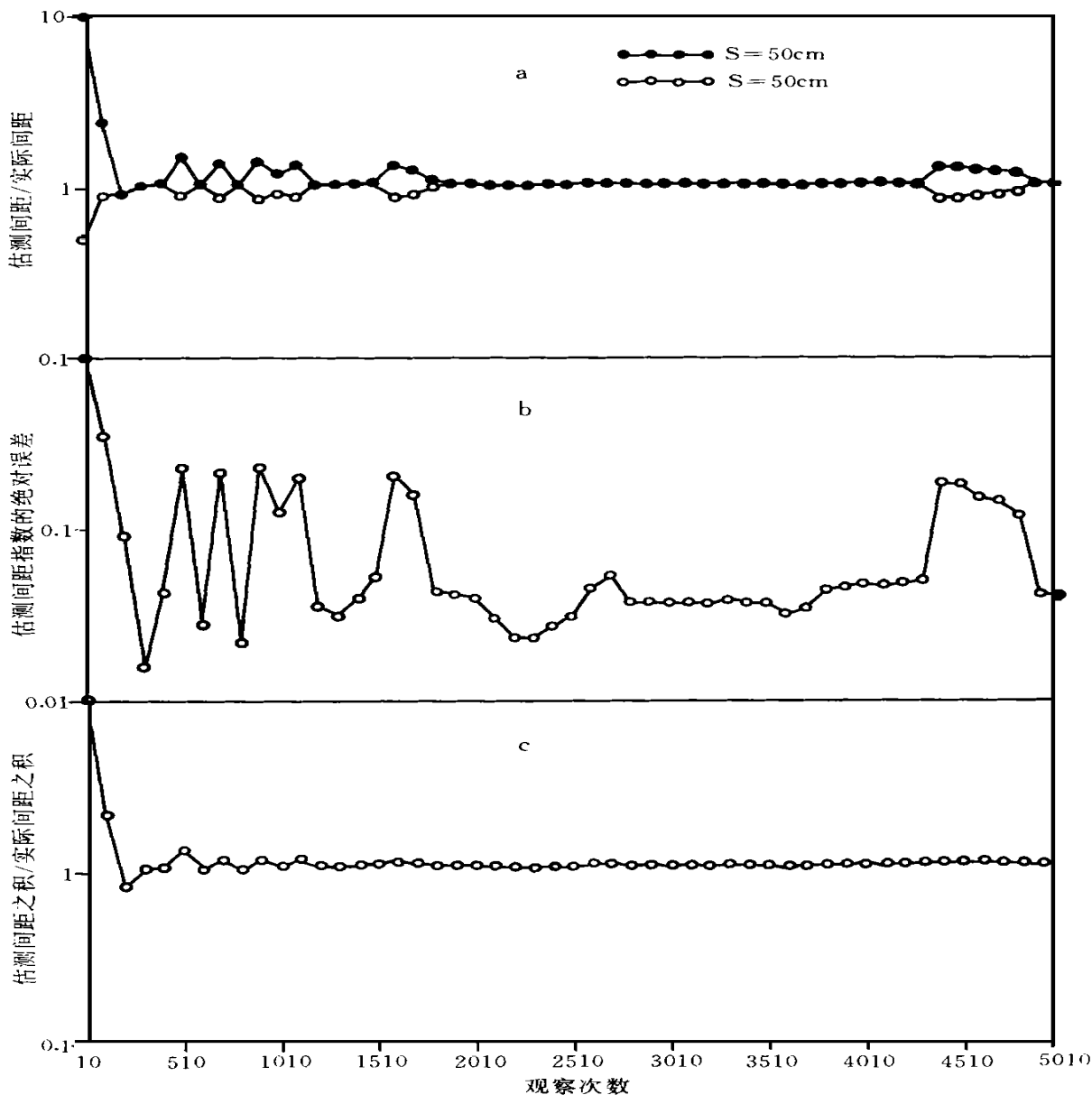


图 3 实验 2 中不同观察次数的估测结果

a. 估测的裂缝间距与实际的裂缝间距之比; b. 估测的裂缝间距指数的绝对误差; c. 估测的裂缝间距之积与实际的裂缝间距之积的比值

2.3 实验 3(50cm × 100cm; 图 4)

模型中两组裂缝正交。与其它实验结果(图 2、3)相比,估测结果的准确程度较低,相对平稳的估测间距值并不与实际间距值吻合。这除了与随机取样产生的波动有关外,还很可能是因为随机取样的范

围有限,造成观察的裂缝出现概率随着观察次数的增加并不趋向真值,而是与其存在偏差的某一值。加大随机取样的范围将减小该偏差。对比表明,在同样的取样范围内,估测的准确程度随着裂缝岩块面积增大而降低。因此,估测的准确程度与观察次数、裂

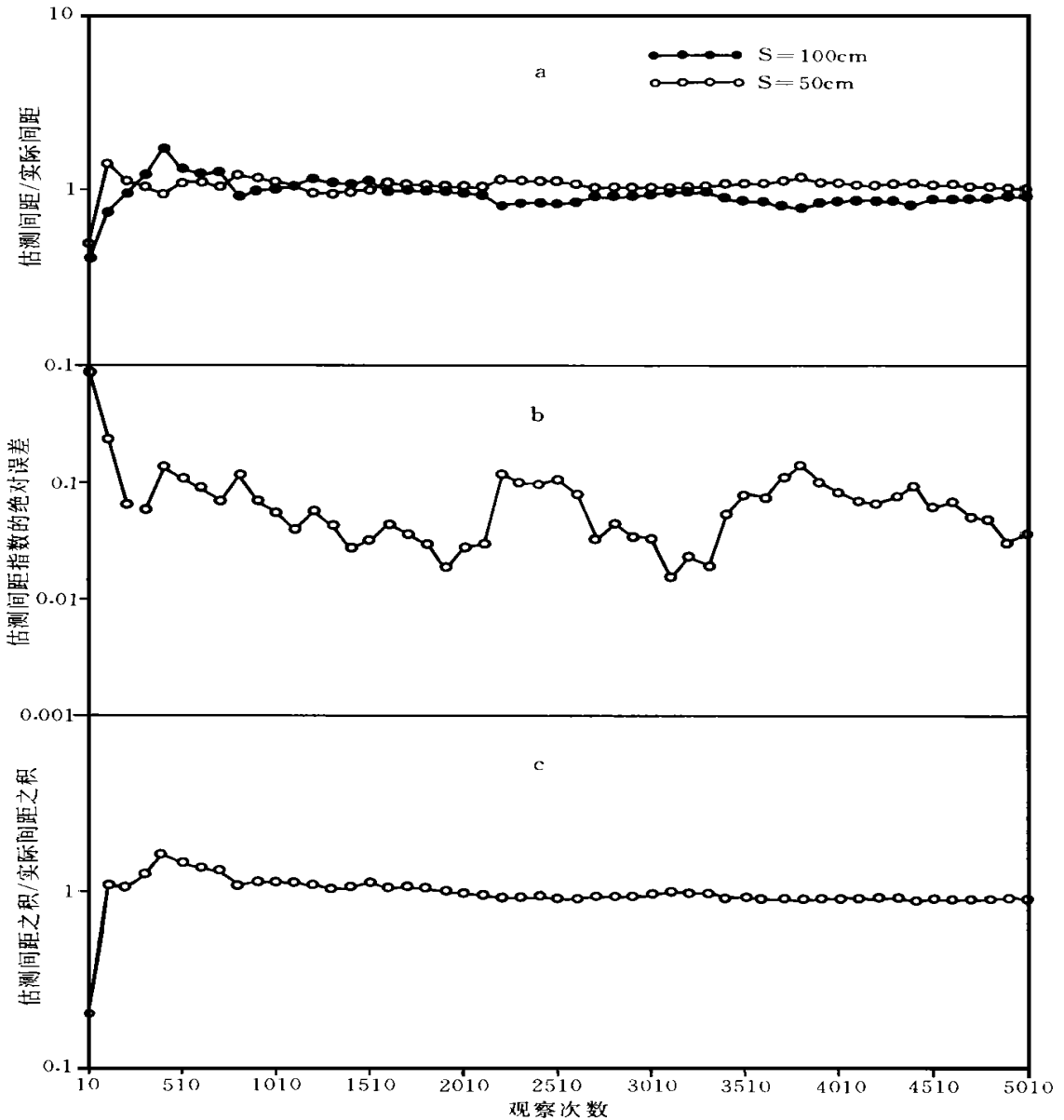


图 4 实验 3 中不同观察次数的估测结果

a. 估测的裂缝间距与实际的裂缝间距之比; b. 估测的裂缝间距指数的绝对误差; c. 估测的裂缝间距之积与实际的裂缝间距之积的比值

缝间距、取样范围和随机取样自身等多种因素有关。

2.4 实验 4(5cm × 100cm × 150cm; 图 5)

模型中 3 组裂缝的产状分别是 0°、90° 和 45°。除间距为 100cm 的裂缝组外,其它两组裂缝的估测值具有低的准确程度,这种情形较实验 3 的更为严重,

说明随着裂缝组的增加,在相同的观察次数下的估测准确程度趋向降低。同样地,估测的裂缝间距之比单纯的估测间距更易稳定下来,接近真值,通过图 2-3、3-3、4-3 和 5-3 的对比,不难看出随着裂缝组的增加和裂缝间距之积的增大,估测的裂缝间

距之积趋向稳定的观察次数阈值也趋向增大。

上述实验的结果表明能够采用本文方法估测地下多组裂缝间距。由于该方法自身没有利用全部或部分的裂缝方向资料, 估测的准确程度直接取决于

观察的裂缝出现概率, 而后者与观察次数、取样范围、裂缝组系、方向和间距、随机取样等因素密切相关, 实验中任意一因素都将造成估测准确程度的变化。

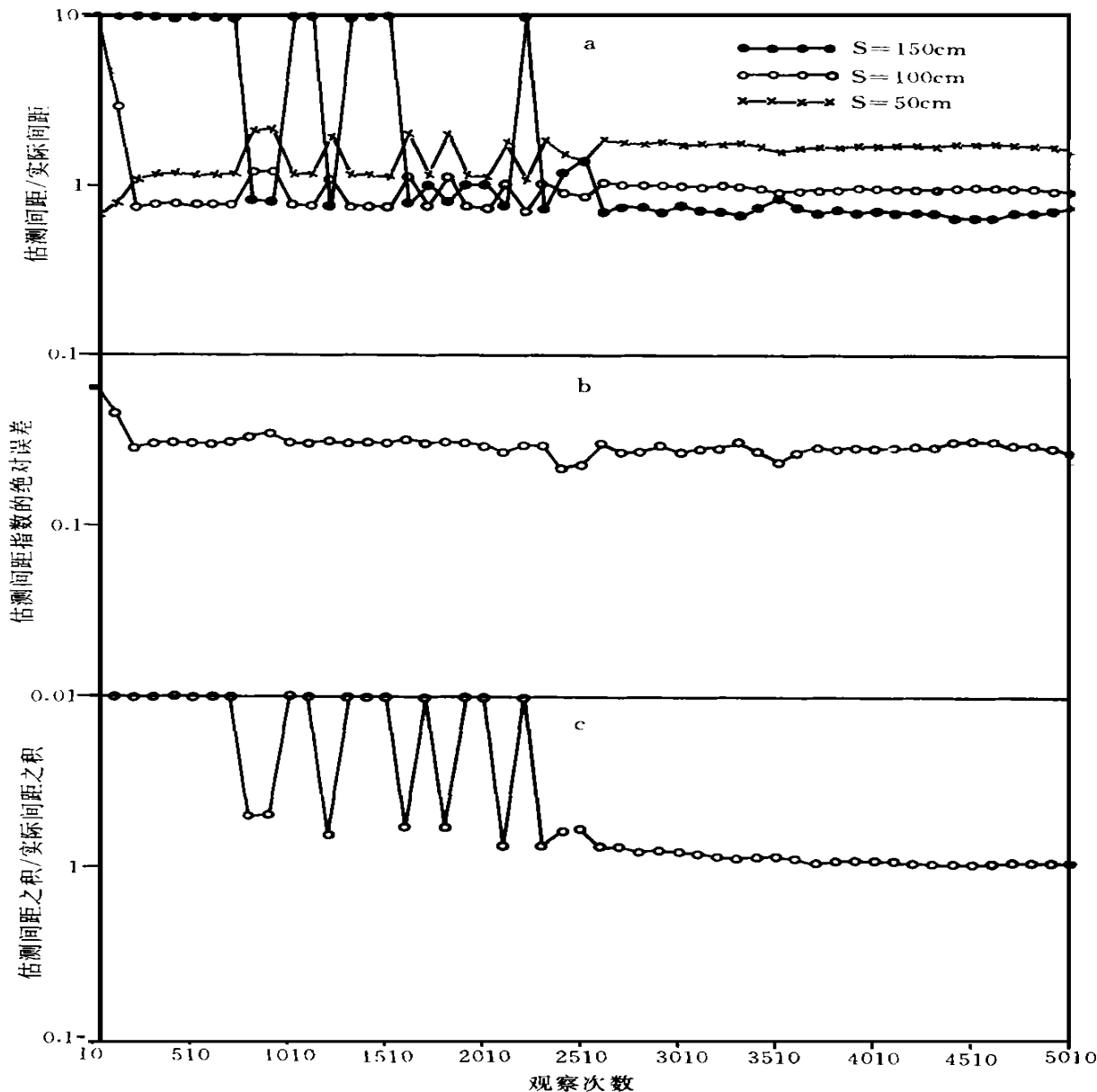


图5 实验4中不同观察次数的估测结果

a. 估测的裂缝间距与实际的裂缝间距之比, 大于10的比值一律记为10; b. 估测的裂缝间距指数的绝对误差; c. 估测的裂缝间距之积与实际的裂缝间距之积的比值, 大于10的值一律记为10

3 应用

应用的对象是处于鄂尔多斯地台东部的靖安油田南二区三叠系延长组储层。鄂尔多斯地台是由于

中生代以来构造—岩浆活化, 早古生代华北地台瓦解而残余下来的部分(陈国达等, 1977), 总体上为略向西倾的单斜构造。陕西省延庆县境内延河两岸很好地出露该储层, 主要发育着近东西向和近南北向两组系统性裂缝, 前者在绝大多数情形下限制后者,

反映出前者形成较早。根据有关资料, 河东中部寒武-二叠系地层里这两组正交裂缝系形成在印支-燕山期构造运动中(袁鼎等, 1986)。然而非常有意思的是, 河东中部黄土(第四纪风成)高原却发育着与北平行的网络状、梯状水系, 明显受同向的裂缝系作用, 一般认为地壳表面是一个自由界面, 地应力为零, 因此黄土中的正交裂缝系与地应力无关。由此看来区内近东西向和近南北向两组裂缝的形成不简单与构造运动有关, 还与其它因素相关。区内延长组六段沙岩露头上, 两组裂缝延伸长且稳, 几乎没有被充填, 将岩层分隔成棋盘状; 裂缝测量表明它们在 23~130cm 厚度范围内具有基本一致的裂缝间距指数, 为 0.80~1.91。

靖安油田南 2 区的裂缝测井资料反映出地下储层中发育着主导的近南北向和近东西向两组裂缝。通过详细观察 6 口取芯井以延长组六段为主, 累计长度达 200 多米的岩芯, 发现岩芯上的裂缝高度不超过 35cm, 厚度小于或等于 50cm 的砂岩层共有 72 层, 其中包含 1 条裂缝的有 2 层, 包含 2 条裂缝的有 2 层, 其余为不含裂缝的。表 1 是采用本文方法得到的裂缝间距估测结果, 假设 4 种不同裂缝组的情况。考虑到储层的地表观察和测井裂缝解释, 我们认为两组裂缝的假设比较切合实际, 估测的间距值分别是 71.9cm 和 50cm, 相应的裂缝间距指数为 1.44 和 1, 与露头的观测结果相符, 但是由于观察次数少, 上述的估测结果仅能做参考, 而裂缝岩块面积为 3595cm², 在没有其它证据下可做为实际的近似值。

表 1 靖安油田南二区三叠系延长组六段细砂岩
(厚度: 50cm) 的裂缝间距估测

裂缝组	估测的裂缝间距(cm)				Z_{\min}
	1	2	3	4	
1	15.6	-	-	-	0.2045
2	71.9	50	-	-	4.45E-002
3	62763.6	68	52.9	-	5.60E-002
4	9256.5	777.2	82.7	50.6	9.38E-002

4 讨论

应用本文方法预测地下多组裂缝间距时, 提高估测准确程度的关键在于获得具有代表性的观察裂缝出现概率 $P_o(k)$, 一般的做法是增加观察次数, 以便得到较为稳定的 $P_o(k)$ 值。岩芯观察中须注意岩性层与限制裂缝的力学层之间的异同, 两者的差异

对于岩性变化明显的地层并不显著, 但是对于岩性变化不明显的地层如陆相地层尤其突出。在陆相地层里岩性的变化经常是过渡的, 给直接划分力学层带来困难, 同时裂缝还可以穿透过一些岩性层, 不受层面限制。裂缝高度、裂缝纵向分布和岩性是岩芯上力学层划分的主要依据。只有力学层才是我们关心的对象, 其正确划分是岩芯裂缝观察的首要任务。

岩芯观察的另一注意事项是天然裂缝与诱发裂缝的区别。诱发裂缝是指在钻进、取芯和随后处理过程中形成的裂缝, 它与天然裂缝有着本质的不同, 在大多数情形下两者的表面特征足以彼此区分(Ku-lander BR et al, 1990)。诱发裂缝经常出现在岩芯上, 应注意识别。不加分析地将观察到的裂缝视为天然裂缝, 必然会导致估测结果失真。

此外, 由于系统性裂缝具有明显的方向性, 在方向分布上呈各向异性, 钻井的分布形式和范围会影响着观察裂缝出现概率的准确性。这种影响很容易被人们忽视, 下面以一组系统性裂缝的情形为例来说明。假设有一组 n 口井的井排, 每口井只有一次观察, 当井排方向与裂缝走向平行时, 各钻井遇到裂缝的情形只有两种: 要么全部有裂缝, 要么全部没有裂缝, 因而遇到裂缝的概率是 $(\frac{D}{S})^n$; 当井排方向不与裂缝走向平行时, 由二项式分布可知遇到裂缝的概率是 $\sum_{i=1}^n C_n^i (1-\frac{D}{S})^{n-i} (\frac{D}{S})^i$ 。显然前一种情形的裂缝出现概率要小于第二种情形的, 也就是说当存在第一种情形时几乎不可能获得裂缝出现概率的准确观察值。目前对一定取样范围内由已知裂缝密度计算出裂缝出现概率的研究已有开展(Santalo LA 1976; Andeison J et al, 1984), 但是其反问题——由观察的裂缝出现概率和取样范围来求取裂缝密度分布, 对利用岩芯资料准确估测地下裂缝间距是极其重要的, 却鲜见研究报道。

本文方法和其它的裂缝间距估测方法(Narr W et al, 1984; 1991; Aguilera R, 1988; 单业华等, 1991), 都基于裂缝等间距分布的假设, 适用于规则或较为规则的裂缝。野外观察和物理实验(Wu H et al, 1995)表明, 在裂缝成核、生长和连接过程中, 裂缝是由不规则分布向规则分布逐渐演化的, 当接近规则分布时, 裂缝生长达到“饱和”状态, 即继续增大应变并不形成新的裂缝或扩展先存的裂缝, 而是张开先存的裂缝。因此从裂缝演化上看, 裂缝规则分布意味着裂缝发育完全。对于自然界岩层中不完全发育的裂缝, 其间距估测目前还没有好的方法。

5 结论

本文提出一种利用岩芯资料估测地下多组系统性裂缝间距的最优化方法,该方法适用于发育完全或较为完全的裂缝系,其基本假设是各组裂缝中的裂缝平行、等距、与层面垂直且无限延长。与以往的一组裂缝间距估测方法相比,它无需对裂缝性岩石进行定向,就能直接估测出多组裂缝间距。裂缝间距之积的估测准确程度通常要比单纯的裂缝间距的高。然而,该方法的缺点是没有全部或部分考虑到裂缝走向资料,因此为了获得准确的估测,往往需要大量的岩芯观察次数。这一点可以由测井资料来弥补。在结合测井裂缝解释的基础上,利用本文方法就能获得有关裂缝形式如裂缝组系、方向、间距、裂缝岩块形态和大小等较为全面的信息。这些对裂缝性油气田的勘探设计、开发和完井策略至关重要(Lanbach SE, 1991)。

参 考 文 献

- 1 Narr W, Lerche L. A method for estimating subsurface fracture density in core. *AAPG Bull.* 1984, 68(8): 637~648
- 2 Narr W. Fracture density in the deep subsurface: techniques with application to Point Arguello Oil Field. *AAPG Bull.* 1991, 75(8): 1310~1323
- 3 Aguilera R. Determination of subsurface distance between vertical parallel natural fractures based on core data. *AAPG Bull.* 1988, 72(7): 845~851

- 4 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, 1991, 24(1): 73~76
- 5 Gross M R. The origin and spacing of cross joints: examples from the Monterey Formation, Santa Barbara Coastline, California, *J. Struct. Geol.* 1993, 15(6): 7373~751
- 6 Nelson R A. Geological analysis of naturally fractured reservoirs, Gulf Publishing Company, 柳广第等译. 北京: 石油工业出版社, 1985
- 7 陈宝林. 最优化理论与算法. 北京: 清华大学出版社, 1996: 535
- 8 陈国达、薛家谋等. 中国大地构造概要. 北京: 地震出版社, 1997: 112
- 9 袁鼎、单业华. 山西柳林鼻状构造的裂缝特征及煤层气开发的关系. 第二届全国煤层气学术讨论会. 煤工业部煤层气信息中心, 1996
- 10 Kulander B R Dean S L & Ward B J Jr. Fractured core analysis: interpretation, Logging, and use of natural and induced fractures in core, *AAPG Methods in Exploration Series.* 1990, (8): 87
- 11 Santalo I A. Integral geometry and geometric probability, Addison Warley, Reading Mass. 1976
- 12 Anderson J. Shapiro A M & Bear J. A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information, *Water Resources Res.*, 1984, 20(1): 79~88
- 13 Wu H & Pollard P D. An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness, *J. Struct. Geol.* 1995, 17(6): 887~905
- 14 Laubach S B Fracture patterns in low-permeability sandstone gas reservoir rocks in the Rocky Mountains regions. *SPE 21853* 1991: 501~508

(收稿日期: 1997年9月23日)

A PRINCIPLE TO ESTIMATE A FEW SETS OF SUBSURFACE SYSTEMATIC JOINT SPACINGS AND ITS APPLICATION

Shan Yehua

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

Li Zhian

(Changsha Institute of Geotectonics, Academia Sinica 410013)

Abstract

In this paper, an optimum method is suggested to estimate a few sets of subsurface systematic joint spacings. Instead of fractured-rock orientation, core data are used to estimate a few sets of joint spacings. In order to confirm the efficiency of this method, an ideal fracture model is set up. It is discovered that the product of joint spacings is estimated more accurately than joint spacings alone under the same times of observations. Finally, the method is applied in estimating a few sets of joint spacings of reservoir in the 6th member of Triassic Yanchang Formation at the southern 2nd region of Jingan oil field in the Ordos Platform.