

# 声波测井关联维评价潜山储层裂缝尺度

杨世明, 鲁新便, 安鸿伟

(成都理工大学, 四川成都 610059)

**摘要:** 潜山储层声波测井能够指示裂缝, 但基本不能描述裂缝尺度。通过对已知的潜山裂缝层段进行声波测井关联维分析, 进一步证实了潜山裂缝属于分形体系, 同时得出如下结论: ①声波测井关联维数大小指示了裂缝发育宽度与延展性; ②宽度中等裂缝(中尺度裂缝)与宽度宽且延伸长(大尺度裂缝)的裂缝不仅表现在声波测井关联维的差异上, 而且稳定相空间的维数及求取关联维数时的采样间隔也有区别; ③微裂缝(小尺度裂缝)声波测井关联维最小, 且关联维的大小对应于裂缝尺度大小。

**关键词:** 潜山; 关联维; 重建相空间; 裂缝尺度

中图分类号: TE122.2<sup>+</sup>3

文献标识码: A

## Evaluation of fracture scale of buried hill reservoirs with the associated dimension of sonic logs

Yang Shiming, Lu Xinbian, An Hongwei

(Chengdu University of Science and Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Sonic log of buried hill reservoirs is able to indicate the existence of fractures, but it is generally incapable of describing the fracture scale. The analysis of associated dimension of sonic logs performed at the fracture intervals of known buried hills confirms that fractures of buried hills belong to fractal system. In addition, three other conclusions are arrived. 1) The amount of associated dimension indicates fracture width and extension. 2) The difference between medium scale fractures (i.e. fractures with medium width) and large scale fractures (i.e. fractures with large width and extension) shows off in two ways. One is the associated dimension, the other is the dimension of stable phase space and sampling spacing used in calculation of the associated dimension. 3) Micro scale fractures (i.e. fractures with microfractures) have the least associated dimension of sonic log, and the amount of the associated dimension is proportional to fracture scale.

**Key words:** buried hill; associated dimension; reconstruction of phase space; fracture scale

裂缝是在应力作用下岩石未发生明显破裂的一种结构特征。前人研究表明, 天然裂缝系统是一个分形体系。地下构造的复杂性导致声波测井信号的不规则, 是一混沌的一维反射序列。非线性动力学的大量研究表明: 时间等一维序列包含着较为丰富的信息, 它蕴藏着参与动态作用的全部其他变量的痕迹。混沌运动的轨迹在相空间的某个区域内无穷次地折叠, 构成一个无穷层次的自相似结构——奇怪吸引子。那么, 如何利用信息有限的一维数据序列来尽可能地提取地层演化过程中众多的动力学信息呢? 最常用的办法就是对一维时间序列的维数进行扩充和延拓, 即所谓的重建相空间。对一个  $n$  维(含  $n$  个变量)的动力系统, 可用  $n$  个一阶微分方程加以描述<sup>[1]</sup>

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

通过消元变换为一个  $n$  阶非线性微分方程

$$x^n = f(x, x^1, x^2, \dots, x^{n-1}) \quad (2)$$

此时状态空间的坐标就由  $(x, x^1, x^2, \dots, x^{n-1})$  或  $(x^1, x^2, \dots, x^n)$  来代替。(2) 式描述了与(1) 式同样的动力学, 它在由坐标  $x(t)$  加上其  $(n-1)$  阶导数所张成的空间中演变, 因此, 这种代替并不损失该动力系统演化的任何信息。1981 年法国科学家 Ruelle 提出了用离散的时间序列  $x(t)$  和它的  $(n-1)$  时滞位移  $x(t+\tau), x(t+2\tau), \dots, x(t+(n-1)\tau)$  来代替(2) 式中的  $x(t)$  和它的导数, 其中  $\tau$  称为时滞参数。显然, 这种延拓运算类似于连续变量的微分。

收稿日期: 2002-01-04; 改回日期: 2002-06-05。

作者简介: 杨世明, 男, 1969 年生, 博士生, 现从事油气藏储层地质方面的研究工作。

据上述原理, 3种潜山裂缝地层声波测井曲线计算的关联维对应了3种不同的裂缝发育状态, 同时证明裂缝系统具有自相似结构, 存在稳定吸引子。

### 1 关联维计算原理

计算分数维  $D$ , 首先用一维数据序列建立相空间, 就可以从某一给定一维序列确定系统的分数维  $D$ 。设一维声波测井序列为

$$\begin{matrix}
 x(t_0) & & x(t_1) & & \dots \\
 x(t_0 + \tau) & & x(t_1 + \tau) & & \dots \\
 x(t_0 + 2\tau) & & x(t_1 + 2\tau) & & \dots \\
 x(t_0 + (m-1)\tau) & & x(t_1 + (m-1)\tau) & & \dots \\
 \\
 x(t_i) & \dots & x(t_n - (m-1)\tau) \\
 x(t_i + \tau) & \dots & x(t_n - (m-2)\tau) \\
 x(t_i + 2\tau) & \dots & x(t_n - (m-3)\tau) \\
 x(t_i + (m-1)\tau) & \dots & x(t_n)
 \end{matrix} \quad (3)$$

式中,  $\tau = k \Delta t (k = 1, 2, \dots)$ 。上式中的每一列构成  $m$  维相空间的一个相点, 任一相点  $x(t_i)$  有  $m$  个分量:  $x(t_i), x(t_i + \tau), x(t_i + 2\tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)$ 。上述  $[n - (m-1)\tau]$  个相点间的连线描述了  $m$  维相空间的演化轨迹。考察  $m$  维相空间中的一对相点

$$\begin{aligned}
 X_m(t_i) &= (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)) \\
 X_m(t_j) &= (x(t_j), x(t_j + \tau), \dots, x(t_j + (m-1)\tau))
 \end{aligned} \quad (4)$$

设它们之间的距离, 即欧氏模为  $r_{ij}(m)$ , 则

$$r_{ij}(m) = \|X_m(t_i) - X_m(t_j)\| \quad (5)$$

任给一标度  $r$ , 统计相空间中距离小于  $r$  的点对数目在所有点对中所占的比例为

$$C(m, n, r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N H(r - \|X_i - X_j\|) \quad (6)$$

式中,  $N$  为相点总数,  $N = n - (m-1)\tau$ ;  $H$  是 Heaviside 函数,  $H(x) = 0$ , 当  $x < 0$ ,  $H(x) = 1$ , 当  $x > 0$ 。

令  $D(m) = \left| \frac{\ln C(m, n, r)}{\ln r} \right|$ , 则  $D(m)$  就是关联维数。显然, 关联维数  $D(m)$  与所嵌入的相空间维数  $m$  有关。

在用一维数据序列重建相空间的过程中, 为了保证该重建相空间容纳该状态空间原来吸引子的拓扑特征, 那么嵌入相空间的维数  $n$  究竟取多大才合适呢? Whitney 在 1934 年提出, 后来 Takens

在 1980 年证明了嵌入空间维数大小的嵌入定理: 如果原来吸引子处在一个  $m$  维空间中(假定原动力系统的状态空间是一个  $d$  维流形), 那么其嵌入空间维数必须是  $m \geq 2d + 1$ 。只要满足上述条件, 则重构的动力系统与原动力系统是几何等价的<sup>[1]</sup>。因为状态空间的  $d$  (即吸引子维数) 实际上是未知的, 在实际操作过程中, 一般是采用试算的办法求  $m$  和  $d$ 。求关联维数的具体做法是<sup>[2]</sup>: 先给定一较小的  $m$ , 同时在一定范围变化  $\tau$  值, 根据所取的  $N$  个  $r$  值和与其对应的  $N$  个  $C(m, n, r)$  值, 作出  $(\ln C(m, n, r) - \ln r)$  曲线, 而其直线部分的斜率即为  $D(m)$ 。不断地提高嵌入维数  $m$ , 重复上述步骤, 直到  $m$  达到某一值  $m_c$  时, 相应的关联维数的估计值  $D(m)$  不再随  $m$  的增长发生有意义的变化(即保持在给定的误差范围内)为止, 此时所对应的  $m$  值被称为饱和嵌入维数(即  $m_c$ ), 所求得的吸引子维数才能真正代表状态空间维数, 且  $m$  为真正的嵌入空间维数。

### 2 3种尺度裂缝的关联维计算

研究的目的是就不同裂缝发育程度的井段寻求声波测井在重建相空间中的维数、关联维及在求取关联维时  $\tau$  值选择等规律。所用资料是辽河油田大民屯凹陷沈 625 井的潜山石英岩地层测井数据, 这口井进行了井周声波扫描(图 1, 图 3, 图 5 左半部)及微电阻率扫描测井(图 1, 图 3, 图 5 右半部), 不同井段裂缝张裂、延展程度比较清楚, 根据裂缝张裂程度可分为张裂宽度大纵向延展长(图 1)、张裂程度中等纵向延伸短(图 3)和微裂缝(图 5)3 种情况。3 种情况关联维计算分述如下。

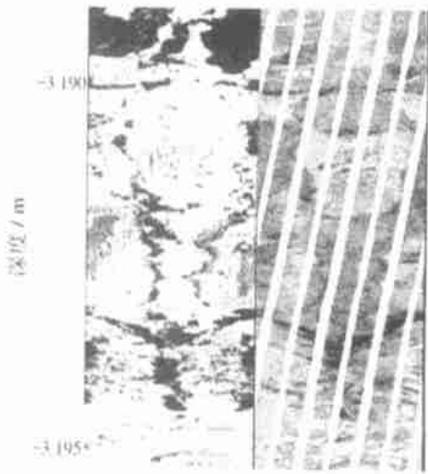


图 1 3 188~ 3 195 m 裂缝发育段

### 2.1 张裂宽度大、纵向延展长石英岩层段(图 1)的关联维计算

根据井周声波扫描及微电阻率扫描测井反映的裂缝情况提取声波测井数据并进行关联维计算。相空间维数在 4~ 8 之间变化, 针对每一个维数进行  $\tau$  值变化试算, 在维数  $m = 6$ ,  $\tau = 2$  时出现的直线段斜率不再随维数继续增大而发生有意义变化(图 2), 可以确定 6 维相空间可以描述该裂缝状态的分形结构, 关联维为 6.03。

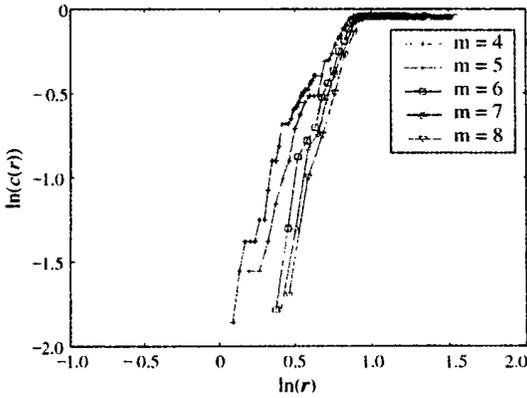


图 2 图 1 裂缝岩层  $\ln(c(r))$  与  $\ln(r)$  双对数曲线

### 2.2 张裂程度中等、纵向延伸短(图 3)的关联维计算

数据提取及计算如 2.1 所述。在维数  $m = 7$ ,  $\tau = 1$  时出现的直线段斜率不再随维数继续增大而发生变化(图 4), 因此 7 维相空间可以描述裂缝张开中等程度且纵向分布不均这一状况的分形结构, 关联维为 4.51。与 2.1 相比, 相空间维数  $m$  及采样间隔  $\tau$  都有变化。

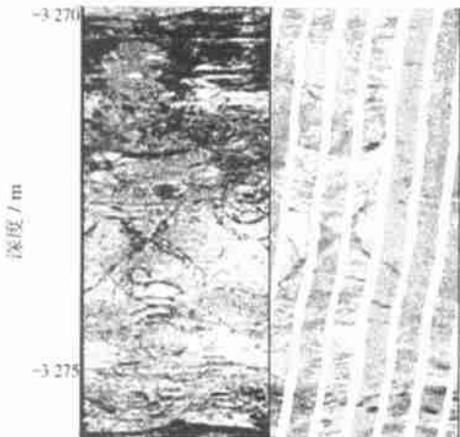


图 3 3 272~ 3 278 m 裂缝发育段

### 2.3 微裂缝(图 5)关联维计算

数据提取及计算如 2.1 所述。在维数  $m = 6$ ,  $\tau = 2$  时出现的直线段斜率不再随维数继续增大

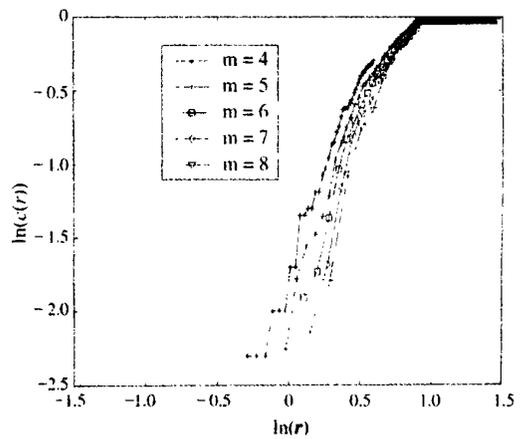


图 4 图 3 裂缝岩层  $\ln(c(r))$  与  $\ln(r)$  双对数曲线

而发生变化(图 6), 故 6 维相空间可以描述该裂缝纵向分布的分形结构, 关联维为 2.71。与 2.1 和 2.2 相比, 关联维数减小是一重要特征。

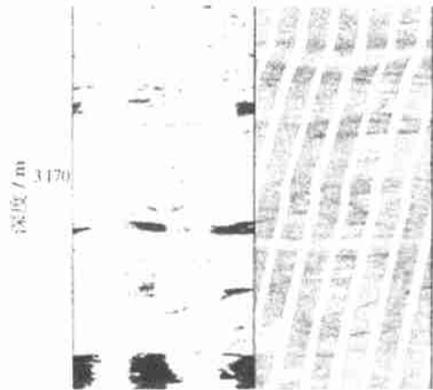


图 5 3 167~ 3 175 m 微裂缝岩层段

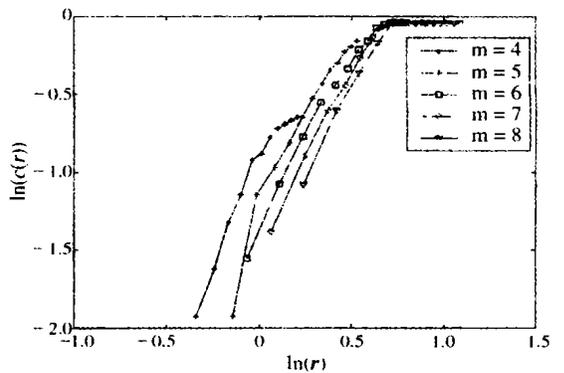


图 6 图 5 微裂缝岩层  $\ln(c(r))$  与  $\ln(r)$  双对数曲线

## 3 结束语

1) 以潜山裂缝状态已知, 对不同状态裂缝层段的关联维计算, 进一步证实潜山裂缝分布确实存在混沌状态的自相似分形结构, 关联维的大小可以

作为裂缝状态的指标。

2) 微裂缝与中等程度上裂缝的声波测井关联维数差异较大,即关联维高值代表裂缝发育,关联维低值代表裂缝不发育。微裂缝与张裂宽度大、纵向延展长裂缝在稳定(出现直线段时)相空间中的关联维数及重建相空间时采样间隔  $\tau$  具有一致性。

3) 张裂程度中等、纵向延伸短与张裂宽度大、纵向延展长裂缝在稳定相空间中的维数有区别,前

者  $m = 7$ , 后者  $m = 6$ , 且在出现稳定相空间时采样间隔不一样,前者  $\tau = 1$ , 后者  $\tau = 2$ , 这些都反映了前者地层结构的复杂程度。

### 参 考 文 献

- 1 黄润秋, 许强. 工程地质广义系统科学分析原理及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1997. 96~ 100
- 2 王天波, 董春旭. 用分形理论确定  $m$ 、 $n$  值的方法及其应用 [J]. 测井技术, 1998, 22(1): 16~ 20

## MCGM' 2003 第六届国际粉体检测与控制学术会议 征 文 通 知

第六届国际粉体检测与控制学术会议(MCGM' 2003) 将于 2003 年 8 月 20 日至 22 日在中国上海召开。本次会议由国际粉体检测与控制联合会(IFMCGM)发起, 中国颗粒学会、中国仪器仪表学会和中国计量学会合作发起, 东北大学、上海宝山钢铁股份有限公司联合承办。

### 一 征文范围

6 所有关于颗粒、块(状)、浆(液)等粉粒物料参数的测量, 包括温度、密度、压力、湿度、流量、含水量、粘性、膨胀度、位置、尺寸、重量、形状、分布等;

6 采矿和矿物工业中原料开采、粉碎、运输、筛分、浮选、精选等工艺的过程控制;

6 冶金工业中原料制备、火冶法、烧结等工艺的过程控制;

6 水泥及陶瓷工业中原料制备、焙烧、填料、烘干等工艺的过程控制;

6 煤炭制备中研磨、输送、流化床等工艺的过程控制;

6 石油、化工、医药、造纸、食品、纺织、水处理、粉尘处理等有关粉粒物料的过程控制;

6 工业过程成像技术及其应用;

6 其它有关粉体、颗粒、浆(液)材料的测量与控制的理论研究或实际应用题目。

### 二 征文要求

(1) 论文应具有较高学术或应用价值, 表达清晰, 未公开发表;(2) 提供 400 字左右的中英文摘要, 包括论文题目, 作者姓名, 单位, 主要标题, 指定联系作者和其完整的通信地址, 邮编, 电话, 传呼, 手机, E-mail 地址;(3) 受各类基金资助的论文, 请注明项目名称及编号;(4) 版权纠纷, 作者自负。

### 三 重要信息

本次会议论文集将被 **ISTIP** 收录。

会议相关信息和进一步要求, 请浏览《沈阳测控信息网》, 网址: [www. syias. org. cn](http://www.syias.org.cn)。

### 四 重要日期

论文摘要提交截止日期: 2003 年 3 月 15 日。论文录用通知发出日期: 2003 年 4 月 15 日。论文全文提交截止日期: 2003 年 5 月 15 日。

### 五 投稿地址

沈阳市铁西区南十三路 1 号 29 信箱(邮编 110023) 沈阳市仪器仪表与自动化学会 贾冬娜收。电话: 024-25415320, 25691417 传真: 024-25415320 电子信箱: [webmaster@syias.org.cn](mailto:webmaster@syias.org.cn); [webmaster@meeting.org.cn](mailto:webmaster@meeting.org.cn)。

国际粉体检测与控制联合会  
2002 年 9 月 20 日