

储层孔隙结构分形分析计算机实现*

钟宝荣 王泽中 李龙滢 陈恭洋

(江汉石油学院勘探开发研究所, 湖北荆沙 434102)

分形技术是一种研究储层孔隙结构的新方法, 其计算机实现步骤包括: (1) 制作 SEM 图片; (2) SEM 图片数字化; (3) 统计特征体; (4) 拟合特征体的概率与计算分形孔隙度。此文阐述了在计算机上实现上述各步骤的原理和技术过程, 开发了相应的软件, 并在实用中取得了较好的效果。

关键词 特征体 分形孔隙 储层 孔隙结构

第一作者简介 钟宝荣 男 32岁 讲师(硕士) 计算机软件 数学地质

1 引言

与常用的粒径、颗粒形状的几何测量方法不一样, 自动分形表面技术着重于岩石孔隙界面的复杂度分析, 它通过对具有分形特征的扫描电镜图像的结构特征的统计测量, 从而达到研究储层孔隙结构的目的。

砂岩的孔隙结构具有分形特征, 其分形维数是孔隙结构的一个极为重要的评价参数, 其它许多参数都依赖于分形维数 $D^{[1]}$ 。到目前为止, 这方面所做的工作主要集中在以下几方面: (1) 国外目前已对 SEM 图片采用自动化测量, 并建立了一个在一定范围内反映孔隙结构的数学模型^[1]; (2) 国内近年也开始了分形技术的研究, 并企图在石油勘探领域应用这些最新技术^[2]。在储层特性分析的新方法研究中, 我们也采用了用电镜图片分形统计技术来进一步开展砂岩的孔隙结构研究, 希望通过新的手段从新的角度来重新认识与评价砂岩的微观结构, 及其对油气的储、运、采的影响。

2 孔隙分形分析原理

2.1 分形的概念

自然界中大量与经典问题大不相同的现象促使了分形的产生^[3,4]。一个分形集合, 若对其进行定量讨论^[3], 则有:

$$N_n = C/r_n^D \quad (1)$$

式中, N_n 是特征线度 (特征体) 为 r_n 的物体的数目; C 为比例常数; D 为分形维数。

分形维数可能是整数, 这时与欧氏空间的维数相等价, 如在欧氏空间中, 点的维数为 0 维, 线段的维数

* 本文为中国石油天然气总公司资助项目

收稿日期: 1995-06-19 改回日期: 1995-07-18

为1, 正方形维数为2, 而立方体维数为3, 但一般而言, 分形维数不一定是整数, 而是分形, 这就是分数维(分形)的由来。

由式(1), 可以改写 D 的表达式:

$$D = \frac{\ln(N^{n+1}/N_n)}{\ln(\gamma_n/\gamma_{n+1})} \quad (2)$$

具有分形特征的物体, 在一定的尺度内其变量都有部分相关或相似性, 即自相似性。所谓自相似性是指将分形结构体分成更小的区域, 这一小区域放大后与原来的分形结构形状几乎一样。经研究表明很多岩石的孔隙结构具有分形的特征。

2.2 孔隙分形的基本原理

通过对砂岩断面扫描电镜图片的观察, 可以看到孔隙表面存在许多的凹凸与大小褶皱, 它是一种分形结构。孔隙体积的分形维数与孔隙表面的维数相同^[1], 所以我们采用的 SEM 图片上的孔隙结构分形就是测定孔隙表面的分形维数。孔隙表面是指颗粒与孔隙空间的界面, 维数介于2与3之间, 它能反映孔隙结构的复杂性。

SEM 图片是由一条一条的扫描线组成, 而每条扫描线均是 SEM 射线与砂岩孔隙表面的一维交线。这些交线由一段一段大小不等的弦长组成, 每段弦均代表一个小孔隙的线度, 这些长度不等的弦长我们称之为特征体, 这些特征体按尺度的分布具有分形性质, 其分形维数与孔隙内的分形维数有内存的关系。

由前述已知的分形体的基本特征: 分形结构的特征体在一定尺度范围内存在且服从幂律分布:

$$dN(l)/dl \propto l^{-p} \quad (3)$$

其中: l 为特征体尺度; p 为分形维数; $dN(l)$ 为 dl 范围内尺度为 l 的特征体数目; $dN(l)/dl$ 为单位长度内长度为 l 的特征体的数目。

分形几何学的余弦定理^[5]: 集合 I 为集合 A 与 B 的交集, 即 $I = A \cap B$, 且 C 为 A 与 B 的共同空间, 则集合 I 的分形维数由下式给定:

$$D_I = D_A + D_B - D_C \quad (4)$$

在这里: SEM 图片为砂岩孔隙空间(维数为 D) 与 SEM 射线(维数为1)的交集, 而孔隙空间与 SEM 射线共同的空间为现实世界(维数为3), 因此分形孔隙的分形维数为:

$$P = D + 1 - 3 = D - 2$$

若取单位长度为1 cm, 则式(3)可写成:

$$N(L) = AL^{2-D} \quad (5)$$

式中: A 为比例常数; $N(L)$ 为 SEM 图中每厘米上尺度为 L 的特征体数目。

设数字化采集 SEM 图片时, 取相同的采样分辨率以及相等的窗口大小(视域), 并设定窗口图像宽为 W_i 个像素, 高为 H_i 像素, 而窗口实际宽度为 W (cm), 其中图片的放大倍数为 M , 则式(5)改写成:

$$N(L)/\text{cm} = A(LW/W_i M)^{2-D} \quad (6)$$

式中: L 的单位为像素。

设尺度为 L 的特征总数为 $n(L)$, 其有效测量距离为 $R(L)$, 则有:

$$n(L)/R(L) = N(L) \quad (7)$$

若对一幅图片逐行统计特征体后得到的分布直方图为 $n(L)$, 其中 $l=1, 2, 3, \dots$, 则有效统计长度为:

$$R(L) = \frac{W}{W_i M} \left[W_i H_i - \sum_{k=1}^{L-1} kn(K) \right] \quad (8)$$

最后得到:

$$n(L)/R(L) = A \left[\frac{LW}{W_i M} \right]^{2-D} \quad (9)$$

由该式可以求出分形维数。

分形的幂律是在一定的尺度范围内存在的,通过对不同放大倍数的图片作上述分析统计后,对所得的结果进行分析可以确定出尺度范围的上极限值 L_2 与下极限值 L_1 ,通过下式计算孔隙结构的分形孔隙度。

$$\Phi_i = \left[\frac{L_1}{L_2} \right]^{3-D} \quad (10)$$

分形维数、分形孔隙度以及分形孔隙占孔隙的比例,是储层分形孔隙研究极重要的三个参数。

3 孔隙分形处理方法

孔隙分形分析与处理方法的过程如图1所示(图1)。

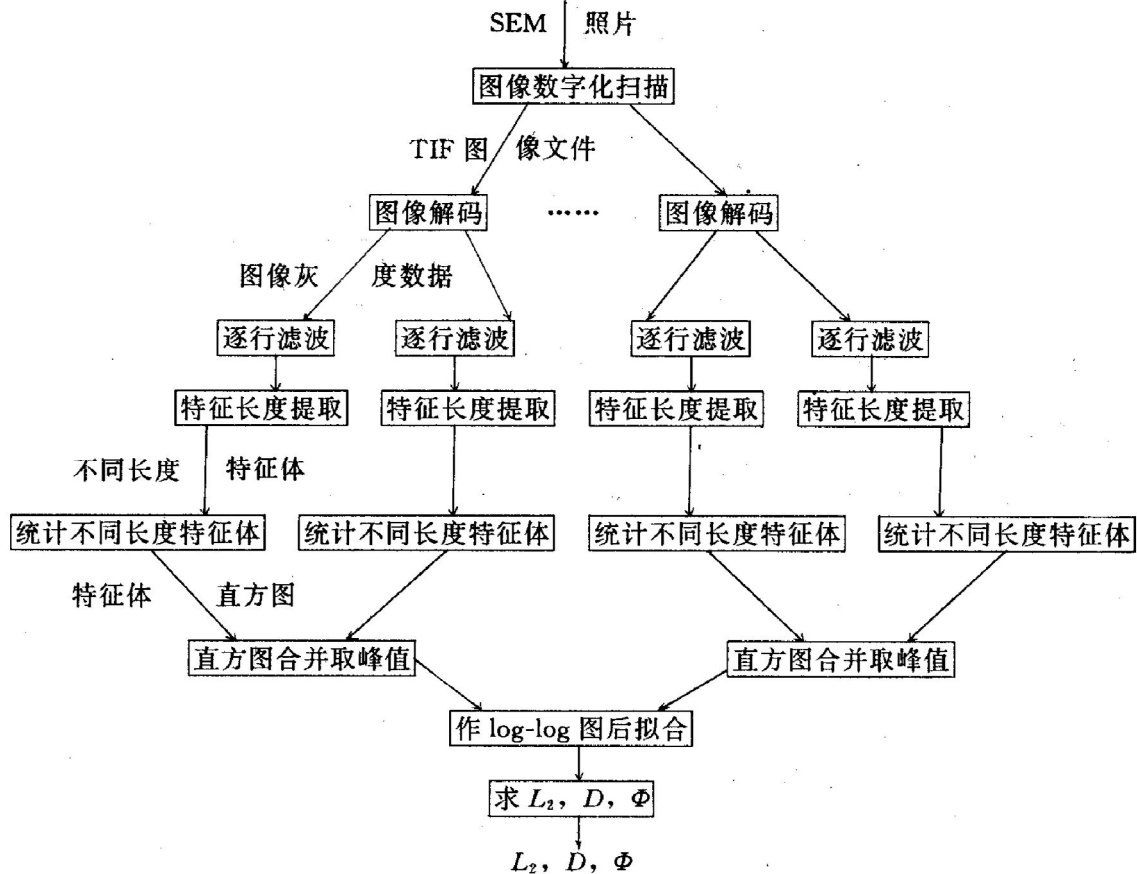


图1 孔隙分形分析的流程图

3.1 制作砂岩断面的 SEM 图片

根据需要取样后,将待测样打碎,取2cm×2cm的新鲜断面,处理后在SEM电镜下摄像,不过在放大过程中要取断面的一个典型视域。照相时要对同一个位置取几十倍到几千倍不同倍数的照片15~20幅,而且各数量级适当选取,使其具有连续性、代表性。

3.2 图片数字化

对上述每张图片用高分辨率的扫描仪扫描输入到计算机,扫描时采用高分辨率256级的灰度成像方式,采集时的扫描窗口固定大小,采集图像数据以灰度文件保存,以待处理。

3.3 特征体统计

处理前先对图像文件进行解码,转成一行一行的灰度数据,但由于成像采集与传输过程含有噪声,在统

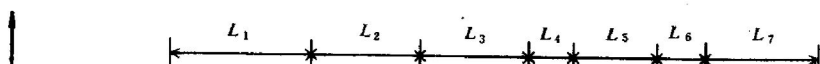
计前还需对每行数据进行滤波以消除噪声,滤波可采用加权窗口平滑波法

设某行数据为 $d(i)$, $1 \leq i \leq W_i$, 则有:

$$d'(j) = 0.36d(j) + 0.24[d(j+1) + d(j-1)] + 0.08[d(j+2) + d(j-2)] \quad (11)$$

其中: $j \in [3, W_i - 2]$

特征体边缘在 SEM 图像的灰度变化较大(图 2),特征体就是相邻两个极大处之间的距离。由于地质因素,还要设置一个阈值以克服起伏与噪声,但阈值选取应适当,太大可能漏失统计特征体,太小则达不到期望



对一个样品的 20 余幅图片可以有 20 余个分布图,分别取每个所对应的分布图上极大值处的 L 与

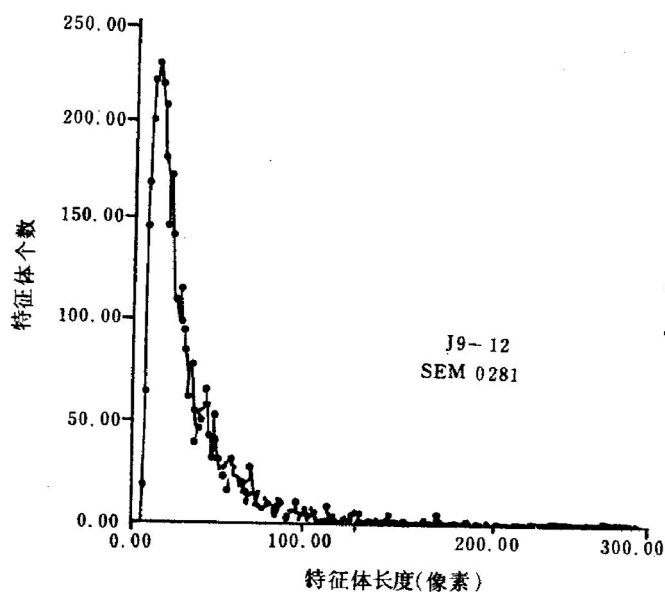


图3 特征长度的分布图

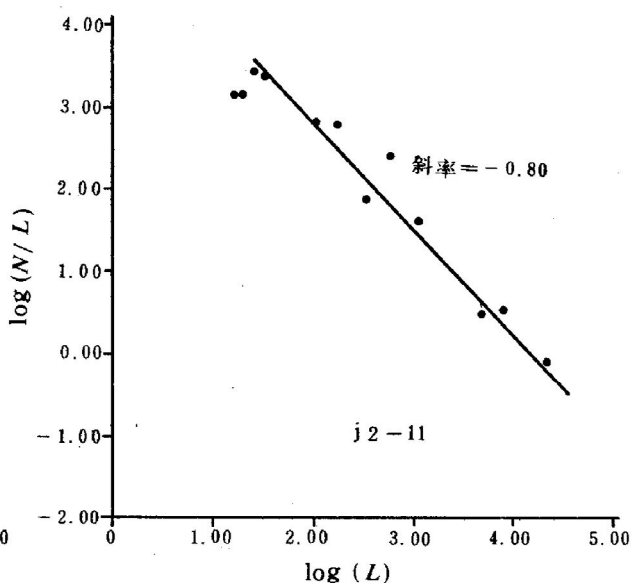


图4 某样品的 L 与 $N(L)$ 双对数图

$N(L)$, 由式(9)可以拟合得到 L_2 , A 与 D 。这里采用最小二乘法,但先对式(9)两边取对数,从而转化成线性关系,这样较方便。确定特征体的分布是否服从幂率分布的最简单方法是作单位长度上的统计特征体数目与特征体尺度的双对数图。

双对数图是测定的概率分布图的峰值有关 $n(L)$ 与 L 同时取对数而得,把在不同放大倍数的 L 与 $N(L)$ 的对数点对投在一张图上后,结果有关 L 与 $N(L)$ 的 $\log\text{-}\log$ 图(图4)每个样品一幅,由此,可以求得拟合直线的斜率,以及上下截止长度。

3.5 分形维数及分形孔隙度计算

由图4得到了每个样品的 $\log(N/L) - \log(L)$ 的双对数图的拟合直线的斜率 d 和上下截止长度 L_1 与 L_2 。由下述两式可以求出分形维数 D 与分形孔隙度 Φ_f 。

$$D = 2 - d \quad (12)$$

$$\Phi_f = \left[\frac{L_1}{L_2} \right]^{3-D}$$

一般地 $\Phi_f < \Phi$, 由样品的几何孔隙 Φ 与分形孔隙 Φ_f , 我们还可以求得分形孔隙的百分比。

4 结论

研究表明, 分形维数 D 的增加值正比于 L_2 的增加值; 分形维数 D 正比于岩石孔隙的复杂程度; 分形维数 D 高, 其岩石孔隙表面充填的三维空间的分形范围更大; 比例常数 A 与分形维数相关性不好。 Φ_f 及 Φ_f/Φ 反映岩石孔隙空间的复杂程度及岩石的复杂程度。

对孔隙分形的特征的研究, 使人们在认识储层微观特征方面推进了一步。储层的优劣不仅取决于孔隙度的大小, 也取决于孔隙的复杂程度。定量描述孔隙复杂程度的参数是孔隙的分形维数 D 或分形孔隙度 Φ_f 。很容易理解, Φ_f 大的储层, 其中的流体通过能力必然很差, 导致残余油饱和度的增加或油田采收率的下降。这点对于评价储层, 改造储层方面有特别重要的意义。

本技术在几个油田中进行应用, 得到了肯定与好评。另外, 我们在研究本技术的同时开发的一套软件, 在我们所完成的若干油藏项目中得到了应用, 也取得了较好效果。

参 考 文 献

- 1 Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores; implications for conductivity and pore formation. *Physical Review Letter*, 1985, 54 (12): 1325
- 2 王域辉, 廖淑华. 分形与石油. 北京: 石油工业出版社, 1994. 123~254
- 3 Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. New York: Freeman, 1982
- 4 Feder J. Fractals. New York: Plenum Press, 1988
- 5 Falcouer K. 分形几何——数学基础及其应用. 曾文曲等译. 吉林: 东北大学出版社, 1992. 141~152
- 6 高安秀树 (日). 分数维. 沈步明, 常子文译. 北京: 地质出版社, 1989. 14~25

FRACTAL ANALYSIS OF RESERVOIR PORE TEXTURE ACCOMPLISHED BY COMPUTER

Zhong Baorong Wang Zezhong Li Longyan Chen Gongyang

(Jiangnan Petroleum Institute, Jingsha, Hubei)

Abstract

Fractal technique is a new method of studying reservoir pore texture. The process includes: 1. making of SEM images; 2. digitizing SEM images; 3. counting geometrical features as a function of feature size; 4. fitting the distribution probability of the feature and calculating fractal porosity. The principle and detailed technical process of the analysis are discussed in this paper, and the relative computer program is also developed. The result of practical use has been proved to be satisfactory.