

沉积岩中的分形及其在石油勘探和开发中的应用*

田巨平 姚凯伦

(华中理工大学物理系, 武汉 430074)

摘要 介绍了沉积岩的分形性质, 简述了沉积岩中的分形在石油勘探和开发中的应用.

关键词 沉积岩, 分形, 数据压缩, 粘滞指进

Abstract Fractal characteristics of sedimentary rock are introduced in this paper. Application of the fractal theory in petroleum industry are brief described.

Key words sedimentary rock, fractal, data compression, viscous fingering

沉积岩是一种多孔介质, 它是由许多矿物沉渣、粘土和沙岩历经百万年的风化、腐蚀、压实、沉积和成核生长而成的多连通的孔隙网络. 这些孔隙网络空间既是油气的运输通道, 又是油气的储存空间. 因而, 研究沉积岩孔隙的结构、特征及其中的流体输运性质, 对石油工业具有非常重要的意义. 但由于沉积岩结构的复杂性, 使得人们建立的模拟沉积岩结构的许多模型(如毛细管模型、颗粒模型和瑞士奶酪模型等)只能简单地描述其某些特征. 近十余年来, 人们通过对沉积岩的微结构的研究, 发现至少有三种方法可以确定沉积岩的分维特性, 即分子吸附法^[1]、显微图像数据成像技术^[2]和小角散射法^[3]. 这些实验结果表明, 绝大多数砂岩都具有分形孔隙空间, 其标度区间一般在零点几到几十个纳米量级, 分维 D 一般介于 2 和 3 之间. 现在, 人们已测出了一些岩石的分维, 如石英($D=1.89$)、片麻岩($D=2.13$)、花岗岩($D=2.22$)和玄武岩($D=2.56$)等. 由于分形研究的兴起和活跃, 使得物理学家、地球物理学家和石油工程方面的专家们将分形理论和方法应用于石油工业研究中, 取得了可喜的成效. 下面将分形理论和方法在石油工业中的两个主要应用作一简要介绍.

1 地震数据的压缩和恢复

地震曲线是有限个地震子波干涉叠加、组

合而成的具有疏密分布、波动起伏的十分复杂的曲线. 对地震记录的研究表明, 地层反射系数的功率谱服从负幂律关系, 具有分形特征. 而地震序列可视为大量滤波后的混沌时间序列, 混沌运动的轨迹在相空间某区域内无穷次折叠、从而构成一个无限自仿射结构——奇异吸引子. 奇异吸引子是分形集, 许多地质特征就蕴含在其中. 奇异吸引子的分维可用重建相空间法——GP 算法获得. 地震曲线是分形曲线, 其维数可由容量维的定义

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)} \quad (1)$$

求得. 但由于实际问题中的空间尺度的有限性, ϵ 趋于零是不可能达到的. 实际的作法是, 在地震道所在的平面上, 选取适当的方格子覆盖地震曲线. 设方格边长为 ϵ , 与地震道相交的格子数为 $N(\epsilon)$. 再将格子分细, 如取为 $\epsilon/2$, 计算 $N(\epsilon/2)$. 如此下去, 可得一组坐标点: $[\ln \epsilon, \ln N(\epsilon)]$, $[\ln(\epsilon/2), \ln N(\epsilon/2)]$, ... 这些双对数坐标点形成的近似曲线的斜率 D 的数值大小即为地震道计盒维数. 求 D 的常用方法为最小二乘法或作图近似法. 计算表明, D 约为 1.4. 由于地震数据的数据量通常是非常大的, 使得单凭磁盘或磁带存储数据十分困难. 如果只存储少量的数据, 且又能通过这些少量数据准确

* 1995 年 4 月 10 日收到初稿, 1995 年 8 月 23 日收到修改稿.

地恢复出原来的数据,则称之为数据的压缩与恢复.基于地震数据的分形特征,应用分形方法可以迅速准确地对地震数据进行压缩和恢复.判断一个集合是否为分形集称为解分形的正问题;而将各种方法产生所需要的分形集称为解分形的反问题.解分形反问题的方法有叠代函数系法和统计模拟法等,我们这里介绍用分形数学压缩数据的方法.

一般地震数据集 $s = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ 是分段自相似的^[4],假如它可以分为 m 段,每段为 S_i ,则地震记录 $S = \bigcup_{i=1}^m S_i$. 由于每段自相似,可找出一个共同的对比段 S_δ ,故

$$S = \bigcup_{i=1}^m a_i r_i S_\delta, \quad (2)$$

其中 $a_i = \pm 1$, r_i 是相似因子, $r_i = \max_i / \max_\delta$, \max_i 为第 i 段的极大值.这样,全体数据只存储一个对比段,每段只有一个符号值和相似因子,就达到了压缩数据的目的.数据压缩好坏的指标有三:(1)数据压缩比 $R = M/N$ (其中 N 为数据总数, M 为压缩后存储的数据个数);(2)经压缩后恢复出原数据的符合度;(3)恢复原来数据所耗机时.计算表明,对自相似段为 5 或 6 的采样点,其压缩比为

$$R = \frac{2 \left(\frac{m}{nd} - 1 \right) + nd}{m}, \quad (3)$$

这里, m 为每道划分的段数, nd 为每段的样点个数.由(3)式可知,若 $nd = 6$, $m = 1000$,则压缩比 $R = 33.7\%$.即只需 337 个数据就可以表征 1000 个数据的信息,其数据压缩量约为 $2/3$.利用(3)式进行地震数据的压缩,其一般步骤大致为:(1)对地震道进行编辑,求得其分维;(2)根据(1)式求度量尺度,并确定度量尺度范围内采样点的个数;(3)由(2)式进行数据压缩,即得压缩后的数据;(4)重建或恢复原始记录.

陈志文对我国某地区具有原始数据为 152014 个的 CDP 叠加剖面进行了数据压缩^[5],其压缩后的数据仅为 51827 个,而数据压缩后的叠加剖面几乎与原始叠加剖面完全一

致,且所耗 CPU 机时甚少.应用分形理论进行数据压缩,数据压缩量大,方法简单,准确快捷,具有较高的经济价值和实用效果.该法能适用于叠前与叠后剖面,且与地下介质分布情况无关.

2 粘滞指进与采油

注水或注气采油是提高采收率的一项重要措施,因为油田经过一次、二次采油后,采收率往往不到原有储量的 $1/2$,故需要注水或注气将储层中的原油驱赶至采油井中.理想情况当然是要充分驱尽储层中的原油,即驱赶流体(如水)与被驱赶流体(如原油)间的界面平整.但是,当粘滞性较小的流体驱替粘滞性较大的流体的时候,两流体间的界面是不稳定的,粘滞性较小的流体呈树枝状侵入粘滞性较大的流体中,这种现象称为粘滞指进.在注水采油过程中,常采用五点布井法,即在一个几乎为正方的地域,其四个顶点各有一个生产井,中心则为注水井.注水井的作用是驱替原油至生产井中,但由于粘滞指进存在,不仅使储层中大量的石油无法采出,而且又使采出的石油含有一定量的水,降低了采收率.更为严重的情况是,当水的指进与生产井之间发生破裂时,开采出来的几乎全是水.因此,关于粘滞指进现象的研究具有重要的意义.由于油水是不混容的,因而在驱替过程中油水界面存在表面张力 γ ,这将导致两个重要的效应^[6]:第一,在极短的长度范围抑制分枝状结构.该效应在 d 维空间中产生线度为 l 的隆起,消耗表面能为 γl^{d-1} ,而节省体积能为 $\Delta P l^d$,这里 ΔP 为系统的压降.因此,隆起尺寸必须大于 $l_c = \gamma / \Delta P$,这里 l_c 称为毛细长度,它决定指进宽度的最小值.第二,在细小的油水弯月面上产生毛细力.对收缩管和颗粒压实模型,略去空隙表面的分形性质,则弯月面的周长由颗粒尺寸 l_g 标度,而弯月面的面积由 l_c^2 标度,这里 l_c 为特征咽喉尺寸.因而界面压力 $\Delta P \propto \gamma l_g / l_c^2$,粘滞压降 $\Delta P_{vis} \propto l_g \Delta P$.于是粘滞压降

和界面压力的比率 R_{γ} 近似为 $(\gamma l_g/l_i^2)/l_g \Delta P = \gamma/l_i^2$. 由 Darcy 定律, $\Delta P = \eta v/k$ (这里, η, k 和 v 分别为流体的粘滞系数、渗透率和平均流速). 若定义 $k' = k/l_i^2$, 毛细数 $N_{ca} = \eta v/\gamma$, 则 R_{γ} 近似为 k'/N_{ca} . 在地下岩石中, $k' < 10^{-3}$, 油藏中的典型流速 v 大约为 $4 \mu\text{m/s}$, 故 $N_{ca} < 10^{-6}$, $R_{\gamma} > 10^3$, 因而粘滞压力在其长度小于由 $l_g R_{\gamma}$ 指定的特征长度范围内可忽略, 该特征长度决定了毛细和粘滞效率两者的转变长度, 其大小约为 1m . 可见粘滞效应是一种大尺度的油藏现象.

粘滞指进源于流体驱替过程中的动力学不稳定性, 尽管描述该现象的基本方程是关于压力场的拉普拉斯方程, 但边界条件异常复杂, 故使得用传统的解析描述方法遇到了极大的困难. 研究表明, 驱替流体的前沿是一种分形结构, 因而运用分形几何研究粘滞指进是很自然的. 过去常用 Hele-Shaw 装置研究粘滞指进, 但它与实际的多孔介质中的粘滞指进存在较大的差异, 甚至有明显的不同^[7]. 在多孔介质中, 流体是在相互独立、无序的吼喉中发生的, 其平均流动应加上一个绝对不能忽略的噪声项, 而在 Hele-Shaw 装置中无法反映. 有人在填料床中研究了混溶流体的粘滞指进现象, 所得的指进模式与 DLA 图形类似.

在计算机模拟粘滞指进现象中有许多模型, 如 DLA 模型、DBM 模型、二行走模型、梯度支配生长模型、随机模型和决定论模型等^[6]. 在决定论模型中, 视多孔介质为孔隙相互连通的网路, 这些连通键的通道被假设成具有非常数半径的圆柱体管道. 在相邻孔隙 i 与 j 之间的压力降为^[8]

$$p_i - p_j = \frac{8[\eta_1 x_{ij} + \eta_2(l_{ij} - x_{ij})]q_{ij}}{\pi R_{ij}^4} = \frac{q_{ij}}{g_{ij}}, \quad (4)$$

其中, l_{ij}, R_{ij}, x_{ij} 和 q_{ij} 分别为孔隙 i 与 j 之间的吼管长度、半径、驱替流体所占管子的长度和流速, η_1 和 η_2 分别为驱替与被驱替流体的粘滞系数, g_{ij} 为流体孔隙无储存效应, 即意味着每一节点的流体通量守恒, 即 $\sum_j q_{ij} = 0$. 压力场可以通

过超松弛算法(Gauss-Seidel 叠代)得到

$$P_i^{n+1} = \frac{\alpha \sum_j g_{ij} P_j^n}{\sum_j g_{ij}} + (1 - \alpha) P_i^n, \quad (5)$$

这里, α 为超松弛参数, 通常 $\alpha = 1.7$. 于是就可以逐步计算出每相邻孔隙间的流体通量. Yu 和 Yao^[9,10] 对自相似多孔介质中的逾渗与输运特性作了研究. 由于压力场是拉普拉斯场, 因而分层聚集模型对多孔介质中的压力特性研究也有一定的意义. 尽管 Martin Blunt 和 Peter King 建立了一个较接近实际的多孔介质中的分形与渗流模型^[11], 但真正具有实际意义的模型应该是: 格点(孔隙)的位置和大小、吼管的半径等按一定规律随机分布, 且每一格点上的键数亦在某一区间随机分布, 这是一个具有挑战性的工作.

在搞清了粘滞指进的分形特征后, 就可以将其应用于油田中去. 有两个非常有用的应用领域, 驱扫效率(sweep efficiencies)和导通时间(breakthrough times). 若注水持续时间为 t_{inj} , 回转半径为 $R(t_{inj})$, 则可以证明^[12] 驱扫面积 $A(t_{inj}) \propto [R(t_{inj})]^D$, 而驱扫效率定义为 $E_A = A(t_{inj})/\pi R^2$. 注水导通时间是回转半径达到出口处 R_b 时的注水持续时间 $(t_{inj})_b = C_{eff} R_b^D$, 这里 C_{eff} 是一个比例常数.

分形在石油勘探和开发中还有许多应用, 诸如对断层的分析^[13], 地震解释中的油气预测和裂缝发育带预测, 划分沉积和沉积相, 水力压裂裂缝的描述^[14], 储积层的非均匀性描述^[15], 裂缝油藏描述^[16], 重正化群方法^[17] 和分形地质统计学^[18] 等.

参 考 文 献

- [1] D. Avnir, D. Farin and P. Pfeifer, *Nature*, **308**(1984), 261.
- [2] A. J. Katz and A. H. Thompson, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 1235.
- [3] P. Z. Wong, *phys. Rev. B*, **37**(1988), 7751.
- [4] 王嘉松, 南京大学学报(地球科学), **5**(1993), 215.
- [5] 陈志文, 石油物探, **31**(1992), 1.

- [6] P. Z. Wong, *Physics today*, **41-12**(1988), 24.
- [7] Mahammad Sahimmi, *Rev. Mod. Phys.* **65**(1993), 1398.
- [8] Matin Blunt and Peter King, *Phys. Rev. A*, **37**(1988), 3935.
- [9] B. M. Yu and K. L. Yao, *Phys. Rev. A*, **44**(1991), 3664.
- [10] B. M. Yu and K. L. Yao, *Phys. Rev. A*, **41**(1990), 5564.
- [11] Matin Blunt and Peter King, *Phys. Rev. A*, **42**(1990), 4787.
- [12] J. R. Fanchi and R. L. Chisfiansen, Society of Petroleum Engineers, 19782, (1989), 105.
- [13] D. C. A. Aviles, *J. Geophys. Res.* **92**(1987), 331.
- [14] M. Thiercelin, R. G. Jeffrey and Ben Naceur, Society of Petroleum Engineers, 16431, (1987), 441.
- [15] T. A. Hewett, Society of Petroleum Engineers, 15386, (1986), 1.
- [16] Jincai Chang and Yanis C. Yortsos, *SPE Formation Evaluation*, **5**(1990), 31.
- [17] D. L. Turcotte, *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge University Press, (1992).
- [18] A. S. Emanuel, G. K. Alameda and R. A. Behrens et al., *SPE Reservoir Engineering*, **4**(1989), 311.

X 射线像增强器及其应用*

杨晓文

(厦门大学新技术研究所, 厦门 361005)

余永正

(上海华科电子显像公司, 上海 201800)

摘要 综述了 X 射线像增强器的结构、工作原理和性能, 简要介绍了它的可能的应用。

关键词 光电成像技术, X 射线探测器, X 射线像增强器

广义地讲, 图像增强器是一种对入射光子或带能粒子像敏感的通过转换、增强输出有更高亮度的可见光像的器件。X 射线像增强器则是对 X 射线(能量 10—100keV)敏感的图像增强器。它将入射的低强度 X 射线像转换并增强为较高亮度的可见光像输出。在空间天文学、物理学、医学和工业等领域, 或是要求探测强度极低的 X 射线图像, 或是要求观测低强度 X 射线图像的细部, 都要求采用能使图像亮度增强而又有一定空间和时间分辨率的器件, X 射线像增强器无疑是极有用的观测工具。自 50 年代研制成功 X 射线像增强器以来, 它的应用领域日益广泛, 同时其性能也得到不断的完善和发展。

1 结构和性能

X 射线像增强器主要由接收元件、增益单
25 卷(1996)第 3 期

元和图像读出体三部分组成。由于 X 射线的光子能量高, 不能用光学或电学方法使之聚焦或放大, 所以首先需将高能 X 射线的光子转换成易于控制的低能电子。接收元件是一个能量转换体, 通过二次转换(X 射线光子→可见光光子→电子)或一次转换(X 射线光子→电子), 将 X 射线像转换成电子像。由于各种能量转换体(它由 X 射线荧光屏、可见光光阴极、X 射线光阴极组成)的转换效率都很低, 在低强度 X 射线入射时, 对于记录和读出来说, 这些低能电子是远不够的。增益单元的作用是将输入电子数倍增或使其能量增加。被增强了的电子像轰击图像读出体(荧光屏), 利用荧光屏的阴极射线致发光效应最终转换成高亮度的可见光像, 直接目视或用电视摄像显示。

* 1995 年 3 月 20 日收到初稿, 1995 年 6 月 25 日收到修改稿。