

① 209-212

多孔介质体的分形及其在石油开采中的应用

TE 31

张建树¹⁾ 孙秀泉¹⁾ 程定东²⁾

(1)西北大学物理学系;2)西北大学地质学系,710069,西安;第一作者54岁,男,副教授)

A 摘要 评述了近年来应用分形几何学方法研究油田砂岩孔隙结构的分形特征及其对水驱油采收率的影响,并指出目前应用中存在的问题。

关键词 分形;分维;多孔介质体;孔隙结构;无水期采收率

分类号 O41;TE31

石油开采

1 分形理论是研究无序孔隙结构新的有力工具

地质学所研究的对象——地球及地质上的各类地质体,从本质上讲是一个开放系统。它与外界环境存在着物质和能量交换,是一个不断变化着的系统。因此,各种地质作用以及这些作用所形成的地质体,大多处于复杂的非线性状态,即不规整的分形状态。多孔介质体就是其中一个极为重要的典型。所谓多孔介质体就是由许多孔隙和实体组成的介质体,自然界中这样的例子非常多。例如,一堆自然堆放的砂子就形成一种多孔介质体,其中砂粒就是一个一个的实体,砂粒间形成了一个一个的孔隙。与人类生活休戚相关的石油就储集在砂岩的无序孔隙中。砂岩的孔隙不仅是油藏流体(油、气、水)的储集空间,也是它们的运输通道。与油藏流体运输相关的岩石性质是石油开采中最关切的问题,因而岩石孔隙结构的研究自然成为地质工作者和物理工作者共同关心的热门领域。

为了准确地描述孔隙结构及其对流体运动规律的影响,人们建立了许多数学模型。但是以往的模型基本思路都是将孔隙空间简化成平行管束或球形、椭球形孔隙段节。简言之,即试图以规整几何体代替复杂的无规则岩石孔隙结构。这些模型可以称之为经典孔隙模型。经典孔隙模型的基础是欧几里德几何学,它以研究连续性、渐变性、光滑性对象为特点。各种经典孔隙模型都具有所谓特征长度。基于经典模型,人们还提出了各种各样的参数来描述孔隙结构的特征,如孔隙度、渗透率、孔喉比、配位数、微观均质系数、相对分选系数等。虽然这些参数在一定程度上描述了孔隙结构的特征,但仍有较大的局限性。有的参数难以确定(如配位数),有的参数在用来表征对石油采收率的影响时具有不确定性,其规律性也不明显。例如渗透率,当渗透率增大时,采收率(特别是无水期采收率)既有可能增大,也有可能减小,还有可能不变。由此可见,建立在欧几里德几何理论基础上的经典模型对于描述粗糙复杂的孔隙结构、激烈起伏的岩石性质及其形成演化机理,已经力不从心了。

分形(fractal)是由曼德尔布罗特(B. B. Mandelbrot)在70年代总结了自然界非规整几何图形后提出的新概念。分形几何学是研究复杂的、支离破碎的不规则现象和过程的有力工具,从分形几何概念出发建立的孔隙模型恰可以弥补在传统观念上建立的经典孔隙模型的缺陷。分形孔隙模型的理论基础是分形几何学。分形孔隙模型具有膨胀对称性,或者说具有标度不变性。其含义是指结构不随尺度变化而

• 中国石油天然气总公司开发局攻关项目资助课题
收稿日期:1995-11-08

改变,因而不具有特征长度。将小尺度复杂无序的多孔介质放大后,看起来和大尺度的多孔介质相同。

分形几何学自诞生后便引起石油界的高度重视,近 10 多年来取得了大量的研究成果。1984 年 H. D. Bale 和 P. W. Schmidt 用 X 射线散射方法研究表明,多孔介质体的微观结构具有分维特征^[1]。1985 年 A. J. Kadz 和 A. H. Thompson 用扫描电镜研究了砂岩断裂面,也发现砂石的孔隙空间在一定长度范围内具有分形性质^[2]。1986 年 C. E. Krohn 和 A. H. Thompson 又发展了扫描电镜的自动化测量技术^[3]。1986 年 P. Wong 和 J. Howard 用小角度中子散射技术研究了沉积岩的微观孔隙结构^[4]。1988 年 C. E. Krohn 提出砂岩孔隙体可以分成两个部分:小尺度范围具有分形性质,而大尺度范围不具有分形特征。1992 年胡尊国等人研究了非等径球堆积的多孔介质体的分形问题。同年,李克文等人和王域辉等人采用分形理论描述油藏岩石孔隙结构及其形成演化机理^[5,6]。1995 年,贾芬淑等指出无水期采收率与油藏岩石孔隙结构的分维具有良好的相关性,因而分维可作为用以预测无水期采收率的参数^[7]。

本文拟对利用分形理论研究砂岩孔隙结构做以评述,同时谈及砂岩孔隙结构的分形特征对水驱油采收率的影响。

2 测定多孔介质体分维的方法

10 多年来,经过科学工作者的探索,已经发展了许多测量孔隙结构的实验方法。这些方法可以分为两大类:①实空间测量法;②倒空间测量法。前者以变换标度为基础,后者则以光或中子的散射为基础。对于一特定系统,可根据系统的性质和尺度范围选择适当的测量方法。应用图像分析及分形理论研究砂岩孔隙结构的原理、手段和具体方法简述如下:

2.1 多孔介质体样品的制备

选取某种砂岩岩心分别制成两种测试样品,即柱塞岩样和铸体薄片岩样。柱塞岩样用来进行常规物性分析、水驱油实验;铸体薄片岩样用来进行分形特征的测定。铸体薄片岩样具体做法是,先将洗油、烘干后的岩石样品在高温高压下灌注染色环氧树脂,冷却固化后制成薄片,然后在一定倍数的显微镜下拍制成彩色照片,再将彩色照片输入计算机图像处理系统,提取孔隙特征成为 2 值图像,进行图像分析。

2.2 多孔介质体分维的测定原理

自然界中的分形是多种多样的,因此描写它们的分维也有多种形式。例如豪斯道夫(Hausdorff)维、相似维、关联维、信息维、容量维、模糊维等。至今人们尚未找到对任何事物都适用的分维普适形式。利用 2 值图像进行分析测定时,所采用的方法均是从分形原始定义出发,在保证几何体总测度不变的条件下进行测定的。

从测度学角度看,要测出一个面积,可以用半径为 r 的小圆去覆盖(也可以用小正方形去覆盖),所需要的小圆数目为

$$N(r) = \frac{S}{\pi r^2} \sim \frac{S}{r^2} \quad (1)$$

显见, r 越小, $N(r)$ 就越大。同理,要测定一个体积可用半径为 r 的小球去填充(也可以用小立方体去填充),所需要的小球数目为

$$N(r) = \frac{V}{\frac{4}{3}\pi r^3} \sim \frac{V}{r^3} \quad (2)$$

根据上述推导,可将 $N(r)$ 与 r 的关系推广到任意维的情况:对于一个 D 维(D 可以是整数,也可以是分数)的物体,设其测度为 A ,则所需小球数可用下式表示:

$$N(r) \sim \frac{A}{r^D} \quad (3)$$

或者写成

$$N(r) = \frac{C \cdot A}{r^D} \quad (4)$$

式中 C 为比例系数,在式(1)的情况下, $D=2, C=S/\pi$;在式(2)的情况下, $D=3, C=3V/4\pi$ 。

将式(4)可以化为

$$\log N(r) = -D \log r + \log(C \cdot A). \quad (5)$$

在式(5)中,若保证几何体的总测度 A 不变,则式(5)中右边第二项是个常数。而 $N(r)$ 和 r 是两个变量, r 的改变可以引起 $N(r)$ 的变化。在以 $\log N(r)$ 和 $\log r$ 的坐标系中绘出 $N(r)$ 与 r 的关系,直线部分斜率即分维 D ,非直线部分说明那个区间不具有分维性质。

2.3 多孔介质体分维的测定方法

测定的具体步骤如下:首先在已处理好的 2 值图像上随机地选取一点作圆心,数半径为 r 的圆内所占的点数。如果 $N(r)$ 与 r 在双对数坐标系中呈线性关系,则表明该图片上的孔隙结构具有自相似性,是分形体。直线的斜率就是分维 D 。按上述方法,随机地变换几个圆心,测定一组 D 后取平均值,作为表征该图片上孔隙分形特征的分维。

上述的测量中选取小圆为单元体, r 代表小圆半径。若选小正方形为单元体,则 r 表示正方形的边长。为方便计,一般选取小正方形作为单元体。

前面所述实验上测定分维的方法是在实空间测量。另一种方法称之为小角度散射法。它的基本原理是:散射强度或微分散射截面与所研究物体的电荷分布(对光、X 射线散射)或质量分布(对 neutron 散射)的傅里叶变换有关。如果所研究的物体是分形,则它的分维会表现在其散射强度或微分散射截面中。小角度散射实验不是在实空间而是在动量空间或倒空间进行的。该方法的优点是短时间内可以收集到高质量的数据,其缺点是只适于探测微米乃至次微米的结构。最新水平的同步辐射 X 光散射也只能测量 5×10^{-11} cm 以下的特性,因而对于大尺度结构感兴趣的地质工作者一般很少采用这种方法,故此不做详述。

值得注意的是在第一种方法中测量的半径 r 取值较小时,点数 $N(r)$ 会因选取的圆心位置不同而有较大的差别。只有当测量半径大于某一尺度 r_0 之后,在双对数坐标中,不同测量圆心的各组 $N(r) \sim r$ 点才收敛于一条直线附近。上述情况说明,沉积岩孔隙结构并非在任何尺度下都符合分形特征,而是存在一个尺度下限 r_0 。只有在 $r > r_0$ 后,薄片岩样上的孔隙结构才符合分形特征,计算出的分维数才比较稳定,而与圆心位置无关。这个尺度下限 r_0 即岩石铸体薄片上孔隙分布的分形尺度下限。砂岩油藏孔隙结构尺度下限 r_0 是一个与油藏地质特征密切相关的参数。其变化范围较大,根据目前所测的结果看,小到 $120 \mu\text{m}$ 左右,大到 $1200 \mu\text{m}$ 左右^[7]。

贾芬淑等人对大庆、胜利、中原、吐哈油田部分砂岩样品的分析测定结果表明,分维数在 1.49~1.94 之间。分维数大,则孔隙均匀,储集性能好;反之,孔隙小且不均匀,储集性能差^[7]。A. J. Katz 和 A. H. Thompson 对各种砂岩的分维测定值在 2.57~2.87 之间,得出类似的结论^[2]。T. A. Hewett 利用分形几何理论对油藏非均质性及对油藏内流体输运特性的影响进行了研究,认为油藏渗透率和孔隙度的非均匀分布可用分维较好地定量描述。

3 油田砂岩孔隙结构分维对水驱油采收率的影响

在油田开发中,影响原油采收率的主要因素是油水粘度比、岩石湿润性和微观孔隙结构。大量研究表明,在油水粘度比、驱替速度和岩石湿润性基本相同的条件下,岩石孔隙结构的好坏成为影响水驱油采收率的主要因素。根据已往的研究结果,人们已经知道孔隙结构均质性好,无水期采收率高,反之亦然,但没有给出定量关系。为寻找砂岩孔隙结构分形特征与水驱油采收率之间的定量关系,在柱塞岩样中进行水驱油实验,为突出孔隙结构对采收率的影响,实验应在基本相同的油水粘度比、岩样尺寸、驱油速度和湿润性条件下进行。所用柱塞岩样洗油后经高温处理,使之变成强亲水岩样。再将岩心 100% 饱和模拟地层水后装入岩心夹持器,用模拟油驱水至束缚水状态。最后用水驱油,测定不同时间或不同注入体积倍数条件下的采收率。

贾芬淑等人对胜利、大庆、中原和吐哈油田部分岩样铸体薄片所做的分形研究及相对应的柱塞岩样水驱油实验结果表明,油藏岩石孔隙结构的分维越大,无水期采收率越大。无水期采收率与分维之间有

良好的线性关系。其相关关系式为

$$\eta_{\text{无}} = \exp(1.6041D - 3.6130). \quad (6)$$

相关系数在 0.9 以上^[7]。此关系式与实验符合较好的结果充分说明,分维可以在一定程度上较好地定量描述岩石孔隙结构的非均质特性。它可以作为评价砂岩油藏孔隙结构及储集性能的一个主要指标,并可作为预测水驱油无水期采收率的参数。

4 存在问题和展望

4.1 就贾芬淑及 C. E. Krohn 等人对多孔介质体分维测定的结果来看,砂岩孔隙结构分维的变化范围较小,常常需要在 10^{-2} 数量级以上进行对比分析。这样的分辨率可能会使分维的应用受到限制,因而需要寻找新的参数作为分维的辅助指标。

4.2 现在的分维测定还仅限于对 2 维薄片图片的分布。若能直接从砂岩岩心测得其孔隙结构的分维 ($2 < D < 3$), 就可以提高其可靠程度和普适性。

4.3 油藏内普遍存在粘性指进现象,特别是在不利流度比条件下水驱油尤为重要。这一现象对原油采收率和注水的有效利用率有很大影响。已往对此已进行了大量研究,但基本上只停留在定性阶段。也有人开始利用分形几何理论进行探讨,但所提出的模型还不尽人意,需要更为深入的研究,使之定量化更符合客观实际。

参 考 文 献

- 1 Bale H D, Schimidt P W. Small-angle X-ray scattering investigation of submicroscopic porosity with fractal properties. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, 53: 596~599
- 2 Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pore; implication for conductivity and pore formation. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54(12): 1 325~1 328
- 3 Krohn C E, Thompson A H. Fractal sandstone pore; automated measurements using scanning electron microscope images. *Phys. Rev.*, 1986, 33B(9): 6 366~6 374
- 4 Wong P Z, Howard J. Surface roughening and the fractal nature of rocks. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57(5): 637~640
- 5 李克文,沈平平,贾芬淑. 油藏岩石孔隙结构的分形描述及其应用. 分形理论及其应用. 合肥:中国科学技术大学出版社,1993. 362~365
- 6 王域辉,廖淑华. 沉积岩孔隙空间的分形结构. 分形理论及其应用. 合肥:中国科学技术大学出版社,1993. 327~340
- 7 贾芬淑,沈平平,李克文. 砂岩孔隙结构的分形特征及应用研究. 断块油气田,1995,2(1): 16~21

责任编辑 张银玲

Fractal of Porous Media and Its Application in Petroleum Exploration

Zhang Jianshu¹⁾ Sun Xiuquan¹⁾ Cheng Dingdong²⁾

(1)Department of Physics; 2)Department of Geology; Northwest University, 710069, Xi'an)

Abstract The researches on and application to recovery efficiency of water-drive-oil are represented in recent years. Existing problems are questioned for sake of further researches.

Key words fractal; fractal dimension; porous media; pore structure; breakthrough recovery