

天然低渗岩芯分形维数变化原因分析

景贵成, 刘福海, 俞 理

(中国科学院 渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007)

摘要: 基于相似维数的概念提出用常规压汞资料或图像分析测定天然低渗岩芯分形维数的方法, 并推导分形维数的计算公式。利用油田的天然岩芯压汞资料数据绘制双对数曲线, 并求出多孔介质分形维数, 分析导致岩芯具有单一分形或多重分形的原因, 得出如果沉积条件不变则分形维数唯一, 而沉积条件发生明显改变则分形维数多变的结论。

关键词: 岩石力学; 分形维数; 低渗岩芯; 沉积条件; 孔隙结构

中图分类号: TU 45, O 357.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)06-0921-04

ANALYSIS OF CHANGEABLE CAUSE FOR THE FRACTAL DIMENSION IN THE NATURAL LOW-PERMEABLE CORES

JING Gui-cheng, LIU Fu-hai, YU Li

(*Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China*)

Abstract: The effects of pore structure on the fractal dimension were studied. Based on the similar dimension, the method of measuring the fractal dimension was brought forward in natural low-permeable cores through traditional intrusive mercury data or image analysis, and the calculated formula for the dimension was achieved. By using the intrusive mercury data from natural cores, the curves were protracted and the fractal dimensions in porous media were calculated. In some formation segments, where there are only compaction and solution under pressure, the fractal dimension has diagenesis; while in other segments, the pore structures become more complicated due to intensive epigeneses, such as secondary quartz enlargement, recrystallization, and corrosion. Therefore there are several dimension values.

Key words: rock mechanics; fractal dimension; low-permeable core; depositional condition; porous structure

1 引言

自 1982 年 B. B. Mandelbrot 的《自然界中的分形》出版以来, 分形几何成为研究不规则物体和复杂现象的有力工具, 突破了欧几里得几何的许多局限。多孔介质孔隙的空间分布具有统计自相似性, 孔隙的大小分布也可如同 Mandelbrot 研究岩石碎片的类似方法进行分形描述。目前, 国内外关于这方面

的研究尚处于起步与探索阶段, 文献较少。文[1]研究了岩石颗粒大小分布的分形特征, 给出了颗粒大小分布与分形维数的关系。文[2]较全面地研究了岩石孔隙空间分布的分形规律, 通过对灰岩、白云岩与砂岩的图像分析研究, 发现砂岩表面、孔隙大小分布、岩石剖面的孔隙周长都可以用分形原理描述^[3, 4]。根据对岩样分析结果, 文[2, 5]认为, 有的岩石用单重分形来表征有关参数的分形特征, 而有的岩石则需用多重分形来表征。本文利用国内某油

收稿日期: 2003-10-13; **修回日期:** 2003-11-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“大幅度提高石油采收率基础研究”(G1999022510)

作者简介: 景贵成(1976-), 男, 1999年毕业于大庆石油学院石油工程系石油工程专业, 2002年于大庆石油学院获油气田开发专业硕士学位, 现为中国科学院渗流流体力学研究所博士研究生, 主要从事油气田开发方面的研究工作。E-mail: jingguicheng@sohu.com.

田天然岩芯压汞资料数据，绘制双对数曲线，证明天然岩芯孔隙空间分布具有分形特征，并求出分形维数，分析导致岩芯具有单一分形或多重分形的原因，得出如果沉积条件不变则分形维数唯一，而沉积条件发生明显改变则分形维数多变的结论。

2 分形维数测定的理论基础

油藏岩石是在漫长的地质年代里形成的复杂多孔介质，油气的聚集、渗流、二次采油和三次采油的驱替以及扩散过程等都发生于其中。孔隙结构直接影响油气田的产量、剩余油的分布以及化学剂的指进、扩散和吸附等。对多孔介质结构及其对渗流过程影响的研究一直是油气渗流力学、油藏物理的重要基础研究领域。前人大量的工作已经证明，油藏岩石孔隙空间具有分形特征^[6,7]。研究分形的一个基本问题是要求出分形维数，以便研究有关的量与分形维数间的关系。分形学正处在发展阶段，目前还没有适合于一切分形结构的分形维数定义。为研究方便起见，在不同类的问题中，人们使用了不同的分形维数定义。而测量分形结构的实验方法在过去几十年间更是百花齐放、百家争鸣。这些方法可以分为两大类：实空间测量法，以变换测量尺码为基础；倒空间测量法，以光或中子的散射为基础。对于特定系统，选择合适的测量方法是以该系统的性质和尺度范围为依据的^[6]。本文基于相似维数的概念提出了用常规压汞资料或图像分析来测定砂岩孔隙结构分形维数的方法。

设岩石孔隙体积为 v_T ，岩石孔隙分形维数为 D_p 。半径为 r_p 的孔隙的孔隙数为 $N_u(r_p)$ ，半径为 r_p 的孔隙所占的孔隙体积为 $v(r_p)$ ，可由压汞资料求得，半径为 r_p 的孔隙占总孔隙体积份额为 $g(v(r_p))$ 。假设岩石孔隙近似为球状，则有

$$\frac{3g(v(r_p))v_T}{4\pi r_p^3} = N_u(r_p) \tag{1}$$

根据分形理论，岩石孔隙体积 v_T 为

$$v_T = AN_u(r_p)Br_p^{D_p} \tag{2}$$

式中： A, B 为由孔隙结构分形性质确定的常数。

由式(1)，(2)可得

$$r_p^{-D_p} = \frac{g(v(r_p))}{r_p^3} \frac{3AB}{4\pi} \tag{3}$$

两边取对数可得

$$-D_p \lg r_p = \lg \frac{g(v(r_p))}{r_p^3} + \lg \frac{3AB}{4\pi} \tag{4}$$

若在双对数坐标系上绘制 $\lg(g(v(r_p))/r_p^3) - \lg r_p$ 曲线，则式(4)应为一曲线，其斜率即为该岩芯孔隙大小分布分形维数的相反数。

文[8~10]应用岩芯压汞资料，结合数理统计分析，推导出了 Laplace 毛管压力公式的变形形式。设 $p(1), p(2), \dots, p(n)$ 为进汞时各阶段注入压力， $p(0) = 101.325 \text{ kPa}$ ， $S(1), S(2), \dots, S(n)$ 为相应的进汞饱和度， $S(0) = 0$ ，则在一个间隔内，进汞孔隙半径为

$$r_p(m) = \frac{4\sigma}{p(m-1) + p(m)} \quad (m = 1, 2, \dots, n) \tag{5}$$

式中： σ 为表面张力。具有相应半径的孔隙所占总孔隙体积份额为

$$g(v(r_p(m))) = S(m) - S(m-1) \tag{6}$$

将式(6)代入式(4)即可作图。

3 天然岩芯分形维数测定及结果分析

本研究对大庆油田几十口井天然岩芯(有效渗透率 $2.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)进行压汞实验，限于篇幅，只给出具有代表性的 1 号井岩芯 1[#], 2[#](井深 1 449.8~1 589.6 m 油层段)、2 号井岩芯 1[#], 2[#](井深 1 390.7~1 415.2 m 油层段)和 3 号井岩芯 1[#], 2[#](井深 1 352.0~1 360.5 m 油层段)以及 4 号井岩芯 1[#], 2[#](井深 1 636.8~1 639.9 m 油层段)、5 号井岩芯 1[#], 2[#](井深 1 785.7~1 807.1 m 油层段)和 6 号井岩芯 1[#], 2[#](井深 1 853.4~1 857.8 m 油层段)共 12 块岩芯压汞资料数据，绘制 $\lg(g(v(r_p))/r_p^3) - \lg r_p$ 曲线，从而求出分形维数，并讨论影响曲线形状变化的因素。

图 1 是 1, 2 和 3 号井岩芯孔隙大小分布概率密度曲线。图 2 是 1, 2 和 3 号井岩芯 $\lg(g(v(r_p))/r_p^3) - \lg r_p$ 曲线，这些曲线可以认为是直线，代表岩芯单一的孔隙结构。通过对本区砂岩薄片的观察与统计，结合 X 衍射、阴极发光、扫描电镜等分析，证实在本区主要存在压实、压溶单一沉积成岩作用^[11]，沉积条件几乎未发生变化，石英次生加大、重结晶以及溶蚀等后生作用不明显。这主要由于沉积物沉积后，逐渐在上覆载荷的静压作用下发生碎屑颗粒结构组合上的重新调整以及塑性组分的变形等，继而使得岩石碎屑颗粒排列紧密，孔隙度和渗透率降低，

体积缩小。例如：出现片状矿物(如白云母)和长形碎屑颗粒呈定向性排列和压弯现象；石英颗粒发生脆性破裂；长石沿双晶面或解理缝发生塑性弯曲和脆性破裂等形变现象；塑性组分(如泥屑)因压实作用而压扁、压断呈假杂基形式出现。另外，在压实作用过程中，由于压力不够大，使石英颗粒不致破裂，而在碎屑颗粒接触处较长时间受到有效压力，可发生局部溶解，称为压溶。对本区油层砂岩样品薄片观察发现，颗粒之间呈凸凹接触，接触界限切割原始石英颗粒边缘的尘线，从而显示出矿物界面处的溶解作用。而其他成岩作用不明显，说明 1, 2 和 3 号井岩芯是具有单一分形特征的多孔介质结构。由图 2 可分别求得曲线斜率，即求得岩芯孔隙结构分形维数 D_p 的相反数，3 口井岩芯的分形维数 D_p 分别为 2.54, 2.46 和 2.62。

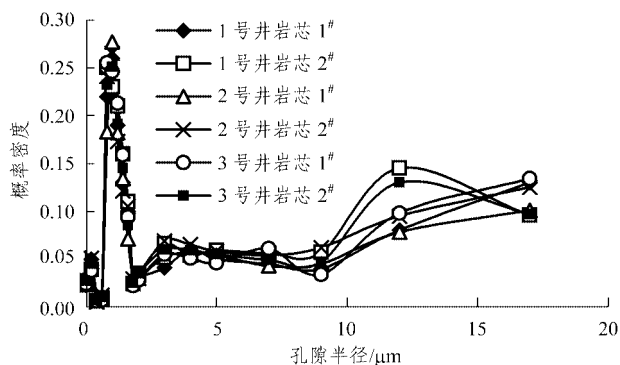


图 1 1, 2 和 3 号井岩芯孔隙大小分布概率密度曲线

Fig.1 Curves of pores distribution probability density for cores in well 1, 2 and 3

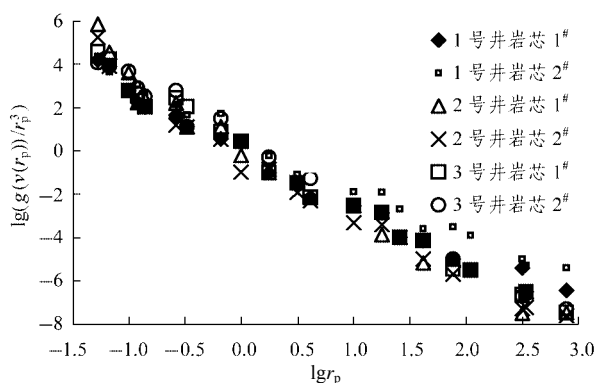


图 2 1, 2 和 3 号井岩芯 $\lg(g(v(r_p))/r_p^3) - \lg r_p$ 曲线

Fig.2 $\lg(g(v(r_p))/r_p^3) - \lg r_p$ curves of cores in well 1, 2 and 3

图 3 是 4, 5 和 6 号井岩芯孔隙大小分布概率密度曲线。图 4 是 4, 5 和 6 号井岩芯 $\lg(g(v(r_p))/r_p^3) - \lg r_p$ 曲线，这些曲线由一些折线组成，曲线发生波

动。通过对本区砂岩薄片的观察与统计，结合 X 衍射、阴极发光、扫描电镜等分析，证实这是由于沉积条件发生变化而导致在一块岩芯中具有不同的孔隙结构，与石英次生加大、重结晶以及溶蚀等后生作用有关^[11](如图 5~8 所示)。经研究发现，机械压实作用初期可使沉积物体积迅速减小，孔隙度迅速下降，剩余孔隙空间为随后发生的石英、长石次生加大以及方解石等自生矿物的沉淀提供了有利的空间。本区石英次生加大普遍可见，在泥质杂基含量小的细砂岩中，加大边宽 10~15 μm ，用点计求积仪线测法对普通薄片和阴极发光照片中石英次生加大定量统计。结果表明，次生加大边面积为 2%~5%。在成岩后期，大量粒间孔隙被胶结物的粗大晶体所充填，说明在成岩后生阶段发生较普遍的重结晶作用。此外在扫描电镜下观察，在本区还广泛发育长石的溶解和蚀变作用，有的长石被孔隙溶液所溶解，但同时被溶解的部位上没有新矿物生成，溶解的物质被孔隙溶液携带并转移，从而在长石晶体上留下晶内溶孔；有些长石被新矿物所置换，新矿

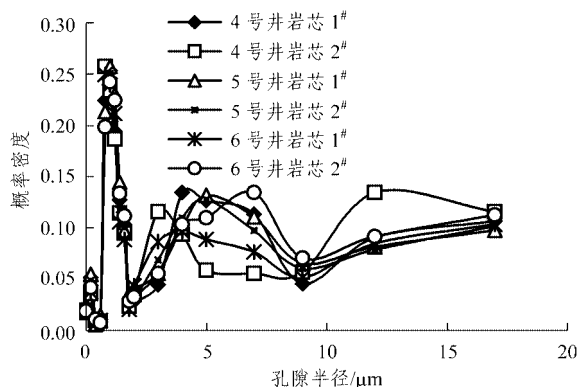


图 3 4, 5 和 6 号井岩芯孔隙大小分布概率密度曲线

Fig.3 Curves on pores distribution probability density of cores in well 4, 5 and 6

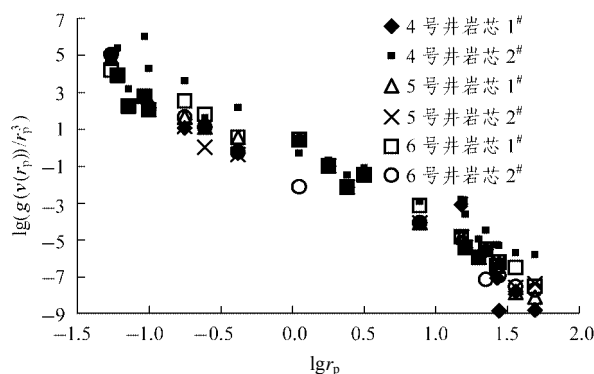


图 4 4, 5 和 6 号井岩芯 $\lg(g(v(r_p))/r_p^3) - \lg r_p$ 曲线

Fig.4 $\lg(g(v(r_p))/r_p^3) - \lg r_p$ curves of cores in well 4, 5 and 6

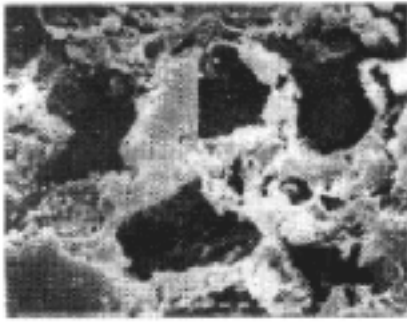


图5 4号井岩芯1#孔隙扫描电镜照片(标尺1 μm)

Fig.5 Scanning electron microscope telegraph on pores of core No.1 in well 4 (staff gauge : 1 μm)



图6 4号井岩芯2#孔隙扫描电镜照片(标尺1 μm)

Fig.6 Scanning electron microscope telegraph on pores of core No.2 in well 4 (staff gauge : 1 μm)



图7 5号井岩芯2#孔隙扫描电镜照片(标尺1 μm)

Fig.7 Scanning electron microscope telegraph on pores of core No.2 in well 5 (staff gauge : 1 μm)

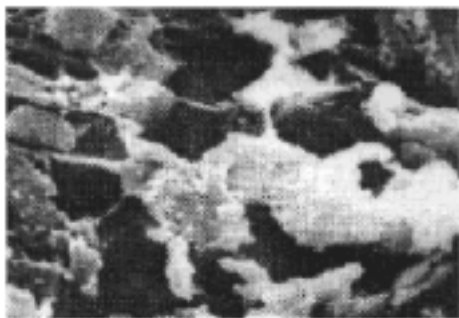


图8 6号井岩芯1#孔隙扫描电镜照片(标尺1 μm)

Fig.8 Scanning electron microscope telegraph on pores of core No.1 in well 6 (staff gauge : 1 μm)

物占据了原来长石的位置,并继承了长石的大部分化学组分,如长石的高岭土化和水云母化,使长石表面出现污浊,呈云雾状,颗粒轮廓模糊不清,这种现象称为溶蚀。以上现象说明由于沉积条件发生变化,岩芯内不同位置具有不同的分形维数,反映到曲线上就是这条曲线由一些折线组成,并且孔隙大小分布概率密度曲线也发生剧烈波动。

4 结 论

采用分形维数测定理论,对天然岩芯分形维数进行测定分析,可以判断低渗岩芯中的孔隙结构具有分形特征;如果分形维数唯一则可能是由于沉积条件单一,如果分形维数多变则可能是由沉积条件变化导致孔隙结构具有多重分形。

参考文献(References) :

- [1] Zhong Y Z, Yi W. Fractal analysis applied to cataclastic rocks[J]. *Tectonophysics*, 1990, 12(5) : 373 - 377.
- [2] Garrison J J R, Pearn W C, Von Rosenberg D U. The fractal nature of geological data sets : power law processes everywhere[R]. SPE 22842, 1991.
- [3] Blunt M J, King P R, Goshank J A. Simulations of viscous fingering in a random network[A]. In : *The Mathematics of Oil Recovery*[C]. Oxford : Clarendon Press, 1992. 82 - 86.
- [4] Jacob B, Yavuz C M. *Transport Processes in Porous Media*[M]. London : Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [5] Dle D J. A review of reservoir simulation techniques and considerations on future developments[A]. In : *The Mathematics of Oil Recovery*[C]. Oxford : Clarendon Press, 1992. 103 - 111.
- [6] 王域辉, 廖淑华. 分形与石油[M]. 北京 : 石油工业出版社, 1994. (Wang Yuhui, Liao Shuhua. *Fractal and Petroleum*[M]. Beijing : Petroleum Industry Press, 1994. (in Chinese))
- [7] 李克文, 沈平平. 砂岩分形结构研究[M]. 合肥 : 中国科学技术大学出版社, 1993. (Li Kewen, Shen Pingping. *Studies on the Fractal Structure of Sandstone*[M]. Hefei : University of Science and Technology of China Press, 1993. (in Chinese))
- [8] 朱九成. 砂岩孔隙结构分形模型及随机网络仿真[J]. 石油大学学报, 1995, 19(6) : 32 - 35. (Zhu Jiucheng. Fractal model for structure of porous media and stochastic network simulation[J]. *Journal of the University of Petroleum*, 1995, 19(6) : 32 - 35. (in Chinese))
- [9] 王子亭. 分形多孔介质的渗滤理论[博士学位论文][D]. 北京 : 石油大学, 1995. (Wang Ziting. *Fractal percolation theory in porous media*[Ph. D. Thesis][D]. Beijing : University of Petroleum, 1995. (in Chinese))
- [10] Barrufet M A, White J R J. A waterflood model based upon percolation theory concepts[R]. SPE 27018, 1994.
- [11] 冯志琨. 低渗透砂岩油田开发地质分析[M]. 哈尔滨 : 黑龙江科学技术出版社, 1998. (Feng Zhikun. *Geologic Analysis for the Development of the Low-permeable Sandstone Oilfield*[M]. Harbin : Heilongjiang Science and Technology Press, 1998. (in Chinese))