

砂岩孔隙结构分维及其应用

陈程¹ 孙义梅²

¹ (河南油田研究院开发室, 河南南阳 473132)

² (江汉石油学院, 湖北沙市 434102)

提 要 分形几何学特别适合于解决复杂环境中的许多问题。本文把砂岩孔隙结构置于分形几何学框架内, 推导了小于孔隙半径 r 的孔隙度与孔隙半径之间幂函数关系, 表明其指数与孔隙结构分维 (D) 有关, 用压汞曲线证实这种幂函数关系是客观存在的, 提供了一种测量孔隙结构分维的方法。作者研究认为, 孔隙结构分维 (D) 能定量表征砂岩的储集性能, 并能反映砂岩孔隙结构的成因特征。D接近于 2, 砂岩储集性能极好; D接近于 3, 砂岩储集性能极差。不同成因的孔隙结构具有不同的分维, 但相同或相似成因的孔隙结构的分维具有固定的范围, 因此可用分维对砂岩孔隙结构进行分类和评价。实际应用效果较好。

关键词 砂岩 孔隙结构 分维 分类和评价

第一作者简介 陈程 男 29岁 工程师 沉积学与储层地质学

引 言

砂岩孔隙结构是直接影响油气运移的客观因素。以往人们对孔隙结构的研究仅限于拓补学范畴, 使原本极其复杂的孔隙几何特征大大地简化了, 失去了本质的自然属性。自 Mandelbrot 创立分形几何学以来, 人们采用分子吸附、图像分析和 X 射线等技术重新对孔隙表面形态及大小分布进行了研究^[1,2], 发现孔隙结构也是一种分形结构, 从而客观地揭示了孔隙结构本质的几何特征, 同时提供了描述孔隙表面形态及大小分布复杂程度的定量参数——分维。

本文从分维概念出发, 推导了孔隙结构中小于孔隙半径 r 的孔隙度 ($\Phi(r)$) 与孔隙半径 (r) 之间幂函数理论关系, 并用压汞曲线予以证实, 论述了孔隙结构分维的储层地质学意义及其应用。

1 孔隙结构分维

分形是具有超过拓扑维数的 Hausdorff 维数的客体。对于某一分形客体, 如果量度其“容积”的单位半径为 r , 用该单位量度的结果 $N(r)$ 满足以下关系

$$N(r) = K_1 r^{-D} \quad (1)$$

式中, K_1 ——不随 r 而变的常数; D ——分形客体的维数

如, 一个体积为 V 的三维球体, 现用半径为 r 的小球体积作单位去量度, 所得的结果为 $N(r)$, 则有

$$N(r) = \frac{V}{\frac{4}{3}c_r^3} = \left(\frac{3V}{4c}\right) r^{-3} = K_1 r^{-D} \left[D=3, K_1 = \frac{3V}{4c}\right] \quad (2)$$

在这里, 不必规定 D 是整数, 故按此定义的维数就自然而然地扩展到分数 (既包括整数也包括非整数), 因此, D 是分维, 也称 Hausdorff 维数。

实验已证实孔隙结构是一种分形结构, 故也满足式 (1) 的关系。 D 可称为孔隙结构分维。

由于 $N(r)$ 较难测得, 所以据式 (1) 来计算孔隙结构分维是困难的。为此, 将 $N(r)$ 变换成储层物理实验易测量的参数

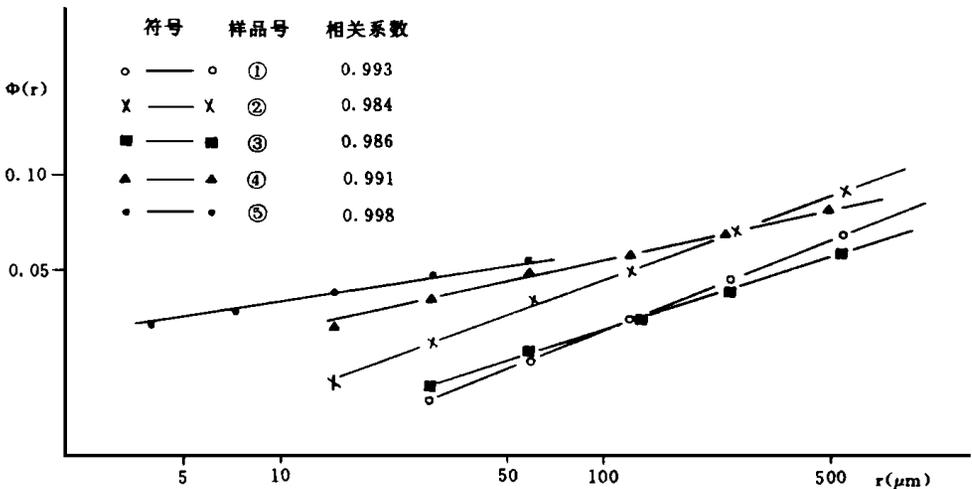


图 1 砂岩孔隙结构中 $\Phi(r)$ 与 r 的关系图

Fig. 1 Diagram showing the relationship between $\Phi(r)$ and r of the pore- texture in sandstones
由小球占据的孔隙空间体积为

$$V(r) = \frac{4}{3}c_r^3, N(r) = \frac{4}{3}cK_1 \cdot r^{3-D} \quad (3)$$

对式 (3) 微分, 得

$$dV(r) = \frac{4}{3}cK_1 (3-D) \cdot r^{2-D} dr \quad (4)$$

设岩样体积为 V_r , 当 r 很小时, 则小于孔隙半径 r 的孔隙度 $H(r)$ 为

$$H(r) = \int_0^r dV(r) / V_r = \left[\frac{4}{3} cK_1 / V_r \right] \cdot r^{3-D} + C \quad (5)$$

当 $r=0$ 时, $H(0) = 0$, 因此 $C=0$ 故

$$H(r) = \left[\frac{4}{3} cK_1 / V_r \right] \cdot r^{3-D} = K \cdot r^{3-D} \quad (6)$$

式中, $K = \frac{4}{3} cK_1 / V_r$, 对某一岩样为常数。

式 (6) 中的 $H(r)$ 、 r 均可从压汞曲线上获取, 在双对数坐标中, $H(r)$ 与 r 普遍具有直线关系 (图 1), 因此式 (6) 是客观存在的。

孔隙结构分维可由直线斜率计算

$$D = 3 - m \quad (7)$$

式中, m ——双对数坐标中 $H(r)$ 与 r 直线斜率。

2 储层地质学意义

实验结果表明, 在三维欧氏空间中砂岩孔隙结构分维是介于 2 与 3 之间的分数^[2], 是表征孔隙表面形态粗糙程度和大小分布复杂程度的综合参数, 与砂岩储集性能具有较密切的关系。 D 接近于 2 时, 孔隙表面光滑、平直, 大小分布均匀; D 接近于 3 时, 孔隙表面粗糙、褶皱, 大小分布极不均匀 (表 1)。显然, D 接近于 2, 阻碍流体流动的阻力很小, 储集性能极好; D 接近于 3, 流体流动的阻力就很大, 因而储集性能极差 (图 2)。

表 1 砂岩孔隙结构分维与孔隙几何特征

Table 1 Fractional dimension of the pore- texture and geometric features of the pore in sandstones

样号	孔隙度 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	斜率	分维	孔隙几何特征
①	23.13	1374.3	0.500	2.500	表面较光滑, 大小分布均匀, 形状规则
②	25.05	1068.8	0.378	2.622	表面有粘土矿物披覆, 大小分布较均匀, 形状较规则
③	17.21	375.0	0.325	2.675	表面凹凸不平, 大小分布较均匀, 形状不规则
④	14.01	26.1	0.235	2.765	表面凹凸不平, 大小分布不均匀, 形状不规则
⑤	6.11	1.3	0.178	2.822	表面粗糙、褶皱, 大小分布复杂, 形状极不规则

将 Milligan 和 Adams 的累积孔隙体积分布表达式^[3]变换成如下方程

$$H(r) = A + B \text{th} [k_2 (r - r_0)] \quad (8)$$

式中, K_2 ——孔隙大小分布曲线尖锐程度因子; r_0 ——最常出现的孔隙半径; A B ——常数; $H(r)$, r ——与式 (6) 中的含义相同。

式 (8) 是一个双曲正切函数。而指数小于 1 的幂函数图形与双曲正切函数在某一范围内应该有相同的部分, 即在一定范围内式 (8) 与式 (6) 曲线重合

$$K \cdot r^{3-D} = A + B \operatorname{th} [K_2 (r - r_0)] \tag{9}$$

不同的 K_3 r_0 值代表了不同成因的孔隙结构类型, 而不同的 K_3 r_0 值对应不同的分维, 因此, 不同成因的孔隙结构类型具有不同的分维。这种对应关系将为砂岩孔隙结构分类和评价提供理论基础。

3 应用

砂岩孔隙结构的几何特征, 受沉积和成岩作用等地质因素控制。而分维既能定量地描述孔隙结构的复杂程度, 又能指示其成因特征。实际研究表明, 相同或相似成因的孔隙结构的分维往往固定在某一范围。下面以下二门油田为例阐述分维在砂岩孔隙结构分类和评价中的应用。

下二门油田位于南襄盆地泌阳凹陷东侧背斜上, 主要含油气层位是下第三系核桃园组二段和三段, 处于候庄三角洲前缘。水下分流河道和河口坝是主要含油气储层类型。研究认为, 下二门油田砂岩孔隙结构分维与砂岩渗透率具有较密切的关系 (图 2), 而与砂岩孔隙度却没有明显的关系 (图 3)。但根据岩样点沿分维轴的分布特征, 明显地将 113 个岩样孔隙结构区分为四类。显微镜和扫描电镜观察表明, 这四类孔隙结构是由不同类型、形状、连通性和大小分布特征的孔隙组成。

I 类 分维值为 2.40—2.50, 孔隙度为 10%—25%, 平均渗透率为 $3.200 \mu\text{m}^2$, 平均孔径为 $57 \mu\text{m}$, 孔隙均匀系数为 0.42。以原生粒间孔为主, 形状规则, 连通性好。孔隙内有少量粘土矿物沉淀, 无其它胶结物。

II 类 分维值为 2.51—2.65, 孔隙度 8%—26%, 平均渗透率为 $0.610 \mu\text{m}^2$, 平均孔径为 $42 \mu\text{m}$, 孔隙均匀系数为 0.38。以次生粒间孔为主, 形状不规则, 连通性较好。有少量分散状粘土矿物及残余碳酸盐胶结物。

III 类 分维值为 2.66—2.75, 孔隙度为 5%—25%, 平均渗透率为 $0.190 \mu\text{m}^2$, 平均孔径为 $25 \mu\text{m}$, 孔隙均匀系数为 0.33。主要为次生孔隙, 形状极不规则, 连通性较差。局

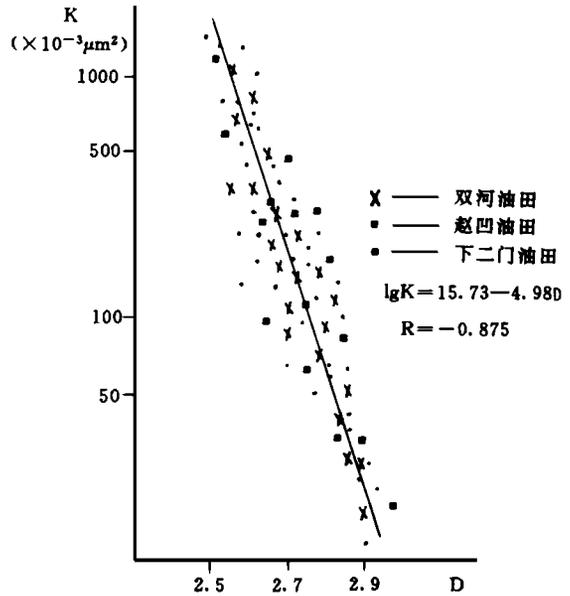


图 2 砂岩渗透率 (K)

与孔隙结构分维 (D) 的关系

Fig. 2 Relationship between sandstone permeability (K) and fractional dimension of the pore- texture (D)

部碳酸盐胶结物较多或被充填

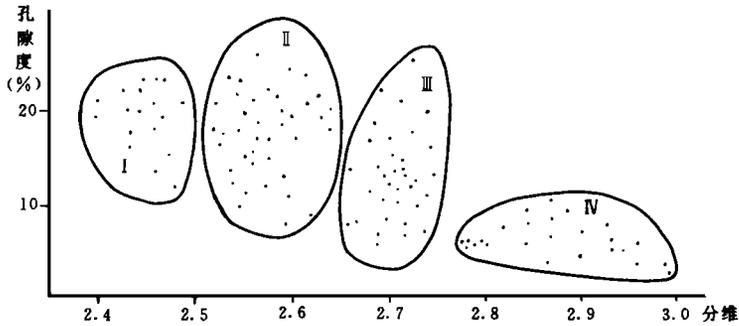


图 3 下二门油田孔隙结构分类

Fig. 3 Classification of the pore-textures in Xiaermen Oil field

IV类 分维值为 2.78—3.00, 孔隙度为 2%—10%, 平均渗透率为 $0.034 \mu\text{m}^2$, 平均孔径为 $1.56 \mu\text{m}$, 孔隙均匀系数为 0.20 多为胶结物晶间孔和杂基内的微细孔隙, 分布复杂。

可见, 相同或相似成因的孔隙结构的分维值具有一定范围。尽管各种成因的孔隙结构的分维值相差不大, 但也很容易将各种成因的孔隙结构类型区分开。随着孔隙结构的分维值增大, 孔径逐渐变小, 孔隙分布变得复杂, 渗透率也降低, 储集性能将变差, 因此下二门油田I类孔隙结构的储集性能好, II类为中等, III类为差, IV类为最差。

4 结 论

1) 理论和压汞曲线证明, 砂岩孔隙结构中小于孔隙半径 r 的孔隙度与孔隙半径呈幂函数关系, 其指数与孔隙结构分维有关。因此可用压汞曲线计算孔隙结构分维。

2) 砂岩孔隙结构分维 (D) 应介于 2 与 3 之间。 D 接近于 2, 砂岩储集性能极好; D 接近于 3, 砂岩储集性能极差。

3) 不同成因的孔隙结构类型对应着不同的分维, 但相同或相似成因的孔隙结构的分维往往固定在某一范围, 故可用分维对砂岩孔隙结构进行分类。

4) 根据孔隙结构分维与孔隙度的交绘图, 将下二门油田砂岩孔隙结构区分为四类。I类的分维值为 2.40—2.50, 储集性能好; II类的分维值为 2.51—2.65, 储集性能中等; III类的分维值为 2.66—2.75, 储集性能差; IV类的分维值为 2.78—3.00, 储集性能最差。

参 考 文 献

- [1] Avnir D., Farin D. and Pfeifer P., Molecular Fractal Surface. Nature, 1984, 308 (15): 261.
- [2] 屈世显, 张建华, 分形与分维及在地球物理学中的应用, 西安石油学院学报, 1991, 6 (2): 8—13
- [3] Miuigan W O and Adams C R. An analytical expression for cumulative pore volumes and poresize distribution. Phys, 1945.

Fractional Dimension of The Pore- Texture in Sandstones and Its Application

*Chen Cheng*¹ and *Sun Yimei*²

¹ (Institute of Exploration and Development, Henan Oilfield 473132)

² (Jianhan Petroleum Institute, Hubei Shashi 434102)

Abstract

Recently, studies on the pore- texture have made significant progress. Many researchers consider that the pore- texture is a fractional texture with the self- similarity in sandstone. In this study, the authors inferred the power relationship between $\Phi(r)$ and r with fractional geometric principles, i. e.

$$\Phi(r) = K \cdot r^{3-D} \quad (1)$$

Where

$\Phi(r)$ - porosity whose pore radius is less than r , r - pore radius, K - proportional constant, and D - fractional dimension of the pore- texture.

The relationship between $\Phi(r)$ and r obtained from the mercury injection curve usually follows a straight line in the log- log plot. Thus, it was proved that the power relationship between $\Phi(r)$ and r inferred theoretically is correct and could provide a method for measuring fractional dimension of the pore- texture. The experimental results showed that fractional dimension of the pore- texture is a fraction between 2 and 3 in the three dimensions and that its size indicates a complex degree of the pore- texture which has a close relationship with the reservoir property in sandstones. Surface shape and size distribution of pores are either relatively simple if D is close to 2, so the reservoir property is extremely good; or relatively complex if D close to 3, so the reservoir property extremely poor in sandstones. Comparing Eq. (1) with $\Phi(r)$'s expression which is transformed from Milligan and Adams' formula of the accumulative pore volume, the authors considered that types of the pore- texture with different origin have different fractional dimensions, and fractional dimensions of the pore- texture with either the same or similar origin are usually within a certain range. It is seen that fractional dimension not only describes mathematical characters of complex degree of the pore- texture, but also indicates its original characters. In this paper, this is theoretical basis to classify and evaluate the pore- texture in sandstones. In the study on the Xia Ermen oilfield, although the fractional dimension value of the pore- texture has a closer relationship with permeability, no clear relationship exists with porosity in sandstones. The pore- textures could be divided into four types clearly according to distribution characters of samples on the fractional dimension's axis. Among these, the reservoir property of type I is good, type II moderate, type III poor and type IV worst. The results are consistent with those observed with microscope and scanning electric microscope, showing that fractional dimension is of importance in classification and evaluation of the pore- texture in sandstones.

Key words sandstone pore- texture fractional dimension classification and evaluation