

陆东凹陷交南断鼻上侏罗统砂岩的分形孔隙

王泽中 钟宝荣 陈恭洋 李龙滢 周丽娟

(江汉石油学院, 湖北荆沙 434102)

李真济 廖兴明 吴仁山

(辽河石油勘探局, 辽宁盘锦 124010)

用 SEM 图片半自动分析方法, 对陆东凹陷交南断鼻上侏罗统砂岩储层的 28 块样品进行的孔隙分形测量表明, 该储层孔隙分形分为沉积分形和成岩分形两大类。沉积分形孔隙是由颗粒表面原始的不规则性产生的, 分形维数一般小于 2.50, 分形孔隙度小于 5%, 分形孔隙占总孔隙的 15% 以下; 成岩分形孔隙是由自生粘土矿物、自生石英和长石溶蚀所产生的, 分形维数多大于 2.50, 分形孔隙度大于 5%, 分形孔隙在总孔隙中占 50%~80% 或更高。没有观察到碳酸盐胶结物产生的分形, 泥岩中的孔隙几乎全为分形孔隙, 而辉绿岩则无分形孔隙。

关键词 交南断鼻 砂岩储层 分形孔隙 分形维数 沉积分形 成岩分形

第一作者简介 王泽中 男 31 岁 讲师 (硕士) 沉积学与石油地质学

1 分形孔隙的测量

多数储集岩的孔隙均具有分形特征。这种分形特征主要是由孔隙与颗粒界面的凹凸不平所产生的。界面越是粗糙复杂, 分形特征越是明显。不难看出, 区分两类具有不同界面的孔隙在储层评价中有着重要的实际意义。而定量描述界面复杂程度的参数正是分形维数 D , 根据 D 可计算出分形孔隙度 Φ_f , 它表示在总孔隙中分形孔隙所占的份额, 其计算式为:

$$\Phi_f = A (L_1/L_2)^{3-D} \quad (1)$$

式中: L_1 为下截止尺度, L_2 为上截止尺度, D 为分形维数, A 为比例常数。对砂岩而言, 可取 $A=1$ 。其中, D , L_1 , L_2 均可从分形维数交会图中求得。

目前, 对分形孔隙的测量主要有手工方法和半自动方法两种。二者都是利用储层样品的扫描电镜 (SEM) 图片统计不同特征体的大小及个数, 从而建立特征体长度 (L) 与特征体个数 N 的双对数曲线, 从该曲线上求出样品的分形维数 D 及上下截止尺度 L_2 、 L_1 , 即可利用式 (1) 计算分形孔隙度。

手工测量方法精度差、速度慢。为此, 我们完成了 SEM 图片的半自动处理方法, 并开发出相应的软件。进行储层孔隙分形测量, 一般包括以下几个步骤:

1.1 制作SEM图片

与一般的SEM图片制作方法相似,将岩样打碎,取 $2\text{cm}\times 2\text{cm}$ 左右大小样品的新鲜断面,处理后在电镜下观察,选择一个典型的视域拍摄15~20张从50~4000倍不同放大倍数的照片。视域应能反映岩石孔隙结构的细节,同时不同倍数下的照片应尽可能保持灰度和反差一致。

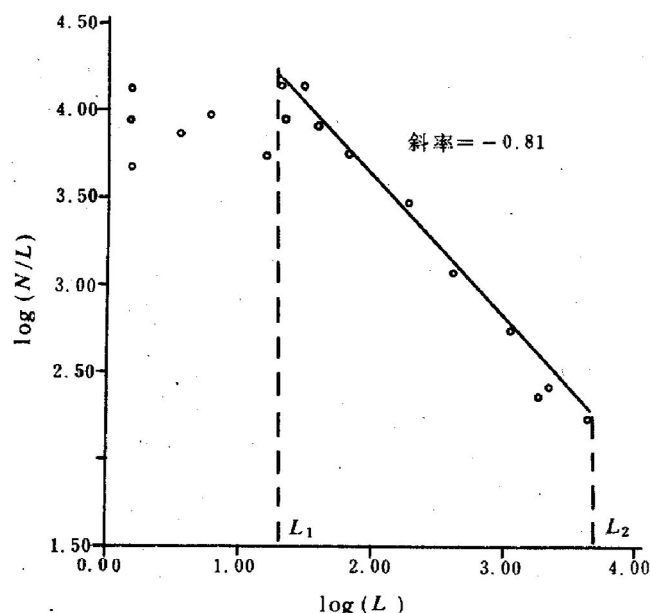


图1 样品J9~12的 L 与 N/L 的双对数图

L_2 与 L_1 之间一般相差1~2个数量级,图1求得 $L_1=3.2\mu\text{m}$, $L_2=38.86\mu\text{m}$,斜率 $K=-0.81$ 。由公式 $D=2-K$ 求得样品的分形维数 $D=2.81$ 。

2 结果及分析

我们对陆东凹陷交南断鼻上侏罗统碎屑岩储层28个样品的500余幅照片,按上述方法进行了处理,其结果如表1所列。结合薄片和X-衍射资料,可以把这些样品产生的分形孔隙归纳为四类。

2.1 自生粘土矿物产生的分形孔隙

主要有由高岭石、伊利石和绿泥石产生。高岭石在电镜下为假六方片状,集合体排列成书页状和蠕虫状。由于高岭石多呈孔隙充填式存在,不同放大倍数下均能见到。典型的由高岭石产生的分形样品如J12-1, J12-11。但比较这两个样品可以发现,虽然它们都有由高岭石产生的分形孔隙,但J12-1样品中高岭石广泛存在(图版1-1),故其分形孔隙度高,占98%。而J12-11样品则在局部发育高岭石,我们称之为高岭石分形岛,亦即分形孔隙并非在样品处处均匀地发育,故其分形孔隙度仅占49%。

伊利石在电镜下个体呈不规则片状、絮状,以衬垫式分布于颗粒表面。由于伊利石外表呈蜂窝状,因此它更容易产生分形孔隙,代表性样品有J2-3和J9-6,其分形孔隙度亦较高。

1.2 图片的数字化

将图片用扫描仪输入计算机后进行数字化,以便以数字的形式保存图像并进行处理。

1.3 特征体提取

特征体是指岩石颗粒与孔隙界面上的凹坑与凸起。特征体提取就是统计不同大小特征体的数目。

1.4 拟合特征体的概率分布图

即作单位长度上的特征体数目与特征体尺度的双对数图(图1),从该图即可得出下截止尺度 L_1 ,上截止尺度 L_2 ,其含义是长度大于 L_2 而小于 L_1 的特征体不具分形特征,

表1 交南断鼻储集岩分形分析结果

样号	井深/m	$L_2/\mu\text{m}$	D	Φ_f^*	Φ^{**}	Φ_f/Φ	形成机制
J12-1	1 042.10	70.81	2.78	10.41	10.6	0.98	高岭石产生的分形
J12-2	1 044.10	75.79	2.72	5.1			长石溶蚀产生的分形
J12-3	1 044.80	14.59	2.76	11.68			绿泥石及伊利石产生的分形
J12-4	1 175.35	10.18	2.57	2.58			不规则的长石颗粒及粘土矿物产生的分形
J12-5	1 176.05	7.69	2.24	0.19			泥质及长石表面的溶孔产生的分形
J12-6	1 686.20	12.94	2.06	2.16			玄武岩无分形孔隙
J12-7	1 589.35	6.69	2.28	0.29			岩屑及其表面的不规则性产生的分形
J13-3	1 111.86	6.96	2.36	0.53			颗粒及其表面的不规则性产生的分形
J13-5	1 728.0	2.66	2.72	13.11	18.4	0.71	它形石英及少量粘土矿物产生的分形
J13-8	1 732.8	17.12	2.72	7.89	18.8	0.42	石英自生加大及粘土矿物产生的分形
J13-10	1 735.6	57.97	2.76	8.61	11.6	0.74	粘土矿物分形及少量石英颗粒产生的分形
J2-3	2 114.7	30.57	2.76	10.13	15.9	0.64	伊利石及绿泥石产生的分形
J2-9	1 674.2	29.96	2.69	5.01	20.9	0.24	长石、石英断口, 分形很小
J2-10	1 673.0	18.92	2.80	15.63	24	0.65	长石表面的不规则性及丝绢状伊利石产生的分形
J2-11	1 162.2	16.12	2.78	13.37	17.6	0.76	高岭石产生的分形岛
J2-12	1 092.0	50.40	2.70	4.78	9.7	0.49	石英及少量绿泥石产生的分形
J5-1	1 123.65	24.53	2.74	8.65	20.8	0.42	高岭石+绿泥石产生的分形
J5-2	1 124.45	3.94	2.75	14.53	25.5	0.57	长石+粘土矿物共同产生的分形
J5-3	1 125.15	9.39	2.43	0.78			长石表面不规则产生的分形
J5-4	1 126.35	17.12	2.47	0.84	17	0.05	长石表面不规则产生的分形
J5-5	1 126.85	31.82	2.79	13.74	19.7	0.69	绿泥石产生的分形
J5-6	1 127.65	50.40	2.81	14.84	22	0.67	长石溶蚀产生的分形孔隙, 长石表面极不规则
J7-1	1 724.90	18.17	2.72	7.65			粘土矿物质点和大小不同的方解石晶粒
J9-4	1 621.0	26.58	2.79	12.99	20.5	0.63	长石表面不均匀产生的分形, 碳酸盐含量少
J9-6	1 612.0	24.53	2.78	13.19	18	0.73	自生石英及丝绢状伊利石产生的分形
J9-8	1 581.05	8.00	2.27	0.32	24.3	0.01	少量石英次生加大及岩屑碎片产生的分形
J9-9	1 579.60	16.44	2.57	2.03	23.4	0.08	长石碎片及少量伊利石产生的分形
J9-12	1 117.8	38.86	2.81	14.83	19.0	0.78	石英及伊利石产生的分形岛

* Φ_f : 分形孔隙度, 其中, 据晶体成核理论及成岩过程中矿物生成机理, L_1 一般统一地取 $2 \times 10^{-9} \mu\text{m}^{[1]}$, 此处从略

** Φ : 岩芯测定孔隙度

绿泥石为规则的叶片状, 充填于孔隙中或附于颗粒表面。典型的由绿泥石产生的分形样品有 J5-5, 具有较高的分形孔隙度。

根据 X-衍射分析结果, 交南断鼻上侏罗统储集岩中的粘土矿物随深度变化 (图 2)。高岭石和绿泥石主要发育于 1 200 m 以上, 伊利石主要发育于 1 500 m 以下。由此可知, 由高岭石和绿泥石产生的分形孔隙多存在于 1 200 m 以上, 而由伊利石产生的分形孔隙则多存在于 1 500 m 以下。

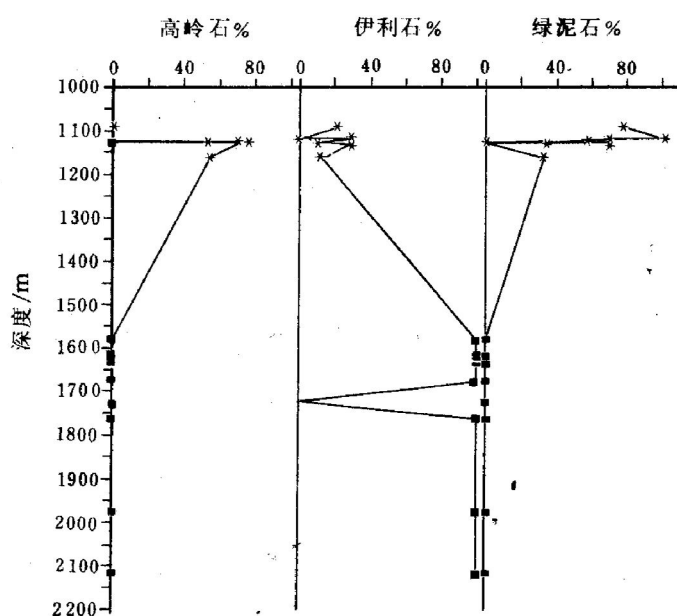


图2 交南断鼻粘土矿物含量变化 (据X-衍射分析结果) 图

幂指数关系正是分形存在的必要条件^[2]。

2.3 长石溶蚀产生的分形孔隙

研究区储集岩成分成熟度低,主要表现为长石和岩屑含量高。长石在成岩过程中的溶蚀广泛存在,因此亦有较多由长石溶蚀产生的分形孔隙。代表性样品有J12-2, J5-5和J9-4,其长石含量分别为30% (薄片鉴定)、57% (X-衍射分析)和34% (X-衍射分析)。薄片和电镜下均见长石被溶蚀成蜂窝状 (图版1-3, 4)。

2.4 颗粒本身的不规则性产生的分形孔隙

主要是由岩屑、长石、石英和粘土杂基的不规则性产生的分形。由于储集岩的物源近、搬运距离短而且又多为重力流搬运,颗粒多为棱角状和次棱角状,因此由颗粒不规则性产生的分形孔隙亦大量存在。代表性的样品有J12-4等。但这类分形孔隙的分形维数小,分形孔隙度低。

从表1可以看出,由自生粘土矿物、自生石英和长石溶蚀等成岩现象产生的分形孔隙的分形维数 D 一般大于2.50,分形孔隙度在8%以上,分形孔隙占总孔隙的50%~80%或更高。这类分形我们称之为成岩分形。而由颗粒不规则性产生的分形孔隙其分形维数 D 一般小于2.50,分形孔隙度小于5%,分形孔隙占总孔隙的15%以下,这类分形我们称之为沉积分形。由此可见,成岩作用是产生分形孔隙的主要因素。

值得指出的是,我们无论在普通显微镜下、电镜下或是X-衍射分析,都发现储集岩中发育大量碳酸盐胶结物,主要为方解石和白云石,另有少量碳钠铝石。有的样品碳酸盐胶结物含量达40%,一般为5%~20%,但在分形测量中却未见到由白云石或方解石产生的分形孔隙。其原因尚需进一步研究。

我们有意选择了两块非储层样品作为对比研究。一个是黑色钙质泥岩(J7-1);另一个为辉绿岩(J12-6)。J7-1在电镜下主要见由陆源粘土矿物和方解石晶粒组成 (图版1-5, 6),

2.2 自生石英产生的分形孔隙

它是石英沿颗粒表面生长而形成的,由于石英均垂直颗粒表壁生长,晶粒大小变化大,因而容易产生分形孔隙。由于石英的生长并不是处处均匀的,因而亦称石英分形岛 (图版1-2),典型的样品如J9-12、J2-12、J13-8等,其分形孔隙度的高低依石英分形岛在岩石中的多寡而定。

以上两种分形都是在成岩过程中因自生矿物沉淀而产生的。关于自生矿物形成并产生分形的机制,Katz等^[1]曾从化学动力学的角度进行过讨论,他们的结论是,晶体生长的尺寸 R 与具有这种尺寸的晶体个数 $N(R)$ 间存在着幂指数关系,而这种

方解石晶粒很细, 只有在高倍放大时才可见, 具分形孔隙, 其分形孔隙度 Φ_f 为 7.65% (表 1)。该样品为非储集岩, 没有进行岩芯物性分析, 但估计其孔隙度为 5%~10%, 可能其分形孔隙含量很高。J12-6 样品在镜下见自形长条状、板状斜长石呈不规则排列, 含量 70%~80%, 其间充填方解石、白云石晶粒和少量磁铁矿、辉石, 具典型的粗玄结构。分形测试结果, 分形维数 $D=2.06$, 分形孔隙度 $\Phi_f=2.16$, 说明不具分形特征。

3 研究意义

通过孔隙分形的研究, 陆东凹陷上侏罗统储层存在沉积分形和成岩分形两大类。这为衡量沉积作用和成岩作用对孔隙造成的影响提供了一个定量的尺度和为开采油气、保护储层提供了一个重要的依据。若储层具有较高的分形孔隙, 即孔隙与颗粒的界面比较复杂, 就会使其中的流体运动不畅, 导致较高的残余油饱和度, 不利于提高采收率。又因为我们的研究已经指出本区的分形孔隙并不是因为碳酸盐矿物的沉淀所造成的, 因而也不能用酸化一类的方法来改善储层, 这些都已在现场引起了重视。

分形的研究不仅仅局限于储集岩微观孔隙结构方面, 而且在储层非均质性、渗流现象、裂缝发育规律等各方面都有广泛的应用^[3]。相信这种以描述复杂现象而见长的方法将会在油气勘探开发的各个领域发挥更大的作用。

参 考 文 献

- 1 Kats A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54: 1325~1328
- 2 Krohn C E. Fractal measurements of sandstones, shales and carbonates. *J. Geophys. Res.*, 1988, 93 (B4): 3297~3305
- 3 王域辉, 廖淑华. 分形与石油. 北京: 石油工业出版社, 1994. 123~254

FRACTAL PORES OF UPPER JURASSIC SANDSTONE IN JIAONAN FAULT-NOSE, LUDONG DEPRESSION

Wang Zezhong Zhong Baorong Chen Gongyang

Li Longyan Zhou Lijuan

(Jiangnan Petroleum Institute, Jingsha, Hubei)

Li Zhenji Liao Xingming Wu Renshan

(Liaohu Bureau of Petroleum Exploration, Panjin, Liaoning)

Abstract

Fractal pore measurement of 28 samples collected from Upper Jurassic sandstone were made using a statistical analysis of structural features on fracture surfaces of SEM pictures.

The fractal pore measurement indicates that there are two types of fractal pores. The depositional fractal pores and diagenetic fractal pores. The depositional fractal pores are formed of original irregular grain surfaces during deposition. The fractal dimension is less than 2.50, the fractal porosity is generally less than 5%, the fractal pores amount to 15% of the total pores. The diagenetic fractal pores resulted from authigenetic clay minerals, qaurts and dissolution of feldspars. The fractal dimension of those fractal pores is greater than 2.50, the fractal porosity is usually higher than 5%, and the fractal pores are more than 50%~80%. No fractal pores caused by carbonate cements could be found. Almost all the pores in mudstone are fractal pores while there is no fractal pores in diabase.