

自然伽马测井曲线的分形特征分析

梁齐端, 赵世龙, 丁忙生

(核工业 208 大队, 内蒙古 包头 014010)

摘要:许多研究认为,自然伽马曲线具有分形特征。根据实际资料,利用分形理论,对自然伽马曲线进行了分析,结果发现,自然伽马曲线的分形特征与地层中放射性富集程度有关,曲线的分形特征在一定的范围内存在,但当地层中放射性物质含量富集到一定程度时,就不具有分形特征。分形在自然伽马测井曲线中的适用性需要认真分析。

关键词:分形;自然伽马曲线;放射性异常

中图分类号: P631.8⁺17

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 8918(2006)03 - 0240 - 04

分形理论是一门新兴的边缘科学,是由美国学者 Mandelbrot 在 20 世纪 70 年代初创立的。从统计意义上讲,一个分形体具有的几何特征是各个组成部分的形状可视为整体形状的缩影,分形理论提供了一种不同的描述复杂自然现象的手段。地质问题是复杂的非线性问题,分形方法是解决非线性问题的一种有效的新方法,因此分形几何在石油、核能、煤炭勘探中得到了广泛的应用。

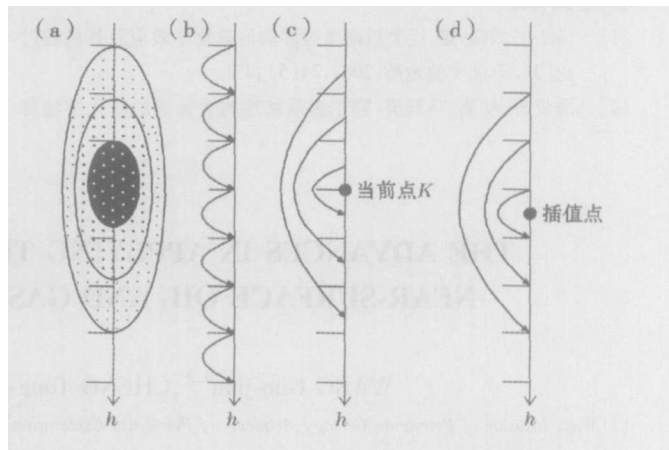
许多研究表明,地震波曲线、测井曲线具有分形性质,在地球物理数据处理中得到了普遍的应用:应用分形技术由拟测井曲线重建声测井曲线;利用分形插值方法,由一条测井曲线修复另一条曲线,最终解决实际测井过程中产生的曲线断缺问题;根据维数的变化情况,检测地层的含油性;将分形几何理论应用于井间储层参数预测,仅用少量的既反映储层宏观变化趋势又反映储层内部非均质变化的储层参数建立预测模型。

在当前的勘探中,分形理论应用得较多的是预测储层的物性,研究储层的特征。1986 年,美国石油工程师 T. A. Hewett 首次将分形理论应用到储层表征之后,分形理论便成了进行储层物性分析的有利工具。测井资料是对储集层中多种信息的综合反映,其中某种成分发生变化,测井曲线形态即发生变化,反映该种信息的分维数亦发生变化,根据分维数的变化就可较为准确地求出地层中的信息。该方法在渗透性、非均质性等方面应用较广。

1 分形几何与分维数

自然伽马曲线测量的是探测晶体一个邻域的平均

结果(如图 1a),并未反映当前深度下的实际地球物理属性,合理地定义测井曲线的测度就成为讨论自然伽马测井曲线的关键。当以等间距进行自然伽马曲线测量时(如图 1b),图 1c、图 1d 用一个不断增大的尺子($h, 3h, 5h, \dots$; h 为采样间隔),以当前点 $k(k \cdot h$ 深度处)为中心的一个测井曲线覆



a—测井值来自当前点邻域的均值;b—各测井点代表其周围采样点深度覆盖内的值;c—已知点周围邻域的测量覆盖尺度;d—未知点周围邻域的深度覆盖

图 1 测井曲线覆盖及测井曲线测度定义

盖,在各个覆盖下定义测度为^[1]:

$$\mu(k,) = \sum_{i=k-M/2}^{k+M/2} x(i) \cdot h_0 \quad (1)$$

式中, $\mu(k,)$ 为当前点 k 处以 $=M \cdot h$ 为覆盖尺度的测度, $x(i)$ 为 $i \cdot h$ 深度处的测井曲线值; h 为测井曲线采样间隔。

在欧氏空间中,当将覆盖尺度扩大(或缩小)倍时, $\mu(k,)$ 将扩大(或缩小)倍,其豪斯多夫维

数 $D_f^{[2]}$:

$$D_f = \ln / \ln \quad (2)$$

当 D_f 大于其拓扑维数 D_i 时,对于一维数据,其分形维数的变化范围为 1 ~ 2,自然伽马就具有分形特征,否则就不具备分形。

1986年首次将分形理论应用到储层表征中^[3],从此之后,分形理论便成了储层物性分析的一个有利工具。1991年 Taggart对几个不同地方的几口砂岩垂直井进行了分析,发现所有的测井曲线都有分形特征^[4]。在实际工作中,经常发现自然伽马曲线的分形只存在于一定的情况下,在某些情况下并不具有分形,分形维数变化较大。笔者分析自然伽马曲线后,认为今后分形技术在测井曲线地质解释中将能发挥指导作用。

2 分形

自然伽马测井是通过在井内测量岩层中自然存在的放射性射线强度来研究地质问题的一种方法,广泛地应用于划分岩性、估算岩层泥质含量、地层对比等,同时也用于探测和评价放射性矿藏,如铀矿。

岩石的天然放射性是由岩石中所含铀、钍和放射性钾等放射性核素引起的^[3],岩石中的放射性核素含量也千差万别。以沉积岩为例,沉积岩层中的放射性核素含量主要与它的含泥质的多少有关,随泥质含量增大而变大,常采用自然伽马测井曲线估计泥质含量。放射性核素也在地层中富集,形成矿床(图 2)。因此对自然伽马曲线应加以区分,分正常场与异常场进行研究。

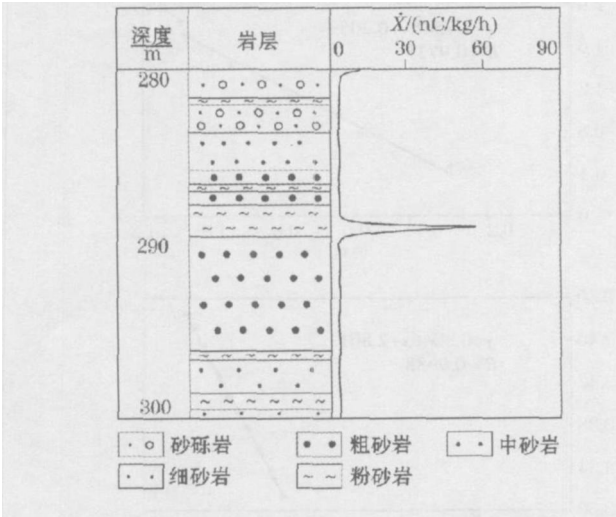


图 2 巴音戈壁盆地 ZK巴 5 自然伽马测井曲线

2.1 正常场的分形特征

图 2 的自然伽马测井曲线在 287.50 ~ 289.9 m 深度段测得,自然伽马测井数值比围岩的值偏高,出

现了一个峰值,显示放射性核素在地层中的富集,这段称之为放射性异常场,在其外称为放射性正常场,在正常场中选取一个点 294 m,以此中心,利用式 (1)、(2) 计算正常场的分形维数(豪斯多夫维数)。将覆盖尺度的扩大倍数与测度扩大倍数作双对数坐标图(图 3),对这些散点确定最小二乘法的最佳拟合曲线,拟合线的相关系数为 0.999 2,拟合趋势线的斜率(D_f)为 1.057 2,这个结果与 J. Pang 和 C. P. North 在北海北部 Dunlin 油田 11 口井伽马测井曲线的分维数介于 1.002 5 ~ 1.103 3 之间^[4]相吻合,说明当计算数据没有涉及放射性核素富集层位数据时,作为一维曲线,其分形维数大于其拓扑维数,自然伽马曲线具有分形特征。

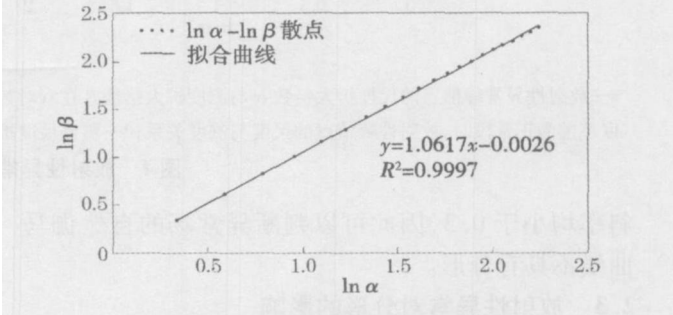
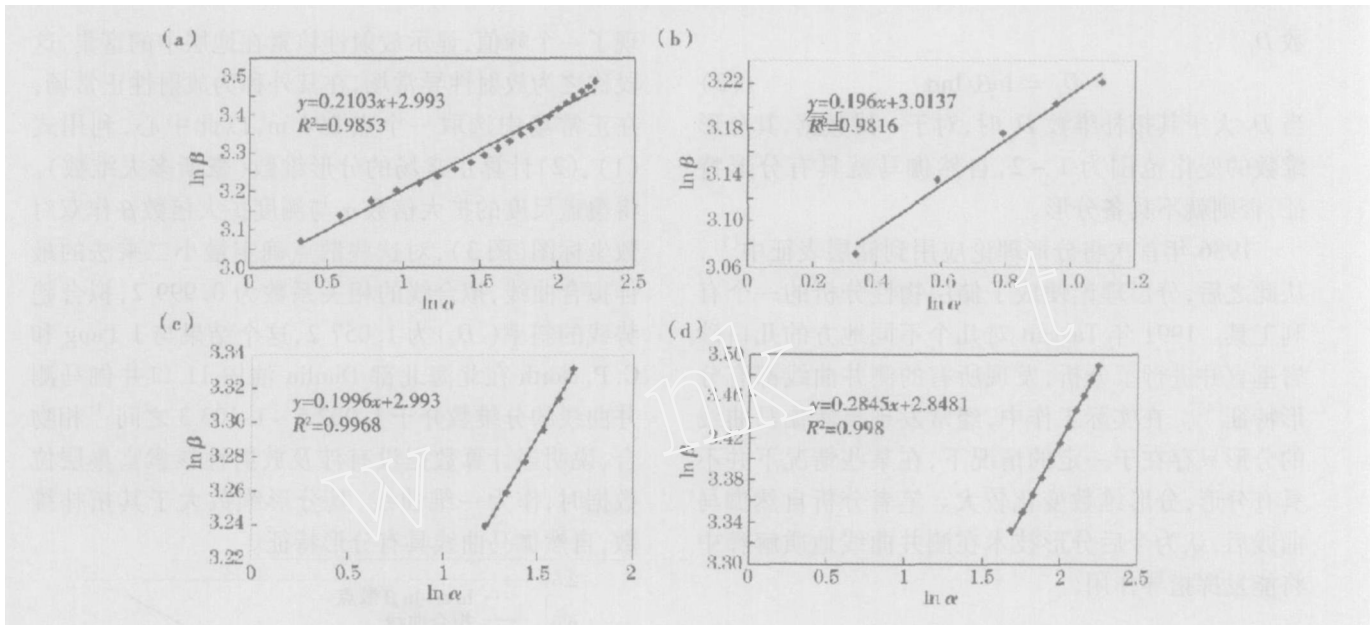


图 3 放射性正常场测度与尺度分析

2.2 异常场的分形特征

如果地层中的放射性核素富集到一定程度,在放射性勘探中将这种情况称为形成了放射性异常。图 2 中的 287.50 ~ 289.90 m 深度段,自然伽马曲线是否具有分形特性? 选取最大峰值点(288.90 m)来讨论。

以峰值(288.90 m)点为中心,采用不同的尺度,计算其分形维数,将覆盖尺度扩大到正常场(图 4a),这时曲线的分形维数为 0.210 3,拟合线的相关系数为 0.985 3,直线的拟合程度较差,在图中 $\ln - \ln$ 呈 3 段式的特点,没有明显表现出分形的特征。当覆盖尺度在异常段内开始增大时,周围低的测井值对其造成了较大的影响。随尺度的增大,的扩大速度比的扩大速度快(图 4b),这时拟合直线的斜率为 0.196。随着尺度的不断增大,覆盖到正常场,拟合线的斜率为 0.199 6,仍然保持着相同的趋势(图 4c)。当尺度增大到一定程度,拟合线的斜率有所增加(图 4d), D_f 值为 0.284 5,拟合线的相关系数增大为 0.998, $\ln - \ln$ 表现出较强的线性关系。对于异常段,不管其覆盖尺度有多大,无论在异常场(图 4b),还是涉及正常场与异常场(图 4c),甚至是完全在正常场(图 4d)中,自然伽马曲线的局部分维数都小于 1,在图 4 中表现为所有拟合直线的



a—放射性异常峰值点的尺度扩大倍数 与测度扩大倍数 在双对数坐标中的关系；b—覆盖范围为异常区间时的尺度与测度关系；c—尺度范围为正常段时，放射性峰值点的尺度与测度关系；d—覆盖尺度扩大到正常场时，放射性异常峰值点的测度与尺度关系；图例同图 3

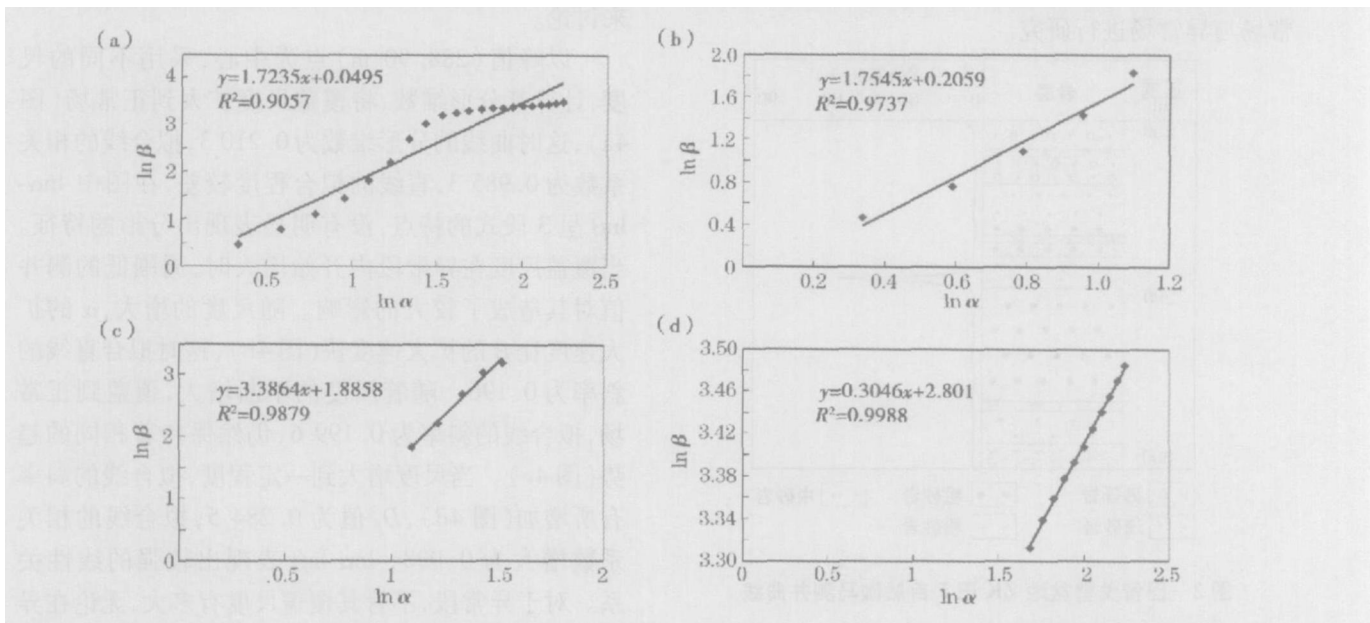
图 4 放射性异常场测度与尺度分析

斜率均小于 0.3,因此可以判断异常场的自然伽马曲线不具有分形。

2.3 放射性异常对分形的影响

经过上述分析,正常场的自然伽马曲线具有分形特征,异常场不具有分形特征,那么放射性异常数据是否对正常场的分形特征有影响呢?选取 290 m 处的放射性异常数据计算分形维数,它位于正常场,上邻放射性异常段,往下是正常场;以这个点为中心,随着覆盖尺度的增大,向上覆盖异常场,向下是

正常场,其 $\ln -\ln$ 的散点曲线(图 5a)没有呈现出线性关系,而有 3 段式的特点。当覆盖尺度增至峰值(288 90 m)时(图 5b),拟合线的斜率为 1.754 5,与总体相同,但是系数为 0.973 7,明显增大,各点仍分散于拟合趋势线的两侧,变化较大;当覆盖了整个异常段时(图 5c),拟合直线的斜率为 3.386 4,对于一维数据,分形维数的变化范围为 1~2,可以判定这时自然伽马曲线不具有分形;随着尺度的增加,覆盖范围向上增至正常场,这时 $\ln -\ln$ 的线性关系



a—异常数据对分形的影响；b—不断增大的异常数据对分形特征的影响；c—放射性异常峰值数据使得测度的扩大倍数远大于尺度的扩大倍数；d—经过异常段影响后正常场的自然伽马曲线不再具有分形特征；图例同图 3

图 5 放射性异常对正常场分形的影响分析

明显增加(图 5d),但其斜率减小为 0.349,在此时自然伽马曲线不具有分形。

分析表明,自然伽马曲线作为一种自然分形,在特定的情况下具有分形特征,由于地层的放射性核素分布的不规律性,当计算数据涉及放射性异常段数据时不具有分形特征。

3 结论

分形学作为一种现代数学方法,为测井资料的地质解释提供了一种新的手段,利用该方法计算得到的巴音戈壁盆地 ZK巴 5 正常场的自然伽马曲线的分维数为 1.057 2,自然伽马曲线正常场具有分形特征。对于异常场而言则不具有分形。

自然伽马异常能够引起曲线的分形特征发生变化,这与原始数据的变化有关,原始数据变化越快,测度的变化相应变快,在尺度变化速度不变的情况下,分形维数的变化也加快。

对于由于岩性发生变化引起的原始数据变化要加以区分,在图 3 中有一个“偏离点”,这是由于地层岩性发生变化,地层中的放射性核素的富集程度不同,晶体探测器的有效探测范围发生变化,导致自然伽马测量读数产生突变,其结果是测度发生变化。

自然伽马曲线不是一种规则分形,而是自然分形,它的自相似性存在有其尺度范围。当地层中的天然放射性核素富集成异常时,曲线就不具备分形,同时这些异常数据又会影响正常场曲线的分形特征。目前的问题是不存在一个可用的参考量来确定阈值,确定自然伽马曲线的无标度域,只能通过试验来取得。分形在自然伽马曲线应用之前,还要对其适用性进行认真分析。

参考文献:

- [1] 李度谋,成秋明. 测井曲线分形校正[J]. 地球科学——中国地质大学学报. 2002, 27(1): 63.
- [2] 谢季坚,邓小炎. 现代数学方法选讲[M]. 北京:高等教育出版社. 2001.
- [3] Hewett T A. Fractal distribution of reservoir heterogeneity and their influence on fluid transport[R]. SPE 15386, 1986.
- [4] Taggart IJ, Salisch H A. Fractal distribution of reservoir heterogeneity and their influence on fluid transport[J]. APEA Journal, 1991, 31.
- [5] 丁次乾. 矿场地球物理[M]. 山东:石油大学出版社. 2002.
- [6] Pang J, North C P. 分形理论及其在测井资料地质解释中的适用性[J]. 宋丽译. 国外油气勘探. 1997, 9(3): 385.

AN ANALYSIS OF FRACTAL CHARACTERISTICS OF NATURAL GAMMA-RAY LOGGING CURVES

LIANG Qi-duan, ZHAO Shi-long, DENG Mang-sheng

(No. 208 Geological Party, Bureau of Geology, CNPC, Baotou 014010, China)

Abstract: Many researchers hold that natural gamma-ray curves have fractal characteristics. Using the fractal theory, the authors studied some natural gamma-ray curves. The result shows that the fractal characteristics of the natural gamma-ray curves are related to the extent of radioactive concentration in strata. The fractal characteristics exist within a certain range but disappear when the radioactive concentration exceeds a certain value. The adaptability of fractal characteristics in natural gamma-ray curves should be carefully analyzed.

Key words: fractal; natural gamma-ray curve; radioactive anomaly

作者简介: 梁齐端(1969 -),男,高级工程师。1992年毕业于华东地质学院,主要从事放射性勘探和研究工作。