

# 钻井岩屑分形分析的现场应用研究

潘德元, 何计彬

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

**摘要:**岩屑是反映地层资料的重要依据,在实验条件下岩石的可钻性与岩屑的分形维数存在明显的相关性,但现场岩屑的几何特征及粒度分布受到钻进过程中多因素的综合影响,不同条件下获得的岩屑粒度分布规律不同。因此采用分形理论对不同工程及地质条件的岩屑进行分析,总结各因素对岩屑分形规律的影响及其影响程度。结果表明:岩屑粒径分布具有良好的分形特征;现场岩屑分形维数是对井下各种因素的综合表现,比较符合实钻情况;等破碎概率 $P_c$ 是判断钻进效率的参数之一,可通过调整钻进参数降低 $P_c$ 值,提高机械钻速。

**关键词:**岩屑;岩石可钻性;粒度分布;分形分析;等破碎概率

**中图分类号:**P634.1   **文献标识码:**A   **文章编号:**1672-7428(2016)11-0011-04

**Research on the Field Application of Analysis on Cutting Particle Size/PAN De-yuan, HE Ji-bin** (Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, Baoding Hebei 071051, China)

**Abstract:** Cuttings are important evidence for the formation research, and there is a significant correlation between rock drillability and fractal dimension in Lab, but the geometric characteristics and particle size distribution of cuttings are affected by multiple factors during the drilling process, particle size distribution is different for cuttings obtained under different conditions. According to fractal theory, the cuttings of different engineering and geological conditions are analyzed to sum up the influence and influence degree of various factors to fractal law of cuttings. The results show that the cuttings particle size distribution has good fractal features; the cuttings fractal dimension is conform to the real drilling situation; and equiprobable breaking  $P_c$  is one of the parameters to judge drilling efficiency,  $P_c$  value can be reduced by adjusting drilling parameters to improve ROP.

**Key words:** cuttings; rock drillability; particle size distribution; fractal analysis; equiprobable breaking

岩屑是指在钻进过程中钻头破碎岩体后被循环介质携带出地表的岩石碎屑,是反应地层资料的重要依据。不同性质的地层,以及不同的钻进工艺产生岩屑的粒径大小数量都不相同,通过对岩屑进行分形分析,研究岩屑的粒度分布规律,可以探索相应地层的岩石可钻性,相应钻进工艺的岩石破碎机理,为研究岩石破碎工艺,提高钻进效率提供理论依据和技术参考。

分形是对那些没有特征尺度而又具有相似性的现象的总称,自20世纪80年代以来在岩石力学方面得到了广泛应用,国内外学者都已取得了大量的研究成果<sup>[1-5]</sup>。国内学者已提出采用分形方法描述钻井上返岩屑分布规律来确定岩石破碎难易程度的理论,并在室内实验中得到了验证<sup>[6-15]</sup>,表明岩石可钻性分形分级表在描述岩石可钻性方面具有很高

的精度。

但是,在钻井施工过程中,岩屑的形成受到多个因素的影响,在地质方面有钻遇岩石的力学特征、岩石化学成分、岩石物理性质等,在工程方面有碎岩方式、钻进参数、钻井工况等,在工艺方面有岩屑的收集方式等。因此,钻井现场岩屑的粒度分布规律是否适用需要进一步研究探索。

## 1 分形理论

分形反映了自然界中一类对象局部与局部、局部与整体的自相似性,是该类对象的基本属性,分形理论旨在试图找到介于有序与无序、宏观与微观、整体与局部之间的新秩序<sup>[2]</sup>。描述分形的特征参数是分形维数,采用 $D$ 表示,在实际应用中通常把几何上不明显的自相似性转化为统计意义上的自相似

收稿日期:2015-12-04;修回日期:2016-07-24

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“东北典型地区深部水文地质调查”(编号:12120114025001)

作者简介:潘德元,男,汉族,1982年生,工程师,钻井工程专业,硕士,从事钻探技术研究工作,河北省保定市七一中路1305号,panyice@163.com。

性,如针对岩屑的研究就是在统计意义下自相似<sup>[2-4]</sup>。

针对颗粒的分布分析,可采用 Rosin - Rammler 和 Gaudin - Schuhmann 两个分布函数进行分析<sup>[3]</sup>。根据函数定义,通常认为 Rosin - Rammler 函数趋向于粗粒端,而 Gaudin - Schuhmann 函数趋向于细粒端<sup>[4-5]</sup>,而在钻井现场获取的岩屑粒度总体分布细粒端占较大比例,因此在本文的研究中采用 Gaudin - Schuhmann(高登 - 舒兹曼)分布函数进行分析。

$$y = (x/x_m)^n \quad (1)$$

式中: $x$ ——粒径尺寸; $y$ ——粒径小于 $x$ 的岩屑相对量; $x_m$ ——粒度的分布特征值,即岩屑的理论最大粒径; $n$ ——模型参数,简称模数,表征岩屑粒度分布系数。

## 2 岩屑等破碎分形模型

钻头破碎岩石产生岩屑的过程是一个统计自相似过程,岩屑的分布具有分形特征,从几何角度来看,岩屑可是不同大小,具有自相似性的多边形几何体。

在钻头作用下,岩石从一大块体以相似比 $\gamma = 1/B$ 等概率 $P_c$ 破碎成几个近似的几何体,由于破碎颗粒之间相互摩擦、挤压、或与钻头再次作用,从而发生再次破碎,如此,岩体不断发生破碎。 $B$ 为岩体破碎基数,研究证明 $B$ 取3最合适<sup>[5]</sup>。根据已有研究成果<sup>[5,9]</sup>:

$$D = 3 - (\ln P_c / \ln \gamma) = 3 - n \quad (2)$$

$$P_c = 3^{D-3} \quad (3)$$

## 3 岩屑粒度分形分析计算方法

根据分形理论,在分形范围 $[a, b]$ 中任取一个区间 $[e, f]$ ,在该区间内分形理论仍然是成立的。岩屑在取样的过程中,通常经过振动筛过滤,采用筛网清洗,岩屑的微小粒径颗粒已经流失,而大颗粒岩屑在取样过程中存在较大误差,因此需要合理的确定筛网尺寸范围,对岩屑样品进行“去头截尾”处理,消除实际操作中产生的误差<sup>[7]</sup>。

同时,在钻进过程中,岩屑的形成受到岩体本身的岩性以及钻进工艺两大因素影响。水敏性地层产生的微小岩屑易水化进入钻井液,而大块岩屑之间会胶结起来,从而形成岩屑的粒度组成。牙轮钻头、PDC 钻头、潜孔锤等钻进方式在同一岩性地层中钻

进产生的岩屑粒度组成分布也不同。在本次研究中,将直接采取不同岩性、不同钻进方式产生的岩样进行分形分析,探索在实际应用中的可行性。

岩屑粒度的分布分形模型有两种:(1)岩屑尺寸 - 数量关系;(2)岩屑尺寸 - 质量关系。由于上返岩屑粒度分布趋向于细粒,在数量统计上存在很大困难,在实际中难以得到应用,一般采用第二种分形模型,根据岩屑尺寸 - 质量关系确定分形维数<sup>[5]</sup>。

设一系列不同孔径 $r$ 的筛网对岩屑进行筛选,岩屑总质量为 $M$ ,筛网下粒径小于 $r$ 的岩屑质量为 $M(r)$ ,根据式(1)G-S公式得:

$$M(r)/M = (r/x_m)^n \quad (4)$$

对上式两边取对数:

$$\ln[M(r)/M] = n \ln r - n \ln x_m \quad (5)$$

将式(5)改写为线性函数:

$$Y = BX + A \quad (6)$$

## 4 岩屑样品采集

岩屑采取井位于五大连池火山群地区,实钻地层依次为玄武岩、灰绿色泥岩、碳质板岩以及砂砾岩夹层等,在玄武岩地层采用气动潜孔锤钻进,循环介质为空气,在下部取样井段采用 PDC 钻头钻进,循环介质为膨润土钻井液。本次试验采取的岩屑为潜孔锤钻井的玄武岩岩屑, PDC 钻头钻进的泥岩岩屑和碳质板岩岩屑。

玄武岩井段为 3.6 ~ 67.4 m,地层破碎,裂隙发育,岩屑基质为隐晶质,呈灰黑色,颗粒分散。泥岩井段为 97.6 ~ 152.7 m,其中上段为灰绿色泥岩,下段为灰绿色含砾泥岩,砾石含量约 25%,岩屑胶结明显,粒径偏大。碳质板岩井段为 162.7 ~ 210.2 m,黑色,含约 10% 的方解石和白云岩,含有少量胶结物。

## 5 岩屑分形分析

### 5.1 岩屑筛分

将岩屑选用不同孔径的筛子进行筛分称重,孔径分级为:0.25、0.5、1.0、2.0、4.0、10.0、20.0 mm,其中 4.0、10.0、20.0 mm 孔径筛网为圆孔筛,其余为方孔筛。在筛分过程中发现样品粒径 < 0.25 mm 岩屑极少,同时,除泥岩外,玄武岩和碳质板岩中粒径 > 20.0 mm 的岩屑极少,因此根据岩屑取样过程

及分形理论,对部分岩屑样品进行“去头截尾”处理。在现场取样中,玄武岩岩屑不同深度取样 10 个,泥岩岩屑取样 5 个,碳质板岩取样 5 个,因篇幅有限,将具有代表性的岩屑筛分结果列出,见表 1。

表 1 岩屑粒径质量分布

| 岩性   | 岩屑性质 |      | 岩屑不同粒径筛下累计相对含量/% |       |       |       |       |       |
|------|------|------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 编号   | 井深/m | 0.5 mm           | 1 mm  | 2 mm  | 4 mm  | 10 mm | 20 mm |
| 玄武岩  | 1    | 10   | 0.17             | 5.95  | 21.26 | 40.65 | 81.12 |       |
|      | 2    | 20   | 1.23             | 6.70  | 19.22 | 33.69 | 76.19 |       |
|      | 3    | 30   | 2.86             | 15.90 | 35.93 | 56.92 | 90.62 |       |
|      | 4    | 45   | 1.57             | 13.12 | 38.94 | 66.62 | 94.15 |       |
|      | 5    | 55   | 5.14             | 19.31 | 42.21 | 61.84 | 89.25 |       |
| 泥岩   | 6    | 100  | 2.24             | 3.54  | 7.08  | 12.66 | 37.62 | 72.44 |
|      | 7    | 140  | 8.54             | 20.56 | 36.72 | 51.00 | 75.83 | 95.59 |
| 碳质板岩 | 8    | 175  | 6.73             | 30.64 | 56.80 | 74.44 | 97.01 |       |
|      | 9    | 190  | 3.58             | 22.54 | 44.03 | 54.03 | 96.87 |       |

由岩屑筛分结果可知,(1)采用气动潜孔锤钻进玄武岩地层产生的岩屑粒径主要处于中粒端,过大过小粒径的岩屑含量都较少。这是由于潜孔锤以冲击碎岩方式为主,岩石主要为体积破碎,同时由于钻遇地层裂隙发育,跑风严重,大粒径岩屑难以随着带出气流返出井口,需经重复破碎为小颗粒方可返出。(2)采用 PDC 钻进灰绿色泥岩的岩屑粒径偏向粗粒端,大于 10 mm 的岩屑含量 >60%,而灰绿色含砾泥岩的粒径分布比较平均。泥岩岩屑中含有较多的粘土成分,岩屑之间易胶结形成大块岩屑,造成岩屑颗粒分布偏向粗粒端,而 7 号岩屑中含有较多砾石,所以粒径分布与 6 号不同。(3)碳质板岩岩屑的粒径分布大致符合正态分布。

## 5.2 岩屑分形分析

画出表中的粒度累计相对含量与岩屑粒径在对数坐标中的曲线图,以  $\ln r$  为横坐标,  $\ln[M(r)/M]$  为纵坐标,如图 1,2,3。

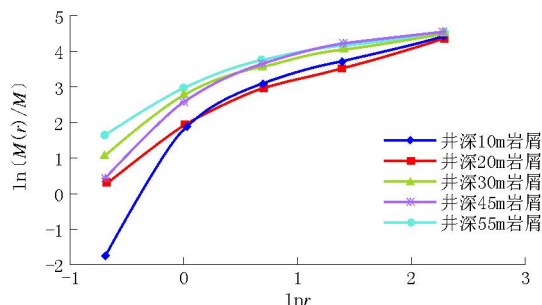


图 1 玄武岩岩屑分形曲线

根据图 1,2,3,用最小二乘法拟合回归直线,其斜率即为所求的分形维数,见表 2。

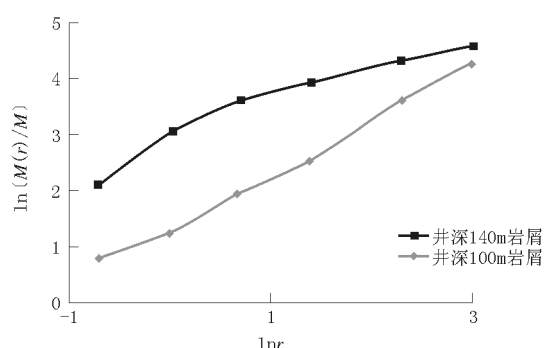


图 2 泥岩岩屑分形曲线

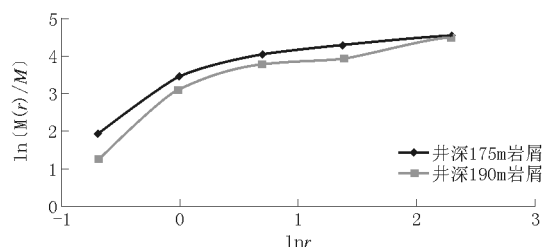


图 3 碳质板岩岩屑分形曲线

表 2 粒度分形特征统计表

| 岩屑编号 | 相关系数 $R$ | 分形维数 $D$ | $P_e$   | 拟合关系式                      |
|------|----------|----------|---------|----------------------------|
| 1    | 0.910484 | 1.102723 | 0.12439 | $Y = 1.897277X + 0.834073$ |
| 2    | 0.970217 | 1.676531 | 0.23364 | $Y = 1.323469X + 1.606677$ |
| 3    | 0.941659 | 1.907431 | 0.30110 | $Y = 1.092569X + 2.226918$ |
| 4    | 0.924269 | 1.695418 | 0.23854 | $Y = 1.304582X + 2.123737$ |
| 5    | 0.946709 | 2.083059 | 0.36518 | $Y = 0.916941X + 2.714768$ |
| 6    | 0.909128 | 2.035082 | 0.34643 | $Y = 0.964918X + 1.337752$ |
| 7    | 0.918932 | 2.378723 | 0.50533 | $Y = 0.621277X + 2.906471$ |
| 8    | 0.997079 | 2.172535 | 0.40290 | $Y = 0.827465X + 3.040161$ |
| 9    | 0.966528 | 2.002115 | 0.33411 | $Y = 0.997885X + 2.611472$ |

## 5.3 岩屑的分形维数应用分析

如表所示,  $\ln r$  与  $\ln[M(r)/M]$  相关系数  $R$  都大于 0.9,说明两者之间具有良好的相关性,但是由于实钻中存在其他影响因素,玄武岩中裂隙发育,岩屑上返困难,泥岩岩屑之间胶结,唯有碳质板岩的  $R$  最高。

根据前人研究得知,牙轮钻头钻进的岩石可钻性级值  $K_d$  与岩屑分形维数  $D$  存在着明显的对应性<sup>[7]</sup>。玄武岩的  $K_d$  值通常大于泥岩、板岩,但是从表 2 中发现三者分形维数  $D$  之间与相应的可钻性级值没有对应性,表明采用不同钻进工艺取得的岩屑分形维数之间没有可比性。

岩石的破碎概率表示钻头破碎岩石的能力,也表示岩屑整体破碎的情况,同时反应钻进的机械钻速,破碎概率越高,说明钻头对岩屑重复破碎越多,

导致钻进效率降低。从表2中可以发现气动潜孔锤钻进时的破碎概率较小,1号岩屑位于井深10 m处,地层裂隙尚未发育,因此 $P_c$ 值最小,随着井深增加,地层裂隙逐渐发育,气体漏失严重,岩屑重复破碎概率逐渐增加,钻至泥岩及碳质板岩地层后,因现场泥浆泵检修,采用单泵循环钻进,携岩效果差,导致岩屑重复破碎概率较大,钻时增加。

## 6 结论与建议

(1)通过对现场获得的钻井岩屑进行筛分, $\ln r$ 与 $\ln[M(r)/M]$ 相关系数 $R$ 都大于0.9,说明岩屑粒径分布具有良好的分形特征。

(2)现场岩屑分形分析与室内实验分析结果<sup>[7-10]</sup>相差较大,受现场多因素影响,分形维数已经与岩石可钻性之间的相关性不大。

(3)现场岩屑分形维数是对井下各种因素对岩屑影响综合表现,包含了碎岩方式、岩石岩性、地层特点、钻进参数等因素的影响,比较符合实际钻进中地层可钻性。

(4)岩石的等破碎概率 $P_c$ 是判断钻进效率的参数之一, $P_c$ 值越高,说明岩屑重复破碎越多,钻进效率越低,可通过调整钻进参数降低 $P_c$ 值,提高机械钻速。

(5)岩屑在进行标准化处理后得到的分形维数与岩石的可钻性相关,将该结果与现场岩屑分析结果对比可判断现场各因素对岩石钻速的影响程度,从而可筛选出主要影响因素。

## 参考文献:

- [1] Mandelbrot B B. Fractal character of fracture of meals[J]. Nature, 1984, 308: 271 - 272
- [2] 艾南山,陈嵘,李后强. 走向分形地貌学[J]. 地理学与国土研究, 1999, 15(1): 11 - 15.
- [3] 谢和平. 分形 - 岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 239 - 249.
- [4] 程士珍. 浅谈分形的应用[J]. 天津工业大学学报, 2001, 20(4): 65 - 67.
- [5] ZHAO Zhongyan, WANG Yi, LIU Xiaohao. Fractal analysis applied to cataclastic rocks[J]. Tectono Physics, 1990, 178: 373 - 377.
- [6] 李玮,闫铁. 岩石可钻性分形法的检验与评价[J]. 西部探矿工程, 2013, (1): 52 - 58.
- [7] 李士斌,李玮. 岩石可钻性分形法的可行性分析[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(3): 24 - 26.
- [8] 黄勇,朱丽红,殷琨,等. 潜孔锤反循环钻进岩屑粒度分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(4): 1119 - 1124.
- [9] 余继峰,刘焕杰,李增学. 砂岩粒度分布分形特征研究方法探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 480 - 485.
- [10] 宓永宁,岳川,陈浩等. 辽河特细砂混凝土骨料的分形研究. 科学技术与工程, 2015, 15(31): 91 - 95
- [11] 李士斌,闫铁,李玮. 地层岩石可钻性的分形表示方法[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 124 - 127.
- [12] 李玮. 岩石可钻性的分形表示方法研究[D]. 黑龙江大庆: 大庆石油学院, 2006.
- [13] 闫铁,李玮,李士斌,等. 牙轮钻头的岩屑破碎机理及可钻性的分形法[J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(2): 27 - 30.
- [14] 刘石,许金余,白二雷,等. 基于分形理论的岩石冲击破坏研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 163 - 166.
- [15] 徐永福,张庆华. 压应力对岩石破碎的分维影响[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 250 - 254.