

岩土工程

# 流体参与下的岩石破裂机制及其分形特征

杨果岳, 张家生

(中南大学土建学院, 湖南长沙, 410075)

**摘要** 流体参与下的岩石破裂机制一般分为爆发作用、流化作用和液压致裂等, 其分维值大小一般遵循爆发作用、流化作用、液压致裂。通过对凤凰山铜矿 II 号矿体不同地段的角砾岩进行分形统计分析, 判明其属于液压致裂角砾岩, 验证了分维值的大小与致裂能量之间的正相关关系。

**关键词** 爆发致裂 流化致裂 液压致裂 角砾岩 分形

[中图分类号] P585.2 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2006)03-0107-04

岩石破裂的发展和传播是一个极其复杂的非线性过程, 碎形生成过程包含许多不同标度上的破裂的相互作用。如果碎形在很大的标度范围内产生, 其自然标度与材料性质和破裂过程无关, 那么可以预料, 碎形中的数目与大小之间的分布将是分形的<sup>[1]</sup>。

越来越多的证据表明, 岩石的破裂(形貌与过程), 在很宽的范围内都表示出在时间、空间和强度上的分形特征<sup>[2][3]</sup>。分维数是较好反映岩石破裂机理的一个综合参量<sup>[2]</sup>。

研究岩石破裂的分形特征与成矿流体之间的内在联系, 对于热液矿床的快速勘察有着十分重要的意义。

## 1 流体参与下的岩石破裂机制

在构造地质学和岩石力学中, 关于岩石破裂机制有库仑破裂理论、欧文破裂理论和格里菲斯能量理论<sup>[4]</sup>, 但这些理论都属于固体力学的范畴, 没有考虑流体的作用。

流体作用下的岩石破裂在于流体形成异常高压, 即储集空间中的流体压力高于静水压力<sup>[5]</sup>。有研究表明: 当流体的内能与内压所产生的瞬时作用力远大于围岩的破坏强度极限时, 流体就会地下发生迅猛的爆发作用<sup>[6]</sup>; 当流体所产生的浮力大于自由碎屑颗粒的重力时, 流体与碎屑的混合物就会发生流化作用<sup>[7]</sup>; 当流体具有异常高压时, 岩石中就会存在液压致裂作用<sup>[8]</sup>。

### 1.1 爆发致裂和流化致裂

爆发致裂是当流体(主要是气体)的内能与内压所产生的瞬时作用力远大于围岩的破坏强度极限时, 流体会在地下发生迅猛的爆发作用, 围岩会在极短时间内破碎。如果流体因爆发而过度扩容或逃逸, 迅速降低的内压则不能满足碎屑再发生任何流体动力作用, 此时形成的破裂产物—角砾岩为爆发角砾岩<sup>[9]</sup>。

流化致裂一般发生在爆发致裂之后, 爆发致裂使围岩破裂时, 残余内能及内压所产生的浮力大于自由碎屑颗粒的重力时, 流体与碎屑的混合物就会发生流化作用<sup>[10]</sup>。流化作用是物理与化学共同作用的统称。爆发作用致岩石破碎后, 高速运动的流体带着碎块流动, 在这个过程中, 碎块与碎块之间, 碎块与围岩之间发生撞击。撞击产生的能量波又引起脆性碎裂, 应力场与碎裂的方式如同爆发作用。每个碎块记录着复杂而动态的角砾化演变, 所有撞击所产生的动能都转换为弹性能, 这种弹性破碎系统是制造更细的破碎介质的最有效的方法<sup>[9]</sup>。碎块在流动的过程中, 还与流体发生化学反应, 它们之间发生反应的原因是两者之间的化学不平衡。这种反应其实也是一种溶蚀过程, 它使原本呈锯齿状或棱角状的碎块具有好的磨圆度<sup>[10]</sup>。

### 1.2 液压致裂

液压致裂发生的条件是  $P_f > \sigma_3 + R_f$  ( $P_f$  为流体压力,  $\sigma_3$  为最小主应力,  $R_f$  为岩石内聚力最薄弱处的岩石抗张强度) 时, 即岩石中孔隙(或裂隙)流

[收稿日期] 2005-11-24; [修订日期] 2006-02-11; [责任编辑] 陈仁俊。

[第一作者简介] 杨果岳(1974-), 中南大学在读博士研究生。主要从事岩石土力学方面的研究。

体的压力超过岩石所受的最小主应力和岩石最薄弱处的抗张强度之和时,岩石就会发生破裂。

我们可以用流体参与下的摩尔-库仑强度理论来解释它的致裂机理:

1. 流体压力表达式:根据多孔均匀介质渗流的达西定律、质量守恒定理可以推出二维条件下流体压力的表达式为

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

2. 流体压力产生的影响:在没有流体压力作用的情况下,摩尔圆所代表的应力状态的方程为

$$\left( \sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau^2 = \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 \quad (2)$$

当流体压力  $P$  作用于岩石后,修正后与之相当的应力为  $\sigma$ , 其中  $\nu$  为修正系数,则有效正应力  $\sigma = \sigma_0 - \nu P$ ,  $\sigma_0$  所代表的应力状态服从新的摩尔圆方程

$$\left( \sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \nu P \right)^2 + \tau^2 = \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 \quad (3)$$

可见,由于流体压力的作用,使摩尔圆向左移动了  $\nu P$ , 与包络线相切(图1),引起岩石破裂。流体压力越大,岩石越容易破裂。

## 2 流体参与的角砾岩化的分形

角砾岩是岩石破裂的极端产物,它不仅是造成一种特殊的有利于水-岩反应的岩石构造,也是一种岩石扩容的有效方式,更重要的是它造成一种特殊变化的物理环境。

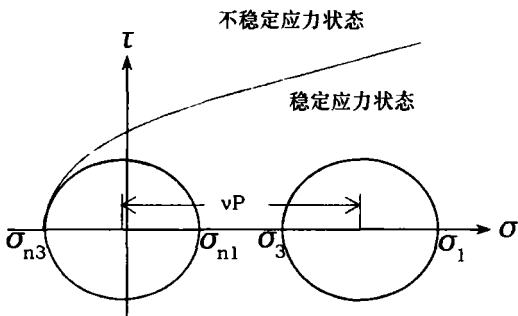


图1 考虑流体压力的摩尔圆

随着分形理论的创立和发展,岩石破裂的研究方法已由几何研究发展到了分形研究阶段<sup>[10],[11]</sup>,从而更深入地揭示了岩石破裂的微观机制。

### 2.1 分维数的计算

定量描述自相似性的参数称为“分维数”或简称“分维”,记为  $D$ ,可以是分数。维数是一定时空

的数值特征,普遍应用维数观正是现代非线性科学获得的共识。岩石破碎块度分布的分形统计方法有很多种,我们常用的有以下四种:

1. 根据分形的基本定义,按尺-频关系有

$$N \sim r^{-D} \quad (4)$$

其中,  $N$  为特征尺寸大于  $r$  的碎块数,  $D$  即块度分布维数。

2. 由质量统计法,按质-频关系有

$$N(m) \sim m^{-b} \quad (5)$$

其中,  $N(m)$  为质量大于  $m$  的碎块数,  $b$  为质量分布指数。因  $m \sim r^3$ , 故  $D = 3b$

3. 由 Weibull 统计法可得

$$M(r)/M_r = 1 - \exp[-(r/r_0)^a] \quad (6)$$

其中,  $M(r)$  为尺度大于  $r$  的碎块质量,  $M_r$  为总质量,  $r_0$  为碎块平均尺度,若  $r/r_0 < 1$ , 则

$$M(r)/M_r \sim r^{-a} \quad (7)$$

因  $dN \sim r^{-D-1} dr$

又  $dN \sim r^{-a} dm$  故

$$D = 3 - a$$

4. 由密度统计法可得

$$f(m) dm \sim m^{-s} \quad (8)$$

其中,  $f(m) dm$  为质量在  $m \sim m + dm$  间的碎块数,可得

$$D = 3(s - 1) \quad (9)$$

由于幂函数分形分布是其中唯一的一类不含特征尺度的分布。这样在研究岩石破碎的分形时,一般应用的是尺-频和质-频关系。考虑在野外工作进行碎形尺寸大小的统计比较方便,所以本文将应用的是尺-频关系。

为了求出分维数  $D$ , 将观测数据  $[N(r_1), N(r_2), N(r_3), \dots, N(r_n)]$  和  $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ , 绘在双对数坐标上,如果散点大致分布在一条直线上的话,分维数  $D$  就可以利用直线的斜率求出,也就是说,将观测数据  $[N(r_1), N(r_2), N(r_3), \dots, N(r_n)]$  和  $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ , 代入  $N(r) = Cr^{-D}$ ,

上式可分解为两式:

$$N(r) = Cr^D \quad r > 0 \quad (10)$$

$$N(r) = Cr^{-D} \quad r > 0 \quad (11)$$

然后两边取对数,  $N(r) = Cr^{-D}$  可化为一元线性回归模型:

$$\lg N(r) = -D \lg r + \lg C \quad (12)$$

用最小二乘法求出斜率  $D$  的估计值,即为分维数。

### 2.2 流体参与的角砾岩化的分形特征

人们对角砾的研究经历了从定性到定量的过程,对角砾的定量研究方法有形貌的分形、颗粒粒径分布 (Particle size distribution) 的分形、组构、膨胀率等,尤其是前两者用的较为普遍。形貌的分形研究是指单个的颗粒,而颗粒尺寸分布的分形研究则是针对整个破碎区域的颗粒。

单个角砾形貌的分维值  $D_f$  的求法很多,比如球度或平面形状的比率(长比宽)、面积比周长等。不同的方法各有利弊,本文不一一述说。但有一个总的结论,角砾的外貌形状越复杂其分维值  $D_f$  就越高<sup>[10]</sup>。

破碎岩石的颗粒尺寸分布的分维值  $D_s$  的大小与破碎过程、初始尺寸分布、碎裂事件发生的次数、能量的输入、应变和围岩的压力有关,它们之间是正相关关系<sup>[9]</sup>。

流体参与的角砾岩化的形貌分形特征比较复杂,这主要是和流化作用中的化学作用有关,化学作用可以给出两种破碎形态。一种是有限扩散的方式,它产生形貌比较均匀的角砾。一种是运动方式,它产生形貌比较复杂的角砾<sup>[10]</sup>。前者  $D_f$  值低,后者高。这样  $D_f$  值可以帮助区别运动方式,但不能辨识一个形貌较圆的角砾岩的成因,因为它的形成与不同的角砾化过程有关,包括流体的升降压、撞击、有限扩散溶蚀。

流体参与的角砾岩化的颗粒尺寸分布 (P. S. D) 的规律比较简单,一般遵循爆发作用—流化作用—液压致裂,当然它们之间的界限没有那么明显,因为各种作用本身都相伴发生,有时重叠在一起。但因为爆发作用的能量最大,所以它的分维值也最大。Grady 和 Kipp 在 1987 年的实验中得出的分维值在 4 到 6 之间。其次是流化过程,它的分维值  $< 2.5$ 。再其次是水压致裂,它的分维值  $< 2$ 。

## 3 凤凰山铜矿的岩石破裂机制及分形特征

### 3.1 凤凰山铜矿岩石破裂机制

凤凰山矿床的特点是受接触带和断裂构造双重控矿。矿体受接触带控制的最主要原因在于接触带是反差极大的岩性变化带,因而也是物理和化学环境的急剧过渡带,是构造变形的薄弱带,因而也是应力集中的场所。构造应力和流体压力在接触带产生共同作用,导致岩石破裂。岩石的破裂不仅仅是构造应力的结果,成矿流体作用下的液压致裂和临界致裂也是其形成的重要机制,而流体参与的岩石角

砾化是其外在表现。

### 3.2 凤凰山铜矿岩石破裂的分形特征

我们采用的是统计角砾颗粒粒径的方法,由于 II 号矿体是凤凰山矿床的主要矿体,因此它的统计结果具有一定的代表性。我们沿着 II 号矿体的岩体—近矿体—矿体内—矿体附近大理岩中的角砾作一个统计剖面,根据统计结果用最小二乘法,做回归分析,得各段角砾的分维值(图 2)。

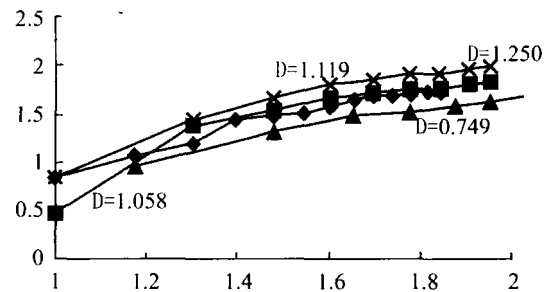


图 2 凤凰山铜矿 II 号矿体各段角砾分维值

前面已经论述,流体参与下的角砾岩化的颗粒尺寸分布 (P. S. D) 的分维值  $D_s$  大小与破碎过程、初始尺寸分布、破裂事件发生的次数、能量的输入、应变和围岩的压力有关,它们之间是正相关关系,即破裂事件发生的次数越多、能量的输入越大、围岩的压力越大,  $D_s$  值就越大。

从以上的统计计算我们可知在 II 号矿体的统计剖面上,矿体内角砾的分维值 (1.250)  $>$  近矿体角砾的分维值 (1.119)  $>$  岩体内角砾的分维值 (1.058)  $>$  矿体附近大理岩角砾的分维值 (0.749)。如前所述,在 II 号矿体的统计剖面上,四处角砾的分维值都小于 2,这说明它们的破裂是以液压致裂为主。而且从它们分维值的大小排列,我们可以推测它们破碎时的能量大小的排列为:矿体内角砾  $>$  近矿体角砾  $>$  岩体内角砾  $>$  远矿体大理岩角砾。这很容易理解,因为容矿部位的角砾,处于破碎扩容中心,因此它的致碎的能量输入肯定是最大的;离矿体较远的大理岩角砾,致碎的能量输入肯定较小。可以这么认为,离成矿中心,向两边延伸的角砾岩破碎带,随着离扩容成矿中心的距离越远,它的破碎能量输入就会越小。由此可以推断在隐爆致裂角砾岩中,爆发中心的角砾分形分维值肯定大于爆发边缘和远离爆发中心的角砾岩分维值,这也可以用能量的输入大小来解释。也正因为如此,隐爆角砾岩的分维值一般要大于液压致裂角砾岩的分维值,因为隐爆的能量肯定大于液压致裂的能量。当然,

影响分维值大小的因素很多,在这里,能量可能起了决定性的作用。

#### 4 结论

(1) 流体导致岩石破裂的原因在于流体产生异常高压,实验研究和大量野外证据都表明,流体异常高压是广泛存在的,并可用流体参与下的摩尔-库仑强度理论来解释它的致裂机理;

(2) 角砾是岩石破裂的极端产物,通过对凤凰山铜矿 II号矿体的岩体-近矿体-矿体内-矿体附近大理岩中的角砾进行统计分析,发现其具有分形分布,且分维值大小按矿体内角砾 >近矿体角砾 >岩体内角砾 >远矿大理岩角砾的顺序排列;

(3) 证明了 II号矿体角砾的产生是以液压致裂为主,同时也证明了颗粒尺寸分布的分维值  $D_s$  的大小与致裂能量大小之间的正相关关系。

#### [参考文献]

- [1] 特科特. D. L. . 分形与混沌在地质学和地球物理学中的应用 (陈禹页,郑捷,季颖译). 北京:地震出版社, 1993, 21 ~ 36  
[2] 申维. 分形混沌与矿床预测. 北京:地质出版社, 2002

- [3] 高峰,赵鹏. 岩石破碎程度的分形度量. 力学与实践. 1994, 16 (2): 16 ~ 17.  
[4] 朱志澄,宋鸿林. 构造地质学. 武汉:中国地质大学出版社, 1990. 50 ~ 54.  
[5] 李明诚. 石油与天然气运移. 北京:石油工业出版社, 1987, 11 ~ 13.  
[6] Bumhan C W. Energy release in subvolcanic environments: implications for breccia formation. Econ Geol, 1985, 80: 1515 ~ 1522.  
[7] Sillitoe R H. Ore - related breccias in volcanoplutonic areas. Econ Geol 1985, 80: 1467 ~ 1514.  
[8] Meere P A. High and low density fluid in a quartz vein from the Irish Variscides. J Struct Geol 1995, 17 (3): 435 ~ 446.  
[9] Tom G. Cataclasis and Processes of Particle Size Reduction. PA-GEOPH, 1996, 136: 136 ~ 151.  
[10] J Jebrak M. Hythermal breccias in vein - type ore deposits: A review of mechanism, morphology and size distribution. Ore Geology Reviews 1997, 12: 111 ~ 134.  
[11] Lorilleux G, Jebrak M, Cuney M Baudemont. Polyphase hydrothermal breccias associated with unconformity - related uranium mineralization (Canada): from fractal analysis to structural significance. Journal of Structural Geology, 2002, 24: 324 ~ 338.

## THE MECHANISMS OF FLUID - ASSISTING ROCK FRACTURE AND THE FRACTAL CHARACTERISTIC

YANG Guo - yue, ZHANG Jia - sheng

(Central South University, Hunan Changsha 410075)

**Abstract:** The mechanisms of fluid - assisting rock fracture is divided into outburst fracturing, fluid - chemical fracturing and hydraulic fracturing, etc. The worth size of fractal follows generally Principle that outburst fracturing is larger than fluid - chemical fracturing and fluid - chemical fracturing is larger than hydraulic fracturing. Fractal statistical computation is given to the breccias associated with the ore body II, typical ore body in the Fenghuangshan deposit. It is judged that rock fracture results from the hydraulic fracture mechanism and there is a positive related relation between fractal worth and fracture energy.

**Key words:** outburst fracturing, fluid - chemical fracturing, hydraulic fracturing, breccias, fractal statistics