

常规三轴压缩下花岗岩断裂表面 的分形研究

倪玉山 匡震邦

(西安交通大学 西安 710049)

杨英群

(能源部西北勘测设计院科学研究所 西安 710054)

摘要 用花岗岩试件做了常规三轴压缩试验,对在不同围压作用下的岩石断裂表面进行了分形研究。其结果表明,随着围压的增加,沿破坏面剪切错动方向分形维数增加,而垂直于该方向的分形维数则基本不变。用光学显微镜及扫描电镜观察岩石断口的分形特征,分析了岩石断裂机理。结果表明,分形维数是一个能反映岩石损伤断裂机理的特征参数。

关键词: 三轴压缩, 断口表面形貌, 分形维数

1 引言

如所周知,岩石的最终宏观破坏是与其内部微结构及外载情况紧密相关的。由于岩石类材料本身微结构的复杂性和影响因素的多样性,对其断裂机理的认识,仍是地质和采矿科学所面临的一大课题。岩石断裂后,断裂表面的粗糙不平程度是其微结构、载荷以及其他复杂因素的一个综合反映。因此,若能对其断口特征做出真实的描述,我们就有可能追溯岩石断裂时的力学行为,从而加深对岩石损伤断裂机理的认识。

以前人们对这种不规则形貌无法进行定量描述。1984年 Mandelbrot 等⁽¹⁾将分形概念引入材料断口学,使得对断口这一不规则形貌的定量描述成为可能。目前,国内外已对金属⁽²⁾、陶瓷⁽³⁾、橡胶⁽⁴⁾等材料的断口进行了分形分析,并取得了一些成果。实验事实使我们相信,分形几何是定量描述断口特征的一种有效方法,对其做进一步的研究是很有理论价值和现实意义的。

岩石类材料断口的分形分析,近几年在国内外也是比较活跃的一个领域^(5,6),但至今还未见到国内外对岩石三轴受压断裂表面进行分形行为研究的报道。本文对青海拉西瓦花岗闪长岩进行了常规三轴压缩试验,对其在不同围压下的破坏断口进行了分形特征研究。结果发现,花岗岩分形行为的码尺区间与其晶粒尺寸密切相关。对平行和垂直于破坏面剪切错动方向的分形维数进行了分析计算,发现随着围压的增加,沿剪切错动方向的分形维数增加,而垂直于该方向的分形维数基本不变。用光学显微镜及扫描电镜观察不同围压下

的断口分形特征,分析其断裂机理,发现上述两个方向的断裂机理有所不同,同分维测量结果一致.可以认为分形维数是反映岩石损伤断裂机理的一个特征参数.上述结果使我们对花岗岩三轴受压变形破坏机理有了更进一步的认识.

2 实验及分析方法

2.1 实验方法

以青海拉西瓦花岗闪长岩钻孔岩心为材料.其成分为:条纹长石 40%,斜长石 40%,石英 10%,普通角闪石 9%,黑云母 1%. 晶粒尺寸为 0.3—4 mm,试样为直径 4 cm、高 9 cm 的圆柱体.实验前,对试样进行了防油处理.

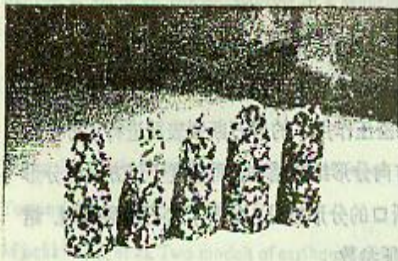


图 1 破坏后的花岗岩试样

Fig. 1 Fractured granite samples

常规三轴压缩实验均在长江—500 型岩石三轴试验机上进行.实验时,控制围压,每步加差应力 5 MPa,直至岩石破坏.围压分别为 10、20、25、30、40 和 55 MPa.在每个围压下试验三块试样.岩石试样破坏后,剪切断裂面与轴向应力夹角为 20° 左右,如图 1 所示.

2.2 断口粗糙面测量

岩石断口形貌测量采用自行设计的一套图像阴影轮廓测量方法⁽⁷⁾.该测量方法的基本原理为:在岩石表面上放一把直尺,经光线照射,即可在岩石表面产生一条阴影,如果岩石表面是光滑的,阴影边界将是直线,如果岩石表面是粗糙的,阴影边界则是一条不规则的曲线.光源如以垂直角度照射岩石表面,即可得到一条反映垂直断裂表面轮廓形貌尺寸的迹线.

本实验采用 CCD 摄像机,对形成的岩石表面阴影轮廓进行取象.经过 PC-vision 图象输入系统处理后,即可及时得到该图象的一幅数字化图象.通过该图象处理系统的计算机,即可迅速而方便地得到该阴影线的数值,即岩石表面轮廓轨迹.

本实验对每一断裂表面,平行于及垂直于剪切滑动方向分别测量三条平行测线,每条长 4 cm,1000 个测量数字点,每个数字点间距为 40 μm.分析每个方向的分形维数时,按三条测线分形维数平均取值,然后对围压相同的三块试样的分形维数取平均,作为该围压下的分形维数.

2.3 分形维数的计算

在分形的实验研究中发现,现有的计算分形维数的方法,码尺的改变对结果的影响较大,且用各种方法计算分形维数时,所得结果不尽相同.本实验采用了 Dubuc 等新近发展的变差法(variation method)⁽⁸⁾.用该方法计算分形维数时,码尺的改变对结果的影响

小, 易得到断裂表面的真实分形维数, 比现今通用的求断口分维的方法(切割岛法, 垂直截面法等)优越。

实质上, 该方法仍可采用一般的分维计算公式

$$D = \log N / \log(1 / \varepsilon) \quad (1)$$

式中 N ——覆盖的盒子数; ε ——码尺

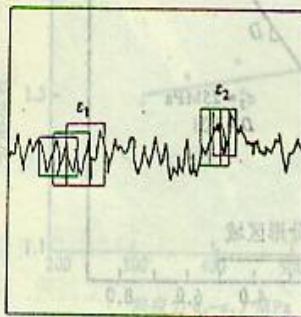


图 2 变差法图示

Fig. 2 A graphical representation of the variation method

以轨迹上一定数字点的水平距离作为码尺单位(ε_1), 如图 2 所示。从迹线首端开始作直方盒子(其宽度为 ε_1 , 高度为在 ε_1 范围内数字点的最大值与最小值的差值), 并计算盒子面积。以相同的 ε_1 沿迹线移动, 每前进一个测量点, 即重新建立直方盒子, 直到迹线末端。将盒子面积求和, 并除以 ε_1^2 进行归一化, 作为相应于 ε_1 的盒子数 $N(\varepsilon_1)$ 。按上述方法, 逐次改变码尺 ε , 并重新覆盖整个迹线长度, 画出 $N(\varepsilon)$ 与 $1/\varepsilon$ 的双对数图, 其斜率即为分形维数。

在本实验中, 共取了 1000 个点(4 cm), 因此, ε 最大为 1000 个点。采用归一化单位($\varepsilon/1000$)进行计算, 实际的分形维数是 $N(\varepsilon)$ 与 $1000/\varepsilon$ 的双对数图的斜率。

不同围压下的分形数计算如图 3 所示。

整个实验的结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

Tab. 1 Experimental results

| 试样编号 | 围压 σ_3 (MPa) | 差应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa) | 平行于剪切 方向的分维 D_1 | 垂直于剪切 方向的分维 D_2 | $D_1 + D_2$ |
|---------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| 1-1, 2-1, 3-1 | 10 | 312.0 ± 13.0 | 1.30 ± 0.03 | 1.30 ± 0.02 | 2.60 ± 0.02 |
| 1-2, 2-2, 3-2 | 20 | 366.7 ± 1.8 | 1.33 ± 0.01 | 1.31 ± 0.03 | 2.64 ± 0.02 |
| 1-3, 2-3, 3-3 | 25 | 402.0 ± 0.1 | 1.32 ± 0.02 | 1.26 ± 0.03 | 2.58 ± 0.02 |
| 1-4, 2-4, 3-4 | 30 | 431.1 ± 3.0 | 1.35 ± 0.02 | 1.26 ± 0.01 | 2.61 ± 0.02 |
| 1-5, 2-5, 3-5 | 40 | 436.8 ± 0.8 | 1.31 ± 0.02 | 1.26 ± 0.02 | 2.57 ± 0.02 |
| 1-6, 2-6, 3-6 | 55 | 525.5 ± 0.5 | 1.34 ± 0.02 | 1.32 ± 0.03 | 2.66 ± 0.02 |

材料宏观断口的分形特征依赖于材料本身的脆性和随机性的综合反映。在岩石三轴压缩实验中, 岩石的损伤断裂过程, 直接决定着岩石的断裂过程。假设岩石为脆性破坏, 不消耗塑性能, 在断裂过程中, 能量全部用于岩

新数据(与第10期)表明,随着围压的增大,岩石的破坏模式由脆性向延性转变,破坏前的应变硬化现象更加明显。上述结果一致,可以认为分形维数是反映岩石破坏前应变硬化现象的一个特征参数。上述结果(第10期)对花岗岩三轴受压破坏前应变硬化现象有了更深入的解释,为岩石破坏前应变硬化现象提供了一个新的解释。

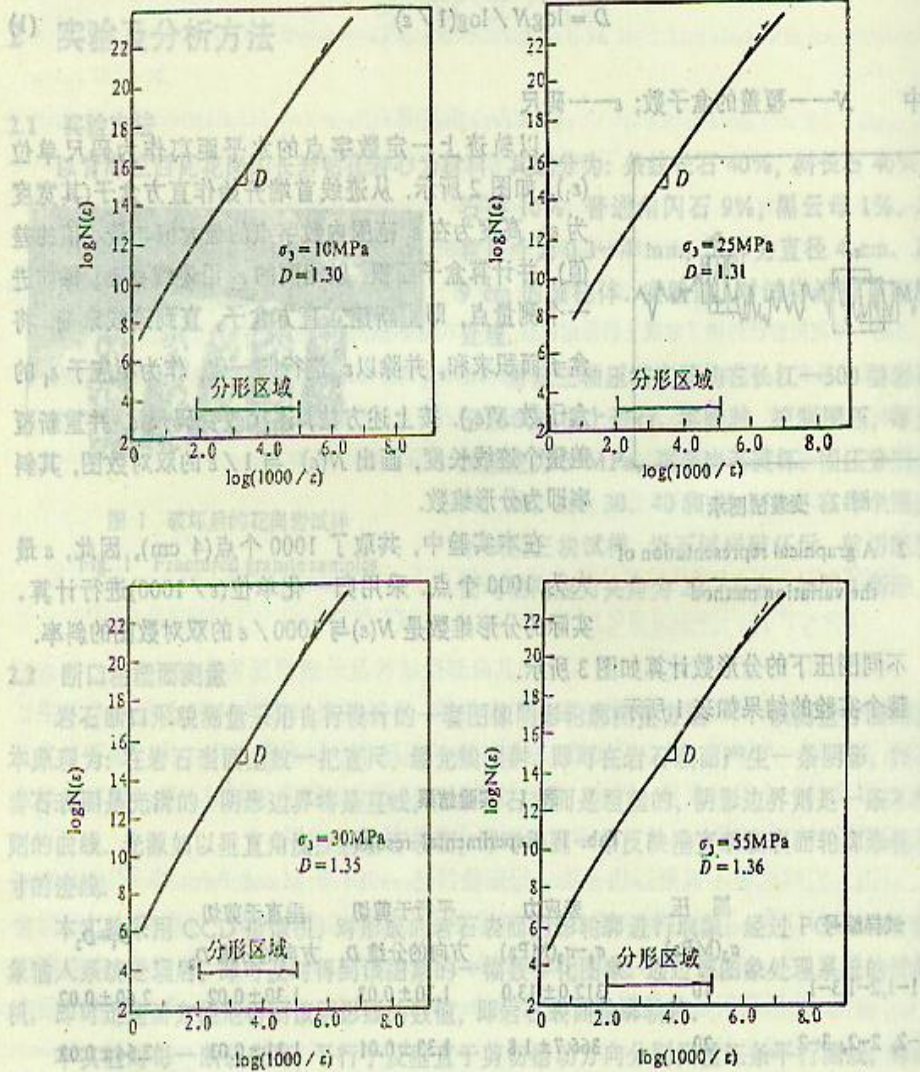


图3 不同围压下 $\log(1000/c)$ 与 $\log N(c)$ 的关系曲线

Fig. 3 A plot of $\log(1000/c)$ versus $\log N(c)$ for fracture surfaces under different confining pressures

在分形的实验方法中,分形维数的计算方法,随尺度的改变对结果的影响很大,且用各种方法计算分形维数时,所得结果不尽相同。本实验采用了 Dubuc 等提出的变异法 (variation method)^[15]。用该方法计算分形维数时,尺度的改变对结果的影响

3 实验结果与讨论

3.1 花岗岩三轴破坏表面分形特征分析

从图3得知, 满足分形行为的码尺区间为0.27—5.47 mm(双对数图上横坐标为2—

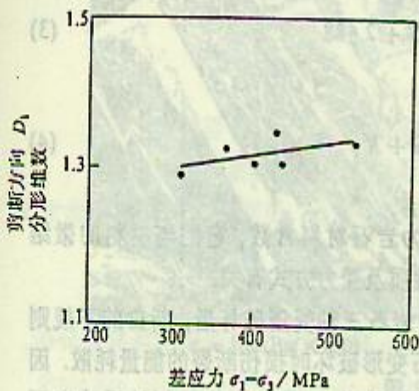


图4 差应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与分形维数 D_1 的关系

Fig. 4 A plot of D_1 versus $\sigma_1 - \sigma_3$

5), 而花岗岩的晶粒尺寸分布为0.3—4 mm, 二者接近. 这说明满足岩石分形行为的这一测量码尺区间与岩石晶粒尺寸有密切关系. 用中间码尺区间测量花岗岩断裂表面, 能较好地符合观测表面特征, 故分形维数是一个能较好地反映岩石断裂不规则性的特征参量.

岩石沿破坏面剪切错动方向的分形维数 D_1 与差应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的关系如图4所示. 回归分析表明, 该方向的分形维数随着差应力的增加而增加.

垂直于破坏面剪切错动方向的分形维数 D_2 与差应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的关系如图5所示. 回归分析表明, 该方向的分形维数基本不随差应力而变化.

由分形积和原理⁽⁹⁾, 忽略断裂面二方向的交互作用, 可认为花岗岩三轴受压断裂表面的分形维数为 $D_1 + D_2$.

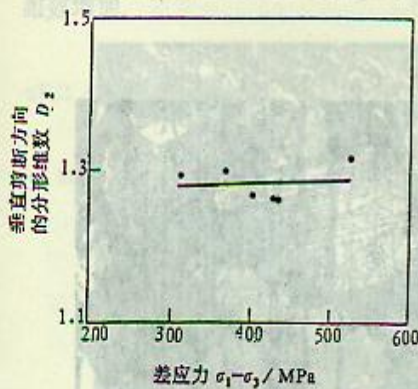


图5 差应力与 D_2 的关系

Fig. 5 A plot of D_2 versus $\sigma_1 - \sigma_3$.

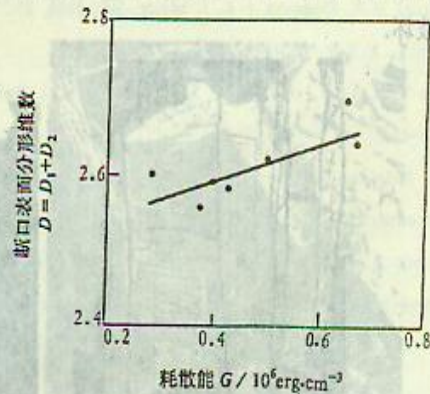


图6 G 与 $D_1 + D_2$ 的关系

Fig. 6 A plot of G versus $\sigma_1 - \sigma_3$.

材料宏观断口的分形特征依赖于材料本身的微观结构与受力条件, 是裂纹扩展损伤耗散性和随机性的综合反映. 在岩石三轴压缩实验中, 岩石的损伤断裂耗散能, 决定着岩石的断裂过程. 假设岩石为脆性破坏, 不消耗塑性能, 在断裂过程中, 能量全部用于岩

石损伤断裂耗散, 则耗散能为

$$G = \sigma_c^2 / 2E - 2\sigma_2 \varepsilon_d \quad (2)$$

式中 E —弹性模量; ε_d —最大径向应变; σ_c —抗压强度.

将 G 与分形维数 D 建立关系, 得到了较满意的结果, 如图 6 所示. 用最小二乘法拟合得

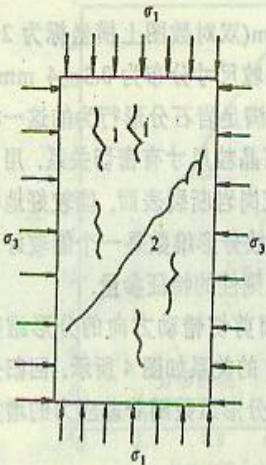
$$D = 0.2555G + 2.488 \quad (3)$$

写成一般式为

$$D = K_1 G + K_2 \quad (4)$$

式中 K_1 和 K_2 为岩石材料常数, 它们与材料的微结构、材料本身性质及受力方式有关.

上式说明, 岩石三轴受压破坏后, 断口的不规则性反映了在岩石变形破坏时损伤断裂的能量耗散. 因此可以认为, 分形维数 D 是一个能较好地反映岩石断裂机理的综合量.



1. 翼状裂纹 2. 翼状裂纹连通形成剪切带
图 7 花岗岩三轴压缩剪切破坏形成机理

Fig. 7 Genesis of shear fracture of granite under triaxial compression

3.2 花岗岩三轴受压变形破坏机理分析

通过对不同受力情况下的断裂试件进行光学显微镜和扫描电镜观测, 可得到岩石三轴受压破坏机理如图 7 所示. 在一定的围压下, 随着差应力的增加, 平行于轴向(最大主压应力方向)的翼状裂纹生长并逐渐连通, 最终成为剪切带而破坏.

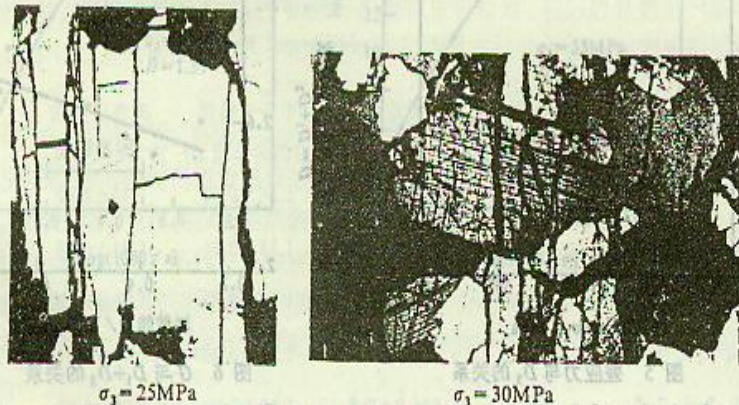


图 8 花岗岩受力后翼状裂纹($\times 10$)

Fig. 8 Wing cracks in granite under triaxial compression

对在不同围压下受压破坏的岩石进行切片, 在光学显微镜下观察可知, 随着围压的增

加, 沿主应力方向的翼状微裂的重叠与交错现象有所增加, 轴向长度变短, 锯齿状裂纹增密, 如图 8 所示。

用扫描电镜观察了不同围压下破坏后的花岗岩断口形貌, 各断口形貌属粒间破坏为主、伴有穿粒破坏的混合型, 如图 9 所示。

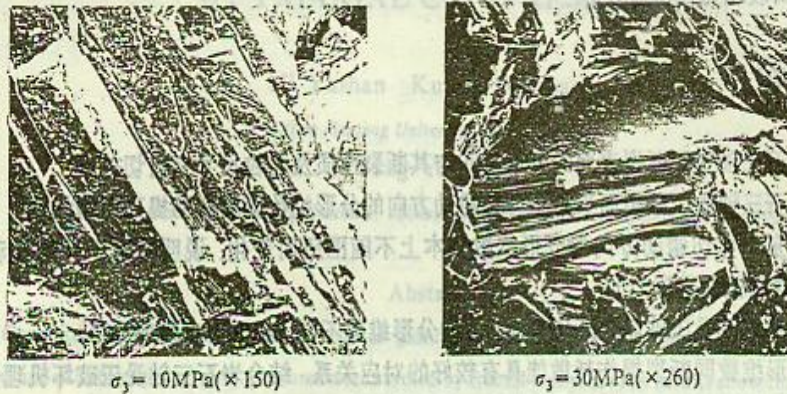


图 9 花岗岩断口形貌

Fig. 9 Fractograph of tested granite

岩石三轴受压破坏时, 若围压较低, 则断裂表面较脆, 形成功较小, 多呈粒间断裂; 随着围压的提高, 断口的脆性程度有所降低, 穿粒成分和断裂表面形成功增加, 表面粗糙度增加, 即在剖面的不规则曲线上, 跨距小于晶粒尺寸的谷或峰的数目和相应的高差均有所增加, 因而 D 值相应增大。这同由测量结果得到的结论一致, 即: 随着围压的提高, 分形维数增加。

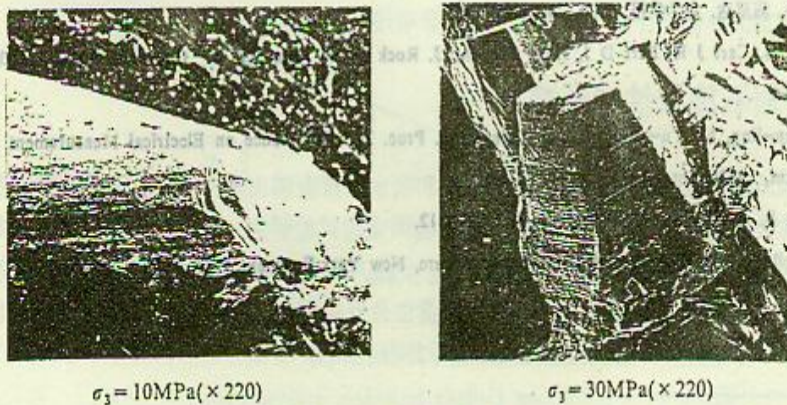


图 10 花岗岩断口形貌

Fig. 10 Fractography of granite fractured by triaxial compression

垂直于破坏面剪切错动方向取不同部位进行了断口分析, 发现不同围压下的断口没有明显差别, 断裂性质大致相同, 如图 10 所示。这说明该方向在不同围压下的微观断裂机理

基本相似,同测量所得的该方向分形维数不随围压而变化的结论一致。

综上所述,花岗岩三轴受压破坏时,随着围压的增加,沿剪切错动方向的破坏机理发生变化,而垂直方向的破坏机理则基本相似,二方向的破坏机理不同,测量得到的二方向的分形维数也不同,说明花岗岩三轴受压破坏时,由于材料的各向异性,内部应力不均匀,断口表现为自仿射分形。

4 结论

- 4.1 岩石三轴受压断裂表面的分形区间与其断裂性质及晶粒尺寸有密切关系。
- 4.2 岩石三轴受压断裂而平行于剪切错动方向的分形维数随围压的提高而增加。
- 4.3 垂直于剪切错动方向的分形维数基本上不随围压而变化,说明垂直于剪切错动方向的断裂微观机理是相似的。
- 4.4 岩石三轴受压破坏的断裂表面,各向分形维数不同,断口为自仿射分形。
- 4.5 分形维数同断裂损伤耗散能具有较好的对应关系。结合岩石三轴受压破坏机理分析,分形维数是能较好反映其断裂机理的一个综合参数。

5 参考文献

- 1 Mandelbrot B B, Passoja D E, Paullay A J. Nature, 1984, 308:721-722.
- 2 Parde C S, et al. Acta Metall., 1987, 35(7):1633-1637.
- 3 Mecholsky J J, Passoja D E, Feinberg-Ringel K S. Am. Ceram. Soc. J., 1989, 72:60-65.
- 4 Stupak P R, Donovan J A. J. Mater. Sci., 1988, 23:2230-2247.
- 5 谢和平, 陈至达. 力学学报, 1988, 20(3):264-270.
- 6 Lee Y H, Carr J R, Barr D J, Haas C J. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1990, 27(6): 453-464.
- 7 He Pen-ling, Ni Yu-shan, Kuang Zhen-bang. Proc. Int. Conference on Electrical Measurement and Instrument, 1992(in press).
- 8 Dubuc B, et al. Phys. Rev. A, 1989, 39:1500-1512.
- 9 Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature, New York:Freeman, 1983, 365.

FRACTAL STUDY OF THE FRACTURE SURFACE OF GRANTITE CAUSED BY TRIAXIAL COMPRESSION

Ni Yushan Kuang Zhenbang

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Yang Yingqun

(Northwest Research and Design Institute, Ministry of Energy Resources of China, Xi'an 710054)

Abstract

Conventional triaxial compression tests of granite were made and the fracture surfaces of samples tested under different confining pressures were studied by fractal analysis. The results show that the fractal dimension parallel to the direction of shear displacement increases with increasing confining pressure whereas the fractal dimension perpendicular to that direction is almost invariant. Fractographic study of the granite tested was carried out using scanning electron microscope and optical microscope. The result of this study shows that the fractal dimension of fracture surfaces is a characteristic parameter capable of reflecting the damage-fracture mechanism of rocks.

Key words: triaxial compression, fractographic study of granite, fractal dimension.

为了研究水对岩石膨胀性的影响,首先按常规三轴压缩试验样品加工成型。在试验之前,将一部分试样放在真空干燥箱中,经过一定时间,使其一部分试样自然风干到所要求的含水率。试验过程中,用扫描电镜和光学显微镜对试样进行分形维数测定。试验结果说明,随着围压的增大,平行于剪切位移方向的断口分形维数增大,而垂直于该方向的分形维数几乎不变。花岗岩断口的分形维数是一个能反映岩石破坏-断裂机理的特征参数。

花岗岩三轴压缩试验,得出断口分形维数与水含量的关系。断口分形维数随围压增大而增大,随含水率增大而减小。断口分形维数与围压的关系式为: $D_f = 1.5 + 0.005 \sigma_3$ 。断口分形维数与含水率的关系式为: $D_f = 1.5 - 0.005 \omega$ 。式中 D_f 为断口分形维数, σ_3 为围压, ω 为含水率。