

文章编号: 1004-0609(1999)03-0661-05

岩石料层冲击粉碎细观损伤观测及分析^①

王介强 宋守志 徐小荷

(东北大学岩石破碎实验室, 413 信箱, 沈阳 110006)

摘 要: 采用 ASM68K 半自动图象分析系统观测花岗岩料层动态粉碎产品的细观损伤特性, 分别从唯象和分形的角度研究了料层材料动态损伤的演化规律。研究结果表明: 料层粉碎产品的损伤程度随冲击速度的提高而增加, 动态损伤分布具有分形特征, 分维数是反映料层动态损伤程度的一个特征量, 用分维数定义的损伤变量与料层应变率呈近似的线性关系。

关键词: 岩石料层; 动态细观损伤; 分形; 分维数

中图分类号: P632.3

文献标识码: A

无论是静载, 还是动载, 对岩石类材料的粉碎效果实质上体现在两个方面: 材料由于碎块分离而导致的宏观尺寸缩减和材料内部由于微裂纹繁衍而引起的细观损伤的积累。长期以来, 人们将粉碎效果与粒度缩减等同起来, 从而将研究的焦点多集中在材料宏观尺寸的缩减上, 而忽视了对后者即损伤对粉碎效果影响的研究。事实上, 材料的粒度缩减正是其内部细观损伤在应力作用下演化的宏观体现, 不同的损伤效果反映在宏观上的粒度缩减也不同, 二者存在不可分割的内在联系。如在冲击作用下, 某些颗粒(尤其是相对较大的颗粒)从表面上看虽然没有碎裂, 但其内部随机分布的微裂纹得到活化和繁衍, 而且不同的冲击载荷, 微裂纹活化和繁衍的程度也不同, 对于下一级粉碎而言, 它们的初始损伤值则不同, 从而影响了下一级的粉碎效果和能耗。对损伤的研究还不成熟, 它受到实验技术和理论方法两方面的制约, 对岩石类材料损伤的研究则显得更为复杂。几何损伤理论^[1]采用唯象的方法是研究损伤最为直接的途径。本文采用 ASM68K 半自动图象分析系统观测花岗岩料层在不同冲击速度下颗粒内部的细观损伤分布及演化结果, 统

计得到活化裂纹密度(指单位面积上的活化裂纹条数)和裂纹平均长度, 定性地表征了损伤细观测定量与宏观力学量之间的关系。为弥补细观测定量与宏观力学量在数量级上的悬殊差别, 用分形几何的方法研究了损伤分布, 发现岩石料层动态损伤分布具有分形特征, 并求得在不同冲击速度下颗粒内部细观损伤分布的分维值。

1 实验方法

1.1 样品制备

选用花岗岩料层为研究对象, 料层初始粒度为 10~15 mm, 每份料重 100 g。采用自行设计的矿岩料层动态粉碎及测试装置^[2]进行冲击粉碎, 得到 5~35 m/s 范围内不同冲击速度下的粉碎产品, 从粉碎产品中筛分出 5 mm 粒级的颗粒制成薄片。制取薄片时先用质量比为 9:1 的环氧树脂与三乙醇胺混合液对颗粒进行团化, 放入温度调至 80 °C 的恒温箱内恒温 5~6 h, 待其完全固结后取出, 然后进行切片、粗磨、细磨、精磨、抛光。精磨和抛光要做到十分精细, 尽量消除切片、粗磨时对颗粒造成的

① 国家自然科学基金资助项目 59474001 收稿日期: 1998-12-04; 修回日期: 1999-05-17
王介强(1971-), 男, 博士研究生

人为损伤。将抛光后的光片用冷杉胶粘结在载玻片上,再粗磨、细磨、精磨,直至在透射式偏光显微镜下可分辨出颗粒内部的活化裂纹。

1.2 样品观测

观测系统采用德国 Leitz 公司生产的 ASM 68K 半自动图象分析仪,它主要有主机,微机显示器,图象监视器,数字式输入板,显微镜和照相系统,打印机等组成。该分析仪能将显微镜四分之一的视域传送到监视器屏幕上,其测试软件可实现对屏幕图象的二维平面测量和一维线性测量。观测时采用平行测线

法,一个视域接着一个视域地观测,直至统计求得整个薄片内花岗岩颗粒面积,活化裂纹条数,裂纹平均长度。通过数字式输入板将颗粒内分布的活化裂纹描绘在显示器屏幕上,再由打印机输出,安装在显微镜上部的照相系统可实现观测过程中的照片工作。

2 实验结果和分析

2.1 唯象统计

图 1 是在不同冲击速度下冲击花岗岩料层

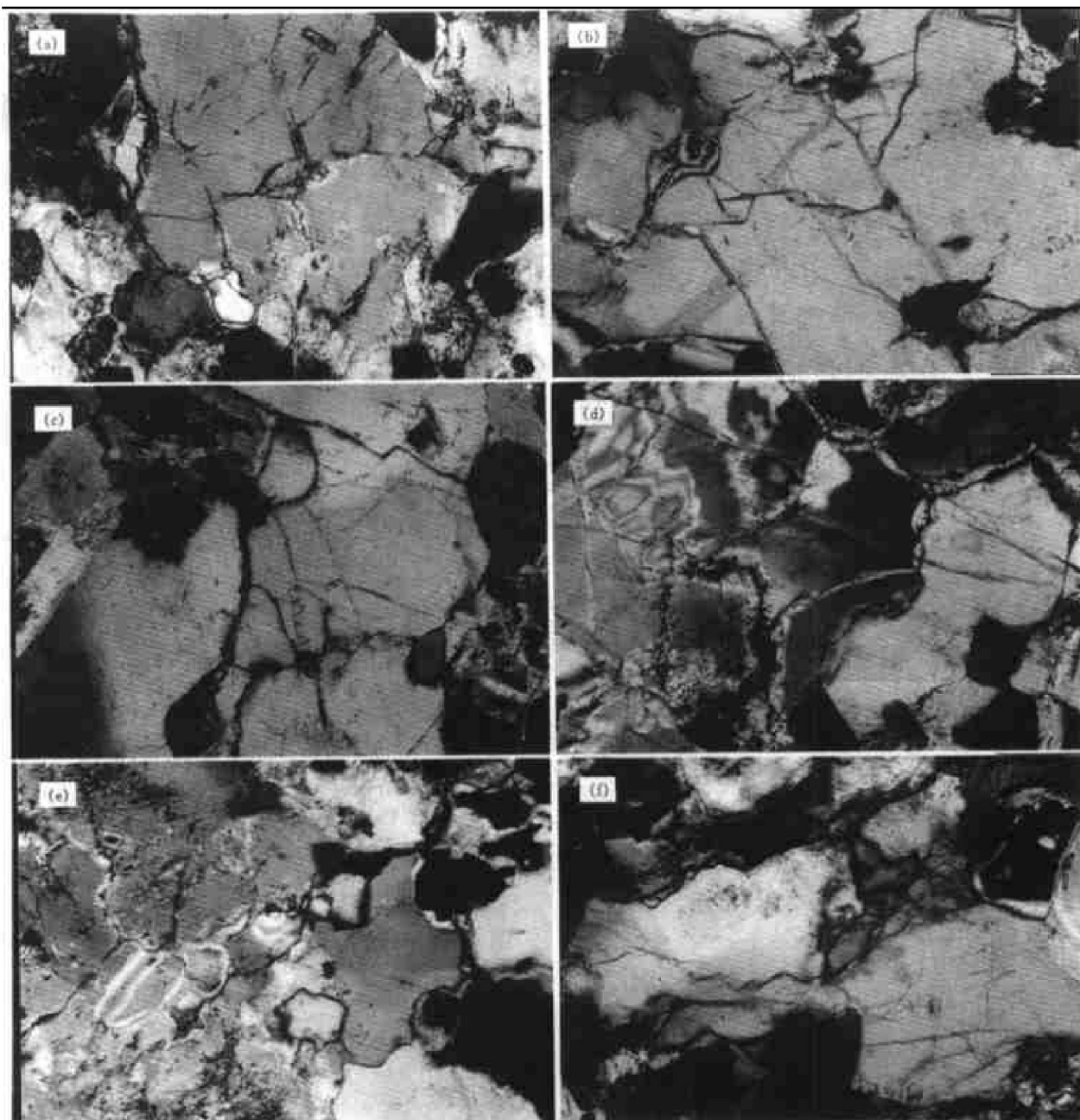


图 1 花岗岩在不同冲击速度下的损伤观测图片 ($\times 31.5$)

Fig. 1 Damage images of granite under different impact velocities

- (a) $v = 8.62 \text{ m/s}$; (b) $v = 13.69 \text{ m/s}$; (c) $v = 16.40 \text{ m/s}$;
(d) $v = 20.50 \text{ m/s}$; (e) $v = 26.80 \text{ m/s}$; (f) $v = 31.50 \text{ m/s}$

拍摄到的颗粒内部细观损伤情形，从活化裂纹演化的路径可以看出：岩石细观裂纹形式主要是沿晶裂纹、穿晶裂纹、沿穿晶裂纹和晶内裂纹。在低速时以沿晶裂纹为主，随着冲击速度的提高，穿晶裂纹、沿穿晶裂纹和晶内裂纹明显增加。表 1 为对活化裂纹的统计结果，可以看出随着冲击速度的提高活化裂纹密度增加，裂纹平均长度减小，其直观表现为晶间、晶内裂纹的大量繁衍，根本原因则在于高速冲击下高挤压应力对花岗岩颗粒的作用结果。

表 1 不同冲击速度下活化裂纹统计结果

Table 1 Statistic results of active cracks under different impact velocities

Impact velocity / $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Density of cracks / mm^{-2}	Mean length of cracks / mm
8.62	0.366	0.630
11.63	0.673	0.542
13.69	0.888	0.391
16.40	1.187	0.339
20.50	1.482	0.221
23.70	2.932	0.172
26.80	3.877	0.142
31.50	3.652	0.101
34.27	3.847	0.082

活化裂纹密度的增加，裂纹平均长度的减小表明随着冲击速度的提高，岩石料层粉碎不仅在宏观上表现为细粒级产品增多，而且在细观上同粒级产品的内部损伤程度也随着冲击速度的提高而增大。另外，由图 2 和图 3 可看出，当冲击速度提高到 30m/s 左右时，活化裂纹密度和裂纹平均长度的变化较迟钝，这可能是由于花岗岩料层在高速冲击破坏时，由于已粉碎细粒的包裹作用使大颗粒内部的损伤得不到充分繁衍的结果。

2.2 分形损伤

文献[3~5]的研究结果均表明：矿岩类材料在静态比例加载下，宏观裂纹周围的损伤区具有明显的分形特征；文献[6~8]对金属材料在不同的加载条件下的断裂表面进行了分析，普遍发现断裂表面具有分形特征。

图 4 是观测得到的一组具有代表性的在不同冲击速度下的花岗岩活化裂纹分布图，采用

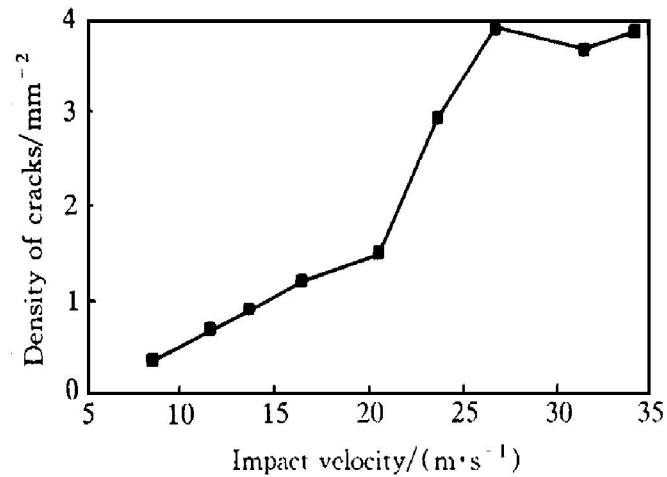


图 2 裂纹密度与冲击速度的关系

Fig. 2 Relation of density of cracks and impact velocity

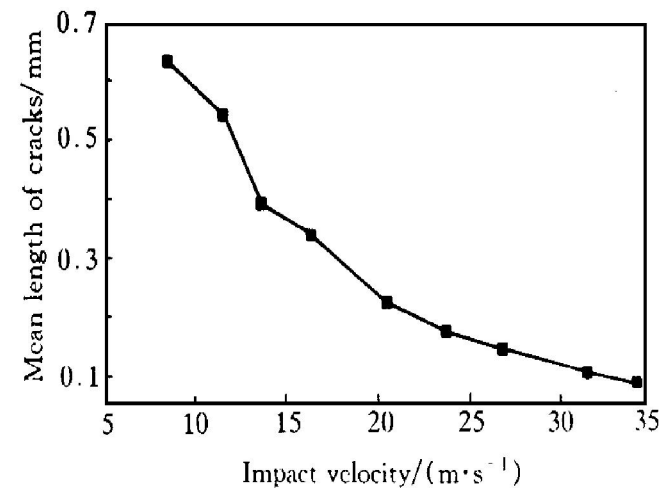


图 3 裂纹平均长度与冲击速度的关系

Fig. 3 Relation of mean length of cracks and impact velocity

分形几何中的计盒维数法^[9]。

$$N(a) = Aa^{-D_f} \tag{1}$$

对不同部位的裂纹分布图进行求分维数 D_f

$$\ln N(a) = \ln A - D_f \ln a \tag{2}$$

式中 a 是盒尺度， $N(a)$ 是至少包含一条裂纹的盒数，把测得的 $N(a)$ 与对应的 a 在双对数坐标轴上进行回归，回归曲线如图 5 表明，裂纹分布具有明显的分形特征，曲线斜率的相反值即为所求的分维数值。表 2 是得到的在不同冲击速度下裂纹分布的分维数，分维值在 1~2 之间，并随冲击速度的提高而增加。因此可以用裂纹分布的分维数来表征不同冲击速度下颗粒内部的细观损伤程度。

用分维数定义损伤变量弥补了细观测定量

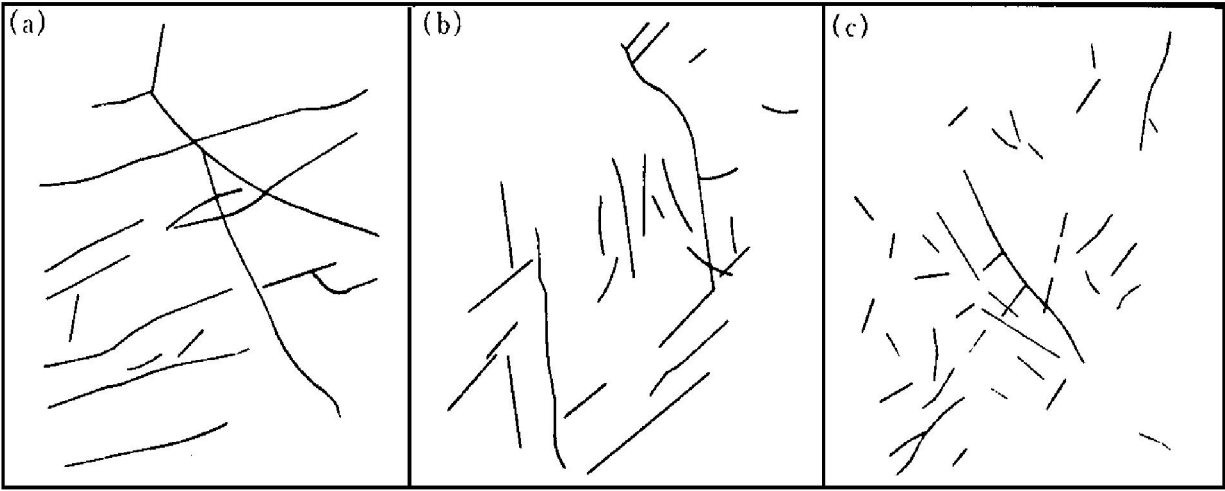


图 4 不同冲击下的活化裂纹分布图

Fig. 4 Distributions of active cracks under different impact velocities

(a) $v = 11.63 \text{ m/s}$; (b) $v = 23.70 \text{ m/s}$; (c) $v = 31.50 \text{ m/s}$

表 2 分形分析的结果

Table 2 Results of fractal analysis

Code	B	C	D	E	F	G
Impact velocity $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	11.63	13.69	16.40	23.70	26.80	31.50
Strain rate/ s^{-1}	221	234	382	715	837	1002
Fractal dimension	1.142	1.167	1.214	1.248	1.327	1.378
Damage value	0.142	0.167	0.214	0.248	0.327	0.378

与宏观力学量在数量级上的悬殊差别，而且用分维数定义的损伤变量是标量，避免了用张量定义损伤变量的抽象与复杂，将分维数减去 1 即可与连续损伤理论中的 0~ 1 损伤变量相对应，从而利于建立细观损伤变量与宏观力学量的关系。图 6 是料层损伤变量与料层应变率之

间的关系，表明损伤变量随应变率增加基本呈线性增大的趋势。

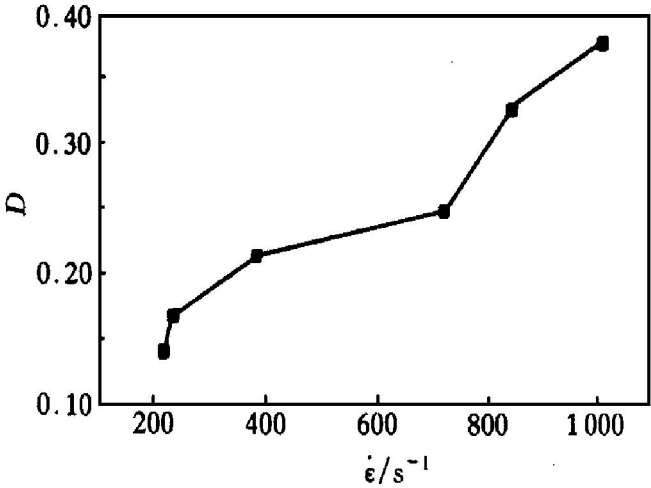


图 6 损伤变量与料层应变率的关系

Fig. 6 Relation of damage variation and strain rate of layers

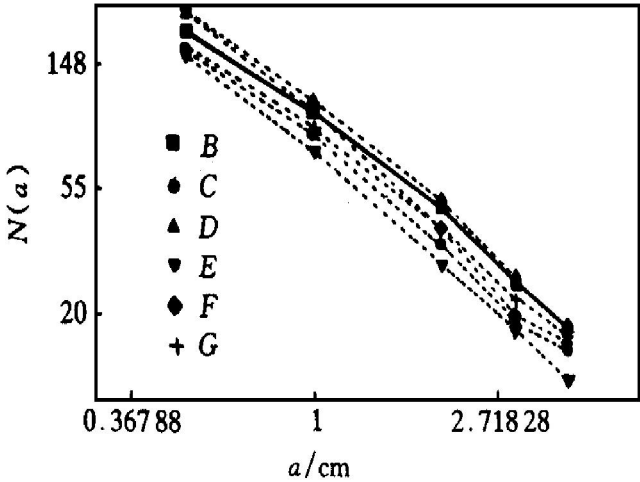


图 5 不同冲击下 a 和 $N(a)$ 的回归曲线

Fig. 5 Regression lines of a and $N(a)$ under different impact velocities

3 结论

从唯象和分形两个角度对花岗岩料层在不同冲击速度下的细观损伤进行观测和分析，得到：

- (1) 不同冲击速度下得到的同粒级产品，其细观损伤程度不同，损伤随冲击速度的提高而加剧；
- (2) 活化裂纹密度随冲击速度的提高而增加，裂纹平均长度随冲击速度的提高而减小；

(3) 花岗岩料层动态细观损伤具有分形特征, 裂纹分布的分维值在 1~2 之间, 且随冲击速度的提高而增大, 因而可用分维数定义料层冲击粉碎的细观损伤变量;

(4) 用分维数定义的料层损伤变量与冲击过程中的料层应变速率呈近似线性的关系。

REFERENCES

- 1 Yu Tianqing(余天庆) and Qian Jicheng(钱济成). Damage Theory and Its Application(损伤理论及其应用). Beijing: National Defence Industry Press, 1993: 75.
- 2 Wang Jieqiang(王介强) *et al.* In: Symposia of the Fifth Academic Conference on Powder Science and Technology of China(第五届全国粉体工程学术会议论文集), 1998: 44.
- 3 Botsis J and Kunin B. Int J of Fracture, 1987, 35: 51.
- 4 Nolen-Hoeksema R C and Gordon R B. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1987, 24(2): 135.
- 5 Zhao Yonghong(赵永红). PhD Thesis. Beijing: Peking University, 1993: 31.
- 6 Mandelbrot B B, Passeja D E and Paullay A J. Nature, 1984, 308: 721.
- 7 Pande C S, Richards L E, Louat N *et al.* Acta Metall, 1987, 35: 1633.
- 8 Mu Z Q and Lung C W. J Phys, 1988, D21: 848.
- 9 Zeng Wenqu(曾文曲) *et al* transl. Fractal Geometry Mathematical Foundations and Applications(分形几何—数学基础及其应用). Shenyang: Northeastern University Press, 1993: 58.

Observation and analyses of meso-scopic damage of rock layers impacted

Wang Jieqiang, Song Shouzhi, Xu Xiaohu
Box 413, Laboratory of Rock Fragmentation,
Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China

Abstract: The meso-scopic damage of impacted granite layers was observed by ASM68K semi-automatic image analysis system. The distribution and evolving process of dynamic damage of layers were studied respectively from imaginary and fractal view. The test results indicated that the damage degree increases with raising impact velocity, the damage distribution of layers is fractal, the fractal dimension is a proper value reflecting dynamic damage degree of layers, the damage variation defined by fractal dimension is approximately linear with the strain rate of layers.

Key words: rock layers; dynamic meso-scopic damage; fractal; fractal dimension

(编辑 何学锋)