

# 岩石冲击实验碎屑分类及其分形特征<sup>\*</sup>

杜 晶 李夕兵 宫凤强 殷志强

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 利用分离式霍普金森压杆实验系统, 进行一系列的不同长径比砂岩冲击实验。对试验碎屑采用不同方法提取其信息, 包括对粒径小于 0.075 mm 的颗粒采用激光粒度分析仪。对受载后岩样破碎块度进行筛分统计, 得到了该加载条件下岩石破碎的粒度分布。在此基础上, 进一步计算相应破碎块度的分形维数, 分别探讨了不同的长径比对分维数的影响。结果表明, 砂岩破碎分维值在 1.54 到 2.49 之间, 分维愈大, 其粒度愈细。相同长径比岩石试件, 岩石破碎分维值与试样的应变率线性相关, 随应变率增大而增大。

**关键词:** 岩石破碎; 碎屑分类; 长径比; 破碎块度; 分维数

**中图分类号:** TD231.1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1005 - 2763(2010)05 - 0020 - 04

## Classification and Fractal Characteristics of the Fragments from Impacting Experiment of Rock

Du Jing, Li Xibing, Gong Fengqiang, Yin Zhiqiang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract:** A series of impacting experiment on sandstone samples with different length - diameter ratios were made by SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) test system. The information of the fragmental rock from impacting experiment was extracted with different methods, including testing the particles less than 0.075 mm by laser particle size analyzer. The size distribution of fragmental rock was obtained through screening and statistics of rock samples fragmented under different impact load. On the basis of these, the fractal dimensions of the size distribution of fragmental rock were calculated, and effect of different length - diameter ratios on the fractal dimension was investigated. The results showed that the fractal dimension of the size distribution of fragmented sandstone ranged from 1.54 to 2.49, and larger the value of the fractal dimension was, smaller the particle size was. For rock sample with same length - diameter ratio, the values of fractal dimension were related with strain rate, the fractal dimension increased with increasing in strain rate of rock sample.

**Key Words:** Rock fragmentation, Classification of rock frag-

ments, Length - diameter ratio, Fractal dimension

应力波的作用引起岩石内部裂纹的起裂、成核、贯通, 最终众多微观裂纹相互作用引起岩石的破坏。破坏模式是岩石受力状态的反映, 对岩石的破坏进行分析有着重要的理论与实际意义。

对于岩石破坏后的碎块, 可以对其不同信息数据进行分形研究, 迄今为止诸多学者在此方面进行了大量的研究工作<sup>[1~4]</sup>。近年来, 胡柳青等<sup>[5~7]</sup>已经采用分形方法对爆破或冲击条件下岩体破碎程度进行分析, 包括破坏过程的能量分析。冲击载荷下, 较低应变率与高应变率时的岩石破坏特征有显著的差别。随着动载加大, 岩石的破坏会加剧, 甚至会碎成无数屑末。岩石夹持在入射杆和透射杆之间, 破坏形式大都以沿轴向方向的拉伸劈裂破坏为主<sup>[8,9]</sup>。在冲击实验中, 目前对实验产生的岩石碎屑的研究方法主要有: 筛分法、经验公式法、摄影法等。由于岩石破碎后形成的产物尺度分布非常复杂, 在破碎阶段, 岩石类材料的粉碎效果实质上体现在两个方面: 一是由于材料内部微裂纹繁衍而引起的细观损伤的积累, 二是由于碎块分离而导致的宏观尺寸缩减。岩爆破坏碎屑主要有片状、块状、颗粒状。何满潮等对岩爆实验破坏后的碎屑进行了分类, 将岩爆碎屑分为粗粒碎屑、中粒碎屑、细粒碎屑和微粒碎屑<sup>[10]</sup>。

## 1 冲击实验技术及设备

本次研究所使用的霍普金森试验装置见图 1。其中, 冲头、入射杆、透射杆和吸收杆均采用 40Cr 合金钢, 其弹性极限达 800 MPa, 纵波波速为 5400 m/s, 密度为 7810 kg/m<sup>3</sup>; 超动态应变仪型号为 CS-1D, 示波器型号为 DL-750; 电阻应变片型号为 B×120-2AA, 栅长×栅宽为 2 mm×1 mm, 电阻为 120

\* 收稿日期: 2010 - 07 - 07

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(10872218)。

作者简介: 杜 晶(1986 -), 女, 江苏淮安人, 硕士, 从事安全技术与岩土工程方面的研究工作, Email: dujing040316@163.com。

( $\pm 0.2$ )  $\Omega$ 、灵敏系数为  $2.08 \pm 1\%$ ; 数据采集处理单元主要为基于系统数据的处理软件 CLRM<sup>[8]</sup>。



图 1 SHPB 实验装置及测试系统

试验所用的材料为粉砂岩 颜色为白色 致密块状构造 宏观均匀一致。为了研究岩石不同长径比的特性 设计加工方案如下: 岩样为圆柱形 直径为 50 mm ,长度分别约为 20 30 40 和 50 mm 。岩石试

样都取自同一块岩块 ,避免了同种岩石试件在成分和结构上的差异。为使试验能更好地反映岩石本身的力学特性 ,试件在自然状态下放置一段时间 ,使其含水量与天然岩石基本一致之后再行尺寸测量、称重和弹性波速测试。

2 岩石冲击载荷下的碎屑分类

在冲击实验中 ,不同的加载速率使得岩石破碎产生的碎屑的尺寸和形状有所不同。图 2 是冲击加载试件破坏后产生的碎屑。当加载的速率较小、冲击动载不大时 ,岩石有时只会出现轻微的裂纹 ,见图 2( a) ,更多时候会破裂成几半或数个比较大的块状碎片见图 2( b) ;当冲击载荷增大时 ,碎块数量增多 ,几何形状相应的减小 ,见图 2( c、d) ;当动载达到某一定值时 ,岩石碎块中会出现无数细粒碎屑和微粒碎屑 ,碎块颗粒均匀而细小 ,见图 2( e、f) 。

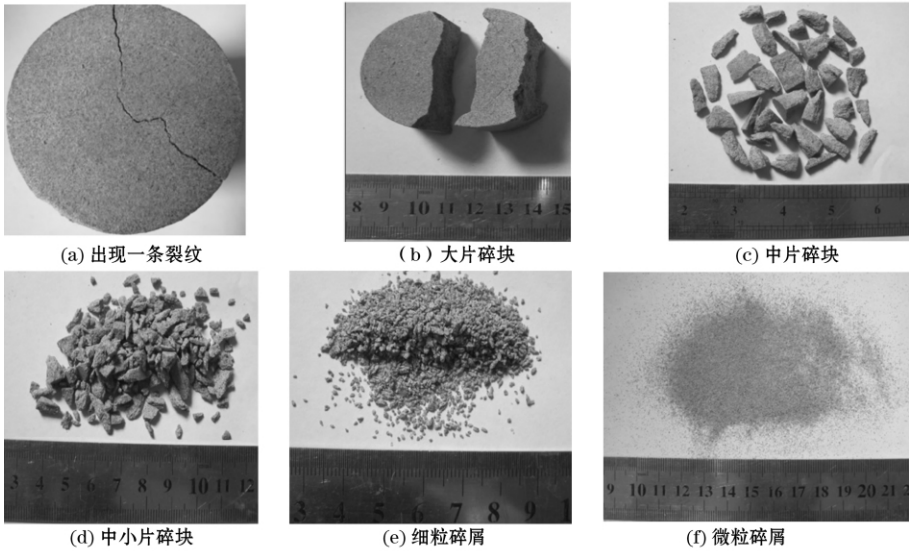


图 2 冲击载荷下岩石破碎后产生的颗粒及碎屑

冲击试验后 ,对每件试样的碎块均进行收集和筛分 ,以便求出冲击破碎岩块的粒度分布。碎片颗粒直径小于 0.08 mm 时 ,无法采用尺寸测量方法 ,也无法通过照片提取信息 ,但可以采用激光粒度分析仪对其进行颗分 ,获得颗分曲线。使用 SCF - 103 激光粒度分析仪对岩石破碎产生的微粒的粒度分布情况进行了测定 ,分析结果见图 3。测试样的遮光比达到 39.1% ,由图 3 可以得出粒径为 0.074 mm 以下的微粒主要分布在直径为 0.002 ~0.01 mm 区间内 ,0.0679 mm 是筛分分布峰值 ,说明这一数值粒径的数量最多。

对尺寸稍大的岩石碎块进行筛分 根据实验产

生碎块的尺寸特点 ,选用的分析筛孔径系列依次为: 40.00 20.00 10.00 5.00 2.00 1.00 0.5 mm。筛分后 ,通过物理天平获得每个规格孔径筛中滞留的碎块质量。然后可以根据测量所得数据计算出每一

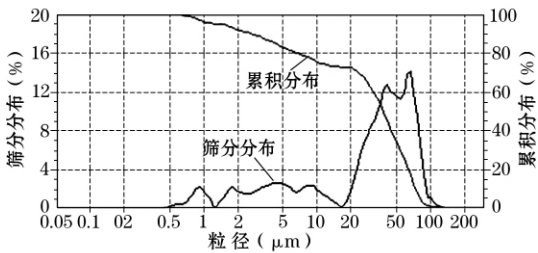


图 3 粒径分布

固定尺寸范围内试样碎块的质量百分含量或小于某一尺寸范围累积质量百分含量。试件碎块的尺寸分布范围较大,为较好地反映其分布特征,以计算所得结果的自然对数为坐标绘制成曲线,见图4。由图4

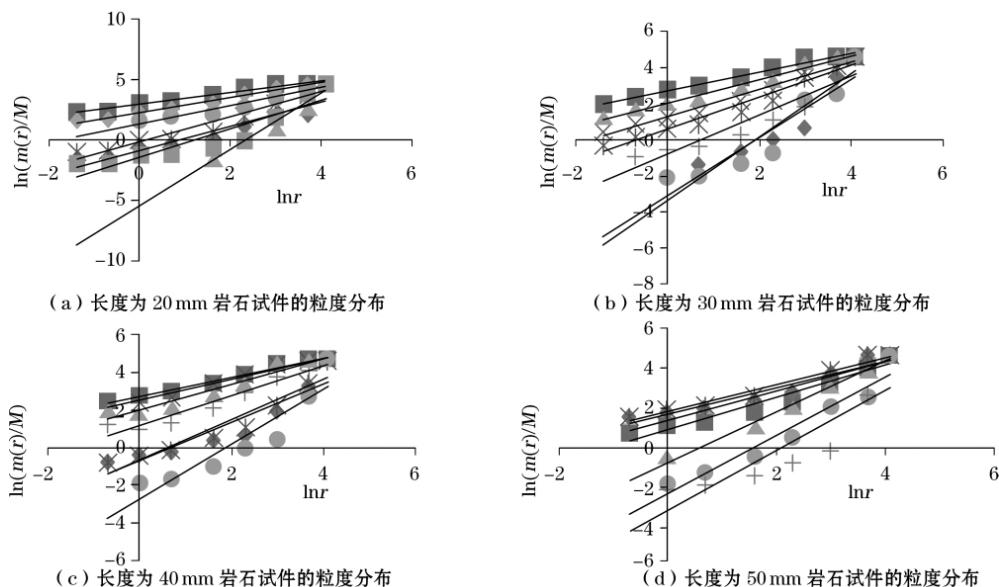


图4 不同长径比岩石破碎块度分布

### 3 不同长径比岩石碎屑分形维数变化

对岩石破碎块度的分形维数进行研究有两种方法<sup>[11]</sup>:基于可靠性的方法和基于能量的方法。基于能量的方法是指把块度分布的分形维数与所需能量联系起来,即把块度分布的分形维数与破碎前的材料几何特征通过统计的方法联系起来。本文采用特征长度-累计质量<sup>[12]</sup>方法进行分维数的计算。

图4可以说明岩石试件破碎后块度分布具有很好的自相似性,即符合分形分布。试验中块度分布

可以看出,同一系列长径比岩石试样,加载率不同则图中曲线的斜率不同,随着加载率的增加,斜率增大。相同动载的条件下,长径比小的岩石试件的直线斜率较大。

的分维数在1.54到2.49之间,绝大部分在1.9~2.2之间,分维愈大,其粒度愈细。

图5是长径比一定的情况下,试样应变率与破碎块度分维数之间的关系,从中可以看出,长径比一定时,岩石破碎分维值与试样的应变率呈线性相关,随应变率增大而增大,可以用如下关系式表示:

$$D = k\dot{\varepsilon} + B \quad (1)$$

说明加载率越高,岩石破碎块体越多,体积越小,意味着破碎程度越高,这一点跟岩石破碎试验现象十分吻合。

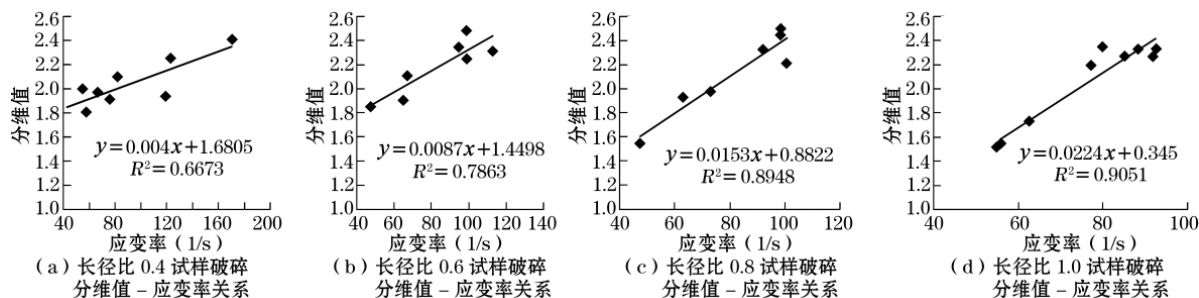


图5 不同长径比岩石破碎分维值变化

图6是岩石长径比 $\lambda$ 与应变率-分维数关系式系数 $k$ 之间的关系图。从中可以看出,两者之间也呈很强的线性相关性,可以表示为:

$$k = 0.311\lambda - 0.0092 \quad (2)$$

根据式(2)可知,当系数 $k$ 取值为0时,即岩石破碎块度跟相应的应变率之间不具有线性相关时,可以得到此时长径比 $\lambda$ 的值为0.296,即大约长径比

(下转第84页)

量指标;对于定量指标,按效益型指标和成本型指标分类进行计算。通过实例,利用该评价模型对露天开采现场拟采用的3个爆破方案进行了评价和选择,实施结果表明,所选爆破方案能够达到爆破目的,对现场爆破方案的选择和确定具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 李宝祥,等.金属矿床露天开采[M].北京:冶金工业出版社,1986.
- [2] 王德胜,龚敏.露天矿山台阶中深孔爆破开采技术[M].北京:煤炭工业出版社,2007.

- [3] 赵国彦,黄治成,刘高,等.中深孔爆破效果的AHP-模糊综合评价方法[J].矿业研究与开发,2010,30(2).
- [4] 袁梅,吴桂义,李希建.AHP在煤矿安全现状评价中的应用[J].矿山机械,2008,(24):43~45.
- [5] 袁梅,王作强,章壮新.矿井通风安全状况的计算机评价系统[J].辽宁工程技术大学学报,2003,22(4):500~502.
- [6] 张俊福,邓本让,朱玉仙,等.应用模糊数学[M].北京:地质出版社,1988.
- [7] 叶海旺,常剑.基于模糊决策和层次分析法的采矿方法选择[J].武汉理工大学学报,2009,31(8):145~153.

(上接第22页)

为0.3。从中可以推断,对本文砂岩而言,在SHPB试验中所采用的试样长径比 $\lambda$ 具有最小值,即为0.3左右。对于其他岩石,也应该存在类似的长径比最小值。

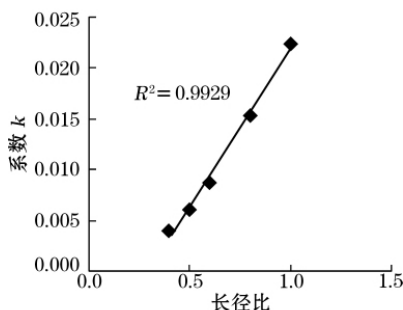


图6 岩石长径比与应变率-分维数关系式系数之间的相关性

## 4 结 论

在霍普金森试验系统上进行了岩石冲击载荷试验,在对岩样的破碎块度进行分类的基础上进一步统计分析得到了不同长径比岩石破碎的分形维数值。

(1) 0.074 mm 以下的微粒粒径主要分布在直径0.002~0.01 mm 区间内,0.0679 mm 是筛分分布峰值,说明这一数值粒径的数量最多。

(2) 岩石破碎物碎屑粒度分布的分维数在1.54~2.49 之间,绝大部分在1.9~2.2 之间,分维愈大,其粒度愈细。

(3) 相同长径比岩石试件,岩石破碎分维值与试件的应变率呈线性相关,随应变率增大而增大。

参考文献:

- [1] 谢和平,高峰,周宏伟,等.岩石断裂和破碎的分形研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(4):1~9.
- [2] 洪亮.冲击载荷下岩石强度及破碎能耗特征的尺寸效应研究[D].长沙:中南大学,2008.
- [3] Zhao Yonghong. Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(3):349~366.
- [4] Xu Yongfu. Explanation of scaling phenomenon based on fractal fragmentation[J]. Mechanics Research Communications, 2005, 32(2):209~220.
- [5] 周子龙.岩石动静组合加载实验与力学特性研究[D].长沙:中南大学,2004.
- [6] 高科.岩石SHPB实验技术数值模拟分析[D].长沙:中南大学,2009.
- [7] Bazant Z P. Is the cause of size effect on structural strength fractal or energetic statistical[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(1):1~31.
- [8] 胡柳青,李夕兵,赵伏军.冲击荷载作用下岩石破裂损伤的耗能规律[J].岩石力学与工程学报,2002,21(S2):2304~2308.
- [9] BADGE M N, RAINAA K, CHAKRABORTY, et al. Rock mass characterization by fractal dimension[J]. Engineering Geology, 2002, 63(1):141~155.
- [10] 何满潮,杨国兴,苗金丽,等.岩爆实验碎屑分类及其研究方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1521~1529.
- [11] 李夕兵,古德生,等.岩石冲击动力学[M].长沙:中南工业大学出版社,1998.
- [12] 陶高梁,张季如.表征孔隙及颗粒体积与尺度分布的两类岩土体分形模型[J].科学通报,2009,54(6):497~846.