2月

2014 年

李德建,关 磊,韩立强,等. 白皎煤矿玄武岩岩爆破坏微观裂纹特征分析 [J]. 煤炭学报 2014,39(2):307-314. doi: 10.13225/j. enki. jecs. 2013. 2013

Li Dejian ,Guan Lei ,Han Liqiang ,et al. Analysis of micro-erack characteristics from rockburst failure of basalt in Baijiao Coal Mine content [J]. Journal of China Coal Society 2014 39(2): 307 – 314. doi: 10.13225/j. cnki. jccs. 2013. 2013

白皎煤矿玄武岩岩爆破坏微观裂纹特征分析

李德建¹² 关 磊¹² 韩立强²³ 缪澄宇²

(1. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院,北京 100083; 3. 山东省地震局山东 济南 250014)

摘 要:为研究煤矿中发生岩爆灾害机理和破坏特征,从岩爆破坏产生的岩石碎屑中微观裂纹结构 特征入手,分析在岩爆实验过程中岩石样品的极限应力状态与所产生的裂纹分形维数之间的关系。 选取四川白皎煤矿岩爆高发区4个地点的8件玄武岩样品,进行两种加卸载方式的岩爆实验,得到 不同加卸载条件下产生的玄武岩岩爆碎屑,利用电子扫描显微镜观察岩爆碎屑表面裂纹微观结构 特征,拍摄适当比例的岩爆裂纹电镜扫描(SEM)图片。通过图片处理,提取岩爆碎屑 SEM 图片微 观裂纹信息,计算岩爆微观裂纹分形维数,结果表明两种加卸载方式产生的岩爆碎屑微观裂纹分形 维数值明显不同。分析岩爆破坏极限状态下最大主应力和第2主应力比值与岩爆裂纹分形维数之 间的关系,得出相应的线性表达式,表明岩爆裂纹的分形维数与岩爆发生过程的应力转化过程关系 密切。

关键词:玄武岩;岩爆;碎屑;裂纹;分形 中图分类号:TD315 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2014)02-0307-08

Analysis of micro-crack characteristics from rockburst failure of basalt in Baijiao Coal Mine content

LI De-jian^{1,2} ,GUAN Lei^{1,2} ,HAN Li-qiang^{2,3} ,MIAO Cheng-yu²

(1. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering China University of Mining and Technology(Beijing) Beijing 100083 , China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering China University of Mining and Technology(Beijing) Beijing 100083 , China; 3. Seismological Bureau of Shandong Province Jinan 250014 , China)

Abstract: This study intends to learn more about the mechanism and feature of rockburst disaster in coal mines from the perspective of micro-cracks observed in the fragments from the laboratory rockburst tests *i*. e. , the relationship between the fractal dimensions of the micro-cracks and the corresponding failure stress state from each of the tests. Two types of loading-unloading methods were applied in the laboratory rockburst tests on 8 basalt specimens from 4 locations of Baijiao Coal Mine , where rockburst happened frequently. Scanning Electron Microscope(SEM) technique was used to capture the images of micro-cracks with proper scales , and the fractal dimensions of the micro-cracks were calculated based on the digital information from the images. The results show an obvious difference in the fractal dimensions of the micro-cracks and the ratio of the maximum to the intermediate principal stress(σ_1/σ_2) at failure was analyzed , and the corresponding quantitative linear formula was obtained , exhibiting a closely correlated relation-

作者简介: 李德建(1966—) , 馬 河北徐水人 副教授。Tel: 010 - 51733713 , E - mail: lidj@ cumtb. edu. cn

收稿日期: 2013-11-12 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226800);教育部创新团队发展计划资助项目(IRT0656);中央高校基本科研 业务费专项资金资助项目(00-80001512)

ship between the fractal dimensions of micro-cracks and the process of stress conversion during rockburst.

Key words: basalt; rockburst; fragment; cracks; fractal

岩石宏观破坏是其内部孔隙和裂纹等缺陷不断 萌生发育、扩展、聚集和贯通的最终结果,这一从细观 损伤发展到宏观破碎的过程是能量耗散过程。岩石 从小尺度微断裂到大尺度整体破坏的损伤发展是一 个分形过程,其自身结构演化所表现的几何特征和物 理力学性质的数字特征,均呈现出一定的统计自相似 性,岩石破坏产生的碎块块度分布的分形维数是岩石 细观结构、加载方式及试样形状尺寸等因素的综合反 映^[1]。

20 世纪 70 年代, Mandelbrot^[2] 通过研究极不规 则的几何图形 提出了分形的概念 ,为具有自相似性 的不规则曲线和形状等的研究提供了定量化的描述 方法。谢和平等^[3]利用分形理论研究岩石特性,主 要集中在岩石断口的分形维数特征 断裂和岩爆分形 特征及损伤和能量耗散的关系等。通过分形的数目 - 半径关系考察已报道微震事件的位置分布 发现其 有集聚(Cluster)分形结构,指出尽管岩爆所经历的物 理过程相当复杂,但在数学上,它仅是一个分形集聚 集合过程。谢和平等^[4]还将分形理论引入岩石断裂。 和破碎的研究中 ,包括岩石微观断裂、宏观断裂动态 扩展以及岩体破碎块度分布等。李廷芥等^[5]分析了 花岗岩单轴压缩破坏电镜扫描试验裂纹分维值与岩 性和应力状态的关系,讨论了裂纹分形维数变化与岩 爆现象间的内在联系。王泽云^[6]、Hiroyuki Nagahama^[7]、王利^[8]和单晓云^[9]等,利用单轴压缩、巴西劈 裂、单轴拉伸实验得到的岩石碎屑 ,采用一定尺度范 围 - 数量关系计算分形维数 ,来研究岩石破坏损伤或 能量耗散。许金余等^[10]研究了加载速率对破碎碎块 分布的影响 建立了分形维数与岩石能量吸收比之间 的关系。

岩爆是岩体工程中一种常见的破坏现象,在深部 岩体工程中更为频发。岩爆是工程岩体破坏时内部 储存的弹性能大量转化为破坏动能的过程,伴随着能 量的突然释放,严重威胁人员的生命安全。岩石裂纹 的发展对岩爆过程中能量耗散的变化有极大影 响^[6] 李德建等^[11]利用高速摄影图像研究了岩爆试 件表面裂纹扩展过程。岩爆现象发生的应力条件、岩 石物理力学性质及能量消耗与岩爆产生的碎屑特征 之间有着密不可分的关系,因此,研究岩爆碎屑特征 可以为岩爆发生的能量机制及特征分析提供依 据^[12]。

本文利用岩爆实验得到白胶煤矿玄武岩碎屑 通

过对岩爆后碎块进行 SEM 实验,提取碎屑表面裂纹 信息 利用分形理论对岩爆破坏产生裂纹进行处理, 得到相应的分形维数,分析岩爆碎屑裂纹分形维数与 加载方式及应力状态之间的关系,为岩爆发生机理研 究以及岩爆灾害防治、预测预报等提供参考。

1 玄武岩单轴、岩爆及 SEM 实验

选取四川白皎煤矿玄武岩样品,在中国矿业大学 (北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室进 行单轴及岩爆实验^[13],对岩爆产生的碎屑表面进行 (SEM)实验。

白皎煤矿位于四川省宜宾市珙县巡场镇南 5 km。矿区岩层中断层、褶曲和层滑构造较多,双向挤 压造成部分残余的构造应力存储于抗压强度较高岩 层中,形成了很高的水平构造应力,巷道开挖后,导致 能量向巷道临空面突然释放,经常发生岩爆。根据区 域构造应力分布及原实测地应力数据,结合实际埋 深,确定采样地点的地应力取值,自重应力为9 MPa, 南北方向水平应力为 15.3 MPa,东西方向水平应力 为 25.2 MPa。

1.1 实验样品

玄武岩为深灰、灰绿色,部分具气孔,杏仁状构造, 致密坚硬。经X射线衍射实验分析,样品全岩矿物中石英约占40%,斜长石约占30%,辉石约占20% 黏土矿物占10%,主要矿物组成以石英晶体为主。所含黏土矿物以绿泥石为主,含量高达78%,绿蒙混层约为19%,此外还有少量的伊利石,约占3%。从现场采集的样品,密封运抵实验室后,加工成满足实验要求的标准试件,单轴实验试件为圆柱形,标准尺寸为 φ50 mm × 100 mm,岩爆实验试件为长方柱形 基本尺寸为150 mm × 60 mm × 30 mm。

1.2 单轴实验

选取二水平胶带下山、水仓及运输大巷的玄武岩 样品各3件进行单轴压缩试验,采用电液伺服微机控 制岩石实验仪,以轴向变形0.001 mm/s的恒定速率 加荷,自动采集荷载和变形值,直至破坏。

玄武岩单轴实验主要结果见表 1。圆柱形试件 的破坏形式均以竖向张裂破坏为主,胶带下山(P)、 水仓(S)及运输大巷(H)等 3 个不同地点的岩样抗 压强度存在较为明显的差异,平均值分别为 175.0, 202.0及 99.7 MPa,运输大巷样品较胶带下山和水仓 两个地点样品强度明显偏低。

第	2	期
~	-	771.

Table 1 Results of basalt specimens in uniaxial experiments							
组别	试样编号	密度/(g•cm ⁻³)	纵波波速/(m・s⁻¹)	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	
胶带下山	FRUCP1	2.96	5 763	185.0	43. 6	0.17	
	FRUCP2	2.95	5 738	167. 0	36.3	0.17	
	FRUCP3	2.95	4 793	172. 0	41. 1	0.19	
	平均	2. 95	5 431	175.0	40. 3	0.18	
水仓	FRUCS1	2.95	5 665	209.0	73. 7	0.20	
	FRUCS2	2.97	5 867	197. 0	60. 1	0. 22	
	FRUCS3	2.97	5 885	201. 0	66. 3	0.61	
	平均	2.96	5 805	202. 0	66. 7	0.34	
运输大巷 -	FRUCH1	2.95	5 411	97.1	60. 0	0.65	
	FRUCH2	2.92	5 757	92. 8	67. 1	0.17	
	FRUCH3	2.95	5 797	109. 0	86. 0	0.25	
	平均	2. 94	5 655	99. 7	71.0	0.36	

赤。

表 1 单轴压缩实验结果 able 1 Results of basalt specimens in uniaxial experimen

1.3 岩爆实验

1.3.1 岩爆实验加载方式及破坏特征

采用两种应力加卸载方式对3个采样地点的8 件玄武岩样品进行岩爆实验,记录岩爆实验过程中的 图像、声发射等信息,分析试件破坏特征。

(1)加载方式1:加载一卸载一加集中应力。对 长方柱试件的6个表面沿竖直方向和2个水平方向 同时加载,然后卸载一水平方向应力,保持另一水平 方向的应力不变,按集中系数增大竖直方向应力,模 拟滞后岩爆。经过几次加载-卸载后,发生岩爆破坏



(a) 试件 FRRBP1



(c) 试件 FRRBD1



(d) 试件 FRRBX1

图1 加载方式1试件岩爆实验后的照片

Fig. 1 Photos of specimens after rockburst in loading way 1

1.3.2 岩爆实验结果

岩爆实验结果见表 2。胶带下山和水仓 4 个样 品的单轴实验强度高,其相应的最大破坏主应力较大 巷的 4 个样品也高。从试件破坏情况看,玄武岩岩爆 破坏时具有脆性岩石岩爆破坏的典型特征,即产生爆 坑和竖向裂纹,具有岩爆破坏中常见的板状裂化特 征^[14],两种加载方式产生的岩爆碎屑宏观上观察没 有明显差异。 1.4 岩爆碎屑 SEM 实验

为了系统进行岩爆碎屑分析,何满潮等^[15]将岩爆碎屑按粒径大小分为粗粒碎屑(粒径>30 mm)、中粒碎屑(5~30 mm)、细粒碎屑(0.075~5.000 mm) 和微粒碎屑(<0.075 mm)4个粒组。本文选取白皎煤矿玄武岩岩爆破坏后的中粒碎屑组进行SEM实验 岩爆碎屑尺寸为10 mm×10 mm×5 mm 左右,利用电子显微镜按以下步骤观察裂纹情况:

时在试样卸载临空面发生爆裂,形成爆坑,岩爆碎屑 从试件表面飞出。试件没有卸载的水平方向两侧形

成从上到下贯通的竖向裂纹 ,且在底部清晰可见沿试

件宽度方向贯通。试件破坏后的照片如图1所

3个方向上同时加载,后卸载一水平方向应力,保持

其他方向的应力不变,模拟产生瞬时岩爆的可能性。

宏观观察所见破坏特征与加载方式1基本一致 没有

明显差异。试件破坏后的照片如图 2 所示。

(2) 加载方式 2: 加载一卸载一保持。对试件在



图 2 加载方式 2 试件岩爆实验后的照片

Fig. 2 Photos of specimens after rockburst in loading way 2

Table 2 Results of basalt specimens in rockburst experiments						
加载方式	编号	密度/(g•cm ⁻³)	纵波波速/(m・s⁻¹)	极限应力状态/MPa	爆坑尺寸	
1	FRRBP1	2.96	5 812	178/48/0	$60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$	
	FRRBS1	2. 94	6 138	163/48/0	全面爆裂	
	FRRBD1	2. 94	6 017	127/41/0	100 mm \times 60 mm \times 5 mm	
	FRRBX1	2. 87	5 348	113/41/0	$40~\mathrm{mm}\times20~\mathrm{mm}\times5~\mathrm{mm}$	
2	FRRBP2	2.96	5 558	161 /64 /0	$60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$	
	FRRBS2	2. 98	5 780	167 / 66 / 0	$75~\mathrm{mm}\times60~\mathrm{mm}\times10~\mathrm{mm}$	
	FRRBD2	2. 94	5 815	116/50/0	全面爆裂	
	FRRBX2	2. 94	5 726	113/54/0	150 mm \times 60 mm \times 15 mm	

	表 2	岩爆实验结果	
able 2	Results of basalt	specimens in rockburst	experiments

(1) 对所选取的样品进行编号、确定岩爆破坏后 的剥离面为观察面 进行拍照 记录表面信息 包括矿 物成分、颜色、可见裂纹情况等。

(2) 在扫描电镜上进行不同部位及不同放大倍 数的观察。对每一待观察样品,先放大50倍左右,然 后选择局部区域进一步放大观察,并拍摄照片。为方 便统计,拍摄过程中必须有放大100,300,500及 1000倍的图片。

(3) 进一步观察 100~1 000 倍的图片,记录相应 矿物成分 拍摄典型图片,观察裂纹的形态、规模(包 括长度、宽度)、密度、分析岩石裂纹的形态、特征尺 寸等断口形貌信息 通常可以将岩石微观断裂分为穿 晶断裂、沿晶断裂及沿晶穿晶耦合断裂^[4]。

(4) 对于有代表性的裂纹,必要时可以拍摄放大 1 000~5 000 倍范围内的局部图片,以便在不同放大 倍数下分析裂纹开裂的细节特征。

利用上述方法 对 8 个岩爆试样产生的碎屑进行 了 SEM 实验。

2 岩爆碎屑微观裂纹分形分析

2.1 微观裂纹处理

利用 Photoshop 等图像处理软件进行图形转化和

处理。SEM 图像是灰度图像,对灰度图像在图片处 理工具条中利用亮度和对比度进行调整 保留图像中 所关心的裂纹部分信息,并转化成二值图,得到只有 黑白两种颜色信息的裂纹图片。图 3 为 SEM 图片处 理过程 原始 SEM 灰度图像图 3(a) 经过亮度和对比 度调整后得到图片图 3(b) 图 3(c) 是去除某些不关 心的信息,保留所关心裂纹信息图像 图 3(d) 是处理 后的裂纹图片。

对岩爆碎屑 SEM 实验获得的 32 幅图片进行裂 纹信息提取后得到的裂纹图片如图 4 5 所示 图中数 字为相应图片的裂纹分形维数。

2.2 裂纹分形维数计算

岩爆裂纹分形维数的测量采用盒维数法[16] ,数 字图像的盒维数计算是从数学角度分析图像展示的 二维形态信息 ,一般用于裂隙网络等复杂线状物的自 相似性分析,可以利用覆盖法计算裂纹的分形维 数^[17]。

覆盖法是分形计算中使用最广泛的方法之一 ,它 不要求分形具有严格的几何相似性。将图像 F 划分 为边长为 δ_k 的网格,后计算出覆盖除图像区域的网格 个数 N_{sk}(F)。若 F 具有分形特征,可根据式(1) 计



图 4 加载方式 1 获得玄武岩岩爆碎屑裂纹图片

Fig. 4 Crack photos of fragment after rockburst in loading way 1

算出岩爆裂纹图像的分形维数^[18]。

$$D = \lim_{k \to \infty} \frac{\ln N_{\delta_k}(\mathbf{F})}{\ln \delta_k}$$
(1)

基于以上原理,对处理后的岩爆裂纹二值信息图像(裂纹)采用盒维数法计算分形维数。利用 Matlab

平台编写了盒维数计算程序^[19]。

电镜扫描得到的 SEM 图片为 768 × 648 像素点, 为了避免数字图像网格 "畸变",等分时需要图像的 宽和高相等,取二等分来生成 δ_k 序列。故在同一张 SEM 图片中选择 512 × 512 像素检测区域,产生边长



图 5 加载方式 2 获得玄武岩岩爆碎屑裂纹图片



序列为 512,256,…2,1 的正方形(盒子)去覆盖选 定的 SEM 图片区域,统计不同尺度(盒子大小d)下 覆盖含裂纹图像的正方形数量(盒子数量 N),根据 统计结果将一系列"盒子大小"d 的倒数和相应的 "盒子数量"N 绘制在双对数坐标系中,得到 ln N~ ln(1/d) 的关系,按线性关系拟合数据点得到的直线 斜率即为裂纹图像的分形维数 D。每张图片选取 3 ~4 次像素检测区,以平均图像不同部位的差异。

图6为图3中岩爆碎屑裂纹图片经裂纹信息提 取得到的拟合直线及斜率,计算出的分形维数为 1.093。



图 6 盒维数法分形维数计算

Fig. 6 Fractal dimension calculation in box counting

图 7 为加载方式 1 和 2 获得的岩爆碎屑裂纹图 像分析得到的尺度倒数和数量的双对数曲线,即 ln *N* -ln(1/*d*)关系曲线。

从图 7 可以看出,同一组试件,即同一种加载方 式得到的裂纹分形关系曲线具有比较好的一致性,且 两组试件的计算结果存在明显的差异,岩爆碎屑裂纹 的分形维数能够在某种程度上反映加载方式等岩爆 破坏条件的影响。



图 7 岩爆碎屑表面微裂纹分形关系曲线

Fig. 7 Fractal dimension of microcrack on rock pieces

岩爆碎屑裂纹图像的分形维数计算结果及裂纹 特征(是否可见穿晶裂纹)见表3,分形维数的计算结 果同时标注于图4和5中。从SEM图片可以看到, 岩爆碎屑中存在大量的穿晶裂纹,而单轴破坏过程中 的裂纹扩展是沿晶界为主的,只有小部分穿晶而 过^[5],这与岩爆破坏时能量释放率大、破坏更为猛烈 的现象吻合。两种加载方式的岩爆碎屑SEM图片中 可见穿晶裂纹图片占全部裂纹分析图片的比例分别 为69%和81%,没有形成明显差异。

2.3 微观裂纹分形特征

图 8 为岩爆碎屑裂纹的分形维数 加载方式 1 的

Table 3 Fractal dimension of surface crack on rock pieces									
加载方式	计开始中	应力比值		裂纹分形维数					
	以沿狮方	应力比值	图片1	图片 2	图片 3	图片 4	平均值		
1	FRRBP1	3.74	1.419*	1.566*	1. 493	1. 521	1.500		
	FRRBS1	3.43	1.382	1.607*	1.366*	1.418	1.443		
	FRRBD1	3.18	1.291*	1.334	1.491*	1.351*	1.367		
	FRRBX1	2.79	1.537*	1.439*	1.521*	1.472*	1.492		
2	FRRBP2	2.54	1. 391*	1.093*	1.286*	1.221	1.248		
	FRRBS2	2.53	1.213*	1.397	1.395*	1.290	1.324		
	FRRBD2	2.34	1.335*	1.376*	1.097*	1.267*	1.269		
	FRRBX2	2.12	1.315*	1.063*	1.283*	1.297*	1.240		

表 3 玄武岩岩爆碎片表面裂纹分形维数 Table 3 Fractal dimension of surface crack on rock nier

注:* 表示可见穿晶裂纹。





 Fig. 8
 Fractal dimension of fragment in basalt rockburst

 玄武岩岩爆碎屑分维数分布在1.3~1.6,平均值为

 1.45。加载方式2的玄武岩岩爆碎屑分维数分布在

 1.1~1.4,平均值为1.27。加载方式1产生的岩爆

 碎片裂纹分形维数大于加载方式2的相应数值。

根据分形维数的物理意义,分形维数越大表示裂 纹越曲折或者宽度越大,开裂发展时需要的能量越 多,产生碎屑的破碎程度越高。加载方式1的应力变 化较加载方式2更容易产生较为强烈的破坏,岩爆破 坏后室内及现场碎块及裂纹的分形维数值与岩爆破 坏过程的应力状态关系密切,可以为岩爆发生机理研 究提供依据。

图9为发生岩爆破坏的极限应力状态应力比值 (简称应力比值)与碎屑裂纹分形维数之间的关系曲 线,可表示为

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 6.37D - 5.76$$
(2)

从总体趋势看 岩爆破坏时的极限应力状态最大 主应力 σ_1 与第2主应力 σ_2 比值越大,破坏时两个加 载方向的应力差越大,产生岩爆碎屑裂纹分形维数 *D* 也越大 岩爆碎屑微观裂纹的分形维数与岩爆破坏的 应力状态密切相关。



 图 9 应力比值与岩爆裂纹分形维数关系
 9 Relationship between the ration of stress and the fractal dimension of rockburst crack

3 结 论

(1) 白皎煤矿玄武岩在不同加卸载方式岩爆实 验产生的岩爆碎屑宏观上没有明显差异,但 SEM 图 片观察到的微观裂纹分形维数明显不同。

(2)白皎煤矿玄武岩在不同加载方式下产生岩 爆破坏过程中的极限状态最大主应力与第2主应力 的比值与岩爆碎屑裂纹分形维数之间呈线性关系。

(3) "加载─卸载─应力集中"条件下,岩爆破 坏前为加载阶段,应力以一定的速率变化,较"加 载─卸载─应力保持"条件下发生的岩爆破坏发展 更快,形成的岩爆裂纹的分形维数值更大,分形维数 与破坏能量及裂纹扩展过程关系密切,有待进一步研 究。

参考文献:

[1] 高 峰 谢和平 赵 鹏. 岩石块度分布的分形性质及细观结构 效应[J]. 岩石力学与工程学报 ,1994 ,13(3):240-246.
Gao Feng ,Xie Heping Zhao Peng. Fractal properties of size-frequency distribution of rock fragments and the influence of meso-structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,1994 ,13 (3):240-246.

- [2] Mandelbrot Benoit B. The fractal geometry of nature [M]. New York: W. H. Feeman and Company ,1983.
- [3] 谢和平, Pariseau W G. 岩爆的分形特征和机理[J]. 岩石力学与 工程学报, 1993, 12(1): 28-37.
 Xie Heping Pariseau W G. Fractal character and mechanism of rock burst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(1): 28-37.
- [4] 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.
 Xie Heping ,Gao Feng ,Zhou Hongwei ,et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks [J]. Journal of Disaster Prevention and Miti-

gation Engineering 2003 23(4):1-9.

- [5] 李廷芥, 王耀辉, 张梅英, 等. 岩石裂纹的分形特性及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报 2000,19(1):6-10.
 Li Tingjie, Wang Yaohui Zhang Meiying, et al. Fractal properties of crack in rock and mechanism of rock-burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2000,19(1):6-10.
- [6] 王泽云,刘 立,刘保县.岩石微结构与微裂纹的损伤演化特征
 [J].岩石力学与工程学报 2004 23(10):1599-1603.
 Wang Zeyun ,Liu Li ,Liu Baoxian. Characteristic of damage evolution of micropore and microcrack in rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004 23(10):1599-1603.
- [7] Nagahama Hiroyuki. Fractal scal in GS of rock fragmentation [J].
 Earth Science Frontiers 2000 7(1):169 177.
- [8] 王利高谦.基于损伤能量耗散的岩体块度分布预测[J]. 岩石力学与工程学报 2007 26(6):1202-1211.
 Wang Li, Gao Qian. Fragmentation distribution prediction of rock based on damage energy dissipation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007 26(6):1202-1211.
- [9] 单晓云,李占金.分形理论和岩石破碎的分形研究[J].河北理 工学院学报 2003 25(2):11-17.
 Shan Xiaoyun, Li Zhanjin. Fractal theory characteristics and its application on rock fragmentation [J]. Journal of Hebei Institute of Technology 2003 25(2):11-17.
- [10] 许金余,刘 石.大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析
 [J].岩土力学 2012 33(11):3225-3229.
 Xu Jinyu ,Liu Shi. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading[J]. Rock and Soil Mechanics 2012 33(11):3225-3229.

- [11] Li Dejian Zhao Fei ,Ma Runjie ,et al. Analysis of cracking processes of sandstone in rockburst test [J]. Applied Mechanics and Materials 2013 256 - 259: 1052 - 1059.
- [12] 李德建,贾雪娜,苗金丽,等.花岗岩岩爆试验碎屑分形特征分析[J].岩石力学与工程学报 2010 29(S1):3280-3289.
 Li Dejian Jia Xuena Miao Jinli et al. Analysis of fractal characteristics of fragment from rockburst test of granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2010 29(S1):3280-3289.
- [13] 何满潮,苗金丽,李德建,等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2007 26(5):865 876.
 He Manchao, Miao Jinli, Li Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007 26(5):865 876.
- [14] Gong Q M ,Yin L J ,Wu S Y et al. Rock burst and slabbing failure and its influence on TBM excavation at headrace tunnels in Jinping II hydropower station [J]. Engineering Geology 2012 ,124(1):98 108.
- [15] 何满潮 杨国兴 苗金丽 等. 岩爆实验碎屑分类及其研究方法
 [1]. 岩石力学与工程学报 2009 28(8):1521-1529.

He Manchao , Yang Guoxing , Miao Jinli , et al. Classification and research methods of rockburst experimental fragments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009 28(8): 1521 – 1529.

- [16] 张亚衡 周宏伟,谢和平. 粗糙表面分形维数估算的改进立方体 覆盖法[J]. 岩石力学与工程学报 2005 24(17):3192-3196.
 Zhang Yaheng Zhou Hongwei, Xie Heping. Improved cubic covering method for fractal dimension of a fracture surface of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (17):3192-3196.
- [17] Xie H Zhou H W. Application of fractal theory to top-coal caving
 [J]. Chaos Solitons and Fractals 2008 36(4):797 807.
- [18] He Manchao ,Nie Wen ,Han Liqiang ,et al. Microcrack analysis of Sanya granite fragments from rockburst tests [J]. Mining Science and Technology 2010 20(2):238 – 243.
- [19] Li Dejian ,Wang Guilian ,Han Liqiang ,et al. Analysis of microscopic pore structures of rocks before and after water absorption [J]. Mining Science and Technology 2011 21(2):287-293.