

DOI: 10.11779/CJGE201608016

# 不同加载速率下岩爆碎块耗能特征试验研究

苏国韶, 陈智勇, 蒋剑青, 莫金海, 石焱炯

(广西大学土木建筑工程学院工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 利用自主研发的真三轴岩爆试验系统, 以红色粗晶花岗岩作为岩石长方体试件, 开展了不同加载速率的应变型岩爆室内模拟试验, 在提出一种岩爆碎块单位面积表面能测定方法的基础上, 结合应力-应变曲线分析, 实现了岩爆碎块耗能组成的定量化分析, 进而探讨了不同轴向加载速率下岩爆碎块的耗能特征。研究表明: ①在单面临空真三轴压缩条件下, 只有在足够大的轴向加载速率下, 岩样集聚一定的弹性应变能并通过岩板劈裂以及潜在岩爆坑等岩爆碎块的形成耗散适当能量, 岩爆弹射破坏才可能发生; ②在 0.5~30 kN/s 加载速率范围内, 随着加载速率的增大, 碎块破碎程度呈降低趋势, 碎块耗能呈线性减小趋势; ③不同加载速率下的岩爆碎块中, 片状粗粒碎块主要来自岩爆坑表面, 主要为张拉破坏所致, 棱块状的中粒碎块、细粒碎块, 粉末状的微粒碎块主要来自岩爆坑内部, 主要为剪切破坏所致; ④不同加载速率下, 岩爆碎块耗能均以剪切耗能为主, 剪切耗能的百分比达到 97%~99%。

**关键词:** 岩石力学; 岩爆; 加载速率; 能量耗散; 真三轴试验

中图分类号: TV672; TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)08-1481-09

**作者简介:** 苏国韶(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水利工程安全研究方向。E-mail: suguoshao@163.com。

## Experimental study on energy dissipating characteristics of rockburst fragments under different loading rates

SU Guo-shao, CHEN Zhi-yong, JIANG Jian-qing, MO Jin-hai, SHI Yan-jiong

(School of Civil Engineering and Architecture, Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** The experiments on coarse-grain cuboid granite are performed for simulating ejection process of strain rockburst under different loading rates by using self-developed triaxial rockburst test system. Based on a new method for measuring surface energy per unit area, the quantitative analysis of energy dissipation of rockburst fragments is realized by with analyzing the stress-strain curve. Then energy dissipating characteristics of rockburst fragments under different loading rates are studied. The experimental results show that: (1) Under the triaxial compression with one single free face, rockburst ejection occurs when some conditions are met including that the vertical loading rate exceeds a certain rate, gathering enough elastic strain energy and dissipating proper energy through rock splitting on the surface of the free face and rock shearing in potential rockburst near the free face. (2) With the increase of loading rates ranging from 0.5~30 kN/s, the broken degree of rockburst fragments linearly declines. (3) Among the fragments under different loading rates, the coarse sheet fragments mainly come from surface of rockburst notch and are created by tension failure, and the medium-granular, fine-grained prismatic fragments and powdery tiny fragments mainly come from the interior of rockburst notch and are created by shear failure. (4) Under different loading rates, energy dissipation is mainly caused by shearing, and the percentage of energy dissipation caused by shearing reaches about 97% to 99%.

**Key words:** rock mechanics; rockburst; loading rate; energy dissipation; true triaxial test

## 0 引言

随着地下岩体工程向深部拓展, 岩爆灾害问题日益凸显。岩爆破坏是以岩石碎块高速弹射或者抛出为主要特征的硬岩动力破坏现象, 给施工人员生命、设备安全以及工程进度带来严重的威胁<sup>[1-2]</sup>。当前, 岩爆机理是一个尚未得到合理解释的世界性难题, 因此需

要开展岩爆的室内物理试验<sup>[3-4]</sup>, 再现岩爆的弹射破坏过程, 进而揭示岩爆的能量演化过程。这对于进一步揭示岩爆的发生机理, 实现岩爆的合理预测具有重要的学术价值与指导意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472329)

收稿日期: 2015-07-13

弹射动能是量化描述应变型岩爆（以下简称岩爆）破坏规模或强度的重要指标。岩爆弹射动能的合理估计是当前岩爆研究领域的重大难题，问题的解决有赖于岩爆能量集聚、耗散、释放等演化过程的深入开展。弹射碎块耗能是岩爆能量演化过程的重要一环，弹射碎块耗能特征研究有助于进一步揭示岩爆能量的演化过程，故这方面的研究开始引起了学者们的关注。如 Shivakumar 等<sup>[5]</sup>通过假设岩爆碎块具有相似性，对岩爆粒径特征进行研究；李延芥等<sup>[6]</sup>、谢和平等<sup>[7]</sup>分析了岩石裂纹的分形特征及岩爆机理；何满潮等<sup>[8]</sup>、李德建等<sup>[9]</sup>通过真三轴卸载试验，研究了不同卸载速率下的岩爆碎块特征；马艾阳等<sup>[10]</sup>研究了大理岩岩爆破坏，指出张性裂纹早于剪切裂纹，且岩爆的渐进破坏观点能较好解释岩爆机制；夏元友等<sup>[11]</sup>对大尺寸试件的岩爆碎块进行了分形分析，指出试件在低围压卸荷的岩爆碎屑分形维数值比高围压卸荷时大。

以上研究成果对于揭示岩爆弹射碎块的耗能机理具有重要意义，但不难发现：①现有岩爆碎块研究尚处于定性化研究阶段，相关量化研究还有待开展。②与传统的单轴和三轴试验相比，单面临空的真三轴试验可以更好地模拟实际地下工程开挖面附近岩石单元受力状态，该类型的试验将成为岩爆室内试验的一种发展趋势。③近年来的岩爆试验大多侧重于研究卸载效应<sup>[12-15]</sup>，但卸荷引起岩爆破坏的原因并不完全是围岩围压降低导致其承载力降低，开挖卸荷后围岩环向应力的急剧增大也是引起岩爆破坏的重要原因，故考虑卸载产生临空面后持续加载的真三轴试验能更好模拟隧洞开挖诱发岩爆的过程。④工程实践表明，岩爆一般出现在开挖后几个小时或 1~3 d 内<sup>[16]</sup>，由此说明围岩的应力集中是一个渐进的过程。因此，有必要考虑加载速率对岩爆的影响。

本文利用自主研发的真三轴岩爆试验系统，进行不同加载速率下的单面临空真三轴试验，在室内再现并记录岩爆孕育与发生的全过程。在分析岩爆碎块粒径分布特征的基础上，结合其他常规岩石力学试验，通过量化手段与方法开展岩爆弹射碎块的耗能特征研究，为深化岩爆破坏的能量机理研究提供科学依据。

## 1 试验设备与试验方案

### 1.1 试验设备

试验系统由真三轴岩爆试验机、应力与变形数据采集系统、高速摄像系统、声信号监测系统等于系统组成（图 1）。真三轴岩爆试验机是一种新型的刚性压力机，竖向最大加载压力为 5000 kN，两个水平方向的最大加载压力为 3000 kN，可在 3 个垂直方向通过

伺服控制进行独立加卸载，采用刚性压头直接对试件表面加载，具有在三向六面加载条件下单面快速卸载、单面临空三向五面加载的特殊功能，并可通过数码摄像机对临空面的破坏现象进行实时观测。



图 1 试验系统

Fig. 1 Experimental system

### 1.2 试验方案

洞室开挖后，由于临空面的形成，切向应力逐渐增大（对应的主应力为  $\sigma_1$ ），围岩洞径方向的主应力急剧降低（对应的主应力为  $\sigma_3$ ），而洞轴方向的主应力与初始地应力场保持一致（对应的主应力为  $\sigma_2$ ），见图 2。为模拟开挖后围岩临空面岩体单元的受力状态，试验应力路径为：保持一个水平临空面，同时施加三向五面应力，水平向  $\sigma_2$ ， $\sigma_3$  施加到预定值后保持不变，逐渐增加轴向主应力  $\sigma_1$  至试件破坏（图 3）。

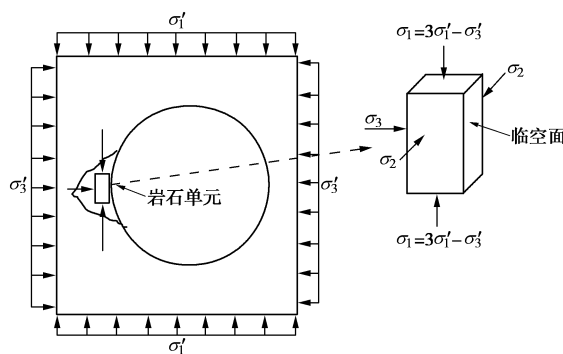


图 2 岩石单元的应力转化

Fig. 2 Stress conversion of rock element

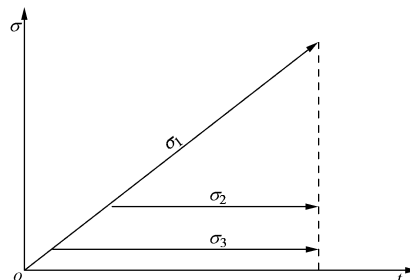


图 3 试验加载路径

Fig. 3 Loading paths of tests

对于圆形隧洞，开挖后的围岩切向压应力  $\sigma_\theta$  可根据 Kirsch 方程  $\sigma_\theta = 3\sigma_1' - \sigma_3'$  进行估算（ $\sigma_1'$  和  $\sigma_3'$  为初始

地应力的第一和第三主应力,  $\sigma_\theta$  对应于室内试验的轴向应力  $\sigma_1$ )。从理论上, 只要  $\sigma_1 < \sigma_{\max}$  条件满足 ( $\sigma_{\max}$  为岩样的峰值应力), 岩样就不会发生压缩破坏。故当  $\sigma_1 < \sigma_{\max}$  时, 试验模拟的初始地应力场为满足  $3\sigma'_1 - \sigma'_3 < \sigma_{\max}$  条件的所有可能组合的初始地应力场; 当  $\sigma_1 = \sigma_{\max}$  时, 试验模拟的初始地应力场为满足  $3\sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma_{\max}$  条件的所有可能组合的初始地应力场。因此, 采用上述应力加载路径, 既能模拟  $\sigma_\theta$  的不断增大过程, 又考虑了众多不同初始地应力场情形, 而且保证了每次试验的岩样应力都能到达峰值, 从而巧妙地避免了以往真三轴试验中因设想的初始地应力场设置三向加载应力, 这些初始地应力场情形单一, 且因加载后的轴向应力往往低于岩石试件的实际强度而不发生最终破坏等问题。

特别指出的是, 为模拟开挖导致的围岩应力转化, 也可采用如下试验应力路径: 加载三向应力至初始地应力场, 突然单面卸载  $\sigma_3$ , 调整临空面对偶面的  $\sigma_3$ , 保持  $\sigma_2$  不变, 逐渐增大  $\sigma_1$  至岩样破坏。研究发现, 该试验应力路径的实现较为复杂耗时, 但与本文采用的试验应力路径的效果相差无几, 主要原因在于所考虑的初始地应力场的  $\sigma'_1$  远低于岩样抗压强度时, 单面突然卸载  $\sigma_3$  并不能导致岩样发生明显损伤或开裂。

岩石取自广西梧州市岑溪县红色粗晶花岗岩, 制成 100 mm×100 mm×200 mm 长方体试件, 为了更好地区分岩爆坑表面和岩爆坑内部碎块, 试件临空面用墨笔划分了若干网格, 网格内标注不同英文字母。试验方案见表 1, 共 6 组, 每组试验的试件数为 3 个。

表 1 试验方案

Table 1 Experimental schemes			
编号	加载速率/(kN·s <sup>-1</sup> )	$\sigma_2$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa
Z-1	0.5	30	5
Z-2	5	30	5
Z-3	15	30	5
Z-4	20	30	5
Z-5	25	30	5
Z-6	30	30	5

2 试验结果

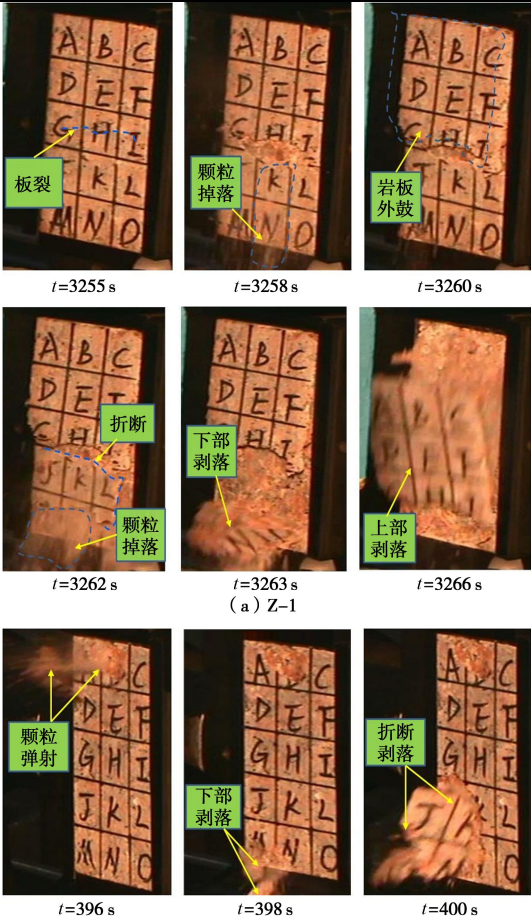
表 2 列出了不同加载速率下的试验结果 (每组试验取代表性的 1 个试件进行分析)。加载速率为 0.5 kN/s 时, 岩石试件出现静态脆性破坏, 而加载速率大于 0.5 kN/s 时, 岩石试件均出现碎块弹射破坏。这种变化趋势表明, 只有在足够大的加载速率下, 峰前集聚一定的弹性应变能, 通过岩板劈裂与潜在岩爆坑内剪切成块 (片) 等破坏过程消耗适当的能量, 才能促使岩样最终发生岩爆弹射破坏。

岩石试件破坏过程见图 4。岩爆试件临空面首先

出现小颗粒弹射, 随后发生岩板劈裂并向外鼓胀, 劈裂过程中伴有碎块的剥落, 最后岩板折断即刻出现碎块弹射现象, 并伴随有较大的声响。岩爆弹射破坏过程概况为小颗粒弹射、劈裂成板、剪切成块、板折弹射等 4 个阶段。

表 2 试验结果

Table 2 Test results		
加载速率/(kN·s <sup>-1</sup> )	峰值应力/MPa	破坏过程
0.5	164	竖向应力达到 162 MPa 时, 临空面板裂形成薄岩板; 约 4 s 后, 临空面上部岩板剥落。
5	206	竖向应力达到 198 MPa 时, 临空面出现小颗粒弹射; 15 s 后, 岩板外鼓折断, 发生弹射破坏, 并伴随较大声响。
15	257	竖向荷载达到 249 MPa 时, 临空面出现小颗粒弹射; 10 s 后, 岩板折断, 最后发生弹射破坏, 并伴有巨响。
20	247	竖向荷载达到 231 MPa 时, 临空面出现剥落并伴有破裂声; 约 8 s 后, 临空面岩板折断、发生弹射破坏, 并伴有较大声响。
25	251	竖向荷载达到 234 MPa 时, 临空面上部出现开裂并伴有破裂声; 约 7 s 后, 岩板折断、发生弹射破坏, 并伴有巨响。
30	260	竖向荷载达到 242 MPa 时, 临空面上部出现小颗粒弹射; 6 s 后, 岩板折断、发生弹射破坏, 并伴有巨响。





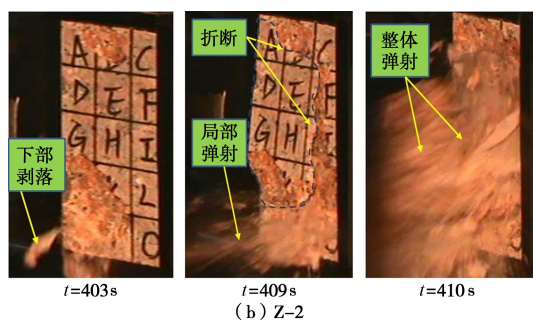


图4 试件破坏过程

Fig. 4 Failure process of specimens

试件的破坏形态见图 5。试件发生岩爆弹射破坏后，母岩出现 V 型岩爆坑，岩爆坑表面呈台阶状，并分布有白色岩粉，岩身内侧出现一条较大的贯穿性剪切斜裂缝，缝内布满白色岩粉。总的来说，岩石试件破坏形态具有显著的二元性，即临空面呈现 V 型岩爆坑，岩身内侧出现剪切裂缝。

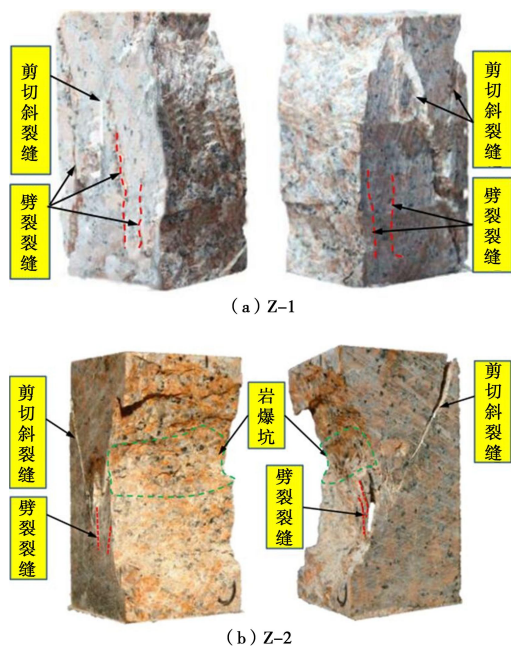


图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

各轴向应力 - 应变曲线见图 6。与静态脆性破坏的试件不同，发生岩爆破坏的试件峰前曲线具有明显的屈服点，屈服点与峰值点之间的应力 - 应变曲线较为平缓，对应的破坏现象为岩样临空面出现的劈裂破坏现象以及潜在岩爆坑范围内的剪切破坏现象。此外，与静态脆性破坏的试件不同，发生岩爆破坏试件的峰前轴向应变明显大于峰后轴向应变，峰后应力 - 应变曲线较陡。

### 3 碎块的测定与特征分析

#### 3.1 碎块的粒度与宏观特征分析

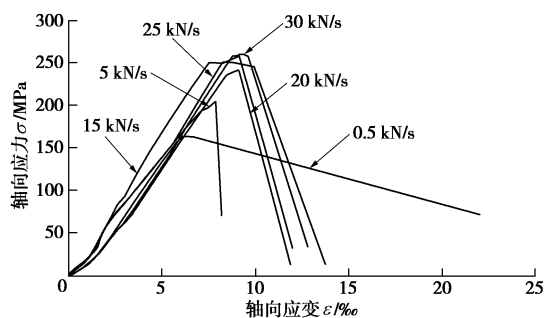


图6 不同加载速率下的轴向应力 - 应变曲线

Fig. 6 Axial stress-strain curves under different loading rates

为了进行碎块的宏观特征分析，首先需将岩石碎块进行筛分，筛径分别为 9.5, 4.75, 2.36, 1.18, 0.6, 0.3, 0.15, 0.075 mm。将筛分后碎块分为粗粒 ( $d \geq 9.5$  mm)、中粒 ( $4.75 \text{ mm} \leq d < 9.5$  mm)、细粒 ( $0.075 \text{ mm} \leq d < 4.75$  mm) 和微粒 ( $d < 0.075$  mm) 4 个粒级，然后通过电子秤称量每级筛上碎块的质量 (图 7)。其中，岩爆粗粒碎块主要呈片状，主要来自于岩爆坑表面，其破坏形式以张拉、劈裂破坏为主；岩爆中粒、细粒碎块主要呈棱块状，微粒碎块呈细粉状，主要来自于岩爆坑内部，其破坏形式以剪切破坏为主。

不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  是表征碎块粒度特征的重要参数，其计算公式为

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (2)$$

式中,  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$  分别为颗粒级配曲线上相应于 10%, 30%, 60% 含量的粒径。

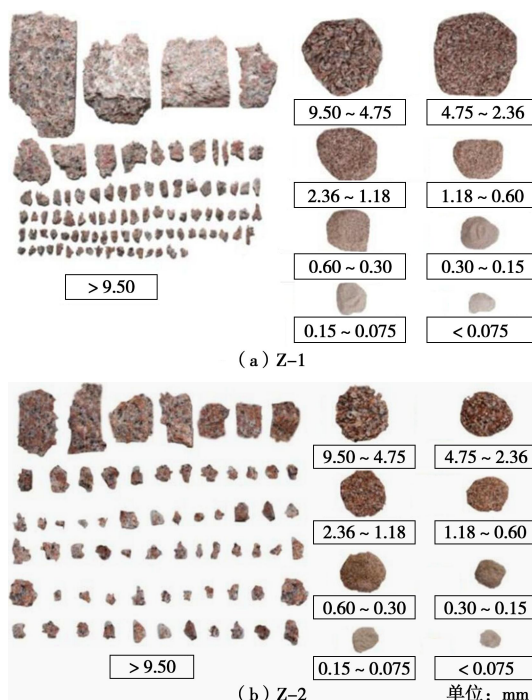


图7 岩石碎块分类

Fig. 7 Categories of rock fragments

计算结果见表 3。加载速率为 0.5 kN/s 时,  $C_u$  和  $C_c$  均大于 10, 级配较差; 其他加载速率均满足不均匀系数  $C_u \geq 5$ 、曲率系数  $C_c = 1 \sim 3$  的条件, 级配良好。

表 3 不同加载速率下碎块级配

Table 3 Fragment grading under different loading rates		
加载速率/(kN·s <sup>-1</sup> )	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
0.5	27.46	10.28
5	17.11	1.75
15	14.13	2.31
20	8.87	2.44
25	13.55	2.19
30	8.00	2.22

表 4 给出了不同加载速率下岩石碎块质量分布。加载速率为 0.5 kN/s 时, 岩样发生静态脆性破坏, 产生碎块的质量最多, 其中细粒碎块比其他粒径的质量大, 其他加载速率下岩样均出现了强烈弹射破坏, 碎块质量随着加载速率的增大而增大, 粗粒碎块质量比其他粒径碎块的质量大。

不同加载速率下弹射碎块 (指弹射距离大于 20 cm 的碎块) 的粒径分布见图 8 (纵坐标采用对数坐标)。从中可见, 不同加载速率下, 各粒径所占比重由大到小依次为粗粒、细粒、中粒、微粒。

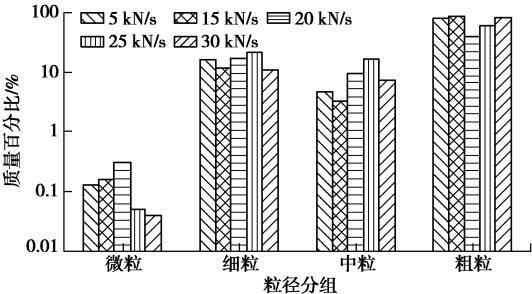


图 8 不同加载速率下弹射碎块的粒径分布

Fig. 8 Particle-size distribution of ejection fragments under different loading rates

不同加载速率下所有碎块的粒径分布见图 9 (纵坐标采用对数坐标)。从中可见, 微粒碎块的质量百分比随着加载速率的增大而减小, 说明加载速率越小, 较小碎块产生越多, 岩爆碎块的破碎程度越高。

表 4 不同加载速率下碎块质量

Table 4 Quality of fragments under different loading rates (g)						
粒径 分组	加载速率/(kN·s <sup>-1</sup> )					
	0.5	5	15	20	25	30
微粒	10.20	0.36	0.76	0.65	0.12	0.21
细粒	211.25	62.09	54.25	101.87	101.08	72.72
中粒	69.12	16.66	19.88	44.08	63.06	47.72
粗粒	182.48	173.50	197.95	210.43	241.15	298.67
合计	473.05	252.61	272.84	357.03	405.15	419.32

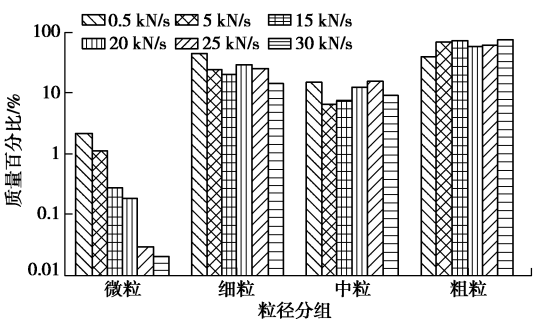


图 9 不同加载速率下所有碎块的粒径分布

Fig. 9 Particle-size distribution of all fragments under different loading rates

3.2 岩爆坑碎块的细观特征分析

分别选取各试件中来自岩爆坑体表面的片状碎块和内部碎块, 采用 VHX-2000 超景深三维显微镜进行细观结构观察。

对于岩爆坑表面的碎块, 放大倍数为 500 倍时, 断口形貌为河流状花样, 晶粒棱角分明; 放大倍数为 1000 倍时, 断口出现凹凸不平的沿晶裂纹 (图 10)。

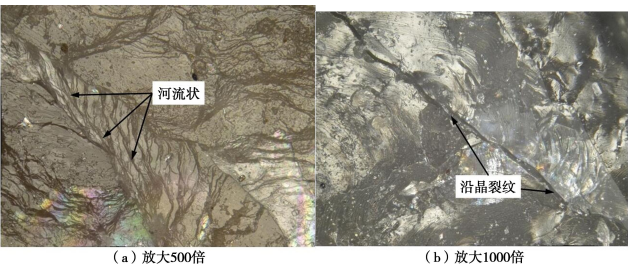


图 10 岩爆坑体表面碎块的细观结构

Fig. 10 Fragment microstructure of surface of rockburst notch

对于岩爆坑内部的碎块, 放大倍数为 500 倍时, 断口形貌为台阶状花样, 晶粒棱角分明; 放大倍数为 1000 倍时, 断口出现凹凸不平的穿晶裂纹 (图 11)。

结合微观及宏观的碎块破坏形态特征可以发现, 岩爆坑表面主要出现以薄片状碎块为主的沿晶张拉破坏, 对应于劈裂成板的宏观破坏现象; 岩爆坑内部主要出现以棱块状碎块为主的穿晶剪切破坏, 对应于剪切成块的宏观破坏现象。

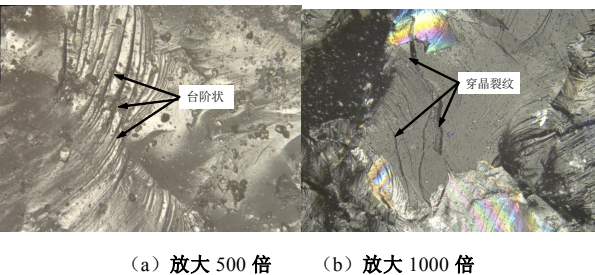


图 11 岩爆坑体内部碎块的细观结构

Fig. 11 Fragment microstructure of interior of rockburst notch



4 岩爆碎块耗能的估算

4.1 基于岩石应力-应变曲线的碎块耗能估算方法

岩石应力-应变曲线与能量关系见图 12。设岩石单元峰前、峰后耗能之和为  $U_a$  (以下简称总耗能), 屈服点之前耗能为  $U_d$ , 屈服点到峰值点间的耗能为  $U_t$ :

$$U_t = U - U_e - U_d, \quad (3)$$

式中,  $U$  为岩石单元峰前三向压缩总输入能量,  $U_e$  为岩石单元峰前储存的最大弹性应变能,  $U_d$  为岩石单元屈服点前的耗能。

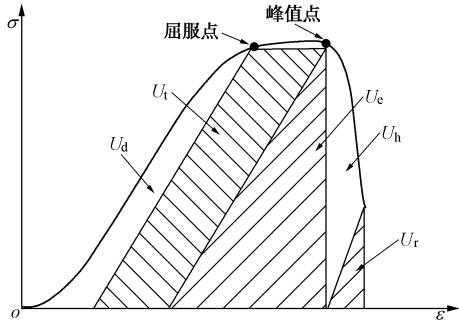


图 12 基于岩石应力-应变曲线的能量分析示意图  
Fig. 12 Schematic diagram of energy analysis based on stress-strain curve

对于试验过程中的任意时刻  $t$  的应变能, 采用微小梯形条块面积求和获得。微小梯形条块面积为

$$U_i = \sum_{i=0}^n (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) (\sigma_{i+1} + \sigma_i) / 2, \quad (4)$$

式中,  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_i$  分别为岩石单元应力-应变曲线上的每一点的值。

将岩石单元应力-应变曲线与单面临空真三轴试验的临空面破坏现象结合起来分析, 不难发现, 屈服点到峰值点之间的主要破坏形式是岩板劈裂与潜在岩爆坑的块片剪切破坏 (图 13), 故可以认为屈服点到峰值点之间的耗能  $U_t$  主要用于岩爆碎块的形成。屈服点前耗能  $U_d$  与峰后的耗能  $U_h$  主要发生在母岩中。因此, 对于单面临空真三轴试验, 通过应变-应变曲线分析可获得岩爆碎块耗能  $U_t$ 。

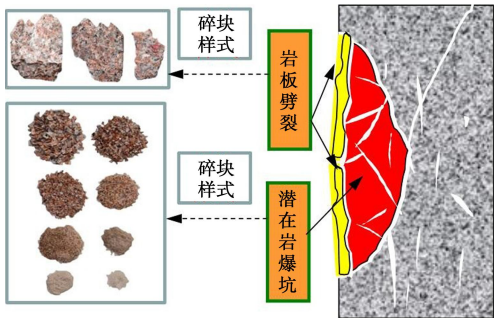


图 13 岩爆破坏示意图

Fig. 13 Schematic diagram of rockburst failure

4.2 岩爆碎块表面能的估算方法

上述试验结果表明, 岩爆的破坏机制主要为张拉与剪切的复合破坏, 其中, 临空面板裂以张拉破坏为主, 岩爆坑以剪切破坏为主。因此, 岩爆碎块的耗能主要包含了拉裂与剪切两个方面的耗能, 根据断裂力学的 Griffith 能量准则, 岩爆碎块的耗能估计式如下:

$$\Delta E = r_t \Delta S_t + r_s \Delta S_s, \quad (5)$$

式中,  $\Delta E$  为碎块耗能,  $r_t$  为张拉破坏的单位面积表面能,  $r_s$  为剪切破坏的单位面积表面能,  $\Delta S_t$  为张拉破坏的新增表面积,  $\Delta S_s$  为剪切破坏的新增表面积。

为了获得岩爆碎块的张拉与剪切耗能的合理估计值, 利用真三轴岩爆试验机具有多种试验功能的特点, 笔者提出一种基于真三轴试验机的岩石碎块耗能量化分析方法, 方法的具体步骤如下:

步骤 1: 进行 3 点弯曲试验或巴西劈裂试验, 测量单个张拉裂缝面积, 结合基于应力-应变曲线的能量计算, 初步估计  $r_t$ 。

步骤 2: 进行不同法向应力下的直剪试验, 测量单个剪切裂缝面积, 结合基于应力-应变曲线的能量计算, 初步估计  $r_s$  的区间值。

步骤 3: 进行单面临空真三轴压缩试验, 测量多个劈裂与剪切裂缝的面积, 根据应力-应变曲线, 求出屈服点至峰值段的耗能; 根据前述步骤的单位面积耗散能初步估计值, 通过适当调整  $r_t$  与  $r_s$  的数值, 使式 (5) 的计算结果与基于应力-应变曲线的耗能计算结果间误差最小, 由此获得较为合理的  $r_t$  与  $r_s$  的数值。

4.3 岩爆碎块张拉与剪切耗能值估算的实施

(1) 3 点弯曲试验初步确定  $r_t$

在尺寸为 400 mm×100 mm×100 mm 的长方体岩石中部, 分别预制深度为 10, 20, 30, 40 mm 的裂缝, 并通过支座变化考虑不同的岩石跨度  $\Delta L$ , 进行 3 点弯曲试验。利用试验机对试件所做的功 (与试件裂缝扩展后新增表面积需消耗的能量相等) 除以预制裂缝新增面积, 即可求得张拉破坏的单位面积表面能  $r_t$ , 结果见表 5,  $r_t$  的平均值为 0.26 mJ/mm<sup>2</sup>。

表 5 3 点弯曲试验结果

Table 5 Results of three-point bending tests

试件编号	$E/\text{mJ}$	$\Delta L/\text{mm}$	$\Delta S_t/\text{mm}^2$	$r_t/(\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2})$
S-1	2940	160	12000	0.25
S-2	4146	160	14000	0.30
S-3	3206	160	16000	0.20
S-4	3625	160	18000	0.20
S-5	3396	180	12000	0.28
S-6	5336	180	16000	0.33
S-7	4374	180	18000	0.24
S-8	2285	200	12000	0.19
S-9	4663	200	16000	0.29
S-10	5223	200	18000	0.29

(2) 直剪试验初步确定  $r_s$  区间取值

将岩石加工成 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件进行剪切试验。分别考虑 0.5, 1.0, 1.5 MPa 等 3 种不同的法向应力  $\sigma_n$ 。根据刚性试验机的力与位移的做功推算直剪过程所消耗的能量, 然后除以剪切裂缝面积即可求得剪切破坏的单位面积表面能  $r_s$ , 结果见表 6。 $r_s$  的区间值为[0.77, 1.21] mJ/mm<sup>2</sup>。

表 6 直剪试验结果

Table 6 Results of direct shear tests				
试件编号	$\sigma_n$ /MPa	$E$ /mJ	$\Delta S_s$ /mm <sup>2</sup>	$r_s$ /(mJ·mm <sup>-2</sup> )
J-1	0.5	49300	64436	0.77
J-2	1.0	75920	73140	1.04
J-3	1.5	97410	80609	1.21

(3) 单面临空真三轴压缩试验修正  $r_t$  与  $r_s$

通过不同加载速率的单面临空真三轴压缩试验获得相应的应力 - 应变曲线。

首先, 根据轴向的应力 - 应变曲线, 获得屈服点与峰值点之间的耗能  $U_t$  值; 然后, 根据碎块的形态特征将碎块分为片状张拉破坏型碎块与棱块状剪切破坏型碎块两大类, 测量出两类碎块的新增表面积  $\Delta S_s$ ,  $\Delta S_t$ ; 基于式 (5) 的耗能计算结果与应力 - 应变曲线的耗能计算结果间的均方差最小为目标, 经优化调整获得的修正值为  $r_t=0.24$  mJ/mm<sup>2</sup>,  $r_s=1.06$  mJ/mm<sup>2</sup>。

(4) 各岩爆试验的张拉与剪切碎块耗能估算

根据修正后的单位面积表面能, 可分别估算不同加载速率下岩石试件的碎块张拉耗能、剪切耗能以及碎块总耗能, 如表 7 所示。

表 7 不同加载速率下碎块耗能值

Table 7 Dissipation energy of fragments under different loading rates			
rates			
加载速率/(kN·s <sup>-1</sup> )	张拉耗能/J	剪切耗能/J	总耗能/J
0.5	33.31	1296.38	1329.69
5	18.73	1085.99	1104.36
15	6.39	862.81	869.20
20	10.89	866.37	877.26
25	8.87	811.01	819.88
30	18.91	682.61	701.52

5 岩爆碎块耗能特征分析

5.1 不同加载速率下的岩爆碎块耗能特征分析

(1) 不同加载速率下的碎块耗能分析

不同加载速率碎块耗能关系曲线见图 14。加载速率越大, 岩爆碎块的耗能越小。原因在于加载速率越大, 试件在加载过程中内部裂纹发育越不充分, 碎块破碎程度越低, 相应的耗能越小。

(2) 不同加载速率下张拉与剪切破坏的耗能比例

从表 7 可知, 加载速率为 0.5, 5, 15, 20, 25, 30 kN/s 时, 岩石碎块的剪切破坏耗能占总耗能的比例为 97.5%, 98.3%, 99.3%, 98.1%, 98.9%, 97.3%。说明不同加载速率下碎块耗能均以剪切耗能为主。

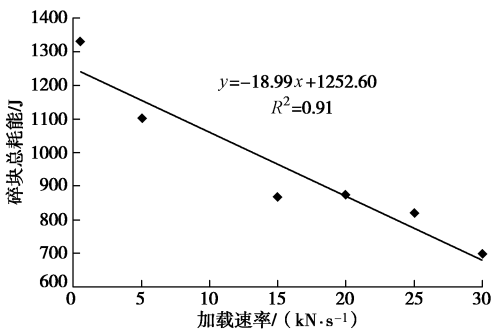


图 14 加载速率与碎块耗能关系曲线

Fig. 14 Curve of loading rates vs. energy dissipation of fragments

不同加载速率的张拉与剪切耗能比例变化过程见图 15。张拉耗能比例随着加载速率的增大呈现先减少后增大的趋势, 而剪切耗能比例则出现与张拉耗能相反的变化趋势。

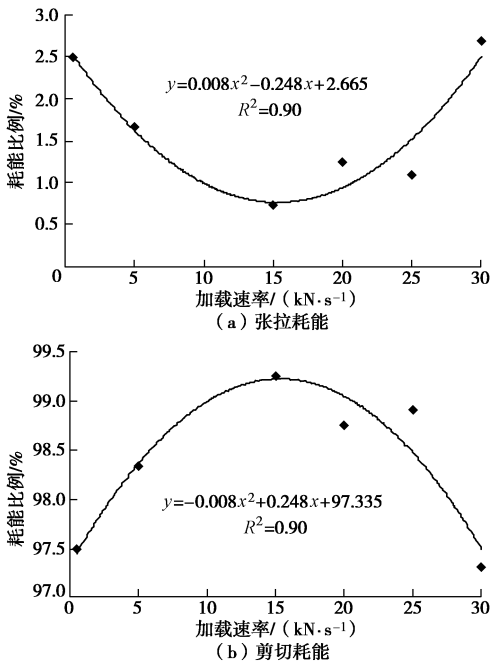


图 15 张拉与剪切耗能比例随加载速率的变化曲线

Fig. 15 Change curves of ratio of tension to shear dissipating energy vs. loading rate

5.2 不同加载速率下的岩爆碎块分形分析

岩石的宏观破碎是内部微裂纹不断发展变化积累之后的质变, 大块岩石经小破裂群体集中形成, 小破裂又是由微小的裂纹演化而来, 这种自相似性的行为导致破碎后的碎块也具有自相似的特征, 所以可以采用分形来描述岩石的破坏特征。岩爆碎块宏观块体特征可以反映岩石破碎程度, 与岩爆发生的能量释放、耗散相联系。将岩爆粗粒碎块所测得的最大长、宽、

厚度值换算为等效粒径；中粒、细粒、微粒碎块以筛分粒径作为等效粒径。利用碎块的质量-等效粒径进行分维数  $D$  计算，计算式如下<sup>[17-18]</sup>：

$$D=3-\alpha \quad , \quad (6)$$

$$\alpha=\frac{\lg [M(r) / M]}{\lg r} \quad . \quad (7)$$

式中  $\alpha$  为  $M(r) / M-r$  在双对数坐标下的斜率值； $r$  为统计区间的等效粒径； $M(r) / M$  为等效粒径小于  $r$  的碎块累计百分含量， $M(r)$  为等效粒径小于  $r$  的碎块质量， $M$  为计算尺寸内碎块的总质量。

不同加载速率下碎块分形维数计算值见表 8，表中分形维数的相关系数值均大于或等于 0.9，说明小于等效粒径的碎块累计百分比与等效粒径的线性相关性较好。碎块分形维数随着加载速率的增大而减小，即加载速率越大，粒径较大的碎块所占比重就越大，碎块破碎程度越低，相应的分形维数越小。

碎块分形维数与碎块耗能的关系见图 16。从图 16 中可知，碎块耗能随分形维数的减小而线性减小，且分形维数值每减小 0.1，碎块耗能相应减小约 110 J，由此进一步说明了加载速率越大，岩爆碎块的分形维数越小，碎块破碎程度越低，相应的碎块耗能越小。

表 8 不同加载速率下的碎块分形维数

Table 8 Fractal dimensions of fragments under different loading rates

加载速率/(kN·s <sup>-1</sup> )	分形维数	相关系数
0.5	2.40	0.95
5	2.22	0.94
15	2.06	0.90
20	2.02	0.92
25	1.97	0.90
30	1.88	0.94

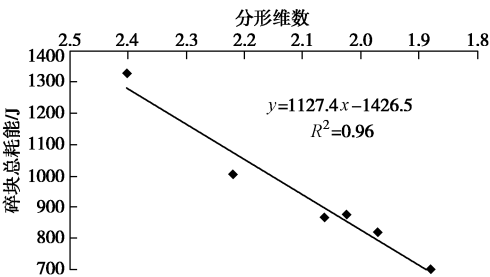


图 16 碎块分形维数与碎块耗能的关系曲线

Fig. 16 Relationship between fractal dimension of fragments and dissipating energy

6 结 论

(1)利用自主研发的真三轴岩爆试验系统成功地模拟了应变型岩爆的萌生、发展与发生的全过程。在单面临空真三轴压缩条件下，岩爆弹射破坏的基本条

件是：轴向加载速率足够大，岩样在峰前集聚一定的弹性应变能，并通过岩板劈裂以及潜在岩爆坑形成耗散适当能量。

(2)加载速率对岩爆碎块的耗能具有显著影响：在 0.5~30 kN/s 范围内，加载速率越大，岩爆碎块的耗能越小，粒径  $d<0.075\text{ mm}$  的微粒碎块所占的质量百分比越小；碎块分形维数随加载速率增大呈减小趋势，而碎块耗能随分形维数的减小而线性减小，分形维数值每减小 0.1，碎块耗能相应减小约 110 J。

(3)岩爆碎块中，片状的粗粒碎块主要来自岩爆坑表面，主要为张拉破坏所致；棱块状的中粒、细粒碎块，粉末状的微粒碎块主要来自岩爆坑内部，主要为剪切破坏所致。

(4)提出了一种岩爆碎块表面能的测定方法，利用该方法可获得较为合理的岩爆碎块张拉与剪切破坏的单位面积表面能。基于该方法的研究结果表明，不同加载速率下，岩爆碎块耗能均以剪切耗能为主、张拉耗能为辅，剪切耗能所占比重达到 97%~99%。

(5)本文基于室内岩爆物理试验进行了岩爆碎块耗能特征分析。试验是在小尺寸岩石试件上进行的，与工程现场复杂的岩体结构、应力条件及破坏现象存在着一定差异，今后需要加强现场研究，进一步揭示岩爆碎块的耗能特征与机理。

参考文献：

[1] 冯夏庭, 陈炳瑞, 张传庆, 等. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1 - 3. (FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, ZHANG Chuan-qing, et al. Mechanism warning and dynamic control of rockburst development processes[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1 - 3. (in Chinese))

[2] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945 - 1956. (QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945 - 1956. (in Chinese))

[3] 李天斌, 王湘锋, 孟陆波. 岩爆的相似材料物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 2610 - 2616. (LI Tian-bin, WANG Xiang-feng, MENG Lu-bo. Physical simulation study of similar materials for rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 2610 - 2616. (in Chinese))

[4] 陈陆望, 白世伟, 殷晓曦, 等. 坚硬岩体中马蹄形洞室岩爆破坏平面应变模型试验[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1520 - 1526. (CHEN Lu-wang, BAI Shi-wei, YIN Xiao-xi, et



- al. Plane-strain model tests on rock-burst of horseshoe section caverns in hard and brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1520 - 1526. (in Chinese))
- [5] SHIVAKUMAR K, RAO M V M S, SRINIVASAN C, et al. Multifractal analysis of the spatial distribution of area rockbursts at Kolar Gold Mines[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, **33**(2): 167 - 172.
- [6] 李廷芥, 王耀辉, 张梅英, 等. 岩石裂纹的分形特征及岩爆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(1): 6 - 10. (LI Ting-jie, WANG Yao-hui, ZHANG Mei-ying, et al. Fractal characteristics of rock cracks and the study of rockburst mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(1): 6 - 10. (in Chinese))
- [7] 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 He-ping, GAO Feng, ZHOU Hong-wei, et al. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Chinese Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, **23**(4): 1 - 9. (in Chinese))
- [8] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(5): 865 - 876. (HE Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian, et al. Experimental study of rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(5): 865 - 876. (in Chinese))
- [9] 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**(增刊 1): 3280 - 3289. (LI De-jian, JIA Xue-na, MIAO Jin-li, et al. Analysis of fractal characteristics of fragmentation from rockburst test of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3280 - 3289. (in Chinese))
- [10] 马艾阳, 伍法权, 沙鹏, 等. 锦屏大理岩真三轴岩爆试验的渐进破坏过程研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(10): 2868 - 2874. (MA Ai-yang, WU Fa-quan, SHA Peng, et al. Progressive failure of Jinping marble in true triaxial rockburst test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(10): 2868 - 2874. (in Chinese))
- [11] 夏元友, 吝曼卿, 廖璐璐, 等. 大尺寸试件岩爆试验碎屑分形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(7): 1358 - 1365. (XIA Yuan-you, LIN Man-qing, LIAO Lu-lu, et al. Fractal characteristic analysis of fragments from rockburst tests of large-diameter specimens [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(7): 1358 - 1365. (in Chinese))
- [12] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 脆性岩石卸围压试验与岩爆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(6): 963 - 969. (CHEN Wei-zhong, LÜ Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Unloading confining pressure for brittle rock and mechanism of rock burst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(6): 963 - 969. (in Chinese))
- [13] LI X J, YANG W M, WANG L G, et al. Displacement forecasting method in brittle crack surrounding rock under excavation unloading incorporating opening deformation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**(6): 2211 - 2223.
- [14] YANG H Q, ZENG Y Y, LAN Y F. Analysis of the excavation damaged zone around a tunnel accounting for geostress and unloading [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, **69**(6): 59 - 66.
- [15] HE Man-chao, MIAO Jin-li, FENG Ji-li. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, **47**: 286 - 98.
- [16] 冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(12): 433 - 443. (FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(12): 433 - 443. (in Chinese))
- [17] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997. (XIE He-ping. Fractal and rock mechanics introduction[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese))
- [18] 邓涛, 杨林德, 韩文峰. 加载方式对大理岩碎块分布影响的试验研究[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2007, **35**(1): 10 - 14. (DENG Tao, YANG Lin-de, HAN Wen-feng. Influence of loading form on distribution of marble fragments[J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2007, **35**(1): 10 - 14. (in Chinese))