

DOI: 10.11779/CJGE201609005

# 高温后花岗岩岩爆的真三轴试验研究

苏国韶, 陈智勇, 尹宏雪, 张晓鹤, 莫金海

(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 200℃~700℃ 不同高温冷却后和常温 25℃ 下的红色粗晶花岗岩作为岩样, 进行岩爆弹射破坏过程模拟物理的试验。在借助高速摄像系统和声发射系统监测岩爆过程的基础上, 分析了不同高温作用后岩样的岩爆弹射过程、破坏形态特征、峰值强度、声发射特性、碎块特征以及弹射动能的变化规律。研究表明: 随着温度的升高, 岩样从出现小颗粒弹射到整体弹射破坏的时间间隔逐渐减少; 300℃ 为该类花岗岩高温后单面真三轴强度的阈值温度, 小于等于 300℃ 时, 岩样的峰值强度变化不大, 岩样脆性随温度的升高而增大, 大于 300℃ 时, 岩样的峰值强度呈明显下降趋势, 岩样的脆性随温度升高而降低; 在岩样压密阶段, 声发射撞击数随温度升高而增大, 大于 300℃ 时, 岩爆发生前夕声发射撞击数显著下降的“平静期”持续时间随温度升高呈增大趋势; 25℃~300℃ 温度范围内, 岩爆弹射动能随温度升高明显增大, 300℃~700℃ 高温后, 岩爆弹射动能随温度升高显著减小。

**关键词:** 岩石力学; 岩爆; 高温; 真三轴

中图分类号: TU458; TV672

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)09-1586-09

**作者简介:** 苏国韶(1973-), 男, 教授, 主要从事土木水利工程安全方面的研究。E-mail: suguoshao@163.com。

## True triaxial tests on rockburst of granite after high temperatures

SU Guo-shao, CHEN Zhi-yong, YIN Hong-xue, ZHANG Xiao-he, MO Jin-hai

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

**Abstract:** The rockburst ejection process of coarse-grain granite after high temperature of 200℃~700℃ and normal temperature of 25℃ are studied by using the self-developed true triaxial rockburst test system. By monitoring the rockburst process with the high speed system and the acoustic emission system, the rockburst ejection process, damage morphology, peak stress, acoustic emission characteristics, fragments feature and kinetic ejection variation are analyzed. The test results show that with the increasing temperature, the time interval between particle ejection and final overall ejection declines. 300℃ is the threshold temperature for the strength of granite treated by different temperatures under true triaxial condition with one single face. Below this temperature, the peak strength changes slightly and the brittleness increases with the increasing temperature. Beyond the temperature, the peak strength declines apparently and the brittleness decreases with the increasing temperature. At the compaction stage, the acoustic emission hits number of rock specimens increases with the increasing temperature. The time of “quiet period”, caused by the acoustic emission impact number decreasing apparently before rockburst, declines with the increasing temperature ranging from 300℃ to 700℃. The rockburst kinetic energy of specimens under temperatures of 25℃~300℃ increases with the increasing temperature, and that of specimens after temperatures of 300℃ to 700℃ decreases with the increasing temperature.

**Key words:** rock mechanics; rockburst; high temperature; true triaxial

## 0 引言

近年来, 随着大型水利水电工程的地下厂房建设向深部拓展, 高应力、高温度和高渗透水压力“三高”环境所带来的突发性地质灾害问题日益凸显, 特别是高应力导致岩爆灾害频发, 对深部地下厂房建设提出了严峻挑战。岩爆是高应力条件下围岩弹性能突然释放引起岩石弹射性破裂的地质灾害现象<sup>[1-2]</sup>, 是一种复

杂的动力破坏现象。岩爆的发生可导致人员的伤亡、仪器设备的毁坏和工期的拖延, 造成重大的经济损失。可以预见, 在高温与高应力联合作用条件下, 岩爆发生的机制会更加复杂。当前, 高温后岩爆破坏是岩石力学领域中的前沿课题, 高温后的岩爆破坏机制尚不

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472329, 51369007)

收稿日期: 2015-07-27

清楚。因此,开展室内高温后岩爆试验,再现其岩爆过程,进而揭示温度变化对岩爆的影响,这对于深部地下空间开发中高温高应力条件下岩体工程科学设计与安全施工具有重要的学术价值与现实意义。

为深入探索高温条件下的岩石破坏机制,国内外学者开展了大量研究并取得了诸多有价值的成果。例如,Chopra<sup>[3]</sup>对高温条件下岩石的瞬时蠕变性能进行了研究。Ferrero等<sup>[4]</sup>对大理岩在230℃~600℃范围内进行了实验研究,分析了不同温度下岩石密度变化对岩石力学行为的影响。Rocchi等<sup>[5]</sup>研究了岩石在高温低压条件下峰值应力、弹性模量、应变率及脆性受温度的影响。Zhang等<sup>[6]</sup>探讨了从室温至800℃下3种硬岩的峰值强度、峰值应变和弹性模量的变化规律。许锡昌等<sup>[7]</sup>研究了20℃~600℃的花岗岩单轴压缩下的主要力学参数随温度的变化规律。徐小丽等<sup>[8]</sup>研究了花岗岩在25℃~1000℃高温作用后的三轴压缩力学性能,指出400℃为花岗岩力学参数的阈值温度。许金余等<sup>[9]</sup>对高温后的大理岩进行不同加载速率下的冲击压缩试验。吴刚等<sup>[10]</sup>对经历不同高温后石灰岩的物理力学特性进行了试验研究。瞿松韬等<sup>[11]</sup>进行了高温作用下岩石的声发射特性试验研究,指出声发射振铃计数率随温度的升高而增大。尹士兵等<sup>[12]</sup>研究了砂岩经历25℃~800℃高温冷却后,密度、纵波波速、峰值强度随温度的变化规律,分析了高温后砂岩的动态破碎特性。陈国庆等<sup>[13]</sup>开展了不同温度下花岗岩加卸载三轴试验,分析了温度对岩石力学参数的影响,并在此基础上探讨了温度影响下的岩爆机理。

在高温条件下岩石破坏机制研究方面,以往的研究主要侧重于温度对岩石物理力学参数以及静态脆性破坏的研究,高温后的应变型岩爆(简称岩爆,下同)过程研究,尤其是相应的室内物理试验研究较为鲜见,这方面的基础研究亟待开展。此外,与单轴、常规三轴、真三轴等常规试验相比,单面临空的真三轴试验可以更好地模拟地下洞室开挖后临空面附近围岩单元的受力状态<sup>[14-16]</sup>,并可实现岩爆碎块弹射过程的观测,该类型试验将成为岩爆室内试验的一种发展趋势。值得指出的是,以往的岩爆试验多侧重于研究卸荷效应对岩爆的影响<sup>[14-18]</sup>。然而,开挖卸载后因围压降低导致围岩承载能力显著下降仅是岩爆发生的部分原因,开挖卸载后围岩切向应力增大并超过围岩下降的承载能力实际上才是岩爆破坏的根本原因<sup>[19-21]</sup>。因此,有必要加强考虑加载效应的岩爆试验研究。

本文利用真三轴岩爆试验系统,进行了不同温度后的岩爆试验,分析了岩爆的弹射过程、破坏形态、峰值强度、声发射特性、碎块特征以及弹射动能变化规律,为揭示高温后岩爆破坏机制提供科学依据。

## 1 试验方案

### 1.1 岩样制备

岩样取自广西梧州市岑溪县红色粗晶粒花岗岩,长方体试件尺寸为100 mm×100 mm×200 mm。加温前,岩样纵波波速约为5.2 km/s,完整性和均匀性较好,平均密度为2607 kg/m<sup>3</sup>。

对所有岩样进行编号并按温度段分组,每组3个试件,将各组岩样分别按照200℃,300℃,400℃,500℃,600℃,700℃进行加温处理。加温过程中为确保岩样内部受热均匀,采用逐级加温方式,加温后恒温1 h,之后开启炉门自然冷却至室温25℃。加温冷却后的岩样纵波波速见表1,从中可见,与室温25℃的岩样相比较,高温后的岩样纵波波速有不同程度下降,表明高温后的岩样出现了不同程度的损伤。

### 1.2 试验设备

本试验所采用的真三轴岩爆试验机是由广西大学自主研发的新型刚性压力机(图1)。试验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,加卸载采用全数字伺服测控器控制,可在3个垂直方向进行独立加卸载,刚性加载推头可直接将压力作用于岩样外包夹具。试验机配置有单面摆杆卸载装置,具有三向六面加压条件下单面快速卸载的特殊功能,可模拟地下工程开挖瞬间围岩应力路径急剧变化的过程。试验还采用了高速摄像系统、数字录像机、声信号监测系统以及LVDT变形传感测量系统进行影像记录与各种物理量测量。



图1 真三轴岩爆试验系统

Fig. 1 True triaxial rockburst test system

岩样临空面的岩爆碎块弹射破坏过程采用美国SVSI GigaView系列的GVC08-B05高速摄像机观测,并利用英国IMETRUM系列的IM-VG03-1-117B高速摄像机进行校准,高速摄像系统的布置见图2。

岩石碎块的弹射速度采用数字影像运动分析专业软件Image ProPlus7.0对高速摄像视频进行分析(图

3), 原理为通过追踪弹射岩石碎块的行轨迹, 利用飞行距离与时间计算其弹射速度。高速摄像机的观测方向与碎块弹射方向存在一定夹角, 分析弹射速度时需进行速度矢量的坐标转换。

弹射动能估算的具体步骤为: ①对粒径大于 9.50 mm 的弹射碎块, 逐个测量各碎块 4 个角点的速度, 取平均值作为弹射速度, 并逐个称取质量; ②对较小粒径的弹射碎块 (4.75~9.50 mm), 分别测出多个弹射碎块的速度, 取平均值作为弹射速度, 并称取总质量; ③对粒径小于 4.75 mm 的碎块, 分别测出不同部位发生的碎块的速度, 取平均值作为弹射速度, 并称取总质量; ④利用动能计算公式  $E_k=mv^2/2$ , 计算各级碎块的弹射动能, 累加后得到总动能。

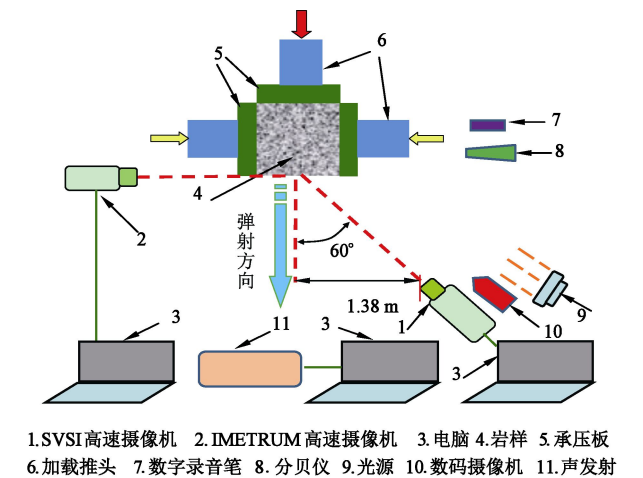


图 2 高速摄像系统布置图  
Fig. 2 Test system of high speed camera

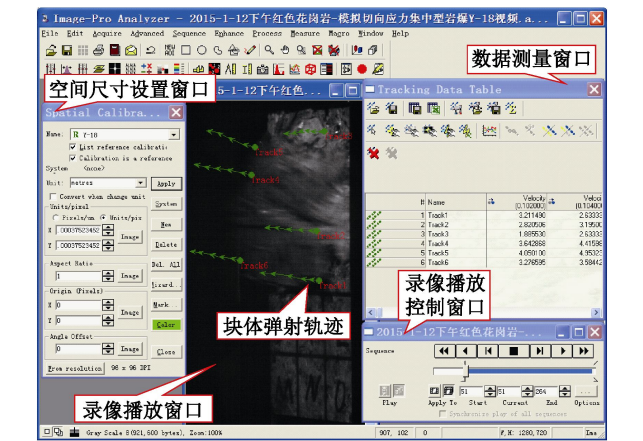


图 3 Image ProPlus 7.0 的速度分析界面  
Fig. 3 Speed analysis interface of Image ProPlus 7.0

1.3 加载路径

为了模拟地下工程开挖后出现临空面以及围岩的切向应力集中效应, 试验加载路径为: 保持一个水平临空面, 以 5 kN/s 加载速率同步增加轴压、围压, 水平向的  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  施加到位后保持不变, 逐渐以相同速

率增加轴向主应力  $\sigma_1$  至试件破坏 (图 4), 该加载路径可概括为“单面临空三向五面加载”。试验方案见表 1, 其中,  $\sigma_3$  取 5 MPa, 以反映第三主应力在径向的梯度分布影响;  $\sigma_2$  取 30 MPa, 基于深部工程实例按经验选取。

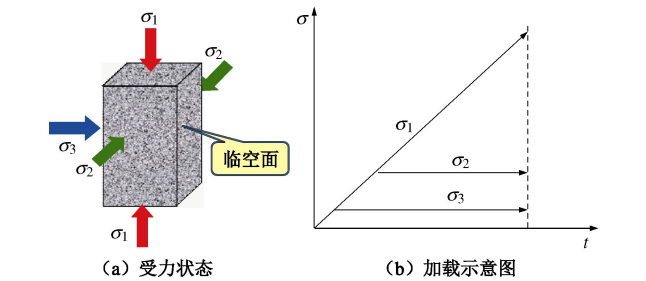


图 4 试验加载路径  
Fig. 4 Loading paths of tests

表 1 试验方案

Table 1 Test schemes

编号	岩样温度 /℃	纵波波速 /(km·s <sup>-1</sup> )	$\sigma_2$ /MPa	$\sigma_3$ /MPa
#1	25	5.2	30	5
#2	200	4.3	30	5
#3	300	3.5	30	5
#4	400	3.2	30	5
#5	500	2.1	30	5
#6	600	1.7	30	5
#7	700	0.9	30	5

2 试验结果及分析

2.1 高温后岩爆的弹射破坏过程

所有高温后花岗岩岩样均发生了不同强度的岩爆弹射破坏。高温后岩爆弹射破坏的典型过程见图 5。不同高温后的岩爆过程较为相似: 当竖向应力约达峰值应力的 95% 时, 出现局部小颗粒弹射现象, 伴有清脆破裂声; 之后出现劈裂破坏, 表层岩板内侧潜在岩爆坑发生剪切破坏并向垂直临空面方向发生体积膨胀, 岩板外鼓屈曲; 当竖向应力达到峰值时, 岩板折断并发生整体弹射破坏, 伴有较大声响。岩爆过程可概括为颗粒弹射、劈裂成板、剪切成块、板折弹射 4 个阶段。

从图 5 可以看出, 温度为 25℃ 的 #1 岩样, 从岩石出现小颗粒弹射到整体弹射破坏总时间为 38 s; 温度为 300℃ 的 #3 岩样, 从出现小颗粒弹射到整体弹射破坏总时间为 28 s; 温度为 700℃ 的 #7 岩样, 从出现小颗粒弹射到整体弹射破坏总时间为 15 s。由此可知, 随着温度的升高, 岩石从出现小颗粒弹射到整体弹射破坏的时间间隔呈逐渐减少趋势。





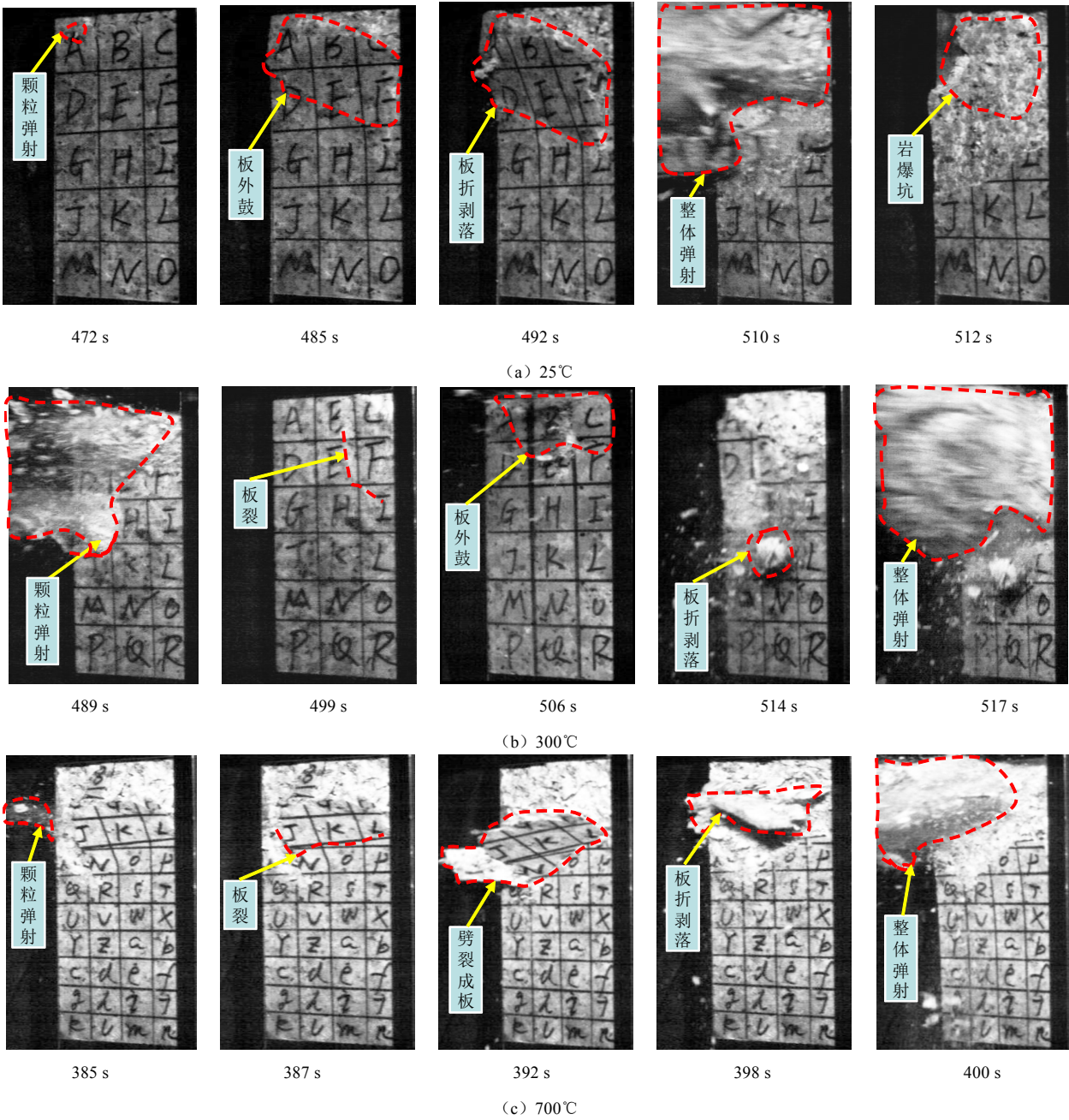


图 5 高温后岩爆弹射破坏过程

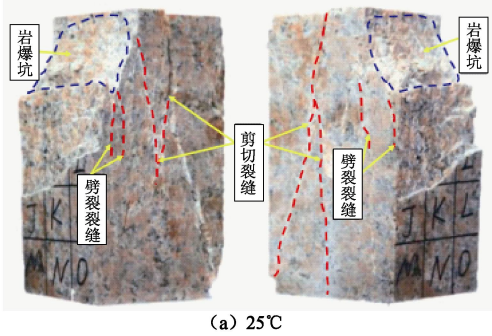
Fig. 5 Rockburst ejection processes under high temperatures

2.2 高温后岩样的破坏形态

图 6 为试验中岩样的典型岩爆破坏形态。岩爆弹射破坏最为剧烈的#3 岩样出现的岩爆坑尺寸(10.1 cm×10 cm×1.3 cm)明显大于弹射破坏最微弱的#7 岩样的岩爆坑尺寸(5.2 cm×10 cm×1.6 cm)。

各高温作用后, 岩样发生岩爆弹射破坏后的母岩的临空面一侧均出现 V 型或台阶状的岩爆坑, 岩爆坑表面凹凸不平, 并分布有白色的细岩粉; 岩身内侧出现多条较大的剪切斜裂缝, 缝内出现大量的白色细岩粉。白色细岩粉的存在说明上述两处均出现了剪切破坏。总体来看, 岩样破坏形态呈现二元破坏模式, 即临空面出现拉剪破坏所致的岩爆坑与张拉作用所致的

劈裂裂缝, 而岩身内侧出现剪切破坏所致的贯穿性剪切裂缝。



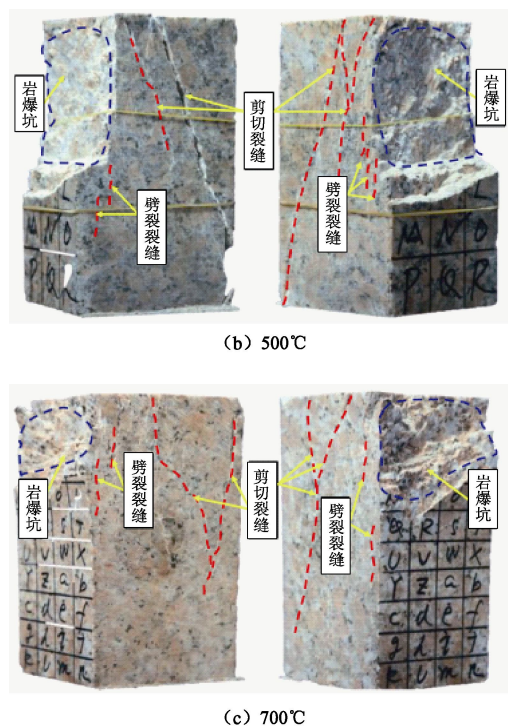


图6 不同温度后岩样的破坏形态

Fig. 6 Failure forms of specimen after different temperatures

### 2.3 高温后岩爆的轴向应力 - 应变曲线分析

图7为围压一定时花岗岩岩样在分别经历了不同高温后的轴向应力 - 应变全过程曲线。不难发现：①在围压一定时，经历不同高温作用后岩样的轴向全应力 - 应变曲线大致经历了压密、弹性、屈服、破坏4个阶段；②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；③峰前轴向应变明显大于峰后轴向应变，且应力一旦达到峰值，应力急剧下降，破坏后的岩石仍具有一定的承载能力。

从应变来看，25℃~700℃温度后，岩样压密阶段的变形随温度的升高而有所增大，其中的主要原因在于温度越高，加载前的试件初始损伤越严重，即内部的初始缺陷与孔隙越发育；对于峰值应力对应的轴向应变，25℃~300℃区间，25℃的最大，200℃次之，300℃最小，说明在25℃~300℃区间内，岩样的脆性随温度升高而增大；300℃~700℃区间，峰值应力对应的应变随温度升高而增大，且屈服点到峰值点之间的应变也随温度升高而增大，说明岩样的脆性随温度升高而降低。

温度与峰值应力、应变的关系见图8。温度分别为25℃，200℃，300℃，400℃，500℃，600℃，700℃时，对应的峰值应力（应变）为255 MPa（10.10%），255 MPa（9.98%），259 MPa（9.95%），249 MPa（11.20%），243.71 MPa（11.00%），223 MPa（12.30%），200 MPa（14.90%）。在300℃之前，岩石强度增大幅度较

小，变形降低趋势较小；但在300℃之后，岩石强度突然降低，变形幅度增大。由此可知，300℃为岑溪红色花岗岩强度突变的阈值点，300℃以后，岩石的峰值强度随温度的升高呈下降趋势，峰值应变随温度的升高呈增大趋势，相对300℃的岩样，700℃岩样峰值强度降低幅度达到22.78%，峰值应变增加幅度达到49.75%。

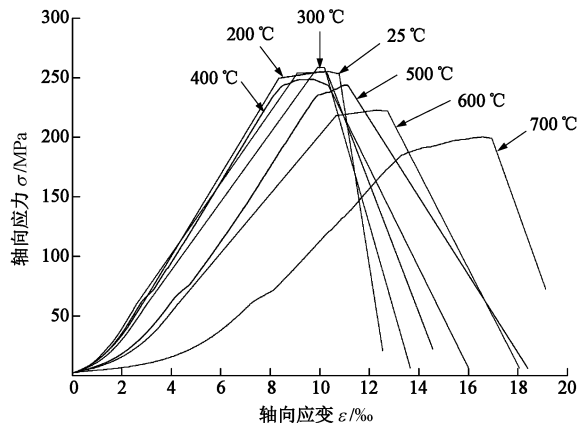


图7 不同高温后岩样的轴向应力 - 应变曲线

Fig. 7 Axial stress-strain curve of specimen after different high temperatures

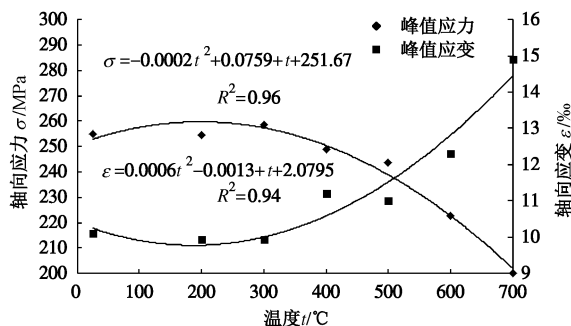


图8 温度与峰值应力、应变关系曲线

Fig. 8 Relationship among peak stress, strain and temperature

### 2.4 高温后岩爆的声发射分析

岩石声发射是岩石受力过程中内部裂纹产生、扩展和断裂所释放的弹性波<sup>[22]</sup>，可以较好地反映岩石破坏演化过程。图9为不同温度后花岗岩应力 - 应变与撞击次数的关系曲线。

从声发射撞击次数来看，加载初期，岩石进入压密阶段，均出现一定的声发射信号，25℃常温下的#1岩样出现较少的声发射撞击数，200℃~700℃高温后岩样在压密阶段的撞击次数明显较高，其中，当温度达到500℃时，岩样的声发射撞击数甚至超过岩爆瞬间的撞击数。由此可知，在加载初期，声发射撞击数随温度的升高而增大，其中的原因在于温度越高，加载前岩石内部的初始微裂纹和微孔洞等缺陷越发育，

随着内部的微裂纹以及微孔洞等压缩闭合, 岩石在压实阶段的声发射撞击数就越多。

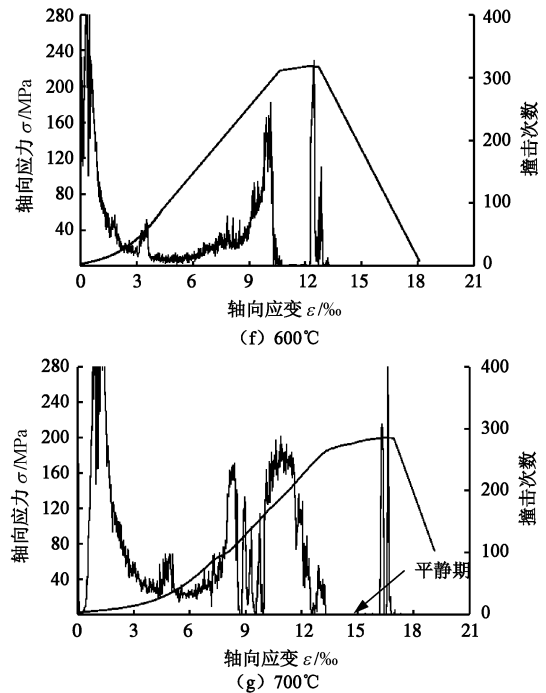
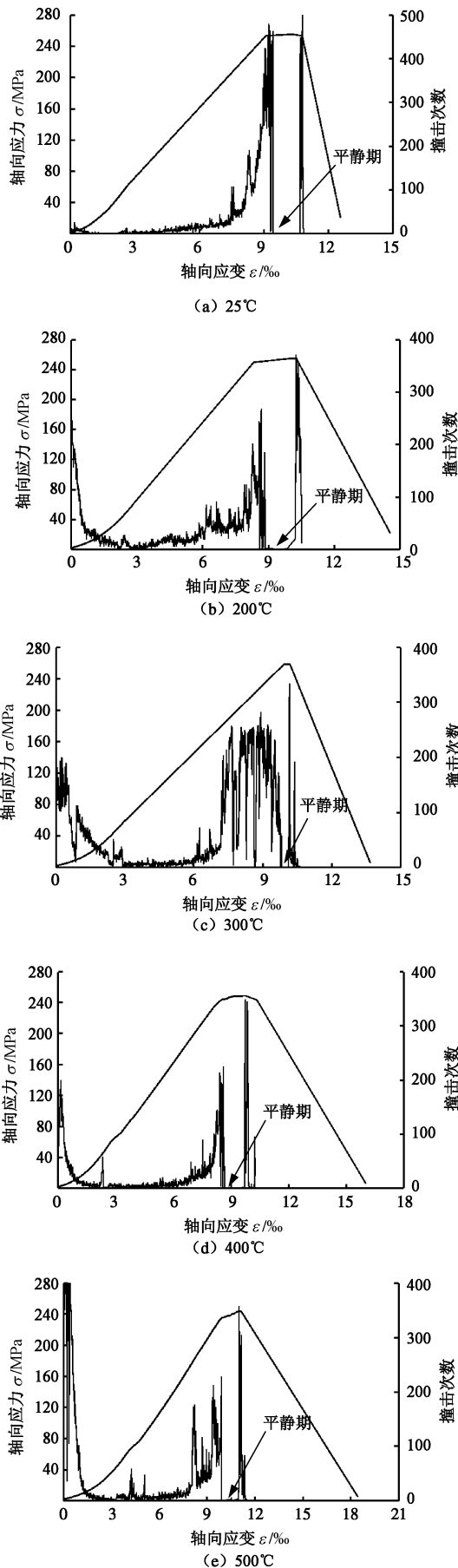


图9 不同温度后花岗岩应力-应变-撞击次数关系曲线

Fig. 9 Stress-strain-impact time curves of granite after different temperatures

随着加载时间的推进, 岩样所受的应力增大, 岩石进入线弹性阶段。此时声发射的撞击数较少且趋于稳定发展。在不断向屈服点靠近的过程中, 声发射逐渐活跃。进入屈服阶段瞬间, 声发射撞击数突增, 之后迅速下降, 在岩爆的前夕出现一段声发射活动较弱的“平静期”。25℃, 200℃, 300℃, 400℃, 500℃, 600℃, 700℃温度后的岩样, 经历“平静期”的时间分别为 5.0, 6.4, 3.2, 15.4, 21.1, 27.5, 35.2 s, 由此可以看出, 300℃高温后岩爆最为剧烈的岩样经历“平静期”的时间最短; 700℃高温后岩爆最为微弱的岩样经历“平静期”的时间最长。总体而言, 大于 300℃的高温后, 随着温度的升高, 岩爆前夕的声发射撞击数“平静期”的持续时间呈增大趋势。

## 2.5 高温后岩爆碎块粒径及特征分析

首先将不同温度后岩爆试验中产生的碎块进行收集, 采用 9.5, 4.75, 2.36, 1.18, 0.6, 0.3, 0.15, 0.075 mm 的标准筛进行筛分。为便于碎块特征分析, 将筛分后碎块分为粗粒、中粒、细粒和微粒 4 个粒级, 分别对应于粒径  $d \geq 9.5$  mm,  $4.75 \text{ mm} \leq d < 9.5$  mm,  $0.075 \text{ mm} \leq d < 4.75$  mm 和  $d < 0.075$  mm, 并通过高灵敏度电子秤称量每级筛上碎块的质量。其次, 对粗粒碎块进行编号, 用游标卡尺测量其最大长度、宽度以及厚度并称量出每块碎块的质量。

图 10 为不同温度后岩爆碎块分类照片。由此可见, 对于粒径  $d \geq 9.5$  mm 的粗粒碎块多呈不规则的片状结构, 其中常温 25℃ 下的粗粒径碎块数量为 124 个,



碎块颜色呈红色；300℃高温后的粗粒径碎块数量为 69 个，碎块颜色呈褐红色；700℃高温后的粗粒径碎块数量为 29 个，碎块颜色呈深红色。总体来看，随着温度的升高，粗粒碎块数量减少，碎块颜色由红色转变为深红色。中粒、细粒碎块以棱块状为主，微粒碎块以粉末状为主。

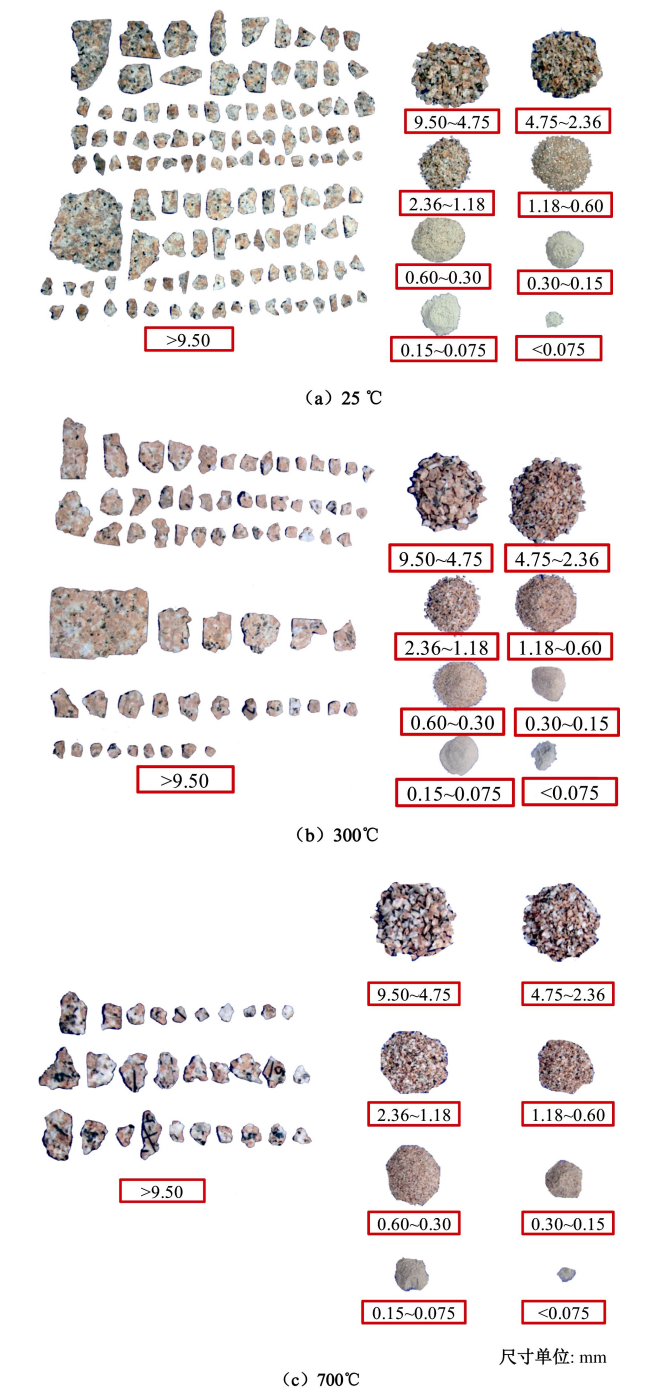


图 10 不同温度后岩爆碎块

Fig. 10 Categories of rockburst fragments after different temperatures

表 2 为不同温度后岩爆碎块的各粒径质量统计。从中可见，岩爆碎块质量以粗粒、中粒和细粒碎块为主。根据列表统计结果，绘制质量百分比分布图，如

图 11 所示（纵坐标为对数坐标）。对于粗粒，各温度后岩爆碎块所占比重是相近的。对于微粒，当温度较高时，碎块质量百分比比较大，岩石破碎程度越高。

表 2 不同高温后岩爆碎块各粒径质量统计

Table 2 Mass statistics of rockburst fragments after different high temperatures (g)

粒径	温度/℃						
	25	200	300	400	500	600	700
微粒	0.2	0.2	0.3	0.4	1.0	1.2	1.4
细粒	113.2	116.1	130.8	104.2	227.6	131.7	151.6
中粒	75.4	58.0	88.7	115.8	111.7	73.9	46.3
粗粒	369.9	331.3	317.1	296.4	214.4	304.8	202.6
合计	558.7	505.6	536.9	516.8	554.7	511.6	401.9

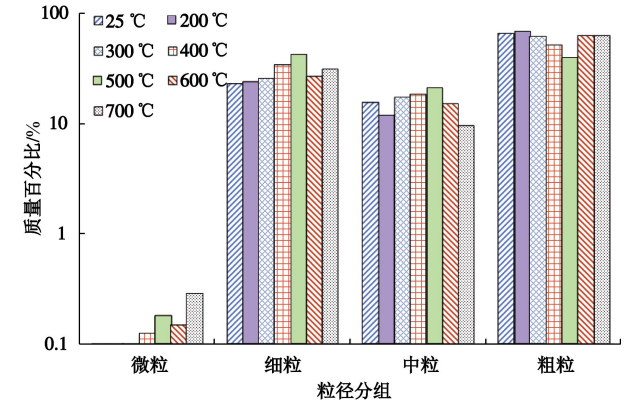


图 11 不同高温后岩爆碎块各粒径质量分布图

Fig. 11 Particle-size distribution of rockburst fragments after different high temperatures

2.6 高温后岩爆弹射动能分析

不同高温后岩爆弹射动能与温度的关系曲线如图 12 所示。温度为 25℃时，弹射动能为 3.68 J；温度增至 200℃后，弹射动能为 5.56 J；温度增至 300℃后，弹射动能最大，为 7.87 J；温度增至 400℃后，弹射动能降为 6.31 J；温度增至 500℃后，弹射动能降为 4.84 J；温度增至 600℃后，弹射动能继续降低，为 1.96 J；增大温度至 700℃后，弹射动能降低至 0.70 J。

总的来看，温度低于 300℃，弹射动能随温度的升高而增大；300℃之后，弹射动能则随温度的升高而减小。由此可知，300℃为该类型花岗岩岩爆强弱的阈值点。这是由于该粗晶花岗岩是由不同矿物构成的集合体，温度在 300℃以下，岩样因温度变化出现合适的损伤，在峰前加载过程中，先前出现的损伤有利于裂纹的萌生与发育，从而有利于潜在岩爆坑的形成，进而导致岩样极限存储能的下降，在峰值强度基本不变的情况下具有更多的剩余能量，最终更有利于弹射动能的释放。温度高于 300℃时，因矿物颗粒间热膨胀不协调，岩样内部严重损伤，微裂纹增加，原生裂纹扩展，集聚的弹性能减少。因此，只有在适当的温度作用后，岩样内部出现合适的损伤，才有利于弹射动能的释放。



研究表明, 300℃后岩爆弹射动能比 25℃常温下的岩爆弹射动能提高了 114%, 相应峰值强度仅提高了 1.6%, 由此说明, 在合适的高温作用后, 岩爆破坏的强烈程度将显著提高, 这对于高温高应力条件下深部岩体工程的工程设计和岩爆灾害防控具有重要的指导意义。

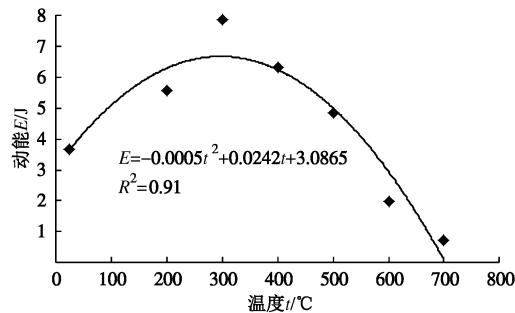


图 12 高温后岩爆弹射动能与温度的关系

Fig. 12 Relationship between ejection kinetic energy of rockburst and temperature

### 3 结 论

本文利用真三轴岩爆试验系统在室内再现了高温后花岗岩岩样的岩爆过程, 主要结论如下:

(1) 不同温度作用后的岩爆弹射破坏过程较为相似, 可概括为颗粒弹射、劈裂成板、剪切成块、板折弹射等 4 个阶段, 所不同的是, 随着温度升高, 岩爆的有效孕育时间有所减小, 即岩样从出现小颗粒弹射到最终发生整体弹射破坏的时间间隔呈减少趋势。

(2) 300℃为该花岗岩的单面临空真三轴强度的阈值温度。小于等于 300℃时, 岩样的峰值强度总体变化不大; 大于 300℃时, 岩样的峰值强度呈明显下降趋势, 峰值应力对应的应变总体上呈增大趋势。

(3) 不同温度作用后岩样应力-应变曲线均具有明显屈服点, 峰前应变明显大于峰后应变; 小于等于 300℃时, 岩样峰值应力对应的轴向应变随温度升高而有所减小, 岩样脆性随温度的升高而有所增大, 大于 300℃时, 岩样峰值应力对应的轴向应变随温度升高而显著增大, 岩样脆性随温度升高而显著降低。

(4) 不同温度作用后岩样的声发射撞击次数在峰值应力前均出现“平静期”; 温度大于 300℃后, 随着温度的升高, “平静期”的持续时间呈显著增大趋势。

(5) 温度作用对岩爆弹射破坏具有重要影响。岩爆弹射碎块的破碎程度随温度的升高而增大。25℃~300℃后, 岩爆弹射动能随温度升高而明显增大, 300℃~700℃后, 岩爆弹射动能随温度升高显著减小。300℃为该花岗岩岩样岩爆弹射动能变化的阈值点, 与单面临空真三轴强度变化的阈值点一致。

(6) 在单面临空真三轴压缩条件下, 最大岩爆弹射动能并不出现在初始损伤最小的常温岩样, 而是出现在初始损伤相对较大的高温后岩样, 由此反映了深部高温高应力岩体在开挖后温度下降的过程中围岩将可能具有更强的岩爆倾向性, 并有可能诱发更强烈的岩爆, 这对于高温高应力条件下的地下岩体工程稳定性分析具有重要的指导意义。

### 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] CHOPRA P N. High-temperature transient creep in olivine rocks[J]. Tectonophysics, 1997, 279: 93 - 111.
- [4] FERRERO A M, MARINI P. Experimental studies on the mechanical behaviour of two thermal cracked marbles[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(1): 57 - 66.
- [5] ROCCHI V, SAMMONDS P R, KILBURN C R J. Fracturing of etnean and vesuvian rocks at high temperatures and low pressures[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 132(2/3): 137 - 157.
- [6] ZHANG L Y, MAO X B, LU A H. Experimental study on the mechanical properties of rocks at high temperature[J]. Science in China: Technological Sciences, 2009, 52(3): 641 - 646.
- [7] 许锡昌, 刘泉声. 高温下花岗岩基本力学性质初步研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 332 - 335. (XU Xi-chang, LIU Quan-sheng. A preliminary study of basic mechanical properties for granite at high temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 332 - 335. (in Chinese))
- [8] 徐小丽, 高峰, 张志镇, 等. 高温后花岗岩能量及结构效应研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 961 - 968. (XU Xiao-li, GAO Feng, ZHANG Zhi-zhen, et al. Energy and structural effects of granite after high temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 961 - 968. (in Chinese))

- [9] 许金余, 刘 石. 加载速率对高温后大理岩动态力学性能的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 879 - 883. (XU Jin-yu, LIU Shi. Effect of impact velocity on dynamic mechanical behaviors of marble after high temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 879 - 883. (in Chinese))
- [10] 吴 刚, 滕念管, 王 宇. 高温后石灰岩的物理力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(2): 259 - 264. (WU Gang, TENG Nian-guan, WANG Yu. Physical and mechanical characteristics of limestone after high temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(2): 259 - 264. (in Chinese))
- [11] 翟松韬, 吴 刚, 孙 红, 等. 高温下大理岩的声发射特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 177 - 183. (ZHAI Song-tao, WU Gang, SUN Hong, et al. Acoustic emission characteristics of thermal cracking of marble under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 177 - 183. (in Chinese))
- [12] 尹士兵, 李夕兵, 王 斌, 等. 高温后砂岩动态压缩条件下力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(5): 777 - 784. (YIN Tu-bing, LI Xi-bing, WANG Bin, et al. Mechanical properties of sandstones after high temperature under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(5): 777 - 784. (in Chinese))
- [13] 陈国庆, 李天斌, 何勇华, 等. 深埋硬岩隧道卸荷热 - 力效应及岩爆趋势分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1554 - 1563. (CHEN Guo-qing, LI Tian-bin, HE Yong-hua, et al. Thermo-mechanical coupling and rockburst tendency analysis of deep hard rock tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1554 - 1563. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] HE Man-chao, JIA Xue-na, COLI M, et al. Experimental study of rockbursts in underground quarrying of Carraramarble[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, **52**: 1 - 8.
- [16] 陈陆望, 白世伟. 坚硬脆性岩体中圆形洞室岩爆破坏的平面应变模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(12): 2504 - 2509. (CHEN Lu-wang, BAI Shi-wei. Research on plane strain model test of rockburst of circular cavern in hard brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(12): 2504 - 2509. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 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))
- [19] ZHAO X G, WANG J, CAI M, et al. Influence of unloading rate on the strainburst characteristics of beishan granite under true-triaxial unloading conditions[J]. Rock Mech Rock Eng, 2014, **47**: 467 - 483.
- [20] HE Man-chao, E Sousa L R, MIRANDA T, et al. Rockburst laboratory tests database-application of data mining techniques[J]. Engineering Geology, 2015, **185**: 116 - 130.
- [21] 吴文平, 冯夏庭, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞围岩的破坏模式分类与调控策略[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(9): 1782 - 1802. (WU Wen-ping, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Classification of failure modes and controlling measures for surrounding rock of deep tunnel in hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(9): 1782 - 1802. (in Chinese))
- [22] 王德咏, 吴 刚, 葛修润. 高温作用后石灰岩受压破裂过程的声发射试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2011, **45**(5): 743 - 748. (WANG De-yong, WU Gang, GE Xiu-run. Acoustic emission characteristics of limestone during compression and fracture after high temperature[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, **45**(5): 743 - 748. (in Chinese))