文章编号：1000－7598－(2013) 增 1－0035－06

直墙拱形巷(隧)道岩爆试验及劈裂与剪切分析

张晓君，王　栋，肖　超，郑怀昌

（山东理工大学 资源与环境工程学院，山东 淄博 255049）

摘　要：针对岩爆试验及监测研究的不足，开展了直墙半圆拱形巷（隧）道岩爆单轴压缩试验、声波监测及岩爆破裂的劈裂与剪切分析。结果表明，巷（隧）道围岩呈现起伏粗糙破裂面和劈裂后的薄块体，试样整体也呈现出明显的劈裂岩爆现象；波速可以很好地反映围岩内部损伤演化进程，将围岩波速由持续不变到开始变小点作为临界损伤点，可以通过监测波速变化进行围岩岩爆的预测预报；通过监测声波波形尤其是对波形稀疏、周期变长的监测，可以很好地掌握围岩内部的全程发展变化情况；通过综合监测声波的波速、波形稀疏、周期变长，达到定性、定量相结合，及时、准确地预测、预报岩爆，以保障人员、设备安全；得出了由应力强度比和压拉比来判定劈裂岩爆发生的综合表达式以及与应力强度比岩爆烈度分级标准相对应的压拉比数值；劈裂岩爆发生的应力强度比即应力判据在 0.27～0.80 之间（R 为 10～30 时）；随着满足劈裂岩爆发生的应力强度比的增大，其越接近满足剪切破坏条件，破坏主要形式将向剪切破坏方向发展。

关　键　词：直墙拱形巷(隧)道；岩爆；单轴压缩试验；声波监测；劈裂；波速

中图分类号：TU 452　　**文献标识码**：A

Test of rockburst in straight-wall-top-arch roadways(tunnels) and its splitting and shearing failure analysis

ZHANG Xiao-jun，WANG Dong，XIAO Chao，ZHENG Huai-chang

（School of Resources and Environment，Shandong University of Technology，Zibo，Shandong 255049，China）

Abstract: Aiming at the monitoring and test of rockburst, the uniaxial compression tests and acoustic monitoring of rockburst in straight-wall-top-arch roadways(tunnels) were carried out and on this basis rockburst splitting and shearing were discussed.The results show that the failure surface of surrounding rock is rough and showing thin splitting block and the whole sample is also showing a distinct splitting rockburst; wave velocity can reflect the rock damage evolution process; and wave velocity from constant to lessening can be used as the dot of critical damage for rockburst prediction which can be achieved by monitoring velocity variation; surrounding rock internal development and changes can be a very good grasp by monitoring the waveform, especially waveform sparse and periodic increase; combination of qualitative and quantitative monitoring by the comprehensive monitoring of sound velocity, waveform sparse and periodic increase can timely and accurately predict rockburst in order to protect personnel and equipment safety; comprehensive expression of splitting rockburst is developed by the stress intensity factor and the ratio of rock's compressive-tensile strength and the numerical value corresponding to rockburst intensity standard of stress intensity factor are developed; stress intensity factor criterion of splitting rockburst is between 0.27－0.80(R=10－30); shearing failure condition will be satisfied with the increase of stress intensity factor and the main failure form will develop in the direction of shearing failure.

Key words: straight-wall-top-arch roadways(tunnels)；rockburst；uniaxial compression test；acoustic monitoring；splitting；wave velocity

1　引　言

近年来，岩爆的试验研究及破坏过程、形成机制方面的研究取得了很大进展。

徐林生[1]对岩石试样进行了卸荷三轴试验。张黎明等[2]对粉砂岩试样进行了保持轴向变形不变的卸围压试验。陈景涛等[3]通过真三轴试验模拟高地应力条件下地下工程开挖引起的复杂的应力路径的

收稿日期：2013-04-18

基金项目：山东理工大学青年教师发展支持计划经费资助；山东理工大学博士基金资助项目（No.4041410012）。

第一作者简介：张晓君，男，1975 年生，博士，副教授，主要从事岩土工程与采矿工程方面的教学和研究工作。E-mail：zhangxj1234@sina.com

演化，对拉西瓦新鲜花岗岩进行了试验研究，但未具体针对岩爆进行研究。何满潮等[4]利用自行设计的深部岩爆过程试验系统，对深部高应力条件下的花岗岩岩爆过程进行了试验研究。张晓君[5]针对立方体辉长岩试样进行了劈裂岩爆试验研究。

李连贵[6]、许迎年[7]等在平面应力的条件下进行了圆形洞室岩爆模拟试验。陈陆望等[8−9]通过钻机开挖圆形洞室，进行了先加载、后开挖的岩爆物理模拟试验，通过预制的上部半圆柱体和下部长方体的马蹄形洞室模型试件（由抗压强度稍低的材料制作）进行了马蹄形洞室加载岩爆试验。李天斌等[10]采用电钻在模型中钻掘出一个圆孔，进行了圆形隧洞岩爆物理模拟试验。陈智强等[11]采用钻孔开挖隧道的方法进行了基于数字散斑技术的深埋隧道围岩岩爆倾向相似材料试验研究。

徐林生等[12]总结出岩爆形成的力学机制主要有压致拉裂、压致剪切拉裂、弯曲鼓折等3种基本类型。苗金丽[13]、何满潮等[4]根据试验结果，将花岗岩岩爆的破坏形式分为颗粒弹射破坏、片状劈裂破坏和块状崩落破坏。伍法权等[14]认为在开挖条件下脆性岩体的岩爆破坏主要为张破裂或者张剪性破裂，破裂角一般较小，呈薄片状或刀口状，认为开挖产生次生张应力和压剪应力条件下微裂纹裂尖出现张应力是可能的。冯夏庭等[15−16]指出岩爆的发生主要是由拉裂破坏、剪切破坏、压剪混合破坏或(和)拉剪混合破坏而引起的。

综上所述，岩爆试验研究多采用完整试块或圆形断面，采用直墙拱形断面的非常少，因此，本文将针对直墙拱形巷（隧）道，将巷（隧）道围岩临空面附近近似单轴压缩状态，研究具有岩爆倾向性的含直墙半圆拱形巷（隧）道的立方体硬岩岩样在单轴压缩情况下的破裂演化情况并进行声波监测，探讨声波特征，为工程预测预报及控制提供依据。

2 立方体硬岩岩样单轴压缩试验

2.1 试验装置与方案

选用硬脆高强、具有岩爆倾向性的济南辉长岩，其具体物理力学特性见文献[5]，这里不再赘述。首先，将试样制成尺寸为 10 cm 的立方体岩样；然后，在此基础上进一步加工成含直墙半圆拱形巷（隧）道的立方体岩样，直墙半圆拱形巷（隧）道宽为 2 cm，直墙和拱高部分均为 1 cm，具体见图 1。

采用非金属声波检测仪 RSM−SY5(T)对岩样进行声波监测，监测岩样的纵波，监测的目的是得到单轴压缩全过程中岩样的内部变化规律。采用夹心式平面声波换能器，超声波探头直径为 5 cm，超声波探头中心位置的水平方向布置在巷（隧）道起拱线处，超声波探头中心位置的垂直方向布置在距离巷（隧）道临空面 2.5 cm 处，均匀涂抹耦合剂，采用特制夹具将两探头固定于岩样上，两探头分别与非金属声波检测仪发射、接收接口连接，整个监测过程不改变探头位置，实施定点连续监测。

试验是在微机控制电液伺服岩石刚性试验机（GAW−2000）上进行，单轴压缩过程采用位移控制，加载速率为 0.12 mm/min，整体试验系统布置见图 2（为加载后期拍摄图）。巷（隧）道内部的围岩破坏情况采用蛇管内窥镜监测。



图 1 试样
Fig.1 Specimen photo

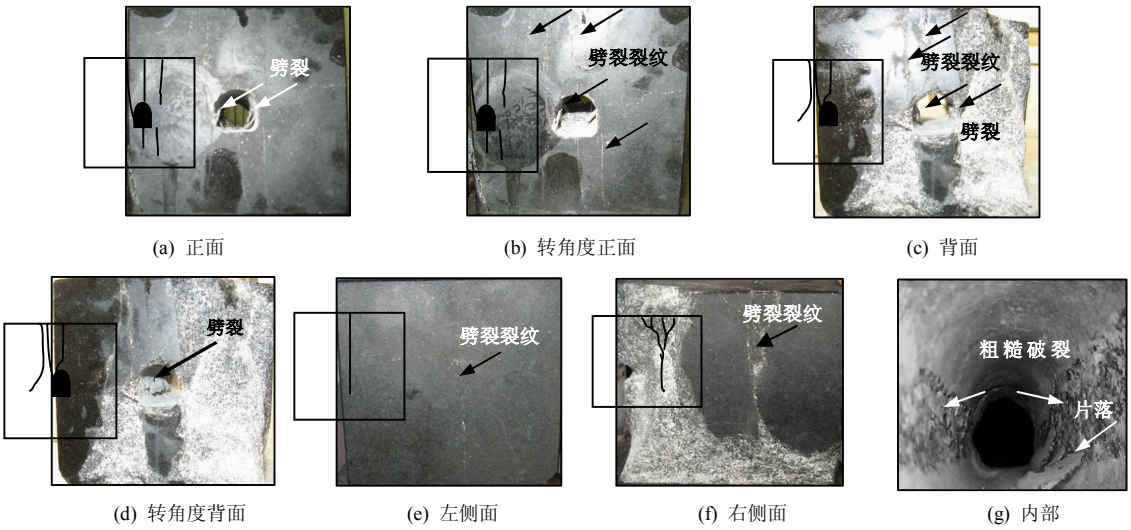


图 2 试验系统
Fig.2 Test system

2.2 试验结果与声波监测探讨

加载爆裂后的试样破坏形式见图3。由图3(a)～(d)可见，试样整体呈现多条劈裂裂纹，试样局部爆裂脱离，劈裂破坏现象明显，应是由试样整体受压致拉引起；由图3(e)、图3(f)可见，试样侧面整体也呈现出明显劈裂裂纹；由图3(a)～(d)可见，直墙拱形巷（隧）道围岩的两帮和起拱线附近发生明显劈裂破坏；由图3(g)可见，直墙拱形巷（隧）道围岩两帮和起拱线附近的粗糙、起伏破裂面和片落体，明显是受拉引起的破坏，剪切破坏并不明显。由试验得到的破坏形式、现象与已发生的山东玲珑

金矿巷道岩爆、雅西路泥巴山隧道岩爆及锦屏水电站隧洞岩爆等一系列岩爆现象一致，如2011年8月7日凌晨3点17分，正在掘进的雅西路泥巴山隧道出口，右线距离掌子面约20 m处发生岩爆，发出巨大响声，进洞右侧拱腰以上位置的岩石被劈裂成板、块、片状散落。



(a) 正面　(b) 转角度正面　(c) 背面

(d) 转角度背面　(e) 左侧面　(f) 右侧面　(g) 内部

图3　破坏形式
Fig.3　Failure modes

随加载载荷的增加，试样声波监测波速的变化见图 4。由图中可见，从载荷 0 MPa 到 80 MPa 试样声波波速一直保持在 6 667 m/s，未发生变化，说明试样内部没有损伤产生；当载荷达到 100 MPa 时，试样声波波速开始发生变化，声波波速变小到 6 250 m/s，说明试样内部开始有损伤产生，可见载荷 100 MPa 是试样临界破裂点（临界损伤）；载荷达到 110 MPa 时，试样声波波速进一步减小到 5 882 m/s；载荷达到 120 MPa 时，试样声波波速进一步减小到 5 556 m/s，载荷达到 130 MPa 时，试样声波波速又进一步减小到 5 263 m/s；载荷达到 135 MPa 时，试样声波波速进一步减小到 4 762 m/s，随即试样产生爆裂；爆裂后的试样声波波速降为 1 470 m/s。由于声波检测仪本身、探头布置位置和相应软件测试的问题，与破裂演化全过程精确对应的全过程波速还难以得到，要得到精确对应的全过程波速除了仪器和软件本身满足要求外，还需要大量的试验工作。

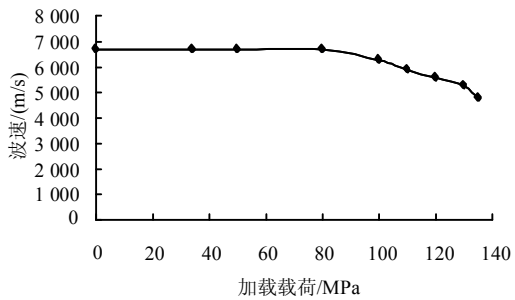


图4　试样波速随载荷的变化
Fig.4　Wave velocity variation with load

综上说明，波速可以较好地反映围岩内部的变化情况尤其是损伤演化进程，将围岩波速由持续不变到开始变小点作为临界损伤点，可以通过监测波速变化进行围岩岩爆的预测预报，相比于其他监测方法（如电磁辐射、微震等）更简单、直观，分析起来相对也更容易。

监测波速对于波速持续不变期间的围岩内部变化情况即前兆并不清楚，因此需要更丰富的监测信息。超声波对岩体内部密度的变化有很灵敏的反应，因此，对于波形的研究分析有助于对试样变形破坏的全过程进行不同阶段的判断。为了更好地对比分析，对监测得到的时域波形图进行了适当处理，波形图的纵坐标为波的幅度，横坐标为时间即声时，只保留了时域波形图中正值的幅度部分，不同载荷下的试验监测时域波形见图 5，从图 5(a)～(i)的时间轴是一致的，图中未给出。由前所述，载荷从 0～80 MPa，其试样声波波速未发生变化，但从图 5 可见，从加载开始其波形就逐步向稀疏方向发展，越到加载后期波形稀疏、周期变长现象更加明显，尤其是到达 110 MPa 时。

波形稀疏、周期变长是试样内部开始疏松，密度发生下降，试样受压其内部致拉逐步扩张的表现，试样受压致拉超过其抗拉强度将产生劈裂。因此，通过监测声波波形尤其是对波形稀疏、周期变长的监测，可以很好地了解掌握围岩内部的全程发展变化情况。由试验结果可知，通过声波监测，监测波

速、波形稀疏、周期变长，将定性与定量相结合，可及时、准确预测预报岩爆。

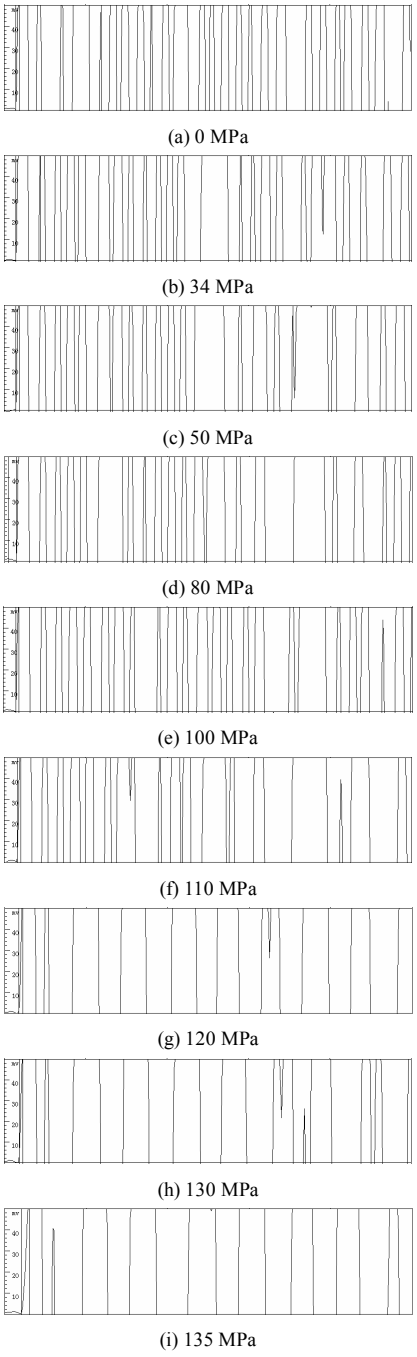


图5 不同载荷下的试验监测时域波形

Fig.5 Time domain waveforms under different loads

3 岩爆破裂的劈裂与剪切分析

围岩岩爆发生劈裂破坏其符合格里菲斯准则，这里将临界切向应力近似取为

$$\sigma_\theta = 8\sigma_{\mathrm{t}} \tag{1}$$

式中：σ_θ 为围岩的临界切向应力；σ_{t} 为岩石的单轴抗拉强度。

可见劈裂岩爆的临界切向应力强烈依赖于岩石抗拉强度，由岩石单轴抗压强度与单轴抗拉强度的对比关系来看，其比值一般大于 10，所以围岩劈裂破坏的临界切向应力 $\sigma_\theta < \sigma_{\mathrm{c}}$，$\sigma_{\mathrm{c}}$ 为岩石的单轴抗压强度。

依据评价岩石的岩爆倾向性方法，用压拉比 R 表示：

$$R = \frac{\sigma_{\mathrm{c}}}{\sigma_{\mathrm{t}}} \tag{2}$$

式中：R 为压拉比。

为了便于与常用的应力强度比法相比较，将式（1）、（2）变换为如下劈裂岩爆判据形式：

$$\frac{\sigma_\theta}{\sigma_{\mathrm{c}}} \geqslant \frac{8}{R} \tag{3}$$

上式为考虑应力强度比和压拉比判定劈裂岩爆发生的综合表达式。根据式（3）得到不同压拉比情况下的应力强度比见图6，得到与应力强度比岩爆烈度分级标准相对应的压拉比参数见表1。

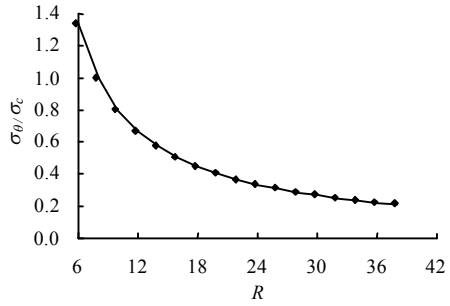


图 6 $\sigma_\theta/\sigma_{\mathrm{c}}$ 随 R 的变化关系

Fig.6 Relation of $\sigma_\theta/\sigma_{\mathrm{c}}$ along with R

表1 岩爆烈度分级标准及破坏主要形式

Table 1 Classification standards of rockburst intensities and failure modes

评级	挪威学者		常用方法		破坏形式中的主成分
指标	$\sigma_\theta/\sigma_{\mathrm{c}}$	R	$\sigma_\theta/\sigma_{\mathrm{c}}$	R	
无岩爆	<0.2	>40.0	<0.3	>26.7	无
弱岩爆	0.2～0.3	26.7～40.0	0.3～0.5	16.0～26.7	劈裂（拉）
中等岩爆	0.3～0.55	14.5～26.7	0.5～0.7	11.4～16.0	劈裂-剪切（拉剪复合）
强岩爆	>0.55	<14.5	>0.7	<11.4	剪切

根据岩石压拉比的范围（一般在 10～30 之间），当 R=10 时，应力强度比 $\sigma_\theta/\sigma_{\mathrm{c}}$=0.80；当 R=16 时，应力强度比 $\sigma_\theta/\sigma_{\mathrm{c}}$=0.50；当 R=30 时，应力强度比 $\sigma_\theta/\sigma_{\mathrm{c}}$=0.27，可见劈裂岩爆发生的应力强度比即应力判据在 0.27～0.80 之间（R 在 10～30 之间），这

里的岩爆判据形式与岩爆应力判据范围基本一致。

对于压拉比大于 10 的脆性岩石来说，围岩岩壁附近极易优先发生劈裂（拉）破坏，这与已有的岩爆现象及试验结果一致。围岩受压致拉逐步扩张，达到剪切所需的应力条件（摩尔-库仑准则），剪切破坏将发生，这要看围岩卸荷后的受力条件和应力水平。

综上所述，随着满足岩爆发生应力强度比条件的增大，其破坏形式主成分由劈裂（拉）向劈裂-剪切（拉剪复合）再到剪切破坏方向发展，具体见表 1 岩爆烈度分级标准及对应的破坏主要形式。

不论是即时性的还是时滞性的岩爆，不论是弱的还是强的岩爆，其破裂演化开始阶段和破坏的成分中必存在劈裂（拉）成分。通过监测围岩的声波波形，当围岩受压致拉逐步扩张，可监测到波形稀疏、周期变长，及时掌握围岩内部的全程发展变化情况，将岩爆的前兆识别大为提前。

4　结　论

（1）开展了直墙半圆拱形巷（隧）道岩爆单轴压缩试验，得到了明显的劈裂岩爆现象，巷（隧）道围岩呈现起伏、粗糙破裂面和劈裂薄块体，与已发生的岩爆现象一致。

（2）对整个试验过程进行了声波监测。波速可以很好地反映围岩内部损伤演化进程，将围岩波速由持续不变到开始变小点作为临界损伤点，可进行围岩岩爆的预测预报。

（3）通过监测声波波形尤其是对波形稀疏、周期变长的监测，可以很好地掌握围岩内部的全程发展变化情况。采用监测波速、波形稀疏、周期变长方法，将定性与定量相结合，可及时、准确地预测、预报岩爆，并将岩爆预测预报的前兆识别大为提前，以保障人员、设备安全。

（4）得出了由应力强度比和压拉比来判定劈裂岩爆发生的综合表达式以及与应力强度比岩爆烈度分级标准相对应的压拉比参数。劈裂岩爆发生的应力强度比即应力判据在 0.27～0.80 之间（R 为 10～30 时）。随着满足岩爆发生应力强度比条件的增大，其破坏形式主成分由劈裂（拉）向劈裂-剪切（拉剪复合）再到剪切破坏方向发展，不论是即时性的还是时滞性的岩爆，不论是弱的还是强的岩爆，其破坏形式中必包括劈裂成分。

参 考 文 献

[1] 徐林生. 卸荷状态下岩爆岩石力学试验[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(1): 1－4.
XU Lin-sheng. Research on the experimental rock mechanics of rockburst under unloading condition[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University**, 2003, 22(1): 1－4.

[2] 张黎明, 王在泉, 贺俊征. 岩石卸荷破坏与岩爆效应[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39(1): 110－113.
ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, HE Jun-zheng. Analysis of failure characteristics of rock under unloading conditions and their effects on rockburst[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)**, 2007, 39(1): 110－113.

[3] 陈景涛, 冯夏庭. 高地应力下岩石的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1537－1543.
CHEN Jing-tao, FENG Xia-ting. True triaxial experimental study of rock with high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1537－1543.

[4] 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 on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 865－876.

[5] 张晓君. 深部巷(隧)道围岩的劈裂岩爆试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 66－71.
ZHANG Xiao-jun. Experimental research on splitting rock burst of surrounding rocks in deep roadways(tunnels)[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2011, 28(1): 66－71.

[6] 李连贵, 徐文胜, 许迎年, 等. 岩爆模拟材料研制及模拟试验分析[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(6): 80－82.
LI Lian-gui, XU Wen-sheng, XU Ying-nian, et al. Experimental study on simulation materials of rockburst[J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology**, 2001, 29(6): 80－82.

[7] 许迎年, 徐文胜, 王元汉, 等. 岩爆模拟试验及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1462－1466.
XU Ying-nian, XU Wen-sheng, WANG Yuan-han, et al. Simulation testing and mechanism studies on rockburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1 462－1 466.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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(增刊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(Supp.1): 2610－2616.

[11] 陈智强, 张永兴, 周检英. 基于数字散斑技术的深埋隧道围岩岩爆倾向相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 141－148.
CHEN Zhi-qiang, ZHANG Yong-xing, ZHOU Jian-ying. Experimental study of deep tunnel surrounding rock rockburst proneness with similarity material simulating method based on digital speckle correlation technique[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.1): 141－148.

[12] 徐林生, 王兰生. 岩爆形成机理研究[J]. 重庆大学院学报(自然科学版), 2001, 24(2): 115－117.
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng. Study on the mechanism of rockburst[J]. **Journal of Chongqing University(Natural Science Edition)**, 2001, 24(2): 115－117.

[13] 苗金丽, 何满潮, 李德建, 等. 花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1593－1603.
MIAO Jin-li, HE Man-chao, LI De-jian, et al. Acoustic emission characteristics of granite under strain rockburst test and its micro-fracture mechanism [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(8): 1593－1603.

[14] 伍法权, 伍劼, 祁生文. 关于脆性岩体岩爆成因的理论分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 589－595.
WU Fa-quan, WU Jie, QI Sheng-wen. Theoretical analysis on mechanism of rockburst of brittle rockmass[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(5): 589－595.

[15] 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(3): 433－444.
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(3): 433－444.

[16] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 561－569.
CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: Time delayed rockburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 561－569.