

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.07.012

# 液压与气液复合加载洞室岩爆模型对比试验

祝文化, 燕星, 刘畅, 夏元友  
(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为了探讨液压与气液复合加载条件下地下洞室岩爆现象的差异, 选择具有明显脆弹性的石膏模型材料, 制作了大尺寸模型试件, 利用自主研发的气液复合型岩爆模型试验装置开展液压与气液复合加载洞室岩爆物理模型试验, 模拟深部地下洞室开挖过程中的岩爆现象。采用应力应变测试、声发射监测及影像获取等方法, 对试件加载过程中洞室的宏观破坏现象、洞室周边内部变形规律、声发射特征参数及裂纹的扩展进行分析。试验结果表明: 洞室边墙和拱肩部位产生较大的应力集中区, 洞室岩爆破坏顺序是先边墙, 后拱肩方向, 边墙和拱肩部位在极短的时间内出现裂纹及扩展, 形成较大范围的层裂、剥落及弹射碎片, 并伴随较大的声响; 在相同的加载应力路径下, 气液复合加载较液压加载破坏区范围更大, 在本试验气液复合加载条件下, 边墙破坏区范围大致为  $0.6b$  ( $b$  为洞室宽度); 岩爆的发生及烈度与加载方法和破坏时能量的释放速率密切相关, 采用气液复合加载的模型试件, 在对应破坏点处应变具有明显的梯度变化, 应变值显著高于液压加载试件, 同时, 声发射能量较液压加载具有明显的突变, 岩爆的宏观破坏过程及现象更为明显, 破坏程度更为剧烈。气液复合加载的试验方法更为符合实际工程岩体破坏过程的实际受荷。

**关键词:** 隧道工程; 岩爆; 模型试验; 洞室; 三向应力; 气液复合; 大尺寸试件

**中图分类号:** U455.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0268(2018)07-0086-07

## Contrast Test of Cavern Rock Burst Model under Hydraulic Loading and Gas-liquid Compound Loading

ZHU Wen-hua, YAN Xing, LIU Chang, XIA Yuan-you

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

**Abstract:** In order to investigate the difference of rock burst phenomena in underground under hydraulic and gas-liquid compound loading conditions, selecting a gypsum model material with brittle elasticity, a large scaled model specimen is produced. Meanwhile, a self-designed gas-liquid compound loading test device is developed to conduct the cavern rock burst physical model test under hydraulic and gas-liquid loadings to simulate the rock burst phenomenon in the process of excavation in deep underground caverns. With the methods of stress-strain testing, acoustic emission monitoring and imaging retrieval, the macroscopic failure features, the interior deformation characteristics around the cavern, the acoustic emission characteristic parameters and the crack propagation in the loading process of specimen are analyzed. The test result shows that (1) Cavern wall and spandrels create a larger stress concentration zone, the rock burst of cavern appears in the side wall firstly then spandrel, the cavern wall and spandrels are cracked and expanded in a very short time, forming a wide range of cracks, spalling and ejection fragments, accompanied by a large sound. (2) The failure zone under the gas-liquid compound loading is larger than that under the hydraulic loading at the same stressing paths. The damage range of the cavern wall is  $0.6b$  ( $b$  is the cavern width) under the gas-

收稿日期: 2017-09-30

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110143110017); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014-IV-150)

作者简介: 祝文化(1966-), 男, 河南固始人, 硕士, 副研究员. (jyzwh@whut.edu.cn)

liquid compound loading condition. (3) The occurrence and intensity of rock burst are closely related to the loading method and the energy release rate during the rock burst process. In the model specimen under the gas-liquid compound loading, the obviously gradient change appears at the corresponding failure point, the strain value is significantly higher than of the hydraulic loading specimen. (4) The acoustic emission energy has obvious mutation compared with the hydraulic loading. The macroscopic failure process and phenomena of the rock burst are more obvious, and the degree of rock burst is more severe. Therefore, the test method using gas-liquid compound loading is more conformable to the loading condition of the real rock failure process.

**Key words:** tunnel engineering; rock burst; model test; cavern; 3D stress; gas-liquid compound loading; large-scaled specimen

## 0 引言

岩爆是在高地应力地区硬岩隧洞施工中经常发生的一种动力失稳地质灾害。自1738年英国的莱比锡煤矿发生岩爆以来,世界各国相继有关于岩爆的报道,我国最早有记录的岩爆发生在1933年的抚顺胜利煤矿<sup>[1-2]</sup>。随着国家经济建设的快速发展,我国有多个大型水电和公路工程,如天生桥水电站、锦屏二级水电站、二郎山隧道、秦岭隧道等都曾发生过强烈岩爆<sup>[3-5]</sup>。岩爆发生时,岩体产生爆裂、弹射甚至抛掷等破坏现象,直接威胁施工人员及设备的安全,造成重大灾害。针对工程建设中岩爆这一亟待解决但又很难解决的问题,国内外岩石力学工作者多年来从不同的角度进行了大量的研究工作。但因其本身问题的复杂性,还未能形成成熟的理论和方法。

岩爆模型试验是探讨洞室岩爆机理的一种重要方法,例如李天斌<sup>[6]</sup>制作的半径为42 mm的圆孔洞室尺寸模型,采取“后开孔”的成孔方式来研究洞室岩爆物理过程;费鸿禄<sup>[7]</sup>等为了再现地下工程中的岩爆现象,在试验中进行了洞径为18 mm的模拟洞室试验;陈陆望和白世伟<sup>[8-9]</sup>进行了直径为160 mm的圆形洞室岩爆破坏的平面应变模型试验。以上模型试验虽然取得了一定的研究成果,但所采用的加载系统都是由液压系统完成。顾金才<sup>[10]</sup>认为目前试验中采用的油压控制系统由于油路供油速度缓慢,很难实现抛掷型岩爆;左宇军等<sup>[11-12]</sup>采用改进的三轴霍普金森压杆(SHPB)实现动静组合加载试验,一定程度上能模拟动静组合加载,但其试验对象是小尺寸( $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ )圆柱体试件,观察到的岩爆现象也不是十分明显。

由于现有岩爆模型试验系统所采用的液压加载系统在试件破坏瞬间因油路供油缓慢,导致加载速

率较低,本研究在已有模型试验成果的基础上,按模型材料物理学性能需满足岩爆倾向性指标的要求,选用石膏材料制作了大尺寸模型试件,采用自主研发的气液复合岩爆模型试验装置<sup>[13-14]</sup>,比较相同加载应力路径下,液压和气液复合加载的洞室岩爆现象,对洞室的破坏过程、破坏形态、破坏范围、临界荷载等相关规律进行研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试验系统

模型试验是在自主研发的气液复合加载岩爆模型试验装置(图1)上进行,本装置主要由岩爆模型试验主机、液压控制系统、气压控制系统和数据采集系统4大部分组成。主机内腔顶部装有4组相互独立加载器,可实现对试件的均布加载或梯度加载。气液复合型加载器采用气液联合设计,当试件破坏时,油压瞬间下降,此时,蓄能腔储存的压缩气体迅速补偿加载器的压力损失,克服了液压传动加载速率迟缓,无法及时补充能量的缺点<sup>[15]</sup>,满足模型破坏突然失稳时加载器快速响应的动静组合加载。



图1 气液复合加载岩爆模型试验装置

Fig. 1 Rock burst test apparatus using gas-liquid compound loading

### 1.2 模型试件

本研究的模型试验相似问题,主要考虑了几何

相似条件和应力相似条件,根据试验装置的内部结构尺寸,选取几何相似系数为1:20,应力相似系数为1:10。模型试件尺寸为长×宽×厚=1 000 mm×600 mm×400 mm,采用地下工程常用的直墙拱顶洞室结构形式进行试验,预开挖模型洞室宽度为200 mm,拱半径为100 mm。

根据已进行的模型试验成果<sup>[13-14]</sup>,选用高强度石膏材料制作模型,为了在试验过程中测量模型内部受力及变形状况,对试验模型试件分两块进行制作,每块尺寸:长×宽×厚=1 000 mm×600 mm×200 mm,水膏比为0.6,添加柠檬酸作缓凝剂,单片试件制作完成后经常温干燥和烘干处理,粘贴好测试应变片,经保护处理后,利用快干水泥将两块试件进行合模粘结,形成岩爆模型试验整块试件(1 000 mm×600 mm×400 mm)。试验确定的模型材料参数与根据相似比换算出的原型岩体力学参数见表1。

表1 模型材料及原型岩体力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of model material and prototype rock mass

材料类别	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
模型材料	6.2	0.6	2.0	0.25
岩石材料	60	6	20	0.25

为测量试验过程模型试件内部受力和变形状况,设计在直墙拱顶洞室断面的拱顶、45°拱、边墙和底部分别布置应变测量,每条测线布置5~7个测点的环向应变片和径向应变片。测点布置如图2所示。

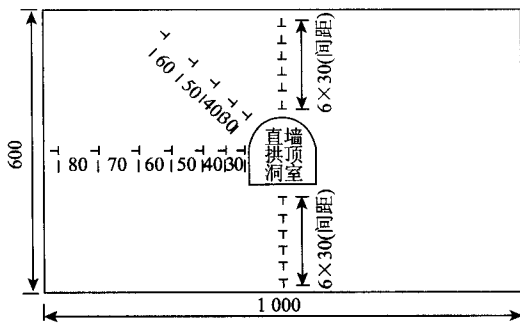


图2 应变片测点布置图(单位:mm)

Fig. 2 Layout of strain gauge measuring points (unit: mm)

### 1.3 试验加载路径

模型试件材料的单轴抗压强度为6 MPa,对应于原型洞室的拱顶应力达60 MPa,如果该原型应力场单纯由岩体自重产生,文献[16]一般取应力集中系数1.5~3,可模拟800~1 500 m埋深的岩体洞

室。为了模拟较大埋深条件下的洞室受荷破坏状态,试验时在模型试件的顶部表面覆盖一块8 mm厚钢板。试验共进行了两组,试件1顶部加载器均为静态加载;试件2顶部加载器为气液复合加载,即加载试验前,先在气液复合加载装置的蓄能腔中充入2 MPa的储能气压,积蓄岩爆破瞬间加载器所需的弹性应变能,待加载压力到达2 MPa后,即可与静态加载压力同步。通过两组模型试验,比较不同荷载条件下,地下深埋洞室岩爆发生的规律性、影响范围以及岩爆剧烈程度的差异性。

根据深埋洞室开挖过程中洞室表面围岩受力特点,模型试验通过3个方向的独立加载装置对洞室进行3向加载。试验时按照洞室顶部垂直荷载和水平荷载3:1的比例同步施加荷载,模型试验加载如图3所示。

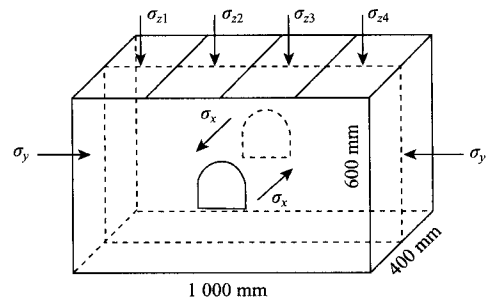


图3 模型试验加载图

Fig. 3 Loading in model test

试验加载时,每级荷载需稳压10 min后再进行下一级加载,以便荷载能够均匀传递,同步记录各个加载器的荷载值。试验加载路径如表2、表3所示。

表2 试件1加载路径

Tab. 2 Loading path of specimen 1

加载分级	荷载/MPa					
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{z1}$	$\sigma_{z2}$	$\sigma_{z3}$	$\sigma_{z4}$
1	0.3	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0
2	0.8	0.8	2.0	1.9	2.0	1.9
3	1.3	1.3	3.0	3.0	3.0	3.1
4	1.7	1.6	4.1	4.0	4.3	4.2
5	2.1	2.0	5.0	5.1	5.1	5.1
6	2.5	2.5	6.5	6.4	6.5	6.5

## 2 洞室岩爆模型试验结果与分析

### 2.1 试件宏观破坏现象

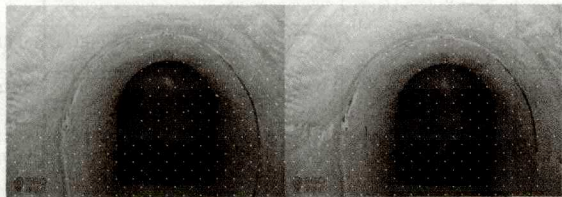
试件宏观破坏现象如图4所示,由图4可知:

(1) 试件1模型顶部加载器采用液压加载,顶部荷载和围压按3:1的比例同步施加,每级荷载需

表3 试件2加载路径  
Tab.3 Loading path of specimen 2

加载分级	荷载/MPa					
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_{z1}$	$\sigma_{z2}$	$\sigma_{z3}$	$\sigma_{z4}$
1	0.8	0.7	2.1	2.1	2.0	2.1
2	1.3	1.3	3.1	3.1	3.1	3.1
3	1.7	1.6	4.1	4.1	4.1	4.1
4	2.1	2.1	5.1	5.0	5.1	5.1
5	2.5	2.5	6.1	6.1	6.1	6.2

稳压 10 min 后再进行下一级加载。顶部初始加载为 1 MPa, 围压初始加载为 0.3 MPa, 试件总加载时长为 60 min。由洞室内部布置的摄像头观察发现, 试件加载至第 5 级荷载时, 洞室侧墙及拱脚部位有碎屑颗粒弹射出来, 加载至第 6 级荷载时, 洞室侧墙和拱肩部位开始出现裂纹的扩展, 随着荷载的作用, 洞室两侧的裂纹继续扩张并形成片状逐步剥落下来。



(a) 试件1宏观破坏 (第6级荷载)



(b) 试件2宏观破坏 (第5级荷载)

图4 试件围岩宏观破坏

Fig.4 Macro damage of surrounding rock of specimen

(2) 试件 2 模型试件顶部加载器采用气液复合加载, 顶部荷载和围压按 3:1 的比例同步施加, 每

级荷载需稳压 10 min 后再进行下一级加载。顶部气液复合加载装置的蓄能腔中充入初始储能气压, 顶部初始加载为 2.1 MPa, 围压初始加载为 0.7 MPa, 试件总加载时长为 50 min。试件加载至第 5 级荷载时, 由洞室内部布置的摄像头观察发现, 洞室侧墙及起拱部位在极短的时间内出现了较大范围的层裂及弹射碎片, 并伴随较大的声响。继续稳压, 洞室两侧的块体形成较大范围的剥落破坏。试件顶部气液复合加载的蓄能腔工作产生的气压, 在洞室破坏瞬间维持较高的加载速率, 是洞室两侧块体形成较大破坏范围的主要原因。

从试验后的试件表面可以看出, 试件 1 在静载作用下洞室周边形成了数条环状的细、浅裂纹, 在洞室边墙及拱顶部位逐渐向上扩展, 裂纹宽度逐渐变细。试件 2 在气液复合加载作用下, 沿洞室周边形成了较大的破坏裂缝, 直至扩展到模型边缘, 洞室破坏程度较大。

对试验后的洞室破坏区域进行清理测量, 试件 1 的边墙破坏深度在 20 ~ 50 mm 左右, 而试件 2 的边墙破坏深度达 100 ~ 120 mm 左右。

## 2.2 试件应变特性分析

试验时每组测点分别布置环向和径向应变片,  $h_1 \sim h_7$  表示试件洞室由洞壁处依次沿着洞径方向向外分布的环向应变,  $v_1 \sim v_7$  表示试件洞室由洞壁处依次沿着洞径方向向外分布的径向应变。根据试验过程采集的应变数据, 整理出应变随加载及时间变化的关系曲线, 分析试件逐级加载过程中, 试件内部变形状态和应力变化。各测点应变变化特征如图 5 所示。

(1) 从试件 1 洞室周边各测线的应变 - 时间曲线可看出, 随着荷载的施加, 各测点应变逐步增长。洞室拱肩和边墙部位各测点应变较大, 环向应变呈受压状态, 径向应变呈受拉状态, 加载至第 5 级荷载时, 距离洞室侧墙 30 mm 处的 1 号测点发生破坏, 与洞内摄像头观察到的加载至该分级荷载后有轻微弹射现象产生基本吻合; 加载至第 6 级荷载后, 距离洞室侧墙、拱肩及顶拱洞周附近的部分测点也发生破坏, 洞室拱肩及边墙部位产生裂纹, 逐步扩展发生破坏。

(2) 从试件 2 洞室周边各测线的应变 - 时间曲线可看出, 随着荷载的施加, 各测点应变逐步增长。当加载至破坏荷载时, 洞室拱肩和边墙部位各测点应变有一个明显的瞬间梯度变化, 破坏时的应变较试件 1 有 1 倍以上的突变。距离洞室 120 mm 内拱肩

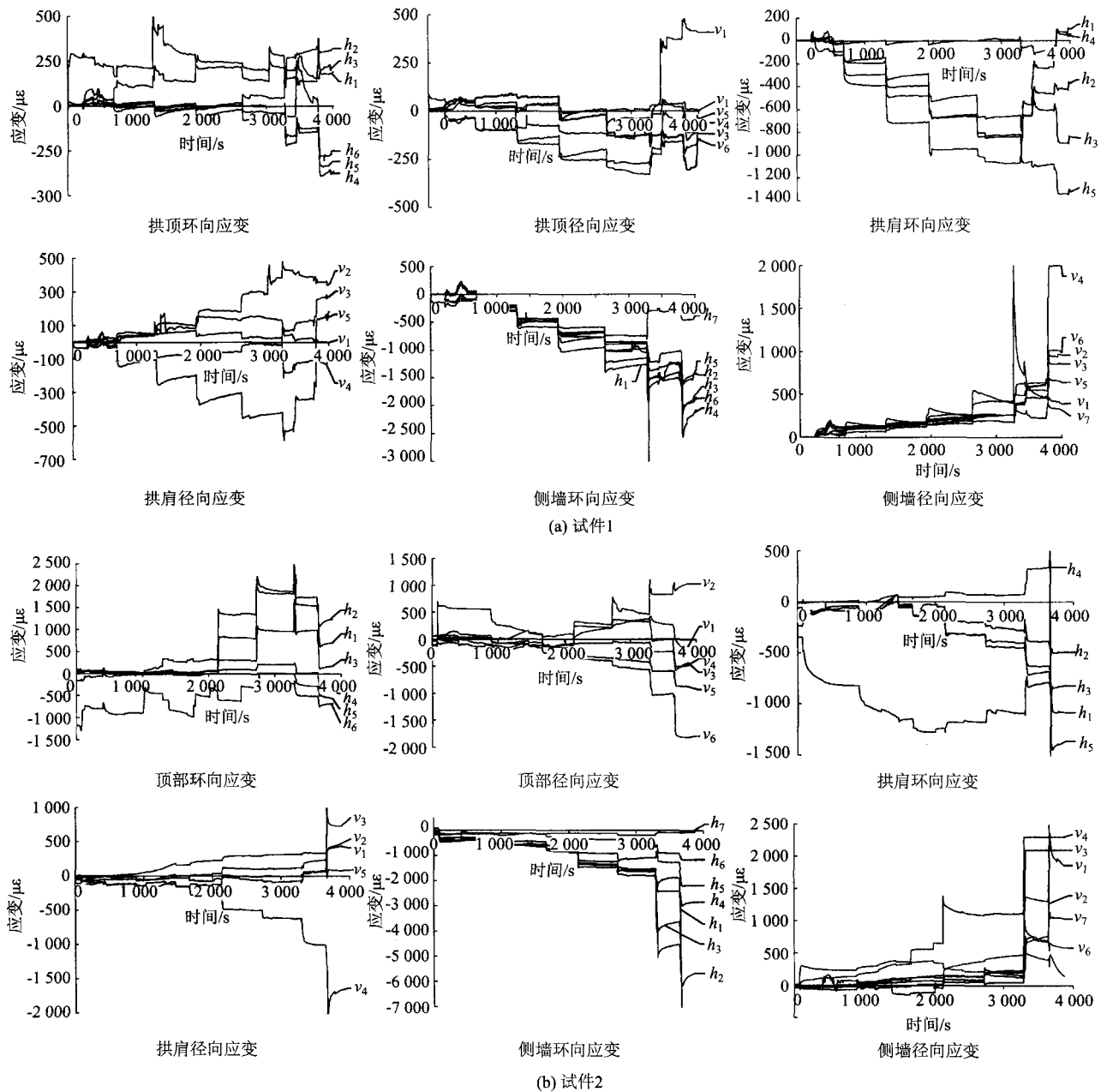


图5 试件应变-时间曲线

Fig. 5 Strain-time curves of specimens

和边墙部位的多测点发生破坏,同时,破坏瞬间洞室拱顶各测点的应变也较试件1有较大的突变。与洞内摄像头观察到的加载至该破坏荷载时,在洞室侧墙及起拱部位出现较大范围的层裂及弹射碎片并伴随较大声响的现象基本吻合。与试件1相比,采用气液复合加载时,相同部位的破坏现象更为剧烈,侧墙的破坏范围更大,岩块的弹射量也更多,岩爆现象更为显著。

### 2.3 试件声发射能量特征分析

声发射能量是反映岩石内部破坏有效且敏感的

声发射特征参数,广泛用于预测岩石的破坏<sup>[17-18]</sup>。为此,采用声发射设备对岩爆过程进行了监测。洞室顶部为通道1,左边墙为通道2,右边墙为通道3,试件洞室声发射传感器布置如图6所示。各声发射能量-时间-累积能量曲线中,横轴表示到达时间(单位s),纵轴为通道号能量。模型试件加载历程所有通道声发射能量曲线如图7所示。

根据试件宏观破坏现象,结合试件声发射能量-时间-累积能量曲线及参数,分析得出:



图6 声发射传感器布置图  
Fig.6 Layout of AE sensors

(1) 试件1为静载试验。随着荷载的施加,各通道产生不同程度的声发射能量事件,破坏瞬间释放的最大声发射能量较小,大部分能量用于洞室周边裂缝的产生及扩展,能量集聚程度低,破坏以局部弹射和剥落方式产生碎屑、碎块。

(2) 试件2为气液复合加载试验。随着荷载的施加,各通道产生不同程度的声发射能量事件,加载至岩爆发生前,试件不断积聚能量,在岩爆时集聚的能量瞬间释放,洞室边墙部位的声发射在发生岩爆时有明显的能量突变,释放的累积能量值较大,岩爆产生的弹射体较大,岩爆强烈。

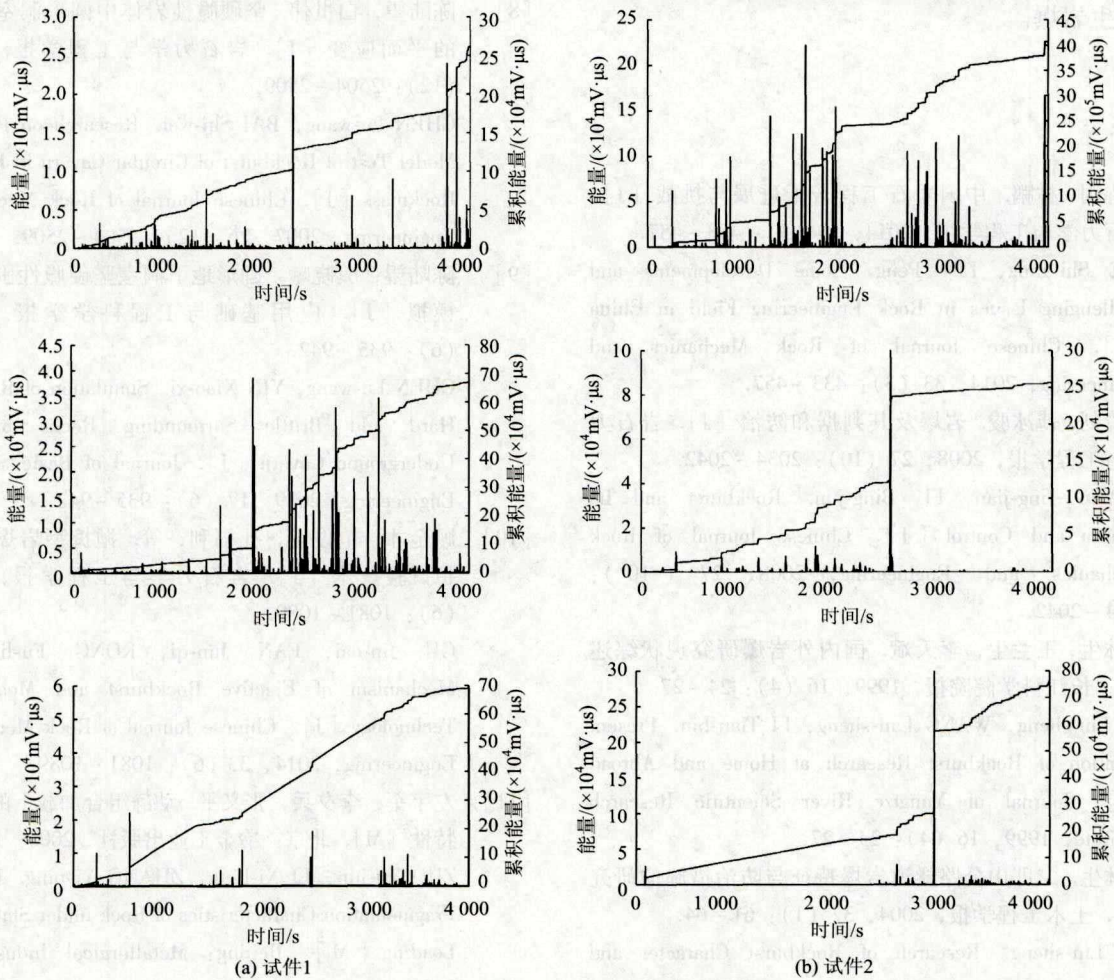


图7 声发射能量-时间-累积能量曲线

Fig.7 AE energy-time-cumulative energy curves

两组试验加载方法不同,洞室周边的能量集聚程度和释放速率不同,使得试件破坏现象差异性明显。试验表明:岩爆的发生及烈度与能量的集聚程度和破坏时能量的释放速率密切相关。

### 3. 结论

采用自主研发的气液复合型岩爆模型试验装置,

进行了液压和气液复合两种不同加载方式的岩爆模型试验,得到以下结论:

(1) 直墙拱顶断面洞室边墙及拱肩部位在加载过程中易产生环向破坏,并形成岩石碎屑的剥落、弹射现象。在本试验加载条件下,液压加载条件下,边墙的破坏范围较小,而气液复合加载条件下,边墙破坏区范围大致为 $0.6b$  ( $b$ 为洞室宽度)。

(2) 试验表明, 岩爆的发生及烈度与加载方法和破坏时能量的释放速率密切相关。由两组试件的应变-时间曲线可看出, 气液复合加载破坏瞬间洞室拱顶及拱肩部位的应变较液压加载有一倍以上的突变, 相同部位的破坏现象更为剧烈, 岩块的弹射量也更多, 岩爆现象更为显著, 因此, 气液复合加载的试验方法更为符合实际工程岩体破坏过程的实际受荷。

(3) 试件声发射最大能量释放通道均为布置于侧墙部位的通道, 说明洞室边墙部位易发生损伤破坏, 气液复合加载较静载加载具有明显的能量突变, 更容易产生岩爆。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 余诗刚, 林鹏. 中国岩石工程若干进展与挑战 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (3): 433-457.  
SHE Shi-gang, LIN Peng. Some Developments and Challenging Issues in Rock Engineering Field in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (3): 433-457.
- [2] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (10): 2034-2042.  
ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and Its Criteria and Control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (10): 2034-2042.
- [3] 徐林生, 王兰生, 李天斌. 国内外岩爆研究现状综述 [J]. 长江科学院院报, 1999, 16 (4): 24-27.  
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng, LI Tian-bin. Present Situation of Rockburst Research at Home and Abroad [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16 (4): 24-27.
- [4] 徐林生. 二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施的研究 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (1): 61-64.  
XU Lin-sheng. Research of Rockburst Character and Prevention Measure in Erlang Mountain Highway Tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (1): 61-64.
- [5] 刘学增, 苏云帆. 隧道施工岩爆安全评价量化指标体系研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (11): 88-93.  
LIU Xue-zeng, SU Yun-fan. Study on Rock Burst Safety Evaluation Quantitative Index System for Tunneling [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (11): 88-93.
- [6] 李天斌, 王湘锋. 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. Physical Simulation Study of Similar Materials for Rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (1): 2610-2616.
- [7] 费鸿禄, 徐小荷, 唐春安. 岩爆的物理模拟及其机制的研究 [J]. 中国矿业, 2000, 9 (6): 35-37.  
FEI Hong-lu, XU Xiao-he, TANG Chun-an. Study on Rock Burst by Means of Physical Simulation [J]. China Mining Magazine, 2000, 9 (6): 35-37.
- [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 [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, 殷晓曦. 圆形地下洞室坚硬脆性围岩岩爆的模拟 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17 (6): 935-942.  
CHEN Lu-wang, YIN Xiao-xi. Simulation of Rockburst in Hard and Brittle Surrounding Rocks of Circular Underground Cavern [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17 (6): 935-942.
- [10] 顾金才, 范俊奇, 孔福利, 等. 抛掷型岩爆机制与模拟试验技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (6): 1081-1089.  
GU Jin-cai, FAN Jun-qi, KONG Fu-li, et al. Mechanism of Ejective Rockburst and Model Testing Technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (6): 1081-1089.
- [11] 左宇军, 李夕兵, 张义平. 动静组合加载下的岩石破坏特性 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 10-40.  
ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, ZHANG Yi-ping. Failure and Fragmentation Characteristics of Rock under Static-dynamic Loading [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 10-40.
- [12] 李夕兵, 周子龙, 叶州元, 等. 岩石动静组合加载力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (7): 1387-1395.  
LI Xi-bing, ZHOU Zi-long, YE Zhou-yuan, et al. Study of Rock Mechanical Characteristics under Coupled Static and Dynamic Loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (7): 1387-1395.

- 2012, 34 (3): 14 - 21.
- [20] 李峰. 大型铁路客运站“环境与节能”使用后评价体系构建及应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
LI Feng. Construction and Application of Post-evaluation System for “Environment and Energy-saving” of Large-scale Railway Passenger Stations [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [21] GB/T50378—2014, 绿色建筑评价标准 [S].  
GB/T50378—2014, Assessment Standard for Green Building [S].
- [22] GB/T50668—2011, 节能建筑评价标准 [S].  
GB/T50668—2011, Standard for Energy Efficient Building Assessment [S].
- [23] GB/50189—2015, 公共建筑节能设计标准 [S].  
GB/50189—2015, Design Standard for Energy Efficient of Public Buildings [S].
- [24] 李晨龙. 绿色低碳公路运输站场评价指标体系与评价方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.  
LI Chen-long. Study on Evaluation Index System and Evaluation Method of Green and Low-carbon Road Transportation Terminal [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

(上接第92页)

- [13] 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.
- [14] 祝文化, 马能, 夏元友, 等. 气液复合加载的岩爆模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (1): 159 - 166.  
ZHU Wen-hua, MA Neng, XIA Yuan-you, et al. Model Tests on Rock Burst Using Gas-liquid Composite Loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (1): 159 - 166.
- [15] 贺永胜, 丁幸波, 明治清, 等. 气液复合型岩爆模拟加载器研制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (增1): 3177 - 3183.  
HE Yong-sheng, DING Xing-bo, MING Zhi-qing, et al. Development of Gas-liquid Composite Loader for Rockburst Simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (S1): 3177 - 3183.
- [16] OBERT L, DUVAL W L. Rock Mechanics and the Design of Structure in Rock [M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [17] 杨建, 王连俊. 岩爆机理声发射试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (20): 3796 - 3802.  
YANG Jian, WANG Lian-jun. Study on Mechanism of Rock Burst by Acoustic Emission Testing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (20): 3796 - 3802.
- [18] 吴永胜, 余贤斌. 单轴压缩条件下岩石声发射特性的实验研究 [J]. 金属矿山, 2008, 388 (10): 25 - 28.  
WU Yong-sheng, YU Xian-bin. Experimental Study on the Acoustic Emission Characteristics of Rocks at Uniaxial Compression [J]. Metal Mine, 2008, 388 (10): 25 - 28.