

引用格式:谷雪斌,郭伟耀,赵同彬,等.侧压影响下圆形洞室岩爆双轴物理模拟试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(1):46-52.

GU Xuebin, GUO Weiyao, ZHAO Tongbin, et al. Biaxial physical simulation test of rock burst in circular tunnel under influence of lateral pressure [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(1): 46-52.

# 侧压影响下圆形洞室岩爆双轴物理模拟试验研究

谷雪斌<sup>1,2</sup>,郭伟耀<sup>1,2,3</sup>,赵同彬<sup>1,2,3</sup>,沈宝堂<sup>1,2,4</sup>,张东晓<sup>1,2</sup>

(1.山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,山东 青岛 266590;

2.山东科技大学 矿业与安全工程学院,山东 青岛 266590;3.山东科技大学 矿业工程国家级实验教学示范中心,山东 青岛 266590;4.澳大利亚联邦科学院能源部 昆士兰先进技术中心,澳大利亚 昆士兰州 布里斯班 4069)

**摘要:**为研究侧压影响下圆形洞室岩爆机制,采用双轴加载装置对含孔洞红砂岩试样进行了物理模拟试验,期间采用高速相机观测了孔洞破坏全过程。研究结果表明:岩爆过程可划分为平静期、剥落期、屈曲期和岩爆期四个时期;洞壁垂直起裂应力和岩爆V型槽破坏深度均随侧压增大而呈线性增大趋势。侧压主要从两方面影响岩爆发生:一是影响洞室破坏机制,当侧压较低时,洞壁垂直方向起裂应力小、水平方向应力梯度小,以拉伸破坏机制为主,破坏范围小,而侧压较大时,洞壁浅部区域破坏机制与低侧压时类似,但洞壁深部区域由于水平应力增加,受力类似三轴压缩,以剪切破坏机制为主,破坏范围大;二是影响洞壁能量积聚释放特征,由于侧压增大,平静期持续时间增加,而破坏期持续时间减小,造成洞壁破坏时单位时间内能量释放率增加,岩爆发生更加剧烈。

**关键词:**圆形洞室;岩爆;模拟试验;侧压;V型槽

中图分类号:TU45

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2020)01-0046-07

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.01.006

## Biaxial physical simulation test of rock burst in circular tunnel

### under influence of lateral pressure

GU Xuebin<sup>1,2</sup>, GUO Weiyao<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Tongbin<sup>1,2,3</sup>, SHEN Baotang<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Dongxiao<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Mining Engineering Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 4. CSIRO Energy, Queensland Centre for Advanced Technologies, Brisbane, Queensland 4069, Australia)

**Abstract:** In order to study the rockburst mechanism of circular tunnel under the influence of lateral pressure, the physical test of red sandstone samples with holes was carried out by means of biaxial loading device. The high-speed camera was used to record the whole process. The results show that the rockburst process can be divided into four periods: The quiet period, spalling period, buckling period and rockburst damage period. With the increase of lateral pressure, the vertical initiation stress of the borehole and the depth of the V-shaped notch increase linearly. Lateral pressure affects rockburst primarily from two aspects. Firstly, it affects the failure mechanism of caverns. The verti-

收稿时间:2019-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51674160);山东省自然科学基金项目(ZR2019QEE026);泰山学者优势特色学科人才团队支持计划项目

作者简介:谷雪斌(1995—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事矿山岩体力学研究。

郭伟耀(1990—),男,山西朔州人,讲师,主要从事矿山岩体力学研究,本文通信作者.E-mail:363216782@qq.com

cal crack initiation stress and the horizontal stress gradient of the borehole are low during low lateral pressure. The tensile failure mechanism is the main failure mechanism and the failure range is minimum. When the lateral pressure is large, the failure mechanism in the shallow part of the borehole is similar to the case with low lateral pressure. But the failure mechanism in the deep sections of the borehole is similar to the triaxial compression with the increase of horizontal stress. The main failure mechanism is shear failure mechanism and the failure range is high. Secondly, it affects the energy accumulation and release characteristics of the borehole. As the lateral pressure increases, the duration of the quiet period increases while the duration of the failure period decreases. As a result, the energy release rate per unit time increases and the rockburst occurs more violently.

**Key words:** circular tunnel; rockburst; simulation test; lateral pressure; V-shaped notch

规律性层裂化破坏是深部工程中硬脆性岩体中的普遍现象,且层裂化破坏与岩爆发生密切相关<sup>[1-3]</sup>。国内外学者围绕这类问题从案例分析、理论研究、试验研究和数值模拟四个方面进行了大量研究。

Fairhurst 等<sup>[4]</sup>最早对这种围岩平行于洞壁破坏的现象进行描述,并将其称之为层裂化破坏(spalling 或 slabbing);Martin 等<sup>[5]</sup>对加拿大某硬岩矿山开采中矿柱的破坏形式进行现场案例统计分析,发现当矿柱宽高比小于 2.5 时,其主要破坏形式为层裂化剥落和破坏;张传庆等<sup>[6]</sup>对锦屏二级水电站 2 号试验洞开挖后围岩破坏形态统计,将破坏形态分为三种:片状破坏、薄板状破坏和楔形板状破坏。理论研究方面,主要从力学角度对岩爆发生条件进行了分析,并建立了相应的岩爆破坏模型,如冯涛等<sup>[7]</sup>应用断裂力学原理分析了岩体的断裂特征,并提出了岩爆发生机理的层裂屈曲模型;左宇军等<sup>[8]</sup>建立了洞室层裂屈曲岩爆的突变模型,得出洞室层裂屈曲岩爆在准静态破坏条件下的演化规律;顾金才等<sup>[9]</sup>对抛掷型岩爆发生机制进行分析研究,并进行了相应装置的研发。试验研究方面,主要研究了结构面和不同加载条件对层裂化岩爆的影响,如周辉等<sup>[10-11]</sup>通过室内物理实验及数值模拟验证的方式,研究了结构面和开挖断面的曲率半径对板裂屈曲岩爆的影响。Zhao 等<sup>[12]</sup>研究了单轴压缩条件下含裂隙试样的板裂破坏特征;何满潮等<sup>[13-14]</sup>利用真三轴试验系统,对含孔洞试样进行真三轴岩爆模拟试验研究。数值模拟方面,主要研究了侧压系数、扰动应力波等因素对巷道围岩层裂化破坏的影响,如王学滨等<sup>[15-16]</sup>分别使用 FLAC 和 RFPA 数值模拟软件,研究了不同侧压系数下板裂围岩的失稳破坏特点;雷光宇等<sup>[17]</sup>利用 LS-DYNA 软件,研究了扰动应力波作用下巷帮围岩层裂破坏特点。

上述研究极大丰富了岩爆和层裂化破坏研究,尤其是对揭示层裂屈曲岩爆机理具有重要意义。但是目前对于侧压影响下的岩爆机制研究较少,尤其是双轴物理模拟试验研究。鉴于此,采用含孔洞红砂岩试样进行双轴加载试验,利用高速相机记录孔洞破坏过程,研究侧压影响下圆形洞室破坏特征及岩爆机制。

## 1 试样制备及试验方案

红砂岩取自山东省莒南县,首先制得尺寸为 100 mm × 100 mm × 50 mm 的长方体试样,之后通过磨平机磨平试样两个端面,试样加工精度均符合国际岩石力学学会(international society for rock mechanics, ISRM)有关标准。然后利用岩芯取样机制作直径为 30 mm 孔洞,具体如图 1 所示。该红砂岩单轴抗压强度为 43.5 MPa,弹性模量为 6.9 GPa。

采用 RLJW-2000 型岩石伺服压力试验机(如图 2)。对含孔洞红砂岩试样进行单双轴加载试验,侧压取 0、1、5、8 和 12 MPa 5 种情况(侧压为 0 代表单轴压缩实验)。为保证试验结果准确性,试样在每种加载情况下至少制备 3 块及以上试样进行试验,最终选取有效结果进行分析。试验过程中,在加载垫块与试样接触表面之间涂抹凡士林,以减少端面效应。单轴压缩试验,以 0.25 mm/min 加载速率施加轴向压力直

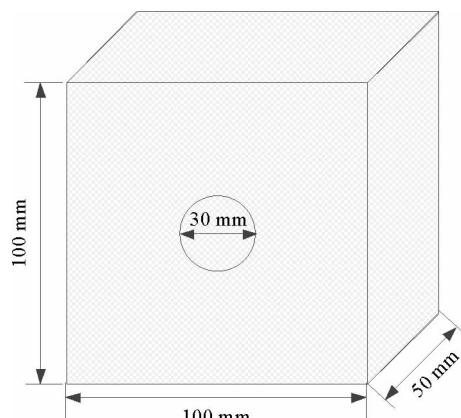


图 1 试样示意图

Fig. 1 Specimen used in the test

至试样破坏;双轴压缩试验,首先以 $0.1 \text{ MPa/s}$ 的加载速率同时施加轴向和侧压至侧压值(此时轴压与侧压相等),之后保持侧压不变,再以 $0.25 \text{ mm/min}$ 的加载速率施加轴压直至试样破坏。



图 2 试验系统

Fig. 2 Testing system

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同侧压下孔洞破坏过程

侧压对孔洞的破坏过程及形态影响较小,均以洞室两侧形成近似对称的V型槽为主。以侧压 $5 \text{ MPa}$ 为例,结合图3洞室破坏点应力应变特征和图4高速相机记录的照片对其破坏过程进行描述:试验进行到 $9'12''$ 时( $\sigma_z = 29.16 \text{ MPa}$ ),洞壁中点开始发生破坏; $9'21''$ 时( $\sigma_z = 31.18 \text{ MPa}$ ),洞壁部分区域开始产生明显鼓起; $9'59''$ 时( $\sigma_z = 39.26 \text{ MPa}$ ),洞壁中点上方区域出现大面积鼓起,同时产生岩片滑落现象; $10'19''$ 时( $\sigma_z = 42.37 \text{ MPa}$ ),洞壁破坏区域继续增大,产生颗粒剥落现象; $10'31''$ 时( $\sigma_z = 43.48 \text{ MPa}$ ),再次产生大岩片滑落现象; $10'38''$ 时( $\sigma_z = 43.36 \text{ MPa}$ ),破坏加剧,V型槽贯穿,发生岩爆。

根据试验结果分析,可将红砂岩岩爆过程大致可分为平静期、剥落期、屈曲期和岩爆破坏期四个时期:

1) 平静期:洞壁没有产生宏观破坏现象,处于积蓄能量时期,但此时内部产生较多微裂纹,如图5(a)。Shen等<sup>[18]</sup>研究认为,当环向应力与岩体单轴抗压强度比值达到0.4,岩体内部微裂隙开始产生并发展,微裂纹在隧洞中间区域产生和发展,并且微裂纹方向平行于洞壁。

2) 剥落期:洞壁表面首先产生颗粒、岩片剥落现象,随着继续加载,剥落现象增多、剥落岩片尺寸增大,初步形成剥落槽,如图5(b)。

3) 屈曲期:随着继续加载,洞壁不再发生明显变化,洞壁浅部层裂化破坏停止,但洞壁一定深度范围内的层裂结构屈曲蓄能,如图5(c)。

4) 岩爆期:层裂结构屈曲变形达到其承载极限,突然失稳,产生岩块飞溅、崩出现象,即发生岩爆,如图5(d)。

### 2.2 侧压影响下洞壁垂直起裂应力及破坏深度

假定洞室的应力方向分别为 $x, y, z$ ,其中 $\sigma_z$ 为垂直应力, $\sigma_x$ 为水平应力, $\sigma_y$ 为沿洞室轴向方向的应力。

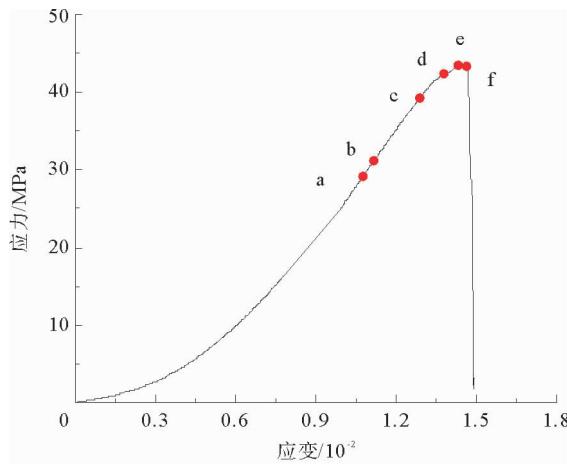


图 3 洞室破坏点应力-应变分布特征

Fig. 3 Stress-strain distribution  
characteristics of failure point

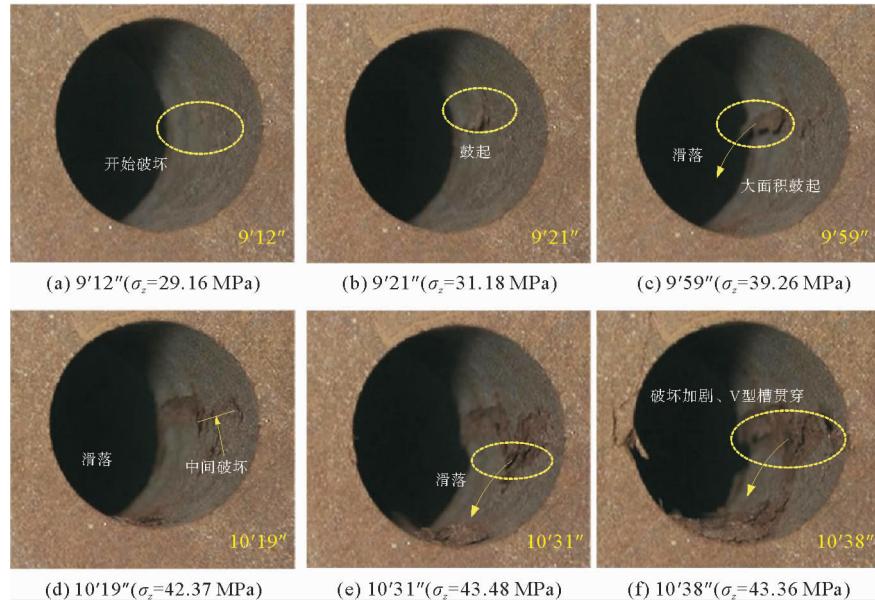


图 4 侧压 5 MPa 洞室破坏图

Fig. 4 Damage patterns of tunnels when lateral pressure is 5 MPa

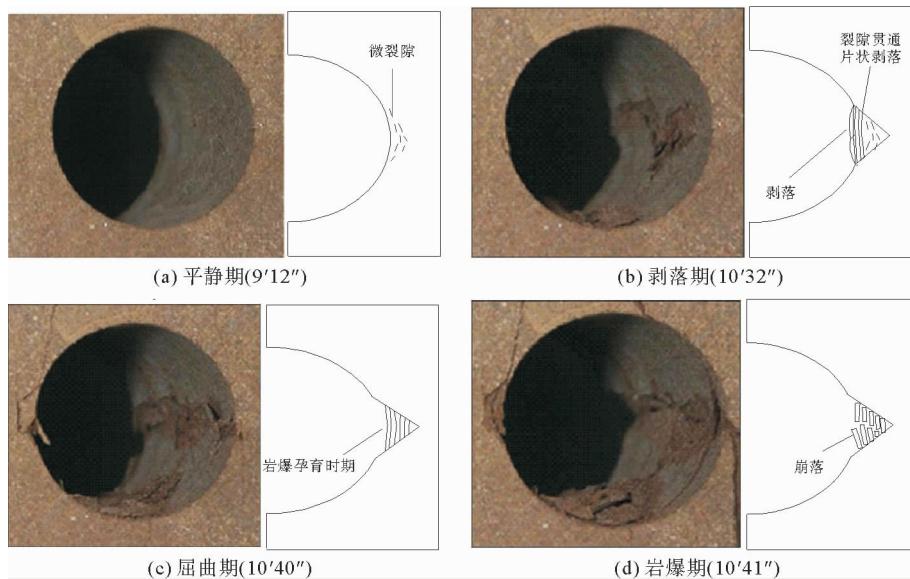


图 5 孔洞破坏过程

Fig. 5 Failure process of the borehole

根据弹性力学平面应变问题的假定,围岩受到平行于横截面且不沿长度变化的面力,即沿洞室轴向方向不产生变形,因此可以将问题看成平面应变问题。在二向应力状态下,根据弹性力学公式,圆形洞室最大切应力位于洞室两帮中点,且  $\sigma_{\theta\max} = 3p - q$ 。在二向应力状态,  $p = \sigma_z$  和  $q = \sigma_x$ , 可得到最大切应力

$$\sigma_{\theta\max} = 3\sigma_z - \sigma_x \quad (1)$$

表 1 和图 6 给出了洞壁破坏时的垂直起裂应力  $\sigma_z$  和最大切应力  $\sigma_{\theta\max}$  及二者与侧压的关系。洞壁的垂直起裂应力和最大切应力均随侧压增大呈线性增大趋势。当侧压为 1 MPa 时,垂直起裂应力和最大切应力分别为 32.18 和 95.54 MPa,而当侧压增大到 12 MPa 时,垂直起裂应力和最大切应力数值分别为 48.1 和 132.3 MPa,分别提高了 49.5% 和 38.5%。

图 7 给出了洞壁破坏深度与侧压的关系。随着侧压增大, 洞壁破坏深度呈线性增大趋势, 如侧压为 1 MPa 时, 洞壁破坏深度仅为 2.1 mm, 而侧压增大到 12 MPa 时, 洞壁破坏深度达 5.3 mm, 增大 152%。文献[19]的现场案例分析表明, 围岩破坏深度随洞壁最大切应力增大而呈线性增大趋势, 结合“洞壁最大切应力随侧压增大呈线性增大趋势”这一结论, 可佐证该试验结果。破坏深度与洞室半径比值可以达到 1.35, 这与 Martin 等<sup>[20]</sup>现场监测结果相近。

表 1 洞壁破坏时的垂直起裂应力和最大切应力  
Tab. 1 Vertical initiation stress and maximum tangential stress

侧压 $\sigma_x$ /MPa	1	5	8	12
垂直起裂应力 $\sigma_z$ /MPa	32.18	34.16	38.84	48.1
最大切应力 $\sigma_{\theta\max}$ /MPa	95.54	97.48	108.52	132.3

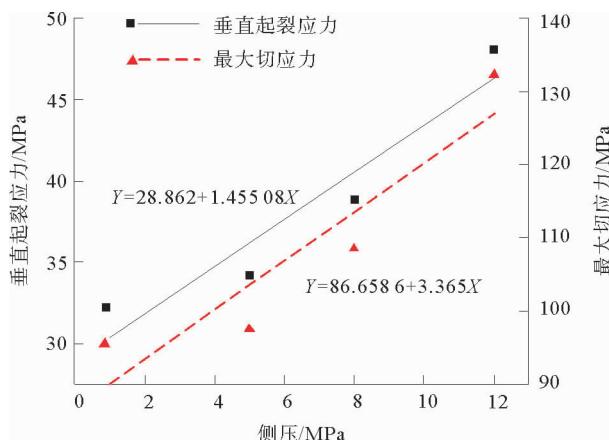


图 6 洞壁垂直起裂应力及最大切应力与侧压的关系图

Fig. 6 Curve of vertical initiation stress, maximum tangential stress and lateral pressure

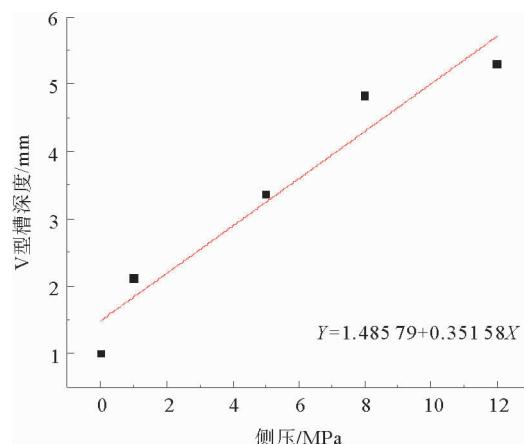


图 7 洞壁破坏深度与侧压的关系图

Fig. 7 Relationship between borehole failure depth and lateral pressure

### 3 侧压影响下洞室岩爆机制分析

图 8 给出了低侧压(1 MPa)和高侧压(8 MPa)下洞壁的破坏形态。当侧压较低时, 洞壁以劈裂破坏为主, 破坏深度小; 当侧压较高时, 洞壁浅部区域以劈裂破坏为主, 而深部区域以剪切破坏为主, 破坏深度大。

当侧压较低时, 如图 9(a)所示, 洞壁沿水平方向应力梯度小, 即水平方向约束力较小, 受力类似单轴压缩, 以拉伸破坏机制为主, 而此时洞壁最大切应力也较小, 围岩蓄能低, 故围岩破坏深度小; 当侧压较高时, 如图 9(b)所示, 洞壁沿水平方向应力梯度大, 洞壁浅部区域破坏机制与侧压较低时类似, 但洞壁深部区域受力类型三轴压缩, 以剪切破坏机制为主, 而此时洞壁最大切应力较大, 围岩蓄能高, 故围岩破坏深度大。

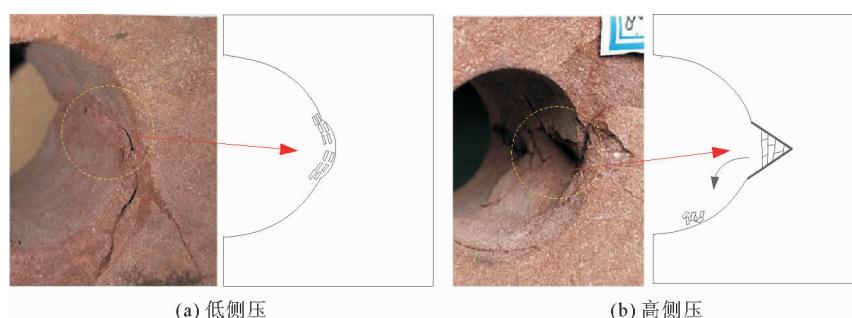


图 8 洞室破坏形态及其素描图  
Fig. 8 Cave failure pattern and its sketch

岩爆过程可以大致分为平静期、剥落期、屈曲期和岩爆期四个时期, 其中平静期为聚能期、剥落期和岩爆期是释能期, 通过分析各阶段的时间占比能反映岩爆演化过程中的能量变化特征, 不同侧压下岩爆过程各阶段时间占比见表 2。随着侧压增大, 平静期持续时间及占比增大, 而破坏期时间及占比反而减小, 如侧压从 1 MPa 增大到 12 MPa 时, 平静期持续时间及占比分别增加了 519 s 和 10.44%, 而破坏期持续时间及占比分

别减小了 40 s 和 10.44%。该结果表明,随着侧压增大,围岩积聚能量增加,而释放能量时间持续减小,会造成洞壁破坏时单位时间内释放的能量增加,即岩爆更加剧烈。

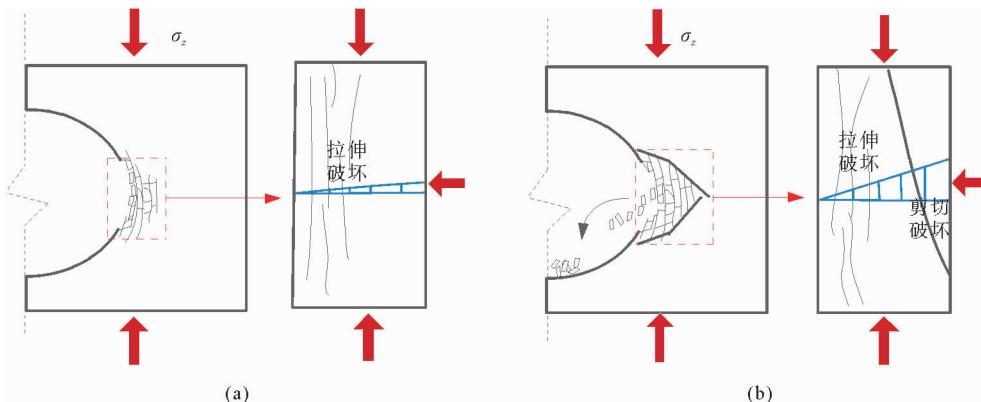


图 9 洞室破坏模式示意图

Fig. 9 Failure model of borehole

表 2 岩爆过程各阶段时间占比

Tab. 2 Time proportion of rockburst at different stages

水平应力/MPa	平静期持续时间/s	平静期阶段时间占比/%	洞室初始破坏到岩爆喷射阶段时间/s	洞室初始破坏到岩爆喷射阶段时间占比/%
1	531	84.15	100	15.85
5	553	86.00	90	14.00
8	750	91.91	66	8.09
12	1 050	94.59	60	5.41

#### 4 结论

1) 岩爆破坏过程中经历四个典型的阶段:平静期、剥落期、屈曲期和岩爆期。随着侧压增大,洞壁垂直起裂应力线性增加,同时岩爆发生后造成的 V 型坑深度也线性增加。

2) 侧压较低时,洞壁沿水平方向应力梯度小,水平方向约束小,受力类似单轴压缩,以拉伸破坏机制为主,洞壁破坏深度小;侧压较高时,洞壁沿水平方向应力梯度大,洞壁浅部区域破坏机制与侧压较低时类似,但洞壁深部区域受力类似三轴压缩,以剪切破坏机制为主,洞壁破坏深度大。

3) 侧压对洞壁能量积聚和释放有重要影响,随着侧压增大,平静期持续时间增加、破坏期持续时间减小,即围岩积聚能量增加、释放能量持续时间减小,造成洞壁破坏时单位时间内释放能量增加,使岩爆发生更加剧烈。

#### 参考文献:

- [1] HOEK E, MARTIN C. Fracture initiation and propagation in intact rock: A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(4): 287-300.
- [2] ZHAO T, GUO W, TAN Y, et al. Case studies of rock bursts under complicated geological conditions during multi-seam mining at a depth of 800 m[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(5): 1539-1564.
- [3] 谭云亮, 郭伟耀, 辛恒奇, 等. 煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 160-172.  
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 160-172.
- [4] FAIRHURST C, COOK C. The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighbourhood of a surface[C]// 1st International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering Congress. 1966: 687-692.
- [5] MARTIN C, MAYBEE W. The strength of hard-rock pillars[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1967, 4: 111-125.

- ences, 2000, 37(8): 1239-1246.
- [6] 张传庆, 冯夏庭, 周辉, 等. 深部试验隧洞围岩脆性破坏及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2063-2068.  
ZHANG Chuanqing, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Brittle failure of surrounding rock mass in deep test tunnels and its numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2063-2068.
- [7] 冯涛, 潘长良. 洞室岩爆机理的层裂屈曲模型[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 287-290.  
FENG Tao, PAN Changliang. Lamination spallation buckling model for formation mechanism of rockburst[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(2): 287-290.
- [8] 左宇军, 李夕兵, 赵国彦. 洞室层裂屈曲岩爆的突变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(2): 311-316.  
ZUO Yujun, LI Xibing, ZHAO Guoyan. Acatastrophe model for underground chamber rock burst under lamination spallation buckling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2005, 36(2): 311-316.
- [9] 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 Jincai, FAN Junqi, KONG Fuli, et al. Mechanism of ejective rockburst and model testing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1081-1089.
- [10] 周辉, 徐荣超, 卢景景, 等. 深埋隧洞板裂屈曲岩爆机制及物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增2): 3658-3666.  
ZHOU Hui, XU Rongchao, LU Jingjing, et al. Study on mechanisms and physical simulation experiment of slab buckling rockburst in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3658-3666.
- [11] 周辉, 卢景景, 胡善超, 等. 开挖断面曲率半径对高应力下硬脆性围岩板裂化的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 140-146.  
ZHOU Hui, LU Jingjing, HU Shanchao, et al. Influence of curvature radius of tunnels excavation section on slabbing of hard brittle rockmass under high stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 140-146.
- [12] ZHAO T, GUO W, TAN Y, et al. Failure mechanism of layer-crack rock models with different vertical fissure geometric configurations under uniaxial compression[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(11): 1-15.
- [13] 何满潮, 刘冬桥, 宫伟力, 等. 冲击岩爆试验系统研发及试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1729-1739.  
HE Manchao, LIU Dongqiao, GONG Weili, et al. Development of a testing system for impact rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1729-1739.
- [14] 宫凤强, 罗勇, 司雪峰, 等. 深部圆形隧洞板裂屈曲岩爆的模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1634-1648.  
GONG Fengqiang, LUO Yong, SI Xuefeng, et al. Experimental modelling on rockburst in deep hard rock circular tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1634-1648.
- [15] 王学滨, 伍小林, 潘一山. 圆形巷道围岩层裂或板裂化的等效连续介质模型及侧压系数的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2395-2402.  
WANG Xuebin, WU Xiaolin, PAN Yishan. An equivalent continuum model for exfoliation or slabbing phenomenon of surrounding rock of circular tunnel and effects of lateral pressure coefficients[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2395-2402.
- [16] 贾蓬, 唐春安, 张国联. 深埋垂直板裂结构岩体中洞室失稳破坏机制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008(6): 893-896.  
JIA Peng, TANG Chun'an, ZHANG Guolian. Failure mechanism study on vertically stratified rock mass around deep tunnel [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008(6): 893-896.
- [17] 雷光宇, 卢爱红, 茅献彪. 应力波作用下巷道层裂破坏的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2005(9): 1477-1480.  
LEI Guangyu, LU Aihong, MAO Xianbiao. Numerical simulation on layered crack and failure of roadway under stress wave [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, (9): 1477-1480.
- [18] SHEN B, BARTON N. Rock fracturing mechanisms around underground openings[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 16(1): 35-47.
- [19] MARTIN C, CHRISTIANSSON R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 46(2): 219-228.
- [20] MARTIN C, KAISER P, MCCREATH D. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(1): 136-151.

(责任编辑: 吕海亮)