

# 深埋隧洞板裂屈曲岩爆机制及物理模拟试验研究

周 辉<sup>1</sup>, 徐荣超<sup>2</sup>, 卢景景<sup>1</sup>, 张传庆<sup>1</sup>, 孟凡震<sup>1</sup>, 沈 峥<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 华北水利水电大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450045)

**摘要:**结合锦屏二级水电站深埋隧洞典型岩爆案例,分析板裂屈曲岩爆的发生机制及结构面作用机制,研究表明:开挖卸荷作用导致围岩板裂化结构的形成,切向集中应力作用下岩板向开挖空间内屈曲变形并积聚应变能,当板裂化围岩结构自身积聚的能量超过其储能极限,或在外界扰动作用下发生突发性失稳破坏,形成以岩板压折、岩块弹射为特征的岩爆现象;渐进的板裂化破坏过程起到了活跃结构面的作用,而结构面的存在及其扩展降低了板裂化围岩结构的稳定性,促进了岩爆的发生;不同倾角的结构面在板裂屈曲岩爆中的作用机制不同。结合板裂化围岩的结构特征,配制板裂化模型试样,采用 2 种不同的加载方式进行板裂屈曲岩爆的物理模拟试验,结果表明:预制裂隙的扩展将试样劈裂成板,压缩荷载进一步作用下岩板向临空面屈曲变形,并最终形成岩板压折、岩片弹射的失稳破坏现象。研究结果对于认识深埋隧洞板裂屈曲岩爆机制及其支护控制具有重要意义。

**关键词:**岩石力学;深埋隧洞;板裂屈曲岩爆;发生机制;结构面作用机制;物理模拟试验

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2015)增 2-3658-09

## STUDY ON MECHANISMS AND PHYSICAL SIMULATION EXPERIMENT OF SLAB BUCKLING ROCKBURST IN DEEP TUNNEL

ZHOU Hui<sup>1</sup>, XU Rongchao<sup>2</sup>, LU Jingjing<sup>1</sup>, ZHANG Chuanqing<sup>1</sup>, MENG Fanzhen<sup>1</sup>, SHEN Zheng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Resource and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China)

**Abstract:** With combination of typical rockburst cases happened in deep tunnels of Jinping II hydropower station, formation mechanism and function mechanism of structural plane of slab buckling rockburst were analyzed. The research shows that slabbing failure of surrounding rock is caused by excavation unloading and the action of the tangential concentrated stress will lead to the buckling deformation of slabs towards the excavation space as well as growing strain energy stored in the slabs. When the amount of energy stored in the slabbing rock structure exceeds its energy storage limitation, or due to external disturbances, slab buckling rockbursts will take place with the characteristics of crushing of slabs and ejection of rock. The gradual failure process of slabbing failure makes the structural planes be active. The existence and extension of structural planes will reduce the stability of slabbing rock structure which in turn promotes the occurrence of rockburst. The structural planes with different inclination angles play different roles in the formation of slab buckling rockburst. Slabbing specimens were made according

**收稿日期:** 2014-06-20; **修回日期:** 2014-12-27

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046902); 中国科学院科技创新“交叉与合作团队”(人教字〔2012〕119号); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-QN115)

**作者简介:** 周 辉(1972-), 男, 博士, 1994年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析等方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0874

to the architectural feature of slabbing surrounding rock and physical simulation tests of slab buckling rockburst were conducted under two different loading modes. The experiment results show that propagation of pre-existing fissures makes the specimens split into slabs, and further action of compression load cause buckling deformation of slabs towards the free face which leads to the instability destruction phenomenon of specimens characterized by crushing of slabs and ejection of rock. The research results have an important significance for understanding and support control of slab buckling rockburst.

**Key words** rock mechanics ;deep tunnel ;slab buckling rockburst ;formation mechanism ;mechanism of structural plane ; physical simulation test

## 1 引 言

伴随着我国基础工程建设和资源开发逐步向深部岩体发展，在大埋深、高地应力条件下，岩体由于开挖卸荷而诱发的高强度动力灾害频繁发生，给现场施工人员和设备安全造成了极大的危害，如 2009 年 11 月 28 日发生在锦屏二级水电站排水洞的极强岩爆，造成了多名人员的伤亡和近亿元 TBM 设备被埋。以岩爆为典型代表的动力灾害已经成为制约深部岩体工程安全建设的瓶颈问题。

岩爆是一种开挖卸荷条件下，高地应力区地下洞室岩体自身积蓄的弹性应变能突然猛烈释放所造成的拉张脆性或张剪脆性并存的急剧破裂或爆裂破坏灾害现象<sup>[1]</sup>。岩爆问题的研究主要分为三大方面：岩爆机制、岩爆的预测预报以及岩爆的防治。而岩爆机制的研究是岩爆的核心问题，只有弄清岩爆的发生和破坏机制，才能为提高岩爆预测的准确性、采取科学的岩爆防治措施提供可靠依据。岩爆发生机制也是岩爆分类的重要依据，W. D. Ortlepp 和 T. R. Stacey<sup>[2]</sup>将岩爆分为应变型、弯曲破折型、工作面挤压型、剪切断裂型和断层滑移型；P. K. Kaiser 等<sup>[3]</sup>在此基础上将岩爆分为应变型、矿柱型、断层滑移型；王兰生等<sup>[4]</sup>将岩爆划分为爆裂松脱型、爆裂剥落型、爆裂弹射型和抛掷型四大类；谭以安<sup>[5]</sup>将岩爆类型划分为水平应力型、垂直应力型和混合应力型；冯夏庭等<sup>[6]</sup>从岩爆的发生机制和条件，将其分为应变型、应变-结构面滑移型和断裂滑移型岩爆。尽管目前有关岩爆的发生和破坏机制、分类等方面，取得了上述研究成果，但由于岩爆是一种及其复杂的动力灾害，其发生的条件与影响因素非常复杂，目前为止，工程界和学术界对岩爆的发生和破坏机制仍缺乏清楚的认识，没有形成统一的定论。锦屏二级水电站深埋隧洞大量岩爆案例表明，

在多数开挖卸荷诱发的隧洞岩爆发生前，相对较完整的洞壁围岩都会出现明显的板裂化破坏现象<sup>[7-9]</sup>，而目前有关深埋隧洞中板裂化围岩结构失稳破坏形成的岩爆(本文称之为板裂屈曲岩爆)的发生机制尚不清楚，因此有必要针对此类岩爆开展相关研究工作。

岩爆机制的研究主要从工程实录、室内试验、理论分析和数值模拟等几个角度开展。由于岩爆灾害的瞬时突发性及巨大的危害性，很难直接捕捉岩爆发生前及发生过程中所表现出的具体特征，而在室内试验条件下，通过设计合理的加卸载试验方法，可以再现工程实际中岩爆发生时表现出的剧烈的脆性破坏现象，对于认识岩爆的发生机制、过程和特征具有重要意义。何满潮等<sup>[1, 10]</sup>自行设计了深部岩爆过程试验系统，对深部高地应力条件下花岗岩岩爆过程进行了试验研究，将花岗岩岩爆全过程分为 4 个阶段，依据岩爆破坏形式和发生时间的滞后性对岩爆进行系统分类，并重点分析了石灰岩试块岩爆过程及其声发射特性；张永双等<sup>[11]</sup>结合高黎贡山越岭隧道规划，基于实测地应力值和岩石力学试验数据，设计和完成了不同工况下花岗岩斑岩的岩爆模拟试验研究；吴世勇等<sup>[12-14]</sup>针对锦屏二级水电站 TBM 引水洞及排水洞深部大理岩发生的岩爆，通过采集该工程区深部大理岩岩样，采用真三轴岩爆试验设备，对其在不同高应力作用下的板裂化岩爆现象进行了室内试验；顾金才等<sup>[15]</sup>探讨了高地应力隧洞岩爆机制，对抛掷型岩爆模拟试验技术，提出新的试验方案，研发新的试验装置，开展新的岩爆模拟试验，取得了理想的试验效果。可见，岩爆的模拟试验研究已成为岩爆机制研究的重要方法和手段。以上所述岩爆的室内模拟试验研究，尽管可以充分考虑岩爆发生的应力和岩性(硬脆性)条件，并较好地再现了工程现场中的岩爆现象。然而，上述研究结论并不完全适用于板裂屈曲岩爆，其原因在

于，此类试验局限于完整试块尺度，没有考虑板裂屈曲岩爆的结构失稳特性。板裂屈曲岩爆的室内模拟试验研究，应充分考虑到此类岩爆的结构失稳特性。

基于此，本文结合锦屏二级水电站深埋隧洞典型的围岩板裂化破坏现象及板裂屈曲岩爆案例，分析板裂屈曲岩爆发生机制及结构面作用机制；利用石膏材料配制板裂化模型试样，通过2种不同的加载方式进行板裂屈曲岩爆的室内物理模拟试验，分析试样失稳破坏过程及特征，以期深入认识板裂屈曲岩爆发生机制，并为此类岩爆的支护控制提供依据。

## 2 深埋隧洞围岩板裂化破坏及其结构特征

图1为锦屏二级水电站深埋隧洞施工过程中围岩典型的板裂化破坏现象。有关深埋隧洞围岩板裂化破坏的形成机制及其影响因素，周辉等<sup>[8]</sup>做了较为系统的文献综述，但由于本文所研究的板裂屈曲岩爆所针对的对象正是围岩发生板裂化破坏所形成的“板裂化围岩结构”，因此，有必要对围岩板裂化破坏机制及特征做进一步的阐述。



(a) 出露于洞壁 (b) 钻孔探视  
图1 锦屏二级水电站隧洞围岩板裂化破坏现象

Fig.1 Slabbing failure phenomenon of surrounding rock in Jinping II hydropower station

### 2.1 围岩板裂化破坏及其发生机制

深埋高地应力条件下，相对完整的硬脆性岩体由于开挖卸荷的作用而导致围岩一定深度范围内产生多组近似平行于洞壁(开挖面)的以张拉型为主的裂纹，裂纹扩展贯通后，将围岩切割形成规律性的板状或层状结构，围岩的这种破坏现象称之为板裂化破坏。从岩性和岩体完整性条件而言，与层状岩体(含有大量规律分布的原生节理、弱面等)的剥离、

弯折破坏不同，板裂化破坏是完整性好的硬脆性岩体的开裂现象。板裂化破坏产生的直接原因是开挖卸荷的作用，因而不同的开挖方式(TBM、钻爆法等)及其引起的卸荷效应对围岩板裂化破坏会产生重要影响，其他主要影响因素包括：动力扰动(临近施工与爆破等形成的应力波)、开挖断面形状、岩体非均质性等。从板裂化破坏形成的细观机制而言，板裂裂纹以张拉型为主，也包含拉剪、压剪等类型，板裂裂纹产生的应力水平与岩石本身应力门槛值(起裂应力、损伤应力等)、地应力大小、开挖引起的围岩损伤、围岩应力集中程度等因素密切相关，而当这些近似平行于开挖面的裂纹(有学者称为 surface-parallel fracture<sup>[16]</sup>或 layered fracture<sup>[17]</sup>)进一步扩展、贯通并逐步发生张开位移后，便形成了宏观的板裂面。因而，围岩发生板裂化破坏所形成的板裂化围岩结构是由多组板状岩板和板裂面所构成。

### 2.2 围岩板裂化破坏的结构特征

在锦屏二级水电站深埋隧洞施工过程中，笔者对围岩板裂化破坏现象进行了大量的现场调研与统计工作，发现：围岩板裂化破坏的一般结构特征在于，围岩内形成的多组近似平行于开挖面的裂纹将围岩切割形成板状，并且由临空面向围岩内部，板裂面切割形成的岩板厚度呈逐步增大的趋势<sup>[7-8, 20]</sup>(见图2)。

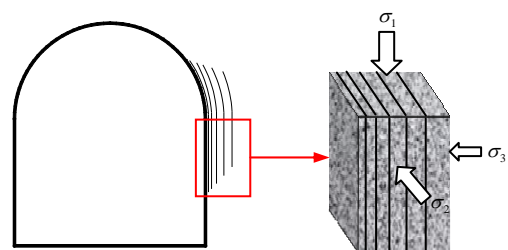


图2 围岩板裂化破坏的结构特征

Fig.2 Structural feature of slabbing surrounding rock

## 3 深埋隧洞板裂屈曲岩爆机制及结构面的影响分析

### 3.1 板裂屈曲岩爆的发生机制

#### 3.1.1 典型岩爆案例

2010年8月18日，锦屏二级水电站3<sup>#</sup> TBM洞段引(3)10+350~356北侧边墙与拱顶发生强烈岩爆，爆坑最大深度为1.5m，岩爆区域附近埋深约2000m，岩性为T<sub>2b</sub>白色巨厚状中粗晶大理岩，节理不发育。从岩爆宏观破坏面来看，岩体完整，破

裂面较为新鲜，爆坑边缘呈层板状折断，起伏不平。从滞留在挂网内部和破坏面表面的爆出物可以看出，爆出的岩块多呈板、片状<sup>[18]</sup>(见图 3)。

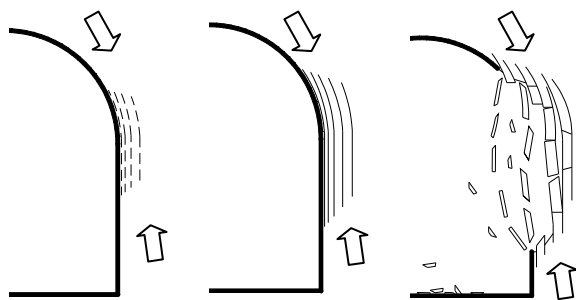


图 3 板裂屈曲岩爆破坏图

Fig.3 Damage pictures of slab buckling rockburst

### 3.1.2 发生机制分析

隧洞开挖卸荷后，切向集中应力作用下，导致围岩内微缺陷、原生裂隙尖端微裂纹萌生并稳定扩展，产生近似平行于开挖面的张拉裂纹(见图 4(a))。张拉裂纹进一步扩展、贯通并发生张开位移，形成多组板裂面，板裂面将围岩切割成板状岩板，板状岩板与板裂面共同构成板裂化围岩结构(见图 4(b))。切向集中应力进一步作用岩板，不断积聚应变能并向开挖空间产生屈曲变形。当板裂化围岩结构自身积聚的能量超过其储能极限，或者在外界扰动作用



(a) 张拉裂纹萌生与扩展 (b) 板裂化围岩结构形成 (c) 屈曲失稳

图 4 板裂屈曲岩爆发生过程示意图

Fig.4 Sketch of formation process of slab buckling rockburst

下发生突发性失稳破坏，形成岩板压折、岩块弹射的岩爆灾害(见图 4(c))。结合节 3.1.1 中案例可知，板裂屈曲岩爆所爆出的岩块多呈板、片状，爆坑边缘可见明显的层状或台阶状的折断痕迹以及大量分布的张拉裂纹，而爆坑底部往往较为平直，呈平底锅状。

### 3.2 板裂屈曲岩爆的结构面作用机制

结构面对于岩爆的重要影响已逐步被广大科研工作者及工程师们所认识。从锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆发生后所揭露出来的爆坑特征来看，多数岩爆发生区域存在着规模不等的结构面(节理、硬性结构面等)。现场案例统计表明，隐藏于隧洞围岩一定深度范围内的硬性结构面对板裂屈曲岩爆的发生具有重要的影响作用。

#### 3.2.1 典型岩爆案例

案例 1<sup>[19]</sup>：2010 年 12 月 1 日，锦屏二级水电站 1-1-E 洞段引(1)K8+940~948 北侧边墙发生中等岩爆，岩爆破坏面高 2~4 m、长 6~8 m，爆坑深 0.3~0.7 m；岩爆时发出较大响声，爆出的岩块多呈薄片状，大小不一，厚度 0.2~0.5 m，岩块抛掷最远至隧洞中心约 8 m。从岩爆宏观破坏面来看，破裂面新鲜，起伏不平，破坏面边缘呈板裂折断，其他部位以张裂面为主，中心部位可见多条与隧洞轴线近似平行的结构面(见图 5(a))。

案例 2<sup>[18]</sup>：2010 年 12 月 15 日，锦屏二级水电站 1-P-E 洞段 SK8+485~495 段北侧边墙发生一次中等岩爆，岩爆爆坑深 0.3~0.7 m、高度 2~4 m，沿洞轴线长度为 6~7 m；岩爆爆出的岩块，主要呈薄板状、片状，也有较大的块体，且可见较多岩粉；爆坑边缘呈阶梯状折断，并可见密集分布的板裂面，爆坑内部可见明显的结构面(见图 5(b))。

#### 3.2.2 结构面作用机制分析

结构面对板裂屈曲岩爆的发生具有重要影响。板裂化围岩结构的形成是一个渐进的破坏过程，隧洞开挖卸荷后，破裂面由洞壁表层岩体向围岩内部



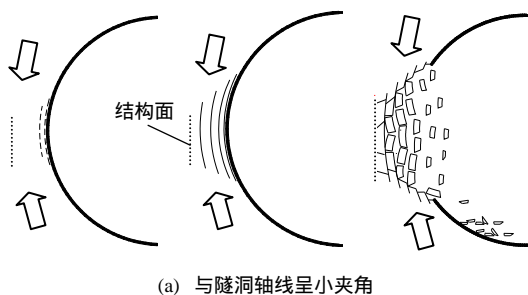
(a) 结构面与隧洞轴线呈小夹角



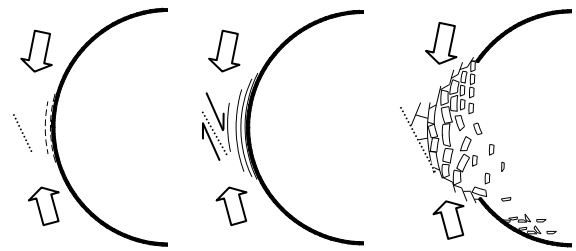
(b) 结构面与隧洞轴线呈大夹角  
图 5 岩爆造成隧洞破坏图

Fig.5 Damage pictures of tunnels caused by rockburst

发展过程中，将导致结构面法向作用力逐步降低，使得原本处于闭合状态的结构面变得活跃起来，切向集中应力作用下结构面开始扩展。此时，岩爆的发生不仅取决于板裂化围岩结构自身的稳定程度，还要受到结构面的影响。当结构面与隧洞轴线近似平行或呈小夹角分布时(见图 5(a))，结构面的存在对板裂化破裂向围岩深部的扩展起到了一定的阻隔和限制作用，并加剧了切向应力的集中程度，结构面的扩展将进一步降低板裂化围岩结构的稳定性。此时岩爆的发生多数情况下是，依靠板裂化围岩结构中平行岩板自身的能量积聚或者外界扰动触发作用下发生，结构面则控制了爆坑的深度和形状。而当结构面与隧洞轴线呈大夹角分布(见图 5(b))，一方面渐进的板裂化破坏过程促进了切向集中应力作用下结构面的扩展；另一方面结构面附近应力与能量的集中极可能造成结构面发生剪切错动，结构面剪切错动过程中剧烈的能量释放，则会诱发板裂化围岩结构的整体失稳破坏。此时，结构面的剪切错动成为板裂屈曲岩爆发生的诱发因素，而爆出的岩块既有结构面切割作用所形成的块状的，也有岩板压折断裂形成的板、片状的。上述 2 种类型结构面在板裂屈曲岩爆过程中的作用机制分别如图 6(a)和 (b)所示。



(a) 与隧洞轴线呈小夹角



(b) 与隧洞轴线呈大夹角

图 6 板裂屈曲岩爆过程结构面作用机制示意图

Fig.6 Sketch of mechanisms of structural plane in the formation of slab buckling rockburst

## 4 板裂屈曲岩爆的物理模拟试验

在分析板裂屈曲岩爆发生机制基础上，本次试验制作了满足节 2.2 中所述的板裂化结构特征的模型试样，通过 2 种不同的加载方式(单轴压缩及一侧约束条件下的单轴压缩)，研究板裂化模型试样的失稳破坏过程、规律及特征。需要说明的是，本次试验中所配制的板裂化模型试样主要考虑了试样的脆性特征及岩板厚度的规律性变化特征，而并未刻意要求试样其他物理及力学参数满足严格的相似比。此外，本次物理模拟试验中未考虑动力扰动及结构面的影响。

### 4.1 模型试样制备及试验方案

试样采用  $\alpha$  型高强石膏浇注，本次试验制作了 2 种类型的板裂化模型试样，如图 7 所示，试样 A 和 B 都为 60 mm×40 mm×120 mm(长×宽×高)的长方体，试样中预制裂隙均与水平面成 90° 夹角，平行布置，长度相同但彼此间距不同，预制裂隙为贯穿裂隙。所不同的是试样 A 含对称的 4 条预制裂隙，试样浇注的水灰比为 1 : 4(水与石膏的质量比)，加

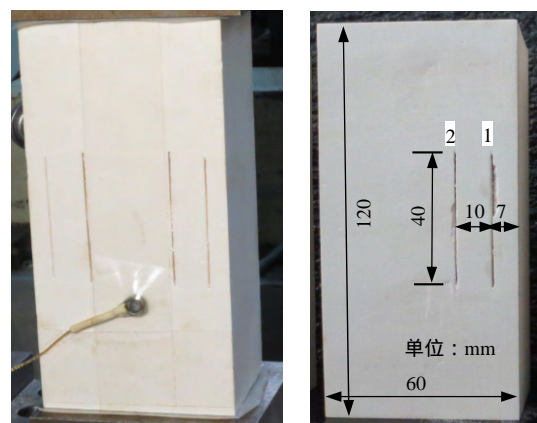


图 7 模型试样尺寸及预制裂隙位置图

Fig.7 Fissure locations and size of model specimens

载方式为单轴压缩(见图 8(a))；而试样 B 含 2 条预制裂隙，浇注水灰比为 1 3，加载方式为一侧约束条件下的单轴压缩(见图 8(b))。试验系统与周 辉等<sup>[20]</sup>相同，这里不再赘述。

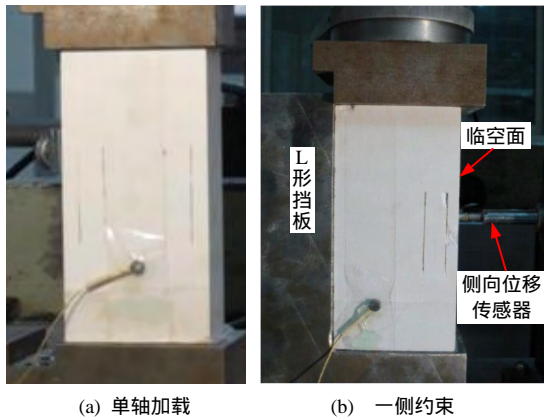


图 8 加载方式  
Fig.8 Loading modes

4.2 模型试样破坏过程及结果分析

结合试样的荷载-变形曲线、声发射特性曲线以及典型照片，分析 2 类试样的破坏过程及特征。

单轴压缩下试样 A-1 破坏过程如图 9 所示，

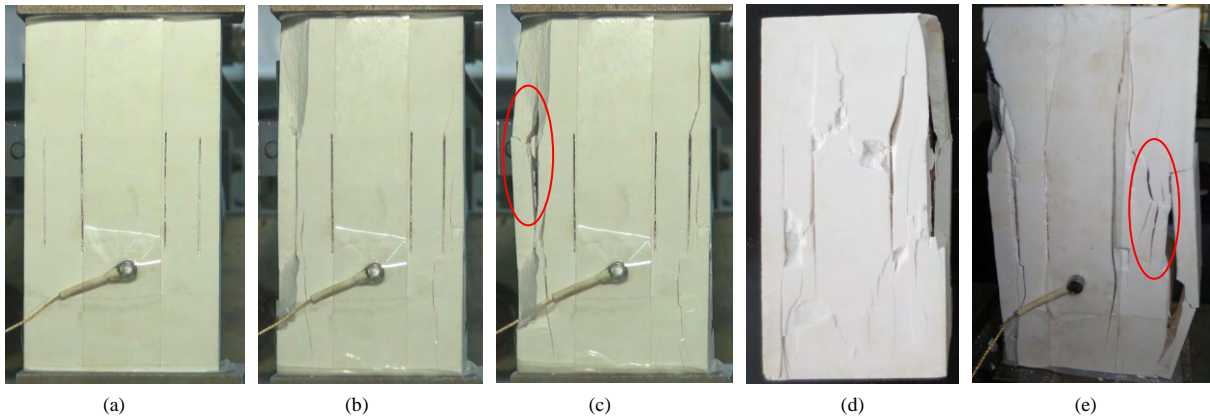


图 9 单轴压缩下模型试样破坏过程图  
Fig.9 Failure process of model specimen under condition of uniaxial compression

其荷载-声发射-时间关系如图 10 所示。由图 10 可知，试样加载初期经历了显著的压密和线弹性阶段，此阶段试样保持完整；当加载时间增至 150 s 左右时，试样声发射撞击率开始显著增大，而声发射累积能量曲线也开始呈现非线性增长趋势，且增长速率逐渐增大，这表明试样内预制裂隙尖端裂纹开始萌生，并逐步扩展；伴随着荷载值的进一步增大，预制裂隙尖端张拉裂纹进一步扩展，并将试样沿着预制裂隙(竖直方向)劈裂成板；加载时间增至 233 s 时，试样达到峰值强度，之后荷载值由 104 kN 迅速跌落至 25.1 kN，伴随着这一过程，试样左侧劈裂形成的岩板发生压折并弹射出去(见图 9(b))，此时声发射撞击率达到了 34 次/s，而声发射累积能量由 4 000 突增至 11 000；此后，试样荷载值缓慢上升至 30.12 kN 时再一次发生跌落，试样左侧岩板则再次发生压折现象(见图 9(c)中圆框所示)。由图 9(c)，(e)可明显看出，试样 A-1 岩板屈曲断裂形态。

一侧约束单轴压缩条件下试样 B-1 破坏过程如图 11 所示，其荷载-声发射-时间关系如图 12 所示，试样荷载-侧向变形曲线如图 13 所示。当压

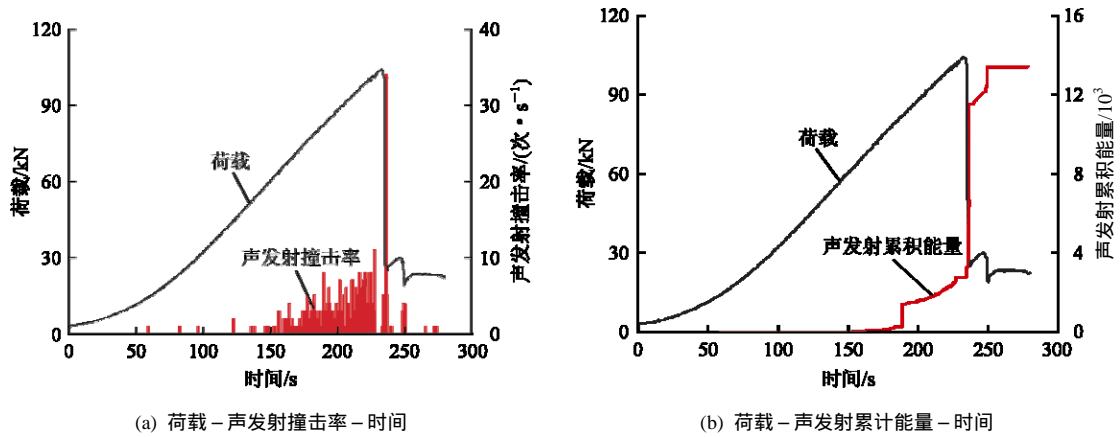


图 10 试样 A-1 荷载-声发射-时间关系  
Fig.10 Relationships of load , acoustic emission and time of specimen A-1

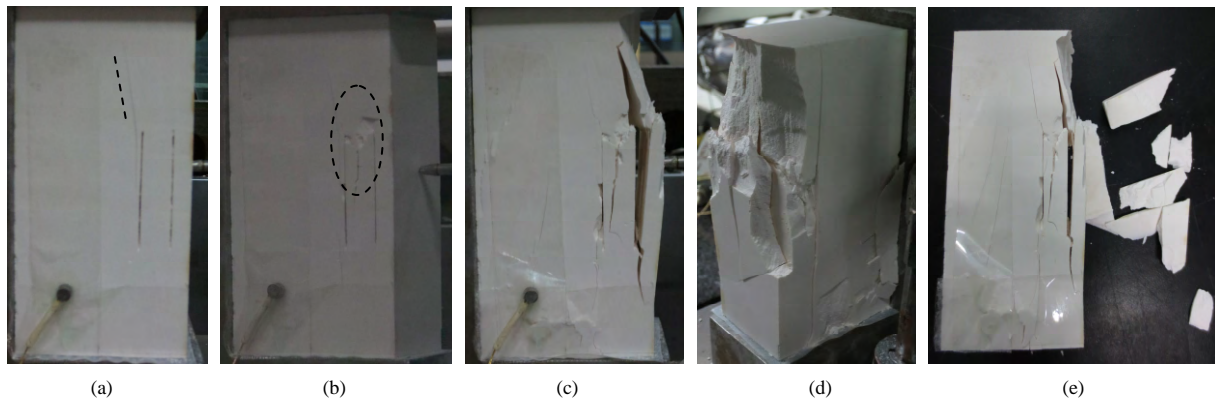


图 11 一侧约束单轴压缩下模型试样破坏过程图

Fig.11 Failure process of model specimen under condition of uniaxial compression with one lateral constraint

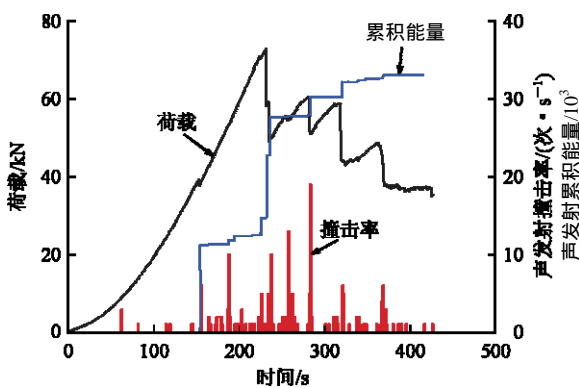


图 12 试样 B-1 荷载-声发射-时间关系

Fig.12 Relationships of load , acoustic emission and time of specimen B-1

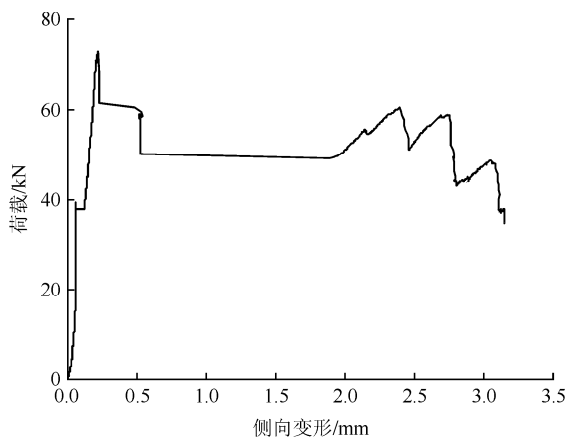


图 13 试样 B-1 荷载-侧向变形曲线

Fig.13 Curve of load-lateral deformation of specimen B-1

缩荷载值增至 39.3 kN 时, 试样内部预制裂隙尖端产生了张拉裂纹(见图 11(a)中虚线条), 张拉裂纹的产生导致试样荷载值发生微小跌落和侧向变形的突增现象, 同时声发射累积能量曲线也由 34 突增至 10 937。之后, 从图 13 可以看出, 随着荷载值的进一步增大, 试样侧向变形速率显著增大, 这主要由两方面原因造成的: 一是预制裂隙尖端张拉裂纹的稳

定扩展造成试样劈裂成板, 岩板在压缩荷载作用下逐步产生屈曲变形; 二是张拉裂纹扩展的同时也逐步发生张开变形。当加载时间增至 231 s 时, 试样达到峰值强度, 此时试样内部岩板发生压折(见图 11(b)中椭圆线框), 试样荷载值由 72.77 kN 跌落至 58.1 kN, 试样侧向变形也由 0.21 mm 突增至 0.52 mm。之后, 当压缩荷载出现微小幅值的增大后, 试样靠近临空面的岩板压折并发生岩块弹射现象(见图 11(c)), 试样荷载值发生进一步跌落, 而侧向变形则增至 1.89 mm。试样 B-1 最终破坏形态及岩板压折形成的弹射岩片如图 10(d), (e)所示。

由上述试验过程及结果分析可知, 板裂化模型试样的失稳破坏过程为: 预制裂隙扩展、试样劈裂成板, 压缩荷载进一步作用下, 岩板向临空面屈曲变形, 最终形成岩板压折、岩片弹射的失稳破坏。模型试样的失稳破坏过程, 合理反映了板裂屈曲岩爆的破坏机制。由于试样 B-1 受力状态更接近板裂化围岩实际受力状态(见图 2), 因而其失稳破坏过程及特征更合理地反映了板裂屈曲岩爆过程。

需要指出的是, 与板裂化围岩实际受力状态相比(见图 2), 本文试验中一侧约束条件下的单轴压缩(见图 8(b))并未考虑第二主应力  $\sigma_2$  的作用, 这主要是出于以下两方面的考虑: 一是, 根据相关室内试验<sup>[21]</sup>和数值模拟<sup>[16]</sup>的结论, 双向压缩荷载作用下第二主应力  $\sigma_2$  的作用是有利于试样内产生的裂纹朝向 2 个主应力方向扩展, 进而形成多组近似平行分布的板裂裂纹, 而本文模型试样中已经制作了平行预制裂隙用于模拟试样的板裂化破坏, 因而本次试验中并未考虑  $\sigma_2$  的作用; 二是, 第二主应力  $\sigma_2$  方向荷载的施加将不便于预制裂隙尖端裂纹扩展情况的观察、模型试样失稳破坏过程的认识。

## 5 结论与讨论

本文针对锦屏二级水电站深埋隧洞板裂化围岩结构失稳破坏所形成的板裂屈曲岩爆, 总结、分析了围岩板裂化破坏的形成机制及其结构特征; 结合典型岩爆案例, 分析了板裂屈曲岩爆的发生机制、结构面作用机制。在此基础上, 进行板裂屈曲岩爆的物理模拟试验, 研究了板裂化模型试样的失稳破坏过程、规律及声发射特征。取得如下主要结论与认识:

(1) 深埋高地应力条件下, 相对完整的硬脆性岩体由于开挖卸荷的作用, 导致围岩一定深度范围内产生多组近似平行于洞壁(开挖面)的以张拉型为主的裂纹。裂纹扩展贯通后, 将围岩切割形成规律性的板状或层状结构, 围岩的这种破坏现象称之为板裂化破坏。

(2) 深埋隧洞板裂屈曲岩爆的发生机制为: 切向集中应力作用下, 围岩板裂化破坏形成的岩板向开挖空间内屈曲变形, 并积聚应变能, 当板裂化围岩结构自身积聚的能量超过其储能极限或者在外界扰动作用下发生突发性失稳破坏, 形成以岩板压折、岩块弹射为外在表现特征的岩爆灾害。

(3) 结构面对板裂屈曲岩爆具有重要影响: 渐进的板裂化破坏过程起到了活跃结构面的作用, 结构面的存在及其扩展降低了板裂化围岩结构的稳定性, 促进了板裂屈曲岩爆的发生; 当结构面与隧洞轴线近似平行或呈小夹角分布时, 结构面的存在对板裂化破裂向围岩深部的扩展起到了一定的阻隔和限制作用, 并加剧了切向应力的集中程度, 结构面的扩展将进一步降低板裂化围岩结构的稳定性; 当结构面与隧洞轴线呈大夹角分布时, 结构面的剪切错动容易诱发板裂化围岩结构的整体失稳破坏, 对板裂屈曲岩爆的发生起到至关重要的控制作用。

(4) 板裂化模型试样的失稳破坏过程为: 预制裂隙的扩展将板裂化模型试样劈裂成板, 压缩荷载的进一步作用下, 岩板向临空面产生屈曲变形, 并最终形成岩板压折、岩片弹射的失稳破坏现象。物理模拟试验很好地反映了板裂屈曲岩爆的破坏机制。与单轴压缩相比, 侧向约束条件下试样破坏过程更合理地反映了板裂屈曲岩爆的发生过程。

本文结合岩爆实例和室内物理模拟试验, 从结构失稳破坏的角度, 初步分析了板裂屈曲岩爆机制及其破坏特征。笔者认为: (1) 通过建立合理的力

学模型、应用相关理论, 有望对板裂屈曲岩爆相关问题(岩爆能量释放、岩爆爆坑深度、岩块弹射速度等)做深入的研究, 进而为岩爆灾害下支护系统的设计提供有益指导。(2) 围岩板裂化破坏是多种因素组合作用下而发生的, 尽管岩爆具有结构失稳的特征, 但并不意味着岩爆发生前都会表现出明显的板裂化破坏现象。实际上, 隧洞岩爆发生前, 围岩内的板裂化破坏形态、范围等相关信息很难被探测。因此, 深入研究、准确解译围岩板裂化破坏所包含的岩爆前兆信息, 是深埋隧洞板裂屈曲岩爆风险预测及其防治的关键与难点问题。

## 参考文献(References):

- [1] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865-876.(HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rockburst process of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865-876.(in Chinese))
- [2] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(1): 59-65.
- [3] KAISER P K, MCCREATH D R, TANNANT D D. Canadian rockburst support handbook[R]. Sudbury: Geomechanics Research Centre, Laurentian University, 1996.
- [4] 王兰生, 李天斌, 徐进, 等. 二郎山公路隧道岩爆及岩爆烈度分级[J]. 公路, 1999, (2): 41-45.(WANG Lansheng, LI Tianbin, XU Jin, et al. Rockburst and its classification of intensity in Erlang Mountain highway[J]. Highway, 1999, (2): 41-45.(in Chinese))
- [5] 谭以安. 岩爆类型及其防治[J]. 现代地质, 1991, 5(4): 450-456.(TAN Yian. Types and treatments of rockburst[J]. Geoscience, 1991, 5(4): 450-456.(in Chinese))
- [6] 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 Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, 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.(in Chinese))
- [7] 周辉. 深埋隧洞围岩破裂结构特征及其与岩爆的关系[C]// 新观点新学说学术沙龙文集 51: 岩爆机理探索, 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 106-114.(ZHOU Hui. Structural feature of surrounding rock of deep-buried tunnel and its relationship with rockburst[C]// New Ideas New Doctrine Academic Salon Blogs 51: Exploration of Rockburst Mechanism. Beijing: China Science and



- Technology Press, 2011: 106–114.(in Chinese))
- [8] 周 辉, 徐荣超, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞围岩板裂化破坏研究的关键问题及研究进展[J]. 岩土力学, 2015(待刊).(ZHOU Hui, XU Rongchao, ZHANG Chuanqing, et al. Critical problems of study on slabbing failure of surrounding rock in deep hard rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(to be Pressed).( in Chinese))
- [9] 周 辉, 徐荣超, 卢景景, 等. 深埋隧洞板裂化围岩预应力锚杆锚固效应试验研究及机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1 081–1 090.(ZHOU Hui, XU Rongchao, LU Jingjing, et al. Experimental investigations and mechanism analysis of anchoring effect of pre-stressed bolts for slabbing surrounding rock in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1 081–1 090.( in Chinese))
- [10] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2): 286–298.
- [11] 张永双, 熊探宇, 杜宇本, 等. 高黎贡山深埋隧道地应力特征及岩爆模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2 286–2 294.(ZHANG Yongshuang, XIONG Tanyu, DU Yuben, et al. Geostress characteristic and simulation experiment of rockburst of a deep-buried tunnel in Gaoligong Mountain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2 286–2 294.(in Chinese))
- [12] 吴世勇, 龚秋明, 王 鸽, 等. 锦屏 级水电站深部大理岩板裂化破坏试验研究及其对 TBM 开挖的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1 089–1 095.(WU Shiyong, GONG Qiuming, WANG Ge, et al. Experimental study of slabbing failure for deep-buried marble at Jinping II hydropower station and its influence on TBM excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1 089–1 095.(in Chinese))
- [13] 侯哲生, 龚秋明, 孙卓恒. 锦屏二级水电站深埋完整大理岩基本破坏方式及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 727–732.(HOU Zhesheng, GONG Qiuming, SUN Zhuoheng. Primary failure types and their failure mechanisms of deep buried and intact marble at Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 727–732.(in Chinese))
- [14] GONG Q M, YIN L J, WU S Y, et al. Rock burst and slabbing failure and its influence on TBM excavation at headrace tunnels in Jinping II hydropower station[J]. Engineering Geology, 2012, 124: 98–108.
- [15] 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): 1 081–1 089.(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): 1 081–1 089.(in Chinese))
- [16] CAI M. Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries-Insight from numerical modeling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 763–772.
- [17] ZHANG C Q, ZHOU H, FENG X T, et al. Layered fractures induced by the principle stress axes rotation in hard rock during tunneling[J]. Materials Research Innovations, 2011, 15(Supp.1): S527–S530.
- [18] 明华军. 基于微震信息的深埋隧洞岩爆孕育机制研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012.(MING Huajun. Studies on rockburst nucleation mechanism in deep-buried tunnel based on microseismic informations[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.(in Chinese))
- [19] 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 Bingrui, FENG Xiating, MING Huajun, 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.(in Chinese))
- [20] 周 辉, 徐荣超, 卢景景, 等. 板裂化模型试样失稳破坏及其裂隙扩展特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015(待刊).(ZHOU Hui, XU Rongchao, LU Jingjing, et al. Experimental study on instability destruction and crack propagation characteristic of slabbing model specimen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(to be Pressed).(in Chinese))
- [21] SAHOURYEH E, DYSKIN A V. Crack growth under biaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(18): 2 187–2 198.