

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.10.001

# 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

周 辉<sup>1</sup>, 卢景景<sup>1</sup>, 徐荣超<sup>2</sup>, 张传庆<sup>1</sup>, 孟凡震<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:** 规律性的板裂化破坏是深埋硬脆性岩体开挖卸荷造成的典型围岩破坏现象, 给隧洞的安全施工建设带来了严峻挑战。板裂化破坏的研究主要涉及两个关键问题: 板裂化破坏的形成机制及其影响因素, 板裂化破坏与岩爆的关系。多年来, 国内外学者通过理论分析、现场及室内试验、数值模拟等不同途径对板裂化破坏问题进行了系统的研究, 取得了丰富的研究成果。在系统分析有关板裂化破坏两个关键问题研究进展的基础上认为, 板裂化破坏的形成机制复杂、影响因素众多。基于板裂化破坏形成的细观机制, 建立不同类型板裂化破坏的力学准则与力学模型是揭示板裂化破坏形成机制的关键所在; 板裂化破坏现象与岩爆之间具有很强的相关性和本质的联系, 深入揭示板裂化破坏特征所包含的岩爆前兆信息是板裂化破坏与岩爆关系研究的关键与难点问题。

**关 键 词:** 深埋隧洞; 板裂化破坏; 岩爆; 关键问题; 研究进展

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)10-2737-13

## Critical problems of study of slabbing failure of surrounding rock in deep hard rock tunnel and research progress

ZHOU Hui<sup>1</sup>, LU Jing-jing<sup>1</sup>, XU Rong-chao<sup>2</sup>, ZHANG Chuan-qing<sup>1</sup>, MENG Fan-zhen<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 Resources and Environment,

North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China)

**Abstract:** Slabbing failure with regularity of surrounding rock is a typical failure phenomenon in deep hard and brittle rock mass due to excavation activity, which poses a serious challenge to safely construct the underground tunnels. There are two critical problems in the research of slabbing failure, i.e. the formation mechanism of slabbing failure and its influencing factors, and the relationship between slabbing failure and rockburst. Remarkable achievements have been made in the slabbing failure by theoretical analysis, field tests, laboratory experiments and numerical simulation over the past decades. By summarizing the research progress related to these two critical problems, it is believed that the formation mechanism of slabbing failure is a complex problem involving various influencing factors. Based on the meso-mechanism of the slabbing failure, the key point to explore its formation mechanism is to establish different types of mechanical criterion and model. Slabbing failure and rockburst have strong correlation and essential connection. To further reveal characteristics of slabbing failure and the involved precursor information of rockburst is a critical and difficult problem to study the relationship between slabbing failure and rockburst.

**Keywords:** deep tunnel; slabbing failure; rockburst; critical problems; research progress

## 1 引 言

为适应国民经济发展的需要, 我国基础工程建

设和资源开发正逐步向深部发展, 深部岩体具有埋深大、地应力高的突出特点。在深埋高地应力条件下, 硬脆性岩体表现出与浅埋地应力条件下完全不

收稿日期: 2014-04-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 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(No. KZCX2-EW-QN115); 国家自然科学基金项目(No. 41172288)。

第一作者简介: 周辉, 男, 1972年生, 博士, 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方面的研究工作。

E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

同的力学行为, 规律性的板裂化破裂是深埋隧洞硬脆性围岩的普遍规律和现象<sup>[1]</sup>。现场调研与统计表明<sup>[2]</sup>, 锦屏二级水电站引水隧洞、排水隧洞施工期间, 洞壁围岩板裂化破坏现象严重, 给隧洞施工与支护工作带来许多不利影响。图 1 所示为锦屏二级水电站某隧洞施工过程中观察到的围岩典型的板裂化破坏现象。



(a) 出露于洞壁



(b) 钻孔探视

图 1 锦屏二级水电站某隧洞围岩板裂化破坏现象  
Fig.1 Slabbing failure phenomena of surrounding rock in Jinping II hydropower station

另一方面, 深埋隧洞开挖卸荷诱发的高强度岩爆频发, 造成人员伤亡、机械损坏、工期延误和重大经济损失<sup>[3-5]</sup>, 岩爆灾害已经成为制约深埋隧洞工程安全建设的瓶颈问题。同时, 大量工程案例表明<sup>[2, 5, 6]</sup>, 围岩板裂化破坏现象与岩爆之间具有很强的相关性, 引起了广大科研工作者的关注。高地应力条件下, 硬脆性岩体板裂化破坏问题, 给隧洞的安全施工建设提出了新的挑战。

多年来, 国内外学者通过现场及室内试验、理论分析、数值模拟等不同途径对围岩板裂化破坏问题进行了系统的研究, 取得了丰硕的研究成果。本文从板裂化破坏的形成机制及影响因素、板裂化破坏与岩爆的关系两大方面总结分析国内外有关硬脆性岩体板裂化破坏的研究现状。基于此, 对板裂化破坏未来研究的发展方向 and 亟待解决的关键问题进行探讨。

## 2 板裂化破坏现象的描述与区分

国内学者孙广忠等<sup>[7]</sup>, 从工程地质的角度定义了板裂结构的概念: 由软弱结构面分割构成板状结构体的岩体结构, 称为板裂结构。这里定义的板裂结构指的是长期地质作用形成的天然岩体结构, 所研究的对象也主要是针对边坡岩体。孙广忠<sup>[8]</sup>认为, 板裂介质岩体包含完整结构岩体由人工开挖或劈裂成板状结构而构成似板裂结构岩体, 这对板裂结构进行了有益补充。需要说明的是, 本文研究的板裂破坏属于相对完整岩体开挖卸荷形成的似板裂结构, 并非经过长期地质作用而形成的天然板裂结构。

### 2.1 板裂化破坏现象描述

板裂化破坏现象的产生, 很早便引起了国内外学者的注意, 许多学者对板裂化破坏现象进行了记录与描述。

Fairhurst 等<sup>[9]</sup>最早对这种近似平行于围岩洞壁的板裂破坏进行了详细描述, 将板裂破坏现象称之为 spalling 或者 slabbing, 认为板裂破坏的产生与围岩内张拉裂纹的扩展与贯通密切相关。孙广忠等<sup>[10]</sup>根据现场工程师提供的资料, 详细记录了鲁布格电站地下厂房边墙围岩板裂化破坏情况, 并建立了边墙板裂破坏的拱条力学模型。Ortlepp<sup>[11-12]</sup>认为, 板裂破坏是高地应力条件下, 开挖卸荷引起的一种破坏型式, 板裂面一般平行于最大切向应力方向, 且随着破坏的发展, 最终会形成一个 V 型凹槽。Martin 等<sup>[13]</sup>通过对加拿大硬岩矿山开采中, 178 例矿柱破坏模式的现场案例统计研究表明, 当硬岩矿柱的宽高比小于 2.5 时, 其主导破坏模式为渐进的板裂化与剥落破坏, 最终形成类似漏斗状或沙漏状的破坏形状 (如图 2 所示)。Cai<sup>[14]</sup>研究认为, 板裂破坏通常表现为洞壁围岩密集分布的洋葱皮状裂纹, 裂纹切割围岩形成近似平行于开挖面的岩板, 裂纹密度取决于岩体地应力条件、岩体强度以及岩石的非均质性。张传庆等<sup>[15]</sup>将锦屏二级水电站 2 号试验洞开挖后, 围岩板裂化破坏形态详细划分为: 片状破坏、薄板状破坏、楔形板状破坏 3 类, 并对各种类型的板裂破坏形态进行了较为详细的描述。周辉<sup>[1]</sup>在对锦屏二级水电站深埋隧洞大量围岩板裂化现象的统计分析基础上, 按照围岩板裂化出露于洞壁的几何形态将其分为薄片状、曲面状、规则闭合板状、规则张开板状、不规则张开板状和巨厚板状 6 大类; 按照围岩板裂化沿隧洞断面的分布特征, 分为密集板裂区和稀疏板裂区。

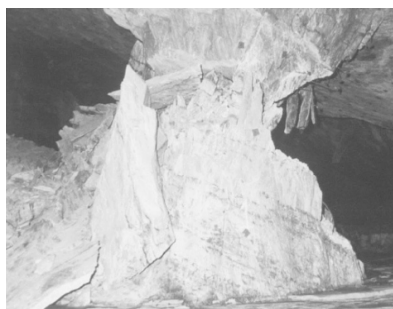


图 2 矿柱板裂化破坏<sup>[13]</sup>

Fig.2 Slabbing failure phenomenon of mining pillar<sup>[13]</sup>

### 2.2 V 型破坏中的板裂化现象

对于高应力下硬脆性岩体的破坏模式和机制，国际上最具有代表性的是加拿大原子能有限公司 (AECL) 地下试验室 (URL) 开展的相关研究工作<sup>[16]</sup>。其中 Martin 等<sup>[17]</sup>详细记录了在埋深为 420 m，水平布置的试验隧洞在开挖过程中 V 型破坏的形成过程。V 型破坏与板裂化破坏均属于高地应力下硬岩发生的脆性破坏，文献<sup>[17]</sup>中 V 型破坏形成过程中关于板裂化现象的描述如下：板裂破坏发生在掌子面后方 0.5~1 m 的围岩洞壁周边，从微裂隙密度最大的地方开始扩展，并逐步形成密集薄板，薄板厚度与岩石晶粒尺寸相当，即厚 2~5 mm；伴随着 V 型剥落的继续发展，会在 V 型两翼形成不稳定的板裂裂纹扩展，形成的岩板厚度一般为 1 至几厘米厚，若将形成的岩板剥离洞壁，会观察到 V 型破坏向围岩内的扩展情况。如图 3 所示为 V 型破坏中的板裂化现象。

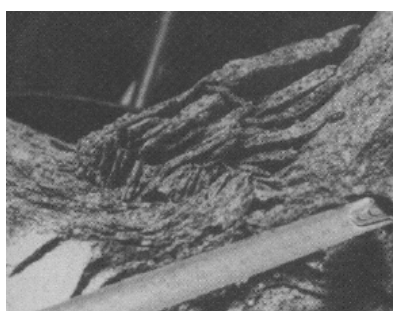


图 3 V 型破坏中的板裂化现象<sup>[17]</sup>

Fig.3 Slabbing failure phenomenon of V-shaped notch<sup>[17]</sup>

此外，Lee 等<sup>[18]</sup>利用 Lac du 花岗岩进行室内双轴压缩试验，发现了 V 型破坏形成中的板裂现象，如图 4 所示。V 型破坏形成过程中，会在 V 字型的两翼形成一系列密集分布、近似平行的张拉裂纹；被这些近似平行、密集分布的裂纹分割而成的薄板，其渐进的分离或剥落，逐步导致了狗耳朵状的 V 型破坏的形成。

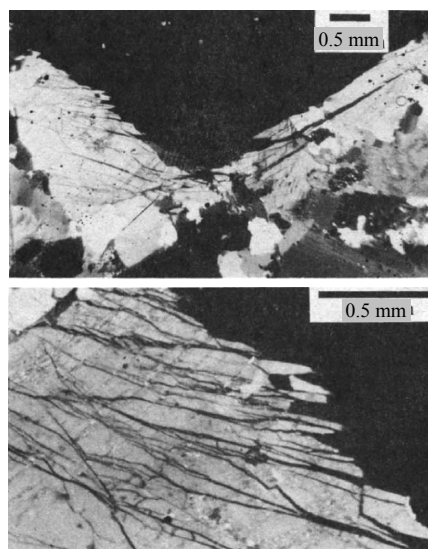


图 4 室内试验 V 型破坏中的板裂化现象<sup>[18]</sup>

Fig.4 Slabbing failure phenomena of V-shaped notch in laboratory experiments<sup>[18]</sup>

### 2.3 板裂化破坏与其他破坏模式的区分

板裂化破坏是深埋高地应力条件下，硬脆性岩体由于开挖卸荷而导致围岩内形成多组近似平行于开挖面的裂纹（板裂面），裂纹（板裂面）将围岩切割形成板状或层状破坏现象。笔者认为，认识板裂化破坏现象应注意与其他破坏模式的区别与联系。

(1) 板裂与弯折内鼓。弯折内鼓<sup>[19]</sup>在破坏的表现形态上虽然也是一种呈层状或板状的剥离，但从岩体的完整性角度而言，弯折内鼓是层状、特别是薄层状围岩的主要破坏模式（如图 5 所示），而板裂破坏是相对完整岩体所体现的脆性破坏型式。

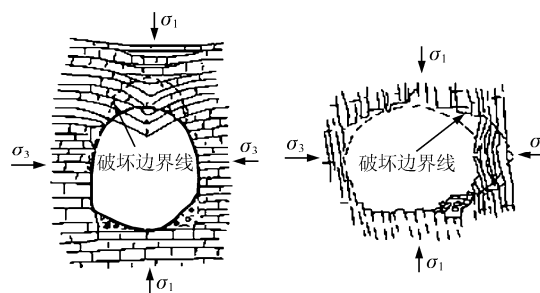


图 5 弯折内鼓<sup>[19]</sup>

Fig.5 Buckling and bulging<sup>[19]</sup>

(2) 板裂与片帮剥落、溃屈破坏。完整岩体在切向应力集中作用下发生劈裂拉伸，呈薄片状或板状，若劈裂成薄片状，片状岩体直接剥落，落地后碎裂，称为片帮剥落；若劈裂成板状，板状岩体继而发生弯折断裂，称为溃屈破坏<sup>[19]</sup>。尽管随着板裂化破坏的稳定发展，洞壁围岩会表现出与片帮剥落、溃屈破坏相类似的形态，但在多数情况下（尤其是

曲率半径无限大的直立边墙)围岩板裂化破坏形成的岩板厚度较大、板裂结构强度大,板裂化破坏现象并非直观地体现在围岩洞壁上的片状或板状剥落,围岩内部的板裂化破坏情况,需要借助一定手段,如钻孔摄像等,才能弄清(如图 1(b)所示),Cai<sup>[14]</sup>采用数值模拟软件 ELFEN 说明了这一点。此外,在开挖隧洞横断面、沿着隧洞径向,板裂化破坏向围岩内部的扩展深度通常都要比片帮剥落、溃屈破坏大很多。

(3) 板裂与 V 型破坏。如上文所述,板裂与 V 型破坏均是高地应力下围岩发生的脆性破坏,现场观测和室内试验均表明, V 型破坏形成过程中伴有明显板裂化现象的产生(如图 3、4 所示)。然而, V 型破坏分布范围表现出明显的主应力方向相关性(沿着最小主应力方向或成一小角度,如图 6 所示),而现场案例统计表明,洞室边墙、拱肩均会有板裂化破坏现象产生,且板裂化破坏形态受洞室曲率半径影响较大,少数情况下表现出宏观的 V 型轮廓。

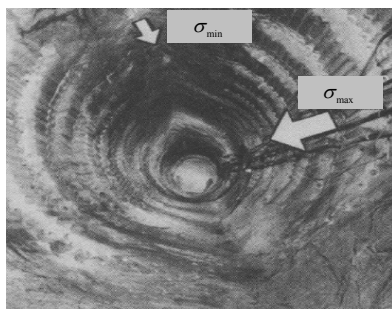


图 6 主应力方向与 V 型破坏<sup>[17]</sup>

Fig.6 Directions of the maximum principal stresses and V-shaped notch<sup>[17]</sup>

此外,一些文献中用层裂代替板裂来描述围岩的这种开挖卸荷形成的脆性破坏现象。然而,根据层裂现象的定义<sup>[20]</sup>,层裂是冲击荷载作用下材料的一种破坏模式,是材料内部微损伤在极短时间内经历了成核、长大、连接这一演化过程的最终结果,主要由压应力波在介质自由表面反射为拉应力波造成的拉伸破坏,在金属材料领域研究较为成熟。尽管,板裂化破坏的产生在一定程度上受动力扰动的影响<sup>[21-25]</sup>,在表现形态上也是分层间隔破裂现象,笔者认为,板裂与层裂形成机制不同,硬岩开挖卸荷导致的板裂化破坏现象,不宜用层裂描述。

### 3 板裂化破坏形成机制与影响因素

围岩板裂化破坏的形成机制一直备受关注,多

年来,科研工作者们分别从现场调研与案例分析、理论研究、室内试验与数值模拟等途径,对板裂破坏的形成机制及其影响因素进行了研究,取得了许多可喜进展。

#### 3.1 板裂化破坏判据

Dowding 等<sup>[26]</sup>通过总结分析地下隧洞开挖过程中 5 个典型的围岩板裂化破坏与岩爆案例。分析认为,隧洞开挖引起的洞壁围岩最大切向应力  $\sigma_{\theta_{\max}}$  与岩石室内单轴抗压强度  $q_u$  之比达到 0.35 时,便会导致围岩产生板裂化破坏现象;当上述比值达到 0.5 时,会形成弱至中等的岩爆;强烈岩爆通常在此比值大于 1 的情况下才发生。

Stacey 研究发现<sup>[27]</sup>,硬岩隧洞开挖过程中,隧洞边墙和掌子面附近大量发育的张拉裂纹,应用传统的 Mohr 强度准则和 Griffith 强度准则无法给出合理的解释(如裂纹的起裂应力水平和方向)。基于此,Stacey<sup>[28]</sup>提出了一个脆性岩石开裂的简单张应变准则,该准则描述为:脆性岩石的张应变超过其阈值张应变时,将产生张拉裂纹,即

$$e \geq e_c \quad (1)$$

式中:  $e$  为张应变总值;  $e_c$  为张应变阈值,张应变阈值可由室内试验确定,且岩性不同,其张应变阈值不同。

张应变(extension strain)与拉伸应变(tensile strain)不同,拉伸应变暗含拉应力作用而产生的应变,而拉应力并不是张应变产生的必要条件,这一点可以通过下式给出解释。在线弹性条件下,有

$$e = e_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (2)$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $e_3$  为第三主应变;  $\nu$  为泊松比;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为第一、第二、第三主应力。

由式(2)可以看出,即使在三向受压的情况下,当  $\nu(\sigma_1 + \sigma_2) > \sigma_3$  时,也会有张应变的产生,张应变超过岩石阈值张应变时,张裂纹将在垂直于最小主应力方向的平面内扩展。这很好地解释了硬脆性岩体开挖卸荷后,板裂、劈裂现象的产生。同时,与传统的 Mohr 强度准则和 Griffith 强度准则相比,该准则考虑了第二主应力的影响。同时,Stacey<sup>[29]</sup>将该准则用于高地应力条件下洞室边墙围岩板裂化破坏深度的预测。

Dowding 和 Stacey 分别给出了板裂化破坏形成的应力和应变判据。然而, Dowding 给出的板裂化破坏应力判据是根据工程实例得到的经验判据,而 Stacey 的板裂化破坏应变判据中,不同岩石的张应

变阈值难以准确确定，因而这两个板裂化破坏判据并未在工程中广泛应用。

Diederichs 等<sup>[30]</sup>结合室内试验、数值模拟、理论分析等方法研究了隧洞开挖过程中的板裂、剥落等破坏现象，并与 Hoek-Brown 强度准则包络线对比得到了板裂化破坏的经验-理论判据曲线（如图 7 所示）。分析认为，板裂、剥落等破坏现象是硬岩开挖卸荷条件下产生的张性破裂，其形成机制与低围压下岩石室内轴向劈裂破坏类似，与高围压条件下的剪切破坏不同，难以用传统的强度准则给出合理的解释；室内试验条件下，岩石发生劈裂、板裂破坏应力门槛值远低于其单轴抗压强度，应力门槛值可以根据其单轴抗压强度、结合声发射特征曲线推测，并受矿物组成、胶结程度、晶粒尺寸等一系列复杂因素的影响，不同岩石其门槛值不同，花岗岩类一般为单轴抗压强度的 0.35~0.45 倍；而在实际工程现场中，围岩板裂、剥落破坏还受到岩体非均质性、损伤程度、开挖扰动、自由边界效应、隧洞开挖过程中应力旋转效应等作用。

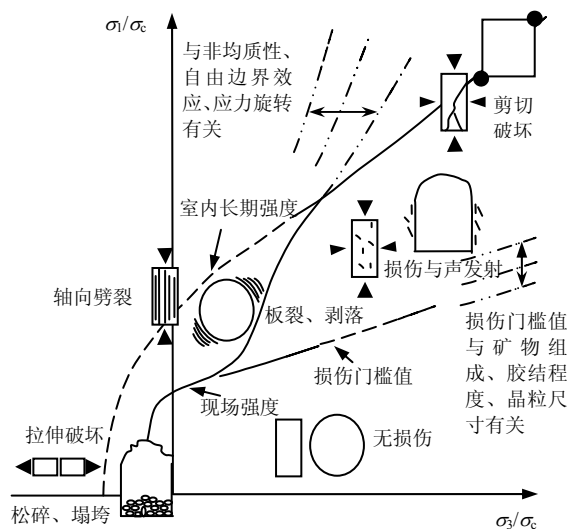


图 7 板裂化破坏的经验-理论判据与室内强度包络线<sup>[30]</sup>  
 Fig.7 Empirical-theoretical composite criterion curve of slabbing failure and laboratory strength envelope<sup>[30]</sup>

### 3.2 板裂化破坏形成的微观机制

从断裂力学角度来说，板裂化破坏的形成是岩体内裂纹萌生、扩展与贯通的最终结果，因而，许多学者从板裂破坏形成的微观机制，即板裂裂纹的形成与扩展规律入手，对板裂化破坏展开研究。不同应力状态下，裂纹扩展规律不同、试件破坏形态也不尽相同，归纳起来，众多研究者们分别从单轴压缩、双向压缩和真三轴条件下，对板裂裂纹形成、

扩展及贯通规律进行了系统研究。

Li 等<sup>[31]</sup>利用挪威 Iddefjord 花岗岩，研究了单轴压缩条件下长方体试样板裂破坏的形成条件如下：单轴压缩条件下，试样高宽比小于 0.5 时，试样的宏观破坏型式由剪切破坏转变为板裂化破坏；室内试验条件下，当轴向应力达到单轴抗压强度的 60% 左右时，试件内开始产生板裂裂纹。李地元等<sup>[32]</sup>利用断裂力学理论，以张开型滑移微裂纹单元应力模型为基础，研究了压缩荷载作用下平行于最大主应力方向板裂裂纹的扩展规律；采用 FLAC 数值模拟手段，模拟了单轴压缩下含孔洞岩样的板裂化破坏，发现塑性破坏单元以拉伸破坏为主，拉伸破坏单元沿孔洞竖向向边界贯通形成劈裂破坏面，模拟结果与室内试验观测结果一致。

岩石在双向压缩的情况下，会表现出与单轴受压时不同的力学响应，不仅其强度会发生明显变化，其破坏模式和机制也大不相同。Sahouryeh 等<sup>[33]</sup>从理论分析和室内试验两方面分析了第二主应力对岩石内预制裂纹扩展的影响：第二主应力的存在使得裂隙沿着平行于两个主应力的方向扩展并最终贯穿试样整体，形成劈裂破坏。Cai<sup>[14]</sup>利用有限元与离散元耦合数值分析软件 ELFEN，从数值模拟角度验证了 Sahouryeh 研究结论的正确性，并认为，相对高的中间主应力、近于 0 的最小主应力和岩石的非均质性是洞壁围岩形成平行于开挖面的洋葱状、片状剥落及板裂化破坏的主要原因。

岩体开挖卸荷后，围岩由初始的三向受压变为双向受压、一面临空的受力状态，开挖卸荷的影响至关重要，因而岩石的室内真三轴加卸载试验成为一些学者研究板裂化破坏的重要途径。何满潮等<sup>[34]</sup>自行设计了深部岩爆过程试验系统，在对深部高地应力条件下花岗岩岩爆过程进行试验研究时，观察到了花岗岩的板裂化破坏现象。吴世勇等<sup>[2]</sup>和 Gong 等<sup>[35]</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板裂化破坏，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破坏现象进行了室内试验，认为试样内板裂裂纹的形成主要是竖向劈裂裂纹，夹杂些许较小的剪切裂纹。

### 3.3 板裂化破坏的影响因素分析

大量的室内试验与数值模拟研究<sup>[36-39]</sup>表明，岩石在压应力场中，裂隙尖端萌生的裂纹，其扩展方向大致都沿着主压应力方向。可见，主应力方向对裂纹的扩展模式起到很大程度上的控制作用（如图 8 所示）。从工程角度来说，隧洞开挖过程中，伴随

掌子面不断向前推进, 掌子面前方围岩各处主应力大小将不断发生改变, 主应力方向也发生偏转, 这将导致微裂纹的多次扩展和扩展方向的改变<sup>[30, 40]</sup>。Eberhardt<sup>[40]</sup>利用 VISAGE 软件进行隧洞开挖过程的三维数值模拟, 详细分析了掌子面推进过程中监测单元的主应力大小变化、方向偏转情况, 并探讨了研究结果对认识硬脆性围岩板裂化破坏形成机制的意义。Zhang 等<sup>[41]</sup>从数值模拟和断裂力学角度, 分析了中间主应力、应力路径、主应力方向偏转等因素对锦屏二级水电站试验洞岩体板裂化破坏的影响, 分析认为, 洞壁围岩的裂纹扩展受第二主应力的影响较大; 隧洞开挖过程中, 围岩应力调整导致主应力方向的偏转, 主应力方向偏转不仅影响裂纹的扩展方向还会引起板裂裂纹的进一步扩展。

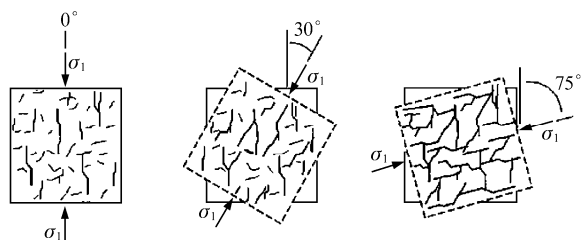


图 8 主应力方向转动与细观裂隙演化过程示意图<sup>[40]</sup>

Fig.8 Schematic diagrams of the rotation of the maximum principal stress axis and evolution process of meso-fracture<sup>[40]</sup>

在深埋高地应力条件下, 隧洞开挖引起的地应力瞬态卸荷效应变得异常突出。因而, 动态卸荷效应被认为是围岩形成板裂化破坏的重要影响因素之一。Carter 等<sup>[21]</sup>研究表明, 岩体初始应力的瞬态卸荷会在围岩中诱发动拉应力, 岩体开挖卸荷速率越快, 诱发的动拉应力值越大。严鹏等<sup>[22]</sup>采用理论计算、数值模拟和工程实测资料验证相结合的方法分析了圆形隧洞钻爆开挖时开挖边界上初始应力场动态卸荷效应。分析认为, 初始应力动态卸荷在岩体中所产生的损伤范围比准静态卸荷所产生的损伤范围要大, 在相同的卸载速率条件下, 侧压力系数越大, 动态卸载效应越显著, 其所产生的损伤范围也相应较大。肖建清等<sup>[23]</sup>针对地下圆形隧道的开挖卸荷效应, 对比分析了动态(弹性解)和静态(弹性解及弹塑性解)开挖卸荷中应力及位移的差异。分析认为, 弹性岩体的动态解中, 沿径向的质点, 其振动效应由弱变强再变弱, 径向应力一直处于压缩状态, 而切向应力先拉后压, 有利于径向拉裂纹及层板结构的形成。张文举等<sup>[24]</sup>通过理论分析和数值计算研究深埋地下隧洞开挖卸荷引起的围岩开裂,

并分别对准静态和瞬态开挖卸荷引起的围岩开裂机制与开裂特征进行分析, 瞬态卸荷存在动态拉应力效应, 开挖卸荷时间越短, 引起的拉应力区及围岩开裂范围越大, 围岩开裂深度及范围随着侧压力系数增加而增大, 且开裂区近似成 V 型。

由于隧洞施工过程中, 围岩不可避免地会受到施工机械及爆破等因素产生的动力扰动作用, 因而动力扰动的作用对围岩板裂化破坏的影响机制受到了许多学者的关注。左宇军等<sup>[25, 42]</sup>为研究动、静组合加载下深部巷道围岩分区破裂化的机制, 对深部洞室模型进行了动、静组合加载试验。分析认为, 巷道轴向应力为最大主应力且与外部扰动应力叠加达到一定值时, 围岩会发生分层断裂现象; 巷道直径越大, 在相同的动、静组合加载条件下, 更易发生分层断裂现象; 相同直径的巷道, 在不同的动、静组合加载作用下, 巷道围岩分层断裂化程度不同, 动、静组合应力叠加值越大, 分层断裂化程度越严重; 利用 RFPA<sup>2D</sup> 数值模拟软件, 对不同冲击载荷作用下非均匀介质中应力波反射诱发层裂过程进行数值模拟, 通过对不同应力波持续时间、不同应力波峰值和不同应力波波形下应力波诱发层裂过程的数值分析, 对应力波反射诱发层裂的规律和机制进行探讨。李夕兵等<sup>[43]</sup>理论分析了半正弦冲击入射加载波形下的层裂破坏特性, 推导产生层裂破坏的位置和层裂厚度, 并利用改进的霍普金森压杆装置对花岗岩试件进行层裂破坏试验, 岩石试件在半正弦入射加载波形情况下, 首先如理论推导结果一样只产生了一层层裂破坏, 但随着时间的推移, 岩石试件后续又产生了多层层裂, 后续产生的层裂是由于入射加载过程中已经对岩石试件产生了损伤, 以致在很弱的残余反射波作用下继续产生破坏而出现多层层裂。雷光宇等<sup>[44]</sup>采用 LS-DYNA 软件, 对扰动应力波作用下巷帮围岩层裂破坏结构的形成过程、扰动应力波强度对层裂结构形成的影响进行数值模拟, 得到了一定巷道围岩应力状态下巷帮围岩层裂结构的形状、厚度等特征。张晓春等<sup>[45]</sup>采用数值方法, 模拟应力波作用下巷道围岩层裂结构的形成过程, 探讨巷道围岩层裂结构的形成与巷道埋深、岩体弹性模量及应力波强度、时程特性的关系。

此外, 王学滨等<sup>[46]</sup>研究了不同侧压系数时圆形巷道围岩中的剪切应变增量及最小、最大主应力等的分布规律, 认为围岩层裂或板裂化现象的原因是环向的高压应力和径向的高拉应力共同作用的结果。

总结以上众多学者的研究成果可以发现, 板裂化破坏的形成机制复杂、影响因素众多, 揭示工程

实践中不同类型的板裂化破坏，需要结合多种手段与方法进行深入地研究。

### 4 板裂化破坏与岩爆的关系

Diederichs<sup>[47]</sup>研究认为，板裂化破坏是在高地应力条件下，洞室开挖过程中围岩在压应力场中产生的张性破裂过程；板裂化可以是剧烈的，也可以是非剧烈的，在某些情况下也可能是与时间有关的一个缓慢过程；围岩板裂化破坏可以发生在应变型岩爆之前，板裂化破坏产生的近似平行的岩板，其产生不稳定的变形（屈曲失稳），为应变型岩爆能量的突然释放创造了条件。可见，稳定的、非剧烈的板裂化破坏主要涉及板裂化岩体的变形问题（如图 9 所示），针对板裂化围岩的变形预测（包含岩板弹性变形、岩板弯曲变形、岩板之间分离变形），许多学者进行了有益研究<sup>[6, 10, 48]</sup>。然而，随着隧洞埋深的增加、地应力的增大，剧烈的板裂化破坏，即岩爆发生的概率大大增加（如图 10 所示），板裂化破坏与岩爆之间的关系，成为板裂化破坏研究的热点问题。



图 9 板裂化岩体变形<sup>[49]</sup>

Fig.9 Deformation of slabbing rock mass<sup>[49]</sup>



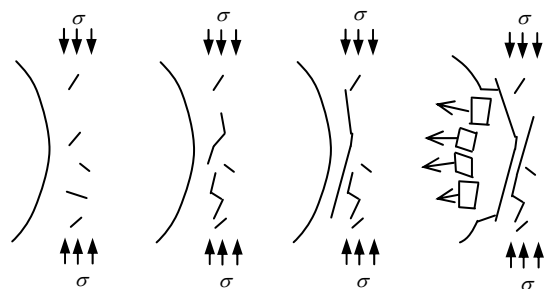
图 10 板裂化岩爆坑<sup>[50]</sup>

Fig.10 Pit of slabbing rockburst<sup>[50]</sup>

概括起来，研究者们主要从以下两大方面对板裂化破坏与岩爆的关系开展研究。

一是依据断裂力学相关理论，研究近自由边界

板裂裂纹的形成及其失稳扩展形成岩爆的过程研究。Nemat-nasser 等<sup>[51]</sup>通过理论和试验研究了预制裂隙尖端萌生的裂纹在压应力场中扩展规律，分析了自由边界对裂纹扩展型式的影响，并对研究结论在板裂及岩爆中的应用进行了有益探讨。Dyskin 等<sup>[52]</sup>认为，隧洞开挖导致洞壁围岩压应力集中（见图 11(a)），原生裂隙向着最大压应力方向稳定扩展（见图 11(b)）；自由表面对裂纹的扩展会产生显著的影响，当裂纹扩展尺寸与其至自由表面距离相当时，自由表面的存在使得裂纹产生不稳定扩展，进而产生近似平行于洞壁方向的板裂化破坏的形成（见图 11(c)），岩板折断与围岩突然分离形成岩爆破坏（见图 11(d)）。冯涛等<sup>[53]</sup>在 Dyskin 研究基础上，应用断裂力学原理讨论了岩体的断裂特征，指出裂纹与自由边界发生相互作用可能引起裂纹的失稳扩展，进而裂纹相互连接形成一长的薄片状岩层，由此提出了岩爆发生机制的层裂屈曲模型，该模型可以描述岩体自由表面动力失稳型岩爆。方恩权等<sup>[54]</sup>基于断裂力学机制，研究了自由边界分别为直边、凹形、凸形对近边界原生裂纹扩展稳定性进行了理论研究，并利用 FLAC 数值模拟技术验证理论解，数值结果表明，凹边界情况下裂纹扩展较为稳定，而直边界及凸边界情况裂纹扩展过程由稳定扩展向非稳定扩展逐步发展。谭以安<sup>[55]</sup>从岩石脆性断裂的微细观研究入手，应用 SEM 电镜扫描技术，对岩爆岩石断口进行观察，认为板状劈裂以张性断裂为主，局部存在剪切应力作用；并结合隧洞岩爆观测，提出了围岩“劈裂成板-剪断成块-块、片弹射”的岩爆渐进破坏过程。侯哲生等<sup>[50]</sup>通过对锦屏二级水电站隧洞工程的现场调查，定性分析了深埋完整大理岩张拉型板裂化岩爆的发生机制为：洞壁附近围岩因开挖卸荷发生拉张型板裂化，岩板在切向力的进一步作用下积聚弹性应变能，最后岩板受某种扰动，弹性应变能被突然释放并将岩板抛出形成岩爆。



(a) 压应力集中 (b) 裂隙扩展 (c) 板裂化破坏 (d) 岩爆破坏

图 11 岩爆机制的定性描述<sup>[52]</sup>

Fig.11 Qualitative description of the mechanism of rock burst<sup>[52]</sup>

二是不考虑板裂化破坏的形成过程,在板裂化结构形成后,将板裂化围岩结构形成岩爆视为一种结构的失稳破坏,主要应用弹塑性稳定性理论<sup>[56]</sup>或者突变理论<sup>[57]</sup>开展研究。王敏强等<sup>[58]</sup>针对锦屏长探洞现场岩爆的实际破坏型式,提出了边墙破坏的板梁-脆性弹簧模型,研究了破坏面平行于洞室边墙情况下的岩爆机制和判别方法,并给出了板裂结构发生岩爆的判别式。何满潮等<sup>[34]</sup>利用自行设计的深部岩爆过程试验系统,通过对深部高地应力条件下花岗岩岩爆过程进行试验研究,将岩爆发生过程分为垂直板裂化、垂直板屈曲变形及岩爆破坏,即岩爆板状结构演化模型(如图12所示);并在文献<sup>[59]</sup>中研究了石灰岩岩爆过程的声发射特性。左宇军等<sup>[60]</sup>建立了洞室层裂屈曲岩爆的突变模型,得到了洞室层裂屈曲岩爆在准静态破坏条件下的演化规律,还建立了动力扰动下洞室层裂屈曲岩爆的非线性动力学模型。研究认为,洞室层裂屈曲岩爆与否,不仅取决于岩体的内因,还取决于外部作用力的大小和方式。张晓春等<sup>[61]</sup>分析了煤壁层裂板结构形成及压曲失稳破坏规律,给出了层裂板结构压曲失稳的条件。颜立新等<sup>[62]</sup>采用板壳理论,根据工程结构可靠性分析原理,研究了直立板裂结构岩体的稳定概率分析方程和计算方法。李江腾等<sup>[63]</sup>应用能量原理及突变理论推导了矿柱失稳的临界荷载,提出矿柱发生失稳的屈曲模型。贾蓬等<sup>[64]</sup>采用 RFP 数值模拟软件研究了不同侧压力系数条件下板裂化围岩的失稳破坏特点,侧压力系数对深埋垂直板裂结构岩体中洞室围岩失稳破坏形式有重要影响,边墙岩柱的溃屈失稳破坏发生在侧压力系数小于1的情况下,当侧压力系数大于1时,破坏集中发生在拱顶和隧道底部,边墙岩柱不发生溃屈破坏。

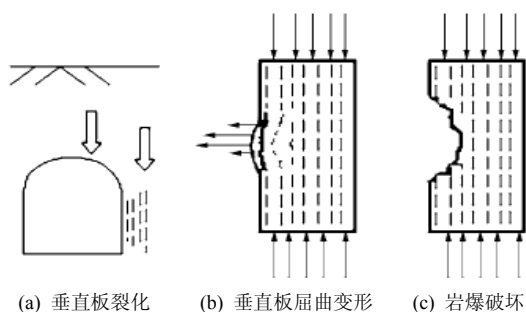


图12 岩爆板状结构演化模型<sup>[34]</sup>

Fig.12 Plate structure evolution models of rockburst<sup>[34]</sup>

Szwedzicki<sup>[49]</sup>研究认为,岩体工程灾害发生前,总是伴有明显的前兆规律和信息,而这些前兆规律也是逐步发展和演化的,准确解译岩体破坏发生前

所特有的前兆信息是进行风险评估和采取防治和挽救措施的关键。从以上众多科研工作者的研究成果可见,围岩板裂化现象与岩爆之间都具有很强的相关性和本质的联系,因此,全面、准确地解译板裂化破坏包含的岩爆前兆信息是合理评估和准确预测深埋隧洞岩爆风险的关键。

## 5 讨 论

### 5.1 板裂化破坏的形成机制

尽管众多学者对围岩板裂化现象的产生原因进行了许多有益研究,但板裂化破坏的形成机制复杂、影响因素众多,笔者认为,要真正意义上揭示工程实践中所遇到的各种不同类型的板裂破坏的形成机制,需要结合多种方法与手段进行深入地研究。

(1) 现场案例统计与分析表明<sup>[1, 10, 15, 50]</sup>,围岩板裂化破坏包含了大量张拉裂纹、少量的剪切裂纹和拉剪裂纹,围岩不同类型的板裂化破坏其形成过程中所处的应力状态不同。笔者认为,对于板裂化破坏形成机制的研究,应从板裂裂纹产生的细观机制入手,结合断裂力学相关理论,分析不同应力状态下板裂裂纹的形成、扩展与贯通规律。

(2) 数值模拟是板裂化破坏研究的重要手段。断裂力学在分析岩石裂纹扩展方面的缺陷性<sup>[65-66]</sup>:其一,岩石具有多晶、各向异性的细观结构,岩石内裂纹的产生与其细观结构密不可分,宏观破裂尖端通常包含大量微裂纹的萌生和扩展,进而导致裂纹扩展过程中产生局部应力场较大的波动,可见,岩石宏观破裂行为受其细观结构特性的影响很大,这是传统的断裂力学所无法描述的;其二,岩石在压应力场作用下,其破坏并非受一条裂纹的不稳定扩展所控制,而是多条裂纹之间的相互作用、贯通,断裂力学对于多条裂纹之间的相互作用所采取的等效处理方法并不能反映裂纹扩展的影响。运用能够考虑岩石细观特性的数值分析软件,如 PFC<sup>[67]</sup>等,进行板裂化破坏过程的细观数值模拟,对认识板裂化破坏形成的细观机制具有重要意义。此外,基于连续介质力学理论的岩石破裂过程的数值模拟<sup>[68-70]</sup>,如细化单元网格、对屈服单元进行退化处理、单元非均质性的考虑,模拟岩石裂纹形成与扩展过程,也不失为一种有效的处理方法。

(3) 重视板裂化破坏的试验研究,尤其是真三轴加、卸载试验,在试验基础上建立不同类型板裂破坏应力准则,进而为建立合理的板裂力学模型提供依据;然而,岩石的加、卸载试验具有破坏的突发性,不利于认识板裂化破坏的一般形成过程和规

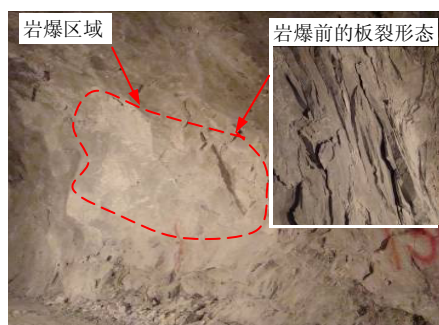


律, 因而能够模拟现场开挖过程的大尺度物理模型试验, 对于认识板裂化破坏的渐进破坏特性、总结板裂化破坏特征、板裂化破坏的影响因素具有重要意义。

## 5.2 板裂化破坏与岩爆的关系

总结前人的研究成果、结合本文的分析, 对于板裂化破坏形成岩爆的一般物理、力学过程, 已经有了定性的认识。然而, 围岩板裂化破坏作为岩爆的一种前兆现象, 其所包含的信息, 需要进行深入地、量化地研究, 例如, 板裂化破坏形态与岩爆之间的关系。通过对锦屏二级水电站众多岩爆案例统计分析发现, 板裂面密集分布、岩板越薄的情况下, 岩爆发生时, 多数为弱至中等岩爆; 而板裂面稀疏、岩板越厚的区域, 发生岩爆时其强度要强很多, 多为中等及中等以上岩爆。如图 13 给出的两个岩爆案例, 图 13(a)中, 隧洞开挖后围岩出现密集分布的不规则板裂, 板裂面张开度为 3~27 mm, 1 d 后发生中等岩爆; 图 13(b)中, 隧洞开挖后围岩出现薄片状曲面板裂, 板裂面闭合, 3 d 后发生强烈岩爆。

此外, 结构面(不同类型、产状、力学性质等)对岩爆的发生具有重要影响, 甚至是岩爆的主导因素。围岩板裂化破坏形成后, 板裂面与不同类型的结构面组合作用下岩爆的发生机制与规律研究, 也应是未来研究的重要内容。



(a) 岩爆案例 1



(b) 岩爆案例 2

图 13 板裂化破坏形态与岩爆

Fig.13 Morphology of slabbing failure and rockburst

## 6 结论及展望

(1) 规律性的板裂化破坏是深埋硬脆性岩体开挖卸荷造成的围岩典型的破坏现象, 其特征在于围岩内形成的多组近似平行于开挖面的裂纹(以张拉型为主)将围岩切割形成板状或层状; 正确认识板裂化破坏现象, 应与其他破坏模式区分开来, 如弯折内鼓、片帮剥落与溃屈破坏、V 型破坏等。

(2) 板裂化破坏的形成机制复杂、影响因素众多, 揭示工程实践中不同类型板裂化破坏的形成机制, 应从板裂裂纹产生的细观机制入手, 结合断裂力学相关理论、细观数值模拟等方法, 分析不同应力状态下板裂裂纹的形成、扩展与贯通规律。通过室内试验建立不同类型板裂化破坏的力学准则, 进而建立合理的力学模型是板裂化破坏研究的关键。加强板裂化破坏的物理模型试验研究, 对于认识板裂化破坏的渐进破坏特性、总结板裂化破坏特征、板裂化破坏的影响因素具有重要意义。

(3) 围岩板裂化破坏现象与岩爆之间具有很强的相关性和本质的联系。围岩板裂化破坏作为岩爆的一种前兆现象, 其所包含的信息, 需要进行深入地、量化地研究, 准确地解译板裂化破坏所包含的岩爆前兆信息是合理评估和准确预测深埋隧洞岩爆风险的关键。板裂面与不同类型的结构面组合作用下, 岩爆的发生机制与规律研究, 也是板裂化破坏与岩爆关系研究的重点和难点问题。

## 参考文献

- [1] 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: 岩爆机制探索. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 106—114.
- [2] 吴世勇, 龚秋明, 王鹤, 等. 锦屏 II 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): 1089—1095.  
WU Shi-yong, GONG Qiu-ming, 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): 1089—1095.
- [3] KAISER P K, TANNANT D D, MCCREAT D R. Canadian rockburst support handbook[M]. Sudbury: Geomechanics Research Centre, 1996.
- [4] 徐林生, 王兰生. 二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 74—76.  
XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng. Research on rockburst character and prevention measure of Erlang Mountain

- highway tunnel[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2003, 16(1): 74—76.
- [5] ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45(3): 275—288.
- [6] 刘宁, 朱维申, 于广明, 等. 高地应力条件下围岩劈裂破坏的判据及薄板力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 3173—3179.
- LIU Ning, ZHU Wei-shen, YU Guang-ming, et al. Research on mechanical model of thin plate and splitting failure criterion for surrounding rock with high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 3173—3179.
- [7] 孙广忠, 张文彬. 一种常见的岩体结构——板裂结构及其力学模型[J]. 地质科学, 1985, (3): 275—282.
- SUN Guang-zhong, ZHANG Wen-bing. A commonly sighted rock mass structure—Slab-rupture structure and its mechanical model[J]. **Chinese Journal of Geology**, 1985, (3): 275—282.
- [8] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [9] FAIRHURST C, COOK N G W. The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighborhood of a surface[C]// Proceedings of the First Congress of International Society on Rock Mechanics. Lisbon: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1966: 687—692.
- [10] 孙广忠, 黄运飞. 高边墙地下洞室洞壁围岩板裂化实例及其力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(1): 15—24.
- SUN Guang-zhong, HUANG Yun-fei. An example of slab-rupture in the surrounding rock of underground excavation with high walls and its mechanical analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1988, 7(1): 15—24.
- [11] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 1994, 9(1): 59—65.
- [12] ORTLEPP W D. Rock fracture and rockbursts: an illustrative study[M]. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997.
- [13] MARTIN C D, MAYBEE W G. The strength of hard-rock pillars[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(8): 1239—1246.
- [14] CAI Ming. 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.
- [15] 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 Chuan-qing, FENG Xia-ting, 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.
- [16] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1251—1275.
- [17] MARTIN C D, READ R S, MARTINO J B. Observations of brittle failure around a circular test tunnel[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(7): 1065—1073.
- [18] LEE M, HAIMSON B C. Laboratory study of borehole breakouts in Lac du Bonnet granite: A case of extensile fracture mechanism[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1993, 30(7): 1039—1045.
- [19] 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.
- [20] 李秀地, 郑颖人, 徐干成. 爆炸荷载作用下地下结构的局部层裂分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 853—855.
- LI Xiu-di, ZHENG Ying-ren, XU Gan-cheng. Spall response analysis of underground structures under blast loads[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(6): 853—855.
- [21] CARTER J P, BOOKER J R. Sudden excavation of a long circular tunnel in elastic ground[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1990, 27(2): 129—132.
- [22] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. 隧洞开挖过程初始地应力动

- 态卸载效应研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1888—1894.
- YAN Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Effect of initial geo-stress dynamic unloading during tunnel excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(12): 1888—1894.
- [23] 肖建清, 冯夏庭, 邱士利, 等. 圆形隧道开挖卸荷效应的动静态解析方法及结果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2471—2480.
- XIAO Jian-qing, FENG Xia-ting, QIU Shi-li, et al. Dynamic and static analytical method of excavation unloading effect in circular tunnel and results analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(12): 2471—2480.
- [24] 张文举, 卢文波, 杨建华, 等. 深埋隧洞开挖卸荷引起的围岩开裂特征及影响因素[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2690—2698.
- ZHANG Wen-ju, LU Wen-bo, YANG Jian-hua, et al. Cracking characteristics and influential factors of surrounding rocks induced by excavation unloading in deep tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(9): 2690—2698.
- [25] 左字军, 马春德, 朱万成, 等. 动力扰动下深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2929—2936.
- ZUO Yu-jun, MA Chun-de, ZHU Wan-cheng, et al. Model test study of mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum tunnelling under dynamic disturbance [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(10): 2929—2936.
- [26] DOWDING C H, ANDERSSON C A. Potential for rock bursting and slabbing in deep caverns[J]. **Engineering Geology**, 1986, 22(3): 265—279.
- [27] STACEY T R, DE JONGH C L. Stress fracturing around a deep level bored tunnel[J]. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**, 1977, 78(5): 124—133.
- [28] STACEY T R. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1981, 18(6): 469—474.
- [29] STACEY T R, HARTE N D. Deep level raise boring prediction of rock problems[C]//International Symposium: Rock at Great Depth. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989: 583—588.
- [30] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(5): 785—812.
- [31] LI Di-yuan, CHARLIE C L, LI Xi-bing. Influence of sample height-to-width ratios on failure mode for rectangular prism samples of hard rock loaded in uniaxial compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2011, 44(3): 253—267.
- [32] 李地元. 高应力硬岩脆性板裂破坏和应变型岩爆机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [33] SAHOURYEH E, DYSKIN A V. Crack growth under biaxial compression[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2002, 69(18): 2187—2198.
- [34] 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 Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian, 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.
- [35] 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.
- [36] ASHBY M F, SAMMIS C G. The damage mechanics of brittle solids in compression[J]. **Pure and Applied Geophysics**, 1990, 133(3): 489—521.
- [37] TAPPONNIER P, BRACE W F. Development of stress-induced microcracks in Westerly granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1976, 13(4): 103—112.
- [38] TANG C A, LIU H, LEE P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—Part I: Effect of heterogeneity[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2000, 37(4): 555—569.
- [39] WU H, POLLARD D D. Possible secondary fracture patterns due to a change in the direction of loading[C]//Proceedings of the Conference on Fractured and Jointed Rock Masses. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 487—493.
- [40] EBERHARDT E. Numerical modeling of three dimension

- stress rotation ahead of an advancing tunnel face[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(4): 499—518.
- [41] ZHANG Chuan-qing, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Layered fractures induced by the principle stress axes rotation in hard rock during tunneling[J]. **Materials Research Innovations**, 2011, 15: 527—530.
- [42] 左宇军, 朱万成, 唐春安, 等. 非均匀介质中应力波反射诱发层裂过程的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(6): 1177—1182.
- ZUO Yu-jun, ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an, et al. Numerical simulation on spallation process of inhomogeneous medium induced by reflection of stress wave[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2006, 37(6): 1177—1182.
- [43] 李夕兵, 陶明, 宫凤强, 等. 冲击载荷作用下硬岩层裂破坏的理论和试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1081—1088.
- LI Xi-bing, TAO Ming, GONG Feng-qiang, et al. Theoretical and experimental study of hard rock spalling fracture under impact dynamic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(6): 1081—1088.
- [44] 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, 26(9): 1477—1480.
- LEI Guang-yu, LU Ai-hong, MAO Xian-biao. Numerical simulation on layered crack and failure of roadway under stress wave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1477—1480.
- [45] 张晓春, 卢爱红, 王军强. 动力扰动导致巷道围岩层裂结构及冲击矿压的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 3110—3114.
- ZHANG Xiao-chun, LU Ai-hong, WANG Jun-qiang. Numerical simulation of layer-crack structure of surrounding rock and rockburst in roadway under dynamic disturbance[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.1): 3110—3114.
- [46] 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 Xue-bin, WU Xiao-lin, PAN Yi-shan. An equivalent continuum model for exfoliation of slabbing phenomenon of surrounding rock of circular tunnel and effects of lateral pressure coefficients[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2395—2402.
- [47] DIEDERICHS M S. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(9): 1082—1116.
- [48] 李晓静. 深埋洞室劈裂破坏形成机制的试验和理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [49] SZWEDZICKI T. Rock mass behaviour prior to failure[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(4): 573—584.
- [50] 侯哲生, 龚秋明, 孙卓恒. 锦屏 II 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 Zhe-sheng, GONG Qiu-ming, SUN Zhuo-heng. 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.
- [51] NEMAT-NASSER S, HORII H. Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1982, 87(B8): 6805—6821.
- [52] DYSKIN A V, GERMANOVICH L N. Model of rockburst caused by cracks growing near free surface[C]// **Rockbursts and Seismicity in Mines**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993: 169—174.
- [53] 冯涛, 潘长良. 硐室岩爆机制的层裂屈曲模型[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 287—290.
- FENG Tao, PAN Chang-liang. Lamination spalling buckling model for formation mechanism of rockburst[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2000, 10(2): 287—290.
- [54] 方恩权, 蔡永昌, 朱合华. 自由边界形状与近边界裂纹相互作用模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3318—3323.
- FANG En-quan, CAI Yong-chang, ZHU He-hua. Research on interaction model of free boundary shape on crack propagation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3318—3323.
- [55] 谭以安. 岩爆岩石断面扫描电镜分析及岩爆渐进破坏过程[J]. 电子显微学报, 1989, 2: 41—48.
- TAN Yi-an. Analysis of fractured face of rockburst with scanning electron microscope and its progressive failure

- process[J]. **Journal of Chinese Electron Microscopy Society**, 1989, 2: 41—48.
- [56] 梁炳文, 胡业光. 弹塑性稳定理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [57] 潘岳, 王志强. 岩体动力失稳的功、能增量——突变理论研究方法[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(9): 1433—1438.  
PAN Yue, WANG Zhi-qiang. Research approach on increment of work and energy—Catastrophe theory of rock dynamic destabilization[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1433—1438.
- [58] 王敏强, 侯发亮. 板状破坏的岩体岩爆判别的一种方法[J]. **岩土力学**, 1993, 14(3): 53—60.  
WANG Min-qiang, HOU Fa-liang. A method to determine rockburst in rockmass with plate-form damage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1993, 14(3): 53—60.
- [59] 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.
- [60] 左宇军, 李夕兵, 赵国彦. 硐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 Yu-jun, LI Xi-bing, ZHAO Guo-yan. A catastrophe model for underground chamber rock burst under lamination spallation buckling[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2005, 36(2): 311—316.
- [61] 张晓春, 缪协兴, 杨廷青. 冲击矿压的层裂板模型及实验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 1999, 18(5): 497—502.  
ZHANG Xiao-chun, MIAO Xie-xing, YANG Ting-qing. The layer-crack-plate model and testing study of the rockburst in mines[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(5): 497—502.
- [62] 颜立新, 康红普, 苏永华. 板裂化地下岩体工程稳定的力学机制及概率分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(增刊): 1938—1941.  
YAN Li-xin, KANG Hong-pu, SU Yong-hua. Mechanics mechanism and probability analysis of blocky rockmass stability in underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(Supp.): 1938—1941.
- [63] 李江腾, 曹平. 硬岩矿柱纵向劈裂失稳突变理论分析[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2006, 37(2): 371—375.  
LI Jiang-teng, CAO Ping. Analysis of pillar stability in hard rock mass by longitudinal splitting based on catastrophe theory[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2006, 37(2): 371—375.
- [64] 贾蓬, 唐春安, 张国联. 深埋垂直板裂结构岩体中硐室失稳破坏机制[J]. **东北大学学报(自然科学版)**, 2008, 29(6): 893—896.  
JIA Peng, TANG Chun-an, ZHANG Guo-lian. Failure mechanism study on vertically stratified rock mass around deep tunnel[J]. **Journal of Northeast University (Natural Science)**, 2008, 29(6): 893—896.
- [65] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1329—1364.
- [66] POTYONDY D O. Simulation stress corrosion with a bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(5): 677—691.
- [67] Itasca Consulting Group Inc. PFC<sup>2D</sup> (particle flow code in 2D) theory and background[R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc., 2008.
- [68] TANG C A, KAISER P K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure part I: Fundamentals[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35(2): 113—121.
- [69] FANG Z, HARRISON J P. Development of a local degradation approach to the modelling of brittle fracture in heterogeneous rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(4): 443—457.
- [70] FANG Z, HARRISON J P. Application of a local degradation model to the analysis of brittle fracture of laboratory scale rock specimens under triaxial conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(4): 459—476.