

# 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制：即时型岩爆

冯夏庭<sup>1</sup>, 陈炳瑞<sup>1</sup>, 明华军<sup>1</sup>, 吴世勇<sup>2</sup>, 肖亚勋<sup>1</sup>, 丰光亮<sup>1</sup>, 周 辉<sup>1</sup>, 邱士利<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. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610051)

**摘要：**论述深埋隧洞岩爆孕育过程的现场原位综合观测试验思路和方法，给出利用该方法观测到的岩爆孕育时空演化规律以及基于观测结果的关于岩爆孕育机制的认知成果。通过一系列现场深埋隧洞开挖过程中的多元信息综合观测试验，揭示深埋隧洞的即时型岩爆(隧洞开挖卸荷效应影响过程中的隧洞掌子面及其附近的围岩，开挖后几小时到几天内发生)的裂纹(萌生、扩展、张开和闭合过程)、变形、弹性波、声发射和微震时空演化规律及其在时空上的分布特征。通过对监测的微震信息进行矩张量分析，认识即时型岩爆中应变型和应变-结构面滑移型 2 类岩爆的孕育机制差异性：前者主要是拉张破裂引起，后者主要是拉张破坏、剪切破裂与拉剪-压剪破裂引起，剪切破裂主要沿着硬性结构面发生，形成爆坑边界。该研究成果为针对时空演化规律的深埋隧洞岩爆的预测和动态调控提供了重要基础。

**关键词：**岩石力学；岩爆；即时型岩爆；应变型岩爆；孕育规律；孕育机制；微震；深埋隧洞

**中图分类号：**TU 45

**文献标识码：**A

**文章编号：**1000-6915(2012)03-0433-12

## EVOLUTION LAW AND MECHANISM OF ROCKBURSTS IN DEEP TUNNELS : IMMEDIATE ROCKBURST

FENG Xiating<sup>1</sup>, CHEN Bingrui<sup>1</sup>, MING Huajun<sup>1</sup>, WU Shiyong<sup>2</sup>, XIAO Yaxun<sup>1</sup>, FENG Guangliang<sup>1</sup>,  
ZHOU Hui<sup>1</sup>, QIU Shili<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. Ertan Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China)

**Abstract :** The ideas and methodology for the in situ monitoring of rockburst preparation of deep tunnels was described firstly. The time and space evolution law of immediate rockburst observed, which occurred usually during or after excavation immediately and affected mainly by excavation unloading effectiveness, was analyzed. Based on a series of in situ monitoring of deep tunnels, process of crack initiation, propagation, opening and closing, evolution of wave velocity, deformation, acoustic emission and microseismicity were observed. Based on moment tensor analysis of the monitored microseismicity during the excavation of deep tunnels, the difference of mechanism of strain rockburst and strain-structure slip rockburst was found. The former was mainly from tensile cracking but the latter mainly from tensile cracking, shear cracking, and tensile-shear/compressive shear cracking which was from shearing of stiff structures and formed boundary of rockburst pit. The results are used as a guide of prediction of rockburst and its dynamic control based on evolution of the monitored microseismicity and other information.

**Key words :** rock mechanics ;rockburst ;immediate rockburst ;strain rockburst ;evolution law ;evolution mechanism ; microseismicity ; deep tunnel

**收稿日期：**2011-10-08；**修回日期：**2011-12-02

**基金项目：**国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732006)；国家自然科学基金资助项目(50909092)；湖北省自然科学基金项目(2009CDB120)

**作者简介：**冯夏庭(1964-)，男，博士，1986年毕业于东北工学院采矿工程专业，现任研究员、博士生导师，主要从事岩石力学智能分析方法及其应用方面的教学与研究工作。xtfeng@whrsm.ac.cn

# 1 引言

岩爆孕育的规律和机制是岩爆预测与动态调控的基础。只有清楚岩爆的孕育规律和机制，才能更有针对性地对其进行预测和调控。岩爆的孕育是从岩体的破裂开始的，原位观测试验是观察岩体破裂过程以及岩爆孕育过程的一种有效手段。如：R. S. Read<sup>[1]</sup>在加拿大 AECL 地下实验室采用微震、声发射、应力、变形和声波综合手段观测隧洞围岩的片帮形成过程；R. J. Durrheim 等<sup>[2]</sup>在南非通过实时监测微震活动性，研究深部金矿开采过程中岩爆孕育规律；我国的多个煤矿、金属矿山中，采用了微震监测开采活动诱发的矿岩体破坏、岩爆、冲击地压过程<sup>[3]</sup>。

从发生的时间来看，岩爆分为即时型岩爆和时滞型岩爆。根据发生的条件和机制，岩爆可分为应变型岩爆、应变-结构面滑移型岩爆和断裂滑移型岩爆。不同类型的岩爆的孕育规律和机制不同。目前为止，这些不同类型岩爆的孕育规律和机制尚不清晰，这给岩爆的预测和动态调控带来了极大的不确定性。本文首先论述了关于深埋隧洞岩爆孕育规律和机制的现场原位综合观测研究的基本思路，重点介绍已经观测到的深埋隧洞开挖过程中即时型岩爆(包括应变型岩爆和应变-结构面滑移型岩爆)孕育的时空演化规律与机制，讨论了未来一段时间内岩爆研究的重点。关于时滞型岩爆的孕育规律和机制另文专述。

## 2 深埋隧洞岩爆孕育规律和机制现场原位综合观测研究的基本思路

深埋隧洞开挖过程中的多元信息综合观测试验是研究深埋隧洞开挖诱发岩爆的一种直接手段。现阶段可以采用如图 1 所示的观测手段综合观测岩爆孕育的规律，主要包括微震<sup>[4]</sup>、声发射<sup>[5]</sup>、数字钻孔摄像<sup>[6]</sup>、声波、变形<sup>[7]</sup>等。在监测设施布置之前，需要采用宏观地质判断和数值分析等手段初步估计岩爆发生的可能位置，以利于将监测设施布置在可能观测到发生岩爆的位置，用岩爆倾向性指标 RVI 可以估计岩爆爆坑的深度<sup>[8]</sup>。综合分析后，布置多手段监测设施，最大限度地获得更多的有用信息。

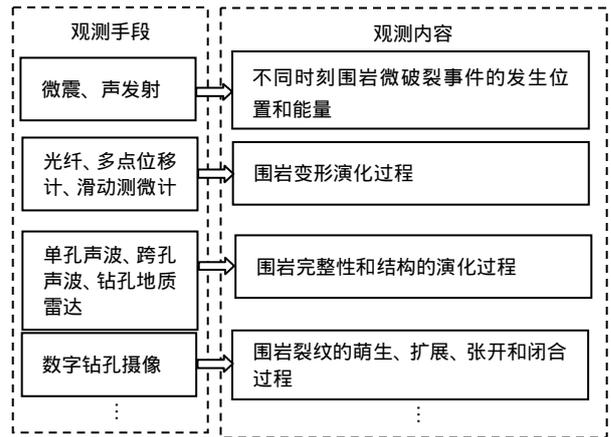


图 1 深埋隧洞岩爆现场原位综合观测试验手段和内容  
Fig.1 Way of comprehensive in situ observation of gestation process of rockburst

例如，隧洞微震监测与矿山微震监测的不同点在于微震震源可能位于微震传感器阵列之外，应考虑这些特殊性以获得可靠的监测结果<sup>[4]</sup>。

为了更好地掌握岩爆孕育规律和机制，需要获得以下几方面的信息：

(1) 主要地质信息。包括隧洞所在部位的地质构造分布情况，即褶皱及其核部和翼部、层理、硬性结构面、断层等；地下水情况以及隧洞所在区域地质构造情况等。

(2) 地应力场的分布信息。包括 3 个主应力的方向和大小。

(3) 隧洞工程信息。包括开挖方法(钻爆法、TBM 法)与断面尺寸、隧洞支护情况、隧洞埋深与上覆岩层地形地貌。

(4) 岩爆发生的主要信息。包括爆坑深度、形态以及边界是否由结构面控制形成；岩爆产生飞出的岩片和岩块距爆坑的距离，岩爆发生时的声音，岩爆发生引起周边物体的破坏，岩爆产生的岩片和岩块的形状、厚度及其分布；爆出的岩片 SEM 扫描等。

## 3 深埋隧洞即时性应变型岩爆的主要特征

所谓即时型岩爆，是指开挖卸荷效应影响过程中，完整、坚硬围岩中发生的岩爆。深埋隧洞发生岩爆的位置主要有：施工过程中的隧洞掌子面、距掌子面 0~30 m 范围内的隧洞拱顶、拱肩、拱脚、

侧墙、底板以及隧洞相向掘进的中间岩柱等，多在开挖后几个小时或 1~3 d 内发生(某深埋隧洞爆破开挖一天 2 个循环进尺 4~8 m)。深埋隧洞的某一洞段可能发生 1~2 次岩爆，也可能连续发生多次不同等级或烈度的岩爆，如图 2 所示。开始时轻微~中等岩爆，然后极强岩爆。

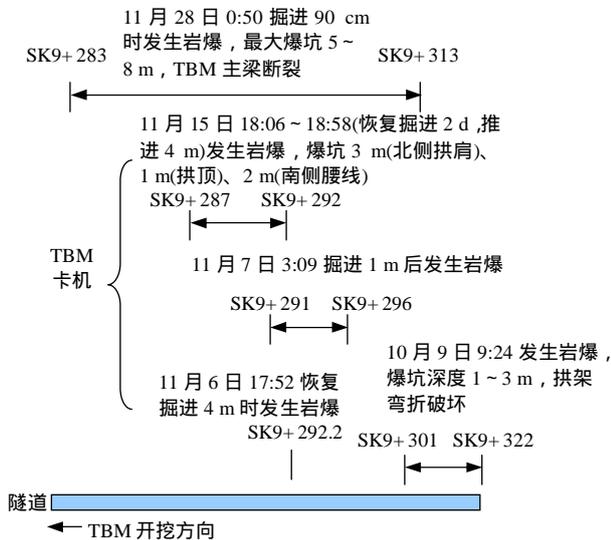


图 2 某深埋隧洞在某一段内开挖过程中连续发生多次岩爆(2009 年)

Fig.2 Several rockbursts occurred in a deep tunnel during the excavation of TBM(in 2009)

在深埋隧洞开挖过程中，经常可观察到 2 种类型的即时型岩爆：即时性应变型岩爆和即时性应变-结构面滑移型岩爆。它们的时空特征各有所不同。图 3 为几个典型的即时性应变型岩爆实例照片，其主要特征为：发生在完整、坚硬、无结构面的岩体中；爆坑岩面非常新鲜，爆坑形状有“浅窝型”(见图 3(a), (b)和(c))、长条“深窝型”和“V”字型(见图 3(d), (e))等。不同烈度的岩爆爆出的岩片大小不同。一般地，岩爆烈度或等级越大，爆坑深度越大、爆出的岩片就越大(厚)、爆出的岩片弹射的距离也越大，岩体破坏的声响也就越大。



(a) 拱顶



(b) 左拱肩(面向掌子面)



(c) 右侧边墙(面向掌子面)



(d) 右侧边墙(面向掌子面)



(e) 起拱线以下南侧边墙

图 3 典型的即时性应变型岩爆的实例照片

Fig.3 Typical example photos of immediate strain rockburst occurred in deep tunnel

某深埋隧洞即时性应变-结构面滑移型岩爆的主要时空特征如图 4 所示。一般地，此类型的岩爆发生在坚硬、含有零星结构面或层理面(多为 1 条，偶有不同产状的 2 条或几条 III, IV 级闭合的硬性结构面或层理面)的岩体中，闭合的硬性结构面(或层理面)控制了岩爆爆坑的底部边界或侧部边界(见图 4)，控制岩爆爆坑侧部边界的结构面处有陡坎，



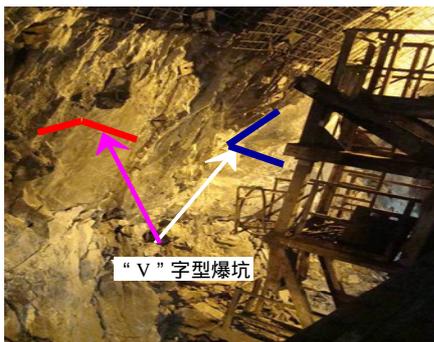
(a) 结构面形成倒立的岩爆爆坑的右侧平直边界



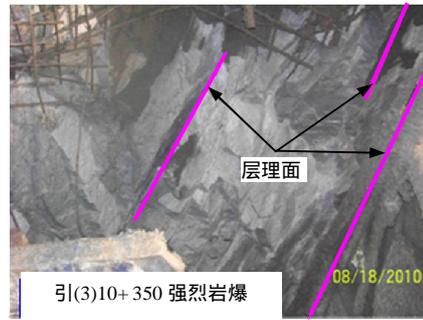
(b) 结构面形成掌子面岩爆爆坑的右侧平直边界



(c) 结构面形成岩爆爆坑的上部边界



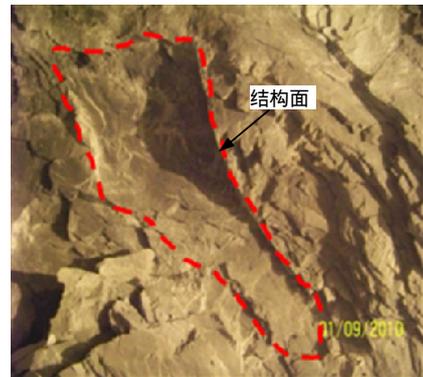
(d) 结构面形成岩爆爆坑上、下边界



(e) 层理面形成似台阶状岩爆爆坑(平直陡坎)



(f) NWW 结构面形成岩爆爆坑的下部平直边界



(g) 结构面形成爆坑的右侧边界层理面形成爆坑右底部边界

图 4 某深埋隧洞多次发生的即时性应变-结构面滑移型岩爆典型案例

Fig.4 Typical examples of immediate strain-structure slip rockbursts occurred in deep tunnels

也有结构面在爆坑中间部位穿过(见图 4(f))。与即时性应变型岩爆相比,一般情况下,即时性应变-结构面滑移型岩爆烈度或等级要高一些,形成的爆坑及造成的危害要大一些。

### 4 深埋隧洞即时型岩爆孕育的微震演化规律

根据数字钻孔摄像的结果,可以直接观察到岩爆孕育过程中裂纹是如何萌生、扩展、张开和闭合的<sup>[6]</sup>:高应力下在裂纹萌生之前,岩体发白;裂纹萌生后,随着其扩展、贯通、张开及一定程度闭合,原生裂隙也会发生张开、扩展及一定程度闭合。

从大量的岩爆实例中获得了实时微震监测信息，对其进行统计分析，得出的中等即时型岩爆孕育过程中微震事件的时空演化规律及累积视体积和能量指数随时间的演化规律如图 5~10 所示。需说明，图 5~7 对应某中等即时型岩爆，图 8~10 对应 1-P-E 中等即时型岩爆，图 7，10 横坐标日期的起点时间为 0:00。从图 5~10 可以看出：等级较高(强烈及中等)的深埋隧洞即时型岩爆在孕育到发生的过程中，一般具有如下微震时空演化规律：

(1) 微震事件持续增加，位置不断集中，无明显的“平静期”(见图 5, 6, 8, 9)。在“平静期”阶段，没有或极少微震事件发生。

(2) 微震事件的能量释放呈现持续维持高位突然降低(随后维持较低水平)突然增加的变化趋势。根据图 7 和 10 所示的能量指数(指某一震级微震事件的能量与其平均能量比值)的演化规律，能量维持较低水平时，这一阶段持续很短或一段时间，具体与应力水平、岩性、现场开挖、支护情况有关。

(3) 累积视体积呈现持续增加(变化较小)突增趋势(见图 7, 10)。视体积指发生非弹性变形的岩体体积。累积视体积持续增加阶段的持续时间很短或一段时间，具体与应力水平、岩性、现场开挖、支护情况有关。

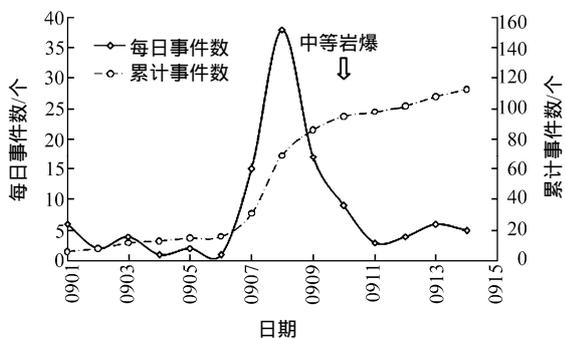


图 5 某中等即时型岩爆孕育过程中微震事件随时间演化规律(2010 年)

Fig.5 Evolution rule of microseismic events with time during pregnant process of a medium immediate rockburst (in 2010)

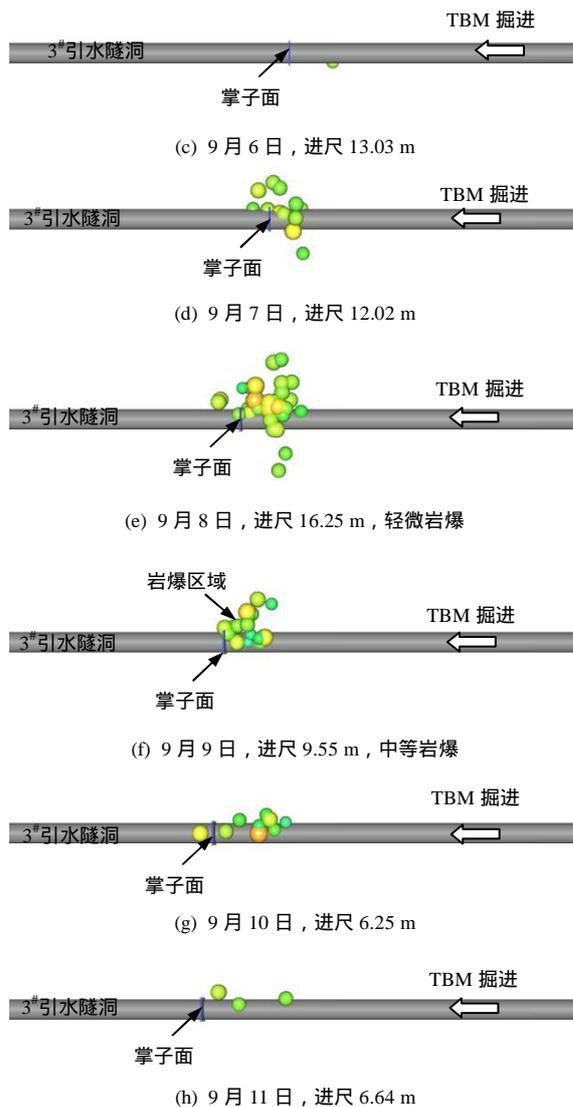
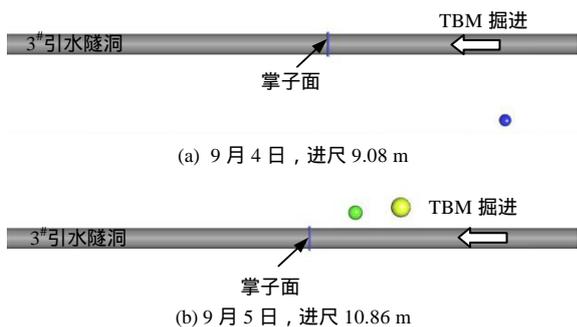


图 6 某中等即时型岩爆孕育过程中微震事件空间分布(2010 年)

Fig.6 Space distribution of microseismic events during pregnant process of a medium immediate rockburst (in 2010)

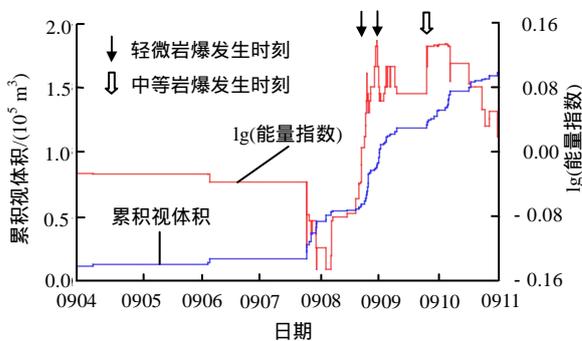


图 7 某中等即时型岩爆孕育过程累积视体积和能量指数随时间的演化规律(2010 年)

Fig.7 Evolution rule of accumulative apparent volume and energy index with time in pregnant process of a medium immediate rockburst in 2010

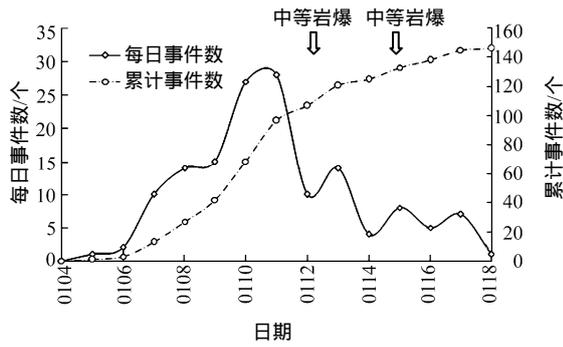


图 8 1-P-E 中等即时型岩爆孕育过程微震事件随时间演化规律(2011 年)

Fig.8 Evolution rule of microseismic events with time in the pregnant process of a medium immediate rockburst in 1-P-E tunnel(in 2011)

高应力下开挖卸荷作用，使高压、高储能的深埋隧洞围岩应力进一步集中和能量进一步聚集，应

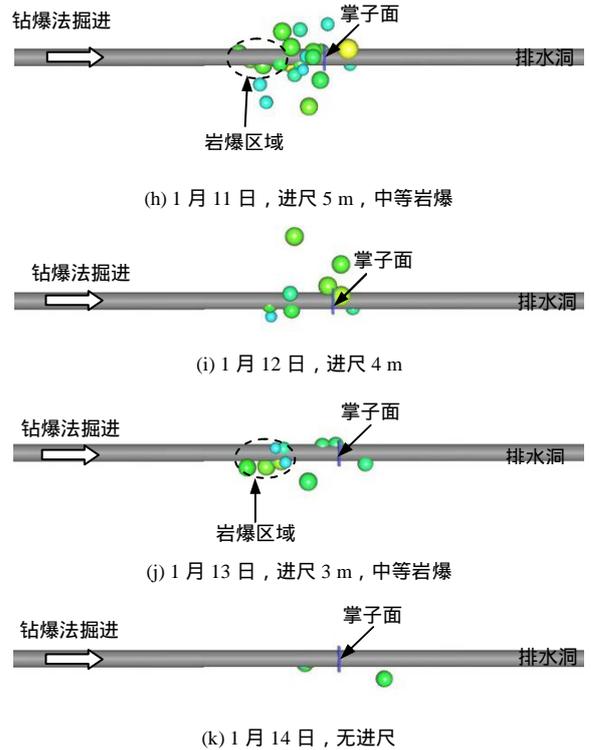
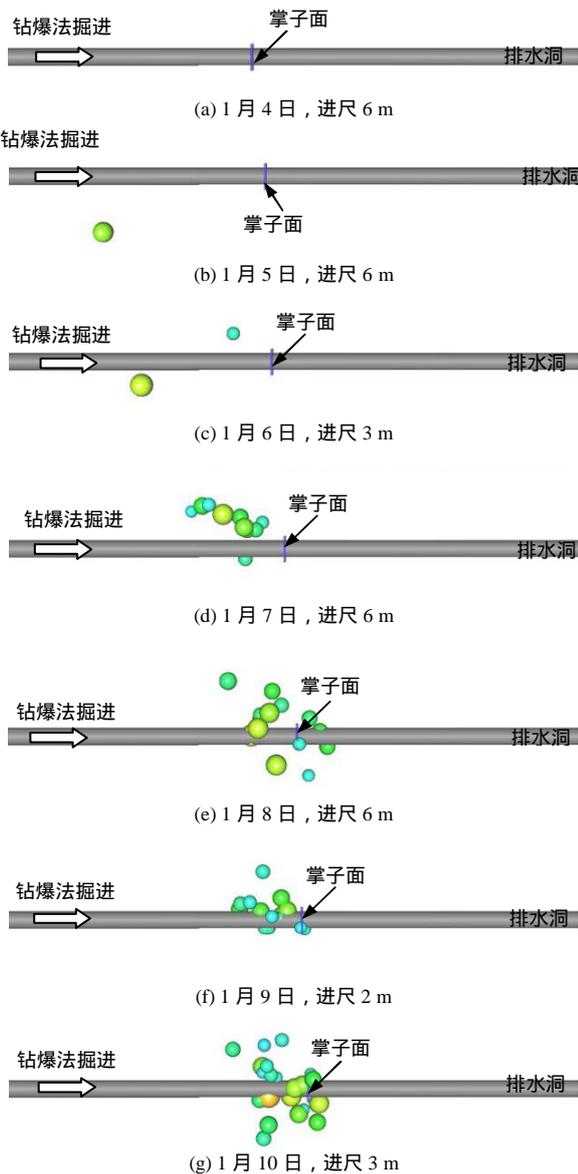


图 9 1-P-E 中等即时型岩爆孕育过程中微震事件空间分布(2011 年)

Fig.9 Space distribution of microseismic events in pregnant process of a medium immediate rockburst in 1-P-E tunnel(in 2011)

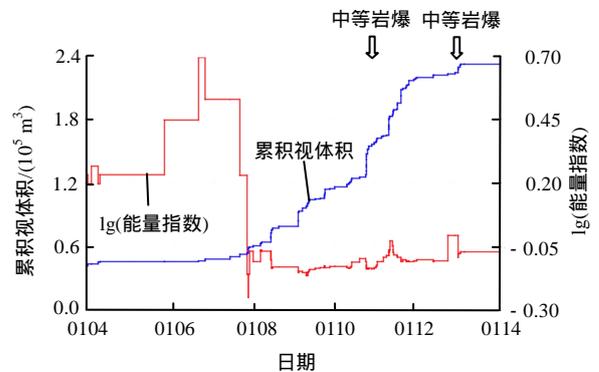


图 10 1-P-E 中等即时型岩爆孕育过程累积视体积和能量指数随时间的演化规律(2011 年)

Fig.10 Time evolution laws of cumulative apparent volume and energy index for a medium immediate rockburst in 1-P-E tunnel(in 2011)

力的释放和能量的耗散导致不同部位岩体破裂，微震事件发生，从而非弹性变形持续增加；而后，储存围岩能量水平降低，使能量相对较低的微震事件发生，非弹性变形持续增加。应力集中不断向围岩内部转移，不断产生新的岩体破裂，微震事件不断发生。小破裂事件形成的裂纹会在岩体内发生贯通，从而产生能量高的大破裂事件，出现大裂纹，

最终导致岩块或岩片弹射出去，引起岩爆发生。

深埋隧洞开挖过程中，掌子面不断向前推进，应力的调整、集中与释放以及能量的聚集、耗散与释放也随之发生变化。掌子面的开挖和向前推进又进一步加剧能量的聚集，从而产生新的破裂，能量释放的增加和非弹性变形的突增，最终导致岩爆岩块或岩片弹射出去。

上述这些特点可从图 6 中的每日进尺及其微震事件数变化反映出来。

### 5 深埋隧洞即时型岩爆的孕育机制

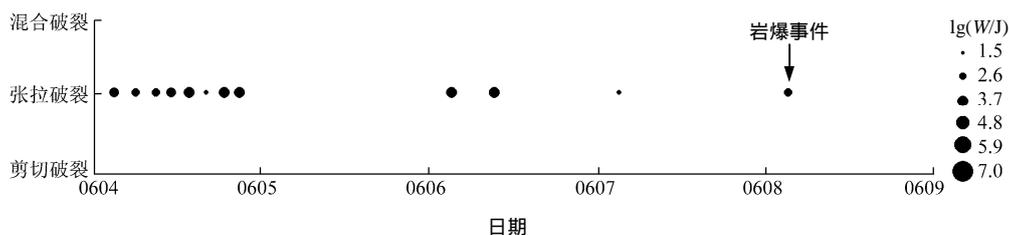
针对深埋隧洞微震监测特点，提出了基于微震监测信息，采用矩张量分析方法<sup>[9]</sup>研究其岩爆机制。利用该方法对实时监测到的微震信息进行分析，获得了即时型岩爆的孕育机制：岩爆孕育过程中经历了拉张破坏、剪切破坏、拉剪混合型破坏或(和)压剪混合型破坏。

#### 5.1 深埋隧洞即时性应变型岩爆的孕育机制

对岩爆及其附近区域(如爆坑边界以外各增加 10 m 的区域)内监测到的微震事件进行矩张量分析，结果表明，即时性应变型岩爆孕育过程中，主要是拉张破坏形成的裂纹，偶尔有剪切和压剪、拉剪混合型破坏裂纹产生(见图 11)，图 11 中，圆球代表实际微震事件，圆球越大表示微震事件释放的能量  $W$  就越大，反之亦然。图 3(a)所示的岩爆，为轻微即

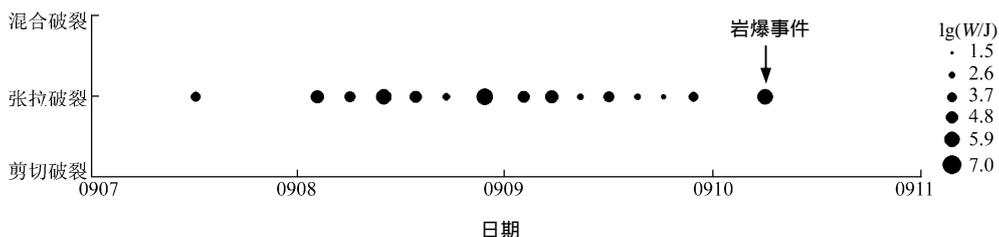
时性应变型岩爆(最大爆坑深度 20 ~ 35 cm)，于 2010 年 6 月 8 日 00:32:11 在 3<sup>#</sup>TBM 引(3) K11+ 080 ~ 090 处发生，该岩爆几乎都是因拉张破坏导致的(见图 11(a))。图 3(b)所示的岩爆，为轻微 ~ 中等即时性应变型岩爆(爆坑高 1.0 ~ 2.3 m，最大爆坑深约 0.6 m，截至 2011 年 5 月 8 日 8 点，掌子面桩号为：引(4) K8+ 583，岩爆距离掌子面 15 ~ 33 m)，于 2011 年 5 月 8 日凌晨在引(4) K8+ 550 ~ 568 处北侧边墙发生，其主要是由拉张破坏形成裂纹、偶尔有剪切和拉剪混合型裂纹产生的。图 3(c)所示的中等岩爆，在 3<sup>#</sup>东端 TBM 掘进段内，于 9 月 10 日凌晨在引(3)K10+ 138.99 ~ 143.43 区段内发生，该岩爆区段位于刚离开 TBM 掘进护盾外，主要是拉张破坏引起的(见图 11(b))。图 3(e)所示的岩爆，为起拱线以下南侧边墙发生的 2 次中等岩爆，均发生在辅引 1 排水洞向东钻爆法掘进洞段内，分别发生于 1 月 11 日下午在 SK8+ 709 ~ 703 段及 1 月 13 日下午在 SK8+ 712 ~ 718 段。11 ~ 13 日钻爆法掘进桩号为：SK8+ 706 ~ 718，2 次岩爆位置均为紧靠掌子面，仅出现拉张事件，没有出现剪切和压剪、拉剪事件(见图 11(c))。

上述表明，即时性应变型岩爆主要是在高应力开挖卸荷作用下，隧洞完整、坚硬围岩产生拉裂破坏，形成一排甚至多排的新生拉裂纹(与隧洞围岩面呈一定小角度或零角度相交)引起的。这些新生的



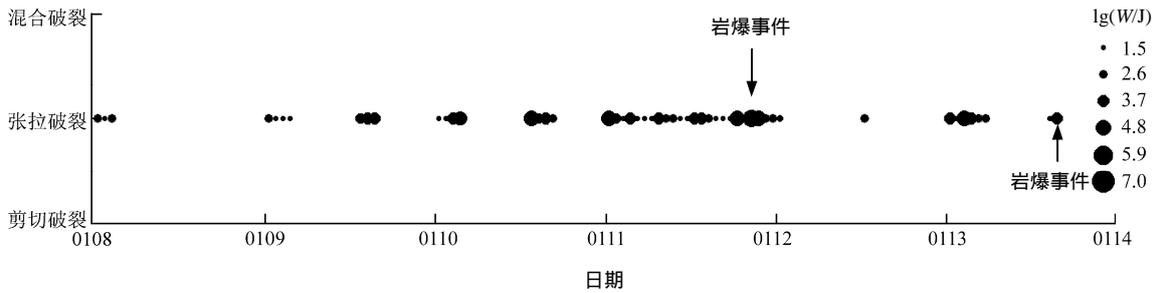
注：微震事件发生的时刻(从左至右)依次为：6 月 4 日：17:45:23, 17:48:35, 17:50:23, 17:52:37, 18:13:42, 20:24:34, 21:03:16, 22:15:11；6 月 6 日：01:27:58, 02:48:47；6 月 7 日：01:10:17；6 月 8 日：00:32:11。

(a)



注：微震事件发生的时刻(从左至右)依次为：9 月 7 日：22:48:20；9 月 8 日：19:07:31, 19:13:42, 19:29:35, 19:44:29, 20:17:03, 20:17:26；9 月 9 日：00:51:26, 01:13:46, 07:55:41, 20:07:20, 20:32:25, 20:52:16, 21:54:45；9 月 10 日：00:35:25。

(b)



注：微震事件发生的时刻(从左至右)依次为：1月8日：09:42:52，10:09:28，10:48:08；1月9日：02:14:28，07:44:57，07:51:44，08:34:04，17:47:20，17:47:25，17:53:35，18:12:18；1月10日：07:25:07，08:27:39，10:02:42，10:23:26，19:08:39，19:08:41，19:08:43，19:08:48，19:09:42，22:09:00，23:44:03；1月11日：00:57:23，01:14:08，01:31:21，08:28:17，08:28:31，08:29:06，08:29:27，08:29:34，08:29:36，08:33:03，08:35:54，08:55:31，09:01:39，09:17:35，10:32:38，11:02:08，11:10:38，11:21:33，13:31:18，13:34:07，15:38:45，15:57:20，16:47:02，20:27:04；1月12日：11:37:17，19:56:54；1月13日：01:55:59，01:56:51，01:57:50，03:13:43，11:53:43，11:54:01，12:40:17，16:44:04，18:07:13。

(c)

图 11 某深埋隧洞几个即时性应变型岩爆的破坏类型演化机制(2010 ~ 2011 年)

Fig.11 Evolution mechanism of several typical immediate strain rockbursts in deep tunnels(in 2010 – 2011)

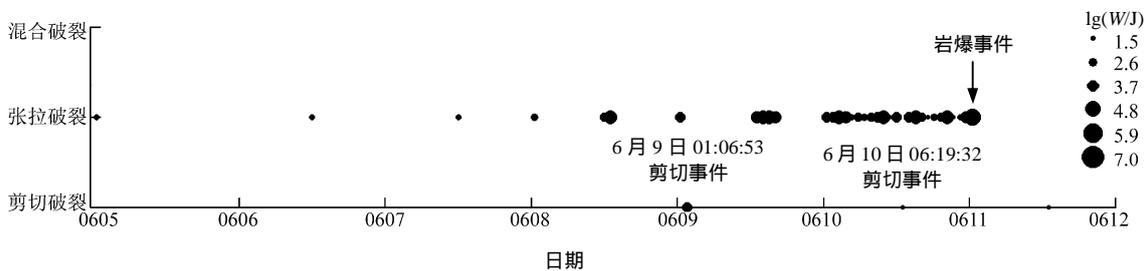
拉裂纹不断扩展、贯通以及张开，靠近隧洞壁面的裂纹会先形成一定厚度的岩块或岩片。这些新生裂纹形成的岩块或岩片呈突出状，该突出状的岩块或岩片在剩余能量的作用下向临空面弹射出来。岩块或岩片飞出后，使隧洞围岩出现新的自由面，靠近该自由面的隧洞围岩内部新生裂纹与该自由面逐渐形成新的岩块或岩片而向外弹射。于是，岩爆爆坑不断向围岩内部扩展，最终形成“浅窝型”或“V”字型爆坑。这种应变型岩爆形成过程的概念详见 X.T. Feng 等<sup>[10-11]</sup>的研究。

### 5.2 深埋隧洞即时性应变 – 结构面滑移型岩爆的孕育机制

即时性应变 – 结构面滑移型岩爆的孕育过程

为：较少的拉裂纹产生 剪切事件发生 一系列拉裂纹事件发生 剪切事件发生 多个拉裂事件发生 岩爆发生。例如：

(1) 2010 年 6 月 11 日 00:27:41，在 3<sup>#</sup>TBM 引(3) K11+045 ~ 054 南侧边墙至拱肩发生强烈岩爆(最大爆坑深度 1.0 ~ 1.2 m)，该岩爆的孕育机制为：由于高应力环境下开挖卸荷作用，开始产生较少的拉裂纹，从而引起高度压缩的硬性结构面发生剪切滑移，发生剪切事件，接着发生一系列的拉裂事件，然后发生剪切事件以及多个拉裂事件，直至岩爆发生。岩爆发生后还产生了多个拉裂事件，如图 12 所示。发生这种现象的原因可能是岩爆后岩体储存的能量释放或因外界扰动形成新的岩石破裂。该岩爆不同

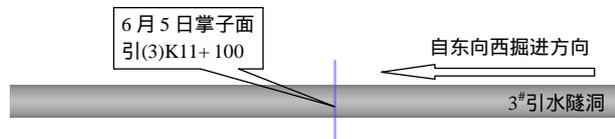


注：微震事件发生的时刻(从左至右)依次为：6月5日：11:42:37；6月6日：15:23:38，23:48:01；6月7日：12:41:15；6月8日：04:12:13，17:42:53，18:16:13，18:51:14；6月9日：00:08:24，01:06:54，17:05:54，18:06:55，20:44:19，21:06:26，21:30:43，22:51:16，23:16:12，23:42:30；6月10日：00:08:18，00:57:23，02:19:30，02:30:18，02:36:36，03:55:12，04:02:53，04:18:33，04:49:33，04:55:49，05:37:18，05:44:27，06:19:33，06:30:04，06:32:26，07:23:45，11:08:08，14:13:53，15:28:04，15:38:39，18:09:13，18:13:36，22:43:34；6月11日：00:27:41。

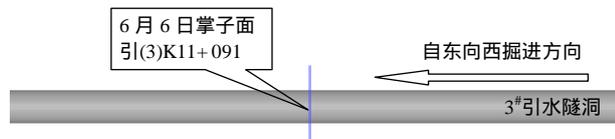
图 12 某强岩爆发生后还产生了多个拉裂事件(2010 年)

Fig.12 Several tensile events occurred after occurrence of main strong rockburst(in 2010)

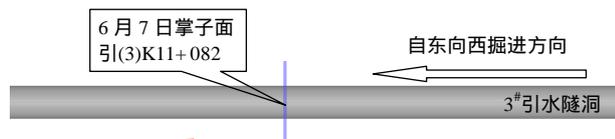
时刻裂纹事件发生的大致位置和方位见图 13，由于微震震源事件定位存在一定误差，裂纹事件发生的位置只是大致位置，但从图中还是能大致看出爆坑的形成过程。



(a) 2010 年 6 月 5 日掌子面和微震破裂面情况



(b) 2010 年 6 月 6 日掌子面和累积微震破裂面情况



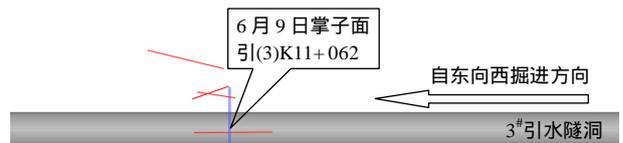
(c) 2010 年 6 月 7 日掌子面和累积微震破裂面情况



(d) 2010 年 6 月 8 日掌子面和累积微震破裂面情况



(e) 2010 年 6 月 9 日掌子面和 6 月 9 日 01:06:54 剪切微震事件及其出现以前累积微震破裂面情况



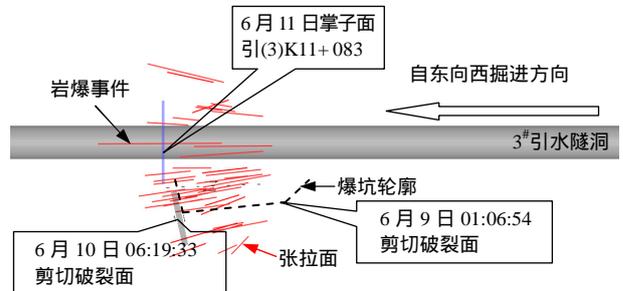
(f) 2010 年 6 月 9 日掌子面和累积微震破裂面情况



(g) 2010 年 6 月 10 日掌子面和 6 月 10 日 06:19:33 剪切微震事件及其出现以前累积微震破裂面情况



(h) 2010 年 6 月 10 日掌子面和累积微震破裂面情况



(i) 2010 年 6 月 11 日 0:30 左右岩爆时掌子面和累积微震破裂面以及由破裂面得到的爆坑轮廓情况

图 13 强烈岩爆孕育过程中的拉裂面和剪切面形成过程 (对应图 12 所示岩爆)

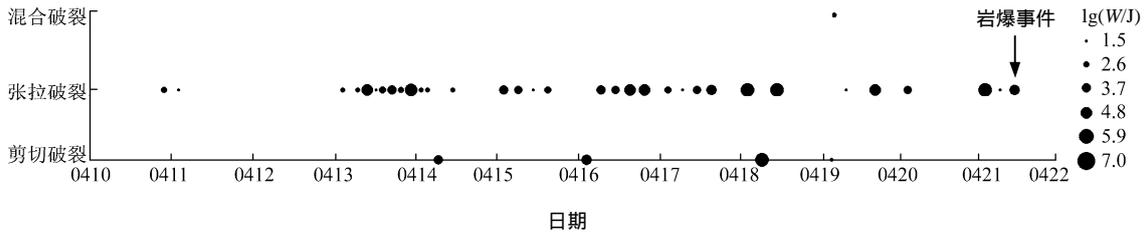
Fig.13 Formation processes of tension surface and shear surface in evolution process of fracture for strong rockburst(corresponding to rockburst shown in Fig.12)

(2) 如图 14 所示，2011 年 4 月 21 日 23:01:05 3-3-W 掌子面引(3) K6+125~130 右侧边墙强烈岩爆(最大爆坑深约 1 m)，截至 2011 年 4 月 21 日 8:00，3-3-W 掌子面桩号为：引(3) K6+106，距离岩爆 19~22 m。该岩爆发生过程为：开始是不同能量的多个拉裂事件发生，经历了多个拉裂事件

一个剪切事件发生 多个拉裂事件发生 一个剪切事件发生 多个拉裂事件发生 一个小剪切事件发生 较少拉裂事件发生 拉剪或压剪复合事件发生 多个拉裂事件发生 岩爆发生形成爆坑(见图 15(a)).

(3) 如图 16 所示, 2011 年 4 月 27 日 22:20:26, 3-3-W 掌子面引(3) K6+074~079 拱肩强烈岩爆。截至 2011 年 4 月 27 日 8:00, 3-3-W 掌子面桩号为: 引(3) K6+074, 岩爆发生在掌子面附近。

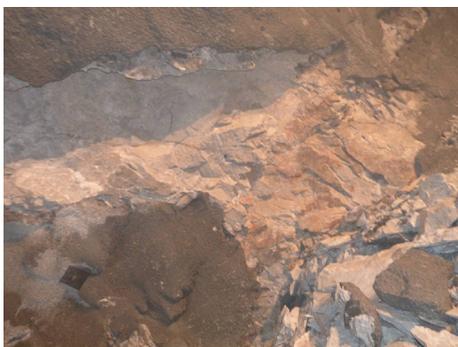
该岩爆发生的过程为: 开始是不同能量的多个拉裂事件发生, 经历了多个拉裂事件 一个较大剪切事件发生 一个较大的拉裂-剪切复合事件发生 多个拉裂事件发生 一个较小的拉裂-剪切复合事件发生 岩爆发生, 其形成的爆坑如图 15(b)所示。这与笔者所在课题组的隧道现场观测试验所观察到的应变-结构面滑移型岩爆的裂纹演化过程与机制



注: 微震事件发生的时刻(从左至右)依次为: 4 月 10 日: 02:54:02; 4 月 11 日: 08:31:31; 4 月 13 日: 12:27:34, 12:27:41, 12:29:52, 12:30:01, 12:36:54, 15:36:43, 16:00:26, 16:33:01, 20:46:14; 4 月 14 日: 05:00:18, 05:00:58, 18:35:04; 4 月 15 日: 04:48:48, 12:02:33, 12:45:03, 12:58:21; 4 月 16 日: 09:56:42, 09:58:00, 09:58:02, 11:17:12, 22:09:37; 4 月 17 日: 04:10:03, 15:47:40, 15:48:48, 21:50:22; 4 月 18 日: 02:11:48, 04:12:05, 16:08:08; 4 月 19 日: 01:11:21, 01:43:56, 01:47:18, 11:57:58; 4 月 20 日: 12:44:56; 4 月 21 日: 02:48:19, 13:35:41, 23:01:05。

图 14 某强烈岩爆的孕育机制(2011 年)

Fig.14 Evolution mechanism of a strong rockburst(in 2011)



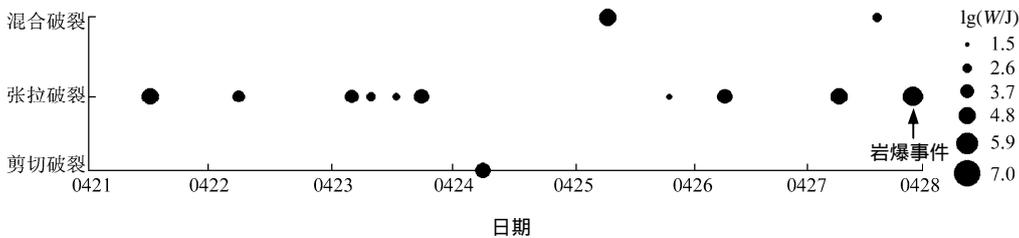
(a) 对应于图 14



(b) 对应于图 16

图 15 不同岩爆的爆坑

Fig.15 Rockburst pits of two different rockbursts



注: 微震事件发生的时刻(从左至右)依次为: 4 月 21 日: 08:49:17; 4 月 22 日: 09:26:49; 4 月 23 日: 12:35:23, 12:35:54, 17:43:16, 18:03:18; 4 月 24 日: 13:28:10; 4 月 25 日: 02:15:29, 02:18:09; 4 月 26 日: 16:23:26; 4 月 27 日: 07:22:39, 18:41:43, 22:20:26。

图 16 某岩爆的孕育机制(2011 年)

Fig.16 Evolution mechanism of a rockburst(in 2011)

一致<sup>[6]</sup>。裂纹的萌生是由于高应力环境下开挖卸荷作用下，坚硬岩体产生拉伸破裂和高度压缩的硬性结构面发生剪切滑移，拉张破裂、剪切滑移以及拉剪滑移引起裂纹张开、扩展，而压剪作用引起裂纹闭合。

上述表明，即时性应变-结构面滑移型岩爆主要是在高应力环境下开挖卸荷作用下，隧洞完整、坚硬围岩产生拉裂破坏，形成一排或多排的新生拉裂纹(与隧洞围岩壁面呈一定小角度或零角度相交)而引起的。由于开挖卸荷作用，高应力环境下高度压缩的硬性结构面产生剪切滑移破坏，形成新生剪切裂纹。这些新生拉裂纹不断扩展甚至贯通，也可能张开及闭合<sup>[6]</sup>，与新生剪切裂纹一起，在靠近隧洞壁面处先形成一定厚度的岩块或岩片。新生拉裂纹形成的岩块或岩片呈突出状，此突出状的岩块或岩片在剩余能量的作用下向临空面弹射出来。岩块或岩片飞出后，使隧洞围岩出现新的自由面，靠近该自由面的隧洞围岩内部新生裂纹与该自由面逐渐形成新的岩块或岩片而向外弹射。于是，岩爆爆坑不断向围岩内部扩展，最终形成由硬性结构面控制的“陡坎”和由新生拉裂纹面组成的“浅窝-结构面陡坎型”爆坑。这种应变-结构面滑移型岩爆形成过程详见 X. T. Feng 等<sup>[10-11]</sup>的研究。

## 6 讨论与结论

通过对锦屏 II 级水电站 1 900 ~ 2 525 m 埋深处 4 条引水隧洞和施工排水洞(长度累计约 10 km, 桩号分别为 K5+500 ~ K6+230 和 K7+374 ~ K9+100)大理岩洞段 TBM 和钻爆法开挖过程中发生的上百个岩爆实例的综合分析(包括微震信息、岩爆爆坑信息、初步数值分析、地质条件、开挖与支护情况等)，揭示了深埋大理岩隧洞即时性应变型岩爆和即时性应变-结构面滑移型岩爆的孕育规律和机制。应指出，该大理岩洞段地应力的条件为：最大、中间主应力相差较小，最大主应力最大值达到 70 MPa 以上。得到的主要结论如下：

(1) 即时型岩爆在孕育初期微震的活动性一般，在临近岩爆发生时微震活动性很活跃，一般没有明显的“平静期”。根据微震事件的活动性及其能量和视体积的演化规律，可对即时型岩爆的等级和

空间位置进行预测、预警。

(2) 即时型岩爆一般发生在开挖卸荷效应影响过程中，在开挖过程中、开挖后几小时或 1 ~ 3 d 内发生，发生位置可在掌子面、拱顶、侧墙、拱脚和底板。所以，及时降低应力集中水平、能量集中水平和释放速率、及时支护封闭围岩以改善围岩应力状态等，可以避免或推迟岩爆的发生，降低岩爆发生的风险。

(3) 即时型岩爆发生的位置取决于围岩所在处的应力集中水平、围岩性质、地质条件及结构面状况。硬性结构面，即使是零星的，也可以诱发高等级的岩爆，同时也对爆坑的边界起到至关重要的控制作用。所以，加强硬性结构面的探测、识别及预处理十分重要。

(4) 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。数字钻孔摄像也已观察到岩爆发生前裂纹的萌生、张开、扩展和闭合等特征。岩爆在整个孕育过程中，硬岩开裂~岩块(片)弹射出去的全过程以及能量的积聚、耗散和释放全过程的机制和条件等，还有待于进一步研究。研究中，可采用连续-非连续数值分析、综合观察试验等方法。

(5) 岩爆的类型可分为即时型和时滞型，即时型又可分为即时性应变型、即时性应变-结构面滑移型。因此，在清楚其发生机制和条件的基础上，有必要建立统一的理论体系，实现岩爆的综合分析与预测。

**致谢** 现场微震监测得到了二滩水电开发有限责任公司的资助，中铁十八集团有限公司、中铁十三集团有限公司、北京振冲工程有限公司、四川二滩国际工程咨询有限责任公司和中国水电顾问集团华东勘测设计研究院等单位给予的大力支持，在此表示衷心感谢！

## 参考文献(References)：

- [1] 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): 1 251 - 1 275.
- [2] DURRHEIM R J, HAILE A, ROBERTS M K C, et al. Violent failure a remnant in a deep South African gold mine[J]. Tectonophysics,

- 1998, (289): 105-116.
- [3] 李庶林, 尹贤刚, 郑文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2 048-2 053. (LI Shulin, YIN Xiangang, ZHENG Wenda, et al. Research of multichannel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2 048-2 053.(in Chinese))
- [4] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275-283. (CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275-283.(in Chinese))
- [5] 陈炳瑞, 冯夏庭, 肖亚勋, 等. 深埋隧洞 TBM 施工过程围岩损伤演化声发射试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1 562-1 569.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, XIAO Yaxun, et al. Acoustic emission test on damage evolution of surrounding rock in deep-buried tunnel during TBM excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1 562-1 569.(in Chinese))
- [6] LI S J, FENG X T, LI Z H, et al. In situ tests on pregnancy and evolution of rock burst in a deeply buried tunnel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012(to be pressed).
- [7] 李邵军, 冯夏庭, 张春生, 等. 深埋隧洞 TBM 开挖损伤区形成与演化过程的数字钻孔摄像观测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1 106-1 112.(LI Shaojun, FENG Xiating, ZHANG Chunsheng, et al. Testing on formation and evolution of TBM excavation damaged zone in deep-buried tunnel based on digital panoramic borehole camera technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1 106-1 112.(in Chinese))
- [8] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞岩爆倾向性指标 RVI 的建立及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1 126-1 141. (QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Development and validation of rockburst vulnerability index(RVI) in deep hard rock tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1 126-1 141.(in Chinese))
- [9] 明华军, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 基于矩张量的深埋隧洞岩爆机制分析[J]. 岩土力学, 2012(待刊).(MING HuaJun, FENG Xiating, CHEN Bingrui, et al. Rockburst mechanism analysis for deep tunnel based on moment tensor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012(to be pressed).(in Chinese))
- [10] FENG X T, HUDSON J. Rock engineering design[M]. Leiden :CRC Press/Balkema, 2011: 263.
- [11] 向天兵, 冯夏庭, 江 权, 等. 大型洞室群围岩破坏模式的动态识别与调控[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 871-883.(XIANG Tianbing, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. Failure mode recognition and dynamic control method for surrounding rock of large cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 871-883.(in Chinese))

## 沉痛悼念《学报》特殊贡献奖得主——周思孟先生逝世

《学报》特殊贡献奖得主——周思孟先生因病医治无效于 2011 年 12 月 28 日上午 7 时不幸去世,享年 90 岁。惊悉周先生仙逝,我们十分悲痛!

周先生于 1921 年 11 月 7 日出生,籍贯江西省泰和县,1948 年 7 月 1 日毕业于南昌大学土木系,1949 年 8 月在江西省泰和县泰和中学任教员;1950 年 5 月~1981 年 2 月在长江水利委员会长江科学院任工程师;1981 年 12 月调入中国科学院武汉岩土力学研究所后,受陈宗基先生的委托创办《岩石力学与工程学报》。1982 年《学报》创刊,每年出版一期,为了争取刊号,周先生曾多次上北京沟通和请示汇报,最后才于 1986 年特批刊号!在周先生担任副主编期间,起初陈宗基院士作为主编对前几期特别关心,后来看到周先生认真负责的态度,就放心地将《学报》全权委托他负责,这是对周先生的极大信任!周先生将《学报》当成自己的孩子,用心呵护,在他的努力下,组织到了不少来自工程一线研究人员的优秀稿子,并慧眼发现和培养了不少优秀的科技人员为《学报》撰稿。正是由于周先生的执着、努力,为《学报》的后续发展奠定了良好的基础,直到临终前周先生一直关心《学报》的发展,还告诫编辑部的同仁们,办《学报》的理念是对读者负责,要公平、公正,实事求是,严把学术和编辑质量关,要像他当年那样,不太讲“人情”。

周先生为《学报》献身的崇高精神与巨大人格力量将沾溉学林,永垂不朽!

《岩石力学与工程学报》编辑部

2011 年 12 月 28 日