

岩爆及其微震监测预报

——可行性与初步实践

摘 要：岩爆监测预报仍然是岩土工程中的世界性难题。在我国水电、交通等工程领域，近年来有越来越多的深埋长大隧道进入施工期，地下洞室“长、大、深、群”的特点也愈加明显，带来许多深部岩石力学问题，其中尤以岩爆最为突出。岩爆不仅破坏地下工程结构，损坏生产设备，而且严重威胁人身安全，已成为我国未来深部或深埋地下工程中的一大技术瓶颈问题。本文以微震监测技术在锦屏二级水电工程隧道施工中的应用为例，简要探讨了岩爆及其微震监测预报的可行性。

一、前 言

在我国水电、交通等工程领域，近年来有越来越多的深埋长大隧道进入施工期，地下洞室“长、大、深、群”的特点也将愈加明显，带来许多深部岩石力学问题，其中尤以岩爆最为突出。岩爆不仅破坏地下工程结构，损坏生产设备，而且严重威胁人身安全，已成为我国未来深部或深埋地下工程中的一大技术瓶颈问题（谭以安，1989、1991；Jenkins, Williams, Wideman, 1990；谢和平、Pariseau，1993；Young, 1993；费鸿禄，1993；周爱民，1996；康德安，1996；冯夏庭、王泳嘉，1998；唐春安，2004）。

岩爆是一种由渐进破坏诱发突变的过程，其力学机制极其复杂，目前有关它的研究还多停留在假说和经验阶段。正如著名岩石工程学家 Brown（1988）教授所指出的：“甚至在岩爆定义上达到一致意见都是困难的，岩爆这个问题的成功答案，目前正在全世界很多研究中心进行着研究，它的进展将代表着岩石力学这门学科的发展和重大突破”。Hoek 和 Brown（1986）教授也曾指出：“目前对这种渐进破坏过程还很不清楚，它是岩石力学研究工作者所面临的一个挑战性难题”。

目前已有许多研究试图监测岩爆并希望预测它们的发生，这些方法包括微重力法、流变方法、回弹方法、钻筒屈服法、微地震法等（谢和平、Pariseau，1993）。尽管所有这些方法均被广泛采用，但没有一种方法被证明是可靠的，很成功的例子几乎没有。

岩爆的监测预报是公认的世界难题。人们通常认为，与地震原理一样，岩爆的震源以剪切破裂为主，岩爆也遵从尺度不变性，即没有发现岩爆与地震之间有系统的物理本质差别。因此，许多研究者据此断定，地震监测预报的低成功率就预示了岩爆监测预报成功的前途暗淡。近年连续出现的多次未经预报的大地震灾害，使得岩石工程专家对于岩爆是否能够监测预报更加心存疑虑。地震预报的低成功率，大大降低了工程技术人员对

岩爆监测预报的信心。

近年来,作为一种岩体微破裂三维空间监测技术——微震监测技术得到了迅速的发展。微震监测技术不仅可以通过声波分析岩爆事件的时间、位置和震级(也称时空强三要素),而且灵敏度较高的微震监测系统还可以捕捉比岩爆震级更小的岩石微破裂前兆事件,从而为岩爆预报提供了潜在的可能性。目前,加拿大、美国、南非、澳大利亚等发达国家的深部开采矿山大多都装备有这种先进的岩爆监测网络系统。我国一些大型煤矿或个别金属矿山也引进过几套这种监测设备,但由于价格方面的原因,还远没有达到普及应用的程度。影响微震监测系统在我国水利、交通领域应用的原因除了价格以外,没有非常成功的岩爆监测预报案例是问题的关键。由于岩爆现象的研究尚处于探索阶段,迄今为止,我们对岩爆孕育和发生的过程还缺乏深入的认识,许多机理性的东西远没有弄清楚。面对先进监测系统得到的繁多的监测数据,如何充分利用和开发这些第一手资料并进行合理的解释,从中得到可以预测未来岩爆的信息,则是岩爆监测预报工作中的难点。因此,加强深部或深埋地下工程中的岩爆分析方法与监测技术的研究,对于推动我国 21 世纪的深部地下工程技术发展,防治深部地下工程诱发灾害,确保深部地下工程施工和生产安全,具有重要的理论与实际意义。

有关国内外岩爆研究的现状,近年已有许多综述文章发表,推荐参阅的资料包括张镜剑、傅冰骏先生(2008)的“岩爆及其判据和防治”一文以及此文中列举的参考文献,本文不再赘述。下面仅从岩爆监测的可行性和岩爆监测的工程实践两个方面谈谈岩爆及其监测预报,供同行参考。

二、岩爆监测预报可行性的力学基础

由于岩爆与地震同属岩石破裂过程失稳问题,因此,在岩爆监测预报的研究工作中借鉴地震学和地球物理学理论无疑是极具指导意义的。在地震研究中,地震学家们已经积累了丰富的经验并取得了大量有价值的成果。特别是微震监测、定位等方面的研究,已经成为岩爆研究的宝贵财富。

然而,我们必须看到,尽管岩爆在力学机理上与地震类似,但与天然地震相比,多数岩爆是人类工程活动的结果。由于开挖洞室、隧道或巷道,使原有的地应力平衡被打破,不仅地应力将重新分布,而且往往造成局部围岩应力跃升及能量进一步集中,并可能导致围岩变形局部化现象,诱发岩石中的微破裂,使围岩由静态平衡向动态失稳发展,释放大量的弹性能,形成岩爆。相对于天然地震的长周期、低发生率和震源深度大等特征,岩爆的震源区则是可接近的(如开挖面),时间上则具有短周期、多发性等特征。更重要的是,对于长大隧道而言,地质构造比较明确、岩爆的发生区域与工程进度有关、具有高重复性等等。

因此,岩爆的监测预报与地震相比,从原理上讲具有更大的可能性。具体理由可以从如下三个方面阐述:

(1) 震源区问题。天然地震的发生主要与地壳介质的宏观地质状况、地层结构有关,但大范围地壳整体的内部结构是很难了解的,发生地震的区域是难以确定的。然而,对于地下工程特别是隧道工程而言,工程技术人员一般都要在工程施工之前对现场施工范围内的地质条件进行尽可能详细的勘察,从而可以对地下工程结构和围岩的力学性质有一个总体的了解,这对于分析岩爆产生的原因,特别是寻找岩爆与地质结构的联系,具有重要的参考价值;

(2) 孕育周期问题。天然地震的孕育周期长,大多都在数百年以上,即使一个研究人员的一生,也很难在研究中对一个具体地震的孕育过程和发展历史做到全面的掌握。然而,诸如隧道之类的地下工程,都是一个按设计进行有序施工的过程,岩爆的发生往往与已知的人工开挖过程(即干扰)具有特定的联系。因此,岩爆的孕育过程与施工的过程也存在时间序列和空间序列上的必然联系。特别是长大隧道,尽管施工周期可能只有几年,但却可能发生数起甚至数十起岩爆事件,而且大多具有一定的规律重复性,这对掌握岩爆规律、提高监测预报的可能性是十分有利的;

(3) 尺度问题。受目前计算机发展水平的限制,地震学家还很难建立地壳整体的大尺度地质模型。但对

于工程尺度而言,建立三维工程结构的地质模型却是可能的。有了三维地质模型,就有可能在此基础上建立整体工程结构的三维力学模型,从而可以对工程的整体结构进行应力场和结构稳定性分析,促进岩爆监测预报的研究。

我们认为,可以从如下几个方面去认识岩爆监测预报的可行性问题:

(1) 岩石的非均匀性是岩爆存在前兆的根源。岩石是一种本质上非均匀的材料(唐春安,1993)。在较小的尺度上,岩石常含有各种不同的矿物颗粒、胶结物、孔隙等缺陷等;在较大的尺度上,则含有层理、裂隙等缺陷;在更大的尺度上,则有断层等结构面。因此,当对工程结构进行应力分析时,有时将岩石简化成均匀材料是可接受的。但当考察岩体的破坏过程时(如研究岩爆问题),忽略岩石介质的非均匀性影响,可能会掩盖岩石变形与破裂过程中的许多与非均匀性有关的特殊现象,包括声发射或微震模式。如果不从岩石的非均匀性入手,很难分析岩体结构失稳破坏的前兆,这对于岩爆的监测预报是不利的。正是由于岩石具有的这种非均匀性特性,使得任何岩体结构在主破坏之前,或多或少都会有微破裂前兆出现,这是岩爆有可能被监测预报的最基本的力学原理;

(2) 变形的局部化是形成岩爆的内因。对岩体破坏现象的研究发现,各种尺度岩体(岩石)的破裂都是局部的。实验室内小尺度岩样的破裂,无论是剪破裂还是拉破裂,都是由均匀变形逐渐发展到局部化变形直至破裂的过程,不会遍及整个试样。岩爆的发生也是集中在隧道或开挖空区的某些部位,更大尺度上地壳介质的突然破裂(地震),大多发生在板块的边沿或断裂带附近。岩石或岩体结构变形的这种局部化现象,需要在岩爆机理和预测的研究中给予重点考虑。引起岩石变形局部化的因素主要有两个,一个是由于几何形状或载荷的不均匀性,例如隧道周围或裂纹尖端的应力集中等,引起应力超过强度而发生局部破坏。另一个则是介质本身力学性质的非均匀性和非连续性。变形的局部化是现代力学中的重要概念(唐春安等,1994),它与结构的失稳破坏密切相关。因此,在岩爆监测分析中,注意捕捉变形的局部化信息并掌握其发展趋势,就有可能提高岩爆监测预报的可能性;

(3) 岩石与其周围环境的相互作用是岩爆的外因。相互作用是失稳现象的灵魂。岩石与其周围环境的相互作用,带来失稳现象的高度复杂性。相同的岩石,当其周围环境介质的性质有差异时,很可能表现出极其不同的破坏序列特征,从而得到不同的破坏模式。通常破坏问题的研究都只关心破坏体本身的性质,包括破坏时的能量释放。但进一步研究发现,岩体破裂时的能量释放远远不止是破坏体本身的能量释放。对于岩爆这种灾难性的破坏而言,促使岩体破坏的真正动力源主要来自破坏体周围介质的弹性能释放。因此,传统基于破裂体介质应力和强度分析的岩爆判据是不可取的,深入进行岩石与其周围环境的相互作用问题研究,特别是破裂体之外的非破裂体中所包含的反映破裂失稳的前兆信息,可能会给岩爆的监测预报带来新的启示。

三、岩爆监测预报的技术可行性

(一) 位移与位移监测的局限性

目前,大型边坡、超大隧道及地下硐室稳定性监测大多采用位移或变形监测等方法。这种位移或变形监测方法对于软岩或变形较大的岩体是合适的。但是,对于硬岩即脆性岩石结构而言,往往在宏观破坏之前并没有很大的变形或位移显现。只有当岩体结构邻近宏观破坏时,才有可能出现大的变形或位移。因此,传统的位移或变形监测手段只能给出岩体结构已经出现宏观破裂及其相关大位移的监测结果,而对岩体内部的微破裂及微破裂演化过程的监测(往往是人类眼睛无法感知的微破裂前兆)却无能为力。

位移或变形监测方法的另一个局限性在于它只能被用于对岩体中的局部点进行监测,其结果不能反映相邻范围内的岩体变形或位移情况,因而难以通过这些监测对岩体结构的整体稳定性进行全面的宏观评价。

由于岩爆一般是硬岩即脆性岩体结构在高应力作用下的渐进破坏诱致突变的过程,因此,岩爆的孕育过程

一般很难通过变形或位移监测来敏感地反映，这就是变形或位移监测技术在岩爆监测预报中的局限性。

（二）地应力与地应力显现

就机理来讲，任何材料破裂，必定与高应力的存在有关。因此，从原理上说，对于岩爆的监测预报而言，只要我们能够获得岩石工程结构与围岩介质中的应力场分布，找到高应力存在的位置，岩爆的监测预报就是可能的。遗憾的是，尽管目前国际上有许多成熟的应力监测技术，但迄今为止，能够用于实际工程中的应力监测技术，与变形或位移监测技术一样，一般也都是“点”测量技术，即只能获得某个局部点的应力状态。目前还没有一种技术能够给出工程结构及围岩中的整体应力场信息。因此，通过应力测量技术监测预报岩爆在技术上是不可行的，至少现阶段是这样。

我们知道，岩石工程开挖，必然引起围岩应力的转移，造成围岩应力的释放或积累，其中应力积累的区域，就有可能伴随岩石的微破裂现象。这种微破裂现象反映的就是一种结构对应力的响应，我们称之为应力场“显现”。因此，尽管我们难以监测到岩体结构中的应力场，但如果我们能够监测到岩体结构对应力的响应（即微破裂），那么，就可以通过这种微破裂的时、空、强演化行为，间接地掌握工程扰动应力的变化规律。

能够达到这一目的的监测技术就是目前世界上发展很快的微震监测技术。

（三）微震监测技术

微震监测技术是一种地球物理学方法，它是对岩体在变形破坏过程中所产生的微破裂进行定时、定位的一种监测技术。当岩石中的裂纹的产生、扩展、摩擦时，内部积聚的能量便以应力波的形式释放，产生微震事件，并通过P波和S波的形式传播。微震监测系统通过地震检波器或加速度传感器就可以将接受的波形转化成电信号并经数据采集系统转换成数据信号，借助专业化的数据处理软件，就能够实现在三维空间中实时准确地确定岩体中微震事件发生的时间、位置、量级（即时空强），从而对岩体受力破坏的活动范围、稳定性及其发展趋势做出定性、定量评价。微震监测技术的应用领域主要包括：环境与公共安全中的土木工程、隧道和隧道开挖、岩爆、边坡稳定、地下洞室、结构响应、大坝监测；石油工业的断层活动定向、油气井稳定性、油气层监护管理、水压致裂监测评估、地下石油储备；矿山工程中的地下洞室开挖稳定性、崩落采矿、采空区管理、露天开采边坡稳定性、爆破等。

相对传统的位移或应力监测技术而言，微震监测技术具有如下几个重要特点：

- （1）监控范围广，能直接确定岩体内部的破裂时间、位置和震级，突破了传统“点”监测技术的局部性、不连续性、劳动强度大、安全性差等弊端；
- （2）实现了监测的自动化、信息化和智能化，代表了深埋岩体工程结构稳定性监测的发展方向；
- （3）监测仪器设备正朝高集成性、小体积、多通道、高灵敏度等方向发展；
- （4）支持自动监测和信息远程传输，可以通过GPRS无线传输发送到微震数据分析中心。
- （5）由于它采用接收地震波信息的方法，因此，其传感器可以布设在远离岩体易破坏的区域，更有利于保证监测系统的长期运行。

（四）微震监测技术用于岩爆监测预报的可行性

如前所述，由于岩石介质一般是非均匀的，因此，任何岩体在宏观破坏前一般都会产生许多细小的微破裂。这些微破裂会以弹性能释放的形式产生弹性波，并可被安装在有效范围内的微震传感器接收。利用多个传感器接收这种弹性波信息，通过反演方法就可以得到岩体微破裂发生的时刻、位置和震级，即地球物理学中所谓的“时空强”三要素。根据微破裂的大小、集中程度、破裂密度，则有可能推断岩石宏观破裂的发展趋势，特别是微破裂分布及其丛集规律（即变形破坏过程局部化现象），就有可能对岩爆的发生进行预测预报。

由于软岩或土的变形大而破坏时释放的能量小，因此，适合使用变形监测技术。而岩爆一般是硬岩即脆性岩体结构在高应力作用下的渐进破坏诱致突变的过程，变形小但破裂过程释放的能量大，因此，特别适合使用微震监测技术。

四、岩爆监测预报的工程实践

受二滩公司锦屏管理局委托，大连力软科技有限公司第一次在锦屏二级隧道施工中构建了随 TBM 同时推进的移动式微震监测系统，对隧道 TBM 施工过程中的微震活动进行实时监测，并基于微震监测数据的处理分析结果，探索岩爆预报的可能性。目前该系统已经正常运行并取得一定的初步成果。本文以此为例，简要介绍了微震监测技术应用于大型水电工程 TBM 隧道岩爆监测预报的初步实践。

（一）概况

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州木里、盐源、冕宁三县交界处的雅砻江干流锦屏大河弯上，利用雅砻江大河湾天然落差，截弯取直，开挖隧洞引水发电，是雅砻江干流上的重要梯级电站，总装机容量 4800MW，单机容量 600MW（吴世勇，2008）。

锦屏二级水电站地处青藏高原向四川盆地过渡的地貌斜坡地带，锦屏山以近南北向展布于河湾范围内，山势雄厚，重峰叠嶂，沟谷深切，主体山峰高程 4000m 以上，最高峰 4488m，最大高差达 3000m 以上。锦屏二级水电站工程包括 7 条平行隧洞，分别是 1#-4#引水隧洞、施工排水洞、A、B 辅助洞等。其中 1#、3#隧洞采用 TBM 法施工，开挖尺寸为 12.43m 圆形隧洞、施工排水洞也采用 TBM 法施工，开挖直径为 7.2m，其余隧洞采用钻爆法施工，2#、4#隧洞开挖断面最大尺寸为 13m 的马蹄形。

锦屏二级隧洞自开始掘进以来，先后发生数百次各种强度的岩爆，其中最近的两次岩爆属极强型和超强型岩爆（单治钢，2001；孙立福，2009；杨安林、赵桂连，2009；李育枢、李天斌、郑建国，2009）。

2009 年，二滩公司锦屏管理局委托大连力软科技有限公司（Mechsoft），将加拿大 ESG 微震监测技术用于锦屏二级电站施工隧道工程，第一次构建了随着 TBM 推进的移动式微震监测系统，通过微震数据采集系统连续数据采集、远程数据传输（大连 Mechsoft 服务器）、数据处理与分析，以及 Mechsoft 专门针对中国用户开发的中文可视化软件 MMS-View，实现了对施工隧道微震活动的 24 小时连续监测和分析，形成了微震数据现场全天候连续采集和集中分析的模式，为 TBM 施工隧道过程中的岩爆监测预报探索提供了重要的研究平台。

微震监测系统见图 1、图 2 所示，详细的构建方案请参考 Mechsoft 技术报告（2009）。

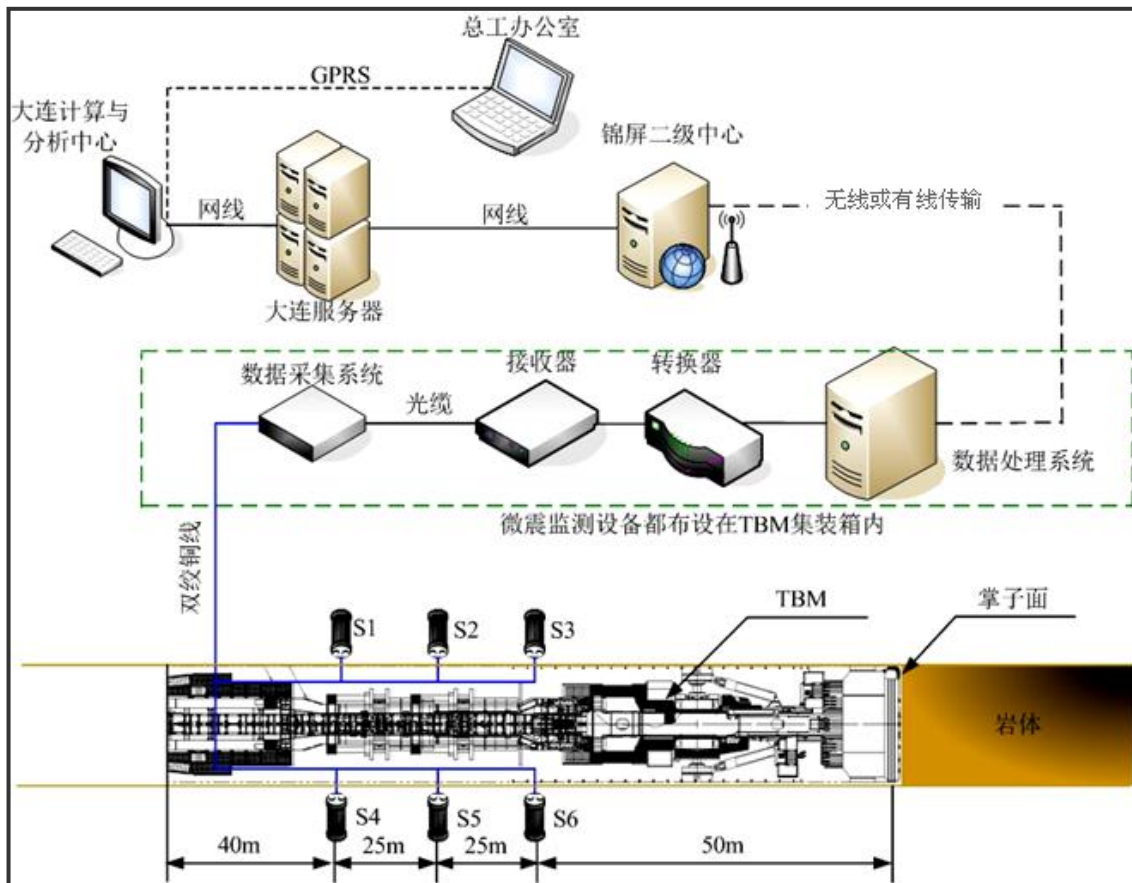


图 1 锦屏二级 TBM 隧道施工岩爆监测分析系统



图 2 隧道施工微震监测系统主机与分站

(二) 初步成果

图 3 是锦屏二级某隧道发生极强岩爆前 30 天的微震事件累积分布，其中微震事件集中的区域就是岩爆的中心位置。微震事件的云图显示（图 4），岩爆发生的位置在数天前就被微震监测系统准确定位。

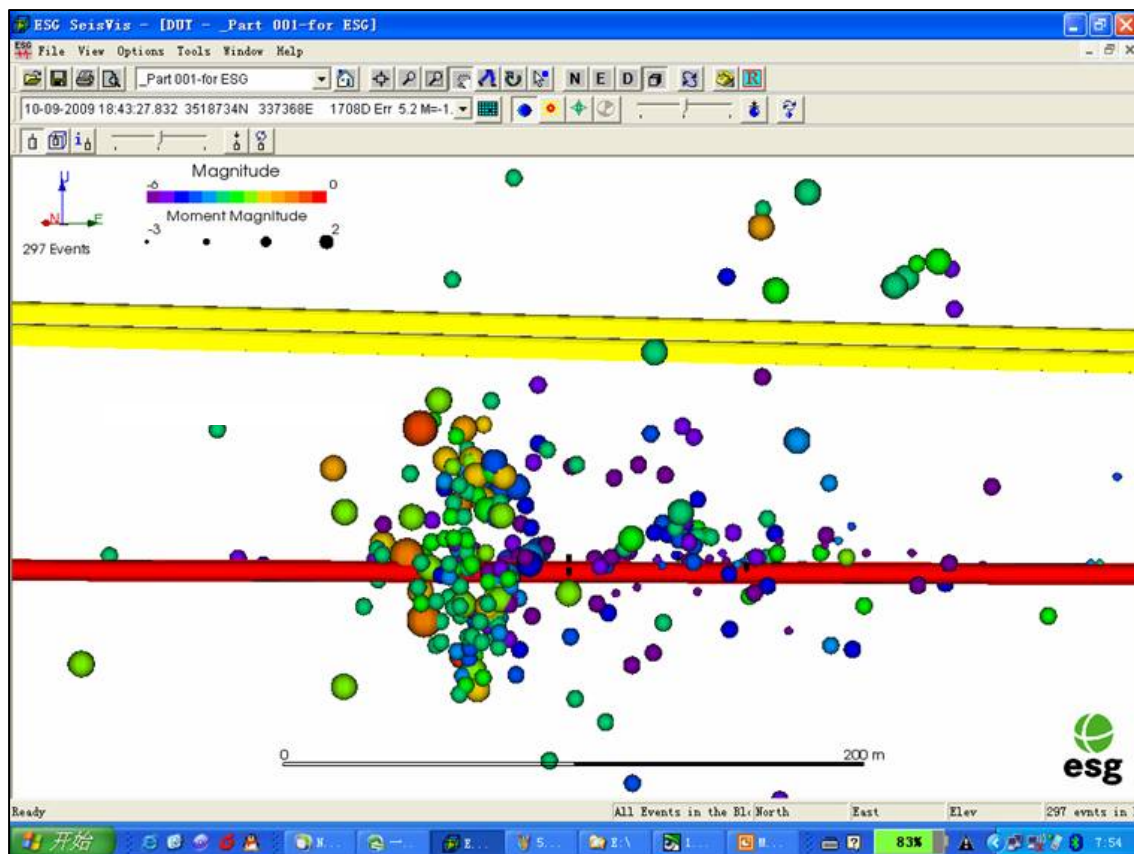
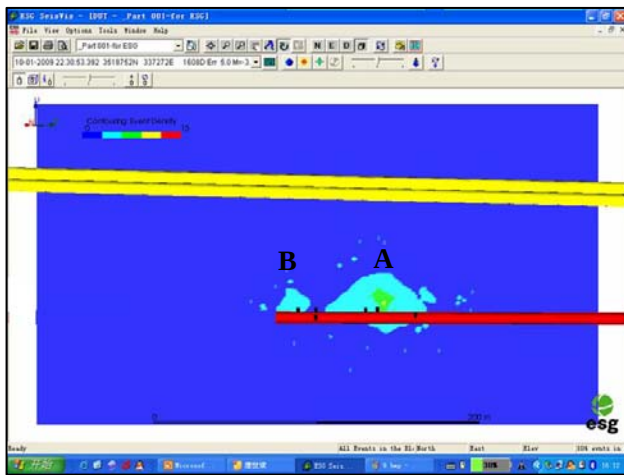


图 3 某次极强岩爆前 30 天的微震累积事件

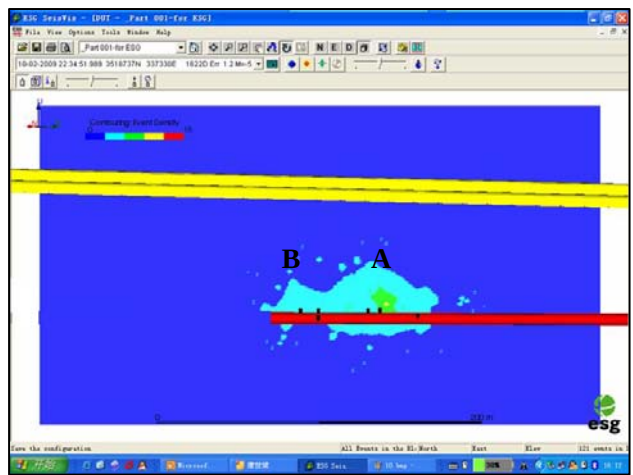
图 4 是此次极强岩爆发生前 30 天的微震事件云图。图 4 中的 B 点下方的隧道位置是岩爆发生的部位。由图可见，在岩爆前 8 天，B 点位置附近的微震密度云图就开始显现。随着隧道 TBM 的推进，在岩爆前 5 天，位于 B 点的岩爆核心就已开始形成。5 天后，岩爆正好就在此位置发生。

图 5 是相隔不到两个月的另一次超强岩爆的微震密度云图。图中的 B 点是岩爆发生时的位置。这次岩爆的前兆更加明显，在岩爆前 14 天，B 点附近的云图开始出现异常。岩爆 2 天前，B 点位置的云图核心更趋明显。之后，发生了一次更大量级的极强岩爆并引发大跨落。

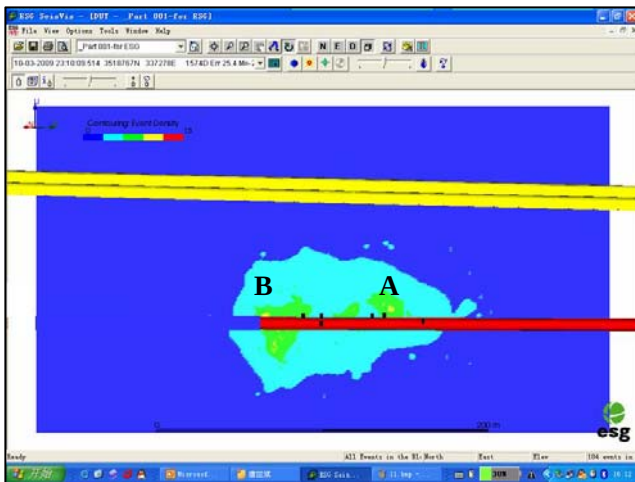
现场考察发现，此次超强岩爆的爆坑深达 9 米，有明显的结构面痕迹。但是，图 6 所示的岩爆过程的微震定位记录表明，尽管爆坑深达 9 米，但爆坑的形成过程却长达 2 分钟之久。从 00:42:43 记录到第一个微震数据开始，直到 00:44:42 的 2 分钟内，微震监测系统共计记录到约 40 个有效微震事件，而且大部分微震事件是沿着一个条带分布的，这个分布带与岩爆现场考察发现的岩体结构面走向吻合。



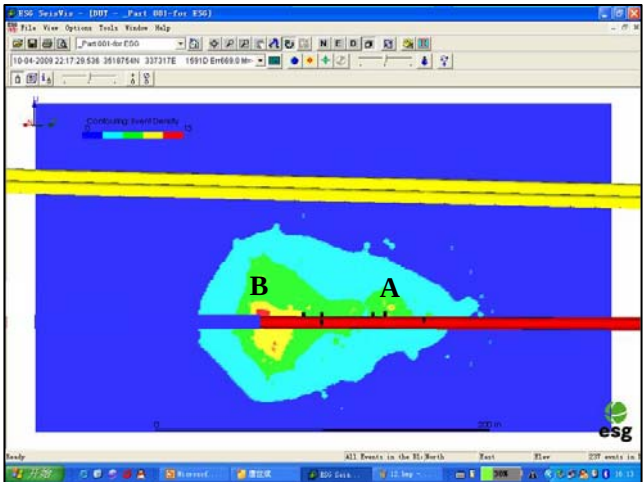
岩爆前 8 天



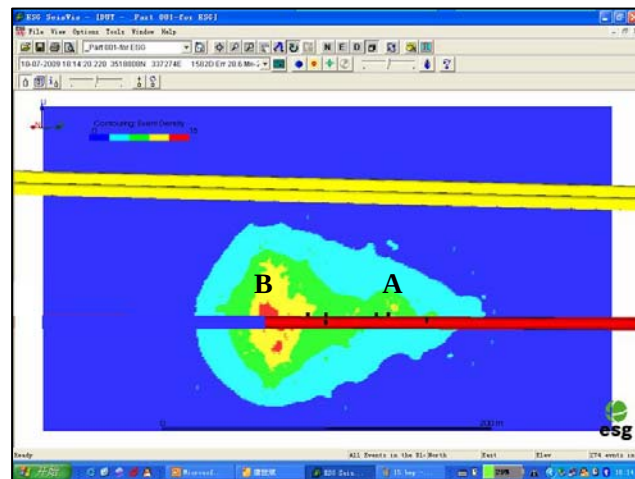
岩爆前 7 天



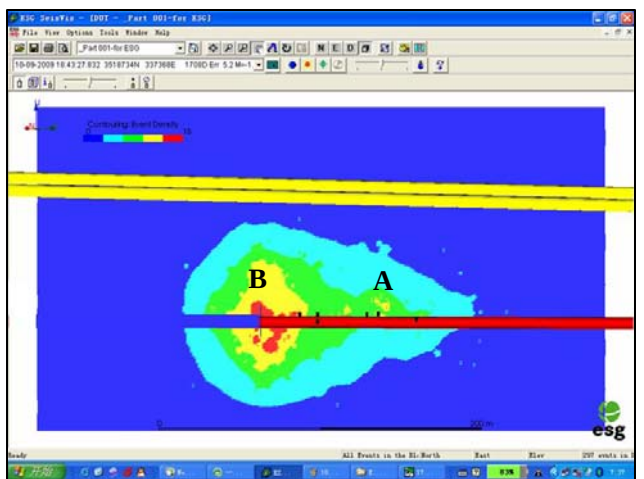
岩爆前 6 天



岩爆前 5 天

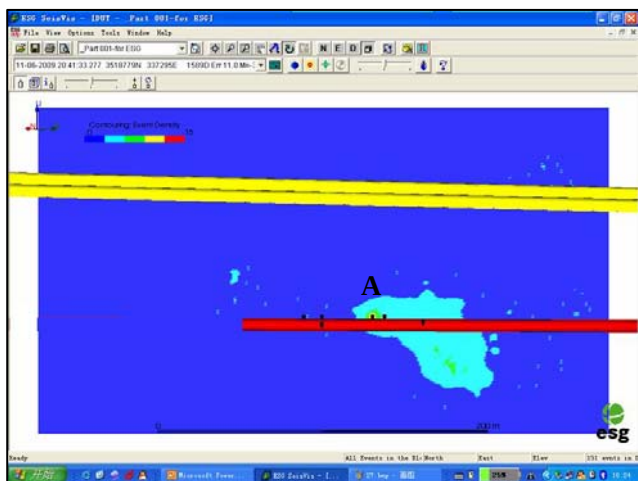


岩爆前 2 天

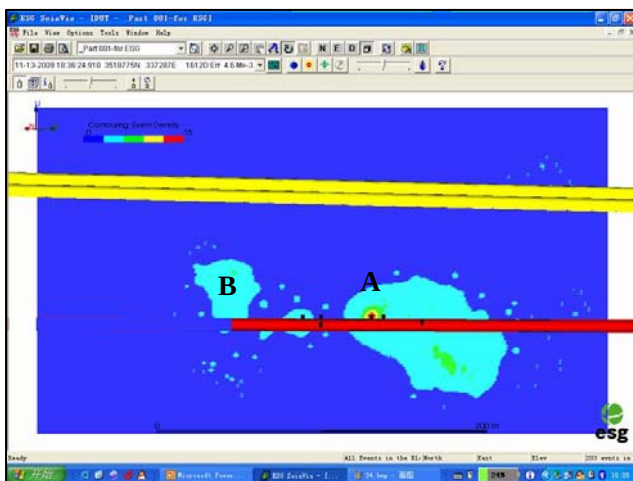


岩爆时刻

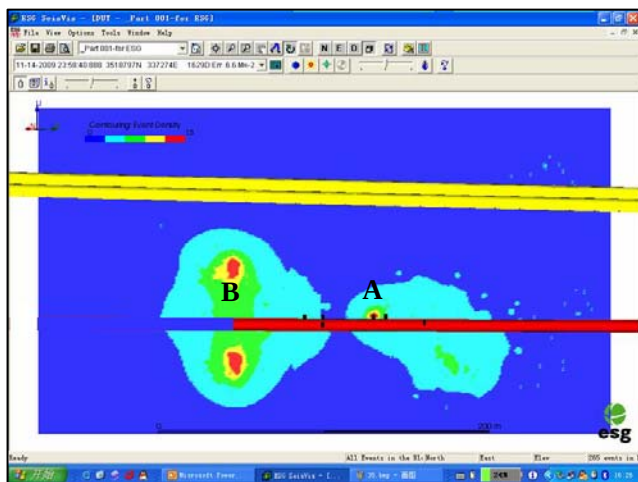
图 4 某次岩爆前微震事件密度云图变化过程
(B 点下方的隧道位置为最终岩爆位置)



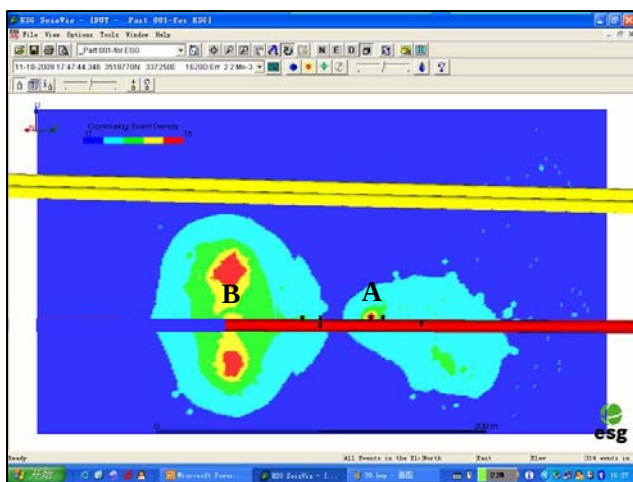
岩爆前 22 天



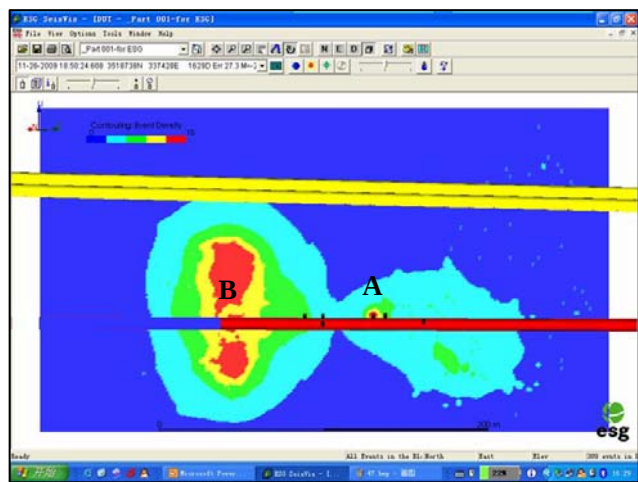
岩爆前 15 天



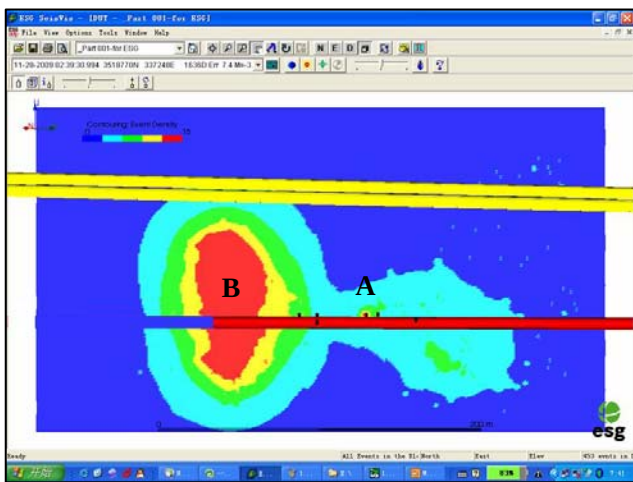
岩爆前 14 天



岩爆前 10 天

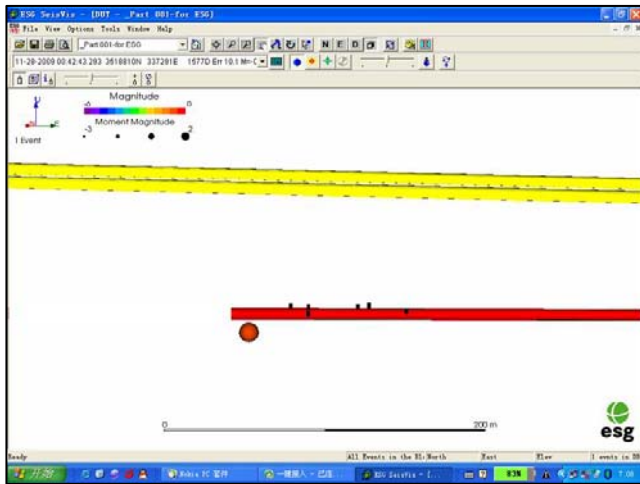


岩爆前 2 天

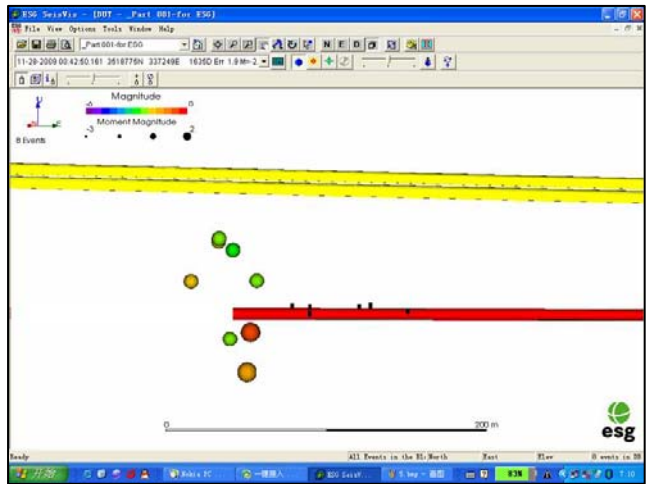


岩爆时刻

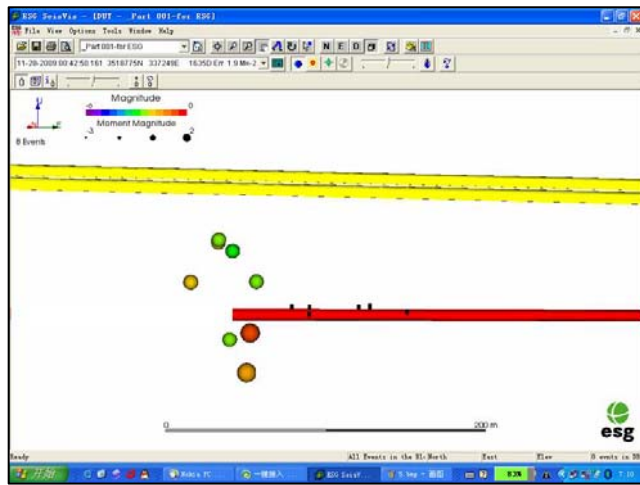
图 5 另一次岩爆前微震事件密度云图变化过程
(B 点下方的隧道位置为最终岩爆位置)



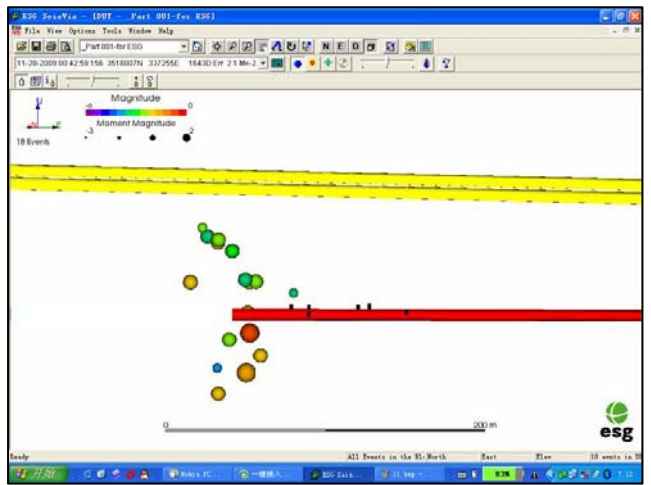
00: 42: 43



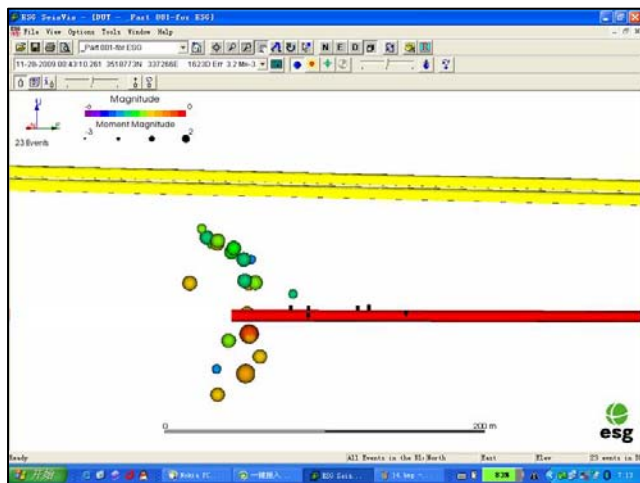
00: 42: 48



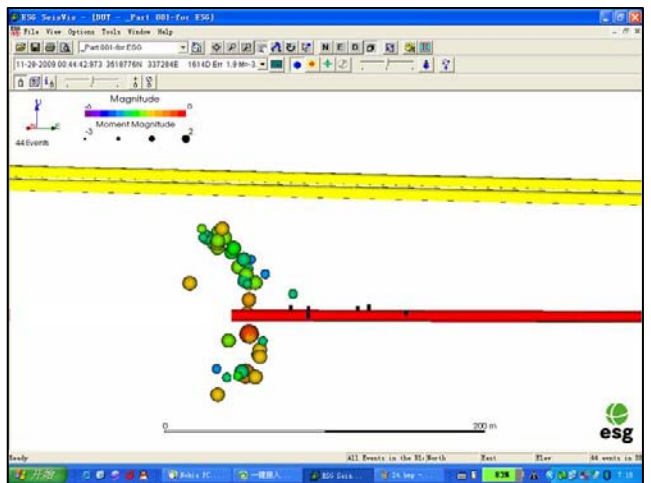
00: 42: 50



00: 42: 59



00: 43: 10



00: 44: 42

图 6 岩爆爆坑形成过程的微震定位
(爆坑形成过程长达 2 分钟)

(三) 几点认识

1. 结构面的影响

在岩爆的监测预报工作中，要特别关注岩体结构中的结构面、软弱交界面等异构特征对诱发岩爆的作用。

图 7 是根据锦屏技术资料提供的岩性参数和断层、结构面和软弱交界面情况，用 RFPa 精细计算获得的锦屏二级某隧道剖面的二维应力场分布计算结果。其中上图的灰度代表弹性模量值的相对大小，中图是计算得到的最大剪应力分布，亮度代表应力值的相对大小，下图的曲线是计算得到的主应力与单轴抗压强度之比的相对值。图 7 表明，在隧道沿线岩体结构中的结构面、软弱交界面等异构特征部位，应力的集中现象非常明显。图 7 特别明显地说明，当岩性由软变硬时，应力场有一个明显的阶跃。这显然是诱发岩爆发生的最危险区域。结构面如断层的位置，也是应力突变的危险区域（见图 6）。

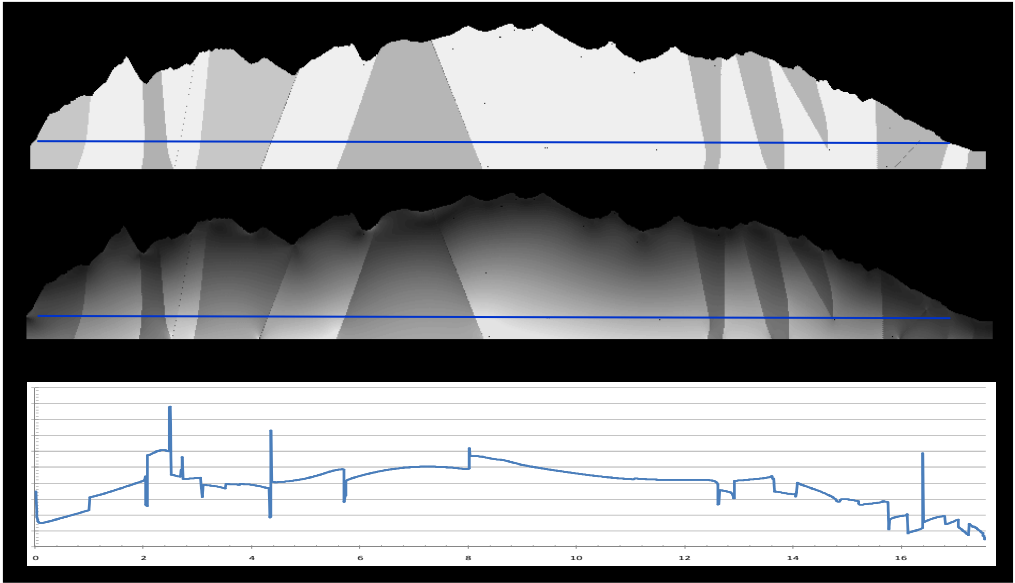


图 7 RFPa 计算得到的隧道剖面应力场分布相对值

2. 微震监测数据的精度问题

尽管微震事件的定位在沿隧道的轴线方向具有很高的定位精度，但是，在垂直隧道的剖面方向却误差很大。图 8 是图 5 和图 6 介绍的岩爆发生隧道部位的横切剖面。尽管大部分微震事件都发生在隧道的周围，形成一个近似的包围圆。但显然在这个剖面上微震事件的定位误差是很大的，即大部分微震事件的定位都远离隧道周边。

造成沿隧道方向的定位精度高而在剖面方向的定位精度低的原因，是因为传感器只能沿隧道轴线方向一维布置。因此，微震事件的定位只能采取切线定位的方法，而不能采取相交定位的方法。这种方法只能保证沿隧道轴线方向的定位精度。即便如此，保证在轴线方向的一维定位精度已经可以满足隧道施工的要求。

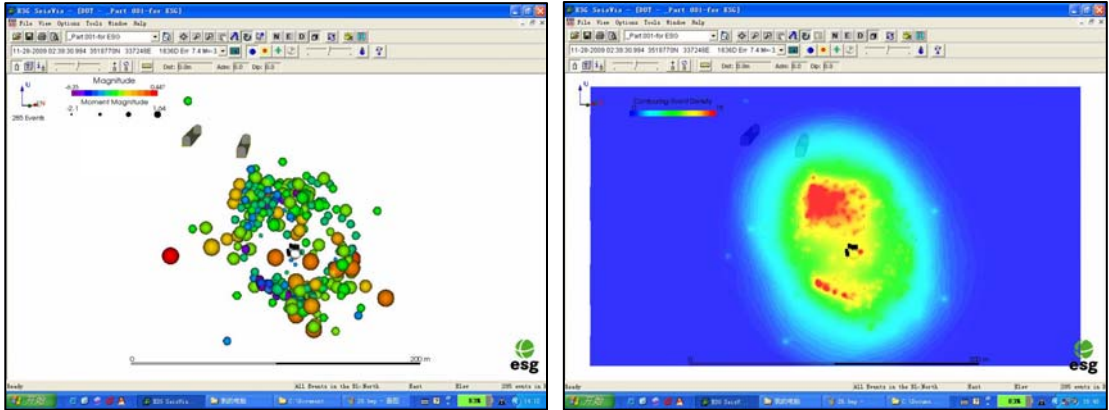


图 8 隧道剖面的微震事件分布和云图

3. 几个需要克服的问题

- （1）波速确定问题：在爆破隧洞中，可以使用爆破数据进行波速校正。但在 TBM 施工隧道，则不能采取定点爆破的方式来测定岩体的波速，加之 TBM 不断掘进，岩体岩性和结构不断变化，波速需要不断设定，难以保证定位精度。因此，需要反复使用通过较大震级的已知微震点校正波速的办法，来保证监测定位的精度；
- （2）震源位置确定问题：由于目前主要是采用相切定位模式，虽然在隧道轴线方向定位上能基本保证定位精度，但在垂直隧道轴线方向上定位精度较差。建议未来采取异洞监测办法，实现相交定位，提高监测的定位精度；

(3) 由于 TBM 掘进时间不定、掘进速度不定、撑靴挪动时间不定，对岩体的扰动也无法确定，所以，对于岩爆发生的准确时间亦难以准确预测，需要继续不断摸索、总结、积累。

(4) 受现场条件限制，监测前期难以实现 24 小时的连续监测和数据分析，目前通过光纤传输基本实现了监测和分析的实时性，但仍存在光纤在施工过程中被损害的现象，导致数据传输中断。

(5) 目前岩爆发生的能量和震级仍难以确定，需进一步摸索和总结经验。

五、结论与建议

(1) 锦屏二级隧道施工过程中的微震监测结果表明，多数岩爆都存在有可能被微震监测系统监测到的微破裂前兆；

(2) 从距离上看，几十米到上百米外的岩爆，微震仪都可能监测到一些破坏前兆，而且强岩爆危险区域的大致范围可以被微震监测系统定位；

(3) 从时间上看，一些前兆往往出现在数天以前。由于岩爆的发生与掘进进度有关，因此，尽管岩爆发生的位置有可能被提前确定，但准确时间目前仍难以预报；

(4) 从震级上看，目前只能根据现场积累的经验，采取类比法，获得岩爆的相对震级；

(5) RFPA 精细模拟表明，结构面（如断层、节理等）位置的应力集中十分显著，是岩爆监测的重点。通常的用 γh 计算的自重载荷只能做岩爆预估的参考，用它作为岩爆判据是不可取的。研究表明，通过微震监测与地应力场精细 RFPA 模拟的结合，岩爆预测预报的可能性有望提高；

(6) 微震监测数据显示，某些岩爆的爆坑形成过程长达 2 分钟之久，说明岩爆的破坏区域（爆坑）并不是在瞬间形成的，而是一个发展过程。这意味着采用有一定的柔性的支护系统，能够吸收部分冲击破坏释放的能量，可在一定程度上延缓或阻碍进一步的围岩破坏，从而达到减轻岩爆灾害的目的；

(7) 基于采用微震监测系统预测强岩爆还在进一步探索，对于未来 TBM 施工引水洞，建议采用钻爆洞监测 TBM 洞方案，从而可以通过高精度的相交定位模式，改善目前低精度的相切定位模式，提高监测精度；

(8) 相邻隧道监测方案不仅可以提高监测精度，更可以提高监测人员的安全，值得考虑；

(9) 用中文对中文服务取代英文对中文服务是提高我国微震监测技术应用水平的方向。不管是购买国外谁家的设备，国外厂家都只会提供几天的现场安装和培训。国外的远程数据分析服务不仅价格昂贵而且因语言障碍、时差等问题必然是远水解不了近渴，而且国外的数据分析服务也只负责数据本身的分析，不可能提供各种不同工程稳定性分析。因此，必须有本土化的专业微震监测技术支撑队伍，才能保证微震监测技术在我国的应用水平。

