

DOI: 10.11779/CJGE201412021

基于微震监测的锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育过程分析

于 群, 唐春安, 李连崇, 李 鸿, 程关文

(大连理工大学岩石破裂与失稳研究所, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 为研究锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育及发展过程, 利用构建的微震监测系统对#3引水洞的TBM掘进过程进行全天候连续实时监测。通过获取大量微震监测数据, 分别从微震事件的时空序列分布、事件活动率、微震能量、能量密度及视体积对隧洞岩爆前各参数变化特征进行分析, 并从动态裂纹扩展角度揭示了岩爆孕育过程中微破裂的萌生、发展、扩展直至相互贯通的宏观破坏机制, 初步探讨了微震活动演化规律与岩爆间的时空内在联系。监测与分析结果表明: 多数岩爆都存在有可被微震监测定位的微破裂前兆, 微震活动率、微震能量及累积视体积均有不同程度的上升趋势。部分岩爆的驱动源由本地岩爆能量与转移能量之和获得, 即 $E_{驱动} = E_{本地} + E_{转移}$, 强岩爆可再次诱发邻近位置产生岩爆。研究结果, 初步证明了利用微震监测系统对深埋隧洞岩爆进行实时监测的可行性。

关键词: 岩爆; 微震监测; 微震活动; 孕育过程; 锦屏二级水电站

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)12-2315-08

作者简介: 于 群(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事深部岩石工程灾害机理分析与控制方面的研究工作。E-mail: snoopy.351@hotmail.com。

Nucleation process of rockbursts based on microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station

YU Qun, TANG Chun-An, LI Lian-chong, LI Hong, CHENG Guan-wen

(Institute of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To study the rockburst nucleation and evolution process in deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station, a microseismic real-time monitoring system is established to monitor diversion tunnel No. 3 during TBM excavation. Based on a great deal of microseismic monitoring data, the characteristics of spatiotemporal distribution, activity rate, exhausted energy, energy density and apparent volume of microseim are comprehensively considered before occurrence of rockbursts. What's more, the initiation, propagation, extension and inter-coalescence mechanisms of microcracks during progressive nucleation process of rockbursts at Jinping II Hydropower Station are revealed. The spatial relationship between evolution rules of microseismic activities and rockbursts is discussed. The monitoring results show that precursory microcracking exists prior to most rockbursts, which can be captured by the microseismic monitoring system. The event rate, microseismic released energy and accumulated apparent volume have their different increase tendencies before rockbursts. The energy source of some rockbursts is composed of local energy and transfer energy, namely $E_{drive\ source} = E_{local} + E_{transfer}$, and a portion of rockbursts can be induced by certain adjacent violent rockbursts at the same time. It is feasible to monitor and predict rockburst events by using the microseismic monitoring technology for deep-buried tunnels.

Key words: rockburst; microseismic monitoring; microseismic activity; nucleation process; Jinping II Hydropower Station

0 引 言

随着中国西部大开发项目的实施, 岩土工程和采矿工程得以大力开展。然而, 由于西部地区特殊的地质环境, “三高一深”的地质条件成为各种地质灾害的温床, 尤其是高地应力条件下引起的岩爆现象最为突出, 而锦屏二级水电站的项目建设就包含其中。2009年

“11·28”事故中, 施工排水洞突发极强岩爆, 沿洞轴线28 m范围内支护系统全部毁损, 塌方总量400余

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB047100, 2011CB013503); 国家自然科学基金项目(51279024); 国家自然科学基金委创新研究群体基金项目(51121005)
收稿日期: 2013-10-29

方, TBM 被永久长埋, 并且造成 7 死 1 伤的惨痛局面。作为一种严重的动力地质灾害, 岩爆不仅威胁人员和设备安全, 而且直接影响工程进度, 甚至诱发地震并摧毁整个工程建设, 它已成为中国未来深部和深埋地下工程中的一大技术瓶颈问题。

近年来, 深井开采和深部地下工程建设规模逐步扩大, 岩爆问题日益突出。破坏程度和涉及范围也越来越广泛, 只停留在理论研究和室内试验方面显然不足。因此, 结合实际工程对微震活动诱发的岩爆灾害和孕育机理进行研究和预测预报是十分必要的。Tang 等^[1-2]分别从岩石的非均匀性、局部化变形等方面对岩爆预测的力学基础与可行性分析进行了论述; Srinivasan 等^[3]将微震事件、微震耗散能量以及事件主频作为岩爆短期预测指标, 并将其应用在印度 Kolar 金矿的岩爆预测中。刘建坡^[4]运用空间相关长度变化特征、分形维数特征、 b 值特征等地震学分析方法对红透山铜矿岩爆的前兆特征进行研究。刘滨^[5]利用最小耗能原理, 以弹性模量变化定义了孕育阶段的损伤变量, 在整体破坏准则的基础上建立了岩爆孕育阶段的损伤演化方程。唐礼忠^[6]提出地震孕育成核模型, 将地震应力与地震位移的相对变化作为地震孕育与成核的重要评判标准, 并将此模型成功应用到对冬瓜山铜矿岩爆预测中。

针对上述岩爆诱发机理及前兆特征研究而言, 通常采用理论分析、概念模型及数值模拟等分析方法, 对岩爆的倾向性和危险性指标做出综合性评估。而岩爆的孕育和发展过程实际是岩体由静态平衡渐进向动态失稳转化的过程, 其宏观表征是岩体的局部变形、开裂、失稳破坏等一系列的动态演化过程。在此过程中岩体的力学性能和应力状态等相关参数均在发生变化。若仅限于理论推导和概念计算等静态分析方法, 则对岩爆孕育过程的研究显露出局限性的一面。而现有的研究成果对岩体从细观损伤到失稳直至产生岩爆的宏观破坏过程却鲜有报道。鉴于此, 以锦屏二级水电站深埋引水洞为研究对象, 基于微震监测技术, 从裂纹扩展角度探讨了岩体内部微破裂的萌生、发展直至失稳破坏的岩爆孕育机制。利用微震活动率、微震耗散能量及视体积等相关地震学参数, 分析岩爆前夕各参数变化特征, 总结和归纳微震活动规律与岩爆间的内在联系, 进而对岩爆潜在危险区域进行圈定与控制, 确保人员设备安全及工期顺利进行。

1 锦屏二级水电站工程简介

1.1 工程地质概况

锦屏二级水电站穿越锦屏山长隧洞, 由相互平行

的 7 条隧洞组成, 工程平面布置图详见图 1。引水隧洞洞线长约 16.67 km, 最大埋深达到 2525 m, 深埋超 1500 m 的洞段长度占总长的 75.7%~75.9%。TBM 施工段主要以白山组大理岩和盐塘组大理岩为主, 工程区内构造线以 NNE 走向控制, 结构面发育丰富, 断层、褶皱和裂隙居多。最大主应力、中间主应力和最小主应力均随埋深增加而增大, 围岩以 II、III 类围岩为主, 岩石坚硬完整。

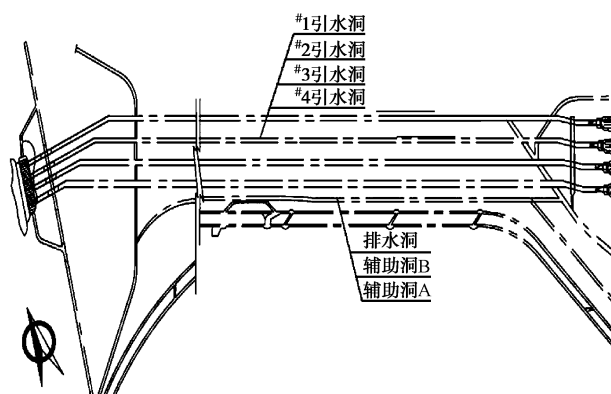


图 1 锦屏二级水电站工程平面布置图

Fig. 1 Layout of Jinping II Hydropower Station

1.2 微震监测技术及系统组成

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产生的微破裂进行定时、定位的一种监测技术。当岩体受外界扰动产生裂纹时, 内部积聚的应变能以弹性波的形式释放, 产生微震事件。作为一种先进的空间三维技术—微震监测技术已在采矿工程^[7-11]、水电交通、边坡工程^[12]、核废料储备及地下隧道工程^[13-14]等领域得到广泛应用^[15-16]。

锦屏二级深埋隧洞微震监测分析系统见图 2 所示。该监测项目采用加拿大 ESG (Engineering Solution Group) 公司生产的微震监测系统, 主要由以下几部分组成: Paladin 数字信号采集系统、Hyperion 数字信号处理系统、加速度传感器、数据通讯调制解调器、电缆光缆及基于远程无线网络传输的 MMS-View 三维可视化软件。

1.3 微震监测范围及监测方法

锦屏深埋#3 引水隧洞引(3) 8+000—10+000 处于高埋深高地应力区, 洞主轴线方位角为 N58°W, 最大埋深在 2500 m 左右, 围岩完整性好, 以 II—III 类为主, 最大主应力达 65 MPa 以上, 工程地质剖面图如图 3 所示。随着埋深的加大, 岩爆灾害问题频现, 局部洞段发生强烈和极强岩爆, 因此以该洞段(本文截取引(3) 9+607—9+675)作为监测和分析对象具有一定的研究价值和现实意义。

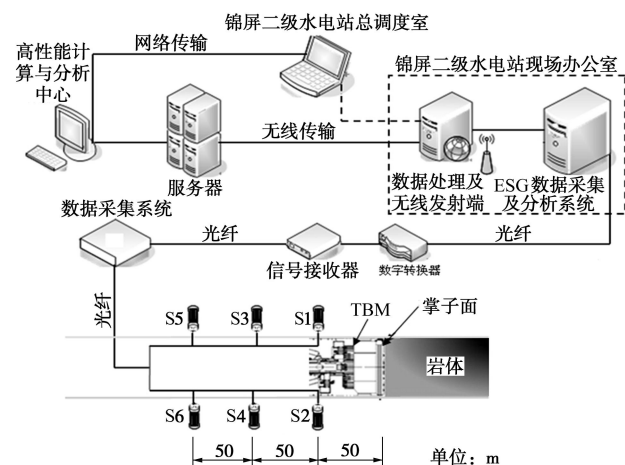


图 2 锦屏二级水电站深埋[#]3 引水洞微震监测分析系统

Fig. 2 Microseismic monitoring system for diversion tunnel No. 3 of Jinping II Hydropower Station

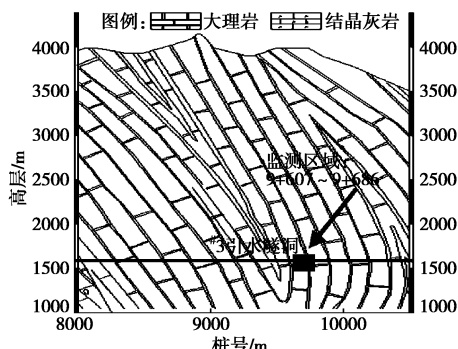


图 3 [#]3 引水洞微震监测区域地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of microseismic monitoring region for diversion tunnel No. 3

微震监测系统采用 6 通道数据采集仪布置于掌子面后方, 可对岩体卸荷产生的微破裂活动进行连续实时监测, 获得大量微震事件的时空数据、误差、震级和能量等多项震源信息。加速度传感器以阵列形式分别安装在南北墙的拱肩处, 首先在距离掌子面后方约 50 m 处布置 2 个传感器, 且传感器与传感器之间间隔也为 50 m。当 TBM 向前掘进 50 m 左右时, 位于掌子

面最后方的 2 个传感器向前跟进至距掌子面 50 m 处, 以此循环, 实现微震监测系统紧跟掌子面协同工作, 达到微震实时监测的目的。

2 TBM 掘进[#]3 引水洞微震监测结果

2.1 开挖情况

2011 年 2 月 TBM 开挖进度详见表 1。2 月上旬 TBM 掘进速度较快, 日均进尺约为 7.7 m, 期间内无岩爆发生。至 2 月中旬由于发生多次轻微—强烈不同等级的岩爆事故, 掘进速度也随之下降, 进尺较短。由于受前期岩爆影响较严重, 考虑人员和设备安全, TBM 被迫停止作业, 除 2 月 21 日掘进 4 m 外, 2 月下旬的其他时间段内无进尺。

2.2 微震活动的“时、空、强”分布特征

2011 年 2 月 1 日—2 月 5 日由于开挖进度较慢, 围岩受开挖扰动影响较小, 低能量小震级的微震事件偏多, 且分布离散 (见图 4 (a)), 岩体发生大规模破坏的可能性较小。2 月 6 日—10 日, 微震数量和释放能量有增加的趋势, 发生岩爆 (2 月 11 日) 的前一天受 TBM 开挖扰动较大, 掌子面后方 25 m 处北侧边墙产生微震事件数量加速集聚, 围岩释放的能量也异常增多 (见图 4 (b)), 且远高于前期释放的能量, 岩爆征兆明显。2 月 11 日—2 月 16 日, 在引 (3) +629—639 范围内微震事件有集中迹象, 且围岩释放的能量较大 (见图 4 (c))。2 月 16 日共计产生 13 个微震事件, 事件活跃程度显著且聚集加速, 初步判断围岩开始进入峰值强度后的破坏阶段, 岩爆风险区再次显现。2 月 17 日—2 月 21 日产生的微震事件虽然不多, 但分布密集且高能量大震级的微震事件持续产生 (见图 4 (d)), 围岩累积释放能量远高于前期, 在桩号 9+607—9+622 形成微震密集区。此期间内发生中等—强烈岩爆 4 次, 并引起掌子面后方多处塌方产生^[17]。

表 1 TBM 掘进[#]3 引水洞日进尺一览表 (2011 年 2 月 1 日—2011 年 3 月 1 日)

Table 1 Schedule of diversion tunnel No. 3 during TBM excavation

日期	掌子面桩号/m	TBM 进尺/m	日期	掌子面桩号/m	TBM 进尺/m	日期	掌子面桩号 /m	TBM 进尺/m
2 月 1 日	引(3)9+686	12	2 月 11 日	引(3)9+630	7	2 月 21 日	引(3)9+607	4
2 月 2 日	引(3)9+686	0	2 月 12 日	引(3)9+630	0	2 月 22 日	引(3)9+607	0
2 月 3 日	引(3)9+686	0	2 月 13 日	引(3)9+630	0	2 月 23 日	引(3)9+607	0
2 月 4 日	引(3)9+684	2	2 月 14 日	引(3)9+629	1	2 月 24 日	引(3)9+607	0
2 月 5 日	引(3)9+680	4	2 月 15 日	引(3)9+629	0	2 月 25 日	引(3)9+607	0
2 月 6 日	引(3)9+671	9	2 月 16 日	引(3)9+623	6	2 月 26 日	引(3)9+607	0
2 月 7 日	引(3)9+664	7	2 月 17 日	引(3)9+621	2	2 月 27 日	引(3)9+607	0
2 月 8 日	引(3)9+657	7	2 月 18 日	引(3)9+619	2	2 月 28 日	引(3)9+607	0
2 月 9 日	引(3)9+649	8	2 月 19 日	引(3)9+616	3	3 月 1 日	引(3)9+607	0
2 月 10 日	引(3)9+637	12	2 月 20 日	引(3)9+611	5			

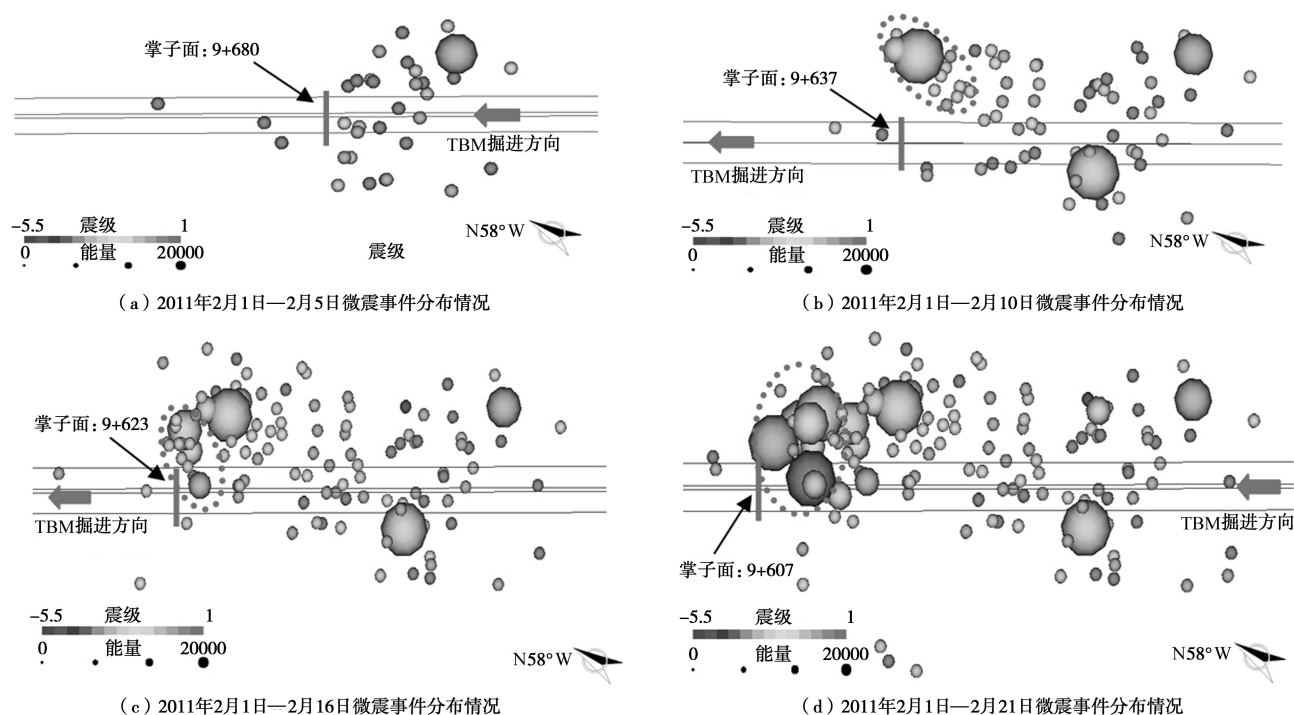


图 4 TBM 掘进#3 引水洞微震活动时空强分布示意图
Fig. 4 Spatiotemporal distribution of microseismic events of diversion tunnel No. 3 during excavation

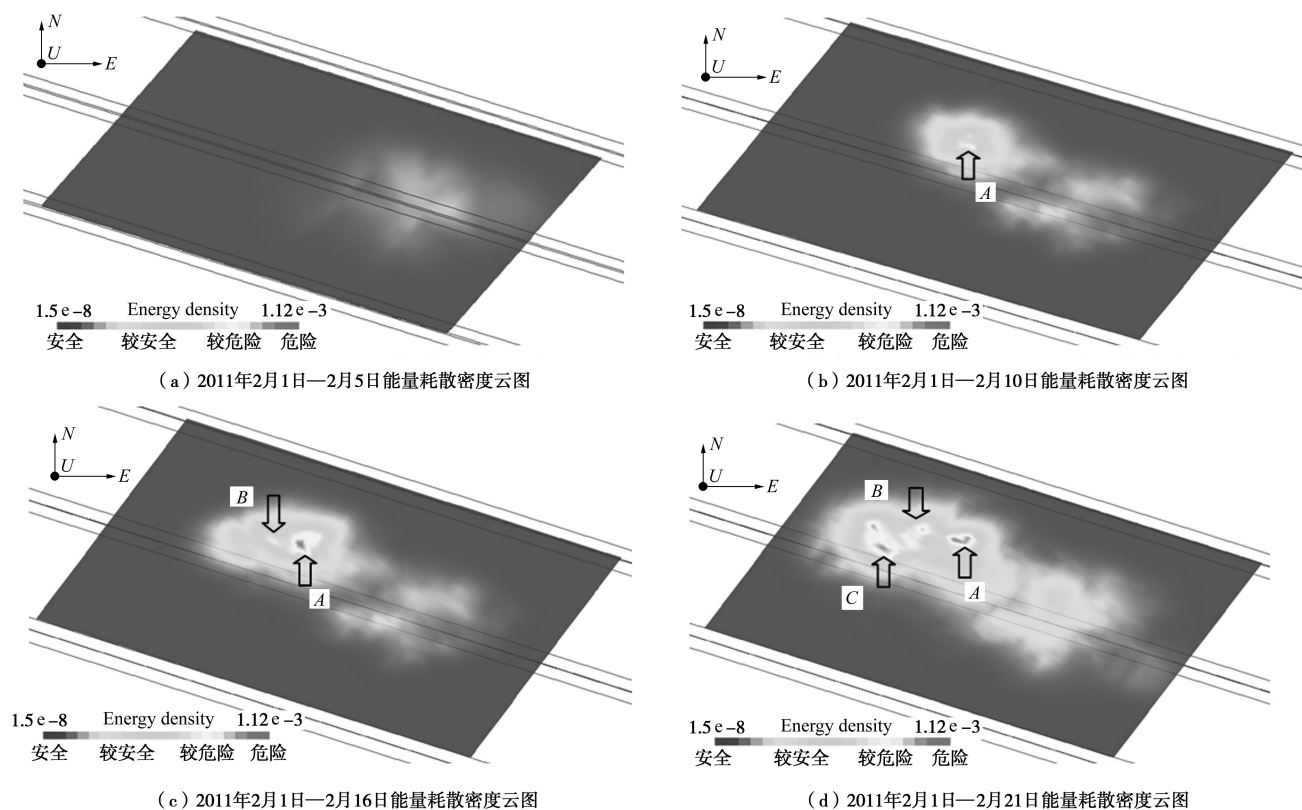


图 5 #3 引水洞微震能量耗散密度云图
Fig. 5 Contours of energy density of microseismic activity diversion tunnel No. 3

2.3 微震能量密度与岩爆危险区的圈定

#3 引水洞微震活动能量密度云如图 5 所示, 图中 A , B 和 C 点即为对应洞段发生岩爆的位置 (见图 5 (d))。2011 年 2 月 1 日—2 月 10 日, 即发生岩爆 10 d 前, 在 A 点附近的能量密度云开始显现 (见图 5(b))。随后 6 d 内在 A 附近形成核心区的迹象突出并开始逐

步扩大。此时 B 附近岩爆核心区的密度云也随之出现, 但成核迹象不明显 (见图 5 (c))。随着 TBM 的向前掘进, 受开挖卸荷影响及围岩自身具有应力调整要求, 微震活动数量和释放能量持续维持在高位, B , C 两点的岩爆核心区显现迹象愈加明显 (见图 5(d)), 2011 年 2 月 16 日—2 月 21 日的多次岩爆恰好在此区域内

发生。因此可采用能量密度云直观的找出岩爆成核区，提前圈定岩爆潜在危险区，有利于分析岩爆产生的原因及发展趋势。

3 TBM 掘进^{#3} 引水洞微震活动规律及演化特征

3.1 微震活动与岩爆孕育过程的关系

2011 年 2 月 1 日—3 月 1 日围岩微震活动时空分布情况如图 6 所示，期间内发生岩爆基本情况详见表 2。总体来看，微震活动相对密集区主要有 2 个，对应洞段分别为引(3)9+640—662 和引(3)9+607—637。经现场初步分析，2 月 10 日围岩受 TBM 掘进速度影响较大，地下应力重新发生分布和转移，使得岩体裂隙进一步向深部（图中左上方）扩展，导致微震活动密集区 I 呈“条带状”分布，当裂纹扩展到一定程度后剪切带形成并贯通，于是发生 2 月 11 日的强岩爆。随着开挖进行，应力也在不断转移和积累，微震事件随之增加的同时微震活动密集区 II 也再次形成。该区域内高能量大震级的事件持续发生，岩体损伤程度较上次更为严重，内部微裂纹有进一步扩展的趋势并形成新的剪切带。受 TBM 开挖卸荷及几日内多次岩爆的影响，应力发生积累和转移的同时，裂纹也在不断扩展，而两个微震活动集中区相距较近，多因素叠加效果使得岩体力学性能严重劣化，最终导致两个区域的裂隙带相互贯通。形成的剪切带与隧洞临空面围成一“三角形”区域，围岩应力和能量向临空面及周围

转移和释放，当达到或超过岩体强度峰值时，发生失稳破坏并伴随大量片帮剥离母岩、楔形碎石抛射现象。最终造成 2 月 21 日以剪切破坏为主，同时伴有拉伸破坏及拉剪混合破坏的大面积岩爆事故。

表 2 现场岩爆发生情况(2011 年 2 月 1 日—2011 年 3 月 1 日)

Table 2 Occurrence of rockbursts in field			
岩爆时间	岩爆位置	表现形式	岩爆等级
2 月 11 日 03:30	9+637—675	剥落、劈裂、弹射、岩爆前有局部塌方现象。	强烈
2 月 13 日 18:11	9+651—652	剥落、以片帮零星碎块为主，少量楔形碎块。	轻微
2 月 16 日 21:57	9+623	T2b 大理岩Ⅲ类围岩，片帮、弹射、大量楔形	中等
2 月 16 日 22:00	9+628—633		较强
2 月 16 日 23:40	9+628—635		较强
2 月 18 日 14:50	9+627	剥落、片帮、劈裂、零星楔形碎块弹射。	中等
2 月 18 日 19:10	9+626		中等
2 月 19 日 15:42	9+621—626	劈裂、弹射、大量楔形碎块，发生前有清脆的破裂声，“V”形爆坑。	较强
2 月 21 日 5:45	9+607—626 北侧	片帮、劈裂、弹射、多以楔形碎块为主，并引	强烈
	9+613—618 南侧		强烈
	9+651—664 南侧		轻微

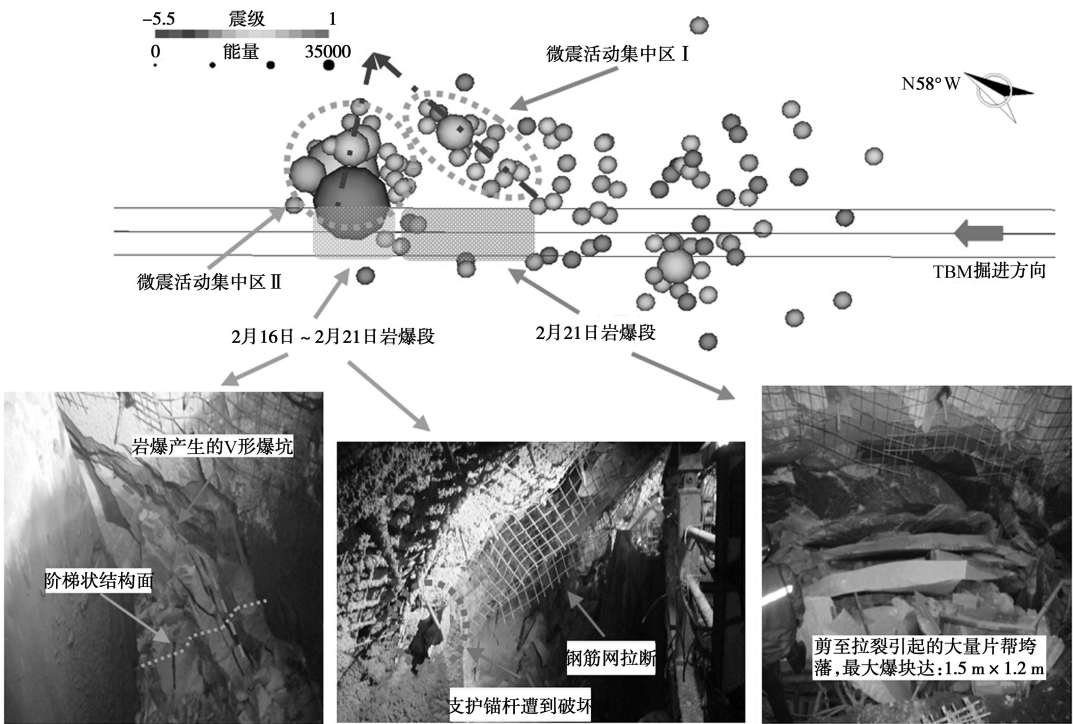


图 6 TBM 掘进^{#3} 引水洞微震活动的时空分布、能级分布及对应洞段破坏情况 (2011.2.1~2011.3.1)
Fig. 6 Spatial distribution of microseismic events, released energy, local magnitude and their corresponding failures

3.2 微震活动率与释放能量的关系

2011 年 2 月 1 日—3 月 1 日微震活动、释放能量与时间对应关系如图 7 所示:可看出多次岩爆发生前,微震活跃程度显著,岩体微破裂释放的能量呈上升趋势,累积释放能量具有剧增和突增特点。尤其在 2 月 21 日岩爆前,微震能量释放显著增强且连续经历了 2 次增大过程,峰值最大值达到 $6.89 \times 10^4 \text{ J}$, 远高于正常的能量释放水平,这种现象属于典型的微震活动异常,岩爆征兆明显。

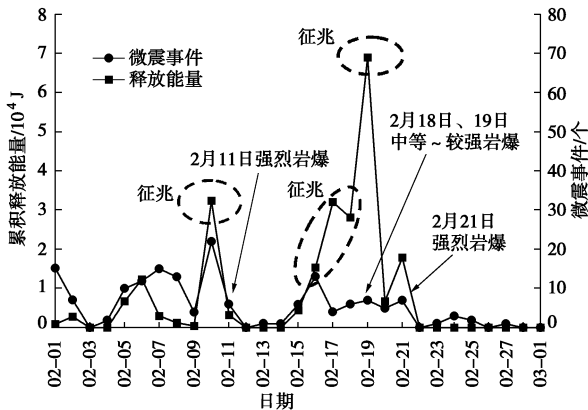


图 7 岩爆前微震活动与释放能量时序特征图

Fig. 7 Time-sequence characters of microseismic activities and released energy before rockbursts

3.3 微震活动率与视体积的关系

在地震学中,视体积是描述地震孕育及发展过程的一个重要参数,用来反映地震发生前岩体的变化规律。而在地震活动分析时,累积视体积 ΣV_A 随时间变化曲线的斜率长被认为是表示岩体应变速率的重要指标^[18]。图 8 为微震活动率和累积视体积随时间变化关系曲线。岩爆前期,随着 TBM 向前掘进,岩体应力集中程度加剧,预存微裂隙不断萌生和发展的同时应变能也在不断积累、释放和转移。分别在 2 月 10 日、2 月 16 日—19 日,累积视体积 ΣV_A 急剧增加,CAV 曲线出现一个突变的拐点。另外,在 2 月 7 日—10 日内微震活动率维持在较高水平,但在一段时间内微震活动经历了骤然下降后又陡增至最高水平,此种现象恰恰符合典型的地震时间序列活动规律,初步判断是围岩发生突变前的“平静期”。综合上述两种迹象,表明围岩已释放出大量能量,且经历了峰值强度前的压实阶段和弹性阶段,岩体已发生失稳破坏。

综合上述对深埋隧洞岩爆孕育和发生过程的描述,微震活动规律一般具有如下特征:①微震事件时空演化规律与岩爆时空分布规律具有良好的相关性,由微震事件的“时空强”分布和相对集中区可初步圈定岩爆潜在危险区。②微震能量特征表现为:围岩释放能量突然或急剧增加至一定程度后急剧减弱,最后

处于相对平缓状态并维持在较低水平,以此循环。即对应能量积累→能量释放→能量转移的动态循环过程。③岩爆发生前夕累积视体积呈突增趋势,岩爆往往发生在上升段或上升段的拐点处。累积视体积的突然增加与微震活动的突然下降(平静期)可作为岩爆微破裂的前兆特征。

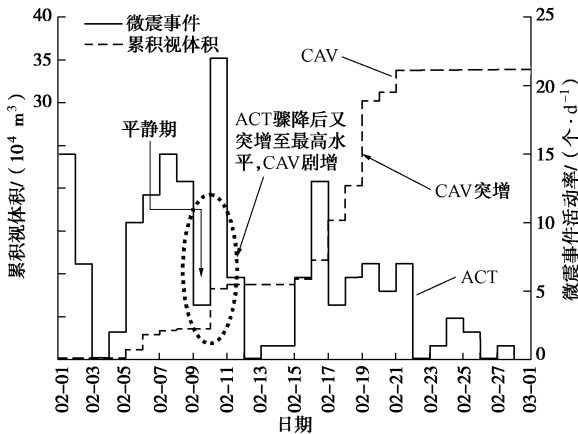


图 8 微震活动率 ACT 和视体积 CAV 随时间变化关系

Fig. 8 Time histories of relationship between ACT and CAV

4 应力转移和能量转移对岩爆的影响

2011 年 2 月 21 日 5:45 沿洞轴线不同位置同时发生 3 次岩爆(详见表 2),其中强烈岩爆发生在 9+613—618(南侧边墙)和 9+607—626(北侧边墙),轻微岩爆却发生在 9+651—664(南侧边墙)之间,而岩爆中心位置的间距最长达 42 m,即发生同时不同位岩爆。产生这种现象究其原因这是由于原有的应力场平衡被打破,二次应力场进行调整和重分布。相应的应力和能量经历了积累、释放和转移过程。且某些情况下,能量转移量远大于能量释放量。在此过程中由于岩体的天然缺陷,其内部潜在关键危险区(如节理、裂隙及破裂带等)必然会产生高度应力集中现象。随着外界扰动的持续进行,应力不断积累,当应力值达到或超过岩体强度极限时,岩爆可同时被触发。

因此,岩爆能量的驱动源大致可分为两种:一是由于本地岩体储蓄的应变能;而另一种是除本地岩体积蓄的变形能外,由其他处的应变能通过能量转移而来,即 $E_{\text{驱动}} = E_{\text{本地}} + E_{\text{转移}}$,由二者叠加产生的岩爆可能更为剧烈,因此更需预防此种岩爆的发生。此次轻微岩爆正是因强烈岩爆释放的能量部分转移至该洞段所致,即等级较强的岩爆可再次诱发邻近位置的岩爆。这种现象与顾金才等^[19]在室内岩爆试验研究中,提出的工程发生抛掷型岩爆时,单靠岩爆体本身积蓄的能量还不够,必须要有周围岩体对其破坏过程进行能量汇集和补充这一观点基本一致。

5 结 论

针对锦屏二级水电站深埋引水洞特殊的地质条件和施工特征建立的微震监测系统, 实现了工程开挖过程中围岩微震活动的实时监测、分析, 并得到以下 3 点结论。

(1) 多数岩爆都存在有可被微震监测定位的微破裂前兆。岩爆前微震活动率显著增加, 微震释放能量和累积视体积均有增强趋势, 结合微震活动密集区和能量密度云可对岩爆潜在危险区作出初步圈定。研究结果证明了微震监测对深埋隧洞岩爆进行实时监测的可行性。

(2) 通过 TBM 掘进洞段发生的强岩爆实例, 从动态裂纹扩展角度揭示了岩爆孕育过程中微裂纹的萌生、扩展、发展、形成剪切带直至相互贯通的宏观失稳破坏机制, 初步探讨了微震活动演化规律与岩爆孕育过程的关系。

(3) 岩爆能量的驱动源大致可分为两种: 一是由本地岩体储蓄的应变能; 二是除本地产生的变形能外仍存在少数岩爆的驱动源通过外界能量转移的形式获得, 即 $E_{\text{驱动}} = E_{\text{本地}} + E_{\text{转移}}$ 。强岩爆可再次诱发临近位置产生岩爆(暂且叫诱发型岩爆), 即发生同时不同位岩爆。在施工和监测过程中, 应注意此类岩爆的发生。

参考文献:

- [1] TANG C A, WANG J M, ZHANG J J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II Project[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, **2**(3): 193 - 208.
- [2] 唐春安, 王继敏. 岩爆及其微震监测预报—可行性与初步实践[J]. *岩石力学与工程动态*, 2010(1): 39 - 51. (TANG Chun-an, WANG Ji-min. Preliminary engineering application of rockburst and microseismic monitoring technique to prediction[J]. *Rock Mechanics and Engineering Tendency*, 2010(1): 39 - 51. (in Chinese))
- [3] SRINIVASAN C, ARORA S K, BENADY S. Precursory monitoring of impending rockbursts in Kolar gold mines from microseismic emissions at deeper levels[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, **36**(7): 941 - 948.
- [4] 刘建坡. 深井矿山地压活动与微震时空演化关系研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011. (LIU Jian-po. Studies on relationship between microseism time-space evolution and ground pressure activities in deep mine[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. (in Chinese))
- [5] 刘 滨. 基于最小耗能原理的岩爆孕育发生机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009. (LIU Bin. Study on mechanism of rockburst preparation and development based on the least energy consumption principle[D]. Wuhan: Institut of Rock and soil Mechanics Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese))
- [6] 唐礼忠. 深井矿山地震活动与岩爆监测及预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008. (TANG Li-zhong. Study on monitoring and predietion of seismicity and rockburst in a deep mine[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese))
- [7] THEODORE I U, TRIFU C I. Recent advances in seismicmonitoring technology at Canadian mines[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, **45**(4): 225 - 237.
- [8] 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.
- [9] DURRHEIM R J, CICHOWICZ A. Guidelines standards and best practice for seismic hazard assessment and rockburst risk management in South African mines[C]// POTVIN Y ed. *Deeping Mining 07-The Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining*. Nedlands: Australian Center for Geomechanics, 2007: 249 - 259.
- [10] ALEXANDER J, TRIFU C I. Monitoring mines seismicity in Canada[C]// POTVIN Y, HUDYMA M, ed. *Controlling Seismic Risk RaSiM6*. Nedlands: Australian Center for Geomechanics, 2005: 353 - 358.
- [11] 杨志国, 于润沧, 郭 然, 等. 微震监测技术在深井矿山中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(5): 1066 - 1073. (YANG Zhi-guo, YU Run-cang, GUO Ran, et al. Application of microseismic monitoring to deep mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(5): 1066 - 1073. (in Chinese))
- [12] XU N W, TANG C A, LI L C, et al. Microseismic monitoring and stability analysis of the left bank slope in Jinping first stage hydropower station in southwestern China[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, **48**(6): 950 - 963.
- [13] MILEV A M, SPOTTISWOODE S M, RORKE A J, et al. Seismic monitoring of a simulated rock burst on a wall of an underground tunnel[J]. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2001, **101**(5): 253 - 260.

- [14] 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 Bing-rui, FENG Xia-ting, ZENG Xiong-hui, 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))
- [15] BASSON F R P, VAN DER MERWE S. Seismicity management at Hill 50 Gold Mine, Western Australia[C]// POTVIN Y ed. Deeping Mining 07-The Fourth International Seminar on Deep and High Stress Mining. Nedlands: Australian Center for Geomechanics, 2007: 233 - 241.
- [16] GE M C. Efficient mine microseismic monitoring[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, **64**(1/2): 44 - 56.
- [17] 崔 凯. 雅砻江锦屏二级水电站招标设计阶段 C5 标岩爆防治专题周报[R]. 北京: 中铁十三局北京振冲联合体锦屏项目部, 2011. (CHUI Kai. Weekly report on rockburst prevention of C5 bid section for Jinping II hydropower station at Yalong River during invite public bidding phase[R]. Beijing: Commonwealth of China Railway 13th Bureau and Beijing Vibroflotation Engineering Co., Ltd in Jinping Project Department, 2011. (in Chinese))
- [18] 王春来, 吴爱祥, 刘晓辉. 深井开采岩爆灾害微震监测预警及控制结束[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 125 - 127. (WANG Chun-lai, WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui. Microseismic monitoring prediction and controlling technology of rockburst hazard in deep mining[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 125 - 127. (in Chinese))
- [19] 顾金才, 范俊奇, 孔福利, 等. 抛掷型岩爆机制与模拟试验技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(6): 1081 - 1088. (GU Jin-cai, FAN Jun-qi, KONG Fu-li, et al. Mechanism of ejective rockburst and model testing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(6): 1081 - 1088. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)