

DOI: 10.11779/CJGE201707006

深埋隧洞 TBM 掘进微震与岩爆活动规律研究

赵周能^{1, 2}, 冯夏庭^{2, 3}, 陈炳瑞³

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004;
3. 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)

摘要: 以锦屏二级水电站 TBM 开挖的深埋隧洞为工程背景, 基于微震监测数据和岩爆实例, 研究了深埋隧洞 TBM 掘进过程中微震与岩爆时空分布特征及岩爆孕育过程微震演化规律。结果表明: ①微震活跃期和岩爆高发期处于 TBM 作业时段及停机后的 1 h 以内; 微震活动范围主要介于掌子面后方 3 倍洞径至前方 0.4 倍洞径之间, 其峰值位于掌子面后方 0.8 倍洞径附近; 而岩爆主要发生在掌子面后方 2 倍洞径以内, 尤其是掌子面后方 1 倍洞径以内是岩爆高发区; 可见, 微震与岩爆具有良好的时空相关性。②在时间序列上, 微震能突增现象, 以及累积视体积快速上升而 Schmidt 数急剧下降的现象均属微震活动异常, 属岩爆前兆。③在空间序列上, 微震事件逐渐向某个区域高度集结且大震级高能量事件不断增多的现象属微震活动异常, 预示高岩爆风险, 属岩爆前兆。

关键词: 岩石力学; 深埋隧洞; 微震; 岩爆; 隧道掘进机 (TBM)

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)07-1206-10

作者简介: 赵周能(1976-), 男, 讲师, 博士, 主要从事采矿及深部岩石力学方面的研究工作。E-mail: zhzhneng@163.com。

Activity laws of microseisms and rockbursts in deep tunnels by TBM tunneling

ZHAO Zhou-neng^{1,2}, FENG Xia-ting^{2,3}, CHEN Bin-rui³

(1. School of Environmental Engineering and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: For the deep tunnel of Jinping II Hydropower Station excavated by TBM, based on the seismic monitoring data and rockbursts, the temporal and spatial distribution characteristics of microseismic events and rockbursts and evolution laws of microseismicity information during the preparation process of rockbursts are studied. The conclusions are drawn as follows: (1) The active period of microseisms and the peak period of rockbursts are the working time and within one hour after stopping working for TBM. The microseismic activity mainly ranges from 3 times the tunnel diameter behind working face to 0.4 times ahead, and its peak value is located at 0.8 times the tunnel diameter behind working face. The rockbursts mainly occur within the region 2 times the tunnel diameter behind working face, especially the high-risk zone of rockbursts lies in the region as large as 1 times the tunnel diameter behind working face. Therefore, there is certain space-time relativity between the microseisms and the rockbursts. (2) A sudden increase of microseismic released energy or the steep rise of cumulated apparent volume (CAV) with a sharp drop of Schmidt number in the time sequence is an microseismic anomaly, which is a premonition of rockbursts. (3) The spatial distribution pattern of mircoseismic events shows a transformation from random to clump distribution in certain zone with time, and the degree of their clump dispersion pattern gradually increases, simultaneously accompanied by a growing number of microseismic events with large magnitude and high energy, that is, it is an microseismic anomaly and also a premonition of rockbursts.

Key words: rock mechanics; deep tunnel; microseismicity; rockburst; tunnel boring machine

0 引言

岩爆是高地应力条件下地下洞室开挖过程中, 由于开挖卸荷引起围岩应力重分布, 导致储存于围岩中的弹性应变能突然释放, 并产生爆裂、松脱、剥落、弹射甚至抛掷等破坏现象的一种动力失稳地质灾害^[1]。岩

爆通常受地层岩性和地应力等背景条件的控制^[2], 但是

基金项目: 国家自然科学基金国际合作重大项目 (41320104005); 国家自然科学基金项目 (51479192); 西南科技大学博士研究基金项目 (14zx7106)

收稿日期: 2016-03-25

如果岩石未被挖走, 岩体仍安然无恙地呆在地下深处, 可见, 岩爆并不是纯自然的地质现象, 而是人类活动诱发的地质灾害, 其发生与否与地下洞室开挖后在围岩内形成的应力分布有着密切的关系。研究发现^[3], TBM 和钻爆法开挖洞室的围岩物理力学性能与应力条件存在显著差异, 在高地应力环境下, 若开挖方式选用不当则会大大恶化围岩的物理力学性能和应力条件, 从而诱发甚至加剧岩爆的发生。就施工技术而言, TBM 和钻爆法均是开挖长大隧道的成熟方法, 但两者的岩爆现象却存在明显差异, 西康铁路秦岭隧道的岩爆现象很好的证实了这一点。秦岭隧道由相距仅 30 m 的 I 线和 II 线组成, 其岩爆实录显示^[4-6], 与 I 线无岩爆洞段 (TBM 开挖) 相对应的 II 线 (钻爆法开挖) 却是不同等级岩爆的频发段。所以, 开挖方式 (TBM 和钻爆法) 是岩爆的重要影响因素之一, 近年来, 这方面的研究逐渐成为人们关注的热点。

Rudajev 等^[7]认为岩爆的发生与所采用的开挖方式密切相关。张志强等^[8]在总结国内外许多地下工程岩爆发生的条件后指出, 地质条件相同时, 采用 TBM 施工的隧道可能不发生岩爆, 而采用钻爆法施工时则会发生岩爆。王彦辉等^[9]在分析钻爆法施工特点的基础上, 认为应尽量以 TBM 替代钻爆法开挖隧道, 减小施工对围岩的振动, 从而减少岩爆触发因素。刘丽萍等^[10]在综合分析国内外 TBM 开挖工程实例后指出, 在地下隧道施工中, TBM 的安全性远优于钻爆法。但是, 候靖等^[11]基于锦屏二级水电站辅助洞和排水洞的岩爆对比分析, 指出在工程地质和隧洞断面尺寸相似的条件下, TBM 开挖发生的岩爆累计长度及等级均大于钻爆法开挖。锦屏二级水电站排水洞岩爆实录亦显示^[12-13], 在 TBM 掘进过程中发生大量不同等级的岩爆, 甚至极强岩爆, 如 2009 年 11 月 28 日发生了极强岩爆, 导致 TBM 被毁, 余下未掘洞段被迫改为钻爆法开挖。可见, 长期以来, 人们通常认为对同一工程区或地质条件相似的隧道工程, 钻爆法开挖引起的岩爆风险要高于 TBM 开挖。但是, 工程实践表明, 对于埋深大、地应力高的地下岩石工程如锦屏二级水电站引水工程, TBM 开挖也面临着频繁的岩爆灾害, 甚至较钻爆法更严重, 不仅损毁价值昂贵的工程设备、影响施工进度, 而且还严重威胁施工人员的生命安全。因此, 通过微震监测技术, 获取深埋隧道/洞工程 TBM 开挖的微震活动规律, 进而掌握岩爆活动规律并进行预警, 为岩爆防治提供可靠参考, 对于确保深埋隧道/洞工程 TBM 施工安全显得尤为重要。

近年来, 人们对深埋隧道洞岩爆进行了大量研究, 如冯夏庭等^[14]、陈炳瑞^[15], 依据隧洞岩爆的发生时间将岩爆划分为即时型和时滞型两类岩爆, 并对其孕育

机制进行了研究; 陈炳瑞等^[16]通过分析深埋隧洞 TBM 掘进过程中开展微震监测存在的困难与不足, 对现有微震监测技术进行了优化和改进, 并取得了预期效果; 明华军等^[17]基于微震数据, 利用矩张量分析了深埋隧洞岩爆机理; 于群等^[18]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了微震监测系统, 实现了工程开挖过程中围岩微震活动的实时监测与分析; 冯夏庭等^[19]对 TBM 开挖岩爆孕育过程的微震演化规律进行了研究, 得出了一些有益结论。这些研究成果对深埋隧洞岩爆防治具有重要意义, 但对 TBM 开挖下岩爆孕育中的 Schmidt 数随时间的演化规律及微震信息在 TBM 掘进中的演化特征未展开深入研究。鉴于此, 本文以锦屏二级水电站#3 引水隧洞 TBM 开挖的极强岩爆段为工程背景, 研究微震与岩爆的活动规律, 并选取典型岩爆案例分析岩爆孕育过程微震活动时空演化特征, 以期为深埋隧洞 TBM 开挖的岩爆防治提供科学的参考依据。

锦屏二级水电站引水隧洞平均埋深约 1610 m, 最大埋深达 2525 m, 属典型的高地应力区, 在其开挖过程中可能潜在强至极强岩爆风险, 严重威胁隧洞施工安全。鉴于此, #3 引水隧洞 TBM 开挖的白山组大理岩洞段搭建了微震监测系统, 籍此对岩爆灾害进行实时监测。本文选取埋深介于 1864~2229.63 m 之间的 10050~11165 m 里程洞段进行分析, 该洞段搭建了南非 ISS 微震监测系统, 其监测方法、监测系统构成及工程背景参见文献[16, 19], 此处不再赘述。

1 微震与岩爆时空分布规律

1.1 时间分布规律

TBM 作业在 24 h 内分检修时段 (8: 00~12: 00) 和掘进时段 (12: 00~次日 8: 00), 其中后者又分白班 (12: 00~22: 00) 和夜班 (22: 00~次日 8: 00)。统计结果显示, TBM 开挖引起的微震事件和岩爆在不同作业时段的分布存在显著差异。以 2010 年 5 月 28 日—9 月 26 日为例, TBM 掘进时产生的微震事件与岩爆在 24 h 内分布规律如图 1 所示 (为了展示事件与岩爆随时间的循环变化规律, 图中横坐标时间刻度取 48 h)。可以看出, 两者在 24 h 内的演化趋势基本一致, 总体上呈余弦曲线状, 其中 8: 00~12: 00 位于曲线谷底, 对应于 TBM 检修时段, 微震事件和岩爆分别占各自总数的 5.94% 和 3.28%, 可见, 此时段的微震活动较弱, 岩爆活动频次少, 处于相对平静期; 12: 00~次日 8: 00 位于曲线峰部, 对应于 TBM 掘进时段, 微震事件和岩爆分别占各自总数的 94.06% 和 96.72%, 显然, 该时段为微震活跃期, 岩爆活动频

繁。

TBM 常以连续方式开挖, 属缓慢的准静态卸载过程, 该过程产生许多微震事件, 占 77.85% (见图 2(a)); 因检修或其它原因而停止作业期间产生的微震事件占 22.15%, 显然, 事件主要产生于 TBM 开挖过程中。进一步分析发现, 在停止作业时段, 停机 2 h 内发生的微震事件最多, 占停机后事件数的 57.64%, 其中尤以 1 h 以内为最多, 占 43.75%; 之后则迅速减少 (见图 2(b))。这表明 TBM 开挖过程及停机 1 h 以内围岩微震活动十分活跃, 岩体微破裂活动频繁, 围岩应力和能量调整最为剧烈, 预示高岩爆风险, 这与现场岩爆相吻合。事实上, 在掘进时段发生的岩爆最多, 占 86.58%, 停机时段次之, 占 13.42%, 如图 2(a) 所示; 停机时段发生的岩爆主要出现在停机后的 1 h 以内, 而后迅速减少 (见图 2(b))。显而易见, TBM 作业时段及停机后的 1 h 内为岩爆高发期。

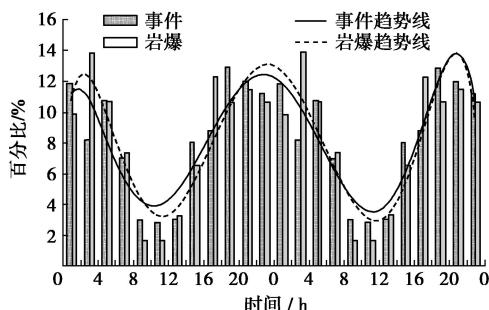


图 1 TBM 掘进过程 24 h 内微震事件与岩爆分布规律

Fig. 1 Distribution of microseismic events and rockbursts caused by TBM tunneling within 24 hours

上述分析表明, 微震和岩爆具有良好的时间相关性, 且两者与 TBM 作业活动密切相关。一般地, 开挖扰动前, 置于高应力状态的深埋岩体处于原岩应力平衡状态。TBM 掘进时, 该平衡状态因开挖卸荷而被打破, 进而引起应力重分布, 造成局部围岩存在高应力集中, 导致岩体新生和原有裂纹扩展、贯通, 释放弹性应变能并伴有微震。随着岩体微破裂不断产生和发展, 岩体完整性被削弱, 其承载力和蓄能能力逐渐下降, 当降至某一临界状态时, 储存的弹性应变能会发生突然释放, 造成岩体动力失稳, 从而产生岩爆。而 TBM 检修和停止作业期间, 岩体未受到开挖扰动作用, 围岩应力因自适应调整而在洞壁产生高应力集中, 导致岩体破裂, 造成应力松弛, 使最大应力逐渐向围岩深部转移。围岩应力经自适应调整后处于相对平衡状态, 短期内, 只有在外界扰动下, 该平衡方能被打破, 进而引起应力的再调整。所以随着停止作业时间的延长, 围岩破裂活动趋于变缓, 微震和岩爆活动较弱, 处于相对平静期。

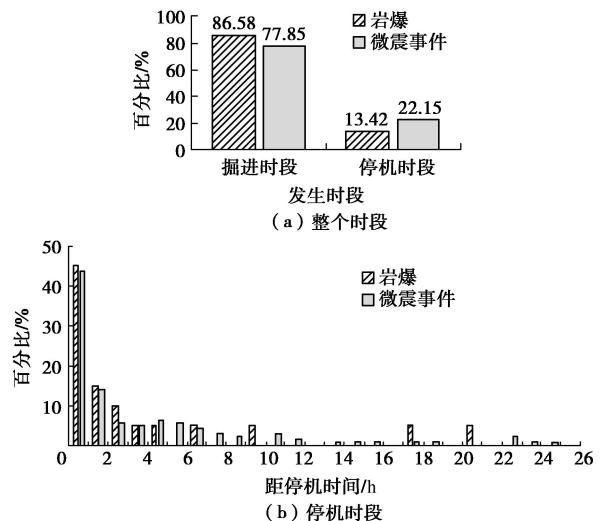


图 2 TBM 掘进过程微震事件和岩爆的时间分布

Fig. 2 Time distribution of microseismic events and rockbursts during TBM tunneling

1.2 空间分布规律

根据岩石力学理论, 地下洞室围岩的应力调整范围与洞径密切相关。为使研究结果具有普遍性, 便于与其它工程比较, 在分析事件频次在隧洞轴向上的分布规律时, 采用洞径 D (12.4 m) 表示事件与掌子面距离, 并以掌子面为原点, 隧洞掘进方向为横坐标正向。基于此获得的统计分析成果如图 3 所示, 可见, 在隧洞轴向上, 掌子面后方 16D 至前方 9D 范围内均有微震事件发生, 分别占 89.04% 和 10.96%, 其中掌子面后方 8D 至前方 3D 范围内为微震事件主要分布区, 占 97.72%, 而又尤以掌子面附近区域为最多 (见图 3(a))。需要指出的是, 掌子面后方 8D 至前方 3D 范围以外产生少许事件, 占 2.28%, 这些事件较为离散, 其产生原因可能与系统监测误差及岩体不均匀性有直接关系, 分析时不予以考虑。

为进一步揭示事件在掌子面附近的分布规律, 将图 3(a) 进行局部放大, 见图 3(b), 可以看出:

(1) 事件集中分布在 $-3D \sim 0.4D$ 之间, 占所有事件的 79.45%, 事件峰值位于 $-0.8D$ 附近。这表明 $-3D \sim 0.4D$ 区域微破裂频次高, 属高应力集中区, 应力调整剧烈, 预示着高岩爆风险。据此圈定的区域是 TBM 施工过程中岩爆、坍塌、支护的重点关注区域。事实上, 在隧洞轴向上, 99.33% 的岩爆发生在掌子面后方 2D 范围以内 (即 $-2D \sim 0$ 区间), 掌子面后方 2D 范围以外仅发生一次轻微时滞型岩爆 (见图 4)。由此可见, ①掌子面后方 2D 范围以内是岩爆高发区, 该区域与微震活跃区基本一致; ②TBM 开挖产生的岩爆以即时型岩爆为主, 时滞型岩爆甚少; ③对于地应力高, 具有强甚至极强岩爆风险的区域, 采用半导洞先行, TBM 随后跟进^[20-21] 或全断面钻爆法开挖时, 掌子面前

方应力解除深度应达到或超过 $0.8D$, 使掌子面前方高应力集中向深部转移, 从而抑制或降低掌子面岩爆风险, 确保当前和下一炮次开挖安全。

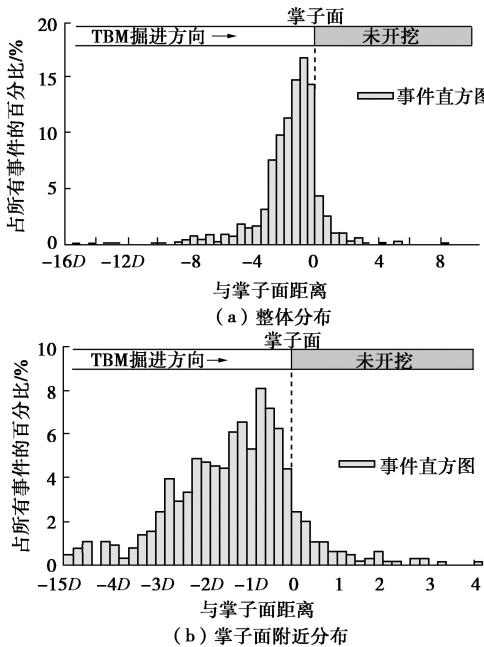


图 3 微震事件在隧洞轴向上的分布规律

Fig. 3 Distribution of microseismic events along axial direction of tunnel

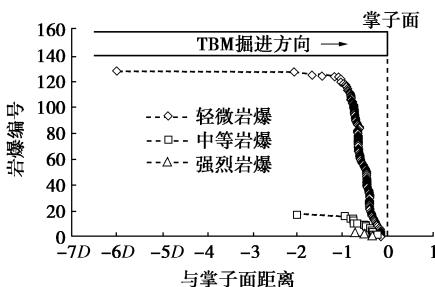


图 4 岩爆在隧洞轴向上的分布规律

Fig. 4 Distribution of rockbursts along axial direction of tunnel

(2) 事件先递增, 至 $-0.8D$ 达最大值, 而后递减, 但越过掌子面后便急剧下降。呈现这一分布规律的主要原因在于围岩应力重分布的时间效应和空间效应。TBM 开挖属于缓慢的准静态卸载过程, 对于紧邻掌子面的开挖区域, 一方面, 围岩揭露时间短, 岩体仍保持较好完整性, 具有良好的承载力, 而应力重分布需要一定时间才能完成并形成应力集中区; 另一方面, 由于受到开挖面的空间约束, 开挖面附近的围岩不能立即释放其全部瞬时弹性位移, 换言之, 在一定程度上抑制或延缓了围岩应力调整。这就使得掌子面近区围岩产生微破裂的频次虽高但并非峰值区。沿隧洞轴向由内向外, 随着与掌子面距离的增大, 围岩经过一定时间的应力重分布, 许多局部区域形成了应力集中, 且开挖面的空间约束作用逐渐减弱, 使得围岩微破裂

频次递增, 至 $-0.8D$ 附近形成峰值。随着距离的进一步增大, 应力重分布的时间效应占居主导, 围岩应变能得到一定释放, 应力集中逐渐向围岩深部转移, 导致微破裂频次虽高但呈现降低趋势, 至掌子面后方 $3D$ 处已大为降低。

上述分析表明, $-0.8D \sim 0$ 区间即掌子面与事件峰值之间的区域, 由于受到掌子面的空间约束而抑制了围岩应变能的释放, 导致围岩因积蓄大量应变能而形成高储能体, 潜在高岩爆风险, 是防控岩爆的重点关注区。这与现场岩爆情况相吻合, 岩爆实录(参照文献[22]划分岩爆等级)显示, 92.19% 的轻微岩爆、94.12% 的中等岩爆和全部强烈岩爆均出现在掌子面后方 $1D$ 以内(即 $-1D \sim 0$ 区间)(见图 4)。

图 5 为加拿大 Mine-By 试验隧洞(长 46 m, 直径 3.5 m)机械开挖段的微震监测结果^[23]。对比分析图 3 和图 5 可以看出, 洞径不同的隧洞采用机械开挖所产生的微震事件沿隧洞轴线的变化趋势基本一致, 但前者引起的事件分布范围介于 $-16D \sim 9D$ 之间, 而后者为 $-3D \sim 0.4D$ 之间, 显而易见, 前者远大于后者。这表明两者引起事件的分布范围存在显著差异。初步研究认为, 开挖工艺与工程地质条件无疑是导致该现象的原因之一, 但机械开挖过程中, 隧洞围岩应力调整范围及剧烈程度是否存在洞径效应尚待分析和研究。

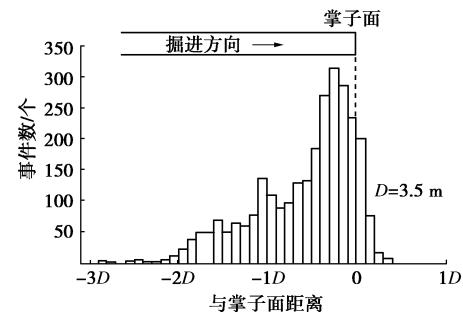


图 5 机械凿岩法开挖微震事件与掌子面的距离^[23]

Fig. 5 Distance between microseismic event and tunnel face by excavation of mechanical drilling method

图 6 为 TBM 掘进过程中微震事件与岩爆在隧洞径向上的分布情况。由图 6(a) 可以看出, 事件主要分布在距隧洞中心 $1.5D$ 范围以内, 占 76.1%, 其中尤以距洞壁 $1D$ 的圆环内为最多, 占 53.12%, 可见, 距洞壁 $1D$ 以内的围岩中产生大量微破裂, 属围岩主要微破裂损伤区, 该区域存在高应力集中, 积蓄大量应变能, 为岩爆提供了能量来源。从隧洞洞周分布来看, 事件主要集中分布在隧洞掌子面前方及上断面围岩中, 并在隧洞南、北侧拱肩附近形成聚集区, 而下断面围岩产生事件少且呈离散状。这表明隧洞掌子面前方及上断面围岩, 尤其是南、北侧拱肩附近存在高应力集中, 聚集大量应变能, 具有高岩爆风险, 需予以

高度关注；而隧洞下断面尤其是底部微破裂少，聚集应变能小，存在岩爆风险的可能性低。实际上，隧洞北侧边墙至拱肩发生的岩爆最多，占 42.07%；南侧边墙至拱肩及掌子面次之，分别占 28.28% 和 23.45%；拱顶和底部最少，仅为 6.21% 和 0，如图 6 (b) 所示。

对比分析岩爆与事件在隧洞轴向和径向的分布特征可以明显看出，岩爆与事件的分布区域基本吻合，事件聚集区域对高岩爆风险区域具有很好的指示性。

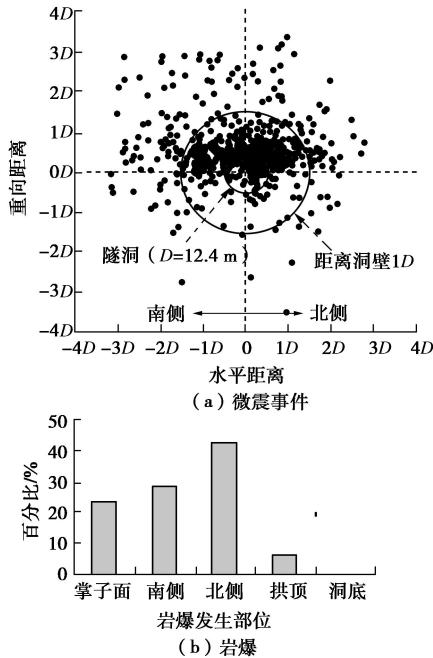


图 6 微震事件与岩爆在隧洞径向上的分布规律

Fig. 6 Distribution of microseismic events and rockbursts along radial direction of tunnel

研究发现，TBM 开挖产生的岩爆具有下列特点：①岩爆区域往往多次发生轻微岩爆，高等级岩爆孕育过程中常伴有低等级岩爆，如中等岩爆发生前伴有轻微岩爆，强烈岩爆孕育过程中伴有轻微和（或）中等岩爆，以此类推。②中等岩爆尤其是强烈和极强岩爆发生后，通常出现轻微或（和）中等岩爆（相当于余震），换言之，大的能量释放过后通常产生很多小能量的岩爆和事件，而后趋于平静，如图 7 所示。可见，TBM 开挖时围岩应变能往往是逐次释放的，这与 TBM 开挖形成的围岩应力状态密切相关。TBM 开挖时，围岩损伤小，洞壁完整性好，承载力大，使得最大切向应力位于洞壁近处，造成较大的应力梯度，导致开挖后洞壁附近持续出现岩体微破裂活动，并伴随大量事件，其中部分属轻微或中等岩爆；随着岩体微破裂增多，最大切向应力逐渐向围岩深部和破裂区附近完整岩体转移。在这一过程中，如果积聚的应变能过大，将导致中等、强烈，甚至极强岩爆的发生，排水洞 TBM 开挖诱发的 11.28 极强岩爆就属于此类情况，如图 8 所示。

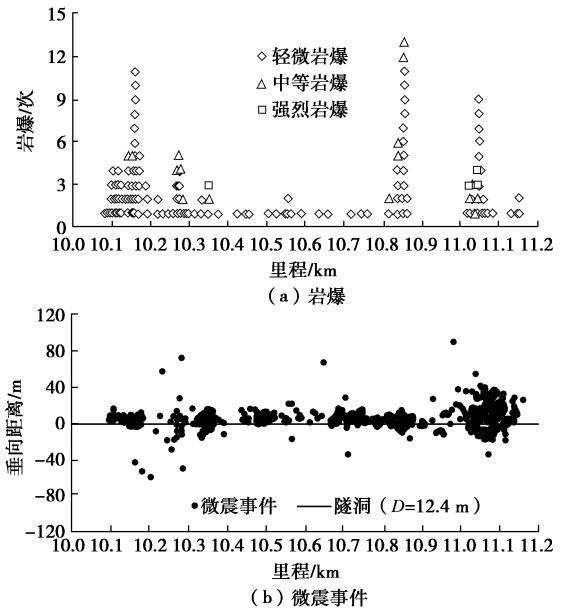


图 7 微震事件与岩爆沿隧洞轴向的分布规律

Fig. 7 Distribution of microseismic events and rockbursts along axial directions of tunnel

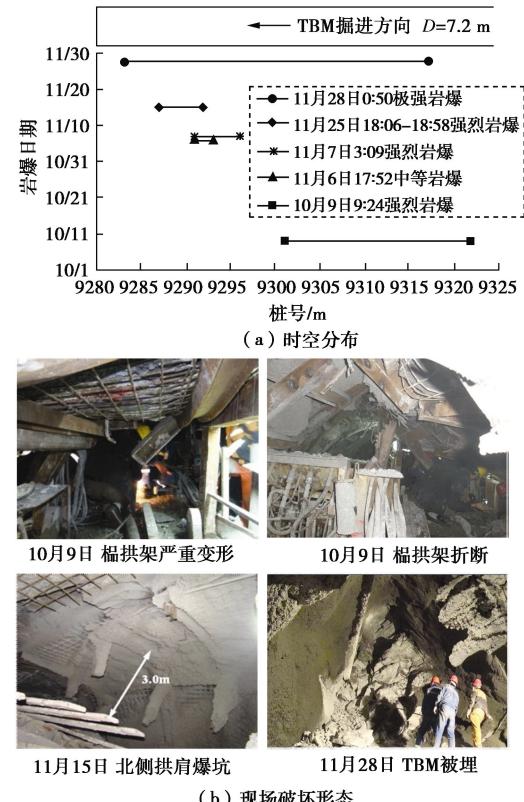


图 8 排水洞 SK9+283—9+323 岩爆的时空分布及现场破坏形态（2009 年）

Fig. 8 Space-time distribution of rockbursts and their corresponding field failure modes at stake number 9283—9323 in drainage tunnel (in 2009)

由图 8 (a) 可以看出，在 11.28 极强岩爆孕育过程中，岩爆区域发生 1 次中等、3 次强烈岩爆，另外还伴有大量轻微岩爆，最后于 2009 年 11 月 28 日 0:

50 在 9283~9313 里程发生极强岩爆, 爆坑波及深度最大达 8 m, 约 1.11 倍洞径, 现场破坏情况如图 8(b) 所示。

2 微震与岩爆时空分布特征的成因分析

由上述分析可知, 微震与岩爆主要分布在掌子面附近, 且多发生在 TBM 开挖过程及停机 1 h 以内, 之后则迅速减少, 这表明微震与岩爆具有紧随掌子面迁移演化的特征。这一分布特征与隧洞开挖后的应力调整密切相关。众所周知, 隧洞开挖是一个沿轴线不断推进的过程, 掌子面前方岩体在开挖前通常呈径向挤压状态, 开挖后因突变为径向松弛状态而发生剧烈的应力调整; 随着掌子面不断推进, 已开挖区域距掌子面越来越远, 其应力调整幅度会逐渐减小而趋于缓和, 围岩松弛状态进一步发展并逐渐稳定下来。研究发现隧洞围岩应力调整通常发生在掌子面后方 3 倍洞径尤其是 2 倍洞径以内^[24]。分析认为微震与岩爆呈现上述时空分布特征的根本原因在于, 随着掌子面不断推进, 由开挖卸荷效应引起的围岩应力调整区域会随着掌子面推进而有规律地向前移动。下面以^{#3}引水隧洞 TBM 开挖段 10186.1~10098 m 里程的微震事件为分析数据, 分析 TBM 开挖下隧洞围岩应力调整区域随掌子面推进而有规律地向前移动的特征, 进一步阐述微震与岩爆紧随掌子面迁移演化的成因。

为便于分析, 在考虑 TBM 掘进日进尺的基础上, 以 1.5~2 倍洞径作为一个分析单元, 共划分 4 个单元, 如图 9 所示。可以看出, 每个单元的微震事件主要集中分布在掌子面后方 3 倍洞径以内, 尤其是 1.5 倍洞径以内, 表明该区域岩体破裂活动频繁, 围岩应力和能量调整最为剧烈, 预示着高岩爆风险; 在开挖下一个单元时, 微震事件随着掌子面的推进而有规律地同步向前移动, 如图 9 中虚线所示。可见, 微震活动具有非常明显的时空迁移性, 这说明微震事件与隧洞开挖活动存在密切联系, 其分布呈现时空迁移规律是由于掌子面开挖卸荷效应引起的围岩应力调整范围会随着掌子面推进而有规律地向前迁移所致。

3 岩爆孕育过程微震活动时空演化规律

从力学角度看, 岩爆孕育过程实质上是岩石内部微破裂的损伤演化过程; 而微震是由于脆性岩石产生微破裂, 造成能量的快速释放而发出的瞬态弹性波, 与岩石微破裂有着息息相关的联系; 所以, 微震的时空分布能够很好地反映岩爆孕育过程。基于此, 选取典型岩爆案例为研究对象, 以岩爆孕育过程产生的微震事件为分析数据, 分析微震活动时空演化特征, 揭

示岩爆孕育过程中应力、能量积累转移与微震的内在联系, 以期为岩爆预警提供依据。^{#3}引水隧洞 11165~10050 m 里程发生 4 次强烈岩爆(见图 7(a)), 鉴于篇幅限制, 下面以 2010 年 6 月 11 日 0:27 及 3:14 发生于 11040~11046 m 里程的 2 次强烈岩爆为例, 阐述岩爆孕育过程微震活动时空演化规律。

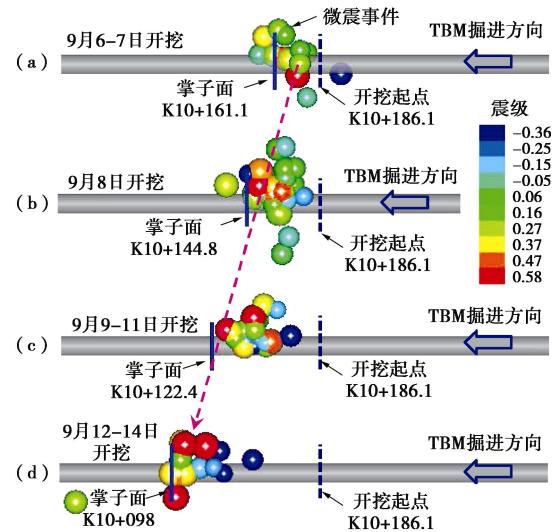


图 9 微震事件紧随掌子面迁移演化规律 (2010 年)

Fig. 9 Migration and evolution of microseismic events moving with tunnel face (in 2010)

3.1 时间演化规律

(1) 事件频次与微震能随时间的演化特征

根据 TBM 开挖记录, 岩爆区域开挖始于 2010 年 6 月 8 日 14:59, 止于 10 日 23:07。岩爆区域开挖揭露前, 当掌子面推进至距岩爆区 11.93 m(约 0.94D, 6 月 6 日)时, 岩爆区开始产生以小震级低能量为主的微震事件, 且随着掌子面的不断推进, 事件频次、累积微震能和震级呈增大趋势, 但其增加幅度较小(见图 10, 11)。这说明随着掌子面不断临近岩爆区, 岩爆区域由于受前方岩体开挖卸荷影响而产生应力重分布, 使得局部岩体形成应力集中, 积蓄高应变能, 进而导致岩体产生微破裂, 使岩体开始出现微破裂损伤。

在掌子面穿越岩爆区域过程中, 高能量大震级事件较岩爆区开挖揭露前明显增多(见图 10), 高于平均震级的比例由岩爆区域开挖揭露前 6 月 6 日、7 日的 16.67% 和 10%, 突增至 6 月 8 日、9 日的 55.56% 和 64.86%, 其中部分大事件以轻微岩爆形式显现。另外, 事件频次和累积微震能较岩爆区域开挖揭露前大幅增加且处于高位(见图 11), 分别由 6 月 6 日的 6 个/d 和 6729.19 J/d、6 月 7 日的 10 个/d 和 4507.27 J/d, 突增至 6 月 8 日的 27 个/d 和 2.65×10^5 J/d、6 月 9 日的 37 个/d 和 1.22×10^6 J/d。随着岩爆区域的不断开挖揭露, 事件频次呈现先增后减的趋势, 如图 12 中 6

月 8 日—10 日的事件分布, 而累积微震能却呈现持续递增趋势并处于较高水平。岩爆发生前, 微震事件频次并不处于峰值, 但累积微震能发生大幅度的突增且处于较高水平(见图 10, 11)。

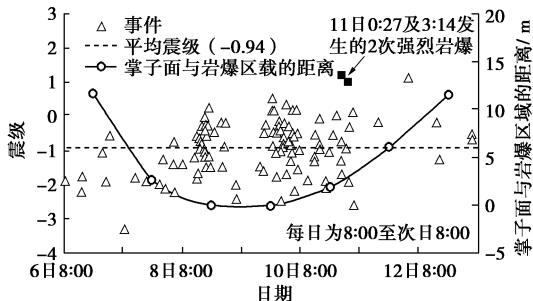


图 10 岩爆孕育过程微震震级随时间的变化特征(2010年6月)

Fig. 10 Temporal change of magnitude of microseismic events in development process of rockbursts (in June 2010)

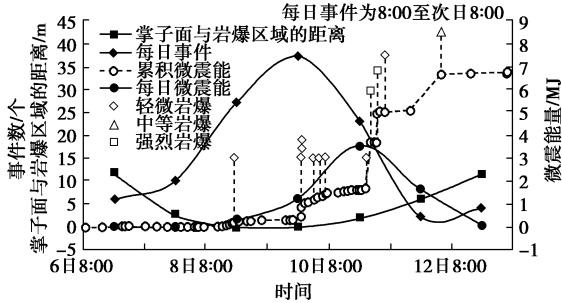


图 11 岩爆孕育过程微震事件和能量随时间的演化规律
(2010年6月)

Fig. 11 Time evolution of microseismic events and energies in development process of rockbursts (in June 2010)

上述分析表明, 在时间序列上, 累积微震能递增并发生突增的现象属于典型的微震活动异常, 是岩爆前兆信息。

(2) 累积视体积 CAV 与 Schmidt 数随时间的演化特征

视体积 (apparent volume) 是指震源区内由微震伴生的非弹性变形区岩体的体积, 它是一个较为稳定的参数; 由于其属于标量, 在时间序列曲线上可以很容易地以累积量 (cumulative apparent volume, 简称 CAV) 来表示, 可按下式计算^[25]:

$$CAV = \frac{P}{\varepsilon_s}, \quad (1)$$

式中, P 为微震体变势, ε_s 为微震源岩体应变。

由于微震活动在时间上的迁移和变化具有黏性流体的物理特性^[26], 微震活动随时间的演化规律可以借助黏性流体物理力学参数如黏度和扩散率来描述。在地震学中, 微震的动力黏滞系数与扩散率之比称为岩

体微震 Schmidt 数 (简称 Sc) ^[27-28]:

$$Sc(\Delta V, \Delta t) = \frac{v_s}{d_s} = \frac{4\mu^2 \Delta V \Delta t (\bar{t}) \sum_{t_1}^{t_2} E}{\rho(\bar{X})^2 \left(\sum_{t_1}^{t_2} P \right)}. \quad (2)$$

Schmidt 数包含了描述微震特性的 4 个基本参数 \bar{t} , \bar{X} , P 和 E , 是一个无量纲的标量, 常用来表示岩体微震流或微震变形的时空复杂性。Schmidt 数越小, 微震流越不稳定, 换言之, 微震变形越不稳定。因此, 可以根据 Schmidt 数在时间序列上的变化特征来判断岩体稳定性。

在地震学中, 视体积和 Schmidt 数是描述地震孕育过程的 2 个重要参数, 常用来描述孕震区岩体的变化规律, 两者关系可由式 (1)、(2) 给出。图 12 为累积视体积与 Schmidt 数随时间的演化规律, 可以看出, 6 月 6 日、7 日, Schmidt 数总体上呈增长趋势且保持较高水平, 而累积视体积增幅小, 基本维持低位。这表明岩体微震变形较小, 其复杂程度低, 岩体处于稳定状态。6 月 8 日 Schmidt 数快速下降而累积视体积加速上升, 这说明围岩变形出现加速, 岩体微震变形复杂程度升高, 预示着岩体处于不稳定状态。实际上, 现场发生了次轻微岩爆。6 月 9 日、10 日, 随着掌子面不断推进, 围岩应力受到扰动而发生进一步调整, 导致岩体微破裂再次加速, 累积视体积出现两次突增, 而与之相对应时段的 Schmidt 数发生突降, 这表明微震变形进一步向复杂性高的状态发展, 岩体处于高度不稳定状态。事实上, 这两个时段均有岩爆发生, 其中前者发生 6 次轻微岩爆, 后者除发生 2 次轻微岩爆外还在短时间内相继发生 2 次强烈岩爆。

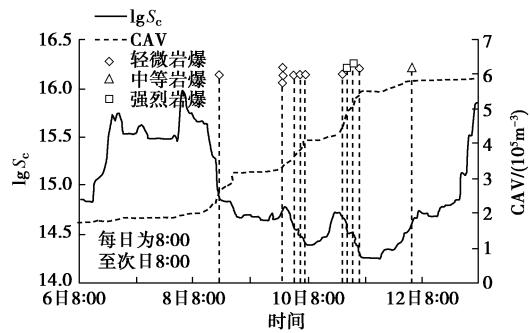


图 12 岩爆孕育过程累积视体积与 Schmidt 数随时间的演化规律 (2010年6月)

Fig. 12 Time evolution of cumulated apparent volume and Schmidt number in development process of rockbursts (in June 2010)

可见, 在时间序列上, 累积视体积快速上升而 Schmidt 数急剧下降的现象属于典型的微震活动异常, 是岩爆前兆信息。这与 Mendecki 基于矿山工程背景得

出的研究成果相一致^[29]。

3.2 空间演化规律

由图 13 (a) 和 (b) 可以看出, 掌子面面临近岩爆区域时, 岩爆区域及其附近产生以小震级低能量为主、分布离散的微震事件。掌子面穿越岩爆区域时, 微震事件突增并集中分布在掌子面附近, 且大震级高能量事件明显增多, 在岩爆区域形成非常明显的聚集区(见图 13 (c)、(d)、(e))。在隧洞径向断面上, 事件主要分布在隧洞南侧和北侧拱肩附近, 尤其是南侧拱肩附近, 形成明显的事件聚集区(见图 14)。岩爆实录

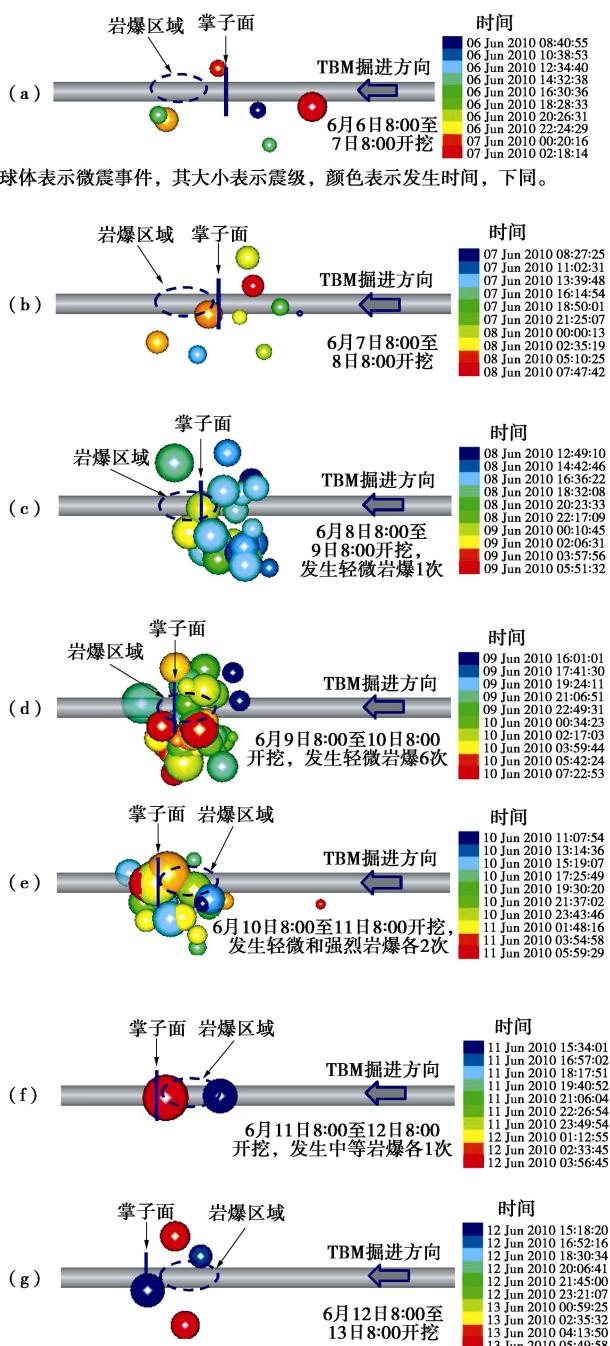


图 13 岩爆孕育过程微震事件的空间演化规律(2010 年)

Fig. 13 Spatial evolution of microseismic events in development process of rockbursts (in 2010)

显示, 2010 年 6 月 11 日 0:27, 隧洞南侧边墙至拱肩发生 1 次强烈岩爆, 随后在隧洞北侧边墙至拱肩发生 1 次强烈岩爆, 两次岩爆的发生时间相差不足 2 h。分析认为, 第二次强烈岩爆是由于隧洞北侧拱肩附近的高应力集中和第一次强烈岩爆造成应力转移共同作用所致。两次强烈岩爆之后, 岩爆区域先后发生轻微和中等岩爆各 1 次; 此后, 岩爆区域产生的事件以小震级低能量为主, 且分布离散(见图 13 (g))。这表明 TBM 掘进过程中发生大的能量释放过后会产生小能量的事件和岩爆, 然后趋于平静, 进一步说明, TBM 开挖时围岩应变能往往是逐次释放的。

综上, 在 TBM 掘进过程中, 岩爆孕育期间产生的微震事件在空间上具有如下分布特征: 潜在岩爆风险区开挖前, 微震事件分布离散且以小震级低能量事件为主; 开挖过程中微震事件分布集中, 形成事件聚集区, 且大震级高能事件明显增多。由此可见, TBM 开挖时, 微震事件逐渐向某个区域高度集结且大震级高能量事件不断增多的现象属于微震活动异常, 预示着高岩爆风险, 是岩爆前兆信息。

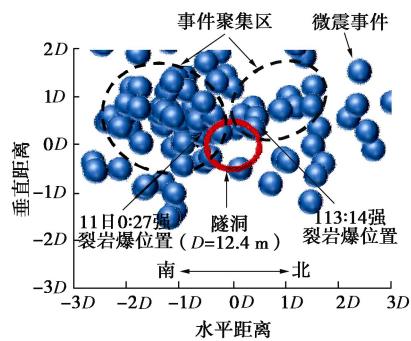


图 14 微震事件在隧洞径向上的分布特征(2010 年 6 月 8 日—13 日)

Fig. 14 Distribution characteristics of microseismic events along radial direction of deep tunnel (on June 8~13, 2010)

4 结 论

锦屏二级水电站#3 引水隧洞 TBM 开挖段属典型高地应力岩石地下工程, 以此为工程背景, 基于大量微震监测数据和岩爆实例, 开展深埋隧洞 TBM 掘进过程中微震与岩爆时空分布特征及岩爆孕育过程微震演化规律研究, 获得的主要结论如下:

(1) 微震活跃期与岩爆高发期位于 TBM 作业时段及停机后 1 h 以内; 微震主要分布在掌子面后方 3 倍洞径至前方 0.4 倍洞径之间的区域, 其峰值位于掌子面后方 0.8 倍洞径附近; 岩爆主要发生在掌子面后方 2 倍洞径, 尤其是 1 倍洞径以内。显然, 微震与岩爆具有良好的时空相关性。

(2) 在时间序列上, 微震能突增现象, 以及累积视体积快速上升而 Schmidt 数急剧下降的现象均属微震活动异常, 属岩爆前兆。

(3) 在空间序列上, 微震事件逐渐向某个区域高度集结且大震级高能量事件不断增多的现象属微震活动异常, 预示高岩爆风险, 属岩爆前兆。

致 谢: 感谢中国科学院武汉岩土力学研究所锦屏 II 水电站微震监测项目组明华军、肖亚勋、丰光亮等在获取微震数据及收集岩爆实例等方面所做的贡献。

参考文献:

- [1] 徐林生, 王兰生, 李天斌, 等. 二郎山公路隧道岩爆特征预测研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1999(2): 55 - 59. (XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng, LI Tian-bin, et al. Study on the character of rockburst and its forecasting in the Erlang Mountain tunnel[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1999(2): 55 - 59. (in Chinese))
- [2] WHITTAKER B N, SINGH R N, SUN G. Rock fracture mechanics: principles, design, and applications[M]. Elsevier, 1992.
- [3] 赵周能, 冯夏庭, 肖亚勋, 等. 不同开挖方式下深埋隧洞微震特性与岩爆风险分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 867 - 876. (ZHAO Zhou-neng, FENG Xia-ting, XIAO Ya-xun, et al. Analysis of microseismic features and rockburst risk of deep tunnel constructed with different excavation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 867 - 876. (in Chinese))
- [4] 司军平, 高洪涛, 刘正雄. 对秦岭隧道 II 线平导进口端岩爆的几点认识[J]. 世界隧道, 1998(2): 57 - 60. (SI Jun-ping, GAO Hong-tao, LIU Zheng-xiong. Review on the construction of long single-track tunnel with tyre transportation[J]. Tunnelling and Underground Works, 1998(2): 57 - 60. (in Chinese))
- [5] 李春杰, 李洪奇. 秦岭隧道岩爆特征与施工处理[J]. 世界隧道, 1999, 16(1): 36 - 41. (LI Chun-jie, LI Hong-qi. Rockburst characteristics and treatment methods in Qinling tunnel[J]. Tunnelling and Underground Works, 1999, 16(1): 36 - 41. (in Chinese))
- [6] 李 春. 秦岭 I 线隧道 TBM 施工初始阶段的体会和认识[J]. 世界隧道, 1998(4): 15 - 17. (LI Chun. Experience and cognition on TBM construction of Qinling tunnel line I [J]. Tunnelling and Underground Works, 1998(4): 15 - 17. (in Chinese))
- [7] RUDAJEV V, SÍLENY J. Seismic events with non-shear component: II rock bursts with implosive source component[J]. Pure and Applied Geophysics, 1985, 123(1): 17 - 25.
- [8] 张志强, 关宝树. 岩爆发生条件的基本分析[J]. 铁道学报, 1998, 20(4): 82 - 85. (ZHANG Zhi-qiang, GUAN Bao-shu. Basic analysis of rock bursting occurrence condition[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 20(4): 82 - 85. (in Chinese))
- [9] 王彦辉, 东兆星. 隧道施工中岩爆的成因及预防研究[J]. 河北交通科技, 2010, 7(2): 27 - 29. (WANG Yan-hui, DONG Zhao-xing. Study on rock burst mechanism and prevention in tunnel[J]. Hebei Jiaotong Science and Technology, 2010, 7(2): 27 - 29. (in Chinese))
- [10] 刘丽萍, 谢 冰. 钻爆法与全断面掘进机修建地下隧洞的比较[J]. 山西水利科技, 2000(4): 1 - 5. (LIU Li-ping, XIE Bing. Comparison on the "Drill Blast" method and the TBM method[J]. Shanxi Hydro Technics, 2000(4): 1 - 5. (in Chinese))
- [11] 侯 靖, 张春生, 单治钢. 锦屏 II 级水电站深埋引水隧洞岩爆特征及防治措施[J]. 地下空间与工程学报. 2011, 7(6): 1251 - 1257. (HOU Jing, ZHANG Chun-sheng, SHAN Zhi-gang. Rockburst characteristics and the control measures in the deep diversion tunnel of Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1251 - 1257. (in Chinese))
- [12] 丁 宇. 锦屏二级水电站引水隧道 TBM (隧道掘进机) 施工岩爆综合预测研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012. (DING Yu. Study on rockbursts prediction of TBM construction at headrace tunnels of Jinping II Hydropower Station[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [13] 吴世勇, 王 鹤. 锦屏二级水电站深埋长隧洞群的建设和工程中的挑战性问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2161 - 2171. (WU Shi-yong, WANG Ge. Challenge Issues in construction and project of large-scale deep-buried tunnel group of Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2161 - 2171. (in Chinese))
- [14] 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 Xia-ting, CHEN Bing-rui, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts at deep tunnels: immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering, 2012, **31**(3): 433 – 444. (in Chinese))
- [15] 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 Bing-rui, FENG Xia-ting, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts at deep tunnels: time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(3): 561 – 569. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 明华军, 陈炳瑞, 冯夏庭, 等. 基于矩张量的深埋隧洞岩爆机理分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 163 – 181. (MING Hua-jun, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, et al. Rockburst mechanism analysis for deep-buried tunnel based on moment tensor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 163 – 181. (in Chinese))
- [18] 于群, 唐春安, 李连崇, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2315 – 2322. (YU Qun, TANG Chun-an, LI Lian-chong, et al. Nucleation process of rockbursts based on microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2315 – 2322. (in Chinese))
- [19] 冯夏庭, 陈炳瑞, 张传庆, 等. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, ZHANG Chuan-qing, et al. Mechanism, warning and dynamic control of rockburst development processes[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [20] 袁亮, 彭邦兴. 锦屏二级水电站引水隧洞岩爆段 TBM 穿越技术[J]. 水电站设计, 2012, **12**(增刊 1): 13 – 17. (YUAN Liang, PENG Bang-xing. TBM excavation technology of rockburst zone of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2012, **12**(S1): 13 – 17. (in Chinese))
- [21] 张照太. 大直径 TBM 通过深埋强岩爆段的岩爆防治方法[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(2): 431 – 435. (ZHANG Zhao-tai. TBM construction method in the large overburden and intensive rockburst zone[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(2): 431 – 435. (in Chinese))
- [22] GB50287—2006 水力发电工程地质勘查规范[S]. 2006. (GB50287 — 2006 Code for hydropower engineering geological investigation[S]. 2006. (in Chinese))
- [23] BLAKE W, HEDLEY D G F. Rockbursts: case studies from North American hardrock mines[M]. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc, 2003: 19 – 28.
- [24] 赵周能, 冯夏庭, 丰光亮, 等. 深埋隧洞微震活动区与岩爆的相关性研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(2): 491 – 497. (ZHAO Zhou-neng, FENG Xia-ting, FENG Gang-liang, et al. Study on relativity between rockburst and microseismic activity zone in deep-buried tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(2): 491 – 497. (in Chinese))
- [25] MENDECKI A J. Keynote address: Real time quantitative seismology in mines[C]// Rockbursts and Seismicity in Mines, Rotterdam, 1993: 287 – 295.
- [26] KOSTROV B V. Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rock[J]. Phys Solid Earth, 1974(13):13 – 21.
- [27] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines [M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [28] MCCOMB W D. The physics of fluid turbulence[J]. Chemical Physics, 1990.
- [29] MENDECKI A J. Data-driven understanding of seismic rock mass response to mining[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. Johannesburg: The South Africa Institute of Mining and Metallurgy, 2001: 1 – 9.