

# 爆破开挖扰动作用下深埋隧洞的微震分布规律

赵周能<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1,2</sup>, 焦凯<sup>3</sup>, 陈天宇<sup>1</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 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;

3. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

**摘 要:** 基于地应力高、开挖断面大、日炮次多、爆破扰动强的施工环境下的微震监测数据, 研究了爆破开挖扰动作用下深埋隧洞的微震分布规律. 结果表明: 爆破开挖卸荷影响范围内的微震活动既与围岩应力重分布有关, 又与爆破扰动密不可分; 爆破扰动是开挖卸荷影响范围之外微震活动的主要诱因, 是时滞型岩爆孕育发生的重要影响因素之一; 微震分布区域与爆破地点的相对位置及距离密切相关. 研究结果可为钻爆法开挖下的隧洞岩爆防治提供参考.

**关 键 词:** 爆破扰动; 深埋隧洞; 微震分布; 岩爆; 围岩应力

中图分类号: TU 45 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2013)08-1179-05

## Microseismic Event Distribution in Deep Tunnels Under the Disturbance of Blasting Excavation

ZHAO Zhou-neng<sup>1</sup>, FENG Xia-ting<sup>1,2</sup>, JIAO Kai<sup>3</sup>, CHEN Tian-yu<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China. Corresponding author: ZHAO Zhou-neng, E-mail: zhzhneng@163.cn)

**Abstract:** Based on the monitored microseismic data in situations with high geo-stress, large diameter, frequent daily blasting and strong blasting disturbance, the distribution of microseismic events occurring in the deep tunnels of Jinping II hydropower station under the action of blasting disturbance was investigated. The results show that the microseismic activities in the areas affected by excavation unloading are closely related to surrounding rock stress redistribution and blasting disturbance. And blasting disturbance is a main factor of triggering microseismic activities outside the influence range of excavation unloading; hence it is one of important factors for triggering the time-delayed rockburst. Moreover, the distribution area of microseismic events is associated with its distance from the sites where blasting events happen and the relative location between them. The results achieved can provide the reference for the rockburst prevention during deep tunnel excavation by drill-and-blast technique.

**Key words:** blasting disturbance; deep tunnel; microseism distribution; rockburst; surrounding rock stress

深部岩体工程在开挖隧洞(道)或洞室过程中往往面临危害性较大的岩爆灾害,岩爆的发生与众多因素有关,其中爆破扰动是一个重要诱因.如南非 Witwatersrand 金矿的地震活动高峰点出现在进行爆破工作日的下午;北京矿务局门头沟

煤矿发生的412次破坏性较大的岩爆中,80%是发生在放炮后40 min内;枣庄矿务局陶庄煤矿爆破触发的岩爆占68%<sup>[1]</sup>.目前,微震监测技术是岩爆灾害监测非常有效的手段和方法.该技术首先利用岩体发生微破裂所释放的地震波反演岩体

收稿日期: 2012-12-19

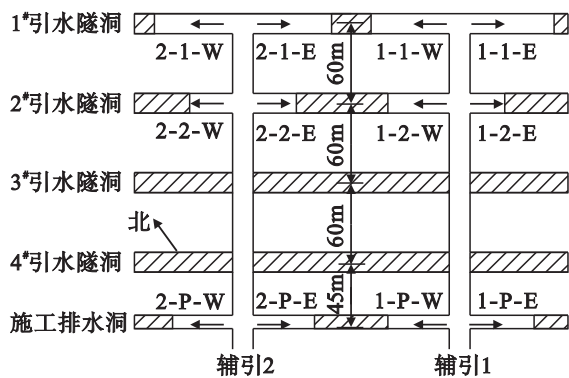
基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB732006).

作者简介: 赵周能(1976-),男,广西桂林人,东北大学博士研究生;冯夏庭(1964-),男,安徽潜山人,东北大学教授,博士生导师.

微破裂发生的时刻、位置和性质(即微震信息的时、空、强)再据此分析岩爆孕育规律,然后进行岩爆灾害预测预警。显然,准确掌握爆破开挖扰动作用下岩体微破裂(微震)分布规律是对爆破开挖扰动诱发的岩爆灾害进行成功预测预警的基础。所以,有必要系统地研究爆破开挖扰动作用下微震分布规律。在此方面,国内外学者进行了许多研究,并取得了一些重要的成果<sup>[2-5]</sup>,但这些研究主要是以矿山工程(如南非、澳大利亚、加拿大、印度及我国等国的深井矿山)为背景,而针对深埋隧洞工程的相关研究鲜有报道。在深埋大断面隧洞多掌子面同时推进条件下,爆破开挖扰动诱发微震的分布规律有待研究。鉴于此,本文以锦屏二级水电站深埋隧洞工程为背景,基于丰富的现场微震数据,探讨了爆破开挖扰动作用下微震的分布规律,以期对岩爆预测预警提供参考和依据。

### 1 工程背景简介

锦屏二级水电站深埋隧洞群由4条引水隧洞和1条施工排水洞组成,平均长度约16.7 km,平均埋深约1610 m,最大埋深达2525 m,其中埋深超1500 m的洞段长度占总长的75.7%~75.9%,围岩最大地应力达50~70 MPa。1#、3#引水隧洞及排水洞的东端采用隧道掘进机开挖;其西端及2#、4#引水隧洞则采用钻爆法开挖。其中引水隧洞分两次开挖,上断面开挖宽13 m,高8.5~9 m;排水洞一次开挖,洞径约8 m。为了加快施工进度,隧洞中部自东向西布置了3条施工支洞(辅引1~3)及多条横通道,以实现多个掌子面同时开挖。图1示出了隧洞中部辅引1~2在2010-08~2010-12的掌子面分布情况,可见,若按每



“1-1-E”表示辅引1开挖区1#水隧洞向东掌子面,其他类推,下同。

图1 隧洞中部掌子面分布示意图(2010-08~2010-12)  
Fig. 1 Distribution of the working faces in middle area of tunnels (from August to December 2010)

天1班计,已开挖洞段每天将承受12次爆破扰动;若每天2班计,则多达24次。此外,隧洞线间距小(45~60 m),掌子面沿轴线方向呈阶梯式不等速推进,使得施工环境具有地应力高、开挖面大、日炮次多、爆破扰动强的特点。频繁的爆破扰动势必影响隧洞围岩稳定性,甚至诱发岩爆灾害。

### 2 爆破开挖扰动下微震分布规律

#### 2.1 开挖卸荷影响范围内微震分布规律

图2为基于数值模拟得出的锦屏二级水电站深埋隧洞轴向位移变形规律曲线<sup>[6]</sup>。可见,在掌子面前方26 m(2倍洞径(跨))处,围岩位移释放率趋于0,这表明掌子面开挖对该处围岩位移影响很小;在掌子面后方26 m处,围岩位移释放率约96%,而在掌子面后方39 m(3倍洞径(跨))处,围岩位移释放率接近100%,这说明围岩变形已基本完成。由此得出,锦屏二级水电站深埋隧洞开挖卸荷影响范围主要介于掌子面后方3倍洞径(跨)至前方2倍洞径(跨)之间;而掌子面后方3倍洞径(跨)以外,围岩变形已达到稳定,应力重分布已基本完成,这与基于现场位移测试数据得出的研究结果<sup>[7]</sup>基本吻合。

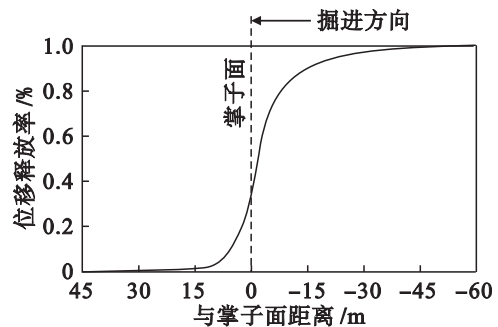


图2 隧洞纵向变形曲线<sup>[6]</sup>  
Fig. 2 Longitudinal deformation profile of tunnel

工程实践表明,钻爆法开挖条件下,微震事件分布既受围岩应力重分布的影响,又受爆破扰动的影响;而机械凿岩法主要受围岩应力重分布的影响,故对比分析两种开挖方法对事件分布的影响,有助于认识在爆破开挖扰动下微震事件在开挖卸荷影响范围内的分布规律。

加拿大 Mine-By 试验隧洞(长46 m,直径3.5 m)机械开挖段的现场微震监测结果<sup>[8]</sup>显示,在-3D~0.4D(D代表洞径,下同)之间,事件先呈递增趋势,至-0.3D达最大值,而后递减,但越过掌子面后便急剧下降,仅深入到掌子面前方0.4D,见图3a。而锦屏二级水电站深埋隧洞钻爆

法开挖时,事件在开挖卸荷影响范围呈正态分布,其峰值位于  $-0.2D$  附近,深入到掌子面前方的距离较大,见图 3b。对比分析可以看出,机械凿岩法开挖时,大部分事件分布于  $-2D \sim 0.2D$ ,  $0.4D \sim 2D$  范围内未产生事件,  $-3D \sim -2D$  范围内出现事件极少;而钻爆法在这三个范围内均产生众多事件,这表明钻爆法在开挖卸荷影响范围内诱发事件的范围比机械凿岩法大,另外还可看出,钻爆法开挖时事件峰值两侧的递减幅度明显小于机械凿岩法,这说明前者引起的事件分布的集中程度相对较低,在较大范围内表现出强微震活动性;而后者引起的事件分布集中程度较高,仅在事件峰

值两侧较小范围表现出强微震活动性。综上,钻爆法开挖诱发事件分布范围及其集中区域均比机械凿岩法大,这主要是由于这两种方法诱发微震事件的动力源不完全相同。机械凿岩法主要受围岩应力重分布的影响,而钻爆法除此之外,还存在开挖爆破的爆炸荷载以及岩体应力瞬态卸荷导致的岩体破坏<sup>[9]</sup>,并且频繁的爆破震动在岩体中产生的疲劳累积损伤也有助于岩体裂隙的扩展。由此可以得出,钻爆法与机械凿岩法相比较,前者造成的围岩破坏(损伤)范围较后者大,所以钻爆法开挖有利于应力集中向围岩深部转移以及应变能的释放。

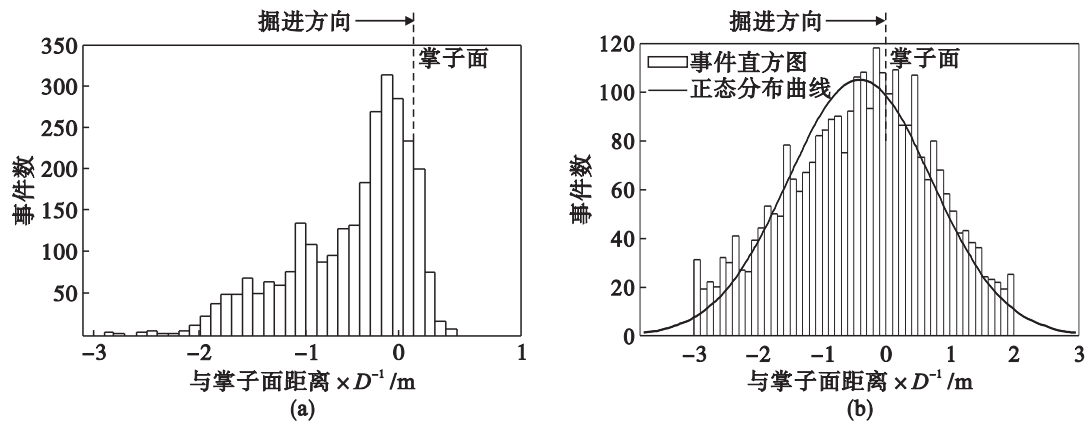


图 3 隧洞掌子面附近微震事件分布  
Fig. 3 Distribution of microseismic events near tunnel face during tunnel excavation  
(a) —机械凿岩法<sup>[8]</sup>; (b) —钻爆法。

2.2 开挖卸荷影响范围外微震分布规律

由 2.1 节分析可知,开挖引起的围岩应力扰动对掌子面后方 3 倍洞径(跨)以外区域影响甚小,其围岩已达到新的稳定状态,应力重分布基本完成。因此,伴有微震的围岩破裂活动主要受外界扰动影响,如机械振动、爆破扰动、岩爆等,其中尤以爆破扰动影响最为显著。当然,岩石流变性质引起的裂缝流变断裂效应<sup>[10]</sup>对其也有一定影响;但工程实践表明,对硬岩地下工程而言,在施工期间,该影响甚微,可忽略不计。

图 4 为爆破扰动诱发微震事件的典型实例。可见 3-4-W 在 2011-07-02 ~ 2011-07-14 开挖过程中,掌子面后方 39 m (3 倍洞跨) 至 278 m 范围内产生了 40 个事件,其中主要分布于引(4) 5+801 ~ 5+875。值得指出的是,该区域与 2011-07-27 发生时滞型岩爆的位置(引(4) 5+825 ~ 5+810)一致;这表明爆破扰动对伴有微震的围岩破裂活动具有十分显著的影响,是引起深埋隧洞塌方和岩爆的重要原因之一。

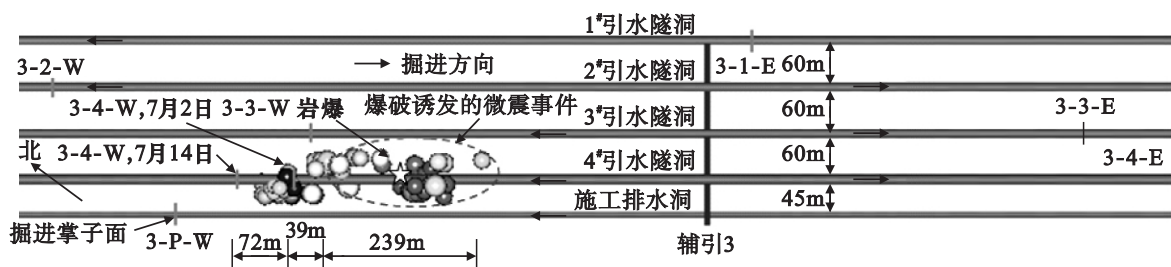


图 4 爆破扰动诱发的微震事件  
Fig. 4 Microseismic events induced by blasting disturbance

统计数据表明,在掌子面后方开挖卸荷影响范围之外,从整体上来看,事件随着与掌子面距离的

增加而呈递减趋势,其中  $-3D \sim -10D$  范围内分布最多,占掌子面后方开挖卸荷影响范围之外事件

总数的 76.93% ,  $-10D \sim -18D$  范围内次之 , 占 17.83% , 小于  $-18D$  范围内最少 , 仅占 5.24% , 见图 5. 这一分布规律与隧洞自身及其附近掌子面产生的爆破扰动密切相关. 根据爆破地震波衰减规律 , 爆破扰动强度随着爆心距的增加而递减<sup>[11]</sup>. 所以 , 就同一洞段当前掌子面爆破扰动而言 , 在掌子面后方已开挖洞段中 , 距掌子面越远 , 扰动强度越弱 , 由此诱发的岩体破裂活动也越弱 , 伴随的微震事件就越少 , 使得事件随着与掌子面距离的增加而呈递减趋势. 另外 , 由于隧洞之间沿洞轴线方向呈阶梯式不等速向前推进 , 掌子面之间通常相差一定距离 , 一般为 30 ~ 350 m , 由此造成已开挖洞段受到附近掌子面频繁爆破扰动的影响 , 从而导致掌子面后方较大范围(最远约 360 m) 产生众多微震事件 , 甚至在局部区域出现事件峰值 , 见图 6a.

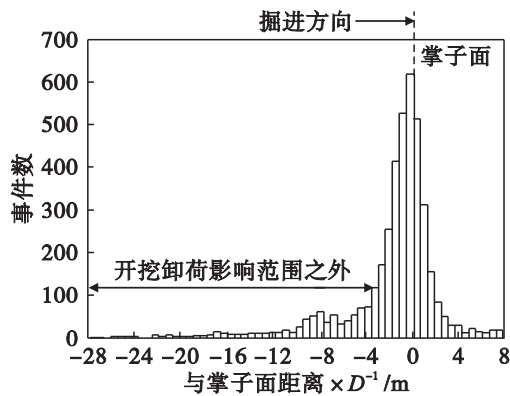


图 5 引水隧洞微震事件分布  
Fig. 5 Distribution of microseismic events in diversion tunnel

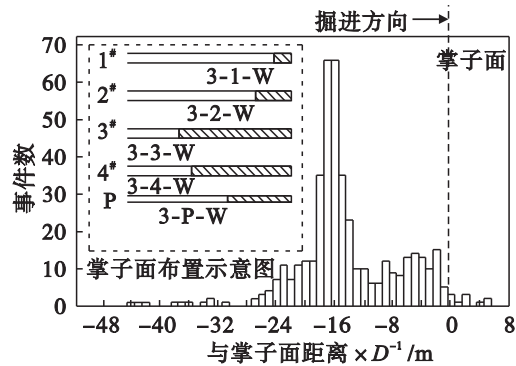
2.3 不同线间距隧洞爆破开挖微震分布规律

图 6 所示为不同线间距隧洞爆破开挖引起的微震分布 , 其中掌子面布置示意图中的 1# ~ 4# 表示引水隧洞 , P 表示施工排水洞 , 阴影部分表示未开挖区 , 箭头所指方向表示隧洞掘进方向.

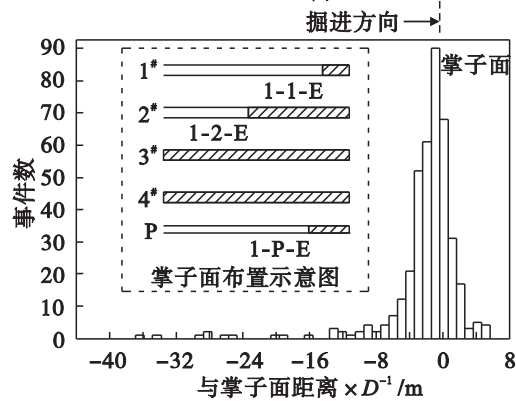
在隧洞轴线方向 , 3-1-W , 3-2-W 掌子面位于 3-P-W 掌子面前方 250 m 以外 , 与 3-P-W 已开挖洞段的爆心距均大于 300 m ; 而 3-3-W , 3-4-W 掌子面分别位于 3-P-W 掌子面后方 150 ~ 200 m 和 90 ~ 130 m , 且呈阶梯式分布 , 与 3-P-W 已开挖洞段的最小爆心距分别为 105 m 和 45 m. 就附近掌子面爆破扰动而言 , 3-P-W 的微震活动主要受 3-3-W , 3-4-W , 尤其是后者的影响. 统计结果显示 , 3-P-W 的事件分布在  $-44D \sim 6D$  之间 , 其中大部分事件介于  $-26D \sim 0$  之间 , 占 95.71% , 而尤以  $-18D \sim -14D$  范围内最多 , 占 45.37% , 见图 6a. 由此可见 , 事件分布范围远大于开挖卸荷影响范围 , 且事件峰值并不出现在掌

子面附近 , 而是出现于掌子面后方  $-16D$  ( $-128$  m) 附近. 形成这种事件分布的根本原因在于 , 3-P-W 已开挖洞段时间受到 3-3-W 及 3-4-W 掌子面 , 尤其是后者频繁爆破扰动的影响 ; 另外 , 由于 3-P-W 与 3-4-W 掌子面在较长时间内保持约 130 m 的距离同时向前推进 , 导致 3-P-W 掌子面后方  $-16D$  ( $-128$  m) 附近出现大量微震事件 , 从而形成事件峰值.

在隧洞轴线方向 , 1-1-E 掌子面位于 1-P-E 掌子面前方 20 ~ 50 m , 与 1-P-E 已开挖洞段的最小爆心距约 226 m ; 而 1-2-E 掌子面位于 1-P-E 掌子面后方 120 ~ 200 m , 与 1-P-E 已开挖洞段的最小爆心距为 165 m. 显然 , 1-1-E 及 1-2-E 掌子面产生的爆破扰动是 1-P-E 已开挖洞段围岩微震活动的一个重要诱因. 由图 6b 可见 , 1-P-E 的事件分布在  $-37D \sim 6D$  之间 , 其中主要分布在  $-6D \sim 2D$  之间 , 占 86.5% , 事件峰值出现在掌子面附近.



(a)



(b)

图 6 施工排水洞微震事件分布  
Fig. 6 Distribution of microseismic events in drainage tunnel

(a) 3-P-W 小线间距隧洞爆破开挖 ;  
(b) 1-P-E 大线间距隧洞爆破开挖 .

对比图 6a 和图 6b 可以看出 , 在开挖卸荷影响范围之外 , 无论是事件分布范围还是事件数 , 3-P-W 洞段均比 1-P-E 洞段大 , 其主要原因在于

前者与附近掌子面的爆心距(45 m, 105 m) 比后者(165 m, 226 m) 小, 换言之, 前者受到的爆破扰动较后者强, 这表明掌子面后方微震分布区域与爆破地点的相对位置及距离密切相关。另外, 前者的系统支护在部分时段距掌子面较远, 而后者的系统支护基本上紧跟掌子面也是原因之一。需要说明的是, 1-P-E 掌子面附近微震活动明显比 3-P-W 强, 其主要原因, 一方面是 1-P-E 的平均埋深(2 459 m) 比 3-P-W(1 954 m) 大, 地应力高; 另一方面是 3-P-W 在向前推进过程中, 在部分时段, 监测仪器因掌子面附近不具备安装条件而远离掌子面, 导致部分有效事件未被捕获。同样值得指出的是, 3-P-W 在开挖卸荷影响范围之外发生 8 次时滞型岩爆, 而 1-P-E 仅 1 次, 再次表明爆破扰动在时滞型岩爆孕育发生过程中具有重要作用。

### 3 结 论

1) 开挖卸荷影响范围内的微震活动既与围岩应力重分布有关, 又与爆破扰动密不可分; 在此范围, 微震事件呈正态分布, 其峰值位于  $-0.2D$  附近。

2) 爆破扰动是开挖卸荷影响范围之外微震活动的主要诱因, 是时滞型岩爆孕育发生的重要影响因素之一。在该范围内, 微震事件总体上随着与掌子面距离的增加而递减, 但在附近强爆破扰动下, 距离掌子面较远区域可能出现事件峰值。

3) 微震分布区域与爆破地点的相对位置及距离密切相关。

#### 参考文献:

- [1] 王文星, 潘长良. 现场岩爆发生条件探讨[J]. 西部探矿工程, 2002, 74(1): 54-56.  
(Wang Wen-xing, Pan Chang-liang. Conditions of in-situ rock-

- burst[J]. *West China Exploration Engineering*, 2002, 74(1): 54-56.)
- [2] Maochen G E. Efficient mine microseismic monitoring [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005, 64(1/2): 44-56.
- [3] Butt S D, Calder P N, Apel D B. The use of high frequency and mine-wide microseismic systems to monitor the movement of blasting induced stresses [J]. *CIM Bulletin*, 2000, 93(1040): 90-95.
- [4] Spottiswoode S M, Milev A M. The use of waveform similarity to define planes of mining-induced seismic events [J]. *Tectonophysics*, 1998, 289(1): 51-60.
- [5] Lindin G L, Lobanova T V. Pre-rockbursting seismic activity in Tashtagol mine [J]. *Journal of Mining Science*, 2012, 48(2): 260-268.
- [6] 冯夏庭, 张传庆, 李邵军, 等. 深埋硬岩隧洞动态设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
(Feng Xia-ting, Zhang Chuan-qing, Li Shao-jun, et al. Mechanism, warning and dynamic control of rockburst evolution processes [M]. Beijing: Science Press, 2013.)
- [7] Carranza-Torres C, Fairhurst C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion [J]. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2000, 15(2): 187-213.
- [8] Martin C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(5): 698-725.
- [9] Abuov M G, Aitaliev S M, Ermekov T M, et al. Studies of the effect of dynamic processes during explosive break-out upon the roof of mining excavations [J]. *Journal of Mining Science*, 1988, 24(6): 581-590.
- [10] 周维垣. 高等岩石力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.  
(Zhou Wei-yuan. Advanced rock mechanics [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1990.)
- [11] Kahrman A. Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(11): 887-892.