

DOI: 10.11779/CJGE201712004

深部岩体隧洞即时型岩爆微震震源体积的分形特征研究

于 洋^{1,2}, 冯夏庭², 陈炳瑞², 肖亚勋², 丰光亮²

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013; 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)

摘 要: 根据即时型岩爆孕育及发生过程中微震信息的自相似性, 提出了一种震源体积的分形计算方法。运用上述方法, 基于锦屏二级水电站施工排水洞及 4 条引水隧洞施工过程中大量不同类型、等级的即时型岩爆案例, 展开微震事件震源体积分布的分形行为研究。研究表明: 即时型岩爆孕育及发生过程中的微震信息震源体积分布是具有分形结构的; 即时性应变型岩爆体积分形维数大于 0.7, 即时性应变-结构面滑移型岩爆体积分形维数小于 0.6, 这意味着根据微震事件体积分形维数可以对即时型岩爆的类型进行区分; 对于即时型岩爆来说, 岩爆等级越强则微震体积分形维数值越大; 对于即时性应变-结构面滑移型岩爆, 结构面数越多则震源体积分形维数值越小。上述研究结果可以为高地应力条件下不同类型岩爆的预测与防治提供合理的科学依据。

关键词: 即时型岩爆; 水电站; 微震事件; 震源体积; 分形维数

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)12-2173-07

作者简介: 于 洋(1982-), 男, 博士, 主要从事深部岩体力学方面的研究工作。E-mail: lukeryuyang@163.com。

Fractal characteristics of micro-seismic volume for different types of immediate rock-bursts in deep tunnels

YU Yang^{1,2}, FENG Xia-ting², CHEN Bing-rui², XIAO Ya-xun², FENG Guang-liang²

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: A fractal method is put forward to study the self-similarity of the volume distribution of micro-seismic events during the development of different types of immediate rock-bursts. The proposed method is used to study the fractal behaviours of the volume distribution of micro-seismic events during the development of immediate rock-bursts that occur in four deep headrace tunnels and one drainage tunnel at the Jinping II Hydropower Station. The results indicate that the volume distribution of micro-seismic events during the evolution of immediate rock-bursts displays fractal properties. The fractal dimension of volume can be used as the basis for estimating rock-burst type, that is, the fractal dimensions of immediate strain rock-bursts are >0.7 and <1 , but those of immediate strain-structure slip rock-bursts are >0.2 and <0.6 . For the immediate strain rock-bursts and the immediate strain-structure slip rock-bursts, if the intensity is lower, the fractal dimensions of volume will be smaller. For the immediate strain-structure slip rock-bursts, the more the number of structure planes, the smaller the fractal dimensions of volume. These conclusions can be used as the guideline to develop a warning system and to reduce the risk of rock-bursts during construction of deep, hard-rock tunnels.

Key words: immediate rock-burst; hydropower station; micro-seismic event; micro-seismic volume; fractal dimension

0 引 言

岩爆是高应力条件下, 聚积于岩体中的弹性变形势能突然猛烈释放, 导致岩石爆裂并弹射出来的现象。深部岩体隧洞开挖过程中频发的岩爆灾害时常会造成大量的人员伤亡以及巨大的财产损失。因此, 岩爆的预测与防治对于深部地下工程的顺利开展具有十分重要的意义。

目前, 微震监测已经在深部岩体隧洞岩爆的研究中取得了成功的应用^[1], 国内外学者将微震震源体积作为可靠的震源参数进行了大量的研究: Mendeck 等^[2-3]提

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509092); 江西省自然科学基金项目(20161BAB216141, 2016BAB206159); 江西省教育厅科研项目(150518); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金项目(Z015004)
收稿日期: 2016-09-14

出岩体发生失稳破坏前常伴随有累积震源体积上升这一前兆特征。陈炳瑞等^[4]针对深埋隧洞 TBM 开挖方式下的微震活动性进行了研究。结果表明, 在一些岩爆发生之前, 微震事件数及微震事件震源体积在时间上具有一个突增的过程, 此过程中常伴随着累积震源体积的增加以及能量指数的降低。

自从 Mandelbrot^[5]根据海岸线的自相似性提出了分形几何的概念以来, 分形几何迅速的发展为一个重要的数学分支, 近 20 年来分形理论被发展为一个有效的理论工具用于针对自然界以及工程技术中不规整的现象进行描述, 并且被广泛的应用到几乎各个领域, 在基于微震信息的岩爆前兆特征研究方面取得许多令人瞩目的显著成果: Kagan 等^[6-7]首先证实了地震孕育过程中的微震事件在空间结构及时间序列上是具有分形特征的, 并且空间分形维数值一般情况下是震源深度的 2.2 倍, 然后在进一步的研究中指出如果将地震看作是一次大型的事件, 那么余震发生的几率与 t^{-1} 具有正比例关系。另外, Gutenberg–Richter 理论同样指出从小的岩体微裂隙到大范围的地震, 其频率、能量、震级以及表面的有效裂隙的尺寸都是具有自相似性的^[8-14]。

根据深埋隧洞开挖过程中岩爆的发生的时间、位置可以将其划分为即时型岩爆和时滞型岩爆^[15-16]。即时型岩爆, 指在工程开挖卸荷效应影响范围内发生的岩爆, 空间上发生在掌子面及其附近的围岩中, 时间上发生在开挖后几小时到几天内; 时滞型岩爆, 指发生在隧洞掌子面开挖应力调整扰动范围之外, 一般在时间上滞后该区开挖时间 6~30 d, 空间上在距离掌子面 80 m 的范围内, 其发生是岩爆区开挖应力调整与外界扰动联合作用的结果。根据岩爆的发生机制又将其划分为应变型岩爆和应变–结构面滑移型岩爆^[1]。综上所述, 即时型岩爆可以分为即时性应变型岩爆和即时性应变–结构面滑移型岩爆。

本文以锦屏二级水电站深埋隧洞的开挖过程为工程背景。引入分形理论的计算方法, 针对上述两种不同类型即时性岩爆孕育及发生过程中的微震信息进行震源体积的分形特征研究, 并且对分形维数的分布规律进行机理分析。其结果可以为深埋地下隧洞开挖过程中岩爆风险的控制提供合理的科学依据。

1 工程概述及微震实时监测

1.1 工程概述

锦屏二级水电站深埋隧洞工程, 位于四川省凉山彝族自治州境内的雅砻江锦屏大河弯处雅砻江干流上, 最大埋深为 2525 m, 其中埋深大于 1600 m 的洞

段占隧洞总长度的 70% 以上, 主要由 7 条相互平行的隧洞组成, 分别为交通辅助洞#A、#B, 施工排水洞#P 以及#1~#4 引水隧洞^[17]。

根据岩爆发生时所发出的声响级别、爆坑断面尺寸及其孕育过程中的破坏的特征^[18-19], 锦屏二级水电站岩爆等级划分标准详见表 1。隧洞施工表明: 锦屏二级水电站深埋隧洞在施工过程中产生大量岩爆, 岩爆等级以轻微、中等为主, 局部开挖段发生强烈、极强岩爆, 由于轻微岩爆对工程产生的影响基本可以忽略, 本文主要针对中等及强烈岩爆展开研究。

表 1 锦屏二级水电站岩爆强度判别标准				
Table 1 Intensities classification of immediate rock-bursts in deep tunnels of Jinping II Hydropower Station				
岩爆等级	破坏形式	声响级别	爆坑深度	施工影响程度
轻微岩爆	围岩表面岩体剥落, 基本无岩体的抛射	可以听到轻微声响, 持续时间短	小于 0.5 m	影响程度较轻
	围岩岩体严重开裂、剥落, 具有轻微的岩体抛射现象	发出类似雷管音, 具有一定的持续时间	0.5~1.0 m	
中等岩爆	围岩岩体严重开裂、剥落, 具有轻微的岩体抛射现象	发出类似雷管音, 具有一定的持续时间	0.5~1.0 m	具有一定影响
强烈岩爆	大量围岩岩体被突然、快速地抛射出	发出炸药爆炸的巨响, 声音响亮而持久	大于 1.0 m, 破坏程度较深	严重影响施工安全

1.2 微震实时监测

采用南非 ISS 微震监测系统, 对钻爆法开挖方式下施工排水洞#P 及#1~#4 引水洞的施工过程进行连续性实时微震监测 (每天爆破 1~2 次, 每次爆破进尺 2.5~3 m), 微震监测区如图 1 所示。该监测系统传感器采样频率为 100~6000 Hz, 采用 8 个传感器协同布局, 大大的增加了微震事件定位精度 (达到 98% 以上)^[1], 其系统及信号处理过程详见文献^[4]。

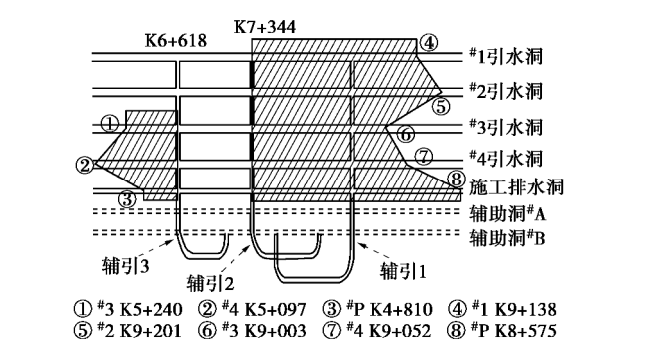


图 1 锦屏二级水电站钻爆法开挖方式下的微震监测区(#A、#B 为交通辅助洞)

Fig. 1 Ranges of micro-seismic monitoring on DBM excavation of diversion tunnels in Jinping II Hydropower Station

1.3 微震事件震源体积参数

微震事件震源体积 (视体积) 是描述岩爆孕育过

程的重要参数,经常用来描述岩爆发生前岩体的变化规律^[2-4],表示的是震源塑性变形区岩体的体积,可以通过微震监测仪器记录的波形参数获得,是一个较为稳健的震源参数,其表达式为^[20]

$$V_A = \frac{mP^2}{E} \quad , \quad (1)$$

式中, V_A 为微震源体积, m 为岩石的剪切模量, P 为微震体变势, E 为微震辐射微震能。

2 深埋隧洞即时型岩爆微震震源体积的分形特征研究

2.1 应变型岩爆震源体积分形特征

锦屏二级水电站 2011 年 11 月 6 日, #2 引水洞向西 1-2-W 掌子面附近桩号 K8+398—402 位置北侧边墙发生强烈岩爆。该岩爆发生洞段内围岩完整,无结构面发育,围岩岩性为 T2b 白色巨厚状中粗晶大理岩。岩爆坑最大深度为 1.1 m,爆坑呈宽 10 m、高 6.5~8 m 的圆形断面,表面起伏不变,其破坏表征形式体现出典型的应变型岩爆特征^[15]。结合该岩爆过程中岩体破坏机制与开挖扰动的关系,定义此次强烈岩爆为即时性应变型岩爆。该即时性应变型岩爆发生后岩体的宏观破坏情况如图 2 所示。选择岩爆中心线前后 30 m 范围内的微震事件进行震源体积分形研究^[1], 2011 年 11 月 6 日即时型岩爆孕育及发生过程中此范围内的微震事件震源体积对数 $\lg v$ 的最大值为 2.08,最小值为 0.46,其微震事件空间分布情况如图 3 所示。

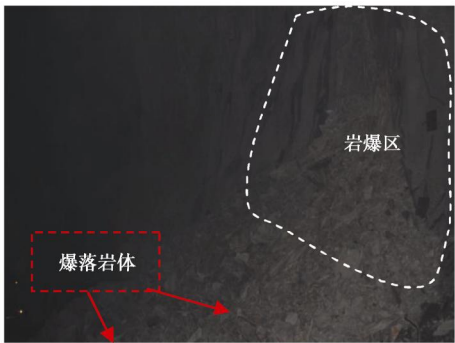


图 2 2011 年 11 月 6 日岩爆现场照片

Fig. 2 The rock-burst on 6 November 2011

基于分形几何学原理^[5],微裂隙产生过程中微震震源体积分布的相关积分可以表示为

$$c(v) = \frac{2N(v)}{N(N-1)} \quad (v \leq V) \quad . \quad (2)$$

式中 V 为所有微震事件在震源体积范围区间内的上限值; v 为 V 体积范围内每一个微震事件的震源体积值; $N(v)$ 为 v 震源体积范围内的微震事件的偶对数目; N 为 V 体积范围内的微震事件总数。计算出 v 体积范

围内的相关指数 $c(v)$,如果微裂隙产生过程中的微震事件在震源体积上是具有分形结构的,那么可以将微震事件震源体积分布的相关积分表达为^[5, 8]

$$c(v) \propto v^{D_v} \quad , \quad (3)$$

即

$$D_v = \lim_{v \rightarrow V} \frac{\lg c(v)}{\lg v} \quad . \quad (4)$$

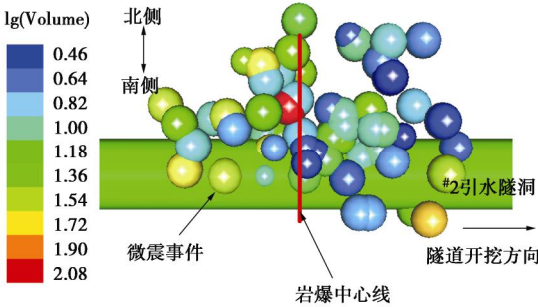


图 3 2011 年 11 月 6 日岩爆微震事件定位图

Fig. 3 Micro-seismic events in area in 2011

根据 2011 年 11 月 6 日即时性应变型岩爆孕育及发生过程中的总微震事件数 N (图 3 所示的所有微震事件) 以及 v 震源体积范围内的微震事件对的数目 $N(v)$,运用图 4 及式 (2) 根据微震事件在震源体积上的分布情况计算出 $\lg c(v)$ 。以微震事件体积范围 $\lg v$ 为横坐标 (此处选取为 0 到 0.8, 1.1, 1.4, 1.7, 以及最大值 $\lg V: 2.08$)、 $\lg c(v)$ 为纵坐标,建立直角坐标系并进行线性拟合。若拟合直线具有较好的线性相关性,表明此即时性应变型岩爆孕育过程中所产生的岩石微裂隙在震源体积上是具有分形分布关系的。同时,所求得的直线斜率 D_v 值为此次即时性应变型强烈岩爆孕育及发生过程中微震事件在震源体积上的分形维数值 (如图 5 中的 \diamond)。

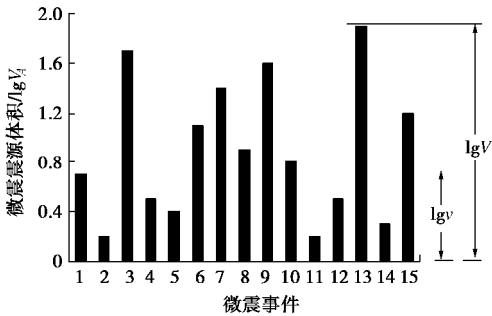


图 4 微震震源体积分形计算参数的选取

Fig. 4 Parameter selection of fractal calculation of micro-seismic volume

运用上述分形计算方法,根据表 2 中所选取的参数,对多次即时性应变型岩爆孕育及发生过程中的微震事件进行微震震源体积分形计算,如图 5 所示。图

5 中线性拟合的平均方差 (RMSE) 可表示为

$$\text{RMSE} = \frac{\sum D_i^2}{n}, \quad (5)$$

D_i 是线性拟合直线与拟合点之间纵坐标的差值, n 是拟合点的个数 (此处 $n=5$)。从图 5 中可以看出, $\lg v$ 与 $\lg c(v)$ 之间具有良好的线性关系, 其自相似系数 R 均大于 0.97, 平均方差也都小于 3×10^{-3} 。因此, 即时性应变型岩爆孕育及发生过程中的微震事件在震源体积上是具有分形分布特征的并且表现出良好的自相似性。

表 2 即时性应变型岩爆震源体积分形参数选取

Table 2 Immediate strain rock-burst data					
岩爆等级	岩爆日期	最小震源体 积/ m^3	选取最 小值 $\lg v$	最大震源体 积/ m^3	选取最 大值 $\lg V$
强烈	2011-11-06	2.86×10^0	0.8	1.21×10^2	2.08
强烈	2011-01-11	1.37×10^0	0.8	1.12×10^2	2.05
强烈	2011-01-26	2.38×10^0	0.8	9.55×10^1	1.98
强烈	2011-04-20	4.03×10^0	0.8	1.07×10^2	2.03
中等	2011-02-19	1.87×10^0	0.8	1.05×10^2	2.02
中等	2011-08-26	7.04×10^{-1}	0.8	9.35×10^1	1.97

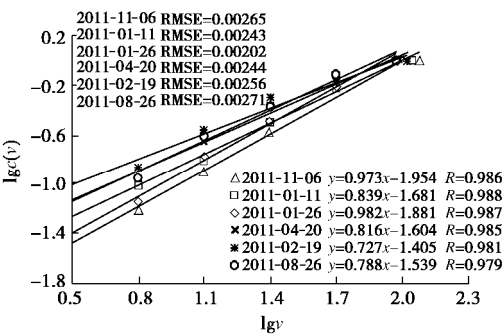


图 5 即时性应变型岩爆微震事件震源体积分形维数拟合图
Fig. 5 Fractal fitting of volume of micro-seismic events during evolution of immediate strain rock-bursts

2.2 应变-结构面滑移型岩爆震源体积分形特征

2010 年 11 月 10 日, #3 引水隧洞桩号 9+721—710 位置南侧边墙至拱肩处发生强烈岩爆。爆坑最大深度达 1.2 m, 岩爆爆坑表面可见一条明显的剪切滑移面。此次岩爆既受高地应力的作用, 同时也受结构面的控制。结合该岩爆过程中岩体破坏机制与开挖扰动关系, 定义此次强烈岩爆为一条 (组) 结构面控制所产生的即时性应变-结构面滑移型岩爆。该即时性应变-结构面滑移型岩爆发生后岩体的宏观破坏情况如图 6 所示。同样选择岩爆中心线前后 30 m 范围内的微震事件进行体积分形研究, 2010 年 11 月 10 日强烈岩爆孕育及发生过程中的微震事件震源体积对数 $\lg v$ 的最大值为 2.01, 最小值为 -0.02, 其孕育及发生过程中此

范围内的微震事件发生情况如图 7 所示。运用前文所述的震源体积分形方法, 对锦屏二级水电站多次一条结构面控制作用下的即时性应变-结构面滑移型岩爆孕育及发生过程中获得的微震事件进行微震震源体积分形计算, 如图 8 所示。

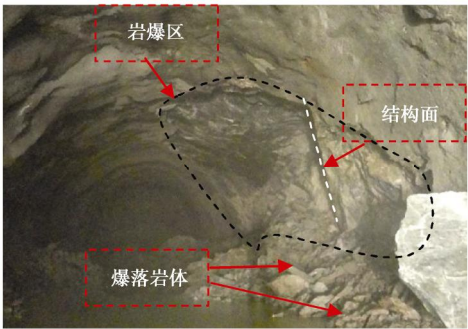


图 6 2010 年 11 月 10 日岩爆现场照片
Fig. 6 The rock burst on 10 November 2010

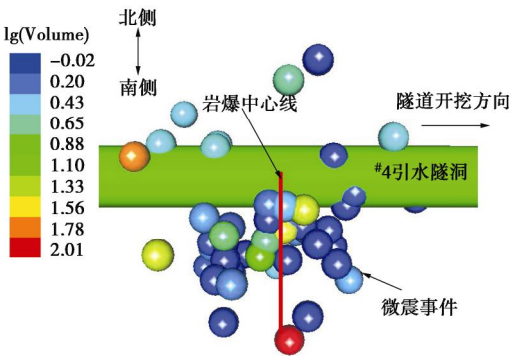


图 7 2010 年 11 月 10 日岩爆微震事件定位图
Fig. 7 Micro-seismic events in area in 2010

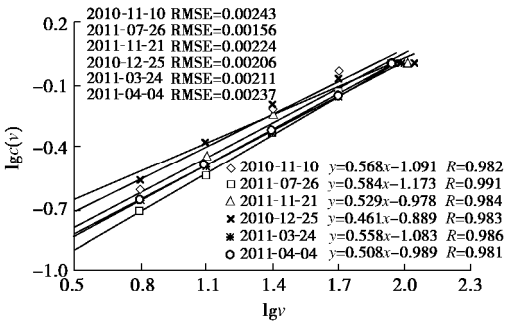


图 8 一条结构面控制作用下即时性应变-结构面滑移型岩爆微震事件震源体积分形维数拟合图
Fig. 8 Fractal fitting of volume of micro-seismic events during evolution of immediate strain-structure slip rock-bursts with one structural plane

2011 年 1 月 3 日, #4 引水隧洞桩号 8+051—060 位置掌子面靠近北侧边墙发生中等岩爆, 爆坑最大深度达 0.7 m、宽度为 7~9 m、高约 5 m, 岩性为 T2b

灰色厚层状大理岩。此次岩爆坑表面可见多条明显的剪切滑移面（如图 9 所示）。

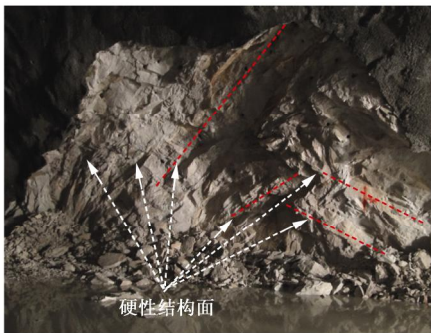


图 9 2011 年 1 月 3 日岩爆现场照片
Fig. 9 Rock burst on 3 January 2011

结合该次中等岩爆发生过程中开挖与扰动的对应关系，定义此次岩爆为两组结构面控制作用下的即时性应变—结构面滑移型岩爆。对施工过程中多条结构面控制作用下的即时性应变—结构面滑移型岩爆进行震源体积分形计算（图 10（a）、（b）所示）。综合分析图 8 及图 10（a）、（b）发现， $\lg v$ 与 $\lg c(v)$ 之间具有良好的线性关系，其自相似系数 R 均大于 0.97，平均方差也均小于 3×10^{-3} 。综上所述，即时性应变—结构面滑移型岩爆孕育及发生过程中的微震事件在震源体积上同样是具有分形分布特征的。

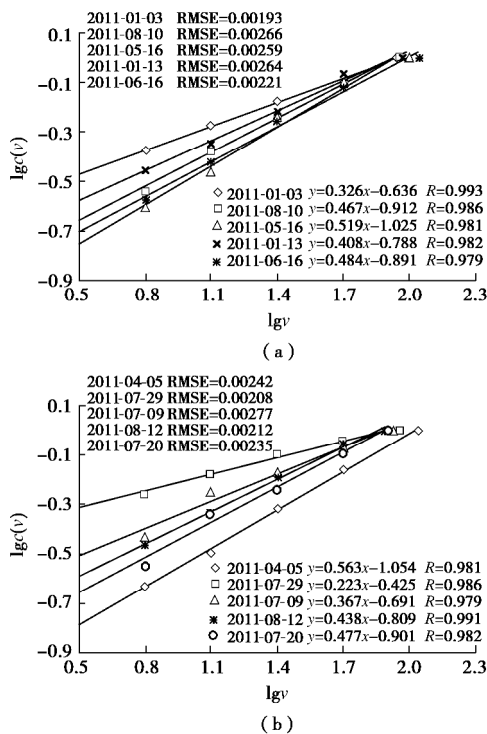


图 10 多条结构面控制作用下即时性应变—结构面滑移型岩爆微震事件震源体积分形维数拟合图
Fig. 10 Fractal fitting of volume of micro-seismic events during evolution of immediate strain-structure slip rock-bursts with multiple structural planes

2.3 不同类型即时性岩爆震源体积分形维数分布特征

上述施工排水洞#P 及#1、#2、#3、#4 引水洞中等以上即时性应变型岩爆及即时性应变—结构面滑移型岩爆的微震事件震源体积分形维数如图 11 所示。

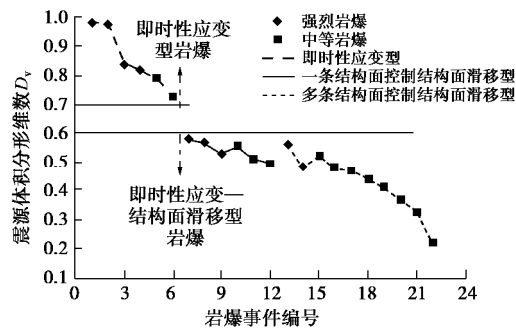


图 11 不同类型岩爆微震震源体积分形维数分布规律
Fig. 11 Fractal characteristics of volume of different types of immediate rock-bursts

从图 11 中可以看出，对于锦屏二级水电站深埋隧洞施工过程中的岩爆灾害：即时性应变型岩爆震源体积分形维数均大于 0.7(本研究所针对的岩爆实例主要分布在 0.7~1.0 范围内)，即时性应变—结构面滑移型岩爆震源体积分形维数分布在 0.2~0.6 范围内，这意味着根据微震事件体积分形维数可以对即时性岩爆的类型进行区分；对于即时性应变型岩爆来说，强烈岩爆微震事件震源体积分形维数分布在 0.8~1.0 范围，大于中等岩爆（分布在 0.7~0.8 范围）；对于即时性应变—结构面滑移型岩爆，强烈岩爆微震事件震源体积分形维数分布在 0.5~0.6 范围总体上大于中等岩爆（分布在 0.2~0.6 范围），同时随着结构面数目的增加震源体积分形维数具有降低的趋势（一条结构面控制滑移型分布在 0.4~0.6 范围，多条结构面控制滑移型分布在 0.2~0.6 范围），但是不存在一一对应的情况，分析其原因是对于即时性应变—结构面滑移型岩爆其震源体积分形维数同样受到结构面长度、角度等方面因素的影响。

3 岩爆震源体积分形维数特征分析

微震事件震源体积分形维数表示的是微震事件在微震震源体积上的分布情况，大尺寸的微震事件所占的比重越少，震源体积分形维数越小。即时性应变型岩爆微震震源体积分形维数大于即时性应变—结构面滑移型岩爆，说明即时性应变型岩爆孕育过程中的微震事件在震源尺寸上的分布要高于即时性应变—结构面滑移型岩爆。

图 12 为相同等级两种不同类型即时性岩爆微震事件震源尺寸（半径）的分布情况，对上述结论进行了印证。从图 12（a）、（b）中可以看出对于相同等级

的即时性岩爆来说,应变-结构面滑移型岩爆震源半径小于 2 m 的微震事件率大于应变型岩爆,并且随着震源半径的增加其微震事件率表现出递减的趋势;而应变型岩爆震源半径大于 2 m 的事件率高于应变-结构面滑移型岩爆,且在震源半径的分布上表现出一种接近正态的分布规律。分析其原因在于,相对于应变型岩爆的张拉破裂为主的围岩破坏模式^[1],由于岩体中结构面的发育使得开挖过程中大量的微震破裂事件沿着结构面张开、扩展、贯通进而形成了新的自由面,被自由面切割的那部分岩体在围岩卸荷应力的作用下,沿着贯通的自由面剪切滑移并被抛射出去,进而导致应变-结构面滑移型岩爆的发生。同时,由于结构面的控制作用这些微震事件的震源体积值都相对较小,使得即时性应变-结构面滑移型岩爆孕育过程中的微震事件在震源体积分布上低于应变型岩爆。

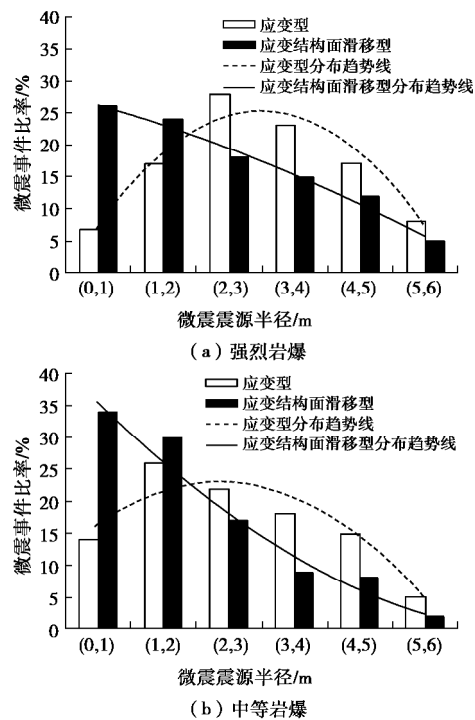


图 12 相同等级不同类型岩爆震源尺寸的分布情况

Fig. 12 Size distribution of micro-seismic events in immediate rock-bursts with same intensity and different types

同样,对于即时性应变型强烈岩爆的震源体积积分维数大于中等岩爆,说明强烈岩爆孕育及发生过程中大尺寸微震事件分布高于中等岩爆;对于即时性应变-结构面滑移型岩爆,岩爆等级越低、结构面数量越多,微震信息震源尺寸分布就越低,其微震事件震源体积积分维数与岩爆等级具有正比关系与结构面数具有反比关系。

4 结 论

对锦屏二级水电站施工排水洞#P 及#1、#2、#3、#4

引水洞钻爆法开挖方式下不同类型、等级的即时型岩爆进行了微震信息震源体积分形研究,从而揭示了不同类型即时性岩爆孕育及发生过程中微震事件的尺寸分布特征,经研究发现:

(1)不论对于即时性应变型岩爆还是即时性应变-结构面滑移型岩爆,其孕育及发生过程中的微震事件在震源体积上都是具有分形分布规律的,并且表现出良好的自相似性。

(2)基于微震信息震源体积分形维数可以对即时性应变型岩爆及即时性应变-结构面滑移型岩爆进行区分:应变型岩爆微震信息震源体积分形维数大于 0.7,应变-结构面滑移型岩爆分形维数小于 0.6。

(3)对于两种不同类型的即时性岩爆来说,强烈岩爆孕育过程中的微震震源体积分形维数总体上大于中等岩爆;对于相同等级的即时性应变-结构面滑移型岩爆,由于岩体中结构面发育对微震事件震源尺寸的控制作用,其微震震源体积分形维数值与结构面的数目具有反比关系。

致 谢: 论文中所涉及的微震监测数据均来源于中科院武汉岩土所锦屏二级水电站微震监测项目部。

参考文献:

[1] 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 rock-burst development processes[M]. Beijing: China Social Sciences Publishing House, 2013. (in Chinese))

[2] MENDECKI A J. Real time quantitative seismology in mines[M]// Rock-bursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: Balkema, 1993: 287 - 295.

[3] MENDECKI A J. Principles of monitoring seismic rockmass response to mining[C]// Rock-bursts and Seismicity in Mines. Balkema, 1997: 69 - 79.

[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 Bing-rui, FENG Xia-ting, ZENG Xiong-hui, et al. Real-time micro-seismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deepburied tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275 - 283. (in Chinese))

[5] MANDELBROT B B. The Fractal geometry of nature[M]. London: W H Freeman and Company, 1982.

[6] KAGAN Y Y, KNOPOFF. Stochastic synthesis of earthquake

- catalogs[J]. Geophys Royal Economic Society, 1981, **86**(B4): 2853 - 2862.
- [7] KAGAN Y Y, KNOPOFF. Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes[J]. Geophys Royal Economic Society, 1978, **55**(1): 67 - 86.
- [8] FENG X T, STEO M. A new method of modeling the rock-microfracturing process in double torsion experiments using neural networks[J]. International Journal of Analytic and Numerical Methods in Geomechanics, 1999, **23**(4): 905 - 923.
- [9] FORD A, BLENKINSOP T G. Combining fractal analysis of mineral deposit clustering with weights of evidence to evaluate patterns of mineralization: application to copper deposits of the Mount Isa Inlier, NW Queensland, Australia[J]. Ore Geology Reviews, 2008, **33**: 435 - 450.
- [10] HIRATA T, SATOH T, ITO K. Fractal structure of spatial distribution microfracturing in rock[J]. Geophys J R astr Soc, 1987, **90**: 367 - 374.
- [11] KATSUMATA K. A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake ($M=9.0$)[J]. Earth Planets Space, 2011, **63**: 709 - 712.
- [12] SETO M, NISHIZAWA O, KATSUYAMA K. The variation of hypocenter distribution of AE events in coal under triaxial compression[J]. Acoust Em, 1994, **11**: 27 - 36.
- [13] MANDAL P, RODKIN M V. Seismic imaging of the 2001 Bhuj Mw7.7 earthquake source zone: b-value, fractal dimension and seismic velocity tomography studies[J]. Tectonophysics, 2011, **512**: 1 - 11.
- [14] CAI M. Influence of stress path on tunnel excavation response-numerical tool selection and modeling strategy[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(6): 618 - 628.
- [15] 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, **10**(3): 447 - 451. (FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rock-bursts in deep tunnels: immediate rock-burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **10**(3): 447 - 451. (in Chinese))
- [16] 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 rock-bursts in deep tunnels: time delayed rock-burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(3): 561 - 569. (in Chinese))
- [17] 江 权, 冯夏庭, 周 辉. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞群允许最小间距研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(3): 656 - 662. (JIANG Quan, FENG Xia-ting, ZHOU Hui. Study on acceptable minimum interval of long deep-buried hydropower tunnels in Jinping hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **29**(3): 656 - 662. (in Chinese))
- [18] TANG Y. A new classification of rock-burst intensity[J]. Geol Rev, 1992, **38**(5): 439 - 443.
- [19] WANG L S, LI T B, XU J, et al. Study on rock-burst and its intensity classifies in the tunnel of Erlang Mountain road[J]. Road, 1999, **2**: 41 - 45.
- [20] AKI K. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress strain drop from the G-wave spectrum[J]. Bulletin of Earthquake Research Institute, 1966, **44**(12): 73 - 88.