

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700812

不同类型岩爆孕育过程中震源体积自相似分布的分形特征分析

于 洋, 晏志禹, 徐长节, 刘金泉, 耿大新

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

摘 要:岩爆严重威胁着深部岩体隧洞的施工安全, 并造成大量的人员伤亡及财产损失。在深部岩体隧洞岩爆灾害的孕育及发生过程经常伴随一系列的微震事件; 通过针对微震事件发生的时间、空间位置、数量多少、能量大小及震源体积分布等特征参数进行分析, 有助于认识岩体的破裂机制, 进而为岩爆等动力地质灾害的研究与防治提供理论基础。采用理论分析与微震监测相结合的研究手段, 基于锦屏 II 级水电站深埋引水隧洞施工过程中大量不同类型(即时性应变-结构面滑移型岩爆、即时性应变型岩爆)、不同等级即时性岩爆的典型实例, 针对岩爆孕育及发生的动态过程展开震源体积分布的自相似特征及分形行为研究。结果表明: 深部岩体隧洞开挖即时性岩爆孕育过程中的微震源体积分布表现出良好的自相似性, 其自相似系数均大于 0.97; 对于不同类型的即时性岩爆, 其微震信息震源体积分形维数均随着岩爆孕育过程不断增加, 岩爆发生时达到最大值的特征; 应变-结构面滑移型岩爆过程中每天的震源体积分形维数分布在 0.1~0.8 范围内, 应变型岩爆过程中每天的震源体积分形维数分布在 0.4~1.3 范围内, 岩爆发生当天的分形维数均大于 1.0。研究成果对高地应力条件下岩爆灾害动态预警体系的建立具有重要的指导意义, 同时可为中国深部岩体隧洞开挖过程的安全设计提供必要的科学依据和支撑。

关键词:微震; 自相似; 分形; 应变-结构面滑移型岩爆; 应变型岩爆

中图分类号: TU 45

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2019)01-0121-08

Analysis for Self-similarity and Fractal Characteristic of Micro-seismic Volume During the Evolution of Different Types of Rock-burst

YU Yang, YAN Zhiyu, XU Changjie, LIU Jinquan, GENG Daxin

(Key Lab. of Geotechnical Eng. Infrastructure and Safety Control, East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013, China)

Abstract: Rock-burst is a serious threat to the construction safety of deep tunnels, which causes huge economic loss and staff casualties. The evolution process of rock-bursts is accompanied by a series of micro-seismic events. Analyzing and processing these characteristic parameters about the microfracturing such as size, time, space, energy, volume, etc, which is helpful to understand the fracture mechanism of rock mass, and provides a theoretical basis for the study of rock-burst disaster. In this research, theoretical analysis combined with micro-seismic monitoring were used. Based on the hundreds of immediate rock-bursts (including immediate strain structure slip rock-bursts and immediate strain rock-bursts), with different types and intensities, occurred in four deep headrace tunnels at Jinping-II hydropower station in Sichuan province, China. The self-similarity characteristic and fractal behavior of micro-seismic volume distributions during the dynamic evolution process of such rock-bursts were studied. The achieved results are as follows: The volume distribution of micro-seismic events during the development of immediate rock-bursts shows great self-similarity, the value of correlation coefficient are all greater than 0.97. For different types of immediate rock-bursts, the daily volume fractal dimension increases during the evolution of immediate rock-bursts, and they totally increase up to a certain threshold value before the rock-burst occur. The volume fractal dimension values on each day were between 0.8 and 0.1 for the evolution of immediate strain structure slip rock-bursts, but those of immediate strain rock-bursts were between 0.4 and 1.3, and both of them are greater than 1.0 when the rock bursts. The micro-seismic energy fractal dimension can be used as a significant guideline to build up a warning system and reduce the risk of rock-bursts during construction under high in-situ stress condition.

Key words: micro-seismic; self-similarity; fractal; strain-structure slip rock-burst; strain rock-burst

收稿日期: 2017-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509092); 江西省科技厅重点研发资助项目(20181BBG70052); 江西省交通厅科研项目资助(2017D0036)

作者简介: 于 洋(1982—), 男, 讲师, 博士. 研究方向: 深部岩体力学. E-mail: lukeryuyang@163.com

网络出版时间: 2018-12-24 10:52:36

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20181221.0842.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

岩体内部产生微破裂的同时会以应力波的形式释放应变能,这些沿着岩体介质向外界辐射的应力波称为微震。上述应力波可被声发射、微震仪器接收,对其进行分析、处理后可确定微破裂事件的发生时间、空间位置、能量大小、数量多少等信息参数。通过分析岩体受力破坏过程的微震信息特征参数,有助于认识岩体的破裂机制,进而为岩爆等动力地质灾害的研究与防治提供理论依据和技术支撑^[1]。

自1982年美国数学家Mandelbrot等^[2]基于海岸线的自相似特征提出分形概念,分形几何学迅速发展为一个重要的数学分支,被成功应用到各领域的研究中。基于此,分形理论在宏观结构下地震、岩爆的微震信息特征方面同样取得了令人瞩目的成果:Sadovskiy等^[3]在对盒维数的应用过程中指出,不论是全球范围还是在局部范围内的地震,其微震事件均具有自相似分布特征;Xie等^[4]针对矿山开采岩爆灾害孕育过程中微震事件在空间上的自相似分布规律进行研究,发现空间分形维度值越小,发生岩爆的几率越大;另有研究表明从大范围的地震灾害到小范围的岩体微裂隙,其能量、频率及裂隙有效尺寸的分布都具有自相似结构^[5-8]。

冯夏庭等^[9-10]对锦屏Ⅱ级水电站深部岩体隧洞岩爆的发生类型进行研究,进而将岩爆划分为即时性应变型岩爆、即时性应变-结构面滑移型岩爆和时滞型岩爆,同时指出不同类型岩爆具有不同的发生机制,基于微震事件震源体积分形维数可对即时性岩爆的类型进行区分: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。基于此,针对上述2种不同类型即时性岩爆孕育及发生的动态过程中微震信息震源体积分形维数的分布范围及演化规律展开研究,并提出2种不同类型岩爆发生之前震源体积分形维数的预警阈值,为不同类型岩爆预测、预警及岩爆危险程度的判定提供合理的科学依据。

1 基于微震震源体积的分形方法

1.1 工程概述及微震监测

锦屏Ⅱ级水电站深部岩体引水隧洞工程,位于四川省凉山州境内雅砻江干流上。最大埋深为2 525 m,其中大于2 000 m的开挖区段占隧洞总长度的40%以上(图1)。该工程主要由5条相互平行的隧洞组成,分别为施工排水洞P[#]及1[#]~4[#]引水隧洞,隧洞平均长度约为16.7 km^[11-12]。施工排水洞P[#]为圆形断面,开挖直径为8 m;1[#]、3[#]引水洞为圆形断面,2[#]、4[#]引水洞为马蹄形断面,引水隧洞断面直径均为13 m(图2),隧洞主要开挖方法为钻爆法,施工过程中发生上百次不

同等级的岩爆,造成了大量的人员伤亡及财产损失。采用南非ISS微震系统,对图2所示1[#]~4[#]引水隧洞的整个施工过程进行连续性实时监测研究,详细监测过程参考文献^[9,13]。

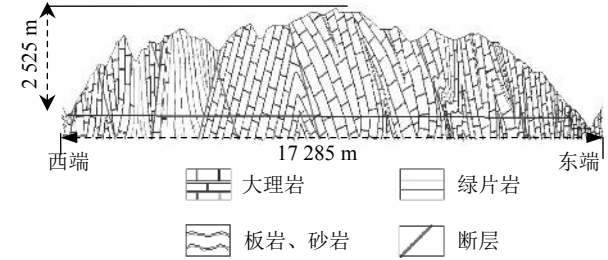


图1 锦屏Ⅱ级水电站深部岩体引水隧洞地质剖面
Fig. 1 Geological section of deep tunnels in Jinping-II hydropower station

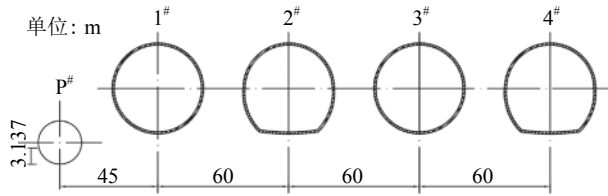


图2 锦屏Ⅱ级水电站引水隧洞断面布置
Fig. 2 Layout of the headrace tunnels at Jinping-II hydropower station

1.2 微震事件震源体积分形计算方法

微震事件震源体积 V_A 表示震源非弹性变形区的体积范围,是描述岩爆孕育过程的重要参数^[13],经常用以描述岩爆发生前围岩岩体的变化特征^[14],可表示为:

$$V_A = \frac{\mu P^2}{E} \tag{1}$$

式中, μ 为岩体的剪切模量, P 为微震体变势, E 为相应微震事件的辐射能量值。基于不同类型即时性岩爆孕育及发生过程中的所有微震事件(总数为 N)在震源体积上的分布特征,根据图3所示选取最大震源体积微震事件所对应的体积值 V , v 为 V 范围内的震源体积间隔, $n(v)$ 为 v 体积范围内的微震事件偶数对计算值。则岩爆孕育及发生过程中微震事件震源体积分布的相似积分可以表达为^[2]:

$$c(v) = \frac{2n(v)}{N(N-1)}, v \leq V \tag{2}$$

在 V 体积范围内选取不同 v 值($v \leq V$),以 $\lg v$ 为横坐标,其相应计算值 $\lg c(v)$ (式(2))为纵坐标进行线性拟合,如果拟合直线具有很高的自相似性(大于0.95),那么,岩爆过程中的微震事件在震源体积上具有分形结构,可将微震事件震源体积分布的相关积分表达为:

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

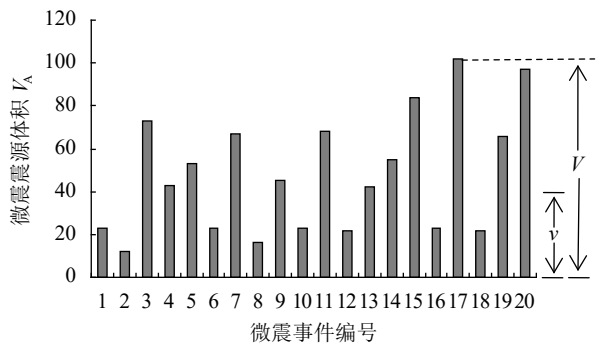


图 3 震源体积分形计算参数选取方法

Fig. 3 Parameters of micro-seismic volume fractal calculation

所求得的直线斜率 D_v 为微震事件在震源体积上的分形维数。即

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

运用此方法, 即时性岩爆孕育及发生过程中微震事件的震源体积分形维数可在任意时刻计算得出^[10]。

2 深埋隧洞即时性岩爆微震震源体积的自相似特征

2.1 结构面型岩爆孕育过程震源体积自相似特征

2010年12月7日下午16时25分, 4[#]引水洞 K10+420~K10+408位置南侧边墙至拱底处发生中等岩爆, 此开挖段岩性为T_{2b}灰白色~灰黑色厚层状粗晶大理岩。岩爆爆坑最大深度为0.88 m, 爆坑呈宽12 m、高8.5~9.0 m的楔形断面, 岩爆爆坑表面可见明显的剪切滑动面, 结合此次岩爆发生的位置及岩爆现场的围岩岩体破坏机制分析^[15], 确定此次中等岩爆为即时性应变-结构面滑移型岩爆。上述岩爆发生情况如图4所示。

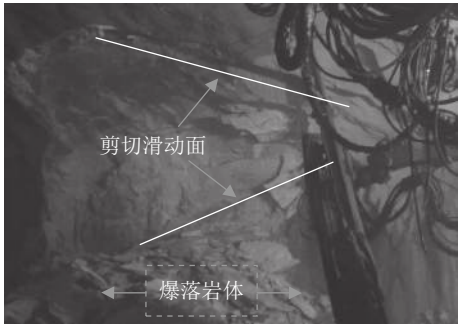


图 4 2010年12月7日岩爆现场

Fig. 4 Rock-burst on Dec. 7, 2010

岩爆中心线±30 m范围所发生的微震事件对岩爆发生具有重要的贡献意义, 同时被运用于岩爆的动态预警研究^[9]。同样, 基于上述范围内的微震事件开展震源体积分形行为研究。2010年12月7日应变-

结构面滑移型岩爆孕育及发生过程中的微震事件震源体积对数 $\lg V_A$ 的最大值为1.99, 最小值为-0.61, 其孕育及发生过程中此范围(K10+384~K10+444)内的微震事件发生情况如图5所示。

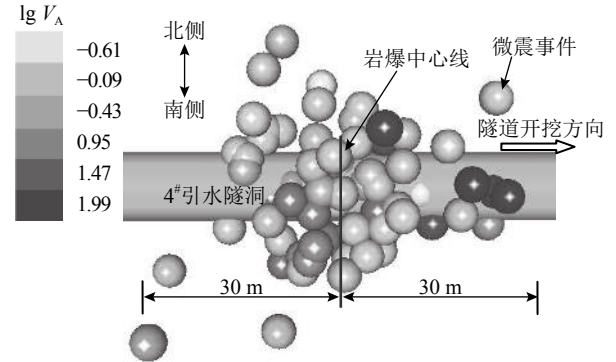


图 5 2010年12月7日岩爆微震事件

Fig. 5 Micro-seismic events in the area on Dec. 7, 2010

基于2010年12月7日的应变-结构面型岩爆孕育及发生过程中微震事件在震源体积上的分布特征, 根据图3所述方式确定微震事件总数 N 及 v 体积内微震事件的偶数对值 $n(v)$, 并运用式(2)计算出相应的 $\lg c(v)$ 。以 $\lg c(v)$ 为纵坐标, $\lg v$ 为横坐标($\lg v$ 选为0.8、1.1、1.4、1.7), 对最大值 $\lg V$ 进行线性拟合, 所求得直线 $\lg v-\lg c(v)$ 斜率即为震源体积上的分形维数。运用上述计算方法, 根据表1中所选取的参数, 对2010年12月3日至7日(从岩爆发生时刻向前每24小时作为一个计算循环)即时性应变-结构面滑移型岩爆孕育及发生过程中每天的微震事件进行微震震源体积分形行为计算, 结果如图6所示。

表 1 应变-结构面滑移型岩爆震源体积分形参数选取

Tab. 1 Immediate strain-structure slip rock-burst data

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 $\lg V$
2010-12-03	0.237	0.8	82.9	1.92
2010-12-04	0.243	0.8	85.4	1.93
2010-12-05	0.403	0.8	84.7	1.93
2010-12-06	0.387	0.8	89.3	1.95
2010-12-07	0.812	0.8	98.6	1.99

由图6可知, $\lg v$ 与 $\lg c(v)$ 之间均表现出良好的线性关系, 表明2010年12月3日至7日应变-结构面滑移型岩爆孕育及发生过程中每天的微震事件在震源体积上均表现出分形分布特征, 且具有良好的自相似性。图7为应变-结构面滑移型岩爆震源体积分形维数拟合曲线。对表2中不同等级的应变-结构面滑移型岩爆孕育及过程中的微震事件进行震源体积参数分形计算, 表明应变-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均表现出分形分布特征(图7), 且具有良好的自相似性(R 均大于0.97)。

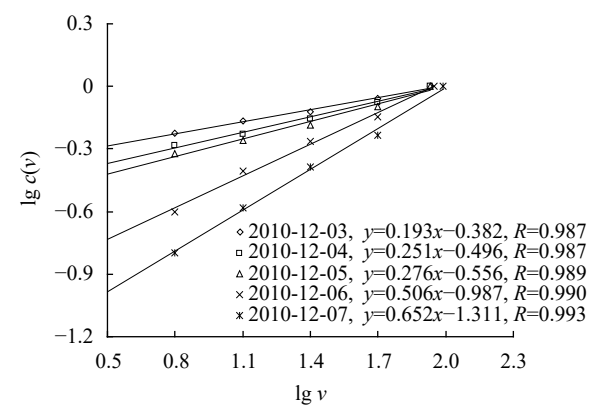


图 6 2010年12月7日岩爆震源体积分形维数拟合曲线
Fig. 6 Volume fractal fitting curves of micro-seismic events of the rock-burst on Dec. 7, 2010

1[#]~4[#]引水隧洞不同等级应变-结构面滑移型岩爆孕育及发生过程中每天的震源体积分形维数演化特征如图8所示。由图8可知,即时性应变-结构面滑移型岩爆过程中的震源体积分形维数分布在0.1~

0.8范围内,具有随着岩爆孕育过程不断增加,岩爆发生时达到最大值的特征,且在岩爆发生当天的震源体积分形维数均大于0.5。

2.2 应变型岩爆孕育过程震源体积自相似特征

2011年4月20日凌晨2点30分,3[#]引水隧洞掌子面开挖至桩号K6+106位置时,于掌子面南侧发生强烈岩爆。此次岩爆最大爆坑深度约1.2 m,爆坑呈长13 m、高10 m的圆形断面,爆坑表面起伏不定表现出明显的张拉破坏特征(图9)。基于岩爆过程与掌子面开挖扰动之间的关系,定义其为典型的即时性应变型强烈岩爆^[16]。此次岩爆孕育及发生过程中,岩爆影响范围内的有效微震事件(岩爆中心线±30 m范围)见图10。

运用第1.2节所述的震源体积分形方法,根据表3中所选取的参数,对此次应变型岩爆孕育及动态发生过程中每天的微震事件进行震源体积分形计算,其结果如图11所示。

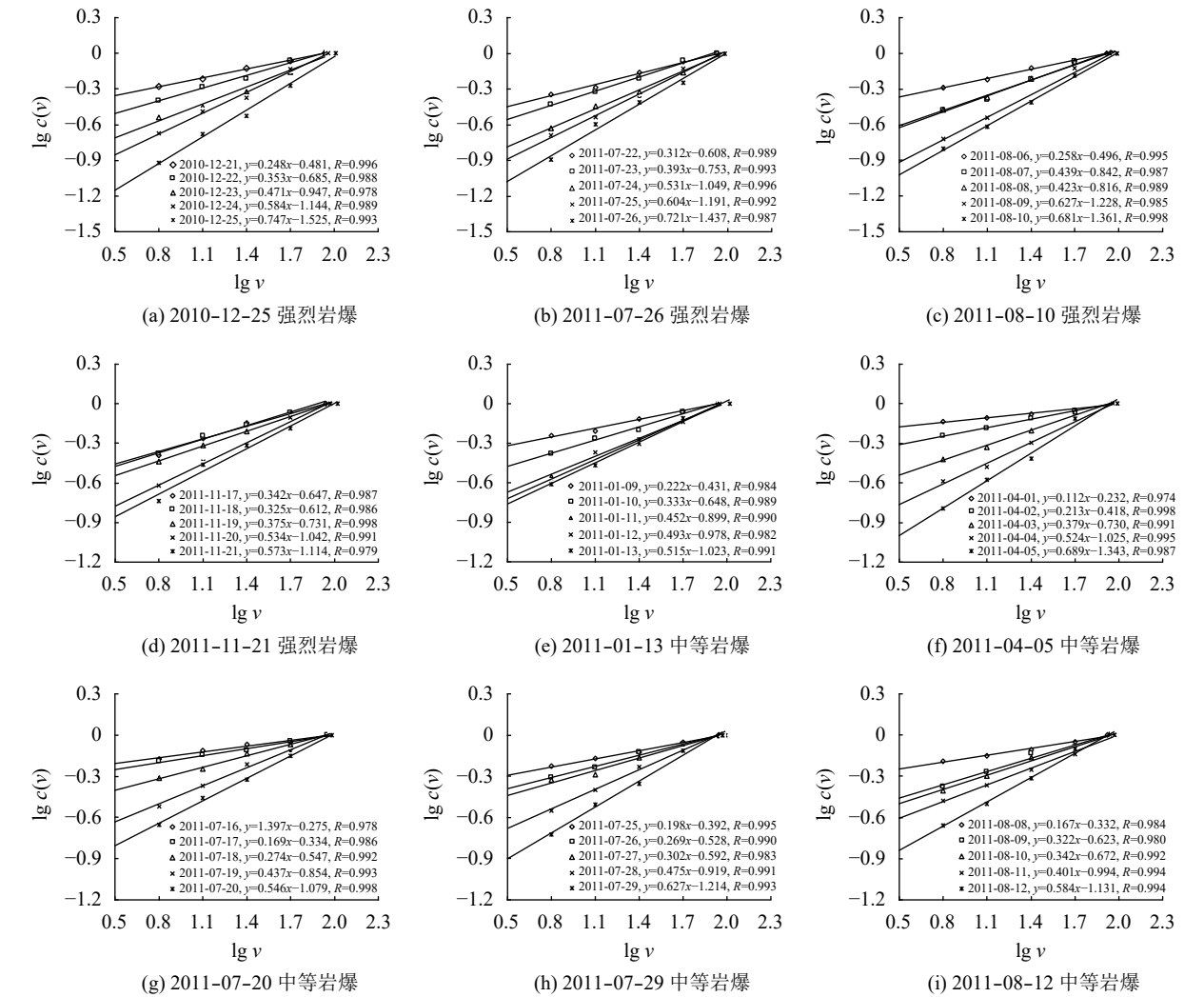


图 7 应变-结构面滑移型岩爆震源体积分形维数拟合曲线
Fig. 7 Volume fractal fitting curves for strain-structure slip rock-bursts

表 2 应变-结构面滑移型岩爆
Tab. 2 Strain-structure slip rock-bursts occurring in the deep tunnels

岩爆强度	引水隧洞编号	岩爆日期	岩爆描述
强烈岩爆	1 [#]	2010-12-25	钻爆法开挖方式下K7+753处上台阶钻爆法开挖过程中,顶拱处发生强烈岩爆,岩爆爆坑为圆弧形断面,宽13 m,高8.5~9.0 m,最大深度1.4 m,见明显剪切滑移面
	2 [#]	2011-07-26	上台阶开挖过程中,K7+802~K7+808拱顶处发生强烈岩爆,圆弧形爆坑断面,宽11 m,高8.5~9.0 m
	3 [#]	2011-08-10	K8+700~K8+728北边墙至拱肩处发生结构面滑移型强烈岩爆,圆弧形断面,宽13 m,高8.7~9.0 m
	4 [#]	2011-11-21	K6+020~K6+018向西工作面距离底板高度为8 m的顶拱发生强烈岩爆,爆坑长度约7.3 m,最大深度约1.3 m
中等岩爆	2 [#]	2011-01-13	上台阶钻爆法开挖,K8+875拱肩处发生中等岩爆,岩性为T _{2b} 灰白色厚层状细晶大理岩,爆坑为圆弧形断面,宽8 m,高6 m,最大深度约0.86 m
	4 [#]	2011-04-05	K5+997~K5+993位置中等岩爆,岩性为T _{2b} 灰白色厚层状细晶大理岩,爆坑为圆形断面,宽7.6 m,高6.2 m
	1 [#]	2011-07-20	上台阶钻爆法开挖过程中,K6+786发生中等岩爆,爆坑为圆弧形断面,宽9.2 m,高5.5~7.0 m,最大深度0.74 m
	3 [#]	2011-07-29	K8+697~K8+691位置发生结构面滑移型中等岩爆。上台阶钻爆法开挖,爆坑呈圆弧形断面,宽6 m,高6 m
	4 [#]	2011-08-12	4 [#] 引水隧洞K8+812~K8+837北边墙至拱肩中等岩爆;上台阶钻爆法开挖,爆坑呈圆形断面,宽6.5 m,高6.2 m

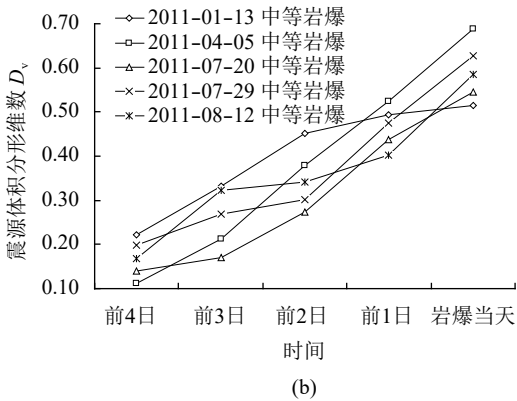
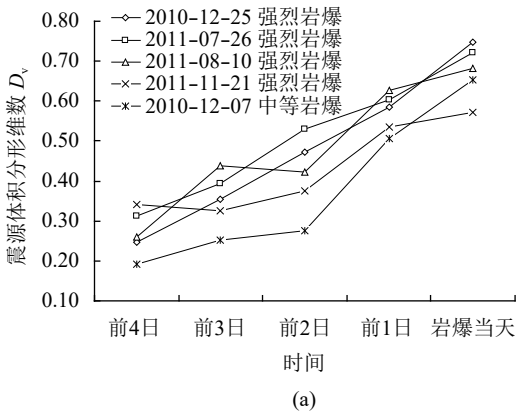


图 8 应变-结构面型岩爆孕育过程的体积分形维数演化特征
Fig. 8 Evolution of volume fractal dimensions for micro-seismic events occurred per day during the development of strain-structure slip rock-burst

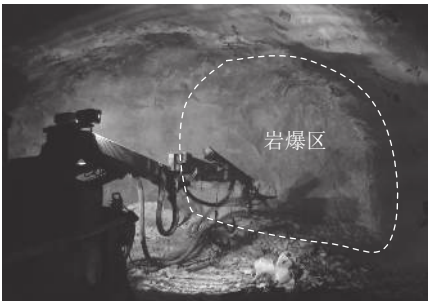


图 9 2011年4月20日岩爆现场
Fig. 9 Rock-burst on 20 April, 2011

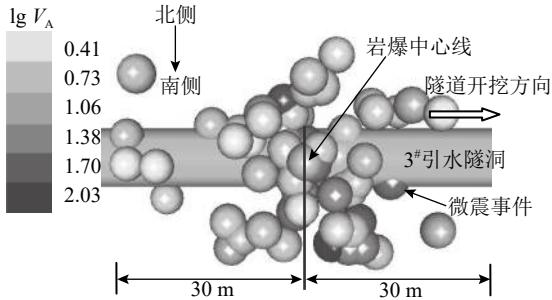


图 10 2011年4月20日岩爆微震事件
Fig. 10 Micro-seismic events in the area on 20 April, 2011
由图11可知,lg v与lg c(v)之间同样具有良好的线性关系,其自相似系数R均大于0.98。同时,对1[#]~4[#]引水隧洞施工过程中不同等级的应变型岩爆(表4)孕育及动态发生过程中的微震事件进行震源体积参数分形行为研究,见图12。由图12可知,应变型岩爆孕育及发生过程中的微震事件在震源体积上

同样表现出分形分布特征,且具有良好的自相似性($\lg v$ - $\lg c(v)$ 之间具有良好的线性关系)。应变型岩爆孕育及发生过程中每天的震源体积分形维数变化特征见图13。

表 3 应变型岩爆震源体积分形参数

Tab. 3 Strain rock-burst parameters				
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 $\lg V$
2011-04-16	2.42	0.8	85.1	1.93
2011-04-17	2.53	0.8	91.2	1.96
2011-04-18	3.02	0.8	83.3	1.92
2011-04-19	4.87	0.8	93.2	1.97
2011-04-20	6.04	0.8	10.8	2.03

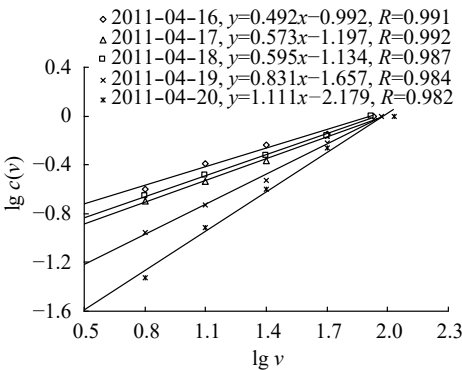


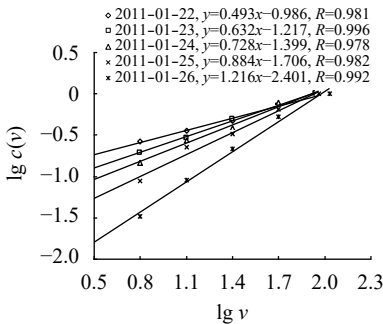
图 11 2011年4月20日应变型岩爆震源体积分形维数拟合曲线

Fig. 11 Volume fractal fitting curves of micro-seismic events of the strain rock-burst on April 20, 2011

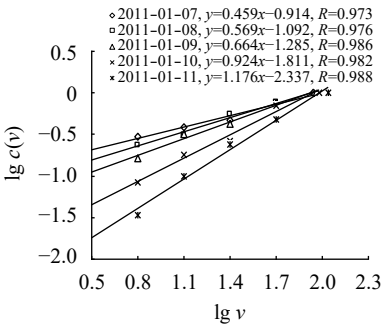
表 4 应变型岩爆

Tab. 4 Strain rock-bursts occurring in the deep tunnels

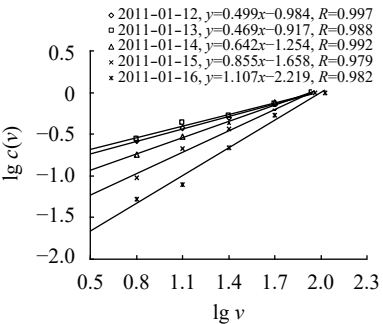
岩爆强度	引水隧洞编号	岩爆日期	岩爆描述
强烈岩爆	4 [#]	2011-01-26	K8+753~K8+761位置南侧边墙发生强烈岩爆,岩爆爆坑表现出圆形断面,爆坑最大深度1.3 m,高度约6.0 m,宽8.0 m
	1 [#]	2011-01-11	掌子面当开挖到K8+706~K8+709位置时洞段北侧边墙发生岩爆,此次岩爆爆坑最大深度1.4 m,高度约为8~10 m,直径约10 m,造成设备损坏和人员受伤
	2 [#]	2011-01-16	钻爆法开挖过程中,K9+178~K9+181北侧边墙强烈岩爆,圆弧形断面,宽10 m,高8.5~9.0 m
中等岩爆	4 [#]	2011-11-06	掌子面向西开挖段,引K8+393~K8+400南侧边墙发生岩爆,此次岩爆爆坑宽约为6.4 m,最大深度0.8 m,岩爆过程中未造成设备损坏及人员伤亡
	3 [#]	2011-02-19	北侧边墙K11+023~K11+030上台阶钻爆法开挖,拱肩处强烈岩爆,爆坑为圆弧形断面,最大深度0.86 m,宽7.00 m,高8.50~9.00 m



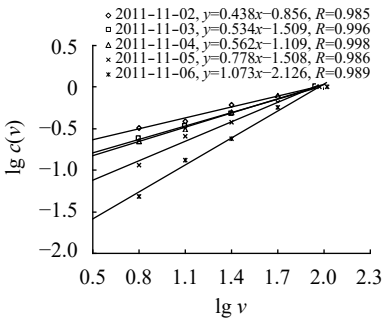
(a) 2011-01-26 强烈岩爆



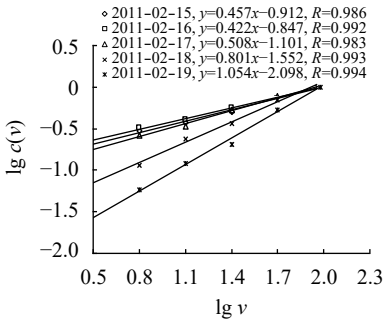
(b) 2011-01-11 强烈岩爆



(c) 2011-01-16 强烈岩爆



(d) 2011-11-06 中等岩爆



(e) 2011-02-19 中等岩爆

图 12 应变型岩爆震源体积分形维数拟合曲线

Fig. 12 Volume fractal fitting curves for strain rock-bursts

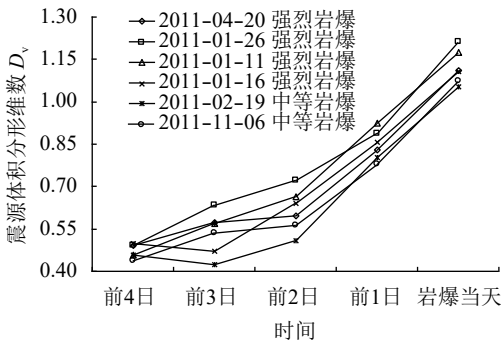


图 13 即时性应变型岩爆孕育过程的体积分形维数演化特征

Fig. 13 Evolution of volume fractal dimensions for micro-seismic events occurred per day during the development of immediate strain rock-bursts

由图13可知,应变型岩爆过程中的震源体积分形维数主要集中分布在0.4~1.3范围内,大于应变-结构面滑移型,同样具有随着岩爆孕育过程不断增加,岩爆发生时达到最大值的特征,且在岩爆发生当天的震源体积分形维数均达到1.0以上。

2.3 震源体积分形维数的岩爆前兆特征

微震事件震源体积分形维数描述的是微震事件在震源体积上的分布特征,塑性破坏范围大的微震事件所占的比重越多,震源体积分形维数越大。2种不同类型即时性岩爆(应变-结构面滑移型、应变型)均具有震源体积分形维数随着岩爆孕育过程不断增加,至岩爆发生时达到最大值的特征。其结论从分形的角度证实即时性岩爆孕育及动态发生过程中,岩爆区围岩岩体均处于破坏区加速积累、不断扩展并相互贯通的过程[9,16];当岩体破坏发展到一范围时,伴随着裂隙的相互贯通、围岩弹性势能的突然释放,导致岩爆的发生。

锦屏 II 级水电站深埋引水隧洞施工过程中40余次不同类型、等级即时性岩爆当天(岩爆发生前24小时)震源体积分形维数分布情况如图14所示(按分形维数从小到大进行排列)。

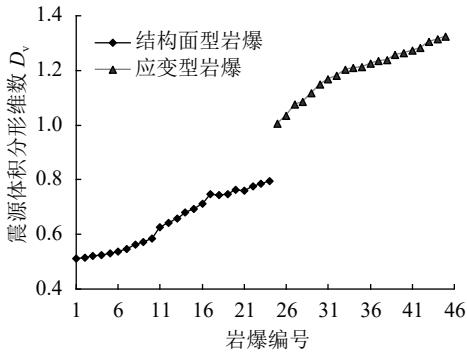


图 14 岩爆当天微震震源体积分形维数分布规律

Fig. 14 Volume fractal characteristics on the day rock-bursting

由图14可知,即时性应变型岩爆发生当天的震源体积分形维数(均大于1.0)高于结构面型岩爆震源体积分形维数(均小于0.8)。结合图8、13可知,应变-结构面滑移型岩爆孕育及发生过程中的震源体积分形维数分布总体上均小于应变型岩爆,这是由于结构面的控制作用,导致大量小震源体积的微震事件沿着结构面产生及扩展[17],进而使得应变-结构面滑移型岩爆过程中的微震事件在裂隙体积分布上低于应变型岩爆,故其相对于应变型岩爆的震源体积分形维数值有所降低。

3 结 论

基于锦屏 II 级水电站深埋引水隧洞施工过程中的大量岩爆实例,针对即时性应变-结构面滑移型及即时性应变型2种不同类型岩爆孕育及动态发生过程中的微震事件,进行了震源体积分布的自相似特征分析,结果表明:

1)深部岩体隧洞施工过程中,即时性岩爆的微震事件在震源体积上具有分形结构,且表现出良好的自相似性。

2)对于2种不同类型即时性岩爆,其微震事件震源体积分形维数均具有随着岩爆孕育过程不断增加,至岩爆发生时达到最大值的特征。

3)应变-结构面型滑移型岩爆孕育及动态发生过程中每天震源体积分形维数主要分布在0.1~0.8范围内。

4)应变型岩爆孕育及动态发生过程中每天震源体积分形维数集中在0.4~1.3范围内,岩爆当天的分形维数均大于1.0。

所涉及的岩爆案例及微震监测数据均来源于中科院武汉岩土所锦屏 II 级水电站微震监测项目部。

参考文献:

[1] Durrheim R J.Violent failure of a remnant in a deep South African gold mine[J].Tectonophysics,1998,289(1/2/3): 105-116.

[2] Mandelbrot B B,Passoja D E,Paullay A J.Fractal character of fracture surfaces of metals[J].Nature,1984,308:721-722.

[3] Sadovskiy M A,Golubeva T V,Pisarenko V F,et al.Characteristic rock dimensions and hierarchical properties of seismicity[J].Earth Phys,1984,20:87-96.

[4] Xie Heping,Pariseau W G.Fractal character and mechanism of rock bursts[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1993,30(4):343-350.

[5] Kagan Y Y,Knopoff L.Stochastic synthesis of earthquake catalogs[J].Geophys Royal Economic Society,1981,86(B4): 2853-2862.

[6] Kagan Y Y,Knopoff L.Statistical study of the occurrence of

- shallow earthquakes[J].[Geophys Royal Economic Society](#), 1978,55(1):67–86.
- [7] Hirata T,Satoh T,Ito K.Fractal structure of spatial distribution microfracturing in rock[J].[Geophysical Journal International](#),1987,90(2):367–374.
- [8] Bhattacharya P M,Majumdar R K,Kayal J R.Fractal dimension and b -value mapping in northeast India[J].[Current Science](#),2002,82(12):1486–1491.
- [9] 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.
- [10] Yu Yang,Feng Xiating,Chen Bingrui,et al.The micro-seismic volume fractal characteristics research for different types of immediate rock-bursts in deep tunnels[J].[Chinese Journal of Geotechnical Engineering](#),2017,39(12):2173–2179.[于洋,冯夏庭,陈炳瑞,等.深部岩体隧洞即时型岩爆微震震源体积的分形特征研究[J].[岩土工程学报](#),2017,39(12):2173–2179.]
- [11] Li S J,Feng X T,Li Z H,et al.In situ monitoring of rock-burst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station[J].[Engineering Geology](#), 2012,137/138:85–96.
- [12] Jiang Quan,Feng Xiating,Zhou Hui,et al.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.[江权,冯夏庭,周辉,等.锦屏 II 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.]
- [13] Chen Bingrui,Feng Xiating,Zeng Xionghui,et al.Real-time micro-seismic 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.[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.]
- [14] Mendecki A J.Principles of monitoring seismic rockmass response to mining[C]//[Rock-bursts and Seismicity in Mines](#). Rotterdam:Balkema,1997:69–79.
- [15] Feng Xiating,Chen Bingrui,Ming Huajun,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.[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.]
- [16] Yu Yang,Feng Xiating,Chen Bingrui,et al.Analysis of energy fractal and microseismic information characteristics about immediate rockbursts in deep tunnels with different excavation methods[J].[Rock and Soil Mechanics](#),2013,34(9):2622–2628.[于洋,冯夏庭,陈炳瑞,等.深埋隧洞不同开挖方式下即时型岩爆微震信息特征及能量分形研究[J].[岩土力学](#),2013,34(9):2622–2628.]
- [17] Feng Xiating,Yu Yang,Feng Guangliang,et al.Fractal behaviour of the microseismic energy associated with immediate rockbursts in deep,hard rock tunnels[J].[Tunnelling and Underground Space Technology](#),2016,51:98–107.

(编辑 李轶楠)

引用格式:Yu Yang,Yan Zhiyu,Xu Changjie,et al.Analysis for self-similarity and fractal characteristic of micro-seismic volume during the evolution of different types of rock-burst[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2019,51(1):121–128.[于洋,晏志禹,徐长节,等.不同类型岩爆孕育过程中震源体积自相似分布的分形特征分析[J].[工程科学与技术](#),2019,51(1):121–128.]