文章编号：1000－7598 (2013) 09－2622－07

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

于　洋[1]，冯夏庭[1, 2]，陈炳瑞[2]，肖亚勋[2]，丰光亮[2]，李清鹏[2]

（1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室，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，武汉 430071）

摘　要：基于锦屏二级水电站深埋隧洞钻爆法及隧道掘进机（TBM）开挖过程中大量微震监测数据及不同等级的岩爆案例，对不同开挖方式下即时型岩爆的孕育及发生过程的能量释放展开研究，并运用分形几何原理研究微震能量分布的变化规律，得到以下结论：(1) 即时型岩爆的孕育及发生过程中，岩爆区围岩岩体处于破坏加速集聚并不断扩展的过程；(2) 钻爆法开挖过程中储存在岩体内的弹性应变能消耗于岩体破裂过程大于 TBM 开挖，而转化为岩体动能小于 TBM 开挖；(3) 钻爆法开挖微震能量分形维度在即时型岩爆的孕育过程不断增加，岩爆临近前会增加到某个临界值以上；(4) TBM 开挖即时型高等级岩爆能量分形维度值大于钻爆法开挖，并且其分形维度值可以反映低等级岩爆伴随发生的特征。

关　键　词：钻爆法；即时型岩爆；微震事件；能量分形；分形维度
中图分类号：TU 45　　**文献标识码：**A

Analysis of energy fractal and microseismic information characteristics about immediate rockbursts in deep tunnels with different excavation methods

YU Yang[1]，FENG Xia-ting[1, 2]，CHEN Bing-rui[2]，XIAO Ya-xun[2]，FENG Guang-liang[2]，LI Qing-peng[2]

（1. Key Laboratory of Ministry of Education for Safe Mining of Deep Metal Mines, 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）

Abstract: Based on a large amount of microseismic informations and hundreds of rockbursts with different intensities occurring in the deep diversion tunnels of Jinping II hydropower station excavated with drill-and-blast method and tunnel boring machine (TBM), the energy release processes of immediate rockbursts with different excavation methods are compared; and energy distribution of microseismic events are analyzed by fractal theory. The achieved results are as follows: (1) Damage of rock mass are gathering and expanding in the processes of immediate rockbursts. (2) Elastic potential energy which stored within the rock mass has different ways of release with different excavation methods. (3) The energy fractal dimension values would increase continuously before the rockburst happens and they totally increase to a critical value when the rockburst approaches during drill-and-blast method excavation. (4) The energy fractal dimension values in TBM excavation which is bigger than that in drill-and-blast method can describe the mild and moderate rockbursts of the working face.

Key words: drill-and-blast method; immediate rockburst; seismic event; energy fractal; fractal dimension

1　引　言

岩爆，又称冲击地压，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。岩爆的发生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。

岩体像其他材料一样，当受到应力作用时，就会在产生微破裂的同时释放应变能并产生应力波，称之为微震，这些应力波在可以被微震仪器接收，对其分析、处理后可以确定岩体破裂过程中微震事件的发生时间、空间位置、能量大小、数量多少等信息，因此在岩爆的孕育及发生过程中对微震事件

收稿日期：2013-04-28
基金项目：国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2010CB732006)。
第一作者简介：于洋，男，1982 年生，博士研究生，主要从事深部岩体力学方面的研究工作。E-mail: lukeryuyang@163.com

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

各参数进行分析，可以达到对岩爆灾害的发生进行动态预测、预警的目的。国内外许多学者运用微震监测的手段对岩爆的孕育过程及发生机制展开了研究，并获得显著成果。Durrheim 等[1]在南非通过实时监测微震活动性，研究深部金矿开采过程中岩爆孕育规律；我国的多个煤矿、金属矿山中，采用了微震监测技术，分析开采活动诱发的矿岩体破坏、岩爆、冲击地压过程[2]。但是，此类研究大多是围绕矿山活动而展开的，而对于深埋线性隧洞不同开挖方式下岩爆发生的对比研究却鲜有报道，岩爆不仅威胁着矿山工程的安全，同时其在深埋线性隧洞开挖过程中也存在潜在危害，深埋线性隧洞与矿山工程在围岩应力情况及监测方法等方面都具有显著的区别，应该区别对待。

从发生的时间来看，岩爆分为即时型岩爆和时滞型岩爆[3]。本文运用微震监测的手段，针对锦屏二级水电站引水隧洞钻爆法及 TBM 两种不同开挖方式下即时型岩爆的孕育及发生过程展开研究，并将微震能量分形维度的变化规律进行对比分析，从而深入了解不同开挖方式下即时型岩爆的孕育及发生机制，确保在最恰当的时间、位置采取最有效的防治方法。

2　工程概述

锦屏二级水电站引水隧洞位置如图 1 所示，位于中国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，隧洞平均长度约为 17.3 km，埋深超过 1 500 m 的洞段占总长度的 80%左右，其中最大埋深为 2 525 m，本研究主要针对Ⅱ、Ⅲ类大理岩开挖段展开，此开挖段岩石坚硬完整致密，单轴抗压强度为 55～114 MPa，弹性模量为 25～40 GPa，变形模量为 8～16 GPa。

锦屏二级水电站地下隧洞工程主要由图 2 所示的 5 条相互平行的隧洞组成，分别为 1#～4#引水隧洞及施工排水洞，其中 1#、3#引水洞开挖断面为圆形，直径为 13 m；2#、4#引水洞开挖上断面为半圆，下段面为马蹄形，直径为 13 m；施工排水洞为圆形断面，开挖直径为 8 m。隧洞开挖采用钻爆法与 TBM 相结合的方式，钻爆法开挖每天爆破 1～2 次，每次爆破进尺 3 m，而 TBM 法开挖速度为每天 5～15 m。引水洞和排水洞施工表明：锦屏深埋隧洞在开挖过程中产生多次岩爆，其程度以轻微～中等为主，局部洞段发生强～极强岩爆。

微震监测仪器采用南非 ISS 监测系统，对引水洞和施工排水洞钻爆法及 TBM 开挖段的施工过程进行连续性实时微震监测，微震监测系统组成及信号处理详见文献[4]。

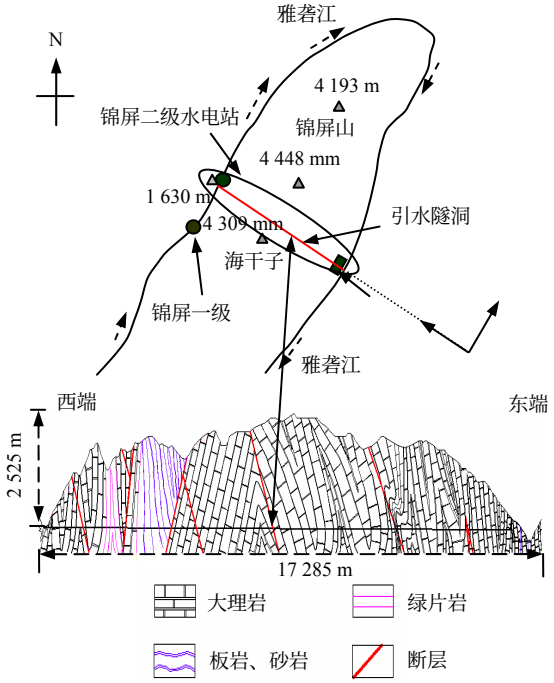


图 1　锦屏二级水电站引水隧洞位置[5]

Fig.1　The location of diversion tunnels in Jinping II hydropower station[5]

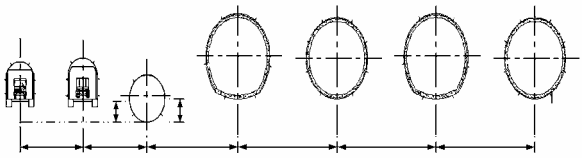


图 2　引水隧洞布置图（单位：m）

Fig.2　Layout of diversion tunnels (unit: m)

3　微震信息特征分析

3.1　即时型岩爆孕育及发生过程的能量释放

岩体在开裂过程中向外界辐射的能量是由于弹性变形向非弹性变形转化所产生的[6]，经常用来描述地震发生前岩体的变化规律，可以被微震仪器监测接收并计算出来：

$$E_{\mathrm{P,S}}=\frac{8}{5}\pi\rho v_{\mathrm{P,S}}R^2\int_0^{t_S}u^2{}_{\mathrm{corr}}(t)\mathrm{d}t \qquad (1)$$

式中：ρ 为岩石密度；$v_{\mathrm{P,S}}$ 为 P 波、S 波的波速；R 为到震源的距离；$u^2{}_{\mathrm{corr}}(t)$为波形速度脉冲的时间函数。

微震仪器接收到的累计微震释放能可表示为

$$SRE=E_{\mathrm{P,S1}}+E_{\mathrm{P,S2}}+\cdots E_{\mathrm{P,S}i} \quad (i=1, 2, 3....n) \qquad (2)$$

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中：$E_{P,S1}$、$E_{P,S2}$、$E_{P,S3}$ ……, $E_{P,Si}$ 为微震仪器监测的每一个微震事件的微震释放能。

钻爆法及 TBM 两种不同开挖方式下，多次即时型岩爆孕育及发生过程中每一天的累计微震释放能如图 3 所示。从图中可以看出，相同时间尺度的情况下两种不同开挖方式的即时型岩爆孕育及发生过程中，每一天岩爆活动区内的累计微震释放能均不断增大，并且在岩爆发生当天达到最大值；TBM 开挖岩爆孕育及发生过程中每一天累计微震释放能要大于钻爆法开挖的过程。

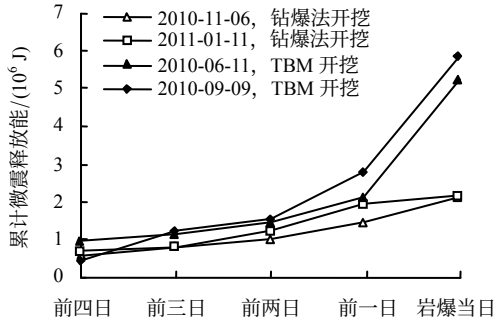


图 3 岩爆活动区微震能量变化

Fig.3 Energy changes of microseismic in rockbursts activity zone

根据断裂力学的观点，岩体的开裂尺度越大、开裂速度越快，在开裂过程中向外界辐射的能量就越大，而拟静态开裂过程不会产生辐射能量。因此，即时型岩爆的孕育及发生过程中每一天的微震释放能不断增大，说明岩爆区围岩岩体正处于破坏加速集聚并不断扩展的过程。而不同开挖方式下即时型岩爆的孕育及发生过程中掌子面开挖累计进尺情况如图 4 所示，由于 TBM 开挖速度远远大于钻爆法开挖，所以在相同时间内其累计微震释放能要大于钻爆法开挖。

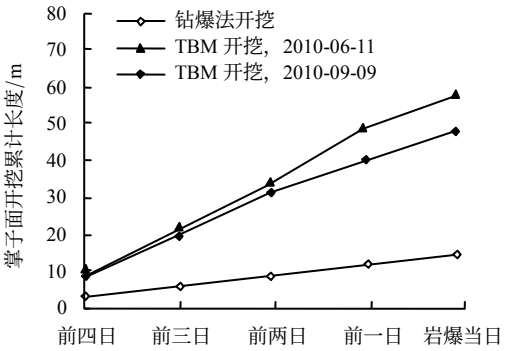


图 4 不同开挖方式下掌子面开挖累计长度

Fig.4 The accumulative excavation length of the working faces with different excavation methods

3.2 不同开挖方式下的能量释放

两种不同开挖方式下掌子面推进单位长度的情况下的微震能量释放如图 5 所示。从图中可以看出：两种开挖方式下即时型岩爆的孕育及发生过程中，开挖单位长度的情况下岩爆活动区内微震释放能同样呈现出不断增大，并且当岩爆发生当天达到最大值的特征，但是 TBM 开挖单位长度的微震能量要小于钻爆法开挖。

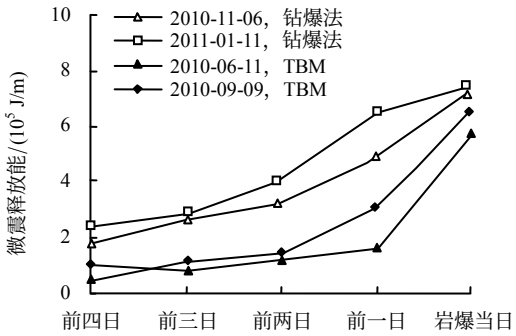


图 5 开挖单位长度岩爆活动区微震能量变化

Fig.5 Energy changes of microseismic in rockbursts activity zone with excavation per unit length

3#引水洞 K11+159～K10+035 位置 TBM 施工洞段掌子面附近共发生即时型岩爆 89 次，其中轻微 72 次、中等 14 次、强烈 3 次，如图 6 所示。TBM 开挖轻微～中等岩爆大多是连续发生的，在时间上具有区域集结的特点，主要发生在强烈岩爆孕育及发生过程中。同时钻爆法开挖段的 1#、2#、3#、4#引水洞以及施工排水洞即时型岩爆发生情况如表 1 所示，并且钻爆法开挖各等级岩爆均是单独发生的。因此，钻爆法开挖过程中发生的岩爆无论在频度还是强度方面均小于 TBM 开挖。以上岩爆实际发生等级参考现场记录，岩爆划分依据参考规范[7]。

高地应力条件不同开挖方式下掌子面附近区域的应力调整经历不同的路径。Abuovd 等[8]研究指出，爆破开挖可以导致掌子面上的原岩应力快速卸荷以及开挖面内保留岩体的破坏；Cai[9]也认为，在深埋隧洞钻爆法开挖过程中，瞬间爆破会在开挖边界上产生很大的不平衡力，这与 TBM 开挖围岩应力的准静态调整具有显著的区别，不同应力路径下积存于岩体内部的弹性应变能的释放应该有所不同。按照能量观点，对于高地应力条件下的硬脆性岩石，积存于岩石中的弹性应变能主要有以下两种释放方式：一方面消耗于围岩破裂的产生过程中并以弹性波的形式向外界辐射能量；另一方面转化成

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

围岩高应力介质向表面位移的动能并以岩爆形式将岩块向外界投掷、抛射。锦屏二级水电站引水隧洞声波测试结果表明，钻爆法开挖损伤区范围大于 TBM 开挖, 并且其严重损伤区深度占到总损伤区深度的 50%以上，大于 TBM 开挖的 30%[10]。损伤区是岩体中微破裂的活动区域, 微破裂聚集程度越高, 岩体的损伤程度就越深，因此钻爆法开挖微破裂事件在空间上的活动性及聚集程度均要大于 TBM 开挖。结合两种不同开挖方式在掌子面开挖为单位长度的情况下（假定释放等量弹性变形势能），钻爆法开挖累计微震释放能要大于 TBM 开挖，而岩爆无论在频度还是强度方面均小于 TBM 开挖，故而此过程中钻爆法开挖方式下积存于岩体中的弹性应变能消耗于围岩损伤、破裂产生的部分大于 TBM 开挖，而转化为岩体动能方面小于 TBM 开挖。

因此，从深埋隧洞开挖方式选择的角度来看，采用钻爆法和 TBM 开挖各有利弊。采用钻爆法开挖时，围岩损伤产生的范围大且程度深，因此在开挖过程中要确保支护的及时性（即支护进度紧跟掌子面的推进），以防止由于严重损伤区大范围形成而造成的塌方等灾害的发生，该方法适应性强，可以适应各种断面尺寸及复杂的地质条件；采用 TBM 开挖时，相对于钻爆法来说，虽然损伤的范围小、程度轻，但是岩爆特征明显，因此在 TBM 开挖过程中，支护的同时还要合理地选择与控制掌子面开挖速度，当多次轻微～中等岩爆在同一区域内连续发生时应当减缓施工，使该区域内的围岩应力得到调整、围岩能量得到释放，以减少甚至避免强烈岩爆的发生，确保工程的安全性和高效性。另外，该方法的工程地质适应性也较差。

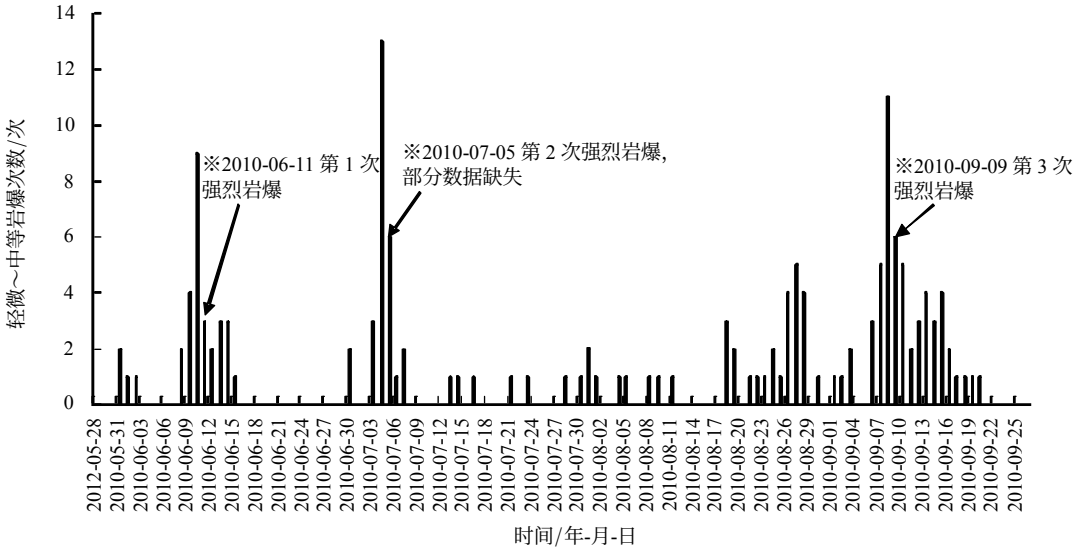


图 6　深埋隧洞 TBM 开挖过程中掌子面附近岩爆发生情况

Fig.6　Rockbursts on the working face in deep tunnel excavated by TBM

表 1　深埋隧洞钻爆法开挖岩爆发生情况

Table 1　Rockbursts in deep tunnels excavated by drill-and-blast methods

施工隧洞	掌子面编号	起始桩号	结束桩号	轻微岩爆/次	中等岩爆/次	强烈岩爆/次	总岩爆/次
1#引水洞	1-1-W	K8+759	K8+125	4	5	0	9
2#引水洞	1-2-E	K7+496	K7+965	10	1	1	12
3#引水洞	1-3-E	k8+546	K9+003	7	1	1	9
4#引水洞	1-4-E	K8+525	K9+062	3	7	1	11
施工排水洞	1-P-E	K8+202	K8+757	7	4	2	13

4　微震能量分形研究

分形的概念是由美籍数学家曼德布罗特首先提出的，他创造性地引入分形方法对裂隙岩体进行非连续变形、强度和断裂破坏的研究，形成了裂隙岩体非连续行为分形研究的新方向，国内外许多岩体力学研究者也针对这一理论开展了大量的研究，并取得了显著的成果[11−18]。微震能量分布与大尺度、快速破坏的裂隙在岩体内部的发生发展情况相对应，因此掌握微震能量分布的变化规律对于了解岩体稳定性具有重要作用。微震事件的能量分布特征异常复杂，其变化过程具有多参量、非线性等特

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

点，很难直观地被表达出来，而分形理论可以准确地对这种分布进行有效描述。

4.1 能量分形方法

根据分形几何学，岩体微裂产生过程中微震能量分布的相关积分可以表示为

$$c(e)=\frac{2N(e)}{N(N-1)}\quad (e\le E) \tag{3}$$

式中：E 为所有微震事件微震释放能的范围区间上限值；e 为 E 范围内的微震释放能；$N(e)$ 为 e 能量范围内的微震事件数对数值；N 为 E 能量范围内的微震事件总数。

如果微裂隙产生过程中的微震事件在能量上是具有分形结构的，那么可以将微震能量分布的相关积分表达为

$$c(e)\propto e^{D} \tag{4}$$

即

$$D_e=\lim_{e\to E}\frac{\lg c(e)}{\lg e}\quad (e\le E) \tag{5}$$

运用这种方法，根据微震监测系统获得的微震事件在能量上的分布情况，能量分形维数 D_e 可以通过求线性的斜率方法进行计算。

4.2 即时型岩爆微震能量分形

以排水洞钻爆法开挖 2011 年 1 月 11 日即时型强烈岩爆为例，其孕育及发生过程中岩爆活动区内的微震事件如图 7 所示，将此过程中每一天的微震事件设定为一组，运用图 8 所示的方式，根据微震事件在能量上的分布情况（主要分布在 0～10^6 J 的范围内）统计出 $N(e)$ 及 N 值，用以计算相应的 $\lg e$ 与 $\lg c(e)$，以 $\lg e$ 为横坐标，$\lg c(e)$ 为纵坐标进行线性拟合，求出直线的斜率即为当天微震能量分形维度值，如图 9 所示。

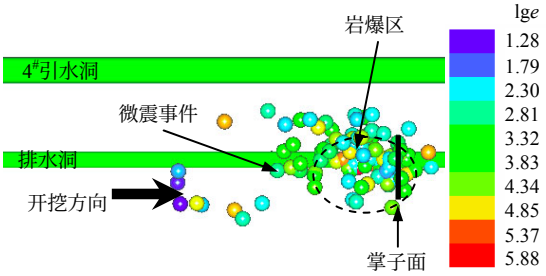


图 7 岩爆活动区微震事件分布

Fig.7 Microseismic events in rockbursts activity zone

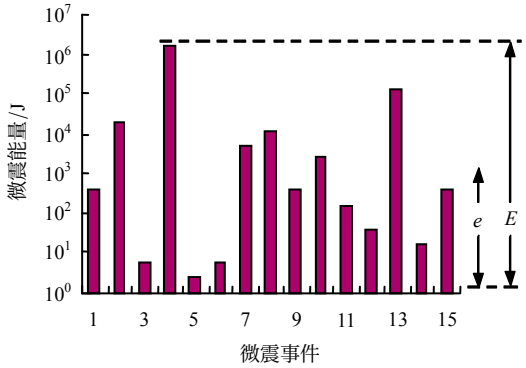


图 8 微震能量分形计算的参数选取

Fig.8 Parameter selection of microseismic energy fractal calculation

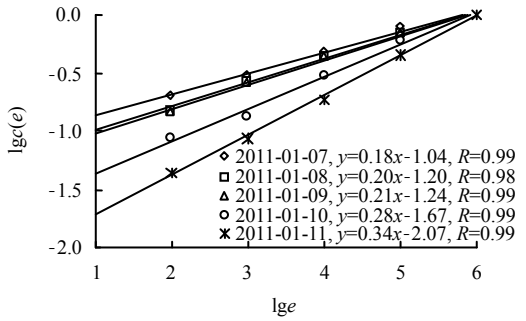


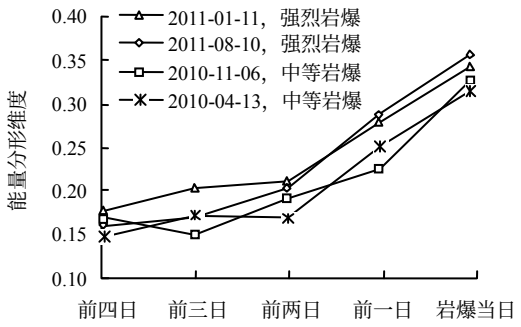
图 9 岩爆过程中微震能量分形维度拟合图

Fig.9 Energy fractal fitting chart of microseismic during rockburst process

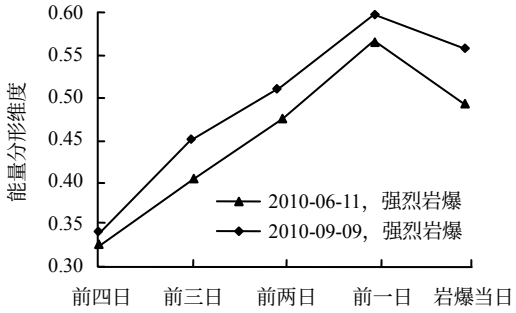
$N(e)$ 与 e 的双指数比值 $\lg c(e)/\lg(e)$ 呈现出良好的线性关系，这表示即时型岩爆的孕育及发生过程中微震事件是具有能量分形特征的，并且表现出良好的自相似性。运用同样的方法对钻爆法开挖多次不同等级岩爆及 TBM 开挖 2010 年 6 月 11 日、2010 年 9 月 9 日两次强烈岩爆孕育及发生过程中的微震事件进行能量分形，能量分形维度变化规律如图 10 所示。

即时型岩爆孕育及发生过程中钻爆法开挖微震能量分形维度主要分布在 0.15～0.35 的范围内，随着岩爆的孕育过程不断增大直至岩爆发生，并且在岩爆发生之前分形维度值均上升到 0.30 以上；TBM 开挖强烈岩爆微震能量分形维度大于钻爆法开挖主要分布在 0.30～0.60 的范围内，随着岩爆的孕育过程不断增大，而在岩爆发生之前的能量分形维度有所下降，但是总体上还是呈现出上升的趋势。结合图 6 可以看出，TBM 开挖即时型强烈岩爆发生前其影响范围内均有轻微～中等岩爆伴随发生的情况，并且随着岩爆的孕育过程呈递增的趋势，在岩爆发生当天有所减少。TBM 开挖即时型强烈岩爆孕育及发生过程中的能量分形维度与其影响范围内伴随发生的轻微~中等岩爆次数之间具有正比关系如图 11 所示。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 钻爆法开挖能量分形维度变化规律



(b) TBM 开挖能量分形维度变化规律

图 10　不同开挖方式即时型岩爆孕育及发生过程中微震能量分形维度变化规律

Fig.10　Energy fractal dimension changes of microseismic with different excavation methods during the generating process of immediate rockburst

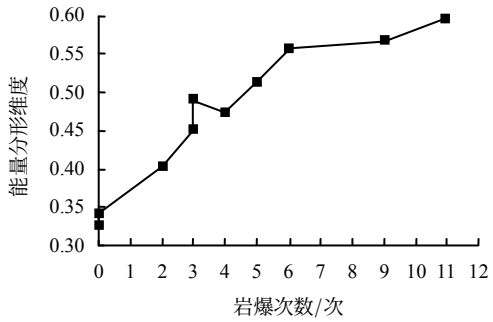


图 11　TBM 开挖即时型岩爆孕育及发生过程中能量分形维度与轻微~中等岩爆之间的关系

Fig.11　Relationship between energy fractal dimension and mild to moderate rockbursts with TBM excavation during generating process of immediate rockburst

能量分形维度表示的是微震事件在能量上的分布规律，分形维度值越大，表明辐射能大的微震事件所占的比重越大。两种不同开挖方式下，即时型岩爆的孕育过程中能量分形维度不断增加，说明大尺度、高速度裂隙产生的比例不断增大，从分形的角度说明此时岩爆区围岩岩体处于大范围破坏加速集聚的过程；TBM 开挖即时型强烈岩爆能量分形维度大于钻爆法开挖并且体现出不同的规律，是由于受到轻微~中等岩爆伴随发生现象的影响，这些伴随发生的岩爆使得大微震事件的比例有所增大，并且其发生的次数直接影响分形维度的变化规律。

5　结　论

（1）通过微震监测的手段，对深埋硬岩隧洞开挖过程中岩爆的发生进行研究是可能的，也是可行的。即时型岩爆孕育及发生过程中岩爆区围岩岩体在正处于破坏加速集聚并不断扩展的过程，并且根据微震能量的演化规律，可对即时型岩爆进行预警。

（2）综合分析了深埋硬岩隧洞不同开挖方式下的现场情况及微震监测数据。受掌子面应力调整路径的影响，钻爆法开挖与 TBM 开挖过程中储存在岩体内的弹性应变能在损伤产生以及动能转化方面消耗的比例有所不同。此结论可以为开挖方式的选择以及不同开挖方式下岩爆的预测方法与防治手段的确定提供依据。

（3）提出了微震活动性的能量分形方法，揭示了不同开挖方式下即时型岩爆孕育及发生过程中的能量分形维度变化特征。钻爆法开挖即时型岩爆微震能量分形维度在岩爆的孕育过程具有明显增加，并且在岩爆临近前会增加到某个临界值以上；TBM 开挖即时型高等级岩爆微震能量分形维度大于钻爆法开挖，其分形维度值与伴随发生的低等级岩爆的发生情况之间具有内在联系。此结论对不同开挖方式下，确定预测岩爆的预警指标以及对提高岩爆危险程度判别的准确性具有重要意义。

由于 TBM 开挖监测段即时型强烈岩爆案例较少，其孕育及发生过程中微震能量分形维度的变化规律是否具有普遍性还有待进一步研究。

参 考 文 献

[1]　DURRHEIM R J, HAILEA. Violent failure a remnant in a deep South African gold mine[J]. **Tectonophysics**, 1998, 289(1): 105－116.

[2]　李庶林, 尹贤刚, 郑文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2048－2053.
LI Shu-lin, YIN Xian-gang, ZHENG Wen-da, et a1. Research of multichannel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2048－2053.

[3]　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(12): 433－443.
FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

tunnels: immediate rockburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(12): 433－443.

[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 microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-duried tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 30(2): 275－283.

[5] ZHANG CHUANQING, FENG XIATING, ZHOU HUI, et al. A top pilot tunnel preconditioning method for the prevention of extremely intense rockbursts in deep tunnels excavated by TBMs[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 31(3): 289－309.

[6] 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.

[7] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50287－2006 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.

[8] ABUOV M G, ERMEKOV T M. Studies of the effect of dynamic processes during explosive break-out upon the roof of mining excavations[J]. **Journal of Mining Science**, 1989, 24(6): 58l－590.

[9] 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.

[10] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. 深部岩体开挖方式对损伤区影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1097－1106.
YAN Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. In-situ test research on influence of excavation method on induced damage zone in deep tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(6): 1097－1106.

[11] KAKI. A probabilistic synthesis of precursory phenomena, in earthquake prediction[M]. Washington D. C.:[s. n.], 1981: 566－574.

[12] KAGAN Y Y, KNOPOFF. Stochastic synthesis of earthquake catalogs[J]. **Geophys Royal Economic Society**, 1981, 86(B4): 2853－2862.

[13] KAGAN Y Y, KNOPOFF. Spatial distribution of earthquakes: Two-point correlation function[J]. **Geophysical Journal of Royal Astronomical Society**, 1980, 62(2): 303－320.

[14] KAGAN Y Y, KNOPOFF. Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes[J]. **Geophys Royal Economic Society**, 1978, 55(1): 67－86.

[15] XIE HEPING. Fractals in rock mechanics[M]. Rotterdam: A.A. Balkema, 1992: 132－144.

[16] 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.

[17] FENG XIATING, SETO M. Fractal structure of the time distribution of microfracturing in rocks[J]. **Geophysical Journal International**, 1999, 136(1): 275－285.

[18] FENG XIATING, 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.

上接第 2621 页

[8] 姜福兴, 杨淑华, XUN Luo. 微地震监测揭示的采场围岩空间破裂形态[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 357－360.
JIANG Fu-xing, YANG Shu-hua, XUN Luo. Spatial fracturing progresses of surrounding rock masses in longwall face monitored by microseimic monitoring techniques[J]. **Journal of China Coal Society**, 2003, 28(4): 357－360.

[9] 姜福兴, XUN Luo, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 23－25.
JIANG Fu-xing, XUN Luo, YANG Shu-hua. Study on microseismic monitoring for spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(1): 23－25.

[10] LUO XUN, JIANG F X, YANG S H. A trial of microseismic monitoring of coal bumps at an underground coal mine in China[C]//Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings. [S. l.]: Australia Center for Geomechanics, 2005: 145－147.

[11] 姜福兴. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.

[12] 史红, 姜福兴, 王同旭. 顶板结构稳定性与顶煤放出率的动态关系探讨[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(1): 80－83.

[13] 史红. 综采放顶煤采场厚层坚硬顶板稳定性分析及应用[博士学位论文 D]. 青岛: 山东科技大学, 2005.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net