

用分维研究采场顶板失稳的声发射过程^①

唐绍辉 桑玉发

(长沙矿山研究院, 长沙 410012)

摘 要 应用分形几何方法, 对室内岩石试样及矿山顶板冒落前后的声发射参数进行分析, 寻求顶板冒落过程中声发射参数的分形特性, 用分维来研究岩体失稳的声发射规律。研究结果发现: 采场顶板岩体冒落前的声发射参数(C 、 E)分布符合分形, 不同类型的岩体虽然失稳前分维 D 大小不同, 但表现出相同的规律性, 即顶板处于相对稳定期时, 分维值上升, 当声发射参数达到临界状态时, 分维值开始下降, 分形维随岩体破坏的发展而减小, 特别是最低的分维产生于岩体破坏灾害附近。

关键词 分维 声发射 采场顶板 失稳

岩体是一种应力介质, 当其受力变形时, 将伴随着能量的释放过程, 声发射是这种释放过程的物理效应之一, 声发射参数在一定程度上反映了岩体的应力状态和释放变形能的速率。因此, 声发射技术作为监测和预报岩体稳定性的一种重要手段, 近年来无论在监测仪器或实际应用等方面都有了很大的进展, 尽管如此, 也还存在一些需要进一步探讨的问题, 主要有: (1) 由于岩体性质、地质构造及回采活动的影响, 岩体破坏时, 没有统一的岩体失稳时的声发射临界参数; (2) 除了目前所采用的声发射事件率、能率外, 还有哪些参数可作为更加可靠的岩体失稳前兆信息; (3) 岩体破坏前并不总是伴随任何可辩识的声发射前兆异常, 许多研究表明: 容易辩识的前兆异常不一定预示冒顶的来临, 而冒顶破坏也不一定有异常前兆; (4) 由于便携式岩体声发射仪鉴别环境噪音能力较差, 仪器本身无声源定位功能, 声发射技术的有效应用与发展受到了限制, 其准确度在一定程度上还取决于用户的技能和经验。

本文应用分形几何方法, 通过对室内岩石试样及二个矿山顶板冒落前后的声发射参数进行分析, 寻求顶板冒落过程中声发射参数的分

形特性, 用分维来研究岩体失稳的声发射规律, 克服以往预报参数的模糊性和不确定性, 力求使声发射预报技术更加科学化。

1 分形理论的基本原理

岩体破坏监测过程发生的声发射事件以岩体破坏之前的微破裂过程为特征, 一些研究表明: 从地壳尺度的板块断裂到显微镜下的晶粒破裂均具有分形结构^[1]。岩石材料的损伤演化过程也可以认为是一种分形, 而分数维是反映其损伤程度的某一特征量^[2]。岩石破坏过程中包含有大量非线性特征的声发射参数, 对它的研究应从非线性观点出发, 但大多数情况下不知非线性问题中微分方程的具体形式, 只是通过声发射监测知道它所包含的变量发展过程, 对于这样随时间变化所组成的序列集, 根据分维数描述的特点, 选用关联维数进行描述是合适的。

对于监测参数组成的序列集, 定义一个容量为 n 的序列集^[3, 4]:

$$\overline{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (1)$$

由式(1)来支撑一个 m 维的相空间($m < n$), 即先取 m 个数作为 m 维空间的一个向量:

① 收稿日期: 1996-06-03; 修回日期: 1997-04-10

唐绍辉, 男, 32岁, 高级工程师

$$\overline{X}_1 = \{X_1, X_2, \dots, X_m\} \quad (2)$$

然后, 右移一步取 m 个数作为第二个向量:

$$\overline{X}_2 = \{X_2, X_3, \dots, X_{m+1}\} \quad (3)$$

依此类推, 构成 $N = n - m + 1$ 个矢量, 相应的关联函数为:

$$C(\gamma) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H(\gamma - |\overline{X}_i - \overline{X}_j|) \quad (i \neq j) \quad (4)$$

其中 $C(\gamma)$ 描述了相空间 R^m 中两点 $\overline{X}_i$ 和 $\overline{X}_j$ 之间的距离小于标准距离 γ 的概率, γ 为量测尺度。这里 $H(\gamma)$ 是 Heaviside 函数, 定义为

$$H(\gamma) = \begin{cases} 1 & \gamma \geq 0 \\ 0 & \gamma < 0 \end{cases} \quad (5)$$

可以证明, 当 γ 较小时, $C(\gamma) = \gamma^D$, 若在一定范围内取不同的 γ 值, 则 $\lg C(\gamma)$ 与 $\lg \gamma$ 之间应呈直线关系, 由该直线段的斜率可得到前兆序列的分维数:

$$D = \lg C(\gamma) / \lg \gamma \quad (6)$$

2 室内岩石声发射特性试验

试验所采用的岩样由石英角斑凝灰岩制备, 试验时采用长沙矿山研究院研制的 DYF-1 型智能地音仪采集声发射信号, 在 MTS 刚性试验机上得到单轴压缩和剪切条件下试样破坏前的声发射事件率与加载时间的关系, 其中单轴压缩的声发射次数 C 与加载时间 t 的关系如图 1 所示。

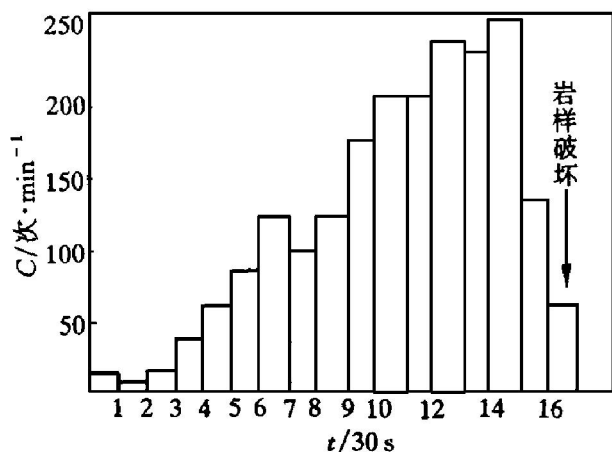


图1 室内试验声发射事件率-时间关系

试验结果表明: 岩石声发射特性与受力过程是密切相关的, 并且前者能够反映岩体微小逐次破坏的过程, 在载荷达到极限应力的 75% 左右时, 声发射特征表现得十分明显, 且声发射参数先于岩体破坏达到峰值。

3 冒顶过程的现场声发射监测

3.1 冒顶预报的声发射参数

以往通常采用以下几个参数来预测顶板岩体的冒落。

(1) 波形图及波形有关的参数, 即从波形图可以得到岩体声发射信号有关波形特征的一些参数, 诸如波的初至时刻、波形持续时间、信号的振幅等。

(2) 声发射事件率(C)和能率(E), 即单位时间的声发射次数和释放的能量, 它们是所有声发射或微震评价岩体破坏状态最常用的参数。

(3) 声发射事件增长率 R_C , 能率增长率 R_E 。

3.2 声发射监测实例

云锡老厂锡矿具有一百多年的开采历史, 资源丰富, 是我国锡矿开采的典范。14[#]-5 矿体是老厂锡矿主要矿体, 采用下向胶结充填法开采, 硫化矿很稳固, 但夹层或氧化矿的存在影响其稳固性, 自开采以来发生过多项顶板冒落事故。图 2 为 2[#] 矿柱一次冒顶预报声发射监测数据。

白银公司小铁山矿由于岩体工程地质条件恶劣, 矿体和围岩主要为浸染矿体和石英角斑凝灰岩, 且走向结构面极为发育, 自 1980 年正式投产以来, 至 1993 年 8 月的 13 年间, 人身伤亡事故中冒顶、片帮死亡人数占 60%, 从 1994 年 8 月至 1995 年 5 月, 针对小铁山矿四、五、六中段不稳定采场, 运用声发射技术成功地进行多次采场冒顶片帮预报, 图 3 为 1620-750 川 1[#] 测点附近发生冒顶前后的声发射活动过程。

大量的室内试验及现场监测表明, 岩体在

变形或破坏阶段都要产生声发射,且不同阶段声发射活动的程度不同,岩石破坏失稳前典型的声发射过程可分为三个阶段:

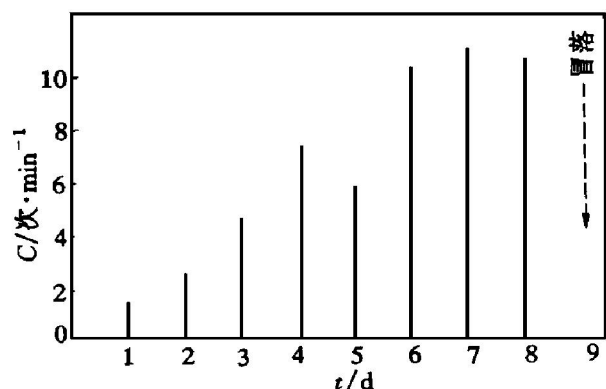


图2 2#矿柱AE事件率-时间关系

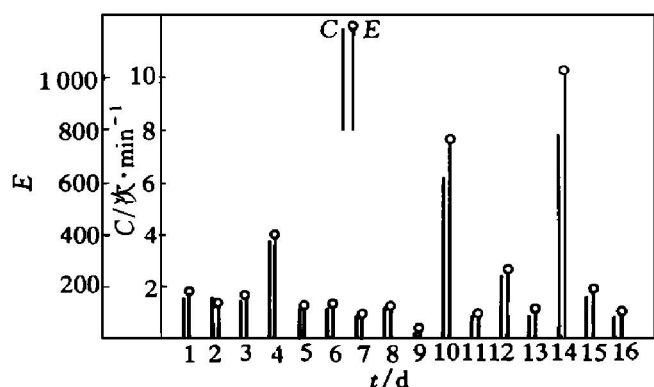


图3 1620—750川1#测点C、E-t过程

(1) 相对平静期: 这个过程是岩体在外力作用下原生裂隙的逐次闭合, 声发射活动一直比较平静, 持续保持在较低的能量水平, 此过程与岩体性质及原生裂隙发育程度有关。

(2) 急剧增加期: 随着外力的增加, 声发射的活动大量增加, 各声发射参数也达到临界值, 此时, 岩体沿已有裂隙滑移并产生新的裂隙, 是前期积聚弹性能的释放过程。

(3) 失稳前兆期: 局部破裂释放能量之后, 声发射次数和能率迅速减少, 此过程为岩体破坏前存在的安静期。

虽然如此, 但从二个矿山实测资料可看出: 由于影响因素的差异, 各过程的长短及失稳前声发射参数的临界值有很大的差别, 为此, 给准确预报工作带来很大的困难, 须寻求

建立在声发射监测数据基础上的更为有效的科学预报方法。

4 声发射参数的分形特征

采用关联函数计算声发射参数分维, 为了避免 γ 取值的分散性^[3], 计算中取

$$\gamma = K \cdot \gamma_0 / 10 \quad (7)$$

式中 K 为比例系数, 依次取 $K = 1, 2, 3, \dots$; γ_0 为集合中两点距离的均值, 即

$$\gamma_0 = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H(|\bar{X}_i - \bar{X}_j|) (i \neq j) \quad (8)$$

这样就可较好地计算出不同观测尺度 γ 下的 $C(\gamma)$ 值。

将结果绘于双对数坐标中, 曲线的线性部分即分维存在的区间, 斜率的绝对值即为分维, 表1为小铁山矿1#测点冒顶前相空间维数 m 不同时的计算结果, 图4为二个矿山的分维 D 与相空间维数 m 的关系。图5为室内试验岩石破坏前的分维计算结果。

计算结果表明, 声发射参数分布符合分形, 具有很好的统计自相似性, 线性回归的相关系数均大于0.96。小铁山矿1#测点能率 E 的分维在五维相空间趋于极限值2.02, 且声发射参数的分维增幅远小于其相应相空间维数的增幅, 这预示着相空间中能率分形的分布没有能率 E 观测数据复杂。但在五维相空间下事件率 C 的分维值还未趋于稳定值, 说明岩体声发射事件率是个非常复杂的非线性动力学过程, 时间序列表现为一种对初始条件十分敏感的混沌特性, 描述该混沌时间序列所必需的最小相空间维数 m 大于5。

在每一容量空间中, 选取适合的相空间维

表1 不同相空间维数时声发射参数的分维值

相空间维数	5	4	3	2	注
D 值	1.9959	1.8786	1.2845	0.8281	C 值
相关系数 γ	0.9642	0.9710	0.9811	0.9779	
D 值	2.023	2.022	1.338	0.866	E 值
相关系数 γ	0.9675	0.9847	0.9804	0.9759	

数, 分别计算室内单轴抗压、抗剪以及现场监测的冒顶前声发射参数的分维变化情况, 如图6、图7、图8所示。

比较声发射参数与其分维的计算结果可见, 顶板岩体(或岩样)处于相对稳定期时, 分维值上升; 当声发射参数达到临界最大值时,

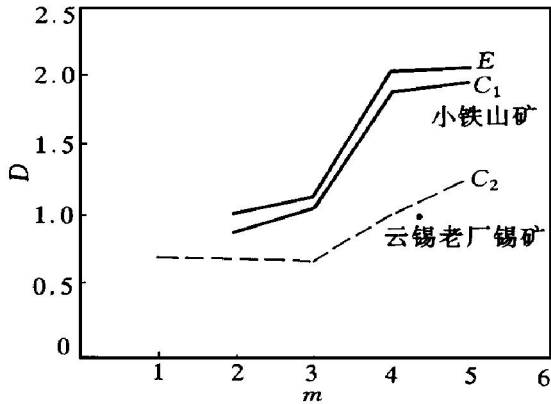


图4 现场监测 AE 参数 m - D 关系
 E 、 C_1 —小铁山矿; C_2 —云锡老厂锡矿

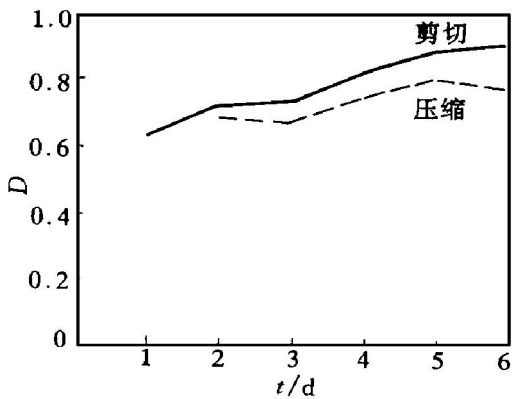


图5 室内试验 AE 参数 m - D 关系

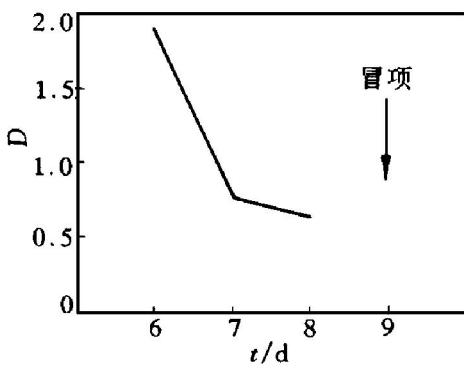


图6 老厂锡矿 AE 参数 D - t 关系

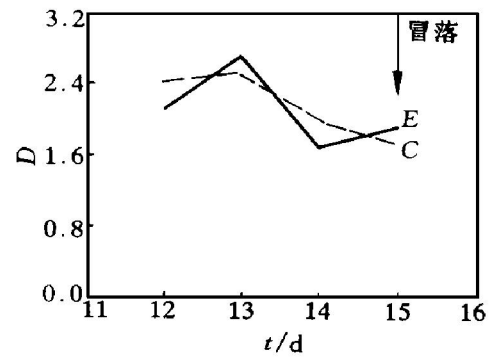


图7 小铁山矿 AE 参数 D - t 关系

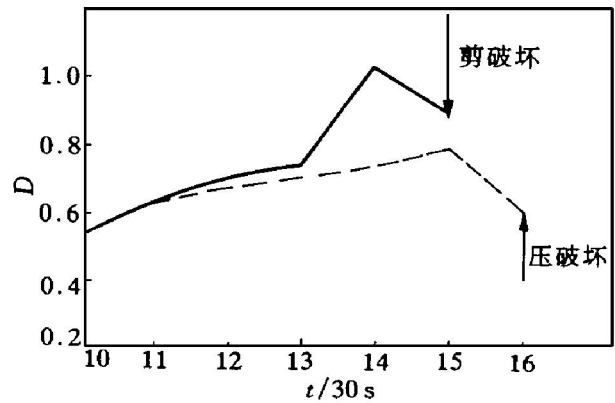


图8 室内试验 AE 参数 D - t 关系

分维值反而下降, 在冒顶前声发射事件率的分维值达到最低值。系统科学理论和对岩石破裂过程的试验均已表明^[5]: 岩石破裂过程是一个降维有序的过程, 因此, 可以说采场冒顶的孕育过程, 也即是一个耗散结构的形成过程。该结果显示, 声发射参数分维的降低是某一岩体破坏事件的前兆, 因此声发射参数的分维 D 是评价岩体失稳破坏的有效指标。

5 结论

(1) 采场顶板岩体冒落前的声发射参数 (C 、 E) 分布符合分形, 不同类型的岩体虽然失稳前分维 D 大小不同, 但表现出相同的规律性, 即顶板处于相对稳定期时, 分维值上升, 当声发射参数达到临界状态时, 分维值开始下降, 分形维随岩体破坏的发展而减小, 特别是最低的分维产生于岩体破坏灾害附近。因此,

(To page 42)

CALCULATING MODELS OF MASS ACTION CONCENTRATION FOR SEVERAL BINARY MATTES

Zhang Jian

Metallurgical Engineering School,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

ABSTRACT Based on the facts that cations and anions of molten salts and binary oxide solutions don't separate from each other as well as that the electric conductivities of mattes are greater than that of salts and oxide solid solutions, calculating models of mass action concentration for binary mattes involving eutectic or complex compound have been formulated according to the same principle that cations and anions of matte also don't separate from each other. Calculated results agreed well with measured values, this in turn showed that the calculating models can reflect the structural characteristics of binary mattes concerned.

Key words matte activity eutectic complex compound mass action concentration

(编辑 朱忠国)

(From page 25)

参考文献

分维更能科学地评价岩体稳定状态。

(2) 相空间维数 m 对分维值有较大的影响, 故必须基于同一 m 值来计算声发射参数的分维值, 以保证问题的可比性。如何选取最优的 m 值, 是有待进一步研究的问题。

- 1 李久林. 水文地质工程地质, 1994, (3): 25- 28.
- 2 孙 钧. 面向 21 世纪的岩石力学与工程. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 6- 9.
- 3 王凤江, 笪 盍. 金属矿山, 1994, 216(6): 24- 26.
- 4 谭云亮等. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 90- 95.
- 5 秦四清等. 工程地质研究进展. 成都: 西南交通大学出版社, 1992: 122- 151.

USING FRACTAL DIMENSION TO STUDY ACCOUSTIC EMISSION RPOCESS OF STOPE ROOF' S UNSTABILITY

Tang shaohui, Sang Yufa

Changsha Institute of Mining Resarch, Changsha 410012

ABSTRACT Acoustic emission(AE) parameters, measeured from rock specimens in laboratory and monitored from stopes before/ after roof collapses , were studied by using fractal geometric method, so as to investigate their fractal characteristics during the rock failure process. Meanwhile the AE rules governing rockmass destabilization were investigated through fractal dimension study. The research results indiated that the fractal dimension values of the stope roof rockmass before suddenly collapsing exhibit certatin regularity which can be used to evaluate the stability of the rock in stoping and excavation more scientifically, and to predict the activation of rock pressure in mining and excavation processes.

Key words fractal dimension AE roof destabilization

(编辑 何学锋)