

静力破碎花岗岩电磁辐射分形特征研究

樊勇¹, 赵伏军^{1,2}, 张孟举¹, 张柏¹, 李玉¹

(1.湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 选用球型压头和十字型压头在 RMT-150C 岩石力学试验机上对花岗岩分别进行不同加载速率的岩石破碎实验, 采用 KBD5 电磁辐射数据采集系统对岩石破碎过程中产生的电磁辐射信号进行采集处理, 应用分形理论分析电磁辐射脉冲数的分形特征。实验结果分析表明: 试件在受载过程中电磁辐射脉冲数与时间具有明显的分形特征, 并随加载速率增大电磁辐射信号强度增大, 分形维数 D 也增大, 具有正相关性; 在相同速率的岩石加载破碎下, 十字型压头电磁辐射分形维数 D 比球型压头的大, 与电磁辐射脉冲信号的强度变化呈相同的规律, 利用电磁辐射脉冲信号和分形维数 D 的相同规律可以更全面的反映岩石的真实破裂过程。

关键词: 花岗岩; 电磁辐射; 加载速率; 分形维数

中图分类号: TD315 **文献标识码:** A

Study of fractal characteristics of electromagnetic emission during granite static crushing

FAN Yong¹, ZHAO Fujun^{1,2}, ZHANG Bai¹, CHEN Ke¹, ZHANG Mengju¹, LI Yu¹

(1.School of Energy and Safety Engineering Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201 China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Xiangtan 411201 China)

Abstract: Rock crushing experiments with different loading rates on the granite were carried out on the RMT-150C rock mechanics testing machine with spherical indenter and cross indenter, using KBD5 electromagnetic emission data acquisition and processing system to collect and handle electromagnetic emission signal during rock crushing process. Fractal characteristics of electromagnetic emission pulses were analyzed by fractal theory. Analysis of the experimental results showed that in the process of the specimen loaded, electromagnetic emission pulse number has obvious fractal characteristics with time, and with the increase of the loading rate, the intensity of electromagnetic radiation signal and the fractal dimension D increases, which has a positive correlation; Under rock loading and crushing of the same rate, cross indenter electromagnetic emission fractal dimension D is larger than spherical indenter, which has the same law with the intensity change of the electromagnetic emission pulse signal, by using the same law of the electromagnetic emission pulse signal and the fractal dimension D , the real fracture process of the rock can be more fully reflected.

Key words: granite; electromagnetic emission (EME); loading rate; fractal dimension

电磁辐射 (EME) 现象是煤岩体非均质材料在受载条件下发生变形破坏时向外辐射电磁能量的过程。该现象的发生是因为煤岩体内各个部位的非均质变速变形引发的电荷迁移及裂隙扩张过程中导致带电粒子变速运动而产生的^[1]。随着电磁辐射技术应用范围不断扩大, 人们对电磁辐射研究更加的深入^[2-7]。研究人员在试验中发现煤岩体等硬脆性材料破碎过程产生的电磁辐射信号具有较强的非线性特征, 运用常规线性统计的方式来描述电磁辐射脉冲

收稿日期:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474103); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ2070); 湖南省研究生科研创新项目(CX2015B508)

通信作者: 赵伏军(1963-), 男, 湖南衡山人, 博士, 教授, 研究方向: 岩石力学. E-mail: zfjxn@263.net

信号等数据时，难以全面地反应电磁辐射波动的本质性，但是如果采用分形理论进行电磁辐射研究则可以较好地突出数据的真实性，所以分形理论为这一非线性问题的研究提供了技术支撑和保障^[8-12]。王恩元等^[13]对原煤在受载破坏时电磁辐射的统计分形规律和特性展开了深入的研究和分析，发现随着受载煤体的变形破坏增大，电磁辐射信号越强，分形维数 D 也越大。姚精明等^[14]通过研究认为电磁辐射分形维数反映了煤岩体发生破坏的难易程度，利用分形维数可以预测预警煤岩体的失稳。基于上述研究成果，本文通过试验采集花岗岩破坏过程中的电磁辐射信号，并运用分形理论对花岗岩破裂电磁辐射脉冲信号分形维数进行计算，以期获得电磁辐射分形维数与岩石破裂程度和脉冲信号的对应关系，多角度联合分析岩石破裂电磁辐射特性。

1 静力破碎花岗岩的电磁辐射实验

1.1 实验系统

实验系统由加载部分和电磁辐射信号采集部分组成，如图 1 所示。试验中利用 RMT-150C 岩石力学试验机对花岗岩试件进行静力加载破坏，利用 KBD5 电磁辐射信号采集系统对试件破坏过程中产生的电磁辐射脉冲信号进行采集。试验试件为硬脆性花岗岩，试样尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的正方体。从加工好的试样中选取 6 组（每组 3 个）完整性较好的作为试验用样，并进行分组编号。采用球型和十字型两种压头对试样分别进行 0.001 mm/s 、 0.01 mm/s 、 0.1 mm/s 三种不同加载速度的静力侵入破碎试验。

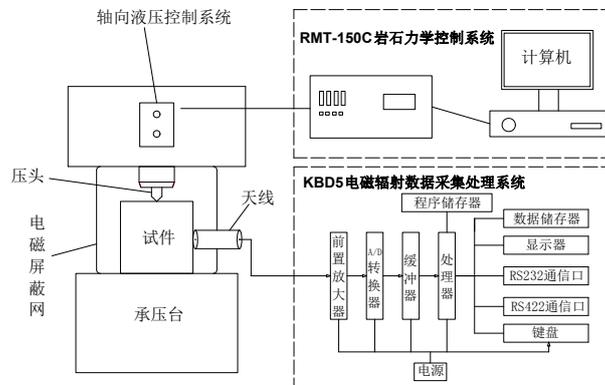
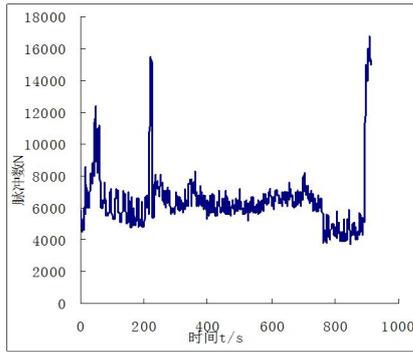


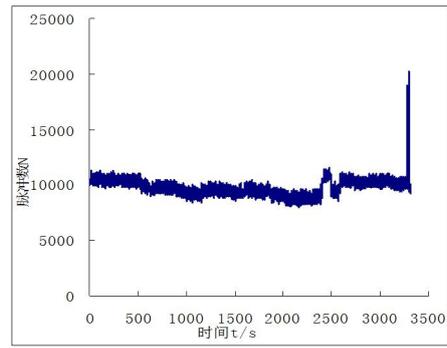
图 1 花岗岩静力破碎电磁辐射试验系统示意图

1.2 试验结果与分析

实验开始同步采集试样受载直至破坏全过程的电磁辐射信号，记录的不同加载速率下破岩电磁辐射脉冲数与时间关系如图 2、图 3、图 4 所示。

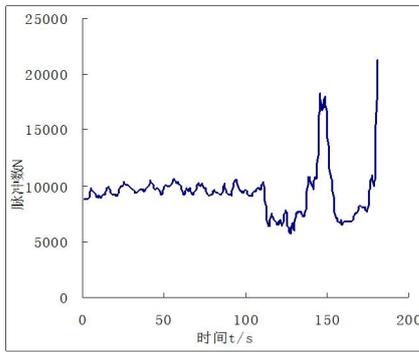


(a) 球型压头

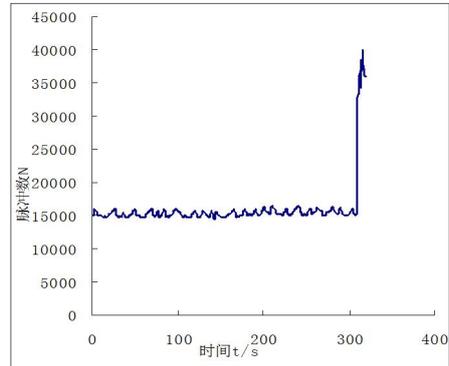


(b) 十字型压头

图2 0.001mm/s 加载速率破岩电磁辐射脉冲数-时间关系分布图

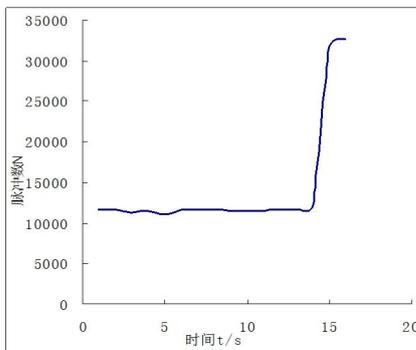


(a) 球型压头

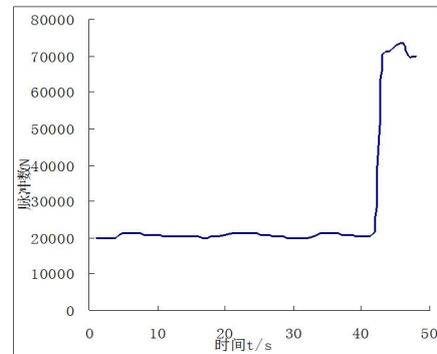


(b) 十字型压头

图3 0.01mm/s 加载速率破岩电磁辐射脉冲数-时间关系分布图



(a) 球型压头



(b) 十字型压头

图4 0.1mm/s 加载速率破岩电磁辐射脉冲数-时间关系分布图

由图2、图3和图4不同加载速率下静力破岩电磁辐射脉冲数-时间关系图对比分析可以得到：(1)随加载速度的增大，峰值前的电磁辐射脉冲数信号波动减小。在0.1mm/s的加载速率下，峰值前的信号基本为稳定状态，而在0.001mm/s的加载速率下，峰值前的信号波动幅度较大，因为在低的加载速率下由于能量的集聚造成试件微破裂的频次较高，从而使得电磁辐射脉冲信号的波动幅度增大；(2)对于试验所选用的压头而言，无论是十字型还是球型压头，在压头类型不变的情况下，每种类型的压头破岩时所产生的电磁辐射信号均会随着加载速率的增大而增大，并且加载速率越大，破岩所需时间越短；(3)当加载速率不变时，

十字型压头和球型压头在每个速率等级下破岩所产生的电磁辐射信号具有一定的规律性,十字型压头破岩产生电磁辐射脉冲数比球型压头破岩产生的电磁辐射脉冲数多,这是因为十字型压头破岩后会形成两个破裂面,而球型压头破岩后只形成了一个破裂面,破裂面的形成会伴随着电磁辐射信号的产生,所以十字型压头产生的电磁辐射脉冲数比球型压头的多;(4)在相同加载速率下采用十字型压头破岩的时间比球型压头时间长,因为十字型压头破岩的试样最终破裂成4块碎岩,球型压头破岩的试样最终破裂成2块碎岩,十字型压头比球型压头破岩石的碎块多,消耗的能量多,所以破岩的时间长。

2 岩石破裂电磁辐射信号分形维数

2.1 分形维数计算方法

分形概念首先由学者Mandelbrot^[15]提出,随后作为一种非线性研究手段在理论和实践当中得到了迅速的推广和应用。现在,计算分形维数的公式有很多,其中普遍采用的是盒维数法^[16],即利用盒维数的数目和圆的半径求分形维数 D 。如果是分形分布,电磁辐射脉冲数的个数则有如下关系:

$$M(r) = Cr^D \quad (1)$$

式中, $M(r)$: 电磁辐射脉冲数的个数; C : 试样的材料常数; D : 分形维数; r : 圆的半径。

所以式(1)可以改写为

$$\lg M(r) = D \lg r + \lg C \quad (2)$$

由式(2)可知, D 可以由脉冲数的个数 $M(r)$ 和圆的半径 r 取双对数后得出斜率来确定。试件在受载破坏过程中产生电磁辐射信号,用电磁辐射脉冲数描述试件随加载时间发生破裂的过程,脉冲数所对应的时间构成了一个时间集合 $\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$,每一个时间点对应一个脉冲数。这样,可以得出电磁辐射信号在时间上的分形特征。通常,电磁辐射的信号标度 r 取值为

$$r = k\Delta t (k = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (3)$$

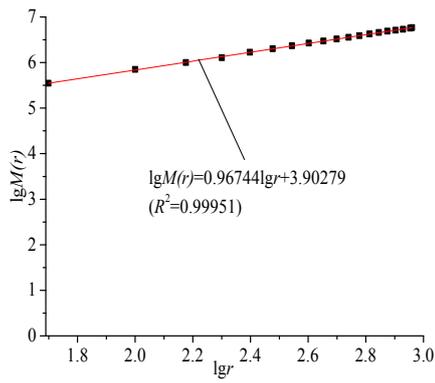
式中, $\Delta t = r_i - r_{i-1}$, 一般取 10 s, $k\Delta t$ 需要小于试样破坏过程电磁辐射监测的时间^[14]。

2.2 单轴载荷球型压头和十字型压头破岩电磁辐射分形特征

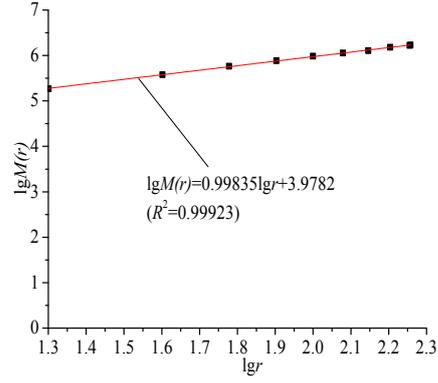
运用电磁辐射脉冲信号分形理论对试验所得的电磁辐射信号做进一步分析处理,通过对分形维数 D 的计算和曲线拟合,得出分形维数与电磁辐射脉冲信号之间的对应关系。

2.2.1 不同加载速率球型压头破岩的电磁辐射分形特征

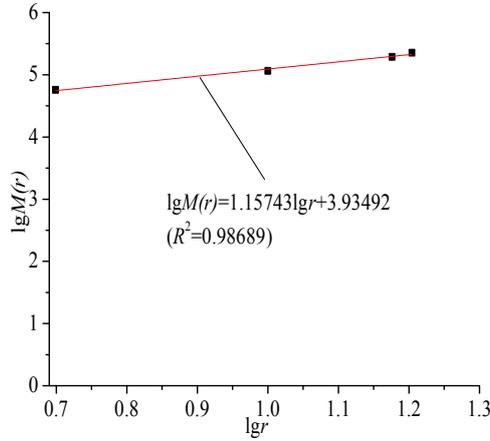
对图 2(a)、图 3(a)和图 4(a)中的电磁辐射脉冲信号分形特性进行数据拟合与分析,拟合结果如图 5 (a)、(b)、(c)所示。



(a) 0.001mm/s 加载速率



(b) 0.01mm/s 加载速率



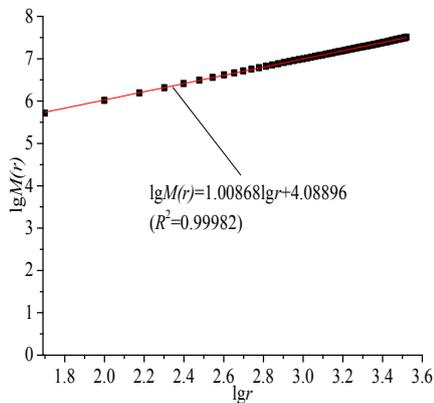
(c) 0.1mm/s 加载速率

图5 分形拟合结果

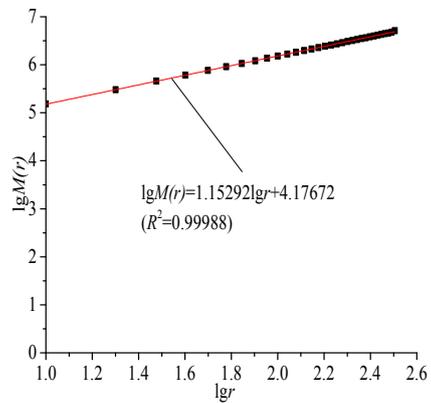
由图5 (a)、(b)、(c)可知，球型压头侵入花岗岩试样破坏过程产生的电磁辐射脉冲数在时间上具有良好分形分布特性。拟合函数相关系数 R^2 都大于0.95，拟合效果较好。三个加载速率下所得的电磁辐射分形维数 D 分别为0.96744、0.99835和1.15743。加载速率越大，产生的电磁辐射脉冲信号越强，分维数也越大，具有较好的正相关性。

2.2.2 不同加载速率十字型压头破岩的电磁辐射分形特征

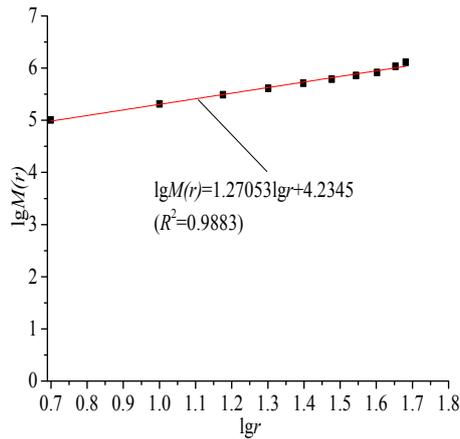
对图2 (b)、图3 (b)和图4 (b)中的电磁辐射脉冲信号分形特性进行数据拟合与分析，拟合结果如图6 (a)、(b)、(c)所示。



(a) 0.001mm/s 加载速率



(b) 0.01mm/s 加载速率



(c) 0.1mm/s 加载速率

图 6 分形拟合结果

由图 6(a)、(b)、(c)可知，十字型压头侵入花岗岩试样破坏过程产生的电磁辐射脉冲数在时间上同样具有良好分形分布特性。拟合函数相关系数 R^2 同样大于 0.95，拟合效果较好。三个加载速率下所得的电磁辐射分形维数 D 分别为 1.00868、1.15292 和 1.27053。加载速率越大，产生的电磁辐射脉冲信号越强，分维数也越大，具有较好的正相关性。

3 结论

1) 花岗岩试样受载破坏过程产生的电磁辐射脉冲数在时间上具有明显的分形分布特性，用分形维数 D 可以度量电磁辐射的分形特征。

2) 无论是球型压头还是十字型压头，随着加载速率的增大，电磁辐射信号越强，分形维数 D 也越大，与电磁辐射脉冲信号强度成正相关性。

3) 当加载速率不变时，十字型压头电磁辐射分形维数 D 比球型压头电磁辐射分形维数 D 大，这和电磁辐射脉冲信号的强度变化呈相同的规律，因此利用电磁辐射脉冲信号和分形维数的相同规律可以更全面的反映岩石的真实破裂的过程。

参考文献:

- [1] 王恩元,何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报,2000,43(1):131-137.
- [2] 林鹏,康绳祖,王铨,等.花岗岩自膨胀开裂破坏力电磁效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11):2196-2204.
- [3] 万国香.应力波作用下岩石电磁辐射与声发射特性研究[D].中南大学,2008.
- [4] 姚精明,闫永业,刘茜倩,等.基于能量理论的煤岩体破坏电磁辐射规律研究[J].岩土力学, 2012, 33(1):233-242.
- [5] 宋晓艳.煤岩物性的电磁辐射响应特征与机制研究[D].中国矿业大学,2009.
- [6] Frid V. Calculation of electromagnetic radiation criterion for rock burst hazard forecast in coal mines [J]. Pure and Applied Geophysics,2001,15(8): 931-944.
- [7] Frid V,Vozoff K.Electromagnetic radiation induced by mining rock failure[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(1): 57-65.
- [8] 李德,李守巨,于申,等.压头作用下岩石破碎过程分形特性研究[J].岩土工程学报, 2013, 35(2):314-319.
- [9] 闫铁,李玮,毕雪亮,等.旋转钻井中岩石破碎能耗的分形分析[J].岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3649-3654.
- [10] 谢和平,高峰,周宏伟,等.岩石断裂与破碎的分形研究[J].防灾减灾工程学报, 2003,23(4):1-9.

- [11] 易顺民,赵文谦.单轴压缩条件下三峡坝基岩石破裂的分形特征[J].岩土力学, 1999, 18(05):520-523.
- [12] 许金余,刘石.大理岩冲击加载实验碎块的分形特征分析[J].岩石力学与工程学报, 2012, 33(11): 3225-3229.
- [13] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂. 煤岩变形及破裂电磁辐射信号的分形规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),1998,17(4):343-347.
- [14] 姚精明, 闫永业, 税国洪等.煤岩体破裂电磁辐射分形特征研究[J].岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 2):4102-4107
- [15] Mandelbrot B B. Fractals: forms, chance and dimension[M]. San Francisco: W.H.Freeman,1997.
- [16] 谢和平.分形-岩石力学导论[M].北京:科学出版社,1996.