

混凝土单轴压缩破坏过程电磁辐射特性

张柏¹, 赵伏军^{1,2}, 陈珂¹, 朱卓慧^{1,2}, 张孟举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:采用 RMT-150 岩石力学实验机对标准混凝土试样进行单轴压缩实验, 利用 KBD5 电磁辐射监测仪对试样加载直至破坏全过程的电磁辐射强度和脉冲数进行监测。结果表明:混凝土在受压作用下产生电磁辐射信号, 其强度和脉冲数随时间变化呈相近的趋势, 随载荷的增大而增强, 在主破裂时刻电磁辐射信号急剧增大; 混凝土的强度越大, 电磁辐射信号越强; 加载速率越大, 电磁辐射信号也越强。电磁辐射信号能较好地反应试样的受力和变形破坏状态。因此开展混凝土电磁辐射的研究对于工程中混凝土的安全性评价、混凝土强度的预测等具有一定的理论意义和应用前景。

关键词:混凝土; 单轴压缩; 辐射强度; 脉冲数

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2015)03-0009-05

The electro-magnetic emission character of concrete's failure process under uniaxial compression loading

ZHANG Bai¹, ZHAO Fujun^{1,2}, CHEN Ke¹, ZHU Zhuohui^{1,2}, ZHANG Mengju¹

(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: RMT-150 rock mechanics testing machine is adopted to make a uniaxial compression experiment on standard concrete sample, and KBD5 electromagnetic radiation logger is used to monitor the electromagnetic radiation strength and the pulse number in the whole process of sample's loading until failure. Results show that concrete can produce electromagnetic emission signal in pressure, and a similar tend is produced between the strength and the pulse number of electromagnetic emission as the change of time. Electromagnetic emission signals become stronger with increasing pressures, and it increases sharply in main fracture; the greater strength of concrete, the stronger electromagnetic emission signals are; the higher the loading rate, the stronger electromagnetic emission signals are. The electromagnetic radiation signals can reflect the specimen's stress, deformation and failure state. Thus the study about concrete electromagnetic radiation has theoretical significance and application prospects for the safety assessment, strength prediction of concrete in the engineering field.

Key words: concrete; uniaxial compression loading; radiant strength; number of pulses

电磁辐射(EME)是煤岩体等非均质材料在受载情况下变形破坏过程中向外辐射电磁能量的过程,是由煤岩体各部分的非均质变速变形引起的电荷迁移和裂纹扩展过程中形成的带电粒子变速运动而形成的。电磁辐射现象最早是地震工作者从震前电磁异常现象中发现的。随着科学技术的发展,电磁辐射的研究对象不断扩展,从最初的岩石、混凝土发展到煤岩材料,还有学者对冰的破碎、摩擦等过程中伴随的电磁辐射现象进行了研究^[1]。目前电磁辐射作为一门无损探测技术越来越得到人们的重视。许多大地震前都

收稿日期: 2015-02-08

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)

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: zjfxxn@263.net

曾观测到电磁辐射的异常现象^[2,3]. 此外,岩爆、煤与瓦斯突出前都监测到了电磁辐射. 总之,岩石破裂过程中电磁辐射是一个普遍的物理现象. 目前,电磁辐射技术在工程中得到了一定的应用,如地震、煤岩动力灾害预报等. 此外,在工程安全性评价、建筑物微破裂、以及煤与瓦斯突出、冲击地压等煤岩动力及隧道稳定性监测等方面也具有广泛应用^[4-11]. 在实验方面,许多学者对各种岩石、煤岩等材料的电磁辐射特征做了大量的研究工作. 赵扬锋^[12]对花岗岩单轴压缩下电磁辐射信号作了实验研究;金佩剑^[13]研究了煤岩单轴循环加载的电磁辐射规律和特性;王恩元^[14]在岩土单轴压缩过程的电磁辐射特性实验研究中,得出岩土破坏也能产生电磁辐射现象;荣耀^[15]分析了不同含水岩石蠕变试验电磁辐射频谱特征;邱黎明^[16]通过含孔洞混凝土受载破裂过程的声电信号特征来揭示其破裂机理. 姚精明^[17]采用室内试验和分形理论相结合的方法研究单轴压缩煤体产生的电磁辐射分形特征;钱书清^[18]地震电磁辐射前兆不同步现象物理机制的实验研究对地震监测有一定指导. 上述研究都说明电磁辐射与煤岩体等材料的受载情况及变形破坏过程密切相关,但在实验室对于岩石、煤岩、混凝土等材料受载破坏过程中电磁辐射信号的监测方面研究的不多,特别是用电磁辐射监测仪器接收信号的也比较少见. 本文通过 RMT-150 岩石力学试验机开展混凝土单轴压缩试验,用 KBD5 电磁辐射监测及数据处理系统对电磁信号进行接收和分析处理,以期获得混凝土破裂工程中的电磁辐射特性.

1 实验设备及样品

1.1 实验设备

实验设备由加载系统和信号采集系统组成,加载系统为 RMT-150 岩石力学试验机,信号采集系统为 KBD5 电磁辐射监测及数据处理系统,如图 1 所示. 利用 KBD5 电磁辐射数据采集处理系统对混凝土单轴压缩受载破坏过程中产生的电磁辐射信号脉冲数、强度最大值及平均值进行记录,接收的强度信号反应了混凝土的受载程度及变形破坏强度,脉冲信号反应了混凝土受载过程中变形和微破裂的频次. 通过实验过程中所接收的信号可以对混凝土试样的破坏全过程进行描述. 而载荷、位移及时间等参数通过 RMT-150 微机控制电液伺服压力试验机进行自动记录.

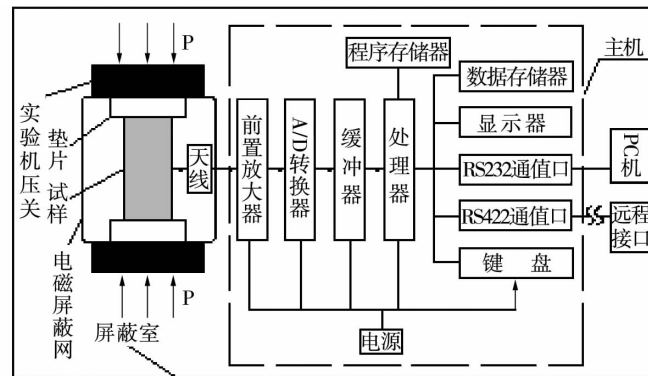


图 1 电磁辐射实验系统

1.2 实验样品制备

试验用水泥:水:砂为 1:0.5:2,规格为 50 mm × 100 mm 圆柱体标准试样,2 个端面的平整度误差要小于 0.02 mm. 对加工成的试件进行严格的筛选:(1)剔除表面有明显破损及可见裂纹的试件;(2)剔除尺寸及平整度不符合要求的试件. 为保证试验结果的可比性,混凝土试样在同一块大试块上密集套钻取得. 对钻取的试样的精度要求沿试样整个高度上,直径的误差不超过 0.3 mm. 2 端面的不平行度不超过 0.05 mm,端面应垂直于试样轴线,最大偏差不超过 0.25°. 直径应沿试样整个高度上分别量测 2 端面和 midpoint 3 个断面的直径,取其平均值作试样直径;高度应在两端等距取 3 点量测试样的高,取其平均值,作为试样的高,同时检验 2 端面的不平整度. 尺寸测量均应精确到 0.1 mm.

1.3 实验方案

1) 从上述试样中选取 9 块相对完整的标准圆柱体试样,分为 3 组,第一组编号为 D11, D12, D13, 第二组编号为 D21, D22, D23, 第三组编号为 D31, D32, D33.

2) 在 RMT-150 岩石力学试验机上分别对 3 组试样进行单轴压缩实验,控制方式为力控制,速率为第一组 0.05 kN/s,第二组 0.10 kN/s,第三组 0.20 kN/s,各组保持加载速率不变直至试样破坏.

3) 实验过程中用 KBD5 电磁辐射监测仪接收试样加载全过程的电磁辐射信号,电磁辐射监测仪接收天线与试样的受力方向垂直放置,保持与混凝土试样的距离在 10 cm 以内,并做好实验过程中的屏蔽措施,以保证接收信号的真实性,实验过程所接收的信号通过电磁辐射数据处理系统进行处理.另外,压力试验机与试样上下端面均用绝缘纸隔开,以防止信号转移.

2 实验结果与分析

实验全过程对 9 块混凝土试样进行了单轴压缩,通过对所得数据进行整理和分析,选取典型的试样试验结果绘制成图形如图 2~图 7 所示.

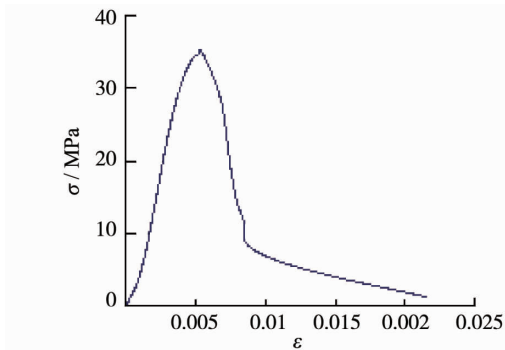


图2 应力与应变关系

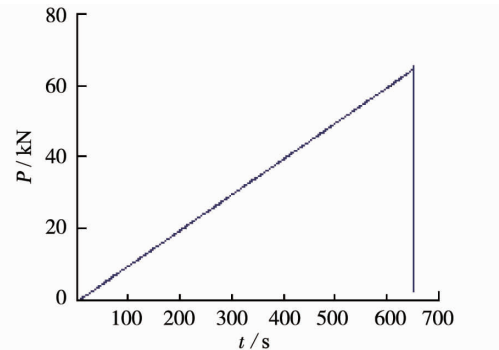


图3 垂直力与时间关系

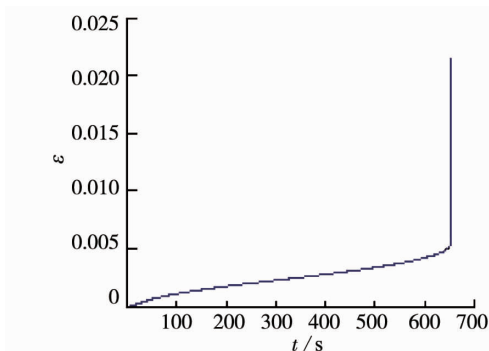


图4 垂直应变与时间关系

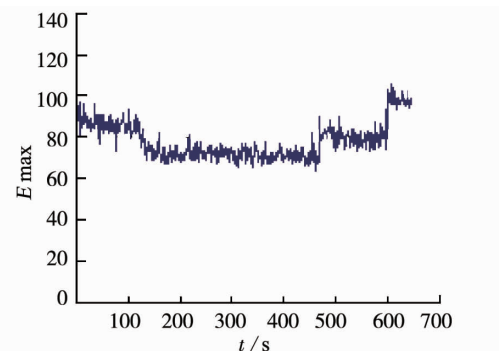


图5 电磁辐射强度最大值与时间关系

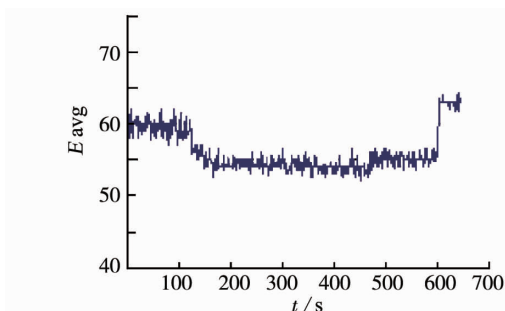


图6 电磁辐射强度平均值与时间关系

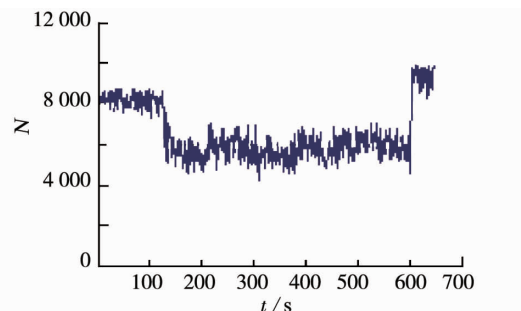


图7 电磁辐射脉冲数与时间关系

分析图 2~图 7 可得出:在混凝土的加载过程中伴随着电磁辐射信号产生.从采集到的应力-应变、电磁辐射强度-时间等变化曲线可将混凝土的破裂过程大致分为 4 个阶段:(1) 孔隙裂隙压密阶段:在加载初期,产生较强的电磁辐射信号,这是由于混凝土试样属于非均质材料,内部存在大量裂隙、孔洞等缺陷,在加载初期发生孔洞和裂隙等缺陷的闭合,产生试样内部局部应力集中形成一定的裂纹扩展而产生的,此时应力-应变曲线呈上凹型;(2) 弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段:在 120 s 左右,混凝土被压实之后,变形破裂程度相对压密阶段弱,而且比较稳定,产生的电磁辐射信号强度有所减小,波动程度不

大,该阶段的应力-应变曲线成近似直线型;(3)非稳定破裂发展阶段:在 470 s 左右,电磁辐射信号突然增强,此时,混凝土试样达到屈服点,微破裂的发展出现了质的变化,破裂不断发展,由于屈服后的混凝土试样发生塑性硬化,使试样所能承受的应力继续上升,直至 600 s 左右,试样完全破坏,产生的电磁辐射信号强度急剧增加,并达到最大值;(4)破坏后阶段:混凝土承载力达到峰值强度后,其内部结构遭到破坏,但试件基本保持整体状.到本阶段,裂隙快速发展,交叉且相互联合形成宏观断裂面,电磁辐射信号也保持在较高的水平.整个过程电磁辐射变化呈震荡趋势,表明混凝土试样为非均质体,在受载过程中变形破坏是不连续的,所受的应力状态也是不均匀的.总的来说,应力-应变曲线与电磁辐射变化有较强的对应关系;实验过程中所接收的电磁辐射信号能较好的反应试样的受力状态和变形破坏程度,与混凝土破裂形态相互对应,特别是试样达到屈服之后,对应关系更加明显;实验过程中接收的电磁辐射强度信号与脉冲数随时间的变化规律也具有良好的对应关系.因此可以通过电磁辐射技术监测混凝土的受力以及破坏全过程,这对于工程中有关混凝土的安全性评价等问题提供了一定的理论意义和应用前景.

3 影响电磁辐射信号的因素

3.1 混凝土自身强度对电磁辐射信号的影响

本实验过程中 3 组试样力的加载速率分别为 0.05,0.10,0.20 kN/s,对 3 组试样单独进行讨论,并选取第二组试验结果得出电磁辐射信号强度与混凝土试样强度之间的关系,如图 8~图 10 所示.

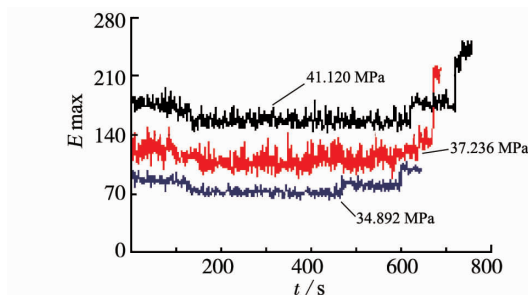


图 8 电磁辐射强度最大值与混凝土强度关系

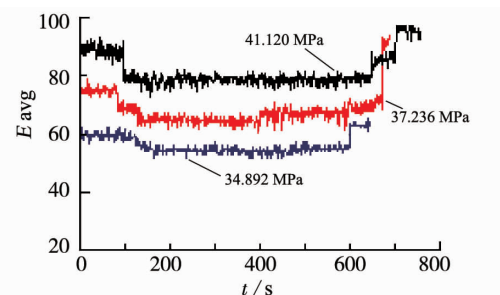


图 9 电磁辐射强度平均值与混凝土强度关系

由图 8~图 10 可知,单轴压缩过程中混凝土试样的强度极限分别为 34.892,37.236,41.120 MPa.在相同的加载速率(0.10 kN/s)下,混凝土所产生的电磁辐射强度信号和脉冲数与自身强度基本上成正相关,强度越大,所能承受的力越大,变形破坏也越剧烈,产生的对应电磁辐射信号也越强,由此为混凝土强度的预测和比较提供了一定的指导.

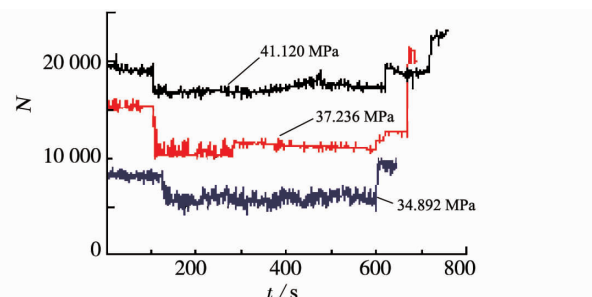


图 10 电磁辐射脉冲数与混凝土强度关系

3.2 加载速率对电磁辐射信号的影响

对 3 组试样进行比较,讨论不同加载速率过程中产生电磁辐射信号的特性,得出加载速率与电磁辐射信号的关系,如图 11~图 13 所示.

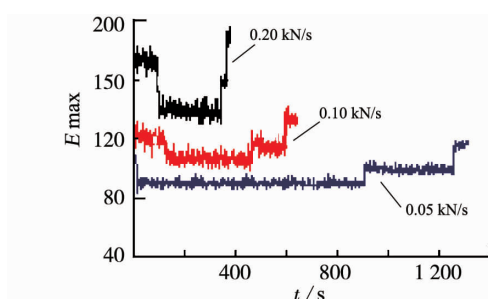


图 11 电磁辐射强度最大值与加载速率关系

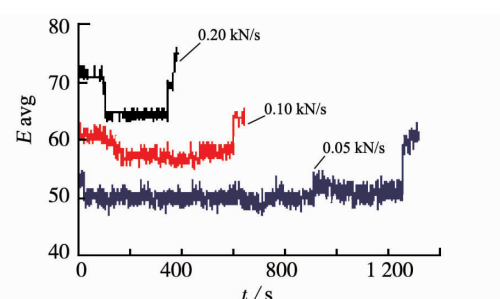


图 12 电磁辐射强度平均值与加载速率关系

由图 11 ~ 图 13 可知,实验过程中产生的电磁辐射强度信号和脉冲数均随着加载速率的增大而增强,具有较好的正相关性,加载速率越大,电磁辐射信号强度也越大,另外加载速率大的产生的电磁辐射脉冲信号较加载速率小的要稳定,小的加载速率由于破坏需要能量的积累,导致变形和微破裂的频次较多,直接影响了电磁辐射脉冲信号,致使脉冲信号起伏变化波动较大。

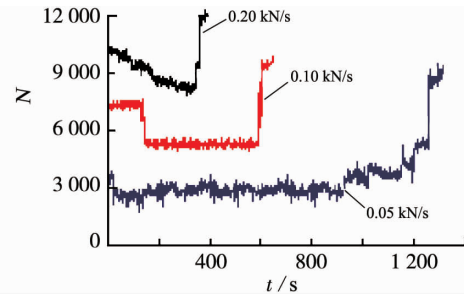


图 13 电磁辐射脉冲数与加载速率关系

4 结论

1) 混凝土试样在单轴压缩过程中会产生电磁辐射现象. 并且试样在受压破裂过程中产生的电磁辐射强度与脉冲数随时间的变化规律具有良好的对应关系,且电磁信号强度与加载过程中所受的力和变形破坏程度正相关,应力 - 应变曲线与电磁辐射变化有较强的对应关系。

2) 混凝土破裂产生的电磁辐射信号强度与其自身强度有关,试样强度越大,所能承受的力越大,变形破坏也越剧烈,产生的电磁辐射信号也越强。

3) 实验过程中的加载速率对电磁辐射信号的强度也有一定的影响,加载速率越大,电磁辐射信号越强。

4) 电磁辐射技术可应用于混凝土的无损检测,对于工程中混凝土的安全性评价、混凝土强度的预测等具有一定的理论意义和应用前景。

参考文献:

- [1] 王恩元,何学秋,李忠辉,等. 煤岩电磁辐射技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 毛桐恩,钱书清,刘小伟. 震前电磁波观测与实验研究文集[M]. 北京:地震出版社,1989.
- [3] 陈智勇,杜晓泉,陶如谦,等. 电磁辐射与地震[M]. 北京:地震出版社,1998.
- [4] 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.
- [5] Frid V, Vozoff K. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64(1):57 - 65.
- [6] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等. 受载岩石电磁辐射特性及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1473 - 1477.
- [7] 王恩元,何学秋,窦林名,等. 煤矿采掘过程中煤岩体电磁辐射特征及应用[J]. 地球物理学报,2005,48(1):216 - 221.
- [8] 窦林名,何学秋. 冲击矿压危险预测的电磁辐射原理[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):427 - 431.
- [9] 撒占友,何学秋,王恩元,等. 煤岩变形破坏电磁辐射记忆效应实验研究[J]. 地球物理学报,2005,48(2):379 - 385.
- [10] 撒占友,何学秋,王恩元. 煤岩变形破坏电磁辐射记忆效应的力电耦合规律[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1517 - 1522.
- [11] 刘建辉,李化敏. 电磁辐射法在岩爆监测中的应用[J]. 矿业研究与开发,2006,26(1):69 - 73.
- [12] 赵扬锋,潘一山. 单轴压缩下花岗岩电磁信号的实验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(3):132 - 137.
- [13] 金佩剑,王恩元,宋大钊. 单轴循环加载煤岩电磁辐射规律实验研究[J]. 煤矿安全,2013,44(5):46 - 48.
- [14] 王恩元,赵恩来. 岩土单轴压缩过程的电磁辐射特性实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报,2007,26(1):56 - 58.
- [15] 荣耀,许锡宾,靖洪文,等. 不同含水岩石蠕变试验电磁辐射频谱分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(s1):74 - 83.
- [16] 邱黎明,王恩元. 含孔洞混凝土单轴压缩实验的声电信号特征[J]. 煤矿安全,2013,44(6):55 - 58.
- [17] 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(s2):4102 - 4107.
- [18] 钱书清,吕智,任克新. 地震电磁辐射前兆不同步现象物理机制的实验研究[J]. 地震学报,1998,20(5):535 - 540.