

文章编号: 0253-9993(2010)01-0037-05

饱和含水煤岩单轴压缩条件下的声发射特征

唐书恒 颜志丰 朱宝存 张松航 张佳赞

(中国地质大学 能源学院 北京 100083)

摘要: 为了模拟研究煤储层的压裂特征,进行了饱和含水煤岩单轴压缩破裂实验以及声发射测试。结果表明:饱和含水煤岩在单轴压缩条件下首先产生变形,然后出现裂隙,直到最后破坏。根据声发射和应力-应变曲线特征将煤岩压裂过程分为迸裂型、破裂型和稳定型三大类。煤岩压裂过程受试件取样方向影响,当试件轴向平行面割理时,破裂过程出现迸裂型、破裂型,而无稳定型;当试件轴向垂直面割理时,破裂过程出现破裂型、稳定型,而无迸裂型。

关键词: 饱和含水煤岩;单轴压缩;声发射;破裂过程

中图分类号: TU457 文献标志码: A

Acoustic emission characteristics of water-saturated coals in uniaxial compression experiment

TANG Shu-heng, YAN Zhi-feng, ZHU Bao-cun, ZHANG Song-hang, ZHANG Jia-zan

(School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to investigate the fracturing characteristics of coal reservoir, the uniaxial compression experiment was conducted for water-saturated coals, and the acoustic emission testing was carried out simultaneously. The results indicate that water-saturated coals occur compression deformation first, then fracture, and finally are destroyed. Based on both the acoustic emission characteristics and stress-strain curves characteristics, the fracturing process of water-saturated coals were classified into three types: burst open (I), rupture (II) and stable (III). Influenced by the sampling direction, the fracturing processes are different. There are type I and type II without type III when the axial of specimens parallel to the face cleats, and type II and type III without type I when the axial of specimens perpendicular to the face cleats.

Key words: water-saturated coals; uniaxial compression; acoustic emission; fracturing process

声发射技术是靠岩石发声来侦察其内部状态和力学特性的一种方法^[1],当岩石受力变形时,岩石中原来的或新产生的裂缝周围地区应力集中,应变能较高,当外力增加到一定大小时,在有裂缝缺陷地区发生微观屈服或变形,裂缝扩展,从而使得应力弛豫,一部分贮藏能量将以弹性波(声波)的形式释放出来。

对岩石发出的声波进行观测、分析,可以了解其内部的裂缝发育状态。声发射信号不仅能反映岩石

的力学性质,而且这种弹性波形式的信号还具有容易传播和接收、能保证监测系统快速化、可扩大监测范围、可进行长期监测和动态测试等优点^[2]。一系列的实验室和现场研究表明,声发射是岩石材料及其力学结构稳定性的一个度量。奥伯特(Obert)和杜瓦尔(Duvall)发现受压力作用的岩石结构有声发射活动存在,并把声发射技术应用到矿山矿柱岩体稳定性和岩爆的监测预报中^[3]。此外,当应力达到材料所受的最大先期应力时开始出现明显的声发射现象,即

收稿日期: 2009-03-19 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家高科技发展计划(863)基金资助项目(2006AA06Z235);国家自然科学基金资助项目(40772096,40972108);国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2006CB202202,2009CB219604);国家科技重大专项课题(2008ZX05034-003)

作者简介: 唐书恒(1965—),男,河北正定人,教授,博士生导师。Tel: 010-82320601, E-mail: tangsh@cugb.edu.cn

“Kaiser 效应”,为材料受力研究提供了依据^[4-5]。在各种各样外部物质因素作用下,固体结构即使发生轻微的不可逆变化以及部分可逆变化均伴随着声发射的发生,检测声发射就能够检测材料内部损坏过程中实时连续的信息^[6-7]。通常在自然煤岩体中,煤处于复杂的应力状态中,Kaiser 效应在塑性岩石不同的变形阶段具有不同的规律,因此煤岩损坏的声发射试验是研究煤岩动力破坏开始和发展的重要方法^[8]。

为模拟研究煤储层的压裂特征,进行了饱和含水煤岩单轴压缩作用下的破裂实验,同时进行了声发射测试。试验中测试了声发射振铃计数率来对煤岩在受力作用下的声学特性进行描述。

1 实验装置及样品制备

压缩实验在 WEP-600 微机控制屏显万能试验机上进行,记录设备选用 30 t 压力传感器和 7V14 程序控制记录仪。声发射检测仪为 AE21C 型(沈阳计算机技术研究设计院制造)。声发射探头采用单分量检波器,放大器增益为 22 dB,设置声发射事件间隔为 300 μ s。探头拾取的声发射信号经前置放大和主放大后由声发射仪进一步处理成声发射参数(振铃计数率、能量计数率等)。在试验过程中声发射参量及模拟量由微机自动采集处理,数据采集间隔为 0.05 s。利用系统配备的计算机数据采集系统,记录加载过程中的荷载、位移、应力、应变等参数,由此绘制煤岩单轴压缩全应力-应变曲线。

试验选择 10 个定向煤岩试件,煤岩取自山西省晋城寺河煤矿 3 煤,按岩石力学实验规范将煤试块加工成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱型标准试件,圆柱轴向均平行层面,圆柱轴向垂直面割理方向的试件 5 件(编号 DC1~DC5),平行面割理方向的试件 5 件(编号 DP1~DP5),试验工作按照中华人民共和国行业标准《水利水电工程岩石试验规程(SL264-2001)》进行,试验前对试件进行了饱水处理,以测试煤岩在饱和含水条件下的压缩变形和声发射特征。试验时将声发射传感器耦合在试件上,为保证耦合效果,在探头与试件接触部位涂上一层黄油,再用胶布等把探头固定。利用以上试验方法对 10 个煤样进行了单轴压缩条件下的声发射试验。

2 结果与讨论

2.1 煤样单轴压缩情况下的应力-应变曲线特征

实验室条件下受载煤体的变形及破裂可能表现为煤体骨架的压实、孔隙收缩、颗粒接触面积的增大,

或是形成裂隙组,个别区域之间黏附性降低等一系列过程。一般可将煤岩试样的轴向应力-应变曲线试验结果分为以下 3 个阶段:

(1) 压实阶段。煤体中含有大量的孔隙和裂隙,在外载荷作用下,这些孔隙、裂隙发生闭合。煤体的强度比较低,裂隙闭合时,裂隙壁面附近的部分煤体会发生变形和微破裂,这足以引起声发射的产生。同时,该阶段也包含弹性变形,当卸载后会产生一定的弹性回复。有的样品该阶段表现明显,有的样品表现不明显。

(2) 表观线弹性变形阶段。从宏观上看该阶段是线弹性的,应力-应变曲线是线性连续的,但从微观上看,煤体的变形及破裂是不连续的,是阵发性的。煤体变形及破裂过程中产生的声发射也是阵发性的,而不是连续的^[9-10]。只有当煤体中的变形能积累到一定程度,才能引起破裂。而每一次的破裂均会引起弹性能的释放,产生声发射。

(3) 破坏(破裂发展)阶段。经过线弹性变形阶段后,煤体中已经形成了一定数目的微裂纹,使煤体的承载能力降低。该阶段中煤体积累了足够的能量,变形开始加速,载荷上升缓慢,煤体中产生大量的微裂纹并汇合、贯通,形成大的裂隙,煤体失稳、破坏。煤体的塑性越强,该阶段越明显。

2.2 煤样声发射应变-振铃计数率曲线的类型特征

根据试验所获得的应力-声发射曲线的特征,以及和应力-应变曲线的相互关系,煤岩压裂过程可以分为 3 种类型:

(1) 进裂型。轴向应力-微应变曲线呈直线,没有明显的试样压密阶段,也没有明显的破坏变形阶段,微应变总体上和应力成正比;轴向应力-径向微应变曲线呈现类似的规律,仅在破坏时有一个很小的破坏变形阶段。

本类型的煤样呈脆性破坏,且单轴抗压强度很高。在试验压力低于 1.67 MPa 时,没有声发射现象,当压力小于极限承载力的 85% 时,声发射振铃计数率强度很低,高于该压力时声发射振铃计数率强度逐渐增高,接近破裂时突然出现一个很高的声发射振铃计数率强度峰值,然后迅速降低(图 1(a))。声发射开始后不久,在较低压力下煤岩声发射时间-累积振铃计数率对数曲线,出现一个明显的弯曲,曲线由竖直向水平方向转变,之后曲线逐渐上升,呈向上弯曲的弧形曲线,在接近破坏时会出现一段很短的近水平线段(图 2(a))。其时间-累积振铃计数率曲线呈一向上弯曲的弧形曲线(图 3(a))。

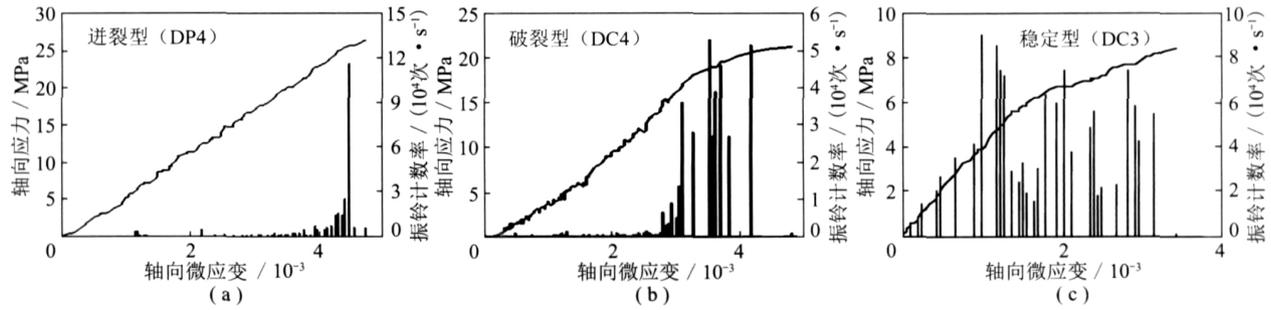


图 1 声发射振铃计数率与应力 - 应变曲线的关系

Fig. 1 The correlation between the acoustic emission signaling count rate and the stress-strain curves

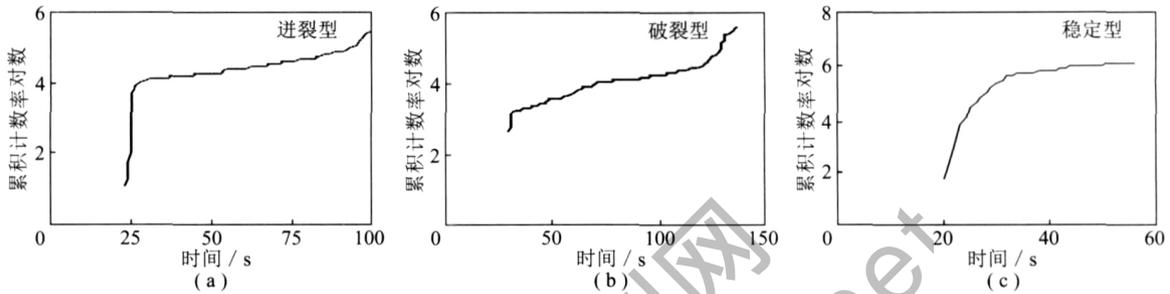


图 2 岩石单轴压缩声发射累积振铃计数率对数 - 时间曲线

Fig. 2 The curves of time-cumulative log of the acoustic emission signaling count rate under the uniaxial compression

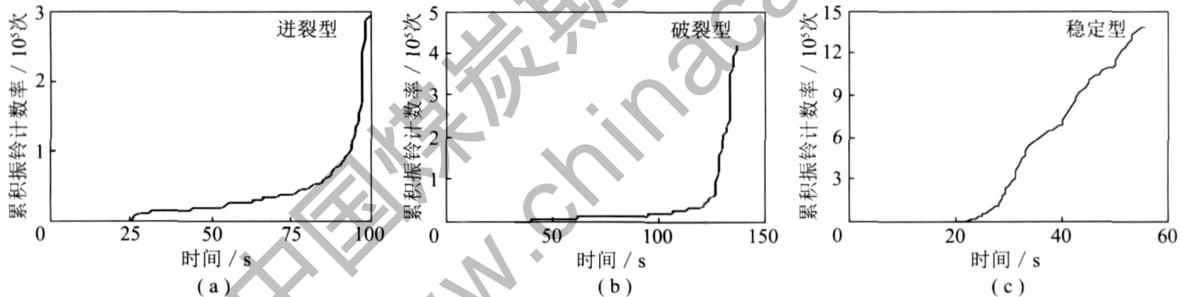


图 3 岩石单轴压缩声发射累积振铃计数率 - 时间曲线

Fig. 3 The curves of time-cumulative acoustic emission signaling count rate under the uniaxial compression

(2) 破裂型。轴向应力 - 微应变曲线可分为压密阶段、弹性变形阶段和破坏阶段 3 个部分; 轴向应力 - 径向微应变曲线可分为弹性变形阶段和变形破坏阶段 2 部分。声发射特征表现为压密阶段早期没有声发射现象, 后期可出现数值很低的声发射振铃计数率, 在表观线弹性阶段声发射振铃计数率强度很低, 进入破坏阶段时声发射振铃计数率迅速增加, 达到最大值后逐渐降低(图 1(b))。

煤岩声发射时间 - 累积振铃计数率对数曲线变化较复杂, 通常具有 2 个或多个急增点, 这些急增点通常被认为是 Kaiser 效应点^[11-12]。声发射开始后很快出现一个明显的弯曲, 曲线发生较大角度的改变, 曲线的最后一个急增点往往对应着破坏阶段的开始(图 2(b))。其时间 - 累积振铃计数率曲线为顶端呈弧形且接近垂直的折线(图 3(b))。

(3) 稳定型。轴向应力 - 微应变曲线一般可分为压密阶段、弹性变形阶段和破坏阶段 3 部分; 轴向应力 - 径向微应变曲线可分为弹性变形阶段和变形破坏阶段 2 部分。声发射振铃计数率最大值不是出现在破裂阶段, 而是出现在线弹性变形阶段。

该类型在压密阶段开始就出现声发射, 在线弹性变形阶段声发射振铃计数逐步增加, 在线弹性变形阶段的中上部迅速达到最大值, 可具有 2 个或多个峰值, 随后声发射强度开始逐步降低, 在破坏阶段振铃计数率出现一次相对较大的峰值, 随后逐步降低, 破坏时声发射强度变得较低。该类型的煤样单轴抗压强度较低(图 1(c))。煤岩声发射时间 - 累积振铃计数率对数曲线呈现一上凸的弧形线(图 2(c))。其时间 - 累积振铃计数率曲线呈现阶梯形曲线(图 3(c))。

2.3 不同方向煤岩试样的声发射特征

试验过程中有轴向平行面割理和轴向垂直面割理样品各 5 个 2 组样品具有不同的声发射特征。

(1) 轴向平行面割理样品。该组样品轴向应力-微应变曲线的主体是线弹性变形阶段,有的样品压缩阶段和变形破坏阶段不明显;径向应变-轴向应力曲线由线弹性变形阶段和破坏阶段 2 部分组成,在破坏阶段径向应变快速增加;在弹性变形阶段体积逐渐减少,在进入破坏阶段时体积开始增加,其对应的体积微应变曲线在径向应变-轴向应力曲线呈现线性

变形阶段时表现为直线或近似直线,体积呈减少的趋势,当径向应变-轴向应力曲线进入破坏阶段时体积呈快速增加的趋势。其声发射特征为弹性变形阶段振铃计数率很低,在弹性变形阶段和破坏阶段的转折处振铃计数率突然变大。声发射突然变强所对应的应力和轴向应力-径向微应变曲线拐点的应力对应很好,轴向应力-径向微应变曲线的拐点的应力就是声发射强度突然变强所需的应力(图 4(a))。该组样品声发射曲线类型有迸裂型和破裂型,没有稳定型曲线。

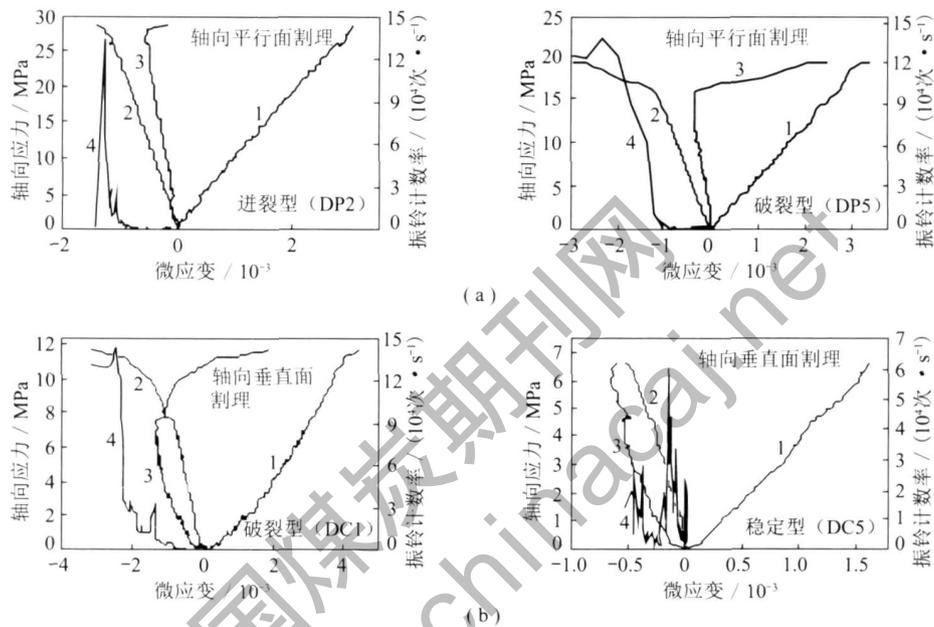


图 4 单轴压缩变形曲线与振铃计数率曲线的关系

Fig. 4 The correlation between the uniaxial compression deformation and the acoustic emission signaling count rate

1—轴向微应变-应力曲线;2—径向微应变-应力曲线;3—体积微应变-应力曲线;4—振铃计数率-径向微应变曲线

(2) 轴向垂直面割理样品。该组样品径向微应变-轴向应力曲线不像平行面割理样品那样具有明显的特征,轴向应力-微应变曲线 3 个阶段特征较明显,个别样品某一阶段不明显;径向微应变-轴向应力曲线可分为 2 类:第 1 类具有线性变形阶段和破坏阶段 2 个阶段;第 2 类仅有线性变形 1 个阶段。体积微应变曲线没有规律性,变形特征复杂(图 4(b))。声发射曲线和应力-径向微应变曲线没有轴向平行面割理样品那种关系。该组样品的声发射曲线特征可分为破裂型和稳定型 2 类,没有迸裂型。

对于轴向平行面割理的样品,在轴向压力作用下,割理面延伸方向和力的作用方向相同,煤在较低压力作用下发生表观线性变形,变形主要是煤岩本身的压缩变形,由于割理两侧的岩性和结构相同,在相同力的作用下其变形差异非常小,割理面产生的摩擦

作用非常小,难以形成较强的声发射,因此在压缩阶段和表观线弹性阶段声发射强度很低,难以形成稳定型的声发射特征;进入破坏阶段时变形加剧,发生侧胀,割理面由于摩擦而产生较强的声发射;同时产生大量新的裂隙,新裂隙的产生将伴随产生强烈的声发射,因而开始进入破坏阶段时声发射强度急剧增加,当破坏阶段不明显时,则可能形成迸裂型声发射类型。

对于轴向垂直面割理的样品,在压力作用下将发生面面之间的力量传递,割理面也可能是粗糙的,在压力作用下发生摩擦,可能产生声发射;另外在长期地质作用下割理面上很可能有矿物颗粒的充填,当单个较大的矿物颗粒充填时,由于矿物的强度比煤岩要大,在力的作用下,在煤岩和矿物接触面上将产生应力集中,因而在较小压力作用下就可能在煤岩中产生

新的裂隙,从而伴随产生声发射。因此在较低的压力作用下就可能产生较强的声发射,形成稳定型声发射类型;由于大量的面接触,在较高的压力作用下由于摩擦而形成声发射,因此难以形成进裂型曲线。

3 结 论

饱和含水煤岩在普通压缩机下的轴向应力-应变曲线可以分为 3 个阶段: 压密阶段、表现线性变形阶段和破裂阶段。按声发射及应力-应变曲线特征,将煤岩压裂过程分为 3 种类型: 进裂型、破裂型和稳定型。煤岩压裂特征受试件取样方向影响,当试件轴向平行面割理时,应力-应变曲线出现进裂型、破裂型,而没有稳定型;当试件轴向垂直面割理时,应力-应变曲线呈破裂型、稳定型,而没有进裂型。

参考文献:

- [1] Blake W. Microseismic applications for mining: a practical guide [R]. U. S. : Bureau of Mines ,1982.
- [2] 谢 强,张永兴,余贤斌. 石灰岩在单轴压缩条件下的声发射特性[J]. 重庆建筑大学学报 2002 24(1): 19-22, 58.
Xie Qiang, Zhang Yongxing, Yu Xianbin. Study on acoustic emission of limestone in uniaxial compression test [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University 2002 24(1): 19-22, 58.
- [3] 尹贤刚,李庶林,唐海燕,等. 岩石破坏过程的声发射特征研究[J]. 矿业研究与开发 2003 23(3): 9-11.
Yin Xiangang, Li Shulin, Tang Haiyan, et al. Study on characteristics of acoustic emission in the process of rock failure [J]. Mining Research and Development 2003 23(3): 9-11.
- [4] 唐绍辉,吴壮军. 岩石声发射活动规律的理论与实验研究[J]. 矿业研究与开发 2000 20(1): 16-18.
Tang Shaohui, Wu Zhuangjun. The theory of sonic emission activity rule of rock mass and relevant experiments [J]. Mining Research and Development 2000 20(1): 16-18.
- [5] 傅宇方,唐春安. 岩石声发射 Kaiser 效应的数值模拟实验研究[J]. 力学与实践 2000 22(6): 42-44.
Fu Yufang, Tang Chun'an. Numerical test on Kaiser effect in rock failure process [J]. Mechanics and Engineering 2000 22(6): 42-44.
- [6] Shkuratnik V L, Filimonov Yu L, Kuchurin S V. Experimental investigations into acoustic emission in coal samples under uniaxial loading [J]. Journal of Mining Science 2004 40(5): 458-460.
- [7] Ren Fenhua, Lai Xingping, Cai Meifeng. Dynamic destabilization analysis based on AE experiment of deep-seated, steep-inclined and extra-thick coal seam [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing 2008 15(3): 215-219.
- [8] Shkuratnik V L, Filimonov Yu L, Kuchurin S V. Features of the Kaiser effect in coal specimens at different stages of the triaxial axisymmetric deformation [J]. Journal of Mining Science 2007 43(1): 1-4.
- [9] 王恩元,何学秋,刘贞堂. 煤岩破裂声发射实验研究及 R/S 统计分析[J]. 煤炭学报 1999 24(3): 270-273.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang. Experimental research and R/S statistic analysis of AE during the fracture of coal or rock [J]. Journal of China Coal Society 1999 24(3): 270-273.
- [10] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等. 煤体破裂声发射的频谱特征研究[J]. 煤炭学报 2004 29(3): 289-292.
Wang Enyuan, He Xueqiu, Liu Zhentang, et al. Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture [J]. Journal of China Coal Society 2004 29(3): 289-292.
- [11] 秦四清,李造鼎,张倬元,等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
Qin Siqing, Li Zaoding, Zhang Zhuoyuan, et al. An introduction to the technology of acoustic emission of rock [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993.
- [12] 陈 强,朱宝龙,胡厚田. 岩石 Kaiser 效应测定地应力场的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2006 25(7): 1370-1376.
Chen Qiang, Zhu Baolong, Hu Houtian. Experimental research on measurement of in-situ stress field by Kaiser effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 25(7): 1370-1376.