

具有弱冲击倾向性的须六段砂岩声发射特征

张凤舞¹, 郭臣业^{2,3}, 沈大富², 周东平^{2,3}, 姜永东⁴

(1. 重庆市能源投资集团公司, 重庆 400060; 2. 重庆市能源投资集团科技有限责任公司, 重庆 400060;
3. 重庆市能源瓦斯研究院, 重庆 400060; 4. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要:为了认识具有弱冲击倾向性砂岩的声发射特性,利用 MTS815 岩石力学测试系统、AE 测试分析系统对永川煤矿须六段砂岩进行了测试。结果表明:砂岩受载过程的不同阶段产生的 AE 信号有较大区别;AE 事件空间分布的变化反映了岩石受损伤后的破裂失稳过程;须六段砂岩存在 Kaiser 效应和 Felicity 效应。研究结论为应用 AE 监测技术预测、预报矿井岩石动力灾害提供了科学依据。

关键词:岩石力学;弱冲击倾向性;声发射;Kaiser 效应;Felicity 效应

中图分类号:TD713 文献标志码:A 文章编号:1672-3767(2011)06-0001-07

Acoustic Emission Characteristics of Weak Impact-prone T₃xj⁶ Sandstone

ZHANG Fengwu¹, GUO Chenye^{2,3}, SHEN Dafu², ZHOU Dongping^{2,3}, JIANG Yongdong⁴

(1. Chongqing Energy Investment Group, Chongqing 400060, China;

2. Science and Technology Co. Ltd, Chongqing Energy Investment Group, Chongqing 400060, China;

3. Chongqing Institute of Gas Energy, Chongqing 400060, China;

4. Key Lab for Development of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to understand the acoustic emission characteristics of weak impact-prone sandstone, experiments of T₃xj⁶ sandstone in Yongchuan coalmine were tested by means of MTS815 rock testing system and AE testing system. Results of the tests indicated that there were large differences of the acoustic emission signals produced in different stages of sandstone loading process. The variation of spatial distribution of AE events reflected the failure process of sandstone damaged. The Kaiser and Felicity effects existed in T₃xj⁶ sandstone. The research provided a scientific basis for the prediction of rock dynamic disaster by using AE monitoring technology in coalmines.

Key words: rock mechanics; weak impact-prone; acoustic emission; Kaiser effect; Felicity effect

煤岩等脆性材料在受载破坏过程中,由于裂纹产生、扩展或断裂将导致声发射(acoustic emission, AE)现象,AE 信号反映了煤岩材料的损伤破坏机制^[1-2]。深部矿井岩爆、矿震、冲击地压等岩石动力现象是煤岩体达到极限应力平衡状态时产生的局部失稳现象^[3-4],失稳破坏过程中伴随着大量 AE 信号产生,这些信号与煤岩材料受力破坏产生的 AE 信号本质上是一致的。用仪器检测、记录、分析 AE 信号和利用 AE 信号推断声发射源的技术称为声发射监测技术,它广泛应用于矿山压力显现、岩爆预测等采矿工程领域。因此,利用声发射监测技术分析冲击倾向岩石在受载过程中的 AE 特性,有助于深入认识这种岩石的力学性质。

国内外学者^[5-7]对岩石声发射进行了深入研究,揭示了岩石受载的声发射特征,为应用声发射技术预测岩石动力现象提供了科学依据。目前,对岩石声发射的 Felicity 效应研究较少,本研究将探讨须六段砂岩的

收稿日期:2011-06-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50904082);重庆市科委自然科学基金计划项目(cstcejA00002)。

作者简介:张凤舞(1962—),男,重庆市忠县人,高级工程师,主要从事煤矿瓦斯防治与利用方面的研究。

E-mail:gcyer@yahoo.com.cn.

Felicity 效应特征,揭示在单轴加载条件下弱冲击倾向性砂岩的声发射特性。

1 须六段砂岩物理力学性质

1.1 须六段砂岩的冲击倾向性

永川煤矿—600 m 延深工程(垂深 850~1 050 m)过须六段砂岩层时发生了岩爆、片帮动力现象,发生在须六段砂岩层的岩爆具有以下特征:岩爆多发生在巷道侧拱顶及岩墙中下部位置;岩爆发生时有劈裂声响,且有岩片弹射现象;岩爆后遗留有球冠状、锥形或窝状爆坑。2009 年对延深工程中遇到的须六段砂岩层进行了取样、试验,试验结果表明须六段砂岩层有弱冲击倾向性^[8-9]。

1.2 须六段砂岩的取样、加工及物理特性

测试 AE 特性所用试验岩样取自永川煤矿—600 m 延深工程遇到的须六段砂岩层,用湿式法将岩样加工成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (单轴抗压、抗冲击倾向性及声发射测试用)、 $\Phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ (劈裂试验用)的圆柱体试件和 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ (声发射损伤定位用)的立方体试件,其加工精度满足国际岩石力学学会建议试验规范要求,加工成型后保持自然干燥状态。提取岩芯后剩余岩样用于测试渗透性、元素组成、比表面积等物理指标。砂岩力学性质、AE 特性试验及元素成分分析在重庆大学完成测试,部分物理指标在成都理工大学完成测试。试验中所用设备有 MTS815 岩石力学测试系统、声发射测试分析系统以及 AutoPore IV 9500 压汞仪、X 射线荧光光谱仪等。

按照煤和岩石物理学性质试验规程(MT49-87)的要求,测得的砂岩部分物理力学性质参数见表 1。物理特性测试显示,砂岩的比表面积较大,相同测试条件下永川焦煤 BET(Brunauer-Emmett-Teller)比表面积为 $280 \text{ m}^2/\text{g}$,孔隙率(相同测试条件下永川焦煤孔隙率为 14.746 7%)和渗透率极低,表明该种砂岩微孔隙较发育,但孔隙的连通性较差。永川煤矿须六段砂岩埋深大,且受区域内构造应力挤压,压实和压密作用强,造成其孔隙不发育和渗透率低。元素分析表明,须六段砂岩 Si、Al 元素含量较多,可以推测砂岩样品中含有较多 Si、Al 化合物,Si、Al 在岩石中存在的主要形式为石英、云母、长石等,石英等含 Si 元素的矿物硬度大、脆性高,在应力达到其强度时会产生剧烈破坏,具有冲击破坏的特征。须六段砂岩 Si 元素含量多,从物质成分上反映了其具有冲击倾向性。

1.3 砂岩力学特性

图 1 是砂岩单轴加载和峰前循环加载的典型应力应变曲线,其中,峰前循环加载的应力水平低于其屈服强度(σ_{\max} 为 44.3 MPa, σ_{\min} 为 37.0 MPa)。图 1 显示砂岩在单轴加载条件下,应力应变曲线与弹塑性体受力变形形状近似,砂岩样所受应力较低时,曲线向上弯曲,当应力增加到一定值后,曲线为直线,最后曲线向下弯曲,类似“S”形。砂岩单轴应力应变曲线有明显的孔隙压密阶段和屈服阶段,其弹性段较短、且陡峭,当应力达到峰值强度后承载力急剧下降,结合表 1 数据可得出如下结论:永川砂岩的杨氏模量低、强度一般不高,具有脆性特征。

表 1 砂岩物理力学性质表

Tab. 1 Physical and mechanical properties of sandstone

项目	参数特征	项目	参数特征
BET 比表面积/ (m^2/g)	203.1	σ_c/MPa	68.7
孔隙率/%	4.301 2	σ_s/MPa	47.7
渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	0.003 01	σ_t/MPa	7.48
孔隙率/%	2.29	E/GPa	24.3
Si 元素质量含量/%	44.48	μ	0.153
Al 元素质量含量/%	5.62	内聚力 C/MPa	10.83
K 元素质量含量/%	3.07	$\Phi/(\text{°})$	51.91
其他元素质量含量/%	46.83	σ_c/σ_t	8.39
容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	26.3	W_{ET} 指数	3.201(弱冲击倾向性)
f	6.48		

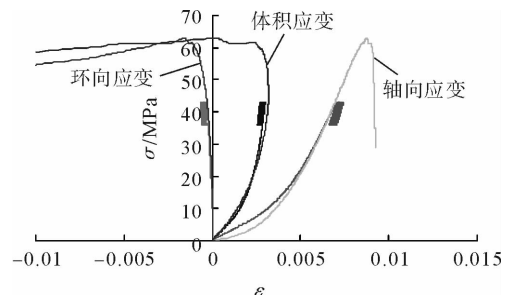


图 1 砂岩单轴加载的典型应力应变曲线图

Fig. 1 Typical stress-strain curve of sandstone under uniaxial compression

峰前循环加载应力应变曲线显示:当循环加载应力低于岩样屈服强度时,每一个峰前加、卸载的循环都产生塑性滞环,滞环面积在加载开始阶段较大,随着循环次数的增加,滞环面积逐渐变小并趋于稳定;循环加载的上限载荷低于屈服强度时,循环加载的时间即使大于 15 h,岩样也没有破坏迹象。已有的研究^[10]也表明,在循环加载应力低于岩样屈服强度条件下,即使循环加载次数达万次,岩样的轴向变形仍然非常小,不会产生疲劳破坏迹象。

2 砂岩 AE 特性

2.1 岩样受载全过程 AE 特征及损伤定位实验

2.1.1 岩样受载全过程 AE 特征

砂岩 AE 特性测试是在力学性质测试的同时进行的,AE 接收探头的安装如图 2 所示。为了接收到高质量的声发射信号,选择均质岩样进行测试,测试前在试样端面 and 压力机压盘之间涂减磨剂(硬脂酸),AE 信号阈值设定为 40 dB。图 3 为砂岩单轴压缩过程中典型的 AE 特征图,图中显示应力应变曲线各个阶段的 AE 特征是不同的,在初始压密阶段振铃数少、能量低、振幅小;弹性阶段 AE 信号微弱,表现为振铃数很少、能量很低、振幅很小;应变硬化阶段 AE 信号非常强烈,表现为振铃数骤增、能量高、振幅大;应变软化阶段岩石还有一定的承载力,AE 信号会继续产生,表现为振铃数骤减、能量和振幅减小。

图 3(a)还显示砂岩样破坏时(446 s) AE 振铃数峰值明显,该时刻岩样发生宏观破裂,此后岩样基本失去承载能力。振铃数-时间曲线的第一个峰值(167 s)表示砂岩破坏的 Kaiser 效应点,此时对应岩样受力为 9.18 MPa。在 359 s 时振铃数-时间曲线出现第二个峰值,该峰值对应轴向应力应变曲线屈服点,表明岩石变形方式从以弹性为主向塑性为主转变^[11]。第二个振铃数-时间曲线峰值对应强度为 46.5 MPa,与根据岩样应力应变曲线求得的屈服强度 47.7 MPa 相比小了 1.2 MPa,若将 47.7 MPa 作为真实值,则根据 Kaiser 点求得的屈服点值的误差率为 8.6%。考虑到试验测试误差的存在,这里近似认为用上述两种方法求得的屈服点强度都是正确的。

2.1.2 岩样受载的 AE 损伤定位

AE 定位的原理是利用不同 AE 探头接收到 AE 源信号的时间差来计算 AE 事件的位置^[12]。AE 损伤定位测试用方形试件,测试时的 6 个 AE 接收探头安装及连接见图 4。

图 5 显示了方形砂岩试件在单轴连续加载过程中 AE 事件空间定位结果,图 5(a)为 87 s 时的

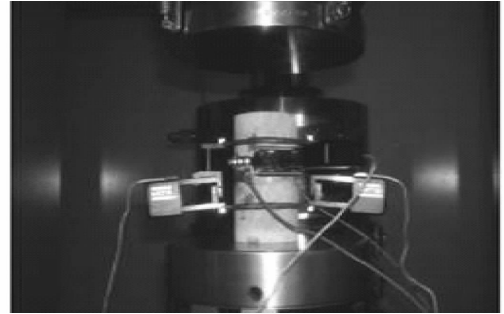


图 2 AE 接收探头安装图

Fig. 2 Installation of AE sensors

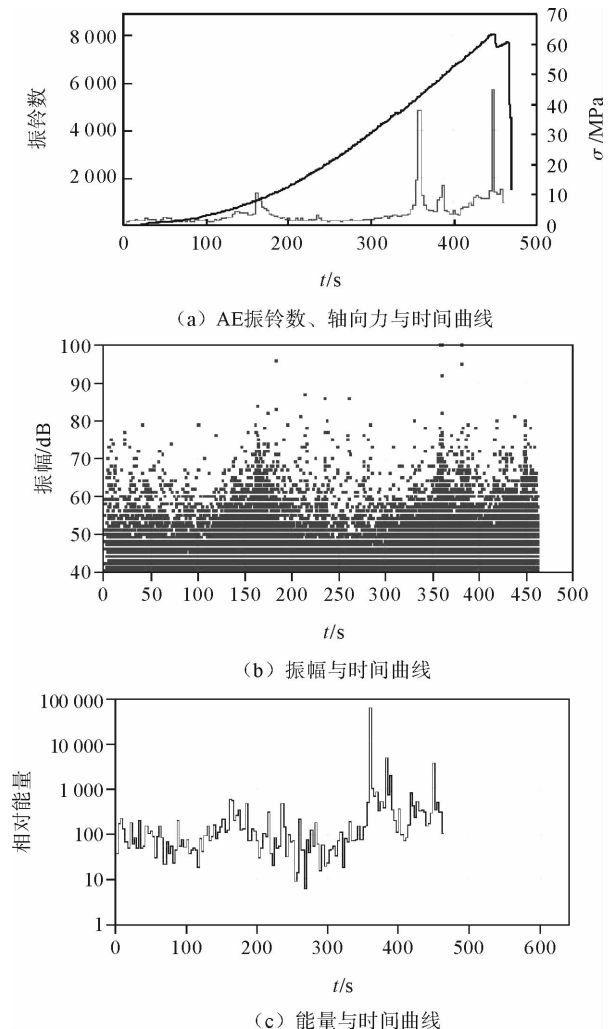


图 3 砂岩单轴压缩破坏过程曲线图

Fig. 3 The breakage curves of sandstone under uniaxial compression

定位结果,此时对应应力应变曲线的弹性段,事件数为 7, AE 事件零星散布于试件中,表明砂岩试样在外力作用下已形成初步损伤;随着应力增加至砂岩样屈服点附近时, AE 事件数明显增多,图 5(b)显示了 559 s 时的损伤定位结果,此时事件数为 220;当应力继续增加进入塑性变形阶段后,事件数急剧增加,试样损伤加剧,裂纹扩大并初步贯通,图 5(c)显示了试样破碎前(636 s 时试样达到峰值强度并破坏)13 s 的损伤定位结果,此时事件数已达到 3 633。在应力应变曲线软化阶段仍有声发射产生,这是因为试样宏观破裂面相互滑动摩擦并带动附近的弱结构单元(或已受损单元)继续产生新裂纹,从而产生的少数低能量 AE 事件。

岩石破裂过程中, AE 事件随应力应变曲线变化表现出不同的特征。初始加载阶段至初始裂纹形成之前, AE 活动不明显,一旦岩样出现初始裂纹, AE 事件会迅速增多;裂纹稳定扩展至岩样破坏的阶段, AE 活动异常活跃,特别是在微裂纹扩展的非稳定阶段, AE 随应力应变曲线变化非常显著。岩样卸载的 AE 损伤定位测试表明,岩石破裂失稳过程就是岩石内部初始微裂纹形成、扩展和岩石宏观破坏的过程, AE 事件是岩石内部初始微裂纹形成、扩展引起的。

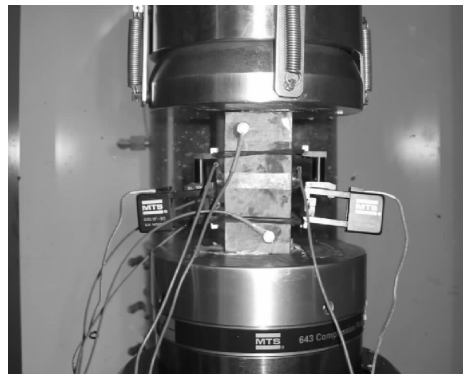


图 4 损伤定位的 AE 探头安装图
Fig. 4 The installation of AE sensors for damage localization

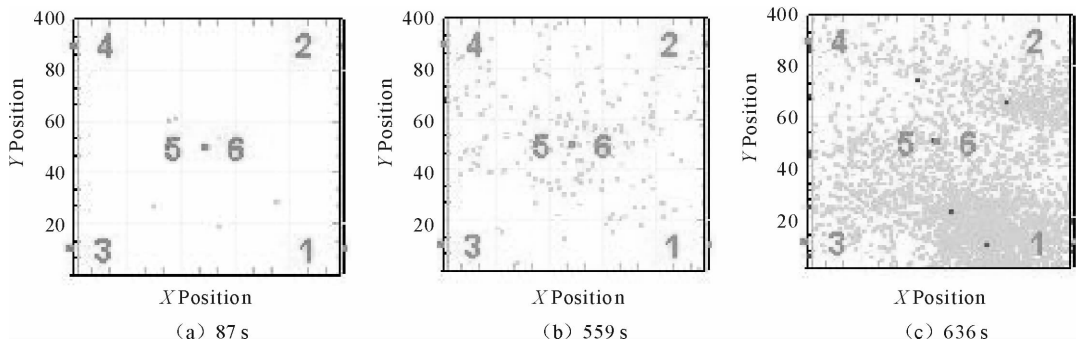


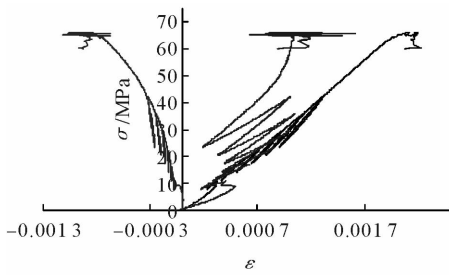
图 5 AE 损伤定位结果图

Fig. 5 The location results of AE damages

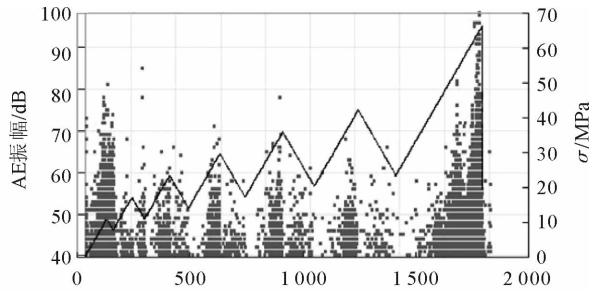
2.2 岩样峰前变循环加载的 Kaiser 与 Felicity 效应

Kaiser 效应是指在超过先前所施加的应力之前不出现可探测到的声发射^[13-14],而 Felicity 效应被认为是反 Kaiser 效应, Felicity 效应是指重复载荷到达原先所知最大载荷前发生明显声发射的现象,是 Kaiser 效应失效程度的补充^[15-16]。Felicity 比值大于 1 表示 Kaiser 效应成立,而小于 1 则表示 Felicity 效应成立。目前,对岩石 Kaiser 效应及其应用的研究较多,而研究 Felicity 效应较少,其原因是 Felicity 效应的认定标准还没有统一。判断岩石声发射 Felicity 效应的关键是如何确定明显的 AE 现象。如何定义“明显”声发射,目前并无统一的标准。

图 6 为砂岩样在单轴差应力循环加载作用下的应力应变曲线和 AE 特征,差应力循环加载波形为三角形波,循环加载方式为上限力限幅 12.5 kN,下限力增幅 7.5 kN,加载至试件破坏。图 6(b)的加载波形与 AE 信号振幅对比图显示, AE 事件产生密集处并不位于岩样破坏前每个循环加载的峰值,它一般位于循环加载的最低应力点与最高应力点连线的中上部。下面以图 7 所示差应力应变曲线的 AE 特征来研究砂岩样的 Kaiser 与 Felicity 效应。本研究将 Kaiser 效应对荷载的记忆拓展到轴向应力和轴向应变,并认为卸载后再次加载时, AE 活动显著增多时刻(比照图 6(b))对应岩样卸载状态为 Felicity 效应点。



(a) 应力应变曲线



(b) 加载波形与AE信号振幅

图 6 砂岩样差应力应变曲线与声发射典型特征图

Fig. 6 The picture of typical AE characteristics and differential stress-strain curves of sandstone

用应力表示的 Felicity 比值定义如下：

$$FR_{\sigma} = \sigma_{AE} / \sigma_{max} \quad (1)$$

其中： FR_{σ} 为轴向应力的 Felicity 比值； σ_{AE} 、 σ_{max} 分别为重复加载时的声发射起始轴向应力和上一次加载的最大轴向应力。

若用应变表示，则

$$FR_{\epsilon} = \epsilon_{1AE} / \epsilon_{1max} \quad (2)$$

其中： FR_{ϵ} 为轴向应变的 Felicity 比值； ϵ_{1AE} 、 ϵ_{1max} 分别为重复加载时的声发射起始轴向应变和上一次加载的最大轴向应变。

表 2 砂岩样差应力加载循环的 Felicity 比值及 AE 起始时刻表

Tab. 2 Felicity ratio and AE starting time of sandstone sample under differential stresses

循环级	2	3	4	5	6	7
FR_{σ}	1.11	1.03	1.02	1.0	0.93	0.9
轴向应力/MPa	12.05	17.60	23.25	28.34	33.44	38.03
时刻/s	185.1	352.7	579.3	840.1	1 178.3	1 688.1
FR_{ϵ}	1.32	1.15	1.10	1.002	0.86	0.78
轴向应变	0.000 43	0.000 60	0.000 75	0.000 87	0.000 92	0.001 03
时刻/s	219.5	371.9	549.1	795.1	1 125.9	1 527.1

表 2 为砂岩样差应力加载循环条件下应力和应变不同时刻对应的 Felicity 比值及 AE 起始时刻，图 7 为据表 2 得到的不同应力和应变阶段的 Felicity 比值。由图 7 和表 2 可以看出，在第 2、3、4、5 个循环中， FR_{σ} 和 FR_{ϵ} 都大于 1，Kaiser 效应成立，而这两个阶段处于弹性变形阶段，即弹性变形阶段砂岩对轴向应力、轴向应变均有较好的记忆能力；在第 6、7 个循环中， FR_{σ} 和 FR_{ϵ} 都小于 1，Felicity 效应成立。

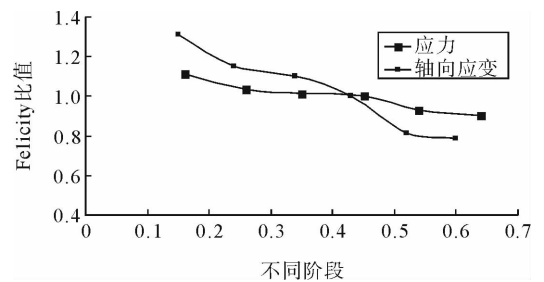


图 7 不同应力和应变阶段的 Felicity 比值图

Fig. 7 Felicity ratio under different stages of stress and strain

研究^[17]认为，岩石的 Kaiser 效应有其局限性，超过岩石的屈服点后，岩石的 Kaiser 效应将不再成立，Felicity 效应是损伤加剧造成的。由于岩石疲劳破坏存在应力门槛值^[10-18]，低于应力门槛值的疲劳过程一般不会造成岩石破坏，且应力门槛值接近常规屈服值。根据以上讨论，可近似认为只有出现了 Felicity 效应的岩石才会发生疲劳破坏。

研究^[17]认为，岩石的 Kaiser 效应有其局限性，超过岩石的屈服点后，岩石的 Kaiser 效应将不再成立，Felicity 效应是损伤加剧造成的。由于岩石疲劳破坏存在应力门槛值^[10-18]，低于应力门槛值的疲劳过程一般不会造成岩石破坏，且应力门槛值接近常规屈服值。根据以上讨论，可近似认为只有出现了 Felicity 效应的岩石才会发生疲劳破坏。

2.3 须六段砂岩冲击倾向性与 AE 特性分析

不同岩性岩石受载的声发射类型分为群发型、集发型、突发型和散发型^[19],对应岩石具有的冲击倾向性依次为强烈、较强烈、中等、弱。图3(b)显示须六段岩样受载全过程中 AE 事件振幅整体较平稳,局部(破坏时)较大,图3(c)的谱图也显示声发射事件的能量前期较平稳,邻近破坏时能量较大,具有散发型的特点。须六段砂岩层属于沉积地层,此类岩石的矿物强度较之其胶结物高得多,而胶结物多以钙质、泥质为主,连接较弱,在载荷作用下岩石内部易产生裂纹和孔隙破坏,对应力较敏感,受载时在应力应变全过程曲线上均有声发射现象产生。由于须六段砂岩 Si、Al 元素含量较多,其组成的石英等矿物强度高、脆性大,为属于沉积层的须六段砂岩具有冲击倾向性提供了基础。声发射特征反映的须六段砂岩具有弱冲击倾向性,与文献[8]、文献[9]的研究结论一致。

3 结论

1)具有弱冲击倾向性的永川煤矿须六段砂岩层 Si、Al 元素含量多,内生孔隙连通性差,且具有杨氏模量低、强度不高的力学特征;

2)须六段砂岩单轴受载过程的不同阶段产生的 AE 信号有较大区别,压密阶段振铃数少、能量低、振幅小,弹性阶段振铃数很少、能量很低、振幅很小,屈服阶段振铃数骤增、能量高、振幅大,应变软化阶段振铃数骤减、能量和振幅很低。

3)定义了用应力和应变表示的 Felicity 效应比值,验证了具有弱冲击倾向性的须六段砂岩存在 Kaiser 效应和 Felicity 效应;

4)岩石受载过程中 AE 事件空间分布的变化反映了岩石受损伤后的破裂失稳过程,须六段砂岩的声发射特征具有散发型的特点,反映了该种岩石具有弱冲击倾向性。

参考文献:

- [1]秦四清. 岩石声发射技术概论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1993.
- [2]邹德蕴,段伟,刘志刚,等. 采矿区上覆岩层诱发矿震及预测技术研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2009,28(4):54-58.
ZOU Deyun, DUAN Wei, LIU Zhigang, et al. Study on mine earthquake induced by falling of overburden strata over goaf and its predictive technology[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 28(4): 54-58.
- [3]宋振骥,卢国志,彭林军,等. 煤矿冲击地压事故预测控制及其动力信息系统[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2006,25(4):1-5.
SONG Zhenqi, LU Guozhi, PENG Linjun, et al. Forecast and control of rock burst in collieries and its dynamic information system[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 25(4): 1-5.
- [4]赵毅鑫,姜耀东,田素鹏. 冲击地压形成过程中能量耗散特征研究[J]. 煤炭学报,2010,35(12):1979-1983.
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, TIAN Supeng. Investigation on the characteristics of energy dissipation in the preparation process of coal bumps[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 1979-1983.
- [5]LAVROV A. The kaiser effect in rocks; principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40: 151-171.
- [6]袁子清,唐礼忠. 岩爆倾向岩石的声发射特征实验研究[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(1):94-98.
YUAN Ziqing, TANG Lizhong. Experimental research on acoustic emission characteristics of burst-prone rocks[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 94-98.
- [7]潘长良,祝方才,曹平,等. 单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征[J]. 中南工业大学学报:自然科学版,2001,32(4):336-338.
PAN Changliang, ZHU Fangcai, CAO Ping, et al. Characteristics of acoustic emission of bursting-intended rocks under uni-axial compression[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2001, 32(4): 336-338.
- [8]郭臣业,鲜学福,万亮亮,等. 永川煤矿须六段砂岩力学性质与冲击倾向性实验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):94-97.

- GUO Chenye, XIAN Xuefu, WAN Liangliang, et al. Mechanical characteristics and burst-prone experiments of $T_3 x_j^6$ sandstone in Yongchuan coal mine[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 94-97.
- [9] 郭臣业, 鲜学福, 李晓红, 等. 重力场条件下砂岩突出倾向性[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(12): 1487-1491.
- GUO Chenye, XIAN Xuefu, LI Xiaohong, et al. Outburst orientation of sandstone under gravitational field[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(12): 1487-1491.
- [10] 葛修润, 卢应发. 循环载荷作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56-60.
- GE Xiurun, LU Yingfa. Investigate of fatigue failure and non-reversible deformation cyclic loading in rock[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56-60.
- [11] 唐晓军. 循环载荷作用下岩石损伤演化规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [12] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 644-650.
- ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruipu, et al. Study on rock samples based acoustic emission location[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 644-650.
- [13] LI C, NORDLUND E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(4): 333-351.
- [14] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 花岗岩 Kaiser 效应的实验验证与分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(2): 254-257.
- ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruipu, et al. Experimental verification/analysis of Kaiser effect in granite[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2007, 28(2): 254-257.
- [15] 杨明纬. 声发射检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [16] PAPARGYRIS A D, COOKE R G, PAPARGYRI S A, et al. The acoustic behaviour of bricks in relation to their mechanical behaviour[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(7): 361-369.
- [17] 李树春. 周期循环加载作用下岩石变形与损失规律及非线性特征[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [18] 葛修润, 任建喜, 浦毅彬, 等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探[J]. 岩土工程学报, 2001, 2(23): 191-195.
- GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, et al. Primary study of CT real-time testing of fatigue meso-damage propagation law of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 2(23): 191-195.
- [19] 杨健, 王连俊. 岩爆机理声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3796-3802.
- YANG Jian, WANG Lianjun. Study on mechanism of rock byacousite emission testing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3796-3802.

“矿山灾害预防与控制”专栏征稿

征稿范围:

- | | |
|-------------|------------------|
| ◇ 矿山岩层控制 | ◇ 煤炭科学开采理论、方法与技术 |
| ◇ 采动岩体力学 | ◇ 安全监测监控与信息化 |
| ◇ 资源规划与绿色开采 | ◇ 井下充填开采 |
| ◇ 矿井瓦斯与火灾治理 | ◇ 现代化矿井生产技术 |
| ◇ 矿山震动与冲击地压 | ◇ 瓦斯的抽采与利用 |

欢迎相关领域专家学者和工程技术人员踊跃投稿, 来稿请注明“矿山灾害预防与控制”专栏。稿件通过专家评审后优先发表, 并实行优稿优酬。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: zkchem@sdust.edu.cn; sdustzkb@163.com

联系电话: 0532-86057859