

doi: 10.13745/j.esf.2015.03.034

三轴应力下饱和水煤岩破裂的声发射特征

蔡益栋¹, 刘大锰^{1,*}, 姚艳斌¹, 李俊乾¹, 邱勇凯¹, 张百忍²

1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083

2. 中国地质图书馆, 北京 100083

CAI Yidong¹, LIU Dameng^{1,*}, YAO Yanbin¹, LI Junqian¹, QIU Yongkai¹, ZHANG Bairen²

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

2. China Geological Library, Beijing 100083, China

CAI Yidong, LIU Dameng, YAO Yanbin, et al. Acoustic emission characteristics of water-saturated coals under tri-axial stress condition in the process of deformation and failure. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 394-401

Abstract: Experiments on acoustic emission (AE) of coals with saturated water under tri-axial stress were conducted, and the relationship between stress and strength under tri-axial stress was analyzed on the rock mechanical experimental rig (GAW-2000). The results reveal that the coals of different ranks always have variable AE characteristics. Normally, they were divided into three types. The results of tri-axial experiments and AE analysis of water-saturated coals show that AE events were less active at the elastic stage, after that the AE become active; Experimental comparison between uniaxial and tri-axial shows that the confining pressure will significantly change the strength of semi-anthracite coal at the compaction stage, while it is not obvious for anthracite coal. And the confining pressure is insignificant for other stages of coal deformation and failure process. AE ring counts and energy counts reveal that they can be applied to predicting the coming failure point. The frequency and amplitude of the ringing rate and energy rate have been greatly raised during approaching the destruction precursor for the semi-anthracite coal. When the stress reaches 90% of the yield stress, the ring counts and energy counts will remain unchanged. For anthracite coal, the destruction precursor will produce an obvious sharp increase in frequency or amplitude. Meanwhile, the results also reveal that AE characteristics have significant relationship with coal composition and coalification.

Key words: tri-axial stress; saturated water; coals; acoustic emission

摘 要:在 GAW-2000 型岩石力学试验系统上进行了煤岩饱和水条件下的三轴压缩应力应变试验及声发射检测。结果表明:不同煤级煤岩有着不同的声发射特征,主要可以划分为 3 种类型。饱和水煤岩的三轴-声发射试验显示,煤样在线弹性阶段之前声发射事件较少,而之后声发射趋于活跃;单轴与三轴实验对比发现,围压会明显改变半无烟煤煤岩在压密阶段的应变变量,而对无烟煤不明显。围压的存在对煤岩变形其他阶段的影响要小于压密阶段。声发射参数振铃率和能量率可以应用于预测最大屈服应力点:半无烟煤煤岩在破坏前兆来临时,振铃率和能量率的频率和幅度均有很大提高,在近最大屈服应力 90%左右时,幅度基本维持不变;无烟煤煤岩在破坏前兆来临时,会产生明显的某一突变,频率或幅值上有跳跃或突增。同时,煤岩的声发射特征的方式和差异性跟煤岩的物质组成及煤岩演化程度有很大的相关性。

关键词:三轴应力;饱和水;煤岩;声发射

中图分类号:TU459 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2015)03-0394-08

收稿日期:2013-07-24;**修回日期:**2013-12-13

基金项目:国家大型油气田及煤层气开发科技重大专项资助项目(2011ZX05034-001);北京市优秀博士学位论文指导教师科技项目(YB20101141501)

作者简介:蔡益栋(1985—),男,博士研究生,主要从事煤储层物性动态变化规律研究。E-mail:caiyidong-2004@hotmail.com

*** 通讯作者简介:**刘大锰(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事煤层气地质与开发研究。E-mail:dmliu@cugb.edu.cn

岩石受力发生变形时,岩石内部裂缝周围会产生区域应力集中,致使应变能增高。当力增大到一定程度时,原裂纹尖端附近区域发生了微观屈服或变形,裂纹扩展,此时岩石中所储藏能量以弹性波的形式释放出来,即声发射现象^[1]。声发射技术是靠岩石发声来判别其内部状态和力学特性的一种方法,对岩石发出的声波进行观测、分析,可获得岩石裂隙期次、强度等特征,反映受力作用下的裂纹产生、扩展、联通及破坏的过程。该技术在1920年前后由美国矿业局 Obert 和 Duvall 率先开发并应用于矿山矿柱岩体稳定性和岩爆的监测预报中^[2]。20世纪90年代以来,该项技术在矿山地压以及岩体失稳预测研究中得到了广泛应用^[3-4]。2000年来逐渐应用到煤岩压裂研究中,众所周知,煤岩动力灾害,诸如煤与瓦斯突出和冲击地压等,是煤矿生产中的严重自然灾害。声发射技术在分析复杂环境下煤岩裂隙演化期次与级别,及在识别不同状态下的裂隙形成方面也越来越多地受到关注,如加卸载条件,高温条件等^[5-7]。前人研究表明^[8],当应力达到岩石所受的最大先期应力时开始出现明显的声发射现象,即“Kaiser 效应”,为煤岩受力研究提供了新的思路。建立声发射参数与煤岩力学破坏机制的关系可以更好地了解煤岩损伤演化规律,进一步揭示煤岩动力灾害及煤储层压裂过程中的裂隙演化特征及控制机理。因此,本文以煤岩三轴应力-声发射实验为基础,通过分析不同煤阶煤岩在三轴应力作用下的声发射与裂隙演化特征,探讨了地层条件下煤岩裂隙形成过程的内在机制。

1 样品及实验装置

煤样均采自沁水盆地南部3#(主煤层),4#,9#及15#(主煤层)煤层的7个矿井工作面,受区域构造的影响,区内发育一组宽缓背向斜,地层倾角较缓,一般为 $3^{\circ}\sim 12^{\circ}$,总体构造属简单类型。煤体结构多为原生结构,这种结构对煤层割理、裂隙的形成与保存有利。采集样品为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的块样,煤样最大镜质组反射率为 $1.83\%\sim 3.28\%$,为半无烟煤和无烟煤(表1)。煤岩显微组分的差异不仅影响煤的生气潜力,还影响煤储层对甲烷气体的吸附能力,同时还会直接影响煤岩力学性质。本研究所采的各矿区煤岩显微组分测试结果表明:煤显微组成以镜质组为主,大多介于 $80\%\sim 96\%$,其

中最低的YC4#-1为 18.5% 。惰质组介于 $4.7\%\sim 81.4\%$,样品差异较大。壳质组均为0,这与煤级有着明显的相关性。矿物含量介于 $0\sim 4.1\%$,高煤阶煤岩普遍偏高。样品中部分物质含量差异明显,如YC4#-1煤样惰性组达 80% 以上,SY3#-2煤样矿物质为0,这可能与样品局部非均质性和实验分析方法有关。宏观煤岩类型分析表明:无烟煤煤岩多以半亮煤及亮煤出现,同时其对煤岩显微裂隙有着明显的控制作用,无烟煤微裂隙普遍发育。煤岩光片显微分析结果表明:A型为较大微裂隙,连续性好,但延伸远的很少;B和C型为中等微裂隙,这两种多呈树枝状或羽状组合出现,两种类型裂隙间的连通性较好,但发育较少;D型为较小微裂隙,该型裂隙发育广泛,但其方向性和连通性相对其他类型较差(表1)。在采煤工作面,通过刻槽采样法获得实验煤样,再将煤样沿着层理方向钻取两组试样:一组用于单轴压缩实验,用于测定基础岩石力学参数;另一组用三轴应力试验。考虑煤岩的强非均质性和加工易碎等特征,将煤样加工成近标准三轴试件(直径 $40\text{ mm}\times$ 高 80 mm),圆柱轴向均平行于面割理方向,实际制样尺寸见表2。

试验按照《水利水电工程岩石试验规程(SL 264—2001)》行业标准进行,试验前对所有试件都进行饱和水处理,以测试煤岩在饱和含水条件下的单轴压缩基础煤岩力学参数,三轴应力下的煤岩变形及声发射特征。单轴压缩试验:试验时将应变感应器贴合在试件上,固定好后,对上述7个煤样进行单轴压缩试验,获得样品相关力学参数。三轴应力-声发射实验:在GAW-2000型微机控制电液伺服刚性压力试验机上进行,轴向最大载荷 $2\,000\text{ kN}$,围压最大为 70 MPa ,试验准确度 1% 误差,加载时可以采用位移和速度两种控制方式(图1)。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,由此绘制煤岩三轴压缩全应力-应变特征曲线。声发射检测仪为AE21C型。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 $300\text{ }\mu\text{s}$ 。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,实验设置门槛值为 40 dB ,数据采集间隔为 0.1 s 。利用上述试验方法对7组煤样进行了三轴应力条件下的煤岩压缩-声发射特征试验。

表 1 煤岩显微组分及裂隙分析结果

Table 1 Analysis results of coal micro-composition and fractures

样品号	煤层号	显微组分及矿物含量/%			$R_{o,m}/\%$	宏观煤岩 类型	每 9 cm ² 显微裂隙统计条数				连通性
		镜质组	惰质组	矿物			A	B	C	D	
XZ9 #-1	9	87.9	9.5	2.6	1.83	半亮煤	0	4	11	60	一般
SY3 #-2	3	95.3	4.7	0	1.88	半亮煤	0	2	8	20	一般
CC3 #-2	3	89.2	9.6	1.2	1.94	亮煤	0	0	9	5	一般
ZLS3 #-1	3	69.8	28.9	1.3	1.98	半亮煤	0	2	11	47	差
SJZ9 #-1	9	86.7	10.9	2.4	2.24	半亮煤	0	0	6	9	好
YC4 #-1	4	18.5	81.4	0.1	2.68	亮煤	1	8	5	41	差
WTP15 #-2	15	89.5	6.2	4.3	3.28	半亮煤	0	2	6	1	一般

注:壳质组均为 0;A—宽度(W)≥5 μm 且长度(L)≥10 mm;B—W≥5 μm 且 L<10 mm;C—W<5 μm 且 L≥300 μm;D—W<5 μm 且 L<300 μm。

表 2 煤岩基础实验数据及力学参数

Table 2 Fundamental test results and rock mechanic parameters of coals

样品号	直径 /mm	高度 /mm	天然 质量/g	声波时差/μs		煤岩力学参数		
				试验前	试验后	E/MPa	σ	C/MPa
XZ9 #-1	38.21	64.29	112.7	39.6	87.2	3 690	0.21	20.3
SY3 #-2	38.35	78.11	118.88	37.6	88.2	2 400	0.27	13.5
CC3 #-2	38.01	77.51	121.12	45.2	97.8	4 520	0.38	28.3
ZLS3 #-1	38.49	82.02	133.77	39.2	87.4	1 995	0.32	16.8
SJZ9 #-1	38.14	80.85	132.36	38	84.6	3 610	0.32	26.1
YC4 #-1	38.33	82.08	139.38	34	88.3	2 270	0.37	13.2
WTP15 #-2	39.04	81.48	163.8	43.2	168.6	2 200	0.3	14.2

注:E—杨氏模量;σ—泊松比;C—抗压强度。

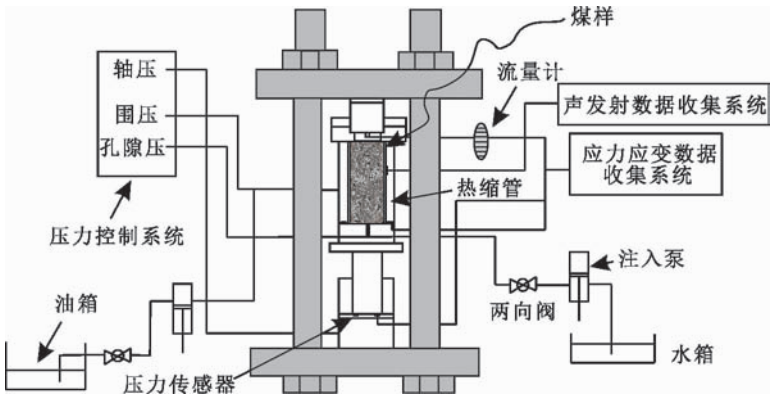


图 1 三轴应力下饱和水煤岩应力应变-声发射实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus of stress-strain and AE under triaxial stress

2 实验结果

2.1 煤样单轴下的应力-应变曲线特征

受载煤岩的变形及破裂可能表现为:煤体骨架压实,孔隙收缩,颗粒接触面积增大,或是形成裂隙组,裂隙的闭合压实、摩擦和滑移等等。在全部试验

煤样中,如图 2 所示的不同煤阶煤岩单轴压缩应力-应变曲线结果,其应力应变曲线的特点基本相近,都是经历初始压密、弹性、塑性和峰后破坏 4 个阶段:(1)OA 区段。该段曲线稍微向上弯曲,属于煤岩孔隙及微裂隙被压实结果。在轴向载荷的作用下,孔隙裂隙发生闭合。应变与煤级有一定的相关性,煤级越低,其 OA 段越长,即应变越大。(2)AB 区

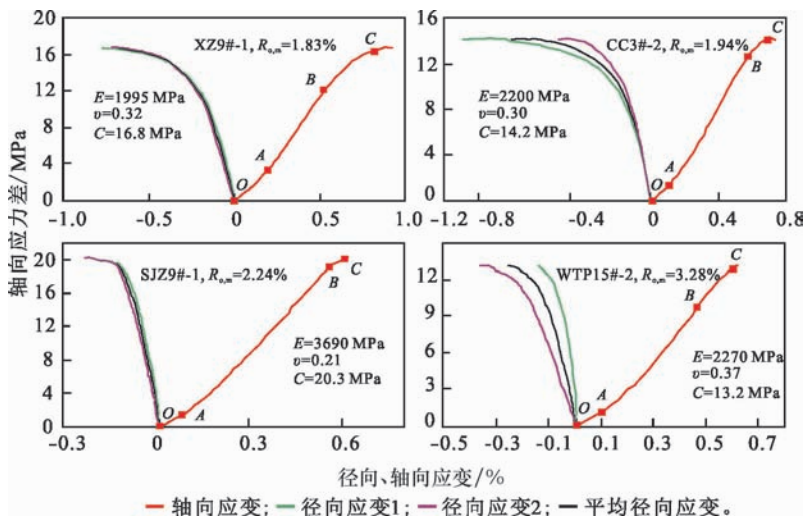


图 2 不同煤阶煤岩单轴压缩应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves under uniaxial stress for different rank coals

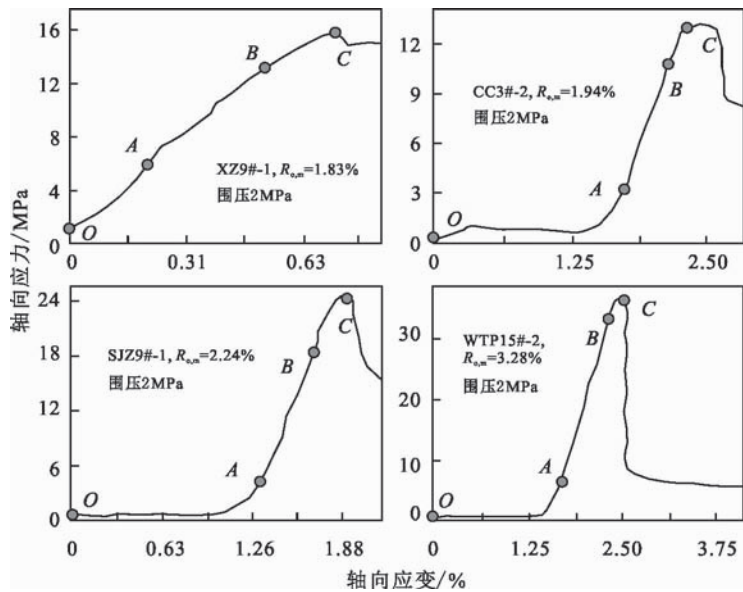


图 3 不同煤阶煤岩三轴压缩轴向应力-应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curves under triaxial stress for different rank coals

段。该段曲线近直线,属于弹性变形阶段。该段应力应变曲线是线性连续的,但前人的研究表明^[9],从微观上看,煤岩的变形及破裂是不连续的,是阵发性的,这说明煤岩内部是高度非均质性的。(3)BC 区段。B 点常位于峰值应力的三分之二处,B 点为屈服应力点,曲线斜率随着应力增加逐渐变为零,该段属于塑性强化段。在本阶段,微裂隙进一步扩展,煤体中大量的微裂纹进行汇合、贯通,形成大的裂隙,向宏观裂隙过渡,裂隙稳定发展^[6]。(4)C 点后段。从 C 点开始,曲线斜率为负值,为残余强度段。该段应力不会增加,但变形量会增加很快。

由于该段已形成宏观裂缝带,煤岩的受力骨架在总体上受到破坏,煤岩内部的潜在能量在裂隙四周基本耗尽。

2.2 煤样三轴下轴向应力-应变曲线特征

煤岩中存在大量的原生裂隙、孔洞等,施加围压会使得这些孔裂隙孔径不同程度地闭合压密。实验室条件下三轴加载煤岩的变形及破裂同样可能表现为煤岩骨架压实,孔裂隙收缩,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。三轴加载条件下的轴压加载应力应变曲线发现(图 3):围压等级为 2 MPa 时起始部分有一

小段上凸过程,随后进入弹性阶段,说明在后期施加轴压过程中煤样仍经历了较低程度的压实作用。对于不同煤级煤岩来说,围压对无烟煤的初始压实段作用明显,半无烟煤煤岩的初始应变变量反而有下降趋势,即OA段。这说明,围压能够使得中低煤阶疏松煤岩骨架更加致密,孔裂隙急剧减少,从而提高疏松煤岩的抗压性。随着煤级的增加,AB段的曲线斜率明显增大。这说明随着煤岩脆性的增加,轴压使得煤岩内部微裂隙更广泛的产生。进入BC段,即裂隙稳定扩展阶段。对应应力位于峰前90%~100%峰值应力,由于围压的存在,使得煤岩由弹性阶段向塑性阶段转化,裂隙在煤岩内部快速不稳定扩展。随后进入C点后段,即裂隙非稳定扩展阶段。小裂隙逐渐向大裂隙或宏观裂隙转变,但所需应力急剧下降。这说明煤岩的受力骨架已经受到破坏,裂隙四周的潜在能量已经耗散。

原始饱和水煤岩声波时差为: $t=l/v_{wm}$, l 为煤岩样品长度, v_{wm} 为声波在煤岩饱和水和骨架中的传播速度。三轴轴向压缩后为 $l'=l-\Delta l$, Δl 为压缩变化量,则声波时差为: $t'=l'/v'_{wm}$, v'_{wm} 为声波在压裂后煤岩饱和水及骨架中的传播速度。理论上,可以根据声波时差的数值来计算三轴轴向压裂后新生成的孔裂隙空间。通过三轴压裂前后的声波时差分析发现,所有煤岩在经历最大峰值压力后,声波时差都增大两倍或者两倍以上(表2),这说明煤岩破坏后的裂隙量明显增加。

2.3 煤样声发射应变-振铃计数率曲线特征

根据三轴加载过程轴向应力-声发射振铃计数率曲线特征的分析,煤岩破坏过程可以分为3种类型:(1)稳定上升破裂型。其三轴状态下的轴向应力应变曲线一般可分为压密阶段、线弹性变形阶段和非线性弹性变形阶段及破坏后阶段四部分。在压实阶段(OA段),声发射几乎不存在。声发射振铃计数率出现在线弹性变形阶段(AB段),随着应力增加,振铃计数率逐渐上升,在非线性变形阶段(BC段)达到最大值。该类型大致与早期单轴压缩破坏的第2类近似^[6]。在线弹性变形阶段声发射振铃计数逐步增加,在非线弹性变形阶段迅速达到最大值,一般具有两个或多个峰值,随后声发射强度开始逐步降低,在破坏后阶段振铃计数率出现一次相对较大的峰值,随后逐步降低(图4a₁,图4b₁)。该类型的煤样三轴轴向抗压强度较低(图3)。这种类型的典型代表是样品XZ9#-1和CC3#-2。(2)稳定下

降破裂型。同样,其三轴轴向应力应变曲线也可分为压密阶段、线弹性变形阶段和非线性弹性变形阶段及破坏后阶段四部分。声发射特征表现为压密阶段早期几乎没有声发射现象,后期可出现数值很低的声发射振铃计数率,在线弹性阶段早期声发射振铃计数率迅速上升,很快达到最高强度,随后开始下降,进入非线性破坏阶段时声发射振铃计数率逐渐下降,在达到峰值应力略有上升,随后逐渐降低(图4c₁)。煤岩声发射时间-振铃计数率曲线变化较复杂,通常具有两个或多个急增点,这些急增点通常被认为是Kaiser效应点^[10]。最后一个急增点通常对应着裂隙形成的起始点(图4c₁)。(3)崩裂型。三轴轴向应力应变曲线显示,该类型压实阶段(OA段)不明显,非线性变形阶段(BC段)也不明显。该类型的煤样在三轴状态下仍呈脆性破坏,且轴向抗压强度很高。在轴向压力低于15 MPa时,没有声发射现象。当压力小于极限承载力的70%时,声发射振铃计数率强度较低,高于该压力时声发射振铃计数率突然增高,出现峰值破坏前的一个高值点,接近破裂时突然又出现一个很高的声发射振铃计数率强度峰值,然后急速降低(图4d₁)。理论上,饱和水煤样的声发射振铃计数率是会明显少于干燥煤样的,同时会产生明显的声发射的时间滞后。前人研究^[11]表明,进入塑性阶段,含水煤样与干燥煤样声发射较弹性阶段明显增大,声发射计数率是弹性阶段的5~7倍。

2.4 煤样声发射应变-能量率曲线的类型特征

根据三轴加载过程轴向应力-声发射能量率曲线特征的分析发现,煤岩在三轴轴压加载初期经历了小段裂隙压实的过程,几乎检测不到声发射的存在。随后进入线性弹性阶段,煤岩整体性和均匀性经过压实作用得以提高,裂隙面之间的相互作用继续承载应力^[12-13],随着轴压的持续增加,裂隙会轻微的滑移,从而导致少量的声发射能量率出现。对于煤样XZ9#-1和CC3#-2来说,应力应变曲线进入线性弹性阶段时,能量率开始缓慢上升,下降,再上升的现象,表明煤岩内部结构开始重新调整,微裂隙在煤岩内部稳定扩展,声发射发生频率增加,但其能量普遍较低,偶有较高能量大裂隙形成。对于半无烟煤煤岩XZ9#-1来说, $t=750$ s左右时能量率开始小幅度增加,对应试件开始产生明显的扩容现象。当 $t=1500$ s时,能量率明显上升,对应应力应变曲线的屈服点附近,此时裂隙在煤岩初步成核(图4a₂)。

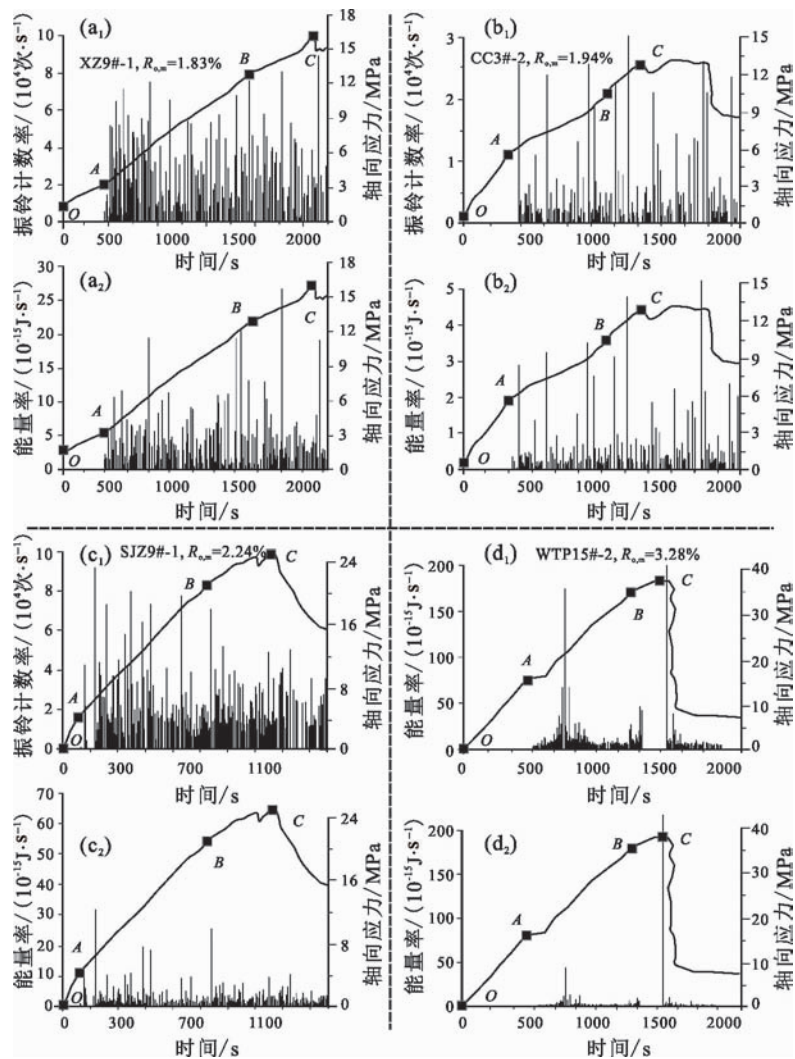


图 4 围压 2 MPa 下振铃计数率与能量率随时间演化(A、B、C 对应初始损伤点、屈服点和峰值点)
Fig. 4 Relationship between ring, energy counts and time at confining pressure of 2 MPa

这种情况同样发生于样品 CC3 # -2(图 4b₂)当 $t=150$ s 左右,能量率显著增加,能量率很快达到最高强度,随后开始下降,进入非线性破坏阶段时声发射能量率逐渐下降,在达到峰值应力略有上升,随后逐渐降低(图 4c₂)。这说明无烟煤煤岩 SJZ9 # -1 的主裂隙形成于弹性变形阶段,而后裂隙进一步扩展,在峰前 80%~95% 峰值应力,裂隙形成不明显,多以扩展的小裂隙为主。对于同样是无烟煤的煤岩 WTP15 # -2 来说,则与其差别较大,虽然其在线弹性阶段也形成了明显的裂隙主聚集区,但其裂隙级别远没有 SJZ9 # -2 那么大,而在非线性变形阶段,随着能量的积累其已形成的裂隙则急速不稳定扩展,标志破坏前兆(图 4d₂)。随着应力进一步增加,振铃率和能量率幅值整体上明显猛增,表明低能小裂隙向高能大裂隙转化^[14]。

3 煤岩破裂的控制因素

3.1 煤岩物质组成与声发射特征

声发射反映岩石内部结构变化,如裂纹的产生、扩展、贯通,软弱结构面间错动及内部结构破坏等,但不同物质的岩体声发射特征又有着显著的差别。前人研究表明,即使同一种材料在不同的取样方式下,所得到的声发射特征亦存在明显差别(如煤岩取样,平行或垂直于割理面^[6])。煤是一种沉积物质,初始的煤岩结构更多的是受控于煤岩的物质组成。本文通过对所有煤岩样品的组分分析(表 1),发现同煤阶的煤岩样品镜质组含量较高的煤岩抗压性普遍较好,而成分复杂,非均质性较强的煤岩抗压性较差。这可能是由于单一组分高的煤岩的均质性较

好,而较低的矿物含量使得水分对其影响较小。另外,矿物的存在会使得煤岩受力时的能量分布不均,从而更易导致微裂隙的产生。煤本身是由碳分子层相互链接起来的材料,在压力的作用下,这些碳分子层之间会存在明显的错动关系,从而改变其内在的物理结构,使得内部更趋于稳定^[15]。同时,煤岩演化所形成的微裂隙也会影响煤岩破裂的方式。分析结果显示,半无烟煤煤岩的微裂隙含量普遍较高,以C型和D型为主(表1)。大量的微裂隙会在压密阶段消失,但其由于煤岩的应力时,加载记忆效应,在重新加载应力这些微裂隙会再次发挥作用,如有利于裂隙位错及交叉等。

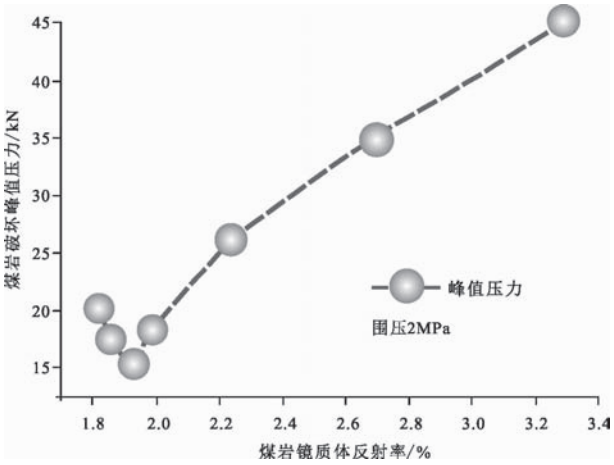


图5 煤岩破坏峰值压力与镜质体反射率关系曲线(围压2 MPa)
Fig. 5 Relationship between failure pressure and vitrinite reflectance of coals (confining pressure 2MPa)

煤岩在轴向加载过程中形成的裂隙是不断变化的,可以根据裂隙变化量来计算裂隙刚度系数(κ_n)。对于含裂隙煤岩体来说,有效杨氏模量可以定义为

$$\frac{1}{E_{\text{eff}}}=\frac{1}{E_0}+\frac{1}{\kappa_n s} \tag{1}$$

E_{eff} 为有效杨氏模量(GPa); E_0 为平均杨氏模量。

$$E_0=\frac{\partial \sigma_0}{\partial \epsilon_0} \tag{2}$$

即指图 6a 中,应力-应变曲线上近似直线部分的斜率。 s 为裂隙发育平均数,可以表述为: $s \sim \frac{L}{N}$,其中 L 为样品长度, N 为裂隙数,可以用图 6b 中的声发射次数来表述。

3.2 煤岩力学与声发射特征

煤岩力学性质(抗压强度,杨氏模量及泊松比

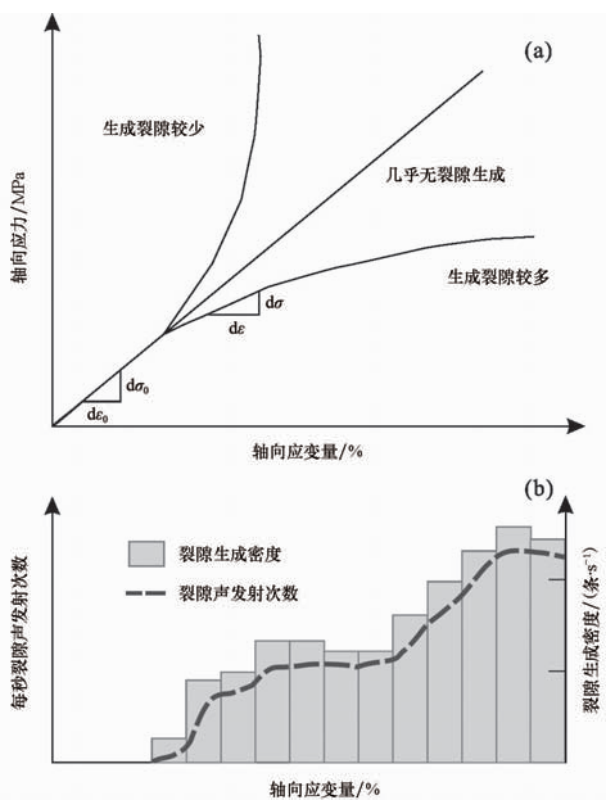


图6 轴向应力与声发射振铃数及应变量的关系图
Fig. 6 Relationship between axial stress, ring counts and axial strain

等)是影响声发射特征最直接的参数。对于不同煤岩来说,其岩石力学差异较大。裂隙越发育的煤岩,其受力作用后变形作用越明显。煤岩发生变形及破坏形态与它所承受的围压密切相关,其应力-应变曲线斜率随着围压的增加而明显陡升,随着轴向载荷的增加,表现为岩石的刚度和强度均随围压的增加而增大,这说明孔隙裂隙发育良好的煤岩在围压作用下,孔隙裂隙被压密闭合,从而使煤岩刚度和强度增大。煤岩的杨氏模量与围压之间呈非线性关系^[16]:

$$E=a_0+a_1\sigma_2+a_2\sigma_2^2 \tag{3}$$

式中: E 为杨氏模量(GPa); σ_2 为围压(MPa); a_0,a_1 和 a_2 为岩石刚度岩性影响系数。随着围压(σ_2)的增大,煤岩的轴向抗压强度也增大,但其增大的速率,受煤岩岩性所控制,其关系式可以表达为

$$\sigma_1=\sigma_c+k\sigma_2 \tag{4}$$

式中: σ_1 为轴向抗压强度(MPa); σ_2 为围压(MPa); σ_c 为煤岩单轴抗压强度(MPa); k 为岩石强度岩性影响系数,煤岩一般为2.07。围压使得煤岩中的原生孔隙及裂隙闭合,从而使得煤岩的杨氏模量和抗压强度都有明显的增加。因而,理论上来说围压下

的煤岩在压密阶段和弹性阶段前期的声发射的振铃次数和能量率都会有所减少,而弹性阶段中后期及塑性阶段则会有明显的振铃及能量率的增加。

3.3 煤级与声发射特征

不同煤岩具有不同的声发射特征,其所反映的是煤岩内部结构的差异性。不同煤级的煤岩有着不同的岩石力学性质,其同时也受到煤岩的岩石物性影响。半无烟煤煤岩的孔隙度普遍较大,因而也就造成了其应变率在压密阶段较无烟煤更大(图3)。通过对煤岩声波时差的分析发现,煤级越高,煤岩脆性越大,在加载过程中产生的裂隙量就越大,因而其含水煤岩的声波时差就越大(表2)。根据煤岩镜质体反射率与煤岩抗压强度的分析,发现两者存在“V”字型关系(图5),在中低煤阶阶段,煤岩随着演化程度的增高,抗压程度逐渐减小。当达到1.94%时,这种关系开始转变为逐渐上升的趋势,这说明中低煤阶煤岩的内部结构的非均质性要明显强于高煤级煤岩,抗压性普遍要小于无烟煤煤岩,但不同煤阶所控制的煤岩物质组成^[17]及物性差异仍是差异的最主要原因。

4 结论

根据煤岩物质组成分析,声波时差分析,单轴饱和和水压缩实验分析及饱和水三轴压缩实验,分析发现:煤岩的三轴轴向压缩产生的声发射特征能够完整反映煤岩压缩变形和裂隙生成、演化过程。饱和含水煤岩在三轴作用下的轴向应力-应变曲线可以分为4个阶段:压密阶段、线性变形阶段、裂隙稳定扩展阶段和非稳定扩展阶段。据声发射及应力-应变曲线特征,将7组煤岩样品三轴下压裂分为稳定上升破裂型、稳定下降破裂型和迸裂型3种类型。基于上述实验分析,总结出:

(1)由于煤是一种天然多孔、微裂隙、割理的沉积岩,其结构的特殊性使得煤岩在围压作用下,孔隙被压密,强度随围压的增高而增加,镜质体反射率小于2.0%的煤岩样品应变率减小明显。

(2)振铃率和能量率可以应用于预测最大屈服应力点:在破坏前兆来临时,振铃率和能量率的频率和幅度均有很大提高,在近屈服应力90%左右时,幅度基本维持不变;镜质体反射率大于2.0%的煤岩样品在破坏前兆来临时,会产生明显的某一突变,

频率或幅值上有跳跃或突增。

(3)煤岩的声发射特征的方式和差异性与煤岩的物质组成及煤岩演化程度有很大的相关性。

参考文献

- [1] Blake W. Microseismic Applications for Mining: A Practical Guide[R]. Washington: US Bureau of Mines, 1982.
- [2] 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.
- [3] 曹庆林,余克圣. 采场冒顶灾害的声发射预报技术[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(2): 7-11.
- [4] 李庶林,毛建华,桑玉发. 基于岩体声发射参数的竖井围岩稳定性分析[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(增刊2): 753-757.
- [5] 刘保县,李东凯,赵宝云. 煤岩卸荷变形损伤及声发射特性[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 57-61.
- [6] 唐书恒,颜志丰,朱宝存,等. 饱和含水煤岩单轴压缩条件下的声发射特征[J]. 煤炭学报, 2010, 34(9): 37-41.
- [7] 武晋文,赵阳升,万志军,等. 高温均匀压力花岗岩热破裂声发射特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1111-1117.
- [8] Lavrov V. The Kaiser effect in rocks: Principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 151-171.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 秦虎,黄滚,王维忠. 不同含水率煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1115-1120.
- [12] 苏承东,翟新献,李永明,等. 煤样三轴压缩下变形和强度的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 2963-2968.
- [13] 艾婷,张茹,刘建锋,等. 三轴压缩煤岩破裂过程中声发射时空演化规律[J]. 煤炭学报, 2012, 36(12): 2048-2057.
- [14] Tang S F, Tong M M, Hu J L, et al. Characteristics of acoustic emission signals in damp cracking coal rocks[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(1): 143-147.
- [15] 据宜文,林红,李小诗,等. 煤岩构造变形与动力变质作用[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 158-166.
- [16] 孟召平,彭苏萍,傅继彤. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 102-106.
- [17] 曹代勇,李小明,邓觉梅. 煤化作用与构造热事件的耦合效应研究: 盆地动力学过程的地质记录[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 52-60.