

不同瓦斯压力下煤岩力学性质及声发射特性研究

高保彬^{1,2,3}, 吕蓬勃^{1,2,3}, 郭 放^{1,2,3}

(1. 煤炭安全生产河南省协同创新中心,河南 焦作 454003;2. 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地,河南 焦作 454003;3. 河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454003)

摘要:为研究煤岩瓦斯复合动力灾害发生的机理,从细观角度对三交河煤矿、屯留煤矿、平煤十矿煤样原生孔隙和裂隙等参数进行分析,选取平煤十矿煤样作为力学试验研究对象,采用自主研发的含瓦斯煤岩受载变形破坏试验装置,利用DS-5型全信息声发射信号分析仪,分析其在不同瓦斯压力条件下力学性质和声发射特征,并对声发射的计数、累计计数、能量、累计能量等在不同瓦斯压力下的演化规律进行了对比分析。结果表明:随着瓦斯压力的增大(0~2 MPa),煤样的峰值强度和弹性模量呈降低趋势,泊松比呈升高趋势,其抗压强度下降22.61%,弹性模量下降23.97%,泊松比增加33.67%;不同瓦斯压力下煤样受载破坏过程中的声发射都经历了平静期、活跃期、提速运动期、残余运动期4个阶段,且煤样的声发射累计计数和累计能量随着瓦斯压力的增加而降低,其声发射累计计数减小了32%,累计能量降低了25.32%。研究成果有利于发现煤岩体破坏的细观机理,为找到煤岩体破坏失稳预测预报方法和指标提供了依据。

关键词:含瓦斯煤;动力灾害;单轴压缩;声发射

中图分类号:TD712 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)01-0112-08

Study on mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal at different gas pressure

GAO Baobin^{1,2,3}, LYU Pengbo^{1,2,3}, GUO Fang^{1,2,3}

(1. Coal Production Safety Collaboration Innovation Center in Henan Province, Jiaozuo 454003, China; 2. Cultivation Base of Province and Ministry Joint Established State Key Lab-Henan Provincial Key Lab of Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to study the mechanism of gassy coal-rock complex dynamic disaster, based on the analysis of primary porosity and fractures of the coal samples of the Sanjiaohe colliery, Tunliu colliery and the 10th Mine of Pingdingshan coal group, this paper selected the coal samples of Pingdingshan as subject. Then, by using the self-developed device which contained the gas and coal-rock samples in deformation and failure under load and DS-5 full information acoustic emission signal analyzer, the experiment analyzed the mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal-rock under different gas pressure. It also analysed the evolution of acoustic emission count, cumulative count, energy, and accumulated energy under different gas pressure. The result shows that: with the increase of gas pressure (0~2 MPa), the peak intensity and elastic modulus of coal samples decrease, but the Poisson's ratio increases. The compressive strength decreases by 22.61%, the elastic modulus decreases by 23.97% and Poisson's ratio increases by 33.67%. The acoustic emission of coal samples under different gas pressure have experienced four stages: stationary period, active period, speed-up movement period and residual motion period. The coal samples' acoustic emission cumulative count and accumulated energy decreases with increasing gas pressure, and the acoustic emission cumulative count decreases by 32% and the cumulative energy declines by 25.32%. The research results are helpful to find out the meso-mechanism of coal and provide the basis for predicting the failure of coal and rock mass.

Key words: gassy coal; dynamic disaster; uniaxial compression; acoustic emission

收稿日期:2017-11-24;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.01.016

基金项目:国家自然科学基金委员会-河南省人民政府人才培养联合基金资助项目(U1304502);教育部博士点项目(新教师类)基金资助项目(20134116120001)

作者简介:高保彬(1977—),男,河南民权人,副教授,博士。E-mail:gaobaobin@163.com

引用格式:高保彬,吕蓬勃,郭 放. 不同瓦斯压力下煤岩力学性质及声发射特性研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(1):112-119,149.

GAO Baobin, LYU Pengbo, GUO Fang. Study on mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal at different gas pressure [J].

0 引言

近些年,随着我国煤炭开采深度的逐渐增加,冲击地压、煤与瓦斯突出等复合动力灾害发生的频度和强度日益增加。煤作为复杂多孔介质,其孔隙裂隙结构及赋存的瓦斯对煤的物理力学性质有重要影响。因此,利用细观试验研究煤体内部的结构特征,对其进行不同瓦斯压力下的力学试验,并通过声发射监测技术对煤体破坏过程中的声发射信息进行监控,可为研究煤岩瓦斯复合动力灾害发生机理,探究其破坏失稳的预测、预报方法和指标提供依据。

为了研究含瓦斯煤岩失稳破裂的发生机理,预防动力灾害事故的发生,国内外学者对此做了大量的研究。文献[1-4]利用自行研制的含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流试验装置,进行不同加载条件下含瓦斯煤力学特性的试验研究。结果表明,不同加载条件下含瓦斯煤的力学性质存在较大差异,含瓦斯煤的弹性模量和承载强度随加载条件的变化呈现一定的规律。赵洪宝等^[5-7]在单轴压缩条件下利用 MTS815 岩石力学试验系统对含瓦斯煤岩的力学特性进行了研究,研究结果认为,瓦斯参与后煤岩试件破坏的脆性增强,强度降低。王家臣等^[8]以具有突出倾向的原煤粉制备的型煤试件为研究对象,研究了瓦斯对突出煤体的力学性质的影响。研究结果认为,瓦斯对煤样的三轴强度、变形模量及峰值应变等性质有较大影响。吕有厂等^[9]利用自主研制的含瓦斯煤岩热流固耦合三轴伺服渗流装置对含瓦斯煤岩进行了三轴卸围压试验。李晓泉^[10]对含瓦斯煤力学特性及煤与瓦斯延期突出机理进行了研究。黄启翔^[11]对卸围压条件下含瓦斯煤岩的力学特性进行了研究。李宏艳等^[12]采用声发射探测手段对不同冲击倾向性煤体失稳破坏进行试验研究,发现不同冲击倾向煤体失稳破坏过程中振铃计数、AE 能量、频谱及 b 值变化存在差异;宋真龙等^[13]从能量角度研究了不同瓦斯压力下煤样的冲击倾向性,指出瓦斯的参与使得煤样的冲击破坏性降低;王振等^[14]、李铁等^[15]都对瓦斯对煤岩体的冲击特性的影响进行了研究,研究表明在深部煤炭开采过程中冲击地压的发生与瓦斯有着密切的联系。MAJESSKA 等^[16]通过对煤样在瓦斯和二氧化碳吸附解吸过程中的声发射及应变特征分析,认为在瓦斯和二氧化碳吸附解吸过程中其声发射与应变特征具有差异性。从以上研究成果发现,过去学者对含

瓦斯煤的力学性质的研究多是在三轴含瓦斯条件下,而单轴含瓦斯条件下的煤岩物理力学性质的研究很少,这与国标规定的单轴测定煤样冲击倾向性指标的方法不符。基于此,笔者从细观结构对三交河煤矿、屯留煤矿、平煤十矿煤样原生孔隙和裂隙进行了分析,并结合研发的含瓦斯煤岩受载变形破坏试验装置,研究了平煤十矿煤样在不同瓦斯压力下经单轴压缩后的煤岩力学性质,此外,利用声发射仪对其受载破坏过程中的声发射信息进行同步监测,从中提取声发射参量,根据所得应力-应变曲线及声发射特性,找到含瓦斯煤失稳破坏的声发射前兆信息,以期对煤岩瓦斯复合动力灾害进行监测、预测和防控。

1 煤样的低场核磁共振测试及分析

煤样的孔裂隙结构不仅决定着瓦斯的吸附、解吸、扩散等特性,而且对煤的力学性质有一定的影响,是判定煤层是否具有突出危险性的重要依据之一。采用 MesoMR23-060H-I 型核磁共振仪对煤样的孔裂隙结构进行定量分析,该设备主要由电磁系统、电子控制系统和分析软件等部分组成,如图 1 所示。



图 1 低场核磁共振设备

Fig.1 Nuclear magnetic resonance (NMR)

试验煤样采用屯留煤矿、三交河煤矿以及平煤十矿变质程度不同的煤块。煤样加工采用水平钻法将煤块制作成 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形。在进行核磁共振测试之前,需要对各矿煤样进行饱水处理以及仪器初始参数设置,试验结果如图 2 所示,其中区 I 为微小孔,区 II 为中大孔,区 III 为裂隙。

1) 平煤十矿煤样的核磁共振结果分析。从图 2a 可以看出,该组煤样的 T_2 图谱为双峰结构,非零谱段在 3 个区域都有出现,这说明微小孔、中大孔和裂隙在煤样中都有发育,但主峰主要存在于区域 I,说明微小孔比较发育,而在区域 III 则逐渐降为零,说明该组煤样裂隙较少,不发育。此外,3 个区域之间

没有零点,连通性比较好,说明孔隙裂隙之间有部分沟通,利于煤体中的流体储存和运移。而且 T_2 谱曲线对应的孔隙度分量值较大,说明该组煤样的孔隙度较大,实测该组煤样的平均核磁共振孔隙度达到 14.274%。

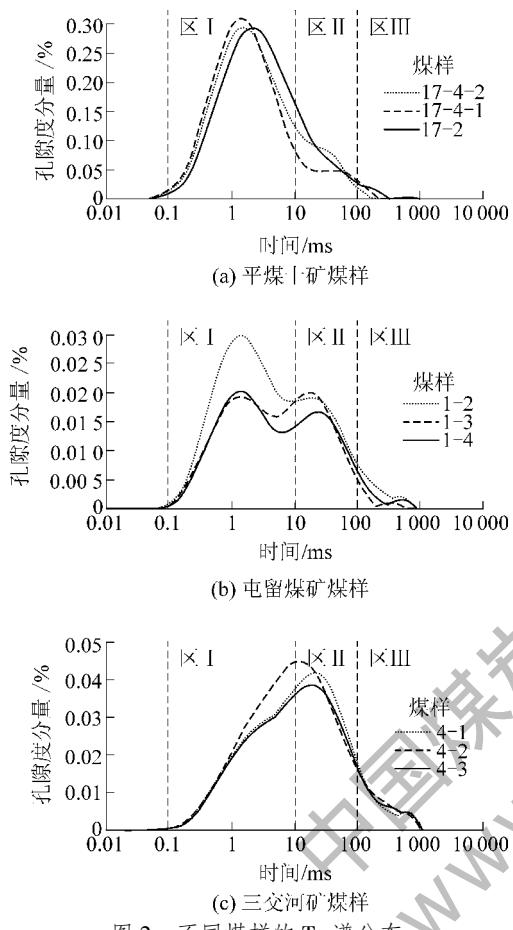


图 2 不同煤样的 T_2 谱分布

Fig.2 The T_2 distribution picture of different coal samples

2) 屯留煤矿煤样的核磁共振结果分析。从图 2b 可以看出,该组煤样测得的 T_2 图谱为典型的三峰结构,前峰和中峰的峰值较为明显,表明在煤样中微小孔和中大孔较发育,这 2 个峰之间存在较好的连通性,说明微小孔和中大孔 2 类孔隙之间发育有连贯通道,而裂隙峰峰面积远小于前峰和中峰,说明该组煤样中原生裂隙较少,裂隙不发育。区 II 和区 III 之间不连通,说明中大孔和裂隙之间不连通,煤样整体渗透率不高。总体来看 T_2 谱曲线对应的孔隙度分量都不高,说明该组煤样的孔隙度不高,实测平均核磁共振孔隙度为 1.551%。

3) 三交河矿煤样的核磁共振结果分析。从图 2c 可以看出,该组煤的 T_2 谱属于典型的双峰结构,主峰的峰值处于区间 II,说明该组煤样的中大孔最

发育,且区间 I、区间 II 和区间 III 之间连续性好,反映了煤样中孔隙和裂隙分布相差较小,连通性好,说明本组煤样的渗透率较高,有利于煤层瓦斯的富集和运移。但是由于 T_2 谱中曲线对应的纵坐标孔隙度分量不高,所以本组煤样的孔隙度不高,实测平均核磁共振孔隙度为 2.7%。

4) 对比分析。通过分析各煤样的核磁共振结果,可以得到 3 组煤样的孔隙度和平均孔隙度,见表 1。由表 1 可知,屯留煤矿煤样的核磁共振孔隙度为 1.551%,三交河煤矿煤样的核磁共振孔隙度为 2.7%,平煤十矿煤样的核磁共振孔隙度为 14.274%。与平煤十矿煤样相比,三交河煤矿煤样的平均孔隙度减小了 11.574%,降幅达 81.08%;而与三交河煤矿煤样相比,屯留煤矿煤样的平均孔隙度减小了 1.149%,降幅为 42.5%。由此可以看出,随着煤样变质程度的增高,煤体变得越来越致密,其孔隙度逐渐减小。低变质程度的烟煤与中变质程度的焦煤之间变化很大,而中变质程度的焦煤与中高变质程度的贫煤之间变化逐渐变小。

表 1 三组煤样的孔隙度

Table 1 Porosity of three types of coal samples

煤矿	编号	孔隙度/%	平均孔隙度/%	标准差
屯留煤矿	1-2	1.869		
	1-3	1.423	1.551	0.277
	1-4	1.360		
三交河煤矿	4-1	2.584		
	4-2	2.771	2.700	0.101
	4-3	2.745		
平煤十矿	17-2	14.656		
	17-4-1	13.769	14.274	0.456
	17-4-2	14.397		

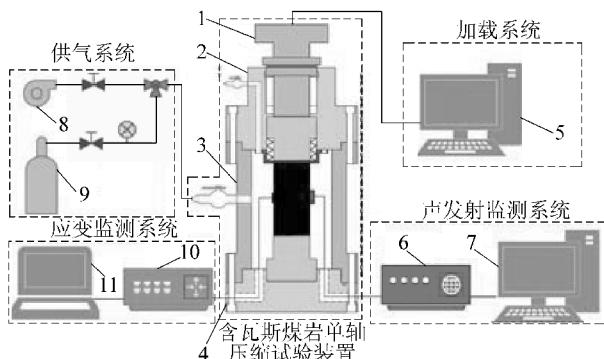
综合以上低场核磁共振分析结果发现:平煤十矿的煤样孔隙较多、孔径较大,孔隙裂隙连通性比较好,有利于瓦斯流动和赋存。结合平煤十矿瓦斯等級鉴定结果及《煤矿安全规程》第 133 条,判定平煤十矿所采 戊_{9-10} 、 戊_{10} 、 己_{15} 、 己_{15-16} 、 己_{17} 、 丁_{5-6} 煤层均为突出煤层。因此,为了更好探求不同瓦斯压力对煤岩力学性质的影响,本次试验选取平煤十矿煤样作为试验对象。

2 煤岩单轴压缩力学试验设备及方案

2.1 试验设备

为了研究不同瓦斯压力下煤岩单轴压缩力学性

质及声发射特性,笔者自主研发了单轴压缩条件下含瓦斯煤岩受载变形破坏试验装置,并结合 RMT-150C 型岩石力学试验构成了含瓦斯煤单轴压缩试验系统,该系统主要包括伺服控制加载系统、声发射信号监测系统、含瓦斯煤岩单轴压缩试验装置、应力应变监测及记录系统、超声综合监测系统、真空泵及供气系统等组成,如图 3 所示,煤岩单轴压缩力学试验设备如图 4 所示。



1—上压头;2—顶盖;3—密封仓;4—底座;5—试验机控制软件;
6—声发射监测仪;7—声发射软件;8—抽真空泵;9—气罐;
10—电阻应变仪;11—应变监测软件

图 3 含瓦斯煤单轴压缩试验系统

Fig.3 Schematic diagram of experiment system of gassy coal under uniaxial compression



图 4 煤岩单轴压缩力学试验设备

Fig.4 Device of uniaxial compression with coal and rock

2.2 试验方案

2.2.1 煤样制备

依据 GB/T 23561.7—2009《煤和岩石物理力学性质测定方法 第 7 部分:单轴抗压强度测定及软化系数计算方法》规定,利用钻孔取样机从煤块上钻取一定尺寸的标准煤样:直径为 50 mm、高度为 100 mm,然后利用端面磨石机将钻取好的煤心加工成端面平行度偏差<0.05 mm,上下高度偏差<0.2 mm 的端面平整、两端平行的标准煤样。煤岩作为非均质物质,离散性比较大,为了减少误差,达到试验的目的,在单轴压缩试验中每组煤样至少加工 3 个。部

分煤样如图 5 所示。

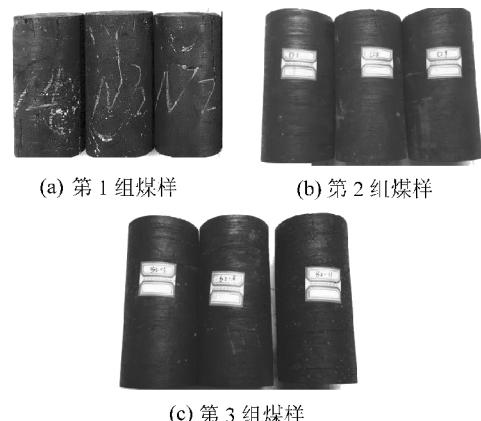


图 5 部分煤样实物

Fig.5 Pictures of part of the coal samples

2.2.2 试验方法

1) 将取自平煤十矿标准煤样分成 3 组,每组 3 个煤样,并进行编号并记录各煤样的原始物理参数,如高度、直径、质量等。

2) 第 1 组煤样编号为 D1、D2、D3,该组煤进行常规单轴压缩试验。

3) 第 2 组煤样编号为 D4、D5、D6,该组煤进行瓦斯压力为 1 MPa 条件下的单轴压缩试验。在进行单轴压缩之前,将煤样置于自主研制的含瓦斯煤样单轴压缩试验装置内部,并在煤样表面贴好应变片,把密封好的试验装置放置于 RMT-150C 岩石力学试验机上,将装置底座设置的导线连接到相应的信号监测仪器上,然后用导气管连接瓦斯气罐和装置的进气阀,对装置进行充气,直至装置内部瓦斯压力达到 1 MPa,使煤样处于 1 MPa 瓦斯压力环境下直至吸附饱和,然后进行含瓦斯情况下的单轴压缩试验。试验过后打开排气阀,排空瓦斯,记录试验数据。

4) 第 3 组煤样编号为 D7、D8、D9,该组煤进行瓦斯压力为 2 MPa 条件下的单轴压缩试验和声发射试验,试验过程同第 2 组煤样。

3 煤样在不同瓦斯压力下的力学性质及声发射特性分析

3.1 不同瓦斯压力下煤样的力学特性

在对煤样进行不同瓦斯压力下的基本岩石力学参数测定的试验过程中,采取位移和力控制加载方式,加载速率为 0.002 mm/s 或 0.05 kN/s,测试结果见表 2 和图 6。

表2 煤样基本参数测定结果
Table 2 Result of the basic parameters of coal samples

取样地点	编号	瓦斯压力/MPa	高度/mm	直径/mm	密度/(g·cm ⁻³)	强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
平煤十矿已 ₁₅ 煤	D1	0	99.30	49.55	1.25	30.661	2.109	0.287
	D2	0	99.10	49.60	1.26	29.832	2.081	0.302
	D3	0	99.20	49.75	1.25	29.556	1.992	0.292
	D4	1	100.05	49.60	1.25	25.323	1.708	0.315
	D5	1	99.30	49.65	1.26	25.023	1.671	0.321
	D6	1	99.55	49.70	1.25	24.540	1.866	0.332
	D7	2	99.80	49.55	1.25	20.866	1.611	0.391
	D8	2	100.00	49.80	1.24	20.092	1.626	0.401
	D9	2	99.50	49.55	1.26	19.744	1.470	0.386

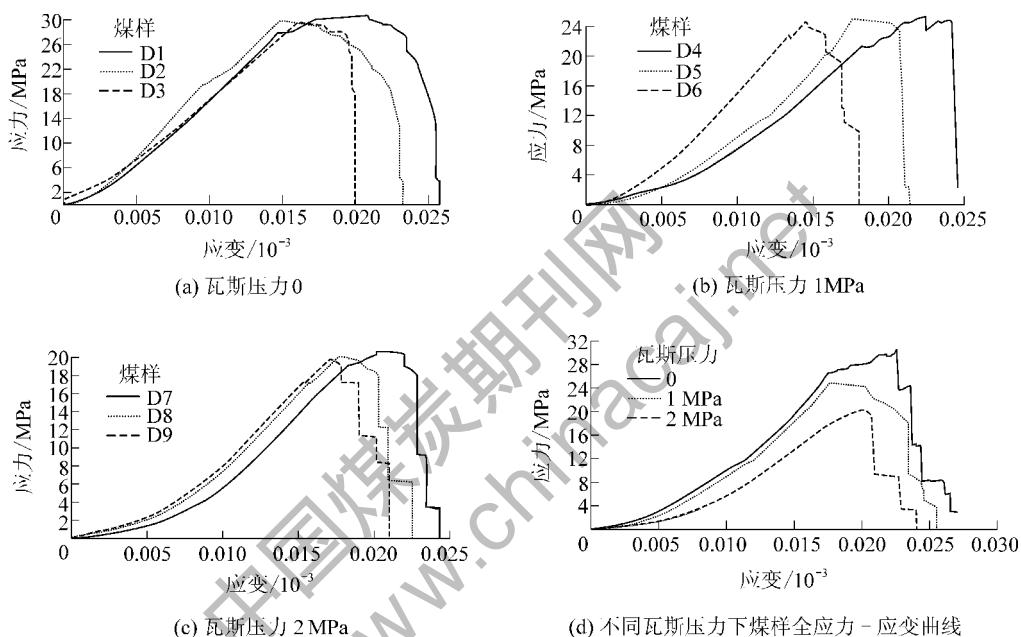


图6 单轴压缩下煤样的应力-应变曲线

Fig.6 Curves of the stress-strain of the coal samples under uniaxial compression

由表2和图6可知,随着瓦斯压力的增大,煤样在单轴压缩过程中具有比较明显的差异性和规律性。在瓦斯压力为0的条件下,平煤十矿已₁₅煤的平均抗拉强度为30.02 MPa,平均弹性模量最大为2.061 GPa,泊松比为0.294,整体呈现出脆性破坏的性质;当瓦斯压力为1 MPa时,煤样的平均抗压强度为24.962 MPa,平均弹性模量为1.749 GPa,泊松比为0.327,相比于不含瓦斯的煤样,抗压强度下降了24%,弹性模量降低了12.86%,泊松比增加11.22%;当瓦斯压力为2 MPa时,煤样的平均强度为20.234 MPa,平均弹性模量为1.569 GPa,泊松比为0.393,与1 MPa压力下的煤样强度相比,抗压强度下降了17.84%,弹性模量降低了15.19%,泊松比增加20.18%,相比无瓦斯压力下

的煤样强度下降了37.57%,弹性模量降低了26.1%,泊松比增加33.67%,强度、弹性模量降低比较明显(图7)。总体来看,随着瓦斯压力的增加,吸附饱和状态下的煤样应力-应变曲线的斜率出现持续减小的趋势。此外,煤样的峰值强度、弹性模量也随瓦斯压力的升高而降低,但泊松比出现了升高的趋势。由此可见瓦斯压力和煤岩的力学性质之间存在较好的规律关系。

瓦斯对煤的作用主要体现在2个方面:一方面,随着瓦斯压力的增大,含有一定动能的瓦斯气体通过渗流作用不断地进入煤样内部的孔隙裂隙中,通过吸附作用附着在煤体颗粒的表面,降低了煤基质的表面能和煤基质之间的联结力,使得煤体颗粒间的间距变大,在宏观上,降低了煤体抵抗变形能力和

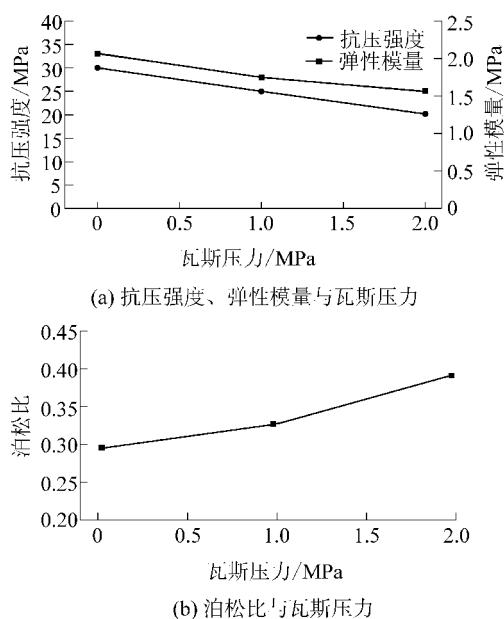
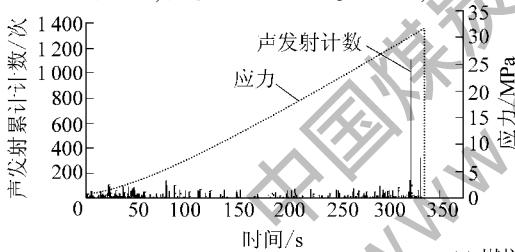


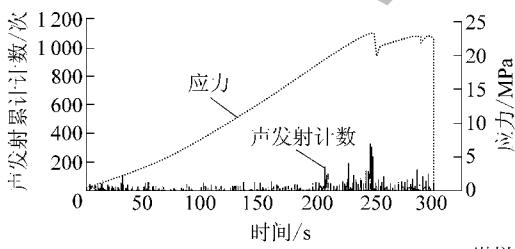
图 7 不同瓦斯压力下煤样的力学参数

Fig.7 Mechanical parameters of coal samples under different gas pressure

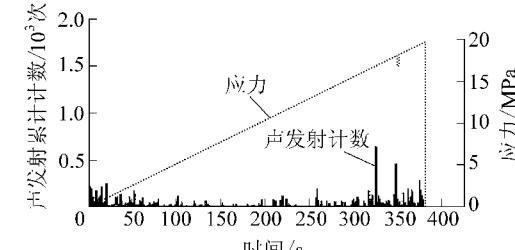
破坏能力;另一方面,煤体内部游离态的瓦斯气体在孔裂隙之间运移,会扩充煤体体积,同时也会进入到煤颗粒内部的孔隙中,促使颗粒膨胀。因此,在游离



(a) 煤样 D3(瓦斯压力 0)



(b) 煤样 D6(瓦斯压力 1 MPa)



(c) 煤样 D9(瓦斯压力 2 MPa)

图 8 不同瓦斯压力下煤样声发射计数、累计计数与时间的关系

Fig.8 Relationship curves between AE counts, cumulative counts and time of the coal samples under different gas pressure

态和吸附态瓦斯的共同作用下,煤样会发生膨胀变形、裂纹扩张等微观损伤,造成含瓦斯煤强度降低,煤质相对变软的情况。

3.2 不同瓦斯压力下煤样破裂过程中声发射参数演化规律

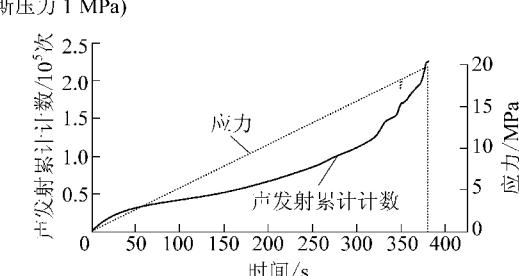
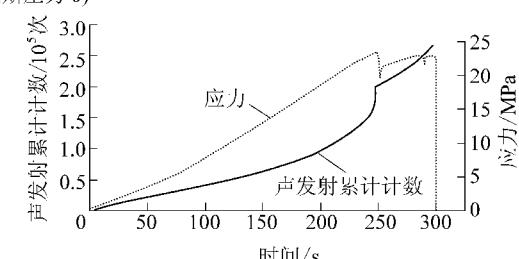
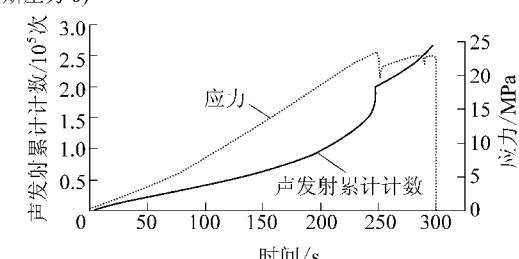
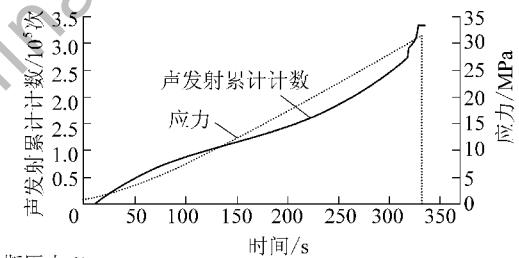
在进行含瓦斯煤的力学试验过程中,通过声发射仪对含瓦斯煤受载破坏过程中的声发射特性进行了同步监控。选取不同瓦斯压力下的3个煤样进行对比分析,研究瓦斯压力对煤样破裂过程中的声发射特性的影响。

煤样D3、D6、D9在不同瓦斯压力下受载破坏过程中的声发射计数与累计计数、能量与累计能量的统计见表3和图8、图9。

表 3 声发射参数特征

Table 3 Characteristics of AE parameters

煤样	声发射计数峰值/次	累计计数/次	声发射能量峰值	累计能量
D3	7 997	333 059.1	20 565.16	519 161.4
D6	7 134	267 663.0	19 832.6	448 125.2
D9	4 556	226 467.5	17 085.0	387 667.7



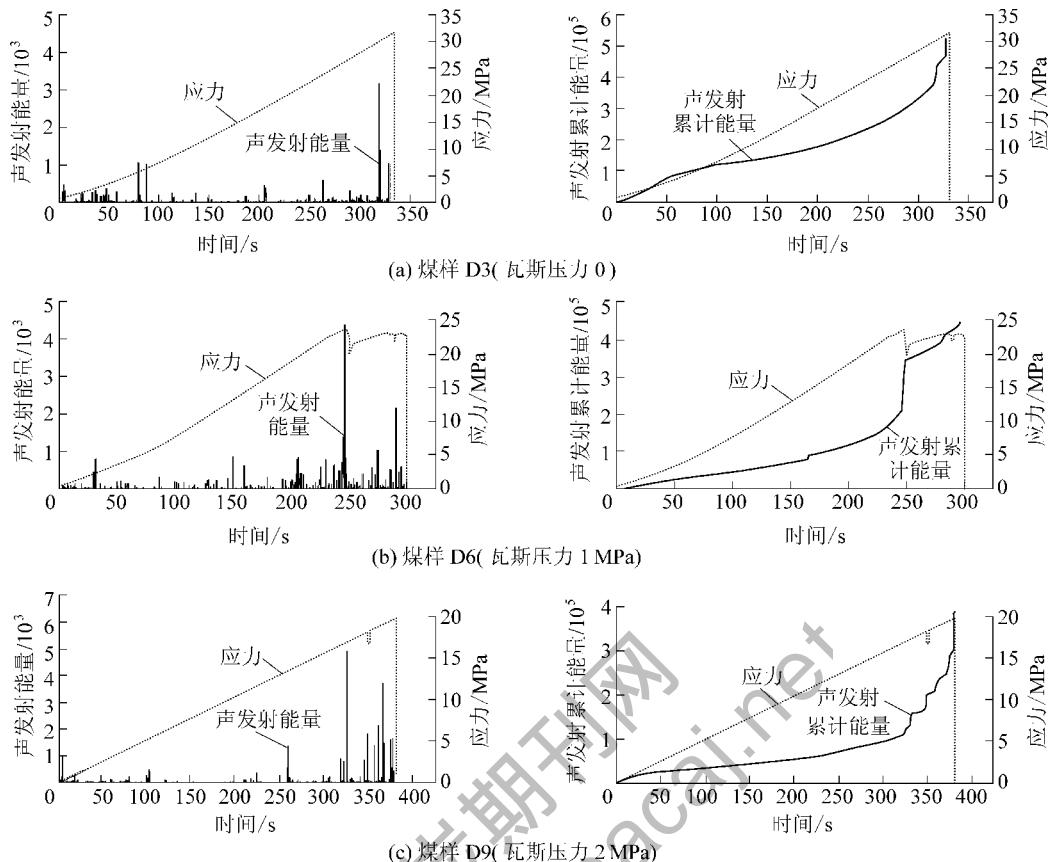


图9 不同瓦斯压力下煤样声发射能量、累计能量与时间的关系

Fig.9 Relationship curves between AE energy, cumulative energy and time of the coal samples under different gas pressure

通过图8和9,根据煤样的应力-应变曲线和声发射参数随时间变化的规律,可以将煤样受载破坏过程中的声发射特性划分为4个时期。

1)平静期。该时期经历了从开始加载的初始压密阶段到弹性阶段的全过程,声发射信号源自煤体原生裂隙受载后的压缩、闭合和滑移,在弹性变形阶段由于骨架的弹性变形吸收应变能,没有明显的损伤出现,所以只有少量的声发射计数,能量也不高,累计能量曲线在此阶段较为平缓。

2)活跃期。随着荷载的不断增加,煤体开始出现损伤,微裂隙开始大量发育和扩展,尤其在塑性变形阶段出现不可逆的塑性变形。从曲线中可以看出,在此阶段声发射信号数量将会显著增加,声发射累计计数和累计能量曲线的斜率变大。

3)提速运动期。随着微裂纹的不断扩展、贯通,煤体将出现宏观上的主裂纹,发生失稳破坏,此阶段由于断裂导致积聚的应变能大量释放,声发射计数、能量都会出现急剧的增加。该时期从煤体出现宏观上的主裂纹开始到发生失稳破坏断裂为止。

4)残余运动期。煤体发生失稳破坏一般分为

脆性断裂和延性变形,发生脆性断裂后煤体失去承载能力,声发射信号逐渐降为零;延性变形进入到残余应力阶段后仍有一定的承载能力,断裂块体之间存在相对移动,这时仍能产生少量的声发射信号,声发射计数和能量继续增加,但增加速率降低。

通过对表3和图8、图9中不同瓦斯压力下煤样失稳破坏过程中声发射参数的变化情况进行对比分析,可以看出:含瓦斯煤的声发射特性在不同瓦斯压力下具有一定的相似性和差异性。相似性表现在平静期较为一致,增长比较平缓,没有明显的密集区域,在提速运动期声发射活动开始密集,声发射累计计数出现激增,且声发射峰值都出现在应力峰值处,具有很好的相关性。差异性表现在随着瓦斯压力的增加,含瓦斯煤的声发射特性受到了一定的影响,声发射累计计数方面:瓦斯压力1 MPa下煤样的声发射累计计数比瓦斯压力0条件下减少了65 396.1次,降幅达19.63%,而瓦斯压力2 MPa下的累计计数比1 MPa下也减少了41 195.5次,降幅为15.39%,和瓦斯压力0条件下相比减小了10 6591.6次,降幅为32%,减小幅度特别明显。同样,累计能量方面:

瓦斯压力 1 MPa 下煤样的声发射累计能量比瓦斯压力 0 下煤样的声发射累计能量降低了 71 006.2, 降幅为 13.68%, 瓦斯压力 2 MPa 下煤样的累计能量比 1 MPa 下降低了 60 457.5, 比瓦斯压力 0 时降低了 131 463.7, 降幅分别为 13.49% 和 25.32%。

由此可见, 瓦斯对煤体的力学性质有一定的弱化作用, 降低了煤体的峰值强度, 也降低了变形破坏的激烈程度; 另一方面, 随着瓦斯压力的增大, 促进了煤体内部微裂纹的扩展, 使得煤体存在初始损伤, 所以完成破坏过程所需要的力变小, 降低了损伤扩展的难度, 因此导致含瓦斯煤的声发射计数和能量减小。

4 结 论

1) 搭载 RMT-150C 试验机的自行研发装置在 2 MPa 气体压力下仍能保证良好的气密性, 可以实现单轴和三轴加载方式下含瓦斯煤体受载变形破坏过程的力学和声发射特性测量和研究。

2) 通过低场核磁共振测试发现: 具有突出危险性的平煤十矿的煤样具有孔隙多、孔径大、孔隙裂隙连通性好的特点, 有利于瓦斯流动和赋存, 因此力学性质和声发射试验选取了平煤十矿煤样作为研究对象。

3) 通过试验数据分析, 随着瓦斯压力从 0 升高为 2 MPa, 煤样的强度随之下降了 22.61%, 弹性模量下降了 23.9%, 泊松比增大 33.67%, 煤样的力学性能与瓦斯压力呈现负相关的关系。

4) 煤样受载破坏过程的声发射特性可分为 4 个时期: 平静期、活跃期、提速运动期、残余运动期; 随着瓦斯压力的增大, 声发射累计计数下降了 32%, 累计能量降低了 25.32%, 因此, 瓦斯压力对煤样的声发射特性有一定的弱化作用。

参考文献(References):

- [1] 王振, 尹光志, 胡千庭, 等. 高瓦斯煤层冲击地压与突出的诱发转化条件研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 572-575.
WANG Zhen, YIN Guangzhi, HU Qianting. Inducing and transforming conditions from rockburst to coal-gas outburst in a high gassy coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 572-575.
- [2] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 不同加卸载条件下含瓦斯煤力学特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 891-901.
YIN Guangzhi, LI Wenpu, LI Minghui, et al. Experimental study of mechanical properties of coal containing methane under different loading-unloading conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 891-901.
- [3] 李小双, 尹光志, 赵洪宝, 等. 含瓦斯突出煤三轴压缩下力学性质试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3350-3358.
LI Xiaoshuang, YIN Guangzhi, ZHAO Hongbao, et al. Experimental study of mechanical properties of outburst coal containing gas under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3350-3358.
- [4] 尹光志, 王振, 张东明. 有效围压为零条件下瓦斯对煤体力学性质影响的实验 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33(11): 130-133.
YIN Guangzhi, WANG Zhen, ZHANG Dongming. Experiment of the gas effect on coal mechanical properties under zero effective confining pressure [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(11): 130-133.
- [5] 赵洪宝, 李振华, 仲淑姬, 等. 单轴压缩状态下含瓦斯煤岩力学特性试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 131-134.
ZHAO Hongbao, LI Zhenhua, ZHONG Shuhong, et al. Experimental study of mechanical properties of coal rock containing gas under uniaxial compression [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 131-134.
- [6] 赵洪宝, 张红兵, 尹光志. 含瓦斯软弱煤三轴力学特性试验 [J]. 重庆大学学报, 2013, 36(1): 103-109.
ZHAO Hongbao, ZHANG Hongbing, YIN Guangzhi. Experiments on triaxial mechanical properties of soft coal containing gas [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 36(1): 103-109.
- [7] 赵洪宝, 汪昕. 卸轴压起始载荷水平对含瓦斯煤样力学特性的影响 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 259-263.
ZHAO Hongbao, WANG Xin. Effect of initial load level of axial unloading on mechanical properties of coal contained gas [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 259-263.
- [8] 王家臣, 邵太升, 赵洪宝. 瓦斯对突出煤力学特性影响试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 391-394, 400.
WANG Jiachen, SHAO Taisheng, ZHAO Hongbao. Experimental study of effect of gas on mechanical properties of outburst coal [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 391-394, 400.
- [9] 吕有厂, 秦虎. 含瓦斯煤岩卸围压力学特性及能量耗散分析 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1505-1510.
LYU Youchang, QIN Hu. Investigation into mechanical responses and energy dissipation properties of coal containing methane to confinement unloading [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1505-1510.
- [10] 李晓泉. 含瓦斯煤力学特性及煤与瓦斯延期突出机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [11] 黄启翔. 卸围压条件下含瓦斯煤岩力学特性的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [12] 李宏艳, 康立军, 徐子杰, 等. 不同冲击倾向煤体失稳破坏声发射先兆信息分析 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 384-388.

(下转第 149 页)

- revolving mining in gob-surrounded pillar with fully mechanized mining [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(5): 520-523.
- [12] 陈福印, 刘培浩. ZF4000/16/28型综放支架配套工作面调斜实践 [J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(12): 37-39.
- CHEN Fuyin, LIU Peihao. Practices on alignment of fully mechanized top coal caving mining face with ZF4000/16/28 hydraulic powered caving supports [J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(12): 37-39.
- [13] 龙亚, 高亚军. 龙固煤矿7202轻放工作面调斜旋转回采工艺 [J]. *煤炭科学技术*, 2005, 33(7): 39-41.
- LONG Ya, GAO Yajun. Adjusted rotary coal mining face technology of No.17202 fully mechanized top coal caving mining face with light weight hydraulic powered supports in Longgu Mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2005, 33(7): 39-41.
- [14] 李生生, 李光勇. 复杂条件下综采工作面调斜开采技术与实践 [J]. *煤矿开采*, 2016, 21(3): 43-45.
- LI shengsheng, LI Guangyong. Practical of tilt modulation mining technology of fully mechanized face with complex condition [J]. *Coal Mining Technology*, 2016, 21(3): 43-45.
- [15] 赵启安, 李亚军. 激光定位在综采工作面刮板输送机防滑的应用 [J]. *煤炭科学技术*, 2009, 37(5): 93-94.
- ZHAO Qian, LI Yajun. Application of laser positioning to sliding prevention of scraper conveyor in fully mechanized coal mining [J]. *Coal Science and Technology*, 2009, 37(5): 93-94.
- [16] 牛剑峰. 综采工作面自动调斜与防滑控制系统研究 [J]. *煤矿开采*, 2015, 20(2): 32-34.
- NIU Jianfeng. Automatic incline adjustment and anti-skid control system development for full-mechanized mining face [J]. *Coal Mining Technology*, 2015, 20(2): 32-34.
- [17] 邱锦波. 滚筒采煤机自动化与智能化控制技术发展及应用 [J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(11): 10-13.
- QIU Jinbo. Development and application of shearer automation and intelligent control technology [J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(11): 10-13.
- [18] 黄曾华, 苗建军. 综采工作面设备集中控制技术的应用研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(11): 11-17.
- HUANG Zenghua, MIAO Jianjun. Application research of equipment centralized control technology in fully-mechanized coal face [J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(11): 11-17.
- [19] 张科学. 综掘工作面智能化开采技术研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(7): 106-111.
- ZHANG Kexue. Study on intelligent mining technology of fully-mechanized heading face [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(7): 106-111.
- [20] 牛剑峰, 李俊士, 刘清. 一种综采工作面伪斜自动控制系统: 中国, 201410373013.3 [P]. 2014-08-01.

(上接第119页)

- LI Hongyan, KANG Lijun, XU Zijie, et al. Precursor information analysis on acoustic emission of coal with different outburst proneness [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 384-388.
- [13] 宋真龙, 韩佩博, 李文璞, 等. 瓦斯对冲击性煤样能量耗散的影响 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(4): 843-849.
- SONG Zhenlong, HAN Peibo, LI Wenpu, et al. Impact of energy dissipation of coal samples with rockburst tendency from gas in its failure process [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 843-849.
- [14] 王振, 胡千庭, 尹光志. 瓦斯压力对煤体冲击指标影响的实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(4): 516-519.
- WANG Zhen, HU Qianting, YIN Guangzhi. Experimental research on the burst proneness index of coal treated with gas pressure [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(4): 516-519.
- [15] 李铁, 蔡美峰, 王金安, 等. 深部开采冲击地压与瓦斯的相关性探讨 [J]. *煤炭学报*, 2005, 30(5): 20-25.
- LI Tie, CAI Meifeng, WANG Jinan, et al. Discussion on relativity between rockburst and gas in deep exploitation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(5): 20-25.
- [16] MAJEWSKA Z, MORTIMER Z. Chaotic behavior of acoustic emission induced in hard coal by gas sorption-desorption [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 70(4): 305-312.