2月

2014年

JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY

Vol. 39 No. 2

Feb. 2014

孟 磊 汪宏伟 李学华 等. 含瓦斯煤破裂过程中声发射行为特性的研究 [J]. 煤炭学报 2014 39(2): 377 – 383. doi: 10. 13225/j. cnki. jccs. 2013. 2002

Meng Lei "Wang Hongwei "Li Xuehua et al. Investigation on acoustic emission characteristics in failure process of coal absorbed methane [J]. Journal of China Coal Society 2014 39(2):377 – 383. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.2002

含瓦斯煤破裂过程中声发射行为特性的研究

孟 磊¹² 汪宏伟² 李学华² 赵毅鑫¹²

(1. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院 北京 100083;

摘 要: 为探求含瓦斯煤失稳破坏过程中的声发射行为演化规律,笔者以含瓦斯原煤为研究对象,利用配备有声发射同步监测功能的含瓦斯煤三轴力学伺服实验装置,完成了不同瓦斯压力条件下含瓦斯煤破裂过程中全应力应变和声发射行为同步监测实验,进而探求含瓦斯煤破裂过程中的声发射行为演化特性,以及声发射行为对瓦斯压力变化的响应特性。研究发现: 含瓦斯煤弹性模量、峰值强度及峰值应变均随吸附瓦斯压力增加而线性降低,且在瓦斯压力的影响下应力应变曲线总体上向"低应力诱发大应变"方向迁移; 受载煤体在破裂过程中随时间变化,声发射行为演化过程可以划分为4个时期,分别为 I 平静期、II 提速期、III 加速期以及 IV 稳定期,其中提速期和加速期累计计数较平静期分别最高提高了6.39和37.5倍,能量参数分别最高提高了8.39和43.7倍; 受载不含瓦斯煤样声发射演化过程中提速期和加速期的声发射参数累积量均明显高于同样加载条件下的含瓦斯样品,且在提速期和加速期,瓦斯压力与声发射参数累积量呈指数函数衰减关系。

关键词: 含瓦斯煤; 声发射; 时空演化; 损伤破坏

中图分类号: TD315; TD712

又献标志码: A

文章编号: 0253 - 9993 (2014) 02 - 0377 - 07

Investigation on acoustic emission characteristics in failure process of coal absorbed methane

MENG Lei^{1 2} ,WANG Hong-wei² ,LI Xue-hua² ZHAO Yi-xin^{1 2}

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining China University of Mining & Technology (Beijing) Beijing 100083 China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering China University of Mining & Technology (Beijing) Beijing 100083 China)

Abstract: In order to acquire the evolution characteristics of acoustic emission in failure process of coal absorbed methane the raw coal absorbed gas was used as the object of study in this paper and the acoustic emission behavior evolution characteristics in failure process of coal absorbed gas under different pore pressure was performed by using triaxial servo-controlled press equipment with acoustic emission synchronous detection function for coal absorbed gas. The results show as follows: mechanical parameters of the coal absorbed gas such as elastic modulus peak strength and peak strain decrease as increase of gas pressure and the stress-strain curve transfers to "large strain induced by low stress" under the influence of gas; the acoustic emission behavior evolution of coal can be divided into four phases with time including quiet period slow acceleration period acceleration period and stationary period; cumulative ring counts of slow acceleration and acceleration period increases respectively 6.39 and 37.5 times in comparison with quiet period

收稿日期: 2013 - 10 - 10 责任编辑: 韩晋平

od and energy parameters increases respectively 8.39 and 43.7 times in comparison with quiet period; the acoustic emission parameters of slow acceleration period and acceleration period in failure process of coal mass under load are obviously higher than coal mass absorbed gas under the same conditions in addition the acoustic emission parameters have exponential attenuation relationships with gas pressure in the acceleration period.

Key words: coal absorbed methane; acoustic emission; time-space evolution; failure and damage

含瓦斯煤岩动力灾害是我国煤矿最为严重的动力灾害。具有极大的危害性、较强的突发性以及复杂的发生机理等特点。对煤矿的安全生产产生了极大的威胁;并且随着开采强度的增加以及开采深度的延伸,含瓦斯煤岩动力灾害对煤矿安全生产的威胁也日益加重[1-2]。含瓦斯煤岩动力灾害在孕育、形成及发生的过程中往往会出现诸如煤炮、片帮、离层破裂以及震动等煤岩体结构和应力状态改变的前兆信息。且往往以"声音"形式进行传播[3-5],而对这种前兆信息的有效捕捉和监测对于认知含瓦斯煤岩动力灾害机理以及防治措施的优化具有极为重要的现实意义。

国内外众多学者围绕煤岩体受载变形过程中的 声发射行为特点以及前兆信息捕捉等方面进行了大 量的研究,并取得了很多研究成果: L. Obert W. I. 和 Duvall^[6]利用声发射设备对岩石开挖引起的破裂位 置进行监测并确定了最大应力区; V. L. Shkuratnik 等[7-8]基于煤岩体的单轴和三轴加载实验,系统研究 煤岩体的声发射行为特性; 国内学者苏承东等[9] 利 用 RMT-150B 岩石实验机对冲击性煤样进行了单 轴、三轴以及卸围压试验,系统地研究了不同应力路 径下煤体破坏变形的声发射特征以及之间的差异; 赵 毅鑫和姜耀东^[10]基于冲击倾向性煤样破裂过程中的 声发射和热红外同步监测试验 尝试对冲击倾向性煤 样失稳破坏前兆信息进行捕捉; 曹树刚等[11] 以突出 煤为研究对象 完成突出煤全应力应变过程的声发射 监测 认为振铃事件比能够准确地反映煤体变形破坏 过程声发射行为变化趋势; 艾婷等[12] 在不同围压下 对煤体声发射行为时空演化行为进行试验研究 发现 声发射参数的时空演化过程与应力应变曲线具有较 好的对应关系,煤体失稳破坏前兆为应力峰值的 92%~98%。而在含瓦斯煤的实验研究方面 学者们 开展了创新性尝试,并且取得了长足的进展: P. G. Ranjith 等[13]尝试利用声发射仪器对吸附 CO。 气体后的煤样破裂和损坏过程进行监测 发现相对于 自然条件下煤样 吸附 CO₂的受载煤体裂隙发育和扩 展时应力比峰值应力百分比有所提高 ,但裂隙破坏时 则相反; 尹光志和赵洪宝等[14-15] 开展了三轴压缩条 件下的含瓦斯煤声发射实验研究 并建立了基于声发 射特性的含瓦斯煤损伤变形模型; 刘延保等[16] 利用

分形理论对含瓦斯煤破裂过程中 AE 序列(声发射) 关联维数演化规律进行了探讨。

综上所述 国内外学者在受载煤体声发射行为演化特性方面的研究取得了丰硕成果,为进一步认知受载含瓦斯煤裂隙发育、扩展及最终贯通破裂机制和捕捉受载含瓦斯煤失稳破坏的前兆信息奠定了坚实的基础。但由于受制于仪器设备和方法,所进行的相关研究还处于探索阶段,尤其是对含瓦斯煤失稳破坏过程中的微破裂事件捕捉和声发射演化规律,以及受载煤体的声发射行为对瓦斯压力响应的认知鲜见报道。因此笔者以含瓦斯煤为研究对象,利用四川大学配备有声发射同步监测功能的含瓦斯煤三轴力学伺服实验系统开展在不同瓦斯压力下,含瓦斯煤破裂过程中声发射行为演化规律,以及声发射行为对瓦斯压力变化响应的实验研究。

1 实 验

1.1 实验样品

开滦赵各庄矿开采历史较长、井巷工程及地质构造较为复杂 随着开采深度的不断延伸,兼具冲击地压特征的煤与瓦斯突出事故也不断增多,累计共发生突出事故 20 多起,其中有记录的 19 起突出事故全部发生在 9 号煤层^[17]。目前赵各庄矿已延伸至十三水平 9 号煤层埋深超过千米,含瓦斯煤岩动力现象显现频发。实验煤样采自赵各庄矿埋深约为 1 100 m的 9 号煤层 顶板为褐灰色粉砂质泥岩,底板为深灰色粉砂质泥岩,煤层小构造较多且发育有软分层,瓦斯含量约为 7.5~8.5 m³/t,顶底板岩性较为致密且强度较大,煤的普氏系数约为 0.6~1.0,这种"两硬一软"构造致使煤层透气性较差,有利于瓦斯的保存。

由于在成煤过程中历经多次大规模的地质构造运动 9 号煤层煤介质发育成为一种复杂的双重孔隙介质 并且发育有层理等缺陷 ,具有明显非均质性和各向异性 ,煤样加工制作极为困难 ,容易造成实验结果离散型较大。因此为了保证煤样的完整性 将现场采集的原始煤块用多层保鲜薄膜密封好并放置在大小适当的木箱内 ,然后用素混凝土进行分层浇灌至完全包裹好煤块为止 ,待混凝土完全硬化后进行取芯和

打磨 制作成 ϕ 50 mm × 100 mm 的标准煤样。在进行实验前 对制作成的标准煤样进行超声波测试 ,选取 纵波波速相近的样品完成实验 ,以尽可能减小实验数据的离散性 [18]。

1.2 实验仪器设备

实验设备采用由 MTS815 岩石力学试验系统改装完成的配备有声发射同步监测功能的含瓦斯煤三轴力学伺服实验系统。实验装置主要包含伺服加载系统、孔隙压力控制系统以及声发射监测系统,如图1 所示。



图 1 含瓦斯煤声发射监测试验系统

Fig. 1 $\,$ Acoustic emission testing system of coal absorbed gas

1.3 实验方法及步骤

在室温下分别完成围压恒定为 5 MPa 无孔隙压力、瓦斯压力 0.5 ,1.0 2.0 3.0 4.0 MPa 时的含瓦斯煤三轴全应力应变压缩及声发射同步监测实验。其中加载速率 0.1 mm/min ,数据记录频率是 1 次/s ,操作步骤如下:

- (1) 气密性检查,首先用标准金属试件检查实验系统的气密性,保证实验数据的真实性和可靠性;
- (2) 样品装配 将样品安装到三轴压力室样品平台上 ,用热缩管封装煤样并安装环向引伸计和温度传感器 ,连接好数据传输线 ,并将高压气瓶连接到系统中 检查系统各部分运行是否正常;
- (3) 实验系统脱气及吸附,先将围压和轴压加载到设定值并稳压,使用真空泵连续地对系统进脱气, 当系统气压降至50 Pa以下时,开始进行煤样吸附;
- (4) 开始实验,待样品充分吸附后,按照预定加载速率和路径开始加载,并进行声发射系统同步监测;样品破坏后,通过更换样品按照既定实验方案完成剩余实验。

2 受载含瓦斯煤变形与强度特征

图 2 为围压 5 MPa 下无孔隙压力和孔隙压力为 3 MPa 时三轴压缩典型的全应力应变曲线(图中 M₁

为常规三轴压缩变形曲线; M_2 为含瓦斯煤三轴压缩变形曲线, L 瓦斯压力为 3 L MPa)。

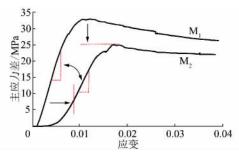


图 2 含瓦斯煤三轴压缩全应力应变曲线

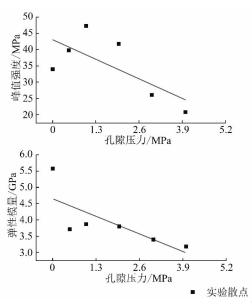
Fig. 2 Complete stress–strain curves of coal absorbed gas

从图 2 可以明显看出实验所用煤样在三轴压缩变形过程中均经历了压密、弹性变形、塑性变形以及断裂破坏(应力跌落和残余应力) 4 个阶段。但是不含瓦斯煤和含瓦斯煤在三轴压缩过程中所显现的变形特性存在明显不同 相对于不含瓦斯煤样,充分吸附瓦斯的原生结构煤样出现明显的应力应变初始压密阶段且此阶段应力应变曲线显著弯曲下沉,且在 6 MPa 应力下应变从 0.002 2 突增至 0.14 弹性模量也随之降低,以 40%的幅度降低至 3.33 GPa; 另外煤样在 3 MPa 瓦斯压力影响下其峰值强度从 33.8 MPa 降低到 25 MPa 左右,下降幅度达到 23.8%。综上所述 在瓦斯压力的影响下应力应变曲线总体上向"低应力诱发大应变"方向迁移。

在实验之前对样品进行了超声波波速测定并选 取相似波速样品以便完成同一组实验,虽然无法完全 消除实验数据的离散性 但随瓦斯压力变化含瓦斯煤 力学参数整体上依然呈现有规律可循的变化。随着 瓦斯压力的增加 峰值强度、峰值应变以及弹性模量 均随之呈现下降趋势(图3) 这主要是由瓦斯气体在 煤体内部发生的渗流 - 扩散 - 吸附作用所引起 ,瓦斯 气体通过渗流作用进入煤体宏观裂隙和孔隙内 并不 断向包含微小孔裂隙的基质内部扩散 ,一方面宏观孔 裂隙内的游离气体挤推煤壁扩充煤体体积,另一方面 通过吸附作用附着在煤基质表面的吸附态瓦斯致使 基质表面能降低且通过不断楔入基质微孔裂隙内部 促使基质膨胀 因此在吸附态和游离态瓦斯气体共同 作用下,含瓦斯煤体发生膨胀变形[18],造成含瓦斯煤 整体密度降低、煤质相对变软,并出现明显弯曲下沉 的初始压密应力应变曲线。相对于不含瓦斯煤样三 轴压缩实验 ,含瓦斯煤样出现低应力高应变必然造成 弹性阶段应力应变曲线向下偏转、弹性模量降低。

另外基于太沙基有效应力原理 $\sigma_p = \sigma_1 - \partial p$ (图 4 中 σ_1 为外部荷载; σ_p 为有效应力; ρ 为孔隙压力;

A - A 为横截面) 可以做以下分析 ,其中系数 ∂ 取值范围 $0 \sim 1$,对于孔裂隙极为发育且整体上与松散土体较为相似的煤体 ,其内部瓦斯气体必然造成有效围压 σ_0 的降低、约束裂隙发育及扩展的能力下降 ,削弱了



含瓦斯煤强度; 而随孔隙压力增加峰值应变减小,是由于携带动能的游离气体加速主贯通裂隙发育和扩展并使含瓦斯煤在应变很小情况下就发生断裂破坏, 类似于加载速率对煤岩体力学特性的影响规律[19]。

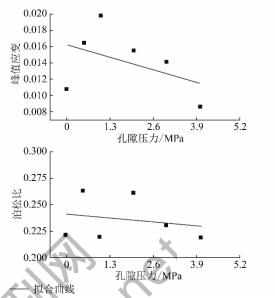


图 3 不同孔隙压力下含瓦斯煤力学参数

Fig. 3 Mechanical parameters of coal absorbed gas under different pore pressure

此外,图 3 的实验结果还显示随着孔隙压力增加 泊松比 ν 差别不大且基本上在 0.22 ~ 0.26 内波动, 与瓦斯压力无明显的相关性。这主要是由于泊松比 ν 是由弹性变形阶段轴向应变 ε_x 与横向应变 ε_y 的比值所确定,影响因素较多,不仅受应力环境以及煤样 非均质性和各向异性的影响,而且还受煤层发育层 理、缺陷等以及煤样加工制作工艺的约束,因此泊松 比对瓦斯压力变化的响应还需要进一步的研究。

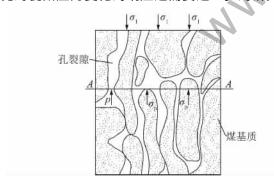


图 4 煤样内部受力情况示意

Fig. 4 Diagrammatic sketch of inner stress in coal

3 受载含瓦斯煤声发射参数演化规律

声发射监测参数主要有振铃计数、能量、绝对能量、信号强度、幅值等多个参量^[20]。 其中振铃计数反映声发射源的一次材料局部变化 ,用来体现声发射事件的总量和频度 ,以及一定程度的信号幅值; 能量为

能够反映声发射事件的相对能量或强度; 因此这两个声发射参数也被大多数研究受载煤岩声发射特性的研究人员所利用^[5-12]。笔者选用振铃计数(以下简称计数)和能量参数对含瓦斯煤声发射行为特性及演化规律进行相关分析。

3.1 声发射参数演化过程分析

不含瓦斯煤和含瓦斯煤在三轴压缩破裂过程中 声发射计数和能量参数随时间演化如图 5.6 所示 (由于篇幅所限,只列部分样品)。根据煤样失稳破 裂过程中随时间累计计数和能量变化曲线形态可以 将整个过程划分为 4 个时期: I 平静期 ,从开始加载 至弹性变形全过程结束(包括全应力应变过程中的 初始压密和弹性变形阶段),仅仅发生原生孔裂隙的 压缩、闭合和骨架的弹性变形 以及应变能储集 而未 有显著的损伤出现 因而这个时期只有零星的声发射 计数和极少能量释放率 累计计数和能量相对于总数 未产生明显变化; Ⅱ 提速运动期 ,当荷载增加到煤体 屈服强度时 煤样出现损伤、裂隙开始发育及扩展 应 力时间曲线开始偏离直线进入到开始出现损伤的塑 性变形阶段 声发射计数和能量释放率显著增加 ,累 计计数和能量曲线斜率开始增加 此时期从煤样发生 屈服开始至断裂破坏结束 且较平静期的累计计数和 能量分别提高 2.76~6.39 倍和 3.05~8.69 倍; Ⅲ加 速运动期 此时期从宏观主裂隙贯通煤体发生失稳断 裂至应力跌落为止,由于煤样的断裂破坏,应变能大 量的释放 促使声发射计数和能量急速增加 ,并将累计计数和能量曲线分别拉升到平静期的 13.2~37.5 倍和 10.9~43.7 倍; Ⅳ 稳定运动期 ,在进入到残余应力阶段后 ,煤样强度由稳定滑移的断裂块体之间剪

切力提供 剧烈结构运动停止 ,声发射活动也趋于平缓 断裂块体间的稳定滑移所产生较少计数和较弱能量释放率使声发射累计计数和能量呈现稳定增加的趋势。

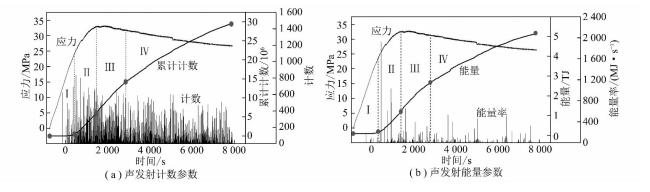


图 5 煤常规三轴加载破裂过程中声发射参数演化

Fig. 5 Acoustic emission parameters of coal in process fracture of under triaxial compression

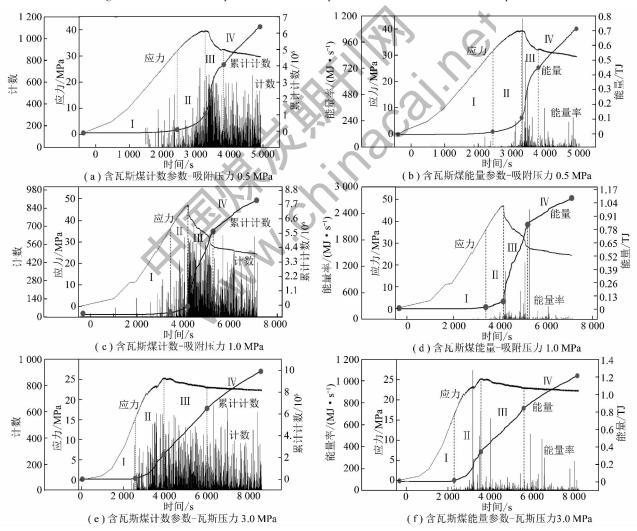


图 6 含瓦斯煤破裂过程中声发射参数演化

Fig. 6 Acoustic emission parameters of coal in process fracture of under triaxial compression

另外,含瓦斯煤在三轴压缩变形过程中呈现出两种应力时间曲线形态,既有峰后弹性能释放猛烈的脆

性变形也有具有塑形流动特性的延性变形 如图 6 所示。这两种含瓦斯煤在失稳破坏过程中的声发射演

化行为存在明显差别 主要有以下两点:

- (1)对于具有峰后弹性能释放猛烈的脆性变形煤样,其失稳破坏过程中声发射行为的平静期、提速期、加速期以及稳定期具有明显范围和界限,而对于峰后出现塑形流动并未猛烈释放大量弹性能的煤样,其声发射提速期和加速期界限不明显,声发射参数时间曲线在这两个时期保持一致的直线形态。
- (2) 另外具有脆性变形特征的煤样,其声发射计数和能量瞬时峰值均出现在加速期; 而峰后呈现塑形

流动变形的煤样 其声发射计数和能量的瞬时峰值则出现在提速期。

3.2 瓦斯压力对声发射行为演化影响分析

含瓦斯煤力学参数在游离态和吸附态瓦斯气体的综合影响之下发生变化,瓦斯气体不仅削弱了含瓦斯煤峰值强度和弹性模量,改变了全应力应变曲线形态,而且还改变了含瓦斯煤破裂失稳过程中的声发射行为特性。图7为随瓦斯压力变化声发射参数在提速期和加速期的演化规律。

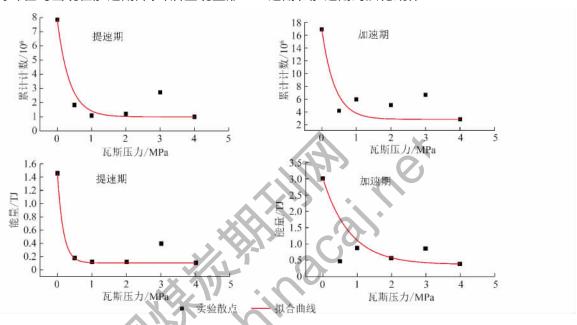


图 7 含瓦斯煤破裂过程中声发射参数演化

Fig. 7 Acoustic emission parameters of coal in process fracture of under triaxial compression

从实验结果可以看出 在三轴压缩变形全过程中不含瓦斯煤在提速期的声发射参数(累计计数和能量)均明显高于同样加载条件下含瓦斯煤在提速期的声发射参数 其累计计数和能量参数分别为含瓦斯煤的 4.3~7.9 倍和 3.7~14.1 倍。在提速期瓦斯压力分别与累计计数和能量参数呈指数衰减函数关系,随着瓦斯压力增加 累计计数和能量参数先是迅速降低而后呈指数式衰减。

加速期的声发射参数演化特征与提速期较为相似,瓦斯压力同样与声发射参数呈指数衰减函数关系,不含瓦斯煤累计计数和能量在加速期相对于含瓦斯煤分别提高了 2.6~6.2 倍和 3.4~7.8 倍。但是在加速期瓦斯压力和声发射参数拟合吻合程度明显低于提速期,出现这种情况主要是由此时期煤体所处应力环境的复杂性所致,声发射行为加速期主要对应煤体的应力跌落过程。在此阶段煤体失稳断裂成多个块体,不仅存在摩擦滑移连续介质力学问题,还存在断裂块体间的结构问题以及高压瓦斯对煤岩体冲击的动力学问题。

瓦斯气体对含瓦斯煤声发射行为的削弱作用主要存在以下原因:一方面在游离和吸附态瓦斯气体的共同作用下弱化了煤体的力学性能且使其具有了蠕变倾向,降低了变形破坏的激烈程度;另一方面游离态气体降低了含瓦斯煤的有效围压,降低了裂隙发育及扩展的难度,这两方面的原因共同造成受载煤体的声发射计数和能量释放率减小。此外,含瓦斯煤中瓦斯气体所形成的"气垫"对煤体破裂所释放弹性能的吸收和缓冲,也在一定程度上弱化了声发射行为。

4 结 论

- (1)含瓦斯煤和不含瓦斯煤在三轴压缩过程中 具有相同的变形演化规律,即均存在压密、弹性变形、 塑性变形以及失稳断裂4个阶段;含瓦斯煤弹性模 量、峰值强度及峰值应变均随瓦斯压力增加而降低, 且在瓦斯压力的影响下应力应变曲线总体上向"低 应力诱发大应变"方向迁移。
- (2) 受载煤体在破裂过程中,随时间变化声发射 参数演化过程可以划分为4个时期: Ⅰ平静期,Ⅲ提

速期、Ⅲ加速期以及Ⅳ稳定期。

(3)在受载不含瓦斯煤在破裂过程中,声发射提速期和加速期的累计计数和能量均明显高于同样加载条件下的含瓦斯煤样。且在提速期和加速期,瓦斯压力与声发射参数呈指数函数关系,随着瓦斯压力增加,累计计数和能量参数先是迅速降低而后逐渐呈指数式衰减。

参考文献:

- [1] 刘明举 孟 磊 魏建平. 近年煤与瓦斯突出的统计特性及其防范措施[J]. 煤矿安全 2009(7):73-76.
 - Liu Mingju Meng Lei "Wei Jianping. The statistical characteristics of coal and gas outburst and its corresponding preventive measures [J]. Safety in Coal Mine 2009(7):73 76.
- [2] 于不凡,王佑安. 煤与瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社 2000.
- [3] 石显鑫 蔡栓荣 ,冯 宏 ,等. 利用声发射技术预测预报煤与瓦斯突出[J]. 煤田地质与勘探 ,1998 25(3):60-65.
 - Shi Xianxin ,Cai Shuanrong ,Feng Hong ,et al. The prediction of coal and gas outburst using the acoustic emission technique [J]. Coal Geology & Exploration ,1998 25(3):60-65.
- [4] 吴自立. AE 信号参数预测预报煤(岩)与瓦斯突出危险性的进展及展望[J]. 矿业安全与环保 2005 32(1):27-29.
 - Wu Zili. Progress and prospect of AE signal parameter for predicting coal and gas outburst hazard [J]. Mining Safety & Environmental Protection 2005 32(1):27-29.
- [5] 左建平 裴建良,刘建锋,等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(8):1564 = 1570.
 - Zuo Jianping, Pei Jianliang, Liu Jianfeng, et al. Investigation on acoustic emission behavior and ite tiem-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2011 30(8):1564-1570.
- [6] Obertl Duvall W I. Use of subaudible noises for prediction of rock-bursts II—report of investigation [R]. Denver: U. S. Bureau of Mines 1941.
- [7] Shkuratnik V L ,Yu L Filimonov ,Kuchurin S V ,et al. Experimental investigations into acoustic emission in coal samples under uniaxial loading [J]. Journal of Mining Science 2004 40(5): 458 – 464.
- [8] Shkuratnik V L ,Yu L Filimonov ,Kuchurin S V ,et al. Experimental regularities of acoustic emission in coal samples under triaxial compression [J]. Journal of Mining Science 2005 41(1):44-53.
- [9] 苏承东 高保彬 ,南 华 ,等. 不同应力路径下煤样变形破坏过程声发射特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2009 28

- (4):757-767.
- Su Chengdong ,Gao Baobin ,Nan Hua ,et al. Exprimental study on acoustic emission characteristics during deformation and failure processes of coal samples under different stress pathes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2009 ,28 (4): 757 767.
- [10] Zhao Yixin Jiang Yaodong. Acoustic emission and thermal infrared precursors associated with bump-prone coal failure [J]. Internation al Journal of Coal Geology 2010 83(1):11-20.
- [11] 曹树刚 刘延保 涨立强. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报 2007 26(S1): 2794 2799.

 Cao Shugang "Liu Yanbao Zhang Liqiang "et al. Study on character—istics of acoustic emission in outburst coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007 26(S1): 2794 2799.
- [12] 艾 婷 涨 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 2011 26(12):2048-2057.

 Ai Ting Zhang Ru Liu Jianfeng et al. Space-time evolution rules of acoustic emission locations under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society 2011 26(12):2048-2057.
- [13] Ranjith P G Jasinge D Choi S K et al. The effect of CO₂ saturation on mechanical properties of Australian black coal using acoustic emission [J]. Fuel 2010 89: 2110 2117.
- [14] Yin Guangzhi ,Qin Hu ,Huang Gun ,et al. Acoustic emission from gas-filled coal under triaxial compression [J]. International Journal of Mining Science and Technology 2012 22:775 778.
- [15] 赵洪宝. 含瓦斯煤失稳破坏及声发射特性的理论与实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学 2009.
- [16] 刘延保 曹树刚 李 勇 等. 含瓦斯煤破坏过程中 AE 序列关联维数演化分析[J]. 重庆大学学报 2012 35(3):108-114.
 Liu Yanbao ,Cao Shugang ,Li Yong ,et al. Correlation dimension analysis of AE sequence under failure of gas-filled coal [J]. Journal of Chongqing University 2012 35(3):108-114.
- [17] 李建民 章之燕 杨占秋. 浅析开滦赵各庄矿动力显现与预防措施[J]. 煤矿开采 2008, 13(2):71-74.

 Li Jianmin Zhang Zhiyan , Yang Zhanqiu. Analysis of dynamic pressure behavior and prevention of Zhaogezhuang Colliery in Kailuan [J]. Coal Mining Technology 2008, 13(2):71-74.
- [18] 孟 磊. 含瓦斯煤体损伤破坏特征及瓦斯运移规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京) 2013.
- [19] 孟 磊. 煤电性参数实验研究[D]. 焦作: 河南理工大学 2010.
- [20] 沈功田 耿荣生 刘时风. 声发射信号的参数分析方法 [J]. 无 损检测 2002 24(2):72-77.
 - Shen Gongtian ,Geng Rongsheng ,Liu Shifeng. Parameters analysis of acoustic emission signals [J]. NDT 2002 24(2):72 -77.