

许多,张茹,高明忠,等. 基于间接拉伸试验的煤岩层理效应研究[J]. 煤炭学报,2017,42(12):3133-3141. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0412

XU Duo,ZHANG Ru,GAO Mingzhong, et al. Research on coal bedding effect based on indirect tensile test[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(12):3133-3141. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0412

基于间接拉伸试验的煤岩层理效应研究

许 多^{1,2,3},张 茹^{1,2,3},高明忠^{1,2,3},张泽天^{1,2,3},刘倩颖^{1,2,3},谢 晶^{1,2,3},张朝鹏^{1,2,3}

(1. 四川大学 水力学及山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065; 2. 四川大学 水利水电学院,四川 成都 610065; 3. 四川大学 深地科学与工程教育部重点实验室,四川 成都 610065)

摘 要:采用多种先进的宏观测试手段,探究煤的层理构造和矿物分布。进行加载方向与煤岩层理面平行和垂直的间接拉伸以及实时声发射(AE)试验,分析了煤的破坏机理、拉伸力学特性以及在拉伸过程中声发射时空序列特征和损伤变量演化的层理效应。研究表明:方解石矿物主要沿煤岩层理面分布,对裂隙的萌生和发展起着关键作用;加载方向平行和垂直于层理面煤岩的抗拉强度分别为0.706和1.039 MPa;平行组试样声发射活动的整体水平弱于垂直组,但平行组试样AE事件在破坏前短期内激增,总能量释放少,破坏突然,主裂纹沿层理面发展,垂直组试样的AE信号在低应力水平出现,AE振铃计数率和能率均强于平行组,空间定位点有明显的成核区域;垂直组和平行组损伤变量 D 值变化曲线分别呈现出阶梯式和两段式特征,具有明显差异,基于AE能量计算的岩石损伤状态更加符合实际。

关键词:煤;力学特性;声发射;层理效应;损伤变量

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)12-3133-09

Research on coal bedding effect based on indirect tensile test

XU Duo^{1,2,3},ZHANG Ru^{1,2,3},GAO Mingzhong^{1,2,3},ZHANG Zetian^{1,2,3},
LIU Qianying^{1,2,3},XIE Jing^{1,2,3},ZHANG Zhaopeng^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. MOE Key Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: By using several advanced macro and micro test methods, the bedding structure and mineral distribution of coal were analyzed, which lay the foundation for the study on the mechanism of coal rock bedding effect. Indirect tensile test and acoustic emission (AE) test in which loading direction is parallel and perpendicular to the bedding plane of coal were conducted, and the failure mechanism, bedding effect on tensile mechanical properties, as well as the bedding effect on AE timing parameters, law of energy release, spatial evolution characteristics and the damage variable D during the stretching process were analyzed. The results show that, the calcite mineral mainly distributes along the bedding plane and it plays an important role in the process of initiation and development of cracks. The tensile strength of coal whose loading direction is parallel and perpendicular to bedding plane is 0.706 and 1.039 MPa, respectively. Compared with the vertical group, the AE activity of parallel group is weaker in the whole process, and AE events increase sharply in a short time when approaching to failure, the failure occurs suddenly and the main fracture surfaces

收稿日期:2017-03-29 修回日期:2017-07-18 责任编辑:常 琛

基金项目:国家优秀青年科学基金资助项目(51622402);四川省青年科技创新研究团队资助项目(2017TD0007)

作者简介:许 多(1995—),男,四川南充人,硕士研究生。E-mail:15182900988@163.com。通讯作者:张 茹(1976—),女,四川成都人,教授。E-mail:zhangru@scu.edu.cn

distribute along the bedding plane. The AE signal of vertical group appears at the beginning of the loading, the AE ring count rate and energy rate are higher than the parallel group and the spatial localization of vertical group has an obvious nucleation area. The damage variable D in the vertical and parallel groups shows an obvious different characteristic with ladder type and two-section type, respectively. The rock damage state based on AE energy is more coincident with reality.

Key words: coal; mechanical properties; acoustic emission; bedding effect; damage variable

实际开采过程中,煤层总是处于复杂的应力状态,由于其抗拉强度远小于抗压强度,煤的拉伸破坏常常成为事故发生的主要原因^[1],因此探究煤在拉伸状态下的破坏机理和损伤演化特征显得尤为重要。间接拉伸法作为国际岩石力学学会推荐的测试岩石抗拉强度的方法之一,被广泛用于测定包括煤在内的多种岩石的抗拉强度^[2-8]。

层理是煤的主要构造标志,其存在会破坏煤岩体的整体性和连续性,造成煤在层理方向上成分的差异^[9],由于开采过程中常会遇到近水平、倾斜和近垂直的煤层层理,因此层理构造对煤力学行为的影响引起了国内外学者的广泛关注: PAN 等^[10]发现层理结构多样性对煤渗透率演化和瓦斯灾害控制有明显影响; ZHANG 等^[11]研究得出煤内部方解石颗粒的分布是影响裂隙扩展的主要因素,层理对煤的单轴抗压强度起控制作用; LI 等^[12]发现微震信号的振幅和速度在沿煤平行层理方向上改变较小但在垂直层理方向上明显减弱; ZHAO 等^[13]对煤进行动态间接拉伸试验,揭示其抗拉强度与层理的粗糙度和不连续性有关; 刘恺德等^[14]对煤进行了与层理面平行和垂直的间接拉伸试验,得出宏观煤岩成分的条带状分布是决定其力学特性各向异性的内在原因。以上研究均反映出煤力学特性与层理的强烈相关性,但并未通过有效手段,探究煤在拉伸状态下考虑层理构造的损伤演化特征,因此,通过系统的宏细观试验,对这一问题进行讨论,具有重要的工程意义。

声发射测试作为无损检测技术中的一种,已经被广泛应用于受载岩石破坏和失稳前兆信息的研究中,声发射演化规律即代表了岩石在荷载作用下的损伤演化过程^[15-17]。但煤强度低,原煤试样加工困难,再加上设备的可靠性和超声波频率范围的限制,直到20世纪50年代,声发射技术才被运用于煤的研究,这使得有关煤的声发射研究明显少于其他种类岩石^[18]。ZHANG 等、LI 等^[19]研究了在单轴压缩条件下,不同加载速率对煤样声发射和力学特性的影响; SHKURATNIK 等^[20]通过比较煤岩在不同围压下多个变形阶段的声发射参数从而探索煤的物理力学特性; MAJEWSKA^[21]等对无烟煤开展吸附-解吸循环

作用下的声发射试验,发现煤与 CO₂ 或 CH₄ 相互作用会造成其结构的改变; YIN 等^[22]研究了含瓦斯煤在常规三轴条件下的声发射特性,表明声发射振铃计数与煤的损伤演化情况、渗透率的变化情况对应良好; AI 等^[23]研究了煤在不同卸荷速率下的三轴卸围压实验中声发射参数的时空演化规律并提出了相应的破坏前兆信息; WU 等^[24]运用声发射监测技术研究了煤的动态损伤特性,张潮鹏等^[25]通过对比多种声发射参数,研究了煤在单轴受压条件下的层理效应。这些研究均表明声发射数据能为煤内部的损伤演化过程提供有效信息,并得到了国内外学者的肯定,然而针对煤在拉伸过程中声发射特征层理效应的研究还鲜有涉及。

因此,笔者选择山西大同塔山煤为试样,进行电镜扫描(SEM)、工业用计算机断层成像技术(工业CT)测试等细观试验,并在进行间接拉伸试验的过程中辅以声发射技术,研究具有层理构造的煤的细观结构、加载方向平行和垂直层理这两种特殊情况下的拉伸力学特性以及基于声发射的损伤演化特征层理效应,为煤炭资源的安全开采提供参考。

1 试样制备及试验方案

1.1 试样制备

试验煤样取自山西大同煤矿集团塔山煤矿 8212 工作面,深度 469.4 m。本次研究围绕煤的层理效应开展,故在煤块中取芯时有相应要求,需使用钻机、车床等机械设备按照轴向平行层理方向和轴向垂直层理方向分别钻取煤芯,经切割打磨等工序,使试件表面光滑,避免因不规则表面产生的应力集中现象,且所取煤岩尽可能避免肉眼可见的缺陷,使其离散性尽量减小。按照 ISRM 建议,将煤样加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 标准圆柱体试件,用于轴向平行层理和轴向垂直层理煤岩的 CT 测试; 间接拉伸的煤样 $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,层理面与圆柱轴线平行,如图 1 所示,具体尺寸信息见表 1。

1.2 试验设备及方案

细观试验主要使用以下仪器: X 射线衍射测试(XRD)使用 DMAX-3C 型 X 射线衍射仪; X 射线

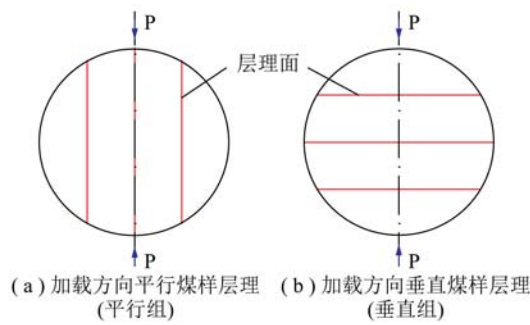


图 1 间接拉伸试件示意

Fig. 1 Sketch map of indirect tensile test specimens

荧光测试(XRF)采用 XRF-1800 CCED 型 X 射线荧光光谱仪;电镜扫描采用 JSM-7500F 冷场发射扫描电子显微镜;工业 CT 测试采用 ACTIS300-320/225 工业 CT 扫描系统,结合 CT 探测器特性及试件尺寸条件,本次

扫描选用电流 220 mA,电压 120 kV。间接拉伸试验采用 MTS815 岩石力学试验系统进行加载和应力、变形数据收集工作,使用美国物理声学公司 PCI-II 型声发射测试系统进行拉伸全过程声发射测试。

试验时将试件分别分为加载方向平行和垂直于煤层理面两组,为叙述简便,后文将这两组煤样的名称分别简化为平行组试样和垂直组试样。加载时采用 0.06 mm/min 的环向变形控制,直至试样破坏失去承载能力。试件前后各均匀布置 4 个 AE 传感器,共 8 个,在试件与传感器的接触部位涂抹凡士林以保证二者之间的接触贴合效果,加载方式如图 2 所示。试验进行时,同步开展拉伸全过程的声发射实时监测,最后结合细观试验结果并综合多种声发射参数对受拉煤岩损伤演化的层理效应进行研究。

表 1 煤样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal sample

层理方向	煤样编号	直径/mm	高度/mm	体积/cm ³	质量/g	密度/(g·cm ⁻³)	峰值应变/10 ⁻³	抗拉强度/MPa	平均值/MPa
平行(//)	P6-1	47.84	25.73	46 234.56	59.10	1.28	6.269	0.720	0.706
	P6-2	47.70	25.49	45 539.98	59.97	1.32	6.067	0.651	
	P6-3	47.71	21.37	38 199.89	49.89	1.31	3.589	0.906	
	P6-4	47.75	26.80	47 998.95	63.12	1.32	1.505	0.546	
垂直(⊥)	V7-1	47.83	25.60	45 995.16	58.87	1.28	5.759	1.100	1.039
	V7-2	47.77	24.36	43 650.39	57.70	1.32	4.837	0.963	
	V7-3	47.83	24.35	43 752.73	55.50	1.27	10.224	1.469	
	V7-4	47.76	27.35	48 995.56	63.04	1.29	8.865	1.114	
	V7-5	47.83	24.13	43 361.88	55.40	1.28	6.938	0.825	
	V7-6	47.85	25.23	45 367.52	59.36	1.31	4.277	0.762	

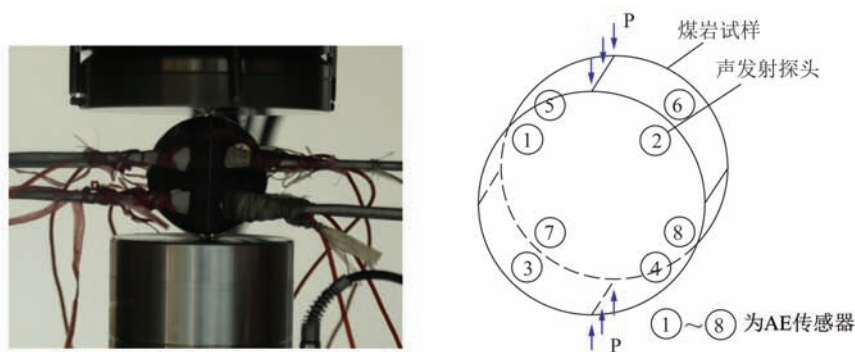


图 2 煤间接拉伸加载示意

Fig. 2 Sketch map of indirect tensile loading

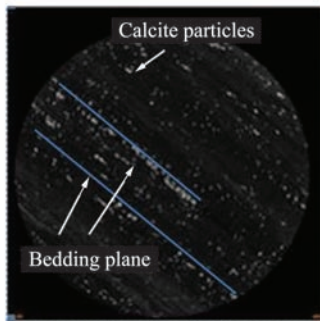
2 试验结果及分析

2.1 细观结构层理效应

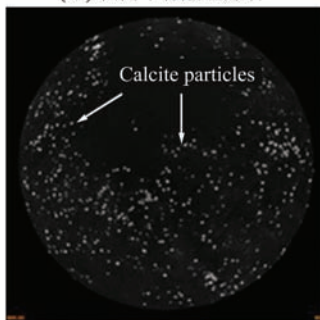
根据 XRD 和 XRF 测试结果,煤样矿物组成为:

含碳有机物 71.44%,高岭石 20.13%,方解石 6.98%,其他 1.45%。由于 2 组测试样品均为粉末状,无法将测试结果与煤的具体部位对应,故对煤断面进行 SEM 点扫描测试,发现其附着的白色物

质为方解石。再将 SEM 结果与工业 CT 测试结果(图 3)对比,得知试件内部分布的白色斑点为方解石。从图 4 可以看出垂直层理煤岩的白色斑点明显多于平行层理煤岩,表明方解石主要沉积在煤层面上。



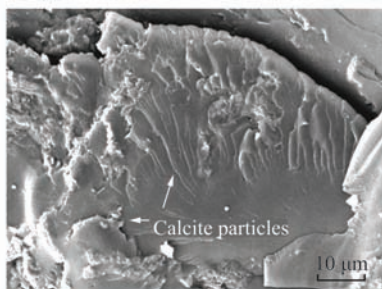
(a) 轴向平行层理煤岩



(b) 轴向垂直层理煤岩

图 3 工业 CT 扫描图片

Fig. 3 Industrial CT scanning picture



(a) 轴向平行层理煤岩断口形貌



(b) 轴向垂直层理煤岩断口形貌

图 4 煤岩断口 SEM 图像

Fig. 4 SEM image of coal rock fracture

SEM 结果(图 4)显示,煤样结构相对致密,孔隙较不发育,断口表面散落着很多细小的方解石颗粒,平行

状或贝壳状的断口均起始于方解石颗粒,大量微裂隙分布在煤基质与方解石的结合处。造成这种现象的原因为方解石的莫氏硬度分布范围为 2.7~3.0,明显高于含碳有机物和高岭石,这种突出于其他成分的脆性使得其边界容易产生应力集中,同时由于附近原生孔隙的存在,微裂隙就更易在此处萌生和发育,随着荷载的增大,裂隙逐渐发展连通直至试件破坏。

平行层理煤岩的破坏面沿层面扩展;垂直层理煤岩的宏观破裂面的形成则会受到层理的阻碍,因此,煤的层理构造和矿物分布均会对微裂隙的发展过程造成明显影响,从而影响煤在拉伸状态下宏观破裂面的特征。

2.2 间接拉伸力学特征层理效应

煤样间接拉伸应力应变曲线如图 5 所示,由图 5 可以看出,试件在加载过程中经历弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段 3 个过程,没有出现类似于压缩试验的压密阶段,这与本批试件孔隙率较小,结构比较致密有关。与平行组试样相比,部分垂直组试样在屈服后变形相对较大,呈现出明显的塑性变形(如试件 V7-3、V7-4 和 V7-6),力学特征略偏向延性。

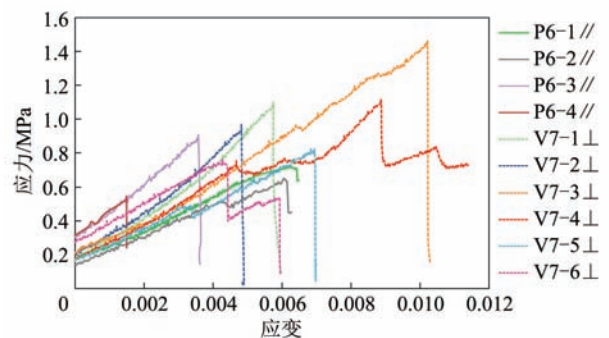


图 5 煤样应力-应变曲线

Fig. 5 Stress and strain curves of coal sample

煤样间接拉伸特征力学参数列于表 1,平行组和垂直组试样的抗拉强度均值分别为 0.706 和 1.039 MPa,后者为前者的 1.5 倍,承载能力明显增强。这是由于加载方向平行于煤层理面时,裂隙沿层理面扩展,试件内部主要靠层理间的黏聚力来抵抗拉应力,计算强度可以认为是煤软弱层理面的抗拉强度,当加载方向垂直于煤层理面时,裂隙的扩展需要贯通各层理,拉应力由层理间基质承担,计算强度为煤基质的抗拉强度,而层理间的粘聚作用明显弱于层理内基质,故使得平行组试样的抗拉强度明显小于垂直组试样。因此,煤内部的层理构造会造成其强度的各向异性。

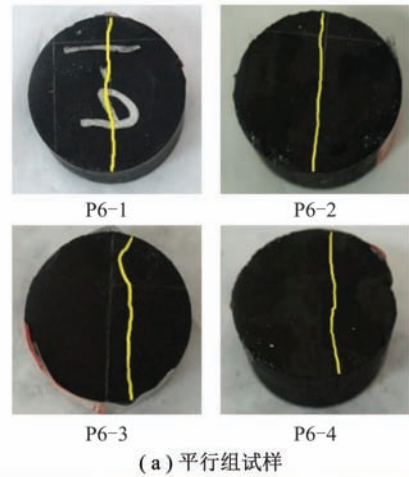
不同层理方向煤样劈裂结果如图 6 所示,平行组煤样仅存在一条沿层理面发展的竖向主裂纹,无次级

裂纹生成,宏观破裂面始于矿物边界处并在竖向荷载的作用下沿软弱层面张开。垂直组煤样的主裂纹大多垂直层理发展,部分试件(如 V7-3、V7-4 和 V7-5)还伴随着与层理平行或成小角度的剪切破坏。造成这种现象的原因是竖向荷载使得垂直于层理面的方向产生了较大的压应力,抑制了裂隙沿着层理面发育,随着竖向荷载加大,基质内薄弱部位承受的拉应力首先超过其抗拉强度,试样中部产生裂纹,此时试样呈现非平衡状态,层理在竖向压力的作用下发生局部错动,从而产生横向裂纹;同时,裂纹总是沿着消耗能量最少的路径发展^[26],因而裂隙大都沿矿物分界面发育而不是贯穿矿物,造成试件破坏的裂纹多呈弯曲状态,不完全通过圆盘中心。由此可以看出,煤的拉伸破坏形态具有明显的层理效应。

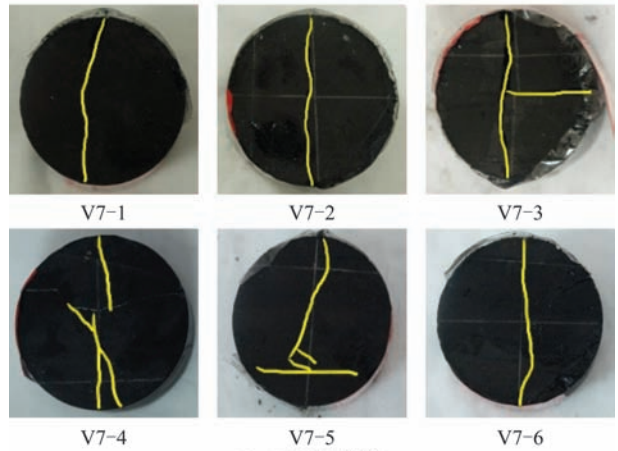
上述分析表明煤的拉伸力学行为表现出显著的层理效应。接下来对拉伸过程中接收的 AE 信号进行整理和分析,并结合其拉伸力学特性,进一步探究煤受拉损伤演化特征的层理效应。

2.3 声发射时空序列特征层理效应

图 7 为平行组时空演化特征,图 8 为垂直组时空演化特征。其中,图 7(a),8(a)为煤岩振铃计数率随应变的变化曲线,图 7(b),8(b)为煤岩能率随应变的变化曲线,图 7(c),8(c)为煤岩声发射空间分布随应力水平演化。图 9 为不同层理方向煤岩累计振铃计数随应力水平变化曲线,表 2 为不同层理方向煤岩振铃计数率、能量计数率最大值统计表。



(a) 平行组试样



(b) 垂直组试样

图 6 不同层理方向煤样劈裂破坏结果
Fig. 6 Different direction of coal fracturing results

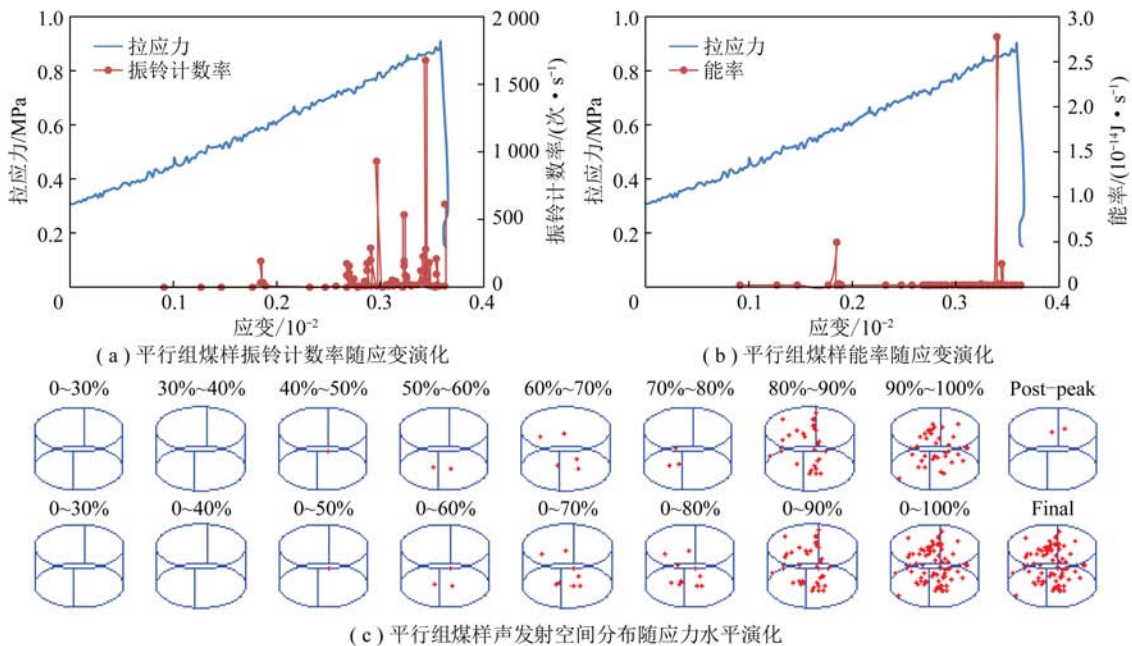


图 7 平行组时空演化特征(P6-3)

Fig. 7 Spatiotemporal evolution of parallel group(P6-3)

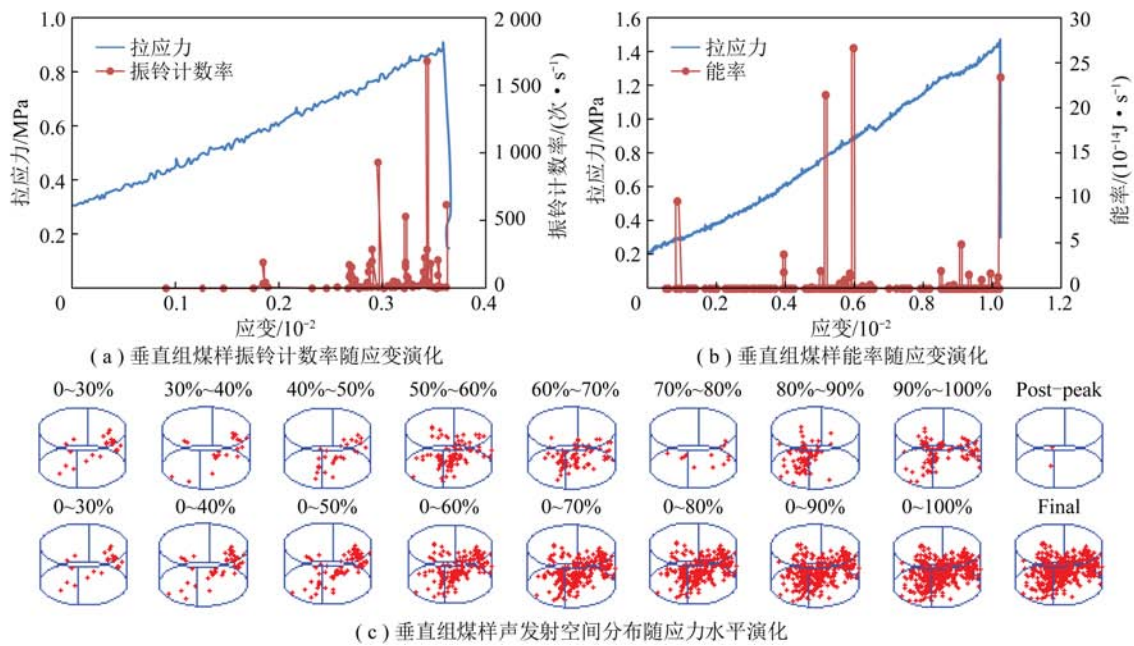


图 8 垂直组时空演化特征(V7-3)

Fig. 8 Spatiotemporal evolution of vertical group(V7-3)

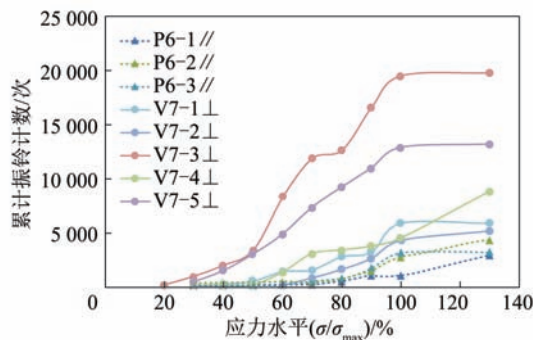


图 9 不同层理方向煤样累计振铃计数随应力水平演化
Fig. 9 Evolution of coal accumulative count of different bedding direction with stress levels

从图 7~9 可以看出,两组试件内部的活动均随着应力的增大逐渐剧烈,但仍有明显差异。平行组试样的振铃计数率曲线较为稀疏,一定规模的 AE 事件出现时刻较晚,其在峰值应力的 50% 开始出现 AE 事件,80%~100% 这一时段内突增,AE 定位点较为分散;垂直组试样的 AE 信号在试验初期出现,曲线更为密集,煤内部 AE 活动在拉伸全过程均处于高活跃状态,其 AE 空间定位点出现在加载初期,在整个损伤破坏过程中逐步增加,最终形成明显的主聚集区,应力水平 70%~80% 这一阶段 AE 事件数突然减少,这与层理破坏造成层间错动从而产生的应力重分布有关,该组试件的 AE 事件数明显多于平行组。平行

表 2 煤样振铃、能量计数率最大值统计

Table 2 Maximum data of coal ringing and energy count rate

试件编号	层理方向	最大振铃计数率/(次·s ⁻¹)	最大振铃计数率平均值/(次·s ⁻¹)	最大能量计数率/(10 ⁻¹⁴ J·s ⁻¹)	最大能量计数率平均值/(10 ⁻¹⁴ J·s ⁻¹)
P6-1	//	27 286		4. 17	
P6-2	//	26 133	18 364	2. 45	3. 14
P6-3	//	1 674		2. 79	
V7-1	⊥	108 367		32. 37	
V7-2	⊥	81 765		86. 45	
V7-3	⊥	41 607	60 572	26. 59	49. 16
V7-4	⊥	39 608		70. 63	
V7-5	⊥	31 513		29. 77	

组试样的累计振铃计数在应力水平达到 80% 以后迅速增加,振铃计数率最大值为 1 674 次/s,累计振铃计数为 3 130 次,垂直组试样的累计振铃计数在整个破坏过程中随应力水平增大缓慢上升,振铃计数率幅值明显高于平行组试样,最大值为 41 607 次/s,累计振铃计数为 19 797 次,是平行组试样的 6.3 倍。在整个拉伸过程中,平行组试样仅发生 3 次能量激增事件,累计能量释放 14.58×10^{-14} J,垂直组试样除几次大规模的能量释放外,还伴随着很多小型的能量释放事件,能量率的幅值明显高于平行组煤岩累计能量释放 23.31×10^{-14} J,为平行组试样的 1.6 倍。从表 2 可见,对于参与试验的所有煤样,平行组试样能率峰值的平均值为 3.14×10^{-14} J/s,垂直组试样能率峰值的平均值为 49.16×10^{-14} J/s,为平行组能率峰值的 15.7 倍。此外平行组试样振铃计数率最大值为 18 364 次/s,而垂直组试样振铃计数率峰值为 60 572 次/s,是前者的 3.3 倍。这表明裂隙沿煤层理面发展所耗能量明显少于拉断层间煤基质所耗能量。

在试验过程中,轴向荷载造成平行组试样内部产生垂直于层理面的拉应力,煤层理接触面之间的结合能力较弱造成其承载能力较低,由于硬度较大的脆性矿物方解石沿层理面分布,通常不会对平行组试样裂隙的贯通造成阻碍,轴向荷载施加后,内部的横向拉应力使得矿物与基质分界处的原生裂隙微微张开,但没有裂纹形成和扩展,主要发生弹性变形,未检测到 AE 事件;在应力足够大时,微裂隙从方解石矿物的边界处萌生,其端部最先达到抗拉强度,沿着煤内部的软弱结构面迅速发育贯通,试件瞬间被拉裂,累积的应变能全部同时释放,宏观竖向裂纹形成,试件破坏,这就造成能率和振铃计数率在应力峰值前的小范围内激增,平行组试样的抗拉强度较低。垂直组试样内部的拉应力沿层理方向延伸,孔隙分布较多或是有初始微裂隙存在的基质层由于承载能力较弱,最先发生破坏,其少量微破裂在试验初期时出现在加载部位附近小范围内矿物界面上和中部的薄弱处;随着应力的增大,微破裂逐渐增多并向试件中部发展,但裂纹分布仍呈现出无规律的随机特征,断裂的煤基质层数量增多,余下的基质层承受的应力急剧增加,当达到极限荷载的 60% 左右时,微裂纹逐渐发展扩大,每个层理内的微断裂相互连通,形成宏观主破裂面,出现明显的成核区域。裂隙穿过层理面发育所耗能量明显大于沿层理面产生,应力集中造成部分基质内的破坏面贯通方解石颗粒,使得垂直组试样的振铃计数率和能量计数率幅值和激增次数都明显多于平行组;基质层的逐层破坏造成能量的持续稳定释放,避免了应变

能的大量累积,使得垂直组振铃计数率和能率演化整体的幅值较大,内部的 AE 活动一直处于活跃状态;岩石内部微裂纹的萌生由于层理构造和矿物非均质性而呈现出很强的随机特性,但是受到层理面构造的影响,微裂纹的连通、发展呈现出一种从无序到有序的自组织过程,因而会形成特定的宏观裂纹模式。

当竖向荷载加载方向平行和垂直于煤层理面时,分别对应试件内部拉应力垂直和平行于层理面两种情况。因此,在实际开采过程中,拉应力垂直于层理方向的临空煤体在损伤过程中虽然能量释放小,但破坏失稳突然,应加强声发射监测;而当拉应力方向与煤层理面平行时,整个损伤过程释放能量大,煤内部活动剧烈,更易于捕捉破坏前兆信息。

2.4 煤岩损伤特征层理效应

损伤变量是表征材料或结构劣化程度的量度,直观上可理解为微裂纹或空洞在整个材料中所占体积的百分比^[27-29]。基于声发射特征参数的岩石损伤变量计算公式为

$$D = \frac{\Omega}{\Omega_t} \quad (1)$$

其中, Ω_t 为岩石试样截面全破坏时的声发射累积; Ω 为岩石试样截面破坏面积为部分的声发射累积数值,本文选取 AE 振铃计数表征声发射累积数值,且在图 5 中可以看出,当应力达到试样的抗拉强度,应力应变曲线陡降,试样不再具有承载能力,故认为应力达到试样抗拉强度时,岩石损伤变量 $D=1$ 。图 10 为垂直组和水平组在巴西劈裂试验中 D 值随应力水平的变化曲线。

从图 10 可以看出两组 D 值都随着应力水平的增加而增加,这说明在加载过程中,试样逐渐产生裂纹,并随着应力水平的增加而累计直至试样破坏,但两组 D 值增加的趋势具有明显的差异。

平行组 D 值变化曲线前期平缓,在接近试样极限应力时, D 值迅速上升,呈现出明显的两段式特征。这说明在拉伸应力作用下,平行层理煤在破坏过程中虽然释放能量少,但失稳破坏突然,破裂的尺度波动范围更大。

垂直组的 D 值变化曲线较平行组相对稳定,呈现出逐渐阶梯式上升的趋势。这表明垂直层理煤岩在加载过程中释放总能量大,内部活动更为剧烈,但微裂纹的产生和扩展平稳进行,逐层推进,呈现出渐进式破坏的特征。中间的部分阶梯式上升则是由于裂纹于基质层中贯通时,试样突然出现大的破裂。

由损伤变量 D 随时间的变化曲线可以直观清晰的看到,平行组试样在整个破坏过程中,前期稳定,接

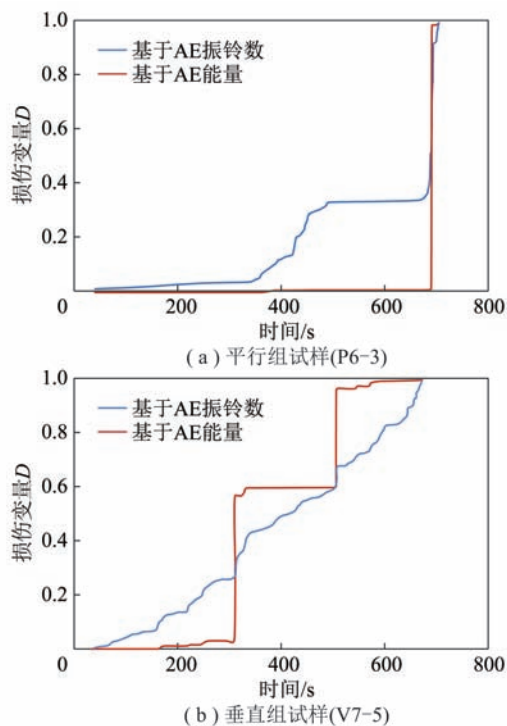


图10 不同层理方向煤样损伤变量 D 随时间演化
Fig. 10 Evolution of coal damage variable D of different bedding direction with time

近于极限应力时突然破坏,垂直组试样则是逐渐破坏。这与上文的叙述也相符合,进一步反应了煤岩不同层理方向具有不同的破坏特征。

由上述的分析可知,一段式与阶梯式分别为平行组与垂直组损伤变量 D 随时间变化曲线的特征,由图10可知,基于AE能量的损伤变量随时间变化曲线更加符合该特征,这表明,基于AE能量计算的岩石损伤状态,比由AE振铃数计算的损伤状态更符合实际,揭示出岩石损伤演化中的能量耗散是其变形破坏的内在驱动^[30]。

3 结 论

(1)方解石矿物主要沿煤层层面分布,对裂隙的萌生和发展起着关键作用。加载方向与层理面平行的煤岩试样的抗拉强度均值为0.706 MPa,垂直组试样抗拉强度均值为1.039 MPa,是前者的1.5倍。平行组试样的抗拉强度可以认为是软弱层理面间的抗拉强度,试样的破裂沿层理面发展;垂直组为煤岩基质的抗拉强度,试样除竖向主裂纹外,还伴随着次级张拉或剪切裂纹。煤的层理构造和矿物分布的非均匀性造成了二者抗拉强度和破坏方式的差异。

(2)从AE时空序列特征来看,平行组试样AE事件稀疏,振铃计数率和能率在峰前激增,总能量释放少,空间定位点在峰值应力的50%左右分散出现,

主要为矿物界面处微裂隙的张开,随后在80%~100%阶段内突增,试件迅速沿层面拉裂;垂直组试样声发射活动的整体水平强于平行组,大小规模AE事件在试验全过程均有发生,应变能持续稳定释放,空间定位点在初期便出现,并出现明显的成核区域,破坏过程为层理内基质的逐层拉裂最后贯通。研究成果可对采煤现场围岩的微震监测提供一定的借鉴和参考。

(3)从损伤变量 D 随时间的变化曲线来看,平行组 D 值前期变化小,再接近峰值应力时, D 值陡增,变化曲线呈现出两段式特征,而垂直组则是逐渐破坏, D 值变化曲线为阶梯式上升,这表明平行组相较于垂直组破坏突然,实际工程中,需要重点关注。基于AE能量计算的岩石损伤状态更加符合实际,揭示出岩石损伤演化中的能量耗散是其变形破坏的内在驱动。

参考文献 (References):

- [1] 谢和平. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] CHEN C S, HSU S C. Measurement of indirect tensile strength of anisotropic rocks by the ring test[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2001, 34(4): 293-321.
- [3] DAN D Q, KONIETZKY H, HERBST M. Brazilian tensile strength tests on some anisotropic rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, 58: 1-7.
- [4] TAVALLALI A, VERVOORT A. Behaviour of layered sandstone under Brazilian test conditions: Layer orientation and shape effects[J]. *Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering*, 2013, 5(5): 366-377.
- [5] EFIMOV V P. The rock strength in different tension conditions[J]. *Journal of Mining Science*, 2009, 45(6): 569-575.
- [6] ERARSLAN N, WILLIAMS D J. Investigating the effect of cyclic loading on the indirect tensile strength of rocks[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2012, 45(3): 327-340.
- [7] CHEN C S, PAN E, AMADEI B. Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1998, 35(97): 43-61.
- [8] OKUBO S, FUKUI K, QI Q. Uniaxial compression and tension tests of anthracite and loading rate dependence of peak strength[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 68(3): 196-204.
- [9] 杨起. 中国煤田地质学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1979.
- [10] PAN R, CHENG Y, YUAN L, et al. Effect of bedding structural diversity of coal on permeability evolution and gas disasters control with coal mining[J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(2): 531-546.
- [11] ZHANG Z, ZHANG R, LI G, et al. The effect of bedding structure on mechanical property of coal[J]. *Advances in Materials Science & Engineering*, 2014(1): 1-7.
- [12] LI C, LIU J, WANG C, et al. Spectrum characteristics analysis of microseismic signals transmitting between coal bedding[J]. *Saf-*

- ty Science, 2012, 50(4):761-767.
- [13] ZHAO Y, ZHAO G F, JIANG Y, et al. Effects of bedding on the dynamic indirect tensile strength of coal; Laboratory experiments and numerical simulation[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 132:81-93.
- [14] 刘恺德, 刘泉声, 朱元广, 等. 考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2):308-316.
LIU Kaide, LIU Quansheng, ZHU Yuanguang, et al. Experimental study of coal considering directivity effect of bedding plane under Brazilian splitting and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2):308-316.
- [15] 袁振明. 声发射技术及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1985.
- [16] 秦四清. 声发射技术概论[M]. 四川:西南交大出版社, 1993.
- [17] ZHANG R, DAI F, GAO M Z. Fractal analysis of acoustic emission during uniaxial and triaxial loading of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 79:241-249.
- [18] SHKURATNIK V L, FILIMONOV Y L, KUCHURIN S V. Experimental investigations into acoustic emission in coal samples under uniaxial loading[J]. Journal of Mining Science, 2004, 40(5):458-464.
- [19] LI H, LI H, GAO B, et al. Study of acoustic emission and mechanical characteristics of coal samples under different loading rates[J]. Shock & Vibration, 2015(1):1-11.
- [20] SHKURATNIK V L, FILIMONOV Y L, KUCHURIN S V. Regularities of acoustic emission in coal samples under triaxial compression[J]. Journal of Mining Science, 2005, 41(1):44-52.
- [21] MAJEWSKA Z, ZIETEK J. Changes of acoustic emission and strain in hard coal during gas sorption-desorption cycles[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70(4):305-312.
- [22] YIN G, QIN H, HUANG G, et al. Acoustic emission from gas-filled coal under triaxial compression[J]. International Journal of Mining Science & Technology, 2012, 6(6):775-778.
- [23] AI T, ZHANG R, LIU J, et al. Space-time evolution rules of acoustic emission location of unloaded coal sample at different loading rates[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 6(6):847-854.
- [24] WU Y L, CHEN J, ZENG S M. The acoustic emission technique research on dynamic damage characteristics of the coal Rock[J]. Procedia Engineering, 2011:1076-1082.
- [25] 张朝鹏, 张茹, 张泽天, 等. 单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(4):770-778.
ZHANG Zhaopeng, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Experimental research on effects of bedding plane on coal acoustic emission under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(4):770-778.
- [26] 周筑宝. 最小耗能原理及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [27] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1993.
- [28] 黄志鹏, 郭映忠, 朱可善. 单轴压缩岩石声发射与损伤变量关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998(S):784-787.
HUANG Zhipeng, GUO Yingzhong, ZHU Keshan. Experimental study on acoustic emission and damage variable of rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998(S):784-787.
- [29] 张明, 李仲奎, 杨强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12):2493-2493.
ZHANG Ming, LI Zhongkui, YANG Qiang, et al. A damage model and statistical analysis of acoustic emission for quasi-brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12):2493-2493.
- [30] 张茹. 岩石损伤演化的声发射特征及岩爆综合预测研究[D]. 成都:四川大学, 2010.
ZHANG Ru. Research on AE properties of rock damage evolution process and rockburst integrated prediction[D]. Chengdu:Sichuan University, 2010.