

宋红华,赵毅鑫,姜耀东,等. 单轴受压条件下煤岩非均质性对其破坏特征的影响[J]. 煤炭学报,2017,42(12):3125-3132. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0588
SONG Honghua,ZHAO Yixin,JIANG Yaodong, et al. Influence of heterogeneity on the failure characteristics of coal under uniaxial compression condition[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(12):3125-3132. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0588

单轴受压条件下煤岩非均质性对其破坏特征的影响

宋红华^{1,2},赵毅鑫^{1,2},姜耀东^{1,3},张修泽³

(1. 中国矿业大学(北京) 共生能源精准开采北京市重点实验室,北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院,北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:以忻州窑14号煤为研究对象,基于波速测试、CT扫描和三维重构技术,分析了煤岩内部原生裂隙、孔隙以及矿物夹杂分布的非均质特征,研究了单轴受压条件下,沿不同方向加载时,煤样内部结构分布的非均质性对煤岩破坏特征的影响。研究发现,煤样内部原生裂隙、孔隙以及矿物夹杂分布方向的非均质性是造成不同加载方向上煤岩破坏特征差异性的原因;煤样内部原生裂隙、矿物夹杂沿层理方向分布和延伸,造成沿垂直层理加载煤样的单轴抗压强度、总声发射计数等参数的均值高于沿平行层理加载的煤样;割理的横向切割作用使沿垂直割理加载煤样整体性低于沿平行割理加载煤样,并造成其单轴抗压强度,总声发射计数等参数的均值以及加载过程中声发射现象的规律性略低于后者;煤样单轴抗压强度与纵波波速呈指数函数关系,煤样内部非均质性对其单轴抗压强度的影响可由非均质系数表示,且二者呈负相关。

关键词:CT扫描;三维重构技术;煤岩;非均质性;单轴压缩

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)12-3125-08

Influence of heterogeneity on the failure characteristics of coal under uniaxial compression condition

SONG Honghua^{1,2}, ZHAO Yixin^{1,2}, JIANG Yaodong^{1,3}, ZHANG Xiuzhe³

(1. Associated and Symbiosis Energy Precision Mining Key Laboratory of Beijing, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the P-wave velocity test, CT scanning and three-dimensional reconstruction technology, the distribution heterogeneity of cracks and mineral inclusions in coal sample, obtained from the No. 14 coal in Xinzhou Mine, was researched, and the failure characteristics of coal samples loaded in different directions effected by its heterogeneity were also investigated, according to the uniaxial experiment when the coal samples loaded in various directions. Results indicate that the distribution heterogeneity of microstructures in coal sample leads to the difference of failure characteristics loading in different directions. The primary fractures and mineral inclusions are distributed and extended along the bedding plane, the average uniaxial compressive strength, total AE count, and other parameters are loaded perpendicular to bedding plane higher than that parallel to bedding plane, at the same time, the transverse cutting effect of cleats makes the parameters of mentioned above and the regularity of AE in the loading process loaded perpendicular to cleats lower than the coal samples been loaded parallel to the cleats. The UCS and the P-wave velocity of

收稿日期:2017-05-02 修回日期:2017-09-03 责任编辑:许书阁

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801401, 2016YFC0600708);中央高校基本科研业务资助项目(2009QM01)

作者简介:宋红华(1988—),男,河南周口人,博士研究生。E-mail:songhonghua@163.com。通讯作者:赵毅鑫(1977—),男,教授,博士生导师,博士。E-mail:zhaoyx@cumb.edu.cn

the coal sample have an exponential function relation, and the effect of heterogeneity inside the coal sample on the UCS can be reflected by the heterogeneity coefficient, and the heterogeneity coefficient has a negative correlation with the UCS of the coal.

Key words: CT scanning; three-dimensional reconstruction technology; coal; uniaxial compression

煤是一种复杂的非均质性材料。煤层内生层理、割理、矿物颗粒及其他缺陷使其具有明显的非均质性和各向异性特征^[1-3]。

采矿过程中巷道开挖、工作面回采等造成开挖扰动应力场与原岩应力场叠加^[4-5],易引起煤体中较薄弱区域出现煤壁片帮、冒顶等问题;而煤体中个别具有较高强度区域又易在采动叠加应力场的作用下出现应力集中,积聚弹性能,并在顶板断裂等外界扰动条件下,产生动力灾害^[6-7]。此外,煤体的非均质性亦会造成声波在其内部传输的复杂性,进而影响利用声音传输特性的物探设备精度,如微震等^[8-9]。因此,研究煤岩非均质性对其破坏特征的影响,有助于深入认识煤岩失稳破坏机理和前兆规律,为巷道支护设计、动力灾害预警等方面提供理论参考。

目前,国内外学者对煤岩非均质性及其对煤岩破坏特征影响的研究主要集中在煤岩内部结构(如矿物夹杂)在煤岩破坏过程中的作用及加载条件(如加载方向、速率等)对煤岩宏观力学特性影响等方面,如:ZHAO等^[10]利用 Computed Tomography (CT) 技术、三维重构技术,构建了基于真实岩芯的数值模型,研究了矿物夹杂在煤岩破坏中的作用,得到了加载速率与煤岩强度的对应关系;刘凯德等^[11]采用巴西劈裂及单轴压缩试验,研究了垂直、平行层理方向上煤岩的拉、压力学特性;吴基文等^[12]对煤岩抗拉强度进行测试,发现煤岩不同层理方向的抗拉强度具有明显的各向异性;ZHAO等^[13]采用分离式霍布金森压杆冲击试验和数值模拟方法,研究了层理对煤岩间接动态抗拉强度的影响,发现煤岩间接动态抗拉强度与层理倾角及层理的粗糙度有关;MAJID Noorian Bidgoli等^[14]利用数值模拟的方法,研究了含节理岩石强度和变形的各向异性特征,发现岩石强度包络线和弹性变形参数随围压和轴向应力变化而不同的特征;KWANG Yeom Kim等^[15]运用实验和数值模拟的方法,研究了沿与页岩层理方向呈不同夹角的加载条件下,页岩强度、变形破坏的变化特征。但通过分析煤岩内部结构分布特征及进行相应岩石力学实验,量化分析煤岩非均质性对其破坏特征及强度影响的研究鲜见报道。

获取煤岩内部结构分布特征是研究非均质性对煤岩破坏特征影响的基础。CT (Computed Tomo-

graphy) 技术作为一种无损探测技术,在分析岩石类材料内部结构特征方面具有独特的优越性,借助三维重构软件,其能在不损伤试样的情况下获得可视化的煤岩内部裂隙、矿物夹杂等的分布特征^[16-17]。波速是反映岩石内部结构及其力学特性,表述岩石各向异性特征的理想载体^[18-19],作为一种无损、便携的探测手段,波速也常用来估测岩石的基本力学参数,许多学者也对不同岩石波速与单轴抗压强度的关系进行了广泛的研究,并发现二者具有某种确定关系^[20-23]。声发射 (Acoustic Emission“简称 AE”) 伴随煤样受载变形、破坏的整个过程。声发射参数,如声发射计数、振幅、声发射能量等,可直观的反映试样内部结构及其变形破坏的剧烈程度^[24]。

因此,本文采用声波测试、CT 和三维重构技术,获得了沿垂直层理,平行层理、垂直割理和平行层理、割理方向煤样的横波波速,以及煤样内部三维结构特征,并沿上述 3 个方向对煤样进行单轴压缩实验,得到了沿不同加载方向下煤样应力-应变全过程曲线和相应声发射数据,分析了煤岩非均质性对其破坏特征的影响,研究了煤岩非均质性与单轴抗压强度的关系。

1 煤的性质及样品制备

1.1 煤样的性质

煤样取自大同忻州窑 14 号煤层,该煤层属侏罗纪大同组。14 号煤由亮煤和暗煤组成;质地较硬,断口平坦,呈参差状,偶见阶梯状;发育少量内生裂隙;水平层理,碎块状构造,条带状,透镜及均状结构。由 ORTHOPLAN 型反光油浸显微镜和 D/MAX-2500 型 X 射线衍射仪,测得该煤样中镜质组为 43.3%;惰质组为 54.1%;石英为 0.6%,非晶质为 96.0%,黏土矿物为 3.4%。

1.2 煤样的制备

从现场所取较大煤块中加工成的 3 组共 9 个立方体煤样为研究对象,尺寸为 50 mm × 50 mm × 50 mm。加工时,煤样上下表面平行于层理,侧面垂直于层理、平行于割理或垂直于层理、割理,加工角度误差不超过 3°;研磨时试样两端面不平行度小于 0.01 mm,上下端垂线偏差小于 0.02 mm。加工完成后煤样平均分为 X, Y, Z 三组,并从 X, Y, Z 三个方向

对其进行标记,X 方向为平行于层理、垂直于割理方向,Y 方向为平行于层理、割理方向,Z 方向为垂直于层理方向,标记后试样如图 1 所示。

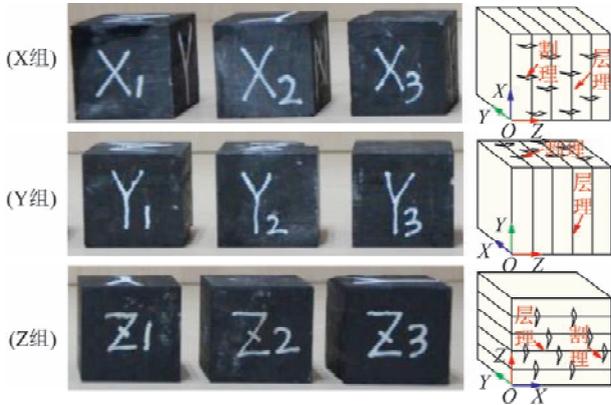


图 1 煤岩立方体试样
Fig. 1 Cube coal samples

采用 ACTIS300-320/225 型微焦点工业 CT,对煤样进行扫描,并进行三维重构,图 2 给出了样品 X₁ 内部原生裂隙、割理、矿物夹杂的分布特征,不难看出:矿物夹杂呈片、层状,沿平行于层理方向分布和延伸;原生裂隙、孔隙沿大致平行于层理方向分布和延伸(为了方便描述本文原生裂隙不包括割理);割理数量较少,呈孤立状,沿垂直于层理方向延伸。

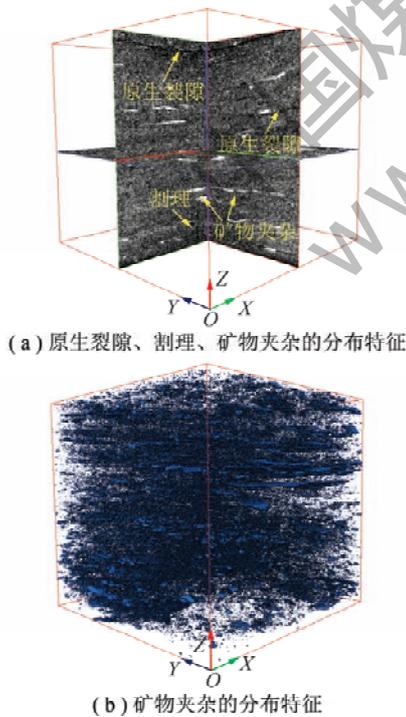


图 2 煤样内部原生裂隙、割理和矿物夹杂的分布特征
Fig. 2 Distribution character of fractures, cleat and mineral inclusions inside the coal sample

1.3 波速测试

煤样受压前,为进一步了解煤样非均质性对其波

动力学特性影响,采用 ZBL-U510 型非金属超声检测仪,对各样品沿 X, Y, Z 方向的纵波波速进行测定。ZBL-U510 型非金属超声检测仪,声时精度为 0.05 μ s,测度范围 0 ~ 629 000 μ s;放大器增益 82 dB,带宽 10 ~ 250 kHz,测试结果见表 1。不难发现:所有样品中沿不同方向的纵波波速的关系为:Y 方向>X 方向>Z 方向,该结果和 CT 扫描所揭露的煤样内部结构分布特征相一致。

表 1 各煤样波速测试结果

Table 1 P-wave velocity test results of all the samples

煤样编号	波速/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
X ₁	2.160	2.194	1.847
X ₂	1.958	2.120	1.867
X ₃	2.023	2.232	2.016
Y ₁	2.198	2.274	2.049
Y ₂	2.017	2.193	1.894
Y ₃	2.194	2.278	1.923
Z ₁	2.194	2.239	1.821
Z ₂	2.277	2.404	1.892
Z ₃	2.273	2.358	1.834
均值	2.144	2.255	1.849

2 试验设备及试验方案

单轴压缩试验和声发射测量装置分别采用中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室的 3 000 kN 超高刚性伺服试验机和美国 PAC 公司生产的 PCI-2 声发射信号采集系统。单轴压缩试验机最大荷载 3 000 kN,精度为 $\pm 1\%$,分辨率为 1/100 kN;PCI-2 声发射信号采集系统带宽频率为 1 kHz ~ 3 MHz,最大信号幅度为 100 dB,动态范围大于 85 dB,试验机和处理好的煤样如图 3 所示。

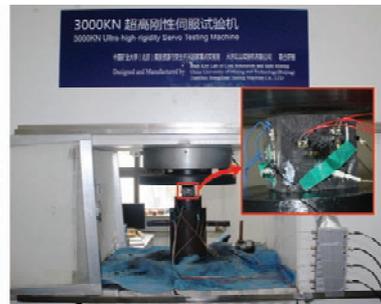


图 3 单轴压缩试验机和处理好的煤样
Fig. 3 Coal sample and UCS testing machine

单轴压缩试验采用位移控制的加载方式,加载速率为 0.2 mm/min;X, Y, Z 组煤样分别沿各自分组对应方向加载。

3 试验结果及分析

3.1 煤样的力学响应特征

表2列出了测得的相应力学参数,图4为由试

验机测得3组煤样沿不同方向加载过程中的应力-应变曲线。由图4和表2可知,煤样的单轴抗压强度、弹性模量等力学参数表现出明显的方向性特征。

表2 煤样单轴压缩试验结果

Table 2 Experimental results of uniaxial compression test on coal samples

加载方向	煤样编号	单轴抗压强度/MPa	强度均值/MPa	弹性模量/GPa	模量均值/GPa	压密应变变量/%	压密应变变量均值/%	峰后应变变量/%	峰后应变变量均值/%	压密应变占总应变比重/%	压密应变比重均值/%	峰后应变占总应变比重/%	峰后应变比重均值/%
X	X ₁	23.96		32.45		0.10		0.67		6.67		44.43	
	X ₂	26.92	26.21	30.64	33.04	0.18	0.21	0.71	0.61	11.68	13.8	46.10	40.18
	X ₃	27.36		36.03		0.35		0.45		23.33		30.00	
Y	Y ₁	25.88		34.96		0.05		0.23		4.42		20.35	
	Y ₂	29.24	26.24	33.49	33.63	0.20	0.19	0.29	0.40	13.42	12.26	19.46	26.88
	Y ₃	23.60		32.43		0.32		0.69		18.93		40.83	
Z	Z ₁	40.88		30.03		0.75		0.12		34.09		5.45	
	Z ₂	31.64	36.07	32.13	31.99	0.42	0.50	0.42	0.28	25	21.68	25.00	17.04
	Z ₃	35.68		33.80		0.3		0.31		21.33		20.67	

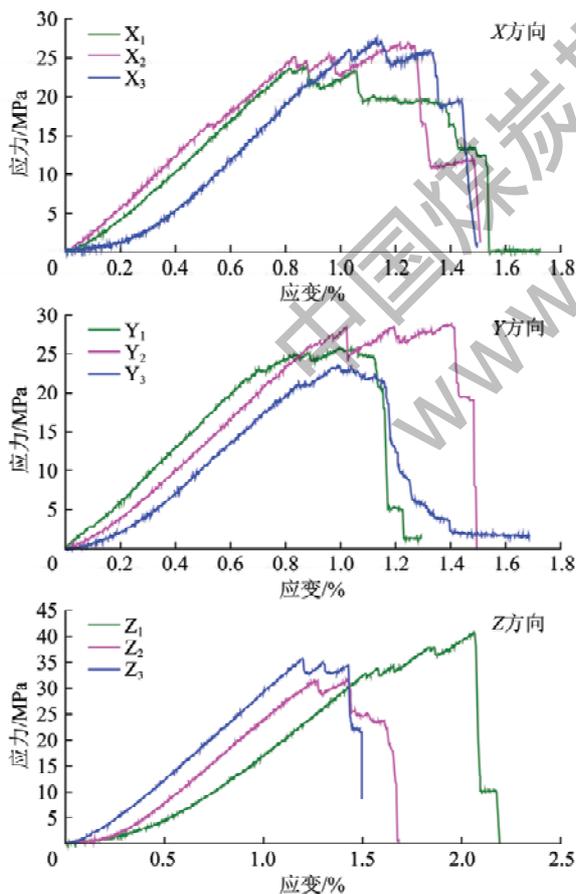


图4 各煤样单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 4 Uniaxial stress-strain curves of coal samples

沿Z方向加载煤样的单轴抗压强度均值为36.07 MPa,大于沿X,Y方向加载煤样的26.21,26.24 MPa;沿Z方向加载煤样的平均弹性模量为

31.99 GPa,小于沿X,Y方向加载煤样的33.04,33.63 GPa;沿Z方向加载煤样在压密阶段的平均应变量为0.50%,占总应变变量比重的均值为21.68%,大于沿X,Y方向加载煤样应变量的0.21%,0.19%,及其占总应变变量比重均值的13.8%,12.26%;沿X,Y方向加载的煤样比沿Z方向加载的煤样表现出更多的延性破坏,沿X,Y方向加载的煤样在破坏后阶段的应变变量均值分别为0.61%,0.40%,占总应变变量比重的均值分别为40.18%,26.88%,均大于沿Z方向加载煤样应变量的0.28%和比重的17.04%。

沿平行于层理不同方向加载的煤样力学特性也表现出一定的差异性,沿Y方向加载的煤样平均弹性模量和单轴抗压强度,略高于沿X方向加载时的煤样;沿X方向加载煤样在压密和峰后阶段应变变量占总应变的比重,均大于沿Y方向加载的煤样。

不同加载方向煤样力学性质的差异性可由煤样内部结构分布的方向性来解释。原生裂隙、孔隙大致沿层理方向延伸,沿Z方向加载的煤样所受轴向应力垂直于层理,其原生裂隙、孔隙在压密阶段容易被压密,煤样轴向应变变量较大;沿X,Y方向加载时,所受轴向应力平行于层理,只有割理容易被压密,而原生裂隙、孔隙间的空隙则不易被压密,导致沿X,Y方向加载煤样在压密阶段轴向应变变量少于沿Z方向加载的煤样。

矿物夹杂等大致沿平行于层理方向延伸,在弹性阶段,沿Z方向加载时,煤样层理间软弱夹层垂直于

加载方向,其应变量计入轴向应变,导致其轴向应变较大、应力随应变增加量较少,弹性模量较低;而 X, Y 方向加载时,软弱夹层平行于加载方向,煤基质起到“骨架”作用,轴向应变仅为煤基质应变,因而应力随轴向应变增加量大,弹性模量也较沿 Z 方向加载煤样大。

层理之间、煤基质与矿物夹杂界面之间的黏结力较弱,沿 X, Y 方向加载时,轴向应力与层理面、矿物和煤基质界面以及原生裂隙面平行,这些界面在非稳定破裂和破坏后阶段容易离层,削弱了煤样的承载能力,但煤样破坏过程中通过横向离层而进行应力调整能力较强,使得煤样表现出较多的延性破坏,这些可由煤样在非稳定阶段径向应变增加量体现(表 3);沿 Z 方向加载的煤样则反之,故沿 Z 方向加载煤样的单轴抗压强度高于沿 X, Y 方向加载的煤样,但其在非稳定破裂和破坏后阶段应变增量小于沿 X, Y 方向加载的煤样。

表 3 不同加载方向煤样非稳定破坏阶段横向应变增量

Table 3 Lateral strain increment of coal samples loaded in various directions at the unsteady failure stage

加载方向	煤样编号	侧向微应变增量/ 10^{-3}	侧向微应变增量均值/ 10^{-3}
X	X ₁	6.58	
	X ₂	4.84	4.67
	X ₃	2.58	
Y	Y ₁	3.35	
	Y ₂	2.12	3.33
	Y ₃	4.51	
Z	Z ₁	2.22	
	Z ₂	2.48	2.64
	Z ₃	3.23	

沿 X 方向加载时,加载方向垂直于割理,割理对煤样的横向截割作用降低了煤样内部的整体性,煤样在破坏过程中径向扩容应力调整多于沿 Y 方向加载的煤样,煤样径向应变量大,见表 3,故而沿 X 方向加载煤样的承载能力弱于沿 Y 方向加载的煤样,但其在非稳定破坏阶段的应变增量大于沿 Y 方向加载的煤样。

3.2 煤样声发射特征

研究煤岩破坏过程中的声发射特征,是获取煤岩破坏过程中的变形破坏特征,进一步验证煤岩内部结构非均质性对煤岩破坏特征影响的重要途径。表 4 总结了声发射监测结果,限于篇幅,图 5 仅列出了沿 X, Y, Z 方向加载时,煤样 X₁, Y₂, Z₁ 的声发射计数、释放总绝对能量和轴向应力随应变、时间变化的特征。

表 4 总声发射计数、绝对能量及其均值

Table 4 Total number of AE count, absolute energy and their average value

加载方向	煤样编号	总计数/ 10^6	总计数均值/ 10^6	总绝对能量/ 10^{-8} J	总绝对能量均值/ 10^{-8} J
X	X ₁	1.71		0.84	
	X ₂	2.34	2.08	1.10	0.87
	X ₃	2.20		0.67	
Y	Y ₁	2.94		0.77	
	Y ₂	2.74	2.54	1.84	1.14
	Y ₃	1.93		0.81	
Z	Z ₁	2.42		2.27	
	Z ₂	3.29	2.61	1.69	1.72
	Z ₃	2.11		1.20	

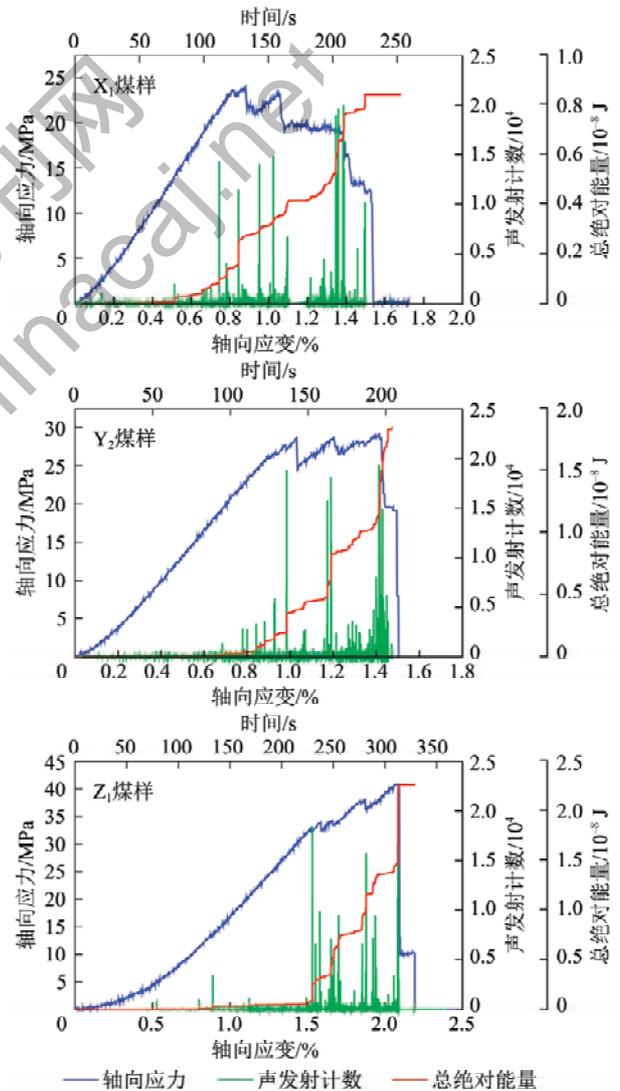


图 5 代表性煤样应力(计数、能量)-应变(时间)曲线
Fig. 5 Stress (AE count, energy)-strain (time) curves of representative coal samples

由表 4 可知,煤样声发射参数也表现出明显的方向性特征:沿 Z 方向加载的试样的平均声总发射计

数为 2.61×10^6 、释放平均总绝对能量为 1.72×10^{-8} J, 大于沿 X, Y 方向加载的煤样; 沿 Y 方向加载煤样的平均总声发射计数、释放总绝对能量分别为 $2.54 \times 10^6, 1.14 \times 10^{-8}$ J, 大于沿 X 方向加载煤样的 $2.08 \times 10^6, 8.7 \times 10^{-9}$ J。

由图 5 可知, 煤样在不同加载阶段的声发射特征也表现出一定的差异性。

(1) 孔隙裂隙压密阶段。该阶段声发射计数、释放总绝对能量均较小, 沿 Z 方向加载煤样的声发射计数少于沿 X, Y 方向加载的煤样。因为煤样内原生裂隙、孔隙大致沿平行于层理方向延伸, 沿 Z 方向加载时, 轴向应力垂直于裂隙、孔隙面, 同一裂隙(或孔隙)两面沿垂直裂隙面相向移动, 原生裂隙、孔隙面间相对滑动较少, 声发射事件较少; 沿 X, Y 方向加载时, 原生裂隙(孔隙)大致平行于加载方向, 原生裂隙(或孔隙)压密时, 同一裂隙(或孔隙)两面间相互错动, 导致裂隙(孔隙)面间摩擦较多, 进而产生比前者多声发射事件。

(2) 弹性变形阶段。沿 X, Y 方向加载煤样声发射计数、释放总绝对能量数值均开始明显增加, 其声发射计数峰值数值多在 100 ~ 300, 少数在 400 ~ 910; 但沿 X 方向加载煤样声发射计数峰值在弹性阶段后期随煤样应变增加而递增的规律性没有 Y 方向明显; 沿 Z 方向加载煤样的声发射计数峰值多在 100 ~ 300, 少数在 500 ~ 1 100, 声发射释放总能量略有增加, 弹性阶段后期声发射计数峰值没有规律性增加的趋势。

这是因为沿 X 方向煤样内割理垂直于加载方向, 割理在弹性阶段后期有较大幅度的调整, 使得其在该阶段偶有明显声发射计数, 削弱了其整体声发射递增的规律性; 沿 Z 方向加载煤样的原生裂隙、孔隙周围在压密阶段积累弹性能较多, 其每次调整释放能量较多, 能被设备检测到的声发射事件较多, 使个别声发射计数峰值大于沿 X, Y 方向加载的煤样; 但由于加载方向垂直于原生裂隙、孔隙, 沿 Z 方向加载煤样裂隙在弹性阶段调整较少, 其声发射计数峰值在弹性阶段后期也没有规律性增加的趋势。

(3) 非稳定破裂发展和破坏后阶段。煤样声发射计数、声发射释放总绝对能量迅速增加。沿 Z 方向加载的煤样绝对声发射能量由 7.52×10^{-10} J 增加到 2.27×10^{-8} J, 增加量大于沿 X, Y 方向加载的煤样, 即分别由 8.24×10^{-10} J 增加到 8.42×10^{-9} J 和由 1.38×10^{-9} J 增加到 1.84×10^{-8} J; 沿 Y 方向加载煤样声发射计数的极大峰值在 $1.6 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^4$, 比沿 X 方向加载煤样的 $1.25 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$ 平稳; 沿 Z 方向

加载煤样声发射计数的极大峰值数值与沿 X, Y 方向加载时相差不大, 在 $1.6 \times 10^4 \sim 2.2 \times 10^4$, 但产生了较多在 $0.6 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^4$ 的次峰值。

沿 X 方向加载时, 煤样内割理及其扩展的横向截割作用, 使其内部变形在破坏后阶段没有沿 Y 方向加载时连续, 煤样内部调整不规律, 造成沿 X 方向加载煤样声发射计数峰值的波动较沿 Y 方向加载的煤样明显; 沿 Z 方向加载时, 煤样裂隙周围及其内部在之前阶段中积聚能量较多, 裂隙在扩展、贯通以及宏观裂隙形成过程中释放能量比沿 X, Y 方向多, 声发射幅值相较于 X, Y 方向加载时高, 能被声发射设备检测到的声发射事件多, 因而产生较多的次峰值。

4 煤岩非均质性对煤岩强度的影响

煤岩非均质性研究的目的是量化煤岩非均质性对其力学性质的影响, 为工程实践和相关研究提供借鉴。由表 1 可知, 同一试件内沿 Z 方向测量得到的波速小于沿 X, Y 方向的波速, 这表明波速也可以反映煤岩内部不同方向的结构差异性, 而煤岩内部结构分布的差异性导致了煤岩宏观力学参数的各向异性, 故可考虑用波速表述煤岩非均质性对其强度的影响。

表 5 总结了以往学者研究得到各种不同岩石纵波波速与相应单轴抗压强度之间的关系^[25-26], 表 5 中, a, b 为常数; Y, UCS, q_u, σ_c 为单轴抗压强度, MPa; x, V_p, SV 为波速, km/s。

表 5 不同岩石波速与单轴抗压强度的关系

Table 5 Relations between P-wave velocity and UCS among different rocks

经验公式	相关系数	研究者
$Y = ax^b$	0.880	MCCANN etc ^[25]
$q_u = 9.95V_p^{1.21}$	0.83	KAHRAMAN ^[25]
$SV = 0.0317\sigma_c + 2.0195$	0.80	YASAR etc ^[25]
$Y = ae^{bx} (a=0.78, b=0.88)$	0.533	ENTWISLE etc ^[25]
$Y = ax^b (a=0.78, b=0.88)$	0.531	ENTWISLE etc ^[25]
$UCS = 0.0642V_p - 117.99$	0.9022	P. K SHARMA etc ^[26]

根据表 5 中提供的波速与岩石单轴抗压强度关系对本研究中测得的煤岩波速和相应单轴抗压强度进行拟合(相关数据见表 1, 2), 发现将沿 X, Y, Z 方向的波速和单轴抗压强度放在一起按表 5 中关系进行拟合时的相关系数在 0.65 ~ 0.68, 而将沿 X, Y, Z 三个方向的波速和单轴抗压强度分别拟合时, 发现以 $v = a\sigma^b$ 关系对煤岩单轴抗压强度、波速进行拟合, 其相关系数较高, 在 0.81 ~ 0.87(图 6), 转换后得

$$\sigma = e^{\frac{1}{b} \ln \frac{v}{a}} \quad (1)$$

其中, v 为声波在煤样中传播速度, km/s ; σ 为煤样沿相应方向加载时的单轴抗压强度, MPa ; a, b 为与加载方向有关的常数。沿 X, Y, Z 方向加载时 a 取值分别为 15.77, 4.07, 3.13; b 取值分别为 -0.627, -0.182, -0.147。

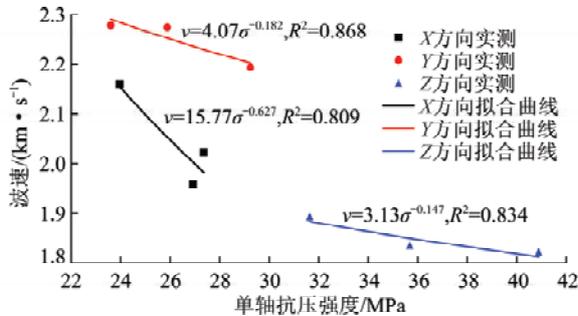


图6 不同加载方向波速-单轴抗压强度拟合曲线

Fig. 6 Wave velocity-uniaxial compressive strength fitting curves for different loading directions

这表明,煤岩单轴抗压强度与波速间存在指数函数关系,且其方向性特征比其他岩石更复杂,这可能是由于煤基质强度弱于其他岩石,导致其更容易受煤岩内部结构的影响。

对比常数 a, b 数值发现, 2 者存在确定的线性关系, 即 $b = -0.0388a - 0.0198$, 故式(1)可转换为

$$\sigma = e^{\frac{1}{0.0388a - 0.0198} \ln \frac{v}{v_0}} \quad (2)$$

为此,可定义 a 为方向有关的非均质系数,由式(2)可知,煤岩单轴抗压强度 σ 与波速 v 、非均质系数 a 之间存在对应的指数函数关系,且不同方向的非均质系数与煤岩在该方向的单轴抗压强度呈负相关。

单轴抗压强度是煤岩基本力学参数,也是巷道支护、巷道保护煤柱宽度优化等工程设计的基本参数,式(2)可以方便在现场或实验室获得不同加载方向煤岩单轴抗压强度参数,避免煤样加工及进行实验室测试过程(尤其是煤样加工困难的时候),此外,非均质系数 a 反映了煤岩内部非均质特征与煤岩强度之间的关系,是表征煤岩各向异性的重要参数,可以用于煤岩各向异性本构模型的研究。此外,本公式通过对忻州窑14号煤进行测试得到,对于其他种类煤岩,仍需进行试验验证。

5 结 论

(1)煤岩内部原生裂隙、孔隙、矿物夹杂沿层理方向分布、延伸,使沿垂直层理加载煤样的单轴抗压强度、总声发射计数等参数均值高于沿平行层理加载的煤样。

(2)割理的横向截割作用造成沿垂直割理加载

煤岩单轴抗压强度、声发射总绝对能量等参数均值及加载过程中声发射递增的规律性弱于沿平行割理加载的煤样。

(3)煤岩单轴抗压强度与纵波波速呈指数函数关系,煤岩非均质性对煤岩单轴抗压强度的影响可由非均质系数描述,且煤岩单轴抗压强度与非均质系数呈负相关。

参考文献 (References):

- [1] ZHAO Yixin, GAO Feng, JIANG Yaodong. Experimental and numerical modelling investigation of fracturing in coal under impact loads [J]. International Journal of Fracture, 2013, 183: 63-80.
- [2] Karacan C O. Swelling-induced volumetric strains internal to a stressed coal associated with CO_2 sorption [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 72: 209-220.
- [3] GAO Fuqiang, STEAD Doug, KANG Hongpu. Numerical investigation of the scale effect and anisotropy in the strength and deformability of coal [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 136: 25-37.
- [4] 林健, 王洋, 杨景贺, 等. 不同围压巷道开挖应力场演化规律模拟试验研究 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2313-2319.
LIN Jian, WANG Yang, YANG Jinghe, et al. Simulation studies on stress field evolution of roadway excavation under different confining pressures [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2313-2319.
- [5] 徐学锋, 刘军, 张银亮. 基于煤层巷道开挖卸荷效应的底板冲击孕育过程研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2015(2): 77-82.
XU Xuefeng, LIU Jun, ZHANG Yinliang. Preparatory process of floor shock caused by unloading effect during excavation of coal roadway [J]. Coal Geology & Exploration, 2015(2): 77-82.
- [6] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188-2204.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204.
- [7] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [8] 杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 98-104.
YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 98-104.
- [9] 何俊, 潘结南, 王安虎. 三轴循环卸加载作用下煤样的声发射特征 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 84-90.
HE Jun, PAN Jienan, WANG Anhu. Acoustic emission characteristics of coal specimen under triaxial cyclic loading and unloading [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 84-90.

- [10] ZHAO Yixin, LIU Shimin, GAO Feng, et al. Failure mechanisms in coal: Dependence on strain rate and microstructure [J]. *Geophys. Res. Solid Earth*, 2014, 19:6924-6935.
- [11] 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.
- [12] 吴基文, 闫立宏. 煤岩抗拉强度两种室内间接测定方法比较与成果分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(10): 1643-1647.
WU Jiwen, YAN Lihong. Comparison study on two kinds of indirect measurement methods of tensile strength of coal in lab[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 1643-1647.
- [13] ZHAO Yixin, ZHAO Gaofeng, JIANG Yaodong, 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] MAJID Noorian Bidgoli, LANRU Jing. Anisotropy of strength and deformability of fractured rocks [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, 6: 156-164.
- [15] KWANG Yeom Kim, LI Zhuang, HWAYOUNG Yang, et al. Strength anisotropy of berea sandstone: Results of X-Ray computed tomography, compression tests, and discrete modeling [J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49: 120-210.
- [16] 赵毅鑫, 赵高峰, 姜耀东, 等. 基于微焦点 CT 的煤岩细观破裂机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 4-7.
ZHAO Yixin, ZHAO Gaofeng, JIANG Yaodong, et al. The study on micro-fracture mechanism of coal based on micro-focus CT[M]. Beijing: Science Press, 2013: 4-7.
- [17] 张修泽. 煤岩各向异性及其在不同加载速率下的响应研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
ZHANG Xiuzhe. Coal anisotropy and its response at different loading rates [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2015.
- [18] 尤明庆, 苏承东, 李小双. 损伤岩石试样的力学特性与纵波速度关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 458-467.
YOU Mingqing, SU Chengdong, LI Xiaoshuang. Study on relation between mechanical properties and longitudinal wave velocities for damaged rock samples[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 458-467.
- [19] HANNA Kim, JUNG-WOO Cho, INSUN Song, et al. Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of asan gneiss, boryeong shale, and Yeoncheon Schist in Korea [J]. *Engineering Geology*, 2012, 147-148: 68-77.
- [20] AMIN Jamshidi, MOHAMMAD Reza Nikudel, MASHALAH Khamsehchiyan, et al. The effect of specimen diameter size on uniaxial compressive strength, P-wave velocity and the correlation between them [J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2015, 11: 1-7.
- [21] ABDOLAZIM Azimian, RASSOUL Ajallooian, LEILA Fatehi. An empirical correlation of uniaxial compressive strength with P-wave velocity and point load strength index on marly rocks using statistical method [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(1): 205-214.
- [22] ABBASZADEH Shahri, ABBAS Larsson, STEFAN Johansson, et al. Updated relations for the uniaxial compressive strength of marlstones based on P-wave velocity and point load index test [J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2016, 1: 1-7.
- [23] MORADIAN Z A, BEHNIA M. Predicting the uniaxial compressive strength and static Young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2009, 9(1): 14-19.
- [24] 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): 757-766.
SU Chengdong, GAO Baobin, NAN Hua, et al. Experimental study on acoustic emission characteristic during deformation and failure processes of coal samples under different stress paths [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(4): 757-766.
- [25] MINAEIAN Behnaz, AHANGARI Kaveh. Estimation of uniaxial compressive strength based on P-wave and Schmidt hammer rebound using statistical method [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(6): 1925-1931.
- [26] ARMAGHANI D J, MOHAMAD E T, HAJIHASSANI M, et al. Application of several non-linear prediction tools for estimating uniaxial compressive strength of granitic rocks and comparison of their performances [J]. *Engineering with Computers*, 2016, 32(2): 189-206.