



单轴压缩下松软煤体波速演化与裂隙分布特征

朱传奇 王磊 陈礼鹏 张宇 王安铨

引用本文:

朱传奇, 王磊, 陈礼鹏, 等. 单轴压缩下松软煤体波速演化与裂隙分布特征[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 288-301.

ZHU Chuanqi, WANG Lei, CHEN Lipeng. Wave velocity evolution and fracture distribution of soft coal under uniaxial compression[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 288-301.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1388>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单轴压缩下煤岩细观结构参数表征及演化规律

Fracture evolution of coal under uniaxial compression based on X-ray microscopic imaging

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 88-95 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0766>

正交各向异性裂隙煤层地震波波速响应特征研究

Study on characteristics of seismic wave velocity response in orthotropic fractured coal seams

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/53b30705-8f47-440f-b013-051cf2d4902a>

不同冲击倾向性煤单轴压缩下能量演化与损伤特征

Energy evolution and damage characteristics of coal with different bursting liability under uniaxial compression

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 111-118 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b1356989-ce5b-451c-a90b-d8c5f9180a2b>

基于显微CT扫描和统计强度的煤岩损伤破裂特性研究

Study on the damage and fracture characteristics of coal rock based on the X-ray micro-CT scanning technology and statistical strength theory

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 1-12 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2185>

煤岩损伤研究的CT扫描技术发展现状及展望

CT Scanning Technology on coal-rock damage: a comprehensive review

煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/173f1c14-ca82-491c-a5d3-9e2d9879eeb6>

热冲击花岗岩力学响应及损伤特征显微CT试验研究

Study on mechanical properties and damage characteristics of granite under thermal shock based on CT scanning

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 58-72 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0180>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

采矿科学与工程



移动扫码阅读

朱传奇,王磊,陈礼鹏,等.单轴压缩下松软煤体波速演化与裂隙分布特征[J].煤炭科学技术,2024,52(4):288-301.

ZHU Chuanqi, WANG Lei, CHEN Lipeng, *et al.* Wave velocity evolution and fracture distribution of soft coal under uniaxial compression[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 288-301.

单轴压缩下松软煤体波速演化与裂隙分布特征

朱传奇,王磊,陈礼鹏,张宇,王安铖

(安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽淮南 232001)

摘要:为研究松软煤体超声波传播规律与破坏特征,选用型煤代替原煤,设定3条波速传播路径,运用MTS岩石力学实验机、PCI-II声发射仪开展单轴压缩条件下煤体多路径波速同步监测试验,引入各向异性指数分析波速演化规律;选定3个横、纵向切面,采用CT扫描设备开展破坏特征观测试验,重构破坏后煤体细观几何结构,对比研究二维横纵切面裂隙分布差异性;探讨波速和三维裂隙体积的关系。结果表明:①随轴向应变的增加,平行、垂直加载方向及煤体平均波速均表现出先平稳后降低再平稳的基本规律,波速各向异性指数具有先平稳后增大再平稳的变化趋势;垂直加载方向波速最先下降,且降幅最大。②与纵向切面相比,破坏后煤体横向切面裂隙谱峰占比和裂隙分形维数均较大,裂隙密度较高,裂隙形态也较为复杂。③随裂隙体积的增大,破坏后煤体平均波速大致呈线性降低,单轴荷载作用下煤体内部裂隙扩展以平行加载方向为主,裂隙竖向线状扩展是造成各方向波速和横纵切面破坏特征差异性的主要原因。④与平行加载方向相比,采用垂直加载方向波速求得的损伤变量较大、评价煤体损伤破坏状态也更为可靠。现场采用声波评价煤体破坏状态时,将声波传播路径设置为垂直煤体受载(最大主应力)方向,有利于提高预测失稳事故的合理性。

关键词:松软煤体;损伤破坏;裂隙分布;各向异性指数;CT扫描

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2024)04-0288-14

Wave velocity evolution and fracture distribution of soft coal under uniaxial compression

ZHU Chuanqi, WANG Lei, CHEN Lipeng, ZHANG Yu, WANG Ancheng

(State Key Laboratory of Mining ~ induced Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to study the ultrasonic propagation law and damage characteristics of the soft coal body, coal briquette is selected to replace raw coal, three wave propagation paths were set, and MTS rock mechanics experiment machine and PCI-II acoustic emission instrument were used to carry out the multi-path wave synchronization monitoring test of the coal body under the condition of uniaxial compression, and the anisotropy index was introduced to analyze the wave velocity evolution law. Three transverse and longitudinal sections were selected, and CT scanning equipment was used to carry out damage characterization experiments, reconstruct the micro-structure of the coal body after failure, and compare and study the differences in the distribution of the transverse and longitudinal fissures of two-dimensional slices, and to explore the relationship between the wave velocity and the three-dimensional volume of the fissures. Results show that: ① The parallel and vertical loading directions and the average wave velocity of the coal body show the basic law of smoothness followed by decrease and then smoothness with the increase of axial strain. The wave velocity anisotropy index has a smooth, then increasing and then smooth trend with the increase of axial strain, and the wave velocity in the vertical loading direction is the first to decrease, and the decrement is the largest. ② Compared with the vertical plane, the fracture spectral peak ratio and fractal dimension of the transverse

收稿日期:2023-09-27

责任编辑:周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-1388

基金项目:安徽省高校自然科学基金资助项目(2023AH040153);国家自然科学基金资助项目(52004007)

作者简介:朱传奇(1991—),男,安徽濉溪人,博士,副教授。E-mail: zhuchuanqi2013@126.com

通讯作者:王磊(1980—),男,山东省济宁市人,博士,教授。E-mail: leiwang723@126.com

plane of the damaged coal body are larger, the fracture density is higher, and the fracture morphology is also more complicated. ③ With the increase of fissure volume, the average wave velocity of the damaged coal body decreases roughly linearly, and the expansion of internal fissures in the coal body under uniaxial loading is dominated by the parallel loading direction, and the vertical linear expansion of the fissures is the main cause of the variability of the wave velocity in all directions and the damage characteristics of the transverse and longitudinal sections. ④ Compared with the parallel loading direction, the damage variables obtained by using the wave velocity in the vertical loading direction are larger and the evaluation of the damage state of the coal body is more reliable. When sound waves are used in the field to evaluate the damage state of coal, it is beneficial to improve the reasonableness of the prediction of instability accidents by making the sound wave propagation path perpendicular to the direction of the coal body loaded (maximum principal stress).

Key words: soft coal; damage destruction; fracture distribution; wave velocity anisotropy index; CT scanning

0 引言

松软煤层在我国华南、华北、华东和西北等地区广泛分布^[1-2],安徽省两淮矿区的8煤、7煤、1煤均为松软煤层。在深部高采动应力作用下,松软煤体物理力学特征显著改变,工作面形成之初,煤壁偶有整状块煤,手抓即碎,呈散体状态,一经采掘,极易片冒,造成煤岩失稳事故^[3-6]。研究荷载作用下煤体物理力学行为及其演化规律对揭示围岩失稳致灾机理、预测防控失稳事故具有重要的理论意义。近年来,众多专家学者采用型煤代替原煤研究了松软煤体破坏过程,在煤体力学特征测定方面,GAN等^[7]通过热压作用制备出型煤试样,测定了单轴、三轴压缩条件下煤体渗流特性;GU等^[8]测定了不同颗粒级配饱水型煤孔隙率、动静态强度和弹性模量;尹光志等^[9]对比分析了三轴应力条件下含瓦斯型煤和原煤的变形特性和抗压强度;许江等^[10]针对二次碳化型煤开展了单轴压缩力学特征测定试验、三轴压缩渗流特性测定试验;蒋宇静等^[11]进行了不同卸围压速度下型煤三轴试验,分析了煤体力学特征;张文清等^[12]研究了冲击速度对型煤破碎耗能和块度分布的影响,孔德中等^[13]探讨了型煤单轴抗压和楔形剪切试验中煤体的破坏和变形特征;李祥春等^[14]研究了型煤的蠕变特征,探讨了煤体蠕变对瓦斯渗流的影响;谢广祥等^[15-16]试验研究了淮南矿区煤体强度和变形破坏随含水率、孔隙率及黏土含量的变化规律。在煤体破坏特征监测方面,GE等^[17]采用数字图像处理技术研究了型煤表面应变演化规律,并与原煤进行了对比;XIE等^[18]获得了冲击荷载下型煤破坏特征及断面形貌;林海飞等^[19]针对含不同钻孔倾角型煤,获得了钻孔倾角对煤体变形破坏形态的影响规律;张天军等^[20]进行了含孔型煤单轴压缩试验,探讨了煤体孔周裂纹扩展过程;程立朝等^[21]分析了含瓦斯煤剪切过程中裂纹演化模式、裂纹长度及形态变化规律。

超声波携带着与煤体物理力学性质密切相关的声学信息,声学特征参数能够精确感知煤体内部孔

裂隙发育扩展情况及损伤劣化程度^[22]。在型煤声学特征监测方面,SUN等^[23]监测了无节理及节理型煤超声波纵波传播速度;王刚等^[24]监测了真三轴下注水型煤超声波声学参数,探究了注水对煤体声学特征的影响规律;赵洪宝等^[25]开展了不同加载面积下型煤压缩试验,获得了加载过程中煤体超声波波速;王兆会等^[26]监测了单轴抗压条件下型煤超声波速的全程动态演化特征;朱传奇等^[27]开展了单轴压缩状态下型煤波速实时监测室内试验,分析了波速变化特征。

以往专家学者们研究了组分、荷载施加方式、瓦斯压力、含水率等因素影响下的型煤应力-应变曲线及强度、变形、破坏特征,并采用超声波无损监测技术分析了型煤声学特征,为厘清煤体破坏失稳过程、评价破坏状态,指导工程实践奠定了坚实基础。但目前,针对型煤破坏特征的研究主要集中在表面形态分布演化,在煤体波速监测方面还多局限于单一传播路径上的波速。鉴于此,以淮南矿区潘一矿11518工作面松软煤体为研究对象,开展压缩状态下煤体多路径波速同步监测试验及破坏特征观测试验,在此基础上,分析煤体各方向波速演化、纵横切面裂隙分布的差异性,探讨波速与裂隙分布的相关性,以期为松软煤层采掘工作面围岩失稳事故预测及防控提供试验依据。

1 试验概况

1.1 试样制备

试验所用的原煤选自淮南矿区潘一矿11518工作面,选取7个原煤试样,采用点荷载测得的煤体应力-应变曲线如图1所示,平均单轴抗压强度为1.61 MPa。

将煤体烘干破碎后,采用标准筛网筛分出粒径0.10~0.25 mm的颗粒煤。参考文献[28]型煤制备配比,取颗粒煤230 g、水泥55 g、纯水35 g充分均匀混合,运用制样模具和压力机压缩混合后的煤粉,压制50 mm×50 mm×100 mm的长方体煤样,并置于养护箱内养护备用(图2)。采用CT扫描系统,探测

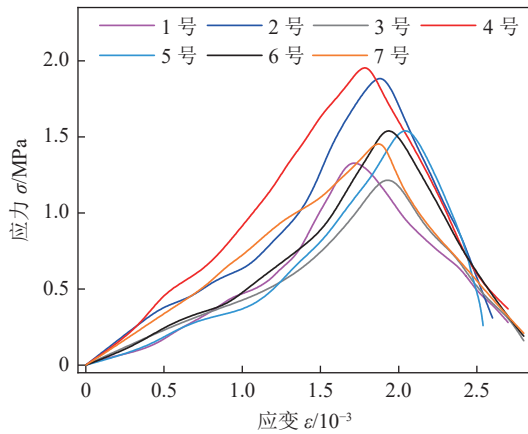


图1 松软原煤应力-应变曲线

Fig.1 Relationship curve between stress and strain curve of raw coal samples

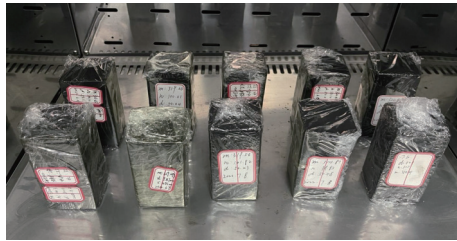


图2 型煤试样
Fig.2 Briquettes

煤体初始孔裂隙分布,挑选无明显宏观裂隙的试样5块用于试验,试样尺寸及编号见表1。

图3为煤样代表性CT扫描图像,可以看出,型煤内部无明显的裂缝,仅存在少量孔隙,不同切片间细观结构几乎无差别,均质性较强。

1.2 松软煤体多路径波速同步监测试验

试验采用的煤岩声学与力学特征同步实时监测系统如图4所示,该监测系统包括MTS816岩石力学试验机、CM-1L-32型数字静态应变仪、PCI-II声发射仪,具备煤岩力学特征测定及声波采集功能,能够同步实时监测煤体破坏失稳过程中的力学与声学特征参数。

考虑到现场煤壁主要受覆岩荷载作用^[29-30],为

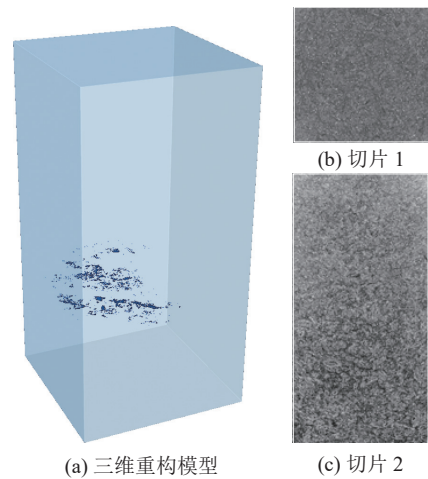


图3 煤样CT扫描图像

Fig.3 CT scan image of coal sample

近可能接近现场煤体实际力学环境,便于同步监测煤体多路径波速,采用岩石力学试验机开展煤体单轴压缩试验,设定加载速率为0.002 mm/s,在试样四周布置2组应变片,位置如图5所示,用于实时采集应变信息。同时,在试样周围均匀布置声波探头6个,编号1、2、3、4、5、6,设置超声波传播路径3条,其中路径1平行加载方向,路径2、3垂直加载方向。试样上下端头布置了中空垫块(图6)用于放置声波探头1,2,通过旋动螺栓调动探头位置以保证探头与试样直接紧密接触。荷载施加过程中,每隔20 s,参考文献[31]采用声发射仪AST透射模式同步监测3条路径上的纵波波速,设定声发射阈值为45 dB,前置放大倍数为40 dB,采样率为2 MHz,并记录系统自主处理后的多路径平均波速,直至试样完全破坏。

1.3 煤体破坏特征观测试验

煤体破坏特征观测试验采用安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室的phoenix v|tome|x L300微焦点CT扫描系统(图7),通过扫描获取灰度图像,并结合 phoenix datosx 2和VG Studio max软件重构煤体三维几何结构,能够准

表1 型煤基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of briquettes

试样编号	长度×宽度×高度/ (mm×mm×mm)	质量/g	峰值应力/MPa	弹性模量/GPa	峰值应变/10 ⁻²	初始波速/(km·s ⁻¹)
1	50.0×50.0×100.1	317.44	1.875	0.203	1.156	1.319
2	50.0×50.0×100.2	318.05	1.633	0.281	0.929	1.350
3	49.9×49.9×100.1	317.43	1.566	0.195	1.102	1.272
4	50.0×50.0×99.9	316.96	1.813	0.169	1.607	1.243
5	50.0×50.0×99.9	317.19	1.546	0.172	1.335	1.228
均值		317.41	1.687	0.204	1.226	1.282

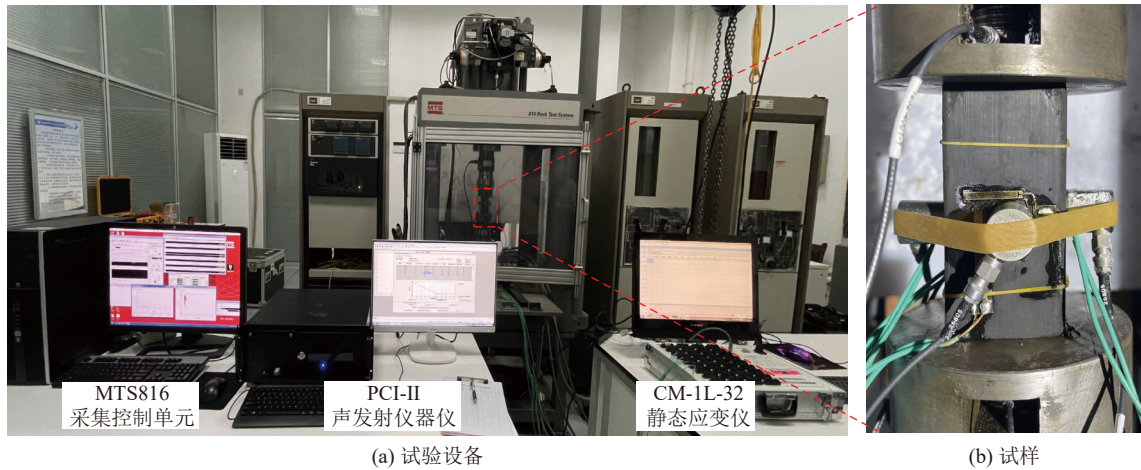


图4 煤岩声学与力学特征同步实时监测系统

Fig.4 Synchronous real-time monitoring system for acoustic and mechanical characteristics of coal and rock

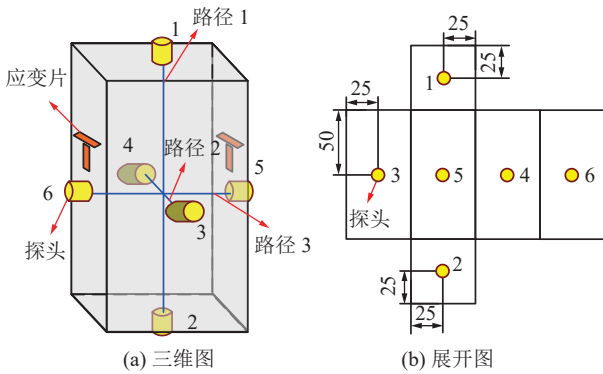


图5 声波探头布置图

Fig.5 Layout of acoustic probe

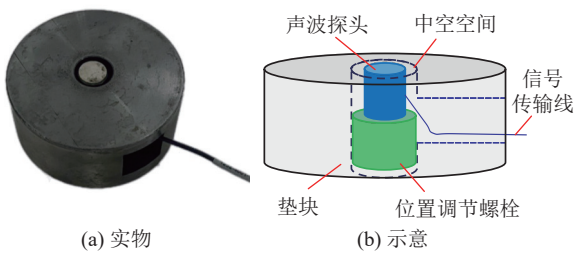


图6 中空垫块

Fig.6 Hollow pad



图7 CT扫描设备

Fig.7 CT scanning equipment

确定内部细观孔裂隙分布形态及特征参数。完全破坏后的煤体内部裂隙发育最充分和复杂，最能反

映破坏状态，因此，CT扫描阶段选定在煤体完全破坏后。具体扫描参数：电压设定为190 kV，电流为190 μ A，分辨率为25 μ m，曝光时间为1 000 ms，扫描时间为76 min。

2 试验结果及分析

试验测得的5个试样峰值应力分别为1.875、1.633、1.566、1.813、1.546 MPa，平均值为1.687 MPa，弹性模量在0.169~0.281 GPa范围内，平均值为0.204 GPa，峰值应变介于 0.929×10^{-2} ~ 1.607×10^{-2} ，平均值为 1.226×10^{-2} ，初始波速处于1.228~1.350 km/s范围内，平均值为1.282 km/s，各试样基本力学及初始声学参数差异较小，强度与松软原煤接近，满足试验要求，但松软煤体的强度远低于坚硬煤岩，这与文献[32]的研究结果一致。

2.1 松软煤体波速演化特征

依据不同破坏阶段超声波在煤体内部3条路径传播的波速平均值(\bar{v})，图8给出了煤体应力/平均波速-应变关系曲线。由图可见：与坚硬煤岩相似^[33]，各试样煤体变形曲线大致相同，均可划分为压密(OA)、线弹性(AB)、屈服(BC)、软化(CD)和残余(DE)5个阶段。以1号试样为例，各阶段应力/波速变化规律如下：①压密阶段，应力随应变的增加小幅增长，平均波速(\bar{v})一直稳定在1.319~1.322 km/s。②线弹性阶段，煤体力学性质基本稳定，应力随应变线性增大，平均波速曲线依然平稳，在轴向变形由 0.316×10^{-2} 增加到 0.724×10^{-2} 过程中， \bar{v} 仅在1.315~1.327 km/s范围内小幅波动。③屈服阶段，随轴向变形的增加，应力增速变缓，煤体开始破坏， \bar{v} 缓慢降低，由应变为 0.724×10^{-2} 时的1.324 km/s降至应变为 1.156×10^{-2} 时的1.104 km/s，降低了0.220 km/s。

④ 软化阶段, 随加载的进行, 应力达到峰值后逐渐降低, 煤体破坏加剧, v 降低趋势更加明显, 逐步降至 D 点处的 0.749 km/s。⑤ 残余阶段, 应力随应变的增大一直处于较低值, 煤体完全破坏, v 始终保持在 0.462 ~ 0.749 km/s 范围内。整体来看, 随轴向应变

的增加, 松软煤体平均波速呈现先平稳后降低再平稳的变化规律。受载初期, 松软煤体波速平稳, 而坚硬煤岩波速升高^[34-36], 在受载中后期, 松软煤体波速变化规律与坚硬煤岩相似, 这与文献 [27] 的研究结果一致。

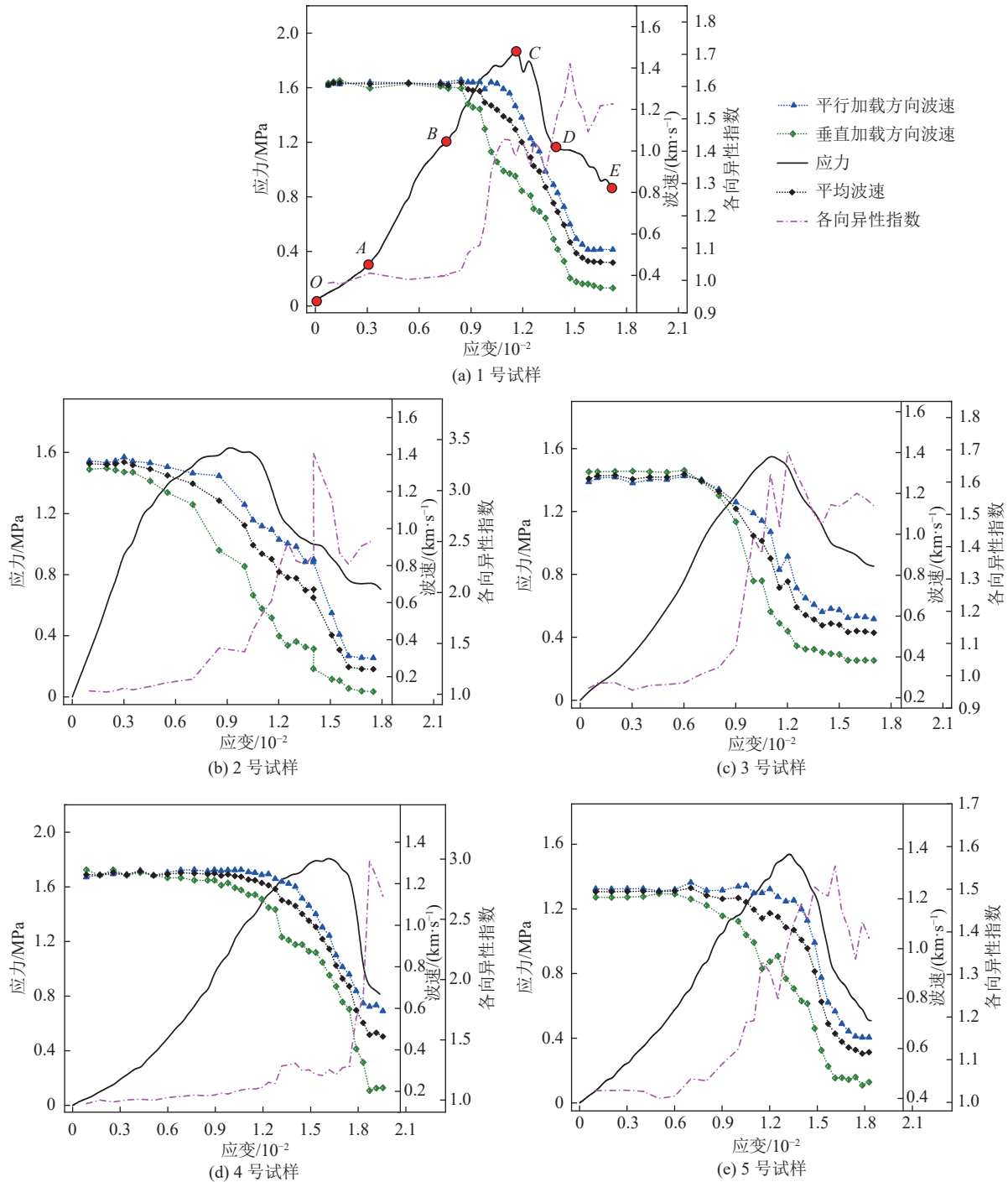


图8 煤体应力/波速及各向异性-应变关系曲线

Fig.8 Stress/wave velocity and anisotropy-strain curves of coal

设置的波速传播路径 1 与加载方向平行, 波速传播路径 2、3 均与加载方向垂直, 为便于量化分析不同方向波速的差异性, 将路径 1 波速视为平行加

载方向波速($v_{//}$)、路径 2、3 波速的平均值视为垂直加载方向波速(v_{\perp}), 并引入各向异性指数 γ ^[37]:

$$\gamma = v_{//} / v_{\perp} \quad (1)$$

各试样不同方向波速及各向异性指数-应变关系曲线如图8所示,以1号试样为例,分析可见:加载初期,平行加载方向波速($v_{//}$)、垂直加载方向波速(v_{\perp})依次为1.316 km/s、1.326 km/s,各向异性指数 γ 为0.992,此时,煤体均质性较强,各方向声波传播速度相近。随加载的进行,在轴向变形为 0.843×10^{-2} 时, v_{\perp} 开始降低,而 $v_{//}$ 基本无变化, γ 增至1.031,波速各向异性程度有所增大,可能的原因在单轴荷载条件下,煤体内部微裂隙的初始扩展大致与加载方向平行,导致传播路径2、3内率先出现一定数量的微裂隙,抑制了声波传播。在轴向变形增至 1.051×10^{-2} 时, $v_{//}$ 开始降低, v_{\perp} 降至0.948 km/s, γ 增大到1.397,波速各向异性程度进一步增大,可能因为垂直加载方向裂隙扩展滞后于平行方向。在此之后,随轴向应变的增加,当轴向变形达到 1.438×10^{-2} 后, γ 稳定在1.461~1.671范围内;而 $v_{//}$ 、 v_{\perp} 均继续降低,并在轴向变形为 1.5×10^{-2} 左右时,均趋于稳定,完全破坏后煤体 $v_{//}$ 、 v_{\perp} 各为0.524 km/s、0.339 km/s,与加载前相比,降幅依次为60.182%、74.434%。

为进一步研究不同方向波速变化的差异性,图9、10分别给出了不同方向波速降低起始点应变和破坏后波速降幅柱状图。分析可知:平行加载方向各试样波速下降起始点应变依次为 1.051×10^{-2} 、 0.553×10^{-2} 、 0.702×10^{-2} 、 1.234×10^{-2} 、 1.051×10^{-2} ;平均值为 0.918×10^{-2} ;垂直加载方向波速下降起始点应变各为 0.843×10^{-2} 、 0.352×10^{-2} 、 0.602×10^{-2} 、 0.979×10^{-2} 、 0.601×10^{-2} ,平均值为 0.675×10^{-2} ,与平行加载方向相比,垂直加载方向波速波起始点应变较小,波速率先出现降低现象。破坏后的煤体各方向波速均出现不同程度的降低,平行加载方向各试样波速降幅分别为60.150%、77.895%、53.416%、52.356%、47.992%,平均值为58.362%,垂直加载方向依次为74.434%、90.909%、70.651%、82.810%、61.426%,平均值为76.046%,降幅较大。

综合来看,随轴向变形的增加,煤体波速各向异性指数呈现先平稳后增大再平稳的变化规律,垂直加载方向波速最先下降,且降幅最大。

2.2 松软煤体横纵切面裂隙分布特征

为对比分析不同切面煤体裂隙分布特征,选定2个纵向切面(切面1、2)及1个横向切面(切面3),各切面位置如图11所示。基于CT扫描重构结果,截取切面扫描图像,对图像进行二值化处理,图12~14为各煤样切面1、2、3裂隙分布形态。以1号试样为例,分析可见:试样3切面的裂隙分布差异明显,切

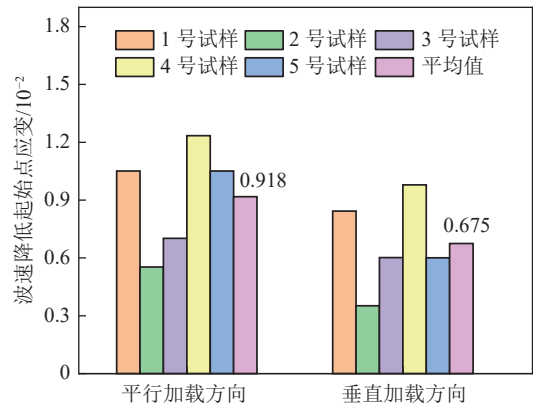


图9 不同方向波速降低起始点应变

Fig.9 Wave velocities in different directions reduce strain at starting point

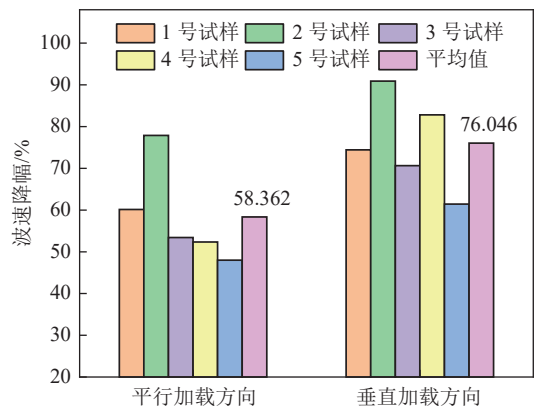


图10 不同方向波速降幅柱状

Fig.10 Bar chart of velocity drops in different directions

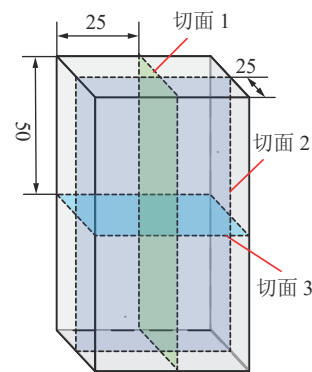


图11 横纵切面位置分布

Fig.11 Transverse and longitudinal section position distribution

面1内分布着3条宏观裂纹(A1、A2、A3),A1、A2在试样中上部贯通,A2、A3在试样底部交互,宏观裂隙相互连接,形成类似“N”型的裂隙网络,其他区域随机分布着角度各异、长度不一的旁生裂隙;切面2的两条宏观裂隙B1和B2在试样中下部连通,大致呈“Λ”形,由于端部效应旁生裂隙在试样的底部两侧大量聚集丛生;切面3内分布着4条宏观裂隙(C1、C2、C3、C4),C2与C1、C4相连,C3、C4相连,形成

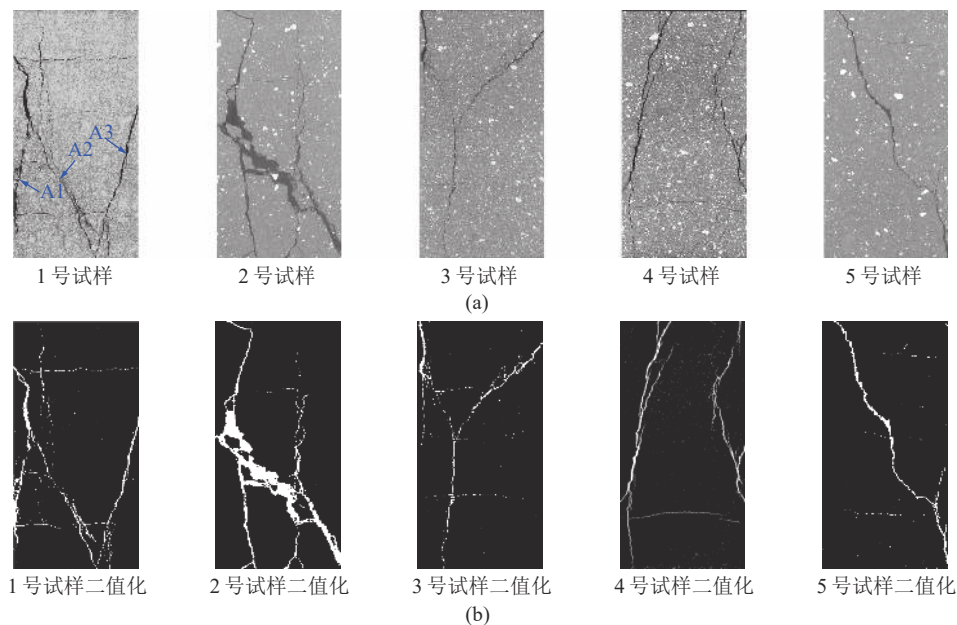


图12 切面1裂隙分布形态
Fig.12 Fracture distribution of section 1

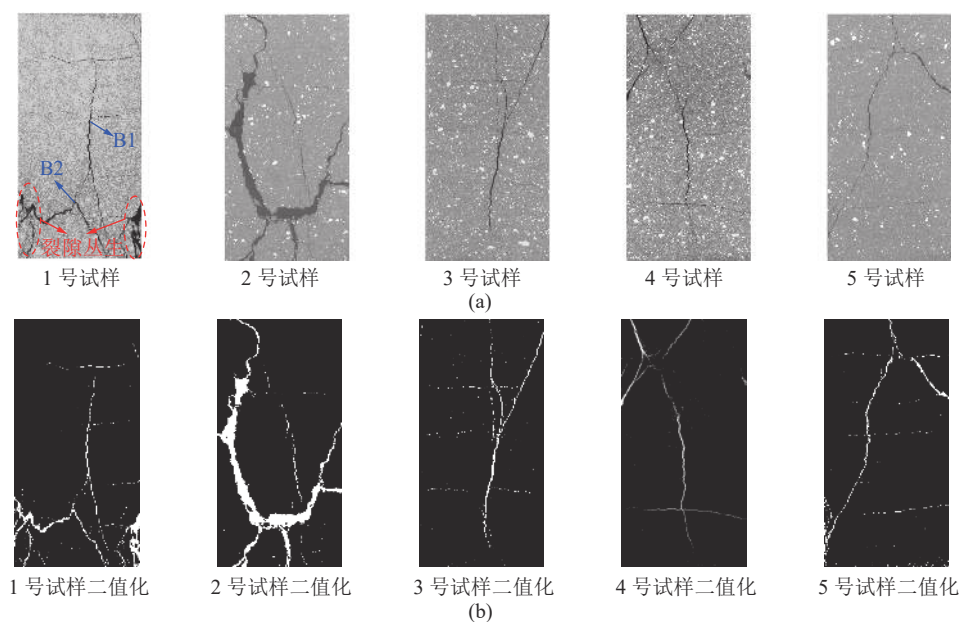


图13 切面2裂隙分布形态
Fig.13 Fracture distribution of section 2

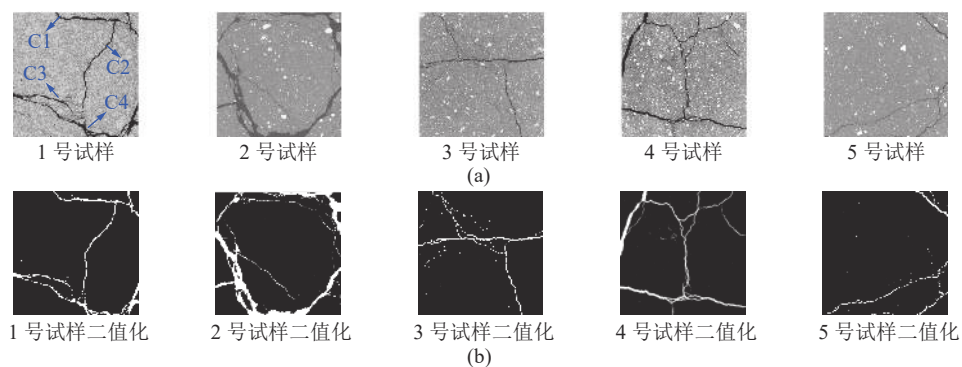


图14 切面3裂隙分布形态
Fig.14 Fracture distribution of section 3

类似“Z”型的裂隙网络,其他区域几乎无明显裂隙。

由5个煤样3个切面的裂隙分布形态综合来看,与其他试样相比,2号试样切面内宏观裂隙数量最多,裂隙宽度最大;各试样纵向切面内宏观裂纹少且多为竖向裂隙,横向切面内宏观裂纹较多,且多为贯穿裂隙。

为定量研究不同切面煤体裂隙分布特征,对各切面CT扫描图像进行灰度处理,获取的灰度直方图如图15—图17所示,其中,谱峰分别代表煤体裂隙和基质。

表2和图18依次给出了各切面裂隙谱峰比例及柱状图。分析可知:2号试样3切面的裂隙谱峰占比最大,为18.247%,其次是2号试样2切面,为16.145%,5号试样2切面的裂隙谱峰占比最小,为1.356%,整体来看,各试样切面3裂隙谱峰占比最大,为12.327%,切面1与切面2裂隙谱峰占比较为接近,分别为6.593%、5.870%,说明切面3裂隙密度明显大于切面1、2,裂隙发育程度较高。

采用盒维数法计算切面裂隙分形维数,表2给

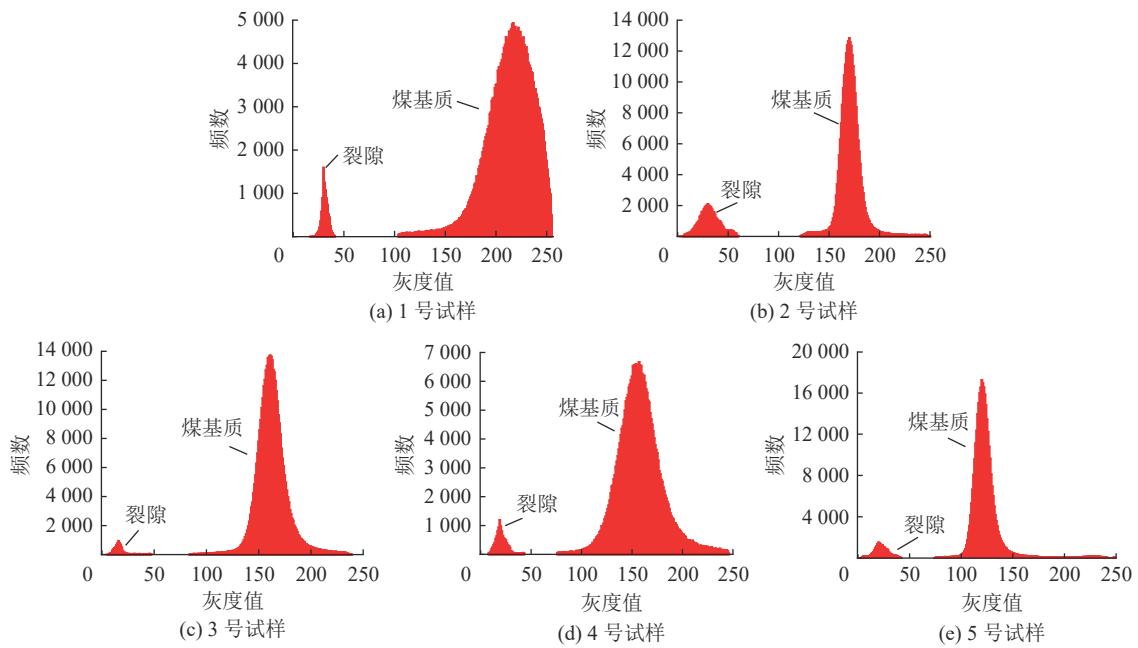


图15 切面1灰度直方图
Fig.15 Gray histogram of section 1

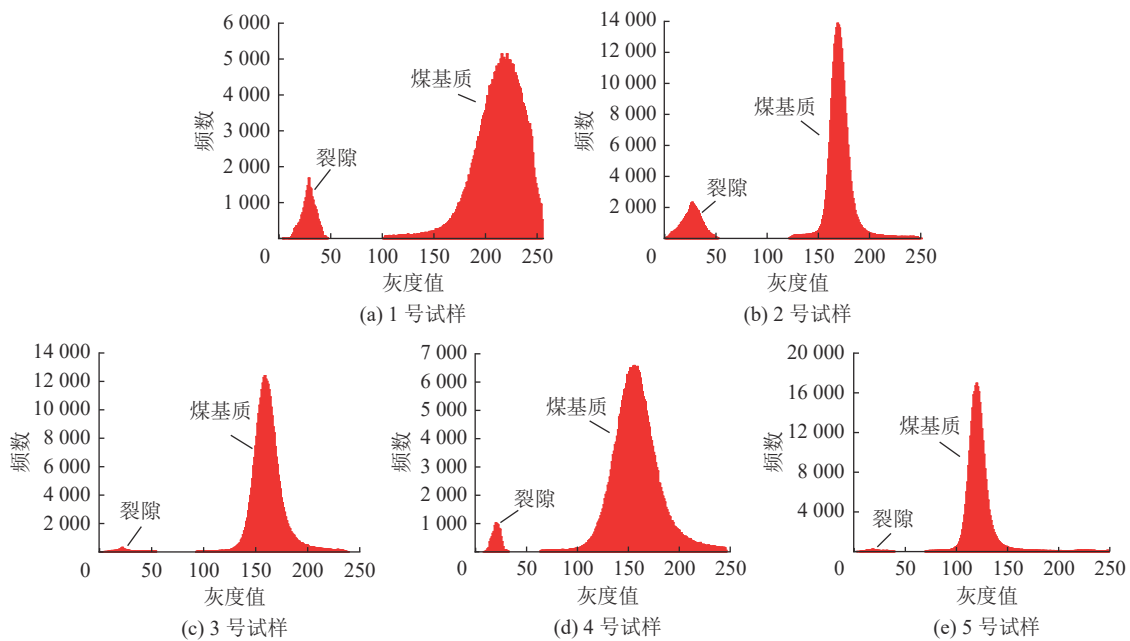


图16 切面2灰度直方图
Fig.16 Gray histogram of section 2

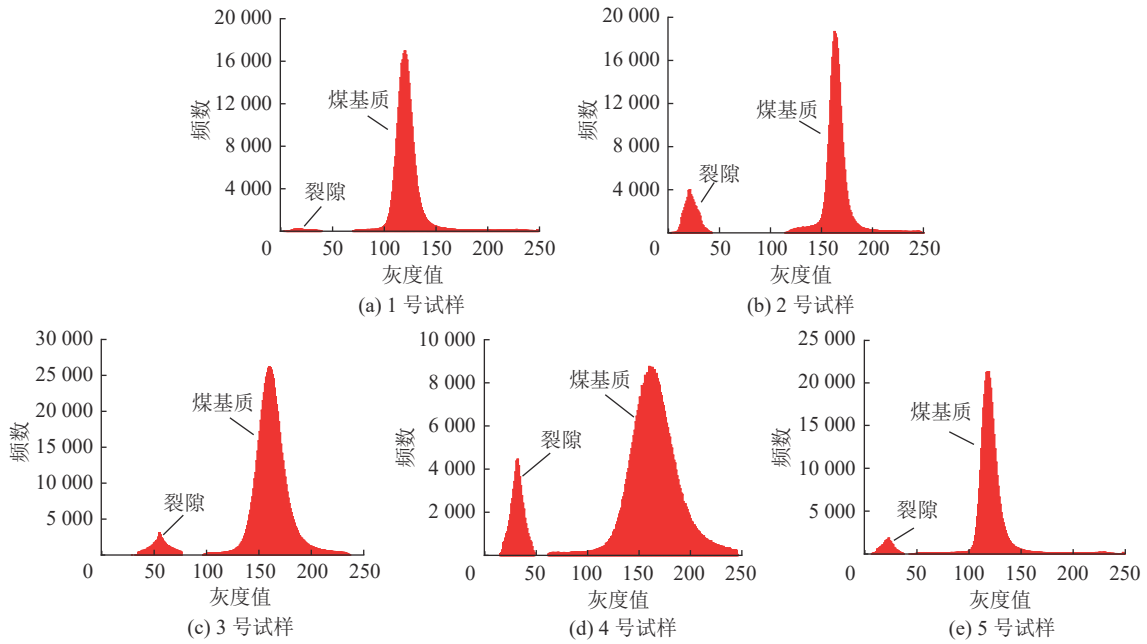


图 17 切面 3 灰度直方图
Fig.17 Gray histogram of section 3

表 2 煤体切面裂隙特征参数

Table 2 Characteristic parameters of coal section crack

切面	试样编号	裂隙谱峰比例/%	裂隙分形维数
1	1	9.774	1.236 4
	2	15.148	1.297 5
	3	2.138	1.113 1
	4	4.098	1.280 6
	5	1.807	1.047 0
	均值	6.593	1.194 9
2	1	7.407	1.192 6
	2	16.145	1.331 7
	3	1.499	1.100 9
	4	2.941	1.102 2
	5	1.356	1.136 2
	均值	5.870	1.172 7
3	1	14.159	1.287 1
	2	18.247	1.399 3
	3	8.245	1.296 0
	4	15.124	1.274 2
	5	5.862	1.150 5
	均值	12.327	1.281 4

出了各试样 3 个切面裂隙分形维数, 图 19 为煤体各切面裂隙分形维数柱状图。

破坏后的各煤样切面 1 分形维数介于 1.047 0 ~ 1.297 5 之间, 平均值为 1.194 9, 切面 2 分形维数分别为 1.192 6、1.331 7、1.100 9、1.102 2、1.136 2, 平均值与切面 1 接近, 为 1.172 7, 相比之下, 切面 3 分形维

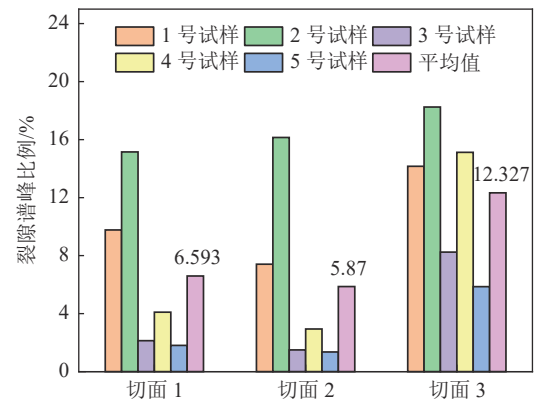


图 18 切面裂隙谱峰比例柱状图

Fig.18 Section crack spectrum peak proportion histogram

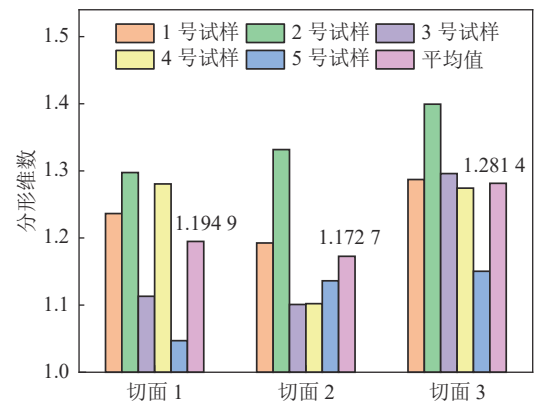


图 19 切面分形维数柱状图

Fig.19 Section fractal dimension histogram

数最大, 在 1.150 5 ~ 1.399 3 范围内, 平均值达 1.281 4。

各切面裂隙分布形态、裂隙谱峰占比和分形维数数据表明, 与纵向切面相比, 破坏后的煤体横向切

面裂隙数量较多,裂隙密度较大,且形态复杂,裂隙发育更加充分。

2.3 松软煤体三维裂隙分布特征

依据 CT 扫描结果,煤体重构模型与三维裂隙分布形态如图 20 所示。

分析可见:单轴压缩荷载下,破坏后的煤样内部碎化较为严重,三维立体空间裂隙相互贯通交织形成复杂的裂隙体系,其中:1 号试样上部大量裂隙分布,存在贯穿整个试样的竖向裂隙,具有一定的拉剪复合破坏特征,裂隙体积为 3 868.883 2 mm³。2 号试样上、中部均有大量裂隙分布,竖向发育的贯穿裂隙

是导致试样破坏的主要原因,裂隙体积为 4 467.001 3 mm³。3 号试样内部主要裂隙网络由 2 条相互交织的贯穿裂隙组成,致使煤样表现出明显的 X 状共轭斜面剪切破坏特征,裂隙体积为 3 590.617 8 mm³。4 号试样裂隙主要分布在试样上部,但依然存在竖向贯穿裂隙,裂隙体积为 3 704.176 3 mm³。5 号试样裂隙主要分布在试样中下部,同时,存在多条贯穿裂隙,裂隙体积为 3 323.543 6 mm³。综合看来,5 个试样破坏后内部裂隙均主要呈竖向线状发育,裂隙扩展方向均与加载方向平行,这也是造成煤体横纵向切面破坏差异性的主要原因。

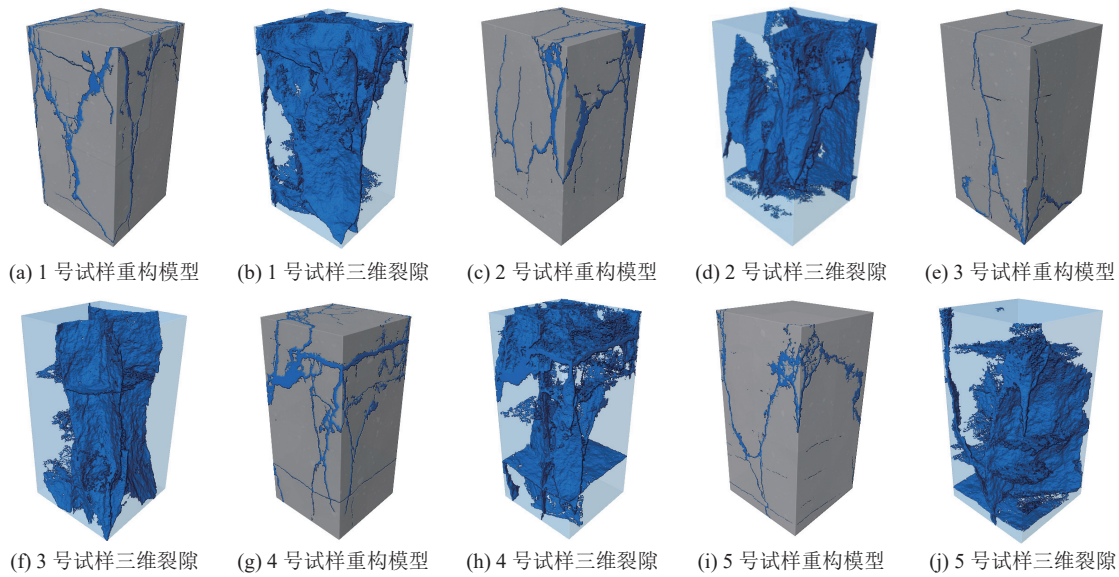


图 20 煤体重构模型与三维裂隙分布形态

Fig.20 Coal reconstruction model and 3D crack distribution pattern

2.4 煤体波速随裂隙体积变化规律

基于 5 个试样破坏后的波速及三维裂隙体积,图 21 给出了平均波速(\bar{v})与裂隙体积(V)关系曲线。

可以发现:在三维裂隙体积由 3 323.543 6 mm³增大到 4 467.001 3 mm³过程中,煤体波速由 0.585 km/s 逐渐降低至 0.241 km/s,降低了 0.344 km/s。总的来看,随裂隙体积的增大,破坏后煤体波速大致呈线性降低的变化规律,两者拟合关系式为:

$$\bar{v} = -2.993 \times 10^{-4} V + 1.588 8 \quad (R^2 = 0.978 4) \quad (2)$$

超声波在含裂隙煤体传播过程中,波速大小遵循费马原理^[38],即:

$$\frac{1}{\bar{v}} = \frac{1 - n_v}{v_{pm}} + \frac{n_v}{v_{pf}} \quad (3)$$

式中: n_v 为煤体裂隙率; v_{pm} 、 v_{pf} 分别为波速在煤体矿物固体颗粒和裂隙中流体的传播速度。

进一步有:

$$\frac{1}{\bar{v}} = \frac{1}{v_{pm}} + \frac{V}{V_z} \left(\frac{1}{v_{pf}} - \frac{1}{v_{pm}} \right) \quad (4)$$

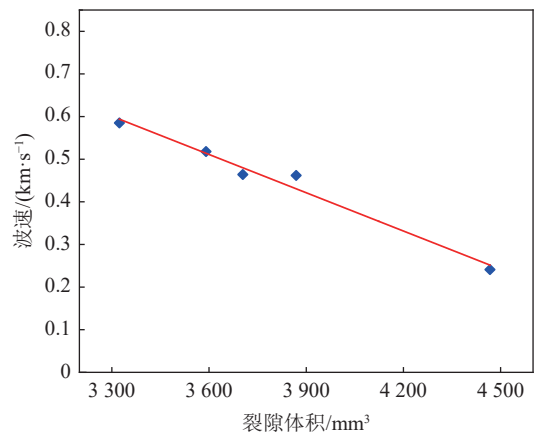


图 21 波速-体积关系曲线

Fig.21 Wave-volume relation curve

其中： V_z 为煤体总体积。

煤体是一个由矿物固体颗粒和裂隙结构及其内部流体组成的非均质体，在其中传播的波速大小主要取决于裂隙特征参数和矿物、流体成分。试样制备原料及配比完全相同，加载前各试样组份几乎完全相同，施加的单轴荷载仅能够显著改变煤体裂隙特征参数，加载前后 v_{pm} 、 v_{pf} 均可看作恒定值，且试样内部的液体主要为纯水，波速在煤体矿物固体颗粒的传播速度大于在裂隙中流体的传播速度，即 $v_{pm} > v_{pf}$ ，由此结合由式(4)可知， \bar{v} 与 V 呈反比例关系，因此，破坏后煤体裂隙体积越大，波速越小。

3 讨论

煤岩受载破坏过程中，超声波波速能够直接反

映损伤破坏程度，文献 [39] 基于波速定义了传统的损伤变量 D ：

$$D = 1 - (v_p/v_0)^2 \quad (5)$$

其中， v_0 、 v_p 分别为煤体初始、某一破坏阶段的波速。分别采用平行加载方向波速($v_{//}$)、垂直加载方向波速(v_{\perp})计算相应的损伤变量值 $D_{//}$ 、 D_{\perp} ，并绘制煤体损伤变量-应变曲线(图 22)，发现随煤体轴向变形的增加，损伤变量 $D_{//}$ 、 D_{\perp} 均呈现先平稳后增大再平稳的变化规律，依次对应图中的 I、II、III 阶段，但在煤样由峰前向峰后过渡的 II 阶段，煤体力学性质突变，5 个试样 $D_{//}$ 的平均变化率为 0.929×10^2 ， D_{\perp} 为 1.047×10^2 ，说明与 $D_{//}$ 相比， D_{\perp} 变化幅度更大， v_{\perp} 受灾响应更加敏感。同时，在试验数据范围内，煤体

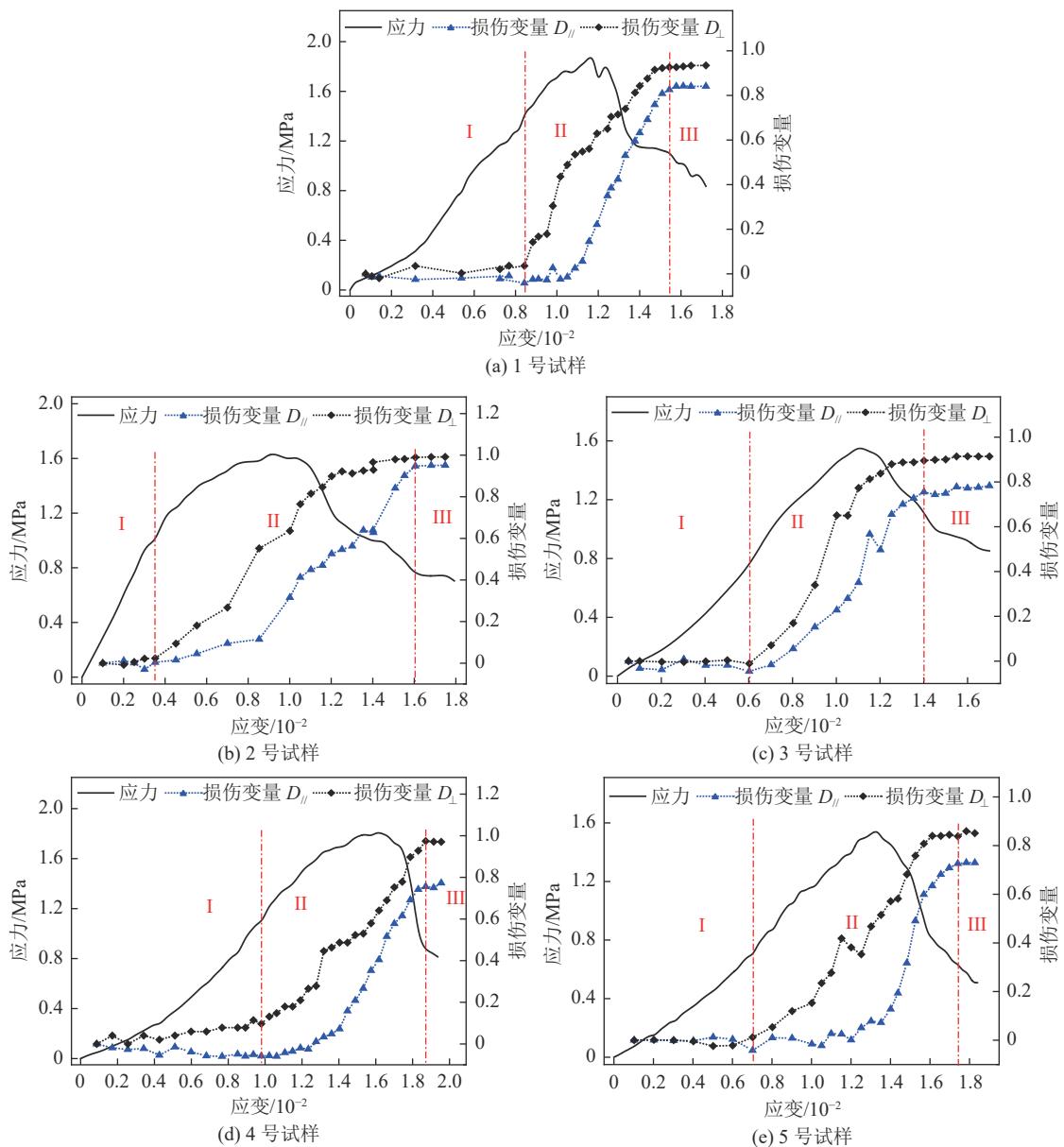


图 22 煤体损伤变量-应变关系曲线

Fig.22 Damage variable and strain curves of coal

破坏任意时刻 D_{\perp} 均高于 $D_{//}$, 说明采用 D_{\perp} 评价煤体损伤破坏状态更为可靠。现场采用声波评价煤体破坏状态时, 将声波传播路径设置为垂直煤体受载(最大主应力)方向, 有利于提高预测失稳事故的合理性。

型煤是以颗粒煤、水泥和水为原料, 经高压压制而成, 超声波在煤体内部传播过程中主要受煤体基质与内部裂隙影响, 忽略荷载作用下煤体基质变形对波速的影响, 荷载作用前, 煤样处于完好状态, 内部无明显的裂隙, 单轴荷载作用后煤体内部裂隙不均衡分布是造成不同方向波速差异性的主要原因。结合表 2 及图 18—图 19 可见, 造成损伤变量 $D_{//}$ 、 D_{\perp} 差异性可能的原因为: 与平行加载方向切面(纵向切面)相比, 垂直加载方向(横向切面)裂隙密度较高, 裂隙分形维数较大, 垂直加载方向声波(v_{\perp})传播过程中发生的反射、衍射等现象的次数较多, 导致波速降低, 基于 v_{\perp} 计算得出的损伤变量 D_{\perp} 较大。

4 结 论

1) 获得了荷载作用下煤体波速演化规律。随轴向应变的增加, 平行、垂直加载方向及平均波速均表现出先平稳后降低再平稳的基本规律, 垂直加载方向波速最先下降, 且降幅最大。

2) 破坏后煤体横纵向切面破坏特征差异显著。与纵向切面相比, 横向切面裂隙密度较高, 裂隙分形维数也较大。

3) 单轴荷载作用下煤体内部三维裂隙扩展以平行加载方向为主, 且随裂隙体积的增大, 煤体平均波速大致呈线性降低。

4) 采用垂直加载方向波速评价煤体损伤破坏状态更为可靠, 将声波传播路径设置为垂直煤体受载(最大主应力)方向, 有利于提高现场预测失稳事故的合理性。

文中虽基于压缩破坏后型煤横纵向切面裂隙特征参数, 分析了破坏的各向异性, 并探讨了波速与裂隙分布的相关性。后续工作中需优化型煤与现场松软原煤的相似性, 制备含孔裂隙等缺陷型煤试样, 开展复杂应力路径下煤体横纵向多切面裂隙特征参数对比研究, 以便更加全面研究波速及破坏特征。

参考文献(References):

[1] 张子敏. 瓦斯地质学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009: 303-305.
ZHANG Zimin. Gas geology [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009: 303-305.

[2] 刘 春. 松软煤层瓦斯抽采钻孔塌孔失效特性及控制技术基础

[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.

LIU Chun. Study on mechanism and controlling of borehole collapse in soft coal seam [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

- [3] 康红普, 姜鹏飞, 杨建威, 等. 煤矿千米深井巷道松软煤体高压锚注-喷浆协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 747-762.
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, YANG Jianwei, et al. Roadway soft coal control technology by means of grouting bolts with high pressure-shotcreting in synergy in more than 1000 m deep coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 747-762.
- [4] 陈 贵. 极软易燃特厚煤层综放开采技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1873-877.
CHEN Gui. Fully mechanized top coal caving mining technology of ultra soft, combustible and special thick seam [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1873-1877.
- [5] 王 沉, 屠世浩, 李召鑫, 等. 深部“三软”煤层回采巷道断面优化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(1): 9-15.
WANG Chen, TU Shihao, LI Zhaoxini, et al. Section optimization of deep gateways in three soft coal seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1): 9-15.
- [6] 袁 永, 屠世浩, 马小涛, 等. “三软”大采高综采面煤壁稳定性及其控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 21-25.
YUAN Yong, TU Shihao, MA Xiaotao, et al. Coal wall stability of fully mechanized working face with great mining height in “three soft” coal seam and its control technology [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 21-25.
- [7] GAN Qingqing, XU Jiang, DOMG Bingyan, et al. Effect of chemical structure on mechanical-seepage characteristics of briquette under different heating temperatures [J]. Powder Technology, 2023, 428(10): 1-14.
- [8] GU Helong, TAO Ming, LI Xibing, et al. Dynamic tests and mechanical model for water-saturated soft coal with various particle gradations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132(8): 1-12.
- [9] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 两种含瓦斯煤样变形特性与抗压强度的实验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 410-417.
YIN Guangzhi, WANG Dengke, ZHANG Dongming, et al. Test analysis of deformation characteristics and compressive strength of two types of coal specimens containing gas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 410-417.
- [10] 许 江, 甘青青, 蔡果良, 等. 二次炭化型煤成型装置及型煤制作[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 4055-4068.
XU Jiang, GAN Qingqing, CAI Guoliang, et al. Thermal forming method and device for secondary carbonized briquette coal [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 4055-4068.
- [11] 蒋静宇, 史孝宁, 程远平, 等. 急速卸压条件下构造煤体应力释放规律试验研究 [J/OL]. 采矿与安全工程学报: 1-12 [3-12-12]. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2023.0134>.
JIANG Jingyu, SHI Xiaoning, CHENG Yuanping, et al. Study on stress release law of tectonic coal under the condition of rapid unloading confining pressure [J/OL]. Journal of Mining and Safety Engineering: 1-12 [2023-12-12]. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2023.0134>.

- [12] 张文清, 石必明, 穆朝民. 冲击载荷作用下煤岩破碎与耗能规律实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 375-380.
ZHANG Wenqing, SHI Biming, MU Chaomin. Experimental research on failure and energy dissipation law of coal under impact load[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(2): 375-380.
- [13] 孔德中, 杨胜利, 张锦旺, 等. 煤样强度特征的浆液量效应试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 420-425.
KONG Dezhong, YANG Shengli, ZHANG Jinwang, *et al.* The experimental study of the grout quantity effect of strength properties of coal sample[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(3): 420-425.
- [14] 李祥春, 张 良, 赵艺良. 常规三轴压力下含瓦斯煤蠕变-渗流演化规律[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(4): 55-62.
LI Xiangchun, ZHANG Liang, ZHAO Yiliang. Evolution of gas-filled coal creep-seepage under conventional triaxial compression[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(4): 55-62.
- [15] 朱传奇, 谢广祥, 王 磊, 等. 含水率及孔隙率对松软煤体强度特征影响的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 601-607.
ZHU Chuanqi, XIE Guangxiang, WANG Lei, *et al.* Experimental study on the influence of moisture content and porosity on soft coal strength characteristics[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(3): 601-607.
- [16] 朱传奇, 李传明, 殷志强, 等. 不同含水率及黏土含量下松软煤体力学特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3258-3265.
ZHU Chuanqi, LI Chuanming, YIN Zhiqiang, *et al.* Experimental study of soft coal mechanics characteristics with different moistures and clay contents[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3258-3265.
- [17] GE Lina, YI Fu, DU Changbo, *et al.* Deformation Localization and Damage constitutive model of raw coal and briquette coal under uniaxial compression[J]. Geofluids, 2022, (1): 1-12.
- [18] XIE Beijing, YAN Zheng, DU Yujing, *et al.* Determination of holmquist-johnson-cook constitutive parameters of coal: laboratory study and numerical simulation[J]. Processes, 2019, 7(6): 1-20.
- [19] 林海飞, 刘思博, 李树刚, 等. 稳压条件下煤体稳定特性钻孔倾角效应的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 575-583.
LIN Haifei, LIU Sibao, LI Shugang, *et al.* Experimental study for the effects of drilling angle on coal mass stability under stable pressure conditions[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(3): 575-583.
- [20] 张天军, 张 磊, 李树刚, 等. 含孔试样渐进性破坏的表面变形特征[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2623-2630.
ZHANG Tianjun, ZHANG Lei, LI Shugang, *et al.* Characteristics of the surface deformation of specimens with a hole during the progressive failure[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2623-2630.
- [21] 程立朝, 许 江, 冯 丹, 等. 黏结剂含量对含瓦斯煤剪切细观损伤力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2467-2477.
CHENG Lichao, XU Jiang, FENG Dan, *et al.* Effect of binder content on mesoscopic damage mechanical characteristics of gas-bearing coal subjected to shear load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2467-2477.
- [22] NARA, Yoshitaka, KATO, Harumi, YONEDA, Tetsuro, *et al.* Determination of three-dimensional microcrack distribution and principal axes for granite using a polyhedral specimen[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(2): 316-335.
- [23] SUN Xiaoyuan, CHEN Gengyue, LI Jihui, *et al.* Propagation characteristics of ultrasonic P-wave velocity in artificial jointed coal briquettes[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2020, 17(5): 827-837.
- [24] 王 刚, 李胜鹏, 刘义鑫, 等. 真三轴下注水条件对煤体超声波传播特性影响规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2225-2239.
WANG Gang, LI Shengpeng, LIU Yixin, *et al.* Influence of water injection on ultrasonic propagation characteristics of coal under true triaxial stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2225-2239.
- [25] 赵洪宝, 王 涛, 苏泊伊, 等. 局部荷载下煤样内部微结构及表面裂隙演化规律[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 227-237.
ZHAO Hongbao, WANG Tao, SU Boyi, *et al.* Evolution law of internal microstructures and surface cracks of coal under local loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(2): 227-237.
- [26] 王兆会, 王家臣, 王 凯. 综放开采顶煤冒放性预测模型的构建与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 49-62.
WANG Zhaohui, WANG Jiachen, WANG Kai. A model for top-coal cavability assessment and its application in longwall top-coal caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 49-62.
- [27] 朱传奇, 谢广祥, 王 磊. 松软煤体波速演化规律与破坏程度量化指标[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2609-2622.
ZHU Chuanqi, XIE Guangxiang, WANG Lei. Wave velocity evolution law and quantitative index of damage degree of soft coal[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2609-2622.
- [28] 赵洪宝, 胡桂林, 王飞虎, 等. 局部荷载下含中心孔洞煤体裂纹扩展特征量化分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 860-870.
ZHAO Hongbao, HU Guilin, WANG Feihu, *et al.* Quantitative analysis of crack expansion in specimens of coal having asingle pre-existing hole[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 860-870.
- [29] 王家臣. 极软厚煤层煤壁片帮与防治机理[J]. 煤炭学报, 2007, 32(8): 785-788.
WANG Jiachen. Mechanism of the rib spalling and the controlling in the very soft coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(8): 785-788.
- [30] 吴学明, 雷照源, 文 杰. “三软”煤层工作面煤壁片帮防治试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 20-29.
WU Xueming, LEI Zhaoyuan, WEN Jie. Experiment on preven-

- tion and control of coal wall spalling in three soft coal seam working face[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 20–29.
- [31] 张艳博, 王科学, 姚旭龙, 等. 基于波速场成像技术的岩石损伤评价研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(12): 2404–2417. ZHANG Yanbo, WANG Kexue, YAO Xulong, *et al.* Rock damage evaluation based on wave velocity field imaging technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(12): 2404–2417.
- [32] 高保彬, 李回贵, 李 林, 等. 同组软硬煤煤样声发射及分形特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 3498–3504. GAO Baobin, LI Huihui, LI Lin, *et al.* Study of acoustic emission and fractal characteristics of soft and hard coal samples with same group[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 3498–3504.
- [33] 张 琪, 李祥春, LI Biao, 等. 单轴压缩条件下煤体的宏-微观损伤破坏特征研究 [J/OL]. *采矿与安全工程学报*: 1–14 [2023-11-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1760.TD.20231103.1138.004.html>. ZHANG Qi, LI Xiangchun, LI Biao, *et al.* Research on the damage characteristics of macro and microscopic scales of a loaded coal under uniaxial compression[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*: 1–14 [2023-11-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1760.TD.20231103.1138.004.html>.
- [34] 张国凯, 李海波, 夏 祥, 等. 单轴加载条件下花岗岩声发射及波传播特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(5): 1133–1144. ZHANG Guokai, LI Haibo, XIA Xiang, *et al.* Experiment study on acoustic emission and wave propagation in granite under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(5): 1133–1144.
- [35] 何玉红. 单轴荷载下砂岩波速特征与损伤演化规律研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(1): 44–48. HE Yuhong. Research on Ultrasonic Velocity Properties and Damage Development of Sandstone under Uniaxial Compression[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(1): 44–48.
- [36] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 单轴荷载作用下盐岩声波与声发射特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(10): 2107–2116. LI Haoran, YANG Chunhe, LIU Yugang, *et al.* Experimental study of ultrasonic velocity and acoustic emission properties of salt rock under uniaxial compression load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(10): 2107–2116.
- [37] 邓 涛, 黄斌彩, 杨林德. 致密岩石纵横波波速各向异性的比较研究[J]. *岩土力学*, 2007(3): 493–498. DENG Tao, HUANG Bincai, YANG Linde. Anisotropy comparison of P wave and S wave velocity for compacted rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007(3): 493–498.
- [38] 尹晓萌, 晏鄂川, 王鲁男, 等. 水与微观结构对片岩波速各向异性特征的影响及其机制研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2221–2230, 2238. YIN Xiaomeng, YAN Echuan, WANG Lunan, *et al.* Effect of water and microstructure on wave velocity anisotropy of schist and its mechanism[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2221–2230, 2238.
- [39] 赵明阶, 徐 蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究[J]. *岩土工程学报*, 2000(6): 720–722. ZHAO Mingjie, XU Rong. The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000(6): 720–722.