



移动扫码阅读

雷国荣, 李春元, 齐庆新, 等. 原生层理结构影响下煤岩组合体超声波及 CT 扫描分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(3): 74–86.

LEI Guorong, LI Chunyuan, QI Qingxin, *et al.* Ultrasonic and CT scanning analysis of coal-rock mass under the primary bedding structure[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3): 74–86.

原生层理结构影响下煤岩组合体超声波及 CT 扫描分析

雷国荣, 李春元, 齐庆新, 王嘉敏, 杜伟升, 李向上, 何 团

(煤炭科学研究总院有限公司 深部开采与冲击地压防治研究院, 北京 100013)

摘要: 为研究原生层理结构对煤岩组合体波速及力学性质的影响, 并提升室内获取煤岩波速及力学参数的精确性、快速性及便捷性, 在室内对不同原生层理倾角的煤岩组合体开展了多层次多方位的超声波及 CT 扫描测试。基于超声波测试数据, 获取了原生层理结构影响下煤岩组合体不同层位的波速及波速比变化特征; 结合 CT 扫描及三维重构技术, 应用煤岩灰度分布频数数据, 提出了不同层位 CT 灰度均值的计算方法, 获得了不同原生层理倾角下煤岩组合体不同层位灰度及煤岩含量的变化规律, 建立了煤岩 CT 灰度均值与波速、力学参数的关系; 构建了考虑层理倾角与煤岩含量效应的煤岩组合体纵波波速计算模型, 并应用测试数据进行了对比验证。结果表明: ①含原生层理的煤岩组合体波速及波速比与层理倾角线性相关, 随层理倾角增加, 组合体的纵波波速近似线性减小, 而波速比的分布范围增大; ②不同层理倾角下组合体的 CT 灰度均值与波速线性相关, 随 CT 灰度均值增高, 煤岩组合体波速线性增加; ③煤岩组合体的密度随 CT 灰度均值增加线性增高, 其动态弹性模量及剪切模量则与 CT 灰度均值均呈三阶多项式关系, 并随 CT 灰度均值增高趋于增大; ④层理倾角与煤岩含量相比, 组合体波速对煤岩含量的敏感性更高, 煤岩含量相近则波速受层理倾角影响变化最大。
关键词: 煤岩组合体; 层理倾角; 超声波; CT 扫描; 波速; 灰度

中图分类号: TD313; TD315

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)03-0074-13

Ultrasonic and CT scanning analysis of coal-rock mass under the primary bedding structure

LEI Guorong, LI Chunyuan, QI Qingxin, WANG Jiamin, DU Weisheng, LI Xiangshang, HE Tuan

(Deep Mining and Rock Burst Research Institute, Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study the influence of the primary bedding structure on wave velocity and mechanical properties of coal-rock mass, multilayer and multi-directional ultrasonic and CT scanning tests were carried out in laboratory. It also aims to improve the accuracy, rapidity and convenience of obtaining the wave velocity and mechanical parameters of coal-rock mass in laboratory. Based on the ultrasonic test, the characteristics of wave velocity and wave velocity ratio at different layers of coal-rock mass under the primary bedding dip angle were obtained. Combined with CT scanning and 3D reconstruction technology, the calculation method of CT gray mean value in different layers was proposed by using the data of the gray frequency of coal and rock. And the variation law of gray value and coal and rock content of coal-rock mass in different layers under different primary bedding dip angle was obtained. Meanwhile, the relationships between CT gray mean value and wave velocity, mechanical parameters of coal-rock mass were established. Considering the effect of bedding dip angle and the content of coal and rock, the calculation model of longitudinal wave velocity of coal-rock mass was constructed. Then the correctness of the model is verified by comparing the test data. The results show that: ① the wave velocity and wave velocity ratio of coal-rock mass with primary bedding are linearly related to bedding dip angle; with the increase of bedding dip angle, the longitudinal wave ve-

收稿日期: 2023-05-14

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0314

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51904303); 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项重点资助项目(2022-3-ZD001); 煤炭科学研究总院创新创业科技专项资助项目(2021-KXYJ-004)

作者简介: 雷国荣(1990—), 男, 贵州兴义人, 博士研究生。E-mail: 1604371980@qq.com

通讯作者: 李春元(1986—), 男, 河南永城人, 副研究员, 博士。E-mail: ley6055@163.com

locity of coal-rock mass decreases linearly, while the distribution range of wave velocity ratio expands; ② the mean wave velocity of CT is linearly correlated under different bedding dip angles, and the wave velocity of coal-rock mass increases linearly with the increases of CT gray mean value; ③ the density of coal-rock mass increases linearly with the increase of CT gray mean value, the dynamic elastic modulus and shear modulus of coal-rock mass have third order polynomial relationships with the mean value of CT gray level, and they tend to increase with the increase of the mean value of CT gray level; ④ compared with the bedding dip angle, the wave velocity of coal-rock mass is more sensitive to the coal and rock content, and the wave velocity changes largest during the content of coal and rock similar.

Key words: coal-rock mass; bedding dip angle; Ultrasonic; CT scanning; wave velocity; gray level

0 引言

煤岩体内部存在的天然层理是煤岩体中最为常见,且发育较为广泛的原生结构,其控制着煤岩的连续性和整体性^[1-2],使煤岩的声学及力学性质更加复杂,并对地下工程围岩的稳定性产生重要影响。故快速精确获取含原生层理结构煤岩体的声学及力学性质,对掌握煤岩内部的原生结构及其力学特性具有重要的现实意义和应用价值,也可为地下工程开发及资源开采提供可靠的数据支撑。

作为研究岩体结构及其力学参数的有效途径之一^[3-7],超声波检测技术得到了广泛应用,并取得了可喜的研究成果。在岩石波速方面,WYLLIE 等^[8]、史调等^[9]研究指出岩石波速随孔隙率的增加而非线性衰减;蒋玺等^[10]研究得出岩石高温产生的物性含量变化是导致岩石波速衰减的主要原因;晏先震等^[11]指出随层理角度增大,页岩声波时差、衰减系数均线性增大;邓继新等^[12]分析得出充填矿物是导致泥、页岩波速异性的主要原因;ZUO 等^[13]认为裂隙的存在降低了声波在岩石中的传播速度。为应用波速表征岩石的力学参数,KURTULU C 等^[14]研究了完整岩石的力学特性与纵波速度的关系;NOURANI 等^[15]获得了岩石 RMR 及 Q 系统指标值与波速的关系。徐晓炼等^[16]指出煤岩体波速与孔隙率、渗透率负相关;李东会等^[17]研究得出了平行层理、垂直层理煤样波速随饱和度的变化规律;朱传奇等^[18]应用波速建立了煤体破碎程度指标;李全贵等^[19]研究得出在层状煤岩组合体中声波传播的幅值衰减先快后慢。这促进了超声波技术在岩石结构探测及力学参数预测方面的研究和应用,并为研究原生层理煤岩组合体的超声波传播及力学性质奠定了基础。

随科学技术进步及装备发展,CT 扫描作为一种无损检测手段,因其具有三维重构功能,且能够快速准确地获取岩石的细观结构^[20-22],已被广泛用于研究岩石的结构及力学特性。如杨更社等^[23]以岩石 CT 数为指标,建立了岩石损伤变量与 CT 数的关系;仵彦卿等^[24]推导了岩石 CT 数与孔隙率的关系;李静

等^[25]对三轴加载渗流条件下的砂岩进行 CT 扫描,分析了孔隙结构对岩石破坏的影响;毛灵涛等^[26]应用连续 CT 扫描方法,分析了单轴压缩试验过程中煤样内部裂隙的演化规律,并给出了煤样变形与 CT 数的关系;孙欢等^[27]结合岩石 CT 扫描及单轴试验,量化分析了岩石 CT 扫描数据与单轴抗压强度的关系,提出了采用 CT 扫描数据预测岩石单轴抗压强度的新方法。这些研究成果表明,CT 扫描可广泛用于岩石结构及其力学特性的量化分析,并拓展了 CT 扫描技术在岩石工程领域的应用。

综上所述,国内外专家学者利用超声波及 CT 扫描技术研究了煤岩的结构和力学性质,取得了丰硕的成果,并为研究原生煤岩体的组构及力学性质提供了借鉴和参考依据。而在实际工程中,煤系地层岩体多以层状、互层形式赋存于地层中,形成了不同形式的煤-岩、岩-岩等组合结构,岩层间和层内多具有明显的分界面、层理等结构,并与煤、岩单体的力学特性具有显著差异,故研究其声学、力学性质可为分析评价采动煤岩的稳定性提供基础依据。当前,已有研究主要以煤岩单体,或以人工拼接的煤岩组合体进行研究,多忽略了原生煤岩分界面及层理结构的影响,并忽视了波速与 CT 扫描数据的关联性;且由于煤岩组合结构的复杂性,室内超声波测试获取煤岩波速时,仍存在测试周期长、工作量大、误差大等缺点,而 CT 扫描可有效弥补其缺点,以此研究原生煤岩组合体波速与 CT 扫描数据的关系,可显著提升室内获取煤岩波速及力学参数的精确性、便捷性及快速性,也可为精准判识原生煤岩层理结构特征提供指导,对提升采动煤岩体的评价能力具有重要的指导意义。

基于此,对含原生层理结构的煤岩组合体进行了超声波及 CT 扫描测试,研究了原生层理倾角对波速及 CT 扫描数据的影响,建立了原生煤岩组合体波速、力学参数与 CT 灰度值的量化关系,并为实现在室内快速精确获取煤岩体的波速、力学性质提供理论依据,从而为 CT 扫描分析预测煤岩的力学性质提供新的便捷方法和思路。

1 含原生层理结构组合体试样制备

河南能源集团赵固一矿二₁煤层开采,长期受底板承压水突水困扰;而采场底板为层理裂隙发育的煤层、砂质泥岩、泥岩、细粒砂岩、灰岩等多种岩层形成的组合结构底板,并影响着采动底板的力学性质及断裂突水机制。据此,在赵固一矿二₁煤层工作面内人工截割获取了含矸石的原生煤岩组合体岩块,肉眼观察其具有明显的层理结构。在室内分别按原生层理与试样径向方向的夹角约为 0° 、 25° 、 50° 和 75° 倾角钻取加工了 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的标准圆柱试样(图1);同时,将所有试样四周表面打磨平滑,使其不平整度偏差 $<0.02\text{ mm}$ 。受试样截割、运输、取心、打磨等过程震动影响,原生煤、岩极易分离,且钻取岩心获取所需层理倾角进一步降低了标准试样的制备成功率,故每种层理倾角仅2个标准试样满足测试需求,共8个试样。

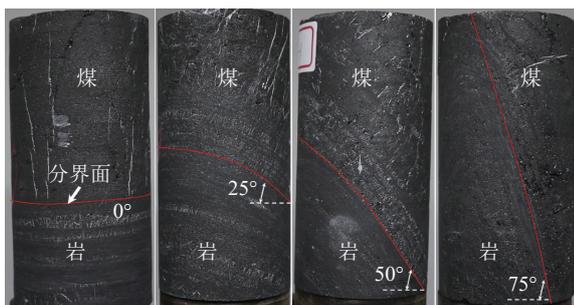


图1 不同原生层理倾角煤岩组合试样

Fig.1 Coal-rock mass samples with different primary bedding dip angles

根据图1,层理倾角 25° 、 50° 试样表面层理线具有弧形弯折现象,其主要由于制备试样时,圆柱表面的层理线受圆形截面影响而产生一定弧度,造成其层理倾角小于实际倾角;尤其在试样边缘或边缘附近表面,从视觉方面易使人感觉层理角度有一定变化;而试样内部的层理倾角并未明显变化,且超声波沿试样直径的传播路径最快,CT扫描可精确获取其煤岩含量及内部裂隙变化,则试样表面层理误差对试验结果影响较小;故可近似忽略圆柱试样层理角度差异对超声波测试结果的影响。

试验前,对各煤岩组合试样进行编号,并使用游标卡尺和电子秤测定了试样的直径、高度和质量,计算了各试样的密度,见表1。试样编号CR25-1,字母CR代表组合试样,25代表层理倾角 $\beta=25^\circ$,1表示第1个试件。

由表1知,原生煤岩组合体试样的密度介于 $1.17\sim 1.58\text{ g/cm}^3$,各试样的密度具有一定差异,主要

由于原生层理结构变化,使得各煤岩组合体试样内煤、岩的含量不同,造成煤岩组合体试样的密度呈现了一定的离散性,试验时将对超声波测试结果造成一定影响,而CT扫描可精确获取试验内部煤岩成分、裂隙结构,并弥补超声波测试的局限,从而可在一定程度上降低试样内部岩性成分差异对试验结果造成的离散性影响。

表1 含原生层理结构煤岩组合体试样规格

Table 1 Sample specification of coal-rock mass with primary bedding structure

编号	直径/mm	高度/mm	质量/g	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
CR0-1	50.16	100.04	311.93	1.58
CR0-2	49.78	96.65	306.99	1.58
CR25-1	49.80	99.96	246.69	1.27
CR25-2	49.75	99.90	264.55	1.36
CR50-1	49.86	99.29	227.12	1.17
CR50-2	49.94	99.35	237.53	1.22
CR75-1	50.03	99.54	255.50	1.31
CR75-2	49.87	99.54	229.32	1.18

2 含原生层理结构组合体超声波测试

2.1 超声波测试方案

在室内采用CVA-100型超声波测试系统对各煤岩组合体试样进行超声波测试,测试探头换能器及信号采集频率分别为1、10 MHz。测试前,应用凡士林涂抹探头及试样接触区域,以降低两者接触不充分造成的误差;测试时,超声波发射探头与接收探头沿试样轴向及径向对称布置,如图2所示。

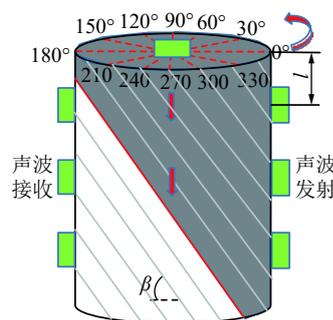


图2 超声波测试方法

Fig.2 Ultrasonic test method

根据图2,先沿轴向方向测试试样的整体波速;再沿试样径向方向分别按距试样上端面距离 l 不同自上至下测试3~4层层位的径向波速,且各层位均从 0° 方位角起始,每旋转 30° 间隔测试1次,直至 180° 方位角结束,从而为分析不同原生层理结构下煤岩组合试样的波速变化提供数据基础。

2.2 不同层理倾角下组合体波速变化规律

统计获取了各原生层理倾角煤岩组合体试样沿轴向的整体纵波波速 V_p 和横波波速 V_s ，并应用式 (1)^[28] 计算了波速比 ζ ，如图 3 所示。

$$\zeta = V_p/V_s \quad (1)$$

由图 3 知，受层理倾角 β 影响，沿组合体轴向，各试样的 V_p 、 V_s 及 ζ 有一定差异。 $\beta=0^\circ$ 、 25° 、 50° 、 75° 时， V_p 均值分别为 2 153、2 325、2 257、2 139 m/s，最大相差 186 m/s；而 V_s 均值分别为 1 361、1 327、1 389、1 018 m/s，最大相差 371 m/s，主要受 $\beta=75^\circ$ 试样离散性大影响； ζ 均值分别为 1.58、1.75、1.62、2.09，除 $\beta=75^\circ$ 试样外，各试样差异较小。因此，层理倾角影响下各试样波速分布较集中，组合体内部原生孔隙、层理结构差异不大。

同时，根据各试样径向方向的多层位、多方位测试结果，以 V_p 为例，绘制了各煤岩组合体在不同层位的纵波波速雷达图，如图 4 所示。

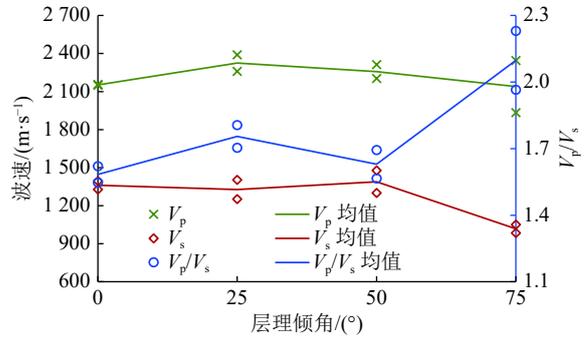


图 3 不同层理倾角下组合体轴向波速及波速比变化
Fig.3 Wave velocity and its ratio change of coal-rock mass along axial direction under different bedding dip angles

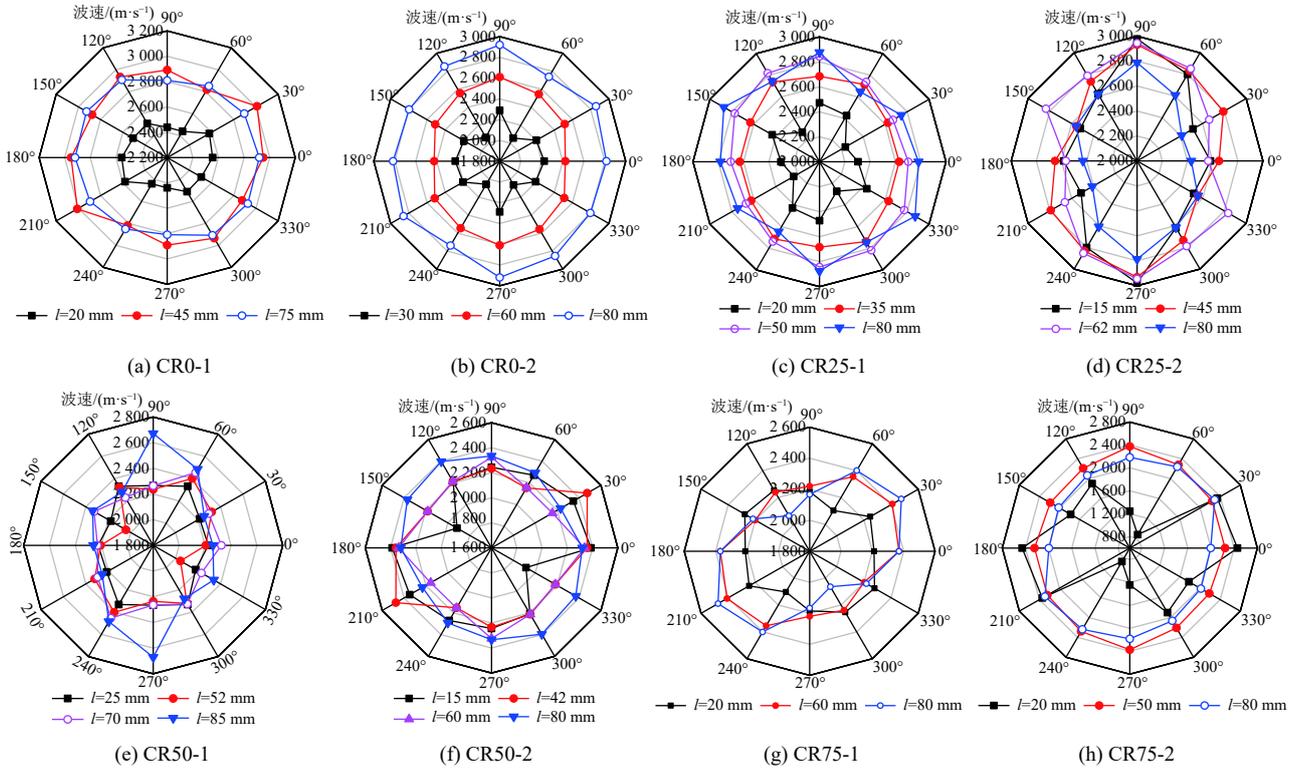


图 4 不同层理倾角煤岩组合体试样纵波波速

Fig.4 P-wave velocity radar diagram of coal-rock mass samples under different bedding angles

根据图 4，整体上看，各层位径向 V_p 离散性不大， V_p 最大、最小值的方位基本一致。且 β 越小，各试样在 l 较小层位的径向 V_p 越小； β 增高后，各层位 V_p 差异减小，并表现为上部层位径向 $V_p <$ 中部 $<$ 下部。结合图 1、图 2 可知，自上部至下部，各组合体试样内岩石比例逐渐增大，煤的比例降低，而煤的波速较岩小，从而造成测试层位 V_p 变小，故煤、岩含量是影响组合体波速的主要因素之一。

同时，试样各层位 V_s 雷达图与 V_p 变化基本一致，结合式 (1) 计算统计了 ζ 的变化，如图 5 所示。

由图 5 知， β 越大， ζ 的分布范围越大。 $\beta=0^\circ$ ， $\zeta=1.43 \sim 1.99$ ，最大值与最小值相差 0.56； $\beta=75^\circ$ ， $\zeta=1.20 \sim 3.32$ ，最大值与最小值相差达 2.12，较 $\beta=0^\circ$ 增加了 1.56，增加约 2.79 倍。因此，在原生层理倾角影响下，各层位煤、岩含量变化使得 ζ 产生差异，并导致 ζ 的分布范围随 β 增大而增大。

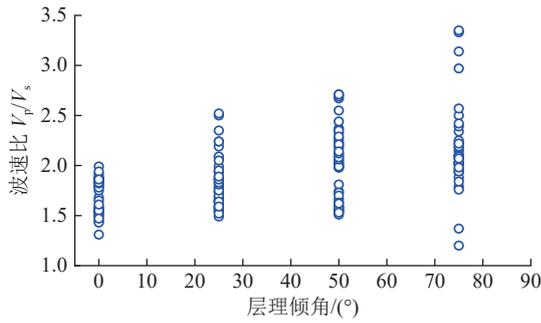


图5 不同层理倾角煤岩组合试样波速比散点变化

Fig.5 Dispersion of wave-velocity ratio of coal-rock mass samples under different bedding angles

为进一步分析不同 β 下煤岩组合体的波速变化,统计了各层位的波速平均值,获取了各试样上部 ($15\text{ mm} \leq l \leq 25\text{ mm}$)、中部 ($40\text{ mm} \leq l \leq 60\text{ mm}$) 及下部 ($70\text{ mm} \leq l \leq 80\text{ mm}$) 的波速及波速比,如图6所示。

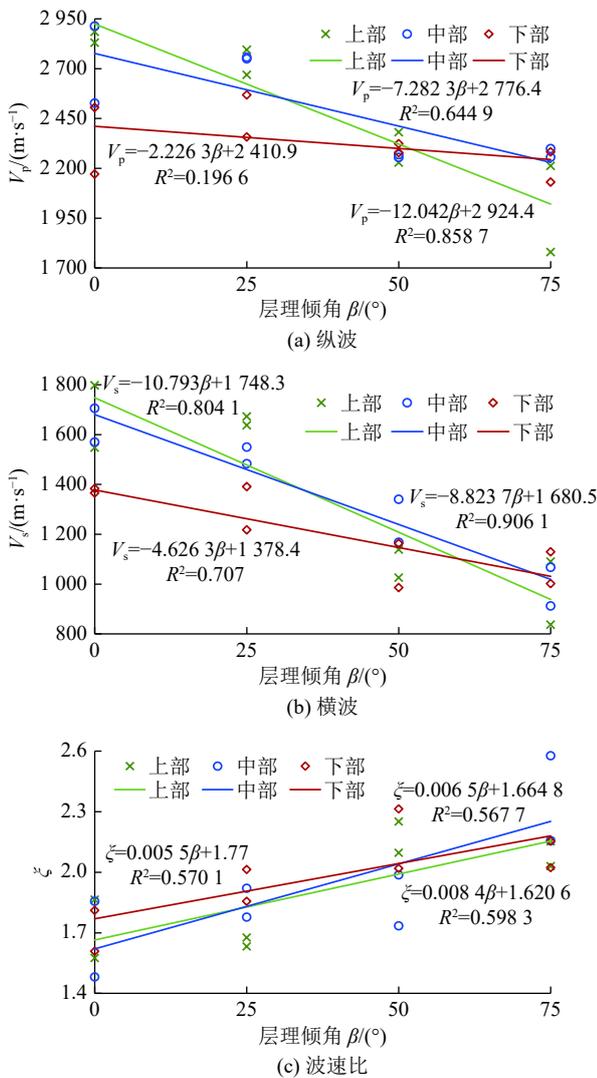


图6 不同层理倾角下组合体径向波速及波速比变化规律
Fig.6 Wave velocity and wave velocity ratio changes of coal-rock mass in radial direction under bedding angles

根据图6,组合体的 V_p 、 V_s 均符合上部<中部<下部规律,而 ξ 的变化规律与波速相反;随 β 增大,各层位 V_p 、 V_s 均降低,而 ξ 增高。各试样上部、中部及下部的波速及 ξ 与 β 基本呈线性关系,即:

$$V_p = -A_p\beta + B_p, V_s = -A_s\beta + B_s, \xi = A_\xi\beta + B_\xi \quad (2)$$

式中, A_p 、 B_p 为 V_p 的拟合常数; A_s 、 B_s 为 V_s 的拟合常数; A_ξ 、 B_ξ 为波速比的拟合常数。

根据文献 [5, 16],煤单体的波速具有随层理倾角增大而线性减小规律,即超声波在煤岩组合体中的传播具有明显的层理效应,与试验所得层理倾角度 β 对煤岩组合体波速的影响规律相符。但煤岩组合体的波速除受 β 影响外,其也与层理两侧的煤、岩含量密切相关。受各层位煤、岩含量差异,各线性拟合常数及拟合优度 R^2 均有一定变化,但上部、中部层位的拟合优度优于下部层位。

3 含原生层理结构煤岩 CT 扫描分析

3.1 CT 扫描测试方案

为分析含原生层理结构煤岩组合体的内部结构变化及其对超声波波速数据的影响,在室内应用 NanoVoxel 4000 型三维扫描 CT 系统对超声波测试后的试样进行了扫描处理,处理流程如图7所示。

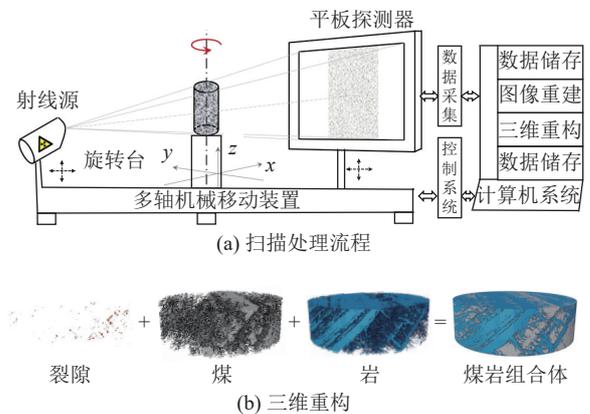


图7 试样 CT 扫描处理示意
Fig.7 Schematic of CT scanning

扫描时,采用螺旋扫描,扫描电压、电流及分辨率分别为 200 kV 、 $220\text{ }\mu\text{A}$ 、 $18.37\text{ }\mu\text{m}$ 。扫描后,先采用 VoxelStudio Recon 软件进行数据重建,再用 Avizo 软件对试样进行区域重构,并将扫描数据转换为 16 位灰度级别 (灰度为 $1 \sim 65535$) 的图像。同时,令各试样不同波速测试层位的重构区域高度略大于超声波探头覆盖高度,各层位的扫描切片取 400 张,以准确反映波速测试区域的结构变化。

3.2 煤岩组合试样 CT 灰度值变化规律

各煤岩组合试样扫描后,应用阈值分割方法处理获得了不同波速测试层位的扫描图像,其扫描切片示意如图 8a 所示。

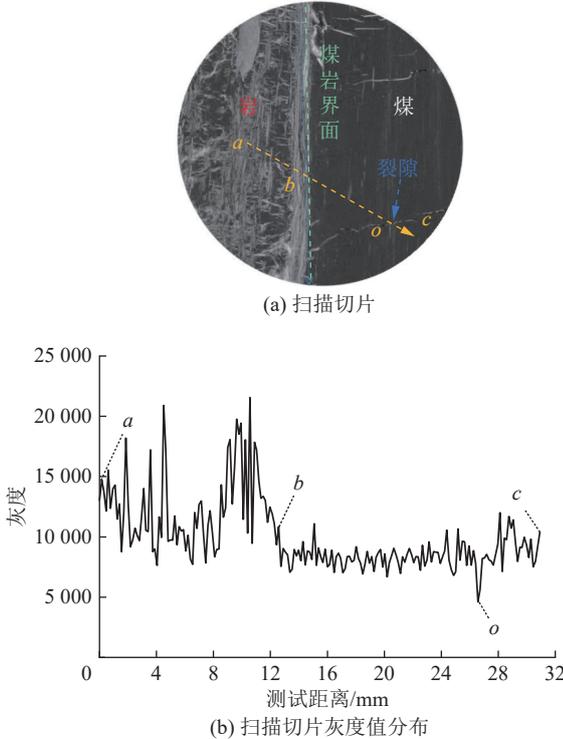


图 8 试样 CT 扫描切片及其灰度值变化

Fig.8 CT scanning section and gray value change of samples

根据 CT 扫描原理^[29],煤、岩材料密度越大,所扫描 X 射线衰减越大;X 射线穿过孔隙、裂隙时,衰减系数较小;而衰减系数越大,则其 CT 扫描灰度图像越亮。故在图 8a 中,灰度黑色的区域为裂隙,灰度较暗区域为煤,灰度明亮的区域为岩;试样内部较为致密,裂隙发育不明显,煤内部含有微量杂质,部分天然裂隙被岩石充填,裂隙开度小。为明确煤、岩、裂隙的 CT 灰度差异,提取了对应图 8a 中黄色虚测线上各点的灰度值,如图 8b 所示。分析可知,当测线在岩石内(ab 段)时,灰度值普遍较高,向上凸的波峰较多;当测线在煤内(bc 段)时,灰度较低,且多为下凹的波谷;而测线穿过裂隙(o 点)的波谷较煤更低。因此,组合体试样不同层位的煤、岩及裂隙均可通过灰度值进行区分。

为获取组合体试样波速测试层位的整体 CT 灰度值水平,应用 Avizo 软件提取了各层位的 CT 切片重构数据,并生成了包含煤岩组合体灰度分布状态及灰度级别频数的灰度直方图(图 9),再应用式(3)计算了波速测试层位的平均 CT 灰度值 G ,如图 10 所示,从而与所获取波速数据对应。

$$G = \left(\sum_{i=0} G_i m_i \right) / \left(\sum_{i=0} m_i \right) \quad (3)$$

式中: G_i 为不同级别灰度值; m_i 为不同级别灰度值的频数。

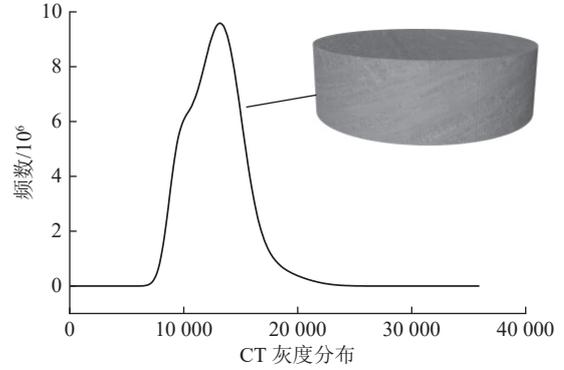


图 9 CT 灰度直方图

Fig.9 CT gray histogram

根据图 10,试样各层位的 CT 灰度均值 G 均在 8 000 以上,距上部煤端面较近的层位 G 较小,随层位远离上部煤端面,即 l 增加, G 线性升高,且除 0° 层理试样外,其线性拟合优度 R^2 均较高;而 l 决定了试样所在层位的煤岩含量,故各层理倾角下 G 与所在层位的煤岩含量正相关。同时,根据图 10e,在试样上、中、下部层位,其 G 与层理倾角 β 呈负线性相关关系,并与 2.2 节波速与 β 关系一致,但各层位的 R^2 偏低,尤其在试样上部其 R^2 仅为 0.009 9,分析认为其主要由于 0° 时上部煤体内节理裂隙发育导致误差增大所致。

3.3 原生煤岩组合体组构分析

为进一步分析组合体内部的煤岩比例、层理结构和裂隙等信息,重构了不同层理角度下组合体试样的三维图像,如图 11 所示。

由图 11 知,煤岩组合体主要包含煤基质(灰色)和岩基质(蓝色),试样内部无较大的裂隙。随 β 增大,试样自上至下煤、岩的比例逐渐变化; 0° 倾角试样上下部煤、岩区分最明显,其余试样含煤岩混合区域。结合图 8、9 知,煤、岩的灰度值范围分别为 4 600 ~ 10 300、10 301 ~ 21 000,裂隙中充填物的灰度与其基质相近;据此提取了各试样所有测试层位的煤、岩及裂隙含量,并以煤为例绘制了各 β 下不同层位煤含量 n 的变化曲线,如图 12 所示。

由图 12 知,与图 1 煤含量 n 变化规律一致,根据 CT 灰度值计算的 n 随 l 增加逐渐减小;但受原生煤岩组合体取自煤层影响, n 的拟合曲线未严格服从线性规律,故个别层位拟合优度 R^2 较低,但多数层

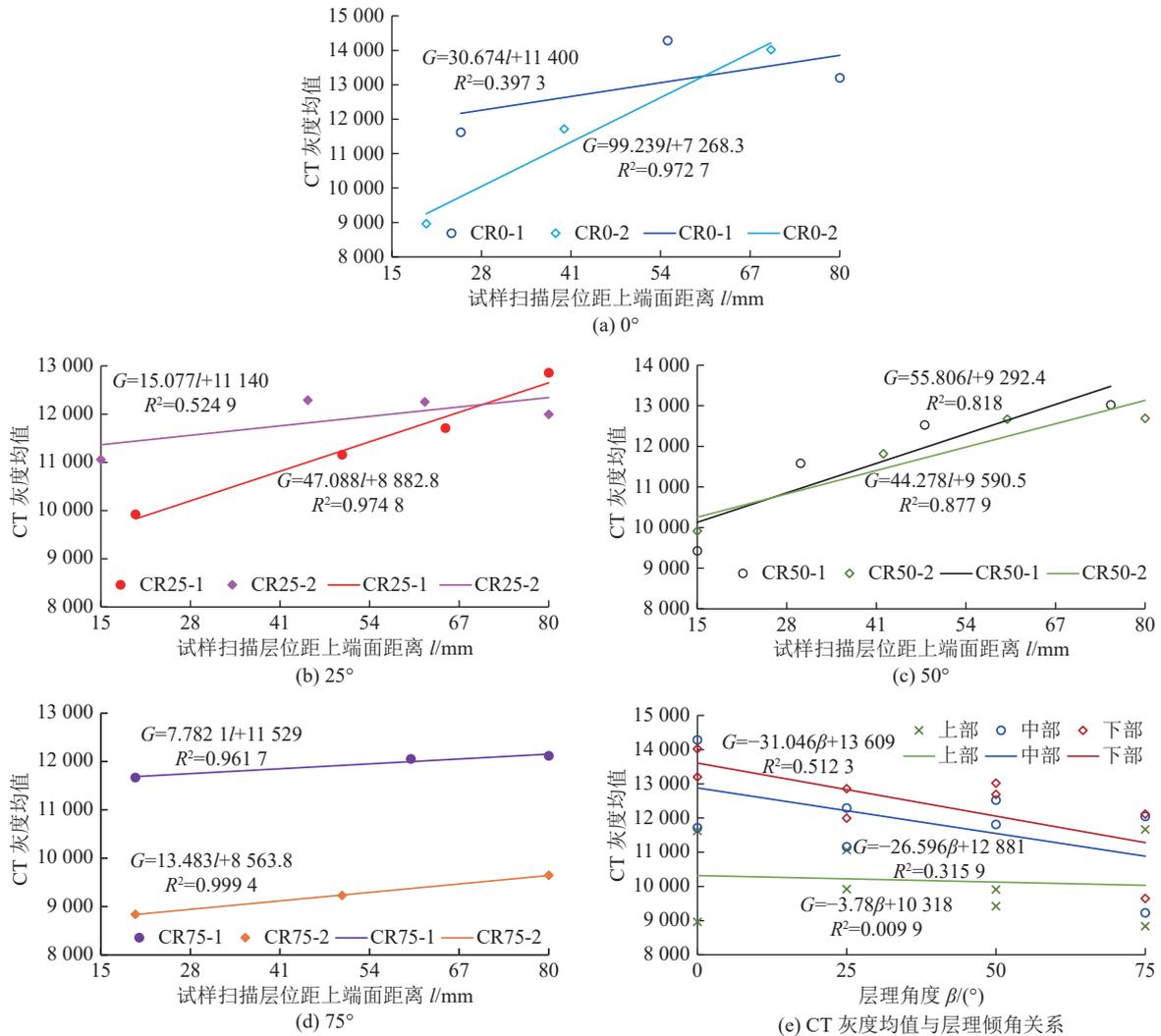


图 10 不同层位 CT 灰度值变化

Fig.10 CT gray value changes at different layers

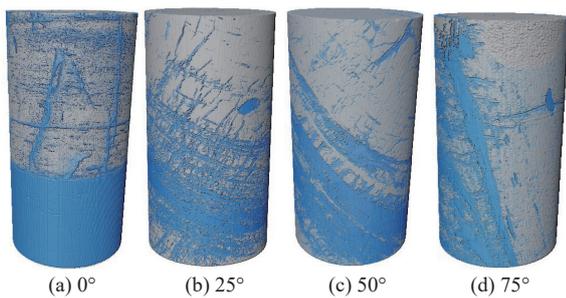


图 11 不同层理角度下煤岩组合体试样三维重构

Fig.11 Three dimensional reconstruction of coal-rock mass samples under different bedding angles

位 R^2 可达 0.91 以上。同时,随 β 增加, n 的拟合曲线变缓,即 β 越大, l 对煤岩含量差异的影响变小,从而造成波速及 CT 灰度均值产生变化。

同时,绘制了所有测试层位煤、岩及裂隙的含量与 CT 灰度均值的关系,如图 13 所示。

根据图 13,制备的组合体试样内裂隙率极低,最

大仅 0.30%,故所取试样天然裂隙不发育,且部分裂隙受煤、岩基质充填,其对各层位 CT 灰度均值 G 的影响可忽略不计,故在同一 CT 灰度均值 G 下,煤含量 n 增加,则岩含量 n_R 降低,反之相反;所有测试层位的煤含量与 G 的关系见式 (4):

$$n = -A_n G + B_n, n_R = A_R G + B_R, \quad (4)$$

式中: A_n 、 B_n 为煤含量的拟合常数; A_R 、 B_R 为岩含量的拟合常数。

故所有测试层位 G 随岩石含量增加或煤含量降低而升高,并线性相关,且 R^2 均高于 0.97。因此,组合体内各层位的 CT 灰度均值主要取决于所在层面的煤、岩含量变化,进一步表明采用煤、岩及裂隙阈值分割提取并计算其含量具有准确、精准性。

4 CT 扫描的原生煤岩组合体力学性质

根据前述,超声波测试与 CT 扫描均为特定能量

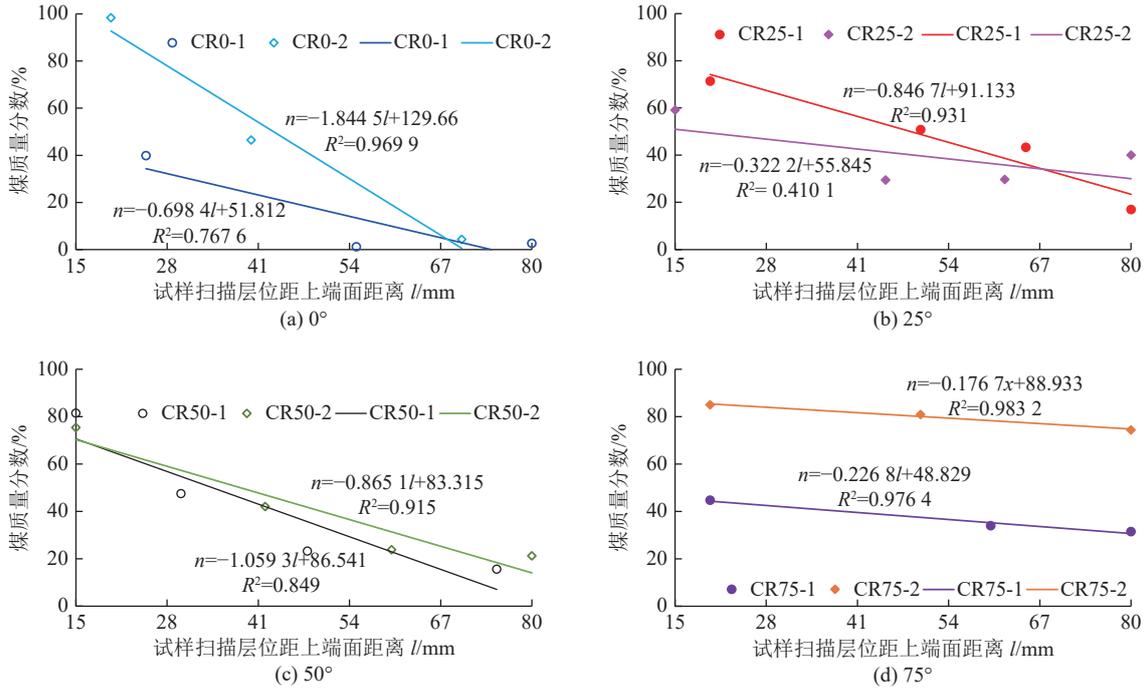


图 12 组合体试样不同层位煤含量变化

Fig.12 Coal content change in different layer of samples

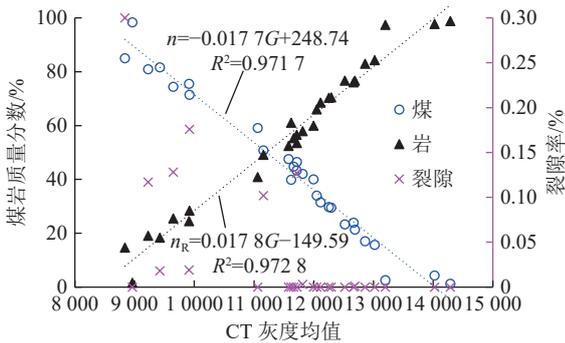


图 13 组合体内煤、岩及裂隙含量变化

Fig.13 Variation of coal, rock and fissure content of coal-rock mass

穿透组合体后所获取的能量衰减数据,且受原生层理结构及煤、岩含量差异影响,穿透组合体后的波速与 CT 扫描数据均发生变化,据此可分析煤岩试样 CT 扫描数据与波速的相关性,从而为 CT 扫描获取波速及组合体的力学参数提供依据。

4.1 CT 灰度值与波速关系

根据原生煤岩组合体各层位 CT 灰度均值及其波速测试结果,绘制了不同层理倾角下煤岩组合体试样的 CT 灰度均值与波速的关系图,如图 14 所示。

由图 14 知,相同 β 下,组合体纵波波速 V_p 和横波波速 V_s 均与 CT 灰度均值 G 呈正线性相关,即

$$V_p = A_{PG}G + B_{PG}, V_s = A_{SG}G + B_{SG}, \quad (5)$$

式中, A_{PG} 、 B_{PG} 分别为纵波波速的拟合常数; A_{SG} 、 B_{SG}

为横波波速的拟合常数。

由此可知,随 G 增大, V_p 、 V_s 呈线性增高趋势,受 β 及煤岩含量变化影响,各层理倾角的拟合优度 R^2 有一定差异,尤其 $\beta=50^\circ$ 时,其 V_p 、 V_s 变化范围较小,而 CT 灰度均值变化较大,并导致其 R^2 较小。同时, β 越大,拟合曲线增加趋势变缓,拟合曲线的斜率 A_{PG} 、 A_{SG} 有变小趋势,并与煤、岩含量的差异密切相关,即煤、岩含量差异越小, G 变化范围减小, V_p 、 V_s 变化越平缓。因此,煤岩试样的波速大小与 CT 灰度均值具有较好的关联性,在室内可通过精确计算试样不同层位的 CT 灰度值获取其波速,以达到预测煤岩波速的目标。

4.2 CT 灰度值与力学参数关系

由于原生组合体试样的裂隙率极小,且裂隙中充填物与基质相近,裂隙的影响可忽略,则 G 取决于煤、岩含量,加之其与波速具有良好的线性拟合关系,故可根据 G 进一步获取试样的层位密度、弹性模量及剪切模量等物理力学参数。

1)层位密度。设测试层位煤的含量为 n ,则岩石含量为 $1-n$,若纯煤、纯岩的密度分别为 ρ_C 、 ρ_R ,测试层位体积为 V_{CR} ,则层位密度 ρ 可表示为

$$\rho = [\rho_C V_{CR} n + \rho_R V_{CR} (1 - n)] / V_{CR} = [\rho_C n + \rho_R (1 - n)] \quad (6)$$

根据室内测定, $\rho_C=1.20 \text{ g/cm}^3$, $\rho_R=1.70 \text{ g/cm}^3$,代入式 (6),可得

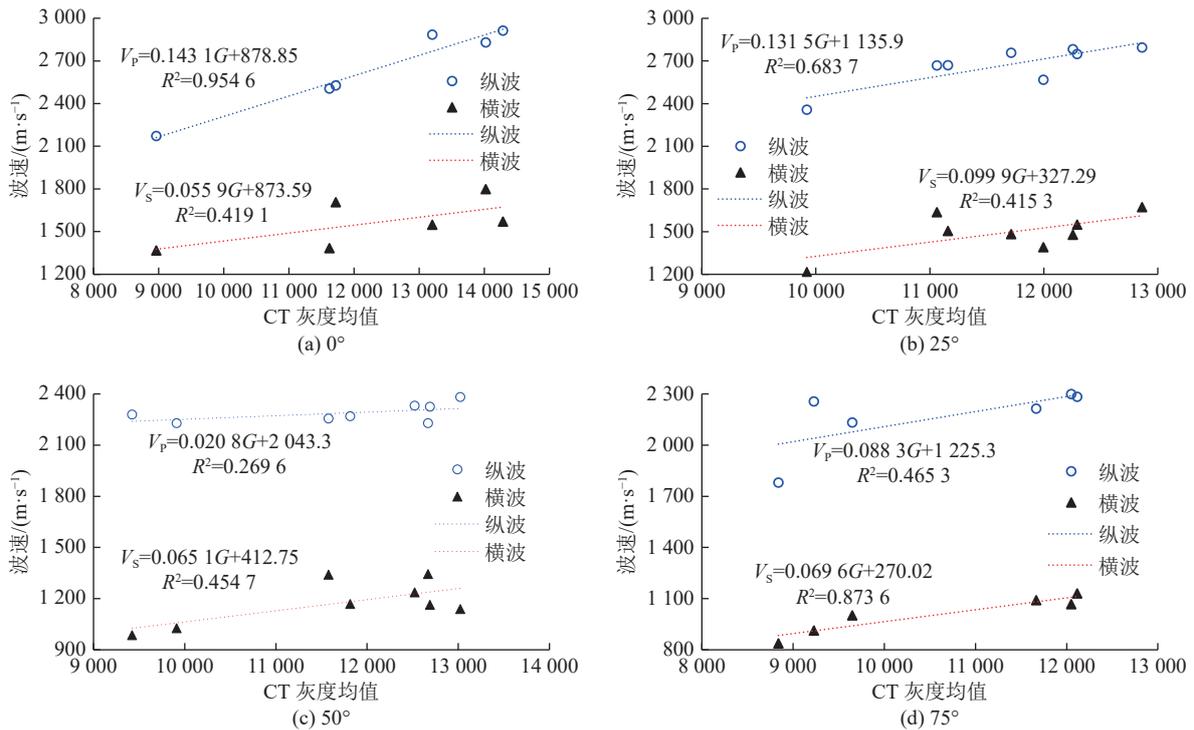


图14 不同层理倾角下组合体CT灰度均值与波速关系

Fig.14 Relationships between CT gray value and wave velocity of coal-rock mass with different bedding angles

$$\rho = 1.7 - 0.5n \quad (7)$$

根据式7计算了各层位的密度 ρ ,并绘制了所有层位的密度与其CT灰度均值关系,如图15所示。

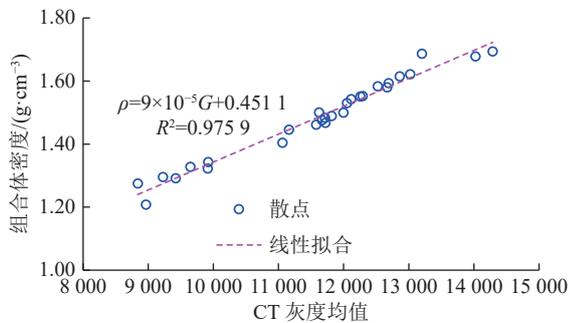


图15 组合体层位密度与CT灰度均值关系

Fig.15 Relationships between assemblage level density and CT gray mean value

根据图15, ρ 与 G 呈线性关系,即

$$\rho = A_{\rho}G + B_{\rho} \quad (8)$$

式中, A_{ρ} 、 B_{ρ} 为层位密度的拟合常数。

由于 $A_{\rho} > 0$,故随 G 增加, ρ 不断增高,且拟合优度 R^2 达到了0.97,线性拟合程度好。因此,室内对试样CT扫描后,可根据 G 直接获取不同层位的密度,据此也可根据编制程序对各层位的CT灰度均值求和,再平均后直接计算每个试样的整体密度,可减少称重等常规计算密度的环节。

2)动态弹性模量及剪切模量。为获取不同层理

倾角下煤岩组合体的力学参数,可根据各层位的平均波速计算其动态弹性模量 E 及动态剪切模量 K ,见式(9)^[19]所示。

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}, \quad K = \rho V_s^2 \quad (9)$$

将 ρ 及2.2节所取各层位的 V_p 、 V_s 代入式(9),计算了各层位的动态弹性常数 K 及 E ,并获得了不同层理倾角下组合体动态弹性参数与CT灰度均值的关系,如图16所示。

由图16知,根据式(9)计算的 E 介于2.43~12.60 GPa, K 介于1.08~5.42 GPa, K 均小于 E ;层理倾角 β 不同, E 、 K 所处区间范围具有明显差异, β 较小,两者均较高, β 增加,则两者均有一定程度的降低,故随 β 增加, E 、 K 有降低趋势。同时,随CT灰度均值 G 增加, E 、 K 整体上趋于增加,且不同 β 下,两者的规律较为相似。由式(4)知,组合体 G 与岩的含量成正比,故图16表明不同 β 下 E 、 K 随硬岩含量增加而增大,并与文献[30]中硬岩含量对岩石力学参数的影响类似,均反映出岩石整体力学参数随硬岩含量增加而提高的规律。

将式(5)、(8)代入式(9),可得:

$$K = (A_{\rho}G + B_{\rho})(A_{SG}G + B_{SG})^2 = A_{\rho}A_{SG}^2G^3 + (2A_{\rho}A_{SG}B_{SG} + B_{\rho}A_{SG}^2)G^2 + (A_{\rho}B_{SG}^2 + 2A_{SG}B_{SG}B_{\rho})G + B_{\rho}B_{SG}^2 \quad (10)$$

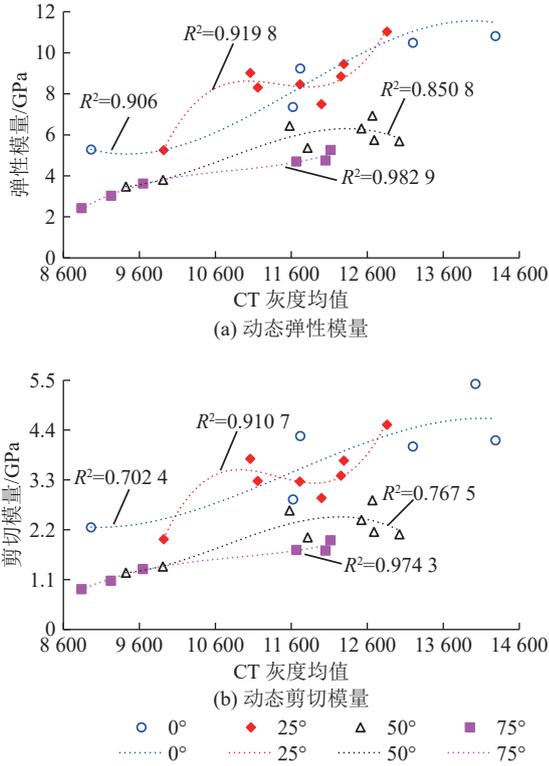


图 16 不同层理倾角下试样弹性参数与 CT 灰度均值关系
Fig.16 Relationships between elastic parameters and CT gray mean value under different bedding dip angles

结合式 (1), 对式 (9) 中 E 的表达式变换, 可得:

$$E = K \frac{3\xi^2 - 4}{\xi^2 - 1} \quad (11)$$

由于 ξ 为无量纲量, 则根据式 (10)、式 (11), E 、 K 与 G 均呈三阶多项式关系, 据此拟合的曲线及其 R^2 已分别标注在图中。分析知, 不同 β 下各曲线的拟合效果较好, R^2 均在 0.7 以上, 尤其 $\beta=75^\circ$ 时, E 、 K 与 G 的拟合效果最好, R^2 分别达 0.9829、0.9743, 故应用 G 可以很好地描述组合体的动态弹性模量及动态剪切模量。

5 含原生层理结构煤岩体波速分析

为进一步分析层理倾角对煤岩体波速的影响, 可结合波速测试及 CT 扫描数据分析不同层理倾角下煤岩体的波速变化。

5.1 波速与层理倾角关系

在同一介质内考虑层理结构作用时, 根据单一横向各向同性介质 (VTI) 的弹性波传播特征与传播相位角特点, 可获取单一 VTI 岩层相应的纵波波速 V_p 的表达式 (10)^[31-32]:

$$V_p(\theta) = V_{p\perp} \left(1 + \delta \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \varepsilon \sin^4 \theta \right) \quad (12)$$

式中: θ 为 VTI 岩层弹性波的入射方向与介质对称轴

(竖直方向) 的夹角 (图 17); $V_{p\perp}$ 为 VTI 岩层沿轴向对称方向的纵波波速, 即相位角 $\theta=0^\circ$; δ 、 ε 、 γ 分别为 Thomsen 各向异性介质参数。

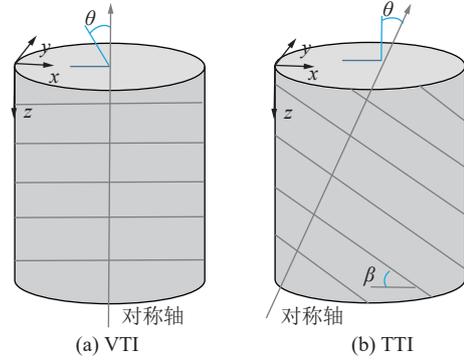


图 17 VTI 及 TTI 介质模型示意
Fig.17 VTI and TTI media model diagram

而当介质内层理倾角为 β 时, 介质为对称轴与竖直方向具有一定角度的横向各向同性介质 (TTI), 如图 17b 所示, 则其对称轴与竖直方向的夹角与 β 相等; 当波的传播方向沿竖直方向恒定时, 介质对称轴与竖直方向的夹角与 θ 相等, 即 $\beta=\theta$, 则波速与层理倾角度的关系可由式 (12) 变换为:

$$V_p(\theta) = V_{p0} \left(1 + \delta \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \varepsilon \sin^4 \beta \right) \quad (13)$$

式中: V_{p0} 为 $\beta=0^\circ$ 时竖直方向的纵波波速。

同理, 当波沿水平方向恒定传播时, 其波速同样随 β 变化, 则波的传播方向相位角 θ 与介质对称轴的倾角互余, 其波速与层理倾角的关系为:

$$V_p(\theta) = V_{p90} \left(1 + \delta \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \varepsilon \cos^4 \beta \right) \quad (14)$$

式中: V_{p90} 为 $\beta=90^\circ$ 时, 水平方向的纵波波速。

若将含原生层理结构的煤岩组合体视为煤和岩 2 种介质组成 (忽略组合体极小裂隙率影响), 煤岩组合体则可简化为各向同性的煤层、岩层组合形成的两层垂直横向各向同性岩层, 当波沿 VTI 岩层传播时, 其速度和 Thomsen 参数^[32-33] 可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{p\perp} = \frac{1}{n} \frac{S}{\sqrt{\left[\frac{AB}{C} + A^2 \right] \left(\frac{S}{T} \right)^2 + \left[\frac{AC}{B} + 1 \right]}} \\ \varepsilon = 2(n-n^2) \frac{\left(2-M-\frac{1}{M} \right) (2\nu_a-1) + \left(\frac{1}{M}-M \right) \Delta\nu}{4N^2} \\ \delta = 2(n-n^2) \frac{2D \left[\frac{2N}{n} - (A-1) \Delta\nu \right] \Delta\nu}{8 \left(A + \frac{1}{M} \right) N^3 - 4 \left(\frac{1}{n} - D \right) N^2 \Delta\nu} \end{array} \right. \quad (15)$$

式中: $A=1/n-1$, $B=\rho_a-\Delta\rho/2$, $C=\rho_a-\Delta\rho/2$, $D=(1-M)/M$, $N=\nu_a-1$, $S=V_{pa}-\Delta V_p/2$, $T=V_{pa}+\Delta V_p/2$, V_{pa} 、 ΔV_p 分别为煤、

岩的纵波波速平均值及差值; ρ_a 、 $\Delta\rho$ 分别为煤、岩的密度平均值及差值; v_a 、 Δv 分别为煤、岩的泊松比平均值及差值; M 为煤、岩的剪切模量比值; n 为煤含量, $0 < n < 1$ 。

当波的传播方向沿组合体水平方向恒定时, V_{p90} 与 $V_{p\perp}$ 的意义相同, 均为对称轴方向的纵波波速。式(14)、式(15)联立, 可得层理煤岩组合体沿水平方向波速 $V_p(\beta)$ 与 β 及 n 的关系, 如式(16)所示:

$$V_p(\beta) = \frac{1}{n} \frac{V_{pc}}{\sqrt{\left[A \frac{\rho_c}{\rho_r} + A^2\right] \left(\frac{V_{pc}}{V_{pr}}\right)^2 + \left[A \frac{\rho_c}{\rho_r} + 1\right]}} \left\{ 1 + Z \sin^2 \beta \cos^2 \beta \times \frac{D \left[\frac{-2N}{n} + (N-1) \Delta v \right] \Delta v}{2 \left(\frac{1}{n} + D \right) N^3 - \left(\frac{1}{n} - D \right) N^2 \Delta v} + Z \frac{(2-W)(2v_a-1) + U \Delta v}{4N^2} \cos^4 \beta \right\} \quad (16)$$

式中: $U=(1-M^2)/M$, $W=(1+M^2)/M$, $Z=n-n^2$, V_{pc} 、 V_{pr} 分别为煤、岩的纵波波速。

根据前述, CT 扫描可获取不同层位 ρ_c 、 ρ_r , 而单一煤、岩介质的 V_{pc} 、 V_{pr} 、 Δv 、 M 均可通过波速测试简单获取, 则 $V_p(\beta)$ 主要随 n 及 β 变化, 应用式(14)绘制了 $V_p(\beta)$ 的变化规律 ($n=10\% \sim 90\%$, $\beta=0^\circ \sim 90^\circ$), 如图 18 所示。

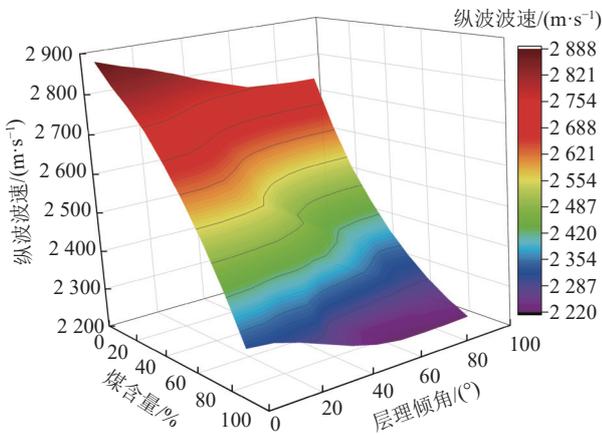


图 18 煤岩组合体波速与煤含量、层理倾角关系 q

Fig.18 Relationships between wave velocity of coal-rock mass and coal content and bedding dip angle

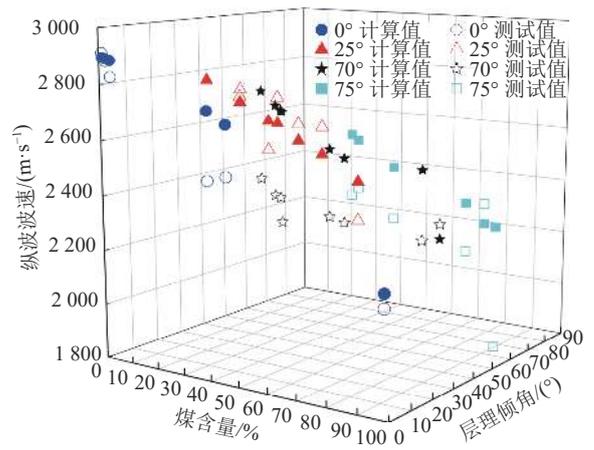
根据图 18, $V_p(\beta)$ 在 $n=10\%$ 、 $\beta=0^\circ$ 时具有极大值, 其值为 2 887 m/s; 随 n 及 β 增加, $V_p(\beta)$ 由图中左上方极大值向右下方极小值变化, 极小值为 2 220 m/s, 两者相差达 667 m/s。而在 n 及 β 共同影响下, $V_p(\beta)$ 等值线由一定的弯折变化, 分析知弯折处的煤、岩含量相近, 尤其当 $n=50\%$ 时, β 由 0° 增至 90° 时组合体波速降低尤为明显, $V_p(\beta)$ 由 2 682 m/s 降低至 2 387 m/s, 降低了 295 m/s, 故不同煤含量的煤岩组合体波

速对 β 的敏感性不同。

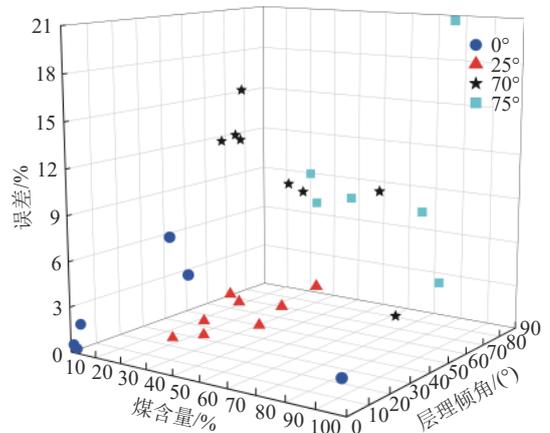
若 $n=10\%$, 当 $\beta=0^\circ$ 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 时, $V_p(\beta)$ 分别为 2 887、2 866、2 849、2 826、2 801 m/s, 前后差值依次为 21、17、23、25 m/s; 而当 $\beta=0^\circ$ 、 90° , $V_p(\beta)$ 差值最大, 相差 137 m/s; 故在相同煤含量 n 下, $V_p(\beta)$ 随 β 增大近似线性减小。若 β 不变, 而 n 增加, 则 $V_p(\beta)$ 同样近似线性减小; 如若 $\beta=0^\circ$, 而 n 分别为 10%、20%、30%、40%、50% 时, $V_p(\beta)$ 分别为 2 887、2 837、2 795、2 746、2 682 m/s, 前后差值依次为 50、42、49、64 m/s; 而 $n=10\%$ 、 90% 时, $V_p(\beta)$ 差值最大达 566 m/s。因此, $V_p(\beta)$ 随 β 、 n 增加均近似线性减小, 并与前述试验结果基本一致; 且 β 与 n 相比, $V_p(\beta)$ 对 n 的敏感性更高, 煤岩含量相近时, $V_p(\beta)$ 受 β 的影响变化最大。

5.2 验证分析

为验证含原生层理结构煤岩组合体波速计算的准确性, 将前述 28 组测试层位的 n 及 β 代入式(14), 计算了其 $V_p(\beta)$, 并与其测试值对比, 如图 19 所示。



(a) 计算值及测试值对比



(b) 计算值及测试值误差

图 19 不同层理倾角下组合体波速的计算值、测试值对比
Fig.19 Comparison of calculated and measured wave velocity of coal-rock mass under different bedding dip angles

由图 19 知,煤岩组合体波速模型计算值与测试值相差不大,两者较为接近;当 $\beta=25^\circ$ 时,两者的最小差值仅 3 m/s,误差仅 0.11%;当 $\beta=75^\circ$ 时,两者的最大差值为 468 m/s,误差达到了 20.97%。而 $V_p(\beta)$ 的计算值与测试值的差值普遍介于 3 ~ 246 m/s,误差多小于 10%,其占比达 75%;两者误差高于 10% 的 7 组数据中, $\beta=50^\circ$ 时占了 6 组, $\beta=75^\circ$ 时其误差虽达最高,但仅 1 组数据高于 10%,故 $V_p(\beta)$ 计算值的误差普遍较小。分析认为, $V_p(\beta)$ 计算时将煤与岩视为各向同性介质,忽略了裂隙对波速的影响;且组合体波速测试过程中操作也易造成人为误差,使两者产生了一定差异。因此,根据式 (14) 计算的层理煤岩组合体波速模型具有一定的准确性,可较为精确地分析、计算煤岩组合体的波速。

因此,波速与 CT 扫描数据具有较好的相关性,且利用 CT 扫描能充分获取煤岩的含量、结构信息,据此可显著提升试样波速及力学参数获取的精确性及便捷性。

6 结 论

1)煤岩组合体不同层位的波速及波速比与 β 线性相关,主要受所在层位煤、岩含量制约; β 越大,波速比分布范围越大。

2) G 与 β 线性相关,并同波速与 β 关系一致; G 随岩石含量增加或煤含量降低而线性升高,随 G 增高,煤岩组合体波速线性增加;而煤岩组合体的动态弹性模量及剪切模量与 G 均呈三阶多项式关系,两者均随 G 增高趋于增大。

3)建立了考虑层理倾角与煤岩含量效应的煤岩组合体纵波波速计算模型,应用测试值验证了模型的精确性,并指出:随 β 或煤含量增加,含原生层理的煤岩组合体纵波波速近似线性减小。

参考文献(References):

- [1] 艾 婷,张 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, 36(12): 2048–2057.
AI Ting, ZHANG Ru, LIU Jianfeng, *et al.* Spatial-temporal evolution of acoustic emission during fracture of coal under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2048–2057.
- [2] 潘荣锟,程远平,董 骏,等. 不同加卸载下层理裂隙煤体的渗透特性研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 473–477.
PAN Rongkun, CHENG Yuanping, DONG Jun, *et al.* Study on permeability characteristics of fractured coal under different loading and unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 473–477.
- [3] 陈 旭,俞 缙,李 宏,等. 不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2527–2533.
CHEN Xu, YU Jin, LI Hong, *et al.* Experimental study on acoustic propagation law of rock with different lithology and water content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2527–2533.
- [4] 王 宇,李 晓,胡瑞林,等. 岩土超声波测试研究进展及应用综述[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 287–300.
WANG Yu, LI Xiao, HU Ruilin, *et al.* Review on research progress and application of rock and soil ultrasonic testing[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(2): 287–300.
- [5] 李贤胜,刘向君,熊 健,等. 层理对页岩纵波特性的影响[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(3): 152–160.
LI Xiansheng, LIU Xiangjun, XIONG Jian, *et al.* Effect of bedding on longitudinal wave characteristics of shale[J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(3): 152–160.
- [6] SRI RAVINDRARAJAH R. Strength evaluation of high-strength concrete by ultrasonic pulse velocity method[J]. NDT and E International, 1997, 30(4): 261–262.
- [7] SOLÍS-CARCANO R, MORENO E. Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity[J]. Construct Build Mater. 2008, 22(6): 1225–1231.
- [8] WYLLIE M R J, GREGORY A R, Gardner L W. Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media[J]. Geophysics, 1956(2): 41–70.
- [9] 史 譔,杨东全. 岩石波速和孔隙度、泥质含量之间的关系研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 379–384.
SHI Ge, YANG Dongquan. Study on the relationship between rock wave velocity, porosity and mud content[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(3): 379–384.
- [10] 蒋 玺,安 邦,唐 波,等. 0.6 ~ 2.0 GPa 压力下部分熔融角闪辉长岩的纵波波速[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(4): 505–514.
JIANG Xi, AN Bang, TANG Bo, *et al.* Longitudinal wave velocities of partially fused angular blitz gabbro at 0.6–2.0 GPa pressures[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2013, 32(4): 505–514.
- [11] 晏先震,白海波,翟明磊. 不同层理倾角页岩的超声波传播特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 552–559.
YAN Xianzhen, BAI Haibo, ZHAI Minglei. Study on ultrasonic propagation characteristics of shale with different bedding dips[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S2): 552–559.
- [12] 邓继新. 泥、页岩及储层砂岩声学性质实验与理论研究[D]. 北京: 北京大学, 2003.
DENG Jixin. Experimental and theoretical study on acoustic properties of mud, shale and reservoir sandstone[D]. Beijing: Peking University, 2003.
- [13] ZUO J P, WEI X, SHI Y, *et al.* Experimental study of the ultrasonic and mechanical properties of a naturally fractured limestone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 125: 104162.
- [14] KURTULU C, SERT ELIK F, SERT ELIK I. Correlating physico-mechanical properties of intact rocks with P-wave velocity[J]. Acta Geodaetica et Geophysica, 2016, 51(3): 571–582.
- [15] NOURANI M H, MOGHADDER M T, Safari M. Classification

- and assessment of rock mass parameters in Choghart iron mine using P-wave velocity[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering: English Edition*, 2017, 9(2): 11.
- [16] 徐晓炼, 张 茹, 戴 峰, 等. 煤岩特性对超声波速影响的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(4): 793–800.
XU Xiaolian, ZHANG Ru, DAI Feng, *et al.* Experimental study on the influence of coal and rock characteristics on ultrasonic wave velocity[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(4): 793–800.
- [17] 李东会, 梁雁侠, 张 凯, 等. 含水煤体纵波波速变化规律试验研究: 以古汉山烟煤与赵固无烟煤为例[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(5): 143–149.
LI Donghui, LIANG Yanxia, ZHANG Kai, *et al.* Experimental study on the variation law of longitudinal wave velocity of water-bearing coal body: taking Guhanshan Bituminous coal and Zhaogu anthracite as examples[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(5): 143–149.
- [18] 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. Evolution law of wavevelocity and quantitative index of failure degree of soft coal body[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2609–2622.
- [19] 李全贵, 凌发平, 胡千庭, 等. 层状煤岩弹性波传播衰减特性试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 184–190.
LI Quanguai, LING Faping, HU Qianting, *et al.* Experimental study on elastic wave propagation and attenuation characteristics of layered coal[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 184–190.
- [20] 张朝宗. 工业 CT 技术和原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [21] 毛灵涛, 袁则循, 连秀云, 等. 基于 CT 数字体相关法测量红砂岩单轴压缩内部三维应变场[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(1): 21–30.
MAO Lingtao, YUAN Zexun, LIAN Xiuyun, *et al.* Measurement of three-dimensional strain field in red sandstone under uniaxial compression based on CT digital volume correlation method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(1): 21–30.
- [22] 苑京文, 贾 东, 魏东涛, 等. 基于工业 CT 扫描的岩芯裂缝结构表征[J]. *高校地质学报*, 2016, 22(1): 200–206.
YUAN Jingwen, JIA Dong, WEI Dongtao, *et al.* Structural characterization of core fractures based on industrial CT scanning[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2016, 22(1): 200–206.
- [23] 杨更社, 孙 钧, 谢定义, 等. 岩石材料损伤变量与 CT 数间的关系分析[J]. *力学与实践*, 1998(4): 48–50.
YANG Gengshe, SUN Jun, XIE Dingyi, *et al.* Analysis of relationship between rock material damage variable and CT number[J]. *Mechanics in Engineering*, 1998(4): 48–50.
- [24] 仵彦卿, 曹广祝, 丁卫华. CT 尺度砂岩渗流与应力关系试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(4): 4203–4209.
WU Yanqing, CAO Guangzhu, DING Weihua. Experimental study on relationship between seepage and stress in CT scale sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(4): 4203–4209.
- [25] 李 静, 孔祥超, 宋明水, 等. 储层岩石微观孔隙结构对岩石力学特性及裂缝扩展影响研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4149–4156.
LI Jing, KONG Xiangchao, SONG Mingshui, *et al.* Study on the influence of micro pore structure of reservoir rock on rock mechanical properties and fracture propagation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4149–4156.
- [26] 毛灵涛, 安里千, 王志刚, 等. 煤样力学特性与内部裂隙演化关系 CT 实验研究[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(3): 408–411.
MAO Lingtao, AN Liqian, WANG Zhigang, *et al.* CT experimental study on the relationship between mechanical properties and internal fracture evolution of coal samples[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2010, 29(3): 408–411.
- [27] 孙 欢, 刘晓丽, 王恩志, 等. 基于 X 射线断层扫描预测岩石单轴抗压强度 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(S2): 3575–3582.
SUN Huan, LIU Xiaoli, WANG Enzhi, *et al.* Prediction of rock uniaxial compressive strength based on X-ray tomography[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(S2): 3575–3582.
- [28] 吴萍萍, 丁志峰, 谭捍东, 等. 基于 V_p/V_s 波速比模型约束的张渤地震带深部电性结构研究[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(8): 2716–2732.
WU Pingping, DING Zhifeng, TAN Handong, *et al.* Study on deep electrical structure of Zhangbo Seismic Zone based on V_p/V_s velocity ratio model[J]. *Journal of Geophysics*, 2021, 64(8): 2716–2732.
- [29] 刘玉龙, 汤达祯, 许 浩, 等. 基于 X-CT 技术不同煤岩类型煤储层非均质性表征[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(3): 141–146.
LIU Yulong, TANG Dazhen, XU Hao, *et al.* Based on X-CT technology, the heterogeneity of coal reservoir of different coal rock types is characterized[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(3): 141–146.
- [30] 王 斌, 邓继新, 刘喜武, 等. 矿物组分对龙马溪组页岩动、静态弹性特征的影响 [J]. *地球物理学报*, 2019, 62(12): 4833–4845.
WANG Bin, DENG Jixin, LIU Xiwu, *et al.* Influence of Mineral Components on dynamic and static elastic characteristics of Longmaxi shale[J]. *Journal of Geophysics*, 2019, 62(12): 4833–4845.
- [31] THOMSEN. Weak elastic anisotropy[J]. *Geophysics* 1986, 51(10): 1954–1966.
- [32] 王 赟, 刘媛媛, 张美根. 裂缝各向异性地震等效介质理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [33] 王 赟, 杨 春, 芦 俊. 薄互层弹性波反演面临的困境 [J]. *地球物理学报*, 2018, 61(3): 1118–1135.
WANG Yun, YANG Chun, LU Jun. Dilemmas of elastic wave inversion in thin interlayer[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(3): 1118–1135.