

郭永红, 王国伟, 张迎春, 等. 基于超声测试的深部煤层气储层脆性表征[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 137-150. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024942

GUO Yonghong, WANG Guowei, ZHANG Yingchun, et al. Characterization of brittleness property for deep coalbed methane reservoirs based on ultrasonic test data[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 137-150. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024942

基于超声测试的深部煤层气储层脆性表征

郭永红¹, 王国伟², 张迎春¹, 刘毅², 张乐¹, 杨小勇¹, 陈豪²

- 国能蒙西煤化工股份有限公司, 内蒙古鄂尔多斯 017000;
- 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要:为探究深部煤层气储层脆性及其各向异性特征, 分析有机质和黏土总含量及定向排列程度、等效孔隙率及孔隙纵横比等物性参数对深部煤层气储层脆性特征的影响。首先采集20块太原组8号煤层的原生结构煤样开展微观观察、物性测试和超声速度测试。然后基于试验结果和微观观察, 构建深部煤层气储层各向异性岩石物理模型, 最后建立二维脆性岩石物理量版。结果表明: 煤样脆性具有明显的方向依赖性, 且平行和垂直层理方向脆性性质具有相关性, 平行和垂直层理方向的杨氏模量差异与速度差异呈正相关关系, 泊松比和脆性指数各向异性与速度各向异性参数呈负相关关系。试验数据验证表明所构建的岩石物理模型能够有效刻画煤组分、结构对储层脆性特征影响。

关键词: 深部; 煤; 脆性; 超声速度; 岩石物理建模

中图分类号: TD 989

文献标志码: A

文章编号: 2096-2193(2025)01-0137-14

Characterization of brittleness property for deep coalbed methane reservoirs based on ultrasonic test data

GUO Yonghong¹, WANG Guowei², ZHANG Yingchun¹, LIU Yi²,
ZHANG Le¹, YANG Xiaoyong¹, CHEN Hao²

- CHN Energy Mengxi Coal Chemical Industry Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia 017000, China;
- College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: To explore the brittleness and its anisotropy of deep coalbed methane reservoir, the effects of parameters such as the total content of organic matter and clay and the preferred orientation degree, equivalent porosity and pore aspect ratio on the brittleness of deep coalbed methane reservoirs were analyzed. Firstly, 20 primary structural coal samples from No. 8 coal seam of Taiyuan Group were collected to carry out microscopic observation, physical property experiments and ultrasonic velocity experiments. Then an anisotropic rock physics model of the deep coalbed methane reservoir was constructed based on the experiment results and microscopic observation. Finally, a two-dimensional brittle rock physics template is established. The results show that the brittleness of coal samples has obvious direction dependence, and the brittleness of parallel and perpendicular lamination directions are correlated. The

收稿日期: 2024-11-25 修回日期: 2024-12-24

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体(52121003); 中央高校基本科研业务费专项资金(2024ZKPYDC03); 国家能源集团重点科技攻关(GJNY-22-126)

作者简介: 郭永红(1977—), 男, 内蒙古乌海人, 博士, 高级工程师, 主要从事矿井安全生产方面的工作。E-mail: 493537267@qq.com

difference of Young's modulus between parallel and perpendicular laminations is positively correlated with the difference of velocity, and the anisotropy of Poisson's ratio and brittleness index is negatively correlated with the velocity anisotropy parameter. The validation of experimental data shows that the petrophysical model constructed in the paper can effectively portray the influence of coal components and structure on the brittleness characteristics of the reservoir.

Key words: deep; coal; brittleness; ultrasonic velocity; rock physics modeling

我国埋深在 1 500~3 000 m 的深部煤层气地质资源量超过 $30 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。近年来,深部煤层气成为继致密油、致密气之后的非常规油气勘探开发的热点^[1-3]。深部煤层气储层埋藏深,以原生结构煤为主,层理连续且裂缝欠发育,具有基质渗透率低、孔隙连通性差等特征,对其进行规模性压裂改造是该类储层实现商业性开发的关键技术^[4-5]。脆性性质作为影响压裂改造效果的关键因素,其对非常规油气储层可压性评价和压裂方案的设计至关重要^[7-9]。深部原生煤的层理连续发育,具有复杂的各向异性^[7]。目前深部煤脆性及其各向异性仍不明确,严重制约煤层气储层工程甜点的准确识别。

储层脆性特征受岩性、矿物组成、孔隙、层理、围压和孔压等多种因素的综合影响^[10-12]。众多学者开展了关于岩石脆性特征及其影响因素的研究^[13-15]。如 WU 等^[13]、吴海波等^[14]基于超声测试结果得到了煤样脆性特征的参数信息,并定性分析了脆性和煤样的类型与裂缝发育程度的关系。前人研究煤样的脆性特征时,多将其视为各向同性介质,尽管吴海波等^[14]通过测量煤样不同方向的超声速度,并对比分析了不同方向上煤样的脆性差异,但该研究仍基于煤样具有各向同性的假设。龚飞等^[16]分别计算了不含和包含各向异性信息的杨氏模量,并对比两者之间的数值关系。随着研究逐步深入,更多学者认为长石、白云石和方解石均对岩石脆性特征存在影响^[17-18]。HEIDARI 等^[19]利用试验法研究岩石孔隙率与脆性的相关关系,发现岩石脆性随岩石孔隙率的增大而减小。MOSKA 等^[12]和 GONG 等^[20]基于超声速度计算页岩的杨氏模量和泊松比,并依次探究了层理结构对页岩脆性及各向异性的影响。深部煤层气储层原生结构煤由于层理发育表现出各向异性,使得储层煤脆性特征更为复杂^[7]。综上所述,已有研究大多未能清晰地阐述煤脆性各向异性特征,针对深部煤脆性各向异性及其影响因素的研究仍需持续加强。

岩石物理模型建立了储层微观结构与地震响应特征之间的映射联系^[21-22]。现有研究通过构建各种岩石物理模型分析了页岩、致密砂岩和碳酸盐

岩等非常规储层地震响应特征,以提高定量地震解释准确性和储层预测精度^[23-25]。ZHANG 等^[25]采用岩石物理建模等方法,分析砂岩储层参数对地震的影响。GUO 等^[26]提出了一种考虑变化孔隙结构的地震岩石物理反演方法,该方法实现了致密砂岩储层物性参数的精确预测。程绩伟等^[27]基于四川盆地裂缝型页岩储层,构建了正交各向异性岩石物理模型,并预测了井中速度的各向异性参数。岩石物理模型能够为油气储层高精度反演提供约束条件,有助于准确确定有利储层的目标区域^[28]。然而,适用于煤层气储层的岩石物理模型相对有限。HUANG 等^[29]和吴海波等^[14]针对煤层气储层建立了一种各向同性岩石物理模型,并以此分析煤层气含量对地震参数的影响。为了研究煤层气储层的各向异性特征,WU 等^[30]考虑煤层气储层水平裂缝特征,构建了相应的岩石物理模型,实现横向各向同性煤层的速度各向异性参数的准确估算。GONG 等^[31]构建各向异性岩石物理模型以评价煤层气储层中存在的双重孔隙结构,并以此建立了有机质和黏土含量与杨氏模量和泊松比的脆性岩石物理模型。已有的煤层气储层岩石物理模型主要针对中浅部煤层气储层,重点考虑煤层气的赋存状态及水平裂缝对煤体固有各向异性的影响,忽略了层理对其的影响,进而导致研究结论与实际情况差距较大。因此,有必要建立符合深部煤层气储层实际层理和孔隙结构特征的各向异性岩石物理模型,为深部煤层气储层工程甜点的定量预测提供支持。

本文通过实验测试获得了 20 块原生结构煤样的组分、超声速度和基本物性性质。首先,基于试验结果研究煤样脆性及其各向异性特征,分析脆性各向异性与弹性各向异性的相关关系;然后,基于煤样矿物组成和物性特征,构建描述深部煤层气储层脆性各向异性特征的岩石物理模型。采用理论和实验相结合的方法探究深部煤层气储层脆性各向异性及其影响因素,分析孔隙和层理对深部煤脆性各向异性的影响。

1 试验样品与方法

鄂尔多斯盆地东缘是我国深部煤层气勘探开发的主要区域,煤体以原生结构煤为主,碎裂煤为辅^[3,32]。深部煤层气储层的煤样需要钻井采集,煤体易碎,能够用于多方位测试的完整大块煤样难以获取。因此,为研究深部煤层气储层煤的脆性及其各向异性特征,在鄂尔多斯盆地东缘的神府地区某矿区采集了 20 组与深部煤结构相似的块状原生煤并以 PC-进行命名,煤样均采集自太原组 8 号煤层工作面,煤样的宏观煤岩类型为半光亮煤,低灰分,煤体完整且层理面连续,表面无明显裂缝。将煤样切割为边长 100 mm 的八面体结构,并将其用于超声速度测试,煤样顶、底面平行于层理面,侧面垂直于层理面,斜切面与层理面呈 45° 夹角,相对误差均小于 0.3%。将切割剩余的样品进行加工,用于微观结构的观察和其他物性的测试。

将煤样放置在 70 °C 的烘干箱中均匀加热超过 48 h,干燥样品。为保证测量准确性,避免样品过度干燥导致测量误差,在烘干后将样品放置在常温压下静置 24 h,得到含有约 1%~3% 水分的干燥样品。煤样密度通过包络体积法测量获得;镜质组最大反射率和孔隙率分别通过显微光度计法和气体法测得;煤样组分采用 X 射线衍射试验检测,测量结果的相对误差均小于 2%。在常温、常压条件下测量干燥样品的超声速度,换能器主频为 1 MHz,测量时在换能器与样品的接触面分别涂抹蜂蜜,以增加耦合性。超声测试系统示意图及不同方向超声速度测量方位如图 1 所示。图 1 中虚线表示层理。超声速度由超声波传播时间与传播路径的比值进行计算,相对误差小于 1%^[33]。利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察煤样的微观结构特征。煤样 PC-1 的微观结构特征图像如图 2 所示。由图 2 可以清晰观察到,有机

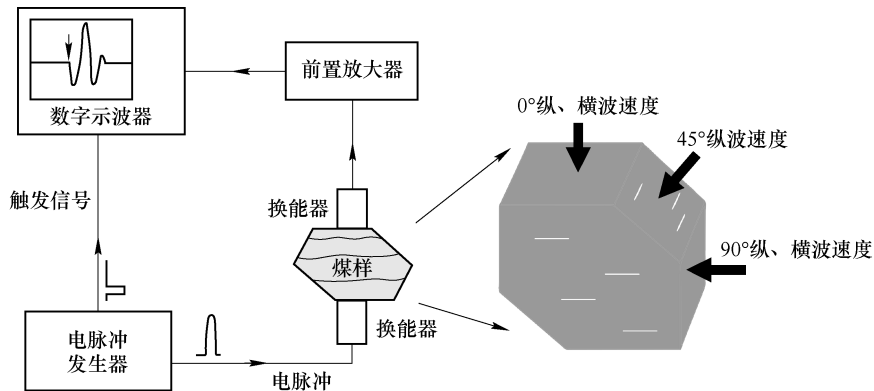


图 1 煤样超声速度测试示意

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic velocity testing of coal samples

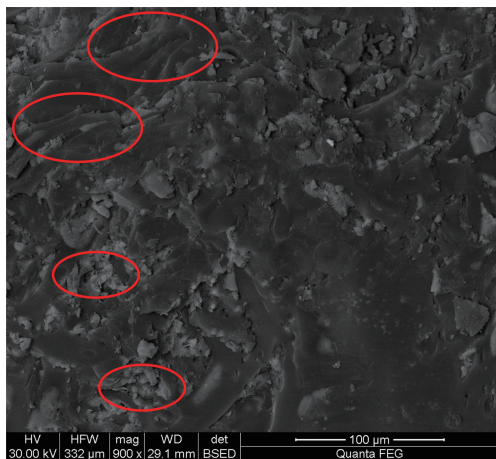


图 2 煤样 PC-1 平行层理方向扫描电镜图像

Fig. 2 SEM image of coal sample PC-1 parallel to the bedding direction

质和黏土呈层状分布,层理连续,且有少量脆性矿物嵌入有机质和黏土中。微观结构观察表明,有机质和黏土排列趋于一致,具有方向性,这与页岩中黏土颗粒的排列方式相似^[34],符合垂直横向各向同性 (Vertical Transverse Isotropy, VTI) 介质特征。

2 理论背景

深部煤层气储层的煤以原生结构煤为主,碎裂煤为辅,水平层理较为连续^[3]。层理对深部煤的脆性及其各向异性性质的影响较为显著,由于高角度裂隙不发育,平行层理脆性差异较小,煤样可被近似当作 VTI 介质^[35-36]。VTI 介质应力应变关系可由具有 5 个独立常数的刚度矩阵表示,具体表述如下^[37]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & & & \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}$, 所以只需要 5 个独立的弹性常数就可以表征弹性特征。根据 Christoffel 方程, 弹性常数可由岩石密度和不同方向速度计算得到^[38]:

$$C_{11} = \rho V_{P(90^\circ)}^2 \quad (2)$$

$$C_{33} = \rho V_{P(0^\circ)}^2 \quad (3)$$

$$C_{44} = \rho V_{S(0^\circ)}^2 \quad (4)$$

$$C_{66} = \rho V_{S(90^\circ)}^2 \quad (5)$$

$$C_{13} = \sqrt{(C_{11} + C_{44} - 2\rho V_{P(45^\circ)}^2)(C_{33} + C_{44} - 2\rho V_{P(45^\circ)}^2)} - C_{44} \quad (6)$$

式中, ρ 为煤样密度, g/cm^3 ; V_P 和 V_S 分别为纵、横波速度, m/s ; 0° 、 90° 和 45° 为波传播方向与对称轴夹角。

VTI 介质的速度各向异性可由弹性参数计算^[39]:

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} \quad (8)$$

式中, ε 和 γ 分别为纵、横波速度各向异性。

杨氏模量和泊松比是表征岩石脆性的重要参数, VTI 介质的杨氏模量、泊松比可由弹性常数表示^[40]:

$$E_{11} = \frac{4C_{66}(C_{33}(C_{11} - C_{66}) - C_{13}^2)}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \quad (9)$$

$$E_{33} = \frac{C_{33}(C_{11} - C_{66}) - C_{13}^2}{C_{11} - C_{66}} \quad (10)$$

$$v_{13} = \frac{2C_{13}C_{66}}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \quad (11)$$

$$v_{31} = \frac{C_{13}}{2(C_{11} - C_{66})} \quad (12)$$

$$v_{12} = \frac{C_{33}(C_{11} - 2C_{66}) - C_{13}^2}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \quad (13)$$

式中, E_{11} 、 E_{33} 分别为平行和垂直层理方向的杨氏模量, GPa ; v_{13} 和 v_{12} 为平行层理方向应力作用下垂直和平行层理方向应变关系; v_{31} 为垂直层理方向应力作用下平行层理方向应变关系。

3 试验结果与分析

3.1 试验测试结果

煤样基本物性参数和矿物组成见表 1。试验

表 1 煤样基本物性参数

Table 1 Basic petrophysical properties of coal samples

煤样编号	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最大镜质组 反射率/%	孔隙率/ %	有机质质量 分数/%	黏土质量 分数/%	方解石质量 分数/%	石英质量 分数/%	黄铁矿质量 分数/%
PC-1	1.46	1.05	2.9	89.4	8.1	1.7	0.8	0
PC-2	1.49	1.13	4.4	83.2	7.8	5.4	2.2	0.9
PC-3	1.47	0.92	2.6	81.1	9.9	5.1	3.1	0.5
PC-4	1.47	1.15	2.9	82.2	9.3	6.1	1.9	0.3
PC-5	1.48	1.07	3.6	81.7	5	6.1	5.3	1.7
PC-6	1.45	1.14	4.9	85.5	7.5	3.3	2.1	0.7
PC-7	1.5	1.13	3.7	87.5	4.1	3.6	2.4	1.8
PC-8	1.47	1.07	4.6	81.1	7.9	5.1	3.1	2.1
PC-9	1.48	1.05	3.9	86.1	9.1	2.3	1.6	0.6
PC-10	1.43	1.07	3.1	80.4	9.8	6.9	1.8	1.1
PC-11	1.48	1.09	4.5	84.1	6.7	3.5	4.4	1.2
PC-12	1.43	1.03	4.4	80.4	9.8	6.9	1.8	1.1
PC-13	1.49	1.03	3.9	87.1	7.1	2.3	1.6	1.6
PC-14	1.51	1.16	3.2	79.5	8.1	5.6	3.4	2.8
PC-15	1.45	0.89	2.6	86.4	9.8	1.9	1.2	0.1
PC-16	1.44	1.14	4.2	85.2	7.4	4.4	2.1	0.7
PC-17	1.44	1.14	5.0	84.1	7.4	4.3	2.2	1.7
PC-18	1.49	1.06	4.5	85.5	6.1	3.6	2.4	1.9
PC-19	1.48	0.93	3.8	86.3	8.6	2.1	1.8	0.8
PC-20	1.45	0.99	2.8	83.4	6.8	5.4	2.7	1.4

所用煤样镜质组最大反射率小于 1.2 % ,属于中低成熟度煤,样品密度约为 1.5 g/cm³。煤样有机质含量均超过 80 % ,与 QUROL 等^[41]的测量结果相似。黏土矿物含量与脆性矿物含量相近(均约为 10 %)。层状分布的有机质是煤的主要组成成分,这增强了煤的脆性各向异性特征。煤样不同方向的超声速度与孔隙率关系如图 3 所示。由图 3 可知,纵、横波速度与孔隙率呈负相关关系。所测煤样平行层理方向纵波速度均值约为 2 156 m/s,

约为同方向横波速度的 1.85 倍;垂直层理方向纵波速度均值约为 2 059 m/s,约为同方向横波速度的 1.79 倍;斜 45° 方向纵波速度均值约为 2 132 m/s。样品不同方向的纵波速度相对大小均满足 $V_{P(0^\circ)} < V_{P(45^\circ)} < V_{P(90^\circ)}$,横波速度相对大小均满足 $V_{SV(0^\circ)} < V_{SH(90^\circ)}$,符合 VTI 介质特征^[35-36]。纵、横波速度沿层理方向比沿垂直层理方向的纵波传播地更快,这与 STAN-KLECZEK^[42]的研究观察结果相似。

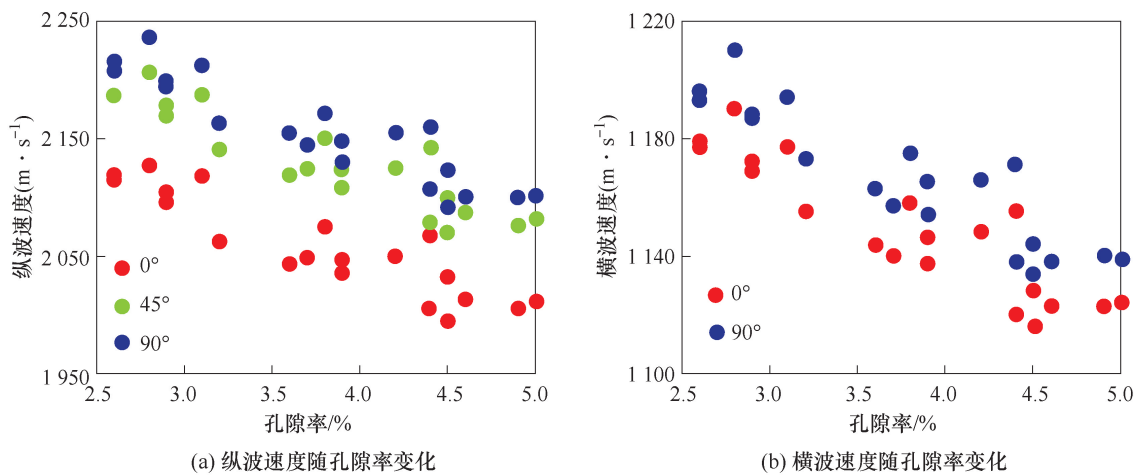


图 3 煤样超声速度与孔隙率关系
Fig. 3 Ultrasonic velocity of coal samples as a function of porosity

3.2 煤脆性及其各向异性特征

脆性是深部煤层气储层压裂开发的重要参考依据,反映了储层岩石受外力变形时发生破裂的性质^[43]。脆性指数 (Brittleness Index, BI) 作为衡量脆性强弱的重要指标,其计算方法多样。GUO 等^[44]基于脆性强的岩石具有高杨氏模量和低泊松比的特征,提出了利用杨氏模量和泊松比的比值定义脆性指数的方法。该方法计算过程较为简明,不需要对杨氏模量和泊松比的上下限进行限定,且杨氏模量和泊松比均可由试验测得的超声速度进行计算得到。该方法定义的脆性指数如下:

$$BI_{11} = \frac{E_{11}}{v_{12}} \quad (14)$$

$$BI_{33} = \frac{E_{31}}{v_{31}} \quad (15)$$

式中,BI₁₁ 和 BI₃₃ 分别为平行和垂直层理方向的脆性指数,GP_a。

受层理发育的影响,煤样具有 VTI 介质特征,因此可以将其近似视为 VTI 介质。利用式(9)~式

(15) 计算包含各向异性信息的煤样脆性参数,可进行煤样平行和垂直层理方向脆性参数的对比,如图 4 所示。可以看出,煤样脆性具有明显的各向异性特征,满足 $E_{11} > E_{33}, v_{13} > v_{31} > v_{12}, BI_{11} > BI_{33}$,表明深部煤平行层理方向比垂直层理方向脆性更强。不同方向杨氏模量和泊松比具有良好的线性相关性,平行和垂直层理方向的脆性指数虽具有一定的线性关系,但其相关性较弱。

图 4 表明,煤样脆性性质具有明显的各向异性特征。为定量表征深部煤的脆性各向异性特征,定义脆性各向异性参数 $\Psi_E, \Psi_v, \Psi_{BI}$:

$$\Psi_E = \frac{E_{11} - E_{33}}{E_{33}} \quad (16)$$

$$\Psi_v = \frac{v_{31} - v_{12}}{v_{12}} \quad (17)$$

$$\Psi_{BI} = \frac{BI_{11} - BI_{33}}{BI_{33}} \quad (18)$$

式中, Ψ_E, Ψ_v 和 Ψ_{BI} 分别为杨氏模量、泊松比和脆性指数的各向异性。

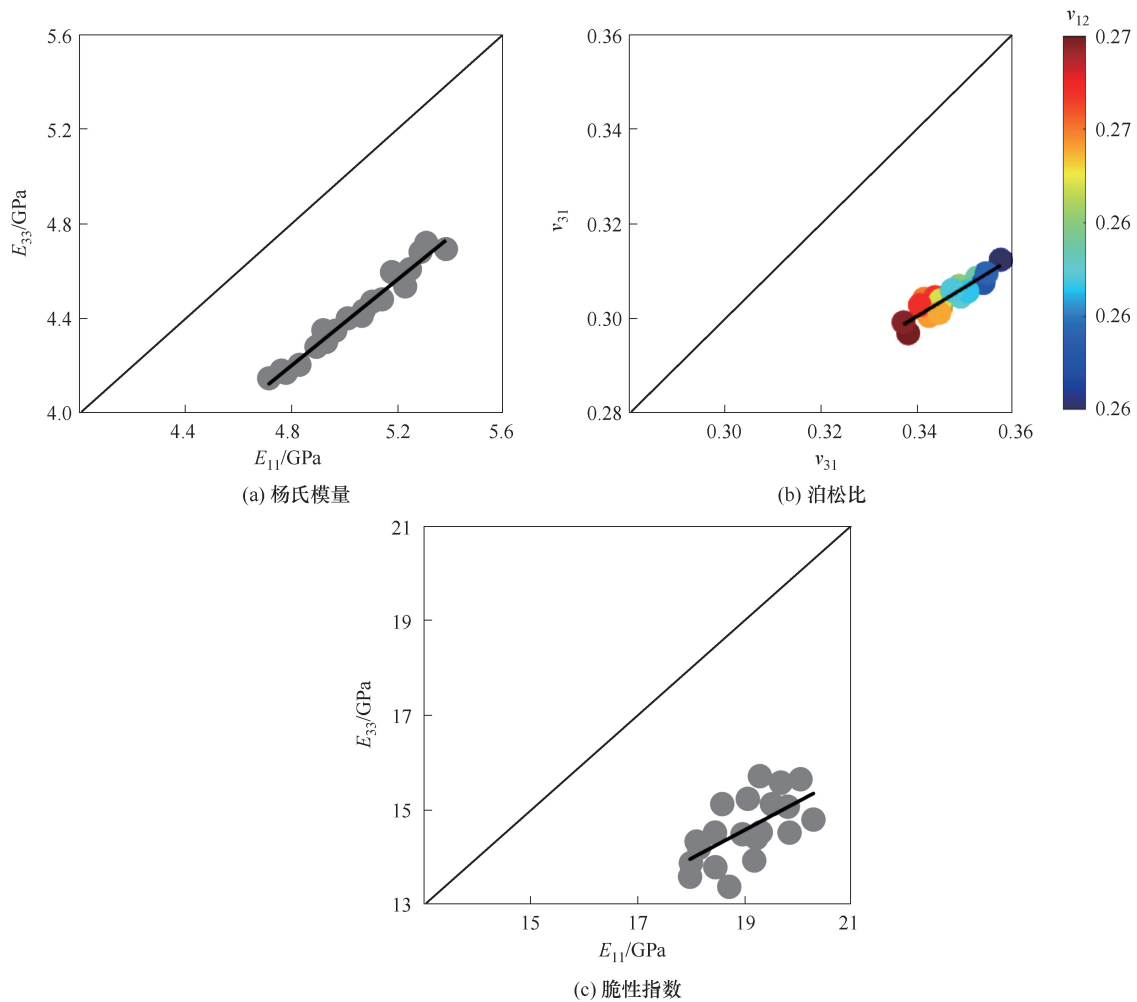


图 4 煤样平行和垂直层理方向杨氏模量、泊松比和脆性指数对比

Fig. 4 Comparison of Young's Modulus, Poisson's Ratio and brittleness index of coal samples parallel to and perpendicular to bedding direction

由于层理发育,煤样脆性与速度均具有各向异性特征。杨氏模量、泊松比和脆性指数各向异性参数与速度各向异性参数的对比如图 5 所示。煤样的 Ψ_E 最高达到 0.15, Ψ_v 最高为 0.22, Ψ_{BI} 最显著达到 0.4。煤样脆性各向异性参数与速度各向异性参数具有一定的相关性。 Ψ_E 与速度各向异性参数呈正相关关系, Ψ_v 和 Ψ_{BI} 与速度各向异性参数呈负相关关系。 Ψ_E 与速度各向异性呈正相关关系且相关性最强;泊松比和脆性指数与速度各向异性呈负相关关系,但相关性较弱。通过对比脆性各向

异性和速度各向异性,可以发现,煤样速度各向异性参数比脆性各向异性参数具有更强的敏感性,在实际工程勘探中可以通过速度各向异性近似推导储层的脆性各向异性特征。

3.3 煤脆性全角度表征

深部煤由于层理发育具有 VTI 特征,而地应力与层理面通常具有一定夹角,有必要对煤的脆性性质进行全角度表征^[45]。设应力方向与煤层理面的夹角为 θ ,则脆性参数与夹角 θ 的关系为^[34,46]

$$E = \frac{1}{\frac{\sin^4 \theta}{E_{11}} + \frac{\cos^4 \theta}{E_{33}} + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left(\frac{1}{\mu_{13}} - \frac{2\nu_{31}}{E_{33}} \right)} \quad (19)$$

$$v = \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{33}} - \frac{1}{\mu_{13}} \right) - (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \frac{\nu_{31}}{E_{33}}}{\frac{\sin^4 \theta}{E_{11}} + \frac{\cos^4 \theta}{E_{33}} + \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left(\frac{1}{\mu_{13}} - \frac{2\nu_{31}}{E_{33}} \right)} \quad (20)$$

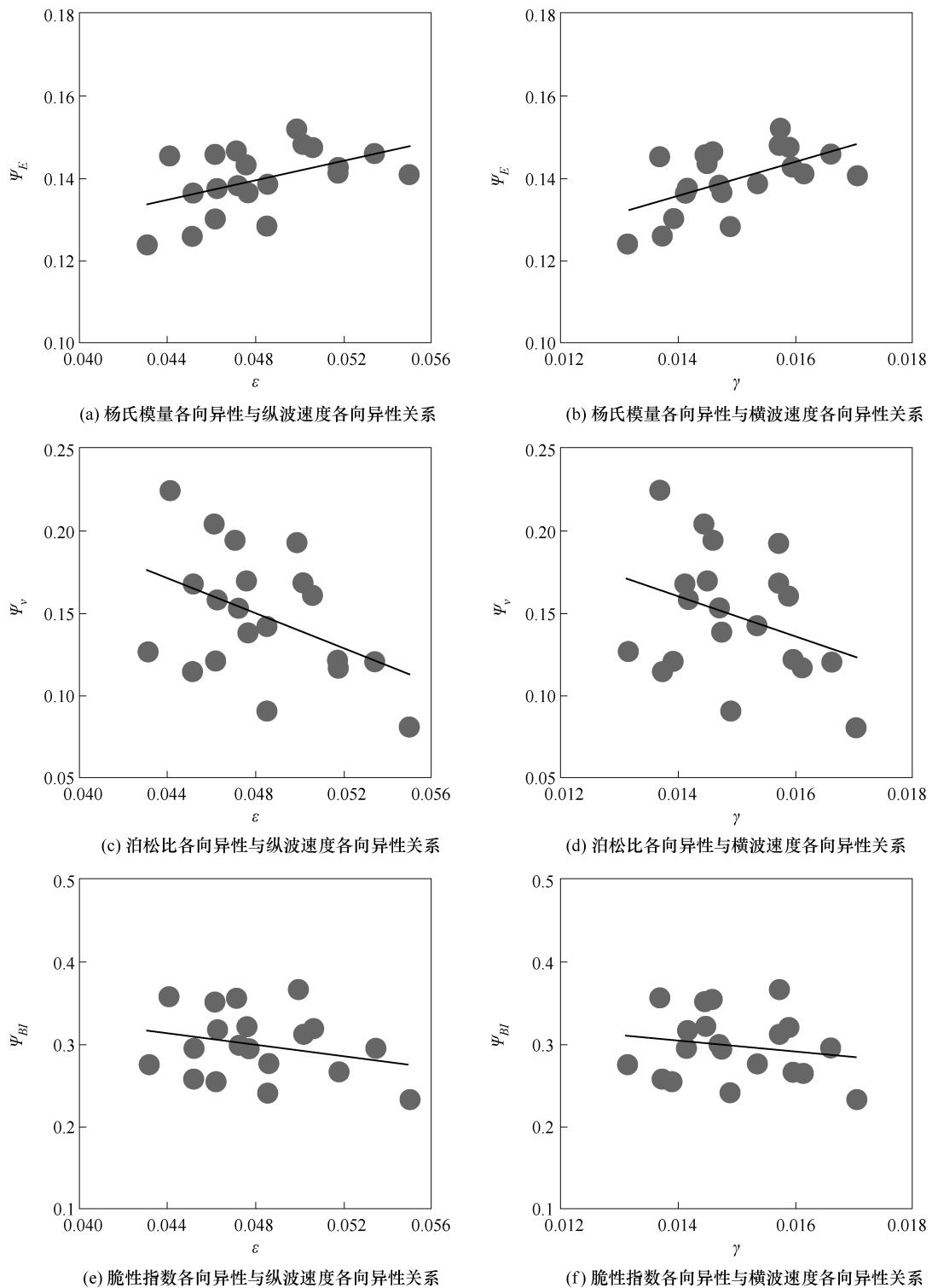


图 5 煤样杨氏模量、泊松比及脆性各向异性参数与速度各向异性参数关系

Fig. 5 Relationship between brittle anisotropy parameters and velocity anisotropy parameters of coal samples

$$v = \frac{-\frac{\nu_{12}}{E_{11}}\sin^2\theta - \frac{\nu_{31}}{E_{33}}\cos^2\theta}{\frac{\sin^4\theta}{E_{11}} + \frac{\cos^4\theta}{E_{33}} + \sin^2\theta\cos^2\theta\left(\frac{1}{\mu_{13}} - \frac{2\nu_{31}}{E_{33}}\right)} \quad (21)$$

$$BI_{11} = E/\nu_p \quad (22)$$

$$BI_{33} = E/\nu_v \quad (23)$$

式中, E 为平行于受力方向的杨氏模量, GPa; ν_p 和 ν_v 分别为平行和垂直层理方向的泊松比。

选取 5 块具有代表性的煤样(PC-1、PC-5、PC-10、PC-15、PC-20) 绘制脆性参数随角度的变化曲线, 探究煤样脆性与应力和层理夹角 θ 的相关关系。煤样杨氏模量、泊松比和脆性指数全角度表征

如图6所示。由图6可知,煤样的脆性参数均受应力与层理夹角 θ 的影响,表现出复杂的方位依赖性。当夹角为 0° 时,杨氏模量达到极小值,垂直和平行层理方向的泊松比和脆性指数均达到极大

值;当夹角为 90° 时,当应力方向平行层理时,杨氏模量和平行层理方向的泊松比和脆性指数均达到极大值,垂直层理方向的泊松比和脆性指数达到极小值。

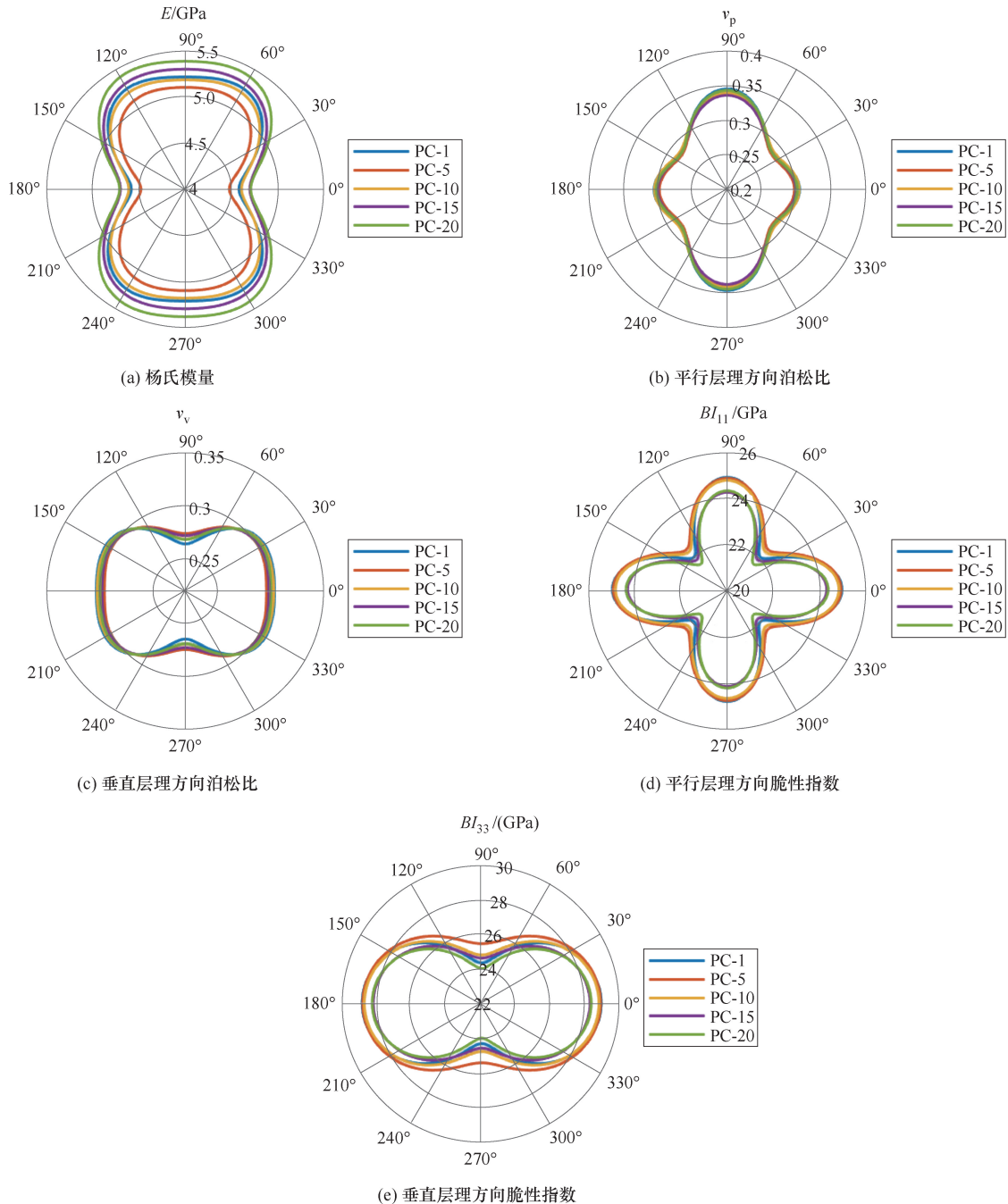


图6 煤样杨氏模量、泊松比和脆性指数全角度表征

Fig. 6 Coal sample Young's Modulus, Poisson's Ratio and Brittleness Index full angle characterization

4 深部煤层气储层各向异性岩石物理模型表征

4.1 深部煤层气储层岩石物理建模方法

煤样的组成成分复杂,主要由有机质、黏土、石英、方解石和黄铁矿组成,有机质的含量超过80%

(表1),有机质和黏土定向排列形成对煤脆性各向异性具有显著影响的层理结构^[7]。为研究有机质—黏土定向分布对煤样脆性各向异性的影响,采用BACKUS^[47]提出的Backus平均法对完全定向的有机质—黏土进行建模:

$$\begin{cases} C_{11}^{\text{Backus}} = C_{22}^{\text{Backus}} = \langle C_{11} - C_{13}^2 C_{33}^{-1} \rangle + \langle C_{33}^{-1} \rangle^{-1} \langle C_{13} C_{33}^{-1} \rangle^{-1}, \\ C_{33}^{\text{Backus}} = \langle C_{33}^{-1} \rangle^{-1}, C_{44}^{\text{Backus}} = C_{55}^{\text{Backus}} = \langle C_{44}^{-1} \rangle^{-1}, \\ C_{66}^{\text{Backus}} = \langle C_{66} \rangle, \\ C_{13}^{\text{Backus}} = C_{23}^{\text{Backus}} = C_{31}^{\text{Backus}} = C_{32}^{\text{Backus}} = \langle C_{33}^{-1} \rangle^{-1} \langle C_{33}^{-1} C_{13} \rangle, \\ C_{12}^{\text{Backus}} = C_{21}^{\text{Backus}} = C_{11}^{\text{Backus}} - 2C_{66}^{\text{Backus}} \end{cases} \quad (24)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 为括号内参数的加权平均数; C_{ij} 为单层介质的刚度系数, GPa。

利用 Bond 变换^[48] 调整完全定向排列的有机质和黏土颗粒的旋转角度, 随后利用 Voigt-Reuss-Hill (VRH) 平均法^[49] 计算等效刚度矩阵 C_{OC} :

$$\begin{cases} C_{\text{rot}}(\theta, 0) = L_{\text{im}} L_{\text{jn}} L_{\text{kp}} L_{\text{lp}} C_{\text{mnpq}}(0, 0), \\ C_{\text{rot}}(\theta, \xi) = L_{\text{im}} L_{\text{jn}} L_{\text{kp}} L_{\text{lp}} C_{\text{mnpq}}(\theta, 0), \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} L_{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \\ L_{\xi} = \begin{bmatrix} \cos \xi & -\sin \xi & 0 \\ \sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} C_{\text{rot}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} v(\theta, D_{\text{LI}}) C_{\text{rot}}(\theta, \xi) d\theta d\xi, \\ S_{\text{rot}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} v(\theta, D_{\text{LI}}) S_{\text{rot}}(\theta, \xi) d\theta d\xi, \\ C_{\text{OC}} &= \frac{C_{\text{rot}} + (S_{\text{rot}})^{-1}}{2}, \end{aligned} \quad (27)$$

式中, ξ 为方位角, ($^{\circ}$); θ 为平均倾斜角度, ($^{\circ}$); $C_{\text{rot}}(\theta, \xi)$ 和 $S_{\text{rot}}(\theta, \xi)$ 为每个旋转单元的刚度和柔度矩阵; $v(\theta, D_{\text{LI}})$ 为正态分布函数, 通过控制正态分布标准差模拟有机质和黏土不同的定向排列程度 (Lamination Index, LI), 其平均值表示有机质和黏土颗粒的平均优势取向, 标准差值表示旋转有机质和黏土颗粒的倾斜角的分散程度^[50]。

$$v(\theta, D_{\text{LI}}) = \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2D_{\text{LI}}^2}\right) \quad (28)$$

由于脆性矿物具有近乎各向同性性质且其弹性模量相差不大, 故采用 VRH 平均混合 3 种脆性矿物^[6]:

$$M_{\text{VRH}} = \frac{\sum_N^{i=1} f_i M_i + \sum_N^{i=1} \frac{f_i}{M_i}}{2} \quad (29)$$

式中, M_i 为第 i 种脆性矿物的弹性模量, GPa; f_i 为第 i 种脆性矿物的体积分数; M_{VRH} 为脆性基质的弹性模量, GPa。

脆性矿物在煤中占比较少, 且分散嵌入有机质

和黏土形成的层状混合物中。利用各向异性微分等效介质模型 (Differential Effective Medium, DEM) 将孔隙和脆性矿物依次添加到有机质和黏土混合物中^[49]。煤可被视为含有裂缝和基质孔隙的双重孔隙介质^[51]。由于所测煤样孔隙率较低, 为了简化模型, 将孔隙等效为具有一定孔隙纵横比的非连通孔隙, 等效表征孔隙对脆性性质的影响。DEM 模型计算过程如下:

$$dC^{\text{eff}} = \frac{df_i}{1-f_i} (C_i - C^{\text{eff}}) Q_i \quad (30)$$

$$Q_i = [\mathbf{I} + \mathbf{G}(C_i - C^{\text{eff}})]^{-1} \quad (31)$$

式中, i 为包裹体序号; f_i 为对应的体积分数; \mathbf{I} 为矩阵单元; \mathbf{G} 为四阶张量, 它控制每个包裹体的形状^[52]。

4.2 深部煤层气储层建模流程

基于煤样的微观结构和矿物组成, 利用 Backus 平均、Bond 变换、VRH 平均和各向异性 DEM 模型等逐级耦合煤基质、孔隙结构, 得到深部煤层气储层各向异性等效介质模型。基于试验测试结果确定模型中各组分的含量, 各组分弹性模量取自 MAVKO 等^[37] 的研究。深部煤层气储层各向异性岩石物理建模流程 (图 7) 如下:

(1) 采用 Backus 平均形成完全定向排列的层状有机质和黏土混合物, 利用 Bond 变换旋转叠加有机质和黏土颗粒以模拟其不同定向排列程度。

(2) 通过各向异性 DEM 模型向有机质和黏土混合物中添加孔隙, 形成含孔隙的柔性混合基质。

(3) 利用 VRH 平均估算 3 种脆性矿物 (黄铁矿、石英和方解石) 混合后的弹性模量, 并通过各向异性 DEM 模型将脆性矿物混合物加入到有机质和黏土背景介质中, 模拟脆性矿物分散嵌入有机质和黏土的结构状态, 得到各向异性深部煤模型。

4.3 深部煤层气储层有机质和黏土参数的脆性响应

应力方向与层理面垂直时杨氏模量、泊松比和脆性指数随有机质和黏土总含量及其定向排列程度的变化如图 8 所示。由图 8 可知, 有机质和黏土总含量变化范围为 75%~95%, D_{LI} 的变化范围为

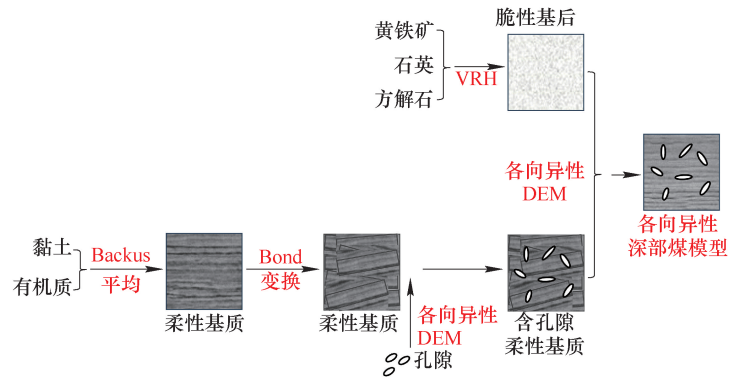


图7 深部煤层气储层各向异性岩石物理建模流程

Fig. 7 Work flow of anisotropic rock physics modeling for deep coalbed methane reservoir

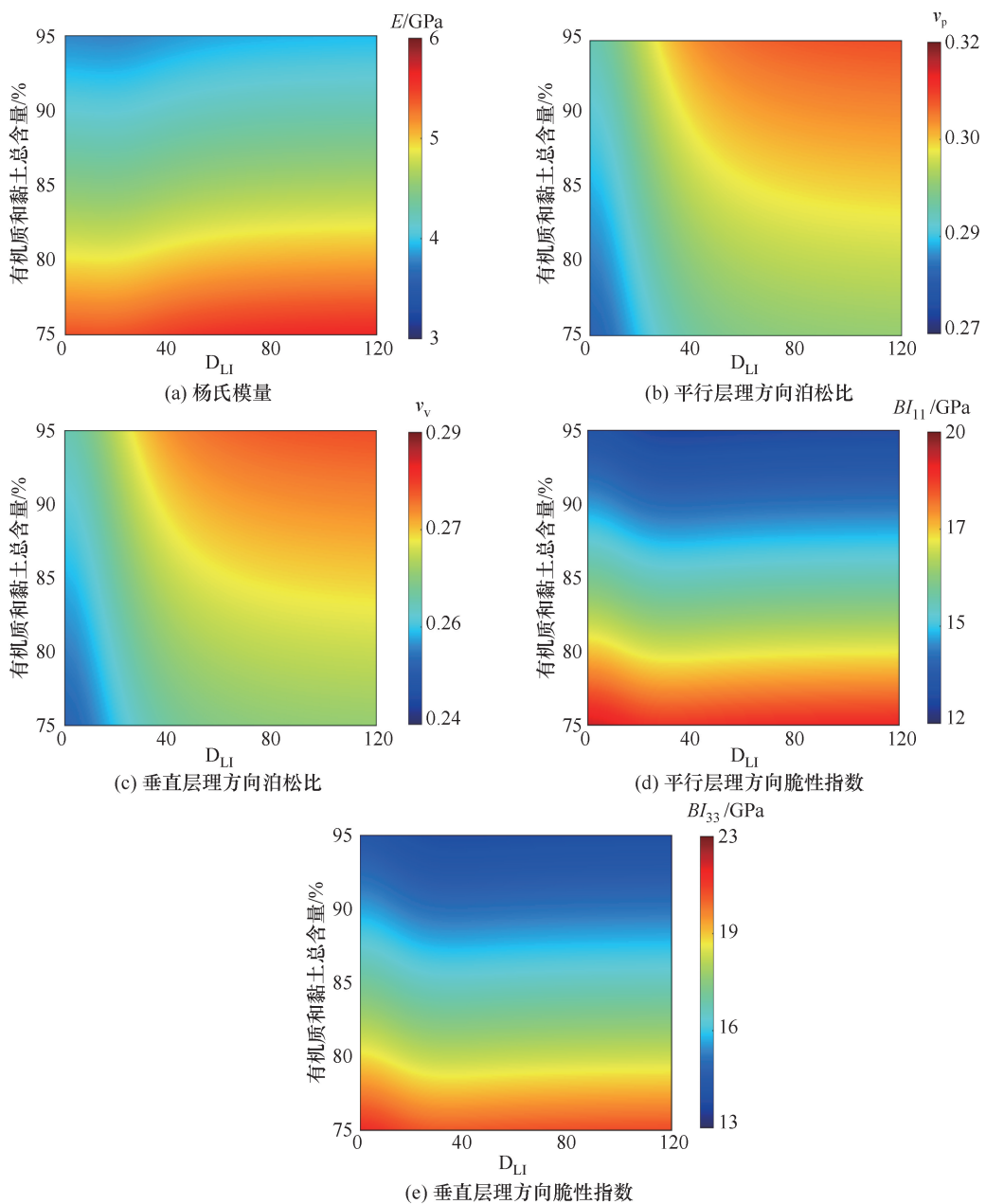


图8 深部煤杨氏模量、泊松比和脆性指数与有机质和黏土总含量及定向排列程度关系

Fig. 8 Young's Modulus, Poisson's Ratio and Brittleness Index of deep coal as a function of total content of organic matter and clay and degree of orientation distribution

0~120;杨氏模量和脆性指数与有机质和黏土总含量呈负相关,泊松比与有机质和黏土总含量呈正相关。在结构相似条件下,脆性矿物含量少的煤具有更弱的脆性特征。随着定向排列程度的增加,脆性指数增大,杨氏模量和泊松比减小。平行和垂直方向的脆性指数随有机质和黏土的定向排列程度变化趋势相似。

4.4 深部煤层气储层脆性岩石物理量版分析

深部煤层气的状态以游离气为主,吸附气为辅^[53]。煤层的孔隙特征在一定程度上能够反映其脆性特征,影响储层压裂效果。基于构建的各向异性岩石物理模型,以杨氏模量为横坐标、泊

松比为纵坐标,构建关于孔隙率和等效孔隙纵横比的岩石物理量版,并结合试验数据校正岩石物理量版。深部煤孔隙率和孔隙纵横比岩石物理量版如图9所示。由图9可知,杨氏模量随孔隙纵横比的增大而增大,随孔隙率的增大而减小;泊松比随孔隙纵横比的增大而增大,其与孔隙率的相关关系受孔隙纵横比的影响;脆性指数与孔隙率呈现明显的负相关。对比试验数据分布特征和量版发现,散点数据的孔隙率分布特征与量版的变化趋势基本趋于一致。因此,基于该深部煤层气储层岩石物理量版可合理预测孔隙率和孔隙结构特征。

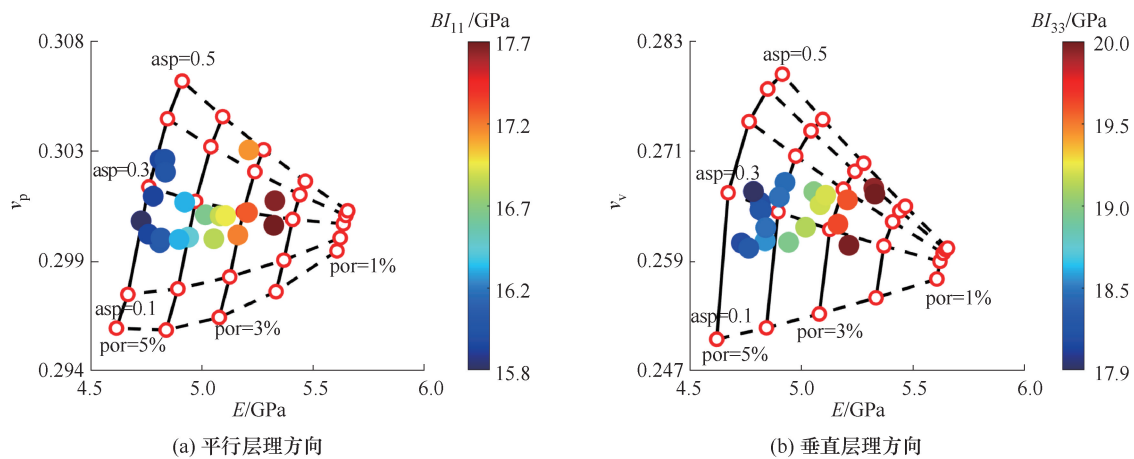


图9 深部煤脆性岩石物理量版

Fig. 9 Rock physics template for brittleness of deep coal

5 结论

(1) 煤样脆性性质具有明显的方向依赖性,脆性各向异性参数 Ψ_E 最高达到 0.15, Ψ_ν 最高为 0.22, Ψ_{BI} 最高为 0.4。煤样平行层理方向比垂直层理方向脆性更强,均满足 $E_{11} > E_{33}$, $\nu_{13} > \nu_{31} > \nu_{12}$, $BI_{11} > BI_{33}$ 。煤样脆性各向异性参数与速度各向异性参数具有一定相关性, Ψ_E 与纵、横波速度各向异性呈正相关, Ψ_ν 和 Ψ_{BI} 与纵、横波速度各向异性呈负相关。

(2) 杨氏模量和脆性指数与有机质和黏土总含量呈负相关,泊松比与有机质和黏土总含量呈正相关。脆性指数与有机质和黏土定向排列程度呈正相关,杨氏模量和泊松比与有机质和黏土定向排列程度呈负相关。

(3) 杨氏模量随孔隙纵横比的增大而增大,随孔隙率的增大而减小,泊松比随孔隙纵横比的增大而增大,脆性指数与孔隙率呈负相关。

参考文献

- [1] 温声明,周科,鹿倩. 中国煤层气发展战略探讨—以中石油煤层气有限责任公司为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(5): 129-136.
WEN Shengming, ZHOU Ke, LU Qian. A discussion on CBM development strategies in China based upon a case study of PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd. [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(5): 129-136.
- [2] 秦勇,申建. 论深部煤层气基本地质问题[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 125-136.
QIN Yong, SHEN Jian. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 125-136.
- [3] 徐凤银,王成旺,熊先钺,等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1764-1780.
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyu, et al. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei

- Sinica, 2023, 44(11): 1764–1780.
- [4] 王锦昌, 刘刚, 张辉, 等. 深部煤层地下气化选址研究—以东胜气田 J148 地区为例[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(2): 156–166.
WANG Jinchang, LIU Gang, ZHANG Hui, et al. Study on site selection of underground gasification in deep coal seam: a case study of J148 area in Dongsheng Gas Field[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(2): 156–166.
- [5] 朱光辉, 季洪泉, 米洪刚, 等. 神府深部煤层气大气田的发现与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(8): 12–21.
ZHU Guanghui, JI Hongquan, MI Honggang, et al. Discovery and implications of the large deep coalbed methane in Shenfu gas field[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(8): 12–21.
- [6] BA J, HU P, TAN W, et al. Brittle mineral prediction based on rock physics modelling for tight oil reservoir rocks[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2021, 18(6): 970–983.
- [7] ZHAI M, LI L, CHEN B, et al. Investigation on the anisotropy of mechanical properties and brittleness characteristics of deep laminated sandstones[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 289: 109386.
- [8] 杨国梁, 毕京九, 张志飞, 等. 被动围压下层理角度对页岩动态强度及耗能的影响[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(2): 188–195.
YANG Guoliang, BI Jingjiu, ZHANG Zhifei, et al. The influence of the bedding angle under passive confining pressure on the dynamic strength and energy consumption of shale[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(2): 188–195.
- [9] 赵阳, 周宏伟, 刘迪, 等. 深部煤层顶板砂岩弹性模量与孔隙度关系模型研究[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(3): 204–212.
ZHAO Yang, ZHOU Hongwei, LIU Di, et al. The study of the relation model between elastic modulus and porosity in deep coal seam roof sandstone[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(3): 204–212.
- [10] BOURBIE T, COUSSY O, ZINSZNER B. Acoustics of porous media[M]. Paris Editions Technip, 1987: 10–11.
- [11] WINKLER K W, MURPHY III W F. Acoustic velocity and attenuation in porous rocks[M]. Washington America: American Geophysical Union, 1995: 20–34.
- [12] MOSKA R, KASZA P, MASLOWSKI M. Rock anisotropy and brittleness from laboratory ultrasonic measurements in the service of hydraulic fracturing[J]. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2018, 1(189): 67–76.
- [13] WU H, ZHANG P, DONG S, et al. Brittleness index analysis of coal samples[J]. Acta Geophysica, 2019, 67: 789–797.
- [14] 吴海波, 黄亚平, 张平松, 等. 基于等效介质理论的煤层气储层岩石物理建模与应用[J]. 地球物理学报, 2021, 64(6): 2184–2198.
WU Haibo, HUANG Yaping, ZHANG Pingsong, et al. Rock physics model for coal-bed methane reservoir and its application based on equivalent medium theory[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2021, 64(6): 2184–2198.
- [15] LIU X, ZHANG Z, GE Z, et al. Brittleness evaluation of saturated coal based on energy method from stress-strain curves of uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54: 3193–3207.
- [16] 龚飞, 王国伟, 康武江, 等. 沁水盆地构造煤弹性各向异性及裂缝特征研究[J]. 地球物理学报, 2024, 67(9): 3544–3555.
GONG Fei, WANG Guowei, KANG Wujiang, et al. Study on elastic anisotropy and fracture characteristic of tectonic coals in Qinshui Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(9): 3544–3555.
- [17] GOKTAN R M, GUNES Y N. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting efficiency[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105(10): 727–733.
- [18] 罗冰, 文华国, 廖义沙, 等. 川东北地区二叠系吴家坪组二段页岩储层特征及有利区分布[J]. 岩性油气藏, 2025, 37(1): 1–12.
LUO Bing, WEN Huaguo, LIAO Yisha, et al. Shale reservoirs characteristics and favorable areas distribution of the second member of Permian Wujiaping Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2025, 37(1): 1–12.
- [19] HEIDARI M, KHANLARI G R, TORABI-KAVEH M, et al. Effect of porosity on rock brittleness[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47: 785–790.
- [20] GONG F, DI B, WEI J, et al. Experimental investigation of the effects of clay content and compaction stress on the elastic properties and anisotropy of dry and saturated synthetic shale[J]. Geophysics, 2018, 83(5): 195–208.
- [21] 桂俊川, 马天寿, 陈平. 横观各向同性页岩岩石物理模型建立—以龙马溪组页岩为例[J]. 地球物理

- 学报, 2020, 63(11): 4188-4204.
- GUI Junchuan, MA Tiantao, CHEN Ping. Rock physics modeling of transversely isotropic shale: an example of the Longmaxi formation in the Sichuan basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(11): 4188-4204.
- [22] ZHANG L, BA J, CARCIONE J M, et al. A rock-physics model to determine the pore microstructure of cracked porous rocks[J]. Geophysical Journal International, 2020, 223(1): 622-631.
- [23] AVSETH P, JOHANSEN T A, BAKHORJI A, et al. Rock-physics modeling guided by depositional and burial history in low-to-intermediate-porosity sandstones [J]. Geophysics, 2014, 79(2): 115-121.
- [24] GUO Q, LUO C, GRANA D. Bayesian linearized rock-physics amplitude-variation-with-offset inversion for petrophysical and pore-geometry parameters in carbonate reservoirs[J]. Geophysics, 2023, 88(5): 273-287.
- [25] ZHANG J J, YIN X Y, GU Y P, et al. Sandstone reservoir rock physics modeling and time-lapse seismic analysis [J]. Journal of Applied Geophysics, 2024, 222: 105318.
- [26] GUO Q, BA J, LUO C et al. Seismic rock physics inversion with varying pore aspect ratio in tight sandstone reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 207: 109131.
- [27] 程绩伟, 张峰, 李向阳. 四川盆地含裂缝海相页岩储层正交各向异性岩石物理建模[J]. 地球科学, 2024, 49(1): 299-312.
- CHENG Jiwei, ZHANG Feng, LI Xiangyang. Orthorhombic Anisotropic Rock Physics Modeling for Fractured Marine Shale Reservoir in Sichuan Basin [J]. Earth Science, 2024, 49(1): 299-312.
- [28] ZHANG F, LI X, QIAN K. Estimation of anisotropy parameters for shale based on an improved rock physics model, part 1: theory [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2017, 14(1): 143-158.
- [29] HUANG Y, WEI M, MALEKIAN R, et al. CBM reservoir rock physics model and its response characteristic study [J]. IEEE Access, 2017, 5: 5837-5843.
- [30] WU H, GUO J, JI G, et al. Estimating the anisotropy of the vertical transverse isotropy coal seam by rock physics model-based inversion [J]. Geophysical Prospecting, 2024, 72(5): 2064-2075.
- [31] GONG F, ZOU G, ZHANG Z J, et al. An anisotropic rock physics modeling for the coalbed methane reservoirs and its applications in anisotropy parameter prediction [J]. Journal of Applied Geophysics, 2024, 225: 105381.
- [32] CAO Y, ZHANG J, ZHANG X, et al. Micro-fractures in coal induced by high pressure CO₂ gas fracturing [J]. Fuel, 2022, 311: 122148.
- [33] YURIKOV A, LEBEDEV M, PERVUKHINA M et al. Ultrasonic velocity measurements on thin rock samples: Experiment and numerical modeling [J]. Geophysics, 2018, 83(2): 47-56.
- [34] GONG F, DI B, ZENG L, et al. The elastic properties and anisotropy of artificial compacted clay samples [J]. Geophysics, 2021, 86(1): 1-15.
- [35] SAURABH S, HARPALANI S. Anisotropy of coal at various scales and its variation with sorption [J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 201: 14-25.
- [36] JI G, LI H, WEI J, et al. Preliminary study on wave field and dispersion characteristics of channel waves in VTI coal seam media [J]. Acta Geophysica, 2019, 67: 1379-1390.
- [37] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. The rock physics handbook [M]. Cambridge England: Cambridge University, 2020: 21-80.
- [38] CHEADLE S P, BROWN R J, LAWTON D C, et al. Orthorhombic anisotropy: A physical seismic modeling study [J]. Geophysics, 1991, 56(10): 1603-1613.
- [39] THOMSEN L. Weak elastic anisotropy [J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1954-1966.
- [40] GAUTAM R, WONG R C K. Transversely isotropic stiffness parameters and their measurement in Colorado shale [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(12): 1290-1305.
- [41] QUEROL X, WHATELEY M K G, FERNANDEZ-TURIEL J L, et al. Geological controls on the mineralogy and geochemistry of the Bey pazari lignite, central Anatolia, Turkey [J]. International Journal of Coal Geology, 1997, 33(3): 255-271.
- [42] STAN-KIECZEK I. The study of the elastic properties of carbonate rocks on a base of laboratory and field measurements [J]. Acta Montan. Slovaca, 2016, 21: 76-83.
- [43] 于正军, 张军华, 周昊, 等. 准噶尔盆地东南缘页岩油储层脆性预测与评价 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2024, 54(5): 1711-1723.
- YU Zhengjun, ZAHNG Junhua, ZHOU Hao, et al. Brittleness prediction and evaluation of shale oil reservoir in southeastern margin of Junggar Basin [J]. Journal of Jilin University : Earth Science Edition, 2024, 54(5): 1711-1723.
- [44] GUO Z, CHAPMAN M, LI X. Exploring the effect of fractures and microstructure on brittleness index in the

- Barnett Shale [M]. Society of Exploration Geophysicists: SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2012: 1-5.
- [45] 张辉, 徐珂, 李珺, 等. 三维地震数据模型驱动下的超深全层系复杂构造地应力建模[J/OL]. 地质通报, 1-18 [2024-12-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20241012.1119.002.html>. ZHANG Hui, XU Ke, LI Jun, et al. 3D full-layer Geomechanical modeling of complex structures in the ultra-deep system driven by 3D seismic data [J/OL]. Geological Bulletin of China, 1-18 [2024-12-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20241012.1119.002.html>.
- [46] GONG F, DI B, WEI J, et al. Experimental investigation of mechanical compaction on the physical and elastic properties of synthetic shales [J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 161: 139-152.
- [47] BACKUS G E. Long wave elastic anisotropy produced by horizontal layering [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(11): 4427-4440.
- [48] BOND W L. The mathematics of the physical properties of crystals [J]. The Bell System Technical Journal, 1943, 22(1): 1-72.
- [49] HORNBY B E, SCHWARTZ L M, HUDSON J A. Anisotropic effective-medium modeling of the elastic properties of shales [J]. Geophysics, 1994, 59(10): 1570-1583.
- [50] GONG F, HUANG A, KANG W, et al. The influence of lamination and fracture on the velocity anisotropy of tectonic coals [J]. Geophysics, 2024, 89(6): MR355-MR365.
- [51] ZHAO M, JIN Y, LIU X, et al. Characterizing the complexity assembly of pore structure in a coal matrix: Principle, methodology, and modeling application [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(12): e2020JB020110.
- [52] BANDYOPADHYAY K. Seismic anisotropy: geological causes and its implications to reservoir geophysics [M]. San Francisco America: Stanford University, 2009: 33-39.
- [53] 李勇, 高爽, 吴鹏, 等. 深部煤层气游离气含量预测模型评价与校正—以鄂尔多斯盆地东缘深部煤层为例 [J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1892-1902. LI Yong, GAO Shuang, WU Peng, et al. Evaluation and correction of prediction model for free gas content in deep coalbed methane: a case study of deep coal seams in the eastern margin of Ordos Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2023, 44(11): 1892-1902.

(责任编辑:陈骏)

(上接 136 页)

- [28] 吴克柳, 朱清源, 陈掌星, 等. 边底水碳酸盐岩气藏提高采收率的微观驱气效率 [J]. 天然气工业, 2023, 43(1): 122-131. WU Keliu, ZHU Qingyuan, CHEN Zhangxing, et al. Microscopic gas displacement efficiency of enhanced gas recovery in carbonate gas reservoirs with edge and bottom water [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(1): 122-131.
- [29] 张涛, 孙天礼, 陈伟华, 等. 不同孔-缝-洞组合碳酸盐岩储层气水两相孔隙尺度流动模拟 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2023, 45(5): 88-96. ZHANG Tao, SUN Tianli, CHEN Weihua, et al. Pore-scale simulation of gas-water two phase flow in carbonate reservoir with different combinations of pore, network and hole [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2023, 45(5): 88-96.
- [30] LIU H J, ZHU Z W, PATRICK W, et al. Pore-scale numerical simulation of supercritical CO₂ migration in porous and fractured media saturated with water [J]. Advances in Geo-Energy Research, 2020, 4(4): 419-434.
- [31] YUE P T, ZHOU C F, FENG J J, et al. Phase-field simulations of interfacial dynamics in viscoelastic fluids using finite elements with adaptive meshing [J]. Journal of Computational Physics, 2006, 219(1): 47-67.
- [32] XU Z Y, LIU H H, VALOCCHI A J. Lattice Boltzmann simulation of immiscible two-phase flow with capillary valve effect in porous media [J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3770-3790.
- [33] TIAN J, CHEN Q, QIN C Z, et al. Pore-scale systematic study on the disconnection of bulk gas phase during water imbibition using visualized micromodels [J]. Physics of Fluids, 2022, 34(6): 062015.

(责任编辑:张彩艳)