

鄂尔多斯盆地佳县地区深部煤层地应力特征及其对储层物性的控制

牟朋威^{1,2}, 李珮杰³, 姚艳斌^{1,2,4,5}, 刘大锰^{1,2,4}, 马立民³, 孙晓晓^{1,2}, 邱勇凯^{1,2}

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 煤层气开发利用国家工程研究中心煤层物性实验室, 北京 100083; 3. 中国石油冀东油田公司, 河北 唐山 063000; 4. 深时数字地球前沿科学中心, 北京 100083; 5. 山西省煤系矿产综合勘查技术创新中心, 山西 太原 030006]

摘要:鄂尔多斯盆地佳县地区是深部煤层气勘探开发新区。目前该区地应力研究程度较低,地应力与煤层物性发育特征关系不明确,限制了该区煤层气高效开发。基于测井和岩心测试资料,构建了基于组合弹簧模型的测井地应力计算模型,研究了本区地应力分布特征,提出了地应力对储层裂隙、孔隙度和渗透率等的控制作用。研究表明,佳县地区8#煤层地应力平面分布具有西高东低的特点。三向主应力具有垂向主应力(平均值 56.72 MPa)>最大水平主应力(平均值 41.08 MPa)>最小水平主应力(平均值 37.77 MPa)特征,为正断型应力机制。侧压系数平均值为 0.70,表明煤层整体处于拉张环境,有利于张性裂隙发育。煤层物性特征与各地应力参数的关系表明,研究区8#煤层物性发育特征是三向主应力综合作用的结果,水平主应力起主要控制作用,煤层孔隙度和渗透率随侧压系数增大和水平主应力差减小而呈减小趋势。研究区深部煤层气含气量测试结果表明,侧压系数和水平主应力差对煤层物性发育情况具有较好的指示作用,可用于有效地识别深部煤层气地质甜点区。

关键词: 孔隙度; 渗透率; 侧压系数; 地应力; 深部煤层气; 佳县地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

In-situ stress in deep coal seams and its control on reservoir physical properties in the Jiaxian area, Ordos Basin

MOU Pengwei^{1,2}, LI Peijie³, YAO Yanbin^{1,2,4,5}, LIU Dameng^{1,2,4}, MA Limin³, SUN Xiaoxiao^{1,2}, QIU Yongkai^{1,2}

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Coal Reservoir Laboratory of National Engineering Research Center of CBM Development and Utilization, Beijing 100083, China; 3. Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan, Hebei 063000, China; 4. Deep Time Digital Earth Frontier Science Center, Beijing 100083, China; 5. Shanxi Center of Technology Innovation for Coal Measure Mineral Resources Comprehensive Exploration, Taiyuan, Shanxi 030006, China]

Abstract: The Jiaxian area emerges as a new target for the exploration and development of deep coalbed methane (CBM) in the Ordos Basin. However, the lack of studies on its in-situ stress and the undefined relationships between the in-situ stress and the physical properties of coal seams have hindered efficient CBM production in this area. Using data from logging and core analysis, we develop a logging-based in-situ stress calculation model as constructed by the combined spring model, investigate the in-situ stress distribution in the area and explore the controlling effects of in-situ stress on the fissures, porosity, and permeability of coal reservoirs. The results indicate that the planar distribution of the in-situ stress in the No. 8 coal seam within the Jiaxian area features high in the west and low in the east. The three principal stresses decrease in the order of vertical principal stress (averaging 56.72 MPa), maximum horizontal principal stress (averaging 41.08 MPa), and minimum horizontal principal stress (averaging 37.77 MPa), suggesting a normal-faulting stress regime. The No. 8 coal seam has an average coefficient of lateral pressure of 0.70, indicating that

收稿日期: 2024-07-23; 修回日期: 2024-08-31。

第一作者简介: 牟朋威(1996—), 男, 博士研究生, 煤层气地质。E-mail: moupengwei@163.com。

通信作者简介: 姚艳斌(1978—), 男, 教授、博士研究生导师, 非常规油气地质与开发。E-mail: yyb@cugb.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金项目(42125205); 中央高校基本科研业务费深时数字地球前沿科学中心“深时数字地球”中央高校科技领军人才团队项目(2652023001)。

this coal seam resides in a tensile setting overall, which creates favorable conditions for the formation of tensile fissures. The relationships between the reservoir physical properties and various in-situ stress parameters indicate that the physical properties of the No. 8 coal seam in the study area result from the combined effects of the three principal stresses, in which the horizontal principal stress play a predominant role. The porosity and permeability of the coal reservoirs trend downward with an increase in the lateral pressure coefficient and a decrease in the horizontal principal stress difference. The test results of deep CBM content in the study area indicate that the lateral pressure coefficient and the horizontal principal stress difference are reliable indicators of the physical properties of coal reservoirs, establishing them as effective tools for identifying the geologic sweet spots of deep CBM.

Key words: porosity, permeability, lateral pressure coefficient, in-situ stress, deep coalbed methane (CBM), Jiaxian area, Ordos Basin

引用格式: 牟朋威, 李珮杰, 姚艳斌, 等. 鄂尔多斯盆地佳县地区深部煤层地应力特征及其对储层物性的控制[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1640–1652. DOI: 10. 11743/ogg20240611.

MOU Pengwei, LI Peijie, YAO Yanbin, et al. In-situ stress in deep coal seams and its control on reservoir physical properties in the Jiaxian area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1640–1652. DOI: 10. 11743/ogg20240611.

深部煤层气作为煤层气勘探与开发的重要接替领域已经引起人们的重视^[1-2]。中国深部煤层气资源丰富。据统计,中国埋深大于2 000 m的煤层气地质资源量为 $40.71 \times 10^{12} \text{ m}^3$,约为浅部(埋深<2 000 m)的1.4倍^[3],显示出巨大的开发潜力。然而,深部煤层气具有高地应力、低孔隙度和低渗透率的特点^[4],深部煤层气的高效开发仍面临诸多挑战。

地应力决定了煤层孔隙和裂隙的开启与闭合,是影响深部煤层气勘探与开发的重要因素^[5-6]。为实现煤层地应力的准确预测,学者们提出了地质资料分析^[7]、岩心实验^[8]、现场测试^[9]和模型计算^[10]等方法。其中,地质资料分析方法仅能定性获取地应力方向信息;岩心实验仅能获得单点地应力信息;现场测试成本较高,且获取的数据有限,数据准确性也相对较低^[11-12];而基于测井信息的地应力计算方法具有成本低和数据连续等优点,已广泛应用于煤层地应力预测。

关于地应力对煤层物性的影响,之前普遍认为随着地应力增加,煤层裂隙逐渐闭合,孔隙度和渗透率呈指数降低^[13-14]。然而,随着研究重点转向深部,人们发现深部煤层物性随地应力变化呈现出更复杂的变化趋势^[15]。不同埋深(地应力)条件下,煤储层渗透率呈现明显的分区性^[16],甚至出现随埋深增加煤层渗透率增大的现象^[17]。显然,深部煤层高地应力条件下储层物性的变化规律仍有待进一步揭示。

鄂尔多斯盆地佳县地区是中国深部煤层气勘探开发新区,是未来中国煤层气“增储上产”的重要基地^[18]。目前该区地应力研究程度较低,地应力控制下的煤层物性发育特征也不明确,限制了该区煤层气高效开发。据此,笔者基于佳县地区主力煤层测井和实

验等资料,构建了适用于该区的煤层地应力预测模型,剖析了研究区地应力分布特征及其对储层物性的控制作用,以期为研究区乃至其他区块煤层气开发有利区优选提供指导和借鉴。

1 研究区概况

佳县地区地处鄂尔多斯盆地东部,整体位于伊陕斜坡二级构造单元内,区内构造简单,断层和褶皱等均不发育。研究区自下而上发育奥陶系、上石炭统本溪组、下二叠统太原组、下二叠统山西组和中二叠统石盒子组等地层^[18],煤层多有发育,主要位于本溪组、太原组和山西组(图1)。其中,本溪组8#煤层埋深1 900~2 600 m,煤层厚度稳定(7~8 m),是深部煤层气开发的主要目标,也是本次研究的目的层。

2 测井地应力模型的建立

地层原位地应力可以分解为垂向主应力(σ_v)、最大水平主应力(σ_H)和最小水平主应力(σ_h)^[19]。三向主应力形成原因不同^[20],需要分别计算。

2.1 垂向主应力计算

垂向主应力是由上覆重力引起的,是上覆岩层密度和深度的函数^[21],可采用密度积分法计算:

$$\sigma_v = \int_0^H \rho(H) g dH \quad (1)$$

式中: σ_v 为垂向主应力,MPa; $\rho(H)$ 为岩层密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; H 为岩层埋藏深度,m。

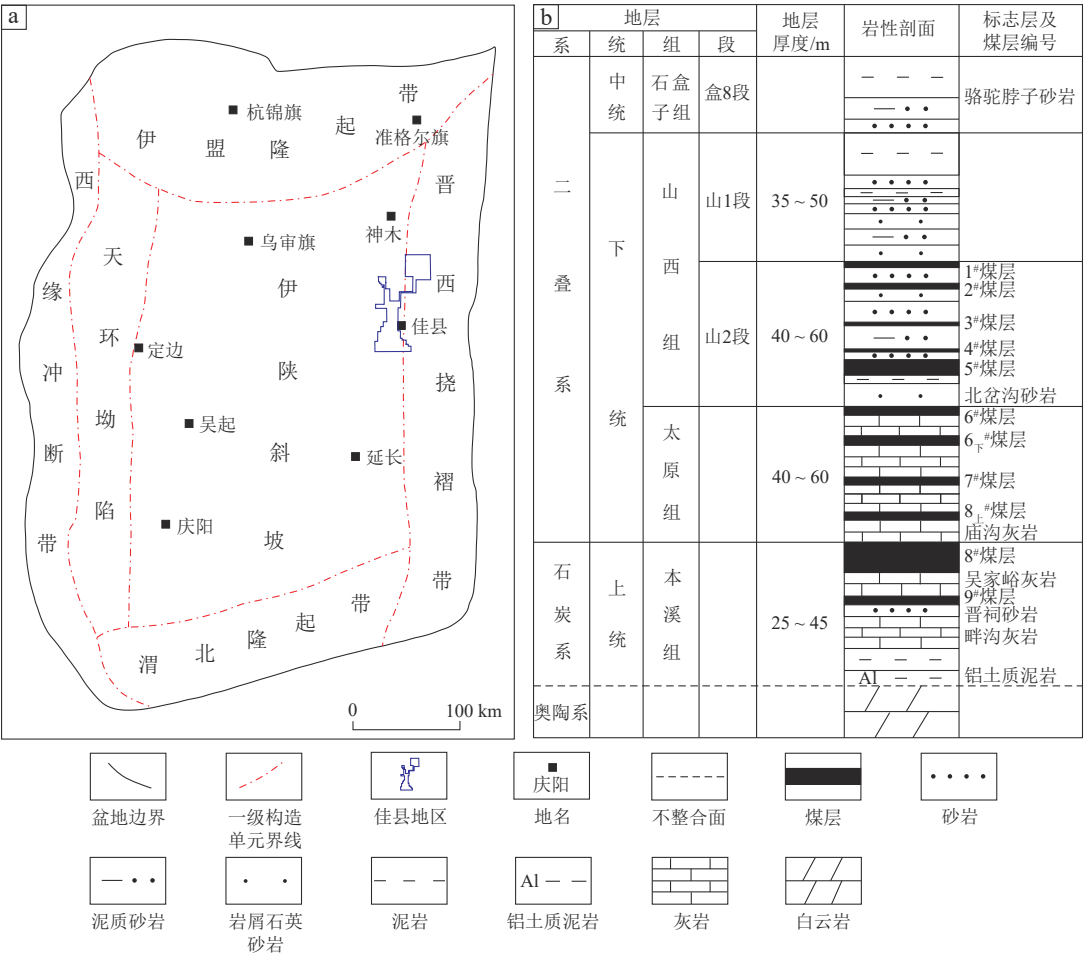


图1 鄂尔多斯盆地佳县地区构造位置(a)及沉积地层特征(b)(据李国永等^[18]修改)

Fig. 1 Location (a) and stratigraphic column (b) of Jiashan area, Ordos Basin (modified after reference [18])

然而,由于成本限制,浅部岩层往往没有密度测井数据,且不同地区地层沉积模式不同,地层压实程度也存在差异^[12]。因此,针对特定井,采用已有深度段地层密度平均值作为浅部地层密度数据,结合公式(1)计算研究区8#煤层垂向主应力。

2.2 水平主应力预测

基于测井资料的地应力计算方法是获取水平主应力的有效手段。然而,地应力预测模型中往往存在较多待确定参数^[22],要准确预测水平主应力需要以实测地应力为约束。

2.2.1 实测地应力计算

声发射实验是获取岩层地应力的有效方法。首先对取自不同方向的样品(图2)分别进行单轴压缩实验并测定样品在加载过程中的声发射信号,然后根据声发射信号突变点获得不同应力分量数据,最后,结合公式(2)和公式(3)计算水平主应力值^[23]。

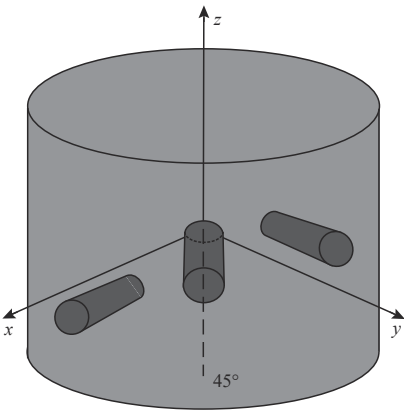


图2 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层声发射实验取样示意图^[23]

Fig. 2 Schematic diagram showing the sampling for acoustic emission tests^[23]

$$\sigma_H = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \left(\sigma_{x45y} - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2} \quad (2)$$

$$\sigma_h = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \left(\sigma_{x45y} - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2} \quad (3)$$

式中: σ_H 为最大水平主应力,MPa; σ_h 为最小水平主应力,MPa; σ_x 是 x 轴方向试样的应力分量,MPa; σ_{x45y} 是 45° 方向试样的应力分量,MPa; σ_y 是 y 轴方向试样的应力分量,MPa。

对研究区J17井不同深度的2块钻心沿层理方向分别取心后(图2)进行声发射实验,水平主应力计算结果如表1所示。

2.2.2 地应力计算参数获取

国内外学者提出了许多地应力计算模型^[24]。在常用的地应力计算模型中,Anderson模型忽略了构造应力对水平主应力的影响^[25];黄氏模型未考虑岩性对地层应力的影响^[24]。组合弹簧模型是对黄氏模型的修正,其充分考虑了构造应力和不同岩性岩石力学性质差异对地应力计算的影响,在煤层地应力预测中应用广泛^[10]。因此,以组合弹簧模型为基础构建地应力计算模型:

$$\sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v - \alpha p_p) + \frac{E\varepsilon_H}{1-\mu^2} + \frac{\mu E\varepsilon_h}{1-\mu^2} + \alpha p_p \quad (4)$$

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v - \alpha p_p) + \frac{E\varepsilon_h}{1-\mu^2} + \frac{\mu E\varepsilon_H}{1-\mu^2} + \alpha p_p \quad (5)$$

式中: E 为岩石弹性模量,MPa; μ 为岩石泊松比,无量纲; α 为Biot系数,无量纲; p_p 为储层压力,MPa; $\varepsilon_H, \varepsilon_h$ 分别为最大、最小水平主应力方向应变系数,无量纲。

1) 横波时差

岩石横波时差是实现地应力预测的关键参数,通常通过声波测井直接获取。由于仅收集到33口井的声波测井数据,不能达到覆盖研究区的目的,而横波时差和纵波时差具有较好的相关性(图3)(相关系数 $R^2=0.71$),因此,通过建立煤岩纵、横波时差间的转换关系实现横波时差预测:

$$\Delta t_s = 2.58\Delta t_c - 201.98 \quad (6)$$

式中: Δt_s 为煤岩横波时差, $\mu s/m$; Δt_c 为煤岩纵波时差, $\mu s/m$ 。

2) 岩石力学参数

岩石力学参数与地应力密切相关。根据纵、横波时差数据及密度测井数据,结合经验公式计算动态岩

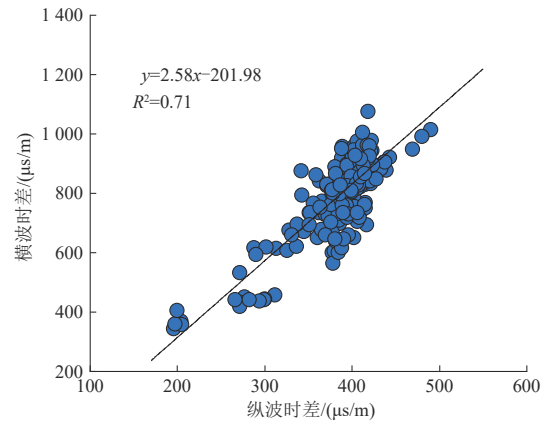


图3 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层纵、横波时差转换关系
Fig. 3 Conversion between compressional wave internal transit time and shear-wave interval transit time of the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

石力学参数:

$$E_0 = \frac{\rho\beta}{\Delta t_s^2} \cdot \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_c^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2} \quad (7)$$

$$\mu_0 = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_c^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2)} \quad (8)$$

式中: E_0 为动态弹性模量,MPa; ρ 为岩石密度, g/cm^3 ; β 为转换因子,取 1.0×10^9 ; μ_0 为动态泊松比,无量纲。

然而,实际地层条件下岩石的变形情况与实验室测试获得的静态岩石力学参数更相似^[26],因此,需要对岩石力学参数进行动、静态转换(图4)。8#煤层弹性模量和泊松比的动静态转换公式为:

$$E = 0.23E_0 + 3.45 \quad (9)$$

$$\mu = 0.25\mu_0 + 0.30 \quad (10)$$

3) 储层压力

储层压力预测方法主要包括等效深度法^[27]、Eaton法^[28]和压力梯度法^[29]等。其中,等效深度法和Eaton法受压实系数影响较大,预测煤储层压力时存在较大误差^[10]。根据收集到的资料,佳县地区储层压力梯度为0.975 MPa/hm,因此采用压力梯度法预测研究区8#煤储层压力:

$$p_p = 0.00975H \quad (11)$$

4) Biot系数

Biot系数(有效应力系数)是反映孔隙弹性特征的重要参数,体现了孔隙压力对有效应力的贡献^[30],通常根据Biot-Gassmann理论求解^[31]:

$$\alpha = 1 - \frac{c_{ma}}{c_b} \quad (12)$$

表1 鄂尔多斯盆地佳县地区J17井8#煤层地应力计算结果

Table 1 Calculated in-situ stresses in the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

深度/m	最大水平 主应力/MPa	最小水平 主应力/MPa
2 227.42	42.54	39.64
2 230.40	38.49	36.82

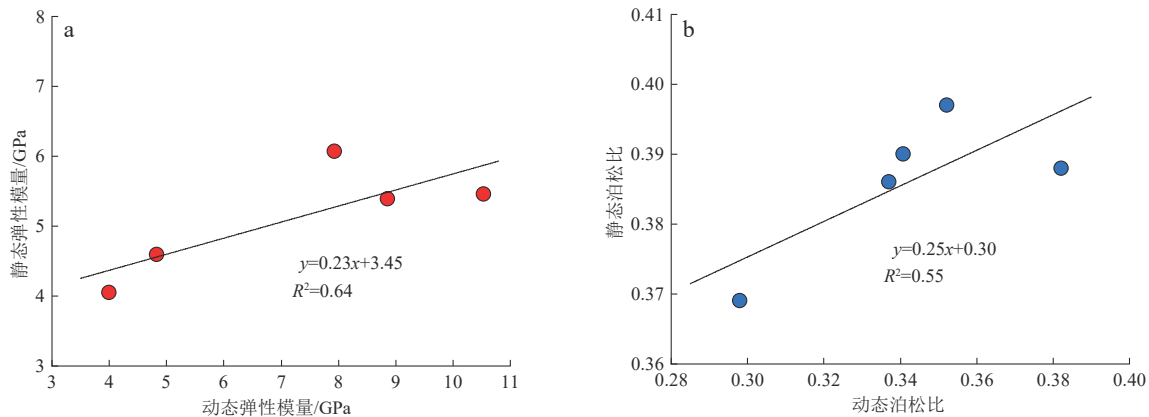


图4 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层动、静态岩石力学参数转换关系

Fig. 4 Conversions between dynamic and static rock mechanical parameters of the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

a. 动、静态弹性模量转换关系; b. 动、静态泊松比转换关系

$$c_{ma} = \frac{1}{\rho_{ma}\beta\left(\frac{1}{\Delta t_{mac}^2} - \frac{4}{3\Delta t_{mas}^2}\right)} \quad (13)$$

$$c_b = \frac{1}{\rho\beta\left(\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2}\right)} \quad (14)$$

式中: c_{ma} 为煤岩骨架压缩系数, 无量纲; c_b 为煤岩体积压缩系数, 无量纲; ρ_{ma} 为煤岩骨架密度, 取 1.55 g/cm^3 ; Δt_{mac} 为煤岩骨架纵波时差, 取 $393.44 \text{ } \mu\text{s/m}$; Δt_{mas} 为煤岩骨架横波时差, 取 $767.21 \text{ } \mu\text{s/m}$ [32]。

研究表明, Biot系数的范围为 $0 \sim 1$ [33]。然而, 根据公式(12)计算 Biot系数时会出现煤岩纵、横波时差小于骨架纵、横波时差的情况, 此时孔隙压力对有效应力无贡献, Biot系数取0。

2.2.3 地应力计算模型

构造应变系数是反映煤层所受构造应力大小的参数, 可以根据实测水平主应力反算得到。研究区有两组水平主应力实测数据(表1)。本次以一组水平主应力实测数据($\sigma_H = 42.54 \text{ MPa}$; $\sigma_h = 39.64 \text{ MPa}$)为约束建立地应力计算模型, 另一组($\sigma_H = 38.49 \text{ MPa}$; $\sigma_h = 36.82 \text{ MPa}$)用于验证模型有效性。研究区最大、最小水平主应力方向构造应变系数分别为 0.000577 和 -0.000356 , 据此建立基于组合弹簧模型的地应力计算模型:

$$\sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v - \alpha p_p) + 0.000577 \frac{E}{1-\mu^2} - 0.000356 \frac{\mu E}{1-\mu^2} + \alpha p_p \quad (15)$$

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v - \alpha p_p) - 0.000356 \frac{E}{1-\mu^2} + 0.000577 \frac{\mu E}{1-\mu^2} + \alpha p_p \quad (16)$$

采用上述地应力计算模型[公式(15)和公式(16)]预测的第二组最大、最小水平主应力分别为 40.05 MPa 和 36.64 MPa , 与实测值相对误差分别为 4.05% 和 0.49% 。这表明上述地应力计算模型可以较为准确地预测研究区8#煤层水平主应力。

3 研究区地应力分布特征

3.1 研究区地应力平面分布特征

基于上述地应力计算模型[公式(1)、公式(15)和公式(16)]计算了40口煤层气井8#煤层的垂向和水平主应力, 获得了研究区8#煤层三向主应力平面分布图(图5)。研究区8#煤层垂向主应力变化范围为 $49.24 \sim 62.85 \text{ MPa}$, 平均值为 56.72 MPa ; 最大水平主应力变化范围为 $35.39 \sim 46.53 \text{ MPa}$, 平均值为 41.08 MPa ; 最小水平主应力变化范围为 $31.42 \sim 43.48 \text{ MPa}$, 平均值为 37.77 MPa 。对比张和伟等[19]和高向东等[34]关于临兴区块8#和9#煤层(埋深 $1093.20 \sim 2163.50 \text{ m}$)主应力计算结果, 研究区水平主应力预测值较大, 但与陈世达等[35]提出的鄂尔多斯盆地东缘埋深 $1900 \sim 2500 \text{ m}$ 的煤层水平主应力处于一致水平(最小水平主应力为 $28 \sim 43 \text{ MPa}$; 最大水平主应力为 $30 \sim 58 \text{ MPa}$), 表明地应力预测结果符合区域认识。

研究区三向主应力分布均具有西高东低的特点(图5)。主应力高值区主要位于研究区西南部, 向东

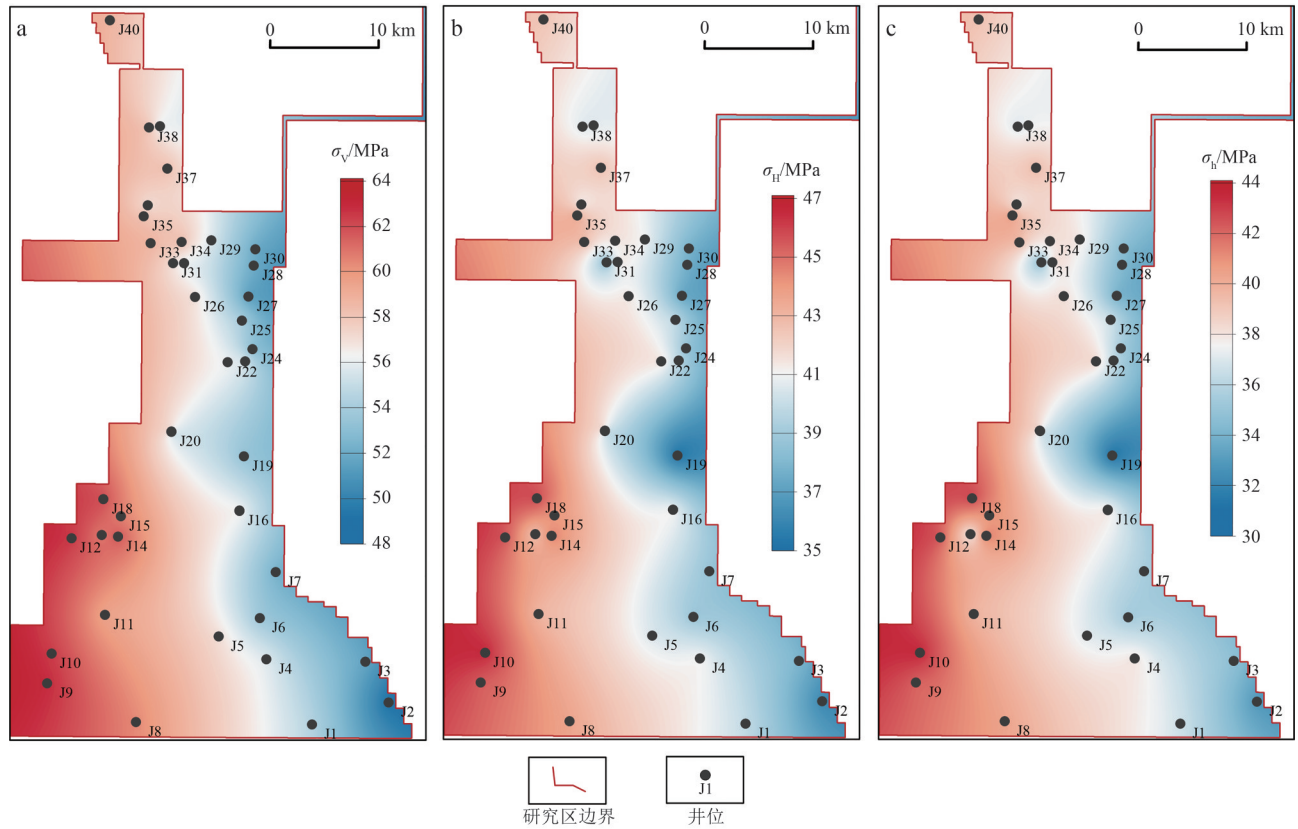


图5 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层地应力平面分布特征

Fig. 5 Mapping of the in-situ stress distribution in the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

a. 垂向主应力(σ_v); b. 最大水平主应力(σ_H); c. 最小水平主应力(σ_h)

北方向三向主应力呈减小趋势。其中,垂向主应力低值区位于研究区东南部,最大、最小水平主应力低值区位于研究区东部。

3.2 研究区地应力垂向分布特征

3.2.1 埋深

根据图6,研究区三向主应力随埋深增加均呈线性增大趋势,且三向主应力始终表现为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ 。Anderson^[25]根据三向主应力的相对大小将地应力状态划分为3种应力机制:正断型应力机制($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$)、逆断型应力机制($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$)和走滑型应力机制($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$)。显然,研究区属于正断型应力机制,煤层整体处于拉张应力状态。

3.2.2 侧压系数

侧压系数(λ)是反映岩层水平主应力和垂向主应力关系的重要参数,可用于描述地应力状态^[36]:

$$\lambda = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2\sigma_v} \quad (17)$$

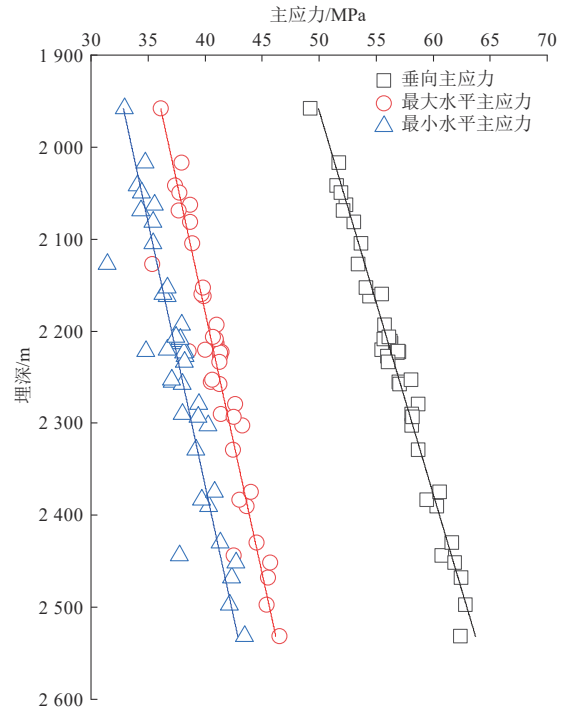


图6 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层地应力与埋深的关系

Fig. 6 Relationship between the in situ stress and burial depth of the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

研究区8#煤层侧压系数介于0.63~0.72(图7),平均值为0.70,均小于1,表明8#煤层主要处于伸张带^[37],有利于煤层孔隙、裂隙张开和渗透率提高。研究区侧压系数随埋深变化并不明显,这是由于侧压系数与构造应力密切相关,而研究区构造简单,全区构造应力差异较小,侧压系数也较为接近。此外,所有的侧压系数数据点均位于中国主要含煤盆地煤层地应力包络线和鄂尔多斯盆地东缘煤层地应力包络线之内^[9],这也表明地应力预测结果符合研究区区域背景。

4 地应力对煤层物性的控制

煤层物性特征是影响煤层气赋存和运移的关键因素^[38],而研究表明,地应力对储层物性具有控制作用^[37,39]。为促进深部煤层气高效开发,有必要就地应力对储层物性的控制作用进行研究。

4.1 深部煤层物性特征

采用室内实验的方法准确获取8#煤层裂隙、孔隙度和渗透率等物性特征。其中,煤样裂隙观测采用Tescan MAIA-3场发射电镜,依据《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》(SY/T 5162—1997)进行;同时,采用AP 608覆压孔渗测定仪,依据《页岩氦气法孔隙度和脉冲衰减法渗透率的测定》(GB/T 34533—2017)对3口井共14块标准圆柱样品(高50.0 mm,直径25.0 mm,试样直径误差 ≤ 0.3 mm)进行氦气孔隙度和脉冲渗透

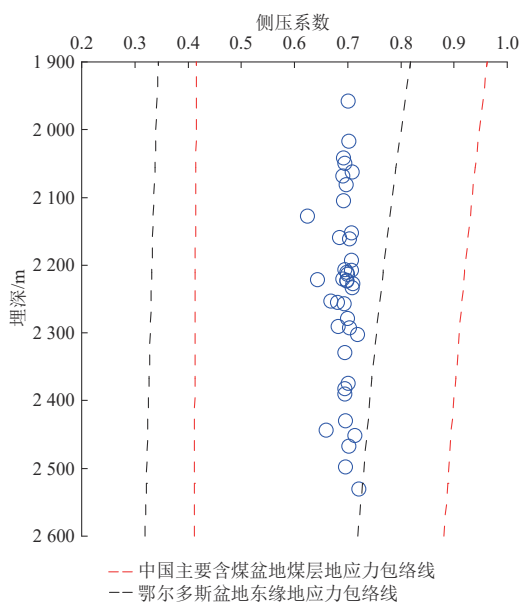


图7 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层侧压系数与埋深的关系
Fig. 7 Relationship between the lateral pressure coefficient and burial depth of the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

率测试。

煤样裂隙扫描电镜观测结果表明(图8),8#煤层裂隙普遍发育,且裂隙形态曲折,具有典型的张性裂隙特征。此外,观测到少量裂隙被矿物充填,但矿物的充填作用并不会完全封闭裂隙,充填矿物与裂隙面间仍存在一定空间。

煤样孔、渗测试结果表明(表2),研究区8#煤层孔隙度介于6.50%~9.19%,平均值为7.49%,与大宁—吉县区块深部煤样实验测试结果(2.04%~10.13%)相近^[4,40];渗透率介于 $(0.79 \sim 2.06) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值 $1.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,显著大于李国永等^[18]关于神木—佳县区块渗透率的数值模拟结果 $[(0.03 \sim 0.10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2]$ 。显然,常温常压条件下渗透率测试结果并不是储层条件下的真实情况,仅能在一定程度上反映储层条件下的物性特征。

4.2 地应力对煤层物性的影响

煤层裂隙发育特征是地应力状态的直观反映^[41]。根据图8,煤层裂隙具有明显的张性裂隙特征,这与研究区属于正断型应力机制,有利于张性裂隙形成的结论一致。同时,张性裂隙发育也预示着煤层具有较高的孔隙度和渗透率。

为揭示地应力对储层孔隙度和渗透率的影响,绘制了各地应力参数与煤样孔隙度和渗透率的交会图(图9,图10)。根据图9,三向主应力对煤样孔隙度和渗透率的影响存在显著差异。煤样孔隙度和渗透率与垂向主应力间无明显相关性,而最大和最小水平主应力对孔隙度和渗透率的影响显著,表现为随最大/最小水平主应力增大,孔隙度和渗透率线性减小,这与前人的观点存在差异^[42-43]。杨延辉等^[42]和李鑫等^[43]认为,煤层试井渗透率与地应力间呈负指数函数关系。这可能与试井渗透率受到储层原位压力和温度条件限制,而常规渗透率测试所获得的渗透率为岩心卸压后的结果,不再受到原位温压条件限制有关。

为进一步揭示不同方向主应力对储层孔隙度和渗透率的影响,分析了侧压系数、水平主应力差与储层孔隙度和渗透率的关系。根据图10,煤层孔隙度和渗透率与侧压系数和水平主应力差具有良好的相关性,表现为随着侧压系数减小和水平主应力差增大,煤层孔隙度和渗透率线性增大。显然,相较于垂向主应力,水平主应力对煤层孔隙度和渗透率的控制作用更显著,这与前人的观点基本一致^[14,44]。

综上所述,地应力对储层物性的控制作用是三向主应力综合作用的结果。作为表征三向主应力相对大

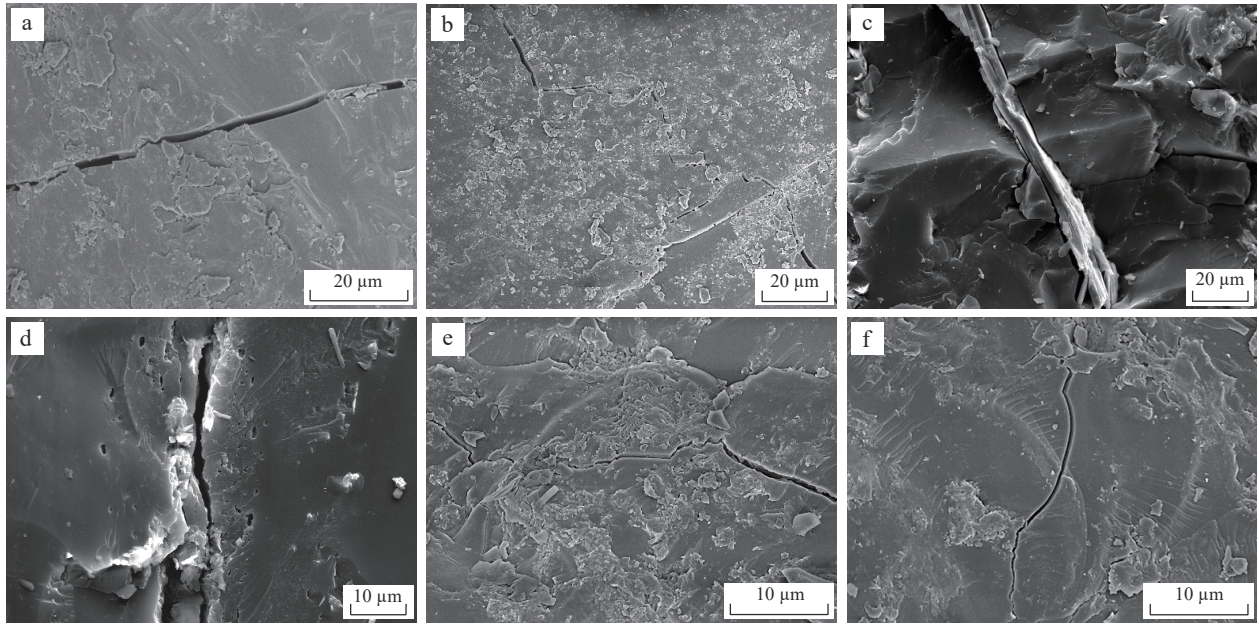


图8 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层显微裂隙扫描电镜照片

Fig. 8 Scanning electron microscope (SEM) images of fissures in the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

a. J6井,埋深2 142.68 m,裂隙开度约为1.60 μm ,部分裂隙被充填;b. J6井,埋深2 143.97 m,裂隙开度约为1.33 μm ,形态曲折;c. J13井,埋深2 448.76 m,开度约0.90 μm ,裂隙充填严重;d. J13井,埋深2 451.88 m,裂隙开度约为1.75 μm ,基本无充填;e. J30井,埋深2 096.79 m,裂隙开度约0.60 μm ,形态曲折;f. J30井,埋深2 096.79 m,裂隙开度约为0.40 μm ,基本无充填

表2 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层孔隙度和渗透率特征

Table 2 Porosity and permeability of the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

井号	样品编号	氦气孔隙度/%	氦气渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
J10	J10S1	6.50	—
	J10S2	6.66	—
	J10S3	—	0.85
	J10S4	6.90	—
	J10S5	6.64	—
J13	J13S1	8.63	—
	J13S2	8.18	—
	J13S3	7.75	—
	J13S4	8.16	—
	J13S5	—	1.61
J37	J37S1	6.96	1.22
	J37S2	—	2.06
	J37S3	7.40	0.79
	J37S4	6.92	1.30

注:“—”表示无测试数据。

小的重要参数,侧压系数和水平主应力差更能反映储层地应力状态。较大的侧压系数和较小的水平主应力差预示着煤层遭受水平方向较强的挤压作用^[45],不利于储层孔隙度和渗透性提高。此外,相较于三向主应力,侧压系数和水平主应力差对煤层物性发育情况具有更好的指示作用。

4.3 地应力控制下的储层物性特征对深部煤层气勘探开发的启示

在煤层气地质-工程一体化开发研究中,地应力通常被作为影响压裂施工和裂缝扩展的工程参数^[34,46-48]。然而,近几年的研究表明,原位地应力场与储层渗透率、流体压力系统及含气性分带之间均存在着必然联系^[49],从而影响煤层气地质甜点优选。如前所述,在表征储层地应力的相关参数中,侧压系数和水平主应力差对煤层物性发育情况具有很好的指示作用。因此,根据侧压系数和水平主应力差平面分布特征划定煤层物性较好的区块对于煤层气地质甜点优选具有指导意义。

佳县地区侧压系数和水平主应力差差异较小,为进一步实现研究区煤层气地质甜点优选,综合考虑孔隙度、渗透率与侧压系数和水平主应力差的关系(图10),将侧压系数小于0.7且水平主应力差大于3.2 MPa的区域定为煤层气地质甜点Ⅰ类区,其他区域为Ⅱ类区。分区结果表明(图11),研究区南部、东部和北部(图11c)为8#煤层物性较好的区域(Ⅰ类区),有利于煤层气赋存。根据研究区4口煤层气井保压取心含气量测试结果(表3),Ⅰ类区煤层气井(JN2井,J6-1井和J19井)平均含气量大于Ⅱ类区(J10井),证实了Ⅰ类区更有利于煤层气赋存,也表

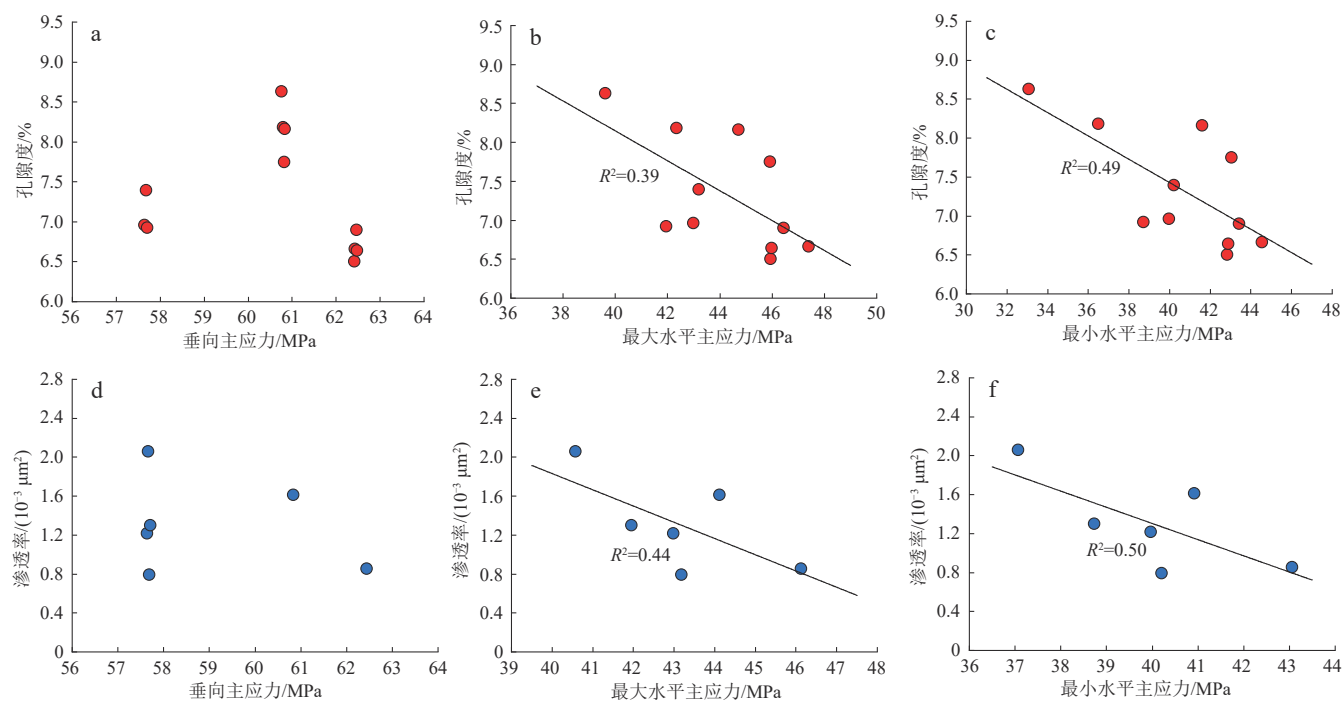


图9 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层三向主应力与孔隙度和渗透率的关系

Fig. 9 Relationships of three principal stresses with the porosity and permeability of the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

a, d. 垂向主应力与孔隙度和渗透率的关系; b, e. 最大水平主应力与孔隙度和渗透率的关系; c, f. 最小水平主应力与孔隙度和渗透率的关系

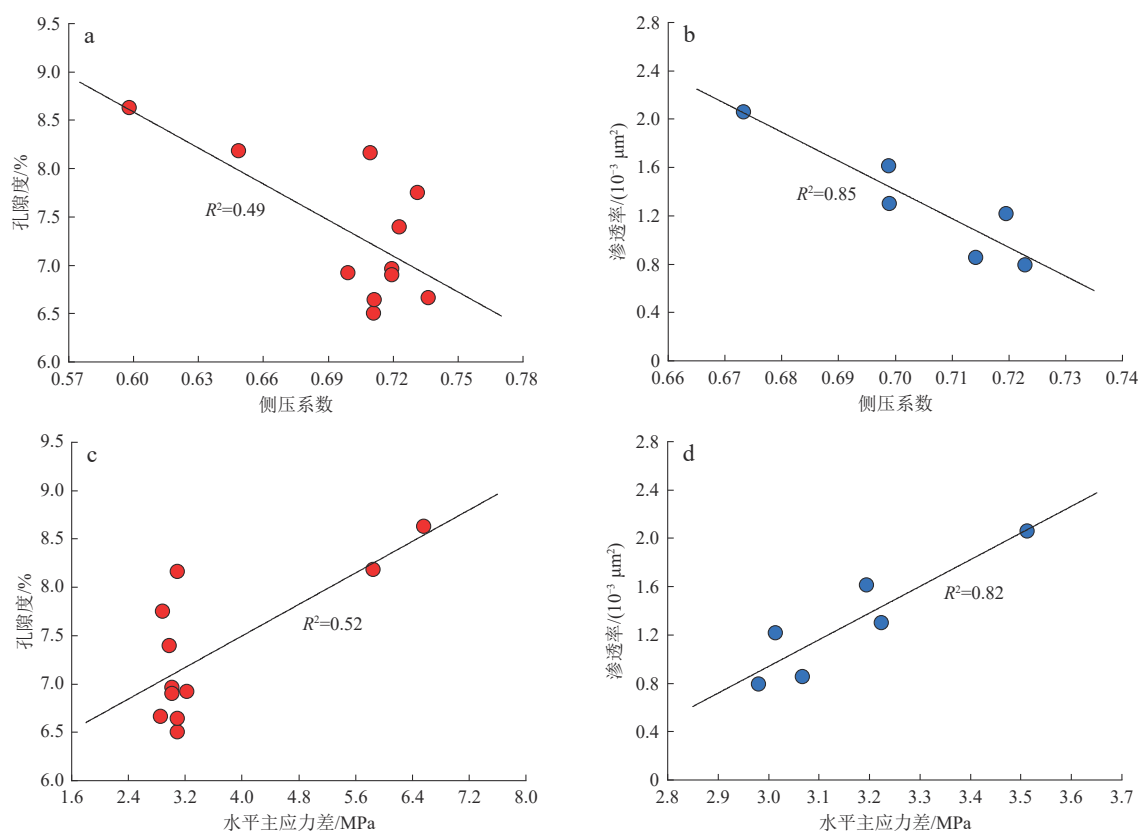


图10 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层侧压系数和水平主应力差与孔隙度和渗透率的关系

Fig. 10 Relationships of the lateral pressure coefficient and horizontal principal stress difference with the porosity and permeability of the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

a. 侧压系数与孔隙度的关系; b. 侧压系数与渗透率的关系; c. 水平主应力差与孔隙度的关系; d. 水平主应力差与渗透率的关系

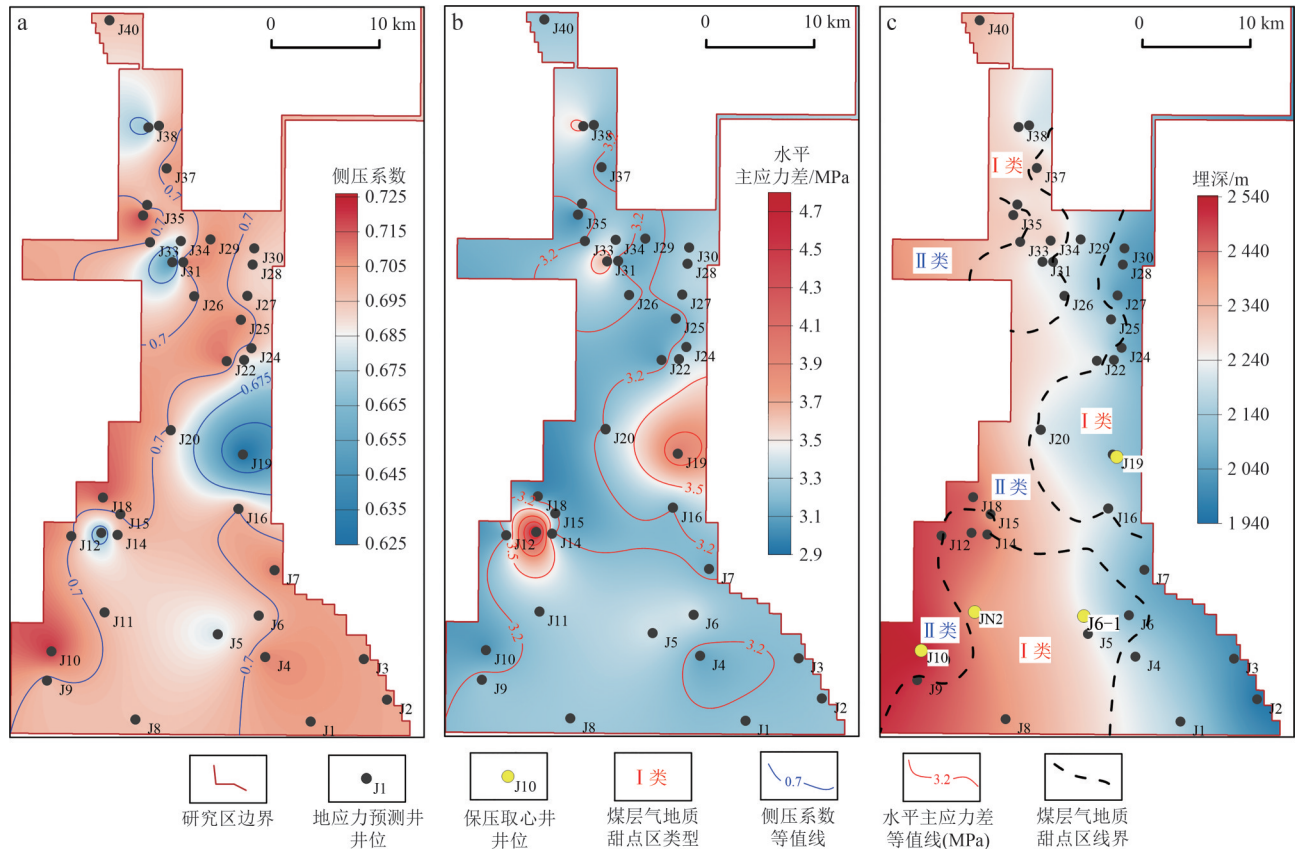


图11 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层侧压系数、水平主应力差平面分布及煤层气地质甜点区划分

Fig. 11 Maps showing the lateral pressure coefficient and horizontal principal stress difference and the partition of the geologic sweet spots of CBM for the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

a. 侧压系数平面分布; b. 水平主应力差平面分布; c. 煤层气地质甜点区划分

表3 鄂尔多斯盆地佳县地区8#煤层保压取心含气量测试结果

Table 3 Test results of CBM content based on pressure-retaining coring for the No. 8 coal seam in the Jiaxian area, Ordos Basin

地质甜点区类型	井号	平均含气量/(m ³ /t)
I 类	JN2	23.5
	J6-1	22.8
	J19	21.4
II 类	J10	21.1

明侧压系数和水平主应力差可用于深部煤层气地质甜点区的有效识别。

5 结论

1) 佳县地区8#煤层地应力分布具有西高东低的特点,其中垂向主应力介于49.24~62.85 MPa;最大水平主应力介于35.39~46.53 MPa;最小水平主应力介于31.42~43.48 MPa,为正断型应力机制。侧压系数介于0.63~0.72,表明煤层整体处于拉张环境,有

利于张性裂隙发育。

2) 佳县地区8#煤层孔隙度和渗透率发育特征是三向主应力综合作用的结果,其中水平主应力起主要控制作用。随着侧压系数减小和水平主应力差增大,煤层孔隙度和渗透率呈增大趋势。

3) 侧压系数和水平主应力差对煤层物性发育情况具有较好的指示作用。佳县地区深部煤层气含气量测试结果表明,侧压系数和水平主应力差分布特征可应用于深部煤层气地质甜点区的有效识别。

参 考 文 献

- [1] 郭旭升,周德华,赵培荣,等. 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1013-1023.
- GUO Xusheng, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1013-1023.
- [2] 何发岐,董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2):

- 277-285.
- HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 277-285.
- [3] 罗平亚, 朱苏阳. 中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1755-1763.
- LUO Pingya, ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1755-1763.
- [4] 唐淑玲, 汤达祯, 杨焦生, 等. 鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深部煤储层孔隙结构特征及储气潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1854-1866, 1902.
- TANG Shuling, TANG Dazhen, YANG Jiaosheng, et al. Pore structure characteristics and gas storage potential of deep coal reservoirs in Daning-Jixian block of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1854-1866, 1902.
- [5] 徐宏杰, 桑树勋, 易同生, 等. 黔西地区煤层埋深与地应力对其渗透性控制机制[J]. *地球科学*, 2014, 39(11): 1507-1516.
- XU Hongjie, SANG Shuxun, YI Tongsheng, et al. Control mechanism of buried depth and in-situ stress for coal reservoir permeability in western Guizhou[J]. *Earth Science*, 2014, 39(11): 1507-1516.
- [6] CHEN Shida, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. In-situ stress measurements and stress distribution characteristics of coal reservoirs in major coalfields in China: Implication for coalbed methane (CBM) development[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 182: 66-84.
- [7] 邹贤军, 陈亚琳. 四川盆地涪陵地区龙马溪组页岩横向各向同性地应力测井评价方法[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(12): 1775-1780, 1808.
- ZOU Xianjun, CHEN Yalin. Geostress logging evaluation method of Longmaxi Formation shale in Fuling area based on transversely isotropic model, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(12): 1775-1780, 1808.
- [8] 范翔宇, 么勃卫, 张千贵, 等. 基于声波信号预测 Kaiser 应力点的水平地应力[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(2): 40-48.
- FAN Xiangyu, YAO Bowei, ZHANG Qiangui, et al. Study on the calculated method of horizontal in-situ stress based on the Kaiser stress point predicted by acoustic signal[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2022, 44(2): 40-48.
- [9] 陈世达, 汤达祯, 陶树, 等. 煤层气储层地应力场宏观分布规律统计分析[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(6): 57-63.
- CHEN Shida, TANG Dazhen, TAO Shu, et al. Statistic analysis on macro distribution law of geostress field in coalbed methane reservoir[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(6): 57-63.
- [10] 常闯, 李松, 汤达祯, 等. 基于测井参数的煤储层地应力计算方法研究——以延川南区块为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(5): 23-32.
- CHANG Chuang, LI Song, TANG Dazhen, et al. In-situ stress calculation for coal reservoirs based on log parameters: A case study of the southern Yanchuan Block[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(5): 23-32.
- [11] 蔡美峰. 地应力测量原理和方法的评述[J]. *岩石力学与工程学报*, 1993, 12(3): 275-283.
- CAI Meifeng. Review of principles and methods for rock stress measurement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1993, 12(3): 275-283.
- [12] ZHAO Zheng, LIU Dameng, WANG Bo, et al. Comprehensive evaluation of in situ stress in the Daning-Jixian area and its control on the distribution of coal-measure gas[J]. *Natural Resources Research*, 2024, 33(1): 347-364.
- [13] JU Wei, JIANG Bo, QIN Yong, et al. The present-day in-situ stress field within coalbed methane reservoirs, Yuwang Block, Laochang Basin, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 102: 61-73.
- [14] ZHAO Junlong, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Characteristic of in situ stress and its control on the coalbed methane reservoir permeability in the eastern margin of the Ordos Basin, China[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(8): 3307-3322.
- [15] 孙良忠, 康永尚, 王金, 等. 地应力类型垂向转换及其对煤储层渗透率控制作用[J]. *高校地质学报*, 2017, 23(1): 148-156.
- SUN Liangzhong, KANG Yongshang, WANG Jin, et al. Vertical transformation of in-situ stress types and its control on coalbed reservoir permeability[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, 23(1): 148-156.
- [16] 李松, 汤达祯, 许浩, 等. 应力条件制约下不同埋深煤储层物性差异演化[J]. *石油学报*, 2015, 36(增刊1): 68-75.
- LI Song, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Evolution of physical differences in various buried depth of coal reservoirs under constraint of stress[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(S1): 68-75.
- [17] 叶建平, 史保生, 张春才. 中国煤储层渗透性及其主要影响因素[J]. *煤炭学报*, 1999, 24(2): 8-12.
- YE Jianping, SHI Baosheng, ZHANG Chuncui. Coal reservoir permeability and its controlled factors in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(2): 8-12.
- [18] 李国永, 姚艳斌, 王辉, 等. 鄂尔多斯盆地神木—佳县区块深部煤层气地质特征及勘探开发潜力[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(2): 70-80.
- LI Guoyong, YAO Yanbin, WANG Hui, et al. Deep coalbed methane resources in the Shenmu-Jiaxian block, Ordos Basin, China: Geological characteristics and potential for exploration and exploitation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(2):

- 70-80.
- [19] 张和伟, 申建, 李可心, 等. 鄂尔多斯盆地临兴西区深煤层地应力场特征及应力变化分析[J]. 地质与勘探, 2020, 56(4): 809-818.
- ZHANG Hewei, SHEN Jian, LI Kexin, et al. Characteristics of the in-situ stress field and stress change of deep coal seams in the western Linxing area, Ordos Basin[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(4): 809-818.
- [20] 廖新武, 刘奇, 李超, 等. 渤中25-1低渗透油田地应力分布特征及对开发的影响[J]. 地质力学学报, 2015, 21(1): 30-37.
- LIAO Xinwu, LIU Qi, LI Chao, et al. Distribution of the present stress in low permeability oilfield of Bozhong 25-1 and its effect on development [J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21(1): 30-37.
- [21] 杨红, 许亮, 何衡, 等. 利用测井、压裂资料求取储层地应力的方法[J]. 断块油气田, 2014, 21(4): 509-512.
- YANG Hong, XU Liang, HE Heng, et al. Method for obtaining ground stress of reservoir using logging and fracturing data [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(4): 509-512.
- [22] 邢力仁, 柳迎红, 王存武, 等. 基于测井信息的煤层气区块地应力预测与综合评价[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 216-221.
- XING Liren, LIU Yinghong, WANG Cunwu, et al. Geostress prediction and comprehensive evaluation based on logging information in coalbed methane block [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 216-221.
- [23] 徐珂. 南堡凹陷高尚堡油藏现今地应力研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- XU Ke. Current in-situ stress of Gaoshangpu reservoir, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2019.
- [24] 尹帅, 刘翰林, 何建华, 等. 动静态地质力学方法约束的致密油砂岩地应力综合评估[J]. 地球科学进展, 2023, 38(12): 1285-1296.
- YIN Shuai, LIU Hanlin, HE Jianhua, et al. Comprehensive evaluation of geo-stress in tight oil sandstone under constraints of dynamic-static geomechanical methods [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(12): 1285-1296.
- [25] ANDERSON E M. The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain[M]. 2nd ed. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951.
- [26] 高秋菊, 宋亮, 刘显太, 等. 致密油藏储层地应力预测及微地震监测[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2020.
- GAO Qiuju, SONG Liang, LIU Xiantai, et al. Prediction of in-situ stress and microseismic monitoring in tight oil reservoirs[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2020.
- [27] 陈宝宁, 王宁. 异常流体压力研究进展与方法实践[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1): 35-37.
- CHEN Baoning, WANG Ning. Research advance and method practice of anomalous fluid pressure [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(1): 35-37.
- [28] 许玉强, 何保伦, 王葵舒, 等. 深度学习与Eaton法联合驱动的地层孔隙压力预测方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 50-59.
- XU Yuqiang, HE Baolun, WANG Yanshu, et al. A novel prediction method of formation pore pressure driven by deep learning and Eaton method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(6): 50-59.
- [29] 刘彦飞. 韩城地区深/浅部煤层气开发地质条件与产能对比研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- LIU Yanfei. A comparative study on the development geologic conditions and productivity of deep and shallow CBM wells in Hancheng area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [30] 尹帅, 丁文龙, 王濡岳, 等. 海陆过渡相致密砂岩储层Biot系数自适应预测方法研究[J]. 石油物探, 2016, 55(6): 861-868.
- YIN Shuai, DING Wenlong, WANG Ruyue, et al. A new prediction method of Biot coefficient for marine-land transition phase tight sandstone reservoir based on the self-adapt method [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(6): 861-868.
- [31] 余雄鹰, 王越之, 李自俊. 声波法计算水平主地应力值[J]. 石油学报, 1996, 17(3): 59-63.
- YU Xiongying, WANG Yuezhi, LI Zijun. Calculation of horizontal principal in-situ stress with acoustic wave method [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(3): 59-63.
- [32] 周广照, 谢元德, 陈庆, 等. 沁水盆地南部海陆过渡相煤层横波波速预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(4): 128-136.
- ZHOU Guangzhao, XIE Yuande, CHEN Qing, et al. Prediction of the shear wave velocity for the sea-land transitional facies coal measure strata in South Qinshui Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(4): 128-136.
- [33] 姜波, 汪吉林, 屈争辉, 等. 大宁—吉县地区地应力特征及其对煤储层渗透性的影响[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 17-23.
- JIANG Bo, WANG Jilin, QU Zhenghui, et al. The stress characteristics of the Daning-Jixian area and its influence on the permeability of the coal reservoir [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 17-23.
- [34] 高向东, 孙昊, 王延斌, 等. 临兴地区深部煤储层地应力场及其对压裂缝形态的控制[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 140-150.
- GAO Xiangdong, SUN Hao, WANG Yanbin, et al. In-situ stress field of deep coal reservoir in Linxing area and its control on fracturing crack [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 140-150.
- [35] 陈世达, 汤达祯, 侯伟, 等. 深部煤层气地质条件特殊性与储层工程响应[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1993-2006.

- CHEN Shida, TANG Dazhen, HOU Wei, et al. Geological particularity and reservoir engineering response of deep coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1993–2006.
- [36] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(4): 211–215.
- [37] 刘大锰, 周三栋, 蔡益栋, 等. 地应力对煤储层渗透性影响及其控制机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(6): 1–8, 23.
- LIU Dameng, ZHOU Sandong, CAI Yidong, et al. Study on effect of geo-stress on coal permeability and its controlling mechanism[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6): 1–8, 23.
- [38] 涂志民, 王兴刚, 车延前, 等. 三塘湖盆地低阶煤煤层气成藏主控因素[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(6): 683–689.
- TU Zhimin, WANG Xinggang, CHE Yanzhan, et al. Controlling factors on CBM accumulation in low-rank coal in Santanghu Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(6): 683–689.
- [39] LI Song, QIN Yong, TANG Dazhen, et al. A comprehensive review of deep coalbed methane and recent developments in China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2023, 279: 104369.
- [40] 邓泽, 王红岩, 姜振学, 等. 深部煤储层孔裂隙结构对煤层气赋存的影响——以鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块为例[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(8): 106–123.
- DENG Ze, WANG Hongyan, JIANG Zhenxue, et al. Influence of deep coal pore and fracture structure on occurrence of coalbed methane: A case study of Daning-Jixian Block in eastern margin of Ordos Basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(8): 106–123.
- [41] 曾联波, 巩磊, 宿晓岑, 等. 深层-超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 1–14.
- ZENG Lianbo, GONG Lei, SU Xiaocen, et al. Natural fractures in deep to ultra-deep tight reservoirs: Distribution and development[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 1–14.
- [42] 杨延辉, 孟召平, 陈彦君, 等. 沁南-夏店区块煤储层地应力条件及其对渗透性的影响[J]. *石油学报*, 2015, 36(z1): 91–96.
- YANG Yanhui, MENG Zhaoping, CHEN Yanjun, et al. Geo-stress conditions of coal reservoirs in Qinnan-Xiadian block and its influences on permeability[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(z1): 91–96.
- [43] 李鑫, 魏永恒, 王文峰, 等. 库拜煤田阿艾矿区煤储层地应力特征及其对储层物性的制约[J]. *新疆大学学报(自然科学版中*
- 英文), 2022, 39(6): 727–735, 746.
- LI Xin, WEI Yongheng, WANG Wenfeng, et al. In-situ stress characters of CBM reservoir in the flexure basin of Kubai coalfield and its constraints on reservoir physical properties[J]. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English)*, 2022, 39(6): 727–735, 746.
- [44] 唐书恒. 煤储层渗透性影响因素探讨[J]. *中国煤田地质*, 2001, 13(1): 28–30, 86.
- TANG Shuheng. Probe into the influence factors on permeability of coal reservoirs[J]. *Coal Geology of China*, 2001, 13(1): 28–30, 86.
- [45] 文卓, 康永尚, 邓泽, 等. 中国含煤盆地浅—中深部现今地应力特点和分布规律[J]. *地质论评*, 2019, 65(3): 729–742.
- WEN Zhuo, KANG Yongshang, DENG Ze, et al. Characteristics and distribution of current in-situ stress at shallow—Medium depth in coal-bearing basins in China[J]. *Geological Review*, 2019, 65(3): 729–742.
- [46] 杨兆中, 杨苏, 张健, 等. 800m以深直井煤储层压裂特征分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 100–104.
- YANG Zhaozhong, YANG Su, ZHANG Jian, et al. Fracturing characteristics analysis of 800 meters deeper coalbed methane vertical wells[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 100–104.
- [47] 闵超, 代博仁, 石咏衡, 等. 基于聚类匹配的煤层气压裂效果主控因素识别[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(4): 135–141.
- MIN Chao, DAI Boren, SHI Yongheng, et al. Identification of main controlling factors of coalbed methane fracturing effect based on cluster matching[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(4): 135–141.
- [48] 姚艳斌, 王辉, 杨延辉, 等. 煤层气储层可改造性评价——以郑庄区块为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 119–129.
- YAO Yanbin, WANG Hui, YANG Yanhui, et al. Evaluation of the hydro-fracturing potential for coalbed methane reservoir: A case study of Zhengzhuang CBM field[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 119–129.
- [49] 陈世达, 汤达祯, 陶树. 原位地应力约束下煤储层自封闭作用及其成藏效应[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2466–2478.
- CHEN Shida, TANG Dazhen, TAO Shu. Self-sealing of coals and CBM accumulation effect constrained by in situ stress[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2466–2478.

(编辑 刘格云)