

沁水盆地南部煤储层赋存环境条件及其对渗透率的影响

孟召平^{1,2}, 任华鑫¹, 禹艺娜^{1,3}, 杨宇¹, 王宇乾¹, 阿古泽仁¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 煤与煤层气共采全国重点实验室, 山西 晋城 048012; 3. 贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:煤层气赋存与产出受控于煤储层地应力、压力和地温等赋存环境条件, 正确分析煤储层赋存环境条件及其对渗透率的影响是煤层气有效开发所关注的关键问题。采用沁水盆地南部煤层气井63个测试资料, 系统分析了研究区煤储层地应力、压力和温度条件, 揭示了煤储层应力、压力和温度随埋藏深度的变化规律, 建立最小水平主应力与垂直主应力和煤储层压力之间关系模型。采用三轴渗流试验系统, 开展了不同应力、压力和温度条件下煤层气渗流试验研究, 揭示了不同温度、应力和压力条件下煤样渗透率变化规律及其控制机理。研究表明, 研究区煤储层最大、最小水平主应力分别为6.62~42.06和3.30~26.40 MPa, 其梯度分别为1.20~5.26和0.99~2.95 MPa/hm; 煤储层压力及其梯度分别为0.99~12.63 MPa和0.23~1.18 MPa/hm; 煤储层温度及其梯度为19.36~38.84 °C和1.98 °C/hm; 且煤储层应力、压力和温度均随深度的增加呈线性增大的规律。随着有效应力的增加, 煤储层渗透率不断降低, 在初始加压阶段, 渗透率下降幅度较大, 随着有效应力的增加, 下降幅度变缓。在相同的应力条件下, 温度的增加使得煤样渗透率不断降低, 渗透率的下降速率随温度的升高而减小。随着有效应力和温度的增加, 煤储层渗透率按负指数函数规律降低。随着孔隙压力的降低, 有效应力增加, 煤储层渗透率不断降低。在初始降压阶段, 煤储层渗透率急剧下降, 随着孔隙压力的降低, 渗透率下降速率逐渐变缓; 当孔隙压力小于0.6 MPa后, 煤储层渗透率随孔隙压力的降低而升高。在高孔隙压力条件下, 渗透率随温度的升高呈负指数函数降低, 在低孔隙压力条件下, 煤储层渗透率随温度的升高呈线性降低。在此基础上, 建立了煤储层渗透率与应力、压力和温度之间的关系模型, 揭示了煤储层渗透率随应力、压力和温度应力的增加按负指数函数降低的规律和控制机理。

关键词:煤储层; 渗透率; 地应力; 储层压力; 储层温度; 沁水盆地

中图分类号: P168.11 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)01-0545-10

Geological conditions of coal reservoir occurrence in the Southern Qinshui Basin and its impact on permeability

MENG Zhaoping^{1,2}, REN Huaxin¹, YU Yina^{1,3}, YANG Yu¹, WANG Yuqian¹, AGU Zeren¹

(1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng 048012, China; 3. School of Materials and Architecture Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The occurrence and output of coalbed methane (CBM) are controlled by the occurrence geological conditions of coal reservoirs, such as stress, pressure, and temperature. The correct analysis of the occurrence geological conditions of

收稿日期: 2023-09-15 修回日期: 2023-12-08 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1154

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42172190); 山西省科技重大专项资助项目(20201102001, 20191102001)

作者简介: 孟召平(1963—), 男, 湖南汨罗人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: mzp@cumt.edu.cn

引用格式: 孟召平, 任华鑫, 禹艺娜, 等. 沁水盆地南部煤储层赋存环境条件及其对渗透率的影响[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 545-554.

MENG Zhaoping, REN Huaxin, YU Yina, et al. Geological conditions of coal reservoir occurrence in the Southern Qinshui Basin and its impact on permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 545-554.



移动阅读

coal reservoirs and their impact on permeability is a key issue of concern for an effective development of CBM. Based on the test data of 63 CBM wells in the southern part of the Qinshui Basin, the ground stress, pressure and temperature conditions of coal reservoirs in the study area are systematically analyzed, the variation law of coal reservoir stress, pressure and temperature with burial depth is revealed, and the relationship between the minimum horizontal principal stress and the vertical principal stress and the pressure of coal reservoir is established. Using the triaxial seepage test system, the experiment of CBM seepage under different stress, pressure and temperature conditions is carried out, and the variation law and control mechanism of coal sample permeability under different temperature, stress and pressure conditions are revealed. The results show that the maximum and minimum horizontal principal stresses of the coal reservoirs in the study area are 6.62–42.06 MPa and 3.30–26.40 MPa, respectively, with the gradients of 1.20–5.26 MPa/hm and 0.99–2.95 MPa/hm, respectively. The coal reservoir pressures and their gradients are 0.99–12.63 MPa and 0.23–1.18 MPa/hm; the coal reservoir temperatures and their gradients are 19.36–38.84 °C and 1.98 °C/hm, respectively. The coal reservoir stress, pressure and temperature increase linearly with the increase of depth. With the increase of effective stress, the permeability of the coal reservoir decreases continuously, the permeability decreases greatly in the initial pressurization stage, but decrease slows down with the increase of effective stress. Under the same stress conditions, the permeability of coal samples and the decrease rate of permeability decrease continuously with the increase of temperature. With the increase of effective stress and temperature, the permeability of coal reservoir decreases according to the law of negative exponential function. With the decrease of pore pressure, the effective stress increases, but the permeability of coal reservoir decreases. In the initial depressurization stage, the permeability of the coal reservoir decreases sharply, and with the reduction of pore pressure, the decrease rate of permeability gradually slows down. When the pore pressure is less than 0.6 MPa, the permeability of the coal reservoir increases with the decrease of pore pressure. Under the condition of high pore pressure, the permeability decreases with the increase of temperature in a negative exponential function, while under the condition of low pore pressure, the permeability of coal reservoir decreases linearly with the increase of temperature. Based on the above results, the relationship model between coal reservoir permeability and stress, pressure and temperature is established. Also, the law and control mechanism of coal reservoir permeability decrease according to negative exponential function with the increase of stress, pressure and temperature stress are expounded.

Key words: coal reservoir; permeability; in situ stress; reservoir pressure; reservoir temperature; Qinshui Basin

煤层气形成的赋存环境条件是指地应力、地温和地下水压力条件^[1],是地球内能以不同形式在地壳上的表现,煤层气赋存与产出受控于这些条件^[2-3]。煤层气主要以吸附状态赋存于煤层中,煤层气的赋存状态随不同煤化程度有较大差异,并随赋存环境条件而发生变化。由于地应力、地下水的压力和地温条件的变化,使煤储层中吸附气和游离气产生转化,同时对煤层气解吸、扩散和渗流产生重要影响。因此正确分析煤储层赋存环境条件及其对渗透率的影响,对于煤矿区煤层气有效开发具有重要意义。

地应力是影响煤储层渗透性和压裂改造效果的主要因素,与常规油气储层相比,煤储层为有机质构成和孔隙-裂隙型结构特征使其渗透率与应力之间的关系更为显著^[4-7]。关于应力对煤储层渗透性的影响,大多基于室内实验研究。随着煤层气开发深入,大量现场测试数据的获得,为储层原位研究提供了基础,基于现场测试数据,揭示了煤储层地应力对渗透率的影响规律^[8-9]。地下水压力场控制着煤层气的保存和

运移,是影响煤层气富集和后期生产的重要地质因素^[10-13],如 MENG 等^[10]将煤储层渗透率随孔隙压力变化划分为渗透率下降、渗透率恢复和渗透率增加 3 个阶段,揭示了应力敏感效应、基质收缩效应和滑脱效应的控制机理。付佳乐等^[11]以重庆松藻煤矿 K2 煤层型煤试样为研究对象,利用含瓦斯煤热-流-固耦合三轴伺服渗流装置,对同一试件先后进行了降孔隙压力渗流试验和三轴压缩-渗流试验,揭示了不同孔隙压力和围压下煤岩渗透性及力学特性。SEIDLE 等^[12]和 SHI 等^[13]提出了有效应力与渗透率之间的计算模型,为现场和实验所得规律提供了理论支撑。地温场是有机质热演化成烃作用的关键,由于地温变化导致煤层气吸附-解吸作用的转化。从开发角度来说,温度越高,煤中甲烷的解吸能力和扩散能力增强,有利于提高煤层气的产出效率。有关煤储层渗透性与温度之间关系,许多学者开展了广泛研究,并取得了显著进展和成效^[14-22]。通过温度、应力对煤岩渗透率的影响研究,揭示了在有效应力一定的条件下媒体渗透

率随温度增加而减小的规律^[14-17]。YU 等^[18-19]通过温度与应力耦合作用下煤储层渗透性试验,分析了温度和应力对煤样渗透率的影响,揭示了温度与应力耦合作用下煤储层渗透性变化规律。由于研究区煤储层应力、压力和温度测量点资料有限,且分布不均,以往主要是采用实验室测试和模型计算方法开展了煤储层赋存环境条件研究,有关基于现场测试数据分析煤储层赋存环境条件相对较弱,现有煤层气井排采控制方法存在一定的盲目性。因此,采用沁水盆地南部煤层气井测试资料,系统分析了研究区煤储层地应力、压力和温度条件,揭示了煤储层应力、压力和温度随埋藏深度的变化规律,建立最小水平主应力与垂直主应力和煤储层压力之间关系模型。采用三轴渗流试验系统,揭示了不同温度、应力和压力条件下煤储层渗透率变化规律及其控制机理,为深部煤层气开发提供理论依据。

1 研究区地质概况和测试资料与方法

1.1 研究区地质概况

沁水盆地南部煤层气田东临太行山隆起,西临霍山隆起,南为中条山隆起,北部与沁水盆地腹地相连,主要包括樊庄区块、郑庄区块和柿庄区块及晋城矿区等(图 1)。本区煤炭资源丰富,煤层含气量高,早在 20 世纪 90 年代初就开始了煤层气的勘探和生产试验,是目前全国勘探程度最高、开发前景最好、商业化程度较高的煤层气气田。地层出露比较齐全,震旦系、寒武系和奥陶系主要出露于盆地周边地区和霍山一带;石炭系、二叠系遍布全区;古近系分布范围局限,新近系在襄垣、晋城和沁水等地有所出露;第四系由现代沉积的砂、砾、泥冲积物和土壤组成,主要分布在沟谷及河流附近。主要含煤地层为上石炭统太原组和下二叠统山西组,总厚度 132.44~166.33 m,平均 146.41 m。太原组和山西组共含煤 21 层,厚度 6.75~16.50 m,平均 12.21 m,含煤系数 9.53%,其中,3 号和 15 号煤层为全区稳定可采煤层,也是煤层气勘探开发的主要目标煤层。由于区内含煤地层沉积环境稳定,岩性组合及地球物理特性具有一定规律,标志层和煤层特征明显,煤岩层对比可靠。研究区位于沁水复向斜的南端,轴向呈 NNE 向展布的复向斜的翘起端,地层倾角一般在 10°以内,局部地区受构造影响可达到 20°以上。以褶皱构造为主,在区块边界和盆地浅部发育一些断裂构造(图 1)。

1.2 测试资料与方法

煤储层应力和压力测试是采用注入/压降试井方法,通过获取破裂压力、闭合压力和煤储层压力及渗

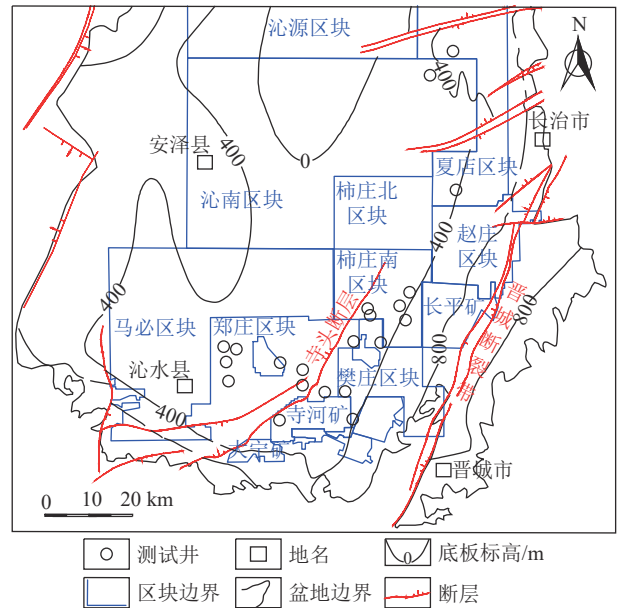


图 1 沁水盆地南部主要煤层气区块及测试井分布

Fig.1 Distribution of main CBM blocks and testing wells in the Southern Qinshui Basin

透率等储层参数,并根据破坏压力、关闭压力和破裂面的方位计算和确定煤储层主应力的方向和大小。本文测试目标层为下二叠统山西组 3 号煤层和上石炭统太原组 15 号煤层。该数据来源于沁水盆地南部典型区块 37 口井 63 层次(测试点)的测试资料,主要位于郑庄区块、樊庄区块、柿庄区块和寺河矿等,如图 1 所示。

煤储层温度采用稳态测温方法,在钻孔停钻 3~10 d,甚至数月或数年后,对全钻孔或特定井段进行连续温度监测,所测温度可直接作为地层温度,地温测试资料来源于研究区 31 口井 31 层次(测试点)煤储层稳态地温测试数据。

为了研究煤储层地应力、储层压力和地温对煤层气渗流的影响,采用煤层气三轴渗流实验系统开展了不同应力、压力和温度条件下煤层气渗流试验研究,试验系统如图 2 所示。

实验中煤样渗透率按式(1)计算:

$$k_g = \frac{2P_0Q_gL\mu_g}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

其中, k_g 为气测渗透率, 10^{-15} m^2 ; P_0 为标准大气压, MPa; Q_g 为气体流量, mL/s; L 为煤样长度, cm; μ_g 为气体动力黏度系数, $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$; A 为煤样横截面积, cm^2 ; P_1 为气体进口压力, MPa; P_2 为气体出口压力, MPa。 μ_g 为与温度有关的变量, CH_4 的黏度系数根据式(2)计算:

$$\mu_g = 1.36 \times 10^{-4} T_K^{0.77} \quad (2)$$

式中, T_K 为绝对温度, K。

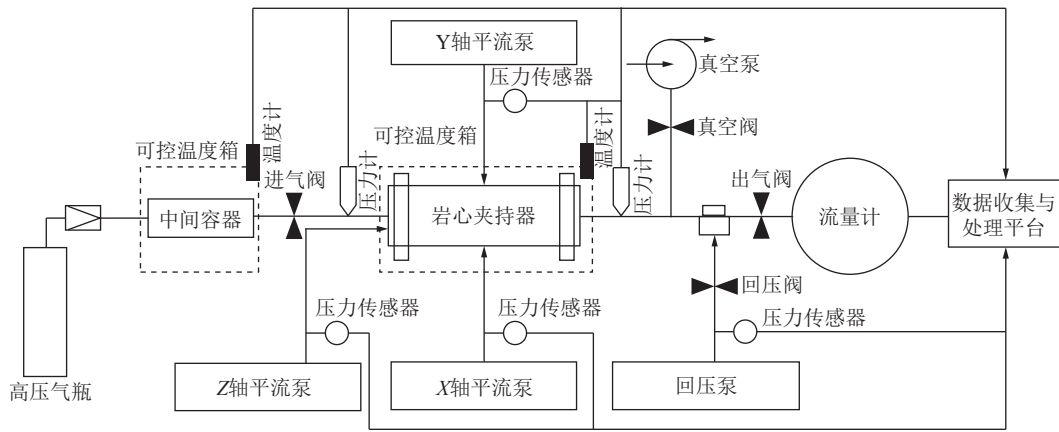


图2 煤层气三轴渗流实验示意

Fig.2 Schematic diagram of CBM triaxial seepage experiment

2 研究区煤储层赋存环境条件

2.1 煤储层应力、压力和温度随埋藏深度的变化特征

根据研究区 1 200 m 以浅的 63 个煤储层地应力测试资料统计,最大水平主应力、最小水平主应力和煤储层压力及其梯度见表 1。

表 1 研究区煤储层地应力和压力测试结果统计

Table 1 Testing results of in-situ stress and pressure for coal reservoirs in the study area

煤层	3号+15号煤层
煤层埋藏深度/m	(334.90~1 122.30)/630.42
最小水平主应力/MPa	(3.30~26.40)/11.57
最小水平主应力梯度/(MPa·hm ⁻¹)	(0.99~2.95)/1.80
最大水平主应力/MPa	(6.62~42.06)/18.11
最大水平主应力梯度/(MPa·hm ⁻¹)	(1.20~5.26)/2.80
煤储层压力/MPa	(0.99~12.63)/4.55
煤储层压力梯度/(MPa·hm ⁻¹)	(0.23~1.18)/0.69

注:数据格式为(最小~最大)/平均。

煤储层地应力和压力均随深度的增加呈线性增大的规律(图3),其关系为

$$\sigma = cD + b \quad (3)$$

式中, σ 为煤储层应力或压力,MPa; D 为煤层埋藏深度,m; c 和 b 为拟合常数,见表2。

根据研究区山西组主采煤层 31 口煤层气井稳态测温数据统计,煤储层地温测试井煤层埋藏深度 519.33~1 272.80 m,平均为 811.61 m。研究区煤储层温度为 19.36~38.84 °C,平均为 29.55 °C。主采煤层地温梯度 1.98 °C/hm,恒温带深度为 30 m,测试数据拟合恒温带温度为 14.1 °C。

测试数据统计表明,本区煤储层温度均随深度的增加呈线性增大的规律(图3)。其关系为

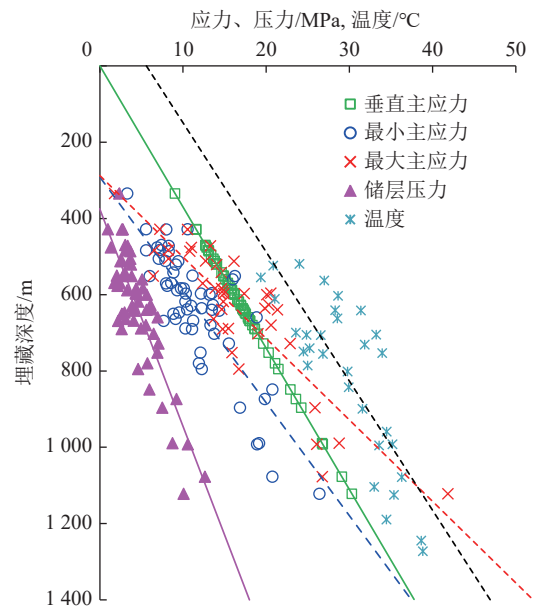


图3 煤储层应力、压力和温度与深度的关系

Fig.3 Relationship between stress, pressure, temperature and depth of coal reservoirs

表 2 煤储层应力和压力随深度变化的回归参数

Table 2 Regression parameters of stress and pressure changes in coal reservoirs with depth

煤储层应力或压力	统计点数	b	c	R^2
最大水平主应力	63	-3.581 4	0.033 9	0.517
最小水平主应力	63	-3.377 3	0.023 6	0.697
垂直主应力	63	0	0.027 0	1.000
煤储层压力	63	-3.470 8	0.012 6	0.721

$$T = 0.019 8(D - H) + 14.10 \quad (4)$$

式中, T 为煤储层温度,°C; D 为煤层埋藏深度,m; H 为恒温带深度,m,本区为 $H=30$ m,统计点 31 个,相关系数 $R^2=0.67$ 。

2.2 煤储层应力与压力和温度之间的关系

2.2.1 煤储层应力与压力之间的关系

测试数据统计也表明,随着地应力的增加,煤储层孔隙-裂隙被压缩,体积变小,煤储层压力增大;反之,则减小。因此,地应力与煤储层压力存在相关性(图 4):

$$P_p = 0.4288\sigma_h - 0.4092 \quad (5)$$

其中, σ_h 为最小水平主应力, MPa; P_p 为煤储层压力, MPa。统计数 $N=63$; 相关系数 $R^2=0.6598$ 。

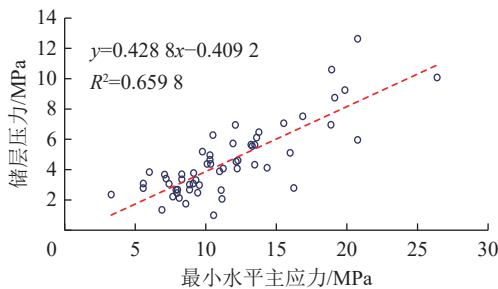


图 4 研究区最小水平主应力和煤储层压力的关系

Fig.4 Relationship between minimum horizontal principal stress and coal reservoir pressure in the study area

由式 (5) 可以看出,最小水平主应力的降低值与煤储层孔隙水压力的降低值成正比。增加地应力,有利于煤储层压力的保持,但往往导致渗透率降低,并给煤储层的排水降压和煤层气的解吸、运移和产出造成一定困难,在高地应力区尤为如此。煤储层压力与最小水平主应力之间的这种规律,我国煤层气勘探开发众多的测试结果也说明了这一点。处于挤压构造应力场背景中的煤储层,其压力往往偏大,压力梯度偏高;而处于拉张型构造应力场中的煤储层,其压力偏低,压力梯度较低。

2.2.2 煤储层热应力与温度关系

AKBARZADEH 和 NIU 等^[21-22]研究发现,在温度

升高至 100 °C 和 470 °C 时煤岩的质量发生显著的损失,当温度超过这 2 个温度临界值时,煤岩内部结构显著变化,可能伴随新生裂隙的出现。本文实验温度处于低温阶段,热裂作用的影响可以忽略,在实验过程中温度对煤样渗透率的控制以热膨胀效应为主。

热膨胀或收缩产生的应变与温度间有如下关系:

$$\Delta\varepsilon_T = \alpha_T \Delta T \quad (6)$$

式中, $\Delta\varepsilon_T$ 为温度变化产生的应变; α_T 为热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, α_T 越大,表明在相同温度增量下煤基质膨胀应变越大; ΔT 为温度增量, $^{\circ}\text{C}$ 。

由热力学理论可知,当煤储层的温度发生变化时,在应力及煤岩分子之间的相互约束作用下,会产生热应力。在原位条件下煤储层热应力的计算公式^[23]为

$$\Delta\sigma_T = \frac{E}{1-2\nu} \alpha_T \Delta T \quad (7)$$

式中, $\Delta\sigma_T$ 为热应力, MPa; E 为弹性模量, MPa; ν 为泊松比; α_T 为热膨胀系数, K^{-1} , 取值 $2.4 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$; ΔT 为温度增量, K。

3 煤储层赋存环境条件对渗透率的影响

3.1 实验方案

基于研究区煤储层赋存环境条件,并考虑深部煤层气开发条件的实际情况,按 2 种实验方案进行不同温度、应力和压力条件下煤样渗透率实验,见表 3。实验方案 1: 不同温度与应力条件下煤样渗透率实验,为避免孔隙压力对煤样渗透率的影响,在实验过程中保持进出口压力不变。实验方案 2: 不同温度和孔隙压力条件下煤样渗透率实验,为了研究不同温度和孔隙压力条件下煤样渗透率,通过不断调节进出口压力模拟排采过程。

实验煤样取自研究区东部 3 号煤层,煤种为贫煤,圆柱型试样尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。

表 3 不同温度、应力和压力条件下煤样渗透率实验

Table 3 Permeability experiment of coal samples under different temperature, stress, and pressure conditions

实验条件	样品	孔隙压力/MPa	围压/MPa	轴压/Pa	有效应力/MPa	温度/ $^{\circ}\text{C}$
方案1	1-1	0.2	2.0	2.6	2.0	25、35、45、55、65
	1-2	0.2	4.0	4.6	4.0	25、35、45、55、65
	1-3	0.2	6.0	6.6	6.0	25、35、45、55、65
	1-4	0.2	8.0	8.6	8.0	25、35、45、55、65
方案2	2-1	0.2	4.0	4.6	4.0	25、35、45、55、65
	2-2	0.6	4.0	4.6	3.6	25、35、45、55、65
	2-3	1.2	4.0	4.6	3.0	25、35、45、55、65
	2-4	1.8	4.0	4.6	2.4	25、35、45、55、65
	2-5	2.4	4.0	4.6	1.8	25、35、45、55、65
	2-6	3.0	4.0	4.6	1.2	25、35、45、55、65

注: 有效应力=应力-孔隙压力=[(围压 \times 2+轴压)/3]-孔隙压力。

3.2 煤样渗透率与有效应力的关系

煤储层有效应力是影响煤渗透率最主要的因素,由原岩应力和煤储层压力共同控制。在煤层气排采过程中,煤储层所受原岩应力基本保持不变,随着储层压力的不断降低,煤储层有效应力不断增大。

3.2.1 煤样渗透率与有效应力之间的关系

煤样渗透率随有效应力的变化规律如图5所示。从图5可知,在相同温度条件下,煤样渗透率随着有效应力的增加而降低。在低有效应力阶段,渗透率下降幅度较大。随着有效应力的持续增大,渗透率下降幅度逐渐变缓。这是因为煤体中存在较多的孔隙和裂隙空间,在应力加载初始阶段,这些空间将被压缩,流体渗流的通道变窄,表现为渗透率的急剧下降。随着有效应力的进一步增加,使得裂隙和孔隙容积减小,其渗流速率变缓。

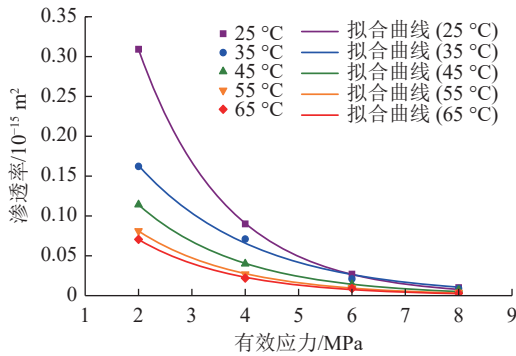


图5 不同温度条件下应力对煤样渗透率的影响
Fig.5 Effect of stress on coal sample permeability at various temperatures

对比不同温度条件下的煤样渗透率变化曲线(图5)可知,在较低应力条件下,煤样渗透率曲线间隔较大,随应力的不断加载,煤样渗透率曲线几乎重合。表明随着有效应力的增加,温度对煤岩渗透率的影响作用减弱。这是因为,低有效应力条件下,可供煤基质热膨胀的孔裂隙空间较大,使得温度影响下的渗透率变化幅度较大;随着有效应力的增加,煤热膨胀空间减小,温度对煤样渗透率的影响作用逐渐减弱。

数值拟合分析可知,不同温度条件下,煤样渗透率与有效应力之间的关系可以用负指数函数来表达:

$$k_g = k_0 \exp(-a_1 \sigma_e) = k_0 \exp[-a_1(\sigma - 0.2)] \quad (8)$$

式中, k_0 为初始应力条件下的煤样渗透率, 10^{-15} m^2 ,取初始应力条件为0.2 MPa; σ_e 为有效应力,MPa; σ 为应力, $\sigma = (\text{围压} \times 2 + \text{轴压})/3$,MPa; a_1 为应力敏感性回归系数, MPa^{-1} 。

实验数据回归分析结果见表4。不同温度条件下,当通过改变轴压和围压控制有效应力时,煤样渗透率

与有效应力之间服从负指数函数规律($R^2 > 0.996$),其中,初始渗透率 k_0 的变化为 $0.215 \times 10^{-15} \sim 1.052 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均为 $0.446 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,表现出随温度的升高 k_0 按幂函数规律降低。 a_1 的变化在 $0.455 \sim 0.613 \text{ MPa}^{-1}$,平均为 0.536 MPa^{-1} (表4)。

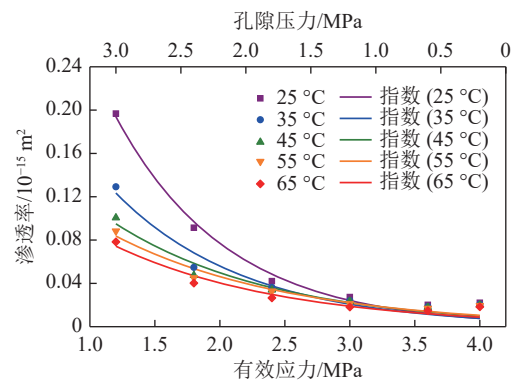
表4 煤样渗透率与有效应力之间拟合参数

Table 4 Fitting parameters between coal sample permeability and effective stress at various temperatures

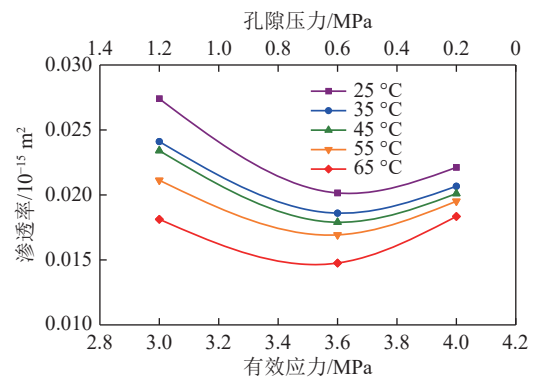
温度/°C	$k_0/10^{-15} \text{ m}^2$	a_1/MPa^{-1}	R^2
25	1.052	0.613	0.999
35	0.405	0.455	0.999
45	0.322	0.518	0.996
55	0.238	0.538	0.999
65	0.215	0.557	0.999

3.2.2 煤样渗透率与孔隙压力之间的关系

分析图6(a)可知,在实验温度范围内,煤样渗透率随孔隙压力的降低总体呈“先降低、后稍微升高”的变化规律。当孔隙压力从3.0 MPa降至1.8 MPa时,煤岩渗透率随着孔隙压力的降低快速减小;当孔隙压力从1.8 MPa降至0.6 MPa时,煤样渗透率随着孔隙



(a) 煤样渗透率随孔隙压力的变化规律



(b) 低孔隙压力下煤样渗透率变化规律

图6 不同温度条件下孔隙压力对煤样渗透率的影响作用
Fig.6 Effect of pore pressure on permeability of coal sample at different temperatures

压力的降低而缓慢减小;随着孔隙压力进一步降低至 0.6 MPa 以下,煤岩渗透率出现回升(图 6(b))。这可能是因为当孔隙压力大于临界解吸压力时,应力敏感效应占主导,煤样渗透率呈负指数函数降低,该阶段服从经典的 S&D 渗透率模型^[13]。随着孔隙压力降低至临界解吸压力以下,煤基质收缩效应和应力敏感效应互为负效应,一定程度上抑制了煤储层渗透率下降速度。当孔隙压力进一步降低至较低水平(0.6 MPa 以下),气体分子密度减小而平均自由程增加,气滑脱效应逐渐明显,使气体流量和煤岩渗透率增高^[10]。

对比不同温度条件下的渗流曲线(图 6)可知,在低孔隙压力阶段,渗流曲线几乎重合,随着孔隙压力的增加,渗流曲线差异性逐渐增加。这是因为孔隙压力的增加,使得煤岩内部裂隙张开程度增大,为煤基质热膨胀提供了更多空间。

通过统计分析可知,不同温度条件下,煤岩渗透率与孔隙压力之间的关系基本满足负指数函数:

$$k_g = k_{0P} \exp(-a_1 \sigma_c) = k_{0P} \exp[-a_1(4.2 - P)] \quad (9)$$

式中, P 为孔隙压力, MPa; k_{0P} 为初始孔隙压力条件下的煤岩渗透率, 10^{-15} m^2 。

回归分析结果见表 5。当改变孔隙压力控制有效应力时,渗透率随有效应力的变化呈负指数函数变化规律。不同温度条件下, k_{0P} 的变化为 $0.191 \times 10^{-15} \sim 0.778 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 平均为 $0.377 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。煤样初始渗透率整体上随温度的升高而降低,煤样应力敏感回归系数 a_1 在 $0.782 \sim 1.158 \text{ MPa}^{-1}$, 平均为 0.919 MPa^{-1} 。

表 5 煤样渗透率与孔隙压力之间拟合参数

Table 5 Fitting parameters between coal sample permeability and pore pressure at various temperatures

温度/°C	$k_{0P}/10^{-15} \text{ m}^2$	a_1/MPa^{-1}	R^2
25	0.778	1.158	0.98
35	0.403	0.987	0.95
45	0.252	0.812	0.94
55	0.207	0.753	0.95
65	0.191	0.782	0.95

3.3 煤样渗透率与温度之间的关系

煤储层始终处在一定的温度场条件中,随着煤储层埋深的增加,煤储层温度和地应力以一定梯度上升,深部煤储层往往具有较高的温度和应力条件,煤储层渗透率受温度和应力的耦合控制。

3.3.1 不同应力条件

由图 7 可以看出,煤样渗透率随着温度的升高不断降低。当应力为 2.2、4.2 MPa 时,在初始升温阶段,

煤样渗透率随温度升高而下降的幅度较快,随着温度的升高,渗透率下降速率变缓。在 6.2 和 8.2 MPa 的载荷条件下,煤样渗透率随温度的升高而降低的速率相对平缓且均匀。这是因为在载荷较小的情况下,煤样的裂隙初始开度较大,当温度升高时,煤基质发生“内膨胀”,使得气体渗流的通道变窄,渗透率快速下降。随着煤基质内膨胀变形的进一步发展,煤体内部可供热膨胀的孔裂隙空间余量大大减小,热膨胀阻力增大,热膨胀系数减小,渗透率下降幅度变缓。在高应力载荷条件下,煤体内部的孔裂隙空间被压实,可供煤基质热膨胀的空间有限,使得煤样渗透率在初始升温阶段就表现出平缓的下降形态。

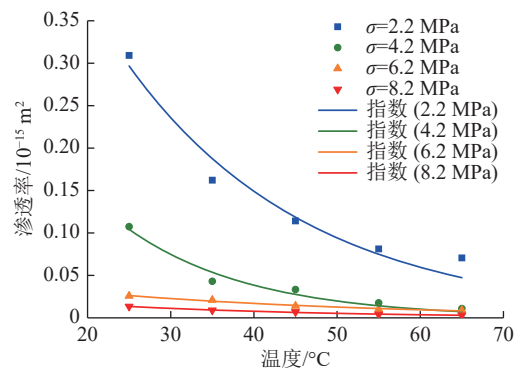


图 7 不同应力条件下温度对煤样渗透率的影响作用
Fig. 7 Effect of temperature on permeability of coal sample under different external stresses

实验结果回归分析可知,不同应力条件下,煤样渗透率与温度之间的变化规律服从负指数函数关系:

$$k_g = k_{0T} \exp(-a_2 T) \quad (10)$$

式中, k_g 为气测渗透率, 10^{-15} m^2 ; k_{0T} 为初始温度条件下的煤样渗透率, 10^{-15} m^2 ; 为了方便计算,设置初始温度为 0; T 为温度, °C; a_2 为温度敏感性回归系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

对温度敏感系数进行了统计,结果见表 6, k_{0T} 的变化为 $0.034 \times 10^{-15} \sim 0.934 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 平均为 $0.393 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 随着有效应力的增加呈负指数函数规律降低,温度敏感性回归系数 a_2 为 $0.029 \sim 0.066 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, 平均为 $0.045 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

表 6 不同应力条件下煤样渗透率与温度之间拟合参数

Table 6 Fitting parameters between coal sample permeability and temperature at different external stresses

应力/MPa	$k_{0T}/10^{-15} \text{ m}^2$	$a_2/^{\circ}\text{C}^{-1}$	R^2
2.2	0.934	0.046	0.96
4.2	0.549	0.066	0.97
6.2	0.054	0.029	0.98
8.2	0.034	0.037	0.99

3.3.2 不同孔隙压力条件

不同孔隙压力条件下,煤样渗透率与温度之间的关系如图 8 所示。煤样渗透率整体随着温度的升高而降低。在高孔隙压力 (1.8、2.4、3.0 MPa) 条件下,煤样渗透率随温度的增加呈负指数函数规律降低。在初始升温阶段,渗透率下降速度较大,随着温度的进一步升高,渗透率下降速率变缓。在低孔隙压力 (0.2、0.6、1.2 MPa) 条件下,煤储层渗透率随温度的升高呈线性下降。

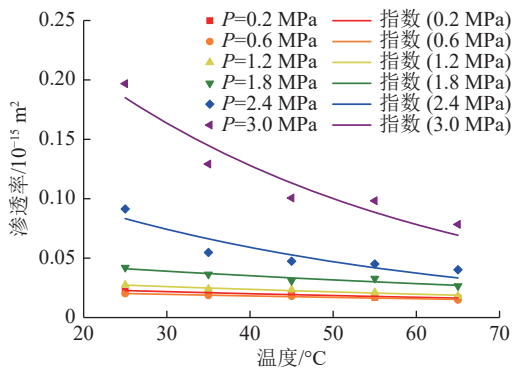


图 8 不同孔隙压力条件下温度对煤样渗透率的影响作用

Fig.8 Effect of temperature on permeability of coal sample under different pore pressures

在高孔隙压力条件下,当温度升高时,气体分子活性增大,使得煤岩捕获气体分子得难度增大,吸附量逐渐下降^[24],煤基质收缩效应逐渐明显,一定程度的削弱了煤基质热膨胀作用^[25],使得煤样渗透率下降幅度减缓。在低孔隙压力状态下,煤基质的吸附膨胀形变可以忽略不计,煤样渗透率仅受热膨胀效应的控制,煤样渗透率与温度呈线性关系。这也表明,在应力为 4.2 MPa 的条件下进行变孔隙压力渗流实验的过

程中,煤样内部孔裂隙体积足以为煤基质热膨胀提供足够的空间,热膨胀系数在升温过程中基本保持不变。

利用式 (10) 对实验结果进行拟合分析,结果见表 7。 k_{0r} 随孔隙压力的增加呈指数函数增加, k_{0r} 的变化范围为 $0.024 \times 10^{-15} \sim 0.342 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,平均为 $0.105 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。温度敏感性回归系数 a_2 为 $0.007 \sim 0.025 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,平均为 $0.014 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。煤样初始渗透率和温度敏感性回归系数整体上随孔隙压力的升高而增大。

表 7 不同孔隙压力下煤样渗透率与温度之间拟合参数

Table 7 Fitting parameters between coal sample permeability and temperature at different pore pressure

孔隙压力/MPa	$k_{0r}/10^{-15} \text{ m}^2$	$a_2/^\circ\text{C}^{-1}$	R^2
0.2	0.028	0.008	0.94
0.6	0.024	0.007	0.95
1.2	0.035	0.009	0.96
1.8	0.053	0.010	0.89
2.4	0.148	0.023	0.83
3.0	0.342	0.025	0.91

3.4 在应力、压力和温度作用下煤储层渗透率控制机理

与常规裂隙储层相比,煤储层具有高应力敏感以及强气体吸附能力,导致煤层气生产过程中,煤储层渗透率变化的控制机制较为复杂。煤储层为孔隙-裂隙型储集层,孔隙系统为煤层气提供储存场所,决定着煤岩的吸附能力;裂隙指的是大孔径的孔隙,为煤层气提供运移通道,控制着煤体渗透率的大小。

煤储层裂隙一般呈互相垂直的形态发育,简化后的煤储层裂隙系统如图 9 所示。

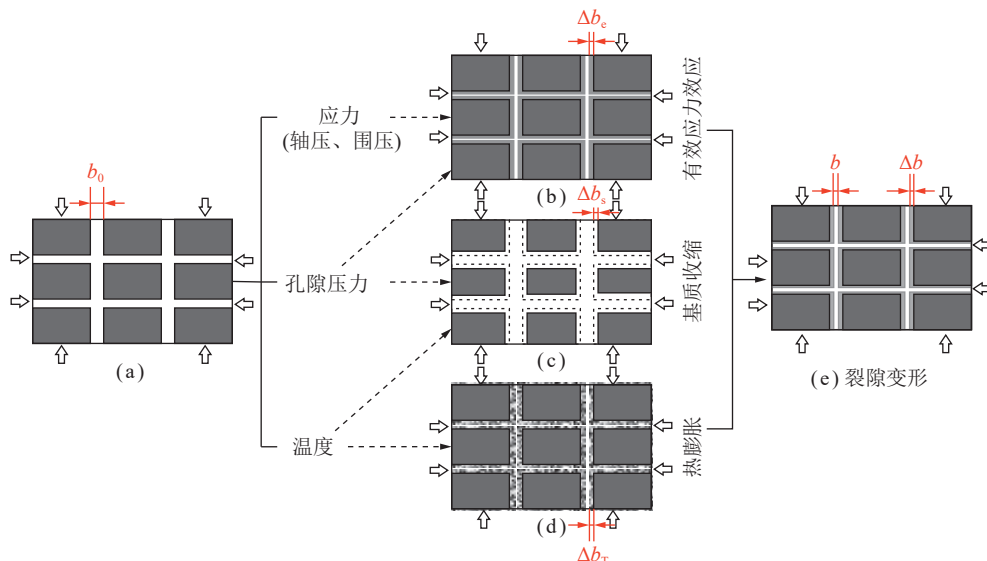


图 9 在 z 轴方向上两组相互正交的裂隙系统变形模式

Fig.9 Deformation pattern diagram of two mutually orthogonal fracture systems in the z-axis direction

基于图 9 所示的简化模型,煤储层渗透率^[26-28]可表示为

$$K_z = K_{0x} \left(1 - \frac{\Delta b_x}{b_{0x}}\right)^3 + K_{0y} \left(1 - \frac{\Delta b_y}{b_{0y}}\right)^3 \quad (11)$$

式中, K_z 为由于开度增量 Δb_x 和 Δb_y 导致渗透率的变化, 压应变为正, 拉应变为负; K_{0x} 为初始应力条件下沿 x 方向裂隙的初始渗透率; K_{0y} 为初始应力条件下沿 y 方向裂隙的初始渗透率; b_{0x} 为在 x 方向上裂隙的初始平均法向开度; b_{0y} 为在 y 方向上的初始平均法向开度。

由式 (11) 可以看出, 煤储层渗透率受控于煤储层裂隙开度, 煤储层裂隙开度 (b) 为初始裂隙开度 (b_0) 减去煤中裂隙开度变化量 (Δb)。在煤层气开采过程中, 影响煤储层裂隙开度的主要因素为孔隙压力和温度变化。如图 9 所示, 在温度、压力和应力的共同影响下煤储层裂隙开度变化是由有效应力效应、基质收缩效应和热膨胀效应所致, 从而导致煤储层渗透率变化。

4 结 论

(1) 研究区煤储层最大、最小水平主应力分别为 6.62~42.06 和 3.30~26.40 MPa, 其梯度分别为 1.20~5.26 MPa/hm 和 0.99~2.95 MPa/hm; 煤储层压力及其梯度分别为 0.99~12.63 MPa 和 0.23~1.18 MPa/hm; 煤储层温度及其梯度为 19.36~38.84 °C 和 1.98 °C/hm; 且煤储层应力、压力和温度均随深度的增加呈线性增大的规律。

(2) 随着有效应力的增加, 煤储层渗透率不断降低, 在初始加压阶段, 渗透率下降幅度较大, 随着有效应力的增加, 下降幅度变缓。在相同的应力条件下, 温度的增加使得煤储层渗透率不断降低, 渗透率的下降速率随温度的升高而减小。随着有效应力和温度的增加, 煤储层渗透率按负指数函数规律降低。

(3) 随着孔隙压力的降低, 有效应力增加, 煤储层渗透率不断降低。在初始降压阶段, 煤储层渗透率急剧下降, 随着孔隙压力的降低, 渗透率下降速率逐渐变缓, 当孔隙压力小于 0.6 MPa 后, 煤储层渗透率随孔隙压力的降低而升高。在高孔隙压力条件下, 渗透率随温度的升高呈负指数函数降低, 在低孔隙压力条件下, 煤储层渗透率随温度的升高呈线性降低。

(4) 煤储层渗透率是煤中裂隙开度的 3 次幂函数关系, 而影响煤储层裂隙开度的主要因素为应力、压力和温度等赋存环境条件。根据裂隙开度与应力之间呈负指数函数关系, 建立了煤储层渗透率与应力、

压力和温度之间的关系模型, 揭示了煤储层渗透率随应力、压力和温度应力的增加按负指数函数降低的规律和控制机理。

参考文献(References):

- [1] 孟召平, 田永东, 李国富. 煤层气开发地质学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 孟召平, 禹艺娜, 李国富, 等. 沁水盆地煤储层地温场条件及其低地温异常区形成机理[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 307-316.
MENG Zhaoping, YU Yina, LI Guofu, et al. Geothermal field conditions of coal reservoirs and its genetic mechanism of low geothermal anomaly areas in the Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 307-316.
- [3] 张厚福, 方朝亮. 盆地油气成藏动力学初探——21 世纪油气地质勘探新理论探索[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 7-12
ZHANG Houfu, FAN Chaoliang. Preliminary study on petroleum pool-forming dynamics of basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(4): 7-12.
- [4] SOMERTON W H, SOYLEMEZOGLU I M, DUDLEY R C. Effect of stress on permeability of coal to gas and water[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1975, 12: 129-145.
- [5] DURUCAN S, EDWARDS J. S. The effects of stress and fracturing on permeability of coal[J]. Min Sci Technol, 1986, 3: 205-216.
- [6] MENG Z P, LI G Q. Experimental research on the permeability of high-rank coal under a varying stress and its influencing factors[J]. Eng Geol, 2013, 162: 108-117.
- [7] 祝捷, 王学, 于鹏程, 等. 有效应力对煤样变形和渗透性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2213-2219.
ZHU Jie, WANG Xue, YU Pengcheng, et al. Effects of the effective stress on deformation and permeability of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2213-2219
- [8] 任少魁, 秦玉金, 贾宗凯, 等. 有效应力对煤体渗透率的影响试验研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(1): 56-61.
REN Shaokui, QIN Yujin, JIA Zongkai, et al. Experimental study on effect of effective stress on permeability of coal[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(1): 56-61.
- [9] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal[J]. Rocky mt Assoc Geol, 1998, 3: 81-91.
- [10] MENG Y, LI Z, LAI F. Influence of effective stress on gas slippage effect of different rank coals[J]. Fuel, 2021, 285: 119207.
- [11] 付佳乐, 李波波, 高政, 等. 不同孔隙压力和围压下煤岩渗透及力学特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 150-159.
FU Jiale, LI Bobo, GAO Zheng, et al. Experimental study on permeability and mechanical properties of coal under different pore pressure and confining pressure[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 150-159.
- [12] SEIDLE J P, JEANSONNE M W, ERICKSON D J. Application of matchstick geometry to stress dependent permeability in coals[J]. Paper SPE, 1992: 24361.
- [13] SHI J Q, DURUCAN S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery[J]. SPE Reserv

- [Eval Eng](#), 2005, 8: 291–299.
- [14] YUAN M, LI B B, XU J, et al. The experiment study on permeability of coal containing methane under different methane pressure[J]. *Coal Mine Saf*, 2011, 42(3): 1–4.
- [15] SUN G Z, WANG G Z, ZHANG R L. Experimental study on the response of structural coal permeability to temperature change[J]. *Geotech Mech*, 2016, 37(4): 1042–1048.
- [16] CAO S G, LI Y, GUO P, et al. Comparative study on seepage characteristics of full stress-strain process of briquette and raw coal[J]. *J Rock Mech Eng*, 2010, 29(5): 899–906.
- [17] BEAR J, CORAPCIOGLU M Y. A mathematical model for consolidation in thermoelastic aquifer due to hot water injection or pumping[J]. *Water Resour Res*, 1981(17): 723–736.
- [18] YU Y N, MENG Z P, LI J J, et al. Laboratory investigation of coal sample permeability under the coupled effect of temperature and stress[J]. *Front Earth Sci*, 2022, 16(4): 963–974.
- [19] YU Y N, MENG Z P, GAO C X, et al. Experimental investigation of pore pressure effect on coal sample permeability under different temperatures[J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31(3): 1585–1599.
- [20] 孟召平, 蓝强, 刘翠丽, 等. 鄂尔多斯盆地东南缘地应力、储层压力及其耦合关系[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(1): 122–128.
MENG Zhaoping, LAN Qiang, LIU Cuili, et al. In-situ stress and coal reservoir pressure in Southeast margin of Ordos Basin and their coupling relations[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(1): 122–128.
- [21] AKBARZADEH H, CHALATURNYK R J. Structural changes in coal at elevated temperature pertinent to underground coal gasification: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 131: 126–146.
- [22] NIU S, ZHAO Y, HU Y. Experimental investigation of the temperature and pore pressure effect on permeability of Lignite under the in situ condition[J]. *Transport in Porous Media*, 2014, 101(1): 137–148.
- [23] TENG T, WANG J G, GAO F, et al. A thermally sensitive permeability model for coal-gas interactions including thermal fracturing and volatilization[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 32: 319–333.
- [24] ZHANG K, MENG Z, LIU S. Comparisons of methane adsorption/desorption, diffusion behaviors on intact coals and deformed coals: Based on experimental analysis and isosteric heat of adsorption[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(7): 5975–5987.
- [25] LI B, YANG K, REN C, et al. An adsorption-permeability model of coal with slippage effect under stress and temperature coupling condition[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 71: 102983.
- [26] ZHANG J, STANDIFIRD W B, ROEGIERS J C, et al. Stress-dependent fluid flow and permeability in fractured media: From Lab experiments to engineering applications[J]. *Rock Mech Rock Engng*, 2007, 40(1): 3–21.
- [27] MENG Z P, ZHANG J C, WANG R. In-situ stress, pore pressure and stress-dependent permeability in the Southern Qinshui Basin[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2011, 48: 122–131.
- [28] 孟雅, 李治平, 唐书恒, 等. 中、高阶煤样甲烷吸附应变及渗透性实验分析[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1915–1924.
MENG Ya, LI Zhiping, TANG Shuheng, et al. Laboratory investigation on methane sorption-induced strain and permeability in middle and high rank coal samples[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(6): 1915–1924.