

鄂尔多斯盆地东缘煤岩渗透率的应力和温度敏感特征

曾泉树^{1,2}, 汪志明^{1,2*}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, wellcompletion@126.com

收稿日期: 2019-09-19

国家自然科学基金青年科学基金项目(51804317) 和国家自然科学基金面上项目(51974333) 联合资助

摘要 了解煤岩渗透率在空间中的分布及其随生产的动态变化有助于准确预测煤层气产量, 并及时调整开发策略。基于自主研发的煤岩渗透率检测装置, 开展了鄂尔多斯盆地东缘典型煤样的渗透率测试, 在实验测量结果的基础上, 结合量纲分析方法, 建立了鄂尔多斯盆地东缘主力产气煤层的原始渗透率表达式。研究结果表明煤岩的裂隙变形和渗透率变化是由储层压实、基质收缩和热膨胀三种效应共同造成的, 本质上取决于煤岩所受应力和温度载荷变化。煤岩渗透率随水平有效应力的降低近似呈指数增长。煤岩渗透率随温度的变化还取决于其所受应力载荷, 当水平有效应力大于临界水平有效应力, 渗透率随温度的升高而降低, 当水平有效应力小于临界水平有效应力, 渗透率随温度的升高而增大。对于所研究的两个煤样, 4#煤层煤样在 1.2~1.9 MPa 水平有效应力范围内发生反转, 8#煤层煤样在 1.8~2.5 MPa 水平有效应力范围内发生反转。建立的原始渗透率表达式有效表征了不同埋深、不同生产阶段的煤层渗透率变化, 预测结果与试井结果吻合良好, 平均相对误差为 28.53%。

关键词 渗透率变化; 应力敏感性; 温度敏感性; 预测模型

Stress and temperature sensitivity of coal permeability in the Eastern Ordos Basin

ZENG Quanshu^{1,2}, WANG Zhiming^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Coal is composed of porous matrix blocks bounded by a well-developed cleat network and is a dual porosity medium. While fluid mobility is mainly controlled by the developed cleat network, the matrix pore contribution to permeability can be ignored. For a typical coal seam, its permeability in-situ depends on the initial stress and temperature loadings. In addition, the stress loads may also change with production, further leading to permeability evolution. In this study, permeability tests were first conducted on two typical coal samples from the Eastern Ordos Basin. Both the stress and temperature loadings were implemented with the in-situ conditions at different coal seam depths and production stages, and the influences of stress and temperature on permeability were further examined. Combined with dimensional analysis, the sensitivity results then generate two empirical permeability models for the Shanxi and Taiyuan formations. The results show that coal deformation and permeability evolution are essentially the result of stress and temperature changes. The changes may generate three effects, a reservoir compaction effect, a matrix shrinkage effect, and a thermal expansion effect. Within the testing temperature range, the results show that coal

引用格式: 曾泉树, 汪志明. 鄂尔多斯盆地东缘煤岩渗透率的应力和温度敏感特征. 石油科学通报, 2020, 04: 512-519

ZENG Quanshu, WANG Zhiming. Stress and temperature sensitivity of coal permeability in the Eastern Ordos Basin. Petroleum Science Bulletin, 2020, 04: 512-519. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.04.044

permeability increases exponentially with the decrease of effective horizontal stress. However, coal permeability changes with temperature may be the opposite of those experienced with different stresses. With significant stresses, the matrix deformation is more pronounced and thus will occupy some space originally occupied by the cleat, showing up as a narrowing down of the cleat and permeability decrease. That is, the permeability may increase with a decrease of temperature at significant stress loadings. As the stresses weaken, any two of the curves at different temperatures will meet with a specific stress loading. In other words, the permeability decrease due to thermal expansion is offset by matrix shrinkage at this point, and the permeability may increase with temperature with a lower stress loading. The curves for the 4# specimen are inverse in a range from 1.2 MPa to 1.9 MPa, while those of the 8# specimen have a range from 1.8 MPa to 2.5 MPa. Once the reservoir compaction is too weak to suppress the thermal expansion, the cleat will swell more rapidly than the matrix instead, and together with the dominant matrix shrinkage, further improve the permeability. The results also show that the empirical permeability models predict the coal seam permeability at different buried depths and different production stages accurately, with an average relative error of 28.5%.

Keywords permeability evolution; stress sensitivity; temperature sensitivity; prediction model

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.04.044

0 引言

煤岩是典型的双孔介质, 包括基质孔隙和裂隙网络, 煤层流体在其中的流动性可用渗透率表征^[1-2]。裂隙网络是煤层流体的主要流动通道^[3], 其渗透率(毫达西, mD)远大于基质渗透率(微达西, μD), 除非特别说明, 本研究所述的渗透率指的都是裂隙渗透率。尽管流体在煤岩中的流动性主要取决于裂隙网络的发育程度, 若煤岩所受应力或温度发生变化, 都将导致裂隙网络变形, 显著影响渗透率^[4-5]。

在煤岩渗透率测试过程中, 应力载荷易控制, 测量数据完整, 便于揭示煤岩渗透率动态变化机理。因此当前的实验主要通过控制煤岩所受应力载荷来模拟煤层条件, 并利用氮气、甲烷、二氧化碳和水等实验流体来测量渗透率随应力的变化, 国内外学者在这方面已开展了大量的研究^[6-8]。然而, 测试时煤样的边界条件与真实煤层条件不同, 无法准确反映渗透率变化趋势^[9], 并且当前的研究大都没有考虑温度的影响^[10-11]。

为了更好地揭示煤岩渗透率动态变化机理, 基于煤岩渗透率检测装置, 通过控制煤岩所受应力载荷模拟单轴应变条件, 开展了鄂尔多斯盆地东缘典型煤样的渗透率测试, 并分析了应力和温度对煤岩渗透率的影响。

1 研究区情况

鄂尔多斯盆地是我国两大煤层气产业发展基地之一^[12], 煤层气资源量为 $(9.62\sim 10.7)\times 10^{12}\text{ m}^3$, 约占全国煤层气资源总量的30%。盆地东缘是煤层气勘探开

发的活跃区域, 然而, 目前开发情况远不如预期, 这主要是由于该盆地内多个煤层纵向叠置分布, 同一产气煤层埋深起伏大, 煤层气体主要分布在中深部煤层中, 开发难度大^[13]。

以保德区块为例, 其主力产气煤层为4#和8#, 4#煤层属于下二叠统山西组^[14-15], 为海陆过渡相沉积, 平均厚度介于40~60 m; 8#煤层属于上石炭统太原组^[16,17], 为海陆交互相沉积, 平均厚度介于10~15 m。该区块内地层呈东高西低沉积, 埋深差异可达1500 m, 如图1所示。

在该区块中, 恒温带深度为20 m, 恒温带温度为10.09 $^{\circ}\text{C}$, 超过恒温带后煤层温度随埋深增加线性增大, 地温梯度为0.0291 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 生产过程中的温度变化可忽略, 如图2所示。另外, 煤层压力随埋深增加线性增大, 基本等于静液柱压力, 随开发进行逐渐衰竭, 如图3所示。尽管该区块内断层不发育, 分布比较稳定, 但巨大的埋深差异将造成煤层环境存在较大区别, 温度差异最高达43 $^{\circ}\text{C}$, 压力差异最大达15 MPa。甲烷在中深煤层中的超临界特性进一步增加了准确描述煤岩渗透率的难度。因此, 有必要深入研究温度和应力对煤岩渗透率的影响, 以认清煤岩渗透率在空间中的分布规律及其随生产的动态变化, 并制定合理的开发策略和排采制度。

2 应力和温度敏感性实验

2.1 实验装置

实验采用自主研发的可变应力和温度的煤岩渗透率检测装置, 已获国家发明专利授权^[18-20], 装置结构

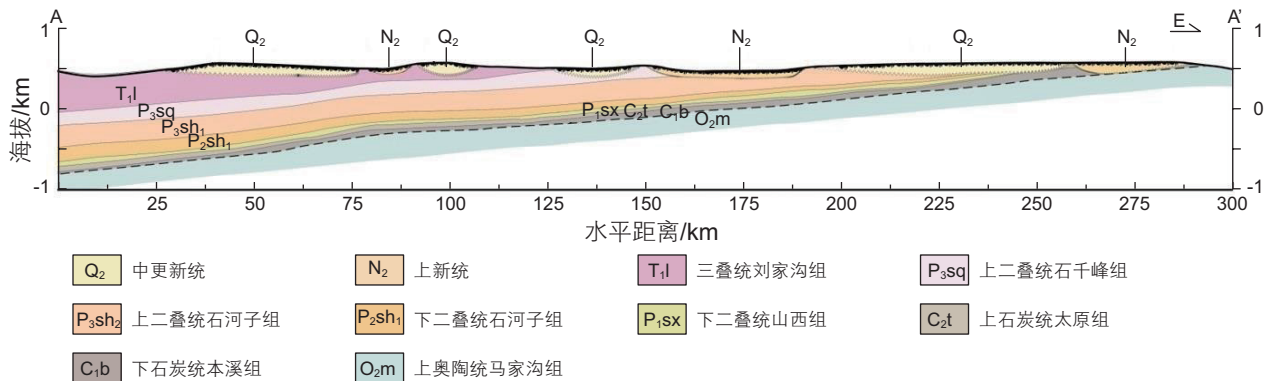
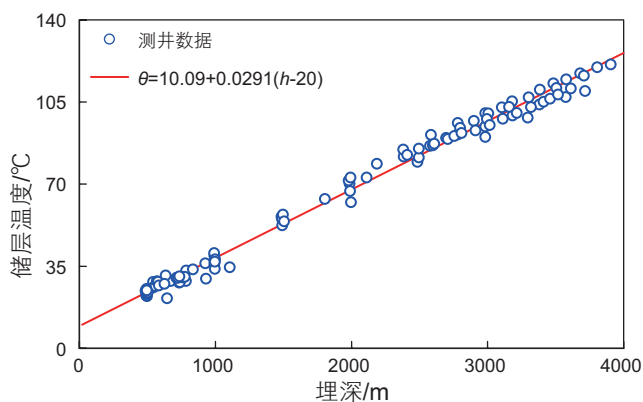
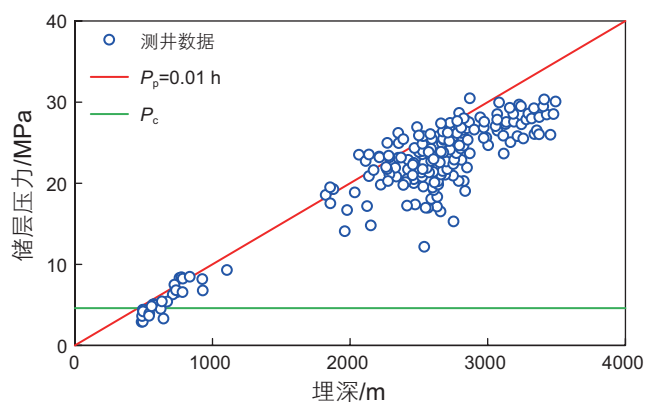


图1 鄂尔多斯盆地东缘保德区块地层剖面图

Fig. 1 Stratigraphic section of Baode Block in Eastern Ordos Basin

图2 鄂尔多斯盆地东缘保德区块煤层温度随埋深的变化
Fig. 2 Reservoir temperature versus coal seam depth in Baode Block, Eastern Ordos Basin图3 鄂尔多斯盆地东缘保德区块煤层压力随埋深的变化
Fig. 3 Reservoir pressure versus coal seam depth in Baode Block, Eastern Ordos Basin

示意图见图4。

该装置包括了煤心夹持系统, 气体循环系统, 数据收集与控制系统。煤心夹持器内部的温度从室温到 100 °C 可调, 精度为 ± 0.1 °C。煤心夹持器的入口压力、出口压力、围压和轴压上限分别为 30 MPa、30 MPa、50 MPa 和 20 MPa, 稳定性为 $\pm 0.1\%$ 。选用纯度为 99.5% 的甲烷作为实验流体。所有的传感器都与数据收集与控制系统相连, 实时监测并记录系统压力、温度和流量信息。一旦需要调整实验温度或压力, 可直接通过数据收集与控制系统向电磁加热套、泵、气体增压机等控制元件下达指令。

2.2 测试煤样

实验所用煤样取自鄂尔多斯盆地东缘保德区块 4# 和 8# 煤层。从煤层中采出后, 立即用塑料泡沫包裹装箱, 并运到实验室中。收到煤样之后, 使用金刚石钻头沿着煤样的层理面取心, 并用液氮作为冷却剂。这两个煤样易碎, 取心成功率较低, 最终仅得到两个

煤岩样品, 如图 5 所示, 其直径为 50 mm, 长度为 100 mm。

2.3 实验方案

由于生产过程中温度几乎不发生变化, 而原始储层压力基本等于静水压力, 为了更真实地反映煤岩在就地煤层中所受应力和温度载荷, 首先对煤样施加特定温度和应力载荷来模拟原始煤层环境, 然后通过改变煤样的应力载荷来模拟煤层气开发过程。煤岩渗透率变化主要取决于垂直于层理面的裂隙网络的变形情况, 因此单轴应变条件能较真实地反映生产过程中煤岩所受应力载荷。参照 Mitra 等人^[9]的研究成果, 将围压设置为孔压的 1.6 倍, 使煤样处于单轴应变条件, 有效模拟了煤层气生产过程中煤岩所受应力载荷。煤样上施加的温度和应力载荷如表 1 所示。

2.4 实验流程

实验流程参照汪志明等人^[18-20]提出的煤岩渗透率

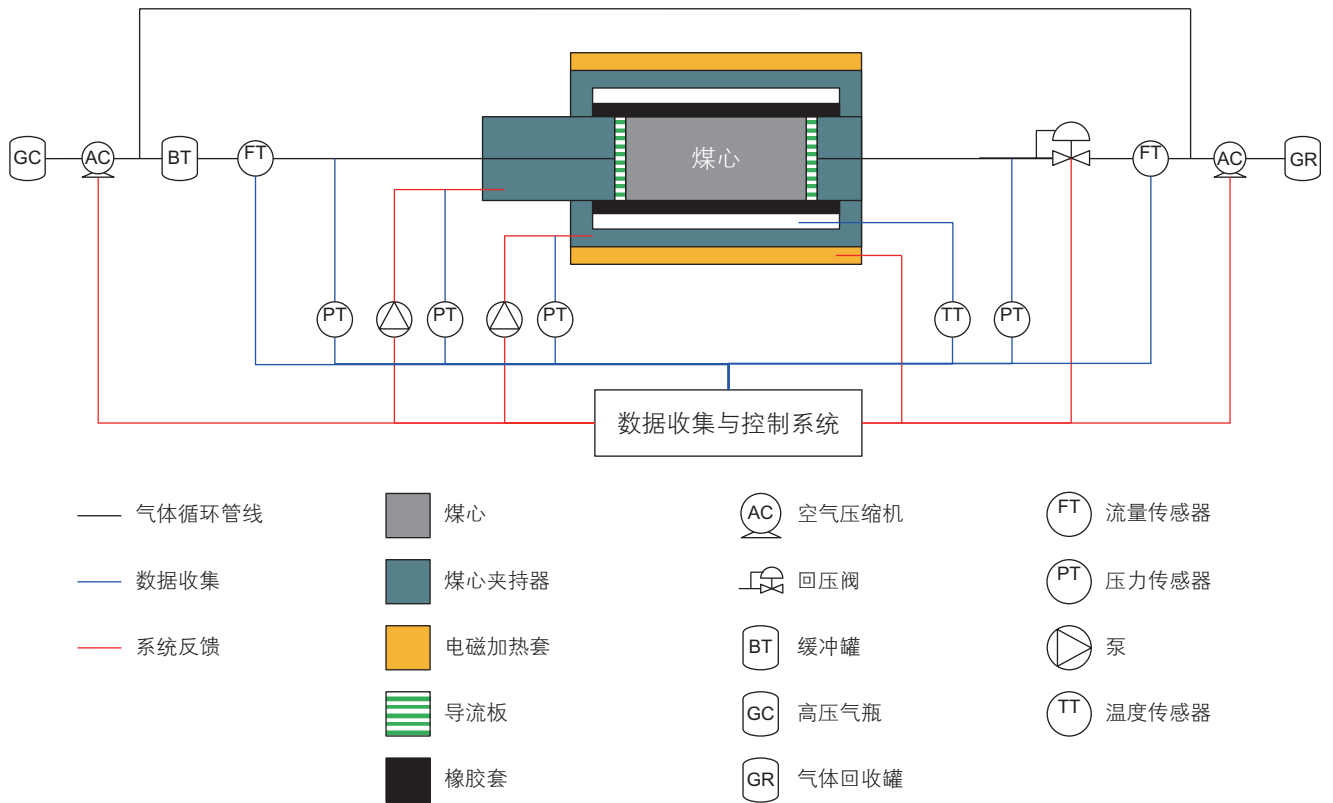


图 4 煤岩渗透率检测装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the coal permeability testing apparatus



(a) 4# 煤层样品

(b) 8# 煤层样品

图 5 所用煤样

Fig. 5 Coal specimens used

检测方法，具体步骤如下：

(1) 将煤样置于煤心夹持器中，通空气循环，确保装置气密性后抽真空；

(2) 将一定量甲烷注入缓冲罐，稳定后开启缓冲罐进行气体循环，调整回压阀，在岩心夹持器进、出口

间设置一个小压差；

(3) 参照表 1，对煤样施加特定的温度和应力载荷来模拟埋深；

(4) 持续循环甲烷直至岩心夹持器进、出口流量差可忽略，此时认为煤样已饱和甲烷，如图 6 所示；

(5) 煤样饱和甲烷后，持续 5 min 记录进、出口压力和流量，取平均值，结合达西定律(Darcy's Law)估算煤岩渗透率；

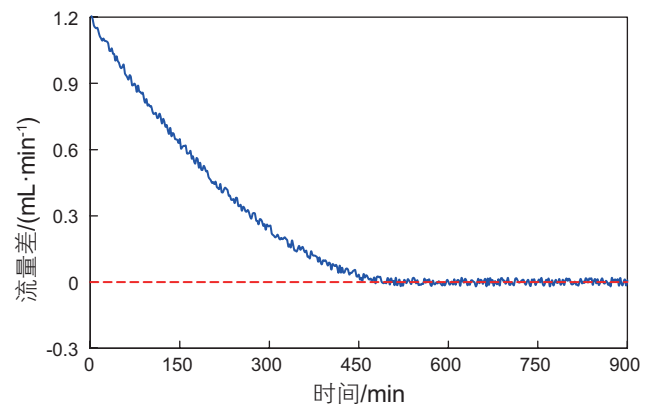


图 6 岩心夹持器入口与出口间的流量差

Fig. 6 Flow rate difference between the inlet and outlet of core holder

(6)同时降低围压和孔压,保证煤样处于单轴应变条件,有效模拟煤层气开发过程中煤岩所受应力载荷,如表1所示,变更应力载荷后,稳定120 min,重复步骤(5);

(7)实验结束后用真空泵将甲烷抽出,收集到气体回收罐中。

3 实验结果及分析

在不同的温度条件下,这两个煤样的渗透率随水平有效应力的变化如图7和图8所示。

可以观察到,煤岩渗透率随水平有效应力的降低

近似呈指数增长。然而,在不同的应力载荷下,煤岩渗透率随温度的变化规律可能发生转变,存在临界水平有效应力。当水平有效应力大于该临界值时,储层压实效应占据主导,煤岩整体膨胀受限。随着温度增加,热膨胀和基质收缩效应都将变强。一方面,煤岩基质的可压性弱于裂隙,随着温度升高,其膨胀速度快于裂隙,将表现为裂隙的闭合和渗透率的降低。另一方面,随着温度升高,将解吸出更多的甲烷,引起煤岩基质收缩和渗透率的改善。也就是说,随温度升高,热膨胀和基质收缩效应对煤岩渗透率的影响正好是相反的。结合实验结果,当水平有效应力大于该临界值时,煤岩渗透率随温度的升高有所降低,但并不

表1 煤样上施加的温度和应力载荷

Table 1 Temperature and stress loadings of coal specimens

埋深/m	温度/°C	孔压/MPa	围压/MPa	埋深/m	温度/°C	孔压/MPa	围压/MPa
500	24.1	5.01	8.00	1000	38.6	9.99	16.00
		4.29	6.90			7.71	12.30
		3.69	5.90			5.79	9.30
		3.21	5.10			4.29	6.90
		2.70	4.30			3.21	5.10
		2.19	3.50			2.31	3.70
		1.71	2.70			1.71	2.70
		1.20	1.90			1.20	1.90
		0.81	1.30			0.81	1.30
1500	53.2	15.00	24.00	2000	67.7	20.01	32.00
		11.49	18.40			15.00	24.00
		8.79	14.10			10.71	17.10
		6.69	10.70			7.20	11.50
		4.80	7.70			4.80	7.70
		3.30	5.30			3.30	5.30
		2.31	3.70			2.31	3.70
		1.71	2.70			1.71	2.70
		1.20	1.90			1.29	2.10

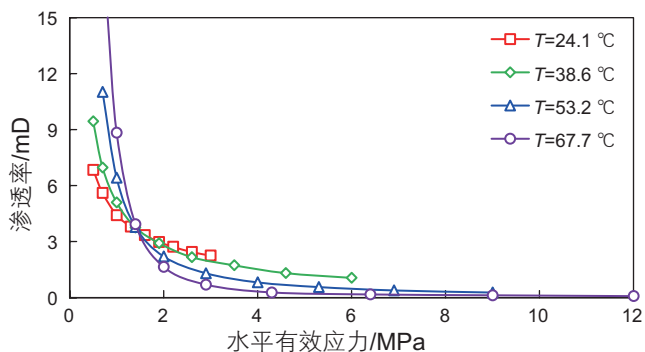


图7 不同温度下4#煤层煤岩渗透率随水平有效应力的变化
Fig. 7 Permeability versus effective horizontal stress with varying temperatures in coal seam 4#

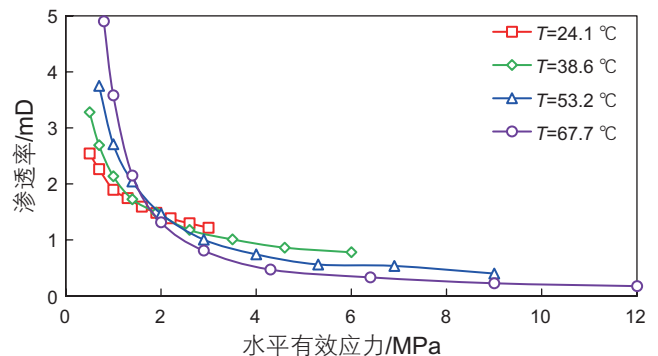


图8 不同温度下8#煤层煤岩渗透率随水平有效应力的变化
Fig. 8 Permeability versus effective horizontal stress with varying temperatures in coal seam 8#

显著。随水平有效应力的减弱,不同温度下煤岩渗透率随水平有效应力的变化曲线都将相交,相交时热膨胀效应引起的渗透率降低正好被基质收缩效应引起的渗透率改善所抵消,对应的水平有效应力称为临界水平有效应力。不同温度下4#煤层样品的临界水平有效应力为1.2~1.9 MPa,而8#煤层样品的曲线在1.8~2.5 MPa水平有效应力范围内发生反转。水平有效应力进一步降低后,此时煤岩所受束缚较小,温度变化引起的基质收缩比热膨胀更显著,表现为裂隙的开启和渗透率的改善。一旦储层压实效应太弱,将无法抑制温度增加引起的煤岩整体向外膨胀,此时裂隙膨胀速度反而超过基质,与占据主导的基质收缩效应一同促进裂隙的开启和渗透率的改善。

总体而言,在不考虑煤岩力学性质差异的情况下,煤层深度越深,其原始渗透率越低,但渗透率恢复速度越快。从煤层气开发的角度来说,开发浅煤层更快收益,而深煤层更具开发潜力。

4 讨论

根据量纲和谐理论,对于一个含有 m 个变量的物理问题,若其中有 n 个变量相互独立,这些变量可重新构造造成 $(m-n)$ 个无量纲关系,所构造的无量纲关系仍能客观真实地反映该物理问题。

对于流体在煤层中的流动性(渗透率 k)来说,其影响因素主要包括:煤岩性质(煤岩密度 ρ_c 、裂隙体积压缩系数 C_f 和热膨胀系数 C_θ),流体性质(黏度 μ)和煤层条件(地温梯度和有效应力 σ_c)。并且这些影响因素都可通过质量 M 、时间 T 、温度 θ 和长度 L 这4个基本量纲进行描述。

$$[k] = L^2, [\sigma_c] = MT^{-2}L^{-1}, \left[\frac{\partial\theta}{\partial x}\right] = \theta L^{-1}, [C_\theta] = \theta^{-1}, \quad (1)$$

$$[C_f] = M^{-1}T^2L, [\mu] = MT^{-1}L^{-1}, [\rho_c] = ML^{-3}$$

消去质量量纲可得:

$$[k] = L^2, \left[\frac{\sigma_c}{\rho_c}\right] = T^{-2}L^2, \left[\frac{\partial\theta}{\partial x}\right] = \theta L^{-1}, [C_\theta] = \theta^{-1} \quad (2)$$

$$[C_f \rho_c] = T^2L^2, \left[\frac{\mu}{\rho_c}\right] = T^2L^2$$

消去时间量纲可得:

$$[k] = L^2, \left[\frac{\sigma_c \rho_c}{\mu^2}\right] = L^2, \left[\frac{\partial\theta}{\partial x}\right] = \theta L^{-1}, [C_\theta] = \theta^{-1}, \left[\frac{C_f \mu^2}{\rho_c}\right] = L^2 \quad (3)$$

消去温度量纲可得:

$$[k] = L^2, \left[\frac{\sigma_c \rho_c}{\mu^2}\right] = L^2, \left[\frac{\partial\theta}{\partial x} C_\theta\right] = L^{-1}, \left[\frac{C_f \mu^2}{\rho_c}\right] = L^2 \quad (4)$$

消去长度量纲,最终可将渗透率的各种影响因素简化为3个无量纲关系式:

$$D_1 = \left[k \frac{\sigma_c \rho_c}{\mu^2}\right], D_2 = \left[k \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^2 C_\theta^2\right], D_3 = \left[k \frac{\rho_c}{C_f \mu^2}\right] \quad (5)$$

其中, D_1 反映了不考虑温度的条件下,应力变化对煤岩渗透率的影响,无量纲; D_2 反映了不考虑应力载荷的条件下,温度变化对煤岩渗透率的影响,无量纲; D_3 反映了不考虑温度和应力载荷的条件下,煤岩裂隙性质对煤岩渗透率的影响,无量纲。

本研究使用非线性回归模型来拟合各煤层的原始渗透率表达式。

$$D_1 = C_1 D_2^{C_2} D_3^{C_3} \quad (6)$$

其中, C_1 、 C_2 、 C_3 为回归分析时所用到的3个拟合系数,无量纲。

对上式两边同时取对数,将非线性方程线性化。

$$\ln(D_1) = \ln(C_1) + C_2 \ln(D_2) + C_3 \ln(D_3) \quad (7)$$

将实验过程中4#煤层煤心施加的应力与温度载荷、测试流体的黏度、测试样品的密度、裂隙体积压缩系数、热膨胀系数和测得的渗透率数据代入式(7)可拟合得到3个系数。

$$C_1 = 0.0001, C_2 = -0.5206, C_3 = 0.7842 \quad (8)$$

类似地,将8#煤层煤心的相关数据代入式(7)。

$$C_1 = 2.3832 \times 10^{-11}, C_2 = -0.6090, C_3 = 0.1866 \quad (9)$$

将上述拟合系数代入式(6)可得这两个煤层的原始渗透率表达式。

$$k^{0.7364} = 0.0001 \sigma_c^{-1} \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^{-1.0412} C_\theta^{-1.0412} \mu^{0.4316} \rho_c^{-0.2158} C_f^{-0.7842} \quad (10)$$

$$k^{1.4224} = 2.3832 \times 10^{-11} \sigma_c^{-1} \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^{-1.2180} C_\theta^{-1.2180} \mu^{1.6268} \rho_c^{-0.8134} C_f^{-0.1866} \quad (11)$$

利用柳林地区4#煤层不同气井的试井渗透率数据^[15]对该渗透率表达式进行评价,这些井的埋深、储层压力、储层压力梯度和试井渗透率数据如表2所示。

将表2中的参数代入式(10),模型预测结果与试井渗透率的比较如图9和表2所示。可以观察到,G8井和G9井的两组渗透率预测值相对误差达216.67%和750.00%,这可能是由于以下原因造成的:G8井和G9井的煤层埋深为700 m左右,对应煤层温度为30℃左右;但在煤岩渗透率测量过程中,24.1~38.6℃范围内施加的有效应力较小;实验施加的有效应力与G8和G9井的不匹配可能是造成预测值相对误差太大的主要原因。另一方面,这两组试井渗透率值本身较小,容易放大预测值的相对误差。尽管如此,该地区不同井的渗透率整体预测结果与试井数据吻合良好,大多落于±30%误差线内,整体平均误差为28.53%。这意味

表2 柳林地区4#煤层不同井的埋深、储层压力、储层压力梯度和试井渗透率数据

Table 2 Coal burial depth, reservoir pressure, reservoir pressure gradient and well test permeability of No.4 coal seam in the Liulin area

井号	埋深/m	储层压力/MPa	压力梯度/(kPa·m ⁻¹)	试井渗透率/mD	预测结果/mD	绝对误差/mD	相对误差/%
G10	759.60	8.33	11.20	0.11	0.15	+0.04	36.36
G8	711.10	6.29	9.00	0.06	0.19	+0.13	216.67
G7	876.40	6.36	7.37	0.15	0.18	+0.03	20.00
G27	491.40	4.39	9.16	0.83	0.78	-0.05	6.02
G28	988.70	9.26	9.40	0.18	0.12	-0.06	33.33
G16	475.30	3.62	7.42	2.03	2.78	-0.75	36.95
G6	483.80	2.91	6.11	3.44	3.40	-0.04	1.16
G8	1043.90	7.85	7.74	1.39	1.41	+0.02	1.44
G9	722.20	6.93	9.76	0.02	0.17	+0.15	750.00
G4	576.25	2.58	4.57	0.64	0.40	-0.24	37.50
G15	568.55	5.07	9.16	0.16	0.21	+0.05	31.25
G17	871.80	7.85	9.18	1.39	1.51	+0.12	8.63

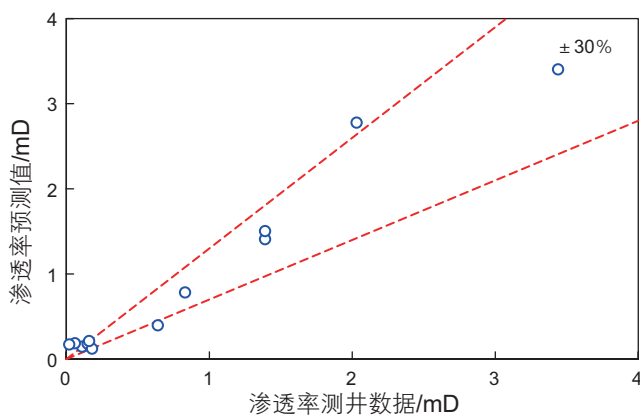


图9 鄂尔多斯盆地东缘保德区块4#煤层渗透率预测与试井结果对比

Fig. 9 Permeability Predicted and Well Test Results for No. 4 Coal Seam, Baode Block, Eastern Ordos Basin

着该方法能够快速、有效预测不同深度/不同生产阶段煤层的渗透率变化。

5 结论

(1)煤岩的裂隙变形和渗透率变化是由储层压实、

基质收缩和热膨胀三种效应共同造成的，本质上取决于煤岩所受应力和温度载荷变化。

(2)煤岩渗透率随水平有效应力的降低近似呈指数增长。

(3)煤岩渗透率随温度的变化还取决于其所受应力载荷。当水平有效应力大于该临界值时，煤岩渗透率随温度的升高有所降低，但并不显著。当水平有效应力小于该临界值时，煤岩渗透率随温度的升高而增大，且水平有效应力越弱，渗透率增幅越显著。

(4)对于所研究的两个煤样，4#煤层样品在1.2~1.9 MPa水平有效应力范围内发生反转，8#煤层样品在1.8~2.5 MPa水平有效应力范围内发生反转。

(5)利用量纲分析法可将渗透率的多种影响因素简化为表征应力载荷、温度载荷和裂隙性质影响的3个无量纲关系，并结合实验研究结果，建立了鄂尔多斯盆地东缘主力产气煤层的原始渗透率表达式。模型预测结果与试井结果吻合良好，平均相对误差为28.53%。

参考文献

- [1] SEIDLE J. Fundamentals of coalbed methane reservoir engineering[M]. Tulsa: PennWell Corp, 2011.
- [2] ZENG Q S, WANG Z M. A new cleat volume compressibility determination method and the corresponding modification to coal permeability model[J]. Transport in Porous Media, 2017, 119(3): 689-706.
- [3] LAUBACH S E, MARRETT R A, OLSON J E, et al. Characteristics and origins of coal cleat: A review[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1-4): 175-207.

- [4] 曾泉树, 高清春, 汪志明. 煤岩吸附高压甲烷的实验与模型研究[J]. 石油科学通报, 2020, 5(1): 78–92. [ZENG Q, GAO Q, WANG Z. Experimental and modeling studies on high pressure methane adsorbed on coals. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(1): 78–92.]
- [5] 李靖, 李相方, 陈掌星, 等. 页岩储层束缚水影响下的气相渗透率模型[J]. 石油科学通报, 2018, 3(2): 167–182. [LI J, LI X, CHEN Z, et al. Permeability model for gas transport through shale nanopores with irreducible water saturation[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2018, 3(2): 167–182.]
- [6] PAN Z J, CONNELL L D. Modelling permeability for coal reservoirs: A review of analytical models and testing data[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 92(1): 1–44.
- [7] LIU J S, CHEN Z W, ELSWORTH D, et al. Interactions of multiple processes during CBM extraction: A critical review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 87(3–4): 175–189.
- [8] WANG G G X, ZHANG X D, WEI X R, et al. A review on transport of coal seam gas and its impact on coalbed methane recovery[J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2011, 5(2): 139–161.
- [9] MITRA A, HARPALANI S, LIU S M. Laboratory measurement and modeling of coal permeability with continued methane production: Part 1 – laboratory results[J]. *Fuel*, 2012, 94(1): 110–116.
- [10] PERERA M S A, RANJITH P G, CHOI S K, et al. Investigation of temperature effect on permeability of naturally fractured black coal for carbon dioxide movement: An experimental and numerical study[J]. *Fuel*, 2012, 94(1): 596–605.
- [11] WANG Z M, YANG G, ZHANG J. A new coal permeability prediction method based on experiment and dimension analysis[J]. *SPE Journal*, 2014, 19(3): 356–360.
- [12] DAI J X. Giant coal-derived gas fields and their gas sources in China[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2016.
- [13] 张守仁. 深煤层煤层气开发有效途径展望[J]. 中国煤层气, 2011, 8(4): 18–21. [ZHANG S R. Proposed effective development method for the deep coalbed methane[J]. *China Coalbed Methane*, 2011, 8(4): 18–21.]
- [14] LIU J L, LIU K Y, HUANG X. Effect of sedimentary heterogeneities on hydrocarbon accumulations in the Permian Shanxi Formation, Ordos Basin, China: Insight from an integrated stratigraphic forward and petroleum system modelling[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 412–431.
- [15] YANG Z, HE S, GUO X W, et al. Formation of low permeability reservoirs and gas accumulation process in the Daniudi Gas Field, Northeast Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 70: 222–236.
- [16] XIAO X M, ZHAO B Q, THU Z L, et al. Upper Paleozoic petroleum system, Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(8): 945–963.
- [17] XU H, TANG D Z, TANG S H, et al. Geologic and hydrological controls on coal reservoir water production in marine coal-bearing strata: A case study of the Carboniferous Taiyuan Formation in the Liulin Area, Eastern Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 59: 517–526.
- [18] 汪志明, 王小秋, 杨刚, 等. 一种煤岩动态渗透率检测方法及装置[P]. 中国专利: ZL 2014 1 0806361.5, 2017. [WANG Z M, WANG X Q, YANG G, et al. A dynamic coal permeability testing method and apparatus[P]. Patent: ZL 2014 1 0806361.5, 2017.]
- [19] 曾泉树. 深煤层产气机理实验与模型研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017. [ZENG Q. Experimental and Modeling Studies on Coalbed Methane Recovery Mechanism in Deep Coal Seams[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2017.]
- [20] 李毅巍. 鄂东盆地煤岩渗透率敏感性实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. [LI Y. Experiment Study on Sensibility of Coalbed Permeability for Eastern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2016.]

(责任编辑 李世远 编辑 马桂霞)