

初应力作用下孔隙介质升温时渗透率变化规律

孙可明, 辛利伟, 张树翠

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘要:为研究不同地应力作用下的油气储层热采过程中渗透率的变化规律,利用自主研发的热流固三场耦合渗流试验系统,选用难被孔隙介质吸附的氦气作为渗流气体,并考虑氦气黏度随温度和压强的变化,消除孔隙介质对渗流气体的吸附和气体黏度变化对渗透试验的影响,开展不同初始应力条件下煤岩试件升温渗透试验。结果表明:孔隙介质渗透率随温度升高先增大后减小,呈非单调非线性变化规律,并存在与初始有效应力有关的拐点温度,这是由于在拐点温度之前,温度应力小于初始有效应力,固体骨架向外膨胀,孔隙空间增大,渗透率增大,超过拐点温度后,温度应力大于初始有效应力,固体骨架向孔隙内膨胀挤占孔隙空间,渗透率降低;渗透率变化拐点温度随初始体积应力的增大而减小,温度应力升高速率随初始体积应力增加而增大。

关键词:温度应力; 孔隙介质; 渗透率; 初始地应力; 热流固耦合

中图分类号: TU 45 **文献标志码:** A

引用格式:孙可明,辛利伟,张树翠. 初应力作用下孔隙介质升温时渗透率变化规律[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(3):138-142.

SUN Keming, XIN Liwei, ZHANG Shucui. Permeability variation law of porous media during heating process under effect of initial geostress[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(3):138-142.

Permeability variation law of porous media during heating process under effect of initial geostress

SUN Keming, XIN Liwei, ZHANG Shucui

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To reveal the rule of permeability variation during thermal recovery of oil and gas reservoirs under different ground stresses, a thermo-hydro-mechanical coupled experimental system was developed, and non-adsorbed helium was used in the experiments. The change of helium gas viscosity with temperature and pressure was considered to eliminate the influences on the infiltration experiments. A series of infiltration experiments were conducted for coal and sandstone under different temperature conditions and different initial stresses. The results indicate that with the increase of temperature, the permeability of porous medium increases firstly, and then decreases in the form of nonlinearity and non-monotone. There is a temperature of inflection point related with the initial effective stress. The mechanism is described as the following: when temperature is lower than the temperature of inflection point, temperature stress is less than the initial effective stress, pore space increases because of the outward expansion of solid skeleton, so the permeability will increase. When temperature is higher than the temperature of inflection point, temperature stress is bigger than the initial effective stress, pore space decreases because of the inward expansion of solid skeleton. In addition, the temperature of permeability variation inflection point decreases with the increase of initial volume stress, the increasing rate of temperature stress is higher when the size of the initial volume stress is bigger.

Keywords: temperature stress; porous media; permeability; initial geostress; thermo-fluid-solid coupling

在油气资源开采、地热开发利用及核废料地下处置等工程中,储层的地下储层处于不同的初始地应力环境,渗透率不仅受地应力等天然储层环境影响而且与温度改变引起的温度应力密切相关。早在20世纪60年代,Somerton等^[1]对温度作用下的岩石渗透率变化情况进行了研究。Randolph等^[2-3]分析了有效应力对岩石渗透率的影响规律。杨建平^[4]在应力-温度对低渗透介质渗透率影响研究中得到温度升高、渗透率降低的结论;Josipa等^[5-8]研究得出相反的结论,认为温度升高,孔隙介质渗透能力提高;袁梅等^[9]在型煤渗透率随温度和有效应力变化的试验研究中得到型煤渗透率随温度的升高而减小的规律;梁冰等^[10]研究了岩石渗透率与温度的关系;胡耀青等^[11]、林日亿等^[12]研究认为:温度对渗透率的影响在不同的温度应力条件下有不同的变化规律。贺玉龙等^[13-14]研究中关于温度对多孔介质的渗透性影响规律也存在相反的结论。由此可见,目前关于升温过程中孔隙介质渗透率的变化规律尚没有形成统一的认识。笔者为消除因孔隙介质对气体吸附等非渗流因素的影响和温度变化对渗流流体黏度等的影响,利用难吸附氦气作为渗流气体进行不同初应力环境下孔隙介质升温过程中渗透率变化规律试验研究。

1 不同初应力下孔隙介质渗流试验

1.1 非等温渗透率计算

氦气通过试件可认为是单相牛顿流体通过孔隙介质的运动,在渗流微段内符合Darcy定律,其等温渗流渗透率计算公式为

$$Q = -\frac{kA dp}{\mu dx} \quad (1)$$

式中, k 为试件渗透率, m^2 ; A 为试件截面积, m^2 ; μ 为流体黏度, $Pa \cdot s$; Q 为横截面积流量, m^3/s ; dp/dx 为试件 dx 微段内的流体压力梯度, Pa/m 。

当流体是可压缩的气体时,由于气体的体积会随着压力的不同而改变,当压力变化时,气体的体积和流量必然随之变化。在温度不变的条件下,根据波义耳—马利奥特定律,可以得出:

$$pQt = p_2 Q_2 t \quad (2)$$

式中, p 和 p_2 分别为试件某截面和出口端的气体压力, Pa ; Q_2 为出口端气体流量, m^3/s ; t 为气体流动时间, s 。

将式(2)代入式(1)中可得

$$kA p dp = -\mu p_2 Q_2 dx \quad (3)$$

对式(3)在试件两端积分,可得

$$kA \int_{p_1}^{p_2} p dp = -\mu p_2 Q_2 \int_0^L dx \quad (4)$$

式中, p_1 为气体的入口压力, Pa ; L 为试件长度, m 。

可得出气体的渗透率为

$$k = \frac{2p_2 L \mu Q_2}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (5)$$

根据非等温渗流试验,气体的黏度和体积受温度和压力的影响,气体状态方程为

$$\frac{pQ}{T} = \frac{p_2 Q_2}{T_2} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中,得到非等温渗透率为

$$k = \frac{2pL\mu_{(p,T)}QT_2}{A(p_1^2 - p_2^2)T} \quad (7)$$

式中, T 、 T_2 分别为升温前、升温后热力学温度, K ; $\mu_{(p,T)}$ 为与温压有关的氦气动力黏度, $Pa \cdot s$ 。

利用式(7)计算渗透率时,代入相应温压条件下的黏度,消除黏度状态参量随温压变化对渗透试验的影响。

压力对氦气黏度影响很小,可以忽略不计^[15],氦气黏度随温度变化规律可表示为

$$\mu = 10^{-7} (A + B_1 T + B_2 T^2 + B_3 T^3 + B_4 T^4 + B_5 T^5 + B_6 T^6 + B_7 T^7) \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= 8.30, B_1 = 1.43098, B_2 = -9.35 \times 10^{-3}, \\ B_3 &= 5.6546 \times 10^{-5}, B_4 = -2.05589 \times 10^{-7}, \\ B_5 &= 4.21961 \times 10^{-10}, B_6 = -4.48134 \times 10^{-13}, \\ B_7 &= 1.90674 \times 10^{-16}. \end{aligned}$$

黏度随温度的变化曲线如图1所示。

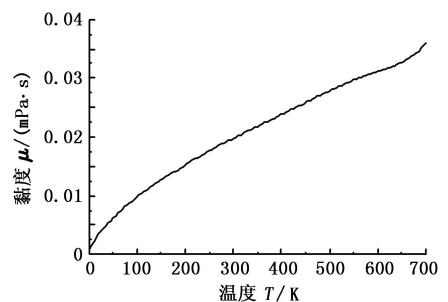


图1 氦气黏度随温度变化曲线

Fig. 1 Relationship between viscosity of Helium gas and temperature

受载试件的有效体积应力为

$$\sigma_\alpha = \Theta - \frac{1}{2}(p_1 + p_2) \quad (9)$$

式中, Θ 为体积应力, MPa ; σ_α 为有效体积应力, MPa 。

由于在同一次试验中孔隙加载压力不变,所以温度变化产生的体积应力为

$$\sigma_{\Delta T} = \sigma_{\alpha T} - \sigma_{\alpha}$$

式中, $\sigma_{\Delta T}$ 为温度体积应力, MPa; $\sigma_{\alpha T}$ 为温度变化后的有效体积应力, MPa。

1.2 试件制作

为了便于多组试件试验结果对比分析和消除天然孔隙介质试件非均质性造成的渗透率差异,试验过程中使用的是 0.18 ~ 0.25 mm 的煤粉在 150 MPa 成型压力条件下压制的 $\Phi 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的圆柱形试件,试件质地均匀,具有平均意义上孔隙介质渗流性质,能够很好地反映渗透率与其影响因素的关系。为得到孔隙介质的渗透率受温度应力影响的一般性规律,制作了型煤试件、砂岩岩心试件如图 2 所示。



图 2 型煤和岩心试件

Fig. 2 Briquette and rock core specimens

1.3 测试系统和试验方案

本次试验所使用的装置是自主研发的热流固三场耦合渗流试验系统。由高压气瓶和压力釜组成的注气系统,热电偶、数字温控仪和加热带组成的温度控制系统,压力泵和蓄能器等组成的应力加载系统,质量流量计和流量积算仪组成的流量监测系统组成,试验装置示意图如图 3 所示。

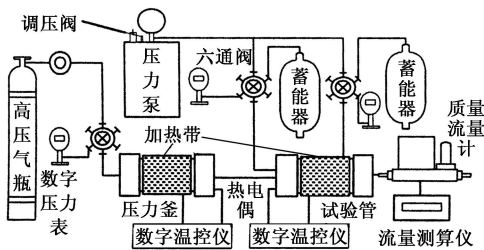


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Sketch of experiment facilities

试验方案如下:用安全无毒且煤对其难吸附的氦气作为渗透气体。在静水应力条件下按照初始有效体积应力不同设定 4 种工况,分别为 10.0、13.3、16.7、20.0 MPa。对应这 4 种工况温度都从 293.0 K 以 5.0 K 为梯度逐步升高到 313.0 K,根据试验系统情况和试验目的将孔隙压控制在 1.0 MPa,分别监测每一个测点的轴压、围压、流速,并做好记录。

1.4 试验过程

(1)将压好的试件封装在两个压头之间,与压头形成整体,加装垫圈并压紧在试验罐中。

(2)试验装置气密性的检查。安装完成后,加载轴压、围压和孔隙压达到预定值,静置 24 h,检查仪表示数,若无变化则密闭性良好。

(3)用真空泵对试件抽气 12 h,抽去其中的杂质气体。抽气完毕后,关闭排气阀,打开注气系统。

(4)孔隙压力稳定后,开始对试验罐和注气压力釜缓慢加热,到达预定温度后稳定 1 h,同时调整围压和轴压,使得温度、轴压、围压和注气压力都达到预定值,关闭轴压和围压的平衡器,打开排气口。

(5)稳定一段时间,待示数稳定方可记录流速、温度、轴压、围压、注气压力。

(6)调整温度控制器,使注气压力釜和试验罐平稳升温,梯度控制在 5.0 K。调整注气压力,控制数值在预定值。

(7)重复第(5)、第(6)步。

2 结果分析

将试验数据进行整理,并代入式(7)和式(10)计算处理。

2.1 渗透率随温度变化

试验测定结果如图 4 所示。可以看出:①在不同的初始体积应力条件下,试件渗透率随温度从 293 K 变化到 313 K 呈现非线性规律。在同一初始体积应力条件下,试件的渗透率随温度升高呈先上升后下降非单调变化规律。这是因为孔隙介质试件骨架随着温度的升高产生膨胀,在拐点温度之前,由于变温后的有效体积应力相对较小,膨胀变形向外扩展,孔隙空间增加,煤体中的渗流通道增大,宏观上表现为煤体渗透率随温度的升高而增大。随着温度的进一步升高,超过拐点温度继续增大,固体骨架的继续膨胀受到较大限制,孔隙介质骨架向孔隙内膨胀占据孔隙空间,阻塞渗流通道,宏观上表现为渗透率降低。②渗透率变化拐点温度随初始有效体积应力的增大而减小。原因是初始体积应力越大,温度应力随温度升高增加速度越快,所以应力达到向内向外膨胀转折值所需要的温度降低,即渗透率变化拐点温度降低。

2.2 温度应力变化

温度应力在相同孔隙压不同初始应力条件下随温度的变化如图 5 所示。

由试验结果分析可得:同一初始有效体积应力

情况下,温度应力随着温度的升高而增加;初始有效体积应力越大,温度应力增加的速率越大,原因是初

始有效体积应力越大,试件被压缩得越致密,束缚相同的变形,增加的温度应力就越大。

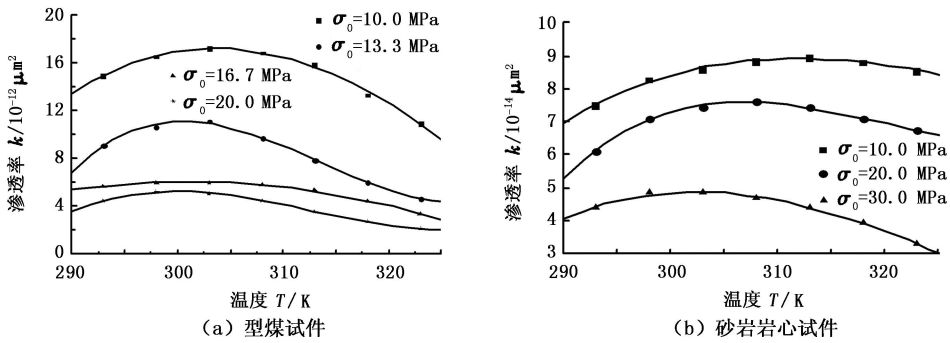


图 4 渗透率与温度关系
Fig. 4 Relationship between permeability and temperature

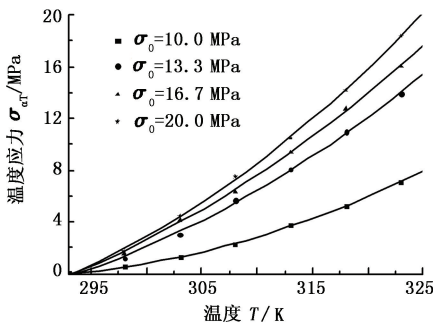


图 5 温度应力与温度的关系

Fig. 5 Relationship between temperature stress and temperature

2.3 渗透率随温度应力变化

渗透率随温度应力变化规律如图 6 所示。

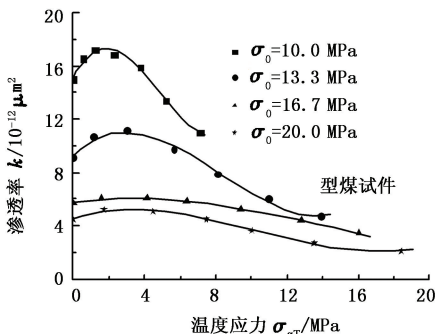


图 6 渗透率与温度应力关系

Fig. 6 Relationship between permeability and temperature stress

由图 6 可知:随着温度应力增大,试件的渗透率先增大后减小,并且趋于平缓。趋于平缓的原因是随着温度应力增大,试件被压缩得更加致密,从而增加相同的温度应力,固体骨架变形量相对减小,渗流通道改变不大,宏观表现为变化趋于平缓。

3 结论

(1)在不同的初始体积应力条件下,孔隙介质

渗透率随温度升高呈现非线性规律,在同一初始体积应力条件下,孔隙介质渗透率随温度升高表现先上升后下降的非单调规律,即存在拐点温度。小于拐点温度,渗透率处于上升阶段即有效体积应力较低,孔隙介质骨架向外膨胀,孔隙空间增大;大于拐点温度,渗透率处于下降阶段即有效体积应力较高,骨架向内膨胀,孔隙空间减小。

(2)渗透率变化拐点处温度随初始有效体积应力的增大而减小,与温度应力的升高速率有关。

(3)相同孔隙压条件下,随着温度应力的增大,试件的渗透率先增大后减小,随后趋于稳定。

(4)同一初始有效体积应力情况下,温度应力随着温度的升高而增加,初始有效体积应力越大,孔隙介质越密实,升高相同的温度,温度应力增加越大,即温度应力增加的速率越大。

参考文献:

- [1] SOMERTONW H, GUPTAVS. Role of fluxing agents in thermal alteration of sandstones[J]. Journal of Petroleum Technology, 1965, 35(4): 585-588.
- [2] RANDOLPH P L, SOEDER D J. Porosity and permeability of tight sands[R]. SPE 12836, 1984: 13-15.
- [3] MORROWNR, GATHERME, BUCKLEYJS. Effects of drying on absolute and relative permeability of low-permeability gas sands[R]. SPE 21880, 1991: 15-17.
- [4] 杨建平, 陈卫忠, 田宏铭, 等. 应力-温度对低渗透介质渗透率影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3587-3594.
YANG Jianping, CHEN Weizhong, TIAN Hongming, et al. Study of permeability evolutions in low permeability media under different stresses and temperatures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3587-3594.
- [5] JOSIPA B, JOSKO O, ROLF H. Permeability measure-

- ment on high strength concrete without and with polypropylene fibers at elevated temperatures using a new test setup[J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 53:104-111.
- [6] 杨胜来, 崔飞飞, 杨思松, 等. 煤层气渗流特征试验研究[J]. *中国煤层气*, 2005, 2(1):36-39.
YANG Shenglai, CUI Feifei, YANG Sisong, et al. Experimental study on mechanism of gas flow in coal bed [J]. *China Coalbed Methane*, 2005, 2(1):36-39.
- [7] 张渊, 赵阳升, 万志军, 等. 不同温度条件下孔隙压力对长石细砂岩渗透率影响试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(1):53-58.
ZHANG Yuan, ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, et al. Experimental study on effect of pore pressure on feldspar fine sandstone permeability under different temperatures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(1):53-58.
- [8] 孙可明, 任硕, 陈治宇, 等. 超临界 CO₂ 在低渗透煤层中渗流规律试验研究[J]. *实验力学*, 2013, 28(1):117-120.
SUN Keming, REN Shuo, CHEN Zhiyu, et al. Experimental study on seepage flow law of supercritical carbon dioxide in low permeability coal seam [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(1):117-120.
- [9] 袁梅, 王珍, 李波波, 等. 型煤渗透率随温度和有效应力变化的试验研究[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(4):8-11.
YUAN Mei, WANG Zhen, LI Bobo, et al. Experiments study on the briquette permeability with temperature and effective stress change [J]. *Safety in Coal Mines*, 2012, 43(4):8-11.
- [10] 梁冰, 高红梅, 兰永伟. 岩石渗透率与温度关系的理论分析和试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(12):2009-2012.
LIANG Bing, GAO Hongmei, LAN Yongwei. Theoretical analysis and experimental study on relation between rock permeability and temperature [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(12):2009-2012.
- [11] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋, 等. 温度对褐煤渗透特性影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(8):1585-1590.
HU Yaoqing, ZHAO Yangsheng, YANG Dong, et al. Experimental study of effect of temperature on permeability characteristics of lignite [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(8):1585-1590.
- [12] 林日亿, 李兆敏, 陆杏英, 等. 稠油热采出砂机制试验研究[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2011, 35(4):123-128.
LIN Riyi, LI Zhaomin, LU Xingying, et al. Experimental study on sand production mechanism of heavy oil thermal recovery [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(4):123-128.
- [13] 贺玉龙, 杨立中. 温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(14):2420-2427.
HE Yulong, YANG Lizhong. Mechanism of effects of temperature and effective stress on permeability of sandstone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(14):2420-2427.
- [14] 程瑞端, 陈海焱, 鲜学福, 等. 温度对煤样渗透系数影响的试验研究[J]. *煤炭工程师*, 1998(1):13-16.
CHENG Ruiduan, CHEN Haiyan, XIAN Xuefu, et al. Experiments on the affection of temperature on permeability coefficient of coal samples [J]. *Coal Engineer*, 1998(1):13-16.
- [15] 康志成, 兰建设, 丁立人. 超导磁体电流引线氦气流阻研究[J]. *超导技术*, 2006, 34(6):459-463.
KANG Zhicheng, LAN Jianshe, DING Liren. Research of the current lead's helium resistance of superconducting magnet [J]. *Superconductivity*, 2006, 34(6):459-463.

(编辑 沈玉英)