

引用格式:任建华,卢比,任韶然.改进的压力衰竭法测试页岩孔渗参数[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):49-55.

REN J H, LU B, REN S R. Improved pressure depletion method measure the porosity and permeability of shale[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 49-55.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.01.008

改进的压力衰竭法测试页岩孔渗参数

任建华¹, 卢比¹, 任韶然²

(1.中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏南京 210011;2.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580)

摘要:非常规油气藏(如页岩气、煤层气和致密砂岩油气等)的渗透率很低,采用常规方法不易进行测试和评价。因此,提出了一种改进的压力衰竭法,用来测试致密岩样的渗透率和孔隙度,其原理是采用一较小体积的气源容器,在岩样一端施加一个较高的压力,测试系统压力的衰竭过程,通过不同压力和时间内的衰减压差,计算岩心的渗透率和孔隙度。对测试原理进行了分析,并给出孔隙度和渗透率计算模型,同时测试分析典型致密页岩岩样的压力衰竭规律,研究不同因素(气体组分、温度、围压和驱替压力)对压力衰竭规律和渗透率的影响。对一页岩岩样根据实验结果计算了不同测试条件下的渗透率值,计算结果表明,随着温度及围压的升高,渗透率均降低,表明温度和围压对渗透率测量结果有重要的影响。渗透率实验测量结果与现场测试结果对比,两者数量级保持一致,表明实验方法可靠。

关键词:致密岩石;渗透率;孔隙度;压力衰竭法;影响因素

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Improved pressure depletion method measure the porosity and permeability of shale

REN Jianhua¹, LU Bi¹, REN Shaoran²

(1. Research Institute of Exploration and Development, Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210011, China;
2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: The permeability of unconventional reservoirs is low, such as shale gas, coal-bed methane and tight gas. It is difficult to measure the permeability by the conventional method. Therefore, a method using the improved pressure depletion to measure the porosity and permeability of tight rock is proposed. The principle is to use a smaller volume gas container with a high pressure applied to one end of the rock sample and then record the process of pressure depletion. According to the variation of pressure with time, calculate the permeability and porosity of core. Therefore, the test principle is analyzed and the computational model for porosity and permeability is established, the pressure depletion rule of the typical compact shale rock samples is tested, and the effects of different factors (gas composition, temperature, confining pressure and displacement pressure) on pressure depletion and permeability are studied. The permeability values of a shale sample under different test conditions are calculated according to the experimental results. Permeability calculation results show that the permeability decreases with the increase of temperature or confining pressure, which prove that the temperature and confining pressure have important effects on permeability measurement results. Compared with the field test results, it is found that the permeability test results are consistent with it, indicating that the experimental method is reliable.

Key words: tight rock, permeability, porosity, pressure depletion method, influencing factors

储层岩石的渗透率是控制气体在储层中流动的重要参数,也是影响非常规气藏产能和开采效率的重要参数之一。准确估算气体地质储量对非常规气藏的勘探与开发具有重要的影响^[1-2],而气体有效孔

收稿日期:2019-06-17。

第一作者简介:任建华(1986—),男,博士,工程师,从事煤层气、页岩气开发。通讯地址:江苏省南京市鼓楼区热河南路37号华扬大厦,邮政编码:210011。E-mail:renjianhua126@126.com

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“彭水地区常压页岩气勘探开发示范工程”(2016ZX05061);中国石化“十条龙”重大科技攻关项目“南川复杂构造带页岩气勘探开发关键技术研究”(P19017-3)。

隙度是计算气体地质储量的重要参数之一。因此准确测得致密岩样的孔、渗参数可以为非常规资源的成功开发奠定基础。

致密岩样具有低孔、低渗或超低渗特性^[3-4],需要高压才能产生稳态流动,但流量太小不容易实现流量的精确测量^[5-6],因此使用常规的孔、渗测量方法比较困难。赵立翠等对各种方法的优缺点和影响因素进行对比分析,提出了当前测量过程中存在的问题和研究方向^[7]。目前常规测试方法和设备都不考虑压力、温度和地应力对渗透率和孔隙度的影响。实际上这些因素对孔、渗参数的影响很大,特别对于致密岩石,深部岩层的渗透率受原岩应力(包括孔隙压力)和温度影响较大^[8-12],同时气体组分对渗透率也有一定影响^[13]。

本文提出一种改进的压力衰竭法测试致密岩样的孔隙度和渗透率,利用简单的常规岩心驱替实验装置,测量高压气体通过岩心的压力衰竭规律,根据达西流动或非达西流动方程及高压PVT方程,分析计算岩心的渗透率和孔隙度。描述了实验方法和测试原理,并测试分析了不同岩样(煤、致密砂岩、页岩)的压力衰竭规律,及其围压、驱替压力、温度以及气体组分等因素对典型页岩岩样渗透率的影响。

1 实验装置和方法

1.1 实验装置

图1所示为压力衰竭法测试岩心孔渗特性的实验装置,与简单的岩心驱替实验类似,主要由岩心夹持器、回压阀、高压气源容器、压力和温度测量系统等组成。其关键部件为一高压小容器(容积10~30 mL)作为气源,能较容易测得压力通过岩心的衰竭变化

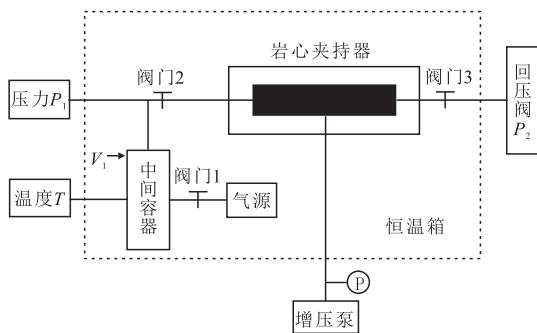


图1 压力衰竭法实验装置

Fig. 1 Experimental device for pressure depletion method

规律。本次实验高压小容器的容积为10 mL,实验测试的岩心为 $\phi 25$ mm标准规格,长度为30~70 mm。

1.2 实验方法

实验流程如图1所示,岩心夹持器置于恒温箱内,用水通过夹持岩心的胶套加围压,实验过程中,岩心所受围压一般高于实验压力2~3 MPa。压力衰竭测试的实验方法和步骤如下:

1) 实验开始之前首先对气密性进行监测,关闭阀门3,打开阀门1充入气体,然后关闭阀门1,进行测试系统压力监测,若1 h以后压力降幅小于0.01 MPa,表明气密性满足实验要求,可以开展实验测试。

2) 抽真空:关闭阀门1,打开阀门2、3,将高压小容器、岩心及管路抽真空,然后关闭阀门3。

3) 高压小容器充气:关闭阀门2,打开阀门1,给高压小容器充气至实验所需的初始压力(P_1),然后关闭阀门1。

4) 压力和温度控制:因为需要通过气体状态方程计算气体体积和压力的变化规律,实验过程中维持压力和温度平衡非常重要。所有实验都在恒温条件下进行,并给予足够时间,使系统压力达到平衡,记录恒温后的系统压力值。

5) 岩心孔隙体积测量:打开阀门2,使气体充满管线及岩心,待压力稳定后,记录系统的压力值(此时 $P_1=P_1'$),岩心的孔隙体积可通过气体的充入量计算(考虑管线体积及真空度的影响,具体计算方法见测试原理部分)。

6) 压力衰竭曲线测试:打开阀门3,测试高压小容器压力(P_1)随时间的衰减。致密岩心实验过程中,通常把回压阀压力设为大气压,即 $P_2=0.1$ MPa, P_1 随时间的变化即为压力衰竭曲线。

2 测试原理和计算方法

2.1 岩心孔隙度的测试

假设高压小容器出口阀门2与阀门3之间的管线和阀门的总体积为 V_t ,岩心孔隙体积为 V_p , P_1 为高压小容器的初始压力, P_2 为充气平衡后的系统压力(见实验方法和步骤4),根据高压气体状态方程以及质量守恒可以得到:

$$P_1 V_1 = Z_1 n_1 R T_1 \quad (1)$$

$$P_1' (V_1 + V_t + V_p) = Z_2 n_2 R T_2 \quad (2)$$

岩心充气过程中保持恒温且质量守恒, $T_1=T_2$, $n_1=n_2$,即:

$$\frac{P_1 V_1}{Z_1} = \frac{P_1'(V_1 + V_r + V_p)}{Z_2} \quad (3)$$

$$V_p = \frac{Z_2 P_1 V_1}{Z_1 P_1'} - V_r - V_1$$

岩样孔隙度:

$$\phi = \frac{V_p}{V_r} = \frac{\frac{Z_2 P_1 V_1}{Z_1 P_1'} - V_r - V_1}{V_r} \quad (4)$$

式中: V_r 为岩心体积, m^3 ; V_1 为阀门1与阀门2之间的总体积, m^3 ; n_1 和 n_2 为气体的物质的量, mol ; R 为气体常数, $J/(mol \cdot K)$; T_1 和 T_2 为实验系统测试压力平衡前后的温度, K ; P_1' 为测量孔隙度时测量系统稳定压力, MPa ; Z_1 和 Z_2 为气体的压缩因子,可以通过PVT软件计算或采用文献数据^[14-15]; 气体黏度可以通过NIST webbook (<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>)或经验公式计算得到。本次实验采用 N_2 和 CH_4 ,根据WinProp相态软件计算回归得气体在不同压力、温度条件下压缩因子以及黏度等参数。

2.2 岩心渗透率的测试

40 °C条件下, CH_4 在不同岩样中压力衰竭曲线如图2所示。 CH_4 在煤样岩心中的压力衰竭速率最快,而在页岩的压力衰竭最慢。所测试的煤岩微裂缝和孔隙发育较好,与致密砂岩和页岩相比,渗透率较大。而页岩较为致密,孔隙度和渗透率都很低,所以气体的渗流和压力衰竭很慢^[16]。显而易见,压力衰竭曲线可以有效地体现岩样的渗透率,即 $K_{煤} > K_{致密砂岩} > K_{页岩}$ 。

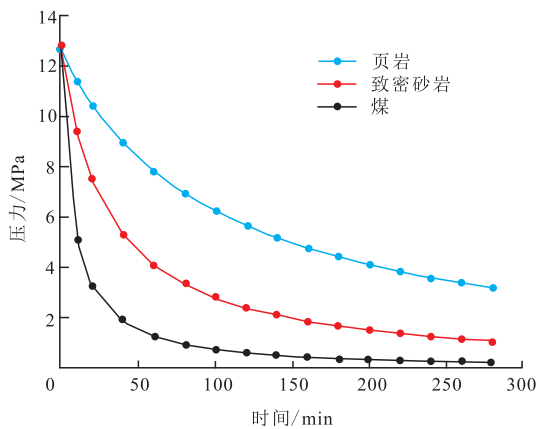


图2 CH_4 在不同岩石岩样中的压力衰竭曲线

Fig. 2 Pressure depletion curve of CH_4 in different rock samples

BRACE等在1968年首次提出TPD测试方法^[17]。相对于稳态测试方法而言,TPD法的主要优点为缩短了测试时间。实验过程中需要记录岩样两端压力随时间变化规律,而文中改进的压力衰竭法测试页岩渗透率只需要记录测试气体渗流过程中的入口端压力衰减规律,不需要测量岩心任意截面上的气体流量,也不需要测量出口端压力变化规律。因此,在实验过程中减少了需要测量的变化量,从而减小了因测量误差等人为因素对测试结果的影响,保证测量结果更加准确。选取某一合适的测试压力作为开始时间,即 $t_0=0$,取一定的时间间隔(研究的页岩岩样,选取1 s作为时间间隔)记录入口端压力变化规律,测试原理图如图3所示。岩样渗透率可通过公式(7)和公式(8)计算得到。

$$\frac{P(t)}{P_i} = \exp(-\alpha t) \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{K_g A}{\mu z L V_u} \quad (6)$$

渗透率计算公式:

$$K_g = \frac{\alpha \mu z L V_u}{A} \quad (7)$$

$$\alpha = -\frac{\ln \frac{P(t)}{P_i}}{t} \quad (8)$$

式中: K_g 为气测渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; $P(t)$ 为不同时刻入口压力, MPa ; P_i 为入口端初始压力, MPa ; μ 为气体黏度, $mPa \cdot s$; z 为气体压缩因子, MPa^{-1} ; L 为岩心长度, cm ; V_u 为岩心入口端体积, cm^3 ; A 为岩心横截面积, cm^2 ; α 为半对数坐标中 $P(t)/P_i$ 与时间 t 的对应斜率,如图4所示。

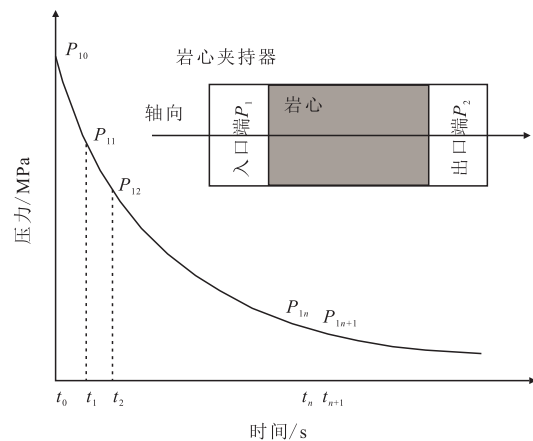


图3 渗透率计算模型

Fig. 3 Permeability calculation model

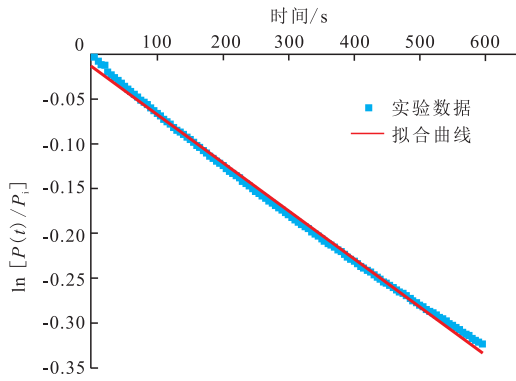


图4 无因次压力随时间变化曲线

Fig. 4 Time-variation curves of dimensionless pressure

3 页岩渗透率实验及影响因素分析

采用页岩岩心研究气体组分、温度、围压(地应力)及驱替压力对压力衰竭和岩心渗透率的影响。实验岩心来自渝东南地区龙马溪组页岩(SY-1井岩心)。

3.1 测试气体的影响

图5为不同气体在页岩(a)和煤岩(b)中的压力衰减规律。在40℃下,初始压力为13.5 MPa,甲烷与氮气在页岩中的压力衰减规律比较接近。在较高的压力时压力衰减较快,当压力降到4 MPa左右时压力衰减的速度逐渐变慢。由此可以定性分析得出,由甲烷测得的页岩渗透率比用氮气测量结果略高,这与测试气体分子量(N_2 28, CH_4 16)有关,分子量越高,该气体测得的渗透率越低。采用煤样时,实验结果与页岩的实验结果相反,在煤样中 N_2 的衰减速度远远高于 CH_4 在煤中的压力衰减速度,且气体在煤样中的衰减速度高于在页岩中的衰减速度,这也表明

实验用的煤岩渗透率大于页岩的渗透率。图5(b)表明在煤岩的渗透率测试过程中还需要考虑测试气体对煤岩的吸附作用^[18-19], CH_4 的吸附能力大于 N_2 ,而气体吸附在煤基质表面会引起煤岩基质的膨胀,导致裂缝间距缩小,渗透率降低。采用公式(7)计算得页岩渗透率为: $K_{CH_4}=2.4\times 10^{-8}\mu m^2$, $K_{N_2}=1.41\times 10^{-8}\mu m^2$;煤岩渗透率为: $K_{CH_4}=0.0347\times 10^{-3}\mu m^2$, $K_{N_2}=0.1025\times 10^{-3}\mu m^2$ 。

3.2 温度的影响

围压17.5 MPa时,不同温度下 CH_4 、 N_2 在页岩中的压力衰减规律(图6)受温度的影响较大。随着温度升高,岩心入口的压力衰减速度降低,高压时压力衰减的速度较快,低压时压力衰减的速度较慢,即测试气体的压力为气体在岩样中渗流的动力,是压力衰减规律的重要因素。渗透率计算结果表明,随着温度升高,实验测得渗透率值降低。产生上述结果的原因为:随着温度升高,页岩骨架膨胀,热应力小于围压有效应力,页岩只能向内部空间膨胀,孔隙体积减小,导致气体在岩心中的渗流阻力增大,故在恒定围压条件下,渗透率随温度的升高而降低^[20]。

3.3 围压的影响

围压的大小体现了地应力的影响,在油气生产过程中,伴随储层流体(油、气、水)的产出,储层孔隙压力降低,受上覆地层压实作用的影响,储层受到压缩,对储层孔隙结构具有一定的影响。薛永超等对微裂缝低渗透岩石渗透率随围压变化开展实验研究,明确受围压影响较大^[21]。因此,在孔隙度渗透率测量过程中,实验条件对测量结果具有重要的影响。在其他条件一定的情况下,分析围压对 N_2 在页岩

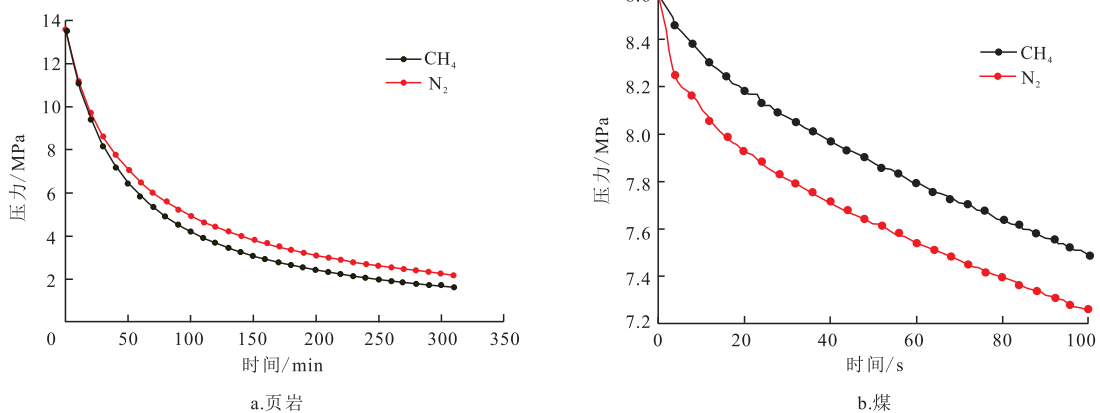


图5 不同气体在页岩和煤中的压力衰减曲线

Fig. 5 Pressure depletion curves of different gas in shale and coal

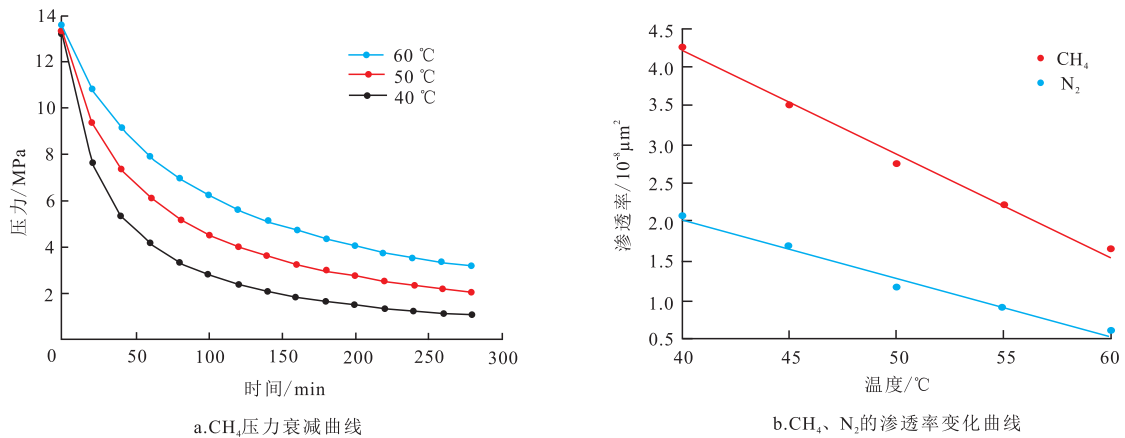


图6 不同温度下CH₄在页岩中的压力衰减规律及CH₄、N₂的渗透率变化规律

Fig. 6 Pressure depletion of CH₄ in shale at different temperatures and permeability variation rules of CH₄ and N₂

岩中压力衰减规律的影响,结果如图7所示。由图7可以看出,随着围压的增大,岩样渗透率降低,且渗透率与围压呈一定的指数关系。这主要是由于岩心在较高围压作用下,岩心中微裂缝被压实、孔隙减小,多孔介质的孔隙被压缩的程度增大,孔隙度减小程度更明显,导致气体渗流阻力增大,所以在较高围压下的压力衰减速度很慢,因此在渗透率测试过程中,要尽量模拟地层应力条件,才能获得较真实的孔、渗参数。

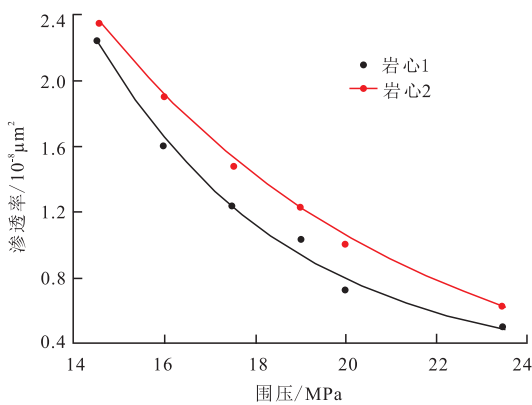


图7 不同围压下渗透率衰减规律

Fig. 7 Permeability depletion rules under different confining pressures

3.4 驱替压力的影响

驱替压力即气体在岩心中渗流的动力,驱替压力越高,则岩心两端的压差越大,驱替速度越大。图8所示为40 °C围压17.5 MPa,不同驱替压力下,CH₄在页岩中的衰减规律。实验结果可以看出,随着初始驱替压力的降低,压力衰减速度逐渐降低。在初

始阶段驱替压力越高,压力衰减越快;当压力降低到一定程度(3 MPa)时,压力衰减曲线基本重合,由此可认为驱替压力对压力衰减规律的影响主要体现在衰减初期。驱替压力的大小能够代表气藏在开发过程中储层能量的大小,储层能力越高即初始压力越高,气体渗流速度较大,气体更容易流入井筒产出。计算结果表明,渗透率测量结果与初始驱替压力具有良好的线性关系。因此在渗透率测试实验过程中,要尽可能保持初始压力相同才能够获得具有对比性的结果,并且在气藏生产过程中,尽可能维持气藏较高的压力有助于气体的产出,从而获得较高的采收率。

4 渗透率计算结果

用上述渗透率计算模型处理实验数据,计算得对应岩样的渗透率(表1)。表1所示为不同温度、围压条件下,CH₄、N₂测得的页岩岩样渗透率。由计算结果可以看出,随着温度的升高或围压的增大,测得的页岩渗透率均降低,但是降低幅度并不相同。随着温度的升高,CH₄测得的渗透率降低了61.7%,N₂测得的渗透率降低了71.3%;而随着围压的增大,

表1 不同实验条件下页岩渗透率测试结果

Table 1 Test results of shale permeability under different experimental conditions

测试气体	渗透率/10 ⁻³ μm ²					
	温度/°C(围压17.5 MPa)			围压/MPa(温度50 °C)		
	40	50	60	17.5	20.0	23.5
CH ₄	4.26	2.73	1.63	2.73	1.45	0.93
N ₂	2.11	1.24	0.61	1.24	0.73	0.49

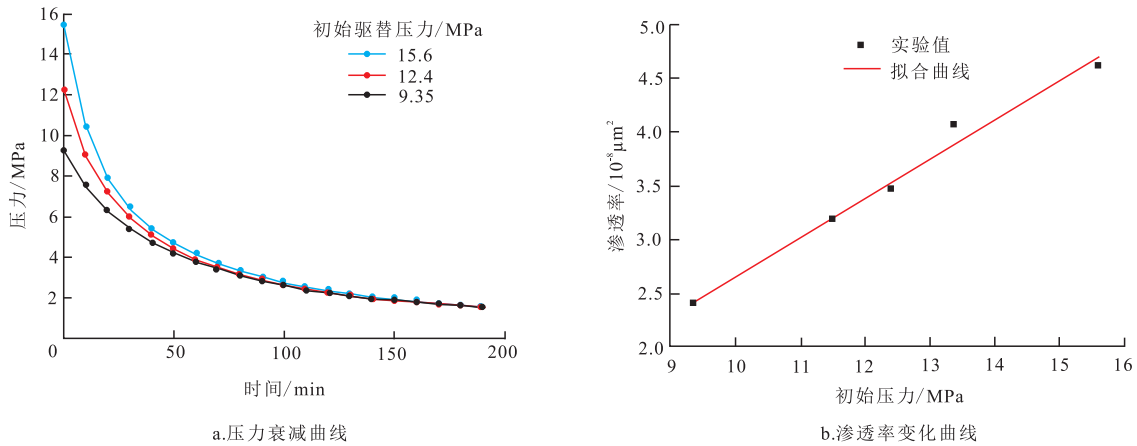


图8 驱替压力对衰减规律的影响

Fig. 8 Effect of displacement pressure on depletion rules

CH₄测得的渗透率降低了65.9%，N₂测得的渗透率降低了60.3%。由此可见，温度和围压对渗透率测量结果都有重要的影响。

5 现场渗透率测试对比

微注入压降测试在较短时间内达到径向流(图9)，可快速有效评价页岩渗透率^[22]。通过调研渝东南地区龙马溪组页岩微注入测试或压恢测试评价渗透率，其中SY-1井渗透率 $3.27 \times 10^{-8} \mu\text{m}^2$ ，现场测试结果与实验测试结果数量级保持一致，表明实验方法可靠。

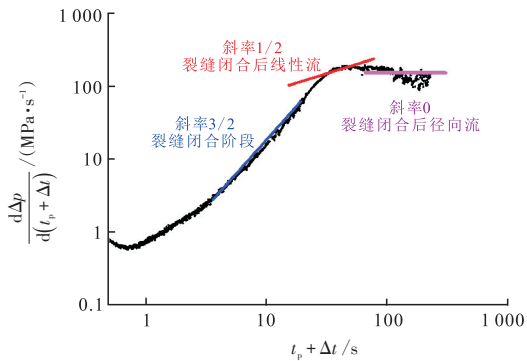


图9 SY-1井微压测试流动阶段诊断曲线

Fig. 9 Flow stage diagnostic curve of well-SY-1 by falloff diagnostic test

6 结论

1) 实验原理是采用一较小体积的气源容器，在岩样一端施加一较高的压力，测试系统压力的衰减过程，通过不同压力和时间内的衰减压差，计算岩心

的渗透率和孔隙度。改进的压力衰竭法只需要记录压力随时间的衰减规律，而不需要测量气体流量，避免了气体流量测量不准确引起的实验误差，测量结果与现场测试评价结果数量级一致，证明方法可靠。

2) 三种不同类型岩心实验结果表明，气体在煤、致密砂岩、页岩中压力衰减速度依次降低，间接表明三者渗透率依次减小。采用CH₄和N₂作为测试介质，压力衰减规律相同，但是气体分子量越小，渗透率测量值越大。渗透率随温度升高呈线性减小趋势，随着围压的增大，渗透率呈指数降低，初始压力越高，渗透率越大，且与初始驱替压力具有良好的线性关系。

3) 计算结果表明，恒定围压17.5 MPa，温度由40℃升至60℃，CH₄测得的渗透率降低了61.7%，N₂测得的渗透率降低了71.3%；恒定温度50℃，围压由17.5 MPa升至23.5 MPa，CH₄测得的渗透率降低了65.9%，N₂测得的渗透率降低了60.3%。

参考文献

- 王曦蒙, 刘洛夫, 汪洋, 等. 川南地区龙马溪组页岩高压甲烷等温吸附特征[J]. 天然气工业, 2019, 39(12): 32-39.
WANG X M, LIU L F, WANG Y, et al. High-pressure isothermal methane adsorption characteristic of Longmaxi Formation shale in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 32-39.
- 李凯, 孟志勇, 吉婧, 等. 四川盆地涪陵地区五峰—龙马溪组解吸气特征及影响因素分析[J]. 石油实验地质, 2018, 40(1): 90-96.
LI K, MENG Z Y, JI J, et al. Characteristics and influencing factors of desorption gas in Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 90-96.

- [3] 朱汉卿,贾爱林,位云生,等.低温氩气吸附实验在页岩储层微观孔隙结构表征中的应用[J].石油实验地质,2018,40(4):559-565.
ZHU H Q, JIA A L, WEI Y S, et al. Microscopic pore structure characteristics of shale reservoir based on low-temperature argon adsorption experiments[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 559-565.
- [4] 尹丛彬.页岩压裂裂缝渗透率的测试与分析[J].天然气工业,2018,38(3):60-68.
YIN C B. Test and analysis on the permeability of fractured fractures in shale reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 60-68.
- [5] 欧阳云丽,汪伟英,杨林江,等.特低渗透率的测定方法综述[J].石油化工应用,2012,31(5):1-3.
OUYANG Y L, WANG W Y, YANG L J, et al. Summarizing the measuring methods of ultra-low permeability[J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(5): 1-3.
- [6] 陈思宇,田华,柳少波,等.致密储层样品体积测量对孔隙度误差的影响[J].石油实验地质,2016,38(6):850-856.
CHEN S Y, TIAN H, LIU S B, et al. Influence of bulk volume measurement on porosity error in tight reservoir core plug analysis[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6): 850-856.
- [7] 赵立翠,王珊珊,高旺来,等.页岩储层渗透率测量方法研究进展[J].断块油气田,2013,20(6):763-767.
ZHAO L C, WANG S S, GAO W L, et al. Research progress in permeability measurement method of shale gas reservoir[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(6): 763-767.
- [8] 任世杰,刘大鹏.页岩应力敏感性分析研究[J].非常规油气,2019,6(1):51-54.
REN S J, LIU D P. Study of the shale stress sensitivity experimental[J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(1): 51-54.
- [9] 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 B, GAO H M, LAN Y W. Thermal analysis and experimental study on relation between rock permeability and temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2009-2012.
- [10] 刘均荣,秦积舜,吴晓东.温度对岩石渗透率影响的实验研究[J].石油大学学报,2001,25(4):51-53.
LIU J R, QIN J S, WU X D. Experimental study on relation between temperature and rock permeability[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001, 25(4): 51-53.
- [11] 贺玉龙,杨立中.温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机理研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2420-2427.
HE Y L, YANG L Z. Mechanism of effects of temperature and effective stress on permeability of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2420-2427.
- [12] 郝振良,马捷,王明育.热应力作用下的有效应力对多孔介质渗透系数的影响[J].水动力学研究与进展,2003,18(6):792-796.
HAO Z L, MA J, WANG M Y. A Influence of effective stress on the coefficient of permeability of porous medium under thermal stress[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(6): 792-796.
- [13] 秦积舜,李爱芬.油层物理学[M].东营:中国石油大学出版社,2006:128-133.
QIN J S, LI A F. Petrophysics[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 128-133.
- [14] ECONOMIDES M J, Martin T. Modern fracturing: Enhancing natural gas production[M]. Houston: ET Publishing, 2007: 35-36.
- [15] BAHADORI A, MOKHATAB S, TOWLER B F. Rapidly estimating natural gas compressibility factor[J]. Journal of Natural Gas Chemistry, 2007, 16(4): 349-353.
- [16] 任建华.煤层气井产能预测及提高产能方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2014.
REN J H. Productivity prediction and enhanced gas recovery methods for coalbed methane well[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [17] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(6): 2225-2236.
- [18] 李东,郝静远.变温变压下煤岩甲烷吸附变化量的研究——以陕西韩城下峪口煤为例[J].非常规油气,2017,4(2):8-12.
LI D, HAO J Y. Study on methane adsorption variation of coal under variable temperature and pressure—A case study of Xiayukou Coal in Hancheng, Shaanxi Province[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(2): 8-12.
- [19] 李东,郝静远,孙晨光,等.变温变压下页岩与煤岩吸附量变化的比较研究——以ALUM页岩与崔家沟7号煤为例[J].非常规油气,2018,5(1):61-65.
LI D, HAO J Y, SUN C G, et al. Comparison study of methane adsorption behavior between shale and coal seam under variation temperature and pressure—Taking ALUM Shale and Cuijiagou 7# Coal as examples[J]. Unconventional Oil & Gas, 2018, 5(1): 61-65.
- [20] 李志强,鲜学福,隆清明.不同温度应力条件下煤体渗透率实验研究[J].中国矿业大学学报,2009,38(4):523-527.
LI Z Q, XIAN X F, LONG Q M. Experiment study of coal permeability under different temperature and stress[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(4): 523-527.
- [21] 薛永超,程林松.微裂缝低渗透岩石渗透率随围压变化实验研究[J].石油实验地质,2007,29(1):108-110.
XUE Y C, CHENG L S. Experimental study on permeability variation with confining pressure in micro-fracture and low-permeability rock[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(1): 108-110.
- [22] 任建华.微注入压降测试在页岩气储层评价中的应用[J].科学技术与工程,2018,18(30):65-69.
REN J H. Application of pre-frac injection falloff diagnostic test in the evaluation of shale gas reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(30): 65-69.

(编辑 黄颖)