

文章编号: 1000-7598 (2013) 04-1009-08

致密储层渗透率测试的稳态与非稳态法对比研究

孙军昌¹, 杨正明^{1,2}, 郭和坤^{1,2}, 肖前华¹, 郝明祥², 徐 轩¹

(1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007; 2. 中国石油勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘 要: 渗透率是油气藏储层评价、产能计算及制定合理的开发方案所需关键参数之一。针对常规稳态法测试致密储层岩石渗透率效率低下、试验过程易受环境温度影响等缺点, 使用脉冲衰减渗透率测试仪对 39 块致密岩石稳态法克氏渗透率与非稳态脉冲衰减渗透率进行系统的对比研究, 分析岩样渗透率、试验操作方法及有效应力组合方式等因素对测试结果的影响。研究表明, 相同净围压条件下致密岩石脉冲渗透率小于克氏渗透率, 脉冲渗透率平均约为克氏渗透率的 47.26%, 岩样渗透率越小, 则两种渗透率之间的差别越大。误差分析表明, 脉冲渗透率试验初期岩样短时间承受的 9 MPa 高围压和其高围压、高孔隙压力组合的有效应力施加方式对脉冲渗透率测试结果具有一定程度的影响, 但仍无法完全解释两种渗透率的总体误差。数学拟合表明, 取自同一区块的露头砂岩岩样脉冲与克氏渗透率相对误差与脉冲渗透率具有较好地对数函数关系, 由数学推导获得该露头砂岩储层岩石脉冲渗透率与克氏渗透率的转换关系。

关 键 词: 渗透率; 致密储层; 稳态渗流; 非稳态渗流; 脉冲衰减法; 操作方法; 有效应力

中图分类号: TE 112.2

文献标识码: A

Comparative study of tight reservoir permeability using steady-state and unsteady-state methods

SUN Jun-chang¹, YANG Zheng-ming^{1,2}, GUO He-kun^{1,2}, XIAO Qian-hua¹, HAO Ming-xiang², XU Xuan¹

(1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, China;

2. Langfang Branch, Research Institute of China Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: Permeability is one of the most important parameters required for reservoir evaluation, well production calculation and developing a reasonable development program. Obtaining the accurate permeability is helpful for effectively exploiting tight petroleum reservoirs. Due to the shortcomings of conventional steady-state permeability measurement method such as long experimental process and easily affected by the environmental temperature, this paper has conducted comparative study of permeability of 39 block rocks of tight reservoir using both steady-state and unsteady-state techniques. Meanwhile, those factors which affecting experimental results accuracy have also analyzed including permeability, experimental operation method and the way of combination of effective stress. The experimental results show that the unsteady-state pulse transient decay technique consistently underestimates the steady-state Klinkenberg-corrected permeability. Pulse decay permeability is only about 47.26% of the steady-state permeability in average. The difference between the above two different kinds of permeability increase with the decrease of the rock samples permeability. Error analysis suggests that the high effective about 9 MPa loaded on the rock sample before the pulse decay permeability measurement and the combination of high confining stress and high pore pressure can induce a portion of experimental error, but still not fully explain the overall error between the pulse decay permeability and the steady-state Klinkenberg-corrected permeability. Finally, mathematical fitting result shows that the relative error and the pulse decay permeability has a good logarithm function.

Key words: permeability; tight reservoir; steady flow; unsteady flow; pulse decay technique; operation method; effective stress

1 引 言

渗透率是油气藏储层评价、产能计算及开发方

案制定所需的关键参数之一^[1], 在岩土工程建设如核废料地下处置、能源地下储气库建设等方面也具有重要的应用^[2], 获得准确的地层岩石渗透率

投稿日期: 2012-02-07

基金项目: 国家油气重大专项-特低渗透油藏有效开发技术项目资助 (No. 2011ZX05013-006); 中国石油股份有限公司重大专项-柴达木盆地难采储量有效动用技术攻关研究项目资助 (No. 2011E-0307)。

第一作者简介: 孙军昌, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事油气渗流力学研究。E-mail: jjsun1983@yahoo.com.cn

参数,对油气田开发方案制定及相关岩土工程建设有着至关重要的基础指导作用^[1-2]。

实验室常用的测试岩石渗透率的方法可分为稳态法和非稳态法^[1],渗流介质可以使用气体(如氮气、氦气)、水或煤油^[1-3]。由于用水进行渗透率测试时,水与岩石中的黏土矿物总会发生不同程度的物理化学反应^[1],不利于不同油田储层渗流物性对比^[1, 3],在石油工业和部分岩土工程领域多以气体作为渗流介质进行岩石渗透率测试^[1, 3]。由于气体在致密储层岩石低压渗流时存在滑脱效应,实验室采用常规稳态法测试的岩石渗透率大小是与驱替压力密切相关的^[1-2, 4]。用常规稳态法测试致密岩石渗透率时,一般需要进行不同孔隙压力(驱替压力)下多次测量以校正滑脱效应,通过 Klinkenberg 方程拟合,获得与测试压力无关的克氏渗透率 K_0 (也称为绝对渗透率)^[1-2, 4]。

对于致密储层岩石,克氏渗透率测试效率较低,试验过程易受环境温度影响,测试结果误差相对较大,相关行业标准推荐的稳态法渗透率测试一般要求岩样渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[1]。基于稳态法测试致密岩石渗透率的上述缺点,Brace 等^[5]于 1968 年提出了基于非稳态渗流理论的脉冲衰减法渗透率测试技术。与稳态法渗透率测试不同,脉冲渗透率的测试不需记录岩样出口流速和驱替压差,通过在测试岩样入口端施加一定的压力脉冲,记录该压力脉冲在岩样中的衰减数据,然后结合相应的理论公式计算渗透率^[5-15]。基于一维非稳态渗流理论分析及巧妙的仪器设计,使非稳态脉冲渗透率测试具有较高的测试效率,在超低渗泥岩盖层及致密油气藏储层渗透率测试中的应用越来越广泛^[5-15]。

由于脉冲渗透率测试技术应用高孔隙压力(平均孔隙压力约为 7 MPa),同时结合理论分析结果,其获得地脉冲渗透率理论上与相同净围压的克氏渗透率非常接近,此时滑脱效应对测试结果的影响可以忽略不计^[6-9]。但 Rushing 等^[9]、Carles 等^[10]先后对使用同样基于非稳态渗流理论的压力降落法测试,并对比了滑脱效应校正的渗透率与稳态法克氏渗透率,发现压力降落法测试的克氏渗透率均大于克氏渗透率,Carles 等认为目前还无法解释出现这种误差的原因^[9-10]。郭大立等^[12]对脉冲渗透率反演计算方法进行了理论研究,并与其自行研制的实验仪器进行了对比分析。李小春等^[11, 14]、Warpinski 等^[16]对非稳态脉冲渗透率测试理论、测试技术和试

验仪器进行了系统地研究,在原有脉冲渗透率测试技术基础上提出了新的变容压力脉冲渗透率测试技术,并设计了相应的试验测试仪器,重点研究和针对岩土工程建设中以水作为渗流介质测试岩石等多孔介质的渗透率。由于基础理论和试验操作方法等因素的差异,非稳态脉冲渗透率与稳态法克氏渗透率可能具有一定程度的差异,系统地研究非稳态脉冲衰减渗透率测试方法在致密储层岩石渗透率测试中的适用性,对于该项技术的正确使用具有重要的指导意义。

本文对不同渗透率大小的致密储层岩石非稳态脉冲渗透率与稳态法克氏渗透率进行了系统地对比研究,分析了岩样渗透率、试验操作方法及有效应力组合方式等因素对测试结果的影响。试验结果表明,脉冲渗透率小于相同净围压条件下的稳态法克氏渗透率,两种试验不同操作方法和有效应力组合方式的差异对试验结果具有一定程度的影响。

2 脉冲衰减法渗透率测试原理

与常规稳态法渗透率测试原理不同,脉冲衰减法是基于—维非稳态渗流理论,通过测试岩样—维非稳态渗流过程中孔隙压力随时间的衰减数据,并结合相应的数学模型,对渗流方程的精确解答和合适的误差控制简化,就可以获得测试岩样的脉冲渗透率计算模型和方法^[5-8]。

根据质量守恒原理及达西定律,不考虑重力作用时气体在岩样—维非稳态渗流的数学模型^[7]为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} &= \frac{c\mu\phi}{K} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \\ (0 < x < L, t > 0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $p(x,t)$ 为岩样孔隙压力; c 为岩样孔隙流体压缩系数; μ 为流体黏度; ϕ 为岩样孔隙度; K 为渗透率; L 为岩样长度; t 为脉冲衰减时间; V_1 、 V_2 分别为仪器上游和下游腔室容积。

脉冲衰减法渗透率测试前,首先使脉冲衰减前仪器腔室和岩样孔隙压力达到平衡状态,均等于下游腔室压力 $p_2(0)$ 。脉冲衰减开始后,分别连接岩样入口和出口的上游和下游腔室压力 p_1 和 p_2 将由于脉冲衰减的原因不断地发生变化。对应式(1)的初始条件和边界条件分别^[7]为

初始条件:

$$p(x,0) = p_2(0), (0 < x < L) \quad (2)$$

边界条件:

$$\left. \begin{aligned} p(0,t) &= p_1(t), (t \geq 0) \\ p(L,t) &= p_2(t), (t \geq 0) \\ \frac{dp_1}{dt} &= \frac{K}{c\mu\phi L} \frac{V_s}{V_1} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0}, (t \geq 0) \\ \frac{dp_2}{dt} &= \frac{K}{c\mu\phi L} \frac{V_s}{V_2} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=L}, (t \geq 0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(1)并结合初始条件和边界条件式(2)、(3)进行理论解析,即可获得压力衰减过程中岩样孔隙压力随时间的变化关系。显然,岩样入口的初始压力脉冲的衰减过程是与岩样渗透率密切相关的,渗透率越大,则脉冲衰减越快,渗透率越小,则脉冲衰减越慢,因此,式(1)获得的解析解包含了岩样渗透率的信息。通过相应的理论分析和仪器设计,在误差可控的范围内进行适当简化,即可获得根据试验数据计算岩样脉冲渗透率的数学模型^[7]:

$$K = \frac{c\mu\phi L^2 s}{f(a, b)} \quad (4)$$

式中: s 为试验测试的脉冲渗透率仪上、下游腔室压差 Δp 与时间 t 在单对数坐标图中的斜率; a 、 b 分别为测试岩样孔隙体积与脉冲渗透率仪上、下游腔室容积的比值,当 $a = b = 1$ 时, $f(a, b) = 1.71$ 。其余符号意义同前。

3 试验材料和方法

3.1 试验材料

试验选取长庆油田某区块 26 块特低渗露头砂岩岩样和大庆外围 13 块特低渗油藏砂岩岩样,表 1 为 39 块岩样常规物性资料。39 块岩样渗透率分布范围涵盖了低渗、特低渗及超低渗油藏储层,具有很好的代表性。

表 1 试验岩样常规物性资料

Table 1 Petrophysical properties of sandstone samples

地区	岩样组成		孔隙度 /%	克氏渗透率 /($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
	K_{∞} 分布范围/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	数量/块		
长庆露头砂岩	>1	4	16.27	1.731 0
	0.1~1.0	13	14.95	0.403 8
	0.01~0.1	5	11.90	0.052 5
	<0.01	4	2.80	0.005 9
大庆油藏砂岩	0.1~1.0	5	14.00	0.221 1
	0.01~0.1	6	9.82	0.044 0
	<0.01	2	3.66	0.004 7

3.2 试验方法和步骤

常规稳态法克氏渗透率测试是在连接有电子流

量计和高精度压力控制系统的试验仪上进行的,岩样入口压力调节系统安装有电子传感器,可精确显示入口压力的变化过程,电子传感器测量精度为 0.001 MPa,流量计测量范围为 0~600 mL/min,精度为 0.01 mL/min。

非稳态脉冲衰减渗透率测试在某商业脉冲衰减渗透率仪上进行。该仪器对传统脉冲渗透率仪器进行了适当改进,使得脉冲衰减前系统压力平衡所需的等待时间明显减小,提高了试验测试效率,适用于渗透率分布在 $10^{-5} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密岩石渗透率测量。运行该仪器需要高压气源和稳定的围压施加装置,气源提供压力不小于 7 MPa。本次试验中使用氮气瓶提供高压气源,围压由手动泵施加。

具体试验步骤和方法如下:

岩样制备:选取不同渗透率级别的露头砂岩和油藏砂岩岩芯,钻取直径约 2.5 cm、长约 5 cm 的柱塞岩样,将柱塞岩样两端切平、切齐,去掉柱塞表面有明显缺陷的岩样。

常规物性参数测量:测量岩样长度和直径后烘干至恒重,测量干重、气测孔隙度等常规物性参数。稳态法克氏渗透率测试按照岩样克氏渗透率测试行业标准《岩心分析方法》^[1],对岩样施加一定大小的围压后测量不同入口压力下的视渗透率。渗透率测试过程中始终保持岩样承受的净围压为 2 MPa。为了提高试验测试精度,克氏渗透率测量过程中均对每块岩样进行了不同入口压力下 8~15 个数据点的视渗透率测量,部分超低渗岩样测量点数增至 20 个以上,最后,根据 Klinkenberg 方程拟合求解克氏渗透率^[1]:

$$K_g = K_{\infty} (1 + b/p_m) \quad (5)$$

式中: K_g 为不同孔隙压力下测试的岩样视渗透率; K_{∞} 为克氏渗透率; p_m 为岩样平均孔隙压力; b 为滑脱因子。

脉冲渗透率测试:试验前 30 min 打开预热脉冲渗透率仪,检查密封性后将岩样放入夹持器,施加 9 MPa 围压,然后打开脉冲渗透率仪器相关阀门,施加约 7 MPa 孔隙压力,使岩样所承受的净围压为 2 MPa。按照仪器提示等待仪器上游腔室、岩样孔隙及下游腔室压力达到热平衡后,手动降低下游腔室压力约 70 kPa 形成初始衰减压力脉冲,自动测试压力衰减数据和计算给出脉冲衰减渗透率数值。

4 试验结果分析与讨论

4.1 试验结果分析

图 1 为 26 块露头及 13 块油藏岩样稳态法克氏

渗透率与脉冲渗透率对比结果, 图 2 为以克氏渗透率为基准计算的脉冲渗透率与克氏渗透率相对误差与脉冲渗透率的关系。在图 1 双对数坐标图中, 克氏渗透率跨越 3 个数量级的低渗、特低渗致密储层岩样, 相同净围压下稳态法克氏渗透率均明显大于脉冲渗透率。图 1(a)中, 露头砂岩克氏渗透率越小, 两种渗透率之间的误差越大, 如克氏渗透率分别为 $1.041 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.041 5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的露头岩样对应脉冲渗透率分别为 $0.612 5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.015 3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 以克氏渗透率为基准计算的相对误差分别为 41.34% 和 63.13%。图 1(b)中, 大庆外围特低渗油藏岩样克氏渗透率也明显大于脉冲渗透率, 但两种渗透率之间误差与脉冲渗透率之间的规律性比较差, 克氏渗透率分别为 $0.0617 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.005 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏岩样对应的脉冲渗透率分别为 $0.018 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.002 9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 以克氏渗透率为基准计算的两种渗透率相对误差分别为 70.50% 和 43.14%。

结合图 1、2 可见, 26 块露头砂岩脉冲与克氏渗透率相对误差与脉冲渗透率具有较好地指数函数关系, 两种渗透率相对误差随脉冲渗透率的增大而

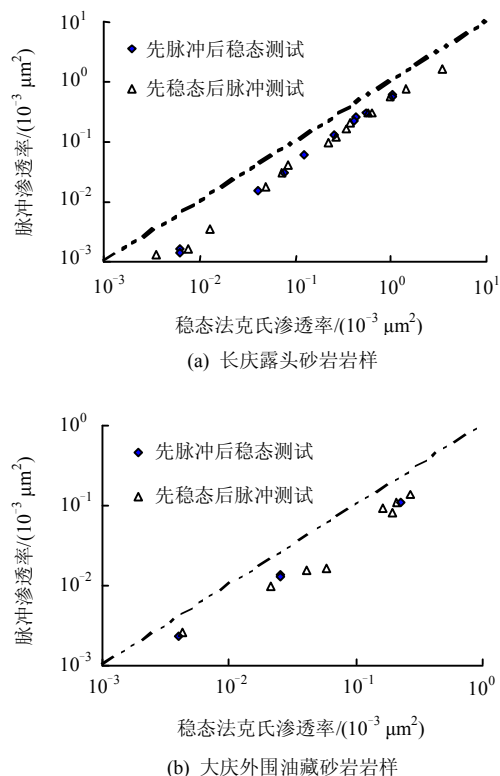


图 1 致密砂岩岩样常规稳态法克氏渗透率与脉冲渗透率对比

Fig.1 Comparison between conventional steady-state Klinkenberg-corrected permeability and pulse decay permeability

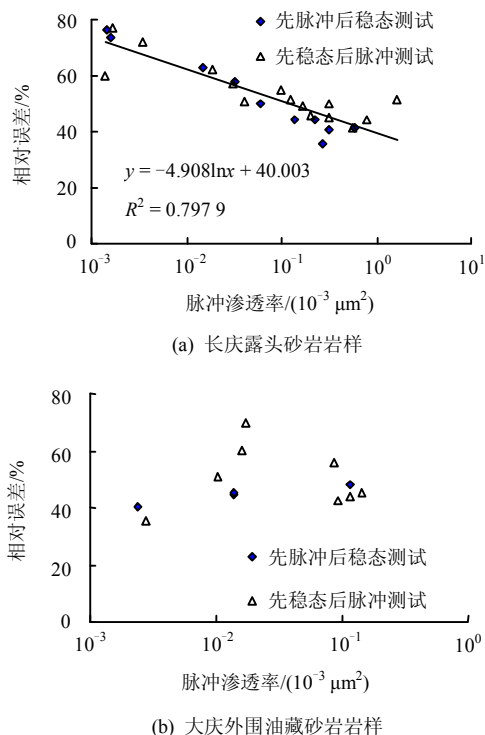


图 2 两种渗透率相对误差与脉冲渗透率的关系
Fig.2 Relationship between permeability relative error and pulse decay permeability

减小, 见图 2(a)。统计表明, 26 块露头砂岩克氏与脉冲渗透率相对误差分布在 35.41%~77.33%之间, 平均值为 53.13%。克氏渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 分布在 $0.1 \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.01 \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以及小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的 4、13、5 和 4 块露头岩样脉冲渗透率仅为克氏渗透率的 55.38%、54.02%、39.36% 和 28.14%。图 2(b)中, 大庆外围油藏砂岩脉冲与克氏渗透率相对误差与脉冲渗透率之间的相关性较差, 脉冲渗透率大于 $0.018 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时两种渗透率相对误差随脉冲渗透率的增大而减小, 脉冲渗透率小于 $0.018 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时两种渗透率相对误差随脉冲渗透率的增大而减小, 13 块油藏岩样脉冲与克氏渗透率相对误差平均值为 51.96%。由于试验研究的油藏岩样取自大庆外围不同区块, 而 26 块露头岩样取自同一区块, 由于不同区块储层特征及微观孔隙结构的差异, 可能是引起两种渗透率相对误差与脉冲渗透率之间关系具有明显的差别的主要原因。总体统计表明, 试验研究的 39 块露头及油藏岩样脉冲与克氏渗透率相对误差平均值为 52.74%, 脉冲渗透率平均约为稳态法克氏渗透率的 47.26%。

4.2 误差分析

根据脉冲衰减渗透率测试仪器技术参数及测试方法, 脉冲衰减前仪器上游和下游腔室及岩样孔隙空间均获得约 7 MPa 的气体压力, 在脉冲衰减过程

中系统平均孔隙压力基本保持不变,类似于常规稳态法气体渗透率测试过程中施加了约 7 MPa 的回压。基于上述设计思想及低渗岩石单相气体渗流理论,较高孔隙压力下致密岩石单相气体滑脱效应对气测渗透率的贡献很小,而当施加较小的回压及平均孔隙压力大于 5 MPa 后,致密岩石单相气体的滑脱效应可以忽略不计^[1-2]。同时,单相气体高速渗流实验研究表明,只有当驱替梯度大于 5.51 MPa/cm 时,渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的致密储层中才会出现对渗透率具有明显的惯性流^[4]。

根据多孔介质单相气体渗流理论及试验研究结果,使用高平均孔隙压力技术,并且在测试过程中,岩样两端的初始最高衰减压差仅约为 70 kPa 的脉冲衰减法渗透率测试技术获取的致密岩石渗透率与相同净围压条件下的稳态法克氏渗透率基本一致,或其误差在工程应用可接受的范围之内。但上述试验结果表明,脉冲与克氏渗透率却具有较为明显的差异,为进一步分析两种渗透率出现明显差异的原因,分别对两种渗透率测试不同的试验操作方法、多孔介质有效应力理论及有效应力组合方式等方面进行对比分析。

4.2.1 试验操作方法的影响

在稳态法克氏渗透率测试过程中,净围压的施加是通过低围压、低孔隙压力的组合而获得,试验前首先给岩样施加 2 MPa 围压,施加入口压力后同步缓慢增加围压和入口压力以获得合适的出口流速。而脉冲渗透率实验过程中,首先对岩样施加 9 MPa 围压,之后放入 7 MPa 孔隙压力使得岩样承受的净围压为 2 MPa,即脉冲渗透率测试过程中岩样在试验初期短时间内承受了 9 MPa 的较高围压作用,其对致密岩石微观孔隙结构可能产生较为明显的压缩变形,包括部分不可恢复的塑性变形,即使后期放入了 7 MPa 的孔隙压力,岩样孔隙结构的塑性变形可能也是无法恢复的,由此可使得岩样脉冲渗透率小于稳态法克氏渗透率。

为了研究试验操作方法差异对试验结果引起的附加影响,对编号为 M12-1-1 (净围压为 2 MPa 时的克氏渗透率为 $0.2857 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 的具有代表性的一露头岩样进行了气测渗透率应力敏感性试验研究,如图 3 所示。从图中可以看出,露头岩样渗透率随有效应力(围压减去岩样入口压力)的增加而减小,当有效应力从 2 MPa 增加至 9 MPa 时,初始渗透率损失了 26.17%。模拟脉冲渗透率测试方法,将有效应力卸载至 2 MPa 时测得的渗透率为初始渗透率的 80.73%,即模拟脉冲渗透率测试方法对岩样

首先施加 9 MPa 有效应力(净围压)使岩样孔隙结构压缩产生的塑性变形导致渗透率损失了约 19.27%。实际上,在进行稳态法克氏渗透率与脉冲渗透率对比研究中,为观察不同试验操作方法和顺序对结果的影响,对 11 块露头岩样、4 块油藏岩样进行了先脉冲后稳态法克氏渗透率测量,对其余岩样进行先稳态克氏渗透率后脉冲渗透率测量如图 1、2 所示。从图中可以看出,脉冲渗透率接近的露头及油藏岩样先稳态后脉冲测试的克氏渗透率均略大于先脉冲后稳态法测试的克氏渗透率,先稳态后脉冲测试的两种渗透率相对误差总体大于先脉冲后稳态测试的两种渗透率相对误差,如脉冲渗透率为 $0.3264 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的露头岩样脉冲试验后测试的稳态法克氏渗透率为 $0.5499 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,两种渗透率相对误差为 40.64%;脉冲渗透率为 $0.3154 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样脉冲试验前测试的稳态法克氏渗透率为 $0.6289 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,两种渗透率相对误差为 49.85%。这就进一步表明,脉冲与稳态法渗透率试验操作方法和顺序对两种渗透率的相对误差具有一定程度的影响,即脉冲试验初期岩样短时间承受的 9 MPa 较高围压对孔隙结构引起的塑性变形对试验结果的影响。图 4 为同一块岩样脉冲试验前、后分别测试的稳态法克氏渗透率对比结果。

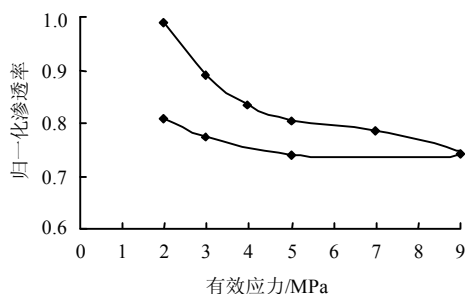


图3 孔隙结构塑性变形对渗透率永久伤害的影响
Fig.3 Effect of microstructure plastic deformation on permeability loss

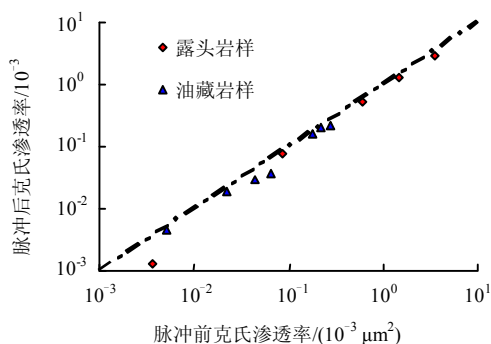


图4 脉冲渗透率测试前后岩样稳态法克氏渗透率对比
Fig.4 Comparison between Klinkenberg permeability before and after pulse decay experiment

由图 4 可见, 对比研究的 5 块露头 and 7 块油藏岩样脉冲试验后克氏渗透率均小于脉冲试验前的克氏渗透率, 编号为 A10-1-2 的露头岩样脉冲试验前、后测试的克氏渗透率分别为 $0.595 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.571 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 编号为 240-2-1 的油藏岩样脉冲试验前、后测试的克氏渗透率分别为 $0.042 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.031 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. 12 块岩样脉冲渗透率与脉冲试验前、后测试的克氏渗透率相对误差平均值分别为 50.98% 和 44.04%, 即由于脉冲渗透率试验操作方法的不同将使得脉冲渗透率比相同净围压下的稳态法克氏渗透率平均偏小 6.94%。

4.2.2 有效应力组合方式的影响

虽然稳态法克氏渗透率和脉冲渗透率测试过程中岩样均是承受 2 MPa 的有效应力, 但稳态法测试过程中岩样承受的有效应力是通过低围压、低孔隙压力的组合实现的 (岩样入口压力分布在 0.05~3 MPa, 对应围压为 2~5 MPa)。而脉冲渗透率实验过程中岩样承受的 2 MPa 有效应力是通过高围压、高孔隙压力组合实现的 (围压和孔隙压力分别为 9 MPa 和 7 MPa), 即两种渗透率测试过程中岩样承受相同大小的有效应力是通过不同大小的上覆围压和孔隙压力组合实现的。

根据经典的 Terzaghi 有效应力理论, 同时受到上覆围压和孔隙压力影响的多孔介质物性参数如孔隙度、渗透率、孔隙压缩系数等, 可等效成其与有效应力的一元函数关系, 并且认为有效应力等于上覆围压与孔隙压力的差值, 即 Terzaghi 有效应力定律 $\sigma_e = \sigma_1 - \alpha p$ 中 Biot 系数 $\alpha = 1$, 其中, σ_e 为有效应力; σ_1 为岩样承受的上覆围压; p 为孔隙压力。但大量的试验研究表明, 致密岩石有效应力定律中 Biot 系数 α 并不等于 1, 且不同的岩石物性参数对应的 Biot 系数 α 亦不相同^[17]。以气体作为渗流介质测试的渗透率有效应力 Biot 系数 α 一般小于 1, 多数学者认为, α 分布在 0.6~1.0 之间, 反映出气体渗流时孔隙压力对致密岩石渗透率的相对影响程度小于围压^[17-18]。也有学者认为, Biot 系数 α 并不是一个定值, 其随围压和孔隙压力的变化而变化^[18]。有效应力组合方式的差异及有效应力理论研究的争议, 将导致上述两种渗透率测试过程中岩样实际承受的有效应力并不相同, 脉冲渗透率试验中岩样承受的有效应力可分布在 2~9 MPa (Biot 系数 α 分布在 0~1)。

基于致密岩石渗透率有效应力理论, 选取了具有代表性 M12-1-1 岩样 (脉冲渗透率为 $0.146 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 分别进行了 5 MPa 和 9 MPa 有效应力下的克

氏渗透率试验 (见图 4)。数学拟合表明, 有效应力分别为 5 MPa 和 9 MPa (对应的 Biot 系数 α 分别为 0.57 和 1.00) 时 M12-1-1 号岩样的克氏渗透率分别为 $0.260 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.221 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。对比结果表明, 考虑致密岩石渗透率有效应力定律的复杂性及不同有效应力组合方式的差异, 对于具有代表性的 M12-1-1 号岩样有效应力为 9 MPa 时, 常规稳态法测试的克氏渗透率仍然小于有效应力为 2 MPa 下的脉冲渗透率, 脉冲渗透率约为克氏渗透率的 66.11%, 表明即使考虑致密储层渗透率有效应力定律本身的复杂性, 较高有效应力作用下的岩样克氏渗透率仍然大于 2 MPa 有效应力作用下的克氏渗透率。试验研究的致密储层岩石相同有效应力作用下的非稳态脉冲衰减克氏渗透率明显小于稳态法克氏渗透率, 两种试验不同操作方法和有效应力组合方式的不同并不能完全解释脉冲与克氏渗透率之间的明显差异, 正如 Carles 等^[10] 对非稳态压力降落法测试的经滑脱效应校正的克氏渗透率与稳态法克氏渗透率对比后指出的, 目前还无法明确解释出现上述误差的原因。

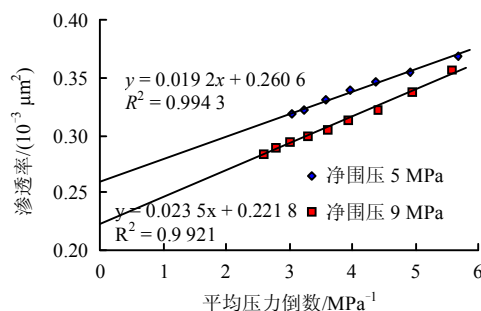


图 5 M12-1-1 号岩样不同净围压下的克氏渗透率测试结果

Fig.5 Klinkenberg-corrected permeability corresponding to different net confining stresses of No. M12-1-1

4.3 冲渗透率校正方法

由于脉冲渗透率试验技术对于特低渗、超低渗致密储层岩石渗透率测试具有效率高、基本消除了滑脱效应等优势, 其在非常规致密气藏、页岩气储层渗透率测试中将发挥越来越重要的作用, 规范推广该项技术对于致密储层物性评价具有重要的意义。基于上述研究结果, 由于相同有效应力作用下的脉冲渗透率与克氏渗透率之间具有较好的函数关系, 因此, 在实际测量过程中, 对于特定区块储层岩石获得脉冲渗透率后基于一定的函数转换关系就可以获得致密岩样的克氏渗透率, 提高克氏渗透率测试效率。根据图 5 数学拟合结果, 推导得到净围压 2 MPa 条件下长庆露头岩样脉冲渗透率转换为克

氏渗透率的经验关系式:

$$K_{\infty} = \frac{K_{\text{pulse}}}{(1 - a \ln K_{\text{pulse}} - b)} \quad (6)$$

式中: K_{∞} 为克氏渗透率; K_{pulse} 为脉冲渗透率; a 、 b 均为数学拟合常数。对于长庆露头岩样, a 、 b 分别为-4.908 和 40.003。

5 结 论

(1) 常规低围压、低孔隙压力组合测试的稳态法克氏渗透率大于相同净围压条件下的非稳态脉冲衰减渗透率, 脉冲渗透率平均约为克氏渗透率的 47.26%。

(2) 岩样渗透率越小, 脉冲与克氏渗透率误差越大, 长庆露头岩样脉冲与克氏渗透率相对误差与脉冲渗透率具有较好的对数函数关系, 而大庆油藏岩样上述两种渗透率相对误差与脉冲渗透率之间不存在明显的对应关系。

(3) 脉冲渗透率试验前岩样短时间承受的 9 MPa 净围压对两种渗透率对比结果具有一定的影响, 使得脉冲渗透率比克氏渗透率平均偏小约 6.94%。

(4) 考虑致密岩石渗透率有效应力理论及两种试验有效应力组合方式的差异, 较高有效应力下的稳态法克氏渗透率仍然大于脉冲渗透率, 试验操作操作方法和有效应力组合方式的差异不能完全解释脉冲与克氏渗透率出现的明显差异。

本文推导得到长庆露头岩样脉冲渗透率转换为克氏渗透率的函数关系, 作为一种适合于致密储层渗透率测试的新技术, 其在页岩气藏及致密油气藏储层渗透率测试中将具有越来越普遍的使用, 研究结果对于该项技术的正确使用具有重要的指导作用。

参 考 文 献

- [1] 中国石油勘探开发研究院石油采收率研究所, 中石化胜利油田有限公司地质研究院. SY/T 5336—2006 岩心分析方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [2] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 236—243.
CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, WU Guo-jun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008 27(2): 236—243.
- [3] 王伟, 李小春, 李强, 等. 小尺度原位瞬态压力脉冲渗透性测试系统及试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3185—3189.
WANG Wei, LI Xiao-chun, LI Qiang, et al. Small size in-situ transient pulse permeability measurement system and its experimental research[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 3185—3189.
- [4] 雷群, 杨正明, 刘先贵, 等. 复杂天然气藏储层特征及渗流规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [5] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73: 2225—2236.
- [6] HSIEH P A, TRACY J V, NEUZIL C E, et al. A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks-I. Theory[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1981, 18: 245—252.
- [7] DICKER A I, SMITS R M. A practical approach for determining permeability from laboratory pressure-pulse decay measurement[C]//The SPE International Meeting on Petroleum Engineering. Tianjin: [s. n.], 1988.
- [8] JONES S C. A technique for faster pulse-decay permeability measurements in tight rocks[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1997, 19: 651—658.
- [9] RUSHING J A, NEWSHAM K E, LASSWELL P M, et al. Kleinberg-corrected permeability measurements in tight gas sands: Steady-state versus unsteady-state techniques[C]//The SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: [s. n.], 2004.
- [10] CARLES P, EGERMANN P, LENORMAND P, et al. Low permeability measurements using steady-state and transient methods[C]//The International Symposium of the Society of Core Analysts. Calgary: [s. n.], 2007.
- [11] 李小春, 高桥学, 吴智深, 等. 瞬态压力脉冲法及其在岩石三轴实验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊 1): 1725—1733.
LI Xiao-chun, GAO Qiao-xue, WU Zhi-shen, et al. Transient pulse technique and its application to conventional triaxial compressive tests[J]. *Chinese*

- Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp. 1): 1725—1733.
- [12] 郭大立, 曾晓慧, 江茂泽. 测定岩心物性参数的新方法研究[J]. 天然气工业, 2002, 22(5): 81—83.
- GUO Da-li, ZENG Xiao-hui, JIANG Mao-ze. New method of measuring core physical parameters[J]. **Natural Gas Industry**, 2002, 22(5): 81—83.
- [13] 陈群策, 祁英男, 毛吉震, 等. 利用压力脉冲实验测定某地花岗岩体的渗透系数[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1469—1472.
- CHEN Qun-ce, QI Ying-nan, MAO Ji-zhen, et al. Permeability test of granite mass by using pressure pulse test method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1469—1472.
- [14] 李小春, 王颖, 魏宁, 等. 变容压力脉冲渗透系数测量方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2482—2487.
- LI Xiao-chun, WANG Ying, WEI Ning, et al. Study of measuring method of permeability by using storage-variable transient pulse method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(12): 2482—2487.
- [15] NUR A, WALLS J D, WINKLER K, et al. Effect of fluid saturation on waves in porous rock and relation to hydraulic permeability[J]. **Society of Petroleum Engineers Journal**, 1980, 20(6): 450—458.
- [16] WARPINSKI N R, TEUFEL L W. Determination of the effective stress law for permeability and deformation in low-permeability rocks[J]. **Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation**, 1992, 7(2): 123—131.
- [17] 李闽, 肖文联, 郭肖, 等. 塔巴庙低渗致密砂岩渗透率有效应力定律实验研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(12): 3166—3174.
- LI Min, XIAO Wen-lian, GUO Xiao, et al. Laboratory study of the effective pressure law for permeability in TaBaMiao low-permeability sandstones[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2009, 52(12): 3166—3174.
- [18] 王颖, 李小春, 魏宁. 变容压力脉冲法渗透系数测量技术测量范围的实验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊): 3113—3121.
- WANG Ying, LI Xiao-chun, WEI Ning. Experimental study of storage-variable transient pulse method for permeability measurement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.): 3113—3121.

砂卵石地层条件下盾构掘进机理与实践

著译者: 高明忠等 标准书号: ISBN 978-7-112-14931-5 开本: 16 开本 装帧: 平装 页码: 148 定价: 20 元

出版单位: 中国建筑工业出版社 出版时间: 2012-12

本书以成都地铁 1 号为工程案例, 系统研究砂卵石地层地质力学特性、盾构选型、掘进参数及其掘进性能的影响因素。根据国内外研究现状, 对当前隧道掘进机进行了科学的分类。结合现场实验及室内实验分析了该类地层的力学不稳定性, 特别探讨了导致盾构掘进性能低下原因。同时, 介绍了专为该类地层开发的数据模型生成系统, 进行了卵石空间形态对力学性能影响的深入探讨。并推导该类地层力学特性的理论计算模型, 通过数值方法进行了验证。

本书既介绍了隧道掘进机分类、盾构选型依据、盾构选型方法及盾构掘进参数优化过程, 又阐述了卵石地层的力学特性。第 1 章 成都地铁 1 号线概况; 第 2 章 成都地铁盾构掘进性能及影响因素分析; 第 3 章 卵石土性能试验研究; 第 4 章 混合材料数值模型生成算法与程序设计; 第 5 章 卵石空间、几何特性对混合体变形性能的影响; 第 6 章 卵石土混合材料变形性能理论预测模型推导; 第 7 章 理论强度预测模型在盾构中的应用。参考文献。

本书可为专业技术人员在类似地层中修建城市地下铁道、交通隧道时确定盾构选型、掘进参数等提供参考。

(信息来源: 中国建筑书店)