

低渗透油藏非线性渗流实验研究

刘志远¹, 杨正明², 刘学伟², 王宁宁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 流体在低渗透岩心中的渗流不再符合达西定律, 存在启动压力梯度, 并且渗流曲线不再是一条直线。为了更精确地描述非线性渗流曲线, 对已有实验在驱替与计量方法上进行了改进。使用改良后的实验装置, 研究了膨胀性黏土矿物含量较高的砂砾岩在低流速下的渗流特征。实验曲线不通过原点, 在压力梯度轴上有正截距, 并且存在上弯与下弯两种形态。低渗透储层岩石喉道微细、强非均质性是非线性渗流产生的原因, 并且储层岩石的特性也对非线性有一定影响。实验所采用岩心伊蒙混层以及伊利石等膨胀性黏土矿物含量高, 对储层的有效渗透率影响较大。利用带喉道半径的渗流模型理论, 从黏土膨胀性角度对产生非线性渗流曲线不同形态的原因进行了初步探讨。结论认为, 上弯形渗流曲线之所以存在, 是由于黏土膨胀减小了岩心中渗流的喉道尺寸, 而使得渗流过程中流速损耗, 同时也增大了启动压力梯度。

关键词 非线性渗流形态; 黏土膨胀性; 喉道半径; 渗流模型; 启动压力

中图分类号 O357.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)17-0057-04

Experimental Study on the Nonlinear Flow in Low Permeability Reservoirs

LIU Zhiyuan¹, YANG Zhengming², LIU Xuewei², WANG Ningning¹

1. Institute of Seepage Flow Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum & Development, Langfang, 065007, Hebei Province, China

Abstract The filtering flow in the core of low-permeability does not follow Darcy's law. There is a starting pressure in the filtering flow, and the porous flow curve is no longer a straight line. Some improvements on the existing core flooding experiments and methods of measurement are proposed in this paper to obtain the non-linear filtering flow curves. The low-velocity flow characteristics in a glutenite with high contents of clay-swelling minerals were studied by using the improved experimental device. The experimental curves do not pass the origin of the coordinate system,

with an intercept in the pressure axis. There are two types of filtering flow curves: the upward bending curves and the downward bending curves. The tiny throat size and high heterogeneity of rock in a low permeability reservoir are the causes to make the flow non-linear. The reservoir lithology is also responsible to the nonlinearity. The cores used in experiments with a high content of clay minerals including illite/smectite formation and illite have a significant effect on the effective permeability. Based on the theories of the seepage flow model, taking account of the throat radius, with the clay-swelling ability as a target, a preliminary study is carried out on the mechanism of different nonlinear flow curves. The final results show that the clay-swelling reduces the size of the throat participated in seepage, and as a result, reduces the velocity and increases the starting pressure, which accounts for the upward bending of the nonlinear flow curves.

Keywords nonlinear flow curve shapes; clay-swelling ability; throat radius; seepage flow model; starting pressure

0 引言

低渗透油藏储层岩石致密, 孔隙尺寸小, 流体在低渗透油藏中低速流动时, 受到岩石壁面较强的作用力, 不再遵守经典的达西方程^[1], 呈现非线性渗流, 并且存在启动压力梯度。黄延章^[2]认为, 孔隙中流体分为边界流体和体相流体, 边界流

收稿日期: 2009-07-30

作者简介: 刘志远, 研究方向为低渗透油藏非线性渗流实验及机制研究, 电子信箱: china1983512@163.com; 杨正明 (通信作者), 高级工程师, 研究方向为渗流理论、低渗透油气田开发和三次采油, 电子信箱: yzmhxj@263.net.

体不只受到流体间相互作用,也受固体分子场作用,其物性不同于体相流体,并认为边界层是产生渗流启动压力和渗流曲线非线性的主要原因^[3],由于边界层的存在,每个喉道都有其相应的启动压力梯度,只有当压力梯度大于该启动压力梯度时,喉道所控制的孔隙中才有流体流动,随着大小喉道逐一打开,岩石渗透性增强。实验室内测定启动压力梯度和非线性渗流曲线的方法多采用稳态法^[4-6],即“压差-流量法”和“毛细管平衡法”^[7],也有研究者在实验方法上积极寻求新的方法^[8]。

随着对渗流实验的不断改进,精度不断提高,在实验室测定渗流曲线时,得到两种不同的非线性形态^[9],上弯形与下弯形。下弯形渗流曲线被广大研究者所接受,并且从大小相异的喉道驱动需要不同的驱替压力解释其形成原因;而上弯形曲线却被认为是实验过程中的误差造成的,不被接受。本文通过改良实验装置,对砂砾岩岩心在低流速下的渗流特性进行研究,并从黏土膨胀的角度,结合包含喉道半径关系的渗流模型,对产生上弯形非线性渗流曲线的原因进行探讨。

1 实验

1.1 实验材料

氮气瓶;中间容器(盛放实验流体);盛有实验流体的玻璃瓶;滑杆(以便玻璃瓶高度调节);压力传感器(精度0.001 MPa);高精度微流量计^[10](内径1 mm,长度为100 mm,液面流动位移精度可达1 μm);夹持器;手动泵(为岩心提供围压)。

实验流体为矿化度10 g/L的标准盐水。

1.2 实验步骤和流程

1) 将实验岩心洗油烘干。抽真空,用矿化度10 g/L的盐水充分饱和。

2) 通过调节气瓶流量,控制夹持器两端压力。依次更换压力为100、80、60、40、20 kPa,对岩心进行驱替,记录不同压力下微流量计中流体液面的位移和所需时间,计算出流速。

3) 关闭中间气瓶、中间容器阀门,打开滑杆玻璃瓶阀门,通过玻璃瓶的高低来调节驱替压力。依次更换玻璃瓶高度为:150、130、110、90、70、50、30、10 cm,记录不同压力下微流量计中流体的位移与所需时间,计算出流速。

4) 根据步骤2)、3)中所测压力与流速,绘制渗流曲线。

实验装置示意图如图1所示。

本实验所用的微流量计计量精度高,避免了天平称重存在的受环境影响大、计量不连续^[11]的缺点,可以测出微小流速下的流量,提高了流量测量的准确度。常规“压差-流量法”使用驱替泵作为压力源时所提供最小压力值较大,且低压下,泵的误差较大;而现用的气瓶和滑杆玻璃瓶提供的压力源范围较大(压力最小可达1 kPa),并且比驱替泵稳定。“毛细管平衡法”可以测出最小启动压力梯度,但耗时长,难以操作,并且无法描述整个渗流曲线;本实验改进方法结合“毛细管平衡法”与“压差-流量法”的优点,既可以较为准确地测定真实启动压力梯度,又可较为完整地描述渗流曲线。

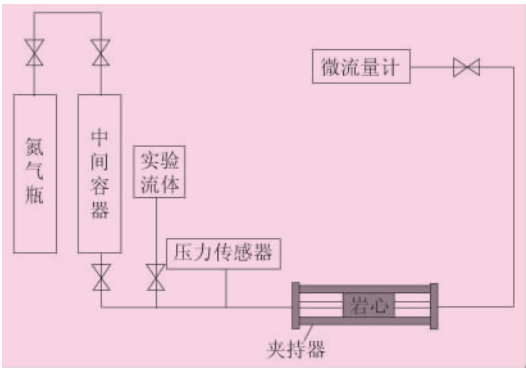


图1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

在常温20℃测定了3块岩心的非线性渗流曲线,其岩样物性如表1。

表1 岩样物性特征				
Table 1 Petrophysical properties of the core				
岩样号	孔隙度/%	渗透率/mD	直径/cm	长度/cm
L1	14.65	7.135	2.480	7.259
L2	12.37	2.645	2.482	7.140
L3	10.09	0.873	2.480	6.177

图2和图3分别为L1、L2和L3三岩样的渗流速度与压力梯度的关系图,图4给出了L2渗流曲线的局部放大效果。对实验所测定的多组值进行二次多项式拟合,拟合公式如表2所示。

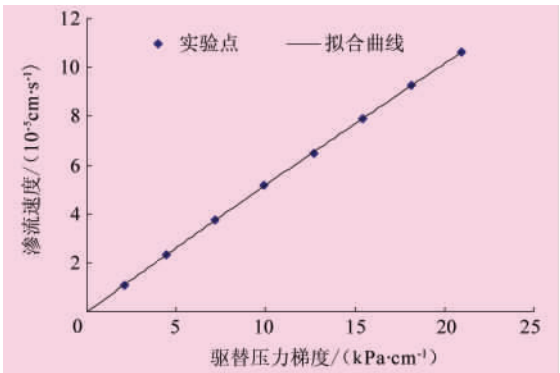


图2 L1岩样渗流曲线

Fig. 2 Flow curve of L1

分析以上渗流曲线,可以得出以下结论。

1) 用二次多项式拟合渗流曲线并反向延长,在压力梯度轴上出现正截距,亦即存在启动压力梯度。渗透率降低,启动压力梯度变大。

2) 渗透率降低,非线性渗流程度变强,渗流曲线表现为

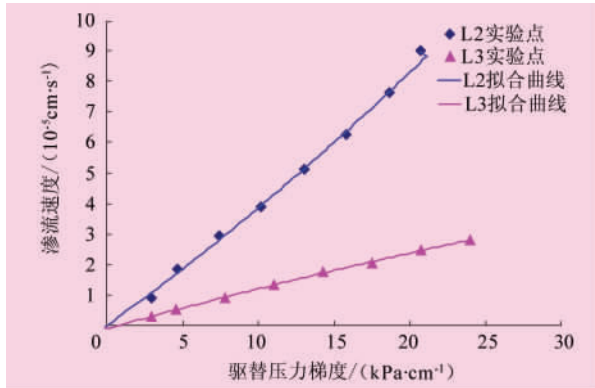


图3 L2和L3岩样渗流曲线
Fig. 3 Flow curves of L2 and L3

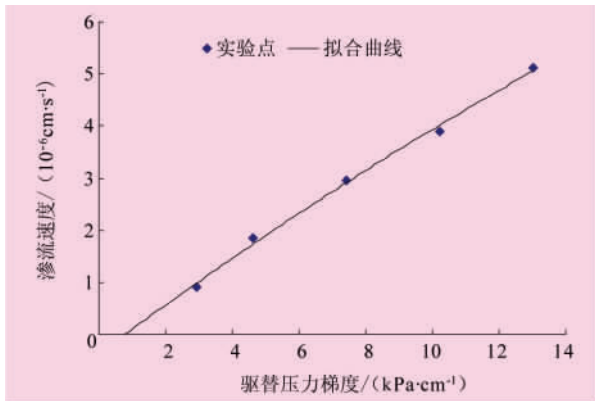


图4 L2岩样渗流曲线局部放大
Fig. 4 Partial enlargements of the flow curve of L2

表2 岩样渗流曲线拟合公式
Table 2 Fitted formulas for flow curves of the cores

岩样编号	拟合公式	拟合相关系数
L1	$y = -11.098x^2 + 5.3114x - 0.0001$	0.999 9
L2	$y = 2.8899x^2 + 0.3565x - 6 \times 10^{-6}$	0.998 3
L3	$y = -0.6714x^2 + 0.1371x - 0.0001$	0.999 1

上弯或下弯形态。

2.2 分析和机制探讨

文献[10]认为,产生低速非达西渗流现象的主要原因之一,是由于黏土颗粒膨胀后使岩心中渗流的喉道尺寸减小,从而产生尺度效应所导致的。不同黏土矿物遇水膨胀能力大小顺序为:蒙皂石>伊蒙混层>伊利石>高岭石。对岩心来源储层进行黏土矿物X射线衍射分析实验,结果是该储层伊蒙混层以及伊利石含量之和平均在60%以上,故黏土矿物膨胀对储层伤害严重。

时宇等^[12]借助恒速压汞实验得出了喉道数量的累积分布和喉道分布的密度函数,从而得出新的渗流模型:

$$Q = \frac{a\pi A}{8\mu} \left[\frac{(r_{\max}^4 - r^4)}{4} \nabla p - \frac{(r_{\max}^3 - r^3)r_{\max}}{3} \nabla p_{\min} \right] \quad (1)$$

式中, Q 为渗流流量, A 为储层截面积, μ 为流体黏性系数, a 为喉道半径累积分布曲线拟合参数, r 为喉道半径, ∇p 为压力梯度。

$$\text{当 } \nabla p_{\max} > \nabla p \geq \nabla p_{\min} \text{ 时, } r = \frac{\nabla p_{\min} r_{\max}}{\nabla p};$$

$$\text{当 } \nabla p \geq \nabla p_{\max} \text{ 时, } r = r_{\min}。$$

分析上弯形渗流曲线形成的原因时,通常只考虑岩样的喉道分布对非线性程度的影响;研究者认为随着喉道逐一被启动,渗流能力增加。但是,由式(1)可知,流量是由流度 $M = \frac{a\pi(r_{\max}^3 - r^3)}{24\mu}$ 和有效压力梯度 $\nabla p_e = \nabla p - [4(r_{\max}^3 - r^3)/[3(r_{\max}^4 - r^4)]] \cdot \nabla p_{\min}$ 两方面共同影响的。黏土膨胀伤害岩样,造成的流量损失是由喉道尺寸减小引起启动压力梯度变大造成的。如图5所示,随着压力梯度的逐渐减小,下弯形渗流曲线切线在 ∇p 轴上截距逐渐增大。渗流曲线呈现上弯还是下弯状态,取决于不同半径的喉道被启动与黏土膨胀二者对非线性程度影响的程度。随着压力梯度的逐渐减小,下弯形渗流曲线的流速递减程度渐强(如图5),从理论上也说明了随着驱替时间延长,黏土矿物膨胀对储层的影响也逐渐增强。

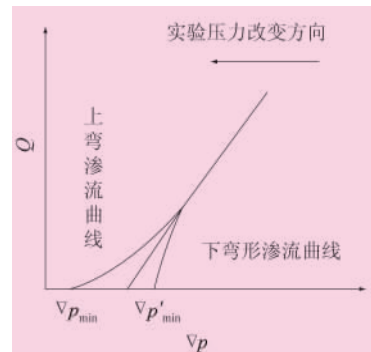


图5 非线性渗流曲线示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the nonlinear flow curves

图2所示岩样L1的非线性渗流曲线呈下弯形态,随着驱替压力的减小,所测流速低于线性渗流流速。但非线性不明显,这是由于L1渗透率较大,而岩样渗透率大部分是由大喉道贡献,黏土膨胀对大喉道造成的伤害较小,所造成的下弯形非线性不明显。

图3所示岩样L2的非线性渗流曲线呈上弯形态,这是由于随着驱替压力梯度的减小,部分喉道不能再被启动,视渗透率逐渐减小;但是局部放大(图4)后可见渗流曲线呈下弯形态,这是由于黏土膨胀对喉道的伤害逐渐累积造成的。L2与L1相比渗透率小,有效喉道半径小,喉道与黏土膨胀所造成的非线性要比L1更明显。

图3所示的岩样L3的非线性渗流曲线呈下弯形态,非线性较L1、L2明显。由于L3渗透率小,有效喉道半径小,黏土矿物膨胀对微小喉道的伤害更大,影响程度更明显,从而L3的渗流曲线非线性程度较L1、L2更大。

3 结论及认识

1) 改进的实验方法结合了“毛细管平衡法”与“压差-流速法”的优点,用高精度微流量计减少了蒸发等造成的误差。

2) 实验所得数据用二次多项式拟合所得渗流曲线,在驱替压力梯度轴上有正截距,说明启动压力梯度存在。

3) 低渗透储层渗流不再遵循达西定律,而为非线性渗流。呈现上弯、下弯形态。对于渗透率较大的岩心来说,非线性不明显。

4) 黏土膨胀对储层伤害较大,膨胀使得喉道半径变小,驱替时间越长,伤害越大;对渗透率小的岩心来说,黏土越膨胀对非线性的影响越明显。

参考文献 (References)

- [1] 贝尔 J. 多孔介质流体动力学 [M]. 李竞生, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
Bell J. Dynamics of fluids in porous media [M]. Li Jingsheng, tran. Beijing: China Building Industry Press, 1983.
- [2] 黄延章. 低渗透油层渗流机制[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
Huang Yanzhang. Porous flow mechanics in low permeability[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [3] 黄延章. 低渗透油藏非线性渗流特征 [J]. 特种油气藏, 1997, 4 (1): 9-14.
Huang Yanzhang. Special Oil and Gas Reservoirs, 1997, 4(1): 9-14.
- [4] 孙黎娟, 吴凡, 赵卫华, 等. 油藏启动压力规律的研究及应用 [J]. 断块油气田, 1998, 5(5): 30-33.
Sun Lijuan, Wu Fan, Zhao Weihua, et al. Fault-Block Oil & Gas Field, 1998, 5(5): 30-33.
- [5] 吴凡, 孙黎娟, 乔国安, 等. 启动压力梯度测定实验条件优选 [J]. 河南石油, 2006, 20(3): 79-80.
Wu Fan, Sun Lijuan, Qiao Guoan, et al. Henan Petroleum, 2006, 20(3): 79-80.

- [6] 韩洪宝, 程林松, 张明禄, 等. 特低渗油藏考虑启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(6): 49-53.
Han Hongbao, Cheng Linsong, Zhang Minglu, et al. Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition, 2004, 28(6): 49-53.
- [7] 吕成远, 王建, 孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 86-88.
Lu Chengyuan, Wang Jian, Sun Zhigang. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 86-88.
- [8] 张爱芬, 张少辉, 刘敏, 等. 一种测定低渗油藏启动压力的新方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 68-71.
Zhang Aifen, Zhang Shaohui, Liu Ming, et al. Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition, 2008, 32(1): 68-71.
- [9] 黄远智. 低渗透岩石非线性渗流机制与变渗透率数值方法研究[D]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 2006.
Huang Yuanzhi. Mechanism of non-linear seepage flow in low permeability rock and its variable permeability numerical solution [D]. Beijing: Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, 2006.
- [10] 王正波, 岳湘安, 韩东, 等. 影响低渗透油藏低速非线性渗流的实验研究[J]. 矿物学报, 2008, 28(1): 48-54.
Wang Zhengbo, Yue Xiang'an, et al. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(1): 48-54.
- [11] 邵东亮, 朱金堂, 孔伟. 液体微流量计量方法研究[J]. 石油仪器, 2005, 19(2): 69-72.
Shao Dongliang, Zhu Jintang, Kong Wei. Petroleum Instruments, 2005, 19(2): 69-72.
- [12] 时宇. 海塔盆地不同类型油藏储层特征及渗流特征研究 [D]. 河北廊坊: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2009.
Shi Yu. Study on the reservoir character and seepage flow of different types of reservoir in Hailar-Tamuchage Basin [D]. Langfang, Hebei: Institute of Porous Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.

(责任编辑 齐志红)

·学术动态·



“中国海洋学会 2009 年学术年会”征文

海岛是海陆兼备的重要海上国土,是海洋生态系统的重要组成部分,是特殊的海洋资源和环境的复合体。中国拥有面积超过 500 平方米的海岛 6 500 多个,其中无人岛约 6 000 多个。这些海岛在我国经济建设和海洋权益确立和维护上占据重要地位,并发挥着特殊作用。中国海洋学会拟于 2009 年 12 月在珠海举办 2009 年学术年会,年会的主题为“海岛(无人岛)开发与管理”。会议旨在发挥学会科技人才资源优势,围绕海岛开发利用中的政策法规和科学技术问题进行研讨,针对我国海岛开发与管理中存在的问题寻找解决的办法,为国家海洋职能部门决策提供科学依据,为海岛立法和管理献计献策。

会议征文范围包括:海岛立法和相关政策,海岛的开发与管理,海岛的生态特征和作用,海岛调查技术,海岛的管理信息系统的构建与管理,海岛旅游业的发展,海岛资源环境综合承载力等。论文截稿日期为 2009 年 10 月 20 日。

联系方式:青岛市崂山区仙霞岭路 6 号(266061) 赵炳来,丰爱平;电话:0532-88965290,13805423495,13969693896;电子信箱:fiokjc@fio.org.cn。