

大孔道内流体流动规律的物理模拟实验

顾文欢¹, 刘月田², 杨宝泉¹, 尚凡杰¹, 苑志旺¹

1. 中海油研究总院, 北京 100027

2. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

摘要 油藏大孔道内部形态结构既不同于多孔介质也不同于常见管道, 因此, 大孔道内流体流动规律也应不同于常规渗流及粗糙管流, 为方便表述, 本文定义流体通过大孔道的流动为“洞流”。为深入研究大孔道洞流规律, 以因次分析法为基础, 建立大孔道洞流规律物理模型的相似准数, 通过采用不同比例目数的砂粒, 制备了9个大孔道洞流规律物理模型, 研究不同壁面突出度条件下大孔道的压降及流量关系。研究结果表明: 随着流量的增加, 9个不同突出度大孔道洞流物理模型的流体流动阻力压力梯度均随流量的增加而逐渐增大, 且突出度越大, 压力梯度的增幅越大; 当流速增加到一定程度时, 大孔道洞流规律由线性流转变为非线性流; 在相同横截面积及相同流动截面积条件下, 洞流的压降梯度小于渗流, 但大于粗糙管流。

关键词 大孔道; 物理模拟; 洞流; 渗流; 管流

中图分类号 TE341

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.36.012

Fluid Flow Mechanism in Large Pore Paths Investigated Using Physical Simulation

GU Wenhuan¹, LIU Yuetian², YANG Baoquan¹, SHANG Fanjie¹, YUAN Zhiwang¹

1. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China

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

Abstract The inner morphological structure of large pore paths is different from neither porous media nor pipes, thus the fluid flow mechanism in them is different from seepage flow and pipe flow. This paper aims to study the law governing fluid flow in large pore paths in unconsolidated sandstone reservoir. The similar number of the physical models of large pore path fluid flow was established based on dimensional analysis. Nine physical models were established with different mesh numbers of sand grains to investigate the relationship between differential pressure and flow rate in large pore paths under different extruding conditions of walls. The results show that the pressure gradient of flow resistance in the nine physical models increased with the increasing of flow rate, and the higher the extruding degree of the wall, the larger the amplification of the pressure gradient. When the flow rate was increased to a certain value, the fluid flow changed from linear to nonlinear. Fluid flow in large pore paths, porous media and pipes was compared under the same cross-sectional area and same flow cross-sectional area, and the pressure gradient in large pore paths was lower than that of seepage flow but higher than that of pipe flow.

Keywords large pore path; physical simulation; large pore path fluid flow; seepage flow; pipe flow

20世纪80年代起, 胜利油田首次提出“大孔道”概念后, 有关油层大孔道的相关研究相继展开, 主要集中于大孔道识别(试井、测井等方法)、大孔道封堵及大孔道形成过程的物

理模拟研究^[1-3]; 针对疏松砂岩油藏大孔道内流体流动规律的研究并不多, 主要以多孔介质渗流^[4-7]、粗糙管流^[8,9]或高速非达西渗流^[10]代替。但是, 由于大孔道的内部结构形态明显区

收稿日期: 2014-07-02; 修回日期: 2014-09-17

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05030-005)

作者简介: 顾文欢, 工程师, 研究方向为油气田开发理论, 电子信箱: guwenhuan20@163.com

引用格式: 顾文欢, 刘月田, 杨宝泉, 等. 大孔道内流体流动规律的物理模拟实验[J]. 科技导报, 2014, 32(36): 75-79.

别于常规多孔介质,也明显不同于常见的管道,而与自然的山洞或蚂蚁洞相似,因此,大孔隙内流体流动应该具有其自身的特殊性,与渗流、管流或高速非达西渗流规律也应该有所不同,即应具有不同的驱动压力梯度和流量之间的变化关系。针对这一问题,本文以疏松砂岩油藏经长期注水开发后形成的油藏大孔隙为研究对象,以相似准则为基础建立实验室内大孔隙流动物理模型,对大孔隙内流体流动规律进行研究。

1 相似理论

由于目前对于大孔隙内流体流动规律的认识并不清楚,没有准确、全面的方程式描述其流动规律。因此,大孔隙内流体流动规律物理模拟相似准则的建立无法以方程分析法进行。因次分析法为解决此问题提供了可靠的理论依据,它只需以与描述的现象相关的物理量为基础建立相似准则。

以疏松砂岩油藏注水开发后期经水流长期冲刷后形成的大孔隙作为研究对象。根据大孔隙形态结构及流体流动特点,给出如下假设条件:

- 1) 大孔隙内含油饱和度很低,以注入水单相流动为主;
- 2) 忽略毛管力及重力影响;
- 3) 流体及岩石均不可压缩;
- 4) 忽略多孔介质渗流对大孔隙内流体流动的影响。

以大孔隙内部形态结构出发(图1,图2),根据理论和实验分析,流体在大孔隙流动过程中,影响压降 $\Delta p/L$ 的因素包括:流体密度 ρ 、流体黏度 μ 、流动速度 v 和平均容积直径 d (大孔隙外径固定不变时,该值大小取决于相对突出度 ε),各物理量因次见表1。

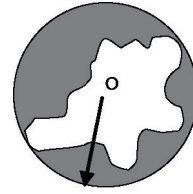


图1 大孔隙横截面积示意

Fig. 1 Schematic diagram of cross-sectional area of large pore paths



图2 大孔隙沿程方向结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lengthwise structure of large pore paths

表1 大孔隙流动规律物理模拟相似准则

Table 1 Similarity criteria of physical simulation of large pore path fluid flow

相似准数	表达式	物理意义	作用
π_1	$\frac{\Delta p d}{\rho v^2 L}$	欧拉数与径长比的乘积	保证径长比,压差和惯性力比值相似
π_2	$\frac{\rho v d}{\mu}$	雷诺数	保证惯性力和黏性力比值相似

本文在相似准则建立过程中,采用的是平均容积直径,而并未采用大孔隙外径,主要依据杜东兴^[11]和Kandlikar^[12]在研究壁面突出度对流动规律的影响时提出的流道收缩效应模型以及邹江等^[13]提出的流道收缩效应修正模型,在这些模型中,对于流道直径的计算,本质上根据管内空隙体积进行,也即计算的流道直径实质上就是平均容积直径,而且Kandlikar^[12]还通过相关实验设计证明了这种计算方法的正确性。因此,基于此认识,本文相似准则建立过程中,关于大孔隙直径这一影响因素亦采用平均容积直径。

为了便于较小流量下对应压力的测量,根据上述相似准数,本实验选择常温条件下黏度为4.2 mPa·s,密度为0.829 g/cm³的柴油作为实验流体。

2 物理实验模型建立

2.1 定量模型建立

自然油藏大孔隙内部形态结构较复杂,构成大孔隙的颗粒形状各异,高度和宽度也各有不同。但从统计的观点看,自然油藏大孔隙中,颗粒的高度和宽度具有相似性,即不同油藏大孔隙内不同颗粒的高度和宽度具有一定的比例关系,而且大孔隙内的颗粒间又是紧密接触的,因此,不同自然油藏大孔隙中,颗粒的平均高度确定后,其颗粒的平均宽度也就相应确定了。所以,建立不同平均突出高度的大孔隙三维实际模型,即可真实反映不同发育程度的自然油藏大孔隙。将内直径15 mm,长度500 mm的有机玻璃管沿中轴线一分为二,在内壁均匀涂抹一层厚为2 mm的玻璃胶,然后黏接不

同目数混合后的砂粒(保证砂粒间紧密接触),最后建立测压点并将各部分黏接,即得到大孔道内流体流动规律物理实验模型。该模型具有大孔道内壁形态参数可定量控制、内壁结构自然的特点。模型如图3、图4所示。

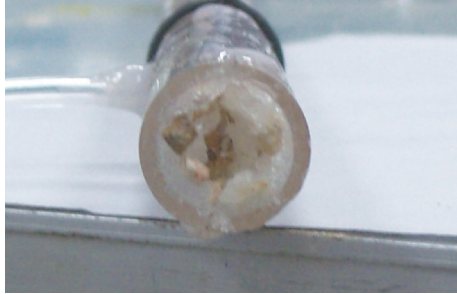


图3 黏接砂粒后模型端面

Fig. 3 Section image of the physical model with sand grains stuck



图4 制作完成的实际模型

Fig. 4 Completed physical models

2.2 定量模型参数

共设计9种物理实验模型,各模型中选用砂粒配比如表2所示,各模型的基本参数如表3所示。

表2 9个模型中所使用的砂粒比例

Table 2 Proportion of sand particles with different sizes in nine models

编号	所占比例/%					平均突出高度/mm
	5.3 mm	3.7 mm	2.4 mm	1.6 mm	0.8 mm	
1	55	30	5	5	5	4.265
2	40	40	10	5	5	3.960
3	30	40	20	5	5	3.670
4	20	30	40	5	5	3.250
5	10	30	40	15	5	2.880
6	10	20	30	35	5	2.590
7	10	10	10	65	5	2.220
8	10	10	10	10	60	1.780
9	5	5	5	5	80	1.290

注:平均突出高度定义为砂粒直径减去2 mm玻璃胶厚度的几何加权平均。

表3 不同突出度模型的各项参数

Table 3 Parameters of models with different extruding degrees of walls

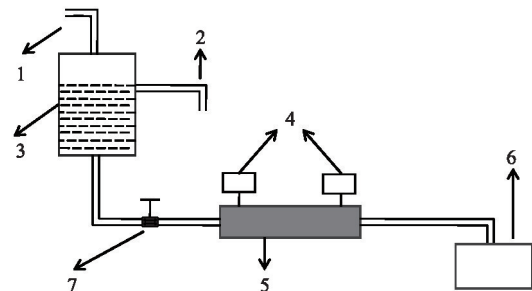
编号	突出高度/mm	突出度	平均容积直径/mm	空隙体积/mL	空隙率	$d_w/d_{\text{外}}$
1	4.265	0.388	6.869	18.52	0.390	0.624
2	3.96	0.360	7.243	20.59	0.434	0.658
3	3.67	0.334	7.560	22.43	0.472	0.687
4	3.25	0.295	7.934	24.71	0.520	0.721
5	2.88	0.262	8.133	25.96	0.547	0.739
6	2.59	0.235	8.490	28.29	0.596	0.772
7	2.22	0.202	8.732	29.93	0.630	0.794
8	1.78	0.162	9.186	33.12	0.697	0.835
9	1.29	0.117	9.697	36.91	0.777	0.882

注:突出度定义为平均突出高度/扣除玻璃胶厚度的玻璃管内直径; $d_w/d_{\text{外}}$ 为平均容积直径除以大孔道外径。

3 大孔道内流体流动规律实验

3.1 实验装置系统

整个实验装置由液体循环系统及实验测量系统组成,如图5所示。



1—进口口;2—出口口;3—高位箱;4—精密数字多用表;5—大孔道流动物理模型;6—流量测试系统;7—控制开关

图5 实验装置示意

Fig. 5 Schematic diagram of experimental equipment

3.2 实验步骤

1) 将模型及管线饱和柴油,并记录高位箱液面与出口端高度差;2) 测量当前高度差下的稳定流量,并记录模型左右两端的压力;3) 改变高位箱高度,并重复第2)步;4) 重复2)~3)步,完成实验设计方案。

3.3 实验结果

通过实验得到9种不同突出度的大孔道三维实际模型流动阻力压降梯度 $\Delta p/L$ 随流量 Q 的变化关系,如图6所示。

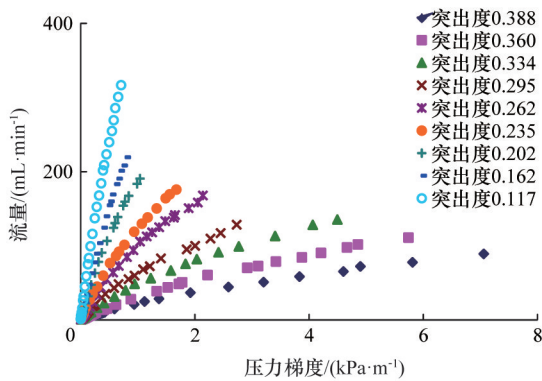


图6 不同壁面突出度时压力梯度-流量相互关系
Fig. 6 Pressure gradient versus flow rate at various extruding degrees of walls

突出度大小对流动规律的影响极其显著。随着流量的增加,9种不同突出度大孔道流动物理模型中流体流动阻力压力梯度 $\Delta p/L$ 均逐渐增大,突出度越大,压力梯度的增幅越大;在相同流量及横截面积条件下,模型的突出度越大,流体流动空间越小,即相应的流动截面积越小,突出元对流体流动的扰动作用越明显,流体受到惯性力的影响也就越大,对应的流体流动阻力压力梯度越大。

根据实验测试结果,可得到由因次分析法推导出的两个相似准数 π_1 和 π_2 间的相互关系(图7)。随雷诺数 Re 的增加,阻力系数 f 逐渐减小;在相同雷诺数下,突出度越大,对应的阻力系数越大。

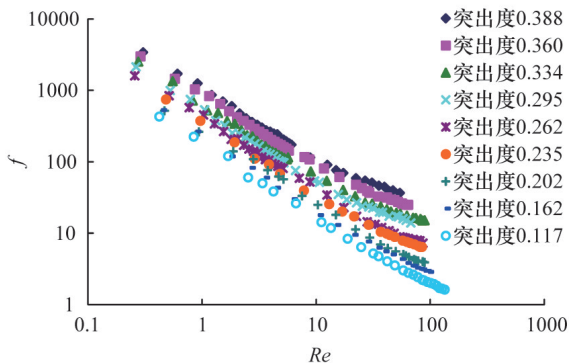


图7 不同壁面突出度时阻力系数与雷诺数的关系
Fig. 7 Resistance coefficient versus Reynolds number at various extruding degrees of walls

实验过程中流量较小时,雷诺数与阻力系数符合线性关系,分析发现,此时的突出度 ε 与 fRe 之间的关系满足方程:

$$\varepsilon = 72.79e^{6.71/Re} \quad (1)$$

但随实验过程中流量的不断增加,雷诺数与阻力系数之间的相互关系由线性逐渐转变为非线性,这意味着流体流动规律也是从线性流动转变为非线性流动。

4 大孔道流动规律

4.1 线性流动规律

流量较小时,雷诺数与阻力系数为斜率是-1的直线段,两者之间的关系可表述为

$$\lg f = \lg b - \lg Re \quad (2)$$

即

$$v = \frac{d^2 \Delta p}{b\mu L} \quad (3)$$

将式(1)代入式(3),可得

$$v = \frac{d^2}{72.79e^{6.71\varepsilon} \mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (4)$$

式中, b 为截距。

4.2 非线性流动规律

当大孔道内流体流速达到一定值后,大孔道内流体流动规律将由线性转为非线性。此时,非线性段阻力系数 f 与雷诺数 Re 的关系可表述为

$$\lg f = \lg b' - n \lg Re \quad (5)$$

即

$$v = \frac{d^{\frac{n+1}{2-n}} \rho^{\frac{n-1}{2-n}}}{b'^{\frac{1}{2-n}} \mu^{\frac{n}{2-n}}} \left(\frac{\Delta p}{L} \right)^{\frac{1}{2-n}} \quad (6)$$

式中, b' 为取决于大孔道壁面突出度的常数, n 为非线性系数。

5 渗流、洞流和管流规律对比

5.1 相同横截面积下不同介质流动规律对比

定义流体通过大孔道的流动为“洞流”。分别利用填砂管模型测试渗流的压力与流量关系,光滑管流公式计算管流的压力与流量关系,用以对比相同横截面积下渗流、管流和洞流的流动规律。对比结果表明,在相同流量下,光滑管流的压力梯度最小,大孔道洞流的压力梯度次之,多孔介质渗流的压力梯度远远大于其他两种介质的压力梯度(图8)。这意味着,若在地层中任取一圆柱体微元,当该微元为多孔介质时,流体流过时阻力较大,因而压力梯度较大;随着注水开发的进行,该微元成为大孔道后,其压力梯度将明显下降;若大孔道进一步发展到极限情况,即光滑管道时,其压力梯度会进一步下降。

5.2 相同流动截面积下不同介质流动规律对比

由于3种介质的横截面积形态结构明显不同,因此当3种介质流体流动有效截面积相等时,其横截面积是不同的,多孔介质模型对应的横截面积最大,其次为大孔道洞流模型,最小为光滑管道模型(图9)。同样地,就不同多孔介质模型而言,即使具有相同的流体流动有效截面积,受孔隙度影响,其横截面积有所不同;大孔道洞流模型亦是如此;只有光滑管道模型的流体流动有效截面积和横截面积是相同的。

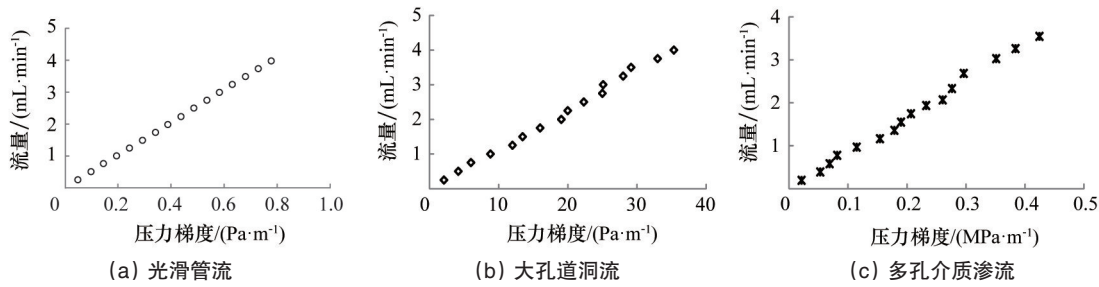


图8 相同横截面积下不同介质流动规律的对比

Fig. 8 Comparison of fluid flow in different media under the same cross-sectional area

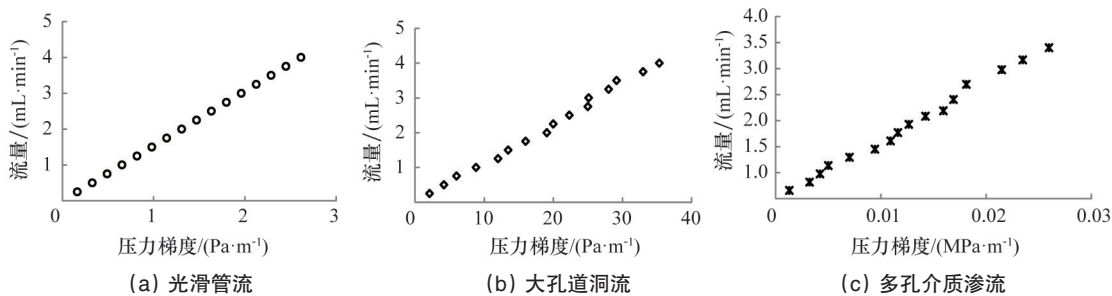


图9 相同流动截面积下不同介质流动规律对比

Fig. 9 Comparison of fluid flow in different media under the same flow cross-sectional area

6 结论

1) 实验结果表明,随着流量的增加,9种不同突出度大孔道流动物理模型中流体流动阻力压力梯度均逐渐增大,且突出度越大,压力梯度的增幅越大。

2) 随流速增加,大孔道洞流规律由线性流转变为非线性流;且不同大孔道突出度条件下对应的临界流速有所不同,突出度越小,对应的临界流速越大。

3) 相同横截面积及相同流动截面积条件下,渗流的流动阻力最大,洞流次之,光滑管流最小。

参考文献(References)

- [1] 崔庆东. 砂岩油藏大孔道的识别方法[J]. 油气井测试, 2009, 18(3): 29-31.
Cui Qingdong. Identification method of big channel in sandstone reservoir[J]. Well Testing, 2009, 18(3): 29-31.
- [2] 胡书勇, 张烈辉, 罗建新, 等. 砂岩油藏大孔道的研究——回顾与展望[J]. 特种油气藏, 2006, 13(6): 10-14.
Hu Shuyong, Zhang Liehui, Luo Jianxin, et al. Study on large pore path in sandstone reservoirs—review and prospect [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2006, 13(6): 10-14.
- [3] 李科星, 蒲万芬, 赵军, 等. 疏松砂岩油藏大孔道识别综述[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 42-44.
Li Kexing, Pu Wanfen, Zhao Jun, et al. Summarization of Identification of Macro-Pores in Unconsolidated Sandstone Oil Reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(5): 42-44.
- [4] 窦之林, 曾流芳, 张志海, 等. 大孔道诊断和描述技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 75-77.
Dou Zhilin, Zeng Liufang, Zhang Zhihai, et al. Research on the diagnosis and description of wormhole [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(1): 75-77.
- [5] 曾流芳, 赵国景, 张子海, 等. 疏松砂岩油藏大孔道形成机理及判别方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(3): 268-275.
Zeng Liufang, Zhao Guojing, Zhang Zhihai, et al. The macroscopic

throats forming mechanism of unconsolidated sand-reservoir and their identifying method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(3): 268-275.

- [6] Wang X Z, Wang J Y, Wang C F, et al. Quantitative description of characteristics of high-capacity channels in unconsolidated sandstone reservoirs using in situ production data[J]. Petroleum Science, 2010, 7 (1): 106-111.
- [7] Hu S Y, Zhang L H, Yao H S, et al. A simulation method for big channel formation in unconsolidated sandstone reservoir during water-flooding[C]. Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, June 13-15, 2006.
- [8] 刘月田, 孙保利, 于永生. 大孔道模糊识别与定量计算方法[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(5): 54-59.
Liu Yuetian, Sun Baoli, Yu Yongsheng. Fuzzy identification and quantitative calculation method for big pore throat [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(5): 54-59.
- [9] 李传亮, 张学磊. 管流与渗流的统一[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(2): 252-253.
Li Chuanliang, Zhang Xuelei. Unification of flow equations in tubes and in porous media[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(2): 252-253.
- [10] 崔传智, 杨勇, 曹刚, 等. 疏松砂岩油藏大孔道中高速非达西渗流对产能的影响分析[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(3): 122-129.
Cui Chuazhi, Yang Yong, Cao Gang, et al. Effect of high velocity non-darcy flow on productivity in wormhole of unconsolidated sandstone reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(3): 122-129.
- [11] 杜东兴. 可压缩性及粗糙度对微细管内流动及换热特性的影响[D]. 北京: 清华大学, 2000.
Du Dongxing. Effect of compressibility and roughness on flow and heat transfer characteristics in microtubes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2000.
- [12] Kandlikar S G. Roughness effects at microscale—reassessing Nikukadse's experiments on liquid flow in rough tubes[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2005, 53(4): 343-348.
- [13] 邹江, 彭晓峰, 颜维谋. 壁面粗糙度对通道流动特性的影响[J]. 化工学报, 2008, 59(1): 25-31.
Zou Jiang, Peng Xiaofeng, Yan Weimou. Effects of roughness on fluid flow behavior in ducts[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(1): 25-31.

(责任编辑 刘志远)