

A New Nonlinear Model of Liquid Flows in Low Permeability Reservoirs

Lin Yuan¹, Changbin Wang¹, Fuquan Song^{2*}, Jianjun Wen²

¹Petroleum Engineering Institute, Northeast Petroleum University, Daqing

²Zhejiang Ocean University, Zhoushan

Email: *fqsong2000@smmail.cn

Received: Jan. 13th, 2014; revised: Feb. 10th, 2014; accepted: Feb. 20th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In the petroleum development engineering, the low permeability reservoir is that the permeability of porous media is lower than 50 micro-Darcy. Because of the existence of the threshold pressure gradient (TPG), the mathematical model of liquid flow in low permeability media is difficult to describe this kind of flow. Until then there is not an ideal model, although there are several models used to fields of well testing analysis and petroleum numerical simulations. Based on force between liquid and surface solid, and the negative slip boundary model of a micro-channel, a new liquid flow model was derived for low permeability reservoirs in this paper. First we defined the no-movement liquid layer close to the solid surface as the boundary stick layer which is regarded as the negative slip length, and used the inverse proportion of the height of the boundary stick layer to the pressure drop gradient, thus the formulae of liquid velocity and the flow rate of a round channel were derived; Then the model of liquid flows in low permeability reservoirs was gotten, based on the capillaries model; Finally the flow models were tested by examples and showed how to get the TPG of the low permeability reservoirs. The results show that there is no TPG on the whole of the low permeability reservoirs, but in small local pressure gradient, the effects of boundary layer can be seen. Compared different power fittings on the experimental data, the first power exponential function fitting is relatively accurate.

Keywords

Low Permeability Reservoirs; No-Darcy's Law; Threshold Pressure Gradient; The Boundary Stick Layer

低渗透油藏的非线性渗流模型

*通讯作者。

袁琳¹, 王常斌¹, 宋付权^{2*}, 文建军²¹东北石油大学石油工程学院, 大庆²浙江海洋学院石化与能源工程学院, 舟山Email: fqsong2000@smmail.cn

收稿日期: 2014年1月13日; 修回日期: 2014年2月10日; 录用日期: 2014年2月20日

摘要

工程上将多孔介质的渗透率小于50毫达西的油藏, 称为低渗透油藏。长期以来, 由于存在启动压力, 低渗透油藏的渗流特征很难描述, 至尽还没有理想的模型。本文考虑液体和固体壁面的相互吸引的性质, 从微管的负滑移边界模型出发, 定义固壁边界附近不流动流体的流体层为边界黏附层, 采用边界黏附层与压力梯度成反比的实验经验公式, 推导出了考虑边界负滑移条件下, 圆管中的流速分布公式和流量公式。进而得到考虑边界黏附层的低渗透渗流模型。最后以微管和低渗透岩心的流动实验对模型进行了验证, 拟合出了相应的启动压力梯度。分析表明: 低渗透油层在整体上不存在启动压力, 但在压力梯度较小的局部, 可以认为存在拟启动压力梯度; 通过对实验数据的不同次方拟合, 我们可以比较出指数函数1次方拟合的相对准确。

关键词

低渗透油藏; 非达西渗流; 启动压力梯度; 边界黏附层

1. 引言

渗流是流体在多孔介质中的流动, 流体渗流的特征涉及到流体的性质、多孔介质的性质和流动的状况以及它们之间的相互作用[1]。低渗透岩心驱替实验和开发的实践表明: 低渗透储层中, 油气渗流不符合达西定律, 即存在启动压力梯度和非线性渗流[2]-[9]。现有的描述低渗透多孔介质中渗流的主要模型有: 拟压力梯度模型[10]、分段模型[10]、多参数模型[11]-[13]等。

在分析低渗透油藏的渗流模型时, 我们发现指数模型与实验符合的很好, 于此同时, 指数模型中得到的1次、2次、3次、4次模型有不同的特点, 本文通过典型的实例对渗流模型的函数进行分析。

2. 静态边界层为整个流动区域的渗流模型分析

假设: 在驱动力趋近于0时, 整个流体都是粘滞层, 所以在微管中, 粘滞层的厚度就是微管的半径, 结合边界黏附层的变化特征, 可以假设

$$\delta = r_0 e^{-c|\nabla p|} \quad (1)$$

式中: δ 为边界黏附层厚度, m^2 ; r_0 为微圆管半径, m ; c 为边界黏附层参数, $m \cdot Pa^{-1}$ 。

如图1为半径为5微米的石英圆管中, 去离子水的流动实验得到的边界黏附层厚度[14], 经拟合表现出了很好的指数特征。

2.1. 牛顿流体在微圆管中的速度及流量公式

根据牛顿流体的应力应变关系,

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

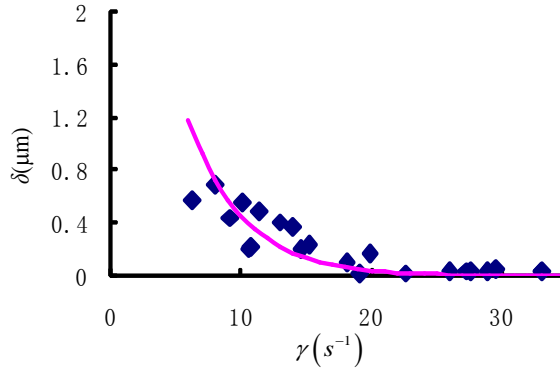


Figure 1. The relationship between boundary layer thickness and shear rate changes, a radius of 5 μm quartz tube
图 1. 微圆管半径为 5 μm 的边界层厚度随剪切率的变化关系

式中, τ 为流体所受的应力, Pa; $\dot{\gamma}$ 为流体的应变, s^{-1} 。

对于圆形的管道, 方程(6)可以具体表达为,

$$\frac{r}{2}|\nabla p| = \mu \frac{dv}{dr} \quad (3)$$

式中, r 为圆管径向坐标, m。

假设边界黏附层的厚度为 δ , 相当于有效流动半径减小 δ , 对方程(7)从 r 到 $r_0 - \delta$ 进行积分, 得到了考虑负滑移时, 流体在圆管中的速度分布,

$$v = - \left[\frac{(r_0 - \delta)^2 - r^2}{4\mu} \right] \nabla p \quad (4)$$

将公式(1)代入公式(4)中得,

$$v = - \left[\frac{(r_0 - r_0 e^{-c|\nabla p|})^2 - r^2}{4\mu} \right] \nabla p \quad (5)$$

再对公式(5)进行过流断面上的积分, 就可以得到对应的流量公式,

$$q = \frac{\pi (1 - e^{-c|\nabla p|})^4 r_0^4}{8\mu} |\nabla p| \quad (6)$$

对于方程(6), 当压力梯度较大时, 可以回归于 Poisuille 流量公式:

$$q = \frac{\pi r_0^4}{8\mu} |\nabla p| \quad (7)$$

在计算中, 我们发现指数是产生非线性的主要因素, 方程(6)中的 4 次方的影响只是程度大小, 因此引进 n 次方模型, 进行详细分析:

$$q = \frac{\pi (1 - e^{-c|\nabla p|})^n r_0^4}{8\mu} |\nabla p|, \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

假设水在半径为 2.5 微米的微圆管中流动, 粘度为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (20°C 下), 由公式(8)可以计算出微管

中的流量,如图 2 所示: 1) 当压力梯度较小时,非线性特征明显。2) c 值越小,非线性的情况越严重[15]。

从图 2 可以看出: 无论括弧上方是几次方(1~4)的函数,均可以表达出非线性的特征,其区别在于: 在相同的 c 下,偏离线性的程度随着次方数的增大而增大。因此对于表象的实验拟合,可以用更简单的方式进行描述,即一次方的形式:

$$q = \frac{\pi(1 - e^{-c|\nabla p|})r_0^4}{8\mu} |\nabla p| \tag{9}$$

当压力梯度较小时, (9)式可以近似为抛物线方程:

$$q = \frac{\pi cr_0^4}{8\mu} |\nabla p|^2, \quad |\nabla p| \ll 1 \tag{10}$$

用去离子水在半径为 $r_0 = 2.5 \mu\text{m}$ 中微圆管中,进行流动实验研究[15], 所得的结果如图 3 所示: 很明显一次和二次方和一次方的模型更好地拟合了实验结果。

2.2. 启动压力梯度的悖论

在低渗透油藏中,常称具有启动压力梯度,从公式(8)的分析中,当压力梯度较大时,流量公式变为

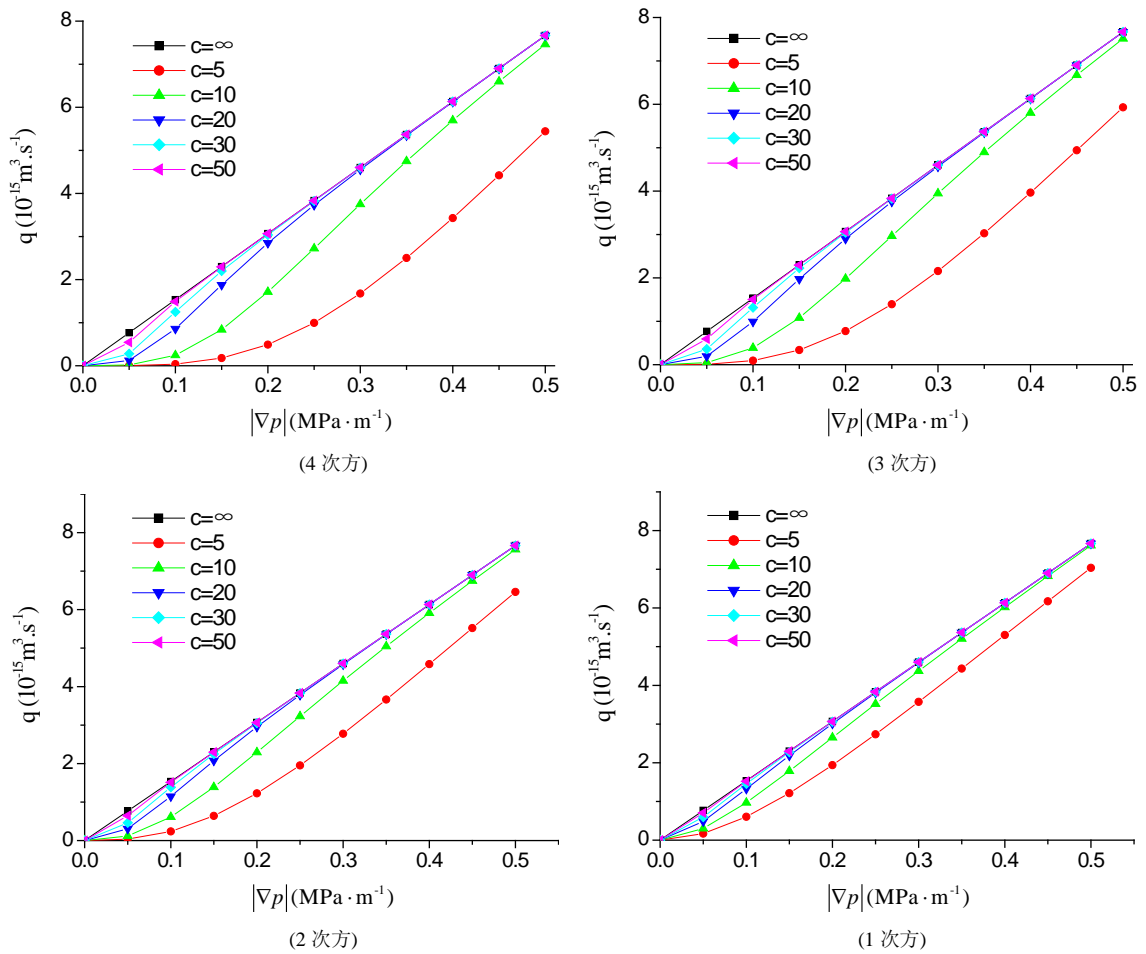


Figure 2. A radius of $2.5 \mu\text{m}$ micro circular tube, different values of c of pressure gradient and flow diagram
 图 2. 微圆管半径为 $2.5 \mu\text{m}$ 不同 c 值的压力梯度与流量的关系图

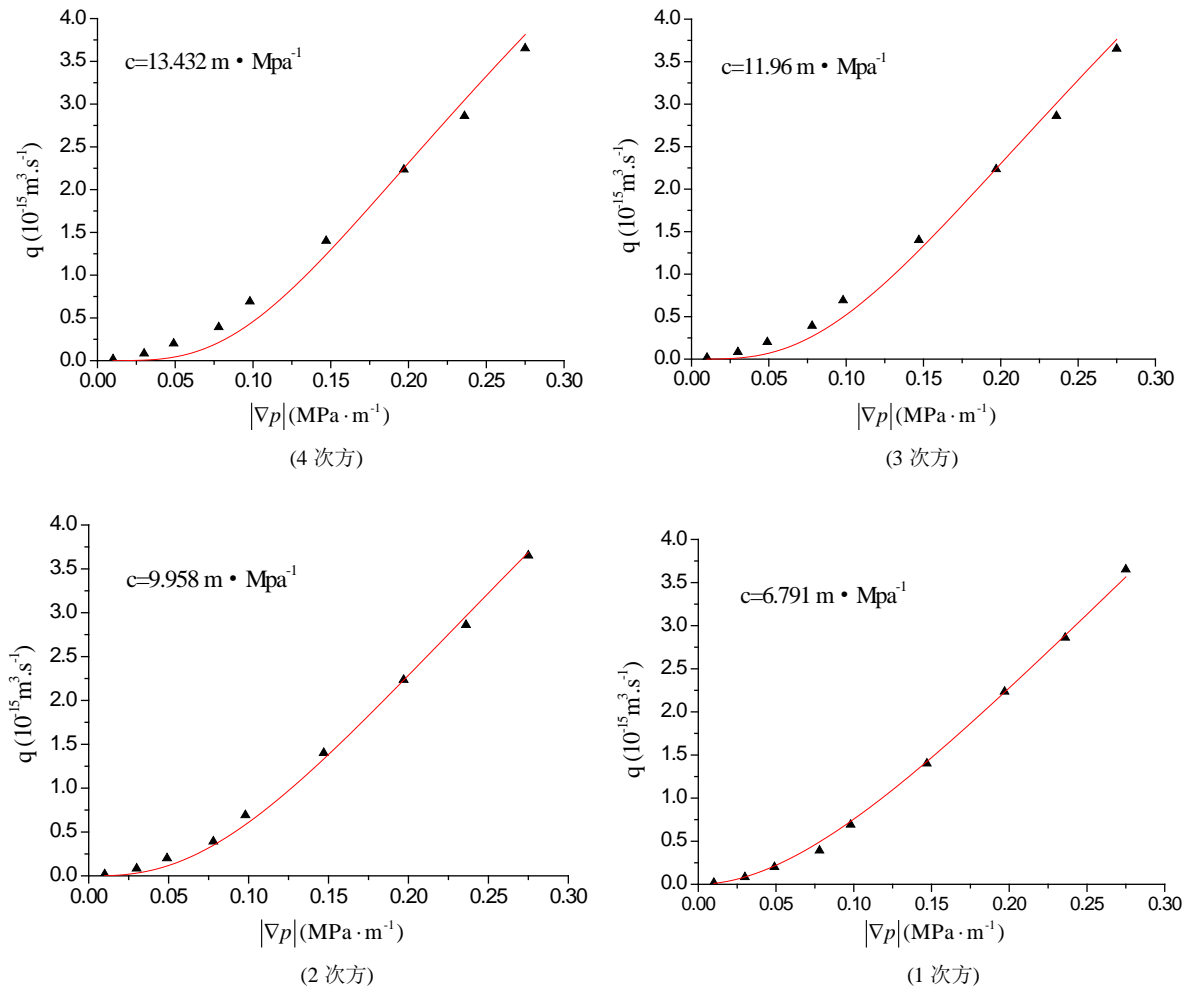


Figure 3. A radius of 2.5 μm micro circular tube, pressure gradient and flow diagram

图 3. 微圆管半径为 2.5 μm 的压力梯度与流量的关系图

方程(11)

$$q = \frac{\pi r_0^4}{8\mu} |\nabla p| \quad (11)$$

从方程(11)并不能看出什么压力梯度，即从压力梯度较大的线性段，向前延长较于坐标原点，即截距是零，并没有什么启动压力梯度，但为什么工程实践和实验中观测到启动压力梯度？那时因为：在实验中压力梯度还是没有足够的大，还处在某个非线性较弱的流动阶段，因此实践中总是利用最后的两、三个数据点进行线性化延长，而得到截距，即所谓的启动压力梯度。如图 2 可以明显的看出这一下，图 4 为不同压力梯度下的情形，也可以说明这点。

从图 4 清晰地看到了“启动压力梯度”的悖论：从某种程度上，启动压力梯度是存在的，但从全局看：启动压力梯度是不存在的，它只是局部条件下的产物，就像盲人摸象一般：局部代替不了整体，整体特征也代替不了局部。

3. 牛顿流体在低渗透多孔介质中的渗流模型

对于多孔介质，可以利用毛管束模型分析相应的渗流公式，可得低渗透多孔介质中的渗流公式为

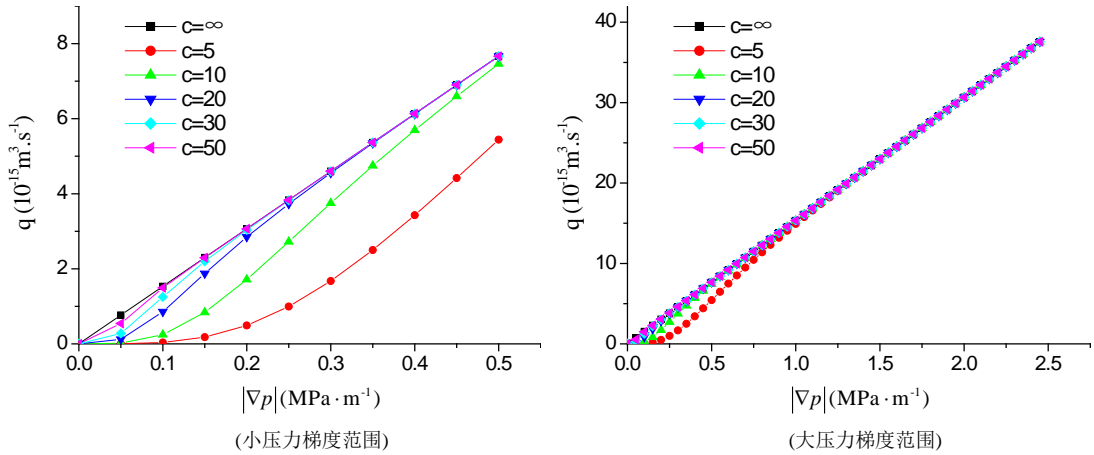


Figure 4. A radius of 2.5 μm micro circular tube, different values of c of pressure gradient and flow diagram
 图 4. 微圆管半径为 2.5 μm 不同 c 值的压力梯度与流量的关系图(4 次方公式)

$$Q = \sum_{i=1}^N n_i q(r_i) = \sum_{i=1}^N n_i \frac{\pi(1 - e^{-c_i |\nabla p|})^n r_i^4}{8\mu} |\nabla p| \quad (12)$$

定义渗流速度为

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i q(r_i)}{\left[\sum_{i=1}^N n_i \pi r_i^2 \right] / \phi} \quad (13)$$

可得，渗流公式为

$$v = \frac{K_0 (1 - e^{-c_\phi |\nabla p|})^n}{\mu} \nabla p \quad (14)$$

其中，

$$\phi = \left[\sum_{i=1}^N n_i \pi r_i^2 \right] / A, \quad K_0 = \frac{\phi \sum_{i=1}^N n_i r_i^4}{8 \sum_{i=1}^N n_i \pi r_i^2},$$

c_ϕ 为平均边界黏附层参数。

为了分析公式(14)的物理含义。假设原油在某一维低渗透多孔介质中的流动特征，其过流面积为 10 m^2 ，渗透率为 $0.001 \mu\text{m}^2$ ，原油粘度为 $10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，由公式(14)可以计算油流量随压力梯度的变化。如图 5 所示：当 c 值较大时($c = 0.5$)，流动特征接近于达西渗流的线性流动，当 c 值较小时($c = 0.01$)，就可以明显地看到小压力梯度下的流量减小，偏离达西流。当 c 趋于无穷大时，公式(14)为达西定律。这说明模型(14)能够很好地描述了低渗透多孔介质中的渗流特征。

图 6 是用公式(14)对实验数据的拟合，实验流量数据见表 1。从图 6 中可以清楚看到公式(14)可以描述出实验数据的非线性规律。根据图 3 和图 5 我们可以看到：方程(11)和(14)无论是对于微圆管，还是对于低渗透多孔介质，它们都可以很好地描述驱动压力梯度所有范围内的流量，尤其以二次方和一次方的模型最好，因此这两个公式可以应用于实际的工程实例计算。

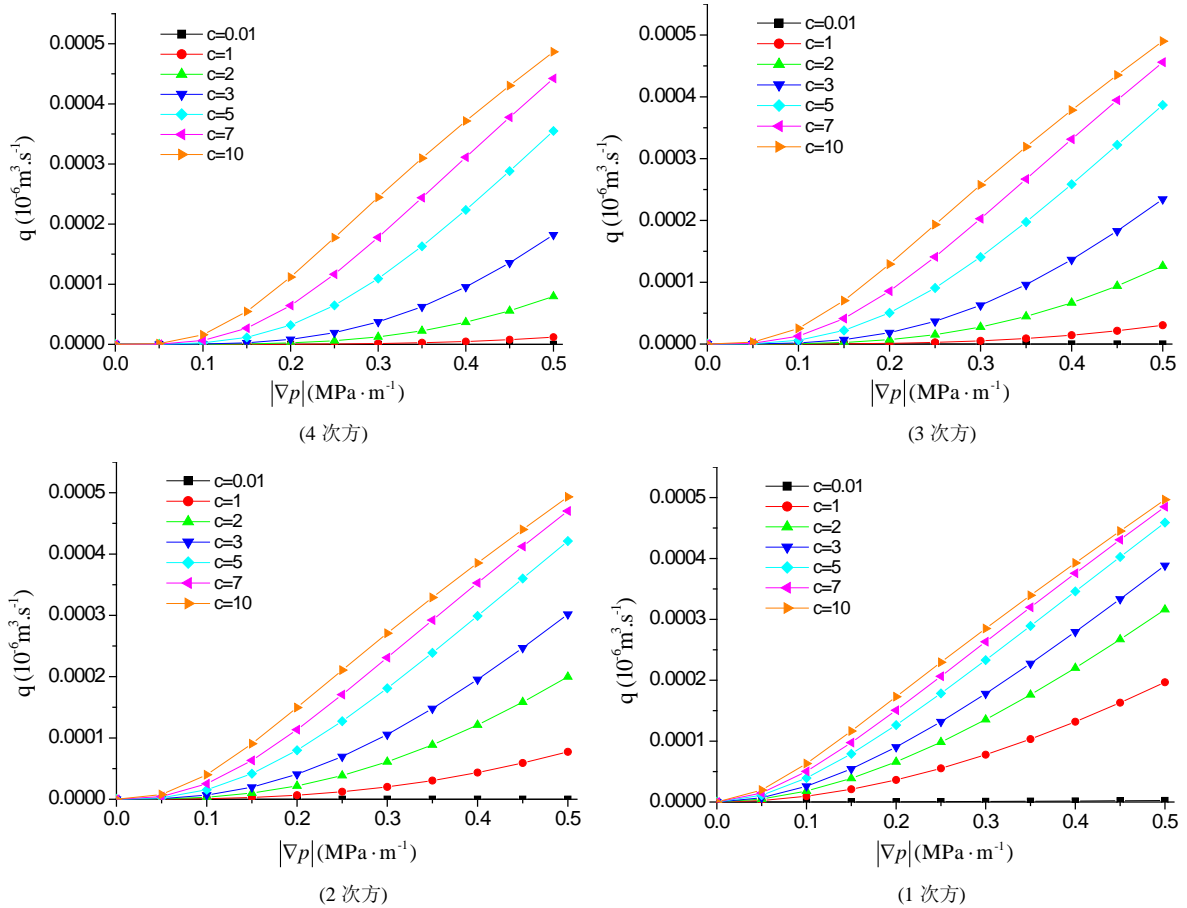


Figure 5. Pressure gradient and flow diagram in low permeability porous media

图5. 低渗透多孔介质中压力梯度与流量的关系图

Table 1. The experimental data of Figure 6

表1. 图6的实验基本数据

	$K_0 = 0.02 \mu\text{m}^2$				$A = 10^{-3} \text{m}^2$				$\mu = 0.002 \text{Pa} \cdot \text{s}$
$ \nabla p (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	0.01191	0.03686	0.05728	0.0783	0.0902	0.10548	0.14802	0.18261	0.25747
$q(10^{-10} \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.24	0.95	1.46	2.14	2.47	3.10	4.70	6.25	9.38

4. 结论

本文经过对现有低渗透油层非达西渗流的模型的分析，从微圆管流动中的边界黏附层的特征出发，推导了具有边界黏附层的流体在微圆管中的速度及流量公式，最后得到了低渗透多孔介质中，考虑边界流体黏附层的渗流模型，并且进行了举例分析。研究表明：低渗透油层在整体上不存在启动压力，但在压力梯度较小的局部，可以认为存在拟启动压力梯度；通过对实验数据的不同次方拟合，我们可以比较出指数函数 1 次方拟合的相对准确。

基金项目

国家重点基础研究发展计划(2013CB228002)。

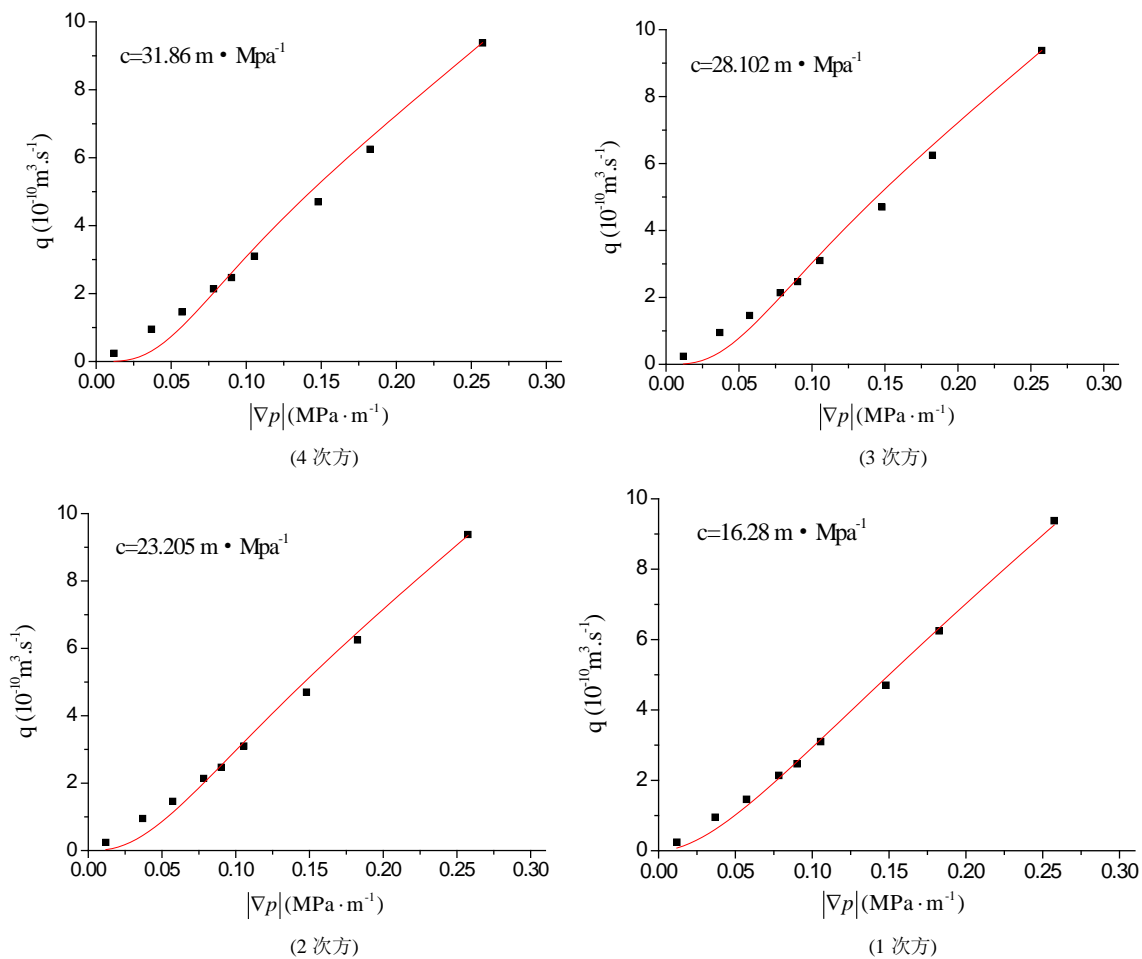


Figure 6. The experimental data fitting of pressure gradient and flow rate in low permeability porous media
 图6. 低渗透多孔介质中压力梯度与流量的实验数据拟合

参考文献 (References)

- [1] 黄延章, 等 (1999) 低渗透油层渗流机理. 石油工业出版社, 北京.
- [2] 王斐, 岳湘安, 王雯靓, 等 (2010) 润湿性对模拟原油微尺度流动和渗流的影响. 石油学报, 2, 302-305.
- [3] 王瑞飞, 沈平平, 宋子齐, 等 (2009) 特低渗透砂岩油藏储层微观孔喉特征. 石油学报, 4, 560-563.
- [4] 魏爱霞, 张烈辉, 赵玉龙 (2011) 基于 Origin 软件的低渗透油藏单相渗流曲线拟合. 内江科技(技术创新版), 8, 90-91.
- [5] 宋付权, 刘慈群, 吴柏志 (2001) 启动压力梯度的不稳定快速测量. 石油学报, 3, 67-70.
- [6] 朱维耀, 刘今子, 宋洪庆 (2010) 低/特低渗透油藏非达西渗流有效动用计算方法. 石油学报, 3, 452-457.
- [7] 宋付权 (2003) 低渗透多孔介质和微管液体流动尺度效应. 自然杂志(科技进展版), 3, 128-131.
- [8] 贾振歧, 韩少鑫, 覃生高 (2007) 特低渗透岩心单相渗流实验研究. 特种油气藏, 3, 78-80.
- [9] 胡华君, 马铭勋, 李光明 (2011) 低渗透毛管束单相渗流模型的建立. 重庆科技学院学报(自然科学版), 3, 93-95.
- [10] 黄延章 (1997) 低渗透油层非线性渗流特征. 特种油气藏, 1, 9-14.
- [11] 邓英尔, 刘慈群 (2001) 低渗透油藏非线性渗流规律数学模型及其应用. 石油学报, 4, 72-77.
- [12] 邓英尔, 刘慈群 (2003) 垂直裂缝井开发低渗透油藏非线性渗流压力分析. 石油勘探与开发, 1, 81-83.
- [13] 时宇, 杨正明, 黄延章 (2008) 低渗透油藏非线性两相渗流研究. 力学与实践, 5, 16-17.

- [14] 姜瑞忠 (2011) 低渗透油藏非线性渗流理论及数值模拟方法. *水动力学研究与进展*, **4**, 444-452.
- [15] Song, F.Q. and Wang, J.D. (2010) Investigation of Influence of Wettability on Poiseuille Flow via Molecular Dynamics Simulation. *Journal of Hydrodynamics*, **22**, 513-517.