

文章编号:1673-9469(2008)03-0070-03

# 边界层对低渗透非达西渗流规律影响的实验研究

张 普<sup>1</sup>,张连忠<sup>2</sup>,李文耀<sup>1</sup>,王云峰<sup>3</sup>

(1. 河北工程大学 城建学院,河北 邯郸 056038;2. 河南省电力勘测设计院 勘测工程部,河南 郑州 450000;3. 邯郸市水利水电勘测设计研究院 河北 邯郸 056038)

**摘要:**针对低渗透油藏中渗流规律偏离达西定律的问题,利用微毛管进行了边界层实验,研究了单一毛管中边界层厚度与压力梯度的关系,并在低渗岩心中进行了边界层对渗流规律影响的研究。同时分析了毛管半径、驱动压力梯度、粘度等影响边界层厚度的因素,并对他们的具体影响方式做了说明。研究结果表明:吸附边界层对低渗多孔介质中流体的渗流特征有着极其重要的影响,边界层越厚,渗流规律越偏离达西定律。

**关键词:**低渗透;边界层;非达西;渗流

中图分类号:P641.2

文献标识码:A

## Experiment on the influence of boundary layer on the Non - Darcy seepage law

ZHANG Pu<sup>1</sup>, ZHANG Lian-zhong<sup>2</sup>, LI Wen-yao<sup>3</sup>, WANG Yun-feng<sup>4</sup>

(1. College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Survey Department, Henan Electric Power Survey and Design Institute, Zhengzhou 450000, China; 3. Research Administration Department, Hebei University of Engineering; Handan 056038, China; 4. Handan Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Handan 056038, China)

**Abstract:** In view of the problem of seepage law which does not agree with the Darcy law, in this paper, both capillary experiment and core flooding have been made. The experiment of boundary layer in capillary and the influences of boundary layer on the porous flow in low permeability core are made. Finally, Factors affecting boundary layer are studied systemically. The results will have directive significances on the study of Non - Darcy porous flow in low permeability oil reservoir.

**Key words:** low permeability; boundary layer; Non - Darcy; porous flow

随着我国陆上低渗透油藏的陆续开发,开展低渗透油藏渗流理论和实验的研究势在必行。低渗透油藏储层的主要特征是渗透率低,油水流动的孔隙比较小,渗流阻力大,固液界面及液液界面之间的相互作用对渗流的影响更大。由于上述特征使得渗流规律偏离了达西定律<sup>[1]</sup>。由于经典的达西线性渗流关系已不再适用,有人提出了非达西渗流概念,认为流体在孔隙中存在边界层流体<sup>[2-4]</sup>。它是流体通过多孔介质孔隙所具有特殊的运动特征,但目前对边界层的研究多数处于定性分析阶段<sup>[5-9]</sup>。本文通过实验与理论相结合的方法研究边界层对渗流的影响,并研究了边界层

厚度的影响因素。

### 1 毛细管渗流实验

#### 1.1 实验设计基本思想

根据边界层理论,流体在低速流动时是不符合管壁叶定律的。因此,在相同条件下,根据管壁叶定律计算有效毛管半径,即可对比出不同流体的边界层厚度。

$$r_{\text{有效}} = \sqrt{\frac{8V\mu l}{\pi \Delta p t}} \quad h = r - r_{\text{有效}}$$

收稿日期:2008-05-19

基金项目:河北省自然科学基金(D2005000463)

特约专稿

作者简介:张普(1980-),男,河北邯郸人,助教,从事水力学河流动力学,水资源环境方面的教学与科研。

式中  $V$  - 渗流液体体积, ml;  $\mu$  - 液体粘度,  $\text{MPa}\cdot\text{s}$ ;  $l$  - 毛细管长度, cm;  $\Delta p$  - 压差, MPa;  $r$  - 实际毛管半径, cm。

1.2 实验方法

1) 实验是在  $23^\circ\text{C}$  下进行的; 2) 原油与白油分别与煤油混合配制成粘度为  $2.5\text{MPa}\cdot\text{s}$  的模拟油; 3) 测量毛管的绝对半径; 4) 进行单根毛细管渗流实验, 根据箔稷叶公式计算毛管的有效半径, 根据毛管的绝对半径计算边界层厚度。

1.3 实验结果与讨论

流体的流变性: 该实验所用的原油与模拟油是粘度相同的牛顿流体。该流体的粘度与剪切速率的关系见表 1。

表 1 粘度与剪切速率的关系

Tab.1 Relation of viscosity with speed ratio of shear

剪切速率 ( $\text{s}^{-1}$ )	模拟油粘度 ( $\text{MPa}\cdot\text{s}$ )	原油粘度 ( $\text{MPa}\cdot\text{s}$ )
200	2.54	2.54
100	2.53	2.55
60	2.56	2.57

单一毛管中边界层厚度与压力梯度的关系: 图 1 所示的是边界层厚度随压力梯度的变化规律, 毛管半径为  $67.5\mu\text{m}$ 。从图 1 可知, 边界层厚度随着压力梯度的增大而减小, 当压力梯度增加到一定值后, 边界层厚度保持最小值不变。图 1 中曲线分为三段: 曲线右侧趋向水平的区域为边界层的固态部分; 中间的倾斜部分为边界层的凝聚结构部分; 左侧趋向竖直的部分为向体相过渡的部分。

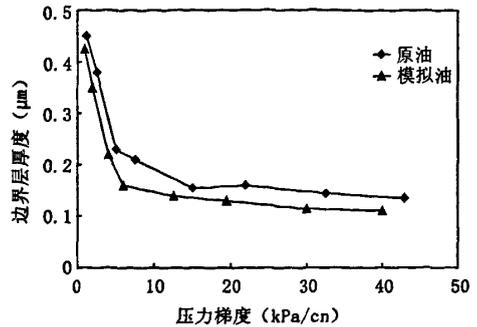


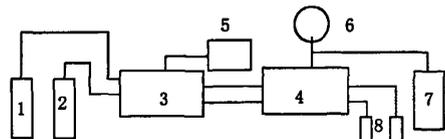
图1 边界层厚度与压力梯度的关系

Fig.1 Relation of boundary layer with the pressure gradient

2 岩心实验

2.1 实验流程

实验是在定流量的条件下做的, 在不同流速下进行实验, 待压力稳定后, 计量各流速下的压力梯度, 具体装置见图 2。



1-水溶液 2-油 3-Quizix泵 4-岩心夹持器  
5-计算机 6-压力表 7-手动泵 8-烧杯

图2 实验流程图

Fig.2 Schematic diagram

2.2 实验结果与讨论

在不同的三块岩心中分别进行岩心实验, 所得结果见图 3

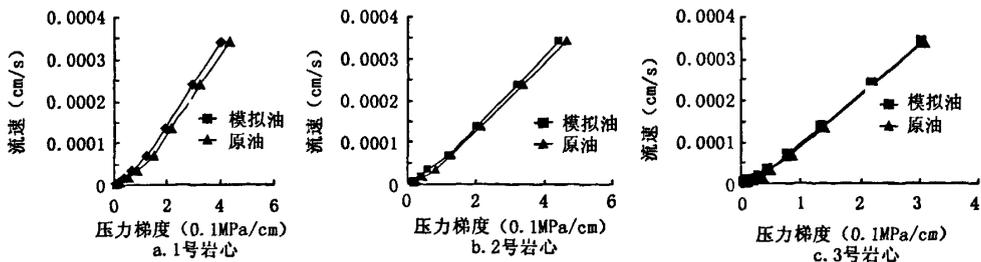


图3 岩心渗流曲线

Fig.3 Seepage curve of cores

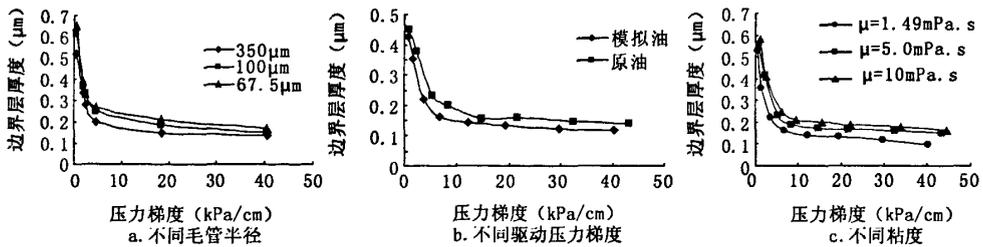


图4 边界层厚度与压力梯度的关系曲线

Fig. 4 Relation of boundary layer with pressure gradient

从图3可以看出边界层的影响与渗透率有关。渗透率越小,边界层的影响越大;渗透率越大,边界层的影响越小。

### 3 边界层的影响因素分析

从上述实验可以看出,吸附边界层对低渗多孔介质中流体的渗流特征有着极其重要的影响,有必要对其影响因素进行分析。

#### 3.1 毛管半径的影响

从图4-a可以看出,对于同一驱动压力梯度下的所有原油来说,毛细管半径减小则导致原油边界层厚度增加,其根本的原因是由于分子场和固相表面的影响,固相表面间的距离增大导致液体分子和分子之间的作用加剧,固液界面的分子力作用随毛细管半径的增大而减小。

#### 3.2 驱动压力梯度的影响

对图4-b的分析表明,驱动压力梯度增加导致原油有效边界层厚度减少。当压力梯度达到某一临界值后,处于液体状态的边界流体都开始流动,只剩下靠近壁面的固体部分,也就是所谓的固化层,边界层厚度不再减小,而趋于一恒定值。

#### 3.3 粘度的影响

从图4-c可以看出,在岩心的物性参数一定的条件下,压力梯度相同的情况下,粘度越大,边界层厚度越大。其流体粘度越大,极性组分含量越多,固液相互作用明显。

## 4 结论

1)在低渗透岩心中,边界层厚度越大,非达西现象越明显。

2)边界层厚度与毛细管半径、驱动压力梯度、粘度、组分等因素有关。

3)在驱动压力梯度相同的情况下,流体的毛细管半径减小将导致其边界层厚度增加。

4)在驱动压力梯度相同的情况下,粘度越大,边界层厚度就越大。

5)驱动压力梯度的增加会导致流体有效边界层厚度的减小,当驱动压力梯度增加到一定程度时,边界层为固化层,厚度的减少不再明显。

### 参考文献:

- [1] 李道品.我国低渗透油田开发探讨[J].石油消息,1998,(7):16-19.
- [2] 徐维生.低渗透介质非达西渗流研究进展[J].勘察科学技术,2007,(3):15-17.
- [3] 黄延章.低渗透油层渗流机理[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [4] A.T.戈尔布诺夫.异常油田开发[M].北京:石油工业出版社,1987.
- [5] 马尔哈辛.油层物理化学机理[M].北京:石油工业出版社,1987.
- [6] 朱长军.地下水的非达西渗流规律研究[J].河北建筑科技学院学报,2004,21(1):18-20.
- [7] 邓英尔.低渗介质单相与两相流体非达西渗流规律研究[D].北京:中国科学院渗流流体力学研究所,1999.
- [8] 姚约东,葛家理.低渗透油层非达西渗流规律的研究[J].新疆石油地质,2000,21(3):213-216.
- [9] 李中锋,何顺利.低渗透油层非达西渗流机理探讨[J].特种油气藏,2005,12(3):35-38.

(责任编辑 闫纯有)