

Experimental Study on the Relationship between Start-Up Pressure Gradient and Microscopic Pore Structure in Tight Sandstone Reservoirs

Ziyuan Li, Changjian Xiao, Hua Fan, Junchi Bao, Yunfeng Zhang*

College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang
Email: yunfeng4510@163.com

Received: Jul. 6th, 2015; accepted: Jul. 25th, 2015; published: Jul. 28th, 2015

Copyright © 2015 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

The tight sandstone reservoir refers to the reservoir density (generally permeability under $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), which can only get sandstone reservoir of economic output after fracturing modification. It is one of the main types of unconventional reservoir formed. Compared with the conventional sandstone reservoir, the flow of the fluid follows the law of non-Darcy flow at low speed. Based on the existence of different starting pressure gradients, a large number of experiments show that tight sandstone reservoir starting pressure gradient increases sharply with the decrease of the permeability. The microscopic analysis accordingly shows that tight sandstone pore throat reduces sharply. Giving priority to nanometer scale pore throat ratio, it shows that tight sandstone reservoir percolation characteristics are controlled by the complex microscopic pore structure.

Keywords

Tight Sandstone, Start-Up Pressure Gradient, Pore Structure, Micro Characteristic, Permeability

致密砂岩储层启动压力与微观孔隙结构关系 实验研究

李自远, 肖长剑, 樊 华, 鲍俊驰, 张云峰*

*通讯作者。

东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆
Email: yunfeng4510@163.com

收稿日期: 2015年7月6日; 录用日期: 2014年7月25日; 发布日期: 2014年7月28日

摘 要

致密砂岩储层是指储层致密(一般渗透率 $< 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、只能经过压裂等改造才能获得经济产量的砂岩储层,它是形成非常规油气藏的主要类型之一。与常规砂岩储层相比,其中流体的流动遵循低速非达西流动规律,即存在大小不一的启动压力梯度。本文通过实验室测得不同地区致密砂岩储层启动压力梯度,结果表明,致密砂岩储层启动压力梯度随渗透率减小而急剧增大,利用扫描电镜和压汞方法进行微观分析发现,致密砂岩孔喉急剧减小,以纳米级孔喉比例为主,说明致密砂岩储层渗流特征受复杂的微观孔隙结构所控制。

关键词

致密砂岩, 启动压力, 孔隙结构, 微观特征, 渗透率

1. 引言

致密砂岩储层中的油气称为致密油气,开发的前景广阔。致密油气通常是指低渗-特低渗砂岩储层中无自然产能,须通过大规模压裂或特殊采气工艺技术才能产出具有经济价值的油气。我国致密砂岩气藏分布广泛,类型多样,在四川、鄂尔多斯、吐哈、准噶尔南部和松辽盆地等区域皆有分布。致密砂岩遵循低速的非达西渗流,启动压力梯度是控制致密油层渗流特征和影响采收率的重要参数,但其控制因素方面的研究较少[1]-[3],因此,深入研究致密砂岩油层岩石启动压力梯度及影响因素,对合理开采致密油层石油具有重要的实际意义。笔者通过选取不同地区致密砂岩储层样品进行启动压力梯度测定并利用扫描电镜和压汞方法进行微观分析,从而揭示致密砂岩储层渗流特征与微观孔隙结构的关系。

2. 启动压力实验原理

2.1. 启动压力、启动压力梯度概念

启动压力是指流体在油层中渗流必须克服一定压力后才能流动,这种压力即为流体渗流时的启动压力,并且渗透率越低启动压力越高。启动压力愈高,说明原油愈难流动,油层吸水能力愈差[4][5]。低渗透油藏油水渗流的基本规律与高渗透油藏明显不同。当储集层渗透率降低到一定程度后,其渗流特征已不符合达西定律,这种渗流被称之为非达西渗流。即驱动压力梯度较小时液体不能流动,只有当驱动压力梯度达到一定值后,液体才开始流动,此时的驱动压力梯度叫启动压力梯度。启动压力梯度的经典公式为[6]:

$$v \approx \left(-\frac{K_e}{\mu_e} \frac{dp}{dL} \right) \left[1 - \frac{4\lambda_0}{3} \left(-\frac{dp}{dL} \right)^{-1} \right] \quad (1)$$

式中: v 为渗流速度, m/s; K_e 为等效渗透率, μm^2 ; μ_e 为等效黏度, mPa·s; dp/dL 为压力梯度, Pa/m; λ_0 为启动压力梯度, Pa/m。

非达西渗流过程可以用图 1 进行描述, a 点为液体开始流动的最小启动压力梯度 ad 线段为液线段流

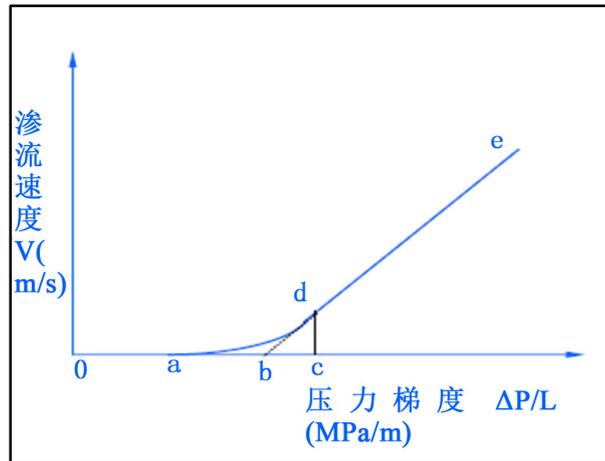


Figure 1. Characteristics of non-Darcy flow curve of low permeability and velocity

图 1. 低渗透低速非达西渗流曲线特征

速呈上凹型增加的实测曲线，de 线段为实测的达西渗流，d 点在压力梯度轴对应的压力点 c 点为由曲线变为直线的临界压力梯度，当压力梯度增加到最高启动压力 c 时，才呈现达西渗流；b 点为 de 直线延伸与压力梯度坐标直线延伸与压力梯度坐标的交点，通常称为拟启动压力梯度，直线度 de 的延长线(即 bd 线)不通过坐标原点，这是非达西渗流的主要特征。

2.2. 启动压力梯度测定原理

启动压力梯度的测试在理论上需要测试流体从静止到渗流发生的瞬间岩心两端的压力差值，但在目前技术条件下，渗流瞬间启动的控制和测量难以达到，因此在实验中启动压力梯度的测试方法是逐次降低实验流量，测定不同流量下岩心两端的压力差值，绘制流量—压力梯度实验曲线，拟合曲线在压力梯度坐标上的截距，以此拟合值为岩心的启动压力梯度值[7]-[9]。因此实验过程中能达到的最小流量越小，拟合出的启动压力梯度值越精确。

3. 启动压力梯度曲线特征

本次研究对松辽盆地大安油田扶余致密-低渗透砂岩油层的启动压力梯度进行了测试分析与大庆、长庆油田致密砂岩储层启动压力梯度进行对比(图 2)。

由图 2 可以看出，水单相渗流的最小启动压力梯度随着渗透率的增大而急剧减小，当渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时候，启动压力梯度几乎为零，即对于致密砂岩储层，空气渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时，水单相渗流的非达西特征不明显。

4. 致密砂岩储层微观结构特征

4.1. 致密砂岩孔隙类型及特征

对于致密储层，微观孔隙以及喉道的观察对储层内部结构具有重要意义按孔隙成因，可将孔隙分为原生、次生及混合成因 3 大类。本区发育多种不同类型孔隙，包括粒间孔、杂基微孔、砾(粒)内溶孔、砾(粒)间溶孔、铸模孔、胶结物内溶孔、成岩缝、构造缝等。其中本区发育的主要原生孔隙类型为单晶片层间缝、矿物解理缝、粒间孔 3 类；主要次生孔隙类型为粒内溶孔、溶蚀孔、构造缝 3 类。致密砂岩纳米级孔隙非常发育，类型主要有：矿物晶间孔、粒内孔隙、微裂缝(图 3)。

矿物晶间孔是充填于孔隙中的自生矿物晶体间的孔隙,自生矿物以伊利石、绿泥石、石英为主(图 3(a)),也包括少量方解石等碳酸盐岩矿物;粒内孔隙见于岩石骨架颗粒矿物形成的孔隙,主要为石英溶蚀、长石溶蚀等形成的纳米级孔隙。此类孔隙分布较零散,孔隙间不连通或者连通性极差。其中石英粒内溶孔为石英表面溶蚀孔隙,成椭球状、串珠状分布,孔隙大小 42~407 nm (图 3(b))。长石粒内溶孔为长石表面淋滤形成的溶孔,椭圆形、片状分布,孔隙大小 352 nm~1.55 μm (图 3(c))。微裂缝是连接微观孔隙与宏观裂缝的桥梁,发育在致密砂岩中的微裂缝主要有两种类型,一种发育在颗粒内部,另一种发育在碎屑

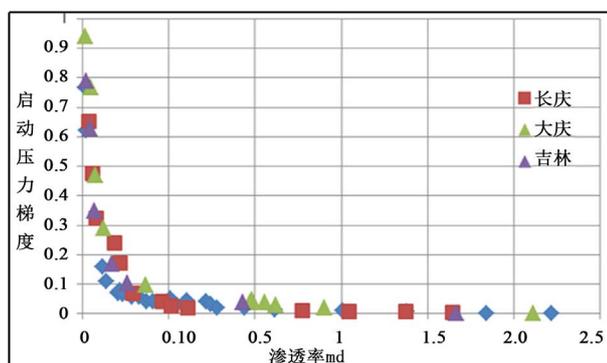


Figure 2. Relationship between start-up pressure gradient and permeability

图 2. 启动压力梯度与渗透率关系

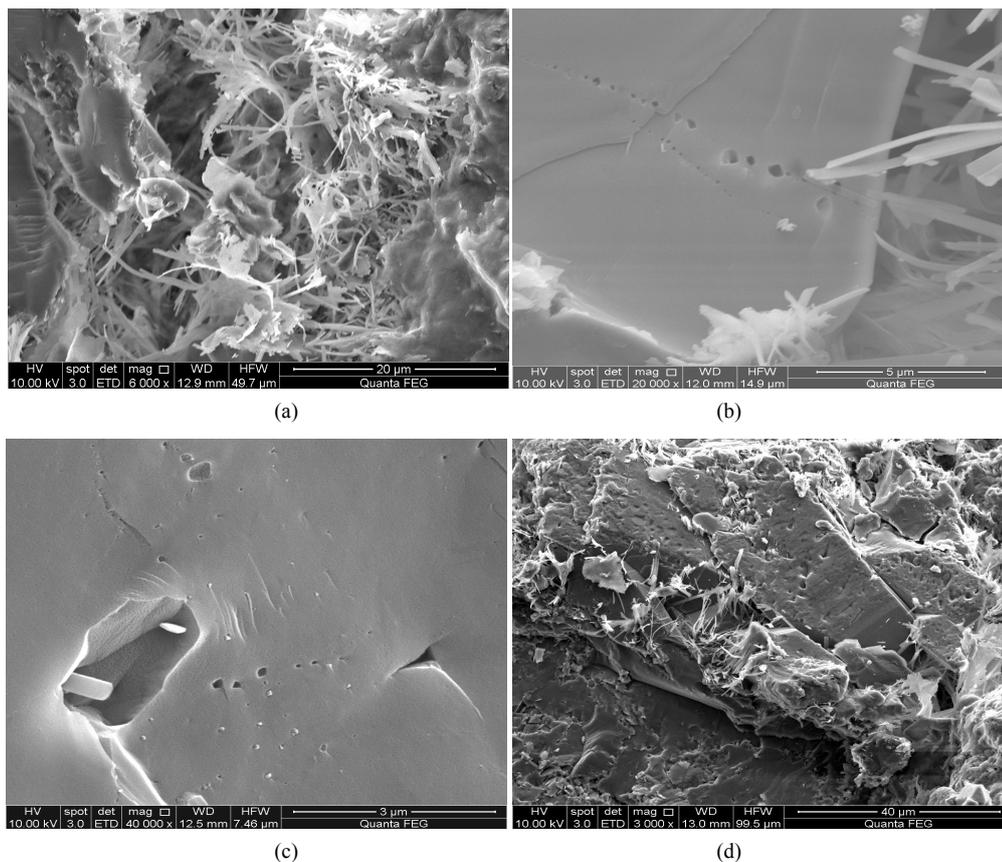


Figure 3. Characteristics of nano scale pores in tight sandstone

图 3. 致密砂岩纳米级孔隙特征

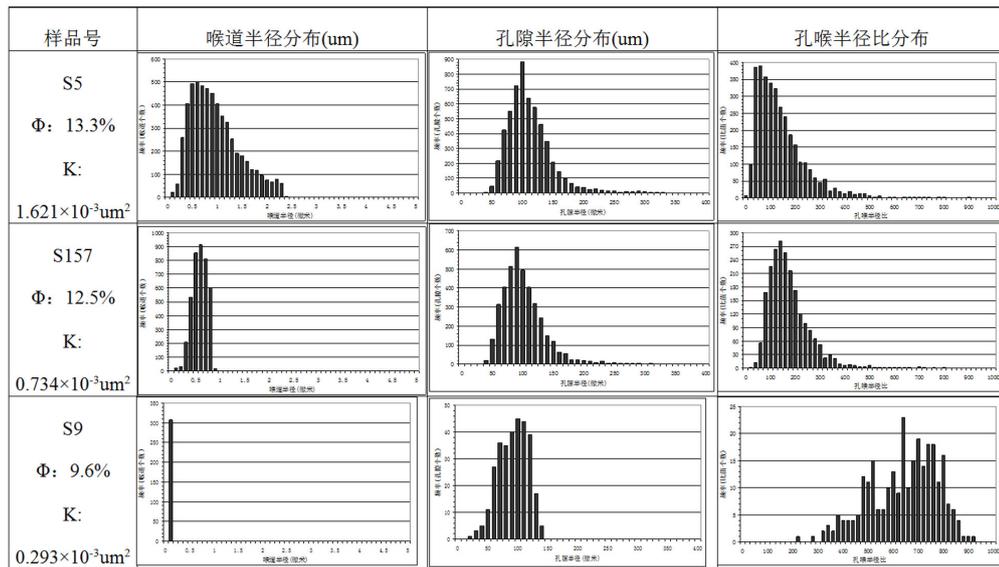


Figure 4. Characteristics of nano scale pores in tight sandstone

图 4. 致密砂岩纳米级孔隙特征

颗粒边缘。存在微裂缝的区域，岩石脆性指数较高，易形成微裂缝网络，从而成为致密砂岩微观尺度上油气渗流的主要通道。本区共发现两种类型微裂缝：颗粒边缘微裂缝，为石英矿物晶间缝，发育在碎屑颗粒边缘，锯齿状弯曲，长条形分布，缝宽宽度 135~540 nm (图 3(c))。颗粒内微裂缝，为石英矿物内微裂缝，发育在矿物颗粒内部，锯齿-线状分布，弯曲度较小，缝宽宽度 31~154 nm (图 3(d))。

4.2. 致密砂岩孔喉分布特征

为了研究致密砂岩储层启动压力梯度与微观结构的关系，分别选取物性不同的三类样品，通过恒速压汞对致密-低渗透砂岩样品的孔喉分布进行了测试分析(图 4)，结果表明，渗透率不同，孔隙分布虽有差异，但不明显，而喉道半径对所有样品物性有较强控制作用，孔喉半径比也呈现明显差异。当渗透率小于 $0.3 \times 10^{-3} \text{um}^2$ 时，孔隙喉道集中在 0.1~0.2 um，微观孔喉结构对致密砂岩储层渗透率影响极大，是启动压力梯度剧增的主要原因。

4. 结论

(1) 致密砂岩储层客观存在启动压力梯度，启动压力梯度随渗透度减小而急剧增大，因此储层启动压力梯度的测试及其与储层物性参数的关系分析是开发好致密油田的一项重要基础工作。

(2) 致密砂岩储层发育大量纳米级孔隙，类型主要有：矿物晶间孔、粒内孔隙、微裂缝等，纳米级孔隙增加了毛细管压力，这是致密砂岩启动压力梯度增大的主要原因。

(3) 致密砂岩储层孔隙喉道分布集中在 150 纳米左右，孔喉比大于正常砂岩储层，是形成启动压力梯度的关键因素。

参考文献 (References)

- [1] 罗瑞兰, 程林松, 彭建香, 等 (2005) 油气储层渗透率应力敏感性与启动压力梯度的关系. *西南石油学院学报*, 27, 20-22.
- [2] 王尤富, 吴刚, 安淑凯, 等 (2006) 低渗透油层岩石启动压力梯度影响因素的试验研究. *石油天然气学报*, 28, 112-113.

- [3] 张楠, 王晓琴, 徐锋, 等 (2012) 启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透油藏直井产能的影响. *特种油气藏*, **19**, 74-77.
- [4] 王晓冬, 郝明强, 韩永新 (2013) 启动压力梯度的含义与应用. *石油学报*, **34**, 188-191.
- [5] 川庆全, 袁敏 (2002) 油气田开发常用名词解释. 石油工业出版社, 北京, 292-302.
- [6] 孔祥言 (2010) 高等渗流力学. 中国科技大学出版社, 合肥, 538-539.
- [7] 韩洪宝, 程林松, 张明禄, 等 (2004) 特低渗油藏启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法. *石油大学学报*, **6**, 35-41.
- [8] 吕成远, 王建, 孙志刚 (2002) 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究. *石油勘探与开发*, **29**, 86-89.
- [9] 牟学益, 刘永祥 (2001) 低渗透油田启动压力梯度研究. *油气地质与采收率*, **8**, 58-59.