

特低渗透储层渗流特征和影响因素

何文祥^{1,2}, 马清^{1,2}, 马超亚³

1. 长江大学地球化学系, 湖北荆州 434023
2. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北荆州 434023
3. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第七采油厂, 陕西吴旗 717606

摘要 为了研究特低渗透储层渗流特征及影响因素,以鄂尔多斯盆地白豹油田为例,对特低渗透岩心的单相和两相渗流特征进行分析。结果表明,特低渗岩心单相渗流具有拟启动压力梯度,渗透率越小,拟启动压力梯度越大;其渗流曲线不再为一条直线,而为下凹型曲线,呈现非达西渗流特征;其流变曲线不是直线,而为上凸型曲线,流体为非牛顿假塑性流体,在较小外力作用下不发生流动,只产生弹性变形,只有当外力大于某值时,流体才发生流动,且具有明显的屈服应力;动极限剪切应力与渗透率的关系表明,动极限剪切应力随渗透率减小而急剧增大;随着剪切速率的增大,视黏度逐渐降低,在剪切作用之后,流体浓度具有变小的特性;油水两相渗流曲线说明束缚水饱和度和残余油饱和度偏高,共渗区较窄,且随着含水饱和度增大,油相渗透率快速下降,水相渗透率缓慢增长。岩心的渗透率大小、润湿性、水锁等因素均对渗流特征有影响。

关键词 特低渗透储层;启动压力梯度;单相渗流;非达西渗流

中图分类号 TE348

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.01.03

Seepage Characteristics and Influencing Factors in Ultra-low Permeability Reservoirs

HE Wenxiang^{1,2}, MA Qing^{1,2}, MA Chaoya³

1. Department of Geochemistry, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei Province, China
2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education; Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei Province, China
3. No. 7 Production Plant, Changqing Oil Field Company, China National Petroleum Corporation, Wuqi 717606, Shaanxi Province, China

Abstract In order to study seepage characteristics and influencing factors in ultra-low permeability reservoirs, with samples taken from Ordos, experiments of single phase flow and oil-water phase flow were conducted. The results indicate there exists a threshold pressure gradient for single phase flows for part of samples. The flow is of non-darcy seepage when the pressure gradient is low and it changes into darcy flow at high pressure; but for other samples, no obvious non-darcy flow is found. The lower the core permeability is, the higher the pressure under which non-Darcy state will retain and less the flow volume will be. The flow curve for the core is not a straight line but a curve protruding to the shearing stress axis. The fluid is non-Newtonian and fake plastic fluid, which does not move besides some elastic deformation under a weak external force, and which moves under a strong external force, with an obvious yield stress. The relation between moving shearing stress and permeability indicates that the shearing stress decreases rapidly with the decrease of permeability. The apparent viscosity reduces slowly when the shearing rate increases. The density of the fluid decreases after shearing. Irreducible water saturation and residual oil saturation become high and the two-phase region becomes narrow under the condition of two-phase seepage. The relative permeability value of oil-phase reduces quickly and the water-phase increases slowly with the increase of water saturation. The permeability, wettability and water-lock influence the seepage characteristics.

Keywords ultra-low permeability reservoirs; threshold pressure gradient; single phase flow; non-Darcy flow

收稿日期: 2010-11-10; 修回日期: 2010-11-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(G199902250)

作者简介: 何文祥, 副教授, 研究方向为油藏描述和油田开发, 电子信箱: hwxlyhky@gmail.com

0 引言

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,低渗透油气资源丰富,达 68 亿 t,占整个盆地石油、天然气总资源量的 92% 以上^[1-3],且特低渗透资源比例较大。2009 年,盆地内两大主要油气生产实体——长庆油田和延长石油油气产量创历史新高,整个盆地合计生产油气当量达 4406.7×10⁴t,成为中国第二油气生产盆地和第一天然气产区^[3]。但随着特低渗透油田储量动用程度增加,油田的开发矛盾越来越突出,主要表现为油井产量低,注水压力高且注水量低,油井低含水期短,含水上快,采油、采液指数递减快,采油速度和采收率低等。

研究表明,低渗透油藏由于储层孔、喉细小,在流体流动过程中容易受到储层敏感性、润湿性以及水锁等因素的影响,其渗流特征明显不同于中、高渗透油藏^[4-7],特低渗透储层性质与低渗透储层相比性质更加特殊,相关的文献报道较少,且被研究盆地由于产能上升快,油田将主要精力集中在扩大勘探、开发面积提高产能建设方面,对特低渗透储层的基础研究如岩心渗流实验分析方面较不全面、系统,因此,加强对特低渗透储层的渗流特征、规律及影响因素等方面的综合深入研究,深刻认识特低渗透储层与低渗透和中高渗透储层本质区别,开发时避免沿用中高渗透储层的开发经验和思维,对特低渗透油田的合理、科学、高效开发具有极其重要的意义。为此,本文以鄂尔多斯盆地白豹油田长 6 储集层特低渗透岩心为例,开展储集层渗流特征和影响因素研究,其研究结果可为油田开发政策的制定和调整提供依据。

1 单相渗流特征

岩心取自白豹油田白 209 区块,实验岩心共 5 块,孔隙度 10%~13%,渗透率 (0.1~3.62)×10⁻³μm²,属于低孔、特低渗岩心。

实验岩心为钻取的圆柱岩心,直径 2.5cm,长 6.5cm,经酒精、苯洗油后烘干。实验流体为地层水,实验温度为地层真实温度 50℃。在不同驱替速度下,进行单相渗流实验,在驱替达到稳定条件下,测定岩心两端压差与渗流速度。

1.1 渗流速度与压力梯度

实验所得水相渗流速度与压力梯度关系曲线如图 1 所示,实验岩心曲线形态基本满足吴景春等^[8]所述的下凹型曲线,总体上看,渗透率越大,非线性程度越明显。由图 1 还可得知以下特征。

(1) 渗透率为 3.62×10⁻³μm² 的岩心渗流曲线由曲线段逐渐过渡为直线段,当压力梯度较小时,渗流曲线为下凹型曲线,随着压力梯度的增大,逐渐变为直线,此时渗流速度与压力梯度呈线性关系。其他岩心渗流曲线基本呈直线。

(2) 直线段的延长线与压力梯度正轴相交,具有拟启动压力梯度。

(3) 随着压力梯度增大,渗流速度增大,且渗透率越高,渗流速度增大幅度也越大。

根据渗流速度与压力梯度的拟合渗流曲线,得到拟合公

式,渗流曲线直线段的延长线与压力梯度轴的交点,即为岩心的拟启动压力梯度,由图 2 可以看出,拟启动压力梯度与渗透率负相关,当渗透率小于 0.25×10⁻³μm² 时,随着渗透率的减小,拟启动压力迅速增大。

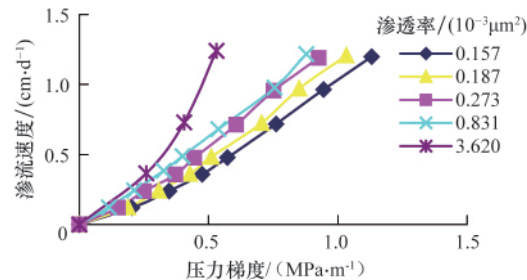


图 1 单相渗流曲线

Fig. 1 Single-phase seepage curve

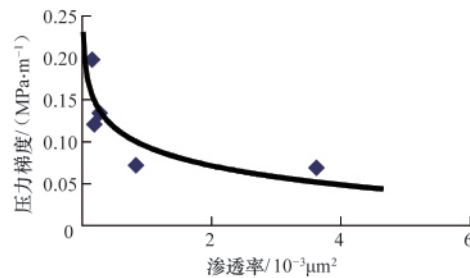


图 2 拟启动压力梯度与渗透率关系

Fig. 2 Relation between threshold pressure gradient and permeability

国内外学者对特低渗非达西渗流成因的研究结果表明,其主要成因有以下几种^[9]:① 储层本身的性质导致非达西流。由于孔隙喉道狭窄、连通性差、储层结构复杂导致渗透率急剧下降。② 各种润湿效应和敏感性的影响。主要是各种黏土矿物与流体之间的相互作用导致储层渗透率下降。③ 岩石骨架变形作用。有效压应力的上升迫使岩石骨架变形,在一定条件下产生塑性形变以致破坏,造成孔隙度、渗透率急剧下降。④ 流体(尤其非牛顿流体)本身的流变性质。黏度异常高或流度异常低,当这种流体流过特低渗透储层时,渗流速度急剧下降。上述原因综合导致非达西渗流,当压力梯度增大到一定程度时,流体克服这些影响而恢复为达西渗流。

研究表明^[9],鄂尔多斯盆地延长组储集层在强烈的压实及胶结作用影响下,原生孔隙丧失殆尽,是形成特低渗透储层的主要原因;而晚期的溶蚀作用,特别是部分黏土矿物的溶解,使得储层的孔隙度和渗透率有所改善,这种改善虽然增加了储集层渗透率,但程度非常有限,而且这种非均质化的溶蚀作用使储集层孔隙结构变得更加复杂,加上储集层较为丰富的黏土矿物增大了流体和岩石表面的相互作用,流体在多孔隙介质中流动时,当渗透率小到一定程度,流体与孔道壁及黏土矿物产生各种润湿效应及敏感性,从而导致只有当压力达到一定值(即启动压力梯度)时,流体才会产生流动,且渗透率越低,启动压力梯度也越高。

1.2 剪切应力、剪切速率和视黏度

使用与单相渗流实验相同的岩心进行剪切应力、剪切速率和视黏度间关系测定实验,以水相为例,流体的剪切应力与剪切速率关系如图3所示,曲线具有以下特征。

(1) 各岩心流变曲线均不为直线,说明流体为非牛顿流体。流体在较小外力作用下不发生流动,只产生弹性变形,只有当外力大于某值时,流体才发生流动,流体具有明显的屈服应力。

(2) 流变曲线均为上凸型曲线,说明流体为假塑性流体。

不同渗透率岩心的动极限剪切应力与渗透率的关系如图4所示,动极限剪切应力随渗透率减小而急剧增大。

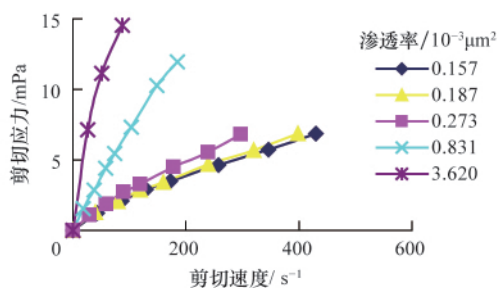


图3 剪切速率与剪切应力的关系

Fig. 3 Curve of shearing rate vs shearing stress

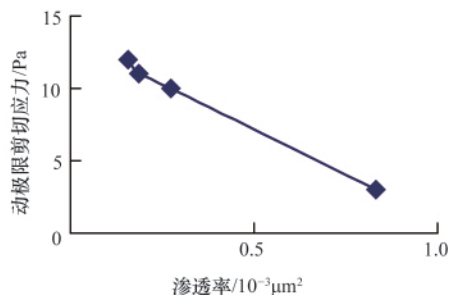


图4 动极限剪切应力与渗透率的关系

Fig. 4 Relationship between shearing stress and permeability

视黏度与剪切速率的关系均表明,随着剪切速率的增大,视黏度逐渐降低(图5),表明流体在剪切作用之后,具有浓度变小的非牛顿流体特性。

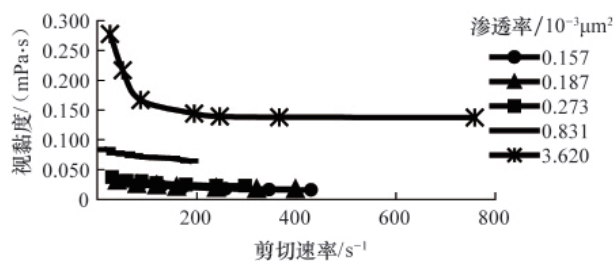


图5 视黏度与剪切速率关系曲线

Fig. 5 Relationship between apparent viscosity and shearing rate

2 油水两相渗流

2.1 相对渗透率曲线

岩心取自白豹油田白209区块长6储集层。岩心直径2.5cm,长约6.5cm;实验仪器:驱替泵、恒温箱和夹持器;实验流体为白豹油田地层水和原油。将岩心洗油、烘干,气测渗透率;抽真空,饱和地层水,测其有效孔隙体积和孔隙度;采用岩心流动装置测定油水两相相对渗透率。

分析17块岩心的油水两相相对渗透率曲线,发现油相渗透率曲线形态基本相似,水相渗透率曲线形态特征可归纳为两类,即下凹型和上凸型(图6)。随着含水饱和度增加,下凹型曲线样品的水相相对渗透率增加较上凸型更加缓慢。除此之外,两类曲线具有一些共同特征:① 束缚水饱和度和残余油饱和度均偏高,共渗区较窄;② 随着含水饱和度增大,油相相对渗透率 K_{ro} 几乎呈直线降低,水相相对渗透率 K_{rw} 增大缓慢,表明随着含水量上升,不但采油指数下降,采液指数也随之降低。

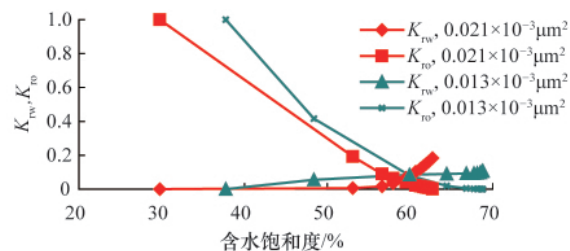


图6 油水相对渗透率曲线

Fig. 6 Oil and water relative permeability curves

2.2 影响油、水渗流特征的因素

油水渗流特征主要包括束缚水饱和度、残余油饱和度等方面^[10-11]。其中束缚水饱和度和残余油饱和度是影响、控制油水相对渗透率曲线的关键要素,而其影响因素包括渗透率、润湿性、贾敏、水锁效应等。

2.2.1 渗透率

渗透率对渗流特征的影响主要体现在对孔隙结构、黏土矿物含量等的影响,一般情况下,孔隙结构好的样品束缚水饱和度低,残余油饱和度也低,两相共渗区较宽;孔隙结构差的样品则相反。因为孔隙半径大,相应比表面积减小,使束缚水饱和度较小,也使流体通过多孔介质的能力增强,渗流阻力小,流体相对渗透率增加。

图7为研究区渗透率与油水两相渗流参数的关系图,从图中可以看出,随着渗透率增加:① 油相有效渗透率逐渐增加;② 交汇点处油、水相相对渗透率逐渐增加;③ 油水两相共渗区逐渐变宽;④ 残余油和残余水饱和度逐渐减少。

2.2.2 储层润湿性

根据共渗点处含水饱和度大小,研究区样品的相渗曲线可以归纳为3种类型^[12-13],即大于、等于和小于50%,但以共渗点大于50%为主,占分析样品的70%以上。一般来说,小于50%为亲油岩石,大于50%为亲水岩石,等于50%时为中性。

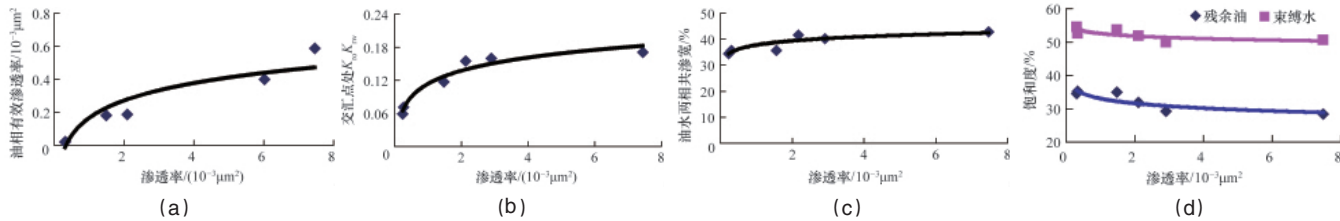


图7 渗透率与油水两相渗流参数关系图

Fig. 7 Relation between permeability and seepage parameters

由图 8 可以看出,亲油岩石水相渗透率随含水饱和度的增大迅速增大,而亲水岩石其增长缓慢,且亲油岩石的残余油饱和度大于亲水岩石的残余油饱和度。

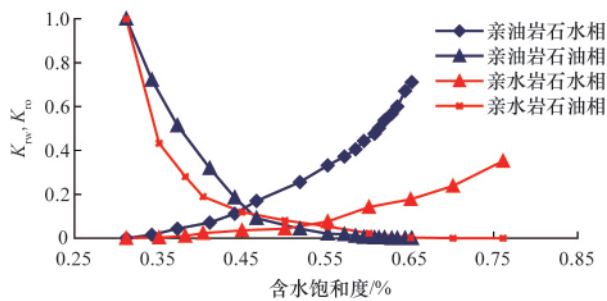


图8 不同润湿性储层的相渗曲线

Fig. 8 Oil and water relative permeability curves with different wettability

储层润湿性对相渗曲线的影响与岩石的亲油和亲水性质相关,随着含水饱和度增加,亲水岩石的水相渗透率增加较亲油岩石迅速。

3 结论

(1) 特低渗岩心单相渗流具有拟启动压力梯度,渗透率越小,拟启动压力梯度越大;其渗流曲线不再为一条直线,为下凹型曲线,呈现非达西渗流特征;其流变曲线不是直线,为上凸型曲线,流体为非牛顿假塑性流体,在较小外力作用下不发生流动,只产生弹性变形,只有当外力大于某值时,流体才发生流动,且具有明显的屈服应力;动极限剪切应力与渗透率的关系表明,动极限剪切应力随渗透率减小而急剧增大;随着剪切速率的增大,视黏度逐渐降低,在剪切作用之后,流体浓度具有变小的特性。油水两相渗流具有束缚水饱和度和残余油饱和度偏高,油水两相共渗区较窄的特征。

(2) 岩心的渗透率大小、润湿性等因素均对渗流特征有影响。通常情况下,渗透率越大,束缚水饱和度和残余油饱和度越低,两相区越宽,水锁效应越弱。而不同的润湿性对残余油和束缚水饱和度有较大影响,对亲油岩石,水驱后残余油饱和度高于相同渗透率的亲水岩石。

(3) 针对特低渗透储层具有非达西渗流的特征,为了提高油田采收率,可以采取增大泄流半径、减小井距、增大注采压力梯度或超前注水提高地层压力等措施降低启动压力对油水渗流的影响。

参考文献 (References)

- [1] 李书恒, 赵继勇, 崔攀峰. 超低渗透储层开发技术对策[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(3): 128-131.
Li Shuheng, Zhao Jiyong, Cui Panfeng. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(3): 128-131.
- [2] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现状与未来[J]. 中国工程科学, 2009, 11(8): 29-37.
Hu Wenrui. *Engineering Sciences*, 2009, 11(8): 29-37.
- [3] 胡文瑞, 翟光明. 鄂尔多斯盆地油气勘探开发的实践与可持续发展[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 64-71.
Hu Wenrui, Zhai Guangming. *Engineering Sciences*, 2010, 12(5): 64-71.
- [4] 蔡忠. 储集层孔隙结构与驱油效率关系研究 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(6): 45-49.
Cai Zhong. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(6): 45-49.
- [5] 徐维生, 柴军瑞, 王如宾, 等. 低渗透介质非达西渗流研究进展 [J]. 勘察科学技术, 2007, 3: 20-24.
Xu Weisheng, Cai Junrui, Wang Rubing, et al. *Investigation Science and Technology*, 2007, 3: 20-24.
- [6] 时宇, 杨正明, 黄延章. 低渗透油藏非线性两相渗流研究[J]. 力学与实践, 2008, 30(5): 16-18.
Shi Yu, Yang Zhengming, Huang Yanzhang. *Mechanics and Practice*, 2008, 30(5): 16-18.
- [7] 王启蒙, 汪强, 诸葛镇. 低渗储层渗流规律及水驱油机理研究[J]. 小型油气藏, 2003, 8(1): 29-34.
Wang Qimeng, Wang Qiang, Zhuge Zhen. *Small Hydrocarbon Reservoir*, 2003, 8(1): 29-34.
- [8] 吴景春, 袁满, 张继成, 等. 大庆东部低渗透油藏单相流体低速非达西渗流特征[J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(2): 82-84.
Wu Jingchun, Yuan Man, Zhang Jicheng, et al. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1999, 23(2): 82-84.
- [9] 王华, 柳益群, 陈巍巍, 等. 鄂尔多斯盆地郑庄区长 6 储层成岩作用及其对储层的影响 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(1): 12-18.
Wang Hua, Liu Yiqun, Chen Weiw, et al. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2010, 25(1): 12-18.
- [10] 祝春生, 程林松, 阳忠华, 等. 特低渗透砂岩油藏渗流特性研究[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(2): 102-104.
Zhu Chunsheng, Chen Linsong, Yang Zhonghua, et al. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(2): 102-104.
- [11] 石京平, 向阳, 张丽萍, 等. 榆树林油田低渗透储层微观孔隙结构特征及渗流特性[J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(1): 90-94.
Shi Jingping, Xiang Yang, Zhang Liping, et al. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2003, 23(1): 90-94.
- [12] 贾振岐, 孙念, 吴景春, 等. 特低渗透岩心相对渗透率实验研究[J]. 特种油气藏, 2009, 16(1): 82-83.
Jia Zhenqi, Sun Nian, Wu Jingchun, et al. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2009, 16(1): 82-83.
- [13] 刘中云, 曾庆辉, 唐周怀, 等. 润湿性对采收率及相对渗透率的影响 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 148-150.
Liu Zhongyun, Zeng Qinghui, Tang Zhouhui, et al. *Oil & Gas Geology*, 2000, 21(2): 148-150.

(责任编辑 刘志远)