

胜利郑 411 区块超稠油单相渗流特征试验研究

孙建芳^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083;2. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院,山东东营 257015)

摘 要:郑 411 区块沙 3 段超稠油性质复杂、开采难度大。为了提高沙 3 段的采收率,研究了其超稠油渗流特征与常规稠油的差别。采用旋转黏度计和原油渗流流变特性测试装置,测定并分析不同温度下超稠油的流变特征,得出郑 411 区块超稠油牛顿流体与非牛顿流体转化的临界温度为 104 ℃。利用室内试验装置,模拟单相渗流过程,研究了不同温度下超稠油的渗流特征,计算了不同温度下的启动压力梯度。结果表明:超稠油在低于临界温度下表现为非达西渗流特征,分为 3 个渗流阶段,不同阶段有不同的压力梯度特征和渗流特征;在高于临界温度时表现为达西渗流特征。

关键词:超稠油 流变性 单相渗流 启动压力梯度 郑 411 区块

中图分类号:TE312 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)06-0086-05

Experimental Study on Single Phase Flow in Block Zheng 411 of Shengli Ultra Heavy Oil Reservoir

Sun Jianfang^{1,2}

(1. College of Energy, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 2. Research Institute of Geology Science, Shengli Oilfield Branch, Dongying, Shandong, 257015, China)

Abstract: Some difficulties exist in ultra heavy oil production of Block Zheng 411 due to its complex properties. In order to improve oil recovery rate of such ultra-heavy oil in Block Zheng 411, the differences of seepage flow characteristics between ultra heavy oil and conventional heavy oil were studied. Experiments of rheological properties of the ultra heavy oil under different temperature were done using spin viscometer and fluid flow experimental apparatus. It was found that the transitional temperature between Newton fluid and non-Newtonian fluid is around 104 ℃. The flow characteristics of ultra heavy oil in the single-phase seepage flow process under different temperature were studied through simulation experiments and pressure gradient of flow initiation was obtained. The experimental results indicate that heavy oil belongs to non-Darcy flow below the critical temperature and could be divided into three flow stages under low temperature with different flow initiation pressure gradients and seepage characteristics. Heavy oil belongs to Darcy flow above the critical temperature.

Key words: ultra heavy oil; rheology; single phase percolation; flow initiation pressure gradient; Block Zheng 411

郑 411 区块构造上处于东营凹陷北部陡坡带西段,沙 3 段是主要含油层系,储层为沙 3 段上扇三角洲前缘的含砾砂岩和砾状砂岩地层,砾石以片麻岩为主。沙 3 上油藏属高孔、高渗超稠油油藏,储层孔隙度 34.8%,平均渗透率 $6\,311.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油层温度约 65 ℃,压力为 12.58~13.75 MPa,压力系数小于 1,属常温、常压系统,地面原油黏度高,原油在

收稿日期:2011-06-12;**改回日期:**2011-11-15。

作者简介:孙建芳(1972—),男,山东曹县人,1994 年毕业于西南石油学院石油工程专业,2002 年获石油大学(华东)油气田开发工程专业硕士学位,在读博士研究生,高级工程师,主要从事稠油油藏开发研究。

联系方式:(0546)8715430, sunjianfang968.slyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化油气勘探开发工程技术基础性前瞻性研究项目“稠油热采非达西渗流机理研究”(编号:P08078)部分研究内容。

油层原始条件下不能流动^[1]。

根据稠油基本物性的测定方法^[2-4],测得郑 411 区块超稠油中芳香烃 27.4%(质量分数,下同),饱和烃 20.1%,沥青质 7.1%,胶质 45.4%,凝固点为 33 ℃,常温下不能流动,地层条件下 90 ℃时黏度为 6 019 mPa·s,110 ℃时为 1 640 mPa·s。由于超稠油的胶质、沥青质质量分数高,密度和黏度大^[5],导致流动困难,开采难度大^[6]。

目前,国内外对超稠油的开采技术、工艺方法进行了大量的物理模拟和数值模拟研究^[7],获得了一些认识,但没有对超稠油的非牛顿特性、非达西渗流规律进行系统研究。因此,针对该区块超稠油渗流特性和其产出层的油层特征,研究了超稠油的渗流特征,以指导油田开发方案的编制与调整。

1 非牛顿特性试验

根据力学性质可把流体分为牛顿流体和非牛顿流体。其力学性质符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体;反之,为非牛顿流体^[8-9]。流体的受力与变形关系可用流体的流变性表示^[10]。

利用 Brookfield 公司生产的 Model Dv-111+ Programmable Rheometer 可编程式流变仪,在不同温度下对郑 411 区块的超稠油进行了流变性测试,每间隔 15 min 记录一次数据,流变曲线如图 1 所示。

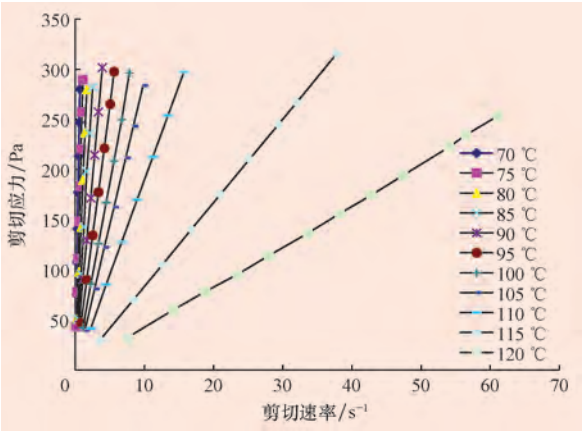


图 1 不同温度下的超稠油流变曲线
Fig. 1 Rheological curve of ultra heavy oil under different temperatures

从图 1 可以看出,剪切应力与剪切速率呈很好的线性关系,因此,可以认为试验所用的超稠油属于宾汉流体^[11],其本构方程可表示为:

$$\tau = \tau_0 + \eta D \tag{1}$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_0 为屈服值,Pa; η 为表观黏度,Pa·s; D 为剪切速率,1/s。

对油样的流变曲线进行线性回归,得到超稠油在不同温度下流变曲线所对应的流变方程(即超稠油的本构方程,见表 1)。

表 1 不同温度下的超稠油本构方程
Table 1 Constitutive equation of ultra heavy oil under different temperatures

温度/℃	本构方程	相关系数
70	$y=405.760x+7.723\ 8$	0.999 2
75	$y=253.680x+6.592\ 9$	0.999 7
80	$y=163.940x+5.640\ 0$	0.999 8
85	$y=110.960x+4.673\ 3$	0.998 2
90	$y=75.778x+3.171\ 4$	0.999 8
95	$y=52.392x+2.211\ 5$	0.999 8
100	$y=37.360x+0.685\ 7$	0.999 6
105	$y=28.988\ 0x$	1.000 0
110	$y=18.953\ 0x$	1.000 0
115	$y=8.344\ 1x$	1.000 0
120	$y=4.118\ 0x$	0.999 5

从表 1 可以看出,郑 411 区块超稠油存在一个临界温度点 T_c ,当温度 $T>T_c$ 时,原油流变行为表现牛顿流体流变特性^[12];当温度 $T<T_c$ 时,原油流变行为表现非牛顿流体的流变特性。

高于临界温度时,超稠油表现为牛顿流体的流变行为,其流变模式为^[13]:

$$\tau = \eta D \tag{2}$$

郑 411 区块原油样品的流变性测试结果表明,随着温度的升高,其非牛顿特性逐渐减弱,到达临界温度后转化为牛顿流体的特征^[14]。根据屈服值与温度的关系曲线(见图 2),得郑 411 区块超稠油的临界温度为 104 ℃。

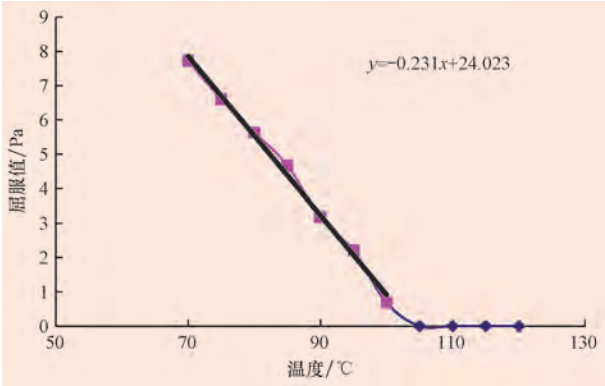


图 2 屈服值与温度的关系曲线
Fig. 2 Relationship between yield value and temperature

2 单相渗流试验

2.1 试验方法

流变性测试试验表明,超稠油在 104 ℃ 以下具有明显的非牛顿特征,因而其渗流特性也必然不同于牛顿流体。采用人造岩心进行不同温度下超稠油的渗流特征试验,以减少复杂因素对其的影响。

试验仪器包括 $\phi 2.5\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 的耐高温填砂管,精度 0.01 mL/min 的平流泵,恒温箱,压力表,秒表。

首先,用 60~70 目的砂子填出渗透率为 $6.15\text{ }\mu\text{m}^2$ 、孔隙度为 32.06% 的岩样,置于恒温箱中,在 90,100,110 和 120 ℃ 温度下进行单相渗流试验。模拟油层的地质条件,利用平流泵和压力表测定超稠油通过填砂模型两端的流量和压差(见图 3a),导出渗流速度与压力梯度的关系和启动压力梯度与温度的关系(见图 3b),从而得到超稠油的地下渗流流变特性^[15]。

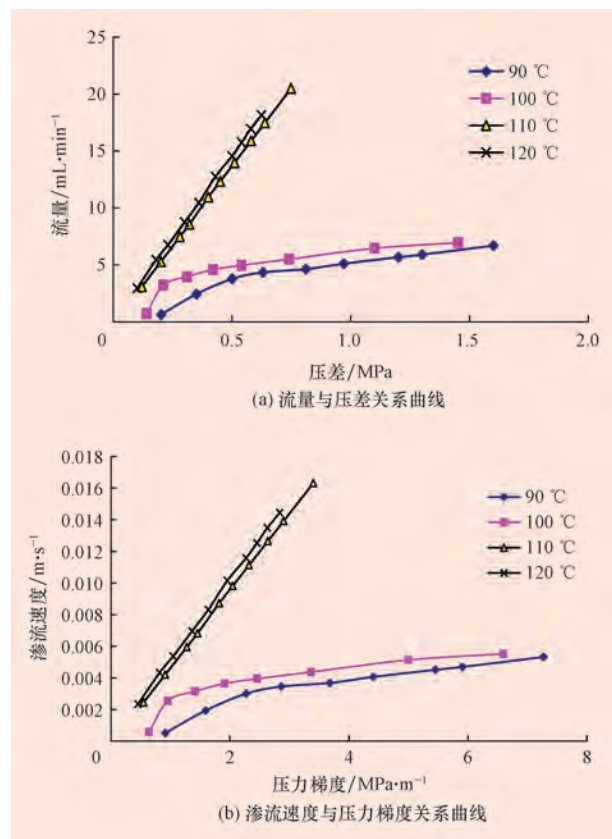


图3 不同温度下超稠油单相渗流特征曲线

Fig. 3 Single-phase flow characteristics of ultra heavy oil under different temperatures

2.2 结果分析与讨论

根据不同温度下郑 411 区块超稠油的渗流特征曲线,可以看出温度对超稠油渗流有很大影响。

2.2.1 低于临界温度

当温度低于临界温度时,在较低压力梯度范围内,超稠油的渗流速度很低,渗流速度与压力梯度呈非线性关系,超稠油的流动表现为非达西渗流特征,存在初始压力梯度;在较高的压力梯度范围内,当超稠油结构被完全破坏时,超稠油的流动表现为拟达西渗流特征。渗流过程可以分为 3 个阶段。

低流速区 在压力梯度较低时,渗流速度很小,随着压力梯度的增大,渗流速度上升非常缓慢。这主要是因为,在较小的压力梯度下,胶质和沥青质等大分子所形成的空间结构没有遭到破坏,破坏与恢复处于动态平衡。此时超稠油在油藏中的渗流是没有破坏这种空间结构的蠕动。

过渡区 随着压力梯度的增大,渗流速度上升较快,渗流曲线由曲线逐渐向直线过渡。在该区域内,随着压力梯度的增大,逐渐打破了胶质、沥青质所形成空间结构的破坏与恢复的平衡状态,随着结构的破坏,渗流阻力明显减小,渗流速度增大。

拟线性区 在压力梯度较高时,渗流速度与压力梯度呈拟线性关系。此时胶质、沥青质所形成的空间结构已经完全遭到破坏,由空间结构造成的流动阻力减小到最小。将曲线过渡为拟线性区时的压力梯度定义为初始压力梯度(也称启动压力梯度),只有当压力梯度大于该值时,超稠油才能够很好地流动起来^[16-17]。

2.2.2 高于临界温度

当温度高于临界温度时,稠油的流动表现为达西渗流特征,渗流速度与压力梯度呈线性关系。

随着温度的升高,超稠油的渗流能力有所提高,其初始压力梯度逐渐减小。在温度较高时,渗流速度与压力梯度呈线性关系,表现为达西渗流特征(如图 3b 中 110 和 120 ℃ 温度下的渗流曲线)。这是因为随着温度的升高,胶质与沥青质形成空间结构的坚固性降低,由于分子热运动的加强,分子之间的相互作用减弱,初始压力梯度开始降低。当温度高于临界温度时,屈服值为零,则其初始压力梯度为零,此时稠油流动符合达西定律,温度越高,渗流能力越强。其原因是:随着温度的升高,孔隙表面油膜厚度

变小,有效流动半径增大,渗流能力得到提高。

3 启动压力梯度计算

由于稠油黏度高,渗流阻力大,只有当驱动压力梯度超过启动压力梯度时,稠油才能流动^[18-19]。利用启动压力梯度可以确定稠油渗流半径的大小,而稠油渗流半径对稠油开发井的井距确定具有重要作用。

存在启动压力梯度时的渗流,符合非达西渗流规律运动方程^[15]:

$$v = \frac{K}{\mu}(G - \lambda)$$
(3)

$$v = aG - b$$
(4)

联立式(3)和(4)可得:

$$a = \frac{K}{\mu}$$
(5)

$$b = \lambda \frac{K}{\mu}$$
(6)

式中: v 为渗流速度,m/s; K 为渗透率, μm^2 ; μ 为液体的黏度,mPa·s; G 为压力梯度,MPa/m; λ 为启动压力梯度,MPa/m; a, b 为直线的系数。

由此可得启动压力梯度计算公式为:

$$\lambda = \frac{b\mu}{K} = b\left(\frac{K}{\mu}\right)^{-1}$$
(7)

根据单相渗流试验时不同渗流速度下测得的压力,计算出压力梯度,绘制 90 和 100 °C 温度下的低流速曲线段,并将其进行直线回归(见图 4,图 5)。

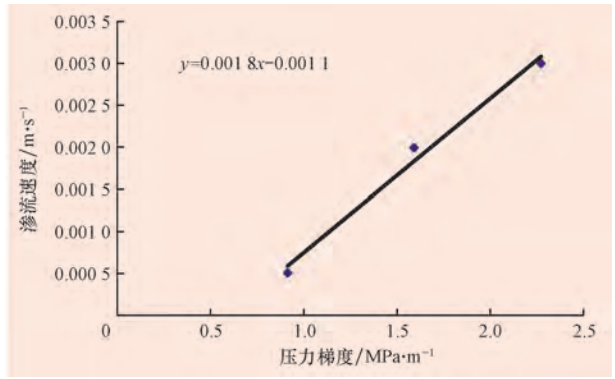


图 4 90 °C 超稠油单相渗流特征

Fig. 4 Single-phase flow characteristics of ultra heavy oil at 90 °C

根据图 4 可得,在 90 °C 温度下, $a=0.0018, b=0.0011, \lambda=0.61\text{ MPa/m}$;根据图 5 可得,在 100 °C 温度下, $a=0.0032, b=0.0011, \lambda=0.34\text{ MPa/m}$ 。

分析可知,郑 411 区块超稠油中胶质和沥青质的质量分数较高,原油在流动时所需要的启动压力梯度

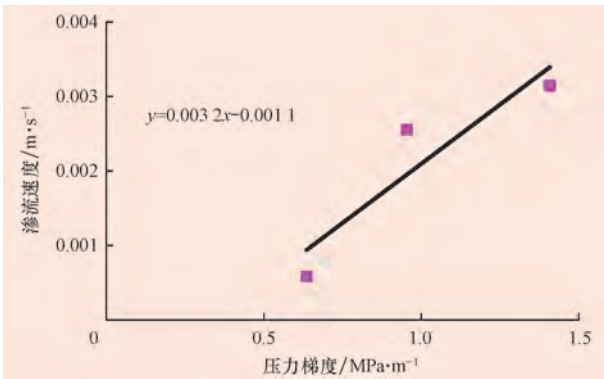


图 5 100 °C 超稠油单相渗流特征

Fig. 5 Single-phase flow of ultra heavy oil characteristics at 100 °C

比较高,在 90 °C 时启动压力梯度为 0.61 MPa/m,在 100 °C 时启动压力梯度为 0.34 MPa/m。

4 结 论

1) 流变试验研究表明,郑 411 区块超稠油的牛顿流体与非牛顿流体转化的临界温度为 104 °C。

2) 单相渗流特征试验研究结果表明,在不同温度下,郑 411 区块稠油的渗流特征明显不同。低于临界温度时,表现为非达西渗流特征,此时的非牛顿流体可分为 3 个渗流阶段,具有不同的压力梯度特征、流体分子结构状态及渗流特征;大于临界温度时,流动表现为达西渗流特征,渗流速度与压力梯度呈拟线性关系。

3) 对单相渗流试验数据进行处理,根据启动压力梯度的计算方法,求出了 90 和 100 °C 温度下的启动压力梯度:90 °C 时为 0.61 MPa/m,100 °C 时为 0.34 MPa/m。可以利用启动压力梯度指导该区块超稠油的开发。

参 考 文 献

References

[1] 程玉桥,牛春荣,苗德玉,等.胜利油区单家寺油田超稠油性质研究[J]. 油气地质与采收率,2002,9(4):33-34.
Cheng Yuqiao, Niu Chunrong, Miao Deyu, et al. Research on property of super heavy oil in Shanjiashi Oilfield of Shengli petroliiferous province[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002,9(4):33-34.

[2] 庞岁社,武平仓,宋南平.一种新的测定原油凝固点方法探讨[J]. 石油仪器,2006,20(1):42-43.
Pang Suishe, Wu Pingcang, Song Nanping. Discussion on a new method for determining the freezing point of crude oil[J]. Petroleum Instruments, 2006,20(1):42-43.

- [3] SY/T 6282—1997 稠油油藏流体物性分析方法:原油渗流流变特性测定[S].
SY/T 6282—1997 Analytical approach of fluid physical property for heavy-oil reservoirs; measurements of porous flow rheological characterization for crude oil[S].
- [4] 伍锐东,彭江华,刘波,等. 轮古15井区含水稠油流变实验研究[J]. 断块油气田,2009,16(6):62-64.
Wu Ruidong, Peng Jianghua, Liu Bo, et al. Experimental study on rheology property of heavy oil O/W emulsion in Lungu 15 Well Block[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(6): 62-64.
- [5] 戴树高,崔波,祁亚玲,等. 高粘度稠油开采技术的国内外现状[J]. 化工技术经济,2004,22(11):21-24.
Dai Shugao, Cui Bo, Qi Yaling, et al. World situation on exploiting technology of heavy oil[J]. Chemical Techno-Economics, 2004, 22(11): 21-24.
- [6] 刘文章. 热采稠油油藏[M]. 北京:石油工业出版社,1998:2-3.
Liu Wenzhang. Heavy oil reserve under thermal production [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 2-3.
- [7] 崔波,石文平,戴树高,等. 高粘度稠油开采方法的现状与研究进展[J]. 石油化工技术经济,2000,16(6):5-10.
Cui Bo, Shi Wenping, Dai Shugao, et al. Present situation and research progress of exploiting methods for highly viscous oil [J]. Techno-Economics in Petrochemicals, 2000, 16(6): 5-10.
- [8] 冯叔初,郭揆常,王学敏. 油气集输[M]. 东营:石油大学出版社,1988:23-25.
Feng Shuchu, Guo Kuichang, Wang Xuemin. Oil-gas gathering and transferring [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 1988: 23-25.
- [9] 邢义良,郎兆新,张丽华. 稠油流变性的测量和研究[J]. 西安石油学院学报,1998,13(2):25-27.
Xing Yiliang, Lang Zhaoxin, Zhang Lihua. The study and the measurement of rheology of viscous crude oil [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 1998, 13(2): 25-27.
- [10] Steinborn R, Flock D L. The rheology of heavy crude oils and their emulsions[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1983, 22(5): 8-10.
- [11] 何勇明,王允诚,姜淑霞,等. 宾汉流体稠油非稳态渗流时地层压力分布数学模型及直井产能预测[J]. 石油钻探技术,2006, 34(1):56-58.
He Yongming, Wang Yuncheng, Jiang Shuxia, et al. A mathematical model of stratum pressure distribution in heavy-oil reservoir with non-steady state bingham fluid and productivity prediction in vertical wells [J]. Petroleum Drilling Tech-
- niques, 2006, 34(1): 56-58.
- [12] 喻高明. 超特稠油流变性综合研究[J]. 河南石油,2004, 18(3):41-42.
Yu Gaoming. A comprehensive study on rheologic characteristic of ultra, super heavy oil [J]. Henan Petroleum, 2004, 18(3): 41-42.
- [13] 刘慈群. 幂律非牛顿流体渗流[J]. 大庆石油地质与开发, 1990, 9(3):4-5.
Liu Ciqun. Power law non-Newtonian fluid transfusion [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1990, 9(3): 4-5.
- [14] 阳晓燕,杨胜来,李秀峦,等. 非稳态法测定稠油油藏相对渗透率实验研究[J]. 断块油气田,2010,17(6):745-747.
Yang Xiaoyan, Yang Shenglai, Li Xiuluan, et al. Experimental study on determining relative permeability of heavy oil reservoir with nonsteady state method [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(6): 745-747.
- [15] 邓玉珍,刘慧卿. 低渗透岩心中油水两相渗流启动压力梯度试验[J]. 石油钻采工艺,2006,28(3):37-40.
Deng Yuzhen, Liu Huiqing. Experiment on starting pressure gradient of oil and water two phases flow in low permeability core [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(3): 37-40.
- [16] 张跃雷,程林松,刘倩. 稠油流变特性的基础实验研究[J]. 特种油气藏,2009,16(6):64-66.
Zhang Yuelei, Cheng Linsong, Liu Qian. Basic experiment research on heavy oil rheological property [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16(6): 64-66.
- [17] 李兆敏,蔡国琰. 非牛顿流体力学[M]. 东营:石油大学出版社,2001:23-25.
Li Zhaomin, Cai Guoyan. Non-Newtonian fluid mechanics [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2001: 23-25.
- [18] 李星民,杨胜来,张建伟,等. 高凝油渗流中启动压力梯度及其影响因素研究[J]. 石油钻探技术,2009,37(5):114-117.
Li Xingmin, Yang Shenglai, Zhang Jianwei, et al. Measurement of starting pressure gradient and affecting factors in the seepage process of high wax oil [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(5): 114-117.
- [19] 许家峰,程林松,李春兰,等. 普通稠油油藏启动压力梯度求解方法与应用[J]. 特种油气藏,2006,13(4):53-57.
Xu Jiafeng, Cheng Linsong, Li Chunlan, et al. Starting pressure gradient calculation and its application in conventional heavy oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006, 13(4): 53-57.