

·油气采收率·

水驱油藏剩余油再富集成藏机理

杨勇¹, 胡罡^{2*}, 田选华^{2,3}

(1.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015; 2.广东石油化工学院石油工程学院, 广东茂名 525000; 3.成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059)

摘要:中国老油田已陆续进入开发中后期,大量剩余油受储层强非均质性的影响而滞留于地下,成为实现老油田稳产的重要物质基础。高含水条件下剩余油潜力区预测是一项高度综合性的研究难题,对其相关领域的理论与实践研究一直在持续发展,但对剩余油富集机制的研究却涉及较少,而油水渗流规律研究是低渗透油藏水驱开发的关键。为此,针对贝克莱-列维尔特驱油理论未考虑油水重率差和毛管压力的问题,基于流体势原理和油气运移成藏理论,考虑水湿油藏水包油和油包水2种状态,从油藏流体受力分析入手,运用达西定律首次推导出水驱油藏流体运移过程中的渗流速度、剩余油再富集成藏速度公式,明确了水驱油藏不同开发阶段剩余油再富集成藏机理。研究表明,水动力存在与否对水驱油藏剩余油再富集成藏速度具有较大影响,且剩余油再富集成藏速度随着空气渗透率、含水饱和度和油水密度差的增加而增大,随着水动力压力梯度、原油粘度和地层倾角的增加而减小。矿场试验证实,水驱油藏剩余油再富集成藏机理是合理、实用的。

关键词:水驱油藏 剩余油 再富集 油气运移成藏 机理

中图分类号:TE341

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)04-0079-08

Reservoir forming mechanism of remaining oil re-enrichment in water flooding reservoir

Yang Yong¹, Hu Gang^{2*}, Tian Xuanhua^{2,3}

(1. *Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China*; 2. *Faculty of Petroleum Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming City, Guangdong Province, 525000, China*; 3. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu City, Sichuan Province, 610059, China*)

Abstract: Old oilfields in China have successively entered into middle to late stage of oil production. Affected by strong reservoir heterogeneity, large amounts of remaining oils are still in the subsurface and provide an important material foundation for a long-term stable yield in old oilfields. It is a highly integrated and difficult research problem to predict potential areas of remaining oil under high water cut condition. The theoretical and practical prediction have never ceased but with fewer researches on enrichment mechanism of remaining oils. Research on oil-water flow rule is the key of water flooding in the low-permeability reservoirs. Oil-water rate difference and capillary force is not considered in Buckley-Leverett principle. Based on the theory of fluid potential energy and petroleum migration and accumulation, the formulae of oil-water seepage velocity and reservoir forming velocity of remaining oil re-enrichment in the whole fluid migration course of water flooding were deduced first in consideration of two states, oil in water and water in oil, in water-wet reservoir by means of force analysis using Darcy's Law. The reservoir forming mechanism of remaining oil re-enrichment at different development stages in the water flooding reservoir was proposed. The research results show that the hydrodynamic force has a big impact on the remaining oil re-enrichment velocity in water flooding reservoir, and the remaining oil re-enrichment velocity

收稿日期:2015-05-12。

作者简介:杨勇(1971—),男,河南遂平人,教授级高级工程师,博士,从事油气田开发研究及管理工作。联系电话:(0546)8533696, E-mail: yangyong.slyt@sinopec.com。

*通讯作者:胡罡(1978—),男,湖北英山人,高级工程师,硕士。联系电话:(0668)2923009, E-mail: hugdput@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“断块油田特高含水期提高水驱采收率技术”(2011ZX05011-003)。

ty increases with the increase of air permeability, water saturation and oil-water density difference, and it decreases with the increase of hydrodynamic pressure gradient, crude oil viscosity and dip angle. The field application indicates that the mechanism of remaining oil re-enrichment in the water flooding reservoir is reasonable and practical.

Key words: water flooding reservoir; remaining oil; re-enrichment; petroleum migration and accumulation; mechanism

剩余油一般是指经一、二次采油后,油藏进入高含水开发后期剩余的可动资源量,是一个动态变化量^[1-11]。开发实践证明,原来已经强采强注的强水淹或特强水淹而停采的油层或区域,由于地下动态条件的变化,经过一段时间后,剩余油在该油层或区域可以再次聚集,且重新开采一般可以获得较好的开发效果^[1-18],这种情况可以称为油气重新运移聚集或再聚集、再富集^[11,19]。为了研究油气重新运移、聚集或再聚集、再富集机理,针对贝克列-列维尔特驱油理论未考虑油水重率差和毛管压力的问题,笔者基于流体势原理和油气运移成藏理论,考虑水湿油藏水包油和油包水2种状态,从油藏流体受力分析入手,运用达西定律推导出水驱油藏水驱油全过程中的油水渗流速度公式、剩余油再富集成藏速度公式,明确了水驱油藏不同开发阶段剩余油再富集成藏机理,以期为水驱油藏开发后期的挖潜与提高采收率,尤其为特高含水低效开发油藏的战略调整、停产与半停产油藏的产能恢复以及废弃油藏的再度开发等指明方向^[1,9,11-23]。

1 剩余油再富集成藏机理

在水驱油藏内部,决定油、气、水分布及其运动状态的作用力主要有水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力(外摩擦力、内摩擦力、相摩擦力)5种,其中水动力中的人工注水驱动压力是可以人为控制的,其他作用力可以根据其特征加以合理利用^[19,21-23]。

1.1 水驱油藏流体运移过程中的渗流速度

考虑油藏不同位置处含油饱和度的分布情况,单位体积孔隙中原油受到的浮力^[20]和重力可以分别表示为

$$F_b = \rho_w g S_{LW} \quad (1)$$

$$G = \rho_o g S_o \quad (2)$$

则单位体积孔隙中原油受到的浮力与重力之差为

$$F_d = \rho_w g S_{LW} - \rho_o g S_o \quad (3)$$

单位体积孔隙中原油沿竖直方向受到的浮力梯度与重力梯度之差为

$$\frac{F_d}{\Delta h} = \left(\frac{\rho_w S_{LW}}{S_o} - \rho_o \right) g \quad (4)$$

根据达西定律,原油沿竖直方向和地层倾角方向运移的渗流速度可以分别表示为

$$v_{ov} = \frac{K_v K_{rov}}{\mu_o} \left(\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + \frac{F_d}{\Delta h} + \frac{\Delta p_{cowv}}{\Delta h_{owv}} \right) \quad (5)$$

$$v_{of} = \frac{K_f K_{rof}}{\mu_o} \left(\frac{\Delta p}{\Delta l} + \frac{F_d}{\Delta h \sin \alpha} + \frac{\Delta p_{cowf}}{\Delta h_{owf}} \right) \quad (6)$$

假定油相相对渗透率不存在各向异性,则式(5)和式(6)可以分别表示为

$$v_{ov} = \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + \frac{F_d}{\Delta h} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (7)$$

$$v_{of} = \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + \frac{F_d}{\Delta h \sin \alpha} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (8)$$

将式(4)代入式(7)和式(8),即可建立水驱油藏单位体积孔隙中原油沿竖直方向和地层倾角方向的渗流速度与含油饱和度的关系式

$$v_{ov} = \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + \left(\frac{\rho_w S_{LW}}{S_o} - \rho_o \right) g + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (9)$$

$$v_{of} = \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + \frac{\left(\frac{\rho_w S_{LW}}{S_o} - \rho_o \right) g}{\sin \alpha} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (10)$$

水驱油藏单位体积孔隙中水沿竖直方向和地层倾角方向的渗流速度与含水饱和度的关系式可以分别表示为

$$v_{wv} = \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + \left(\frac{\rho_w S_{LW}}{S_w} - \rho_o \right) g + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (11)$$

$$v_{wf} = \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + \frac{\left(\frac{\rho_w S_{LW}}{S_w} - \rho_o \right) g}{\sin \alpha} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (12)$$

考虑含水饱和度和含油饱和度对单位体积孔隙中原油和水所受到浮力的影响,分别以在油藏含水饱和度小于等于含油饱和度位置处和油藏含水饱和度大于含油饱和度位置处2种情况分析水驱油藏单位体积孔隙中原油和水沿竖直方向和地层倾角方向的渗流速度与含水饱和度的关系。

1.1.1 在油藏含水饱和度小于等于含油饱和度位置处

在油藏 $S_w \leq S_o$ 位置处,油藏处于油包水状态,

其 $S_{1,w} = S_{1,o} = S_w$, 则式(9)和式(10)可以分别表示为

$$v_{ov} = \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + \left(\frac{\rho_w S_w}{S_o} - \rho_o \right) g + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (13)$$

$$v_{of} = \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + \frac{\left(\frac{\rho_w S_w}{S_o} - \rho_o \right) g}{\sin \alpha} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (14)$$

在这种情况下,水在重力和浮力的共同作用下竖直向下运移,则式(11)和式(12)可以分别表示为

$$v_{vw} = \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + (\rho_o - \rho_w) g + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (15)$$

$$v_{wf} = \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + \frac{(\rho_o - \rho_w) g}{\sin \alpha} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (16)$$

由式(4)可知,单位体积孔隙中原油沿竖直方向受到的浮力梯度与重力梯度之差始终大于或等于0。

当 $0 < S_w \leq \frac{\rho_o S_o}{\rho_w}$ 时, $\frac{F_d}{\Delta h} = 0$, 则式(13)一式(16)可以变换为

$$v_{ov} = \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (17)$$

$$v_{of} = \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (18)$$

$$v_{vw} = \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \times \frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha \quad (19)$$

$$v_{wf} = \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + (\rho_w - \rho_o) g \left(1 - \frac{1}{\sin \alpha} \right) \right] \quad (20)$$

此时,水驱油藏中原油的运移仅受到水动力、毛管压力和摩擦力的控制,而水驱油藏中水在沿竖直方向的运移受到水动力和摩擦力的控制,沿地层倾角方向的运移则受到水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力共5种作用力的控制。

当 $\frac{\rho_o S_o}{\rho_w} < S_w \leq S_o$ 时, $\frac{F_d}{\Delta h} > 0$, 则式(13)和式(14)不变,式(15)和式(16)可以变换为式(19)和式(20)。此时,水驱油藏中原油的运移受到水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力5种作用力的控制,而水驱油藏中水在沿竖直方向的运移仅受水动力和摩擦力的控制,沿地层倾角方向的运移则受到水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力5种作用力的控制。

1.1.2 在油藏含水饱和度大于含油饱和度位置处

在油藏 $S_o < S_w$ 位置处,油藏处于水包油状态,

其 $S_{1,w} = S_{1,o} = S_o$, 则式(9)一式(12)可以分别表示为

$$v_{ov} = \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + (\rho_w - \rho_o) g + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (21)$$

$$v_{of} = \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + \frac{(\rho_w - \rho_o) g}{\sin \alpha} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (22)$$

$$v_{vw} = \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (23)$$

$$v_{wf} = \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + \frac{\left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g}{\sin \alpha} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (24)$$

当 $S_o < S_w < \frac{\rho_w S_o}{\rho_o}$ 时,单位体积孔隙中水在沿竖直方向受到的浮力梯度与重力梯度之差大于0,则式(21)和式(22)可以变换为

$$v_{ov} = \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + 2(\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (25)$$

$$v_{of} = \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + (\rho_w - \rho_o) g \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha} \right) \right] \quad (26)$$

而式(23)和式(24)则保持不变。

此时,水驱油藏中原油和水的运移均受到水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力5种作用力的控制。

当 $\frac{\rho_w S_o}{\rho_o} \leq S_w < S_k$ 时,单位体积孔隙中水在沿竖直方向所受到的浮力梯度与重力梯度之差小于或等于0,则式(21)和式(22)可以变换为式(25)和式(26),而式(23)和式(24)则保持不变。在该含水饱和度变化区间内,水驱油藏中原油和水的运移均受到水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力5种作用力的控制。

当 $S_k \leq S_w < 1$ 时,水驱油藏中的油相由连续相变为部分连续相,进而变为非连续相,孤立的油柱、油珠运移至孔喉处会导致贾敏效应增强,使毛管压力由水驱动力转变为水驱阻力^[24-25],则式(21)一式(24)可以变换为

$$v_{ov} = \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \times \frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha \quad (27)$$

$$v_{of} = \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + (\rho_w - \rho_o) g \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) \right] \quad (28)$$

$$v_{vw} = \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g - (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (29)$$

$$v_{wf} = \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\Delta p}{\Delta l} + \frac{\left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g}{\sin \alpha} - (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (30)$$

此时,水驱油藏中原油沿竖直方向运移仅受到水动力和摩擦力的控制;沿地层倾角方向则受到水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力5种作用力的控制,而水驱油藏中水的运移则始终受到水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力5种作用力的控制。

1.2 水驱油藏剩余油再富集成藏速度

根据流体势原理与油气运移成藏理论^[1,9,21],只要油层中存在低势闭合区,原油和水即会在合力的作用下向低势闭合区运移、滞留及分异,剩余油将在低势闭合区重新聚集,形成新的剩余油聚集区。

油田开发实践证实,剩余油再富集成藏周期是最值得关注的指标。对油层而言,剩余油再富集成藏周期取决于再富集成藏的速度,而再富集成藏速度等于油层中原油上浮速度与水下沉速度之和,其中水是否下沉是剩余油再富集成藏的关键。纵观水驱油藏水驱油的全过程,水动力存在与否对剩余油再富集成藏速度具有较大的影响。

1.2.1 不考虑水动力条件

如果不考虑水动力条件,即油藏处于静置状态,根据式(13)和式(14)、式(17)和式(18)、式(23)一式(30),可以分5种情况分析水驱油藏剩余油再富集成藏速度。

第1种情况,当 $0 < S_w \leq \frac{\rho_o S_o}{\rho_w}$ 时,水驱油藏沿竖直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度可以分别表示为

$$v_v = \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} (\rho_w - \rho_o) g \quad (31)$$

$$v_f = (\rho_w - \rho_o) g \left[\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) \right] \quad (32)$$

此时,剩余油再富集成藏速度与毛管压力和摩擦力梯度相关。随着空气渗透率、油水密度差和储层相对渗透率的增大,原油粘度的减小,沿竖直方向的剩余油再富集成藏速度加快;随着油水密度差、空气渗透率的增大,原油粘度和地层倾角的减小,沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快。

第2种情况,当 $\frac{\rho_o S_o}{\rho_w} < S_w \leq S_o$ 时,水驱油藏沿竖直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度可以分别表示为

$$v_v = \frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} \left[\left(\frac{\rho_w S_w}{S_o} - \rho_o \right) g + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (33)$$

$$v_f = \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left\{ \frac{(\rho_w S_w - \rho_o S_o) g}{S_o \sin \alpha} + (\rho_w - \rho_o) g \times \left[1 + \frac{K_{rw} \mu_o}{K_{ro} \mu_w} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) \right] \right\} \quad (34)$$

此时,水驱油藏剩余油再富集成藏速度与浮力、重力、毛管压力和摩擦力梯度相关。随着油水密度差、含水饱和度和空气渗透率的增大,原油粘度的减小,沿竖直方向的剩余油再富集成藏速度加快;随着油水密度差和空气渗透率的增大,原油粘度和地层倾角的减小,沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快。

第3种情况,当 $S_o < S_w < \frac{\rho_w S_o}{\rho_o}$ 时,水驱油藏中原油和水在沿竖直方向和地层倾角方向的渗流速度可以分别表示为

$$v_{ov} = \frac{2K_v K_{ro}}{\mu_o} (\rho_w - \rho_o) g \quad (35)$$

$$v_{of} = \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left[(\rho_w - \rho_o) g \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha} \right) \right] \quad (36)$$

$$v_{vw} = \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left[\left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (37)$$

$$v_{wf} = \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \left[\frac{\left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g}{\sin \alpha} + (\rho_w - \rho_o) g \right] \quad (38)$$

由式(35)一式(38)可知,水驱油藏中沿竖直方向和地层倾角方向原油和水的渗流方向是相同的,均处于上浮状态,即油水在浮力、重力、毛管压力和摩擦力梯度的共同作用下向低势闭合区运移,油水分离困难,即此时剩余油难以再富集成藏。因此,在这种情况下探讨剩余油再富集成藏速度的意义不大。

第4种情况,当 $\frac{\rho_w S_o}{\rho_o} \leq S_w < S_k$ 时,水驱油藏中沿竖直方向和地层倾角方向原油和水的渗流速度可以分别表示为式(35)一式(38)。由式(35)一式(38)可知,水驱油藏中原油始终处于上浮状态;而水的运移方向则不明确,仅在 $S_w \geq \frac{\rho_w S_o}{2\rho_o - \rho_w}$ 时,水才处于下沉状态,即当 $S_w \geq \frac{\rho_w S_o}{2\rho_o - \rho_w}$,水驱油藏剩余油才可能再富集成藏。此时,水驱油藏沿竖直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度可以分别表示为

$$v_v = \left(\frac{2K_v K_{ro}}{\mu_o} - \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \right) (\rho_w - \rho_o) g - \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g \quad (39)$$

$$v_f = \left[\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha} \right) - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \right] (\rho_w - \rho_o) g - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w \sin \alpha} \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g \quad (40)$$

此时,水驱油藏剩余油再富集成藏速度与浮力、重力、毛管压力和摩擦力梯度相关。随着油水密度差、含水饱和度和空气渗透率的增大,原油粘度的减小,沿垂直方向的剩余油再富集成藏速度加快;随着油水密度差、含水饱和度和空气渗透率的增大,原油粘度和地层倾角的减小,沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快。

第5种情况,当 $S_k \leq S_w < 1$ 时,水驱油藏中沿垂直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度可以分别表示为

$$v_v = \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left[(\rho_w - \rho_o) g - \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g \right] \quad (41)$$

$$v_f = \left[\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) + \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \right] (\rho_w - \rho_o) g - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w \sin \alpha} \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g \quad (42)$$

此时,水驱油藏剩余油再富集成藏速度与浮力、重力、毛管压力和摩擦力梯度相关。随着油水密度差、含水饱和度和空气渗透率的增大,原油粘度的减小,沿垂直方向的剩余油再富集成藏速度加快;随着油水密度差、含水饱和度和空气渗透率的增大,原油粘度和地层倾角的减小,沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快。

1.2.2 考虑水动力条件

如果考虑水动力条件,即油藏始终处于动态变化中,根据式(13)和式(14)、式(17)和式(18)、式(23)一式(30),可以分5种情况分析水驱油藏剩余油再富集成藏速度。

第1种情况,当 $0 < S_w \leq \frac{\rho_o S_o}{\rho_w}$ 时,水驱油藏中沿垂直方向原油和水均处于上浮状态,而沿地层倾角方向的原油处于上浮状态,水的运移方向则不明确。只有当 $\frac{\Delta p}{\Delta l} \leq (\rho_w - \rho_o) g \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right)$ 时,水驱油藏剩余油才可能再富集成藏。其剩余油再富集成藏速度等于沿地层倾角方向的原油与水的运移速度之差,即

$$v_f = \left(\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \right) \frac{\Delta p}{\Delta l} + \left[\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) \right] (\rho_w - \rho_o) g \quad (43)$$

此时,水驱油藏剩余油再富集成藏速度与水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力梯度相关。当 $\frac{K_{rw}}{K_{ro}} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} \leq 1$ 时,随着水动力梯度、油水密度差和空气渗透率的增大,流体粘度和地层倾角的减小,沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快;当 $\frac{K_{rw}}{K_{ro}} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} > 1$ 时,随着油水密度差和空气渗透率的增大,地层倾角的减小,沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快。

第2种情况,当 $\frac{\rho_o S_o}{\rho_w} < S_w \leq S_o$ 时,水驱油藏中沿垂直方向的原油和水处于上浮状态,而沿地层倾角方向的原油处于上浮状态,水的运移方向则不明确。只有当 $\frac{\Delta p}{\Delta l} \leq (\rho_w - \rho_o) g \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right)$ 时,剩余油才可能再富集成藏。其剩余油再富集成藏速度等于原油与水沿地层倾角方向的运移速度之差,即

$$v_f = \left(\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \right) \frac{\Delta p}{\Delta l} + \left[\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) \right] \times (\rho_w - \rho_o) g + \frac{K_f K_{ro}}{\mu_o \sin \alpha} \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g \quad (44)$$

此时,水驱油藏剩余油再富集成藏速度与水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力梯度相关。当 $\frac{K_{rw}}{K_{ro}} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} \leq 1$ 时,随着水动力梯度、油水密度差、含水饱和度和空气渗透率的增大,地层倾角的减小,沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快;当 $\frac{K_{rw}}{K_{ro}} \times \frac{\mu_o}{\mu_w} > 1$ 时,随着油水密度差、含水饱和度、空气渗透率的增大,地层倾角的减小,沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快。

第3种情况,当 $S_o < S_w < \frac{\rho_w S_o}{\rho_o}$ 时,水驱油藏中沿垂直方向和地层倾角方向原油和水的渗流方向是相同的,均处于上浮状态,即原油和水在水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力梯度的共同作用下向低势闭合区运移,油与水分离困难,因此剩余油难以再富集成藏。

第4种情况,当 $\frac{\rho_w S_o}{\rho_o} \leq S_w < S_k$ 时,水驱油藏中原油在垂直方向和地层倾角方向始终处于上浮状态,

而水的运移方向则不明确,仅在 $\frac{\Delta p}{\Delta l} \leq \frac{[2\rho_o S_w - \rho_w(S_o + S_w)]g}{S_w \sin \alpha}$ 时,水才处于下沉状态。即当 $\frac{\Delta p}{\Delta l} \leq \frac{[2\rho_o S_w - \rho_w(S_o + S_w)]g}{S_w \sin \alpha}$,水驱油藏中的剩余油才可能再富集成藏。水驱油藏中沿垂直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度可以分别表示为

$$v_v = \left(\frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} - \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \right) \frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha + \left(\frac{2K_v K_{ro}}{\mu_o} - \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \right) \times (\rho_w - \rho_o)g - \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g \quad (45)$$

$$v_f = \left(\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \right) \frac{\Delta p}{\Delta l} + \left[\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left(1 + \frac{1}{\sin \alpha} \right) - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \right] \times (\rho_w - \rho_o)g - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w \sin \alpha} \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g \quad (46)$$

此时,水驱油藏剩余油再富集成藏速度与水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力梯度相关。当 $\frac{K_{rw}}{\mu_w} \times \frac{\mu_o}{K_{ro}} \leq 1$ 时,随着水动力梯度、油水密度差、含水饱和度、空气渗透率和地层倾角的增大,原油粘度的减小,沿垂直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快;当 $\frac{K_{rw}}{\mu_w} \times \frac{\mu_o}{K_{ro}} > 1$ 时,随着含水饱和度、空气渗透率、地层倾角的增大,原油粘度的减小,沿垂直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快。

第5种情况,当 $S_k \leq S_w < 1$ 时,水驱油藏中原油在垂直方向和地层倾角方向始终处于上浮状态,而水的运移方向则不明确,仅在 $\frac{\Delta p}{\Delta l} \leq (\rho_w - \rho_o)g - \frac{(\rho_w S_o - \rho_o S_w)g}{S_w \sin \alpha}$ 时,水才处于下沉状态。即当 $\frac{\Delta p}{\Delta l} \leq (\rho_w - \rho_o)g - \frac{(\rho_w S_o - \rho_o S_w)g}{S_w \sin \alpha}$,水驱油藏剩余油才可能再富集成藏。水驱油藏中沿垂直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度可以分别表示为

$$v_v = \left(\frac{K_v K_{ro}}{\mu_o} - \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \right) \frac{\Delta p}{\Delta l} \sin \alpha - \frac{K_v K_{rw}}{\mu_w} \left[\left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g - (\rho_w - \rho_o)g \right] \quad (47)$$

$$v_f = \left(\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \right) \frac{\Delta p}{\Delta l} + \left[\frac{K_f K_{ro}}{\mu_o} \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) + \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w} \right] \times (\rho_w - \rho_o)g - \frac{K_f K_{rw}}{\mu_w \sin \alpha} \left(\frac{\rho_w S_o}{S_w} - \rho_o \right) g \quad (48)$$

此时,水驱油藏剩余油再富集成藏速度与水动力、浮力、重力、毛管压力和摩擦力梯度相关。当 $\frac{K_{rw}}{\mu_w} \times \frac{\mu_o}{K_{ro}} \leq 1$ 时,随着水动力梯度、油水密度差、含水饱和度、空气渗透率和地层倾角的增大,原油粘度的减小,沿垂直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快;当 $\frac{K_{rw}}{\mu_w} \times \frac{\mu_o}{K_{ro}} > 1$ 时,随着含水饱和度、空气渗透率、地层倾角的增大,原油粘度的减小,沿垂直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度加快。

2 应用实例

为了验证水驱油藏剩余油再富集成藏机理的合理性与实用性,选取胜利油区东辛油田辛1断块沙一段4砂组油藏开展矿场试验。该单元石油地质储量为 119×10^4 t,油层厚度为 7.5 m,地层倾角为 12.5° ,含油条带长度为 3.6 km,宽度为 100 ~ 250 m,原始状态下单元水体体积约为含油体积的 10 倍,天然水体活跃。油藏孔隙度为 25%,垂直方向和地层倾角方向的渗透率分别为 204×10^{-3} 和 $464 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,地层原油粘度为 10.0 mPa·s,地层原油密度为 0.907 g/cm^3 。

矿场试验前,单元开井 1 口(辛 18-1 井),生产层位为沙一段 4 砂组 4、5 和 8 小层,产液量为 28 m³/d,产油量为 1.1 t/d,综合含水率为 96.2%,动液面深度为 444 m,采出程度为 48%,基本处于近技术废弃状态。2008 年 4 月,在原始含油边界之外利用相邻区块 8 口报废的油水井上返注水,最高单井注水量超过 500 m³/d,在累积注水量为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 后,2008 年 10 月扶停辛 1-22 井,2009 年 2 月扶停辛 104 井,自喷生产且综合含水率分别降至 55% 和 88%,其中辛 1-22 井累积停产 7.5 a,停产前综合含水率为 96.6%;辛 104 井累积停产 8 a,停产前综合含水率为 97.6%。随后在构造高部位补孔上返辛 1-34、辛 100 斜 44、辛 9 斜 78 和辛 100 斜 54 井,扶停辛 18-1 井,均自喷生产且综合含水率大幅下降。实施矿场试验以来,单元产油量由 0.5 t/d 增至 57.9 t/d,累积增油量为 $5.43 \times 10^4 \text{ t}$,累积回注油田污水量为 $287 \times 10^4 \text{ m}^3$,提高采出程度 4.2%,获得了较好的经济效益,且减排油田污水效果显著。

根据研究区的油水相对渗透率曲线可知,油藏停产时,综合含水率为 97.1% 时对应的含水饱和度为 62.5%。考虑辛 1 断块沙一段 4 砂组在重新开发

前处于近技术废弃状态,因此可以认为水动力压力梯度为0,油藏处于静置状态,选用式(39)和式(40)计算得到沿竖直方向和地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度分别为 5.65×10^{-5} 和 7.71×10^{-5} cm/s。以该油藏油水边界处计算,沿竖直方向的剩余油再富集成藏周期约为 1.26 ~ 3.14 a,平均为 2.49 a;沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏周期约为 4.11 ~ 10.28 a,平均为 7.20 a。在油藏静置时间内,油藏大部分区域基本完成剩余油再富集成藏,在构造高位形成新的剩余油再富集油藏,这也是近技术废弃油藏辛1断块沙一段4砂组重新获得开发效益的根本原因。

3 结论

针对贝克莱-列维尔特驱油理论未考虑油水重率差和毛管压力的问题,基于流体势原理和油气运移成藏理论,考虑水湿油藏水包油和油包水2种状态,从油藏流体受力分析入手,运用达西定律首次推导出水驱油藏水驱油全过程的油水渗流速度公式、剩余油再富集成藏速度公式,明确了水驱油藏不同开发阶段剩余油再富集成藏机理。研究结果表明,剩余油再富集成藏速度随着空气渗透率、含水饱和度和油水密度差的增加而增大,随着水动力压力梯度、原油粘度和地层倾角的增加而减小。对于近技术废弃油藏,先期大排量注水增加油藏水动力压力梯度促使油水向低势闭合区运移、滞留、聚集,后期油藏静置促使油藏油水分离成藏是该类油藏实现再度开发的有效途径。矿场试验表明,水驱油藏剩余油再富集成藏机理是合理、实用的,特别是在计算剩余油再富集成藏周期、预测周期注采开发油藏注采周期等方面更为合理、简便、准确。研究成果为特高含水阶段低效开发油藏、周期注采开发油藏的效益开发,停产与半停产油藏的产能恢复及废弃油藏的再度开发等指明了方向。

符号解释:

F_b ——单位体积孔隙中原油受到的浮力, N; ρ_w ——地层水密度, g/cm^3 ; g ——重力加速度, m/s^2 ; S_{1w} ——单位体积孔隙中原油排开水的体积; G ——单位体积孔隙中原油受到的重力, N; ρ_o ——地层原油密度, g/cm^3 ; S_o ——含油饱和度; F_d ——单位体积孔隙中原油受到的浮力与重力之差, N; Δh ——流体在浮力与重力共同作用下的运移距离, m; v_{ov} ——沿竖直方向的原油渗流速度, cm/s; K_r ——沿竖直方向的油层空气渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; K_{rov} ——沿竖直方向的油相

相对渗透率; μ_o ——地层原油粘度, $mPa \cdot s$; $\frac{\Delta p}{\Delta l}$ ——水动力压力梯度, MPa/m ; α ——地层倾角, ($^\circ$); Δp_{conv} ——沿竖直方向的油水界面毛管压力差, Pa; Δh_{ov} ——沿竖直方向油水界面水上升的高度差, m; v_{of} ——沿地层倾角方向的原油渗流速度, cm/s; K_r ——沿地层倾角方向的油层空气渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; K_{rof} ——沿地层倾角方向的油相相对渗透率; Δp_{conf} ——沿地层倾角方向的油水界面毛管压力差, Pa; Δh_{of} ——沿地层倾角方向油水界面水上升的高度差, m; K_{ro} ——油相相对渗透率; v_{ov} ——沿竖直方向水的渗流速度, cm/s; K_{rw} ——水相相对渗透率; μ_w ——地层水粘度, $mPa \cdot s$; S_{1o} ——单位体积孔隙中水排开原油的体积; S_w ——含水饱和度; v_{of} ——沿地层倾角方向水的渗流速度, cm/s; S_k ——油水相对渗透率的比值与含水饱和度的函数关系在高含水阶段出现下弯时的含水饱和度,其表达式为 $S_k = \log\left(\frac{1}{\ln c}\right)$,其中 c 为高含水阶段油水相对渗透率的比值与含水饱和度的函数关系式的回归系数^[24-25]; v_v ——沿竖直方向的剩余油再富集成藏速度, cm/s; v_r ——沿地层倾角方向的剩余油再富集成藏速度, cm/s。

参考文献:

- [1] 蒲玉国,吴时国,冯延状,等.剩余油“势控论”的初步构建及再生潜力区模式[J].西安石油大学学报:自然科学版,2005,20(6):7-11.
Pu Yuguo, Wu Shiguo, Feng Yanzhuang, et al. Preliminary establishment of “the theory of potential controlling remaining oil” and modes of remaining oil regenerating potential area [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2005, 20(6): 7-11.
- [2] 侯健,罗福全,李振泉,等.岩心微观与油藏宏观剩余油临界描述尺度研究[J].油气地质与采收率,2014,21(6):95-98.
Hou Jian, Luo Fuquan, Li Zhenquan, et al. The critical description scale study on core microscopic and reservoir macroscopic remaining oil [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 95-98.
- [3] 王鸣川,朱维耀,董卫宏,等.曲流河点坝型厚油层内部构型及其对剩余油分布的影响[J].油气地质与采收率,2013,20(3):14-17.
Wang Mingchuan, Zhu Weiyao, Dong Weihong, et al. Study on distribution and influence factors of remaining oil in point bar of meandering river [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3): 14-17.
- [4] 李传亮,龙武.油气运移时间的计算[J].油气地质与采收率,2010,17(6):68-70.
Li Chuanliang, Long Wu. Calculation on migration time of oil and gas [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(6): 68-70.
- [5] 李晓燕.东营凹陷地层水成因类型及其与油气运移方向的关系[J].油气地质与采收率,2012,19(3):18-21.
Li Xiaoyan. Genesis of formation water and oil migration in Dongying-

- ing depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(3): 18-21.
- [6] 李军, 赵靖舟, 凡元芳, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界准连续型气藏天然气运移机制[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(5): 592-600.
- Li Jun, Zhao Jingzhou, Fan Yuanfang, et al. Gas migration mechanism of quasi-continuous accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(5): 592-600.
- [7] 李志鹏, 林承焰, 李润泽, 等. 利用油气势能预测油藏开发后期剩余油富集区[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(2): 69-72.
- Li Zhipeng, Lin Chengyan, Li Runze, et al. Predict residual oil zones in the late life of oilfield development by hydrocarbon potential [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(2): 69-72.
- [8] 韩大匡. 准确预测剩余油相对富集区提高油田注水采收率研究[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 73-78.
- Han Dakuang. Precisely predicting abundant remaining oil and improving the secondary recovery of mature oilfields [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 73-78.
- [9] 蒲玉国, 李道轩, 王斌, 等. 流体势原理在注水油田开发中的潜力区研究与应用[J]. *石油学报*, 2000, 21(3): 45-50.
- Pu Yuguang, Li Daoxuan, Wang Bin, et al. Application and research of the liquid potential energy for potentiality region of water injection oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(3): 45-50.
- [10] 施木喜, 江涛, 吴斌, 等. 水驱油田强淹层继续利用地质可行性分析及实践[J]. *河南石油*, 2006, 20(3): 32-34.
- Shi Muxi, Jiang Tao, Wu Bin, et al. Geological feasibility analysis and practice on strong water-flooded layer in water drive oilfield [J]. *Henan Petroleum*, 2006, 20(3): 32-34.
- [11] 徐樟有, 张继春. 丘潜山油藏剩余油的再聚集模式及分布预测[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(3): 70-72.
- Xu Zhangyou, Zhang Jichun. The reaccumulation models and distribution prediction of remaining oil in Renqiu buried hill reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(3): 70-72.
- [12] 赵颖. 各向异性双重孔隙介质的应力与油水两相渗流耦合理论模型[J]. *工程力学*, 2012, 29(2): 222-229.
- Zhao Ying. Fully coupled dual-porosity model for oil-water two-phase flow in anisotropic formation [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(2): 222-229.
- [13] Abbad M. Combining the micro grain imager with the effective medium theory for quick assessment of the absolute permeability in carbonates [R]. SPE 160863, 2012.
- [14] Al-Dhahli A R S, Geiger S, van Dijke M I J. Accurate modelling of pore-scale film and layer flow for three phase EOR in carbonate rocks with arbitrary wettability [R]. SPE 154019, 2012.
- [15] Al-lbadi A, Civan F. Experimental study of gel particles transport through porous media [R]. SPE 153557, 2012.
- [16] Skauge A, Ormehaug P A, Gurholt T, et al. 2D visualisation of unstable waterflood and polymer flood for displacement of heavy oil [R]. SPE 154292, 2012.
- [17] Popa A S, Sivakumar K, Cassidy S. Associative data modeling and ant colony optimization approach for waterflood analysis [R]. SPE 154302, 2012.
- [18] Simjoo M, Dong Y, Andrianov A, et al. A CT scan study of immiscible foam flow in porous media for EOR [R]. SPE 155633, 2012.
- [19] 李本轲. 双河油田剩余油再富集区分布规律研究[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(5): 296-298.
- Li Benke. Study on the distribution of re-enrichment part of remaining oil in Shuanghe oilfield [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(5): 296-298.
- [20] 穆文志, 宋考平, 杨二龙. 水驱油过程中浮力对油滴运移的影响[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(2): 82-85.
- Mu Wenzhi, Song Kaoping, Yang Erlong. Effects of buoyance on oil droplets migration in waterflood process [J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2008, 32(2): 82-85.
- [21] 潘钟祥. 石油地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 98-104.
- Pan Zhongxiang. *Petroleum Geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 98-104.
- [22] 伍友佳. 石油矿场地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 277-345.
- Wu Youjia. *Oil field geology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 277-345.
- [23] 王建, 胡罡. 强化开采及油气重新运移聚集形成剩余油机理研究[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(15): 3 744-3 746, 3 750.
- Wang Jian, Hu Gang. Research on the remaining oil formation mechanism of enforcement enhance recovery & migration and accumulation again [J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(15): 3 744-3 746, 3 750.
- [24] 刘世华, 谷建伟, 杨仁锋. 高含水期新型水驱特征曲线[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2011, 30(增刊): 158-163.
- Liu Shihua, Gu Jianwei, Yang Renfeng. New water-flooding characteristic curve at high water-cut stage [J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2011, 30 (Supplement): 158-163.
- [25] 刘世华, 谷建伟, 杨仁锋. 高含水期油藏特有水驱渗流规律研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2011, 26(6): 660-666.
- Liu Shihua, Gu Jianwei, Yang Renfeng. Peculiar water-flooding law during high water-cut stage in oilfield [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, 26(6): 660-666.

编辑 邹澍滢