

稠油油藏过渡带油水分布规律及布井界限

吴丽, 陈民锋, 乔聪颖, 李晨辰

(中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘要:稠油油藏油水过渡带相对较宽, 开发潜力较大, 井网部署空间较大。但是, 受经济技术条件限制, 难以在过渡带有效布井, 过渡带井网控制程度低, 储量难以得到有效动用。通过定量研究粘度对油水过渡带分布的影响, 分析稠油油藏油水过渡带含油饱和度分布及油井产出规律。在此基础上, 考虑经济因素的影响, 提出确定油水过渡带油井投产经济技术界限的方法, 并基于油田特点和开发要求, 建立W油藏油井投产经济技术界限图版。该图版便于指导W油藏油水过渡带加密调整井的有效部署。

关键词:稠油油藏 油水过渡带 粘度 毛管压力曲线 饱和度分布 收支平衡法 经济技术界限

中图分类号: TE345

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)03-0077-06

Water and oil distribution law and limits for well pattern in the oil-water transition zone of heavy oil reservoir

Wu Li, Chen Minfeng, Qiao Congying, Li Chenchen

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: The oil-water transition zone of heavy oil reservoir is relatively wide, which has considerable amount of remaining oil and great development potential. However, restricted by economic and technical conditions, it is hard to build up the well pattern and produce reserves effectively for low control degree of well pattern. Through quantitative study of the influence of viscosity on the distribution in oil-water transition zone, the oil saturation distribution of the oil-water transition zone and oil-producing law of oil wells in the heavy oil reservoir were analyzed. Based on this, considering the influence of economic factors, a method of determining economic and technical limits of oil well production in the oil-water transition zone was proposed. According to practical oilfield characteristics and development requirements, economic and technical limits chart of the oil well production in W oil reservoir were established. The chart will provide guidance to the effective disposition of infilled adjustment well in the oil-water transition zone of W oil reservoir.

Key words: heavy oil reservoir; oil-water transition zone; viscosity; capillary pressure curve; saturation distribution; incoming and outgoing balance method; economic and technical limits

油水过渡带主要是构造低部位临近油水边界区带及注水井与油水边界之间无井控制的区带。与常规油藏相比, 稠油油藏的原油粘度和油水过渡带厚度大、分布面积广, 具有较大的开发潜力^[1-2]。目前, 稠油油藏油水过渡带开发存在2个主要问题: ①油水分布复杂, 原油流动能力差, 含水率上升快, 产油能力低, 储量未能有效动用; ②因剩余油丰度较小, 受经济技术条件限制, 油水过渡带难以有效

布井, 井网控制程度差、油藏采收率低^[3-4]。为完善稠油油藏油水过渡带开发井网, 提高开发效益, 必须建立反映稠油油藏油水过渡带特点的油井投产经济技术界限, 以指导油水过渡带调整井的部署。目前, 针对稠油油藏油水过渡带开发部署界限的研究较少。笔者通过分析稠油油藏油水过渡带分布特点及产出规律, 基于W油藏实际参数, 利用收支平衡法, 对其进行了油水过渡带油井投产经济技术

收稿日期: 2016-02-06。

作者简介: 吴丽(1990—), 女, 湖南益阳人, 在读硕士研究生, 从事油气田开发方面的研究。联系电话: 13391596907, E-mail: wuliswpu@163.com。

基金项目: 国家“973”计划“致密油高效开发油藏工程理论与方法研究”(2015CB250905)。

界限研究,便于指导稠油油藏油水过渡带经济有效地布井,提高油水过渡带剩余油的产出效率。

1 油水过渡带分布特点及产出规律

1.1 影响因素

油水过渡带饱和度分布及相流动能力分别受毛管压力和相对渗透率控制。毛管压力是油水过渡带形成的主要原因,也是影响油水过渡带油水饱和度分布的主要因素,油水在储层中的分布主要受毛管压力的控制^[4];相对渗透率影响储层油水的流动,储层产水面对应的油相相对渗透率为0的界面,低于该水面的油相不再参与流动。

将毛管压力与相对渗透率曲线相结合,研究稠油油藏油水过渡带分布规律,探讨稠油油藏油水过渡带产出特点。

1.2 毛管压力曲线的定量表征

Brooks 和 Coery 的研究^[5-7]表明,毛管压力和阀压之比与有效湿相饱和度之间的关系式为

$$S_{wi}^* = \lambda \frac{p_c}{p_e} \quad (1)$$

式中: S_{wi}^* 为有效湿相饱和度; λ 为与驱替过程有关的孔隙分布指数; p_c 为毛管压力, MPa; p_e 为阀压, MPa。

对式(1)两边取对数,整理后得

$$\lg p_c = \lg p_e - \frac{1}{\lambda} \lg S_{wi}^* \quad (2)$$

其中, 阀压为定值, 可通过实验测得; 多孔介质分布指数愈大, 表明孔隙分布愈均匀。将式(2)简化为

$$\lg p_c = A + B \lg S_{wi}^* \quad (3)$$

式中: A, B 均为常数, 计算过程中须根据油藏实际条件进行修正。

由式(3)可知, 在双对数坐标中, 毛管压力与有效湿相饱和度呈线性关系。

为了描述 W 油藏过渡带毛管压力, 在岩样压汞测试的基础上, 修正 Brooks 和 Coery 的关系式, 得到符合实际情况的毛管压力与有效湿相饱和度的关系曲线(图1)。

由图1可得到 W 油藏毛管压力计算式为

$$\lg p_c = -2.0704 - 2.0844 \lg S_{wi}^* \quad (4)$$

其中

$$S_{wi}^* = \frac{S_{wi} - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \quad (5)$$

式中: S_{wi} 为湿相饱和度; S_{wc} 为束缚水饱和度。

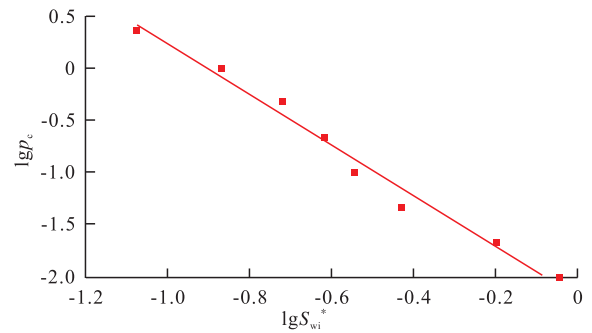


图1 W油藏过渡带饱和度分布曲线

Fig.1 Saturation distribution curve of transition zone in W oil reservoir

束缚水饱和度受岩石孔隙结构、渗透率、原油粘度等因素影响。根据王曙光等关于大庆油田油水相对渗透率统计规律的研究^[8], 束缚水饱和度与束缚水饱和度下油相渗透率(有效渗透率)的关系式为

$$S_{wc} = -0.0442 \ln K_{roc} + 0.2235 \quad (6)$$

式中: K_{roc} 为有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

为了探讨稠油油藏过渡带油水分布特点, 选取多个不同原油粘度、中高渗透率油藏的实验数据进行统计分析, 得到原油粘度与有效渗透率的关系曲线(图2), 从而得到其关系式为

$$K_{roc} = 0.1816 \ln \mu_o + 0.8853 \quad (7)$$

式中: μ_o 为地层原油粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

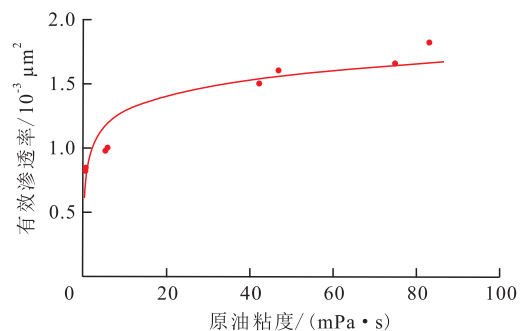


图2 W油藏原油粘度与有效渗透率的关系曲线

Fig.2 Relationship curve of crude oil viscosity and effective permeability of W oil reservoir

分析可知: 由式(7)可计算得到不同粘度条件下的有效渗透率, 再根据式(6)计算得到对应不同粘度条件下的束缚水饱和度, 在此基础上, 可根据式(4)和式(5)得到不同原油粘度下不同含水饱和度对应的毛管压力值。

根据前人研究成果, 可将毛管压力换算成湿相上升(自由水面以上)的高度, 换算关系式^[9]为

$$h = \frac{p_{cr}}{(\rho_w - \rho_o)g} \quad (8)$$

式中: h 为自由水面以上高度, m ; p_{cr} 为油藏条件下油水系统的毛管压力, Pa ; ρ_w, ρ_o 分别为油藏

条件下水、油的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

将自由水面以上高度折算到距内含油边界的深度,并根据地层倾角,得到距内含油边界的平面距离与湿相饱和度的关系式为

$$L = \frac{1}{\tan \theta} \left[\Delta h - \frac{P_{cR}}{(\rho_w - \rho_o)g} \right] \quad (9)$$

式中: L 为距内含油边界的平面距离, m ; θ 为地层倾角, $(^\circ)$; Δh 为油水过渡带厚度, m 。

由式(3)一式(8)可得到不同油藏条件下不同含油饱和度对应的地层深度和油水在纵向上的分布规律。根据式(9)可得到不同油藏条件下油水在平面上的分布规律。

1.3 油水饱和度分布规律

油水过渡带主要是构造低部位临近油水边界区带及注水井与油水边界之间无井控制的区带,油水过渡带以纯油带下界为过渡带内含油边界,纯油带上界为过渡带外含油边界,两边界之间为油水过渡带(图3)。为了探讨稠油油藏过渡带油水分布与常规油藏的差异,基于W油藏参数,研究不同原油粘度下油水过渡带的分布特点与产出规律。

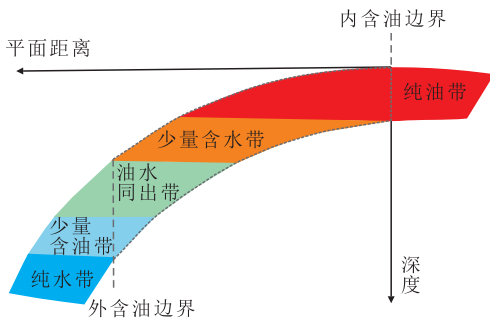


图3 W油藏油水过渡带剖面示意

Fig.3 Simplified section of oil-water transition zone in W oil reservoir

W油藏位于高邮凹陷北斜坡西部,为一砂泥薄互层状普通稠油油藏,平均孔隙度为23%,渗透率为 $171 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,原油粘度为10~290 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。从油藏过渡带简化剖面(图3)可知,以内含油边界为原点,油水过渡带延伸方向为正方向建立坐标,研究油水过渡带含油饱和度在纵向和平面上的分布规律。由式(6)一式(9)计算得到W油藏不同原油粘度油水过渡带的含油饱和度,并绘制出不同原油粘度下的含油饱和度在纵向(图4a)和平面上的(图4b)的分布。

由图4可知,原油粘度越大,油水过渡带饱和度纵向深度分布范围越大;对应的距离油水过渡带顶界面(内含油边界)纵向较低位置时,可动油较多,由此可推算出油水过渡带调整井产层下限。同时,

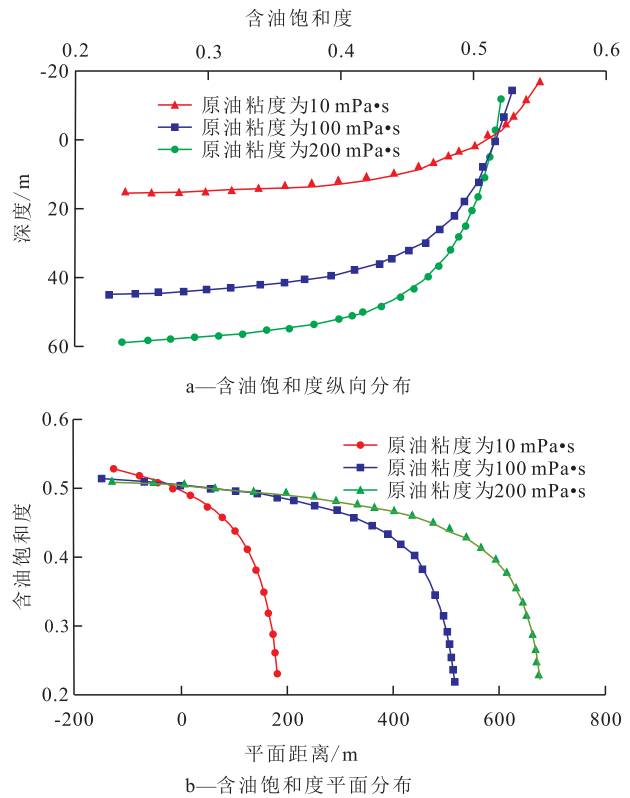


图4 W油藏油水过渡带含油饱和度在纵向及平面上的分布规律

Fig.4 Longitudinal and plane distribution of oil saturation in oil-water transition zone of W oil reservoir

原油粘度越大,油水过渡带饱和度平面宽度分布范围也越大;对应的距离过渡带内界面(内含油边界)平面较远范围内,可动油较多,由此可推算出油水过渡带调整井井点外扩界限。

1.4 油水产出规律

为了定量研究油水过渡带不同位置油水产出规律,通过相对渗透率曲线分析,基于W油藏含水率公式得到油井产油率表达式为

$$f_o = \frac{Q_o}{Q_w + Q_o} = \frac{K_{rw} \mu_o}{K_{ro} \mu_w + K_{rw} \mu_o} = 1 - f_w = \frac{1}{1 + M} \quad (10)$$

式中: f_o 为油井产油率; Q_o 为累积产油量, m^3/d ; Q_w 为累积产水量, m^3/d ; K_{rw} 为水相相对渗透率; K_{ro} 为油相相对渗透率; μ_w 为水相粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; f_w 为油井含水率; M 为油水流量比。

基于W油藏的基础数据,通过式(10)计算得到油水过渡带产油率分别在纵向和平面上的分布规律。

由图5可知,产层纵向位置越低(埋深越大),产油率越低,相应的单井产量越小;原油粘度越大,同等条件下的开发效果越差;但是原油粘度较大油藏的油水过渡带内有相对较厚的纵向距离;原油粘度越大,油水过渡带纵向产油厚度范围越大,过渡带

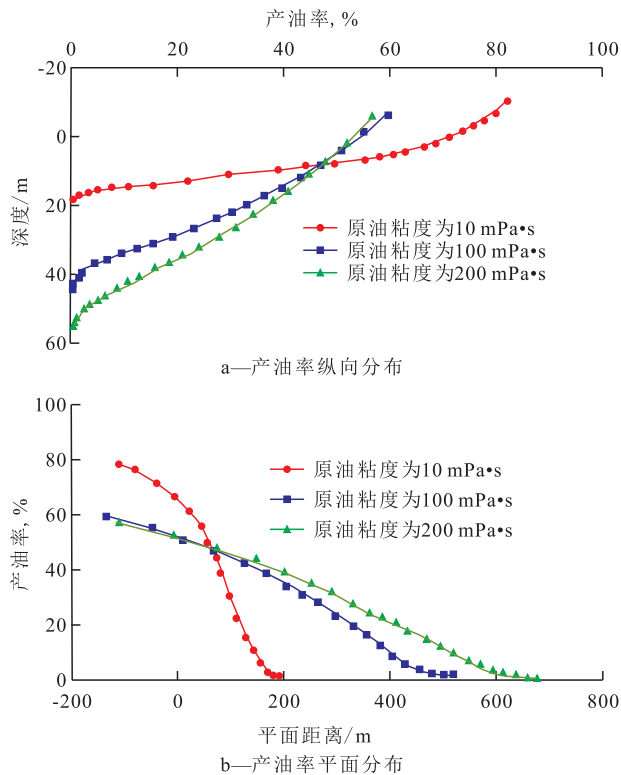


图5 W油藏油水过渡带产油率在纵向及平面上的分布
Fig.5 Longitudinal and plane distribution of oil production rate in oil-water transition zone of W oil reservoir

纵向开采潜力越大。

产层位置越靠外(距内含油边界的平面距离越远),产油率越低,相应的单井产量越小;原油粘度越大,同等条件下的开发效果越差;但原油粘度较大的油藏的油水过渡带内有相对较宽的平面延展;原油粘度增大,油水过渡带饱和度平面产油宽度范围越大;油水过渡带平面开采潜力越大,结合图5可确定油水过渡带调整产层下限和井点外扩界限。

综合以上分析可知:原油粘度对油水过渡带均有较大影响,是造成油水过渡带剩余油富集的重要原因。原油粘度越大,形成的油水过渡带就越宽。同时,原油粘度较大时,水驱受效分布区域较小,波及范围小,容易在油藏高部位富集剩余油^[10-12]。稠油油藏油水过渡带饱和度在纵向和平面上的分布范围较大,具有较大的开采潜力,但是稠油油藏原油流动能力差、过渡带产油率低、含水率上升快,因此更需明确油井投产经济技术界限。

2 油水过渡带开发部署界限

油井投产经济技术界限是指扣除新井运营期间变动操作成本及相关税金后的收益正好能抵消新井投资及运营期间固定操作成本的产量^[13]。

确定油藏油水过渡带油井投产经济技术界限的基本方法是收支平衡法^[14-16]。对于给定的油藏条件,在投资回收期内,单井关井时累积产油量能够超过油井累积产油经济界限。

根据收支平衡法计算油井累积产油经济界限的计算式为

$$\text{钻井投资} + \text{其他投资} = \sum (\text{产油收入} - \text{产油成本} - \text{注入成本} - \text{年操作费用}) \times (1+i)^{-t} \quad (11)$$

式中: i 为贴现率; t 为投资回收期, a 。

2.1 基本参数及生产经济界限

W油藏油水过渡带目前采用直井注水开发,相关参数井深为1 100 m,钻井成本为2 000元/m,操作费为 80×10^4 元/井。按着原油销售价格为80美元/t,要求6 a内收支平衡时(i 为0.068),基于收支平衡法可计算得到单井累积产油经济界限为 0.2×10^4 t。

基于W油藏的基础数据,年产油递减率取该类油藏平均递减率,计算得到不同油价下油井生产经济界限:直井—注水开发条件下,原油价格分别为50, 60, 80和100美元/t时,经济极限产量分别为 0.39×10^4 , 0.31×10^4 , 0.20×10^4 和 0.16×10^4 t。

2.2 投产经济界限图版的制作

基于W油藏基本参数及油水过渡带饱和度分布、油水产出规律,计算得到不同单井控制储量下单井累积产油量与含油饱和度的关系图版、不同含油饱和度下单井累积产油量与单井控制储量的关系图版(图6)。

由图6可知,随着含油饱和度和单井控制储量的增加,单井累积产油量也随之增加;相比于纯油带,油水过渡带含油饱和度较低,要使油水过渡带满足投产经济界限,则要求提高单井控制储量。对于W油藏,要使含油饱和度不小于0.45的区域全部投入开发,则要求其单井控制储量基数不小于 6×10^4 m³。

2.3 实例应用及分析

利用收支平衡方法及投产经济界限图版,对W油藏油水过渡带进行研究,以期指导该区油水过渡带调整加密井的部署。W油藏油水过渡带实施挖潜井6口,平均初期单井产油量为4.48 t/d,目前产油量为1.8 t/d,累积产油量为 0.28×10^4 t,如图7所示。

根据W油藏油水过渡带实际参数,基于各调整井的地质开发条件,可计算得到各调整井累积产油经济界限(表1)。由表1可知,调整井都满足投产经济界限,油水过渡带开发效果较好。说明该图版能

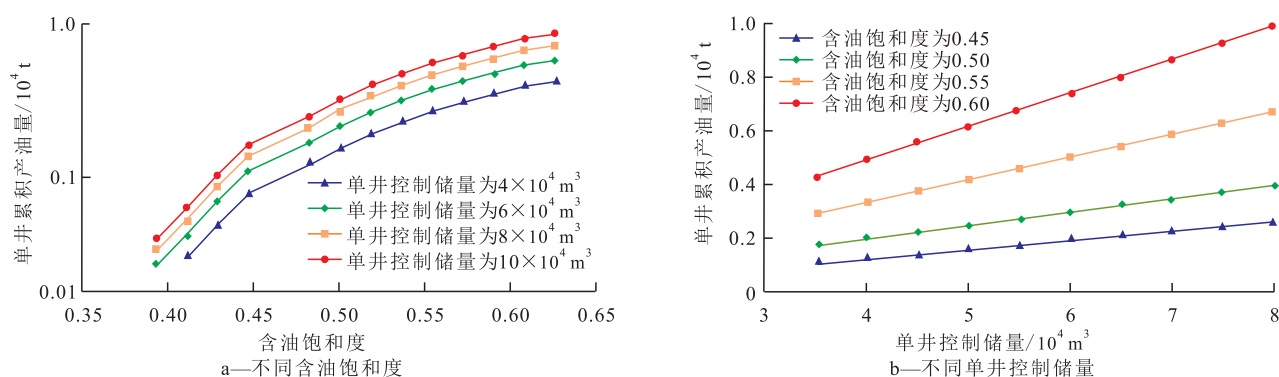


图6 不同含油饱和度和单井控制储量条件下油水过渡带的投产经济界限图版

Fig.6 Economic limit charts of production in oil-water transition zone with different oil saturations and controllable reserves per well

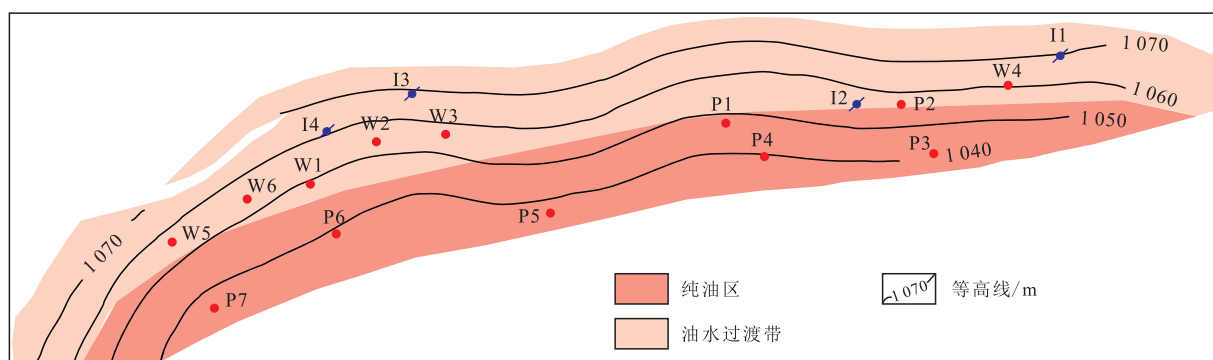


图7 W油藏油水过渡带调整井部署

Fig.7 Deployment of adjustment well in oil-water transition zone of W oil reservoir

表1 W油藏油水过渡带经济界限图版实际运用结果
Table1 Practical application of economic limit chart of oil-water transition zone in W oil reservoir

井号	单井控制储量/10 ⁴ m ³	累积产油界限/10 ⁴ t	目前累积产油量/10 ⁴ t	预测评价期内累积产油量/10 ⁴ t
W1	5.70	0.15	0.68	1.14
W2	2.64	0.16	0.17	0.21
W3	3.84	0.16	0.18	0.18
W4	3.17	0.16	0.28	1.10
W5	4.44	0.16	0.19	0.48
W6	3.95	0.16	0.17	0.59

较好地反映油水过渡带单井生产情况,从而为W油藏油水过渡带调整加密井的部署提供理论依据。

3 结论

基于毛管压力曲线与原油粘度的定量表征关系,研究了稠油油藏油水过渡带分布规律。研究可知:原油粘度对油水过渡带内外油水分布与产出均有较大影响,是造成油水过渡带剩余油富集的重要原因。稠油油藏油水过渡带纵向分布较深、平面分布较广,与普通油藏相比具有更大的开采潜力。但是油水过渡带合理布井与井网部署难度较大,为了

达到油水过渡带合理有效开发,必须分析满足油井投产经济界限的储层条件,预测油水过渡带优势开发潜力区域。利用收支平衡法可确定单井初始油界限和累产油界限,由此制作油井投产经济界限图版。该图版可预测不同油水过渡带条件,在不同井网、投产条件下可达到的经济效益,并由此指导油水过渡带调整加密井网的部署,为稠油油藏油水过渡带开发提供理论依据。但是文中利用统计关系式描述原油粘度与有效渗透率的关系,一定程度上不太合理,主要是由于统计数据具有一定片面性,且毛管压力和相对渗透率受孔隙结构、渗透率、润湿性等多方面的影响,因此其相关式仍有待进一步研究。

参考文献:

[1] 朗兆新.油藏工程基础[M].东营:石油大学出版社,1991.
Lang Zhaoxin.Fundamentals of reservoir engineering [M].Dongying: University of Petroleum Press, 1991.
[2] 马晓玲.萨南油田稠油油藏油水过渡带地区与纯油区储层差异[J].中国石油和化工标准与质量,2012,(4):170-171.
Ma Xiaoling.Reservoir difference between oil-water transition zone and pure oil zone in Sha'nan heavy oil reservoir [J].China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012,(4): 170-171.

- [3] 赵秀娟.喇萨杏油田过渡带综合调整潜力及方法研究[D].大庆:大庆石油学院,2009.
Zhao Xiujuan.Research of the potential and method of adjusting transition belt for Lasaxing oilfield overall[D].Daqing:Daqing Petroleum Institute,2009.
- [4] 邓新颖.胜坨油田沙二段油水过渡带剩余油分布规律及挖潜对策研究[D].青岛:中国石油大学,2010.
Deng Xinying.Research on the remaining oil distribution and tapping measures in transition zone of Member II of Shaheji Formation, Shengtuo oilfield [D].Qingdao: China University of Petroleum,2010.
- [5] 鹿雪峰,徐振中,冯景林.一种定量表征油水过渡区饱和度分布的实用方法[J].中国海上油气,2011,23(6):387-390,397.
Lu Kefeng, Xu Zhenzhong, Feng Jinglin.A practical method to quantitatively characterize oil saturation in oil-water transition zones [J].China Offshore Oil and Gas, 2011, 23 (6) : 387-390, 397.
- [6] 缪志伟.一种计算平均毛管压力曲线的方法[J].新疆石油地质,1997,18(1):67-69.
Miao Zhiwei.A method for determining average capillary pressure curve[J].Xinjiang Petroleum Geology, 1997, 18(1):67-69.
- [7] 陶正武,李闽,陶建,等.毛管压力曲线定量关系探究[J].特种油气藏,2012,19(5):131-134,150.
Tao Zhengwu, Li Min, Tao Jian, et al.Study on the quantitative relationship of capillary pressure curve[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5):131-134, 150.
- [8] 王曙光,赵国忠,余碧君.大庆油田油水相对渗透率统计规律及其应用[J].石油学报,2005,26(3):78-81,85.
Wang Shuguang, Zhao Guozhong, Yu Bijun.Statistical regularity of oil-water relative permeability in Daqing Oilfield [J].Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3):78-81, 85.
- [9] 杨胜来,魏俊之.油层物理学[M].北京:石油工业出版社,2003.
Yang Shenglai, Wei Junzhi.Reservoir physics [M].Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [10] 冯其红,李尚,韩晓冬,等.稠油油藏边水推进规律物理模拟实验[J].油气地质与采收率,2014,21(5):81-83.
Feng Qihong, Li Shang, Han Xiaodong, et al.Physical experiment on edge water drive law of offshore heavy oil reservoir [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5):81-83.
- [11] 李林祥.孤东油田七区馆上段稠油油藏油水过渡带剩余油挖潜技术[J].石油天然气学报,2012,34(9):254-257.
Li Linxiang.Tapping potential technology for remaining oil oil-water transition zone of heavy oil reservoir in upper Guantao member, Area7, Gudong oilfield [J].Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(9):254-257.
- [12] 宋培基,宋宝菊,秦保杰,等.砂岩油藏油水过渡带剩余油分布影响因素及挖潜对策研究[J].科技信息,2013,(17):404-405.
Song Peiji, Song Baoju, Qin Baojie, et al.Research on influencing factors and tapping potential countermeasures for remaining oil in transition zone of sandstone oil reservoir [J].Science & Technology Information, 2013, (17):404-405.
- [13] 刘桂玲,李红昌.南断阶低渗透油藏有效开发技术经济界限研究[J].复杂油气藏,2013,6(1):41-45.
Liu Guilin, Li Hongchang.Study on technical and economic limits of effective development for low-permeable reservoirs in south fault terrace [J].Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2013, 6(1):41-45.
- [14] 梁淞,贾京坤,杨航.基于单井控制储量与井网密度的老油田经济极限井网密度计算方法[J].油气地质与采收率,2014,21(4):104-106.
Liang Song, Jia Jingkun, Yang Hang.Well pattern calculation method based on economic limit in old oilfields using well spacing and well-controlled reserves [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4):104-106.
- [15] 中国石油天然气总公司计划局,中国石油天然气总公司规划设计总院.石油工业建设项目经济评价方法与参数[M].2版.北京:石油工业出版社,1994.
Planning Bureau of China National Petroleum Corporation, Planning and Design Institute of China National Petroleum Corporation.Economic evaluation methods and parameters of construction project in oil industry [M].2nd ed.Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [16] 蔡鹏展.油田开发经济评价[M].北京:石油工业出版社,1997.
Cai Pengzhan.Economic evaluation of oilfield development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.

编辑 王星