特高含水期油藏采油速度研究及影响因素分析

陈 军[1],杨峻懿[2], 刘启国[2]
(1.西南石油大学研究生院,四川 成都 610500;2.西南石油大学石油与天然气工程学院,四川 成都 610500)

摘要:采油速度对于特高含水期水驱油藏开发效果具有十分重要的影响。在特高含水期,含水饱和度进一步升高,油藏在长期的注入水驱替、冲刷、冲蚀作用下,沿注采主流线上,在较大压力梯度的长期作用下,储层胶结疏松的微小颗粒会逐步剥落并随油流、水流一起向油井运移,在井筒近井地带重塑储层孔隙结构,导致储层微观孔隙结构发生深刻变化,严重时甚至会形成次生优势大通道,从而引起油水渗流特性突变,因此出现油水相渗比值曲线非线性的特征。基于这一特征,利用含水率分流方程,建立了采油速度与油藏特征、含水率、含水饱和度及含水上升速度等影响因素的关系表达式,由此揭示采油速度与上述各因素之间的内在联系,并分析各因素对采油速度的影响。通过与前人的方法对比,表明新方法应用于特高含水期油藏具有明显的优势。

关键词:特高含水期;采油速度;含水率;含水上升速度;相渗曲线
中图分类号:TE341 **文献标识码:**A

Study on the speed of oil recovery and influence factors in extra-high water content period

Chen Jun[1], Yang Junyi[2] and Liu Qiguo[2]
*(1.Graduate School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
2.Institute of petroleum and natural gas engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)*

Abstract: The oil recovery rate has great impact on the development effects of the water drive reservoir in the period of extra-high water cut. During this period, the water saturation is further increased. The reservoir is subjected to the flooding, scour and erosion of the long-term water injection. Along the main line of the injection and mining, and under the long-term effect of the large pressure gradient, the loose particles of the reservoir will gradually peel off and move with the oil and water flow to the well. The pore structure of the reservoir is well remodeled in the wellbore near the well area. All these lead to the profound change of the microscopic pore structure of the reservoir. What's more serious is that a secondary dominant channel will form, which causes the abrupt change of the characteristics of the oil and water seepage. So there arises a non-linear characteristic of the oil-water infiltration ratio curve. Based on this feature, we established the relation between the oil recovery rate, and the reservoir characteristics, water cut, water saturation and the water cut increasing rate by using the water diversion equation to show the inner links between the oil recovery rate and the factors above. We also analyzed the influence of the various factors on the oil recovery rate. Compared with the previous methods, this new method has obvious advantages in the application of the reservoirs with the high water cut.

Key words: extra-high water cut period, production oil rate, water cut, increasing rate of water cut, relative permeability curve

采油速度的高低涉及一个油田生产规模的设计,投资者都希望以较高的速度生产,在满足国家能源需要的同时,尽早收回投资并获取最大的经济利益。但是,过高的采油速度将导致含水上升过快,油藏会过早水淹。前人的研究大多数基于油藏数值模拟和数理统计等方法,开展采油速度的影响因素研究,但对特高含水期油藏,从理论角度分析、研究得较少。基于特高含水期油水相渗比值曲线非线性特

收稿日期:2017-06-26。
第一作者简介:陈军(1968—),男,教授,硕士生导师。油气藏工程理论与方法、油气藏工程计算等方向的科研和教学。
基金项目:国家科技重大专项"特低渗—致密油藏不稳定试井分析技术研究"(2017ZX05009004-004)。

征，利用含水率分流方程，建立采油速度与油藏特征、含水率、含水饱和度及含水上升速度的关系表达式，由此揭示采油速度与各个因素之间的内在联系，并分析各因素对采油速度的影响[1-14]。通过与前人的方法对比，验证该文新方法的实用性。

1 油水相渗比值与含水饱和度关系

一般油水相渗比值与含水饱和度之间满足下述数学关系[15]：

$$\frac{K_{ro}}{K_{rw}}=ae^{-bS_w} \tag{1}$$

左右两端取对数为：

$$\ln\left(\frac{K_{ro}}{K_{rw}}\right)=a-bS_w \tag{2}$$

但在高含水阶段，人们发现：$\ln\left(\frac{K_{ro}}{K_{rw}}\right)\sim S_w$ 呈现非线性关系[15]（图1），即在此阶段，随着含水饱和度的增加，油相相对渗透率快速下降，而水相相对渗透率则加速上升，说明特高含水期油藏注水利用率低。

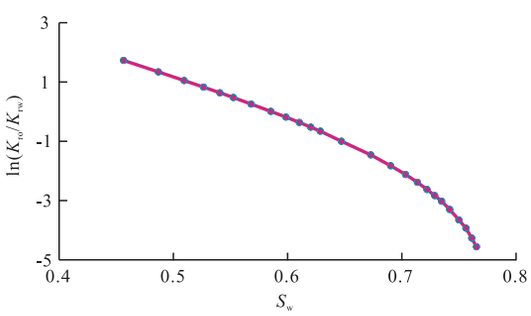

图1 相渗比值曲线变化

Fig. 1 Oil-water relative permeability ratio curve

2 新方法关系式建立

地下水体积含水率表达式为[16-17]：

$$f_w=\frac{1}{1+\frac{\mu_w}{\mu_o}\frac{K_{ro}}{K_{rw}}} \tag{3}$$

特高含水阶段油水相渗比值可用下述方程描述[18]：

$$\ln\left(\frac{K_{ro}}{K_{rw}}\right)=a-bS_w+ce^{S_w} \tag{4}$$

将(4)代入(3)得：

$$f_w=\frac{1}{1+\frac{\mu_w}{\mu_o}e^{a-bS_w+ce^{S_w}}} \tag{5}$$

将(5)变换得：

$$S_w=\frac{-\ln\left[\left(\frac{1}{f_w}-1\right)\frac{\mu_o}{\mu_w}\right]+a+ce^{S_w}}{b} \tag{6}$$

由于：

$$R=\frac{S_w-S_{wi}}{1-S_{wi}} \tag{7}$$

将(6)代入(7)得：

$$R=\left\{\frac{-\ln\left[\left(\frac{1}{f_w}-1\right)\frac{\mu_o}{\mu_w}\right]+a+ce^{S_w}}{b}-S_{wi}\right\}/(1-S_{wi}) \tag{8}$$

化简(8)得：

$$R=A\ln\left(\frac{1}{f_w}-1\right)+B \tag{9}$$

其中：

$$A=-\frac{1}{b(1-S_{wi})}$$

$$B=\frac{1}{b(1-S_{wi})}\ln\left(\frac{\mu_o}{\mu_w}\right)+\frac{a+ce^{S_w}-bS_w}{b(1-S_{wi})}$$

将(9)式两边对时间t求导，得：

$$\frac{dR}{dt}=\frac{1}{b(1-S_{wi})}\frac{1}{f_w(1-f_w)}\frac{df_w}{dt}+\frac{c}{b(1-S_{wi})}e^{S_w}\frac{dS_w}{dt}-\frac{1}{1-S_{wi}}\frac{dS_w}{dt} \tag{10}$$

当取$dt=1a$时，即可得到采油速度表达式：

$$v_o=\frac{1}{b(1-S_{wi})}\frac{1}{f_w(1-f_w)}\frac{df_w}{dt}+\frac{c}{b(1-S_{wi})}e^{S_w}\frac{dS_w}{dt}-\frac{1}{1-S_{wi}}\frac{dS_w}{dt} \tag{11}$$

可见，采油速度与b、c、S_{wi}、f_w以及含水上升速度有关；由于b值、c值为常数，在式(9)对时间t求导时，$\frac{1}{b(1-S_{wi})}\ln\left(\frac{\mu_o}{\mu_w}\right)$为0，说明采油速度与油、水黏度比无关。从式(11)可看出，采油速度由三个部分组成，等式右边第一部分具有三个物理含义，第一项，代表了油藏属性特征，即与束缚水饱和度相关的油水相渗曲线[19-20]对采油速度的影响；第二项，代表了油藏开发特征，即油藏含水率、含水饱和度对采油速度的影响；第三项，代表了油藏开发效果，即含水上升率对采油速度的影响。等式右边第二、三部分都有含水饱和度随时间变化而变化的因素，稍后会进一步分析。

3 采油速度影响因素分析

3.1 油藏属性的影响

根据式(11),油、水相对渗透率之比与含水饱和度的回归系数b值、c值会对采油速度产生一定影响。如果c值一定,b值越大,采油速度越小,反之,采油速度越大。如果b值一定,c值越大,采油速度越大,反之,采油速度越小。选取两组油水相对渗透率曲线,根据(4)式回归得到不同的a、b、c值。

由图2、图3及表1可知,式(4)的回归系数b、c与相渗曲线的形态有关,在相同的含水饱和度下,回归系数b、c值越大,油、水相对渗透率的比值越小,这说明在水相流动性占优的情况下,采油速度低,而油相流动性占优的情况下,采油速度高。在含水饱和度达到0.7时,含水率已经达到经济极限含水率,因此不考虑含水饱和度大于0.7以后的情况。

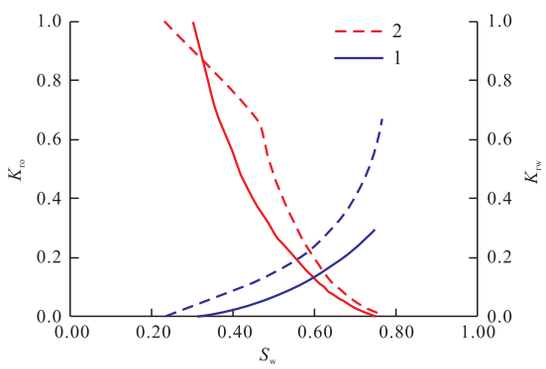

图2　不同的油水相对渗透曲线

Fig. 2　Different oil–water relative permeability curves

表1　不同油水相渗曲线回归系数

Table 1　Regression value of different oil–water relative permeability curves

岩心样品	a	b	c
1	77.8	−234.6	−120.6
2	43.8	−67.8	−46.5

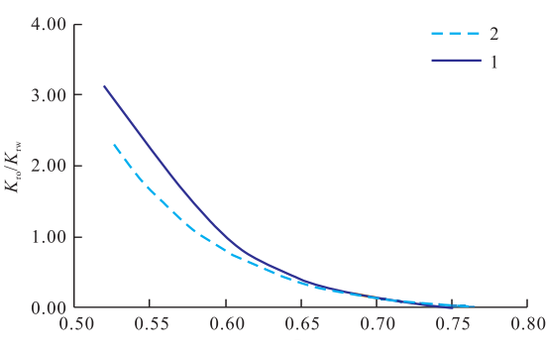

图3　不同油水相对渗透率比值与含水饱和度关系曲线

Fig. 3　Relation between oil–water relative permeability ratio and water saturation

3.2 含水率及含水饱和度的影响

大量生产实践表明,在特高含水期,含水率与含水饱和度之间存在线性关系[21],其关系可表述为:

$$f_w = nS_w + m \tag{12}$$

式(12)对时间t求导得:

$$\frac{df_w}{dt} = n\frac{dS_w}{dt} \tag{13}$$

由式(10)可知,采油速度的主要影响因素是含水率。含水率的变化规律可以反映采油速度的高低。根据XX油藏实际生产状况,在特高含水期,式(13)中系数n接近1,则$\frac{df_w}{dt} = \frac{dS_w}{dt}$,据此对式(11)进行简化处理,设表达式:

$$y = \frac{1}{f_w(1-f_w)} + ce^{f(f_w)} - b \tag{14}$$

在高含水期,函数y随f_w的变化曲线如图4所示,这里b、c值选取表1样品1的数据。可以看出:f_w在0.88~0.95之间的变化,y随着f_w的上升而下降,说明含水率上升与采油速度为负相关关系;在0.95~1之间的变化,y随着f_w上升而上升,说明含水率上升与采油速度为正相关关系。

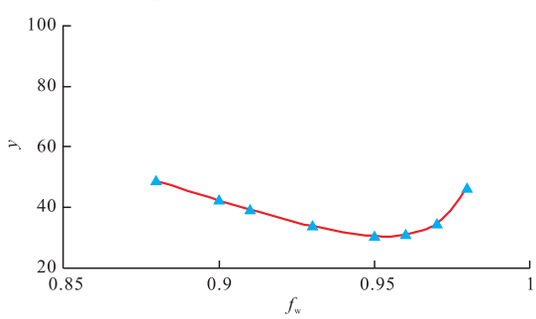

图4　特高含水阶段f_w对y值的影响

Fig. 4　Effect of water cut on value y in the period of extra–high water cut

3.3 含水上升速度的影响

含水上升速度df_w/dt的影响表现为含水上升速度越快,采油速度越快。以表1中样品1为例,含水上升速度分别取1%、2%、3%、4%、5%代入式(11),不同含水上升速度下,采油速度随含水率的变化趋

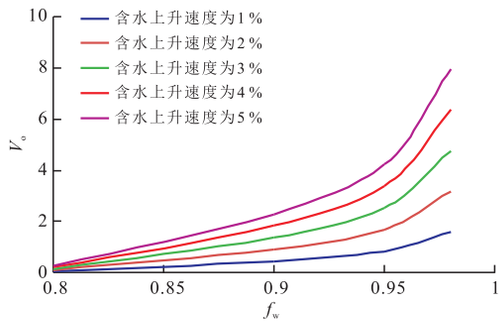

图5 特高含水期含水上升速度对采油速度的影响

Fig. 5 Effect of ascending velocity of water cut on oil recovery rate in the period of extra-high water cut

势如图5。

从上图可见,随着含水上升速度增加,采油速度曲线逐渐上升,尤其是特高含水阶段,采油速度曲线急剧上升,这说明含水上升速度对特高含水期采油速度影响强烈。实际油田开发过程中,过高的采油速度将导致含水上升速度的快速上升,给油田的后续开发带来不利影响,而且经济效益低下。因此,可利用特高含水期含水率反求油藏的合理采油速度。

4 实例验证及方法对比

4.1 实例验证

针对特定的油藏,求取油藏典型相渗曲线的回归系数,并根据实际开发数据计算理论采油速度。以XX区块为例,该油藏为中孔中渗水驱油藏,相渗曲线及其数据如图6和表2所示。

根据式(4)对表2中的油、水相对渗透率比值进行回归,由此得到系数a为40.01,b为-29.56,c为30.25,回归表达式为:

$$\ln\left(\frac{K_{ro}}{K_{rw}}\right)=40.01-\left(-29.56S_w\right)+\left(-30.25e^{S_w}\right) \quad (15)$$

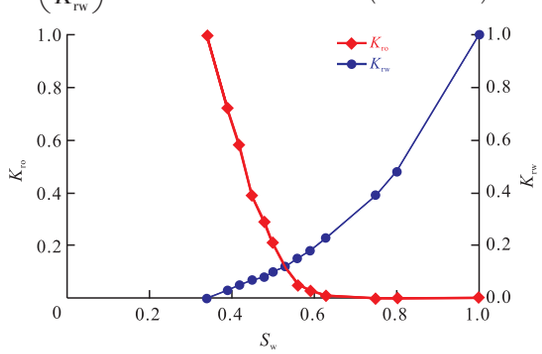

图6 XX油藏相渗曲线

Fig. 6 Oil-water relative permeability of XX reservoir

表2 XX油藏相渗曲线数值

Table 2 Value of relative permeability curves of XX reservoir

S_w	K_{rw}	K_{ro}
0.34	0	1
0.39	0.03	0.72
0.42	0.05	0.58
0.45	0.07	0.39
0.48	0.08	0.29
0.5	0.1	0.21
0.53	0.12	0.12
0.56	0.15	0.05
0.59	0.18	0.03
0.63	0.23	0.01
0.75	0.39	0
0.8	0.48	0
1	1	0

将回归的系数b、c和S_{wi}以及表3中生产数据代入式(11),即可获得理论采油速度。对实际和理论采油速度进行对比分析,并评价其开发效果。

通过实际采油速度与理论采油速度的对比(图7)可知理论采油速度与实际采油速度很接近,在交替涨落变化;理论值在2012年后比实际采油速度高,

表3 实际采油速度与理论采油速度数据

Table 3 Data of actual and theoretical oil recovery rate

年份	实际采油速度,%	新方法,%
2010	0.34	0.34
2011	0.40	0.34
2012	0.36	0.35
2013	0.29	0.31
2014	0.31	0.32
2015	0.33	0.40

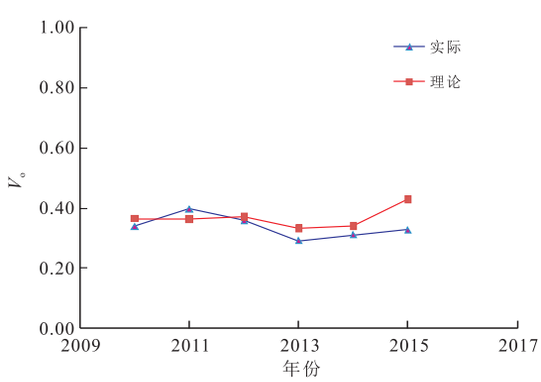

图7 实际采油速度与理论采油速度对比

Fig. 7 Contrast between actual and theoretical oil recovery rate

表明该油藏后期开发效果一般,也佐证实际采油速度过高对油藏开发效果的负面影响。

4.2 方法对比

1970年KOITBITOB提出了油田开发衰减曲线,之后在此基础上国内外学者相继提出了衰减曲线的修正方程。目前衰减曲线及其修正方程作为油气田开发中重要的理论方法,已普遍应用于油田开发实践中。下面用衰减曲线修正方程计算实例油藏的采油速度,并与该文提出的新方法进行对比。

KOITBITOB的衰减曲线方程为:

$$N_p = A - \frac{B}{t} \tag{16}$$

衰减曲线的修正方程为:

$$N_p = a - \frac{b}{t+c} \tag{17}$$

对上式两端进行对t求导,得到:

$$\frac{dN_p}{dt} = \frac{b}{(t+c)^2} \tag{18}$$

又因 $Q = \frac{dN_p}{dt}$,$a = N_R$,再将式(17)代入到式(18),得:

$$Q = \frac{(N_R - N_P)^2}{b} \tag{19}$$

其中,$N_p = N_R R^*$,因此上式又可写为:

$$Q = \frac{N_R^2(1-R^*)^2}{b} \tag{20}$$

将V_o定义为 $V_o = \frac{Q}{N} \times 100\%$,将其代入上式有:

$$V_o = \frac{N_R^2(1-R^*)^2}{bN} \times 100\% \tag{21}$$

由公式(17)可知:油藏年产量Q与$(N_R-N_P)^2$成正比关系,因此可将实际生产的Q与$(N_R-N_P)^2$进行线性拟合,所得直线的斜率为$1/b$,获得b后即可利用公式(21)计算油藏合理采油速度。

新方法与衰减曲线修正方程计算结果对比如表4和图8。

从表4及图8的计算结果可知,衰减方程法计算结果呈现了逐年递减的效果,与实际的生产状况不符。这主要是因为该方法仅从纯数学角度出发,并没有考虑特高含水期油藏的油水相对渗透率曲线特征、储层的非均质性和构造的复杂性等实际地质开发特征,因此这种方法具有较大的局限性。而该文新方法从理论上考虑到了特高含水期油水相渗比值曲线的非线性特征,其计算的理论值与实际采油速度更接近,因此新方法更合理。

表4 高含水采油速度计算结果对比

Table 4 Contrast among the result of recovery rate in the period of extra-high water cut

年份	衰减模型,%	新方法,%	实际采油速度,%
2010	0.37	0.34	0.34
2011	0.34	0.34	0.40
2012	0.31	0.35	0.36
2013	0.29	0.31	0.29
2014	0.27	0.32	0.31
2015	0.24	0.40	0.33

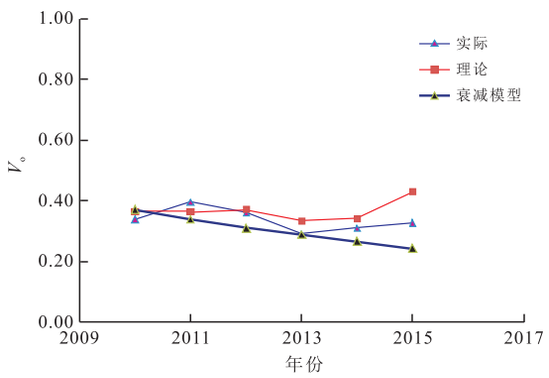

图8 采油速度计算结果对比

Fig. 8 Contrast among the result of recovery rate in the period of extra-high water cut

5 结论

1)考虑基于特高含水期油藏油水相渗比值曲线非线性特征,建立了计算特高含水期采油速度的方程。

2)通过建立的新采油速度计算关系方程,分析认为:对于特高含水期油藏,含水率(含水饱和度)是影响采油速度的主要因素,而与之相关的含水上升速度是更易于辨识的人为可控因素。

3)建立的新采油速度关系表达式,可用于评价特高含水期特定油藏的理论采油速度。

4)采油速度新方法与衰减方程方法对比分析表明,新方法计算的特高含水期采油速度更具有实践指导意义。

符号说明

f_w为含水率,%;K_{ro},K_{rw}为油水相对渗透率,无因次;μ_w,μ_o为地层水及地层原油黏度,mPa·s;S_w为含水饱和度,无因次;S_{wi}为束缚水饱

(下转第32页)