

文章编号: 0253-2697(2014)04-725-08 DOI:10.7623/syxb201404013

聚合物驱油田可采储量计算方法

张继成¹ 姜振海² 林 立² 位建成¹

(1. 东北石油大学石油工程学院 黑龙江大庆 163318; 2. 大庆油田有限责任公司第三采油厂 黑龙江大庆 163000)

摘要:为了改进聚合物驱(聚驱)油田可采储量的计算方法,利用聚驱驱替特征曲线,对大庆油田萨北开发区的 19 套井网进行研究,发现一类与二类油层聚驱可采储量的计算方法是一致的,只是在不同开采阶段采用的方法不同。在聚驱后续水驱阶段,水驱规律曲线表现出明显的直线特征,可采用修正甲型和丙型水驱规律曲线计算聚驱可采储量、标定可采储量、空白水驱可采储量和聚驱增储结果等;在聚驱中后期阶段,通过计算出的累积产油量,利用历史数据预测转后续水驱的累积注水量,即可计算出整个聚驱过程中的聚用量,并可分析后续水驱阶段的采出程度,从而建立起中后期可采储量的计算模型;在聚驱早、前期阶段,对于还未注聚的区块无法用驱替曲线进行可采储量预测,因此采用多元回归的方法,从影响聚驱效果的主要因素出发,回归了聚驱可采储量的计算模型,根据注聚前设定的注聚方案参数就可以进行可采储量的预测。应用实例表明,该方法可精确计算聚驱油田不同阶段的可采储量,其计算平均误差仅为 1.96%。

关键词:聚驱油田;可采储量;水驱规律曲线;多元回归;影响因素
中图分类号:TE328 **文献标识码:**A

Calculation method of recoverable reserves in polymer flooding field

Zhang Jicheng¹ Jiang Zhenhai² Lin Li² Wei Jiancheng¹

(1. College of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Heilongjiang Daqing 163318, China;
2. No. 3 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Limited Company, Heilongjiang Daqing 163000, China)

Abstract: In order to modify the calculation methods of recoverable reserves of polymer flooding oilfield, a study is carried out on 19 sets of well pattern of Sabei development zone by using polymer displacement characteristic curve. The results show that the calculation methods of polymer flooding recoverable reserves are consistent for both the first class reservoir and the second class reservoir, whereas different methods are adopted in different development stages. In subsequent water flooding stage of polymer flooding, the water flooding curve shows obvious linear characteristics, so polymer flooding recoverable reserves, rate recoverable reserves, blank water flooding recoverable reserves and the augmentation of polymer flooding recoverable reserves can be calculated; in the mid-late stage of polymer flooding, through the calculated cumulative oil production and prediction of subsequent water flooding cumulative water injection with the historical data, the polymer dosage in the process of polymer flooding can be calculated and recovery degree of subsequent water flooding stage can be analyzed, then the calculating model of recoverable reserves can be establish; In the early stage of polymer flooding, recoverable reserves cannot be predicted by using displacement curve with the blocks which have not polymer injection. From the main influencing factors of polymer flooding, the calculation model of polymer flooding recoverable reserves is established with the method of multiple regression, thus recoverable reserves can be predicted according to polymer flooding injection scheme parameters. Application examples shows that this method can accurately calculate the recoverable reserves of polymer flooding in different stages, and the average error is only 1.96%.

Key words: polymer flooding field; recoverable reserves; water drive curve; multiple regression; influence factors

油田可采储量是油田开发规划编制、油田开发分析、油田调整设计、石油工业发展规划编制乃至国民经济发展规划编制的重要基础参数,因此测算油田的可采储量意义重大^[1]。目前计算可采储量的方法主要有静态法和动态法。对于未开发油田或开发初期的油田,尚无动态资料或静态资料,无法利用生产数据进行可采储量计算,因此一般采用理论公式、经验公式、类比等静态方法先确定采收率,然后再与地质储量相乘计算可采储量^[2,3]。

大庆油田萨北开发区各套井网均经历了较长的开采历程,有较齐全的历史动态数据,其可采储量计算以动态法为主。然而,其聚合物驱(简称聚驱)可采储量预测方法仍停留在室内,主要是在现场试验及数值模拟取得的认识基础上^[4-6],根据聚合物用量或方案设计提高采收率值,从而计算新增可采储量。但随着聚合物驱推广规模的不断扩大,注聚合物区块生产动态的差异也在不断增大,目前该方法已无法满足计算聚合

基金项目:黑龙江省省长学者后备支持计划项目(2011CJHB005)和黑龙江省新世纪优秀人才支持计划项目(1155-NCET-001)资助。

第一作者及通信作者:张继成,男,1972年3月生,1995年获大庆石油学院油藏工程专业学士学位,2008年获大庆石油学院油气田开发工程专业博士学位,现为东北石油大学石油工程学院教授、博士生导师,主要从事油气田开发工程方面的教学与研究工作。Email:zhangjc777@163.com

物驱可采储量的需要^[7-9]。杨湘龙曾提出应用聚合物区块产量高峰以后水驱曲线出现的拟直线段预测开发指标的方法^[10],但其只适用于近期开发指标预测,不适用于外推预测可采储量。也有学者认为,注聚后水驱特征曲线明显向产油量轴偏转,然后上翘并趋于一条直线^[11,12],注聚前后水驱曲线直线段基本平行,可应用水驱曲线平移校正法(动态跟踪预测法)预测聚合物驱逐年新增的可采储量,但是,聚合物驱油能扩大波及体积和提高洗油效率,增加动态地质储量,因此聚合物驱前、后的水驱直线段斜率是不可能一致的^[13-16]。

笔者以聚驱驱替特征曲线为基础,根据井网的动态资料,将聚驱分为不同的阶段,分别对聚驱各个阶段的可采储量进行研究^[17,18]。并利用聚驱驱替特征曲线在聚驱不同阶段的规律,采用多元回归方法,得出了聚驱可采储量的计算模型,再依据注聚前设定的注聚参数进行可采储量^[19,20]的预测。

1 聚驱驱替特征曲线

对大庆油田萨北开发区 19 套聚驱井网,以及各井网所处的聚驱阶段进行了统计(表 1)。

表 1 萨北开发区不同井网聚驱阶段统计结果

Table 1 Statistical results of polymer flooding stage for different well pattern in Sabei development zone

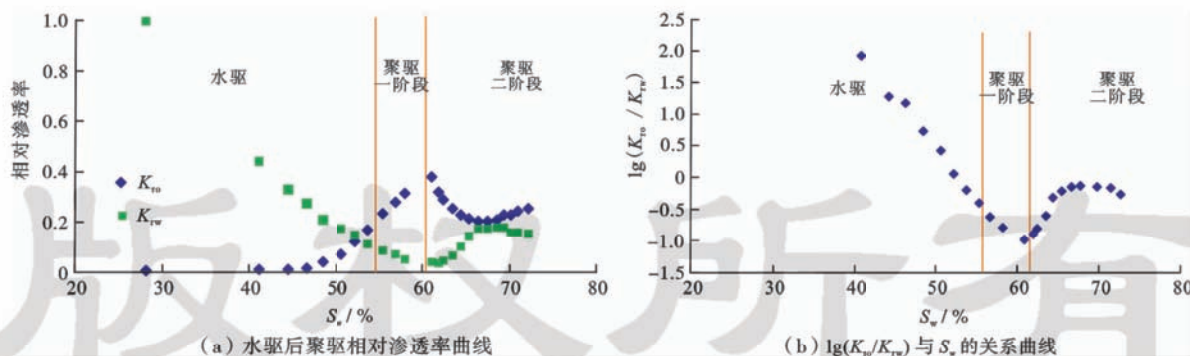
油层类别	未注聚	注聚中	后续水驱
一类油层	北 3-1 排—北 3-3 排东区葡一组、北 3-1 排—北 3-3 排三西葡一组、北 3-1 排—北 3-3 排西区葡一组、四矿一条带东区葡一组、四矿一条带西区葡一组(共 5 套井网)	8 号区块、7 号区块(共 2 套井网)	6 号区块、5 号区块、1 号区块、2 号区块、3 号区块、4 号区块、东过一条带(共 7 套井网)
二类油层	1 号区块二类油层(1 套井网)	2 号区块二类油层、9 号区块二类油层、10 号区块二类油层、4 号区块二类油层(共 4 套井网)	

对聚合物驱替特征曲线的基本认识为:

(1) 聚合物溶液注入一段时间后,地下聚合物浓度场趋于稳定,而剪切稀释主要发生在近井地带,因此注聚一段时间后,聚合物黏度场也趋于稳定。

(2) 由水驱转注聚以后,与空白水驱相比,聚驱相对渗透率曲线特征表现为水相渗透率先大幅度下降后又缓慢回升,油相相对渗透率曲线先迅速上升后缓慢下降(图 1)。其原因就在于聚合物分子直径远大于水分子,聚合物分子链间缠绕聚结,从而导致聚合物溶

液黏度较高,渗流能力降低,所以,注聚后渗流速度减慢。聚合物不但能够进入岩心内的大孔道,而且能够进入水驱未波及区域,从而扩大了波及体积。从地面管道流动实验可以观察到,聚合物溶液的前端对其后边及管道边界处具有较强的“拉、拽”作用。因此在这两方面的作用下使得岩心中分散的油相不断聚集,逐渐形成新的“油墙”,使得油相渗流能力不断增强,表现为油相相对渗透率不断增大,水相相对渗透率不断减小。



注: K_{ro} 为油相相对渗透率; K_{rw} 为水相相对渗透率; S_w 为含水饱和度, %。

图 1 渗透率与含水饱和度关系

Fig. 1 Relationship between permeability and water saturation

(3) 聚合物驱不但能扩大波及体积,而且聚合物溶液的黏弹性效应,能进一步降低残余油饱和度。可是,聚合物前缘一旦在出口端突破,“油墙”就被采出,岩心中的油将更少、更分散化,即使仍有聚合物注入,油相的渗流能力也在急剧降低。而随着岩心中聚合物溶液的增多,驱替相渗流能力不断增加,水相相对渗透率也不断增大。

根据图 1(a) 所示曲线特征,对 K_{ro}/K_{rw} 两边取对数,就可得到聚驱阶段 $K_{ro}/K_{rw}-S_w$ 半对数坐标曲线,其表现为明显的分段直线特征[图 1(b)]。

根据聚驱驱替特征曲线的基本特征,可以分析 3 号区块聚驱状况(图 2)。该区块目前已进入后续水驱阶段,其甲型水驱规律曲线如图 2(b) 所示。

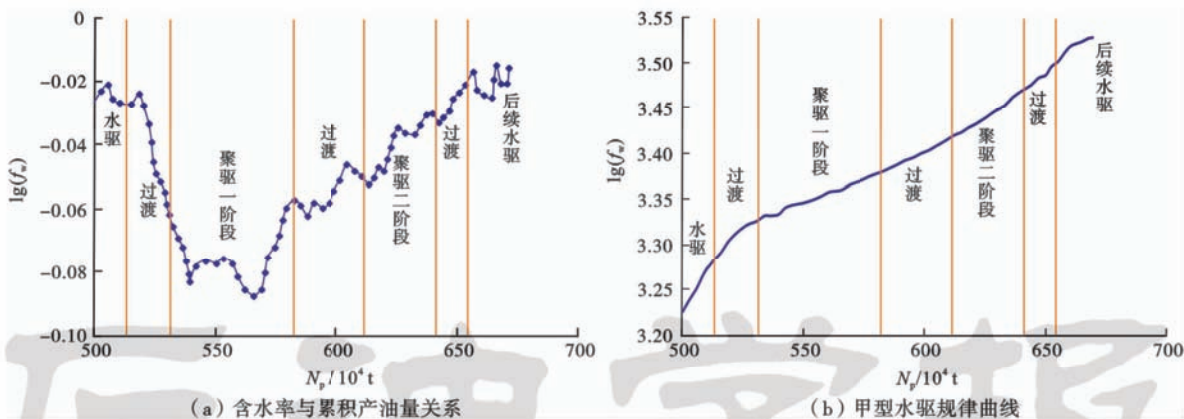


图 2 3# 区块聚驱特征曲线

Fig. 2 Polymer flooding driving characteristic curves in block 3

聚合物黏度场分布稳定后,其黏度值和水驱一样也可设定为常数,因此聚驱特征曲线与水驱相比,区别主要体现在相对渗透率曲线上。3# 区块聚驱规律曲线空白水驱后经过过渡阶段后进入聚驱一阶段,此阶段与 $K_{ro}/K_{rw}-S_w$ 半对数坐标中的聚驱第一段直线相对应,实际对应含水下降阶段;再经过过渡进入聚驱二阶段,此阶段与 $K_{ro}/K_{rw}-S_w$ 半对数坐标中的聚驱第二段直线相对应,实际对应含水上升阶段;最后再过渡进入后续水驱直线阶段。

对于丙型水驱规律曲线(图 3)来说,聚驱和水驱也有区别。由于聚驱能扩大波及体积,降低残余油饱和度,增加可动油储量,因此聚驱丙型水驱规律曲线斜率和水驱相比会变小,后续水驱斜率就介于空白水驱和聚驱之间。如 3# 区块丙型曲线空白水驱斜率为 1.51453×10^{-3} ,聚驱阶段斜率为 0.94220×10^{-3} ,后续水驱阶段斜率为 1.07590×10^{-3} 。

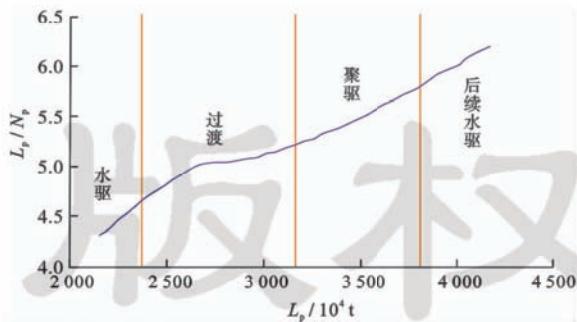


图 3 3# 区块丙型曲线
Fig. 3 Type C curve in block 3

无论是一类油层还是二类油层,含水率变化均是先下降后上升,只不过在含水下降幅度及回升速度等方面有所区别,但其聚合物驱驱替曲线特征是一致的。因此对于聚驱可采储量计算,只需考虑在不同开采阶段采用不同的计算方法即可,一类与二类油层聚驱可采储量计算方法是一致的。

2 聚驱后续水驱可采储量计算模型

后续水驱阶段,水驱规律曲线已表现为明显的直线特征,即可直接参照空白水驱时可采储量的计算方法,采用修正甲型和丙型水驱规律曲线进行计算。

2.1 聚驱可采储量

3# 区块后续水驱甲型水驱规律曲线的表达式为:

$$\lg W_p = 0.00263361N_p + 1.77622923 \quad (1)$$

式中: W_p 为累积产水量, 10^4 m^3 ; N_p 为可采储量, 10^4 t 。

计算可得聚驱可采储量为:

$$N_{pA} = \frac{\lg 49 - [a + \lg(\ln 10 \times b)]}{b} = 809.23 \times 10^4 \text{ t} \quad (2)$$

式中: N_{pA} 为聚驱可采储量, 10^4 t ; a, b 为统计常数。

按照水驱区块计算结果将甲型曲线计算值减去 5.7%, 即得修正后的可采储量值 $N_p = N_{pA} \times (1 - 5.7\%) = 763.11 \times 10^4 \text{ t}$ 。

由后续水驱丙型水驱规律曲线表达式为:

$$L_p / N_p = 0.00107590L_p + 1.72629444 \quad (3)$$

式中, L_p 为累积产液量, 10^4 m^3 。

计算可得聚驱可采储量为:

$$N_{pC} = \frac{1 - \sqrt{a(1 - f_w)}}{b} = 756.75 \times 10^4 \text{ t} \quad (4)$$

式中, f_w 为含水率, %。

则 3# 区块聚驱可采储量标定结果为 $(N_{pA} + N_{pC}) / 2 = 759.93 \times 10^4 \text{ t}$

2.2 空白水驱可采储量

空白水驱甲型水驱规律曲线表达式为:

$$\lg W_p = 0.00443377N_p + 1.01043524 \quad (5)$$

计算可得 3# 区块水驱可采储量为:

$$N_{pBA} = \frac{\lg 49 - [a + \lg(\ln 10 \times b)]}{b} \times 0.943 = 568.04 \times 10^4 \text{ t} \quad (6)$$

空白水驱丙型水驱规律曲线表达式为:

$$L_p/N_{pBC} = 0.00151453L_p + 1.06211203 \quad (7)$$

计算可得3#区块水驱可采储量为:

$$N_{pBC} = \frac{1 - \sqrt{a(1-f_w)}}{b} = 564.04 \times 10^4 \text{ t} \quad (8)$$

因此,3#区块空白可采储量标定结果为 $(N_{pBA} + N_{pBC})/2 = 566.04 \times 10^4 \text{ t}$ 。

2.3 聚驱增储结果

3#区块的动态地质储量为 $N = 1/(0.0010759 \times$

$0.64) = 1452.27 \times 10^4 \text{ t}$ (0.00107590为后续水驱阶段斜率);其聚驱增储结果为 $(N_{pA} + N_{pC})/2 - (N_{pBA} + N_{pBC})/2 = 193.89 \times 10^4 \text{ t}$;聚驱提高采收率值为 $E_k = [(N_{pA} + N_{pC}) - (N_{pBA} + N_{pBC})]/(2N) = 13.35\%$ 。

在7个后续水驱区块中,6#区块、5#区块于2011年9月进入后续水驱,这2个区块由于后续水驱阶段的时间较短,水驱规律曲线直线段不明显,不能用以上方法进行计算,其余区块均可用该方法计算(表2)。

表2 后续水驱区块可采储量计算结果

Table 2 Calculation results of recoverable reserves for subsequent water flooding blocks

区块	修正甲型/ 10^4 t	丙型/ 10^4 t	标定可采储量/ 10^4 t	动态地质储量/ 10^4 t	采收率/%
1#区块	775.94	772.99	774.46	1390.40	55.70
2#区块	991.00	985.03	988.01	1766.34	55.94
3#区块	763.11	756.75	759.93	1452.27	52.33
4#区块	1288.10	1282.01	1285.05	2377.37	54.05
东过一条带	101.42	100.82	101.12	263.25	38.41

3 聚驱中后期可采储量计算模型

聚驱中后期是指聚驱的含水回升期。从 $K_{ro}/K_{rw}-S_w$ 曲线上可以看出[图1(b)],甲型水驱规律曲线的聚驱一阶段对应的是含水下降阶段,聚驱第二阶段对应的是含水回升期,同样丙型水驱规律曲线中的聚驱直线段也是出现在含水回升期。这一点也已经从3#区块的实际生产数据中得到了验证。

3.1 计算步骤

(1) 在含水回升期,甲型水驱规律曲线呈现出聚驱第二直线段,丙型水驱规律曲线也呈现出直线段。按照直线段外推,就可计算出按照设计含水回升期到一定程度转后续水驱时的累积产油量和其他开发指标。

甲型:

$$W_{pl} = \frac{F_{w0}}{b \ln 10} \quad (9)$$

$$N_{pl} = (\lg W_{pl} - a)/b \quad (10)$$

$$L_{pl} = N_{pl} + W_{pl} \quad (11)$$

丙型:

$$N_{pl} = \frac{1 - \sqrt{a(1-f_w)}}{b} \quad (12)$$

$$L_{pl} = \frac{a}{1/N_{pl} - b} \quad (13)$$

$$W_{pl} = L_{pl} - N_{pl} \quad (14)$$

式中: F_{w0} 为水油比; N_{pl} 为转后续水驱时的可采储量, 10^4 t ; L_{pl} 为转后续水驱时的累积产液量, 10^4 m^3 ; W_{pl} 为转后续水驱时的累积产水量, 10^4 m^3 。

(2) 通过历史数据统计可得到累积注采比随累积注水量的变化规律,进而可预测转后续水驱时的累积注水量。

$$R_{ip} = c \times W_i + d \quad (15)$$

$$R_{ip} = W_i/L_p \quad (16)$$

式中: R_{ip} 为累积注采比; W_i 为累积注水量, 10^4 m^3 ; c, d 为统计常数。

转后续水驱时的累积注水量为:

$$W_{i1} = \frac{d}{1/L_{p1} - c} \quad (17)$$

(3) 计算整个聚驱过程中的总聚用量为:

$$P_y = P_{y1} + P_{y2} \quad (18)$$

式中: P_{y1} 为目前的聚用量, $\text{mg/L} \cdot \text{PV}$; P_{y2} 为从目前到聚驱结束时的聚用量, $\text{mg/L} \cdot \text{PV}$ 。

$$P_{y2} = \frac{W_{i1} - W_{i0}}{V_p} C_p \quad (19)$$

式中: W_{i0} 为目前的累积注入量, 10^4 m^3 ; V_p 为油藏孔隙体积, m^3 ; C_p 为聚合物浓度。

则有:

$$P_y = P_{y1} + \frac{W_{i1} - W_{i0}}{V_p} C_p \quad (20)$$

(4) 分析后续水驱阶段的采出程度。对于某一特定区块来讲,聚合物驱提高采收率值与聚合物用量密切相关,后续水驱阶段的采出程度也受聚用量的影响较大。同时考虑到不同油藏之间的差异,将地层系数和聚驱控制程度也选为影响后续水驱采出程度的影响因素,利用前面后续水驱阶段的计算结果(表3)可以回归后续水驱阶段采出程度与聚用量、地层系数及聚

驱控制程度的关系式为:

$$R_s = 0.1189031gP_y - 0.00386KH + 0.002362f - 0.43109 \quad (21)$$

式中: K 为储层有效渗透率, mD ; H 为储层有效厚度, m ; KH 为地层系数, $\mu m^2 \cdot m$; f 为河道多向连通比例, %。

表 3 后续水驱阶段采出程度计算数据

Table 3 Calculation data of subsequent water flooding phase recovery percent

区块	后续水驱采出程度/%	地层系数/ $(\mu m^2 \cdot m)$	聚驱控制程度/%	聚用量/ $(mg \cdot L^{-1} \cdot PV)$
1# 区块	6.05	9.32	78.2	765
2# 区块	3.52	6.81	65.1	707
3# 区块	7.43	8.51	83.5	738
4# 区块	6.69	8.58	82.5	672

(5) 聚驱结束时的累产油加上后续水驱阶段的累产油即为最终的可采储量。

$$N_{pT} = N_{p1} + N \times R_s \quad (22)$$

式中, N_{pT} 为最终可采储量, $10^4 t$ 。

3.2 计算结果

2# 区块、7# 区块、8# 区块、5# 区块和 6# 区块的标定可采储量计算结果见表 4。

表 4 聚驱中后期可采储量计算结果

Table 4 Calculation results of polymer flooding recoverable reserves in middle and later stage

区块	甲型/ $10^4 t$	丙型/ $10^4 t$	标定可采储量/ $10^4 t$	动态地质储量/ $10^4 t$	采收率/%
2# 区块 二类油层	693.48	696.02	694.75	1296.00	53.61
7# 区块	994.35	975.87	985.11	1874.64	54.05
8# 区块	578.02	565.14	571.58	1062.47	53.80
5# 区块	663.36	663.36	663.36	1173.87	56.51
6# 区块	458.23	458.23	458.23	837.00	54.75

4 聚驱前、早期可采储量计算模型

从影响聚驱效果的主要因素出发,包括地质储量 N 、地层系数 KH 、渗透率变异系数 K_v 、河道多向连通比例 f 、聚用量 P 、注聚速度 V 、注聚前含水率 f_w 、聚驱控制程度 J 、井距 d 。根据聚驱区块的计算结果,采用多元回归方法,可以得出聚驱可采储量的计算模型,再依据注聚前设定的注聚方案参数进行可采储量的预测。

选取已计算的后续水驱以及聚驱中后期的 8 个区块的计算结果(表 5),采用灰色关联度方法,计算可采储量各影响因素的影响程度大小顺序。

表 5 8 个区块的可采储量及影响因素

Table 5 Recoverable reserves and influencing factors of eight blocks

区块	标定可采储量/ $10^4 t$	地质储量/ $10^4 t$	地层系数/ $(\mu m^2 \cdot m)$	渗透率变异系数	河道连通比例/%	聚用量/ $(mg \cdot L^{-1} \cdot PV)$	含水率/%	聚驱控制程度/%
1# 区块	774.46	1390.40	9.32	0.63	67.2	765	85.11	78.2
2# 区块	988.01	1766.34	6.81	0.63	55.6	707	89.42	65.1
3# 区块	759.93	1452.27	8.51	0.69	60.0	738	94.63	83.5
4# 区块	1285.05	2377.37	8.58	0.69	59.7	672	91.82	82.5
5# 区块	663.36	1173.87	6.23	0.71	54.7	1232	93.44	74.6
6# 区块	458.23	837.00	5.00	0.67	67.7	1126	94.16	79.3
东过一条带	101.12	263.25	4.11	0.77	51.7	161	94.71	69.8
7# 区块	985.11	1874.64	4.70	0.63	41.7	1096	91.62	79.3

注:注入速度和井距基本不变,不参与计算。

(1) 根据已有区块聚驱可采储量确定灰色关联参考列为:

$$X_0 = (X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)) = (N, KH, K_v, f, P, V, f_w, J, d) \quad (23)$$

式中: X_0 为已有区块预测的聚驱可采储量影响因素; n 为区块数目。

确定聚驱可采储量影响因素比较序列为:

$$X_i = (X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)) \quad (24)$$

式中: i 为影响因素个数, $i = 1, \dots, 9$; $X_i(j)$ 为第 j 个区块的第 i 个影响因素。

(2) 将数据标准化为(表 6):

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \quad (25)$$

式中: X'_{ij} 为标准化值; X_{ij} 为第 j 个区块的第 i 个的影响因素; X_{jmin} 为第 j 个因素的最小影响程度值; X_{jmax} 为第 j 个因素的最大影响程度值。

(3) 将参考列与比较列作差,可求得各个比较列最大差和最小差的绝对值。

$$\begin{cases} \Delta_{max} = \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)| \\ \Delta_{min} = \min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| \end{cases} \quad (26)$$

(4) 求得关联系数为:

$$\epsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{X_0(k) - X_i(k) + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (27)$$

(5) 求得各个影响因素与聚驱可采储量的关联度为(表 7):

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \quad (28)$$

根据经验可知,关联度在 0.6 以上,表示因素对结果的影响程度较大,因此上述各个因素都应考虑成为多元回归的参数。

(6) 根据各个影响因素关联度的大小排序,确定其对聚驱可采储量影响程度的大小顺序为:聚驱控制程度、聚用量、地层系数、含水率、地质储量、渗透率变异系数、河道连通比例。对表 6 和表 7 的数据分析可知:与采收率值呈正相关的有地质储量、地层系数、河道连通比例、聚用量、聚驱控制程度;呈负相关的有渗透率变异系数、注聚前的含水率。

表 6 归一化数据

Table 6 Normalization data

区块	标定可采储量/ 10^4 t	地质储量/ 10^4 t	地层系数/ $(\mu\text{m}^2 \cdot \text{m})$	渗透率变异系数	河道连通比例/%	聚用量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{PV})$	含水率/%	聚驱控制程度/%
1# 区块	0.568 7	0.533 2	1.000 0	0	0.980 8	0.564 0	0	0.712 0
2# 区块	0.749 1	0.711 0	0.519 1	0	0.534 6	0.509 8	0.449 0	0
3# 区块	0.556 5	0.562 4	0.845 4	0.428 6	0.703 8	0.538 7	0.991 7	1.000 0
4# 区块	1.000 0	1.000 0	0.858 0	0.428 6	0.692 3	0.477 1	0.699 0	0.945 7
5# 区块	0.474 9	0.430 7	0.408 1	0.571 4	0.500 0	1.000 0	0.867 7	0.516 3
6# 区块	0.301 6	0.271 4	0.171 9	0.285 7	1.000 0	0.901 0	0.942 7	0.771 7
东过一条带	0	0	0	1.000 0	0.384 6	0	1.000 0	0.255 4
7# 区块	0.746 7	0.762 2	0.113 8	0	0	0.873 0	0.678 1	0.771 7

表 7 各因素关联系数及关联度

Table 7 Correlation coefficient of various and correlation

区块	地质储量/ 10^4 t	地层系数/ $(\mu\text{m}^2 \cdot \text{m})$	渗透率变异系数	河道连通比例/%	聚用量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{PV})$	含水率/%	聚驱控制程度/%
1# 区块	0.383	0.423	0.483	0.507	0.984	0.532	0.772
2# 区块	0.367	0.579	0.413	0.678	0.556	0.711	0.356
3# 区块	0.787	0.523	0.822	0.765	0.944	0.608	0.489
4# 区块	1.000	0.690	0.482	0.585	0.364	0.710	0.932
5# 区块	0.333	0.826	0.865	1.000	0.363	0.637	0.961
6# 区块	0.407	0.709	1.000	0.372	0.333	0.498	0.473
东过一条带	1.000	1.000	0.344	0.526	1.000	0.379	0.634
7# 区块	0.587	0.333	0.414	0.356	0.703	1.000	1.000
关联度	0.610	0.635	0.603	0.600	0.656	0.634	0.702

选取聚驱控制程度 J 、聚用量 P 、地层系数 KH 、渗透率变异系数 K_v 、含水率 f_w 、地质储量 N 、河道连通比例 f 等 7 个影响因素作为参数进行多元回归得:

$$N_{pT} = (0.18767640 \lg P + 0.01068912KH + 0.00035130f_w - 0.06616189K_v + 0.00060035f - 0.00254142J + 0.09153131)N \quad (29)$$

其显著性检验 F 值为 7.02。

回归公式中含水率系数为正值,表示聚驱可采储量随注聚前含水率的增加而增加,这与实际相矛盾。同时聚驱控制程度回归系数为负值,也与实际不符,表明各个因素之间存在共线性关系。

通过逐步多元回归分析,当从因素中剔除聚驱控制程度时,回归方程显著性检验 F 值增大为 12.65,并且方程的回归系数正、负号均与实际规律相符,因此更具合理性。

$$N_{pT} = (0.17013285 \lg P + 0.00582248KH - 0.00251719f_w - 0.03494722K_v + 0.000560756f + 0.22408072)N \quad (30)$$

将各个区块的参数带入到回归出的数学模型进行计算,发现计算结果与实际值相比,平均误差只有 1.96%,因此模型的预测精度很高。

用多元回归方法预测正在注聚区块的可采储量(表 8)。假定在聚用量为 $1000 \text{ mg/L} \cdot \text{PV}$ 时停止注聚,进行后续水驱,按照实际区块的方案参数进行可采储量预测,计算结果见表 9。

表 8 多元回归误差分析

Table 8 Multiple regression analysis error

区块	标定可采储量/ 10^4 t	预测值/ 10^4 t	相对误差/%
1# 区块	774.46	793.02	2.40
2# 区块	988.01	940.73	-4.79
3# 区块	759.93	773.94	1.84
4# 区块	1285.05	1267.80	-1.34
5# 区块	663.36	653.65	-1.46
6# 区块	458.23	460.27	0.44
7# 区块	985.11	1011.10	2.64
东过一条带	101.12	101.91	0.78

表9 多元回归预测聚驱可采储量

Table 9 Polymer flooding recoverable reserves in multiple regression prediction

区块	地层系数/ ($\mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$)	地质储量/ 10^4 t	聚用量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{PV}$)	注聚前 含水率/%	渗透率 变异系数	河道多项 连通比例/%	可采储量 预测值/ 10^4 t	采收率/ %
4#区块二类油层	5.75	1314.00	1000	92.48	0.58	42.7	708.07	53.89
9#区块二类油层	4.15	549.00	1000	92.87	0.63	19.2	281.98	51.36
10#区块二类油层	4.41	583.79	1000	90.82	0.57	20.6	305.42	52.32

5 聚驱可采储量标定结果

根据聚驱不同阶段选择不同的可采储量计算方法,

对8个后续水驱区块、3个聚驱中后期区块和3个注聚早期区块进行了可采储量计算,从计算结果可以看出,大部分一类油层预测采收率值要高于二类油层(表10)。

表10 聚驱可采储量计算结果

Table 10 Calculation results of polymer flooding recoverable reserves

区块	修正甲型/ 10^4 t	丙型/ 10^4 t	标定可采 储量/ 10^4 t	动态地质 储量/ 10^4 t	采收率/ %	
一类后续水驱	1#区块	775.94	772.99	774.46	1390.40	55.70
	2#区块	991.00	985.03	988.01	1766.34	55.94
	3#区块	763.11	756.75	759.93	1452.27	52.33
	4#区块	1288.10	1282.01	1285.05	2377.37	54.05
	东过一条带	101.42	100.82	101.12	263.25	38.41
	5#区块	663.36	663.36	663.36	1173.87	56.51
一类聚驱中后期	6#区块	458.23	458.23	458.23	837.00	54.75
	7#区块	994.35	975.87	985.11	1874.64	54.05
二类聚驱中后期	8#区块	578.02	565.14	571.58	1062.47	53.80
	2#区块二类油层	693.48	696.02	694.75	1296.00	53.61
二类聚驱早期	4#区块二类油层			708.07	1314.00	53.89
	9#区块二类油层			281.98	549.00	51.36
	10#区块二类油层			305.42	583.79	52.32

6 结论

(1) 聚驱特征曲线与水驱相比,其区别主要体现在相对渗透率曲线上。聚驱规律曲线在空白水驱后经过过渡阶段进入聚驱一阶段,此阶段与 $K_{ro}/K_{rw}-S_w$ 半对数坐标中的聚驱第一段直线相对应;再经过过渡阶段进入聚驱二阶段,此阶段与 $K_{ro}/K_{rw}-S_w$ 半对数坐标中的聚驱第二段直线相对应;最后再经过过渡阶段进入后续水驱直线阶段。

(2) 聚驱后续水驱阶段可采储量计算方法与空白水驱一致。聚驱中后期阶段采用聚驱驱替特征曲线法,聚驱早、前期阶段采用多元回归方法。应用实例表明,多元回归方法的计算结果精度较高,平均误差仅为1.96%。

参考文献

- [1] 董岩. 胜利油田孤岛油区东区 Ng3-4 单元剩余经济可采储量研究[D]. 北京:中国地质大学,2009.
Dong Yan. Research of the remaining economically recoverable reserves of unit Ng3-4 at Gudao oil province, SLOF[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.
- [2] 宋考平,杨二龙,王锦梅,等. 聚合物驱提高驱油效率机理及驱油效果分析[J]. 石油学报,2004,25(3):71-74.
Song Kaoping, Yang Erlong, Wang Jinmei, et al. Mechanism of enhancing oil displacement efficiency by polymer flooding and driving effectiveness analysis[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 71-74.
- [3] 王新海,韩大匡,郭高平. 聚合物驱油机理和应用[J]. 石油学报,2004,25(1):83-91.
Wang Xinhai, Han Dakuang, Guo Shangping. Mechanism and application of polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(1): 83-91.
- [4] Taber J J, Maitin F D. Technical screening guides for the enhanced recovery of oil[R]. SPE 12069, 1983.
- [5] 赵永胜,魏国章,陆会民,等. 聚合物驱能否提高驱油效率的几点认识[J]. 石油学报,2001,22(3):43-46.
Zhao Yongsheng, Wei Guozhang, Lu Huimin, et al. The acquaintance of polymer flooding can improve displacement efficiency[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(3): 43-46.
- [6] 陈元千,胡建国. 确定饱和型煤层气藏地质储量、可采储量和采收率方法的推导及应用[J]. 石油与天然气地质,2008,29(1):151-156.
Chen Yuanqian, Hu Jianguo. Derivation of methods for estimating OGIP and recoverable reserves and recovery ratio of saturat-

- ed coal-seam gas reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(1): 151-156.
- [7] 李发印, 宋考平. 预测油气田年增可采储量的新方法[J]. *特种油气藏*, 2011, 18(3): 68-70.
Li Fayin, Song Kaoping. A new method to estimate annual increment of recoverable reserves of oil and gas fields[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2011, 18(3): 68-70.
- [8] 张博全, 王岫云. 油(气)层物理学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2000: 228.
Zhang Boquan, Wang Xiuyun. *Oil(gas) layers of physics*[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2000: 228.
- [9] 丁静. 单项措施增加可采储量计算[J]. *石油地质与工程*, 2009, 23(2): 58-59.
Ding Jing. Calculation of recoverable reserve increase by individual measure[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2009, 23(2): 58-59.
- [10] 杨湘龙. 水驱油田经济可采储量计算方法的改进[J]. *断块油气田*, 2008, 15(4): 68-70.
Yang Xianglong. Improvement of calculation methods for economically recoverable reserves in water flooding oilfields [J]. *Fault-block Oil & Gas Field*, 2008, 15(4): 68-70.
- [11] 魏洪涛, 王怒涛, 黄炳光. 两种新型水驱特征曲线系列[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 31(6): 117-122.
Wei Hongtao, Wang Nutao, Huang Bingguang. Two new types of water flooding characteristic curve series[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2009, 31(6): 117-122.
- [12] 赵晓燕, 崔传智. 提高浅层气藏天然气可采储量标定精度的方法研究[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(2): 300-303.
Zhao Xiaoyan, Cui Chuazhi. Methods to improve the demarcated accuracy of gas recoverable reserves in shallow gas reservoirs [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(2): 300-303.
- [13] 王树华, 魏萍. SEC 储量动态评估与分析[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(2): 93-94.
Wang Shuhua, Wei Ping. SEC reserves dynamic evaluation and analysis[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(2): 93-94.
- [14] 邵绍献. 油田单井可采储量定量预测模型[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(1): 85-88.
Bing Shaoxian. Quantitative forecasting model for recoverable reserves of single well[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(1): 85-88.
- [15] Machuca-Mory D F, Ortiz J M, Deutsch C V. On the challenge of using sequential indicator simulation for the estimation of recoverable reserves[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2008, 22(4): 285-299.
- [16] 高文君, 徐君. 常用水驱特征曲线理论研究[J]. *石油学报*, 2007, 28(3): 89-92.
Gao Wenjun, Xu Jun. Theoretical study on common water-drive characteristic curves[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(3): 89-92.
- [17] 于波, 孙新敏, 杨勇, 等. 高含水期水驱特征曲线上翘时机的影响因素研究[J]. *石油天然气学报: 江汉石油学院学报*, 2008, 30(2): 127-131.
Yu Bo, Sun Xinmin, Yang Yong, et al. Influential factor of up warping moment of water-flooding characteristic curve at high water-cut stage[J]. *Journal of Oil and Gas Technology: Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2008, 30(2): 127-131.
- [18] 陈庆. 萨中开发区地质储量潜力及可采储量计算方法[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
Chen Qing. Research on the geological reserves potentiality and calculation methods of recoverable reserves in Sazhong area[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2009.
- [19] 王丽茹. 剩余可采储量分类技术经济评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.
Wang Liru. The technological and economic assessment of classification on the remaining recoverable reserves[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.
- [20] 陈元千. 预测油气田可采储量和剩余可采储量的快速方法[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(5): 544-548.
Chen Yuanqian. Method for quickly forecasting recoverable reserves and remaining recoverable reserves in oil and gas fields [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(5): 544-548.

(收稿日期 2014-02-02 改回日期 2014-05-20 编辑 王培玺)

版权所有