

低渗透油藏多段塞微生物驱开发指标预测

程明明, 夏 添, 雷光伦, 高建波, 李保生

(中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:油藏条件不同,微生物驱油体系的提高采收率能力和油藏适应性也有所差别,需要合理的注入参数对开发指标进行预测。通过模拟不同注入方式微生物驱油实验优化注入参数,在实验基础上综合运用前缘推进理论和经验回归方法,考虑微生物降低原油黏度以及影响油水相对渗透率等客观因素,建立一种将油井产能和含水变化规律结合的预测模型来预测微生物驱开发指标。微生物驱油实验表明,多段塞微生物驱较单一段塞微生物驱采收率可提高9.24%,见水时间能延长40.10%~40.14%,无水采收率提高18.44%;用该模型能较准确地预测微生物吞吐开井后的产油量、增油量、产液量和含水率,单井预测误差小于10%,区块总体产液量和产油量预测误差均小于3%,含水率仅为0.25%。矿场试验采用五级段塞交替注入调剖用微生物与驱油用微生物,试验区含水上升率由8.1%下降至-4.3%,综合递减率由13.3%下降到4.4%,控水稳油效果明显。

关键词:低渗透油藏;多段塞;微生物驱;开发指标;矿场应用;含水率变化规律;指数递减

中图分类号:TE 357.431 **文献标志码:**A

引用格式:程明明,夏添,雷光伦,等.低渗透油藏多段塞微生物驱开发指标预测[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(6):113-120.

CHENG Mingming, XIA Tian, LEI Guanglun, et al. Development index prediction of multi-slug microbial flooding in low permeability reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 113-120.

Development index prediction of multi-slug microbial flooding in low permeability reservoir

CHENG Mingming, XIA Tian, LEI Guanglun, GAO Jianbo, LI Baosheng

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Different reservoir conditions cause the different effect of microbial enhanced recovery and its adaptability to the reservoir, the optimized injection parameters predicting the development index are needed. On the basis of frontal advance theory and experienced regression method using experiment data, plus considering some objective factors, such as the oil viscosity reduction by the microorganism and oil-water relative permeability influence, a prediction model was established. This model can predict the development index for microbial flooding through the combination of oil well productivity and variation of water cut. Microbial flooding experiments show that the multi-slug can improve the recovery by 9.24% compared with single-slug. Also the water breakthrough time of multi-slug microbial flooding can be extended by 40.10%–40.14%, and the water-free oil recovery can be increased by 18.44%. This model can predict almost exactly the dynamic oil production, liquid production and water cut of the microbial stimulation well. The max relative forecasting error of single well is less than 10%, the total error of the block is less than 3%, and the forecasting error of water cut is only 0.25%. In the field experiment, five slugs are adopted to inject the profile control microorganism and oil displacement microorganism alternately. In the test block the increased rate of water cut decreases from 8.1% to -4.3%, and the composite decline rate decreases from 13.3% to 4.4%, indicating the effect of water control and oil production stabilization is significant.

Key words: low permeability reservoir; multi-slug injection; microbial flooding; development index; field application; water

收稿日期:2014-02-10

基金项目:中国石油大学(华东)研究生创新工程项目(CX2013009)

作者简介:程明明(1988-),女,博士研究生,研究方向为油气渗流理论、石油微生物采油。E-mail: Rachel19cheng@163.com。

cut variation rule; exponential decline

见水时间、见水采收率、累积产油量和累积产液量等指标的预测在油田开发中具有极其重要的地位^[1]。低渗透油藏由于基质渗透率低、孔喉尺度小,毛细管现象突出、油气流动阻力大,且黏土矿物含量高,并有天然裂缝,地层非均质严重^[2],由于长时间注水开发,层系开发的层内矛盾加剧。常用的驱油技术适应性变差,随着驱油轮次的增加,已很难达到预期的效果^[3-4]。微生物采油技术越来越受到石油行业的重视,然而油田开发过程的时变性和地质参数的随机性,含水率、累积产油量等动态模型的参数带有时变性,使得微生物驱油开发指标预测面临很多困难。含水率变化特征曲线只能预测见水时间和见水采收率以及含水率与与前缘含水饱和度的关系;指数递减预测模型法不能预测油气田的见水时间和水驱前缘饱和度^[5-6]。笔者将指数递减预测模型与含水率变化特征曲线相结合,提出一种能够预测水驱油气田开发指标的联解法,在实验基础上根据渗流力学原理综合运用前缘推进理论和经验回归方法,同时考虑微生物降低原油黏度以及影响油水相对渗透率等客观因素,建立一种油井产能和含水变化规律的预测模型,对微生物驱前缘含水饱和度、见水时间、见水采收率等开发指标进行预测。

1 微生物注入方式对提高采收率的影响

微生物提高采收率效果需要以物理模拟实验加以验证,提高采收率与注入方式有关。在已确定的较佳注入微生物浓度、营养液浓度基础上,用物理模拟实验确定注入段塞组合对驱油效果的影响。方法是用细磨油层采出砂装填岩心管(长35.5 mm、直径2.73 mm)作为人造岩心。模型抽真空饱和和地层水后测孔隙度和渗透率。用试验区原油和煤油配制的模拟油(44.4℃时黏度为1.91 mPa·s)饱和岩心建立束缚水。在地层温度下以试验区水驱速度(0.48 m/d)对岩心进行水驱,达到当前试验区含水率时停止水驱。将等量的微生物菌液分别作为一个段塞和均分为多个段塞以相同速度注入,然后关闭岩心管两端阀门,将模型在油藏温度下静置3 d,打开阀门继续以相同速度后续水驱,直到岩心不出油时结束^[7-8]。实验主要装置见图1。

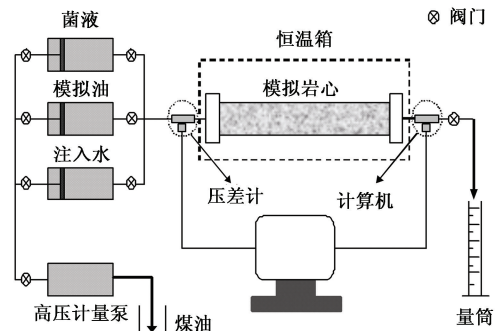


图1 岩心流动模型

Fig. 1 Core flood experiment model

2 水湿储层微生物驱开发指标预测模型的建立

设微生物驱油时单井控油半径为 R_e ,油层压力为 p_e ,微生物驱前单井产液量为 Q ,产油量为 Q_o ,含水率为 f_{w0} ,原油黏度为 μ_o ,油相相对渗透率为 K_{ro} ,水相黏度为 μ_w ,相对渗透率为 K_{rw} 。

对于水湿储层,油水两相相对渗透率曲线的相关经验公式为

$$K_{ro} = \lambda (1 - S_{wD})^\varepsilon; \quad (1)$$

$$S_{wD} = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}}. \quad (2)$$

式中, S_w 为含水饱和度; S_{wi} 为束缚水饱和度; S_{or} 为残余油饱和度; S_{wD} 为标准化的含水饱和度; K_{ro} 为油相的相对渗透率,为 S_w 的函数; K_{rw} 为水相的相对渗透率,为 S_w 的函数; λ 为 $S_w = S_{wi}$ 、 $S_{wD} = 0$ 时油的相对渗透率 $K_{ro}(S_{wi})$; ε 为常数,取决于岩石润湿性和孔隙结构特征。

将式(1)和式(2)等号两端取常数对数得:

$$\lg K_{ro} = \lambda + \varepsilon \lg(1 - S_{wD}), \quad (3)$$

采收率计算公式为

$$E_R = 1 - \frac{S_{or}}{S_{oi}}, \quad (4)$$

式中, E_R 为采收率; S_{oi} 为原始含油饱和度; S_{or} 为残余油饱和度。

由式(4)得微生物驱时的残余油饱和度为

$$S_{or2} = S_{or1} - S_{or}(E_{R1} - E_{R2}). \quad (5)$$

式中, E_{R1} 为水驱采收率; E_{R2} 为最终采收率; S_{or1} 为水驱后剩余油饱和度; S_{or2} 为微生物驱后残余油饱和度。

根据微生物试验区相对渗透率数据,利用式(3),拟合曲线求得 λ 和相关系数 ε ,并且由微生物注入方式对提高采收率影响实验数据,利用式(5)计算微生物驱时的残余油饱和度,可得出水湿储层油相相对渗透率曲线的相关公式。同时认为微生物驱时水相黏度近似不变,则可得到在原油黏度发生变化下微生物驱时含水率变化规律。

微生物驱后,原油黏度变为 μ'_o ,相对渗透率变为 K_{om} ,产油量变为 Q_{om} ,水的黏度与流动能力不变。用式(6)计算微生物驱时地下原油降黏后的黏度为

$$\mu'_o = \mu_o(1-n). \quad (6)$$

式中, n 为地层温度下微生物作用前后原油的降黏率。

微生物驱前,单井产油量为

$$Q_o = \frac{2\pi k K_{ro} h}{\mu_o} \frac{p_e - p_w}{\ln(R_e/R_w)}; \quad (7)$$

微生物驱后,单井产油量为

$$Q_{om} = \frac{2\pi k K_{rom} h}{\mu'_o} \frac{p_e - p_w}{\ln(R_e/R_w)}. \quad (8)$$

设微生物驱前后生产压差不变,则将式(7)与式(8)联立可得

$$Q_{om} = \frac{\mu_o K_{rom}}{\mu'_o K_{ro}} Q_o. \quad (9)$$

由于水相黏度及流动能力在微生物驱时基本保持不变,可认为微生物驱前后的产水量不变。用式(10)计算产水量为

$$Q_w = \frac{2\pi k K_{rw} h}{\mu_w} \frac{p_e - p_w}{\ln(R_e/R_w)}, \quad (10)$$

微生物驱单井产液量为

$$Q_m = Q_w + Q_{om} = \frac{2\pi k K_{rw} h}{\mu_w} \frac{p_e - p_w}{\ln(R_e/R_w)} + \frac{\mu_o K_{rom}}{\mu'_o K_{ro}} Q_o,$$

或

$$Q_m = Q f_w + \frac{\mu_o K_{rom}}{\mu'_o K_{ro}} Q_o. \quad (11)$$

含水率指油水同产时产水量在总产液量中所占的比例,由达西定律可得微生物驱后含水率:

$$f_w = \frac{Q f_{wo}}{Q f_w + \frac{\mu_o K_{rom}}{\mu'_o K_{ro}} Q_o}. \quad (12)$$

油田产油量的变化主要与采油速度亦即油藏内剩余油量变化速率有关。多数油气田在生产后期的产量递减规律比较符合指数递减,应用指数递减模型也可以较好地预测气田的开发指标,不同黏度稀油油藏的递减规律基本相同,因此微生物驱油的油藏剩余油量应有相同的递减规律,用指数递减表示

为

$$Q_{om}(t) = Q_{om} e^{-at}. \quad (13)$$

式中, $Q_{om}(t)$ 为 t 时刻油井产油量; t 为微生物处理后区块(油井)的生产时间; a 为微生物处理后的区块(油井)指数递减率,与菌液及营养液注入量、注入微生物菌种类别以及单井产液强度有关,可根据现场微生物驱的生产数据确定。

由 Buckley-Leveret 方程和物质平衡方程^[9]推导出

$$f'_w(S_{wf}) = \frac{f_w(S_{wf})}{S_{wf} - S_{wc}}. \quad (14)$$

由式(14)可知,在含水率与含水饱和度关系曲线中,通过束缚水饱和度 S_c 作 $f_w - S_w$ 关系曲线的切线,得到切点。该切点对应的含水饱和度即为水驱油前缘含水饱和度 S_f 。

对于微生物驱见水时间,采用油水两相渗流的 Buckley-Leverett 方程进行研究。根据 Buckley-Leverett 方程可推出含水饱和度为 S_w 时的渗流速度为

$$V_{sw} = \frac{dr}{dt} = -\frac{(\partial S_w / \partial t)}{\partial S_w / \partial r} = -\frac{Q}{\phi A(r)} f'_w(S_w). \quad (15)$$

式中, $A(r) = 2\pi r h$,为渗流截面积; $f'_w(S_w)$ 由含水率变化曲线求出。

代入 $A(r)$ 对式(15)分离变量积分得

$$R_0^2 - r^2 = \frac{f'_w(S_w)}{\pi \phi h} \int_0^t Q dt. \quad (16)$$

式中, R_0 为原始含油半径; r 为 t 时刻某一等饱和度面到达的位置。

求解式(17)可得到水驱前缘质点达到油井时间为

$$T = \frac{(R_0^2 - r^2) \pi \phi h}{f'_w(S_{wf}) Q}. \quad (17)$$

由两种注入方式下水驱前缘饱和度导数 $f'_w(S_{wf})$ 计算得到水驱前缘到达井筒时时间即见水时间。

见水采收率为

$$E_R = QT/N_s. \quad (18)$$

其中

$$N_s = \pi r^2 h \phi (1 - S_{wc}) \rho_o / B_o.$$

式中, ρ_o 为地面条件下原油密度; E_R 为见水采收率; S_{wc} 为束缚水饱和度; N_s 为单井地质储量。

3 结果分析

3.1 注入方式

挑选物理参数相近的岩心进行实验,以排除渗

透率和孔隙度差异的影响。用物理模拟方法验证了空白水驱作为对照,结果见表1(V_p 为孔隙体积)。注入不同的微生物段塞对提高采收率的影响,并以

表1 微生物驱物理模拟实验主要结果

Table 1 Results of microbial physical simulation experiments

序号	名称	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度 ϕ	含油饱和度 S_o / %	注入时机	注入菌液量	结束压力/ kPa	压力降低率/ %	注前采收率 E_{R1} / %	最终采收率 E_{R2} / %	采收率提高 ΔE_R / %
1	空白水驱	78.5	0.23	73.85	—	0	257	—	52.71	52.71	—
2	单一段塞微生物驱	80.6	0.21	68.57	$f_w = 70\%$	$0.45V_p$	103	59.92	52.98	59.57	6.6
3	多段塞微生物驱	81.2	0.24	67.74	$f_w = 67\%$	$0.45V_p$	45	82.49	40.00	55.24	15.24

由表1可得,多段塞注入的提高采收率效果为佳,这是因为微生物具有很好的生长繁殖能力,生长的微生物会很快运移到中间注入的间隔水中使其微生物浓度快速增加,相当于这部分水也成了注入菌液。分段塞注入,能保证微生物充分进入地层,延长了微生物有效作用时间,减少了微生物的无效流动,增大了微生物作用半径,有利于将滞留在岩石表面、孔隙角隅处和小毛细管中的剩余油采出,增大了水驱的波及面积。

3.2 开发指标

微生物可以以原油中蜡为碳源,对原油进行降解,使原油长碳链组分变为短碳链组分,结果使原油含蜡量降低,黏度降低,流动性增强,使滞留在岩石表面、孔隙角隅处和小毛细管中的剩余油更容易采出,从而提高原油采收率。由现场资料可知,地下原油黏度为 $1.91 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,地层温度下水的黏度为 $0.656 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。定义降黏率为微生物作用降低的原油黏度占原黏度的比值,假定微生物驱地下原油降黏率和地面脱气原油降黏率一致(计算微生物驱后地下原油黏度取剪切速率为 10.218 s^{-1} 时的脱气原油降黏率)。地层温度下试验区原油在微生物降解作用前后黏度变化见表2。

表2 微生物作用前后原油黏度变化

Table 2 Oil viscosity changes before and after microbial action

剪切速率/ s^{-1}	作用前原油黏度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	作用后原油黏度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	降黏率/ %
1.022	32.20	26.10	18.94
2.555	25.50	21.90	14.12
5.109	26.55	20.40	23.16
10.218	22.05	18.45	16.33
20.436	18.95	17.05	10.03
51.090	16.10	12.05	25.16
102.180	14.15	11.25	20.49
170.300	11.20	10.95	2.23

现场实测的相对渗透率曲线见图2。

根据微生物试验区相对渗透率数据,利用式

(3),拟合求得 λ 和相关系数 r ,并且由微生物注入方式对提高采收率影响实验数据,利用式(5)计算微生物驱时的残余油饱和度,结果见表3。

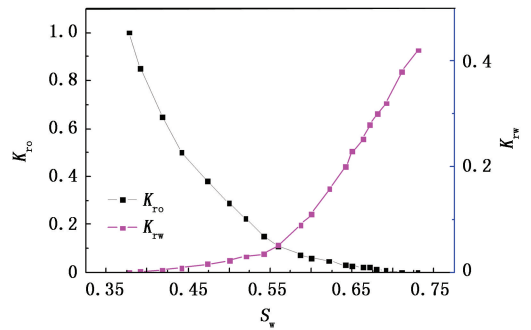


图2 现场相对渗透率曲线

Fig. 2 Relative permeability curves measured on scene

表3 相渗标准化相关特征系数

Table 3 Coefficient of standardization relative permeability

λ	K_{ro}		S_{or_2}	
	ϵ	r	单一段塞注入	多段塞注入
1.0000	2.9385	0.9711	0.2514	0.1373

将表3中数据代入式(5)中得,油水相对渗透率曲线标准化的相关经验公式为

$$K_{ro} = 1.0000 \times (1 - S_{wD})^{2.9385} \quad (19)$$

微生物作用前后水相相对渗透率变化不大,根据式(19)计算单一段塞微生物驱以及多段塞微生物驱时的油相相对渗透率。2种注入方式下微生物驱时的相对渗透率曲线如图3、4所示。

由2种注入方式的相渗曲线,通过式(12)计算得到2种注入方式下的含水率变化,以含水饱和度为横坐标,含水率值为纵坐标,分别绘制两种注入速度下含水率变化曲线,结果见图5、6。

由图5、6可知,当考虑微生物驱时原油降黏和相对渗透率的变化时,微生物驱时的含水率降低,微生物驱比水驱时最大含水可降低20%;目前试验区含水60%~70%时注微生物,含水可降10%~15%。

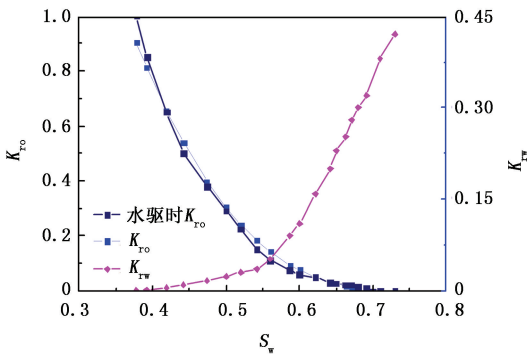


图 3 单一段塞注入微生物相对渗透率曲线
Fig. 3 Relative permeability of single slug microbial flooding

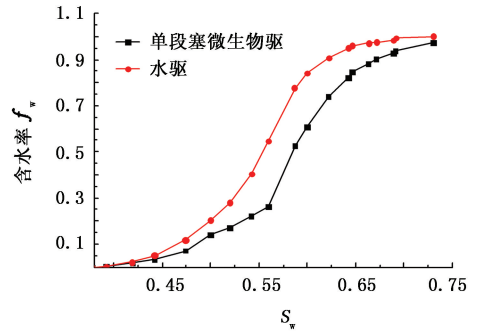


图 6 多段塞微生物含水率变化
Fig. 6 Moisture content variation of segmented slug flooding

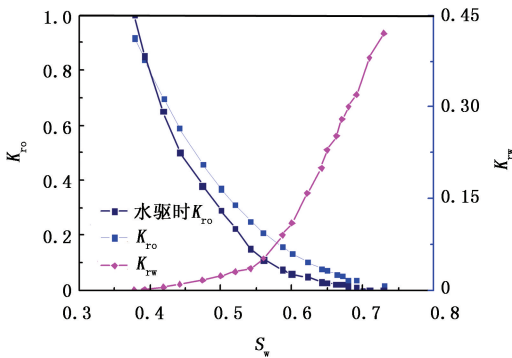


图 4 多段塞注入微生物相对渗透率曲线
Fig. 4 Relative permeability of segmented slug microbial flooding

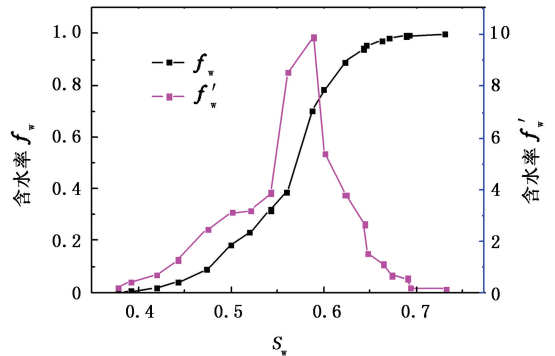


图 7 单一段塞注入微生物含水率导数曲线
Fig. 7 Moisture content derivative of single slug flooding

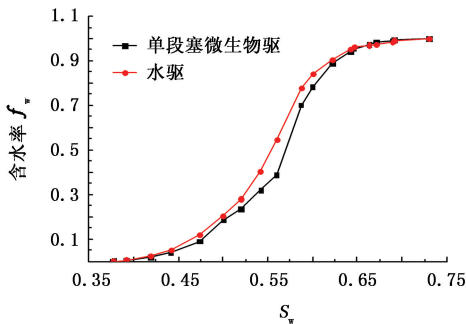


图 5 单一段塞微生物驱含水率变化
Fig. 5 Moisture content variation of single slug flooding

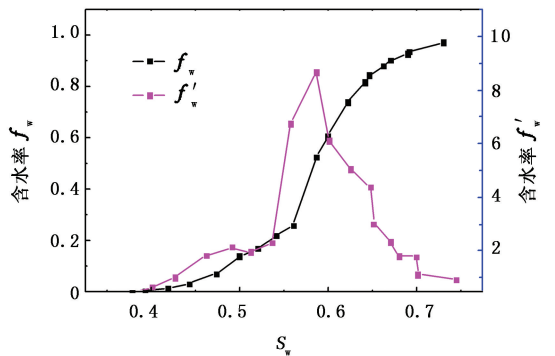


图 8 多段塞注入微生物含水率导数曲线
Fig. 8 Moisture content derivative of segmented slug flooding

由含水率变化曲线作出 2 种注入方式下 f_w-S_w 曲线,与 f_w-S_w 曲线相对比,从而求得 $f'_w(S_{wf})$,见图 7、8。

由现场数据知,平均孔隙度 $\varphi=0.137$,井筒半径 $r_w=10$ cm,油层平均厚度 $h=13.3$ m,取产液量分别为 1、3、7、10 m^3/d ,油井每年生产时间为 360 d。原始供油半径 R_0 分别为 75、125 m,计算得到水驱、微生物驱的前缘含水饱和度 S_{wf} 、见水时间、见水采收率等开发指标见 4、5。

由计算结果可知,考虑微生物对原油的降黏和改变相渗作用,微生物驱时比水驱时指进一步减弱,见水时间延长,无水采收率提高。供油半径 75 m 时,单一段塞微生物驱比水驱见水时间可延长 55.26%~56.02%。多段塞微生物驱比水驱见水时间可延长 95.39%~97.69%。无水采收率从水驱的 16.55% 提高到多段塞微生物驱时的 32.44%,提高 15.89%。供油半径 125 m 时,单一段塞微生物驱比水驱见水时间可延长 55.82%~55.91%。多段塞微生物驱比水驱见水时间可延长 95.96%~

96.00%。无水采收率从水驱的 45.98% 提高到多 段塞微生物驱时的 90.12%,提高 44.14%。

表 4 原始供油半径为 75 m 时的开发指标预测

Table 4 Development index prediction as original drainage radius being 75 m

开发指标	S_{wf}	$f'_{w}(S_{wf})$	E_R	ΔE_R	产液量 $Q/(m^3 \cdot d^{-1})$							
					1		3		7		10	
					t/a	$\Delta t/a$	t/a	$\Delta t/a$	t/a	$\Delta t/a$	t/a	$\Delta t/a$
水驱	0.59	5.90	16.55	—	15.15	—	5.05	—	2.16	—	1.52	—
单一段塞微生物驱	0.89	3.78	24.81	8.26	23.62	8.47	7.87	2.82	3.37	1.21	2.36	0.84
多段塞微生物驱	0.65	3.01	32.44	15.89	29.7	14.55	9.90	4.85	4.27	2.11	2.97	1.45

表 5 原始供油半径为 125 m 时的开发指标预测

Table 5 Development index prediction as original drainage radius being 125 m

开发指标	S_{wf}	$f'_{w}(S_{wf})$	E_R	ΔE_R	产液量 $Q/(m^3 \cdot d^{-1})$							
					1		3		7		10	
					t/a	$\Delta t/a$	t/a	$\Delta t/a$	t/a	$\Delta t/a$	t/a	$\Delta t/a$
水驱	0.59	5.90	45.98	—	42.09	—	14.03	—	6.01	—	4.21	—
单一段塞微生物驱	0.89	3.78	71.68	25.70	65.61	23.52	21.87	7.84	9.37	3.36	6.56	2.35
多段塞微生物驱	0.65	3.01	90.12	44.14	82.49	40.40	27.50	13.47	11.78	5.77	8.25	4.04

3.3 结果验证

将多段塞微生物驱提高采收率计算结果与实验结果进行比较,见图 9。

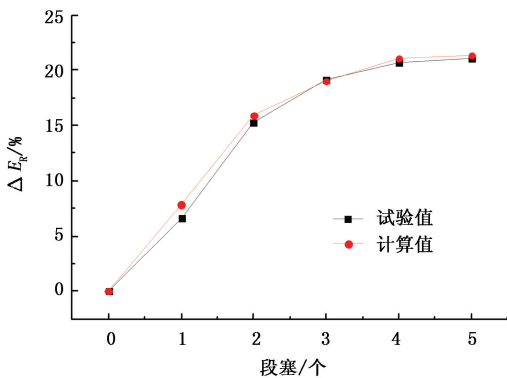


图 9 实验结果与计算结果比较

Fig. 9 Calculation and physical simulation results of microbial flooding

由图 9 看出,随着段塞数量的增加,采收率提高值也在不断增大,均分段塞增加到一定数量时,采收率提高值增幅趋于平缓。另外,图 9 也反映出通过模型计算的采收率提高值与实验测得的采收率提高值有较高吻合度,说明数学模型可以用来预测矿场试验结果。分析模型产生误差的主要因素在于将实际参数进行统计回归,得到渗透率与油层静态参数之间的经验统计,无法给出非均质油层的精细预测^[10-11]。

4 矿场试验效果与分析

4.1 试验区选择与注入参数设计

微生物提高采收率先导性试验区位于安塞油田

王窑断块三叠系延长组致密砂岩,渗透率很低。平均孔隙度 13.7%,地层温度 44.4 °C,油井平均单井产能 2 t/d,是典型的低渗油田。目前王窑等开发区块已进入开发中后期,地质储量采出程度 14.09%,可采储量采出程度 68.07%,平均单井产能 1.3 t/d,综合含水率 59.8%,注水开发采收率很低^[12-14]。采用基础井网为反九点面积井网,微生物注入井 4 口,油井 20 口,单井平均含水率 64.57%,平均日产油 0.95 t。微生物注入 3%,分为五级段塞,交替注入调剖用微生物与驱油微生物菌,可以解决驱油菌剂大量流失问题,同时杜绝了物理化学调剖工艺设备复杂、施工费用高、对驱油菌剂产生毒害和抑制等不利影响,可以大幅度提高微生物采油有效率、降低施工成本。采用一口油套分注井和三口笼统注入井配合的方式依次注入,设计注入参数见表 6。

4.2 试验效果分析

试验实施后,见到明显的微生物驱油效果,采油量上升,综合递减率下降,含水率得到控制。试验井组至 2013 年 3 月底累计增产原油 526.44 t,日增油最高 2.52 t,目前有效期已达 270 d。

4.3 矿场实验效果与预测值比较

用现场试验数据和微生物驱产量预测模型对该区块 8 口井进行微生物吞吐后的产油量、产液量及含水率进行预测,由于微生物驱时作用时间较短,油藏内油相渗透率变化不大,含油饱和度亦变化不大,计算时取微生物作用前后油相渗透率相同,预测值与实测值对比结果见表 7。

表6 微生物注入参数设计

Table 6 Design of microbial injection parameters

项目	调剖用微生物/t	调驱剂/t	驱油微生物菌/t	缓释营养功能剂/t	累计注原液/m ³	注入速度/(m ³ ·d ⁻¹)	注入时间/d
段塞1	24.930	8.170	—	—	24.950	25	11
段塞2	—	—	38.420	—	38.370	25	18
段塞3	—	—	37.629	—	37.650	25	16
段塞4	12.050	0.897	—	—	12.020	25	6
段塞5	—	—	43.489	0.899	43.462	25	22

表7 W1-8 区块微生物驱前后产量实测及预测值

Table 7 Calculation and field measurement results of Block W1-8

井号	施工前实测值			施工后实测值			预测值			误差		
	产液量/t	产油量/t	含水率/%	产液量/t	产油量/t	含水率/%	产液量/t	产油量/t	含水率/%	产液量/t	产油量/t	含水率/%
W19-02	5.42	1.02	81.18	5.53	1.19	78.48	5.62	1.22	78.31	1.60	2.40	0.17
W20-2	6.94	0.86	87.61	6.72	0.98	85.42	7.11	1.03	85.54	5.77	4.84	0.13
W21-01	2.99	0.95	68.23	2.98	1.14	58.39	3.17	1.13	64.25	6.54	0.44	5.86
W21-1	1.24	1.02	17.74	1.56	1.17	25	1.44	1.22	15.29	7.78	4.15	9.71
W22-4	5.42	1.02	81.18	5.53	1.19	78.48	5.62	1.22	78.31	1.60	2.40	0.17
W21-5	3.04	1.73	43.09	3.12	1.93	38.14	3.38	2.07	38.79	8.23	7.09	0.65
W19-6	4.44	0.85	80.6	5.11	1.06	79.26	4.61	1.02	77.95	9.87	4.20	1.31
WC22-3	4.91	0.21	95.72	4.52	0.27	94.03	4.95	0.25	94.93	9.53	7.08	0.91
区块	34.4	7.66	77.73	35.07	8.93	74.25	35.89	9.15	74.50	2.34	2.48	0.25

用该预测模型能较准确地预测出微生物驱开井后的产油量、增油量、产液量和含水率,单井预测误差小于10%,区块总体产液量和产油量预测误差均小于3%,含水率仅为0.25%,说明模型有较高的可靠性,可用于水驱油田的宏观的开发指标变化趋势的预测或开发机制研究。误差产生的原因可能是模型忽略了油层非均质性和压力分布差别,过于理想化。

5 结论

(1)多段塞微生物驱提高原油采收率采收率效果更好。单一段塞注入微生物时,采收率提高6.6%;多段塞注入微生物时,采收率提高15.24%,现场选用五级段塞交替注入微生物,见到明显驱油效果。

(2)综合运用含水率变化特征曲线和指数递减预测模型对安塞油田微生物驱见水时间、见水采收率、累计产油量、累计产液量等开发指标进行预测,物理模拟实验结果与计算结果相近。模型单井预测误差小于10%,区块总体产液量和产油量预测误差均小于3%,含水率仅为0.25%,模型有较高的可靠性。

(3)矿场试验采用五级段塞现场交替注入调剖用微生物与驱油用微生物,试验区含水上升率下降,由8.1%下降至-4.3%;综合递减率也由措施前的

13.3%下降到目前的4.4%。微生物驱油是一种投入低见效快、施工工艺简单、控水稳油效果明显的提高采收率技术。

参考文献:

- [1] 计秉玉. 油田开发指标预测方法综述[J]. 大庆石油地质与开发, 1999,18(2):19-22.
JI Bingyu. Forecasting methods of oil field development indexes[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1999,18(2):19-22.
- [2] 高旺来. 安塞低渗油田孔隙结构对渗流特征曲线的影响[J]. 石油勘探与开发, 2003,30(1):79-80.
GAO Wanglai. The influence of pore structure on flow characteristic curve in Ansai low permeability oil field [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(1):79-80.
- [3] WANG J, MA T, ZHAO L X, et al. Monitoring exogenous and indigenous bacteria by PCR-DGGE echnology during the process of microbial enhanced oil recovery[J]. J Ind Microbiol Biotechnol, 2008, 35:619-628.
- [4] 马香丽,高翔,郑卫宏,等. MF 微生物驱油先导试验 [J]. 海洋石油, 2007,9(1):98-101.
MA Xiangli, GAO Xiang, ZHENG Weihong, et al. The pilot test of MF microbe oil displacement [J]. Offshore oil, 2007,9(1):98-101.
- [5] 刘义坤,毕永斌,隋新光,等. 油气田进入递减阶段开发指标预测[J]. 天然气工业, 2007,27(3):100-

102.
LIU Yikun, BI Yongbin, SUI Xinguang, et al. Production performance forecast of oil & gas field at the depletion stage[J]. *Natural Gas Industry*, 2007,27(3):100-102.
- [6] 计秉玉, 战剑飞, 苏志新. 油井见效时间和见水时间计算公式[J]. *大庆石油地质与开发*, 2000,19(5):24-26.
JI Bingyu, ZHAN Jianfei, SU Zhixin. A theoretical calculation formulate of responding and water breakthrough time of wells after water flooding[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2000,19(5):24-26.
- [7] 雷光伦, 马继业, 郭省学, 等. 微生物菌液物质油水面扩张黏弹性研究[J]. *西安石油大学学报:自然科学版*, 2008,23(6):74-77.
LEI Guanglun, MA Jiye, GUO Shengxue, et al. Study on the dilation viscoelasticity of the interface between bacteria liquid and crude oil[J]. *Journal of Petroleum University (Natural Science Edition)*, 2008,23(6):74-77.
- [8] 雷光伦, 张忠智, 陈月明. 微生物渗流规律及能力研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2002,17(2):149-155.
LEI Gunglun, ZHANG Zhongzhi, CHEN Yueming. Study on microbial seepage rule and capability[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2002,17(2):149-155.
- [9] 张建国, 杜殿发, 侯健, 等. 油气层渗流力学[M]. 2版. 东营:中国石油大学出版社, 2009:214-219.
- [10] YOUSSEF N H, DUNCAN K E, MCINERNEY M J. Importance of the 3-hydroxy fatty acid composition of lipopeptides for biosurfactant activity[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2005,71(12):7690-7695.
- [11] MAUDGALYA S, KNAPP R M, MCINERNEY M J, et al. Development of a bio-surfactant-based enhanced oil recovery procedure [R]. SPE 89473, 2004.
- [12] 刘建英, 张航州, 侯军刚, 等. 安塞特低渗透油藏微生物驱油矿场试验研究[J]. *石油地质与工程*, 2011,25(1):115-117.
LIU Jianying, ZHANG Hangzhou, HOU Jungang, et al. A pilot study on MEOR in Ansai extra-low permeability oilfield[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2011,25(1):115-117.
- [13] 雷光伦, 陈月明. 微生物采油产量预测模型[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 2002,26(2):53-56.
LEI Guanglun, CHEN Yueming. Microbial oil production prediction model[J]. *Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2002,26(2):53-56.
- [14] 张玉秋. 超低渗油田注水开发特征分析[J]. *现代商贸工业*, 2012,3(1):285-286.
ZHANG Yuqiu. Analysis of characteristics of waterflood development of low permeability oilfield [J]. *Modern Business Trade Industry*, 2012,3(1):285-286.

(编辑 刘为清)