

# 聚驱相对渗透率曲线变化规律实验研究

程大勇,李彦来,房娜,郑华,朱志强

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459)

**摘要:**聚驱相对渗透率曲线是聚驱油田进行开发指标预测的重要基础。针对海上L油田因缺乏聚驱相对渗透率实测资料导致的数值模拟精度不高的现状,采用非稳态法测定了聚驱相对渗透率曲线,对比不同岩心渗透率和聚合物浓度下相对渗透率曲线的形态特征,总结聚驱相对渗透率曲线的变化规律。实验结果表明,聚驱相渗曲线随着岩心渗透率升高,相同含水饱和度时的油相相对渗透率降低,残余油饱和度降低;随着聚合物浓度升高,相同含水饱和度时的油相相对渗透率升高,残余油饱和度降低;聚驱冲刷前期,残余油饱和度迅速下降,中后期残余油饱和度下降速度明显变缓。研究成果可为海上聚合物驱油田精细油藏数值模拟、开发方案编制提供指导和依据。

**关键词:**聚合物驱;相对渗透率;聚合物浓度;渗透率测定

中国分类号:TE343

文献标识码:A

## Experimental study on variation law of relative permeability curves of polymer flooding

Cheng Dayong, Li Yanlai, Fang Na, Zheng Hua and Zhu Zhiqiang

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

**Abstract:** The relative permeability curves of polymer flooding are important bases for the development index predicting the polymer flooding oilfield. Aiming at the low numerical simulation accuracy caused by the lack of the relative permeability of the polymer flooding in the offshore L oilfield, we determined the relative permeability curves of the polymer flooding by the non-steady-state method to compare the relative permeability of different core permeability and polymer concentration. The variation law of relative permeability curve of the polymer flooding was summarized as well. The experimental results showed that the permeability curves of the polymer flooding increased with the core permeability, the relative permeability of the oil phase decreased with the same water saturation, and the residual oil saturation also decreased. With the increase of the polymer concentration, the oil relative permeability of the same water saturation increased, but the residual oil saturation decreased. In the early stage of polymer flooding, the residual oil saturation decreased rapidly, while in the middle and late stages, the residual oil saturation decreased slowly. The research results provided guidance and basis for fine numerical simulation and development planning in offshore polymer flooding fields.

**Key words:** polymer flooding, relative permeability, experiment, polymer concentration, permeability determination

聚合物驱是一种建立在水驱基础上改善开发效果的三次采油技术,目前已成为中国主要的三次采油方法之一<sup>[1-2]</sup>。海上油田经过聚合物驱应用的探索与实践,取得了明显的增产效果<sup>[3]</sup>。聚合物驱相对渗透率曲线是描述多孔介质中多相渗流动态及聚驱油

田开发指标计算和预测的重要基础资料<sup>[4]</sup>。在数值模拟预测中,模拟计算结果与现场实际试验结果的吻合程度取决于数学模型对这一物理过程描述的真实性和输入数据的准确性,应根据聚合物驱的不同阶段,分别使用相应驱油过程的相对渗透率曲

收稿日期:2018-08-02。

第一作者简介:程大勇(1984—),男,工程师,油田管理、开发方案设计及提高采收率研究。

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(2016ZX05058-001);国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05057-001)。

线<sup>[5-6]</sup>。目前海上油田有关聚合物驱相对渗透率研究方面的资料较少,相对渗透率研究基本局限于水驱阶段<sup>[7-8]</sup>,在历史拟合过程中,单井整体拟合效果并不理想。针对上述问题,基于海上L油田注聚区C1井钻取的岩心,利用行业内广泛应用的非稳态法<sup>[9-10]</sup>测定聚驱相对渗透率曲线,进而研究不同岩心渗透率、不同聚合物浓度下聚驱相对渗透率曲线的变化规律,具有重要的理论意义与实用价值。

## 1 实验

### 1.1 实验条件

L油田注聚区C1井实钻岩心七组,按照石油行业标准岩心分析方法<sup>[11]</sup>进行预处理。将L油田油样在原油电脱水仪中脱水后与煤油以4:1的比例混合,混合后的油样在65℃条件下黏度为46.1 mPa·s。根据L油田实测数据配制注入水和地层水,其中注入水为CaCl<sub>2</sub>型,总矿化度8 856 mg/L;地层水为NaHCO<sub>3</sub>型,总矿化度6 132 mg/L。聚合物为AP—P4型疏水缔合聚合物干粉,采用注入水配制两种不同浓度的聚合物溶液,浓度分别为1 750 mg/L、2 250 mg/L(表1)。

表1 岩心基础参数及对应的聚合物溶液浓度  
Table 1 Core basic parameters and corresponding polymer solution concentration

岩心编号	长度/cm	直径/cm	孔隙度/%	气测渗透率/ 10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	聚合物溶液浓度/ (mg·L <sup>-1</sup> )
I-1	4.92	2.61	40.7	3 511	2 250
I-2	4.93	2.60	46.1	3 801	0
I-3	4.50	2.55	45.5	3 706	1 750
II-1	5.71	2.56	41.1	1 662	1 750
III-1	5.15	2.60	40.0	605	1 750

实验仪器主要包括原油电脱水仪、烘箱、电子恒温加热套、电动搅拌器、化学驱模拟实验装置、岩心洗油仪。

### 1.2 实验流程

①岩心抽真空饱和地层水;②测岩心孔隙度。根据抽真空饱和水前后质量之差,以及饱和地层水密度,计算得到岩心孔隙度;③测岩心水相渗透率。将岩心放入岩心夹持器内,恒速注入模拟注入水,待

前端压力表示数稳定后,计算岩心渗透率;④岩心饱和油;⑤聚驱相渗曲线测试实验装置连接如图1所示;⑥选取1 mL/min的驱替速度进行聚合物驱油实验,见聚合物溶液初期,加密记录,根据出油量的多少选择时间间隔,随出油量的不断下降,逐渐加长记录的时间间隔,注聚合物30倍孔隙体积后(或含水率到99.95%时),测残余油时的水相渗透率;⑦进一步研究岩心在聚合物高驱替倍数下相渗曲线油相端点值的变化规律,对完成水驱相渗曲线测试的编号I-2岩心重新处理后,采用2 250 mg/L的聚合物溶液进行驱替实验,驱替至400 PV,测水相相对渗透率及残余油饱和度。

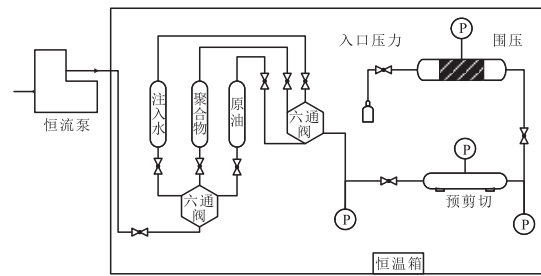


图1 聚驱实验流程

Fig. 1 Flow chart of polymer flooding experiment

### 1.3 数据处理

按照行业标准岩石中两相流体相对渗透率测定方法<sup>[10]</sup>中式(1)~式(3)计算水相、油相渗透率和含水饱和度。

$$K_{ro}(S_w) = f_o(S_w) \frac{d \left[ \frac{1}{\bar{V}_{(t)}} \right]}{d \left[ \frac{1}{I\bar{V}_{(t)}} \right]} \quad (1)$$

$$K_{rw}(S_w) = K_{ro}(S_w) \frac{\mu_w f_w(S_w)}{\mu_o f_o(S_w)} \quad (2)$$

$$S_{we} = S_{wi} + \bar{V}_{o(t)} - f_o(S_{we}) \bar{V}_{(t)} \quad (3)$$

式中:  $K_{ro}(S_w)$  为油相相对渗透率,小数;  $S_w$  为岩样含水饱和度,小数;  $f_o(S_w)$  为含油率,小数;  $\bar{V}_{(t)}$  为量纲一的累积注水量( $V/V_p$ ),无因次,  $V_p$  代表岩样的有效孔隙体积;  $I$  为流动能力比;  $K_{rw}(S_w)$  为水相相对渗透率,小数;  $\mu_w$  为在测定温度下水的黏度, mPa·s;  $\mu_o$  为在测定温度下油的黏度, mPa·s;  $f_w(S_w)$  为含水率,小数;  $S_{we}$  为出口端水饱和度,小数;  $\bar{V}_{o(t)}$  为累积采油

量( $V_0/V_p$ ),无因次; $S_{wi}$ 为束缚水含水饱和度,小数。

## 2 结果与分析

### 2.1 岩心渗透率对聚驱相渗曲线的影响

图2为不同岩心渗透率下聚驱相对渗透率曲线的对比。由图2可以看出,随着岩心渗透率增大,聚驱相渗曲线发生偏移,相同含水饱和度时的油相相对渗透率减小,水相相对渗透率增大;两相之间跨度增大,束缚水饱和度降低,残余油饱和度降低,等渗点左移。由于高渗岩心平均孔喉半径较大,聚合物溶液在岩心孔隙中渗流阻力减小,流动能力增强,因此高渗岩心的水相相对渗透率较高。同时高渗岩心中聚合物溶液对油膜或油滴的拉伸作用更强,聚合物溶液降低两相流度比的作用更加明显,导致残余油饱和度降低。

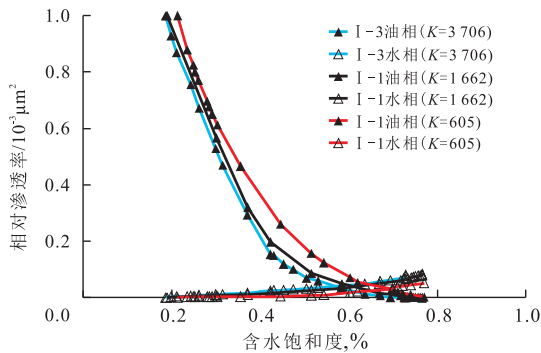


图2 不同岩心渗透率下聚驱相对渗透率曲线对比  
Fig. 2 Comparison of polymer drive relative permeability curves with different core permeability

### 2.2 聚合物浓度对聚驱相渗曲线的影响

图3为相同渗透率级别的岩心,在不同聚合物浓度下相对渗透率曲线的对比。从图3可以看出,随着聚合物溶液浓度增大,相渗曲线发生偏移,相同含水饱和度时的油相相对渗透率增大,水相相对渗透率减小,两相跨度减小;残余油饱和度降低;等渗点右移。由于聚合物浓度的增加,聚合物分子相互缠绕的机会增多,能进一步降低油相在岩心孔隙中流动时的渗流阻力,增加水相的流动阻力,从而表现为油相相对渗透率增大。同时由于聚合物具有黏弹性,随着聚合物溶液浓度的增加,流动比的控制能力增

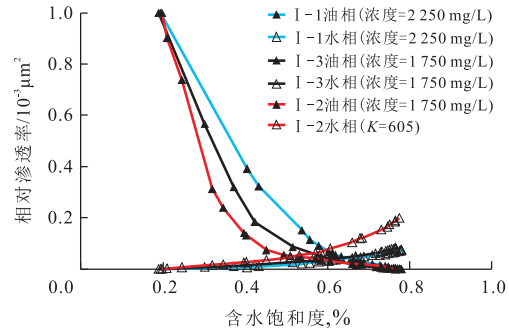


图3 不同聚合物浓度下聚驱相对渗透率曲线对比  
Fig. 3 Comparison of polymer drive relative permeability curves with different polymer concentration

强,波及效率提高,能够驱替出更多的残余油,因此导致残余油饱和度降低。

### 2.3 聚驱倍数对油相相对渗透率曲线端点值的影响

图4为编号1-2岩心油相相对渗透率曲线端点值随聚驱倍数的变化曲线,当聚驱倍数达到25 PV时,残余油饱和度为23.54%(出口端含水量达到99.95%),将此值视为油相相对渗透率曲线的初始端点值。由图4可知,聚合物驱替前期,残余油饱和度迅速下降,中后期残余油饱和度下降速度明显变缓,超过100 PV后,变化幅度已经很小。驱替至400 PV时,相渗曲线的端点值为22.15%,相比于初始值减小了1.4%,降低幅度为5.95%。

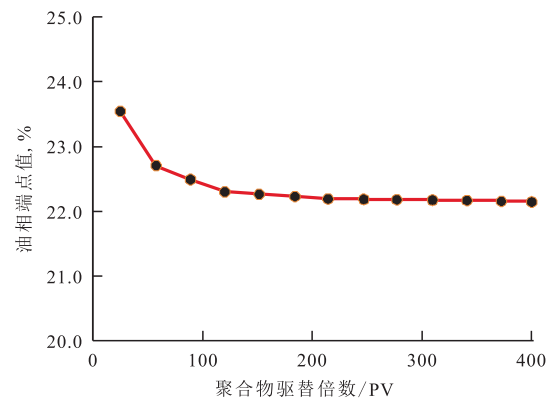


图4 聚合物驱替倍数对油相相对渗透率曲线端点值的影响

Fig. 4 Influence of polymer displacement multiple on end-point value of oil-phase relative permeability curves

表2为相同渗透率级别的岩心,在不同聚合物浓度和聚驱倍数下残余油饱和度、水相相对渗透率对比。由表2可知,继续进行聚驱30 PV驱替后,残余油饱和度降低0.05%,水相相对渗透率降低0.001。

表2 不同聚驱倍数下残余油饱和度、  
水相相对渗透率对比

Table 2 Comparison of residual oil saturation and  
water relative permeability with different multiples of  
polymer flooding

岩心 编号	气测 渗透率/ ( $10^{-3}\mu\text{m}^2$ )	聚合物溶 液浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	残余油 饱和度,%		水相相对渗透率, f	
			聚驱30	聚驱60	聚驱30	聚驱60
			PV	PV	PV	PV
I-3	3 706	1 750	23.47	23.44	0.081	0.080
I-1	3 511	2 250	22.00	21.93	0.077	0.076

### 3 应用效果

目前实验研究结果已成功应用于渤海L油田油藏数值模拟研究,通过对比分析注聚试验区共计49口开发井(其中采油井34口)拟合情况,平均单井拟合精度由70%提高到85%以上(表3),试验区整体拟合效果得到明显改善(图5),开发指标预测结果更

表3 水驱相渗曲线与聚驱相渗曲线拟合情况对比  
Table 3 Comparison of fitting of water flooding phase  
permeability curves and polymer flooding phase  
permeability curves

相渗曲线 选用类别	拟合参数	拟合井数/ 口	拟合相对误差<5%	
			井数	百分比
水驱相渗曲线	地层压力	23	16	69.6
	含水率	34	24	70.6
聚驱相渗曲线	地层压力	23	20	87.0
	含水率	34	29	85.3

注:选取具有连续测压资料的关键井进行拟合。



图5 注聚试验区不同相渗曲线含水率拟合情况对比  
Fig. 5 Comparison of water content fitting of different phase  
permeability curves in polymer injection test area

加符合实际情况,有效指导了油田剩余潜力挖潜。

### 4 结论

1) 聚驱相渗曲线随着岩心渗透率升高,油相相对渗透率降低,水相相对渗透率升高,两相之间跨度增大,束缚水饱和度降低,残余油饱和度降低,等渗点左移。

2) 随着聚合物浓度升高,油相相对渗透率升高,水相相对渗透率降低,两相跨度减小,残余油饱和度降低,等渗点右移。

3) 聚驱冲刷后,水相相对渗透率小幅降低,残余油饱和度降低;聚驱冲刷前期,残余油饱和度迅速下降,中后期残余油饱和度下降速度明显变缓。

#### 参考文献

- [1] 王敬,刘慧卿,张颖.常规稠油油藏聚合物驱适应性研究[J].特种油气藏,2010,17(6):75-77.
- [2] 彭昱强,何顺利,郁鲁彬.岩心渗透率对聚丙烯酰胺溶液流变性的影响[J].特种油气藏,2010,17(5):93-95.
- [3] 谢坤,卢祥国,姜维东,等.稠油油藏聚合物驱相对渗透率曲线及驱油效率影响因素[J].油田化学,2014,31(4):554-558.
- [4] 李斌会,杨清彦,贾忠伟,等.聚合物驱相对渗透率曲线影响因素研究[J].石油化工应用,2007,26(2):20-23.
- [5] 雷光伦,许震芳,张铁林,等.聚合物驱相对渗透率曲线及影响因素试验研究[J].水动力学研究与进展,1994,9(4):469-476.
- [6] 唐金星,陈铁龙,何劲松,等.聚合物驱相对渗透率曲线实验研究[J].石油学报,1997,18(1):81-85.
- [7] 周守为,韩明,张健,等.用于海上油田化学驱的聚合物研究[J].中国海上油气,2007,19(1):25-29.
- [8] 张凤久,姜伟,孙福街,等.海上稠油聚合物驱关键技术与矿场试验[J].中国工程科学,2011,13(5):28-33.
- [9] 吕伟峰,秦积舜,吴康云,等.低渗岩石孔渗及相对渗透率测试方法综述[J].特种油气藏,2011,18(3):1-6.
- [10] 国家发展与改革委员会.SY/T 5345-2007岩石中两相流体相对渗透率测定方法[S].北京:石油工业出版社,2008.
- [11] 国家发展与改革委员会.SY/T 5336-2006岩心分析方法[S].北京:石油工业出版社,2007.

(编辑 常燕)