

# Study on Displacement Properties of Novel Branched Modified Cellulose Ether Displacing Agents

Xiangcheng Wang\*, Yan Yang

Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan  
Email: \*408682720@qq.com

Received: Apr. 20<sup>th</sup>, 2020; accepted: May 4<sup>th</sup>, 2020; published: May 11<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

In the laboratory, the displacement performance and oil recovery of branched modified cellulose ether (MCEL) and unbranched modified cellulose ether (CEL) polymer oil displacement agents are compared. It is found that the permeability is  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  in the range of polymer solution concentration from 0.6 g/L to 1.3 g/L. It was found that with the increase of polymer concentration, the *RF* and *RRF* values of MCEL and CEL flooding increased, and the recovery efficiency increased. The maximum recovery efficiency of MCEL flooding was 11.06%, which was much higher than that of CEL flooding (9.14%). The permeability range of MCEL and CEL can be as low as  $23.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , and they have good displacement effect when the permeability is as high as  $287.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ . At the same time, in the whole range of permeability test, the EOR of MCEL flooding is greater than that of CEL flooding under corresponding conditions. When the permeability of 1.3 g/L MCEL is  $63.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , the increase of recovery efficiency is the largest (11.41%), which is much higher than the maximum value of 9.52% of that of CEL flooding. The new branched modified cellulose ether plays an important role in expanding the swept area and enhancing oil recovery.

## Keywords

Branched Modified Cellulose Ether, Resistance Coefficient, Coefficient of Residual Resistance, Recovery

# 新型支化改性纤维素醚驱替性能研究

王祥程\*, 杨 艳

成都理工大学, 四川 成都  
Email: \*408682720@qq.com

收稿日期: 2020年4月20日; 录用日期: 2020年5月4日; 发布日期: 2020年5月11日

\*通讯作者。

## 摘要

在实验室对支化改性纤维素醚(MCEL)驱油剂和未支化改性纤维素醚(CEL)聚合物驱油剂的驱替性能和采收率进行了对比研究发现, 在聚合物溶液浓度为0.6 g/L到1.3 g/L的范围内, 对渗透率为 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右的填砂管进行驱替, 发现随着聚合物浓度的增加, MCEL和CEL驱替的 $RF$ 和 $RRF$ 值均增大, 采收率提高幅度也均增加, MCEL驱采收率最大值为11.06%远高于CEL驱采收率最大值9.14%。MCEL和CEL适用的渗透率范围可低至 $23.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 在渗透率高达 $287.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时也均有较好的驱替效果。同时, 在整个渗透测试范围内MCEL驱提高采收率的幅度均大于对应条件下CEL驱提高采收率的幅度。1.3 g/L MCEL在渗透率为 $63.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时采收率提高幅度最大(11.41%), 远高于CEL驱提高采收率幅度的最高值9.52%, 新型支化改性纤维素醚对于扩大波及面积, 提高采收率具有重要作用。

## 关键词

支化改性纤维素醚, 阻力系数, 残余阻力系数, 采收率

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

石油开采目前可分为三个阶段。前两个阶段采用物理方法采油, 一般可采出地层中 30%~50%的原油。在多孔介质的微孔中, 原油在注水压力下难以流出多孔介质。所以我们采用注入聚合物驱油剂来提高采收率[1]。世界大范围研究聚合物驱油在 20 世纪 70 年代。加拿大西部大量稠油和中质油主要是利用聚合物驱油从而大量的提高了稠油的采收率, 20 世纪 90 年代以前美国一直是聚合物驱应用大国, 1972 年我国在大庆油田进行聚合物驱试验。1997 年进行了工业推广应用, 均得到了明显的降水增油效果。加入聚合物能够增加水相的粘度, 使水相的流动阻力增加, 从而改善水油的流度比; 由于受到机械捕集、化学吸附和滞留作用的影响, 会有部分聚合物分子滞留在油层孔隙介质中, 这会造成在聚合物驱油后油层孔隙的渗透率将会有不同程度的降低, 从而改善吸水剖面[2] [3]。对于给定的油层, 聚合物驱油性能和采收率与聚合物溶液改善水油流度比和降低油层渗透率能力密切相关, 即与聚合物溶液的阻力系数  $RF$  和残余阻力系数  $RRF$  有关。若聚合物驱的阻力系数越大, 表明聚合物溶液在孔隙介质中流动时的粘度高或渗流阻力较大, 这就越有利于扩大波及体积; 残余阻力系数越大, 说明注入聚合物后孔隙介质的渗透率下降幅度越大, 有利于改善吸水剖面, 提高面积波及系数, 聚合物驱提高原油的采收率也就越高。因此, 通过实验测试  $RF$  和  $RRF$  的数据可以更好的获得 MCEL 和 CEL 驱替时的适用条件以及他们的驱替性能, 从而为 MCEL 在现场的使用提供理论依据。

## 2. 实验

### 2.1 实验试剂

未支化改性纤维素醚(CEL), 分析纯, 阿拉丁试剂; 支化改性纤维素醚(MCEL), 分析纯, 实验室自制; 氯化钠(NaCl), 分析纯, 成都科龙化工试剂厂; 蒸馏水, 二次蒸馏后待用, 实验室自制。

## 2.2. 实验方法

### 1) 实验材料

蒸馏水: 实验室自制;

填砂管;  $L = 30\text{ cm}$ ,  $D = 3\text{ cm}$ ;

样品: 未支化改性纤维素醚(CEL); 支化改性纤维素醚(MCEL);

纯净石英砂: 100~200 目;

装置名称: 高温高压驱替装置。

### 2) 实验步骤

- a) 测定矿化度为 5000 mg/L 模拟盐水条件下的水相渗透率;
- b) 替换成装有低粘度油的中间容器, 向填砂管中注入;
- c) 水驱至含水率 95% 以上;
- d) 以 3 m/d 的流速注入一定浓度的 MCEL 溶液至压力不再变化;
- e) 后续水驱; 记录压力随注入孔隙体积变化情况。

## 2.3. 实验装置

高温高压驱替装置, 山东中石大科技有限公司, 见图 1。



Figure 1. High temperature and high pressure displacement device

图 1. 高温高压驱替装置

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 采收率

岩石孔隙中, 最初饱和地层水, 当油运移进去后可以将水驱出, 还剩下束缚水, 则原始含油饱和度为:

$$S_{oi} = 1 - S_{wc} \quad (1)$$

式中:  $S_{oi}$  ——原始含油饱和度, 小数;

$S_{wc}$  ——束缚水饱和度, 小数。

注水开发采油时, 水驱原油之后的残余油饱和度为  $S_{or}$ , 则被水驱的原始含油饱和度为:

$$S_D = 1 - S_{wc} - S_{or} \quad (2)$$

因此, 采收率为:

$$E_D = \frac{S_D}{S_{oi}} = \frac{1 - S_{wc} - S_{or}}{1 - S_{wc}} \quad (3)$$

### 3.2. 阻力系数与残余阻力系数

#### 3.2.1. 阻力系数

$RF$  表示聚合物驱油过程中, 降低水油流度比的能力。它的数值越大, 则表明该聚合物降低流度比的能力越强。

$$RF = \frac{\lambda_w}{\lambda_p} = \frac{(k/\mu)_w}{(k/\mu)_p} \quad (4)$$

式中:  $(k/\mu)_w$  ——盐水的流度;

$(k/\mu)_p$  ——聚合物溶液的流度。

由达西公式可知, 盐水和聚合物溶液的流度可分别表示为:

$$\lambda_w = \frac{Q_w L}{A \Delta P_w} \times 10^{-1} \quad (5)$$

$$\lambda_p = \frac{Q_p L}{A \Delta P_p} \times 10^{-1} \quad (6)$$

式中:  $Q$  ——流体流经多孔介质时稳定的流量,  $\text{cm}^3/\text{sec}$ ;

$L$  ——多孔介质长度,  $\text{cm}$ ;

$A$  ——多孔介质的截面积,  $\text{cm}^2$ ;

$\Delta P$  ——流体在体积流量  $Q$  下, 流经多孔介质稳定的压力降,  $\text{MPa}$ 。

下标  $w$  和  $p$  分别表示盐水和聚合物溶液。

将(5)和(6)式分别代入(4)式, 阻力系数为:

$$RF = \frac{\lambda_w}{\lambda_p} = \frac{Q_w}{Q_p} \cdot \frac{\Delta P_p}{\Delta P_w} \quad (7)$$

如果在实验中保持相同的体积流量, 那么阻力系数为:

$$RF = \frac{\lambda_w}{\lambda_p} = \frac{\Delta P_p}{\Delta P_w} \quad (8)$$

阻力系数是衡量聚合物驱时改善流度比的一个参数, 数值增加表明聚合物溶液改善油水流度比的能力增强。

#### 3.2.2. 残余阻力系数

残余阻力系数  $RRF$  描述的是聚合物改善油层吸水剖面, 降低孔隙通道通过水相能力也即降低水相渗透率的能力。

$$RRF = \frac{k_{wb}}{k_{wa}} \quad (9)$$

将(5)和(6)式分别代入(9)式, 残余阻力系数为:

$$RRF = \frac{Q_{wb}}{Q_{wa}} \cdot \frac{\Delta P_{wa}}{\Delta P_{wb}} \quad (10)$$

如果在实验中保持相同的体积流量, 那么残余阻力系数为:

$$RRF = \frac{\Delta P_{wa}}{\Delta P_{wb}} \quad (11)$$

式中:  $k_{wb}$ ,  $k_{wa}$  分别为注聚合物前后的水相渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  
 $\Delta P_{wb}$ ,  $\Delta P_{wa}$  分别为聚合物溶液渗流前后盐水渗流时的压差, MPa;  
 $Q_{wb}$ ,  $Q_{wa}$  分别为聚合物溶液渗流前后盐水的流量,  $\text{cm}^3/\text{sec}$ 。

残余阻力系数是度量聚合物溶液封堵孔隙通道能力的参数, 它是衡量聚合物驱时油层吸水剖面改善的一个标准。

### 3.3. MCEL 溶液驱替性能研究

实验中配制活性剂溶液的盐水为大庆油田某区块的平均地层水组成, 试验区总矿化度为 5000 mg/L, 地层温度 45℃。因为同浓度的 MCEL 溶液比 CEL 溶液的表现粘度更大, 所以选用 MCEL 溶液来研究其驱替性能。PV 是填砂管孔隙体积。

#### 3.3.1. MCEL 浓度的影响

模拟大庆油田某区块地层温度 45℃, 研究 MCEL 溶液浓度对渗透率为  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  左右的填砂管驱替性能和采收率的影响。MCEL 溶液浓度和填砂管水测见表 1。

**Table 1.** Effect of MCEL concentration on displacement performance

**表 1.** MCEL 浓度对驱替性能的影响

浓度(g/L)	粘度(mPa·s)	水测渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	孔隙度(%)	阻力系数 $RF$	残余阻力系数 $RRF$	采收率提高幅 度(%)
0.6	30.0	91.71	28.8	15.76	10.57	9.21
0.9	51.2	117.96	26.62	17.90	11.55	9.67
1.0	74.5	96.5	28.46	18.47	11.30	9.84
1.3	122.0	101.1	26.62	26.56	12.81	11.06

图 2 为 0.6 g/L, 0.9 g/L, 1.0 g/L, 1.3 g/L MCEL 溶液的渗流曲线, 实验温度为 45℃。从图中可知, 在一次水驱时, 水驱压力均为 0.3 MPa 左右, 压力较低, 在进行 MCEL 聚合物驱替时, 压力显著提高且再进行二次水驱时, 压力较一次水驱仍高出许多。分析可知, 造成这种现象的问题为单纯水驱时, 驱替水均从大孔隙喉道等优势通道驱出, 导致水窜的现象严重, 不能很好地发挥水驱的作用。所以进行 MCEL 聚合物驱替, 堵塞大孔喉等优势通道, 促使驱替水进入小孔喉, 将其中残余油去提出来, 从而提高采收率。

图 3 是 MCEL 溶液浓度对驱替性能和采收率的影响。由图中可以看到, 随着 MCEL 溶液浓度增加,  $RF$  值和  $RRF$  值均增大。说明在水测渗透率为  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  左右的地层中, 随着 MCEL 溶液浓度增加, 其表现粘度增加, 改善油水流量比的能力不断加强, 封堵较大孔隙通道的能力较强, 能够让更小的空隙通道中的油被驱替出来。由图中可以看到, 随着聚合物浓度增加, 采收率提高幅度增加。说明在研究浓度范围内并未造成堵塞, 同时也再一次证明采收率的提高与  $RF$  和  $RRF$  密不可分, 随着  $RF$  的增加采收率增加。另外, 虽然随着聚合物浓度增加采收率增加, 但是在实际应用中却不是聚合物浓度越高越好,

因为聚合物浓度越高造成封堵孔喉的风险越高, 同时价格也会急剧增加, 因此需要选择合适的浓度, 取得理想性价比。

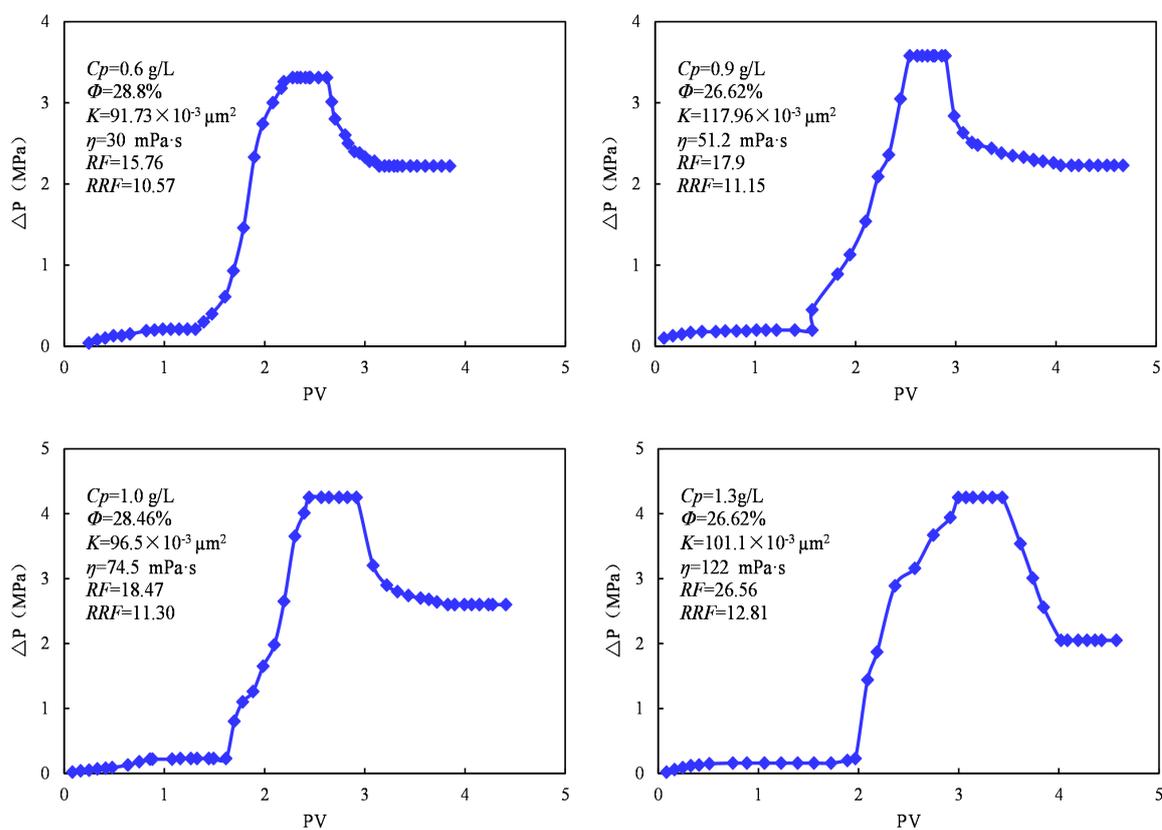


Figure 2. Percolation curve of MCEL solution with different concentrations

图 2. 不同浓度的 MCEL 溶液的渗流曲线

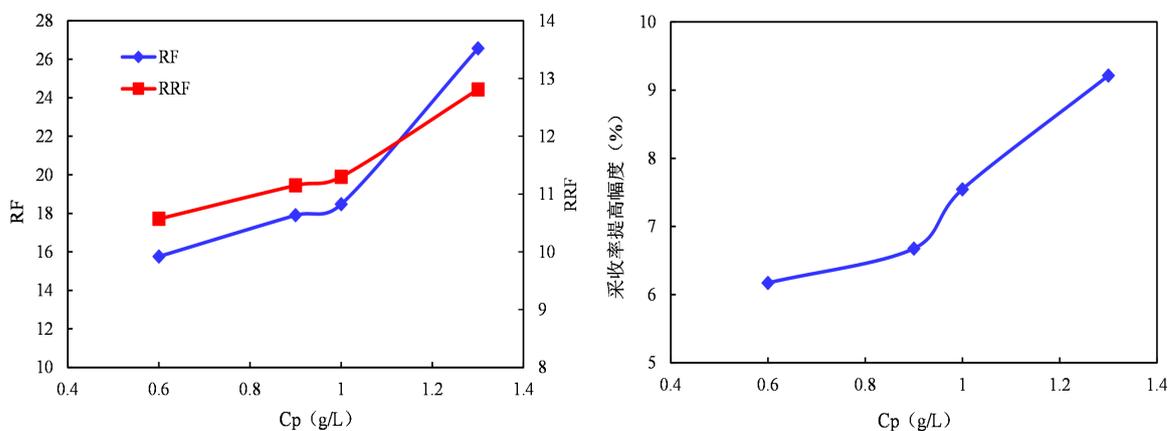


Figure 3. Effect of MCEL concentration on displacement performance and recovery

图 3. MCEL 浓度对驱替性能和采收率的影响

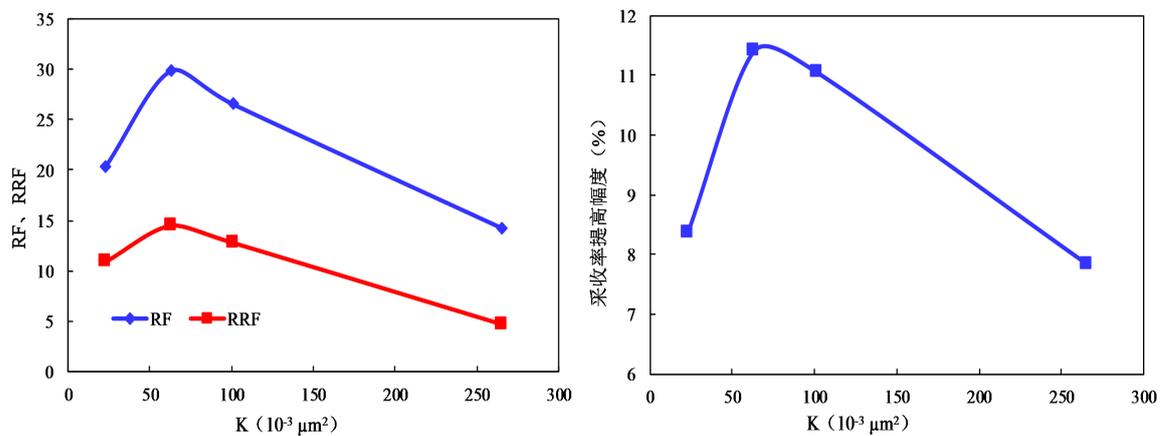
### 3.3.2. 渗透率的影响

模拟大庆油田某区块地层温度 45℃, 对不同的渗透率填砂管进行驱替, 研究渗透率对 MCEL 驱替的驱替性能和采收率的影响。填砂管渗透率见表 2。

**Table 2.** Effect of permeability on displacement performance of MCEL solution  
**表 2.** 渗透率对 MCEL 溶液驱替性能的影响

水测渗透率( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	浓度(g/L)	粘度(mPa·s)	孔隙度(%)	阻力系 $RF$	残余阻力系数 $RRF$	采收率提高幅度(%)
23.06	1.3	122.0	21.08	20.3	10.92	8.37
63.39	1.3	122.0	25.44	29.91	14.52	11.41
101.1	1.3	122.0	26.62	26.56	12.81	11.06
265.4	1.3	122.0	28.46	14.18	4.73	7.85

图 4 是渗透率对 MCEL 驱替性能和采收率的影响。由图中可以看到, 在实验渗透率范围内, 随着渗透率增加,  $RF$  值先上升, 后下降。且均有较好的提高采收率的能力, 采收率提高幅度最高可达 11.41%, 说明在 MCEL 驱替适用的渗透率范围可低至  $23.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 高达  $265.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。



**Figure 4.** Effect of permeability on displacement performance and oil recovery of MCEL solution

**图 4.** 渗透率对 MCEL 溶液驱替性能和采收率的影响

### 3.4. CEL 溶液驱替性能研究

#### 3.4.1. CEL 浓度的影响

模拟大庆油田某区块地层温度  $45^\circ\text{C}$ , 研究 CEL 溶液浓度对渗透率为  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  左右的填砂管驱替性能和采收率的影响。CEL 溶液浓度和填砂管渗透见表 3。

**Table 3.** Effect of CEL concentration on displacement performance  
**表 3.** CEL 浓度对驱替性能的影响

浓度(g/L)	粘度(mPa·s)	水测渗透率( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	孔隙度(%)	阻力系数 $RF$	残余阻力系数 $RRF$	采收率提高幅度(%)
0.6	30.0	98.73	27.43	12.25	4.69	8.41
0.9	51.2	105.45	28.54	15.91	4.95	8.65
1.0	74.5	106.78	26.53	17.45	6.18	8.89
1.3	122.0	94.17	26.62	22.13	7.11	9.14

图 5 为 0.6 g/L, 0.9 g/L, 1.0 g/L, 1.3 g/L CEL 溶液的渗流曲线, 实验温度为  $45^\circ\text{C}$ 。从图中可知, 在一次水驱时, 水驱压力均为 0.3 MPa 左右, 压力较低, 在进行 CEL 聚合物驱替时, 压力显著提高且再进行二次水驱时, 压力较一次水驱仍高出许多。

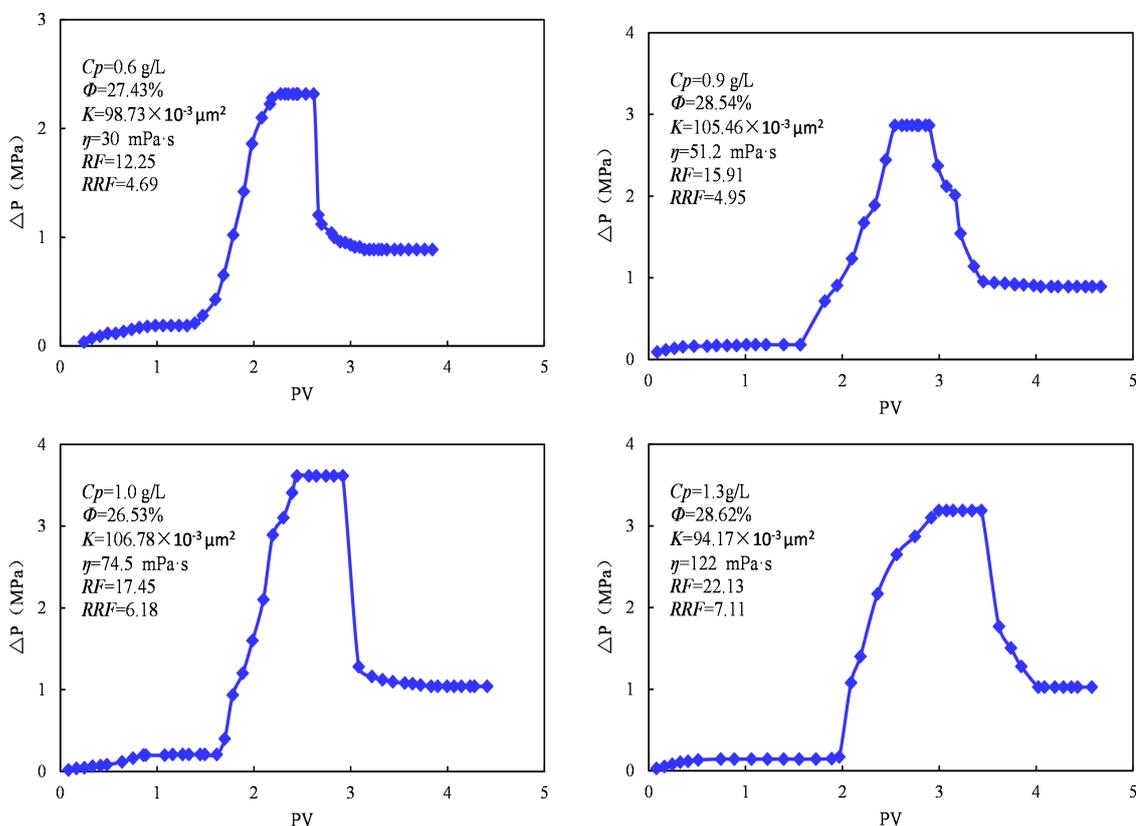


Figure 5. Percolation curve of CEL solution with different concentrations

图 5. 不同浓度的 CEL 溶液的渗流曲线

图 6 是 CEL 溶液浓度对驱替性能和采收率的影响。由图中可以看到, 随着 CEL 溶液浓度增加,  $RF$  值和  $RRF$  值均增大。说明在水测渗透率为  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  左右的地层中, 随着 CEL 溶液浓度增加, 其表观粘度增加, 改善油水流量比的能力不断加强, 封堵较大孔隙通道的能力较强, 能够让更小的空隙通道中的油被驱替出来。由图中可以看到, 随着聚合物浓度增加, 采收率提高幅度增加。说明在研究浓度范围内并未造成堵塞, 同时也再一次证明采收率的提高与  $RF$  和  $RRF$  密不可分, 随着  $RF$  的增加采收率增加。

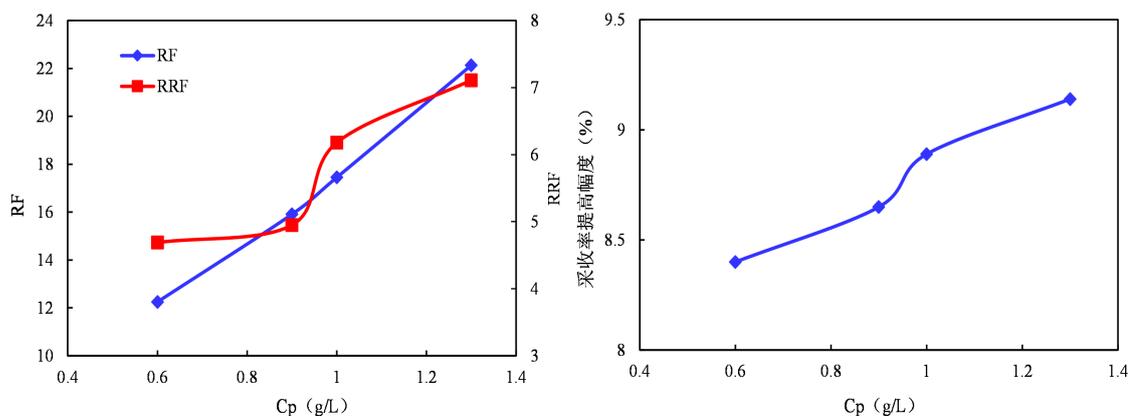


Figure 6. Effect of CEL concentration on displacement performance and recovery

图 6. CEL 浓度对驱替性能和采收率的影响

随着聚合物浓度增加, MCEL 溶液和 CEL 溶液驱的  $RF$  和  $RRF$  值均增加, 采收率提高幅度也增加。MCEL 溶液驱的  $RF$  和  $RRF$  值最大值分别是 26.56 和 12.81, 采收率提高幅度最大值为 11.06%; CEL 溶液驱的  $RF$  和  $RRF$  值最大值分别是 22.13 和 7.11, 采收率提高幅度最大值为 9.14%。在实验浓度范围内, MCEL 溶液的驱替性能和采收率均高于 CEL 溶液。

### 3.4.2. 渗透率的影响

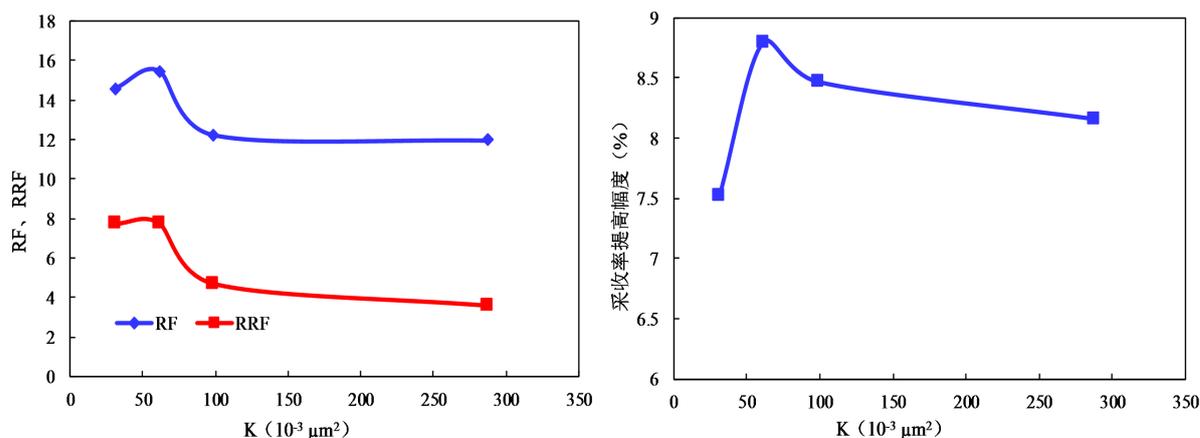
模拟大庆油田某区块地层温度  $45^{\circ}\text{C}$ , 对不同的渗透率填砂管进行驱替, 研究渗透率对 CEL 驱替的驱替性能和采收率的影响。填砂管渗透见表 4。

**Table 4.** Effect of permeability on displacement performance of CEL solution

**表 4.** 渗透率对 CEL 溶液驱替性能的影响

水测渗透率( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	浓度(g/L)	粘度(mPa·s)	孔隙度(%)	阻力系 $RF$	残余阻力系数 $RRF$	采收率提高幅度(%)
31.4	1.3	122.0	23.19	19.87	7.75	8.16
61.39	1.3	122.0	24.03	24.63	8.12	9.52
94.17	1.3	122.0	27.43	22.13	7.11	9.14
287.7	1.3	122.0	29.14	11.97	3.57	7.52

图 7 是渗透率对 CEL 驱替性能和采收率的影响。由图中可以看出 CEL 驱替和 MCEL 驱替时阻力系数、残余阻力系数和采收率提高幅度随渗透率变化的趋势相同。由图中可以看到, 随着渗透率增加,  $RF$  值先上升后下降。说明 CEL 溶液在渗透率为  $61.39 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时改善油水流度比的能力较其他渗透率强。说明在中低渗透率范围内, CEL 溶液存在一个适宜的渗透率范围, 在这个范围内, CEL 分子的缔合结构尺寸与孔喉尺寸最为匹配, 所以能够很好的增加体积波及系数。在实验渗透率范围内, 随着渗透率增加,  $RF$  值先上升, 后下降。但在整个渗透测试范围内 CEL 驱提高采收率的幅度均小于对应条件下 MCEL 驱提高采收率的幅度, CEL 驱采收率提高幅度最高为 9.52%。



**Figure 7.** Effect of permeability on displacement performance and oil recovery of CEL solution

**图 7.** 渗透率对 CEL 溶液驱替性能和采收率的影响

## 4. 小结

1) 提高聚合物溶液浓度可以有效提高原油采收率, 同浓度 MCEL 溶液比 CEL 溶液提高采收率的能力强。在 MCEL 溶液浓度  $0.6 \text{ g/L} \sim 1.3 \text{ g/L}$  的范围内, 随着聚合物浓度的增加,  $RF$  和  $RRF$  值增大, 采收

率提高幅度也增加,最大  $RF$  值为 26.56, 最大  $RRF$  值为 12.81, 采收率提高幅度最大值采收率值为 11.06% 均高于 CEL 溶液值。

2) 在合适的渗透率范围内, 聚合物驱能提高采收率, MCEL 驱替比 CEL 驱替提高采收率的能力强。MCEL 和 CEL 适用的渗透率范围均可低至  $23.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 在渗透率高达  $287.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时也均有较好的驱替效果。同时, 在整个渗透测试范围内 MCEL 驱提高采收率的幅度均大于对应条件下 CEL 驱提高采收率的幅度。MCEL 驱提高采收率幅度最高为 11.41%, 远大于 CEL 驱提高采收率幅度的最高值 9.52%。

3) 新型支化改性纤维素醚驱油剂能够利用自身大分子结构堵塞大孔喉, 有改善吸水剖面, 提高面积波及系数, 无毒易降解且价格低廉易得, 对于提高原油的采收率具有重要作用。

## 参考文献

- [1] 李圣勇, 李圣涛, 陈馥. 聚合物驱提高采收率发展现状与趋势[J]. 化工时刊, 2005, 19(8): 40-42.
- [2] 周易辰, 王建辉, 袁莹. 聚合物驱油机理及影响因素研究[J]. 科技创新导报, 2011(34): 65-65.
- [3] 许冬生. 纤维素醚在石油工业中的应用[J]. 纤维素醚工业, 2001(2): 20-23.