

# 多孔介质中二元复合体系乳化前后流动规律研究

刘哲宇<sup>1,2</sup>, 李宜强<sup>1,2\*</sup>, 庄永涛<sup>3</sup>, 陈一航<sup>4</sup>, 马瑞程<sup>4</sup>

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

3 大港油田采油工艺研究院, 天津 300280

4 中国石油大学(北京)提高采收率研究院, 北京 102249

\* 通信作者, lyq89731007@163.com

收稿日期: 2017-08-08

国家科技重大专项(2016ZX05025-003-010)和中国石油大学优秀博士学位论文基金项目(01JB0585) 联合资助

**摘要** 复合驱过程中出现的乳化现象直接影响开发效果, 目前对复合体系乳化后形成的乳状液的流动规律缺少相关研究。本文采用岩心实验分别注入O/W型乳状液与等黏度的二元体系, 测定采出液的流变性、粒度分布以及乳状液液滴形态, 比较它们多孔介质中的流动规律差异, 再通过多孔介质模拟复合驱过程中乳状液的产生过程, 通过压力变化研究各因素对体系乳化强度的影响。结果表明, 二元体系乳化前后的运移规律存在明显差异, 乳化前体系的压力可以很快达到平稳, 而乳化后的压力呈现跳跃上升, 既表现出幂律流体剪切变稀的特性, 又由于分散性质加强而表现出剪切变稠的特征; 采出液分析表明经过岩心后, 乳状液的流变曲线上移, 粒径变小, 经过3 PV后乳状液的液滴形态才与初始时相似; 各因素中表面活性剂浓度对乳化效果的影响大于剪切速率, 含油饱和度对乳化效果的影响最小。

**关键词** 二元复合驱; 乳状液; 渗流规律; 流变性; 多孔介质

二元复合驱把聚合物和表面活性剂配置在一起注入到储层中, 既可以发挥聚合物的流度控制作用扩大波及体积, 又可以通过表面活性剂降低界面张力来提高洗油效率<sup>[1-2]</sup>, 同时由于没有碱的加入, 避免了储层伤害、检泵频繁、采出液处理困难等问题<sup>[3-4]</sup>。二元复合驱在多个矿场试验中取得了较好效果, 被认为是最有前途的提高采收率技术之一<sup>[5-6]</sup>。近些年来二元复合驱过程中出现的乳化现象越来越受到重视, 有文献报道乳化可以通过乳状液的携带和滞留作用对提高采收率起到积极作用<sup>[7-8]</sup>。很多学者研究了乳状液的形成机理与影响因素, 但多数是用瓶罐实验评价各个因素对乳状液的性能影响<sup>[9-11]</sup>, 而在这种方式下, 外部能量的输入与体系在多孔介质中受到的剪切力相差甚远。同时二元体系乳化以后流动规律发生明显变化, 国内

学者多数使用幂律流体模型对黏度进行修正, 进而模拟乳状液在多孔介质中的流动<sup>[12-13]</sup>, 即使通过实验也只是观测乳状液流经多孔介质时的压力变化<sup>[14-15]</sup>, 没有对产出液的性质进行分析, 不能全面揭示乳状液在多孔介质中的流动机理。国外学者提出多种模型来描述乳状液在多孔介质中的运移, 比如体积黏度模型, 液滴滞留模型以及深层过滤模型等<sup>[16-18]</sup>, 但每种模型均有其局限性, 不能准确反映乳状液在多种介质中的流动规律。

本文针对乳状液在多孔介质中的流动规律尚不清晰, 各因素对多孔介质中二元体系乳化能力的影响程度尚不明确等问题, 从二元体系发生乳化前后的流动规律入手, 详细研究了乳状液与二元复合体系在多孔介质中流动压力曲线的差异, 分析了乳状液流经多孔介质后的

引用格式: 刘哲宇, 李宜强, 庄永涛, 陈一航, 马瑞程. 多孔介质中二元复合体系乳化前后流动规律研究. 石油科学通报, 2017, 04: 527-535  
LIU Zheyu, LI Yiqiang, ZHUANG Yongtao, CHEN Yihang, MA Ruicheng. Comparison of a surfactant/polymer solution and its emulsion flowing in a porous medium. Petroleum Science Bulletin, 2017, 04: 527-535. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.04.049

形态、流变性和粒度分布；并使用岩心剪切方式生成乳状液，直接把乳状液注入到多孔介质中，通过压力的变化研究表面活性剂浓度、含油饱和度以及流速3个因素对二元体系乳化能力的影响。

## 1 实验条件

### 1.1 实验材料

聚合物为部分水解聚丙烯酰胺，相对分子质量  $2\,500 \times 10^4$ ，固含量 88%。表面活性剂由大港油田提供，为阴离子型石油磺酸盐和非离子型表面活性剂复配获得，有效含量 40%，临界胶束浓度 0.06%(wt)。原油取自大港油田港西三区，在地层温度 53 °C 时黏度 70 mPa·s。实验用水按照港西三区水质分析进行室内配制，其离子组成见表 1。实验岩心为石英砂环氧树脂胶结人造均质圆柱岩心，气测渗透率 1 500 mD，岩心直径 2.5 cm，长度 15 cm。

### 1.2 仪器设备

实验过程中使用 Brookfield 布氏黏度计测定黏度，TX-500 旋滴界面张力仪测定界面张力，马尔文激光

粒度仪 MS3000 测定乳状液粒径，Haake 流变仪测定流变性，体式显微镜 Stereo Discovery V12 观测乳状液的形态。采用岩心驱替装置进行流动实验。驱替装置包括平流泵、压力传感器、岩心夹持器、手摇泵和中间容器等，除平流泵和手摇泵外，其他部分置于 53 °C 恒温箱内。

## 2 实验方法

### 2.1 乳状液生成方法

乳状液的生成方法有很多种，包括手动混合乳化法、高速搅拌剪切法、电动搅拌器法和水浴空气振荡法等，但这些方法对油水的剪切方式和强度均与二元体系在多孔介质中生成乳状液的过程不同。本次实验采用岩心剪切法生成乳状液，分别使用 2 个注入泵来设定流速，把原油和二元体系按照实验要求的油水比直接注入到 15 cm 长的岩心中，待压力上升幅度变缓后(大约 3 PV)，在出口处取样测定乳状液的形态与粒径分布，如图 1 所示。使用这种方法可以通过注入泵来控制油水比和流速，生成乳状液后直接进入实验流程中，避免把乳状液放置到活塞中注入发生破乳，可直接模拟乳状液在储层中的生成过程。

### 2.2 实验方案

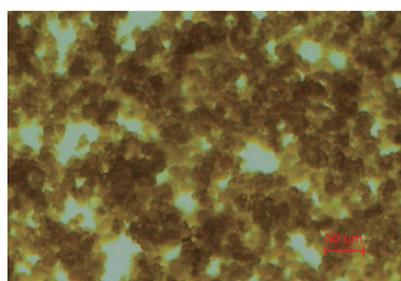
#### 2.2.1 二元体系和乳状液的流动实验

比较等黏度的二元体系与乳状液体系在多孔介质中的流动规律。用地层水配制成二元体系，其中聚合物浓度 1 500 mg/L，表面活性剂浓度 0.2%，53 °C 下二元体系黏度 65 mPa·s(剪切率  $7.34\text{ s}^{-1}$ )。二元乳状液的生成过程是把油和二元体系按照 1:1 的比例注入到直径 2.5 cm，长 15 cm 的岩心中，流速为 0.2 mL/min，其中二元体系使用 1 200 mg/L 的聚合物，表面活性剂

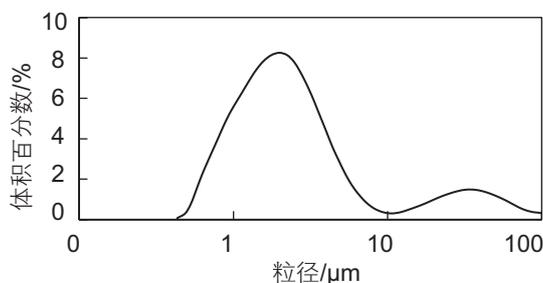
表 1 地层水离子含量

Table 1 Ion composition of the brine

离子	含量/(mg/L)
$\text{K}^+\text{+Na}^+$	1 452
$\text{Mg}^{2+}$	21
$\text{Ca}^{2+}$	40
$\text{Cl}^-$	1 401
$\text{SO}_4^{2-}$	12
$\text{HCO}_3^-$	3 224
总矿化度	6 150



(a)



(b)

图 1 使用岩心剪切方法生成的乳状液的形态(a)与粒径分布(b)

Fig. 1 Morphology (a) and droplets distribution (b) of emulsion generated by core shear

浓度 0.2%，黏度 49 mPa·s(剪切速率 7.34 s<sup>-1</sup>)，在第一段岩心出口处测得生成的乳状液黏度也为 65 mPa·s(剪切速率 7.34 s<sup>-1</sup>)。

2.2.2 多孔介质中二元体系乳化影响因素实验

考虑含油饱和度、界面张力以及流速 3 种影响因素，每个因素选取 3 个数值，设计 27 组实验比较它们对二元体系乳状液的影响，结果如表 2 所示。二元体系中聚合物的浓度始终是 1 500 mg/L。

表 2 3 种因素对二元体系乳化能力影响的实验设计

Table 2 Experiments of influences of three factors on surfactant/polymer emulsification

影响因素	取值范围		
油水比	3:7	5:5	7:3
表面活性剂浓度	0.05%	0.10%	0.20%
界面张力/(mN/m)	0.310	0.070	0.008
流速/(m/d)	2	4	8

2.3 实验步骤

(1) 岩心抽真空、饱和水，计算孔隙度，用盐水测定渗透率，记录压力  $P_w$ 。

(2) 每组实验将 2 段岩心串联在一起，前面一段用于产生乳状液，后面一段用于研究乳状液的渗流规律。同时把油和二元体系按照 2 个实验中各自的设计方案注入到第一段岩心中使之产生乳状液，出口处连接四通阀，四通阀一端连接取样设备，一端连接压力传感器，另一端连接实验所用岩心(第二段岩心)。

(3) 在第一段岩心后取样，用体式显微镜观测乳状液是否生成，实时监测第二段岩心的压力曲线，记录最终平稳段压力  $P_E$ ，测定出口处乳状液的形态与粒径变化。

(4) 选取注入乳状液 5~6 PV 时压力上升幅度变缓段的平均值来计算阻力系数， $R_f = \frac{P_w}{P_E}$ ，用阻力系数表征多孔介质中不同因素对二元体系乳化能力的影响。其中： $P_w$ —水测岩心渗透率时的压力， $P_E$ —注入乳状液后压力曲线平稳段对应的数值； $R_f$ —乳状液的阻力系数。

3 结果与讨论

3.1 二元体系/乳状液在多孔介质中流动特性

以流动压力为指标研究 2 种体系的渗流规律，从采出液的流变性、乳状液的形态以及粒径分布变化上

确定乳状液通过多孔介质后的性质变化。

3.1.1 流动压力差异

等黏度的乳状液与二元体系在岩心中的运移压力曲线如图 2 所示，可以看出在初始阶段(2 PV 以前)二元体系的压力上升幅度快于乳状液。这是因为乳状液在刚进入到岩心后，由于表面活性剂的吸附使得油水两相分离，产生破乳现象，油也会运移吸附到孔隙表面，造成体系黏度下降，流动压力增长缓慢。当吸附饱和以后乳状液可以保持稳定形态，流动压力不断上升，超过二元体系。二元体系突破以后(1 PV)压力保持着稳定状态，而乳状液的压力始终保持着“跳跃性”上升，没有达到平稳，这与乳状液在岩心中的滞留有关，大粒径的乳状液滞留在孔喉处造成渗透率下降，恒速情况下局部毛管数增加，使得乳状液变形突破，此时压力产生波动<sup>[19]</sup>。

3.1.2 流变曲线差异

注入岩心前后分别对二元体系和乳状液进行取样，使用 Haake 流变仪测定二者的流变曲线，如图 3 所示。可以看出二者均呈现出幂律流体性质，黏度随着剪切速率增加呈指数下降，但二元体系在注入前后流变曲线基本没有发生变化，而注入岩心后的乳状液在相同剪切速率时黏度增加，由注入前的 65 mPa·s 上升到注入后的 86 mPa·s，这是因为岩心中的孔喉对乳状液也起到了剪切作用，使得乳状液液滴更加分散，粒径间的相互作用增强，宏观上表现为体系乳化能力增强，黏度升高。由此可见，乳状液在多孔介质中由于体系分散程度加强呈现出剪切变稠的性质。

3.1.3 乳状液形态

由于粒度和黏度的影响，乳状液体系在多孔介质中流动会存在不可波及的区域，这一部分区域被称作

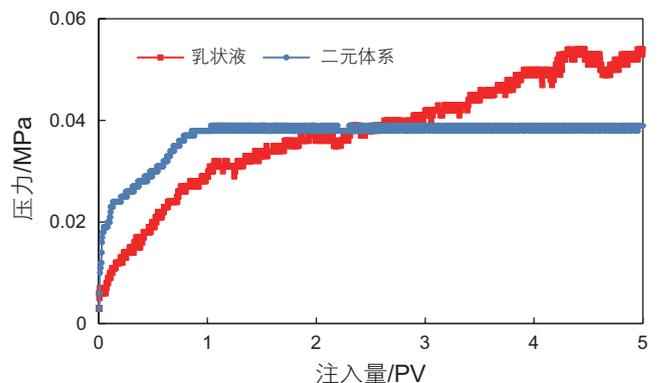


图 2 等黏度的乳状液与二元体系在岩心中的运移压力曲线  
Fig. 2 Pressures curves of emulsion and SP solution flowing in porous medium

不可入孔隙体积,不可入孔隙体积的存在会导致乳状液在出口端提前突破。在不同注入量下使用体式显微镜观察岩心出口处乳状液的形态,如图4所示。注入到岩心前乳状液的形态较为均一,为水包油型乳状液;注入乳状液 0.85 PV后可以观察到其突破,但突破时已经不再是乳状液的形态,为连片油相和水相;在突破后 1 PV,水相变为长条形,开始把油相分割;直到突破 3 PV后,乳状液的形态与初始注入形态较为相似。这是因为乳状液刚注入到岩心中时,体系中的表面活性剂会吸附到岩心壁上,导致乳状液破乳,油水分离。3 PV后体系中表面活性剂浓度能够维持乳状液液滴相对稳定的存在状态,使其与初始注入形态较为相似。

### 3.1.4 乳状液粒径分布

注入岩心前后乳状液的粒径分布如图5所示,可以发现2条曲线的形态较为相似,但注入岩心后乳状

液的粒径分布向左移动,粒度中值由注入前的  $5.2\ \mu\text{m}$  变为注入后的  $4.5\ \mu\text{m}$ 。这是因为岩心中的孔喉会对乳状液产生剪切作用,尤其是在高压力梯度情况下,乳状液会进入到更小的孔隙中,剪切分散使得粒径变小<sup>[20]</sup>;同时大液滴会滞留在岩心中,起到调剖的作用,而小液滴流出岩心,使得出口端的粒径变小。

### 3.2 多孔介质中二元体系乳化影响因素

影响二元复合体系乳化能力的因素有很多,根据乳状液的形成条件以及矿场的可控变量,本文选取表面活性剂浓度、含油饱和度以及流动速度<sup>[8]</sup>3种因素进行研究。通过阻力系数和多孔介质建立联系,研究它们对二元体系乳化能力的影响,选取3种油水比、3种流速和3种表面活性剂浓度,共进行27组实验,测得的阻力系数如图6所示。

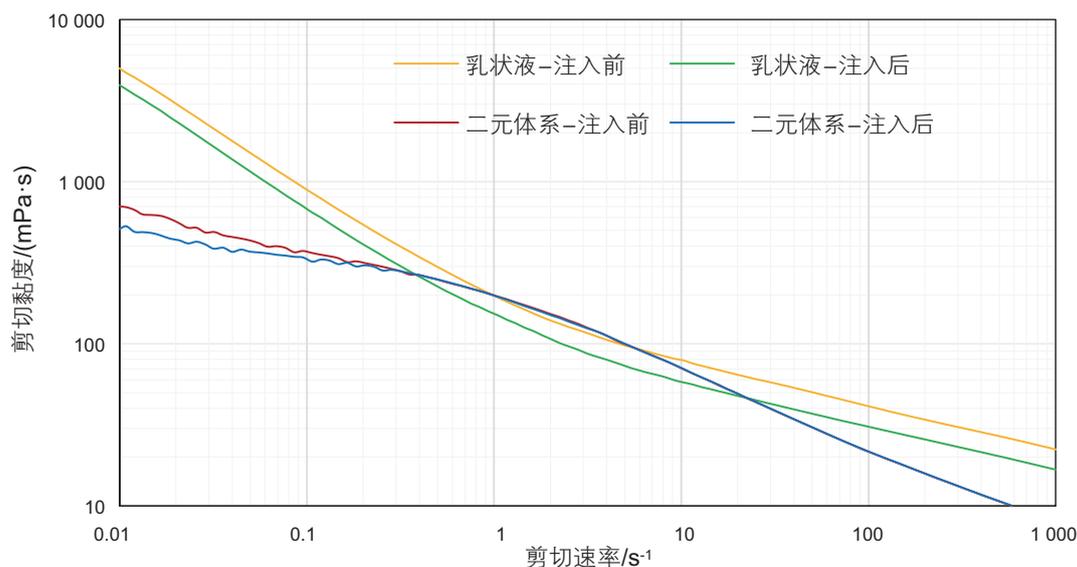


图3 注入前后乳状液与二元体系流变性的差异

Fig. 3 Rheology curves of solutions before and after injection

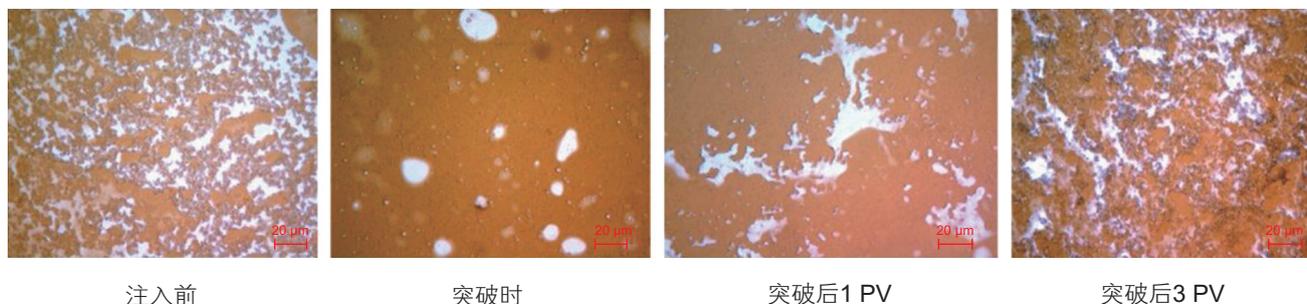


图4 不同注入量下岩心出口处乳状液的形态

Fig. 4 Morphology of emulsion at outlet with different injection pore volume

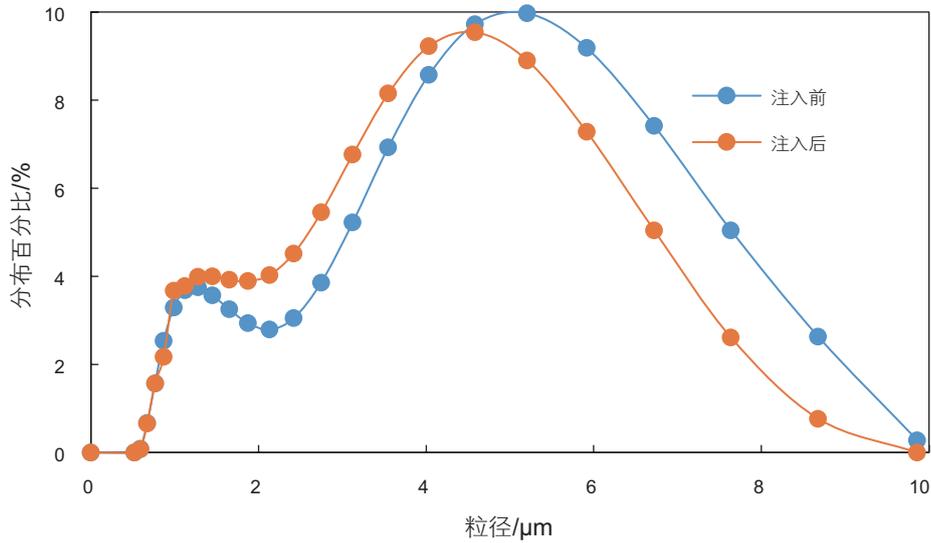


图 5 注入岩心前后乳状液的粒径变化

Fig. 5 Droplet size distribution of emulsions before and after injection in core

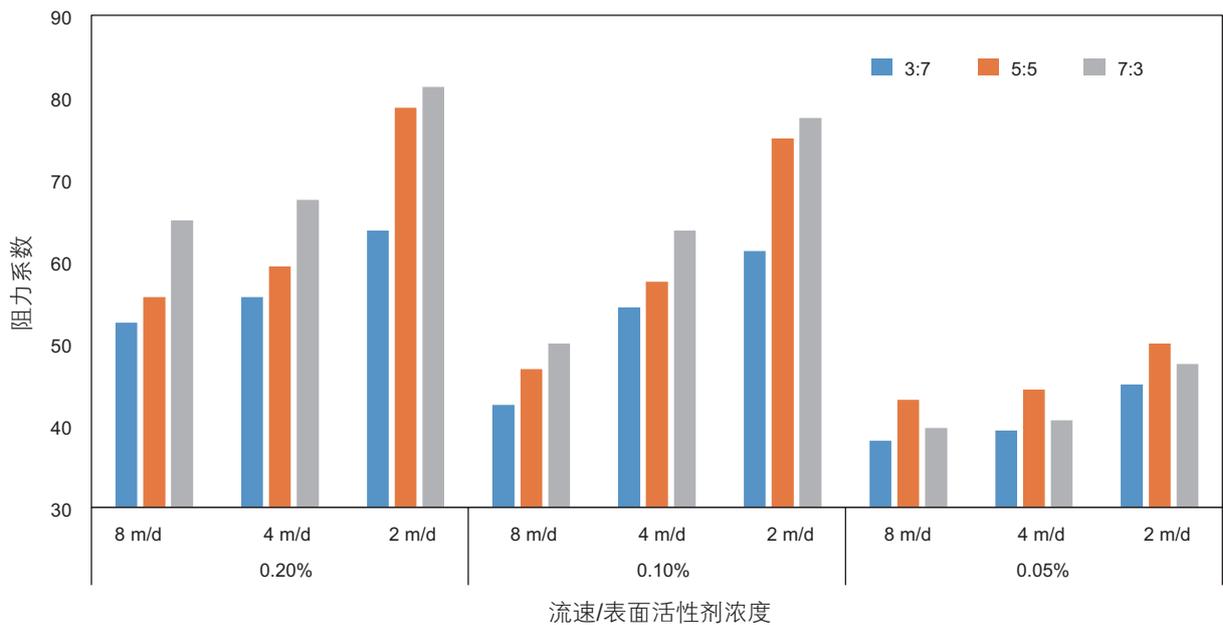


图 6 不同因素下二元体系乳化后的阻力系数

Fig. 6 Resistance factors of emulsions at different conditions

### 3.2.1 表面活性剂浓度

实验中选择了 3 种表面活性剂浓度 0.05%、0.1% 和 0.2%，分别对应 3 个数量级的界面张力  $10^{-1}$  mN/m、 $10^{-2}$  mN/m 和  $10^{-3}$  mN/m。从图 6 可以看出当表面活性剂浓度为 0.05% 时，聚合物/表面活性剂二元体系与原油组成乳状液的阻力系数远小于另外 2 种浓度下的阻力系数。当表面活性剂浓度为 0.1% 和 0.2% 时，形成乳状液的阻力系数较为相近，可见二者的乳化能力没有明显区别。从图 7 可以看出，当活性剂浓度为

0.05% 时，油相和水相是分离开来的，没有形成较为稳定的乳状液。当活性剂浓度达到 0.1% 时，乳化较为强烈。由此可见，对于实验所用的表面活性剂，浓度超过 0.1%，也就是界面张力达到  $10^{-2}$  mN/m 以后，体系发生较强乳化，再增加表面活性剂浓度，对乳状液在多孔介质中的运移能力影响不大。

### 3.2.2 含油饱和度

从图 6 可以看出随着含油饱和度增加，二元乳状液的阻力系数增加。以流速 4 m/d 为例，油水比 3:7

与油水比 5:5 的阻力系数较为相似, 明显小于油水比 7:3。这是因为随着含油饱和度的增加, 乳状液由 O/W 型转变成 W/O 型, 黏度更大<sup>[6,8]</sup>, 呈现压力上升阻力系数增大的现象。从岩心出口处取样分析可以发现, 在油水比 3:7 与 5:5 时形成水包油型乳状液, 当油水比变为 7:3 时, 形成油包水型乳状液。

### 3.2.3 流动速度

流速对二元体系以及乳状液的阻力系数影响规律如图 8 所示。从中可以看出虽然乳状液的黏度 (65 mPa·s) 只略高于二元体系 (49 mPa·s), 但其阻力系数却远高于二元体系, 随着流速的增加, 二者的阻力系数均在减小, 在多孔介质中表现出剪切变稀幂律流

体的性质。为了比较二元体系与乳状液的非牛顿性, 用 2 种体系在流速 4 m/d 时的阻力系数除以 2 m/d 时的阻力系数, 如果是牛顿流体, 比值应该为 1。可以发现在 3 种表面活性剂浓度下乳状液的比值在 1.3~1.33 之间, 而二元体系的比值为 1.21。可见在多孔介质中乳状液剪切变稀的性质强于二元体系, 这是因为在高毛管数下, 滞留的乳状液滴可以通过细小孔喉, 导致乳状液的滞留因子减小, 压力下降, 表现为阻力系数进一步减小。

### 3.2.4 影响程度分析

使用灰色关联分析法 (GRA) 通过计算关联系数来研究 3 种因素对二元体系在多孔介质中乳化的影响程

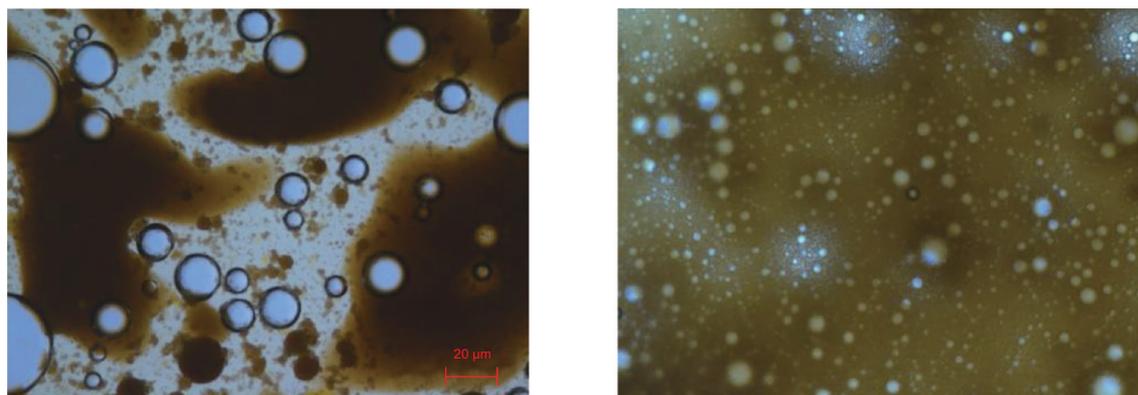


图 7 表面活性剂浓度 0.05% (左) 和 0.1% 时 (右) 出口处乳状液的微观形态

Fig. 7 Morphologies of emulsions at outlet when surfactant concentration is 0.05% (left) and 0.1% (right)

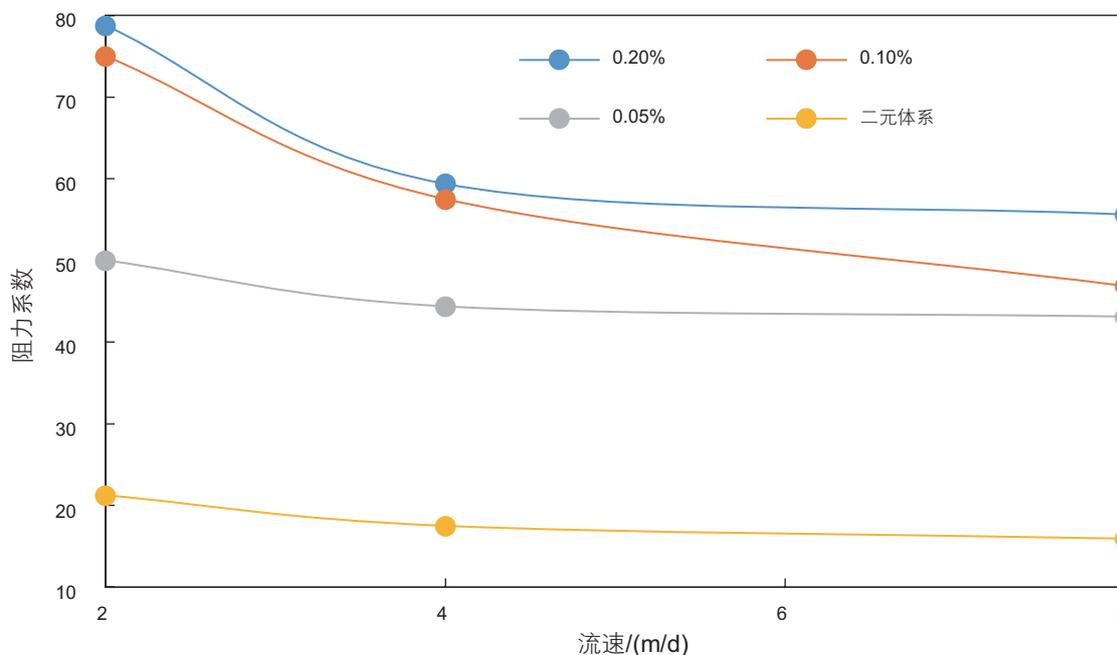


图 8 油水比 5:5 时不同流速下乳状液与二元体系的阻力系数

Fig. 8 Resistance factors of emulsions at various velocities when the oil-water ratio is 5:5

度, 关联系数表征了含油饱和度、表面活性剂浓度以及流动速度和阻力系数的相关程度, 关联系数越大, 代表着相关程度越高。关联系数可以由(1)式和(2)式求得:

$$\gamma(x_0 - x_i) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

总体相关度为:

$$\gamma(X_0 - X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0 - x_i) \quad (2)$$

式中:  $X_0$ —因变量, 即阻力系数;  $X_i$ —自变量, 即含油饱和度, 表面活性剂浓度以及流动速度;  $\rho$ —分辨系数, 在应用这 2 个公式前需要对因变量和自变量无因次化。具体做法是将数列中的各个元素除以整个数列的平均值。分辨系数取值范围为 0~1, 通常取值为 0.5, 引入该系数是为了减少极值对计算结果的影响。一般来说, 分辨系数的取值对关联系数的数值存在影响, 但是不会改变关联系数之间的大小关系。

计算结果如图 9 所示, 即使分变系数取值不同, 但关联系数的排序仍然为表面活性剂浓度 > 流速 > 油水比, 说明二元体系乳化能力受表面活性剂浓度的影响最大。乳化发生的条件是有两相不相溶的液体、剪切力以及乳化剂的存在, 体系中只要有一定量的油水存在就可以满足发生乳化的条件, 而表面活性剂浓度影响到了油水的增溶能力以及对这种分散状态的维持能力, 所以其对体系乳化的影响最大。

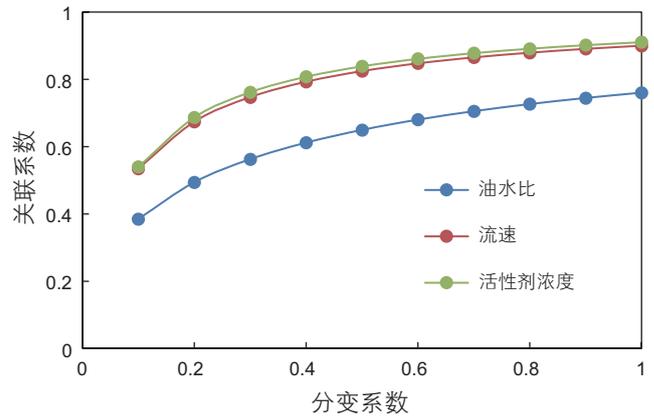


图 9 3 种因素与乳液阻力系数的关联程度

Fig. 9 Relational degree of emulsion between three influence factors and resistance coefficient

## 4 结论

(1) 等黏度乳状液与二元体系在多孔介质中的流动规律存在明显差异。乳状液的压力呈现跳跃式波动上升, 采出液黏度增加, 粒径变小, 经过 3 PV 后乳状液的形态与注入前相似。而二元体系的流动压力很快达到平稳, 注入前后体系的性质没有发生变化。

(2) 乳状液在多孔介质中既表现出了幂律流体剪切变稀的特征, 又由于孔喉对其剪切使乳化作用增强, 呈现出剪切变稠的性质。

(3) 3 种因素对二元体系乳化效果的影响程度排序为, 表面活性剂浓度大于剪切速率大于含油饱和度。

## 参考文献

[1] 夏惠芬, 王刚, 马文国, 等. 无碱二元体系的黏弹性和界面张力对水驱残余油的作用[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 106-110. [XIA H F, WANG G, MA W G, et al. Influence of viscoelasticity and interfacial tension of non-alkali binary compound solution on recovery efficiency of residual oil after water flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 106-111.]

[2] 牛丽伟, 卢祥国, 杨怀军, 等. 二元复合驱流度控制作用效果及其合理流度比研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 148-154. [NIU L W, LU X G, YANG H J, et al. Study on mobility control of polymer /surfactant oil-displacing agent and reasonable mobility ratio[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Nature Science), 2014, 38(1): 148-154.]

[3] 朱友益, 张翼, 牛佳玲, 等. 无碱表面活性剂-聚合物复合驱技术研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 346-351. [ZHU Y Y, ZHANG Y, NIU J L, et al. The progress in the alkali-free surfactant-polymer combination flooding technique[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 346-351.]

[4] GUO H, LI Y, GU Y, et al. Comparison of strong alkali and weak alkali asp flooding pilot tests in Daqing Oilfield[C]. In: SPE Improved Oil Recovery Conference, Tulsa, Oklahoma, USA. 11-13 April, 2016. SPE-179 661.

[5] KHORSANDI S, JOHNS R T. Robust flash calculation algorithm for microemulsion phase behavior [J]. Journal of Surfactants & Detergents, 2016, 19(6): 1-15.

[6] 刘卫东. 聚合物/表面活性剂二元驱提高采收率技术研究[D]. 廊坊: 中国科学院研究生院(渗流流体力学研究所), 2010. [LIU W D. Studies on enhancing oil recovery technology of polymer/surfactant binary flooding[D]. Langfang: University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics), 2010.]

- [7] 王克亮, 付恬恬, 王翠翠, 等. 三元复合体系在渗流过程中的乳化规律研究[J]. 油田化学, 2013, 30(1): 83–86. [WANG K L, FU T T, WANG C C, et al. Emulsion forming rules of asp system seepage flow in porous media. Oilfield Chemistry, 2013, 30(1): 83–86.]
- [8] 郭英. 二元驱(SP)乳状液形成及渗流规律研究[D]. 廊坊: 中国科学院研究生院(渗流流体力学研究所), 2015. [GUO Y. A study on emulsion formation for binary flooding (SP) and porous flow rules[D]. Langfang: University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics), 2015.]
- [9] 孙仁远, 刘永山. 超声乳状液的配制及其段塞驱油试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1997, (5): 102–104. [SUN R Y, LIU Y S. Experimental study on oil displaced by ultrasonic-emulsion slug[J]. Journal of China University of Petroleum, 1997, (5): 102–104.]
- [10] 刘鹏, 王业飞, 张国萍, 等. 表面活性剂驱乳化作用对提高采收率的影响[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 99–102. [LIU P, WANG Y F, ZHANG G P, et al. Study of emulsification effect on oil recovery in surfactant flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 99–102.]
- [11] 侯军伟, 陈素萍, 曾晓飞, 等. 七中区二元驱油体系乳化性能研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(4): 216–220. [HOU J W, CHEN S P, ZENG X F, et al. Emulsion performance research of surfactant-polymer flooding system of Qizhong District[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(4): 216–220.]
- [12] 宋杰, 朱斌. 石油乳状液的黏度模型[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(b11): 30–35. [SONG J, ZHU B. Viscosity model of oil emulsion in chemical flooding. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(b11): 30–35.]
- [13] LEI Z, YUAN S, SONG J. Rheological behavior of alkali-surfactant-polymer/oil emulsion in porous media[J]. Journal of Central South University, 2008, 15(1): 462–466.
- [14] 杨东东, 岳湘安, 张迎春, 等. 乳状液在岩心中运移的影响因素研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2009, 24(3): 28–30. [YANG D D, YUE X A, ZHANG Y C, et al. Factors of influencing the migration of emulsion in a rock core. Journal of Xi'an Shi You University (Natural Science Edition), 2009, 24(3): 28–30.]
- [15] 赵清民, 吕静, 李先杰, 等. 非均质条件下乳状液调剖机理[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 41–43. [ZHAO Q M, LV J, LI X J, et al. Experimental study on profile control mechanism of oil-in-water emulsion in heterogeneous model[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(1): 41–43.]
- [16] ALVARADO A, MARSEDEN S. Flow of oil-in-water emulsions through tubes and porous media[J]. Journal of Petroleum Engineering of AIME Journal, 1979, 19(6): 369–377.
- [17] MCAULIFFE C D. Oil-in-water emulsions and their flow properties in porous media[J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, 25(6): 727–733.
- [18] SOO H, RADKE C J. A filtration model for the flow of dilute, stable emulsions in porous media—I. Theory[J]. Chemical Engineering Science, 1986, 41(2): 263–272.
- [19] COBOS S, CARVALHO M S, ALVARADO V. Flow of oil-water emulsions through a constricted capillary[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(6): 507–515.
- [20] ROMERO M I. Flow of emulsions in porous media[C]// Society of Petroleum Engineers SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, 2009.

## Comparison of a surfactant/polymer solution and its emulsion flowing in a porous medium

LIU Zheyu<sup>1,2</sup>, LI Yiqiang<sup>1,2</sup>, ZHUANG Yongtao<sup>3</sup>, CHEN Yihang<sup>4</sup>, MA Ruicheng<sup>4</sup>

*1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

*2 State Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

*3 Oil Production Technology Institute, Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China*

*4 Research Institute of EOR, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China*

**Abstract** The emulsion generated during combination flooding has a big impact on oil recovery. Unfortunately, there has been a lack of emulsion flow research. Core flow experiments were used to investigate the flow difference between oil in water emulsion and surfactant/polymer solution, which have the same viscosity by measuring pressure, rheological properties, particle size distribution and emulsion droplet morphology of the effluent. Meanwhile, surfactant polymer (SP) solution and

oil was co-injected into a core to generate an emulsion. Impacts on emulsion flow properties, such as oil water ratio, surfactant concentration and flow velocity were investigated by comparing pressure curves. The results showed that there were significant flow differences between the SP solution and its generated emulsion. The pressure of the SP solution quickly achieved a steady level. However, the emulsion showed jamming and drop breakup phenomena. The rheology of the emulsion was not only shear thinning, but also shear thickening because pore throat shearing increased its dispersion. The analysis of effluent indicated that as the viscosity of the emulsion increased, the droplet size decreased and the emulsion morphology become similar to its initial status after 3PV. The surfactant concentration has more effect than shear rate on the emulsification, while the oil saturation has a minimal effect.

**Keywords** surfactant/polymer flooding; emulsion; percolation rule; rheology; porous medium

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.04.049

(编辑 马桂霞)