

非均质条件下孔喉尺度弹性微球深部调驱研究

姚传进,雷光伦,高雪梅,李 蕾

(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266555)

摘要 针对孔喉尺度弹性微球调驱技术设计原理的特殊性,引入粒径匹配系数,通过非均质平行填砂管岩心实验,研究了不同粒径匹配关系下弹性微球的封堵性能以及渗透率级差对剖面改善能力的影响,并在此基础上,开展了弹性微球调驱现场试验。室内实验结果表明,在较佳的粒径匹配系数范围内,岩心的残余阻力系数和封堵率最大,封堵效果最好,弹性微球可选择性优先封堵高渗透层,使高、低渗透管的分流率均趋于50%,对渗透率具有明显的选择性,渗透率级差对弹性微球调驱性能具有重要的影响,在较佳的粒径匹配系数范围和较低的渗透率级差条件下,弹性微球的剖面改善能力较好。现场试验结果表明,在粒径匹配系数为1.52和渗透率级差为3.1的条件下,弹性微球可对吸水剖面进行有效控制,调剖目的层67小层和65小层的剖面改善能力高达98%,运用粒径匹配系数和渗透率级差指导弹性微球深部调驱现场试验具有科学性。

关键词 非均质 弹性微球 粒径匹配系数 封堵性能 渗透率级差 深部调驱

中图分类号 :TE357.4

文献标识码 :A

文章编号 :1009-9603(2012)05-0061-04

孔喉尺度弹性微球深部调驱技术是充分依据油藏岩石的孔隙结构特征及渗流特点,吸取现代高分子材料合成技术而发展起来的一项新型提高采收率技术^[1-2],其设计原理是针对油藏岩石的微米级孔喉尺度特征^[3],在地面控制合成与之匹配的弹性微球,并悬浮分散于水中,由水井注入到调驱层,利用其在储层多孔介质中的运移、封堵、弹性变形、再运移、再封堵机制,在高渗透带不断地封堵和运移,直达油层深部,从而提高油层深部剩余油富集区域的波及体积,大幅度提高原油的采收率^[4-6]。

孔喉尺度弹性微球为具有较高圆球度的交联聚合物弹性颗粒^[7],由于设计原理的特殊性,了解其在非均质条件下的调驱机理对提高采收率有重要的意义。为此,通过非均质平行填砂管岩心实验,研究了不同粒径匹配系数下弹性微球的封堵性能以及渗透率级差对剖面改善能力的影响,并开展了现场试验。

1 实验准备

1.1 试剂与仪器

实验材料主要包括室内合成的、无色的弹性微

球溶液,胜利油区孤岛油田10~100目产出砂,矿化度为3 000 mg/L,粘度为0.74 mPa·s、密度为1 000 kg/m³的模拟地层水、蒸馏水和煤油。

实验仪器主要包括LP-20C型高压平流泵,真空泵,中间容器,恒温箱,直径为2.8 cm、长度为35 cm的填砂管,精度为0.001 MPa、采样频率为5次/s的压力传感器,DJ-1型定时电动搅拌器,高压六通阀,电子天平,量筒,烧杯等。

1.2 实验方法

在室内模拟油藏非均质情况,用填砂管岩心模型,引入粒径匹配系数,通过封堵实验、分流实验和改善剖面能力评价方法考察了弹性微球的调驱性能。

1.2.1 粒径匹配关系表征

弹性微球和岩心孔喉均存在一个特征尺寸,即弹性微球的平均粒径和岩心的平均孔喉直径。因此,引入粒径匹配系数,表征弹性微球粒径与岩心孔喉直径之间的匹配关系,其表达式为

$$\delta = \frac{d_{av}}{\bar{d}} \quad (1)$$

式中: δ 为粒径匹配系数; d_{av} 为弹性微球的平均粒径,μm; \bar{d} 为岩心的平均孔喉直径,μm。

收稿日期 2012-07-15。

作者简介 姚传进,男,在读博士研究生,从事提高采收率及采油化学研究。联系电话:15165283060,E-mail:ycj860714@yahoo.com.cn。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助 孔喉尺度弹性微球渗流机理的实验和模拟研究(11CX06025A),中国石油大学(华东)研究生创新工程资助项目 弹性微球体系渗流特征及提高采收率机理研究(CXZD11-04)。

利用激光粒度分析仪测得弹性微球的粒度分布^[8-9],即可求得平均粒径。对于石英砂填制的填砂管岩心,可利用其孔隙度、渗透率、平均孔喉直径三者之间的关系式^[10]计算岩心的平均孔喉直径。

1.2.2 岩心封堵实验

实验填制9组填砂管模型,弹性微球与填砂管岩心的粒径匹配系数为0.81~2,实验温度为30℃,弹性微球水化膨胀后的平均粒径为19 μm,注入速率为1 mL/min。利用填砂管岩心模型,模拟不同的粒径匹配系数,分别注入2.5倍孔隙体积、质量浓度为2 000 mg/L的弹性微球溶液段塞,考察岩心的残余阻力系数和封堵率。

1.2.3 岩心分流实验

实验填制1组并联填砂管模型,渗透率分别为2.05和0.73 μm²,弹性微球与高渗透管岩心的粒径匹配系数为1.5,实验温度为30℃,注入速度为1 mL/min。利用并联填砂管模型,模拟油藏的非均质情况,采用合注分采方式,考察弹性微球在高、低渗透管的分配情况以及弹性微球封堵后岩心的耐冲刷能力。

1.2.4 改善剖面能力评价实验

实验填制5组渗透率级差分别为2.2,3.4,4.5,6.7和8.3的并联填砂管模型,弹性微球与高渗透管岩心的粒径匹配系数均为1.4~1.5,实验温度为30℃,注入速率为1.0 mL/min。利用并联填砂管模型,模拟具有不同渗透率级差的非均质储层,采用合注分采方式,考察弹性微球的改善剖面能力。改善剖面能力的计算式为

$$f = \frac{\frac{Q_{H1} - Q_{H2}}{Q_{L1} - Q_{L2}}}{\frac{Q_{H1}}{Q_{L1}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: f 为改善剖面能力,%; Q_{H1} 和 Q_{H2} 分别为注入弹性微球溶液段塞前、后高渗透管的分流流量,mL; Q_{L1} 和 Q_{L2} 分别为注入弹性微球溶液段塞前、后低渗透管的分流流量,mL。

2 实验结果分析

2.1 不同粒径匹配系数下弹性微球封堵性能

由不同粒径匹配系数下弹性微球的封堵性能(表1)可见,在不同的粒径匹配系数下,填砂管岩心的残余阻力系数和封堵率相差较大,随粒径匹配系数的降低,填砂管岩心的残余阻力系数和封堵率均先增大后减小,当粒径匹配系数为1.43时,填砂管

岩心的残余阻力系数和封堵率最大,封堵效果最好;而粒径匹配系数过大或过小时,弹性微球在填砂管岩心中运移时的残余阻力系数和封堵率迅速降低。因此,弹性微球粒径与岩心孔喉直径之间的匹配关系是影响弹性微球封堵性能的重要因素。

表1 不同粒径匹配系数下弹性微球的封堵性能

填砂管岩心号	填砂管岩心基本参数			粒径匹配系数	残余阻力系数	封堵率,%
	孔隙度,%	渗透率/μm ²	平均孔喉直径/μm			
1	36.17	1.02	9.50	2.00	1.45	31.05
2	37.15	1.28	10.50	1.81	1.75	42.86
3	37.44	1.61	11.73	1.62	2.48	59.63
4	37.41	1.85	12.58	1.51	5.98	83.27
5	37.09	2.05	13.29	1.43	9.20	89.13
6	38.39	2.18	13.48	1.41	7.20	86.11
7	34.83	2.79	16.01	1.19	2.86	65.08
8	30.92	4.12	20.65	0.92	1.63	38.65
9	30.00	5.16	23.46	0.81	1.30	23.29

弹性微球在多孔介质中运移时,若粒径匹配系数为较佳值(1.43),虽然此时弹性微球的平均粒径大于岩心的平均孔喉直径,但由于弹性微球具有良好的粘弹性和弹性变形特性,在地层压力梯度作用下,仍可依靠弹性变形通过孔喉,然后继续运移至岩心深部区域,从而产生有效的深部封堵,提高封堵效率,表现在注入弹性微球溶液过程中,注入压力呈现波动式上升的变化规律(图1);若粒径匹配系数过大,则只有较小粒径的弹性微球进入岩心,较大粒径的弹性微球无法正常进入岩心,表现在注入弹性微球溶液过程中,注入压力急剧上升(图1),且大量的弹性微球在注入端及注入管线中聚集;若粒径匹配系数过小时,各种粒径的弹性微球均可以正常进入岩心,且在岩心中能够顺利运移,不能对岩心中的孔喉进行有效封堵,表现在注入弹性微球溶液过程中,注入压力上升缓慢,后续注水时,注入

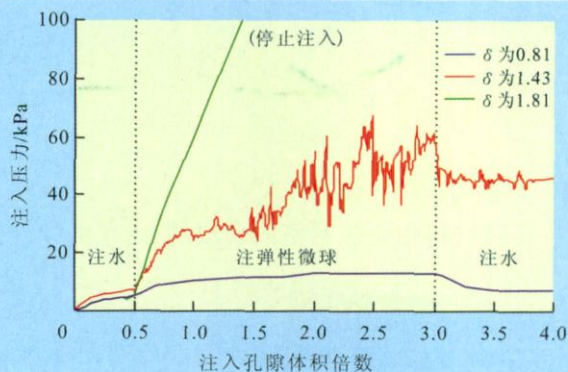


图1 不同粒径匹配系数下注入压力的变化

压力接近于一次水驱结束时的压力(图1)。上述现象说明弹性微球调驱剂只有与储层岩石的孔喉尺寸相匹配时,才能发挥最佳的调驱效果,若将封堵率大于80%作为调驱措施的要求,则粒径匹配系数为1.4~1.5。实验结果进一步表明,在应用弹性微球进行实际调驱处理时,为了取得最佳的调驱效果,需要根据油藏岩石的孔喉分布特征,选择与之匹配的弹性微球。

2.2 非均质条件下弹性微球封堵性能

2.2.1 选择性封堵性能

由图2可以看出,当粒径匹配系数为1.5时,随着弹性微球溶液的注入,高渗透管分流率逐渐降低,低渗透管分流率逐渐增加,当注入1倍孔隙体积时,高、低渗透管的分流率均趋于50%的理想状态,表明弹性微球可以有效地改善介质的非均质性;在后续注水过程中,高、低渗透管的分流率仍保持在50%左右,说明弹性微球封堵后岩心具有较强的耐冲刷能力;后续注水结束后,测试高、低渗透管的渗透率均为 $0.7 \mu\text{m}^2$ 左右,说明弹性微球可选择性地优先进入高渗透管,并对其产生有效封堵,从而显著地降低高渗透管的渗透率。原因在于,弹性微球与高渗透管岩心的粒径匹配系数为1.5时,大量弹性微球可以顺利地进入高渗透管,而只有极少量粒径较小的弹性微球进入低渗透管。此结果进一步验证了粒径匹配关系对弹性微球深部调驱性能的重要性。

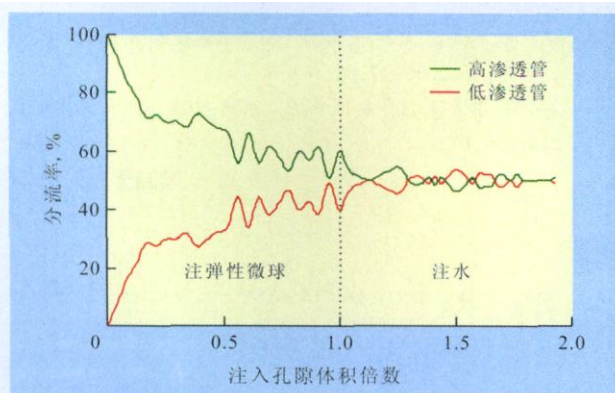


图2 粒径匹配系数为1.5时高、低渗透管分流率变化

2.2.2 改善剖面能力

由渗透率级差对弹性微球改善剖面能力的影响(图3)可以看出,当粒径匹配系数为1.4~1.5时,随着渗透率级差的增大,弹性微球的改善剖面能力逐渐降低。原因在于,随着渗透率级差增大,即低渗透管岩心的渗透率逐渐降低,弹性微球并不能无限地对高渗透管岩心进行封堵,致使高渗透管的分

流率仍然较高,低渗透管的分流率变化不明显。实验结果表明,渗透率级差对弹性微球深部调驱性能具有重要的影响,在应用弹性微球进行实际深部调驱处理时,为了取得最佳的调驱效果,需要根据油藏的非均质情况,制定合理的施工方案。

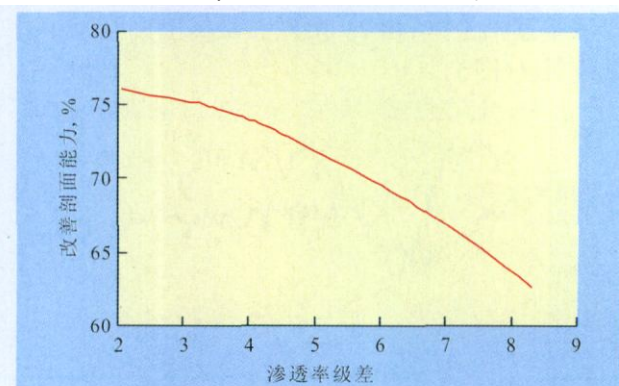


图3 渗透率级差对弹性微球改善剖面能力的影响

3 弹性微球调驱现场试验

在室内实验研究的基础上,2008年2月在冀东油田L1井组开展了弹性微球深部调驱现场试验。调驱目的层为高含油层65小层和高吸水层67小层,根据岩心测试资料分析,67小层的平均孔喉直径为 $23.0 \mu\text{m}$,67小层和65小层的渗透率级差约为3.1,弹性微球的平均粒径为 $35 \mu\text{m}$,注入弹性微球溶液质量浓度为 2000 mg/L ,总注入时间为50 d。

矿场试验结果表明,调驱后注水井L1井的井口压力逐渐升高至 3.7 MPa ,67小层的吸水量明显降低,65小层的吸水量大幅上升,调驱目的层的吸水剖面得到明显改善,58~63小层的吸水量也得到了改善,但幅度较小(图4)。原因在于注入的弹性微球与高渗透层67小层的粒径匹配系数为1.52,调驱目的层渗透率级差为3.1,弹性微球可对吸水剖面进行有效控制,67小层和65小层的剖面改善能力高达

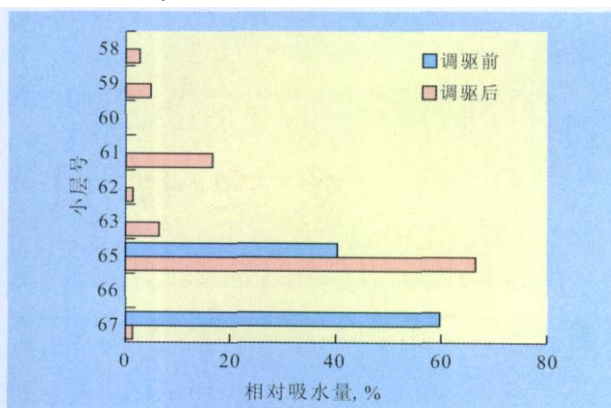


图4 注水井L1井弹性微球调驱前后吸水剖面变化

98%,而由于58、63和66小层与高渗透层67小层的渗透率级差高达8.0以上,弹性微球对这些层位吸水剖面控制程度有限,因此吸水量变化幅度较小。对应受效油井L1-1井的含水率逐渐下降,由55%左右最低下降至26%,产量递减趋势得到遏制,产油量逐渐上升,由23 t/d左右最高上升至38 t/d,见效明显(图5)。

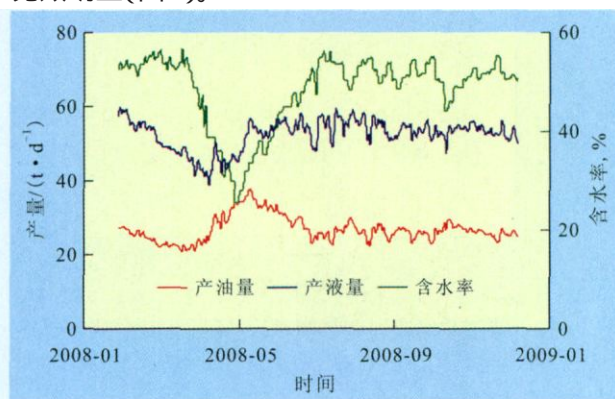


图5 受效油井L1-1井调驱前后产出曲线变化

4 结论

弹性微球只有与储层岩石的孔喉尺寸相匹配时,才能发挥最佳的深部调驱效果;在应用弹性微球进行实际调驱处理时,为了取得最佳的调驱效果,需要根据油藏岩石的孔喉分布特征,选择与之匹配的弹性微球。

在粒径匹配关系较好时,弹性微球注入不同渗透率岩心时的选择性较强。在合注分采模式下,大量弹性微球可选择性优先进入并封堵高渗透层,显著降低高渗透层的渗透率,而只有极少量粒径较小的弹性微球进入低渗透层,对低渗透层渗透率的影

响力较小。

在粒径匹配关系较好时,渗透率级差对弹性微球深部调驱性能具有重要的影响,在应用弹性微球进行实际调驱处理时,为了取得最佳的调驱效果,需要根据油藏的非均质情况,制定合理的施工方案。

现场试验结果表明,在较佳的粒径匹配系数范围和渗透率级差条件下,可成功实现对调剖目的层吸水剖面的有效改善,提高原油产量;同时,试验结果验证了运用粒径匹配系数和渗透率级差考察弹性微球调驱性能进而指导现场试验的科学性。

参考文献:

- [1] 刘承杰,安俞蓉. 聚合物微球深部调剖技术研究及矿场实践[J]. 钻采工艺, 2010, 33(5): 62-64.
- [2] 雷光伦. 孔喉尺度弹性微球深部调驱新技术[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011: 1-10.
- [3] 陈家军, 杨建, 田亮. 基于孔隙网络模型的非水相液体运移实验研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(10): 997-1004.
- [4] 戴彩丽, 赵娟, 姜汉桥, 等. 低渗透砂岩油藏注入阴阳离子聚合物深部调剖技术研究[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 440-444.
- [5] 雷光伦, 李文忠, 贾晓飞, 等. 孔喉尺度弹性微球调驱影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 41-43.
- [6] 孙焕泉, 王涛, 肖建洪, 等. 新型聚合物微球逐级深部调剖技术[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 77-79.
- [7] 贾晓飞, 雷光伦, 李会荣, 等. 孔喉尺度聚合物弹性微球膨胀性能研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 87-90.
- [8] 马光辉, 苏志国. 高分子微球材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 30-50.
- [9] 陈泉水, 罗太安, 刘晓东. 高分子材料试验技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 17-66.
- [10] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 94-102.

编辑 刘北羿

欢迎订阅 欢迎投稿

degree, 3 levels of single well's residual oil potential have been divided after polymer flooding, which can be classified as high, medium and low. According to planar distribution of residual oil geological reserves, 2 enrichment areas after polymer flooding, which are mainly located in prime sand body and weak well pattern controlling parts, are pointed out as well. The research process and results can provide certain methodological and theoretical references on the forecasting of residual oil and the rational adjustment and potential tapping after polymer flooding.

Key words: post-polymer flooding; residual oil; distribution law; area splitting and superposition; recovery degree

Wang Zhengbo, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China

Yao Chuanjin, Lei Guanglun, Gao Xuemei et al. Study on indepth profile control and flooding of pore-scale elastic microspheres under heterogeneous condition. *PGRE*, 2012, 19(5): 61–64.

Abstract: Due to the particularity of design principle for pore-scale elastic microspheres profile control and flooding technology, the particle-pore size matching factor was introduced and through heterogeneous parallel sandpack experiments, the plugging property of elastic microspheres under different particle-pore size matching relationship and the effect of permeability ratio on the ability of profile improvement were studied. Based on this, field test of pore-scale elastic microspheres under heterogeneous condition was carried out. Indoor experimental results show that in a better particle-pore size matching factor range, the residual resistance factor and plugging rate of sandpacks are the maximum as well as plugging effect; elastic microspheres can prefer to plug high permeability layer selectively so as to make the diversion rate of high and low permeability tube all tend to 50%, which indicates that elastic microspheres have significant selectivity on permeability; permeability ratio has an important effect on profile control and flooding performance of elastic microspheres and under condition of better particle-pore size matching factor range and lower permeability ratio, the profile improvement of elastic microspheres is better. Field test results show that when the particle-pore size matching factor is 1.52 and the permeability ratio is 3.1, the elastic microspheres can control the water injection profile effectively and the profile improvement ability of target layer 65 and 67 is up to 98%; it is scientific to guide the field test of elastic microspheres profile control and flooding using particle-pore size matching factor and permeability ratio.

Key words: heterogeneous; elastic microspheres; particle-pore size matching factor; sealing property; permeability ratio; field test

Yao Chuanjin, School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266555, China

Yang Shuai, Dai Caili, Zhang Jian et al. Influence of polymer residue property on EOR after polymer injection for offshore oilfield. *PGRE*, 2012, 19(5): 65–68.

Abstract: As the hydrophobically associating polymer in Bohai Suizhong 36–1 reservoir has the character of high degree of hydrolysis and low intrinsic viscosity, laboratory has carried out the residual-recycled experiments to investigate the sealing characteristics with the changes in degree of hydrolysis and intrinsic viscosity. Residual resistance factor and recovery appreciation are determined by the physical simulation method, to study the effect of formation sealing performance and recovery evaluation by the change of polymer degree of hydrolysis and intrinsic viscosity. The results of laboratory experiments indicate that the sealing characteristics of the inter-acted production which originates from the reaction of residual polymer with high degree of hydrolysis and low intrinsic viscosity and recycled agent is much better than the single polymer with the residual resistance factor reaching more than 20, which lowers the intrinsic viscosity, that is, the higher the degree of hydrolysis, the better the sealing performance. The enhanced oil recovery experiments also indicate that the method can improve the recovery by 9.4%. The result of visualized simulation experiment also validates the viewpoint.

Key words: residual polymer; intrinsic viscosity; degree of hydrolysis; reutilization; enhance oil recovery

Yang Shuai, School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266555, China

Li Caifeng, Guo Liaoyuan, Cao Gongze et al. Research and field application of activator formulas to endogenous microorganism, Gudao Zhongyi Ng3 block. *PGRE*, 2012, 19(5): 69–71.

Abstract: The activation of Zhongyi Ng3 of Gudao after polymer flooding by means of different activator formulas is studied herein. Screening results reveal that the optimal composition of the activator formula is as follows (g/L): glucose 4, peptone 0.4, yeast extract 0.2, NH_4NO_3 0.4, $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$ 0.2. The detailed results show that, at 65 °C and 10 MPa the endogenous microorganism can be activated evidently to 1.48×10^9 cfu/mL via the activator formula consisted of glucose and yeast extract powder. Simultaneously, the concentration of acetic acid is increased distinctly about 600 mg/L and the surface tension of water is reduced to 33.2 mN/m. Physical simulation experiment shows that the endogenous microorganism can enhance the oil recovery by 6.4 percent with the activator formula. Field test shows that the amount of this activator formula to Zhongyi Ng3 block is 405 t by the end of June 2011, and the cumulative oil yield increases by 1.0×10^4 t.

Key words: endogenous microorganism; stimulation agent; physical simulation; nutrient system; Gudao oilfield

Li Caifeng, Shengli Oilfield Oil Production Technology Research Institute, Dongying City, Shandong Province, 257000, China

Luo Qiang, Wu Yongfeng, Li Dongwen et al. Steam stimulation with air by low-temperature oxidation at presence of additives. *PGRE*, 2012, 19(5): 72–74.

Abstract: The objective of this study is to investigate parameters for low-temperature oxidation of heavy oil on the volume fraction of