

文章编号: 0253-2697(2010)06-1024-03

# 非牛顿稠油包水乳状液的剪切稀释性

王 玮<sup>1,2</sup> 宫 敬<sup>1</sup> 李晓平<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学城市油气输配技术北京市重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油天然气管道局博士后科研工作站 河北廊坊 065000)

**摘要:** 以现场稠油和矿化水为工质,制备了多组不同微观液滴分布的 W/O 型乳状液,结合显微镜观察及测量分析,获得了对稠油包水乳状液微观液滴分布及非牛顿性的定量分析。结果表明,随微观液滴直径的减小,乳状液体系将具有更高的表观黏度,并表现出更强的剪切稀释性;结合颗粒雷诺数( $\eta_r-N_{Re,p}$ 关系),能够很好的表征剪切率及微观液滴分布对稠油包水乳状液剪切稀释性的共同影响。

**关键词:** 稠油包水乳状液;非牛顿性;微观液滴分布;颗粒雷诺数;剪切稀释性

中图分类号: TE863

文献标识码: A

## Shear thinning behaviors of non-Newtonian water-in-heavy-oil emulsions

WANG Wei<sup>1,2</sup> GONG Jing<sup>1</sup> LI Xiaoping<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Postdoctoral Research Center, China Petroleum Pipeline Bureau, Langfang 065000, China)

**Abstract:** Various water-in-oil emulsions with different droplet size distributions were prepared at different mixing speeds and phase fractions by using heavy crude oil and mineral water directly from an oilfield. Integrated with the observation and measurement of liquid droplets under microscope, their distributions in water-in-oil emulsions and the corresponding non-Newtonian behaviors were statistically analyzed. The Particle Reynolds number ( $N_{Re,p}$ ) was combined and further investigations were carried out on the relative viscosity ( $\eta_r$ ) of non-Newtonian emulsions. The results indicated that the emulsion system would have a higher apparent viscosity with the decrease in diameters of liquid droplets and show stronger shear thinning behaviors. Integration of the relation between the relative viscosity and the Particle Reynolds number ( $\eta_r-N_{Re,p}$ ) would well represent the co-effect of the shear rate and the droplet size distribution on shear thinning behaviors of water-in-heavy-oil emulsions involved in this study.

**Key words:** water-in-heavy-oil emulsion; non-Newtonian; droplet size distribution; Particle Reynolds number; shear thinning behavior

原油/水乳状液在石油工业中广泛存在,由于原油中通常含有界面活性物质,如胶质、沥青质、环烷酸等,在实际生产中一般会与水形成稳定的油水乳状液。而中国的石油资源中较大比例为高黏稠油,当这些稠油与水形成油包水乳状液后,其表观黏度将显著增大,且呈现出较强的非牛顿特性,这些都将增加集输的难度。

迄今为止,已有很多学者对油水乳状液的非牛顿特性开展了研究<sup>[1-11]</sup>,并将影响油水乳状液剪切稀释性的主要因素归结为分散相含量和剪切率的共同影响<sup>[1-2,5-7]</sup>。随着研究的继续深入,分散相微观液滴分布的影响受到不断的关注<sup>[12-14]</sup>,但结合微观液滴分布开展对稠油-水乳状液非牛顿性的研究仍不多见。为此,笔者以稠油包水乳状液为研究对象,研究剪切率及微观液滴分布对其剪切稀释性的共同影响,以期油田开采及集输工艺提供理论依据。

## 1 实验方法及测量

制备稠油包水乳状液的实验介质稠油及水,来自国内某稠油油田,经电脱水后得到单相稠油及矿化水的物性见表 1。该稠油中沥青质和胶质的质量含量为 22.89%,其他组分,如饱和烃、芳香烃、非烃含量依次为 25.46%、35.95%和 15.70%。采用的加热装置为 HAAKE 公司的 HAAKE C 水浴加热器,用于乳化的搅拌装置为 IKA 公司的数显可控 RW20 搅拌机,并使用 HAAKE VT550 黏度仪测量稠油包水乳状液的表观黏度。

表 1 单相稠油、矿化水物性

Table 1 Properties of heavy crude oil and mineral water

温度/°C	油相黏度/ (mPa·s)	油相密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	矿化水黏度/ (mPa·s)	矿化水密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
50	475.12	954.16	0.89	928.18
60	267.21	949.36	0.75	892.06
70	149.53	944.18	0.56	867.00

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05026-004)和中国石油科技创新基金(2010D-5006-0604)联合资助。

作者简介: 王 玮,男,1982 年 5 月生,2009 年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油天然气管道局在站博士后,主要从事油气水多相混输技术的研究。E-mail: w. wang@cup.edu.cn

制备乳状液时,先将稠油、矿化水在恒温水浴中加热到 50 ℃,然后将油水按比例混合并继续恒温 20 min,再用搅拌器在不同的转速下搅拌 20 min,即可得到具有不同分散程度的稠油包水乳状液体系。实验过程中,对稠油包水乳状液液滴直径及分布规律的测量,主要是通过 KONKYO 公司生产的配有 Anymico DSS™ 数码相机的 CN15-T 型三目生物显微镜,对乳状液油样拍照并结合后期图像处理分析获得<sup>[11]</sup>。

## 2 分散相微观液滴分布

分别以 600 r/min、1 000 r/min 的转速制备了多组 W/O 型乳状液,体积含水率为 40%~60%。图 1 为 50% 含水率时,显微镜拍摄的转速为 600 r/min、1 000 r/min 制备乳状液的液滴分布照片。从图 1 可以看出,在相同的含水率时 1 000 r/min 制备转速下,所形成乳状液的液滴直径更小、分散程度更均匀。

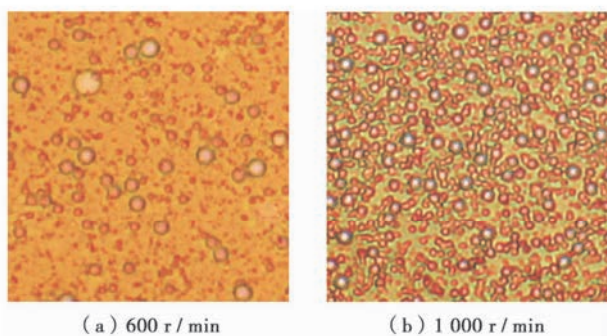


图 1 不同转速制备乳状液的显微图像

Fig. 1 Microscope image of the prepared water-in-heavy crude oil emulsion

图 2 给出了含水率为 50% 时,600 r/min 和 1 000 r/min 制备乳状液液滴直径的分布百分含量和累积百分含量。如图 2(a) 所示,600 r/min 制备乳状液含有直径为 1~3 μm 的液滴数量明显少于 1 000 r/min 制备乳状液;而其所含直径大于 3 μm 的液滴数量又明显多于后者。图 2(b) 更充分展示了两者的差异,在小于 2 μm 的直径范围内,600 r/min 制备乳状液含有该尺寸液滴占其液滴总数的 14%,而 1 000 r/min 制备乳状液含有该尺寸液滴的比例为 27%;在小于 3 μm 的直径范围内,前者含有该尺寸液滴 56%,而后者已达 83%。

结合不同的搅拌转速获得了不同微观液滴分布的乳状液体系,用于进一步开展乳状液的非牛顿性分析。然而,由于分散相的微观液滴分布并不均匀,而是呈现如图 2(a) 所示的正态分布,因此需要选择合适的平均液滴直径形式来表征整个乳状液体系内的液滴分布规律。特选取沙德平均液滴直径  $d_{32}$ , 计算式为

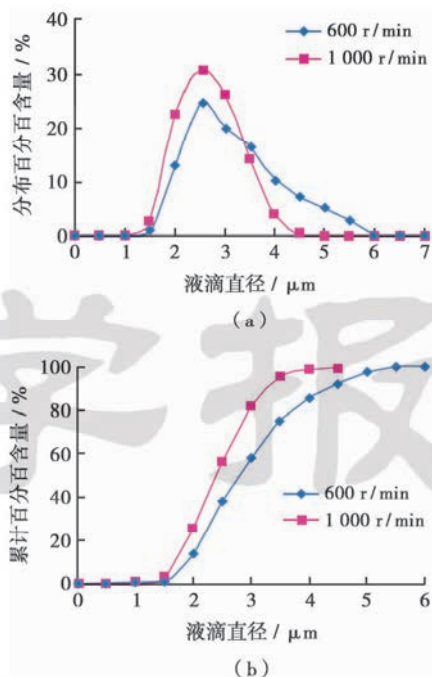


图 2 以不同转速制备乳状液的液滴分布规律

Fig. 2 Dropsize distribution of the prepared water-in-heavy crude oil emulsion

$$d_{32} = \frac{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d^3 (dN/dd) dd}{\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d^2 (dN/dd) dd} = \frac{\sum_{i=d_{\min}}^{d_{\max}} n_i d_i^3}{\sum_{i=d_{\min}}^{d_{\max}} n_i d_i^2} \quad (1)$$

## 3 结果与分析

图 3(a) 和图 3(c) 给出了 50% 和 60% 含水率时,乳状液相对黏度随剪切率变化的规律 ( $\eta_r - \dot{\gamma}$ ), 可见不同微观液滴分布的乳状液均呈现出剪切稀释的非牛顿特性。图 4 进一步分析了微观液滴分布对乳状液剪切稀释性的影响。由图 4 可知: 当剪切率从  $10 \text{ s}^{-1}$  升高到  $70 \text{ s}^{-1}$  后, 随分散相微观液滴直径的减小, 乳状液相对黏度 (相对黏度  $\eta_r$  为乳状液黏度与连续相黏度  $\eta_c$  之比) 分别降低了 2.1、4.0 和 5.2 ( $\Delta\eta_r$ ), 即相对黏度降低的趋势逐渐增强。这表明分散相液滴直径较小的乳状液体系, 具有更强的剪切稀释性。

这是因为随着分散相微观液滴平均直径的降低, 乳状液体系中液滴与液滴间的距离也随之减小, 缩短的间距将带来液滴间范德华力的增加, 从而使得液滴间的絮凝作用显著增强, 并最终表现出体系表观黏度的升高和剪切稀释性的加剧。然而, 乳状液的上述剪切稀释性之间似乎没有相互的联系。

结合颗粒雷诺数获得了液滴分布及剪切率对稠油包水乳状液剪切稀释性的共同影响规律为

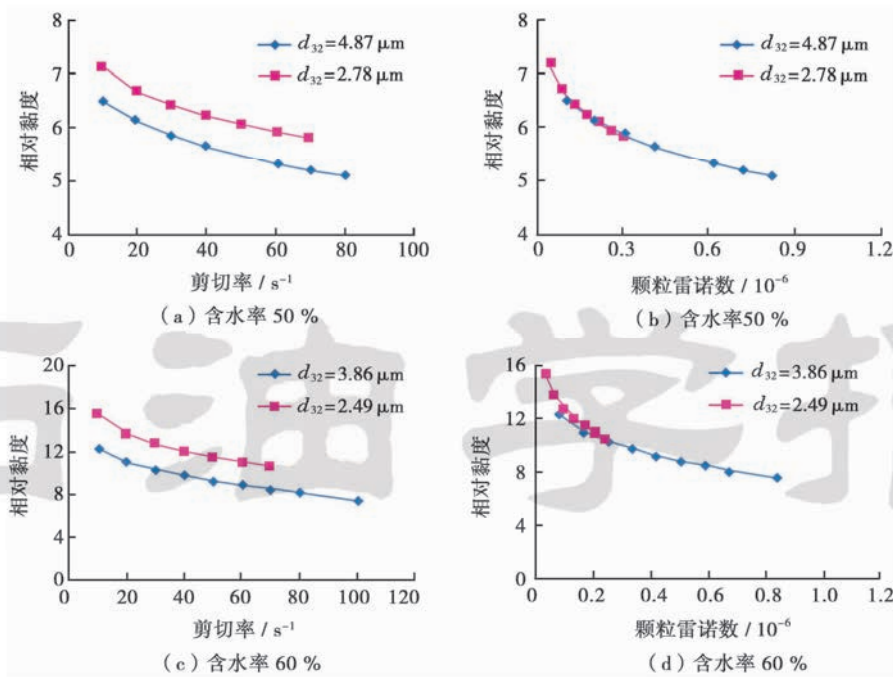


图3 不同微观液滴分布乳状液的剪切稀释性

Fig. 3 Shear thinning behavior of water-in-heavy crude oil emulsions with different droplet size distribution

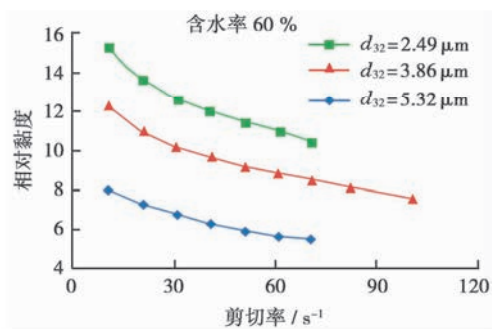


图4 不同分散相微观液滴分布乳状液的相对黏度

Fig. 4 Relative viscosities of the water-in-heavy crude oil emulsion with different shear rate

$$N_{Re,p} = \rho_c \dot{\gamma} d_{32}^3 / 4\eta_c \quad (2)$$

如图3(b)和图3(d)所示。可以看出,不同微观液滴分布乳状液的  $\eta_r - N_{Re,p}$  关系重合为一条曲线,从而表现出彼此一致的剪切稀释性。

从颗粒雷诺数  $N_{Re,p}$  所涵盖的两个关键参数剪切率  $\dot{\gamma}$  与微观液滴分布  $d_{32}$  来分析:当微观液滴分布  $d_{32}$  恒定时,即对同一乳状液体系,随着剪切率  $\dot{\gamma}$  的增大 ( $N_{Re,p}$  随之增大),微观液滴所受惯性力逐渐增大,体系内液滴间的微观团簇结构<sup>[14-15]</sup> 将在惯性力的作用下进一步破坏,从而宏观表征出乳状液黏度的降低及非牛顿性的减弱;反之,当外界施加的剪切  $\dot{\gamma}$  恒定时,对不同微观液滴分布的同种乳状液体系,随着微观液滴直径  $d_{32}$  的增大,体系内液滴间的微观絮凝作用<sup>[14-15]</sup> 随之减弱,由此降低了微观液滴所受黏滞力,

从而再次改善乳状液体系的流动性。综上所述,颗粒雷诺数具有表征非牛顿乳状液剪切稀释性的物理意义,能够很好的表征剪切率及微观液滴分布对稠油包水乳状液剪切稀释性的共同影响。

## 4 结论

(1) 结合显微镜微观测量,获得了对稠油包水乳状液微观液滴分布特征的定量分析,由此肯定:随微观液滴平均直径的减小,乳状液将具有更高的表现黏度,并表现出更强的剪切稀释性。

(2) 结合颗粒雷诺数,分析了微观液滴分布及剪切率对稠油包水乳状液非牛顿性的影响。结果表明,  $\eta_r - N_{Re,p}$  关系能够很好的表征两者对乳状液剪切稀释性的共同影响。

## 参考文献

- [1] Pal R, Rhodes E. A novel viscosity correlation for non-Newtonian concentrated emulsions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1985, 107(2): 301-307.
- [2] Lee H M, Lee J W, Park O O. Rheology and dynamics of water-in-oil emulsions under steady and dynamic shear flow[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1997, 185(2): 297-305.
- [3] 蔡继勇, 陈昕宽, 罗毓珊. 垂直上升管内油水乳状液流动特性的研究[J]. 石油学报, 1998, 19(4): 94-98.  
Cai Jiyong, Chen Tingkuan, Luo Yushan. Petroleum engineering experimental investigation on flow characteristics of oil water emulsion in upward vertical tube[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(4): 94-98.

(下转第 1030 页)