

不同类型表面活性剂对纳米 SiO₂ 流体粘度的影响

宋汝彤^{a,b} 郭立娟^{a,c} 郭拥军^{a,b,d*} 冯茹森^{a,b} 张新民^{a,d} 胡俊^d 李华兵^d

(^a西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 成都 610500;

^b西南石油大学化学化工学院 成都 610500; ^c阿美远东(北京)商业服务有限公司 北京 100000;

^d四川光亚聚合物化工有限公司 成都 610500)

摘要 系统地研究了不同类型的表面活性剂对低浓度纳米 SiO₂ 流体粘度的影响规律,并在此基础上深入探讨了不同碳链长度的阳离子和非离子表面活性剂对纳米 SiO₂ 流体粘度的影响。结果表明,阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)对纳米流体粘度的影响较小,其相对粘度值维持在 1.23 左右;而阳离子表面活性剂十四烷基三甲基溴化铵(TTAB)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、十八烷基三甲基溴化铵(OTAB)、十六烷基氯化吡啶(CPC)、非离子表面活性剂 OP-8、OP-10 和两性离子表面活性剂 DXS14、DXS18 对纳米流体粘度的变化影响较大,其最大相对粘度值分别能达到 3.42、1.82 和 8.87。同时也发现,阳离子表面活性剂碳链越长,纳米流体最高粘度值越大,且纳米流体最高粘度所对应的表面活性剂浓度均在其临界胶束浓度值附近。

关键词 纳米流体,表面活性剂,粘度,吸附

中图分类号:O648.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0518(2014)09-1083-06

DOI:10.3724/SP.J.1095.2014.30623

纳米流体是指将 1~100 nm 的固体颗粒分散到水、油、醇等分散介质中,经过一定的机械搅拌或超声分散所形成的均匀、稳定的悬浮液。这一概念首先是由美国 Argonne 国家实验室的 Choi 等^[1]首次提出,其作为一种化工流体工作液,在传热^[2]、太阳能^[3]和油气开采^[4]等领域已取得了广泛应用。

在纳米流体中,粘度是其重要参数之一。要研究纳米流体在化学工程和地层中的传热性能、流动特性以及在油气开采中的应用,必须精确地测量纳米流体的粘度。未添加分散剂的纳米流体的粘度主要是由颗粒之间或者颗粒与基液之间的相互作用而引起,同时纳米流体的粘度与颗粒浓度、大小、分散剂类型以及基液性能等均有一定关系^[5]。Li 等^[6]采用毛细管粘度计法研究了 Cu/水纳米流体的粘度与温度和纳米粒子的关系,其研究发现纳米流体粘度受温度的影响更大,粘度跟温度呈反比,跟纳米粒子的浓度成正比。Zhao 等^[7]利用乌氏粘度计法研究了纳米 SiO₂ 流体的粘度与纳米颗粒粒径和溶液 pH 值的关系,得出随着纳米颗粒粒径的减小,粘度的变化更加依赖于纳米颗粒体积分数的大小,同时也发现,当纳米颗粒粒径小于 20 nm 时,纳米流体的粘度受 pH 值的变化影响更大。Patrice 等^[8]研究了剪切历史效应对碳纳米管纳米流体粘度的影响,发现该纳米流体在低剪切速率下表现为粘弹性流体,但在高剪切速率下具有剪切稀释作用。Gaganpreet^[9]和 Jeong^[10]同时从另一角度研究了纳米流体粘度的影响因素,即纳米颗粒形状(不同纵横比)对纳米流体粘度的影响,得出具有较高纵横比的纳米颗粒对纳米流体的粘度贡献更大。Jamshidi 等^[11]在前人的基础上研究了纳米 SiO₂/不同分散介质(乙二醇、绝缘油和水)构成的纳米流体的粘度随颗粒体积分数和温度的变化情况,发现 3 种不同分散介质下的纳米流体均随体系温度的升高和纳米颗粒体积分数的降低,纳米流体的粘度减小。

大多数科学家对纳米流体粘度的研究主要集中在不同颗粒体积分数、温度和 pH 值等的情况下,本文通过将纳米 SiO₂ 分别分散在阳离子表面活性剂十四烷基三甲基溴化铵(TTAB)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、十八烷基三甲基溴化铵(OTAB)、十六烷基氯化吡啶(CPC)、阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、非离子表面活性剂 OP-8、OP-10 和两性离子表面活性剂 DXS14、DXS18 溶液中制备纳

米流体,从低浓度(质量分数 2.5%) 纳米 SiO_2 流体体系出发,研究不同表面活性剂对纳米 SiO_2 流体粘度的影响,并就不同类型表面活性剂和同一类型不同碳链长度的表面活性剂与纳米 SiO_2 颗粒之间的相互作用对纳米流体粘度的影响机理进行了探讨与分析。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

纳米 SiO_2 (亲水性、粒径 20 nm、比表面积 $(250 \pm 50) \text{ m}^2/\text{g}$ 、密度 $2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、纯度 $\geq 99\%$), 辽宁大学; 阳离子表面活性剂: 十四烷基三甲基溴化铵 (TTAB, 临界胶束浓度 (cmc) 值 $2.52 \text{ mmol}/\text{L}$)、十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB, cmc 值 $1.37 \text{ mmol}/\text{L}$)、十八烷基三甲基溴化铵 (OTAB, cmc 值 $0.75 \text{ mmol}/\text{L}$) 等均为分析纯, 成都科龙化学试剂厂; 十六烷基氯化吡啶 (CPC, cmc 值 $1.92 \text{ mmol}/\text{L}$), 纯度 $> 98\%$, 瑞士科莱恩化工; 阴离子表面活性剂: 十二烷基苯磺酸钠 (SDBS, cmc 值 $1.68 \text{ mmol}/\text{L}$) 分析纯, 成都科龙化学试剂厂; 非离子表面活性剂: OP-8 (cmc 值 $5.25 \times 10^{-2} \text{ mmol}/\text{L}$)、OP-10 (cmc 值 $6.19 \times 10^{-2} \text{ mmol}/\text{L}$) 均为分析纯试剂, 成都科龙化学试剂厂; 两性离子表面活性剂: 磺酸盐型两性离子表面活性剂 DXS14、DXS18 (碳链长分别为 14 和 18, cmc 值分别为 2.59 和 $0.78 \text{ mmol}/\text{L}$, 实验室自制); 超纯水 (电阻率为 $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)。

乌氏毛细管粘度计 ($D = 0.55 \text{ mm}$, $L = 72 \text{ cm}$, 上海申立玻璃仪器有限公司); EC215 型电导仪 (上海精密仪器仪表有限公司); 76-1 型玻璃恒温水浴, HJ-4A 型数显恒温多头磁力搅拌器 (金坛市科兴仪器厂); KQ-250DB 型超声波清洗机 ($250 \text{ W}/40 \text{ KHz}$, 巩义市予华仪器有限责任公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 纳米 SiO_2 /表面活性剂纳米流体的制备 纳米流体的制备方法有两种^[11-12]: 一步法和两步法。一步法是指制备纳米颗粒的同时将纳米颗粒分散到基液中, 即纳米颗粒和纳米流体的制备同时完成。两步法是指先制备纳米颗粒, 再将纳米颗粒按一定比例分散在基液中制备纳米流体, 该方法具有制作工艺简单, 成本较低, 几乎适用于所有纳米流体的制备, 因此本文采用两步法制备纳米 SiO_2 /表面活性剂纳米流体。其具体步骤为将预先制备的纳米 SiO_2 颗粒分散在超纯水中, 搅拌 0.5 h ($400 \text{ r}/\text{min}$) 后再超声分散 1 h ; 然后将表面活性剂配制成高浓度溶液, 留置待用; 最后将纳米 SiO_2 悬浮液与表面活性剂溶液按一定比例复配, 配制成目标浓度, 磁力搅拌 0.5 h ($400 \text{ r}/\text{min}$), 样品溶液在测试之前均要再重新搅拌 1 h 。

1.2.2 纳米流体相对粘度的测试 首先用毛细管粘度计对超纯水的流出时间进行标定, 误差精度在 0.2% 以内, 用恒温水浴进行控温 $45 \text{ }^\circ\text{C}$, 将其流出时间作为参比值。再对不同的纳米流体进行测量流出时间, 除以参比值, 得到纳米流体体系的相对粘度。重复测量直至重复性较好时为止, 再计算得出平均值。

1.2.3 表面活性剂 cmc 值的测定 在恒温 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 用电导仪测定配制好的不同浓度的离子型表面活性剂溶液的电导率, 再用电导率值对离子型表面活性剂浓度作图, 从曲线中找出转折点对应的浓度即为各离子型表面活性剂的 cmc 值, 用吊环法测非离子表面活性剂 OP-8、OP-10 的表面张力, 用表面张力值对非离子表面活性剂浓度作图, 曲线中的转折点即为非离子的 cmc 值。本实验所用表面活性剂在 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 下所测的 cmc 值见 1.1 节。

2 结果与讨论

2.1 纳米 SiO_2 质量分数对纳米流体粘度的影响

本实验所用纳米 SiO_2 性质如 1.1 节所述, 由于纳米 SiO_2 表面具有较多裸露的羟基, 所以呈亲水特性, 因此在溶液中颗粒表面带负电荷。图 1 为纳米流体的相对粘度与纳米 SiO_2 浓度的关系曲线图。从图 1 可以看出, 纳米流体的相对粘度先随纳米 SiO_2 浓度的增加缓慢增加, 达到一定浓度后 (质量分数 4% 左右) 急剧增加。可以认为, 悬浮液中悬浮颗粒的浓度小于质量分数 4% 时为低浓度悬浮液, 根据

Einstein 假设^[13], 当为低浓度悬浮液时, 悬浮颗粒之间的相互作用可以忽略不计, 悬浮液的粘度是所有悬浮颗粒对整个流体剪切力场的总贡献。但是当悬浮颗粒浓度较高时, 颗粒之间间距大大减小, 颗粒之间引力迅速增强, 对悬浮液粘度的贡献也较大, 所以计算较高浓度悬浮液粘度时, 悬浮颗粒之间的相互作用则不可忽视。

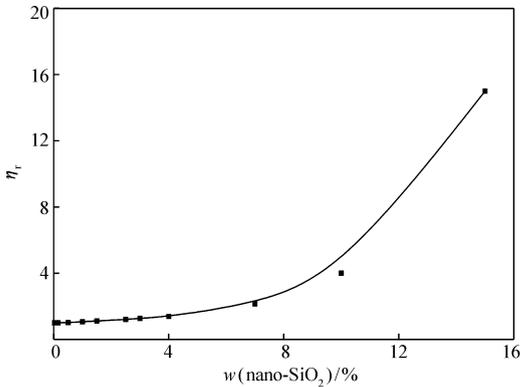


图 1 纳米流体的相对粘度-SiO₂ 浓度曲线

Fig. 1 The relative viscosity of nanofluids vs the silica concentration

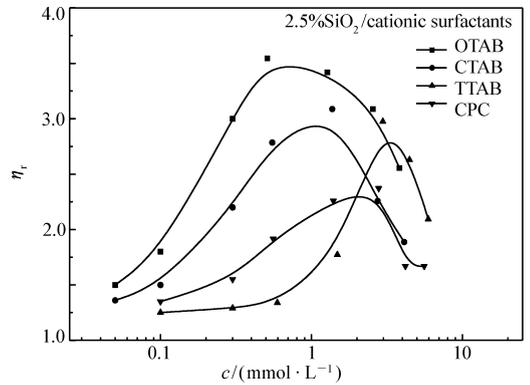


图 2 纳米流体粘度与阳离子表面活性剂浓度关系

Fig. 2 The relative viscosity of nanofluids vs the cationic surfactant concentration

2.2 阳离子表面活性剂对纳米 SiO₂ 流体粘度的影响

为了研究阳离子表面活性剂对纳米 SiO₂ 流体粘度的影响, 本文将纳米流体中的纳米 SiO₂ 浓度固定为质量分数 2.5%, 通过 2.1 节的研究证明, 在纳米 SiO₂ 浓度 < 质量分数 4% 时, 颗粒之间的相互作用可以忽略, 因此, 在低浓度悬浮颗粒下研究表面活性剂对纳米流体粘度的影响可以得出更加明显的比较结果。从图 2 可以看出, 纳米流体中随着阳离子表面活性剂浓度的增加, 所有纳米流体的相对粘度均先缓慢增加, 然后急剧增大, 达到最高点后又急剧降低。同时也发现, 随着阳离子表面活性剂碳链长度的增加, 达到最高粘度时的表面活性剂浓度依次降低, 但相对粘度的最高值则随碳链增长而依次增大, 而且其达到最高粘度时的表面活性剂浓度基本上与该表面活性剂的 cmc 值相同。通过比较相同碳链长度不同离子基头的表面活性剂 CTAB 和 CPC 对纳米流体粘度的影响可知, 其影响规律相同, 但 CPC 体系的纳米流体相对粘度最高值较低, 而且达到相对粘度最高值时的表面活性剂浓度较高, 说明在表面活性剂碳链长度相同时, 不同的离子基头对纳米流体的相对粘度也具有一定影响。

对以上实验现象的解释认为, 在低阳离子表面活性剂浓度下, 纳米流体中纳米颗粒由于吸附阳离子表面活性剂后其表面负电荷会被部分中和, 颗粒之间的静电斥力减弱, 颗粒间发生团聚, 进而增加了纳米流体的粘度, 随着阳离子表面活性剂浓度的进一步增加, 本文中当达到其 cmc 值附近时, 表面活性剂在颗粒表面的吸附达到饱和, 颗粒表面电荷被完全中和, 纳米颗粒之间的静电斥力降到最低, 并通过表面活性剂疏水链的疏水吸附桥连而导致絮凝现象最严重, 纳米流体粘度值最高, 进一步增大表面活性剂浓度时, 由于表面活性剂疏水碳链之间的相互作用, 生成电中性的纳米颗粒表面开始吸附第二层表面活性剂, 其带电阳离子基头伸入水相使纳米颗粒重新带电, 不过是与其所带原始电荷相反的电荷, 但其对纳米流体的分散和粘度的影响具有相同的作用, 即随着颗粒表面所带电荷的增加, 颗粒之间静电斥力越来越大, 纳米流体分散性越来越好, 粘度也随之变小。但是, 为什么同一类型不同碳链长度的表面活性剂对纳米流体粘度最高值的影响随碳链长度增加表面活性剂浓度依次降低, 且相对粘度最高值随碳链增长而依次增大呢? 这是因为这几种同类型表面活性剂的 cmc 值也是随着表面活性剂碳链长度的增加而依次降低的, 且碳链越长, 吸附表面活性剂后的纳米颗粒之间的桥接作用越强, 形成的絮凝体尺寸越大, 进而纳米流体粘度越高^[14]。

2.3 阴离子表面活性剂对纳米 SiO₂ 流体粘度的影响

阴离子表面活性剂 SDBS 对纳米 SiO₂ 流体粘度的影响如图 3 所示。从图 3 可以发现, 随着 SDBS 浓

度的增加,纳米流体的相对粘度先有很小幅度的下降,后又随 SDBS 浓度的增加而缓慢增加。本实验结果与 Wang 等^[15]所研究结果相似,此现象可以用表面活性剂离子竞争吸附来解释^[16],表面活性剂 SDBS 极性基头周围易形成水化层,在表面活性剂浓度较低时,溶液中的 Na^+ 会少量吸附在颗粒表面,由于受范德华力的影响,电离的 SDBS 会取代 Na^+ 而竞争吸附在纳米颗粒表面,从而使纳米颗粒表面电荷绝对值更大,斥力增大,纳米流体粘度降低,随着颗粒表面吸附的表面活性剂越来越多,表面活性剂疏水碳链之间通过疏水缔合作用在一起,因而纳米流体粘度随之增大,但以上两种因素对纳米颗粒表面电荷的影响均较小,所以,总体来看,阴离子表面活性剂对纳米流体粘度的影响较小。

2.4 非离子表面活性剂对纳米 SiO_2 流体粘度的影响

由图 4 可知,非离子表面活性剂对纳米 SiO_2 流体相对粘度的影响在低非离子表面活性剂浓度下,纳米流体的相对粘度随表面活性剂浓度的增加基本无变化,当表面活性剂浓度增大到一定浓度时,纳米流体的相对粘度开始随表面活性剂浓度的增加缓慢增加,达到最高值后又缓慢下降,这种变化规律是因为非离子型的表面活性剂在水中不发生电离,由于亲水性使得其周围存在一层较厚的水化膜,空间位阻效应比较明显^[16]。在低浓度区,其空间位阻效应较弱,所以对纳米流体粘度的影响不大。然后随着表面活性剂浓度的增加,纳米颗粒表面开始被越来越多的非离子表面活性剂所包裹,空间位阻效应越来越强,加上表面活性剂碳链之间的疏水缔合作用共同导致纳米颗粒间架桥而絮凝,因而其粘度增大,这也是为什么疏水链相对较长的 OP-10 体系增粘幅度更大的缘故;进一步增大表面活性剂浓度,纳米颗粒表面逐渐为亲水的表面胶团所覆盖,颗粒之间的絮凝和团聚重新被抑制,因此,纳米流体的粘度又逐渐降低^[17]。

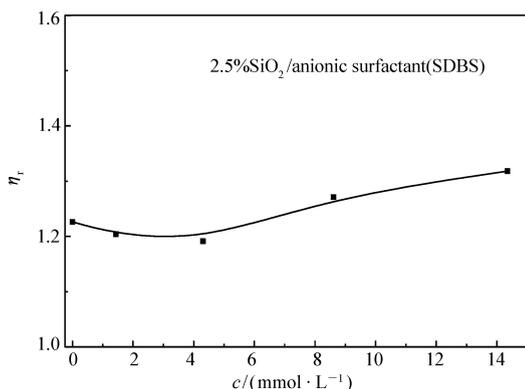


图 3 纳米流体粘度与阴离子表面活性剂 SDBS 浓度关系

Fig. 3 The relative viscosity of nanofluids vs the anionic surfactant(SDBS) concentration

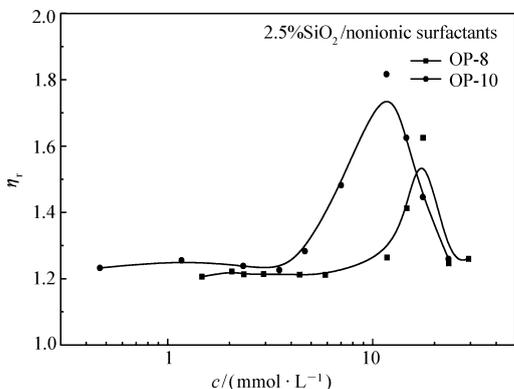


图 4 纳米流体粘度与非离子表面活性剂浓度关系
Fig. 4 The relative viscosity of nanofluids vs the nonionic surfactant concentration

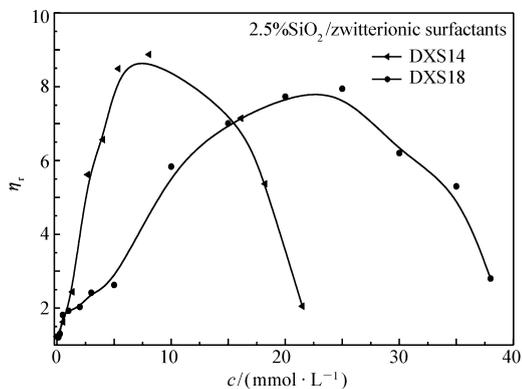


图 5 纳米流体粘度与两性离子表面活性剂浓度关系
Fig. 5 The relative viscosity of nanofluids vs zwitterionic surfactant concentration

2.5 两性离子表面活性剂对纳米 SiO_2 流体粘度的影响

疏水链长为 14 和 18 的磺酸盐型两性离子表面活性剂对纳米 SiO_2 流体相对粘度的影响如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着两性离子表面活性剂浓度的增加,纳米流体相对粘度先急剧增大,达到最高点后,又逐渐降低。由于两性离子表面活性剂在纳米 SiO_2 颗粒表面发生吸附,但由于其同时带正负电荷,因此吸附对纳米颗粒表面电荷性质影响不大,所以纳米流体相对粘度的增加是由于纳米颗粒吸附的表面活性剂疏水链朝向水中,并与其它纳米颗粒吸附的表面活性剂的疏水链发生缔合,使纳米颗粒在溶

液中形成连续的缔合结构,因而粘度急剧增大,但是当表面活性剂浓度进一步增大时,表面活性剂在纳米颗粒表面形成双层吸附,亲水端朝向水中,从而拆散了颗粒间通过疏水缔合形成的结构,因而粘度下降。

3 结 论

在低纳米 SiO₂ 浓度下,阳离子表面活性剂对纳米流体粘度的影响规律是随表面活性剂浓度的增加,纳米流体的粘度先增加,达到最高值后又下降,并得出在表面活性剂 cmc 值附近时纳米流体粘度值最高,且不同碳链长度和离子基头的表面活性剂对纳米流体粘度也具有一定的影响。通过对比研究阴、阳、非和两性离子表面活性剂对低浓度纳米 SiO₂ 流体粘度的影响得出,阴离子表面活性剂 SDBS 对纳米流体粘度的影响较小,而阳离子、非离子和两性离子表面活性剂对纳米流体粘度的影响较大。通过对不同碳链长度的阳离子和非离子表面活性剂的研究得出,碳链越长的表面活性剂对纳米流体最高粘度值的贡献越大,且所使用表面活性剂的浓度越低。

参 考 文 献

- [1] Choi S U S, Eastman J A. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles[J]. *ASME FED*, 1995, **231**(66): 99-103.
- [2] Xuan Y, Li Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids[J]. *Int J Heat Fluid Flow*, 2000, **21**(1): 58-64.
- [3] Mahian O, Kianifar A, Kalogirou S A, et al. A Review of the Applications of Nanofluids in Solar Energy[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, **57**(2): 582-594.
- [4] Hendraningrat L, Li S, Tors ter O. A Coreflood Investigation of Nanofluid Enhanced Oil Recovery[J]. *J Petrol Sci Eng*, 2013, **111**: 128-138.
- [5] Li J, Li Z, Wang B. Experimental Viscosity Measurements for Copper Oxide Nanoparticle Suspensions[J]. *Tsinghua Sci Technol*, 2002, **7**(2): 198-201.
- [6] Li X, Zhu D, Wang X. Experimental Investigation on Viscosity of Cu-H₂O Nanofluids[J]. *J Wuhan Univ Technol: Mater Sci Ed*, 2009, **24**(1): 48-52.
- [7] Zhao J F, Luo Z Y, Ni M J, et al. Dependence of Nanofluid Viscosity on Particle Size and pH Value[J]. *Chinese Phys Lett*, 2009, **26**(6): 066202.
- [8] Estelle P, Halelfadl S, Doner N, et al. Shear History Effect on the Viscosity of Carbon Nanotubes Water-based Nanofluid[J]. *Curr Nanosci*, 2013, **9**(2): 225-230.
- [9] Srivastava S. Influence of Particle Shape on Viscosity of Nanofluids: Proceedings of the AIP Conference Proceedings[C]. Indian Inst Technol, India, 2013, **1512**: 984.
- [10] Jeong J, Li C, Kwon Y, et al. Particle Shape Effect on the Viscosity and Thermal Conductivity of ZnO Nanofluids[J]. *Int J Refrig*, 2013, **36**(8): 2233-2241.
- [11] Jamshidi N, Farhadi M, Ganji D, et al. Experimental Investigation on Viscosity of Nanofluids[J]. *Int J Eng*, 2012, **25**(3): 201-209.
- [12] ZHU Dongsheng, LI Xinfang, WANG Xianju, et al. Study on Preparation and Dispersion Behavior of Al₂O₃-H₂O Nanofluids[J]. *New Chem Mater*, 2007, **35**(9): 45-47 (in Chinese).
朱冬生, 李新芳, 王先菊, 等. 氧化铝-水纳米流体的制备及其分散性研究[J]. *化工新型材料*, 2007, **35**(9): 45-47.
- [13] Einstein A. Eine Neue Bestimmung der Molek Idimensionen[J]. *Annalen der Physik*, 1906, **324**(2): 289-306.
- [14] LI Ling. Surfactants and Nanotechnology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 161-162 (in Chinese).
李玲. 表面活性剂与纳米技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 161-162.
- [15] Wang X J, Wang Z F, Li Z Z. Experimental Investigation on Viscosity of Nanofluids[J]. *Ad Mater Res*, 2013, **650**: 134-138.
- [16] BAO Chucai, LI Chao, PI Zhenbang. Effect of Surfactants on the Stability of CdSSe-H₂O Nanofluids[J]. *Chem Eng Equip*, 2012, (7): 32-36 (in Chinese).
包楚才, 李超, 皮振邦. 表面活性剂对 CdSSe-H₂O 纳米流体稳定性影响[J]. *化学工程与装备*, 2012, (7): 32-36.
- [17] QIAN Jiangang, WU Jinping, GU Tiren. The Mechanism of Adsorption of Nonionic Surfactants on CAB-O-SIL and the Effects of Surface Micellization on the Stability of Silica Suspension[J]. *Chem J Chinese Univ*, 1996, **17**(6): 933-938 (in Chinese).
钱建刚, 吴锦屏, 顾惕人. 非离子表面活性剂的吸附机理和表面胶团化对二氧化硅悬浮液稳定性的影响[J]. *高等学校化学学报*, 1996, **17**(6): 933-938.

Effect of Surfactants on the Viscosity of Nano-SiO₂ Fluids

SONG Rutong^{a,b}, GUO Lijuan^{a,c}, GUO Yongjun^{a,b,d*}, FENG Rusen^{a,b},
ZHANG Xinmin^{a,d}, HU Jun^d, LI Huabing^d

(^aState Key Laboratory of Geology and Production Engineering of Oil-gas Reservoir,
Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

^bSchool of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

^cAramco Far East (Beijing) Business Services Company Limited, Beijing 100000, China;

^dSichuan Guangya Polymer Chemical Company Limited, Chengdu 610500, China)

Abstract The effect of surfactants on the viscosity of low concentration nano-SiO₂ fluids was studied. Specifically, we studied the effect of different carbon chain lengths of cationic and nonionic surfactants for the nano-SiO₂ fluids viscosity. The results show that the anionic surfactant of sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) has a slight effect on the viscosity of nanofluids, it's relative viscosity value maintaining of about 1.23; while the cationic surfactants of tetradecyl trimethyl ammonium bromide (TTAB), cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB), octadecyl trimethyl ammonium bromide (OTAB), cetyl chloride pyridinium (CPC), nonionic surfactants of OP-8, OP-10, zwitterionic surfactants of DXS14, DXS18 have a greater influence on the viscosity, and it's maximum relative viscosity values can reach 3.42, 1.82 and 8.87, respectively, have a greater influence on the viscosity. At the same time, we found that the longer carbon chain in cationic surfactants, the greater the viscosity of nanofluids. The highest viscosity of nanofluids is obtained at the concentration of the surfactants near the critical micelle concentration value.

Keywords nanofluid, surfactant, viscosity, adsorption