

## 双子表面活性剂对海上S油田稠油降粘性能评价

王大威<sup>1,2</sup>, 张健<sup>1,2</sup>, 吕鑫<sup>1,2</sup>, 何春百<sup>1,2</sup>, 李强<sup>1,2</sup>, 谭业邦<sup>3</sup>

(1.海洋石油高效开发国家重点实验室,北京 100027; 2.中海油研究总院,北京 100027; 3.山东大学化学与化工学院,山东 济南 250100)

**摘要:**针对海上S油田地层中胶质和沥青质含量高、稠油粘度大和水驱采收率低的问题,采用双子表面活性剂RB107对S油田稠油进行降粘实验,评价其乳化浓度、聚集形态、界面活性、润湿性和稳定性等,在此基础上通过物理模拟驱油实验考察其驱油性能。结果显示:在油藏条件下,当质量分数为0.3%、油水体积比为50:50时,可使稠油粘度降低97%,使油水界面张力降至0.165 6 mN/m,说明双子表面活性剂RB107在较低浓度下具有较强降粘性能和界面活性;乳化速度为0.24 mL/min,油水乳状液油珠分散均匀且直径小,说明RB107具有较快的乳化速度和较强的稳定性;RB107溶液与原油基底的接触角为10.8°,说明对油水界面具有较强的润湿性;其可在水驱的基础上提高采收率10.1%,说明RB107对S油田稠油具有良好的降粘效果,可作为S油田稠油的降粘剂。

**关键词:**稠油 双子表面活性剂 乳状液 乳化降粘 采收率 海上S油田

中图分类号:TE357.432

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)04-0109-05

## Evaluation of Gemini surfactant for viscosity reduction of heavy oil in offshore S oilfield

Wang Dawei<sup>1,2</sup>, Zhang Jian<sup>1,2</sup>, Lü Xin<sup>1,2</sup>, He Chunbai<sup>1,2</sup>, Li Qiang<sup>1,2</sup>, Tan Yebang<sup>3</sup>

(1.State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing City, 100027, China; 2.CNOOC Research Institute, Beijing City, 100027, China; 3.School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University, Jinan City, Shandong Province, 250100, China)

**Abstract:** Viscosity reduction experiments of new Gemini surfactant RB107 was done to solve the problems of high content of colloid and asphaltenes in formations, high viscosity of heavy oil and low recovery efficiency of water flooding in offshore S oilfield. Emulsion concentration, aggregation morphology, interfacial activity, wettability, stability and other properties of the surfactant were evaluated and its oil displacement performance was investigated through physical simulation experiment. When mass fraction is 0.3% and oil-water volume ratio is 50:50, the viscosity of the heavy oil may be decreased by 97% and oil-water interfacial tension may be dropped to 0.165 6 mN/m under the condition of oil reservoir. The results show that RB107 has strong performance of viscosity reduction and interfacial activity under low concentration. RB107 also has fast emulsification speed (0.24 mL/min) and strong stability with uniformly dispersed oil-water emulsion droplets of small diameter. Contact angle of RB107 solution was 10.8° on oil base, which shows that RB107 has a strong wettability on the oil-water interface. Compared with water flooding results, physical simulation results of RB107 could enhance the oil recovery by 10.1%. RB107 could be the viscosity breaker of the heavy oil in S oilfield for its good viscosity reduction effect.

**Key words:** heavy oil; Gemini surfactant; emulsion; viscosity reduction by emulsifying; recovery efficiency; offshore oilfield

海上S油田是在低幅构造背景上发育的受岩性、构造双重因素控制的构造-岩性油气藏,水体能

量较弱,纵向上流体性质差异大。其明化镇组I原油组原油具有粘度高、胶质和沥青质含量高的特点,

收稿日期:2015-05-19。

作者简介:王大威(1978—),男,黑龙江密山人,工程师,博士,从事三次采油技术研究。联系电话:(010)84526275, E-mail:wangdw3@cnoc.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“海上稠油化学驱油技术”(2011ZX05024-004)。

稠油储量占总储量的77.7%,因此,对S油田稠油的合理高效开发意义重大。目前常用的稠油降粘方法<sup>[1]</sup>有:掺稀降粘、加热降粘、改质降粘及乳化降粘。其中研究和应用最多的是乳化降粘法<sup>[2-4]</sup>,选择合适的乳化降粘剂是该方法的技术关键<sup>[5-8]</sup>。根据作用机理可将影响稠油降粘的因素分为化学因素和物理因素。化学因素主要包括原油、水和乳化剂等乳化体系,物理因素主要指油水体积比、温度、混合方式、矿化度和pH值等外界因素<sup>[9-10]</sup>。

双子表面活性剂是带有2条疏水链、2个亲水基团和1个联接基团的特殊结构的表面活性剂。特殊的结构决定了其独特性质:极高的表面活性,较低的临界胶束浓度,良好的泡沫稳定性、润湿和增溶能力。与传统表面活性剂相比,其临界胶束浓度一般低2~3个数量级<sup>[11]</sup>。为此,笔者系统研究了双子表面活性剂RB107对海上S油田稠油的降粘性能,评价其在岩心中的驱油效果,分析该表面活性剂的降粘作用机理,以期为其在现场的应用提供技术支持。

## 1 实验器材与方法

### 1.1 实验器材

**实验仪器** 实验仪器主要包括:BrookfieldDV-II+P型旋转粘度计,TX500C型旋转滴界面张力仪,ZeissAxioskop40型光学显微镜,TURBISCAN型全能稳定性分析仪,DSA100型光学接触角测定仪。

**实验材料** 实验用降粘剂为双子表面活性剂RB107,实验用破乳剂为TLPE6927,实验用保护段塞为质量浓度为1750 mg/L、粘度为79.7 mPa·s的两亲聚合物ICGN。实验用水为S油田总矿化度为5680.89 mg/L、pH值为8.23的水源井水。实验用油为S油田稠油,20℃原油密度为0.967 g/cm<sup>3</sup>,沥青质含量为2.18%,胶质含量为17.64%,地层原油粘度为440 mPa·s。物理模拟驱油实验采用3层非均质岩心,长度和宽度分别为30和4.5 cm,每层高度均为1.5 cm,高、中、低渗透层的渗透率分别为 $4.635 \times 10^{-3}$ 、 $2.761 \times 10^{-3}$ 和 $1.458 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

### 1.2 实验方法

**性能评价方法** 评价实验步骤包括:①RB107溶液配制。采用水源井水配制质量分数分别为0.05%,0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%,0.75%和1%的RB107溶液。②乳液粘度及最小乳化浓度测定。按照体积比为1:1的比例,将8种质量分数的RB107溶液分别与稠油混合(简称为RB107乳化体

系)后,置于多点搅拌板上,在50℃下搅拌3 min,在50℃下测定乳化体系的粘度,并确定最小乳化浓度。③乳化速度测定。按照体积比为1:1的比例,在恒温玻璃量筒中依次分别加入不同质量分数的RB107溶液与稠油,并记录初始界面处刻度;预热10 min后,以一定速度搅拌一定时间后停止并静置30 s,读取此时的油水界面处刻度,计算乳化速度。④接触角测定。将稠油均匀地涂抹在盖玻片上,水平静置30 min,使其表面平滑,用作基底,用光学接触角测定仪分别测定水源井水、质量分数为0.5%的RB107溶液与原油基底的接触角。⑤乳状体系形貌观察。将稠油与质量分数为0.75%的RB107溶液按油水体积比为1:1混合,利用光学显微镜对乳化体系的形貌进行原位观察。⑥乳化体系类型确定。将稠油与质量分数为0.75%的RB107溶液按油水体积比为1:1混合,取1滴原油乳状液滴到不含表面活性剂的冷水中,观察乳状液在冷水中的分散情况,如果液滴分散,则乳状液为水包油型,否则为油包水型。⑦乳化体系稳定性测定。将质量分数为0.75%和1%的RB107溶液分别按照油水体积比为50:50,60:40和70:30的比例与稠油混合,采用全能稳定性分析仪测定乳化体系的稳定性,获得稳定性动力学指数,其值越小说明样品变化越小,乳液越稳定。⑧乳化体系破乳效果。将质量分数为0.5% RB107溶液与原油按照油水体积比为7:3的比例混匀,脱水温度为50℃,再将质量分数为0.01%的破乳剂与乳化体系混合观察破乳效果。

**物理模拟驱油实验方法** 实验步骤主要包括:

①将岩心烘干后称干重,岩心抽真空,饱和地层水,称湿重,确定各层岩心的孔隙体积;②将饱和水后的岩心放入岩心夹持器中,加围压置于47℃(油藏温度)的恒温箱中,饱和油;③以1 mL/min注入速度进行水驱,水驱至出口含水率大于95%为止,确定水驱残余油饱和度和水驱采收率;④保持注入速度不变,关闭出口端,向岩心内注入质量分数为0.75%的RB107溶液,焖5 h后打开出口端,后续水驱至不出油后,记录出油量,计算最终采收率。由于RB107溶液粘度较低,注入前若不进行调剖,易造成主剂的窜流,因此设置不同的段塞组合,考察不同段塞组合对采收率的影响。前置段塞和后置段塞均采用两亲聚合物ICGN。共设计了4种段塞组合,段塞组合1和2均设置前后段塞保护主段塞,前后段塞注入量均为0.06倍孔隙体积,主段塞注入量分别为0.24和0.3倍孔隙体积;段塞组合3和4均只设置前置段塞,不采用后置段塞保护主段塞,前置段塞注

入量分别为0.12和0.06倍孔隙体积,主段塞注入量均为0.3倍孔隙体积。

## 2 实验结果分析

### 2.1 乳化能力评价结果

**降粘性能和最小乳化浓度** 从图1中可以看出:当质量分数大于0.2%时,乳化体系粘度大幅降低;当质量分数为0.3%时,乳化体系粘度降至13.6 mPa·s,降粘率达97%,降粘率随着RB107质量分数的增加而增大,但增幅变小,因此确定RB107最小乳化浓度为0.3%。RB107在较低浓度下就具有较高的降粘性,说明其比一般表面活性剂具有更好的降粘效果。

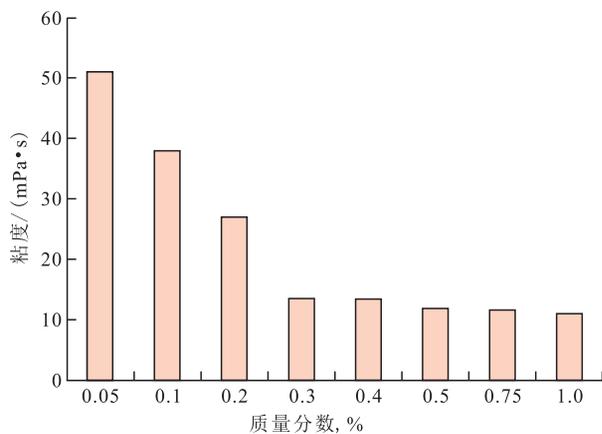


图1 不同质量分数RB107溶液的降粘效果

Fig.1 Viscosity reduction effect of RB107 solution with different mass fractions

**乳化速度** 乳化速度是评价降粘剂性能的重要指标,尚朝辉研究认为,降粘剂的乳化速度与驱油效率相关,乳化速度越快,驱油效率越高<sup>[12]</sup>。实验测定乳化速度为0.24 mL/min,说明降粘剂RB107具有较好的乳化性能和较快的乳化速度。

**乳化体系类型与聚集形态** 稠油乳化体系(主要是水包油型乳状液)的乳化降粘主要采用转相法,即在水包油型乳状液中加入乳化剂,使水包油型乳状液的内外相反转,形成油包水型乳状液,从而改变乳状液性质<sup>[13]</sup>。乳化体系类型测定结果表明,不同质量分数的RB107与原油均可形成油包水型乳状液,说明RB107可改变稠油乳化体系类型,从而降低稠油粘度。质量分数为0.75%的RB107溶液与原油乳化后,体系微分散相的粒径分布较为集中(图2),主要集中在几百纳米,体系由水包油型转化为油包水型,流动性好。

**润湿性** 油水间接触角是表征溶液润湿性的直接参数,接触角越小,溶液越容易润湿表面,对原

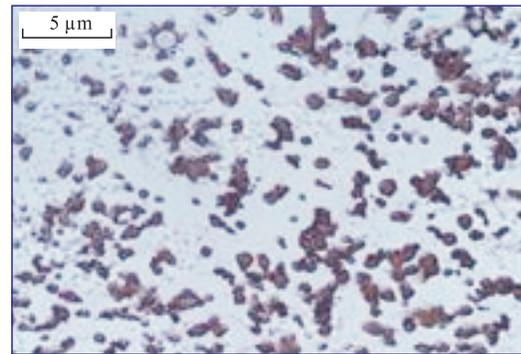


图2 油水比为50:50时0.75%的RB107乳化体系的聚集形态

Fig.2 Gathering form of RB107 emulsion system at 50:50 of oil to water and 0.75% of mass fraction

油的亲和能力越强。润湿性实验结果显示:水源井水和RB107溶液与原油基底的接触角分别为57.5°和10.8°。说明水源井水与原油基底有一定的润湿性,可能是原油含水率和极性组分含量较高所致;RB107溶液与原油基底的接触角远低于水源井水与原油基底的接触角,表明RB107溶液在稠油表面具有良好的铺展作用,疏水基伸入油相,亲水基伸入水相,发生定向吸附,产生了较好的润湿效果。

**界面张力** 界面张力测定结果表明,质量分数为0.75%的RB107溶液与原油的界面张力为0.1656 mN/m,说明在其未复配的情况下可单独将油水界面张力降至 $10^{-1}$  mN/m数量级。这是由于双子表面活性剂具有特殊结构,在较低的浓度下就具有很高的表面活性,使油水界面张力降至超低。

**稳定性** 随着RB107质量分数的增加,RB107乳化体系的稳定性明显增强(图3)。这是因为:①随着RB107质量分数的增加,在界面膜上会有更多的降粘剂粒子,界面膜可以吸附更多的电荷,增加粒子间的电荷斥力,阻止粒子的聚并;②由于界面膜上RB107粒子数目增多,降粘剂分子组成的粒子界面水合层变厚,粒子间距变大,沉降速度降低;③

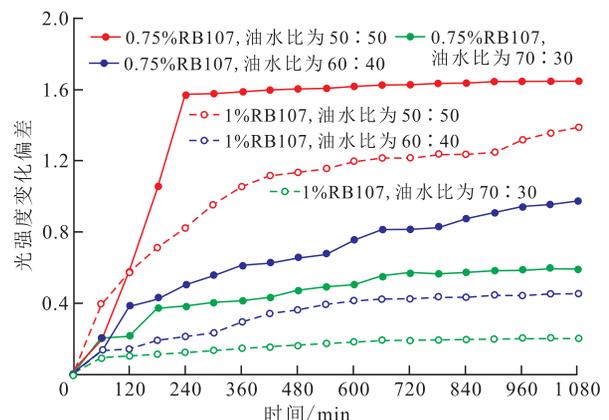


图3 RB107乳化体系的稳定性曲线

Fig.3 Stability curve of RB107 emulsion system

RB107质量分数的增大,还可提高界面膜的完整性和机械强度,使形成的乳化体系液滴变小,液滴大小分布比较均匀,有利于乳化体系的稳定。从图3亦可看出,随着油水体积比的增加,体系的稳定性增加,原因在于稠油粘度较大,可与RB107溶液形成较为稳定的体系。

## 2.2 破乳性能

RB107乳化体系具有较高的稳定性,可能会影响油田采出端的油水处理,须考察其破乳能力。从图4可以看出:未加破乳剂时,乳化体系2h的脱水率为42%;加入破乳剂TLPE6927破乳2h后,脱水率明显提高,达75%,说明目前现场应用的破乳剂TLPE6927对乳化体系具有较好的破乳效果,有利于RB107在现场的应用。

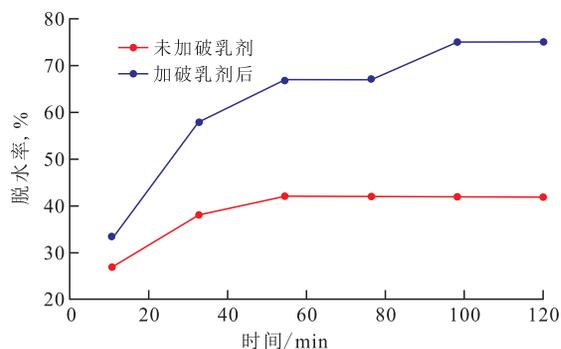


图4 破乳剂对RB107乳化体系的破乳效果

Fig.4 Emulsion breaking effect of RB107 emulsion system

## 2.3 驱油性能

物理模拟驱油实验结果(图5)显示:水驱采收

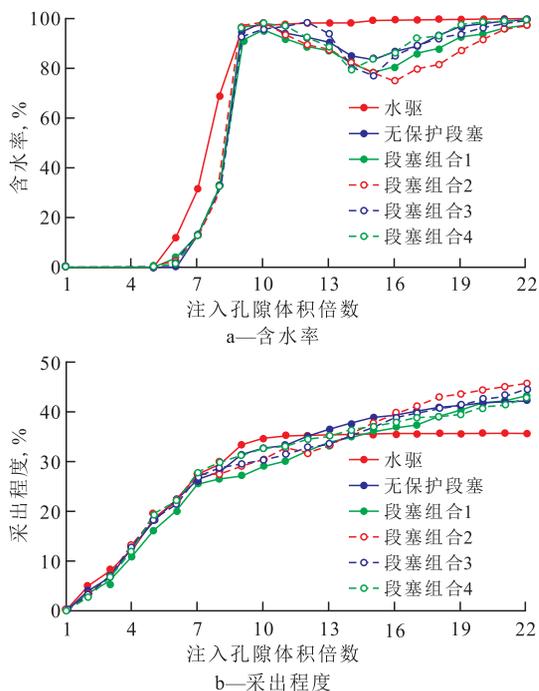


图5 非均质岩心物理模拟驱油实验结果

Fig.5 Physical simulation results of heterogeneous cores

率为35.7%,由于RB107溶液本身粘度较低,注入压力与水驱相近,未加保护段塞、只有主段塞时最终采收率比水驱提高了6.5%;段塞组合1,2,3和4最终采收率比水驱分别提高7.6%,10.1%,8.9%和7.1%,比未加保护段塞时分别提高1.1%,3.5%,2.4%和0.6%;段塞组合2含水率下降较为明显,最低可降至75.0%,且含水率上升速度较慢,段塞组合1与段塞组合3和4含水率下降趋势相近,但其上升速度相比于段塞组合3和4要慢;段塞组合2比组合1主段塞多注了0.06倍孔隙体积,采收率提高了2.5%,说明在保证主段塞一定的条件下,前后均用聚合物段塞进行保护时最终采收率最高,含水率下降漏斗较深。原因在于,未设置后置段塞易造成后续水驱时发生窜流指进,含水率上升较快,影响主段塞作用效果。

## 2.4 降粘机理

RB107能够乳化分散原油,降低原油粘度,提高原油流动性,表面活性剂溶液的界面活性是实现这些功能的基础<sup>[14]</sup>。其驱油机理可归纳为3个方面:①表面活性剂可降低滞留油的毛细压力,与原油具备较低的界面张力,能够使岩石多孔介质中作用于油与水界面的毛细压力降低至足以使滞留油流动, RB107为双子表面活性剂,2个离子头基通过连接基团以化学键连接,相互之间的排斥受制于化学键力而被削弱,碳氢键间容易产生强相互作用,疏水结合力加强,因此RB107在油水界面上排列更加紧密,表面能更低,具有更高的界面活性<sup>[15]</sup>;②表面活性剂能够将岩石孔隙壁表面的润湿性由亲油改变为亲水,从而使粘附的油膜剥落,表面活性剂润湿能力的强弱与连接基团密切相关,双子表面活性剂因其具有2个离子头基,具有较强的润湿性,可使混合体系的润湿时间大幅度降低;③当表面活性剂浓度大于临界胶束浓度时,表面活性剂形成的胶束具有增溶油相的能力,使剩余油与表面活性剂溶液形成油水互溶的混相微乳液,从而使剩余油流动,双子表面活性剂的临界胶束浓度比常规表面活性剂低,在水溶液中更易形成胶束,在较小的浓度下即可达到超低界面张力,增溶性更强,从而有可能以更大幅度提高驱油效率。

## 3 结论

通过一系列室内实验评价了双子表面活性剂RB107降低海上S油田稠油粘度性能,结果表明:①其在较低的浓度下即可对稠油进行乳化,乳化速度

较快,易形成水包油结构,具有较好的界面性能和润湿性,乳化体系分散性和稳定性较好,有利于现场应用;②具有较好的驱油性能,可在水驱基础上提高采收率7.0%~10.0%。考虑到RB107溶液粘度较低,在地层内易造成窜流,在现场应用中建议在降粘剂主段塞前设置调剖段塞,在主段塞后设置保护段塞以减少药剂损失,提高采收率。该表面活性剂可满足在海上S油田井筒降粘、驱替降粘的要求。

#### 参考文献:

- [1] 贾学军.高粘度稠油开采方法的现状与研究进展[J].石油天然气学报,2008,30(2):529-537.  
Jia Xuejun.Present situation and progress of recovery method for high-viscosity heavy oil[J].Journal of Oil and Gas Technology, 2008,30(2):529-537.
- [2] 赵福麟.采油化学[M].东营:石油大学出版社,1989:147-151.  
Zhao Fulin.Oil production chemistry [M].Dongying: Petroleum University Press, 1989:147-151.
- [3] 赵国玺.表面活性剂物理化学[M].北京:北京大学出版社,1984:382-408.  
Zhao Guoxi.Surfactants physical chemistry [M].Beijing: Peking University Press, 1984:382-408.
- [4] 黄敏,李芳田,史足华.稠油降粘剂DJH-1[J].油田化学,2000,17(2):137-139.  
Huang Min, Li Fangtian, Shi Zuhua.Viscosity reducer DJH-1 for use in viscous crude oil production [J].Oilfield Chemistry, 2000, 17(2):137-139.
- [5] 李爱芬,任晓霞,江凯亮,等.表面活性剂改善稠油油藏水驱开发效果实验研究[J].油气地质与采收率,2014,21(2):18-21.  
Li Aifen, Ren Xiaoxia, Jiang Kailiang, et al.Experimental study on influencing factors of injecting surfactant to improve water flooding for heavy oil reservoir-case of Dongxin heavy oil reservoir [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 18-21.
- [6] 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 Peng, Wang Yefei, Zhang Guoping, et al.Study of emulsification effect on oil recovery in surfactant flooding[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014,21(1):99-102.
- [7] 张凤英,李建波,诸林,等.稠油油溶性降粘剂研究进展[J].特种油气藏,2006,13(6):1-3.  
Zhang Fengying, Li Jianbo, Zhu Lin, et al.Advances in oil-soluble viscosity reducers for viscous crude oil[J].Special Oil & Gas Reservoirs, 2006,13(6):1-3.
- [8] 张贤松,王海江,唐恩高,等.渤海油区提高采收率技术油藏适应性及聚合物驱可行性研究[J].油气地质与采收率,2009,16(5):56-59.  
Zhang Xiansong, Wang Haijiang, Tang Engao, et al.Research on reservoir potential and polymer flooding feasibility for EOR technology in Bohai offshore oilfield [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009,16(5):56-59.
- [9] 陈玉祥,李刚,肖喜庆,等.TR-01稠油乳化降粘剂研究[J].油气田环境保护,2008,19(1):11-13.  
Chen Yuxiang, Li Gang, Xiao Xiqing, et al.Study on viscosity-reducer TR-01 for viscous crude oil [J].Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2008,19(1):11-13.
- [10] 孙婷,杨伯涵,李昆,等.两性梳形共聚物PASP-Na-g-DDA的合成及接枝率对其水溶液胶束性质的影响[J].高分子学报,2011,10(10):1139-1143.  
Sun Ting, Yang Bohan, Li Kun, et al.Preparation of amphiphilic comb-polymer pasp-Na-g-DDA and effect of grafting level on micellar behavior in water solution [J].Acta Polymerica Sinica, 2011,10(10):1139-1143.
- [11] 谭中良,韩冬,杨普华,李连表面活性剂的性质和三次采油中应用前景[J].油田化学,2003,20(2):187-191.  
Tan Zhongliang, Han Dong, Yang Puhua.The properties and application prospect in enhanced oil recovery of Gemini surfactants[J]. Oilfield Chemistry, 2003,20(2):187-191.
- [12] 尚朝辉.桩西表面活性剂驱油体系的研究与应用[D].东营:中国石油大学(华东),2007.  
Shang Zhaohui.Research and application of surfactant flooding system in Zhuangxi oil production plant[D].Dongying: China University of Petroleum (East China), 2007.
- [13] 孟江,张燕,龙学渊,等.乳化稠油中多重乳滴的形成及对乳状液性质的影响[J].油田化学,2009,26(4):441-445,452.  
Meng Jiang, Zhang Yan, Long Xueyuan, et al.Formation of multiple oil droplets and their impact on aqueous heavy crude oil emulsions[J].Oilfield Chemistry, 2009,26(4):441-445,452.
- [14] 赵玉竹,刘文彬,徐晓慧,等.功能高分子的增粘与乳化性能研究[J].应用化工,2008,37(8):837-840.  
Zhao Yuzhu, Liu Wenbin, Xu Xiaohui, et al.Study on the viscosity effect and emulsification properties of functional polymer [J]. Applied Chemical Industry, 2008,37(8):837-840.
- [15] Zhu Y P, Masuyama A, Kirito Y I, et al.Preparation and properties of glycerol based double or triple-chain surfactants with two hydrophilic ionic groups [J].Journal of America Chemistry Society, 1992,69(7):626-632.

编辑 常迎梅