

改性核/壳型苯丙乳液及油水分离性能

王梓旭, 裴世红*, 赵月

(沈阳化工大学化学工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

摘要:以苯乙烯(St)、丙烯酸丁酯(BA)为单体, 丙烯酸(AA)为功能单体, 乙烯基三异丙氧基硅烷作为改性剂, 过硫酸铵(APS)为引发剂, 合成了一种非聚醚型破乳剂(S-B-A)。最佳工艺条件: 反应温度为 78℃, 复合乳化剂质量分数(占单体总质量)为 4%, $m(\text{St}) : m(\text{BA}) : m(\text{AA}) = 20 : 19 : 6$, 并与常规破乳剂聚酰胺-胺型树枝状高分子(PAMAM)复配。对 2 种不同破乳剂的温度、沉降时间、复配比、亲水亲油平衡点(HLB)、界面张力(IFT)的影响进行了详细研究。结果表明, 脱水率达 96.2% (质量)以上, 满足工业要求。

关键词:非聚醚破乳剂; 聚合物; 复合; 表面活性剂; 界面张力

中图分类号:TE39

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)12-0139-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.12.033

Oil/water separation performance of modified nuclear/shell type styrene-acrylic emulsion

WANG Zi-xu, PEI Shi-hong*, ZHAO Yue

(College of Chemical Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: A non-polyether demulsifier (S-B-A) is synthesized by using styrene (ST) and butyl acrylate (BA) as monomers, acrylic acid (AA) as functional monomer, vinyl tri-isopropoxysilane as modifier, ammonium persulfate as initiator. The optimum synthesis conditions are as follows: the reaction temperature is at 78℃, the mass concentration of compound emulsifier is 4%, $m(\text{ST}) : m(\text{BA}) : m(\text{AA}) = 20 : 19 : 6$. The S-B-A demulsifier is complexed with conventional demulsifier polyamide-amine polymer (PAMAM). The effects of temperature, coagulation time, complex ratio, hydrophilic affinity balance and interfacial tension on two kinds of demulsifiers are studied in detail. By optimizing the operating conditions, the dehydration rate can reach 96.2% (wt.), meeting the industrial requirements.

Key words: non-polyether demulsifier; polymer; compound; surfactant; interfacial tension

化学破乳脱水法是目前很有效的脱水方法, 可单独使用, 也可与其他脱水方法结合使用^[1-2]。从化学类型来看, 目前非离子聚氧乙烯和聚环氧乙烷嵌段聚合物的破乳剂研究受到重视^[3-4]。吴凯凯等^[5]系统研究了破乳剂分支度、分子质量、EO/PO 质量对脱水率的影响, 结果发现较高的支链度及较大的相对分子质量, 脱水效果更好。Alexander 等^[6]使用己二酸延伸 B61 聚醚的链, 引入羧基官能团, 并使用三烯季戊四醇化合物增加支链, 研究了破乳剂结构与界面张力之间的关系。结果表明, 延伸链和增加分支链后, B61 聚醚破乳剂的破乳性能显著提高。Reza Zolfaghari^[7]提出不饱和酸及其衍生物用于制备乳液, 其可用于(W/O)乳液, 并具有理想的破乳作用。随着油田进入石油采收后期, 原油性质越来越复杂, 单独使用的破乳法不能满足脱水的要求。不同功效的破乳剂以一定比例复配, 弥补了适应性差的缺点, 因为不同类型的破乳剂具有协同

作用, 可以提高破乳性能的效果^[8-9]。笔者开发了一种非聚醚破乳剂(S-B-A), 其具有良好的水溶性、高分枝结构和较强的润湿性, 与传统的破乳剂(PAMAM)以一定的质量比复配, 可以得到不同的破乳剂 HLB 值^[10-12], 最终得到优异性能的破乳剂。

1 实验方法

1.1 实验药品

丙烯酸丁酯(BA)、丙烯酸(AA)、苯乙烯(St)(均为 AR)、十二烷基硫酸钠(SDS, CP)、烷基酚聚氧乙烯醚(OP-10, AR)、过硫酸铵(APS, AR), 国药集团化学试剂有限公司生产; 乙烯基三异丙氧基硅烷(AR), 东京化学工业有限公司生产; 稀释原油用水和 PAMAM 破乳剂(52%)由中国辽河油田提供。

1.2 S-B-A 破乳剂的合成

在四口烧瓶中加入定量水、部分复合乳化剂, 搅拌均匀后缓慢加入核层单体, 40℃ 高速搅拌乳

收稿日期: 2017-05-23

作者简介: 王梓旭(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为乳液聚合及油田化学品开发, 574836643@qq.com; 裴世红(1966-), 女, 本科, 副教授, 研究方向为精细化工产品与资源综合利用, 通讯联系人, 286970431@qq.com。

0.5 h, 取出备用。将一定量的水、剩余乳化剂搅拌溶解, 加入适量的预乳化液和引发剂, 升温到 78℃, 待引发聚合后, 滴加核层预乳化液和部分引发剂, 2 h 内滴加完毕, 保温 0.5 h。再将壳层单体与剩余引发剂滴加到四口瓶中, 2 h 滴加完毕后滴加改性有机硅, 保温 0.5 h。降温到 40℃, 氨水中和 pH = 7.5~8。

1.3 破乳剂性能测试

50℃ 条件下将原油预热 60 min。将 100 mL 原油加入到不同比色管中, 将不同剂量的破乳剂加入原油中, 比色管以最大水平振荡速度振荡 3 min。将试管放入恒温水浴, 记录 30、60、90、120 min 内油/水界面的体积和颜色。脱水率计算式为:

$$\text{脱水率} = [(C_0 - C_1) / C_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_0 为原油的初始含水量; C_1 为去除的含水量。

1.4 HLB 和 IFT 测量

利用松节油 (所需 HLB 值为 16) 和棉籽油 (所需 HLB 值为 6) 制备一系列不同 HLB 的油相, 每 15 份油相加入 5 份试验中的破乳剂, 然后加入 80 份水, 搅拌乳化, 稳定性最好的样品所需 HLB 值为破乳剂的 HLB 值。破乳剂的 HLB 的计算式为:

$$HLB = X_A HLB_A + X_B HLB_B \quad (2)$$

式中: X_A 和 X_B 是 A 和 B 的质量分数, ($X_B = 1 - X_A$); HLB_A 和 HLB_B 分别为 2 种不同破乳剂的 HLB 值。

利用标准型界面张力仪 A101 进行 IFT 测量。所有测量均在 (20.0 ± 0.5)℃ 下完成。

2 结果与讨论

2.1 S-B-A 破乳剂的表征

S-B-A 共聚破乳剂的红外光谱如图 1 所示。由图 1 可以看出, 在 1 453、2 958 cm^{-1} 附近观察到 $-\text{CH}_2-$ 、 $-\text{CH}_3$ 的带。在 1 602 cm^{-1} 处出现强峰, 表明存在苯环骨架, 而 3 029 cm^{-1} 归因于苯环中 CH 的拉伸振动吸收。3 300、1 730 cm^{-1} 处的羧基的强带出现为 O-H、C=O 延伸的羧基。在 1 160 cm^{-1} 处是 $-\text{COO}-\text{C}$ 的典型带, 与 Si-C、Si-O

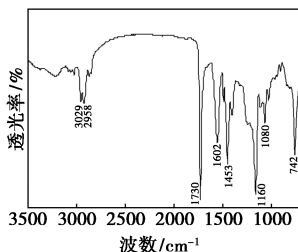
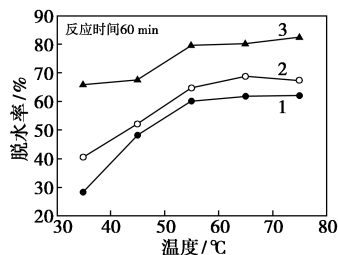


图 1 S-B-A 共聚破乳剂的红外光谱

振动相关的典型条带也可以在约 742 cm^{-1} 和 1 080 cm^{-1} 处发现, 这意味着乙烯基三异丙氧基硅烷参与反应。

2.2 破乳剂性能测试

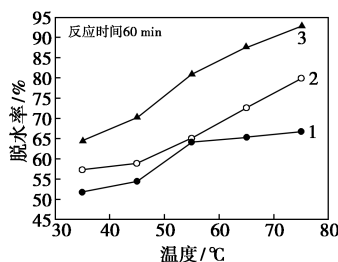
不同质量浓度 PAMAM 破乳剂对原油中脱水率的影响如图 2 所示。即使在 75℃ 高温下, 只通过重力沉降很难有效分离水。为了证明 PAMAM 破乳剂的脱水能力, 使原油乳状液中的破乳剂质量浓度按升序设定为 50、100、150 mg/L。沉降时间维持在 60 min, 温度范围为 35~75℃。显然, 随着温度及破乳剂质量浓度的升高, 脱水率也随之提高, 当温度升至 75℃ 时, 脱水率显著增加, 超过 82.4% 的水从原油中除去。当破乳剂质量浓度为 150 mg/L, 即使温度仅为 35℃, 脱水率也达 65.9%, 显示出 PAMAM 破乳剂在低温下的优异性能。然而, 脱除的水质不清澈, 油/水界面不整齐。实验表明, PAMAM 破乳剂在低温下具有良好的破乳作用, 但油/水界面不整洁, 在脱除水中仍然有油的存在。



1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—150 mg/L

图 2 不同质量浓度 PAMAM 破乳剂对原油中脱水率的影响

为解决以上问题, 合成了另一种不同类型的破乳剂。为了鉴定 S-B-A 破乳剂的破乳性能, 破乳剂的质量浓度控制在 50、100、150 mg/L, 时间保持在 60 min, 温度范围为 35~75℃。S-B-A 破乳剂在不同质量浓度、温度时对脱水率的影响如图 3 所示。由图 3 可以看出, 随着温度的升高, 脱水率相应提



1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—150 mg/L

图 3 S-B-A 破乳剂在不同质量浓度、温度时对脱水率的影响

高,高于同等条件下使用的 PAMAM 破乳剂。温度升高至 75℃,破乳剂质量浓度为 150 mg/L 时,脱水率达到 92.7%,S-B-A 破乳剂不仅具有水溶性,而且具有高度的支链性,引入有机硅增加了破乳剂的适应性,可以快速破坏油/水界面膜^[13]。此外,从破乳剂的脱水情况来看,脱出的水更清澈。但在脱出水中仍有很多油,而且挂壁现象更严重。但按照一定比例将 2 种不同类型的破乳剂复配后可以达到满意效果。

2.3 复配比例和 HLB 对脱水率的影响

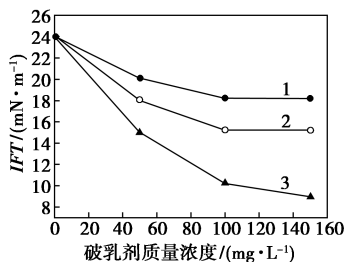
不同复合比例破乳剂的脱水率和 HLB 如表 1 所示。在破乳剂质量浓度为 150 mg/L,反应时间为 60 min,反应温度为 75℃下进行实验。当 S-B-A 与 PAMAM 复配比例为 5:0 时,S-B-A 破乳剂的 HLB 为 13,表明 S-B-A 属于水溶性破乳剂。相反,当复配比例为 0:5 时,PAMAM 破乳剂的 HLB 为 6。然而当复合比为 3:2 时,通过式(2)可知,复合破乳剂的 HLB 为 10.2,脱水率达 99.0%。当 HLB 非常低时,不能真正形成原油界面吸附。相反,破乳剂则具有更强的水溶性^[14-16],太多的破乳剂溶解在水中同样导致失去油/水界面吸附的能力,这两个趋势作用的组合将得到最适合的 HLB,大量的研究表明,最适合的破乳剂 HLB 具有最大的界面吸附和最小的油/水界面张力。

表 1 不同 $m(\text{S-B-A}) : m(\text{PAMAM})$ 的脱水率和 HLB

$m(\text{S-B-A}) : m(\text{PAMAM})$	5:0	4:1	3:2	2:3	1:4	0:5
HLB	13	11.6	10.2	8.8	7.4	6
脱水率/%	91.9	92.8	99.0	98.4	94.6	89.9

2.4 破乳剂用量对油/水界面张力的影响

不同破乳剂质量浓度下破乳性能与其 IFT 之间的相关性如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着破乳剂质量浓度的增加,IFT 降低。当破乳剂质量浓度为 100 mg/L 时,IFT 几乎降至最低。当使用复合破



1—PAMAM 破乳剂;2—S-B-A 破乳剂;
3—复合破乳剂的质量比为 3:2

图 4 IFT 与破乳剂用量之间的相关性

乳剂时,曲线的下降趋势比单一破乳剂更快。最小 IFT 意味着分子可以更快地扩散到油/水界面中,可以形成更薄且更低弹性的膜^[17-19],脱水效率更好。

破乳剂作用下原油乳液的显微照片如图 5 所示。在 75℃下,从反应开始时原油乳状液中存在的大量水滴(平均粒径由 Mastersize 2000 测量出实际上小于 5 μm)到破乳剂渗入乳化液滴的保护层,使保护层破坏,变脆,起皱,最后水滴聚结,尺寸变大,实际上超过 50 μm。90 min 后将乳化水从不同油/水密度的连续相中充分分离。

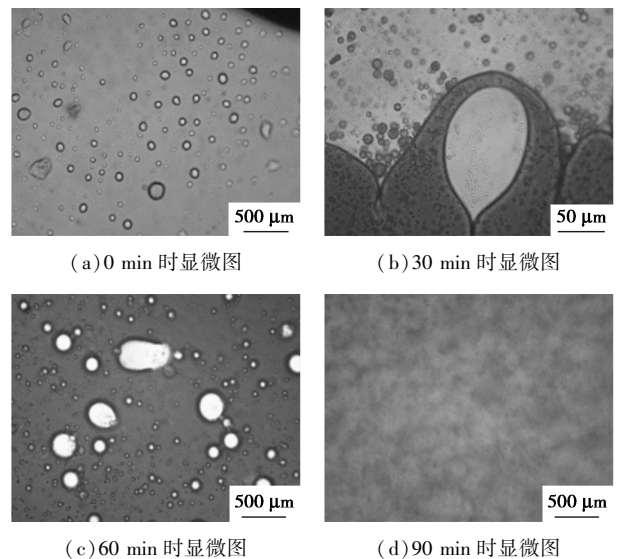
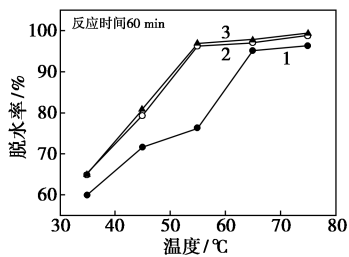


图 5 破乳剂作用下原油乳液的显微照片
(乳化剂质量浓度为 150 mg/L,复合比为 3:2)

2.5 复合破乳剂的性能试验

在与上述相同实验条件下,当破乳剂质量浓度分别为 50、100、150 mg/L,在 35℃下破乳 60 min,脱水率都很高,远远高于在相同条件下的 S-B-A 和 PAMAM 破乳剂。另外,随着不同温度下破乳剂质量浓度的增加,脱水率也逐渐上升,但增幅非常低,特别是在 55℃下,破乳剂质量浓度从 100 mg/L 提高到 150 mg/L 时,脱水率只上升 5%。这是因为较低质量浓度的破乳剂分子被吸附在油水界面上,吸附能力与破乳剂用量成正比,随着破乳剂质量浓度的增加,油/水界面张力迅速下降,脱水率逐渐增加,当破乳剂的质量浓度接近临界胶束浓度(CMC)时^[20-21],界面吸附达到平衡,此时脱水率达到最高,如图 6 所示。由图 6 可以看出,化学破乳剂的最佳质量浓度为 100 mg/L,当温度从 35℃升高到 55℃时,脱水率从 65%迅速上升到 96.2%。然而,当温度从 55℃升高到 75℃时,脱水率只从 96.2%略微上升到 98%。考虑到高温能耗和设备成本的提高,最

终选用 55℃。因此,选用复合破乳剂脱水率高,脱水水及油/水界面清晰。

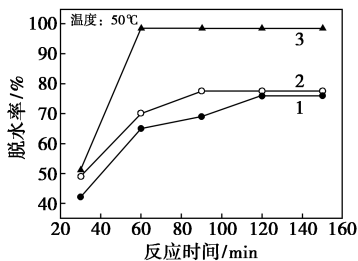


1—50 mg/L; 2—100 mg/L; 3—150 mg/L

图 6 复合比例为 3:2 的不同浓度复合破乳剂中温度对脱水率的影响

2.6 时间对不同破乳剂脱水率的影响

不同破乳剂(质量浓度均为 100 mg/L)的脱水时间对脱水率的影响如图 7 所示。从图 7 中可以看出,沉降时间从 30 min 提高到 60 min 时,曲线的增加趋势较大,3 条曲线的斜率分别为 0.9、1.2、2.6。当使用复合破乳剂,在相同条件下复合破乳剂的脱水效果优于单一破乳剂。此外,当沉降时间从 60 min 增至 90 min 时,复合破乳剂的上升趋势几乎没有变化。此外,随着时间的推移,破乳剂的破乳性能变弱,这与破乳剂的性质有关。



1—PAMAM 破乳剂; 2—S-B-A 破乳剂; 3—复合比例为 3:2 的复合破乳剂

图 7 不同破乳剂中沉降时间对脱水率的影响

3 结论

S-B-A 破乳剂对原油脱水有较好的效果,当破乳剂质量浓度为 150 mg/L,温度为 75℃,时间为 60 min 时,脱水率可达 92.7%。HLB 测试表明,不同复合比例的破乳剂可以得到不同的破乳剂 HLB 值。复合破乳剂 HLB 为 10.2 时,最大脱水率可达 99.0%。IFT 试验表明,破乳剂质量浓度对界面张力存在影响,当破乳剂质量浓度为 100 mg/L 时,界面张力降至最低,脱水率达到最高。脱水率随温度、沉降时间和破乳剂质量浓度的变化而变化,并有最佳值。S-B-A 与 PAMAM 复配比为 3:2 时的复合破

乳剂可显著提高脱水性能,同时达到降低使用剂量及温度的效果。综合考虑,最优复合破乳剂质量浓度为 100 mg/L,温度为 55℃,沉降时间为 60 min 时,脱水率达到 96.2%。

参考文献

- [1] Ishpinder Kailey, Jacqueline Behle. Evaluation of the performance of newly developed demulsifiers on dilbit dehydration, demineralization, and hydrocarbon losses to Tailings [J]. Ind Eng Chem Res, 2015, 54:4839-4850.
- [2] Aburto J, Márquez D M, Navaro J C. Amphiphilic choline carboxylates as demulsifiers of water-in-crude oil emulsions [J]. Tenside Surfactants Detergents, 2014, 51, 313-317.
- [3] Duan Ming, Ma Yongzhang, Fang Shenwen. Treatment of wastewater produced from polymer flooding using polyoxyalkylated Polyethyleneimine [J]. Separation and Purification Technology, 2014, 133: 160-167.
- [4] Erica Pensini, David Harbottle, Fan Yang. Demulsification mechanism of asphaltene-stabilized water-in-oil emulsions by a polymeric ethylene oxide-propylene oxide demulsifier [J]. Energy & Fuels, 2014, 28:6760-6771.
- [5] 吴凯凯, 梁光川, 马培红, 等. 聚醚型稠油破乳剂破乳效果影响因素分析 [J]. 天然气与石油, 2010, 28(2): 74-75.
- [6] Sharli Zarkar, Alexander Couzis, Sanjoy Banerjee. Effect of premixed asphaltenes and demulsifier on oil-water interfacial properties [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2015, 23(2): 99-103.
- [7] Reza Zolfaghari, Ahmadun Fakhru'l-Razi, Luqman C Abdullah, et al. Demulsification techniques of water-in-oil and oil-in-water emulsions in petroleum industry [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 170(1): 377-407.
- [8] 赵世成. 采用正交组合法研究筛选原油破乳剂 [D]. 西安: 西安石油大学, 2004.
- [9] Jai Prakash Chaudhary, Sanna Kotrappanavar Nataraj, Azaz Gogdaa. Bio-based superhydrophilic foam membranes for sustainable oil/water separation [J]. Green Chemistry, 2014, 16, 4552-4558.
- [10] Azadeh Mirvakili, Mohammad Reza Rahimpour, Abdolhossein Jahnamiri. Effect of a cationic surfactant as a chemical destabilization of crude oil based emulsions and asphaltene stabilized [J]. J Chem Eng Data, 2012, 57: 1689-1699.
- [11] Assis K Fraga, Luiz F I Souza, Jeniffer Rayane. Development and evaluation of oil in water nano emulsions based on polyether silicone as demulsifier and antifoam agents for petroleum [J]. Appl Polym Sci, 2014, 131: 40889-40907.
- [12] Christine Dalmazzone, Christine Noik, François Argillier. Impact of chemical enhanced oil recovery on the separation of diluted heavy oil emulsions [J]. Energy & Fuels, 2012, 26: 3462-3469.
- [13] Steven Lawrence, Li Yan Zhang, Zhenghe Xu. Langmuir and langmuir-blodgett asphaltene films at heptane-water interface [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2004, 28: 821-828.

脂酸,天津博迪化工股份有限公司生产;硝酸锌、硝酸镁、氢氧化钠、碳酸钠均为分析纯试剂;油酸钠、铝酸钠、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)均为化学纯,国药集团有限公司生产。

1.2 LDHs 及改性 LDHs 制备

采用快速成核/晶化法制备 LDHs:将 0.12 mol $Zn(NO_3)_2$ 与 0.12 mol $Mg(NO_3)_2$ 混合配制盐溶液 A;将 0.12 mol 的 $NaAlO_2$ 与 0.06 mol Na_2CO_3 混合配制碱溶液 B;在水浴恒温 65℃ 条件下将溶液 A 与 B 迅速混合,搅拌 3 min,用 NaOH 溶液调节体系 pH 至 11,继续搅拌动态晶化 1 h,陈化 24 h 后,过滤,洗涤,所得滤饼于 70℃ 干燥,制得 LDHs。

将计量固体油酸钠溶解配置一定摩尔浓度的油酸钠溶液,将上述未经干燥的滤饼分散在此溶液夜中,恒温搅拌反应一定时间,过滤,洗涤,所得滤饼于 70℃ 烘干,即制得改性 LDHs 样品。

1.3 活化指数(AI)测定

称取 3.0 g 改性 LDHs 于 200 mL 去离子水中,搅拌 1 h,移入 250 mL 分液漏斗,静置 24 h,将分液漏斗下层沉降物放出,抽滤,洗涤,烘干,称重,记录烘干后下层沉降物质量^[9]。计算 AI 值:

$$AI = \left[\frac{\text{(加入样品总质量 - 下层沉降物质量)}}{\text{加入样品总质量}} \right] \times 100\%$$

1.4 复合材料的制备

将改性前后 LDHs 和适量酒精在球料质量比为 2:1,球磨转速为 500 r/min,球磨时间为 10 h 条件下,于 QM-3SP04 球磨机中湿磨,所得磨样于 70℃ 下烘干。按一定配比将改性前后 LDHs 与 PVC 粉、助剂在 SHR-10A 型高速搅拌机中混合 10 min,用 JTC-100 型双辊开炼机 170℃ 下对混合物料进行熔融共混约 10 min,制得改性前后 LDHs/软 PVC 复合

材料。再用 XLB-D400 型平板硫化机于 180℃ 下热压 5 min,冷压成型,室温冷却 24 h 后,加工成复合材料样条进行阻燃及力学性能测试。实验所用软 PVC 基体的配方为:按质量比 PVC 100 份, DOP 30 份,钙锌稳定剂 3 份,硬脂酸 0.4 份,聚乙烯蜡 0.5 份。

1.5 测试分析

利用日本理学 Rigaku D/max-rB 型 X 射线粉末衍射仪($Cu K\alpha, \lambda = 1.54178 \text{ \AA}$)对样品的晶体结构(XRD)进行表征;利用 Nicolet6700 型傅里叶变换红外光谱仪(美国尼高力仪器公司生产)测定样品的 FT-IR 谱图, KBr 压片;利用 SU8020 型扫描电子显微镜(FESEM,加速电压 5 kV,日本日立公司生产)观察样品的微观形貌;利用 STA449F3 型热重分析仪(德国耐驰仪器制造有限公司生产)测定样品的热稳定性(TG), N_2 气氛,升温速率为 10℃/min,测试温度为 35~700℃;根据 GB/T 2406.2-2009,利用 HC-2 型氧指数仪(南京市江宁区分析仪器厂生产)检测样条的 LOI 值;根据 UL-94 垂直燃烧测试标准,用 CZF-3 型垂直燃烧测定仪(南京市江宁区分析仪器厂生产)检测样条的垂直燃烧性能;根据 GB/T 1040-92,用 CMT4304 型电子万能试验机(深圳市新三思材料检测有限公司生产)检测样条的拉伸强度和断裂伸长率。

2 结果与讨论

2.1 湿法改性 LDHs 的工艺条件

2.1.1 油酸钠质量浓度对 AI 值的影响

在改性温度为 75℃,改性时间为 1.5 h 的条件下,考察油酸钠质量浓度对 AI 值的影响,如图 1 所示。

(上接第 142 页)

[14] Mingzhe Dong, Houjian Gong, Wei Tian. Separation of water from high pH water-in-heavy oil emulsions using low pressure CO_2 [J]. Ind Eng Chem Res, 2014, 53: 12216-12223.

[15] Delphine Daniel-David, Isabelle Pezron, Daniele Clause. Interfacial properties of a silicone copolymer demulsifier at the air/water interface [J]. Phys Chem Chem Phys, 2004, 6: 1570-1574.

[16] Ayman M Atta, Hamad A Allohedan, Gamal Mahdy. Dewatering of petroleum crude oil emulsions using modified Schiff base polymeric surfactants [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 122: 719-728.

[17] Nikkiah M, Tohidian T, Rahimpour M R. Efficient demulsification of water-in-oil emulsion by a novel nano-titania modified chemical demulsifier [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2015, 94: 164-172.

[18] Al-Sabagh A M, Nehal S Ahmed, Amal M Nassara, et al. Synthesis and evaluation of some polymeric surfactants for treating crude oil emulsions: Part I; Treatment of sandy soil polluted with crude oil by monomeric and polymeric surfactants [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2003, 216: 9-19.

[19] Li Yifei, Wang Xi, Zhang Huimin, et al. Interfacial and demulsifying behavior of novel fluorinated hyperbranched polymers [J]. J Surfact Deterg, 2014, 17: 977-984.

[20] Andrew P Sullivan, Nael N Zaki, Johan Sjlom, et al. The stability of water in crude and model oil emulsions [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2007, 85: 793-807.

[21] Luiza N Andrade, Camila C Amorim, Sara V Santos. Efficient demulsification of wastewater by steel furnace dust with amphiphilic and surface charge properties [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 277: 281-286. ■