

Evaluation Methods: Physical and Chemical Properties of Surfactants for Enhanced Oil Recovery*

Zhe Liu, Zhen Dong, Fei Yang, Qinwu Jin, Jianshe Zhao[#]

College of Chemistry & Materials Science, Northwest University, Xi'an
Email: #jszhao@nwu.edu.cn

Received: Sep. 21st, 2012; revised: Oct. 10th, 2012; accepted: Oct. 16th, 2012

Abstract: The surfactant is widely used in enhanced oil recovery. This paper describes the current evaluation methods of surfactants for tertiary oil recovery. The measurements of physical and chemical properties, such as surfactant surface (interface) activity, emulsifying properties, wetting properties, and oil displacement efficiency are also analyzed.

Keywords: Enhanced Oil Recovery; Surfactant; Evaluation Methods

驱油用表面活性剂物理化学性质评价方法*

刘 哲, 董 珍, 杨 飞, 金勤武, 赵建社[#]

西北大学化学与材料科学学院, 西安
Email: #jszhao@nwu.edu.cn

收稿日期: 2012年9月21日; 修回日期: 2012年10月10日; 录用日期: 2012年10月16日

摘 要: 立足于三次采油中化学驱油领域的表面活性剂驱油, 简述了目前三次采油用表面活性剂的表面(界面)活性、起泡性、乳化性、润湿性等物理化学性质的评价方法及相关测试的基本操作。

关键词: 三次采油; 表面活性剂; 评价方法

1. 引言

表面活性剂自诞生以来, 即在工业、生活中的各个领域发挥了不可比拟的作用。目前已有大量的研究表明, 表面活性剂可应用于化学驱油、家用清洁剂、个人护理品、化妆品、乳化剂、润湿剂、增溶剂、食品及药物添加剂、纺织印染剂及整理剂、杀菌剂等领域^[1-4]。目前复合驱油用表面活性剂有石油磺酸盐、改性木质素磺酸盐、植物羧酸盐、蓖麻油酸烷醇酰胺、环烷酸盐、高分子表面活性剂及生物表面活性剂(鼠李糖脂)等^[5]。表面活性剂驱油技术在国外开始大量实际应用主要是从20世纪80年代开始的。1980年初, Shell

公司使用了三种类型的化学合成表面活性剂, 驱油试验都取得了良好的效果^[6]。国内对于表面活性剂驱油的研究开展的相对较晚。大庆油田、胜利油田^[7,8]等均已将表面活性剂驱油的技术应用于原油的开采, 并取得了一定的成效。表面活性剂驱油的技术目前尚不成熟, 主要表现在表面活性剂的合成与设计方面。能够有效提高原油采收率的表面活性剂要求表面活性剂本身结构简单、容易制备, 并且具有多种优良的特性。由于表面活性剂驱油技术受到各方面因素的制约, 包括表面活性剂的表面(界面)活性、起泡性、乳化性、润湿性等因素。因此, 筛选优良表面活性剂用以提高原油采收率, 则需要从多个方面进行综合评价。

2. 表面活性剂性质的评价

*基金项目: 国家科技部中国科技支撑计划(No. 2007BAB17B02), 2011年西北大学创新基金(No. 2011028)。

[#]通讯作者。

2.1. 临界胶束浓度

表面活性剂溶液的表面张力随着其浓度的增加而急剧减小, 最终达到一个平台, 不再受浓度变化的影响, 此时表面活性剂在溶液中开始由单分子的非聚集体向聚集体转变, 形成胶束, 将此时表面活性剂溶液的浓度称为临界胶束浓度(CMC, Critical Micelle Concentration)。临界胶束浓度是表面活性剂最基本也是最重要的性质之一, 只有溶液浓度稍高于 CMC 时, 才能充分发挥表面活性剂的作用, 特别是在考虑到表面活性剂的用途(例如: 三次采油)时, 临界胶束浓度值将是一个很重要的参数。目前测定临界胶束浓度的方法主要有表面张力法、电导法、染料法, 还有一些现代仪器的分析方法如荧光光度法、核磁共振法、导数光谱法等。

2.1.1. 表面张力法

表面张力测定临界胶束浓度的方法适合于离子型表面活性剂和非离子型表面活性剂。在表面活性剂浓度较低时, 随着浓度的增加, 溶液的表面张力急剧下降, 当超过临界胶束浓度时, 表面张力的下降则很缓慢或停止。以表面张力对表面活性剂浓度的对数作图, 曲线转折点相对应的浓度即为临界胶束浓度。表面张力的测试方法很多。McConnell^[9]等人利用 Wilhelmy 吊板法进行表面活性剂溶液表面张力的测定, 进而得到所研究的表面活性剂的临界胶束浓度; Lunkenheimer 和 Wantke^[10]利用 du Nouy 环法测定表面张力, 分析其临界胶束浓度; 常用的表面张力测试方法还有最大泡压法、毛细管上升法等。

2.1.2. 电导法

本法仅适合于表面活性较强的离子型表面活性剂临界胶束浓度的测定。秦福初、季甲^[11,12]等人测试表面活性剂溶液的电导率, 以表面活性剂溶液电导率对浓度作图, 曲线的转折点即临界胶束浓度。溶液中若含有无机离子, 方法的灵敏度则会大大下降。

2.1.3. 染料法

某些有机染料在与胶团发生作用时, 会产生增溶效果, 其吸收光谱相较于未增溶时产生显著的变化, 所以只要在大于临界胶束浓度的表面活性剂溶液中加入适量的染料, 然后采用滴定终点观察法或分光光度法, 确定颜色或光谱发生变化的转折点即可得到临

界胶束浓度值。张萍、吴玉芹^[13]等人利用花菁染料的荧光突变点确定非离子表面活性剂的临界胶束浓度。测定临界胶束浓度时, 要求表面活性剂的无机离子具有与染料的有机离子相反的电性, 故常用频那氰醇、碱性蕊香红 G 进行阴离子表面活性剂临界胶束浓度的测定; 阳离子表面活性剂则常采用荧光黄或曙红作为指示剂; 非离子表面活性剂一般采用频那氰醇、四碘荧光素、碘、苯并紫红 4B 等进行临界胶束浓度的分析。此法测定临界胶束浓度会因染料的加入量不同而影响测定的精确性, 尤其对临界胶束浓度较小的表面活性剂, 另外, 当表面活性剂溶液中含有无机盐及醇时, 由于与染料发生一定的作用, 测定结果也不甚准确。

2.2. HLB 值

Griffin 在 1949 年率先提出 HLB 值的论点。HLB 值(Hydrophile-Lipophile Balance Number)称为亲水疏水平衡值, 也称水油度, 用来表示表面活性剂亲水或亲油能力的大小, 其值为亲水基的亲水性与亲油基的亲油性的比值。HLB 中 H 代表“Hydrophile”表示亲水性, L 则是“Lipophilic”表示亲油性, B 是“Balance”表示平衡的意思。HLB 值越大, 其亲水性越强, HLB 值越小, 其亲油性越强。随着新型表面活性剂的不断问世, 对于表面活性剂的亲水油性质的研究具有非常重要的意义。目前应用于表面活性剂的 HLB 值测定的方法主要有水数法、对数法^[14]等。

2.2.1. 水数法

聚乙烯型非离子表面活性剂的 HLB 值与水数有一定的关系: $HLB = aW + b$ 式中, a, b 为常数, W 为水数, 单位为 mL。以体积比为 96% 的二氧化杂环乙烷和 4% 的苯胺混合物将样品溶解, 然后用水滴定至浑浊时所用的水的体积即为水数。

2.2.2. 对数法

对数法是一种最简单的 HLB 值的测定方法。表面活性剂的 HLB 值与其亲水、疏水基团的重量比的对数有关系: $HLB = 7 + 11.71 \lg W_L/W_O$, 其中 W_L , W_O 分别代表表面活性剂结构中亲水、亲油基团的重量; 利用该式进行计算, 即可快速得到表面活性剂的 HLB 值。

测定 HLB 值的方法还有很多, 但测定及计算时

所用的实验方法和所依据的关系式均有一定的使用范围,如果采用方法不当,有时误差会很大。

2.3. 起泡性

众所周知,表面活性剂具有一定的起泡性,其水溶液在外力的作用下,可以产生泡沫。对于这样的泡沫体系的研究主要涉及溶液的起泡能力、泡沫的稳定性及大小分布等。其中起泡体积、半衰期对于表面活性剂泡沫体系的研究特别重要。起泡体积在一定的程度上反映了表面活性剂体系的起泡能力,其大小主要受到起泡剂性能、稳定剂性能、液相粘度等因素的影响。而半衰期主要是用于评价泡沫的稳定性,是指从产生泡沫到衰减为原来的一半时所用时间。半衰期越长,表示泡沫的稳定性越好。

目前对于泡沫性质的表征方法有很多,较常用的有体积法、电导率法等。

2.3.1. 体积法

体积法由于所需设备简单,检测方法直观易行,因此发展得比较成熟。因泡沫产生方法的不同,又可将体积法分为以下几类。

1) 倾泻法(Ross-Miles 法^[15])

Ross-Miles 仪作为室内评价表面活性剂发泡能力的仪器,在化工行业中被广泛应用并在长期使用中不断改进。目前广泛使用的为 GB/T 7462.94 改进 Ross-Miles 法。该法是日用品及化工产品泡沫性能检测的国家标准方法。按待测表面活性剂的工作浓度或其产品标准中规定的试验浓度配制溶液。先加少量水调成浆状,然后用 50℃ 的规定水溶解。缓慢混合,防止形成泡沫。在不搅拌的情况下,保持溶液在 50℃ 左右进行实验测定。使溶液不断地流下,直到水平面降至 150 ml 刻度线处,记录流出时间。在液流停止后的 0.5 min、3 min、5 min 测量泡沫体积。如果泡沫的上面中心处有低洼,按中心与边缘之间的算术平均值记录读数。每次均需按试样溶液的配制要求重新配制新鲜溶液,取得至少 3 次误差在允许范围的结果,以所形成的泡沫在液流停止后 0.5 min, 3 min 和 5 min 时的毫升数来表示结果。

2) 振荡法

振荡法因操作简便,被广泛应用于实验室中溶液发泡能力的测定。Patist^[16]等人用此法评价溶液的起泡

能力。向具塞量筒中装入相关的表面活性剂溶液,剧烈振荡 10 s,停止振荡后,立即记录下所产生泡沫的体积,作为溶液起泡性能的量度。记下从停止振荡到泡沫衰减到原来高度的一半时所消耗的时间 $t(s)$,用于表征泡沫的稳定性。但是此方法由于难以保持恒定的振荡力度,每次实验之间的误差很大。

2.3.2. 电导率法^[17]

电导率法基于泡沫是由大量被液膜隔开的气泡组成,其中液相导电,而气相不导电的特点,电导率法测泡沫性能是将泡沫电导率的大小作为气泡密度的量度,并由电导率的变化规律获得溶液起泡能力和泡沫稳定性的信息。一般产生泡沫的电导率越小,则表示该溶液的起泡性能越好。同样的电导率的变化值越小,则表示该体系的泡沫稳定性越高。根据测量所用电极对多少的不同,电导率法可分为以下两种:

1) 单点电导率

向待测溶液的容器中通 N_2 ,直到产生的泡沫达到一定的高度且淹没电极板时停止通气。记下初始电导率 C_0 ,停止通氮气,5 min 后再次测定电导率 C_t 。分别作为起泡性能和泡沫稳定性的量度。此法简单易测,与体积法相比,电导率法测量泡沫时具有较好的重复性且所得结果准确。

2) 多点电导率

在单点电导率方法的基础上,Varley 和 Phian-mongkhon 提出了一种多点电导率测量方法用于表征泡沫的性能。测量过程中,仍然是向起泡溶液的容器中通 N_2 获得泡沫。在通气口上方 17 cm 和 27 cm 处分别测量泡沫相在不同高度下的泡沫的电导率。第三对电极板则位于液面处,用于测量通氮气初始时的液相的电导率和起泡后用于测量泡沫与液相界面间的电导率。

与体积法相比,电导率法具有灵敏度高,能连续检测泡沫稳定性和液膜排液行为等优点。然而该方法的测试装置比较复杂,费用较高,测试时间不宜过长等缺点大大限制了其使用的范围。目前它一般只用于体积法不适宜的泡沫体系的表征。

3. 表面活性剂改变岩石润湿性^[18,19]

驱油用表面活性剂的复合体系注入油井之后,能够与储层岩石发生相互作用,改变储层岩石的表面亲

水、疏水性能,使岩石表层由原来的油湿性向水湿性不断转化,从而使原油剥落,随驱替剂被驱替出来,提高原油的采收率。对于表面活性剂体系的润湿性能的研究,主要是通过测定其在岩石表面的润湿角来评价的。

通过测量接触角研究驱油用表面活性剂体系对砂岩表面润湿性的影响。制作砂岩薄片,用原油饱和,用来模拟亲油砂岩,放置在接触角测定仪上。配制不同质量浓度的溶液,用注射器吸取待测液并滴于砂岩薄片上,立即测定其接触角。一般可以测定前接触角和后接触角,并进行平均,得到较为准确的测试结果。

一般的随着溶液质量浓度的不断增大,表面活性剂不断被岩石吸附,从而改变岩石表面的润湿性。所以,润湿角的测试一般也用于表征表面活性剂在岩石表面的吸附作用的强弱。

4. 表面活性剂与原油相互作用

4.1. 油/水界面张力

表面活性剂体系能大幅度的降低油-水界面张力,具有很强的乳化原油和改变油层岩石润湿性的能力,使油孔道及岩石表层由亲油性向亲水性转变,改善储层孔隙的微观环境,进而降低原油驱替时地层孔隙间的阻力,将残余油从储层岩石孔隙中带出,提高原油采收率。因此,对于驱油用表面活性剂体系与原油间的界面性质的研究变得非常必要,其有助于更好的研究表面活性剂提高原油采收率。通常对于原油与表面活性剂体系间的界面张力的测试方法有白金牌法、旋转滴法等。

4.1.1. 白金牌法^[20]

白金牌法属于常见的称重法测试界面张力方法。称重法界面张力测试方法还有常见的白金环法,也叫 du Nouy 法。白金环法由于测试过程中白金环容易变形,它的大小形状会对测试结果造成一定的影响。相比之下,白金牌法的使用更加广泛。当白金牌浸入至表面活性剂溶液与原油的界面后,白金牌周围受到界面张力的作用,该作用力将白金牌尽可能的往下拉。当液体间的界面张力及其他相关作用力与平衡力达到均衡时,白金牌就会停止下降。这时候仪器的平衡感应器就会测定白金牌浸入液体的深度,将其转化成为液体间的界面张力值。

4.1.2. 旋转滴法^[21-23]

为测定超低界面张力,须人为地改变原来重力与界面张力间的平衡,使平衡时液滴的形状便于测定。因此,旋转滴法属于形状法测试界面张力。在旋转滴界面张力仪中,通常采用使液-液体系旋转,增加离心力场的作用而实现。这就是旋转滴法界面张力测试的基本原理。通常,我们配制一定浓度的表面活性剂溶液,装入样品管中,再加入少量低密度相液体原油,密封地装在旋转滴界面张力仪上,并保持样品管与转轴轴心在同一水平高度。开动机器,转轴携带液体以角速度 ω 自旋。在离心力、重力及界面张力作用下,低密度相液体在高密度相液体中形成一长球形或圆柱形液滴。其形状由转速 ω 和界面张力决定。测定液滴的滴长(L)以及宽度(D)值以及两相液体密度差($\Delta\rho$)以及旋转转速 ω ,即可计算出界面张力值。当转动角速度足够大时,旋转滴通常呈现平躺的圆柱形,两端成半圆状。这时界面张力计算公式通常为:

$$\gamma = \frac{\omega^2 R^3 \Delta\rho}{4} \quad (1)$$

其中 R 为圆柱半径。但这只是一般公式,事实上,在计算界面张力值时,我们有各种公式的变化,从而产生各种计算公式。

4.2. 配伍性能

表面活性剂,尤其是阴离子表面活性剂一般在高矿化度的条件下其表面活性会因溶解性能的降低而降低,特别在有钙、镁等碱土金属离子存在下其活性会极大降低,所以一般表面活性剂不能在高矿化度水中起到优良的乳化、润湿、洗涤作用。因此对于特别是含有钙、镁等碱土金属离子的高矿化度油井,原油的乳化开采,对表面活性剂的耐盐性提出更高的要求。驱油用表面活性剂要能够适应不同油田水的矿化度,表面活性剂的耐盐性就是衡量其这一性能的重要参数。

将质量百分数 0.5% 的表面活性剂与油田地层水按 1:1 混合后,室温下静置 48 h,观察溶液变化;再放置在 80℃ 水浴中静置 48 h,观察溶液是否出现变化。未出现盐析现象或产生其它沉淀物,则表明该表面活性剂的耐盐性能好,能与地层水配伍。王业飞、赵福麟^[24]等采用相体积分数-盐含量相图来评价表面

活性剂的耐盐性能。在 10 mL 具塞量筒中加入 0.4 g 表面活性剂、0.8 g 异丁醇，加水至 5 mL，摇匀，再加煤油至 10 mL，充分摇匀后放入 30℃ 的恒温水浴中。平衡后读出水相(下相)、中相、油相(上相)的体积。然后加盐，读出不同盐含量下的各相体积，用这些数据作相图。以计算出的 IL 油水混合物的盐含量作为横坐标，对应的各相体积换算为占油水混合物的体积分数作为纵坐标，画出相图。在这种相图中，每一表面活性剂可有两条独立的曲线。上面的为油相线，下面的为水相线。胡小冬、欧阳向南^[25]等人，还利用油/水界面张力测试的方法研究表面活性剂的耐盐性能。采用不同含盐量的模拟地层水进行表面活性剂溶液的配制，进一步对它们的油/水界面张力进行测试，用于表征矿化度对于表面活性剂活性的影响。

4.3. 乳化性能

驱油用表面活性剂体系要求对原油具有很强的乳化能力。当其注入油井岩石孔隙中，在表面活性剂的作用下，能很好的提高孔隙中的剩余油的溶解性，使其形成微乳液(或者乳状液)，由于油滴表面被表面活性剂包裹，使得油滴不易再次被底层岩石表面吸附，从而提高流动性，进一步提高原油的采收率。因此，对于表面活性剂驱油体系的乳化性能的研究吸引了众多研究者的注意。其表征的方法主要有体积法、电导率法^[26,27]。

4.3.1. 体积法

向具塞量筒中装入相关的表面活性剂的溶液，按照一定比例的体积比，加入油相(为便于观察一般采用环己烷和煤油按照一定比例配制的模拟油)。剧烈振荡 10 s，停止振荡后，立即记录下所产生乳化层的体积作为乳化性能的量度。并记录从停止振荡到油相和水相完全分离所消耗的时间 $t(s)$ ，即最大分水时间，用于表征乳化层的稳定性。乳化体积越大、最大分水时间越长，则表示该体系对于油相的乳化性能越好。

4.3.2. 电导率法

采用乳液特性法，确定 W/O 型乳液最大掺水量。由于水是电的良导体，因而 O/W 型乳化液的电导率较 W/O 型要大得多，富水相和富油相的也有显著的电学性质差异，所以可用电导率方法来确定 W/O 和 O/W 乳状液间的相互转换，确定最大掺水量。赵辉，

赵田红^[28,29]确定表面活性剂体系乳化能力时，是在室温下，先混合一定比例的煤油和表面活性剂，然后边搅拌边滴加蒸馏水，用电导率仪测试并记录整个过程中体系电导率的变化，由电导率的突变点来确定最大掺水量。以掺水量-电导率作图，当达到电导率的突变点时，乳化状态就会发生变化，由 W/O 转变成为 O/W 型乳液，体系也随之变得很不稳定。根据其最大掺水量的大小确定表面活性剂对油相的乳化效果。

4.4. 实验室模拟驱油

对于上述性质优异的表面活性剂，一般的，实验室微观模拟驱油实验可以客观的评价要应用于三次采油的表面活性剂的驱油效果，这对于驱油表面活性剂的评价至关重要。赵阳、曲志浩^[30]等人利用此项技术，研究靖安油田长₂、长₆油层砂岩表面活性剂体系的驱油效果，并探究活性剂体系的驱油机理。模拟岩心驱替实验，是在一定的压力下，对于具有一定空隙度及渗透率的饱和油的岩心，经过地层水注入、活性剂体系注入两个过程。根据所得到的图片中原油的剩余情况，计算驱油效率，进而对于活性剂的驱油效果进行数据化的表征。

实验室模拟驱油实验的对象真实油层岩心，首先对于岩心的物理性质进行分析，一般包括岩石平均孔隙度、平均渗透率、地层水矿化度等。一般采用原始油田注入水进行表面活性体系的制备。具体试验步骤^[31]如下：

- 1) 将岩心抽真空，然后用地层水饱和，根据所消耗水量，计算岩心孔隙体积；
- 2) 采用地层水驱替，计算岩心的原始渗透率；
- 3) 按照不同油井的地层温度，确定实验温度。在该条件下用原油或模拟油饱和岩心，并计算含油饱和度；
- 4) 在地层温度下，进行地层水驱油，记录驱替不同孔隙体积倍数的驱替压力，至含水 100%，记录稳定压力；
- 5) 注入 1.0 倍孔隙体积的表面活性剂体系溶液，评价表面活性剂驱油效果，岩心试验驱替速度均为 0.2 mL/min。

5. 结论

对于三次采油用表面活性剂的表/界面活性、HLB

值、起泡性、润湿性、乳化性等物理化学性质的常用测试方法进行了综述, 简单介绍了实验室模拟驱油实验的基本操作方法, 旨在指导驱油用表面活性剂的表征, 寻找更具潜力的驱油体系。

6. 致谢

感谢国家科技部中国科技支撑计划(No.2007BAB17B02), 2011年西北大学创新基金(No.2011028)的支持。

参考文献 (References)

- [1] 孙静, 刘佳鸿, 熊高虎等. 碳纳米管填料的静电自组装制备及在导电涂料中的应用[J]. 涂料工业, 2011, 41(10): 25-33.
- [2] 卢祥国, 陈业生, 仲强等. 利用磷硅酸盐-表面活性剂-聚合物复合体系提高原油采收率[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 104-113.
- [3] 信军. 机械通气联合肺表面活性剂治疗新生儿呼吸窘迫综合征的临床研究[J]. 中国实用医药, 2012, 7(12): 120-121.
- [4] 袁平夫, 廖柏寒, 卢明. 表面活性剂在环境保护中的应用[J]. 环境保护科学, 2005, 31(127): 38-41.
- [5] 唐善法, 刘忠运, 胡小冬. 双子表面活性剂研究与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [6] 童年, 郭春伟, 罗志昕. 化学驱油进展[J]. 日用化学品科学, 2010, 33(7): 19-21.
- [7] 杨振宇, 周浩, 姜江等. 大庆油田复合驱用表面活性剂的性能及发展方向[J]. 精细化工, 2005, 22: 22-23.
- [8] 周国华, 曹绪龙, 李秀兰等. 表面活性剂在胜利油田复合驱中的应用研究[J]. 精细石油化工进展, 2002, 3(2): 5-9.
- [9] T. E. McConnell, Q. S. Shi. Surface energy characterization of three partially hydrolyzed hardwood species determined by dynamic contact angle analysis. *Journal of Adhesion*, 2011, 87(4): 353-365.
- [10] K. Lunkenheimer, K. D. Wantke. On the applicability of the du Nouy (ring) tensiometer method for the determination of surface tensions of surfactant solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1978, 66(3): 79-851.
- [11] 季甲, 周建国, 刘参等. 2-丙烯酰胺基辛烷基磺酸钠的合成及其胶束化行为研究[J]. 精细化工, 2010, 27(8): 46-51.
- [12] 秦福初. Gemini 表面活性剂的合成、溶液性质及其与高分子间相互作用研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2009.
- [13] 张萍, 吴玉芹, 李玲等. 籍疏水花菁染料的荧光突变测定非离子表面活性剂临界胶束浓度[J]. 安徽师范大学学报, 2005, 28(1): 68-71.
- [14] M. A. Al-Sabagh. The relevance HLB of surfactants on the stability of asphalt emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2002, 204(1-3): 73-83.
- [15] GB/T 7462-94, 改进 Ross-Miles 法[S], 1994.
- [16] A. Patist, S. G. Oh and R. Leung. Kinetics of micellization: Its significance to technological processes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, 176(1): 3-16.
- [17] 王莉娟, 张高勇, 董金凤等. 泡沫性能的测试和评价方法进展[J]. 日用化学工业, 2005, 35(3): 171-173.
- [18] 孙琳, 蒲万芬, 吴雅丽等. 表面活性剂作用后的固体润湿性[J]. 中国石油大学学报, 2012, 36(1): 162-164.
- [19] 蒋平, 张贵才, 葛际江等. 润湿翻转机理的研究进展[J]. 西安石油大学学报, 2007, 22(6): 78-84.
- [20] 吴有庭, 梅乐和, 来自强. 液液界面张力的测定[J]. 浙江化工, 1993, 24(3): 36-39.
- [21] 张彩霞, 张世勇, 张文超等. SVT20 旋转滴界面张力仪测量原理及影响因素分析[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(1): 115-118.
- [22] B.-B. Lee, P. Ravindra and E.-S. Chan. New drop weight analysis for surface tension determination of liquids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, 332(2-3): 112-120.
- [23] S. E. Taylor. Thermal destabilisation of bitumen-in-water emulsions—A spinning drop tensiometry study. *Fuel*, 2011, 90(10): 3028-3039.
- [24] 王业飞, 赵福麟. 醚羧酸盐及其与石油磺酸盐和碱的复配研究[J]. 油田化学, 1998, 15(4): 340-343.
- [25] 胡小冬, 欧阳向南, 者邹玮. 耐盐型双子表面活性剂驱油体系研究[J]. 精细与专用化学品, 2011, 19(7): 22-24.
- [26] 王孝平, 李宗琦, 钱越英等. 复合驱油过程中原油乳化聚并机理的探讨[J]. 油田化学, 1999, 04: 63-66.
- [27] 丁德磐, 孙在春, 杨国华等. 原油乳状液的稳定与破乳[J]. 油田化学, 1998, 01: 83-87.
- [28] 赵辉, 路福绥, 李培. 不同因素对高效氯氟菊酯微乳液相图的影响[J]. 物理化学学报, 2006, 22(4): 475-480.
- [29] 赵田红, 董阳阳, 彭国峰等. 两性双子表面活性剂的合成及性能评价[J]. 应用化工, 2011, 40(7): 1219-1221.
- [30] 赵阳, 曲志浩, 刘震. 裂缝水驱油机理的真实砂岩微观模型实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 116-119.
- [31] 薛凝. Gemini 阴离子表面活性剂的合成及驱油实验[D]. 西北大学, 2010.