尊敬的编辑：

您好！

根据审稿意见，我们对稿件进行了修改，所有修改的部分都在文章中用红色标记处理，下面我们将逐条对审稿意见作出回复：

1、图片请参见投稿须知修改，物理量尽量都用中文，电导率可用符号表示，物理量与单位之间用/隔开，复合单位加括号，坐标数值5-6个为宜，部分图的坐标数值过多，图题用中文即可，英文请删去，请参阅本刊已发表的文章。图10数据太少，请补充在正文文字中或用表格表示。期刊黑白印刷，各图数据点符号请稍调大。

修改说明：根据审稿意见，我们按照已刊发文章中图标格式以及投稿须知要求，对于本文中图片格式进行更改，具体更改内容如下：

1. 图中物理量改为中文名称，物理量与单位之间用/隔开，复合单位加括号，图片尺寸控制在宽6.5，长4.5。
2. 坐标数值控制在5-6个。
3. 删除文中的英文图题。
4. 图内数据点符号加大，明确表示不同数据的区别。
5. 在“2.4.2 复配泡沫的响应机理探究”中添加对于图10的数据说明。

2、参考文献格式不符合期刊要求，请参见参考文献格式修改。

修改说明：根据参考文献格式要求，修改并重新整理参考文献排序。

3、请按本刊格式补充第一作者和非第一作者通讯联系人的简介，若有基金项目支持请补充。

修改说明：第一作者邮箱更改为单位邮箱，通讯单位添加“中国石油化工集团公司碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室”，并按照格式在首页页脚对第一作者及通讯联系人的简介进行了修改及补充说明。

阴离子型表面活性剂/叔胺复配泡沫的性质及CO2/N2响应性能

刘冬梅1,2，曾文广1,2，杨康3，石鑫1,2，魏晓静1,2, 张腾方4，孙霜青\*4

（1中国石油化工股份有限公司西北油田分公司工程技术研究院，新疆 乌鲁木齐 830011）

（2中国石油化工集团公司碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011）

（3中国石油化工股份有限公司西北油田分公司石油工程监督中心，新疆 轮台 841600）

（4中国石油大学（华东），山东 青岛 266580）

**摘 要**：泡沫排水采气工艺中，泡沫到达地表后难以实现可控的消泡。为获得兼具稳定性及响应性的泡排体系，并明确在无机盐和油相环境下的适用性，本文将十二烷基硫酸钠（SLS）、十二烷基磺酸钠（SDS）、十二烷基苯磺酸钠（SDBS）分别与N-十二烷基-N,N-二甲基叔胺（C12A）复配，研究了复配溶液的泡沫性能及无机盐和油相对复配体系的影响。针对泡沫性能较好的SLS/C12A和SDS/C12A复配体系进行CO2响应消泡以及N2加热重新起泡实验。SLS/C12A复配体系的耐盐能力强。SDS/C12A复配体系的抗油效果显著，两种复配体系均表现出较好的响应性和可逆性。通过消泡后溶液形态和表面张力变化推测响应机理为：质子化的C12A与表面活性剂静电吸引形成络合物，从溶液中析出，降低了溶液的表面活性，加速了泡沫的破碎。

**关键词**：阴离子表面活性剂；叔胺；CO2响应；泡沫；耐盐；油相影响

**中图分类号**：O647.1 **文献标识码**：A

**Foam Properties and CO2/N2 Response Properties of Anionic Surfactant/ Tertiary Amine Compound Foam**

LIU Dongmei 1,2, ZENG Wenguang 1,2, YANG Kang 3, SHI Xin 1,2, WEI Xiaojing 1,2, ZHANG Tengfang 4, SUN Shuangqing 4\*

(1 Engineering Technology Research Institute, SINOPEC Northwest Company of China Petroleum and Chemical Corporation, Urumqi 830011,China)

(2 Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery in Carbonate Fractured-vuggy Reservoirs, SINOPEC,Urumqi 830011,China)

(3 Petroleum Engineering Supervision Center,Sinopec Northwest Oil Field Branch Company,heel table 841600,China)

(4. China University of Petroleum,Qingdao 266580,China)

**Abstract** In the foam drainage and gas recovery process, it is difficult to manually control and quickly defoam the foam after it reaches the surface. In order to obtain a foaming agent system with both foam stability and responsive defoaming performance, and to clarify the applicable performance under different inorganic salt and oil phase environments, in this paper, sodium dodecyl sulfate (SLS), sodium dodecyl sulfonate (SDS), and sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) are respectively combined with N-dodecyl-N,N-dimethyl Tertiary amine (C12A) equimolar compounding, the foam performance of the compound solution and the influence of inorganic salt and oil relative to the foam performance of the compound system were studied through foam experiments.

Simultaneously, for the SLS/C12A compound system and SDS/C12A compound system with better foam performance, CO2 response defoaming and N2 heating recovery re-foaming and defoaming experiments were carried out. The research results show that the SLS/C12A compound system has the best foam stability and strong salt tolerance. The anti-oil effect of the SDS/C12A compound system is remarkable, and the two compound systems both show good CO2 responsiveness and reversibility. According to the change of the solution and the change of surface tension after defoaming, the response mechanism is inferred that the protonated C12A and anionic surfactants are electrostatically attracted to form a complex, which precipitates out of the solution, which reduces the surface activity of the solution and accelerates the breaking of the foam.

**Keywords** anionic surfactant; tertiary amine; CO2 response; foam; salt tolerance; oil effect

前言

泡沫排水剂通常被叫作泡排剂，首先需要具备足够的起泡能力及携液能力，其次泡沫稳定性要适中。目前气田应用的各类泡沫排水剂虽然具备了较为可靠的起泡和携液能力，但仍存在一些问题。主要有：一、现有泡排剂稳定性较高，需要添加消泡剂进行消泡[1]，浪费人力物力且受环境影响较大[2]。二、由于气井中盐离子油相的存在导致产出液乳化絮凝，影响回收处理[3，4]。智能响应型表面活性剂能够人为的控制泡沫时效，目前报道的多种刺激响应类型中，CO2响应型泡沫，由于其来源广、成本低、操作简单、不易造成离子累积等优点，受到越来越多的关注[5]。

C12A是化学生产过程中重要的中间体，有合成简易、成本低廉、响应迅速、可逆性能好等诸多优点[6]，广泛应用于CO2响应体系当中[7-9]。但C12A泡沫性能差，不能作为起泡剂制备CO2响应型泡沫[5]。有文献指出，将C12A与传统表面活性剂复配，可以形成兼具响应性能和表面活性的乳液[8]。刺激-响应型泡排剂体系中，阴-阳离子型表面活性剂复配体系的耐盐耐油性能也少有研究。由此，本文采用SLS、SDS、SDBS三种不影响叔胺的质子化能力的阴离子表面活性剂作为主表面活性剂，与具有响应性能的C12A组成复配体系，使复配之后的溶液具有很好的泡沫性能，同时确保溶液可以表现出较好的响应性能。此外，为了更好的测试泡排剂体系在无机盐和油相存在条件下的适用性能，本文在测试泡沫性能时，考察了无机盐离子（Na+、Mg2+和Ca2+）和油相（正庚烷、正十二烷和十六烷）对于复配溶液表面活性的影响，为不同气田环境下泡排剂体系的选择提供了理论支持。

1 实验部分

1.1 仪器和试剂

泡沫分析仪：JPM2012，上海中晨数字技术设备有限公司；多头磁力搅拌器：HJ-6，金坛市友联仪器研究所；准微量电子天平：CPA324S，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；数控超声波清洗器：KQ-700DE，昆山市超声仪器有限公司；鼓风干燥箱：6W-330，吴江市荣盛烘干设备厂；数显恒温水浴锅：HH-S1，金坛市医疗仪器厂；接触角测量仪：JC2000C1，上海中晨数字技术设备有限公司。

N-十二烷基N, N-二甲基叔胺：分析纯，北京百灵威科技有限公司；十二烷基硫酸钠：分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；十二烷基磺酸钠：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；十二烷基苯磺酸钠：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；异丙醇：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；二氧化碳：≥99.8%；氮气：≥99.999%；氯化钠：分析纯；六水合氯化镁：分析纯；氯化钙；正庚烷：分析纯；正十二烷；十六烷：98%。

1.2 实验方法

1.2.1 复配泡沫制备与性质研究

将SDS等分别与C12A等摩尔复配，配制0.01 mol/L的复配溶液，室温搅拌1 h。实验过程中，SDBS与C12A溶解效果较差，遂采用5 wt%异丙醇增溶，其余两组做同样处理。

分别取30 ml复配溶液加入泡沫分析仪，恒定0.6 L/min鼓入N2起泡，当泡沫高度为150 mm时停止通气，记录起泡和自然消泡过程的泡沫高度。利用停止通气后泡沫衰减过程的电导率σ与停止通气时电导率的最大值σ0的比值σ/σ0来表征泡沫的析液速率[9]。

1.2.2 复配泡沫的抗盐耐油性质研究

对上述溶液分别添加氯化钠、氯化镁和氯化钙配制成1 g/L的溶液。添加正庚烷、正十二烷和十六烷配制成含油相3%的溶液，添加少量油红作为溶解指示剂。测量泡沫衰变曲线和电导率变化曲线，研究无机盐和油相对泡沫稳定性的影响。

1.2.3 复配泡沫的CO2响应性能和机理研究

对上述溶液恒定0.6 L/min鼓入N2起泡，当泡沫高度为150 mm时停止通气。恒定0.1 L/min通入CO2气体，进行响应消泡，记录泡沫高度随时间的变化。响应消泡完成后，恒定0.1 L/min通入N2，并对溶液60 °C加热2小时，重新起泡。对响应后的溶液和未响应的溶液分别进行表面张力测量。用接触角测量仪进行悬滴法测量，采用五点法测量，重复测量五次以上。

2 结果与讨论

2.1 复配溶液的泡沫性能

如图1所示，随着静置时间增加，泡沫高度逐渐衰减，其中SLS/C12A复配体系的泡沫稳定性最强，SDS/C12A复配体系次之，SDBS/C12A复配体系最差。SLS/C12A和SDS/C12A体系的泡沫衰变曲线均表现为三个阶段：（1）初始稳定区；（2）中期快速衰减区；（3）后期慢速衰减区，以SLS/C12A体系为例在图1中标出。三种复配溶液的电导率变化曲线如图2所示，可以看出曲线大致相似，斜率近似相同，表明携液能力相差不大。初期SLS/C12A复配体系的电导率下降较慢，泡沫携液能力稍强。



图 1 三种复配体系的泡沫衰变曲线 图 2 三种复配体系的电导率变化曲线

2.2 添加异丙醇的复配溶液泡沫性能

实验过程中，SDBS/C12A复配体系溶液溶解度较低，泡沫性能较差。有研究指出醇类分子可以作为辅助表面活性剂与溶液中的表面活性剂产生协同作用形成复合界面膜[10]，使表面活性剂在油水界面的排列过程更容易发生，会降低表面活性剂的临界胶束浓度，增大气-液界面的结合力[11]。此外，醇分子会间隔排列在表面活性剂分子中，能够有效地降低离子型表面活性剂分子中离子基团的库伦斥力，这就使得表面活性剂分子可以在气-液界面排列的更为紧密，提升泡沫稳定性[12-14]。为排除溶解度导致的实验误差，向复配溶液中添加5wt%的异丙醇做增溶剂。

图 3 添加异丙醇后三种复配体系的泡沫衰变曲线(a)和电导率变化曲线(b)图

泡沫半衰期是指泡沫衰减到原始泡沫高度一半时所用的时间，在本文实验中具体是指泡沫高度降低到75 mm的时间消耗。如图3(a)所示，异丙醇的添加使得SLS/C12A复配体系的泡沫半衰期提升四倍以上，SDS/C12A复配体系提高了近似三倍，SDBS/C12A复配体系提升了三倍多。这表明异丙醇的添加能使这三种阴离子表面活性剂的表面活性显著提高。从图3(b)可以看出，SLS/C12A复配泡沫稳定区的时间有显著增加，对应电导率曲线也更为平缓，表明异丙醇的添加降低了SLS/C12A复配泡沫的析液速度，增强了泡沫稳定性能。但SDBS/C12A复配体系泡沫性能仍然很差。表明SDBS自身的泡沫性能相对较差，溶解性问题不是造成其泡沫性能差的直接原因。

2.3 泡沫的抗盐耐油性能

2.3.1 复配泡沫的抗盐性能

**SLS/C12A复配体系**

向SLS/C12A复配溶液中分别加入氯化钠、氯化镁和氯化钙，进行起泡消泡实验。从图4 (a)中可以看出，无机盐的加入会使泡沫高度出现“骤降”。此外，Mg2+和Na+会延长初期稳定区，但稳定区内泡沫的含水量很少，出现部分破裂，呈现出一种没有泡沫作用的稳定状态。Ca2+显著降低了硫酸钠体系的泡沫稳定性。这是因为SLS的电离亲水基团硫酸基亲水性较强，且在溶液中易于与Ca2+结合[15]。而且从图4(b)中可以看出初始阶段无机盐离子对泡沫的析液速度无明显影响，但从320s后，析液速度明显加快，其中Na+对泡沫的析液速度影响最大。



图4 SLS/C12A复配溶液添加盐离子（1 g/L）体系的泡沫衰减图(a)和电导率变化图(b)

**SDS/C12A复配体系**

SDS和SLS结构及泡沫性能相似，如图5(a)所示，泡沫衰变曲线都表现为三个阶段。但无机盐对二者泡沫稳定性的影响则有明显不同。主要表现在：（1）SDS/C12A体系没有泡沫高度的“骤降”特征；（2）三种无机盐离子都显著降低泡沫性能，但影响相差不大；（3）无机盐Mg2+、Ca2+对泡沫析液速度的影响比较小，而Na+会显著加快泡沫的析液速度。而且从图5(b)中可以看出前期无机盐离子使得泡沫析液速度加快，这表明无机盐离子使得磺酸钠体系的初期泡沫稳定区时间减少，停止通气后很短时间内液体含量下降，泡沫开始破碎。



图5 SDS/C12A复配溶液添加盐离子（1 g/L）体系的泡沫衰减图(a)和电导率变化图(b)

**SDBS/C12A复配体系**

如图6(a)，无机盐离子对SDBS/C12A体系影响很大。Mg2+、Ga2+使泡沫在极短时间内完全破碎，泡沫性质差。此外，如图6(b)，Mg2+、Ga2+复配体系的泡沫很不稳定，极短时间内泡沫就完全破碎，并且这两种无机盐离子析液速度很快。但是，SDBS/C12A苯磺酸钠体系表现出较强的抗Na+的能力，Na+的存在对于SDBS/C12A体系泡沫性能以及析液速度影响较小。



图 6 SDBS/C12A复配溶液添加盐离子（1 g/L）体系的泡沫衰减图(a)和电导率变化图(b)

总体来看，无机盐对SLS/C12A体系的影响更大，而对于亲水基团为磺酸基的SDS/C12A和SDBS/C12A体系影响较小。此外，对于三种复配体系，Ca2+对泡沫稳定性的影响比Mg2+的更大。这可能是因为Mg2+的水化作用比Ca2+更强[16]，从而水分子受到的作用力更强，束缚更大，泡沫析液速度更小，泡沫稳定。

2.3.2 复配泡沫的耐油性能

如图7(a)所示，正庚烷对SLS/C12A体系泡沫稳定性影响最大，泡沫半衰期由10000余秒缩减到740秒，大大降低了SLS/C12A体系的泡沫稳定性。添加正庚烷泡沫破碎速度快，十六烷有少许波动，十二烷曲线则与未添加油相体系的曲线形状类似。如图7(b)所示，正庚烷使SDS/C12A体系泡沫在短时间内迅速破碎，而正十二烷提升了体系的泡沫稳定性。在实验中可以发现，未添加正十二烷的体系是一个均匀消泡的过程，十二烷的加入提高了泡沫之间的作用力，即使含水量非常少，泡沫仍不破碎，出现阶段性衰减。这种特殊现象的出现可能与磺酸基团相关。十六烷对于SDS/C12A体系影响也比较小，这表明SDS/C12A的耐油能力比SLS/C12A强。如图7(c)所示，三种油相对SDBS/C12A体系泡沫稳定性的影响近似相同，泡沫半衰期从1560 s降低到750 s。且泡沫衰减速度大致相同，可能与SDBS自身结构的特殊性和自身的泡沫稳定性较差有关。





图 7 SLS/C12A复配体系(a)SDS/C12A复配体系(b)SDBS/C12A复配体系(c)添加油相的泡沫衰减曲线

SLS等三种阴离子表面活性剂在油相中的表面张力会随着烷烃碳链长度的增加，先增大后减小[17]。而理论上一般认为溶液表面张力越小泡沫稳定性越强。本文当中，正十二烷油相的碳原子数与表面活性剂碳原子数相同，根据“相似相溶”的原理，更容易在气液界面规则排列，增强泡沫稳定性。

虽然无机盐离子对SLS/C12A体系影响较大，但是由于SLS/C12A系自身泡沫稳定性的原因，加入无机盐成分之后仍表现出较好的泡沫稳定性。故在实际应用环境中，选择SLS/C12A复配体系可以更好的满足抗无机盐能力的需求。对于油相来说，SDS/C12A体系表现出了较好的耐油能力，特别是添加正十二烷的SDS/C12A体系表现出极好的泡沫稳定性。而添加正庚烷的三种复配溶液，泡沫半衰期大致相同，都在700 s左右。这表明正庚烷会极大的降低表面活性剂的泡沫稳定性，三种阴离子表面活性剂均不适合使用在含有正庚烷的环境中。

2.4 泡沫响应性能及机理

2.4.1 复配泡沫的响应性能研究

由于前文中，SDBS/C12A体系泡沫性能较差，因此，泡沫响应性实验选用泡沫性能好的SLS/C12A和SDS/C12A体系进行测试。



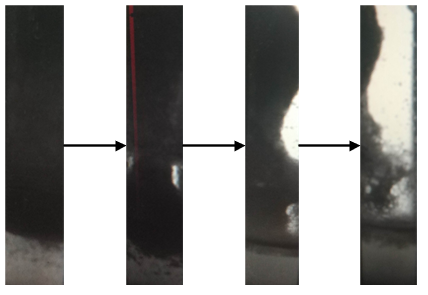
图 8 SLS/C12A复配体系(a) SDS/C12A复配体系(b) 响应和恢复泡沫高度衰变曲线

如图8(a)，N2起泡过程泡沫高度均匀上升，切换气源进入CO2消泡阶段。由于溶液中仍含有部分起泡剂，在气流的冲击作用下，泡沫高度缓慢上升。同时，CO2使叔胺成分质子化，不断生成络合物从溶液中析出，降低了表面活性剂的含量。泡沫高度超过极大值之后，液体中不含有起泡剂成分，不会产生新的泡沫。泡沫中存在于气-液界面的表面活性剂含量减少，降低了气体分子与液相之间的结合力，泡沫很快扩张、破碎。相比于自然消泡泡沫半衰期10630 s，在鼓入CO2的条件下，泡沫完全消失只用了2185 s。这表明CO2的通入产生了响应，加速了泡沫的破碎。对响应后的溶液做去质子化处理，再次鼓入N2进行起泡，测量泡沫衰变曲线，从图中可以看出两次N2起泡阶段的起泡性能近似相同。自然消泡阶段仍具有很强的泡沫稳定性，溶液可逆性较好。

图8(b)曲线形状与SLS/C12A复配体系相似，在CO2消泡阶段，泡沫高度最大值出现较快，且曲线较为平缓，这可能与SDS自身的起泡性能有关系。通入CO2下，完全消泡时间由原来的7615 s缩短至2110 s。SDS/C12A体系具有很好的可逆性。比较二者的响应消泡的总时间，可以发现SLS/C12A复配体系的响应性更好。

2.4.2 复配泡沫的响应机理探究

CO2响应加速了泡沫破碎，其机理可以解释为：CO2通入到复配溶液当中，叔胺发生质子化反应。在库伦引力的作用下，阴离子与质子化的C12A阳离子结合，对外只表露出两侧的疏水头基，从溶液中析出。由此，气-液界面失去了阴离子表面活性剂离子的维系而变得不稳定。随着CO2含量的持续增加，气-液界面的表面活性剂分子含量越来越少，气泡开始合并扩大，最后破碎。实验过程中泡沫形态的变化如图9所示。随着的CO2通入，泡沫中叔胺质子化之后与阴离子表面活性剂结合形成络合物，从泡沫中脱落进入液体当中。CO2继续鼓入，泡沫柱出现部分缺失，并持续扩大，最终整个泡沫体碎裂。可以看出过程中泡沫柱的含液量较大，说明CO2消泡区别于自然消泡（水分降低，泡沫破碎）的“析液”-“破碎”过程而发生了响应。实验中，观察到响应之后的溶液由淡蓝色变得浑浊。静置一段时间后，有明显的白色物质沉积，这表明络合物在水中的溶解度较差。如图10所示。可以看出两种复配体系在产生响应之后表面张力均变大，SLS/C12A复配体系表面张力由30.609 mM·m-1变为37.349 mM·m-1，SDS/C12A复配体系表面张力由26.381 mM·m-1变为30.958 mM·m-1。表面张力越大，泡沫稳定性越差。表明溶液中表面活性剂成分与C12A结合，导致溶液中表面活性剂含量低，响应后溶液的泡沫稳定性降低。

图 9 响应过程泡沫形态变化 图 10 两种体系响应前后表面张力的对比图

3 结论

本文通过泡沫实验测量了十二烷基硫酸钠（SLS）、十二烷基磺酸钠（SDS）和十二烷基苯磺酸钠（SDBS）三种一价阴离子表面活性剂分别与N-十二烷基-N,N-二甲基叔胺（C12A）等摩尔复配形成的复配泡沫的泡沫性能和携液能力。向复配体系中加入无机盐和油相，研究添加成分对泡沫性能的影响。此外，针对泡沫性能较好的SLS/C12A和SDS/C12A复配体系进行CO2消泡实验和N2恢复重新起泡消泡实验，研究两种复配体系的CO2响应性能。主要结论有：

1、SLS/C12A复配体系泡沫性能最好，SDBS/C12A泡沫稳定性最差。

2、SLS/C12A复配体系表现出较强抗盐性能，适宜在含有无机盐的环境中选用。SDS/C12A复配体系有较强的抗油能力，适宜在正十二烷相应油相环境当中使用。

3、无机盐中，Mg2+对泡沫性能的影响最小，Ca2+会显著降低泡沫稳定性。油相中的正十二烷对泡沫稳定性影响较小，而正庚烷会显著降低泡沫性能。

4、CO2的通入会加速泡沫的破碎，使泡沫半衰期衰减五倍有余，达到了智能响应、人为控制泡沫性能的要求。此外，N2恢复之后的溶液仍具有很强的泡沫性能，两种复配体系的可逆性都很好，可以多次循环使用。本文将对泡沫排水采气工艺过程中的智能控制有积极影响，对于不同环境油气田的表面活性剂体系选择具有一定的指导意义。

**参考文献**

[1] 李旭成, 郑榕, 郑小林, 等. 泡沫排水采气固体消泡工艺应用现状[J]. 天然气与石油, 2015, 33(5): 27-31.

[2] 戚杰, 魏伟, 张磊, 等. FG-4固体消泡剂与加药装置的研发及应用[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 61-65..

[3] 田建峰, 曹成寿, 刘建英, 等. 苏里格气田泡沫排水采气工艺应用技术难点及对策[J]. 钻采工艺, 2016, 39(3): 67-69.

[4] Wang Yanwei, Liu Huiqing, Wang Jing, et al. Formulation development and visualized investigation of temperature-resistant and salt-tolerant surfactant-polymer flooding to enhance oil recovery[J]. J. Pet. Sci. Eng., 2019, 174:584-598

[5] 巴爱叶. 耐盐CO2响应型泡排剂制备研究[J]. 中国设备工程, 2020(07):13-14.

[6] 郭爽, 陈志强, 任笑菲,等. CO2响应型乳液体系[J]. 化学进展, 2017, 29(7):695-705.

[7] Zhao Yi , Landfester K, Crespy D. CO2 responsive reversible aggregation of nanoparticles and formation of nanocapsules with an aqueous core[J]. Soft Matter, 2012, 8(46):11687-11696.

[8] Zhang Yongmin, Zhang Yuandi, Wang Cheng, et al. CO2-responsive microemulsion: reversible switching from an apparent single phase to near-complete phase separation[J]. Green Chemistry, 2016, 18(2): 392-396.

[9] Sun Shuangqing, Zhang Xiqiang, Feng Shengxiang, et al. CO2/N2 switchable aqueous foam stabilized by SDS/C12A surfactants: Experimental and molecular simulation studies[J]. Chemical Engineering Science, 2019, 209:115218.

[10] Wang Qiwei, Zhou Guohua, Li Xiangliang, et al. Study on Foam Stability Improver[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003.

[11] Zhao Jun, Xu Kaqiu, Ye Jing. Study of high stability aqueous base foam[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2008.

[12] Lianos P, Lang J, Strazielle C, et al. Fluorescence probe study of oil-in-water microemulsions. 1. Effect of pentanol and dodecane or toluene on some properties of sodium dodecyl sulfate micelles[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1982, 86(6): 1019-1025.

[13] Zana R, Yiv S, Strazielle C, et al. Effect of alcohol on the properties of micellar systems: I. Critical micellization concentration, micelle molecular weight and ionization degree, and solubility of alcohols in micellar solutions[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 1981, 80(1):208-223.

[14] 王彦玲, 郑晶晶, 赵修太, 等. 低碳醇对氟碳与碳氢表面活性剂复配体系泡沫性能的影响[J]. 化工学报, 2010, 61(5):1202-1207.

[15] 刘宏生, 许关利, 杨莉, 等. 抗盐表面活性剂及其复配体系的泡沫性能[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2012, 25(2): 150-152.

[16] 李春秀. 苛刻条件下的水基泡沫稳定性研究[D]; 山东：山东大学, 2013：41.

[17] 于立军. 阴离子表面活性剂在油水界面吸附行为的实验和理论研究[D]. 山东：中国石油大学, 2011：35.