文章编号：1000-4092（2022）02-331-07

阴离子型表面活性剂/叔胺复配泡沫的性质及CO_2/N_2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）材料科学与工程学院，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，将十二烷基硫酸钠（SLS）、十二烷基磺酸钠（SDS）和十二烷基苯磺酸钠（SDBS）分别与*N*-十二烷基-*N*，*N*-二甲基叔胺（$C_{12}A$）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/$C_{12}A$和SDS/$C_{12}A$复配体系进行了CO_2响应消泡以及N_2加热重新起泡实验，分析了复配泡沫的响应机理。结果表明，SLS/$C_{12}A$复配体系的泡沫性能最好，SDBS/$C_{12}A$的泡沫稳定性最差。SLS/$C_{12}A$复配体系的耐盐能力强，SDS/$C_{12}A$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的变化分析响应机理为：质子化的$C_{12}A$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。这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。

关键词：阴离子表面活性剂；叔胺；CO_2响应；泡沫

文献标识码：A DOI：10.19346/j.cnki.1000-4092.2022.02.024

中图分类号：O647.1：O648.2*4 开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

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。比如，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]；由于气井中盐离子油相的存在导致产出液乳化絮凝，影响回收处理等[3-5]。智能响应型表面活性剂能人为控制泡沫时效。在已报道的多种刺激响应类型中，CO_2响应型泡沫由于具有来源广、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[6]。

N-十二烷基*N*，*N*-二甲基叔胺（$C_{12}A$）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[7]，广泛应用于CO_2响应体系当中[8-10]。但$C_{12}A$泡沫性能差，不能作为起泡剂制备CO_2响应型泡沫[6]。Zhang等[9]将$C_{12}A$与传统表面活性剂复配，制得兼具响应性能和表面活性的乳液。刺激-响应型泡排剂体系中，阴-阳离

* 收稿日期：2021-07-06；修回日期：2021-11-04。

基金项目：国家自然科学基金面上项目“新型CO_2响应型耐温抗盐泡排体系的设计、作用机理和应用研究”（项目编号51874331）。

作者简介：刘冬梅（1986—），女，工程师，陕西科技大学有机化学专业硕士（2011），从事油气田腐蚀与防护工作，通讯地址：830011 乌鲁木齐市新市区长春南路466号中国石化西北石油科研生产园区工程技术研究院B608，电话：0991-3161282，E-mail：liudm.xb-sj@sinopec.com。孙霜青（1981—），男，教授，本文通讯联系人，主要研究领域为油气田化学药剂开发，通讯地址：266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号中国石油大学（华东）材料科学与工程学院，E-mail：sunshuangqing@upc.edu.cn。

子型表面活性剂复配体系的耐盐耐油性能也少有研究。因此，本文采用十二烷基硫酸钠（SLS）、十二烷基磺酸钠（SDS）和十二烷基苯磺酸钠（SDBS）3种不影响叔胺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$C_{12}A$组成复配体系，使复配之后的溶液具有良好的泡沫性能，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，考察了无机盐离子（Na^+、Mg^{2+}和Ca^{2+}）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 材料与仪器

N-十二烷基*N*, *N*-二甲基叔胺（$C_{12}A$），分析纯，北京百灵威科技有限公司；十二烷基硫酸钠（SLS），分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；十二烷基磺酸钠（SDS）、十二烷基苯磺酸钠（SDBS）、异丙醇、氯化钠、六水合氯化镁、氯化钙、正庚烷、正十二烷、十六烷（98%），分析纯，国药集团化学试剂有限公司；二氧化碳（CO_2），≥99.8%；氮气（N_2），≥99.999%；油红，上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

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

1.2 实验方法

（1）复配泡沫的制备与性能评价

将SDS等分别与$C_{12}A$按等物质的量复配，配制0.01 mol/L的溶液，室温搅拌1 h。实验过程中，SDBS与$C_{12}A$的溶解效果较差，遂用5%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，在0.6 L/min下鼓入N_2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σ_0的比值（σ/σ_0）来表征泡沫的析液速率[9]。

（2）复配泡沫的抗盐耐油性评价

在上述溶液中分别添加氯化钠、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3%油相的溶液，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。

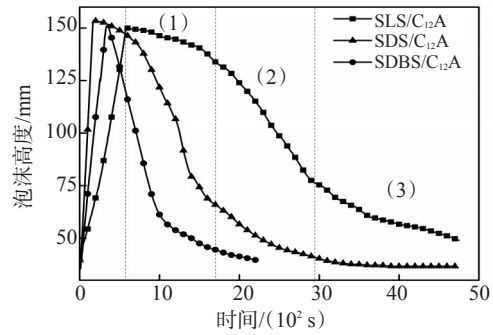
（3）复配泡沫的CO_2响应性能和机理分析

在0.6 L/min下向上述溶液鼓入N_2起泡，当泡沫高度为150 mm时停止通气。在0.1 L/min下通入CO_2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，在0.1 L/min下通入N_2，将溶液在60 ℃下加热2 h，重新起泡。用接触角测量仪对响应后的溶液和未响应的溶液分别进行表面张力的测量。按悬滴法进行实验，慢慢挤压针管使液滴掉落；对于捕捉到的图像采用5点法分析计算，重复测量5次以上。

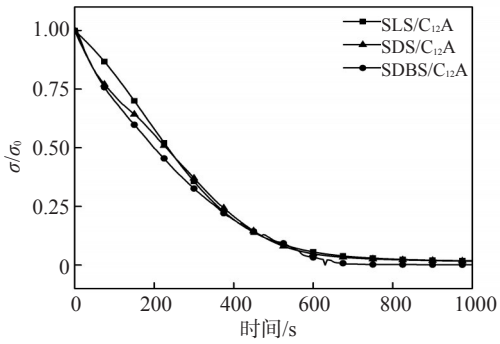
2 结果与讨论

2.1 复配溶液的泡沫性能

如图1（a）所示，随着静置时间增加，泡沫高度逐渐衰减，其中SLS/$C_{12}A$复配体系的泡沫稳定性最强，SDS/$C_{12}A$复配体系次之，SDBS/$C_{12}A$复配体系最



（a）泡沫衰变曲线



（b）电导率变化曲线

图1 3种复配体系的泡沫稳定性

差。SLS/C_{12}A和SDS/C_{12}A体系的泡沫衰变曲线均表现为3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/C_{12}A体系为例在图1中标出。3种复配溶液的电导率变化曲线如图1(b)所示。由图可见，电导率变化曲线大致相似，斜率近似相等，表明3种复配溶液的携液能力相差较小。初期SLS/C_{12}A复配体系的电导率下降较慢，泡沫携液能力稍强。

2.2　添加异丙醇的复配溶液的泡沫性能

实验过程中，SDBS/C_{12}A复配体系溶液的溶解度较低，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[11]，使表面活性剂在油水界面的排列过程更容易发生，降低表面活性剂的临界胶束浓度，增大气-液界面的结合力[12]。此外，醇分子会间隔排列在表面活性剂分子中，能有效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[13-15]。为排除溶解度导致的实验误差，向复配溶液中添加5%的异丙醇做增溶剂。

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，在本实验中具体指泡沫高度降至75 mm时所用的时间。如图2(a)所示，异丙醇的添加使得SLS/C_{12}A复配体系的泡沫半衰期提升约4.4倍，SDS/C_{12}A复配体系提高了2.9倍，SDBS/C_{12}A复配体系提升了3.03倍。这表明异丙醇的添加能使3种阴离子表面活性剂的表面活性显著提高。由图2(b)可见，SLS/C_{12}A复配泡沫稳定区的时间显著增加，对应电导率曲线也更为平缓，表明异丙醇的添加降低了SLS/C_{12}A复配泡沫的析液速度，增强了泡沫稳定性。但SDBS/C_{12}A复配体系的泡沫性能仍然很差，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

2.3.1　复配泡沫的抗盐性

(1)SLS/C_{12}A复配体系

向SLS/C_{12}A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。由图3(a)可见，无机盐的加入会使泡沫高度出现“骤降”。此外，Mg^{2+}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。Ca^{2+}显著降低了SLS/C_{12}A体系的泡沫稳定性。这是由于SLS的电离亲水基团硫酸基亲水性较强，且在溶液中易与Ca^{2+}结合[16]。而且从图3(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320 s后，析液速度明

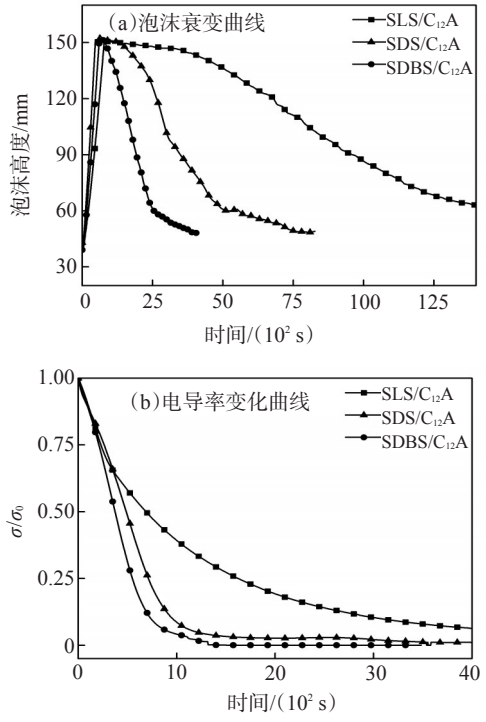
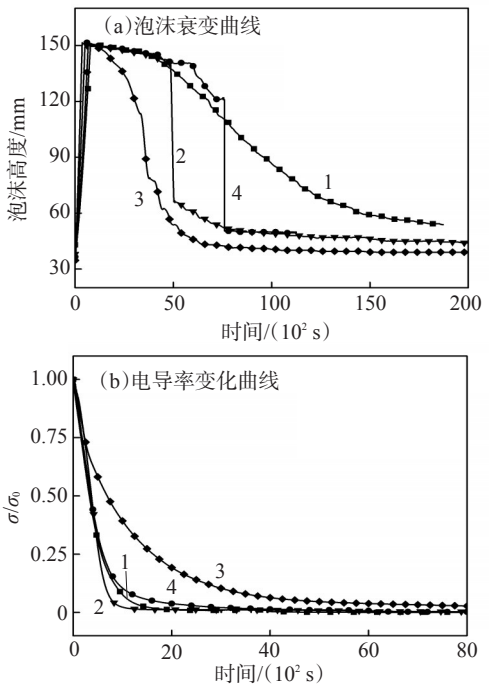


图2　异丙醇对3种复配体系泡沫稳定性的影响



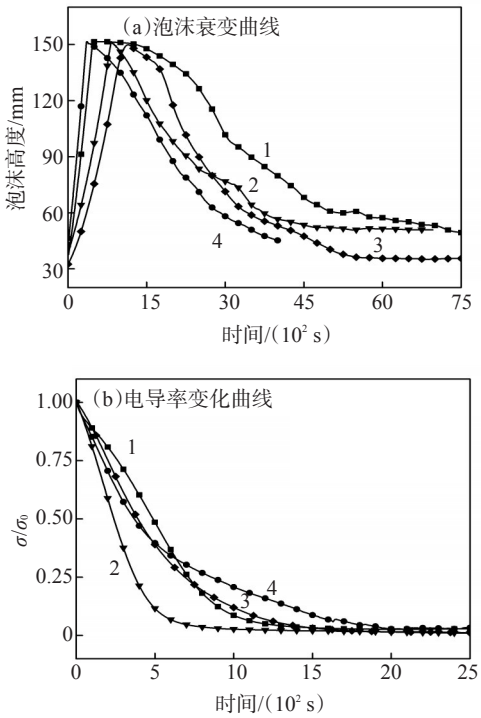
1，■，未添加无机盐；2，▼，氯化钠；3，◆，氯化钙；4，●，氯化镁。

图3　盐离子对SLS/C_{12}A复配溶液泡沫稳定性的影响

显加快，其中Na^+对泡沫析液速度的影响最大。

（2）SDS/C_{12}A复配体系

SDS和SLS的结构及泡沫性能相似，泡沫衰变曲线均表现为3个阶段，如图4（a）所示。但无机盐对二者泡沫稳定性的影响有明显不同。主要表现在：（1）SDS/C_{12}A体系没有泡沫高度的“骤降”特征；（2）3种无机盐离子都显著降低泡沫性能，但影响相差较小；（3）无机盐Mg^{2+}、Ca^{2+}对泡沫析液速度的影响较小，而Na^+会显著加快泡沫的析液速度。而且从图4（b）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SDS/C_{12}A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。

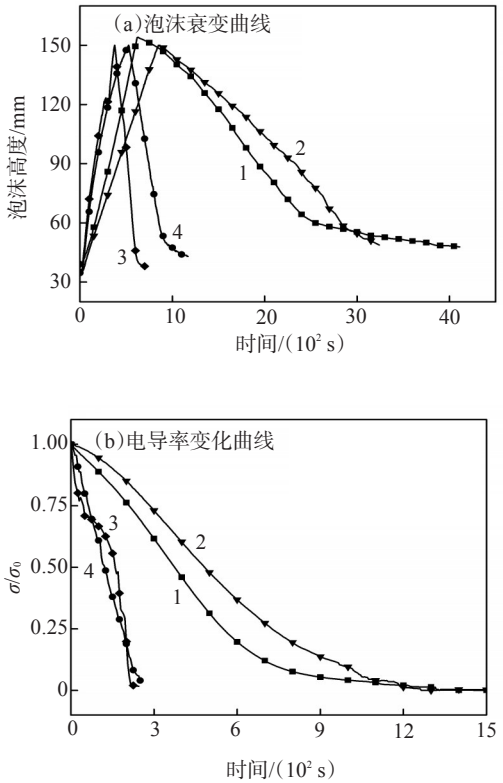


1，■，未添加无机盐；2，▼，氯化钠；3，◆，氯化钙；4，●，氯化镁。

图4 盐离子对SDS/C_{12}A复配溶液泡沫稳定性的影响

（3）SDBS/C_{12}A复配体系

如图5（a）所示，无机盐离子对SDBS/C_{12}A体系的影响很大。Mg^{2+}、Ca^{2+}使泡沫在极短时间内完全破碎，泡沫性质差。此外，如图5（b）所示，Mg^{2+}、Ca^{2+}复配体系的泡沫很不稳定，在极短时间内泡沫即完全破碎，并且这两种无机盐离子的析液速度很快。但是，SDBS/C_{12}A苯磺酸钠体系表现出较强的抗Na^+的能力，Na^+对SDBS/C_{12}A体系泡沫性能及析液速度的影响较小。



1，■，未添加无机盐；2，▼，氯化钠；3，◆，氯化钙；4，●，氯化镁。

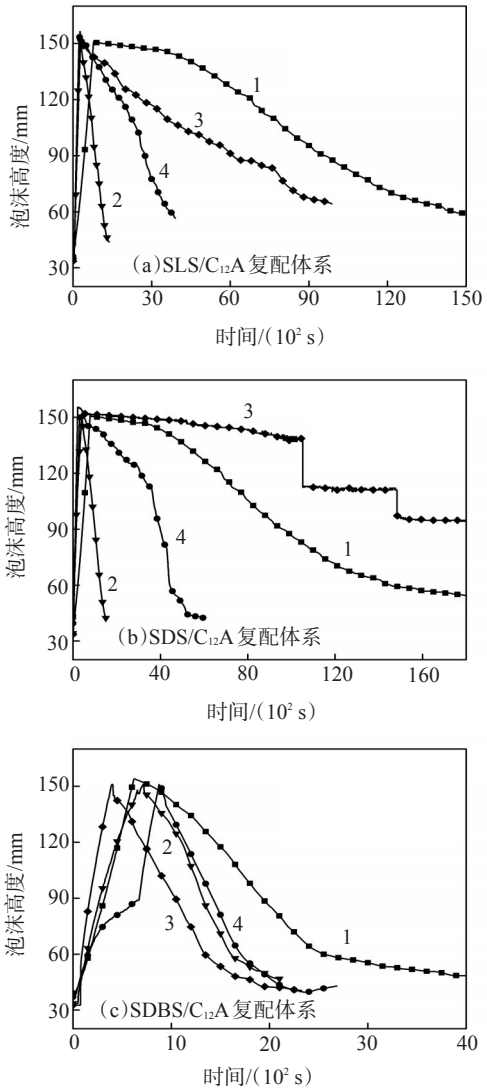
图5 盐离子对SDBS/C_{12}A复配溶液泡沫稳定性的影响

总体来看，无机盐对SLS/C_{12}A体系的影响最大，而对于亲水基团为磺酸基的SDS/C_{12}A和SDBS/C_{12}A体系的影响较小。此外，对于3种复配体系，Ca^{2+}对泡沫稳定性的影响大于Mg^{2+}。这可能是由于Mg^{2+}的水化作用强于Ca^{2+}[17]，从而水分子受到的作用力强，束缚大，泡沫析液速度小，泡沫稳定。

2.3.2 复配泡沫的耐油性

如图6（a）所示，正庚烷对SLS/C_{12}A体系泡沫稳定性的影响最大，泡沫半衰期由10 000余秒缩减到740 s，大大降低了SLS/C_{12}A体系的泡沫稳定性。添加正庚烷的泡沫破碎速度快，添加十六烷的有少许波动，添加十二烷的曲线则与未添加油相体系的曲线形状类似。如图6（b）所示，正庚烷使SDS/C_{12}A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。实验中发现，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SDS/C_{12}A体系的影响也比较小，表明SDS/C_{12}A的耐油能力强于SLS/C_{12}A。如图6(c)所示，3种油相对SDBS/C_{12}A体系泡沫稳定性的影响相似，泡沫半衰期从1560 s降至750 s，且泡沫衰减速度大致相同。这可能与SDBS自身结构的特殊性和自身的泡沫稳定性较差有关。



1，■，未添加油相；2，▼，正庚烷；3，◆，正十二烷；4，●，十六烷。

图6　复配泡沫添加油相的泡沫衰变曲线

SLS等3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[18]。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/C_{12}A体系的影响较大，但由于SLS/C_{12}A体系自身泡沫稳定性的原因，加入无机盐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/C_{12}A复配体系可以更好地满足抗无机盐能力的需求。对于油相来说，SDS/C_{12}A体系表现出了较好的耐油能力，特别是添加正十二烷的SDS/C_{12}A体系表现出极好的泡沫稳定性。而添加正庚烷的3种复配溶液，泡沫半衰期大致相同，均约为700 s。这表明正庚烷会极大地降低表面活性剂的泡沫稳定性，3种阴离子表面活性剂均不适合在含有正庚烷的环境中使用。

2.4　泡沫响应性能及机理

2.4.1　复配泡沫的响应性能

由于前文中，SDBS/C_{12}A体系的泡沫性能较差，因此，泡沫响应性实验选用泡沫性能好的SLS/C_{12}A和SDS/C_{12}A体系进行测试(图7)。如图7(a)所示，N_2起泡过程中泡沫高度均匀上升，切换气源进入CO_2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，CO_2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，液体中不再含有起泡剂成分，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

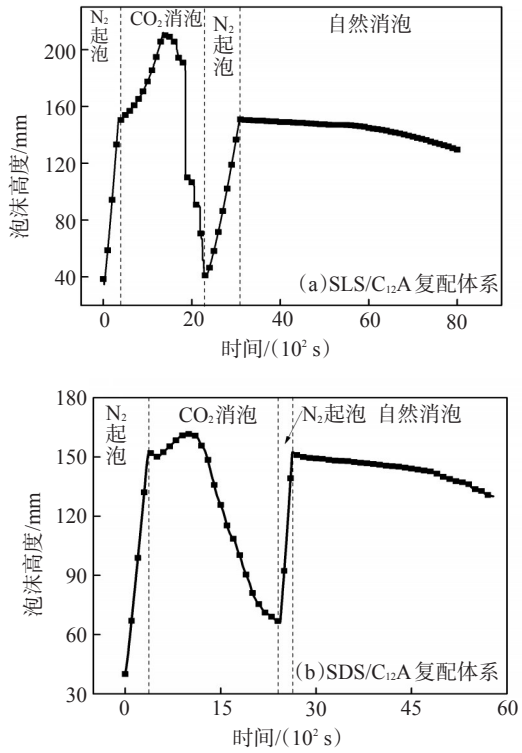


图7　复配泡沫响应和恢复泡沫高度衰变曲线

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10 630 s，在鼓入CO_2的条件下，泡沫完全消失只用了2185 s。这表明CO_2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N_2进行起泡，测量泡沫衰变曲线。从图中可以看出，两次N_2起泡阶段的起泡性能近似。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7(b)曲线的形状与SLS/C_{12}A复配体系的相似。在CO_2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。通入CO_2后，完全消泡时间由原来的7615 s缩短至2110 s。SDS/C_{12}A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/C_{12}A复配体系的响应性更好。

2.4.2 复配泡沫的响应机理

CO_2响应加速了泡沫破碎，其机理可以解释为：CO_2通入复配溶液当中，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C_{12}A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CO_2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8所示。随着CO_2的通入，泡沫中的叔胺质子化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。CO_2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，通入CO_2的过程中泡沫柱的含液量较大，说明CO_2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，表明络合物在水中的溶解度较差。SLS/C_{12}A、SDS/C_{12}A两种复配体系在产生响应之后的表面张力均变大。SLS/C_{12}A复配体系的表面张力由30.609 mN/m增至37.349 mN/m，SDS/C_{12}A复配体系的表面张力由26.381 mN/m增至30.958 mN/m。表面张力越大，泡沫稳定性越差。表明溶液中的表面活性剂成分与C_{12}A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。

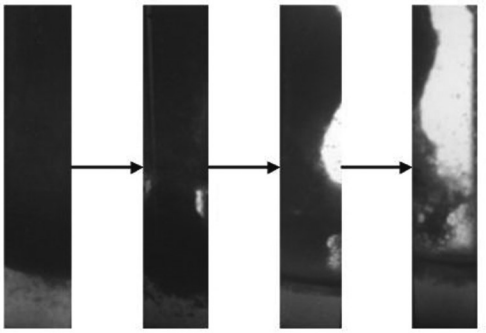


图8 响应过程中泡沫的形态变化

3 结论

研究了十二烷基硫酸钠(SLS)、十二烷基磺酸钠(SDS)和十二烷基苯磺酸钠(SDBS)3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(C_{12}A)按等物质的量复配形成体系的泡沫性能和携液能力。考察了无机盐和油相对复配体系泡沫性能的影响。针对泡沫性能较好的SLS/C_{12}A和SDS/C_{12}A复配体系，进行CO_2消泡实验和N_2恢复重新起泡消泡实验，研究两种复配体系的CO_2响应性能。

SLS/C_{12}A复配体系的泡沫性能最好，SDBS/C_{12}A的泡沫稳定性最差。SLS/C_{12}A复配体系表现出较强的抗盐性能，适宜在含有无机盐的环境中选用；SDS/C_{12}A复配体系有较强的抗油能力，适宜在正十二烷类油相环境中使用。无机盐中，Mg^{2+}对泡沫性能的影响最小，Ca^{2+}会显著降低泡沫稳定性。油相中的正十二烷对泡沫稳定性的影响较小，而正庚烷会显著降低泡沫性能。CO_2会加速泡沫的破碎，使泡沫半衰期衰减5倍有余，达到了智能响应、人为控制泡沫性能的要求。此外，用N_2恢复之后的溶液仍具有良好的泡沫性能。SLS/C_{12}A和SDS/C_{12}A两种复配体系的可逆性均较好，可以多次循环使用。本文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 Y W, LIU H Q, WANG J, 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] 田雨露，王纪伟，李加玉. 泡沫排水用起泡剂的应用进展[J]. 油田化学，2021，38(2)：368–373.

[6] 巴爱叶. 耐盐 CO_2 响应型泡排剂制备研究[J]. 中国设备工程，2020(7)：13–14.

[7] 郭爽，陈志强，任笑菲，等. CO_2 响应型乳液体系[J]. 化学进展，2017，29(7)：695–705.

[8] ZHAO Y, LANDFESTER K, CRESPY D. CO_2 responsive reversible aggregation of nanoparticles and formation of nanocapsules with an aqueous core [J]. Soft Matter, 2012, 8 (46): 11687–11696.

[9] ZHANG Y M, ZHANG Y D, WANG C, et al. CO_2-responsive microemulsion: Reversible switching from an apparent single phase to near-complete phase separation [J]. Green Chem, 2016, 18(2): 392–396.

[10] SUN S Q, ZHANG X Q, FENG S X, et al. CO_2/N_2 switchable aqueous foam stabilized by SDS/C_{12}A surfactants: Experimental and molecular simulation studies [J]. Chem Eng Sci, 2019, 209: 115218.

[11] 王其伟，周国华，李向良，等. 泡沫稳定性改进剂研究[J]. 大庆石油地质与开发，2003，22(3)：81–84.

[12] 赵俊，徐卡秋，叶静. 高稳定性水基泡沫液的研究[J]. 日用化学工业，2008，38(6)：363–385.

[13] 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]. J Phys Chem, 1982, 86(6): 1019–1025.

[14] 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]. J Colloid Interface Sci, 1981, 80(1): 208–223.

[15] 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.

[16] 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.

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

[18] 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]. 东营：中国石油大学，2011：35.

Foam Property and CO_2/N_2 Response Performance 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, Northwest Oilfield Branch Company, Sinopec, Urumqi, Xinjiang 830011, P R of China; 2. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery in Carbonate Fractured-vuggy Reservoirs, Sinopec, Urumqi, Xinjiang 830011, P R of China; 3. Petroleum Engineering Supervision Center, Northwest Oilfield Branch Company, Sinopec, Luntai, Xinjiang 841600, P R of China; 4. School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, P R of China*)

Abstract: In the foam drainage and gas recovery process, it is difficult to achieve controllable defoaming after the foam reaches earth surface. In order to obtain a foam discharge system with both stability and responsiveness, and clarify the applicability in inorganic salt and oil phase environments, sodium dodecyl sulfate (SLS), sodium dodecyl sulfate (SDS) and sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) were compounded with *N*-dodecyl-*N*, *N*-dimethyl tertiary amine (C_{12}A), respectively. The foam property of the compound solution and the effect of inorganic salt and oil on the compound system were studied. For the SLS/C_{12}A and SDS/C_{12}A compound systems with better foam property, CO_2 response defoaming and N_2 heating re-foaming experiments were carried out, and the response mechanism of the compound foam was analyzed. The results showed that the foam property of SLS/C_{12}A compound system was the best, and the foam stability of SDBS/C_{12}A was the worst. SLS/C_{12}A compound system had strong salt tolerance, and SDS/C_{12}A compound system had significant oil resistance. Both compound systems showed good responsiveness and reversibility. The response mechanism was analyzed by the change of solution morphology and surface tension after defoaming. The protonated C_{12}A electrostatically attracted surfactant to form a complex, which precipitated from the solution. The surface activity of the solution was reduced and the breakage of the foam was accelerated. It had certain guiding significance for the selection of surfactant system in oil and gas fields with different environments.

Keywords: *anionic surfactant; tertiary amine; CO_2 response; foam*