

# 耐温耐盐 CO<sub>2</sub> 响应型叔胺泡沫的性能及响应机理

王秀民 崔健鹏 王志坤 孙霜青

中国石油大学(华东)材料科学与工程学院

**摘要:** **目的** 解决传统泡沫过于稳定,消泡困难等问题。**方法** 采用 N-十二烷基-1,3-丙二胺与耐温耐盐型阴离子表面活性剂复配,制备一种 CO<sub>2</sub> 响应型耐温耐盐复配泡沫体系,并采用分子模拟探究了复配泡沫的稳定性和响应机理。N-十二烷基-1,3-丙二胺具有良好的质子化性能和耐盐性能,但其耐温性能较差,且不具备响应性能。将其与十二烷基硫酸钠(SDS)和十二烷基磺酸钠复配后,高温下起泡速度提高了 40%,泡沫存在时间达到复配前的 3.17 倍,耐温性显著提升,且具有良好的 CO<sub>2</sub> 响应性能。分子模拟研究发现,通入 CO<sub>2</sub> 后,液膜内 SDS 中含 S 原子基团与 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 中带正电荷的 N 原子基团相结合,从而失去表面活性,导致泡沫的稳定性变差,这也是响应消泡的原因。**结论** 该复配体系具有良好的耐温耐盐性能和响应性能,能够在苛刻环境下完成泡沫排水采气后实现响应消泡,具有广阔的应用前景。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 响应型泡沫;表面活性剂;耐温耐盐;分子模拟

**DOI:** 10.3969/j.issn.1007-3426.2024.04.010

**引用格式:** 王秀民,崔健鹏,王志坤,等.耐温耐盐 CO<sub>2</sub> 响应型叔胺泡沫的性能及响应机理[J].石油与天然气化工,2024,53(4):73-78.

WANG X M, CUI J P, WANG Z K, et al. Performance and response mechanism of CO<sub>2</sub> responsive tertiary amine foam with temperature and salt tolerance[J].

Chemical Engineering of Oil & Gas, 2024, 53(4): 73-78.

## Performance and response mechanism of CO<sub>2</sub> responsive tertiary amine foam with temperature and salt tolerance

WANG Xiumin, CUI Jianpeng, WANG Zhikun, SUN Shuangqing

School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, China

**Abstract:** **Objective** In order to solve the problems such as too stable traditional foam and difficulty in defoaming. **Method** Using N-dodecyl-1,3-propanediamine and temperature and salt tolerant anionic surfactant to prepare a CO<sub>2</sub> responsive temperature and salt tolerance composite foam system, and uses molecular simulation to explore the stability and response mechanism of the composite foam. **Results** Results show that N-dodecyl-1,3-propanediamine has good protonation and salt tolerance properties. However, its temperature tolerance is poor, and it does not have response performance. After compounding with sodium dodecyl sulfate (SDS) and sodium dodecyl sulfate, the foaming speed at high temperature is increased by 40%, the foam duration is 3.17 times longer than that before compounding, the temperature resistance is significantly improved, and the foam is defoamed rapidly within a short period after passing CO<sub>2</sub>. Molecular simulation studies reveal that the S atomic groups contained in SDS will combine with the positively charged N atomic groups in C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> and lose surface activity, resulting in poor stability of the foam, which is also responsible for the responsive defoaming. **Conclusion** The composite system has good temperature and salt resistance and responsiveness, and can realize responsive defoaming after foam drainage and gas production in harsh environments which has broad application prospects.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> responsive foam; surfactant; temperature and salt tolerance; molecular simulation

泡沫在排水采气,提高油气采收率方面应用广泛,然而油气资源所处环境具有高温高含盐量等特点<sup>[1]</sup>,温度越高,离子的运动速度越快,导致离子之间的碰撞越频繁,从而不利于泡沫的稳定性<sup>[2]</sup>。而

不同的无机盐也会影响表面活性剂的性能,使其起泡能力等受到不同程度的影响。因此,泡沫排水起泡剂需要具备良好的稳定性<sup>[3-5]</sup>,且能够在复杂的地下环境中起泡并携带水至地面。2019年,李兆敏等<sup>[6]</sup>

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目“新型 CO<sub>2</sub> 响应型耐温抗盐泡排体系的设计、作用机理和应用研究”(51874331)

**作者简介:** 王秀民,1976年生,研究生学历,工学硕士,高级实验师,2014年毕业于中国石油大学(华东)材料工程专业,主要从事实验教学与科研工作,重点研究油气田腐蚀与防护领域,已发表论文近30篇。E-mail: wangxiumin@upc.edu.cn

**通信作者:** 孙霜青,1981年生,博士,教授,2010年毕业于北京有色金属研究总院,主要从事党务管理及科研教学工作,重点研究油田化学驱及多尺度模拟领域,主持国家自然科学基金2项,主持省部级课题6项,主持厅局级和校级课题6项。E-mail: sunshuangqing@upc.edu.cn

研究发现 0.5%(w)HY-4 与 1.0%(w)疏水纳米 SiO<sub>2</sub> 颗粒复配得到的泡沫性能良好,在 150 °C 下有良好的稳定性;2020 年,方珏等<sup>[7]</sup>以  $\alpha$ -烯基磺酸钠为主要成分复配,得到了耐温耐油的泡沫体系。实验结果表明,复配能够改善表面活性剂的耐温耐盐性能,提高泡沫的稳定性。

目前,泡沫排水采气都需要在地面管线加消泡剂,而响应型泡排剂能够在井筒起泡,在地面管线快速自动消泡,从而可以大幅降低泡沫排水药剂的用量与成本。近年来,科研工作者相继研发了具备 pH、光、氧化还原和磁等响应性质的泡排剂<sup>[8-11]</sup>,其中 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 开关响应型泡沫能够在到达地面后自动消泡,因其绿色环保的优势而颇受欢迎<sup>[12-17]</sup>。Sun 等<sup>[12]</sup>制备了一种十二烷基叔胺(C<sub>12</sub>A)与十二烷基硫酸钠(SDS)复配泡沫体系,当通入 CO<sub>2</sub> 气体后,C<sub>12</sub>A 会质子化,与 SDS 所带的负电荷相互作用,使 SDS 失去表面活性发生消泡。Wang 等<sup>[18]</sup>将长链脂肪酸(LCFA)与聚醚胺 d230 按摩尔比(2:1)混合合成“伪 gemini”表面活性剂,获得了具有优异表面活性和响应行为的表面活性剂。

N-十二烷基-1,3-丙二胺(C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)具有较好的耐盐性能,在酸性条件下能够质子化,并且相比于其他响应型分子具有响应灵敏的优点。因此,采用 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 与耐温耐盐型阴离子表面活性剂复配,制备了一种耐温耐盐的 CO<sub>2</sub> 响应型复配泡沫体系。采用分子模拟技术对其响应机理进行探究。

## 1 实验和模拟

### 1.1 仪器与试剂

阴离子表面活性剂:SDS、十二烷基磺酸钠,AR,上海麦克林生化科技有限公司。叔胺:十二烷基-1,3-丙二胺,质量分数为 88%,郑州阿尔法化工有限公司。NaCl、MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O、CaCl<sub>2</sub>,AR,国药集团化学试剂有限公司。CO<sub>2</sub>,质量分数≥99.8%,青岛天源气体制造有限公司。N<sub>2</sub>,质量分数≥99.999%,青岛天源气体制造有限公司。

JPM2012 型泡沫分析仪,上海中晨数字技术设备有限公司。CPA324S 型准微量电子天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司。KQ-700DE 型数控超

声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司。

### 1.2 叔胺的耐盐性测试

按物质的量比为 1:1:1 配制质量浓度分别为 400 mg/L、600 mg/L 和 800 mg/L 的 NaCl、CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 和 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 混合盐溶液,以及 600 mg/L 的 NaCl、CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 和 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 单独盐溶液。向盐溶液中添加 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>,配制含 0.02 mol/L 叔胺的盐溶液。取 50 mL 盐溶液于泡沫分析仪中,以 0.6 L/min 的流量向溶液中通入 CO<sub>2</sub> 气体,在起泡高度达到 210 mm 时停止通气,记录叔胺在不同浓度盐溶液中的起泡和消泡时间。

### 1.3 叔胺及复配体系的耐温性测试

将浓度为 0.02 mol/L 的 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 分别与 SDS 和十二烷基磺酸钠按物质的量比 1:1 进行复配。取 50 mL 溶液加热至 90 °C,以 0.6 L/min 的流量向溶液中通入 CO<sub>2</sub> 气体,待泡沫高度达到 210 mm,停止通入气体,记录起泡和消泡时间。再将单独的浓度为 0.02 mol/L 的 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 沿管壁倒入泡沫分析仪中,以 0.6 L/min 的流量向溶液中通入 N<sub>2</sub>,起泡至相同高度(210 mm)后,停止通气,记录相关数据。

### 1.4 叔胺及复配体系的泡沫响应性测试

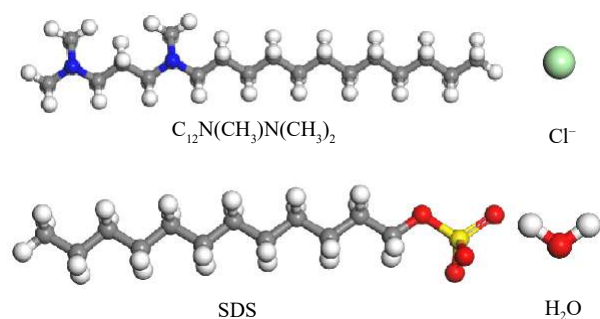
按物质的量比为 1:1:1 配制 800 mg/L 的 NaCl、CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 和 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 混合盐溶液,并向盐溶液中添加浓度为 0.02 mol/L 的 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 的叔胺盐溶液。取 50 mL 溶液置于泡沫电导仪中,以 0.6 L/min 的流量向溶液中通入 CO<sub>2</sub> 气体,测试溶液电导率的变化。开始阶段,溶液电导率随 CO<sub>2</sub> 气体的通入而上升,当溶液电导率不再变化时,停止通入 CO<sub>2</sub>。通过溶液电导率的变化来反映溶液的响应能力。

将浓度为 0.02 mol/L 的 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 盐溶液分别与 SDS 和十二烷基磺酸钠按物质的量比 1:1 进行复配。取单一 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液和复配溶液各 30 mL 置于泡沫分析仪中,对单一 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 的泡沫性质进行测试。以 0.6 L/min 的流量向溶液中通入 CO<sub>2</sub> 气体,待泡沫高度达到 140 mm 时,停止通气,记录其起泡时间和消泡时间;其次,对两种复配体系的响应性能进行探

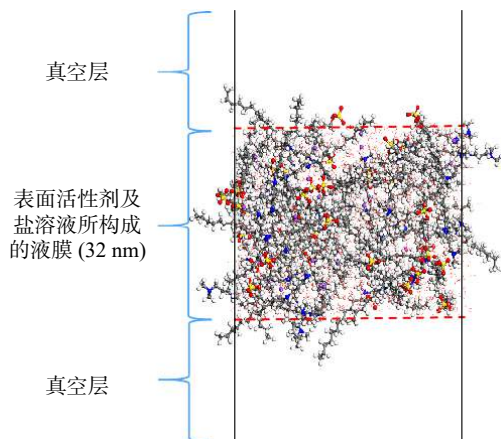
究。以 0.6 L/min 的流量向复配溶液通入  $N_2$ ，待泡沫高度达到 140 mm 时，停止通气，记录起泡时间；而后以 0.2 L/min 的流量缓慢通入  $CO_2$  气体进行响应，待泡沫消除后停止通气，并记录响应时间。

## 1.5 计算方法和模型

采用 Accelrys 公司的 Materials Studio 软件进行模型构建和分子动力学模拟研究。首先构建研究对象的分子及离子模型(见图 1(a))，然后采用 Amorphous Cell 模块构建表面活性剂初始盐溶液液膜模型，其中包含 72 个表面活性剂分子、2042 个水分子及一定数目的  $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$  和  $HCO_3^-$  (根据研究内容需求设定盐含量)。盒子初始尺寸为 4.368 nm×4.368 nm×9.00 nm，其中，沿  $z$  轴方向液膜初始厚度为 3.20 nm，沿模型 3 个方向设定周期性边界条件(见图 1(b))。进一步采用 Forcite 模块对上述模型进行几何优化和分子动力学模拟计算，选择 COMPASS 力场描述各原子之间相互作用，而描述静电和范德华相互作用的求和方法，分别设置为 Ewald 和 Atom Based，截断半径设置为 1.25 nm；选择正则系综(NVT)对计算进行限制，控温方法为



(a) 分子及离子模型



(b) 盐溶液中复配体系初始模型

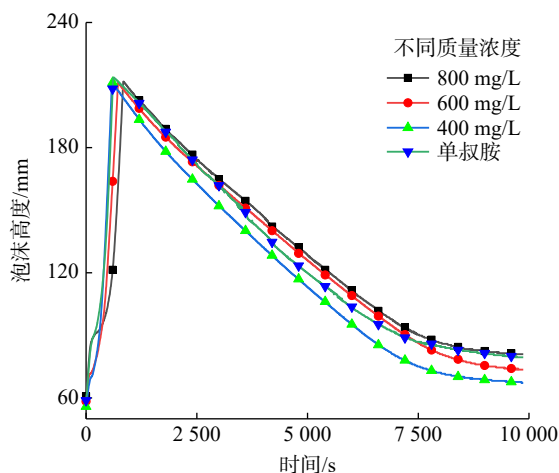
图 1 分子模拟模型

Nose，设置常温 298 K (1 K=-272.15 °C) 和高温 313 K 两个温度；设置动力学模拟时长为 2 ns，步长为 1 fs，动力学模拟计算结果每 2000 步输出一帧，用于结果分析。

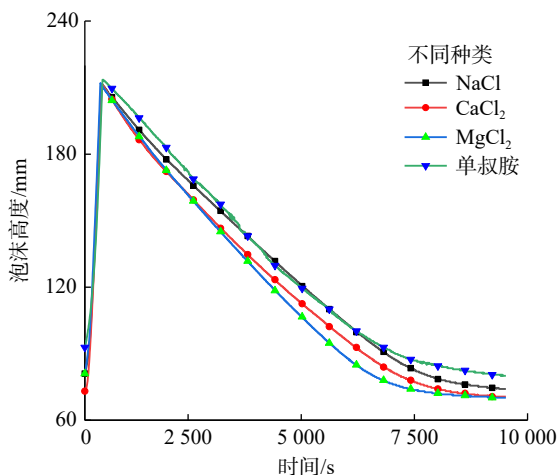
## 2 结果与讨论

### 2.1 单一叔胺泡沫体系的耐盐性

盐离子对泡沫液膜的稳定性具有较大影响，因此，首先考查了单一  $C_{12}N(CH_3)N(CH_3)_2$  叔胺泡沫的耐盐性能。在设置质量浓度梯度的混合无机盐中(见图 2(a))，盐质量浓度分别为 400 mg/L、600 mg/L 和 800 mg/L 通入  $CO_2$  气体，使得分子中的两个叔胺基团质子化，大大增强了表面活性剂亲水头基和水相之间的结合强度，从而起到稳定泡沫液膜的作用。由图 2(a)可知，不同质量浓度的混合盐对叔胺的起泡速度及消泡时间都影响不大，故泡沫具有良



(a) 不同质量浓度的无机盐体系



(b) 不同种类无机盐溶液

图 2 泡沫体系的耐盐性能

好的抗盐能力,能够适用于油气田开采。

进一步研究 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和 Mg<sup>2+</sup>对泡沫性质的影响。由图 2(b)可知,与纯叔胺泡沫体系相比,添加 3 种无机盐后,泡沫起泡速度基本不变,泡沫稳定时间呈现一定程度下降。其中,添加 Na<sup>+</sup>以后泡沫稳定时间与纯叔胺体系非常接近,证明一价盐离子基本不会改变泡沫稳定性;而添加 Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>后,泡沫稳定时间下降比 Na<sup>+</sup>大,说明二价盐离子对泡沫液膜性质造成的影响比一价盐离子大。这可能是因为二价盐离子所带电荷较大,对质子化后叔胺的头基在水相的吸附性能有较大影响。

## 2.2 叔胺复配泡沫体系的耐温性

温度会对液膜的表现黏度造成影响,而高温会提高析液速率,降低泡沫的携液量,进而降低泡沫的稳定性。本研究将叔胺与带有磺酸基团的耐温型阴离子表面活性剂复配,以提高泡沫耐温能力。将浓度为 0.02 mol/L 的 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 分别与 SDS 和十二烷基磺酸钠按物质的量比 1:1 进行复配,在 90 °C 高温下,对复配体系及单叔胺的泡沫性能进行研究,实验结果见图 3。由图 3 可知,在高温环境下,叔胺泡沫的半衰期高度迅速下降,说明其耐高温性能较差;两种复配体系相比于叔胺的消泡周期显著增加,起泡速度能够提高 40%,高温下的泡沫存在时间能够达到复配前的 3.17 倍,说明复配体系表面活性剂的耐温性能较好,其中与十二烷基磺酸钠复配能获得更好的泡沫质量。

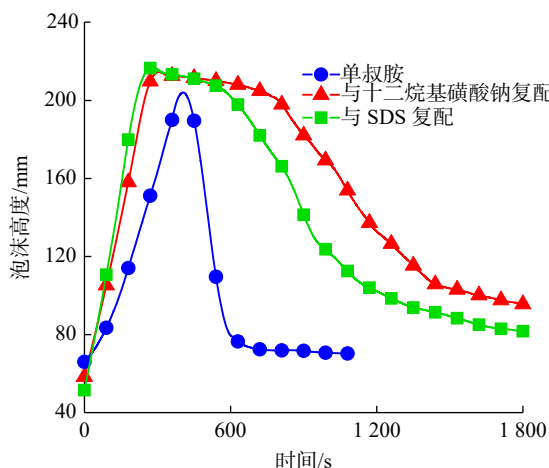


图3 复配前后泡排剂耐温性对比

出现这一现象的主要原因是复配表面活性剂的独特结构,使其更容易在气液界面形成双电层结

构。这种双电层结构,一方面可以限制气体的流动及液体和气体的渗透行为;另一方面,复配之后,体系内部表面活性剂的质量浓度有所增加,体系黏度也随之变大,使得泡沫的携液能力变强,进而提高了泡沫的稳定性。

## 2.3 叔胺及其复配泡沫体系的响应性

C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 是一种结构简单的 CO<sub>2</sub> 响应性良好的 CO<sub>2</sub> 开关响应型表面活性剂。随着 CO<sub>2</sub> 的通入测试 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液的电导率变化,以此来明确该表面活性剂的 CO<sub>2</sub> 开关响应性能,测试结果见图 4(a)。

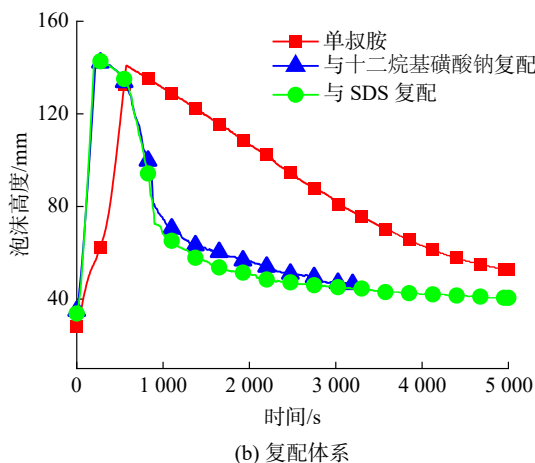
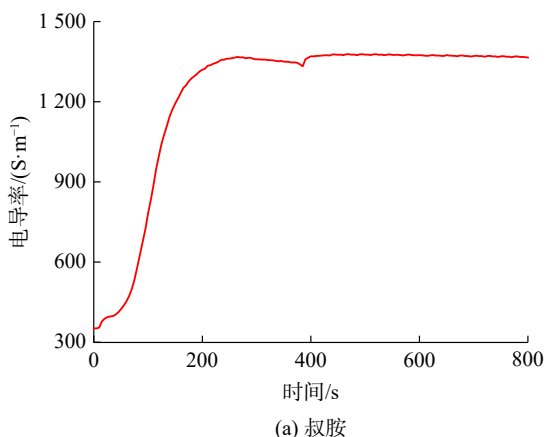


图4 表面活性剂的响应性能研究

由图4(a)可看出,浓度为 0.02 mol/L 的 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 溶液初始电导率非常低,表明 C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 为中性化合物,其溶液中几乎不含有游离的阴阳离子。而向溶液中通入 CO<sub>2</sub> 时,起初泡沫生成速率缓慢,但随着通入的 CO<sub>2</sub> 气量逐渐增大,溶液的电导率迅速升高,通气约 240 s 后,电导率达到最大值,并且在通气过程中有大量泡沫生



成。这说明  $\text{C}_{12}\text{N}(\text{CH}_3)\text{N}(\text{CH}_3)_2$  溶液在通入  $\text{CO}_2$  后,叔胺基团迅速质子化变为叔胺碳酸氢盐,溶液中出现了大量的阴阳离子,从而具有良好的响应性。

叔胺本身具有良好的泡沫稳定性,因而短时间内难以消除。通过响应性实验发现:在复配后,体系的起泡速度加快,能在更短时间内达到设计高度;而在通入  $\text{CO}_2$  后,随着叔胺表面活性剂的质子化,质子化后的叔胺分子头基带正电荷,与叔胺表面活性剂尾链带负电荷的  $\text{SO}_4^{2-}$  基团相互作用,分子弯曲缠绕生成不溶的絮状沉淀。此时,溶液中的叔胺表面活性剂不再以离子状态存在,而是以一种中性化合物状态存在,使叔胺表面活性剂失去了表面活性的作用,液膜稳定性降低,携水率开始下降,从而能够在较快的时间完成消泡,见图 4(b)。

## 2.4 复配泡沫体系的响应机理

为研究复配体系的响应机理,构建了响应前后的气液界面模型(见图 5(a)),并对其提取参数进行分析。在响应前,由于叔胺与阴离子表面活性剂都具有一定的表面活性与起泡性,所以,几乎全部的分子都位于气液界面处,亲水头基插入到液相,疏

水尾链伸向气相。这说明叔胺  $\text{C}_{12}\text{N}(\text{CH}_3)\text{N}(\text{CH}_3)_2$  与 SDS 本身都具有两亲性,经过分子动力学模拟之后,两种分子都由于两亲作用而分布于气液界面处。所以,在响应前的模型中,复配体系中叔胺与 SDS 表面活性剂分布于气液界面而起到稳定泡沫的作用,泡沫稳定性较好。从响应之后的模型中可看出,SDS 中含 S 原子基团与  $\text{C}_{12}\text{N}(\text{CH}_3)\text{N}(\text{CH}_3)_2$  中带正电荷的 N 原子基团相结合,失去表面活性,分布于气液界面处的分子数明显减少,且在液相中形成了一个明显的胶束。在气液界面处的分子排布也比较杂乱,这主要是由于分子间的相互作用引起的。液相中的胶束外围为表面活性剂的亲水头基,胶束内部为疏水尾链的相互缠绕,导致泡沫的稳定性变差,这也是响应消泡的原因。

对响应前后的径向分布函数进行分析(见图 5(b)和图 5(c)),从图 5 可看出,响应之后的 SDS 中的 S 原子基团和水中 O 原子径向分布函数峰值降低,峰值越低,代表动力学过程中在其周围分布的概率越低,也就是两者结合能力下降。反观响应前后 SDS 中的 S 原子基团与 N-十二烷基-1,3-丙二胺中的 N 原子的径向分布函数峰值显著提高,证明响

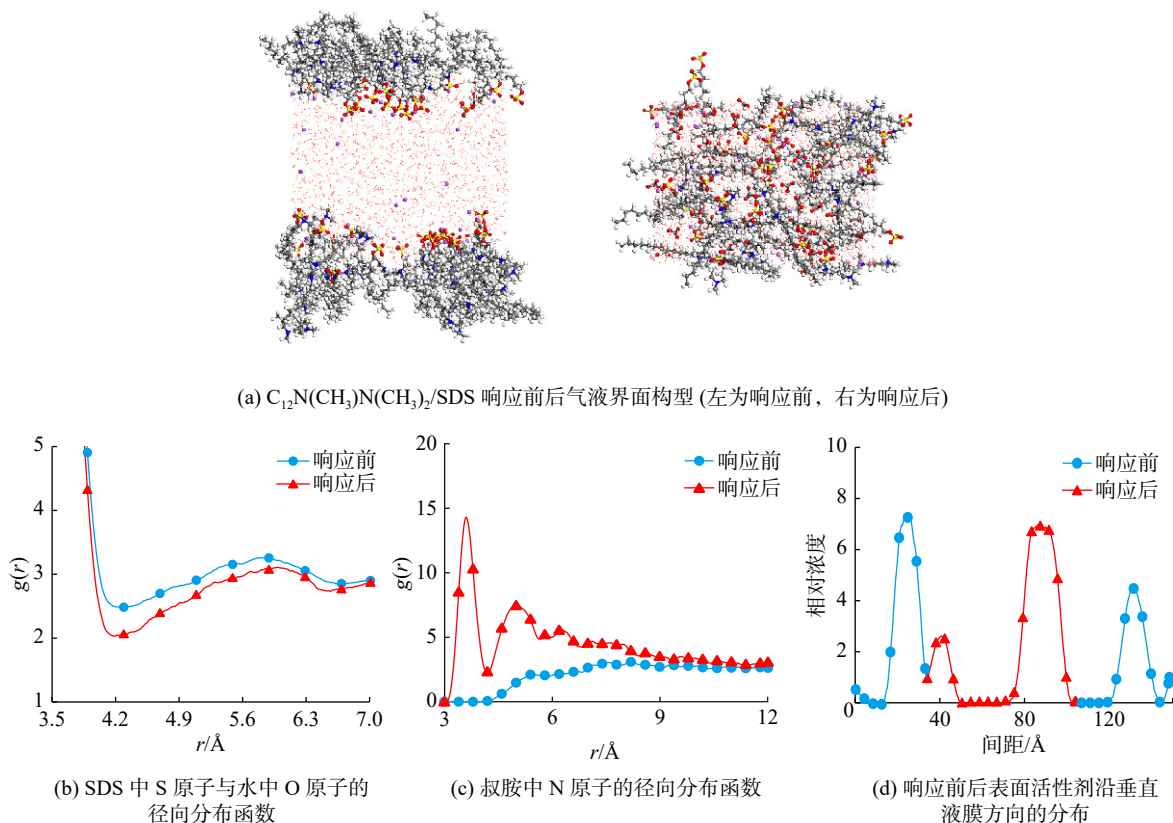


图 5 表面活性剂的相应机理分析

应前两者不相互影响,而响应后正负离子结合,S原子周围布满N原子。起泡剂与叔胺结合,导致携水能力下降,使得泡沫破灭。

进一步分别提取了不同体系中的表面活性剂的相对浓度分布(见图5(d)),左右两侧的峰为分子位于气液界面处的相对浓度,中间的峰为位于液相中的分子的相对浓度,峰强度越高,相对浓度越大。说明响应后,表面活性剂从水相两端均匀分布到水相中,再不能维持泡沫的稳定,故泡沫破裂发生消泡。

### 3 结论

1) C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>本身具有良好的质子化性能,能在通气约240 s后达到最大值电导率,且具有良好的耐盐性能;在模拟卤水层的环境中具有较快的起泡速度和良好的泡沫稳定性;Na<sup>+</sup>对泡沫性质的影响小于Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>,即二价盐离子对泡沫液膜性质造成的影响比一价盐离子大。

2) C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>本身的耐温性能较差,高温下难以维持液膜的稳定性,且起泡能力也受到影响;在复配之后,起泡性能和泡沫质量都得到了显著提升,起泡速度能够提高40%,高温下的泡沫存在时间能够达到复配前的3.17倍;与十二烷基磺酸钠复配,能获得更好的泡沫质量;体系具有良好的响应性,能够在通入CO<sub>2</sub>之后快速实现响应消泡。

3) 通过对起泡和消泡时间、气液界面构型、径向分布函数,以及浓度分布等参数的对比和分析,得到了复配体系CO<sub>2</sub>响应性的机理,即:通入CO<sub>2</sub>后,C<sub>12</sub>N(CH<sub>3</sub>)N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>分子中的N原子发生质子化,带正电荷,与SDS中带负电的S原子基团相结合,使其携水性下降,导致泡沫破灭。

### 参考文献

- [1] 巫扬,刘世常.气井泡沫排水中起泡剂的研究与应用[J].天然气技术,2007,1(2):46-48.
- [2] 邱升才.耐高温泡排剂的研制与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(9):62-63.
- [3] 蒋泽银,李伟,罗鑫,等.长宁页岩气井泡沫排水起泡剂优选及现场应用[J].石油与天然气化工,2018,47(4):73-76.
- [4] 王健,覃达,何冯清,等.Orinoco油藏泡沫油性能评价研究[J].石油与天然气化工,2018,47(5):68-73.
- [5] 赵进,刘学利,郭臣,等.高温高盐高压油藏条件下泡沫适应性研究[J].石油与天然气化工,2023,52(1):74-78.
- [6] 李兆敏,侯大炜,鹿腾,等.疏水型SiO<sub>2</sub>纳米颗粒稳定泡沫机理与泡沫耐温性能评价[J].油田化学,2019,36(3):494-500.
- [7] 方珏,冯磊,严以楼.耐高温型泡沫剂的制备及应用研究[J].化工时刊,2020,34(6):15-17.
- [8] JOHNSON M, WAGENAAR A, ENGBERTS J B F N. Sugar-based Gemini surfactant with a vesicle-to-micelle transition at acidic pH and a reversible vesicle flocculation near neutral pH[J]. Journal of the American Chemical Society, 2003, 125(3): 757-760.
- [9] DUNKIN I R, GITTINGER A, SHERRINGTON D C, et al. A photodestructible surfactant[J]. Journal of the Chemical Society, Chemical Communications, 1994(19): 2245-2246.
- [10] TSUCHIYA K, ORIHARA Y, KONDO Y, et al. Control of viscoelasticity using redox reaction[J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126(39): 12282-12283.
- [11] BLANCO E, LAM S, SMOUKOV S K, et al. Stability and viscoelasticity of magneto-Pickering foams[J]. Langmuir, 2013, 29(32): 10019-10027.
- [12] SUN S Q, ZHANG X Q, FENG S X, et al. CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> switchable aqueous foam stabilized by SDS/C<sub>12</sub>A surfactants: Experimental and molecular simulation studies[J]. Chemical Engineering Science, 2019, 209: 115218.
- [13] WANG J, LIANG M Q, TIAN Q R, et al. CO<sub>2</sub>-switchable foams stabilized by a long-chain viscoelastic surfactant[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 523: 65-74.
- [14] ZHU Y, JIANG J Z, CUI Z G, et al. Responsive aqueous foams stabilised by silica nanoparticles hydrophobised in situ with a switchable surfactant[J]. Soft Matter, 2014, 10(48): 9739-9745.
- [15] LU H S, HE Y, HUANG Z Y. Foaming properties of CO<sub>2</sub>-triggered surfactants for switchable foam control[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2014, 35(6): 832-839.
- [16] LI D X, REN B, ZHANG L, et al. CO<sub>2</sub>-sensitive foams for mobility control and channeling blocking in enhanced WAG process[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2015, 102: 234-243.
- [17] ZHAO Y, LANDFESTER K, CRESPIY D. CO<sub>2</sub> responsive reversible aggregation of nanoparticles and formation of nanocapsules with an aqueous core[J]. Soft Matter, 2012, 8(46): 11687-11696.
- [18] WANG Z Z, REN G H, YANG J W, et al. CO<sub>2</sub>-responsive aqueous foams stabilized by pseudogemini surfactants[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 536: 381-388.