文章编号:1673-2677(2026)01-0097-10 DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2026.01.011
引用:董三宝,晏瑶,李金华,等.椰油酰甘氨酸钠泡排剂体系构建及性能研究[J].新疆石油天然气,2026,22(1):97-106.
Cite:DONG Sanbao,YAN Yao,LI Jinhua,et al.Research on construction and properties of a foaming complex containing sodium cocoyl glycinate for gas well drainage[J].Xinjiang Oil & Gas,2026,22(1):97-106.

椰油酰甘氨酸钠泡排剂体系构建及性能研究

董三宝[1,2],晏瑶[1],李金华[1],马超[3,4],陈家魁[1],任振宇[1],韩薇薇[1,2]
(1.西安石油大学化学化工学院,陕西西安 710065;2.西安石油大学油气田化学陕西省高校工程研究中心,陕西西安 710065;3.长江大学石油工程学院,湖北武汉 430100;4.油气钻采工程湖北省重点实验室(长江大学),湖北武汉 430100)

摘 要:针对水淹气井,选用高性能气井泡排剂是成功进行泡沫排水采气作业的关键。合成了一种Gemini阳离子表面活性剂(CAGB),将其与椰油酰甘氨酸钠(SCG)以及短链氟碳表面活性剂FS-50复配,构建出一种具有优异耐盐、耐凝析油性的三元泡排体系。经测试,当CAGB/SCG/FS-50的物质的量之比为4∶16∶5,总量为25 mmol/L时,起泡体积和泡沫半衰期最佳,分别达455 mL和20.45 min。加入鼠李糖后起泡体积和半衰期分别为405 mL、74.09 min。经携液测试发现,一定含量凝析油和甲醇可提升泡排剂体系携液性能,凝析油含量为50%时,携液率高达45.94%,最高能耐受60%的凝析油;甲醇含量为20%时可将携液率提至44.69%,甲醇含量为50%时仍具有较高的携液能力。鼠李糖可使三元泡排体系在矿化度为410 g/L时仍能稳定携液,携液率为32.35%;升高温度有利于提升该三元泡排体系携液能力,90 ℃时携液率高达69.11%。最后,经过表面张力测试、泡沫微观结构观察也证实了三组分间存在协同效应。

关键词:排水采气;椰油酰甘氨酸钠;鼠李糖;发泡性能;携液率
中图分类号:TE357 **文献标识码**:A

Research on Construction and Properties of a Foaming Complex Containing Sodium Cocoyl Glycinate for Gas Well Drainage

DONG Sanbao[1,2],YAN Yao[1],LI Jinhua[1],MA Chao[3,4],CHEN Jiakui[1],REN Zhenyu[1],HAN Weiwei[1,2]
(1. College of Chemistry and Chemical Engineering,Xi'an Shiyou University,Xi'an 710065,Shaanxi,China;2. Shaanxi University Engineering Research Center of Oil and Gas Field Chemistry,Xi'an Shiyou University,Xi'an 710065,Shaanxi,China;3. School of Petroleum Engineering,Yangtze University,Wuhan 430100,Hubei,China;4. Hubei Key Laboratory of Oil and Gas Drilling and Production Engineering (Yangtze University),Wuhan 430100,Hubei,China)

Abstract:For liquid-loading gas wells,applications of high-performance foaming complexes are key to successful foam-assisted removal of water accumulating in gas wells. Therefore,in this paper,we developed a gemini cationic surfactant (CAGB) and combined it with sodium cocoyl glycinate (SCG) and a short-chain fluorocarbon surfactant FS-50 to form an excellent ternary foam drainage formulation tolerant of salts and gas condensate. Experimental results showed that with the CAGB/SCG/FS-50 molar ratio of 4∶16∶5 and a total concentration of 25 mmol/L,the foam volume and half-life time were optimized up to 455 mL and 20.45 min,respectively. After

基金项目:国家自然科学基金青年项目"输气管线中天然气水合物壁面沉积层失稳脱落机制研究"(52204046);西安市科技计划项目—高校院所人才服务企业项目"新型耐温耐盐耐油超分子泡排剂体系构筑及泡沫特性调控机制研究"(23GXFW0078);陕西省教育厅科学研究计划服务地方专项—产业化培育项目"陕北致密油藏CO_2响应清洁压裂液体系构筑及应用基础研究"(24JC076);油气钻采工程湖北省重点实验室开放基金资助项目"智能响应型泡排剂体系构筑及其泡沫特性调控机理研究"(YQZC202413)。
作者简介:董三宝(1988-),2018年毕业于中国石油大学(华东)油气田开发工程专业,博士,副教授,主要从事油田化学、表面活性剂和提高采收率的研究。(E-mail)dongsanbao@xsyu.edu.cn

adding rhamnose, the foam volume and half-life were 405 mL and 74.09 min, respectively. The liquid carrying tests showed that a certain amount of condensate and methanol can enhance the liquid carrying performance of the foaming formulation. The liquid-carrying rate reached 45.94% in the case of the condensate content of 50%, and the foam formulation could withstand up to 60% condensate. Methanol also promoted the liquid-carrying performance. When the methanol content was 20%, the liquid-carrying rate could be increased to 44.69% and it remained high even at the methanol content of 60%. The addition of rhamnose allowed the ternary foaming formulation to maintain stable liquid-carrying capability at a salinity of 410 g/L, with a liquid-carrying rate of 32.35%. Elevated temperature is in favor of improving the liquid-carrying capability of the ternary foaming formulation, and the liquid-carry rate was high up to 69.11% at 90 °C. Finally, surface tension tests and foam morphological observations also confirmed the synergistic effect of the components of the foaming formulation.

Key words: water drainage gas production; sodium cocoyl glycinate; rhamnose; foaming performance; liquid carrying rate

随着国内天然气田开发逐渐进入中后期，气井积液问题逐渐显现并严重制约着气井的安全高效开采[1]。泡沫排水采气技术因其高效性、经济性和适应性广等特点被广泛应用，其核心组分——表面活性剂的性能是决定泡沫排水采气作业成功的关键[2-3]。在此背景下，开发出兼具环保性和在苛刻条件（如高盐、高矿化度等）下稳定发泡和携液的新型泡排剂体系至关重要[4-5]。

椰油酰甘氨酸钠（SCG）作为一种天然来源的阴离子表面活性剂，具有优异的发泡性、温和性及生物降解性，在日用化学品领域具有较多应用[6]，但在泡沫排水采气领域应用不多。SCG可在气液界面形成致密吸附膜，可将溶液表面张力降低至30 mN/m以下，同时能产生细腻持久的泡沫[7]。此外，其在弱酸性条件下的增稠特性及与多种表面活性剂的良好兼容性，为构建多功能复合起泡体系提供了可能。然而，单一SCG所形成的泡沫在极端环境（如高温、高盐）仍存在稳定性不足的局限，需通过复配策略进一步提升泡沫稳定性能[8-10]。通常特定阳离子表面活性剂能改善阴离子表面活性剂的起泡和稳泡特性。本实验室[11]曾合成了一种Gemini阳离子表面活性剂（CAGB），将其与甜菜碱表面活性剂（CAPB）和月桂酰谷氨酸钠（SLG）复配，在CAGB/CAPB/SLG质量比为3∶3∶4时，起泡体积达到440 mL，半衰期达到11 min；在携液性能测试中，该复配泡排体系表现出良好的耐油和耐盐性，当凝析油含量在50%，携液率达47.1%，发泡率为100%，最大耐盐90 g/L，该条件下携液率为47.24%，发泡率为100%。鉴于阴离子、CAGB在起泡方面的协同作用，优选CAGB与SCG复配。

此外，与传统的碳氢表面活性剂相比，氟碳表面活性剂具有更优异的综合性能，概括为“两疏”“三高”，即疏油和疏水性能以及高化学稳定性、高表面活性、高热稳定性[12-16]。瞿超超等[17]利用十二烷基硫酸钠（SDS）、椰油酰胺丙基羟磺基甜菜碱（CHSB）、氟碳表面活性剂（PFBS）三者的协同作用研制了耐油泡排剂COT。通过研究发现，当油滴接触到COT泡沫液膜时，会形成稳定的假乳液膜，阻止油滴继续渗入，从而形成稳定的耐油泡沫。该COT泡排剂已在12口气井得到了现场应用，累计增产天然气26.35×10^4 m^3。武俊文等[18]将自制的一种有机铵盐型阳离子氟碳表面活性剂与实验室自制起泡剂（月桂酰胺丙基甜菜碱与α-烯基磺酸钠的质量比为10∶1）按质量比1∶15混合，得到耐高含量凝析油的泡排剂PQ-Y。该泡排剂在50%石油醚含量下起泡、稳泡和携液性能良好。在龙凤山北201-XY井现场试验中，平均产气量提高幅度达56%，增产效果明显。该泡排剂可满足凝析油含量较高气藏排水采气的需求。综上，氟碳表面活性剂可以应用于制备气井泡排剂体系，如控制其碳氟链的链长，该类氟碳表面活性剂仍然具备可接受的生物降解性[19-21]。

综合上述考虑，本研究拟选择短链氟碳两性表面活性剂（FS-50）作为复配体系中的另一组分，并通过特定的分子协同设计，将Gemini阳离子、阴离子表面活性剂和FS-50进行复配协同，探索其是否能产生“1+1+1> 3”的协同效应，以期解决现有泡排剂抗油、抗盐性能差等难题。此外，本研究也将考察将鼠李糖作为泡排剂助剂的可能性。实验采用Waring Blender法产生泡沫，并依据行业标准评价起泡和稳泡能力，利用自组装携液装置测定泡排剂的携液率，以此完成新型泡排剂体系的研发。本研究也将采用表面张力测试、发泡液流变性测试、泡沫微观形貌演变分析等手段分析泡排剂体系的协同作用机理。

1 实验部分

1.1 试剂

石油醚（用于模拟气井凝析油）购自西安凯诺科化工有限公司；$CaCl_2$（分析纯），购自天津市大茂化学试剂厂；氯化钠、无水乙醇及甲醇均为分析纯，购自天

津市富宇精细化工有限公司；氯乙酸钠（纯度98%）、1，2-二溴乙烷（纯度98%）以及十二酸（纯度98%）购自上海毕得医药科技股份有限公司；*N*，*N*-二甲基-1，3-丙二胺（纯度97%）购自北京伊诺凯科技有限公司；SCG（99.8%）购自上海毕得医药科技股份有限公司；FS-50购自深圳市金腾龙实业有限公司；鼠李糖（纯度99.99%）购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2　仪器

GJ-3S型数显高速搅拌器，青岛海通达专用仪器有限公司；Sigma 700型表面张力仪，瑞典Biolin科技有限公司；MARS60型KAAKE流变仪（选用CC41DG/Ti转子），Haaker公司；携液测试装置，实验室自组装；VERTEX 70布鲁克红外光谱仪，德国布鲁克公司。

1.3　实验方法

1.3.1　CAGB表面活性剂的合成

在氮气保护下，将十二酸（0.5 mol）置于装有回流冷凝管、滴液漏斗及N_2导入管的三颈烧瓶中，加热至170 ℃。随后，在4小时内缓慢滴加N，N-二甲基-1，3-丙二胺（0.75 mol）。滴加完毕后，于170 ℃继续搅拌反应6小时。反应结束后，将体系降温至100 ℃，在减压条件下蒸馏除去过量的N，N-二甲基-1，3-丙二胺及生成的水，得到淡黄色固体AA。在N_2保护下，将AA与1，2-二溴乙烷按2∶1.2的物质的量之比投料，以无水乙醇为溶剂，于80 ℃下回流反应48 h。反应结束后，将所得产物旋蒸除去溶剂，即得到Gemini型阳离子表面活性剂CAGB，反应过程如图1所示。

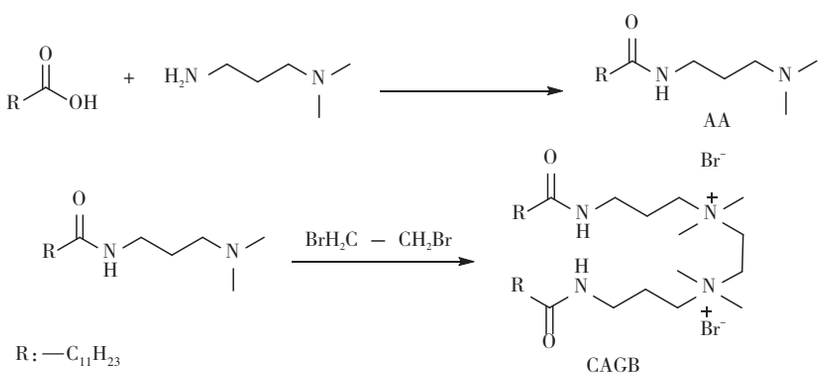


图1　CAGB合成路线图

Fig. 1　Synthesis route of CAGB

1.3.2　起泡和稳泡性能测试

本研究采用Waring Blender法生成泡沫。测量时，将复配的100 mL表面活性剂溶液转移到搅拌器中，用数显高速搅拌器以7 000 r/min的转速搅拌3 min，将产生的泡沫立即转移到量筒中，得到溶液的起泡体积。静置并立即开始计时，记录50 mL游离液体从泡沫中排出时所需要的时间为半衰期。每次实验重复三次以获得起泡体积和半衰期的平均值。

1.3.3　携液性能测试

泡排剂的携液性能测试采用自组装装置，如图2所示，按照标准SY/T7494-2020《油气田用起泡剂实验评价方法》进行携液测量。每次测量前，将200 g液体混合物（含有表面活性剂、盐、凝析油或甲醇）缓慢倒入泡沫柱中（120 cm×5 cm），随后以400 mL/min的流速从泡沫柱底部注入N_2，由此产生扰动气流并生成泡沫，N_2注入时间为9 min。将所得的泡沫称重，计算即可得到携液率（k）和发泡率（η）。在测试时，利用外循环水浴锅使泡沫和液体保持在设定温度。计算公式如下：

$$k = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$\eta = \frac{m_0 - m_r}{m_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中：k为携液率，%；η为发泡率，%；m_1为泡沫接收器中接收的泡沫质量，g；m_0为初始溶液的质量，g；m_r为注入氮气9 min后剩余未起泡液体的质量，g。

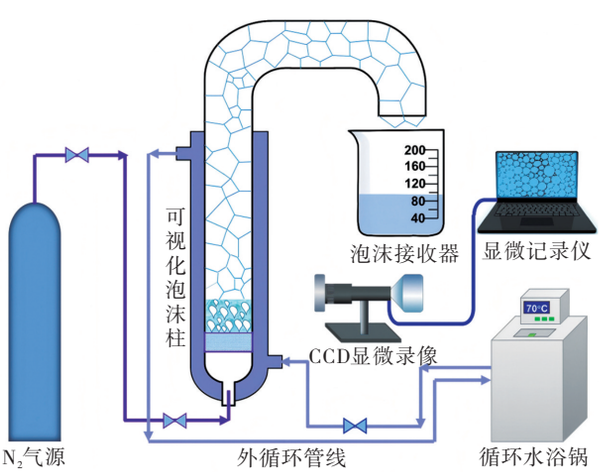


图2　携液率测试实验装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the experimental setup of liquid unloading tests

1.3.4　表面张力测试

采用带有Du Noüy铂环的Sigma700表面张力仪测

量一系列表面活性剂溶液的表面张力。在每次测量之前，用乙醇和去离子水洗净玻璃皿，以去除可能存在的有机污染，再进行装样测量。

1.3.5 黏度测试

使用配有CC41 DG/Ti转子的KAAKE流变仪测量每种表面活性剂溶液在1~100 s^{-1}剪切率范围内的表观黏度。每次测量在室温(25 ℃)条件下进行。

1.3.6 泡沫显微观察

本研究采用自行设计的装置(图2)对泡沫的微观形态进行观测。每次实验前，将200 g表面活性剂溶液缓慢注入泡沫柱(尺寸为120 cm × 5 cm)中，随后以400 mL/min的流速通入N_2以产生泡沫。当泡沫高度达到80 cm时停止通气。采用配备CCD相机的显微镜(DV-100型)，实时记录泡沫形态随时间的变化。相机放置高度为40 cm。利用ImageJ/Fiji软件对拍摄视频进行帧提取和图像清晰化处理，以获得清晰呈现气泡轮廓的图片。所有实验均在室温条件下进行，每种样品重复观测3次。

2 结果与讨论

2.1 CAGB红外表征

图3为CAGB表面活性剂的红外光谱。在765 cm^{-1}处的吸收峰归属于$(CH_2)_n$基团的面内摇摆振动。1 382 cm^{-1}、1 351 cm^{-1}处吸收峰通常与分子中C-H共价键的弯曲振动相关，3 427 cm^{-1}处的吸收峰表明存在酰胺基团中N—H的伸缩振动。1 587 cm^{-1}和1 633 cm^{-1}处的吸收峰分别对应于酰基中N—H的弯曲振动以及酰胺基团中C═O的伸缩振动。此外，在1 468 cm^{-1}处观察到季铵官能团的特征吸收峰，说明体系中除生成酰胺中间体外，还伴随少量季铵盐产物的形成。以上各吸收峰说明了产物分子中存在CAGB的特征官能团，红外表征初步证实该产物为目标产物CAGB。

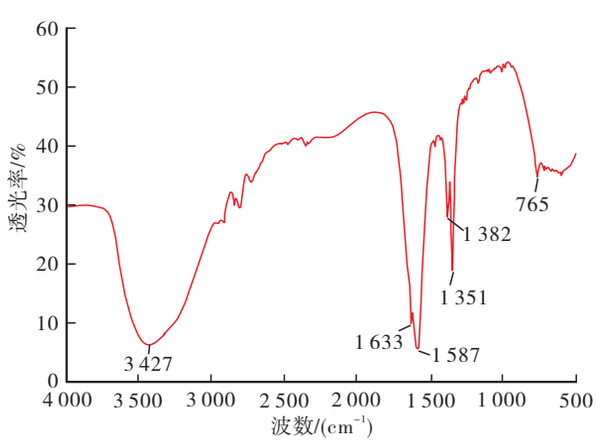


图3 CAGB红外谱图

Fig. 3 FT-IR spectrum of CAGB

2.2 泡排剂体系构筑

2.2.1 单一表面活性剂的起泡和稳泡性

首先，测试了单一SCG在不同浓度下的起泡性能与泡沫稳定性，如图4所示。实验结果表明，当SCG浓度为5 mmol/L时，体系未表现出起泡能力；而当浓度增至10 mmol/L时，起泡体积达到345 mL，泡沫半衰期为5.51 min。可以明显看出，在浓度由10 mmol/L上升至15 mmol/L的过程中，起泡体积与半衰期均有所提升，起泡体积从345 mL增至375 mL，半衰期由5.51 min延长至6.21 min。然而，当SCG浓度处于15 mmol/L至25 mmol/L范围内时，起泡体积略有下降，基本维持在355 mL至360 mL之间。与此同时，半衰期则呈现小幅上升趋势。综合来看，SCG在浓度为15 mmol/L时表现出最优性能，此时起泡体积为375 mL，半衰期为6.21 min。因此，在后续复合泡沫体系构筑实验中，起泡剂的浓度初步设定为15 mmol/L。

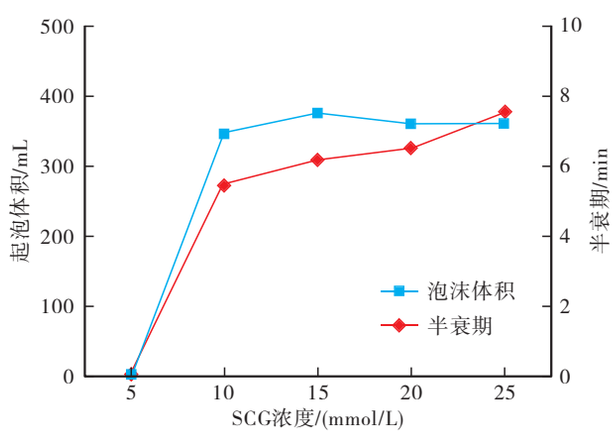


图4 SCG在不同浓度下的起泡体积和半衰期

Fig. 4 Foam volume and half-life in cases of different concentrations of SCG

2.2.2 二元表面活性剂的起泡和稳泡性

SCG的分子结构中亲水基团包含羧酸根(—COO^-)和酰胺官能团，疏水部分则来源于椰油酰长链[22]。而CAGB是一种双子季铵盐型阳离子表面活性剂，具有双亲水头基(—N^+—)和两条长烷基链构成的疏水链。两者之间存在较强的静电作用，可增强分子在气液界面排列的紧密程度，因而进一步提高界面稳定性与泡沫持久性[23]。为此，接下来考察不同物质的量之比对SCG与CAGB复配体系的起泡性能与泡沫稳定性的影响。实验过程中表面活性剂总浓度固定为15 mmol/L。结果表明，与单一SCG体系相比，复配体系在起泡体积和半衰期方面均有显著提升。从图5可见，当CAGB与SCG的物质的量之比处于1∶9至2∶8范围内时，起泡体积呈现上升趋势，半衰期约为8.00 min。其中，CAGB∶SCG物质的量之比为2∶8时，

起泡体积达到385 mL，半衰期达8.51 min，显示出较单一组分更优的起泡与稳泡性能。因此，确定CAGB与SCG的最佳物质的量之比为2∶8。

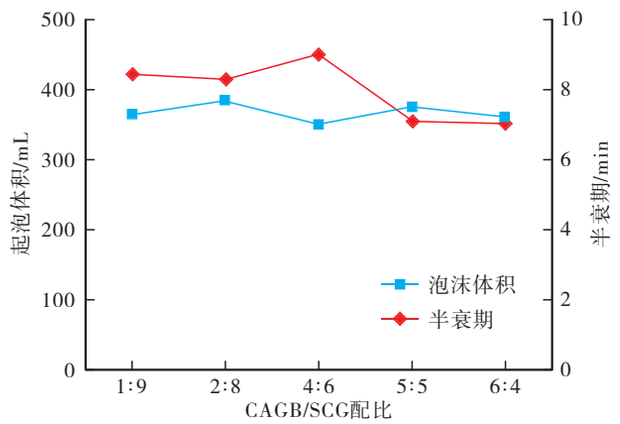


图5　CAGB/SCG配比对泡沫性能的影响

Fig. 5　Effects of CAGB/SCG proportions on foam properties

2.2.3　三元表面活性剂的起泡和稳泡性

接下来，在CAGB/SCG二元复配体系基础上引入FS-50，以此构建三元复合体系。实验中固定CAGB与SCG的物质的量之比为2∶8，固定CAGB与SCG、FS-50的总浓度为15 mmol/L，在此基础上添加不同量的FS-50，系统考察其对体系起泡性能与泡沫稳定性的影响，结果如图6所示。实验数据显示，当FS-50添加量为3 mmol/L时，体系起泡体积达到425 mL，半衰期延长至14.57 min；然而，当FS-50浓度超过3 mmol/L后，CAGB/SCG/FS-50复配体系的起泡体积与半衰期均呈现下降趋势。综合考虑各方面性能，最终确定CAGB/SCG/FS-50的最佳物质的量之比为4∶16∶5。

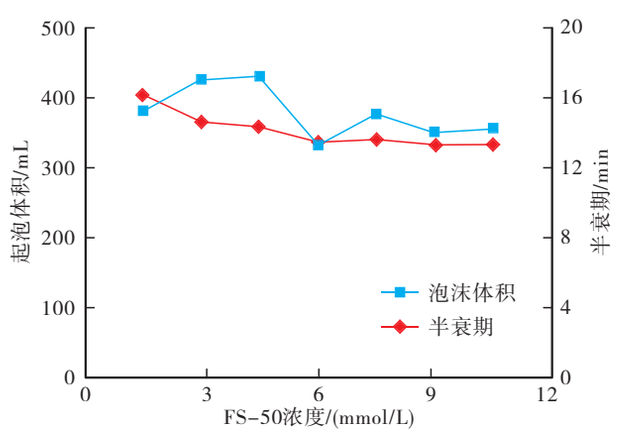


图6　CAGB/SCG/FS-50复配体系中FS-50含量对泡沫性能的影响

Fig. 6　Effects of FS-50 content in CAGB/SCG/FS-50 mixtures on foam properties

随后，考察了三元混合物CAGB/SCG/FS-50总浓度对其起泡性能与泡沫稳定性的影响。结果如图7所示，总体浓度对起泡体积影响较小，在总浓度10 mmol/L至30 mmol/L之间，起泡体积维持在400~455 mL之间；当总浓度为25 mmol/L时，起泡体积显著提高至455 mL。与此同时，泡沫半衰期随总浓度增加呈先升后降趋势，并在25 mmol/L时达到最大值20.45 min，此时起泡体积也为最高值（455 mL）。基于上述结果，最终确定三元混合物的最佳总浓度为25 mmol/L，且CAGB/SCG/FS-50的物质的量之比为4∶16∶5。

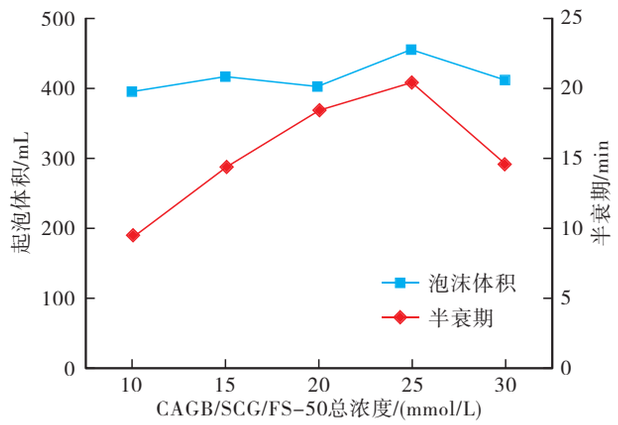


图7　三元混合物总量对泡沫性能的影响

Fig. 7　Effects of total amount of ternary mixture on foam properties

随后，探究了生物大分子对泡沫性能的影响。在三元体系（总浓度25 mmol/L，CAGB/SCG/FS-50物质的量之比为4∶16∶5）的基础上引入鼠李糖作为稳泡剂，系统评估了其对起泡体积与泡沫半衰期的影响。鼠李糖是由特定微生物（如假单胞菌）产生的生物大分子。与传统化学表面活性剂相比，它在泡排剂应用中具有良好的稳泡性和耐高温性能[24]。实验结果如图8所示，当鼠李糖浓度为0.05%时，体系的起泡体积为405 mL，半衰期达到74.09 min，表现出良好的起泡能力与泡沫稳定性。上述结果说明，特定生物大分子的引入对泡排剂的起泡与稳泡性能均具有显著的协同增强作用。

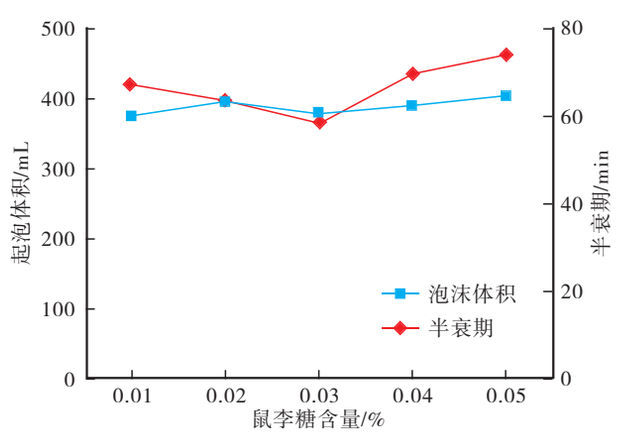


图8　鼠李糖对泡沫性能的影响

Fig. 8　Effects of rhamnose content on foam properties

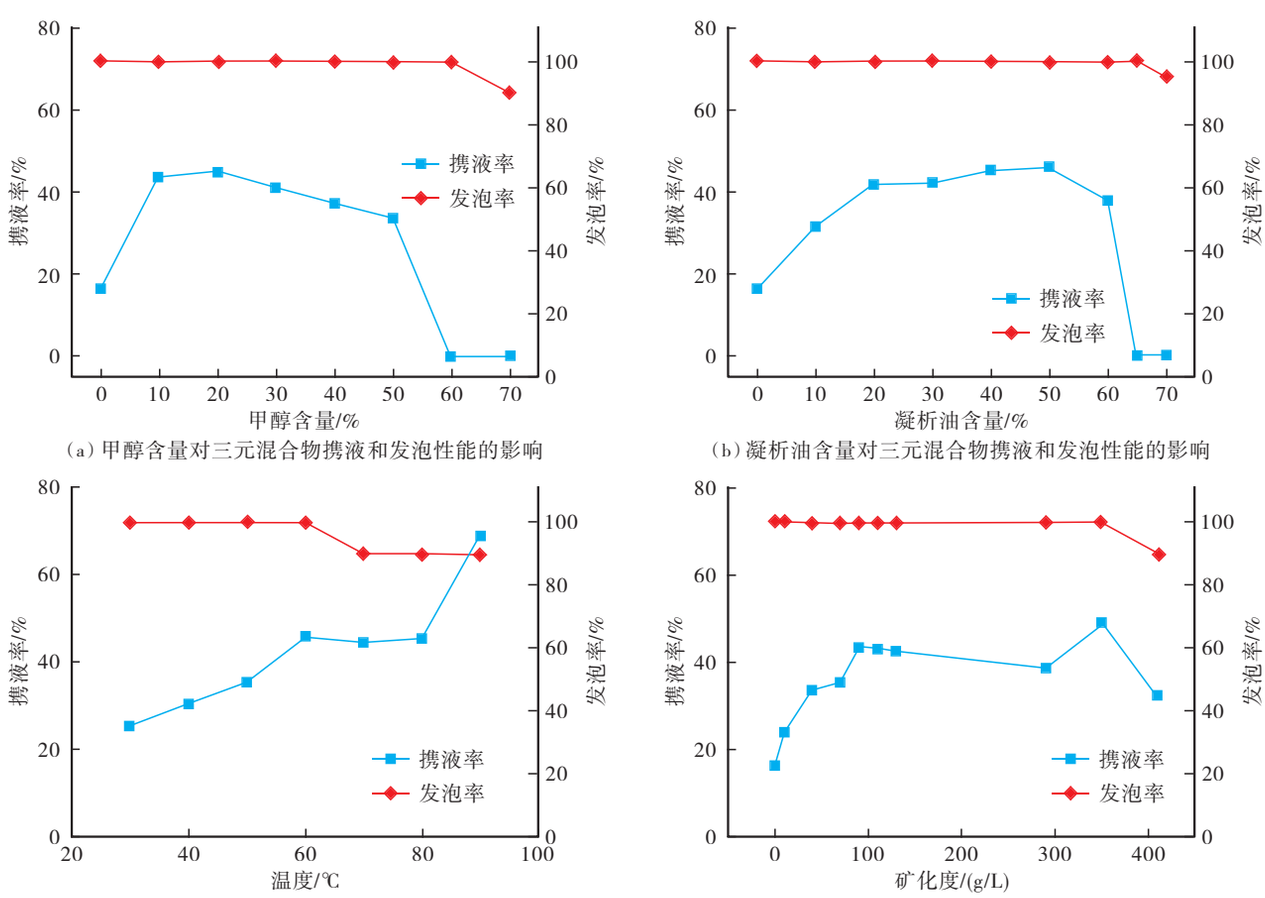
综合上述实验结果可知，SCG本身具备良好的起泡性能，而随着CAGB与FS-50的引入，三元混合体系在起泡体积与半衰期方面均实现显著提升：起泡体积由SCG单体系的375 mL提高至三元体系的425 mL，半衰期则由最初的6.21 min延长至14.57 min。值得注意的是，当三元混合物总浓度为25 mmol/L，且CAGB/SCG/FS-50的物质的量之比为4∶16∶5时，体系的起泡体积与半衰期均达到最大值（455 mL，20.45 min）。然而，继续提高总浓度并未进一步提升泡沫性能，反而出现轻微下降趋势。这可能是由于胶束数量增加和溶液黏度升高所致，黏度过高会增加发泡难度[25]。进一步引入0.05%鼠李糖后，尽管起泡体积略微下降至405mL，但获得了优异的泡沫稳定性（半衰期74.09 min）。

2.3　三元泡排剂体系在极端条件下的携液率和发泡率

本部分将系统探究甲醇、凝析油、温度及矿化度含量对三元体系CAGB/SCG/FS-50携液性能的影响，实验结果如图9所示。实验条件设定为：SCG/CAGB/FS-50总浓度固定为25 mmol/L，其物质的量之比例为4∶16∶5，鼠李糖添加量为0.05%（占液相）。

首先，考察了甲醇含量（10%~70%）对体系性能的影响。从图9（a）可以看出，当甲醇含量在10%~60%范围内时，发泡率基本稳定在100%，表明甲醇对发泡能力影响较小。与此同时，甲醇对三元混合物（CAGB/SCG/FS-50）的携液率表现出积极的促进作用：在10%~50%范围内，携液率随甲醇含量增加而上升，并于20%处达到峰值（44.69%），这说明适量甲醇有助于提升泡沫的携液能力；然而，当甲醇含量过高时，泡沫性能会受到抑制，导致携液率下降。实验结果表明，该三元泡排剂体系可耐受的最高甲醇含量为50%。

由图9（b）可知，凝析油对三元混合物（CAGB/SCG/FS-50）的携液率与发泡率均产生积极影响。在凝析油含量为10%至50%的范围内，携液率呈上升趋势，并于50%时达到最大值（45.94%）；而当含量进一步增至60%至70%时，携液率转为快速下降。在发泡率方面，凝析油含量在10%至60%之间对其影响甚微，发泡率始终稳定在100%左右，其中凝析油含量为60%时携液率为37.98%，仍高于不含凝析油时的携液率（16.42%）。超过65%时携液率、发泡率均出现明显下降。综合上述结果可知，该体系可耐受的最高凝析



（a）甲醇含量对三元混合物携液和发泡性能的影响

（b）凝析油含量对三元混合物携液和发泡性能的影响

（c）温度对三元混合物携液和发泡性能的影响

（d）矿化度对三元混合物携液和发泡性能的影响

图9　不同条件对三元混合物携液和发泡性能的影响

Fig. 9　Impacts of different factors on liquid carrying and foaming performances of the ternary mixture

油含量为60%。

起泡剂的耐温性能是评估其应用潜力的关键指标。如图9(c)所示，在0~60 ℃范围内，三元体系(CAGB/SCG/FS-50)的携液率随温度升高由16.42%缓慢上升至45.91%，表明该体系在不同温度下均具备良好的携液能力。温度进一步升至60~80 ℃时，携液率进入平台期，未呈现明显波动。值得注意的是，当温度达到90 ℃时，体系的发泡率开始上升，携液率也进一步提高至69.11%，且未出现衰减，说明高温条件在一定程度上对发泡与携液过程具有促进作用。以上结果证明，该三元体系在高温环境下仍能保持稳定性能，表现出良好的热稳定性。

图9(d)展示了不同矿化度条件下体系的携液率与发泡率变化情况，所有泡沫溶液中NaCl与$CaCl_2$的质量比均固定为4∶1。实验结果显示，盐离子的存在对泡沫的携液与发泡性能具有促进作用，该现象与已有研究报道一致。在矿化度为0~110 g/L范围内，携液率从16.42%提升至43.11%，发泡率则始终保持100%，表明该矿化度区间内盐离子对CAGB/SCG/FS-50体系的携液能力具有协同增强作用，且未影响其发泡性能。当矿化度升至110~290 g/L时，携液率出现缓慢下降，但发泡率仍保持稳定。在290~350 g/L的高矿化度范围内，携液率重新呈现上升趋势，从24.45%提高至49.02%，同时发泡率依然稳定在100%。尽管在410 g/L时发泡率出现轻微下降，但整体表明该体系具备优异的耐高矿化度性能，此时携液率为32.35%，因此该体系最高可承受矿化度达410 g/L。据已有相关报道，这是目前耐矿化度最高的泡排剂体系[26]。

2.4　三元表面活性剂混合物的协同作用机理

通常而言，较低的表面张力有助于泡沫的形成与稳定。图10展示了单一表面活性剂SCG、CAGB、FS-50以及CAGB/SCG/FS-50三元混合物(物质的量之比为4∶16∶5)的表面张力随浓度变化曲线。如图所示，各体系的表面张力均随浓度增加呈线性下降，达到临界胶束浓度(CMC)后趋于稳定。其中，三元混合物的CMC值为0.06%，低于单一组分SCG(0.15%)，与CAGB对应CMC值(0.05%)比较接近，略高于FS-50的CMC值(0.03%)。在平衡表面张力方面，SCG、CAGB和FS-50分别为27.23 mN/m、15.29 mN/m和15.01 mN/m，而三元混合物CAGB/SCG/FS-50溶液的平衡表面张力进一步降低至14.22 mN/m。上述结果表明，复配体系不仅具有较低的CMC，还能将平衡表面张力降至更优水平，从而有利于提升发泡能力与泡沫稳定性，该结论与前期泡沫性能研究结果一致。

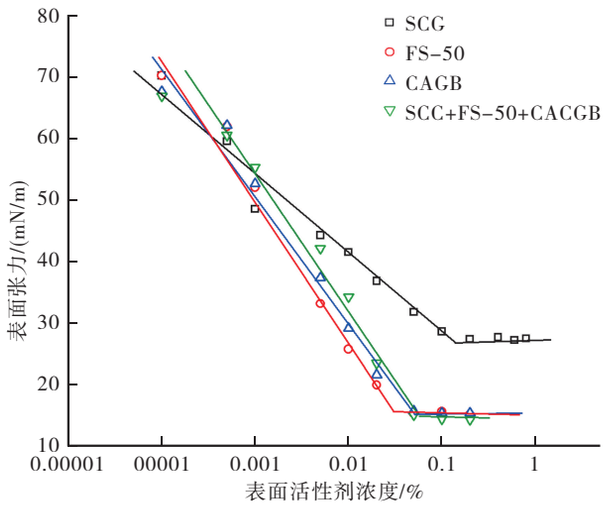


图10　各表面活性剂溶液室温下的表面张力

Fig. 10　Surface tension curve of each surfactant solution at room temperature

图11显示了各表面活性剂溶液在1~100 s^{-1}剪切速率范围内的表观黏度，从图中可以看出，剪切速率在1到100 s^{-1}范围内，25 mmol/L的SCG、CAGB和FS-50溶液的黏度几乎保持不变，分别保持在1.1 mPa·s、4.1 mPa·s和1.2 mPa·s左右，说明了单剂表面活性剂溶液表现出牛顿流体的性质[27]。三元表面活性剂溶液CAGB/SCG/FS-50(物质的量之比为4∶16∶5，总量为25 mmol/L)在整个剪切速率范围内的表现黏度稳定在4 mPa·s以上，高于各单剂溶液的黏度，可减缓泡沫排液和歧化速率，有助于维持泡沫稳定性。

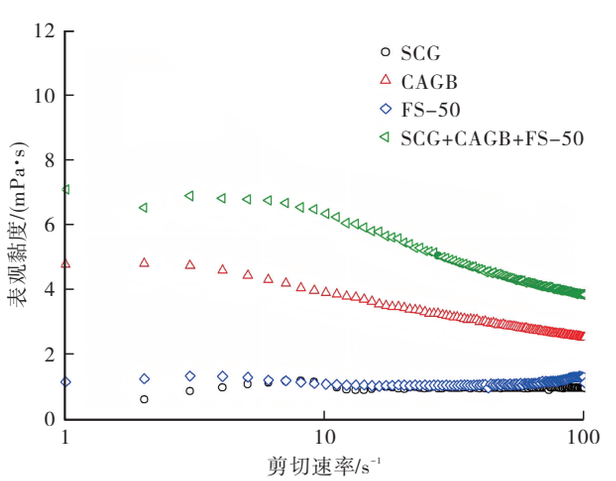


图11　室温下各表面活性剂溶液在不同剪切速率下的表观黏度

Fig. 11　Room-temperature apparent viscosity of each surfactant solution at different shear rates

综合以上分析可知，CAGB/SCG/FS-50三元混合物在降低表面张力和CMC方面具有协同作用，正如Yang等[28]所证实，当表面活性剂浓度为CMC时，发泡溶液具有最高的携液性能；同时，在相同剪切速率条件下，CAGB/SCG/-FS-50三元混合物体系的表观黏度

最高，高表观黏度可以有效增加液膜厚度并延缓泡沫的排液效应[29]。

2.5 泡沫形态观察

图12为研究各表面活性剂组分复配效应的泡沫形貌演变对比图。通过观察泡沫微观形态可知：两个相邻气泡的液膜会形成一个液体通道，而三个相邻气泡之间的三角区域称为Plateau区域[30]，通过测量液膜厚度（液膜厚度取12个位点的平均值），将其作为一个简单指标来评估泡沫携液能力，Li[31]等在携液性能研究中也采用了这一方法。其中，图12(a)~(c)分别为三种单一组分（25 mmol/L CAGB，SCG和FS-50）对应的泡沫微观图；图12(d)为CAGB与SCG复配（总浓度25 mmol/L，物质的量之比2∶8）体系对应的泡沫微观图；图12(e)为CAGB、SCG与FS-50三者复配（总浓度25 mmol/L，物质的量之比4∶16∶5）体系对应的泡沫微观图。各泡沫液膜的厚度均呈减小趋势。图12中，标尺为1.5 mm，箭头(g)表示录像过程中的重力方向。由图12可见，二元表面活性剂混合物（84.01 μm）和三元表面活性剂混合物（192.31 μm）形成泡沫的初始膜厚，远高于单个表面活性剂CAGB（38.21 μm）、SCG（54.33 μm）、FS-50（79.71 μm）形成泡沫的初始膜厚；在12 min内，CAGB、SCG和FS-50泡沫的膜厚分别是减小到CAGB（9.49 μm）、SCG（34.06 μm）、FS-50（12.37 μm）；12 min后，CAGB/SCG/FS-50泡沫的膜厚为46.11 μm，明显高于单剂和CAGB/SCG泡沫的液膜厚度，表明CAGB/SCG/FS-50三元混合物泡沫体系具

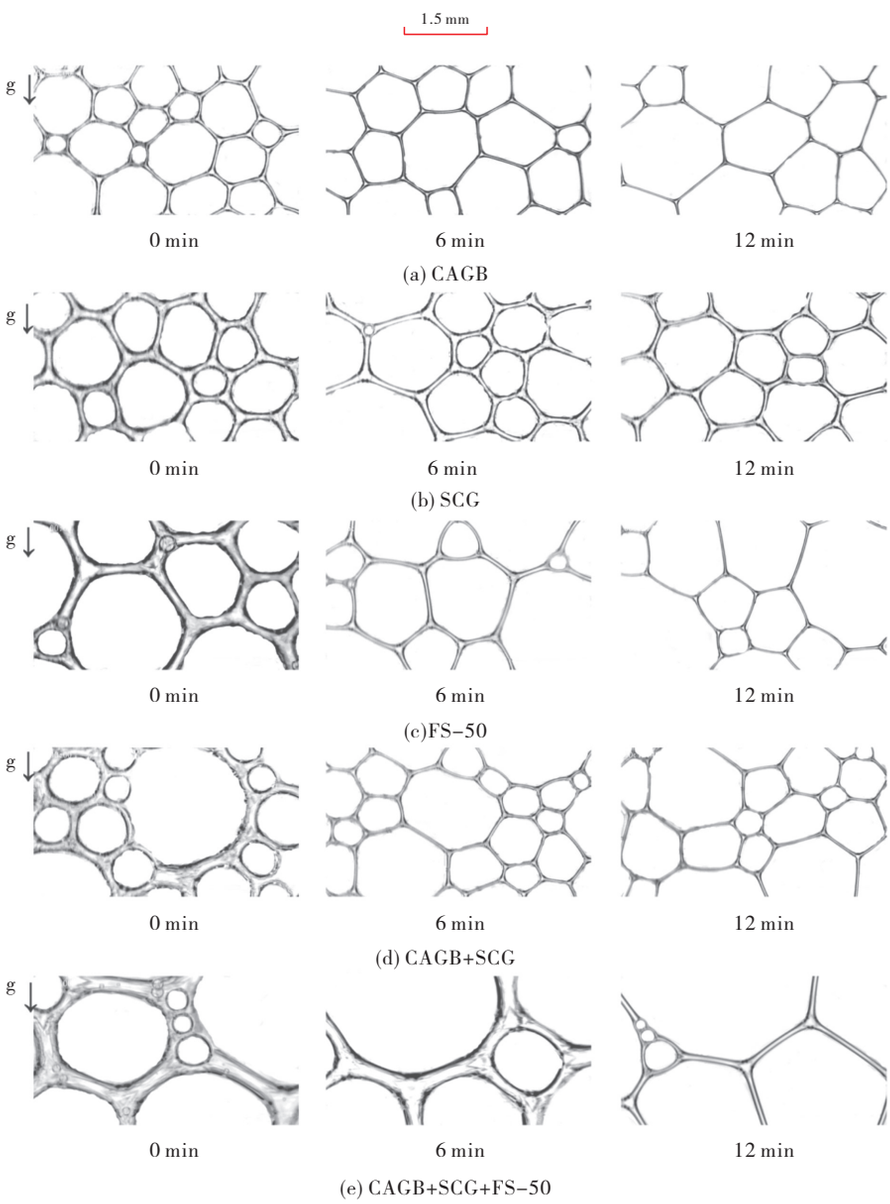


图12 各表面活性剂泡沫演变过程

Fig. 12 Foam evolution process of each surfactant

有最优的稳定性。

综合以上分析可知，三元混合物泡沫液膜厚度明显高于单剂和二元混合物的液膜厚度。Huang等[32]经泡沫稳定模型模拟发现，泡沫厚度对泡沫稳定性有显著影响，液膜越厚，泡沫越稳定。三维液膜内部空间正是泡沫内液体赋存之处，CAGB/SCG/FS-50泡沫的厚液膜也预示着该泡沫体系具备优异的携液能力。

3　结论

本文研发了一种三元复合泡排剂体系CAGB/SCG/FS-50，该三元复合泡排体系的复配物质的量之比为4∶16∶5，总浓度为25 mmol/L时，起泡能力与稳泡能力较强。0.05%鼠李糖的加入可显著延长该体系的泡沫半衰期。

经携液性能考察可知：该三元泡排剂体系可在凝析油含量为50%时，携液率高达45.94%且发泡率稳定，最高可耐受60%的凝析油含量；此外，该三元泡排剂体系可分别在甲醇含量50%、矿化度410 g/L条件下稳定发泡和携液，其中在矿化度为410 g/L时携液率为32.35%、发泡率为90%；温度为90 ℃时携液率可达69.11%。表面张力、黏度测试表明，CAGB/SCG/FS-50按上述比例复配时，可产生较低的临界胶束浓度和表面张力，且表观黏度较高；泡沫微观形态观察显示，该三元体系生成的泡沫液膜厚度最大，证实其在起泡、稳泡和携液方面具有优异的协同作用。这些结果表明，本文研制的高性能泡排剂具有良好的应用前景，对于保障水淹气井的稳产和增产具有重要意义。

参考文献

[1]KELLAND M. Production chemicals for the oil and gas industry (second edition)[M]. CRC Press, 2016.

[2]李根生，王天宇，李杰，等. 多能融合下油气智能绿色开发路径与展望[J]. 新疆石油天然气，2025，21(3)：1-13.
LI Gensheng, WANG Tianyu, Li Jie, et al. Path and prospect of intelligent and green development of oil and gas driven by multi-energy integration [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2025, 21(3): 1-13.

[3]QI H, BAI Z, ZHANG Q, et al. Synthesis of a Gemini betaine surfactant and its properties as foam drainage agent[J]. Tenside Surfactants Detergents, 2018, 55(2): 142-147.

[4]BHATT S, SARAF S, BERA A. Perspectives of foam generation techniques and future directions of nanoparticle-stabilized CO_2 foam for enhanced oil recovery[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(3): 1472-1494.

[5]马赟，赵黎. 双碳背景下二氧化碳输送管道智能化技术应用及探索[J]. 新疆石油天然气，2024，20(4)：87-94.
MA Yun, ZHAO Li. Application and exploration of intelligence technology for CO_2 transportation pipelines in the background of Carbon Peak and Carbon Neutrality[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(4): 87-94.

[6]许珺莹，刘正芳，许显，等. 椰油酰甘氨酸钠与两性表面活性剂复配泡沫性能探究[J]. 中国洗涤用品工业，2023，(1)：15-20.
XU Junying, LIU Zhengfang, XU Xian, et al. Research on the foam properties of the compound systems of sodium cocoyl glycinate and zwitterionic surfactants[J]. China Cleaning Industry, 2023, (1): 15-20.

[7]耿二欢，徐浩，许佳斌. 椰油酰甘氨酸钠应用性能研究[J]. 中国洗涤用品工业，2020，(12)：42-45.
GENG Erhuan, XU Hao, XU Jiabin. Study on the application performance of sodium cocoyl glycinate[J]. China Cleaning Industry, 2020, (12): 42-45.

[8]王普兵. pH值对椰油酰甘氨酸钠洁面膏性能的影响[J]. 中国洗涤用品工业，2019，(8)：72-77.
WANG Pubing. The effect of pH value on properties of sodium coconut glycine cleanser[J]. China Cleaning Industry, 2019, (8): 72-77.

[9]张青，张毅，陈胜环，等. 氨基酸型表面活性剂的泡沫性能研究及椰油酰氨基丙酸钠增稠体系的建立[J]. 中国洗涤用品工业，2020，(5)：67-76.
ZHANG Qing, ZHANG Yi, CHEN Shenghuan, et al. Research on foam property of common amino acid surfactant and establishment of a thickening system[J]. China Cleaning Industry, 2020, (5): 67-76.

[10]陈天文. 氟碳表面活性剂的制备及其在水成膜泡沫灭火剂中的应用[D]. 江苏南京：南京理工大学，2022.
CHEN Tianwen. Preparation of the fluorocarbon surfactants and their application in aqueous film forming foam extinguishing agent[D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology, 2022.

[11]DONG S B, FAN J B, LV H M, et al. Excellent condensate and salt-resistant foam by anionic-zwitterionic-cationic Gemini surfactants compounds for gas well deliquification [J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2024, 27(1): 135-145.

[12]彭梦圆，李家明，沙敏，等. 季铵盐氟碳表面活性剂复配体系的性能研究[J].化工学报，2025，76(8)：4177-4184.
PENG Mengyuan, LI Jiaming, SHA Min, et al. Study on the performance of quaternary ammonium fluorocarbon surfactant compound system [J]. CIESC Journal, 2025, 76(8): 4177-4184.

[13]ZHAO W, XU Z, YAN L, et al. Synthesis of short-chain fluorocarbon surfactant: Enhancing surface and foam performance through hydrocarbon surfactants compounding [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 64: 105409.

[14]张宇强,黄芮,曾山晋,等.新型短碳链氟碳表面活性剂发泡性能研究[J].化学研究与应用,2024,36(7):1529-1536.
ZHANG Yuqiang, HUANG Rui, ZENG Shanjin, et al. Study on foaming performance of new short carbon chain fluorocarbon surfactants [J]. Chemical Research and Application, 2024,36(7):1529-1536.

[15]朱新华,黄河,张宇强.不同温度下氟碳链长度对表面活性剂理化性能的影响[J].消防科学与技术,2024,43(6):855-859.
ZHU Xinhua, HUANG He, ZHANG Yuqiang. The effect of fluorocarbon chain length on the physicochemical properties of surfactants at different temperatures[J]. Fire Science and Technology,2024,43(6):855-859.

[16]贾晨悦. Gemini表面活性剂的合成、性质及应用研究[D].湖北武汉:武汉轻工大学,2024.
JIA Chenyue. Synthesis, properties, and applications of Gemini surfactants[D]. Wuhan, Hubei: Wuhan Polytechnic University,2024.

[17]瞿超超,刘正中,殷鸿尧,等.新型排水采气用抗凝析油泡排剂[J].石油学报,2020,41(7):865-874.
QU Chaochao, LIU Zhengzhong, YIN Hongyao, et al. A new anti-condensate foaming agent for drainage gas recovery[J]. Acta Petrolei Sinica,2020,41(7):865-874.

[18]武俊文,张汝生,王海波,等.耐高含量凝析油泡排剂的研制及现场应用[J].油田化学,2019,36(3):508-512.
WU Junwen, ZHANG Rusheng, WANG Haibo, et al. Research and field application of high content of condensate oil resistance foam unloading agent [J]. Oilfield Chemistry, 2019,36(3):508-512.

[19]张佳庆,尚峰举,黄杰,等.典型水成膜泡沫灭火剂流变性研究[J].材料导报,2025,39(5):281-286.
ZHANG Jiaqing, SHANG Fengju, HUANG Jie. Rheological properties of typical aqueous film-forming foam[J]. Materials Reports,2025,39(5):281-286.

[20]张宇强,贾旭宏,朱新华.温度影响下两性氟碳表面活性剂的性能研究[J].日用化学工业(中英文),2025,55(2):162-169.
ZHANG Yuqiang,JIA Xuhong,ZHU Xinhua. Study on the effect of temperature on the performance of zwitterionic fluorocarbon surfactants[J]. China Surfactant Detergents & Cosmetics,2025,55(2):162-169.

[21]欧红香,闵政,薛洪来,等.疏水改性纳米氧化镁对短氟碳链泡沫性能影响[J].化工进展,2024,43(9):5177-5184.
OU Hongxiang,MIN Zheng,XUE Honglai,et al. Effect of hydrophobic modified magnesium oxide nanoparticles on the properties of short fluorocarbon chain foam[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2024,43(9):5177-5184.

[22]丁志强.椰油酰甘氨酸钠体系洁面膏配方的优化研究[D].上海:上海师范大学,2022.
DING Zhiqiang. Optimization study on the formula of cocoyl glycinate sodium system cleansing cream [D]. Shanghai: Shanghai Normal University,2022.

[23]GAZEM A, KRISHNA S, AL-YASERI A. Low-salinity enhanced oil recovery using biosurfactant-ZnO nanoparticle-xanthan gum formulations: A comparative study of rhamnolipid and sophorolipid systems[J]. Journal of Molecular Liquids,2025,432:127894.

[24]ZHU X,JIA X,ZHANG Y,et al. Synthesis and characterization of a novel short fluorocarbon chain cationic surfactant [J]. Journal Surfactants and Detergents,2020,23(5):873-881.

[25]匡韶华,吕民,孙振宇,等.耐高温泡沫树脂低伤害均匀固砂技术[J].油田化学,2024,41(1):53-60.
KUANG Shaohua,LU Min,SUN Zhenyu,et al. High temperature resistant foam resin sand consolidation technology with uniform and low damage [J]. Oilfield Chemistry, 2024, 41(1):53-60.

[26]熊春明,曹光强,张建军,等.适应中国主要气田的纳米粒子泡排剂系列[J].石油勘探与开发,2019,46(5):966-973.
XIONG Chunming,CAO Guangqiang,ZHANG Jianjun,et al. Nanoparticle foaming agents for major gas fields in China[J]. Petroleum Exploration and Development,2019,46(5):966-973.

[27]SHENG Y,ZHANG S,MA W,et al. Tuning stability, rheology, and fire-extinguishing performance of advanced fire-fighting foam material by inorganic nanoparticle flame retardants [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 677:378-389.

[28]YANG J,JOVANCICEVIC V,RAMACHANDRAN S. Foam for gas well deliquification [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2007,309(1-3):177-181.

[29]许豪,燕永利,刘辉,等.油水混相泡沫排液行为的研究[J].日用化学工业(中英文),2025,55(2):154-161.
XU Hao,YAN Yongli,LIU Hui,et al. Study on the drainage behavior of mixed aqueous-and-oil foam[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics,2025,55(2):154-161.

[30]LI J,WEN M,YANG J,et al. Synthesis and analysis of magnetic nanoparticles within foam matrix for foam drainage gas production [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 238:212887.

[31]LI C,WANG Z,WANG W,et al. Temperature and salt resistant CO_2 responsive gas well foam:Experimental and molecular simulation study[J]. Applied Surface Science,2022,594:153431.

[32]HUANG B,NAN X,FU C,et al. Study of the bubble collapse mechanism and its influencing factors on stability under ultra-low surface tension[J]. Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects,2021,618:126440.

(修改回稿日期:2025-12-18 编辑:粟刘)