

综述与专论

DOI: 10.11949/0438-1157.

 α -烯烃基高性能表面活性剂的研究进展

刘天姿, 黄志为, 方松, 周聪聪, 尹相汛, 张红如, 程浩然

(青岛科技大学化工学院, 高性能有机光学聚合物与先进制造技术全国重点实验室, 山东 青岛 266042)

摘要: 在全球朝绿色低碳转型、“双碳”战略的推进过程中, α -烯烃凭借其末端双键、直链结构,成为高性能表面活性剂实现绿色化发展的关键原料。本文系统综述了 α -烯烃基表面活性剂在全链条过程中实现高值化利用的研究进展,深入剖析了疏水链长、支化度、亲水基类型对于临界胶束浓度、界面张力、液膜流变行为的构效关系,总结了 α -烯烃磺酸盐的C-S键稳定性和抗硬水性、 α -烯烃乙氧基化物的亲水亲油平衡可调性特性与润湿乳化性能、 α -烯烃磺基甜菜碱的内盐结构耐盐机理及复配协同效应,并结合日用化工、高温高盐油藏的应用实例,阐述了其在降低油水界面张力、稳定泡沫封堵、提高洗油效率等方面的作用优势。未来研究应聚焦于分子模拟与人工智能辅助的靶向设计、微通道连续流与生物催化等绿色工艺的强化方面,同时要建立全生命周期评价模式,以此推动 α -烯烃基表面活性剂朝着高端绿色功能材料进行升级。

关键词: 石油; α -烯烃; 表面活性剂; 构效关系; 耐温抗盐; 绿色制造

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-18

Research progress on high-performance α -olefin-based surfactants

LIU Tianzi, HUANG Zhiwei, FANG Song, ZHOU Congcong, YIN Xiangxun, ZHANG Hongru, CHENG Haoran

(National Key Laboratory of High-Performance Organic Optical Polymers and Advanced Manufacturing Technology, College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, Shandong, China)

Abstract: Driven by the global transition toward a low-carbon economy and China's "dual carbon" strategy, α -olefins have emerged as key feedstocks for the green development of high-performance surfactants, owing to their terminal double-bond structure and linear alkyl chains. This paper systematically reviews recent advances in the high-value utilization of α -olefin-based surfactants throughout the full chain. The structure-property relationships between hydrophobic chain length, branching degree, and hydrophilic group type are critically analyzed with respect to critical micelle concentration, interfacial tension, and liquid film rheology. The characteristics of representative surfactants are summarized: the C-S bond stability and hard-water resistance of α -olefin sulfonates, the tunable hydrophilic-lipophilic balance and wetting/emulsification performance of α -olefin ethoxylates, and the salt tolerance mechanism of the inner-salt structure of α -olefin sulfobetaines along with their synergistic effects in formulation. Combined with application cases in daily chemicals and high-temperature, high-salinity reservoirs, the mechanisms by which these surfactants reduce oil-water interfacial tension, stabilize foam

收稿日期: 2026-04-14 修回日期: 2026-07-07

通信作者: 张红如(1996—),女,博士,副教授,zhanghr103@163.com

第一作者: 刘天姿(2003—),女,硕士研究生,15615447845@163.com

基金项目: 国家科技重大专项(2024ZD1406601); 中国石油科技创新基金项目(2024DQ02-0118); 山东省自然科学基金项目(ZR2025QC500)

引用本文: 刘天姿, 黄志为, 方松, 周聪聪, 尹相汛, 张红如, 程浩然. α -烯烃基高性能表面活性剂的研究进展[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-18

Citation: LIU Tianzi, HUANG Zhiwei, FANG Song, ZHOU Congcong, YIN Xiangxun, ZHANG Hongru, CHENG Haoran. Research progress on high-performance α -olefin-based surfactants[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-18

for plugging, and enhance oil-washing efficiency are elucidated. Future research should focus on targeted molecular design assisted by molecular simulation and artificial intelligence, intensified green processes such as microchannel continuous-flow technology and biocatalysis, and the establishment of a whole-life-cycle assessment model, thereby promoting the upgrade of α -olefin-based surfactants toward high-end green functional materials.

Keywords: petroleum; α -olefins; surfactants; structure-property relationship; temperature and salt resistance; green manufacturing

引 言

随着现代化工行业的发展,石油的核心地位仍不可被替代。在全球“碳达峰、碳中和”战略的驱动下,石油化工行业正加速向绿色低碳转型,对三次采油用表面活性剂等产品提出了更高的要求^[1-2]。 α -烯烃作为一类关键的线性烯烃,它是现代石化产业链里乙烯齐聚、费托合成、生物质转化的核心枢纽,也是制备高性能表面活性剂不可替代的结构单元。目前,全球 α -烯烃市场前景广阔,我国多家企业已完成 α -烯烃的中试以及工艺包编制,到2026年在建以及规划的总产能达到151万吨^[3],亟需通过高端转化来解决产能过剩与附加值低的矛盾,开发 α -烯烷基表面活性剂是实现这一产业升级很重要的路径。

α -烯烃独特的末端双键结构赋予了其极高的反应活性,通过磺化、季铵化、乙氧基化等改性手段^[4],可精准构筑阴离子型 α -烯烃磺酸盐(AOS)、非离子型环氧乙烷加成物(AOE)及两性离子型磺基甜菜碱(AO-SB)等表面活性剂。和传统的烷基酚或者支链烷基苯相比, α -烯烃衍生物的直链疏水骨架具有优异的界面吸附能力,生成产物有良好的生物降解性,符合绿色化学的发展趋势。尤其是在高温

高盐油藏化学驱里,其界面活性与稳定性的协同调控有着显著的应用潜力(图1)。

当前,尽管相关研究日益增多,但仍存在关键问题:其一,对于 α -烯烃面向表面活性剂的转化缺乏系统总结,无法指导工艺的精准筛选;其二,对疏水链长、支化度、亲水基定位的构效关系认识碎片化,没有建立微观结构调控宏观性能的理论框架;其三,对极端工况下表面活性剂与油水界面的相互作用机制和配伍规律理解不够深入。

基于此,本文以 α -烯烃的全链条高值化利用为导向,深入剖析 α -烯烃磺化、乙氧基化等改性过程的反应机理与工艺强化策略;重点归纳碳链结构与亲水基类型对表/界面活性的调控规律;最后结合油田驱油与日化应用的实际需求,展望生物基 α -烯烃及微通道反应器等绿色制造技术的未来发展趋势,旨在为高性能 α -烯烷基表面活性剂的分子设计与工程放大提供理论参考。

1 α -烯烃理化特性与高值转化

1.1 α -烯烃的结构特性及合成工艺

α -烯烃的核心特征在于其末端双键与直链烷基骨架的组合结构。末端双键的空间位阻较小,电

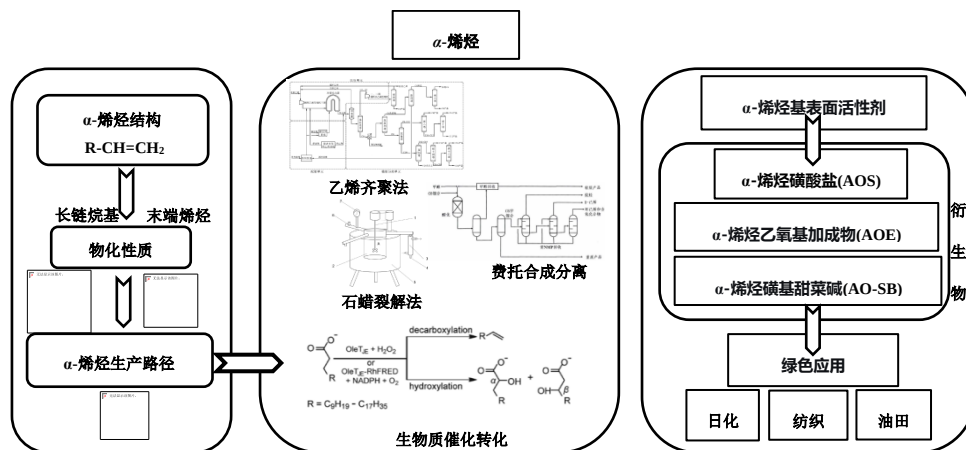


图1 α -烯烃:从结构到表面活性剂应用^[5-9]

Fig.1 α -olefins: from structure to surfactant applications^[5-9]

子云密度较高,因此极易受到亲电试剂或自由基的攻击,表现出极高的化学反应活性。直链烷基骨架是表面活性剂生物降解性的结构基础,相较于支链或芳香族疏水基,直链 α -烯烃衍生物可通过 β -氧化途径快速矿化,契合绿色化学的发展趋势^[10]。 α -烯烃的物理化学性质与碳链长度有关,这些性质对于其在表面活性剂合成过程中的应用有着直接的影响(图2)。在常压环境下, α -烯烃的沸点会随着碳数的增多而升高,其双键使分子空间构型紧凑,

限制了分子链的柔性,其分子间堆积不如烷烃紧密,所以相同碳原子数的 α -烯烃的沸点会比对应的直链烷烃略低,而且支链数量越多,分子间的接触面积就越小,沸点也就会相应地有所降低。对于表面活性剂而言,碳链长度增加,分子间范德华力会逐渐增强,水溶性会降低,疏水性增强,这既有利于降低表面张力,也能够帮助提高乳化稳定性、增溶能力,形成比短链分子更加稳定的胶束结构^[11-12]。

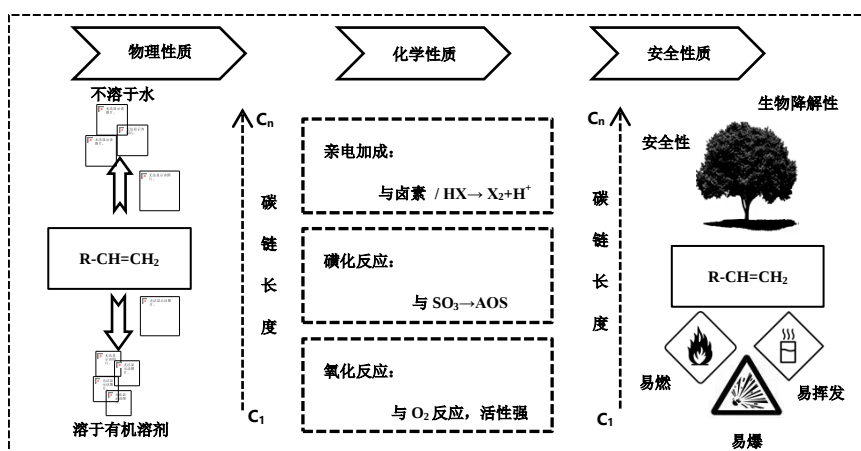


图2 不同碳链长度 α -烯烃的性质特点

Fig.2 Properties and characteristics of alpha olefins with different carbon chain lengths

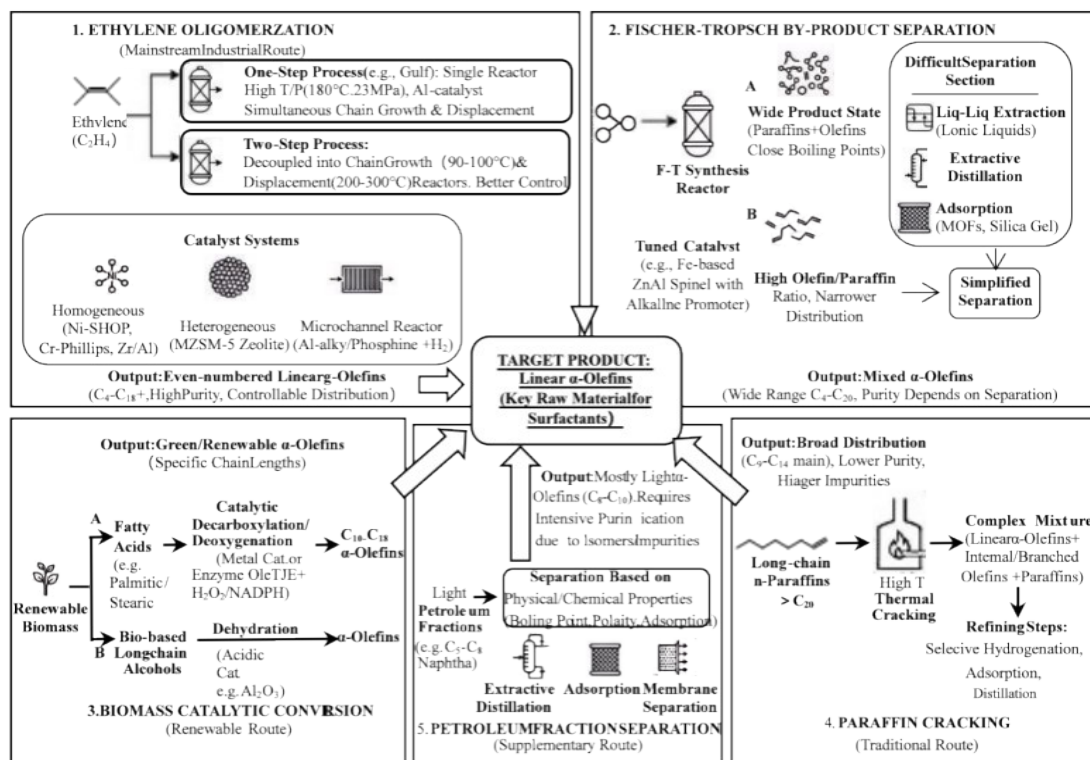


图3 α -烯烃的主要合成方法

Fig.3 Main synthetic methods for α -olefins

目前,全球 α -烯烃生产主要依赖乙烯齐聚工艺,该技术通过控制乙烯的聚合程度,能够高效获得偶碳数的直链 α -烯烃^[13-16],是表面活性剂原料的主要来源(图3)。与此同时,费托合成副产物分离法作为重要的补充手段^[17],利用煤或天然气基合成气转化过程中的副产资源,通过精馏分离^[18-19]可获得一定比例的混合 α -烯烃,但所得 α -烯烃纯度低^[20-22],限制了其在高端日化领域的应用。石蜡裂解法以长链正构烷烃为原料高温裂解生成烯烃混合物,但产物支链度高、杂质多^[23];石油馏分分离法则基于轻质馏分中烯烃与烷烃、环烷烃等物化性质差异进行分离提纯^[24];生物质催化转化以植物油或动物脂肪中的脂肪酸或脂肪醇为原料,通过脱羧、脱氧或脱水反应生成C10-C18 α -烯烃,具有可再生与绿色化优势^[25]。总体而言,不同路线在碳数分布、线性度及杂质组成上的差异,直接影响其下游表面活性剂的产品等级与应用场景选择。

1.2 α -烯烃合成表面活性剂的转化路径

α -烯烃的后续反应路径众多,可通过聚合、共聚、氢甲酰化、烷基化等多种反应路径实现高值化转化应用(表1)。面向表面活性剂领域的转化,目前工业应用与学术研究中常见的 α -烯烃功能化转化方法主要有磺化反应、氧化反应和乙氧基化反应等。这些反应为 α -烯烃提供了更多的化学转化途径,使得最终产品能够满足特定应用领域的需求。

(1)磺化反应:这是 α -烯烃转化为阴离子表面活性剂最核心的工艺。 α -烯烃与三氧化硫发生亲电加成反应,经老化、水解及中和,生成以烯基磺酸盐和羟基磺酸盐为主的AOS^[26-27],该产物因磺酸基团的强亲水性和直链烷基的疏水效应,表现出优异的抗硬水能力、泡沫性能及表面活性^[28],广泛应用于洗涤剂与三次采油领域。 α -烯烃和三氧化硫发生亲电加成反应,历经老化、水解、中和等一系列步骤,最终生成了主要成分为烯基磺酸盐和羟基磺酸盐的AOS。因为磺酸基团具备很强的亲水性,同时直链烷基又有着疏水效应,所以这种产物展现出了出色的抗硬水能力、良好的泡沫性能、较高的表面活性,从而被广泛应用于洗涤剂和三次采油等领域。

(2)氢甲酰化-乙氧基化反应:该路径是制备非离子型表面活性剂的主要路线。首先要通过氢甲酰化反应把 α -烯烃转变为高碳醛,经过加氢制成高碳脂肪醇,在碱性催化剂的作用下,发生乙氧基化

反应,与环氧乙烷开环加成,生成AOE。通过调节乙氧基化步骤里环氧乙烷的加成数,能够精准调控产物的亲水和疏水平衡,进而实现对润湿、乳化等性能的定向设计^[29]。

(3)氧化反应:利用温和的氧化条件把 α -烯烃转变为羧酸盐或者醇硫酸盐之类的表面活性剂^[30-31],这些产品在洗涤剂、化妆品当中有着广泛的应用。氧化后的 α -烯烃能够进一步转化成具备抗菌性能的表面活性剂^[32]。

表1 α -烯烃的种类及用途

Table 1 Types and applications of α -olefins

烯烃种类	用途
C4-C8	聚乙烯共聚单体
C6-C8	聚氧乙烯、低分子量脂肪酸
C8-C12	聚 α -烯烃、润滑油、胺类添加剂
C10-C16	洗涤剂、非离子表面活性剂、油田化学品
C16-C18	表面活性剂、油田化学品、润滑油添加剂
C20-C30+	油田化学品、蜡流变改性剂

2 α -烯烷基表面活性剂的构效关系

α -烯烃的分子构型对于其下游表面活性剂的产品等级、应用边界有着直接的决定性作用。 α -烯烷基表面活性剂所具备的性能优势并非是由单一化学结构产生的,而是疏水链构型与亲水基电荷特性共同发挥作用所导致的结果。依据电荷性质方面存在的差异,该类表面活性剂主要被划分为阴离子表面活性剂AOS、非离子表面活性剂AOE及两性离子表面活性剂AO-SB三大体系,分别借助磺酸基电离、聚氧乙烯链水合、分子内电荷补偿机制实现界面活性。

2.1 阴离子表面活性剂:AOS

20世纪30年代,Cuent her等^[33]人提出通过对 α -烯烃的直接磺化得到活性剂的方法,从此AOS作为一种毒性小、无污染的新型表面活性剂开始了工业化生产。北京石油勘探开发研究院和大庆石油勘探开发研究院研究表明,AOS配制的微乳液可以与原油形成超低界面张力,并且该体系具有明显的耐盐性能^[34-35]。AOS是目前应用最广泛的 α -烯烷基阴离子表面活性剂,其亲水基为磺酸钠($-\text{SO}_3^-\text{Na}^+$),通过稳定的C-S键直接连接于烯烃主链。该结构特征赋予AOS优异的水溶性、抗硬水性、化学稳定性及温和性,使其在日化洗涤、个人护理及工业清洗领域占据重要地位。

2.1.1 AOS反应工艺 AOS的主要组成为烯基磺酸盐($\text{RCH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_n\text{SO}_3\text{Na}$) (64%~72%)、羟基磺酸盐($\text{RCHOHCH}(\text{CH}_2)_n\text{SO}_3\text{Na}$) (21%~26%)和二磺酸盐(7%~11%),其性能与烷基链的长度、支化度与双键位置等密切相关(式中R代表长链烷基)^[36]。反应历程主要以C14-C18的 α -烯烃为主要原料,经过磺化、老化、水解及中和四步核心工艺(图4)。其中, SO_3 对末端双键亲电加成生成高活性的 β -磺内酯,随后在40~80℃的老化过程中, β -磺内酯异构化为热力学更稳定的 γ/δ -磺内酯,最终经碱性水解开环形成具有表面活性的终产物^[37-38]工业上常采用降膜式反应器,通过精准控制 SO_3 与烯烃的摩尔比(一般为1.05:1)来抑制副产物。

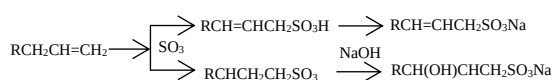


图4 AOS合成路径

Fig.4 Synthetic pathway of α -olefin sulfonates

相较于传统烷基苯磺酸盐,AOS的分子结构中不含苯环,且磺酸基通过稳定的C-S键连接,赋予其优异的生物降解性和更低的皮肤刺激性,这使其成为继烷基苯磺酸盐和脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸钠之后第三大类阴离子表面活性剂。目前,AOS的制备工艺和性能研究已经取得了显著进展,通过优化反应过程中的关键步骤^[39],大幅提升了AOS的产率和纯度,同时AOS自身独特的表面活性,使其在洗涤剂、三次采油、农药乳化等领域拥有广阔的应用前景^[40-43]。

2.1.2 烷基链长对性能的影响 α -烯基表面活性剂的疏水链长度是决定其表面活性的首要结构参数。随着碳链的增长,表面活性剂的疏水驱动力增强,使临界胶束浓度(γ_{cmc})显著降低,同时调控界面吸附行为与宏观应用性能^[44]。Jia等人^[45]通过分子动力学模拟揭示了AOS在油水界面的吸附构型(图5),发现长链烷基的伸展取向与头基水合层的协同作用决定了界面层稳定性。实验数据表明,C14AOS、C16AOS与C18AOS的临界胶束浓度(CMC)分别为290 mg/L、190 mg/L和13 mg/L,随碳链增长呈数量级下降,而 γ_{cmc} 维持在32.6~33.1 mN/m区间内^[46],当碳链达到有效长度后,气/液界面的分子堆积密度趋于饱和,表面张力降低能力受限于头基水合层的排斥作用。

Niu等人^[47]的研究进一步表明,AOS的泡沫性能

随碳链增加呈现先升后降的“倒U型”规律,其中C16-C18区间达到最优。过短的碳链(C14)疏水驱动力不足,难以在界面形成紧密吸附层,泡沫膜弹性模量低,气泡易并聚;过长的碳链(C20+)虽增强了疏水相互作用,却导致水溶性骤降、分子扩散系数降低,动态表面张力下降迟缓,无法满足瞬态起泡过程的需求;C16-C18的AOS在疏水缔合强度与分子溶解/扩散动力学之间实现了最佳平衡,形成的泡沫尺寸更小、分布更致密。

此外,AOS分子中疏水性的长链烷基与强亲水性的磺酸基团可形成两亲结构,赋予其极低的CMC,在低浓度下显著降低水溶液表面张力,表现出高效的界面吸附能力^[48]。而磺酸基团的强亲水性及直链烷基结构的位阻效应^[49],使其在低温条件下仍可维持透明溶液状态,CMC低至0.1~0.3 mmol/L,显著优于支链结构的烷基苯磺酸盐(LAS)^[50]这一特性使其在润湿、乳化和分散过程中快速作用于固-液或液-液界面,尤其适用于高疏水表面的清洁需求。

因此,碳链长度对表面活性剂的CMC、界面吸

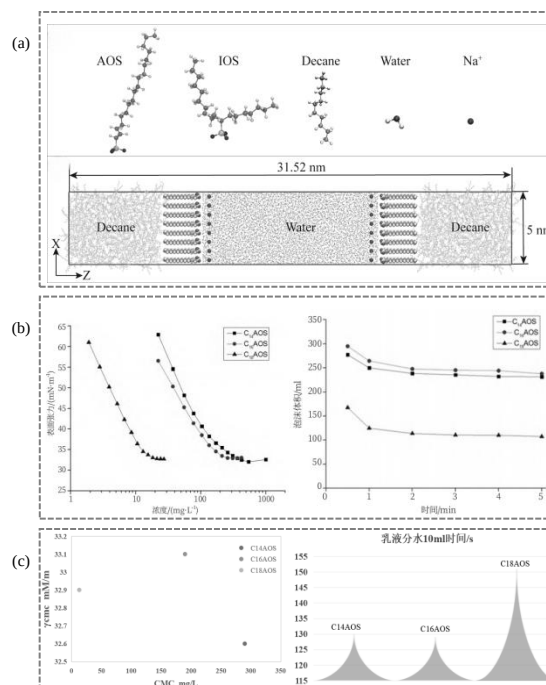


图5 AOS的结构和性能 (a) AOS等分子结构模型; (b) AOS的表面张力、泡沫体积; (c) AOS的表面活性参数和乳化能力^[45-46]

Fig.5 Structure and Properties of AOS (a) AOS and other molecular structure models; (b) Surface tension and foam volume of sodium α -alkenyl Sulfonate (AOS); (c) Surface activity parameters and emulsification ability of AOS^[45-46]

附效率及泡沫性能具有系统性调控作用,通过调控最优碳链区间,能够实现降低CMC与保持良好水溶性的目标。

2.1.3 支化度与双键位置对性能的影响 α -烯烃支链结构会降低分子排列的紧密性,导致CMC升高、表面活性下降,而末端的双键结构可增强界面活性持久性,使产品在高温、高矿化度环境下仍能保持稳定性能。Bai等人^[27]对比了不同支化程度的

AOS(图6),发现支化程度越高,表面活性剂的CMC越大, γ_{cmc} 越低。其中,高度支化的TEC4 AOS虽CMC略高,但其动态表面张力下降速率最快,润湿性和乳化稳定性优于直链产品。这是因为支化破坏了分子链的规整性,降低了结晶度,从而改善了低温溶解性。然而,过度支化会削弱分子间的疏水缔合作用,导致界面排列疏松,降低表面活性。

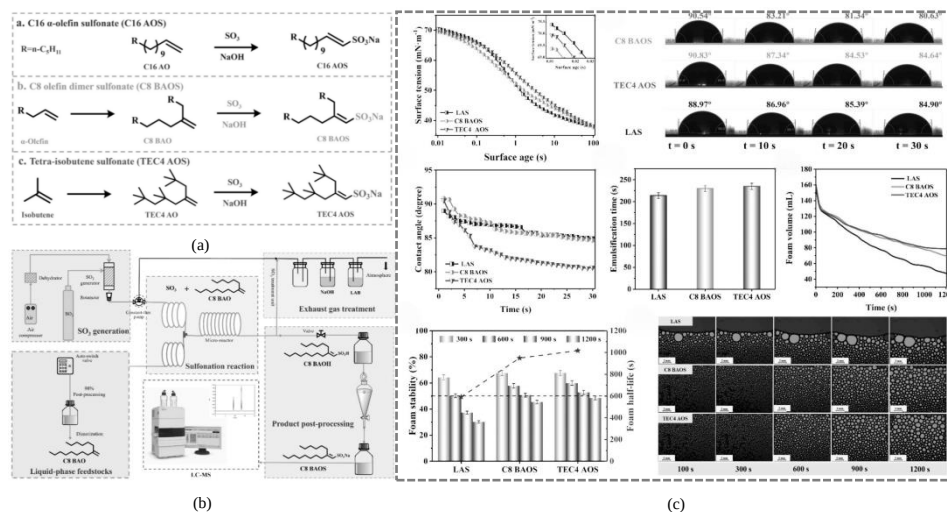


图6 不同支化程度的 α -烯烃磺酸盐表面活性剂的(a)合成方法;(b)磺化过程;(c)性能测试^[27]

Fig.6 Synthesis methods of α -olefin sulfonate surfactants with varying branching degrees (a) Synthesis methods; (b) Sulfonation process; (c) Performance testing^[27]

2.1.4 抗硬水性与化学稳定性机制 抗硬水性与化学稳定性是AOS区别于传统阴离子表面活性剂的核心优势。磺酸基团与钙镁离子的结合常数较低,在硬水中仍能维持高表面活性,避免皂垢生成,解决了传统皂基类表面活性剂的失效问题^[51]。Jin等人^[52]指出,AOS的浊点临界 Ca^{2+} 浓度可达800 mg/L,远高于LAS。在高硬度水质中,AOS的刚性吸附膜结构能减少硬水离子对界面活性的干扰,保障了乳化与分散效率。

在化学稳定性方面,AOS的磺酸基团通过稳定的C-S键直接连接于烯烃主链,相较于硫酸酯基($-\text{OSO}_3^-$)更不易发生酸性或碱性水解,显著优于十二烷基硫酸钠(SDS)等硫酸盐类表面活性剂。C-S键的高键能使得AOS在pH 2~12范围内保持稳定,不易发生水解,且热重分析显示其主链分解起始温度达220℃以上^[53]。杨志坚等人^[54]研究表明,AOS在40~70℃范围内乳液稳定性不随温度变化,与碳酸钠复配可显著降低稠油黏度,降黏率高达98.22%,展现出优异的耐温抗盐性能。此外,Wibbermann等

人^[55]在对阴离子表面活性剂的风险评估中指出,AOS具有低毒性和高生物降解性,其在环境中不易积累,化学性质相对稳定。

综上所述,AOS的构效关系中疏水链长决定性能优势,分子链构型调控平衡与动态行为,磺酸头基则保障化学稳定性与环境耐受性。AOS凭借其多维度的表面活性优势^[56-57],成为兼具高效性、环境友好性与应用普适性的绿色表面活性剂代表。

2.2 非离子表面活性剂:AOE

AOE是 α -烯烃通过乙氧基化反应而制得的一类关键非离子表面活性剂,其独特的分子构效关系,让它在动态润湿、界面吸附、乳液稳定等方面,展现出比传统直链醇乙氧基化物更为出色的性能。研究表明,其表面活性、润湿性能,很大程度上取决于分子中亲水基的聚合度和疏水基(α -烯烃链)的支化程度^[58]。依靠其独特的分子结构设计、可调控的构效关系,在表面活性、润湿、乳化还有分散等方面,呈现出比传统表面活性剂更具优势的综合性性能。

2.2.1 AOE 反应工艺 20 世纪 60 年代, Shell 公司和 ICI 公司便开展了 α -烯烃直接乙氧基化的探索^[59]。然而, 由于 α -烯烃双键反应活性低于脂肪醇, 直接乙氧基化效率低、催化剂选择性差, 导致 AOE 在很长一段时间内未能实现大规模工业化。

现代工艺通过窄分布乙氧基化技术, 将 α -烯烃经分子筛干燥和离子交换脱酸预处理后, 利用 DMC 催化剂替代传统 KOH, 在碱性条件下催化剂活化 α -烯烃双键生成碳负离子, 进攻环氧乙烷(EO)分子中电负性较高的氧原子, 引发开环反应, 形成 β -羟基乙氧基中间体, 有效抑制了聚乙二醇副产物的生成, 使产物分子量分布指数显著降低, 从而提升了乳化精度和稳定性^[58]。反应过程中, 通过分段升温 and 精确控制 EO 滴加速率, 可防止局部过热导致的双键异构化或 EO 自聚^[59]。反应产物经醋酸中和、活性炭脱色以及减压蒸馏脱除残留 EO, 并通过薄膜蒸发或分子蒸馏分离低聚物, 最终得到经值可控、多分散指数的目标产物。该工艺通过催化剂选型和参数优化, 有效抑制副反应, 可以实现 AOE 的高效合成。此外, 工业上针对 α -烯烃双键直接与 EO 加成路径效率低、副产物多的问题, 主流生产工艺往往采用 α -烯烃氢甲酰化/加氢得到高碳脂肪醇, 再进行乙氧基化的间接路线^[60]。

2.2.2 EO 聚合度对性能的影响 AOE 的性能高度依赖于聚氧乙烯醚链的长度, 依靠改变 EO 链长度(即聚合度)能调控 AOE 的亲水-疏水平衡(HLB)。低 EO 数的 AOE 产物 HLB 值低, 疏水核暴露, 在固/液界面有快速的扩散-吸附动力学, 有优异的润湿和铺展能力^[61]。随着 EO 聚合度增加, 产物 HLB 值升高, 亲水性增强, 在水溶液中容易形成胶束, 适用于 O/W 型乳液聚合, 不过过高聚合度会使分子中疏水基团相对比例下降, 进而降低表面活性。Arihiro

Kanazawa 等人^[62]揭示了乙氧基化条件(催化剂、温度、压力、EO 加成数)对产物表面活性、润湿、泡沫及乳化性能的系统影响规律, 采用带供电子取代基的环氧单体, 通过生成稳定的碳正离子中间体实现与 α -烯烃的链增长反应, 加入弱路易斯碱促进环氧单体开环, 提高交叉反应频率, 溶剂极性调节共聚物中单体的序列分布。通过空间位阻效应增强分散模式的动力学稳定性, 随 EO 数变化梯度调节表面活性剂的 HLB 值, 能实现从水包油至油包水乳液的精准调控^[63]。

2.2.3 疏水链支化对性能的影响 AOE 分子结构中的支链化 α -烯烃疏水基与聚氧乙烯链亲水基可形成协同效应, 赋予其优异的界面吸附能力, 使其在复杂环境条件下保持高度的稳定性与适应性。AOE 的支链化疏水基通过降低界面能垒, 可促进其在油/水界面的快速吸附, 形成低曲率胶束结构, 从而稳定乳液液滴^[64]。与传统直链醇乙氧基化物相比, AOE 在动态润湿、界面吸附及乳液稳定等方面表现出更优的性能^[58]。Zhai 等人^[65]利用煤基费托 α -烯烃合成了支链乙氧基化物, 合成的支链表面活性剂(MDC6E_n)具有较低的平衡表面张力、优异的润湿性和乳化性能, 为合成支链非离子表面活性剂提供了新途径。王亚魁等人^[66]通过疏水基的支链化特性来削弱分子间疏水缔合作用, 从而显著降低 CMC, 并提升气/液界面吸附效率, 形成紧密排列的单分子层, 从而有效降低动态表面张力(图 7)。此外, 支链疏水基与直链表面活性剂的复配可进一步通过分子间疏水-亲水互补效应优化乳液粒径分布^[67], 其非离子特性使其对电解质、pH 波动及温度变化具有良好的强耐受性, 在复杂介质中仍能维持胶束-界面协同稳定机制。

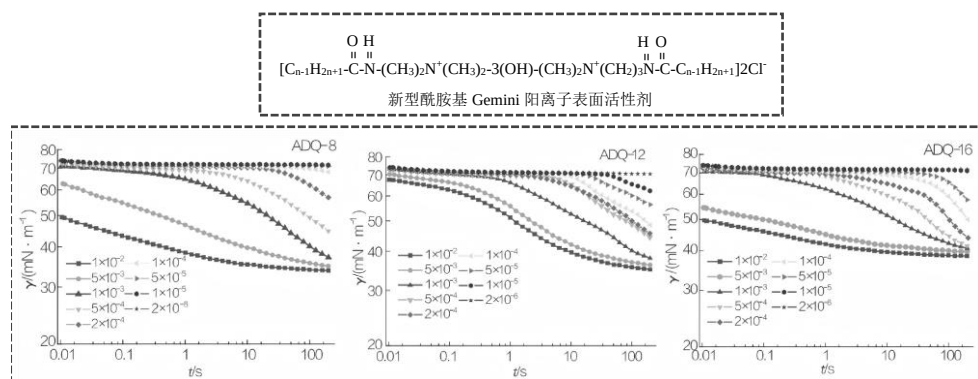


图 7 不同疏水链长酰胺基 Gemini 阳离子表面活性剂的动态表面张力^[66]

Fig. 7 Dynamic surface tension of amide-based Gemini cationic surfactants with different hydrophobic chain lengths^[66]

综上所述, AOE 的性能受亲水基 EO 链长与疏水基支化度共同影响, EO 链长通过调控 HLB 值调控其界面行为与乳化类型, 支链化疏水基则赋予其分子构象柔性与环境适应性, 两者的协同调控是实现 AOE 性能按需设计的核心机制。

2.3 两性离子表面活性剂: AO-SB

AO-SB 属于两性离子表面活性剂, 它具有阴离子磺酸基团和阳离子季铵基团。与 AOS 的单一阴离子磺酸基和 AOE 的无电荷聚氧乙烯醚链不同, AO-SB 分子内的阴离子磺酸基与阳离子季铵基同时存在, 它们借助短链烷基桥联形成内盐型两性离子对。此特性在本质上决定了其在耐盐性、抗硬水性、界面稳定性还有生物相容性等方面存在差异, 使得它在高温高盐油田化学品、高端日化、生物医药领域具备了巨大的应用潜力。

2.3.1 AO-SB 反应工艺 AO-SB 的研究起始于 20 世纪 80 年代, 在早期阶段主要是以天然油脂衍生出来的甜菜碱型表面活性剂作为研究对象。随着时间推移, α -烯烃磺化技术变得成熟起来, 而以 α -烯烃作为疏水基骨架的 AO-SB, 因为其直链结构所带来的良好生物降解性、更低的环境毒性, 逐渐成为了研究的热点内容。到了 21 世纪之后, 考虑到高温高盐油藏(温度 $>120^{\circ}\text{C}$, 矿化度 $>20\times 10^4\text{ mg/L}$)化学驱的实际需求, AO-SB 的耐温抗盐性能受到了广泛的关注。

AO-SB 的合成路径主要是依靠 α -烯烃的磺化、季铵化反应来实现的^[68]。其核心工艺在于精确地调控疏水基支链的结构、亲水基电荷的平衡。在进行磺化反应时, 严格把控反应温度、磺化剂的摩尔比, 让 α -烯烃与磺化剂发生反应从而生成 AOS, 以此来防止过度磺化或者双键副反应的出现。之后, AOS 与含有叔胺基团的季铵化试剂, 在碱性条件下进行磺酸基与氨基的脱质子缩合反应, 进而形成同时拥有磺酸根阴离子和季铵阳离子的两性离子结构。

2.3.2 反聚电解质效应 AO-SB 将正负电荷共存于同一分子的亲水基构型, 赋予其独特的电荷补偿机制, 使其在等电点附近呈电中性, 具有反聚电解质效应^[51, 69]。在低盐浓度下, 分子间静电排斥力弱。在高浓度电解质环境中, AO-SB 的 CMC 随盐浓度升高仅发生轻微变化, 表面张力降低效率保持稳定^[70]。该特性源于分子内正负电荷的相互屏蔽: 外部盐离子(如 Na^+)对磺酸根的静电屏蔽被季铵基团的正电荷部分抵消, 减少了反离子在胶束表面的富集, 从

而抑制分子间静电排斥力的显著下降。这一机制与 AOS 的单一阴离子结构形成鲜明对比, AOS 在高盐环境中因反离子压缩双电层而胶束化加速, CMC 降低但表面活性衰减, AOE 虽无电荷不受盐影响, 但缺乏电荷屏蔽效应带来的界面吸附能调控能力。

此外, 在硬水中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等多价金属离子易与 AOS 的磺酸根或羧酸盐的羧酸根结合形成沉淀^[71], 但 AO-SB 的磺酸根基团与金属离子螯合能力较弱, 且季铵基团的空间位阻效应阻碍了金属离子与磺酸根的直接配位, 从而避免了钙皂沉淀的生成。AO-SB 的磺酸根基团与金属离子螯合能力较弱, 且季铵基团的空间位阻效应阻碍了金属离子与磺酸根的直接配位, 使其在硬水环境中表现出卓越的溶解稳定性。Hou 等人^[51]在 95°C 、高矿化度(TDS = 57600 mg/L)条件下对六种离子型表面活性剂进行 150 天老化实验, 结果显示热稳定性顺序为磺基甜菜碱 $\sim$ 季铵盐 $>$ 磺酸盐 $>$ 硫酸盐 $>$ 羧酸盐, 明确了内盐型亲水基在高温高盐环境中的结构优势(图 8)。AO-SB 分子的 α -烯烃疏水链具有一定刚性, 可进一步减少金属离子诱导的分子聚集, 协同提升其在硬水环境中的溶解稳定性。

2.3.3 内盐型亲水结构对性能的影响 与 AOS 的阴离子头基因静电排斥而呈松散排列不同, AO-SB 的分子内电荷中和使其在界面可实现更紧密的堆积, 同时保留头基水合层的结构完整性, 使其在气液界面可形成独特的偶极定向吸附模式。穆瑞花等人^[72]合成的磺基甜菜碱型 Gemini 表面活性剂证明, 内盐型亲水基的引入可显著提升泡沫膜的黏弹性和耐油性。He 等人^[73]研究表明, AES 与十二烷基羟丙基磺基甜菜碱复配可降低表面张力、提高泡沫稳定性, 印证了内盐型结构对界面膜弹性的增强作用。AO-SB 的泡沫稳定性使其在硬水环境中仍能保持良好发泡性, 在油气开采中可作为泡沫驱油剂, 在 120°C 、 $\text{NaCl} > 200\text{ g/L}$ 的苛刻条件下形成稳定泡沫封堵高渗层^[74]。中国石油大学(华东)团队^[75]的研究表明, 十二烷基羟磺基甜菜碱(HSB12)与 AOS 以质量比 6:1 复配形成的 SA61 体系, 在 130°C 、矿化度 $22\times 10^4\text{ mg/L}$ 的极端条件下, 泡沫液膜的弹性模量显著提升, 消泡半衰期较单一组分提高 10~25 倍。这种高强度的界面膜能够有效封堵高渗层, 迫使驱替液进入低渗层, 从而大幅提高波及效率和高温高盐油藏采收率。

同时, AO-SB 的内盐型亲水基通过电荷自屏蔽

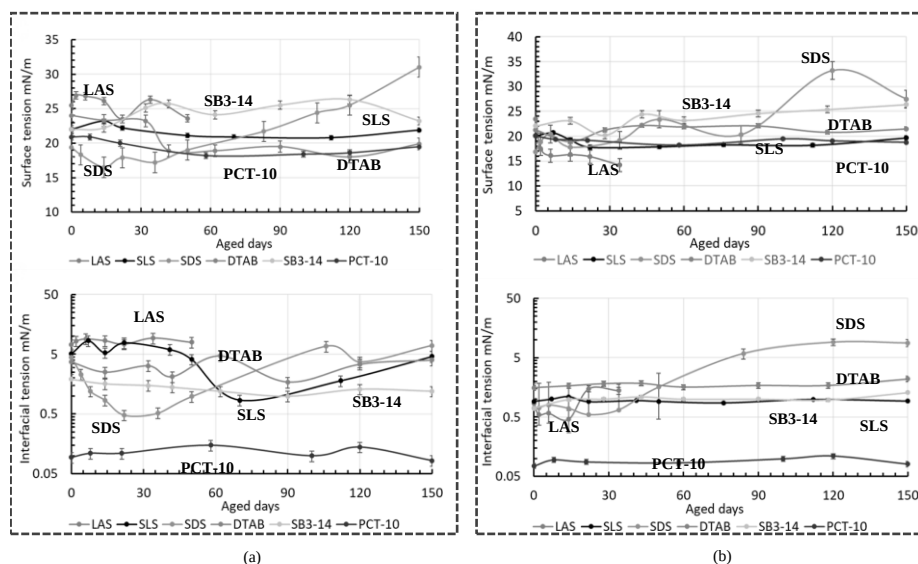


图8 六种表面活性剂的表面张力和界面张力 (a) 在95℃去离子水中热老化不同时间后; (b) 在95℃热老化不同时间后^[51]

Fig.8 Surface tensions and interfacial tensions of six surfactants: (a) after thermal aging for different durations in 95℃ deionized water; (b) after thermal aging for different durations at 95℃^[51]

效应显著降低了与生物界面的静电相互作用^[76]。与AOS的阴离子头基易与正电荷位点产生静电吸引不同, AO-SB的分子内正负电荷平衡使其在合适pH范围内维持近电中性^[77], 从而弱化了蛋白质二级结构及脂质有序排列的扰动能力^[78]。Schlenoff等人^[69]研究表明, AO-SB两性离子头基的电荷分布模式与天然磷脂酰胆碱高度相似, 可通过氢键网络形成致密水合层, 阻隔非特异性蛋白吸附及补体识别位点暴露。这一“仿生亲和”特性是AOS的单一电荷结构和AOE的无电荷结构均不具备的。

因此, AO-SB的内盐型两性离子结构通过电荷补偿、空间位阻等多重机制, 实现了极端环境下的界面稳定性与生物相容性的统一, 其耐盐性、泡沫稳定性及温和性使其成为高温高盐驱油、特种泡沫体系的优选表面活性剂, 与AOS、AOE的复配更可进一步优化界面行为与功能输出。

3 α -烯烷基表面活性剂的复配协同效应

在实际应用当中, 仅仅使用单一的表面活性剂, 往往难以同时满足降低界面张力、提高泡沫稳定性、增强乳化能力等多种要求。而复配这种方式, 对于提高 α -烯烷基表面活性剂的应用性能而言, 是非常关键的途径。 α -烯烷基表面活性剂通过与阴离子、非离子、两性离子表面活性剂进行复配,

能够呈现出显著的协同增效功能。

3.1 阴离子-非离子复配体系:AOS-AOE

阴离子-非离子复配体系属于工业应用里最为广泛的组合。当AOS与AOE复配时, 非离子的AOE会插入到阴离子AOS的吸附层当中, 对头基间的静电排斥起到削弱作用, 进而让分子排列变得更加紧密, 界面吸附的密度也增大, 表面张力降低, 胶束稳定性得到提高^[79]。并且, AOE的聚氧乙烯链能够提供空间位阻保护, 增强模式对电解质、温度的耐受性。

就泡沫性能而言, AOS与AOE复配时, 在维持高起泡能力的情况下, 随着非离子组分插入, 液膜表面黏度会有一定增加, 排液速率延缓, 使得泡沫的细腻程度、稳定性都得到改善。AOS与椰油酰胺丙基甜菜碱复配能让泡沫体积提高40%, 这种在泡沫性能方面的协同增效, 源于阴离子磺酸根基团和两性离子基团存在电荷补偿效应、疏水链于界面膜中穿插排列, 最终形成更为紧密稳定的界面膜。

3.2 阴离子-两性离子复配体系:AOS-AO-SB

阴离子-两性离子复配体系于高温高盐环境展现出独特优势。AOS有较强亲水性, IFT能力较低, AO-SB通过静电吸附加强在油水界面的占位。He等^[73]针对脂肪醇聚氧乙烯醚硫酸钠与十二烷基羟丙基磺基甜菜碱复配泡沫体系展开研究, 发现二者混合可降低表面张力, 还能提高泡沫稳定性, 这证明阴离子-两性离子复配在界面吸附效率、膜强度方

面有协同增益。Majeed 等^[80]人证实, AOS 的泡沫性能对电解质耐受性高, 当 NaCl 浓度增加到 150 g/L 时, 泡沫半衰期仅下降 10%–15%, 而当 Ca^{2+} 浓度达 800 mg/L 时, 泡沫体积保持率仍超过 80%。AOS 与两性离子表面活性剂复配时, 阴离子磺酸根基团与阳离子季铵盐基团在界面产生协同作用, 进而形成紧密排列的混合吸附膜(图 9)。光谱与电镜分析表明, AO-SB 泡沫液膜的弹性模量(15.0–20.0 mN/m)

和黏弹性均高于单一离子型表面活性剂, 有效抵抗液膜排液与气泡并聚^[81]。然而, 高浓度下两性离子基团对金属离子的屏蔽效应及界面膜中疏水链的有序排列导致该协同效应具有浓度依赖性^[80], 当 AOS 浓度较低时, 加盐会降低泡沫稳定性, 当 AOS 浓度较高时, 加盐反而能提高泡沫稳定性。AOS 与 AO-SB 的复配体系可在高温高盐油藏中维持超低界面张力和稳定泡沫结构, 显著提高驱油效率。

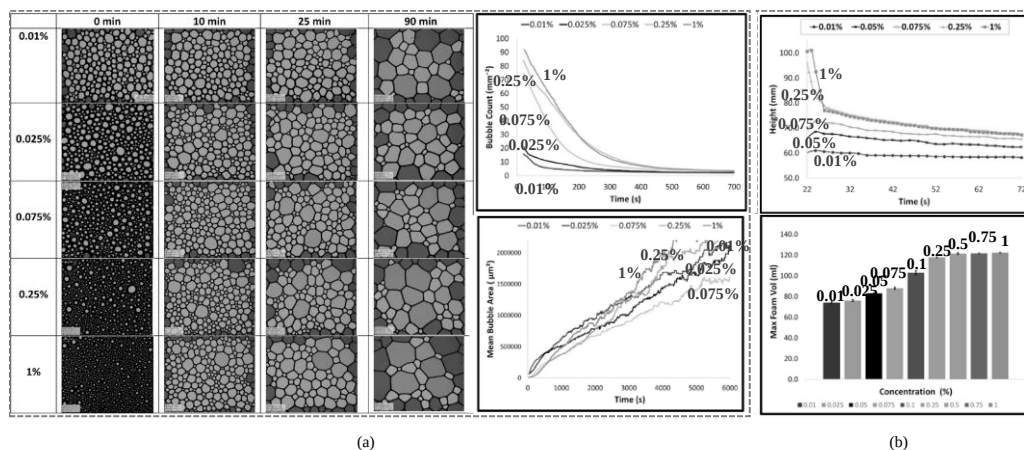


图9 不同表面活性剂 AOS 浓度下的泡沫性质 (a) 泡沫稳定性图像、气泡计数和气泡面积; (b) 不同浓度的 AOS 产生的泡沫高度和最大泡沫体积^[80]

Fig.9 Foam properties at different AOS concentrations of surfactants: (a) Foam stability images, bubble count, and bubble area; (b) Foam height and maximum foam volume generated by AOS at varying concentrations^[80]

3.3 非离子-两性离子复配体系: AOE-AO-SB

在高温高盐油藏化学驱时, AOE 与 AO-SB 的复配体系为处理高温液膜失稳、高盐吸附损耗给出了关键的界面设计方法。和单一阴离子模式不同, 在高矿化度时单一阴离子模式因双电层压缩致使界面膜弹性衰减, 而 AOE-AO-SB 复配体系借助聚氧乙烯链与 AO-SB 磺酸基水合壳间的弱氢键交联, 于油水界面建立了一层致密的连续水化缓冲层, 极大地增强了界面分离压里的水化排斥分量, 进而有效抑制了高温时液膜的排液速度^[82]。这种特殊的界面结构不但利用 AO-SB 的内盐特性消除了净电荷对多价金属离子的敏感性, 防止了传统阴离子表面活性剂在高钙镁离子环境下出现沉淀的风险, 还通过聚氧乙烯醚链的空间位阻效应提高泡沫液膜的黏弹性、乳化液滴的聚并能垒。

尤为重要的是, 该复配体系在近零表面电势下的吸附行为, 显著降低了带负电岩石表面的静电吸附滞留, 缓解了药剂注入即被岩石吸收的行业痛点^[83]。尽管 AOE 的醚键在高温氧化环境下存在热稳定性上限, 且 AO-SB 的成本相对较高, 限制了其

作为主驱剂的规模应用, 但作为泡沫驱封堵高渗通道或乳化-捕集调剖的战术性助剂, AOE-AO-SB 复配体系凭借其在极端盐度下维持界面膜完整性的能力, 为实现低药剂用量、高波及效率的深部流体转向提供了不可替代的机理^[84], 是未来高温高盐油藏低碱/无碱化学驱配方设计中极具潜力的稳泡稳乳模块。

3.4 多元复配体系

多元复配体系的协同优化是 α -烯烃基表面活性剂配方设计的重要发展方向。实际工业配方往往并非二元体系, 而是将 AOS、AOE 与 AO-SB 三者按特定比例复配, 以兼顾阴离子的高起泡性、非离子的低刺激性和两性离子的耐盐性, 通过精确调控各组分的摩尔比和碳链匹配度, 实现对 CMC、HLB 值、浊点及界面张力的精准控制, 从而满足不同应用场景的多元化需求^[85]。然而当前多元复配研究主要是靠经验性配方筛选, 缺少对系统分子机制的阐释。支链疏水基和直链表面活性剂复配, 能够借助分子间疏水-亲水互补效应进一步优化乳液粒径分布。未来基于分子模拟、人工智能的复配配方预测

技术,有望从分子方面揭示多组分界面膜的相互作用规律,进而提高 α -烯烃基表面活性剂复配模式的设计效率与性能上限。

4 α -烯烃基表面活性剂的应用现状

α -烯烃基表面活性剂的应用价值不是仅仅由表面活性的高低来决定的,而在于其分子结构对于特定工况的适配能力。因为它具有这样的结构和性能特点,所以在日用化工领域处于主导地位,同时在三次采油提高原油采收率、稠油降黏、高性能乳液聚合等比较苛刻的工业场景里也得到了广泛应用,进而成为解决特定技术难题的关键助剂。

4.1 α -烯烃基表面活性剂的应用领域

在日化领域中,AOS凭借出色的表面活性、优异的抗硬水能力、丰富的发泡性能,而被广泛应用于洗涤剂、餐具清洁剂、个人护理产品中^[86]。从市场地位来讲,2019年AOS的产销量约占据阴离子表面活性剂总量的4.0%。罗宇等人^[42]指出,和传统的

LAS相比,长链AOS(C16-C18)的CMC大幅下降,而且在硬水条件下依然能够保持稳定的泡沫性能、去污力。经过安全性测试可以发现,AOS具有更低的皮肤刺激性、更好的生物降解性,其降解速度明显快于LAS,符合当下绿色环保的发展趋势。Chen等人^[87]借助流变学测试验证,泡沫稳定性跟液膜自身的黏弹性关系紧密,直链烷基于界面紧密排列,形成高致密吸附层,由AOS构成的泡沫液膜具备比SDS更高的黏弹性模量,呈现出更优异的泡沫稳定性。这般结构特征使它在硬水环境中依旧能维持稳定的界面膜,防止了LAS因钙皂沉淀而让去污力大幅下降。在纺织品喷墨印花方面,Li等人^[88]将AOS与海藻酸钠复配运用到棉/锦纶交织织物的预处理上,可提高织物的喷墨印花成效,在特定配比时,品红、黄、青、黑四色墨水的K/S值均达到最大值,染色牢度符合日常使用要求,该研究拓宽了AOS在纺织印染领域的应用范围,为多组分纤维织物的数码印花给出了新的技术途径(图10)。

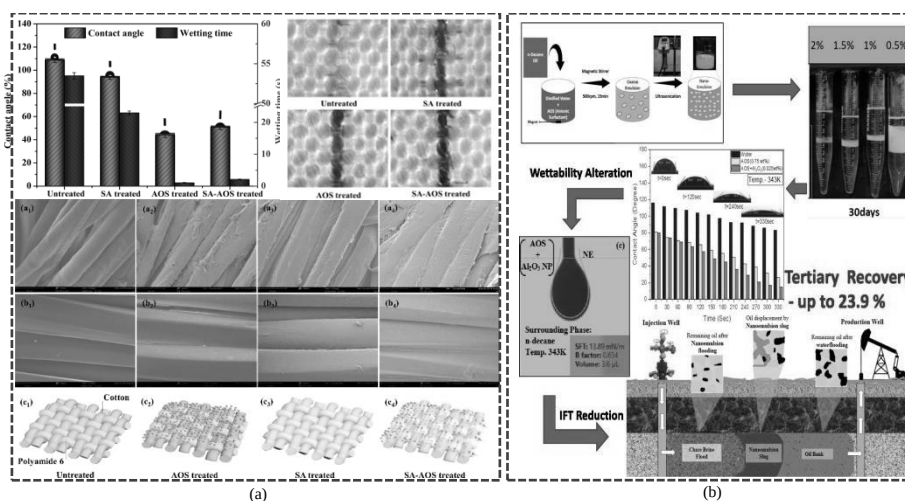


图10 α -烯烃基表面活性剂的应用性能 (a) AOS与海藻酸钠在喷墨印花中的应用研究^[88]; (b) AOS表面活性剂乳液驱油^[89]

Fig.10 Application of α -olefin surfactants (a) Application research of alpha olefin sulfonate and sodium alginate on Inkjet printing of cotton/polyamide fabrics^[88]; (b) AOS surfactant emulsion for oil displacement^[89]

在油气开采领域, α -烯烃基表面活性剂同样表现出重要价值,AOS优异的泡沫性能和耐盐特性使其成为高温高盐油藏气窜控制的关键助剂。杜小东等人^[90]将AOS与十二烷基酰胺丙基氧化胺复配,在含原油体系中可形成更为稳定的泡沫,显著降低气体流动性,从而提升注气过程的波及效率。该复配体系在高温高矿化度条件下仍保持良好的稳定性,为泡沫辅助水交替注气技术提供了可行的化学剂选择。Li等人^[91]的研究表明,C16 AOS与C12 AO-

SB以6:1复配时,混合吸附膜在130℃下的弹性模量较单一组分提升10倍以上,这种高界面膜强度有效封堵了高渗通道,使岩心阻力系数在632 mD岩心中达到显著水平,拓展了AOS在三次采油领域的应用,为深层油气开发提供了新技术途径。

在“双碳”战略与绿色制造的时代背景下, α -烯烃基表面活性剂正经历从传统化工助剂向可持续功能材料的转型升级,进一步增强了表面活性剂的可持续发展潜力,其生物相容性与可降解性满足绿

色化学对低生态毒性的要求。 α -烯基磺酸盐凭借其良好的界面活性、环境适应性与复配协同效应,已在日用化工和油田化学领域形成多元化的应用格局。

4.2 现存工业化瓶颈

尽管 α -烯烷基表面活性剂在实验室研究和中试层面已展现出优异的性能潜力,但 α -烯烷基表面活性剂的大规模应用仍受制于原料纯度、工艺精度与性能评价体系等瓶颈^[92]。

在原料供给层面,核心问题在于长链 α -烯烃的国产化产能严重不足。长链 α -烯烃是制备高性能磺酸盐表面活性剂的关键原料,但目前国内自给率不足40%,高端产品所需的高纯度长链烯烃高度依赖壳牌、雪佛龙等海外厂商进口。这一供给格局不仅使国内生产企业面临价格波动风险和供应不稳定性,也限制了产品配方开发的自主性。与此同时,依托费托合成制备长链烯烃的路线虽在煤化工富集区具有资源禀赋优势,但其分离工序面临组分复杂、馏分切割难度大的技术瓶颈^[93]。而费托路线随原料低廉,但产物中正构烷烃与 α -烯烃的沸点接近,传统精馏分离能耗极高,而萃取精馏、吸附分离等替代技术尚未实现低成本工业化,导致费托 α -烯烃直接磺化时,产物色泽深、杂质含量高^[94]。在表面活性剂不容忽视的前提下,这一环节的短板直接削弱了国产产品在国际市场上的价格竞争力。

在生产工艺层面,现行主流 SO_3 降膜磺化体系受反应器混合效率限制^[95],在处理高粘度、高活性 α -烯烃时,存在物料瞬时混合不均、局部过热的现象,反应传质控制难度大。磺化副反应难以抑制,体系持续生成未反应原料油、无机硫酸盐等副产物^[96],副产物分离与危废处置工艺流程繁琐、环保投入偏高,中小生产企业受环保新规约束,副产物治理成本已成为主要盈利短板。虽然微通道反应器通过强化气液传质可将反应时间缩短至毫秒级,显著提升选择性^[97],但设备造价高、连续量产适配性不足,目前仅在特种精细化学品中应用,尚无法完全替代万吨级降膜装置。

在性能应用层面,现有研究多局限于常温或短期测试,缺乏对高温高矿化度长时间耦合条件下的性能衰减评价机制研究。特别是AO-SB在高温下的季铵基团降解与AOE的醚键热氧化断链数据匮乏,难以揭示表面活性剂在储层条件下因水解、氧化、吸附等因素导致的界面活性衰减机制。另外,

高温高盐环境中表面活性剂与地层水、岩石矿物的配伍性数据不足,无法有效指导配方选型,难以精准优化分子结构,限制了其在深层油藏的长效应用^[98]。

4.3 绿色转型路径

在 α -烯烷基表面活性剂的研究与应用进程中,绿色化发展已成为驱动行业转型的核心动力。绿色化工转型主要从原料绿色化、反应过程绿色化及产品全生命周期管控三个维度推进,实现化工产业低能耗、低排放与环境友好化升级。

从原料端的变革来看, α -烯烷基表面活性剂的绿色化首先体现为碳源结构的重构。长期以来,线性 α -烯烃主要来源于乙炔齐聚或费托合成等石油化工路线,其碳足迹与不可再生资源的消耗密切相关。以生物基 α -烯烃^[99]替代传统石油基原料是重要发展方向。生物基 α -烯烃依托生物质资源制备,具有可再生、低碳足迹、污染负荷低等优势,可有效减少化石能源消耗与碳排放,能够广泛应用于表面活性剂、聚烯烃及精细化学品领域,从源头降低化工生产的资源与环境压力。近年来,随着生物炼制技术的成熟,以天然油脂为原料经平台化合物转化制备生物基 α -烯烃的路线逐渐显现出工业化潜力。通过蓖麻油裂解制得的十一碳烯酸,或通过棕榈油衍生脂肪醇脱水制得的直链内烯烃,均可作为构筑表面活性剂疏水链的生物基砌块^[100]更为关键的是,生物基 α -烯烃在引入酯键等可裂解单元后,能够赋予最终产物以化学循环再生的能力。这种设计理念突破了传统表面活性剂线性代谢模式,使表面活性剂分子在使用完后可通过温和条件下的水解反应解构为原始单体,再经缩聚实现闭环再生^[101],从而在分子层面契合循环经济的核心理念^[102]。

在生产过程绿色化方面,新型绿色反应工艺能够有效改造传统高污染工序。传统的釜式磺化工艺,一方面受到传质传热效率的制约,另一方面还会遭遇局部过热、副反应增多等问题。特别是对于异构烯烃这种反应活性较高的原料而言,其磺化过程更难以实现精准控制。微通道反应器具备极大的比表面积、优异的混合效率,借助微尺度下的高比表面积换热,能够在短短毫秒级时间内完成磺化反应,精确控制 SO_3 /烯烃摩尔比,从源头上遏制二磺酸副产物的产生,进而提高原子经济性。这种连续流技术,不但减少了后处理过程中的溶剂消耗、废水排放,而且因其具有本质安全特性,降低了工艺

放大的风险。同时,超临界CO₂辅助磺化技术借助超临界流体出色的传质与溶解特性,取代了传统的强酸磺化体系^[103],明显减少了废酸排放、设备腐蚀情况,反应条件温和,溶剂能够循环利用,极大地提高磺化工艺的绿色水平。另外,酶催化乙氧基化工艺依靠生物催化剂的高选择性,在常温常压的条件下达成高效定向合成,副产物数量少、能耗较低,并且没有重金属残留,适用于高品质绿色助剂与中间体的清洁化生产^[104]。

从产品全生命周期绿色管控层面,在分子设计中引入酯键或酰胺键等可水解单元,使表面活性剂

在完成驱油或清洗功能后,能在环境或地层条件下温和降解为小分子酸/醇,避免长期生态累积^[105]。这种功能-降解一体化的分子设计,是未来 α -烯烃基表面活性剂从化学品向绿色功能材料跨越的核心标志。通过开展产品生物降解性评价与生态毒性分析,实现化学品从生产到废弃的全过程环境风险控制,系统评估产品在自然环境中的降解能力及母体物质、降解产物的生态毒性,可以指导化学品分子结构优化与绿色配方设计,淘汰难降解、高环境风险产品,构建从绿色原料、绿色工艺到绿色终端产品的完整绿色化工体系,推动行业可持续转型。

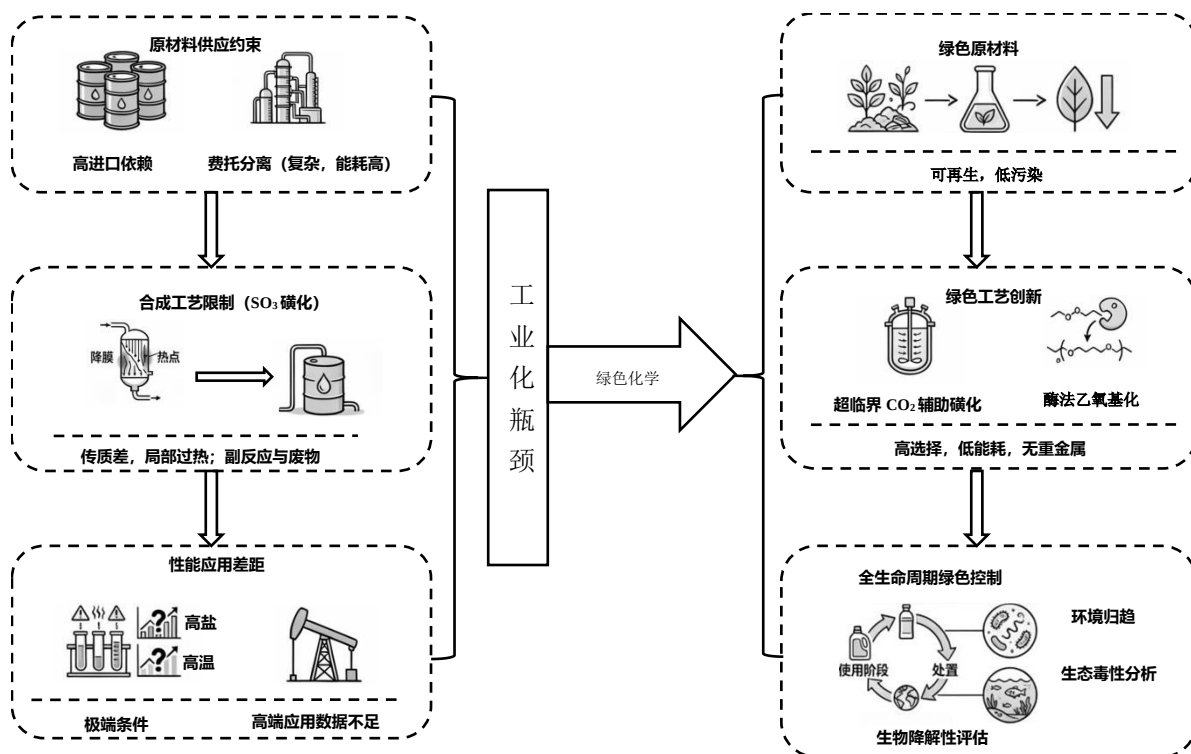


图 11 α -烯烃基表面活性剂的工业瓶颈与绿色转型

Fig.11 Industrial bottlenecks and green transformation of α -olefin-based surfactants

α -烯烃基表面活性剂的绿色化发展正从末端治理转向源头设计,这种趋势回应了全球碳中和目标给化工行业带来的刚性约束,也为表面活性剂从功能化学品转变为可持续材料开辟了新可能(图11)。

5 结论与展望

α -烯烃基表面活性剂凭借末端双键的高反应活性与直链烷基骨架的优异生物降解性,已成为日用化工与油气开采领域的关键功能材料。本文对现有合成工艺进行了总结,乙烯齐聚法产出的高线

性度C14-C18馏分,杂质少、分布窄,是构筑高性能表面活性剂的主流选择。费托合成副产路线虽具备成本优势,但生产的 α -烯烃与同碳数正构烷烃沸点差小及含氧化杂质多,其高能耗分离仍是制约其高端化应用的主要障碍。

在分子构效关系方面,当前研究主要聚焦于三类典型结构的差异化调控机制:AOS通过在疏水尾链与磺酸根基团间建立稳定的C-S键连接,不仅赋予产物卓越的抗硬水性与化学稳定性,其直链烷基在界面的紧密排列还能形成高致密吸附层,从而获得优异的泡沫稳定性与乳化能力;AOE以聚氧乙烯

醚链作为柔性连接单元,通过精确调控HLB值与疏水链支化度,实现了对润湿、铺展及乳化性能的连续调节;AO-SB则创新性地在一分子内集成阴离子磺酸基与阳离子季铵基,形成电荷自屏蔽的内盐结构,使其在面对高温高盐及多价金属离子时,能通过“反聚电解质效应”维持界面膜完整性,有效解决了传统阴离子表面活性剂在极端环境下失效的难题。

针对单一组分在复杂工况下面临的界面膜老化、吸附损耗及长效稳定性不足等挑战,现有研究普遍通过建立复配体系来获得协同增效作用。AOS与AO-SB复配可借助静电吸引与空间水化双重机制,大幅提升液膜黏弹性与泡沫封堵能力,有效遏制高温高盐油藏的气窜现象;AOE与AO-SB复配则通过聚氧乙烯链醚氧与磺酸基水合壳间的氢键网络耦合,增厚界面水化层,在降低总药剂用量的同时保持温和清洁效能,缓解了“高清洁力-低刺激性”的矛盾。

虽然 α -烯烃基表面活性剂依靠其直链骨架具有的生物降解性、末端双键所拥有的高反应活性,在日用化工和油气开采领域已经确立了无法被替代的地位,然而为了满足当下国家提出的“双碳”战略、能源安全对于高性能绿色化学品的需求,仍需在以下这些关键维度进一步探索:

(1)当前 α -烯烃基表面活性剂的结构优化仍高度依赖实验试错,缺乏对微观作用机制的深刻理解,未来亟需将分子动力学模拟与人工智能技术深度结合,从分子层面阐明疏水链在不同油水界面下的动态构象演变、水化层微观结构及其与原油组分/岩石矿物的相互作用机制。

(2)单一表面活性剂体系在应对复杂油藏非均质性时往往表现出适应性不足的短板,未来研究应深入揭示AOS、AOE与AO-SB之间,以及它们与聚合物、碱、纳米材料等其他驱油剂之间的界面组装机理与协同增效规律。

(3)当前已有的研究大多只把重点聚焦于驱油效率这一单一指标上,却忽略了对经济成本、环境风险进行全面的考量。未来要建立一种综合成本、驱油效率、环境降解性等多个方面的全生命周期评价模式,进而推动 α -烯烃基表面活性剂从传统的石油助剂朝着高端、绿色、可持续的功能型材料实现转型升级。

参考文献

- [1] Li X, Li J Q, Wang X H, et al. Novel branched-chain sulfonate surfactants based on α -olefins from Fischer - Tropsch synthesis via reaction-separation-utilization integrated process[J]. Fuel, 2023, **339**: 126961.
- [2] Verma A, Chauhan G, Ojha K. Characterization of α -olefin sulfonate foam in presence of cosurfactants: Stability, foamability and drainage kinetic study[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, **264**: 458-469.
- [3] 席珍珍, 苗蓓. 高碳 α -烯烃的下游产品研究及应用[J]. 合成技术及应用, 2026, **41**(1): 31-36.
Xi Z Z, Miao B. Research and application of products based on high-carbon α -olefins[J]. Synthetic Technology and Application, 2026, **41**(1): 31-36.
- [4] 汪侠. 表面活性剂研发现状及未来发展前景研究[J]. 化工设计通讯, 2023, **49**(4): 55-57.
Wang X. Research on research and development status and future development prospects of surfactants[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, **49**(4): 55-57.
- [5] 邢凤义. 乙烯齐聚制 α -烯烃(LAO)装置危险性分析及对策[J]. 安全、健康和环境, 2023, **23**(3): 45-48.
Xing F Y. Risk analysis and countermeasures of unit for ethylene oligomerization to α -olefin[J]. Safety Health & Environment, 2023, **23**(3): 45-48.
- [6] 王婉君. 蜡裂解生产 α -烯烃工艺研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2022.
Wang W J. Study on production of α -olefin by wax cracking[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huangdong), 2022.
- [7] 聂金. 费托合成油中 α -烯烃及正构烷烃吸附分离技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Nie J. Studies on adsorptive separation of α -olefins or N-alkanes from Fischer Tropsch synthetic oil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [8] Liu Y, Wang C, Yan J Y, et al. Hydrogen peroxide-independent production of α -alkenes by OleTJE P450 fatty acid decarboxylase[J]. Biotechnology for Biofuels, 2014, **7**(1): 28.
- [9] Wiczorek D, Gwiazdowska D, Staszak K, et al. Surface and antimicrobial activity of sulfobetaines[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2016, **19**(4): 813-822.
- [10] 曹妮, 张会军, 周永涛. 煤制烯烃碳排放分析及碳减排措施探索[J]. 煤炭加工与综合利用, 2023(6): 54-58.
Cao N, Zhang H J, Zhou Y T. Discussion of carbon emissions and reduction in coal to olefin industry[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2023(6): 54-58.
- [11] Gao J F, Liu S E. Synthesis and Performance Properties of Bisulfonate Gemini Surfactant as Viscous Oil Emulsifier/Viscosity Reducer GMS-1[J]. Oilfield Chemistry, 2008, **25**(1): 13-16.
- [12] Nguyen T T, Sabatini D A. Characterization and emulsification properties of rhamnolipid and sophorolipid biosurfactants and their applications[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2011, **12**(2): 1232-1244.
- [13] Kinoshita S, Kawamura K, Fujita T. Early-transition-metal catalysts with phenoxy - imine-type ligands for the oligomerization of ethylene[J]. Chemistry - An Asian Journal, 2011, **6**(2): 284-290.

- [14] 张君涛, 付兴国, 张耀君, 等. 乙烯齐聚制线性 α -烯烃的技术进展[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2002, **17**(2): 44–48, 55.
Zhang J T, Fu X G, Zhang Y J, et al. Advance in the technology of ethylene oligomerization for preparation of linear α -olefins[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2002, **17**(2): 44–48, 55.
- [15] Belov G P, Matkovsky P E. Processes for the production of higher linear α -olefins[J]. Petroleum Chemistry, 2010, **50**(4): 283–289.
- [16] 龚畅. 乙烯齐聚合成 α -烯烃催化剂的制备及性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
Gong C. Study on preparation and properties of catalysts for synthesis of ethylene oligomerization to α -olefins[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [17] Silva M S P, Rodrigues A E, Mota J P B. Effect of dead volumes on the performance of an industrial-scale simulated moving-bed Parex unit for p-xylene purification[J]. AIChE Journal, 2016, **62**(1): 241–255.
- [18] Zuo J L, Geng S Q, Kong Y Z, et al. Current progress in natural deep eutectic solvents for the extraction of active components from plants[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2023, **53**(1): 177–198.
- [19] 赵闯, 李桦, 范景新, 等. 多孔材料烷烃/烯烃分离技术的研究[J]. 无机盐工业, 2019, **51**(8): 79–82.
Zhao C, Li B, Fan J X, et al. Study on alkanes/olefin separation technology of porous material[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2019, **51**(8): 79–82.
- [20] Liu Z X, Jia G P, Zhao C X, et al. Efficient Fischer-Tropsch to light olefins over iron-based catalyst with low methane selectivity and high olefin/paraffin ratio[J]. Fuel, 2021, **288**: 119572.
- [21] Hou Y F, Li J F, Qing M, et al. Direct synthesis of lower olefins from syngas *via* Fischer-Tropsch synthesis catalyzed by a dual-bed catalyst[J]. Molecular Catalysis, 2020, **485**: 110824.
- [22] Guo Z S, Wang F, Yang Z Q, et al. Operation and optimization of 4 Mt/a industrial plant of coal-based Fischer-Tropsch synthesis[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(4): 1259–1266.
- [23] 郑海男, 鱼鲲. 以石蜡裂解 α -烯烃为原料合成 α -烯基磺酸盐表面活性剂[J]. 精细石油化工进展, 2006, **7**(2): 9–12.
Zheng H N, Yu K. Preparation of α -alkenyl sulphonate surfactant from wax cracking α -olefin[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2006, **7**(2): 9–12.
- [24] Gaile A A, Kameshkov A V, Karnaukh V S, et al. Comparative efficiency of extraction purification of straight-run petroleum fractions and gas oils of secondary oil-refining processes for obtaining marine fuels[J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2024, **58**(4): 1098–1104.
- [25] Kim Y E, Im H B, Jung U H, et al. Production of linear α -olefin 1-octene *via* dehydration of 1-octanol over Al_2O_3 catalyst[J]. Fuel, 2019, **256**: 115957.
- [26] Li Y, Mu Y X, Qin M X, et al. Optimization of gas-liquid sulfonation in cross-shaped microchannels for α -olefin sulfonate synthesis[J]. Micromachines, 2025, **16**(6): 638.
- [27] Bai H J, Wei Z M, Bi Z X, et al. Isomeric olefin sulfonate surfactants with varied branched hydrocarbon architectures: Effect of the chain branching degree[J]. Chemical Engineering Science, 2025, **317**: 122070.
- [28] Zhao Y J, Qiu J, Zhu X D, et al. Interfacial properties and foam performance of alpha olefin sulfonate and CO_2 switchable aminopropyl methyl siloxane surfactant mixtures[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2024, **27**(4): 589–603.
- [29] 蒋言清. 聚氧乙烯醚的物化性能应用及乙氧基反应技术的现状[J]. 广东化工, 1999, **26**(5): 43–45.
Jiang Y Q. The physics-chemical properties of polyoxyethenether and the technological present of ethoxylation[J]. Guangdong Chemical Industry, 1999, **26**(5): 43–45.
- [30] Wang S P, He F G, Weng Q, et al. Synthesis and characterization of a novel crosslinkable side-chain sulfonated poly(arylene ether sulfone) copolymer proton exchange membranes[J]. RSC Advances, 2020, **10**(42): 24772–24783.
- [31] Pysny D, Piotrowski T, Orlńska B. Oxidative cleavage of long-chain terminal alkenes to carboxylic acids[J]. Organic Process Research & Development, 2019, **23**(3): 309–319.
- [32] DeWitt W J. Performance of alpha olefin sulfonates derived from ziegler olefins in light duty liquid detergents[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1972, **49**(6): 361–365.
- [33] Abed M A, Saxena A, Bohidar H B. Micellization of alpha-olefin sulfonate in aqueous solutions studied by turbidity, dynamic light scattering and viscosity measurements[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2004, **233**(1/2/3): 181–187.
- [34] Knifton J F. Linear carboxylic acid esters from alpha-olefins. I. Catalysis by homogeneous platinum complexes[J]. The Journal of Organic Chemistry, 1976, **41**(5): 793–797.
- [35] 范森, 李宜强, 宋文玲, 等. 以重 α -烯烃研制驱油活性剂 α -烯基磺酸盐[J]. 大庆石油学院学报, 2005, **29**(3): 19–22.
Fan S, Li Y Q, Song W L, et al. Preparation of surfactant α -alkene sulfonate by using heavy α -alkene[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005, **29**(3): 19–22.
- [36] Tuvell M E, Kuehnhanss G O, Heidebrecht G D, et al. AOS: an anionic surfactant system: Its manufacture, composition, properties, and potential application[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1978, **55**(1): 70–80.
- [37] Gutiérrez González J, Mans Teixidó C, Costa López J. Sulfonation in a falling film reactor: comparison of experimental results with mathematical model predictions[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 1985, **6**(3): 303–315.
- [38] Alul H R. Chlorosulfuric acid sulfonation of alpha olefins[J]. Product R&D, 1971, **10**(3): 358–360.
- [39] Xu Y M, Li P, Ma H R, et al. Multistep cascade continuous flow synthesis of AOS based on microreactor[J]. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, 2023, **192**: 109505.
- [40] 孟海林, 孙明和. α -烯基磺酸盐的生产和应用开发[J]. 日用化学工业, 1994(2): 13–19.
Meng H L, Sun M H. Production and application development of α -alkenyl sulfonate[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 1994(2): 13–19.
- [41] Chunhua Z, Wei L, Ying F, et al. Styrene-Butyl Acrylate-Sodium-alpha-Olefin Sulfonate Copolymer Emulsion Prepared by Using Polymerizable Emulsifier[J]. Acta Chimica Sinica, 2011, **69**(2): 215–220.
- [42] 罗宇. α -烯烃磺酸钠性能及其在日化产品中的应用[J]. 中国洗涤用品工业, 2021(4): 66–70.
Luo Y. Properties of sodium alpha-olefin sulfonate and application in daily chemical products[J]. China Cleaning

- Industry, 2021(4): 66–70.
- [43] 黄恩慧. α -烯烃磺酸盐(AOS)的性质及生产现状分析[J]. 精细与专用化学品, 2006, **14**(5): 25–29.
- Huang E H. Properties of alpha olefine sulfonates and analysis of its production situation[J]. Fine and Specialty Chemicals, 2006, **14** (5): 25–29.
- [44] McClelland D J, Wang B X, Cordell W T, et al. Renewable linear alpha-olefins by base-catalyzed dehydration of biologically-derived fatty alcohols[J]. Green Chemistry, 2021, **23**(12): 4338–4354.
- [45] Jia J H, Li J W, Liang Y F, et al. Molecular dynamics study on performance of olefin sulfonate at the decane – water interface: effect of molecular architecture[J]. Fuel, 2022, **308**: 122013.
- [46] 余水兵, 许祖国, 李应锋, 等. 不同碳链 α -烯基磺酸钠性能研究[J]. 中国洗涤用品工业, 2022(7): 50–53.
- Yu S B, Xu Z G, Li Y F, et al. Performance of α -olefin sulfonate with different carbon chain[J]. China Cleaning Industry, 2022(7): 50–53.
- [47] Niu R X, Wang D Q, Long B, et al. Salinity tolerance, adsorption, and emulsification properties of nonylphenol alkyl sulphonates derived from bi-component linear alpha olefin[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2017, **95**(11): 2073–2077.
- [48] Farajzadeh R, Krastev R, Zitha P L J. Foam films stabilized with alpha olefin sulfonate (AOS) [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, **324**(1/2/3): 35–40.
- [49] Elmarhoum S, Mathieu S, Ako K, et al. Sulfate groups position determines the ionic selectivity and syneresis properties of carrageenan systems[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, **299**: 120166.
- [50] Pal B, Gupta K K S, Sen P K. Oxidative cleavage of α , β -unsaturated compounds by pentachlorohydroxoplatinate(IV) in alkaline medium[J]. Transition Metal Chemistry, 2005, **30**(5): 593–600.
- [51] Hou J, Huang T P, Alotaibi M, et al. Long-term thermal stability of ionic surfactants for improving oil production at high-salinity high-temperature conditions[J]. ACS Omega, 2024, **9**(10): 11976–11986.
- [52] Jin Y M, Tian S L, Guo J L, et al. Synthesis, characterization and exploratory application of anionic surfactant fatty acid methyl ester sulfonate from waste cooking oil[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2016, **19**(3): 467–475.
- [53] Memon M K, Ansari U, Memon H U Z. Laboratory analysis of foam generating surfactants and their thermal stability for enhanced oil recovery application[J]. Mehran University Research Journal of Engineering and Technology, 2020, **39**(2): 407–412.
- [54] 杨志坚, 马贵阳, 胡志勇, 等. α -烯基磺酸钠与碳酸钠复配降黏剂对稠油乳化降黏效果的影响[J]. 油田化学, 2018, **35**(1): 135–138, 155.
- Yang Z J, Ma G Y, Hu Z Y, et al. Effect of alpha olefin sulfonate and sodium carbonate compound viscosity reducer on the viscosity reduction of viscous crude oil[J]. Oilfield Chemistry, 2018, **35**(1): 135–138, 155.
- [55] Wibbertmann A, Mangelsdorf I, Gamon K, et al. Toxicological properties and risk assessment of the anionic surfactants category: Alkyl sulfates, primary alkane sulfonates, and α -olefin sulfonates [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2011, **74**(5): 1089–1106.
- [56] Bai L, Wang Y, Liu X C, et al. Effect of alkyl tail length of alpha olefin sulfonates on foam properties[J]. Tenside Surfactants Detergents, 2018, **55**(6): 484–490.
- [57] Niu R X, He J Y, Long B, et al. Adsorption, wetting, foaming, and emulsification properties of mixtures of nonylphenol dodecyl sulfonate based on linear alpha-olefin and heavy alkyl benzene sulfonate[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2018, **39**(8): 1108–1114.
- [58] Wang Y, Liu X C, Bai L, et al. Influence of alkyl chain length of alpha olefin sulfonates on surface and interfacial properties[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2017, **38**(12): 1764–1769.
- [59] Keim W. Oligomerization of ethylene to α -olefins: discovery and development of the shell higher olefin process (SHOP) [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2013, **52**(48): 12492–12496.
- [60] 吴前辉, 何雨航, 张先文, 等. 煤基长链 α -烯烃氢甲酰化合成表面活性醇的多相催化体系研究与应用[J]. 当代化工研究, 2025(18): 169–171.
- Wu Q H, He Y H, Zhang X W, et al. Water/organic multiphase catalytic system for the hydroformylation of Fischer–Tropsch long-chain α -olefins to surfactant alcohols[J]. Modern Chemical Research, 2025(18): 169–171.
- [61] 秦娇龙, 庞文文, 刘如军, 等. 脂肪醇聚氧乙烯醚的HLB值分析方法研究[J]. 世界农药, 2014, **36**(3): 46–48, 55.
- Qin J L, Pang W W, Liu R J, et al. Determination of HLB values in AEO[J]. World Pesticide, 2014, **36**(3): 46–48, 55.
- [62] Kanazawa A, Aoshima S. Concurrent cationic vinyl-addition and ring-opening copolymerization of vinyl ethers and oxiranes[J]. Polymer Journal, 2016, **48**(6): 679–687.
- [63] Zhulina E B, Borisov O V, Priamitsyn V A. Theory of steric stabilization of colloid dispersions by grafted polymers[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1990, **137**(2): 495–511.
- [64] Voorhees P W. The theory of Ostwald ripening[J]. Journal of Statistical Physics, 1985, **38**(1): 231–252.
- [65] Zhai J W, Bi Z X, Chen G, et al. Hydroformylation of branched olefins catalyzed by $\text{Co}_2(\text{CO})_8$ for synthesis of branched alcohol ethoxylates and their surfactant properties[J]. Tenside Surfactants Detergents, 2024, **61**(5): 435–449.
- [66] 王亚魁, 耿涛, 姜亚洁, 等. 新型酰胺基Gemini阳离子表面活性剂在气/液界面的吸附行为和生物活性[J]. 日用化学品科学, 2019, **42**(10): 28–32.
- Wang Y K, Geng T, Jiang Y J, et al. The adsorption behavior at air/water interface and biological activity of novel amide-based cationic Gemini surfactants[J]. Detergent & Cosmetics, 2019, **42** (10): 28–32.
- [67] Rajabi-Hamane M, Engell S. Time optimal production of a specified particle size distribution in emulsion polymerization[J]. Chemical Engineering Science, 2007, **62**(18/19/20): 5282–5289.
- [68] Shi C X, Liao G Z, Liu W D. Synthesis of internal olefin sulfonate and its application in oil recovery[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, **39**(1): 37–41.
- [69] Schlenoff J B. Zwitteration: coating surfaces with zwitterionic functionality to reduce nonspecific adsorption[J]. Langmuir, 2014, **30**(32): 9625–9636.
- [70] Chen H L, Li Z M, Wang F, et al. Investigation of surface

- properties for electrolyte solutions: measurement and prediction of surface tension for aqueous concentrated electrolyte solutions[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2017, **62**(11): 3783–3792.
- [71] Yan H, Yuan S L, Xu G Y, et al. Effect of Ca^{2+} and Mg^{2+} ions on surfactant solutions investigated by molecular dynamics simulation[J]. *Langmuir*, 2010, **26**(13): 10448–10459.
- [72] 穆瑞花, 赖小娟, 王磊, 等. 磺基甜菜碱 Gemini 表面活性剂的合成与应用性能[J]. *化工进展*, 2019, **38**(7): 3377–3383.
- Mu R H, Lai X J, Wang L, et al. Synthesis and application properties of a sulfo betaine Gemini surfactant[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, **38**(7): 3377–3383.
- [73] He G, Li H B, Guo C F, et al. Stable foam systems for improving oil recovery under high-temperature and high-salt reservoir conditions[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, **211**: 110145.
- [74] Wu M Y, Liang Y T, Zhao Y Y, et al. Preparation of new gel foam and evaluation of its fire extinguishing performance[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, **629**: 127443.
- [75] 刘子铭. 高温高盐油藏提高采收率用起泡剂研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2022.
- Liu Z M. Study on foaming agent for enhanced oil recovery in high temperature and high salt reservoir[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2022.
- [76] Kumar V, Pal N, Jangir A K, et al. Dynamic interfacial properties and tuning aqueous foamability stabilized by cationic surfactants in terms of their structural hydrophobicity, free drainage and bubble extent[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, **588**: 124362.
- [77] 闫树鹏, 张冲, 吕华. 两性离子聚合物的研究进展[J]. *功能高分子学报*, 2020, **33**(01): 1–14.
- Yan S P, Zhang C, Lv H. Research Progress on Amphoteric Ion Polymers[J]. *Journal of Functional Polymer Science*, 2020, **33**(01): 1–14.
- [78] 曲广森, 程杰成, 冯耀, 等. 新型 Gemini 两性离子表面活性剂的合成与表征[J]. *中国皮革*, 2011, **40**(7): 43–46.
- Qu G M, Cheng J C, Feng Y, et al. Synthesis and characterization of novel zwitterionic gemini surfactants[J]. *China Leather*, 2011, **40**(7): 43–46.
- [79] Zhu Z Y, Li S L, Wang P F, et al. Study on the blending of AOS/CAB-35 binary surfactants and their foam dust suppression performance[J]. *Powder Technology*, 2026, **470**: 122026.
- [80] Majeed T, Sølling T I, Kamal M S. Foam stability: The interplay between salt-, surfactant- and critical micelle concentration[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, **187**: 106871.
- [81] Chen S Y, Liu H J, Yang J J, et al. Bulk foam stability and rheological behavior of aqueous foams prepared by clay particles and alpha olefin sulfonate[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, **291**: 111250.
- [82] Israelachvili J N. *Intermolecular and Surface Forces*[M]. 3rd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2011.
- [83] Yekken N, Manan M A, Idris A K, et al. Influence of surfactant and electrolyte concentrations on surfactant Adsorption and foaming characteristics[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, **149**: 612–622.
- [84] Huang J, Ren Z H. Micellization and interactions for ternary mixtures of amino sulfonate surfactant and nonionic octylphenol polyoxyethylene ethers in aqueous solution: 1 Blending with nonionic surfactants with smaller numbers of hydrophilic unit[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, **278**: 53–60.
- [85] Bejczy R, Nagy R. Thermodynamic and interfacial characterization of petroleum industry surfactants: a study on critical micelle concentration and interfacial tension behavior under mild conditions[J]. *ChemistryOpen*, 2025, **14**(9): e202500066.
- [86] Raney K H, Shpakoff P G, Passwater D K. Use of high-active alpha olefin sulfonates in laundry powders[J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 1998, **1**(3): 361–369.
- [87] Chen S Y, Zhou Y J, Wang G H, et al. Influence of foam apparent viscosity and viscoelasticity of liquid films on foam stability[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2016, **37**(4): 479–485.
- [88] Li C, Fang L, Fang K J, et al. Synergistic effects of alpha olefin sulfonate and sodium alginate on inkjet printing of cotton/polyamide fabrics[J]. *Langmuir*, 2021, **37**(2): 683–692.
- [89] Kaushik A, Joshi D, Kumar Saw R, et al. Formation and characterization of nanoparticle assisted surfactant stabilized oil-in-water nanoemulsions for application in enhanced oil recovery[J]. *Fuel*, 2024, **359**: 130500.
- [90] 杜小东, 左庭颜, 慕飞, 等. 混合表面活性剂在原油中生成稳定泡沫分析[J]. *石油化工应用*, 2021, **40**(5): 74–78.
- Du X D, Zuo T Y, Mu F, et al. Analysis of mixed surfactant in stable foam formation in crude oil[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2021, **40**(5): 74–78.
- [91] Li L J, Ge J J, Chen P F, et al. Construction of a foaming agent containing hydroxysulfobetaine and α -olefin sulfonate for elastic reservoirs with high temperature and high salinity[J]. *Petroleum Science*, 2025, **22**(2): 771–786.
- [92] Torres Galvis H M, de Jong K P. Catalysts for production of lower olefins from synthesis gas: a review[J]. *ACS Catalysis*, 2013, **3**(9): 2130–2149.
- [93] Amin M, Usman M, Kella T, et al. Issues and challenges of Fischer-Tropsch synthesis catalysts[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2024, **12**: 1462503.
- [94] Buthelezi A S, Tucker C L, Heeres H J, et al. Fischer-Tropsch synthesis using promoted, unsupported, supported, bimetallic and spray-dried iron catalysts: a review[J]. *Results in Chemistry*, 2024, **9**: 101623.
- [95] Ulfa M, Salsabila P R, Saputro A N C, et al. Methylene blue degradation with sulfonated SPG20 silica- Fe_2O_3 hybrid photocatalysts[J]. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2025, **20**(3): 441–457.
- [96] Wang Q, Li X, Dong J X. Synthesis and surface properties of branched-chain tertiary fatty alcohol sulfate surfactants[J]. *Tenside Surfactants Detergents*, 2023, **60**(6): 569–587.
- [97] Xu N, Yu J P, Zhang L Q, et al. Study on gas-liquid sulfonation reaction under annular flow pattern in micro-reactor: Mechanism, model and process optimization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **498**: 155611.
- [98] Hosseini-Nasab S M, Douarche F, Simjoo M, et al. Numerical simulation of foam flooding in porous media in the absence and presence of oleic phase[J]. *Fuel*, 2018, **225**: 655–662.
- [99] 徐珂. α -烯烃应用研究进展[J]. *石化技术*, 2025, **32**(10): 32–

- 34, 40.
- Xu K. Advances in the application of α -olefin[J]. Petrochemical Industry Technology, 2025, **32**(10): 32-34, 40.
- [100] Lee H J, Choi I H, Kim S W, et al. Selective production of bio-based linear alpha-olefin from wasted fatty alcohol on Al_2O_3 for bio-based chemicals[J]. Polymers, 2021, **13**(17): 2850.
- [101] Sun W, Pang Y Z, He Y C, et al. Chemically recyclable, fully biobased polyolefins with performance parity to low-density polyethylene[J]. Green Chemistry, 2026, **28**(1): 387-395.
- [102] Yang S Q, Du S, Zhu J, et al. Closed-loop recyclable polymers: from monomer and polymer design to the polymerization - depolymerization cycle[J]. Chemical Society Reviews, 2024, **53**(19): 9609-9651.
- [103] 韩亚明, 牛金平. 磺化产品的功能化与绿色化[J]. 日用化学科学, 2010, **33**(9): 39-41, 54.
- Han Y M, Niu J P. Functional and green sulphonated products[J]. Detergent & Cosmetics, 2010, **33**(9): 39-41, 54.
- [104] 张纪梅, 步月华, 贾莉伟, 等. 脂肪酶催化脂肪醇乙氧基化研究[J]. 化学通报(印刷版), 2006, **69**(2): 144-147.
- Zhang J M, Bu Y H, Jia L W, et al. Study on ethoxylation of fatty alcohol catalyzed by lipase[J]. Chemistry, 2006, **69**(2): 144-147.
- [105] Chowdhury S, Rakshit A, Acharjee A, et al. Biodegradability and biocompatibility: Advancements in synthetic surfactants[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, **324**: 115105.