

综述与专论

DOI: 10.11949/0438-1157.

驱油用延展型表面活性剂研究进展与展望

金恒仟, 尹相讯, 张宇轩, 孟尧, 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: 化学驱是通过改变储层油、水、岩石多相界面活性提高原油采收率(EOR)的重要技术手段, 对保障我国能源安全具有重要意义。传统表面活性剂在高温、高盐的油藏条件下, 面临易沉淀、失活等严峻挑战。延展型表面活性剂(E-表面活性剂)凭借其独特的“疏水尾链-聚醚连接链-亲水头基”结构, 展现出较好的耐温、抗盐和高界面活性而备受关注。本文围绕E-表面活性剂在油藏化学驱中的应用, 系统梳理其分子构建策略、界面作用机理及应用效果, 深入剖析了疏水尾链、聚醚中间链(PPO/PEO)和亲水头基的结构效应, 总结了E-表面活性剂降低油水界面张力的微观行为, 并归纳了其原油组分的定量匹配规律。结合高温高盐砂岩、碳酸盐岩及稠油油藏的矿场实践案例, 总结了其在苛刻条件下EOR的作用优势。未来延展型表面活性剂研究应持续在结构设计智能化和复配体系高效绿色化方面攻关, 建立全生命周期综合评价体系, 从而推动延展型表面活性剂在进一步提高采收率技术中发挥更大作用, 拓展化学驱技术的应用范围。

关键词: 石油; 延展型表面活性剂; 化学驱; 构效关系; 提高采收率

中图分类号: TQ423

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-18

Research progress and development prospect of extended surfactants for enhanced oil recovery

JIN Hengqian, YIN Xiangxun, ZHANG Yuxuan, MENG Yao, ZHANG Hongru, CHENG Haoran

Abstract: Chemical flooding is a crucial technical approach to enhancing oil recovery (EOR) by modifying the multiphase interfacial activity among reservoir oil, water, and rock, holding strategic significance for securing national energy supplies. Under harsh reservoir conditions, conventional surfactants face severe challenges such as high precipitation tendencies and deactivation. Extended surfactants (E-surfactants), featuring a unique "hydrophobic tail - polyether linker - hydrophilic head" architecture, have garnered significant attention due to their superior thermal stability, salt tolerance, and high interfacial activity. Focusing on the application of E-surfactants in reservoir chemical flooding, this paper systematically reviews their molecular construction strategies, interfacial interaction mechanisms, and application performance. It provides an in-depth analysis of the structural effects of hydrophobic tails, polyether intermediate chains (PPO/PEO), and hydrophilic headgroups; summarizes the microscopic behaviors of E-surfactants in reducing oil-water interfacial tension (IFT); and outlines the quantitative matching rules between E-surfactants and crude oil components. Furthermore, based on field pilots in high temperatures and high salinity sandstone, carbonate, and heavy oil reservoirs, the operational advantages of E-

收稿日期: 2026-04-15 修回日期: 2026-07-13

通信作者: 张红如(1996-), 女, 博士, 副教授, zhanghr103@163.com; 程浩然(1988-), 男, 博士, 教授, chenghaoran@qust.edu.cn

第一作者: 金恒仟(1996-), 男, 博士研究生, j1582663@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: 金恒仟, 尹相讯, 张宇轩, 孟尧, 张红如, 程浩然. 驱油用延展型表面活性剂研究进展与展望[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1-18

Citation: JIN Hengqian, YIN Xiangxun, ZHANG Yuxuan, MENG Yao, ZHANG Hongru, CHENG Haoran. Research progress and development prospect of extended surfactants for enhanced oil recovery[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1-18

surfactants in boosting recovery under hostile conditions are synthesized. Future research on extended surfactants should continuously focus on intelligent molecular design and high-efficiency, green formulation development, alongside establishing a comprehensive life-cycle evaluation system. This will further empower extended surfactants to play a greater role in EOR technologies and expand the application scope of chemical flooding.

Keywords: petroleum; extended surfactants; chemical flooding; structure-property relationship; enhanced oil recovery

引 言

石油属于不可再生资源,在经济不断扩张、人口持续增长的双重压力之下,其储量日益趋于紧张状态,提高石油开发效率对于保障国家能源安全、推动全球经济发展而言有着深远的战略意义。据2025年的统计数据,我国原油表观消费量达到了7.8亿吨,进口规模为5.78亿吨,对外依存度处于较高水平。当前我国多数主力油田已步入高含水开发阶段,苛刻油藏剩余油分布日趋复杂,进一步大幅提高采收率(EOR)已成为亟待攻克的重大现实难题。在当前复杂的地缘格局背景之下,加强EOR的技术攻关、降低成本增加效益,是巩固国家能源安全屏障、促进产业高质量发展的战略关键所在^[1,2]。化学驱技术通过注入化学药剂来改善油水流动度比或者降低界面张力,能够大幅度提高原油采收率,因而适应性广泛、增加原油产量的潜力显著。化学驱技术主要涵盖聚合物驱^[3,4]、碱驱^[5,6]、表面活性剂驱^[7,8]等,其中,表面活性剂依靠其在界面具备的高效吸附能力来减小张力,在化学驱实践当中被广泛应用^[9]。然而,在极端工况条件下,表面活性剂驱面临严峻挑战:以石油磺酸盐和重烷基苯磺酸盐为代表的传统阴离子表面活性剂,在高温、高矿化度及高二价离子含量等环境下易发生盐析沉淀,导致界面活性丧失^[10];而普通非离子表面活性剂虽耐盐性良好,却受浊点制约导致高温下易发生相分离,且两者均面临在岩石表面上的强吸附损失。因此,通过结构优化来开发兼具优异耐温性与耐盐性的新型驱油表面活性剂,对于化学驱EOR具有重要意义^[11]。

延展型表面活性剂(E-表面活性剂)凭借灵活的高度可调性结构,成为应对上述挑战的新型分子(图1)。早在20世纪80年代,Exxon公司Gale等人合成了含有聚氧丙烯-聚氧乙烯(PPO-PEO)共聚醚链的硫酸酯盐和磺酸盐型表面活性剂^[12],1995年,Miñana-Perez、Graciaa、Lachaise和Salager等研究者

首次将这类在疏水尾链与亲水头基之间嵌入PPO或PPO-PEO共聚醚链段的分子命名为“E-表面活性剂”^[13]。其核心结构特征在于引入了中等极性的聚醚链段作为间隔基,打破了传统表面活性剂中亲水头基与疏水尾链“刚性直连”的模式。通过精准调控PPO链段长度,可增强分子疏水性并使其深入油相来提升耐盐性;通过调节PEO链段比例,可强化水化层稳定性来优化耐温性;通过改变离子头基类型(硫酸盐、磺酸盐、羧酸盐等),可实现对油水界面张力及岩石润湿性的定向调控^[14,15]。这种多维度可设计的分子结构,使其成为解决苛刻条件油藏驱油难题的理想候选体系。

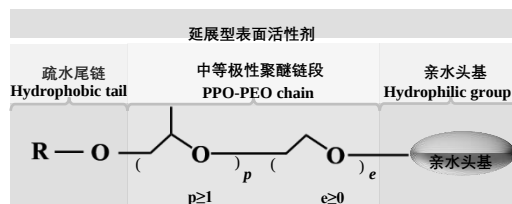


图1 E-表面活性剂的一般结构式

Fig.1 General structure of E-surfactants

本文系统梳理了E-表面活性剂在复杂油藏化学驱领域的研究进展与应用现状,重点围绕分子设计工艺、构效关系特征及工程适配性三个维度展开论述,深入阐述了关键链段组成对亲水-亲油平衡(HLB)的调控规律,分析了复配体系实现协同增效的作用机制,归纳了E-表面活性剂在耐温抗盐和抑制岩石吸附等方面的性能优势。通过对现有研究成果的整合与评述,为E-表面活性剂在复杂油藏化学驱中的规模化应用提供理论支撑与研究导向。

1 E-表面活性剂的分子结构设计优化

E-表面活性剂分子是由疏水烷基链、聚醚连接链以及极性离子头基三部分构成^[16,17]。常见疏水链可为直链或支链烷基;聚醚连接链主要包括聚氧丙烯醚(PPO)、聚氧丙烯-b-聚氧乙烯醚(PPO-b-

PEO)、聚氧乙烯-*b*-聚氧丙烯醚(PEO-*b*-PPO)及聚氧丙烯-*co*-聚氧乙醚(PPO-*co*-PEO)等类型;离子头基则可为阴离子、阳离子或非离子类型,其中以阴离子型为主^[18]。此外,E-表面活性剂中硫酸、磺酸、羧酸及磷酸酯盐等极性功能基团的引入,进一步拓展了分子末端修饰的化学空间,使头基类型和接枝方式有了更多选择。由于疏水链、聚醚嵌段和离子头基均可通过选择不同原料与反应路径进行独立调控,合成设计的灵活性较大,也为后续根据油藏工况开展定向合成和工艺优化提供了基础。

1.1 疏水尾链的类型选择

疏水尾链构成了E-表面活性剂疏水性的主要调节单元,其结构效应主要由碳链长度与支化程度两个方面来调控,通过调控分子在界面上的空间构象与油相增溶容量实现性能优化。

1.1.1 直链烷基 直链烷基是E-表面活性剂疏水端最为常见的结构形式,其合成通常直接以天然脂肪醇或油醇等为原料,经烷氧基化及末端官能团转化即可制备,工艺路线相对简单。He等人^[19]以油醇为起始原料,依次经乙氧基化、丙氧基化和硫酸酯化及中和反应后,制备了油醇聚氧乙烯-聚氧丙烯醚硫酸钠。该分子疏水尾链中含有的孤立双键赋予了烷基链优异的构象柔性,使其在较高矿化度条件下可自发组装形成蠕虫状胶束,这种特定的聚集形态转变显著增强了体系在驱油过程中的黏弹性调剖与洗油能力。区别于不饱和油醇,饱和直链脂肪醇来源更广,且碳链长度易于实现精准调控。胡学一等人^[20]选用辛醇、月桂醇、十六醇等直链饱和脂肪醇,合成了一系列直链烷基聚氧丙烯醚硫酸钠(C_nP_pS)。研究证实,在直链疏水骨架中,通过协同调控碳链长度与PPO加成数,可在设计阶段实现对固液界面聚集行为的优化。

1.1.2 支链烷基 相较于直链烷基,疏水尾链的支链化会显著改变分子的空间构型,这种几何构型的差异不仅影响合成过程中反应位点的可及性,更直接决定了产物的性能。任晓丹等人^[21]以异辛醇为起始原料,丙氧基化、硫酸酯化和中和反应后制备了异辛醇聚氧丙烯醚硫酸盐,研究发现支链结构的引入改变了分子在界面处的堆积方式。在此基础上,Zhang等人^[22]以异十三醇聚氧乙醚为原料,通过烯丙基化反应引入不饱和侧链,再经磺化处理得到含有三个短支链的烷基脂肪醇醚磺酸盐,进一步提高了疏水端的支化程度。与直链结构的同系物相

比,基于异十三醇的高度支化骨架赋予了分子更优异的极端环境耐受性,其热稳定性和抗盐性能均有提升(图2)。因此,对E-表面活性剂的疏水端进行支化合成设计研究,对其性能优化具有重要价值。

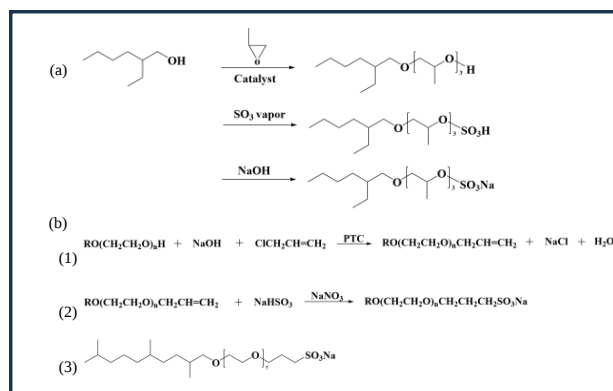


图2 支链烷基结构E-表面活性剂的合成路线:(a)异辛醇聚氧丙烯醚;(b)异十三醇聚氧乙醚磺酸盐^[21, 22]

Fig.2 The synthesis route of branched alkyl structured E-surfactants: (a) isooctanol polyoxypropylene ether; (b) iso-tridecanol polyoxyethylene ether sulfonate^[21, 22]

1.2 亲水头基的类型选择

作为E-表面活性剂的核心亲水单元,头基结构的定向选择不仅调控分子的电离状态与界面活性,更是增强分子在复杂高矿化度地层环境中的稳定性及降低固相表面吸附的关键。根据头基结构差异,常见阴离子型E-表面活性剂可分为硫酸盐、磺酸盐、羧酸盐及磷酸盐四类(图3),各类型的耐温耐盐行为差异显著,油藏适用条件各不相同^[23]。

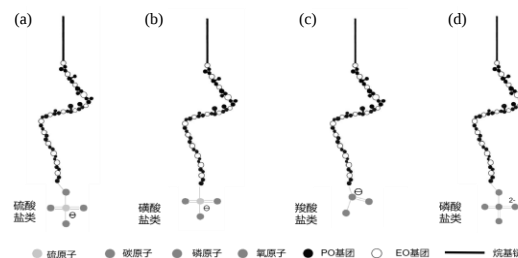


图3 延展型表面活性剂(a)硫酸盐型(b)磺酸盐型(c)羧酸盐型(d)磷酸盐型

Fig. 3 Extended surfactants: (a) sulfate, (b) sulfonate, (c) carboxylate, (d) phosphate

1.2.1 硫酸盐 硫酸盐头基一般通过聚醚末端羟基的硫酸酯化反应引入,常用氯磺酸或氨基磺酸等试剂与醇羟基反应,形成O-S键连接的硫酸酯盐结构。该路径操作相对成熟,是E-表面活性剂合成中较为常见的头基引入方式之一。其不足之处在于,

E-表面活性剂。岩心润湿实验表明,该表面活性剂在0.3%浓度下即可将接触角降至31.4°,驱动岩石表面由油湿向水湿转变。上述结果证实,羧酸盐头基的合成路径不仅限于简单的羧甲基化,其与双链疏水骨架及混合聚醚嵌段协同作用时,可利用温和的表面电荷特性有效降低固-液界面吸附能,从而实现显著的润湿反转调控。该头基体系的主要局限在于对pH变化极为敏感,在酸性条件下易质子化转变为羧酸形式,导致溶解度骤降和表面活性丧失;此外,与多价金属离子的络合沉淀问题亦较为突出,耐硬水性不及磺酸盐型表面活性剂。

1.2.4 磷酸盐 磷酸头基通常通过聚醚末端羟基与五氧化二磷或焦磷酸等试剂反应引入,产物以P-O-C键与分子骨架相连,可形成单酯或双酯结构。由于磷酸化试剂和反应条件的差异,单/双酯比例可

在合成阶段加以调控,进而影响分子的电荷密度与亲水性。值得注意的是,磷酸化反应选择性较差,单/双酯产物分离困难,产物组成不均一,批次间重现性不易控制,这些因素综合影响了其工业化应用的可行性。李猛等人^[30]以十二醇为起始原料,先经丙氧基化反应引入聚氧丙烯链段,再采用五氧化二磷法合成混合单/双十二烷基聚氧丙烯醚磷酸钠(C₁₂P₃P),并通过与焦磷酸法纯品复配得到系列不同单/双酯比例的样品,该药品具有显著的驱油性能。在此基础上,方良辉等人^[28]以天然脂肪醇和环氧丙烷为原料,经丙氧基化反应制备烷基聚氧丙烯醚,再与焦磷酸反应制备了系列单烷基聚氧丙烯醚磷酸酯钠(图4)。与单十二烷基磷酸钾相比,该产物低温水溶性更好,泡沫力和乳化力更为突出。

表1 不同阴离子头基E-表面活性剂的化学稳定性与油藏适用性比较

Table 1 Comparison of chemical stability and reservoir applicability of E-surfactants with different anionic head groups

头基类型	化学键	耐温性	耐盐性	化学稳定性	适用油藏条件
硫酸盐	O-S键	低于60℃易断裂	高浓度Na ⁺ 下易盐析,Ca ²⁺ /Mg ²⁺ 下生成不溶性沉淀	强酸/强碱中均易水解失活	低温低矿化度油藏
磺酸盐	C-S键	不易水解或氧化断裂	在高浓度Na ⁺ 下抗盐析能力强,Ca ²⁺ /Mg ²⁺ 下不易生成沉淀	全pH范围完全电离	高温高盐
羧酸盐	C-C键	低于磺酸盐、磷酸盐	高浓度Na ⁺ 下易盐析,与Ca ²⁺ /Mg ²⁺ 易络合沉淀	受pH显著调控,酸性环境质子化失活	中性至碱性环境
磷酸盐	C-O-P键	可耐150℃以上	Ca ²⁺ /Mg ²⁺ 下可通过螯合作用部分溶解,但高浓度时仍可能生成沉淀	可适应高矿化度	高温高矿化度砂岩

综上所述,四类阴离子头基各具优劣:磺酸盐与磷酸盐虽具备稳定的化学键,耐受高温高盐性能显著,但分别受限于钙镁离子不稳定性及合成成本;硫酸盐虽界面活性卓越,但耐温耐盐性能较弱;羧酸盐则兼具环境友好优势,但受限于狭窄的适用pH区间及热稳定性瓶颈(具体见表1)。因此,在实际分子设计中,需针对油藏具体环境进行头基类型的选择,亦可考虑通过结构改性或复配策略弥补单一头基的性能短板。

1.3 聚醚链接链的类型选择

E-表面活性剂区别于传统表面活性剂,其疏水基与亲水头基之间嵌入了聚醚中间链段^[31],通过调控聚醚链的基团类型、聚合度及PPO-PEO链段比例,可实现对E-表面活性剂分子结构的精准设计^[32,33]。Liu等人^[34]制备出了三种PPO均聚型中间体,之后经过硫酸酯化、中和反应而得到。在此基础上,采用“先丙氧基化后乙氧基化”的分步投料策略,在PO加成数为8的聚醚链末端继续引入2个

EO单元,从而得到了PPO-b-PEO嵌段型产物C₁₂P₈E₂S。此项工作表明,在相同疏水骨架的情况下,通过调控烷氧基化单体种类、加料顺序,可合成均聚或嵌段型不同序列结构的连接链。对于烷基芳基体系,He等人^[35]在苯环上引入了不同长度的PPO链段,硫酸酯化后得到一系列产物,PPO链长能够通过单体与起始醇的投料比直接进行控制。若将加料顺序进行颠倒,采用“先乙氧基化后丙氧基化”的策略,则可合成序列相反的PEO-b-PPO嵌段结构。与PPO-b-PEO序列相比较,这种反向嵌段在工艺方面仅仅改变了PO与EO的加料先后顺序,但是产物在泡沫行为、润湿性、界面吸附特征等方面呈现出明显的差异,这表明序列设计对产物性质有着直接的影响^[36]。此外,PO与EO单元也可在同一反应器中同时投料,通过无规共聚得到PPO-co-PEO链段。该策略简化了分步烷氧基化操作,所得无规序列在特定条件下可与其他表面活性剂共混形成层状结构,且层间距随温度和共聚物分子量呈

规律性变化^[18]。

因此,中间聚醚嵌段的序列结构主要借助烷氧基化反应的加料顺序及方式来调控,单一丙氧基化能获得PPO均聚链,分步顺序加料可得到PPO-*b*-PEO或者PEO-*b*-PPO嵌段结构,同时投料会形成无规共聚。不同序列路径给E-表面活性剂的合成工艺提供了灵活的设计空间。

2 界面行为与构效关系

E-表面活性剂能突破传统结构在苛刻油藏下的应用局限,核心在于其独特的分子构型改变了界面物理化学行为。分析其界面张力降低的微观动力学、耐温耐盐的构效关系,以及原油组分的相互作用机理,是实现表面活性剂定向设计与高效驱油的基础。

2.1 降低油水界面张力的微观机制

PPO链段在界面的构象规律是E-表面活性剂产生高界面压、实现超低IFT的结构基础,而PPO-PEO链长及无机盐浓度等参数与IFT之间也具有定量关联。

2.1.1 PPO链段界面构象行为及其对界面压的贡献机制

在E-表面活性剂分子中,PPO链段作为连接疏水基与亲水头的中间极性嵌段,兼具一定的油相亲和性与空间柔性,其界面构象行为对界面层分子排列密度及界面压的形成具有决定性影响^[13, 37, 38]。Chen等人^[39]的研究证实,在油水界面上PPO链段既不完全伸入油相,也不完全留在水相,而是呈现出一种“拉伸-卷曲”共存的状态。这种类椭球状的构象赋予了分子更大的占据面积,使得分子能够在界面上更紧密地堆积。同时,PPO链段的醚氧原子可以与水分子形成氢键,而其烷基主链则与油相相互作用,这种“双相亲和性”显著增加了界面压,从而大幅压低了界面张力。二者的动态平衡与转化不仅调控界面层的致密化程度,更是调控界面压与界面活性的关键^[40]。

分子动力学模拟结果表明,长PPO链段的E-表面活性剂在界面处倾向于形成螺旋蜷曲构象。He等人^[41]通过分子动力学模拟发现,长PPO链在界面处呈螺旋状结构,PO基团在油相平行于界面取向,通过油相蜷曲有效包裹亲水氧原子,从而实现表面活性剂分子在界面的紧密排列,显著降低界面空隙

率与油水界面张力。这种螺旋蜷曲构象通过最大化分子堆积密度,构成了长链E-表面活性剂获得超低油水界面张力的重要结构基础。随着PPO聚合度降低,螺旋结构的稳定性下降,链段构象逐渐由蜷曲向伸展状态过渡。此外,当PPO链长缩短时,分子难以维持稳定的螺旋环结构,转而以更伸展的构象分布于界面。Liu等人^[42]通过分子动力学模拟证实短疏水链E-表面活性剂中短PPO链段因空间位阻较小而无法形成稳定螺旋环,主要以伸展构象存在于油水界面。尽管该构象在油相对亲水氧原子的包裹能力弱于蜷曲构象,但其能有效削弱分子侧向排斥作用,促进界面有序排列,显著增强对界面压的贡献(图5)。

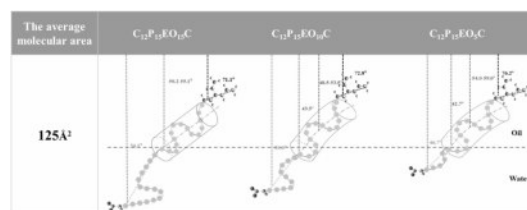


图5 $C_8P_{15}E_mC$ ($m = 15/10/5$)在油水界面的排列示意图^[42]

Fig.5 Schematic diagram of the arrangement of $C_8P_{15}E_mC$ ($m = 15/10/5$) at the oil-water interface^[42]

除链长效应外,界面吸附分子密度亦是驱动PPO链段构象演化的关键热力学因素。扩张流变学研究表明,在较低界面吸附密度下,PPO链段倾向于向油相方向伸展以降低体系界面自由能;随着界面吸附量增加,分子间相互作用增强,链段构象发生动态调整,通过螺旋蜷曲回缩实现更程度的界面致密化,进而提升界面压并强化界面活性。上述由伸展向蜷曲的构象转变,伴随着界面层分子堆积密度的增大,构成了E-表面活性剂界面活性随吸附密度增加而增强的重要分子机制^[40]。

2.1.2 分子结构参数与盐浓度对IFT的定量影响

(1)烷基链长与PPO链段的协同增疏效应实验数据表明,E-表面活性剂的分子结构与其界面活性之间存在明确的定量相关性。陈骥等人^[43]以十二醇、十四醇及二者混合醇为原料合成了系列直链烷基聚氧丙烯醚硫酸钠(C_nP_3S),结果发现,PPO链的嵌入不仅为 C_nP_3S 分子提供了额外的疏水驱动力,还起到了连接疏水链与亲水头的极性过渡作用;随着烷基链长增长, $C_{12}P_3S$ 和 $C_{14}P_3S$ 在降低表面张力及乳化能力方面均显著优于两种商用表面活性剂(见表2),证实了烷基链长与PPO链的协同增疏是提升界

面活性的重要结构基础。

表2 25℃下表面活性剂的表面活性参数^[43]

Table 2 Surface activity parameters of surfactants at 25 °C^[43]

Surfactant	$\Gamma_{CMC}/$ ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)	CMC/ ($10^{-3} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	pC_{20}	CMC/ C_{20} ($10^{-6} \text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\Gamma_m/$ ($10^{-6} \text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$)	CMT/ $^{\circ}\text{C}$
$\text{C}_{12}\text{P}_3\text{S}$	32.50	0.63	4.17	9.30	1.78	<0
$\text{C}_{14}\text{P}_3\text{S}$	31.20	0.30	4.58	11.50	1.56	<0
$\text{C}_{1214}\text{P}_3\text{S}$	32.10	0.56	4.28	10.30	1.68	<0
SDS	35.00	8.00	2.51	4.20	2.40	13.20
SLE_3S	40.80	0.69	3.64	3.00	2.11	<0

(2)PO/EO数目的定量调控规律在保持疏水链长不变的情况下,PO聚合度与油水界面张力之间呈现出明确的定量演变规律。Ren等人^[44]以甜菜碱和不同PO链长的延展型表面活性剂混合体系为对象,研究了PO数目对油-水界面行为及协同效应的影响。结果表明,在固定疏水链长的前提下,PO基团聚合度对界面张力呈现显著的定量调控规律:PO₇和PO₉链因柔性较好,其界面构型可由甜菜碱结构调控并表现出正协同效应,界面张力可降至超低值;而PO₁₃链因形成螺旋刚性结构、形变能力差,与空间位阻较小的甜菜碱混合时产生竞争吸附,呈现负协同效应(图6)。

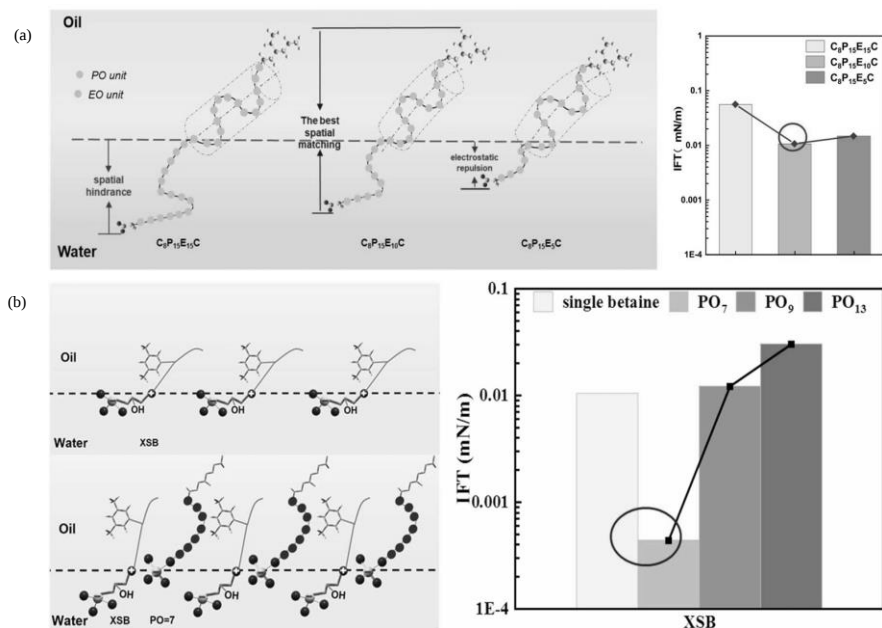


图6 (a)分子在油水界面的构象演变及其张力降低机理;^[42, 44](b)PO数目对分子界面构象与界面张力的影响^[42, 44]

Fig.6 (a) Conformational evolution of molecules at the oil-water interface and their interfacial tension reduction mechanism;^[42, 44](b) Effect of PO unit number on molecular interfacial conformation and interfacial tension^[42, 44]

与PPO链段不同,PEO链段主要影响分子的亲水-疏水平衡及界面定向排列能力。Liu等人^[42]以短疏水链延展型表面活性剂C₈P₁₅E_mC为对象,研究了EO数目对油-水界面排列行为及界面张力的定量调控规律。结果表明,PEO链会斜向延伸入水相,取向随深入程度增加而逐渐变平,较长PEO链即m=10和15时,链中间区域倾向于卷曲。当EO数目为10时表现出最佳界面活性,亲水-疏水平衡与空间尺寸效应达到最佳匹配,EO链过短或过长均导致界面排列疏松或过度伸展,使界面张力升高(图6)。

代轩瑞等人^[45]考察了PPO-PEO链段比例对浊点及HLB值的影响,在起始剂/PPO比例固定时,随

PPO/PEO质量比减小,破乳剂浊点与HLB值同步升高;当PPO-PEO比例不变而起始剂/PPO比例减小时,PPO绝对含量增加导致亲水性下降,浊点与HLB值随之降低。上述研究表明,PPO段主要决定界面构型与分子刚性,PEO段则负责调节亲疏水性,二者在结构上的协同适配是实现超低界面张力的基础。

(3)盐离子与嵌段链长的相互作用在分子结构参数固定的前提下,无机盐浓度对IFT的调控呈现显著的非单调变化特征,且与PPO链长存在定量匹配关系。Liu等人^[34]系统考察了NaCl浓度对表面活性剂IFT的影响。结果表明,随NaCl浓度增加,各体

系与癸烷的平衡 IFT 均呈先降低后升高的趋势;且最佳 NaCl 浓度随 PO 数增加而降低。这是因为 PPO 链较长的分子本身已具备较强的疏水吸附驱动力,适度增加盐度可通过电荷屏蔽效应促进界面吸附;但过高盐度反而会破坏表面活性剂的水化层,促使分子在体相中聚集,导致界面吸附效率下降。Wang 等人^[46]以 $C_8P_{15}E_{10}C$ 为研究对象,研究了二价阳离子在固定盐度下对油-水界面张力的调控作用。结果表明,随着 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 浓度增加,界面张力呈微弱下降趋势但未能达到超低值,这归因于长 PEO 链的空间位阻效应阻碍了二价阳离子桥接两个表面活性剂离子、形成紧密排列的界面膜;与仅含 PPO 链的硫酸盐型 E-表面活性剂相比,含长 PEO 链的表面活性剂削弱了二价离子对界面张力的进一步降低能力,体现了 PEO/PPO 链长比例对盐响应行为的关键调控作用(图 7)。

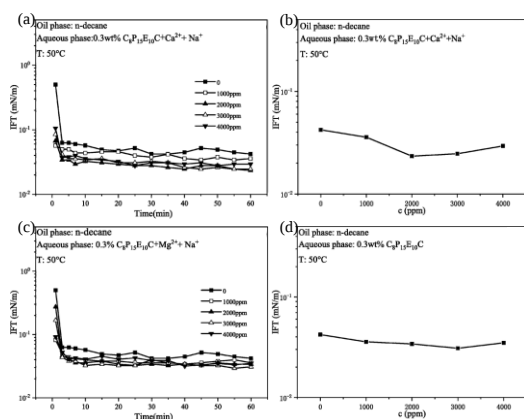


图 7 (a) Ca^{2+} 浓度对动态界面张力的影响; (b) Ca^{2+} 浓度对平衡界面张力的影响; (c) Mg^{2+} 浓度对动态界面张力的影响; (d) Mg^{2+} 浓度对平衡界面张力的影响^[46]

Fig. 7 (a) Effect of Ca^{2+} concentration on dynamic interfacial tension; (b) Effect of Ca^{2+} concentration on equilibrium interfacial tension; (c) Effect of Mg^{2+} concentration on dynamic interfacial tension; (d) Effect of Mg^{2+} concentration on equilibrium interfacial tension^[46]

2.2 耐温耐盐机理

2.2.1 耐盐抗钙机制与界面稳定性 区别于传统阴离子表面活性剂, E-表面活性剂中非离子聚醚链段与离子头基的协同稳定作用使其展现出独特耐盐优势^[47]。传统阴离子表面活性剂在高钙镁离子含量环境中失效的主要原因是发生离子交换生成沉淀^[48]。E-表面活性剂通过引入 PPO-PEO 链段,显著增大了离子头基的有效体积^[11]。首先, PPO-PEO 链段通过醚键氧原子与水分子形成氢键网络实现水

合, 该机制不依赖于静电力, 可在高离子强度环境下维持稳定的水化层; 同时, 大体积磺酸基团离子头基在界面处形成致密水合层, 有效阻挡无机盐离子对负电荷的中和与穿透, 从而抑制盐析沉淀。其次, PPO 链段在油水界面呈紧密盘绕构象, 显著增强了吸附膜的致密排布, 由此产生的空间位阻效应可有效阻碍二价阳离子对相邻阴离子头基的同时配位, 进而抑制分子聚集及沉淀生成。此外, PPO 链段的弱疏水性有助于维持高盐环境下表面活性剂分子的亲油亲水平衡, 避免发生相分离。Wang 等人^[46]以羧酸盐型表面活性剂为研究对象, 发现界面处 PPO 链的卷曲构象通过空间位阻效应, 有效抑制了二价阳离子诱导的分子间缔合, 进而提升了体系的耐盐性与钙镁离子抗性。

根据上述耐盐协同机制, 在对耐盐性能进行定向调控时, 聚醚链的链长、嵌段序列、亲疏水性配比, 都成为关键的分子设计参数。冯鹏等人^[18]研究发现, 共聚醚链接基具有较大截面积, 一方面能够借助螯合作用来束缚 Ca^{2+} , 另一方面可以通过空间位阻效应抑制反离子靠近, 进而阻断沉淀生成路径。聚醚链段的水化层主要依靠氢键形成, 受盐度影响相对较小, 保障了其在高矿化度环境下的溶解稳定性(图 8)。

与 PEO 链段相比较而言, PPO 自身具有较强的疏水性, 可使体系的电解质耐受能力降低。张美军等人^[49]经过对比研究得出, 含有纯 PPO 链接基的烷基酚 E-表面活性剂(NPP₃S), 尽管其表界面活性优异, 但其耐盐性比含有 PEO 链接基的 NPE3S 差。康万利团队^[50]引入 PEO-PPO 聚醚嵌段为链接基, 提高了羧酸盐型 E-表面活性剂的耐电解质能力, 适度嵌入 PEO 可增强亲水性、水化层稳定性来改进高盐适应性。

2.2.2 耐温机制与界面稳定性 E-表面活性剂因其独特的分子结构, 具有良好的耐温性能。PPO 链段能在油水界面建立厚而坚韧的疏水屏障, 对高温引起的分子热运动产生一定抑制作用。PEO 链段通过强水化作用形成致密的保护层, 可屏蔽离子攻击并延缓热降解进程, 使表面活性剂在高温环境下依然保持优良的性能。Zhang 等人^[51]通过调控 PPO-PEO 链段的比例, 发现增加 PEO 链段有利于形成厚水合层, 与磺酸基团共同作用提高耐温性, 有效抑制高温时脱水致使分子聚集与失活, 赋予 E-表面活性剂出色的温度耐受性。Yu 等^[52]通过分子动力学

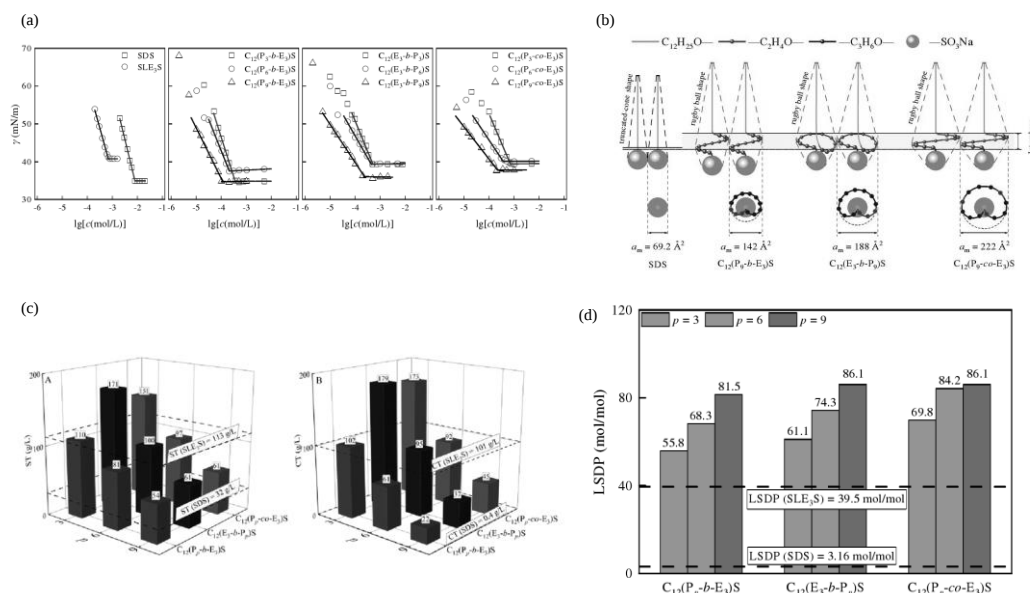


图8 (a) 25 °C时表面活性剂溶液的 γ -lgc曲线; (b)根据25 °C时最小铺展面积(a_m^*)和表面吸附面积(a_m)值推测的橄榄球形状的E-表面活性剂和截头锥形状的E-表面活性剂的分子形状示意图; (c) 45 °C时表面活性剂胶束溶液的NaCl耐受性和CaCl₂耐受性; (d) 25 °C时表面活性剂胶束溶液的钙皂分散力^[18]

Fig.8 (a) γ -lgc curves at 25 °C; (b) Schematic illustration of the inferred molecular shape of e-surfactants with a rugby ball shape and c-surfactants with a truncated-cone shape depended on the experimental values of minimum spreading area (a_m^*) and surface adsorption area (a_m) at 25 °C; (c) NaCl tolerance and CaCl₂ tolerance at 45 °C; (d) Lime soap dispersion power at 25 °C^[18]

模拟揭示PPO-PEO嵌段链具有温度自适应水合特性:在低温环境中,PPO链与水形成的氢键数量多于PEO链来保障分子的水溶性,温度升高后,PPO链的脱水效应比PEO链更明显,使分子亲疏水平衡向疏水侧调整,高温下维持紧密的界面吸附、超低油水界面张力(图9)。E-表面活性剂连接化学键的选择对热稳定性极其关键。醚键能够连接疏水尾链与聚醚链段、PPO-PEO链段,有着较高的化学稳定性,在超过120 °C的高温下不容易断裂,可保证分子骨架完整。酯键通常存在于硫酸盐型E-表面活性剂的头基连接处,虽然硫酸盐型表面活性剂界面活性较强,但是在高温高酸环境下有水解风险。与之相比,磺酸盐型因C-S共价键键能高,呈现出更出色的热稳定性^[53]。所以,在超高温油藏应用里,选用磺酸盐型头基配合稳定的聚醚链段合成E-表面活性剂,是保证长期热稳定性的一种有效办法。

2.3 E-表面活性剂与原油组分的定量匹配关系

E-表面活性剂降低油水界面张力的成效,在很大程度上取决于其分子结构与油相性质的适配程度。原油当量烷烃碳数(EACN)能体现其极性与分子量大小。对于低EACN即轻质油而言,要挑选较短疏水链、较长亲水链的E-表面活性剂,这样可防

止分子过于疏水进而在水相中析出。而对于高EACN即重质油或者含胶质沥青质较多的原油,就得增加疏水尾链长度并延长PPO链段,以此增强分子在油相的溶解度,避免因亲水性过强而无法吸附在界面上。当原油里含有大量极性组分时,E-表面活性剂的聚醚链段尤其是PPO链段会与这些极性大分子产生特异性相互作用。所以要依据EACN、极性组分含量,对疏水基碳数与PPO链长度进行协同优化,从而实现界面匹配并形成超低油水界面张力^[54]。Lu等人^[55]研发出新型大疏水基烷基硫酸盐和羧酸盐表面活性剂,研究发现原油EACN越高或者温度越高,所需要的疏水基尺寸也就越大。对于含有极性组分的原油而言,分子匹配机制更加复杂。Perez等人^[13]指出,E-表面活性剂在传统疏水链和亲水基之间引入PPO链段,能在界面区域建立中等极性过渡层,进而提高模式对酯类、甘油三酯等极性油的增溶能力。另外,油相中极性组分的存在会降低其EACN,需要通过调节PPO链长度实现表面活性剂结构与油相极性的界面匹配,以此增强模式混相和增溶性能(图10)。所以,依据不同的油藏条件,理想的E-表面活性剂设计原则有所不同。对于低熟轻质油,注重“短尾-长PPO”结构来实现超

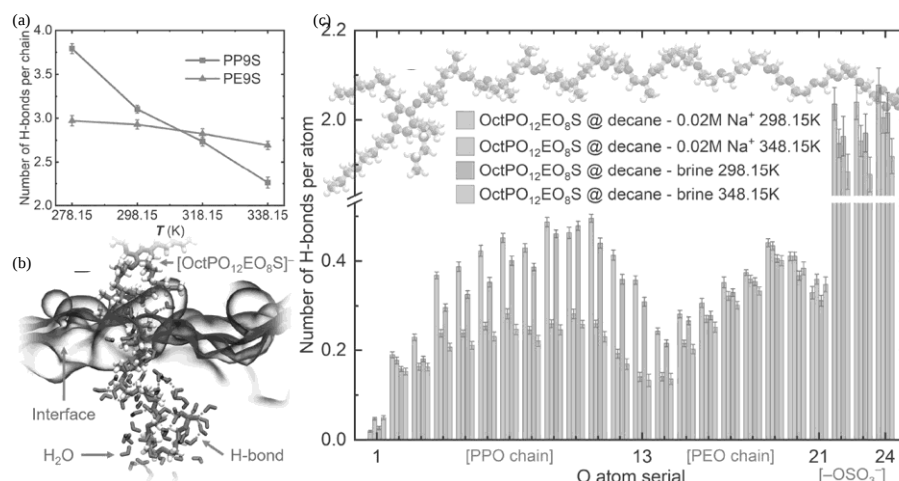


图9 (a)不同温度下PP9S与PE9S和水分子形成的氢键数量;(b)界面处 $[\text{OctPO}_{12}\text{EO}_8\text{S}]^-$ 与水分子间的氢键;(c)4-H、5-A和6-C体系中表面活性剂的氢键分布^[52]

Fig.9 (a) Number of H-bonds formed by PP9S and PE9S with water at different temperatures; (b) H-bonds between $[\text{OctPO}_{12}\text{EO}_8\text{S}]^-$ and water at the interface; (c) H-bonds distribution of surfactants in systems 4-H, 5-A, and 6-C^[52]

低 IFT; 对于高温高盐重质油, 则侧重“长尾-短 PPO-大体积磺酸盐头基”结构来保障耐温耐盐与乳

化稳定性。这种定量的构效关系指导, 能够提高药剂筛选的成功率、驱油效率。

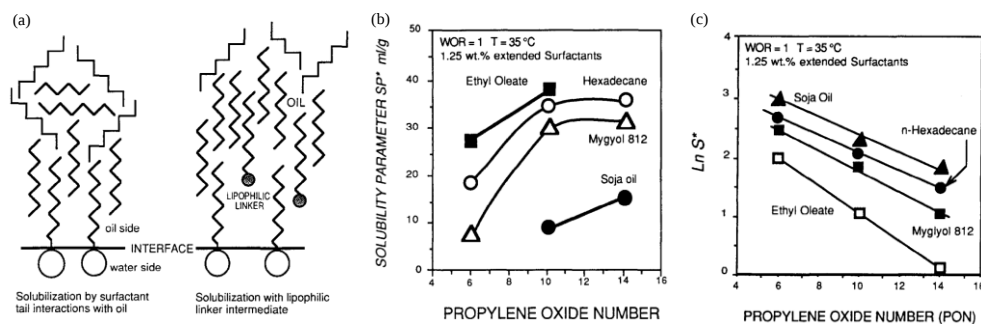


图10 (a)亲脂连接剂改善增溶作用的示意图;(b)不同油相中延伸表面活性剂PO基团数量(PON)对最佳盐度的影响;(c)不同油相中延伸表面活性剂PON对增溶参数(SP)的影响^[13]

Fig.10 (a) Schematic diagram of improved solubilization by lipophilic linker; (b) Effect of propylene oxide number (PON) of extended surfactants on optimal salinity for different oils; (c) Effect of PON of extended surfactants on solubilization parameter (SP) for different oils^[13]

3 复配体系与协同增效机制

单一结构的E-表面活性剂虽然性能优良, 但对油藏环境的多重限制, 往往难以同时达到耐温耐盐、超低界面张力及流度控制的要求。通过复配引入组分间的协同作用, 是解决单组分体系局限性、实现无碱驱油增效的核心路径。E-表面活性剂独特的聚醚链段结构, 使其在复配体系中表现出不同于传统表面活性剂的协同行为。

3.1 表面活性剂复配体系

E-表面活性剂与不同类型表面活性剂复配时

会产生协同增效作用, 借助分子间相互作用优化界面排列、聚集体行为, 从而突破单一模式的性能极限^[56]。Zhang 等人^[57]发现E-表面活性剂和甜菜碱复配呈现出明显的协同效果: 单一模式 IFT 只能降到 10^{-2} – 10^{-3} mN/m, 而最优复配比的复配模式 IFT 能低至 1.7×10^{-4} mN/m, 并且在较宽配比范围内都保持超低油水 IFT。两性离子和阴离子头基之间的静电吸引有效降低了混合模式的 CMC, 并且, E-表面活性剂柔性的 PPO 链段能够自我调节分子尺寸, 同甜菜碱形成尺寸匹配, 显著增加了界面膜厚度、致密性。Zhang 等人^[58]同样对 E-两性表面活性剂和阳离子表

面活性剂十六烷基氯化吡啶做了研究。该模式的界面活性比单一组分更好,可以把油水 IFT 降低到 10^{-3} mN/m。非离子链段和 E-表面活性剂的聚醚链段在界面具有较强的相互作用,有效屏蔽了带电头基间的静电斥力,使界面分子排列更为紧密,界面膜强度也显著增强(见图 11)。另外,在多孔介质驱替过程中,单一小分子表面活性剂容易出现色谱分离现象。E-表面活性剂中的聚醚链段有较强的空间位阻效应,能有效减缓其在岩石表面的吸附速率。当与非离子表面活性剂复配之后,二者借助氢键、范德华力彼此缠结,对各组分的独立运移产生了抑制作用,进而保证驱油模式在油藏深部依旧能够维持稳定的化学组成和界面活性。

此外,E-表面活性剂与阳离子表面活性剂复配后,两者间的静电引力会促使分子发生排列重组,从而大幅提升界面活性。阴离子与阳离子表面活性剂复配虽易因强静电作用导致沉淀,但 Panswad 等人^[59]发现阴离子 E-表面活性剂与阳离子表面活性剂复配后,混合体系 CMC 显著降至 0.01–0.03

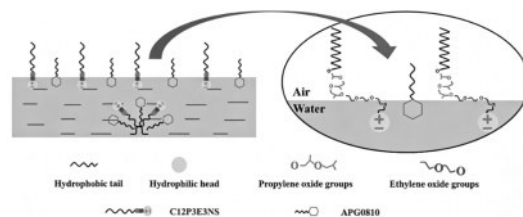


图 11 混合表面活性剂在空气-水界面的吸附和排列示意图^[58]

Fig.11 Schematic illustration of the adsorption and arrangement of mixed surfactants at air - water interface^[58]

mM,远低于任一单一组分(图 12)。这是由于阴阳离子配对消除了不利的静电自由能,从而削弱了亲水头基间的静电排斥;同时,EO 与 PO 基团的卷曲效应提供了充足的空间位阻,使沉淀相区较传统阴离子表面活性剂与阳离子表面活性剂体系显著收窄,拓展了阴阳离子复配在高盐条件下的应用范围。因此,E-表面活性剂与不同类型活性剂的复配可通过静电作用调控与空间位阻效应的协同,实现混合体系 CMC 降低、界面膜致密化及色谱分离抑制,为构建高效复合驱替体系提供了分子设计依据^[60]。

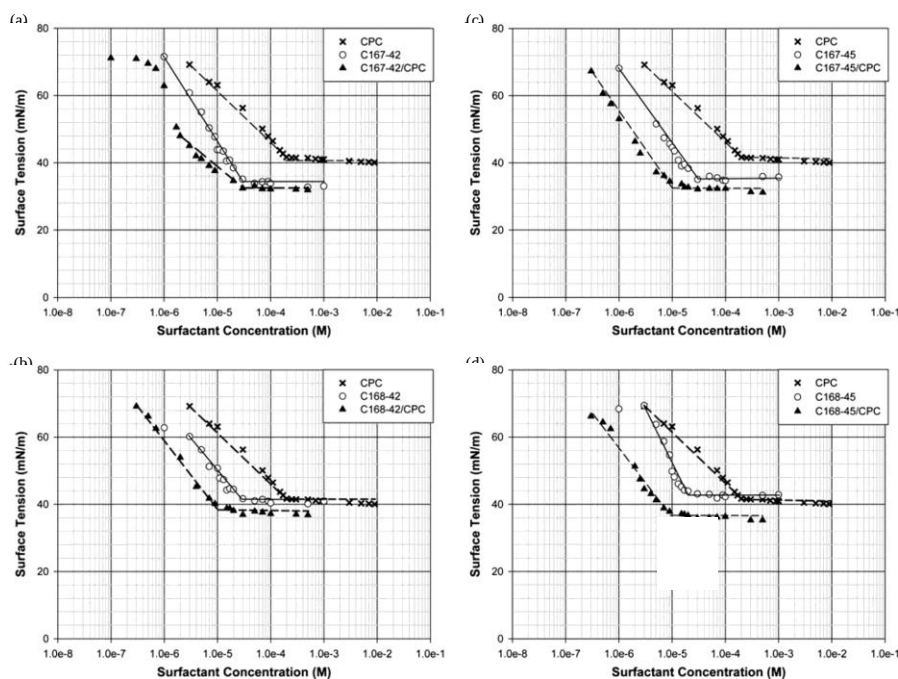


图 12 0.01 mol/L NaCl, pH 9.0 ± 0.5 、温度 25 ± 2 °C 条件下体系表面张力: (a)CPC、C167-42 及 C167-42/CPC; (b)CPC、C168-42 及 C168-42/CPC; (c)CPC、C167-45 及 C167-45/CPC; (d)CPC、C168-45 及 C168-45/CPC^[59]

Fig.12 The surface tension at 0.01 mol/L NaCl, solution pH 9.0 ± 0.5 and temperature 25 ± 2 °C: (a) CPC, C167-42 and C167-42/CPC; (b) CPC, C168-42 and C168-42/CPC; (c) CPC, C167-45 and C167-45/CPC; (d) CPC, C168-45 and C168-45/CPC^[59]

3.2 E-表面活性剂与聚合物的协同作用

在无碱条件下,E-表面活性剂与疏水缔合聚合物的协同作用,是实现流度控制与洗油效率的关

键^[16]。疏水缔合聚合物在水中通过疏水基团形成物理交联网络,提供黏度。E-表面活性剂的疏水尾链能插入聚合物的疏水微区,起到“表面活性剂胶束

桥接”的作用,增强了聚合物分子间的交联点强度,从而在不增加聚合物用量的情况下大幅提升体系的结构黏度与抗剪切能力。此外,E-表面活性剂在聚合物网络中均匀分布,当遇到原油时,其聚醚链段能迅速响应并吸附于油水界面。由于聚合物提供了连续的黏弹性网络,E-表面活性剂在界面的扩散与排布受到网络约束,导致其在界面形成的吸附膜具有更高的黏弹性模量。这种高模量膜能有效阻止液滴聚并,形成更稳定的“冻胶状”乳状液,从而大幅增强微观洗油效率^[61]。

石静等人^[62]研究表明,E-表面活性剂与聚合物复配后,溶液黏弹性显著增强,同时维持超低油水界面张力和良好的乳化性能(图13)。该体系中,聚合物通过长链缠结构建体相黏弹网络,E-表面活性剂则借助柔性PPO链段优化界面吸附层致密性,二者协同实现了体相流变性能与界面活性的同步提升,综合性能显著优于单一组分。程杰成院士等人^[63]进一步考察了该协同作用在无碱体系中的表

现。研究表明,聚合物与E-表面活性剂复配后,体系兼具黏弹性调控与油水IFT降低、强乳化的双重优势,界面活性稳定性与抗吸附能力均优于传统弱碱体系,且色谱分离效应显著减弱。这表明无碱条件下二者仍可通过分子间相互作用实现高效耦合,拓展了复配体系的盐度与pH适应边界。徐辉等^[61]的研究则揭示了该协同效应的条件依赖性。对于油溶性强的E-表面活性剂,与特定聚合物复配可进一步将IFT降至 4.0×10^{-3} mN/m以下;但若表面活性剂本身界面活性较弱,复配后油水IFT反而上升。该现象表明,二者的协同效果高度依赖于界面活性匹配性,需在分子结构设计上进行针对性调控。因此,E-表面活性剂与聚合物的复配可通过拓扑结构缔合与柔性PPO链段构象自适应的协同,实现体相黏弹网络构建、界面吸附层致密化及聚集体结构稳定,为揭示表面活性剂-聚合物协同增效的分子机制提供了理论依据。

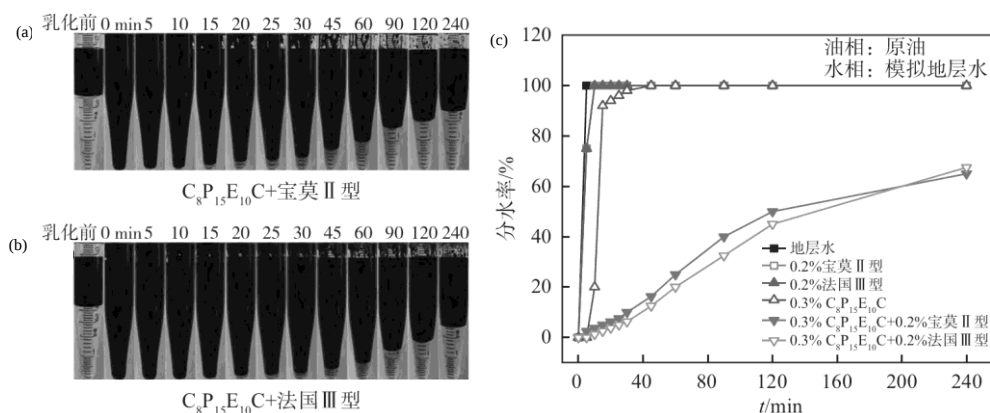


图13 (a)C₈P₁₅E₁₀C+宝莫Ⅱ型体系聚合物复配体系的乳状液外观;(b)C₈P₁₅E₁₀C+法国Ⅲ型体系复配体系的乳状液外观;(c)上述两类乳状液的分水率随时间的变化情况^[62]

Fig.13 (a) The emulsion appearance of polymer compound system of C₈P₁₅E₁₀C+Baomo II system; (b) The emulsion appearance of C₈P₁₅E₁₀C+French III system; (c) The change of water separation ratio of the above two types of emulsions with time^[62]

4 苛刻油藏环境下的应用现状

E-表面活性剂有着特殊的结构,拥有耐温、耐盐、低吸附的优势,是解决复杂油藏难题的关键技术。这部分内容借助室内评价、现场试验,分析该类药剂在极端条件下的表现和作用原理。

4.1 高温与高盐油藏

对于塔里木、准噶尔等高温且高矿化度的深层油藏来说,传统表面活性剂常常会因为热稳定性不够或者在矿化环境中产生沉淀而失去效果。E-表

面活性剂借助PPO链段的极性过渡、构象调节,再配合PEO链段形成的水化膜,能够有效应对高温与高盐的环境,并且有着抗二价阳离子的优势。和传统表面活性剂相比较,其PEO链段在高离子强度环境下能通过增强水化层厚度、空间位阻效应,有效减弱反离子屏蔽作用,进而在极端条件下维持稳定的界面活性。

在超高矿化度油藏里面,E-表面活性剂呈现出出色的对油水界面张力的调控能力。国内沈之芹等人^[64]所开发的烷基酚聚醚磺酸盐型E-表面活性

剂,在模拟塔里木油田的水样(矿化度是 25×10^4 mg/L,含钙镁离子 6550 mg/L)中进行了为期 90 天的热老化实验。实验结果显示,该药剂在 90℃ 的环境下老化 90 天后,依然能够保持 10^{-3} 至 10^{-4} mN/m 的超低 IFT,并且没有沉淀析出。这种高稳定性是由于其分子结构之中稳定的 C-S 共价键、聚醚链段的空间位阻效应,它们抵御了高温下的水解、高矿化度下的

盐析。国外 Wang 等人^[65]以美国中部 Third Earlsboro 砂岩油藏作为研究对象,在总矿化度高达 161860 mg/L 的采出水配制条件下,E-表面活性剂模式依旧能够形成稳定的中相微乳液,将油水 IFT 降低至 3.46×10^{-4} mN/m,驱后的残余油采收率提高 52%~67%,而且不需要进行淡水预处理,展示出良好的现场适配性(表 3)。

表 3 表面活性剂的性质^[65]
Table 3 Surfactant properties^[65]

名称	有效物含量/%	分子量/(g/mol)	EO 数	PO 数	烷基碳数
Alfoterra 8-41s	32	507	1	4	8
Alfoterra 123-4s	83±8	528	—	4	12-13
Daclor 70-3-23 AL	69±1	430	3	—	11-12
AMA	80	388	—	—	6(双尾结构)

Wang 等人^[66]以 E-表面活性剂 $C_{12}PO_{15}EO_5C$ 为研究对象,发现通过优化 NaCl 浓度后,在 50℃ 下可将油水 IFT 降至 10^{-3} mN/m 数量级;即便在矿化度高达 300000 mg/L 的极端盐度条件下,其界面活性依然保持稳定,突破了传统表面活性剂的耐盐极限。深层油藏通常渗透率较低,吸附滞留损失是制约驱油效率的关键。殷代印等人^[67]针对低渗透砂岩油藏的研究表明,优化的 E-表面活性剂体系在 4 g/L 浓度下的油砂吸附量仅为 2.035 mg/g。这得益于 E-表面活性剂较大的分子截面积和聚醚链段的水化层,有效降低了其在岩石表面的物理吸附。物理模拟驱油实验证实,该体系能在水驱基础上将采收率提升 11%,展示了其在深层低渗油藏的巨大潜力。Duan 等人^[29]研究发现温度提升至 110℃、模拟地层水总矿化度 23155 mg/L 条件下,E-表面活性剂 $C_8P_{10}EO_5C$ 在 0.3% 浓度下仍能保持油水 IFT 维持在 0.0273 mN/m,经岩心吸附后仅小幅升至 0.0348 mN/m。上述结果表明,E-表面活性剂在高温高盐环境中兼具稳定的界面活性与抗吸附能力,展现出良好的界面稳定性与应用潜力。

4.2 碳酸盐岩复杂岩性与稠油油藏

碳酸盐岩储层和稠油油藏是化学驱面临的两大难题。碳酸盐岩储层常伴有高温、高矿化度、高硬度以及倾向于油湿的润湿性;其裂缝发育导致储层非均质性突出,驱替液容易产生指进和窜流。此外,受岩石表面正电荷影响,常规阴离子表面活性剂会产生强静电吸附,严重制约驱油效率。对于稠油油藏,由于原油黏度高,水驱采收率很低,且高黏原油容易与化学药剂形成稳定乳状液,增加了后续

地面处理的压力。这两类油藏对表面活性剂的热稳定性、耐盐性、抗钙镁能力及界面活性提出了严格要求,而 E-表面活性剂凭借 PPO-PEO 链段的可调控分子构象,展现出针对性适应优势。

针对碳酸盐岩储层的高盐高硬度特征,分子设计需重点解决二价阳离子引发的沉淀与界面活性丧失问题。Wu 等人^[68]报道,支化烷基醇丙氧基硫酸盐表面活性剂在 0.2 wt% 低浓度下即可从 Berea 砂岩中驱替出 35%~50% 的水驱残余油。Alfoterra 38 配方在岩心驱替实验中实现了水驱残余油 50% 的采收率,显著提高了化学驱替效率。Alfoterra 23 在同等条件下亦取得了 35% 的残余油采收率,证实了该类表面活性剂在低浓度下强化驱油效率的应用潜力。Malik 等人^[69]研究表明,部分水解聚丙烯酰胺与烷基聚乙二醇醚非离子表面活性剂复配体系在高温高盐碳酸盐岩储层中可实现约 26% 的额外原油采收率。通过岩心驱替实验证实,该表面活性剂-聚合物体系可将总采收率由水驱的 38% 提升至 64%,显著提高了残余油的洗油效率。且进一步指出,相较于热稳定性较差的阴离子醇丙氧基硫酸盐体系,该非离子表面活性剂体系在 90℃ 及高矿化度条件下展现出更优的化学驱替性能与适应性。

在稠油开采方向,超短疏水链表面活性剂通过 PPO-PEO 链段延伸分子链长,可在保持水基稳定性的同时获得优异的界面活性。Baek 等人^[70]针对 Athabasca 稠油开展了超短疏水链表面活性剂强化聚合物驱实验,在玻璃珠填充模型中于 2.0 PV 注入量下实现了 84% 的原油采收率,较水驱和聚合物驱分别提高 54% 和 22%。Baek 等人指出,2 wt%

phenol-4PO-20EO 的添加使油水界面张力由 11 dyn/cm 降至 0.39 dyn/cm, 显著改善了驱替效率并降低了残余油饱和度。

4.3 E-表面活性剂在新兴驱油技术中的应用

随着油田开发需求的精细化, E-表面活性剂在纳米复合驱和无碱驱等新兴技术领域展现出独特的协同优势。通过与其他功能材料复合或优化驱替配方可发挥其界面活性特性, 拓展在复杂油藏中的适用性。

4.3.1 纳米复合驱 在纳米复合驱中, E-表面活性剂主要作为纳米颗粒的分散剂与界面改性剂。Liang 等人^[71]的研究表明, E-表面活性剂能牢固吸附于纳米颗粒表面, 通过聚醚链段的空间稳定作用, 防止纳米颗粒在高盐环境中团聚沉降。同时, 修饰后的纳米颗粒携带了 E-表面活性剂的活性基团, 能协同降低 IFT 并封堵高渗通道, 形成“纳米流体-表面活性剂”的双重增效体系。Paternina 等人^[72]对比研究了亲水型与部分疏水型纳米颗粒对 E-表面活性剂二元体系界面性能及吸附行为的影响, 结果表明, 亲水型纳米颗粒的界面增效作用显著优于疏水型, 仅需 20 ppm 即可将油水 IFT 降至 10^{-4} mN/m 超低水平。动态驱替实验进一步揭示, 该浓度下表面活性剂在岩心中的吸附量降低 31.1%, 且经后续盐水驱替后 94.7% 的吸附剂可解吸返回液相, 表明纳米颗粒可通过竞争吸附或空间位阻机制有效抑制化学剂的不可逆滞留。Rattanaudom 等人^[73]系统考察了疏水性与亲水性 SiO_2 纳米颗粒对羧酸盐 E-表面活性剂/琥珀酸二辛酯二元阴离子体系相行为及界面性能的影响, 添加 500 ppm 纳米颗粒即可促使体系在 1.75 wt% 盐度下形成 Winsor III 型中相微乳液, IFT 降至 0.0013–0.0018 mN/m, 且最佳盐度由 2 wt% 降至 1.75 wt%; 当颗粒浓度增至 1000 ppm 时, 最佳盐度进一步降至 1.5 wt%。这说明纳米颗粒可通过调控表面活性剂在油水界面的排列密度与聚集体结构, 拓展体系在较低盐度下的微乳液形成空间。Zhou 等人^[74]构建了 E-表面活性剂 Soloterra 964 增强的功能化 SiO_2 纳米流体体系(图 14), 研究了纳米颗粒与表面活性剂的协同界面行为。该体系可将油水 IFT 由 13.78 mN/m 降至 0.02 mN/m, 并将岩石表面接触角由 43.4° 逆转至 130.2° , 实现由水润湿向油润湿的转变。岩心驱替实验表明, 该协同体系较单一组分具有显著的正向协同效应。因此, 纳米颗粒与 E-表面活性剂的复配可通过 IFT 降低、吸附抑制、微

乳液相行为调控及润湿反转等多维度机制实现协同增效。

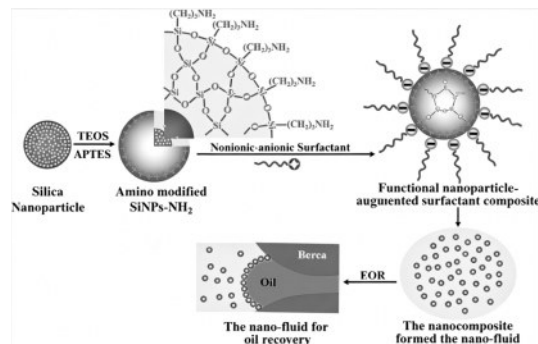


图 14 氨基改性二氧化硅纳米粒子-延展型表面活性剂复合驱油体系的制备及提高采收率机理^[74]

Fig.14 Preparation of amino modified silica nanoparticles-extended surfactant composite flooding system and its enhanced oil recovery mechanism^[74]

4.3.2 无碱驱油体系 传统 ASP 驱依靠碱剂和原油酸性组分进行原位皂化, 以此来降低 IFT 并抑制表面活性剂吸附损耗^[75]。然而, 在高矿化度、高硬度、碳酸盐岩等条件苛刻的油藏中, 强碱容易与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 产生碳酸盐或者氢氧化物沉淀, 进而造成地层伤害, 与此同时还会引发阴离子表面活性剂络合失活、采出液过度乳化, 显著加大了地面处理负荷^[76, 77]。因此, 以 E-表面活性剂为核心的无碱或低碱配方设计, 成为拓展化学驱适用边界的重要方向。

引入中间极性嵌段为在无碱条件下维持界面活性给予了关键的结构支撑。韩晓瑜等人^[78]针对高矿化度油藏, 系统评价了含 PPO 链段的 E-阴离子表面活性剂脂肪醇聚氧丙烯醚硫酸盐的复配性能。该无碱体系已在大庆油田某区块的三元复合驱中实现现场应用(图 15), 在无碱条件下, PPO 链段扩展了表面活性剂分子的空间构象, 增强了其在油水两相中的穿插能力、界面排列密度。该体系只要外加 1.5% 的 NaCl 就能实现 10^{-3} mN/m 的超低 IFT, 并且在后续采出液处理过程中展现出比传统强碱模式更好的原油脱水效果。Molinier 等人^[79]以 0.75 wt% 直链烷基聚氧丙烯聚氧乙醚醚硫酸钠作为主要表面活性剂, 将其与非离子共表面活性剂进行复配, 进而展开无碱驱油方面的研究。相关结果显示, 高剂量的亲水性助表面活性剂能够抑制模式因缺少碱皂化作用而形成的液晶胶相, 促使模式在最优盐度处于 53–60 g/L 的情况下呈现出典型的 Winsor I–III–II 相态转变, 此时 IFT 降低至 2.0×10^{-4}

mN/m。此方案在砂岩、石灰岩岩心中均达成了1%-5%的极低残余油饱和度,而且在现场应用的时候能够避免因碱消耗而必须软化注入水这一复杂工序。韩旭等人^[80]经研究发现,无碱条件下通过精准调控盐度可替代碱的离子强度效应。当NaCl的含盐量达到1.70%时,就能够和原油形成稳定的中相微乳液,这种微乳液不但具备良好的水溶性,而且IFT超低。岩心驱油实验显示,相较于水驱而言,其采收率提高44.6%,证实了无碱配方在提高洗油效率方面的有效性。Levitt等人^[81]在对西德克萨斯原油展开研究的时候发现,仅仅依靠支化醇丙氧基磺酸盐E-表面活性剂与聚合物进行复配,就能够在模拟地层水中实现超低IFT,并且无需添加碱。该无碱模式不但避免了碱对地层造成伤害,降低了表面活性剂的吸附滞留量,简化了地面工艺流程,是未来化学驱发展的重要方向。

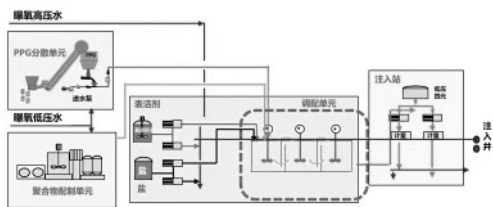


图15 大庆油田某区块无碱三元复合驱注入流程图^[78]

Fig.15 Injection process diagram of alkali-free ternary composite flooding in a certain block of Daqing Oilfield^[78]

可以看出,纳米复合模式提高采收率的方式主要是减少表面活性剂在岩石表面的吸附,同时调节微乳液的相态。而无碱模式借助PPO-PEO的分子结构,在不加碱的情况下,通过盐类协同作用,在保护地层结构之时实现超低界面张力。将E-表面活性剂进行合理复配或者优化配方,它就能适应复杂油藏条件,其实验与现场验证都表明了其具有工业应用价值。

5 总结与展望

E-表面活性剂凭借其特殊分子特性依靠亲水和亲油双重界面调控能力在降低油水界面张力和改善驱替效率方面有良好表现。本文就E-表面活性剂在化学驱提高采收率领域研究进展进行综述重点探讨它的分子建立界面行为复配协同及在苛刻油藏环境下的应用适配性。E-表面活性剂在疏水尾链和亲水头基间引入由PPO和PEO构成的中

等极性间隔基改变传统表面活性剂刚性连接模式。其中PPO链段使分子疏水性增强,深入油相,降低CMC并提高耐盐性,PEO链段强化水化层提高耐温性。通过精确调控PPO-PEO链段序列结构能实现对HLB值的连续调节进而协同优化耐温耐盐超低界面张力等关键性能。然而,单一的E-表面活性剂在复杂油藏中依旧面临着挑战。建立复配体系能够产生协同增效作用。阴-非离子复配可以降低CMC,增加界面膜的厚度、致密性,抑制色谱分离现象。阴-阳离子复配借助静电吸引促使分子紧密堆积,更易于达成超低IFT。与疏水缔合聚合物的协同作用能够在无碱的条件下同时提高模式的增黏能力、乳化稳定性,为无碱驱油提供技术方面的支持。

尽管E-表面活性剂已有了卓越进展,但为满足当前国家经济发展需求,仍需进行深入探索:

(1)当前E-表面活性剂的结构设计仍以经验试错为主导。未来需融合分子动力学模拟与人工智能技术,从分子尺度深入阐明各链段在界面的动态构象演化、水化层结构特征及其与原油组分的作用机理。借助结构-性能预测模型,达成特定油藏条件下E-表面活性剂分子结构的定向设计,大幅缩短研发周期。

(2)深入研究E-表面活性剂与其他驱油剂(如聚合物、碱、纳米材料等)的复配机理与协同性能,构建更高效率的复合驱油体系,以适应更复杂的油藏环境。

(3)未来的研究要建立合成成本-驱油效率-环境降解性的全生命周期评价模式。着重开发低成本的合成工艺,全面评价其在地下高温高盐环境里的长期稳定性、采出液的环境行为,保证技术在提高经济效益的同时兼顾生态安全,推动E-表面活性剂在油田领域的可持续发展。

参考文献

- [1] Lazar I, Petrisor I G, Yen T F. Microbial enhanced oil recovery (MEOR) [J]. Petroleum Science and Technology, 2007, 25(11): 1353-1366.
- [2] 胡汝开. 三次采油技术的研究现状及其发展趋势[J]. 化学工程与装备, 2021, (8): 229-230.
Hu R K. Research status and development trend of tertiary oil recovery technology[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021, (8): 229-230.
- [3] Bera A, Mandal A. Microemulsions: a novel approach to enhanced oil recovery: a review[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2015, 5(3): 255-268.

- [4] Wassmuth F R, Green K, Arnold W, et al. Polymer flood application to improve heavy oil recovery at east bodo[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, **48**(2): 55–61.
- [5] Sedaghat M, Ahadi A, Kordnejad M, et al. Aspects of alkaline flooding: oil recovery improvement and displacement mechanisms [J]. Middle East Journal of Scientific Research, 2013, **18**(2): 258–263.
- [6] Sheng J J. Critical review of alkaline–polymer flooding[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2017, **7**(1): 147–153.
- [7] Sheng J J. Status of surfactant EOR technology[J]. Petroleum, 2015, **1**(2): 97–105.
- [8] Demirbas A, Alsulami H E, Hassanein W S. Utilization of surfactant flooding processes for enhanced oil recovery (EOR)[J]. Petroleum Science and Technology, 2015, **33**(12): 1331–1339.
- [9] 张思瑶. 三次采油技术现状与其发展方向研究[J]. 化学工程与装备, 2018, (9): 278–279.
- Zhang S Y. Research on the present situation and development direction of tertiary oil recovery technology[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2018, (9): 278–279.
- [10] 许建国. 温度对延展型表面活性剂界面张力的影响[J]. 天津工业大学学报, 2021, **40**(5): 49–54.
- Xu J G. Effect of temperature on interfacial tensions of extended surfactants[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2021, **40**(5): 49–54.
- [11] 荆波, 田玉芹, 胡秋平, 等. 延展型表面活性剂与原油活性组分相互作用对界面张力的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2020, **42**(7): 55–59, 108.
- Jing B, Tian Y Q, Hu Q P, et al. Effect of the interactions between extended surfactants and crude oil fractions on interfacial tensions [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2020, **42**(7): 55–59, 108.
- [12] Gale W W, Puerto M C, Ashcraft T L, et al. Propoxylated ethoxylated surfactants and method of recovering oil therewith: US4293428[P]. 1981–10–06.
- [13] Miñana-Perez M, Gracia A, Lachaise J, et al. Solubilization of polar oils with extended surfactants[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1995, **100**: 217–224.
- [14] Salager J L, Forgiarini A, Marquez R. Extended surfactants including an alkoxyated central part intermediate producing a gradual polarity transition—a review of the properties used in applications such as enhanced oil recovery and polar oil solubilization in microemulsions[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2019, **22**(5): 935–972.
- [15] 唐艳丽. 阴—非离子表面活性剂的合成及驱油性能评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- Tang Y L. Synthesis of anionic–nonionic surfactants and evaluation of oil displacement performance[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [16] 金光勇, 何志强, 方云, 等. Extended表面活性剂的合成与性能[J]. 石油化工, 2013, **42**(3): 253–259.
- Jin G Y, He Z Q, Fang Y, et al. Synthesis and properties of extended surfactants[J]. Petrochemical Technology, 2013, **42**(3): 253–259.
- [17] Du Y C, Zhang Q, Zhu Y Y, et al. Adsorption of extended surfactants at the water–PTFE interface: The effect of PO number [J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, **348**: 118465.
- [18] 冯鹏. 延展型表面活性剂中聚醚联接基的构效关系[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- Feng P. Structure–activity relationship of polyether linking group in extended surfactants[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [19] He H J, Xiao H Y, Zhou Z H, et al. Effect of oxyethylene and oxypropylene groups on the interfacial structure and property of extended surfactants: Molecular simulation and experimental study [J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, **382**: 121944.
- [20] 胡学一, 韩璐璐, 方云, 等. 氧化铝–延展型表面活性剂的吸附胶束及其吸附增溶[J]. 高等学校化学学报, 2021, **42**(3): 843–849.
- Hu X Y, Han L L, Fang Y, et al. Admicelles and adsolubilization of extended surfactants on alumina[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2021, **42**(3): 843–849.
- [21] 任晓丹, 王万绪, 杨效益, 等. 短支链型 Extended 表面活性剂的合成及性能研究[J]. 日用化学品科学, 2016, **39**(12): 18–23, 44.
- Ren X D, Wang W X, Yang X Y, et al. Synthesis and properties of a branched short–alkyl extended surfactant[J]. Detergent & Cosmetics, 2016, **39**(12): 18–23, 44.
- [22] Zhang Y, Wang Y L, Bai B J, et al. Study on the synthesis and performance of alkyl fatty alcohol ether sulfonate with three short branch chains[J]. Journal of Molecular Structure, 2025, **1348**: 143357.
- [23] 武华萍, 孙永强, 康保安. 非离子表面活性剂的结构与性能的关系[J]. 日用化学品科学, 2012, **35**(6): 17–21.
- Wu H P, Sun Y Q, Kang B A. Relationship between the structure and performance of non–ionic surfactant[J]. Detergent & Cosmetics, 2012, **35**(6): 17–21.
- [24] 陈骥. 烷基硫酸钠延展型表面活性剂的构效关系研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- Chen J. Study on structure–activity relationship of sodium alkyl sulfate extended surfactants[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [25] 金光勇, 何志强, 方云, 等. 新型伸展型表面活性剂辛基聚氧丙烯(9)聚氧乙烯(6)硫酸酯钠/磺酸钠的合成及其性能[J]. 石油化工, 2014, **43**(3): 310–315.
- Jin G Y, He Z Q, Fang Y, et al. Synthesis and performances of novel octyl propoxyl(9) ethoxyl(6) sulfate/sulfonate extended surfactant[J]. Petrochemical Technology, 2014, **43**(3): 310–315.
- [26] 罗佳莹, 罗芳草, 袁浩恩, 等. 十二烷基酚嵌段醚丙基磺酸钠的溶液性能[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2025, **40**(3): 115–121.
- Luo J Y, Luo F C, Yuan H E, et al. Solution properties of sodium dodecylbenzene polypropylene–polyoxyethylene ether propyl sulfonate[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2025, **40**(3): 115–121.
- [27] 朱英. 羧酸盐型 extended 表面活性剂的合成及性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- Zhu Y. Synthesis and properties of carboxylate–type extended surfactants[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [28] 方良辉. 延展型磷酸酯表面活性剂的合成和性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- Fang G H. Synthesis and properties of extended phosphate surfactants[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [29] Duan Y W, Li Y P, Chen B R, et al. Preparation and performance evaluation of a novel temperature–resistant anionic/nonionic surfactant[J]. Scientific Reports, 2024, **14**(1): 5710.
- [30] 李猛, 雷小英, 胡学一, 等. 磷酸酯型 extended 表面活性剂的性

- 能研究[J]. 中国洗涤用品工业, 2022, (5): 59–65.
- Li M, Lei X Y, Hu X Y, et al. Performance investigation of phosphate extended surfactants[J]. China Cleaning Industry, 2022, (5): 59–65.
- [31] He W D, Ge J J, Zhang G C, et al. Effects of extended surfactant structure on the interfacial tension and optimal salinity of dilute solutions[J]. ACS Omega, 2019, 4(7): 12410–12417.
- [32] Zhang Q, Zhong J Y, Deng Y, et al. Artificial intelligence-driven prediction of novel extended surfactants for ultra-low oil-water interfacial tension[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2026, 742: 140438.
- [33] 闫飞, 马骋, 徐志成, 等. 延展型阴离子表面活性剂泡沫性能研究[J]. 日用化学工业(中英文), 2025, 55(4): 415–421.
- Yan F, Ma C, Xu Z C, et al. Study on the foam properties of extended anionic surfactants[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2025, 55(4): 415–421.
- [34] Liu X C, Zhao Y X, Li Q X, et al. Surface tension, interfacial tension and emulsification of sodium dodecyl sulfate extended surfactant[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 494: 201–208.
- [35] He Z Q, Zhang M J, Fang Y, et al. Extended surfactants: a well-designed spacer to improve interfacial performance through a gradual polarity transition[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014, 450: 83–92.
- [36] 万伟康, 曹圣悌, 霍月青, 等. 脂肪醇聚氧丙烯聚氧乙烯醚硫酸盐性能研究[J]. 应用化工, 2022, 51(S2): 155–158.
- Wan W K, Cao S T, Huo Y Q, et al. Study on the properties of fatty alcohol polyoxypropylene polyoxyethylene ether sulfate[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(S2): 155–158.
- [37] 黄志学, 王业飞, 白世勋, 等. 三次采油用延展型表面活性剂的研究进展[J]. 石油化工, 2026, 55(6): 960–969.
- Huang Z X, Wang Y F, Bai S X, et al. Research progress of extended surfactants for tertiary oil recovery[J]. Petrochemical Technology, 2026, 55(6): 960–969.
- [38] Withayapanyanon A, Acosta E J, Harwell J H, et al. Formulation of ultralow interfacial tension systems using extended surfactants[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2006, 9(4): 331–339.
- [39] Chen J, Hu X Y, Fang Y, et al. What dominates the interfacial properties of extended surfactants: Amphipathicity or surfactant shape[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 547: 190–198.
- [40] Sun Q, Cao X L, Yuan F Q, et al. Dilational rheology of extended surfactants at the air/water and oil/water interfaces: effect of propylene oxide group numbers[J]. Langmuir, 2023, 39(37): 13008–13018.
- [41] He H J, Xiao H Y, Cao X L, et al. A helical shape of polyoxypropylene chain for extended surfactant molecule at the water/oil interface: Theoretical and experimental study[J]. Fuel, 2022, 312: 122835.
- [42] Liu M X, Zhu Y W, Xiao H Y, et al. Molecular dynamics simulation of short hydrophobic chain extended surfactants: Effects of PO and EO groups[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 718: 136930.
- [43] 陈骥, 胡学一, 方云. 聚氧丙烯链对 Extended 表面活性剂界面性质的影响[J]. 石油化工, 2019, 48(5): 472–477.
- Chen J, Hu X Y, Fang Y. Contribution of polypropylene oxide spacer on interfacial properties of extended surfactants[J]. Petrochemical Technology, 2019, 48(5): 472–477.
- [44] Ren J, Xiao H Y, Cao X L, et al. Molecular dynamics simulation study on interfacial behaviors of betaines and extended surfactants[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 666: 131323.
- [45] 代轩瑞, 贾新磊, 王霖, 等. 老化油聚醚破乳剂的制备与性能评价[J]. 天然气与石油, 2021, 39(3): 50–55.
- Dai X R, Jia X L, Wang J, et al. Synthesis and performance evaluation of polyether demulsifier on aged oil[J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(3): 50–55.
- [46] Wang C G, Pan Y, Xu Z C, et al. Ultralow interfacial tension achieved by extended anionic surfactants with a short hydrophobic chain[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 400: 124514.
- [47] Phaodee P, Attaphong C, Sabatini D A. Cold water detergency of triacylglycerol semisolid soils: the effect of salinity, alcohol type, and surfactant systems[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2019, 22(5): 1175–1187.
- [48] Sugahara T, Ichihashi H, Tsumura K, et al. Aggregation characteristics of biobased anionic surfactant, hydroxy alkane sulfonate in aqueous CaCl₂ solutions: vesicle and supported bilayer formation[J]. Langmuir, 2024, 40(41): 21719–21727.
- [49] 张美军. 烷基酚聚氧丙烯醚硫酸(磺酸钠)的合成与性能[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- Zhang M J. Synthesis and properties of sodium alkylphenol polyoxypropylene ether sulfate/sulfonate[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [50] 康万利, 徐典平, 谭俊领, 等. 脂肪醇聚氧乙烯聚氧丙烯醚羧酸盐的合成与界面张力[J]. 石油与天然气化工, 2006, 35(4): 304–306.
- Kang W L, Xu D P, Tan J L, et al. Preparation and interfacial tension of polyoxyethylene polyoxypropylene ether carboxylate of fatty alcohol[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2006, 35(4): 304–306.
- [51] Zhang Y X, Jin H Q, Zhao H J, et al. A novel gemini extended surfactant for enhanced oil recovery in high-temperature high-salinity reservoirs[J]. Chemical Engineering Journal, 2026, 535: 175741.
- [52] Yu L T, Gao S M, Ding W, et al. Mechanism analysis and property prediction of extended surfactants based on the respectively optimized force field[J]. Langmuir, 2023, 39(42): 14859–14868.
- [53] 孙建峰, 郭东红, 崔晓东, 等. 脂肪醇聚氧乙烯醚磺酸盐的合成与性能评价[J]. 精细石油化工, 2018, 35(1): 56–60.
- Sun J F, Guo D H, Cui X D, et al. Synthesis and properties of aliphatic alcohol polyoxyethylene ethers sulfonate[J]. Speciality Petrochemicals, 2018, 35(1): 56–60.
- [54] Baek K H, Argüelles-Vivas F J, Abeykoon G A, et al. Low-tension polymer flooding using a short-hydrophobe surfactant for heavy oil recovery[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(12): 15936–15948.
- [55] Lu J, Liyanage P J, Solairaj S, et al. New surfactant developments for chemical enhanced oil recovery[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 120: 94–101.
- [56] Kayali I, Qamhi K, Olsson U. Formulating middle phase microemulsions using extended anionic surfactant combined with cationic hydrotrope[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2010, 32(1): 41–46.
- [57] Zhang Q, Han L, Luan H X, et al. Synergism for lowering

- interfacial tensions between betaines and extended surfactants: The role of self-regulating molecular size[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, **378**: 121605.
- [58] Zhang G Q, Zheng Y C, Mu J, et al. Interactions and oil recovery performance of a prepared extended amphoteric surfactant combining with a nonionic surfactant under high salinity condition[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, **414**: 126077.
- [59] Panswad D, Sabatini D A, Khaodhiar S. Precipitation and micellar properties of novel mixed anionic extended surfactants and a cationic surfactant[J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2011, **14**(4): 577–583.
- [60] 周朝辉, 张晓杰, 张群, 等. 基于超浸润现象的高效提高原油采收率方法[J]. *石油勘探与开发*, 2025, **52**(5): 1154–1165.
- Zhou Z H, Zhang X J, Zhang Q, et al. New high-efficiency system for improving oil recovery based on the superwetting phenomenon[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, **52**(5): 1154–1165.
- [61] 徐辉. 微胶囊乳液型聚合物对延展型表面活性剂界面张力的影响[J]. *日用化学工业(中英文)*, 2025, **55**(4): 407–414.
- Xu H. Effects of microcapsulated emulsion polymer on the interfacial tension of extended surfactants[J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2025, **55**(4): 407–414.
- [62] 石静, 张磊, 陈兴锋, 等. 基于延展型表面活性剂的化学驱体系驱油机理研究[J]. *日用化学工业(中英文)*, 2025, **55**(12): 1501–1508.
- Shi J, Zhang L, Chen X F, et al. Study on oil displacement mechanism of chemical flooding based on extended surfactant[J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2025, **55**(12): 1501–1508.
- [63] 程杰成, 吴军政, 吴昊, 等. 无碱三元乳化驱油体系[J]. *石油学报*, 2023, **44**(4): 636–646.
- Cheng J C, Wu J Z, Wu H, et al. Alkali-free three-component emulsification flooding system[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, **44**(4): 636–646.
- [64] 沈之芹, 李应成, 沙鸥, 等. 高活性阴离子-非离子双离子表面活性剂合成及性能[J]. *精细石油化工进展*, 2011, **12**(9): 25–29.
- Shen Z Q, Li Y C, Sha O, et al. Synthesis and properties of nonionic-anionic gemini surfactants with high activity[J]. *Advances in Fine Petrochemicals*, 2011, **12**(9): 25–29.
- [65] Wang S S, Chen C L, Yuan N, et al. Design of extended surfactant-only EOR formulations for an ultrahigh salinity oil field by using hydrophilic lipophilic deviation (HLD) approach: From laboratory screening to simulation[J]. *Fuel*, 2019, **254**: 115698.
- [66] Wang Z S, Zhou Z H, Han L, et al. The mechanism for lowering interfacial tension by extended surfactant containing ethylene oxide and propylene oxide groups[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, **359**: 119364.
- [67] 殷代印, 仲玉仓. 阴非离子型 Gemini 表面活性剂驱油体系性能评价[J]. *应用化工*, 2018, **47**(7): 1556–1558.
- Yin D Y, Zhong Y C. Properties of an anionic-nonionic Gemini surfactant flooding system[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, **47**(7): 1556–1558.
- [68] Wu Y, Iglauer S, Shuler P, et al. Branched alkyl alcohol propoxylated sulfate surfactants for improved oil recovery[J]. *Tenside Surfactants Detergents*, 2010, **47**(3): 152–161.
- [69] Malik I A, Al-Mubaiyeh U A, Sultan A S, et al. Rheological and thermal properties of novel surfactant-polymer systems for EOR applications[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2016, **94**(9): 1693–1699.
- [70] Baek K, Argüelles-Vivas F J, Abeykoon G A, et al. Application of ultrashort hydrophobe surfactants with cosolvent characters for heavy oil recovery[J]. *Energy & Fuels*, 2019, **33**(9): 8241–8249.
- [71] Liang X, Li Y, Bai J, et al. Feasibility evaluation of novel anionic-nonionic gemini surfactants for surfactant-enhanced aquifer remediation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, **393**: 136338.
- [72] Paternina C A, Quintero H, Mercado R. Improving the interfacial performance and the adsorption inhibition of an extended-surfactant mixture for enhanced oil recovery using different hydrophobicity nanoparticles[J]. *Fuel*, 2023, **350**: 128760.
- [73] Rattanaudom P, Alimin A A, Ben Shiau B J, et al. Experimental investigation of hydrophobic and hydrophilic silica nanoparticles on extended surfactant properties: Micro-emulsion, viscosity, and adsorption behaviors[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, **223**: 211582.
- [74] Zhou Y X, Wu X, Zhong X, et al. Surfactant-augmented functional silica nanoparticle based nanofluid for enhanced oil recovery at high temperature and salinity[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, **11**(49): 45763–45775.
- [75] 王琦. 三元复合驱采油技术在石油开采中的应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2025, **45**(16): 164–166.
- Wang Q. Application of ASP flooding oil recovery technology in oil exploitation[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2025, **45**(16): 164–166.
- [76] 刘煜, 安俊睿. 弱碱三元复合驱采出液特性及处理技术研究[J]. *当代化工*, 2020, **49**(5): 782–785.
- Liu Y, An J R. Study on characteristics and treatment technology of produced fluid of weak alkali ASP flooding[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, **49**(5): 782–785.
- [77] 彭占刚. 油田中三元复合驱油井结垢机理与防垢技术研究[J]. *化学工程与装备*, 2024, (5): 50–52.
- Peng Z G. Study on scaling mechanism and anti-scaling technology of ASP flooding wells in oilfield[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2024, (5): 50–52.
- [78] 韩晓瑜. NaCl 无碱三元复合驱采出液稳定性机理及采出液处理研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2025.
- Han X Y. Study on the stability mechanism and treatment of produced fluid from NaCl-based alkali-free three-component composite flooding[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2025.
- [79] Molinier V, Klimenko A, Passade-Boupat N, et al. Insights into the intimate link between the surfactant/oil/water phase behavior and the successful design of (alkali) - surfactant - polymer floods[J]. *Energy & Fuels*, 2021, **35**(24): 20046–20059.
- [80] 韩旭, 王正茂, 姜国庆, 等. 无碱中相复合驱体系实验[J]. *石油学报*, 2023, **44**(7): 1140–1150.
- Han X, Wang Z M, Jiang G Q, et al. Experiment of alkali-free composite oil displacement system with middle-phase microemulsion[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, **44**(7): 1140–1150.
- [81] Levitt D B, Jackson A C, Heinson C, et al. Identification and evaluation of high-performance EOR surfactants [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2009, **12**(2): 243–253.