DOI:10.3969/j.issn.1671-024x.2026.04.004

内烯烃磺酸盐和甜菜碱降低界面张力的协同效应

严 峰[1],岳如山[2],楚艳苹[3],徐清华[3],张 磊[4],张 路[4]
(1.天津工业大学 化学学院,天津 300387;2.天津工业大学 化学工程与技术学院,天津 300387;3.大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院,黑龙江 大庆 163712;4.中国科学院 理化技术研究所,北京 100190)

摘 要: 为阐明疏水链长对内烯烃磺酸盐(IOS)界面活性的作用规律及其与甜菜碱的协同作用机制,利用旋转滴界面张力仪测试了具有不同疏水链长的IOS溶液与正构烷烃的界面张力,考察了不同疏水链长IOS表面活性剂与二十二烷基磺基甜菜碱(SB22)降低油水界面张力的协同性能。结果表明:长疏水链的IOS22可以与癸烷达成亲水亲油平衡,有着更高的界面活性,可将癸烷-水界面张力降至0.074 mN/m;不同疏水链长度的IOS因静电吸引都能与SB22产生协同效应,协同作用强弱受到"链长匹配"性的影响;然而,单疏水链的AOS18因与SB22空位匹配性差,不能产生明显的协同作用;在最佳混合质量比为4∶6、十二烷为油相的条件下,IOS22和SB22的二元体系可将油水界面张力降至0.005 3 mN/m。

关键词: 内烯烃磺酸盐;甜菜碱;界面张力(IFT);混合吸附;链长匹配
中图分类号: TQ423.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2026)04-0026-07

Synergistic effect of internal olefin sulfonates and betaines on reducing interfacial tension

Yan Feng[1], Yue Rushan[2], Chu Yanping[3], Xu Qinghua[3], Zhang Lei[4], Zhang Lu[4]
(1. School of Chemistry, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, Tiangong University, Tianjin 300072, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oil Field Company Limited, Daqing 163712, Heilongjiang Province, China; 4. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To clarify the effect of hydrophobic chain length on the interfacial activity of internal olefin sulfonates (IOS) and their synergistic mechanism with betaine, the interfacial tension (IFT) between IOS solution with different hydrophobic chain lengths and *n*-alkanes was tested by a rotating drop interfacial tensiometer. The synergistic performance of IOS surfactants with different hydrophobic chain lengths and betaine SB22 for reducing oil-water IFT was investigated. The results show that IOS22 with a long hydrophobic chain can achieve hydrophilic-lipophilic balance (HLB)with decane, and has higher interfacial activity, which will reduce the decane-water IFT to 0.074 mN/m. IOS with different hydrophobic chain lengths can produce synergistic effect with SB22 due to electrostatic attraction, and the strength of synergistic effect is affected by "chain length matching". However, AOS18 with a single hydrophobic chain cannot produce obvious synergistic effect due to its poor vacancy matching with SB22. Under the optimal mass mixing ratio of 4∶6 with dodecane as the oil phase, the binary system of IOS22 and SB22 can reduce the oil-water IFT to 0.005 3 mN/m.

Key words: internal olefin sulfonate; betaine; interfacial tension(IFT); mixed adsorption; chain length matching

原油不仅在世界能源资源中有着举足轻重的地位,还是诸多化工生产中原料的来源之一[1]。原油的开采经历了一次采油、二次采油和三次采油阶段。经过一次采油和二次采油后,仍有近六成的原油因受毛细管阻力而滞留在油藏中[2],如何提高三次采油的开采效率成为当前研究的热点。提高剩余油采收率的方法

收稿日期: 2025-03-14
基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFA0708700)
通信作者: 严 峰(1980—),男,博士,教授,主要研究方向为胶体与界面化学。E-mail:yanfeng@tiongong.edu.cn

主要有：化学驱[3]、气体驱[4]、微生物驱[5]和热采[6]等。其中，化学驱是目前提高采收率的主要手段[7]，其核心是注入适宜的表面活性剂溶液，以大幅降低原油与水驱之间的界面张力（interfacial tension，IFT），从而减小毛细管阻力。一般而言，要驱动剩余油，原油与水之间的界面张力必须达到超低水平（$<10^{-2}$ mN/m）[8]。近几十年的研究表明，降低油水界面张力的表面活性剂种类较多，主要包括阴离子型（如石油磺酸盐、α–烯烃磺酸盐、烷基苯磺酸盐）、非离子型（如聚氧乙烯醚类、烷基酚聚氧乙烯醚）、两性离子型（如甜菜碱类）以及生物表面活性剂（如鼠李糖脂、槐糖脂）等。其中，阴离子表面活性剂因成本效益和界面活性优势，在油田化学领域应用最为广泛。近年来，随着高温高盐油藏开发需求的增加，兼具耐温抗盐性能与超低界面张力特性的新型表面活性剂成为研究热点。

内烯烃磺酸盐（internal olefin sulfonate，IOS）作为新兴的阴离子表面活性剂备受关注。其分子结构中磺酸基团位于碳链内部，相较于传统端位磺化的 α–烯烃磺酸盐，具有较大碳数或较长烷基尾的 IOS 表面活性剂在降低界面张力方面更有效[9]。张如青等[10]研究了烯烃磺酸盐表面活性剂的合成工艺及其物化性质，发现 IOS 具有较低的临界胶束浓度、优良的增溶能力、钙皂分散力和较强的表界面活性，同时也具有良好的生物降解性。然而作为磺酸盐类阴离子表面活性剂，其抗高盐能力不足，研究人员开始关注 IOS 的复配体系，以克服其不耐高盐的缺点。烷基磺基甜菜碱是一种具有良好的耐盐性和界面活性的两性离子表面活性剂，并且因其亲水基团和疏水基团尺寸匹配存在缺陷[11]，使其在与阴离子表面活性剂复配时，通常能产生降低界面张力的协同作用。Chen 等[12]发现两性离子表面活性剂（十二烷基甜菜碱）和阴离子表面活性剂（内烯烃磺酸盐–IOS）的混合体系在 4%~6%的矿化度（质量分数）和 100 ℃下能稳定地存在于水溶液中，且对原油和甲苯混合的模拟轻质原油具有超低的油水界面张力。Shi 等[13]以内烯烃和 SO_3 为原料，通过磺化反应合成了十六烷基内烯烃磺酸盐，发现其与十八烷基羟基磺基甜菜碱复配时产生协同效应，对大港原油的界面张力降至超低水平，对比水驱采收率提高 15.15%。然而，现有关于内烯烃磺酸盐研究多聚焦于单一结构表面活性剂的性能优化，对复配体系中疏水链长、分子构型及配比等关键参数的协同机制仍缺乏系统性研究。此外，目前研究主要以原油为油相，原油中具有复杂活性组分，不利于探究表面活性剂的构效关系。

针对上述问题，本研究以不同疏水链长的内烯烃磺酸盐（IOS14、IOS16、IOS18、IOS22）和甜菜碱（SB22）为研究对象，测试了不同疏水链长度的内烯烃磺酸盐的界面活性，及其与烷基甜菜碱（SB22）混合体系对正构烷烃界面张力的影响，系统探讨疏水链长度对 IOS 界面活性的作用规律和其与甜菜碱的协同作用机制，为 IOS 的超低界面张力体系的构建提供理论依据。

1　实验部分

1.1　试剂与仪器

表面活性剂：不同烷基链长的内烯烃磺酸钠（疏水链碳数为 14、16、18、22，简称 IOS14、IOS16、IOS18、IOS22）、α–烯烃磺酸钠（疏水链碳数 18，简称 AOS18）、烷基磺基甜菜碱（疏水链碳数为 22，简称 SB22），均由中国科学院理化技术研究所提供，活性物的质量分数大于 95%。上述表面活性剂的结构如图 1 所示。

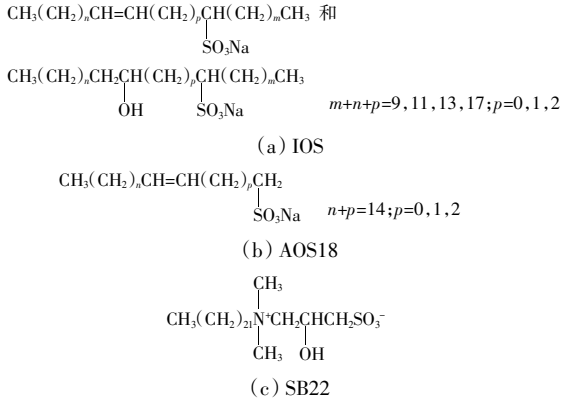


图 1　内烯烃磺酸盐、α–烯烃磺酸盐和甜菜碱结构

Fig.1　Structures of internal olefin sulfonate，α–olefin sulfonate，and betaine

由图 1 可见，内烯烃磺酸盐由内烯烃经磺化、中和、水解三步反应得到，在磺化过程中会产生烯烃磺酸及副产物磺内酯和硫酸羰基酯。烯烃磺酸中和水解后生成内烯烃磺酸盐；而磺内酯和硫酸羰基酯中和水解后会生成烷基羟基磺酸盐和内烯烃磺酸盐[14]。因此，内烯烃磺酸盐的活性组分有 2 种。

其他试剂：NaCl，分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；C_6–C_{14} 的正构烷烃，分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；超纯水，自制，电导率为 18.2 MΩ/cm。

实验仪器：CNGTX701 型旋转滴界面张力仪，北京盛维基业科技有限公司。

1.2　界面张力测量

本文 IFT 数据均采用 CNGTX701 型界面张力仪通过旋转滴法测量获得，测量原理参考文献[11，15]，

测量时转速设置为 5 000 r/min。本文模拟广利油田莱 1 西油藏，该油藏水质条件为总矿化度 45 g/L 的$CaCl_2$水型，温度为 85 ℃。本文采用质量分数为 4.5%的 NaCl 水溶液模拟水相矿化度。当 IFT 值低于 1 mN/m 时，IFT 值的测量误差低于±5%。

1.2.1　IOS 链长对界面张力的影响

将不同疏水链长度的内烯烃磺酸盐（IOS14、IOS16、IOS18、IOS22）用质量分数 4.5%的 NaCl 配制成质量分数为 0.3%的单一表面活性剂溶液；将 IOS 与 SB22 按质量比 1∶1、总质量分数为 0.3%的混合表面活性剂溶液，用质量分数为 4.5%的 NaCl 水相配制得到复配表面活性剂溶液。测试上述表面活性剂溶液与正癸烷的界面张力。

1.2.2　IOS22 浓度及与 SB22 混合对界面张力的影响

以质量分数 4.5%的 NaCl 盐水为水相，将 IOS22 配制成质量分数为 0.001%~0.500%的水溶液，用正癸烷作为油相，测试 IOS22 浓度对油水界面张力的影响。同样地，保持总表面活性剂质量分数为 0.3%，将 IOS22 与 SB22 按不同质量比（0∶10~10∶0）配制表面活性剂混合溶液，用正癸烷作油相，测试 IOS22 与 SB22 质量比对油水界面张力的影响。

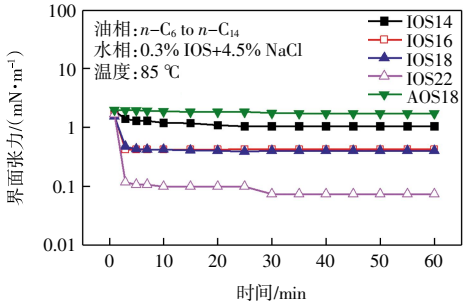
1.2.3　IOS22 亲水亲油平衡测量

用 4.5%的 NaCl 溶液配制质量分数为 0.3%的 IOS22 单一表面活性剂溶液，然后测试其与一系列正构烷烃（C_6–C_{14}）的界面张力，将稳态界面张力作为油相碳数的函数绘图，以确定 IOS22 的亲水亲油平衡（HLB）。

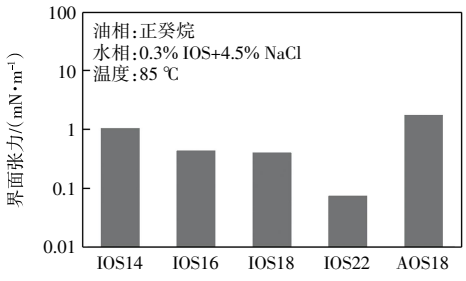
2　结果与讨论

2.1　IOS 疏水链长对界面张力的影响

表面活性剂疏水链长度的改变往往可以影响其在油相和水相中的分配比，进而影响表面活性剂在界面上的浓度。对于相同亲水基团的表面活性剂，疏水链的变化对其界面活性有着不可忽视的影响。为此，本文首先研究了不同疏水链长度的内烯烃磺酸盐（表面活性剂质量分数均为 0.3%）对油水界面张力的影响，结果如图 2 所示。由图 2（a）可看出，IOS 与癸烷的动态界面张力曲线为常见的“L”型曲线[16]。初始阶段因浓度梯度，表面活性剂快速从体相向界面处扩散并吸附，界面张力快速降低。随着界面处表面活性剂浓度升高，界面处表面活性剂向体相扩散速率逐渐加快，界面张力降低速度减缓，并最终实现界面吸附与脱附的动态平衡，此时界面张力保持稳定。由图2（b）不同疏水链长的内烯烃磺酸盐与正癸烷的稳态界面张力值可以看出，随着疏水链长的增加，IOS 与癸烷的稳态界面张力降低 2 个数量级达到 0.01 mN/m 数量级。IOS22 的界面活性最高，可将癸烷–水的界面张力降低至 0.074 mN/m。这是因为在 IOS 分子结构中磺酸根离子提供了较强的亲水性，而较短的疏水链（如 IOS14）不能提供足够的亲油性，因此短疏水链的 IOS 与正癸烷难以达成亲水亲油平衡（HLB）。而随着疏水链长的增加，IOS 的油溶性增加，使得 IOS 与正癸烷更加接近 HLB，因此油水界面张力下降。



（a）IOS/AOS 的动态界面张力



（b）IOS/AOS 的稳态界面张力

图 2　疏水链长对 IOS 界面张力影响

Fig.2　Effect of hydrophobic chain length on IFT of IOS

此外，图 2 还给出了相同浓度单疏水链的 α–烯烃磺酸盐 AOS18 与癸烷的界面张力。由图 2 可看出，AOS18 的界面张力稳态值为 1.73 mN/m，高于疏水链碳数同为 18 的 IOS18（0.40 mN/m）。这是因为支链结构可以在油水界面处提供比直链更大的空间占位。具有支链疏水基团的 IOS18 的亲水基团和疏水基团的尺寸相容性更好，IOS 分子在油水界面处排列较 AOS18 分子更紧密，降低界面张力的能力更强。Jia 等[9]通过分子动力学模拟也证实了这一点。

2.2　IOS22 浓度对界面张力的影响

IOS22 浓度对油（正癸烷）–水稳态界面张力的影响结果如图 3 所示。由图 3 可知，IOS22 的稳态界面张力随浓度增加而下降，界面张力从 10 mN/m 数量级下降

至 10^{-2} mN/m 数量级。由图 3 还可以看出，IOS22 与癸烷的界面张力最低可降至 0.074 mN/m。当 IOS22 质量分数大于 0.100% 时，其与癸烷的界面张力小于 0.10 mN/m。由此表明，IOS22 有着较宽的应用浓度窗口。

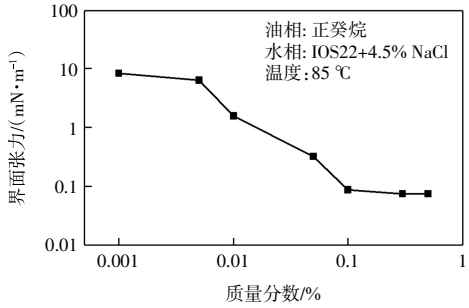
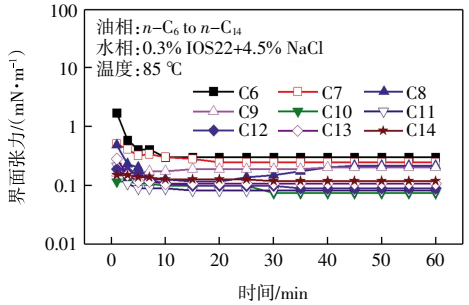


图 3　IOS22 浓度对稳态界面张力的影响

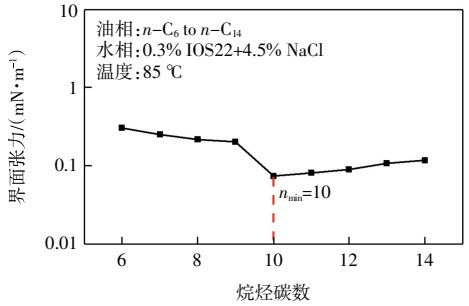
Fig.3　Effect of IOS22 concentration on equilibrium IFT

2.3　IOS22 亲水亲油平衡

表面活性剂的分子结构差异决定其两亲特性，需同时具备适度水溶性和油溶性方可在界面相富集，从而显著降低界面张力。通过测量表面活性剂溶液与不同碳数（ACN）的正构烷烃的界面张力，可得到正构烷烃 ACN 值对界面张力的影响曲线。当表面活性剂的亲水亲油平衡与油相的碳数匹配时，界面张力最低。界面张力最低的 ACN 定义为 n_{min}。因此，n_{min} 可间接反映表面活性剂在特定条件下的 HLB 值[17]。n_{min} 越大，油溶性越强，HLB 值越小。基于此，本文测试了 IOS22 与不同 ACN 的正构烷烃的界面张力，结果如图 4 所示。



（a）IOS22 动态界面张力



（b）IOS22 稳态界面张力

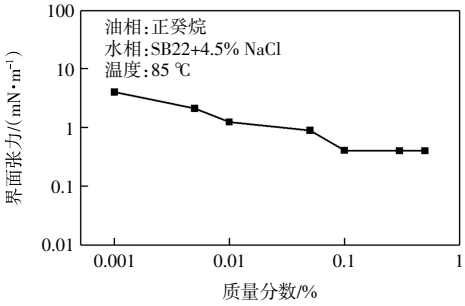
图 4　IOS22 与不同正构烷烃的界面张力

Fig.4　IFT between IOS22 and different *n*–alkanes

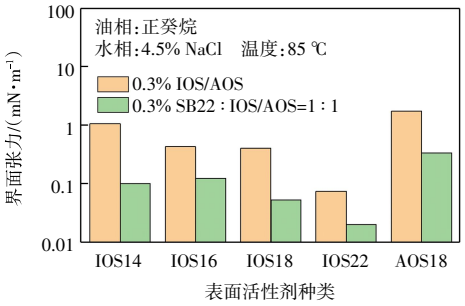
图 4（a）中的动态界面张力行为与 2.1 中所述相同；由图 4（b）中稳态界面张力可以看出，IOS22 稳态界面张力与不同碳数烷烃的曲线中，在 ACN 等于 10 时通过最低点。该结果表明，IOS22 在油相为正癸烷时达到亲水亲油平衡。这也是不同链长的 IOS 中 IOS22 与正癸烷的界面张力最低的原因。

2.4　甜菜碱 SB22 对不同链长 IOS 界面张力的影响

本课题组前期的研究已经证实了阴离子表面活性剂和甜菜碱之间存在静电吸引力[18]，从而促使阴离子表面活性剂和甜菜碱之间可以产生协同作用，降低油水界面张力。为此，本文将甜菜碱 SB22 引入 IOS 体系，以期获得超低界面张力，结果如图 5 所示。



（a）SB22 的稳态界面张力



（b）混合体系稳态界面张力

图 5　不同质量分数 SB22 及 IOS 和 SB22 混合体系的稳态界面张力

Fig.5　Equilibrium IFT of SB22 with different mass fractions and mixed systems of IOS and SB22

由图 5（a）不同质量分数 SB22 的稳态界面张力可以看出，随着 SB22 质量分数升高，油水界面张力下降，并在质量分数大于 0.100% 后，界面张力基本不变。0.3 % 的 SB22 与正癸烷的稳态界面张力为 0.41 mN/m。从图 3 可看出，相同浓度（质量分数为 0.3%）的 IOS22 与癸烷的界面张力可降至 0.074 mN/m。显然，SB22 的界面活性低于 IOS22，这与 SB22 的分子结构和界面吸附方式有关。根据相关前期研究[19]可知，甜菜碱 SB22 的亲水基团尺寸大于疏水基团，且亲水基团倾向于以平躺的方式吸附在油水界面处，使得 SB22 难以在癸烷–水界面处形成致密的吸附层。然而，IOS22 因具有支链的

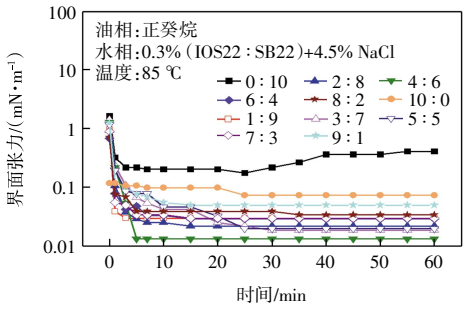
疏水基团，疏水基团显著较大，IOS22 分子的疏水基团和亲水基团可以在油水界面处有着更好的尺寸匹配。当表面活性剂的亲油基团和亲水基团尺寸匹配且在油水界面处占据的空间越大，降低界面张力的能力越强[20]。因此，IOS22 的界面活性高于甜菜碱 SB22 的界面活性。

图 5(b)为表面活性剂总质量分数 0.3%，SB22 和 IOS 质量比 1∶1 条件下，IOS 烷基链长对混合表面活性剂体系与正癸烷界面张力的影响。由图 5(b)可看出，不同疏水链长的 IOS 都能够与甜菜碱 SB22 产生不同程度的协同作用，表明 IOS 和 SB22 之间也存在静电吸引力。IOS 与 SB22 的协同作用随着 IOS 疏水链长的增加而增强。这一结果可以用“链长匹配”性来解释[21]。当表面活性剂的链长相同时，分子间的相互作用最大化，吸附膜最致密；不匹配的链长导致过量烷基尾部热运动而破坏分子排列，使吸附膜变松散。IOS22 的疏水碳数为 22，SB22 的烷基链碳数也为 22，两者的疏水链长较为接近，因此 IOS22 与 SB22 的协同效应最强。

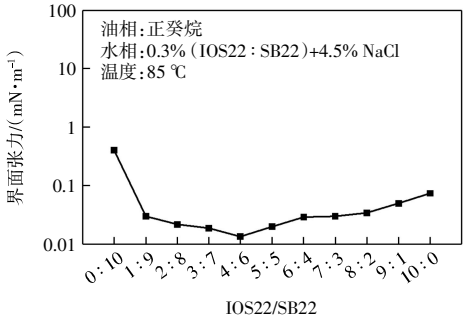
AOS18 作为 IOS 的同系物，其区别在于前者为直链结构，而后者为支链结构。从图 5(b)中可看出，AOS18 并不能与 SB22 产生明显的协同作用。这是因为 IOS 支链疏水基团具有柔性[22]，能够通过自我调节灵活地插入甜菜碱分子间的空位，形成更为致密的界面膜，降低界面张力的能力增强。然而，AOS18 的疏水部分为直链结构，具有一定的刚性，直链结构的空间位阻较小，不能与 SB22 分子在油水界面处的空位匹配。

2.5　甜菜碱 SB22 与 IOS22 配比对界面张力的影响

上文研究结果表明，在质量比 1∶1 条件下，IOS22 与 SB22 具有最佳的协同效应。然而，诸多研究表明，复配体系中表面活性剂配比也会影响整体配方的界面活性，合适的配比可以使界面张力达到超低水平，从而提高采油效率。为此，本文进一步考察了 IOS22 与 SB22 混合比例对二者协同效应的影响，结果如图 6 所示。图 6(a)的动态界面张力曲线与 2.1 节中的并无二致。在图 6(b)中，单一 IOS22 和 SB22 溶液与正癸烷的界面张力分别为 0.074 mN/m 和 0.410 mN/m，IOS22 和 SB22 的混合溶液对正癸烷的界面张力均小于单独 IOS22 和 SB22 溶液的界面张力。表明 IOS22 和 SB22 在任意比例下都具有协同作用。在混合溶液中，随着 IOS22 浓度的增加，界面张力先降低后增加。其中在质量比为 4∶6 时协同作用最强，其混合体系与癸烷的界面张力为 0.013 mN/m，接近超低水平。



（a）动态界面张力



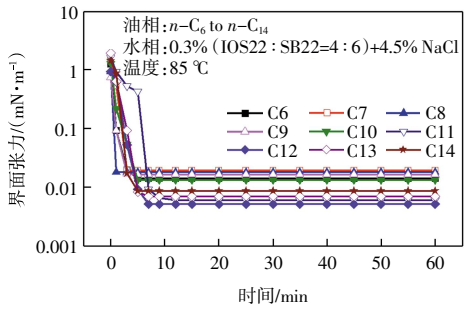
（b）稳态界面张力

图 6　IOS22 与 SB22 混合溶液的界面张力

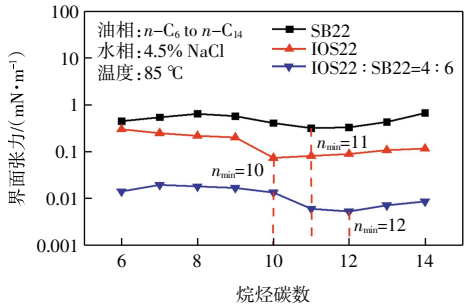
Fig.6　IFT of IOS22 and SB22 mixed solutions

对于烷烃，油相中烷烃链变长会增大油分子间内聚能，使表面活性剂分子更难进入油相，表面活性剂在油相中的分配越小。因此表面活性剂在油相中的分配与油相性质有关。为探寻最佳油相下，混合体系降低界面张力的能力，对最佳混合比例的 SB22 和 IOS22 的二元体系做正构烷烃扫描，结果如图 7 所示。图 7(a)中动态界面张力与前文中的并无二致。由图 7(b)稳态界面张力可以看出，与单一 IOS22 和SB22 溶液类似，含有 IOS22 和 SB22 的混合溶液界面张力随着油相碳数的变化而变化，并在某一碳数下达到最低。影响二元表面活性剂体系界面张力的方式有 2 种：一种是混合吸附；另一种是影响 HLB。若是影响 HLB，ACN 曲线则会表现出左右平移的趋势，并且 n_{min} 介于两单一体系的 n_{min} 之间。而 IOS22 与 SB22 的混合体系表现出界面张力整体下降，并且混合体系的 n_{min} 并不介于 IOS22 和 SB22 的 n_{min} 之间，表明混合吸附对降低界面张力起着至关重要的作用。此外，添加 SB22 后混合体系的 n_{min} 有变大的趋势，这表明混合体系的 HLB 受到油溶性较强的 SB22 影响，使得混合体系的油溶性增加。在油相 ACN 数大于 10 时，混合体系与烷烃的界面张力值低至 10^{-3} mN/m 数量级，达到了超低水平。其中，混合溶液与正十二烷的界面张力最低

可达 0.005 3 mN/m。在适当油相条件下，IOS22 和 SB22 的混合体系展现出强大的降低界面张力的能力。



（a）动态界面张力



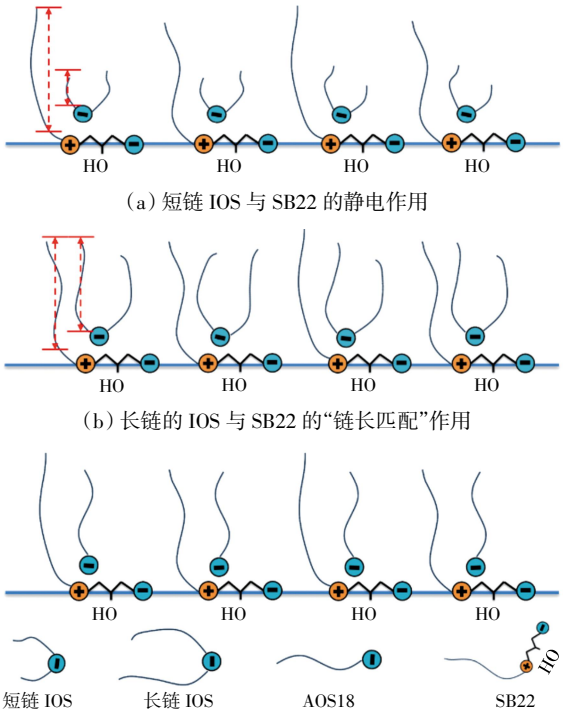
（b）稳态界面张力

图 7　IOS22 与 SB22 混合溶液（质量比 4∶6）与正构烷烃的界面张力

Fig.7　Dynamic and equilibrium IFT for *n*–alkanes with mixed solutions of IOS22 and SB22 at mass ratio of 4∶6

2.6　甜菜碱与内烯烃磺酸盐协同作用机制

基于上述实验结果和理论分析，本文提出了内烯烃磺酸盐与甜菜碱协同作用降低界面张力的机制，如图 8 所示。IOS 作为阴离子表面活性剂，其带负电的亲水基团与甜菜碱 SB22 亲水基团的正电中心存在静电吸引，因而容易通过混合吸附而产生协同效应。然而两者之间的协同作用受到“链长匹配”和“空位匹配”的影响。在图 8（a）中，较短疏水链的 IOS 虽然可以通过静电吸引和甜菜碱 SB22 形成混合吸附，但因疏水链明显短于甜菜碱分子的烷基链，SB22 过量的烷基链的热运动导致混合吸附膜紧密程度降低，协同效应不强。对于长链的 IOS22，其疏水链长度与 SB22 烷基长接近，“链长匹配”性的增加导致 IOS22 分子与 SB22 分子在界面处排列紧密，如图 8（b）所示，导致界面张力明显降低。在图 8（c）中，对于直链的 AOS18，虽然其疏水链与 SB22 分子的烷基链匹配程度较高，但因其是直链结构，提供的空间位阻有限，与 SB22 分子在界面处的空位匹配程度较差，不能与 SB22 分子形成致密的吸附层，因此，二者复配降低界面张力的效果较差。



（a）短链 IOS 与 SB22 的静电作用

（b）长链的 IOS 与 SB22 的“链长匹配”作用

（c）直链的 AOS 与 SB22 的空间位阻作用

图 8　内烯烃磺酸盐和甜菜碱的协同效应机理

Fig.8　Synergistic effect mechanism of internal olefin sulfonates and betaines

3　结　论

本文通过测试不同疏水链长度的内烯烃磺酸盐的界面活性，及其与烷基甜菜碱（SB22）混合体系对正构烷烃界面张力的影响，探讨 IOS 表面活性剂与甜菜碱 SB22 的协同作用机制，得出以下结论。

（1）随着烷基链长的增加，IOS 系列表面活性剂与正癸烷的界面张力下降，具有较长疏水链的 IOS22 与正癸烷达到亲水亲油平衡，具有更高的界面活性，界面张力降至 0.074 mN/m。

（2）IOS 的支链结构比 AOS 的直链结构提供更大的空间位阻，亲疏水基团尺寸相容性更好，降低界面张力能力更强。

（3）IOS 分子可以与甜菜碱 SB22 分子形成混合吸附膜，界面张力明显降低。这种协同效应受“链长匹配”性的影响。IOS22 与 SB22 的链长匹配程度高，协同作用最强。单疏水链的 AOS18 因“空位匹配”性较差而不能与 SB22 产生降低界面张力的协同效应。

（4）优化 IOS22 和 SB22 的比例发现，在两者质量比为 4∶6 条件下，协同作用最强，混合体系与正十二烷达成最佳亲水亲油平衡，界面张力降低至超低，为 0.005 3 mN/m。

参考文献：

[1] Li Y B, Wang Z Q, Hu Z M, et al. A review of *in situ* upgrading technology for heavy crude oil[J]. Petroleum, 2021, 7(2): 117–122.

[2] Bashir A, Sharifi Haddad A, Rafati R. A review of fluid displacement mechanisms in surfactant–based chemical enhanced oil recovery processes: Analysis of key influencing factors[J]. Petroleum Science, 2022, 19(3): 1211–1235.

[3] Tackie–Otoo B N, Ayoub Mohammed M A, Yekeen N, et al. Alternative chemical agents for alkalis, surfactants and polymers for enhanced oil recovery: Research trend and prospects[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 187: 106828.

[4] Dubey S, Majumder S K. Stability analysis of CO_2 microbubble for CO_2 sequestration and mobility control in enhanced oil recovery[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 500: 156595.

[5] Yin J, Wei X X, Hu F T, et al. Alternative stable microbiome state triggered by the introduction of functional microbes in oil reservoirs drives sustainable microbial enhanced oil recovery[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 475: 146073.

[6] Gomaa S, Salem K G, El–hoshoudy A N. Enhanced heavy and extra heavy oil recovery: Current status and new trends[J]. Petroleum, 2024, 10(3): 399–410.

[7] Zhao M W, Liu K W, Meng X J, et al. Review on principles, influence and applications of nanomaterials in enhancing oil recovery[J]. Fuel, 2024, 371: 131985.

[8] Massarweh O, Abushaikha A S. The use of surfactants in enhanced oil recovery: A review of recent advances[J]. Energy Reports, 2020, 6: 3150–3178.

[9] 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.

[10] 张如青, 郭雨飞, 杨媛, 等. 烯烃及烯烃类表面活性剂的合成工艺研究进展[J]. 中国洗涤用品工业, 2021(12): 67–75.
Zhang Ruqing, Guo Yufei, Yang Yuan, et al. Progress in the synthesis of α–olefins and internal olefins and their preparation of olefin sulfonate surfactants[J]. China Cleaning Industry, 2021(12): 67–75(in Chinese).

[11] Zhou Z H, Zhang Q, Liu Y, et al. Effect of fatty acids on interfacial tensions of novel sulfobetaines solutions[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(2): 1020–1027.

[12] Chen X Y, Sotomayor M, Alshaer H J, et al. Enhanced oil recovery with anionic and zwitterionic surfactants in carbonate rocks: A CT–aided investigation[J]. Fuel, 2022, 311: 122589.

[13] 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.

[14] 尹成峰, 丁伟, 王庆红, 等. 内烯烃磺酸盐表面活性剂的合成与性能[J]. 当代化工, 2014, 43(6): 928–931.
Yin Chengfeng, Ding Wei, Wang Qinghong, et al. Synthesis and properties of internal olefin sulfonate surfactants [J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43(6): 928–931(in Chinese).

[15] Song X W, Dong L F, Cao X L, et al. Dynamic interfacial tensions of *p*–(*n*–lauryl)–benzyl polyoxyethylene ether carboxybetaine solutions[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124: 27–34.

[16] Zhao S, Zhou Z H, Shangguan Y N, et al. Effect of bivalent cations on the interfacial tensions of extended anionic surfactant solutions[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 349: 118162.

[17] 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.

[18] Sun Q, Zhou Z H, Zhang Q, et al. Effect of electrolyte on synergism for reducing interfacial tension between betaine and petroleum sulfonate[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(3): 3188–3198.

[19] 赵濉, 郭朝阳, 刘苗, 等. 甜菜碱与油酸混合吸附膜的界面扩张流变性质[J]. 天津工业大学学报, 2020, 39(5): 50–55.
Zhao Sui, Guo Zhaoyang, Liu Miao, et al. Interfacial dilational rheological properties of mixed adsorption film formed by betaine and oleic acid[J]. Journal of Tiangong University, 2020, 39(5): 50–55(in Chinese).

[20] 张路, 刘岩, 王策, 等. 支链化聚氧乙烯醚磺酸盐溶液的界面张力性质[J]. 天津工业大学学报, 2015, 34(4): 1–6.
Zhang Lu, Liu Yan, Wang Ce, et al. Interfacial tensions of branched alkyl alcohol polyoxyethylene ether sulfonate solutions[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2015, 34(4): 1–6(in Chinese).

[21] Zhong Q L, Zhou Z H, Zhang Q, et al. Studies on interfacial tensions of ionic surfactant and alkyl sulfobetaine mixed solutions[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(8): 8202–8209.

[22] Han L, Luan H X, Ren J, et al. Effect of double chain anionic surfactant on the dynamic interfacial tensions of betaine solutions[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 382: 121866.

本文引文格式：

严峰, 岳如山, 楚艳苹, 等. 内烯烃磺酸盐和甜菜碱降低界面张力的协同效应[J]. 天津工业大学学报, 2026, 45(4): 26–32.
Yan Feng, Yue Rushan, Chu Yanping, et al. Synergistic effect of internal olefin sulfonates and betaines on reducing interfacial tension[J]. Journal of Tiangong University, 2026, 45(4): 26–32(in Chinese).

（责任编辑：程晓英）