

低浓度聚乙烯醇和表面活性剂混合溶液润湿性行为研究

刘全存, 杨思雨, 王思雨, 薛长国*

安徽理工大学材料科学与工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年6月23日; 录用日期: 2025年7月30日; 发布日期: 2025年8月7日

摘 要

聚合物和表面活性剂相互作用在化学、材料科学和工业应用中具有重要意义, 尤其在制药、化妆品和涂料等领域中具有广泛应用。其中表面活性剂的种类以及聚合物的浓度均会对彼此产生作用。当前, 聚合物和不同种类的表面活性剂的相互作用的动态润湿性行为研究主要集中在高浓度下。本文制备了不同浓度的聚乙烯醇(PVA)溶液以及不同种类表面活性剂(SAA)与PVA的混合溶液, 研究了不同质量分数和不同种类的SAA混合溶液的表面张力变化, 以及这些溶液在聚二甲基硅氧烷(PDMS)疏水表面上的横向摩擦力。研究发现, PVA溶液以及添加不同种类表面活性剂后的混合溶液在PDMS表面运动时的横向摩擦力与其表面张力大小呈线性变化关系, 即横向摩擦力大小随着表面张力值增加而逐渐增加。而且, 阴离子表面活性剂对于PVA的作用效果比阳离子表面活性剂更为明显。本文通过探究低浓度PVA和表面活性剂混合溶液在疏水表面的润湿性与摩擦行为, 为制药领域的药物缓释制剂设计、化妆品的肤感优化以及涂料的均匀成膜等实际应用提供理论支持与技术指导, 具有重要的实际应用价值。

关键词

聚乙烯醇, 表面活性剂, 润湿性, 摩擦性能, 聚合物 - 表面活性剂相互作用

Study of Wettability Behavior of Mixed Solutions of Low-Concentration Polyvinyl Alcohol and Surfactant

Quancun Liu, Siyu Yang, Siyu Wang, Changguo Xue*

School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

*通讯作者。

文章引用: 刘全存, 杨思雨, 王思雨, 薛长国. 低浓度聚乙烯醇和表面活性剂混合溶液润湿性行为研究[J]. 材料科学, 2025, 15(8): 1559-1568. DOI: 10.12677/ms.2025.158166

Abstract

Polymer-surfactant interactions are of great importance in chemistry, materials science and industrial applications, especially in fields such as pharmaceuticals, cosmetics and coatings. Among them, the type of surfactant, as well as the concentration of the polymer, can have an effect on each other. Currently, studies on the dynamic wettability behavior of the interaction between polymers and different types of surfactants are mainly focused on high concentrations. In this paper, solutions of polyvinyl alcohol (PVA) at different concentrations and mixtures of different types of surfactants (SAA) with PVA were prepared, and the changes in surface tension of the mixtures of different mass fractions and different types of SAA were investigated, as well as the transverse friction of these solutions on the hydrophobic surface of polydimethylsiloxane (PDMS). It was found that the lateral friction of the PVA solutions and the mixed solutions with the addition of different kinds of surfactants during the movement on the PDMS surface showed a linear relationship with the magnitude of their surface tension, *i.e.*, the magnitude of the lateral friction increased gradually with the increase of the surface tension value. Moreover, the effect of anionic surfactants on PVA is more obvious than that of cationic surfactants. By investigating the wettability and friction behavior of low-concentration PVA and surfactant mixed solutions on hydrophobic surfaces, this paper provides theoretical support and technical guidance for the design of sustained-release formulations of drugs in the pharmaceutical field, the optimization of the skinfeel of cosmetics, and the homogeneous film-forming of coatings, which are of great practical application value.

Keywords

Polyvinyl Alcohol, Surfactant, Wettability, Friction Properties, Polymer-Surfactant Interaction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

聚合物与表面活性剂的相互作用在化学工程、材料科学及工业应用中具有重要地位，尤其在调控界面润湿性方面展现出广泛的应用前景[1]-[5]。而当处于低浓度条件下时，聚合物-表面活性剂复合体系同样备受关注，因其在药物缓释、涂层均匀性及清洁效率等领域起到关键作用[6]。研究表明，表面活性剂分子通过静电吸附、疏水缔合等作用可显著改变聚合物链构象，进而影响溶液的表面张力和润湿性行为[7]-[9]。然而，现有研究多集中于高浓度体系的宏观热力学性质(如临界胶束浓度、稳态界面张力)[10]-[14]，但是对于低浓度下的动态润湿性行为与固液界面摩擦特性的研究较少，特别是在疏水表面体系中，表面活性剂分子的吸附与聚合物链构象变化的协同效应导致的变化，这限制了其在微流体器件、生物医用涂层等精密场景中的优化应用。

传统界面表征技术(如表面张力仪、流变仪)虽能提供宏观热力学参数，却难以解析低浓度体系的分子尺度相互作用与动态摩擦特性[15]。例如，Holmberg [16]等(1992)通过 Langmuir 槽技术建立了 SDS 吸附动力学方程，但研究对象限于 0.1 wt% 以上浓度；Dobrynin [17]团队(1995)虽结合标度理论与动态光散射技术阐明了聚电解质构象转变规律，但其研究体系仍停留在宏观均相溶液范畴。近年来，Ritacco [18](2017)

利用电光克尔效应实现了单分子级界面极化现象观测, 但该方法无法原位捕捉液滴滑移过程中的瞬时摩擦响应。此类技术局限性导致低浓度混合体系的界面摩擦机制未能得到研究。

针对上述问题, 本文构建了基于毛细管偏转的光学杠杆摩擦检测系统[19], 结合先前的实验得到实验设备及具有普适性[20]并且实现了对聚乙烯醇(PVA)和表面活性剂混合溶液在疏水表面动态摩擦行为的探究。通过对阳离子表面活性剂(CTAB)与阴离子表面活性剂(SDS)在 0.001~0.1 wt%浓度范围内对溶液表面张力、接触角及液滴横向摩擦力的影响, 揭示了聚合物-表面活性剂协同效应对润湿性的调控规律。

2. 实验

2.1. 实验材料

聚二甲基硅氧烷(PDMS, Sylgard184)、交联剂购自美国道康宁公司, 聚乙烯醇(PVA-1799 型), 正己烷, 十二烷基硫酸钠(SDS)、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)购自上海麦克林, 去离子水由实验室制备。

2.2. 样品制备

PDMS 和交联剂(预聚体)按 10:1 的质量比充分混合并搅拌至均匀, 随后使用真空干燥箱对混合液进行脱泡处理, 消除混合液中的气泡, 最后将混合液放在 60℃环境下加热固化 2 h, 得到表面光滑的 PDMS 薄膜。

在 PVA 的溶解过程中, 首先将其在室温下的冷水中充分溶胀并均匀分散。随后, 通过水浴加热至 90℃以加速溶解, 待冷却到室温时, 将表面活性剂加入分散均匀的 PVA 溶液中, 待两种组分完全溶解后, 形成均一稳定的 PVA/表面活性剂溶液。实验中制备了质量分数分别为 0.001%、0.005%、0.010%、0.050% 和 0.100%的 PVA 溶液, 以及相同质量分数的 CTAB 和 SDS 溶液。同时, 还制备了质量分数为 0.001%的 PVA 溶液与质量分数分别为 0.001%、0.005%、0.010%和 0.050%的表面活性剂混合溶液。

2.3. 样品表征

表面张力采用 Wilhelmy 板法于室温($\pm 25^\circ\text{C}$)下测定, 实验使用 BZY-203 型表面张力仪(上海方瑞仪器有限公司)。每次实验取 15 mL 待测溶液, 通过三次独立测量取平均值以确保数据可靠性。接触角则通过 SLA 100 型接触角测量仪(德国 LAUDA 公司)测定, 实验中每次滴加 3 μL 样品溶液至 PDMS 表面, 以三次独立测量结果的平均值作为最终接触角值。所有测量均在恒温恒湿环境中进行, 以减小环境波动对结果的干扰。

图 1 是制备的厚度为 0.5 mm 的 PDMS 薄膜的 SEM 图像, 扫描电子显微镜分析显示表面无特征且光滑。



Figure 1. SEM images of PDMS membranes applied on slides

图 1. 应用于载玻片上的 PDMS 膜的 SEM 图像

2.4. 液滴横向摩擦力测量

在本研究中,采用具有特定的弹性常数 K 的硼硅酸盐玻璃毛细管($50 \times 0.36 \times 0.09 \text{ mm}^3$),探究固液界面的横向摩擦效应。实验设置包括一个慢速步进电机位移平台(型号 MD5-HF28-A),用于固定材料表面并实现其精确移动。实验过程中,首先利用微型取样器将 $3 \mu\text{L}$ 的液滴放置于材料表面。随后,通过步进电机驱动平台,使液滴与材料表面同步移动。当液滴一端与毛细管接触并被阻挡时,会在固液界面产生相对滑动趋势或实际滑动,进而导致毛细管发生偏转,即毛细管偏转 D 。如图 2 所示。

为了精确测量这一偏转现象,实验采用了激光器发射 635 nm 波长的激光束,该激光束照射毛细管下端,避免了与液滴的直接接触。基于光学杠杆原理,通过 KPA101 型号位置敏感探测器(PSD)监测毛细管反射光斑位置的微小变化。这种非接触式监测方法能够在不干扰测量结果的前提下,实现对毛细管微偏转的高精度检测,从而间接测量液滴在材料表面滑动时产生的横向摩擦力。根据胡克定律,作用于毛细管上的力 F 与毛细管的挠度 D 之间存在线性关系,即

$$F = K * D \quad (1)$$

其中 K 为弹性常数, D 为毛细管的挠度。这一关系为实验提供了定量分析的基础。

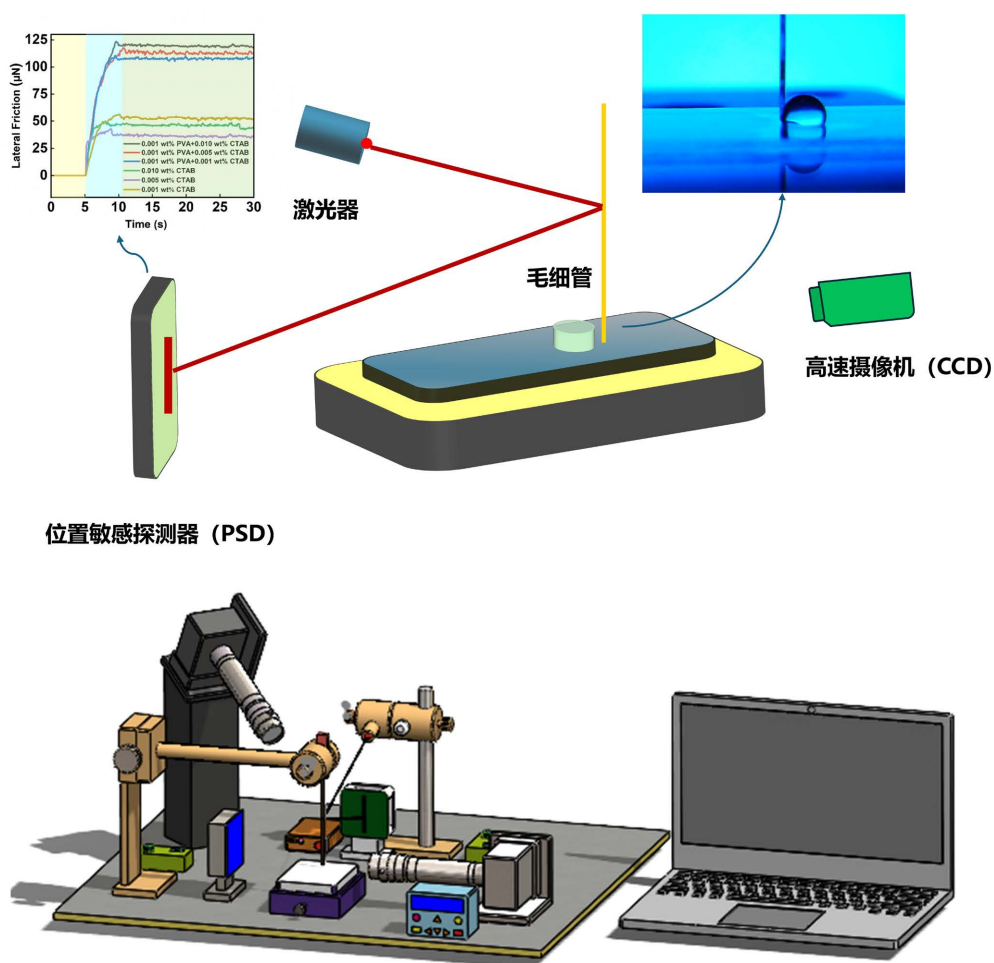


Figure 2. Schematic diagram of solid-liquid interface transverse friction detection system
图 2. 固液界面横向摩擦力检测系统示意图

3. 结果与讨论

3.1. PVA 浓度对润湿性的影响

通过 FTIR 光谱分析发现, PVA 与两种表面活性剂(CTAB 和 SDS)结合后, 化学结构发生了显著变化(如图 3 所示)。PVA 和 CTAB 的混合溶液在 2098.2 cm^{-1} 、 2846.5 cm^{-1} 和 2927.5 cm^{-1} 处出现特征吸收峰, 分别对应氨基伸缩振动和烷基链的 C-H 伸缩振动; 而 PVA 和 SDS 混合溶液在 2856.2 cm^{-1} 和 2915.9 cm^{-1} 处的 C-H 伸缩振动峰以及 1637.3 cm^{-1} 、 1461.8 cm^{-1} 、 1224.6 cm^{-1} 、 1091.5 cm^{-1} 、 653.7 cm^{-1} 和 624.8 cm^{-1} 处的吸收峰, 与 C=O、C-H 弯曲、C=C、C-O、C-N 和 C-S 化学键的振动有关[21]。这些吸收峰的变化表明 PVA 与两种表面活性剂充分混合且相互作用, 改变了溶液的化学结构。

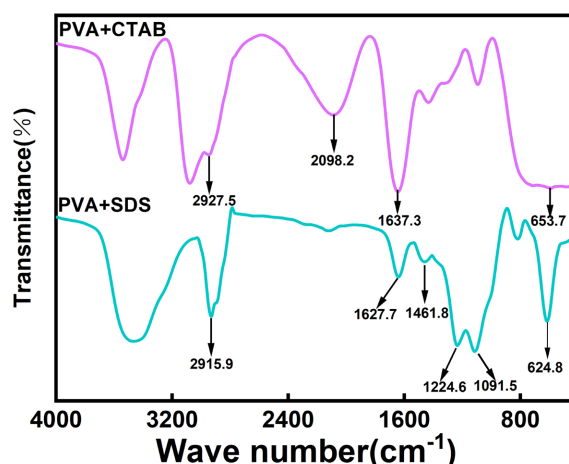


Figure 3. FTIR spectra of mixed solutions of PVA with different surfactants
图 3. PVA 与不同表面活性剂混合溶液的 FTIR 光谱图

在低质量分数下, PVA 分子链的处于未充分伸展状态, 其分子间仅存在微弱的范德华力和有限的氢键作用, 导致分子链的运动相对独立, 难以形成有效的三维网络结构[22]。此时, PVA 分子对表面活性剂的吸附位点暴露不足, 且自身对水分子的结构破坏能力较弱, 因此接触角维持在约 113.5° 的较高水平(图 4(a)), 表明溶液对疏水表面的润湿性处于动态平衡状态[23]。随着 PVA 浓度的逐步增加, 其分子链通过熵驱动效应发生解缠结, 暴露出更多羟基官能团, 同时分子间氢键密度显著提高。一方面, 这种结构变化使得 PVA 链段通过空间位阻效应阻碍表面活性剂分子的聚集, 迫使其向气液界面迁移; 另一方面, PVA 的亲水基团与表面活性剂的极性头基(如 SDS 的磺酸基、CTAB 的季铵盐基团)形成多重氢键和离子-偶极相互作用, 形成动态稳定的复合物。这种协同作用显著提升了表面活性剂在空气-水界面的吸附效率, 通过降低界面自由能从而推动表面活性剂分子在界面上的定向排列, 从而有效降低表面张力[24]。这种分子间相互作用通过降低表面活性剂临界胶束浓度(CMC), 使其在临界浓度下即可实现高效的界面覆盖, 最终表现为表面张力随 PVA 浓度增加的持续下降趋势。而当表面活性剂浓度降低时, 其在界面上的吸附量减少, 无法完全补偿空气-水界面的能量势垒, 导致部分区域恢复为气液界面, 接触角随之增大, 表面张力回升, 润湿性呈现梯度下降特征[25]。从图 4(b)可以看出, 质量分数为 0.001 wt% 的 PVA 与不同质量分数的表面活性剂混合溶液的接触角变化显著。PVA 的高分子链与表面活性剂的极性头基发生相互作用, 增强了表面活性剂在界面的吸附能力, 从而增大了接触角。对于 CTAB 和 SDS, 随着其质量分数的增加, 接触角逐渐降低, 表明表面活性剂在界面上的吸附更加紧密, 润湿性增强[26]。这种浓度依赖性差异可能与表面活性剂分子在界面上的排布方式有关: 低浓度时, 表面活性剂以孤立分子形式吸附,

形成疏松的界面层。此外,阴离子表面活性剂 SDS 与阳离子表面活性剂 CTAB 的差异性表现进一步凸显了电荷效应的影响:SDS 的负电荷与 PVA 链上羟基的弱氢键作用可能促进其在界面上的横向扩散,而 CTAB 的正电荷则可能因静电排斥作用限制其在 PVA 密集区域的吸附,导致其润湿性增强幅度低于 SDS [27]。

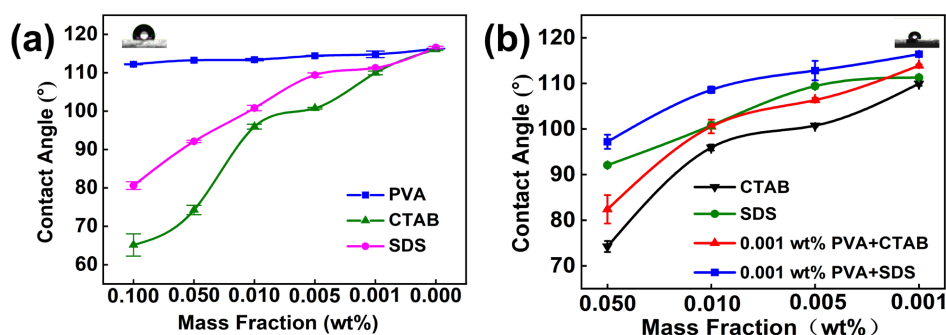


Figure 4. (a) Variation of contact angle for solutions with different mass fractions of PVA, CTAB, and SDS; (b) Variation of contact angle for mixed solutions of PVA with different mass fractions of surfactants
图 4. (a) 不同质量分数 PVA、CTAB、SDS 溶液的接触角变化; (b) PVA 与不同质量分数表面活性剂混合溶液的接触角变化

从图 4(b)可以看出,质量分数为 0.001 wt% 的 PVA 与不同质量分数的表面活性剂混合溶液的接触角变化显著。PVA 的高分子链与表面活性剂的极性头基发生相互作用,增强了表面活性剂在界面的吸附能力,从而增大了接触角。对于 CTAB 和 SDS,随着其质量分数的增加,接触角逐渐降低,表明表面活性剂在界面上的吸附更加紧密,润湿性增强。

3.2. 表面活性剂对横向摩擦力的影响

实验测量了不同浓度下 CTAB 和 SDS 表面活性剂对 PVA 水溶液横向摩擦力的影响。结果表明,CTAB 溶液的滑动摩擦力(F_k)随着浓度的增加而显著增加,0.001 wt% CTAB 溶液的 F_k 从 35.59 μN 到 0.01 wt% CTAB 溶液的 53.48 μN (如图 5 所示)。当加入 PVA 后,0.001 wt% CTAB 和 PVA 混合溶液的 F_k 从 107.61 μN 到 0.01 wt% CTAB 和 PVA 混合溶液的 113.7 μN (如图 5 所示)。在低浓度条件下,表面活性剂分子以孤立状态吸附于气液界面,其亲水头基与 PVA 链段的极性基团通过动态氢键结合,而疏水尾链则倾向于在溶液本体中聚集。此时界面层呈现疏松的多孔结构,摩擦力仅由表面活性剂分子与基底间的弱范德华力主导,表现为较低的摩擦值(如 0.001 wt% CTAB/PVA 混合溶液 $F_k \approx 107.61 \mu\text{N}$)。随着浓度增加,表面活性剂分子通过疏水尾链和头基间的静电/氢键作用发生侧向聚集,形成致密的结构,从而导致吸附层更加紧密和有序,增加了溶液界面的粘附力,从而提高了横向摩擦力,增强了混合溶液的稳定性。

对于 SDS 溶液, F_k 也随着浓度的增加而显著增加,从 0.001 wt% SDS 溶液的 36.4 μN 到 0.01 wt% SDS 和 PVA 混合溶液的 170.6 μN (如图 6 所示)。 F_k/F_s 比值的变化趋势与 CTAB 类似,表明 SDS 分子中的疏水尾部与 PVA 分子链的疏水微区之间的相互作用,促进了 SDS 分子在空气-水界面上的吸附,随着 SDS 浓度的增加,这种吸附作用更加明显,导致了滑动摩擦力的显著增加。

横向摩擦力的变化趋势与表面活性剂在界面上的吸附行为密切相关。CTAB 和 SDS 作为离子型表面活性剂,其分子在界面上的吸附能力随着浓度的增加而增强,从而导致横向摩擦力的显著增加。此外, F_k/F_s 比值的变化进一步表明,表面活性剂的吸附不仅增加了界面的粘附力,还改变了界面的摩擦特性,使得动摩擦力与静摩擦力之间的差异逐渐减小。

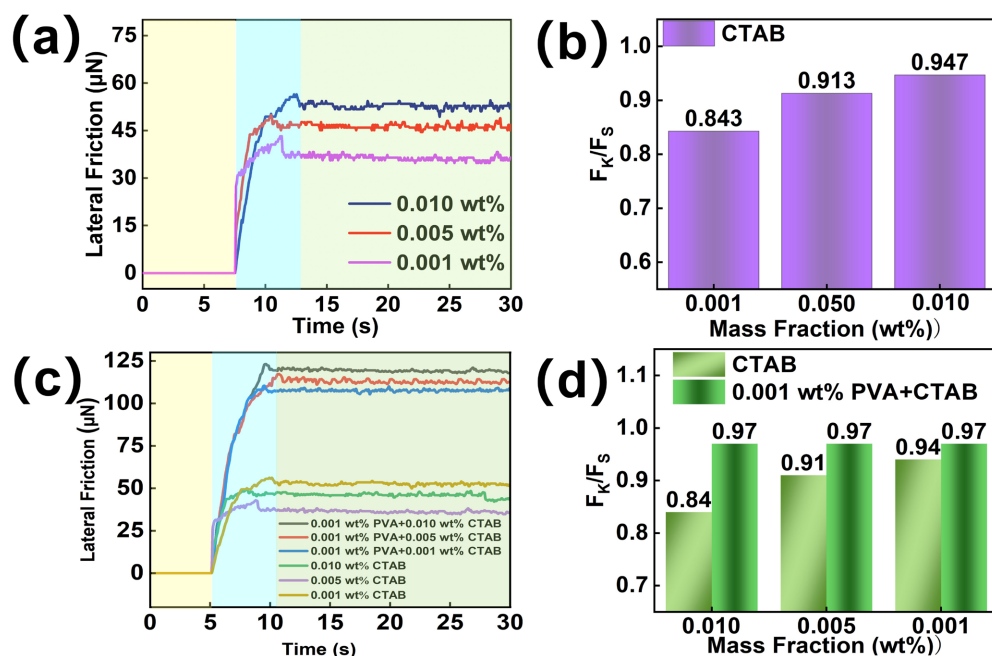


Figure 5. (a) Transverse friction of CTAB solutions with different mass fractions; (b) F_k/F_s of CTAB solutions with different mass fractions; (c) Transverse friction of PVA mixed with different mass fractions of CTAB; (d) F_k/F_s of PVA mixed with different mass fractions of CTAB

图 5. (a) 不同质量分数的 CTAB 溶液的横向摩擦力; (b) 不同质量分数 CTAB 溶液的 F_k/F_s ; (c) PVA 与不同质量分数的 CTAB 混合溶液的横向摩擦力; (d) PVA 与不同质量分数的 CTAB 混合溶液的 F_k/F_s

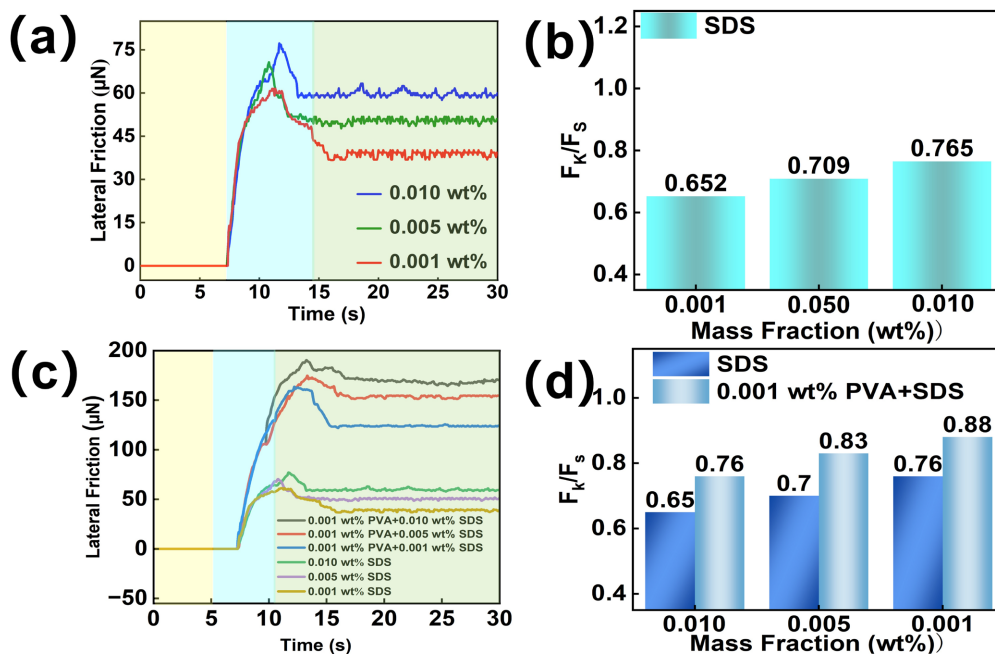


Figure 6. (a) Lateral friction of SDS solutions with different mass fractions; (b) F_k/F_s of SDS solutions with different mass fractions; (c) Lateral friction of PVA mixed with SDS with different mass fractions; (d) F_k/F_s of PVA mixed with SDS with different mass fractions

图 6. (a) 不同质量分数的 SDS 溶液的横向摩擦力; (b) 不同质量分数 SDS 溶液的 F_k/F_s ; (c) PVA 与不同质量分数的 SDS 混合溶液的横向摩擦力; (d) PVA 与不同质量分数的 SDS 混合溶液的 F_k/F_s

3.3. 表面活性剂对表面张力的影响

将 CTAB 与 PVA 混合时, 如图 7(a)所示, 混合溶液的表面张力比单独的 CTAB 溶液更低。这表明 PVA 的存在进一步增强了 CTAB 在空气 - 水界面的吸附, 是由于 PVA 与 CTAB 之间的相互作用促进了 CTAB 分子在界面的排列, 从而更有效地降低了表面张力。同样地, 图 7(b)展示了 SDS 溶液的表面张力随 SDS 质量分数增加的趋势。SDS 作为阴离子表面活性剂, 其分子中的疏水尾部与 PVA 分子链的疏水微区之间的相互作用, 促进了 SDS 分子在空气 - 水界面上的吸附。随着 SDS 浓度的增加, 这种吸附作用更加明显, 导致了表面张力的显著降低。SDS 与 PVA 混合溶液的表面张力。与纯 SDS 溶液相比, SDS 与 PVA 混合溶液的表面张力进一步降低, 例如, 0.001 wt% 的 SDS 溶液的表面张力从约 69.82 mN/m 降至与 0.001 wt% PVA 混合后的约 53.63 mN/m。这一现象表明, PVA 对表面活性剂在界面吸附的促进作用, 这种降低是由于 PVA 与 SDS 之间的相互作用, 这种相互作用增强了 SDS 在界面的吸附, 从而更有效地降低了表面张力。

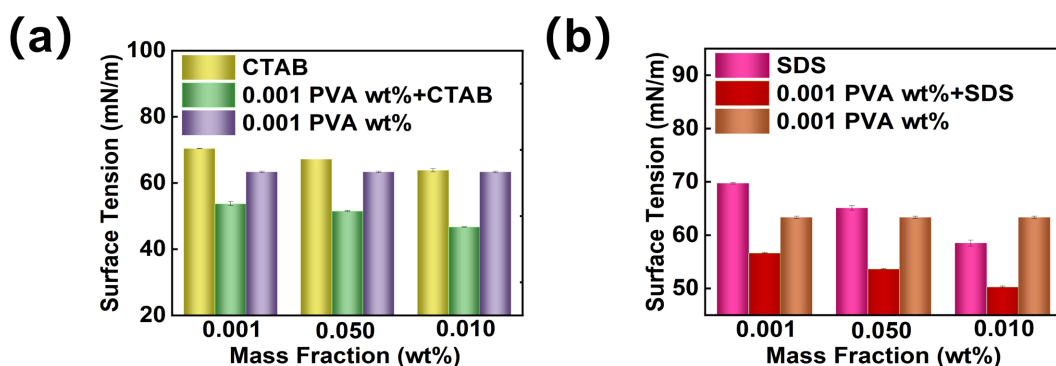


Figure 7. (a) Variation of surface tension for different mass fractions of CTAB solutions; (b) Variation of surface tension for different mass fractions of SDS solutions

图 7. (a) 不同质量分数 CTAB 溶液的表面张力变化; (b) 不同质量分数 SDS 溶液的表面张力变化

4. 结论

实验结果表明, 在 PVA 溶液中加入阳离子和阴离子表面活性剂后, 溶液的表面张力和润湿性发生了显著变化。随着表面活性剂浓度的增加, 表面张力逐渐降低, 润湿性增强, 并且阴离子表面活性剂效果强于阳离子表面活性剂。接触角和横向摩擦力的测量结果表明, 虽然两种表面活性剂均在一定程度上改善了溶液的润湿性能, 但 SDS 的效果更为显著。本研究基于横向摩擦力表征了表面润湿性的变化, 该方法不仅更好地反映了所研究溶液动态润湿性的变化, 还有助于深入探究表面活性剂对 PVA 溶液润湿性能的影响, 为理解聚合物 - 表面活性剂相互作用的界面机制提供了新的视角, 推动了低浓度体系界面行为研究的发展, 对优化润湿性调控和摩擦性能具有重要的理论意义和应用价值。

基金项目

安徽省重点研究与开发计划项目(No. 202004h07020026), 安徽省大学生创新创业计划项目(2023303816)和安徽省留学回国人员创新项目。

参考文献

- [1] Vats, S., Khan, F., Prajapati, D., Pandey, A., Sharma, S. and Saxena, A. (2023) Synthesis and Evaluation of Mesoporous Silica Nanoparticle and Its Application in Chemical Enhanced Oil Recovery. *ChemistrySelect*, **8**, e202204206. <https://doi.org/10.1002/slct.202204206>

- [2] Chen, C., Zhang, H. and Zhang, X. (2023) Synergism of Surfactant Mixture in Lowering Vapor-Liquid Interfacial Tension. *Langmuir*, **39**, 11828-11838. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c01565>
- [3] Li, Y., Sun, D., Jiang, C., Ding, H. and Wang, Q. (2021) Preparation of Polypeptide Surfactants Using chromium-containing Waste Leather: Effect of Hydrophilic and Lipophilic Groups. *Journal of Surfactants and Detergents*, **24**, 923-931. <https://doi.org/10.1002/jsde.12513>
- [4] Wang, R., Xu, X., Shi, X., Kou, J., Song, H., Liu, Y., *et al.* (2022) Promoting Efficacy and Environmental Safety of Pesticide Synergists via Non-Ionic Gemini Surfactants with Short Fluorocarbon Chains. *Molecules*, **27**, Article 6753. <https://doi.org/10.3390/molecules27196753>
- [5] Stoll, W.M., al Shureqi, H., Finol, J., Al-Harthi, S.A., Oyemade, S., de Kruijf, A., *et al.* (2011) Alkaline/Surfactant/Polymer Flood: From the Laboratory to the Field. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **14**, 702-712. <https://doi.org/10.2118/129164-pa>
- [6] Zhang, S., Hu, F., Li, J., Lv, L. and Lu, H. (2021) Lubrication Effect of Polyvinyl Alcohol/Polyethylene Glycol Gel for Artificial Joints. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2021**, Article ID: 2588784. <https://doi.org/10.1155/2021/2588784>
- [7] Harada, A. and Kataoka, K. (2006) Supramolecular Assemblies of Block Copolymers in Aqueous Media as Nanocontainers Relevant to Biological Applications. *Progress in Polymer Science*, **31**, 949-982. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.09.004>
- [8] Dan, A., Ghosh, S. and Moulik, S.P. (2009) Physicochemistry of the Interaction between Inulin and Alkyltrimethylammonium Bromides in Aqueous Medium and the Formed Coacervates. *The Journal of Physical Chemistry B*, **113**, 8505-8513. <https://doi.org/10.1021/jp902641d>
- [9] Bai, G., Nichifor, M. and Bastos, M. (2010) Cationic Polyelectrolytes as Drug Delivery Vectors: Calorimetric and Fluorescence Study of Rutin Partitioning. *The Journal of Physical Chemistry B*, **114**, 16236-16243. <https://doi.org/10.1021/jp1071555>
- [10] Spiridonov, A.M., Sokolova, M.D., Fedoseeva, V.I., Nikiforov, L.A. and Okhlopova, A.A. (2021) Adsorption Complexes 'Zeolite-Cationic Surfactant': Properties and Surface Activity in a Polymer Composite Material Based on Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene. *Materials Today Chemistry*, **20**, Article 100441. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100441>
- [11] Shirahama, K., Tsujii, K. and Takagi, T. (1974) Free-Boundary Electrophoresis of Sodium Dodecyl Sulfate-Protein Polypeptide Complexes with Special Reference to SDS-Polyacrylamide Gel Electrophoresis. *The Journal of Biochemistry*, **75**, 309-319. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jbchem.a130398>
- [12] Czajka, A. and Armes, S.P. (2021) Time-Resolved Small-Angle X-Ray Scattering Studies during Aqueous Emulsion Polymerization. *Journal of the American Chemical Society*, **143**, 1474-1484. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c11183>
- [13] Niemiec, A. and Loh, W. (2007) Interaction of Ethylene Oxide-Propylene Oxide Copolymers with Ionic Surfactants Studied by Calorimetry: Random versus Block Copolymers. *The Journal of Physical Chemistry B*, **112**, 727-733. <https://doi.org/10.1021/jp0761362>
- [14] Baloch, M.K., Ahmad, F., Rauf, A. and Durrani, G.F. (2009) Effect of Polyethyleneoxide and Sodium Chloride over the Micellization Behavior of Sodium Dodecyl Sulfate. *Journal of Applied Polymer Science*, **114**, 1444-1448. <https://doi.org/10.1002/app.30321>
- [15] Trabelsi, S. and Langevin, D. (2006) Co-Adsorption of Carboxymethyl-Cellulose and Cationic Surfactants at the Air-Water Interface. *Langmuir*, **23**, 1248-1252. <https://doi.org/10.1021/la062296d>
- [16] Holmberg, C., Nilsson, S., Singh, S.K. and Sundeloef, L.O. (1992) Hydrodynamic and Thermodynamic Aspects of the SDS-EHEC-Water System. *The Journal of Physical Chemistry*, **96**, 871-876. <https://doi.org/10.1021/j100181a064>
- [17] Dobrynin, A.V., Colby, R.H. and Rubinstein, M. (1995) Scaling Theory of Polyelectrolyte Solutions. *Macromolecules*, **28**, 1859-1871. <https://doi.org/10.1021/ma00110a021>
- [18] Ritacco, H.A. (2017) Electro-Optic Kerr Effect in the Study of Mixtures of Oppositely Charged Colloids. The Case of Polymer-Surfactant Mixtures in Aqueous Solutions. *Advances in Colloid and Interface Science*, **247**, 234-257. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.05.015>
- [19] Gao, N., Geyer, F., Pilat, D.W., Wooh, S., Vollmer, D., Butt, H., *et al.* (2018) How Drops Start Sliding over Solid Surfaces. *Nature Physics*, **14**, 191-196. <https://doi.org/10.1038/nphys4305>
- [20] Chen, L., Feng, H., Zhang, S., Liu, Q., Zhang, J. and Xue, C. (2024) An Experimental Study on the Wettability of Nanofluids. *AIP Advances*, **14**, Article 095222. <https://doi.org/10.1063/5.0226337>
- [21] Ghorpade, V.S., Dias, R.J., Mali, K.K. and Mulla, S.I. (2019) Citric Acid Crosslinked Carboxymethylcellulose-Polyvinyl Alcohol Hydrogel Films for Extended Release of Water Soluble Basic Drugs. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, **52**, 421-430. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.05.013>

-
- [22] He, X., Zhang, L. and Shen, Q. (2022) Quantitatively Evaluation of the Hydrogen Bonding, Wettability and Sorption Behaviors of Poly(Vinyl Alcohol)/Tea Polyphenols Composites. *Journal of Polymer Research*, **29**, Article No. 485. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03301-1>
- [23] Qiao, G., Wang, P. and Hou, D. (2024) Quasi-Reaction Coarse-Grained Simulation: Unveiling the Mesoscale Interfacial Response of CSH/PVA Fiber. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 32633-32648. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03994>
- [24] Su, W., Hui, L., Yang, Q., Wang, L., Ma, X. and Zhao, Y. (2022) Electrospinning Hydrophobically Modified Polyvinyl Alcohol Composite Air Filter Paper with Water Resistance and High Filterability Properties. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, **37**, 356-365. <https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0066>
- [25] Xu, H., Li, P., Ma, K., Welbourn, R.J.L., Penfold, J., Thomas, R.K., *et al.* (2019) The Role of Competitive Counterion Adsorption on the Electrolyte Induced Surface Ordering in Methyl Ester Sulfonate Surfactants at the Air-Water Interface. *Journal of Colloid and Interface Science*, **533**, 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.08.061>
- [26] Chari, K., Seo, Y. and Satija, S. (2004) Competitive Adsorption at the Air-Water Interface from a Self-Assembling Polymer-Surfactant Mixture. *The Journal of Physical Chemistry B*, **108**, 11442-11446. <https://doi.org/10.1021/jp049062s>
- [27] Slatanova, A., Campbell, R.A., Islas, L., Welbourn, R.J.L., R. P. Webster, J., Vaccaro, M., *et al.* (2022) Interfacial Complexation of a Neutral Amphiphilic 'Tardigrade' Co-Polymer with a Cationic Surfactant: Transition from Synergy to Competition. *Journal of Colloid and Interface Science*, **606**, 1064-1076. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.014>