

颗粒稳定的Pickering泡沫的研究进展

朱 玥^{*#}, 尹海蓉

南通大学化学化工学院, 江苏 南通

收稿日期: 2022年8月4日; 录用日期: 2022年8月14日; 发布日期: 2022年8月25日

摘 要

近年来, 将纳米颗粒(NPs)添加到表面活性剂泡沫体系以提高泡沫体系的稳定性受到了广泛的关注。本文旨在回顾和总结近年来关于颗粒稳定泡沫的最新研究结果, 分析纳米颗粒的大小、表面湿润性、浓度和与表面活性剂的协同作用等主要因素对泡沫的影响, 并确定未来研究的方向。在本文中, 首先介绍了泡沫的结构与性质, 其次介绍了纳米颗粒提高泡沫稳定性的机理。最后通过回顾近几年的研究, 讨论了颗粒大小、表面湿润性、浓度等因素对泡沫稳定性的影响, 结果表明: 纳米颗粒对泡沫稳定性的影响是由多种因素共同构成的, 目前还没有办法确定和衡量某一种单一性质对泡沫稳定性的贡献, 这可能将成为未来研究的主题。

关键词

泡沫, Pickering泡沫, 纳米颗粒, 表面活性剂

The Study on Development of Pickering Foams Stabilized by Particles

Yue Zhu^{*#}, Hairong Yin

School of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu

Received: Aug. 4th, 2022; accepted: Aug. 14th, 2022; published: Aug. 25th, 2022

Abstract

The addition of nanoparticles (NPs) to the foam systems including the surfactant to improve the stability of foams has received extensive attention for several years. This paper aims to review and summarize the latest research on particle-stabilized foams in recent years, analyze the effects of

*第一作者。

#通讯作者。

nanoparticles size, surface wettability, concentration and synergy with surfactants on the foams, and identify directions for future research. In this report, the structure and properties of the foams are firstly introduced, and then the mechanism that nanoparticles improve the stability of the foams is briefly introduced. Finally, some major factors such as particle size, surface wettability, and concentration on the foam stability are introduced and discussed through new findings in recent years. The results of the study show that the effects of nanoparticles on the stability of the foams are composed of a combination of factors, and there is currently no way to identify and measure the contribution of a single property to the stability of the foams, which may be a subject of future research.

Keywords

Foams, Pickering Foams, Nanoparticles, Surfactants

Copyright © 2022 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. 泡沫

泡沫是典型的分散系统(如图 1), 即把一种或一种以上的物质分散在其他物质中所构成的系统。它是由于气体分散在液体中构成的。其中, 被分散的气体称之为分散质; 而分散气体的液体称之为分散介质。由于气泡的半径一般大于 100 nm, 可以轻易被肉眼观察, 所以属于分散系统中的粗分散系统[1]。经验表明, 纯液体不能够产生稳定的泡沫。泡沫的产生要求液体中必须含有两个或两个以上的组分, 即还需要在液体中入发泡剂。最典型的发泡剂是表面活性剂。表面活性剂吸附在气-液界面时, 大大降低了界面张力, 从而稳定泡沫。除了应用最广泛的表面活性剂之外, 蛋白质和另外一些水溶性高分子也能够起到稳定泡沫的作用[2]。

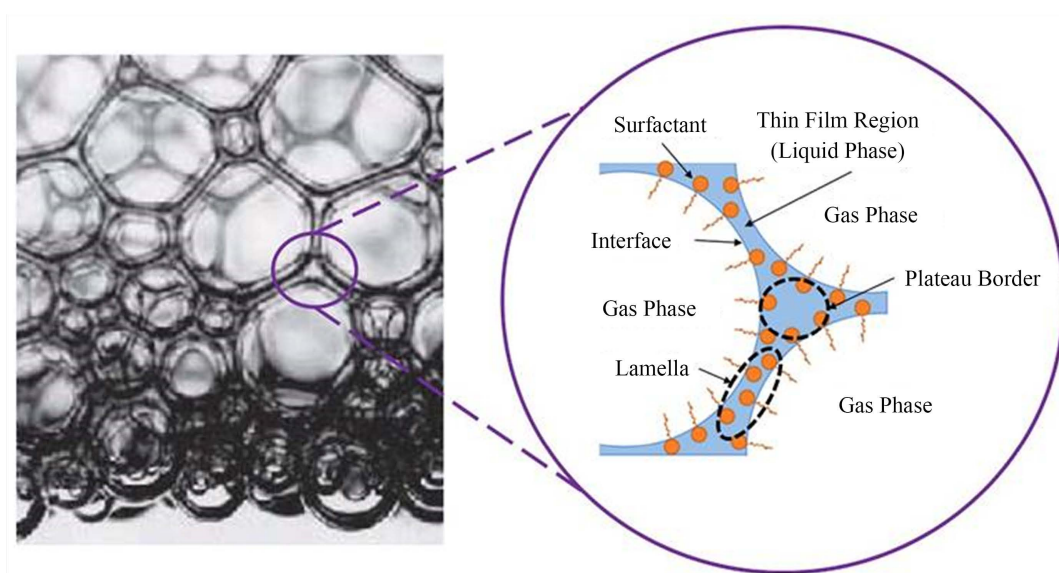


Figure 1. The structure of foams

图 1. 泡沫体系示意图

1.1. 泡沫的结构

在气/液体系中, 泡沫由多个单气泡相互聚集产生, 并且两个气泡聚集时会在接触面形成液膜。当三个气泡聚集时, 则会在接触面会形成三角式的液柱, 三个隔膜互成 120° 是稳定的力学体系, 我们称之为 Plateau 边界[3]。若再增加一个气泡后, 四个气泡的隔膜不满足 Plateau 边界, 是非常不稳定的体系, 任何细微的外力作用, 会使隔膜移动, 最后形成较稳定的三气泡接触模型(如图 2 所示)。因为这样的原因, 二维泡沫大致呈现均匀的六角或网状结构。

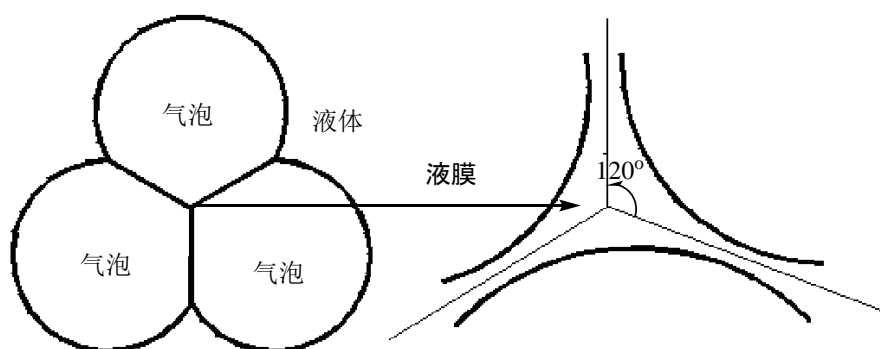


Figure 2. Configuration of interfacial film between bubbles—Plateau border
图 2. 三个气泡形成的稳定 Plateau 边界

1.2. 泡沫的性质

泡沫的广泛应用得益于它有许多性质, 如溶液的发泡能力(泡沫体系生成的难易程度以及泡沫量的多少)、泡沫的稳定性(泡沫体系的持久程度) [4], 泡沫的流变性, 泡沫的润滑性能, 泡沫的悬浮能力, 泡沫的热物理性质, 气泡大小分布等。在这些性质之中, 研究最多和应用最广的是发泡能力和泡沫的稳定性 [5]。

2. 表面活性纳米颗粒

2.1. 纳米颗粒的表面湿润性

纳米颗粒的表面湿润性由颗粒和流体界面的接触角 θ 的大小来表示。当 θ 小于 90° 时, 颗粒为亲水颗粒(Hydrophilic), 一般的金属氧化物颗粒就是亲水颗粒[6]。相反, 当接触角大于 90° 时, 颗粒为疏水颗粒(Hydrophobic) (如图 3), 比如经适当表面处理的 SiO_2 颗粒就是疏水颗粒。而当固体颗粒的表面湿润性能够使颗粒恰好附着在气/液界面, 那么颗粒就具备表面活性。

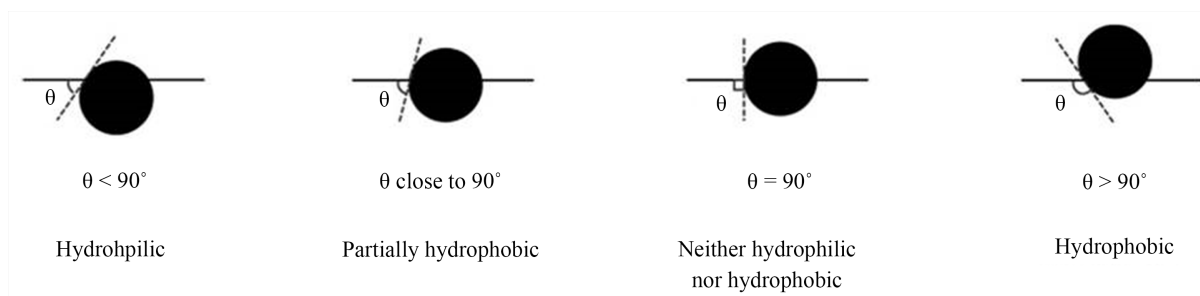


Figure 3. The contact angle of particles at air/water interface
图 3. 颗粒在气/液界面的接触角

当颗粒处于流体界面时, 所形成的单层结构会发生自发弯曲, 这种性质和表面活性剂形成的单分子层的性质相似。所以, 当颗粒为亲水颗粒时, 在泡沫中颗粒会包裹气体, 形成气泡结构; 而当颗粒为疏水颗粒时, 在泡沫体系中会形成反向泡沫结构[6] (如图 4 所示)。

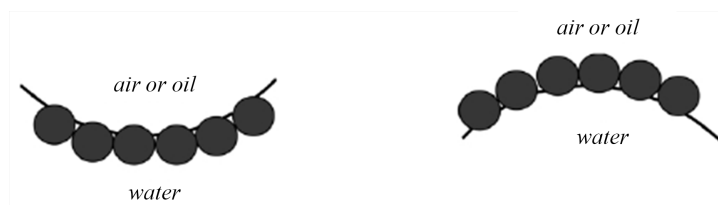


Figure 4. Positioning of particles at a curved fluid-water interface
图 4. 颗粒在弯曲流体界面上的合适位置

2.2. 纳米颗粒的表面活性化

大多数天然颗粒是不具备表面活性的。市售的商品纳米颗粒多数是极度亲油, 如纳米炭黑; 或者是极度亲水, 如纳米 SiO_2 颗粒, 纳米 CaCO_3 颗粒。一般必须通过对颗粒进行表面改性才能使颗粒具有表面活性。通常使用的表面改性途径包括制备双亲颗粒、均匀涂层表面改性和原位表面活性化等[7] [8]。

3. 纳米颗粒稳定的泡沫体系

颗粒稳定的泡沫称之为 Pickering 泡沫。最早由英国科学家 Ramsden 和 Pickering 发现。他们经过实验研究发现, 细微的固体颗粒可以用来稳定乳状液和泡沫。目前, Pickering 泡沫在矿物浮选、环境、材料等方面有着广泛的应用, 并且随着人们对关于纳米颗粒的不断深入研究[9], Pickering 泡沫受到越来越多的关注。

3.1. 颗粒稳定的泡沫的特点

和表面活性剂稳定的泡沫相比, Pickering 泡沫在稳定性方面, 有着更为优异的表现。然而, 泡沫会随着时间的推移而消泡。消泡主要是由于泡沫体系中气泡的合并、粗化和泡沫排水所导致的[10] [11] (如图 5)。

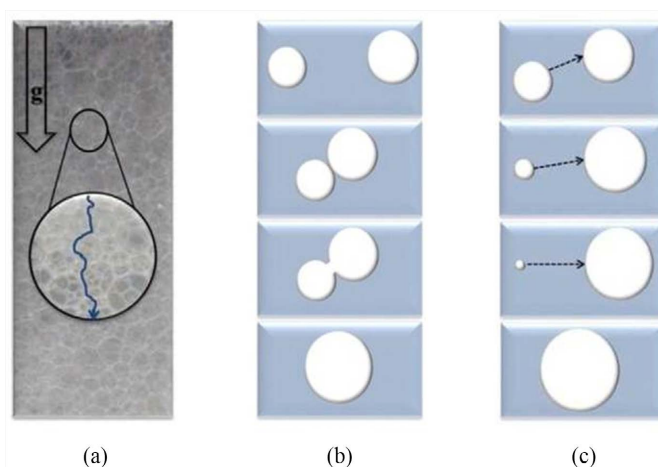


Figure 5. Three mechanisms of foams to be unstable. (a) Drain off; (b) Bubble coalescence; (c) Bubble curing

图 5. 泡沫失稳的三种机制示意图。(a) 液体排出; (b) 气泡合并; (c) 气泡粗化

Binks [12], Horosov [13], Kaptay [14]等人的实验研究, 给出了解释上述这些现象(合并, 粗化和排水)的四个观点。首先表面活性剂分子很容易从气液界面脱离。外界只要能够提供少许的这种能量, 就会很容易导致表面活性剂的脱离, 从而造成泡沫体系消泡。其次, 气液界面存在一定的压差(即毛细压力), 泡沫体系中的气泡聚结现象会随着压差的增加而加快。除此之外, 只需要很低的能量就能使薄膜破裂和将表面活性剂泡沫体系中的气泡间距缩小为零。最后一个因素是表面活性剂稳定的泡沫体系中液体的粘度很低, 这会导致液体从液膜中加快排出。而在表面活性剂稳定的泡沫体系中加入纳米颗粒将有效改善这些现象。

与传统的表面活性剂稳定的泡沫不同, Pickering 泡沫由于具有数千个 kt 的吸附自由能, 其在气液界面的吸附几乎是一个不可逆的过程, 因而形成的超稳定分散体系, 可称之为准热力学稳定体系。Binks 和 Lumsdon [15]在其 2000 年发表的论文中指出, 纳米颗粒从气液表面去除颗粒所需要的脱附能是自然界中很难达到的高能量, 下式为 Gbadamosi [16]等人在 2019 年提出的颗粒脱附能公式(3.1)。如图 6 所示, 假设颗粒足够小(粒径甚至小于 $1 \mu\text{m}$), 此时重力可以忽略不计, 则半径为 R 的颗粒自界面张力为 γ_{ap} 的气/液界面脱附所需要的能量为

$$W_r \text{ (脱附能): } W_r = \pi R^2 \gamma_{\text{ap}} (1 \pm \cos \theta)^2 \quad (3.1)$$

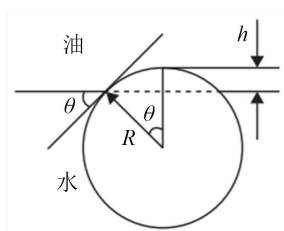


Figure 6. Calculation of adsorption/desorption energy based on the contact angle of particles at the interface

图 6. 基于颗粒在界面的接触角计算其吸附或脱附自由能

其中“+”表示颗粒从界面移入气相, “-”表示颗粒从界面移入液相。经过实验验证, 在相同的条件下, 大小为 10 nm , 接触角近似为 90° 的颗粒(如经过表面处理的 SiO_2 颗粒)的脱附能是表面活性剂分子脱附能的 1000 倍。进一步说明了在表面活性剂稳定的泡沫中加入纳米颗粒能够增加该体系的稳定性。同时, 固体颗粒能够附着在气泡界面上, 形成一个阻止气泡中液体扩散的屏障, 导致气泡合并、粗化及排液速度的大幅降低。除此之外, Horosov [13]等人在 2008 年的论文中指出, 不同的相对湿润性会导致颗粒在气泡薄膜的表面存在不同的排列状态(如图 7)。

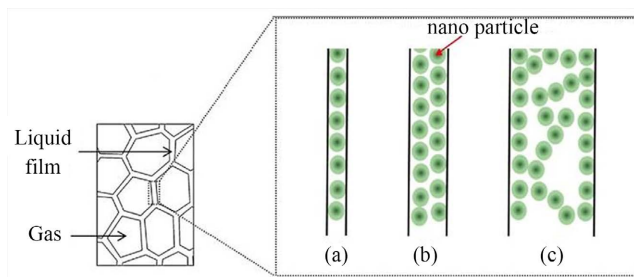


Figure 7. Arrangement of the particles at the air/water interface: (a) The structure of bridged monolayer particles; (b) The structure of close packed double layer particles; (c) The mesh structure of particles in the film aggregation

图 7. 气液界面的颗粒排列状态: (a) 桥接型单层颗粒结构; (b) 紧密堆积型双层颗粒结构; (c) 膜内的颗粒聚集网络

在这三种不同的排列状态中, 网络结构稳定性最好, 而单层结构稳定性最差。但是总的来说这三种排列结构中的颗粒都会不断动态地重新排列, 从而降低了泡沫薄膜破裂的趋势。另一方面, 颗粒的加入会导致液体粘度的增加, 以此降低排液速度, 以提高泡沫的稳定性。

3.2. 颗粒稳定泡沫的影响因素

经过长期的科研探索, 研究者们已经确定了影响颗粒稳定泡沫性能的几个关键参数, 它们分别是: 颗粒的尺寸、颗粒表面湿润性、颗粒的浓度、表面活性剂和颗粒之间的协调作用以及颗粒类型的影响。下面会分别讨论每个因素的影响。

3.2.1. 颗粒的尺寸

Kim [17]在 2016 年指出, 当颗粒具有相同的表面特性时, 颗粒的尺寸是影响泡沫稳定性的重要因素。Hu [18]等人在 2018 年研究了尺寸分别为 20, 100, 500 nm 的 SiO₂ 纳米颗粒对 CTAB (十六烷基三甲基溴化铵)泡沫体系的影响。

他们观察到泡沫的稳定性和颗粒的尺寸成反比(如图 8)。20 nm 的 SiO₂ 颗粒对泡沫的稳定性有着最有效的改善, 他在论文中指出, 较小的 SiO₂ 纳米颗粒能够创建一个更紧密的颗粒层, 有效地防止泡沫体系中的粗化和聚结。

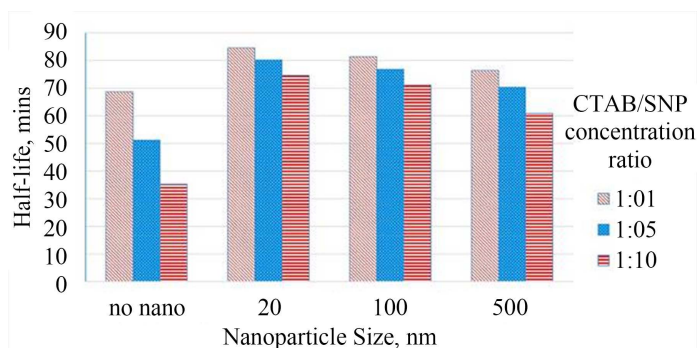


Figure 8. Correlation between half-life of the CTAB aqueous solutions, dispersions of silica nanoparticles in CTAB aqueous solutions and CTAB concentration

图 8. CTAB 溶液和 CTAB/二氧化硅纳米粒子(SNPs)分散体的半衰期与 CTAB 浓度的关系

此外, Kim [17]等人在 2016 年从充砂和岩心驱替实验中观察到泡沫粘度会随着颗粒尺寸的减小而增加。Rafati [19]和他的团队在 2016 年测定了性质相同, 尺寸不同 BaSO₄ 纳米颗粒(1.38 μm), CaSO₄ 纳米颗粒(7.61 μm), CaCO₃ 纳米颗粒(12.16 μm), SrSO₄ 纳米颗粒(64.14 μm), Fe₃O₄ 纳米颗粒(131.04 μm), 对泡沫半衰期的影响。研究结果表面, 在表面活性剂泡沫的结构中添加纳米颗粒, 包括硫酸钡、碳酸钙和硫酸锶, 浓度分别为 0.05、0.1、0.5 和 0.1 wt%, 能够提高泡沫的半衰期, 从而提高了稳定性。然而, 这些结果对于硫酸钙和氧化铁颗粒并不适用, 反而减少了泡沫的半衰期, 从而降低了泡沫的稳定性。

Kim [17]在他的论文中指出由于更大的扩散系数, 小尺寸的纳米颗粒很容易被吸附到气液界面上。但是另一方面, Rafati [20]等人在 2014 年观察到大尺寸的纳米颗粒也可以存在于薄片和高原边界, 这具体取决于薄片的厚度, 从而通过减缓液体排出的速度来提高泡沫稳定性。

3.2.2. 颗粒的相对湿润性

第 2 部分中介绍了颗粒相对湿润性的基本概念。当颗粒的相对湿润性能够使颗粒恰好附着在气液界

面,那么颗粒就具有表面活性。Horozov [13]在 2008 年和 Kruglyakov [21]等人在 2011 年的研究中都指出,尽管亲水颗粒不能牢固地吸附在气液界面上,但是亲水颗粒确实能够提高泡沫的稳定性。Singh 和 Mohanty [22]在 2015 年通过共聚焦显微镜观察了从由亲水颗粒和阴离子表面活性剂组成的泡沫薄片液体排出的延迟过程。实验证明,在存在亲水颗粒的情况下,厚度更厚,也就是说排液更加缓慢。在达到临界膜厚度后,气泡膜会变得平坦,并且随着薄片液体的进一步排出导致液体被拉向颗粒。薄片中的颗粒堆积和重排会使薄膜变得稳定。如图 9 所示,纳米颗粒可以从双层排列转变为单层排列。最重要的是,Vatanparast [23]等人在 2018 年发布的论文中指出在表面活性剂中加入具有相同电荷的亲水纳米颗粒不会降低起泡性。相反,它能够通过静电排斥作用力促进表面活性剂吸附到气液界面上,从而有效降低溶液的界面张力,使得泡沫更加稳定。

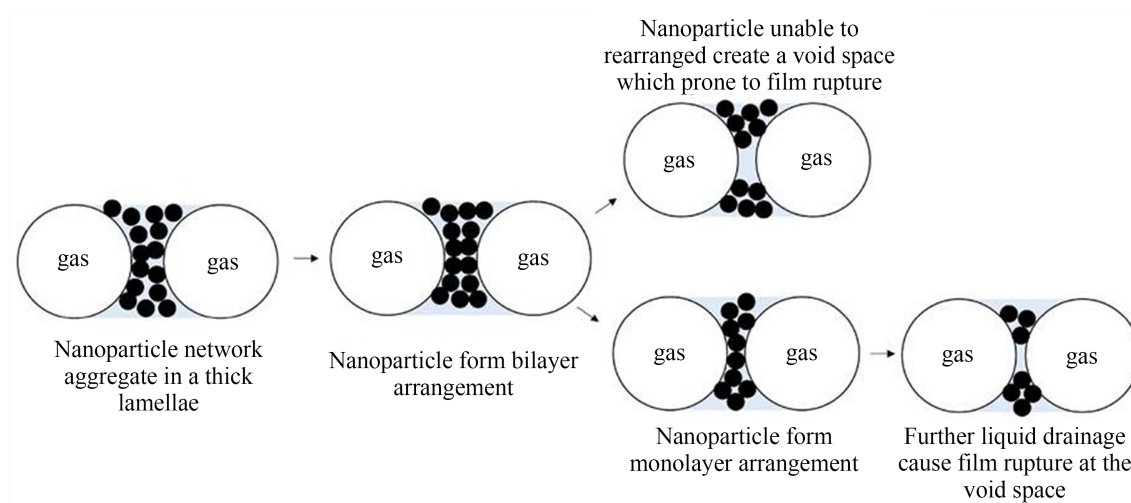


Figure 9. The stability mechanism of hydrophilic particles avoiding the film break

图 9. 亲水颗粒防止膜破裂的稳定机理

而 Binks [15]和他的团队发现部分疏水的颗粒也能够通过粘附在气液界面上来增强泡沫系统的稳定性。这些颗粒可以在接近 90° 的接触角下达到最大附着能量,从而提高泡沫稳定性(如图 10 所示)。

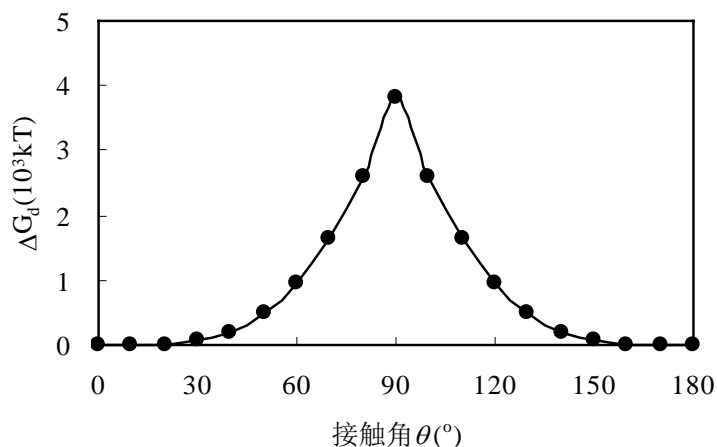


Figure 10. Desorption energy of a particle from air/water interface as function of contact angle

图 10. 纳米颗粒自水界面的脱附自由能随其接触角的变化

Arriaga [24]等人在他们的论文中提到, 阳离子表面活性剂和带负电荷的二氧化硅纳米粒子的共同作用下, 随着纳米粒子变为部分疏水性, 整体泡沫稳定性会增加。Kruglyakov [21]和他的团队在 2011 年的研究论文中提到当纳米颗粒由强亲水性变成部分疏水时, 泡沫稳定性随着纳米颗粒的水相接触角的增加而增加。但是, 接触角超过 90° 之后, 随着接触角的增加会形成大的颗粒聚集体。从而使泡沫稳定性降低, 这是由于重力, 纳米颗粒不能“附着”在气液界面上。但是 Zargartalebi [25]在他 2015 年发布的论文中指出, 对于部分疏水的颗粒, 是能够显著增强泡沫的稳定性的。

根据以上的研究可以确定: 颗粒的相对湿润性是影响泡沫体系稳定性的重要因素, 在实际应用过程中应考虑针对不同的泡沫体系应该选择不同湿润性的颗粒。

3.2.3. 亲水性颗粒浓度的影响

Karakashev [26]和他的团队在 2011 年研究了在十二烷基硫酸钠(SDS)中加入海泡石颗粒对泡沫稳定性的影响。结果表明, 在固定表面活性剂浓度的情况下, 随着颗粒浓度的增加, 泡沫的半衰期也明显增加。2018 年 Maurya [27]等人在癸烷中也观察到了类似的现象。

然而, Hu [18]等人在 2018 年的研究中指出当使用的颗粒和表面活性剂所带有的电荷不同时, 起泡性会降低, 如图 11 所示。随着颗粒浓度的增加, 更多的表面活性剂分子被吸附在颗粒表面; 因此, 通过实验观察到 Zeta 电位降低。当附着在表面的离子浓度与颗粒的表面电荷之间达到平衡时, 可以降低 Zeta 电位或零 Zeta 电位。由于溶液中可用的表面活性剂分子较少, 因此颗粒稳定泡沫的起泡性随着颗粒浓度的增加而降低。Alyousef [28]等人在 2018 年的实验中将具有亲水性的二氧化硅分别与三种非离子型表面活性剂混合也观察到了类似的现象。

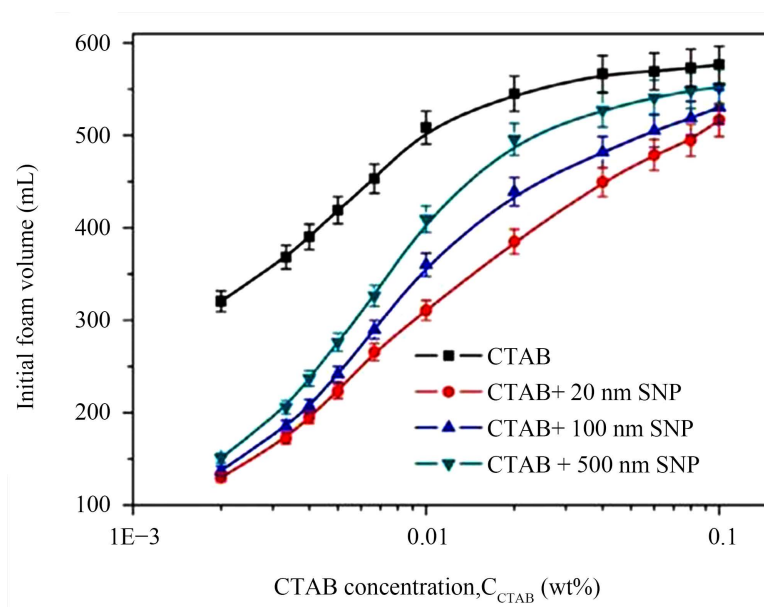


Figure 11. Foam volume as function of CTAB concentration for CTAB aqueous solutions and dispersions of 0.1 wt.% silica nanoparticles in CTAB aqueous solutions

图 11. 二氧化硅纳米颗粒(SNPs)浓度为 0.1 wt%, 泡沫体积随 CTAB 浓度的变化

总之, 增加颗粒浓度可以提高泡沫稳定性。然而, 某些情况下它也可能会降低其起泡性, 具体取决于所使用的纳米颗粒和表面活性剂类型。因此, 在任何颗粒稳定的泡沫实际应用之前, 确定最佳的颗粒

浓度和使用的表面活性剂来实现最佳的起泡性和泡沫稳定性至关重要。

3.2.4. 颗粒和表面活性剂的协同作用的影响

颗粒表面电荷和表面活性剂净电荷之间的相互作用也是影响泡沫体系稳定性的重要因素之一。带相反电荷的颗粒和表面活性剂之间存在着静电吸引力, 而带相同电荷的颗粒和表面活性剂之间存在着静电排斥力。Hu [18]和他的团队在 2018 年的研究中指出与传统的表面活性剂稳定的泡沫相比, 具有相同或相反电荷的纳米颗粒和表面活性剂的混合物可提高泡沫体系的稳定性。可以通过混合物中的颗粒的分散状态、Zeta 电位、颗粒聚集和泡沫稳定性来分析协同效应。

Veyskarami [29]等人在 2018 年的研究中指出带正电荷的颗粒和阴离子表面活性剂存在静电吸引力, 能够使得表面活性剂吸附在颗粒表面。因此, 当相反电荷的表面活性剂在颗粒表面形成单层结构时, 可能会使颗粒的润湿性从亲水性转为部分疏水性也就是原位疏水化作用。然而进一步增加颗粒疏水性可能会使接触角超过 90° , 从而导致固体颗粒的絮凝。因此, 有必要确定最佳颗粒和表面活性剂浓度, 以避免颗粒变得极度疏水, 从而避免絮凝。

Guo 和 Aryana [30]在 2016 年的研究和 Vatanparast [23]等人在 2018 年的研究中指出具有静电排斥作用的颗粒与表面活性剂体系中, 分散液的 Zeta 电位可以保持不变或进一步增加。根据 Vatanparast 等人的说法通过添加 SDS, 体系中的亲水性二氧化硅纳米颗粒的 Zeta 电位几乎保持不变, 这意味着表面活性剂分子不会改变纳米粒子的表面电荷。这个结果在某种程度上是可以预测的, 因为纳米粒子表面和表面活性剂的电荷相同。然而, 在存在颗粒的情况下, SDS 分子和颗粒之间的静电排斥在降低界面张力方面表现更好。

尽管颗粒和表面活性剂之间的相互作用基于不同的机制, 但根据 Hu [18]和 Yekeen [10]的论文报道, 带相反电荷的颗粒和表面活性剂之间可以实现更长的泡沫半衰期使得泡沫的稳定性更好。因此, 静电吸引力在增强泡沫稳定性方面更为突出。然而, 还要考虑到带相反电荷的纳米粒子和表面活性剂的最佳浓度, 以避免粒子在溶液中聚集和沉淀。

3.2.5. 颗粒类型的影响

总的来说与表面活性剂稳定的泡沫相比, 颗粒能够增强泡沫的稳定性。泡沫稳定性的增强和颗粒特性密不可分, 例如密度、尺寸、形状、润湿性和表面电荷, 这些特性都会影响稳定机制。

Yekeen [10]等人对表面活性剂(阴离子、阳离子和非离子)和颗粒类型(Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiO_2 、 TiO_2 、 ZnO 、 CuO 和碳纳米管)的影响进行了广泛研究。据观察, 纳米粒子表面电荷和表面活性剂之间的静电吸引力在稳定泡沫方面起着至关重要的作用。这种相互作用允许在气液界面更好地吸附颗粒并在界面处更紧密地堆积, 从而减缓液体排出以增强泡沫稳定性。在使用粉煤灰颗粒与 MFOMAX 表面活性剂结合的泡沫半衰期测量中, Phong [31]给出了任何颗粒都可用于稳定表面活性剂泡沫的结论。这是因为颗粒在气液界面的不可逆吸附特性通过充当流体之间的屏障来减少液体排出并抑制气泡聚结。Wang [32]等人将粉煤灰和 SDS、1,4-二(2-乙基己基)丁二酸酯磺酸钠(AOS)表面活性剂混合也发现了类似的现象。最近的研究评估了碳纳米管增强泡沫稳定性的能力。Ramanathan 等人[33]通过泡沫半衰期的测定比较了二氧化硅和浓缩多壁碳管(MWCNT) (如图 12 所示)与 AOS 表面活性剂的泡沫性能。结果表明, MWCNT 的泡沫稳定性是二氧化硅纳米粒子的 4.6 倍。同时, 在泡沫驱实验期间, MWCNT 表现出比二氧化硅更高的流动性降低因子。与二氧化硅纳米粒子相比, MWCNT 发泡和稳泡性能更好, 主要归因于 MWCNT 的特性(棒状结构、尺寸、Zeta 电位和部分疏水性)。颗粒的特性有助于提高泡沫稳定性。

应进一步探索和研究其他纳米颗粒的潜在用途, 特别是飞灰等丰富的副产品颗粒, 以实现潜在的低成本产品和可持续性发展。

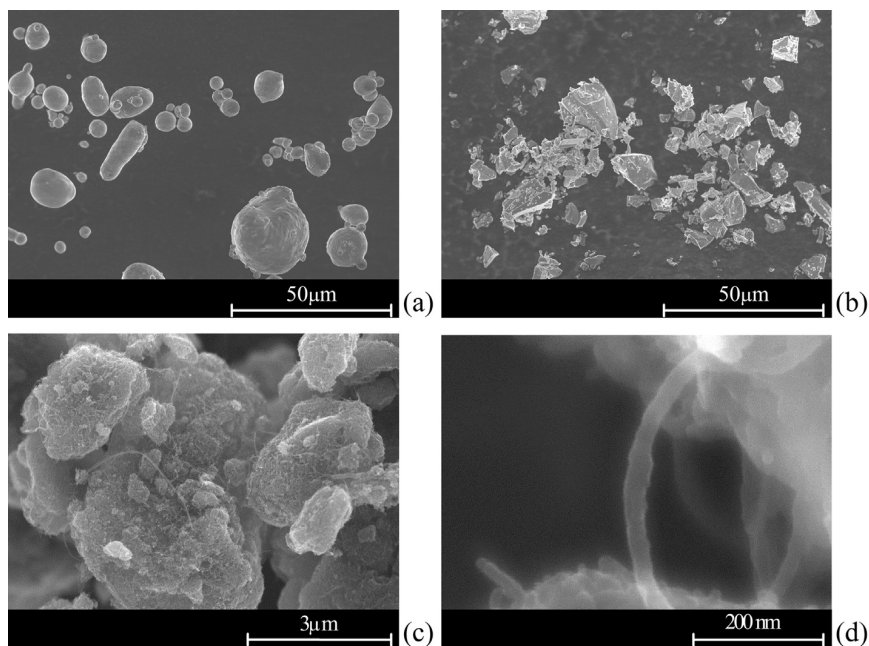


Figure 12. SEM image of the particles: (a) Al-12 alloy; (b) TiH₂ powder; (c) (d) MWCNTs-COOH

图 12. 颗粒的扫描电镜: (a) Al-12 合金; (b) TiH₂ 粉末; (c) (d) MWCNTs-COOH

4. 结论

通过加入纳米颗粒能够提高泡沫的稳定性。然而,稳定性的增强程度取决于多个因素,包括纳米颗粒的尺寸、类型、表面润湿性、纳米颗粒面电荷与表面活性剂净电荷之间的协同效应。主要研究结果如下。

- 1) 纳米颗粒稳定的泡沫稳定性与颗粒的大小成反比。
- 2) 亲水性和部分疏水性纳米颗粒均能提高泡沫稳定性。
- 3) 纳米颗粒的存在增加了泡沫的稳定性。然而,提高稳定性的程度取决于纳米颗粒的性质(即密度、尺寸、形状、润湿性和表面电荷)。
- 4) 相同的电荷导致表面活性剂与纳米颗粒之间发生斥力,使表面活性剂向气液界面移动,降低界面张力。当表面活性剂在纳米颗粒表面的吸附使纳米颗粒的表面性质从亲水性提高到部分疏水性,从而提高了泡沫的稳定性。然而,疏水性的过度增加可能会导致颗粒聚集,导致颗粒沉积,降低泡沫稳定性。因此,必须确定带电的纳米颗粒和表面活性剂的最佳浓度。

基金项目

国家自然科学基金项目(21802075)。

参考文献

- [1] 尹忠. 泡沫的性质及其在油田的应用[J]. 表面活性剂工业, 1996, 2(3): 40-42.
- [2] 周风山. 泡沫性能研究[J]. 油田化学, 1989, 6(3): 267-271.
- [3] 崔燕贞. 纳米碳酸钙-表面活性剂混合体系的泡沫性能研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2009: 13-15.
- [4] 王丽娟, 张高勇, 董金凤, 等. 泡沫性能的测试和评价方法进展[J]. 日用化学工业, 2005, 35(3): 171-173.
- [5] 郭志伟, 徐昌学, 路遥等. 泡沫起泡性、稳定性及评价方法[J]. 化学工程师, 2006, 5(4): 51-54.

- [6] Binks, B.P. (2019) Particles as Surfactants Similarities and Differences. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, **7**, 21-41. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(02\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(02)00008-0)
- [7] Aveyard, R., Binks, B.P. and Clint, J.H. (2003) Emulsions Stabilised Solely by Colloidal Particles. *Advances in Colloid & Interface Science*, **8**, 41-67. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(02\)00069-6](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(02)00069-6)
- [8] 陈子成, 刘温霞, 张克庆. Pickering 乳状液[J]. 西南造纸, 2005, 34(6): 2-3.
- [9] Binks, B.P. and Horozof, T.S. (2006) *Colloid Particles at Liquid Interfaces*. Cambridge University Press, London, 78, 89-133.
- [10] Yekeen, N., Manan, M.A., Idris, A.K., et al. (2018) A Comprehensive Review of Experimental Studies of Nanoparticles-Stabilized Foam for Enhanced Oil Recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **164**, 43-74. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.035>
- [11] Sun, Q., Li, Z., Wang, J., et al. (2015) Aqueous Foam Stabilized by Partially Hydrophobic Nanoparticles in the Presence of Surfactant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **471**, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.02.007>
- [12] Binks, B.P., Kirkland, M. and Rodrigues, J.A. (2008) Origin of Stabilisation of Aqueous Foams in Nanoparticle-Surfactant Mixtures. *Soft Matter*, **4**, 2373-2382. <https://doi.org/10.1039/b811291f>
- [13] Horozov, T.S. (2008) Foams and Foam Films Stabilised by Solid Particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, **13**, 134-140. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2007.11.009>
- [14] Kaptay, G. (2006) On The Equation of the Maximum Capillary Pressure Induced by Solid Particles to Stabilize Emulsions and Foams and on the Emulsion Stability Diagrams. *Colloids & Surfaces: A Physicochemical & Engineering Aspects*, **282**, 387-401. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.021>
- [15] Binks, B.P. and Lumsdon, S.O. (2000) Influence of Particle Wettability on the Type and Stability of Surfactant-Free Emulsions. *Langmuir*, **16**, 8622-8631. <https://doi.org/10.1021/la000189s>
- [16] Gbadamosi, A.O., Junin, R., Manan, M.A., et al. (2019) An Overview of Chemical Enhanced Oil Recovery: Recent Advances and Prospects. *International Nano Letters*, **9**, 171-202. <https://doi.org/10.1007/s40089-019-0272-8>
- [17] Kim, I., Worthen, A.J., Johnston, K.P., et al. (2016) Size-Dependent Properties of Silica Nanoparticles for Pickering Stabilization of Emulsions and Foams. *Journal of Nanoparticle Research*, **18**, Article No. 82. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3395-0>
- [18] Hu, N., Li, Y., Wu, Z., et al. (2018) Foams Stabilization by Silica Nanoparticle with Cationic and Anionic Surfactants in Column Flotation: Effects of Particle Size. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **17**, 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.04.008>
- [19] Rafati, R., Haddad, A.S. and Hamidi, H. (2016) Experimental Study on Stability and Rheological Properties of Aqueous Foam in the Presence of Reservoir Natural Solid Particles. *Colloids & Surfaces: A Physicochemical & Engineering Aspects*, **509**, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.08.087>
- [20] Rafati, R., Haddad, A.S. and Hamidi, H. (2014) Effect of Particles and Aggregated Structures on the Foam Stability and Aging. *Comptes Rendus Physique*, **15**, 748-760. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2014.09.009>
- [21] Kruglyakov, P.M., Elaneva, S.I. and Vilkova, N.G. (2011) About Mechanism of Foam Stabilization by Solid Particles. *Advances in Colloid and Interface Science*, **165**, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.02.003>
- [22] Singh, R. and Mohanty, K.K. (2018) Study of Nanoparticle-Stabilized Foams in Harsh Reservoir Conditions. *Transport in Porous Media*, **7**, 16-67.
- [23] Vatanparast, H., Shahabi, F., Bahramian, A., et al. (2018) The Role of Electrostatic Repulsion on Increasing Surface Activity of Anionic Surfactants in the Presence of Hydrophilic Silica Nanoparticles. *Scientific Reports*, **8**, 7251-7262. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25493-7>
- [24] Arriaga, L.R., Drenckhan, W., Salonen, A., et al. (2012) On the Long-Term Stability of Foams Stabilised by Mixtures of Nano-Particles and Oppositely Charged Short Chain Surfactants. *Soft Matter*, **8**, 61-103. <https://doi.org/10.1039/c2sm26461g>
- [25] Zargartalebi, M., Kharrat, R., Barati, N., et al. (2015) Enhancement of Surfactant Flooding Performance by the Use of Silica Nanoparticles. *Fuel*, **143**, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.040>
- [26] Karakashev, S.I., Ozdemir, O., Hampton, M.A., et al. (2011) Formation and Stability of Foams Stabilized by Fine Particles with Similar Size, Contact Angle and Different Shapes. *Colloids & Surfaces: A Physicochemical & Engineering Aspects*, **382**, 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.09.023>
- [27] Maurya, N., et al. (2018) Investigation of Synergistic Effect of Nanoparticle and Surfactant in Macro Emulsion Based EOR Application in Oil Reservoirs. *Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, **132**, 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.049>
- [28] Alyousef, Z.A., Almobarky, M.A. and Schechter, D.S. (2018) The Effect of Nanoparticle Aggregation on Surfactant

- Foam Stability. *Journal of Colloid and Interface Science*, **511**, 365-373. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.09.051>
- [29] Veyskarami, M. and Ghazanfari, M.H. (2018) Synergistic Effect of Like and Opposite Charged Nanoparticle and Surfactant on Foam Stability and Mobility in the Absence and Presence of Hydrocarbon: A Comparative Study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **166**, 433-444. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.076>
- [30] Guo, F. and Aryana, S. (2016) An Experimental Investigation of Nanoparticle-Stabilized CO₂ Foam Used in Enhanced Oil Recovery. *Fuel*, **186**, 430-442. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.058>
- [31] Phong, G.M., Pilus, R.M. and Mustaffa, A. (2020) Relationship between Fly Ash Nanoparticle-Stabilized-Foam and Oil Production in Core Displacement and Simulation Studies. *Fuel*, **266**, 117-233. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117033>
- [32] Wang, Y., Wang, J., Fan, H., *et al.* (2020) Effect of Inorganic Salt on Foam Properties of Nanoparticle and Surfactant Systems. *Tenside Surfactants Detergents*, **57**, 382-388. <https://doi.org/10.3139/113.110698>
- [33] Ramanathan, R. and Abdelwahab, O. (2021) A New Effective Multiwalled Carbon Nanotube-Foam System for Mobility Control. *SPE Journal*, **7**, 1-17.