

引用本文: 张道明, 王佳琪, 赖全勇, 张焯, 张新歌. 黄原胶悬浮液的制备及其稳定性分析 [J]. 离子交换与吸附, 2025, 41(6): 490-495.

Citation: ZHANG Dao-ming, WANG Jia-qi, LAI Quan-yong, ZHANG Ye, ZHANG Xin-ge. Research on the Fabrication and Stability of Xanthan Gum Suspensions [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2025, 41(6): 490-495.

· 研究论文 ·

文章编号: 1001-5493(2025)06-0490-06

DOI: 10.16026/j.cnki.ica.2025060490

黄原胶悬浮液的制备及其稳定性分析*

张道明^{1**}, 王佳琪¹, 赖全勇¹, 张焯², 张新歌²

(¹中海油田服务股份有限公司油田化学研究院, 三河 065200; ²功能高分子材料教育部重点实验室, 南开大学化学学院高分子化学研究所, 天津 300071)

摘要: 黄原胶的高黏度导致其在溶液中固含量较低, 难以满足工业应用需求, 因此开发高固含量的黄原胶溶液是一项具有挑战性的任务。文章提出一种简单高效的制备策略: 将黄原胶颗粒分散于非极性液体以提升其固含量, 并进一步评价该悬浮液的稳定性及影响因素。黄原胶悬浮液主要由黄原胶颗粒、聚合物黏合剂(羧丙基甲基纤维素)、表面活性剂(月桂醇聚氧乙烯醚磺基琥珀酸酯二钠或月桂基磺化琥珀酸单酯二钠)和植物油组成。通过改变悬浮液中表面活性剂成分和环境温度, 文章揭示了各组份间的相互作用, 并评估了表面活性剂的分子尺寸与温度对悬浮液稳定性的影响。研究发现, 较大分子尺寸的表面活性剂有助于提升悬浮液的稳定性; 而升高温度, 表面活性剂对悬浮液稳定性的影响无显著差异。

关键词: 悬浮液, 黄原胶, 稳定性, 稳定性分析仪

中图分类号: TQ423.2 **文献标志码:** A

1 前言

钻井液通过循环流动可将井底破碎岩屑携带至地面, 实现井眼清洁与安全快速钻井; 同时, 其能在井筒中产生一定的液柱压力, 维持井壁内外受力平衡, 有效预防井塌和井喷等复杂工况^[1]。钻头和钻具在钻井液中旋转时, 钻井液可大幅降低摩擦阻力, 发挥良好的润滑作用^[2]。钻井液的携岩性能主要取决于自身黏度和切力, 向其中添加提切剂即可实现增黏提切的目标。

提切剂主要分为生物聚合物增黏剂和合成聚合物增黏剂两类。黄原胶作为一种生物聚合物, 易溶于水并形成高黏度、悬浮性能较好的胶体溶液, 是适用于淡水、海水、盐水钻井液的高效增黏剂^[3-4]。它具有优良的剪切稀释性能, 在钻头

水眼高流速下黏度较低, 有利于提高钻速; 而在环形空间的低剪切速率下黏度较高, 层流时空流速剖面较平整, 有利于携砂^[5]。黄原胶是黄原杆菌作用于碳水化合物生成的高分子链状阴离子多糖聚合物, 以线性 β -(1-4)-D-吡喃葡萄糖聚糖为骨架, 部分葡萄糖的C-3位置依次连接包含D-甘露糖、D-葡萄糖醛酸和D-甘露糖的侧链, 与末端D-甘露糖相连的丙酮酸残基及与D-甘露糖单元相连的乙酰基, 均使黄原胶分子带负电^[6]。其分子量为 $2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ Da, 分子刚度与分子间缔合作用均使黄原胶呈现剪切稀化效应^[7]。黄原胶分子由特定结构的五糖单元重复构成, 且含羟基(—OH)、羧基(—COO—)等强极性基团, 其带电侧链可反向缠绕主链, 有序状态下主链与侧链还能通过氢键形成双螺旋结构^[8]。独特的化学结构使其溶液具有良好的流变、增黏、抗盐和

* 收稿日期: 2025-03-07

作者简介: 张道明, 硕士, 工程师, 研究方向钻完井液数智化。

**通信作者: 张道明, E-mail: zhangdm1116@163.com.

抗剪切性能,但也导致其聚集态分子间作用力强、结构复杂,在水中易出现分散性较差、成团、溶解困难、黏度过大等问题^[3]。为满足石油工业对黄原胶溶解性的需求,本研究旨在配制高含量的黄原胶悬浮液,并探讨分散剂和温度对其稳定性的影响。

2 实验部分

2.1 仪器和试剂

试剂:黄原胶,购自上海舜水化工有限公司;羟丙基甲基纤维素(纯度97%),购自天津市江天化工技术股份有限公司;月桂醇聚氧乙烯醚磺基琥珀酸酯二钠(纯度99.0%),购自中山星瑞化工有限公司;月桂基磺化琥珀酸单酯二钠(纯度98%),购自中山星瑞化工有限公司;正丁醇

(纯度98%),购自天津华浔医疗科技有限公司。

仪器:高速分散机(艾卡 T 25 Easy Clean Digital),德国 IKA 公司;台式数控超声波清洗器(KQ-200DE),中国昆山市超声仪器有限公司;多功能稳定性分析仪(LUMiSizer),德国 LUM 公司。

2.2 黄原胶悬浮液的制备

将表面活性剂(月桂醇聚氧乙烯醚磺基琥珀酸酯二钠或月桂基磺化琥珀酸单酯二钠)、正丁醇和羟丙基甲基纤维素按一定比例加入植物油中,采用高速分散机在 12000 r/min 条件下乳化 3 min,随后加入黄原胶颗粒,快速搅拌 30 min 后即可得到油基黄原胶悬浮液。样品 XC1 和 XC2 的黏度分别为 11717 cP 和 11013 cP,其组成如表 1 所示。

表1 黄原胶悬浮液的组成

Table 1 Composition of Xanthan gum suspension.

样品	固体颗粒质量分数 (%)	表面活性剂	分散剂	溶剂	黏度 (cP)
XC1	20	月桂醇聚氧乙烯醚磺基琥珀酸酯二钠	羟丙基甲基纤维素	植物油	11717
XC2	20	月桂基磺化琥珀酸单酯二钠	羟丙基甲基纤维素	植物油	11013

2.3 黄原胶悬浮液的黏度测试

将待测液体倒入测试容器至液面标记线,插入转筒并完全浸没。在检测界面设置转子、转速和数据采集参数,根据测量时显示的扭矩数值判断转筒选择的合理性。扭矩在 10%~90% 的测量值为有效值,数据采集为单点模式。待数值稳定后读数,连续测定 3 次并取平均值。

2.4 黄原胶悬浮液分散稳定性表征

采用德国 LUMiSizer 多功能稳定性分析仪评估不同黄原胶悬浮液的稳定性。该仪器结合斯托克斯定律的离心加速法和朗伯-比尔定律的光学技术监测样品的稳定性、全程分离步骤、沉降与悬浮并存的复杂分离行为。通过软件记录样品在离心作用下的红外透光率变化并绘制谱线,计算透光率积分与时间的曲线斜率,并依据斜率大小判定样品的稳定性^[9]。检测条件如下:温度分别为 20 °C 和 30 °C,样品离心速度为 3000 r/min,光散射系数为 1.00,每 10 s 扫描一次,共扫描 600 次。

3 结果与讨论

3.1 悬浮液的背散射光通量变化

LUMiSizer 分析离心法通常用于模拟样品系

统的不稳定环境。在加速离心过程中,可通过透射率变化和颗粒光谱线迁移判断悬浮液的絮凝稳定性,透射曲线变化越小,表明悬浮液稳定性越好。本研究采用多样品分析离心机,通过空间和时间分辨消光剖面技术,确定分散剂与温度对微粒悬浮液物理稳定性的影响。该技术可实现对整个样品自上而下同步观察,是研究颗粒悬浮液和乳剂的有效手段。以预设时间间隔扫描样品,可分析其物理稳定性与原始传输位置的关系。透射曲线反映样品内部颗粒浓度的变化,高透射率对应低浓度,而低透射率对应高浓度。通过 100 min 的离心过程,得到黄原胶悬浮液的透光率图(图 1),该图展示了整个分离时间内样品从顶端到底部的透光率变化过程。图 1 中,纵坐标为透光率,横坐标为距旋转中心的距离,曲线从第一条红色曲线过渡至最后一条绿色曲线,第一条红色透射曲线靠近横坐标轴,即透光率接近零,这是由于悬浮液在初始阶段稳定性良好且不透明^[10]。在离心力作用下,悬浮液稳定性下降,透光曲线逐渐向右下方移动,表明悬浮液透光率降低;当曲线轮廓从左向右移动时,说明有沉淀产生;而当轮廓从右向左移动时,说明样品发生乳化^[11]。

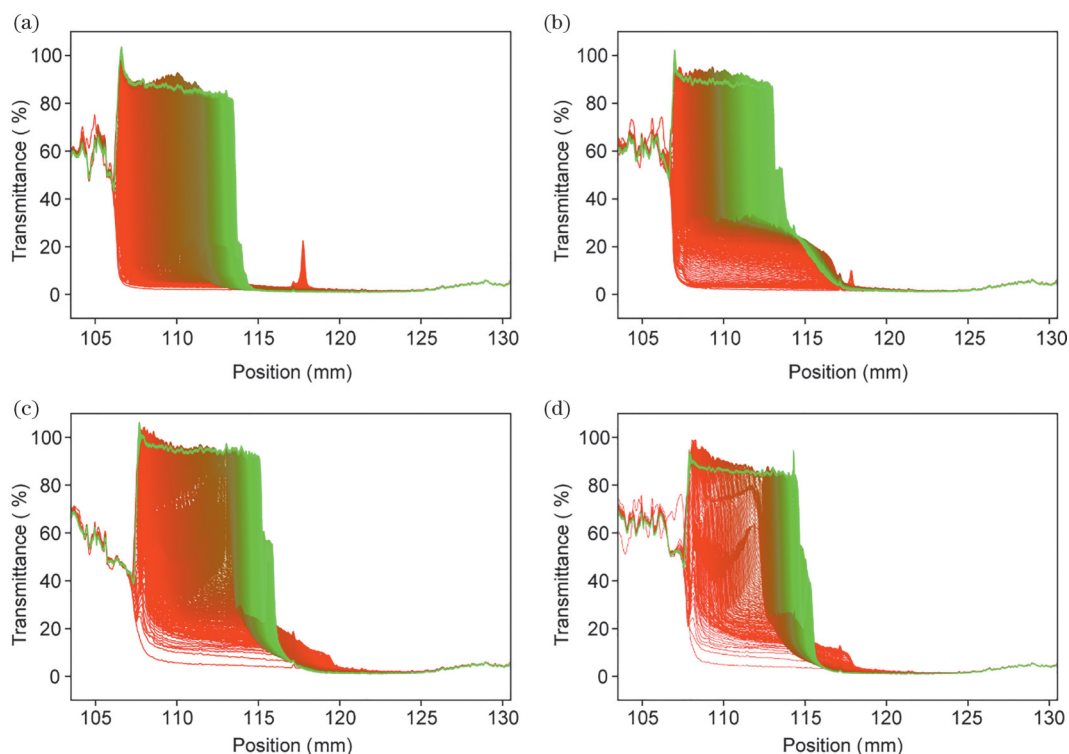


图1 20 °C (a) 和30 °C (b) 时XC1的稳定性图谱; 20 °C (c) 和30 °C (d) 时XC2的稳定性图谱。

Figure 1 Stability spectra of XC1 at 20 °C (a) and 30 °C (b); Stability spectra of XC2 at 20 °C (c) and 30 °C (d).

图1显示, 不同样品在不同温度下的微粒悬浮液原始透射曲线差异不显著。由图1(a)和图1(c)可知, 20 °C时XC2的最终透射率(最后一条曲线)超过100%, 且大于XC1的最终透射率, 这说明XC1的透光曲线更密集, XC2悬浮液的透光曲线相对稀疏。上述结果表明, XC1稳定乳液中油滴向上移动的速度慢于XC2, 即XC1的稳定性更强^[12]。这主要是由于在表面活性剂分子组成的薄界面层中, 悬浮液内较小粒径的布朗运动效应发挥核心作用, 悬浮液具有较高的重力分离稳定性^[13-14]。

对比图1(c)和图1(d)可知, 20 °C时悬浮液最终透射率高于30 °C时, 这表明30 °C下的悬浮液相对更稳定。由图1还可知, 颗粒聚集体有足够的空间单独沉降: 分离初期未出现明显沉降峰, 表明所有颗粒以相同速度运动; 随后颗粒聚集体因尺寸差异以不同的速度运动, 即出现多分散沉降; 当透光率图谱显示界面向底部迁移时, 悬浮液发生快速且完全的沉积。离心10 s后, 界面上清液分散相已移动5 mm, 大部分固体颗粒抵达样品管底部, 此时底部透光率极低; 沉积物形成后会逐渐压实, 这是絮凝颗粒的典型特征。

比较不同分散剂和温度下的分离过程发现, 所有样品分离均表现出沉降颗粒界面明显、颗粒以相同速度运动(区域沉降)的特点。20 °C时, 与XC2相比, XC1样品的连续曲线间距变窄(这是分散相进一步压实受阻所致), 且絮凝网络(凝胶)内颗粒浓度的沉降也随之增加。除了絮凝网络分离, 还观察到细颗粒的分离沉降(明显沉降界面后的透光率逐渐升高), 说明细颗粒未与絮凝网络紧密结合。XC2样品的透光率曲线间距变大, 表明其颗粒沉积速度较快, 分散体的主要沉降行为未随分散剂改变而变化^[11]。

不同温度下的稳定性分析结果显示, 悬浮液主要呈现沉降行为。20 °C和30 °C时, XC1和XC2在离心监测过程中的光信号发生变化: 与XC2相比, XC1谱线变化范围更窄, 沉降速度更慢, 样品稳定性更好; XC1在30 °C时的谱线变化范围窄于20 °C, 沉降速度更慢, 样品稳定性更优。

3.2 悬浮液的不稳定指数随时间的变化

为评价样品整体稳定性, 采用不稳定指数判断各体系的相对稳定性。该指数为测量时间内所有相邻两次测量间的背散射光或透射光强度变化值的累加, 反映样品在整个测量期间体

积浓度与颗粒粒径的综合变化。样品变化幅度越大, 不稳定指数越大, 体系越不稳定。为直观比较XC悬浮液稳定性差异, 图2(a)呈现了不稳定指数随时间的变化趋势: XC1和XC2的不稳定指数随时间延长增加越缓慢, 说明悬浮液稳定性好; 20℃时, XC2体系的不稳定指数随时间变化幅度明显大于其他3个样品, 稳定性较差。图2(b)显示, 离心6000 s时, 20℃下XC2的不稳定指数最大为0.374, 高于XC1的0.308, 这表明XC2悬浮液具有较强的透光率和较差的稳定性。当XC1体系处于20℃和30℃时, 其不稳定指数分别为0.308和0.306, 说明温度升高有利于体系稳定, 但对XC1体系的影响不显著, 这可能是由于该体系中分散剂黏附于颗粒表面, 增加了颗粒间的空间位阻, 体系更稳定; 分散剂的分子量越大, 分子运动阻力越大, 速

度越慢, 宏观上界面运动速度降低, 进而提升体系稳定性^[15]。XC2体系在30℃下的稳定性更优, 这可能是由于液体中分散剂分子量较低, 当温度升高时, 运动速度加快, 能够抵抗部分离心作用力, 从而提升悬浮液的稳定性, 达到与XC1体系相当的水平。20℃时, XC1体系的不稳定指数(0.308)小于XC2(0.374), 说明低温下表面活性剂种类对体系稳定性起重要作用; 30℃时, XC1和XC2的不稳定指数接近, 表明此时表面活性剂成分对体系稳定性影响较小。上述结果说明, 当体系中采用大分子量的分散剂时, 分子运动阻力大, 宏观界面运动速度减小, 可提升黄原胶颗粒悬浮液的稳定性; 相同温度下, 小分子量的分散剂对体系稳定性的影响更显著, 这与不稳定指数与时间曲线的结果一致。

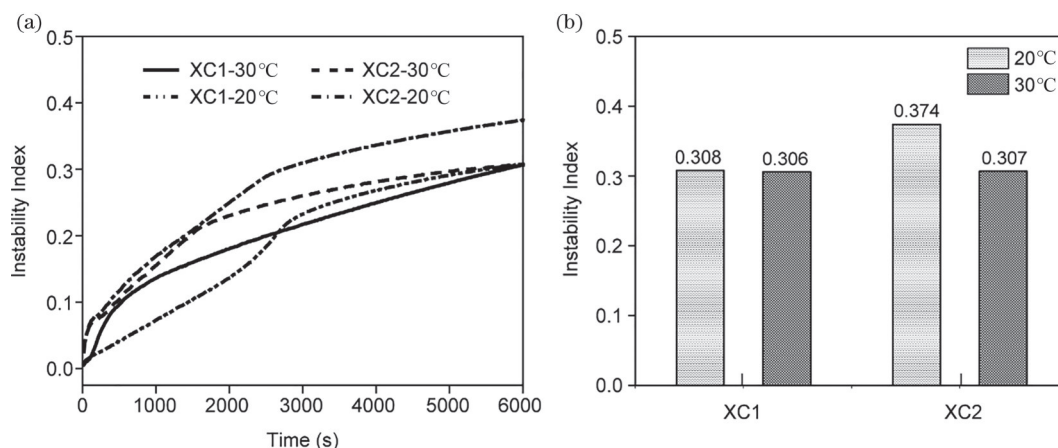


图2 (a) 不稳定指数随时间变化的分布; (b) 不稳定指数定量图。

Figure 2 The curves of instability index evolution (a) and the instability index (b) of XC suspensions at different temperature.

3.3 悬浮液的沉降速率和悬浮速率

本研究选取50%透光率位置测定沉降速率与悬浮速率: 若沉降速率较快、悬浮速率较慢, 则表明样品易发生沉降, 稳定性较差; 反之, 若沉降速率较慢、悬浮速率较快, 则说明样品稳定性较好。离心沉降速率通常用于表征悬浮液系统的稳定性, 并反映溶液中不稳定颗粒的数量, 离心沉降速率越大, 颗粒聚集引发的沉降现象越显著^[16]。如图3(a)所示, 20℃时XC1与XC2的离心沉降速率存在明显差异: XC1的离心沉降速率为1.603 $\mu\text{m/s}$, XC2为2.205 $\mu\text{m/s}$; 当温度升至30℃时, XC1的离心沉降速率降至1.099 $\mu\text{m/s}$, XC2悬浮液也呈现相同的变化趋势, 降至

1.520 $\mu\text{m/s}$ 。这可能是由于温度升高加快了分子运动, 可抵抗重力诱导的悬浮液聚集, 从而提升体系稳定性。在相同温度下, XC1的离心沉降速率均小于XC2, 这可能是由于体系中乳化液分子尺寸增大, 增加了悬浮液分子间的空间位阻, 阻碍了分子聚集^[17]。如图3(b)所示, 20℃时XC1与XC2的悬浮速率无显著差异: XC1的悬浮速率为-0.2788 $\mu\text{m/s}$, XC2的离心沉降速率为-0.2216 $\mu\text{m/s}$; 当温度升至30℃时, 二者悬浮速率分别增至-1.293 $\mu\text{m/s}$ 和-1.066 $\mu\text{m/s}$ 。上述结果表明, 温度升高有助于提高悬浮液的稳定性。因此, 可通过提升温度、增大乳化液分子尺寸, 降低悬浮液的离心沉淀速率, 进而提高储存稳定性。

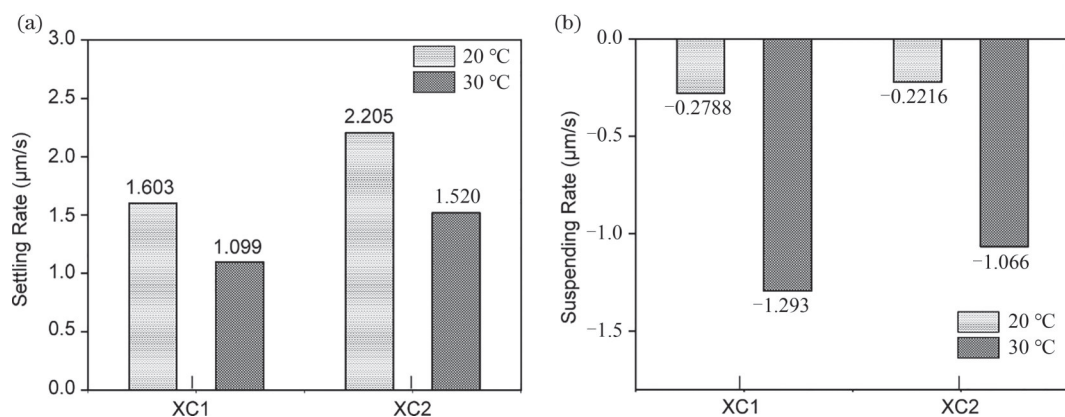


图3 20 °C和30 °C时XC悬浮液的沉降速率(a)和悬浮速率(b).

Figure 3 (a) Sedimentation rate and (b) suspension rate of XC suspension at 20 °C and 30 °C.

4 结论

本研究成功制备出稳定的黄原胶悬浮液。多尺度表征结果显示, XC1悬浮液体系比XC2更稳定。悬浮液中表面活性剂分子尺寸对体系稳定性

具有调控作用: 增大表面活性剂分子尺寸, 可增加粒子间的空间位阻, 有助于改善体系稳定性; 对于含小分子尺寸表面活性剂的悬浮液, 升高温度则有助于提升其稳定性。本研究结果为构筑稳定的悬浮液体系提供了理论参考。

参考文献

- 1 陈大钧. 油气田应用化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- 2 褚奇, 石秉忠, 李涛, 等. 水基钻井液用低增黏提切剂的合成与性能评价[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(6): 689-693.
- 3 Nadzir M M, Nurhayati R W, Idris F N, et al. Biomedical applications of bacterial exopolysaccharides: A review [J]. *Polymers*, 2021, 13(4): 530.
- 4 Xia S X, Zhang L B, Davletshin A, et al. Application of polysaccharide biopolymer in petroleum recovery[J]. *Polymers*, 2020, 12(9): 1860.
- 5 Corredor L M, Husein M M, Maini B B. A review of polymer nanohybrids for oil recovery[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 272: 102018.
- 6 García-Ochoa F, Santos V E, Casas J A, et al. Xanthan gum: Production, recovery, and properties[J]. *Biotechnology Advances*, 2000, 18(7): 549-579.
- 7 Pacheco-Torgal F, Ivanov V, Karak N, et al. Biopolymers and biotech admixtures for eco-efficient construction materials[M]. *Cambridge: Woodhead Publishing*, 2016.
- 8 Wyatt N B, Liberatore M W. Rheology and viscosity scaling of the polyelectrolyte xanthan gum[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 114(6): 4076-4084.
- 9 Wang X, Li X, Xu D X, et al. Comparison of heteroaggregation, layer-by-layer and directly mixing techniques on the physical properties and *in vitro* digestion of emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 228-237.
- 10 Ahn N, Park J H, Chai C, et al. The interaction of milk sphingomyelin and proteins on stability and microstructure of dairy emulsions[J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(5): 3832-3845.
- 11 Su J Q, Cai Y J, Tai K D, et al. High-internal-phase emulsions (HIPEs) for co-encapsulation of probiotics and curcumin: Enhanced survivability and controlled release[J]. *Food & Function*, 2021, 12(1): 70-82.
- 12 Niu H, Hou K K, Wang W D, et al. Emulsification properties of sugar beet pectin: The synergistic effect of homogalacturonan and rhamnogalacturonan-I[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109074.
- 13 Xu J, Zhou L, Miao J Y, et al. Effect of cinnamon essential oil nanoemulsion combined with ascorbic acid on enzymatic browning of cloudy apple juice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(5): 860-870.
- 14 Dong X, Zhu Q, Dai Y Q, et al. Encapsulation artocarpone and ascorbic acid in O/W microemulsions:

- Preparation, characterization, and antibrowning effects in apple juice[J]. *Food Chemistry*, **2016**, 192: 1033-1040.
- 15 Wang B, Tian H Y, Xiang D. Stabilizing the oil-in-water emulsions using the mixtures of *Dendrobium officinale* polysaccharides and gum Arabic or propylene glycol alginate[J]. *Molecules*, **2020**, 25(3): 759.
- 16 Ling Y, Cheng L, Bai X, et al. Effects of microfluidization on the physical and storage stability of walnut protein emulsion and beverages[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, **2023**, 78(2): 467-475.
- 17 Bakkalbasi E, Meral R, Dogan I S. Bioactive compounds, physical and sensory properties of cake made with walnut press-cake[J]. *Journal of Food Quality*, **2015**, 38(6): 422-430.

Research paper

Research on the Fabrication and Stability of Xanthan Gum Suspensions

ZHANG Dao-ming^{1*}, WANG Jia-qi¹, LAI Quan-yong¹, ZHANG Ye², ZHANG Xin-ge²

(¹Oilfield Chemistry Research Institute, China Oilfield Services Limited, Sanhe 065200, China; ²Key Laboratory of Function Polymer Materials of Ministry of Education, Institute of Polymer Chemistry, College of Chemistry, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract The high viscosity of xanthan gum leads to a low solid content in its solution, which is difficult to meet the requirements of industrial applications. Therefore, developing a xanthan gum solution with a high solid content is a challenging task. This article proposes a simple and efficient preparation strategy: dispersing xanthan gum particles in a non-polar liquid to increase its solid content, and further evaluating the stability of the suspension and the influencing factors. The xanthan gum suspension mainly consists of xanthan gum particles, a polymer binder (carboxymethyl cellulose propyl ether), surfactants (disodium lauryl ether sulfosuccinate and disodium lauryl sulfosuccinate), and vegetable oil. By changing the surfactant composition in the suspension and the environmental temperature, the article reveals the interactions among the components and assesses the effects of surfactant molecular size and temperature on the stability of the suspension. The study found that surfactants with larger molecular sizes help improve the stability of the suspension; however, when the temperature is increased, there is no significant difference in the effect of surfactants on the stability of the suspension.

Keywords Suspension, Xanthan gum, Stability mechanism, Stability analyzer

* Corresponding author: ZHANG Dao-ming, E-mail: zhangdm1116@163.com.