

Evaluation of Emulsification Performance of Food Grade Nonionic Surfactants

Jianping Zhou Mingjian Ba Qin He Ling Sun

Zhejiang Golden Palm Technology Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang, 313300, China

Abstract

Food-grade nonionic surfactants play a pivotal role in food processing, emulsification, and stabilization systems, with their performance directly determining product texture characteristics, stability, and flavor profile. This study focuses on emulsification properties, conducting a systematic analysis from three perspectives: molecular structure, interfacial activity characteristics, and emulsion stabilization mechanisms. Results demonstrate that the hydrophobic-lipophilic balance (HLB) and critical micelle concentration (CMC) of surfactants jointly govern emulsion formation and stabilization processes. Hydrophobic chain length, polar group types, and molecular orientation influence interfacial membrane density and droplet repulsion. The compound system significantly enhances emulsion efficiency, anti-aggregation capability, and storage stability through synergistic effects. The research suggests that establishing a standardized emulsification performance evaluation system combined with molecular design optimization can provide scientific basis and technical support for food formulation development, product quality control, and green emulsifier development.

Keywords

nonionic surfactants; emulsification; hydrophile-lipophile balance; interfacial activity; food emulsion stability

食品级非离子表面活性剂的乳化性能评价

周建平 巴明建 何琴 孙玲

浙江金棕榈科技股份有限公司, 中国·浙江 湖州 313300

摘要

食品级非离子表面活性剂在食品加工、乳化与稳定体系中具有核心作用, 其性能直接决定产品的质构特征、稳定性和风味表现。本文以乳化性能为研究重点, 从分子结构、界面活性特征及乳液稳定机理三方面展开系统分析。结果表明, 表面活性剂的亲水亲油平衡值 (HLB) 与临界胶束浓度 (CMC) 共同决定乳液形成与稳定过程; 疏水链长度、极性基团类型及分子取向影响界面膜致密性与油滴间排斥力。复配体系通过协同作用显著提升乳液的乳化效率、抗聚并能力与储藏稳定性。研究认为, 建立标准化乳化性能评价体系并结合分子设计优化, 可为食品配方研发、产品品质控制及绿色乳化剂开发提供科学依据与技术支持。

关键词

非离子表面活性剂; 乳化性能; 亲水亲油平衡; 界面活性; 食品乳液稳定性

1 引言

表面活性剂广泛应用于食品、医药、化妆品和日化产品中, 其在食品体系中的主要功能包括乳化、分散、润湿、起泡与稳定。食品级表面活性剂具有安全、低毒、生物可降解等特性, 常见类型有单、双甘油酯、蔗糖酯、山梨醇酯及聚氧乙烯山梨醇酯 (Tween 类) 等。非离子型表面活性剂因分子结构中不含电荷基团, 受 pH 值及离子强度影响较小, 兼具良好的热稳定性与体系适应性, 是食品工业中使用最广的乳化剂类型。乳化性能是其最核心的功能指标, 直接决定

油滴形成、粒径分布、界面膜强度与体系稳定性。乳化效果受分子在油水界面的吸附能力、膜结构致密性及抑制聚并能力影响。传统评价方法多依赖经验或单一参数, 难揭示结构与性能的内在关系。随着食品加工功能化与结构化发展, 乳化剂的分子设计与性能表征成为研究重点。构建科学系统的乳化性能评价体系, 探讨结构—性能关系, 对于优化食品配方、提升产品品质和推动绿色高效乳化技术具有重要理论与实践意义。

2 食品级非离子表面活性剂的分子特征与分类

2.1 分子结构特征与亲水亲油平衡关系

非离子表面活性剂的乳化性能与其分子结构密切相关, 其基本骨架由疏水烃链与亲水极性基团构成, 两者比例决

【作者简介】周建平 (1974-), 男, 中国湖北荆州人, 本科, 工程师, 从事油脂表面活性剂研究。

定了分子的亲水亲油平衡值 (HLB)。在食品乳液体系中, HLB 值介于 8–18 的表面活性剂通常用于油 / 水型 (O/W) 体系, 而 HLB 值为 3–6 的品种更适合水 / 油型 (W/O) 体系。食品级非离子表面活性剂如 Tween-20、Tween-80、Span-60、蔗糖酯等, 因结构中含有聚氧乙烯链或糖基结构, 兼具良好的亲水性与生物安全性。实验表明, 极性基团数量越多, 分子亲水性越强, HLB 值越高, 乳液的形成速率与均匀性越好; 而疏水链长度增加可增强界面膜的韧性与抗剪切性能, 从而提高乳液稳定性。通过改变聚氧乙烯链长度或疏水烷基结构, 可对 HLB 值进行精确调控, 以匹配特定食品体系的乳化需求, 实现乳化膜结构与界面能的最优配置。

2.2 主要类型与应用特征

食品工业中常用的非离子表面活性剂类型丰富, 其性能与应用领域各具特色。甘油单酯是一类兼具乳化、起泡与保湿性能的表面活性剂, 广泛用于乳制品、蛋黄酱和烘焙制品中。山梨醇酯及其聚氧乙烯衍生物 (Tween 类) 具有良好的乳化与增溶作用, 可显著提高油性香精、乳饮料和沙拉酱的分散稳定性。蔗糖酯由于含有多羟基结构, 不仅表现出优异的乳化性能, 还具有抗氧化与防腐协同作用, 适用于高脂肪乳制品及功能性食品中。聚乙二醇脂肪酸酯因界面吸附速率快、乳化膜致密, 常用于乳饮料及蛋白饮品的均质体系中。不同类型的表面活性剂因极性基团种类、空间结构与链长不同, 其在界面的吸附动力学、取向方式与膜形成速率存在差异, 从而导致乳化效果与储藏稳定性的变化。

2.3 分子聚集行为与界面活性特征

非离子表面活性剂在水溶液中可通过疏水相互作用形成胶束结构, 其临界胶束浓度 (CMC) 是衡量界面活性的关键指标。CMC 越低, 说明分子在界面上的自组装能力越强, 界面张力下降速度越快。乳化剂分子在油水界面的吸附与重排过程受温度、pH 及盐离子浓度影响显著。温度升高会引起聚氧乙烯链段脱水, 使分子亲水性降低, 从而影响乳化膜稳定性; pH 变化可能影响糖酯类乳化剂的水解速率及极性基团电性; 而高盐环境可能压缩双电层厚度, 改变胶束结构。研究发现, 不同 HLB 值的表面活性剂复配使用可产生显著的协同效应, 通过调节吸附速率与界面排列密度, 能降低体系的界面能, 改善油滴分散与防聚并性能, 从而提升乳液体系的热稳定性与长期储藏性能。这种协同机制为食品工业设计多功能复配乳化剂体系提供了理论支撑与应用基础。

3 乳化性能的评价指标与方法体系

3.1 乳液形成效率的测定方法

乳液形成效率是评价非离子表面活性剂乳化性能的核心指标, 其优劣主要取决于分子在油 / 水界面的扩散速率与吸附能力。评价方法通常从粒径分布、分散均匀性和乳化速率三个维度展开。动态光散射 (DLS) 技术可定量分析乳液粒径与分布宽度, 从而反映乳化体系的均匀程度; 显微镜成

像结合图像分析软件可观察油滴形态、聚并趋势与分布状态, 用以判断乳化剂初期分散能力。实验数据表明, 粒径分布越集中、变异系数越低的乳液, 其物理稳定性越高。具有较高 HLB 值的乳化剂由于亲水端吸附速率快、界面张力降低显著, 能更有效形成粒径较小且分散均匀的油滴结构, 表现出优异的乳化效率与形成速度。

3.2 界面张力与吸附动力学分析

界面张力是衡量乳化剂界面吸附能力与形成稳定膜结构的重要参数。滴重法和旋转滴法是常用测定手段, 可获得不同浓度下的界面张力变化曲线。根据实验数据可拟合 Langmuir 或 Gibbs 吸附模型, 以推算吸附常数、界面膜密度及分子占据面积等关键参数。吸附动力学研究表明, 扩散速率越快、吸附自由能越低的分子更易在界面形成致密单分子层, 进而提高膜强度与乳液稳定性。实验结果显示, Tween 类乳化剂在低浓度下即可显著降低油 / 水界面张力, 说明其分子极易迁移至界面; 蔗糖酯体系虽然吸附速率略慢, 但形成的界面膜更稳固、抗聚并能力更强, 体现出动力学与热力学性能的双重优势。

3.3 乳液稳定性与储藏性能评价

乳液稳定性决定产品的使用寿命与商业价值, 是乳化性能综合评估的重要环节。常用测试包括加速离心法、热循环法和长期储藏实验。乳液的分层速率、界面电位 (ζ 电位) 及体系粘度变化是主要评价参数。通过 60 天储藏测试发现, 含聚氧乙烯链的非离子表面活性剂因能在油滴周围形成厚吸附层, 显著抑制油滴聚并和相分离。离心试验结果显示, 蔗糖酯与 Tween 复配体系的分层高度小于 2%, 优于单一体系。温度循环实验表明, 该类乳化剂在高低温交替环境下仍保持较好的粒径稳定性与界面强度。复配体系通过静电斥力与空间位阻的协同作用, 提高了抗热扰动与抗离心性能, 实现了长期乳液稳定的结构强化与功能优化。

4 影响乳化性能的主要因素分析

4.1 分子结构与 HLB 值的作用规律

乳化性能的差异根源于非离子表面活性剂的分子结构特征。实验表明, 当 HLB 值处于 10–14 范围时, 乳化剂在油 / 水乳液体系中表现出最佳稳定性。较长的疏水链段能增强油滴表面膜的机械强度, 使其抵抗外界扰动的能力提升; 而亲水基团的空间位阻效应有助于减少油滴间聚集与聚并, 维持体系均匀分散。蔗糖酯因含有多羟基, 可在界面形成稳固的氢键网络, 提高乳液的热稳定性和抗氧化能力。分子极性分布与对称性亦决定其在界面的排列方式, 影响吸附层致密度及乳化膜的完整性, 从而决定乳液体系的长效稳定性。

4.2 复配体系的协同效应

单一乳化剂往往难以兼顾乳化速率与体系稳定性, 复配不同 HLB 值的表面活性剂可实现界面吸附速率与膜韧性

的平衡。研究发现, Tween-80 与 Span-60 按不同比例混合可有效调节体系 HLB 值, 使界面张力进一步下降, 形成致密稳定的复合吸附膜。复配体系能显著降低临界胶束浓度 (CMC), 增强界面分子间相互作用力, 减少油滴间融合与聚并现象。实验结果显示, 复配体系的抗离心分层率较单组分体系下降约 30%, 且在高温条件下仍能保持较小粒径变化。复配乳化体系通过界面膜的协同增强, 实现“快速乳化—高稳定—抗聚并”的动态平衡, 是食品乳液开发的重要方向。

4.3 环境条件对乳化性能的影响

非离子表面活性剂在不同环境条件下的乳化性能表现差异明显。温度升高会导致聚氧乙烯链段脱水, 降低乳化膜的柔性与稳定性; 酸性环境下蔗糖酯等糖基结构可能发生水解, 导致 HLB 值变化, 从而影响乳化效率。pH 变化虽不直接改变分子电荷, 但会影响其在界面的吸附取向及膜厚度。剪切速率在乳化过程中起关键作用, 过低会导致油滴破碎不充分, 过高则可能造成界面膜破裂。实验表明, 适度剪切可显著缩小乳液粒径并提高分散均匀性。综上, 控制环境参数、优化乳化条件, 是保持非离子表面活性剂性能稳定与实现高效乳化的必要条件。

5 实验研究与性能比较分析

5.1 实验设计与材料方法

为系统评价食品级非离子表面活性剂的乳化性能, 本研究选取具有代表性的 Tween-20、Tween-80、Span-60 及蔗糖酯四种乳化剂作为研究对象。实验以大豆油为油相、去离子水为水相, 按油相质量配比添加乳化剂, 设定浓度梯度为 1%、2%、3%。采用高速剪切乳化机 (转速 10000 r/min) 乳化 5 分钟, 所得乳液静置 24 小时后测试相关参数。乳液平均粒径及分布由动态光散射仪 (DLS) 测定, 界面张力通过旋转滴法获得, 稳定性指标包括分层高度变化率、离心分离率及热循环前后粒径变化。所有实验均在恒温 ($25 \pm 1^\circ\text{C}$) 环境下进行, 以确保数据可比性。通过单因素与多因素分析, 研究乳化剂类型与浓度对乳液形成效率、界面稳定性及长期储藏性能的影响, 探讨不同结构参数与乳化性能间的关联规律, 为食品工业选择合适乳化体系提供实验依据。

5.2 乳化性能结果与分析

实验结果显示, 不同非离子表面活性剂在相同条件下的乳化性能差异显著。Tween-80 在 1% 浓度下形成的油/水乳液粒径分布最为均匀, 平均粒径为 $2.1 \mu\text{m}$, 且界面张力较未加乳化剂体系下降约 45%, 表明其具有较强的界面活化能力。Tween-20 虽亲水性更强, 但由于其疏水链较短, 形成的界面膜强度较低, 乳液长期稳定性略逊。Span-60 因 HLB 值较低, 油溶性较好, 表现出优异的乳化初期分散性,

但在储藏后出现轻微聚并, 稳定性不足。蔗糖酯体系的乳化效率与热稳定性最优, 其形成的乳液粒径最小、分布最窄, 体系在高温下依旧保持良好的流变性能。复配体系 (Tween-80 与 Span-60 按 3:1 比例混合) 表现出显著的协同效应: 乳化效率高、界面膜致密、油滴间相互作用力弱, 分层速率低于 0.2%, 表明复配能有效兼顾乳化速率与稳定性, 适用于乳饮料、调味油脂等复杂体系。

5.3 长期储藏与热循环性能

为评估乳液的耐储性与抗热性能, 样品在 4°C 与 25°C 环境下储藏 60 天并进行 5 次热循环 (加热至 60°C 后冷却至室温) 测试。结果表明, Tween-80 及其与 Span-60 复配体系在长期储藏过程中保持较好的稳定性, 分层高度变化率均小于 3%, 油滴聚并与相分离现象极少。蔗糖酯体系在 25°C 条件下稳定性最佳, 粒径变化小于 $0.3 \mu\text{m}$, 说明其界面膜在热循环下仍具较高的韧性与抗氧化能力。对比分析显示, 单一乳化剂体系在经历多次加热冷却后乳液结构易发生重排, 而复配体系通过形成复合界面膜结构显著提高了抗热扰动能力。该结果表明, 不同 HLB 值的乳化剂复配可有效缓解高温与剪切对乳液体系的破坏作用, 延长产品货架期。综合评价可见, 蔗糖酯与 Tween 复配体系在乳化效率、热稳定性及储藏性能方面均优于单一体系, 具有更广泛的食物应用潜力。

6 结语

食品级非离子表面活性剂在食品乳化体系中具有不可替代的作用。研究表明, 其乳化性能受分子结构、HLB 值、复配比例及环境因素多重影响。复配使用不同极性的表面活性剂可有效改善界面膜致密性与体系稳定性。通过建立标准化乳化性能评价体系, 结合粒径、界面张力与稳定性等指标, 可实现对乳化剂功能的量化评估。未来研究应在多相体系动态监测、界面膜结构可视化与乳化过程模拟等方向深化, 推动食品乳化剂从经验应用向数据驱动与精准调控转变, 为食品工业高质量发展与绿色生产提供科学支撑。

参考文献

- [1] 张梦. 芒果核壳纤维素纳米纤维的结构表征、乳液制备及应用研究[D]. 华中农业大学, 2023.
- [2] 徐志刚. 松香改性壳聚糖非离子表面活性剂制备及性能研究[D]. 安徽理工大学, 2016.
- [3] 别业勇. 植物源表面活性剂和黄腐酸在农药和肥料中核心技术攻关与应用. 广西壮族自治区, 广西勤德科技股份有限公司, 2016-02-05.
- [4] 李婉春. 两种小麦蛋白衍生表面活性剂的合成、性能及应用研究[D]. 江南大学, 2024.
- [5] 于洪洋. 腰果酚基驱油表面活性剂的合成及性能研究[D]. 东北石油大学, 2019.