

混合蛋白饮料（含乳植物奶）中乳化体系的构建与工业化放大研究

陶剑鸣

杭州威欧生物科技有限公司 浙江 杭州 310000

【摘要】：混合蛋白饮料（含乳植物奶）因乳蛋白与植物蛋白营养互补，成食品工业研发热点，其品质稳定性与乳化体系构建质量相关。乳化体系是混合蛋白饮料核心，能分散脂溶性成分、维持体系均一、提升感官品质。本文基于胶体化学等理论，以理论分析与逻辑推演为核心，探讨混合蛋白饮料乳化体系构建原理、影响因素与优化路径，剖析工业化放大技术瓶颈与适配策略，明确核心逻辑。研究表明，合理蛋白配比、乳化剂筛选复配与工艺参数优化是构建稳定乳化体系基础，工业化放大需兼顾稳定性与效率，通过工艺适配等实现实验室配方向工业化生产转化。本文研究为混合蛋白饮料乳化体系构建与应用提供理论支撑，也为同类饮品研发生产提供参考。

【关键词】：混合蛋白饮料；含乳植物奶；乳化体系；体系构建；工业化放大

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.041

1 引言

随着健康意识提升，兼具乳蛋白与植物蛋白营养优势的混合蛋白饮料（含乳植物奶）成为市场主流。但其复杂体系在生产储存中易出现分层、絮凝等稳定性问题，根源在于乳蛋白与植物蛋白界面性质差异，乳化体系构建质量直接决定产品稳定性与货架期。

当前研究多聚焦实验室配方优化，缺乏对工业化放大的系统性探索。实验室构建的稳定体系在规模化生产中常因设备差异、工艺参数变化等因素导致稳定性下降，且蛋白互作机制等核心理论问题尚未厘清。

本文基于界面化学与食品胶体理论，系统分析混合蛋白饮料乳化体系构建原理与关键影响因素，提出从蛋白配比优化、界面膜强化到工艺参数调控的全链条优化策略。同时深入探讨工业化放大过程中的设备适配、质量控制等技术瓶颈，提出针对性解决方案。研究成果为精准构建稳定乳化体系、实现高效生产提供理论指导，对推动植物基饮品产业高质量发展具有重要实践价值，也为同类复合蛋白饮料研发提供科学参考。

2 混合蛋白饮料乳化体系的构建基础与作用机理

2.1 乳化体系的核心组成与功能定位

混合蛋白饮料乳化体系是典型水包油型体系，核心组成有分散相、连续相、乳化剂与稳定剂，各组分协同形成稳定胶体分散体系。连续相以水为基质，溶解水溶性成分；分散相是原料天然脂肪，以微小油滴分散于连续相；乳化剂吸附于油水界面，降低张力、形成保护膜；稳定剂通过增稠等作用提升体系黏度与稳定性。

其核心功能有三：一是提升稳定性，抑制脂肪上浮等，延长货架期；二是优化感官品质，使产品质地均一、口感适宜；三是保留营养，减少营养流失。此外，还能调节流变特性，提

升竞争力。

2.2 乳蛋白与植物蛋白的界面特性及相互作用

乳蛋白与植物蛋白是乳化体系天然乳化成分，其界面特性影响构建质量与稳定性。乳蛋白含酪蛋白与乳清蛋白，二者协同优化界面膜。植物蛋白乳化能力因原料而异，普遍低于乳蛋白，多数需改性提升界面吸附与膜形成能力。

乳蛋白与植物蛋白在界面相互作用复杂，可促进协同吸附形成复合界面膜，但体系条件变化可能产生拮抗效应。调控体系条件强化协同作用是关键。

2.3 乳化体系稳定的核心作用机理

混合蛋白饮料乳化体系稳定机理包括界面膜保护、黏度调控与静电排斥，三者协同维持稳定。界面膜保护是核心，乳化剂与蛋白形成复合界面膜，抵御外界冲击。黏度调控通过提升连续相黏度延缓相分离，体系黏度需适宜。静电排斥基于界面膜电荷特性，使油滴带相同电荷。油滴间的静电排斥力阻碍其聚集。体系 pH 值、电解质含量等因素可调节界面膜表面电荷密度，影响静电排斥力强度。当 pH 值偏离蛋白等电点，蛋白分子带电性增强，静电排斥力提升，乳化体系稳定性增强；而电解质会通过电荷屏蔽作用削弱静电排斥力，使体系稳定性下降，因此需严格控制电解质含量。

3 混合蛋白饮料乳化体系的构建策略与优化路径

3.1 蛋白组分的优化配比与改性处理

蛋白组分优化是稳定乳化体系的基础，需结合乳蛋白与植物蛋白界面特性合理配比，强化协同作用。配比应兼顾乳化活性、稳定性与营养特性——过量植物蛋白易致絮凝沉淀，过量乳蛋白增加成本与胆固醇含量。适宜比例可促进蛋白在油水界面形成致密复合膜，优化流变特性。

植物蛋白改性是提升乳化性能的关键：酶解改性将大分子

降解为小分子肽段，增强界面吸附速度；超声处理改变蛋白空间构象，提升乳化稳定性；适度热处理促使蛋白变性，形成更稳定的界面膜。改性参数需精准调控，过度处理会降低乳化性能，应根据蛋白种类特性优化方案，在提升功能特性的同时保留营养价值。

3.2 乳化剂与稳定剂的筛选及复配优化

乳化剂筛选需考虑 HLB 值与蛋白兼容性，优选单硬脂酸甘油酯等食品级乳化剂。HLB 值适配体系需求的乳化剂能提升乳化效率，促进稳定复合界面膜形成。单一乳化剂效果有限，采用离子型与非离子型、低高 HLB 值复配可协同增效，但需通过理论推演优化比例，避免拮抗效应，严格控制添加量符合标准。

稳定剂选择应匹配体系黏度需求：黄原胶可提升黏度、抑制相分离；瓜尔胶增稠效率高，协同增强稳定性；果胶形成凝胶网络结构，强化体系稳定性。添加量需精准平衡——过量影响口感，不足则稳定性下降。

3.3 体系关键参数的调控与优化

pH 值是核心调控参数，混合蛋白饮料适宜范围为 6.5-7.5，此区间可维持蛋白最佳带电状态，抑制絮凝与油滴聚集，需用食品级酸度调节剂精准控制。

电解质含量需严格限制，过量会屏蔽静电排斥力，导致油滴聚集及蛋白盐析。应控制原料电解质含量，避免添加高盐成分，必要时进行脱盐处理。

加工温度与时间显著影响乳化质量：温度过高使蛋白过度变性、乳化剂分解，过低则降低乳化效率；乳化时间需匹配设备特性，避免不足或过度。储存温度应保持恒定，防止波动破坏体系结构。

3.4 乳化工艺优化设计

乳化工艺围绕油滴分散效率、界面膜质量与体系均一性展开。高速剪切乳化依靠机械剪切力分散油相，操作简便、成本低，适用于中小批量生产，但稳定性有限。高压均质乳化通过高压使油滴均匀破碎，形成致密界面膜，稳定性优异，是工业化首选，需精准调控压力（通常 30-80MPa）与温度参数。超声乳化利用空化效应破碎油滴，粒径小且对蛋白营养影响小，适用于高端产品，需优化功率、时间与温度。

复合工艺效果更佳，如“高速剪切预乳化+高压均质”组合：前者初步分散，后者精细均质，协同提升体系稳定性与均一性。工艺参数需根据蛋白类型、配方特性动态优化，实现高效稳定乳化。

4 乳化体系工业化放大的技术瓶颈与适配策略

4.1 工业化放大的核心技术瓶颈

实验室构建的乳化体系工业化放大时面临诸多瓶颈，核心

是实验室与工业化生产在工艺条件、设备特性上的差异，导致乳化体系稳定性下降。实验室设备处理量小、剪切力均匀、参数控制精准，可实现油滴均匀分散与界面膜完美构建；工业化设备处理量大、剪切力不均、参数波动大，易使油滴粒径分布变宽、界面膜不致密，引发体系分层等问题。

原料批次稳定性差异也是核心瓶颈，实验室用纯度高、特性稳定的原料，工业化生产中原料批次差异大，如蛋白含量波动、脂肪组分变化等，会影响乳化体系构建，且原料杂质、水分等也会干扰乳化。

工业化生产中连续化加工与工艺协同性不足制约放大，实验室多间歇操作，参数精准调控；工业化连续作业，各环节参数相互影响，需实现工艺协同，避免参数波动破坏乳化体系。

4.2 设备选型与工艺参数的工业化适配

设备选型是工业化放大关键，要结合生产规模、工艺与产品特性选适配的工业化乳化设备，确保乳化效果与实验室一致。高压均质机是核心，要选适宜型号并优化结构，大规模生产可用多级高压均质机提升稳定性。

工艺参数要基于实验室参数，结合设备特性与生产规模调整。高压均质压力随处理量增大而提高，温度通过夹套冷却系统精准控制。此外，要优化进料速度、均质次数等参数，平衡效率与质量。

辅助设备适配也很重要，原料预处理设备要确保原料充分溶解混合，冷却设备要快速降温，搅拌设备选低剪切力型号。通过设备协同适配构建完整生产设备链，保障稳定性。

4.3 原料控制与生产过程质量保障

原料控制是保障稳定性的基础，要建立严格采购与检验标准，检测核心原料关键指标，筛选稳定供应商，建立储存规范。对植物原料要优化预处理工艺。

生产过程质量控制要贯穿全流程，建立关键控制点，实时监测调控参数。在各阶段分别监测混合、乳化、后续加工的参数，避免波动破坏乳化体系。同时，建立产品质量检测体系，及时发现解决问题。针对原料批次差针对工艺波动，可采用过程纠偏机制，通过预设参数调整方案应对生产异常。例如，原料乳化活性下降时，增加乳化剂添加量或调整均质压力；体系 pH 值波动时，用在线酸度调节装置调控 pH 值，确保乳化体系稳定。此外，采用统计过程控制方法，分析参数波动规律，优化工艺参数范围，提升生产稳定性与可控性。

5 乳化体系稳定性的评价方法与影响因素

5.1 乳化体系稳定性的评价方法

乳化体系稳定性从物理、化学、感官三维度评价。物理稳定性关注相分离与聚集现象，采用静置观察法（直观评估长期分层）、离心加速法（快速模拟分离趋势）、粒径分布测定法

(粒径小且分布窄则稳定)及流变特性测定法(黏度适中、弹性模量大于黏性模量时稳定性佳)。化学稳定性针对脂质氧化与蛋白降解,通过过氧化值、酸价、蛋白分子量分布等指标量化。感官稳定性由专业小组评估色泽、质地变化,避免不良体验。多维度评价方法协同应用,可全面反映体系状态,为乳化体系优化设计与工业化质控提供科学依据与标准,确保产品货架期内品质稳定。

5.2 储存过程中的稳定性影响因素

储存温度是影响乳化体系稳定性的核心环境因素,温度升高加速油滴聚集合并、脂肪氧化和蛋白降解,破坏稳定性;低温可延缓但过低会影响口感,需控制适宜温度、避免波动并采用保温包装。储存时间影响显著,随时间延长,界面膜老化破损、油滴聚集、脂肪氧化产物积累、蛋白降解,导致稳定性下降,优化构建策略可延缓。此外,光照、氧气会加速破坏,需采用避光、隔氧包装。产品包装方式与储存条件适配性也有影响,采用密封、避光、隔氧包装材料可抑制破坏,包装容器材质要兼容,避免成分迁移,同时优化堆叠方式,避免过度挤压。

6 关键技术瓶颈与未来发展趋势

6.1 当前核心技术瓶颈

尽管混合蛋白饮料乳化体系构建与工业化放大技术有一定进展,但实际应用仍面临诸多核心技术瓶颈。一是乳蛋白与植物蛋白协同作用机制未完全厘清,蛋白相互作用规律复杂,难以精准构建乳化体系,影响产品品质稳定性。二是工业化放大工艺适配性不足,实验室与工业化生产参数关联性差,缺乏放大理论支撑,乳化体系稳定性难复刻。三是极端环境下乳化体系稳定性不足,饮料在极端储存条件下易出现稳定性下降问题,难满足不同地区、不同季节储存需求。四是功能性与稳定性平衡难题,添加功能性成分可能干扰乳化体系构建,如何保障稳定同时高效添加功能性成分是研发核心难点。

参考文献:

- [1] 邓代君. 混合蛋白饮品中复配稳定剂的应用分析[J]. 现代食品,2017(12):1-3.
- [2] 余立意,吴鑫鑫,许健,等. 基于椰子油乳化稳定体系的构建及其在饮料中的应用[J]. 饮料工业,2022,25(3):7-12.
- [3] 王成祥,刘辉,段胜林,等.应用快速稳定性分析方法研究增稠剂对燕麦饮料稳定性的影响[J].食品与发酵工业.2018,(3).
- [4] 张小龙,代寻,苟彦君,等. Pickering 乳液催化体系及其在食品中的应用进展[J]. 食品工业科技,2025,46(19):448-454.
- [5] 马安德,陈云辉. 发酵型含乳饮料工业化生产工艺研究[J]. 农产品加工(下半月),2015(5):26-28,32.

6.2 未来技术发展趋势

随着食品、材料与生物技术发展,混合蛋白饮料乳化体系构建与工业化放大技术将向精准化、智能化、功能性方向发展。在体系构建上,精准改性技术成研究热点,通过基因、酶工程等定向改造植物蛋白分子结构,优化界面特性与乳化性能,精准构建乳化体系,强化蛋白协同作用,提升稳定性。智能化工业化放大技术将逐步应用,结合人工智能等技术构建参数关联模型,智能优化与精准调控工艺参数,提升放大稳定性与效率。同时,智能化生产设备不断升级,实现全流程智能化控制,减少人为误差,保障产品品质稳定。功能性乳化体系研发成主流,优化构建策略实现功能性成分稳定负载,保障稳定性与口感。此外,天然、健康乳化剂与稳定剂将广泛应用,替代化学合成添加剂,满足消费者健康需求。绿色生产技术也将逐步推广,优化工艺、节能减排,实现工业化生产绿色化与可持续化。

7 结论

本文基于界面化学与食品工艺学理论,系统研究混合蛋白饮料乳化体系构建原理。研究表明:该体系为水包油型胶体分散体系,由分散相、连续相、乳化剂与稳定剂构成,稳定机理依赖界面膜保护、黏度调控与静电排斥协同作用,其中乳蛋白与植物蛋白界面互作是核心因素。

体系优化需四维协同:合理配比并改性蛋白组分增强界面协同;筛选复配乳化剂与稳定剂优化膜结构与流变性;精准调控 pH 值、离子强度等参数;优化乳化工艺确保油滴均匀分散。

工业化放大的关键在于解决实验室-生产差异:适配高剪切设备与参数,严控原料批次稳定性,实施全流程质控。当前存在蛋白协同机制不清等瓶颈,亟需向精准化、智能化方向发展。

研究成果为产品开发提供理论支撑,后续应结合实验验证策略有效性,深化蛋白互作机制研究,优化工业化参数与设备方案,推动植物基饮品产业高质量发展。