

高内相 Pickering 乳液荷载生物活性物质的构建

吴滋灵¹, 尹寿伟^{2*}, 党 华¹

[1. 广州检验检测认证集团有限公司, 国家加工食品质量检验中心(广东), 广州 511447;

2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广州 510000]

摘要: **目的** 构建稳定荷载生物活性物质的高内相 Pickering 乳液。**方法** 通过简单的反溶剂纳米沉淀法制备玉米醇溶蛋白/果胶复合颗粒, 再通过均质乳化技术, 构建荷载姜黄素的高内相 Pickering 乳液, 研究在不同 pH 条件下该乳液体系的储藏稳定性、外观、粒径和流变学特性。**结果** 该荷载姜黄素的高内相 Pickering 乳液(油相占比高达 80%)能稳定储藏两个月以上不变质, 乳液粒径较小, 其流变学行为表明该乳液具有较好的粘弹性和凝胶特性, 并且随着 pH 值的降低, 胶体颗粒的三相接触角越接近 90°, 乳液的凝胶性越强, 乳液越稳定。**结论** 本方法制备简单, 操作方便, 成功构建了荷载姜黄素的高内相 Pickering 乳液。

关键词: 高内相 Pickering 乳液; 玉米醇溶蛋白; 果胶; 姜黄素; 流变学特性; 凝胶特性

Fabrication of high internal phase Pickering emulsion loaded with bioactive substances

WU Zi-Ling¹, YIN Shou-Wei^{2*}, DANG Hua¹

[1. *Guangzhou Inspection and Testing Certification Group Co., National Quality Testing Center for Processed Food (Guangdong), Guangzhou 511447, China;* 2. *College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China*]

ABSTRACT: Objective To build a high internal phase Pickering emulsion with stable loading of bioactive substances. **Methods** The zein/pectin composite particles were prepared by a simple anti-solvent nano-precipitation method, and the high internal phase Pickering emulsion loaded with curcumin was constructed by homogeneous emulsification technology. The storage stability, appearance, particle size and rheological properties of the emulsion system under different pH conditions were studied. **Results** The high internal phase Pickering emulsion (oil phase proportion was as high as 80%) loaded with curcumin could be stored for more than 2 months without metamorphism. The emulsion particle size was small, the rheological behavior showed that the emulsion had good viscoelastic and gel properties, and with the decrease of pH value, the three-phase antennae of colloidal particles was close to 90°, the gelatability of emulsion was stronger, and the emulsion was more stable. **Conclusion** This method is simple to prepare and operate, and the high internal phase Pickering emulsion loaded curcumin is successfully constructed.

KEY WORDS: high internal phase Pickering emulsion; zein; pectin; curcumin; rheological properties; gel property

*通信作者: 尹寿伟, 教授, 主要研究方向为功能性胶体粒子与膜材料。E-mail: feysw@scut.edu.cn

*Corresponding author: YIN Shou-Wei, Professor, South China University of Technology, No.381 Wushan Road, Tianhe District, Guangdong 510000, China. E-mail: feysw@scut.edu.cn

0 引言

玉米醇溶蛋白(zein)是安全的可食性蛋白质,是玉米蛋白中最重要的组成成分,其分布和来源广泛,被美国食品和药物管理局认为是安全的食品加工原料,属于两亲性分子,具有明显的疏水和亲水性区域,是一种疏水性蛋白^[1]。玉米醇溶蛋白在反溶剂过程中,在溶剂极性的作用下,会引发两亲性驱动的 zein 分子通过自组装的方式形成纳米或微米级的胶体粒子^[2-6],所以,探索通过玉米醇溶蛋白胶体颗粒作为基质,构建食品级的 Pickering 乳液在食品结构修饰以及在营养物质输送等方面具有巨大的应用前景。果胶是一种结构复杂的可食性天然植物多糖,是受世界卫生组织以及联合国粮农组织推荐食用的食品添加剂^[7-10]。果胶通常被广泛应用于冰激凌、水果制品^[11]和医药等行业中,因其具有较强的亲水性、凝胶性和重要的生理功能,如降低胆固醇等,因此,可以通过多糖和蛋白质 2 种物质之间相互的修饰作用^[12-13],赋予乳液体系优异的物理稳定性。

姜黄素(curcumin)是一种生物活性物质,具有改善心血管功能^[14]、抗肿瘤^[15-16]、抗炎症^[17]、抗氧化性^[18-19]等作用。且姜黄素无明显的毒副作用、来源丰富、价格低廉,因此在食品领域和医药领域中都有广泛的应用。但姜黄素在水溶液中的溶解度较低,且在氧化、热、碱性和光照的条件下迅速降解,导致其较低的生物利用率^[20],极大的限制了姜黄素功能的发挥,所以,提高姜黄素的溶解度并且提高其生物活性是急需解决的难题^[21-22]。

Pickering^[23]乳液指由固体粒子稳定油水界面的乳状液体系,该乳液体系具有比传统由表面活性剂^[24-25]稳定的乳液更为突出的优点^[26],对环境更加友好,具有更强的稳定性和更好的流变学性能等。而高内相 Pickering 乳液(high internal phase emulsions, HIPE)指分散相的体积分数大于 74%的乳液,属于超浓乳液^[27]。目前高内相乳液的应用主要是集中在色谱分析^[28]、吸附^[29]、化妆品^[30]和多孔材料的制备^[31]等方面,稳定油水界面的颗粒主要是合成的聚合材料和表面活性剂成分,具有一定的污染性和毒害作用。而蛋白质和多糖类天然高分子物质,本身具有较高的营养价值,并且在稳定乳液界面具有优异的性能,由蛋白质和多糖类物质制备的食品级高内相 Pickering 乳液具有较强的可塑性和粘弹性^[32],能够实现液态油脂向固态油脂的转变,方便油脂的储藏和运输,并且该类型乳液制备简单,无毒副作用,能够包埋负载生物活性物质到特定部位达到靶向缓释目的,从而提高生物活性物质的生物利用率^[33],因此该类型高内相 Pickering 乳液在医药、人体输送和食品领域等方面具有广阔的应用前景。但高内相 Pickering 乳液极易发生相反转^[34-35],这主要是跟稳定油水界面的固体颗粒表面湿润性有关,固体颗粒的表面湿润性是其能否作为稳定剂的决定因素,评价固体颗粒表面湿润性的重要参数是三

相接触角^[36]。一般情况下,当其三相接触角接近 90°时, Pickering 乳液的稳定性最好,但能满足颗粒作为稳定剂表面湿润性要求的天然材料很少,因此经常通过调控颗粒的表面湿润性使其稳定在油水界面上,而 pH 值可以改变固体颗粒的带电性质或颗粒的表面湿润性^[37-38],从而影响固体颗粒在油水界面的吸附性能,因此常被用于调控固体颗粒的吸附性能。而天然的蛋白质和多糖等大分子物质大多数具有亲水性,这导致其较差的乳化性能,制备的高内相 Pickering 乳液容易发生相反转,因此对蛋白质和多糖类物质表面湿润性的调控显得尤为重要。本研究主要以玉米醇溶蛋白作为实验原料,通过反溶剂方法制备负载姜黄素的玉米醇溶蛋白与果胶复合胶体颗粒作为颗粒乳化剂,通过剪切和均质技术,制备负载生物活性物质的高内相 Pickering 乳液,研究其在不同 pH 条件下的外观稳定性和流变学特性,以期高内相 Pickering 乳液在药品领域、化妆品领域和食品领域的研究应用提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

T25 高速分散机(德国 IKA 公司); FA1004 分析天平(上海精科仪器有限公司); CR22G 冷冻离心机(日本 HITACHI 公司); RV10 旋转蒸发仪(德国 IKA 公司); S210 精密 pH 计(梅特勒-托利多仪器有限公司); Mastersizer3000 粒度分布仪(英国 Malvern 公司); HAKKE RS600 流变仪(德国 Thermo 公司); T10 Basic 高速均质机(德国 IKA 公司); OCA20 视频光学接触角测量仪(德国 Dataphysics 公司)。

姜黄素标准品(纯度 98.9%, Sigma-Aldrich 公司); 乙醇、氢氧化钠、盐酸(分析纯,国药试剂化学有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 玉米醇溶蛋白/果胶复合胶体颗粒的制备

把果胶溶解在水中,得到质量分数为 0.2%的果胶水溶液;把玉米醇溶蛋白粉溶解在为 70%(V/V)的乙醇水溶液中,得到质量分数为 2.5%的玉米醇溶蛋白溶液;把玉米醇溶蛋白溶液缓慢的倒入果胶水溶液中,倒入过程中用剪切机以 6000 r/min 进行均质,此时水溶液和醇溶液的体积比为 2.5。把均质后的液体在 40 °C、75 r/min 条件下用旋转蒸发仪蒸发多余的乙醇溶液,约 25 min,得到玉米醇溶蛋白/果胶复合胶体颗粒,浓度为 2%。

1.2.2 复合胶体颗粒溶液的 pH 调节

复合胶体颗粒溶液的初始 pH 是 3.8,实验中用 NaOH 和盐酸调控复合胶体颗粒的 pH,得到 pH 分别为 3.0、3.8、4.0、5.0、6.0 的复合胶体颗粒溶液。

1.2.3 复合胶体颗粒三相接触角的测量

三相接触角测定指水相、固体物质以及油相三相,可以用于表征固体颗粒表面的亲水亲油性,是判断固体颗粒

乳化能力的重要手段。本文利用 OCA20 测试仪对复合胶体颗粒的表面性质进行测量。通过测试仪观察并测量去离子水滴在复合胶体颗粒表面随时间变化的接触角度数, 样品取 8 次平衡, 平均值是复合胶体颗粒的三相接触角。

1.2.4 高内相 Pickering 乳液的制备

在玉米油中溶解姜黄素, 使其终浓度达到 0.5 mg/mL。采用均质乳化技术制备高内相乳液。把 1.2.2 制备的复合胶体颗粒与溶解了姜黄素的玉米油(水相和油相比为 1:4, V:V)置于血清瓶中, 利用 IKA T10 高速均质机在 15000 r/min 条件下均质 2 min, 得到油相占比高达 80% 的高内相 Pickering 乳液。

1.2.5 高内相 Pickering 乳液的粒径分析

通过粒度分布仪测量该高内相乳状液的粒径。其具体的实验参数如下: 颗粒折射率为 1.470, 颗粒吸收率为 0.001, 分散剂折射率为 1.330, 分散剂是水。测量结果用面积平均直径 $d_{3,2}$ 和体积平均直径 $d_{4,3}$ 表示, 设置自动测试样品 3 次。

1.2.6 高内相 Pickering 乳液的流变学特性分析

通过流变仪测定该高内相乳液的流变学特性。设置样品的测试温度为 25 °C, 平板直径为 27.83 mm 的平板, 间隙为 1 mm。

应力扫描: 固定应力扫描频率为 1 Hz, 扫描范围为 0.1~1000 Pa。

频率扫描: 依据应力扫描结果, 应选择在线性粘弹区域内的应力。本文固定应力为 1 Pa, 频率扫描范围为 0.1~10 Hz。

粘度: 设置仪器剪切速率为 0.1~100 s^{-1} 。

触变: 设置仪器剪切速率为 0.1、10、0.1 s^{-1} 。

2 结果与分析

2.1 复合胶体颗粒的三相接触角

固体颗粒的表面湿润性是其重要的性质, 是由颗粒本身决定的。固体颗粒作为乳化剂的重要前提是能被两相

(水相和油相)同时润湿但又不完全溶于任何一方, 即同时具备亲水疏水性。固体颗粒的表面湿润性可通过测定颗粒与水的接触角得到, 一般情况下, 当接触角小于 90°时, 颗粒主要存在于水相中, 表现为亲水性; 而当接触角超过 90°时, 颗粒主要存在于油相中, 表现为疏水性, 接触角过大或过小均会导致固体颗粒较难吸附到油水界面而导致乳液不稳定、破乳; 当接触角在 90°左右时, 颗粒表现出亲水疏水性, 能够较好的稳定 Pickering 乳液。

图 1 是复合胶体颗粒在不同 pH 条件下的三相接触角, 从图中可以看出, 固体颗粒在 pH 3.0 时, 其接触角为 86.4°, 最接近 90°, 同时表现出亲水疏水性, 即两亲性能。随着 pH 值继续增大, 接触角逐渐减小, 亲水性逐渐增强, 在 pH 为 6.0 时, 其接触角为 75.8°, 表明该固体颗粒具有较强的亲水性, 乳化性较差。

2.2 高内相 Pickering 乳液外观和粒径分析

不同 pH 条件下的玉米醇溶蛋白/果胶复合胶体颗粒制备的荷载了姜黄素的高内相 Pickering 乳液外观见图 2 所示。从 A 组图(新制乳液)可看出, 新制备的高内相 Pickering 乳液外观呈现均匀统一的淡黄色, 乳液表面无油滴出现, 说明乳液不破乳, 而且在 pH 为 3.0、3.8、4.0 条件下的新制乳液可以实现倒置, 这表明该乳液内部形成了较为稳定的凝胶网络结构, 彼此黏连以保持体系的稳定。从 B 组图可看出(乳液放置 2 个月), 在 pH 3.0 到 5.0 条件下外观仍是统一的淡黄色, 表面无明显油脂析出, 可以实现倒置, 但在 pH 5.0 条件下乳液的液滴明显较大, 说明乳液内部出现了液滴合并絮凝, 在 pH 6.0 时, 乳液发生相反转, 呈现破乳状态, 说明在 pH 6.0 条件下该乳液体系不能长时间保存, 体系不稳定。乳液的外观图与其复合胶体颗粒的三相接触角实验结果相一致, 在 pH 3.0 时, 胶体颗粒的三相接触角在 90°左右, 表现出两亲性, 乳化性较好, 随着胶体颗粒 pH 值的增大, 其三相接触角随之减小, 表现出越来越强的亲水性, 在 pH 6.0 时, 接触角最小, 亲水性最强, 导致固体颗粒较难吸附到油水界面, 制备的乳液较为不稳定, 容易发生相反转、破乳。

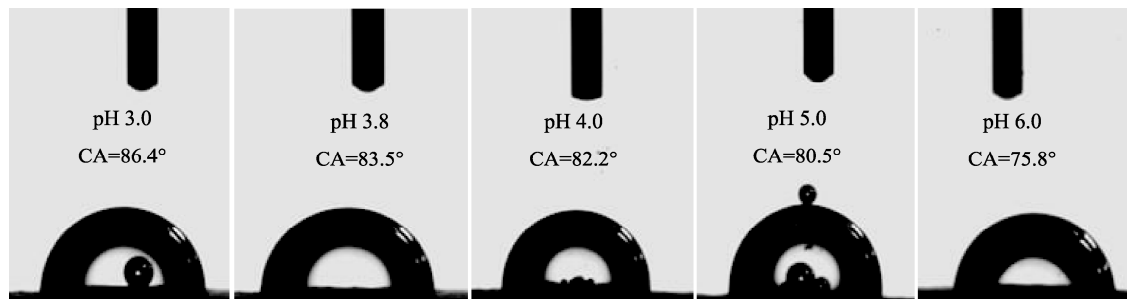
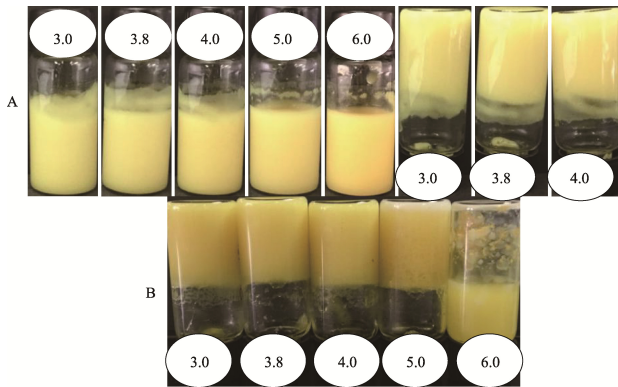


图 1 复合胶体颗粒的三相接触角

Fig.1 Three-phase antennae of colloidal particles



注: A: 新制; B: 两个月后

图 2 荷载姜黄素的不同 pH 复合胶体颗粒制备的高内相乳液
Fig.2 Appearance of HIPE loading curcumin with different pH values

不同 pH 条件下复合胶体颗粒制备的荷载了姜黄素的高内相 Pickering 乳液粒径分布图见表 1 和图 3。在 pH 3.0 到 5.0 范围内, 乳液滴的粒径分布在 100~300 μm , 并且随着 pH 值的增大, 乳液滴的粒径也随之增大。而乳液滴的粒径越小, 吸附到油水界面的固体颗粒越多, 乳液体系越稳定。所以, 在较低 pH 值条件下, 该高内相 Pickering 乳液的粒径越小, 乳液体系越稳定, 能够稳定储藏两个月以上, 这与乳液的外观结果相一致。

表 1 荷载姜黄素的不同 pH 值复合胶体颗粒制备的高内相乳液粒径分布

Table 1 Distribution of HIPE loading curcumin with different pH values		
pH	$d_{3,2} / \mu\text{m}$	$d_{4,3} / \mu\text{m}$
3.0	103 \pm 0.58	108 \pm 1.00
3.8	146 \pm 3.00	160 \pm 2.51
4.0	151 \pm 8.00	167 \pm 7.51
5.0	201 \pm 12.73	240 \pm 15.31

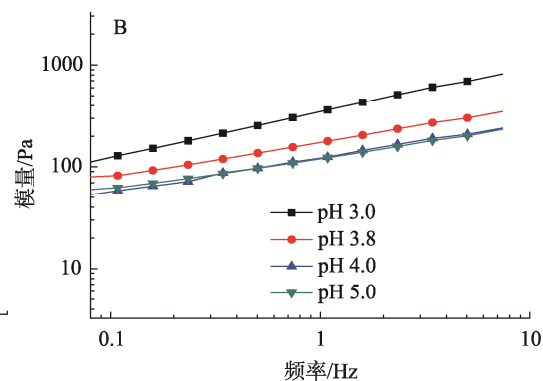
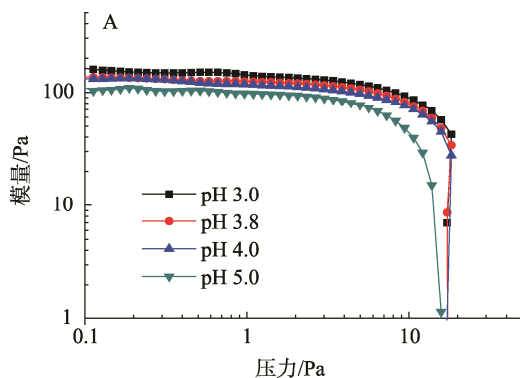


图 4 荷载姜黄素的高内相乳液在不同 pH 下的应力、频率扫描图
Fig.4 Stress and frequency scan of HIPE loading curcumin with different pH values

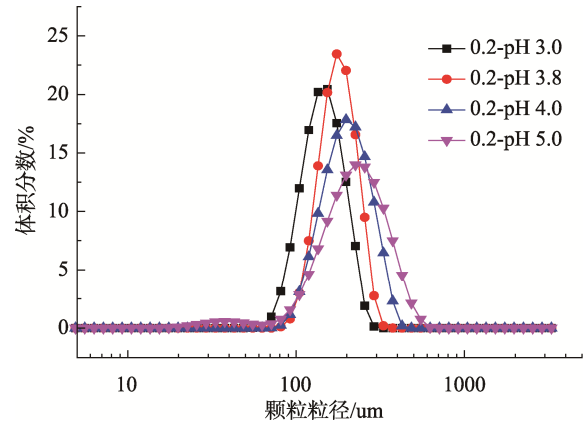


图 3 荷载姜黄素的不同 pH 值复合胶体颗粒制备的高内相乳液粒径分布

Fig.3 Particle size distribution of HIPE prepared by composite colloidal particles loaded with curcumin at different pH values

2.3 高内相 Pickering 乳液的流变学特性分析

2.3.1 高内相 Pickering 乳液的应力、频率扫描结果分析

流变学特性是乳液一个非常重要的特性, 表征乳液的凝胶性和粘弹性。通过应力扫描和频率扫描研究不同 pH 复合胶体颗粒制备的荷载姜黄素的高内相 Pickering 乳液的凝胶强度以及其线性粘弹区域范围。图 4 中的 A 组图是乳液的应力扫描结果图, 可以看出, 乳液在 0.1~10 Pa 应变压力下其模量变化较小, 这表明该高内相 Pickering 乳液形成类弹性的固体凝胶特性。继续增大压力开始出现拐点, 这说明乳液在该应力下模量迅速下降进入到非线性粘弹区域, 乳液的凝胶结构开始向溶胶结构转化。同时从图 4 看出, 随着 pH 值的增大, 乳液的起始模量越小, 拐点出现的越快, 乳液越不稳定。图 4 中的 B 组图是该高内相 Pickering 乳液的频率扫描图, 由图 4 可知该乳液都体现出较弱的频率依赖性, 并且随着 pH 值的增大, 其起始模量越低, 表明凝胶性越弱。因此, 由该高内相乳液的频率扫描和应力扫描结果可知, 该高内相乳液形成了稳定的凝胶网络结构, 同时该结构受到 pH 值的影响, pH 越低, 其内部结构越稳定, 凝胶特性越强。

2.3.2 高内相 Pickering 乳液的粘度特性

通过对乳液施加 $0.1\sim 100\text{ s}^{-1}$ 的剪切速率, 测定该乳液的静态流动特性。图 5 是不同 pH 条件下复合胶体颗粒制备的荷载姜黄素的高内相 Pickering 乳液粘度图。由图 5 可知, 随着剪切速率的增加, 乳液的粘度随之下降, 呈现出剪切变稀的特点, 这说明该高内相 Pickering 乳液属于牛顿流体范畴。另外, 在 pH 为 3.0 到 4.0 时, 乳液的起始粘度没有明显的变化, 在 $40\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 左右, 但在 pH 为 5.0 时, 其起始粘度低于 $10\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 这表明该高内相 Pickering 乳液在较低 pH 条件下形成的体系更具有粘弹性。

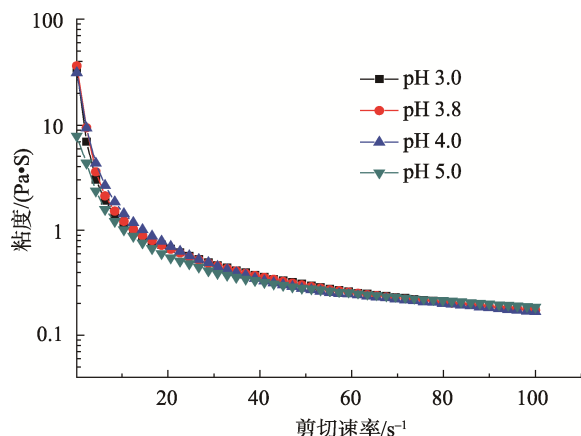


图 5 荷载姜黄素的高内相乳液粘度图
Fig.5 Viscosity of HIPE loading curcumin

2.3.3 高内相 Pickering 乳液的触变恢复性能

为研究该高内相 Pickering 乳液在不同压力下的触变恢复性能, 对不同 pH 固体颗粒制备的高内相 Pickering 乳液施加交替的剪切速率 $0.1、10、0.1\text{ s}^{-1}$, 从而观察其粘度变化, 结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, 在较低剪切速率时, 乳液粘度变化不大, 继续增大剪切速率, 乳液粘度急剧下降, 继续减少剪切速率, 乳液的粘度出现了反弹变高。这充分说明了该高内相 Pickering 乳液形成的凝胶网络结构具有一定的粘弹性。表 2 是不同 pH 固体颗粒制备的高内相乳液经过触变实验后的粘度恢复程度比较, 由表 2 可知, 在经过较高剪切速率作用后, 该高内相 Pickering 乳液的粘度恢复性能都达到 80% 以上, 具有较好的恢复能力。而且随着 pH 值的降低, 其恢复能力越高, 在固体颗粒 pH 为 3.0 条件下制备的乳液, 能达到 90% 以上的弹性恢复程度。这表明固体颗粒的 pH 值能影响高内相 Pickering 乳液稳定性, pH 值越低, 稳定性越好, 凝胶性越强, 这一实验结果也与其应力扫描结果和频率扫描结果相一致。

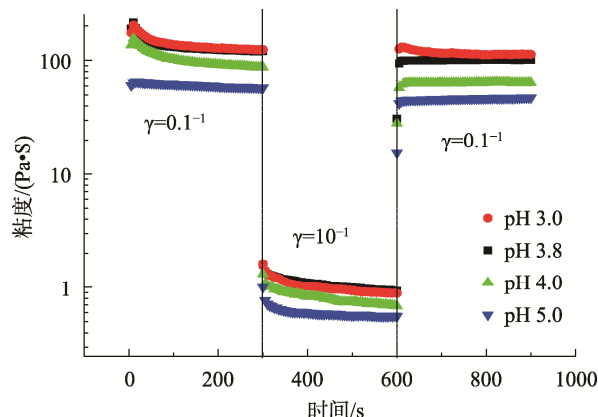


图 6 荷载姜黄素的高内相乳液触变图
Fig.6 Herschel-Bulkley flow parameter of HIPE loading curcumin

表 2 荷载姜黄素的高内相乳液触变恢复程度
Table 2 Herschel-Bulkley flow parameter recovery degree of HIPE loading curcumin

pH	3.0	3.8	4.0	5.0
第一阶段粘度/(Pa·s)	124.8	119.8	87.2	57.7
第二阶段粘度/(Pa·s)	112.9	104.5	72.3	47.5
恢复性能	90.9%	87.3%	83.0%	82.2%

3 结论

本研究通过反溶剂纳米沉淀法制备玉米醇溶蛋白/果胶复合胶颗粒, 再通过均质乳化技术, 成功构建了荷载生物活性物质姜黄素的高内相 Pickering 乳液体系, 该乳液体系油相占比高达 80%, 通过研究该高内相乳液体系的颗粒三相接触角、外观、储藏稳定性、粒径和各种流变学性能, 结果表明, 复合胶体颗粒的三相接触角在 pH3.0~6.0 范围内随着 pH 值的增大, 其亲水性越强, 乳化性越弱; 荷载了姜黄素的高内相 Pickering 乳液液滴在 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 范围内, 乳液能够稳定储藏 2 个月以上而不变质; 乳液的流变学行为表明, 该高内相 Pickering 乳液具有一定的粘弹性、触变恢复性能和凝胶特性, 而且乳液的稳定性受到固体颗粒 pH 值的影响, pH 越低, 其三相接触角越接近 90° , 胶体颗粒表现出两亲性, 乳液的流变学特性越优异, 表明其形成的凝胶网络结构越强, 乳液越稳定。该高内相 Pickering 乳液体系的成功构建, 为后续体外模拟消化实验以及活性物质的靶向缓释等相关内容的进一步研究提供了一定的理论基础。

参考文献

[1] 王聘翟. 脱酰胺玉米醇溶蛋白纳米颗粒的制备及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
WANG DD. Preparation and application of deamidated zein nanoparticles [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.

- [2] WANG YH, WANG JM, YANG XQ, *et al.* Amphiphilic zein hydrolysate as a novel nano-delivery vehicle for curcumin [J]. *Food Funct*, 2015, 6(8): 2636.
- [3] 傅玉颖, 李泽亚, 张豪, 等. 玉米醇溶蛋白复合纳米粒子的组装及稳定性研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(2): 196–203, 210.
FU YY, LI YZ, ZHANG H, *et al.* Advance in assembly and stability of zein composite nanoparticles [J]. *J Chin Cereals Oils Ass*, 2020, 35(2): 196–203, 210.
- [4] 孙翠霞. 基于玉米醇溶蛋白的复合胶体颗粒制备、表征及其应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
SUN CX. Fabrication, characterization and application of zein-based composite colloidal particles [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [5] 唐瑜婉, 王启明, 杨雅轩, 等. 玉米醇溶蛋白-多酚纳米颗粒对 Pickering 乳液稳定性的调控[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 11: 280–285.
TANF WY, WANF QM, YANG YX, *et al.* Regulation of the stability of Pickering emulsion by zein-polyphenol nanoparticles: A review [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 11: 280–285.
- [6] WANG Y, PADUA GW. Nanoscale characterization of zein self-assembly [J]. *Langmuir Acs J Surf Colloid*, 2012, 28(5): 2429–2435.
- [7] ZHANG W, XIE F, LIU X, *et al.* Pectin from black tomato pomace: Characterization, interaction with gallotannin, and emulsifying stability properties [J]. *Starch-Strke*, 2019, 71: 1800172.
- [8] AGUS P. 从柑橘罐头废水获得的柑橘果胶作为饼干和冰淇淋中的潜在脂肪代用品[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
AGUS P. Citrus pectin obtained from mandarin canning wastewater as a potential fat replacer in cookies and ice cream [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [9] 许馨予, 毛小雨, 杨鹤隽, 等. 天然植物果胶的提取及其在食品工业中的应用现状[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(8): 120–127.
XU XY, MAO XY, YANG HJ, *et al.* Extraction of natural plant pectin and its application in food industry [J]. *China Food Addit*, 2020, 31(8): 120–127.
- [10] ZHANG W, MAHUTA KM, MIKULSKI BA, *et al.* Novel pectin-based carriers for colonic drug delivery [J]. *Pharm Dev Technol*, 2016, 21(1): 127–130.
- [11] BEZERRA TS, FERNANDES TN, RESENDE JVD. Effects of added sucrose and pectin on the rheological behavior and freezing kinetics of passion fruit pulp studied by response surface methodology [J]. *J Food Sci Technol*, 2015, 52(6): 3350.
- [12] 侯俊杰. 大豆蛋白—甜菜果胶相互作用及其对食品微结构及感官性质影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
HOU JJ. Soy protein and sugar beet pectin interaction and its application in manipulating the microstructure and sensory perception of food [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [13] 万芝力. 大豆蛋白—甜菊糖苷相互作用及对界面主导食品体系的调控研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2016.
WANG ZL. Tunable soy proten-steviol glycoside interactions and their relationships with interface-dominated food systems [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2016.
- [14] LI H, SUREDA A, DEVKOTA HP, *et al.* Curcumin, the golden spice in treating cardiovascular diseases [J]. *Biotechnol Adv*, 2019, 38: 107343.
- [15] 李玉倩, 李学军. 姜黄素抗肿瘤作用基础与临床研究进展[J]. *中国药理学与毒理学杂志*, 2020, 34(5): 321–335.
- LI YQ, LI XJ. Basic and clinical research progress in antitumor effect of curcumin [J]. *China J Pharm Toxicol*, 2020, 34(5): 321–335.
- [16] 孟玲玉, 朱开梅, 顾生玖, 等. 姜黄素对胃癌 MGC-803 细胞磷酸化-丝氨酸/苏氨酸蛋白激酶表达的影响[J]. *广西医学*, 2017, 39(5): 674–677.
MENG LY, ZHU KM, GU SJ, *et al.* Effect of curcumin on protein expression of phosphorylase serine threonine kinase in gastric cancer MG-803 cells [J]. *Guangxi Med J*, 2017, 39(5): 674–677.
- [17] ULLA HF, LIANG A, RANGEL A, *et al.* High bioavailability curcumin: An anti-inflammatory and neurosupportive bioactive nutrient for neurodegenerative diseases characterized by chronic neuroinflammation [J]. *Arch Toxicol*, 2017, 91(4): 1623–1634.
- [18] RUAN D, WANG WC, LIN CX, *et al.* Effects of curcumin on performance, antioxidation, intestinal barrier and mitochondrial function in ducks fed corn contaminated with ochratoxin a—sciencedirect [J]. *Animal*, 2019, 13(1): 42–52.
- [19] JAKUBCZYK K, DRUGA A, KATARZYNA J, *et al.* Antioxidant potential of curcumin—a meta-analysis of randomized clinical trials [J]. *Antioxidants*, 2020, 9(11): 1092.
- [20] 王春颖. 蛋清蛋白高内相皮克林乳液的制备及其包埋姜黄素的性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
WANG CY. Preparation of high internal phase pickering emulsion stabilized by egg white protein and its properties of embedding curcumin [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [21] KAUR K, BHUYAN DJ, LI CG, *et al.* Modification of curcumin and investigation of its bioactivity [C]. *Virtual Keystone Symposia: Adv Cancer Immunother*, 2020.
- [22] 王丽娟. 玉米醇溶蛋白胶体颗粒的制备及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
WANG LJ. Fabrication of zein colloid particles and their applications [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [23] PICKERING SU. Emulsions [J]. *J Chem Soc*, 1907, 91: 2001–2021.
- [24] SINDT O, GAUTHIER C, HAMAIDE T, *et al.* Reactive surfactants in heterophase polymerization. XVI. emulsion copolymerization of styrene-butyl acrylate-acrylic acid in the presence of simple maleate reactive surfactants [J]. *J Appl Polym Sci*, 2015, 77(12): 2768–2776.
- [25] 刘燕军, 邵建楠, 周存. 离子型表面活性剂对乳液性能的影响[J]. *精细石油化工*, 2018, 35(3): 25–29.
LIU YJ, SHAO JN, ZHOU C. Effect of ionic surfactants on emulsion properties [J]. *Speciality Petrochem*, 2018, 35(3): 25–29.
- [26] WU J, MAG H. Recent studies of pickering emulsions: Particles make the difference [J]. *Small*, 2016, 12(34): 4633.
- [27] BUTLER R, DAVIES M, COOPERA I. Emulsion templating using high internal phase supercritical fluid emulsions [J]. *Adv Mater*, 2001, 13(19): 1459–1463.
- [28] HUGHES J, BUDDP M, TIEDE K, *et al.* Polymerized high internal phase emulsion monoliths for the chromatographic separation of engineered nanoparticles [J]. *J Appl Polym Sci*, 2015, 132(1): 41229.
- [29] 李先先, 阮贵华, 张文娟, 等. 氧化石墨烯掺杂高内相乳液多孔复合材料的制备及其应用[J]. *桂林理工大学学报*, 2019, 39(2): 453–459.
LI XX, RUAN GH, ZHANG WJ, *et al.* Preparation and application of graphene oxidized high internal phase emulsion porous composites [J].

- J Guilin Univ Technol, 2019, 39(2): 453–459.
- [30] 王永辉, 郭卫芸, 高雪丽, 等. 羟基磷酸钙基皮克林乳液的制备及流变性研究[J]. 广州化工, 2018, 46(14): 69–71, 100.
WANG YH, GUO WY, GAO XL, *et al.* Preparation of hydroxyapatite based pickering emulsion and study on its rheological properties [J]. Guangzhou Chem Ind, 2018, 46(14): 69–71, 100.
- [31] LIAN GJ, WU Y, DEN GX, *et al.* Optically active porous materials constructed by chirally helical substituted polyacetylene through a high internal phase emulsion approach and the application in enantioselective crystallization [J]. *Acs Macro Lett*, 2015, 4(10): 1179–1183.
- [32] LEE MC, TAN C, RAVANFA RR, *et al.* Ultra-stable water-in-oil high internal phase emulsions featuring interfacial and biphasic network stabilization [J]. *Acs Appl Mater Inter*, 2019, 11(29): 26433–26441.
- [33] 曾涛. 小麦醇溶蛋白胶体颗粒制备抗氧化 Pickering 高内相乳液及多孔材料的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
ZENG T. Fabrication of antioxidant pickering high internal emulsions and porous materials by gliadin colloid particles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [34] BINKSB P, LUMSDON SO. Catastrophic inversion of water-in-oil emulsions stabilized by hydrophobic silica [J]. *Langmuir*, 2000, 16(6): 2539–2547.
- [35] VIVIAN O, IKE M, ANGELIK A, *et al.* High internal phase emulsions stabilized solely by functionalized silica particles [J]. *Angew Chem Int Edit*, 2008, 47(43): 8277–8279.
- [36] 杨传玺, 王小宁, 杨诚. Pickering 乳液稳定性研究进展[J]. 科技导报, 2018, 36(5): 70–76.
YANG CX, WANG XN, YANG W. Research progress on the stability of Pickering emulsion [J]. *Sci Technol Rev*, 2018, 36(5): 70–76.
- [37] 焦博, 石爱民, 刘红芝, 等. 基于食品级固体颗粒稳定的 Pickering 乳液研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 296–303.
JIAO B, SHI AM, LIU L, *et al.* A review on food-grade particle stabilized Pickering emulsion [J]. *Food Sci*, 2018, 39(5): 296–303.
- [38] 刘永创. 多功能性大豆蛋白纳米颗粒的制备及其应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LIU YC. Fabrication and application of multifunctional soy protein nanoparticles [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



吴滋灵, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学与工程方向。
E-mail: 948486245@qq.com



尹寿伟, 教授, 主要研究方向为功能性胶体粒子与膜材料。
E-mail: feysw@scut.edu.cn