

# 用小麦醇溶蛋白/阿拉伯胶复合胶体颗粒制备植物基蛋黄酱及其性质分析

叶芸彤<sup>1</sup>, 梅钰琪<sup>1</sup>, 杨韵仪<sup>1</sup>, 刘潇<sup>2</sup>, 万芝力<sup>1\*</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 食物蛋白与胶体研究中心, 广东广州 510640)

(2. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏南京 210023)

**摘要:** 该研究采用反溶剂法制备小麦醇溶蛋白/阿拉伯胶 (G/GA) 复合胶体颗粒, 制备不同浓度 (0.5~2.0 wt%) 复合胶体颗粒稳定的高内相乳液 (HIPE)。复合胶体颗粒及乳液的粒度及性质分析结果显示, 复合胶体颗粒的平均粒径为 1.03  $\mu\text{m}$ 。外观上, 随着复合胶体颗粒浓度的增加 (1.0~2.0 wt%), 乳液的液滴的粒径逐渐减小, 液滴之间的排列更紧密, 形成更稳定的乳液凝胶。流变学中蛋黄酱的触变恢复率为 98.62%, 不同复合胶体颗粒浓度 HIPE 分别为 83.69% (0.5 wt%)、88.52% (1.0 wt%)、86.53% (1.5 wt%) 和 97.17% (2.0 wt%)。摩擦系数上所有样品均呈现先减小再增大的趋势。热稳定性检测中, 2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 的微观结构在加热后没有发生明显变化, 液滴保持与处理前大小一致的球状, 表明具有较好的热稳定性。该研究以 G/GA 复合胶体颗粒稳定的高内相乳液制备植物基蛋黄酱, 获得与蛋黄酱性质高度相似且具有更好的热稳定性的 HIPE, 证明 2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 具备作为植物蛋白基蛋黄酱开发应用的潜力, 为替代传统动物蛋白基蛋黄酱提供了新的思路与数据支持。

**关键词:** 植物基蛋黄酱; 高内相乳液; 小麦醇溶蛋白/阿拉伯胶复合胶体颗粒; 摩擦学性质

文章编号: 1673-9078(2022)12-59-66

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.12.0425

## Preparation of Plant-Based Mayonnaise with Wheat Gliadin/Gum Arabic Composite Colloidal Particles and Comparison of Their Properties

YE Yuntong<sup>1</sup>, MEI Yuqi<sup>1</sup>, YANG Yunyi<sup>1</sup>, LIU Xiao<sup>2</sup>, WAN Zhili<sup>1\*</sup>

(1. Laboratory of Food Proteins and Colloids, School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. School of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing, 210023, China)

**Abstract:** Wheat gliadin/gum arabic (G/GA) composite colloidal particles were prepared by the anti-solvent method, which were then used in different concentrations (0.5~2.0 wt%) to prepare a stable high internal phase emulsion (HIPE). The particle size and properties of the composite colloid particles and emulsion showed that the average particle size of the composite colloid particles was 1.03  $\mu\text{m}$ . With the increase in the concentration of the composite colloid particles (1.0~2.0 wt%), the droplet size decreased, and the arrangement of droplets became more compact, forming a more stable emulsion gel. The thixotropic recovery rate of mayonnaise in rheology was 98.62%, and the HIPE of different composite colloidal particle concentrations was 83.69% (0.5 wt%), 88.52% (1.0 wt%), 86.53% (1.5 wt%), and 97.17% (2.0 wt%). The friction coefficient of all samples first decreased and then increased. In the thermal stability test, the microstructure of the 2.0 wt% G/GA-stabilized HIPE did not change significantly after heating. Additionally, the droplets remained spherical with the same size as that before treatment,

引文格式:

叶芸彤, 梅钰琪, 杨韵仪, 等. 用小麦醇溶蛋白/阿拉伯胶复合胶体颗粒制备植物基蛋黄酱及其性质分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 59-66

YE Yuntong, MEI Yuqi, YANG Yunyi, et al. Preparation of plant-based mayonnaise with wheat gliadin/gum arabic composite colloidal particles and comparison of their properties [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 59-66

收稿日期: 2022-04-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32172347); 大学生创新训练项目 (S202010561248)

作者简介: 叶芸彤 (2001-), 女, 本科生, E-mail: yuntong\_ye@163.com

通讯作者: 万芝力 (1987-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 蛋白质化学与营养, E-mail: zhiliwan@scut.edu.cn

indicating good thermal stability. In this study, plant-based mayonnaise was prepared with an HIPE stabilized by G/GA composite colloidal particles, and an HIPE with properties highly similar to those of mayonnaise was obtained, which had better thermal stability. The above results confirm that 2.0 wt% G/GA-stabilized HIPE can be developed and applied as vegetable protein-based mayonnaise, thus providing new ideas and data support for replacing traditional animal protein-based mayonnaise.

**Key words:** plant-based mayonnaise; high internal phase emulsion; wheat gliadin/arabic gum complex colloidal particles; tribology

作为广受欢迎的配方调味酱, 蛋黄酱呈乳液凝胶状, 由蛋黄、植物油等原料均质混合而制得<sup>[1]</sup>。商品化蛋黄酱被看作是水包油型高内相乳液<sup>[2]</sup> (High Internal Phase Emulsion, HIPE), HIPE 通常被定义为油相体积分数大于 74% ( $V/V$ ) 的乳液体系<sup>[3]</sup>。在形成时, 蛋白质为系统的稳定起到了重要的作用。但蛋黄本身除蛋白质外, 还含有较多的胆固醇及饱和脂肪酸, 大量摄入会增加人体患心血管疾病的风险<sup>[4]</sup>。此外, 在健康饮食的潮流下, 人们对于此类食品开始出现抵触心理, 更多地去追求绿色、健康的食品。目前, 利用植物蛋白替代动物蛋白, 从而减少或消除产品对动物性原料的依赖, 是实现可持续发展的方案之一<sup>[5-7]</sup>。因此, 利用植物蛋白部分或全部代替动物蛋白制作具有类似蛋黄酱结构的 HIPE 或乳液凝胶<sup>[8,9]</sup>是非常热门的课题之一, 早在二十一世纪初, Franco 等<sup>[10]</sup>便进行过类似的实验。

乳液由于自身不稳定性, 通常加入乳化剂来降低界面张力。食品中为了达到健康的要求, 通常采用蛋白质、多糖等物质作为天然乳化剂<sup>[11]</sup>。而蛋白凝胶体颗粒因其具有良好的乳液、界面稳定能力及特有的营养价值, 被视为优质的 HIPE 乳化剂。小麦醇溶蛋白是一种水溶性较差的蛋白颗粒, 但在一定浓度的乙醇溶液中具有较好的溶解性<sup>[12]</sup>。并且含有较多的疏水性氨基酸, 呈现出较好的两亲性。曾涛<sup>[13]</sup>成功利用小麦醇溶蛋白胶体颗粒制备抗氧化 HIPE, 表明其在开发植物蛋白乳液凝胶方面具有潜力。但在酸性条件下, 其具有较强的亲水性, 无法在界面上吸附, 故无法达到好的稳定效果<sup>[14]</sup>。目前, 利用多糖制备蛋白/多糖复合颗粒已被证明可修饰蛋白颗粒的结构, 从而改善界面吸附性质, 提高体系的乳化性<sup>[15]</sup>。一些因为具有非极性基团或蛋白质附着在亲水性碳水化合物链上的天然多糖, 具有良好的乳化性能。阿拉伯胶是最常见的此类表面活性多糖, 也是目前食品工业中应用最广泛的天然多糖乳化剂。然而, 其主要缺点是需要较高的乳化剂与油的比例才能形成稳定的乳液<sup>[11]</sup>。但阿拉伯胶属于阴离子多糖, 具有独特的蛋白质与鼠李糖分子结构, 展现出良好的两亲性<sup>[16]</sup>, 可用于制备具有较好乳化性的复合胶体颗粒。

基于此, 本项目利用小麦醇溶蛋白与多糖(阿拉伯胶)通过反溶剂法制备复合颗粒<sup>[17]</sup>, 进一步制备出

HIPE, 并对乳液的外观及粒径分布、微观结构、流变学行为、摩擦学性质和热稳定性等性质加以评估, 致力于开发一种与蛋黄酱性质相似的植物蛋白基 HIPE, 为食品生产中植物蛋白作为动物蛋白的替代品提供可能, 便于人们在追求健康的同时兼顾口感追求, 并以此作为新型健康食品的开发提供思路及理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

谷朊粉购自封丘华丰粉业有限公司, 阿拉伯胶购自 Sigma-Aldrich 公司, 葵花籽油购于当地超市, 其他试剂均为分析纯, 所有实验用水均为去离子水。

### 1.2 仪器与设备

Arium 611 纯水机, 德国 Sartorius 公司; CR22 低温离心机, 日本 Hitachi 公司; DELTA 1-24 LSC 冷冻干燥机, 德国 Christ 公司; DHG-9140A 电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器公司; T10 Basic 高速分散机, 德国 IKA 公司; MasterSizer 3000 微米粒度仪, 英国 Malvern 公司; IX53 光学显微镜, 日本 OLYMPUS 公司; HAKKE MARS60 流变仪, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; RV10 旋转蒸发仪, 德国 IKA 公司; DHZ-DA 恒温摇床, 江苏太仓市实验设备厂。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 小麦醇溶蛋白/阿拉伯胶(G/GA)复合胶体颗粒的制备

小麦醇溶蛋白的制备按照 Duclairoir 等<sup>[18]</sup>的方法, 稍作修改。称取 100 g 谷朊粉于 2 L 烧杯中, 加入 1 000 mL 70% ( $V/V$ ) 的乙醇水溶液, 调节 pH 值至 4.0, 在 25 °C 下进行搅拌 2~3 h, 8 000 r/min 离心 20 min, 将上清液转移至旋蒸仪中, 在 45 °C 下去除乙醇, 随后将溶液冷冻干燥 24 h, 得到的样品即为小麦醇溶蛋白。

通过反溶剂方法制备小麦醇溶蛋白纳米颗粒。准确称量 16 g 小麦醇溶蛋白粉末, 溶解在 200 mL 70% ( $V/V$ ) 乙醇溶液中, 另外将 8 g 阿拉伯胶溶于 400 mL 去离子水。待两者分散均匀后, 调节 pH 值至 4.0, 并将小麦醇溶蛋白溶液快速加入至阿拉伯胶溶液中, 过

程中不断搅拌。随后将溶液在 45 °C 条件下进行旋蒸处理以完全除去乙醇,得到的溶液冷冻干燥 24 h 后获得 G/GA 复合胶体颗粒(小麦醇溶蛋白与阿拉伯胶的质量比为 2:1)。

### 1.3.2 复合胶体颗粒的粒度测定

利用 MasterSizer 3000 测量复合胶体颗粒的粒径。使用超纯水分散 G/GA 复合胶体颗粒,颗粒折射率设定为 1.473;颗粒吸收率为 0.001;分散剂为水,折射率为 1.330。所有测量均在 25 °C 下进行。

### 1.3.3 复合胶体颗粒的微观结构 (SEM)

利用扫描电子显微镜对复合胶体颗粒的微观结构进行观察。将粉末样品用导电胶固定于金属载物台上进行喷金处理,使用 5 kV 加速电压,观察其形貌特征。

### 1.3.4 高内相乳液 HIPE 及蛋黄酱的制备

调节 G/GA 复合胶体颗粒的 pH 值为 4.0,以不同浓度的 G/GA 复合胶体颗粒溶液为水相,葵花籽油为油相,油相占比为 75 wt%,制备不同复合胶体颗粒浓度的 HIPE<sup>[19]</sup>。使用高速分散机在 20 000 r/min 转速下剪切均质 3 min,得到 Pickering 类型的 HIPE。其中 G/GA 复合胶体颗粒溶液的浓度分别为 2 wt%、4 wt%、6 wt% 和 8 wt%,最后制得的 HIPE 中复合胶体颗粒浓度分别为 0.5 wt%、1.0 wt%、1.5 wt% 和 2.0 wt%。

参照 Ghoush 等<sup>[20]</sup>的方法制备蛋黄酱,稍作修改。将 0.4 g 糖、0.22 g 食盐、3.1 g 蛋黄与 48 g 葵花籽油混合,使用 T10 Basic 高速分散机在转速 20 000 r/min 下剪切 3 min,加入 1.25 g 白醋和 11 g 水均质 1 min。所得蛋黄酱的油含量与 HIPE 相同,均为 75 wt%。

### 1.3.5 HIPE 的粒度测定

使用 MasterSizer 3000 微米粒度仪对 HIPE 液滴的尺寸测定分析,分散介质为超纯水,葵花籽油和水相折射率分别设定为 1.46 与 1.33。

### 1.3.6 HIPE 的微观结构观察

分别观察不同浓度 HIPE 的外观,用 IX53 光学显微镜对新鲜制备的乳液进行微观结构观察。

### 1.3.7 HIPE 的流变学特性测定

采用 HAAKE MARS60 流变仪测定 HIPE 的流变性能<sup>[21]</sup>。操作时,采用直径为 60 mm 的平板,间隙设为 1 mm。确定试样的线性粘弹性区域,对试样进行 0.1~1 000 Pa 的应力扫描(频率为 1 Hz)。之后对样品进行 0.1~10 Hz 的频率扫描,应力恒定为 1 Pa。此外,粘度测量的剪切速率为 1~50 s<sup>-1</sup>。采用三间隔触变性测试(3-ITT)研究乳液凝胶的剪切稀化和触变行为,分别于 0.1 s<sup>-1</sup>、10 s<sup>-1</sup>、0.1 s<sup>-1</sup> 的剪切速率下测定 600 s。测试温度恒为 25 °C。利用所得结果计算触变恢复率。

$$A = \frac{V_{III}}{V_I} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$A$ ——触变恢复率, %;

$V_{III}$ ——第三阶段中峰值粘度值, Pa·s;

$V_I$ ——第一阶段结束时粘度值, Pa·s。

### 1.3.8 HIPE 的摩擦学性质

HAAKE MARS60 流变仪与球三板摩擦附件(T-PTD 200)联用以进行摩擦性能测试。摩擦计由三个钢销(15 mm×6 mm×3 mm)和一个钢球(12.7 mm)组成。试验前,用超纯水清洗钢球,自然空气干燥。测试温度恒定在 25 °C,样品池中加入 400 μL 乳液,静置 2 min 至稳定状态。对于 Stribeck 曲线的测试,法向力为 1 N,摩擦速率设为 0.1~100 mm/s。

### 1.3.9 HIPE 的热稳定性

为了测定 HIPE 的热稳定性,将样品置于水浴锅中,90 °C 处理 30 min,用光学显微镜观察样品形态变化。

### 1.3.10 数据分析

所有样品测定都经过三次测定以获得数据,通过 SPSS 21.0 软件对数据进行显著性分析,采用 Origin 2018 软件进行作图分析,Duncan 检验对多组样品进行显著性分析( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合胶体颗粒的表征

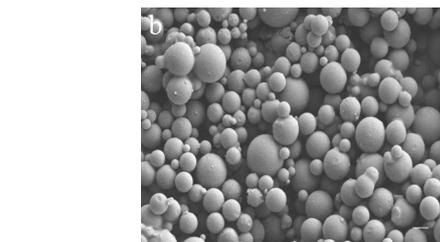
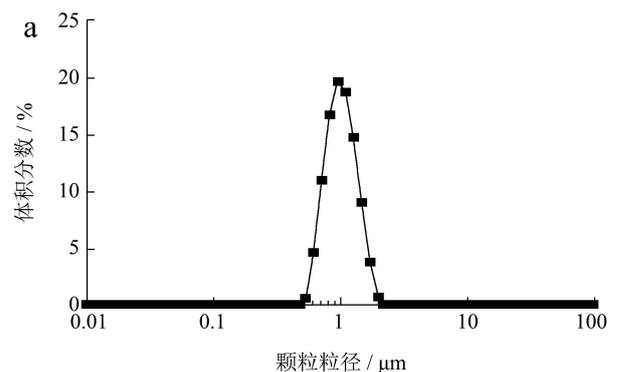


图 1 G/GA 复合胶体颗粒的粒径分布及扫描电子显微镜图

Fig.1 Particle size distribution and scanning electron microscopy of G/GA complex colloidal particles

注:图 b 比例尺为 1 μm。

小麦醇溶蛋白可溶于乙醇水溶液中，以此制备两亲性纳米材料，其等电点接近中性（pH 值 7.0）<sup>[22]</sup>。为了避免等电点对制备小麦醇溶蛋白过程造成影响，本实验参照刘潇<sup>[23]</sup>的方法，在酸性条件（pH 值 4.0）制备小麦醇溶蛋白。同样，为避免小麦醇溶蛋白等电点对以小麦醇溶蛋白为原料制备的复合胶体颗粒的制备与测量造成影响，选择酸性条件（pH 值 4.0）进行对复合胶体颗粒的制备和测量。

由图 1a 可知，G/GA 复合胶体颗粒的平均粒径为 1.03 μm，粒径分布曲线呈单峰，颗粒具有良好的单分散性。图 1b 为 G/GA 复合胶体颗粒微观结构图，图片显示胶体颗粒均呈规则的圆球状，表面光滑，除个别颗粒存在差异外，其他大小均分布在 1.00 μm 左右，与粒径测定结果较为接近。据吴滋灵等<sup>[24]</sup>的研究，小麦醇溶蛋白胶体粒径为 120.1 nm，远小于 G/GA 复合胶体颗粒，但据 Yuan 等<sup>[9]</sup>的研究，以未经过任何修饰的小麦醇溶蛋白制备的高内相乳液只具备稳定数天的能力。以上结果说明小麦醇溶蛋白可以通过该方法制备出均一稳定的 G/GA 复合胶体颗粒，且制备出的 G/GA 复合胶体颗粒利于进一步的研究与应用。

## 2.2 HIPE 的粒径分布

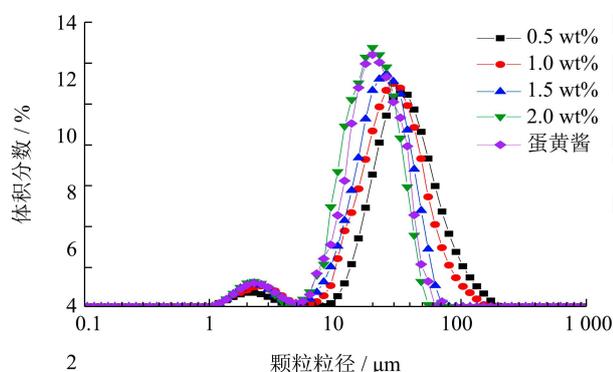


图 2 G/GA 稳定的高内相乳液 HIPE 和蛋黄酱的粒径分布图

Fig.2 Particle size distribution of G/GA-stabilized HIPE and mayonnaise

蛋黄酱是一种典型的水包油乳液，在食品应用中，液滴大小对其稳定性和性能起着主导作用<sup>[25]</sup>，而据 Hunter 等<sup>[26]</sup>研究，液滴尺寸受颗粒浓度的影响，浓度越高，水油界面上的界面富集蛋白的效益越强，液滴尺寸越小。在本研究中，粒径大小同样与颗粒浓度相关。图 2 为 G/GA 稳定的 HIPE 和蛋黄酱的粒径分布图，用于检测不同浓度 G/GA 稳定的 HIPE 粒径分布与蛋黄酱之间存在的差异。图中所有测试样品均呈现接近的粒度分布趋势，都存在一大一小两个峰，大峰位于 20.00 μm 左右，表明绝大多数 HIPE 粒径接近 20.00 μm，且随 G/GA 浓度的增加，分布曲线逐渐向左偏移，表

明乳液液滴的粒径逐渐变小。小粒径峰位于 2.00 μm 左右，大小接近复合胶体颗粒。推测双峰的出现可能有两个原因，一方面可能是存在部分未吸附到油-水界面而停留在体相中的复合胶体颗粒导致的<sup>[27]</sup>；另一方面可能是由于在高粘度体系剪切过程中，油滴粒径分布不均匀造成的<sup>[28]</sup>。此外，G/GA 为 2.0 wt% 的 HIPE 粒径分布与蛋黄酱的分布曲线具有高度的重合性，说明两者在乳液的形成方面具有较高的相似性。

## 2.3 HIPE 的微观结构

高内相乳液 HIPE 通常被称为超浓缩乳液，通常由大量表面活性剂（5~50 wt%）稳定。研究表明，由固体颗粒稳定的 Pickering 乳液更加稳定<sup>[29]</sup>，吸附在乳液液滴表面的颗粒（如乳清蛋白颗粒、玉米醇溶蛋白颗粒）可形成单层或多层颗粒层<sup>[30]</sup>，通过产生强烈的空间排斥作用防止液滴聚集<sup>[31]</sup>。

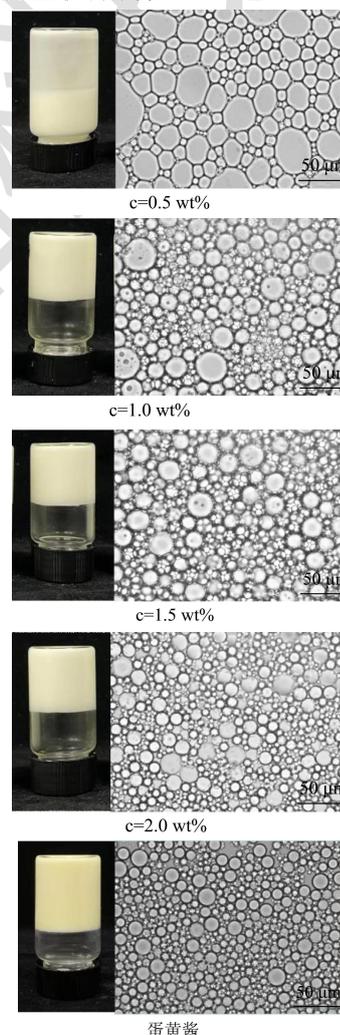


图 3 G/GA 稳定的高内相乳液 HIPE 与蛋黄酱的外观图、光学显微镜图

Fig.3 Appearance and optical microscopy of G/GA-stabilized HIPE and mayonnaise

如图3所示,不同浓度的复合胶体颗粒的 HIPE 在 pH 值 4.0 时的外观图、光学显微镜图存在明显差异。当复合胶体颗粒的浓度为 0.5 wt% 时,乳液呈流动状态,无法形成半固态或固态的乳液凝胶形式,液滴粒径较大。随着复合胶体颗粒浓度的增加(1.0~2.0 wt%),乳液液滴的粒径逐渐减小,液滴之间的堆积更为紧密,形成更加稳定的乳液凝胶。当复合胶体颗粒的浓度为 2.0 wt% 时,粒径大小及微观结构接近蛋黄酱,这与乳液粒径分布的测定结果相符。

根据刘潇<sup>[23]</sup>的研究,在乳液形成过程中,小麦醇溶蛋白作为富含半胱氨酸的蛋白可在油-水界面处部分展开,这可能会导致游离巯基暴露,可以进一步参与巯基-二硫键交换反应形成蛋白分子间二硫键交联。而在实验中发现,浓度越高,更容易形成结构化的乳液凝胶,故而我们推测,对于小麦醇溶蛋白而言,浓度越高,粒径越小,二硫键交联反应更容易触发。

### 2.4 HIPE 的流变学行为

图4a为不同复合胶体颗粒浓度 G/GA 稳定的 HIPE 与蛋黄酱的应力扫描图。在一定范围内(0.5 wt% G/GA 稳定的 HIPE 为 2 Pa 内,其他样品均为 10 Pa 内),所有样品的弹性模量( $G'$ )一直高于粘性模量( $G''$ ),表现出类弹性固体性质。随着应力提高,出现明显的  $G'$  和  $G''$  交点,说明在该应力大小下,样品的网络结构开始发生变化。由图中可知,随着 G/GA 浓度增加,该点出现时所对应的应力增大。这表明 G/GA 颗粒将液滴连接,液滴相互作用形成的三维凝胶网络增加了乳液的机械强度,G/GA 浓度越大,形成的三维凝胶网络越牢固。而如图4b所示,恒定的应力下,在测试频率范围内,所有样品的  $G'$  和  $G''$  均表现出频率依赖性低的特点,特别是  $G'$ ,显示较小的波动。此外,所有样品  $G'$  值始终高于  $G''$ ,在所有测试频率下都未出现  $G'$  和  $G''$  交点,说明频率改变并不能产生凝胶-溶胶的转变。随着 G/GA 浓度的增大, $G'$  显著提高,并且 2.0 wt% G/GA 制备 HIPE 与蛋黄酱  $G'$  接近。这表明可以通过改变 G/GA 浓度可操控 HIPE 流变学性质,并且 2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 与蛋黄酱具有相似的结构性质。

表观粘度随剪切速率变化的曲线如图4c所示,从曲线上看,所有蛋黄酱的粘度随剪切速率的增大而减小,表明所有样品都具有假塑性流体性质。这是由于乳状液滴在流动层中沿剪切方向逐渐排列,大液滴被分散形成小液滴。随着复合颗粒浓度的增大,乳液粘度增大。蛋黄酱的形态在生产、处理、运输、储存和食用过程中会发生一定程度的变化,因此在模拟食品工业的整个过程时,其触变性也至关重要。采用 3-ITT

的方法在测量蛋黄酱变形和恢复的性能,以模拟分析实际操作的效果。通常认为,恢复率大于 70% 即拥有较高的触变恢复性<sup>[32]</sup>。

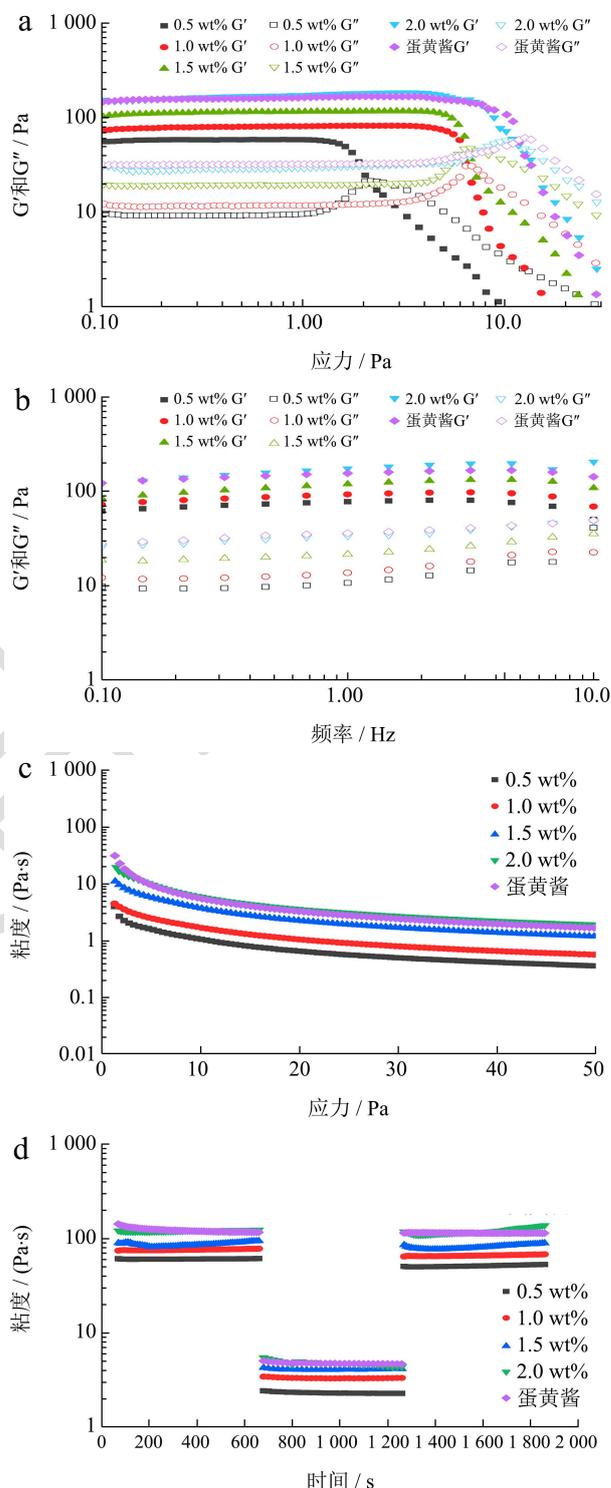


图4 G/GA 稳定的高内相乳液 HIPE 与蛋黄酱的流变学特性: (a) 振幅扫描; (b) 频率扫描; (c) 粘度; (d) 触变恢复性  
Fig.4 Rheological properties of G/GA-stabilized HIPE and mayonnaise: (a) Amplitude sweep, (b) frequency sweep, (c) viscosity curve, and (d) thixotropic recovery

如图4d所示,经计算蛋黄酱的触变恢复率为

98.62%，不同复合胶体颗粒浓度 HIPE 的触变恢复率分别为 83.69% (0.5 wt%)、88.52% (1.0 wt%)、86.53% (1.5 wt%) 和 97.17% (2.0 wt%)。其中，2.0 wt% 的 HIPE 显示出与蛋黄酱几乎一致的高触变恢复率，表明了其在快速涂抹后能像蛋黄酱一样可迅速恢复粘度，证明在性质上与蛋黄酱高度相似，具有代替蛋黄酱的潜力。值得注意的是，由图可以看出，2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 与实际蛋黄酱的四个表征曲线都几乎重合，表明两者的流变学性质非常接近。

## 2.5 HIPE 的摩擦学性质

乳液的流变学和摩擦学特性在消费者口腔加工过程中的感官知觉中发挥着主导作用<sup>[33]</sup>。Stribeck 曲线呈现了摩擦系数和夹带速度之间的关系。在 Stribeck 曲线中，存在三种主要的润滑状态：边界（两个滑动面之间有大量接触，摩擦系数 $\geq 0.1$ ），混合（接触面开始被润滑剂分开，摩擦系数介于 0.001 和 0.1）和流体动力学（滑动表面完全被润滑剂隔开，摩擦系数 $\leq 0.001$ ）<sup>[34]</sup>。如图 5 所示，可以看出，随夹带速度的增加，不同复合胶体颗粒浓度的 HIPE 的摩擦系数均呈现先减小再增大的趋势，并且明显看到，相同夹带速度下，复合胶体颗粒浓度越大，HIPE 的摩擦系数也越大。对于 2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE，其表现出与实际蛋黄酱极为相似的 Stribeck 曲线，这在一定程度上表明 2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 在实际口感上与蛋黄酱高度接近，具有较大的替代蛋黄酱的潜力。

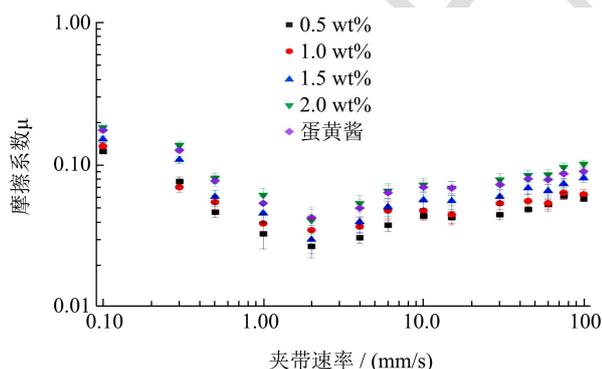


图 5 G/GA 稳定的高内相乳液 HIPE 与蛋黄酱的 Stribeck 曲线  
Fig.5 Stribeck curves of G/GA-stabilized HIPE and mayonnaise

测试样品（HIPE 和蛋黄酱）作为润滑剂促进接触表面的相对运动，进而降低两者间的摩擦系数。根据 Chojnicka 等<sup>[35]</sup>的研究结果表明，在压力相对较低时（50~100 kPa），润滑剂中蛋白质聚集体的浓度及其形状和大小显著影响软接触摩擦。蛋白质浓度越高，粒径越大，润滑效果也越好。所有蛋白质分散体均以浓度依赖的方式有效降低了边界摩擦力。而在本试验的测试样品中吸附在乳状液滴表面的颗粒形成单层或多层颗粒层，

并且随着复合胶体颗粒浓度的增加（1.0~2.0 wt%），乳液液滴的粒径逐渐减小，液滴之间的排列更为紧密，形成更加稳定的乳液凝胶。我们推测，其中的复合胶体颗粒分散体拥有类蛋白质的性质，也以浓度依赖的方式有效降低了边界摩擦力。

## 2.6 乳液的热稳定性

乳液体系的热稳定性对其加工贮藏有着重要作用<sup>[36]</sup>，而蛋黄酱为高度热力学不稳定体系，高温对其体系影响较大。通过前面的研究我们发现，2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 和蛋黄酱具有非常相似的微观结构、流变学、摩擦学等性质。因此我们进一步研究了 2.0 wt% G/GA 稳定 HIPE 的热稳定性。在早先的研究中发现，蛋白质颗粒层还可以通过降低界面自由能来改善 Pickering 乳液的物理稳定性，从而在均质过程中形成较小的液滴<sup>[37]</sup>。通常，较小的液滴比较大的液滴更能抵抗重力分离和聚集<sup>[30]</sup>。由图 6 所示，在 90 °C 热处理 30 min 后，2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 呈现倒立不流动的膏状，但实际蛋黄酱出现结构破坏，产生油水分离现象，表明蛋黄酱产品的稳定性遭到破坏。光学显微镜观察到蛋黄酱小液滴聚集变为大液滴，而 2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 的微观结构在加热后没有发生明显变化，液滴仍保持与处理前大小一致的球状。因此，这表明 2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 比蛋黄酱具有更好的热稳定性。

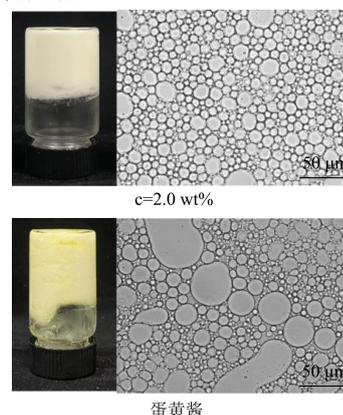


图 6 2.0 wt% G/GA 稳定的高内相乳液 HIPE 和蛋黄酱在 90 °C 加热处理 30 min 后的外观和光学显微镜图

Fig.6 Appearance and optical microscopy of 2.0 wt% G/GA HIPE and mayonnaise after heating at 90 °C for 30 min

此外，一般认为，胶体颗粒的平均尺寸应至少比乳化液滴的平均尺寸小一个数量级，以便有效吸附到界面上并形成保护层。随着胶体颗粒尺寸的减小，可以使稳定的乳化液滴的比表面积增加，从而形成更小的乳化液滴，通常更稳定。这也印证了乳液的粒径测试与乳液的微观结构测定中的试验结论。作为商品，

加工与贮藏方面的优势同时也决定了经济效益的优势。因此, 2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 在制作植物基蛋黄酱方面具有较大的开发优势。

### 3 结论

本研究通过反溶剂法制备了小麦醇溶蛋白/阿拉伯胶(G/GA)复合胶体颗粒,并以此为乳化剂制备高内相乳液 HIPE。通过研究乳液的微观结构及粒度分布、流变学行为、摩擦学性质以及热稳定性,评估该体系作为蛋黄酱替代物的潜力。主要结论如下: G/GA 复合颗粒具有良好的单分散性,呈规则的圆球状。随着 G/GA 浓度的增加,乳液液滴的粒径逐渐变小,液滴之间的排列更为紧密;当复合颗粒浓度为 2.0 wt%时,制备的 HIPE 粒径及形貌与蛋黄酱最为相似。流变学测定中,所有样品均表现出类弹性固体性质,并且均随着 G/GA 浓度增加,乳液的机械强度逐渐增强。摩擦学性质方面,随夹带速度的增加,所有样品的摩擦系数均呈现先减小再增大的趋势;且复合颗粒浓度越高,HIPE 的摩擦系数也越大。值得注意的是,2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 显示出与蛋黄酱几乎一致的粘弹特性、表观粘度、高触变恢复率以及摩擦系数。表明在乳液质构及感官上,2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 与蛋黄酱具有极大的相似性。热稳定性评估结果进一步表明 2.0 wt% G/GA 稳定的 HIPE 比蛋黄酱具有更高的热稳定性,上述结果在一定程度上说明,在热加工、热杀菌方面,采用 G/GA 稳定的 HIPE 制备植物基蛋黄酱具有较大优势,在代替动物蛋白生产类似蛋黄酱产品方面具有巨大的开发潜力。

### 参考文献

- [1] Ma Z, Boye J I. Advances in the design and production of reduced-fat and reduced-cholesterol salad dressing and mayonnaise: A review [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 648-670
- [2] Ding M, Zhang T, Zhang H, et al. Gelatin molecular structures affect behaviors of fish oil-loaded traditional and Pickering emulsions [J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125642
- [3] Anton M. Egg yolk: structures, functionalities and processes [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(12): 2871-2880
- [4] Miranda J M, Anton X, Redondo-Valbuena C, et al. Egg and egg-derived foods: Effects on human health and use as functional foods [J]. Nutrients, 2015, 7(1): 706-729
- [5] 申瑞玲,孟付荣,罗双群.燕麦糊精脂肪替代品的制备[J].粮油加工,2009,9:106-109
- [6] 郝晓敏,谷长生,刘继伟,等.淀粉基脂肪模拟物的性质及代脂研究[J].食品研究与开发,2007,2:32-35
- [7] 陈茂彬.植物甾醇酯的制备、生物活性及应用研究[D].武汉:华中农业大学,2005
- [8] Xiao J, Lu X, Huang Q. Double emulsion derived from kafirin nanoparticles stabilized Pickering emulsion: Fabrication, microstructure, stability and in vitro digestion profile [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 62: 230-238
- [9] Yuan D B, Hu Y Q, Zeng T, et al. Development of stable Pickering emulsions/oil powders and Pickering HIPEs stabilized by gliadin/chitosan complex particles [J]. Food & Function, 2017, 8(6): 2220-2230
- [10] Franco J M, Partal P, Ruiz-Marquez D, et al. Influence of pH and protein thermal treatment on the rheology of pea protein-stabilized oil-in-water emulsions [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2000, 77(9): 975-983
- [11] Ozturk B, McClements D J. Progress in natural emulsifiers for utilization in food emulsions [J]. Current Opinion in Food Science, 2016, 7: 1-6
- [12] Mendes A C, Stephansen K, Chronakis I S. Electrospinning of food proteins and polysaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 68: 53-68
- [13] 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
- [14] Zeng T, Wu Z L, Zhu J Y, et al. Development of antioxidant Pickering high internal phase emulsions (HIPEs) stabilized by protein/polysaccharide hybrid particles as potential alternative for PHOs [J]. Food Chemistry, 2017, 231: 122-130
- [15] Zhou F Z, Yan L, Yin S W, et al. Development of pickering emulsions stabilized by gliadin/proanthocyanidins hybrid particles (GPHPs) and the fate of lipid oxidation and digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(6): 1461-1471
- [16] Altuna L, Herrera M L, Foresti M L. Synthesis and characterization of octenyl succinic anhydride modified starches for food applications. A review of recent literature [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 97-110
- [17] Gullon P, Gullon B, Romani A, et al. Smart advanced solvents for bioactive compounds recovery from agri-food by-products: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 101: 182-197
- [18] Duclairoir C, Orecchioni A M, Depraetere P, et al. alpha-Tocopherol encapsulation and in vitro release from wheat gliadin nanoparticles [J]. Journal of Microencapsulation, 2002, 19(1): 53-60

- [19] 陈雨桐.小麦醇溶蛋白/单宁酸复合物稳定的皮克林乳液体系的构建及应用[D].武汉:华中农业大学,2019
- [20] Abu Ghoush M, Samhouri M, Al-Holy M, et al. Formulation and fuzzy modeling of emulsion stability and viscosity of a gum-protein emulsifier in a model mayonnaise system [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84(2): 348-357
- [21] 代欣欣,李汴生.食品增稠剂流变学研究综述[J].*中国食品添加剂*,2007,4:138-142
- [22] Wu Y V, Dimler R J. Hydrogen ion equilibria of wheat glutenin and gliadin [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1963, 103: 310-318
- [23] 刘潇.小麦蛋白基乳液凝胶的构建、应用及机理研究[D].广州:华南理工大学,2019
- [24] 吴滋灵,周福珍,尹艳,等.超声处理制备小麦醇溶蛋白胶体颗粒 Pickering 乳液及其表征[J].*现代食品科技*,2018,34(7):123-127,257
- [25] Liu X, Guo J, Wan Z-L, et al. Wheat gluten-stabilized high internal phase emulsions as mayonnaise replacers [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 168-175
- [26] Hunter T N, Pugh R J, Franks G V, et al. The role of particles in stabilising foams and emulsions [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2008, 137(2): 57-81
- [27] Jiao B, Shi A M, Wang Q, et al. High-internal-phase pickering emulsions stabilized solely by peanut-protein-isolate microgel particles with multiple potential applications [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2018, 57(30): 9274-9278
- [28] 韦越.阿拉伯木聚糖玉米纤维胶的改性及乳液稳定性和界面流变学研究[D].上海:上海交通大学,2020
- [29] Yan X J, Ma C C, Cui F Z, et al. Protein-stabilized Pickering emulsions: Formation, stability, properties, and applications in foods [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 103: 293-303
- [30] Murray B S. Pickering emulsions for food and drinks [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2019, 27: 57-63
- [31] Patel A R, Dewettinck K. Comparative evaluation of structured oil systems: Shellac oleogel, HPMC oleogel, and HIPE gel [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2015, 117(11): 1772-1781
- [32] Sarkar A, Krop E M. Marrying oral tribology to sensory perception: a systematic review [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2019, 27: 64-73
- [33] Zheng Y, Bashandeh K, Shakil A, et al. Review of dental tribology: Current status and challenges [J]. *Tribology International*, 2022, 166: 107354
- [34] Choknocka A, De Jong S, De Kruif C G, et al. Lubrication properties of protein aggregate dispersions in a soft contact [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(4): 1274-1282
- [35] Zhang X Y, Niu J L, Wu J Y. Evaluation and manipulation of the key emulsification factors toward highly stable PCM-water nano-emulsions for thermal energy storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 219: 110820
- [36] Harman C L G, Patel M A, Guldin S, et al. Recent developments in Pickering emulsions for biomedical applications [J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2019, 39: 173-189
- [37] Liang H N, Tang C H. pH-dependent emulsifying properties of pea *Pisum sativum* (L.) proteins [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 33(2): 309-319