

乳清蛋白和瓜尔豆胶复合物作为低脂蛋挞脂肪替代品的评价

樊子萱, 孙爽爽, 单媛媛

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 随着人们对美好生活的追求, 消费者对低脂产品愈发感兴趣。因此, 需要新的脂肪替代品来改善低脂产品的质量。该研究使用乳清蛋白 (Whey Protein, WP) 和瓜尔豆胶 (Guar Gum, GG) 生产乳清蛋白-瓜尔豆胶 (Whey Protein-Guar Gum, WP-GG) 复合物作为低脂蛋挞的脂肪替代品。对 WP-GG 复合物的浊度、粒径及电位进行测定, 发现乳清蛋白与瓜尔豆胶形成复合物的最适质量比为 9:1。通过 FT-IR、相互作用力、显微结构与流变学分析, 发现乳清蛋白能够与瓜尔豆胶形成性能稳定、结构致密的 WP-GG 复合物。进一步研究发现, WP-GG 复合物具有较高的硬度, 有利于形成弹性更好的热凝胶。最后, 利用 WP-GG 复合物进行脂肪替代制作低脂蛋挞, 发现蛋挞芯的结构更加致密, 当脂肪替代品的比例是 30% 时, 蛋挞获得了最好的形态、色泽和内部结构。这些表明 WP-GG 复合物可作为低脂蛋挞制品中优良的脂肪替代品。

关键词: 乳清蛋白 (WP); 瓜尔豆胶 (GG); 低脂蛋挞; 脂肪替代品; 复合物

文章编号: 1673-9078(2025)06-233-241

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0589

Evaluation of the Whey Protein-guar Gum Complex as A Fat Substitute in Low-fat Egg Tarts

FAN Zixuan, SUN Shuangshuang, SHAN Yuanyuan

(College of Food Science and Engineering, Northwest Agriculture & Forestry University, Yanlin 712100, China)

Abstract: With the pursuit of an improved life, consumers are increasingly interested in low-fat products. Therefore, there is demand for new fat substitutes to improve the quality of low-fat products. In this study, whey protein (WP) and guar gum (GG) were used to produce a WP-GG complex as a fat substitute for low-fat egg tarts. The turbidity, particle size, and zeta potential of the WP-GG complexes were determined. The optimal WP-to-GG mass ratio required to form the complex was 9:1. Fourier transform-infrared spectroscopy, interaction force, microstructural, and rheological analyses revealed that the formulated WP-GG complex had stable properties and a dense structure. Furthermore, the WP-GG complex was quite hard, favoring the formation of thermogels with high elasticity. Finally, the WP-GG complex was used as a fat substitute in low-fat egg tarts, resulting in a dense structure. The results demonstrated that the tart filling was compact. In addition, when

引文格式:

樊子萱,孙爽爽,单媛媛.乳清蛋白和瓜尔豆胶复合物作为低脂蛋挞脂肪替代品的评价[J].现代食品科技,2025,41(6): 233-241.

FAN Zixuan, SUN Shuangshuang, SHAN Yuanyuan. Evaluation of the whey protein-guar gum complex as a fat substitute in low-fat egg tarts [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 233-241.

收稿日期: 2024-04-29

作者简介: 樊子萱 (2002-), 女, 本科生, 研究方向: 多糖与蛋白质为基质形成的复合凝胶的研发, E-mail: 13031225728@163.com

通讯作者: 单媛媛 (1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 动物性食品的营养加工与副产物的综合利用研究, E-mail: shanyuanyuan@nwafu.edu.cn

the percentage of fat substitute reached 30%, the egg tarts exhibited superior morphology, color, and internal structure. These results suggest that the WP-GG complex as a promising fat substitute in low-fat egg tart products.

Key words: whey protein; guar gum; low-fat egg tart; fat substitute; complex

蛋挞是一种美味的烘焙食品，其中含有大量的脂肪^[1]。脂肪能够改善食品的口感、质地与香味等，但过量摄入脂肪会导致肥胖、高血压和心血管等疾病的发生^[2]。直接从食品中去除脂肪会导致口感变涩、结构塌陷、香味减少等问题，从而降低产品质量。为了解决该问题，人们尝试在食品中使用脂肪替代品以模拟脂肪的口感和质地。目前，基于蛋白质多糖的脂肪替代品可能是生产具有更健康食品的有效策略，它们能够很好地改善低脂食品的感官、质地和摩擦学特性，其中蛋白质可以模仿脂肪的润滑特性，多糖主要是通过稳定凝胶状基质中的大量水赋予食品类似脂肪的乳脂状和流动特性^[3]。

乳清蛋白是乳清中的重要组分，具有乳化性、起泡性且气味温和。此外，乳清蛋白还具有凝胶特性，在形成热致凝胶后再经高速剪切可改变其原有的水结合特性和粒径大小，使食品具有类似脂肪的口感和物理性质^[4]。已经有大量研究表明，乳清蛋白具有替代食品中脂肪的潜力，且能够改善酸奶、香肠和蛋黄酱等产品的质量^[5-7]。单独的乳清蛋白虽然具有良好的功能特性，但具有各种功能与感官限制，例如其稳定性差，易受到 pH 值、温度和离子强度的影响，且易受到热诱导变性发生聚集，导致其溶解度和功能性降低^[8,9]，从而限制了其在多种食品中的应用。因此，为了拓宽乳清蛋白在食品中的应用，提高其稳定性至关重要。

由于多糖大多具有亲水性，与蛋白质结合后可以增加其亲水能力，并减少蛋白质的聚集^[10]。此外，多糖在水相中具有良好的凝胶性和增稠性，也可以增加体系的稳定性^[11]。已有研究表明，蛋白糖基化后，其凝胶性、乳化特性及抗氧化活性等功能特性均可得到改善^[12]。因此，乳清蛋白和多糖复合能够提高其稳定性^[13,14]。瓜尔豆胶是一种天然存在的高分子量水溶性多糖，质地与脂肪相似，可使食品具有顺滑口感，并且能够预防血糖和胰岛素血症^[15]。此外，瓜尔豆胶棒状聚合结构中存在的羟基有助于制造各种衍生物^[16]，它可以与水合矿物和有机表面形成氢键，并通过氢键相互作用影响复合物的稳定性^[17]。

本研究是基于乳清蛋白(WP)和瓜尔豆胶

(GG)形成 WP-GG 复合物的最适配比，评价 WP-GG 复合物作为脂肪替代品的功能特性及在低脂蛋挞中的应用潜力，这些结果为乳清蛋白在食品中的综合利用与烘焙食品中新型脂肪替代品的研发提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

浓缩乳清蛋白 80 (食品级，蛋白质质量分数 $\geq 80\%$)，河南宏翔生物科技有限公司；瓜尔豆胶 (粘度 7849 Pa·s)，北京瓜润科技有限公司； β -巯基乙醇，上海麦克林生化科技有限公司；尿素，陕西渭河煤化工集团有限责任公司。棕榈油、牛奶、细砂糖、鸡蛋、低筋面粉等均为市售。

1.2 仪器与设备

UV-2600 紫外分光光度计，日本岛津公司；LS13320 激光粒度分析仪，美国贝克曼库尔特商贸；ZEN3600 纳米激光粒度仪，英国马尔文公司；TA.XT plus 质构仪，英国 Stable Micro Systems 公司；ZEN360003060120 激光共聚焦显微镜，德国徕卡显微公司；INVENIO R 傅里叶红外光谱仪，德国布鲁克公司；CX40 光学显微镜，浙江舜宇光学科技公司。

1.3 WP-GG复合物的制备

将乳清蛋白和瓜尔豆胶以 6:1、9:1、12:1、15:1 和 18:1 的质量比混合，配置成 15% 的溶液，并过夜搅拌。调节样品的 pH 值至 6.5 左右，85 °C 水浴加热 20 min，冰水浴冷却至室温，并在 4 °C 放置 24 h，使其凝胶化，得到前体物质。使用高速搅拌机在 10 000 r/min 下剪切 5 min，得到 WP-GG 复合物。

1.4 WP-GG复合物的结构表征与性能评价

在无尘操作下，用超纯水将 WP-GG 复合物 (0.5%, *m/V*) 稀释 100 倍，调温至 25 °C。使用分光光度计测量 WP-GG 复合物在 600 nm 处的吸光度，以进行浊度分析。将约 1 mL 样品倒入聚苯乙烯样品池中，使用纳米激光粒度仪测定粒径，注入弯曲式毛细管样品池中，使用激光粒度分析仪测定 Zeta 电位。

为探究复合物的微观结构,将 FITC (2 mg/mL) 和罗丹明 B (2 mg/mL) 分别与 WP、WP-GG 复合物充分混合后,使用激光共聚焦显微镜在 40 倍物镜下观察, FITC 和罗丹明 B 的激光波长分别为 488 nm 和 559 nm。

在 FT-IR 分析中,首先将样品冻干,然后样品与溴化钾颗粒按 1:100 的质量比混合,研磨成粉末。使用傅里叶红外光谱仪 (FT-IR) 测量 400~4 000 cm^{-1} 内的吸收光谱,分辨率为 4 cm^{-1} ,波数精度为 0.01 cm^{-1} ,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下扫描 32 次。为进一步分析相互作用力,将 5 份 0.1 g 样品分别与 10 mL 的 A、B、C、D、E 五种溶液混合 (A : 0.05 mol/L NaCl ; B : 0.6 mol/L NaCl ; C : 0.6 mol/L NaCl+1.5 mol/L 尿素; D : 0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素; E : 0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素 +0.05 mol/L β -巯基乙醇)。混合溶液均质后于 4 $^{\circ}\text{C}$ 静置 1 h, 10 000 r/min 离心 15 min,用 Lowry 法测定上清液中蛋白质质量分数。离子键的质量分数以溶解于 A、B 溶液中蛋白质质量分数之差来表示,氢键的质量分数以溶解于 B、C 溶液中蛋白质质量分数之差来表示,疏水性相互作用以溶解于 C、D 溶液中蛋白质质量分数之差来表示,二硫键以溶解于 D、E 溶液中蛋白质质量分数之差来表示。

冷藏样品在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下平衡 1 h,然后在振荡测试中进行对数扫描。线性流动扫描测试也进行了 5 s 的平衡和 30 s 的平均时间以达到稳定状态。在 0.1~100 rad/s 和 0.1% 应变下进行频率扫描测试,以估计储能 (G')、损耗模量 (G'')、复数粘度 (η^*)。在 25 $^{\circ}\text{C}$, 剪切速率 0.1~100 rad/s 和 0.1% 应变下进行流动斜坡测试。

通过观察 WP-GG 复合物在高温下粒径和微观结构的变化,研究复合物的热稳定性。样品在 100 $^{\circ}\text{C}$ 、150 $^{\circ}\text{C}$ 和 200 $^{\circ}\text{C}$ 烤箱中孵育 15 min,冷却至室温进行后续实验。用上述方法测量复合物粒径,并用 CX40 光学显微镜观察 Whey-GG 复合物的微观结构。将样品稀释两次后,取约 10 μL 的样品置于显微镜载玻片表面,在光学显微镜的 20 $\times$ 物镜下进行观察。

1.5 蛋挞的制备

常脂蛋挞液的配制:棕榈油 180 g、牛奶 140 g、细砂糖 80 g、蛋黄 4 个、低筋面粉 15 g,蛋挞皮 60 个。低脂蛋挞液的配制中,将 WP-GG 复合物分别按照质量分数 0%、10%、20%、30%、40% 和 50% 的比例替代常脂蛋挞液配方中的棕榈油。首先,棕榈

油或 WP-GG 复合物与牛奶混合,加入细砂糖,加热搅拌至砂糖溶解,冷却至不烫手后,加入蛋黄与低筋面粉,搅拌均匀。将蛋挞液倒入蛋挞皮内至七分满,以上火 220 $^{\circ}\text{C}$ 、下火 210 $^{\circ}\text{C}$ 烤制 25 min。

1.6 蛋挞的理化特性和感官评价

1.6.1 质构的测定

蛋挞烘烤制备后冷却 2 h,去除蛋挞皮,将蛋挞芯切成边长 2.0 cm 的方块,用探头为 P/50 的质构仪进行分析,在测试前和测试中保持 1 mm/s 的速率,压缩百分比为 70%,两次压缩的时间为 5 s,触发力为 0.98 N。

1.6.2 感官评价

采用刘贺等^[18]方法,略做调整。在进行感官分析之前,首先对 15 名评定员 (本校学生) 进行培训。评定员对低脂蛋挞样品就其形态 (光滑度、气孔多少)、口感 (润滑程度、流动性、黏性等)、颜色 (是否促进食欲)、香味等指标按照嗜好整体评价:极厌恶评 1 分、非常厌恶评 2 分、相当厌恶评 3 分、稍厌恶评 4 分、不厌恶也不喜欢评 5 分、稍喜欢评 6 分、相当喜欢评 7 分、非常喜欢评 8 分、极喜欢评 9 分。评价表附在样品上并给出评分标准及评分空白,随机提供给评定员。要求评定员对颜色、形态、香味、口感四项指标打分,品评每个样品后均需要用纯净水漱口。

1.7 数据统计

所有试验进行 3 次,数据以平均值 $\pm$ 标准差表示。统计分析采用 SPSS 21.0 版。样本之间的差异效果通过 Duncan 的多重检验进行评估 ($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 不同比例复合物的浊度、粒径和电位

乳清蛋白与瓜尔豆胶以不同质量比制得的复合物状态如图 1a 所示,除 9:1 的质量比外,其余比例下的复合物都有气泡产生与分层的现象。以 9:1 的质量比形成的复合物状态粘稠,奶盖气泡细密,外观更接近奶油,并且有明显的挂壁行为。故初步认为乳清蛋白与瓜尔豆胶的最适复合比为 9:1。

蛋白质和多糖在溶液中以共溶态或络合物的状态存在,蛋白质结合多糖的数量对分子聚集体的形成起着重要的作用,并会影响体系的浊度^[19]。图 1b 显示了在 15% 总固体物含量下,乳清蛋白与瓜尔豆

胶在不同复合比例时复合物的浊度。整体来说，随着乳清蛋白比例的增大，浊度逐渐增大。这是可能是缔合相分离引起的。当乳清蛋白与瓜尔豆胶的质量比例是 9:1 时，整个体系的浊度最低，具有显著性差异。因为形成了软流体凝胶网络而不是聚集体。

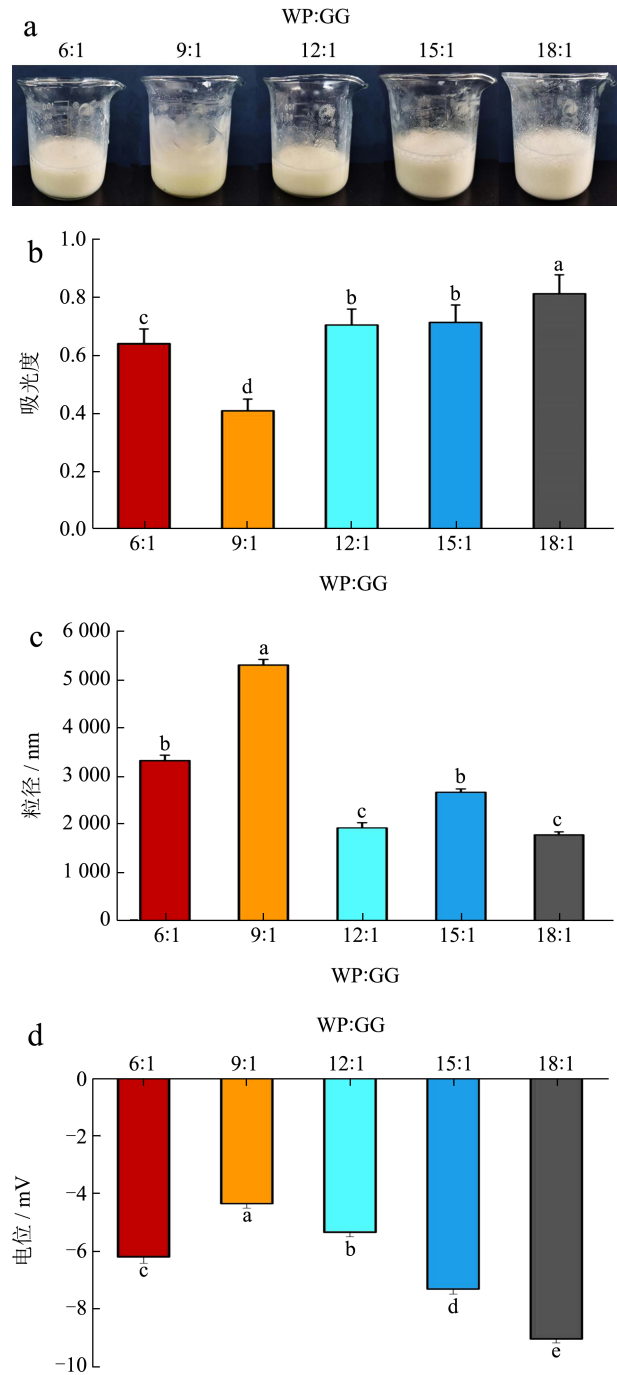


图 1 WP-GG 复合物的状态 (a)、浊度 (b)、粒径 (c)、电位 (d)

Fig.1 Turbidity (a), particle size (b), and zeta potential (c) of WP-GG complex

注：柱上具有不同字母上标的数据之间具有显著性差异 ($P<0.05$)。下同。

如图 1c 所示，在乳清蛋白与瓜尔豆胶的质量比是 9:1 时，乳清蛋白与瓜尔豆胶形成的复合物平均粒径更大，高于其余比例，具有显著性差异。此外，WP-GG 复合物的颗粒尺寸均小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，这有助于增强产品的奶油口感^[20]。图 1d 表明，随乳清蛋白比例的增大，电位绝对值先减小后增大，当质量比是 9:1 时，电位绝对值最小，具有显著性差异。当乳清蛋白与瓜尔豆胶的质量比是 9:1 时，乳清蛋白与瓜尔豆胶间相互作用更强，蛋白质表面暴露的羧基更少，因此负电荷更少。根据粒径和电位的结果，乳清蛋白与瓜尔豆胶在 9:1 的比例下更容易形成复合物，这与浊度的结果一致，但是乳清蛋白与瓜尔豆胶的结合方式还需要进一步研究。

2.2 WP-GG复合物的理化性质

2.2.1 WP-GG复合物的微观结构

为了更清晰地观察 WP-GG 复合物中蛋白质和多糖的分布，并进一步解释瓜尔豆胶影响乳清蛋白稳定性的原因，利用共聚焦激光扫描显微镜分别对乳清蛋白与 WP-GG 复合物的微观结构进行观察。乳清蛋白显微图像如 2a 所示，蛋白质显示出均匀聚集倾向的絮状凝胶网络结构。WP-GG 复合物显微图像如图 2b 所示，蛋白质被 FITC 和罗丹明 B 染色呈黄色，多糖被 FITC 染色呈绿色。WP-GG 复合物中的蛋白质分布相对均匀，几乎没有聚集。与乳清蛋白相比，WP-GG 复合物的结构更致密，这是因为瓜尔豆胶具有线性结构，乳清蛋白通过非共价键与其相互作用，填充在凝胶网络中。

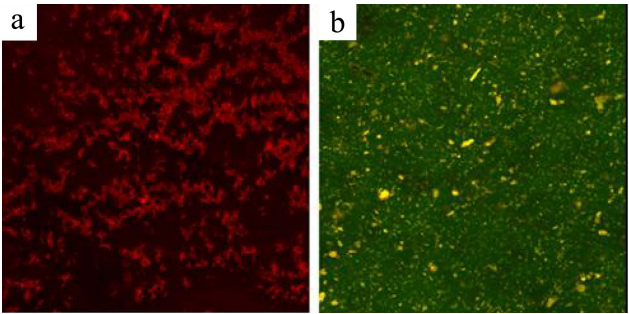


图 2 乳清蛋白 (a) 与 WP-GG 复合物 (b) 的 CLSM 图像

Fig.2 Confocal laser scanning micrographs of whey protein (a) and WP-GG complex (b)

2.2.2 WP-GG复合物的相互作用力

乳清蛋白、瓜尔豆胶和 WP-GG 复合物的 FT-IR 光谱如图 3a 所示，瓜尔豆胶的添加使乳清蛋白与 WP-GG 复合物在各个特征峰的强度略有不同。所

有样品均在 $3\,401\text{ cm}^{-1}$ 处观察到的特征峰, O-H、N-H 的伸缩振动证明了瓜尔豆胶与水接触会产生氢键^[21]。因此, 复合物具有优异的持水能力。在 $2\,359\text{ cm}^{-1}$ 处观察到的特征峰是由于瓜尔豆胶的加入, 复合物增加了叁键与累积双键。这些结果表明, 与乳清蛋白相比, WP-GG 复合物的部分官能团发生变化, 双键和叁键等不饱和基团增加, 氢键相互作用增强。

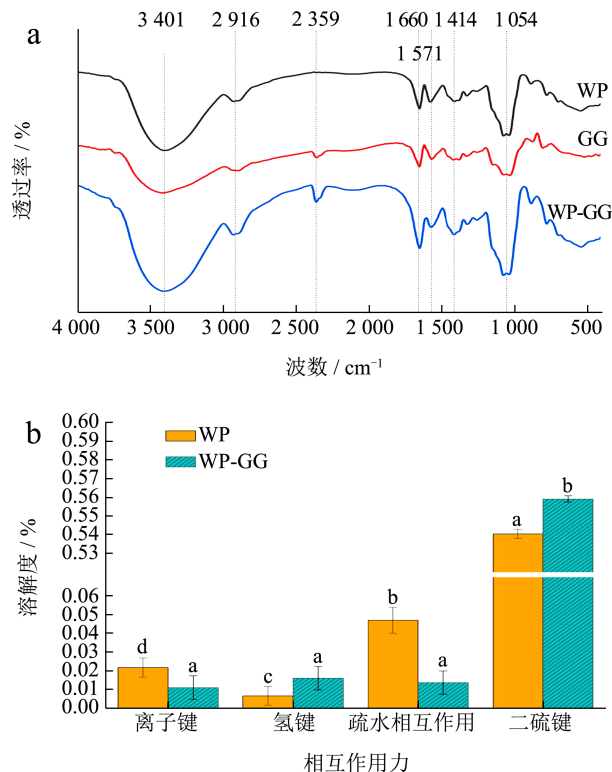


图3 乳清蛋白、瓜尔豆胶和 WP-GG 复合物的 FT-IR 光谱 (a) 和相互作用力 (b)

Fig.3 FT-IR spectra (a) and interaction (b) of whey protein, guar gum and WP-GG complex

如图 3b 所示, 在乳清蛋白中各个相互作用力差别均有显著性差异, 而在 WP-GG 复合物中二硫键具有显著性差异。与乳清蛋白相比, WP-GG 复合物中氢键和二硫键增强, 离子键和疏水相互作用力减弱。瓜尔豆胶是多羟基多糖, 与乳清蛋白产生了较强的分子间氢键相互作用, 这与 FT-IR 光谱在 $3\,401\text{ cm}^{-1}$ 波长处 O-H 和 N-H 振动伸缩的增强结果一致。同时, 瓜尔豆胶的加入阻止了乳清蛋白的聚集, 使其分布更均匀, 有利于增强凝胶网络结构, 从而形成更多的二硫键。乳清蛋白与瓜尔豆胶结合后, 形成的复合物粒径增大, 表面电荷减少, 从而静电相互作用降低。加热处理后的乳清蛋白结

构展开, 疏水基团暴露, 疏水相互作用增强, 由于瓜尔豆胶含有大量的羟基, 具有强亲水性, 与乳清蛋白相比, WP-GG 复合物疏水相互作用减弱。

2.3 WP-GG 复合物的功能特性

2.3.1 WP-GG 复合物体系的流变特性

流变特性决定了 WP-GG 复合物抗大幅度振荡剪切并保持稳定的能力, 且影响其在食品应用中的质量。图 4a 显示了在剪切速率 $0.1\sim 100\text{ s}^{-1}$ 下复合物的黏度变化。剪切速率相同时, WP-GG 复合物较乳清蛋白具有更高的粘度, 这表明乳清蛋白与瓜尔豆胶结合形成了具有空间位阻的聚集体。乳清蛋白的粘度在不同的剪切速率下基本没变, 对剪切速率变化的敏感性较低, 而 WP-GG 复合物与瓜尔豆胶溶液的粘度随剪切速率的增加而逐渐降低, 最终趋于平缓, 这表明该复合凝胶是具有剪切稀化行为的假塑性非牛顿流体, 其中 WP-GG 复合物溶液剪切黏度更容易受到剪切速率增加的影响, 表明体系的假塑性行为增强。如图 4b 所示, 当剪切速率相同时, WP-GG 复合物比乳清蛋白的剪切应力大, 较高的剪切应力值表明 WP-GG 复合物较乳清蛋白的稳定性增加。如图 4c 所示, 与乳清蛋白相比, 瓜尔豆胶加入后的 WP-GG 复合物复粘度显著增加, 特别是 $0.1\sim 3.1\text{ rad/s}$ 期间, 这极大阻碍了乳液液滴的流动性, 从而抑制了乳液乳化。图 4d 和 4e 显示了在 $0.1\sim 100\text{ rad/s}$ 的频率扫描范围内, 乳清蛋白、瓜尔豆胶和 WP-GG 复合物的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 的变化。 G' 反映流变行为中的类固体成分, 而 G'' 代表材料的粘度, 所有体系的 G' 和 G'' 都随角频率的增加而增加, 添加瓜尔豆胶后复合物的 G' 和 G'' 都显著提高, G' 的增加表明瓜尔豆胶的加入可能增强了蛋白质结构中的键强度和瓜尔豆胶与乳清蛋白之间的相互作用, 复合体系中聚合物缠结的增加使其更加坚硬, 流动性减弱。此外, 在 WP-GG 复合物中, 观察到固体状特性 G' 占主导地位, 这有利于提供良好的乳化稳定性。在添加其它亲水胶体的凝固型酸奶中也有类似的 G' 和 G'' ^[22]。用幂律模型分析了制备的不同体系的剪切应力与剪切速率的关系, 如表 1 所示, 添加瓜尔豆胶后, 流态特性指数 (n) 从 0.76 降低到 0.3, 黏性常数 (K) 从 0.31 上升到 19.1, 这是因为 WP-GG 复合物中形成了更强的分子间网络结构。

表 1 WP-GG复合物的流态特性指数和黏性常数

Table 1 The flow behavior index and viscosity constant of WP-GG complex

样品名	流态特性指数 (<i>n</i>)	黏性常数 (<i>K</i>)	<i>R</i> ²
乳清蛋白	0.76 ± 0.03 ^a	0.31 ± 0.08 ^c	0.99
瓜尔豆胶	0.45 ± 0.01 ^b	8.58 ± 0.46 ^b	0.99
WP-GG 复合物	0.3 ± 0.01 ^c	19.1 ± 0.23 ^a	0.98

注：具有不同字母上标的数据之间具有显著性差异 (*P* < 0.05)。下同。

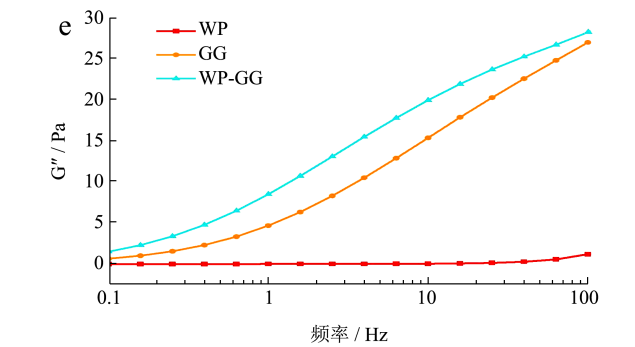
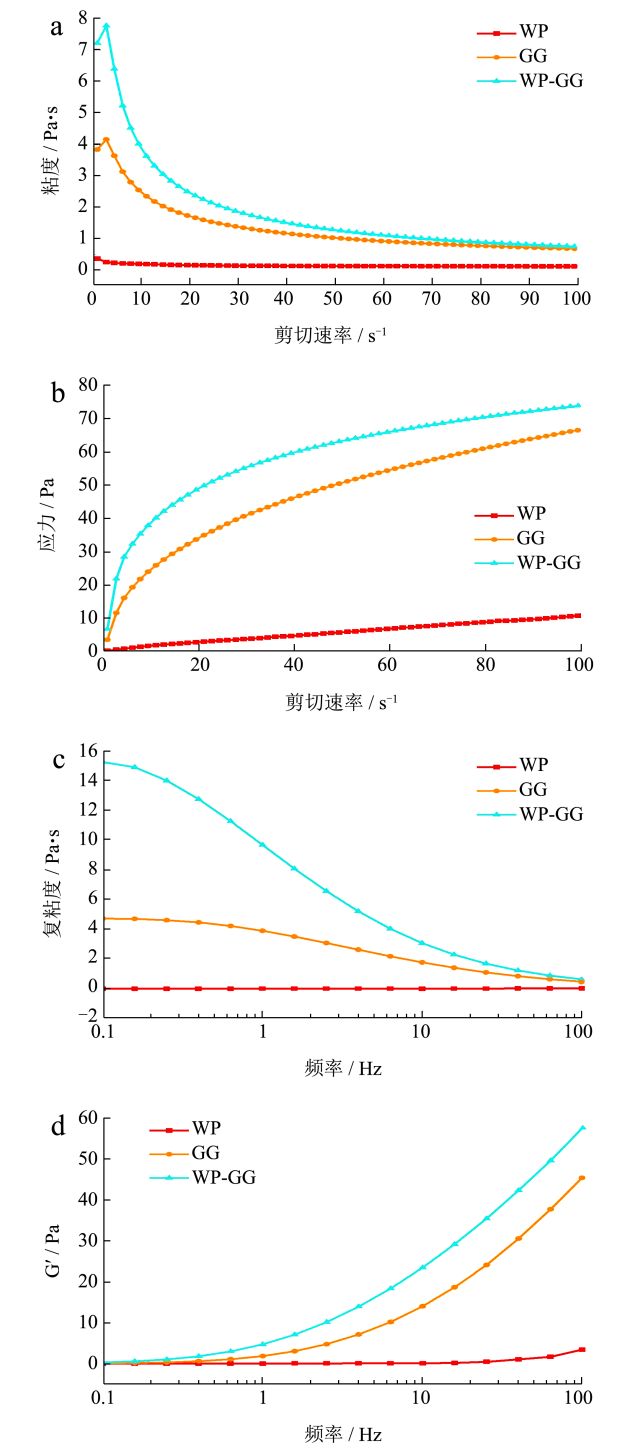


图 4 WP-GG 复合物体系黏度随剪切速率的变化 (a), 应力随剪切速率的变化 (b) 以及复粘度 (c), *G'* (d), *G''* (e) 随频率的变化

Fig.4 Variation of viscosity with shear rate (a), variation of stress with shear rate (b) and variation of complex viscosity (c), *G'* (d), *G''* (e) with frequency for WP-GG complex system

2.3.2 WP-GG复合物的热稳定性

通过分析加热处理后复合物表现出的形态特征, 评估复合物在不同加热温度下的稳定性。如图 5a 所示, 乳清蛋白和 WP-GG 复合物的粒径均随加热温度的升高而增大, 瓜尔豆胶的粒径随温度变化不明显。这是因为乳清蛋白和 WP-GG 复合物在热处理时结构被改变, 发生了不同程度的聚集。100 °C 及以上温度处理后, WP-GG 复合物较乳清蛋白与瓜尔豆胶的粒径之间均有显著性差异, WP-GG 复合物粒径最大。有图 5b 为 WP-GG 复合物经过不同温度处理后的显微图像, 150 °C 处理后的体系结构中没有发现明显的变化 (图 5b₃)。经 200 °C 高温处理后, WP-GG 复合物中出现团聚, 并导致粒径急剧增加, 体系结构改变, 发生了聚集行为, 有利于凝胶网络的形成与热凝胶弹性增强 (图 5b₄)。以上结果表明, 热处理削弱了复合物分子间的排斥力, 且经过 200 °C 及以上的高温热处理后, WP-GG 复合物开始形成凝胶网络, 有利于热凝胶弹性的增强, 故说明 WP-GG 复合物具有在高温烘焙食品中的应用潜力。

2.4 WP-GG复合物在蛋挞中的应用

2.4.1 蛋挞的状态

与全脂蛋挞相比, 低脂蛋挞表面的气孔明显减少。脂肪的替代比例越大, 蛋挞表面气孔越少, 结构越致密。与脂肪相比, WP-GG 复合物具有更好的溶解度, 有助于提升蛋挞保水性 (图 6)。在蛋挞液的制备过程中, WP-GG 复合物与脂肪发生乳化反应, 促进脂肪分布均匀, 蛋挞芯结构更致密^[23]。

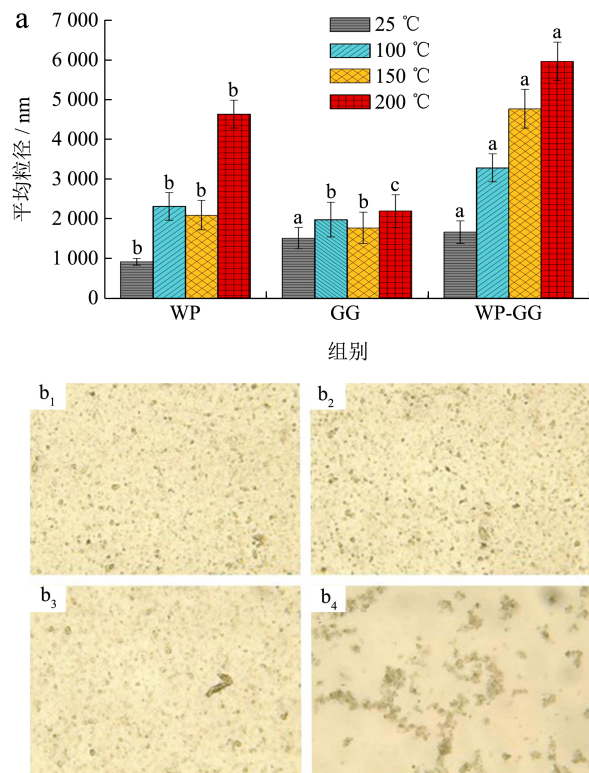


图5 WP-GG 复合物在不同热处理温度下的平均粒径 (a) 和微观形态图 (b)

Fig.5 Particle size (a) and micromorphology (b) of the system of WP-GG complexes at different heat treatment temperatures

注: b₁ 为常温 25 °C, b₂~b₄ 分别为加热 100、150、200 °C。

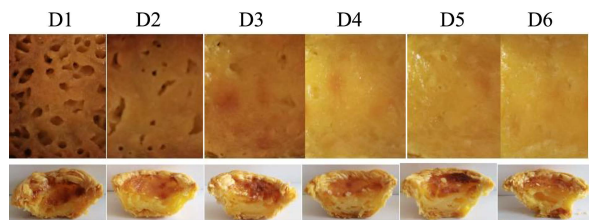


图6 蛋挞状态图

Fig.6 State diagram of the egg tart

注: D1 为全脂蛋挞; D2~D6 的脂肪替代比例分别为 10%、20%、30%、40% 和 50%。下同。

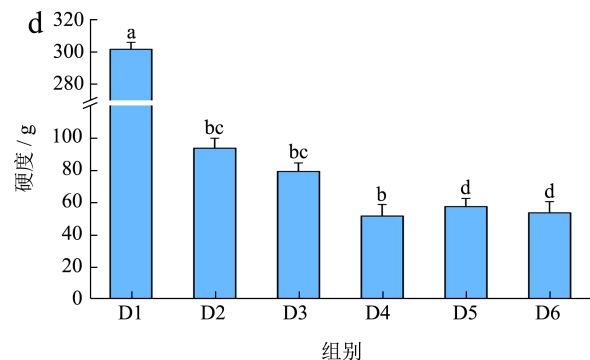
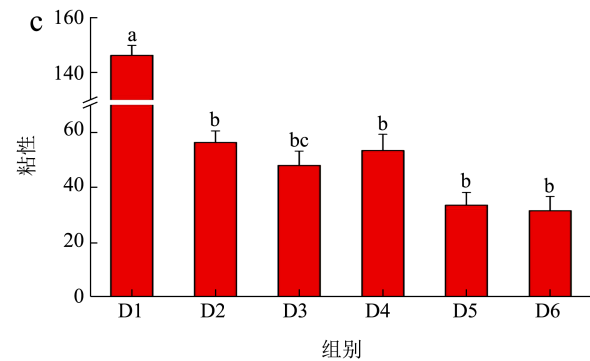
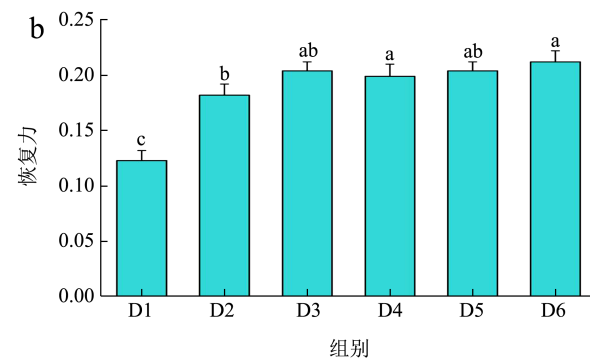
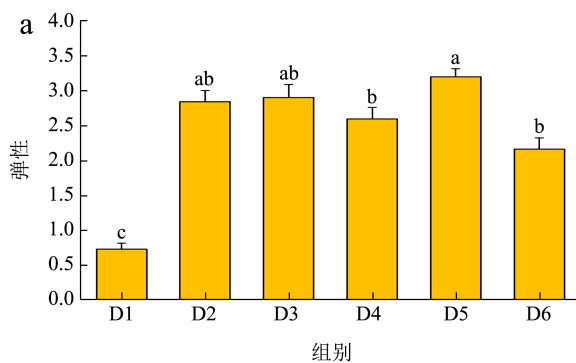


图7 全脂和低脂蛋挞的弹性、恢复力、粘性、硬度
Fig.7 Firmness, viscosity, elasticity and bonding of full-fat and low-fat egg tarts

2.4.2 蛋挞的质构

为了评价 WP-GG 复合物在蛋挞中替代不同比例的脂肪对蛋挞质构的影响^[24], 测量了蛋挞的弹性、恢复力、粘性、硬度。如图 7 所示, 与全脂蛋挞相比, 低脂蛋挞的粘性和硬度均有显著性降低, 弹性和恢复力均有显著性提高 ($P < 0.05$), 这与 WP-GG 复合物平均粒径的增大和优良的凝胶网络结构有关。证明了 WP-GG 复合物为蛋挞中优良的脂肪替代品, 较全脂蛋挞, 低脂蛋挞组的感官质量得到了显著提升, 且有应用于不同烘焙食品的巨大潜力。

2.4.3 蛋挞的感官评价

蛋挞的感官评价是判断其消费者接受度的主要依据, 故通过感官评价进行最佳替代比例的确定有

助于低脂蛋挞产品的实际开发与市场推广。图 8 与表 2 分别为全脂蛋挞和不同脂肪替代比例的低脂蛋挞感官评价雷达图与分析表,当脂肪替代质量分数为 30% 时,低脂蛋挞的色泽、口感与形态均达到最佳,具有显著性差异,而香气显著性减弱。随脂肪替代比例的增大,蛋挞的香气逐渐减小,这是因为脂肪是在食品加工过程中产生香气的重要物质。故对于脂肪替代在烘焙食品中引起的香气减退有待进一步开发研究。

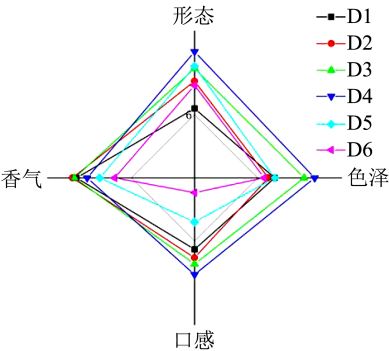


图 8 蛋挞感官评价雷达图

Fig.8 Radar chart of sensory evaluation of egg tarts

表 2 蛋挞的感官评价分析表

Table 2 Egg tart sensory evaluation analysis table

	形态	色泽	口感	香气
D1	6.15 ± 0.93 ^b	6.4 ± 1.5 ^b	6.2 ± 1.67 ^b	7.3 ± 1.45 ^a
D2	6.8 ± 1.32 ^b	6.25 ± 1.62 ^b	6.4 ± 1.79 ^b	7.4 ± 1.47 ^a
D3	7.1 ± 1.41 ^a	7.1 ± 1.21 ^a	6.55 ± 1.05 ^a	7.35 ± 1.27 ^a
D4	7.5 ± 1.19 ^a	7.35 ± 1.31 ^a	6.8 ± 0.83 ^a	7.05 ± 1.43 ^b
D5	7.15 ± 1.09 ^a	6.4 ± 1.39 ^b	5.55 ± 0.89 ^c	6.75 ± 0.91 ^b
D6	6.7 ± 1.34 ^b	6.15 ± 1.23 ^b	4.85 ± 1.27 ^c	6.4 ± 1.05 ^b

3 结论

根据浊度、状态、粒径和电位的结果,乳清蛋白与瓜尔豆胶以 9:1 的质量比结合形成的复合物组织均匀细腻。与全脂蛋挞芯相比,将 WP-GG 复合物以质量分数 30% 的比例进行脂肪替代的低脂蛋挞芯在色泽、口感与形态方面表现出更好的感官品质。因此,WP-GG 复合物具有作为高温烘焙食品中脂肪替代品的潜力,这在一定程度上拓展了乳清蛋白的应用范围,为乳清蛋白在食品中的应用提供了理论支持。

参考文献

[1] HU Y, WANG M, HUANG W, et al. Risk assessment of dietary exposure to phytosterol oxidation products from baked food in China [J]. Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess, 2018, 35(2): 200-210.

[2] LI Y, GUO J, WANG Y, et al. Effects of hydrocolloids as fat-replacers on the physicochemical and structural properties of salt-soluble protein isolated from water-boiled pork meatballs [J]. Meat Science, 2023, 204: 109280.

[3] BOUROUIS I, PANG Z, LIU X. Recent advances on uses of protein and/or polysaccharide as fat replacers: Textural and tribological perspectives: A review [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 11: 100519.

[4] 李倩文,梁影,王晓楠,等.乳清蛋白-低聚木糖复合脂肪替代品的制备及其于再制干酪中的应用[J].食品科学,2023, 44(20):53-61.

[5] KRZEMINSKI A, PRELL K A, BUSCH-STOCKFISCH M, et al. Whey protein-pectin complexes as new texturising elements in fat-reduced yoghurt systems [J]. International Dairy Journal, 2014, 36(2): 118-127.

[6] KWON H C, SHIN D M, YUNE J H, et al. Evaluation of gels formulated with whey proteins and sodium dodecyl sulfate as a fat replacer in low-fat sausage [J]. Food Chemistry, 2021 337: 127682.

[7] YANG K, XU R, XU X, et al. Role of flaxseed gum and whey protein microparticles in formulating low-fat model mayonnaises [J]. Foods (Basel, Switzerland), 2022 11(3): 282.

[8] LACLAIR C E, ETZEL M R. Ingredients and pH are key to clear beverages that contain whey protein [J]. Journal of Food Science, 2010 75(1): C21-C27.

[9] TEO A, GOH K K T, WEN J, et al. Physicochemical properties of whey protein, lactoferrin and Tween 20 stabilised nanoemulsions: Effect of temperature, pH and salt [J]. Food Chemistry, 2016, 197: 297-306.

[10] OZTURK B, MCCLEMENTS D J. Progress in natural emulsifiers for utilization in food emulsions [J]. Current Opinion in Food Science, 2016, 7: 1-6.

[11] YE A. Complexation between milk proteins and polysaccharides via electrostatic interaction: principles and applications-a review [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2008, 43(3): 406-415.

[12] 王志高,陶璇,张倩玉,等.糖基化-酰化菜籽蛋白抗菌水凝胶的制备与表征[J].中国粮油学报,2022,37(12):142-149.

[13] GU F, KIM J M, ABBAS S, et al. Structure and antioxidant activity of high molecular weight Maillard reaction products from casein-glucose [J]. Food Chemistry, 2010, 120(2): 505-511.

[14] KARBASI M, MADADLOU A. Interface-related attributes of

- the Maillard reaction-born glycoproteins [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(10): 1595-1603.
- [15] BUTT M S, SHAHZADI N, SHARIF M K, et al. Guar gum: a miracle therapy for hypercholesterolemia, hyperglycemia and obesity [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2007, 47(4): 389-396.
- [16] THOMBARE N, JHA U, MISHRA S, et al. Guar gum as a promising starting material for diverse applications: A review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 88: 361-372.
- [17] SHARMA G, SHARMA S, KUMAR A, et al. Guar gum and its composites as potential materials for diverse applications: A review [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 199: 534-545.
- [18] 刘贺,朱丹实,徐学明,等.脂肪替代品在低脂蛋黄酱中的应用研究[J].*食品科学*,2009,30(10):82-85.
- [19] KHUBBER S, CHATURVEDI K, THAKUR N, et al. Low-methoxyl pectin stabilizes low-fat set yoghurt and improves their physicochemical properties, rheology, microstructure and sensory liking [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106240.
- [20] LIU R, WANG L, LIU Y, et al. Fabricating soy protein hydrolysate/xanthan gum as fat replacer in ice cream by combined enzymatic and heat-shearing treatment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 81: 39-47.
- [21] PATEL H, BAINS A, TOSIF M M, et al. Blend of guar/acacia gum as a partial substitute oflecithin in white chocolate: Optimization, characterization, and shelf-life evaluation [J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2024, 15: 100944.
- [22] WANG X, KRISTO E, LAPOINTE G. The effect of apple pomace on the texture, rheology and microstructure of set type yogurt [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 91: 83-91.
- [23] YANG Y, ZHANG M, LI J, et al. Construction of egg white protein particle and rhamnolipid based emulsion gels with β -sitosterol as gelation factor: The application in cookie [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 127: 107479.
- [24] JEYAKUMARI A, JANARTHANAN G, CHOUKSEY M K, et al. Effect of fish oil encapsulates incorporation on the physico-chemical and sensory properties of cookies [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(1): 856-863.