宋雅婕, 刘雨潇, 冯紫蓝, 等. 玉米淀粉预糊化温度对罗非鱼肌原纤维蛋白乳液凝胶特性与 3D 打印性能的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 155−164. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030146

SONG Yajie, LIU Yuxiao, FENG Zilan, et al. Effect of Corn Starch Pregelatinization Temperature on Gel Properties and 3D Printing Performance of Tilapia Myofibrillar Protein Lotion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 155−164. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030146

· 研究与探讨 ·

玉米淀粉预糊化温度对罗非鱼肌原纤维蛋白乳液凝胶特性与 3D 打印性能的影响

宋雅婕[1], 刘雨潇[1], 冯紫蓝[2], 廖　琳[1], 裴志胜[1,2,3,4,5], 薛长风[1,3,4,5,*]

（1.海南热带海洋学院食品科学与工程学院, 海南三亚 572022;
2.海南大学食品科学与工程学院, 海南海口 570228;
3.海南省院士团队创新中心, 海南热带海洋学院, 海南三亚 572022;
4.海南省海洋食品工程技术研究中心, 海南热带海洋学院, 海南三亚 572022;
5.海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心, 海南热带海洋学院, 海南三亚 572022）

摘　要: 本研究以罗非鱼肌原纤维蛋白（myofibrillar proteins，MP）为基底，玉米油为油相，添加玉米淀粉（corn starch，CS）构建乳液凝胶，旨在探究不同预糊化温度（25、40、60、80、100 ℃）的 CS 对乳液凝胶微观结构、粒径尺寸、流变特性、稳定性及 3D 打印特性的影响。结果表明，CS 预糊化温度的增加能够显著提高乳液凝胶的储能模量（G'）与表观黏度，特别是当添加 CS 的预糊化温度为 60 ℃（CS60）时。拉曼光谱分析结果显示 MP 与预糊化 CS 之间不存在共价相互作用。凝胶作用力分析结果表明，乳液凝胶分子间主要维持作用力为氢键和疏水相互作用，这表明添加预糊化 CS 溶出的 CS 分子能够与 MP 在分子间相互作用力的作用下形成更加紧密的三维网络结构。此外，3D 打印效果显示，CS 预糊化温度的增加提高了乳液凝胶的质构特性，特别是在 CS60 时表现出了最佳的打印精度。本研究提出了预糊化 CS 改善 MP 乳液凝胶特性的可能内在机理，为预糊化 CS 在改善 MP 乳液凝胶特性及 3D 打印性能方面提供了一定的理论参考。

关键词: 玉米淀粉, 预糊化温度, 乳液凝胶, 凝胶特性, 3D 打印

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0155−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030146　　本文网刊:

Effect of Corn Starch Pregelatinization Temperature on Gel Properties and 3D Printing Performance of Tilapia Myofibrillar Protein Lotion

SONG Yajie[1], LIU Yuxiao[1], FENG Zilan[2], LIAO Lin[1], PEI Zhisheng[1,2,3,4,5], XUE Changfeng[1,3,4,5,*]

（1.School of Food Science and Engineering, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China;
2.School of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;
3.Hainan Provincial Academician Team Innovation Center, Hainan Tropical Ocean Institute, Sanya 572022, China;
4.Hainan Marine Food Engineering Technology Research Center, Hainan Tropical Ocean Institute, Sanya 572022, China;
5.Collaborative Innovation Center for Key Technologies in Deep Processing of Marine Food, Jointly Established by the Provincial and Ministerial Governments, Hainan Tropical Ocean Institute, Sanya 572022, China）

Abstract: This study used tilapia myofibrillar proteins (MP) as the base material, corn oil as the oil phase, and incorporated corn starch (CS) to construct emulsion gels, aiming to investigate the effects of pregelatinized CS at varying temperatures

收稿日期: 2025−03−13

基金项目: 国家自然科学基金（32560530）; 海南省院士创新平台科研专项（YSPTZX202131）; 海南热带海洋学院人才科研启动项目（RHDRC202302）。

作者简介: 宋雅婕（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品精深加工, E-mail: 1649565273@qq.com。

*** 通信作者:** 薛长风（1975−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工, E-mail: 16356729@qq.com。

(25, 40, 60, 80, and 100 ℃) on the microstructure, particle size, rheological properties, stability and 3D printing properties of the emulsion gels. The findings demonstrated that increasing the pregelatinization temperature of CS significantly enhanced both the storage modulus (G') and apparent viscosity of the emulsion gel. The most pronounced improvement was observed when the pregelatinization temperature of CS was 60 ℃ (CS60). Raman spectroscopy analysis indicated that no covalent interactions were formed between MP and pregelatinized CS. Gel strength analysis further revealed that hydrogen bonding and hydrophobic interactions were the dominant intermolecular forces stabilizing the emulsion gel. This suggested that the starch molecules released from pregelatinized CS could form a denser three-dimensional network with MP through these intermolecular interactions. In addition, the 3D printing results showed that higher CS pregelatinization temperatures improved the texture of the emulsion gel, with CS60 exhibiting the highest printing precision. Overall, this study elucidated the underlying mechanism whereby pregelatinized CS enhanced the properties of MP-based emulsion gels and provided a theoretical basis for optimizing MP gel performance and 3D printability through starch modification.

Key words: corn starch; pregelatinized temperature; lotion gel; gel characteristics; 3D printing

3D 打印技术是一种基于墨水的数字制造技术，在实现复杂结构物体快速制造方面具有独特优势[1]。借助 3D 打印技术能够利用多种材料根据需求设计并制造出结构支架。近年来，3D 打印技术已经在食品加工、再生医学、添加剂制造以及先进材料等多个领域取得了显著进展[1−3]。在食品加工领域，3D 打印技术具有设计灵活性高、可实现大规模个性化定制生产、浪费率低、能制造复杂结构等优势，例如，3D 打印能够为特殊饮食需求群体定制营养结构精确的食品，实现个性化定制[4]；能够按需生产，精确用量，减少食品原料的浪费，提高资源利用率[5]；还能实现自动化生产，制作具有复杂结构、独特外观的新型产品[6−7]。然而，3D 打印性能受打印油墨的材料及流变特性的影响非常严重，打印油墨要求较高，因此当前迫切需要开发一种以天然材料为基础的 3D 打印油墨，这种油墨应当具备良好的可再生性和流变特性，以适用于稳定性强、适用范围广的 3D 产品的打印。

乳液凝胶作为两种不相溶的液体构成的非均相体系，其良好的流变特性与剪切稀化行为使其成为 3D 打印的理想油墨[8]。本文基于课题组前期的研究[9]，制备出的乳液凝胶能够实现其 3D 打印，但未对其在 3D 打印过程中的稳定性进行评估考量，同时由于打印成本较高，将其应用于产业化生产仍面临一些挑战。

预糊化玉米淀粉（corn starch, CS）为天然淀粉在特定条件下发生糊化作用后的产物，具有独特的吸水膨胀性、糊化稳定性和黏附性等特性[10]。同时，鉴于预糊化 CS 具有一定的剪切稀化与非牛顿流体特性，因此将预糊化 CS 加入乳液凝胶的配方进行凝胶特性改善的研究值得探讨。但是不同预糊化温度 CS 的添加可能会对乳液凝胶及其 3D 打印的性能产生影响，因此将不同预糊化温度 CS 添加到乳液凝胶配方进行凝胶特性改善的研究，以期得到性能更加优良的乳液凝胶。

基于此，本研究以不同预糊化温度的 CS 制备罗非鱼肌原纤维蛋白（myofibrillar proteins, MP）乳液凝胶，探究不同预糊化温度 CS 的添加对 MP 乳液凝胶微观结构、流变特性与稳定性的影响，同时选取粒径尺寸作为指标，利用拉曼光谱检测其二级结构以揭示乳液凝胶的内在形成机理。将不同预糊化温度下的乳液凝胶作为食品油墨应用于 3D 打印，通过质构分析与纹理分析探究其打印精度与适印性。本研究阐述预糊化 CS 对乳液凝胶特性的影响，为拓展预糊化 CS 在改善 MP 乳液凝胶 3D 打印性能的应用方面提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

玉米淀粉　科赫生物科技有限公司；罗非鱼片（冷冻）　海南翔泰渔业股份有限公司；压榨玉米油　上海嘉里食品工业有限公司；L-精氨酸　河北华阳生物科技有限公司；二水合磷酸氢钠、十二水合磷酸氢钠、氯化钠、氢氧化钠、尿素、十二烷基硫酸钠、低磷酸盐缓冲溶液、高磷酸盐缓冲溶液　均为分析纯，西陇科学股份有限公司。

KQ-300DA 超声仪　昆明市超声仪器有限公司；33C260 高速均质剪切机　宁波新芝生物科技有限公司；SZ780 光学显微镜　Cnoptec；MCR 92 流变仪　Anton Paar；LS 13 320 激光粒度仪　贝克曼库尔特商贸（中国）有限公司；DXR2 激光显微拉曼光谱仪　美国赛默飞世尔科技公司；Foodbot-D1 食品 3D 打印机　杭州时印科技有限公司；TMS-PRO 质构分析仪　英盛恒泰科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　罗非鱼 MP 的提取　参照 Pei 等[11] 的方法，将解冻后的罗非鱼鱼肉收集白色肌肉在冰浴条件下搅碎，然后加入低磷酸盐缓冲溶液，混合充分后离心，温度 4 ℃、转速 4000 r/min、时间 10 min，重复离心步骤 3 次。离心结束后，弃去上清液保留下层肌肉，随后将其加入到高磷酸盐缓冲溶液中，并在相同条件下离心 3 次。将离心后的样品取出置于 4 ℃ 冰箱内，静置 24 h 后进行离心，温度 4 ℃、转速 10000 r/min、时间 10 min，重复离心步骤 3 次。离心结束后，保留上清液，在 4 ℃ 的环境中沉淀 3 h，弃去上层水分，在相同的条件下离心 15 min 后收集沉淀。最终获得

的 MP 存放于 4 ℃ 冰箱内，须在 24 h 内使用完毕。参照 Feng 等[9] 的方法利用双缩脲法检测蛋白质含量，使蛋白质质量分数保持在 10%。

1.2.2　不同预糊化温度乳液凝胶的制备　取 15 支离心管，分为 5 组。将 0.015 g 玉米淀粉和 5 mL 超纯水加至各离心管中，振荡均匀。取一组于常温（25 ℃）下放置，其他四组分别在 40、60、80、100 ℃ 下水浴加热 30 min，完成后置于 4 ℃ 冰箱内冷却。参照 Feng 等[9] 的方法，将 1.5wt% 的 MP 加至冷却后的各离心管中，涡旋 2 min，随后将 0.5wt% 的 L-精氨酸加至各离心管中，利用超声仪在 4 ℃、300 W 的条件下超声 15 min。超声结束后，向各离心管中缓慢加入体积分数为 φ=0.8、pH 为 7.0 的玉米油，随后将其置于高速均质剪切机进行均质操作，控温 10 ℃ 以下、转速 7000 r/min、时间 2 min，所得即为 CS25、CS40、CS60、CS80、CS100 乳液凝胶样品。

1.2.3　不同预糊化温度乳液凝胶的表征

1.2.3.1　显微结构观察　参照薛山等[12] 的方法并稍作修改。采用光学显微镜观察预糊化 CS 样品的显微结构。将样品分别置于 4 倍、10 倍、40 倍镜头下观察，所得图像采用自带软件进行拍摄，每个倍数下拍摄 3 次。

1.2.3.2　粒径测定　分别以水、1% 十二烷基硫酸钠（SDS）、6 mol/L 尿素作为分散剂，采用激光粒度仪对乳液凝胶进行粒径测定。参数如下：样品折射率为 1.52，介质为水，水的折射率为 1.333[13]。重复测定 3 次。

1.2.3.3　流变学特性测定　参照 Xu 等[14] 的方法，并在此基础上进行适当优化调整。利用流变仪对乳液凝胶样品的流变性特性进行测定，选取直径为 49.95 mm 平行板，其中间隙为 1 mm，环境温度为 25 ℃。重复测定 3 次。在 0.1~100 s^{-1} 的剪切速率范围内，测定样品的表观黏度。触变恢复试验第 1 阶段剪切速率恒定 0.1 s^{-1}，测试时间 600 s；第 2 阶段剪切速率恒定 10 s^{-1}，时间 600 s；第 3 阶段剪切速率恒定 0.1 s^{-1}，测试时间 600 s，共 1800 s。固定应变振幅为 0.1%，在 1~10 Hz 范围内进行频率扫描测试。应变振幅在 0.1%~1000% 的条件下测定样品的储能模量（G'）和损耗模量（G''）。

1.2.3.4　拉曼光谱测定　参照何冬雪等[15] 的方法并稍作修改。采用激光显微拉曼光谱仪测定乳液凝胶的二级结构，参数如下：激光器 532 nm，物镜 40 倍，激发功率设置为 10 mW，狭缝孔径 50 μm，曝光时间 10 s，扫描波数范围为 100~3500 cm^{-1}，重复 3 次。采用 Peakfit4.12 软件计算酰胺Ⅰ带（1600~1700 cm^{-1}）的二级结构。

1.2.4　不同预糊化温度乳液凝胶的稳定性测定

1.2.4.1　离心稳定性　参照刘玫君等[16] 的方法并稍作修改。采用离心机在 10000 r/min，15 min，4 ℃ 条件下对乳液凝胶进行离心。观察其分层现象，并拍照记录。

1.2.4.2　冻融稳定性　参照宋苗苗等[17] 的方法并稍作修改。将不同预糊化温度下的乳液凝胶在−20 ℃ 下低温冷冻 20 h，随后取出在室温下自然解冻 4 h，直至冰晶全部融化。利用光学显微镜在 10 倍镜头下观察样品，所得图像采用自带软件进行拍摄，每个倍数下拍摄 3 次。

1.2.5　不同预糊化温度乳液凝胶 3D 打印

1.2.5.1　打印精度　参照刘丽莉等[18] 的方法并稍作修改。分别将不同预糊化温度下的乳液凝胶放入食品 3D 打印机料仓中，室温（25 ℃）下打印。参数如下：造型为“倒棱台”模型，底部尺寸 20 mm、顶部 25 mm、高度 10 mm，填充率为 100%。每个样品重复打印 3 次，拍照并记录数据，按照下式计算样品打印精度。

$$\text{打印精度}(\%)=\frac{\left(1-\frac{|L_b-L_{s1}|}{L_{s1}}\right)+\left(1-\frac{|L_t-L_{s2}|}{L_{s2}}\right)+\left(1-\frac{|H_e-H_s|}{H_s}\right)}{3}\times 100$$

式中：L_b 表示底长，mm；L_t 表示顶长，mm；L_{s1} 表示设定底长，mm；L_{s2} 表示设定顶长，mm；H_e 表示高度，mm；H_s 表示设定高度，mm。

1.2.5.2　质构分析　参照吴嘉婕等[19] 的方法并稍作修改。采用质构分析仪对蒸煮后的 3D 打印样品进行质构分析。将乳液凝胶切成高 2 cm、直径 5 cm 的圆柱体，使用 75 mm 圆盘探头。测试前取出样品平衡至室温，测试速率为 2 mm/s，压力为 20 g，间隔时间为 5 s。每个样品重复测定 3 次，采用 Texture Expert software version 1.22 程序采集并计算乳液凝胶的质构特性。

1.2.5.3　蒸煮损失　参照李嘉琦等[20] 的方法测定蒸煮损失率，并稍作修改。打印样品在室温下放置 1 h 后进行 80 ℃ 水浴蒸煮，时间 15 min。结束后放置 5 min。按照下式计算打印样品的蒸煮损失率。

$$W(\%)=\frac{W_1-W_2}{W_1}\times 100$$

式中：W 表示蒸煮损失率，%；W_1 为蒸煮前乳液凝胶的质量，g；W_2 为蒸煮后乳液凝胶的质量，g。

1.3　数据处理

所有的实验均重复测定 3 次，实验数据以“平均值±标准偏差”表示，采用 IBM SPSS Statistics 27 进行单因素 ANOVA 检验组间数据的显著性差异（P<0.05），并采用 Origin 2024 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　不同预糊化温度 CS 对乳液凝胶微观结构的影响

为进一步了解不同预糊化温度 CS 的添加对乳液凝胶性能的影响，采用显微镜观察了乳液凝胶的微观结构。如图 1 所示，对照组 CS25 样品中的液滴不

规则且分布不均匀。随着 CS 预糊化温度的增加，当添加 CS 的预糊化温度达到 60 ℃ 时，液滴发生形变，呈现为多边形而不是球形，这可能是具有一定膨胀程度的预糊化 CS 的添加导致了液滴之间的相互挤压[21]。同时，液滴的尺寸明显更加均一，其在体系中的分布更加均匀，这可能是加入的预糊化 CS 与 MP 之间形成的分子间作用力能够使乳液凝胶内部形成较为致密的网络结构，从而限制了液滴的聚集与絮凝[22]。当添加 CS 的预糊化温度进一步增加时，液滴的均一性再次降低，这可能是完全糊化的 CS 颗粒膨胀尺寸过大导致的，同时 CS 分子的过多溶出也会使结构变得疏松，体系中水相黏度的降低使液滴之间发生了聚集[23]。这说明通过添加不同预糊化温度的 CS 可以调节乳液凝胶体系中液滴的尺寸与分布，从而改善乳液凝胶的稳定性。

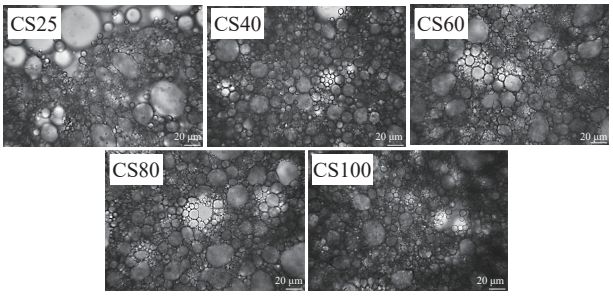


图 1 不同预糊化温度乳液凝胶的微观结构

Fig.1 Microstructure of lotion gel at different pregelatinized temperatures

2.2 不同预糊化温度 CS 对乳液凝胶粒径尺寸的影响

采用去离子水、SDS、尿素对乳液凝胶进行处理，观察其对粒径尺寸的影响，以探究其液滴分子间的相互作用力。在同一溶剂处理条件下，乳液凝胶的液滴粒径越细小均匀，表明液滴的分散稳定性越好[24]。由图 2A 所示，在去离子水中，乳液凝胶的粒径尺寸均处于 15~30 μm，与其他相似研究对比发现[25−26]，本样品组的粒径尺寸均在较小的范围之内，这说明本样品组乳液凝胶体系中液滴具有较好的分散稳定性。同时，随着加入 CS 的预糊化温度的增加，乳液凝胶的粒径尺寸逐渐增大，其原因可能为在乳液凝胶体系中，MP 基质形成主干，CS 颗粒填充其中。CS 预糊化温度越高，膨胀程度越大，其膨胀尺寸与黏度也随之增大，其在体系中的分布也逐渐分散，从而在一定程度上增大了乳液凝胶的粒径尺寸[27]。不同分散剂对乳液凝胶中的各种作用力破坏能力不同，SDS 作为一种常用的阴离子表面活性剂，主要破坏体系中分子间与分子内部的疏水相互作用；尿素作为常见的蛋白质变性剂，可通过破坏蛋白质内部的氢键来揭示 MP 乳液凝胶的内部结构。由图 2B 可知，与去离子水组相比，经 SDS 处理后样品的粒径尺寸显著减小（P<0.05），这可能是 SDS 破坏了乳液凝胶体系中分子间的疏水作用力导致其解聚成了更小的单元，表明在预糊化 CS 乳液凝胶体系中，维系体系结构的主要作用力存在疏水相互作用。由图 2C 可知，与去离子水组相比，经尿素处理后样品的粒径尺寸显著增大（P<0.05），这可能是尿素破坏了乳液凝胶体系中的氢键导致其伸展，表明维持预糊化 CS 乳液凝胶体系结构的主要作用力存在氢键相互作用力[28−29]。由此可以得出，疏水相互作用和氢键这两种作用力均参与了预糊化 CS 乳液凝胶内部结构的形成，是乳液凝胶体系中分子间相互作用的主要作用力[30]。

2.3 不同预糊化温度 CS 对乳液凝胶流变特性的影响

2.3.1 表观黏度 表观黏度与乳液凝胶 3D 打印过程中的挤出难易程度密切相关。由图 3 可知，在相同的剪切速率下，随着 CS 预糊化温度的增加，样品的表观黏度呈现先降低后升高再降低的趋势，这可能跟 CS 分子与 MP 形成了更加紧密的三维网络结构有关[31]。当添加 CS 的预糊化温度为 40 ℃ 时，样品的表观黏度降低，这可能是该温度下 CS 颗粒发生膨胀，较大的膨胀程度使颗粒间的相对距离与分散程度变大，导致了乳液凝胶中 CS 颗粒与 MP 以及自身之间连接点的降低[10]。当添加 CS 的预糊化温度为 60 ℃ 时，样品的表观黏度增大并达到最高，这是因为 60 ℃ 时 CS 开始糊化，此时 CS 颗粒中的直链淀粉与支链淀粉分子部分溶出，分子链之间的缠结作用使乳液凝胶的黏度增大。当添加 CS 的预糊化温度大于 60 ℃

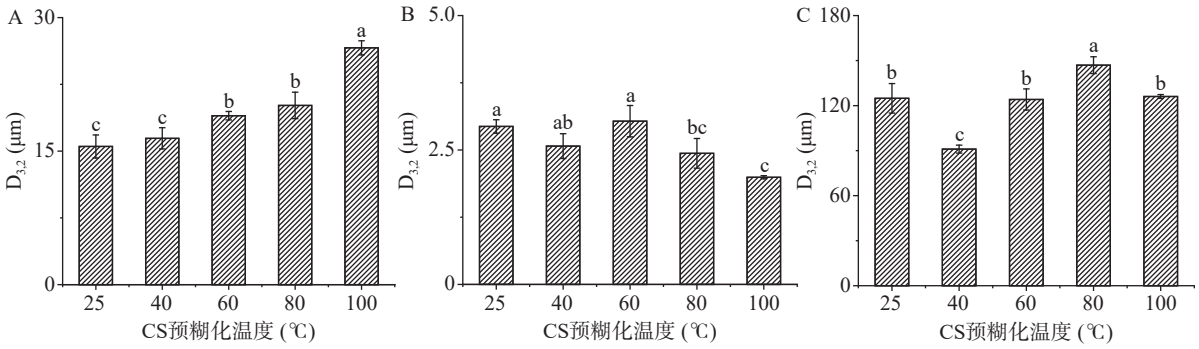


图 2 不同预糊化温度乳液凝胶在不同溶剂下的粒径尺寸

Fig.2 Particle size of lotion gel at different pregelatinized temperatures in different solvents

注：A：去离子水；B：SDS；C：尿素；不同字母代表差异显著（P<0.05），图 12、图 13 同。

时，样品的表观黏度随 CS 预糊化温度的增加而减小，这是因为此时的温度超过了 CS 的完全糊化温度，直链淀粉溶出增加，结构变得疏松，导致其流动黏性阻力降低[23]。

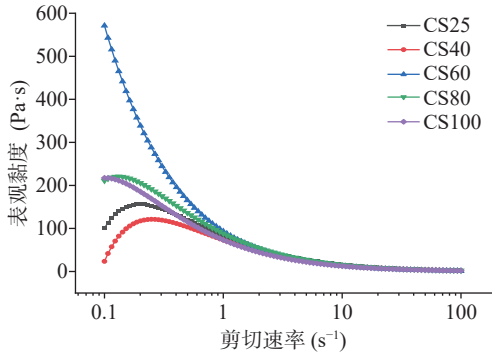


图 3　不同预糊化温度乳液凝胶的黏度曲线

Fig.3　Viscosity curve of lotion gel at different pregelatinized temperatures

2.3.2　触变恢复试验　3ITT 常用来模拟 3D 打印过程，以反映样品的粘弹特性和触变恢复性能。由图 4 可知，0~600 s 乳液凝胶样品经历低速剪切过程，为第 1 阶段；600~1200 s 样品经历高速剪切过程，为第 2 阶段；1200~1800 s 样品再次回到低速剪切过程，为第 3 阶段[32]。相较于第 1 阶段，各组样品在第 3 阶段的黏度明显更低，这说明在剪切过程中其剪切力作用破坏了乳液凝胶结构[33]。其中，触变恢复率作为重要指标，一般用第 3 阶段黏度与第 1 阶段黏度的比值来表示。当触变恢复率位于 70% 至 80% 的区间时，表明该乳液凝胶拥有良好的触变恢复性能[34]。在乳液凝胶样品中，CS25 的触变恢复率为 93.10%，CS40 的触变恢复率为 99.97%，CS60 的触变恢复率为 90.56%，CS80 的触变恢复率为 91.66%，CS100 的触变恢复率为 98.83%。由此可见各组样品的触变恢复率均高于 90%，这说明所有预糊化温度的乳液凝胶样品均具有良好的触变恢复性。因此当这些样品从 3D 打印喷嘴挤出并沉积到产品上时，可以在较短时间内恢复其机械强度同时保持其形状，从而具有良好的打印精度。

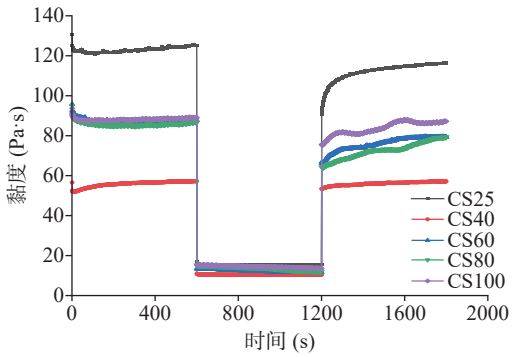


图 4　不同预糊化温度乳液凝胶的 3ITT 扫描

Fig.4　3ITT scanning of lotion gel at different pregelatinized temperatures

2.3.3　频率扫描　由图 5 可知，在整个振荡频率过程中，乳液凝胶样品均显示为 G'>G"，表明它是以弹性为主导的黏弹性固体材料[35]。当添加 CS 的预糊化温度从 25 ℃ 增加至 60 ℃ 时，乳液凝胶样品的 G'值随 CS 预糊化温度的增加而增大，在 CS60 时达到最大值。这可能是随着 CS 糊化温度的继续升高，CS 颗粒逐渐膨胀，直链淀粉分子与支链淀粉部分分子溶出，此时淀粉分子链与体系产生氢键等相互作用力，同时 CS 颗粒在网络结构空隙中的膨胀填充增加了乳液凝胶强度[26]。当添加 CS 的预糊化温度大于 60 ℃ 时，乳液凝胶样品的 G'值随 CS 预糊化温度的增加而减小，其内部结构松散易形变，该变化与表观黏度的表征变化相一致。Zhao 等[23] 在研究凝胶温度对高弹性淀粉基乳液填充凝胶流变行为的影响时发现，当凝胶温度从 55 ℃ 增加到 60 ℃ 时，模量显著增加，而在较高温度下模量降低，呈现出较软的网络结构，与本文得到的结果一致。较高的弹性模量赋予其一定的自支撑性能和良好的打印精度，G'值越大，表明乳液凝胶内部分子间形成了更加紧密稳固的分子间网络结构，打印精度越高[36]。由此可见 CS60 具有最高的 G'值，能够使乳液凝胶自支撑力最强，打印精度最佳。

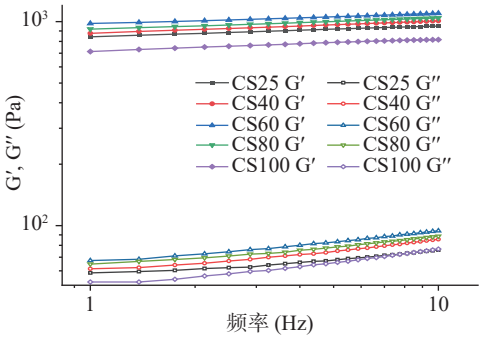


图 5　不同预糊化温度乳液凝胶的频率扫描

Fig.5　Frequency scanning of lotion gel at different pregelatinized temperatures

2.3.4　应变扫描　如图 6 所示，乳液凝胶样品的线性黏弹区均为 0.1%~30%，临界应变值为 30%。由图可知，随着剪切应变的增加，当剪切应变超过临界应变值时，所有乳液凝胶样品均出现 G'值下降，G"值先升高后下降的现象，这可能是因为 CS 颗粒最初溶出的分子链随着应变的增加而缠结，从而引发剪切增稠现象，即 G"值的升高[37]。同时随着应变的增大，G">G'，这说明乳液凝胶的结构被破坏，从而导致了更类似于流体的行为[38]，Zhao 等[23] 在研究凝胶温度对高弹性淀粉基乳液填充凝胶流变行为的影响时，也得到了类似的结果。由图 6 可知，在乳液凝胶的线性黏弹区内，各组样品的 G'值无明显差距且保持稳定，这表明各组样品均有较好的黏弹性，且能够在一定的剪切应变下稳定维持。

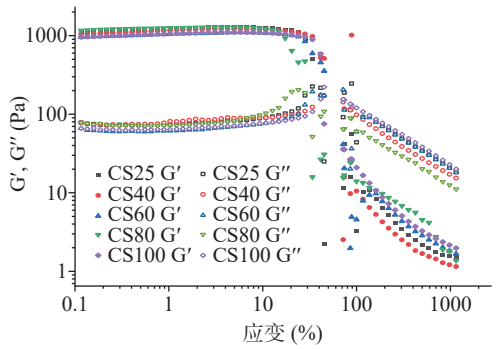


图 6　不同预糊化温度乳液凝胶的应变幅度振荡剪切测试

Fig.6　Strain amplitude oscillation shear test of lotion gel at different pregelatinized temperatures

2.4　乳液凝胶的拉曼光谱分析

拉曼光谱能够敏感地检测到双键以及芳香族碳氢键的振动，能够检测到蛋白质二级结构的变化[39]，也是一种探索乳液凝胶机制以及其中是否有新物质形成的良好工具[40]。由图 7 可知，添加不同预糊化 CS 乳液凝胶的体系中，强烈的酰胺 I 带吸收峰位于乳液凝胶的 1600~1700 cm^{-1} 区域，这主要是由酰胺基团中 C=O 键的伸展振动，同时伴随着 N-H 键的弯曲振动与 C-N 键的伸展振动引起的，表明在乳液凝胶的油-水界面上有蛋白质吸附结合。值得注意的是，随着添加 CS 预糊化温度的增加，不同预糊化温度 CS 的添加没有改变 MP 乳液凝胶样品的出峰位置与峰形，这说明预糊化 CS 与 MP 之间不存在共价相互作用。在相关的研究中也得出了类似的结论[25]。

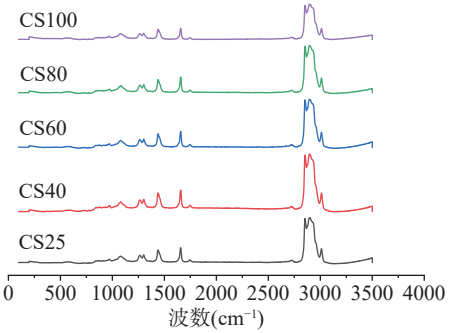


图 7　不同预糊化温度乳液凝胶的拉曼光谱测定

Fig.7　Raman spectroscopic determination of lotion gel at different pregelatinized temperatures

通过拉曼光谱分析，计算了乳液凝胶中 α-螺旋、β-折叠、β-转角、无规卷曲的相对含量。由图 8 可知，当添加 CS 的预糊化温度在 100 ℃ 以下时，随着 CS 预糊化温度的增加，乳液凝胶的二级结构大致呈现 α-螺旋结构相对含量减少，β-转角结构相对含量增多的趋势，其中 α-螺旋结构与蛋白质的展开程度密切相关，这说明了体系中 MP 部分解旋，暴露出了更多的残基。这可能是添加的预糊化 CS 与 MP 之间形成了分子间相互作用力导致的结果[41]。此外，CS60 具有相对更高含量的无规卷曲结构，占总体结构的 17%。而无规则卷曲含量与 G'呈正相关[42]，这能够与频率扫描结果相印证。

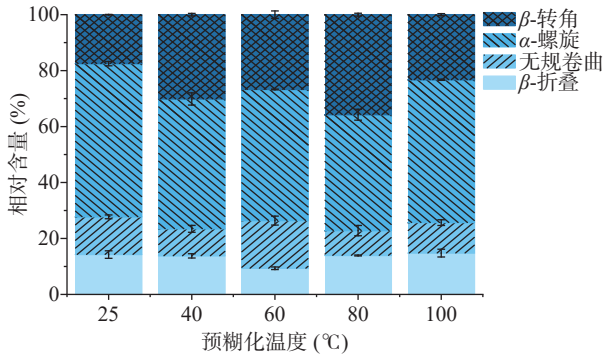


图 8　不同预糊化温度乳液凝胶在 1600~1700 cm^{-1} 的二级结构占比图

Fig.8　Ratio diagram of secondary structure of lotion gel with different pregelatinized temperatures at 1600~1700 cm^{-1}

2.5　不同预糊化温度 CS 对乳液凝胶稳定性的影响

2.5.1　离心稳定性　由图 9 可见，在 10000 r/min 下离心 15 min 后得到的 5 组不同预糊化温度乳液凝胶均能保持较好的凝胶状态，凝胶部分保持完好。其原因为在乳液凝胶体系中，预糊化 CS 溶出的分子链与 MP、水分子产生了分子间非共价相互作用，同时 CS 颗粒自身填充于网络结构之中，形成的具有一定强度的凝胶网络阻止了油滴的自由移动与聚结[23]。体系中水相黏度增大，CS 颗粒与油滴之间的相互作用使凝胶体系更加稳定[26]。

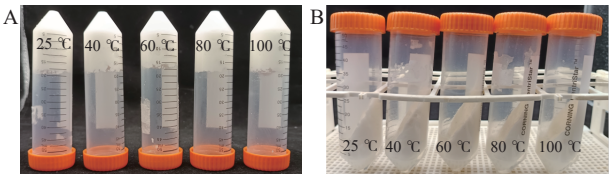


图 9　不同预糊化温度乳液凝胶离心前(A)与离心后(B)外观图

Fig.9　Appearance of lotion gel with different pregelatinized temperatures before centrifugation (A) and after centrifugation (B)

2.5.2　冻融稳定性　冻融稳定性是指凝胶经冷冻、解冻后保持原有结构的能力，在此过程中，乳液凝胶会经历热胀冷缩、冰晶的形成及熔化，这可能会对其结构稳定性产生负面影响[43]。如图 10 所示，经历冻融后的样品其表观状态出现明显分层，油相与水相分

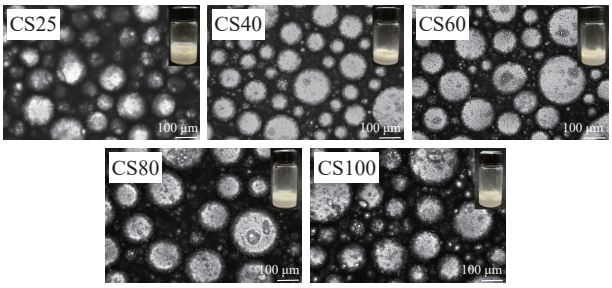


图 10　不同预糊化温度乳液凝胶冻融后的表观状态与微观结构

Fig.10　Apparent state and microstructure of lotion gel after freeze-thaw at different pregelatinized temperatures

离，微观结构显示出大量的油滴聚集体，这说明冷冻破坏了乳液凝胶的网络结构，使得油相合并析出并与基质分离[16]。其原因可能为冻融过程中大冰晶的撞击导致了油-水界面导致其变形，同时冰晶的生长打破了乳液凝胶原有的网络结构，导致油滴与水分子向外迁移[44]，乳液凝胶难以继续束缚住油滴与水分子。由此可见，5 组不同预糊化温度乳液凝胶均不具备较好的冻融稳定性。

2.6　不同预糊化温度 CS 对乳液凝胶 3D 打印性能的影响

2.6.1　表观分析　如图 11 所示，各组乳液凝胶均可成功打印成型，但各样品的打印质量仍具有较为明显的差异。CS25 油墨能够通过打印喷嘴顺利挤出并按照模型打印，但打印样品表面线条模糊，并与下层出现溶合，侧面线条层次不清晰。随着 CS 预糊化温度的增加，当添加 CS 的预糊化温度达到 60 ℃ 时，打印样品在形状完整性上逐渐提升，表面线条清晰度增加，层次变得明显，纹理更加清晰。这说明 CS 在此预糊化温度范围内，其添加会增加 G'与凝胶强度，从而使其具有更好的打印性能，与流变学测试结果相互印证。CS80 打印样品形状仍能保持完好，但其表面开始出现部分塌陷下沉。CS100 油墨从打印喷嘴的挤出能力明显变得困难，并且打印样品形状保持能力欠佳，塌陷现象明显。相较之下，CS60 油墨挤出顺利，打印样品表面线条清晰、层次分明，无塌陷及下沉现象，能够维持最好的打印形状，具有最佳的 3D 打印性能[45]。

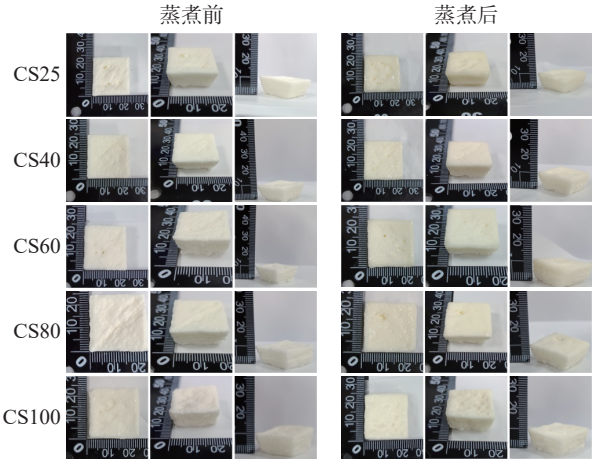


图 11　不同预糊化温度乳液凝胶蒸煮前后的 3D 打印外观图

Fig.11　3D printing appearance of lotion gel before and after cooking at different pregelatinized temperatures

2.6.2　打印精度　图 12 为不同预糊化温度乳液凝胶的打印精度。随着 CS 预糊化温度的增加，打印精度大致呈现先升高后降低的趋势。其中当添加 CS 的预糊化温度从 25 ℃ 增加至 60 ℃ 时，乳液凝胶的打印精度随 CS 预糊化温度的增加显著提高（P<0.05），其中 CS60 样品的打印精度最高，达到 96.1%±2.2%，与流变分析结果一致。Li 等[46] 在研究储存时间对卵清蛋白-结冷胶乳化凝胶的 3D 打印精度时，打印精度最高达到 91%，相较之下本样品的打印精度更高，这可能是 CS 颗粒的添加带来了较高的机械强度与触变恢复率导致的，与流变结果相互印证。

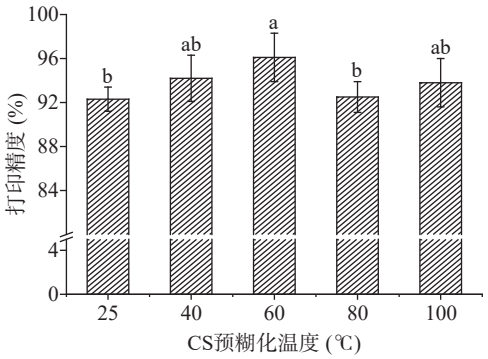


图 12　不同预糊化温度乳液凝胶的蒸煮前打印精度

Fig.12　Printing accuracy of lotion gel before cooking at different pregelatinized temperatures

2.6.3　质构分析　质构特性是衡量乳液凝胶 3D 打印性能的重要指标。如表 1 所示，乳液凝胶样品的质构特性在预糊化 CS 加入后均受到了一定程度的影响，整体变化规律呈现为随着 CS 预糊化温度的增加，特性指标数值呈先上升后下降的趋势，这与流变

表 1　不同预糊化温度乳液凝胶 3D 打印倒棱台蒸煮前后的质构特性

Table 1　Texture characteristics of lotion gel 3D printing inverted prism before and after cooking at different pregelatinized temperatures

样品	硬度(g)	粘附性(mJ)	内聚性	弹性(mm)	胶粘性(mJ)	咀嚼性(mJ)
CS25(蒸煮前)	0.77±0.09^{ab}	0.12±0.01^{ab}	0.72±0.06^{a}	1.86±0.13^{a}	0.57±0.05^{ab}	1.08±0.16^{a}
CS25(蒸煮后)	0.63±0.25^{a}	0.16±0.07^{a}	0.96±0.42^{a}	1.72±0.16^{a}	0.53±0.05^{a}	0.89±0.06^{a}
CS40(蒸煮前)	0.90±0.00^{a}	0.10±0.00^{b}	0.72±0.01^{a}	1.70±0.21^{a}	0.63±0.05^{a}	1.09±0.15^{a}
CS40(蒸煮后)	0.70±0.42^{a}	0.12±0.02^{a}	0.88±0.14^{a}	2.23±0.13^{a}	0.60±0.28^{a}	1.21±0.86^{a}
CS60(蒸煮前)	0.77±0.09^{ab}	0.12±0.00^{ab}	0.75±0.06^{a}	1.73±0.12^{a}	0.57±0.05^{ab}	1.03±0.11^{a}
CS60(蒸煮后)	0.83±0.09^{a}	0.13±0.01^{a}	0.78±0.05^{a}	2.20±0.28^{a}	0.63±0.05^{a}	1.47±0.33^{a}
CS80(蒸煮前)	0.67±0.05^{b}	0.14±0.01^{a}	0.66±0.10^{a}	1.89±0.08^{a}	0.43±0.12^{ab}	0.88±0.24^{ab}
CS80(蒸煮后)	0.70±0.00^{a}	0.14±0.03^{a}	0.74±0.09^{a}	2.13±0.29^{a}	0.53±0.05^{a}	1.20±0.29^{a}
CS100(蒸煮前)	0.60±0.14^{b}	0.12±0.02^{ab}	0.58±0.13^{a}	1.24±0.23^{b}	0.37±0.17^{b}	0.49±0.25^{b}
CS100(蒸煮后)	0.53±0.17^{a}	0.16±0.00^{a}	0.87±0.06^{a}	1.39±1.01^{a}	0.50±0.14^{a}	0.81±0.58^{a}

注：同列不同小写字母代表同一样品不同温度间差异显著（P<0.05）。

学测试结果相一致。其中，CS40 与 CS60 样品均具有较好的质构特性。在蒸煮前，CS40 样品具有最强的硬度、胶粘性与咀嚼性，CS60 样品具有最强的内聚力；在蒸煮后，CS40 样品具有最强的粘附性与弹性，CS60 样品具有最强的硬度、胶粘性与咀嚼性。这可能是经过适当加热处理的 CS 颗粒拥有适当的膨胀程度填充于乳液凝胶中，同时适当糊化程度的 CS 颗粒溶出适量的直链与支链淀粉分子，从而形成更加致密的结构[25]。Wang 等[39] 研究发现，这也可能是加热后混合体系中淀粉颗粒的冷却再生增加了凝胶的硬度。凝胶基质中的水分子与油滴的流动性和聚集效应明显减少，从而使其具备较好的质构特性。

2.6.4 蒸煮损失 蒸煮损失是评价乳液凝胶保水性能的重要指标。由图 13 可知，在 3D 打印样品中，不同预糊化温度乳液凝胶的蒸煮损失率均小于 10%，其中 CS60 样品的蒸煮损失率相较之下稍显偏高，但与 CS80 样品的蒸煮损失率无显著性差异（$P>0.05$）。其原因可能为，当样品中添加 CS 的预糊化温度在 60 ℃ 以下时，乳液凝胶体系中的 CS 颗粒均处于未完全糊化阶段，在蒸煮过程中，CS 颗粒吸水膨胀，乳液凝胶网络体系中的含水量增加，导致蒸煮损失率降低；随着添加 CS 的预糊化温度的增加，颗粒膨胀性降低[47]，从而使蒸煮损失率升高；而当乳液凝胶中存在大量的直链与支链淀粉分子时，蛋白质与淀粉分子发生了蛋白质-淀粉相互作用[48]，蛋白质-淀粉分子重新形成的凝胶网络结构束缚了一定的水分子，使得蒸煮损失率降低。加热蒸煮能影响乳液凝胶的凝胶网络结构，并影响其凝胶特性[49]，这在后续实验中有待进一步展开研究与讨论。

综合来看，CS60 样品的打印精度最高、质构特性良好，打印样品能够维持最好的打印形状，具有最佳的 3D 打印性能。加热蒸煮改变了预糊化 CS 的膨胀程度以及 MP 乳液凝胶原有的网络结构，CS60 样品的蒸煮损失有待改善，这在后续实验中将展开进一步的探究。

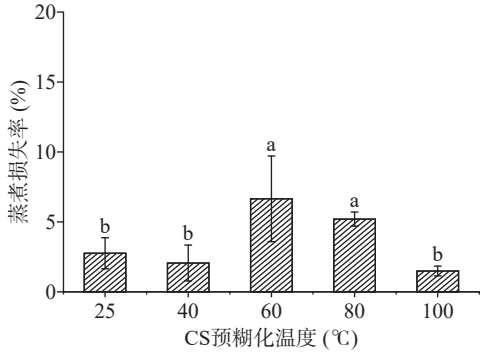


图 13 不同预糊化温度乳液凝胶 3D 打印样品的蒸煮损失率

Fig.13 Cooking loss rate of lotion gel 3D printed samples at different pregelatinized temperatures

2.7 预糊化 CS-MP 乳液凝胶的可能形成机理

本研究基于对预糊化 CS 性质与乳液凝胶结构的理解，提出了在不同预糊化温度下 CS 颗粒与 MP 乳液凝胶的可能形成机理（图 14）。在乳液凝胶体系中，预糊化 CS 颗粒在高速剪切下自发移动至油-水界面层并通过分子间相互作用力形成紧密排布[50]。25 ℃ 的 CS 颗粒未经过加热预糊化处理，其颗粒内部的 CS 分子在氢键等相互作用下紧密排列，CS 颗粒均匀地分散在乳液凝胶体系之中。CS 颗粒在 40 ℃ 时受热膨胀，水分子进入颗粒内部破坏并与 CS 分子形成新的氢键。当糊化温度为 60 ℃ 时，CS 进入开始糊化阶段，颗粒继续膨胀，部分直链与支链淀粉分子溶出，与 MP 产生氢键、疏水相互作用等弱相互作用力[48]，分子链之间相互纠缠，MP 三维网络结构更加紧密，同时膨胀的 CS 颗粒填充在网络间隙之中，阻止了油滴间相互靠近而聚集，增加了体系的凝胶强度[22,26]。随着添加预糊化 CS 温度的进一步增加，CS 分子在体系中的分布逐渐分散，当糊化温度为 80 ℃ 时，CS 颗粒接近完全糊化程度，颗粒继续膨胀变大且部分膨胀破裂，大部分的直链与支链淀粉分子溶出，结构变得疏松[10]。当糊化温度达到 100 ℃ 时，CS 颗粒几乎完全膨胀破裂，颗粒内容物代替 CS 颗粒留在体系之中。

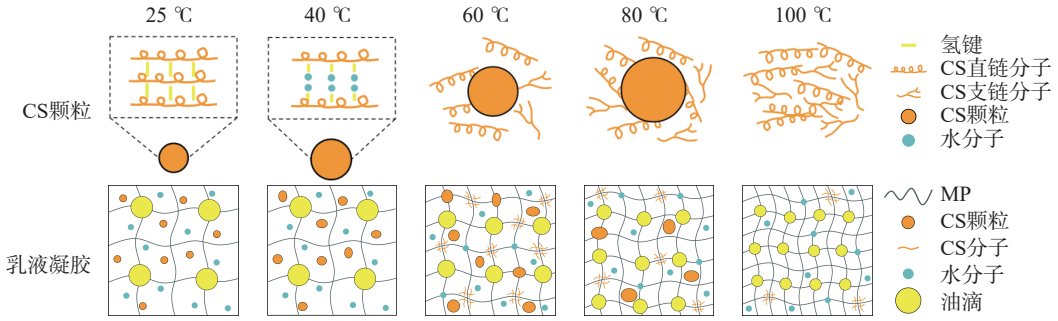


图 14 CS 颗粒的糊化形态及添加不同预糊化温度 CS 对乳液凝胶的影响

Fig.14 Gelatinization morphology of CS particles and the effect of adding CS at different pregelatinized temperatures on lotion gel

3 结论

本研究以预糊化 CS 制备了 MP 乳液凝胶，通过改变 CS 预糊化温度对乳液凝胶的凝胶特性进行改善，考察其微观结构、流变特性及稳定性，评价其 3D 打印的精确性及适印性，同时对其内在作用机理进行了分析与揭示。结果表明，CS 预糊化温度的增

加能够提高乳液凝胶的凝胶强度、黏弹特性及稳定性，但较高的预糊化温度引起的颗粒膨胀破裂会导致 CS 分子的溶出与液滴的聚集，使其稳定性降低。其中 CS60 样品具有最佳的改善效果，这是由于该预糊化温度下溶出的 CS 分子与 MP 和水分子形成了氢键、疏水作用力等分子间相互作用力，使乳液凝胶的三维网络结构更加紧密。此外，预糊化 CS 的添加能够使乳液凝胶具有良好的打印精度与适印性，CS60 样品表现出最佳的 3D 打印效果。本研究在拓展 MP 乳液凝胶 3D 打印的应用方面具有一定的理论参考意义。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 172−196.

[2] CHEN Y, QUAN S, HUANG S, et al. Applications and progress of 3D printed bioceramic scaffolds in bone tissue repair and immune regulation[J]. Ceramics International, 2024.

[3] VARPE A, SAYED M, MANE N S. A comprehensive literature review on advancements and challenges in 3D bioprinting of human organs: ear, skin, and bone[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2025, 53(1): 14−33.

[4] XIE Y, LIU Q, ZHANG W, et al. Advances in the potential application of 3D food printing to enhance elderly nutritional dietary intake[J]. Foods, 2023, 12(9): 1842.

[5] MADADI M, AMIRI H, PAN J, et al. Food loss and waste valorization offers a sustainable source of biopolymers in bioinks for 3D printing[J]. Nature Food, 2025, 6(4): 1−8.

[6] SCHÜLER K, MARQUES D M C, GUSMÃO A, et al. 3D printing of plant-based fat inks towards manufacturing complex cellular agriculture products with fatty structures[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110369.

[7] XIAN D, WU L, LIN K, et al. Augmenting corn starch gel printability for architectural 3D modeling for customized food[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110294.

[8] DAI H, WEN L, LIANG H, et al. Enhancing 3D food printing precision: Development and interaction behavior of soy protein isolate-konjac glucomannan-xanthan gum composite ink based on hot-melt extrusion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 304: 140854.

[9] FENG Z, HE D, LI C, et al. 3D printed emulsion based on arginine-myofibrillar protein[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 375: 112049.

[10] LACERDA L D, da SILVEIRA N P, BONDAM A F, et al. Starch gelatinization behavior: The impact of granular structure[J]. Starch-Stärke, 2024, 76(7-8): 2300143.

[11] PEI Z S, WANG H, XIA G, et al. Emulsion gel stabilized by tilapia myofibrillar protein: Application in lipid-enhanced surimi preparation[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134424.

[12] 薛山, 罗娟. 多糖添加对兔肌原纤维蛋白 Pickering 乳液稳定性及凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 21−29. [XUE Shan, LUO Juan. Effect of polysaccharide addition on stability and gel properties of rabbit myofibrillar protein Pickering lotion[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(13): 21−29.]

[13] 孟然. 玉米醇溶蛋白/羧甲基糊精复合纳米颗粒 Pickering 乳液的构建与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. [MENG Ran. Construction and application of corn gliadin/carboxymethyl dextrin composite nanoparticles Pickering lotion[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.]

[14] XU Y T, TANG C H, LIU T X, et al. Ovalbumin as an outstanding Pickering nanostabilizer for high internal phase emulsions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(33): 8795−8804.

[15] 何冬雪, 冯紫蓝, 申铉日, 等. 分子动力学结合拉曼光谱评价乳液界面蛋白结构变化[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 87−95. [HE Dongxue, FENG Zilan, SHEN Xuanri, et al. Evaluation of structural changes of lotion interfacial proteins by molecular dynamics combined with Raman spectroscopy[J]. Food Science, 2024, 45(7): 87−95.]

[16] 刘玫君, 乔蕾蕾, 杨敏. 酪蛋白-海藻酸钠基乳液凝胶性质及其在姜黄素负载中的应用[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(2): 58−74. [LIU Meijun, QIAO Leilei, YANG Min. Properties of casein sodium alginate based lotion gel and its application in curcumin loading[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(2): 58−74.]

[17] 宋苗苗, 王军辉. 乳液浓度对豆腐柴果胶/乳清浓缩蛋白冷固型乳液填充凝胶理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 84−92. [SONG Miaomiao, WANG Junhui. Effect of lotion concentration on the physical and chemical properties of tofu chai pectin/whey protein concentrate cold setting lotion filled gel[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(10): 84−92.]

[18] 刘丽莉, 段京瑶, 郭悦, 等. 明胶和马铃薯淀粉对大豆分离蛋白凝胶 3D 打印性能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(13): 253−260. [[LIU Lili, DUAN Jingyao, GUO Yue, et al. Effect of gelatin and potato starch on 3D printing performance of soy protein isolate gel[J]. Food and Fermentation Industry, 2025, 51(13): 253−260.]

[19] 吴嘉婕, 田韩, 钟长秀, 等. Bigels 调控鱼糜油墨 3D 打印性能[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 194−204. [WU Jiajie, TIAN Han, ZHONG Changxiu, et al. Bigels regulates the 3D printing performance of fish paste ink[J]. Food Science, 2024, 45(23): 194−204.]

[20] 李嘉琦, 潘德胤, 马金明, 等. 不同浓度丁香酚对肌原纤维蛋白结构和乳液凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 144−151. [LI Jiaqi, PAN Deyin, MA Jinming, et al. Effects of eugenol at different concentrations on the structure of myofibrillar protein and the characteristics of lotion gel[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(1): 144−151.]

[21] HAN Y, TAI X, YOU W, et al. Fabrication of ultrastable oil-in-water high internal phase gel emulsions stabilized solely by modified shea butter for 3D structuring[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 367: 120495.

[22] CHEN Q, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Protein-amylose/amylopectin molecular interactions during high-moisture extruded texturization toward plant-based meat substitutes applications[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107559.

[23] ZHAO X, LI D, WANG L, et al. Role of gelation temperature in rheological behavior and microstructure of high elastic starch-based emulsion-filled gel[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108208.

［24］ 芒莱, 范方宇. OSA 改性木薯淀粉基 Pickering 乳液制备及特性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 63−71. ［MANG lai, FAN Fangyu. Preparation and characteristics of OSA modified cassava starch based Pickering lotion[J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(22): 63−71. ］
［25］ 陈金玉, 胡方洋, 吉芷芮, 等. 豌豆抗性淀粉对肌原纤维蛋白乳液凝胶特性及蛋白质体外消化率的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(24): 26−35. ［CHEN Jinyu, HU Fangyang, JI Zhirui, et al. Effect of pea resistant starch on myofibrillar protein lotion gel properties and protein digestibility *in vitro*[J]. Food Science, 2024, 45(24): 26−35. ］
［26］ ZHOU F, LIU J, HAN Y, et al. The filling effects of starch-based emulsion microgels in gel-based systems[J]. Food Bioscience, 2024, 57: 103608.
［27］ SAARI H, RAYNER M, WAHLGREN M. Effects of starch granules differing in size and morphology from different botanical sources and their mixtures on the characteristics of Pickering emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 844−855.
［28］ 王金鸽, 蔡勇建, 刘俊梅, 等. 均质联合酶解对大豆蛋白纳米颗粒结构与功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 85−93. ［WANG Jinge, CAI Yongjian, LIU Junmei, et al. The effect of homogeneous combined enzymatic hydrolysis on the structure and functional properties of soy protein nanoparticles[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(13): 85−93. ］
［29］ SHEN P, ZHOU F, ZHANG Y, et al. Formation and characterization of soy protein nanoparticles by controlled partial enzymatic hydrolysis[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105844.
［30］ REN Z, CHEN Z, ZHANG Y, et al. Effect of heat-treated tea water-insoluble protein nanoparticles on the characteristics of Pickering emulsions[J]. LWT, 2021, 149: 111999.
［31］ 廖金贤, 赵瑞璇, 刘倩楠, 等. 马铃薯淀粉糊化度对乳液凝胶稳定性的影响及机理[J]. 食品科学, 2025, 46(7): 107−118. ［[LIAO Jinxian, ZHAO Ruixuan, LIU Qiannan, et al. The effect of potato starch gelatinization degree on the stability of lotion gel and its mechanism[J]. Food Science, 2025, 46(7): 107−118. ］
［32］ YU X, HAN L, LIU J, et al. Preparation and 3D printing of high internal-phase Pickering emulsions stabilized by chicken egg white microgel[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109393.
［33］ 胡荣, 汪楠, 张甫生, 等. 高压均质处理对豌豆淀粉流变特性及多尺度结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 53−61. ［HU Rong, WANG Nan, ZHANG Fusheng, et al. The effect of high-pressure homogenization treatment on the rheological properties and multi-scale structure of pea starch[J]. Food Science, 2023, 44(5): 53−61. ］
［34］ ZHANG S, XIN M, WANG Z, et al. Tiger nut oil-based oil gel: Preparation, characterization, and storage stability[J]. Foods, 2023, 12(22): 4087.
［35］ 赵国瑜, 范方宇, 黄瑾, 等. 纳米 SiO_2 改性 4 种大分子材料的乳液制备及性质[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 22−28. ［ZHAO Guoyu, FAN Fangyu, HUANG Jin, et al. Preparation and properties of lotion of four macromolecular materials modified by nano-SiO_2[J]. Food Science, 2022, 43(8): 22−28. ］
［36］ ZHANG J Y, PANDYA J K, MCCLEMENTS D J, et al. Advancements in 3D food printing: A comprehensive overview of properties and opportunities[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(17): 4752−4768.
［37］ 白从瑾, 郭京京, 王一凡, 等. 亚麻籽胶和魔芋胶对豌豆分离蛋白乳液凝胶 3D 打印性能的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 83−91. ［BAI Congjin, GUO Jingjing, WANG Yifan, et al. Effect of flaxseed gum and konjac gum on 3D printing performance of pea protein isolate lotion gel[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(3): 83−91. ］
［38］ ANVARI M, JOYNER H S. Effect of fish gelatin and gum arabic interactions on concentrated emulsion large amplitude oscillatory shear behavior and tribological properties[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 518−525.
［39］ WANG H, ZHANG J, LIU X, et al. Effect of sodium starch octenyl succinate-based Pickering emulsion on the physicochemical properties of hairtail myofibrillar protein gel subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(2): 1018−1028.
［40］ LI Y H, WANG Y S, ZHAO J S, et al. A pH-sensitive curcumin loaded microemulsion-filled alginate and porous starch composite gels: Characterization, *in vitro* release kinetics and biological activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182: 1863−1873.
［41］ CHENG Y, DONKOR P O, REN X, et al. Effect of ultrasound pretreatment with mono-frequency and simultaneous dual frequency on the mechanical properties and microstructure of whey protein emulsion gels[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 434−442.
［42］ BAI Y, ZHANG Y, CUI X, et al. Effect of high-pressure treatment on the heat-induced emulsion gelation of rabbit myosin[J]. LWT, 2022, 154: 112719.
［43］ 李丹丹, 韦惠莹, 齐军茹. 不同柑橘类果胶分子的理化特性、结构及凝胶性能[J]. 农业工程学报, 2024, 40(14): 240−249. ［LI Dandan, WEI Huiying, QI Junru. Physical and chemical properties, structures and gel properties of different citrus pectin molecules[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2024, 40(14): 240−249. ］
［44］ 张怡雪, 贾尚羲, 崔冰冰, 等. 超声波处理鹰嘴豆分离蛋白乳化液对低脂猪肉糜品质及其冻融稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 111−121. ［ZHANG Yixue, JIA Shangxi, CUI Bingbing, et al. The effect of ultrasonic treatment of chickpea protein isolate emulsion on the quality and freeze-thaw stability of low-fat pork mince[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(8): 111−121. ］
［45］ PHUHONGSUNG P, ZHANG M, DEVAHASTIN S. Investigation on 3D printing ability of soybean protein isolate gels and correlations with their rheological and textural properties via LF-NMR spectroscopic characteristics[J]. LWT, 2020, 122: 109019.
［46］ LI R, WANG N, MA C, et al. Effect and mechanism of ultrasound time and storage time on physicochemical properties, 3D printing accuracy, and microstructure of ovalbumin-gellan gum emulsion gels[J]. Food Chemistry, 2025, 477: 143518.
［47］ LOPEZ-SILVA M, AGAMA-ACEVEDO E, BELLO-PEREZ L A, et al. Influence of gelatinization degree and octenyl succinic anhydride esterification on the water sorption characteristics of corn starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 270: 118378.
［48］ WANG Z, ZENG J, DENG Y, et al. Regulating heat-induced fibrous whey protein-wheat starch composite emulsion gels as dysphagia food by preheating temperature: Insights from protein-starch interactions[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110621.
［49］ YANG Z, HE X, SONG Y, et al. Fabrication and characterization of novel curcumin-loaded thermoreversible high amylose maize starch emulsion gel[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 136173.
［50］ 郭璐, 黄亮, 张斌, 等. 疏水淀粉皮克林乳液凝胶的稳定机理及影响因素[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 101−108. ［GUO Lu, HUANG Liang, ZHANG Bin, et al. Stability mechanism and influencing factors of hydrophobic starch Pickering lotion gel[J]. Food Science, 2023, 44(2): 101−108. ］