

黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶结构及功能性质的影响

姚欣鹏, 曹传爱, 孔保华, 孙方达, 张宏伟, 刘 骞

Effect of Xanthan Gum Concentration on Structure and Functional Properties of Porcine Plasma Protein-Xanthan Gum Oleogel

YAO Xinpeng, CAO Chuan'ai, KONG Baohua, SUN Fangda, ZHANG Hongwei, and LIU Qian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

羟丙基甲基纤维素和黄原胶浓度对初榨椰子油乳液及其模板油凝胶构建的影响

Effects of Hydroxypropyl Methylcellulose and Xanthan Gum Concentrations on Virgin Coconut Oil Emulsion and Construction of Template Oleogel

食品工业科技. 2022, 43(7): 102-109 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070166>

黄原胶对大豆分离蛋白凝胶流变特性和微观结构的影响

Effects of Xanthan Gum on Rheological Properties and Microstructure of Soy Protein Isolate Gel

食品工业科技. 2022, 43(4): 65-72 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060103>

黄原胶对扁桃仁蛋白质乳化特性的影响

Effect of Xanthan Gum on the Emulsifying Properties of Almond Kernel Protein

食品工业科技. 2021, 42(20): 76-85 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010122>

黄原胶和瓜尔豆胶对鸡血凝胶特性的影响

Influences of Xanthan Gum and Guar Gum on Gelation Properties of Chicken Blood

食品工业科技. 2023, 44(18): 106-114 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120090>

黄原胶对壳聚糖精油复合膜的性能及精油释放的影响

Effects of Xanthan Gum on Properties and Essential Oil Release of Chitosan Essential Oil Composite Films

食品工业科技. 2020, 41(10): 178-183 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.029>

黄原胶对柠檬醛Pickering乳液膜制备及其理化性能的影响

Effect of Xanthan Gum on the Preparation and Physicochemical Properties of Citral Pickering Emulsion Film

食品工业科技. 2022, 43(16): 59-64 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110164>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚欣鹏, 曹传爱, 孔保华, 等. 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶结构及功能性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 95-104. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100006

YAO Xinpeng, CAO Chuan'ai, KONG Baohua, et al. Effect of Xanthan Gum Concentration on Structure and Functional Properties of Porcine Plasma Protein-Xanthan Gum Oleogel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 95-104. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100006

· 研究与探讨 ·

黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶结构及功能性质的影响

姚欣鹏, 曹传爱, 孔保华, 孙方达, 张宏伟, 刘 骞*
(东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要: 本文以猪血浆蛋白和黄原胶为原料, 采用泡沫模板法制备一种可以物理吸附大豆油且具有一定机械强度的油凝胶, 并对其热稳定性进行分析。结果表明, 随着黄原胶浓度的增加, 猪血浆蛋白-黄原胶共混溶液体系的表现粘度和泡沫稳定性显著增加, 起泡性显著降低 ($P<0.05$)。微观结构结果表明, 黄原胶添加导致猪血浆蛋白-黄原胶含水泡沫体系的气泡尺寸以及大气泡数量降低, 冻干后冷冻泡沫凝胶样品内部排列有序且整体孔隙较为致密, 孔洞清晰可见, 能够较好地将液态油捕获在内部结构中。与此同时, 基于猪血浆蛋白和黄原胶形成的油凝胶具有较强的油约束能力以及更接近半固体的流变学行为。随着黄原胶浓度的增加, 吸油能力呈现先增大后减小的趋势, 且在 0.6% 黄原胶浓度时具有最大值 (46.43 g/g), 此时油凝胶的油约束能力为 84.69%。另外, 黄原胶添加能够显著增加油凝胶在不同温度下的油约束能力 ($P<0.05$), 从而增强其热稳定性。因此, 0.6% 黄原胶添加可制备出较为稳定的猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶, 为以蛋白质和多糖为凝胶剂的新型油凝胶的开发以及在低脂产品中的应用奠定一定的理论基础。

关键词: 猪血浆蛋白, 黄原胶, 泡沫模板法, 油凝胶, 吸油能力

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)17-0095-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100006



本文网刊:

Effect of Xanthan Gum Concentration on Structure and Functional Properties of Porcine Plasma Protein-Xanthan Gum Oleogel

YAO Xinpeng, CAO Chuan'ai, KONG Baohua, SUN Fangda, ZHANG Hongwei, LIU Qian*

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In this paper, a kind of oleogel with mechanical strength and physical absorption of soybean oil was prepared by foam templated by using porcine plasma protein and xanthan gum as raw materials, and its thermal stability was analyzed. The results showed that with the increase of xanthan gum concentration, the apparent viscosity and foam stability of porcine plasma protein and xanthan gum mixed solution system significantly increased, and the foaming property significantly decreased ($P<0.05$). The microstructure results showed that the addition of xanthan gum resulted in a decrease in the size of bubbles and the number of large bubbles in the aqueous foam system. After freeze-drying, the cryogel sample had an ordered internal structure and dense overall pores. The pores were clearly visible, which could better trap the liquid oil in the internal structure. At the same time, the oleogels formed by porcine plasma protein and xanthan gum had stronger oil restraint ability and more semi-solid rheological behavior. With the increase of xanthan gum concentration, the oil absorption capacity tended to increase and then decrease, and it had the maximum value (46.43 g/g) at 0.6% xanthan gum concentration, when the oil restraint ability of the oleogel was 84.69%. The addition of xanthan gum could significantly increase the oil restraint ability of the oleogels at different temperatures ($P<0.05$), which enhanced its thermal stability.

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 黑龙江省自然科学基金杰出青年项目 (JQ2021C003); 东北农业大学“青年领军人才”支持计划 (NEAU2023QNLJ-014)。

作者简介: 姚欣鹏 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: yaoxp1020@163.com。

* 通信作者: 刘骞 (1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: liuqian@neau.edu.cn。

Therefore, a relatively stable porcine plasma protein-xanthan gum oleogel was formed when the xanthan gum concentration was 0.6%, which provided a theoretical basis for developing a novel protein and polysaccharide-based oleogels for use in low-fat products.

Key words: porcine plasma protein; xanthan gum; foam templated; oleogel; oil absorption capacity

动物脂肪在肉制品加工占有较大的比重,不仅能够为产品带来顺滑细腻的口感,还能产生独特的风味^[1]。然而,动物脂肪中含有大量的饱和脂肪酸,其过多摄入可能导致肥胖症及各种心脑血管疾病,对人体健康有一定潜在的威胁^[2]。有研究提出采用脂肪替代物的方式替代动物脂肪,以减少饱和脂肪酸的摄入^[3]。然而,这些脂肪替代物存在着高温下不稳定、稠度、颜色和风味与动物脂肪有很大不同的问题,降低产品的整体可接受性^[4]。因此,如何制备出具有良好稳定性的理想脂肪替代物仍是现阶段的亟待解决的问题。

油凝胶作为一种新型凝胶化塑性脂肪以替代传统脂肪成为研究的热点,其是向液态油中添加凝胶因子,在凝胶因子的作用下将液态油固化形成凝胶状结构而形成^[5]。与动物脂肪相比,油凝胶既满足食品加工所需的塑料脂肪的功能特性,又保留液态不饱和脂肪的营养价值,减轻饱和脂肪和反式脂肪带来的健康风险。油凝胶制备过程中通常采用直接添加凝胶剂(例如,生物蜡^[6]、蜡酯^[7]、单甘油酯^[8]、植物甾醇^[9])进行制备。然而,此方法制备的油凝胶在某些方面存在局限性,例如,大多数蜡基油凝胶会呈现“蜡质”纹理及“蜡状”风味^[10]。近年来,生物聚合物基油凝胶因其高生物相容性、低成本和食品级地位而受到广泛关注。此类油凝胶的制备选用可食用生物聚合物作为凝胶因子,如蛋白质和多糖,但由于其亲水性在疏水溶剂中表现出低分散性,因此具有一定挑战性^[11]。目前,可以采用间接的方法构建油凝胶,包括溶剂交换法^[12]和双相模板法(乳液模板法^[13]和泡沫模板法^[14])。泡沫模板法由于其结构和功能的可调性而引起人们的关注,其是将泡沫体系经过真空冷冻干燥形成多孔冷冻凝胶,再经过吸油形成油凝胶的一种间接制备方法^[14]。与大多数乳液模板或水凝胶模板法相比,它不需要进行高温干燥或溶剂交换过程,且通常具有较高的吸油能力。Patel等^[15]首次采用泡沫模板法利用羟丙基甲基纤维素制备一种轻质高吸油的油凝胶。其能够吸取接近自身100倍重量的葵花籽油。Wei等^[16]在不同pH条件下制备以米糠蛋白为基质的米糠油凝胶,最高可吸取自身重量18.39倍的米糠油,获得的油凝胶具有较好的流变性能。此外,采用两种生物聚合物能够提高共混溶液体系的粘度和泡沫稳定性,促使制备的泡沫模板油凝胶具有一定的触变行为和更好的稳定性^[17]。

本研究采用以猪血浆蛋白和黄原胶为基质构建泡沫模板法油凝胶。猪血浆蛋白是一种从猪血中分离得到的蛋白质,具有良好的功能特性,如起泡性、

乳化性和凝胶性等,且浓度在1%时具有较为优良的起泡性^[18]。黄原胶是由黄单胞菌产生的一种胞外分支多糖,由于其刚性结构,具有极强的稳定性和优良的功能特性,常作为乳化剂、稳定剂和发泡剂应用于食品、药品等领域,但其本身不具有胶凝特性,属于非凝胶型多糖,不能单独做凝胶剂使用^[19]。本文通过测定表观粘度、起泡性、泡沫稳定性、泡沫结构、吸油能力、油约束能力、热稳定性、扫描电镜以及流变特性对猪血浆蛋白和黄原胶溶液的含水泡沫、冷冻泡沫凝胶和油凝胶理化性质进行分析。同时,采用动力学模型系统探究黄原胶浓度对油凝胶吸油动力学的影响,为新型油凝胶的制备及在低脂肉制品中应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

NP-2002猪血浆蛋白粉(蛋白含量为78%) 天津恩彼蛋白质有限公司;食品级黄原胶(99%纯度) 山东阜丰发酵有限公司;金龙鱼精炼一级大豆油 益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司。

AL-104型精密电子天平 上海梅特勒-托利多仪器设备有限公司;HJ-6多头磁力搅拌器 常州丹瑞实验仪器设备有限公司;T25高速分散机(S25N-25G) 德国IKA公司;Pilot3-6M真空冷冻干燥机 北京博医康仪器有限公司;GL-21M高速冷冻离心机 湖南长沙湘仪离心机仪器有限公司;BX53光学显微镜 日本奥林巴斯公司;S-3400N钨灯丝扫描电子显微镜 日本日立公司;Discovery DHR-1 TA流变仪 美国TA仪器公司;DK-8B电热恒温水浴锅 上海精宏实验设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油凝胶的制备

1.2.1.1 含水泡沫制备 首先,称取一定量的猪血浆蛋白粉末于蒸馏水中,使用恒温磁力搅拌器搅拌至猪血浆蛋白完全溶解,配制1%(w/v)的猪血浆蛋白溶液。然后,缓慢加入黄原胶粉末,待溶液混合均匀后,将猪血浆蛋白-黄原胶混合溶液在10000 r/min条件下高速均质充气3 min,得到均匀的含水泡沫。含水泡沫中黄原胶的最终浓度为0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%(w/v)。

1.2.1.2 冷冻泡沫凝胶制备 将1.2.1.1中制备的含水泡沫迅速转移至-18℃冰箱内冷冻,待内部水分完全冻结成冰后对样品真空冷冻干燥24 h,以制备吸油冷冻泡沫凝胶。

1.2.1.3 油凝胶制备 将1.2.1.2中制备的冷冻泡沫

凝胶缓慢放入 30 mL 大豆油中, 保持约 30 min 以吸油。将吸油后的冷冻凝胶用网筛取出并静置约 30 min 至不再漏油, 得到油凝胶。

1.2.2 猪血浆蛋白-黄原胶溶液及含水泡沫性质的测定

1.2.2.1 溶液表观粘度的测定 参考 Guo 等^[20] 的方法进行表观粘度的测定。首先, 将少量猪血浆蛋白-黄原胶溶液置于直径为 40 mm、间距为 1.5 mm 的平行平板应力控制流变仪平台上, 在测量温度 25 °C, 剪切速率变化范围为 0.1~10 s⁻¹ 内进行表观粘度的测定, 分析表观粘度与剪切速率变化的关系。

1.2.2.2 溶液起泡性和泡沫稳定性的测定 参照 Patel 等^[14] 的方法测定溶液起泡性和泡沫稳定性。首先, 将混合溶液初始体积记为 V₀, 将该溶液经均质充气后制备的含水泡沫体积记录为 V₁, 然后将含水泡沫静置 60 min, 此时体积记录为 V₂, 计算起泡性及泡沫稳定性。计算公式如下:

$$\text{起泡性}(\%) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100$$

$$\text{泡沫稳定性}(\%) = \frac{V_2 - V_0}{V_1 - V_0} \times 100$$

1.2.2.3 含水泡沫的宏观与微观结构 使用数码相机记录不同黄原胶浓度下猪血浆蛋白-黄原胶含水泡沫的宏观形态结构。使用 OLYMPUS BX53 光学显微镜在明场模式观察含水泡沫的微观形态。首先, 吸取少量含水泡沫轻轻滴放在载玻片上, 并立即用盖玻片覆盖, 在 40 倍的放大倍率下对样品进行观察, 并拍摄含水泡沫的光学显微照片。另外, 通过 Image-Pro Plus 6.0 软件计算含水泡沫的尺寸数据。

1.2.3 冷冻泡沫凝胶理化性质的测定

1.2.3.1 扫描电镜 冷冻泡沫凝胶样品使用钨灯丝扫描电子显微镜观察。首先, 将样品观察面向上粘贴在扫描电镜样品台上并进行离子溅射喷金, 于加速电压 5.0 kV 的条件下对冷冻泡沫凝胶的微观结构进行观察, 并通过 Image-Pro Plus 6.0 软件对冷冻泡沫凝胶孔隙率进行测定。

1.2.3.2 吸油能力 参照 Wang 等^[21] 的方法分析冷冻泡沫凝胶的吸油能力并略有修改。首先, 将重量为 M₀ 的冷冻干燥泡沫凝胶置于大豆油中保持约 30 min。然后, 用筛子取出吸油后的冷冻泡沫凝胶后, 静置约 30 min 至冷冻泡沫凝胶中没有多余液态油析出, 称重, 记为 M₁。冷冻泡沫凝胶的吸油能力计算公式如下:

$$\text{吸油能力}(\text{g/g}) = \frac{M_1 - M_0}{M_0}$$

1.2.3.3 吸油动力学 根据 1.2.3.2 中的方法, 参照 Jiang 等^[22] 的方法, 记录冷冻泡沫凝胶在 10、15、20、25、30、35、40、45、50、60、80、100、120、600、1200、1800 s 吸油过程中吸收油的重量, 然后, 用网

筛将冷冻泡沫凝胶从油中捞出并静置 30 min 至无液态油析出, 测定指定时间的油吸收量。吸油能力的计算公式同 1.2.3.2。通过线性驱动力模型拟合出吸油量与时间的变化曲线。

冷冻泡沫凝胶吸收液态油是一个物理吸附的过程, 其吸收的方式应当符合线性驱动力 (linear driving force, LDF) 模型^[23], 公式如下所示:

$$Q_t = Q_m \times (1 - e^{-kt})$$

式中, t 是吸油时间, s; Q_t 是在吸油时间 t 时冷冻泡沫凝胶的吸油量, g; Q_m 是冷冻泡沫凝胶在吸油饱和后的最大吸油量, g; k 是冷冻泡沫凝胶的吸附系数, s⁻¹。

1.2.4 油凝胶理化性质的测定

1.2.4.1 油约束能力 油凝胶的油约束能力测定参照 Fayaz 等^[24] 的方法, 并稍作修改。首先, 取约 3 g 油凝胶于 10 mL 离心管中, 于 20 °C、10000 r/min 条件下离心 15 min, 去除离心管多余的液态油, 称量剩余样品的重量, 计算样品的油约束能力。计算公式如下:

$$\text{油约束能力}(\%) = \frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} \times 100$$

式中, M₀ 为空离心管重量 (g), M₁ 为离心前油凝胶和离心管总重量 (g), M₂ 为去除多余液态油后油凝胶和离心管总重量 (g)。

1.2.4.2 热稳定性 油凝胶的热稳定性测定参考 Phoon 等^[25] 的方法, 并稍作修改。取约 3 g 油凝胶样品置于 10 mL 离心管中, 分别在 40、60 和 80 °C 水浴锅中加热 30 min 后取出, 待冷却至室温后于 20 °C、10000 r/min 的条件下离心 15 min, 去除多余液态油, 称量剩余样品的重量。不同加热温度下油凝胶的油约束能力计算方式同 1.2.4.1, 分析其热稳定性。

1.2.4.3 流变特性 油凝胶流变特性测定参考 Brito 等^[26] 的方法, 并略作改动。将约 3 g 油凝胶样品置于直径为 40 mm、间距为 1.5 mm 的平行平板应力控制流变仪平台上, 在两板之间的表面涂抹一层薄硅油, 防止测量期间的水分蒸发。首先, 在 25 °C、1.0 Hz 的条件下, 于 0.01%~100.0% 应变范围内进行振幅扫描, 以确定合适的线性粘弹区间。然后, 在 25 °C、0.01% 应变的条件下, 于 0.1~10.0 Hz 范围内进行频率扫描, 测定不同油凝胶的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 变化。最后, 在 1.0 Hz、0.01% 应变条件下, 以 5 °C/min 的速率从 25 °C 升温到 85 °C 进行温度扫描, 测定加热环境下不同油凝胶的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 变化。

1.2.4.4 油凝胶微观结构 采用配备偏光透镜的光学显微镜在 40 倍放大镜下进行油凝胶的微观结构的观察。

1.3 数据处理

实验进行 3 次重复, 数据以平均值±标准差的形

式表示。数据统计分析采用 IBM SPSS 23(IBM SPSS 软件公司, Chicago, IL, USA)软件包, 差异显著 ($P<0.05$)。采用 Origin 2021(OriginLab 软件公司, Hampton, MA, USA)软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶溶液表观粘度的影响

表观粘度是在一定的速度梯度下, 相应的剪切应力与剪切速率的比值。表观粘度越高, 其内部分子产生的摩擦阻力越大^[27]。黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶溶液表观粘度的影响如图 1 所示。随着剪切速率的增加, 猪血浆蛋白-黄原胶溶液的表观粘度逐渐降低, 呈现出典型的剪切稀释行为。这是由于在剪切过程中, 体系内部连接的次级键被破坏。随着剪切速率的增加, 这种次级键变形断裂行为逐渐加强, 导致表观粘度下降^[28]。随着黄原胶浓度的增加, 猪血浆蛋白-黄原胶溶液的表观粘度逐渐增大。这是由于黄原胶作为一种亲水胶体, 其本身的分子结构中存在着较多的羟基基团, 这些羟基基团能够与游离的水分子通过氢键的作用形成一种较为坚固的网络结构, 限制水的流动, 增大其表观粘度。另外, 黄原胶浓度的增加则会导致分子链间的作用加强, 增大了与水分子间的缠结, 最终导致溶液的表观粘度均随着黄原胶浓度的增大而增大^[29]。

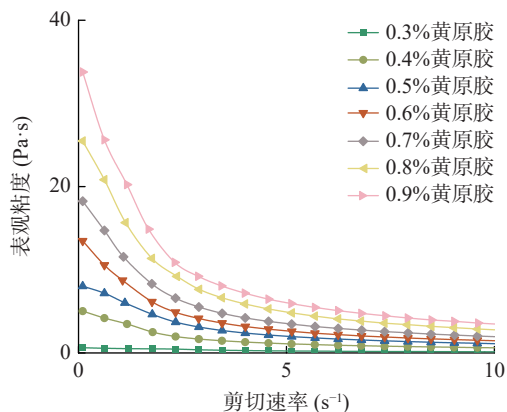


图 1 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶溶液表观粘度的影响

Fig.1 Effect of xanthan gum concentration on apparent viscosity of porcine plasma protein-xanthan gum mixed solution

2.2 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶溶液起泡性与泡沫稳定性的影响

蛋白质由于其两性性, 具有较好的界面性能, 是一种天然的表面活性剂, 在机械作用下可以形成泡沫体系^[30]。由图 2 可知, 随着黄原胶浓度的增加, 猪血浆蛋白-黄原胶溶液的起泡性呈现显著降低的趋势 ($P<0.05$)。泡沫的形成过程主要是依赖于液相对气相组分的容纳速率及能力。黄原胶的添加导致形成的高粘度溶液中分子运动需要消耗更多的能量, 降低能够传递到气液界面的能量, 进而导致气泡减小, 起泡性降低^[31]。与此同时, 猪血浆蛋白-黄原胶溶液的

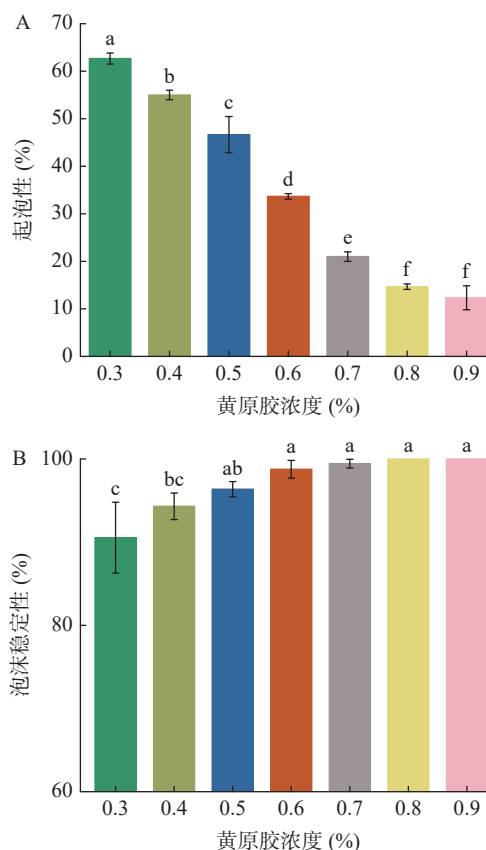


图 2 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶溶液起泡性和泡沫稳定性的影响

Fig.2 Effect of xanthan gum concentration on foaming property and foam stability of porcine plasma protein-xanthan gum mixed solution

注: 图中不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 图 5、图 6 同。

泡沫稳定性随着黄原胶浓度的增加逐渐上升后几乎保持不变, 这与起泡性和溶液的粘度存在一定关联。当溶液粘度较低时, 泡沫的气-液界面的自由能较高, 而为减少界面面积, 自发地降低其界面自由能, 会促使泡沫发生失液、聚合和歧化行为, 由小气泡逐渐合并形成大气泡, 而后发生泡沫的破裂。随着黄原胶浓度的增加, 溶液表观粘度增大, 泡沫表面由于重力导致的失液等现象的速率降低, 进而使泡沫体系的稳定性增强^[32]。这与前面表观粘度的结果相一致。

2.3 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶含水泡沫宏观与微观结构的影响

不同黄原胶浓度下猪血浆蛋白-黄原胶含水泡沫的结构及气泡尺寸结果如图 3 所示。从宏观和微观结构来看, 较低黄原胶浓度 (0.3%~0.5%) 时, 猪血浆蛋白-黄原胶含水泡沫体系表面和内部存在着较多的大气泡。当溶液粘度较低时, 泡沫稳定性较差, 界面的强度较小, 当界面强度减小到临界值时, 小气泡会发生聚合形成一个较大的气泡, 同时有研究表明这种气泡聚合的现象在泡沫形成的初期就已经发生^[33]。因此, 在较低黄原胶浓度时, 泡沫体系内气泡体积较大。然而, 随着黄原胶浓度的继续增加 (0.6%~0.9%), 泡沫体系结构中的大气泡数量逐渐

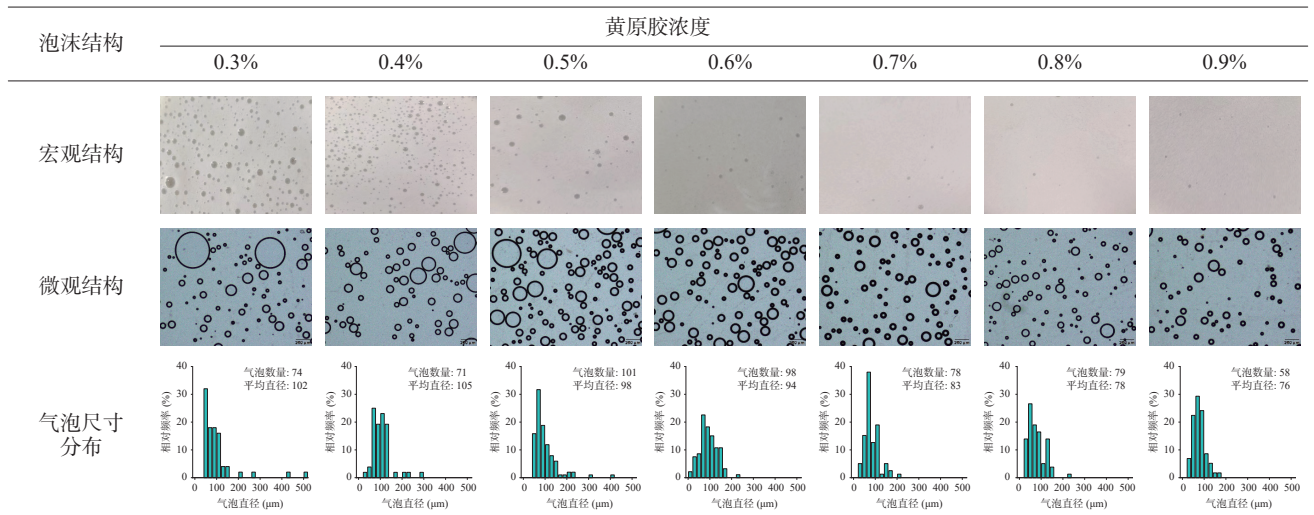


图 3 不同黄原胶浓度下猪血浆蛋白-黄原胶含水泡沫的结构及气泡尺寸

Fig.3 Structure and bubble size of porcine plasma protein-xanthan gum aqueous foam at different xanthan gum concentrations

减少。此现象有利于形成可吸油的冷冻泡沫凝胶网络结构。另外,单位体积内的气泡数量随着黄原胶浓度的增加呈现先增加后逐渐降低的趋势,且在黄原胶浓度为 0.6% 时具有较大的单位体积内的气泡数量。此外,随着黄原胶浓度的增加,泡沫体系的气泡尺寸逐渐下降。例如,在黄原胶浓度为 0.3% 时,气泡平均尺寸为 102 μm ,当黄原胶浓度增加到 0.9% 时,气泡平均尺寸减小为 76 μm 。Denkov 等^[34]指出随着表观粘度的增加,液相对气相组分的容纳速率及能力降低,导致泡沫尺寸减小。这与前面表观粘度的结果一致。

2.4 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶微观结构的影响

当含水泡沫经过真空冷冻干燥后,液体从冰转化为水蒸气析出,形成了一种多孔的冷冻泡沫凝胶,这种多孔材料具有不规则的三维网络结构,内部存在着错综复杂的孔隙,而这种多孔的结构赋予了冷冻泡沫凝胶吸取液态油并将其截留在内部的能力^[35]。不同黄原胶浓度的猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶扫描电镜图如图 4 所示。当黄原胶浓度较低(0.3%~0.4%)时,冷冻泡沫凝胶内部空隙较大,排列无序。

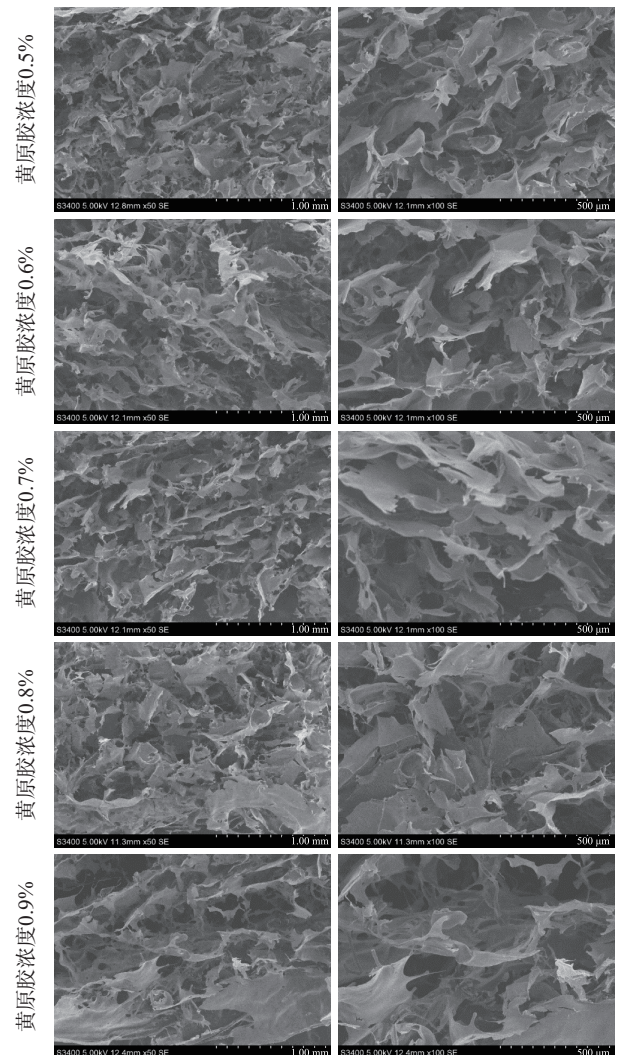
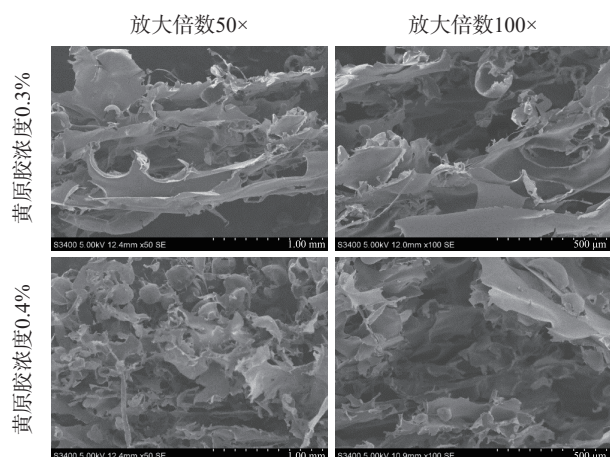


图 4 不同黄原胶浓度的猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶扫描电镜

Fig.4 Scanning electron microscopy of porcine plasma protein-xanthan gum cryogel at different xanthan gum concentrations

这是由于含水泡沫体系内气泡尺寸较大,内部存在大量的空气,冻干去除水分后导致冷冻泡沫凝胶内部有着较大的空洞。如图 5 所示,随着黄原胶浓度的增

加(0.5%~0.7%),此时冷冻泡沫凝胶孔隙率较高,冷冻泡沫凝胶内部排列有序且整体孔隙较为致密,孔洞清晰可见,能够较好地将液态油捕获在内部结构中。然而,当黄原胶浓度为0.8%和0.9%时,由于含水泡沫体系中气泡数量较少,冻干后形成的网络结构孔隙较少,孔隙率逐渐降低至29.58%。

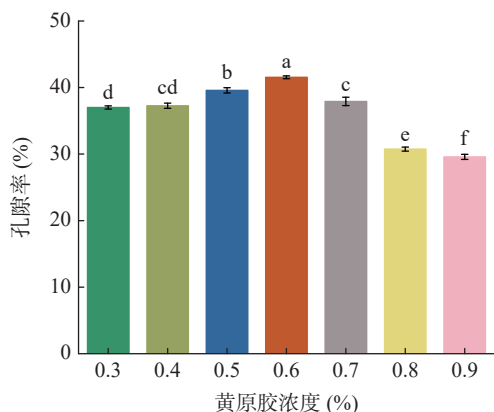


图5 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶孔隙率的影响

Fig.5 Effect of xanthan gum concentration on porosity of porcine plasma protein-xanthan gum cryogel

2.5 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶吸油能力及油约束能力的影响

冷冻泡沫凝胶的吸油能力由许多因素决定,包括聚合物网络的密度、聚合物的结构以及油的极性^[36]。如图6A所示,随着黄原胶浓度的增加,猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶的吸油能力呈现先增大后减小的趋势,且在黄原胶浓度为0.6%时,冷冻泡沫凝胶具有最高的吸油能力(46.43±0.64 g/g)($P < 0.05$)。这是由于孔隙越多,比表面积越大,油与冷冻泡沫凝胶表面产生的吸附力相互作用,使油稳定地被吸附在冷冻泡沫凝胶内^[37]。这与其微观结构的结果是一致的。然而,当黄原胶浓度较高时,如图5所示,猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶孔隙率显著降低($P < 0.05$),从而使能够容纳液态油的体积显著降低,导致吸油能力降低。

油约束能力能够反映冷冻泡沫凝胶对液态油的约束强度。在吸油过程中,驱动液态油进入孔隙内部的主要是毛细管作用力。毛细管作用力越强,冷冻泡沫凝胶对油的约束能力越强。而孔隙大小是决定毛细管作用力的重要因素。因此,吸附强度与孔隙大小成反比^[38]。如图6B所示,随着黄原胶浓度的增加,猪血浆蛋白-黄原胶基冷冻泡沫凝胶的油约束能力呈现逐渐增大的趋势,且在黄原胶浓度为0.9%时,冷冻泡沫凝胶具有最高的油约束能力。在低黄原胶浓度下,猪血浆蛋白-黄原胶含水泡沫由于其内部大气泡较多,冻干形成的孔隙较大,网络结构最为松散,在离心过程中有较多的液态油析出,油约束能力最弱。随着黄原胶浓度的逐渐增大,气泡尺寸逐渐减小,冻干形成孔隙逐渐减小,从而导致油约束能力逐渐增大。

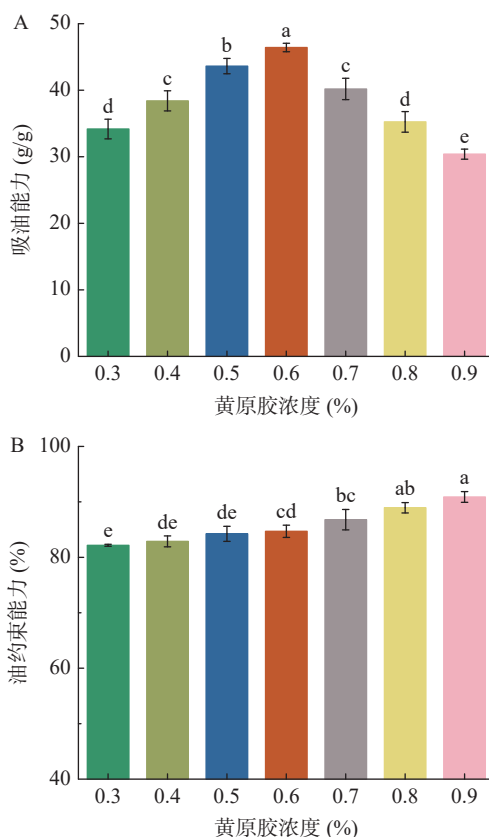


图6 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶吸油能力及油约束能力的影响

Fig.6 Effect of xanthan gum concentration on oil absorption capacity and oil restraint ability of porcine plasma protein-xanthan gum cryogel

2.6 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶吸油动力学的影响

黄原胶浓度对不同时间猪血浆蛋白-黄原胶冷冻泡沫凝胶吸油量变化的影响如图7A所示,在吸油的初始阶段(0~20 s),冷冻泡沫凝胶吸油量迅速增加,吸油速率较高。随着吸油时间的继续增加,吸油速率逐渐下降,吸油量缓慢增加。当吸油量达到饱和时(40 s后),吸油量及吸油速率几乎不随时间改变。

LDF模型将冷冻泡沫凝胶的剩余吸油量($Q_m - Q_t$)与时间(t)建立函数关系,用吸附系数k建立变量间的相关性。如图7B所示,前20 s的曲线斜率显示,添加0.6%黄原胶形成的冷冻泡沫凝胶具有较高的吸附速度。一般来说,孔隙度越高,吸附速率越高^[39]。黄原胶的添加导致猪血浆蛋白-黄原胶冻泡沫凝胶的内部网孔较小且密集,在单位时间内可以吸附更多的液态油,导致冷冻泡沫凝胶的吸收油的速率增加。然而,当黄原胶浓度过高时,由于其内部孔隙较少,冷冻泡沫凝胶内部主体为猪血浆蛋白-黄原胶的聚合结构,液态油进入孔隙的速度减慢,其吸附速率降低^[40]。另外,不同黄原胶浓度冷冻泡沫凝胶的吸附系数如由表1所示。结果显示,黄原胶浓度为0.6%时形成的冷冻泡沫凝胶具有较高的k值,也能够证明其具有较快的吸附速率。因此,LDF模型较为清晰地描述了冷冻泡沫凝胶在不同时间段内油吸收过程,侧面印证吸附速率与剩余吸油量($Q_m - Q_t$)有关。

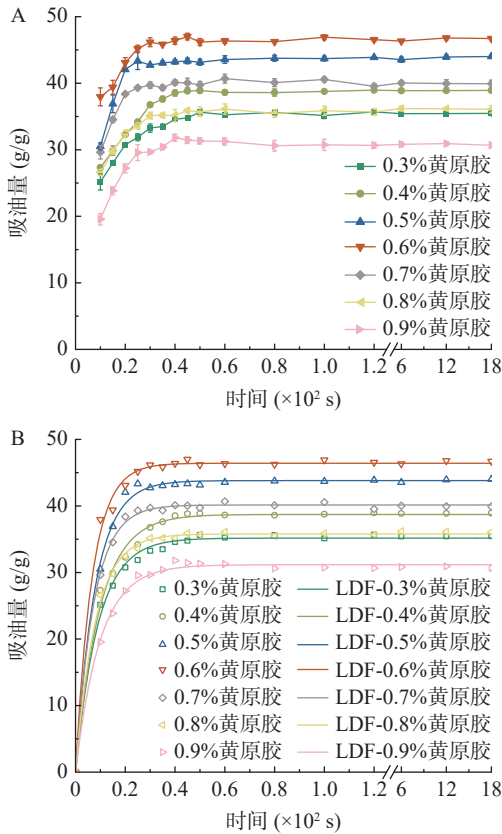


图 7 不同时间冷冻泡沫凝胶的吸油量变化及 LDF 模型拟合曲线

Fig.7 Change of oil absorption and fitting curve of LDF model of cryogel at different time

表 1 黄原胶浓度对吸油动力学参数的影响

Table 1 Effect of xanthan gum concentration on dynamic parameters of oil absorption

黄原胶浓度(%)	Q_m (g)	k (s ⁻¹)	R^2
0.3	35.1694±0.2069	0.1104±0.0042	0.9940
0.4	38.7222±0.2778	0.1032±0.0045	0.9915
0.5	43.8095±0.1991	0.1271±0.0043	0.9962
0.6	46.4221±0.2395	0.1495±0.0067	0.9946
0.7	40.1483±0.1225	0.1366±0.0032	0.9982
0.8	35.7927±0.1303	0.1257±0.0033	0.9975
0.9	31.1638±0.1670	0.1020±0.0033	0.9954

2.7 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶热稳定性的影响

油凝胶的热稳定性通常是在较高温度下通过评估样品的油约束能力来确定。如表 2 所示,随着温度的升高,猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶的油约束能力呈现逐渐下降的趋势($P<0.05$)。这可能是由于在加热处理油凝胶时,油凝胶原有的网络结构被破坏甚至崩溃,使其无法像常温状态下一样捕获液态油,降低其油约束能力^[25]。同时,温度的升高导致液体油粘度降低^[41],使液体油更易从网孔结构中析出,降低其油约束能力。Li 等^[42]通过对纳米纤维素基核桃油凝胶的热稳定性进行研究,发现油凝胶在低温条件下能够保持着较好的油约束能力;当温度加热至 90 °C 时则出现了相对明显的“漏油”现象,这与本文的研究

结果基本一致。此外,随着黄原胶浓度的增加,猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶的油约束能力逐渐增强($P<0.05$),说明黄原胶的添加能够增强猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶的热稳定性。此结果与常温下油凝胶的油约束能力一致。

表 2 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶热稳定性的影响

Table 2 Effect of xanthan gum concentration on thermal stability of porcine plasma protein-xanthan gum oleogel

黄原胶浓度(%)	油约束能力(%)		
	40 °C	60 °C	80 °C
0.3	81.79±0.93 ^{Ab}	77.11±1.78 ^{Bb}	71.35±1.46 ^{Cb}
0.4	82.87±1.60 ^{Ab}	79.91±1.79 ^{Bab}	74.10±3.71 ^{Cab}
0.5	82.68±3.59 ^{Ab}	79.25±1.87 ^{Bab}	74.07±3.28 ^{Cab}
0.6	83.24±0.81 ^{Ab}	82.45±4.00 ^{ABa}	76.57±2.16 ^{Bab}
0.7	85.03±3.84 ^{Aab}	83.36±1.39 ^{Aa}	77.25±1.59 ^{Bab}
0.8	84.77±1.59 ^{Aab}	82.68±2.32 ^{Aa}	77.44±2.98 ^{Ba}
0.9	88.38±0.78 ^{Aa}	83.30±1.50 ^{Ba}	77.80±3.42 ^{Ca}

注:不同大写字母表示同一黄原胶浓度不同温度样品之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一温度不同黄原胶浓度样品之间差异显著($P<0.05$)。

2.8 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶流变特性的影响

猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶的应变扫描曲线如图 8A、B 所示。在整个应变扫描范围内,随着应变从 0.01% 增加到 10%, G' 始终大于 G'' ,说明油凝胶呈现弹性固体行为。在 10%~100% 的应变范围内, G' 与 G'' 产生交点, $G''>G'$,表明油凝胶在较高应变范围内存在着液态行为。此外,在应变由 0.01% 增加到 0.1% 的范围内, G' 变化范围较小,可以将其定义为猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶的线性粘弹区间。随着黄原胶浓度的增加, G' 值增加。此结果说明油凝胶中猪血浆蛋白-黄原胶聚合物结构增加了油凝胶的强度,油凝胶的固体行为增加,这是由于较小的孔隙提供了较大的毛细管作用力来约束油,使油凝胶结构强度增加。

猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶的频率扫描曲线如图 8C、D 所示,在整个频率扫描过程中, G' 呈现上升的趋势,呈现典型的频率依赖行为。对于 G'' 而言, G'' 在频率扫描初期呈现略微下降的趋势,在随后的频率扫描过程中, G'' 呈现上升的趋势,同样呈现出典型的频率依赖行为。随着黄原胶浓度的增加, G' 和 G'' 逐渐增大,说明黄原胶添加增强油凝胶内部网络结构,导致机械强度和固体行为增加。

猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶的温度扫描曲线如图 8E、F 所示,随着温度的升高, G' 和 G'' 呈现缓慢下降的趋势。温度的升高可能会使猪血浆蛋白-黄原胶聚合物网络中的分子内和分子间氢键发生削弱,使油凝胶的结构软化,降低油凝胶的弹性,增加其流动性。同时,较高浓度黄原胶的油凝胶样品随着温度升高仍能保持较高的 G' 和 G'' ,也能够侧面印证其浓度较高时较强的热稳定性。此结果与前面油凝胶的热稳定性结果一致。

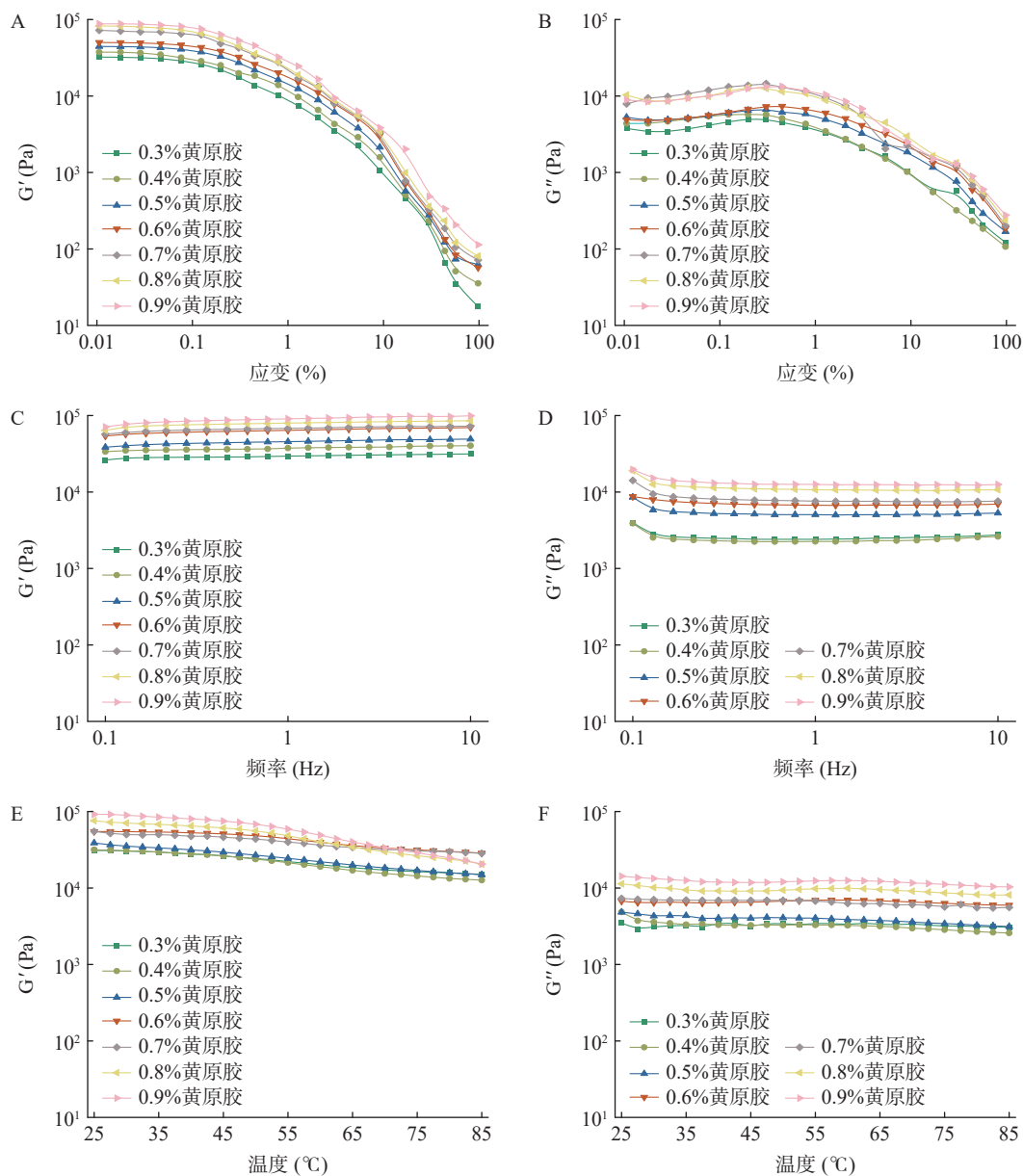


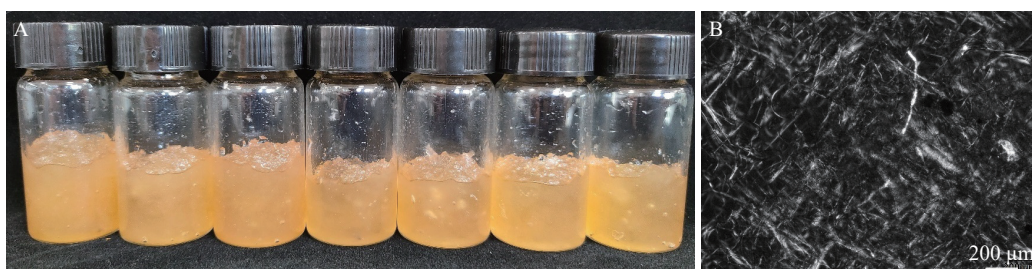
图8 不同黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶流变学行为的影响

Fig.8 Effect of different concentrations of xanthan gum on the rheological behavior of porcine plasma protein-xanthan gum oleogel
注: 应变扫描(A、B); 频率扫描(C、D); 温度扫描(E、F)。

2.9 黄原胶浓度对猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶微观结构的影响

不同黄原胶浓度的油凝胶的宏观与微观结构如图9所示。宏观结构表明所有黄原胶浓度下,猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶均具有较为明显的固体行为。偏光显微镜是用于研究透明与不透明各向异性材料的一种显微镜,利用光的偏振特性对具有双折射

性物质进行研究^[43]。不同黄原胶浓度的油凝胶的偏光显微微观结构如图9所示,冷冻泡沫凝胶内部在吸收液体油之后仍保持着较紧密的网络结构。随着黄原胶的浓度增加,结晶网络呈现先逐渐致密后逐渐疏松的趋势,与冷冻泡沫凝胶微观结构基本一致。这种结晶网络结构可以束缚液体油,但其内部仍存在着油的缓慢流动。



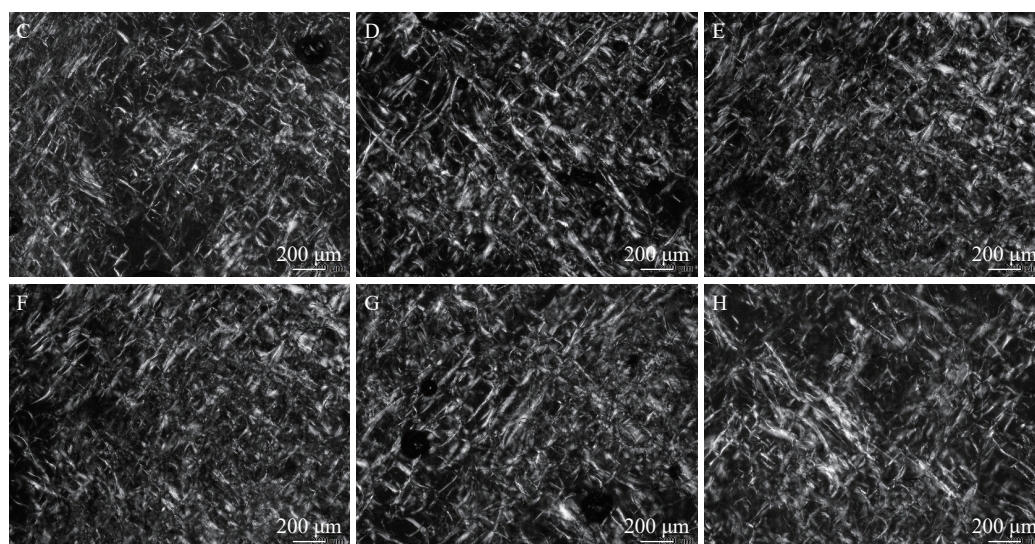


图 9 不同黄原胶浓度的油凝胶的宏观与微观结构

Fig.9 Macroscopic and microscopic structures of oleogel with different xanthan gum concentrations

注: A 为猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶样品宏观图像, B~H 为添加 0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9% 黄原胶的猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶的偏光显微图像。

3 结论

本文以猪血浆蛋白和黄原胶为原料, 采用泡沫模板法经过均质充气、真空冷冻干燥以及吸油过程成功制备出猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶。黄原胶的添加显著改善猪血浆蛋白-黄原胶溶液体系的泡沫稳定性, 从而能够更好地改善含水泡沫的气泡均匀度。经过冷冻干燥后能够形成具有轻质高吸油能力的冷冻泡沫凝胶, 凝胶内部排列有序且整体孔隙较为致密, 能够较好地将液态油捕获在内部结构中, 形成网络结构致密、油约束能力强的油凝胶。然而, 黄原胶过量添加则会导致冷冻泡沫凝胶内部孔隙较少, 降低油凝胶的吸油能力。当黄原胶的添加量为 0.6% 时具有最强的吸油能力, 且形成的油凝胶具有较优良的热稳定性。综上所述, 利用泡沫模板法制备的猪血浆蛋白-黄原胶基油凝胶为新型油凝胶的开发提供新思路, 可以作为固体脂肪的替代品为低脂肉制品的开发提供一定的理论基础。

© The Author(s) 2024. 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] BREWER M S. Reducing the fat content in ground beef without sacrificing quality: A review[J]. *Meat Science*, 2012, 91(4): 385-395.
- [2] 董学文, 张苏苏, 李天宇, 等. 脂肪替代物在肉制品中应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(6): 1961-1966. [DONG X W, ZHANG S S, LI D Y, et al. Research progress of the application of fat substitutes in meat products[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2017, 8(6): 1961-1966.]
- [3] 屠用利. 食品中的脂肪替代物[J]. *食品工业*, 2000, 21(3): 17-19. [TU Y L. Fat replacers in foods[J]. *Food Industry*, 2000, 21(3): 17-19.]

- [4] 张发玲, 梁艳, 李桂华, 等. 变性淀粉在低温火腿中应用研究[J]. *山东轻工业学院学报*, 2013, 27(4): 22-25. [ZHANG F L, LIANG Y, LI G H, et al. Application research on modified starch in the low-temperature ham[J]. *Journal of Shandong Polytechnic University*, 2013, 27(4): 22-25.]
- [5] PEHLIVANOĞLU H, DEMIRCI M, TOKER O S, et al. Oleogels, a promising structured oil for decreasing saturated fatty acid concentrations: Production and food-based applications[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(8): 1330-1341.
- [6] MARYAM M, SOLTANIZADEH N, GOLI S. Production of sesame oil oleogels based on beeswax and application as partial substitutes of animal fat in beef burger[J]. *Food Research International*, 2018, 108(6): 368-377.
- [7] BLAKE A I, MARANGONI A G. Plant wax crystals display platelet-like morphology[J]. *Food Structure*, 2015, 3: 30-34.
- [8] PALLA C, VICENTE J D, CARRIN M E, et al. Effects of cooling temperature profiles on the monoglycerides oleogel properties: Arheo-microscopy study[J]. *Food Research International*, 2019, 125: 108613.
- [9] MOSCHAKIS T, PANAGIOTPOLOU E, KATSANIDIS E. Sunflower oil organogels and organogel-in-water emulsions (part I): Microstructure and mechanical properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 73: 153-161.
- [10] WOLFER T L, ACEVEDO N C, PRUSA K J, et al. Replacement of pork fat in frankfurter-type sausages by soybean oil oleogels structured with rice bran wax[J]. *Meat Science*, 2018, 145: 352-362.
- [11] OKONKWO C E, OFOEDU C E, HUSSAIN S Z, et al. Application of biogels for bioactives delivery: Recent developments and future research insights[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2(2): 100238.
- [12] SCHOLTEN E. Edible oleogels: How suitable are proteins as a structurant?[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2019, 27: 36-42.
- [13] 曹振宇, 刘泽龙, 张慧娟. 食用植物油脂凝胶化技术研究进展[J]. *中国油脂*, 2019, 44(8): 57-64. [CAO Z Y, LIU Z L, ZHANG H J. Advance in technology of edible vegetable oil-gelling[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(8): 57-64.]

- [14] PATEL A R, SCHATTEMAN D, LESAFFER A, et al. Foam-templated approach for fabricating organogels using a water-soluble polymer[J]. *RSC Advances*, 2013, 3(45): 22900–22903.
- [15] 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*, 2013, 117: 1772–1781.
- [16] WEI F L, LU M W, LI J Z, et al. Construction of foam-templated oleogels based on rice bran protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107245.
- [17] MARYAM A, SAYED A, HOSSEIN G, et al. Physicochemical properties of foam-templated oleogel based on gelatin and xanthan gum[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2020, 122: 1900196.
- [18] 张立娟, 孔保华, 刘骞. 环境条件对猪血浆蛋白功能性质影响的研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(11): 37–42. [ZHANG L J, KONG B H, LIU Q. Effect of environmental conditions on functional properties of porcine plasma protein[J]. *Food Science*, 2009, 30(11): 37–42.]
- [19] SINGHVI G, HANS N, SHIVA N, et al. Natural polysaccharides in drug delivery and biomedical applications[M]. Academic Press, 2019: 121–144.
- [20] GUO J J, ZHOU Y H, YANG K, et al. Effect of low-frequency magnetic field on the gel properties of pork myofibrillar proteins [J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 775–781.
- [21] WANG J, ZHAO D, SHANG K, et al. Ultrasoft gelatin aerogels for oil contaminant removal[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2016, 4(24): 9381–9389.
- [22] JIANG Q B, DU L Y, LI S Y, et al. Polysaccharide-stabilized aqueous foams to fabricate highly oil-absorbing cryogels: Application and formation process for preparation of edible oleogels [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106901.
- [23] MOSQUERA M J, RIVAS T, PRIETO B, et al. Capillary rise in granitic rocks: Interpretation of kinetics on the basis of pore structure[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, 222(1): 41–45.
- [24] FAYAZ G, GOLI S A H, KADIVAR M. A novel propolis wax-based organogel: Effect of oil type on its formation, crystal structure and thermal properties[J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2016, 94(1): 47–55.
- [25] PHOON P Y, HENRY C J. Fibre-based oleogel: Effect of the structure of insoluble fibre on its physical properties[J]. *Food and Function*, 2020, 11: 1349–1361.
- [26] BRITO O T C, BISPO M, MORAES I, et al. Stability of curcumin encapsulated in solid lipid microparticles incorporated in cold-set emulsion filled gels of soy protein isolate and xanthan gum[J]. *Food Research International*, 2017, 102: 759–767.
- [27] 黄飞飞, 张孝, 何小龙, 等. 改性羟丙基瓜尔胶/表面活性剂复合压裂液[J]. *精细化工*, 2020, 37(11): 2356–2362. [HUANG F F, ZHANG X, HE X L, et al. Modified hydroxypropyl guar/surfactant based fracturing fluid[J]. *Fine Chemicals*, 2020, 37(11): 2356–2362.]
- [28] LONG Z, ZHAO M M, ZHAO Q Z, et al. Effect of homogenization and storage time on surface and rheology properties of whipping cream[J]. *Food Chemistry*, 2012, 131: 748–753.
- [29] WYATT N B, LIBERATORE M W. Rheology and viscosity scaling of the polyelectrolyte xanthan gum[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 114(6): 4076–4084.
- [30] CROGUENNEC T, RENAULT A, BEAUFILS S, et al. Interfacial properties of heat-treated ovalbumin[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 315: 627–636.
- [31] JEON S, HEINZ U. Introduction to hydrodynamics[J]. *International Journal of Modern Physics E*, 2015, 24(10): 1530010.
- [32] MURRAY B S, ETTELAIE R. Foam stability: Proteins and nanoparticles[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2004, 9(5): 314–320.
- [33] MORENO S Á, MADDALENA T, FRATERS A, et al. Coalescence of diffusively growing gas bubbles[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 846: 143–165.
- [34] DENKOV N, TCHOLAKOVA S, CHOLAKOVA D. Surface phase transitions in foams and emulsions[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2019, 44: 32–47.
- [35] MEMIC A, COLOMBANI T, EGGERMONT L J, et al. Latest advances in cryogel technology for biomedical applications[J]. *Advanced Therapeutics*, 2019, 2(4): 12–17.
- [36] JABERI R, NIA A P, NAJI-TABASI S, et al. *M. heological* and structural properties of oleogel base on soluble complex of egg white protein and xanthan gum[J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51(6): 925–936.
- [37] 赵振国. 吸附作用应用原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. [ZHAO Z G. Application principle of adsorption[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.]
- [38] KHOSRAVI M, AZIZIAN S. A new kinetic model for absorption of oil spill by porous materials[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2016, 230: 25–29.
- [39] BAL K, FAN J, SARKAR M K, et al. Differential spontaneous capillary flow through heterogeneous porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(13–14): 3096–3099.
- [40] TALIMI V, THODI P, ABDI M A, et al. Enhancing harsh environment oil spill recovery using air floatation system[J]. *Safety in Extreme Environments: People, Risk and Security*, 2020, 2(2): 27–37.
- [41] 史宝萍, 王迎春, 逯宝娣, 等. 几种有机液体粘度与温度关系的研究[J]. *太原科技大学学报*, 2007, 28(6): 500–503. [SHI B P, WANG Y C, LU B D, et al. Coupled numerical simulation of flow field and temperature field for molten steel in beam blank continuous casting mold[J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2007, 28(6): 500–503.]
- [42] LI X F, GUO G S, ZOU Y X, et al. Development and characterization of walnut oleogels structured by cellulose nanofiber[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 142: 108849.
- [43] LI M, XIA Y, WANG L Q. The application of PLM and RM in the pigment identification analysis on the polychrome relics[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2013, 25(3): 268–275.