

牡丹籽油-枇杷汁爆珠的工艺优化研究

郭少莉, 张林奕, 谢立梅, 张宁宁*
(福建农林大学食品科学学院, 福建 福州 350000)

摘要: 为促进牡丹籽油以及枇杷的有效利用, 采用牡丹籽油和枇杷汁作为芯材, 利用海藻酸钠和乳酸钙的交联反应, 通过反向成球技术对芯材进行包埋以制备牡丹籽油-枇杷汁爆珠。通过单因素试验以研究海藻酸钠-低酯果胶复合溶液的浓度、乳酸钙添加量、黄原胶添加量、成球反应时间、壳聚糖固化液浓度5个主要因素对爆珠质构的影响, 在此基础上通过正交试验优化爆珠的成球工艺配方; 制备成爆珠后以感官评分为主要评判标准, 确定牡丹籽油、薄荷香精的添加量, 以此优化出牡丹籽油-枇杷汁爆珠的最佳风味配方。结果表明, 制备爆珠的最佳工艺及配方为: 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度为1.2%(w/w), 乳酸钙浓度为1.9%(w/w), 黄原胶浓度为0.8%(w/w), 成球反应时间为10 min, 壳聚糖固化液浓度为0.1%(w/w), 牡丹籽油添加量为1.0%(w/w), 薄荷香精的添加量为1.1%(w/w), 枇杷汁的添加量为95.2%(w/w)。该条件下制成的牡丹籽油-枇杷汁爆珠质构性能佳, 外观呈淡黄色, 圆润饱满, 咀嚼时爆浆感十足。

关键词: 爆珠; 牡丹籽油; 枇杷汁; 反向成球技术; 质构特性

中图分类号: TS 275.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-9989(2024)01-0064-08
DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2024.01.012

Optimization on Technology of Peony Seed Oil-Loquat Juice Hydrogel Bursting Beads

GUO Shaoli, ZHANG Linyi, XIE Limei, ZHANG Ningning*

(College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350000, China)

Abstract: In order to effectively utilize peony seed oil and loquat, peony seed oil and loquat juice were used as core materials, and the cross-linking reaction of sodium alginate and calcium lactate was used to prepare peony seed oil-loquat juice bursting beads. Single factor experiments were conducted to study the effects of five main factors on the texture of bursting beads: the concentration of sodium alginate-low ester pectin complex solution, the addition of calcium lactate, the addition of xanthan gum, pellet forming reaction time and the concentration of chitosan curing solution. On this basis, an orthogonal experiment

收稿日期: 2023-05-30

*通信作者

基金项目: 福建食品工业科技经济融合服务平台项目(KJG20006A)。

作者简介: 郭少莉(1999—), 女, 福建漳州人, 硕士研究生, 研究方向为食品科学与工程。

was used to optimize the pellet forming process formula of bursting beads. The amount of peony seed oil and peppermint flavor was determined by sensory score, so as to optimize the best flavor formula of peony seed oil-loquat juice bursting beads. The results showed that the best technology and formula for preparing bursting beads were: the concentration of sodium alginate and low ester pectin composite solution was 1.2% (w/w), calcium lactate was 1.9% (w/w), xanthan gum was 0.8% (w/w), pelleting reaction time was 10 min, the concentration of chitosan curing solution was 0.1% (w/w), and the amount of peony seed oil was 1.0% (w/w), the content of peppermint flavor was 1.1% (w/w) and loquat juice was 95.2% (w/w). The peony seed oil-loquat juice bursting beads made under these conditions has good texture, light yellow appearance, round and full, and bursting sensation during chewing.

Key words: bursting beads; peony seed oil; loquat juice; reverse pelleting technique; texture property

0 引言

牡丹籽油以牡丹籽仁为原料, 经过压榨、过滤等处理工艺制作而成。牡丹籽油中不饱和脂肪酸含量高达85%以上, 其中又以 α -亚麻酸含量最高, 可达43%^[1], 还含有亚油酸、亚麻酸、牡丹多糖等多种生理活性物质, 具有降低胆固醇、降低血脂、增强免疫力、调节脂肪代谢等多种生理功能^[2]。此外, 牡丹籽油中还含有多种人体所需的微量元素, 如Ca、Na、Fe等。因此, 牡丹籽油是一种具有高价值的、可有效利用的天然油料资源。

枇杷是中国南方的特产时令水果, 特点是果肉柔嫩、果汁丰富、酸甜适口, 备受大众喜爱。枇杷具有润肺、止咳的功效, 但其收获期短、保鲜困难、不耐运输, 给新鲜枇杷的销售带来困难, 造成原料浪费, 利润不达预期^[3]。因此, 研究枇杷深加工, 通过对其营养资源的提取和利用, 以提升枇杷产品附加值, 达到促进枇杷经济发展的目的。

近年来, 随着大众健康饮食观念的树立, 越来越多的消费者开始关注食品的营养价值。牡丹籽油与枇杷属于健康绿色食品, 内含多种生物活性物质。这些生物活性物质虽然可以影响生命调节, 但其本身化学稳定性差、溶解性差, 在食品加工过程中易损失, 因此生物有效性低^[4]。为了有效解决这一问题, 不少学者正在研究递送生物活性物质的新方法, 如运用微胶囊技术制备益生菌微胶囊以保护益生菌活性^[5]。此外, FAN S J等^[6]研究了利用可食用植物中的细胞外囊泡保护siRNAs和促进药物转运的应用; TAN C等^[7]研究了酵母细胞作为递送载体的可行性和未来发展; 张晶晶等^[8]研究了运用多糖经美拉德反应修饰的

酪蛋白递送体系以提高生物活性物质在极端pH值环境下的稳定性。而生物凝胶^[9]作为一种可提供生物相容性^[10]、生物可降解、无毒的食品生物活性材料, 为递送生物活性物质提供了新的研究方向。如海藻酸盐制成的水凝胶珠已被广泛用于制药、生物技术及食品技术领域^[11]。王玉涵等^[12]通过此方法制备了包埋益生菌的功能爆珠, 保护益生菌活性; 杨钰昆等^[13]、倪芳芳等^[14]分别制备了包埋连翘叶、姜黄素的爆珠; TSAI F H等^[11]应用此技术制备萝卜藻酸盐水凝胶珠, 可以改善相关生理活性物质在胃中的稳定性。

本研究采用天然多糖——海藻酸钠与低酯果胶复合, 构成复杂的网络结构, 再与钙离子反应^[15-16], 采用简单温和的物理交联技术形成致密的生物凝胶并制成爆珠^[17], 进而对牡丹籽油进行包埋。应用此方法制作牡丹籽油-枇杷汁爆珠来传递生物活性物质, 以期稳定和保持原料中的生物活性物质, 提高其生物有效性, 也为牡丹籽油和枇杷的进一步开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

海藻酸钠、乳酸钙: 江苏锐康莱科技有限公司; 低酯果胶、黄原胶、壳聚糖: 新疆梅花投资有限公司; 枇杷汁: 绍兴舜耕庄园食品有限公司; 牡丹籽油: 福建瑞璞牡丹籽农业科技发展有限公司; 薄荷香精: 温州市龙威果品香料厂。

1.2 主要仪器与设备

TE313S-DS型电子天平: 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; TMS-Pilot型质构仪: 美国FTC公司; DHG-9123A型电热恒温鼓风干燥箱: 上海精宏实验设备有限公司; HH-4型恒温水浴锅: 上海江星仪器有限公司; 游标卡尺: 烟台市

绿林工具有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 爆珠的制备工艺 图1所示为爆珠制备的工艺流程图。具体的制备流程^[13]如下。

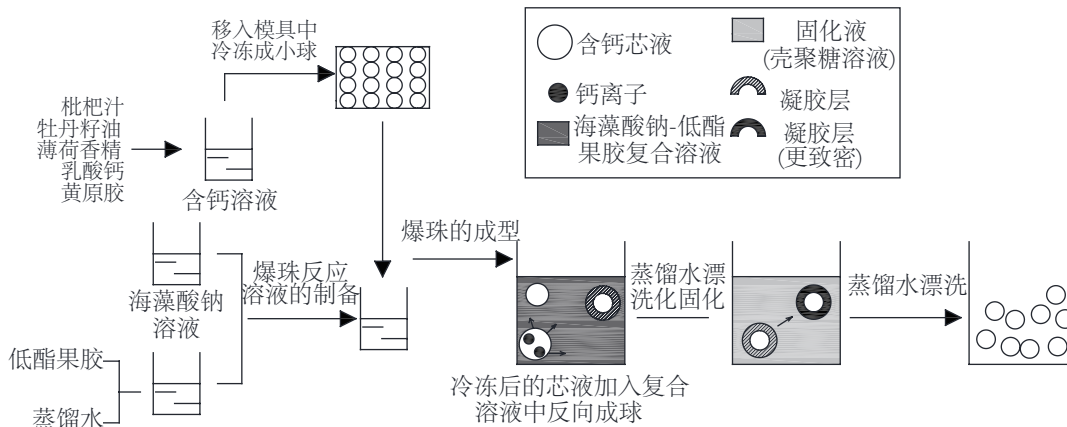


图1 爆珠制备工艺流程图

1.3.1.1 配制交联反应外液 用纯净水分别按比例配制一定浓度的海藻酸钠溶液和低酯果胶溶液。待其充分溶解后，在4℃状态下放置2 h备用。按7:3的质量比将配制成的海藻酸钠溶液与低酯果胶溶液复配，在40℃水浴中加热并充分搅拌混匀，得到海藻酸钠-低酯果胶复合溶液。

1.3.1.2 配制爆珠芯液 将一定量的乳酸钙、黄原胶加入枇杷汁中充分溶解均匀，再加入适量的牡丹籽油、薄荷香精搅拌均匀，静置除泡后得到爆珠芯液。

1.3.1.3 爆珠的成型 用移液枪将芯液移至球形硅胶模具中，于-18℃的冰柜中冷冻4 h以上，得到冷冻小球。将小球放入配制成的复合溶液中，钙离子与胶体分子开始产生交联反应，小球外层逐渐形成一层凝胶膜，一定时间后捞出小球用蒸馏水漂洗，再置于一定浓度的壳聚糖溶液中固化10 min，最后再用蒸馏水漂洗10 min，制得爆珠。

1.3.2 爆珠成球工艺研究

1.3.2.1 单因素试验 根据预试验的结果，选定海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度、乳酸钙添加量、黄原胶添加量、成球反应时间、壳聚糖固化液浓度5个因素作为主要因素，借助单因素试验，研究主要因素对牡丹籽油-枇杷汁爆珠质构特性的影响。

根据表1所示的5个试验组进行单因素试验。按照图1所示工艺流程，每组制备15颗爆珠，采用TMS-Pilot型质构仪，对制得爆珠的硬度、胶黏性、咀嚼性进行测定。设置测定参数为：采用圆柱型探头，测试类型为下压，目标模式为形变，形变量为50%，时间2 s，检测速度为60 mm/min，触发力为0.75 N，力量感应元量程为500 N。每组进行3次试验取平均值。

1.3.2.2 正交试验 根据单因素试验结果，选择海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度、乳酸钙添加量、黄原胶添加量3个因素，每个因素取3个水平进行

表1 单因素试验水平表

| 试验组 | 变量 | 其他因素取值 |
|-----|---|---|
| 1 | 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度 (w/w): 0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4% | 乳酸钙添加量1.7%、黄原胶添加量0.8%、反应时间15 min、壳聚糖固化液浓度0.5% |
| 2 | 乳酸钙添加量(w/w): 1.5%、1.6%、1.7%、1.8%、1.9% | 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度1.2%、黄原胶添加量0.8%、反应时间15 min、壳聚糖固化液浓度0.5% |
| 3 | 黄原胶添加量(w/w): 0.6%、0.7%、0.8%、0.9%、1.0% | 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度1.2%、乳酸钙添加量1.9%、反应时间15 min、壳聚糖固化液浓度0.5% |
| 4 | 成球反应时间(min): 5、10、15 | 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度1.2%、乳酸钙添加量1.9%、黄原胶添加量为0.9%、壳聚糖固化液浓度0.5% |
| 5 | 壳聚糖固化液浓度(w/w): 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% | 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度1.2%、乳酸钙添加量1.9%、黄原胶添加量0.8%、反应时间10 min |

正交试验,以爆珠的硬度作为评判指标。正交试验因素水平设计如表2所示。

表2 正交试验因素水平表

| 水平 | 因素 | | |
|----|--------------------------|-----------------|-----------------|
| | 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度/%(w/w) A | 黄原胶添加量/%(w/w) B | 乳酸钙添加量/%(w/w) C |
| 1 | 1.0 | 0.8 | 1.7 |
| 2 | 1.2 | 0.9 | 1.8 |
| 3 | 1.4 | 1.0 | 1.9 |

1.3.3 牡丹籽油-枇杷汁爆珠配方优化研究 在上述最佳成球工艺基础上,将牡丹籽油、枇杷汁和薄荷香精作为爆珠芯液原料,查阅文献[13],确定爆珠的芯液添加量为400 μ L,枇杷汁作为芯液主原料,是爆珠主要口味的来源,再加入适量的牡丹籽油、薄荷香精以使爆珠风味更加丰富。以感官评价为主要指标,优化牡丹籽油、薄荷香精的添加量。在明确牡丹籽油、薄荷香精的添加量及由正交试验确定乳酸钙、黄原胶的添加量后,芯液中枇杷汁的添加量也随之确定。

1.3.3.1 牡丹籽油添加量对爆珠感官性质的影响

制备牡丹籽油添加量分别为0.9%、1.0%、1.1%、1.2%、1.3%的爆珠,其中薄荷香精添加量为1.0%。通过感官评价小组评分后并取平均值。

表3 爆珠的感官风味评价表

| 项目 | 描述 | 评分 |
|--------|---|-------|
| 气味(15) | 有腥味等不愉快气味 | 1~7 |
| | 无不愉快气味,芯液中存在牡丹籽油、薄荷以及枇杷清香 | 8~15 |
| 颜色(20) | 颜色不均一,浑浊,无光泽 | 1~10 |
| | 颜色均一,芯液呈橘黄色,清亮透彻、有光泽 | 11~20 |
| 外形(20) | 爆珠整体呈不规则球形,有拖尾,芯液有漏出 | 1~7 |
| | 爆珠整体形状扁平,表皮均匀,表面有突起,无明显漏液 | 8~13 |
| | 爆珠整体为球状,挺立饱满,表皮均匀,表面光滑无气泡,芯液无漏出现象 | 14~20 |
| 口感(45) | 外壳无韧性,易破、无爆浆感、芯液流动性差,无特殊风味,味道过甜或过酸,口感不良 | 1~15 |
| | 外壳有韧性,有轻微爆浆感,芯液流动性较好,牡丹籽油风味、薄荷风味过淡或过浓,风味单一,口感一般 | 16~30 |
| | 外壳韧性十足,爆浆感十足,芯液流动性好,牡丹籽油、薄荷香精添加量适当,口味丰富怡人,口感好 | 31~45 |

1.3.3.2 薄荷香精添加量对爆珠感官性质的影响

制备薄荷香精添加量分别为0.8%、0.9%、1.0%、1.1%、1.2%的爆珠,其中牡丹籽油添加量为1.0%。通过感官评价小组评分后并取平均值。

1.3.3.3 感官评定 邀请10名食品专业的学生建立爆珠的感官评价小组,针对制备出的爆珠进行感官评价。根据感官评价的结果确定爆珠中牡丹籽油、薄荷香精的最佳添加量。感官评价标准如表3所示。

1.3.4 牡丹籽油-枇杷汁爆珠与市售爆珠的测定

1.3.4.1 爆珠基本参数的测定

(1)爆珠粒径与膜厚度的测量:用游标卡尺在爆珠的3个不同位置测量直径;然后用针头将爆珠刺破,使其芯液全部流出,再测量爆珠的膜厚度。每组做3个平行,最后取平均值,记录结果。

(2)爆珠的跌落测试:每组随机取10个爆珠,使爆珠在光滑试验台上从10 cm的高度做自由落体运动,爆珠形态无明显变化者为通过,若爆珠变形或破裂为不通过。

1.3.4.2 爆珠脂肪含量的测定 根据GB 5009.6—2016中的索氏提取法测定爆珠中的脂肪含量^[18],并进行数据分析。

1.3.4.3 爆珠还原糖含量的测定 根据GB 5009.7—2016中的直接滴定法测定爆珠中的还原糖含量^[19],并进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 爆珠成球工艺优化

2.1.1 单因素试验结果

2.1.1.1 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度对爆珠质构特性的影响 如图2所示,当海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度在0.6%~1.2%(w/w)时,随着复合溶液浓度的增加,爆珠的硬度、胶黏性及咀嚼性显著提高;当复合溶液浓度为1.2%(w/w)时,爆珠的硬度和胶黏性最高;而当复合溶液的浓度为1.4%(w/w)时,爆珠的咀嚼性最好。这是由于低酯果胶和海藻酸钠分子混合后,分子链间的氢键结合更加紧密所致^[20]。随着复合溶液浓度的增加,海藻酸钠分子和低酯果胶分子的数量增多,因此有更多点位可以与钙离子结合从而使生成的交联结构更加紧密^[13]。制备出的爆珠外观更加光滑饱满,硬度高,爆浆感好,凝胶膜的力学性能也能够提高,即断裂伸长率和含水率均可升高^[20]。但当复合溶液浓度为1.4%(w/w)时,爆

珠的硬度及胶黏性有所下降,这是由于当复合溶液浓度过高时,海藻酸钠浓度大于钙离子浓度,导致芯液无法完全进入复合溶液,芯液表面各部分钙离子与胶体分子间的交联反应不一致,形成的凝胶膜厚度不统一,影响爆珠硬度^[13];且随着海藻酸钠添加量的增加,爆珠的风味也受到影响,出现腥味,凝胶膜变得黏腻,咀嚼感不佳^[12]。综合分析,选定海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度为1.2%(w/w)来制备爆珠。

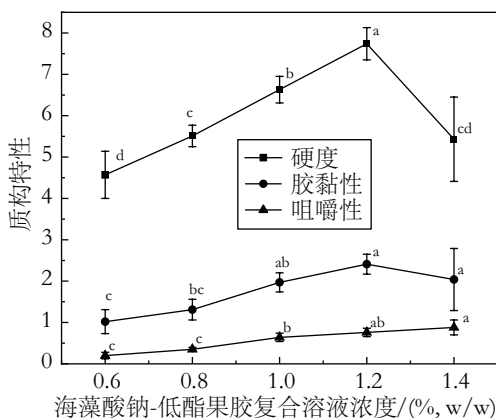


图2 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度对爆珠质构特性的影响

2.1.1.2 乳酸钙添加量对爆珠质构特性的影响 如图3所示,随着乳酸钙添加量上升,爆珠的质构特性显著增强;当乳酸钙添加量为1.9%(w/w)时,爆珠的硬度、胶黏性及咀嚼性均为最高值。这是由于在反应过程中,钙离子与胶体分子间是通过形成“钙桥”^[21]及氢键的共同作用相连接。这种“桥联”模型数量随着钙离子添加量的增加而增加^[22],使得交联结构更加紧密,凝胶层厚度增大,爆珠硬度增加,机械强度也随

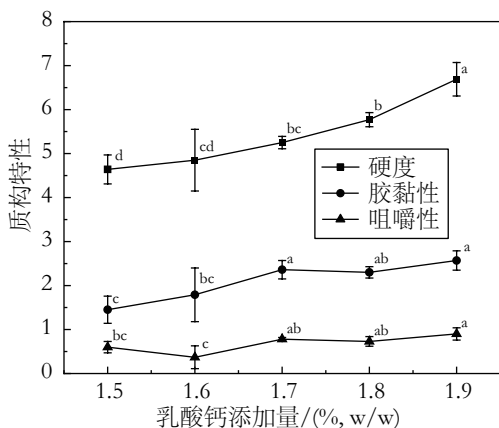


图3 乳酸钙添加量对爆珠质构特性的影响

之增强。由此制备的爆珠外形饱满挺立,有光泽,爆浆感强。因此,选定乳酸钙添加量为1.9%(w/w)以制备爆珠。

2.1.1.3 黄原胶添加量对爆珠质构特性的影响 如图4所示,当黄原胶添加量为0.9%(w/w)时,爆珠的质构特性达到最高。在黄原胶添加量超过0.9%(w/w)后,爆珠的质构特性下降。这是因为加入黄原胶可使芯液增稠,稳定钙离子,使得交联反应稳定进行。故当黄原胶添加量在0.6%~0.9%(w/w)时,爆珠的质构特性显著提高。但黄原胶添加量会影响爆珠芯液中的钙离子量^[22],使得交联反应过程中钙离子与海藻酸钠的比例发生变化。当黄原胶添加量过高时,钙离子浓度降低,从而影响所形成凝胶的机械强度,导致爆珠硬度和咀嚼性下降,形态变得扁平,爆浆感差。当黄原胶添加量为0.9%(w/w)时,制备的爆珠外形饱满,质构特性佳,爆浆感强。因此,选定黄原胶添加量为0.9%(w/w)以制备爆珠。

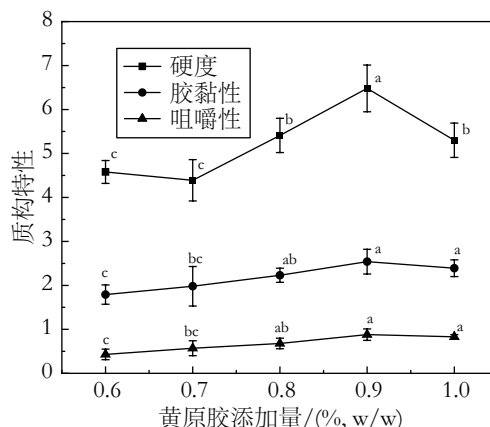


图4 黄原胶添加量对爆珠质构特性的影响

2.1.1.4 成球反应时间对爆珠质构特性的影响 由图5可知,爆珠的硬度、胶黏性及咀嚼性随反应时间的增加而显著增大。图6中从左到右分别是反应时间为5、10、15 min所制得的爆珠,由图6可知爆珠粒径随着反应时间的增加而增大。反应时间为5 min的爆珠,体积较小,整体呈扁平态,硬度低,爆浆感差。这主要是由于反应时间太短,海藻酸钠-低酯果胶分子与钙离子还未充分反应^[20],形成的交联结构不够致密,因此制得的爆珠机械强度低。而反应时间为10、15 min的爆珠粒径较大,整体外观饱满圆润,凝胶强度高,故爆浆感较好。但随着反应时间的延长,所形成的凝胶外

膜厚度增加,凝胶强度更大,而凝胶外膜过硬会降低爆浆感,影响口感。因此,选定反应时间为10 min进行爆珠的制备。

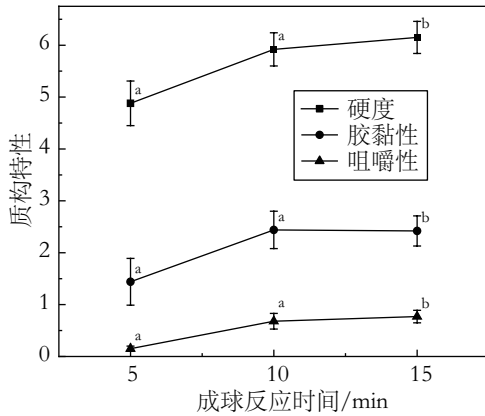


图5 成球反应时间对爆珠质构特性的影响



图6 不同反应时间下制成的爆珠形态

2.1.1.5 壳聚糖固化液浓度对爆珠质构特性的影响

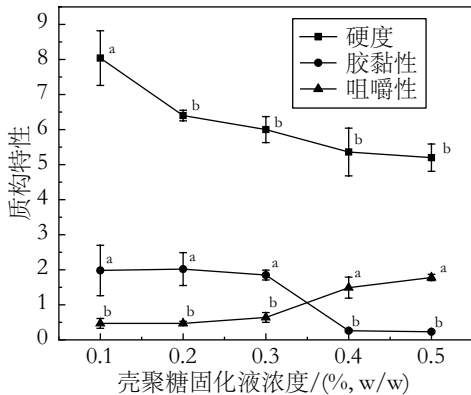


图7 壳聚糖固化液浓度对爆珠质构特性的影响

由图7可知,爆珠的硬度和胶黏性随着壳聚糖固化液浓度的增大而降低,咀嚼性随着浓度的增大而增大。经过壳聚糖溶液固化的爆珠,表面的孔隙率降低,凝胶层结合得更紧密,所以随着壳聚糖溶液浓度的增大,爆珠的咀嚼性增大。爆珠表面的海藻酸钠可以与壳聚糖通过静电相互作用形成聚电解质络合物^[23],并且由于该反应,爆珠被壳聚糖层覆盖。但是海藻酸钠和果胶与Ca²⁺反应形成爆珠后,表面已经形成一层凝胶层,一

定浓度的壳聚糖能使壳聚糖中带正电荷的氨基团渗入到凝胶层与海藻酸盐中带负电的羧基相结合^[24],使凝胶层结合得更紧密,这可以帮助提高爆珠的机械稳定性和渗透性,爆珠的硬度也随之增大。但是,随着壳聚糖浓度的升高,凝胶层无法结合相应的氨基团,制得的爆珠膨胀率增大,导致爆珠的硬度下降。因此,选定壳聚糖固化液浓度0.1%(w/w)进行爆珠的制备。

2.1.2 正交试验结果 根据爆珠制备的单因素试验结果,选定海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度、乳酸钙添加量、黄原胶添加量3个因素,以爆珠的硬度作为评判指标,进行L₉(3⁴)正交试验。正交试验结果如表4、表5所示。

表4 爆珠制备工艺的正交试验结果

| 试验号 | 因素 | | | | 硬度/N |
|----------------|--|-------|-------|-------|------|
| | A | B | C | 空白 D | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4.81 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 5.25 |
| 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 4.98 |
| 4 | 2 | 1 | 3 | 3 | 5.86 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 1 | 6.21 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 6.23 |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 2 | 6.03 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 5.90 |
| 9 | 3 | 3 | 3 | 1 | 6.37 |
| K ₁ | 15.04 | 16.70 | 16.94 | 17.39 | |
| K ₂ | 18.30 | 17.36 | 17.22 | 17.51 | |
| K ₃ | 18.30 | 17.58 | 17.48 | 16.74 | |
| k ₁ | 5.01 | 5.57 | 5.65 | 5.80 | |
| k ₂ | 6.10 | 5.79 | 5.74 | 5.84 | |
| k ₃ | 6.10 | 5.86 | 5.83 | 5.58 | |
| R | 1.09 | 0.29 | 0.18 | 0.26 | |
| 因素主 次顺序 | A>B>C | | | | |
| 最佳 工艺 | A ₂ B ₃ C ₃ | | | | |

利用SPSS 26进行正交试验分析。根据极差分析得出:3个因素中,对爆珠硬度的影响顺序大小为A>B>C,即海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度>黄原胶添加量>乳酸钙添加量。爆珠制备的最佳工艺配方为A₂B₃C₃,即海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度为1.2%(w/w),黄原胶添加量为1.0%(w/w),乳酸钙添加量为1.9%(w/w)。该组合没有出现在正交表中,所以需要进行验证试验,经验证发

现在此条件下制备的爆珠硬度为6.77 N, 高于正交表中的最优组(硬度为6.37 N)。由表5可知, 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液的浓度对爆珠的硬度有显著影响($P < 0.05$), 黄原胶添加量、乳酸钙添加量均对爆珠的硬度无显著影响($P > 0.05$)。

综合考虑后, 适当降低黄原胶添加量以优化爆珠的口感, 故优化后的最佳工艺配方为 $A_2B_1C_3$, 即海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度为1.2%(w/w), 黄原胶添加量为0.8%(w/w), 乳酸钙添加量为1.9%(w/w)。按此工艺制备出的爆珠外观圆润饱满, 有光泽, 外膜厚度均匀, 爆浆感佳。

表5 爆珠的正交试验方差分析

| 方差来源 | III类平方和 | 自由度 | 均方 | F | 显著性 |
|------|---------|-----|-------|--------|-------|
| 因素A | 2.362 | 2 | 1.181 | 20.640 | 0.046 |
| 因素B | 0.140 | 2 | 0.070 | 1.222 | 0.440 |
| 因素C | 0.049 | 2 | 0.024 | 0.425 | 0.702 |
| 误差 | 0.114 | 2 | 0.057 | | |

2.2 牡丹籽油-枇杷汁爆珠配方优化

2.2.1 牡丹籽油添加量对爆珠感官性质的影响 如表6所示, 随着牡丹籽油添加量的增加, 所制爆珠中牡丹籽油的香味增加, 有一定的牡丹芳香, 使爆珠风味变得丰富, 口感更加柔和。但当牡丹籽油的添加量过高时, 会掩盖芯液中枇杷汁的清香风味, 给人以不愉快的感觉, 口感差。根据感官评价结果, 当牡丹籽油添加量为1.0%(w/w)时, 所制的爆珠牡丹籽油风味恰当, 感官评分最高。故确定所制备爆珠中牡丹籽油的添加量为1.0%(w/w)。

表6 牡丹籽油添加量对爆珠感官性质的影响

| 牡丹籽油添加量/(w/w) | 气味 | 颜色 | 口感 | 外观 | 感官总分 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.9 | 11.80 | 15.40 | 16.20 | 34.20 | 78.00 |
| 1.0 | 12.10 | 16.00 | 16.20 | 35.70 | 80.00 |
| 1.1 | 12.40 | 15.80 | 16.50 | 33.10 | 77.80 |
| 1.2 | 11.90 | 15.10 | 15.60 | 34.10 | 77.10 |
| 1.3 | 12.30 | 15.70 | 15.80 | 33.10 | 77.20 |

2.2.2 薄荷香精添加量对爆珠感官性质的影响 如表7所示, 添加薄荷香精后, 爆珠口味变得丰富, 薄荷味与枇杷汁融合, 提升爆珠口味的清新和层次感。但是薄荷香精添加量过高会出现苦涩味, 影响爆珠的感官性质。根据感官评价的结果, 当

薄荷香精的添加量为1.1%(w/w)时, 所制爆珠中的薄荷风味适当, 感官评分最高。故确定所制备爆珠中薄荷香精的添加量为1.1%(w/w), 则芯液中枇杷汁添加量即为95.2%(w/w)。

表7 薄荷香精添加量对爆珠感官性质的影响

| 薄荷香精添加量/(w/w) | 气味 | 颜色 | 口感 | 外观 | 感官总分 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.8 | 9.80 | 14.10 | 15.00 | 29.00 | 67.90 |
| 0.9 | 10.50 | 14.60 | 15.30 | 30.80 | 71.20 |
| 1.0 | 11.60 | 15.30 | 15.80 | 33.10 | 75.80 |
| 1.1 | 12.00 | 16.00 | 17.20 | 34.30 | 79.50 |
| 1.2 | 12.00 | 15.70 | 16.70 | 33.80 | 77.70 |

2.3 牡丹籽油-枇杷汁爆珠与市售爆珠的对比

由表8可知, 牡丹籽油-枇杷汁爆珠的粒径和膜厚度均大于市售的白桃爆珠。爆珠的粒径与芯液的添加量有关, 粒径和膜厚度的比例影响爆珠的爆浆感。爆珠膜的厚度太薄, 咀嚼时溶液漏气, 而太厚则咀嚼感不佳。本研究制得的爆珠和市售爆珠的粒径和膜厚均属于中间水平, 爆浆感好。跌落试验2种爆珠均为通过, 表明两者硬度均较大, 咀嚼性好, 符合大众的口味。在外观方面, 牡丹籽油-枇杷汁爆珠外观圆润, 色泽鲜艳呈现金黄色, 而白桃爆珠颜色为白色, 本研究制得的爆珠使爆珠的颜色种类更为丰富。牡丹籽油-枇杷汁爆珠的脂肪和还原糖含量均比白桃爆珠低, 这为爆珠产品的开发提供了一定的数据参考。

表8 牡丹籽油-枇杷汁爆珠与市售爆珠的对比

| 样品 | 粒径/mm | 膜厚/mm | 跌落试验 | 外观 | 脂肪含量/% | 还原糖含量/% |
|------------|-------|-------|------|---------|--------|---------|
| 牡丹籽油-枇杷汁爆珠 | 9.61 | 0.97 | 通过 | 金黄色、圆球状 | 0.84 | 4.03 |
| 白桃爆珠 | 9.21 | 0.72 | 通过 | 白色、圆球状 | 0.9 | 6.21 |

3 结论

本研究利用海藻酸钠和乳酸钙的交联反应, 应用反向成球技术, 以及物理交联技术对牡丹籽油中的营养成分进行包埋, 以此制备爆珠。通过海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度、乳酸钙添加量、黄原胶添加量、成球反应时间以及壳聚糖固化液浓度5个因素的单因素试验以及前3个因素的正交试验, 得到牡丹籽油-枇杷汁爆珠的最佳成球工艺配方为: 海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度



1.2%(w/w), 乳酸钙添加量1.9%(w/w), 黄原胶添加量0.8%(w/w), 成球反应时间10 min, 壳聚糖固化液浓度0.1%(w/w)。通过感官评价试验确定爆珠的最佳风味配方, 即: 芯液中牡丹籽油添加量为1.0%(w/w)、薄荷香精添加量为1.1%(w/w)、枇杷汁添加量为95.2%(w/w)。研究制备出的爆珠粒径适中, 外观饱满有光泽, 口感丰富弹性好, 爆浆感十足, 适合作为软饮料配料、甜品配料使用, 具有一定的市场价值。同时, 该爆珠作为新型牡丹籽油产品, 为牡丹籽油的开发和利用提供了依据和新思路, 为牡丹籽油、枇杷的深加工提供了一定的技术参考。

参考文献:

- [1] 乔舒敏, 王悦, 吴澎. 牡丹籽油的研究进展[J]. 中国果菜, 2023, 43(2): 24-29.
- [2] 朱文学, 李欣, 刘少阳, 等. 牡丹籽油的毒理学研究[J]. 食品科学, 2010, 31(11): 248-251.
- [3] 胡翎翎, 马春跃. 天然枇杷汁饮料的开发研制[J]. 食品科学, 1996, 17(12): 48-50.
- [4] 常雨, 郑逸梅, 罗碧英, 等. 食品级共价复合物在递送生物活性物质方面的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 389-399.
- [5] 高向新, 陈永福, 乌斯嘎勒. 益生菌微胶囊的制备及其在食品中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 19-28.
- [6] FAN S J, CHEN J Y, TANG C H, et al. Edible plant extracellular vesicles: an emerging tool for bioactives delivery[J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 13: 11028418.
- [7] TAN C, HUANG M G, MCCLEMENTS D J, et al. Yeast cell-derived delivery systems for bioactives[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118(PA): 362-373.
- [8] 张晶晶, 李艾黎, 程金菊. 美拉德反应修饰的酪蛋白递送生物活性物质的应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 316-325.
- [9] 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(8): 1-23.
- [10] 刘凯, 刘文林, 鞠显豪, 等. 基于响应面法优化“二次包埋”制备蓝莓爆珠的工艺研究[J]. 齐鲁工业大学学报, 2021, 35(6): 29-35.
- [11] TSAI F H, KITAMURA Y, KOKAWA M. Liquid-core alginate hydrogel beads loaded with functional compounds of radish by-products by reverse spherification: optimization by response surface methodology[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 96: 600-610.
- [12] 王玉涵, 段佳文, 刘凤仪, 等. 包埋益生菌的功能性爆珠的研制[J]. 食品工业, 2018, 39(12): 100-103.
- [13] 杨钰昆, 杨岚清, 梁小祥, 等. 连翘叶风味爆珠的制备工艺研究[J]. 食品科技, 2022, 47(1): 286-292.
- [14] 倪芳芳, 刘承智, 孙虹, 等. 海藻酸钠-明胶水凝胶珠共包埋植物乳杆菌和姜黄素: 理化性质及机制研究[A]. 第十七届益生菌与健康国际研讨会摘要集[C]. 杭州: 中国食品科学技术学会, 2022: 145-146.
- [15] LIU H X, CHIOU B S, MA Y, et al. Reducing synthetic colorants release from alginate-based liquid-core beads with a zein shell[J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132493.
- [16] GOHIL R M. Synergistic blends of natural polymers, pectin and sodium alginate[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 120(4): 2324-2336.
- [17] 罗司丹, 陈慧凌, 王兆梅. 反向成球法制备风味“爆浆”珍珠的工艺[J]. 现代食品科技, 2020, 36(3): 189-195.
- [18] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [19] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中还原糖的测定: GB 5009.7—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 王小敏, 严伊莹, 杨金梅, 等. 调节肠胃功能爆珠的制备及质构分析[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(8): 82-89.
- [21] BRACCINI I, PÉREZ S. Molecular basis of Ca²⁺-induced gelation in alginates and pectins: the egg-box model revisited[J]. *Biomacromolecules*, 2001, 2(4): 1089-1096.
- [22] 徐伟, 马力, 袁永俊, 等. 低甲氧基果胶的胶凝机制及防止预凝胶形成的措施[J]. 食品与发酵工业, 2004, 3(21): 90-93.
- [23] CHEW S C, TAN C P, LONG K, et al. *In-vitro* evaluation of kenaf seed oil in chitosan coated-high methoxyl pectin-alginate microcapsules[J]. *Industrial Crops and Products*, 2015, 76: 230-236.
- [24] LI X Y, JIN L J, LU Y N, et al. Chitosan-alginate microcapsules for oral delivery of egg yolk immunoglobulin (IgY): effects of chitosan concentration[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2009, 159(3): 778-787.