

调节肠胃功能爆珠的制备及质构分析

王小敏¹, 严伊莹¹, 杨金梅¹, 秦楠¹, 郭丽丽¹, 杨钰昆², 刘星^{1*}

(1. 山西中医药大学 中药与食品工程学院, 山西 晋中 030619; 2. 山西大学 生命科学学院, 山西 太原 030006)

摘要:利用乳酸钙和海藻酸钠的成膜性,选取海藻酸钠-低脂果胶复合凝胶体系的复配比、乳酸钙浓度、成球反应时间、芯液载入量4个主要因素,以粒径、膜厚、跌落测试、外观及爆浆感为评定指标,通过单因素和正交试验探究爆珠的基本制备工艺。在爆珠芯液中添加有助于调节肠胃功能的药食同源材料,以感官评分为指标,通过正交试验得到调节肠胃功能爆珠的最优工艺:以几种药食同源原料煎煮液和海藻酸钠-低脂果胶复合溶液混合液为芯液,其中海藻酸钠-低脂果胶复合溶液浓度为1.2%、体积比为7:3,芯液载入量为530 μ L,每100 mL芯液中木糖醇添加量为4 g、柠檬酸添加量为0.1 g,外液乳酸钙浓度为2.1%、成球反应时间为20 min。调节肠胃功能爆珠粒径、膜厚适中,质构性能好,外观圆润光滑呈淡粉色球形,咀嚼时口感Q弹,爆浆感更佳。

关键词:爆珠;调节肠胃功能;质构分析;海藻酸钠;低酯果胶;乳酸钙

Preparation and Texture Analysis of Breakable Capsules for Regulating Gastrointestinal Function

WANG Xiao-min¹, YAN Yi-ying¹, YANG Jin-mei¹, QIN Nan¹, GUO Li-li¹, YANG Yu-kun², LIU Xing^{1*}

(1. College of Pharmaceutical and Food Engineering, Shanxi University of Chinese Medicine, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 2. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

Abstract: Using the film-forming properties of calcium lactate and sodium alginate, this article mainly explored the effects of compound ratio of sodium alginate-low-ester pectin composite gel system, calcium lactate concentration, balling time and core liquid loading volume on the characteristics of breakable capsules. The particle size, shell thickness, drop test performance, appearance and bursting mouthfeel of the breakable capsules were taken as the evaluation indicators for optimization of the preparation process through single factor test and orthogonal test. The Chinese medicinal materials that help regulate gastrointestinal function were added into the liquid. The liquid formula was optimized via orthogonal test with sensory score as the indicator. The optimal preparation conditions: Chinese medicine decoction mixed with sodium alginate and low-ester pectin composite gel system (concentration of 1.2%, volume ratio of 7:3) as the core liquid, the core liquid loading volume of 530 μ L, calcium lactate concentration of 2.1%, and balling time of 20 min. To 100 mL core liquid, the optimal addition of xylitol and citric acid was 4 g and 0.1 g, respectively. The breakable capsules prepared with the above conditions and formula were compared with two commercial products in terms of texture properties, basic parameters and sensory characteristics. The breakable capsules produced in this study were pink spheres with smooth surface and had suitable particle size, moderate shell thickness, good texture properties, and springy and bursting mouthfeel, demonstrating high quality.

Key words: breakable capsule; regulation of gastrointestinal function; texture analysis; sodium alginate; low-ester pectin; calcium lactate

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32072301);山西省应用基础研究计划自然科学研究面上项目(20210302123227);山西省重点研发计划项目(201903D221032);山西中医药大学2021年科技创新能力培育计划“重点科研项目专题”项目(2021PY-ZD-03)

作者简介:王小敏(1989—),女(汉),副教授,博士,研究方向:食品化学与食品营养学。

*通信作者:刘星(1969—),男(汉),副教授,博士,研究方向:药食同源食品研究。

引文格式:

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.

WANG Xiaomin, YAN Yiyang, YANG Jinmei, et al. Preparation and Texture Analysis of Breakable Capsules for Regulating Gastrointestinal Function[J]. Food Research and Development, 2022, 43(8): 82-89.

爆珠是利用海藻酸钠与 Ca^{2+} 发生快速的离子交换反应形成凝胶的原理^[1],将冻结成球的海藻酸钠-低酯果胶复合液加入乳酸钙溶液中制成的。研究表明,海藻酸钠凝胶具有较好的弹性但质地脆弱,而低酯果胶凝胶具有较高的黏度但弹性较差,两者相互结合,由于低酯果胶与海藻酸钠形成了复杂的氢键网状结构,提高了凝胶的质构性能,因此可以弥补两者的缺点^[2-4];将海藻酸钠-低酯果胶复合液加入乳酸钙溶液中形成凝胶,在钙离子的体系下又增强了复配凝胶的性质^[5-6],拓宽了凝胶的适用范围。目前国外有不少学者使用海藻酸钠与果胶复合,制备了优异的薄膜用于包埋药物^[7]、生物活性物质^[8-10]和制备复合膜^[11],由于海藻酸钠-低酯果胶复合液还具有控制释放异味、避免活性物质失活的能力,已广泛用于制药、食品等领域,利用海藻酸钠-低酯果胶复合所制备的爆珠,具有良好的咀嚼性及爆浆口感,市场前景广阔。

肠胃功能异常在生活中较为常见,尤其发生在众多的青年人群中,肠胃功能异常人群常会出现恶心、烧心、呕吐等症状,严重影响人们的健康和生活质量。因此,本试验利用海藻酸钠与低酯果胶在钙离子体系中的协同作用形成凝胶,使用具有调节肠胃功能的药食同源中药组方(党参、陈皮、紫苏、山楂)^[12-14]煎煮得到可调节肠胃功能的药液,以该药液作为爆珠芯液的一部分,探索调节肠道功能爆珠的最优配方,以期获得具有调节肠胃功能同时又受到大众喜爱的爆珠产品。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

低酯果胶:河南万邦化工科技有限公司;海藻酸钠:青岛明月海藻集团有限公司;柠檬酸:亳州市康易饮生物科技有限公司;乳酸钙:河南金丹乳酸科技股份有限公司;木糖醇:甘肃归香九州药业有限责任公司,以上均为食品级。党参、陈皮、紫苏、山楂:市售。

1.2 仪器与设备

电子天平(AX224ZH1E):奥克斯仪器常州有限公司;游标卡尺(ARZ-150):青岛易购五金有限公司;质构仪(TA.XTC-16):上海保圣实业发展有限公司;数显恒温水浴锅(HH-4):国华电器有限公司。

1.3 爆珠制备的基本工艺

1.3.1 爆珠制备的基本工艺流程

爆珠包括珍珠凝胶外壳和芯液两部分,其制作过程包括3个主要步骤:1)爆珠芯液的配制:用蒸馏水配制成一定浓度的海藻酸钠溶液,超声充分溶解后于4℃静置2h后使用,用50℃蒸馏水配制一定浓度的低酯果胶溶液,取海藻酸钠溶液与低酯果胶溶液按一定体积比复配,在40℃水浴中磁力加热搅拌30min,得到海藻酸钠-低酯果胶复合溶液;2)爆珠外液的配制:用蒸馏水按比例配制成一定浓度乳酸钙溶液;3)爆珠的成型:将上述芯液倒入准备好的球形硅胶模具中,置于-15℃冷冻箱中冻结。将冰球从硅胶模具挤出缓慢搅拌中的常温(25℃)外液中,反应一定时间后冰球融化并且在外层形成一层凝胶膜,捞出,置于蒸馏水漂洗15min。

1.3.2 爆珠基本制备工艺的单因素试验

根据预试验结果,以爆珠的粒径、膜厚、外观、爆浆感、跌落试验为评价指标,选取海藻酸钠与低酯果胶的复配比例、乳酸钙浓度、芯液载入量、成球反应时间4个主要因素进行单因素试验。

1.3.2.1 海藻酸钠与低酯果胶对爆珠特性的影响

分别配制浓度为0.6%、0.8%、1.0%、1.2%的海藻酸钠溶液和低酯果胶溶液,将海藻酸钠溶液与低酯果胶溶液按5:5、6:4、7:3、9:1(体积比)进行复配,按照爆珠制备的基本工艺制备爆珠,其中乳酸钙浓度为1.5%,芯液载入量为530 μL ,反应时间为20min。进行粒径、膜厚、跌落试验、外观以及爆浆感的检测,每组进行3次平行试验,取平均值作为最终结果。

1.3.2.2 乳酸钙浓度对爆珠特性的影响

制备乳酸钙溶液浓度分别为0.9%、1.2%、1.5%、1.8%、2.1%的爆珠,其中海藻酸钠浓度为1.0%,低酯果胶浓度为1.0%,体积比为7:3,芯液载入量为530 μL ,反应时间为20min。进行粒径、膜厚、跌落试验、外观以及爆浆感的检测,每组进行3次平行试验,取平均值作为最终结果。

1.3.2.3 芯液载入量对爆珠特性的影响

制备芯液载入量分别为430、530、830、930、1030 μL 的爆珠,其中海藻酸钠浓度为1.0%,低酯果胶浓度为

1.0%, 体积比为 7:3, 乳酸钙浓度为 1.5%, 反应时间为 20 min。进行粒径、膜厚、跌落试验、外观以及爆浆感的检测, 每组进行 3 次平行试验, 取平均值作为最终结果。

1.3.2.4 成球反应时间对爆珠特性的影响

制备成球反应时间分别为 5、10、15、20、25 min 的爆珠, 其中海藻酸钠浓度为 1.0%, 低酯果胶浓度为 1.0%, 体积比为 7:3, 乳酸钙浓度为 1.5%, 芯液载入量为 530 μL 。进行粒径、膜厚、跌落试验、外观以及爆浆感的检测, 每组进行 3 次平行试验, 取平均值作为最终结果。

1.3.3 检测方法

1.3.3.1 粒径与膜厚的检测

每组随机选取 3 个爆珠, 用游标卡尺测量爆珠的粒径; 扎破爆珠, 使芯液完全流出, 用游标卡尺测量爆珠的膜厚。

1.3.3.2 跌落试验的检测

每组随机选取 3 个爆珠, 把爆珠从高度为 20 cm 的高处丢下, 爆珠形态无明显变化为通过, 若爆珠变

形为不通过。

1.3.3.3 爆浆感的检测

每组随机选取 3 个爆珠, 通过按压爆珠探测爆浆感的程度, 按照差、较差、较好、好 4 种等级评判爆浆感。

1.3.4 爆珠制备工艺的正交试验优化

根据单因素试验结果, 以爆珠膜厚作为评价指标, 选取 3 个影响爆珠制备工艺的主要因素进行 $L_9(3^4)$ 正交试验。

1.3.5 功能性爆珠的基本制备工艺

选取党参、紫苏、陈皮、山楂 4 种药食同源原料, 用水以料液比 1:20(g/mL) 煎煮两次合并滤液, 滤液补足煎煮损失体积后稀释两倍备用。海藻酸钠-低酯果胶复合溶液与稀释后的滤液按 1:1 体积混合, 以 100 mL 混合液为基准, 添加适量木糖醇和柠檬酸调味, 并在 40 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中磁力加热搅拌 30 min 得到功能性芯液。功能性爆珠的成型工艺与爆珠基本制备工艺相同, 流程图见图 1。

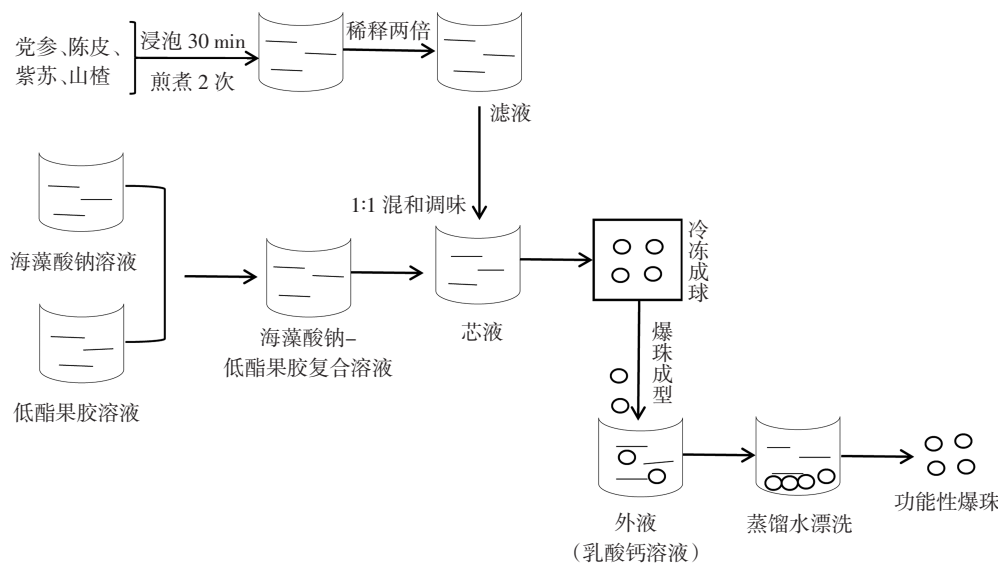


图1 功能性爆珠的工艺流程图

Fig.1 Flowchart for the preparation of breakable capsules

1.3.6 正交试验优化功能性爆珠工艺配方

根据爆珠制备的基本工艺, 以及功能爆珠制备预试验, 选取海藻酸钠-果胶复合溶液浓度、乳酸钙浓度、柠檬酸添加量和木糖醇添加量 4 个因素, 以感官评分为评价指标, 进行 $L_9(3^4)$ 正交试验。感官评价选取 10 名经过培训的人员, 做感官评价, 感官评价标准如表 1 所示。

1.3.7 爆珠产品的基本参数检测和质构分析

对制得功能性爆珠粒径、膜厚、外观及爆浆感分析并进行跌落测试。对制得的功能性爆珠和市售两种爆珠进行质构分析, 质构测试采用 TA/36 的柱形探头,

选用全质构测试模式, 测试类型为下压, 目标模式为形变, 目标数值为 20%, 时间为 2 s, 测试前探头速度为 2.00 mm/s, 测试速度和测试后速度为 1.00 mm/s, 触发点类型为力, 触发力为 5 gf。

2 结果分析

2.1 爆珠基本制备工艺的优化

2.1.1 海藻酸钠与低酯果胶对爆珠特性的影响

将不同浓度海藻酸钠溶液与低酯果胶溶液按不同体积比进行复配, 结果如表 2 所示。

表 1 爆珠感官评价标准

Table 1 Standard for sensory evaluation of explosive beads

项目	描述
气味(10 分)	有异味、腥臭味,中药味过重等不愉快气味(1 分~5 分) 无不良气味,含有明显清香(6 分~10 分)
颜色(25 分)	外壳不透明颜色不均一,芯液颜色不均匀,浑浊,无光泽(1 分~7 分) 外壳半透明,颜色均一,芯液呈淡粉色,颜色均匀,稍微浑浊,光泽不明显(8 分~16 分) 外壳透明,颜色均一,芯液呈淡粉色,颜色均匀,清亮透彻,有光泽(17 分~25 分)
口感(30 分)	外壳韧性不足易破,爆浆感差;芯液流动性不足,过酸或过甜,口感不佳(1 分~10 分) 外壳韧性较好,有轻微爆浆感或爆浆感过强;芯液流动性过强,酸甜强度不大,口感不佳(11 分~20 分) 外壳韧性佳,有适当爆浆感;芯液流动性适中,酸甜适中,具有产品应具有的风味,口感清爽优良(21 分~30 分)
组织(15 分)	质地松塌,柔软度低,Q 弹性差(1 分~5 分) 质地良好,柔软度良好,Q 弹性一般(6 分~10 分) 质地紧密,柔软度适中,Q 弹性好(11 分~15 分)
外形(20 分)	爆珠整体呈椭圆状或扁平,外皮不均匀,有突起和气泡,芯液发生漏液(1 分~6 分) 爆珠部分呈椭圆状,外皮均匀,无突起但是有小气泡,芯液无明显漏液(7 分~15 分) 爆珠整体呈圆球状,外观饱满,外皮均匀,无突起无气泡,芯液无漏液(16 分~20 分)

表 2 海藻酸钠与低酯果胶对爆珠特性的影响

Table 2 Effects of sodium alginate and low-ester pectin on the characteristics of breakable capsules

海藻酸钠浓度/%	低酯果胶浓度/%	海藻酸钠:果胶(体积比)	粒径/mm	膜厚/mm	跌落试验	外观	爆浆感
0.6	0.6	5:5	9.56	0.13	不通过	淡黄色、椭圆球状、粗糙	差
		6:4	9.27	0.41	不通过	白色、椭圆球状、粗糙	差
		7:3	8.88	0.44	不通过	白色、椭圆球状、光滑	差
		9:1	8.28	0.67	不通过	白色、椭圆球状、粗糙	差
0.8	0.8	5:5	9.23	0.17	不通过	淡黄色、椭圆球状、粗糙	差
		6:4	8.91	0.31	不通过	白色、椭圆球状、粗糙	差
		7:3	8.69	0.43	不通过	白色、椭圆球状、粗糙	差
		9:1	8.47	0.78	不通过	白色、椭圆球状、粗糙	差
1.0	1.0	5:5	8.81	0.30	不通过	淡黄色、椭圆球状、粗糙	差
		6:4	8.71	0.35	不通过	白色、椭圆球状、粗糙	差
		7:3	8.64	0.67	通过	白色、圆球状、光滑	好
		9:1	8.53	0.94	通过	白色、圆球状、光滑	较差
1.2	1.2	5:5	8.71	0.35	不通过	淡黄色、椭圆球状、光滑	差
		6:4	8.68	0.84	通过	白色、圆球状、光滑	差
		7:3	8.60	1.25	通过	白色、圆球状、光滑	较差
		9:1	8.50	1.46	通过	白色、圆球状、光滑	差

从表 2 可知,当海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度为 1.0%,海藻酸钠与低脂果胶的复配体积比为 7:3 时,爆珠外观圆润饱满,成膜效果好,表面光滑,爆浆效果好,且通过跌落试验,这可能是由于低脂果胶与海藻酸钠混合后分子间形成的氢键结合更加强烈,同时分子间的力增大使得膜的结构紧密,膜的阻隔性能和力学性能得到提高,断裂伸长率和含水量有所升高^[15]。随着海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度的减少,所制得的爆珠粒径增大,外形扁平粗糙,易碎,外皮柔软导

致爆浆感不明显,且不通过跌落试验,所测得的粒径较大是由于爆珠外壳明显强力不足,而导致爆珠平摊在表面上,无法支撑其成为圆球状,使其为椭圆球状。而随着海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度的增大,膜的厚度增大,爆珠外观虽较饱满,但因浓度的增大使得口感不再清爽,爆浆感变差,具有一定的腥味^[16]。随着海藻酸钠-低酯果胶复配体积比的改变爆珠的外观和颜色不同,当低脂果胶的占比大时,黏度减小,成膜薄效果不佳^[17],成球效果差,颜色呈淡黄色,膜透光性

低,这可能是因为低脂果胶本身为淡黄色,其含量越多,薄膜颜色越深,故其透光性变差^[15]。

综上所述,海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度为 1%,复配体积比为 7:3 时,综合评价好。所以,在后续的单因素试验和对应的正交试验中固定海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度为 1.0%。复配体积比为 7:3。

2.1.2 乳酸钙浓度对爆珠特性的影响

乳酸钙浓度对爆珠特性的影响结果如表 3 所示。

表 3 乳酸钙浓度对爆珠特性的影响

Table 3 Effect of calcium lactate concentration on the characteristics of breakable capsules

乳酸钙 浓度/%	粒径/ mm	膜厚/ mm	跌落 试验	外观	爆浆感
0.9	8.88	0.14	不通过	白色、圆球状、粗糙、漏液	差
1.2	8.82	0.34	不通过	白色、圆球状、粗糙、漏液	差
1.5	8.74	0.63	通过	白色、圆球状、粗糙	较好
1.8	8.65	0.67	通过	白色、圆球状、光滑	好
2.1	8.57	0.82	通过	白色、圆球状、光滑	较差

由表 3 可知,随着乳酸钙浓度的增加,所制得的爆珠粒径减小,膜厚增大。当乳酸钙的浓度小于 1.5%时,外表粗糙,出现漏液现象,不通过跌落试验,可能是钙离子浓度太低与水凝胶形成的凝胶外壳较薄并且凝胶强度较弱,以至于易爆开,流出浆液。当乳酸钙的浓度在 1.5%~2.1%时,爆珠外观圆润饱满,立挺,成球效果好,颜色偏亮,具有一定的爆浆感,且通过跌落测试,这可能是由于随着乳酸钙浓度的增大,外壳的硬度也随之上升,机械强度也明显增强,破裂强度也随之上升^[18]。但随着乳酸钙浓度的继续增大,爆珠的膜厚度也随之增大,当乳酸钙浓度达到 2.1%时,因膜厚太大以至于爆浆感程度减小。综上所述,当乳酸钙的浓度为 1.5%、1.8%、2.1%这 3 个水平进行正交试验。

2.1.3 芯液载量对爆珠特性的影响

不同芯液载量对爆珠特性的影响结果见表 4。

表 4 芯液载量对爆珠特性的影响

Table 4 Effect of core liquid loading volume on the characteristics of breakable capsules

芯液 载量/ μL	粒径/ mm	膜厚/ mm	跌落试验	外观	爆浆感
430	7.45	0.69	通过	白色、圆球状、粗糙	较差
530	8.66	0.68	通过	白色、圆球状、光滑	好
830	10.97	0.57	通过	白色、圆球状、光滑	较差
930	14.17	0.55	不通过	白色、圆球状、粗糙	差
1 030	19.58	0.47	不通过	白色、圆球状、粗糙	差

由表 4 可知,随着芯液载量增加,所制备的爆珠的粒径增大,膜的厚度逐渐减小。当芯液载量为 530 μL 时,爆珠外观圆润饱满,爆浆感好,且通过跌落测试。当芯液载量大于 530 μL 时,爆珠表面粗糙,爆浆感过大,无法通过跌落测试,这可能是由于反应时间相同时钙离子释放速率相同,而球体积增大,形成的薄膜可能薄厚不均匀^[10],且体积增大,相似厚度的膜需要承受更多重量芯液带来的压力,因此易爆破^[9]。当芯液载量为 430 μL 时,爆珠表面粗糙,爆浆感较差。综上所述,芯液载量为 530 μL 时,综合评价好,选择芯液载量为 430、530、830 μL 这 3 个水平进行后续正交试验。

2.1.4 成球反应时间对爆珠特性的影响

不同成球反应时间对爆珠特性的影响结果见表 5。

表 5 成球的反应时间对爆珠特性的影响

Table 5 Effect of balling time on the characteristics of breakable capsules

成球反应 时间/min	粒径/ mm	膜厚/ mm	跌落 试验	外观	爆浆感
5	9.62	0.14	不通过	白色、椭圆球状、粗糙	差
10	9.16	0.34	不通过	白色、圆球状、粗糙	差
15	8.85	0.56	通过	白色、圆球状、光滑	较差
20	8.68	0.66	通过	白色、圆球状、光滑	好
25	8.58	0.75	通过	白色、圆球状、粗糙	较好

由表 5 可知,随着成球反应时间的增大,所制得爆珠的膜厚增大,而粒径逐渐减小。当成球反应时间为 5 min 和 10 min 时,爆珠的粒径较大,膜比较薄,外观呈椭圆球状,不能通过跌落试验,这可能是由于成球反应时间较短,钙离子与海藻酸钠-低脂果胶复合液还未充分反应,形成的凝胶强度低易破碎,且芯液浓度较稠,爆浆感差^[18];当成球反应时间为 25 min 时,爆珠膜太厚,表面粗糙、爆浆感降低,这可能是由于反应时间过长,使得钙离子向外膜进攻,膜的厚度逐渐增大,凝胶强度过大,外壳过于坚硬,以至于影响口感^[9]。当成球反应时间为 20 min 时,爆珠的粒径大小适中,膜的厚度适中,外观成饱满圆球状,爆浆感好,且通过跌落试验。综上所述,成球的反应时间为 20 min 时综合评价好,故选择成球时间为 15、20、25 min 这 3 个水平进行后续正交试验。

2.1.5 爆珠基本制备工艺的正交试验

根据单因素试验结果,选取乳酸钙浓度、芯液载量、成球反应时间 3 个因素进行 $L_9(3^4)$ 正交试验,根据单因素结果以爆珠膜厚为评价指标,正交试验结果如表 6 所示。

表 6 爆珠的正交试验结果

Table 6 The results of orthogonal experiment on breakable capsules					
试验号	A 乳酸钙 浓度/%	B 芯液 载入量/ μ L	C 成球反应 时间/min	D 空白	膜厚/mm
1	1(1.5)	1(430)	1(15)	1	0.14
2	1	2(530)	2(20)	2	0.65
3	1	3(830)	3(25)	3	0.22
4	2(1.8)	1	2	3	0.66
5	2	2	3	1	0.68
6	2	3	1	2	0.15
7	3(2.1)	1	3	2	0.71
8	3	2	1	3	0.45
9	3	3	2	1	0.54
K ₁	1.01	1.51	0.74	1.36	
K ₂	1.50	1.78	1.85	1.51	
K ₃	1.70	0.90	1.53	1.11	
k ₁	0.34	0.50	0.25	0.45	
k ₂	0.50	0.59	0.62	0.53	
k ₃	0.57	0.30	0.51	0.44	
R 值	0.23	0.29	0.37	0.09	
影响因素	C>B>A				
最佳工艺	A ₃ B ₂ C ₂				

由表 6 可知,考察因素中对爆珠的膜厚影响顺序为 C>B>A,即成球反应时间>芯液载入量>乳酸钙浓度;爆珠的最优配方为 A₃B₂C₂,即乳酸钙浓度为 2.1%、芯液量为 530 μ L、成球反应时间 20 min,该组没有出现在正交试验中,经验证试验发现在该条件下制备的爆珠膜厚为 0.80 mm,大于正交试验中最优结果第 7 组(膜厚为 0.71mm),但最优配方所制备的爆珠因膜厚太大,爆浆效果差。方差分析结果见表 7。

表 7 爆珠的正交试验方差分析

Table 7 Analysis of variance in orthogonal experiment of breakable capsules					
因素	离均差平方和	自由度	F 值	临界值	显著性
A	0.083	2	13.452	$F_{0.05}(2,2)=19.00$	
B	0.132	2	21.323		*
C	0.227	2	36.677		*
误差 e	0.006	2			

注:*代表显著性差异, $P<0.05$ 。

经方差分析(表 7)可知,芯液载入量及成球反应时间对爆珠的膜厚有显著性影响($P<0.05$),乳酸钙浓度对爆珠的膜厚无显著性影响。综合考虑后,适当减小乳酸钙的浓度以优化产品的爆浆效果,优化后的最优组合应为 A₃B₂C₂,即乳酸钙的浓度应为 1.8%、芯液载入量为 530 μ L、成球反应时间为 20 min,该条件下膜厚为 0.67 mm,制备的爆珠无异味,色泽明亮,外观

圆润饱满,表面光滑,爆浆感明显。

2.2 正交试验优化功能性爆珠工艺配方

根据优化后爆珠的基本制备工艺以及功能爆珠制备的预试验,选取海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度、乳酸钙浓度、柠檬酸和木糖醇添加量 4 个因素,以感官评分为评价指标进行 L₉(3⁴)的正交试验,确定芯液载入量为 530 μ L,成球反应时间为 20 min,海藻酸钠-低酯果胶复合溶液的复配比为 7:3(体积比)。选取 10 名感官评价员为产品评价小组,对产品的气味、颜色、口感、组织、外形 5 个方面进行感官评价,要求评定人员在品评前 30 min 内不可食用口味较重的食物,评定一个样品后评定人员以清水漱口,间隔 5 min 后再评定下一个样品,正交试验结果如表 8 所示。

表 8 功能性爆珠的正交试验结果

Table 8 The results of orthogonal experiment on breakable capsules					
试验号	A 海藻酸钠- 低酯果胶复合 溶液浓度/%	B 乳酸钙 浓度/%	C 木糖醇 添加量/g	D 柠檬酸 添加量/g	感官 评分
1	1(0.8)	1(1.8)	1(2)	1(0.1)	76.0
2	1	2(2.1)	2(3)	2(0.2)	70.2
3	1	3(2.4)	3(4)	3(0.3)	66.5
4	2(1)	1	2	3	75.9
5	2	2	3	1	90.2
6	2	3	1	2	83.1
7	3(1.2)	1	3	2	89.4
8	3	2	1	3	81.7
9	3	3	2	1	85.1
K ₁	212.7	241.2	240.9	251.4	
K ₂	249.3	242.1	231.3	243.0	
K ₃	256.2	234.6	246.0	224.1	
k ₁	70.9	80.4	80.3	83.8	
k ₂	83.1	80.7	77.1	81.0	
k ₃	85.4	78.2	82.0	74.7	
R 值	14.5	2.5	4.9	9.1	
影响因素	A>D>C>B				
最佳工艺	A ₃ B ₂ C ₃ D ₁				

由表 8 可知,各因素对功能性爆珠的感官评分影响顺序为 A>D>C>B,即海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度>柠檬酸的添加量>木糖醇的添加量>乳酸钙浓度,爆珠的最优配方为 A₃B₂C₃D₁,该组没有出现在正交试验中,经过试验验证该组的感官评分为 94.6,大于正交试验中评分最高的第 5 组试验(90.2),因此可判定爆珠的最优配方为 A₃B₂C₃D₁,即海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度为 1.2%、乳酸钙浓度为 2.1%、木糖醇添加量为 4 g、柠檬酸添加量为 0.1 g。根据该条件制备的功能性爆珠,颜色呈明亮淡粉色,无异味,外观圆润饱满,

表面光滑,爆浆感明显,具有适宜的弹性。正交方差分析见表 9。

表 9 功能性爆珠的正交试验方差分析

Table 9 Analysis of variance in orthogonal experiment of breakable capsules

因素	离均差平方和	自由度	F 值	临界值	显著性
A	363.722	2	33.079	$F_{0.05}(2,2)=19$	*
C	38.029	2	3.459		
D	128.862	2	11.719		
误差 e(B)	13.91	2			

注:* 代表显著性差异, $P<0.05$ 。

经方差分析(表 9)可知,由于乳酸钙浓度对功能性爆珠的感官评分影响程度较小,因此将乳酸钙的浓度用作为误差进行方差分析,海藻酸钠-低酯果胶复合溶液浓度对功能性爆珠的口感影响显著($P<0.05$),木糖醇添加量和柠檬酸添加量对功能性爆珠的感官评分影响不显著。

2.3 爆珠产品的基本参数和质构分析

2.3.1 爆珠产品的基本参数

功能性爆珠颜色呈现明亮的淡粉色,可能是由于

芯液中药食同源药液中含有单宁类物质,制作过程中为了调节产品风味又添加了柠檬酸,使整个体系处于酸性环境中而导致单宁类物质呈现淡粉色^[20]。对功能性爆珠以及市售的草莓爆珠、芒果爆珠的粒径、膜厚、跌落试验以及外观、爆浆感进行分析,结果如表 10。

表 10 爆珠的基本参数

Table 10 The basic parameters of breakable capsules

样品	粒径/mm	膜厚/mm	跌落试验	外观	爆浆感
功能性爆珠	8.69	0.68	通过	淡粉色、圆球状	好
草莓爆珠	7.65	0.27	通过	红色、圆球状	较差
芒果爆珠	9.74	0.34	通过	黄色、圆球状	较好

由表 10 可知,芒果爆珠的粒径较大,膜的厚度较薄,爆浆感较好;草莓爆珠的粒径较小,膜的厚度太薄,咀嚼时容易漏气,爆浆感较差;本试验制得的功能性爆珠粒径大小属于中间水平,具有一定厚度,爆浆感好。

2.3.2 爆珠的质构分析

选用全质构测试模式,对调节肠胃功能爆珠以及市售的两种果味爆珠质构分析结果如表 11 所示。

表 11 爆珠质构分析结果

Table 11 Texture of breakable capsules

样品	硬度/g	黏附性/(g·s)	弹性	咀嚼性/g	胶着性/g	内聚性	回复性
功能性爆珠	22.236	0	0.658 2	13.636	20.663	0.929 9	0.638 7
草莓爆珠	48.451	-0.322	0.680 2	24.838	36.535	0.754 2	0.378 9
芒果爆珠	49.197	-0.27	0.846 4	37.346	44.057	0.894 9	0.624 5

结果发现,草莓爆珠、芒果爆珠的硬度大、弹性大、咀嚼性和胶着性大,咀嚼时费力,还具有一定有黏附性,容易粘牙不爽口;市售的两种爆珠内聚性、回复性较低,说明其内部的收缩力差,易拉伸。本试验自制功能性爆珠咀嚼性、胶着性、弹性、硬度适中,咀嚼时口感好,且具有较大的内聚性和回复性,抗拉伸、形变后容易恢复形状。另外,购买的草莓爆珠、芒果爆珠因硬度大质地脆,膜厚度较小,在保存和评价过程中容易漏气、漏液导致产品爆浆感差。综合比较之下,本试验自制的功能性爆珠粒径、膜厚适中,咀嚼时口感 Q 弹,爽口不粘牙,爆浆感出众,具有较高品质。

3 结论

本文利用乳酸钙和海藻酸钠的成膜性,通过海藻酸钠-低酯果胶复合凝胶体系的复配比、乳酸钙浓度、成球反应时间、芯液载入了 4 个因素探究爆珠的基本制备工艺;添加有助于调节肠胃的药食同源材料煎煮

滤液作为芯液,得到功能性爆珠的最优配方:以滤液和海藻酸钠-低酯果胶复合溶液为芯液,二者体积比为 1:1,芯液中海藻酸钠-低酯果胶复合液浓度为 1.2%、体积比为 7:3、芯液载入了 530 μL 、每 100 mL 芯液中木糖醇的添加量为 4 g、柠檬酸的添加量为 0.1 g,外液乳酸钙浓度为 2.1%,成球反应时间为 20 min。自制的功能爆珠粒径、膜厚适中,质构性能好,外观圆润光滑呈淡粉色球形,产品咀嚼时口感 Q 弹,爽口不粘牙,爆浆感出众,具有较高品质。

参考文献:

- [1] 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.
WANG Yuhuan, DUAN Jiawen, LIU Fengyi, et al. Development of functional blasting beads embedded with probiotics[J]. The Food Industry, 2018, 39(12): 100-103.
- [2] HARPER B A, BARBUT S, SMITH A, et al. Mechanical and microstructural properties of “wet” alginate and composite films con-

- taining various carbohydrates[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(1): 84–92.
- [3] GALUS S, LENART A. Development and characterization of composite edible films based on sodium alginate and pectin[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115(4): 459–465.
- [4] 覃小丽, 杨溶, 刘雄, 等. 两种海藻酸钠基凝胶的溶胀和质构性能[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 7–11.
- QIN Xiaoli, YANG Rong, LIU Xiong, et al. Swelling characteristics and textural properties of two kinds of sodium alginate-based hydrogels[J]. Food Science, 2017, 38(19): 7–11.
- [5] GOHIL R M. Synergistic blends of natural polymers, pectin and sodium alginate[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(4): 2324–2336.
- [6] BRACCINI I, PÉREZ S. Molecular basis of Ca^{2+} induced gelation in alginates and pectins: The egg-box model revisited[J]. Biomacromolecules, 2001, 2(4): 1089–1096.
- [7] ALBORZI S, LIM L T, KAKUDA Y. Encapsulation of folic acid and its stability in sodium alginate-pectin-poly (ethylene oxide) electrospun fibres[J]. Journal of Microencapsulation, 2013, 30(1): 64–71.
- [8] 刘媛, 孙也, 耿伟涛, 等. 改性海藻酸钠乳酸菌微胶囊的制备及其体外性质研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(2): 88–92.
- LIU Yuan, SUN Ye, GENG Weitao, et al. Preparation of modified sodium alginate-lactic acid bacteria microencapsulation and its characterization *in vitro*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(2): 88–92.
- [9] SANDOVAL-CASTILLA O, LOBATO-CALLEROS C, GARCÍA-GALINDO H S, et al. Textural properties of alginate-pectin beads and survivability of entrapped *Lb. casei* in simulated gastrointestinal conditions and in yoghurt[J]. Food Research International, 2010, 43(1): 111–117.
- [10] 陈妮娜, 曾稍稍. 柚皮果胶-海藻酸钠可食复合膜对草莓的保鲜[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 60–64.
- CHEN Nina, ZENG Shaoqiao. Preservation of strawberry with edible composite film based on pomelo pectin and sodium alginate[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(3): 60–64.
- [11] 陈妮娜, 朱亚燕, 阳丽媛, 等. 海藻酸钠-果胶改性复合膜的制备及表征[J]. 中国食品添加剂, 2018(4): 154–163.
- CHEN Nina, ZHU Yayan, YANG Liyuan, et al. Preparation and characterization of cross-linking composite films based on sodium alginate and pomelo pectin[J]. China Food Additives, 2018(4): 154–163.
- [12] 马方励, 沈雪梅, 时军. 党参多糖对实验动物胃肠道功能的影响[J]. 安徽医药, 2014, 18(9): 1626–1630.
- MA Fangli, SHEN Xuemei, SHI Jun. Effect of *Codonopsis* polysaccharide on gastrointestinal tract of experimental rats and mice[J]. Anhui Medical and Pharmaceutical Journal, 2014, 18(9): 1626–1630.
- [13] 孙政华, 邵晶, 郭玫. 党参化学成分及药理作用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(33): 174–176.
- SUN Zhenghua, SHAO Jing, GUO Mei. Research progress of *Codonopsis pilosula* chemical component and pharmacological effects[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(33): 174–176.
- [14] 欧立娟, 刘启德. 陈皮药理作用研究进展[J]. 中国药房, 2006, 17(10): 787–789.
- OU Lijuan, LIU Qide. Research progress on pharmacological effects of tangerine peel[J]. China Pharmacy, 2006, 17(10): 787–789.
- [15] 徐伟, 马力, 袁永俊, 等. 低甲氧基果胶的凝胶机理及防止预凝胶形成的措施[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(3): 90–93.
- XU Wei, MA Li, YUAN Yongjun, et al. The gelatinization mechanism of LM pectin and the measures for preventing pregel formation[J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(3): 90–93.
- [16] 姚骏, 张弘, 郭森, 等. 海带营养调味料的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(4): 213–217.
- YAO Jun, ZHANG Hong, GUO Sen, et al. The research progress of kelp nutrition seasoning[J]. Food Research and Development, 2018, 39(4): 213–217.
- [17] 罗司丹, 陈慧凌, 王兆梅. 海藻酸钠-果胶复合溶液流变性质对核壳胶囊形成与质构的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 6–11.
- LUO Sidan, CHEN Huiling, WANG Zhaomei. Effect of rheological properties of sodium alginate-pectin composite solution on the formation and texture of core-shell capsules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 6–11.
- [18] SINGH J, KAUR K, KUMAR P. Optimizing microencapsulation of α -tocopherol with pectin and sodium alginate[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(9): 3625–3631.
- [19] 王撼辰, 丑述睿, 崔慧军, 等. 钙离子添加量对苹果果胶-苹果多酚复合物体系流变、凝胶及质构特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(24): 46–52.
- WANG Hanchen, CHOU Shurui, CUI Huijun, et al. Impacts of calcium ion addition on rheological, gel and textural properties of apple pectin-apple polyphenol compound[J]. Food Science, 2019, 40(24): 46–52.
- [20] 陈然, 赵建京, 范志红. 煮制条件对绿豆清汤颜色及抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(8): 115–120.
- CHEN Ran, ZHAO Jianjing, FAN Zhihong. Color and antioxidant activity of mung bean clear soup as affected by boiling conditions[J]. Food Science, 2012, 33(8): 115–120.

加工编辑: 孟琬星

收稿日期: 2021-07-06