

小麦淀粉-马铃薯淀粉共混粉团加工 水晶饺皮的性能分析

王欢¹,李沐霖¹,陈嘉¹,叶发银^{1,2*}

(1. 西南大学 食品科学学院,重庆 400715;2. 重庆市甘薯工程技术研究中心,重庆 400715)

摘要:为考察小麦淀粉与马铃薯淀粉共混对其水晶饺皮加工性能的影响,研究单一及不同质量比共混淀粉的糊化特性及淀粉粉团流变特性、生水晶饺皮的拉伸特性、熟水晶饺皮的透明性和质地。结果显示,小麦淀粉的峰值黏度、谷值黏度、崩解值和最终黏度均低于马铃薯淀粉,而小麦淀粉的回生值高于马铃薯淀粉;两种淀粉在糊化时存在交互作用,共混淀粉的峰值黏度、崩解值低于预测值,而谷值黏度、最终黏度及回生值高于预测值,表现出非加和效应。同时,单一淀粉及共混淀粉在目标温度 65、75、85、95 °C 时具有不同的糊化特性曲线,反映不同目标温度条件下它们在水合特性上存在差异。随着马铃薯淀粉添加量的增加,共混淀粉粉团的储存模量和损耗模量逐渐降低,生水晶饺皮的拉伸力、拉伸位移逐渐增大,延展性更好,熟水晶饺皮的透明性、硬度、弹性及咀嚼性均逐渐升高。研究表明,淀粉糊化参数与熟水晶饺皮的透明性和质地之间存在显著相关性。

关键词:淀粉共混;粉团;水晶饺皮;加工特性;品质特性

Performance of Wheat Starch and Potato Starch Blended Dough for Processing Crystal Dumpling Wrappers

WANG Huan¹, LI Mulin¹, CHEN Jia¹, YE Fayin^{1,2*}

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Technology Research Center for Sweetpotato, Chongqing 400715, China)

Abstract: The effects of blended wheat starch and potato starch on the processing properties of crystal dumpling wrappers were investigated. The pasting properties of wheat starch, potato starch, and starch blended in different mass ratios as well as the rheological properties of starch dough, the tensile properties of raw dumpling wrappers, and the transparency and textural properties of cooked dumpling wrappers were investigated. The results showed that wheat starch had lower peak, trough, breakdown, and final viscosities and higher setback viscosity than potato starch. For the blended starch, the interactions between wheat starch and potato starch altered pasting properties. Specifically, the blended starch had lower peak viscosity and breakdown viscosity and higher trough, final, and setback viscosities than the predicted values, which indicated a non-additive effect. Meanwhile, wheat starch, potato starch, and blended starch had different pasting curves at targeted temperatures (65, 75, 85 °C, and 95 °C), which reflected the differences in their hydration characteristics at different targeted temperatures. As the addition amount of potato starch increased, the storage modulus and loss modulus of the blended starch dough gradually decreased, and the raw crystal dumpling wrappers presented gradually increased tensile force and tensile displacement, demonstrating improved ductility. Moreover, as the addition amount of potato starch increased, the transparency, hardness, springiness, and chewiness of cooked crystal dumpling wrappers were increased. The results of the correlation analysis showed significant correlations of starch pasting properties with the transparency and textural properties of cooked crystal dumpling wrappers.

Key words: starch blending; dough; crystal dumpling wrappers; processing properties; quality characteristics

基金项目:西南大学大学生创新创业训练计划项目(国家级)(202210635006);重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0091)

作者简介:王欢(2002—),女(汉),硕士研究生,研究方向:淀粉食品加工。

*通信作者:叶发银(1983—),男(汉),教授,博士,研究方向:淀粉食品科学。

引文格式:

王欢,李沐霖,陈嘉,等.小麦淀粉-马铃薯淀粉共混粉团加工水晶饺皮的性能分析[J].食品研究与开发,2025,46(5):54-63.

WANG Huan, LI Mulin, CHEN Jia, et al. Performance of Wheat Starch and Potato Starch Blended Dough for Processing Crystal Dumpling Wrappers[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 54-63.

水晶饺子因其透明鲜亮的外观和滑爽劲道的口感深受消费者喜爱^[1]。与以小麦粉为原料制作的传统饺子不同,水晶饺子的加工原料为纯化的淀粉,主要包括澄面(小麦淀粉)、生粉(通常指马铃薯或玉米淀粉)等^[2]。由于水晶饺子的加工原料不含小麦面筋,水晶饺皮加工通常采用烫面法:将澄面和生粉按照一定比例混合,加入热水后搅拌,使部分淀粉发生糊化形成雪花状面絮,然后和面制作粉团,压制得到水晶饺皮^[2-3]。

当前水晶饺皮原料加工适性机制尚未探明,生产经验在原料选择上仍起主要作用^[4]。艾志录等^[5]对不同原料淀粉制作的水晶饺皮进行品质测定,结果显示小麦淀粉制作的水晶饺皮品质最好,其次是马铃薯淀粉、木薯淀粉、玉米淀粉和绿豆淀粉。研究表明,将两种或以上的淀粉进行复配,得到的共混淀粉具有一定的加工性能优势,可弥补单一淀粉加工性能的不足^[6-7]。龚永强^[8]研究发现,向小麦淀粉中添加7%羟丙基化糯米淀粉可改善蒸煮性能,增加生(熟)水晶饺皮的亮度。王静文等^[9]对4种变性淀粉与天然淀粉(小麦淀粉:玉米淀粉=3:1,质量比)复配制成的水晶饺皮特性进行测定分析,结果表明添加15%马铃薯醋酸酯淀粉可以提高生水晶饺皮的亮度及熟水晶饺皮的综合感官评分。杨国堂等^[9]选用面粉、藕粉和荸荠粉为原料制作虾饺,研究得出三者最佳配比为10:5:3(质量比)。同样,以一定比例添加玉米淀粉、马铃薯淀粉、芭蕉芋淀粉可改善粉条的品质^[10-11]。综上,将不同颗粒尺寸、形态及组成结构的淀粉按照恰当比例复配能够有效改良淀粉原料物性。

因此,本研究以水晶饺皮加工的常用原料(小麦淀粉和马铃薯淀粉)为对象,对比分析单独使用及复配使用时淀粉的物性、粉团性能以及生、熟水晶饺皮的品质,探究淀粉共混对水晶饺皮加工及其品质的影响,以期为水晶饺皮的原料选择及品质调控提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦淀粉(食品级):新乡良润全谷物食品有限公司;马铃薯淀粉(食品级):上海绿晟实业有限公司;玉米油(食品级):长寿花食品股份有限公司。

1.2 仪器与设备

BSA224S 电子天平:赛多利斯科学仪器(北京)有

限公司;RVA-TecMaster 快速黏度分析仪:瑞典波通仪器公司;DHR-2 流变仪:美国TA公司;TA.XT Plus 物性测定仪:英国 Stable Micro System 公司;TU-1950 双光束紫外可见分光光度计:北京普析通用仪器有限责任公司。

1.3 方法

1.3.1 共混淀粉的制备

将小麦淀粉和马铃薯淀粉按照质量比1:0、3:1、1:1、1:3、0:1在室温下混合均匀,分别命名为WP1:0、WP3:1、WP1:1、WP1:3、WP0:1,备用。共混淀粉中小麦淀粉与马铃薯淀粉的配比见表1。

表1 共混淀粉中小麦淀粉与马铃薯淀粉的配比

Table 1 Proportions of wheat starch and potato starch in blended starch samples

样品	小麦淀粉/%	马铃薯淀粉/%
WP1:0	100	0
WP3:1	75	25
WP1:1	50	50
WP1:3	25	75
WP0:1	0	100

1.3.2 淀粉的快速黏度测定

参考Yuan等^[12]的方法并稍作修改,称取淀粉样品2.5g放入快速黏度分析仪(rapid visco analyser, RVA)专用铝盒中,再加入25g去离子水,先用旋浆搅拌制成悬浮液,放入快速黏度分析仪中进行测试,设置初始温度50℃保持1min,然后以12℃/min分别升高至目标温度65、75、85、95℃,在目标温度保持2.5min,再以12℃/min降至50℃。旋浆在初始10s以960r/min旋转搅拌,在剩余的测试时间内以160r/min旋转。每个样品重复测定3次。

共混淀粉在糊化过程中交互作用的判定:参考Yao等^[13]的方法,将小麦淀粉、马铃薯淀粉以及共混淀粉的糊化特征值的实际值 P 分别记为 P_w 、 P_p 和 P_{bd} ,设定共混淀粉中小麦淀粉和马铃薯淀粉所占质量比分别为 W_w 和 W_p ($W_w + W_p = 1$)。相应地,共混淀粉的糊化特征值的预测值 P_{bp} 的计算公式如下。

$$P_{bp} = P_w W_w + P_p W_p$$

若预测值 P_{bp} 与实际值 P_{bd} 几乎接近,则表明小麦淀粉和马铃薯淀粉混合后对淀粉糊化产生加和效应,

反之则为非加和效应。

1.3.3 共混淀粉粉团流变学特性的测定

将淀粉粉团揉搓成直径约 1 cm 的圆柱形长条,用刀切割成长度约 5 mm 的小圆柱体样品用于测试。采用流变仪进行测试,将粉团样品放置在测试平台上,选择直径为 40 mm 的平板夹具,设定间隙为 2 000 μm ,待平板夹具下降至设定间隙后,用刮板刮去挤压出来的多余样品。为了避免测定过程中淀粉粉团水分散失对试验结果造成影响,在暴露于空气的样品四周涂上少量硅油。具体参数设置如下。

应变扫描:温度 25 $^{\circ}\text{C}$,频率 10.0 rad/s,应变 0.001%~100.00%,测定样品储存模量(G')和损耗模量(G'')随应变的变化曲线,确定样品线性黏弹区(linear viscoelastic region, LVR)。

频率扫描:温度 25 $^{\circ}\text{C}$,应变 0.01%(根据应变扫描结果确定),频率 1.0~100.0 rad/s,获得样品储存模量(G')、损耗模量(G'')以及损耗因子($\tan\delta$)随角频率(ω)的变化曲线。

1.3.4 水晶饺皮的制作

采取烫面法,称取淀粉样品 100 g,倒入和面钵中,加入 70 g 沸水后迅速搅拌,再加入 2 g 玉米油揉制成淀粉粉团,放入保鲜袋中密封,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,静置熟化 6 min。将熟化后的淀粉粉团压制厚度为 2 mm 的面皮,用饺子皮模具制成直径为 5 cm 的圆形饺子皮。

1.3.5 生水晶饺皮拉伸特性的测定

采用物性测定仪测定生水晶饺皮的拉伸特性,测试时选取 A/KIE 探头。更换 A/KIE 探头专用的固定装置,将生水晶饺皮放在 A/KIE 探头配备模具的上下两板间,压紧模具,将饺子皮制成厚约 2 mm、长约 60 mm 的细条,将其放在固定平台上测试其拉伸特性。测试参数为测前速度 2 mm/s、测试速度 2 mm/s、测后速度 10.00 mm/s、测试距离 40 mm、触发力 5.0 g。

1.3.6 熟水晶饺皮透明性的测定

参照艾志录等^[5]的方法,略作改动。将制作好的水晶饺皮样品置于蒸锅中,设置相同温度(100~102 $^{\circ}\text{C}$)大火蒸制 10 min。取出蒸熟的水晶饺皮,用刀切成宽 5 mm、长 3 cm 的条型,放入 1 cm 的石英比色皿中(每次测定时需将水晶饺子条型样品放置在比色皿同一侧),置于双光束紫外可见分光光度计中在 620 nm 波长下测定其透光率($T, \%$)。每种样品制作 6 个长条进行测定,取 6 次结果的平均值。

同时,为了直观评价水晶饺皮的透明性,拍摄包馅水晶饺子样品蒸制前后的照片。馅料为玉米粒,每张饺皮包入大小均匀一致的 7 颗玉米粒。将包馅的水晶饺皮置于蒸锅中大火蒸制 10 min,取出后迅速于室温 25 $^{\circ}\text{C}$ 下拍照(记为放置 0 min 的样品),室温放置 90 min

后再次拍照(记为放置 90 min 的样品)。

1.3.7 熟水晶饺皮质地性能的测定

将生水晶饺皮样品置于蒸锅中大火蒸制 10 min,蒸熟后选择厚薄均匀一致的水晶饺皮样品于室温中冷却 5 min,然后采用物性测定仪对其进行质地性能测定。参考 Wang 等^[14]方法并稍作修改,测试探头选取 P/36R 圆柱形探头,测试参数为测前速度 2.0 mm/s、测试速度 0.8 mm/s、测后速度 0.8 mm/s、触发力 5 g、压缩比设置为 70%、两次压缩时间间隔为 5 s。每种样品测定 6 次并取平均值作为结果。

1.4 数据分析

试验数据至少测定 3 次,结果以平均值 \pm 标准差表示。用 Origin 2021 进行绘图,采用 SPSS 27.0 软件对试验数据进行显著性分析和皮尔森相关性分析, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 共混淀粉的糊化特性

不同质量比共混淀粉的糊化特性曲线见图 1。

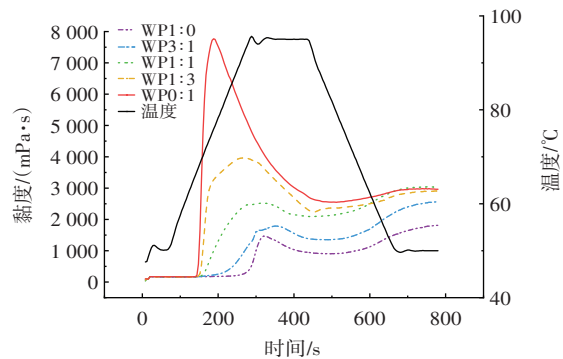


图 1 不同质量比共混淀粉的糊化特性曲线
Fig.1 Pasting curves of starch samples blended in different mass ratios

如图 1 所示,小麦淀粉、马铃薯淀粉及共混淀粉具有不同的糊化特性曲线。其中,小麦淀粉的糊化特性曲线位于最下方,随着马铃薯淀粉添加量的增加,糊化特性曲线逐渐上移,马铃薯淀粉糊化特性曲线位于最上方。同时,马铃薯淀粉添加量的增加使共混淀粉的开始糊化时间提前,物料糊化更为容易。

不同质量比共混淀粉的糊化参数见表 2。

由表 2 可知,小麦淀粉具有较高的糊化温度(91.60 $^{\circ}\text{C}$),而马铃薯淀粉的糊化温度为 66.40 $^{\circ}\text{C}$,马铃薯淀粉的峰值黏度为 7 775.33 mPa·s,约为小麦淀粉的 5.26 倍。这说明二者在淀粉聚集态结构上存在较大差异。马铃薯淀粉含有天然磷酸酯基,磷酸酯基团因负电荷之间的相互排斥作用使马铃薯淀粉具有易糊化、峰值黏度高特性^[15],而小麦淀粉在受热过程中淀粉颗粒吸水膨胀速度远低于马铃薯淀粉^[7]。从谷值黏

表 2 不同质量比共混淀粉的糊化参数

Table 2 Pasting parameters of starch samples blended in different mass ratios

项目	峰值黏度/ (mPa·s)	谷值黏度/ (mPa·s)	崩解值/ (mPa·s)	最终黏度/ (mPa·s)	回生值/ (mPa·s)	糊化温度/°C	峰值时间/ min
WP1:0	实际值	1 478.67±15.31 ^c	903.67±5.51 ^c	575.00±20.81 ^c	1 810.33±30.09 ^d	906.67±24.58 ^b	5.42±0.10 ^b
	预测值	-	-	-	-	-	-
WP3:1	实际值	1 789.00±14.42 ^d	1 351.67±5.13 ^d	437.33±10.50 ^d	2 561.00±23.52 ^c	1 209.33±20.53 ^a	5.87±0.07 ^a
	预测值	3 052.83±15.00 [*]	1 313.67±14.05 [*]	1 739.17±28.25 [*]	2 098.67±28.00 [*]	785.00±14.20 [*]	4.85±0.08 [*]
WP1:1	实际值	2 520.67±13.58 ^c	2 089.33±76.81 ^c	431.33±66.73 ^d	3 033.00±63.41 ^a	943.67±42.44 ^b	5.27±0.07 ^c
	预测值	4 627.00±16.09 [*]	1 723.67±22.77 [*]	2 903.33±35.75 [*]	2 387.00±26.06 [*]	663.33±4.25 [*]	4.29±0.05 [*]
WP1:3	实际值	3 963.00±16.09 ^b	2 229.67±62.64 ^b	1 733.33±62.85 ^b	2 907.33±34.02 ^b	677.67±36.12 ^c	4.45±0.04 ^d
	预测值	6 201.17±18.33 [*]	2 133.67±31.52	4 067.50±43.28 [*]	2 675.33±24.29 [*]	541.67±7.34 [*]	3.72±0.04 [*]
WP0:1	实际值	7 775.33±21.36 ^a	2 543.67±40.28 ^a	5 231.67±50.84 ^a	2 963.67±22.74 ^b	420.00±17.58 ^d	3.15±0.04 ^c
	预测值	-	-	-	-	-	-

注:同列不同小写字母表示不同样品同一指标的实际值差异显著($P<0.05$);*表示预测值与对应样品的实际值差异显著($P<0.05$);-表示此项无数据。

度与峰值黏度比值来看,马铃薯淀粉为 0.327,而小麦淀粉为 0.611,对于共混样品,WP1:1 的比值最大(0.829),WP3:1 的比值(0.756)及 WP1:3 的比值(0.563)次之,表明马铃薯淀粉热糊稳定性较差,二者质量比为 1:1 的共混粉热糊稳定性最好。这也反映在它们的崩解值大小上,马铃薯淀粉的崩解值为小麦淀粉的 9.10 倍,而 WP1:1 的崩解值最小。这表明两种淀粉在快速黏度分析过程存在相互作用。此外,对于共混淀粉,其峰值黏度的实际值均显著低于预测值,而谷值黏度的实际值均高于预测值,由此造成崩解值的实际值也显著低于预测值。推测小麦淀粉在体系中阻碍了马铃薯淀粉的吸水膨胀,淀粉颗粒更加完整而耐剪切,从而导致峰值黏度和崩解值降低^[16]。最终黏度反映了淀粉的增稠能力,最终黏度从大到小依次为 WP1:1 > WP1:3 ≈ WP0:1 > WP3:1 > WP1:0。共混淀粉的最终黏度实际值显著大于预测值,由此可知,共混淀粉在最终黏度上也表现出非加和效应。将二者以质量比 1:1 共混可使淀粉具有最大的增稠能力。共混淀粉在回生值上同样表现出非加和效应,WP3:1 的回生值最大,这表明适当的配比促进了小麦淀粉与马铃薯淀粉分子链段之间的相互作用^[17]。

为了直观分析共混淀粉的非加和效应,将 WP3:1、WP1:1、WP1:3 的实际及预测曲线分别作图,如图 2 所示。

由图 2 可知,WP1:3 的实际及预测曲线在 95 °C 保温及冷却过程中几乎重叠,二者的差异主要体现在升温到 95 °C 的过程,这说明在该混合比例下二者的相互作用主要影响了淀粉吸水膨胀发生糊化的过程。对于 WP1:1 和 WP3:1 而言,二者的相互作用影响了快速黏度分析的全过程,共混淀粉的最终黏度明显高于预测值。罗芳会等^[18]研究发现,玉米淀粉和马铃薯淀粉共混糊化时发生了相互作用,共混淀粉的糊化特征值

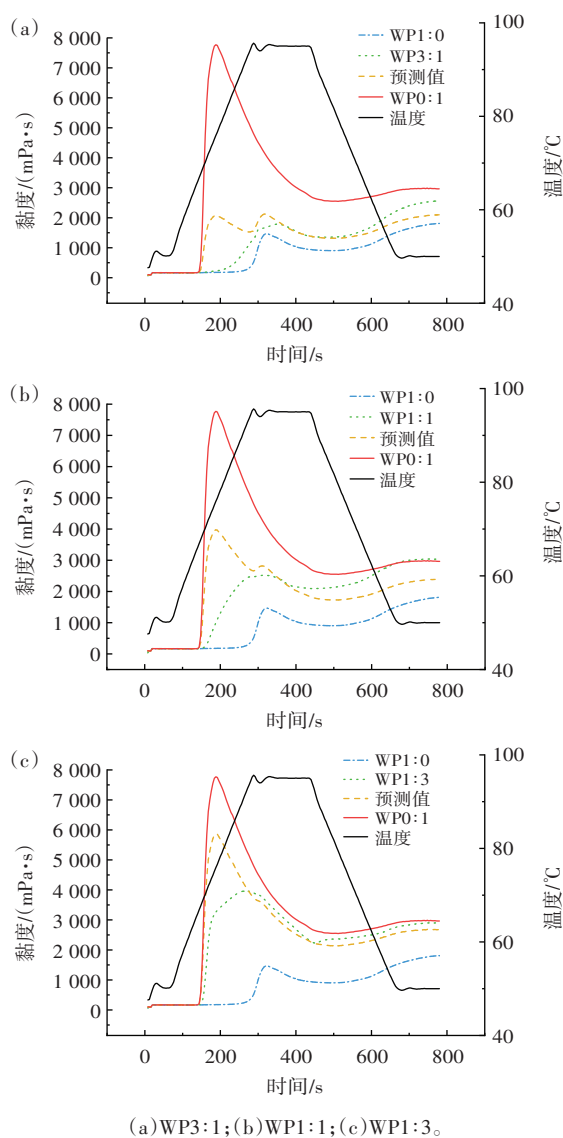


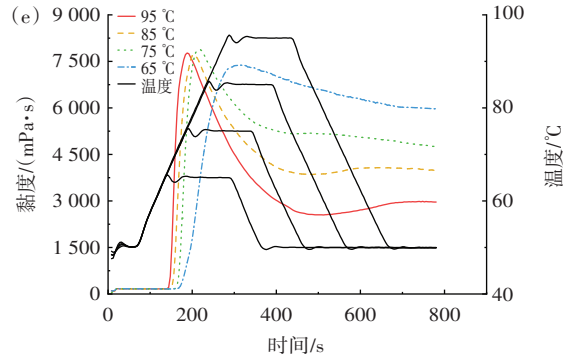
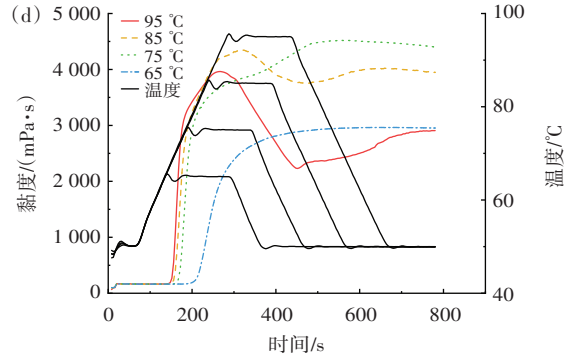
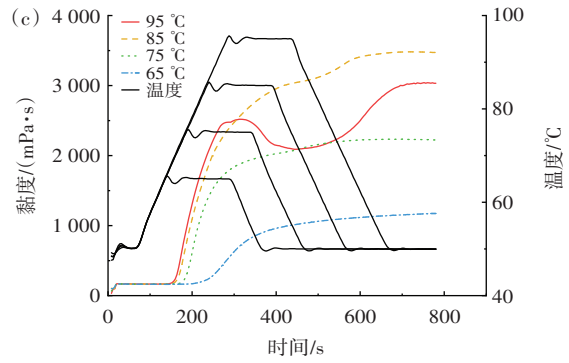
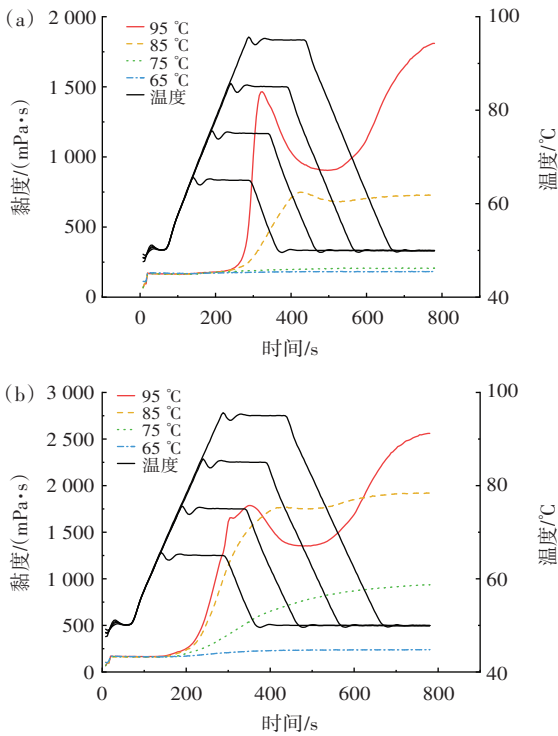
图 2 共混淀粉的糊化特性曲线及其预测曲线
Fig.2 Pasting parameters and their predicted values of blended starch samples

介于单一淀粉之间,但不呈线性关系,即呈现非加和效应。

2.2 共混淀粉在不同温度下的水合特性

研究发现,热烫面团的性能与水温、加水量密切相关。李光磊等^[3]研究发现玉米淀粉饺子皮透明度受和面的水温及加水量影响。为研究共混对烫面法粉团中淀粉水合特性的影响,将小麦淀粉与马铃薯淀粉不同质量比样品制备悬浮液,在快速黏度分析仪上设定不同目标加热温度(65、75、85、95℃),得到糊化特性曲线如图3所示,相关糊化参数见表3。

由图3(a)、表3可知,小麦淀粉(WP1:0)在目标温度为65、75℃时难以糊化,体系黏度始终处于较低水平;随着目标温度升高,其峰值黏度、谷值黏度、最终



(a) WP1:0; (b) WP3:1; (c) WP1:1; (d) WP1:3; (e) WP0:1。

图3 共混淀粉在65、75、85、95℃加热温度下的糊化特性曲线
Fig.3 Pasting parameters of blended starch samples heated at 65, 75, 85℃, and 95℃

表3 共混淀粉在65、75、85、95℃加热温度下的糊化参数

Table 3 Pasting parameters of blended starch samples heated at 65, 75, 85℃, and 95℃

样品	温度/℃	峰值黏度/ (mPa·s)	谷值黏度/ (mPa·s)	崩解值/ (mPa·s)	最终黏度/ (mPa·s)	回生值/ (mPa·s)	糊化温度/℃	峰值时间/ min
WP1:0	65	183.67±2.08 ^d	179.67±3.06 ^d	4.00±1.73 ^c	183.00±6.08 ^d	3.33±3.21 ^c	-	6.09±0.91 ^{ab}
	75	200.33±3.79 ^c	193.33±2.52 ^c	7.00±2.00 ^c	206.67±3.51 ^c	13.33±3.21 ^c	-	6.71±0.34 ^{ab}
	85	745.67±34.36 ^b	568.67±35.44 ^b	177.00±4.58 ^b	728.67±25.01 ^b	160.00±12.53 ^b	85.08±0.08 ^a	7.00±0.00 ^a
	95	1 478.67±15.31 ^a	903.67±5.51 ^a	575.00±20.81 ^a	1 810.33±30.09 ^a	906.67±24.58 ^a	91.60±0.91 ^a	5.42±0.10 ^b
WP3:1	65	232.33±18.58 ^c	224.00±14.42 ^d	8.33±4.16 ^d	239.67±17.95 ^d	15.67±3.79 ^d	-	6.91±0.16 ^a
	75	679.00±20.78 ^b	568.00±20.78 ^c	111.00±0.00 ^c	929.33±24.83 ^c	361.33±4.04 ^b	71.08±3.44 ^b	7.00±0.00 ^a
	85	1 763.33±2.89 ^a	1 600.00±2.65 ^a	163.33±5.51 ^b	1 919.33±4.04 ^b	319.33±6.66 ^c	81.10±0.80 ^a	6.95±0.04 ^a
	95	1 789.00±14.42 ^a	1 351.67±5.13 ^b	437.33±10.50 ^a	2 561.00±23.52 ^a	1 209.33±20.53 ^a	79.92±0.03 ^a	5.87±0.07 ^b
WP1:1	65	986.67±25.72 ^d	891.33±27.79 ^d	95.33±2.08 ^c	1 173.33±27.02 ^d	282.00±1.00 ^c	65.02±0.03 ^c	7.00±0.00 ^a
	75	2 048.33±32.35 ^c	1 980.00±31.80 ^c	68.33±4.93 ^c	2 223.00±32.23 ^c	243.00±8.89 ^c	73.15±1.63 ^a	7.00±0.00 ^a
	85	3 005.00±8.89 ^a	2 826.67±8.02 ^a	178.33±3.21 ^b	3 472.33±10.26 ^a	645.67±8.14 ^b	69.65±0.95 ^b	7.00±0.00 ^a
	95	2 520.67±13.58 ^b	2 089.33±76.81 ^b	431.33±66.73 ^a	3 033.00±63.41 ^b	943.67±42.44 ^a	68.85±0.48 ^b	5.27±0.07 ^b

续表3 共混淀粉在65、75、85、95℃加热温度下的糊化参数
Continue table 3 Pasting parameters of blended starch samples heated at 65, 75, 85 °C, and 95 °C

样品	温度/℃	峰值黏度/ (mPa·s)	谷值黏度/ (mPa·s)	崩解值/ (mPa·s)	最终黏度/ (mPa·s)	回生值/ (mPa·s)	糊化温度/℃	峰值时间/ min
WP1:3	65	2 844.00±36.72 ^d	2 720.33±35.92 ^c	123.67±5.86 ^d	2 953.00±53.84 ^c	232.67±20.40 ^c	65.05±0.00 ^c	7.00±0.00 ^a
	75	4 189.67±39.00 ^b	3 950.67±24.09 ^a	239.00±43.35 ^c	4 405.67±35.22 ^a	455.00±31.75 ^b	70.43±0.46 ^a	7.00±0.00 ^a
	85	4 358.33±75.96 ^a	3 750.67±53.63 ^b	607.67±41.02 ^b	3 947.67±57.62 ^b	197.00±4.00 ^c	67.80±0.43 ^b	5.29±0.10 ^b
	95	3 963.00±16.09 ^c	2 229.67±62.64 ^d	1 733.33±62.85 ^a	2 907.33±34.02 ^d	677.67±36.12 ^a	67.23±0.53 ^{bc}	4.45±0.04 ^c
WP0:1	65	7 542.33±60.35 ^b	6 011.67±116.57 ^a	1 530.67±175.51 ^d	5 973.33±119.32 ^a	-38.33±3.51 ^c	64.90±0.61 ^c	4.98±0.62 ^a
	75	7 938.67±26.76 ^a	4 842.00±19.08 ^b	3 096.67±42.19 ^c	4 759.67±19.14 ^b	-82.33±0.58 ^d	69.95±0.80 ^a	3.60±0.12 ^b
	85	7 715.00±10.82 ^b	3 851.33±13.32 ^c	3 863.67±23.50 ^b	3 983.67±22.48 ^c	132.33±11.72 ^b	67.47±0.08 ^b	3.38±0.04 ^b
	95	7 775.33±21.36 ^b	2 543.67±40.28 ^d	5 231.67±50.84 ^a	2 963.67±22.74 ^d	420.00±17.58 ^a	66.40±0.52 ^b	3.15±0.04 ^b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),-表示此项无数据。

黏度和回生值升高,当目标温度为95℃时小麦淀粉的峰值时间最短(5.42 min),体系峰值黏度达到最大(1 478.67 mPa·s),表明在该温度下淀粉粒快速吸水膨胀过程中,膨润淀粉粒相互摩擦使糊液黏度持续上升。由图3(b)、表3可知,WP3:1在目标温度为65℃时,共混淀粉几乎没有糊化,75℃时共混淀粉的黏度曲线位于小麦淀粉的上方,85℃时共混淀粉的耐剪切性能较好,在目标温度95℃时峰值黏度出现两个分裂峰,这主要是两种淀粉到达峰值黏度时间不同导致的。由图3(c)、表3可知,WP1:1在目标温度为65、75、85℃时,混合淀粉表现出良好的耐剪切性能,黏度一直呈上升趋势,而95℃时出现热糊崩解现象,这说明在该温度下溶胀淀粉维持自身结构的能力下降,以致在冷却过程中淀粉糊的短期回生性能不及85℃下制备的淀粉糊^[19]。总体上,单一淀粉及共混淀粉的崩解值均随目标温度升高而增加。淀粉颗粒在受热时抗剪切能力变差,淀粉颗粒更容易崩解破裂^[20]。Liu等^[21]指出,淀粉糊化过程中由于加热温度的升高使直链淀粉-脂质复合物熔化,并显著降低膨胀淀粉颗粒的完整性。最终黏度反映淀粉糊的增稠能力,同时反映淀粉糊在快速降温过程中淀粉分子的短期回生性能。由图3(d)、表3可知,WP1:3在75℃时的最终黏度达到最大值,而再升高目标温度最终黏度反而下降,在95℃时的最终黏度甚至低于65℃时的最终黏度。由图3(e)、表3可知,马铃薯淀粉(WP0:1)最终黏度的最大值出现在目标温度为65℃时,且随着目标温度升高,马铃薯淀粉的最终黏度显著下降。

2.3 共混淀粉粉团的流变学特性

2.3.1 粉团的应变扫描

水晶饺皮需要由制备好的粉团压片得到,粉团适宜的黏弹性是其能够压制成片的关键^[22]。淀粉粉团是典型的黏弹体,因而采用动态流变学测试来表征粉团内部结构和基本性质^[23]。在小振幅频率扫描测试前,先通过动态应变扫描确定淀粉粉团的线性黏弹区,由小麦

淀粉、马铃薯淀粉以及二者的共混淀粉制得5种粉团样品的动态应变扫描曲线如图4所示。储存模量(G')反映样品的弹性,损耗模量(G'')反映样品的黏性, G' 越大说明粉团的弹性越大, G'' 越大说明粉团的黏性越大。

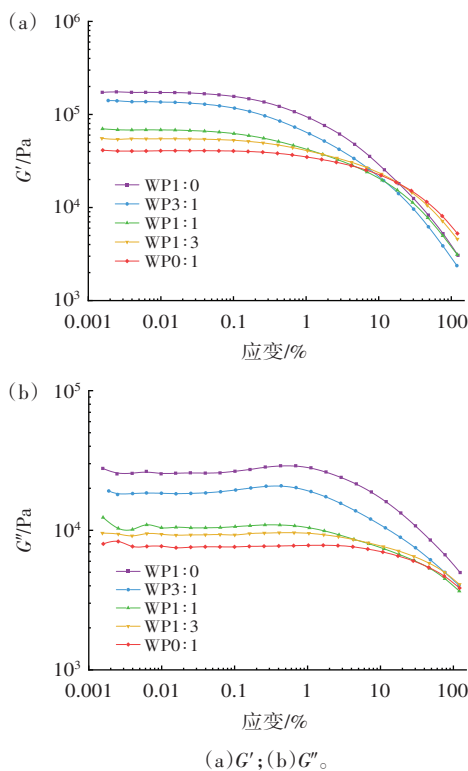


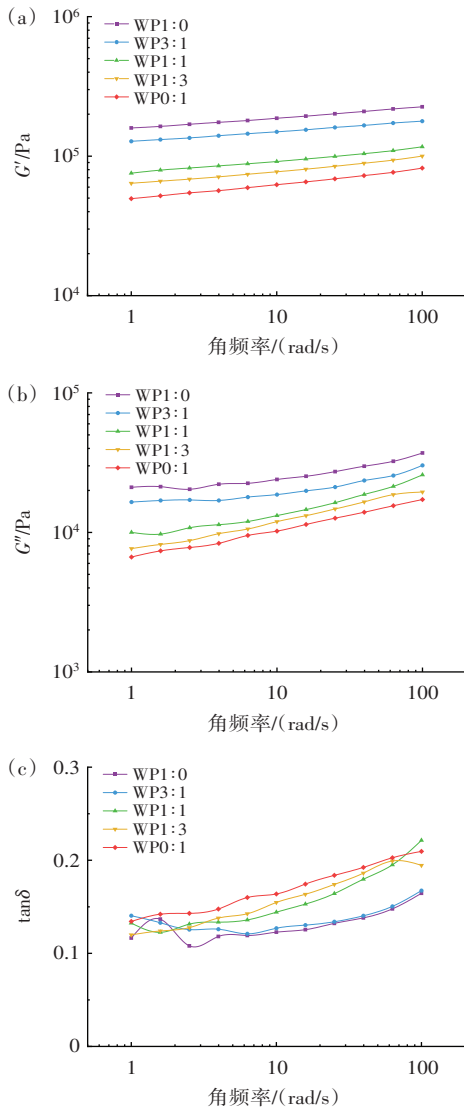
图4 不同水晶饺子粉团的应变扫描曲线
Fig.4 Strain sweep curves of different crystal dumpling starch dough samples

由图4可知,所有粉团样品的 G' 均大于 G'' ,说明样品具有固体黏弹性特征^[24]。所有粉团样品的 G' 和 G'' 随应变增大先保持平稳再逐渐下降,其中小麦淀粉粉团(WP1:0)曲线在0.01%应变以上即开始出现下降趋势,表明该粉团内部结构在超过该应变水平后开始破裂^[25]。马铃薯淀粉粉团(WP0:1)的LVR范围最大;随着小麦淀粉添加量的增加,共混淀粉粉团WP1:3、

WP1:1、WP3:1的LVR范围逐渐变小;小麦淀粉粉团(WP1:0)的LVR范围最小。LVR长度可以反映样品粉团内部结构的稳定性^[24],由此说明粉团样品WP0:1的内部结构最为稳定。确定所有粉团在0.001%~0.01%范围内可以保持其结构稳定性,因此选取0.01%作为后续动态频率扫描的恒定应变值。

2.3.2 粉团的频率扫描

由小麦淀粉、马铃薯淀粉以及二者共混淀粉制得5种粉团样品 G' 、 G'' 和 $\tan\delta$ 随角频率(ω)的变化曲线如图5所示。



(a) G' ; (b) G'' ; (c) $\tan\delta$ 。

图5 不同水晶饺子粉团的频率扫描曲线

Fig.5 Frequency sweep curves of different crystal dumpling starch dough samples

由图5(a)、图5(b)可知,在扫描频率1~100 rad/s范围内,所有粉团样品 G' 和 G'' 均随 ω 的增大而增大,表明所有粉团样品呈现频率依赖性。由图5(a)可知,5种粉团样品的 G' 大小关系为WP1:0>WP3:1>WP1:1>

WP1:3>WP0:1,小麦淀粉(WP1:0)粉团的 G' 最大,马铃薯淀粉(WP0:1)粉团的 G' 最小,共混粉团的 G' 介于两者之间,并且随着马铃薯淀粉添加量的增加,制得粉团的 G' 也随之减小。由图5(b)可知,所有粉团样品的 G'' 也呈现与 G' 相同趋势。粉团的黏弹性和结构强度随着马铃薯淀粉添加量的增加而减小。损耗因子 $\tan\delta$ 为损耗模量 G'' 与储存模量 G' 的比值,反映粉团样品的黏弹性比。由图5(c)可知, $\tan\delta$ 随 ω 的增大整体呈逐渐升高的趋势,表明粉团的黏性随角频率增大而逐渐增大;然而所有样品的 $\tan\delta$ 值都小于1,表明粉团样品总体均呈现类似固体的弹性特征^[26]。结果表明,小麦淀粉粉团更加坚实且不易流动,向其中添加马铃薯淀粉可以促进粉团的变形和流动,粉团更加柔软、延展性更佳,从而更容易压制、延展得到水晶饺皮。在制作粉团加入沸水和面的过程中,马铃薯淀粉更加容易糊化(前文测得马铃薯淀粉糊化温度最低,约为66℃),而糊化的马铃薯淀粉可以作为未糊化淀粉颗粒的黏合剂和润滑剂(小麦淀粉糊化温度约92℃)^[22]。此外,在水晶饺皮制作时发现,太过柔软的粉团压制成片很难得到光滑平整的水晶饺皮,而黏弹性适中的WP1:1粉团样品更易于制得光滑的水晶饺皮。

2.4 生水晶饺皮的拉伸特性

由小麦淀粉、马铃薯淀粉以及二者共混淀粉制成的生水晶饺皮的拉伸特性结果见表4。拉伸特性可以反映粉团网络结构的稳定性以及延展性^[27]。水晶饺皮的拉伸力越大,说明粉团网络结构越紧密;拉伸位移越大,说明水晶饺皮的延展性越好。

表4 不同生水晶饺皮的拉伸特性

Table 4 Tensile properties of different raw crystal dumpling wrappers

样品	拉伸力/g	拉伸位移/mm
WP1:0	144.57±3.05 ^c	11.43±1.06 ^d
WP3:1	193.88±2.23 ^d	14.12±0.64 ^e
WP1:1	253.77±3.07 ^e	14.83±0.77 ^{bc}
WP1:3	284.97±2.47 ^b	15.20±0.24 ^{ab}
WP0:1	334.52±2.81 ^a	16.00±0.94 ^a

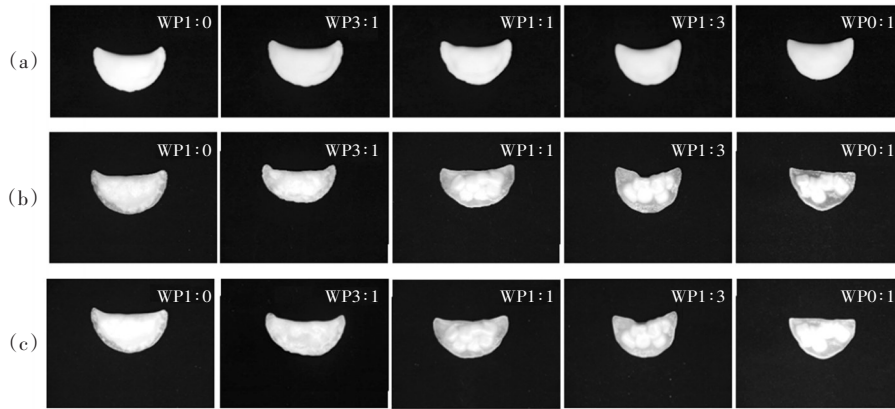
注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表4可知,马铃薯淀粉生水晶饺皮的拉伸力及拉伸距离均高于小麦淀粉生水晶饺皮;随着共混淀粉中马铃薯淀粉比例增加,水晶饺皮的拉伸力及拉伸位移均呈上升的趋势。结果表明,增加马铃薯淀粉添加量可以使粉团结构更加紧密,并提升生水晶饺皮的延展性。

2.5 熟水晶饺皮的品质评价

2.5.1 透明性

透明性是水晶饺皮重要的品质指标之一。图6为不同质量比共混淀粉制得水晶饺子蒸熟前后的照片。



(a)生水晶饺子;(b)蒸熟后室温 25 °C下放置 0 min;(c)蒸熟后室温 25 °C下放置 90 min。

图 6 生、熟水晶饺子外观

Fig.6 Appearance of raw and cooked crystal dumplings

由图 6 可知,不同生水晶饺皮的透明性无明显区别,而熟水晶饺皮的透明性存在差异。其中,马铃薯淀粉(WP0:1)制作的饺皮透明性最好,其次是 WP1:3、WP1:1、WP3:1、WP1:0。此外,熟水晶饺皮的透明性可由其透光率反映,结果见表 5。

表 5 不同熟水晶饺皮的透光率

Table 5 Transmittance of different cooked crystal dumpling wrappers

样品	透光率/%
WP1:0	0.88±0.10 ^e
WP3:1	1.77±0.05 ^d
WP1:1	2.42±0.12 ^c
WP1:3	3.13±0.10 ^b
WP0:1	3.87±0.12 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表 5 可知,蒸熟后不同水晶饺皮之间的透明性存在差异,小麦淀粉水晶饺皮(WP1:0)的透明性最差,

共混淀粉水晶饺皮随着马铃薯淀粉添加量增加,透明性逐渐增大,马铃薯淀粉水晶饺皮(WP0:1)的透明性最高。先前研究发现,适量添加磷酸单酯淀粉可提升玉米淀粉饺子皮透明度^[3],而向水晶饺皮原料粉(小麦淀粉:玉米淀粉=3:1,质量比)中添加 5% 马铃薯羟丙基淀粉可使饺皮透明度升高 12.7%^[8]。Yadav 等^[11]研究发现,木豆或大米的淀粉以 70:30(质量比)混合制作粉条,可兼顾两种淀粉的性能优势,使粉条具有最大透明度、较佳口感和质地。Sandhu 等^[10]研究表明大米淀粉和马铃薯淀粉以 1:1(质量比)混合可以生产出接受度良好的粉条,粉条的蒸煮时间缩短,蒸煮得率增加,粉条更加透明滑爽。因此,制作得到的熟水晶饺皮的透明性可通过调整混合淀粉的质量比实现,若生产透明性高的水晶饺皮产品,应该考虑提高原料中马铃薯淀粉的添加量。

2.5.2 质地性能

熟水晶饺皮的口感或适口性可以由其质地性能反映。不同熟水晶饺皮的质地性能见表 6。

表 6 不同熟水晶饺皮的质地性能

Table 6 Textural properties of different cooked crystal dumpling wrappers

样品	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性	回复性
WP1:0	28 156.091 3±354.190 0 ^e	0.871 5±0.020 0 ^e	0.985 3±0.000 0 ^{abc}	24 190.993 0±1 020.170 0 ^e	1.007 3±0.010 0 ^a
WP3:1	29 659.274 2±293.910 0 ^d	0.941 3±0.010 0 ^b	0.983 7±0.000 0 ^{bc}	27 464.696 2±434.910 0 ^d	1.006 3±0.010 0 ^a
WP1:1	30 523.743 5±65.600 0 ^e	0.942 8±0.000 0 ^b	0.986 2±0.000 0 ^{ab}	28 379.555 5±203.310 0 ^e	0.987 0±0.010 0 ^b
WP1:3	33 242.061 0±172.770 0 ^b	0.952 0±0.010 0 ^{ab}	0.989 8±0.000 0 ^a	31 331.124 8±493.580 0 ^b	1.001 3±0.010 0 ^a
WP0:1	37 000.798 3±359.550 0 ^a	0.963 5±0.000 0 ^a	0.980 2±0.010 0 ^c	34 952.151 8±176.810 0 ^a	0.974 3±0.010 0 ^c

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

如表 6 所示,小麦淀粉水晶饺皮(WP1:0)的硬度、弹性和咀嚼性最小,而马铃薯淀粉水晶饺皮(WP0:1)的硬度、弹性和咀嚼性最大。随着共混淀粉中马铃薯淀粉添加量的增加,熟水晶饺皮的硬度、弹性及咀嚼性

均逐渐升高。不同水晶饺皮样品之间的内聚性难以看出显著差异,表明共混淀粉中小麦淀粉与马铃薯淀粉质量比对所制作的水晶饺皮内聚性几乎没有影响。马铃薯淀粉水晶饺皮(WP0:1)的回复性最小,向其中添

加小麦淀粉可以使其回复性上升。

2.5.3 淀粉糊化特性与熟水晶饺皮品质相关性分析

淀粉糊化特性与熟水晶饺皮透明性及质地参数的相关性分析见表7。

表7 淀粉糊化特性与熟水晶饺皮透明性及质地参数的相关性分析

Table 7 Correlations of pasting properties of starch with the transparency and textural properties of cooked crystal dumpling wrappers

指标	透光率	硬度	弹性	内聚性	咀嚼性	回复性
峰值黏度	0.896**	0.978**	0.608**	-0.314	0.933**	-0.713**
谷值黏度	0.969**	0.883**	0.818**	-0.064	0.917**	-0.698**
崩解值	0.801**	0.932**	0.491**	-0.372*	0.864**	-0.661**
最终黏度	0.842**	0.671**	0.886**	-0.009	0.765**	-0.579**
回生值	-0.765**	-0.860**	-0.348	0.130	-0.778**	0.597**
糊化温度	-0.921**	-0.784**	-0.872**	-0.028	-0.854**	0.597**

注:*表示相关性显著($P<0.05$);**表示相关性极显著($P<0.01$)。

由表7可知,水晶饺皮的透光率与淀粉的峰值黏度、谷值黏度、崩解值及最终黏度呈极显著正相关($P<0.01$),而与淀粉的回生值及糊化温度呈极显著负相关($P<0.01$)。这表明越容易糊化、不易老化的淀粉所制作的水晶饺皮透明性越好^[28]。糊化过程中当淀粉颗粒更易膨胀、破碎,直链淀粉不断从淀粉颗粒中溶出,淀粉糊中颗粒残留物或碎片消失,使其几乎没有光折射,而且在熟制后不易短期回生,从而使得熟水晶饺皮具有更高的透明性^[29]。熟水晶饺皮质地性能与淀粉糊化特性密切相关。具体来说,熟水晶饺皮硬度、弹性和咀嚼性与淀粉的峰值黏度、谷值黏度、崩解值及最终黏度呈极显著正相关($P<0.01$),与淀粉的糊化温度呈极显著负相关($P<0.01$)。随着马铃薯淀粉添加量的增加,共混淀粉的吸水膨胀力增强,在糊化过程中淀粉分子更为伸展,从而使熟水晶饺皮具有较优的凝胶结构,因此呈现更高的弹性^[30]。回复性表示样品在第一次压缩过程中的回弹能力,熟水晶饺皮回复性与峰值黏度、谷值黏度、崩解值及最终黏度呈极显著负相关($P<0.01$),与淀粉的回生值及糊化温度呈极显著正相关($P<0.01$)。然而,内聚性仅与崩解值呈显著负相关($P<0.05$)。对于共混淀粉,由于马铃薯淀粉与小麦淀粉在糊化过程中的相互作用,共混淀粉糊及淀粉粉团内部网络结构的致密性增强,因此共混淀粉制作的水晶饺皮呈现出更优良的质地。

3 结论

以小麦淀粉、马铃薯淀粉为水晶饺皮加工原料,研究发现,小麦淀粉的峰值黏度(1 478.67 mPa·s)、崩解值(575.00 mPa·s)和最终黏度(1 810.33 mPa·s)显著低于马铃薯淀粉(分别为 7 775.33、5 231.67、

2 963.67 mPa·s),而小麦淀粉的回生值(906.67 mPa·s)显著高于马铃薯淀粉(420.00 mPa·s)。将二者以不同质量比(1:0、3:1、1:1、1:3、0:1)混合,得到的共混淀粉在糊化过程中存在交互作用,共混淀粉的峰值黏度、崩解值、谷值黏度、最终黏度及回生值呈现非加和效应。单一淀粉及共混淀粉在不同目标温度(65、75、85、95 °C)下淀粉粒吸水膨胀速度及直链淀粉溶出上存在差异,因而具有不同的糊化特性曲线。同时,淀粉共混影响淀粉粉团的流变学性能,小麦淀粉粉团流动性较差,通过复配适量马铃薯淀粉,可改善粉团的延展性,二者以质量比 1:1 共混制作的淀粉粉团具有较佳的加工性能。共混对生水晶饺皮的外观无明显影响,但是能显著影响其拉伸性能。共混还会够影响熟水晶饺皮的透明性和质地,其中透明性、硬度、弹性、咀嚼性等指标随着马铃薯淀粉添加量的增加而增大。熟水晶饺皮的透明性和质地与淀粉的糊化参数之间存在显著相关性。因此,通过淀粉共混可调节水晶饺皮加工原料的性能,从而调控生熟水晶饺皮的品质。

参考文献:

- [1] 龚永强. 两种改性淀粉与小麦淀粉相容性及在水晶饺皮中的应用研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
GONG Yongqiang. Compatibility of two modified starches with wheat starch and their application in crystal dumpling skin[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022.
- [2] 卢炳书. 广式虾饺制作工艺和创新分析[J]. 现代食品, 2023, 29(8): 118-120.
LU Bingshu. Analysis on the manufacturing technology and innovation of Cantonese shrimp dumplings[J]. Modern Food, 2023, 29(8): 118-120.
- [3] 李光磊, 李刚, 曾洁, 等. 玉米淀粉饺子皮透明度研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(9): 89-90, 94.
LI Guanglei, LI Gang, ZENG Jie, et al. Study on the transparency of corn starch Chinese dumpling wrappers[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(9): 89-90, 94.
- [4] 蔡洁. 预蒸制和微波控压复热对速冻广式水晶虾饺品质的影响及控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
CAI Jie. Influence and control of pre-steaming and microwave controlled pressure reheating on the quality of quick-frozen Cantonese crystal shrimp dumplings[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [5] 艾志录, 孙茜茜, 潘治利, 等. 不同来源淀粉特性对水晶皮品质品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 318-324.
AI Zhilu, SUN Xiqi, PAN Zhili, et al. Effect of different starch source properties on crystal leather textural quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 318-324.
- [6] WATERSCHOOT J, GOMAND S V, FIERENS E, et al. Starch blends and their physicochemical properties[J]. Starch - Stärke, 2015, 67(1/2): 1-13.
- [7] ZHU F, HUA Y Y, LI G T. Physicochemical properties of potato, sweet potato and quinoa starch blends[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105278.
- [8] 王静文, 罗杨合, OKSANA M. 几种变性淀粉水晶饺子皮特性的

- 比较研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 36-41.
- WANG Jingwen, LUO Yanghe, OKSANA M. Comparative study on properties of several modified starch crystal dumpling skins[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(8): 36-41.
- [9] 杨国堂, 高晗, 李先想. 藕粉荸荠粉在虾饺中应用[J]. 食品科技, 2008, 33(5): 48-50.
- YANG Guotang, GAO Han, LI Xianxiang. Study on the shrimp dumpling with the *Lotus* root powder and water chestnut powder[J]. Food Science and Technology, 2008, 33(5): 48-50.
- [10] SANDHU K S, KAUR M, MUKESH. Studies on noodle quality of potato and rice starches and their blends in relation to their physicochemical, pasting and gel textural properties[J]. LWT - Food Science and Technology, 2010, 43(8): 1289-1293.
- [11] YADAV B S, YADAV R B, KUMAR M. Suitability of pigeon pea and rice starches and their blends for noodle making[J]. LWT - Food Science and Technology, 2011, 44(6): 1415-1421.
- [12] YUAN T Z, LIU S Y, REIMER M, et al. Evaluation of pasting and gelling properties of commercial flours under high heating temperatures using Rapid Visco Analyzer 4800[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128616.
- [13] YAO Y, ZHANG J, DING X. Retrogradation of starch mixtures containing rice starch[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1): 260-265.
- [14] WANG H W, XIAO N Y, WANG X T, et al. Effect of pregelatinized starch on the characteristics, microstructures, and quality attributes of glutinous rice flour and dumplings[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 248-256.
- [15] ZAIDUL I S M, NIK NORULAINI N A, MOHD OMAR A K, et al. RVA analysis of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, yam, and cassava starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 69(4): 784-791.
- [16] ZHANG Y Y, GU Z B, HONG Y, et al. Pasting and rheologic properties of potato starch and maize starch mixtures[J]. Starch - Stärke, 2011, 63(1): 11-16.
- [17] LI S H, YE F Y, ZHOU Y, et al. Rheological and textural insights into the blending of sweet potato and cassava starches: In hot and cooled pastes as well as in fresh and dried gels[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 901-911.
- [18] 罗芳会, 刘传菊, 聂荣祖, 等. 玉米淀粉和马铃薯淀粉共混糊化及凝胶特性的研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(8): 159-165.
- LUO Fanghui, LIU Chuanju, NIE Rongzu, et al. Gelatinization and gel properties of blends of corn and potato starches[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(8): 159-165.
- [19] YUAN T Z, AI Y F. Pasting and gelation behaviors and *in vitro* digestibility of high-amylose maize starch blended with wheat or potato starch evaluated at different heating temperatures[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107783.
- [20] TIAN Y, QU J Z, ZHOU Q, et al. High pressure/temperature pasting and gelling of starch related to multilevel structure - analyzed with RVA 4800[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 295: 119858.
- [21] LIU S Y, YUAN T Z, WANG X Y, et al. Behaviors of starches evaluated at high heating temperatures using a new model of Rapid Visco Analyzer-RVA 4800[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 217-228.
- [22] SEETAPAN N, FUONGFUCHAT A, GAMONPILAS C, et al. Effect of modified tapioca starch and xanthan gum on low temperature texture stability and dough viscoelasticity of a starch-based food gel[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(3): 446-453.
- [23] 密更, 王甜, 李学鹏, 等. 淀粉基共混面团的流变表征及特性研究进展[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 397-407.
- MI Geng, WANG Tian, LI Xuepeng, et al. Rheological characterization and properties of starch-based dough: A review[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(3): 397-407.
- [24] ONYANGO C, MUTUNGI C, UNBEHEND G, et al. Rheological and textural properties of *Sorghum* -based formulations modified with variable amounts of native or pregelatinised cassava starch[J]. LWT - Food Science and Technology, 2011, 44(3): 687-693.
- [25] LAZARIDOU A, DUTA D, PAPAGEORGIOU M, et al. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3): 1033-1047.
- [26] FENG Y Y, MU T H, ZHANG M, et al. Effects of different polysaccharides and proteins on dough rheological properties, texture, structure and *in vitro* starch digestibility of wet sweet potato vermicelli[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 1-10.
- [27] 杨岩晓, 牛永武, 牛奔, 等. 甘露糖赤藓糖醇脂对冷冻熟面品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 37-42.
- YANG Yanxiao, NIU Yongwu, NIU Ben, et al. Effects of mannosyl-erythritol lipids on the quality of frozen cooked noodles[J]. Food Science, 2024, 45(14): 37-42.
- [28] LIN D R, ZHOU W, YANG Z F, et al. Study on physicochemical properties, digestive properties and application of acetylated starch in noodles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 128: 948-956.
- [29] SINGH N, CHAWLA D, SINGH J. Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starch[J]. Food Chemistry, 2004, 86(4): 601-608.
- [30] ZHANG N N, YANG S, KUANG Y Y, et al. Effects of different modified starches and gums on the physicochemical, functional, and microstructural properties of tapioca pearls[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 222-231.