

羟丙基二淀粉磷酸酯对水晶饺子皮粉理化特性的影响

吴婧华, 徐梅禹, 陆雅欣, 徐磊
(淮阴工学院生命科学与食品工程学院, 淮安 223003)

摘要:为了解变性淀粉在水晶饺子皮中的应用潜力,本研究在水晶饺子皮粉(CDF)中分别加入质量分数 0%、5%、10%、15% 和 20% 的羟丙基二淀粉磷酸酯(HDP),以探究 HDP 对 CDF 糊化、流变、短期回生特性的影响。结果表明,HDP 的添加可以提高 CDF 的峰值黏度、谷值黏度和终值黏度,而降低相对崩解值、相对回生值和起糊温度($P < 0.05$)。随着 HDP 添加量的增加,CDF 的膨胀势从 13.08 g/g 逐渐上升至 15.48 g/g ($P < 0.05$)。添加 HDP 后,CDF 的短期回生得到显著抑制,CDF 凝胶储能模量 G' 和损耗模量 G'' 降低,最大柔量值从 0.009 Pa⁻¹ 逐渐增加到 0.024 Pa⁻¹,表明 CDF 凝胶黏弹性减弱,流动性增强。微观结构观察发现,添加 HDP 可使 CDF 凝胶空腔变小,结构更加紧凑。随着 HDP 添加量的增加,熟水晶饺子皮的表面更加光滑,透光率从 4.68% 逐渐增加到 15.20% ($P < 0.05$)。

关键词:羟丙基二淀粉磷酸酯;水晶饺子粉;糊化;流变;回生

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001296

中图分类号:TS231 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0055-07

网络首发时间:2025-12-31 13:40:22

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251231.1248.004>

Effect of hydroxypropyl distarch phosphate on physicochemical properties of crystal dumpling flour

Wu Jinghua, Xu Meiyu, Lu Yaxin, Xu Lei

(College of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003)

Abstract:In this study, the effect of hydroxypropyl distarch phosphate (HDP) on the pasting, rheological, and short-term retrogradation properties of crystal dumpling flour(CDF) was investigated for the application potential of modified starch in crystal dumpling. The different mass fractions (0%, 5%, 10%, 15% and 20%) of HDP were added to the CDF, and the results showed that the addition of HDP could increase the peak, trough, and final viscosity of CDF, while decreasing the relative disintegration value, relative retrogradation value, and pasting temperature ($P < 0.05$). The swelling power of CDF was gradually increased from 13.08 g/g to 15.48 g/g ($P < 0.05$) as the addition level of HDP increased. The short-term retrogradation of CDF was significantly inhibited, the storage modulus G' and loss modulus G'' of CDF gel were decreased, and the maximum compliance value of CDF was gradually increased from 0.009 Pa⁻¹ to 0.024 Pa⁻¹ after HDP was added, indicating that the viscoelasticity of CDF gel was weakened and its fluidity was enhanced. Moreover, the observation of microstructure revealed that the addition of HDP could reduce the cavity size of CDF gel and make its structure more compact. In addition, the surface of cooked crystal dumpling wrappers became smoother, and the light transmittance of cooked crystal dumpling wrappers was gradually increased from 4.68% to 15.20% ($P < 0.05$) with the increase of HDP addition.

Key words:hydroxypropyl distarch phosphate; crystal dumpling flour; gelatinization; rheology; retrogradation

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(31801581)

收稿日期:2025-08-13

第一作者:吴婧华,女,2001年出生,硕士,农产品加工及利用,769141664@qq.com

通信作者:徐磊,男,1988年出生,副教授,农产品加工及利用,dapangxulei@163.com

传统水晶饺子皮以小麦淀粉为主,再配以玉米、土豆、木薯等其他来源的淀粉作为原料,水晶饺子加工过程中要求熟化后的饺子皮具有较高的透明度,口感爽韧^[1]。全淀粉制成的水晶饺子皮,在加工和储存过程中存在如透明度低、蒸煮损失高、易回生等问题,严重影响其品质。目前,多种配粉和加工工艺已被用于水晶饺子的品质改良中。王静文等^[2]发现加入马铃薯醋酸酯淀粉后,水晶饺子皮的蒸煮损失率降低、透明度升高,并且制成的水晶饺子冻裂率显著降低。马雨茵等^[3]选用不同的冷冻方式冻结水晶虾饺,发现-90℃液氮速冻可较好保持水晶虾饺皮的微观结构和水分状态。

羟丙基二淀粉磷酸酯(HDP)是一类由原淀粉在碱性条件下通过环氧丙烷醚化,再经磷酸盐交联形成的复合型淀粉衍生物^[4]。与原淀粉相比,HDP具备羟丙基基团,可降低淀粉的糊化温度,糊化后透明度较高,保水能力和低温稳定性强;而交联反应使HDP具有一般交联淀粉的性质,在较高温度和低pH值时能保持一定的剪切稳定性^[4]。HDP因其较好的增稠稳定性,已被广泛应用到不同食品的加工中。徐卓越等^[5]发现在粉圆中加入HDP可抑制粉圆的老化,显著降低粉圆的硬度增加率和提高其感官评分。邵崇璇等^[6]研究了变性淀粉在卡仕达酱中的应用,发现添加HDP的卡仕达酱硬度高、弹性大,具有较高的挺立度和耐烘烤性。夏南等^[7]发现HDP可提升鱼丸的食用品质,添加HDP后鱼丸的凝胶强度和持水性显著上升,蒸煮损失率下降,且可减缓鱼丸储藏期间的挥发性氮等指标的变化速率。

变性淀粉在水晶饺子中的应用及其对水晶饺子皮粉(CDF)理化性质的影响鲜见报道^[2,8]。本研究在CDF中加入不同比例的HDP,通过糊化、流变及短期回生等特性的分析,研究HDP添加对CDF理化性质的影响,以期改善水晶饺子皮质量提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

HDP(TGE-20)、小麦淀粉、玉米淀粉。

1.2 仪器与设备

DHR-1流变仪、SU8010型场发射扫描电镜、CARY 60紫外-可见分光光度计、FD-2C冷冻干燥机。

1.3 方法

1.3.1 糊化特性的测定

将HDP与CDF[m (小麦淀粉): m (玉米淀粉)]为3:1按照不同比例进行复配,使得HDP占复配粉的质量分数分别为0%、5%、10%、15%和20%。参照王心等^[9]的方法,使用流变仪的Starch Pasting Cell附件对复配粉的糊化特性进行测定。准确称取1.5g复配粉于专用铝盒中,加入25mL去离子水,振荡混匀,制成质量浓度60mg/mL的淀粉悬浮液。将悬浮液进行糊化:50℃预热1min,随后以12℃/min的速率升温至95℃,在此温度下恒定2.5min,然后降温至50℃并维持2min。搅拌速率初期10s内设定为960r/min,之后调整至160r/min直至实验结束。分析糊化曲线,得到峰值黏度、谷值黏度、终值黏度、相对崩解值、相对回生值和糊化温度等参数,其中相对崩解值定义为崩解值与峰值黏度的比值,而相对回生值定义为回生值与终值黏度的比值^[10]。

1.3.2 膨胀势的测定

按照1.3.1节所述方法制备质量浓度10mg/mL的淀粉悬浮液并糊化,待其充分冷却,于4000r/min离心10min。分别测定沉淀物的湿重和干重,膨胀势定义为沉淀的湿重与干重之比。

1.3.3 短期回生特性的测定

按照1.3.1节所述方法制备淀粉糊,将样品以12℃/min的速率降温至20℃,然后记录样品在3h内储能模量 G' 随时间的变化。测试时设置频率为1Hz,应变为1%,温度为20℃。

1.3.4 动态流变学的测定

按照1.3.1节所述方法制备淀粉糊,将样品于20℃下冷却3h形成凝胶,然后取适量凝胶样品加载至流变仪平台上,用塑料刮板刮除多余样品,20℃平衡2min后开始实验。测试时选用直径40mm的平板,控制应变为1%,频率从0.15~15.00Hz递增,记录样品储能模量 G' 和损耗模量 G'' 的变化。

1.3.5 蠕变特性的测定

按照1.3.4节所述方法将样品加载至流变仪平台上,控制温度为20℃,记录样品在180s内1.0Pa恒定应力下柔量随时间的变化情况,并采用Burgers模型对所得数据进行拟合^[11]:

$$J = J_0 + J_m \times [1 - \exp(-t/\lambda)] + t/\eta_0$$

式中: J 为蠕变柔量/ Pa^{-1} ; J_0 为瞬时柔量/ Pa^{-1} ;

J_m 为延迟柔量/ Pa^{-1} ; t 为时间/s; λ 为延迟时间/s; η_0 为零剪切速率下的黏度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

1.3.6 微观结构观察

取适量1.3.1节所得淀粉糊, $4\text{ }^\circ\text{C}$ 放置24 h以充分形成凝胶, 冷冻干燥后取样用导电胶带固定于样品台上。样品真空溅射镀金后置于扫描电子显微镜下观察, 放大倍数为100倍, 加速电压为5 kV。

1.3.7 熟水晶饺子皮透明度的测定

取混合粉100 g, 加入0.5 g食盐, 分步加入80 mL的 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 沸水并搅拌均匀, 然后充分揉匀直至形成光滑的面团。利用压面机将制得的面团压成厚度为2 mm的薄片, 并用模具切割成正方形。将蒸熟后的水晶饺子皮室温冷却10 min, 于620 nm处测定透光率。

1.3.8 数据统计与分析

所有实验均重复3次, 结果用平均值 \pm 标准差表示, 采用SPSS 20.0软件对数据进行单因素方差分析($P < 0.05$), 并利用Origin 2021软件进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 HDP添加对CDF糊化特性的影响

糊化特性是淀粉基产品的一个重要性质, 淀粉糊化是包括淀粉颗粒的吸热遇水膨胀、晶体结构破坏和直链淀粉浸出等一系列变化的复杂过程^[12]。HDP添加对CDF糊化特性的影响如图1和表1所示。由图1可见, 添加HDP改变了CDF的糊化特性, 糊化曲线发生了明显变化, 且呈现明显的剂量效应。随着HDP添加量的逐渐增加, CDF的峰值黏度、谷值黏度和终值黏度均呈现逐渐增加的趋势, 而起糊温度从 $64.47\text{ }^\circ\text{C}$ 逐渐降低到 $60.16\text{ }^\circ\text{C}$ ($P < 0.05$)。这主要是由于HDP作为一种复合型变性淀粉, 具有较低的起糊温度和较高的糊化黏度所致^[13]。相对崩解值主要反映淀粉颗粒在加热过程中的稳定性, 值越高表明淀粉颗粒完整性越低^[14]。当添加HDP后, CDF的相对崩解值从29.36%降低到24.71%

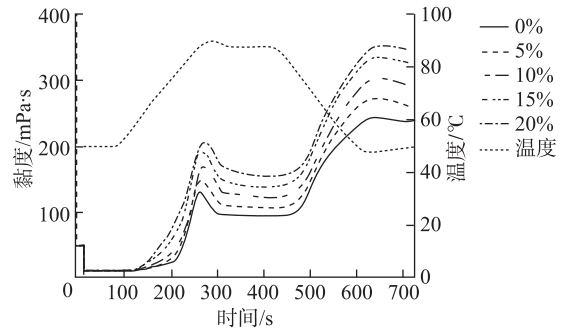


图1 不同质量分数HDP对CDF糊化曲线的影响

($P < 0.05$), 表明添加HDP可以提高淀粉糊的稳定性, 这主要是由于HDP作为一种交联淀粉具有较高的热稳定性。相对回生值可表示淀粉糊冷却过程中的分子再结晶和重排程度^[10]。随着HDP的添加量的增加, CDF的相对回生值从61.95%降低到56.05% ($P < 0.05$), 表明添加HDP可以抑制CDF的回生。这主要是由于HDP含有羟丙基基团, 可阻碍分子间聚集, 且HDP分子可与CDF浸出的直链淀粉分子发生氢键作用, 降低直链淀粉分子之间的结晶和重排。

2.2 HDP添加对CDF膨胀势的影响

膨胀势主要反映淀粉颗粒在糊化过程中吸水的能力。HDP添加对CDF膨胀势的影响如图2所示, 随着HDP添加质量分数从0%增加至20%, CDF的膨胀势从13.08 g/g增加至15.48 g/g ($P < 0.05$)。淀粉的水结合能力主要归因于淀粉分子通

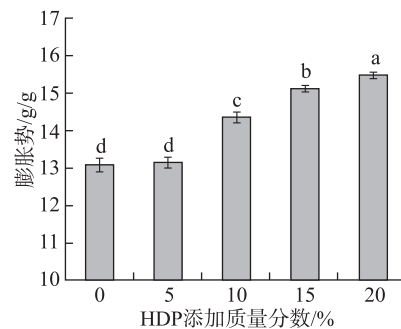


图2 HDP对CDF膨胀势的影响

表1 HDP对CDF糊化参数的影响

HDP添加质量分数/%	峰值黏度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	谷值黏度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	终值黏度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	相对崩解值/%	相对回生值/%	起糊温度/ $^\circ\text{C}$
0	131.78 ± 1.02^a	93.09 ± 1.15^a	244.64 ± 1.09^a	29.36 ± 0.27^a	61.95 ± 0.36^a	64.47 ± 0.26^a
5	151.01 ± 2.15^b	106.80 ± 2.20^b	274.25 ± 1.20^b	29.28 ± 0.16^a	61.06 ± 0.21^a	64.10 ± 0.33^a
10	170.37 ± 2.14^c	122.94 ± 2.03^c	304.57 ± 3.38^c	27.84 ± 0.11^b	59.63 ± 0.12^b	63.25 ± 0.16^b
15	190.74 ± 4.16^d	139.92 ± 3.02^d	338.24 ± 2.18^d	26.64 ± 0.13^c	58.63 ± 0.18^c	61.94 ± 0.22^c
20	207.13 ± 1.07^d	155.95 ± 4.20^d	354.86 ± 4.15^d	24.71 ± 0.20^d	56.05 ± 0.25^d	60.16 ± 0.18^d

注:位于同一列中标有不同字母表示数据之间存在显著差异($P < 0.05$),下同。

过氢键与水的结合作用。HDP 作为一种改性淀粉,具有较高的膨胀势,因而其添加后 CDF 的膨胀势提高^[15]。

2.3 HDP 添加对 CDF 短期回生的影响

淀粉的短期回生是直链淀粉分子快速重结晶的过程,决定了淀粉凝胶的初始黏弹性和硬度^[16]。淀粉凝胶在储存期间储能模量 G' 的增加主要归因于淀粉分子的聚集,因此监测其变化是描述短期回生的最佳参数^[17]。HDP 添加对 CDF 短期回生特性的影响由图 3 可见,所有样品的 G' 在 0.5 h 内迅速增加,而后在剩余时间继续稳定增加,未出现平台区域, Kuang 等^[18] 在研究小麦淀粉的短期回生中也发现了类似的现象。 G' 的迅速增加主要由早期直链淀粉的快速聚集引起,而非平台行为主要和支链淀粉的缓慢重排有关^[19]。所有样品在放置 1.5 h 后斜率变得平缓,随着 HDP 添加量的增加, G' 呈现逐渐降低的趋势,3 h 后最终 G' 值从 1 059.95 Pa 降低到 253.49 Pa。结果表明, CDF 糊化后极易发生回生现象,而添加 HDP 可有效抑制 CDF 的短期回生。HDP 因其较强的亲水性,可与样品体系内的淀粉分子和水产生氢键相互作用,因而增强了凝胶结构的稳定性,有效地干预了淀粉分子的聚集和重排进程,抑制了短期回生。与本研究结果一致,王玉牛等^[20] 报道 HDP 可抑制木薯淀粉的回生,降低淀粉凝胶的析水率。

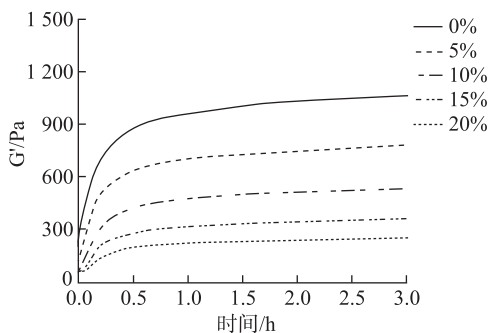


图3 不同质量分数HDP对CDF短期回生曲线的影响

2.4 HDP 添加对 CDF 凝胶动态流变学特性的影响

动态流变特性可用于表征样品中分子间的相互作用力,其中储能模量 G' 可用于表征样品的弹性性质,而损耗模量 G'' 可反应黏性性质^[21]。HDP 添加对 CDF 凝胶的 G' 和 G'' 随频率变化的影响如图 4 所示,所有样品的 G' 均高于 G'' ,且 G' 和 G'' 均随频率增加而增大,表现出明显的类固体弱凝胶特征^[22]。在整个频率范围内,随着 HDP 添加量的逐渐上升, G' 与 G'' 均呈现逐渐降低的趋势。这与 HDP 会对 CDF 短期

回生起到抑制作用的结论一致。HDP 具有较高的糊化黏度,提高了 CDF 的峰值黏度、谷值黏度和终值黏度,然而 CDF 糊化后可迅速发生老化作用,因为 HDP 显著的抑制回生特性导致形成的凝胶强度反而随着 HDP 添加量的增加而降低。产生该现象可能是由于 HDP 具有较强的亲水性,可与淀粉分子或水产生氢键相互作用,从而抑制直链淀粉分子之间的氢键交联,降低凝胶网络的黏弹性^[23]。

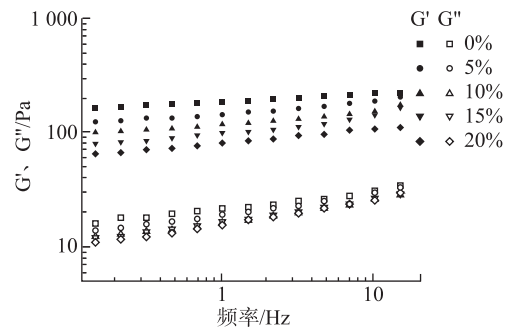


图4 不同质量分数HDP对CDF凝胶频率扫描曲线的影响

2.5 HDP 添加对 CDF 凝胶蠕变特性的影响

在恒定温度和外力的作用下,高分子材料会经历一个渐进性的形状改变过程。柔量为应变与施加应力的比值,可反映样品体系在受到外力作用下发生变形的能力,与材料的黏弹性行为有密切关系。HDP 添加对 CDF 凝胶的蠕变曲线的影响如图 5 所示,所有样品均表现出对应力的非线性响应,这与报道的淀粉凝胶蠕变行为是一致的^[24]。随着 HDP 添加量的逐渐增加, CDF 凝胶的最大柔量值从 0.009 Pa^{-1} 逐渐增加到 0.024 Pa^{-1} ,表明样品越来越软,流动性越来越强。表 2 为采用 Burgers 模型对蠕变曲线拟合后的参数,所有样品的 R^2 值均在 0.960 以上,表明该模型较为合适。瞬时柔量 J_0 与延迟柔量 J_m 均随着 HDP 的添加呈逐渐升高的趋势,而延迟时间 λ 和零剪切速率下的黏度 η_0 均呈现逐渐降低的趋势。这

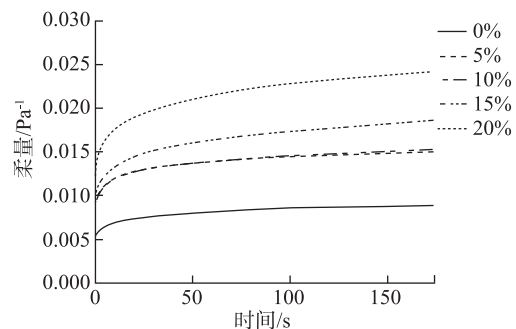


图5 不同质量分数HDP对CDF凝胶蠕变曲线的影响

表明 CDF 凝胶体系在添加 HDP 后变得更弱,具有较低的流动阻力,对外力响应更快、更易变形,蠕变行为表现得更像液体^[25]。该结果和动态流变学特性的结果是一致的,进一步表明 HDP 添加会降低 CDF 凝胶网络的黏弹性。

表 2 HDP 对 CDF 凝胶蠕变参数的影响

HDP 添加 质量分数/%	J_0/\times 10^{-3}Pa^{-1}	J_m/\times 10^{-3}Pa^{-1}	λ/s	η_0/\times $10^4\text{Pa}\cdot\text{s}$	R^2
0	2.09 ± 0.04^d	4.57 ± 0.27^d	0.38 ± 0.02^a	5.62 ± 0.39^a	0.971
5	2.66 ± 0.08^c	8.70 ± 0.18^c	0.33 ± 0.01^b	3.39 ± 0.15^b	0.980
10	2.67 ± 0.12^c	8.69 ± 0.15^c	0.33 ± 0.00^b	3.28 ± 0.18^b	0.964
15	3.22 ± 0.09^b	9.57 ± 0.28^b	0.28 ± 0.01^c	2.29 ± 0.20^c	0.978
20	3.53 ± 0.14^a	13.15 ± 0.31^a	0.25 ± 0.00^d	1.74 ± 0.16^d	0.985

2.6 HDP 添加对 CDF 凝胶微观结构的影响

淀粉颗粒糊化后,淀粉分子在冷却过程中可聚集形成致密的三维网络结构。通过扫描电子显微镜可以观察 HDP 添加对 CDF 凝胶微观结构的影响,结果如图 6 所示。所有淀粉凝胶在冷冻干燥后都表现出粗糙的海绵状结构,表面含有大量不规则形状的小碎片和具有薄孔壁的不均匀孔。当添加 HDP 后,凝胶网络结构发生较大改变,表面孔洞结构坍塌,凝胶空腔变小,结构更加紧凑。样品凝胶的孔隙主要是由冷冻干燥时水分蒸发造成的,可反映水分的分布状态^[26]。HDP 因其较低的糊化温度和较高的增稠性能,在受热糊化时可迅速破裂并锁住大量的水分,因而使凝胶体系内的水分布更加均匀,形成更小的孔隙。此外,HDP 的存在可抑制直链和支链淀粉分子的重排,使得凝胶具有更紧密的网络结构和更小的孔径。Liu 等^[23]研究也发现老化会使淀粉凝胶的孔隙变得更大、更不规则,而回生被抑制时凝胶网络则会更紧凑、孔隙更均匀。

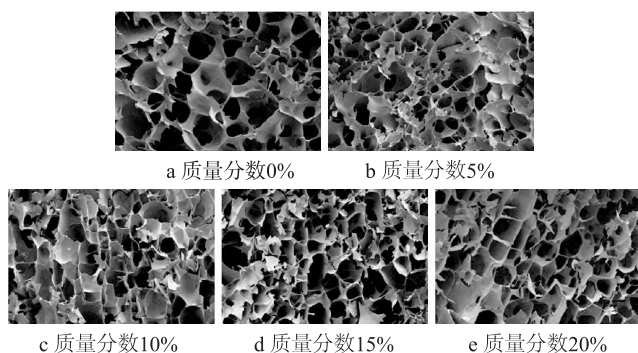


图 6 HDP 对 CDF 凝胶微观结构的影响

2.7 HDP 添加对熟水晶饺子皮透明度的影响

水晶饺子皮的透明度是衡量其品质的关键指标,直接关系到消费者的食用体验,较高的透明度不

仅能为水晶饺子赋予更高的视觉吸引力,还能极大地提升消费者的感官享受^[8]。添加 HDP 对熟水晶饺子皮透光率的影响由图 7 可见,随着 HDP 添加量的增加,熟水晶饺子皮的透光率从 4.68% 逐渐增加到 15.20% ($P < 0.05$)。添加 HDP 后熟水晶饺子皮的透亮度增加,表面光滑,尤其是质量分数 20% 添加量时。这与王静文等^[2]研究的其他种类的变性淀粉对熟水晶饺子皮透明度的影响结果相似。这可能是由于,一方面 HDP 糊化温度低,受热时可快速吸水膨胀,使得光线更易透过,从而提高熟水晶饺子皮的透明度;另一方面 HDP 加入后 CDF 的短期回生得到有效抑制,使得熟水晶饺子皮保持较高的透明度^[27]。

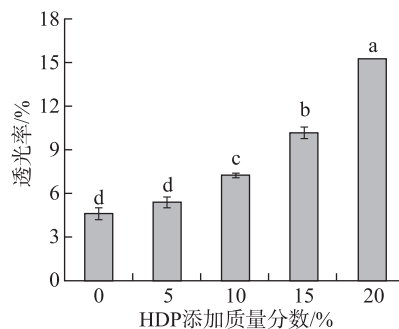


图 7 HDP 对熟水晶饺子皮透光率的影响

3 结论

HDP 的添加能显著影响 CDF 的糊化、老化和流变等理化性质。随着 HDP 的添加,CDF 的峰值黏度、谷值黏度和终值黏度提高,而相对崩解值、相对回生值和糊化温度降低。HDP 可有效降低 CDF 的短期回生,降低 CDF 凝胶的 G' 和 G'' ,而提高蠕变性。当添加 HDP 后,CDF 的膨胀势提高,形成的凝胶空腔变小,结构更加紧凑。HDP 的添加可使熟水晶饺子皮的表面变得光滑,透光率增加。本研究可为变性淀粉在水晶饺子中的合理应用提供参考。

参考文献

- [1]卢炳书. 广式虾饺制作工艺和创新分析[J]. 2023, 29(8):118-120
- [2]王静文, 罗杨合, Melnyk Oksana. 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
- [3]Wang J, Luo Y, 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
- [3] 马雨茵, 汤阳春, 阚启鑫, 等. 液氮速冻技术对广式虾饺感官品质的影响[J]. 中国食品学报, 25(7): 238-248
Ma Y, Tang Y, Kan Q, et al. Effect on sensory quality of shrimp dumplings under liquid nitrogen freezing technology [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 25(7): 238-248
- [4] 杨俊丽, 熊小兰, 李克文, 等. 羟丙基二淀粉磷酸酯的应用研究进展[J]. 精细与专用化学品, 2022, 30(3): 22-25
Yang J, Xiong X, Li K, et al. Progress in application of hydroxypropyl distarch phosphate [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2022, 30(3): 22-25
- [5] 徐卓越, 詹磊, 王玉牛, 等. 三种食品添加剂对粉圆抗老化特性的研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(2): 197-202
Xu Z, Zhan L, Wang Y, et al. Effects of three food additives on tapioca pearls anti-aging properties [J]. China Food Additives, 2023, 34(2): 197-202
- [6] 邵崇璇, 田颖, 李义, 等. 变性淀粉对卡仕达酱性能的影响及复配配方[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 202-208
Shao C, Tian Y, Li Y, et al. Effect of modified starch on the properties of custard sauce and its compound formula [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 202-208
- [7] 夏南, 刘晓媛, 常梦婷. 羟丙基二淀粉磷酸酯对南湾鳙鱼丸品质的影响[J]. 中国调味品, 2025, 50(1): 115-119
Xia N, Liu X, Chang M. Effect of hydroxypropyl distarch phosphate on quality of Nanwan bighead fish balls [J]. China Condiment, 2025, 50(1): 115-119
- [8] 焦云鹏. 淀粉磷酸单酯对虾饺皮透明度的影响研究[J]. 食品科技, 2012, 37(10): 216-219
Jiao Y. Influence of starch phosphate monoester on shrimp dumpling skin transparency [J]. Food Science and Technology, 2012, 37(10): 216-219
- [9] 王心, 闫璟圆, 张倩, 等. 甜菜果胶对小麦淀粉老化的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 169-176
Wang X, Yan J, Zhang Q, et al. Effect of sugar beet pectin on the retrogradation of wheat starch [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(7): 169-176
- [10] Palabiyik İ, Toker O S, Karaman S, et al. A modeling approach in the interpretation of starch pasting properties [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 74: 272-278
- [11] Moreira R, Chenlo F, Torres M D. Effect of sodium chloride, sucrose and chestnut starch on rheological properties of chestnut flour doughs [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 1041-1050
- [12] Li E, Cao P, Cao W, et al. Relations between starch fine molecular structures with gelatinization property under different moisture content [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 278: 118955
- [13] Zhu W, Cheng Y, Gao W, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on physicochemical, thermal, and rheological properties of hydroxypropyl distarch phosphate [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 303: 140713
- [14] Luo D, Li Y, Xu B, et al. Effects of inulin with different degree of polymerization on gelatinization and retrogradation of wheat starch [J]. Food Chemistry, 2017, 229: 35-43
- [15] 赵凯凤, 贾紫阳, 侯丽丽, 等. 不同改性淀粉对生湿面品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(7): 10-16
Zhao K, Jia Z, Hou L, et al. Effect of different modified starches on the quality of fresh raw noodles [J]. Cereals & Oils, 2024, 37(7): 10-16
- [16] Nagano T, Tamaki E, Funami T. Influence of guar gum on granule morphologies and rheological properties of maize starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 72(1): 95-101
- [17] Chen L, Ren F, Zhang Z, et al. Effect of pullulan on the short-term and long-term retrogradation of rice starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 415-421
- [18] Kuang J, Huang J, Ma W, et al. Influence of reconstituted gluten fractions on the short-term and long-term retrogradation of wheat starch [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 130: 107716
- [19] Kim C, Yoo B. Rheological properties of rice starch-xanthan gum mixtures [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(1): 120-128
- [20] 王玉牛, 蔡舒晴, 徐卓越, 等. 三种羟丙基二淀粉磷酸酯对木薯淀粉特性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(5): 209-215
Wang Y, Cai S, Xu Z, et al. Effect of three hydroxypropyl distarch phosphate on tapioca starch properties [J]. China Food Additives, 2023, 34(5): 209-215
- [21] Zhang Y, Wang Y, Yang B, et al. Effects of zucchini polysaccharide on pasting, rheology, structural properties and *in vitro* digestibility of potato starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127077
- [22] Luo H, Guo C, Lin L, et al. Combined use of rheology, LF-NMR, and MRI for characterizing the gel properties of hairtail surimi with potato starch [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(4): 637-647
- [23] Liu Q, Chen P, Li P, et al. Effects of Salecan on the gelatinization and retrogradation behaviors of wheat starch [J].

- LWT – Food Science and Technology, 2023, 186:115238
- [24] Huang M, Theng A H P, Yang D Y, et al. Influence of κ -carrageenan on the rheological behaviour of a model cake flour system[J]. LWT – Food Science and Technology, 2021, 136:110324
- [25] Bhardwaj M, Sandhu K S, Saxena D C. Experimental and modeling studies of the flow, dynamic and creep recovery properties of pearl millet starch as affected by concentration and cultivar type[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135:544 – 552
- [26] Liu H, Yan Y, Liu X, et al. Effects of various oil extraction methods on the gelatinization and retrogradation properties of starches isolated from tigernut (*Cyperus esculentus*) tuber meals[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156:144 – 152
- [27] Srinivasan S, Ge C F, Lewis C L, et al. Effect of chemical modification of corn starch for the development of films for packaging applications: impact of glutaraldehyde and organically modified montmorillonite incorporation[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 367:124019.