

马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系的相互作用及对复合面条性质的影响

Interaction of potato starch-wheat protein blend system and its effect on the properties of compound noodles

屈展平¹ 任广跃^{1,2} 张迎敏¹ 段续^{1,2}

QU Zhan-ping¹ REN Guang-yue^{1,2} ZHANG Ying-min¹ DUAN Xu^{1,2}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471000;

2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

(1. College of Food and Biological Engineering Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Henan Province, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:测定了马铃薯小麦粉复合面条成型过程中马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系的热特性、黏度特性、微观特性以及复合面条的晶体结构、红外光谱、质构特性等,研究表明:在马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系的相互作用中,小麦蛋白对淀粉糊化起抑制作用,使淀粉原本的相变峰向高温移动,同时小麦蛋白对该体系的黏度起到削弱作用并对淀粉结构进行一定的稀释;马铃薯小麦复合面条与普通小麦面条相比结晶度较低,无定型的淀粉构象较多,持水力较强,复合面条的硬度、黏度、咀嚼性小于小麦面条,弹性、回复性、吸水率、断条率大于小麦面条。

关键词:马铃薯淀粉;小麦蛋白;复合面条;相互作用

Abstract: The thermal characteristics, viscosity characteristics of potato starch-wheat protein blends and microscopic characteristics, crystal structure, infrared spectrum and texture characteristics of the composite noodles were determined. Results: In the interaction of potato starch-wheat protein blend system, the wheat protein inhibits the starch gelatinization, causing the original phase transition peak of starch to move to high temperature, and wheat protein weakens the viscosity of the system. The starch structure is diluted to some extent. The potato wheat compound noodles have lower crystallinity than the

common wheat noodles. The amorphous starch has more conformation and stronger water holding capacity. The hardness, viscosity and chewiness of the composite noodles are less than wheat noodles. The elasticity, recovery, water absorption rate and broken rate are greater than wheat noodles.

Keywords: potato starch; wheat protein; compound noodles; interaction

马铃薯又名土豆,富含大量淀粉、膳食纤维、维生素等营养物质,马铃薯中的优质全价蛋白可以弥补其他主粮在限制性氨基酸方面的缺失,同时马铃薯作为世界第四大粮食作物具有种植面积大、消费量大等特点。马铃薯复合面条作为“马铃薯主粮化”的代表产品^[1]与普通小麦面条相比仍有不足,马铃薯干物质中含有的大量淀粉会影响面筋蛋白网络的形成,使面条结构疏松、筋力较差,煮食过程中易断条、易混汤。

目前中国针对马铃薯复合面条的研究主要集中在马铃薯的添加形式^[2]、马铃薯基质特性^[3-4]以及制作工艺^[5]等方面,针对复合面条的成型机制及淀粉—蛋白的相互作用鲜见报道。对于淀粉—蛋白共混体系国内外已有较多研究,国外大多将淀粉和蛋白混合体系用于开发婴儿食品、休闲食品等新型食品^[6-7]。多数研究表明蛋白与多糖结合时会有一定的相互作用^[8-9],马铃薯淀粉、大米淀粉等与盐溶蛋白结合会表现出增强作用^[10-11],但玉米淀粉与大豆蛋白会产生拮抗作用^[12]。陈建省等^[13-14]对面筋蛋白与小麦淀粉的相互作用进行研究,发现小麦淀粉的糊化会受到面筋蛋白种类及添加量的影

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31671907);“十三五”国家重点研发计划(编号:2017YFD0400901);河南省高等学校重点科研项目资助计划立项项目(编号:20A550006)

作者简介:屈展平,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:任广跃(1971—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail: guangyueyao@163.com

收稿日期:2019-11-06

响;汤晓智等^[15]研究了乳清蛋白—大米淀粉体系的流变特性,发现淀粉和蛋白分子间的相互作用有利于增强凝胶网络的形成;苏笑芳等^[16]对大豆分离蛋白—玉米淀粉—谷朊粉共混体系进行研究,结果表明玉米淀粉和谷朊粉的添加可以降低大豆蛋白的热转变焓,而蛋白和谷朊粉能增加淀粉的热转变温度。针对马铃薯淀粉的研究也有所报道,张笃芹等^[17]发现与马铃薯蛋白相比,马铃薯淀粉及蛋白的共混物乳化活性指数、热特性、黏度特性、流变特性均有改变。王效金等^[18]研究马铃薯淀粉颗粒与牛血清蛋白的相互作用,发现其光谱上峰强及峰型有所改变。虽然淀粉—蛋白体系已有较多研究,但是对于复合面条成型过程中马铃薯淀粉—小麦蛋白的相互作用以及其造成面条品质、结构变化的相关研究鲜见报道。

试验拟通过提取马铃薯复合面条中的主要成分—马铃薯淀粉和小麦蛋白,通过研究马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系的热特性、黏度特性、微观特性等探究面条成型过程中的变化机理,并通过红外光谱、XRD 等对比马铃薯复合面条与普通小麦面条在性质、组成等方面的差异,以此分析马铃薯淀粉—小麦蛋白共混物的相互作用及对复合面条的影响,为进一步探究复合面条分子结构的作用机理提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

中薯 2 号马铃薯、五得利小麦粉、食盐:洛阳市大张超市;

谷朊粉、柠檬酸、抗坏血酸:洛阳奥科化玻公司。

1.2 仪器与设备

Brabender 黏度仪:803302 型,北京冠远科技有限公司;

傅立叶红外光谱仪:IS10 型,美国 Nicolet 公司;

X 射线衍射仪:D2 PHASER 型,德国布鲁克 AXS 有限公司;

差示扫描量热仪:DSC 823e 型,梅特勒—托利多仪器上海有限公司;

日立台式电镜:TM3030 型,日本电子株式会社;

热泵干燥机:GHRH-20 型,广东省农业机械研究所;

电热鼓风干燥箱:101 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

压面条机:FKM-20 型,永康市炫林工贸有限公司;

电子分析天平:FA1004 型,上海上平仪器公司;

高速多功能粉碎机:HC.200 型,浙江省永康市金穗机械制造厂;

质构仪:TA.XT express 型,英国 SMS 公司。

1.3 方法

1.3.1 马铃薯全粉的制备 选取外观良好、无虫眼、未发芽的马铃薯,将马铃薯洗净并去皮切片放入护色液中浸

泡 10 min,护色液的浓度(质量分数)为 0.5% 的柠檬酸和 0.05% 的抗坏血酸,将马铃薯预煮 3 min 进行熟化,捞出沥干置于 50 ℃ 的热泵干燥机中进行干燥,待其干燥至含水率 5% 以下粉碎为 100 目备用。全粉的主要成分为马铃薯淀粉。

1.3.2 马铃薯复合面条的制备

(1) 和面:用电子天平称取混合粉 500 g,马铃薯全粉和小麦粉的添加质量比例为 1:1,同时加入谷朊粉 20 g 进行复配。将 5 g 食盐溶解在 325 mL 蒸馏水中,溶解完全后将盐水加入混合粉中,搅拌成面絮,和面 5 min,保持面絮干湿得当,用手紧握时可以成团,松开手后面絮自动散落。

(2) 熟化:将和好的面团用保鲜膜密封放置于恒温 25 ℃ 环境放置 20 min,使各组分充分相互作用形成面筋网络。

(3) 成型:熟化结束后用压面机进行压延,并根据面带的情况逐渐调整压辊的宽度,反复压片,直到面带表面光滑,色泽均匀,富有弹性为止。然后安装压面机的切刀进行出面,所得鲜湿面条长 20 cm,宽 0.3 cm,厚 0.1 cm,根据 GB 5009.3—2010 测得面条初始干基含水率为 0.6 g/g。

1.3.3 马铃薯淀粉的提取 采用水提取法^[19]对马铃薯淀粉进行提取,将新鲜、完好的马铃薯清洗去皮,切成小块状,用组织搅碎机加水将其搅碎,将浆液静置 2~3 h 后过 80 目筛,淀粉沉降物留在水中,用蒸馏水洗涤 4~5 次并进行离心,去除上清液,将沉淀物置于 40 ℃ 干燥至含水率低于 8%,制粉过 80 目筛备用。

1.3.4 小麦蛋白的提取 根据 GB/T 5506.1—2008 采用手洗法得到湿面筋,将其放入真空冷冻干燥机干燥至水分含量低于 5%,制粉并过 80 目筛备用。

1.3.5 试验方法 将马铃薯淀粉(PS)与小麦蛋白(WP)分别按照质量比 1:9,2:8,3:7,4:6,5:5 的比例进行混合制备淀粉—蛋白共混体系,将纯马铃薯淀粉和纯小麦蛋白作为对照,按照试验条件分别对其热特性、黏度特性、微观特性等进行测定。按照 1.3.2 制备马铃薯复合面条,测定其晶体结构、红外光谱、质构特性、蒸煮特性等特征,并与普通小麦面条进行对比,以探究其结构与性质的不同。

1.4 指标测定

1.4.1 热力学特性分析 称取 5 mg 共混样品置于铝坩埚中,加入 10 μL 去离子水,密封坩埚后置于室温下平衡 24 h。测量参数为:升温速率 5 ℃/min,升温温度 25~95 ℃,氮气流速 80 mL/min,以空坩埚作为对照,对样品的热力学特性进行测定。

1.4.2 糊化特性分析 称取 400 g 共混样品水溶液(质量

分数为 6%)，将其放入测量钵中开始测量，测量参数为：起始温度 50 ℃，升温速率 3 ℃/min，最高温度 95 ℃。分别记录其糊化段、恒温段、冷却段、最终恒温阶段的温度及扭矩。

1.4.3 扫描电镜分析 将淀粉—蛋白共混物加水制成面团，淀粉及蛋白以粉末形式分别置于导电胶上，放入日立台式电镜 TM3030 中抽真空并进行观察，放大倍数为 1 000 倍，观察共混物及样品颗粒的微观结构。

1.4.4 晶体结构分析 采用 X-衍射对面条粉碎样品的晶体特性进行分析，将样品粉末置于铝片空中压片，测试条件为：管压 36 kV，电流 20 mA，测量角度为 5°~40°，步长为 0.03°，扫描速率为 4°/min，狭缝系统为 DS/RS/SS=1°/0.16 mm/1°。

1.4.5 红外光谱分析 将样品和溴化钾于 105 ℃干燥至恒质量，称取 1.0 mg 样品于研钵中并加入 150 mg 溴化钾粉末，研磨均匀，压成薄片。FTIR 扫描和测定淀粉样品的条件为：波长 400~4 000 cm⁻¹，分辨率 4 cm⁻¹。

1.4.6 TPA 质构特性的测定 质构特性在压缩模式下进行 TPA(texture profile analysis)试验，质构仪的探头为 P/75，测试参数：测前速率 1.0 mm/s，测中速率 0.8 mm/s，测后速率 0.8 mm/s，压缩程度 70%，停留时间 5 s，触发力 5 g。每组进行 3 次试验取平均值，得到弹性、硬度、咀嚼性及黏性等数值。取面条 30 根，放入 1 000 mL 沸水中煮至最佳蒸煮时间，捞出后淋水 1 min，立即用质构仪测定，每次试验将 5 根长 10 cm 的面条平行放在平台上进行测定。

1.4.7 蒸煮特性测定 准确称量 50 g 干制面条(记为 m_1)，放入 2 000 mL 沸水中，煮至最佳蒸煮时间，捞出面条并放在滤纸上静置，吸干表面水分进行称重，煮制后面条质量记为 m_2 。将面汤继续煮制使其水分大部分蒸发后倒入培养皿中，将培养皿置于 105 ℃烘箱中烘至质量恒重，记录恒重质量为 m_3 ，煮制吸水率和煮制损失率分别按式(1)、(2)计算。取长短一致的面条 20 根，放入

1 000 mL 沸水中进行煮制，煮至最佳蒸煮时间，记录面条断条的根数，按式(3)计算断条率。

$$S = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中：

S ——煮制吸水率，%；

m_1 ——煮制前复合面条的质量，g；

m_2 ——煮制后复合面条的质量，g。

$$L = \frac{m_3}{m_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中：

L ——煮制损失率，%；

m_1 ——煮制前复合面条的质量，g；

m_3 ——面汤烘干至恒重的质量，g。

$$B = \frac{X}{N} \times 100\% \tag{3}$$

式中：

B ——断条率，%；

X ——煮制过程中断条根数；

N ——面条总根数。

2 结果与分析

2.1 马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系相互作用

2.1.1 马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系热力学作用 如表 1 所示，随着马铃薯淀粉占比的升高，初始相变温度 T_0 和峰值温度均呈现减小趋势，纯马铃薯淀粉体系的初始相变温度和峰值温度最低，该混合体系焓变呈现升高趋势，说明在淀粉—蛋白体系加温糊化过程中，由于小麦蛋白的作用，使得淀粉原本的相变峰向高温移动。淀粉含量 50% 时，该体系焓变越大，说明此时混合体系的结构更加致密和有序^[20]。在水和热作用下的糊化过程中，随着温度的升高，淀粉分子发生强烈振动，氢键被破坏同时伴随着能量的改变，对淀粉的结晶度造成影响。随着蛋白含量的升高，糊化温度越来越高，一方面可能是因为谷蛋

表 1 马铃薯淀粉—小麦蛋白体系热力学参数[†]

Table 1 Thermodynamic parameters of potato starch-wheat protein system

体系配比	初始相变温度 $T_0/^\circ\text{C}$	峰值温度 $T_p/^\circ\text{C}$	焓变 $\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	半峰宽温度差 $\Delta T/^\circ\text{C}$
100% WP	59.30±0.28 ^a	67.84±0.06 ^a	0.09±0.00 ^a	4.98±0.05 ^a
10% PS+90% WP	58.82±0.08 ^b	63.71±0.05 ^c	0.61±0.03 ^b	5.41±0.03 ^b
20% PS+80% WP	58.77±0.06 ^b	63.84±0.05 ^b	1.23±0.05 ^d	6.28±0.02 ^d
30% PS+70% WP	59.18±0.09 ^a	63.60±0.04 ^{cd}	0.84±0.02 ^c	5.05±0.04 ^a
40% PS+60% WP	58.56±0.07 ^{bc}	63.62±0.07 ^c	2.48±0.05 ^e	6.29±0.03 ^d
50% PS+50% WP	58.38±0.03 ^c	63.50±0.04 ^d	3.08±0.03 ^f	6.20±0.04 ^c
100% PS	57.30±0.04 ^d	62.11±0.04 ^e	5.45±0.04 ^g	6.34±0.04 ^d

[†] 同列上标字母不同表示差异显著(P<0.05)。

白可以改变淀粉中可用水含量^[21],在糊化过程中小麦蛋白分子的竞争吸水作用使淀粉吸水减少,对其糊化有一定的阻碍作用,使其热变性特性发生改变^[22];另一方面可能是因为蛋白含量较多时其网络结构比较完善,此时淀粉颗粒的分子较少且流动性变强,淀粉链间相互作用较强,所需的糊化温度升高^[23]。在马铃薯淀粉-小麦蛋白体系中,淀粉分子的相互作用及淀粉分子与蛋白网络间的相互作用均会对其热变性造成影响。在复合面条成型过程中,淀粉与蛋白的相互作用表现为对其结晶度及结构的影响。

2.1.2 马铃薯淀粉-小麦蛋白共混体系糊化特性 使用布拉班德黏度仪对马铃薯淀粉-小麦蛋白混合体系的黏度进行测定,结果如图 1 所示,随着温度的升高、恒定及降低过程,其黏度基本呈现升高-降低-升高-不变的变化趋势。由表 2 可知,在混合体系中随着马铃薯淀粉含量的增加,其峰值黏度、最终黏度、崩解值、回生值均呈现增大趋势,峰值温度呈现减小趋势。淀粉对该体系的黏度起积极作用,而小麦蛋白则相反。在小麦蛋白和马铃薯淀粉相互作用过程中主要为静电作用,淀粉的阴离子基团与带正电的蛋白质基团相互作用^[24],最终达到静电平衡,两相共存状态^[25]下淀粉会对蛋白的结构产生稀

释作用,同时蛋白对淀粉浓度产生稀释作用,在此状态下,小麦蛋白会对复合物的黏度产生削弱作用,使其黏度降低。

崩解值表示峰值黏度与谷值黏度之差,随着马铃薯淀粉的增加,其崩解值越大,即该混合体系的耐剪切性越差,说明小麦蛋白的加入可以增大其稳定性,并且可以对淀粉的崩解起一定的掩蔽作用。回生值^[26]指最终黏度与保持黏度之间的差值,表示淀粉老化过程中直链分子重结晶带来的黏度改变。小麦蛋白的增加导致了回生值降低,因此小麦蛋白的加入在一定程度上可以抑制淀粉的凝沉,影响直链淀粉的重结晶,从而延缓淀粉的回生,同时淀粉与谷蛋白之间存在的氢键相互作用可以防止淀粉的老化^[27]。随着小麦蛋白的增加,混合体系的起糊温度及峰值温度升高,说明小麦蛋白对淀粉的糊化有抑制作用,两种聚合物间的可用水竞争导致水分重新分布,延迟了淀粉的糊化。

2.1.3 马铃薯淀粉-小麦蛋白共混体系微观结构特性

由图 2 可知,马铃薯淀粉颗粒为椭圆柱体,表面光滑,大小不一,小麦蛋白形态主要呈块状,部分小块呈不规则形状。随着马铃薯淀粉含量的增加,其淀粉颗粒越来越多,蛋白结构越来越少。在淀粉含量 10% 时混合体系电

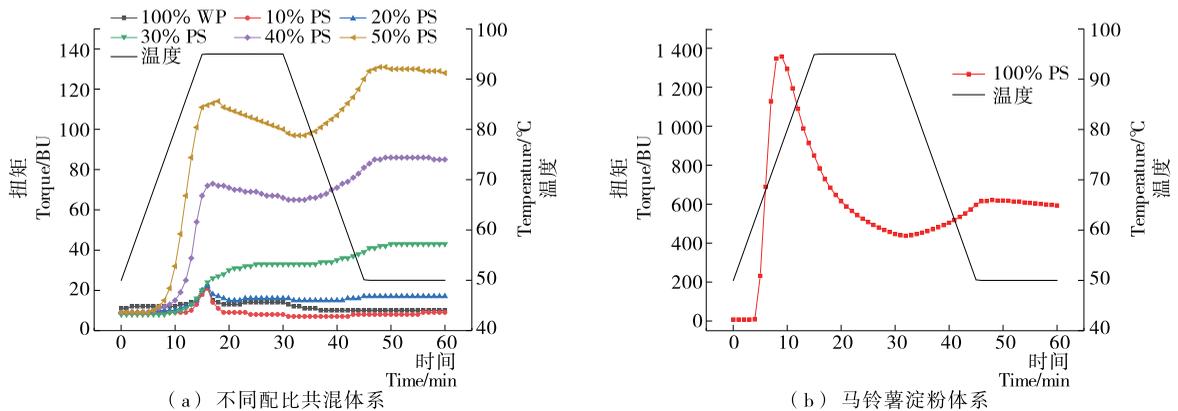


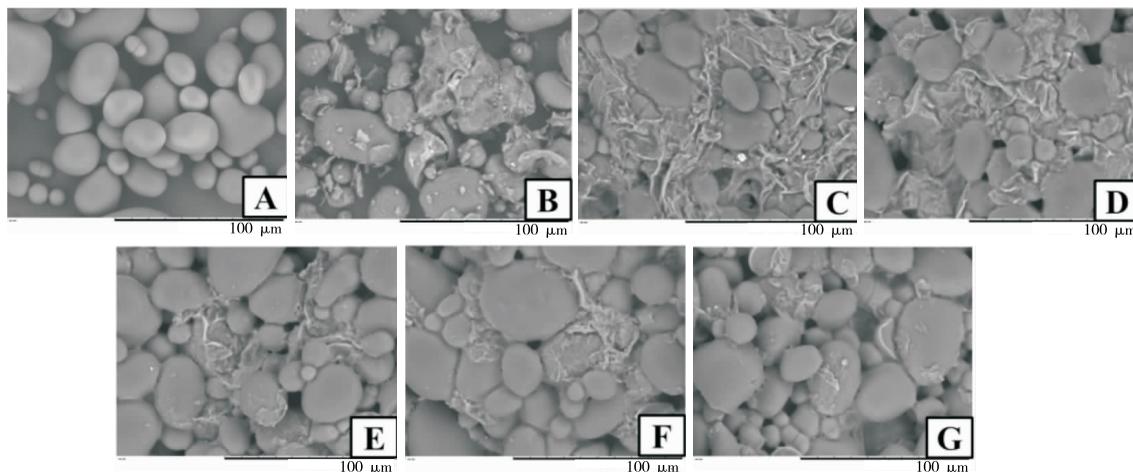
图 1 不同马铃薯淀粉-小麦蛋白共混体系糊化特性

Figure 1 Viscosity characteristics of different potato starch-wheat protein blends

表 2 不同马铃薯淀粉-小麦蛋白共混体系黏度参数

Table 2 Viscosity parameters of different potato starch-wheat protein blends

体系配比	起糊温度/ ℃	峰值黏度/ BU	峰值温度/ ℃	恒温段起始 黏度/BU	冷却段起始 黏度/BU	冷却段结束 黏度/BU	最终黏度/ BU	崩解值/ BU	回生值/ BU
100% WP	95.3	23	95.8	19	14	10	10	9	-4
10% PS+90% WP	94.5	22	96.1	19	8	8	9	14	0
20% PS+80% WP	93.7	23	95.3	21	16	17	17	7	1
30% PS+70% WP	93.7	34	95.0	20	33	39	43	1	6
40% PS+60% WP	82.0	75	95.8	67	66	81	85	9	15
50% PS+50% WP	75.1	114	95.0	111	100	125	128	14	25
100% PS	61.5	1 370	74.5	847	446	597	593	924	151



A. 马铃薯淀粉 B. 小麦蛋白 C~G. 分别为马铃薯淀粉含量为 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 的共混体系

图 2 马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系微观结构图

Figure 2 Microstructure of potato starch-wheat protein blend system (×1 000)

镜图中可见小麦蛋白的网状结构形成较完善,在混合体系中小麦蛋白中的麦醇溶蛋白和麦谷蛋白等通过分子间作用形成三维的面筋网络,淀粉颗粒分子嵌入面筋网络中,形成较为稳定的结构。随着马铃薯淀粉含量的增加,面筋网络结构越来越少,淀粉颗粒更多的暴露出来,对面筋网络起到一定的稀释作用。当淀粉含量为 50% 时,面筋结构几乎没有,表明当淀粉含量过高会阻碍甚至破坏面筋网络的形成,表现在复合面条中即为面条结构粗糙、孔隙较大、容易断裂。同时,小麦蛋白较多时其形成的较完善的面筋结构对淀粉颗粒有一定的包裹作用,同时对其糊化过程中淀粉的吸水作用及凝胶形成造成一定影响,此结果与 DSC 及黏度试验的结果一致。

2.2 马铃薯小麦粉复合面条性质变化

2.2.1 马铃薯小麦粉复合面条淀粉晶型结构 淀粉颗粒为多晶体系,直链淀粉和支链淀粉以一定形式排列、堆积,形成交替存在的结晶区与无定形区。经过 XRD 衍射,尖峰为结晶区特征,而弥散峰为无定形区^[28]。根据 X 射线衍射图谱的差异可将淀粉的结晶结构分为 A 型、B 型、C 型和 V 型 4 大类,A 型主要来自谷物类淀粉;B 型主要来自块茎类淀粉;C 型为 A 型和 B 型的混合晶型;V 型是由直链淀粉与非极性或弱极性的物质络合形成。A 型淀粉分别在 15°,17°,18°,23° 处有 4 个强峰;B 型淀粉其衍射图在 5.6°,17°,22°,24° 有较强的衍射峰出现^[29]。

由图 3 可知,小麦粉是典型的 A 型晶体,马铃薯淀粉为 B 型晶体结构,且在 20° 有一个衍射峰,是直链淀粉与脂质形成的单螺旋峰。复合面条的结构接近 C 型,由 A 型和 B 型混合而成。在 15.3° 附近的峰与小麦面条比,峰高降低,峰面积减小,且峰稍右移,表明复合面条晶相含量低,晶格的有序化程度降低,结晶度变差。在 17° 和 23° 时,复合面条的峰均比小麦面条低,马铃薯淀粉的加入改

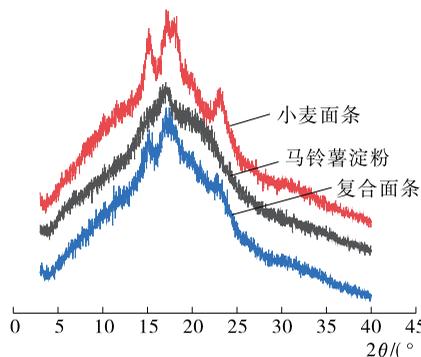


图 3 马铃薯小麦粉复合面条 X 衍射图谱

Figure 3 X-ray diffraction pattern of potato wheat flour compound noodles

变了淀粉颗粒的内部堆积状态,无定形区直链淀粉的重结晶遭到影响,内部重排致使其结晶度降低。故马铃薯小麦粉复合面条与纯小麦面条相比其晶格有序化程度变低,结晶度降低。

2.2.2 马铃薯小麦粉复合面条红外光谱 由图 4 可知,3 400 cm^{-1} 附近的吸收峰主要是由 O—H 键的伸缩振动引起,形成了一个较强且宽的峰,2 930 cm^{-1} 附近 CH_2 的不对称伸缩振动吸收峰,1 650 cm^{-1} 附近的吸收峰为无定形区域吸附的水分子。在 600~1 300 cm^{-1} 的指纹区范围内,有 3 个稍强的吸收峰,1 157 cm^{-1} 附近的吸收峰归属为 C—O, C—C 伸缩振动,1 080 cm^{-1} 附近的吸收峰归属为 C—H 键的弯曲振动,1 022 cm^{-1} 附近的吸收峰归属为非结晶区的结构特征,1 045/1 022 cm^{-1} 可以表示淀粉分子结构中有序结构与无定型结构的相对大小,1 022 cm^{-1} 处的峰强较大表示结构中存在无定型的淀粉构象而不是结晶构象^[30]。由图 4 还可知,复合面条在 1 022 cm^{-1} 处峰强大于小麦面条,表明复合面条的结晶

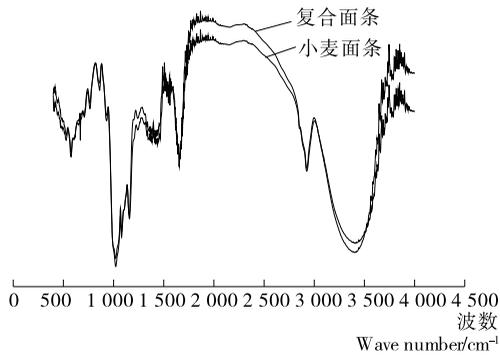


图4 马铃薯小麦粉复合面条红外光谱分析

Figure 4 Infrared spectrum analysis of potato and wheat flour compound noodles

度较差,与X-衍射的结果一致。这可能是因为在加入马铃薯粉后,复合面条直链淀粉上的磷酸基使其具有更好的糊化特性,在成型干燥等过程中,其更易糊化,有助于维持淀粉螺旋结构的亲水及疏水相互作用不被破坏,使其结晶度较差^[31]。复合面条在 3400 cm^{-1} 附近峰强较强,

说明其游离羟基发生缔合,形成强度更高的氢键,对其力学特性和持水力均有影响。

2.2.3 马铃薯小麦粉复合面条 TPA 质构特性 由表3可知,马铃薯小麦粉复合面条的硬度及黏性明显低于小麦面条,其胶着性、咀嚼性略低于小麦面条,然而马铃薯小麦粉复合面条的弹性及回复性稍大于小麦面条。复合面条中添加马铃薯粉使其淀粉含量过高,与小麦面条相比其蛋白含量较低且面筋网络形成不够充分,淀粉颗粒较多的暴露于表面易在成型过程中发生糊化,表现在面条上为筋力不足,口感软糯,即马铃薯复合面条的硬度较小、咀嚼性较差。但马铃薯复合面条因其较多的马铃薯淀粉含量使其在水热作用下凝胶性质更强,所以其弹性及回复性稍大于小麦面条。在 TPA 压缩试验中,马铃薯复合面条表现出的质构特性与上文 X 衍射试验结果吻合,说明在面条成型的湿热作用下,马铃薯淀粉的加入有利于面条的糊化使其硬度及咀嚼性较低,这也是由于复合面条的结构发生变化,其结晶度对结构特性造成了一定的影响。

表3 不同种类面条 TPA 质构特性

Table 3 TPA texture characteristics of different kinds of noodles

种类	硬度/g	黏性/(g·s)	弹性	胶着性	咀嚼性	回复性
小麦面条	7246.23±76.58	424.21±13.46	0.84±0.00	5543.30±69.33	4639.67±52.94	0.51±0.02
复合面条	6550.67±69.44	155.33±19.74	0.85±0.00	5380.67±35.42	4596.33±19.43	0.62±0.01

2.2.4 马铃薯小麦粉复合面条煮制特性 由图5可知,复合面条的煮制吸水率、损失率和断条率均大于小麦面条。煮制过程中的吸水主要是淀粉的糊化作用,复合面条中加入更多的马铃薯淀粉,淀粉含量的增加会使其吸水率增大,此结果验证了DSC的糊化特性结果。煮制损失率表征了面条的品质,其损失主要指面汤中的固形物含量,在蒸煮过程中,直链淀粉的结构及一些水溶性蛋白溶出混入面汤中造成溶出损失。小麦面条的煮制损失率

较低是因为其面筋网络形成的较为完善,淀粉颗粒嵌入面筋网络中被包裹,此时,完整的面筋网会阻碍淀粉的糊化及溶出,表现为煮制损失较少;而复合面条较多的淀粉会稀释面筋网络的结构,使更多的淀粉溶出,同时,面筋网络的不完善会导致蛋白在热作用下变性,其蛋白结构也更易被破坏,蛋白溶出增加。断条率可以表征面条的耐煮性和筋力,小麦面条具有更加完善的面筋网络,面筋含量更高,其断条率更低;复合面条在热作用下淀粉吸水溶胀,其淀粉分子链舒展并有水解趋势,所以在煮制过程中,其结构疏松容易断条。

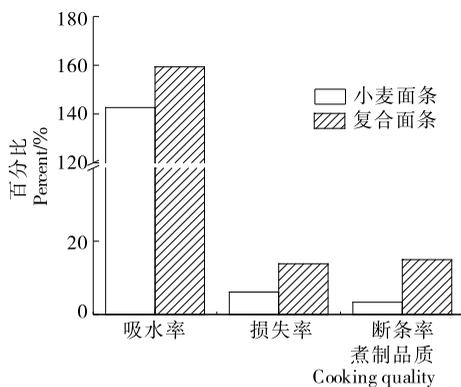


图5 马铃薯小麦粉复合面条煮制特性

Figure 5 Cooking characteristics of potato and wheat flour composite noodles

3 结论

试验探究了马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系在面条成型过程中的相互作用及其对马铃薯小麦粉复合面条结构及性质产生的影响,结果表明:在马铃薯淀粉—小麦蛋白共混体系中,小麦蛋白会对马铃薯淀粉糊化产生抑制作用并改变其热特性,同时,小麦蛋白会对共混体系的黏度产生削弱作用,并对该体系的崩解起到掩蔽作用、抑制淀粉凝沉;马铃薯淀粉的加入会稀释面筋网络的结构,使其结晶度降低。马铃薯小麦粉复合面条为C型晶体结构,晶格有序化程度降低,其无定型淀粉构象较多,氢键强度增强,持水率增大;复合面条的硬度、咀嚼性低于小

麦面条,但其弹性、回复性、吸水率高于普通小麦面条。

参考文献

- [1] 卢肖平. 马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2015(3): 1-7.
- [2] 田晓红, 沈群, 吴娜娜, 等. 马铃薯基质对其挂面品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(12): 22-28.
- [3] 王丽, 李淑荣, 句荣辉, 等. 马铃薯全粉制备条件对面条品质特性的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(9): 51-56.
- [4] 李叶贝, 任广跃, 屈展平, 等. 不同粒度马铃薯全粉对复合面条品质的影响[J]. 食品科学, 2017(19): 61-66.
- [5] 王乐, 黄峻榕, 张宁, 等. 马铃薯面条制作工艺及品质研究[J]. 食品研究与开发, 2017(1): 87-91.
- [6] ANDRÉS C, ALBERTO E L, RIBOTTA P D. Rheological and calorimetric properties of corn-, wheat-, and cassava-starches and soybean protein concentrate composites [J]. Starch-Stärke, 2011, 63(2): 83-95.
- [7] GIUBERTI G, GALLO A, CERIOLO C, et al. Cooking quality and starch digestibility of gluten free pasta using new bean flour[J]. Food Chemistry, 2015, 175: 43-49.
- [8] JEKLE M, MÜHLBERGER K, BECKER T. Starch-gluten interactions during gelatinization and its functionality in dough like model systems[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 196-201.
- [9] MARÍA D A, CRISTINA F, MARÍA D O, et al. A rheological characterisation of mashed potatoes enriched with soy protein isolate[J]. Food Chemistry, 2012, 133(4): 1 274-1 282.
- [10] LI J Y, YE H A I. Gelation properties and morphology of heat-induced starch/salt-soluble protein composites [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(2): 9.
- [11] FAN Ming-cong, HU Ting, ZHAO Si-ming, et al. Gel characteristics and microstructure of fish myofibrillar protein/cassava starch composites[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 221-230.
- [12] LI J Y, YE H A I, FAN K L. Gelation characteristics and morphology of corn starch/soy protein concentrate composites during heating[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1 240-1 247.
- [13] 陈建省, 邓志英, 吴澎, 等. 添加面筋蛋白对小麦淀粉糊化特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 388-395.
- [14] 陈建省, 田纪春, 吴澎, 等. 不同筋力面筋蛋白对小麦淀粉糊化特性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(3): 75-79.
- [15] 汤晓智. 乳清蛋白—大米淀粉混合体系动态流变学特性研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(2): 28-32.
- [16] 苏笑芳, 李淑静, 张波, 等. 大豆分离蛋白—玉米淀粉—谷朊粉共混体系热转变特性[J]. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3 618-3 627.
- [17] 张笃芹, 木泰华, 孙红男. 马铃薯蛋白及马铃薯蛋白—马铃薯淀粉复合物乳化、热及流变学特性的研究[J]. 食品科技, 2015(4): 223-231.
- [18] 王效金, 张兆丽. 马铃薯淀粉纳米颗粒与牛血清蛋白相互作用研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(1): 18-20.
- [19] 王丽, 罗红霞, 李淑荣, 等. 马铃薯淀粉提取方法的优化研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(32): 84-85.
- [20] 郑铁松, 李起弘, 陶锦鸿. DSC 法研究 6 种莲子淀粉糊化和老化特性[J]. 食品科学, 2011, 32(7): 151-155.
- [21] PAULY A, PAREYT B, DE BRIER N, et al. Starch isolation method impacts soft wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Claire) starch puroindoline and lipid levels as well as its functional properties[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 464-469.
- [22] 徐芬. 马铃薯全粉及其主要组分对面条品质影响机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 20-24.
- [23] 刘畅, 阎贺静, 常学东. 糊化处理对板栗淀粉特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(5): 24-29, 36.
- [24] LU zhan-hui, DONNER E, YADA R Y, et al. Physico-chemical properties and in vitro starch digestibility of potato starch/protein blends[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 154: 214-222.
- [25] 赵凯, 江连洲, 缪铭. 淀粉—蛋白质复合物制备、性质及应用研究[J]. 现代化工, 2007(1): 67-70.
- [26] BLANKA B, ÁGNES T, VIKTORIA V, et al. Comparison of the effects of different heat treatment processes on rheological properties of cake and bread wheat flours[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 990-996.
- [27] BARBIROLI A, BONOMI F, CASIRAGHI M C, et al. Process conditions affect starch structure and its interactions with proteins in rice pasta [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(2): 1 865-1 872.
- [28] 罗志刚, 徐小娟, 陈永志. 微波对马铃薯淀粉螺旋结构及消化性的影响[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2017, 45(12): 1-7.
- [29] 王书雅, 翟晨, 时超, 等. 基于 X-射线衍射及扫描电子显微镜的马铃薯淀粉掺伪鉴别[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(10): 2 311-2 315.
- [30] 任静, 刘刚, 欧全宏, 等. 淀粉的红外光谱及其二维相关红外光谱的分析鉴定[J]. 中国农学通报, 2014, 31(17): 58-64.
- [31] DANKAR I, HADDARAH A, OMAR F, et al. Characterization of food additive-potato starch complexes by FTIR and X-ray diffraction [J]. Food Chemistry, 2018, 260: 7-12.