DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251206002
引用格式: 任妍婧, 江帆, 付嘉阳, 等. 藜麦粉-小麦粉混粉面团流变学特性及微观结构研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 222–228.
Ren Yanjing, Jiang Fan, Fu Jiayang, et al. Study on the rheological properties and microstructure of *Chenopodium quinoa* Willd. flour-*Triticum aestivum* L. flour mixed flour dough [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 222–228. (in Chinese with English abstract).

藜麦粉-小麦粉混粉面团流变学特性及微观结构研究

任妍婧[1,2], 江　帆[2,3], 付嘉阳[2], 刘洋金[2,4], 杜双奎[2*]

(1. 陕西省粮油科学研究院, 西安　710082; 2. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 杨凌　712100; 3. 陕西科技大学食品科学与工程学院, 西安　710021; 4. 西安市卫生学校, 西安　710054)

摘　要: 目的　探究在不同藜麦粉添加比例下, 藜麦粉-小麦粉混粉面团的流变学特性及微观结构的变化规律。**方法**　通过测定混粉面团的热机械学特性、糊化特性、拉伸特性、微观结构及动态流变学特性, 分析其变化规律。**结果**　随着藜麦粉添加量的增加, 混粉面团的形成时间及稳定时间呈先增大后减小的趋势, 当藜麦粉添加量 20%时达最大值; 面团的崩解值先减小后增大再下降, 回生值、最大抗拉伸阻力、延伸度呈减小趋势。当藜麦粉添加量为 30%时, 面团的弱化度最高, 面筋网络结构被严重破坏, 小麦淀粉颗粒明显脱落。储能模量 G'、损耗模量 G''与藜麦粉添加量呈正相关; 在蠕变-回复过程中, 混粉面团的应变、回复性与藜麦粉添加量呈负相关。**结论**　当藜麦粉添加量为 10%~20%时, 混粉面团具有较好的热机械学特性、糊化特性和流变学特性, 以及较为完整的面筋网络结构。本研究结果为藜麦粉在主食面团中的应用提供指导, 为藜麦-小麦混粉制品的开发提供理论依据。

关键词: 藜麦粉; 混粉面团; 流变学特性; 微观结构
中图分类号: TS213.2　　**文献识别码**: A　　**文章编号**: 2095–0381(2026)14–0222–07

Study on the rheological properties and microstructure of *Chenopodium quinoa* Willd. flour-*Triticum aestivum* L. flour mixed flour dough

REN Yan-Jing[1,2], JIANG Fan[2,3], FU Jia-Yang[2], LIU Yang-Jin[2,4], DU Shuang-Kui[2*]

(1. *Shaanxi Grain and Oil Science Research Institute*, *Xi'an* 710082, *China*; 2. *College of Food Science and Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *China*; 3. *School of Food Science and Engineering*, *Shaanxi University of Science & Technolog*, *Xi'an* 710021, *China*; 4. *Xi'an Health School*, *Xi'an* 710054, *China*)

ABSTRACT: Objective　To explore the variation patterns of rheological properties and microstructure of *Chenopodium quinoa* Willd. flour and *Triticum aestivum* L. flour mixed flour dough with different *Chenopodium*

收稿日期: 2025-12-06
基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2024NC-YBXM-131)
第一作者: 任妍婧(1994—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为粮食加工与应用。E-mail: 461712989@qq.com
***通信作者:** 杜双奎(1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为杂粮功能化加工与评价。E-mail: dushuangkui@nwafu.edu.cn

quinoa Willd. flour substitution ratios. **Methods** By measuring the thermomechanical properties, gelatinization characteristics, tensile properties, microstructure and dynamic rheological properties of mixed flour dough, the variation patterns were analyzed. **Results** The formation time and stability time of the mixed flour dough increased first and then decreased with the increase of the amount of *Chenopodium quinoa* Willd. flour, the maximum value was reached when the addition of *Chenopodium quinoa* Willd. flour was 20%; the breakdown decreased first and then increased, the resistance to extension, extensibility and setback value of the mixed flour dough showed a tendency to decrease. The weakening degree of the mixed flour dough showed a maximum value, the gluten network structure was destroyed seriously, and the *Triticum aestivum* L. starch granules fell off obviously with 30% of *Chenopodium quinoa* Willd. flour proportion. Storage modulus (*G′*) and loss modulus (*G″*) were positively correlated with the addition of *Chenopodium quinoa* Willd. flour; during the creep and recovery stages, the strain and recovery of the mixed flour dough were negatively correlated with the addition of *Chenopodium quinoa* Willd. flour. **Conclusion** The thermomechanical properties, gelatinization characteristics and rheological properties of the mixed flour dough are better, and the gluten network structure is relatively complete when the addition of *Chenopodium quinoa* Willd. flour is between 10% and 20%. The research conclusion can provide guidance for the application of *Chenopodium quinoa* Willd. flour in staple dough and theoretical basis for the development of *Chenopodium quinoa* Willd.-*Triticum aestivum* L. mixed flour products.

KEY WORDS: *Chenopodium quinoa* Willd. flour; mixed flour dough; rheological properties; microstructure

0 引　言

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)作为苋科藜属双子叶植物, 是原产于南美洲安第斯山脉的一种假谷物[1]。藜麦富含优质的蛋白质、矿物质、维生素、膳食纤维等营养成分, 以及多酚、黄酮、皂苷类等活性物质[2]。此外, 藜麦中含有人体必需的所有氨基酸, 其中赖氨酸含量高于其他普通谷物[3]。藜麦具有抗菌、抗炎、抗癌及改善人体肠道菌群等保健功能, 同时可作为减肥人群及糖尿病患者的日常主食[4]。2013 年, 藜麦被联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)正式推荐为最适宜人类的完美“全营养食品”, 同时被列为全球十大健康营养食品之一[5]。

当前, 随着国民生活水平的提高和消费结构升级, 人们的饮食需求更趋向于多元化、均衡化、健康化的营养型食品。面制品作为我国饮食结构中的主食之一, 具有很大的开发潜力。近年来, 随着藜麦加工工艺的不断成熟, 主打“全营养食品”的藜麦面包、藜麦馒头、藜麦饼干等面粉加工制品已相继进入市场, 国内外相关研究也逐步开展[6–7]。Amrita 等[8]研究表明, 作为一种潜在功能成分, 藜麦胚芽的添加能够显著提高意大利面的蛋白质含量, 为人体提供特定营养。梁霞等[9]研究表明, 当藜麦粉添加量为 15%时, 面条具有较高的感官评价指标。Cannas 等[10]研究表明当藜麦粉添加量大于 50%时, 藜麦手指饼干因苦味而难以被消费者接受。周亚丽等[11]研究表明在制作酥性饼干过程中, 当藜麦粉替代量为 30%时, 混粉面团具有最大吸水率和形成时间, 且饼干具有较好的口感及品质。将藜麦粉与小麦粉进行一定比例复配, 不仅解决了藜麦粉难以形成面团的问题, 同时也为小麦面制品增加了藜麦所特有的营养和风味[12]。但现有研究大多侧重于通过单一或少数几个糊化特性、流变学特性等指标分析藜麦粉-小麦粉混粉的面团加工特性, 或着重在应用层面分析成品如面条、面包等的感官、质构特性[8–12], 未能全面分析比较藜麦粉的添加对小麦粉热机械学特性、糊化特性、微观特性及流变学特性等不同指标的影响, 对淀粉-蛋白质网络结构之间的协同机制探究深度不足。

本研究以藜麦粉与小麦粉为试验材料, 按照不同比例混合, 对其混粉的热机械学特性、糊化特性以及混粉面团的微观结构、拉伸特性及流变学特性进行系统性关联分析, 探讨藜麦粉添加比例对混粉特性的影响规律, 并进一步分析从混粉到面团形成过程中淀粉颗粒与蛋白质网络结构之间的作用机制, 为藜麦-小麦混粉制品的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

藜麦粉(淀粉含量 52.24%, 粗蛋白含量 14.27%, 粗脂肪含量 6.53%, 水分含量 12.11%, 灰分含量 1.75%, 陕西赛越食品有限公司); 老牛“小康之家”一等粉(淀粉含量 67.82%, 粗蛋白含量 11.16%, 粗脂肪含量 1.21%, 水分含量 14.09%, 灰分含量 0.35%, 陕西老牛面粉有限公司)。

淀粉总量检测试剂盒(爱尔兰 Megazyme 生物公司);

无水乙醇、戊二醛、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠(分析纯, 国药集团化学试剂北京有限公司)。

1.2 仪器与设备

MIXOLAB 2 肖邦第二代混合实验仪(法国肖邦技术公司); Nova Nano SEM-450 场发射扫描电子显微镜(美国 FEI 公司); TA.XT plus 质构仪[英国 SMS (Stable Micro Systems)公司]; DHR-1 流变仪(美国 TA 公司); MSP-IS 离子溅射仪(日本日立公司); EMCPD300 超临界干燥仪(德国 LEICA 公司); Tech Master 快速黏度分析仪(瑞典 PERTEN 公司); ME204E 电子天平(精度 0.1 mg, 瑞士梅特勒-托利多有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 原料粉基本组分测定

总淀粉含量采用 Megazyme 试剂盒检测; 粗蛋白含量参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法测定; 粗脂肪参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第一法测定; 水分含量参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法测定; 灰分含量参照 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》第一法测定。

1.3.2 混粉制备

将藜麦粉与小麦粉按照 0:10、1:9、2:8、3:7、10:0 (*m*:*m*)比例混合, 得到藜麦粉添加量为 0%、10%、20%, 30%、100%的混合粉, 充分混匀备用。

1.3.3 混粉热机械学特性测定

采用 MIXOLAB 2 混合实验仪, 参照 Chopin+协议程序分析藜麦粉-小麦粉混粉面团的热机械学特性。根据混粉水分含量和吸水率, 准确称取相应质量(约 50 g), 加水后面团质量为 75 g, 以(1.10±0.05) N·m 为目标扭矩(C1), 两个搅拌刀转速为 80 r/min, 水箱温度为 30 ℃, 得到随搅拌时间变化的力矩曲线图。

1.3.4 混粉糊化特性测定

参照 Devi 等[13]方法稍作改动, 分别称取 3.5 g(以 14%水分含量为基准)不同混合比例的藜麦粉-小麦粉混粉, 置于 RVA 铝制样品筒, 加入 25 mL 蒸馏水混匀。设定测定参数, 使混粉体系在 50 ℃持续搅拌 1 min, 以 12 ℃/min 的速率从 50 ℃加热至 95 ℃, 保温 2 min; 在测定最后 11 min 内温度冷却至 50 ℃, 保持 2 min。测定开始 10 s 内转速设定为 960 r/min, 之后匀速 160 r/min。

1.3.5 面团的制备

按 1.3.2 称取不同比例藜麦粉与小麦粉并混合, 参照 Mixolab 混合实验仪测定的吸水率加水, 揉捏混粉成面团, 待面团光滑用保鲜膜包裹, 在室温下静置 30 min, 备用。

1.3.6 面团拉伸特性测定

参照 Luo 等[14]方法并稍作改动。将制备好的面团按压成片, 转入样品制备槽中, 采用模具板压制, 得到数个 2 mm×60 mm 条状待测样品, 用保鲜膜包裹。将样品迅速放置于质构仪上, 用 A/KIE 探头测定, 选取 6~8 个均匀样品进行重复测定, 以最大抗拉伸阻力、延伸度作为评价指标。

1.3.7 面团微观结构观察

参照 Atudorei 等[15]方法并稍作改动, 将制备好的面团切割成边长 3~5 mm, 厚 1~2 mm 的方形面片, 将面片在 4%戊二醛溶液中浸泡 12~16 h。再将面片分别用磷酸缓冲液、30%~90%不同梯度乙醇、无水乙醇进行 3~4 次洗脱, 每次 10~15 min。待试剂挥发完全后将面片放置在 CO_2 超临界干燥仪中干燥 4 h, 取出面片, 拍摄并观察微观结构。

1.3.8 面团流变学特性测定

(1)动态频率扫描测定

参照 Galkowska 等[16]方法稍作改动, 在 25 ℃恒温条件下, 将面团压制成厚度 2 mm、直径约 40 mm 的圆形面片, 置于流变仪测试平台, 平行板间距 1 mm, 降低上平板, 用硅油涂抹面片外边缘将其密封隔绝空气。在平行板上松弛 5 min 后以动态测量模式下的应变扫描程序确定面团的线性黏弹区, 再进行频率扫描。

(2)蠕变-回复性测定

参照 Lei 等[17]方法稍作改动, 在应变模式下进行测定, 其中应力为 250 Pa, 温度保持 25 ℃, 扫描频率为 1 Hz, 平衡时间 100 s, 蠕变时间 100 s, 回复时间 300 s。

1.4 数据处理

采用 SPSS 20 软件对数据进行方差分析、Duncan 多重比较, 采用 OriginPro 8.5 进行作图, 每组实验均平行测定至少 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

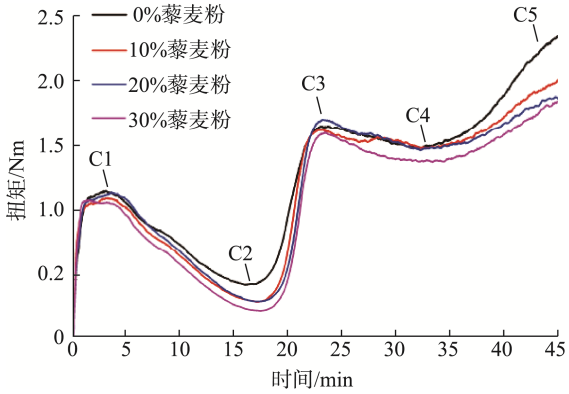
2.1 面团的热机械学特性

藜麦粉-小麦粉混粉面团的热机械学特性结果如图 1、表 1 所示, 由于 100%藜麦粉不含面筋蛋白, 无法形成面团, 因此未进行热机械学特性测定。其余不同比例混粉面团的吸水率、形成时间、稳定时间随着藜麦粉添加比例的增大呈现先增大后减小的趋势, 在藜麦粉添加 10%时混粉具有最大吸水率, 添加 20%时混粉具有最大形成时间和稳定时间, 这可能由于藜麦粉中粗纤维含量较高, 其中羟基与水分子进行氢键结合, 提高了混粉的吸水率[11]; 当藜麦粉添加量大于 20%时, 吸水率、稳定时间开始下降, 这是藜麦粉的添加会稀释小麦粉中的面筋含量, 破坏面团形成过程中的蛋白质-淀粉复合体, 导致面团筋力下降[18]。混粉面团弱化度(C1–C2)与藜麦粉添加量呈正相关, 当藜麦粉添加量 30%时最高, 这是由于藜麦粉的添加导致混粉中的面

筋蛋白含量随着藜麦粉比例的增加而减少，从而降低面筋强度和面团弹性[19]。混粉面团的崩解值(C3–C4)随藜麦粉添加量的增加先减小后增大再下降，当添加量为20%~30%时较高，这表明藜麦粉添加量的增多会降低面团的热黏度稳定性。随着藜麦粉添加比例的增加，混粉面团的回生值(C5–C4)显著下降，当藜麦粉添加量为 30%再上升，这表明藜麦粉的添加可在一定程度上影响面团的老化特性。本研究结果与 Rodriguez-Sandoval 等[20]关于藜麦混粉面团热机械学特性的变化规律一致。

2.2　混粉糊化特性

藜麦粉-小麦粉混粉的糊化特性如图 2、表 2 所示。混粉的峰值黏度随着藜麦粉的添加呈下降趋势，这可能由于藜麦中膳食纤维的存在阻碍了淀粉与水的结合，从而影响混粉的糊化黏度特性[21]。混粉的最终黏度随藜麦粉的添加呈先上升后下降趋势，藜麦粉添加量 20%时，混粉具有最大的最终黏度，这与藜麦粉中直支链淀粉比例、破损淀粉含量相关[22]。随着藜麦粉添加量的增加，混粉的崩解值下降，起糊温度上升，表明藜麦粉的添加可以提高混粉的热糊稳定性，这是由于藜麦粉中的淀粉、蛋白质、脂类、多糖等组分易互相产生作用，淀粉颗粒表面被藜麦蛋白或卵磷脂吸附，影响淀粉的吸水溶胀、糊化[23]。混粉回生值的变化与淀粉吸水膨胀后，直链淀粉和支链淀粉发生重组及重排、各分子链长度及分支结构发生改变有关，其内在机制尚需进一步研究[24]。综合来看，当藜麦粉添加量为10%~20%时混粉具有较好的糊化特性。



注: C1. 揉混面团时最大稠度值，反映吸水率; C2. 面团最小稠度值，可测定蛋白质弱化程度; C3. 淀粉糊化过程最大稠度值; C4. 淀粉糊化过程最小稠度值; C5. 淀粉回生阶段最终稠度。

图 1　混粉面团热机械学特性曲线

Fig.1　Thermomechanical properties curves of mixed flour dough

表 1　混粉面团热机械学特性

Table 1　Thermomechanical properties of mixed flour dough

藜麦粉添加量/%	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	C1/Nm	C2/Nm	C3/Nm	C4/Nm	C5/Nm	C1–C2(弱化度)/Nm	C3–C4(崩解值)/Nm	C5–C4(回生值)/Nm
0	60.90±0.57^{b}	3.11±0.11^{b}	4.69±0.02^{b}	1.12±0.03^{a}	0.46±0.01^{a}	1.60±0.01^{ab}	1.43±0.02^{ab}	2.26±0.02^{a}	0.66±0.02^{c}	0.16±0.00^{b}	0.83±0.00^{a}
10	62.30±0.14^{a}	3.33±0.13^{b}	5.04±0.09^{a}	1.07±0.02^{a}	0.34±0.00^{b}	1.59±0.01^{ab}	1.45±0.00^{a}	1.97±0.00^{b}	0.73±0.03^{b}	0.14±0.01^{b}	0.52±0.00^{b}
20	60.45±0.07^{b}	3.80±0.24^{a}	5.10±0.04^{a}	1.11±0.02^{a}	0.34±0.01^{b}	1.64±0.02^{a}	1.41±0.02^{ab}	1.80±0.04^{c}	0.78±0.01^{ab}	0.23±0.00^{a}	0.39±0.02^{d}
30	60.25±0.07^{b}	1.61±0.13^{c}	4.70±0.03^{b}	1.09±0.03^{a}	0.28±0.01^{c}	1.57±0.02^{b}	1.37±0.03^{b}	1.81±0.03^{c}	0.81±0.02^{a}	0.21±0.01^{a}	0.45±0.01^{c}

注: 同列不同小写字母表示有显著差异(P<0.05)，下表同。

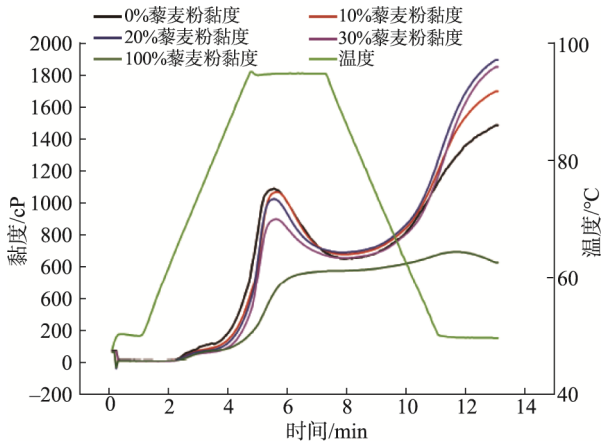


图 2　混粉糊化特性曲线

Fig.2　Gelatinization characteristics curves of mixed flour

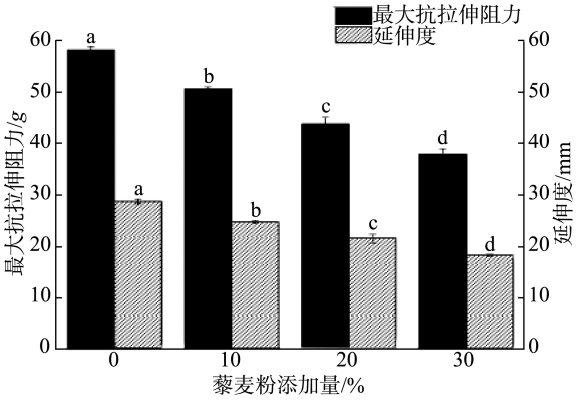
2.3　混粉面团拉伸特性

由于 100%藜麦粉不含面筋蛋白，无法形成面团，不能测定其面团拉伸特性。其他比例混粉面团的最大抗拉伸阻力和延伸度随着藜麦粉添加量的增加均呈显著下降趋势(图 3)。这是由于藜麦粉中淀粉、蛋白质、纤维素、矿物质等物质会加大小麦面筋结构的松散程度，对面团中面筋蛋白有一定稀释作用[25]；且藜麦中的纤维含有多聚糖，这与小麦粉中的麦谷蛋白和麦胶蛋白易发生相互作用，从而改变面筋蛋白的网络结构，降低面筋蛋白的流散性、膨胀能力等功能特性，削弱面团稳定性，进而导致面团的拉伸性显著降低[26]。面团的最大抗拉伸阻力和延伸度越小，面团的结构越紧密硬实，面团越不易加工、感官性越差。

表 2 混粉的糊化特性

Table 2 Gelatinization characteristics of mixed flour

藜麦粉添加量/%	峰值黏度/cP	崩解值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	起糊温度/℃
0	1102±17^{a}	440±13^{a}	1495±18^{c}	833±17^{c}	86.40±0.57^{d}
10	1079±14^{a}	388±11^{b}	1706±14^{b}	1015±20^{b}	88.00±0.42^{c}
20	1036±10^{b}	333±10^{c}	1902±23^{a}	1199±18^{a}	88.75±0.37^{bc}
30	910±13^{c}	242±7^{d}	1858±20^{a}	1190±16^{a}	89.65±0.71^{b}
100	583±8^{d}	37±1^{e}	639±11^{d}	93±4^{d}	94.95±0.57^{a}



注: 不同字母表示有显著差异(P<0.05)。

图 3 混粉面团的拉伸特性

Fig.3 Tensile properties of mixed flour dough

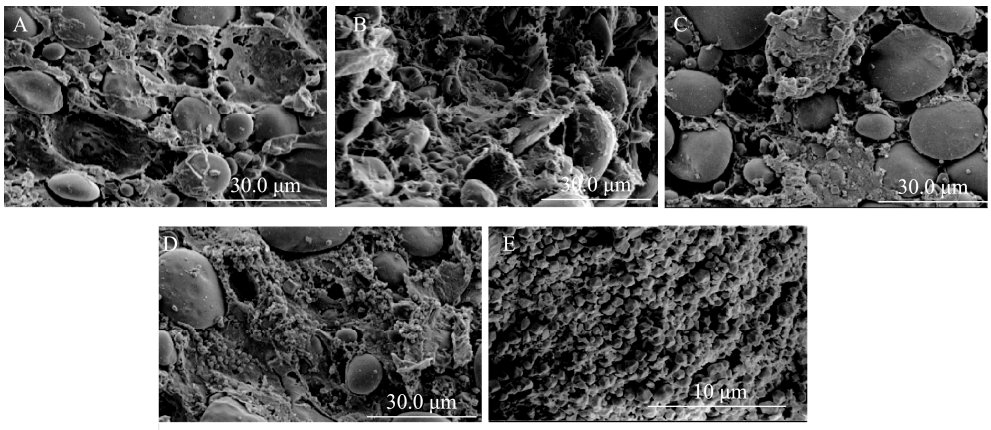
2.4 混粉面团的微观结构

藜麦粉-小麦粉混粉面团的微观结构如图 4 所示。小麦粉面团的面筋网状结构紧密且连续完整, 小麦淀粉被包裹在面筋网络中(图 4A); 藜麦粉面团中的藜麦淀粉颗粒呈不规则多边形, 藜麦蛋白和淀粉颗粒松散地结合在一起(图 4E); 由图 4B 和 4C 可见, 当藜麦粉添加量由 10%增加到 20%时, 混粉面团的面筋网络由起初的紧密结构逐渐变为较疏松的结构。当藜麦粉添加量为 10%时, 藜麦淀粉填充在面筋网络的缝隙中, 可维持一定的面筋网络结构; 当藜麦粉添加量为 20%时, 面团的面筋网络出现明显断裂, 小麦淀粉相对松散, 并发生一定程度的脱落, 部分藜麦淀粉与小麦淀粉黏附在一起。由图 4D 可看出, 当藜麦粉添加量为 30%时, 小麦淀粉颗粒明显脱落且暴露出来, 藜麦淀粉呈团状颗粒聚集在小麦淀粉表面, 使混粉面团中的小麦淀粉与面筋蛋白无法充分结合, 蛋白质之间相互作用力减小, 面筋网络结构受到较大程度的破坏[27]。

2.5 混粉面团的动态流变学特性

2.5.1 动态频率扫描

动态流变学实验中, 储能模量 G'用以反映物料的弹性大小, 损耗模量 G''用以反映物料的黏性大小[16]。如图 5~6 所示, 不同藜麦粉添加量面团的 G'和 G''均随着振荡频率的增大而增大, 且 G'大于 G'', 这表明混粉面团是一种弹性流体, 表现为固态特性, 具有凝胶网状结构的特点[28]。藜麦中虽然不含面筋蛋白, 但小粒径藜麦淀粉的存在及含量较高的支链淀粉能够填充蛋白质网络结构的空隙, 与面筋蛋白产生较强的结合力, 使蛋白质网络结构更加稳定且完整有序, 从而产生较高的 G'; 同时, 支链淀粉的存在增加了蛋白质网络结构中的几何空间阻碍力, 从而产生较高的 G''[23]。此外, 由于藜麦淀粉颗粒具有较大的比表面积, 能够紧密结合大量水分, 改变面团内部的水分分布, 从而削弱了水的塑化作用, 进而改善了面筋的力学性能和面团



注: A. 100%小麦粉面团; B. 10%藜麦粉混粉面团; C. 20%藜麦粉的混粉面团; D. 30%藜麦粉混粉面团; E. 100%藜麦粉面团。

图 4 混粉面团的微观结构

Fig.4 Microstructure of mixed flour dough

的黏弹性[28]。在一定频率范围内，G'、G''与藜麦粉添加量呈正相关，这是由于藜麦粉的添加虽然削弱了面团蛋白质网络结构，但随着藜麦粉添加量的增加，填充在弱化蛋白质网络中的淀粉颗粒增多，形成了更稳定的结构并改善了面团的流变特性。除 100%藜麦粉对照样品外，20%~30%藜麦粉面团表现出最佳的黏弹性。然而，虽然本研究可证明藜麦淀粉理化特性会影响面团流变性，但在实际应用中，蛋白质网络结构或纤维持水能力及脂肪、多糖等成分可能间接影响淀粉的作用机制[29]。未来将进一步研究藜麦中各营养组分相互影响的量化程度。

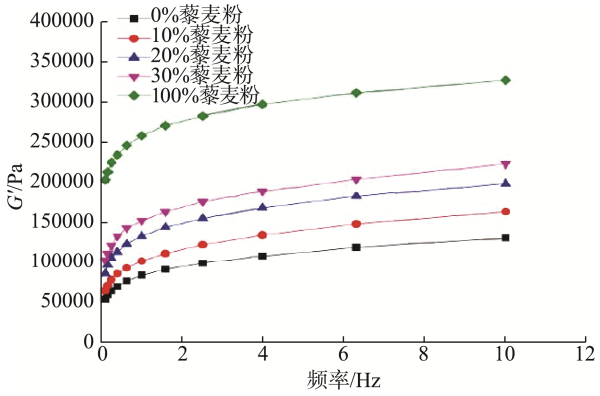


图 5　混粉面团的动态频率扫描曲线(储能模量)

Fig.5　Dynamic frequency sweep curves of mixed flour dough (storage modulus)

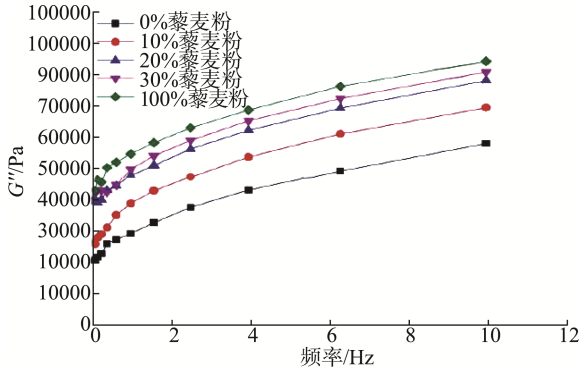


图 6　混粉面团的动态频率扫描曲线(损耗模量)

Fig.6　Dynamic frequency sweep curves of mixed flour dough (loss modulus)

2.5.2　蠕变-回复特性

面团的蠕变-回复曲线可反映面团在加工过程中受外力作用后的外观变化，也从侧面反映了面团的硬度和黏弹性[30]。混粉面团的蠕变-回复特性曲线如图 7 所示。混粉面团的应变、回复性与藜麦粉添加量呈负相关，小麦粉面团在蠕变阶段的应变最大，100%藜麦粉面团的应变最低。这表明藜麦粉的添加对面筋蛋白含量起到稀释作用，从而使面团黏弹性减弱，硬度变大[30]。在回复阶段，随着藜麦粉添加量的增加，面团更容易恢复到最小形变量，松弛后形变量变化越小。这是由于藜麦粉中清蛋白、球蛋白和膳食纤维等的存在加强了面团中不同组分间的摩擦力，使面团在应力作用下难以发生形变，因此表现出较弱的回复性[31]。在蠕变和回复阶段，10%藜麦粉添加量面团的应变大小与小麦粉面团最为接近，表明当藜麦粉添加量为 10%时，藜麦淀粉能够与面筋蛋白充分结合，维持一定的面筋网络结构，此时混粉面团的黏弹性、硬度更适宜加工。

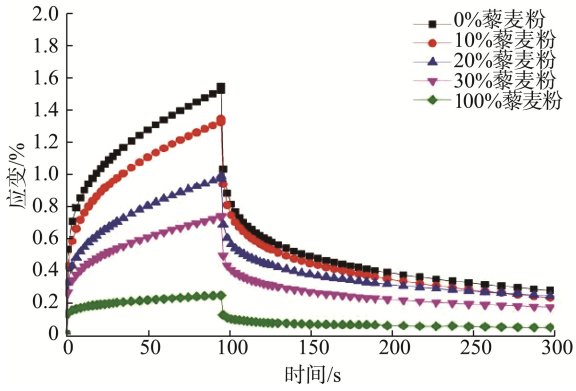


图 7　混粉面团的蠕变-回复特性

Fig.7　Creep-recovery properties of mixed flour dough

3　结　论

本研究系统探讨了藜麦粉添加量对藜麦-小麦混合粉面团的流变学特性及微观结构的影响，并揭示了藜麦淀粉的理化特性及其与面筋蛋白网络结构之间的相互作用机制。随着藜麦粉添加量的增加，藜麦淀粉颗粒表面被蛋白或卵磷脂吸附后，影响了淀粉的吸水溶胀、糊化，使混粉难以糊化；藜麦粉添加量为 10%~20%时，混粉具有较好的糊化特性和热机械学特性。面团拉伸特性和微观结构结果显示，藜麦粉的添加使混粉面团面筋网络结构遭到破坏，小麦淀粉颗粒明显脱落，蛋白质之间相互作用力减小。在动态流变学实验中，混粉面团的 G'、G''与藜麦粉添加量呈正相关，揭示了藜麦小颗粒淀粉填充在弱化蛋白质网络中，改变面团力学性能和黏弹性的现象，当藜麦粉添加量为 10%时混粉面团具有较好的黏弹性、硬度并适宜加工。综合来看，当藜麦粉添加量为 10%~20%时，藜麦淀粉-面筋蛋白之间可形成较稳定的网络结构，混粉面团具有较好的糊化特性、流变学特性及热机械学特性。然而，藜麦中各营养组分较为全面，淀粉、蛋白质、粗纤维及矿物质等组分之间的综合效应较为复杂，未来仍需对各组分间的作用机制进行深入研究，为优化藜麦粉加工制品提供理论依据，以推动藜麦产业的多元化发展。

参考文献

[1] Mu Hongyan, Xue Sophia, Sun Qingrui, et al. Research progress of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Wild.): nutritional components, technological

treatment, and application [J]. Foods, 2023, 12(10): 1–21.
[2] 和丽媛, 王玲, 吕俊梅. 藜麦营养组成及生物学功能研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(4): 11–15.
He Liyuan, Wang Ling, Lv Junmei. Research progress on nutritional composition and biological function of quinoa [J]. Cereals & Oils, 2022, 35(4): 11–15.
[3] 杨丹, 邢泓雨, 范志遥, 等. 藜麦营养品质及其在面条加工方面的研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2024(1): 18–23, 28.
Yang Dan, Xing Hongyu, Fan Zhiyao, et al. Research progress on nutritional quality of quinoa and its application in noodle processing [J]. Cereal & Feed Industry, 2024(1): 18–23, 28.
[4] Lan Yongli, Zhang Wengang, Liu Fuguo, et al. Recent advances in physiochemical changes, nutritional value, bioactivities, and food applications of germinated quinoa: a comprehensive review [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136390.
[5] Agarwal A, Rizwana, Tripathi A D, et al. Nutritional and functional new perspectives and potential health benefits ofquinoa and chia seeds [J]. Antioxidants, 2023, 12(7): 1413.
[6] Gómez M J R, Prieto J M, Sobrado V C, et al. Nutritional characterization of six quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties cultivated in Southern Europe [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 99: 1–7.
[7] 刘兴浩, 崔亚君, 王佳凯, 等. 藜麦营养功能特性及其在植物基食品中的应用[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(8): 226–234.
Liu Xinghao, Cui Yajun, Wang Jiakai, et al. Nutritional and functional properties of quinoa and its application in plant-based foods [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(8): 226–234.
[8] Amrita R, Alok K S, Suresh D S. Quinoa germ-enriched pasta: technological, nutritional, textural, and morphological properties [J]. Journal of Food Science, 2023, 88(12): 4907–4917.
[9] 梁霞, 孟婷婷, 周柏玲, 等. 藜麦-小麦粉的流变学特性及其面条研制[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 184–192.
Liang Xia, Meng Tingting, Zhou Bailing, et al. Rheological properties of quinoa-wheat flour and development of its noodles [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(7): 184–192.
[10] Cannas M, Pulina S, Conte P, et al. Effect of substitution of rice flour with quinoa flour on the chemical-physical, nutritional, volatile and sensory parameters of gluten-free ladyfinger biscuits [J]. Foods, 2020, 9(6): 808.
[11] 周亚丽, 崔利华, 游新勇, 等. 藜麦粉对小麦面团流变学特性及酥性饼干品质的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 191–196.
Zhou Yali, Cui Lihua, You Xinyong, et al. Effect of quinoa flour on the rheological properties of wheat dough and the quality of crisp biscuits [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(6): 191–196.
[12] Wang Sunan, Zhu Fan. Formulation and quality attributes of quinoa food products [J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(1): 49–68.
[13] Devi A, Sindhu R, Khatkar B S. Effect of fats and oils on pasting and textural properties of wheat flour [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(10): 3836–3842.
[14] Luo Xiuzhi, Yu Hui, An Jing, et al. Determination of extensibility and toughness of wheat-flour dough based on bubbles blown by sheeted dough and airflow-3D imaging technique [J]. Journal of Cereal Science, 2023, 113: 1–12.
[15] Atudorei D, Atudorei O, Codină G G. Dough rheological properties, microstructure and bread quality of wheat-germinated bean composite flour [J]. Foods, 2021, 10(7): 1542–1563.
[16] Galkowska D, Witczak T, Witczak M. Ancient wheat and quinoa flours as ingredients for pasta dough-evaluation of thermal and rheological properties [J]. Molecules, 2021, 26: 7026–7033.
[17] Lei Mengxu, Huang Jihong, Tian Xiaoling, et al. Effects of insoluble dietary fiber from wheat bran on noodle quality [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2021, 4: 1–9.
[18] Tao Chunsheng, Wang Kejian, Liu Xuejun, et al. Effects of potato starch on the properties of wheat dough and the quality of fresh noodles [J]. CyTA-Journal of Food, 2020, 18(1): 427–434.
[19] 田晓红, 汪丽萍, 李逸, 等. 多谷物粉含量对面团加工特性和面包品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 177–184.
Tian Xiaohong, Wang Liping, Li Yi, et al. Effect of multi-grain flour content on dough processing characteristics and bread qualities [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(10): 177–184.
[20] Rodriguez-Sandoval E, Sandoval G, Cortes-Rodriguez M. Effect of quinoa and potato flours on the thermomechanical and breadmaking properties of wheat flour [J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2012, 29(3): 503–510.
[21] 孔露, 孔茂竹, 余佳熹, 等. 藜麦淀粉消化特性与理化特性研究[J]. 食品科技, 2019, 44(4): 285–289.
Kong Lu, Kong Maozhu, Yu Jiaxi, et al. Digestibility and physicochemical properties of quinoa starch [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(4): 285–289.
[22] 江帆, 杜春微, 任妍婧, 等. 不同藜麦品种淀粉的理化性质与消化特性[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(7): 77–83.
Jiang Fan, Du Chunwei, Ren Yanjing, et al. Physicochemical properties and digestibility of starches of different quinoa varieties [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(7): 77–83.
[23] 钟雅云, 吴磊燕, 周锦枫, 等. 藜麦粉对冷冻面团特性及其面包品质的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(12): 112–121.
Zhong Yayun, Wu Leiyan, Zhou Jinfeng, et al. Effect of quinoa on the behavior and bread quality of frozen dough [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(12): 112–121.
[24] Kheto A, Das R, Deb S, et al. Advances in isolation, characterization, modification, and application of *Chenopodium* starch: a comprehensive review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 636–651.
[25] 何玲, 江昊, 张国权. 不同藜麦全粉添加量对小麦挂面品质、面筋蛋白结构及功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(9): 277–282.
He Ling, Jiang Hao, Zhang Guoquan. Effect of different quinoa whole flour additions on quality, gluten structure, and functional properties of wheat Chinese dried noodles [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(9): 277–282.
[26] Feng Y Y, Zhu Y L, Wang Z, et al. Effects of whole quinoa flour addition on the pasting property, dough rheology, and steam bread textural property of wheat flour [J]. International Food Research Journal, 2023, 30(5): 1212–1220.
[27] 闫铭欢, 王立博, 陈静, 等. 甜荞全谷物粉对小麦面团流变特性及鲜湿面条品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(10): 72–79.
Yan Minghuan, Wang Libo, Chen Jing, et al. Effect of common buckwheat whole grain flour on rheological properties of wheat dough and quality of fresh wet noodles [J]. Food Science, 2024, 45(10): 72–79.
[28] Ma Yanrong, Guo Lei, Chen Yifei, et al. Quinoa flour addition improves the rheological properties and resistant starch content of wheat dough: from the view of starch physicochemical properties and starch-protein interaction [J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 223: 117804.
[29] Peng Yuan, Wang Dongyue, Yu Jian, et al. Multi-scale structure and digestible process of wheat starch as affected by distribution behavior of rice glutelin amyloid fibril aggregates during gelatinization and digestion [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 284(P2): 138197.
[30] 李娜, 陈前, 李海峰, 等. 燕麦粉对小麦面团特性及饼干品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(1): 134–140.
Li Na, Chen Qian, Li Haifeng, et al. Influence of oat flour on dough properties and biscuit quality [J]. Food Research and Development, 2021, 42(1): 134–140.
[31] 李欣洋, 陈凤莲, 杨春华, 等. 基础流变学在谷物面团品质评价中的应用研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(10): 35–39, 55.
Li Xinyang, Chen Fenglian, Yang Chunhua, et al. Study on the application of basic rheology in the quality evaluation of grain dough [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(10): 35–39, 55.

(责任编辑: 安香玉 曹岱琳)