

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.03.008

白涛, 付丽红, 张宏丽, 等. 超高压处理对小米粉理化特性的影响研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 55-61.

BAI T, FU L H, ZHANG H L, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical and functional properties of millet flour[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(3): 55-61.

超高压处理对小米粉理化特性的影响研究

白 涛, 付丽红, 张宏丽, 李占蓉, 赵璐瑶, 王晓闻✉

(山西农业大学 食品科学与工程学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 对米水比例为 1:1、1:2 (w/w) 的小米在 600 MPa 下分别处理 15 min、30 min, 探讨不同处理条件对小米粉理化特性的影响。结果表明: 与空白组相比, 超高压对 4 组不同样品小米粉颗粒形貌、粒径和晶体特性均有影响。全粉中淀粉颗粒形貌由分散的不规则球体变为与其他物质结合粘成块结构, 颗粒平均粒径显著降低, 颗粒整体缩小, 晶体结构由天然 A 型转变为 B 型, 米水比为 1:2 时对微观结构影响尤为显著。动态流变表明超高压处理后小米粉糊 G' 和 tanδ 均高于原粉, G'' 均低于原粉, 表明高压处理可提高小米淀粉弹性和黏性, 该技术可作为有效的物理改性方法改善小米粉的物理特性。

关键词: 超高压; 小米粉; 微观结构; 流变特性

中图分类号: TS201.7; S-3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)03-0055-07

Effect of High Hydrostatic Pressure on Physicochemical and Functional Properties of Millet Flour

BAI Tao, FU Li-hong, ZHANG Hong-li, LI Zhang-rong, ZHAO Lu-yao, WANG Xiao-wen✉

(College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: Millet was treated at 600 MPa for 15 min and 30 min, respectively (millet: water=1:1 or 1:2 (w/w)). The effects of different treatment conditions on physicochemical and functional properties of millet flour were investigated to provide a theoretical basis for optimizing the quality characteristics of millet powder. The results showed that high hydrostatic pressure (HHP) treatment affected the morphology, particle size, and crystal characteristics of the four different millet powders. The morphology of starch particles in the whole flour changed from a scattered irregular sphere to complex and bonded to block structure with other substances, and the average particle size decreased significantly. The overall particle size shrank, and the crystal structure changed from natural A type to B type. The effect on the microstructure was particularly significant when the ratio of millet to water was 1:2. The dynamic rheological tests showed that G' and tanδ

收稿日期: 2022-12-14

基金项目: 山西省重点研发计划 (201903D21006); 山西省基础研究计划 (202103021223154)

Supported by: Key Research and Development Project of Shanxi Province (No.201903D211006); Fundamental Research Program of Shanxi Province (No.202103021223154)

作者简介: 白涛, 男, 1997 年出生, 在读硕士生, 研究方向为食品营养与健康。E-mail: 18434752337@163.com.

通讯作者: 王晓闻, 女, 1968 年出生, 博士, 教授, 研究方向为食品质量与安全。E-mail: wwxw11@163.com.

of millet paste after HHP treatment were higher than those of original powder, and G'' was lower than that of original powder. The results showed that HHP treatment could improve the elasticity and viscosity of millet starch, and this technology could be used as an effective physical modification method to improve the physical properties of millet powder.

Key words: high hydrostatic pressure; millet flour; microstructure; rheological properties

小米(Foxtail millet)属禾本科,是世界上第六大谷物,主要种植于干旱地区^[1]。小米富含淀粉、蛋白质、脂质、膳食纤维和许多微量元素,如Ca、Fe、Mg^[2]。长期食用小米对人体健康具有益处,如抗溃疡、抗炎、抗氧化特性等^[3]。与其他谷物相比,小米降低了对碳水化合物的消化和吸收,可降低Ⅱ型糖尿病患病风险^[4]。此外,小米无谷蛋白,适合乳糜泻患者食用。因其具有种种益处,小米产品的开发成为当前研究热点。

超高压(High Hydrostatic Pressure, HHP)技术,指在100~1 000 MPa压力下利用液体介质瞬时均匀传播压力于食品,改变食品组分的非共价键,使高分子物质结构随之改变,从而起到改性目的^[5]。HHP最初是一种巴氏杀菌的潜在替代方法,后研究发现其只作用于非共价键的特性开始广泛应用于食品加工中^[6]。目前,HHP作为一种重要的物理改性技术,在谷物加工方面主要用于蛋白质和淀粉变性、灭菌等。高压可以诱导淀粉的凝胶化,与热凝胶化淀粉相比,压力凝胶化淀粉具有不同的性质,可用于开发特殊人群食品和运输营养物质的载体^[7]。高压处理米粉和玉米淀粉后抗性淀粉含量增加,可提高无谷蛋白面包的质量,以帮助乳糜泻患者^[8]。小麦-燕麦复合粉经HHP加工后可降低面条断条率和蒸煮损失,提高其品质^[9]。目前关于超高压处理对小米理化特性的影响研究较少,主要集中在单一成分淀粉或蛋白质的研究上,针对米粉的研究甚少,本研究利用超高压技术处理小米后,采用粒径分析、扫描电子显微镜和傅里叶变换红外光谱等对米粉理化特性进行测定,为小米开发和应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

小米:山西省晋谷21号商品小米;KBr:Sigma-Aldrich公司。

1.2 主要仪器与设备

SSH-实验机三水河超高压食品灭菌设备:中国山西力德福技术有限公司;TGM-100型超微粉碎机:上海田岗机械制造有限公司;HELOS-OASIS干湿二合一激光粒度仪:德国新帕克公司;JSM-7500F冷场发射扫描电子显微镜:日本电子公司;Tesor-27 FTIR光谱仪、BRUCKER D8 ADVANCE X射线衍射仪:德国布鲁克公司;MCR-102电磁流变仪:安东帕(上海)商贸有限公司。

1.3 实验条件

1.3.1 超高压(HHP)处理

将小米和水(比例为1:1,1:2,w/w)包装在聚乙烯塑料袋中,去除水泡以减少泄露的风险。将样品置于三水河SHPP-10LHHP容器中,浸入加压介质(自来水)中。循环水系统的控制温度为25℃,压力增长率为200 MPa/min。样品在600 MPa下分别处理15 min,30 min。HHP处理后,所有样品放入冷冻室(-20℃)并冻干,将冻干后的小米经过超微粉碎成粉末备用。对照组原粉由小米超微粉碎获得。

1.3.2 小米粉粒径的测定

使用激光粒径衍射仪对样品进行干法粒度分析。样品的粉碎条件保持一致,样品分散度为1%加到比色皿中,粒径的测量范围为0.1~35 μm,用分析仪上的软件计算不同尺寸颗粒的百分比。

1.3.3 扫描电子显微镜

采用JSM-7500F扫描电子显微镜进行扫描电镜(SEM),获得米粉在HHP处理前后的微观结构图像。将导电胶贴于扫描电子显微镜的载物台上,用取样器粘取少量样品涂匀,用吸耳球吹去多余样品。在高真空下溅射镀金和钯。电子束的加速电压为10 kV。

1.3.4 傅里叶变换红外光谱

将小米粉与溴化钾以1:200(w/w)的比例进行混合，研磨压片，在傅立叶红外光谱仪上进行扫描测定。FTIR光谱采用Tesor 27 FTIR光谱仪收集，波长范围为4 000~400 cm⁻¹，32次扫描，分辨率为4 cm⁻¹，使用Peakfit4.12软件进行分析。通过寻峰读取波数为1 047 cm⁻¹和1 022 cm⁻¹处的峰强，并计算他们的比值。

1.3.5 X-射线衍射

X-射线衍射(XRD)模式采用X射线衍射仪在以下条件下测量：辐射源，CuKa(40 kV, 50 mA)；衍射角度从4~40°；步长，0.02°；扫描速度为2°/min。为了避免相对湿度对结晶度的负面影响，样品在进行XRD实验之前，在一个100%的相对湿度室中，在室温下平衡48 h。

1.3.6 流变学特性

频率扫描用动态流变仪进行，该设备配有1 mm的40 mm平行板。将样品(1.5 g)和蒸馏水(25 mL)均放置在RVA的铝盒中，按照GB/T 24852—2010《大米及米粉糊化特性测定》的程序加热。所有粘贴的样品室温下放置30 min。移液枪吸取1 mL样品置于平板上，平衡60 s后测量。频率范围是在0.1~100 rad/s内对样品进行震荡测量来进行，线性区域的恒定应变为2.5%。利用仪

器自带软件确定动态流变参数，即存储模量(G')、损耗模量(G'')和损耗正切(tanδ)，并分析25 °C下的流变结果。

2 结果与分析

2.1 HHP对小米粉粒径的影响

由表1可知，与原粉相比，经超高压处理后小米粉主要分布在4~20 μm范围，平均粒径显著降低(P<0.05)，颗粒整体缩小，说明超高压对小米粉的压缩力远大于膨胀力。在米水比例相同情况下，30 min处理小米粉在4~20 μm范围内的粒径增加显著大于15 min超高压处理的粒径(P<0.05)，原因可能是在较长时间处理下，小米的外壳结构受损破碎更严重。在超高压处理时间相同的情况下，米水比例为1:2小米粉粒径在4~20 μm范围内的粒径增加显著小于比例为1:1的小米粉(P<0.05)，原因是小米外壳受高压压缩破碎后全粉内部开始吸水溶胀，水分含量越高小米粉的溶胀效果越好。颗粒范围在30 μm外，可能是淀粉颗粒与非淀粉成分络合作用造成的^[16]。

2.2 HHP对小米粉颗粒形貌的影响

由图1可知，压力为600 MPa下，不同水分比例和处理时间的小米粉颗粒经扫描电镜观测，发现其与原小米粉颗粒存在显著变化，原小米粉

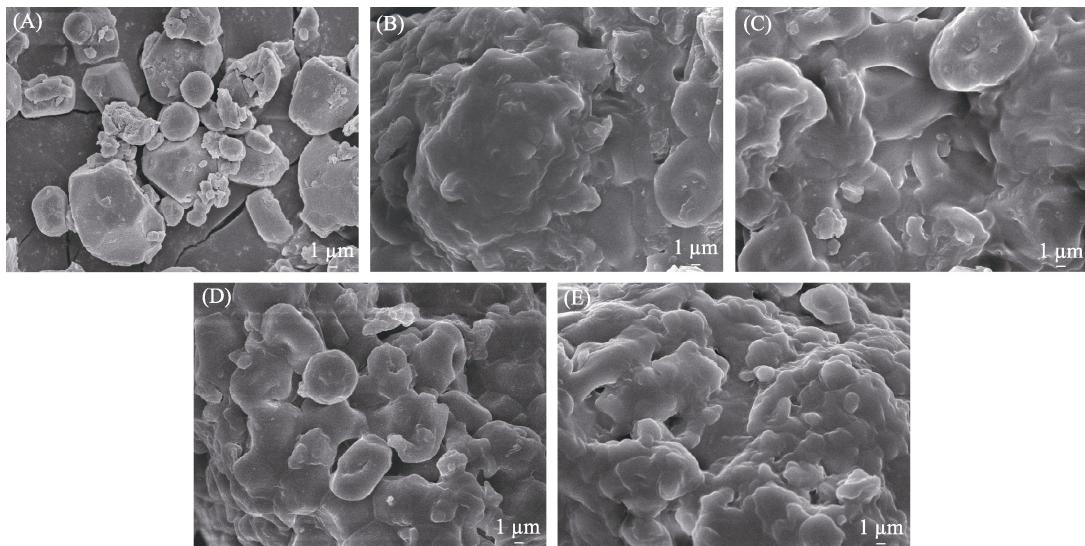
表1 不同超高压条件处理后的小米粉颗粒粒径分布

Table 1 Granule size distribution of foxtail millet powder after different HHP levels

处理组	0~4 μm	4~10 μm	10~20 μm	20~30 μm	>30 μm	D10/μm	D50/μm	D90/μm	C.V./μm	S.D./μm
原粉	3.56±0.04 ^b	19.80±0.20 ^a	28.59±0.23 ^d	15.23±0.08 ^d	32.81±0.39 ^a	7.09±0.03 ^a	20.05±0.22 ^a	49.20±0.15 ^a	11.73±0.08 ^a	25.12±0.09 ^a
600 MPa 1 : 1	5.69±0.03 ^a	26.20±0.07 ^c	33.24±0.04 ^c	15.49±0.03 ^c	19.39±0.05 ^b	5.73±0.02 ^c	15.25±0.03 ^c	39.38±0.00 ^b	9.20±0.03 ^b	19.29±0.03 ^b
	5.59±0.03 ^a	28.16±0.11 ^c	35.06±0.04 ^a	13.97±0.05 ^e	17.22±0.10 ^d	5.75±0.01 ^c	14.24±0.04 ^d	37.84±0.10 ^c	9.15±0.04 ^b	18.38±0.05 ^b
600 MPa 1 : 2	5.68±0.10 ^a	25.44±0.02 ^b	33.65±0.08 ^b	15.75±0.03 ^b	19.47±0.02 ^b	5.75±0.04 ^c	15.49±0.02 ^b	39.41±0.00 ^b	9.24±0.04 ^b	19.40±0.02 ^b
	5.63±0.06 ^a	25.41±0.03 ^b	35.11±0.04 ^a	15.91±0.04 ^a	17.93±0.03 ^c	5.82±0.02 ^b	15.25±0.02 ^c	37.69±0.04 ^c	9.22±0.07 ^b	18.86±0.01 ^b

注：数据用平均值±标准偏差表示；同一列不同字母有显著性差异(P<0.05)；D10、D50、D90分别表示粒径小于该值的颗粒占总颗粒的10%、50%、90%；C.V.：体积平均粒径；S.D.：表面积平均粒径。

Note: The results are the means of three replications ± standard deviations. Means with similar letters in a column do not differ significantly (p<0.05); D10, D50 and D90 respectively represent 10%, 50% and 90% of the total particles with a particle size smaller than this value; C.V.: volume average particle diameter; S.D.: surface area mean particle size.



注：放大倍数为×3000；A：原粉；B：600 MPa 15 min 1 : 1；C：600 MPa 30 min 1 : 1；D：600 MPa 15 min 1 : 2；E：600 MPa 30 min 1 : 2。

Note: The magnification power×3000; A:nature; B:HHP treatment at 600 MPa for 15 min of millet to water is 1 : 1; C:HHP treatment at 600 MPa for 30 min of millet to water is 1 : 1; D: HHP treatment at 600 MPa for 15 min of millet to water is 1 : 2; E: HHP treatment at 600 MPa for 30 min of millet to water is 1 : 2.

图1 不同超高压条件处理后的小米粉扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron micrographs of foxtail millet powder with different HHP levels

中淀粉颗粒多为不规则形状，表面粗糙且有凹陷部分^[14]，碎片可能是蛋白质、脂质和膳食纤维等物质。600 MPa 处理后，小米全粉中淀粉表面附着物与溶胀糊化后的淀粉粘结成片，可能是蛋白质或脂肪与浸出的直链淀粉络合形成，变形明显^[15]。同时，经 600 MPa 处理 30 min 的样品其变形程度显著高于处理 15 min 的样品组，前者络合较为紧密，片状区域更为明显；高水分比例情况下与之相反，可能是淀粉吸水溶胀导致。

2.3 傅里叶红外光谱

淀粉分子中的双螺旋短程有序结构可通过红外光谱中 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 处吸光度的比值来计算，其比值越大，表明淀粉的有序性越好^[10]。由图 2 可知，超高压处理后的 4 组小米粉 FTIR 在峰位置上相似，表明超高压技术只作用于非共价键，但光谱之间峰的强度存在差异，这说明淀粉结构上存在差异。从表 2 看出，在相同水分比例下， $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 处吸光度比值随处理时间延长而降低，表明在含水量相同情况下，时间决定超高压处理的效果。在相同时间下， $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 处吸光度比值随着水分含量的增加而降低，表明水分含量越大，超高压处理对淀粉分

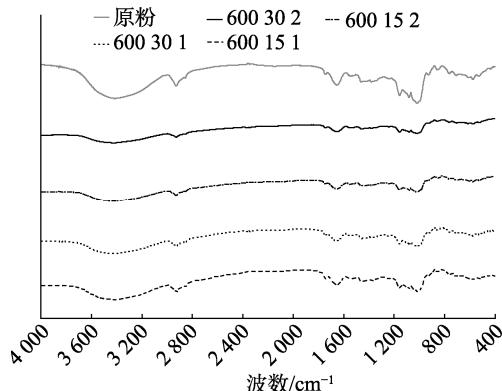


图2 不同超高压条件处理后小米粉的傅里叶红外光谱图

Fig.2 FTIR spectra of foxtail millet powder with different HHP levels

表2 不同超高压条件下小米粉吸光度比值

Table 2 IR ratio $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ of foxtail millet powder with different HHP levels

处理组	红外比值 $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$
原粉	1.0475 ± 0.01^a
600 MPa 15 min 1 : 1	1.0338 ± 0.00^b
600 MPa 30 min 1 : 1	1.0325 ± 0.00^b
600 MPa 15 min 1 : 2	1.0271 ± 0.01^c
600 MPa 30 min 1 : 2	1.0256 ± 0.00^c

注：数据用平均值±标准偏差表示，同一列不同字母有显著性差异($P<0.05$)。

Note: The results are the means of three replications ± standard deviations. Means with similar letters in a column do not differ significantly ($P<0.05$).

子结构的短程有序性破坏程度就越大，即水分含量高的样品对超高压处理更为敏感。

2.4 X-射线衍射

原小米粉和HHP处理后的小米粉的X射线衍射图谱如图3所示，图谱中主峰的衍射角和相对结晶度详见表3。天然小米属于典型的A型X射线衍射图谱，即在2θ角为17°和18°处有明显的双肩特征衍射峰且在15°和23°处有单一的衍射峰^[11]。超高压处理30 min的样品，在2θ角为15°、17°、18°和23°处衍射峰强度表现出略微减弱的现象，且峰强度随水分比例增加而减弱。当米水比例为1:1时，在2θ角为15°、17°、18°和23°处的衍射峰强度随处理时间的增加而降低，但在20°处的衍射峰强度却增强。分析原因，超高压处理有利于直链淀粉-脂质复合物的形成，最终导致20°处

的峰强度增加^[12]。超高压处理后的样品，15°和23°时的峰强度减弱，17°和18°时的双峰在17°时合并成一个单峰，典型的B型晶体结构^[13]，且4组超高压组样品相对结晶度均显著低于原粉组($P<0.05$)。

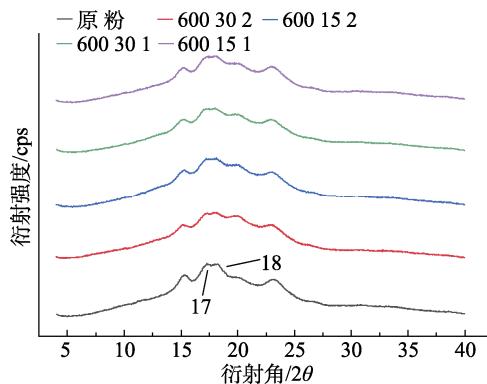


图3 不同超高压条件处理后的小米粉X-射线衍射图谱
Fig.3 X-ray diffraction patterns of foxtail millet powder with different HHP levels

表3 不同超高压条件处理后小米粉X-射线衍射参数

Table 3 X-ray diffraction parameters of foxtail millet powder treated with different HHP levels

处理组	2θ处衍射峰值/晶面间距(Å)					相对结晶度/%
	15°	17°	18°	20°	23°	
原粉	15.22(5.81)	17.91(5.12)	18.30(4.86)	21.19(4.39)	23.43(3.84)	34.82±1.46 ^c
600 MPa 15 min 1:1	15.68(5.78)	18.00(5.09)	17.82(4.92)	20.07(4.42)	22.58(3.85)	15.36±1.21 ^b
600 MPa 30 min 1:1	15.08(5.84)	17.47(5.18)	18.56(4.91)	20.39(4.34)	23.37(3.88)	10.20±0.93 ^d
600 MPa 15 min 1:2	14.21(5.83)	18.29(5.09)	17.86(4.89)	21.69(4.37)	23.46(3.85)	14.87±1.34 ^b
600 MPa 30 min 1:2	15.10(5.84)	17.50(5.13)	24.56(4.92)	18.20(4.47)	21.90(3.87)	7.13±0.88 ^a

注：数据用平均值±标准偏差表示，同一列不同字母有显著性差异($P<0.05$)。

Note: The results are the means of three replications ± standard deviations. Means with similar letters in a column do not differ significantly ($P<0.05$).

2.5 HHP对小米粉流变特性的影响

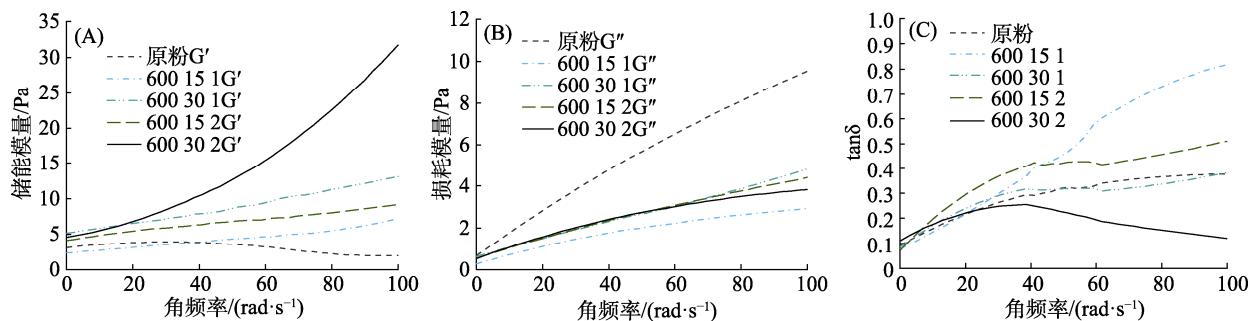
当施加作用力于食品时，会发生弹性形变，撤去作用力后，具有黏性，后表现为流体特征^[17]。储能模量G'是指物料发生弹性形变时存储能量的强弱，是弹性应力和应变的比值；损耗模量G"是物料发生粘性形变时消耗的能量大小，是黏性应力和应变的比值^[18]。损耗角正切tanδ值反映的是体系所具有的综合粘弹性特性，如tanδ值越大，则表明体系中的黏性成分比例越高，流动性越强，体系表现出半固态流体的特征；tanδ值越小，则体系中的弹性成分就越多，体系呈现出固态特征越明显^[19]。

由图4可知，在600 MPa压力下分别经过

15 min和30 min处理后，小米粉的G'与G"随频率增大均逐渐增大，且G'大于G"，表明小米粉糊更具弹性，tanδ也呈先上升后平稳的趋势，且tanδ小于1，说明原粉和超高压处理后的小米粉糊动态流变学特性是一种弱凝胶体系^[20]。米水比例为1:1时，不同时间的小米粉糊G'均高于原粉，G"均低于原粉，且经30 min处理后的小米粉糊G'与G"均高于经15 min处理后的小米粉糊。当米水比为1:2时，表现出相同的趋势。说明超高压处理使小米粉糊弹性增强粘性降低，小米淀粉颗粒晶体结构在高压作用下遭到破坏，导致淀粉颗粒在水溶液中加热剪切作用下也不易破裂，淀粉凝胶柔韧性随之提高。超高压处理15 min后，不

同水分比例的小米粉 $\tan\delta$ 高于原粉，说明超高压处理后的小米粉显示出更高黏性，增加频率 G'' 比 G' 快，流动性得到增强；而经过超高压处理 30 min 的小米粉则与之相反。通过分析比较，当

米水比为 1 : 1 时，600 MPa 高压处理 15 min 后小米粉表现出较好黏弹性性状。因此，超高压技术应用于食品加工时，处理时间过久会造成样品结构破坏影响性状表现。



注：A 米水比为 1 : 1 时 G' 流变图；B 米水比为 1 : 2 时 G'' 流变图；C 为 $\tan\delta$ 流变图

A: G' rheological diagram when millet to water is 1 : 1; B: G'' rheological diagram when millet to water is 1 : 2; C: $\tan\delta$ rheological diagram

图 4 超高压处理后小米粉糊流变学的弹性模量、粘性模量和损耗角正切值随角频率变化关系

Fig.4 G' , G'' and $\tan\delta$ versus frequency curves of foxtail millet powder with different HHP levels

3 结论

本研究主要以山西特色小米——晋谷 21 号为研究对象，采用 HHP 技术对小米的微观结构和宏观流变特性进行分析，研究发现，经超高压处理后小米粉中淀粉颗粒形貌由不规则体变为与其他物质络合，粘结成片，颗粒平均粒径显著降低 ($P < 0.05$)，小米淀粉晶型由 A 型转变为 B 型，米水比例对其影响高于超高压处理时间的作用。在小米粉动态流变学研究中发现，超高压处理可提升小米粉的粘弹性，促使其流动性增强。压力为 600 MPa 时，米水比为 1 : 1，高压处理 15 min 后，小米粉黏弹性显著高于其他组，可为小米的深加工提供依据。

参考文献：

- [1] HABIYAREMYE C, MATANGUIHAN J B, D'AIPOIM GUEDES J. Proso Millet (*Panicum miliaceum L.*) and its potential for cultivation in the pacific northwest[M]. U.S, Front Plant Science, 2016: 7-10.
- [2] SHAHHIDI F, CHANDRASEKARA A. Millet grain phenolics and their role in disease risk reduction and health promotion[J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(2): 570-581.
- [3] GULL A, PRASAD K, KUMAR P. Evaluation of functional, antinutritional, pasting and microstructural properties of Millet flours[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2015, 10(1): 96-102.
- [4] ANNOR G A, TYL C, MARCONE M, et al. Why do millets have slower starch and protein digestibility than other cereals?[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 66: 73-83.
- [5] KNORR D. Emerging technologies: Back to the future[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 76: 119-123.
- [6] D'INCECCO P, LIMBO S, HOGENBOOM J A, et al. Novel technologies for extending the shelf life of drinking milk: Concepts, research trends and current applications[J]. Lwt, 2021, 148: 111746.
- [7] KIM H S, KIM B Y, BAIK M Y. Application of ultra high pressure (UHP) in starch chemistry[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2012, 52(2): 123-141.
- [8] PARK J W, SEO J H, HONG C Y, et al. Physicochemical properties of rice flour suspension treated by ultrahigh hydrostatic pressure[J]. Journal of Food Quality, 2021, 1-7.
- [9] LEE N Y, KOO J G. Effects of high hydrostatic pressure on quality changes of blends with low-protein wheat and oat flour and derivative foods[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 685-690.
- [10] LI W, GAO J, SALEHA S M, et al. The modifications in physicochemical and functional properties of proso millet starch after Ultra-High Pressure (UHP) process[J]. Starch-Stärke, 2018, 70: 5-6.
- [11] LOPEZ-RUBIO A, FLANAGAN B M, GILBERT E P, et al. A novel approach for calculating starch crystallinity and its correlation with double helix content: a combined XRD and NMR study[J]. Biopolymers, 2008, 89(9): 761-768.
- [12] 刘振宇, 张晶, 胡锦蓉, 等. 高静压处理对小米淀粉和小米全粉中淀粉颗粒结构和糊化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(11): 122-127.
- LIU Z Y, ZHANG J, HU J R, et al, Effects of high static pressure

- treated on granular structure and gelatinization properties of millet starch and starch of millet whole powder[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(11): 122-127.
- [13] YANG Z, GU Q, HEMAR Y. In situ study of maize starch gelatinization under ultra-high hydrostatic pressure using X-ray diffraction[J]. Carbohydr Polym, 2013, 97(1): 235-238.
- [14] BANGAR S P, ASHOBON A O, DHULL S B, et al. Prosopis millet starch: Properties, functionality, and applications[J]. Int J Biol Macromol, 2021, 190: 960-968.
- [15] LI W, GUO H, WANG P, et al. Physicochemical characteristics of high pressure gelatinized mung bean starch during recrystallization[J]. Carbohydr Polym, 2015, 131: 432-438.
- [16] CHEN B, JIA X, MIAO S, et al. Slowly digestible properties of lotus seed starch-glycerine monostearin complexes formed by high pressure homogenization[J]. Food Chemistry, 2018, (252): 115-125.
- [17] 张晶, 张美莉. 超高压处理对燕麦淀粉颗粒特性、热特性及流变学特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 114-121.
ZHANG J, ZHANG M L. Effect of high hydrostatic pressure treatment on morphological, thermal and rheological properties of oat starch[J]. Food Science, 2020, 41(23): 114-121.
- [18] 郭泽镔, 陈洁, 曾绍校, 等. 超高压处理对莲子淀粉糊流变特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(5): 29-35.
GUO Z B, CHEN J, ZENG S X, et al. Effect of ultra high pressure processing on the rheological properties of lotus seed starch pastes[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(5): 29-35.
- [19] 张爱霞, 赵巍, 刘敬科, 等. 不同品种小米粉流变学特性差异性研究[J]. 食品科技, 2018, 43(2): 180-184.
ZHANG A X, ZHAO W, LIU J K, et al. Research on the difference of rheological properties in different foxtail millets[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(2): 180-184.
- [20] ROSELL C M, YOKOYAMA W, SHOEMAKER C. Rheology of different hydrocolloids-rice starch blends effect of successive heating\cooling cycles[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 84(1): 373-382. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。