

阿魏酸协同韧化处理对马铃薯淀粉的改性作用

宋靖郑¹, 韩四海^{1,2*}, 刘建学^{1,2}, 李佩艳^{1,2}, 岳崇慧^{1,2}, 罗登林^{1,2}

(¹ 河南科技大学食品与生物工程学院 河南洛阳 471023

² 河南省食品原料工程技术研究中心 河南洛阳 471023)

摘要 为了探讨阿魏酸(FA)协同韧化处理对马铃薯淀粉(PS)的改性作用,采用电子扫描电镜、流变仪、傅里叶红外光谱仪等技术手段研究了阿魏酸协同韧化处理构建的改性马铃薯淀粉糊化及凝胶特性。结果表明:阿魏酸协同韧化处理条件下,FA-PS 复合体系颗粒的粒径增大,FA 1%时,平均粒径达到最大值(41.52 ± 0.01) μm ;白度增强,峰值为(97.10 ± 0.01);FA-PS 的峰值黏度、崩解值及回生值均有降低;FA-PS 凝胶黏弹性提高,FA 添加量为 3%时,损失角正切值($\tan\delta$)最低。韧化处理使马铃薯淀粉凝胶结构紧密,阿魏酸的加入又使其凝胶孔径变得均匀,进而影响复合体系短程有序结构。韧化处理促进了复合体系中马铃薯淀粉与阿魏酸的相互作用,能够有效地改善马铃薯淀粉的糊化特性及流变学特性。

关键词 淀粉;阿魏酸;韧化处理

文章编号 1009-7848(2024)09-0051-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.09.005

淀粉是可再生资源,因成本低、来源和应用广泛等特点而用于食品生产及加工中,但由于其本身存在黏弹性低、易老化等不足而影响其成品品质。在加工中食品体系并不是单一的,淀粉与其它组分(脂质、单糖类、多酚、蛋白质等)相互作用以改善食品本身的感官、糊化等特性^[1-2]。韧化处理作为一种绿色、高效的淀粉改性方法被广泛应用。食源性阿魏酸作为生物活性物质,因具有药理活性(抗氧、抗炎、解毒等)及稳定的化学性质,而被研究者关注^[3]。

许多研究人员使用多酚与淀粉经糊化后(热处理)两者相互作用来改变淀粉分子的结构、理化特征,从而到达改善食品品质的目的^[4]。Xiao 等^[5-6]报道红茶多酚和绿茶多酚能够一致马铃薯淀粉和玉米淀粉糊化后的回生。Gao 等^[7]研究表明原花青素可使马铃薯淀粉糊形成一种松散的凝胶结构,并且能够抑制马铃薯淀粉的回生。杜安林^[8]研究发现湿热环境下,放置 1 d 的复合物淀粉糊随着多酚添加量的增加,其储能模量和损耗模量不断下降。

目前对多酚的研究偏向于提取率、抗氧化等方面,鲜见采用多酚协同韧化处理改性淀粉的研

究。本文选用马铃薯淀粉和阿魏酸为原料,在韧化处理辅助下研究不同添加量的阿魏酸对马铃薯淀粉理化特性的影响,以期在韧化处理下添加多酚类化合物改善食品品质提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯淀粉,黑龙江如意淀粉食品有限公司;阿魏酸(食品级,纯度为 98%),天大生物科技;溴化钾(光谱纯),天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

台式扫描电子显微镜 TM3030Plus,日本日立高新技术公司;傅里叶变换中远红外光谱仪 VERTEX70,德国 BRUKER 公司;激光粒度分布仪 Bettersize2600,丹东百特仪器有限公司;新型布拉班德黏度仪 803302,德国 Brabender 公司;食品流变仪 TA DHR-2,美国沃特斯公司;色差计 Xrite-color i5,东莞市凯得科技有限公司;恒温干燥箱 DH360BS,上海坤天实验仪器。

1.3 方法

1.3.1 阿魏酸协同韧化马铃薯淀粉的制备 50 g 马铃薯淀粉(H-PS)、0.5 g 阿魏酸和 50 g 马铃薯淀粉(H-PS-FA1%)、1.5 g 阿魏酸和 50 g 马铃薯淀粉乳(H-PS-FA3%)、3 g 阿魏酸和 50 g 马铃薯淀粉乳(H-PS-FA6%)、5 g 阿魏酸和 50 g 马铃薯淀粉乳(H-PS-FA10%)加 200 mL 去离子水搅拌均匀

收稿日期:2023-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(32302075)

第一作者:宋靖郑,女,硕士生

通信作者:韩四海 E-mail: hansihai@haust.edu.cn

匀后于4℃放置24 h后将其置于密闭容器中放到50℃烘箱中24 h后取出,离心取弃上清于烘箱内(50℃干燥12 h)烘干研磨过100目筛备用,并以未处理的马铃薯淀粉(PS)作为对照。

1.3.2 微观结构的测定 取少量1.3.1节的样品配成2%淀粉乳,完全糊化后冻干,将冻干后样品的横截面和纵截面放在导电胶上,放于电子扫描电镜上放大50倍观察复合物颗粒的形态。

1.3.3 淀粉颗粒粒径及白度的测定

1.3.3.1 粒径的测定 参考Wang等^[9]的方法并稍作修改,取1.3.1节的样品加入到仪器的水箱中,并与搅拌叶片和300 W的超声一起分散,以获得约10%~15%的遮光率。采用具有水相(1.33)和淀粉粒(1.52)折射率的多分散分析模式,用激光粒度分布仪监测淀粉颗粒的粒径分布。

1.3.3.2 白度的测定 取1.3.1节所制备好的淀粉样品用色差计测定其白度。每个样品测3次后平均值。

1.3.4 红外光谱的测定 将1.3.2节的样品与氯化钾按照1:100的比例混合研磨均匀后在15 MPa压力的压片机内压1 min后取出,用傅里叶变换中远红外光谱仪进行测定。扫描波数为400~4 000 cm⁻¹,扫描次数为64次,分辨率为4 cm⁻¹,纯溴化钾作为背景校正。用OMNIC软件对波数为2 000~800 cm⁻¹的图谱进行自动基线校正、归一化及去卷积处理,峰宽为38,强度为1.9^[10]。

1.3.5 黏度特性的测定 将1.3.1节的样品与去离子水配置成6%的淀粉乳,用布拉班德黏度仪进行测定。从30℃的温度以1.5℃/min的速率升到95℃,保持30 min,再以1.5℃/min的速率降到50℃保持30 min。

1.3.6 流变特性的测定 取1.3.1节的样品用去离子水配置成5%的淀粉乳,充分糊化,于流变仪上测定其流变特性。测试采用直径为40 mm的平行金属板,测试时间隙为1 000 μm,温度为25℃。

1.3.6.1 静态流变的测定 参考王健一等^[11]所描述的方法,从0.1~100 s⁻¹进行速率扫描,记录样品剪切应力(τ)随剪切速率(γ)在0.1~100 s⁻¹过程中的变化,采用Herschel-Bulkley模型对流变曲线进行拟合分析。

$$\tau = \tau_0 + K\gamma^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_0 为屈服应力,Pa; γ 为剪切速率,s⁻¹;K为稠度系数,Pa·sⁿ;n为流动行为指数。

1.3.6.2 动态流变的测定 在应变为1%的条件下进行频率扫描,频率扫描范围为0.1~10 Hz,记录扫描过程中储能模量(G')和损耗模量(G'')的变化。

1.4 数据统计分析

数据结果以平均值±标准差表示,SPSS 27对数据进行方差分析(ANOVA),采用邓肯多重比较,差异显著则 $P<0.05$ 。使用Origin 2018绘图。

2 结果与分析

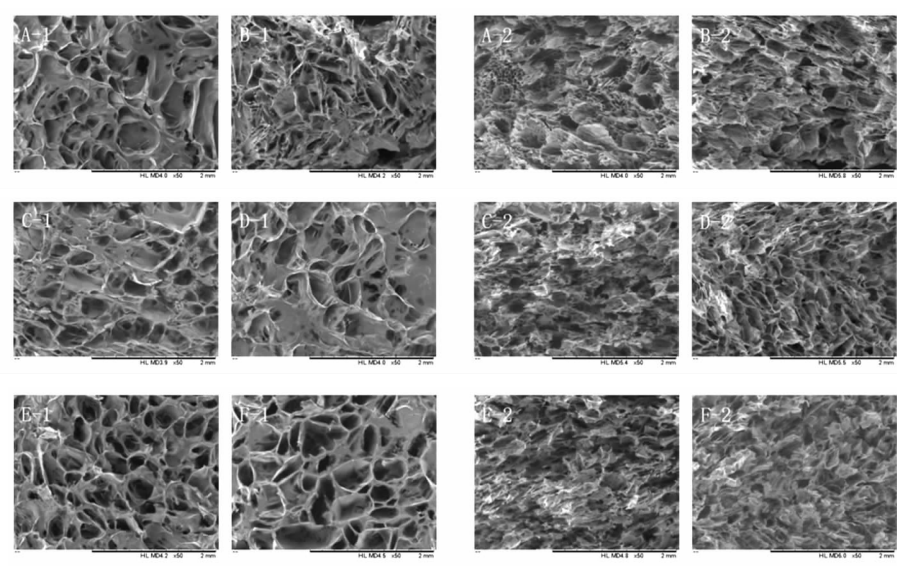
2.1 对马铃薯淀粉凝胶表面形貌的影响

通过扫描电镜对改性淀粉凝胶的微观结构进行观察,结果见图2。

图1A中分析发现马铃薯淀粉糊化后横纵截面孔隙大小不一,这或许与淀粉中直链淀粉与支链淀粉的排列有关。糊化过程中马铃薯淀粉分子结构发生重排,分子间作用力增强致使结构紧密(图1B-1、B-2)。阿魏酸协同糊化处理后其结构变得疏松,且随着FA添加量的增加横截面的孔径变大、纵截面孔径均一化,在3%时纵截面孔径大小达到最均匀,可能是糊化使淀粉结构紧密,过量FA因不能进入淀粉内部而被吸附凝胶表面并聚集吸水,在冷冻升华干燥后在凝胶表面留下较大空洞以及淀粉糊化后在冷却过程中阿魏酸与淀粉相互作用使得淀粉分子之间的相互作用力减少,降低了直链淀粉分子间的缠结绕点及交联导致孔径均一^[12]。

2.2 对淀粉颗粒粒径及颜色的影响

马铃薯淀粉在适当温度及水分存在下,其颗粒开始吸水膨胀,可溶性阿魏酸随水分子一起进入淀粉颗粒内部致使淀粉颗粒粒径变大(表1),可能是阿魏酸进入直链淀粉空腔内而形成V型复合物^[13-14]。然而淀粉颗粒内部空间有限尤其是糊化条件下使淀粉结构紧密,过多的阿魏酸溶于水中使溶液浓度变高或pH值降低致使淀粉不能再次吸水以及颗粒内部粘连聚团。超声使聚集的淀粉颗粒分散于水相中,故而淀粉颗粒的粒径随FA添加量的增加呈现先增加后减小的趋势,并在添



注:A-1 到 F-1 分别为 PS、H-PS、H-PS-FA 1%、H-PS-FA 3%、H-PS-FA 6%、H-PS-FA 10%冻干样的横截面;A-2 到 F-2 分别为 PS、H-PS、H-PS-FA 1%、H-PS-FA 3%、H-PS-FA 6%、H-PS-FA 10%冻干样的纵截面。

图 1 阿魏酸协同初化马铃薯淀粉凝胶的电镜图片

Fig.1 Electron microscopic images of potato starch by ferulic acid synergistic toughening treatment

加量为 1%时的平均粒径最大,为 41.52 μm 。
马铃薯淀粉的颜色较白,这是由于马铃薯淀粉蛋白质和脂肪残留量很低且其淀粉分子结构中含有天然的磷酸基团。初化处理会使马铃薯淀粉的白度增加,水分子进入淀粉颗粒内部影响淀粉

颗粒对光的折射、反射和透射影响了马铃薯淀粉的白度,阿魏酸与直/支链淀粉相互作用致使磷酸基团暴露淀粉表面改变了马铃薯淀粉的结构影响了其对光的折射、反射和透射,引起淀粉颗粒颜色的变化^[15]。

表 1 阿魏酸协同初化马铃薯淀粉颗粒的粒径及白度

Table 1 Particle size and whiteness of potato starch by ferulic acid synergistic toughening treatment				
名称	D10/ μm	D50/ μm	D90/ μm	白度 L^*
PS	15.96 \pm 0.05 ^a	36.86 \pm 0.06 ^a	68.96 \pm 1.18 ^a	95.90 \pm 0.01 ^b
H-PS	16.79 \pm 0.11 ^d	37.84 \pm 0.02 ^b	70.66 \pm 0.27 ^b	96.20 \pm 0 ^d
H-PS-FA1%	18.29 \pm 0.08 ^f	41.52 \pm 0.01 ^f	75.21 \pm 0.39 ^d	96.28 \pm 0.03 ^e
H-PS-FA3%	17.19 \pm 0.02 ^e	41.10 \pm 0.02 ^e	87.14 \pm 0.16 ^e	97.10 \pm 0.01 ^f
H-PS-FA6%	16.34 \pm 0.10 ^e	38.36 \pm 0.02 ^e	72.26 \pm 0.23 ^e	96.17 \pm 0.01 ^e
H-PS-FA10%	16.29 \pm 0.03 ^b	40.86 \pm 0.04 ^d	89.58 \pm 0.13 ^f	92.88 \pm 0.03 ^a

注:同列数据标注不同的字母表示数据之间存在显著性差异($P<0.05$)。D10:颗粒粒径小于该直径的淀粉颗粒占总数的 10%;D50:颗粒粒径小于该直径的淀粉颗粒占总数的 50%;D90:颗粒粒径小于该直径的淀粉颗粒占总数的 90%,并以 D50 表示该淀粉的平均粒径。

2.3 红外图谱的分析

生物聚合物的红外分析可以通过光谱共振的变化来检测分子构象的变化、分子间化学键的分布和化学基团的键能的变化^[15]。在淀粉的红外光谱中(图 2),每个峰的强度和宽度与特定化学基团的振动模式有关,3 400 cm^{-1} 处的强特征峰为羟

基($-\text{OH}$)的伸缩振动,2 930 cm^{-1} 处的峰为甲烯的反对称伸缩振动,1 640 cm^{-1} 处的峰为 O-H 的弯曲振动,是淀粉的结合水的部分^[16-17]。通过比较阿魏酸协同初化处理的淀粉和原淀粉的红外图谱(图 3)发现无新峰出现,阿魏酸的存在没有使其结构发生变化,其可能通过非共价键与淀粉相互

作用,说明其是绿色改性。阿魏酸协同糊化处理的改性淀粉较原淀粉在 3400 cm^{-1} 波段的峰向低波段移动且峰强度变大,说明淀粉中羟基与阿魏酸的羟基或苯酚基之间形成分子内或分子间氢键^[18]。随着 FA 添加量的增加淀粉在 1640 cm^{-1} 处的峰在不断红移并逐渐偏向于阿魏酸的特定吸收峰 (1680 cm^{-1}),可能是阿魏酸中的 C=O 与淀粉中 O-H 的特征峰叠加所致。C=O 键电子云密度较大吸引 O-H,但 O-H 中的氢键较稳定所以会带动 1640 cm^{-1} 处的峰不断红移。阿魏酸的芳香环进入直链淀粉的疏水腔内,这可能导致了极性基团的暴露,使淀粉在 1640 cm^{-1} 处的峰强度增^[19]。

$1200\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 是淀粉的指纹识别区,对其进行傅里叶去卷积发现在 $1050, 1022, 992\text{ cm}^{-1}$ 峰强度有不同变化。其中 1047 cm^{-1} 附近的峰表示淀粉结晶区的结构特征, 1022 cm^{-1} 附近的峰表示淀粉非结晶区的结构特征, 995 cm^{-1} 附近的峰是 C-OH 弯曲振动, 1047 cm^{-1} 与 1022 cm^{-1} 峰强度比值表示淀粉有序度, 1022 cm^{-1} 与 995 cm^{-1} 峰强度比值可以衡量淀粉的无序程度^[20]。糊化处理使马铃薯淀粉结构紧密(图2)淀粉分子间作用力增强,排列更加有序。当有少量 FA(1%)存在时,其有序化程度降低,淀粉分子内羟基形成氢键的数量减少;当有较多 FA 存在时,其有序化程度升

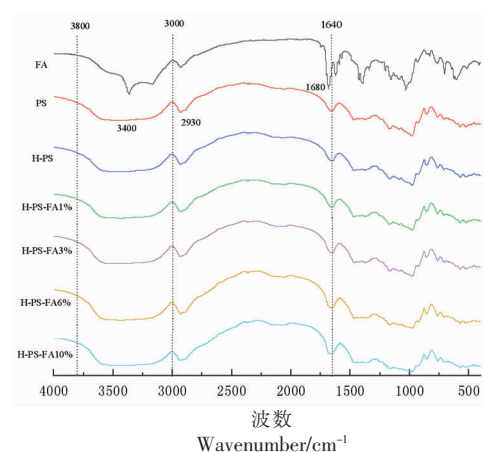


图2 糊化前、后及阿魏酸协同糊化马铃薯淀粉的红外图谱

Fig.2 Infrared map of potato starch by ferulic acid synergistic toughening treatment

高,淀粉分子内羟基形成氢键的数量增加。主要是少量阿魏酸可以阻碍淀粉分子间重新螺旋,过多的阿魏酸会聚集体系中无规则淀粉链,尤其是在淀粉链末端与阿魏酸结合的部分会形成以阿魏酸为架桥的螺旋结构并通过分子间氢键再次聚集、连接多条淀粉链进而形成新的螺旋结构^[18],这也解释了改性淀粉凝胶的横截面孔径逐渐变大的原因。

表2 阿魏酸协同糊化马铃薯淀粉去卷积化图谱的峰值比值

Table 2 Peak ratio of the deconvolved atlas of potato starch by ferulic acid synergistic toughening treatment

样品	PS	H-PS	H-PS-FA1%	H-PS-FA3%	H-PS-FA6%	H-PS-FA10%
1047/1022	1.65 ± 0.05^c	1.69 ± 0.03^d	1.24 ± 0.10^a	1.43 ± 0.02^b	1.45 ± 0.02^b	1.46 ± 0.01^b
1022/995	0.66 ± 0.09^a	0.66 ± 0.02^a	1.07 ± 0.10^c	0.81 ± 0.01^b	0.79 ± 0.02^b	0.79 ± 0.02^b

注:同行数据标注不同的字母表示数据之间存在显著性差异($P<0.05$)。

2.4 糊化特性

马铃薯淀粉呈现典型的A型曲线(图3),表现出较高的峰值黏度和衰减值^[21]。PS经糊化处理后,回升值、峰值黏度、谷值黏度、衰减值降低,这可能是糊化处理使淀粉分子之间结构变得更紧密,淀粉内部分子间作用力增强所致。回升值与衰减值的降低归因于糊化处理使淀粉分子之间结构变得更紧密空间变小,促使阿魏酸(1%)与淀粉相互作用,淀粉内部分子与阿魏酸作用力增强,既防

止淀粉颗粒的破裂又阻止了淀粉链之间的重排^[22]。由此可见,糊化可使阿魏酸与淀粉分子相互作用力增强,对比原淀粉其结合水的能力减弱,抗剪切能力增强。可能是阿魏酸的加入改变了原淀粉内部分子原有排列及体系的pH值,进而改变了黏度参数^[23]。具体而言,阿魏酸很少以游离态形式存在,较少的阿魏酸进入直链淀粉的疏水腔内改变淀粉之间原有的排列阻止了淀粉重新螺旋,过多的阿魏酸会使体系pH值改变、聚集无规则淀粉链

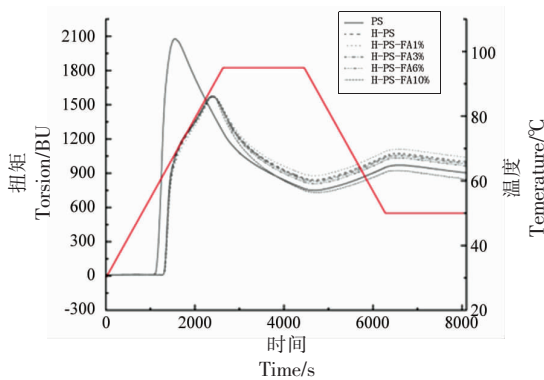


图 3 阿魏酸协同初化马铃薯淀粉的糊化曲线

Fig.3 Datinization curve of potato starch by ferulic acid synergistic toughening treatment

以阿魏酸为桥梁形成新的螺旋结构,分子之间排列改变,使回升值有所上升,与短程有序结构变化

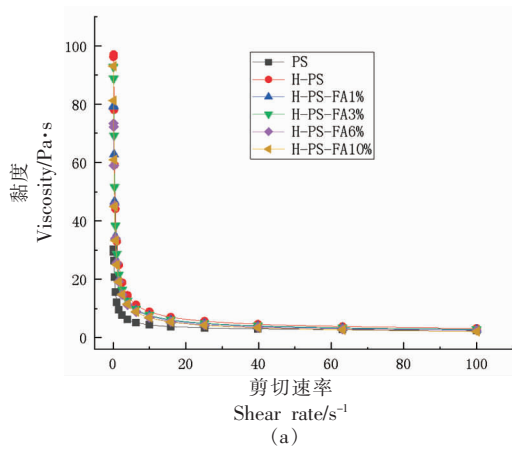


图 4 阿魏酸协同初化马铃薯淀粉的静态流动曲线

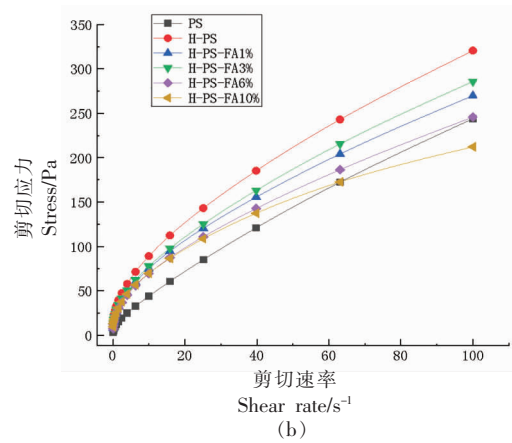
Fig.4 Static flow curve of potato starch by ferulic acid synergistic toughening treatment

表 3 总结了不同样品的一致性系数 (从低剪切速率到高剪切速率)的一致性系数(k)、流动行为指数(n)和屈服应力(τ_0)以及每个样品的流动曲线的决定系数(R^2),具有很好的拟合精度($R^2 \geq 0.999$)。 K 值的变化与淀粉糊的表观黏度变化有关, n 值的变化是因为淀粉糊中网络变化引起的,因此阿魏酸的添加可以影响淀粉的流动特性。由表 3 发现初化处理后的 PS 因结构致密导致 K 值增加抗剪切能力提升,添加 FA 后 K 值降低且与添加量呈负相关,可能是阿魏酸通过非共价键与淀粉结合降低了淀粉分子间作用力所致。初化处理会使 PS 的网络结构发生变化(图 1B-2),FA 的

一致。

2.5 流变学特性

2.5.1 静态流变 图 4 给出了不同浓度阿魏酸存在下马铃薯淀粉的稳定流动特性。所有样品的流动曲线均表现出假塑性、剪切变稀的行为,这可以反映为其流动行为指数值(n)都小于 1(表 3)。当剪切速率小于 6.0 s^{-1} 时,淀粉糊的黏度随剪切速率的增加而迅速降低,当剪切速率大于 6.0 s^{-1} 时,黏度逐渐稳定。淀粉糊中分子链相互缠绕形成类似的网状结构阻碍了分子链之间的运动产生了黏性阻力,当外加剪切应力存在时缠绕的分子链段相继拉伸、缠结点减少最终导致淀粉链重心偏移从而使表观黏度下降,淀粉的流动性增强^[24]。有类似橡胶状屈服前区倾向,该淀粉糊是具有一定屈服应力的非牛顿流体^[25]。



添加与此无显著相关性,外加作用力引起了淀粉糊网络的变化,这与扫描电镜结果一致。通过动态振荡分析进一步探讨了阿魏酸在马铃薯淀粉流变特性中的作用。

2.5.2 动态流变 动态振荡分析提供了关于淀粉体系的黏弹性行为的信息,由图 5 可以看出,在频率扫描范围内所有样品的 G' 均高于 G'' 并对频率显示出依赖性,说明淀粉分子之间形成了三维网状结构,表现出弱凝胶弹性的行为^[26]。随着扫描频率的增加, G' 、 G'' 均呈上升趋势,这表明淀粉凝胶的弹性和黏性能随扫描频率的增加而增大^[27]。PS 经过初化处理后其淀粉糊的 G' 和 G'' 明显升高,初

表 3 阿魏酸协同初化马铃薯淀粉的稳定剪切特性的 Herschel-Bulkley 模型

Table 3 Herschel Bulkley model for the stable shear properties of potato starch by ferulic acid synergistic toughening treatment

样品	K	n	R^2
PS	6.60 ± 0.24^a	0.78 ± 0.01^c	1.000
H-PS	19.53 ± 1.07^d	0.60 ± 0.01^b	0.999
H-PS-FA1 %	16.76 ± 0.79^c	0.59 ± 0.01^a	0.999
H-PS-FA3 %	16.10 ± 0.88^c	0.61 ± 0.01^b	0.999
H-PS-FA6 %	15.78 ± 0.88^b	0.59 ± 0.01^a	0.999
H-PS-FA10%	15.33 ± 0.57^b	0.59 ± 0.01^a	0.999

注:同列数据标注不同的字母表示数据之间存在显著性差异($P<0.05$)。

化处理破坏了淀粉的微晶结构,使淀粉分子重排成更加稳定有序的结构,强化了淀粉糊的凝胶结构,这与微观结构和糊化特性结果一致^[28]。阿魏酸协同初化处理过程中,随着 FA 添加量的增加, G' 和 G'' 均显示出先增加后降低的趋势,表明阿魏酸可以改善淀粉凝胶结构,并在 3% 添加量时形成相

对稳定的凝胶网络^[29]。如图 5b 所示,处理后的样品的损失角正切值($\tan\delta$)均小于 PS 样品,且在 FA 添加量为 3% 时最低,表明阿魏酸可以将淀粉糊从液态的转变成为固态的,且在 3% 添加量时固体样品特性最显著,可能与扫描电镜图 2D-2 的孔径最均匀有关^[27]。

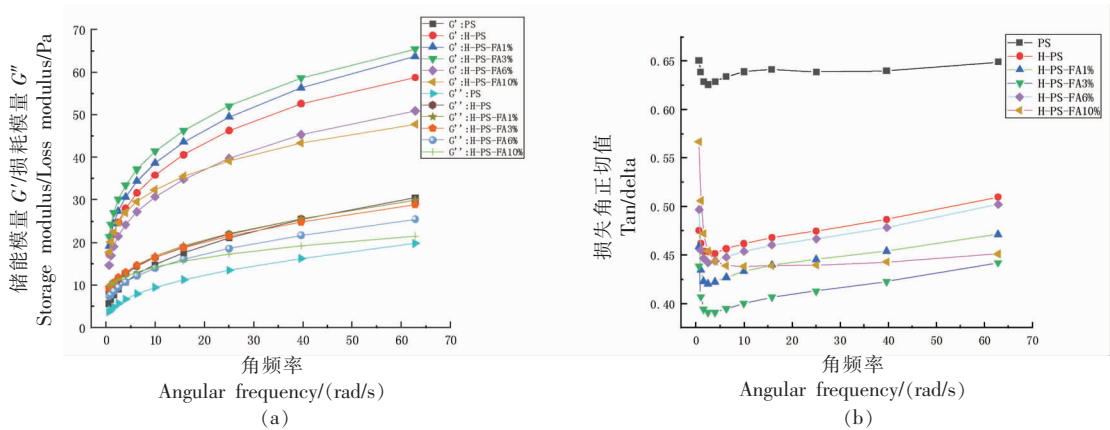


图 5 阿魏酸协同初化马铃薯淀粉的动态流变图

Fig.5 Dynamic rheological diagram of potato starch by ferulic acid synergistic toughening treatment

3 结论

综上所述,初化处理可以使马铃薯淀粉结构变得致密,增加阿魏酸与淀粉分子碰撞的机率,促进阿魏酸与马铃薯淀粉的相互作用,进而影响马铃薯淀粉的理化特性,使淀粉颗粒粒径大小和颜色发生改变。初化处理使马铃薯淀粉凝胶结构致密但孔径大小不一,而阿魏酸的加入又会使淀粉结构疏松均匀,进而影响淀粉的峰值黏度、回生值、有序化程度等。红外图谱表明初化处理下两者的相互作用属于物理变化,没有新官能团的出现

且两者之间形成了分子内或分子间氢键。流变结果表明,所有样品凝胶均表现出剪切变薄行为。阿魏酸协同初化处理能有效地改善淀粉凝胶的黏弹性,并在阿魏酸添加量为 3% 时显著提高。由此可见适量阿魏酸协同初化处理可改善马铃薯淀粉回升性、黏弹性及抗剪切能力,为进一步了解淀粉与多酚在加工方式及多酚调控淀粉改性方面提供理论基础,有助于马铃薯淀粉在工业生产中的充分利用。

参 考 文 献

- [1] 陈南, 高浩祥, 何强, 等. 植物多酚与淀粉的分子相互作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 497–505.
CHEN N, GAO H X, HE Q, et al. Progress in the molecular interaction between plant polyphenols and starch[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(2): 497–505.
- [2] ZHU F. Interactions between starch and phenolic compound[J]. Trends in Food Science and Technology, 2015, 43(2): 129–143.
- [3] 刘珂, 徐成, 郭玉梅, 等. 酚酸类化合物阿魏酸的研究进展[J]. 当代化工研究, 2022(20): 70–74.
LIU K, XU C, GUO Y M, et al. Phenolic acid compound ferulic acid[J]. Contemporary Chemical Industry Research, 2022(20): 70–74.
- [4] 任顺成, 肖遥. 几种食源多酚对玉米淀粉理化特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 8–13.
REN S C, XIAO Y. Effects of several food-derived polyphenols on the physicochemical properties of maize starch[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(4): 8–13.
- [5] XIAO H X, LIN Q L, LIU G Q, et al. Evaluation of black tea polyphenol extract against the retrogradation of starches from various plant sources [J]. Molecules, 2012, 17(7): 8147–8152.
- [6] XIAO H, LIN Q, LIU G Q, et al. Inhibitory effects of green tea polyphenols on the retrogradation of starches from different botanical sources[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(8): 2177–2181.
- [7] GAO L Z, ZHANG C H, CHEN J, et al. Effects of proanthocyanidins on the pasting, rheological and retrogradation properties of potato starch[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(11): 4760–4767.
- [8] 杜安林. 湿热处理环境中多酚对板栗淀粉消化及回生性质协同调控的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
DU A L. Co-regulation of starch digestion and regeneration properties of Chinese chestnut by polyphenols in humid-heat treated environment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [9] WANG J Y, JIANG X F, ZHENG B D, et al. Structural and physicochemical properties of lotus seed starch–chlorogenic acid complexes prepared by microwave irradiation[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 58(11): 4157–4166.
- [10] LIU Y F, CHEN L, XU H S, et al. Understanding the digestibility of rice starch–gallic acid complexes formed by high pressure homogenization [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 856–863.
- [11] 王健一, 汤俊杰, 江祥富, 等. 微波法制备莲子淀粉–绿原酸复合物及其流变特性分析[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 129–136.
WANG J Y, TANG J J, JIANG X F, et al. Preparation of lotus seed starch–chlorogenic acid complex and its rheological properties by microwave method [J]. Food Science, 2021, 42(23): 129–136.
- [12] 王晨, 谢岩黎, 南永远. 阿魏酸对小麦淀粉理化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 12–16, 21.
WANG C, XIE Y L, NAN Y Y. Effect of ferulic acid on the physicochemical properties of wheat starch[J]. Food Industry Technology, 2018, 39(18): 12–16, 21.
- [13] AMOAKO D B, AWIKA J M. Resistant starch formation through intrahelical V –complexes between polymeric proanthocyanidins and amylose[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 326–333.
- [14] WANG S Q, KONG L Y, ZHAO Y, et al. Lipophilization and molecular encapsulation of p – coumaric acid by amylose inclusion complex[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 270–275.
- [15] ZHANG J H, SU R Z. Chromaticity analysis of diffraction pattern of white light under the grating[J]. Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 208: 164553.
- [16] GONZÁLEZ –CRUZ L, MONTAÑEZ –SOTO J L, CONDE –BARAJAS E, et al. Spectroscopic, calorimetric and structural analyses of the effects of hydrothermal treatment of rice beans and the extraction solvent on starch characteristics[J]. Int J Biol Macromol, 2018, 107 (Pt A): 965–972.
- [17] WANG M T, SHEN Q, HU Y L, et al. Physicochemical properties, structure and *in vitro* digestibil-

- ity on complex of starch with lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) leaf flavonoids[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 191–199.
- [18] WANG J J, XI J X, WANG Y Q. Recent advances in the catalytic production of glucose from lignocellulosic biomass[J]. Green Chem, 2015, 17(2): 737–751.
- [19] SILECCHIA G, BORU C E, MOUIEL J, et al. Clinical evaluation of fibrin glue in the prevention of anastomotic leak and internal hernia after laparoscopic gastric bypass: preliminary results of a prospective, randomized multicenter trial[J]. Obesity Surgery, 2006, 16(2): 125–131.
- [20] 万芊. 多酚与玉米淀粉的相互作用及其对淀粉消化和加工特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- WAN Q. Interaction of polyphenols and maize starch and their effects on the digestion and processing properties of starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [21] 蒲华寅, 王乐, 黄峻榕, 等. 糊化处理对马铃薯淀粉及玉米淀粉糊化性质的影响[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2016, 34(6): 141–144, 153.
- PU H Y, WANG L, HUANG J R, et al. Effects of toughening treatment on the gelatinization properties of potato starch and corn starch[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 34(6): 141–144, 153.
- [22] COLUSSI R, KRINGEL D, KAUR L, et al. Dual modification of potato starch: Effects of heat-moisture and high pressure treatments on starch structure and functionalities[J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126475.
- [23] ZHU F, CAI Y Z, SUN M, et al. Effect of phytochemical extracts on the pasting, thermal, and gelling properties of wheat starch[J]. Food Chemistry, 2008, 112(4): 919–923.
- [24] LI G T, ZHU F. Effect of high pressure on rheological and thermal properties of quinoa and maize starches[J]. Food Chemistry, 2018, 241: 380–386.
- [25] CHEN D, FANG F, FEDERICI E, et al. Rheology, microstructure and phase behavior of potato starch-protein fibril mixed gel[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 239: 116247.
- [26] LIU C M, LIANG R H, DAI T T, et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57: 55–61.
- [27] 田金木, 秦礼康, 朱勇. 红茶水提物对大米淀粉糊化、流变和老化特性的影响[J]. 中国粮油报, 2023, 38(3): 101–108.
- TIAN J M, QIN L K, ZHU Y. Effect of red tea extract on gelatinization, rheological and aging characteristics of rice starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(3): 101–108.
- [28] XU M J, SALEH A S M, GONG B, et al. The effect of repeated versus continuous annealing on structural, physicochemical, and digestive properties of potato starch [J]. Food Research International, 2018, 111: 324–333.
- [29] CHEN N, GAO H X, HE Q, et al. Insight into property, function, and digestion of potato starch modified by phenolic compounds with varying structures[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(3): 962–976.

Modification of Potato Starch by Ferulic Acid Synergistic Toughening Treatment

Song Jingzheng¹, Han Sihai^{1,2*}, Liu Jianxue^{1,2}, Li Peiyan^{1,2}, Yue Chonghui^{1,2}, Luo Denglin^{1,2}

(¹College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan

²Henan Engineering Technology Research Center of Food Raw Materials, Luoyang 471023, Henan)

Abstract To investigate the modification effect of ferulic acid (FA) synergistic toughening treatment on potato starch (PS), the gelatinization and gel properties of modified potato starch were studied by means of electronic scanning electron microscope, rheometer and Fourier transform infrared spectrometer. The results showed that under the condition of ferulic acid synergistic toughening, the particle size of FA-PS composite system increased, and when FA was 1%, the average particle size reached the maximum value of (41.52±0.01) μm. The whiteness increased, and the peak value was

(97.10±0.01). The peak viscosity, disintegration value and retrogradation value of FA-PS decreased. The viscoelasticity of FA-PS gel was improved, and the loss tangent ($\tan\delta$) was the lowest when the content of FA was 3%. The toughening treatment made the gel structure of potato starch compact, and the addition of ferulic acid made the gel pore become uniform, which affected the short-range ordered structure of the composite system. Toughening treatment promoted the interaction between potato starch and ferulic acid in the composite system, and could effectively improve the gelatinization and rheological properties of potato starch.

Keywords starch; ferulic acid; toughness treatment