

高静压处理对莲藕淀粉糊化、流变及质构特性的影响

Effect of high hydrostatic pressure on pasting, rheological and texture properties of lotus root starch

陈巧莉 张甫生 陈厚荣 廖珠玲 何英杰

CHEN Qiao-li ZHANG Fu-sheng CHEN Hou-rong LIAO Zhu-ling HE Ying-jie

(西南大学食品科学学院, 重庆 400715)

(College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

摘要:为探究高静压对莲藕淀粉理化特性的影响,研究在不同压力、保压时间和淀粉乳浓度下莲藕淀粉糊化、流变及质构特性的变化趋势。结果表明,在200~500 MPa时莲藕淀粉的峰值黏度、谷黏度、终值黏度和成糊温度随压力增加而增大,而崩解值和回生值未发生明显改变;当压力达到600 MPa时,莲藕淀粉的峰值黏度和崩解值呈相反趋势,分别降低37.65%和96.49%,且在10%~20%浓度时,回生值平均下降43.34%,有效延缓莲藕淀粉的老化;随着保压时间的延长,峰值黏度和崩解值降低程度越明显,淀粉的抗剪切性及抗热性得到提高,处理30 min后,除最终黏度外,其它参数均无法获得;此外,经不同高静压处理后的莲藕淀粉流体指数 n 均小于1,仍为假塑性流体;且经200~500 MPa处理后,稠度系数 K 、 G' 和 G'' 增加越显著,增稠效果明显;而当处理压力为600 MPa时,二者开始下降并随着淀粉浓度降低和保压时间延长,下降趋势越明显;同时莲藕淀粉经不同高静压处理后,质构特性发生了一定的变化,特别是当增加淀粉浓度和减少保压时间时,莲藕淀粉的弹性、咀嚼性显著升高,硬度下降,但对内聚性无明显影响。

关键词: 莲藕淀粉;高静压;糊化特性;流变特性;质构特性

Abstract: In order to explore the influence of high hydrostatic pressure on the physicochemical properties of lotus root starch, effects were studied, including pressures, holding time and starch concentration on the changes of gelatinization, rheological and texture properties of lotus root starch. The results showed that the peak viscosity, valley viscosity, final viscosity and paste temperature of lotus root starch increased with the increase of pressure in the

range of 200~500 MPa, while the breakdown viscosity and setback viscosity did not change significantly. However, when the pressure reached 600 MPa, The peak viscosity and breakdown viscosity of lotus root starch showed the opposite trend, decreasing by 37.65% and 96.49% respectively, and the average setback viscosity decreased by 43.34% within the concentration range of 10%~20%, which effectively delayed the starch retrogradation; With the prolonging of pressure holding time, the decrease of peak viscosity and breakdown viscosity was more obvious, indicating the shear resistance and heat resistance of starch were improved. After 30 min of treatment, except for the final viscosity, other parameters cannot be obtained. In addition, the fluid index n of lotus root starch after high hydrostatic pressure treatment was less than 1, which was still pseudoplastic fluid. After 200~500 MPa treatment, the consistency coefficient K , G' and G'' increased more significantly and the thickening effect increased. When the pressure was 600 MPa, both of them began to descend and enhanced with decreased starch concentration and increased holding time. At the same time, the texture of lotus root starch changed with certain high hydrostatic pressure, notably when increasing starch concentration and reducing holding time, the elasticity and chewiness of lotus root starch increased significantly, while the hardness decreased, but had no effect on cohesiveness.

Keywords: lotus root starch; high hydrostatic pressure; gelatinization property; rheological property; texture property

莲藕淀粉是常见的食用淀粉,也是食品加工的重要原料,其市场需求量极大^[1]。研究表明,莲藕淀粉的热稳定性、抗剪切性差,且冷却条件下不易形成凝胶^[2];此外,与葛根淀粉、玉米淀粉相比,莲藕淀粉中直链淀粉含量高,更易老化^[3],一定程度上限制了其在食品、医药及纺织领域的发展。因此,为了克服莲藕淀粉加工性能上的不足,扩大其应用范围,对莲藕淀粉进行改性研究已成为热点^[4-6];此外因化学改性存在试剂残留等安全问题,故近年来兴起的高静压等物理加工技术为莲藕淀粉改性提供了一种新思路。

基金项目: 重庆市社会事业与民生保障科技创新项目(编号: cstc2017shms-kjfp80020);国家重点研发计划项目(编号: 2017YFD0400701-3)

作者简介: 陈巧莉,女,西南大学在读本科生。

通信作者: 张甫生(1983—),男,西南大学副教授,博士。

E-mail: zfsswu@163.com

收稿日期: 2018-01-28

高静压(High Hydrostatic Pressure, HHP)技术是在相对温和条件下对食品原料加以100~1000 MPa的压力,以改善食品质地结构、延长食品保质期的一项新型非热加工技术^[7-8]。HHP改性处理可以不同程度地降解淀粉颗粒结构,进而改变淀粉的理化性质^[9]。目前高静压改性淀粉的研究大多集中在宏观性质与颗粒结构上,如Vallons等^[10]发现超高压改性淀粉的糊化特性与回生特性优于传统热糊化淀粉;Tan等^[11]研究显示高静压可提高板栗淀粉的储存模量和凝胶强度,并增强淀粉的抗凝沉性;孙沛然等^[12-13]研究显示超高压处理可显著降低籼米淀粉、糯米淀粉和莲子淀粉的老化程度;Błaszczak等^[14-15]研究表明木薯淀粉、玉米淀粉经高静压处理后结晶结构消失,黏度升高,可用作即食粥等产品的增稠剂和抗淀粉老化剂等。

综上,高静压改性能有效地改善淀粉抗凝沉性、抗老化等特性,目前关于压力对淀粉改性的文献较多,关于保压时间和水分含量对淀粉性质影响的研究较少;且尚未见采用高静压技术改善莲藕淀粉宏观性质的报道^[16]。基于此,本试验系统研究不同压力、淀粉乳浓度和保压时间对莲藕改性淀粉的糊化、流变及质构等宏观特性的影响,以期改善莲藕淀粉的加工性能,拓宽其在食品加工中的应用领域,并为高静压改性其它淀粉提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

莲藕淀粉:安徽省枞阳县企发藕粉食品有限公司。

1.2 试验仪器与设备

高压设备:HHP-750型,包头科发高压科技有限公司;

高精数显电子天平:FA2104型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9140A型,上海齐欣科学仪器有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-2型,常州奥华仪器有限公司;

快速黏度分析仪:RVA-TecMaster型,瑞典波通仪器有限公司;

旋转流变仪:DHR-1型,美国TA公司;

物性测定仪:CT3型,美国Brookfield公司。

1.3 试验方法

1.3.1 莲藕淀粉的高压处理

(1) 配制30 g/100 g的莲藕淀粉悬浮液,装入耐高压袋中真空封口并充分摇匀,分别在压力梯度0,200,300,400,500,600 MPa下处理20 min。

(2) 配制30 g/100 g的莲藕淀粉悬浮液,装入耐高压袋中真空封口并充分摇匀,在压力为600 MPa下处理分别处理10,20,30,60 min。

(3) 分别配制10,20,30 g/100 g的莲藕淀粉悬浮液,装入耐高压袋中真空封口并充分摇匀,分别在压力为600 MPa下处理20 min。

样品取出抽滤,于40℃烘箱中烘干后,装入自封袋内密封,常温保存备用。

1.3.2 淀粉糊化过程的测定 采用快速黏度分析仪(RVA)测定淀粉的糊化黏度,并绘制曲线,准确称取2 g淀粉,加入25 mL去离子水,混合于RVA专用铝盒内配制成一定浓度的淀粉乳。测定过程设定:在50℃下保温2 min后,以12℃/min的速率将其从50℃加热到95℃,在95℃下保温2.5 min,再以同样的速率降到50℃。测定过程中,前10 s内搅拌速率为960 r/min,而后搅拌速率均为160 r/min。

1.3.3 静态流变特性的测定 采用平板-平板测量系统,平板直径40 mm,设置间隙1 mm,测定温度25℃,加入糊化好的样品(6%淀粉乳沸水浴糊化30 min),轻轻刮去平板周围多余的样品。测定过程设定:温度25℃,剪切速率从0~300 s⁻¹递增,每30 s记录一个点,记录该过程中剪切应力的变化情况。运用幂定律(Power law模型)对数据点进行回归拟合,剪切应力按式(1)计算:

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

式中:

τ ——剪切应力,Pa;

K ——稠度系数,Pa·sⁿ;

γ ——剪切速率,s⁻¹;

n ——流体指数。

1.3.4 动态黏弹性测定 在温度25℃,扫描应变值1%,振荡频率0.1~10 Hz下,测定糊化好的样品(6%淀粉乳沸水浴糊化30 min)贮能模量 G' 和损耗模量 G'' 随角频率的变化情况。

1.3.5 凝胶质构测定 将糊化好的样品(6%淀粉乳沸水浴糊化30 min)在室温下冷却密封,于4℃下冷藏24 h后,用物性测定仪进行质构测定。测定条件:TPA模式,TA5探头(直径12.7 mm的圆柱状平头探头),测定过程速度均为1.0 mm/s;压缩程度40%;触发力5 g。

1.4 数据处理

试验结果用“平均值±标准差”表示。所有试验均重复进行3次。图表绘制采用软件Origin 8.1,数据的方差分析应用SPSS 17.0统计软件,平均值之间的差异性使用Duncan法($P < 0.05$)进行比较。

2 结果与分析

2.1 高静压对莲藕淀粉糊化特性的影响

高静压处理后莲藕淀粉的糊化特性参数见表1。由表1可知,与原淀粉相比,经200~500 MPa不同压力处理后,峰值黏度、谷黏度、终值黏度和糊化温度分别升高2.40%~20.63%,7.60%~37.10%,3.10%~24.47%,2.70%~14.17%,崩解值和回生值相差不大。当压力上升到600 MPa时,峰值黏度和崩解值分别降低37.65%和96.49%,而谷黏度、终值黏度、回生值及糊化温度各升高了13.38%,13.43%,13.54%,17.40%。这与Li等^[17]研究高压处理对绿豆淀粉糊化性质的影响结果类似,即600 MPa处理可明显改变淀粉的糊化特性,其中崩解值越小,表明淀粉的抗热及抗剪切性越强^[18]。莲藕淀粉的上述变化主要是200~500 MPa处理时,随着处理压力的升高,淀粉颗粒受挤压重

排程度加深,其结构变得越致密,故加热后各黏度值和糊化温度持续上升;而当压力至 600 MPa 时,因莲藕淀粉已达被完全破坏的临界点,原有颗粒被破坏降解,颗粒之间相互黏连成块;由于块状淀粉吸水膨胀能力显著减弱或丧失,故导致其在加热糊化过程中各糊化特征值和较低压力处理下的产生较大差异^[19]。

不同浓度的莲藕淀粉经 600 MPa 高压处理后差异较大,相对于原淀粉,淀粉浓度在 10%~20% 时,莲藕淀粉的峰值黏度、谷黏度、崩解值、终值黏度和回生值分别降低 63.01%~80.28%, 34.63%~67.36%, 95.19%~95.73%, 37.24%~60.12%, 43.23%~43.45%, 其起始糊化温度升高 2.5%~5.9%;而当淀粉浓度为 30% 时,除峰值黏度和崩解值分别下降 37.65% 和 96.49% 外,谷黏度、终值黏度、回生值和糊化温度均高于原淀粉,分别提高了 13.38%, 13.43%, 13.54%, 17.40%。出现这种较大差异的原因主要是高静压导致淀粉糊化的过程是通过水合作用实现的,需要有自由水的存在^[20]。当淀粉浓度提高到 30% 时,自由水的含量降低,从而使淀粉糊化的进程受到一定程度的抑制,故相对于较低浓度处理的淀粉,30% 浓度处理下淀粉糊化特征值下降程度较小,甚至有所上升。不同浓度处理均降低莲藕淀粉的崩解值,淀粉的稳定性增加,且在 10%~20% 时 600 MPa 高压处理还使其回生值明显降低,莲藕淀粉的抗老化能力得到有效提高。此外,保压时间对莲藕淀粉的糊化特性参数影响也较大,当保压时间为 10~20 min 时,谷黏度、终值黏度、回生值、糊化温度分别升高 13.38%~24.48%, 13.43%~22.29%, 13.54%~17.25%, 2.51%~17.40%, 峰值黏度及崩解值分别下降 30.44%~37.65%, 93.76%~94.50%;由表 1 可知,当处理时间超过 30 min 时,莲藕淀粉的谷黏度、崩解值、峰值黏度、回生值及糊化温度等均无法得到。而终值黏度在处理 30 min 时略微上升 3.5%, 超过 30 min 后,显著下降 39.22%。这表明保压时间达到 30 min 以上时,淀粉已被完全糊化,内部结构遭到破坏,且淀粉颗粒体积增大,导致在加热

过程中淀粉的膨胀能力受限,整体黏度较低,存在终值黏度但无峰值黏度等参数。这与 Bauer 等^[21]的研究结果一致,即在一定的温度和压力条件下,处理时间越长,淀粉糊化度越高。

2.2 静态流变特性测定

淀粉的流变特性会影响相关食品的黏稠度、稳定性以及其加工过程中原料的运输、搅拌、混合及能量损失等,进而影响淀粉的应用范围。高静压处理后莲藕淀粉的流变曲线见图 1。由图 1 可知,不同处理条件下的流变曲线弯曲程度不一,但都不同程度地凸向剪切应力轴,故可判断它们都为非牛顿流体,且剪切应力随剪切速率的增加而增大,具有假塑性流体的特性^[22]。其中,当压力为 0~500 MPa 时,随着压力上升,流变曲线凹向剪切应力轴的程度变大,更加趋向于非牛顿流体;而当压力上升到 600 MPa 时,淀粉的流变曲线图和原淀粉相比,较远离剪切应力轴,其非牛顿流体性质减弱[图 1(a)]。随着淀粉浓度从 10% 升高到 30%,流变曲线凹向剪切应力轴的程度逐渐增大,表现出较强的非牛顿流体性质,但都低于原淀粉,特别是当浓度从 10% 增加到 20% 时,曲线变化程度明显增大,非牛顿流体性质更加显著[图 1(b)]。保压时间[图 1(c)]对流变曲线变化影响也较大,总体上流变曲线越来越趋近于剪切速率轴,特别是当保压时间大于 20 min 时,趋势更明显,保压时间的延长使淀粉的非牛顿流体性质减弱程度增大。

同时采用幂定律分别对高静压处理后莲藕淀粉曲线的的数据点进行拟合($P < 0.05$),结果见表 2。由表 2 可知,在所有的处理条件下,莲藕淀粉的决定系数 R^2 均大于 0.99,表明该模型对莲藕淀粉的拟合精度较高。流体指数 n 均小于 1,表明高静压并没有改变莲藕淀粉的流体类型,仍为假塑性流体。稠度系数 K 与增稠能力有关, K 越大,增稠效果越好^[22]。在 0~500 MPa 压力处理下,稠度系数 K 随着压力的升高而提高,说明整个体系的稠度增加,表明在这个压力范围内,高静压处理对莲藕淀粉有较好的增稠作用。这可能是在一定的压力作用下,淀粉分子之间受到挤压,颗粒结构

表 1 高静压处理莲藕淀粉的糊化特征参数[†]

Table 1 Pasting characteristic parameter of HHP-treated lotus root starch

样品	峰值黏度/(MPa·s)	谷黏度/(MPa·s)	崩解值/(MPa·s)	终值黏度/(MPa·s)	回生值/(MPa·s)	糊化温度/℃
未处理	1 968±15.32 ^e	1 054±13.91 ^e	914±14.41 ^b	1 512±12.12 ^f	458±12.79 ^b	68.95±0.21 ^e
200 MPa/20 min-30%	2 016±14.62 ^d	1 134±14.03 ^d	882±14.16 ^c	1 559±14.83 ^e	452±14.83 ^{bc}	70.83±0.16
300 MPa/20 min-30%	2 105±18.21 ^c	1 184±17.87 ^c	921±18.05 ^b	1 582±19.52 ^d	448±18.24 ^{bc}	74.36±0.12 ^d
400 MPa/20 min-30%	2 241±16.54 ^b	1 298±16.21 ^b	943±16.38 ^a	1 691±17.53 ^c	442±16.48 ^c	76.96±0.09 ^c
500 MPa/20 min-30%	2 374±17.36 ^a	1 445±16.95 ^a	919±17.19 ^b	1 882±17.93 ^a	437±16.32 ^c	78.72±0.28 ^b
600 MPa/20 min-30%	1 227±14.09 ^f	1 195±13.97 ^c	32±14.01 ^d	1 715±12.06 ^b	520±12.03 ^a	80.95±0.37 ^a
600 MPa/20 min-20%	728±11.57 ^c	689±11.83 ^c	39±11.62 ^{bc}	949±11.05 ^c	260±11.35 ^c	73.05±0.29 ^b
600 MPa/20 min-10%	388±12.26 ^d	344±11.98 ^d	44±12.06 ^b	603±10.21 ^d	259±11.12 ^c	70.68±0.34 ^c
600 MPa/10 min-30%	1 369±14.65 ^b	1 312±15.86 ^a	57±15.01 ^b	1 849±15.29 ^a	537±15.12 ^a	74.70±0.26 ^b
600 MPa/30 min-30%	—	—	—	1 565±14.24 ^c	—	—
600 MPa/60 min-30%	—	—	—	919±13.65 ^c	—	—

† 同列不同字母表示各数据间有显著性差异($P < 0.05$)。

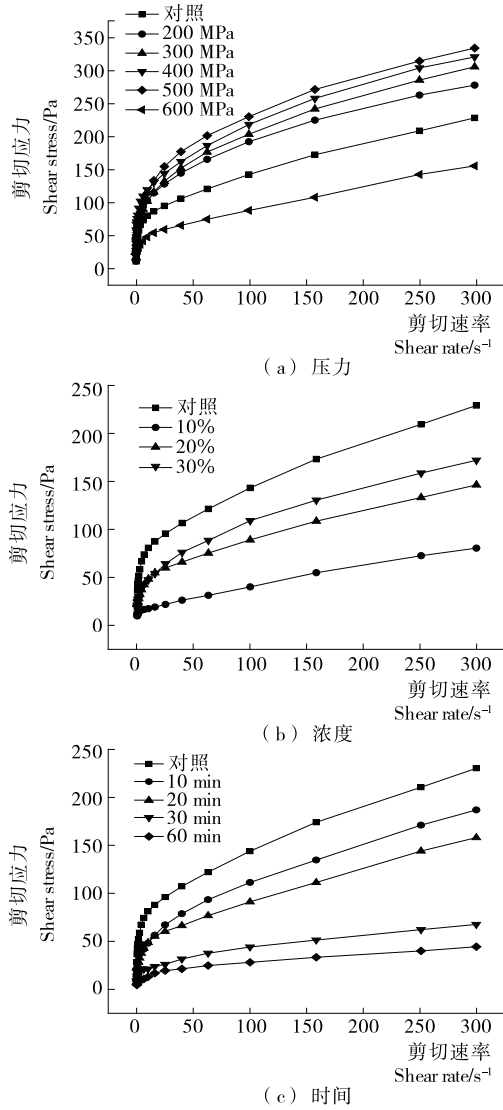


图1 不同高压处理下莲藕淀粉的流变曲线图
Figure 1 Under different high-pressure treatment lotus root starch rheological curve

更加致密,以致其在外力作用下不易伸展变形^[23];但当压力达 600 MPa 时,由于淀粉颗粒受到破坏降解,外力作用时较易伸展变形^[23],故稠度系数 K 与原淀粉相比明显下降,增稠效果减弱。同时当淀粉浓度从 10% 上升到 30% 时,稠度系数 K 增大,而流体指数 n 减小,表明其流动性减弱,越倾向于非牛顿流体。这是由于淀粉浓度越大,淀粉分子之间的作用力就越强,颗粒之间更容易黏连聚集,较难通过氢键方式和水分子结合,从而淀粉颗粒在高静压作用下伸展变形程度减小,结构难以被破坏,故稠度系数增大^[24]。此外,延长保压时间,稠度系数 K 剧烈下降,增稠效果明显减弱。特别是当处理时间达到 60 min 时,增稠效果最差。这是由于随着保压时间的延长,淀粉颗粒受到更大程度的破坏,吸水膨胀能力下降,糊化后淀粉黏稠度与凝胶性降低^[25]。

2.3 动态黏弹性

动态黏弹性可测定样品的黏弹性,对食品加工特性及产品质量控制具有重要的作用^[26]。其中,储能模量(G')表示

样品形变过程中的弹性大小,而损耗模量(G'')则表示其黏性大小^[27]。高静压处理莲藕淀粉的动态黏弹性见图 2。由图 2 可知,所有处理条件下莲藕淀粉的 G' 均大于相对应的 G'' ,说明所有淀粉体系的黏弹性都以弹性为主, G' 和 G'' 曲线在角频率扫描范围内未有交叉现象,说明莲藕淀粉在处理前后表现为弱凝胶状态^[28]。

在 0~500 MPa 时, G' 和 G'' 随着角频率的增加而增加,但当压力升高到 600 MPa 时, G' 和 G'' 下降且低于原淀粉 [图 2(a)]。这与 Vallons 等^[29] 的研究一致,即一定压力范围内, G' 和 G'' 随处理压力的升高而增大,而过高压力则使 G' 和 G'' 降低。可能是淀粉颗粒在 600 MPa 高压下受到一定程度的破坏降解,吸水膨胀能力降低,导致淀粉糊的凝胶强度减弱^[30]。同时 G' 和 G'' 淀粉浓度在 10%~30% 时均逐渐增大,但最终都小于原淀粉所对应的 [图 2(b)],主要是高浓度淀粉的有效水分含量减少,抑制部分淀粉颗粒被破坏,而未被破

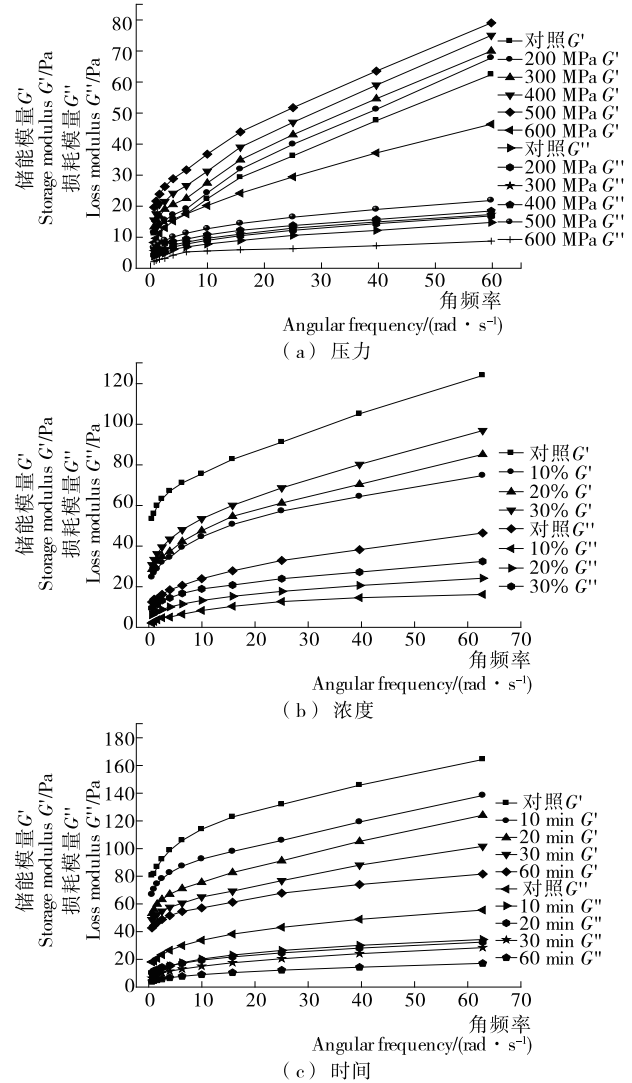


图2 不同高静压处理下莲藕淀粉储能模量 G' 及 G'' 随时间变化曲线
Figure 2 Curve of storage modulus G' and G'' of lotus root starch under different high hydrohydrostatic pressure

表 2 不同高压处理下莲藕淀粉流变特性的拟合参数[†]

Table 2 Fitting parameters of rheological properties of lotus root starch under different high-pressure treatments

样品	稠度系数 $K/(Pa \cdot s^n)$	流体指数 n	决定系数 R^2
未处理	31.701 1±1.131 5 ^e	0.408 2±0.012 6 ^b	0.996 7±0.000 2 ^b
200 MPa/20 min-30%	72.942 7±3.042 5 ^d	0.342 1±0.003 5 ^c	0.993 9±0.000 3 ^c
300 MPa/20 min-30%	81.279 0±4.821 1 ^c	0.328 7±0.001 2 ^d	0.994 9±0.000 1 ^d
400 MPa/20 min-30%	89.678 4±5.326 1 ^b	0.323 3±0.001 1 ^e	0.995 8±0.000 2 ^c
500 MPa/20 min-30%	97.092 6±5.867 3 ^a	0.311 9±0.001 3 ^f	0.999 7±0.000 1 ^a
600 MPa/20 min-30%	24.365 2±2.351 9 ^f	0.456 1±0.002 1 ^a	0.993 0±0.000 1 ^f
600 MPa/20 min-20%	23.355 2±0.543 6 ^c	0.461 1±0.002 3 ^b	0.993 5±0.000 1 ^c
600 MPa/20 min-10%	18.543 5±1.026 5 ^d	0.494 3±0.000 5 ^a	0.994 9±0.000 2 ^b
600 MPa/10 min-30%	28.632 5±2.132 5 ^b	0.431 6±0.001 1 ^d	0.998 6±0.000 2 ^b
600 MPa/30 min-30%	19.532 4±1.986 1 ^d	0.490 3±0.000 7 ^b	0.995 6±0.000 3 ^d
600 MPa/60 min-30%	11.002 6±1.126 3 ^e	0.524 1±0.000 9 ^a	0.999 1±0.000 1 ^a

† 同列不同字母表示各数据间有显著性差异($P<0.05$)。

坏的部分淀粉在糊化过程中仍具有较强的吸水膨胀能力,最终形成强度较大的凝胶^[30]。另外,随保压时间的延长, G' 和 G'' 也降低且均小于原淀粉的[图 2(c)],原因为 600 MPa 高压下淀粉颗粒已受到破坏,随保压时间的延长,其破坏程度增加,淀粉颗粒吸水膨胀能力也急剧下降,从而明显减弱淀粉糊的凝胶强度,即表现在动态黏弹上为 G' 和 G'' 减小^[31]。

2.4 质构特性

淀粉凝胶质构与食品品质特性密切相关,凝胶硬度、弹性、咀嚼性等特性对食品口感、持水性等有着重要影响^[32]。高静压处理莲藕淀粉的凝胶质构参数见表 3。在 200~500 MPa 压力下,与原淀粉相比,凝胶的硬度、黏性、黏着性和咀嚼性分别下降 13.16%~47.37%,12.90%~38.71%,11.11%~55.56%,6.024%~49.000%,弹性升高 6.667%~41.550%;当压力达到 600 MPa 时,凝胶的硬度、黏性、黏着性、咀嚼性的变化趋势和 200~500 MPa 压力处理后一致,且各指标下降更加显著。因为高静压处理会对淀粉颗粒结构

造成不同程度破坏,淀粉分子结构的变化还会导致淀粉发生糊化^[33],随着压力的升高,该作用越明显,故各指标值呈现下降趋势,且在 600 MPa 处理下最明显。600 MPa 下淀粉颗粒被严重破坏,淀粉分子水合能力显著下降,加热形成凝胶的强度较低^[34],故导致弹性也下降。

浓度变化对淀粉凝胶质构特性影响也较大,在 10%~30% 的浓度时,除内聚性外,凝胶的各质构指标值较原淀粉而言均显著下降,但随浓度的升高,凝胶质地下降不明显。特别是 30% 浓度的淀粉凝胶,相比 10% 浓度淀粉凝胶,除硬度为其 0.5 倍外,黏性、弹性、黏着性和咀嚼性均分别为其各指标的 2.0,2.3,1.3,1.2 倍。这主要与水分含量对高静压的影响有关^[35],水分含量越小,高静压对淀粉的影响越小,淀粉破坏程度减弱,故高浓度处理较低浓度处理而言,指标值的变化程度减小。加压时间对高静压处理莲藕淀粉的质构影响也较大,在 10~60 min 的保压时间内,淀粉凝胶各质构指标也呈下降的趋势。尤其是加压时间大于 30 min 时,各

表 3 高静压处理下莲藕淀粉的质构参数[†]

Table 3 Under different high hydrostatic pressure lotus root starch texture parameters

样品	硬度/g	黏性/mJ	内聚性	弹性/mm	黏着性/g	咀嚼性/mJ
未处理	38.0±1.9 ^a	3.1±0.052 ^a	0.25±0.002 ^a	8.40±0.101 ^e	9.0±0.103 ^a	24.9±0.026 ^a
200 MPa/20 min-30%	33.0±1.5 ^b	2.7±0.032 ^b	0.24±0.098 ^a	8.96±0.102 ^d	8.0±0.257 ^b	23.4±0.030 ^b
300 MPa/20 min-30%	27.0±1.3 ^c	2.5±0.015 ^c	0.25±0.001 ^a	9.42±0.109 ^c	7.0±0.175 ^c	18.9±0.083 ^c
400 MPa/20 min-30%	23.0±1.1 ^d	2.2±0.013 ^d	0.24±0.099 ^a	10.56±0.105 ^b	6.0±0.059 ^d	15.2±0.016 ^d
500 MPa/20 min-30%	20.0±1.4 ^e	1.9±0.018 ^e	0.25±0.011 ^a	11.89±0.054 ^a	4.0±0.109 ^e	12.7±0.016 ^e
600 MPa/20 min-30%	10.0±1.2 ^f	1.4±0.012 ^f	0.24±0.095 ^a	4.31±0.043 ^f	2.0±0.124 ^f	7.5±0.036 ^f
600 MPa/20 min-20%	17.0±1.6 ^c	1.2±0.011 ^c	0.24±0.099 ^a	3.87±0.023 ^c	1.4±0.011 ^c	5.8±0.024 ^c
600 MPa/20 min-10%	21.0±1.5 ^d	0.7±0.018 ^d	0.24±0.099 ^a	1.86±0.012 ^d	0.8±0.002 ^d	3.4±0.022 ^d
600 MPa/10 min-30%	23.0±1.3 ^b	2.4±0.022 ^b	0.24±0.097 ^a	6.86±0.112 ^b	8.4±0.152 ^b	13.4±0.023 ^b
600 MPa/30 min-30%	7.5±1.4 ^d	1.0±0.011 ^d	0.25±0.001 ^a	3.52±0.115 ^d	1.4±0.052 ^d	5.2±0.011 ^d
600 MPa/60 min-30%	2.2±1.3 ^e	0.3±0.008 ^e	0.25±0.001 ^a	1.89±0.034 ^e	0.5±0.009 ^e	1.7±0.012 ^e

† 同列不同字母表示各数据间有显著性差异($P<0.05$)。

指标值下降速率更快;相比保压 30 min 而言,60 min 时凝胶的硬度、黏性、弹性、黏着性和咀嚼性显著下降。保压时间越长,莲藕淀粉的破坏程度也越大,故各指标值下降程度也随着保压时间的延长而增加^[36]。此外,不同高静压处理下,莲藕淀粉的内聚性均未发生明显变化,内聚性不仅受淀粉分子之间相互作用的影响,而且与直链淀粉含量、支链淀粉结构有关^[37],内聚性未发生变化的具体原因有待进一步研究。

3 结论

高静压处理使莲藕淀粉宏观和微观性质发生了一定的变化,如 200~500 MPa 时,莲藕淀粉的各黏度值、糊化温度、稠度系数 K 、 G' 和 G'' 随着压力的增大均显著升高;600 MPa 时,崩解值显著降低,且随着淀粉浓度和保压时间的增加,降低程度越明显,淀粉抗剪切性提高;相对于莲藕原淀粉,经 10%~20% 浓度处理后的莲藕淀粉回生值降低,抗老化能力提高;经高静压处理后的莲藕淀粉流体指数 n 均小于 1,仍为假塑性流体。此外,增加淀粉浓度和减少保压时间,莲藕淀粉的弹性、咀嚼性显著升高,硬度下降,但内聚性均未发生明显变化。高静压处理使莲藕淀粉的抗剪切性、抗老化性及质构特性在一定程度上得到改善,可以考虑将改性后的莲藕淀粉应用于糖果、面包、果冻中,赋予产品良好的咀嚼性,或将其添加到酱料中起到稳定产品质感的作用。

参考文献

- [1] 齐建设, 齐一乔, 易宗初, 等. 2014 年度中国莲藕淀粉市场分析[J]. 蔬菜, 2014(12):26-29.
- [2] XU Shi-ying, SHOEMAKER C F. Gelatinization properties of Chinese water chestnut starch and lotus root starch[J]. Journal of Food Science, 2015, 51(2): 445-449.
- [3] ZHU Bao-dong, MA Dong-zhuo, WANG Deng-fei, et al. Multi-responsive hydrogel based on lotus root starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 89: 599-604.
- [4] 刘丽. 醋酸酯化莲藕改性淀粉的制备工艺研究[J]. 食品工业, 2017, 38(1): 25-27.
- [5] 刘敏, 代曜伊, 毕家钰, 等. 魔芋胶对莲藕淀粉糊化和流变特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(7): 109-114.
- [6] LIU Kang, LI Qiang-ming, PAN Li-hua, et al. The effects of lotus root amylopectin on the formation of whey protein isolate gels[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 175: 721-727.
- [7] ROECK A D, MOLS J, DUVETTER T, et al. Carrot texture degradation kinetics and pectin changes during thermal versus high-pressure/high-temperature processing: a comparative study[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 1 104-1 112.
- [8] BULL M K, ZERDIN K, HOWE E, et al. The effect of high pressure processing on the microbial, physical and chemical properties of Valencia and Navel orange juice[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2004, 5(2): 135-149.
- [9] MERTENS B. Developments of nonthermal processes for food preservation[J]. Food Technology, 1992, 5(5): 124-133.
- [10] VALLONS K J, RYAN L A, ARENDT E K. Pressure-induced gelatinization of starch in excess water[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2014, 54(3): 399-409.
- [11] TAN Fa-ju, DAI Wei-ting, KUOCHIANG H. Changes in gelatinization and rheological characteristics of japonica rice starch induced by pressure/heat combinations[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(2): 285-289.
- [12] 孙沛然, 姜斌, 沈群. 高静压对籼米淀粉和糯米淀粉糊化及老化性质的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 51-58.
- [13] 郭泽镔, 曾绍校, 郑宝东. 超高压处理对莲子淀粉理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(11): 118-123.
- [14] BLASZCZAK W, FORMAL J, KISELEVA V I, et al. Effect of high pressure on thermal, structural and osmotic properties of waxy maize andhydon VII starch blends[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 68(3): 387-396.
- [15] 赵精杰, 赵米雪, 刘培玲, 等. 高静压物理变性制备非晶颗粒态木薯淀粉及理化性质研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(7): 40-47.
- [16] 刘培玲, 张甫生, 白云飞, 等. 高静压对淀粉结构及糊化性质的影响[J]. 高压物理学报, 2010, 24(6): 472-480.
- [17] LI Wen-hao, ZHANG Fu-sheng, LIU Pei-lin, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical, thermal and morphological properties of mung bean (*Vigna radiata*, L.) starch[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(4): 388-393.
- [18] 谢涛, 李晓文, 蒋朝晖, 等. 有机酸-湿热复合处理土豆抗性淀粉糊的理化特性[J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 45-49.
- [19] MIAO Ming, ZHANG Tao, JIANG Bo. Characterisations of kabuli and desi chickpea starches cultivated in China[J]. Food Chemistry, 2009, 113(4): 1 025-1 032.
- [20] 刘延奇, 周婧琦, 郭好薇. 超高压技术在淀粉改性中的应用[J]. 食品与机械, 2006, 22(4): 126-129.
- [21] BAUER B A, KNORR D. The impact of pressure, temperature and treatment time on starches: pressure-induced starchgelatinisation as pressure time temperature indicator for high hydrostatic pressure processing[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68(3): 329-334.
- [22] ANDERSON M C, SHOEMAKER C F, SINGH R P. Rheological characterization of aseptically packaged pudding[J]. Journal of Texture Studies, 2010, 37(6): 681-695.
- [23] KAUR L, SINGH N, SODHI N S, et al. Some properties of potatoes and their starches I: Cooking, textural and rheological properties of potatoes[J]. Food Chemistry, 2002, 79(2): 177-181.
- [24] MOORTHY S N. Effect of steam pressure treatment on the physicochemical properties of dioscorea starches[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1999, 47(4): 1 695-1 699.
- [25] SINGH J, KAUR L, MCCARTHY O J. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications: A review[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(1): 1-22.
- [26] RÖNHOLT S, KIRKENS GAARD J J, PEDERSEN T B, et al. Polymorphism, microstructure and rheology of butter. Effects of cream heat treatment[J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1 730-1 739.

(下转第 64 页)

- culture and Food Chemistry, 1997, 45(6): 2 178-2 186.
- [11] 蔡艳梅, 孙宝国, 黄明泉, 等. 同时蒸馏萃取-气质联用分析月盛斋酱牛肉的挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 370-374.
- [12] 庞雪莉, 胡小松, 廖小军, 等. FD-GC-O 和 OAV 方法鉴定哈密瓜香气活性成分研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(6): 174-182.
- [13] BUTTERY R, TURNBAUGH J, LING L. Contribution of volatiles to rice aroma[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1988, 36(5): 1 006-1 009.
- [14] 张雷亮, 李晟, 郭鸽, 等. 1-辛烯-3-醇的合成工艺优化研究[J]. 山东化工, 2017, 46(2): 3-4.
- [15] 旬延军. 金华火腿加工过程中脂类物质及风味成分变化的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005: 24-29.
- [16] 孙圳, 韩东, 张春晖, 等. 定量卤制鸡肉挥发性风味物质剖面分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(15): 3 030-3 045.
- [17] MA Qian-li, HAMID N, BEKHIT A E D, et al. Evaluation of pre-rigor injection of beef with proteases on cooked meat volatile profile after 1day and 21days post-mortem storage[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 430-439.
- [18] 宋国新, 余应新, 王林祥. 香气分析技术与实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 21-22.
- [19] 赖宏刚. 冷鲜鸡与酱卤制品辐照综合保鲜技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017: 44-54.
- [20] 王庭. 脂质对荣昌猪肉风味的贡献研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011: 25-37.
- [21] 陈海涛, 张宇, 孙宝国. SPME 或 SDE 结合 GC-MS 分析贾永信十香酱牛肉的挥发性风味成分[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 171-175.
- [22] PINO J A, MESA J. Contribution of volatile compounds to mango (*Mangifera indica* L.) aroma [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2006, 21(2): 207-213.
- [23] CZERNY M, CHRISTLBAUER M, CHRISTLBAUER M, et al. Re-investigation on odour thresholds of key food aroma compounds and development of an aroma language based on odour qualities of defined aqueous odorant solutions [J]. European Food Research and Technology, 2008, 228(2): 265-273.
- [24] 金冬双, 龚淑英, 林宇皓, 等. 小叶种夏秋茶渥堆加工过程中香气成分研究[J]. 茶叶科学, 2009, 29(2): 111-119.
- [25] 唐春红, 陈旭华, 张春晖, 等. 不同卤制方法对鸡腿肉中挥发性风味化合物的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(14): 123-129.
- [26] KIRMIZIBAYRAK T, ONK K, EKIZ B, et al. Effects of age and sex on meat quality of Turkish native geese raised under a free-range system[J]. Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 2011, 17(5): 817-823.
- [27] ARONAL A P, HUDA N, AHMAD R. Amino acid and fatty acid profiles of peking and muscovy duck meat[J]. International Journal of Poultry Science, 2012, 11(3): 229-236.
- [28] SARI M, ONK K, SISMAN T, et al. Effects of different fattening systems on technological properties and fatty acid composition of goose meat[J]. Archiv Fur Geflugelkunde, 2015, DOI: 10.1399/eps.2015.79.
- [29] WOOD J D, RICHARDSON R I, NUTE G R, et al. Effects of fatty acids on meat quality: a review[J]. Meat Science, 2004, 66(1): 21-32.
- [30] GOGUS U, SMITH C. n-3 Omega fatty acids: a review of current knowledge[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(3): 417-436.
- [31] 郑晓, 潘道东, 曹锦轩. 不同日龄浙东白鹅氨基酸及脂肪酸组成与含量分析[J]. 食品科学, 2013, 34(12): 140-142.
- (上接第 36 页)
- [27] YUVARET V, PIYADA A, MANOP S. Gelatinization and rheological properties of rice starch/xanthan mixtures: Effects of molecular weight of xanthan and different salts[J]. Food Chemistry, 2008, 111(1): 106-114.
- [28] 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.
- [29] VALLONS K J R, ARENDT E K. Effects of high pressure and temperature on the structural and rheological properties of sorghum starch[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 449-456.
- [30] VALLONS K J R, ARENDT E K. Understanding high pressure-induced changes in wheat flour-water suspensions using starch-gluten mixtures as model systems[J]. Food Research International, 2010, 43(3): 893-901.
- [31] STOLT M, STOFOROS N G, AUTIO K. Evaluation and modeling of rheological properties of high pressure waxy maize starch dispersion[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40(4): 293-298.
- [32] FREDRIKSSON H, SILVERIO J, ANDERSSON R, et al. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches[J]. Carbohydrate Polymers, 1998, 35(3/4): 119-134.
- [33] 钟秋平, 谢碧霞, 王森, 等. 高压处理对橡实淀粉凝胶体结构特性的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(3): 66-70.
- [34] STOLT M, OINONEN S, AUTIO K. Effect of high pressure on the physical properties of barley starch[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2000, 1(3): 167-175.
- [35] 张园园, 刘振民, 郑远荣, 等. 超高压处理对干酪质构的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 47-50.
- [36] PUNCHAARNON S, PATHIPANAWAT W, PUTTANLEK C, et al. Effects of relative granule size and gelatinization temperature on paste and gel properties of starch blends[J]. Food Research International, 2008, 41(5): 552-561.
- [37] MATALANIS A M, CAMPANELLA O H, HAMAKER B R. Storage retrogradation behavior of sorghum, maize and rice starch pastes related to amylopectin fine structure[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(1): 74-81.