

超声波处理对豌豆淀粉糊化、流变及质构特性的影响

Effect of ultrasound treatment on pasting, rheological and textural properties of pea starch

李薇^{1,2} 郑炯^{1,2} 陈映衡^{1,2} 张甫生^{1,2}

LI Wei^{1,2} ZHENG Jiong^{1,2} CHEN Ying-heng^{1,2} ZHANG Fu-sheng^{1,2}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 重庆 400715)

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Food Science and Engineering Education, Southwest University, Chongqing 400715, China)

摘要:以豌豆淀粉为原料,分别用0,150,300,450 W的超声波进行处理,考察超声波处理对豌豆淀粉糊化、流变及质构特性的影响。结果表明:超声波处理对豌豆淀粉的糊化、流变及质构特性都有较大影响。随着超声波功率的增加,豌豆淀粉糊峰值黏度、终值黏度、崩解值及回升值都显著下降,使豌豆淀粉冷稳定性及热稳定性得到提升;稠度系数 k 减小,流体指数 n 增大,触变性减小,流动性增加,使豌豆淀粉流变稳定性提高; G' 与 G'' 减小, $\tan \delta$ 增大,使豌豆淀粉黏弹性降低。此外,超声作用使豌豆淀粉凝胶的硬度、弹性、内聚性、胶着性及咀嚼性都呈下降趋势,其中硬度与胶着性下降最显著。扫描电镜表明,超声波对豌豆淀粉产生破坏作用,使淀粉颗粒表面出现坑洞及皱褶,部分颗粒结构变得不完整。

关键词:豌豆;淀粉;超声波;糊化性质;流变特性;质构特性

Abstract: Pea starch was used as the raw material, and was treated with ultrasound of 0, 150, 300 and 450 W respectively to explore the effect of the ultrasonic treatment on pasting, rheological and textural properties of pea starch. The results showed that the effects of the ultrasonic treatment on the pasting, rheological and textural properties of pea starch were significant. With the increasing of the ultrasonic power, the peak viscosity, final viscosity, setback value and the breakdown value of the pea starch paste decreased significantly, which showed the cold stability and the thermal stability were improved; the consistency coefficient k of the system decreased and the fluid index n increased gradually, which showed the thixotropy decreased and the stability increased; the G' and the G'' of the system decreased, and the $\tan \delta$ increased, so that the viscoelastic decreased.

基金项目:中央高校基本科研业务费(编号:XDJK2016B035, SWU20161702001)

作者简介:李薇,女,西南大学在读本科生。

通信作者:郑炯(1982—),男,西南大学副教授,博士。

E-mail: zhengjiong_swu@126.com

收稿日期:2018-01-15

In addition, the hardness, elasticity, cohesion, adhesion and chewiness of the pea starch gel after ultrasound showed a downward trend, the hardness and adhesion decreased the most significant among them. The results of scanning electron microscopy indicated that the ultrasonic effect caused the surface of the pea starch granule to appear potholes and creases, and some of the granule became incomplete.

Keywords: pea; starch; ultrasound; pasting properties; rheological properties; textural properties

豌豆(*Pisum sativum*)是世界各地广泛种植的食用豆类之一,淀粉是其主要成分。豌豆淀粉来源广泛,价格便宜,与薯类淀粉和谷物淀粉相比,其直链淀粉含量较高、形成的凝胶强度大、糊化温度高^[1],适用于粉丝和粉皮的生产加工^[2]。但豌豆淀粉不溶于冷水,淀粉糊极易老化回生,在高温下耐剪切力较弱,热稳定性差^[3],限制了豌豆淀粉在食品行业中的应用。研究发现,经超高压改性后,淀粉重结晶速率降低,回生率减小,回生过程受到控制^[4];酸水解结合湿热处理淀粉可增加其溶解度、凝胶强度并影响淀粉黏弹性^[5]。因此,可采用改性的方法改善或增添豌豆淀粉的功能性质,扩大其应用范围。

目前改性淀粉的方法主要以化学法和酶法为主,但化学法存在反应速率低、操作不易控制、产品质量不稳定等问题,并且在应用化学改性淀粉时还需对其安全性进行评价;而酶的催化活性受到温度、湿度及pH等多种因素影响,操作过程繁琐,使其应用受限^[6]。超声波技术作为一种简便有效的新型物理变性方法,其在介质中传播时可以产生机械效应、热效应和空化效应^[7]。研究表明,超声波主要通过机械断键作用以及自由基氧化还原反应作用于淀粉大分子^[8],而造成淀粉某些大分子链断裂、分子的缠结点减少、结晶结构被破坏等,使淀粉反应活性增加^[6]。且超声波处理作用

时间短、能耗低、无需引入其他化学添加剂^[9],具有良好的应用前景。

Sujka等^[10]研究了超声处理对马铃薯、小麦等淀粉的影响,发现超声处理使得淀粉颗粒表面出现凹陷,最小胶凝浓度以及淀粉糊黏度降低;Hu等^[11]研究发现,糯米淀粉溶液经超声波处理后,糊化的峰值黏度与终值黏度显著低于处理前;此外,孟欣^[12]探究了超声改性对豌豆淀粉黏度、透明度、溶解度、结晶度等的影响,结果表明,超声处理可降低淀粉的峰值黏度与终值黏度,提高淀粉的冷、热稳定性,还可增加淀粉的透明度及溶解性,减小淀粉的糊化焓并使得淀粉的冻融稳定性降低,但却未涉及不同超声功率对豌豆淀粉质构特性及流变特性的影响。流变特性能够预测、解释淀粉在加工过程中的性质变化,影响淀粉浆料的输送、搅拌及加工工艺等;质构特性可直观地反映淀粉凝胶的硬度、弹性、胶黏性等性质,进一步证明超声波处理对淀粉凝胶的形成及稳定性的影响,有利于改善淀粉的加工适应性。但目前围绕这方面的研究报道还较少,且多以玉米^[11]、木薯^[13]等为原料。因此,本试验拟以豌豆淀粉为原料,探究不同功率的超声波对淀粉糊化、流变、凝胶质构特性及微观结构的影响,以期对豌豆淀粉类食品的研究与开发提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

豌豆淀粉(水分含量 11.3%,直链淀粉含量 38.6%,支链淀粉含量 47.3%);食品级,成都达恒毛实业有限公司;

一水合柠檬酸、NaCl:分析纯,成都市科龙化工试剂厂。

1.2 仪器与设备

电子天平:FA2104型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

酸度计:pHS-3C型,成都世纪方舟科技有限公司;

超声波细胞破碎仪:JY98-IIN型,宁波新芝生物科技发展有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-8型,常州澳华仪器有限公司;

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;

钨灯丝扫描电子显微镜:JSM-6510LV型,日本电子株式会社(JEOL)。

1.3 方法

1.3.1 超声波处理豌豆淀粉 参照陈洁等^[13]的方法并加以改动,将称好的豌豆淀粉调成含量为 15%的淀粉溶液,待样品完全均匀分散于水中后,将装有样品的烧杯放置于超声波细胞破碎仪内,将直径为 2 cm 的探头伸入样品中约 3~5 cm,使用低温水浴保持样品温度处于室温,放好样品后将细胞破碎室密封,选定超声功率为 0 W 的豌豆淀粉样品为对照组,其他样品分别经 150,30,450 W 超声波处理 30 min,超声处理的工作时间为 5 s,间歇 3 s。将处理后的淀粉溶液在冰箱中预冷冻 24 h 后,于-50℃下真空冷冻干燥 48 h,待分

析测试用。

1.3.2 糊化性质的测定 参照张正茂等^[3]的方法,准确称取豌豆原淀粉及超声波处理后的豌豆淀粉与蒸馏水置于 RVA 专用铝盒内混合调成质量分数为 12 g/100 g 的悬浮液。采用 RVA Standard 1 测定,程序:前 10 s 内搅拌速率为 960 r/min,而后以 160 r/min 搅拌速率进行黏度测定。初始温度 50℃保温 1 min,经过 3.7 min 升温至 95℃,并保温 2.5 min,经过 3.8 min 降温至 50℃,再保温 2 min,整个过程历时 13 min,记录淀粉的峰值黏度(PV,温度达 95℃时的最高黏度)、终值黏度(FV,在 50℃等温时期结束时的黏度)、崩解值(BV,峰值黏度与谷值黏度之差)、回升值(SV,谷值黏度与终值黏度之差)以及糊化温度(起始糊化温度,指测试过程中,试样黏度开始有明显增加时的试样温度)。

1.3.3 流变特性的测定 参照陈洁等^[13]的方法准确称取 1.3.1 制备的豌豆淀粉及原淀粉与蒸馏水置于 50 mL 小烧杯中混合,调成质量分数为 6 g/100 g 的悬浮液,在 95℃水浴锅中加热糊化 30 min,室温下冷却至 25℃后进行测定。

采用平板-平板测量系统,设置平板直径为 40 mm,平板间隙为 1 mm,上样平衡时间为 3 min,测定温度为 25℃。

静态剪切测定:设定剪切速率从 0 s⁻¹增加至 300 s⁻¹,再从 300 s⁻¹降低至 0 s⁻¹。记录该过程中剪切应力随剪切速率的变化情况。采用幂定律(Power law)模型对数据点进行回归拟合,得方程:

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

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。

滞后环的面积通过前后 2 次剪切速率积分差得出:

$$\Delta Hr = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} k \cdot \gamma^n - \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} k' \cdot \gamma^{n'}, \quad (2)$$

式中:

ΔHr ——滞后环面积,Pa/(s·m);

γ_1 ——起始剪切速率;

γ_2 ——终止剪切速率;

k ——上行线稠度系数;

k' ——下行线稠度系数;

n ——上行线流体指数;

n' ——下行线流体指数。

动态黏弹性测定:设定扫描应变为 1%,记录振荡频率为从 0.1 Hz 增加至 10 Hz 内储能模量(G')、损耗模量(G'')、损耗角正切值(tan δ)随角频率的变化情况。

1.3.4 质构测定 取 1.3.3 中制备的悬浮液,在 95℃水浴锅中加热糊化 30 min。冷却至室温后,于 4℃冰箱内密封冷藏 24 h,形成凝胶后,使用 CT3 物性测定仪对样品进行质地剖面分析(TPA)测定。测定条件:TA5 探头,测试前速度 1.0 mm/s;测试速度 1.0 mm/s;测试后速度 1.0 mm/s;压缩形变程度 30%;触发力 5 g。

1.3.5 微观结构观察 参照张根生等^[2]的方法,取 1.3.3 中制备的悬浮液,经超声处理后静置 0.5 h,弃去多余水分,将样品平铺于培养皿中,置冰箱中预冷冻 24 h,水分完全结冰后,于 -50 °C 条件下进行抽真空冷冻干燥 48 h。将冷冻干燥好的样品用导电胶布固定于样品台上,并用洗耳球吹去多余淀粉,经离子溅射仪喷金后,使用扫描电子显微镜在 20 kV 的加速电压和 1 200 倍的放大倍率下,对样品的微观结构进行观察。

1.3.6 统计分析 试验结果以“平均值±标准差”表示。所有试验均进行 3 次重复。应用 SPSS 19.0 统计软件,对数据进行方差分析。使用 Origin 9.0 进行相关图表的绘制和数据处理。使用 Duncan 法比较平均值之间的差异性。

2 结果与分析

2.1 超声处理对豌豆淀粉糊化性质的影响

图 1 为豌豆淀粉经不同功率超声波处理后的糊化曲线,表 1 为 RVA 特征值。与未经超声处理的原淀粉相比,随着超声波功率的增加,豌豆淀粉糊的峰值黏度、终值黏度、回生值、崩解值显著性降低($P < 0.05$)。这是因为超声波产生的机械作用和空化效应导致淀粉分子链断裂、分子量降低,使限制淀粉糊流动的黏性阻力减小^[14],黏度降低。研究^[15]发现,淀粉颗粒的膨胀和糊化与其结晶区相关,结晶区的占比

越大,淀粉颗粒越易膨胀后受剪切力的破坏而导致崩解值增大。超声波作用破坏了淀粉结晶结构,使支链淀粉减少^[16],最终导致豌豆淀粉的崩解值降低,热稳定性增强^[17]。同时,这种破坏作用使淀粉链暴露了大量羟基,增加了淀粉与水分子的相互作用,提高了淀粉的保水性,从而导致豌豆淀粉回生值降低,冷稳定性增强^[18]。从表 1 可得到,超声处理对糊化温度没有显著影响,与张志华^[6]探究超声波处理对玉米淀粉结构与性质的研究结果一致。

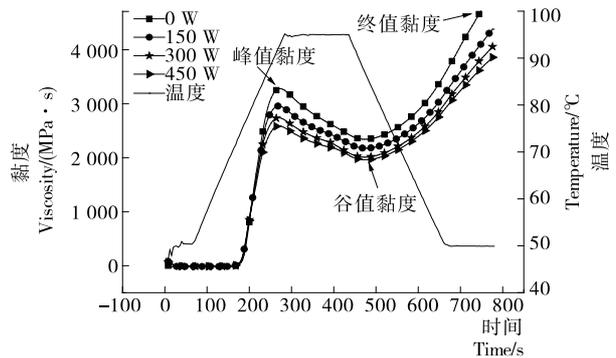


图 1 超声处理后豌豆淀粉的糊化曲线

Figure 1 Pasting curves of pea starch after ultrasound treatment

表 1 超声处理后豌豆淀粉的糊化特征值[†]

Table 1 Pasting parameters of pea starch after ultrasound treatment

超声功率/W	峰值黏度/(MPa·s)	崩解值/(MPa·s)	终值黏度/(MPa·s)	回生值/(MPa·s)	糊化温度/°C
0	3 279±22 ^a	921±15 ^a	5 077±21 ^a	2 736±23 ^a	72.70±0.05 ^a
150	2 956±11 ^b	780±12 ^b	4 379±15 ^b	2 203±23 ^b	72.60±0.10 ^a
300	2 738±27 ^c	728±17 ^c	4 057±27 ^c	2 047±30 ^c	72.70±0.15 ^a
450	2 590±24 ^d	628±10 ^d	3 858±6 ^d	1 896±12 ^d	72.65±0.10 ^a

† 同列数据中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 超声处理对豌豆淀粉流变特性的影响

2.2.1 静态剪切流变特性 图 2 为超声波处理后,豌豆淀粉静态剪切流变特性随剪切速率变化曲线。由图 2 可知,所有样品在流动中所需剪切应力都随着剪切速率的增加而增大,曲线表现为凸曲线,即豌豆淀粉糊的流变呈现剪切变稀,为典型的非牛顿流体^[19]。前人^[20]研究表明,在相同剪切速率下,剪切应力越高,表明淀粉的结构越稳定。由图 2 还可得,超声作用后,豌豆淀粉糊达到相同的剪切速率,所需要的剪切应力降低,即超声作用破坏了淀粉结构,引起淀粉分子降解、大分子链解缠结,从而导致限制分子运动的流动行为弱化^[21],且随着超声功率的增加,淀粉的三维网络结构被破坏程度加大,因此,在 450 W 时淀粉黏度降至最低,该结果与淀粉糊化特性的结果相一致。值得注意的是,当剪切速率降低时,所有豌豆淀粉样品下行剪切曲线均出现较大弯折,与上行剪切曲线重合性较差,出现滞后环,即体系的恢复速率跟不上剪切作用对其的破坏作用,重新形成网络结构需要较长时间,表现出触变性^[22]。

触变性流体均可视为具有剪切稀化的假塑性流体,流体发生触变性则说明其内部结构遭到了破坏,可用滞后环面积

的大小进行评价^[23]。图 3 为超声处理后豌豆淀粉静态剪切滞后环面积的柱状图。由图 3 可知,随着超声波功率的增加,豌豆淀粉糊滞后环面积逐渐减小,说明超声作用降低了体系触变性,使体系结构被打破后还原所需能量降低,回复性及稳定性提高。这种性质对于淀粉物料的加工是有利的,如在物料泵送过程中,搅拌产生剪切使物料表观黏度降低从而易于输送,输送完毕后,剪切力消失,物料表观黏度又得以恢复^[24]。另外,与其他谷薯类淀粉相比,豌豆淀粉的滞后环面积较大,可能是豌豆淀粉中直链淀粉含量较高,在室温下易老化回生,淀粉内部结构在剪切力作用下被破坏程度较大,不易恢复且极不稳定^[25]。

表 2 为超声处理后豌豆淀粉的 Power-law 拟合数据, R^2 值接近于 1,说明幂函数能较好地对接淀粉糊流变曲线进行描述;流体指数 $n < 1$,表征所有样品均具有假塑性流体特征^[26]。由表 2 可得,随着超声功率的增加,豌豆淀粉糊上、下行线稠度系数 k 均逐渐降低,流体指数 n 均逐渐增加,与聂卉等^[27]的研究结果一致。这可能是超声波功率增加导致能量累积,产生高声压及更多空化泡,从而进一步削弱了淀粉分子间的作用力,减少了淀粉分子链在运动过程中因相互

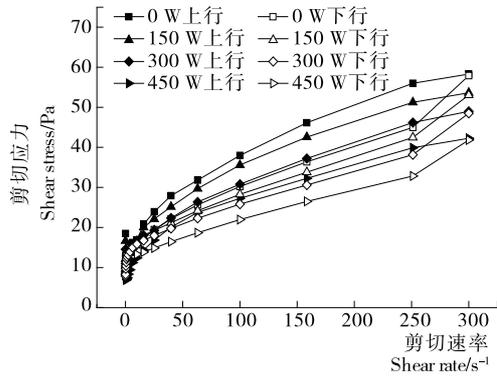


图2 超声处理后豌豆淀粉的静态剪切流变曲线
Figure 2 Flow curves of pea starch after ultrasound treatment

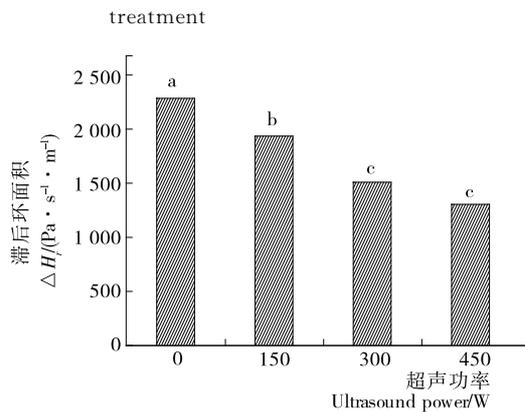


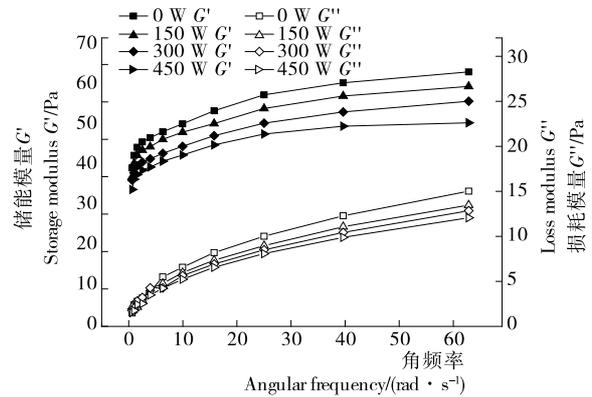
图3 超声处理后豌豆淀粉的滞后环面积柱状图
Figure 3 Hysteresis ring area histograms of pea starch after ultrasound treatment

表2 超声处理后豌豆淀粉流变曲线的幂定律拟合参数
Table 2 Power-law parameters for pea starch after ultrasound treatment

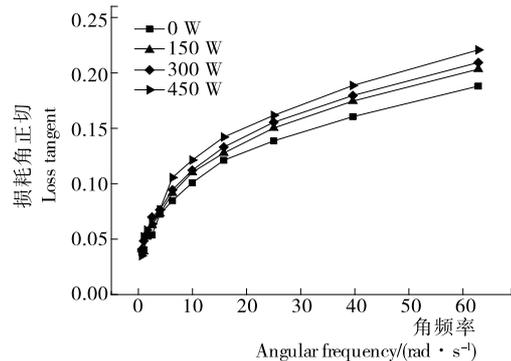
功率/ W	上行线			下行线		
	$k/(Pa \cdot s^n)$	n	R^2	$k/(Pa \cdot s^n)$	n	R^2
0	10.372	0.277	0.962	10.039	0.283	0.936
150	9.940	0.286	0.985	9.759	0.293	0.941
300	9.177	0.298	0.973	8.882	0.301	0.944
450	8.736	0.308	0.983	8.583	0.323	0.939

摩擦而产生的黏性阻力^[28],进而使淀粉糊黏稠度降低,流动性增强。

2.2.2 动态黏弹流变特性 储能模量 G' 又称弹性模量,表示材料因弹性形变而储存的能量,反映材料弹性大小;损耗模量 G'' 又称黏性模量,表示材料因抵抗弹性形变而损失的能量,反映材料黏性大小;损耗模量和储能模量的比值称为损耗角正切,反映材料黏性弹性比例, $\tan \delta > 1$ 时可判断为液体, $\tan \delta < 1$ 时可判断为凝胶。图4为超声处理后,豌豆淀粉的动态模量及 $\tan \delta$ 随角频率变化曲线。由图4可知,所有样品在扫描角频率内, G' 始终大于相应的 G'' , 并且 G' 和 G'' 随扫描角频率上升逐渐增加, $\tan \delta < 1$, 说明样品主要表现



(a) 豌豆淀粉糊的动态模量随角频率变化曲线



(b) 豌豆淀粉糊的 $\tan \delta$ 随角频率变化曲线

图4 超声处理后豌豆淀粉的动态黏弹流变曲线

Figure 4 Curves of dynamic viscoelastic rheological of pea starch after ultrasound treatment

为弹性性质且都为典型的弱凝胶结构^[29]。

由图4(a)可知,随着超声波功率的增加, G' 和 G'' 均呈下降趋势,说明在高频振动下,体系黏弹性降低,流动性增强,更加趋于牛顿流体^[30]。这可能是超声波作用使淀粉内部结晶结构及氢键遭到破坏,使淀粉凝胶内部网络结构变得松散,导致体系抵抗剪切力的能力下降,束缚介质以自由介质的形式被释放^[31-30],从而降低了体系黏弹性。随着超声波功率的增加,更多的空化作用和机械作用使体系的黏弹性进一步降低。此外,随着超声功率的增加,体系的 $\tan \delta$ 呈上升趋势[图4(b)],其反映在 G' 和 G'' 上则为 G'' 的降低幅度小于 G' , 即超声作用对豌豆淀粉体系黏性的影响高于对弹性的影响。这可能是超声波产生的高频剪切振动作用及射流力场作用弱化了淀粉凝胶的交界区,即破坏了淀粉分子间的氢键,减少了分子间的缠结点,最终使得体系形成脆弱的网络结构或更趋向于流动性较强的液体。而豌豆淀粉本身形成的弱凝胶结构弹性较小,受到超声破坏作用后,降低幅度较小。

2.3 超声处理对豌豆淀粉质构特性的影响

淀粉糊化后,淀粉分子重新排列并以氢键相互聚合,破碎的淀粉颗粒包裹在直链淀粉网络结构中,形成具有一定弹性和强度的胶体,即凝胶。表3为超声波处理后,豌豆淀粉凝胶质构特性的参数,由表3可知,随着超声功率的增加,豌豆淀粉凝胶的硬度、弹性、内聚性、胶着性和咀嚼性都呈下降趋势。其中,硬度与胶着性下降最为显著。研究^[32]表明,淀粉凝胶硬度与淀粉分子的双螺旋结构有关,网络结构越紧密,

表 3 超声处理后豌豆淀粉的质构参数[†]

Table 3 Parameters of texture profile of pea starch after ultrasound treatment

功率/W	硬度/g	弹性/mm	内聚性/g	咀嚼性	胶着性
0	88.00±3.46 ^a	13.72±0.23 ^a	0.45±0.02 ^a	4.23±0.19 ^a	39.84±0.49 ^a
150	80.00±2.00 ^b	13.42±0.10 ^b	0.34±0.02 ^b	3.16±0.24 ^b	26.94±0.59 ^b
300	70.67±2.08 ^c	13.31±0.11 ^{bc}	0.29±0.01 ^c	1.86±0.06 ^c	20.47±0.13 ^c
450	57.33±3.79 ^d	13.05±0.17 ^c	0.25±0.01 ^d	1.25±0.09 ^d	15.04±0.79 ^d

[†] 同列数据中不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

淀粉凝胶的硬度越大。因此,超声作用破坏了豌豆淀粉凝胶体系内部网络结构,阻滞了淀粉分子间的交联聚合作用,使淀粉凝胶硬度降低,可适用于软胶囊^[33]的开发。胶着性可模拟表示半固态样品的黏性特征,其与硬度、内聚性呈正相关^[34-35]。因此,超声作用使样品的黏性显著降低,这在商业应用中是有益的,因为黏性较高的凝胶会粘在牙齿或上颚上,这是消费者所不能接受的^[36]。

弹性和内聚性与淀粉内部网络结构的紧密程度呈正相关,咀嚼性则反映了淀粉的综合性^[37]。可能是超声波作用使溶剂分子运动加快,淀粉分子间聚合重排减少,从而导致淀粉分子间网络结构不稳定、不紧密。随着超声波功率的增加,淀粉凝胶 TPA 特征值进一步下降,在 450 W 时,淀粉凝胶具有最低的硬度、内聚性、胶着性、咀嚼性与弹性,有利于改善多种配方食品的基本质地^[38]。

2.4 超声处理对豌豆淀粉微观结构的影响

由图 5(a)可知,豌豆原淀粉颗粒呈卵型或不规则的球形,其表面光滑,颗粒结构完整。

由图 5(b)可得,经 150 W 超声处理后,豌豆淀粉颗粒的整体结构保持完整,但其表面变得粗糙、不平滑。说明超声作用破坏了淀粉颗粒表层结晶结构,使淀粉降解^{[31]18-21}。这可能是超声波处理后,豌豆淀粉糊的黏度、崩解值降低,流动性增强,形成凝胶后硬度降低的根本原因。

由图 5(c)可得,经 300 W 超声处理后,豌豆淀粉颗粒的

整体结构依然保持完整,但其表面出现较大的凹陷与坑洞,部分淀粉颗粒边缘不完整。这是因为随着超声功率加强,更多的空化泡在淀粉颗粒周围瞬间塌陷,进一步破坏淀粉颗粒表面结构,使豌豆淀粉的黏度、崩解值等进一步降低,体系流动性进一步增强。

由图 5(d)可得,经 450 W 超声处理后,颗粒受侵蚀程度加深,其表面出现非常大的凹陷与坑洞,部分淀粉颗粒发生破裂及断裂,几乎所有淀粉颗粒表面都呈现粗糙与不光滑。这是因为在高频率的超声作用下,更高强度的机械作用及空化效应使淀粉表层结晶结构被破坏程度加深,淀粉颗粒结构变得不完整。这可能是超声处理可促进淀粉化学反应活性提高的根本原因。

3 结论

超声波处理能明显降低豌豆淀粉的糊化黏度,提高淀粉热稳定性及冷稳定性,抑制淀粉老化回生。此外,超声波作用可提高体系流动性,减小触变性,降低黏弹性,增强了豌豆淀粉糊的稳定性。同时,超声处理显著降低了豌豆淀粉凝胶的硬度及胶着性,但对其弹性的影响较小,可应用于需要改善豌豆淀粉硬度而保留其弹性的情况。随着超声波功率的增加,效果更明显。因此,应用超声处理对豌豆淀粉进行改性研究,有利于豌豆改性淀粉产品的开发,但淀粉常处于酸、盐等食品体系中进行生产加工,对于不同体系中超声处理对豌豆淀粉性质的影响还需要进行进一步的研究,为该类产品开发的开发提供更多参数。

参考文献

- [1] 张燕鹏, 庄坤, 丁文平, 等. 豌豆淀粉与马铃薯淀粉、玉米淀粉理化性质比较[J]. 食品工业科技, 2016(4): 183-186.
- [2] 张根生, 孙静, 岳晓霞, 等. 马铃薯淀粉的物化性质研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(5): 22-25.
- [3] 张正茂, 王志华, 颜永斌. 不同来源淀粉的糊化特性研究[J]. 食品工业, 2016, 37(6): 141-145.
- [4] GUO Ze-bin, ZENG Shao-xiao, ZHANG Yi, et al. The effects of ultra-high pressure on the structural, rheological and retrogradation properties of lotus seed starch[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 285-291.
- [5] 周慧, 谢涛, 蒋朝晖, 等. 有机酸-湿热复合处理土豆抗性淀粉的结构特性[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 9-12.
- [6] 张志华. 超声波处理对淀粉结构与性质的影响研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2012.
- [7] POVEY M J W, MCCLEMENTSD J. Ultrasonics in food engi-

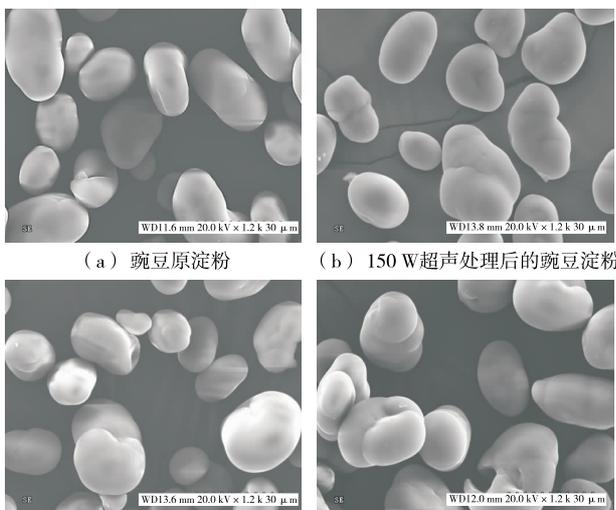


图 5 超声处理后豌豆淀粉的微观结构图

Figure 5 The granular microstructures of pea starch after ultrasound treatment

- neering part I: introduction and experimental methods [J]. *Journal of Food Engineering*, 1988, 8(4): 217-245.
- [8] 付陈梅, 赵国华, 阚建全, 等. 超声波对淀粉降解及其性质影响[J]. *粮食与油脂*, 2002(12): 31-32.
- [9] GARCIA-ÁLVAREZ J, SALAZAR J, ROSELL C M. Ultrasonic study of wheat flour properties[J]. *Ultrasonics*, 2010, 51(2): 223-228.
- [10] SUJKA M, JAMROZ J. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 31(2): 413-439.
- [11] HU Ai-jun, LI Li, ZHENG Jie, et al. Different-frequency ultrasonic effects on properties and structure of corn starch[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(14): 2 929-2 934.
- [12] 孟欣. 豌豆淀粉的超声改性研究及产品开发[D]. 天津: 天津科技大学, 2015: 2-44.
- [13] 陈洁, 郭泽斌, 刘贵珍, 等. 超声波处理木薯淀粉对其流变特性的影响[J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2013(1): 86-92.
- [14] WANG Ya-jane, TRUONG V D, WANG Lin-feng. Structures and rheological properties of corn starch as affected by acid hydrolysis[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 52(3): 327-333.
- [15] YANG Jia-ning, XIE Feng-wei, WEN Wen-qiang, et al. Understanding the structural features of high-amylose maize starch through hydrothermal treatment[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 84: 268-274.
- [16] 马晓东, 钟浩. 马铃薯淀粉的研究及在工业中的应用[J]. *农产品加工*, 2008(2): 59-61.
- [17] 侯蕾, 韩小贤, 郑学玲, 等. 不同直链淀粉含量玉米淀粉研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2013, 26(6): 11-14.
- [18] XING Jun-jie, LI Dong, WANG Li-jun, et al. Temperature thresholds and time-temperature dependence of gelatinization for heat-moisture treated corn starch[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 217: 43-49.
- [19] 谢友均, 陈小波, 马昆林, 等. 粉煤灰对水泥浆体的剪切变稀和剪切增稠作用[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(8): 1 040-1 046.
- [20] CHEN Pei, YU Long, KEALY T, et al. Phase transition of starch granules observed by microscope under shearless and shear conditions[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 68(3): 495-501.
- [21] CHEN Bing-yan, GUO Ze-bin, ZENG Shao-xiao, et al. Paste structure and rheological properties of lotus seed starch-glycerin monostearate complexes formed by high-pressure homogenization[J]. *Food Research International*, 2018, 103: 380-389.
- [22] OSORIO O, MARTINEZ-NAVARRETE N, MORAGA G, et al. Effect of thermal treatment on enzymatic activity and rheological and sensory propertie of strawberry purees[J]. *Food Science and Technology International*, 2008, 14(5): 103-108.
- [23] 朱巧巧. 超声波处理对锥栗淀粉性质的影响及多孔淀粉的制备[D]. 福州: 福建农林大学, 2015: 19-27.
- [24] 高凌云, 张本山. 西米淀粉糊流变特性研究[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(2): 83-85, 88.
- [25] 董贝贝. 八种淀粉糊化和流变特性及其与凝胶特性的关系[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017: 19-24.
- [26] SUKRITI S, MANINDER K. Steady and dynamic shear rheology of starches from different oat cultivars in relation to their physicochemical and structural properties [J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(12): 3 282-3 294.
- [27] 聂卉, 李辰, 陈雨, 等. 超声处理对马铃薯淀粉糊流体性质和表观黏度的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(15): 19-24.
- [28] VALERO M, RECROSIO N, SAURA D, et al. Effects of ultrasonic treatments in orange juice processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(2): 509-516.
- [29] MCCANN T H, FABRE F, LI Day. Microstructure, rheology and storage stability of low-fat yoghurt structured by carrot cell wall particles[J]. *Food Research Internatinal*, 2011, 44(4): 884-892.
- [30] 曾瑞琪, 张明政, 张甫生, 等. 高酯果胶对酸化大豆蛋白凝胶演变及质构特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2008, 44(1): 115-122.
- [31] 赵奕玲. 超声处理对淀粉性能的影响及磷酸酯淀粉的制备与应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [32] SHAHSAVANI M L, RAFA A, SADEGHIAN A, et al. Effects of high amylose corn starch and microbial transglutaminase on the textural and microstructural properties of wheat flour composite gels at high temperatures [J]. *Journal of Texture Studies*, 2017, 48(6): 624-632.
- [33] GAO Zhi-hong, ISHIHARA S, NAKAO S, et al. Texture evaluation of soft gels with different fracture strains using an artificial tongue[J]. *Journal of Texture Studies*, 2016, 47(6): 496-503.
- [34] 陶春生, 王克俭, 陈存社. 压延的压力对小麦面条品质的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2016, 34(5): 84-88.
- [35] 韩小苗, 罗庆, 吴苏喜. 3种鲜藕的质构特性及风味物质测定与评价[J]. *食品与机械*, 2017, 33(9): 64-68.
- [36] HERCEG I L, JAMBRAK A R, ŠUBARIĆ D, et al. Texture and pasting properties of ultrasonically treated corn starch[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2010, 28(2): 83-93.
- [37] 周虹先. 盐对淀粉糊化及老化特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014: 47-48.
- [38] NIE Hui, LI Chen, LIU Pei-hua, et al. Retrogradation, gel texture properties, intrinsic viscosity and degradation mechanism of potato starch paste under ultrasonic irradiation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.08.035.