DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.19.006

超声波处理对糙米淀粉结构与理化性质的影响

梁云浩,王周利,蔡瑞,岳田利,袁亚宏,崔璐*
(西北农林科技大学 食品科学与工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘　要:该文讨论不同超声时间处理下糙米淀粉的结构特征与理化性质,分析糙米淀粉的表观与晶体结构,以及流变学、热力学、透光率、析水率和凝沉性等理化性质,以期为糙米淀粉在超声波食品加工中的应用提供理论依据。结果表明:延长超声处理时间会加重糙米淀粉表观结构的受损程度,但不会改变粒径大小,超声波处理不会改变糙米淀粉晶型,但是显著影响其结晶性质($p<0.05$),处理 30 min 时结晶度达到最大(12.60%±0.08%),随后降低至与对照组(未经超声处理的糙米淀粉)无显著差异。糙米淀粉储能模量(G′)与损耗模量(G″)经超声处理后低于对照组,表现为黏弹性降低。随着超声处理时间延长,淀粉的糊化焓值 ΔH_g 从(6.88±0.51) J/g 降低至(1.36±0.27) J/g(40 min),随后升高至(7.88±0.32) J/g(50 min)。另外经过超声处理,淀粉糊的透光率由(0.52±0.04)%降低至(0.23±0.02)%(40 min),随后又升高至(0.46±0.02)%(50 min),超声处理 30 min 时,糙米淀粉的冻融与凝沉稳定性最好,冻融析水率为(43.51±3.06)%,凝沉沉淀占比为(56.00±1.89)%。研究表明,超声显著影响糙米淀粉的结构特征与理化性质($p<0.05$),适度的超声处理可以赋予糙米淀粉产品更好的加工特性与感官品质。

关键词:糙米;淀粉;超声波;结构特征;理化性质

Effect of Ultrasonic Treatment on the Structural Characteristics and Physicochemical Properties of Brown Rice Starch

LIANG Yun-hao, WANG Zhou-li, CAI Rui, YUE Tian-li, YUAN Ya-hong, CUI Lu*
(College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: This study investigated the structural characteristics and physicochemical properties of brown rice starch ultrasonically treated for different durations. The apparent and crystal structures of brown rice starch as well as their physicochemical properties, such as rheology, thermodynamics, light transmittance, water precipitation and coagulation, were mainly analyzed to provide a theoretical basis for the application of brown rice starch in ultrasonic food processing. The results suggested that prolonging ultrasonic treatment time could increase the degree of damage to the morphology of brown rice starch particles. However, no change in particle size was observed. Additionally, ultrasonic treatment did not change the crystalline form of brown rice starch, but it significantly affected its crystalline properties ($p<0.05$). The crystallinity of brown rice starch reached a maximum percentage of (12.60±0.08)% after 30 min of treatment, following which it decreased to a percentage that did not differ significantly from that of the control group (i.e., brown rice starch not treated ultrasonically). Moreover, the storage modulus (G′) and loss modulus (G″) of brown rice starch after ultrasonic treatment were lower than those of the control group, indicating a decrease in viscoelasticity. With the extension of treatment time to 40 min and 50 min, gelatinization enthalpy decreased from (6.88±0.51) J/g to (1.36±0.27) J/g (40 min), and then increased to(7.88±0.32) J/g(50 min), respectively. Furthermore, the transmittance of the starch paste decreased from (0.52±0.04)% to (0.23±0.02)% (40 min), and then increased to (0.46±0.02)% (50 min)after

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2019NY-107)
作者简介:梁云浩(1998—),男(汉),硕士研究生,研究方向:农产品加工与质量安全。
* 通信作者:崔璐(1981—),女,高级实验师,博士,研究方向:农产品加工与质量安全检测。

ultrasonic treatment for 40 min and 50 min, respectively. After ultrasonic treatment for 30 min, the freeze-thaw and coagulation stability of brown rice starch was the most optimal, water precipitation rate was(43.51±3.06)%, and the proportion of precipitation was (56.00±1.89)%. Collectively, these results showed that the structural characteristics and physicochemical properties of brown rice starch were significantly affected by ultrasonic treatment (p<0.05); appropriate ultrasonic treatment may result in the development of brown rice starch products with improved processing characteristics and sensory quality.

Key words: brown rice; starch; ultrasonic; structural characteristics; physicochemical properties

引文格式:

梁云浩,王周利,蔡瑞,等.超声波处理对糙米淀粉结构与理化性质的影响[J].食品研究与开发,2021,42(19):36-43.

LIANG Yunhao, WANG Zhouli, CAI Rui, et al. Effect of Ultrasonic Treatment on the Structural Characteristics and Physicochemical Properties of Brown Rice Starch[J]. Food Research and Development,2021,42(19):36-43.

糙米是脱壳后的稻谷没有经过加工处理而直接获得的全谷物米粒,由胚芽、胚乳和米糠层组成。与精米相比,糙米极大地保留了稻米的营养物质。除蛋白质、脂肪、维生素和无机盐以外,糙米还含有很多精米中不具备的功能因子,如膳食纤维、谷胱甘肽、γ-氨基丁酸、二十八烷醇和肌醇等,其具有调节血糖血脂、提高免疫力与抗氧化等作用,具有预防胃肠与心脑血管疾病的功能[1-2]。

淀粉是高等植物的主要成分,也是人体能量的重要来源。其具有胶凝性、增稠性以及改善食品质构等多种功能,在食品工业中被广泛用作填充剂、交联剂和稳定剂等[3]。随着主粮工业化的发展和消费者对健康问题的日益关注,近年来糙米淀粉的需求量也逐渐增大。改性是淀粉得以广泛使用的关键步骤,其中物理改性以其副产物少、无化学残留、环境友好的特点备受关注。目前常用的物理改性方法有高压、球磨、辐照、微波、超声波、湿热处理等[4],其中超声波技术具有绿色高效、安全易控和成本低的特点,近年来被广泛地应用于淀粉的物理改性领域。目前,国内外有许多关于超声波处理淀粉并影响其理化性质与结构特征的研究,Zhu 等[5]研究发现超声波处理会在马铃薯淀粉颗粒表面形成凹陷,并对淀粉结晶区造成影响,但不会改变晶体构型。罗志刚等[6]研究发现超声波处理可以降低玉米淀粉的糊化焓值和糊化温度范围。Hu 等[7]研究了不同频率超声波处理对玉米淀粉结构与理化性质的影响,结果发现,超声波能显著改变淀粉的热稳定性、回生性和凝胶性,并降低其峰值黏度。王宏伟等[8]研究发现,超声波处理可以破坏小麦淀粉的颗粒结构和结晶结构,并且随着超声时间延长,淀粉聚集态的无序化程度更加明显。

超声波产生的空化效应是引起聚合物材料性质改变的主要原因。声波空化导致液体中气泡快速生成并破裂,在短时间内产生局部的高温高压,气泡破裂产生的剪切力可能会破坏材料分子的共价键,影响不同链间相互作用并破坏淀粉颗粒的晶体结构,从而影响糊化性能,达到改性目的[9-10]。研究表明,关于超声效果的大多数讨论都是在淀粉溶液中进行的,超声波处理会根据作用时间、温度、功率、频率的差异,以不同方式影响淀粉的理化性质[11]。超声波方法为糙米淀粉的加工提供了一种新的思路。本研究主要是以超声波物理改性方式为核心,通过研究不同超声波处理时间对糙米淀粉的表观与晶体结构特征,以及对淀粉糊的流变学特性、透光率、析水率和凝沉性等理化性质的影响,揭示超声波处理糙米淀粉分子机制,旨在为促进糙米及其淀粉加工产业的发展提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

有机糙米:北京和雅堂食品有限公司;无水乙醇(分析纯):四川西陇科学有限公司。

1.2 仪器与设备

FW-400AD 高速万能粉碎机:天津鑫博得仪器有限公司;SBL-30DTY 超声波恒温清洗机: 宁波新芝生物科技股份有限公司;HC-3018R 高速冷冻离心机:安徽中科中佳科学仪器有限公司;S-3400N 扫描电子显微镜:日本日立公司;DHR-1 旋转流变仪、Q2000 差示扫描量热仪: 美国 Waters 公司;D8 ADVANCE A25 X 射线衍射仪:德国布鲁克公司。

1.3 方法

1.3.1 糙米淀粉的制备与超声处理

采用 Park 等[11]糙米淀粉制备方法并加以修改。用粉碎机将糙米粒磨粉，用 3 倍质量的去离子水浸泡 24 h，振荡提取 4 h，在 4 000 r/min 下离心 20 min，去除上清液并刮掉沉淀表层黄色杂质。加入去离子水清洗，涡旋振荡，在 4 000 r/min 下离心 5 min 并取沉淀，重复清洗步骤 3 次。然后使用无水乙醇清洗 1 次，操作同上。最后收集沉淀于 40 ℃下干燥 12 h 得到糙米淀粉。

参考李杨[12]的方法进行超声处理。准确称取 20 g 糙米淀粉于烧杯中，加入一定量的去离子水制备浓度为 10%的淀粉乳，搅拌均匀，静置 12 h 使其充分溶胀。之后将淀粉乳置于槽式超声波反应器（25 ℃，33 kHz）中处理 10、20、30、40、50 min，以未经超声处理的糙米淀粉作为对照。超声处理结束后离心并取沉淀于 40 ℃下干燥 12 h，粉碎研磨装入自封袋内保存待测。

1.3.2 淀粉颗粒表观结构

参照赵佳[13]的方法。待测样品经过干燥后，均匀分布在粘有导电双面胶的样品台上，喷金固定。在放大倍数 3 000 倍，加速电压 5.00 kV 条件下，使用扫描电子显微镜下拍摄具有代表性的淀粉颗粒形貌。

1.3.3 结晶性质测定

参考刘星等[14]方法，采用 X 射线衍射仪进行测试。测试条件为管压 40 kV，管流 40 mA，衍射角 2θ 为 5°~50°，扫描速率 6°/min，步长为 0.02°。采用 Jade6.0 软件对数据进行分析，图谱经平滑后，计算结晶区的面积占比，得到糙米淀粉的相对结晶度[15]。

相对结晶度/%=衍射峰面积/总面积×100

1.3.4 动态流变学性质测定

称取一定量的淀粉置于烧杯中，加入蒸馏水配成 6%的淀粉乳，95 ℃水浴 30 min，不断搅拌使其充分糊化，糊化完成后冷却至 25 ℃。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 ℃，扫描应变值为 1%，测定振荡频率为 0.1 Hz~10 Hz 内储能模量（G′）、损耗模量（G″）、损耗角正切值（tanδ）随角频率变化的情况，以此反映糙米淀粉样品的黏弹性[16-17]。

1.3.5 淀粉糊的热力学性质测定

准确称取糙米淀粉 0.3 mg（以干基计）于铝坩埚中，按 1:3（g/mL）加入蒸馏水并压片，平衡过夜，以空坩埚为对照进行测定。设定程序：起始温度 20 ℃，升温速率 10 ℃/min，终止温度 120 ℃。使用 TA60 软件对所得结果进行分析，获得糙米淀粉的起始糊化温度 T_o、峰值温度 T_p、终止温度 T_c 和糊化焓值 ΔH_g[12]。

1.3.6 透光率、析水率与凝沉性测定

1）透光率：准确称取一定质量的淀粉样品，加入蒸馏水配制成浓度为 1%的悬浮液，于 95 ℃水浴 30 min，不断搅拌使其充分糊化。糊化结束后取出冷却，以蒸馏水作为空白，在 640 nm 波长下测定淀粉糊的透光率[18]。

2）析水率：准确称取一定质量的淀粉样品，加入蒸馏水配制成浓度为 6%的悬浮液。于 95 ℃下水浴 30 min，然后称取一定质量冷却后的样品装入离心管。在-18℃下冷冻 24 h，常温下解冻和平衡，于 6 000 r/min 下离心 15 min，弃去上清液后称取沉淀物的质量。反复冻融 5 次并测定析水率[19]。

3）凝沉性：准确称取一定质量的淀粉样品，加入蒸馏水配制成浓度为 1%的悬浮液，置于 90 ℃水浴中糊化 30 min。糊化结束后取出冷却至室温 25 ℃，倒入 15 mL 试管中常温（25 ℃）下静置，每隔 12 h 记录 1 次淀粉糊上清液体积（前 12 h 每隔 2 h 记录 1 次），以上清液体积占总体积的百分比随时间的变化情况来反映淀粉的凝沉性质。

1.4 数据处理

每个样品平行测定 3 次，使用 Excel 2016、Origin 2017 和 SPSS 20 软件对试验数据进行处理和统计分析。

2 结果与讨论

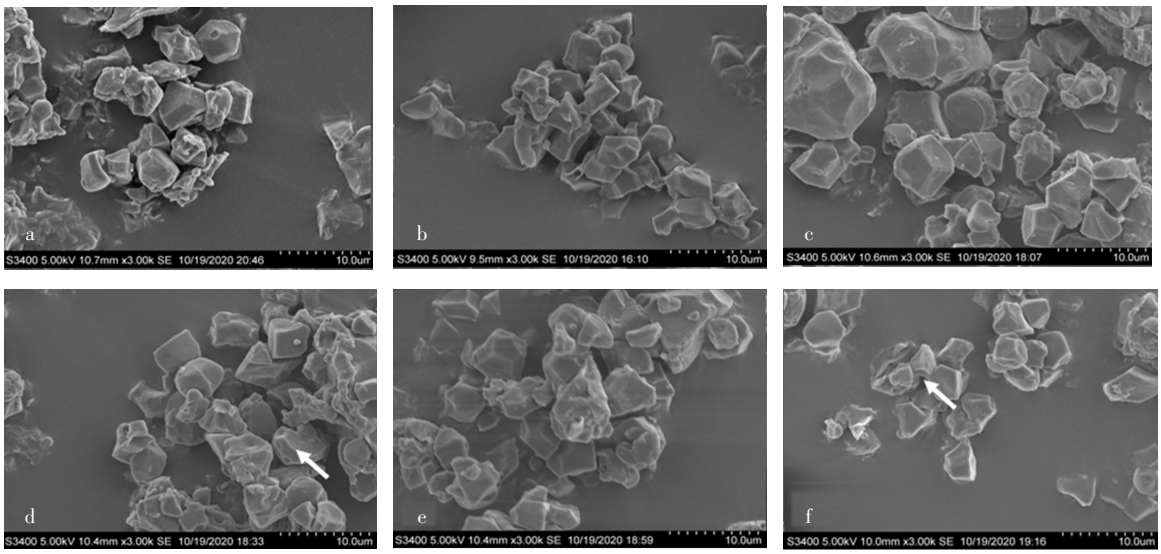
2.1 糙米淀粉的表观结构

不同超声时间处理下糙米淀粉的扫描电镜图见图 1。

由图 1a 可知，未经超声处理的糙米淀粉颗粒表面较为光滑，呈现不规则多面体结构，大小不一，侧面有凹坑[20]。与对照组相比，超声处理 30 min 后，糙米淀粉表面出现小孔与凹陷，随着超声时间进一步延长，糙米淀粉的多面体结构破坏程度更加明显，颗粒表面出现缺口（图 1f）。这是因为当超声波作用于淀粉溶液时，其空化产生的气泡快速生成和破裂，产生高剪切力从而导致糙米淀粉颗粒受损[15]。并且随着超声时间的梯度延长，这种机械损伤的程度增加，但颗粒形状与大小未发生明显变化。

2.2 糙米淀粉的结晶性质

淀粉是天然结晶高聚物，当分子规律性排列时形成结晶区，而排列杂乱的分子则形成非晶区。在对结果进行分析时，X 射线衍射（X-ray diffraction，XRD）谱图中出现尖峰，则说明有结晶结构，出现钝峰则是非晶结构[21]。因此，一般通过对比 XRD 谱图中的结晶区和非晶区特征的强度、比例及变化趋势来表征淀粉颗粒的晶体性质。



a.对照组;b~f 分别为超声处理 10、20、30、40、50 min 的糙米淀粉。

图 1　不同超声时间处理下糙米淀粉的扫描电镜图(×3 000)

Fig.1　Scanning electron microscopy of brown rice starch treated with different ultrasonic time (×3 000)

图 2 为不同超声时间处理下的糙米淀粉样品的 XRD 谱图。

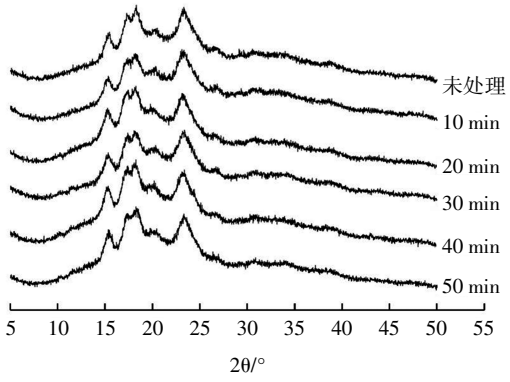


图 2　不同超声时间处理下糙米淀粉的 XRD 谱图

Fig.2　XRD patterns of brown rice starch treated with different ultrasonic time

糙米淀粉在 15°、17°、18°、23°处的衍射特征明显,其中在 15°和 23°明显出峰,在 17°和 18°附近出现相距较近的双峰,可以判断糙米淀粉为 A 型晶体结构[11]。A 型晶体结构比较紧密,在食品加工过程中水分子不易进入结晶区,因此具有较高的稳定性[8]。

XRD 结果显示衍射峰越强,说明其结晶性越强[22]。经过处理后衍射峰变得光滑,说明晶体结构遭到了破坏,结晶区发生改变。从 XRD 谱图来看,超声处理并没有改变糙米淀粉的晶体类型,即超声处理前后均为 A 型,这与 Hu 等[3]采用超声处理马铃薯淀粉和小米淀粉的研究结果一致。然而经超声处理后结晶度发生了明显改变。据研究,淀粉中的直链分子通过氢键作用可以形成双螺旋结构,这一点反映在淀粉的结晶度上[23]。不同超声时间处理下糙米淀粉的相对结晶度与透光率见表 1。

表 1　不同超声时间处理下糙米淀粉的相对结晶度与透光率

Table 1　Relative crystallinity and light transmittance of brown rice starch treated with different ultrasonic time

条件	相对结晶度/%	透光率/%
对照组	10.96 ± 0.18^{bc}	0.52 ± 0.04^{a}
10 min	11.27 ± 0.90^{bc}	0.41 ± 0.03^{b}
20 min	11.73 ± 0.05^{ab}	0.29 ± 0.03^{c}
30 min	12.60 ± 0.08^{a}	0.25 ± 0.01^{c}
40 min	11.21 ± 0.34^{bc}	0.23 ± 0.02^{c}
50 min	10.64 ± 0.13^{c}	0.46 ± 0.02^{ab}

注:同一列不同小写字母表示不同数据之间具有显著性差异,$p<0.05$。

如表 1 所示,经过超声处理的糙米淀粉相对结晶度在 11%左右,与对照组相比,经过超声处理后的淀粉相对结晶度有所增加,这可能是由于超声作用使得短链分子相互作用,晶体间距缩小,使得晶体结构更加紧密。随着超声时间进一步增加到 40 min 时,淀粉相对结晶度呈现出减小的趋势,这可能是因为长时间的声波空化作用,淀粉晶体受到一定程度的破坏,淀粉的无定形结构有所增加,分子自由度增加,从而导致相对结晶度降低[24-25]。本研究结果与杨梦恬等[26]和张奎亮等[27]研究超声处理对糯米和马铃薯淀粉结晶度影响结果一致。

2.3　糙米淀粉的透光率

光线通过淀粉糊时会发生透射、折射等一系列光

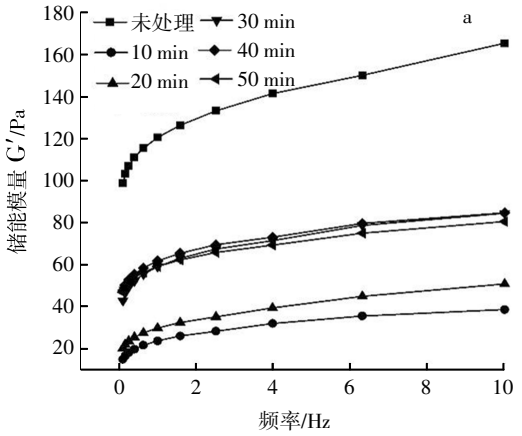
学现象，而当对淀粉施加不同的理化处理后，淀粉糊中的淀粉颗粒和分子状态会发生改变，导致在光线照射下的光学反应不同[32]。淀粉糊的光学反应特征通常以透光率来表示，膨胀颗粒尺寸越大，直链淀粉含量越多，透光率越高。合理控制淀粉糊的透光率可以赋予淀粉基食品特殊的感官品质，以满足消费者对产品的需求。

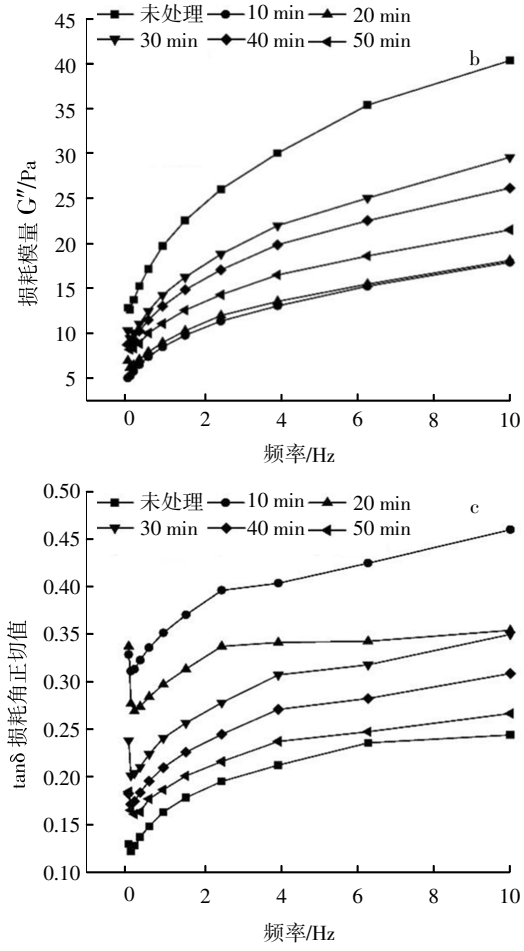
超声波处理影响淀粉的透光率主要是由于淀粉的结晶区受到破坏，溶解度增大，淀粉分子更多地选择与水分子结合，而非淀粉分子之间相互作用。在这种情况下淀粉颗粒吸水膨胀，从而减弱光反射与折射，透光率提高。但是延长超声时间可能会使得淀粉颗粒团聚、透光率下降[25]。由表 1 可知，经过超声处理后，糙米淀粉的透光率由(0.52±0.04)%降低至(0.23±0.02)%(40 min)，继续延长超声时间，透光率上升至(0.46±0.02)%(50 min)，分析其降低的原因可能是超声导致淀粉颗粒发生聚合，淀粉分子之间在溶液中交联结合，不易展开。而随着超声时间进一步延长，超声空化作用使得分子断裂，从而更容易在水中分散，相应地透光率随之上升[27]。

2.4　糙米淀粉的动态流变学特性

研究常用储能模量 G′和损耗模量 G″来评估淀粉样品的动态流变学特性，G′可以用来衡量淀粉糊的弹性大小，G″用来表示淀粉糊的黏性大小[28]。图 3 反映了不同超声处理对糙米淀粉的动态流变学特性影响。

由图 3 可知，G′、G″和 tanδ 基本呈现随频率增加而增加的趋势，且 G′高于 G″，说明凝胶网络形成，结构较为稳固，凝胶特性以弹性为主[29]。由图 3a、图 3b 可知，与对照组相比，经过超声处理后的淀粉糊 G′与 G″均有所降低，这可能是由于超声处理使得淀粉结构变得松散，从而降低了其黏弹性。由图 3c 可知，tanδ 随着频率升高而升高，说明淀粉在高频范围下黏性比例增加，弹性比例降低，即在高频范围下糙米淀粉结构不稳定[17]。





a~c 分别表示储能模量(G′)、损耗模量(G″)和损耗角正切值(tanδ)随动态扫描频率的关系变化。

图 3　不同超声处理下糙米淀粉的动态流变学特性

Fig.3　Dynamic rheological properties of brown rice starch treated with different ultrasonic treatment

2.5　糙米淀粉的热力学性质

表 2 反映了经过不同超声时间处理后糙米淀粉的热力学性质。

表 2　不同超声时间处理下糙米淀粉的热力学特性

Table 2　Thermodynamic properties of brown rice starch treated with different ultrasonic time

组别	T_o/℃	T_p/℃	T_c/℃	ΔH_g/(J/g)
对照组	58.87±0.29^a	65.45±0.46^a	71.90±0.87^a	6.88±0.51^b
10 min	58.12±0.05^a	64.76±0.31^a	71.40±0.91^{ab}	5.97±0.83^b
20 min	62.06±4.64^a	65.73±1.16^a	72.47±1.07^a	6.82±0.20^b
30 min	57.57±0.03^a	64.08±0.02^a	70.84±0.57^{ab}	5.80±0.44^b
40 min	61.88±0.13^a	65.31±0.01^a	68.98±0.53^b	1.36±0.27^c
50 min	57.77±0.01^a	64.61±0.01^a	72.77±0.53^a	7.88±0.32^a

注：同一列不同小写字母表示不同数据之间具有显著性差异，$p<0.05$。

表 2 结果显示，经过超声处理后，糙米淀粉的 T_o、T_p 和 T_c 无显著变化，ΔH_g 随超声时间的延长整体上先

降低后升高。这种变化趋势与 Park 等[11]采用超声波处理糙米淀粉的热力学结果一致。双螺旋的破坏被认为是影响 ΔH_g 的主要原因[30],超声处理 40 min 后 ΔH_g 降低,说明存在于结晶区的一些双螺旋被破坏,在淀粉糊化的过程中不需要较多的热量裂解双螺旋结构,因此糊化焓 ΔH_g 减小[19],而 50 min 后焓值升高,可能是由于更大的链运动性导致了淀粉中的分子重排[31]。

2.6 糙米淀粉的析水率与凝沉性

受加工和运输条件限制,冷冻类食品常常应具备良好的冻融稳定性来抵抗冻融循环中所产生的析水问题,较低的冻融稳定性会导致食品失水严重,口感变差,营养损失。冻融稳定性反映了冷冻食品解冻后的脱水程度,可以用析水率来衡量,析水率越低,冻融稳定性越好[33]。不同超声时间处理下糙米淀粉的析水率和凝沉性见图 4。

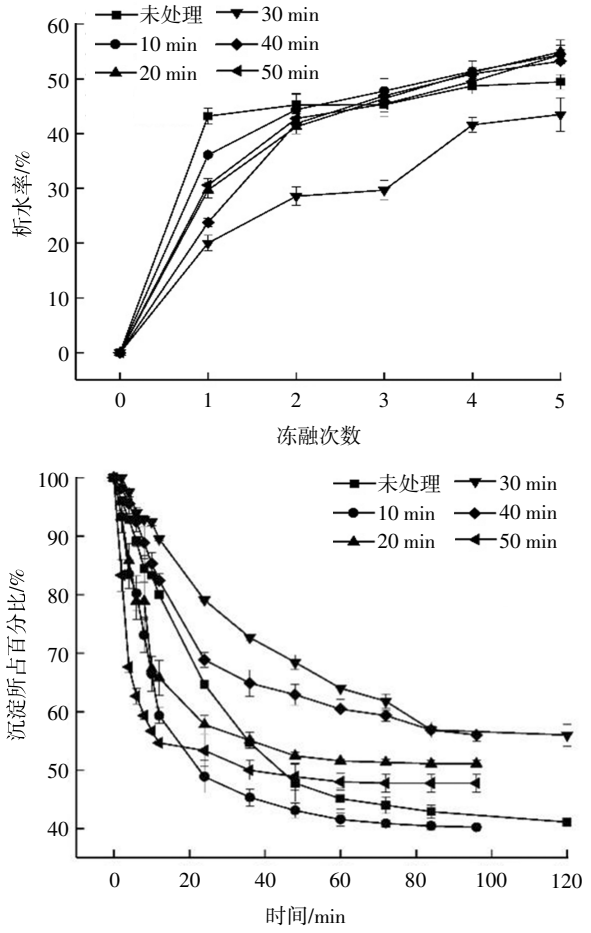


图 4 不同超声时间处理下糙米淀粉的析水率和凝沉性

Fig.4 Water setting rate and coagulability of brown rice starch treated with different ultrasonic time

由图 4 可知,冻融对淀粉糊具有脱水收缩的作用,不同超声时间处理后的糙米淀粉的析水率均随次数增加而增加,超声处理 30 min 后糙米淀粉的冻融析水率最低(43.51%±3.06%),稳定性最好,随着超声时间进一步延长至 50 min,析水率升高至(54.40±1.73)%,稳定性减弱,可能是由于超声波的空化作用使得大分子基团被破坏,共价键断开进而减小分子聚合度,导致直链淀粉的含量相对增加,而淀粉的冻融稳定性与直链淀粉含量成负相关[21]。因此,超声作用会使淀粉的冻融稳定性下降,这与张志华[25]的研究结果一致,此外本研究发现,适度的超声处理可以降低糙米淀粉的析水率,增强其冻融稳定性。

淀粉糊经过静置会发生凝沉现象,宏观上表现为出现浑浊和分层,在分子角度上解释为葡萄糖单元上的羟基之间形成氢键,淀粉分子重新聚集,分子链由无序回到有序状态[32]。如图 4 所示,不同时间处理组下,超声 30 min 凝沉稳定性最好,沉淀占比(56.00±1.89)%,随超声时间的延长,沉淀占比降低至(47.78±1.57)%(50 min),凝沉稳定性相应降低。

3 结论

本试验以糙米淀粉为原料,研究了不同超声时间处理对糙米淀粉的结构特征与理化性质的影响。在扫描电镜下观察发现,超声波处理可以对糙米淀粉表观结构造成损伤,在其表面形成凹陷,并且随着超声时间延长,对其破坏程度更加明显。通过 X-射线衍射结果分析发现,超声处理不会改变糙米淀粉的晶型,但随着超声时间延长,相对结晶度先升高后降低,处理 30 min 时相对结晶度达到最大(12.60±0.08)%,随后降低至与对照组无显著差异,这说明超声对淀粉结晶性质影响显著($p<0.05$)。研究发现,超声波处理可以降低糙米淀粉糊的储能模量(G′)与损耗模量(G″)从而降低其黏弹性,延长超声时间可以破坏淀粉结晶区的双螺旋结构使得淀粉糊化焓降低,因此超声处理影响了糙米淀粉的流变学与热力学性质。此外,适度的超声处理可以降低糙米淀粉糊的透光率和析水率,提高其冻融和凝沉稳定性。因此,合理使用超声波物理改性技术,可以有效影响糙米淀粉的结构与理化性质,为其在食品工业中的应用和普及提供新的思路与方法。

参考文献:

[1] 吕呈蔚, 岳玉兰, 王政, 等. 糙米营养价值及加工技术研究进展[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(6): 140-144.
LV Chengyu, YUE Yulan, WANG Zheng, et al. Research progress on the nutritional value and processing technology of brown rice[J]. Science and Technology of Cereals,Oils and Foods, 2020, 28(6): 140-144.

[2] 张卫华, 宋玉, 陶澍, 等. 发芽糙米即食粉滚筒干燥生产工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(4): 123-128.

ZHANG Weihua, SONG Yu, TAO Shu, et al. Study on drum drying production process of germinated brown rice instant powder[J]. Food Research and Development, 2021, 42(4): 123-128.

[3] HU A J, LI Y, ZHENG J. Dual-frequency ultrasonic effect on the structure and properties of starch with different size[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 106: 254-262.

[4] ZHU F. Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of cassava starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 122: 456-480.

[5] ZHU J, LI L, CHEN L, et al. Study on supramolecular structural changes of ultrasonic treated potato starch granules[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(1): 116-122.

[6] 罗志刚, 卢静静. 超声处理对玉米淀粉热性质的影响[J]. 现代食品科技, 2010, 26(7): 666-668,755.
LUO Zhigang, LU Jingjing. Effect of ultrasonic treatment on the thermal properties of maize starches[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(7): 666-668,755.

[7] HU A J, JIAO S T, ZHENG J, et al. Ultrasonic frequency effect on corn starch and its cavitation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 941-947.

[8] 王宏伟, 肖乃勇, 马颖. 超声处理时间对小麦淀粉聚集态结构及理化性能的影响[J]. 轻工学报, 2019, 34(5): 10-19.
WANG Hongwei, XIAO Naiyong, MA Ying. Effect of ultrasonic treatment time on aggregation structure and physicochemical properties of wheat starch[J]. Journal of Light Industry, 2019, 34(5): 10-19.

[9] MALLAKPOUR S, KHODADADZADEH L. Ultrasonic -assisted fabrication of starch/MWCNT-glucose nanocomposites for drug delivery[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 402-409.

[10] CAO M F, GAO Q Y. Effect of dual modification with ultrasonic and electric field on potato starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 150: 637-643.

[11] PARK D J, HAN J A. Quality controlling of brown rice by ultrasound treatment and its effect on isolated starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 137: 30-38.

[12] 李杨. 小米淀粉物理处理与物化性质的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
LI Yang. Physical treatments of millet starch and its physicochemical properties[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2019.

[13] 赵佳. 水—热处理对淀粉理化特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
ZHAO Jia. Effects of hydrothermal on the physicochemical properties of starches[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.

[14] 刘星, 范楷, 司文帅, 等. 谷粒湿热处理对薏仁米淀粉形态、结构与热特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 128-133.
LIU Xing, FAN Kai, SI Wenshuai, et al. Morphology, structure and thermal properties of starch from heat-moisture treated *Coix* seeds[J]. Food Science, 2018, 39(19): 128-133.

[15] WANG M, WU Y W, LIU Y G, et al. Effect of ultrasonic and microwave dual-treatment on the physicochemical properties of chestnut starch[J]. Polymers, 2020, 12(8): 1718.

[16] 刘敏, 赵欣, 阚建全, 等. 黄原胶对莲藕淀粉糊化性质及流变与质构特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 45-50.
LIU Min, ZHAO Xin, KAN Jianquan, et al. Effect of xanthan gum on pasting, rheological and texture properties of *Lotus* root starch[J]. Food Science, 2018, 39(6): 45-50.

[17] 李勇, 周文化, 李彦, 等. 板栗-小麦混合粉的流变学和热力学特性[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 1-5.
LI Yong, ZHOU Wenhua, LI Yan, et al. The rheological properties and thermal properties of chestnut-wheat blend[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(2): 1-5.

[18] 莫芳, 徐晓萍, 陶晓奇, 等. 高静压对木薯淀粉理化特性及结构的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 109-115.
MO Fang, XU Xiaoping, TAO Xiaoqi, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical properties and structure of cassava starch[J]. Food Science, 2018, 39(17): 109-115.

[19] 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.
ZHU Qiaoqiao. Study on effects of ultrasonic treatment on *Castanea henryi* starch properties and preparation of porous starch[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.

[20] 陶虹. 超声波预处理对糙米品质与萌芽性能的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
TAO Hong. Effects of ultrasound pretreatment on quality and germination of brown rice[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.

[21] 姚慧. 板栗抗性淀粉制备工艺及其特性与应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
YAO Hui. Preparation, physicochemical properties and application research of Chinese chestnut starch[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.

[22] 谢正飞. 镉大米中淀粉的分离及其改性淀粉的制备[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
XIE Zhengfei. Preparation and modification of the starch from cadmium-contaminated rice[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.

[23] 吴修利. 玉米淀粉修饰及其纳米颗粒制备与表征[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
WU Xiuli. Modification of corn starch and preparation and characterization of nanoparticles[D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[24] 闫巧珍, 高瑞雄, 侯传丽, 等. 超声波处理对马铃薯全粉理化性质和消化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(8): 105-110.
YAN Qiaozhen, GAO Ruixiong, HOU Chuanli, et al. The effect of ultrasonic on the physicochemical properties and digestibility of potato granules[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(8): 105-110.

[25] 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.
ZHANG Zhihua. Effect of ultrasonic treatment on structure and

properties of starch[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2012.

[26] 杨梦恬, 沈舒民, 沈圣泉, 等. 超声处理对糯米与非糯米淀粉结构和消化性的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 556-563.
YANG Mengtian, SHEN Shumin, SHEN Shengquan, et al. Effect of ultrasonic treatment on the granular structure and digestibility of waxy and non-waxy rice starches[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(3): 556-563.

[27] 张奎亮, 代养勇, 侯汉学, 等. 超声处理对马铃薯淀粉结构特性及理化性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(5): 128-134.
ZHANG Kuiliang, DAI Yangyong, HOU Hanxue, et al. Effect of ultrasonic treatment on structure and physicochemical properties of potato starch[J]. Food Science, 2018, 39(5): 128-134.

[28] 秦维. 不同制备方法对慈姑抗性淀粉结构及相关功能的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
QIN Wei. Influence on the structure and related functional characteristics of arrowhead(*Sagittaria sagittifolia* L.) resistant starch prepared by different methods[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.

[29] 莫紫梅. 糯米淀粉分子结构及其物化性质的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
MO Zimei. Study on molecular structure and physicochemical characteristics of glutinous rice starch[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.

[30] LIU H, BAO J G, DU Y M, et al. Effect of ultrasonic treatment on the biochemphysical properties of chitosan[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64(4): 553-559.

[31] RATNAYAKE W S, JACKSON D S. A new insight into the gelatinization process of native starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 67(4): 511-529.

[32] 苏伟娟. 阿拉伯胶对玉米淀粉功能性影响的研究及其应用[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2016.
SU Weijuan. Study on the effects of gum Arabic on the properties of corn starch and its applications[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2016.

[33] 周晚霞, 黎怡红, 陈炎, 等. 不同粒径小麦全粉的营养及加工特性比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 172-180.
ZHOU Wanxia, LI Yihong, CHEN Yan, et al. Comparison of nutrition and processing characteristics of whole wheat flours with different particle sizes[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(9): 172-180.

加工编辑:冯娜
收稿日期:2021-04-06