

# 微波处理对莲子淀粉理化性质的影响

陈秉彦, 郭泽镇, 许丽宾, 张帅, 郑宝东, 曾绍校

(福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002)

**摘要:** 为探讨微波处理对莲子淀粉的改性作用, 本文利用微波工作站对莲子淀粉进行加热处理, 观察预处理后的淀粉颗粒形态变化、后期糊化过程中直链淀粉溶出量和流变特性, 结果表明, 30%的莲子淀粉乳经不同微波功率处理后, 其颗粒形态未发生明显变化, 仍呈现光滑的椭球状; 随着微波功率的增强, 颗粒间出现了明显的聚集粘结行为, 颗粒的平均粒径最大值可达 26.37  $\mu\text{m}$ , 为原淀粉 2.15 倍, 同时淀粉颗粒晶区比例增大, 995/1024 吸收峰比值由 0.89 上升至 0.99; 经微波处理后的莲子淀粉, 其淀粉糊的直链淀粉溶出量由 120 mg/g 下降至 87.89 mg/g, 淀粉糊触变性、流变粘度及弹性模量也均有降低。这说明微波处理可促使莲子淀粉拥有更紧密的晶区结构, 并在后期的糊化过程中, 对淀粉颗粒膨胀可能起到了一定的抑制作用, 造成直链淀粉溶出量减少, 从而导致淀粉糊流变特性发生变化。

**关键词:** 莲子淀粉; 微波; 改性; 糊化; 流变特性

文章编号: 1673-9078(2015)3-213-219

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.3.036

## Effect of Physical and Chemical Properties of Lotus Seed Starch by Microwave Treatment

CHEN Bin-yan, GUO Ze-bin, XU Li-bing, ZHANG Shuai, ZHENG Bao-dong, ZENG Shao-xiao

(College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** In this study, physical and chemical properties of lotus seed starch by microwave treatment was investigated. Lotus seed starch paste (30%) was heated in a microwave station and changes in starch particle shape, the amount of dissolution, and rheological properties of amylose during gelatinization were observed. The result showed that after treatment with different microwave intensities, no apparent change in the shape of starch particles was observed, where the granules remained smooth and oval. However, apparent aggregation of starch particles was observed with the increase in microwave intensity, with maximum average particle diameter at 26.37  $\mu\text{m}$ , which was 2.15 times that of untreated starch. Additionally, the proportion of crystalline starch particles increased and the 995/1024 absorption peak ratio increased as well, from 0.89 to 0.99. Lotus seed starch treated by microwaves showed a decrease in amylose dissolution from 120 to 87.89 mg/g. Moreover, the thixotropic, rheology viscosity, and elasticity modulus of the starch paste also decreased. These indicate that microwave treatment could encourage tighter crystalline regions in the lotus seed starch and shows certain inhibition of swelling of the starch particles during subsequent gelatinization. This leads to a reduction in the amount of dissolution of amylose and changes in the rheological properties of starch.

**Key words:** lotus seed starch; microwave; modification; gelatinization; rheological properties

微波作为一种波长在 300 MHz~300 GHz 的高频电磁波, 是通过触发物料中极性基团的介电振动, 来达到快速加热的效果, 在食品加工领域中具有作用时间短, 产品质量高, 受热均匀等特点<sup>[1]</sup>。淀粉作为食品中重要的组成成分, 微波辐射是改变淀粉结构和性能的重要物理方法, 同时, 微波改性涉及到微波辐射与样品之间复杂的作用机理, 样品的水分含量, 微波

收稿日期: 2014-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31000804)

作者简介: 陈秉彦 (1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 淀粉化学

通讯作者: 曾绍校 (1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 淀粉化学及天然产物活性

功率以及不同种类淀粉样品间结构的差异均会影响微波作用时淀粉样品的介电性能。因此, 改变微波处理条件或淀粉种类, 淀粉性能可能会发生不同的变化, 目前, 国内外研究“微波效应”对淀粉的改性作用多集中在淀粉的糊化阶段, Palav 等研究了小麦淀粉的微波效应后发现, 淀粉糊化过程中的偏光十字消失与颗粒的膨胀具有异步性, 微波加热淀粉所产生的特性与微波快速升温及淀粉乳浓度密切相关<sup>[2]</sup>; Lewandowicz 等研究了微波辐射对各种植物来源淀粉改性的影响, 结果发现微波会引起分子结构的重排, 改变淀粉的吸水能力、溶解度和膨胀力等特性<sup>[3]</sup>。Xue 等发现微波辐射对淀粉结构的改性作用可能与其直链

淀粉含量有关,同时直链淀粉所在的无定形区受微波改性作用显著<sup>[4]</sup>;Cristina 研究表明,经微波处理相同时间,小麦淀粉的粘度是传统加热处理的 4 倍<sup>[5]</sup>。少数学者报道了非糊化阶段,微波预处理对糯质谷类淀粉结构的改性影响<sup>[6-7]</sup>,但研究结果各不相同,而对于直链淀粉含量较高的莲子淀粉目前尚未见相关报道。本文以直链淀粉含量较高的莲子淀粉为研究对象,探讨了微波处理(Microwave treatment, MW)对莲子淀粉改性作用的影响,其结果可为淀粉微波效应的进一步研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

速冻鲜莲:产自福建建宁,从福建闽江源绿田实业投资发展有限公司购得。

### 1.2 主要仪器设备

DS-200 高速组织捣碎机,江阴市保利科研机械有限公司;DHG-9140A 烘干箱,上海精宏设备有限公司;AL104 型精密分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;微波超声波联合反应工作站,北京鸿鹄仪器有限公司;UV-2000 型紫外可见分光光度计,尤尼柯(上海)仪器有限公司;XL30-ESEM 型电子扫描电镜,荷兰 PHILIPS 公司;MCR301 流变仪,奥地利安东帕公司;激光粒度分析仪,Master sizer 2000 型,英国 Malvern 公司;傅立叶中远红外光谱仪,德国布鲁克公司

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 莲子淀粉的制备

将置于常温下解冻后的鲜莲与蒸馏水按 1:3 液料比混合,打浆,浆液经 100 目食品级尼龙过滤布过滤后于常温(25 ℃)下静置 12 h,弃去上清液,下层沉淀用蒸馏水反复清洗数次至无色后,干燥(45 ℃, 16 h, 水分含量 10%),磨粉,过筛(100 目)后制的莲子淀粉,置于干燥器中备用。

#### 1.3.2 莲子淀粉微波处理

准确称取一定质量的莲子淀粉,加入蒸馏水配制成一定浓度的淀粉-水悬浮液,置于微波工作站中,设置不同的微波功率进行处理,温度设置为 65 ℃,处理时间为 5 min,处理后的样品经抽滤后,置于 45 ℃ 烘箱中烘干,磨粉,过筛(80 目)后自封袋密封,测其水分后于干燥器中备用。

处理参数:配制 30%的莲子淀粉乳,分别在 2.4

W/g、4.0 W/g、6.4 W/g、8.0 W/g 微波功率下加热至 65 ℃(莲子淀粉糊化温度为 70 ℃),处理 5 min;

对照组:以原淀粉为对照,配制 30%的莲子淀粉乳进行试验。

#### 1.3.3 莲子淀粉颗粒结构的观察

微波处理后的莲子淀粉表面结构用荷兰 XL30-ESEM 型电子扫描显微镜观察,并拍照,放大倍数为 2000 倍。

#### 1.3.4 莲子淀粉颗粒的粒径分析

称取一定量莲子的淀粉于 Malvern Master sizer 2000 激光粒度分析仪的样品池中,以蒸馏水为分散剂,开启超声波振荡 3 min,使淀粉颗粒分散均匀。当遮光率达到 15%时,测定粒度范围及分布,实验平行测定三次,取平均值。淀粉颗粒折射率:1.53,分散剂折射率:1.33。

#### 1.3.5 莲子淀粉颗粒的红外光谱分析

实验前将淀粉样品和溴化钾于 105 ℃烘箱中干燥至恒重,除去样品中的游离水或结晶水以消除水分子对吸收峰的干扰。分别称取 2 mg 淀粉样品置于玛瑙研钵中,加入 150 mg 干燥的溴化钾粉末,在红外灯下将二者研磨均匀,将粉末装入压片模具中抽真空压片成一薄片。采用德国布鲁克(Bruker)傅立叶中远红外光谱仪对不同淀粉样品进行扫描测定,扫描波长范围 400~4000  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数:16~32,分辨率:4  $\text{cm}^{-1}$

#### 1.3.6 莲子直链淀粉溶出量的测定

##### 1.3.6.1 莲子淀粉的糊化

分别称取 2 g 处理后的莲子淀粉与原淀粉,配成 4%的淀粉悬浊液置于 95 ℃水浴中,搅拌 20 min,使之完全糊化(莲子淀粉糊化温度为 72 ℃),糊化后的淀粉静置冷却至室温。

##### 1.3.6.2 直链淀粉溶出量的测定

莲子淀粉经脱脂,加热至完全糊化后,将淀粉糊搅拌均匀,用移液枪吸取 1 mL 淀粉糊于 10 mL 离心管中,加入 6 mL 蒸馏水稀释后,置于离心机中 2500 r/min 离心 5 min,吸取上清液 1 mL 于玻璃试管中,加入 4 mL 稀碘试剂搅匀于 620 nm 处测定其吸光值 A,并以直链淀粉为标品,制定标准曲线:

$$y = 1.2685 \times A - 0.0465, R^2 = 0.9865$$

$$\text{溶出量} = \frac{y \times 6 \times 50}{M (\text{淀粉总质量})}$$

#### 1.3.7 淀粉流变特性的测定

##### 1.3.7.1 剪切稀化的测定

选择锥形模具 CP50-2,设定相应的测定程序后,取少量淀粉糊于流变仪平板上,启动仪器,刮去多余

样品, 设置平板温度为 25 °C, 剪切速率 0~300 s<sup>-1</sup> 测定表观粘度 ( $\eta$ ) 随剪切速率 ( $\dot{\gamma}$ ) 的变化。

### 1.3.7.2 流变曲线及方程拟合

选择锥形模具 CP50-2, 设定相应的测定程序后, 取少量淀粉糊置于流变仪平板上, 启动仪器, 刮去多余的样品, 设置平板温度为 25 °C。测定样品剪切应力 ( $\tau$ ) 随剪切速率 ( $\dot{\gamma}$ ) 从 0~300 s<sup>-1</sup> 递增 (上行线), 再从 300~0 s<sup>-1</sup> 递减 (下行线) 过程中的变化。并采用 Herschel-Bulkley 方程 (如下所示) 对流变曲线进行模型拟合分析, 运用 Hysteresis Area 公式计算滞后面积。

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$$

注:  $\tau$  为剪切应力, Pa;  $\tau_0$  为屈服应力, Pa; K 为稠度系数, Pa s<sup>n</sup>;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率, s<sup>-1</sup>; n 为流动特征指数, 无量纲。

### 1.3.7.3 频率扫描

选择锥形模具 CP50-2, 设定相应的测定程序后, 取少量淀粉糊置于流变仪平板上, 启动仪器, 刮去多余的样品, 设置平板温度为 25 °C。以 10 rad/s 的角频率进行振幅扫描, 确定样品的线性粘弹区; 然后在线性粘弹区内选择合适的应变 ( $\gamma$ ) 进行频率扫描, 测定储能模量 (storage modulus, G') 和损耗模量 (loss modulus, G'') 与角频率的关系。

### 1.3.8 数据统计

同一样品测定三次, 取平均值。结果的偏差统计由 EXCEL 处理分析, 显著性差异为 P ≤ 0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 微波处理对莲子淀粉表面结构的影响

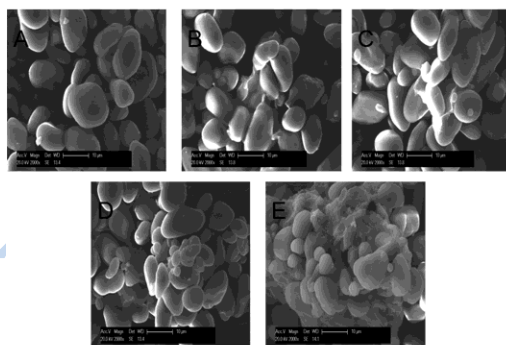


图 1 不同微波功率处理后莲子淀粉的扫描电子显微照片 (2000×)

Fig.1 Scanning electron microscopy photos (2000×) of untreated lotus seed starch (A), microwave-treated starch at 2.4 W/g (B), 4.0 W/g (C), 6.4 W/g (D) and 8.0 W/g (E)

注: A: 原淀粉、B: 2.4 W/g、C: 4.0 W/g、D: 6.4 W/g、E: 8.0 W/g。

不同植物中分离出的淀粉表现出特有的团粒形

态, 由图 1 可知, 经微波处理后大多数淀粉颗粒仍呈光滑的平面, 而随着预处理功率的增加, 部分淀粉颗粒变得更加细碎且表面开始出现互相粘结的现象, 这与马铃薯, 蜡质玉米淀粉经微波处理后, 淀粉颗粒表面变得粗糙, 脐点处出现孔洞及凹坑[8]的研究报道有所不同, 这可能与莲子淀粉的直链淀粉含量高, 支链分支少且短, 对脐点所在的无定形区能起到较好的稳定作用有关<sup>[9]</sup>, 而对于马铃薯, 蜡质玉米等直链淀粉较少, 且支链分支较长的淀粉, 其脐点所在的无定形区结构较弱<sup>[10]</sup>, 容易受到微波加热过程中淀粉颗粒由内而外的强大作用而出现凹陷, 破裂等现象; 淀粉表面发生的相互粘结则推测可能是在高强度微波处理下, 微波效应产生的趋向作用进一步加大了淀粉颗粒间的接触, 并在极化作用下, 淀粉与淀粉间的极性基团发生了相互作用, 造成了颗粒表层的破损, 产生了一种糊化现象。

### 2.2 微波处理对莲子淀粉粒径分布的影响

表 1 微波处理对莲子淀粉粒径分布的影响

Table 1 The effect of microwave treatment on the diameter distribution of lotus seed starch particles

	d(4,3)/ $\mu\text{m}$	d(10%)/ $\mu\text{m}$	d(50%)/ $\mu\text{m}$	d(90%)/ $\mu\text{m}$
原淀粉	12.27±0.02 <sup>e</sup>	10.89±0.01 <sup>a</sup>	12.12±0.0 <sup>e</sup>	14.98±0.02 <sup>e</sup>
2.4W/g	12.36±0.01 <sup>d</sup>	10.63±0.02 <sup>a</sup>	12.35±0.03 <sup>d</sup>	15.75±0.03 <sup>d</sup>
4.0W/g	16.27±0.03 <sup>c</sup>	10.81±0.02 <sup>a</sup>	15.87±0.02 <sup>c</sup>	18.27±0.02 <sup>c</sup>
6.4W/g	20.38±0.22 <sup>b</sup>	9.15±0.02 <sup>b</sup>	19.31±0.2 <sup>b</sup>	28.27±0.22 <sup>b</sup>
8.0W/g	26.34±0.12 <sup>a</sup>	7.32±0.21 <sup>c</sup>	26.47±0.16 <sup>a</sup>	75.36±0.38 <sup>a</sup>

注: 同一列中, 不同的小写字母表示在 P < 0.05 水平时具有的显著性水平。

淀粉颗粒粒度分布是指粉体样品中各种大小的颗粒占颗粒总数的比例, 不同种类的淀粉经过微波处理后的颗粒形态可能呈现不同的变化, 微波处理会改变淀粉颗粒的粒径分布。有研究表明, 淀粉颗粒平均直径的大小和分布会影响到后期淀粉糊化的流变特性。表 1 为不同微波处理后莲子淀粉颗粒大小的变化情况。其中, d(4,3) 表示体积平均径, d(0.1)、d(0.5)、d(0.9) 分别表示样品中粒径小于该直径的颗粒占颗粒总数的 10%、50% 和 90%。由表 1 可知, 莲子淀粉的平均粒径为 12.24  $\mu\text{m}$ , 且微波处理后莲子淀粉颗粒变化较大, 随着处理微波功率的增大, 淀粉颗粒的平均粒径不断增大, 30% 淀粉乳 8.0 W/g 微波处理后平均粒径达到最大值 26.37  $\mu\text{m}$ , 为原淀粉的 2.15 倍。同时实验还发现, 经大功率微波处理后, 出现了许多淀粉大颗粒与淀粉小颗粒, 大颗粒淀粉粒径部分超过 75  $\mu\text{m}$  而小颗粒淀粉粒径只有 7.32  $\mu\text{m}$ , 我们推测大颗粒淀粉的出

现可能与微波处理过程中许多淀粉颗粒发生相互粘结现象有关；而小颗粒淀粉的产生可能与微波快速加热的性质有关，微波加热速率通常是普通加热的数十倍，淀粉颗粒还未完全膨胀就在快速加热效应下发生了破碎，而微波极化趋向效应又促使淀粉颗粒之间快速聚集形成较大的颗粒，因此出现了经微波处理后，淀粉溶液中产生了大颗粒与小颗粒同时出现的情况。

### 2.3 微波处理对莲子淀粉红外特性的影响

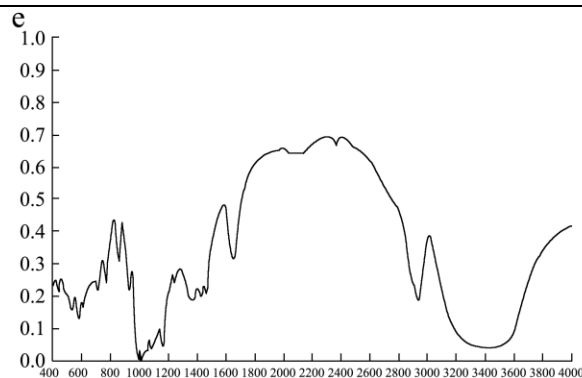
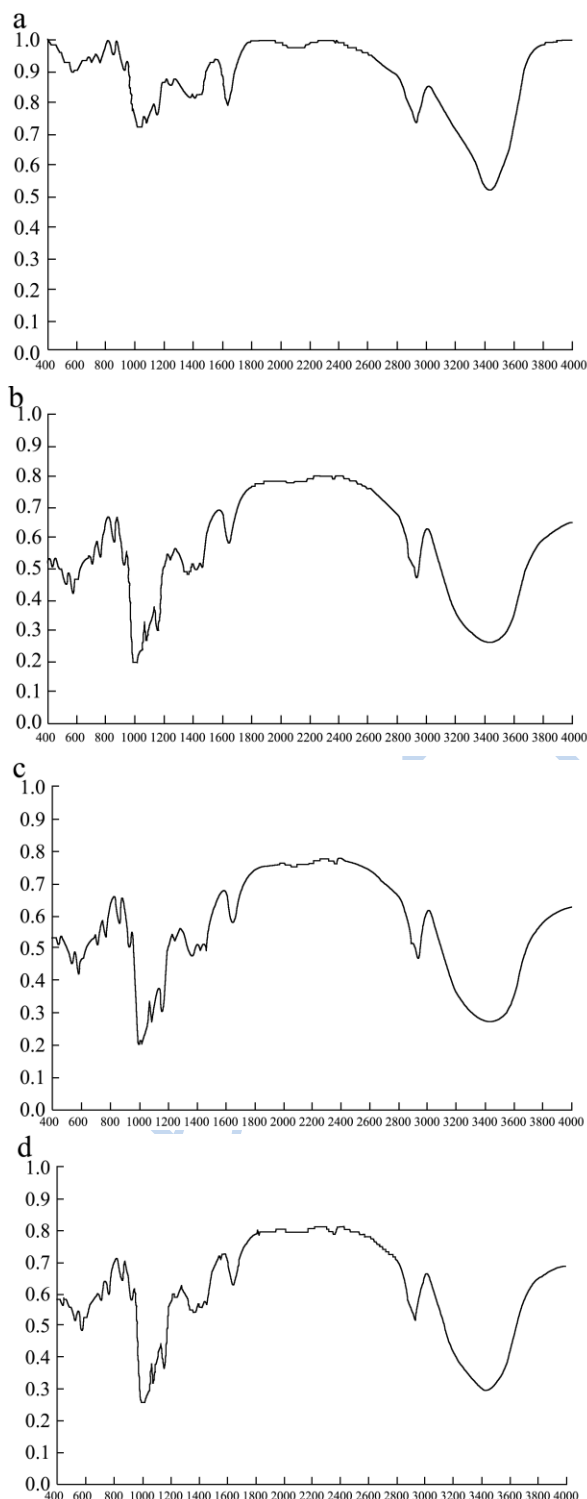


图2 不同微波功率处理后莲子淀粉的中远红外光谱图

Fig.2 Fourier transform infrared spectroscopy of original lotus seed starch (a), microwave-treated starch at 2.4 W/g (b), 4.0 W/g (c), 6.4 W/g (d) and 8.0 W/g (e)

注: a: 原淀粉、b: 2.4 W/g、c: 4.0 W/g、d: 6.4 W/g、e: 8.0 W/g.

红外光谱是一种研究淀粉结构的常用方法，根据谱带的指纹区信息可推测改性后淀粉结晶区及无定型区发生的变化。

由图2的红外光谱可知，莲子淀粉经微波处理后没有出现新的吸收峰也没有某个特征峰消失，表明微波处理是一种物理变性，没有引起某些官能团的产生与消失，随着处理功率增加、莲子淀粉在 $3100\sim 3700\text{ cm}^{-1}$ 范围内(-OH)吸收峰宽度逐渐变宽，说明了在糊化温度前的微波处理可能导致了淀粉分子间或分子内的氢键发生了相互作用，氢键的结合方式增多，内部可能形成了更加精密的微晶结构。谱带 $800\sim 1200\text{ cm}^{-1}$ 是淀粉的指纹区，反应了淀粉C-C, C-OH和C-H的伸缩振动，淀粉聚合物构象及水合过程<sup>[11]</sup>。该波谱区域中有三个典型的振动吸收峰区域，对应波谱带为 $995\text{ cm}^{-1}$ 、 $1022\text{ cm}^{-1}$ 、 $1047\text{ cm}^{-1}$ 周围，其中 $995$ 、 $1047\text{ cm}^{-1}$ 是结晶区的特征谱带， $1022\text{ cm}^{-1}$ 是无定型区的特征谱带，该波谱带对淀粉构象的改变十分敏感，故可以用 $1047\text{ cm}^{-1}$ 与 $1022\text{ cm}^{-1}$ 或 $995\text{ cm}^{-1}$ 与 $1022\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰强度比值作为红外光谱判断淀粉构象的一个重要指标，其比值代表淀粉颗粒中晶区和无定型结构的比例，比值越大，表明淀粉颗粒内结晶区域越大，由红外光谱可知，原淀粉，2.4 W/g~8.0 W/g微波处理淀粉的995/1020谱带比值分别为0.89, 0.92, 0.96, 0.96, 0.99，表明微波处理后淀粉结晶区的密集度与原淀粉相比均有提高，此结果与范大明等人发现微波加热过程对大米淀粉结构影响的“50 °C效应”，即微波加热至淀粉糊化温度前，微波效应诱导淀粉结晶区的双螺旋结构排列更加紧密的结论相一致<sup>[12]</sup>。

### 2.4 莲子淀粉糊化后直链淀粉的溶出量

淀粉组分包括了直链淀粉与支链淀粉，通常只有当淀粉完全糊化溶解后，这两种组分才能被完全区分，Chen 等研究表明直链淀粉的溶出对大米淀粉的流变特性有着显著的影响<sup>[13]</sup>，直链淀粉溶出较少，则粘度较低，两者呈现出一定的相关性，并推测这可能与直链淀粉在淀粉结构的结晶区中起支撑作用有关，由图 3 的直链淀粉溶出曲线可知，经微波处理后的莲子淀粉，其直链淀粉溶出量明显小于原淀粉，并且随着微波功率的增加直链淀粉溶出呈下降趋势，在数值上由原淀粉的 120.31 mg/g 下降为 87.89 mg/g；8.0 W/g 微波预处理后，莲子淀粉的直链淀粉溶出温度稍有提前，推测这可能与微波高功率下莲子淀粉颗粒的破损有一定的关系，而最终溶出量的减少则可能与微波极化作用促使支链淀粉侧链发生趋向，排列成更紧密的微晶结构有关，而在后期糊化过程中，致密的微晶结构以及相互粘结的淀粉团粒可能起到了抑制淀粉颗粒膨胀的作用。

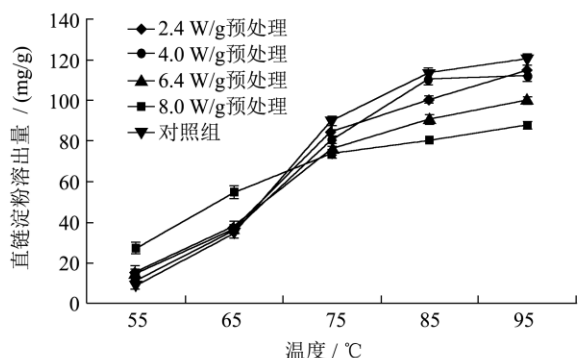


图 3 不同微波功率处理后莲子淀粉糊化的直链淀粉溶出量

Fig.3 Amylose dissolution of starch during gelatinization after microwave treatment at different intensities

## 2.5 微波预处理对莲子淀粉流变特性的影响

### 2.5.1 剪切稀化特性

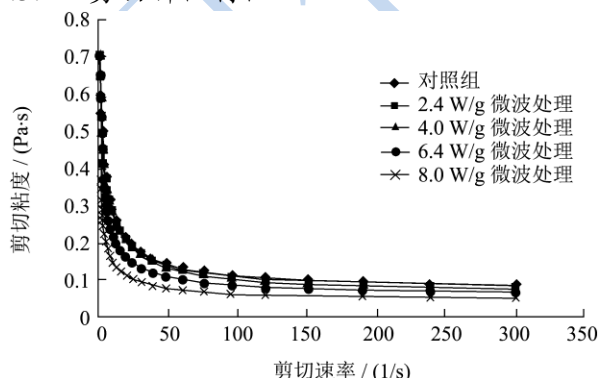


图 4. 不同微波功率处理后莲子淀粉糊表观粘度的变化

Fig.4 The changes in apparent viscosity of lotus seed starch pastes treated with microwaves at different intensities

剪切变稀是材料非牛顿力学行为的一种，通常认为是分子取向或解缠结的结果。由图 4 可以得出，微波处理后的莲子淀粉与原淀粉的剪切粘度均随着剪切速率的增加而减小，呈现剪切变稀的特性，可知它们均属于非牛顿流体中的假塑性流体。随着处理功率增加，处理淀粉的剪切表观粘度均小于原淀粉，且功率在 8.0 W/g 达到最小值，推测，在微波处理过程中，微波效应促使了莲子淀粉颗粒间发生粘结，并在后期糊化过程中，可能抑制了淀粉的膨胀，直链淀粉溶出减少，淀粉内部支链结构未被完全破坏或破坏后无法完全展开，因此无法形成粘度较高的淀粉糊。

### 2.5.2 流变曲线及其模型拟合

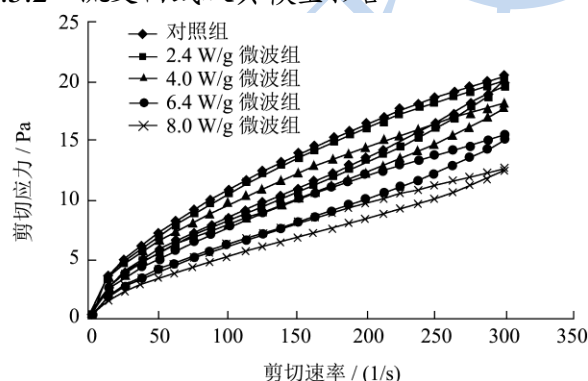


图 5 不同微波功率处理后莲子淀粉糊的触变性

Fig.5 Thixotropy of lotus seed starch pastes treated by microwaves at different intensities

流体的触变性是体系在恒温下“凝胶-溶胶”之间的相互转换过程的重要表现，是衡量食品物质加工稳定性的标志<sup>[14]</sup>，淀粉糊在剪切速率从 0~300 s<sup>-1</sup> 递增所形成的流变曲线被称为上行线，从 300~0 s<sup>-1</sup> 递减时所形成的曲线为下行线，这样的一个循环被称为触变环，所围成的面积被称为滞后面积，滞后面积越大表示该体系受外界作用后难恢复至原先状态。

表 2、表 3 为不同微波处理条件后，莲子淀粉糊的静态流变曲线拟合结果，当剪切速率在 0~300 s<sup>-1</sup> 之间时，曲线相关系数均在 0.99 以上，表 Herschel-Bulkley 方程拟合微波改性后莲子淀粉糊的静态流变行为具有较高的准确度。拟合曲线的 n 值都小于 1，表明微波处理并未改变莲子淀粉的流变类型，均为假塑性非牛顿流体；上行线中稠度系数 K 随微波功率的增加而逐渐下降，表明微波改性对体系起到了稀化的作用，同时由 Hysteresis Area 公式拟合得到各触变环的面积可知，随着微波功率的增加，滞后面积逐渐变小，当 30% 的淀粉乳以 8.0 W/g 微波功率处理后，触变面积变化最大，从 660.99 Pa/s 下降至 278.03 Pa/s，意味着微波处理后的淀粉糊，其剪切稳定性有所提高。

表 2 经微波处理后莲子淀粉流变曲线的 Herschel -Bulkley 模型拟合参数

Table 2 Herschel-Bulkley model fitting parameters of rheology profiles of lotus seed starch treated by microwaves at different intensities

	上行线				下行线			
	$\tau/\text{Pa}$	$K/(\text{Pa S}^n)$	$n$	$R^2$	$\sigma/\text{Pa}$	$K/(\text{Pa S}^n)$	$n$	$R^2$
2.4 W/g	0.1012	0.7299	0.5807	0.9996	1.4876	0.1659	0.8084	0.9901
4.0 W/g	0.4373	0.6594	0.5759	0.9996	1.3622	0.2073	0.7540	0.9965
6.4 W/g	-0.0546	0.5087	0.5697	0.9992	0.8454	0.1464	0.7890	0.9917
8.0 W/g	-0.0566	0.3773	0.6143	0.9995	0.6453	0.1295	0.7790	0.9938
对照组	0.0255	0.7806	0.5731	0.9997	1.5197	0.1845	0.7938	0.9906

表 3 经微波处理后莲子淀粉流变曲线的触变面积

Table 3 Hysteresis area of lotus seed starch treated by microwaves at different intensities

	对照组	2.4 W/g	4.0 W/g	6.4 W/g	8.0 W/g
滞后面积/(Pa·s)	630.99	636.35	481.82	412.90	278.03

2.5.3 动态频率扫描

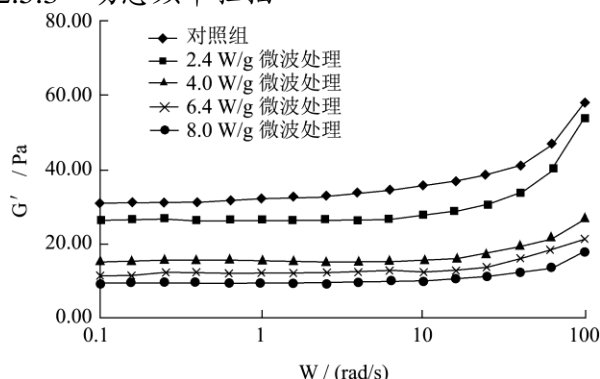


图 6 不同微波功率处理后莲子淀粉糊的储存模量

Fig.6 The storage modulus of lotus seed starch pastes treated at different microwave intensities

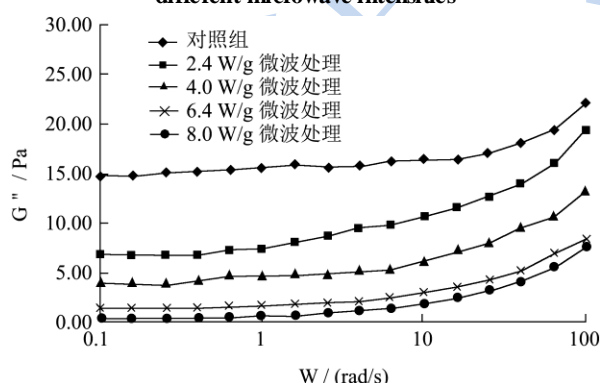


图 7 不同微波功率处理后莲子淀粉糊的损耗模量

Fig.7 The loss modulus of lotus seed starch pastes treated at different microwave intensities

淀粉糊的粘弹性指标通常可以用动态频率扫描中的存储模量 ( $G'$ ), 损耗模量 ( $G''$ ) 以及  $\tan\delta$  来表示, 通过测定淀粉糊在低频下的存储模量以及观察存储模量是否与损耗模量存在交点, 可以判断出关于分子量, 链长等更加精细的淀粉结构信息<sup>[15]</sup>。

图 6、图 7 显示了不同功率微波处理后莲子淀粉糊的频率扫描图, 由图可知, 微波处理后淀粉糊的弹性模量均高于损耗模量, 表明体系仍以弹性为主, 两者之间没有交点, 表明糊化后的淀粉其分子量仍处于较高范畴, 无法形成刚性结构, 表现出弱凝胶的性质, 同时随着处理功率的增大, 莲子淀粉糊的弹性模量不断降低, 储存模量在较低频率下有着较高的平台值, 表明淀粉糊化后呈现较高级的内部结构, 预示着淀粉糊更加稳定; 体系中损耗模量随振动频率升高不断增高, 表明体系经振动后, 淀粉糊网络结构破裂无法及时恢复, 同时这也是体系粘度下降的体现。

3 结论

莲子淀粉经微波处理后, 其颗粒形态变化与其他谷类淀粉有着明显的区别, 随着微波功率的增大, 莲子淀粉中细碎的颗粒数量不断增多, 淀粉颗粒间发生了明显的聚集粘结行为, 这可能是微波的极化趋向与快速升温效应共同作用的结果。经不同功率微波处理后的莲子淀粉, 其淀粉糊的粘度, 弹性模量均有下降, 淀粉糊的稳定性有着不同程度的升高, 这说明微波效应可促使莲子淀粉颗粒拥有更紧密的晶区结构, 并在后期的糊化过程中, 对淀粉颗粒膨胀可能起到了一定的抑制作用, 造成直链淀粉溶出量减少, 这也是淀粉糊粘度下降的主要原因。

参考文献

[1] 谢岩黎,原沙沙,胡慧慧.微波对马铃薯淀粉粉丝品质影响的研究[J].河南工业大学报,2010,31(4):14-17  
XIE Yan-li, YUAN Sha-sha, HU Hui-hui, et al. Effect of microwave on quality of potato starch noodles [J]. Journal of He Nan University of Technology, 2010, 31(4): 14-17

[2] Palav.T, Seetharaman.K. Mechanism of starch gelatinization and polymer leaching during microwave heating [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 65(3): 364-370

[3] Grayna L, Jozef F, Aleksander W. Effect of microwave

- radiation on physico-chemical properties and structure of potato and tapioca starches [J]. *Carbohydrate Polymers*, 1997, 34(4): 213-220
- [4] Xue C F, Mika F, Noboru S. Prediction of the degree of starch gelatinization in wheat flour dough during microwave heating [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(1): 40-45
- [5] Cristina B S, Butler M, Weaver T, et al. Wheat starch gelatinization under microwave irradiation and conduction heating [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 69(2): 224-232
- [6] 罗志刚,周子丹.微波辐射对木薯淀粉性质影响[J].*粮食与油脂*,2010,6:11-12  
LUO Zhi-gang, ZHOU Zi-dan. Effect of microwave radiation on properties of cassava starches [J]. *Cereals and Oils*, 2010, 6: 11-12
- [7] Zhang J, Chen F, Liu F, et al. Study on structural changes of microwave heat-moisture treated resistant canna edulis ker starch during digestion in vitro [J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(1): 27-34
- [8] 罗志刚,扶雄,罗发兴,等.微波辐射下蜡质玉米淀粉性质的变化[J].*华南理工大学学报*,2007,35(4):34-38  
LUO Zhi-gang, FU Xiong, LUO Fa-xing, et al. Property variation of waxy maize starches radiated with microwave [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2007, 35(4): 34-38
- [9] Mana J, Cai J W, Cai C H, et al. Comparison of physicochemical properties of starches from seed and rhizome of lotus [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 88(2): 676-683
- [10] Blaszczyka W, Valverde B, Fornal J, et al. Changes in the microstructure of wheat, com and potato starch granules during extraction of non-starch compounds with sodium dodecyl sulfate and mercaptoethanol [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 53(1): 63-73
- [11] Chen L C, Chiang W D, Chen W C, et al. Influence of alanine uptake on staphylococcus aureus surface charge and its susceptibility to two cationic antibacterial agents, nisin and low molecular weight chitosan [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(4): 2397-2403
- [12] Fan D M, Wang L Y, Ma S Y, et al. Structural variation of rice starch in response to temperature during microwave heating before gelatinisation [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92(2): 1249-1255
- [13] Chen L, Tong Q Y, Ren F. Pasting and rheological properties of rice starch as affected by pullulan [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 66: 325-321
- [14] 刘文婷.超高压处理对檳榔芋淀粉性质影响的研究[D].福州:福建农林大学,2013  
LIU Wen-ting. Effects of ultra high pressure processing on properties of areca taro starch [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013
- [15] Kivia M, Albano M L, Franco V, et al. Rheological behavior of Peruvian carrot starch gels as affected by temperature and concentration [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 40: 30-43