

# 超微粉碎处理对木薯淀粉结构及消化特性的影响

曹英<sup>1</sup>, 夏文<sup>2,\*</sup>, 李积华<sup>2</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 刘洋洋<sup>2</sup>, 林燕云<sup>2</sup>

(1. 华中农业大学食品科技学院, 湖北武汉 430070;

2. 中国热带农业科学院农产品加工研究所, 广东湛江 524001)

**摘要:**为研究超微粉碎改性木薯淀粉及其对消化性的影响,以粒度分析、扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、傅里叶红外分析(FT-IR)以及Englyst法为分析手段,研究木薯淀粉经过不同时间(0、15、30、45、60 min)超微粉碎处理后的粒度、微观结构及消化特性的变化。结果表明:木薯淀粉经超微粉碎处理60 min后,颗粒结构被严重破坏,淀粉颗粒之间发生团聚,淀粉粒径由13.50 μm增加至36.17 μm;超微粉碎处理对木薯淀粉的晶型没有影响,仍为A型,但其相对结晶度由21.33%下降至1.14%;木薯淀粉在3000~2800 cm<sup>-1</sup>与1080 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰强度减弱,表明超微粉碎处理使木薯淀粉的结构遭到破坏,氢键相互作用减弱;天然木薯淀粉的快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)、抗性淀粉(RS)的含量分别为3.91%、44.71%、51.38%,经过超微粉碎处理60 min以后,RDS与SDS的含量分别增加至6.87%和45.91%,RS的含量下降至47.21%,说明超微粉碎处理能够在一定程度上改变木薯淀粉的消化性。

**关键词:**超微粉碎,木薯淀粉,粒度,结构,消化率

## Effect of Micronization on the Structure and Digestibility of Tapioca Starch

CAO Ying<sup>1</sup>, XIA Wen<sup>2,\*</sup>, LI Ji-hua<sup>2</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, LIU Yang-yang<sup>2</sup>, LIN Yan-yun<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Technology of Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Agricultural Products Processing Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang 524001, China)

**Abstract:** The granular size, microstructure and digestibility of micronized tapioca starch with different time (0, 15, 30, 45, 60 min) were investigated by particle size analysis, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and Englyst method, which can provide a theoretical basis for the research of micronization modified tapioca starch and its effect on digestibility. The results showed that the granular structure of starch was seriously damaged, and the starch granules agglomerated after the micronization treatment. When the time of micronization reaches 60 min, the particle size of starch increased from 13.50 μm to 36.17 μm and the A-type crystal structure was not changed, while the degree of crystallinity decreased from 21.33% to 1.14%. The intensities of the infrared (IR) absorption peaks at 3000~2800 cm<sup>-1</sup> and 1080 cm<sup>-1</sup> was decreased, indicating that the structure of tapioca starch was destroyed by micronization treatment, and the hydrogen bond interaction was weakened. The content of rapidly digestible starch (RDS), slowly digestible starch (SDS), and resistant starch (RS) in the native tapioca starch were 3.91%, 44.71%, and 51.38%, respectively. After 60 min of micronization treatment, the contents of RDS and SDS increased to 6.87% and 45.91%, respectively, while the content of RS decreased to 47.21%, showing that micronization treatment could slightly change the digestibility of tapioca starch.

**Key words:** micronization; tapioca starch; particle size; structure; digestibility

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)07-0030-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.07.006

引文格式: 曹英, 夏文, 李积华, 等. 超微粉碎处理对木薯淀粉结构及消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(7): 30-34, 40.

收稿日期: 2018-08-27

作者简介: 曹英(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 淀粉加工与改性, E-mail: cycyclily@163.com。

\* 通讯作者: 夏文(1988-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 淀粉加工与改性, E-mail: xiawensg@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601397); 海南省自然科学基金项目(20163113)。

淀粉是除纤维素之外自然界第二丰富的碳水化合物,具有可再生、环境友好、成本低廉、生物相容性好、可降解等优点<sup>[1]</sup>,被广泛地应用于食品、药品、化妆品、造纸等领域<sup>[2]</sup>。天然淀粉具有直链和支链两种不同的分子结构<sup>[3]</sup>。直链淀粉呈线性结构,由99%的 $\alpha$ -1,4-糖苷键和1%左右的 $\alpha$ -1,6-糖苷键首尾相连而成,而支链淀粉是高分支化的结构,由95%的 $\alpha$ -1,4-糖苷键和5%的 $\alpha$ -1,6-糖苷键首尾相接组成<sup>[4]</sup>。天然淀粉由于其不溶于冷水、成膜性差、抗剪切能力差、易老化、不能形成稳定的胶体溶液等性质,在纺织、造纸、医药、食品等行业的应用受到了很大的限制<sup>[5]</sup>。因此,常常对淀粉进行改性处理以适应生产加工的需求。

目前常用的淀粉改性方法有化学改性、酶法改性和物理改性。化学改性是目前技术最成熟、使用最广泛的淀粉改性方法,但是化学试剂的使用会造成环境污染,并且运用于食品加工时存在安全性问题;酶法改性相对环保,但是成本较高,处理量小,难以实现工业化生产;物理改性是利用热场、力场、电场、磁场等物理场作用于天然淀粉,使其性能发生相应的变化<sup>[6]</sup>。物理改性由于只涉及到物理作用,具有绿色安全的优点,并且反应快速简单。而超微粉碎作为一种新型的物理改性方法,得到了越来越广泛的应用。在超微粉碎过程中,利用摩擦、挤压、碰撞等作用力对淀粉进行改性处理。郭洪梅<sup>[7]</sup>利用超微粉碎对杂豆(粮)淀粉进行处理,结果表明,随着超微粉碎时间的增加,淀粉的结构被逐渐破坏,结晶度下降,发生淀粉团聚,淀粉粒径增加,淀粉发生低温糊化。彭国泰等<sup>[8]</sup>研究发现,超微粉碎处理可以使淀粉的粒度下降,吸水指数,膨胀势上升;RVA结果显示,糙米粉的峰值粘度、谷值粘度、崩解值、最终粘度、回生值均上升,初始糊化温度下降;扫描电镜结果显示,淀粉颗粒破碎、断裂形成许多无规则小碎片,且表面有凹坑。虽然目前对超微粉碎处理淀粉的结构与性质已有很多报道,但是通过结构变化来研究其消化性的报道较少。因此,本文采用超微粉碎处理木薯淀粉,研究不同超微粉碎时间(0、15、30、45、60 min)木薯淀粉的粒径、微观形态、结晶结构、溶解性及消化性,通过分析木薯淀粉的结构变化对其消化性的影响,为木薯淀粉的开发利用提供新思路,也可为超微粉碎改性淀粉的研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

木薯淀粉(水分含量为14.8%,直链淀粉含量为12%,支链淀粉含量为88%) 佛山市南海区奇润食品有限公司;无水乙醇 分析纯,广东光华科技股份有限公司;KBr 光谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;pH5.2的0.2 mol/L 醋酸钠缓冲液 自制;淀粉葡萄糖苷酶(酶活 $\geq 260$  U/mL) A7095 Sigma; $\alpha$ -淀粉酶(酶活50 U/mg) 10080 Sigma;GOPOD 试剂盒 Megazyme。

Mastersizer 2000 型激光粒度分布仪 英国马尔文仪器有限公司;S-4800 型扫描电子显微镜 日本

Hitachi 公司;GVC-1000 离子溅射仪 上海禾早电子科技有限公司;D8 Advance X-射线衍射仪 德国布鲁克公司;Tensor 27 型傅里叶红外光谱仪 德国布鲁克公司;Sigma 3-30K 型离心机 德国 Sigma 公司;FA2004N 型电子天平 上海精密科学仪器有限公司;UV1780 型紫外分光光度计 日本岛津企业管理(中国)有限公司;RB29KBFH1WW/SC 型冰箱 苏州三星电子有限公司;101-1 A 型数显电热鼓风干燥箱 上海沪南科学仪器联营厂;XW-80A 型涡旋混合器 上海青浦沪西仪器厂。

### 1.2 实验方法

1.2.1 超微粉碎木薯淀粉的制备 称取500 g天然木薯淀粉置于超微粉碎机中,启动冷却装置使温度保持在10℃左右,选取不同的时间(15、30、45、60 min)对木薯淀粉进行超微粉碎处理,过100目筛,置于干燥器中保存备用。

1.2.2 粒度分布测定 称取0.5 g的样品溶于50 mL无水乙醇中,使其分散均匀,然后用激光粒度分析仪进行粒度分布测定。

1.2.3 微观结构观察 将木薯淀粉样品(干基)用导电胶粘在样品座上,并置于离子溅射仪中,在样品表面蒸镀一层铂金膜后,在扫描电子显微镜下进行观察与拍照<sup>[9]</sup>。

1.2.4 X-射线衍射 使用X-射线衍射仪对木薯淀粉的结晶结构进行检测。采用连续扫描法,测定条件为:扫描速率6°/min,扫描范围5~45°,管压36 kV,管流30 mA,步长0.04°<sup>[10]</sup>。

1.2.5 红外光谱测定 根据González-Cruz等<sup>[11]</sup>的方法做了一些修改。将干燥的淀粉与KBr按一定的比例(1:100)充分混合,研磨均匀,在10 MPa下进行真空压片处理,然后置于傅里叶红外光谱仪中进行扫描,扫描范围为4000~400 cm<sup>-1</sup>,分辨率为4 cm<sup>-1</sup>,扫描次数为64次。

1.2.6 消化率测定 根据Colussi R等<sup>[12]</sup>的方法做了一些修改。称取100 mg样品置于50 mL离心管中,加入2 mL水,沸水浴10 min糊化,再添加13 mL pH5.2的0.2 mol/L的乙酸钠缓冲液,加入磁力搅拌子(5 mm×20 mm),调节转速为150 r/min左右,在37℃恒温水浴下平衡10 min,再加0.2 mL混合酶液(100 mL淀粉葡萄糖苷酶与20 mg  $\alpha$ -淀粉酶溶于20 mL乙酸钠缓冲液中),在37℃恒温水浴下反应。在反应时间为0、20、40、60、80、100、120、240 min时分别取0.1 mL上清液加入含有0.9 mL无水乙醇的5 mL离心管中以消灭酶活,再取0.1 mL至另外一个5 mL离心管中,加入3 mL GOPOD试剂(由试剂盒中的bottle1和bottle2配制得到),混匀后50℃水浴20 min,冷却后在510 nm处(测定吸光度,每个样品平行测定3次取平均值。按以下公式进行计算:

$$\text{淀粉水解率}(\%) = [0.9 \times (\text{葡萄糖质量} \times \text{稀释倍数})] / \text{总淀粉质量} \quad \text{式(1)}$$

$$\text{RDS}(\%) = \frac{0.9(G_{20} - FG)}{TS} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

$$\text{SDS}(\%) = \frac{0.9(G_{120} - G_{20})}{TS} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

$$RS(\%) = \frac{TS - RDS - SDS}{TS} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

其中,RDS代表快消化淀粉;SDS代表慢消化淀粉;RS代表抗性淀粉; $G_{20}$ 和 $G_{120}$ 分别是在水解20 min和120 min内释放的葡萄糖的量,mg;FG是淀粉中游离葡萄糖的量,mg;TS是总淀粉质量,mg。

### 1.3 数据处理

所有样品均进行三次重复试验,数值用平均值±标准差表示。用Origin 9.0与SPSS 20.0进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 粒度分析

超微粉碎处理前后木薯淀粉颗粒粒径分布见图1。如图1所示,天然木薯淀粉粒径分布图的峰值最大,超微粉碎处理以后,峰值变小且向右移动,表明木薯淀粉颗粒的粒径随着超微粉碎处理时间的增加而变大。天然木薯淀粉颗粒体积平均直径为 $13.50 \mu\text{m}$ ,随着超微粉碎时间的增加而逐渐增加,当超微粉碎处理时间达到60 min时,木薯淀粉颗粒的体积平均直径达到 $36.17 \mu\text{m}$ 。这与谢涛等<sup>[13]</sup>的研究结果一致,锥栗淀粉颗粒粒径随着超微粉碎处理时间的增加而变大,当超微粉碎处理时间达到75 min时,粒径大于 $25 \mu\text{m}$ 的颗粒明显增多。这可能是由于超微粉碎过程中由于瞬时热效应的影响使木薯淀粉发生了团

聚,造成颗粒增大<sup>[14]</sup>;机械作用导致木薯淀粉部分糊化也可能使木薯淀粉颗粒粒径增大<sup>[15]</sup>。

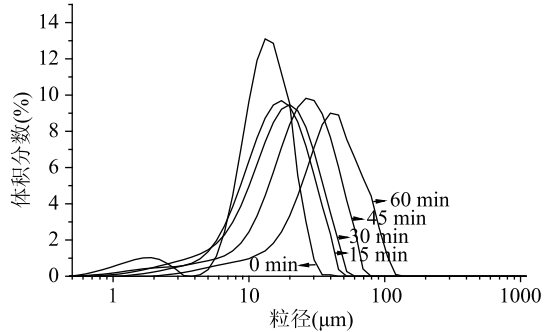


图1 超微粉碎处理木薯淀粉粒径分布

Fig.1 Particle size distributions of tapioca starch after micronization treatment

### 2.2 微观形态分析

超微粉碎处理前后木薯淀粉的微观形态如图2所示。由图2可知,经过超微粉碎处理后,木薯淀粉的微观形态发生了明显的变化。天然木薯淀粉呈现规则的球状,且表面光滑,当超微粉碎时间达到15 min时,规则的球形被破坏,但未发生颗粒的聚集。随着超微粉碎时间的增加,木薯淀粉表面逐渐变得粗糙,结构疏松,呈现出片状糊化结构,并且发生聚集现象。研究结果表明,短时间的超微粉碎处

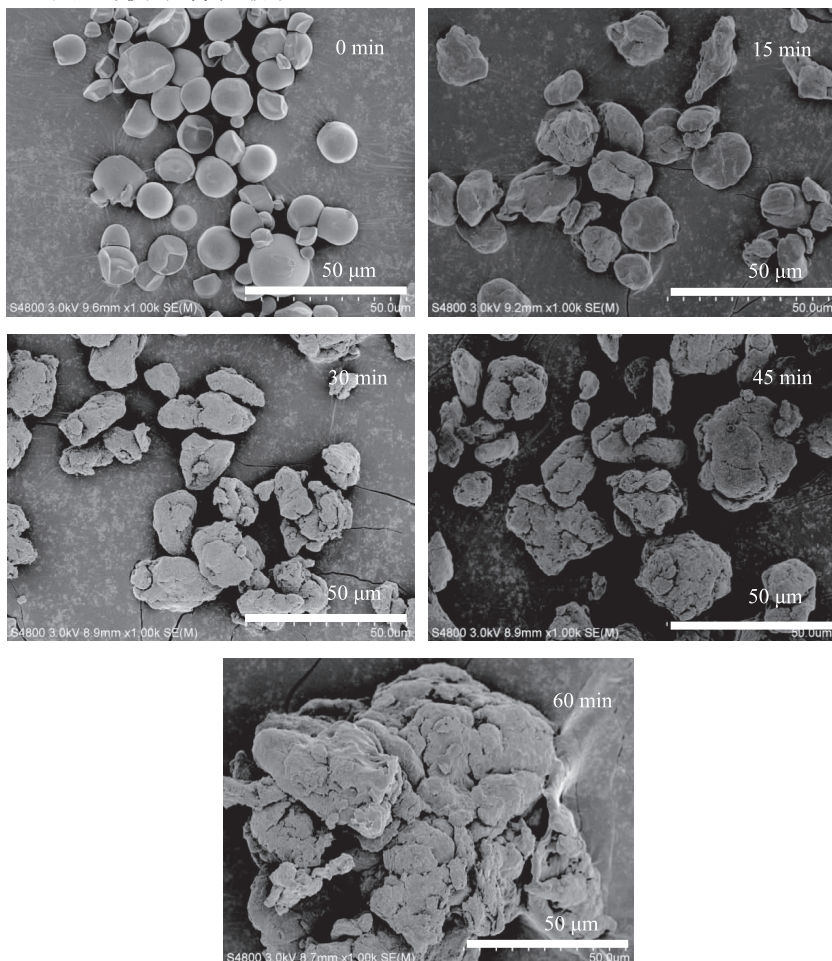


图2 超微粉碎处理木薯淀粉的扫描电镜照片

Fig.2 SEM micrographs of tapioca starch after micronization treatment

表1 木薯淀粉体积平均直径、相对结晶度与RDS、SDS、RS含量

Table 1 Particle size, relative crystallinity and RDS, SDS, RS content of tapioca starch

处理时间 (min)	体积平均直径 ( $\mu\text{m}$ )	相对结晶度 (%)	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)
0	13.50 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	21.33 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	3.91 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	44.71 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	51.38 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>
15	16.84 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	8.14 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	4.08 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	45.40 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	50.52 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>
30	18.54 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>	6.10 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>	5.30 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	45.51 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>	49.19 $\pm$ 0.03 <sup>c</sup>
45	26.09 $\pm$ 0.06 <sup>d</sup>	2.35 $\pm$ 0.07 <sup>d</sup>	6.63 $\pm$ 0.04 <sup>d</sup>	45.67 $\pm$ 0.02 <sup>d</sup>	47.69 $\pm$ 0.04 <sup>d</sup>
60	36.17 $\pm$ 0.04 <sup>e</sup>	1.14 $\pm$ 0.05 <sup>e</sup>	6.87 $\pm$ 0.04 <sup>e</sup>	45.91 $\pm$ 0.02 <sup>e</sup>	47.21 $\pm$ 0.05 <sup>e</sup>

注:同列字母不同表示差异显著( $p < 0.05$ )。

理会破坏木薯淀粉颗粒规则的形态,随着超微粉碎时间的增加,木薯淀粉部分糊化,从而发生团聚,致使淀粉颗粒增大,这与Ren等<sup>[16]</sup>的研究结果相似,研磨处理可以破坏木薯淀粉的微观形态,当研磨时间达到54 h后,木薯淀粉发生明显的团聚现象。Liu等<sup>[17]</sup>研究表明,高压作用也能使淀粉颗粒塌陷、变形,表面出现裂缝与空穴,并且发生部分糊化,进而产生团聚。

### 2.3 X-射线衍射分析

超微粉碎处理前后木薯淀粉的X-射线衍射图谱如图3所示。天然淀粉的X-射线衍射图谱一般可以分为三种类型,A型、B型与C型。A型淀粉的X-衍射图谱在 $2\theta$ 为15.1、17.1、18.0、23.2°处有较强的衍射峰,为谷类淀粉;B型淀粉的X-衍射图谱在 $2\theta$ 为5.6、17、22、24°处有较强的衍射峰,为薯类淀粉;C型淀粉的X-衍射图谱在 $2\theta$ 为5.6°处有特征峰,在18与23°处出现强峰,为A型与B型淀粉的复合物<sup>[18]</sup>。从图3中可以发现,天然木薯淀粉在 $2\theta$ 为15、17、18、23°处出现强的吸收峰,为A型淀粉。当超微粉碎处理时间为15 min时,木薯淀粉衍射峰的位置没有发生改变,但是峰强度减小。当超微粉碎时间达到30 min后,出现‘馒头峰’,反映了淀粉中非结晶区的产生;随着超微粉碎时间的增加,木薯淀粉的相对结晶度逐渐降低,如表1所示,天然木薯淀粉的结晶度为21.33%,当超微粉碎时间达到60 min时,木薯淀粉的相对结晶度下降为1.14%。超微粉碎破坏木薯淀粉的结构,使其结晶区被破坏,相对结晶度降低,但是没有在其他位置出现强的吸收峰,表明超微粉碎并未改变木薯淀粉的晶型。郝征红等<sup>[19]</sup>研究发现,超微粉碎处理40~50 min时,绿豆淀粉的X-射线衍射图谱出现馒头峰,相对结晶度降低,表明机械力对淀粉具有非晶化作用。Devi等<sup>[20]</sup>采用研磨的方式处理低温冷冻淀粉也得到了类似的研究结果,表明淀粉的结晶度随研磨时间的增加而降低。

### 2.4 傅里叶红外光谱分析

3300  $\text{cm}^{-1}$ 左右的吸收峰表示的是分子内或分子间-OH基团的相互作用;3000~2800  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰表示的是C-H的伸缩振动;1650  $\text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰与淀粉内部的结晶水有关;1080  $\text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰归属于C-H键的弯曲振动;1020  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰表示C-O键的伸缩振动<sup>[21]</sup>。如图4所示,木薯淀粉经过超微粉碎处理后没有新的特征峰生成,表明超

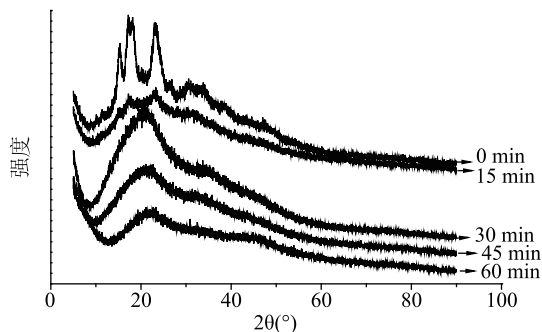


图3 超微粉碎对木薯淀粉X-射线衍射曲线的影响

Fig.3 Effect of micronization on X-ray powder diffraction of tapioca starch

微粉碎处理过程中没有发生官能团的变化。随着超微粉碎处理时间的增加,3000~2800  $\text{cm}^{-1}$ 附近的吸收峰强度逐渐减弱,表明淀粉分子间的C-H键的伸缩振动变小,说明超微粉碎处理能破坏淀粉的分子结构,使淀粉分子链发生断裂,且随着处理时间的增加而增强<sup>[22]</sup>。1080  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰强度随着超微粉碎处理时间的增加而减弱,表明淀粉分子氢键之间的结合力减弱,而氢键作用力的大小可以表示淀粉分子的有序结构,说明淀粉分子的结晶区域被破坏,有序性降低,这与上述X-射线衍射分析的结果一致<sup>[23]</sup>。

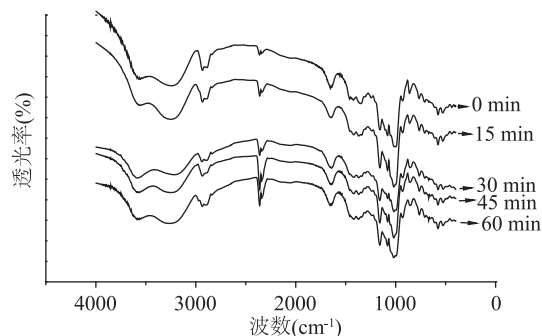


图4 超微粉碎处理对木薯淀粉的红外光谱图的影响

Fig.4 Effect of micronization on the FTIR spectra of tapioca starch

### 2.5 消化性分析

不同时间超微粉碎处理的木薯淀粉的消化率如图5所示。由图5可知,随着消化时间的增加,木薯淀粉的消化率逐渐上升,而超微粉碎能在一定程度上增加木薯淀粉的消化率,表明超微粉碎处理能够增加木薯淀粉对酶的敏感性。木薯淀粉颗粒内部结

构的改变是其酶敏感性增加的原因之一<sup>[24]</sup>,研究表明结晶度低无定型区域大的淀粉更容易被消化<sup>[25]</sup>,而微观结构分析表明超微粉碎处理后木薯淀粉的结晶结构被破坏,分子链的有序性降低。淀粉颗粒的表面结构也会影响淀粉的酶水解特性,淀粉对酶的敏感性随表面孔隙的增加而增加<sup>[26]</sup>。还有可能是超微粉碎破坏了木薯淀粉的双螺旋结构,使官能团更多地暴露出来,增加了淀粉分子与酶的反应位点,因此淀粉的消化率上升<sup>[27]</sup>,这与2.4的分析一致。从表1可知,天然木薯淀粉RDS的含量为3.91%,超微粉碎处理60 min后,RDS的含量升高至6.87%,RS的含量由51.38%降低至47.21%。RDS的含量上升,RS的含量下降,表明超微粉碎处理可以增加木薯淀粉的酶反应活性<sup>[12]</sup>,Shen等<sup>[28]</sup>研究表明,低压会导致淀粉晶体结构或分子链的重排,使其短程有序性增加,淀粉的消化率降低;高压则会对淀粉的结构造成破坏,使其消化率增加。SDS的含量只有略微上升,这与Tian<sup>[29]</sup>的分析结果一致,可能是由于超微粉碎过程中不完美微晶的形成。因此,超微粉碎过程中产生的压力、摩擦力等作用力可以在一定程度上改变木薯淀粉颗粒的结构,以此改变其消化性,为保健食品、药品的研究生产提供了理论基础。

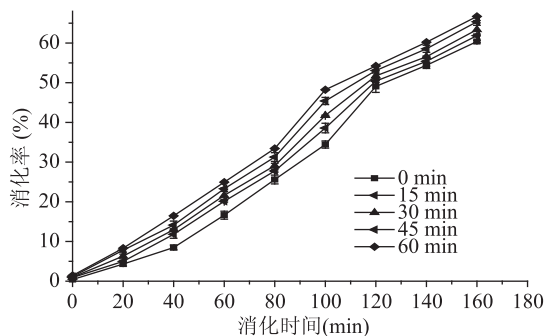


图5 超微粉碎处理对木薯淀粉消化率的影响

Fig.5 Effect of micronization on the digestibility of tapioca starch treated by micronization

### 3 结论

经过超微粉碎处理后,木薯淀粉的粒径随着超微粉碎时间的增加逐渐变大;超微粉碎处理破坏了木薯淀粉规则的球状结构,使其表面变得疏松,并发生了团聚;超微粉碎处理没有改变木薯淀粉的晶型,但使其相对结晶度降低;超微粉碎处理木薯淀粉的分子链被破坏,氢键作用变小,分子有序性降低;经过超微粉碎处理后,木薯淀粉的消化率增加,木薯淀粉中的RDS与SDS的含量升高,RS的含量降低,且超微粉碎时间越长,这种趋势越明显。这些研究结果表明,超微粉碎处理可以改变木薯淀粉的结构,从而改变木薯淀粉的某些性质,可以作为一种前处理手段以满足某些加工生产的需求。同时通过分析超微粉碎处理木薯淀粉结构变化对其消化特性的影响,为超微粉碎技术在淀粉消化特性调控等方面提供了参考意见,能为其在保健食品加工等方面的应用提供新思路,同时也为超微粉碎处理木薯淀粉的结构性质变化提供了一定的理论依据。

### 参考文献

- [1] Mutlu S, Kahraman K, Öztürk S. Optimization of resistant starch formation from high amylose corn starch by microwave irradiation treatments and characterization of starch preparations [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 95: 635-642.
- [2] 杨莹, 黄丽婕. 改性淀粉的制备方法及应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2013, 34(20): 381-385.
- [3] Astuti RM, Widaningrum, Asiah N, et al. Effect of physical modification on granule morphology, pasting behavior, and functional properties of arrowroot (*Marantha arundinacea* L) starch [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 23-30.
- [4] 孙亚东, 陈启凤, 吕闪闪, 等. 淀粉改性的研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30(21): 68-74.
- [5] 何日梅, 李庭龙, 韦榕柳, 等. 淀粉改性方法及应用研究进展 [J]. 现代化工, 2014, 34(12): 25-28.
- [6] 赵丹, 陈宁, 孙明明, 等. 物理改性淀粉的研究进展 [J]. 广州化工, 2015(4): 9-11.
- [7] 郭洪梅. 超微粉碎处理对杂粮(豆)淀粉结构及理化特性的影响 [D]. 榆林: 西北农林科技大学, 2016.
- [8] 彭国泰, 吴娜娜, 谭斌, 等. 超微粉碎处理对糙米粉理化性质的影响 [J]. 粮油食品科技, 2017, 25(2): 17-21.
- [9] 胡洋, 夏文, 李积华, 等. 高速射流对木薯淀粉结构和性能的影响 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 56-60.
- [10] Wei B, Cai C, Xu B, et al. Disruption and molecule degradation of waxy maize starch granules during high pressure homogenization process [J]. Food Chemistry, 2018, 240: 165.
- [11] González-Cruz L, Montañez-Soto JL, 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]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 107(Pt A): 965-972.
- [12] Colussi R, Kaur L, Zavareze EDR, et al. High pressure processing and retrogradation of potato starch: Influence on functional properties and gastro-small intestinal digestion *in vitro* [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 75: 131-137.
- [13] 谢涛, 杨春丰, 亢灵涛, 等. 超微粉碎锥栗淀粉的理化性质变化 [J]. 现代食品科技, 2014, 30(6): 121-125, 81.
- [14] Xia W, He DN, Fu YF, et al. Advanced technology for nanostarches preparation by high speed jet and its mechanism analysis [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 176: 127-134.
- [15] Kasemwong K, Ruktanonchai UR, Srinuanchai W, et al. Effect of high-pressure microfluidization on the structure of cassava starch granule [J]. Starch-Stärke, 2015, 63(3): 160-170.
- [16] Ren GY, Li D, Wang LJ, et al. Morphological properties and thermoanalysis of micronized cassava starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(1): 101-105.
- [17] Hang L, Wang L, Rong C, et al. *In vitro* digestibility and changes in physicochemical and structural properties of common buckwheat starch affected by high hydrostatic pressure [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 144: 1-8.
- [18] Wang J, Zhu H, Li S, et al. Insights into structure and

(下转第40页)

