

# 湿热处理对马铃薯淀粉超高压糊化的影响

蒲华寅, 郝丹丹, 刘姝含, 岳苗, 苏佳, 黄峻榕\*

(陕西科技大学食品与生物工程学院, 西安 710021)

**摘要:** **目的** 研究湿热处理对马铃薯淀粉超高压糊化的影响。**方法** 将经过不同时间湿热处理的样品进行不同压力的超高压处理, 采用偏光显微、X 射线衍射、差示扫描量热、快速粘度分析等技术对马铃薯淀粉样品颗粒形貌、结晶结构、糊化特性进行研究。**结果** 湿热处理增加了马铃薯淀粉的相对结晶度及糊化焓值, 提升了糊化温度。同时通过改变淀粉颗粒内部结构, 引起淀粉分子吸水性降低, 进而导致淀粉膨胀性变差, 粘度降低, 粘度曲线由 A 型向 D 型转变。无论湿热与否, 淀粉在 400~600 MPa 超高压处理过程中, 其相对结晶度、糊化焓值均降低, 但与原淀粉相比, 湿热处理后淀粉在超高压处理过程中相对结晶度和糊化焓值降低程度减小。**结论** 马铃薯淀粉水分含量为 30%(m:m)时, 90 °C 湿热处理 5~15 h 导致淀粉颗粒内部结构更为致密, 增加其压力抵抗性, 延缓了超高压糊化过程。

**关键词:** 马铃薯淀粉; 超高压糊化; 湿热处理

## Effect of heat moisture treatment on ultra-high pressure induced pasting process of potato starch

PU Hua-Yin, HAO Dan-Dan, LIU Shu-Han, YUE Miao, SU Jia, HUANG Jun-Rong\*

(School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT: Objective** To research the effect of heat moisture treatment on the ultra-high pressure induced pasting of potato starch. **Methods** The samples treated for different heat moisture treatment time were subjected by ultra-high pressure treatment with different pressures. The granular morphology, crystalline structure and thermal characteristics of potato starches were analyzed by polarizing microscope, X-ray diffraction, differential scanning calorimetry and rapid viscosity analysis. **Results** The relative crystallinity, gelatinization enthalpy and gelatinization temperature of potato starch increased during heat moisture treatment. At the same time, by changing the internal structure of the starch granules, the water absorption of the starch molecules was lowered, which led to the deterioration of the swelling property of the starch, the viscosity was lowered, and the viscosity curve was changed from the A type to the D type. Regardless of damp heat or not, the relative crystallinity and gelatinization enthalpy of starch decreased during the ultra-high pressure treatment of 400–600 MPa. However, compared with the native starch, the degree of reduction in the relative degree of crystallinity and gelatinization enthalpy decreased for the heat moisture treated starches.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31601509, 31772012)、陕西科技大学大学生创新创业训练计划(2018017)、陕西省自然科学基金研究计划项目(2018JQ3031)、陕西科技大学博士科研启动基金项目(BJ14-14)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (31601509, 31772012), the Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship of SUST (2018017), the Shaanxi Provincial Science and Technology Project (2018JQ3031), and the Doctor Start Foundation of SUST (BJ14-14)

\***通讯作者:** 黄峻榕, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为淀粉资源开发与利用。E-mail: huangjunrong@sust.edu.cn

\***Corresponding author:** HUANG Jun-Rong, Ph.D, Professor, School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China. E-mail: huangjunrong@sust.edu.cn

**Conclusion** When the moisture content for potato starch is 30% (*m:m*), the heat moisture treatment at 90 °C for the treated time ranged from 5–15 h leads to the denser internal structure of potato starch granules, increases their pressure resistance and delays the ultra-high pressure induced pasting process.

**KEY WORDS:** potato starch; ultra-high pressure induced pasting; heat moisture treatment

## 1 引言

淀粉是一种广泛存在的可降解、可再生天然高分子。马铃薯是商用淀粉重要来源,其淀粉含量约占马铃薯鲜重的 15%~20%,且其糊具有粘度高、透明性好等特点,应用广泛<sup>[1,2]</sup>。超高压技术,又称高静压技术,一般认为是压力大于 100 MPa 的食品加工技术,目前受到了广泛的关注<sup>[3]</sup>。作为一种绿色加工技术,超高压处理能改变淀粉结构,实现淀粉的常温糊化,同时,在淀粉质食品加工过程中,其对热敏性组分影响较小,呈现良好的应用前景<sup>[4]</sup>。目前关于淀粉超高压糊化相关研究主要集中在超高压糊化与常规温度糊化的差异,以及不同植物来源淀粉对超高压的耐受性等方面<sup>[5-7]</sup>。研究表明超高压处理对不同种类的淀粉结构的影响程度不同,即不同种类淀粉对压力的抵抗性有差异,表现出不同的糊化压力。通常认为,结晶类型为 B 型淀粉耐压性较强,超高压不易引起糊化,而 C 型和 A 型淀粉耐压性相对较差<sup>[8,9]</sup>。然而,对同一植物来源淀粉内部结构差异对超高压糊化特性影响的研究相对较少。

湿热处理是指在低水分含量(10%~30%)条件下对淀粉进行的热加工(90~120 °C),一般认为湿热处理是能诱导淀粉分子重排,但仍能保持淀粉颗粒结构的物理变性方式<sup>[10]</sup>。湿热处理不仅能提升糊化温度,还可以改变其黏度、稳定性、凝沉性等性质<sup>[11]</sup>。因而,通过湿热处理可以改变马铃薯淀粉颗粒内部结构,从而进一步影响马铃薯淀粉在超高压处理过程中的加工特性,但目前相关研究较少。

本实验通过研究湿热处理前后马铃薯淀粉在相同的超高压处理条件下淀粉颗粒形貌、结晶结构、热性质及粘度特性,探究湿热处理对马铃薯淀粉超高压糊化特性的影响,分析马铃薯淀粉内部结构变化与耐压性的关系,有利于调控马铃薯淀粉超高压加工特性,以期对淀粉的改性及深加工在各领域的应用提供科学理论依据。

## 2 材料与amp;方法

### 2.1 仪器与试剂

HPLL-600/3 型食品高压保鲜设备(天津市华泰森森超高压设备有限公司); DZ-5002S 真空包装机(中国星火包装机械有限公司); ECLIPSE Ci-POL 偏光显微镜(日本尼康公司); D/max2200PC 型 X 光衍射仪(日本理学公司); DSC-Q2000 型差示扫描量热仪(美国 TA 公司); TechMaster 快速黏度分析仪

(瑞典波通瑞华科学仪器公司)。

马铃薯淀粉(食用级,青海威思顿精淀粉有限公司)。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 湿热处理马铃薯淀粉的制备

称取的马铃薯淀粉 100 g,将水分含量调至 30%(*m:m*),密封于密闭容器后于 40 °C 平衡水分 24 h,然后置于恒温鼓风干燥箱里 90 °C 湿热处理 5、10、15 h,未湿热处理样品为空白。湿热处理结束后将产物取出,在 40 °C 干燥 12 h 后粉碎过 100 目筛,即获得湿热处理后的样品,分别命名为 HMT5、HMT10 和 HMT15,空白样品为 NP。

#### 2.2.2 不同超高压处理样品的制备

以 2.2.1 中制备的 4 种样品为原料,分别加水配制成干基占比 30%(*m:m*)的淀粉乳 75 g 各 3 份,每种样品中的 3 份封入聚丙烯塑料薄膜袋密封后,置于超高压处理设备中分别经 400、500 和 600 MPa 室温(25°C)处理 10 min 后取出,40 °C 干燥 12 h 后粉碎过 100 目筛即得样品,命名为 HMT5-HP400、HMT5-HP500、HMT5-HP600; HMT10-HP400、HMT10-HP500、HMT10-HP600; HMT15-HP400、HMT15-HP500、HMT15-HP600<sup>[12]</sup>。原淀粉经过相同条件的超高压处理后,样品分别命名为 NP-HP400、NP-HP500、NP-HP600。

#### 2.2.3 淀粉颗粒形貌及偏光结构观察

利用光学显微镜对上述 16 个样品的颗粒微观结构进行分析。取一定量的样品置于玻璃皿上,添加适量蒸馏水,搅拌均匀,调至成适宜观察浓度的淀粉乳,排除气泡后置于光学显微镜下普通光模式和偏光模式观察,放大倍数为 400 倍。

#### 2.2.4 淀粉结晶结构的测定

采用 X-射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)对样品的结晶结构进行分析。将预先平衡水分的样品平铺于样品池中,放入 X-射线衍射仪中进行测定,采用波长为 0.1542 nm 的单色 Cu-K $\alpha$  射线。测试参数:管压 40 kV,管流 40 mA,扫描区域  $2\theta=4^\circ\sim 60^\circ$ ,步长为 0.02°,扫描速率为 10°/min。采用 Jade6.0 软件对数据进行分析<sup>[13]</sup>。

$$RC = B/A \times 100\%$$

式中:

*A* — 图谱经过平滑后计算谱线与基线间的面积;

*B* — 描出微晶分割线后,谱线与分割线间的面积;

*RC* — 淀粉的相对结晶度。

#### 2.2.5 淀粉黏度的测定

采用快速粘度分析仪(rapid visco analyser, RVA)对样品的粘度进行测定。准确配置 28 g 5%(w/w)的淀粉乳溶液,将

样品放入 RVA 专用铝盒, 然后将铝盒放入快速黏度分析仪中进行测量。采用升温降温循环程序: 从 50 °C 开始计时, 保持 1 min; 以 12 °C/min 升温至 95 °C, 保温 5 min; 再以 12 °C/min 冷却到 50 °C, 保温 2 min。搅拌子旋转速率起初为 960 r/min, 搅拌 10 s, 混匀物料, 随后转速设置为 160 r/min<sup>[13]</sup>。

### 2.2.6 淀粉糊化参数的测定

通过差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC)测定样品的糊化参数。称取 3 g(干基)淀粉样品放入 DSC 铝盒中, 加蒸馏水至 10 mg, 配制成 30%(*m:m*)的淀粉乳, 加盖密封。测定时以空铝盒为参比, 以 10 °C/min 的加热速率从 20 °C 加热至 100 °C。

### 2.2.7 数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 23 进行数据统计分析, 多重比较采用 Duncan 方法。

## 3 结果与分析

### 3.1 湿热处理对淀粉超高压糊化过程中颗粒形貌的影响

图 1 为经不同湿热-超高压条件处理前后的马铃薯淀粉颗粒的光学显微镜图。由图 1 可见, 马铃薯淀粉颗粒较大, 目前通常认为是商用淀粉中颗粒最大的, 大部分淀粉颗粒

呈椭圆形, 小的颗粒呈圆形或椭圆形。湿热处理后, 淀粉颗粒均未发生破裂, 轮廓分明。在部分关于马铃薯淀粉湿热处理后结构研究中表明, 湿热处理会破坏淀粉颗粒形貌, 结果的差异可能与本试验选用的处理温度相对较低有关<sup>[14]</sup>。

淀粉的超高压糊化过程目前难以连续化测定, 较多采用的表征方法为研究样品在其他条件相同情况下, 经过不同压力处理后其结构的变化, 从而分析超高压糊化过程。由图 1 可知, 对于马铃薯原淀粉 400~600 MPa 超高压处理并未明显破坏淀粉的颗粒形貌, 但在 600 MPa 的压力下, 部分马铃薯淀粉颗粒的结构遭到破坏, 颗粒轮廓变得模糊, 表明可能发生部分糊化。对于湿热处理马铃薯淀粉, 经不同压力超高压处理后, 其淀粉的颗粒均未发生破坏, 轮廓分明, 表明湿热处理后淀粉基本不受 600 MPa 内超高压处理的影响, 未观察到淀粉的明显糊化现象。

### 3.2 湿热处理对淀粉超高压糊化过程中结晶结构的影响

图 2 为经不同湿热-超高压条件处理前后的马铃薯淀粉颗粒的偏光显微镜图。由图 2 可知, 马铃薯淀粉颗粒具有明显的球晶结构特征, 在偏光显微镜下呈现出偏光十字, 大部分偏光十字并不对称, 其十字交叉位于颗粒的脐点处。

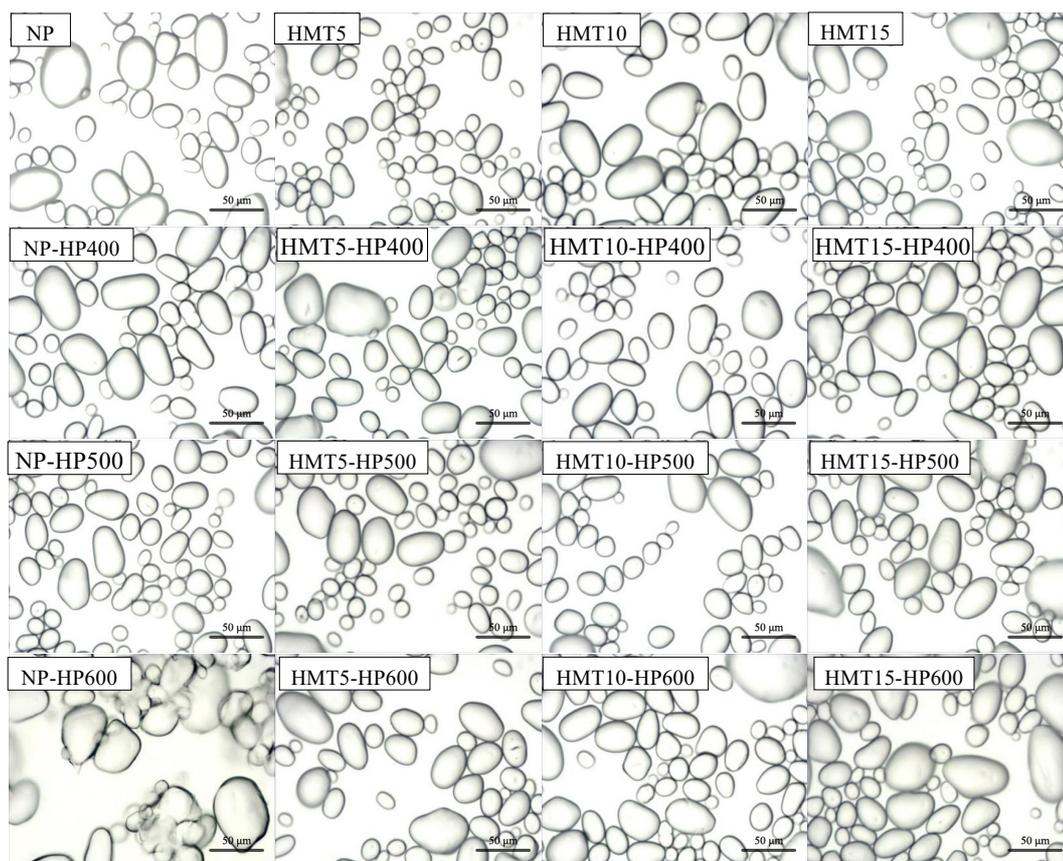


图 1 不同湿热-超高压条件处理后马铃薯淀粉颗粒光学显微镜图

Fig.1 Optical micrographs of potato starch granules treated under different heat moisture-ultra high pressure conditions

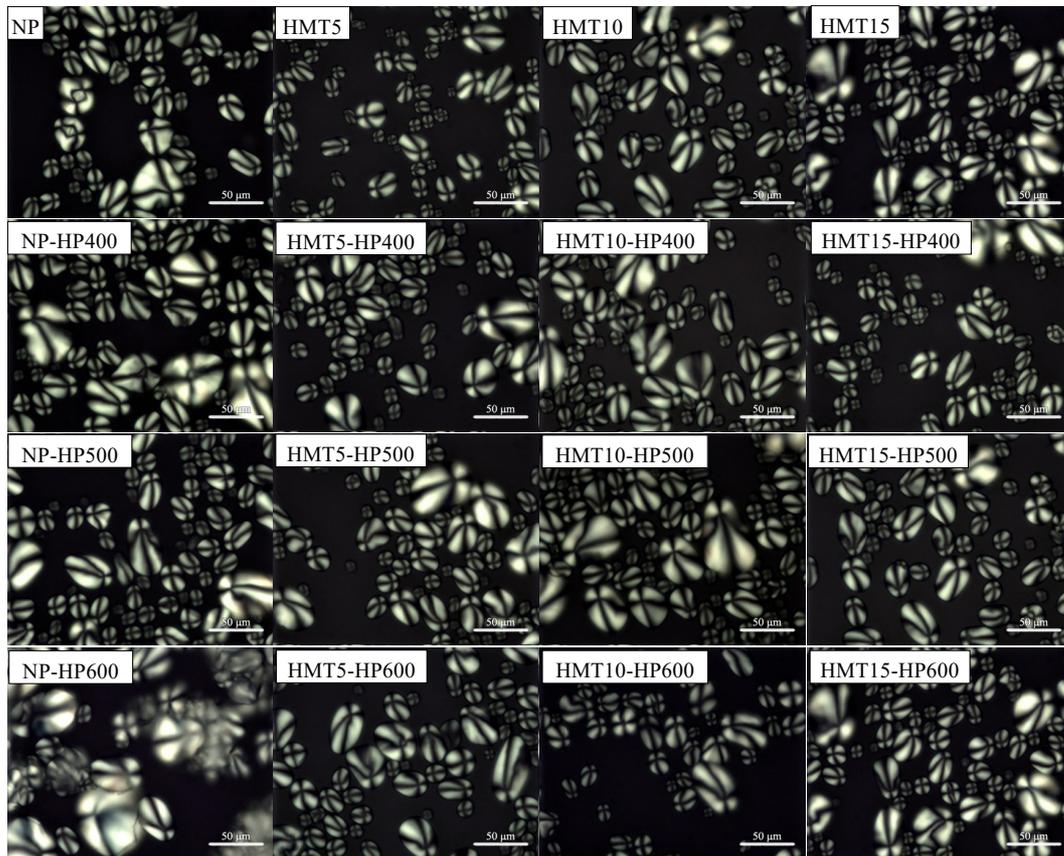


图2 不同湿热-超高压条件处理后马铃薯淀粉颗粒偏光显微图

Fig.2 Polarized micrograph of potato starch granules treated under different heat moisture-ultra high pressure conditions

湿热处理后淀粉样品颗粒整体偏光十字仍然存在,表明内部结晶结构未被破坏。马铃薯原淀粉经超高压处理后,偏光十字仍然存在,但部分颗粒,尤其是大颗粒内部存在裂纹,且在600 MPa(NP-HP600)处理后较为明显,表明超高压处理对淀粉颗粒内部结晶结构可能存在一定的破坏。相比较而言,湿热处理后的样品经不同压力超高压处理,其偏光十字较为完整。

为了进一步分析超高压处理对淀粉结晶结构的影响,利用X-射线衍射(X-ray diffraction, XRD)技术对样品结晶结构进行分析,所有淀粉样品XRD曲线见图3。由图3可知,马铃薯原淀粉呈现典型的B型结晶,在 $2\theta=5.6^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $22^\circ$ 及 $24^\circ$ 呈现特征衍射峰<sup>[15]</sup>。湿热处理后,淀粉主要衍射峰仍然存在,且未出现新峰。但各特征衍射峰衍射强度较原淀粉有增加趋势。无论样品是否经过湿热处理,其再经过超高压处理后,B型结晶结构仍然存在。为了定量表征湿热处理前后淀粉结晶结构的变化,对其相对结晶度(relative crystallinity, RC)进行了计算<sup>[16]</sup>,见表1。由表可知,湿热处理导致马铃薯淀粉相对结晶度小幅度增加。对于原淀粉,随着超高压处理时间的增加,其RC值持续降低,表明超高压导致马铃薯淀粉发生了部分糊化。与之对应的是,对于湿热处理后淀粉样品,随着超高压处理压力的增加,其RC值亦呈现降低的趋势,但降低程度明显低于原淀粉。

表1 不同湿热-超高压条件处理后马铃薯淀粉的相对结晶度(%)  
Table 1 Relative crystallinity of potato starch treated under different heat moisture-ultra high pressure conditions(%)

湿热处理时间/h	超高压处理压力/MPa			
	0	400	500	600
0	30.6	27.9	16.7	14.4
5	31.4	29.7	23.4	17.8
10	33.7	30.4	26.9	20.1
15	34.2	31.2	28.7	23.4

### 3.3 湿热处理对淀粉热焓特性的影响

为了进一步分析湿热处理对淀粉超高压糊化特性的影响,采用差示扫描量热仪(differential scanning calorimetry, DSC)技术对淀粉热性质进行了测定,其糊化参数见表2。由表2可知,湿热处理导致淀粉起始糊化温度和终止糊化温度增加,即导致淀粉热稳定性增强,而糊化焓增加,这与XRD数据相一致。超高压处理对淀粉糊化温度的影响并未呈现明显规律,但均导致焓值降低。相比较而言,原淀粉较湿热处理淀粉焓值降低更为明显,结合XRD测定结果,可以认为,湿热处理可能通过使淀粉内部结构更加紧密,导致淀粉耐超高压能力提升,延缓了淀粉的超高压糊化过程。

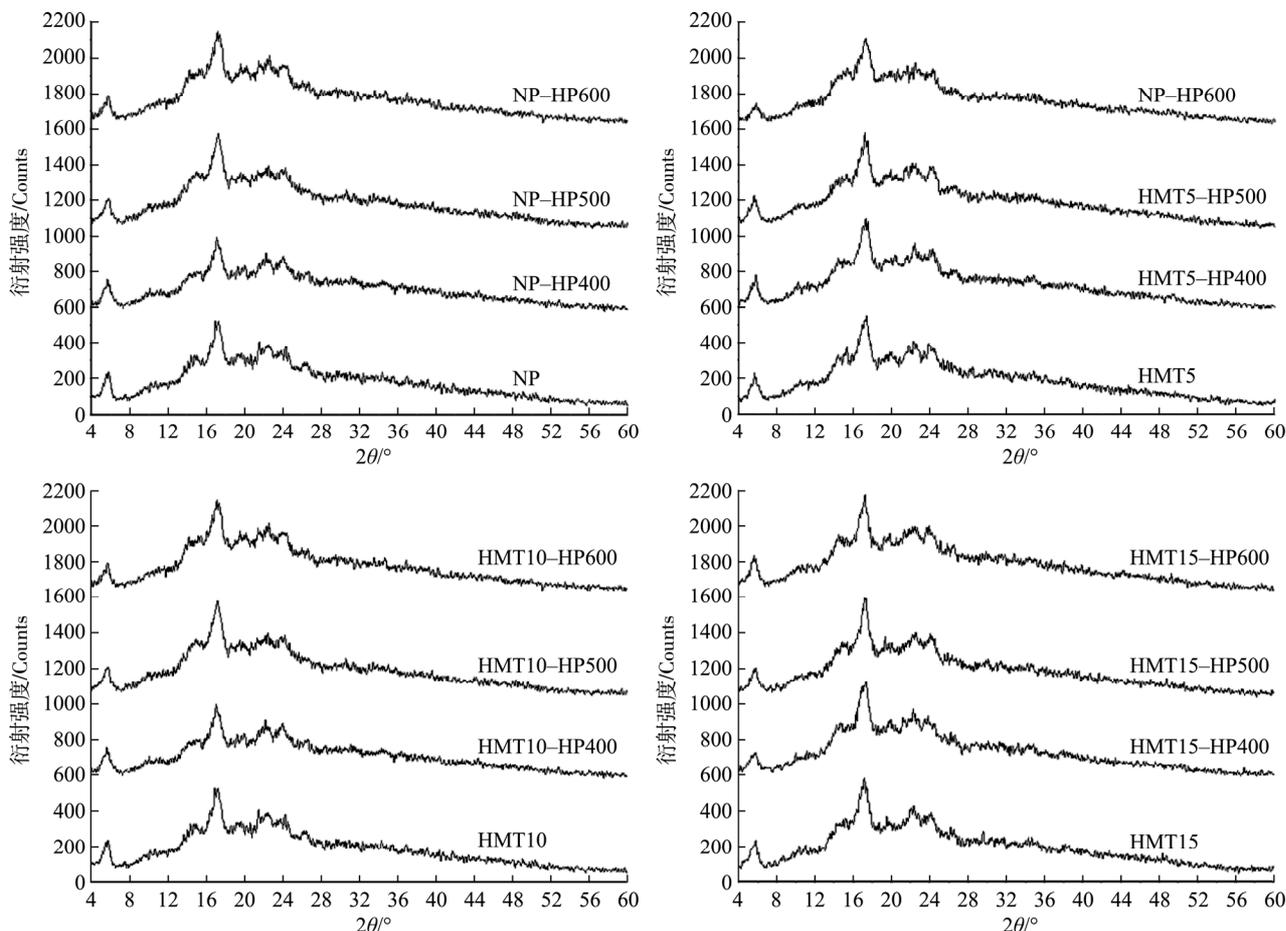


图 3 不同湿热-超高压条件处理后马铃薯淀粉的 XRD 曲线

Fig.3 X-ray diffraction curves of potato starch treated under different heat moisture-ultra high pressure conditions

表 2 不同湿热-超高压条件处理后马铃薯淀粉 DSC 参数

Table 2 DSC parameters of potato starch treated under different heat moisture-ultra high pressure conditions

样品	起始温度 $T_0/^\circ\text{C}$	峰值温度 $T_p/^\circ\text{C}$	终止温度 $T_c/^\circ\text{C}$	糊化焓 $\Delta H/(\text{J/g})$
NP	58.1±0.6 <sup>dc</sup>	61.8±0.3 <sup>i</sup>	67.8±1.1 <sup>f</sup>	19.2±0.3 <sup>c</sup>
NP-HP400	57.8±0.2 <sup>e</sup>	62.0±1.3 <sup>i</sup>	77.4±0.3 <sup>bcd</sup>	14.5±0.6 <sup>ef</sup>
NP-HP500	58.2±1.1 <sup>dc</sup>	62.5±0.7 <sup>i</sup>	75.0±0.5 <sup>dc</sup>	13.0±0.2 <sup>g</sup>
NP-HP600	59.0±0.3 <sup>d</sup>	64.1±0.2 <sup>h</sup>	79.8±0.6 <sup>ab</sup>	7.5±0.5 <sup>h</sup>
HMT5	60.6±0.2 <sup>c</sup>	68.2±0.7 <sup>ab</sup>	79.1±0.2 <sup>abc</sup>	21.4±0.3 <sup>b</sup>
HMT5-HP400	60.7±0.1 <sup>bc</sup>	67.1±0.1 <sup>cdef</sup>	78.5±0.7 <sup>abc</sup>	17.2±0.2 <sup>d</sup>
HMT5-HP500	60.7±0.2 <sup>bc</sup>	66.3±0.1 <sup>cfg</sup>	74.5±1.6 <sup>c</sup>	15.5±0.3 <sup>e</sup>
HMT5-HP600	61.3±0.3 <sup>bc</sup>	65.9±0.4 <sup>g</sup>	77.7±2.6 <sup>bc</sup>	14.2±0.3 <sup>f</sup>
HMT10	62.0±0.1 <sup>ab</sup>	69.0±0.4 <sup>a</sup>	81.0±2.0 <sup>a</sup>	22.2±1.3 <sup>b</sup>
HMT10-HP 400	62.0±0.3 <sup>ab</sup>	68.0±0.8 <sup>abc</sup>	77.0±1.1 <sup>cd</sup>	19.2±1.1 <sup>c</sup>
HMT10-HP 500	61.2±0.3 <sup>bc</sup>	67.7±0.4 <sup>bcd</sup>	78.0±1.1 <sup>bc</sup>	18.1±0.1 <sup>cd</sup>
HMT10-HP 600	61.0±0.9 <sup>bc</sup>	65.9±0.7 <sup>g</sup>	80.6±1.6 <sup>a</sup>	15.5±0.5 <sup>e</sup>
HMT15	61.9±0.2 <sup>abc</sup>	68.5±1.2 <sup>ab</sup>	81.1±0.4 <sup>a</sup>	25.1±0.8 <sup>a</sup>
HMT15-HP 400	62.7±2.1 <sup>a</sup>	67.4±0.2 <sup>bcd</sup>	77.0±1.0 <sup>cd</sup>	22.3±0.3 <sup>b</sup>
HMT15-HP 500	61.1±0.0 <sup>bc</sup>	66.7±0.7 <sup>defg</sup>	77.1±1.1 <sup>cd</sup>	19.2±0.6 <sup>c</sup>
HMT15-HP 600	60.7±0.5 <sup>bc</sup>	66.1±0.0 <sup>f</sup>	78.5±2.6 <sup>abc</sup>	17.6±1.7 <sup>d</sup>

注: 同列不同字母代表差异性显著( $P<0.05$ )。

### 3.4 湿热处理时间对淀粉黏度的影响

图 4 为不同湿热-超高压条件处理前后马铃薯淀粉 RVA 图, 对应特征参数见表 3。由图 4 和表 3 可知, 天然马铃薯淀粉呈现明显的 A 型黏度曲线, 峰值黏度和衰减值较大。5 h 湿热处理后, 黏度曲线由 A 型转化为峰值黏度和衰减值相对较低的 B 型。当时间达到 10 h 后, 黏度曲线转化为 D 型, 即在测试程序下, 黏度持续增加, 淀粉的峰值黏度消失。上述结果表明, 湿热处理改变了淀粉颗粒内部结构, 糊化过程中淀粉分子吸水性降低, 导致淀粉颗粒糊化过程膨胀性变差。同时, 湿热处理导致起糊温度逐渐增加, 这与 DSC 测试结果趋势一致; 最终黏度先增加又降低, 表明湿热处理增加了淀粉糊形成凝胶能力, 但随着处理时间的增加有所降低。

原淀粉经超高压处理后, 峰值黏度和衰减值逐渐减小, 尤其是当处理压力达到 600 MPa 时, 峰值黏度降至 3000 cp 左右, 这可能与马铃薯淀粉内部结晶结构遭到破坏有关。湿热处理样品超高压糊化过程中, 衰减值整体上呈增加趋势, 曲线由 D 型向 B 型转化, 表明对湿热处理样品进行超高压处理, 可能通过影响淀粉内部结构, 导致膨

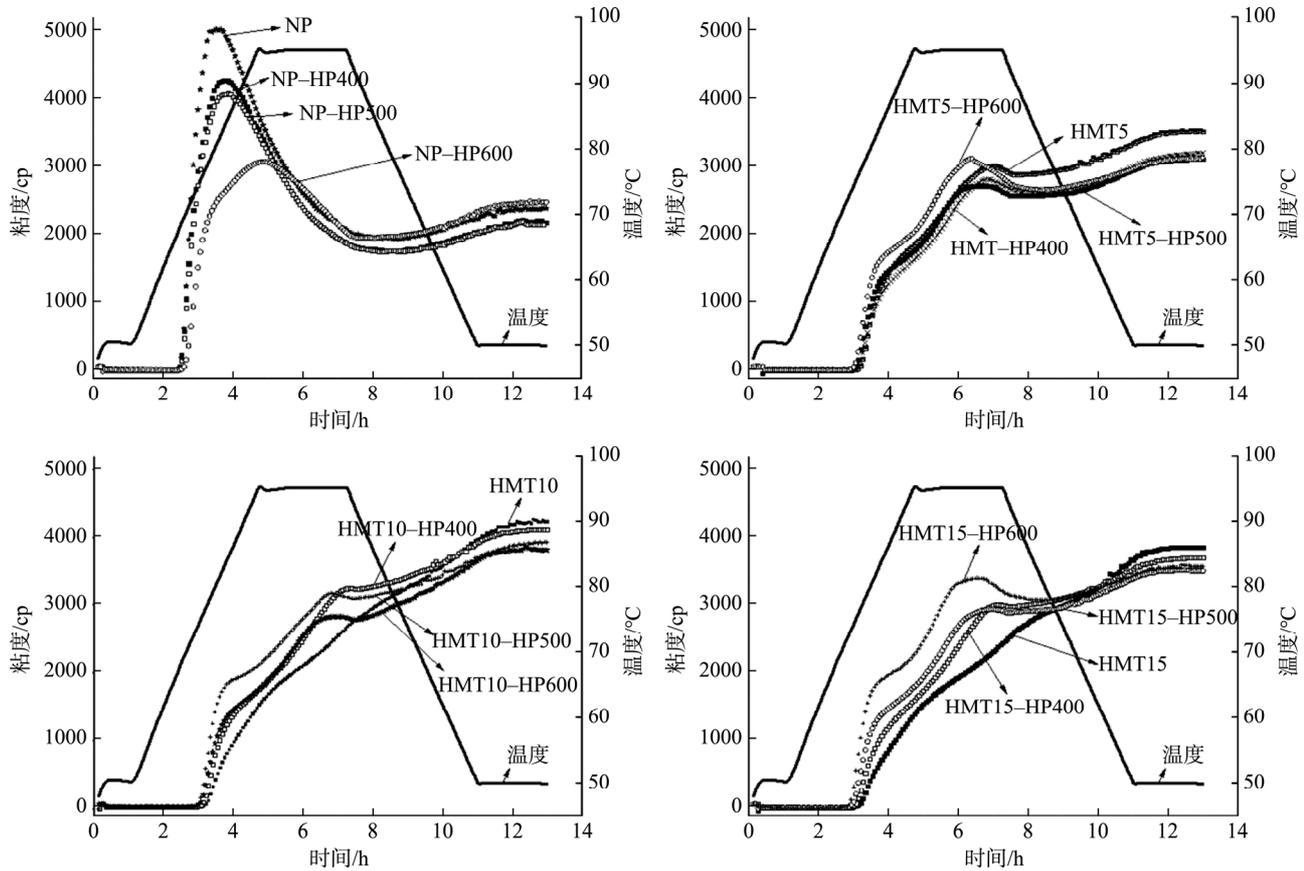


图4 不同湿热-超高压条件处理前后马铃薯淀粉的 RVA 曲线

Fig.4 RVA curves of potato starch treated under different heat moisture-ultra high pressure conditions

表3 不同湿热-超高压条件处理后马铃薯淀粉 RVA 曲线特征值

Table 3 RVA curve eigenvalue of potato starch treated under different heat moisture-ultra high pressure conditions

样品	峰值粘度/cP	谷值粘度/cP	衰减值/cP	最终粘度/cP	回生值/cP	起糊温度/°C
NP	5014	1951	3063	2396	445	67.00
NP-HP400	4282	1766	2516	2195	429	66.90
NP-HP500	4083	1760	2323	2161	401	67.80
NP-HP600	3079	1963	1116	2488	525	68.60
HMT5	3023	2893	130	3530	633	73.45
HMT5-HP400	2820	2623	197	3204	581	73.50
HMT5-HP500	2727	2580	147	3121	541	72.75
HMT5-HP600	3126	2663	463	3125	462	71.85
HMT10	—	—	—	4232	—	75.90
HMT10-HP 400	3247	3235	12	4115	880	75.20
HMT10-HP 500	2830	2782	48	3809	1027	73.50
HMT10-HP 600	3174	3092	82	3925	833	73.55
HMT15	—	—	—	3848	—	75.15
HMT15-HP 400	3012	2981	31	3690	689	74.35
HMT15-HP 500	2940	2887	53	3501	614	72.60
HMT15-HP 600	3388	3073	315	3558	485	71.85

—: 代表无法测得

胀性改善。就起糊温度而言, 湿热处理样品超高压处理过程中, 起糊温度逐渐降低, 这与原淀粉变化趋势相反。

## 4 结 论

研究表明, 在本研究选择的湿热处理条件下, 马铃薯淀粉颗粒形貌并未发生变化, 偏光十字仍然存在, 糊化温度、相对结晶度及糊化焓值均呈现增加的趋势, 表明湿热处理能通过改变淀粉颗粒内部结构, 引起淀粉分子吸水性降低, 进而导致淀粉膨胀性变差、粘度降低, 因此其 RVA 粘度曲线由 A 型向 D 型转变。

湿热处理马铃薯淀粉和原淀粉在经 400~600 MPa 超高压处理过程中, 其相对结晶度、糊化焓值均降低。但与原淀粉相比, 湿热处理后淀粉在超高压处理过程中其 RVA 粘度曲线由 D 型向 B 型转变, 相对结晶度和糊化焓值降低程度减小, 且糊化温度降低, 表明湿热处理可能通过使淀粉内部结构更加紧密, 有效延缓了淀粉超高压糊化过程, 增加了淀粉耐压性。

## 参考文献

- [1] Camire ME, Kubow S, Donnelly DJ. Potatoes and human health [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2009, 49(10): 823-840.
- [2] 蒲华寅, 刘姝含, 韩馨蕊, 等. 超高压改性淀粉凝胶特性研究[J]. *食品科技*, 2018, 43(10): 300-305.  
Pu HY, Liu SH, Han XR, *et al.* Gel properties of starch modified by ultra high pressure [J]. *Food Sci Technol*, 2018, 43(10): 300-305.
- [3] 岳进, 骆亚丽, 钟宇, 等. 高静压对水产品加工及其致敏性影响的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(2): 569-578.  
Yue J, Luo YL, Zhong Y, *et al.* High hydrostatic pressure processing of seafood and its effects on allergenicity [J]. *J Food Saf Qual*, 2013, 4(2): 569-578.
- [4] 陈复生. 食品超高压加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
Chen FS. *Food ultra-high pressure processing technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [5] Guo ZB, Zeng SX, Zhang Y, *et al.* The effects of ultra-high pressure on the structural, rheological and retrogradation properties of lotus seed starch [J]. *Food Hydrocolloid*, 2015, 44: 285-291.
- [6] Li WH, Bai YF, Mousaa SAS, *et al.* Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical and structural properties of rice starch [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2012, 5(6): 2233-2241.
- [7] Liu PL, Hu XS, Shen Q. Effect of high hydrostatic pressure on starches: A review [J]. *Starch Stärke*, 2010, 62(12): 615-628.
- [8] 荆晓燕, 杨留枝, 刘延奇. 天然淀粉的超高压糊化压力研究[J]. *郑州轻工业学院学报(自然科学版)*, 2012, 27(4): 40-43.  
Jing XY, Yang LZ, Liu YQ. Study on gelatinization pressure of starch by ultra high pressure processing [J]. *J Zhengzhou Univ Light Ind (Nat Sci Ed)*, 2012, 27(4): 40-43.
- [9] Oh HE, Pinder DN, Hemar, Y, *et al.* Effect of high-pressure treatment on various starch-in-water suspensions [J]. *Food Hydrocolloid*, 2008, 22(1): 150-155.
- [10] BeMiller JN, Huber KC. Physical modification of food starch functionalities [J]. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2015, 6(1): 19-69.
- [11] Zavareze EDR, Dias ARG. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review [J]. *Carbohydr Polym*, 2011, 83(2): 317-328.
- [12] 刘晓媛, 熊旭红, 曾洁, 等. 湿热处理对甘薯淀粉流变特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(10): 78-86.  
Liu XY, Xiong XH, Zeng J, *et al.* Effects of heat-moisture treatment on rheological properties of sweet potato starch [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(10): 78-86.
- [13] 蒲华寅, 马芸, 黄萌, 等. 超高压辅助制备醋酸酯淀粉结构性性质研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(12): 1-5.  
Pu HY, Ma Y, Huang M, *et al.* Structure and properties of acetylated corn starch prepared under ultra high pressure (UHP) [J]. *Food Mach*, 2017, 33(12): 1-5.
- [14] 周凤超, 李禹儒, 赵俊梅, 等. 氧化和湿热处理对马铃薯淀粉功能特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(15): 31-36.  
Zhou FC, Li YR, Zhao JM, *et al.* Effect of oxidation and heat moisture treatments on functional properties of potato starch [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(15): 31-36.
- [15] 王书雅, 翟晨, 时超, 等. 基于 X-射线衍射及扫描电子显微镜的马铃薯淀粉掺伪鉴别[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(10): 2311-2315.  
Wang SY, Zhai C, Shi C, *et al.* Detection and identification of adulterated substitution in potato starch by X-ray diffraction and scanning electron microscope [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(10): 2311-2315.
- [16] 陈翠兰, 张本山, 陈福泉. 淀粉结晶度计算的新方法[J]. *食品科学*, 2011, 32 (9): 68-71.  
Chen CL, Zhang BS, Chen FQ. A novel method for calculating starch crystallinity [J]. *Food Sci*, 2011, 32 (9): 68-71.

(责任编辑: 陈雨薇)

## 作者简介



蒲华寅, 博士, 讲师, 主要研究方向为淀粉资源开发与利用。

E-mail: puhuyin@sust.edu.cn



黄峻榕, 博士, 教授, 主要研究方向为淀粉资源开发与利用。

E-mail: huangjunrong@sust.edu.cn