

碾轧对马铃薯淀粉的机械力化学效应

牛 凯, 代养勇*, 董海洲, 侯汉学, 张 慧, 刘传富, 纪庆柱, 张 勇

(山东农业大学食品科学与工程学院, 山东省粮食加工技术工程技术研究中心, 山东 泰安 271018)

摘 要: 以马铃薯淀粉为原料, 研究碾轧处理对淀粉结构和性质的影响。通过扫描电子显微镜、X射线衍射、差示扫描量热仪、傅里叶变换红外光谱仪、快速黏度分析仪、偏光显微镜等手段揭示碾轧对马铃薯淀粉的机械力化学效应。结果表明, 碾轧处理对淀粉颗粒的无定形区、结晶区产生不同程度的机械力化学作用, 导致马铃薯淀粉性质发生显著变化。由此推断淀粉颗粒内部依次发生了受力、聚集和团聚效应。

关键词: 碾轧; 马铃薯淀粉; 机械力化学效应; 理化性质; 结构

Mechanochemical Effect of Rolling on Potato Starch

NIU Kai, DAI Yangyong*, DONG Haizhou, HOU Hanxue, ZHANG Hui, LIU Chuanfu, JI Qingzhu, ZHANG Yong

(Engineering and Technology Center for Grain Processing in Shandong Province, College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: The present work was done to investigate the effect of rolling on the structure and physicochemical properties of potato starch. Scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), differential scanning calorimetry (DSC), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), rapid visco analyzer (RVA), and polarizing microscope (PLM) were adopted to reveal the mechanochemical effect of rolling on potato starch. The results showed that rolling treatment had different mechanochemical effects on the amorphous and crystalline regions of starch granules, leading to apparent changes in starch properties. This led us to infer that typical loading, aggregation and agglomeration effects occurred in starch granules.

Key words: rolling; potato starch; mechanochemical effect; physicochemical properties; structure

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201719004

中图分类号: TS231

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2017) 19-0018-06

引文格式:

牛凯, 代养勇, 董海洲, 等. 碾轧对马铃薯淀粉的机械力化学效应[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 18-23. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201719004. <http://www.spkx.net.cn>

NIU Kai, DAI Yangyong, DONG Haizhou, et al. Mechanochemical effect of rolling on potato starch[J]. Food Science, 2017, 38(19): 18-23. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201719004. <http://www.spkx.net.cn>

当物质受到高压、剪切、碾轧或摩擦等机械力作用时, 所施加的机械能一部分以各种形式储存于物质内部, 由此而引起物质发生结构及物理化学性质变化的现象称之为机械力化学效应^[1]。固体物质在机械力作用下主要会发生颗粒形态变化、晶格缺陷或畸变、结晶程度降低、晶型转变等变化^[2]。

碾轧作为一种简便有效的物理改性技术, 是利用碾轧轮的滚动, 对物料进行搓捻、压揉、摩擦, 使料层之间发生位移, 使物料被破坏变得细化, 实现对物料微观组织结构的改善, 进而提高其综合品质^[3]。目前, 国内外对淀粉机械力作用研究主要集中在高压和剪切方面, 而碾轧对淀粉的机械力作用研究尚少。本实验利用碾轧机,

通过控制时间来研究碾轧对马铃薯淀粉结构和性质的影响, 从而揭示碾轧对淀粉的机械力化学效应, 为淀粉物理改性提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

马铃薯淀粉 庄浪县南湖镇成林三豪淀粉有限公司。

1.2 仪器与设备

ZKY-101型碾轧机 北京中科浩宇科技发展有限公司;

UV-8000A型双光束紫外-可见分光光度计 上海元析仪器有限公司; RVA-Eritm黏度分析仪 瑞典波通仪器有限公司;

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31471619); 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2014JL020)

作者简介: 牛凯 (1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮油食品加工。E-mail: niukai1992@sina.cn

*通信作者: 代养勇 (1975—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为粮油食品加工。E-mail: dyyww@163.com

Nicolet iS5傅里叶变换红外光谱仪 美国热电尼高力公司; B-383POL偏光显微镜 意大利康帕斯公司; D8 ADVANCE型X射线衍射仪 德国Bruker-Axs有限公司; QUANTA FEG250扫描电子显微镜 美国FEI公司; LS-POP (6) 型激光粒度分析仪 珠海欧美克仪器有限公司; TA-60热重分析 (thermal gravity analysis, TGA) 仪 日本岛津公司; 200PC差示扫描量热仪 耐驰科学仪器商贸 (上海) 有限公司。

1.3 方法

1.3.1 马铃薯淀粉样品的处理

将马铃薯淀粉置于45℃烘箱干燥至水分含量低于5%, 将烘后的淀粉放入碾轧机内, 在主机转速为20 Hz条件下分别处理3、6、9、12、24 h, 由此得到碾轧处理后的马铃薯淀粉。

1.3.2 扫描电子显微镜观察

将碾轧处理后的样品进行干燥, 用导电双面胶将其固定在金属样品台上, 然后进行喷金处理, 将处理好的样品用扫描电子显微镜分别放大1 000、2 000倍观察。

1.3.3 偏光显微镜观察

将淀粉样品配制成10 g/L淀粉乳, 取一滴滴到载玻片上, 盖上盖玻片后放入样品台上进行观察、拍照, 样品放大400倍。

1.3.4 粒度分布的测定

淀粉颗粒粒度分布采用激光粒度分析仪进行检测。将待测样品溶于一定量的去离子水中, 搅拌均匀, 置于激光粒度分析仪中, 每个样品重复测3次。

1.3.5 X射线衍射分析

采用X射线衍射仪测定结晶特性。测试条件为: 特征射线CuK α , 管压为40 kV, 电流100 mA, 扫描速率为4°/min, 测量角度2 θ =3°~55°, 步长为0.02°, 发散狭缝为1°, 防发散狭缝为1°, 接收狭缝为0.16 mm。

1.3.6 傅里叶变换红外光谱扫描

采用傅里叶变换红外光谱仪的ATR附件对不同组淀粉样品进行扫描和测定, 波数范围为500~4 000 cm⁻¹, 扫描次数为32, 分辨率为4 cm⁻¹。

1.3.7 热稳定性分析

样品经干燥后, 采用TA-60 TGA仪对样品进行TGA分析, 测试条件: 试样质量5 mg, 升温速率25℃/min, 温度范围25~600℃, N₂为保护气。

1.3.8 水溶指数和膨胀度的测定

准确称取一定质量马铃薯淀粉样品于烧杯中, 配成质量浓度为10 g/L的淀粉乳500 mL, 在85℃条件下糊化30 min, 不断搅拌, 冷却至室温, 4 000 r/min离心30 min, 将上层清液倾出于已经恒质量的烧杯中, 放入105℃烘箱中烘干至恒质量, 称取其质量即被溶解的淀粉质量 m_1 , 称取离心后沉淀物质量为膨胀淀粉质量 m_2 , 按公式(1)、(2)计算水溶指数(S)和膨胀度^[4-5]。

$$S/\% = \frac{m_1}{m_3} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{膨胀度}/(\text{g/g}) = \frac{m_2}{m_3(100-S)} \times 100 \quad (2)$$

式中: m_1 为上清液烘干恒质量后的质量/g; m_2 为离心后沉淀物质量/g; m_3 为绝干样品质量/g。

1.3.9 透光率的测定

精确称取一定质量的淀粉 (干基), 加蒸馏水配制成质量浓度为10 g/L的淀粉乳50 mL, 置于沸水浴中加热糊化30 min。在糊化过程中要边加热边搅拌, 糊化完成后冷却至室温, 装入比色皿中, 用分光光度计于650 nm波长处测定透光率^[6]。

1.3.10 糊化特性的测定

根据样品的水分含量, 量取(25.0±0.1) mL蒸馏水移入新样品筒中, 用称量皿称取(2.00±0.01) g淀粉试样并转移到样品筒内的水面上, 采用快速黏度分析仪测定淀粉的糊化特性。测定过程中温度控制如下: 50℃保持1 min, 3.7 min后上升至95℃, 95℃保持2.5 min, 3.8 min后下降至50℃, 50℃保持2 min。起始10 s内搅拌器转速为960 r/min, 以后保持160 r/min^[7]。

1.3.11 热特性分析

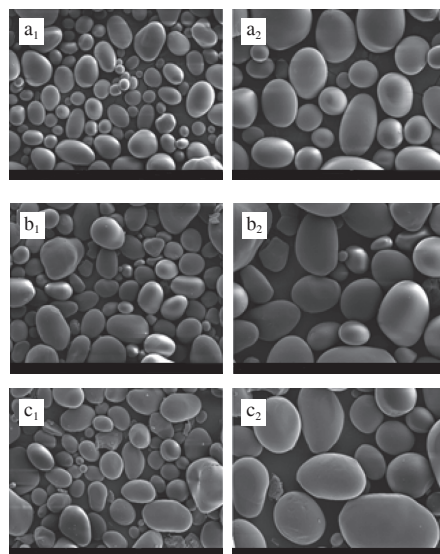
用样品铝盒称取5.0 mg淀粉, 按质量比1:3加入去离子水, 密封, 在室温条件下放置12 h后测定。扫描温度范围为20~120℃, 扫描速率为10℃/min。

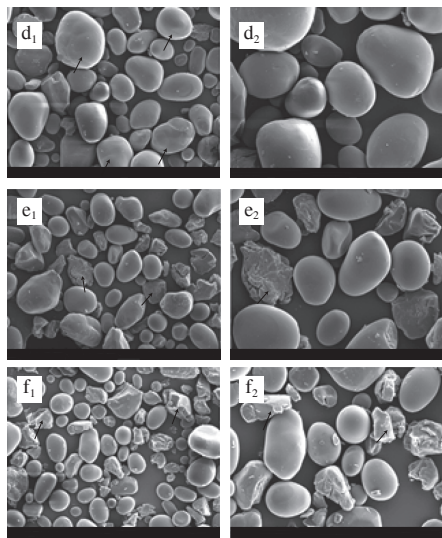
1.4 数据处理

实验数据重复3次, 采用Excel、Origin 8.5软件进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 碾轧对马铃薯淀粉颗粒形貌的影响





a~f.碾轧处理时间分别为0、3、6、9、12、24 h, 图2同; 下标1、2.放大倍数分别为500、1 000。

图1 不同碾轧时间马铃薯淀粉的扫描电子显微镜

Fig. 1 SEM of potato starch at different rolling times

如图1所示, 马铃薯原淀粉的大颗粒呈椭圆状, 小颗粒呈圆状, 表面平坦光滑。当碾轧3 h时, 淀粉的颗粒形态开始出现轻微变形。当碾轧6 h时, 部分淀粉颗粒破裂。当碾轧9 h时, 颗粒破裂的同时表面开始出现球形凸起(图1d₁), 可见淀粉颗粒内部发生了聚集^[8]。当碾轧12~24 h时, 淀粉颗粒破坏得更为严重, 大部分颗粒球状结构发生显著形变, 并且一些小碎片吸附在颗粒表面。

2.2 碾轧对马铃薯淀粉偏光十字的影响

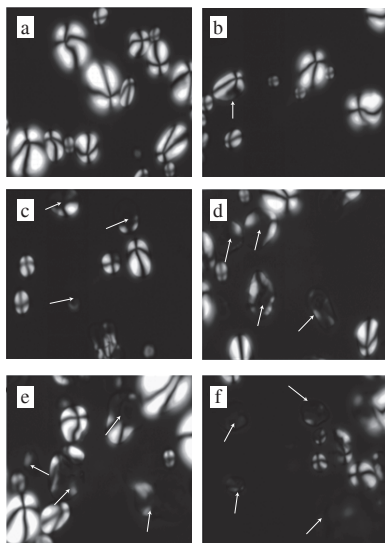


图2 不同碾轧时间马铃薯淀粉的偏光显微镜

Fig. 2 PLM of potato starch modified at different rolling times

由图2可知, 马铃薯淀粉颗粒的偏光十字明显, 但部分颗粒偏光十字并不对称, 其十字交叉点位于颗粒边缘的脐点处^[9]。当碾轧处理6 h时, 部分马铃薯淀粉颗粒的

偏光十字变得模糊, 可见此时碾轧已经对淀粉晶体结构产生破坏作用。当碾轧处理9~12 h时, 部分颗粒十字交叉点黑色区域变大, 说明破坏作用增强。由于淀粉颗粒的核心主要是由无定型区组成, 且脐点中央的分子结构排列较为疏松, 所以脐点处比其他部位弱, 更容易受到破坏^[10]。当碾轧处理24 h时, 部分颗粒的偏光十字特征开始消失, 说明这部分颗粒的结晶结构严重破坏, 无序化程度提高, 导致机械力化学非晶化^[11]。

2.3 碾轧对马铃薯淀粉结晶结构的影响

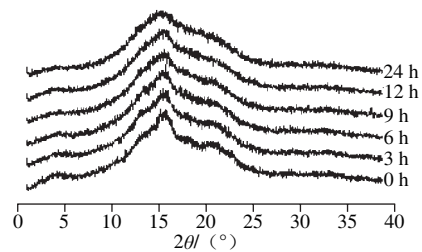


图3 不同碾轧时间马铃薯淀粉的X射线衍射图

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of potato starch at different rolling times

由图3可看出, 马铃薯淀粉在4.5°、17.2°、22.2°处有较强的衍射峰, 属于典型的B型淀粉^[12]。当碾轧处理0~9 h时, 淀粉衍射峰的衍射强度减弱, 结晶度降低, 说明碾轧处理破坏了颗粒结晶结构。当碾轧12~24 h时, 4.5°、22.2°处衍射峰基本消失, 结晶结构发生显著破坏, 由于淀粉的结晶区主要由支链淀粉构成, 因此可推断当淀粉发生破碎时, 晶格缺陷主要发生在支链淀粉的分子链上^[13]。

2.4 碾轧对马铃薯淀粉粒径的影响

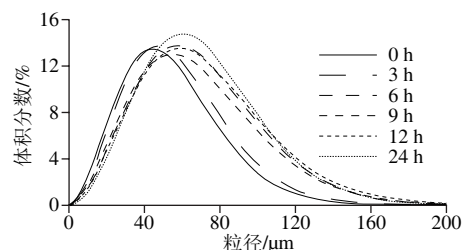


图4 不同碾轧时间马铃薯淀粉的粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of potato starch at different rolling times

由图4可看出, 马铃薯原淀粉的颗粒粒度主要分布在10~100 μm之间。经过3~6 h碾轧处理后, 由于淀粉颗粒形状的不规则变化(图1), 导致马铃薯淀粉的粒径变大, 主要表现为马铃薯淀粉粒度分布曲线右移(图4)。当碾轧时间延长至9 h, 淀粉粒径在40~130 μm之间的颗粒减少, 结合图1可知, 该阶段淀粉颗粒内部发生聚集, 形成球形凸起, 且内部结构更加紧密, 从而导致粒径减小^[14]。当碾轧处理12~24 h时, 粒径在50 μm以上的淀粉颗粒增多, 是因为颗粒破裂、形状变得不规则或是一些小碎片或小颗粒吸附在大颗粒上所致。

2.5 碾轧对马铃薯淀粉官能团的影响

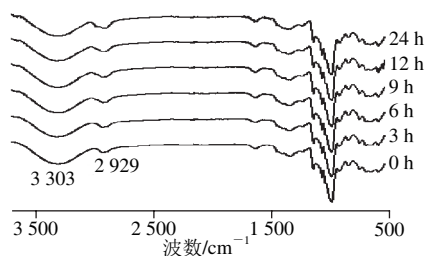


图5 不同碾轧时间马铃薯淀粉傅里叶变换红外光谱图

Fig. 5 FT-IR spectra of potato starch at different rolling times

淀粉在 3303 cm^{-1} 附近宽而强的吸收峰为葡萄糖单元中O—H伸缩振动峰， 2929 cm^{-1} 附近为亚甲基的C—H键的不对称伸缩振动吸收峰^[15]， 1047 、 1022 cm^{-1} 和 1047 、 995 cm^{-1} 吸收峰强度表示淀粉颗粒中结晶区与无定形区大小的比例，并且 995 cm^{-1} 处吸收峰对应于结晶区的单螺旋^[16]。由图5可看出，马铃薯淀粉经碾轧处理后没有新的吸收峰的出现或某个特征峰的消失，表明碾轧处理淀粉前后没有产生新的基团，是物理改性的过程^[17]。

2.6 碾轧对马铃薯淀粉热稳定性的影响

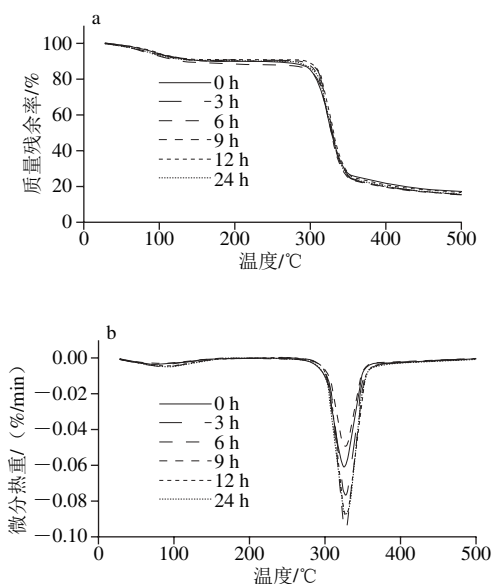


图6 不同碾轧时间马铃薯淀粉的TGA (a) 和DTG (b) 曲线

Fig. 6 TGA (a) and DTG (b) diagrams of potato starch at different rolling times

马铃薯淀粉的热分解主要有两个阶段，第一阶段($T \leq 150\text{ °C}$)质量损失是由于易挥发物质的蒸发所致，主要是水分的蒸发；第二阶段($250\text{ °C} \leq T \leq 370\text{ °C}$)质量损失是由于淀粉分解所致^[18]。

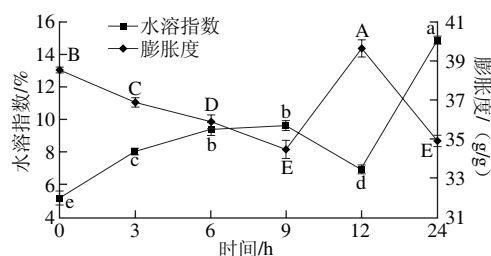
由图6a可看出，马铃薯淀粉在第一阶段质量损失缓慢，淀粉质量略有下降。淀粉在第二阶段时质量损失剧烈，在 370 °C 时，76%淀粉已分解。碾轧处理6 h的淀粉

在 $60 \sim 150\text{ °C}$ 阶段，质量残余率最低，由于淀粉颗粒破裂(图1)，所以淀粉颗粒内部水分容易蒸发散失。而碾轧处理6 h的淀粉在 $260 \sim 320\text{ °C}$ 阶段质量残余率也是最低的，因为碾轧处理6 h的淀粉结晶结构破坏(图2)，热稳定性差，所以葡萄糖环羟基容易快速脱水和分解形成水分子，主链和一些键发生断裂，使淀粉糖类有机物易先分解^[19]。

微分热重(derivative thermogravimetric, DTG)分析曲线表示淀粉质量的变化率，由图6b可知，马铃薯原淀粉达到最大失重速率时的温度为 326 °C ，而碾轧处理后此温度变化不大。但碾轧处理后的淀粉在此温度条件下的失重速率变化率发生了明显变化，由图6b可看出，在此温度条件下，碾轧6 h的淀粉失重速率最大，碾轧9 h的最小。

2.7 碾轧对马铃薯淀粉水溶指数和膨胀度的影响

水溶指数反映了淀粉与水结合能力的强弱，与淀粉的分子结构、颗粒大小、直链淀粉含量等因素有关，而膨胀度则是支链淀粉的特性^[20]。



小写字母不同表示水溶指数差异显著 ($P < 0.05$)；

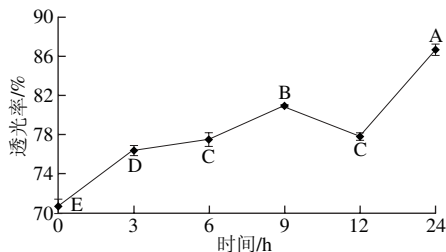
大写字母不同表示膨胀度差异显著 ($P < 0.05$)。

图7 碾轧对马铃薯淀粉水溶指数和膨胀度的影响

Fig. 7 Effect of rolling on water solubility index and swelling power of potato starch

由图7可知，原淀粉的水溶指数为5.15%。当碾轧0~9 h，淀粉水溶指数逐渐增大至9.63%，由于淀粉颗粒内部无定形区结构弱，结晶区结构较强，结合图2和图3，可知该阶段的碾轧处理破坏了颗粒的无定型区和部分结晶区，使直链淀粉易于溶出，水溶指数增大^[21]；而淀粉膨胀度逐渐下降至数值34.45 g/g，推测可能是颗粒内部结晶结构逐渐发生聚集作用(球状凸起)，导致支链淀粉与水的结合能力下降，从而使淀粉膨胀度逐渐下降^[22]。当碾轧12 h时，淀粉水溶指数显著下降至6.92%，这是由于部分小碎片或颗粒吸附在大颗粒上的缘故，导致直链淀粉不易溶出^[23]；而膨胀度显著增大至39.61 g/g，这是因为结晶区破坏，支链淀粉分子与水的结合能力增强，故膨胀度显著增大^[4]。当碾轧至24 h时，因为结晶结构发生严重破坏(图2)，部分支链淀粉分子断裂，导致溶出淀粉增多，水溶指数增大^[24]；同时由于溶出淀粉增多，淀粉颗粒吸水能力下降，导致膨胀度显著降低至34.90 g/g。

2.8 碾轧对马铃薯淀粉透光率的影响



大写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图8 碾轧对马铃薯淀粉透光率的影响

Fig. 8 Effect of rolling on transparency of potato starch

由图8可看出, 透光率随碾轧时间变化规律与水溶指数相似。原淀粉的透光率为70.63%, 当碾轧处理0~9 h时, 马铃薯淀粉的透光率增大至80.91%, 由于此阶段颗粒的无定型区和小部分结晶区破坏, 直链淀粉易溶出, 使溶解度增大, 同时也使得淀粉链在糊液中舒展、分散更加充分, 对光的反射减小, 从而使透光率增大^[25]。碾轧处理时间为12 h时, 马铃薯淀粉的透光率降至77.80%, 这是因为部分小碎片或颗粒吸附在大颗粒上, 淀粉不易溶出和伸展, 从而使透光率降低。当碾轧处理24 h时, 马铃薯淀粉的透光率又显著增大至86.70%, 这是因为此阶段淀粉结晶结构发生严重破坏(图2), 部分支链淀粉分子断裂, 溶出淀粉增多, 使淀粉链更易在水中扩散。

2.9 碾轧对马铃薯淀粉糊化特性的影响

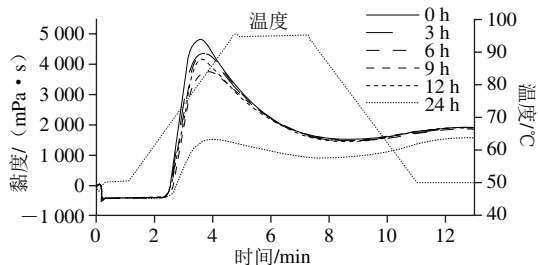


图9 碾轧对马铃薯淀粉糊化特性的影响

Fig. 9 Effect of rolling on pasting properties of potato starch

马铃薯淀粉是长链淀粉, 但因含有磷酸根, 故糊化温度比其他淀粉低^[26]。随着碾轧时间的延长, 淀粉的糊化温度降低, 但不显著。峰值黏度与支链淀粉含量、淀粉结晶度和膨胀度有关^[27]。由图9可知, 碾轧处理显著影响了马铃薯淀粉的峰值黏度。碾轧时间对峰值黏度的影响规律为先下降再升高再下降, 当碾轧9 h时淀粉的峰值黏度较低; 当碾轧12 h时淀粉的峰值黏度又显著上升至4 172 mPa·s。当碾轧至24 h时淀粉的峰值黏度显著下降至1 571 mPa·s。结合图7可知, 淀粉膨胀度与峰值黏度正相关。碾轧处理3~9 h的淀粉由于结晶区内部发生了聚集, 结构紧密, 水分子不易进入结晶区内部, 膨胀度降

低, 从而使峰值黏度也降低。继续碾轧, 颗粒结晶区破坏, 水分子易进入结晶区内部与支链淀粉结合, 膨胀度增大, 导致峰值黏度增大。当碾轧至24 h时, 结晶区发生严重破坏, 溶出淀粉增多同时, 粉颗粒吸水能力下降, 膨胀度降低, 峰值黏度也随之降低。

2.10 碾轧对马铃薯淀粉热特性的影响

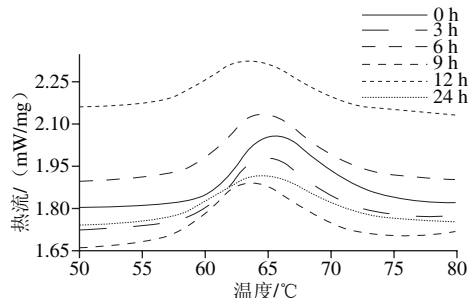


图10 碾轧对马铃薯淀粉热特性的影响

Fig. 10 Effect of rolling on thermal properties of potato starch

T_0 、 T_p 和 T_c 分别表示淀粉颗粒发生相转变的起始温度、峰值温度和终止温度, $T_c - T_0$ 表示淀粉的相转变温度区间, 反映的是淀粉内部晶体的差异程度, 如晶体大小、完善程度等^[28]。由图10可知, 马铃薯原淀粉的糊化峰其温度在60~70 °C之间, 吸收焓为12.45 J/g, 该吸热峰是由淀粉加热糊化发生了从多晶态到非晶态和从颗粒到糊化态的双重物态转化引起的^[29]。碾轧处理后的淀粉 $T_c - T_0$ 均比原淀粉略高, 且随碾轧处理时间延长呈增大趋势, 说明经过碾轧处理后, 淀粉颗粒内部晶体之间的差异增大, 这是因为经过碾轧处理后部分颗粒结晶结构破坏, 有向非结晶部分转化的趋势, 所以晶体之间差异增大。 ΔH 表示糊化焓变, 主要反映的是淀粉颗粒中双螺旋结构的熔解^[30]。由图10可见, 淀粉受力后, 无定型区和结晶区受到破坏, 淀粉颗粒易于糊化, 故糊化温度降低。碾轧处理后淀粉的 ΔH 比原淀粉低, 即要熔解淀粉内部的双螺旋结构需要较少的能量, 说明碾轧处理使双螺旋结构遭到破坏, 这与X射线衍射结果一致。

3 结论

实验结果表明, 碾轧处理后, 马铃薯淀粉结构与性质发生显著变化, 可见碾轧对淀粉具有机械力作用。碾轧处理9 h时, 颗粒表面形成球状凸起、粒径减小, 淀粉脐点周围结晶结构破坏, 同时结晶区内部发生聚集导致膨胀度、热焓值、峰值黏度和糊化温度下降, 该阶段与机械力化学效应聚集阶段相一致。与碾轧处理9 h的淀粉相比, 碾轧处理3~6 h和12~24 h的淀粉结构与性质发生显著变化, 根据机械力化学相关理论推断, 碾轧处理3~6 h和12~24 h分别与机械力化学效应的受力阶段和团聚阶段相对应。

参考文献:

- [1] 涂宗财, 张博, 任维, 等. 超高压微射流对玉米淀粉机械力化学效应研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(2): 172-174. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2008.02.043.
- [2] 杨华明. 材料机械化学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 5-6.
- [3] 王大为, 戴龙, 徐旭, 等. 碾轧对香菇柄综合品质影响及工艺优化[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 33-39.
- [4] SUKHIJA S, SINGH S, RIAR C S. Physicochemical, crystalline, morphological, pasting and thermal properties of modified lotus rhizome (*Nelumbo nucifera*) starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 50-58. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.03.013.
- [5] KLAOCHANPONG N, PUTTANLEK C, RUNGSARDTHONG V, et al. Physicochemical and structural properties of debranched waxy rice, waxy corn and waxy potato starches[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45: 218-226. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.11.010.
- [6] 朱秀梅. 大米直链淀粉在动态超高压微射流均质中的机械力化学效应研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010: 42-44.
- [7] TONG C, CHEN Y L, TANG F F, et al. Genetic diversity of amylose content and RVA pasting parameters in 20 rice accessions grown in Hainan, China[J]. Food Chemistry, 2014, 161(11): 239-245. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.04.011.
- [8] JUSZCZAK L. Surface of triticale starch granules-NC-AFM observations[J]. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 2003, 6(1): 1-8.
- [9] 蒲华寅. 等离子体作用对淀粉结构及性质影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 67-69.
- [10] 陈佩. 不同链/支比玉米淀粉的形态及其在有/无剪切力下糊化的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 88-90.
- [11] 李娜. 固态变形诱导非晶化的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 31-40.
- [12] BERTOFT E, BLENNOW A. Chapter 3-structure of potato starch[M]// SINGH J, KAUR L. Advances in potato chemistry and technology. 2nd ed. Pittsburgh: Academic Press, 2016: 57-73. DOI:10.1016/B978-0-12-800002-1.00003-0.
- [13] 吴俊. 淀粉的粒度效应与微细化淀粉基降解材料研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003: 12-13.
- [14] WANG S S, QU D, CHIEW Y C. A study of starch granular aggregation[J]. Starch-Stärke, 1994, 46(9): 337-341.
- [15] 连喜军, 郭俊杰, 刘立增. 淀粉红外峰归属探讨[J]. 粮食加工, 2015, 40(1): 43-45.
- [16] LIU Y T, MA Y, YU S F, et al. The effect of ball milling treatment on structure and porosity of maize starch granule[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(4): 586-593. DOI:10.1016/j.ifset.2011.06.009.
- [17] 郭泽锦. 超高压处理对莲子淀粉结构及理化特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014: 33-34.
- [18] BENINCA C, COLMAN T A D, LACERDA L G, et al. The thermal, rheological and structural properties of cassava starch granules modified with hydrochloric acid at different temperatures[J]. Thermochimica Acta, 2013, 552(3): 65-69. DOI:10.1016/j.tca.2012.10.020.
- [19] 刘兴训. 淀粉及淀粉基材料的热降解性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 50-79.
- [20] ABEGUNDE O K, MU T H, CHEN J W, et al. Physicochemical characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(2): 169-177. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.03.005.
- [21] MUÑOZ L A, PEDRESCHI F, LEIVA A, et al. Loss of birefringence and swelling behavior in native starch granules: microstructural and thermal properties[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 152: 65-71. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.11.017.
- [22] BRANTLEY J N, WIGGINS K M, BIELAWSKI C W. Polymer mechanochemistry: the design and study of mechanophores[J]. Polymer International, 2013, 62(1): 2-12.
- [23] ASMEDA R, NOORLAILA A, NORZIAH M H. Relationships of damaged starch granules and particle size distribution with pasting and thermal profiles of milled MR263 rice flour[J]. Food Chemistry, 2016, 191: 45-51. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.05.095.
- [24] LI W H, GAO J M, WU G L, et al. Physicochemical and structural properties of A-and B-starch isolated from normal and waxy wheat: effects of lipids removal[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 364-373.
- [25] 张慧, 尹训兰, 侯汉学, 等. 微波辐射对阳离子淀粉性质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 118-123. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201615020.
- [26] JACKSON D S. Starch structure, properties, and determination[M]// CABALLERO B. Encyclopedia of food sciences and nutrition. Pittsburgh: Academic Press, 2003, 133(1): 5561-5567.
- [27] SOMBOONCHAN S, LUBBERS S, ROUDAUT G. Water and temperature contribution to the structuration of starch matrices in the presence of flavour[J]. Food Chemistry, 2016, 195: 79-86. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.04.099.
- [28] 雷俊华. 交联酶解制备新型淀粉药物赋形剂及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 31-33.
- [29] LIAN X J, WANG C J, ZHANG K S, et al. The retrogradation properties of glutinous rice and buckwheat starches as observed with FT-IR, ¹³C NMR and DSC[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 64: 288-293.
- [30] GUO Z B, ZENG S X, XU L, et al. Structural and physicochemical properties of lotus seed starch treated with ultra-high pressure[J]. Food Chemistry, 2015, 186(1): 1-5. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.069.