

湿热处理淀粉的糊化特性及糊化机制

Study on the gelatinization behaviors of heat-moisture treated starch and its mechanism

邢俊杰^{1,2,3} 李 栋² 郭晓娜^{1,3} 朱科学^{1,3}

XING Jun-jie^{1,2,3} LI Dong² GUO Xiao-na^{1,3} ZHU Ke-xue^{1,3}

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214000; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;

3. 青岛特种食品研究院, 山东 青岛 266000)

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Qingdao Special Food Research Institute, Qingdao, Shandong 266000, China)

摘要:以湿热处理淀粉为研究对象,采用动态流变仪(RHE)和差示扫描量热仪(DSC)在过量水分条件下 $[m_{\text{淀粉}}:m_{\text{水}}=1:10\text{ (g/g)}]$ 进行恒速和梯度升温糊化并研究其多阶段糊化特性和糊化机制。结果显示,湿热处理淀粉即使在过量水分条件下糊化也会呈现出双吸热峰(G和 M_1)和双黏度特征峰(PV_1 和 PV_2)。通过对热特性和黏度特性关联分析可将湿热处理淀粉糊化过程分为3个阶段:无定形区吸热(G)发生不可逆溶胀;晶体结构吸热(M_1)解体快速吸水;结晶结构完全解体后体系自吸水溶胀(非吸热)。同时,湿热处理淀粉在糊化过程中具有时间和温度依赖特性,且淀粉在不同糊化阶段存在温度阈值,淀粉糊化的时间和温度依赖特性大小与温度阈值密切相关。

关键词:物理改性;淀粉糊化;多阶段;吸热峰;黏度

Abstract: In this study, the gelatinization of heat-moisture treated (HMT) corn starch was investigated by rheometer (RHE) and differential scanning calorimeter (DSC) under the same condition of excessive water (starch : water = 1 : 10) with heating-rate dependent gelatinization and time-temperature gradient gelatinization tests. DSC and RHE results showed that multiple endothermic transitions (G and M_1) and two viscosity peaks (PV_1 and PV_2) were observed in viscosity curves and DSC traces

even in excess water for HMT starches. The gelatinization process of HMT starch could be divided into three stages by correlation analysis of thermal and viscosity characteristics as follows. The first stage of swelling corresponded to the G endotherm, and the second stage of swelling corresponded to the M_1 endotherm, followed by swelling non-corresponding to any endotherm. The temperature-dependent behaviors of corn starch gelatinization were evidenced by RHE results and starch gelatinization has different temperature thresholds at different stages. The degree of time- and temperature- dependence was closely related to these temperature thresholds.

Keywords: physical modification; starch gelatinization; multi-stage; endothermic peak; viscosity

糊化特性是淀粉的基本性质之一,淀粉的糊化过程对谷物淀粉质食品的最终产品品质起到决定作用。在淀粉糊化理论领域,国外关于淀粉糊化动力学研究较多^[1-2],但由于天然原淀粉结构的复杂性使得糊化过程中不同糊化阶段之间无明显界限,导致难以区分各糊化阶段的细节变化^[3-4]。通过研究改性淀粉的糊化特性,可以从一个新的角度来明晰天然淀粉的糊化过程,同时考虑恒温或变温糊化方式对淀粉糊化过程的影响^[5-6],对改性淀粉在不同糊化阶段的时间和温度的依赖特性进行研究,对完善和验证淀粉糊化理论具有重要意义^[7-8]。

差示扫描量热仪(DSC)和流变仪或RVA是研究淀粉凝胶化或糊化特性的重要手段^[9-10]。其中,在中等或限制水分条件时,DSC曲线上会呈现出多个吸热峰的现象^[11-13],对其进行解释时有多种理论并存的情况,包括水合理论、晶体稳定性理论、有序相变和三阶段相变理论等^[14-15],但尚无相关理论对过量水分条件下的多吸

基金项目:江苏省自然科学基金—青年基金项目(编号: BK20190590);中国博士后科学基金面上项目(编号: 2019M651706);中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号: JUSRP11909)

作者简介:邢俊杰,男,江南大学副研究员,博士。

通信作者:朱科学(1978—),男,江南大学教授。

E-mail: kxzh@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2020-10-12

热峰进行研究^[4,15]。湿热处理是一种重要的物理改性方法^[16-18],湿热处理过程中淀粉颗粒和晶体结构可能发生多种变化,如无定形区内双螺旋结构解体,颗粒的晶体结构遭到破坏,淀粉链分子间与分子内发生重组等^[19]。湿热处理后的淀粉在过量水分条件下有多吸热峰现象,但对其解释目前还存在争议,仍需要进一步研究^[4,20]。试验拟以湿热处理淀粉为样品,在相同的升温速率(10 °C/min)与淀粉—水比例 $[m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 10 \text{ (g/g)}]$,过量水]下,采用 DSC 和 RHE 对同一淀粉样品的糊化过程进行热特性和流变学研究并进行关联分析,以期阐明淀粉的糊化机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

玉米淀粉:河北张家口玉晶食品有限公司;
试验用水:去离子水;
所用试剂:分析纯。

1.2 主要仪器

流变仪:AR2000ex 型,美国 TA 仪器公司;
差示扫描量热仪(DSC):Q10 型,美国 TA 仪器公司;
高速多功能粉碎机:Q250A3 型,上海冰都电器有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:101-3 型,上海路达实验仪器有限公司。

1.3 湿热处理淀粉制备

首先测定天然原淀粉的含水量并记录,计算所需加水量,将计算量的去离子水以喷洒的方式加入到原淀粉中,调节其含水率为 30%。将样品密封于杜兰玻璃容器中,室温平衡 24 h,然后置于 120 °C 的通风烘箱中分别反应 30 min。反应结束后,将样品迅速冷却至室温,并在 40 °C 下风干,粉碎,过 80 目筛,用密封袋包装并保存于干燥器中待用。

1.4 糊化特性研究

通过 AR2000ex 流变仪对淀粉样品进行黏度特性测试。将 2 g 淀粉样品分散到 20 mL 的去离子水中以获得与 DSC 测定相同的淀粉—水比例 $[m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 10 \text{ (g/g)}]$,震荡摇匀 30 min。将改性淀粉悬浊液转载到流变仪 Peltier 上,分别进行以下几种温度—黏度扫描测试。

1.4.1 恒速升温糊化测定 测试时,选取不同的加热速率 5,10,15,20 °C/min 进行黏度扫描。在温度区间 25~95 °C 对淀粉悬浊液体系进行线性升温扫描,并实时记录悬浊液的表观黏度,时间间隔 1 s。

1.4.2 直接升温糊化测定 首先将悬浊液在 50 °C 下平衡 1 min,然后以 10 °C/min 的速度升温至 95 °C,记录黏度变化过程。整个处理过程中,剪切速率保持在 300 s⁻¹。

数据采集间隔为 1 s。

1.4.3 梯度升温糊化测定 首先将淀粉悬浊液以 10 °C/min 的加热速率从 25 °C 加热到预定温度,保持特定时间(5,20,30 min),再以相同的加热速率将体系最终加热到 95 °C,加热过程中实时记录悬浊液的表观黏度,数据采集时间间隔 1 s。其中,在 5 min 较短时间恒温平衡过程中,预定的温度区间为 64~95 °C,具体为 64,66,67,68,70,71,72,73,74,76,78,80,82,84,86,88,90,95 °C,然后筛选特定温度参数进行 20,30 min 较长时间温度平衡程序。

1.4.4 时间和温度依赖特性判定 通过对比分析淀粉在梯度升温糊化过程中温度平衡前后表观黏度的差值($\Delta\mu$)来对时间和温度依赖特性进行判定。具体判定的依据如下:

(1) 温度依赖特性:实际上,整个加热糊化过程都可以被认为是具有温度依赖特性^[21]。在一个糊化过程阶段,假定在一个特定的温度区间下即使淀粉被加热无限长的时间而没有糊化完成,则认为在此温度区间糊化就具有温度依赖特性。

(2) 时间依赖特性:在一个恒定的温度条件下加热淀粉,不需要提高温度,如果淀粉能够在此温度下随着时间延长而完成糊化过程,则认为此糊化阶段是具有时间依赖特性的。

1.5 热特性研究

通过差示扫描量热仪(DSC)测量原淀粉和湿热处理淀粉样品的热特性。在 40 μ L 铝锅内称取淀粉样品(3~4 mg,干样),加入适量去离子水以获得淀粉—水 $[m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 10 \text{ (g/g)}]$ 的混合物。密封铝锅并室温平衡 24 h,以 10 °C/min 的升温速率从 20 °C 加热到 150 °C。空坩埚作为参比。

1.6 数据分析

所有测试重复 3 次,测试数据结果均用平均值 $\pm$ 标准差表示。使用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),通过邓肯多重检验法对同组数据进行显著性差异分析,置信水平为 0.95($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 湿热处理淀粉的糊化特性

淀粉颗粒的多尺度结构较为复杂,通常需要采用多种技术手段对淀粉的糊化特性进行研究^[22]。同一个淀粉糊化过程可以用 DSC 曲线和黏度曲线共同表征,图 1 中的 DSC 曲线和黏度曲线均是在过量水分下 $[m_{\text{淀粉}} : m_{\text{水}} = 1 : 10 \text{ (g/g)}]$,以相同的加热速率(10 °C/min)测得。如图 1(a)所示,在过量水分条件下,原淀粉的黏度曲线在糊化开始前黏度较低且缓慢下降,糊化开始后,黏度逐渐增加直到出现黏度特征峰;原淀粉在糊化过程中逐渐形成吸热峰,该峰的面积大小和糊化焓值相对应,而糊

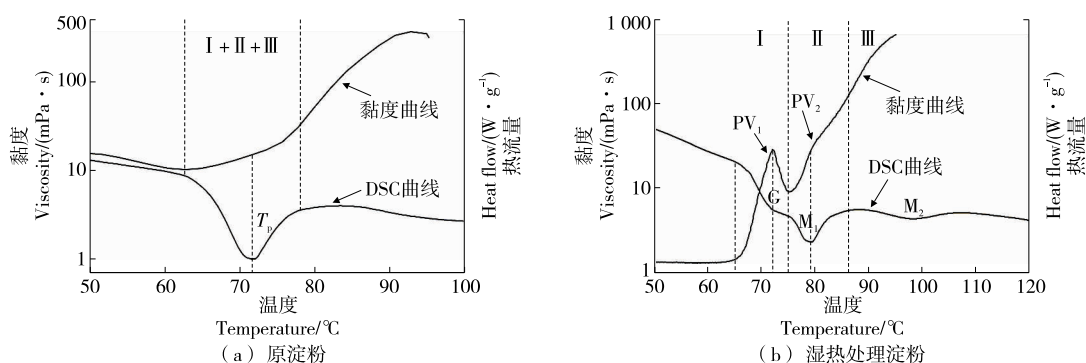


图1 原淀粉、湿热处理淀粉糊化过程中吸热峰与黏度峰的对比分析

Figure 1 Comparing analysis of endotherms with viscosity peaks of native and HMT starch gelatinization

热焐值与颗粒内双螺旋结构断裂所需的耗能有关^[20]。湿热处理淀粉样品的黏度曲线和DSC曲线中分别出现双吸热峰(G, M₁)与黏度特征峰(PV₁, PV₂),其关系见图1(b)。其中,DSC测得的G吸热峰与由流变仪测得的第一黏度峰(PV₁)代表了相同的热转变过程(或反应);M₁则对应于PV₂。基于溶胀溶解理论^[11,23],认为G和M₁峰分别代表湿热处理淀粉的无定形溶胀和晶体结构解体过程。Biliaderis^[24]也认为溶胀通常伴随热相变过程,反映在DSC曲线表现为吸热峰,在黏度曲线上表现为黏度特征峰,还发现淀粉溶胀起始温度接近于DSC检测中的吸热峰起始温度。

基于此,将湿热处理淀粉的糊化过程分为I、II、III 3个阶段,其中,第I阶段,无定形区分子间较弱的氢键吸热(G)发生断裂,释放自由羟基,这些羟基可通过氢键结合水分子,体系黏度增加^[25],产生第一个黏度特征峰PV₁;第II阶段,晶体结构吸热(M₁)解体释放羟基的过程中,体系也在快速吸水,黏度持续增加形成PV₂;第III阶段,结晶结构完全解体后有序排列的支链淀粉已完全解开双螺旋键,大量的羟基暴露在水中,淀粉-水相互作用增强,体系黏度呈指数性增加,体系在不需要额外吸热时即可自吸水溶胀,黏度持续增加至峰值。通过对比同一个糊化过程中热特性和糊化特性可以很好地解释在DSC中出现的三重热相变和黏度曲线的特征峰之间的关系。此外,此糊化理论也能够对Wang等^[11]在淀粉糊化过程中发现的3个明显变化作出很好的解释。

2.2 淀粉糊化的加热速率依赖特性分析

由图2可知,不同加热速率下淀粉的温度-黏度特性曲线呈现出了相同的趋势。其中,在半对数坐标体系下,不同加热速率下的温度-黏度特性曲线均呈现两个黏度特征峰PV₁和PV₂。从图2还可以看出,在第一个峰和第二个峰(I和II阶段)之间有比较清晰的分界线,主要是由于湿热处理可以增加淀粉结晶结构的热稳定性^[15]。因此在加热过程中会在温度尺度上推迟糊化晶体结构的解体过程^[26],这在温度-黏度特性曲线就反映出

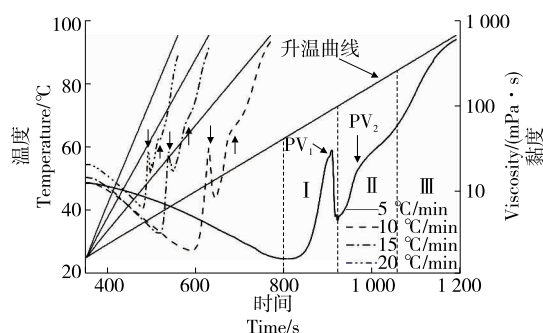


图2 加热速率对湿热处理淀粉黏度变化的影响

Figure 2 Effect of heating rates on the viscosity variation of HMT starch

第二个黏度特征峰逐渐与第一个黏度特征峰发生了分离。

黏度特征峰的峰值温度和加热速率之间具有很大的相关性(表1)。当加热速率从5 °C/min增加到20 °C/min时,黏度曲线上第一个特征峰的峰值温度从70.9 °C增加到72.9 °C;而第二个特征峰的峰值温度从77.8 °C增加到了82.6 °C。扫描速率对温度-黏度特性曲线的影响与其对DSC热谱图的影响很相似^[27]。淀粉糊化过程中,较慢的加热速率会给淀粉颗粒施加类似于淀粉退火(Annealing)的效应,此过程会使得淀粉结晶区

表1 加热速率对湿热处理淀粉黏度特征峰温度参数的影响[†]

Table 1 Effect of heating rate on the characteristic temperatures of peaks viscosity

加热速率/ (°C · min ⁻¹)	峰值温度/°C	
	第一个特征峰	第二个特征峰
5	70.9 ± 0.3 ^A	77.8 ± 0.7 ^A
10	71.6 ± 0.2 ^B	79.5 ± 0.4 ^B
15	72.4 ± 0.2 ^C	81.4 ± 0.5 ^C
20	72.9 ± 0.2 ^D	82.6 ± 0.1 ^D

[†] 同列上标字母不同表示存在显著性差异(P<0.05)。

内的支链淀粉双螺旋结构发生重组优化,同时也会增加无定形区的坚韧度^[28];而较快的加热速率会使得淀粉糊化特征温度值与实际值的测量之间产生滞后。实际上,加热速率对淀粉糊化过程的影响本质上反映的是淀粉糊化的时间和温度依赖特性。在 25~95 ℃ 加热时,加热速率越快,时间依赖性产生的影响越小;而较慢的加热速率就意味着糊化过程的时间越长。

2.3 淀粉糊化的温度依赖特性分析

在不同温度下恒温保温 5 min 的时间—黏度梯度糊化特征曲线如图 3 所示。图 3 中最高的黏度曲线(95 ℃)展示的是典型的淀粉糊化过程,并且展示出湿热处理淀粉所特有的三阶段糊化过程(I、II、III 阶段)。在不同的温度下保持相同时间,即在不同的糊化阶段恒温平衡前后,湿热处理淀粉的黏度变化从不明显增加(64~66 ℃)到适度增加(71~74 ℃),再到大幅度增加(80~95 ℃)。这些黏度值的变化规律表明淀粉的糊化过程是具有温度依赖特性的,且温度依赖特性在不同的糊化阶段影响不同。

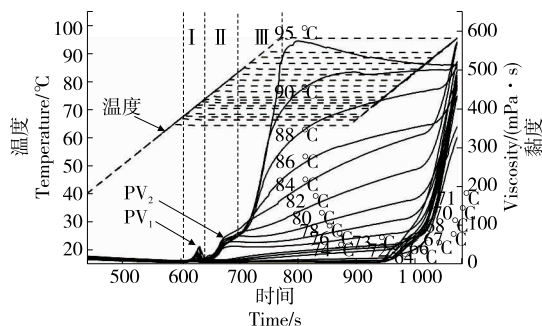
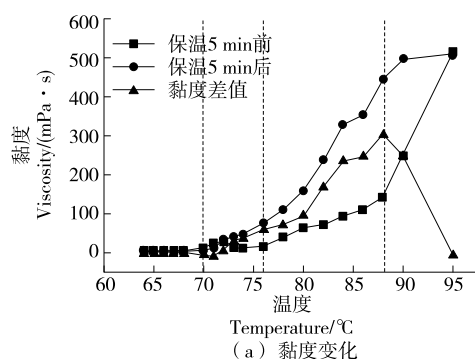


图 3 湿热处理淀粉在不同温度下平衡 5 min 的时间—黏度特性曲线

Figure 3 Viscosity of HMT starch during the time-temperature gradient gelatinization (Samples were held for a short 5 min at predetermined heating temperatures)



TTS₁、TTS₂ 分别为两个糊化阶段的温度阈值 70、76 ℃

图 4 湿热处理淀粉在不同温度下平衡 5 min 前后的黏度和黏度差值($\Delta\mu$)及其一阶导数变化图

Figure 4 The viscosity value, viscosity difference ($\Delta\mu$) and the first-order derivative curve of $\Delta\mu$ values before and after isothermally holding the starch samples at different temperatures for 5 min

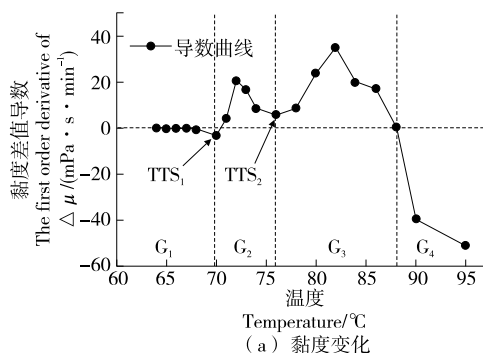
2.4 淀粉糊化的温度阈值分析

为了研究淀粉在不同阶段的温度依赖特性,对不同糊化阶段的温度阈值进行了研究,并从图 4(a)的黏度差值($\Delta\mu$)在温度尺度上进行求导得到其一级导数曲线[图 4(b)]。该一阶导数反映了黏度差值随温度变化的灵敏性,导数越高,黏度差值对温度的敏感性越高,温度依赖特性越强。其中,图 4(b)中两个温度转折点或者临界温度值 70 ℃ 和 76 ℃ 分别被定义为 I、II 糊化阶段温度阈值,这两个温度阈值与不同糊化阶段的启动密切相关。第一个温度 70 ℃ (TTS₁) 被定义为淀粉无定形区发生溶胀的温度阈值;第二个温度 76 ℃ (TTS₂) 则被定义为结晶结构解体的温度阈值。这就意味着:① 只要温度不超过第一个温度阈值($T < 70$ ℃),即使时间再长,淀粉糊化也不会发生,表现出一定的温度依赖特性,同时不具备时间依赖特性;② 只要温度超过第二个温度阈值($T > 76$ ℃),同样,即使不再继续提高温度(维持温度不变),只要足够的时间淀粉糊化就会完成,表现出一定的时间依赖特性^[2]。

2.5 淀粉糊化的时间依赖特性分析

在不同温度下恒温保持不同时间(5, 20, 30 min)的时间—黏度梯度糊化特征曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,湿热处理样品在不同温度平衡过程随时间从 5 min 增加到 20, 30 min 时黏度增加的程度不同。其中,较长时间(20 min 和 30 min)后的黏度变化幅度有显著差异($P < 0.05$)。

在梯度温度等于 TTS₁ (70 ℃) 但低于 TTS₂ 的条件下,第一个黏度特征峰形成于温度平衡程序开始之前,表明第一个糊化阶段(I 阶段)刚好完成;而第二黏度特征峰是在温度平衡程序之后才形成的,则表明第二个糊化阶段(II 阶段)在 70 ℃ 还未开始;当梯度温度开始增加时($T \geq 72$ ℃),温度平衡过程中的黏度差值($\Delta\mu$)逐渐开始变大。例如 76 ℃ 保温之前黏度值为 14 mPa·s,在此温



TTS₁、TTS₂ 分别为两个糊化阶段的温度阈值 70、76 ℃

图 4 湿热处理淀粉在不同温度下平衡 5 min 前后的黏度和黏度差值($\Delta\mu$)及其一阶导数变化图

Figure 4 The viscosity value, viscosity difference ($\Delta\mu$) and the first-order derivative curve of $\Delta\mu$ values before and after isothermally holding the starch samples at different temperatures for 5 min

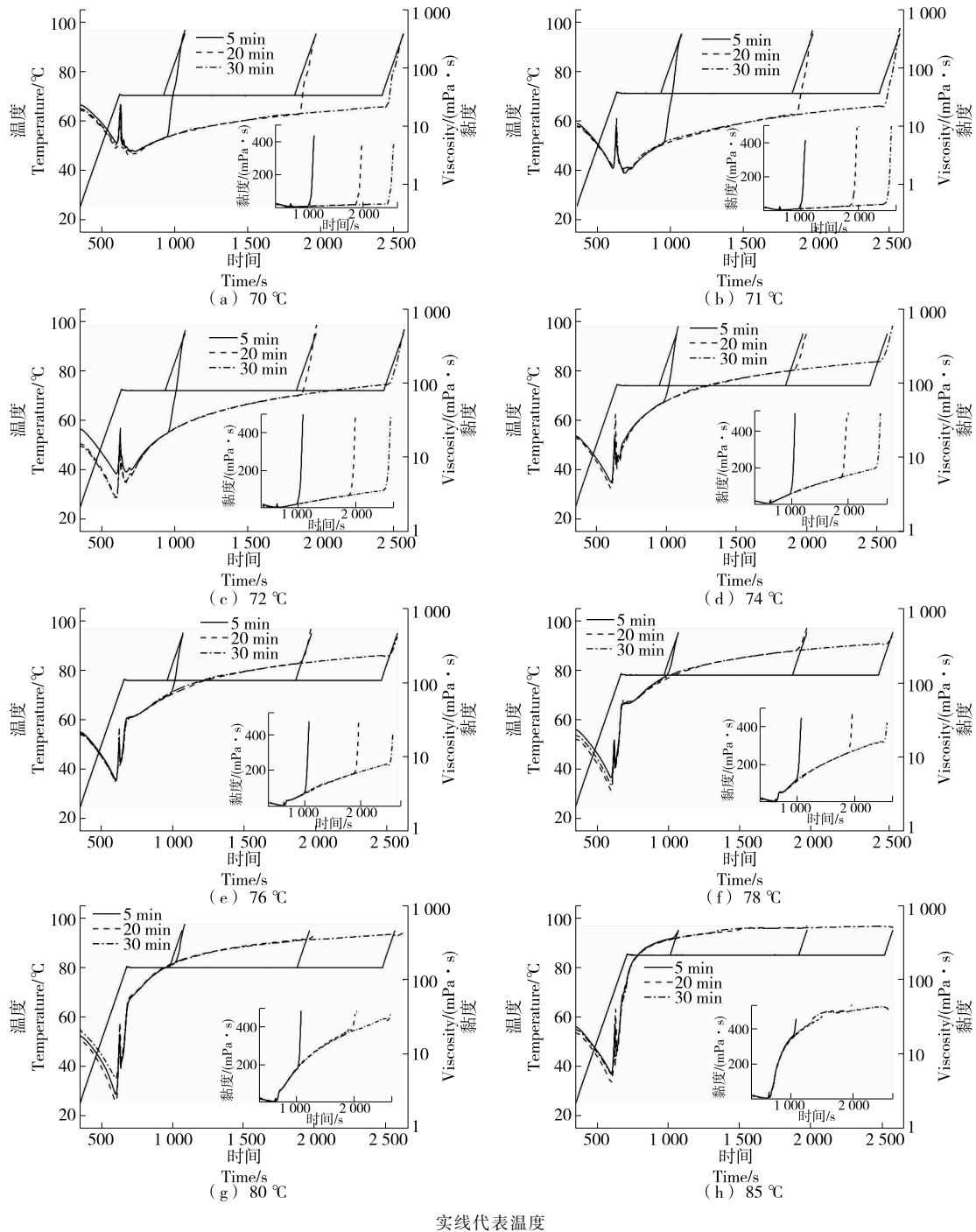


图5 湿热处理淀粉在不同温度下平衡5,20,30 min的半对数坐标时间—黏度特性曲线
Figure 5 The semi-logarithmic plot of viscosity versus time at different isothermal holding temperatures for 5, 20, and 30 min

度下平衡5,20,30 min之后,体系黏度分别增加了4,12,13倍(表2)。黏度的增加主要是由于在第二个糊化阶段中晶体结构解体,支链淀粉的双螺旋结构打开,暴露出大量的羟基基团,这些活跃的羟基基团可以通过氢键结合水分,支链淀粉溶胀吸水之后导致体系黏度增加^[24,29]。第二个糊化阶段(Ⅱ阶段)的终止温度为78 °C,但是当温

度超过78 °C达到80 °C时,结晶结构解体完成后并不意味着体系不再吸收水分,相反,由于在80 °C温度平衡时处在第3个糊化阶段(Ⅲ),体系中淀粉颗粒仍在大量地吸收水分,并导致体系黏度呈指数性增加,从表2可以看出80 °C温度平衡30 min之后,体系黏度增加了364.8 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,是温度平衡前的25倍以上。据此推测,如

表 2 湿热处理淀粉在不同温度下平衡 5, 20, 30 min 前后的黏度差值 ($\Delta\mu$)[†]

Table 2 The difference of viscosity values ($\Delta\mu$ values) before and after the isothermal holding periods of 5, 20 and 30 minutes at different temperatures

平衡温度/℃	平衡时间/min		
	5	20	30
70	-5.3±0.7 ^{aB}	4.0±0.6 ^{bA}	5.6±0.6 ^{cA}
71	-8.5±2.4 ^{aA}	7.6±1.2 ^{bA}	16.6±3.4 ^{cA}
72	11.8±0.9 ^{aB}	59.9±0.5 ^{bB}	91.8±5.0 ^{cB}
74	42.6±0.4 ^{aC}	136.3±1.1 ^{bC}	168.8±8.9 ^{cC}
76	53.3±2.1 ^{aD}	167.5±1.3 ^{bD}	206.1±17.6 ^{cD}
78	74.3±5.8 ^{aE}	225.3±2.2 ^{bE}	271.2±19.9 ^{cE}
80	115.9±0.6 ^{aF}	303.4±5.3 ^{bF}	364.8±8.6 ^{cF}
86	262.5±3.1 ^{aG}	398.2±11.5 ^{bG}	437.9±20.5 ^{cG}

[†] 同行上标小写字母不同表示存在显著性差异 ($P<0.05$); 同列上标大写字母不同表示存在显著性差异 ($P<0.05$)。

果温度平衡时间继续延长,体系的黏度将能够达到淀粉糊化的峰值黏度。因此,当温度超过第 2 个温度阈值 TTS₂时,淀粉糊化的时间依赖特性影响会越来越显著。

3 结论

通过流变仪和差示扫描量热仪(DSC)对淀粉的糊化过程进行了实时检测,通过比较分析流变学与热特性提出了过量水分条件下湿热处理淀粉的糊化机制,研究发现:湿热处理淀粉的糊化黏度上呈现出两个明显的特征峰 PV₁ 和 PV₂,分别对应于 DSC 曲线的 G 和 M₁ 吸热峰。湿热处理淀粉的糊化过程分三阶段进行,糊化阶段的温度—时间依赖特性与各阶段的温度阈值密切相关,且糊化起始阶段多表现为温度依赖特性而非时间依赖特性,随着温度的升高,淀粉糊化的时间依赖特性越来越高;糊化阶段后期,即使温度不再升高,淀粉糊化在较长时间内也能自发完成,此过程的时间依赖特性较为显著。

参考文献

- [1] SABLANI S S, KASAPIS S, AL-TARQE Z H, et al. Iso-baric and isothermal kinetics of gelatinization of waxy maize starch[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(4): 443-449.
- [2] XU Jin-chuan, BLENNOW A, LI Xiao-xi, et al. Gelatinization dynamics of starch in dependence of its lamellar structure, crystalline polymorphs and amylose content[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115481.
- [3] SCHIRMER M, JEKLE M, BECKER T. Starch gelatinization and its complexity for analysis[J]. Starch-Stärke, 2015, 67(1/2): 30-41.
- [4] ZHAO Xia, WANG Yong, LI Dong, et al. Insight into the

biphasic transition of heat-moisture treated waxy maize starch through controlled gelatinization[J]. Food Chemistry, 2021, 341(Pt 1): 128214.

- [5] MALUMBA P, JACQUET N, DELIMME G, et al. The swelling behaviour of wheat starch granules during isothermal and non-isothermal treatments[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114(2): 199-206.
- [6] RATNAYAKE W S, JACKSON D S. Gelatinization and solubility of corn starch during heating in excess water: New insights[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(10): 3 712-3 716.
- [7] 陈巧莉, 张甫生, 陈厚荣, 等. 高静压处理对莲藕淀粉糊化、流变及质构特性的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 31-36, 64.
- [8] WANG Shu-jun, CHAO Chen, XIANG Feng-juan, et al. New insights into gelatinization mechanisms of cereal endosperm starches[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 3 011.
- [9] 董贝贝. 八种淀粉糊化和流变特性及其与凝胶特性的关系[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017: 14-24.
- [10] 李渊, 周惠明, 郭晓娜, 等. 大麦 β -葡聚糖对小麦粉糊化性质和流变学性质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 1-4.
- [11] WANG Shu-jun, COPELAND L. Phase transitions of pea starch over a wide range of water content[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(25): 6 439-6 446.
- [12] PÉREZ-SANTOS D M, VELAZQUEZ G, CANONICO-FRANCO M, et al. Modeling the limited degree of starch gelatinization[J]. Starch-Stärke, 2016, 68(7/8): 727-733.
- [13] LIU Yi, YU Jing-lin, COPELAND L, et al. Gelatinization behavior of starch: Reflecting beyond the endotherm measured by differential scanning calorimetry[J]. Food Chemistry, 2019, 284: 53-59.
- [14] RATNAYAKE W S, JACKSON D S. Starch gelatinization[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2009, 55: 221-268.
- [15] XING Jun-jie, LI Dong, WANG Li-jun, et al. Multiple endothermic transitions of acid hydrolyzed and heat-moisture treated corn starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 81: 195-201.
- [16] TAN Xiao-yan, LI Xiao-xi, CHEN Ling, et al. Effect of heat-moisture treatment on multi-scale structures and physicochemical properties of breadfruit starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 161: 286-294.
- [17] 王青林, 张睿, 肖建东, 等. 湿热处理对不同淀粉理化特性的影响[J]. 食品工业, 2016, 37(12): 88-91.
- [18] XING Jun-jie, LIU Yi, LI Dong, et al. Heat-moisture treatment and acid hydrolysis of corn starch in different sequences[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 11-20.
- [19] 王晓培, 陈正行, 李娟, 等. 湿热处理对大米淀粉理化性质及其米线品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 182-187, 210.

(下转第 39 页)

- 2008, 99(14): 6 266-6 270.
- [18] HERMAN A, TAMBOR K, HERMAN A. Linalool affects the antimicrobial efficacy of essential oils[J]. *Current Microbiology*, 2016, 72(2): 165-172.
- [19] ANGIONI A, BARRA A, CERETI E, et al. Chemical composition, plant genetic differences, antimicrobial and antifungal activity investigation of the essential oil of *Rosmarinus officinalis* L[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(11): 3 530-3 535.
- [20] YANOVSKI S Z, YANOVSKI J A. Long-term drug treatment for obesity: A systematic and clinical review[J]. *JAMA*, 2014, 311(1): 74-86.
- [21] YANG Chuang-s, ZHANG Jin-song, ZHANG Le, et al. Mechanisms of body weight reduction and metabolic syndrome alleviation by tea[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2016, 60(1): 160-174.
- [22] VINER R M, HSIA Y, TOMSIC T, et al. Efficacy and safety of anti-obesity drugs in children and adolescents: Systematic review and meta-analysis[J]. *Obesity Reviews*, 2010, 11(8): 593-602.
- [23] SARKAR S J, DIOUNDI D, GUPTA M. Endophytic pestalotiopsis species from Andaman Islands: A potential pancreatic lipase inhibitor[J]. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 2017, 10(10): 82-83.
- [24] SINGH G, SURESH S, KRISHNA B V, et al. Lipase inhibitors from plants and their medical applications[J]. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 2015, 7(1): 1-5.
- [25] WANG Miao, GU Dong-yu, LI Hao-quan, et al. Rapid prediction and identification of lipase inhibitors in volatile oil from *Pinus massoniana* L. needles [J]. *Phytochemistry*, 2017, 141: 114-120.
- [26] ROCHA S, SOUSA A, RIBEIRO D, et al. A study towards drug discovery for the management of type 2 diabetes mellitus through inhibition of the carbohydrate-hydrolyzing enzymes α -amylase and α -glucosidase by chalcone derivatives[J]. *Food & Function*, 2019, 10(9): 6 203.
- [27] ŞÖHRETOĞLU D, SARI S. Flavonoids as α -glucosidase inhibitors: Mechanistic approaches merged with enzyme kinetics and molecular modelling [J]. *Phytochemistry Reviews*, 2019, DOI: 10.1007/s11101-019-09610-6.
- [28] LOIZZO M R, TUNDIS R, MENICHINI F, et al. Antirancidity effect of essential oils, application in the lipid stability of cooked turkey meat patties and potential implications for health[J]. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 2015, 66(1): 50-57.
- [29] 茹月蓉, 杨金梅, 沈文杰, 等. 青冈栎果壳提取物体外抗氧化及 α -葡萄糖苷酶、乙酰胆碱酯酶抑制能力研究[J]. *食品与机械*, 2020, 36(4): 157-161.
- [30] 李姣, 张晓峰, 王霄凯, 等. 高良姜醇提物的抗氧化、酶抑制活性及其与活性成分的相关性[J]. *食品与机械*, 2019, 35(2): 140-144, 184.
- [31] ADEFEĞHA S A, OLASEHINDE T A, OBOH G. Essential oil composition, antioxidant, antidiabetic and antihypertensive properties of two *afromomum* species[J]. *Journal of Oleo Science*, 2017, 66(1): 51-63.
- [32] SRIRAMAVARATHARAJAN V, MURUGAN R. Cumin scented leaf essential oil of *Cinnamomum chemungianum*: Compositions and their in vitro antioxidant, α -amylase, α -glucosidase and lipase inhibitory activities [J]. *Natural Product Research*, 2018, 32(17): 2 081-2 084.
-
- (上接第 24 页)
- [20] CARLSTEDT J, WOJTASZ J, FYHR P, et al. Understanding starch gelatinization: The phase diagram approach[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 129: 62-69.
- [21] LUND D, LORENZ K J. Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1984, 20(4): 249-273.
- [22] GUO Peng, YU Jing-lin, COPELAND L, et al. Mechanisms of starch gelatinization during heating of wheat flour and its effect on in vitro starch digestibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 370-378.
- [23] WANG Shu-jun, ZHANG Xiu, WANG Shuo, et al. Changes of multi-scale structure during mimicked DSC heating reveal the nature of starch gelatinization [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28271.
- [24] BILIADERIS C G. Chapter 8: Structural transitions and related physical properties of starch[M]// BEMILLER J, WHISTLER R. *Starch*. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2009: 293-372.
- [25] XIE Feng-wei, LIU Hong-shen, CHEN Pei, et al. Starch gelatinization under shearless and shear conditions[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2006, 2(5): 1-29.
- [26] PUKKAHUTA C, SUWANNAWAT B, SHOBSNGOB S, et al. Comparative study of pasting and thermal transition characteristics of osmotic pressure and heat-moisture treated corn starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 72(3): 527-536.
- [27] JENKINS P J, DONALD A M. Gelatinisation of starch: A combined SAXS/WAXS/DSC and SANS study[J]. *Carbohydrate Research*, 1998, 308: 133-147.
- [28] GRYSZKIN A, ZIEBA T, KAPELKO-ZEBERSKA M. Properties of corn starch subjected hydrothermal modification[J]. *International Agrophysics*, 2017, 31(1): 53-60.
- [29] TANANUWONG K, REID D. DSC and NMR relaxation studies of starch-water interactions during gelatinization[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2004, 58(3): 345-358.