

红薯/玉米淀粉共混物糊、流变及热力学性质研究

Study on the pasting, rheological and gelatinization properties of sweet potato/corn starch blend

张丹丹

刘晓康

马丽苹

张晓宇

ZHANG Dan-dan LIU Xiao-kang MA Li-ping ZHANG Xiao-yu

(河南科技大学食品与生物工程学院食品加工与安全教学示范中心, 河南 洛阳 471023)

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology,

National Experimenta, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:以不同质量比(0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0)的红薯/玉米淀粉混合物为原料,用不同试验方法研究其糊化及流变学特征。布拉班德糊化结果表明:玉米淀粉成糊温度(77.7℃)高于红薯淀粉(73.2℃),红薯淀粉峰值黏度(513 BU)大于玉米淀粉(281 BU),混合淀粉的崩解值及回生值介于单一种类淀粉之间;动态频率扫描结果表明:玉米淀粉的储能模量约是红薯淀粉的4倍,混合淀粉的模量介于单一品种淀粉之间,均为弱凝胶;稳态流变曲线表明:被测样品符合 Herschel-Bulkley 模型,均为非牛顿型流体,相较于单一淀粉,红薯/玉米淀粉混合物触变性假塑性更强。剪切结构恢复力结果表明:红薯/玉米混合物淀粉凝胶抗剪切能力低于玉米淀粉。差示扫描量热(Differential scanning calorimetry, DSC)测定结果表明:玉米淀粉具有较高的热焓值,红薯/玉米混合淀粉热焓值降低。

关键词:红薯;玉米;淀粉;糊化;流变学;差示扫描量热

Abstract: This research studied the characteristics of paste, rheology and gelatinization of sweet potato/maize starch mixtures in different proportions(0:100; 25:75; 50:50; 75:25; 100:0). The pasting results showed that the pasting temperature of corn starch (77.7℃) was higher than that of sweet potato starch (73.2℃), and the peak viscosity of sweet potato starch (513 BU) was greater than that of corn starch (281 BU); The breakdown and setback were in between two kinds of starch. The dynamic frequency scanning tests showed that the elastic modulus of corn starch was about four times as that of sweet potato starch, and the modulus of mixed starch was between that of a

single variety. The steady-state rheological curve showed that all the tested samples conformed to the Herschel-Bulkley model and were non-newtonian fluids with shear dilute behavior; Comparing with single starch, thixotropy and pseudoplastic of sweet potato/corn starch mixture increased; The anti-shear ability of starch gel of sweet potato/maize mixture was lower than that of corn starch. Results of differential scanning calorimetry (DSC) indicated that corn starch had higher gelatinization temperature and enthalpy value than the others.

Keywords: sweet potato starch; corn starch; gelatinization; rheology; DSC

淀粉资源丰富、用途广泛。在食品工业中,淀粉因其独特的糊化、老化、流变性等性质而作为重要的食品配料被普遍应用于沙司、汤类、焙烤食品以及乳制品中。红薯/玉米淀粉产量高,用途广,然而二者由于结构的不同,性质存在较大差异。在实际应用中,原淀粉品种很难满足产品的需要,因此通常采用化学改性的方法改善淀粉性能,扩大其应用范围。化学改性淀粉通常由于引入了化学基团会降低食物的安全性,采用其他方式改变单一原淀粉的性质且避免化学处理、保持淀粉天然特性成为当今研究的热点。将不同的淀粉混合起来,获得异于原淀粉特性的淀粉是取代改性淀粉的途径之一。与单一淀粉相比,混合淀粉会有不同的性质且应用于不同的产品中^[1]。

Zhang 等^[2]曾经报道了马铃薯/玉米淀粉糊性质以及流变学性质,指出与淀粉比例相关的糊性质等参数并不呈线性关系。Obanni 等^[3]和 Puncha 等^[4]则发现马铃薯/大米淀粉、美人蕉/大米淀粉、美人蕉/马铃薯淀粉的糊化存在着相互影响,并且指出淀粉颗粒大小与作用效果具有相关性。Waterschoot 等^[5]的试验揭示了马铃薯/玉米、马铃薯/蜡质玉米淀粉糊化过程中的相互影响主要因

基金项目:国家自然科学基金(编号:31401654)

作者简介:张丹丹,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:张晓宇(1979—),男,河南科技大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail: zhangxiaoyu7909@163.com

收稿日期:2019-01-09

为 2 种淀粉相互竞争水分。

本试验拟研究不同比例混合后的红薯/玉米淀粉的糊、流变学及糊化性质与单一淀粉体系的差异。通过布拉班德黏度仪探究各体系淀粉糊成糊温度、峰值黏度、崩解值及回生值变化规律;通过动态流变试验确定体系的黏弹性的变化规律;通过静态流变和剪切回复力试验确定体系的流体特性变化规律;采用 DSC 确定体系的热力学变化规律。为混合淀粉的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

红薯淀粉:洛阳正鑫薯业有限公司;

普通玉米淀粉:孟州金玉米责任有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

流变仪:DHR-2 型,美国 TA 公司;

布拉班德黏度仪:Brabender 803302 型,德国布拉班德公司;

差示扫描量热仪:Mettler-Toledo DSC1 型,瑞士梅特勒—托利多公司。

1.2 方法

1.2.1 样品制备 淀粉质量以干基计算,淀粉浓度固定为 6%,红薯淀粉与普通玉米淀粉的质量比依次为 100:0,75:25,50:50,25:75,0:100,所配样品均在磁力搅拌器上以恒定的转速搅拌 30 min 使其完全均匀分散。制备的淀粉悬浮液用于测定布拉班德糊化的性质。此外,按上述比例配制浓度为 30% 的样品,搅拌均匀后用于 DSC 测定。

1.2.2 糊性质测定 将制备的 6% 样品放入测量钵内,设定程序升温条件:升温/降温速率 1.5 °C/min,从 50 °C 升温至 95 °C 并保温 15 min,然后从 95 °C 降温至 50 °C 并保温 15 min。测定样品黏度,仪器自带软件自动记录数据。

1.2.3 动态流变性质的测定 将采用 1.2.2 方法得到的淀粉糊自然冷却到室温,取 2 mL 左右淀粉糊置于流变仪测试平台上,选取 40 mm 的平板夹具,1 050 μm 下进行刮边并涂硅油,1 000 μm 下开始试验。参考张雅媛等^[6]的方法设定参数为:测试温度 25 °C,应变 1.0%,扫描频率范围 0.1~10.0 Hz,测定样品储能模量 G' 及耗能模量 G'' 的变化。

1.2.4 稳态流变性质的测定

(1) 流变曲线测定:将 1.2.2 得到的淀粉糊自然冷却到室温后,按 1.2.3 步骤加样,参照张雅媛等^[6]的方法并对拟合方程进行优化选取:测试温度 25 °C,测定剪切速率($\dot{\gamma}$)从 0.1~300.0 s^{-1} 递增,再从 300.0~0.1 s^{-1} 递减过程中的流变曲线,采用 Herschel-Bulkley 模型对试验数据点进行回归拟合。

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

式中:

τ ——剪切应力,Pa;

τ_0 ——屈服应力,Pa;

K ——稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1} ;

n ——流体行为指数。

(2) 剪切结构恢复力测定:将采用 1.2.2 方法得到的淀粉糊自然冷却到室温后,按 1.2.4 所述步骤加样,参照 Mezger 等^[7-8]的方法以第三阶段前 30 s 与第一阶段的前 30 s 的比值来评判剪切结构恢复力的效果。

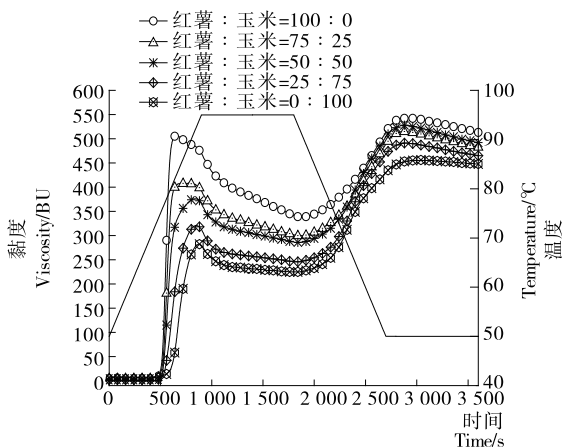
1.2.5 热力学性质的测定 将 1.2.1 中配制质量分数为 30% 的样品,并用移液枪将样品转移至坩埚内压片处理,放置 24 h 平衡样品。淀粉的 DSC 糊化测定参照 Zhang 等^[9]的方法,设定测定条件为:以空坩埚为参比,以 10 °C/min 的速率升温,扫描温度范围为 30~95 °C,测定糊化温度及焓值变化。

1.2.6 数据处理 使用 Origin 8.5 和 Dps 处理数据,所有试验均测试 3 次求平均值,试验数据之间采用 Duncan 新复极差法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 糊性质测定

从图 1 可知,混合淀粉的曲线介于红薯淀粉和玉米淀粉之间。表 1 表明:红薯淀粉、玉米淀粉的成糊温度分别为 73.4,77.8 °C,原因在于玉米淀粉直链淀粉含量高,分子间的氢键作用强,破坏氢键所需要的能量高,因此具有较高的成糊温度^[10];红薯淀粉的回生值(173 BU)小于玉米淀粉(204 BU),说明红薯淀粉的凝胶能力较玉米淀粉弱;玉米淀粉由于结构紧密,完全膨胀后的颗粒强度大,不易破裂,热糊稳定性好,抗剪切能力强,因而玉米淀



图中黑色折线代表程序升温曲线

图 1 红薯/玉米淀粉混合物布拉班德曲线图

Figure 1 Brabender curve of sweet potato/corn mixture

表 1 红薯/玉米淀粉混合物布拉班德糊化特征参数[†]

样品	糊化温度/℃	峰值黏度/BU	谷值黏度/BU	终值黏度/BU	崩解值/BU	回生值/BU
100 : 0	73.2±0.36 ^c	513.00±8.00 ^a	342.33±15.04 ^a	515.67±7.02 ^a	169.67±5.51 ^a	173.33±3.79 ^d
75 : 25	73.8±0.10 ^c	419.67±11.01 ^b	306.00±21.28 ^{ab}	487.67±7.02 ^b	109.67±3.06 ^b	190.33±1.53 ^c
50 : 50	74.4±0.25 ^b	377.67±8.08 ^c	284.00±13.45 ^{bc}	488.00±9.00 ^b	91.00±2.00 ^c	211.00±10.58 ^{ab}
25 : 75	74.9±0.05 ^b	326.00±6.25 ^d	254.33±15.82 ^{cd}	468.33±2.08 ^c	74.33±3.79 ^d	224.33±3.05 ^a
0 : 100	77.7±0.21 ^a	281.33±6.51 ^e	220.33±19.01 ^d	442.67±5.69 ^d	58.00±22.65 ^e	202.00±4.36 ^{bc}

[†] 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

粉(57 BU)远远小于红薯淀粉崩解值(166 BU),其热糊稳定性较好,抗剪切能力弱;上述结果与侯蕾等^[11]的研究结果一致。红薯淀粉与玉米淀粉按一定比例混合后的成糊温度、峰值黏度、终值黏度、崩解值都介于单一种类的淀粉之间,样品之间有显著差别,但各项指标并非随比例变化呈现简单的叠加,即随着玉米淀粉比例的提升三者呈现非线性的下降(以峰值黏度为例,见图 2)。随着玉米淀粉比例的增加,混合淀粉的回生值呈现非线性的上升;充分说明淀粉混合后其成糊过程中的性质并非简单的叠加,而是存在着相互作用。Zhang 等^[2]研究了马铃薯淀粉与玉米淀粉混合后糊性质的改变,同样证明了马铃薯淀粉的添加有效地改善了玉米淀粉的糊化性质,混合物的成糊温度降低,回生值降低,崩解值升高,与本研究相似。

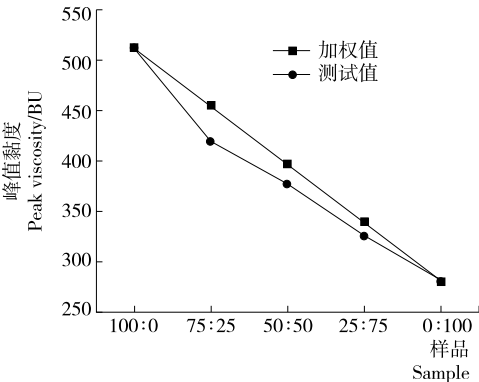


图 2 红薯/玉米淀粉混合物峰值黏度图
Figure 2 Peak viscosity of sweet potato/corn mixture

2.2 动态流变性质

动态流变学反映体系的黏弹性变化的规律^[12]。由图 3 可知,通过小振幅的动态频率扫描,分析糊化后混合物在流动条件下的储能模量(G')和耗能模量(G'')变化趋势得出如下结果:随着频率的增大, G' 和 G'' 增大且 G' 始终远大于 G'' ,表明被测样品所形成的凝胶为弱凝胶,所有体系以弹性为主。从 G' 曲线的变化趋势看,整体对于频率的依赖性不是太强,随频率增大的幅度很缓。 G'' 与 G' 的比值为损耗系数($\tan \delta$),其值越小,表明被测样品的弹性越高,黏性越低。红薯/玉米淀粉混合物的 $\tan \delta$ 值介

于纯红薯或玉米淀粉糊之间(图 4)。结果表明玉米淀粉因其自身直链含量高更易发生老化形成凝胶,红薯淀粉和玉米淀粉混合后可以推迟后者形成凝胶的趋势。

2.3 稳态流变特性

2.3.1 流变曲线 不同比例混合后的红薯/玉米淀粉样品的稳态扫描流变曲线结果如图 5 所示。由图 5 可以看

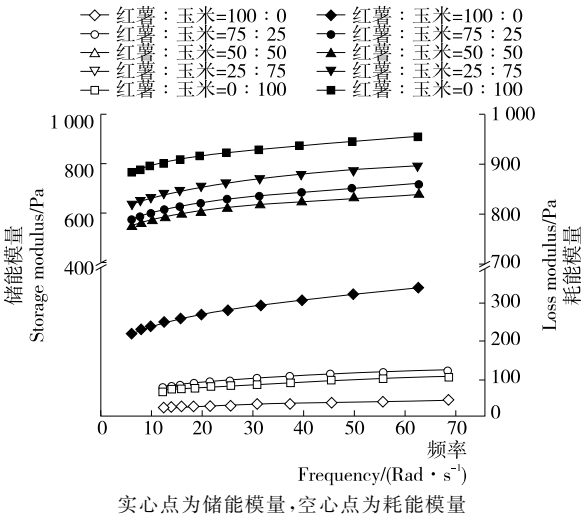


图 3 不同比例红薯/玉米淀粉混合物动态频率扫描图
Figure 3 Dynamic frequency scanning of sweet potato/corn mixture in different proportions

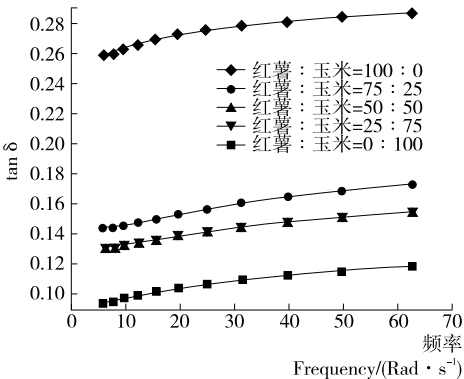


图 4 不同比例红薯/玉米淀粉混合物动态频率 $\tan \delta$ 值
Figure 4 Tangent values of dynamic frequencies of sweet/corn starch mixture in different proportions

出,不同比例淀粉混合后的淀粉糊随着剪切速率的增加,剪切应力增大,且曲线都呈现出凸向剪切应力轴的迹象,对曲线进行拟合,其符合 Herschel-Bulkley 幂律方程(表 2),流体指数 n 均 <1 ,表明被测样品均为非牛顿流

体,且具有假塑性流体的特征,与多数文献^[13-15]的报道一致。混合淀粉的流体指数 n 小于单淀粉,说明混合淀粉糊的假塑性增强。混合淀粉的稠度系数 K 远大于单淀粉,说明淀粉混合后可以提高体系的稠度。

表 2 不同比例红薯/玉米淀粉混合体系拟合参数[†]

Table 2 Parameters for sweet potato/corn starch mixture in different proportions

样品	触变面积/ (Pa·s ⁻¹)	稠度系数 K /(Pa·s ^{n})		流体指数 n		决定系数 R^2	
		上行线	下行线	上行线	下行线	上行线	下行线
100 : 0	7 091.85±32.03 ^d	19.59±0.53 ^d	12.22±0.11 ^d	0.51±0.01 ^a	0.52±0.02 ^a	0.999 5	0.999 9
75 : 25	55 867.94±61.21 ^a	150.71±1.78 ^a	39.97±7.84 ^a	0.29±0.01 ^c	0.51±0.01 ^a	0.994 3	0.998 0
50 : 50	47 146.00±130.49 ^c	102.55±1.42 ^c	38.48±0.23 ^b	0.34±0.02 ^c	0.47±0.02 ^b	0.984 1	0.997 2
25 : 75	52 295.71±80.27 ^b	123.72±2.45 ^b	34.30±0.46 ^c	0.33±0.02 ^c	0.52±0.01 ^a	0.995 1	0.996 5
0 : 100	457.57±6.68 ^e	7.14±0.03 ^e	8.59±0.09 ^e	0.44±0.04 ^b	0.42±0.02 ^c	0.999 4	0.999 9

[†] 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

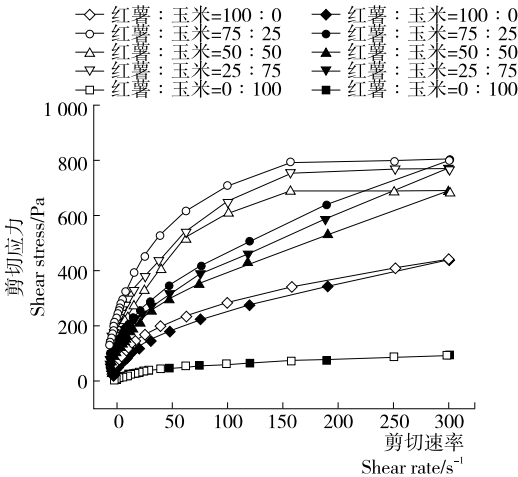


图 5 不同比例红薯/玉米淀粉混合物触变性

Figure 5 Thixotropy of sweet potato/corn mixture in different proportions

在淀粉凝胶结构遭到破坏后,随着剪切速率的递减,被破坏的凝胶结构大部分逐步恢复但在短时间内无法恢复至原始状态,形成下行线与上行线滞后回路。从图 5 看出,被测样品均表现出良好的触变性,形成的触变环面积大小不一,玉米淀粉触变环面积小于红薯淀粉,说明玉米淀粉的触变性弱于红薯淀粉,与之前的报道^[16-18]一致。红薯/玉米淀粉混合后,触变环面积显著增大,触变性增强,当红薯/玉米淀粉比例为 75 : 25 时,触变环面积最大。为了进一步验证凝胶结构破坏后的恢复能力,进行剪切结构恢复力的测定。

2.3.2 剪切结构恢复力 剪切结构恢复力具体是指样品经过低剪切速率—高剪切速率—低剪切速率循环剪切之后,恢复至第一阶段(低剪切速率)表观黏度值的比例^[19]。不同比例红薯/玉米淀粉混合物的剪切结构恢复力测定结果如图 6 所示。以第三阶段的平均表观黏度值和第一

阶段的平均表观黏度值的比值,计算出红薯/玉米淀粉的剪切结构恢复力大小。如表 3 所示:玉米淀粉糊的恢复力达到(96.55±0.006)%,红薯淀粉恢复力只有(61.45±0.08)%,说明玉米淀粉比红薯淀粉凝胶结构稳定。结果显示,玉米淀粉经剪切后恢复至原结构的效果最好。然而混合淀粉的恢复力接近红薯淀粉的恢复力且显著小于玉米淀粉的,与 2.3.1 触变环面积的结果基本一致。因而混合可以改变单一淀粉体系的凝胶结构,调和体系抗剪切能力。

2.4 热力学性质

从 DSC 图谱中可以确定淀粉颗粒发生相转变时的起始温度(T_0)、峰值温度(T_P)、终止温度(T_C)及热焓值变化^[20-21]。由图 7 及表 4 可知,各体系淀粉的 T_0 具有较大的差异,玉米淀粉的 T_0 (66.31 ℃) 高于红薯淀粉 (55.37 ℃),与文献^[22-23]报道一致。混合淀粉的 T_0 介于二者之间,且不同体系差异较大,混合淀粉糊化温度并非按比例简单的叠加,即淀粉的起始糊化温度并不与

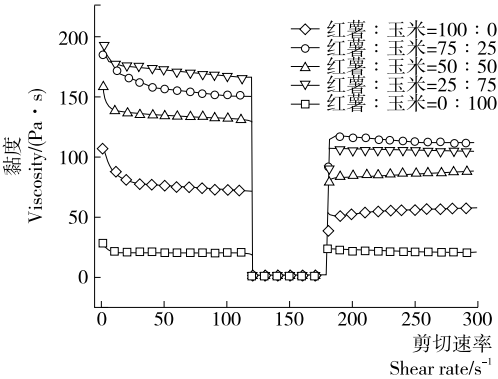


图 6 不同比例红薯/玉米淀粉混合剪切结构恢复图

Figure 6 Restoration of mixed shear struture of sweet potato/corn starch in different proportion

表 3 不同比例红薯/玉米淀粉混合剪切结构恢复力[†]

Table 3 Restoration of mixed shear struture of sweet potato/corn starch in different proportion

样品	第一阶段黏度/ (Pa·s)	第三阶段黏度/ (Pa·s)	第三阶段/ 第一阶段/%
100 : 0	84.66±0.31 ^d	51.94±0.46 ^d	61.45±0.08 ^c
75 : 25	165.31±4.59 ^b	116.14±1.12 ^a	68.59±0.01 ^b
50 : 50	135.92±4.53 ^c	84.42±0.45 ^c	59.62±0.05 ^d
25 : 75	175.59±4.23 ^a	105.54±0.45 ^b	59.60±0.03 ^d
0 : 100	22.56±1.48 ^e	21.98±0.06 ^e	96.55±0.06 ^a

[†] 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

淀粉比例的变化呈线性关系。体系的 T_c 和 T_p 差异不明显。红薯淀粉的糊化焓小于玉米淀粉的,与文献[24—25]结果一致,红薯/玉米淀粉混合后随混合比例的不同,糊化焓值下降,焓值变化同样与淀粉比例并非叠加关系

表 4 不同比例红薯/玉米淀粉混合物的 DSC 糊化特征参数[†]

Table 4 Characteristic parameters of DSC gelatinization of sweet potato/maize starch mixture in different proportions

样品	热焓值 $\Delta H / (J \cdot g^{-1})$	起始温度 $T_0 / ^\circ C$	峰值温度 $T_p / ^\circ C$	终止温度 $T_c / ^\circ C$
100 : 0	10.50±0.05 ^e	55.37±0.03 ^e	73.07±0.03 ^a	83.45±0.04 ^b
75 : 25	10.95±0.03 ^d	60.18±0.17 ^d	71.66±0.10 ^b	84.29±0.05 ^a
50 : 50	11.25±0.06 ^c	63.07±0.02 ^c	71.18±0.02 ^c	79.14±0.13 ^c
25 : 75	11.75±0.05 ^b	66.08±0.07 ^b	71.11±0.02 ^c	76.63±0.44 ^d
0 : 100	12.22±0.03 ^a	66.31±0.06 ^a	71.62±0.02 ^b	76.73±0.04 ^d

[†] 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

3 结论

红薯/玉米淀粉混合后,相较于二者,混合淀粉的糊、流变学、热力学性质都发生了不同程度的改变。玉米淀粉成糊温度(77.7 ℃)高于红薯淀粉(73.2 ℃),红薯淀粉峰值黏度(513 BU)大于玉米淀粉(281 BU),混合淀粉的成糊温度、崩解值、回生值介于单一种类淀粉之间;动态频率扫描结果表明:玉米淀粉的储能模量约是红薯淀粉的 4 倍,混合淀粉的模量介于单一品种淀粉之间,均为弱凝胶;稳态流变曲线表明:被测样符合 Herschel-Bulkley 模型,均为非牛顿型流体,相较于单一淀粉,红薯/玉米淀粉混合物假塑性和触变性均增加;剪切结构恢复力结果表明:红薯/玉米混合物淀粉凝胶抗剪切能力低于玉米淀粉;DSC 测定结果表明:玉米淀粉具有较高的热焓值,红薯/玉米混合淀粉热焓值降低。综上,通过红薯/玉米的混合可以使淀粉的性质发生不同程度的改变,其改变的程度与淀粉比例的变化并非呈线性关系,2 种淀粉之间存在着相互作用,与之前的对土豆/玉米淀粉^[2]、土豆/大米淀粉^[1]等混合物研究结果一致,是混合淀粉性质研究的有益补充,今后可以进一步着眼于混合淀粉的应用,扩大淀粉应用范围,减少化学变性淀粉使用率。

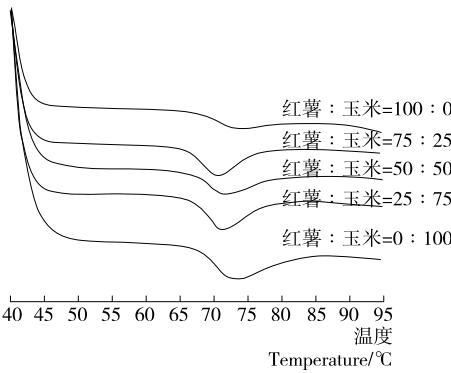


图 7 不同比例红薯/玉米淀粉 DSC 图谱

Figure 7 DSC spectra of sweet potato/corn starch in different proportions

即不呈线性关系。导致这些变化的原因可能是不同淀粉结构不同,彼此间存在着相互作用影响了淀粉的糊化性质^[6]。

参考文献

[1] WATERSCHOOT J, GOMAND S V, FIERENS E, et al. Starch blends and their physicochemical properties [J]. Starch/Stärke, 2015, 67(12): 1-13.

[2] ZHANG Ya-yuan, HONG Yan, GU Zheng-biao, et al. Pasting and Rheological Properties of Potato Starch and Maize Starch Mixtures[J]. Starch/Strake, 2010, 63(1): 11-16.

[3] OBANNI M, BEMILLER J N. Properties of some starch blends[J]. Cereal Chemistry, 1997, 74(4): 431-436.

[4] PUNCHA-ARNON S, PATHIPANAWAT W, PUTTANLEK C, et al. Effects of relative granule size and gelatinization temperature on paste and gel properties of starch blends[J]. Food Research International, 2008, 41(5): 552-561.

[5] WATERSCHOOT J, GOMAND S V, DELCOUR J A, et al. Direct evidence for the non-additive gelatinization in binary starch blends: A case study on potato starch mixed with rice or maize starches[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 50: 137-144.

[6] 张雅媛, 洪雅, 顾正彪, 等. 玉米淀粉与黄原胶复配体系流变和凝胶特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 357-362.

[7] MEZGER T G. The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers[M]. Hannover: Vincentz

- Network GmbH & Co KG, 2006: 55-68.
- [8] 张帆, 周守标, 李宁, 等. 亲水胶体对石蒜淀粉糊特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 37-42.
- [9] ZHANG Xiao-yu, TONG Qun-yi, ZHU Wen-xue. Pasting, rheological properties and gelatinization kinetics starch with sucrose or glucose[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 114: 255-261.
- [10] 柳艳梅, 左小博, 房升, 等. 亲水性胶体对大米淀粉流变与回生性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 47-52.
- [11] 侯蕾, 韩小贤, 郑学玲, 等. 不同淀粉理化性质的比较研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2014, 35(1): 51-54.
- [12] PTASZEK A, BERSKI W, PTASZEK P, et al. Viscoelastic properties of waxy maize starch and selected non-starch hydrocolloids gels[J]. Carbohydrate polymers, 2009, 76(4): 567-577.
- [13] BANCHATHANAKIJ R, SUPHANTHARIKA M. Effect of different β -glucans on gelatinization and retrogradation of rice starch[J]. Food Chemistry, 2009, 114: 5-14.
- [14] 唐敏敏, 洪雁, 顾正彪, 等. 黄原胶对绿豆淀粉糊化和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 42-46.
- [15] 刘敏, 赵欣, 阚建全, 等. 黄原胶对莲藕淀粉糊化性质及流变与质构特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 45-50.
- [16] LI J Y, YE H A I. Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 50(3): 141-148.
- [17] SINGH N. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources[J]. Food Chemistry, 2003, 81(2): 219-231.
- [18] ELIASSEN A C. Viscoelastic behaviour during the gelatinization of starch I: Comparison of wheat, maize, potato and waxy-barley starches[J]. Journal of Texture Studies, 1986, 17(3): 253-265.
- [19] PIYADA Achayuthakan, MANOP Suphantharika. Pasting and rheological properties of waxy corn starch as affected by guar gum and xanthan gum[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 71(1): 9-17.
- [20] SCHIRMER M, JEKLE M, BECKER T. Starch gelatinization and its complexity for analysis [J]. Starch-Stärke, 2015, 67(1/2): 30-41.
- [21] MOLINA M, LEIVA A, BOUCHON P. Examining the effect of freezing on starch gelatinization during heating at high rates using online in situ hot-stage video-microscopy and differential scanning calorimetry[J]. Food and Bioprocesses Processing, 2016, 100: 488-495.
- [22] YU Zhen, WANG Yu-sheng, CHEN Hai-hua, et al. Effect of sodium alginate on the gelatinization and retrogradation properties of two tuber starches [J]. Cereal Chemistry, 2018, 95(3): 445-455.
- [23] KRUEGER B R, KNUTSON C A, INGLET G E, et al. A differential scanning calorimetry study on the effect of annealing on gelatinization behavior of corn starch[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(3): 715-718.
- [24] SANDHU K S, SINGH N. Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties[J]. Food Chemistry, 2007, 101(4): 1 499-1 507.
- [25] KOHYAMA K, NISHINARI K. Effect of soluble sugars on gelatinization and retrogradation of sweet potato starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, 39(8): 1 406-1 410.
-
- (上接第 30 页)
- [16] ARZENI C, MARTINEZ K, ZEMA P, et al. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(3): 463-472.
- [17] MAITY I, RASALE D B, DAS A K. Sonication induced peptide-appended bolaamphiphile hydrogels for in situ generation and catalytic activity of Pt nanoparticles[J]. Soft Matter, 2012, 8(19): 5 301-5 308.
- [18] WANG Jing-yu, YANG Yu-ling, TANG Xiao-zhi, et al. Effects of pulsed ultrasound on rheological and structural properties of chicken myofibrillar proteins[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38(5): 225-233.
- [19] 王静宇, 杨玉玲, 周磊, 等. 超声波对肌原纤维蛋白理化和质构特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(11): 12-16, 21.
- [20] VERA A, VALENZUELA M A, YAZDANI-PEDRAM M, et al. Conformational and physicochemical properties of quinoa proteins affected by different conditions of high-intensity ultrasound treatments[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 51(2): 186-196.
- [21] BOUZID H, RABILLER-BAUDRY M, PAUGAM L, et al. Impact of zeta potential and size of caseins as precursors of fouling deposit on limiting and critical fluxes in spiral ultrafiltration of modified skim milks [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 314(1/2): 67-75.
- [22] 张根生, 岳晓霞, 李继光, 等. 大豆分离蛋白乳化性的影响因素研究[J]. 食品科学, 2006, 27(7): 48-51.
- [23] CAESSENS P W, DE JONGH H H, NORDE W, et al. The adsorption-induced secondary structure of β -casein and of distinct parts of its sequence in relation to foam and emulsion properties [J]. Biochimica Et Biophysica Acta, 1999, 1 430(1): 73-83.
- [24] KEERATI-U-RAI M, MIRIANI M, IAMETTI S, et al. Structural changes of soy proteins at the oil-water interface studied by fluorescence spectroscopy[J]. Colloids and Surfaces B-Biointerfaces, 2012, 93(1): 41-48.
- [25] 吴菊清, 邵俊花, 魏朝贵, 等. 离子强度对猪肉肌原纤维蛋白乳化特性和理化特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(23): 14-19.