

湿热结合壳聚糖处理前后桫欏淀粉 流变特性和热力学性质比较

符珍*, 谭林彬, 刘雨欣, 王启宁, 段贵亭, 黄天仁
(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 探讨湿热处理(Heat-Moisture Treatment, HMT)结合不同分子量的壳聚糖(Chitosan, CS)对桫欏淀粉(*Arenga pinnata* Starch, APS)流变性质和热力学特性的影响。动态流变分析结果表明, HMT结合CS处理提高了凝胶体系的粘弹性模量(G' 和 G''),且随着CS分子量的增加,效果越明显,当添加10 ku CS时具有最高的粘弹性模量, G' 为2 899 Pa, G'' 为309 Pa; HMT-APS-CS凝胶体系均表现为典型的非牛顿流体,呈现出类似固体的性质;损耗因子($\tan\delta$)均小于1,且随着CS分子量的增加而损耗因子逐渐降低, HMT-APS-CS10具有最低的损耗因子, $\tan\delta$ 为0.09。静态流变分析结果表明,所有凝胶体系表现出剪切稀化现象,随CS分子量降低流体指数(n)显著降低。差示量热扫描(Differential Scanning Calorimetry, DSC)结果表明HMT结合CS处理,随CS分子量的提高,显著提高了APS的峰值温度(T_p)($P<0.05$),从69.42 °C提高至86.68 °C,显著降低了APS的糊化焓值(ΔH)($P<0.05$),从3.47 J/g降低至1.07 J/g。HMT结合CS处理提高了APS凝胶结构和热力学稳定性,可为桫欏淀粉及其产品的开发利用提供一定的理论依据。

关键词: 桫欏淀粉; 湿热处理; 壳聚糖; 流变性质; 热力学性质

文章编号: 1673-9078(2023)07-202-208

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.7.0873

Comparison of Rheological and Thermodynamic Properties of *Arenga pinnata* Starch before and after the Hygrothermal Treatment Combined with Chitosan

FU Zhen*, TAN Linbin, LIU Yuxin, WANG Qining, DUAN Guiting, HUANG Tianren
(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The influences of heat-moisture treatment (HMT) combined with chitosan (CS) of different molecular weights on the rheological and thermodynamic properties of *Arenga Pinnata* starch (APS) were investigated in this study. The results of dynamic rheological analysis showed that the combination of HMT and CS increased the viscoelastic moduli (G' and G'') of the gel system, and the effect became more obvious with the increase of CS molecular weight. When 10 ku CS was added, the viscoelastic moduli reached the highest (G' was 2 899 Pa and G'' was 309 Pa); HMT-APS-CS behaved like typical non-Newtonian fluids, exhibiting solid-like properties; the loss factors ($\tan\delta$) of the APS-CS gel systems were all lower than 1, and decreased gradually with the increase of CS molecular weight, with HMT-APS-CS10 having the lowest loss factor ($\tan\delta$ was 0.09). The results of static rheological analysis showed that all the gel systems exhibited shear thinning behaviours, and the fluid index (n) decreased significantly with the reduction of CS molecular weight. Differential scanning calorimetry (DSC) results showed that the HMT combined with CS treatment caused an increase in peak temperature (T_p) ($P<0.05$) from 69.42 °C to 86.68 °C as the CS molecular weight increased, whilst decreased significantly the gelatinization enthalpy (ΔH) of APS ($P<0.05$) (from 3.47 J/g to 1.07 J/g.) The HMT combined with CS treatment improved the gel structure and thermodynamic stability of APS, which would provide certain theoretical

引文格式:

符珍,谭林彬,刘雨欣,等.湿热结合壳聚糖处理前后桫欏淀粉流变特性和热力学性质比较[J].现代食品科技,2023,39(7):202-208.

FU Zhen, TAN Linbin, LIU Yuxin, et al. Comparison of Rheological and thermodynamic properties of *Arenga pinnata* starch before and after the hygrothermal treatment combined with chitosan [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7): 202-208.

收稿日期: 2022-07-12

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(2019GXNSFAA185014); 国家大学生创新项目(202110593057)

作者简介: 符珍(1986-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 碳水化合物, E-mail: fuzhen13@gxu.edu.cn

basis for the development and utilization of APS and its products.

Key words: *Arenga pinnata* starch; heat-moisture treatment; chitosan; rheological properties; thermal properties

以淀粉为代表的碳水化合物是人类的主要能量来源, 淀粉流变性质常作为食品加工企业重要的研究参数, 影响食品的品质、口感和货架期。食品流变学以流体力学和粘弹性理论为基础, 研究食品在外力作用下的流动性能和凝胶特性之间的关系, 建立微观结构与宏观性质的联系^[1]。对淀粉流变学的研究能深入了解食品内部结构变化, 找到相关力学性质的规律有效控制食品质量^[2]。

桄榔淀粉 (*Arenga pinnata* Starch, APS) 是亚热带和热带地区重要的经济原料, 特别的是具有非常高的直链淀粉含量, 高达 60% (*m/m*), 可作为产业加工的原料, 随着桄榔膏等附加产品的开发, 深入研究桄榔淀粉与其他食品分子之间的相互作用, 可研发高附加值桄榔产品, 提高食品企业利润。但是, 天然淀粉存在易老化、热稳定性差和抗剪切性差等缺陷, 无法满足食品加工的要求^[3]。因此, 学者们通常采用物理、化学和酶法对淀粉进行改性, 改善淀粉性能^[4-6]。近年来随着改性技术的深入, 淀粉改性已从单一改性发展为双重改性^[7], 然而关于 APS 的双重改性研究较少, 更多的仍然是单一改性^[8-12]。

物理改性不涉及化学试剂使用且成本低廉, 企业和消费者更易接受。湿热处理 (Heat-Moisture Treatment, HMT) 是在低水分含量 (10%~30%) 和高处理温度 (90~120 °C) 条件处理 15 min~16 h 的一种物理改性方法^[13-15]。HMT 只涉及热量及水分调节, 对环境不会造成污染, 符合清洁标签要求^[16], 可根据生产需求定制水分含量、温度和时间^[17]。HMT 已广泛应用于不同植物来源淀粉的改性, 如玉米、小米、豌豆、扁豆和芸豆等的改性^[18,19]。HMT 通过延长加热时间^[20]、增加循环次数^[20-22]、提高处理温度^[23]、改变水分含量^[24-26], 促进淀粉链相互作用, 导致淀粉晶体结构的破坏, 双螺旋结构分离及分子重排, 最终影响淀粉的功能特性^[27], 拓展了淀粉在食品领域的应用^[18,28]。

亲水胶体能改变淀粉的功能特性^[29,30]。壳聚糖 (Chitosan, CS) 是甲壳素 N-脱乙酰基的产物, 脱乙酰基程度大于 50% 就可称为壳聚糖^[31]。CS 作为一种功能性生物大分子, 产量丰富且价格低廉, 已广泛应用于食品领域^[32,33]。研究表明 CS 显著提高体系粘性和改善冻融稳定性^[10,34]; 但研究主要关注 CS 浓度及高分子量 CS^[35], 关于低分子量 CS 对淀粉的研究较少。

目前, 关于 HMT 和亲水胶体处理淀粉的研究较少, 集中在热处理对不同种类、不同浓度的水胶体淀粉性能的影响^[36,37]。虽然关于干热处理淀粉与 CS 复

合物的研究已有报道, 但不同分子量的 CS 和 HMT 对 APS 的影响未见报道, 假设 CS 和淀粉结合 HMT 可能会增加淀粉与 CS 之间相互作用, 改善淀粉的流变性能^[29,38]。因此, 本研究以 APS 为原料, 通过流变仪和差示量热扫描仪 (Differential Scanning Calorimetry, DSC) 考察 HMT 结合 CS 对 APS 流变性质和热性质的影响, 为 APS 和 CS 在食品领域的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

桄榔粉, 水分含量 12.35% (*m/m*), 淀粉含量 62.32% (*m/m*), 粗蛋白 4.68% (*m/m*), 粗脂肪 0.43% (*m/m*), 膳食纤维 5.43% (*m/m*), 灰分 0.67% (*m/m*), 广西龙州农业推广中心; 壳聚糖 (30、50、100 ku), 索莱宝科技有限公司; 氢氧化钠, 成都市金山化学试剂有限公司; 冰醋酸, 广西南宁沁田生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

JJ300Y 电子天平, 上海仁沃实业发展有限公司; SHZ-88 恒温震荡水浴锅, 江苏金怡仪器科技有限公司; FD-1D-50 冷冻干燥机, 北京博医康实验仪器有限公司; HAAKE MARSIE 流变仪, 德国 Thermo Scientific 公司; DSC200PC 差示扫描量热仪, 德国耐驰仪器公司。

1.3 试验方法

1.3.1 桄榔淀粉提取纯化

淀粉的提取纯化参考已发表的方法^[12]。将桄榔粉 (100 g) 加入 NaOH (0.25%, *m/V*) 溶液中, 用磁力搅拌器在室温下连续搅拌 24 h。然后在 4 000 r/min 的转速下离心 20 min。用蒸馏水冲洗 4 次沉淀物, 用蒸馏水复溶, 用 1 mol/L HCl 调节 pH 值为 5; 然后将纤维素酶 (0.2 g, 10 U/mg) 加入溶液中, 磁力搅拌 12 h; 用高速离心机在常温下 4 000 r/min 离心 20 min, 蒸馏水洗涤 2 次沉淀物, 并用电热鼓风干燥箱在 40 °C 条件下干燥 24 h, 经过碾磨过 120 目筛后, 保存在干燥器中。最终桄榔淀粉得率为 95%, 直链淀粉含量为 60.0%。

1.3.2 桄榔淀粉-壳聚糖复合物的制备

根据 Diao 等^[39]的方法稍加修改, 准确称取 CS (0.5 g) 充分溶解在 100 mL 乙酸溶液 (1%) 中, 在室温下用磁力搅拌器搅拌至充分溶解。准确称取 8 g

APS 加入上述 CS-乙酸溶液中,在磁力搅拌器上室温环境下搅拌 30 min,用 NaOH (2 mol/L) 溶液调节 pH 值至 5。将此混合液放在 40 °C 电热恒温鼓风干燥箱内进行烘干,粉碎、过筛放置于干燥器中进行保存备用。样品分别记作 APS-CS3、APS-CS5、APS-CS10。

1.3.3 湿热处理样品制备

根据 Chung 等^[40]描述的方法进行湿热处理。将上述 APS-CS (CS3、CS5、CS10) 样品的水分调整为 20%,保持在 4 °C 平衡水分 24 h。经 120 °C 湿热处理 12 h,40 °C 干燥箱中进行干燥,研磨,过 120 目筛后保存至干燥器中。湿热处理后的样品分别标记为 HMT-APS-CS3、HMT-APS-CS5、HMT-APS-CS10。空白对照组不加壳聚糖,其他步骤同上,记为 APS。对照组记作 HMT-APS。

1.3.4 流变仪测试

测定 HMT 结合 CS 对 APS 流变性质的影响根据之前的方法略作修改^[41]。样品处理:将 100 mg 样品分散于 1 mL 蒸馏水中 (900 r/min 于室温下磁力搅拌 1 h 使其充分混合),沸水浴糊化 30 min。动态震荡流变测定:取上述淀粉糊,放在载物台上,平板直径为 60 mm,间隙为 1 mm,设定温度为 25 °C,1%应力,频率从 0.1 至 10 Hz 进行测试。收集数据并分析,参数包括储存模量 (G'),损耗模量 (G''),损耗因子 $\tan\delta$ (G''/G')。静态剪切流变测定:在 25 °C,1%应力下在 0.1~100 s^{-1} 和 100~0.1 s^{-1} 进行测试,收集数据并分析,并用 Power law 模型方程分析拟合数据。

1.3.5 DSC 测试

用 DSC 测定淀粉的热特性分析,采用之前的实验方法略作修改^[41]。准确称取 5 mg 样品于坩埚中,样品:蒸馏水质量比为 1:3,摇匀,平衡水分 12 h。测定条件:初始温度为 30 °C,采用 10 °C/min 的升温速率,升温至 95 °C 停止。相变参数分别用初始温度(T_0),峰值温度 (T_p),终止温度 (T_c),焓变 (ΔH) 表示。

1.4 数据分析

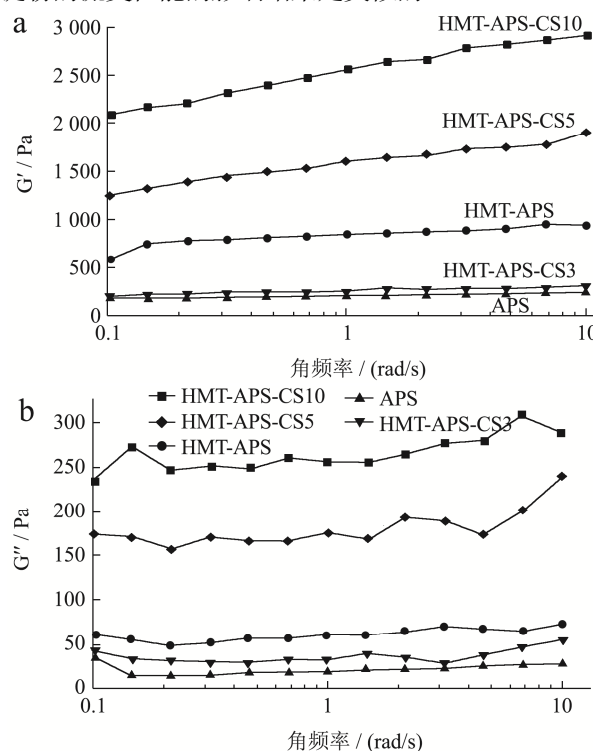
以上实验均重复测量 3 次,以保证实验值的精确度,数据以平均值 \pm 标准偏差表示。实验绘图与分析采用 Origin 9.1 对数据进行绘图,IBM SPSS Statistics 20 软件进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 动态流变性质数据分析

HMT 结合 CS 处理对桃椰淀粉动态流变性质的影响如图 1 所示。在 0.01~10 Hz 范围内,所有凝胶体系

的 G' 值都显著高于 G'' 值;且 G' 值随频率的增加而增大 (图 1a),表明 APS 凝胶为弱凝胶,这种频率依赖性的现象也证明了淀粉凝胶网络结构的形成^[42],同时表现出类似固体的性质^[41]。HMT-APS 和 HMT-APS-CS 样品凝胶的 G' 增加, G'' 值下降, HMT 促进了淀粉之间的相互作用,导致更多的直链淀粉回生,增强了凝胶的弹性,凝胶结构更加稳定^[43]。HMT-APS-CS (CS3、CS5、CS10) 的 G' 和 G'' 值均大于 APS,且随着 CS 分子量的增加,效果越明显,当 CS 分子量达到 10 ku 时,系统具有最高的粘弹性模量, G' 为 2 899 Pa, G'' 为 309 Pa,表明 HMT 和 CS 的加入显著提高了淀粉凝胶的稳定性,使 APS 凝胶在受到外力作用时不容易变形,尤其是高分子量 CS 效果更加明显。在先前的研究中,多糖的加入会引起淀粉体系弹性模量和粘性模量的提高^[44,45],壳聚糖的加入也产生了同样的效果。高分子量 CS 在淀粉糊化过程中与淀粉分子产生更程度的交联作用^[46],HMT-APS-CS10 表现最高的粘弹性模量。值得注意的是,HMT-APS-CS3 具有比 HMT-APS 更低的 G' 与 G'' ,低分子量 CS 形成的交联分子不足以显著改变天然淀粉的粘弹性,同时抑制了湿热处理带来的分子重排作用,在宏观上表现出比 HMT-APS 更低的粘弹性模量,在其他同行的研究中^[47,48],不同分子量的阿拉伯胶加入后降低了 G' 与 G'' ,低分子量的阿拉伯胶显示更显著的抑制作用,抑制淀粉分子浸出,导致更低的粘弹性,此外,分子量越大的魔芋胶对玉米淀粉粘弹性性能的影响越显著^[49],与不同分子量的黄原胶对大米淀粉的流变性能的影响结果是类似的^[50]。



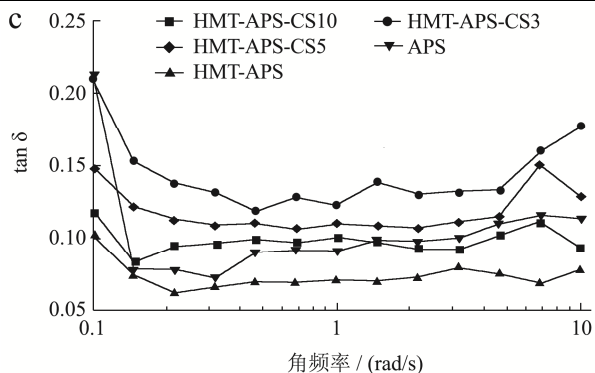


图1 湿热处理结合壳聚糖处理对桃椰淀粉储能模量(a)、损耗模量(b)和tanδ(c)的影响

Fig.1 Influence of HMT and CS on G' (a), G'' (b) and tanδ (c) of APS

损耗因子 (tanδ) 为 G'与 G''的比值, tanδ 越大, 说明粘性越强, 表现出更强的流动性; tanδ 越小, 说明弹性越强, 表现出更强的固体性质。由图 1c 可知, 所有样品的 tanδ 均小于 1, 说明凝胶主要以弹性为主, 在粘弹性能中弹性组分的贡献大于粘性组分, 具有典型的凝胶网络。HMT-APS 的 tanδ 低于 APS, 表明固体性增强, 这可能是由于受到 HMT 的作用, 淀粉分子链的降解, 进行再重排形成连续凝胶网络结构^[1]。在加入低分子量 CS3 和 CS5 后, HMT-APS-CS3 和 HMT-APS-CS5 的 tanδ 高于未改性淀粉, 低分子量的 CS 更易与 APS 发生相互作用, 限制淀粉颗粒表面膨胀, 减少直链淀粉浸出, 削弱了淀粉的凝胶特性。高分子量 CS10 加入 APS 后, HMT-APS-CS10 的 tanδ 低于未改性淀粉, 改性淀粉的凝胶特性更强。

2.2 静态流变性质数据分析

HMT 结合 CS 处理桃椰淀粉样品的静态剪切曲线如图 2 所示, 用 Power law 方程拟合后, 其相应的参数见表 1。拟合系数 R² 在 0.77~1.00 之间, 所有凝

胶体系的剪切应力随着剪切速率的增加而增加, 流体指数 (n) 均小于 1, 表明 APS 和 HMT-APS-CS (CS3, CS5, CS10) 均为典型的假塑性流体, 具有剪切稀化行为^[51]。APS 经 HMT 结合 CS 处理后, 其凝胶体系的流体指数 (n) 显著降低, 且随着 CS 分子量降低而降低, 体系的假塑性越强。在上行曲线中, HMT 结合 CS 表现出比 APS 更高的 K 值, 其中, HMT-APS-CS5 具有最高的 K 值, 为 397.65, 约为 APS 的 2.58 倍。在高剪切速率下, 剪切力破坏了淀粉体系凝胶结构的稳定性; 当剪切力逐渐下降时, 受损结构恢复, 但恢复程度较低, 上下曲线形成滞后环, 即触变性^[52], 触变行为可以用来反映凝胶在剪切过程中的稳定性强弱。HMT 导致滞后环面积减小, 抗剪切能力增强, 值得注意的是, HMT 结合 CS 的淀粉凝胶体系形成了面积更小的触变环 (Lag Torus), 表明 HMT 和 CS 处理 APS 形成的凝胶结构更加稳定, 较高分子量 CS 更明显 (触变环面积最小, 为 0.33×10⁷ Pa/s)。Yang 等^[53] 得出了类似的结论, 黄原胶导致大米淀粉凝胶体系相互作用增强。更小的滞后环和更强的抗剪切能力, HMT 结合 CS 的改性淀粉具有更好的凝胶性能。

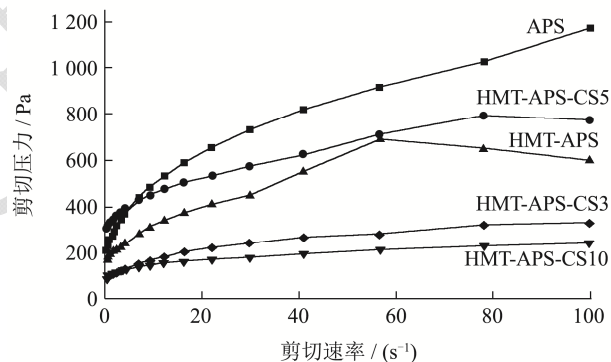


图2 湿热处理结合壳聚糖处理桃椰淀粉样品的静态剪切曲线
Fig.2 Static shear curves of APS and HMT-APS-CS

表 1 湿热处理结合壳聚糖处理桃椰淀粉样品的静态剪切模型参数

Table 1 Power law parameters of APS and HMT-APS-CS

样品	滞后环 ×10 ⁷ /(Pa/s)	N			N'		
		K	n	R ²	K'	n'	R ²
APS	2.65	153.84±3.84 ^g	0.60±0.05 ^a	0.98	233.32±1.53 ^c	0.34±0.01 ^a	1.00
HMT-APS	0.74	349.40±4.40 ^b	0.26±0.03 ^{cd}	0.89	179.66±0.66 ^c	0.28±0.01 ^b	0.94
HMT-APS-CS3	0.48	315.43±3.43 ^c	0.22±0.03 ^d	0.85	93.42±0.42 ^h	0.27±0.02 ^{bc}	0.94
HMT-APS-CS5	0.98	397.65±2.65 ^a	0.30±0.01 ^c	0.88	319.15±0.85 ^b	0.19±0.00 ^d	0.95
HMT-APS-CS10	0.33	265.69±0.69 ^e	0.19±0.01 ^d	0.77	98.86±0.86 ^g	0.18±0.00 ^d	0.99

注: 同一参数不同字母代表具有显著水平差异 (P<0.05); “N”为上行线拟合数据, “N'”为下行线拟合数据。

2.3 热力学性质数据分析

HMT 结合 CS 处理对桃椰淀粉热力学性质的影响

如图 3 和表 2 所示。APS 的起始温度(T₀)为 59.79 °C, 终止温度(T_C)为 78.57 °C, 峰值温度(T_P)为 69.42 °C, 焓值(ΔH)为 3.469 5 J/g。HMT-APS 的 T₀为 62.69 °C,

T_C 为 79.61 °C, T_P 为 72.88 °C, ΔH 为 2.162 8 J/g, 与未改性淀粉相比, 湿热处理使 APS 的糊化温度升高, 焓值降低, 表明 HMT 破坏了 APS 原有的结晶结构, 直链淀粉回生形成了更紧密的结构, 延缓了淀粉的糊化进程, 提高了其热稳定性^[40]。陈旭等^[54]对马铃薯淀粉复合大豆肽进行湿热处理, 显著提高了糊化温度, T_O 从 58.28 °C 上升到 74.92 °C, T_P 从 64.91 °C 上升到 80.63 °C, T_C 从 72.82 上升到 87.45 °C, 显著降低了糊化焓值, ΔH 从 16.74 J/g 下降到 7.96 J/g, 与本文结果一致。在结合 CS 后, HMT-APS-CS 样品的糊化温度 (T_O 、 T_P 和 T_C) 和 ΔH 进一步延后, ΔH 从 2.16 下降到 0.99 J/g, 表明 HMT 和 CS 的加入进一步提高了 APS 的热稳定性, 需要更高的外界温度来破坏淀粉的双螺旋结构^[40]。CS 作为一种亲水胶体, 在水体系中与淀粉之间形成竞争作用, 争夺混合体系中的水分, 限制淀粉无定形区对水的吸附作用, 导致淀粉的不完全糊

化, 改变淀粉的糊化性能^[55,56]。HMT 结合 CS 处理显著降低了样品的 ΔH , 但是在不同分子量 CS 样品间无明显变化, 其结果与蜡质大米淀粉^[57]、普通玉米淀粉^[37]以及蜡质马铃薯淀粉^[58]的实验结果类似。

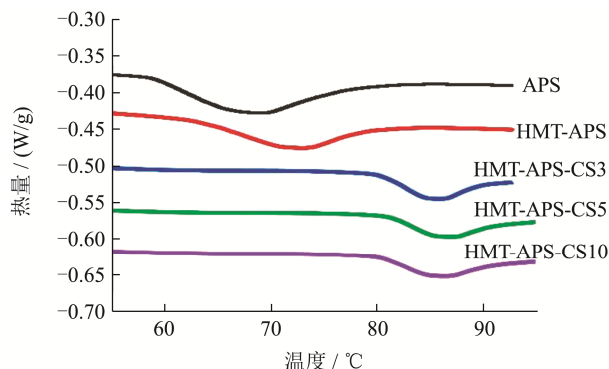


图3 湿热处理结合壳聚糖处理桃榔淀粉样品的 DSC 曲线图

Fig.3 DSC curves of APS and HMT-APS-CS

表 2 湿热处理结合壳聚糖处理对桃榔淀粉热力学特性的影响

Table 2 Influences of HMT and CS on thermal properties of APS

样品	APS	HMT-APS	HMT-APS-CS3	HMT-APS-CS5	HMT-APS-CS10
ΔH (J/g)	3.47±0.05 ^a	2.16±0.03 ^b	1.10±0.16 ^c	0.99±0.14 ^c	1.07±0.07 ^c
T_O /°C	59.79±0.09 ^e	62.69±0.24 ^d	80.28±0.08 ^c	81.42±0.02 ^a	80.81±0.01 ^b
T_P /°C	69.42±0.02 ^e	72.88±0.08 ^d	85.69±0.01 ^c	86.95±0.05 ^b	86.68±0.08 ^a
T_C /°C	78.57±0.07 ^d	79.61±0.01 ^c	91.40±0.40 ^b	93.47±0.07 ^a	93.47±0.03 ^a

注: 同一行不同字母代表具有显著水平差异 ($P < 0.05$)。

3 结论

HMT 结合 CS 对 APS 的流变性能和热性能产生显著影响, 且与不同分子量 CS 有关。HMT 和 CS 提高了凝胶体系的 G' , 降低了 G'' , 且随着分子量的增加越明显。HMT 和 CS 加入提高了 APS 凝胶结构的稳定性, 使 APS 凝胶在受到外力作用时不容易变形, 尤其是高分子量 CS 效果更加明显; HMT 结合低分子量 CS 增强了 APS 的粘性, 而 HMT 结合较高分子量 CS 增强了 APS 的弹性。HMT 结合 CS 提高了 APS 凝胶的剪切稳定性, 较高分子量 CS 更明显 (触变环面积最小, 为 0.33×10^7 Pa/s)。HMT 结合 CS 显著提高了 APS 的糊化温度, 降低了 APS 的 ΔH , 提高了 APS 的热稳定性。HMT 结合 CS 处理提高了 APS 凝胶结构和热力学稳定性, 可为桃榔淀粉及其产品的开发利用提供一定的理论依据。

参考文献

[1] 王艳,王宏伟,王凯旭,等.湿热处理对大米淀粉流变特性的影响[J].食品工业科技, 2021,42(3):48-52.
 [2] 冯铭琴.流变学在食品领域的研究现状与发展趋势[J].食品

安全导刊,2018,9:128-129.

[3] Hermansson A, Svegmarm K. Developments in the understanding of starch functionality [Z]. Oxford: Elsevier Ltd, 1996, 7: 345-353.
 [4] Yan Y, Feng L, Shi M, et al. Effect of plasma-activated water on the structure and *in vitro* digestibility of waxy and normal maize starches during heat-moisture treatment [J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125589.
 [5] Shi M, Gao Q, Liu Y. Changes in the structure and digestibility of wrinkled pea starch with malic acid treatment [J]. Polymers (Basel), 2018, 10(12): 1359.
 [6] Reddy C K, Lee D, Lim S, et al. Enzymatic debranching of starches from different botanical sources for complex formation with stearic acid [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 856-863.
 [7] Ashogbon A O. Dual modification of various starches: Synthesis, properties and applications [J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128325.
 [8] Mei J Y, Zhang L, Ren M H, et al. Insight into multi-scale structure and digestibility of sugar palm (*Arenga pinnata*) starch subjected to high speed jet treatment [J]. Starch-Stärke,

- 2020, 72(9-10): 1900278.
- [9] Zhang L, Mei J, Ren M, et al. Optimization of enzyme-assisted preparation and characterization of *Arenga pinnata* resistant starch [J]. Food Structure, 2020, 25: 100149.
- [10] Mei J Y, Huang T, Bai C H, et al. Influences of chitosan on freeze-thaw stability of *Arenga pinnata* starch [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(2): 692-699.
- [11] Liu Y S, Li M Y, An F K, et al. *In vitro* digestibility, pasting, and thermal properties of *Arenga pinnata* (Wurmb.) Merr starch citrate [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46: e16843.
- [12] Xue S, Mei J Y, Liu Y S, et al. *In vitro* digestibility and physicochemical properties of *Arenga pinnata* starch-chitosan following heat-moisture treatment [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(2): 1340-1349.
- [13] Ji N, Li X, Qiu C, et al. Effects of heat moisture treatment on the physicochemical properties of starch nanoparticles [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 605-609.
- [14] Elessandra D R Z, Alvaro R G D. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 83(2): 317-328.
- [15] Horndok R, Noomhorm A. Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality [J]. LWT - Food Science & Technology, 2007, 40(10): 1723-1731.
- [16] 张连慧,应欣,王勇. 清洁标签在食品行业中的应用[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 326-330.
- [17] 宫冰. 反复/连续湿热处理对不同晶型淀粉结构和理化性质的影响机制[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018.
- [18] Schafranski K, Ito V C, Lacerda L G. Impacts and potential applications: A review of the modification of starches by heat-moisture treatment (HMT) [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106690.
- [19] Molavi H, Razavi S M A, Farhoosh R. Impact of hydrothermal modifications on the physicochemical, morphology, crystallinity, pasting and thermal properties of acorn starch [J]. Food Chemistry, 2018, 245: 385-393.
- [20] Bet C D, de Oliveira C S, Colman T, et al. Organic amaranth starch: A study of its technological properties after heat-moisture treatment [J]. Food Chemistry, 2018, 264: 435-442.
- [21] Zhang B, Zhao K, Su C, et al. Comparing the multi-scale structure, physicochemical properties and digestibility of wheat A- and B-starch with repeated versus continuous heat-moisture treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 519-528.
- [22] 唐玮泽. 多次湿热处理对大米淀粉和米粉消化性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [23] Maache-Rezzoug Z, Zarguili I, Loisel C, et al. Structural modifications and thermal transitions of standard maize starch after DIC hydrothermal treatment [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(4): 802-812.
- [24] Surendra B A, Jagan M R. Influence of prior pre-treatments on molecular structure and digestibility of succinylated foxtail millet starch [J]. Food Chemistry, 2019, 295: 147-155.
- [25] Liu K, Zhang B, Chen L, et al. Hierarchical structure and physicochemical properties of highland barley starch following heat moisture treatment [J]. Food Chemistry, 2019, 271: 102-108.
- [26] Yang Z, Hao H, Wu Y, et al. Influence of moisture and amylose on the physicochemical properties of rice starch during heat treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 168: 656-662.
- [27] Wang Q, Li L, Zheng X. Recent advances in heat-moisture modified cereal starch: Structure, functionality and its applications in starchy food systems [J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128700.
- [28] Zhu F. Structure and physicochemical properties of starch affected by dynamic pressure treatments: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 639-654.
- [29] Mahmood K, Kamilah H, Shang P L, et al. A review: Interaction of starch/non-starch hydrocolloid blending and the recent food applications [J]. Food Bioscience, 2017, 19: 110-120.
- [30] Iuga M, Mironeasa S. A review of the hydrothermal treatments impact on starch based systems properties [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(22): 3890-3915.
- [31] 蒋挺大. 壳聚糖(2版). [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [32] 孙翠霞, 熊柳, 孙庆杰, 等. 壳聚糖对小麦淀粉理化性质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 87-90.
- [33] Shahidi F, Arachchi J K V, Jeon Y. Food Applications of Chitin and Chitosan [M]. Oxford: Elsevier Ltd., 1999, 10: 37-51.
- [34] Zheng M, Lei S, Wu H, et al. Effect of chitosan on the digestibility and molecular structural properties of lotus seed starch [J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 133: 110731.
- [35] 张思聪, 夏文水, 王斌, 等. 不同分子量壳聚糖对高脂膳食小

- 鼠血糖的调节作用[J].食品与机械,2017,33(4):122-126.
- [36] Zhang Y, Zhao X, Bao X, et al. Effects of pectin and heat-moisture treatment on structural characteristics and physicochemical properties of corn starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106664.
- [37] 周帅.亲水性胶体结合湿热处理对玉米淀粉消化性能的影响[D].无锡:江南大学,2020.
- [38] Zheng Y, Sun W, Yang W, et al. The influence of xanthan gum on rheological properties and *in vitro* digestibility of kudzu (*Pueraria lobata*) starch [J]. Starch-Stärke, 2020, 72(3-4): 1900139.
- [39] Diao Y, Si X, Shang W, et al. Effect of interactions between starch and chitosan on waxy maize starch physicochemical and digestion properties [J]. CYTA: Journal of Food, 2017, 15(3): 327-335.
- [40] Chung H, Liu Q, Hoover R. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(3): 436-447.
- [41] Mei J Y, Zhang L, Lin Y, et al. Pasting, rheological, and thermal properties and structural characteristics of large and small *Arenga pinnata* starch granules [J]. Starch-Stärke, 2020, 72(11-12): 1900293.
- [42] Kulicke W M, Eidam D, Kath F, et al. Hydrocolloids and rheology: Regulation of visco-elastic characteristics of waxy rice starch in mixtures with galactomannans [J]. Starch-Stärke, 1996, 48(3): 105-114.
- [43] Jia R, McClements D J, Dai L, et al. Improvement of pasting and gelling properties of potato starch using a direct vapor-heat moisture treatment [J]. Int J Biol Macromol, 2022, 219: 1197-1207.
- [44] Ji X, Yin M, Hao L, et al. Effect of inulin on pasting, thermal, rheological properties and *in vitro* digestibility of pea starch gel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193(Pt B): 1669-1675.
- [45] Krystyjan M, Ciesielski W, Khachatryan G, et al. Structure, rheological, textural and thermal properties of potato starch - Inulin gels [J]. Food Science & Technology, 2015, 60(1): 131-136.
- [46] Kaur L, Singh J, Singh H, et al. Starch-cassia gum interactions: A microstructure-rheology study [J]. Food Chemistry, 2008, 111(1): 1-10.
- [47] Hou C, Zhao X, Tian M, et al. Impact of water extractable arabinoxylan with different molecular weight on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch [J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126477.
- [48] Qiu S, Yadav M P, Liu Y, et al. Effects of corn fiber gum with different molecular weights on the gelatinization behaviors of corn and wheat starch [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 53: 180-186.
- [49] Ma S, Zhu P, Wang M, et al. Effect of konjac glucomannan with different molecular weights on physicochemical properties of corn starch [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 663-670.
- [50] Viturawong Y, Achayuthakan P, Supphantharika M. Gelatinization and rheological properties of rice starch/xanthan mixtures: Effects of molecular weight of xanthan and different salts [J]. Food Chemistry, 2008, 111(1): 106-114.
- [51] Achayuthakan P, Supphantharika M. Pasting and rheological properties of waxy corn starch as affected by guar gum and xanthan gum [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 71(1): 9-17.
- [52] Sikora M, Adamczyk G, Krystyjan M, et al. Thixotropic properties of normal potato starch depending on the degree of the granules pasting [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 121: 254-264.
- [53] Yang Z, Hao H, Wu Y, et al. Influence of moisture and amylose on the physicochemical properties of rice starch during heat treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 168: 656-662.
- [54] 陈旭,赵华彬,罗健伟,等.湿热处理对马铃薯淀粉-大豆肽复合物的理化和消化特性的影响[J].中国食品学报,2022,22(7):133-141.
- [55] Gennaro S D, Birch G G, Parke S A, et al. Studies on the physicochemical properties of inulin and inulin oligomers [J]. Food Chemistry, 2000, 68(2): 179-183.
- [56] Tester R F, Sommerville M D. The effects of non-starch polysaccharides on the extent of gelatinisation, swelling and α -amylase hydrolysis of maize and wheat starches [J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(1): 41-54.
- [57] Zeng F, Ma F, Kong F, et al. Physicochemical properties and digestibility of hydrothermally treated waxy rice starch [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 92-98.
- [58] Wang H, Zhang B, Chen L, et al. Understanding the structure and digestibility of heat-moisture treated starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 88: 1-8.