

卡拉胶与葛根淀粉共混物的物化特性分析

华雨, 方诗怡, 陈思, 唐梓豪, 刘传菊, 李欢欢, 谿银强, 汤尚文*

(湖北文理学院食品科学与化学工程学院, 湖北省食品配料工程技术研究中心, 湖北襄阳 441053)

摘要: 为改善天然葛根淀粉加工性能和食用品质, 研究了不同比例卡拉胶与葛根淀粉共混物 (Carrageenan and Kudzu Starch Blends, CK) 的物化特性。检测结果表明, 添加卡拉胶后 CK 糊化液的黏度、回生值、屈服应力、损耗模量和储能模量显著下降, 糊化温度显著上升; CK 凝胶呈现均一的多孔结构, 析水率、相对结晶度、硬度、胶着性和咀嚼性显著降低, 回复性显著增加。当卡拉胶与葛根淀粉比例为 10:90 (*m/m*) 时, 相对于天然葛根淀粉, 共混物的峰值黏度、保持黏度、崩解值、最终黏度和回生值分别下降了 20.30%、10.12%、54.60%、16.96% 和 28.18%, 而糊化温度上升了 4.00 °C; 屈服应力下降了 9.03 Pa; 硬度下降了 489.45 g、胶着性下降了 422.37 g、咀嚼性下降了 413.58 g、回复性增加了 0.14; 相对结晶度下降了 6.04%。综上, 卡拉胶提升了 CK 的糊化温度, 增强了糊化液的剪切稳定性和流动性, 降低了黏弹性, 使得凝胶质地更加柔软, 研究结果为葛根淀粉食品加工提供了参考。

关键词: 卡拉胶; 葛根淀粉; 物化特性

文章编号: 1673-9078(2025)06-146-153

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0357

Physicochemical Properties of Carrageenan/Kudzu Starch Blends

HUA Yu, FANG Shiyi, CHEN Si, TANG Zihao, LIU Chuanju, LI Huanhuan, HUO Yinqiang, TANG Shangwen*

(School of Food Science and Chemical Engineering, Hubei Provincial Engineering and Technology Research Center for Food Ingredients, Hubei University of Arts and Sciences, Xiangyang 441053, China)

Abstract: The physicochemical properties of carrageenan/kudzu starch blends (CK) with varying carrageenan:kudzu starch ratios were investigated to improve the processing performance and edible quality of natural kudzu starch. The results revealed that the viscosity, retrogradation value, yield stress, loss modulus, and storage modulus of CK pastes decreased significantly and the pasting temperature rose significantly after carrageenan was added. Moreover, the CK gel showed a homogeneous porous structure, and the syneresis rate, relative crystallinity, hardness, gumminess, and chewiness decreased significantly, while the resilience increased significantly. At a 10:90 (*m/m*) ratio, peak viscosity, holding strength, breakdown value, final viscosity, and retrogradation of the blend decreased by 20.30%, 10.12%, 54.60%, 16.96%, and 28.18%, respectively, compared to natural kudzu starch. The pasting temperature increased by 4.00 °C, and the yield stress, hardness, gumminess, and chewiness decreased by 9.03 Pa, 489.45 g, 422.37 g, and 413.58 g, respectively. The resilience increased by 0.14, while relative crystallinity reduced by 6.04%. In conclusion, carrageenan increased the pasting temperature of CK, enhanced the shear stability and fluidity of the paste, and decreased the viscoelasticity, making the gel texture softer. These

引文格式:

华雨,方诗怡,陈思,等.卡拉胶与葛根淀粉共混物的物化特性分析[J].现代食品科技,2025,41(6):146-153.

HUA Yu, FANG Shiyi, CHEN Si, et al. Physicochemical properties of carrageenan/kudzu starch blends [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 146-153.

收稿日期: 2024-03-22

基金项目: 襄阳市科技计划项目 (2023ABA007517); 湖北文理学院大学生创新创业训练项目 (X202210519174)

作者简介: 华雨 (2005-), 女, 本科生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: tangswbhuas@163.com

通讯作者: 汤尚文 (1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 41178619@qq.com

findings provide a reference for the processing of kudzu starch products.

Key words: carrageenan; kudzu starch; physicochemical properties

葛根是我国知名的药食两用植物,其富含异黄酮类、三萜类、香豆素类、皂苷类、生物碱类和多糖类等功能性成分^[1]。淀粉是葛根最重要的组成部分,其干基含量可达 51.6%^[2]。葛根淀粉经提取后通常用于功能性饮料、固体饮料、代餐粉、面条、烘焙食品等产品加工,因富含黄酮类等功能性成分,其加工产品被视为具有一定的食补效果而受到消费者的青睐^[3]。此外近些年的研究表明,葛根淀粉的摄入可导致肠道微生物菌群的特异性改变,具有潜在的益生元效应,还可显著减轻高脂高胆固醇饮食诱导的非酒精性脂肪肝^[4]。

然而,天然葛根淀粉存在一些缺陷限制了其应用领域的拓展,例如葛根淀粉凝胶具有较差的冻融稳定性^[5],粉糊流动性差、易回生,糊化起始温度较低导致冲调时易成团^[6]。为改善天然葛根淀粉固有性能缺陷,采用亲水胶体进行共混改性是一种简便易行的方法。Zheng 等^[7]研究了黄原胶对葛根淀粉物化和消化特性的影响,研究发现黄原胶的加入显著提高了葛根淀粉的峰值黏度、最终黏度,但降低了崩解值、回生值和糊化温度。Zhang 等^[8]研究了阿拉伯胶(AG)、海藻酸钠(SA)、刺槐豆胶(LG)和瓜尔胶(GG)与葛根淀粉共混体系的物化特性,结果表明几种亲水胶体对葛根淀粉的糊化特性、凝胶质地、流变特性和热特性均有显著影响,其中 AG 降低了葛根淀粉的黏度,而 SA、LG 和 GG 增加了黏度和糊化温度,四种胶体均提高了葛根淀粉的热稳定性,降低了析水率,改善了持水能力。 κ -卡拉胶是从某些种类的海藻中提取的水溶性、线性、硫酸盐多糖,可以形成强、脆、不透明的凝胶,可作为作为膨胀剂、乳化剂、胶凝剂、保湿剂、稳定剂或增稠剂广泛应用于各种食品中^[9]。胡方洋等^[10]的研究表明卡拉胶可显著提高薯类淀粉的假塑性和剪切稳定性,降低薯类淀粉凝胶的析水率提升其冻融稳定性。

本文将 κ -卡拉胶(Carrageenan, CAR)以不同比例与葛根淀粉(Kudzu Starch, KS)共混,考察共混物的糊化、凝胶、流变和热特性,以期葛根淀粉的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

葛根淀粉(食品级),湖北葛百岁葛业有限公司;

κ -卡拉胶(食品级),合肥博美生物科技有限公司。其余试剂和药品均为国产分析纯。

RVA-Tec Master 快速黏度分析仪, Perten 波通(珀金埃尔默); TA.XT Plus 质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; Q20 差示扫描量热仪, 美国 TA 仪器公司; MIRA4 场发射扫描电子显微镜, 捷克 TESCAN; D8 Advance X 射线衍射仪, 德国 Bruker; DHR-2 流变仪, 美国 TA 仪器公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备

将 CAR 和 KS 按 0:100、2:98、4:96、6:94、8:92 和 10:90 的质量比例精确称量,用碾钵研磨分散,置于塑料离心管中漩涡震荡 2 h 混合均匀,得到混合样品 CK,分别命名为 CK0、CK2、CK4、CK6、CK8 和 CK10。

1.2.2 共混物凝胶析水率测定

配制 12% (m/m) CK 混合样品悬浮液置于 50.00 mL 离心管中,室温下震荡 60 min 形成均匀分散液后置于沸水浴中糊化 30 min,取出后冷却至室温,置于冰箱 4 °C 冷藏 24 h,自然升温至室温后于离心机 4 000 r/min 离心 20 min,倒掉上清液,称量沉淀并记录。

$$X = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

X ——析水率, %;

m_0 ——离心前凝胶总质量, g;

m_1 ——离心后凝胶总质量, g。

1.2.3 共混物糊化特性测定

称取 2.50 g CK 混合样品和 25.00 g 水至 RVA 铝筒,搅拌均匀后上机测试。测试程序: 960 r/min 快速搅拌 10 s, 降速至 160 r/min 直到实验结束; 浆料在 50 °C 下平衡 60 s, 以 12 °C/min 升温至 95 °C, 保持 150 s, 之后以 12 °C/min 降温至 50 °C 保持 120 s。

1.2.4 共混物流变特性测定

配制 6% (m/m) CK 混合样品悬浮液置于 15.00 mL 离心管内,参考李淑月等^[11]的方法进行静态流变和动态流变测定。测试夹具: 40 mm 平行板, 间距: 1 000 μ m。

采用 Herschel-Bulkley 方程对剪切速率-剪切应力曲线进行拟合, 见公式 (2)。

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

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 ——流动特征指数, 无量纲。

1.2.5 共混物凝胶质构测定

配制为 12% (m/m) CK 混合样品悬浮液, 参考赵灿等^[12]的方法制备 CK 凝胶块进行质构测试。测试时将凝胶块切成 2 cm 高度的圆柱体。测试模式为 TPA 模式: 探头 P100, 压缩比 50%, 测前速度为 2 mm/s, 测后速度 2 mm/s, 测中速度 1 mm/s。

1.2.6 共混物热学特性测定

称取 5.00 mg CK 混合样品和 10.00 μL 水密封于测试坩埚, 用空铝盒作参照进行测试。升温速率 $5^\circ\text{C}/\text{min}$, 扫描范围为 $30\sim 120^\circ\text{C}$, 吹扫氮气 $50\text{mL}/\text{min}$ 。

1.2.7 共混物X射线衍射测定

取 1.2.5 中制备的 CK 凝胶块冻干后研磨过 100 目筛网上机测试, 扫描速率为 $2^\circ/\text{min}$, 扫描范围为 $5^\circ\sim 90^\circ$ 。

1.2.8 共混物凝胶扫描电镜测定

取 1.2.5 中制备的凝胶块冻干后切片, 切片固定于双面导电胶上喷金后上机测试, 在不同放大倍数下观察凝胶多孔结构形貌, 加速电压 5.0 kV。

1.3 数据处理与绘图

采用 Origin 2021 计算各测试数据的平均值、标准差及显著性 (Duncan 检验, $P < 0.05$), 表示方式采用 $\bar{X} \pm S$ (平均值加减标准差), 显著性用小写字母上标表示。绘图采用 Origin 2021 完成。

2 结果与分析

2.1 卡拉胶对共混物凝胶析水率的影响

图 1 为卡拉胶对 CK 混合物凝胶析水率的影响, CK0 析水率为 2.06%, 添加 CAR 后 CK2~CK10 析水率显著降低至 0.84%~1.25%, CK10 相对于 CK0 降低了 0.81%。Lin 等^[13]研究了 CAR 和玉米淀粉、马铃薯淀粉、木薯淀粉、大米淀粉共混体系的析水率有类似的结果, 当 CAR 用量在 0.20%~1.00% 时, 随着 CAR 用量的增加, 所有种类淀粉凝胶析水率

均显著下降。在 CK 共混物中, CAR 分子链舒展后可与 KS 分子交错形成致密的三维网络结构, 从而将水分子锁定在网络结构中, 增强了凝胶水分的稳定性从而降低了析水率。

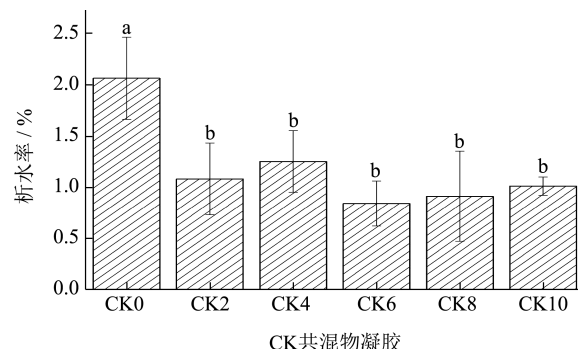


图 1 卡拉胶和葛根淀粉共混物凝胶的析水率

Fig.1 Syneresis rate in gels of blends of carrageenan and kudzu starch

注: 图中不同字母间有显著性差异, $P < 0.05$ 。

2.2 卡拉胶对共混物糊化特性的影响

图 2 和表 1 为不同 CAR 添加量下 CK 共混物糊化曲线和糊化特征参数。图 2 显示, 随着 CAR 添加量的增加, CK2~CK10 的 RVA 曲线均低于 CK0, 表 1 计算结果显示, 添加 CAR 后 CK 共混物的峰值黏度、保持黏度、崩解值、最终黏度和回生值均显著下降, 峰值时间和糊化温度均显著上升。CK10 相对于 CK0, 峰值黏度、保持黏度、崩解值、最终黏度和回生值分别下降了 20.30%、10.12%、54.60%、16.96% 和 28.18%, 而糊化温度上升了 4.00°C 。

Krystyjan 等^[14]研究了 CAR 对马铃薯淀粉糊化特性的影响, 结果显示共混物相对于原淀粉峰值黏度从 987.50 BU 下降至 229.50 BU, 最终黏度从 867.50 BU 降低至 360.00 BU; Kim 等^[15]研究了 CAR 对豌豆淀粉糊化特性的影响, 相对于豌豆原淀粉, 添加 CAR 后峰值黏度、最终黏度和回生值分别下降了 8.35%、9.15% 和 22.95%。值得关注的是, 在已有的亲水胶体与淀粉共混体系糊化特性和流变特性的研究中, 绝大部分的研究结果显示 CAR 等亲水胶体的添加均会引起共混物黏度的增加^[16-18]。在 CK 共混物中 CAR 浓度可能是导致共混物黏度变化规律出现不同结果的最主要的原因。CAR 浓度较低时在水溶液中充分分散, 淀粉颗粒吸水膨胀崩解后, 水中分散的 CAR 分子插入到淀粉分子链中相互纠缠从而导致表观黏度上升; 在高浓度状态下水溶液中 CAR 形成连续相, 披覆在淀粉颗粒表面, 在升温过程中阻碍了淀粉颗粒的吸水膨胀和崩解,

降低了淀粉糊液中碎片相互之间的摩擦，因此表现出糊化温度和峰值时间的增加和表观黏度下降^[19]。整体而言，CAR 的添加降低了 CK 共混物糊化液的黏度，而且对其短期回生有抑制作用。

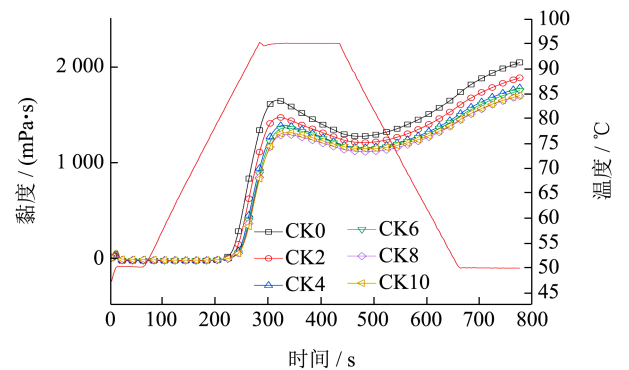


图 2 卡拉胶和葛根淀粉共混物的糊化曲线

Fig.2 Pasting curves of carrageenan and kudzu starch blends

2.3 卡拉胶对共混物糊化液流变特性的影响

图 3 为 CK 共混物糊化液的静态流变曲线。图 3a 中剪切应力随剪切速率变化曲线上行线和下行线不重合，且所有样品上行线均高于下行线形成顺时针回路，表明 CK 糊化液为典型的触变性流体。随着 CAR 用量的增加，上下行曲线之间的间距逐渐缩小，曲线回路所围合的面积（滞后面积，表 2）显著降低，CK0 滞后面积为 1 660.27 Pa·s，CK10 滞后面积为 696.17 Pa·s，相对于 CK0 下降了 964.10 Pa·s，说明 CAR 的添加增加了 CK 糊液的剪切稳定性，同时降低了糊液黏度^[11]。表观黏度的下降在图 3b 中更为明显，随着剪切速率的增加，所有样品均呈现剪切稀化状态，且随着 CAR 比例的增加，黏度下降，该结果与 RVA 测试中最终黏度的下降一致。Herschel-Bulkley 模型拟合结果显示，屈服应力随 CAR 用量的增加而显著降低，CK10 相

对于 CK0 下降了 9.03 Pa，稠度系数无显著性变化，流动特征指数显著增加。流动特征指数在 0.43~0.47，均小于 1，说明样品均为剪切稀释性假塑性流体，而屈服应力的降低则表明 CAR 增强了 CK 糊液的流动性^[20]。

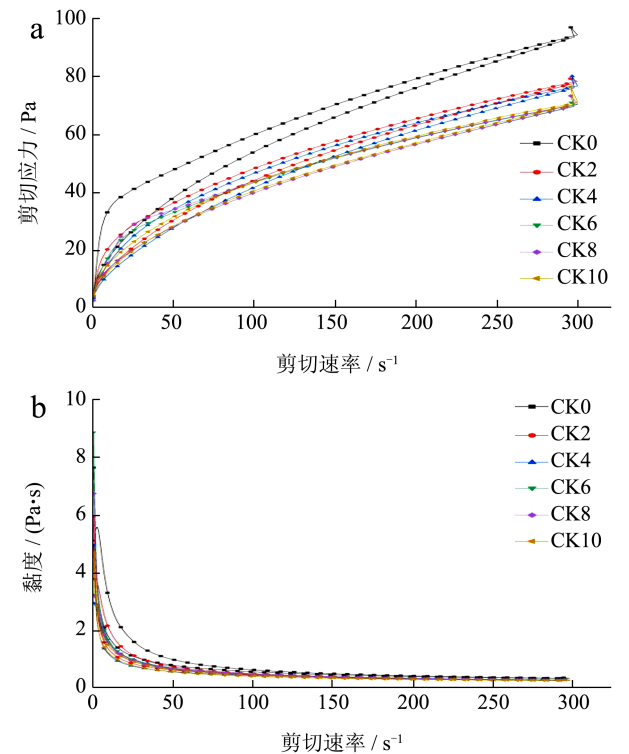


图 3 卡拉胶和葛根淀粉共混物的静态流变曲线

Fig.3 Static rheological curve of the carrageenan and kudzu starch blends

图 4 为损耗模量 (G'') 和储能模量 (G') 随角频率变化的情况，反映了样品的黏弹性。如图所示， G'' 和 G' 均随角频率的增大而增大，说明 CK 糊化液为弱凝胶体系；随着 CAR 用量的增加，CK 糊化液 G'' 和 G' 均逐步下降，表明 CAR 降低了 CK 糊化液的黏弹性^[21]。

表 1 卡拉胶和葛根淀粉共混物的糊化特征参数

Table 1 Pasting parameters of carrageenan and kudzu starch blends

样品	峰值黏度/(mPa·s)	保持黏度/(mPa·s)	崩解值/(mPa·s)	最终黏度/(mPa·s)	回生值/(mPa·s)	峰值时间/min	糊化温度/℃
CK0	1 645.00 ± 26.89 ^a	1 268.33 ± 42.16 ^a	376.67 ± 15.50 ^a	2 042.00 ± 38.63 ^a	773.67 ± 13.32 ^a	5.27 ± 0.00 ^d	83.98 ± 0.03 ^d
CK2	1 468.00 ± 6.56 ^b	1 203.67 ± 12.74 ^b	264.33 ± 14.01 ^b	1 882.00 ± 35.51 ^b	678.33 ± 24.44 ^b	5.35 ± 0.04 ^c	85.55 ± 0.05 ^c
CK4	1 384.33 ± 5.69 ^c	1 149.00 ± 17.58 ^c	235.33 ± 20.60 ^b	1 775.33 ± 21.57 ^c	626.33 ± 14.57 ^c	5.49 ± 0.03 ^b	87.00 ± 0.87 ^b
CK6	1 358.67 ± 15.82 ^c	1 136.33 ± 17.39 ^c	222.33 ± 32.08 ^{bc}	1 748.00 ± 8.89 ^c	611.67 ± 26.27 ^{cd}	5.53 ± 0.00 ^{ab}	87.48 ± 0.94 ^{ab}
CK8	1 290.67 ± 29.57 ^d	1 108.67 ± 8.96 ^c	182.00 ± 32.08 ^{cd}	1 691.67 ± 16.17 ^d	583.00 ± 13.53 ^{de}	5.55 ± 0.04 ^a	88.03 ± 0.03 ^a
CK10	1 311.00 ± 41.07 ^d	1 140.00 ± 23.64 ^c	171.00 ± 18.19 ^d	1 695.67 ± 37.69 ^d	555.67 ± 15.37 ^c	5.58 ± 0.04 ^a	87.98 ± 0.03 ^a

注：同列字母间有显著差异 ($P<0.05$)。下表同。

表 2 卡拉胶和葛根淀粉共混物的流变曲线拟合参数

Table 2 Rheological curve fitting parameters of carrageenan and kudzu starch blends				
样品	滞后面积/(Pa·s)	屈服应力/Pa	稠度系数/(Pa·s)	流动特征指数
CK0	1 660.27 ± 59.16 ^a	9.82 ± 3.35 ^a	5.46 ± 1.69 ^a	0.45 ± 0.04 ^{ab}
CK2	962.23 ± 67.34 ^b	3.03 ± 1.55 ^b	4.37 ± 0.56 ^a	0.45 ± 0.01 ^{ab}
CK4	968.57 ± 78.70 ^b	2.73 ± 1.27 ^b	6.40 ± 1.02 ^a	0.44 ± 0.02 ^{ab}
CK6	948.80 ± 45.02 ^b	2.27 ± 1.02 ^b	5.41 ± 1.35 ^a	0.43 ± 0.02 ^b
CK8	645.17 ± 28.01 ^c	0.93 ± 0.79 ^b	6.08 ± 0.36 ^a	0.46 ± 0.01 ^{ab}
CK10	696.17 ± 66.35 ^c	0.79 ± 0.16 ^b	4.86 ± 0.67 ^a	0.47 ± 0.02 ^a

表 3 卡拉胶和葛根淀粉共混物凝胶的质构参数

Table 3 Texture parameters of the gel of carrageenan and kudzu starch blends					
样品	硬度/g	弹性	胶着性/g	咀嚼性/g	回复性
CK0	687.41 ± 6.43 ^a	0.97 ± 0.01 ^a	595.09 ± 14.70 ^a	579.68 ± 18.70 ^a	0.55 ± 0.01 ^c
CK2	194.21 ± 2.69 ^{bc}	0.96 ± 0.00 ^{bc}	165.18 ± 6.37 ^b	158.17 ± 6.96 ^b	0.75 ± 0.02 ^a
CK4	191.21 ± 6.36 ^{bc}	0.95 ± 0.00 ^{bc}	165.60 ± 7.71 ^b	157.20 ± 7.90 ^b	0.69 ± 0.02 ^b
CK6	185.77 ± 2.40 ^c	0.96 ± 0.00 ^{bc}	164.47 ± 2.01 ^b	157.86 ± 2.22 ^b	0.70 ± 0.01 ^b
CK8	198.72 ± 0.11 ^b	0.95 ± 0.01 ^c	174.21 ± 0.19 ^b	165.27 ± 1.59 ^b	0.67 ± 0.00 ^b
CK10	197.96 ± 3.31 ^b	0.96 ± 0.00 ^{ab}	172.72 ± 2.61 ^b	166.10 ± 2.03 ^b	0.69 ± 0.00 ^b

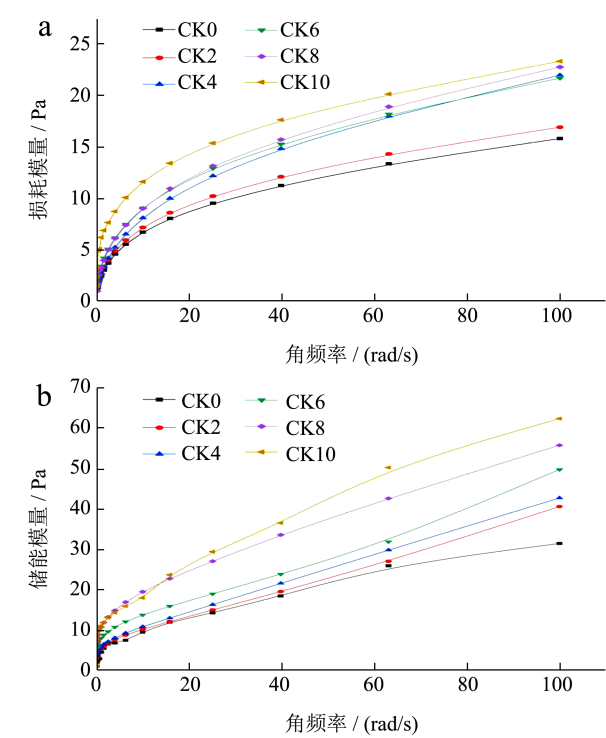


图 4 卡拉胶和葛根淀粉共混物的动态流变曲线
Fig.4 Dynamic rheological curve of carrageenan and kudzu starch blends

2.4 卡拉胶对共混物凝胶质构的影响

表 3 为不同 CAR 添加量下 CK 凝胶的质构参数。添加 CAR 后 CK 凝胶硬度、弹性、胶着性和咀嚼性显著降低，回复性显著增加，其中 CK10 相对于

CK0 硬度下降了 489.45 g、胶着性下降了 422.37 g、咀嚼性下降了 413.58 g、回复性增加了 0.14。表明 CAR 的添加使得 CK 凝胶更加柔软。

Zhang 等^[8]的研究显示阿拉伯树胶和瓜尔胶的添加均能显著增加葛根淀粉凝胶的硬度、咀嚼性和内聚性，但继续加大亲水胶体用量后，硬度反而下降；Zheng 等^[7]的研究则显示黄原胶的添加显著降低了 KS 凝胶的硬度，当黄原胶用量为 2% 时，KS 凝胶硬度从 322.83 g 降低至 135.33 g。淀粉凝胶的硬度主要由直链淀粉在储存过程中的重排决定，较高的直链淀粉含量会导致更大程度的分子间交联和纠缠，从而表现出高的凝胶硬度。CAR 的加入阻碍了直链淀粉分子的聚集和重排，削弱了直链淀粉分子之间的相互作用，且 CAR 与支链淀粉之间的纠缠为复杂体系提供了柔软的结构，从而表现出凝胶较好的回复性，硬度的下降和回复性的增强意味着 CAR 的添加能够抑制共混物凝胶的长期回生。

2.5 卡拉胶对共混物热学特性的影响

图 5 和表 4 是不同 CAR 添加量下 CK 混合物的 DSC 特征参数。检测结果显示，CK0 糊化温度范围在 58.43~89.74 ℃，糊化焓 ΔH 为 8.30 J/g。添加 CAR 后，糊化起始温度 T_0 、峰值温度 T_p 和终止温度 T_c 均显著增加，但 ΔH 无显著变化，其中 CK10 的 T_p 相对于 CK0 增加了 2.90 ℃。

表 4 卡拉胶和葛根淀粉共混物的热学参数

Table 4 Thermal parameters of the carrageenan and kudzu starch blends				
样品	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
CK0	58.43 ± 0.99^c	82.66 ± 0.40^d	89.74 ± 0.41^d	8.30 ± 1.04^a
CK2	55.39 ± 1.14^d	88.01 ± 0.95^a	93.81 ± 0.62^a	8.09 ± 0.18^a
CK4	61.30 ± 0.52^b	84.05 ± 0.41^c	90.74 ± 0.37^c	7.25 ± 0.74^a
CK6	60.98 ± 0.44^b	85.66 ± 0.70^b	91.81 ± 0.16^b	7.81 ± 0.08^a
CK8	65.26 ± 0.78^a	84.20 ± 0.49^c	90.51 ± 0.12^c	7.10 ± 0.83^a
CK10	64.22 ± 1.34^a	85.56 ± 0.31^b	91.53 ± 0.16^b	7.56 ± 0.41^a

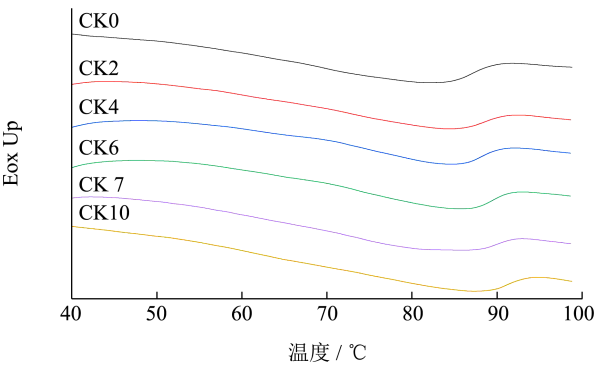


图 5 卡拉胶和葛根淀粉共混物的 DSC 曲线
Fig.5 DSC curves of carrageenan and kudzu starch blends

Duan 等^[22]报道了 3 种葛根淀粉的糊化温度和热焓, T_0 在 $64.57\sim67.05\text{ }^\circ\text{C}$, T_p 在 $69.99\sim73.19\text{ }^\circ\text{C}$, T_c 在 $76.23\sim78.91\text{ }^\circ\text{C}$, ΔH 在 $1.54\sim2.07\text{ J/g}$ 。糊化温度和热焓的不同可能与 KS 淀粉的不同来源有关, 但值得注意的是 DSC 测试中, 淀粉与水分的比例显著影响测试结果^[23]。DSC 图中的吸热峰为淀粉微晶吸热熔融, 添加 CAR 后, 微晶的吸热熔融受到舒展的 CAR 分子链段的阻碍, 因此更难熔融, 表现出 T_0 、 T_p 和 T_c 的升高, 该结果与 RVA 测试中糊化温度的升高一致; 此外, ΔH 无显著变化则表明 CAR 的加入对微晶结构的量没有影响^[12]。

2.6 卡拉胶对共混物凝胶结晶度的影响

KS 在 15.29° 、 17.23° 、 17.95° 和 23.29° 处出现强衍射峰为典型的 A 型结构^[24]。CK0~CK10 均为糊化后凝胶的 XRD 衍射图, 从图 6 中可看出淀粉微晶的强衍射峰均消失, 仅在 17.23° 附近出现弥散的衍射峰, 表明糊化过程中淀粉微晶结构破坏。相对结晶度 (X_c) 计算结果显示, KS 原淀粉结晶度为 37.31% , CK0~CK10 分别为 26.41% 、 22.37% 、 20.79% 、 21.04% 、 19.90% 和 20.37% , CK10 相对于 CK0 下降了 6.04% 。值得注意的是, 通常来说

XRD 相对结晶度与 DSC 测试的 ΔH 呈正相关, 但 2.5 中 CAR 加入前后 ΔH 并无显著变化。这主要是由于 CAR 在糊化升温过程中并不能侵入致密的微晶区对微晶的量产生影响, 因而 ΔH 无显著变化, 而在 XRD 测试时使用的是充分糊化回生后的凝胶样品, 回生过程中舒展的 CAR 分子链参与了凝胶网络的形成, 同时与 KS 中的淀粉分子间形成大量氢键, 扰乱了淀粉分子的有序重排, 从而导致凝胶相对结晶度下降。相对结晶度的下降说明 CAR 的添加有效抑制了 CK 凝胶的长期回生, 该结果也印证了 2.4 中质构测试的结论。

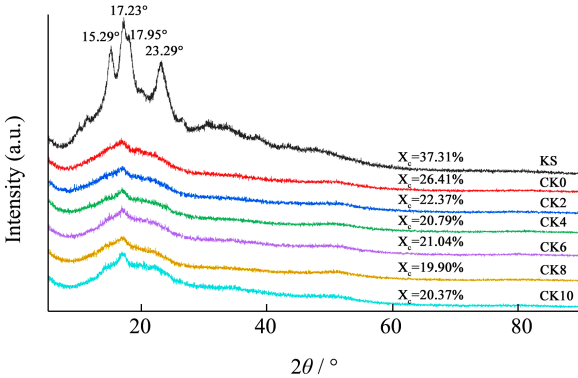


图 6 卡拉胶和葛根淀粉共混物凝胶的 X-射线衍射图
及相对结晶度
Fig.6 X-ray diffraction pattern and relative crystallinity of the gel of carrageenan and kudzu starch blends

2.7 卡拉胶对共混物凝胶多孔结构的影响

图 7 为不同 CAR 用量下 CK 共混凝胶的 SEM 图。从图中可以看出, 添加 CAR 后 CK2~CK10 均表现为较为均一的多孔状结构, 而 CK0 虽有部分微孔, 但分布不均匀, 且孔壁厚薄不一。均匀的多孔结构有利于凝胶与水分的充分结合, 能有效提高凝胶保水性^[25], 这也是 2.1 中凝胶析水率下降的原因。

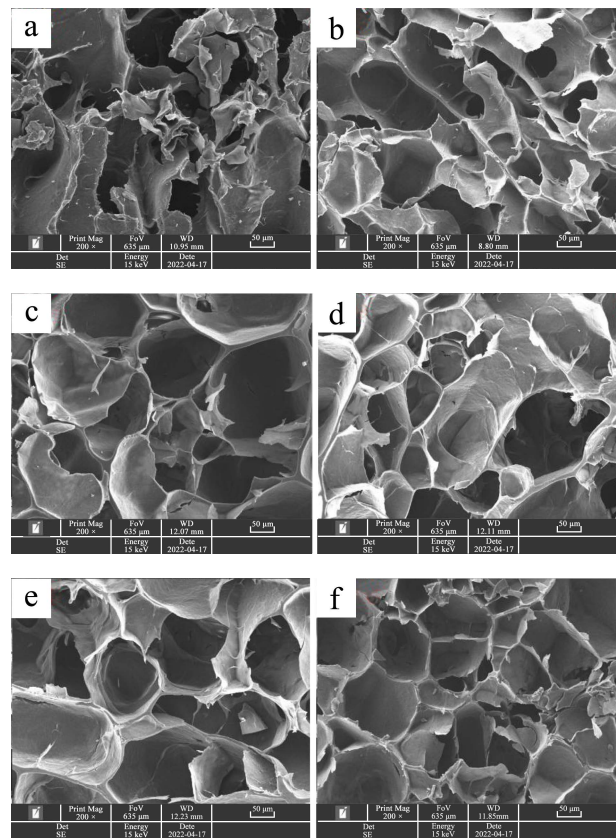


图 7 卡拉胶和葛根淀粉共混物凝胶的 SEM 图

Fig.7 SEM image of the gel of the carrageenan and kudzu starch blends

注：a~f 依次为 CK0、CK2、CK4、CK6、CK8、CK10。

3 结论

RVA 测试显示，CK 共混物的峰值黏度、保持黏度、崩解值、最终黏度和回生值随着 CAR 比例的增加而显著下降，而峰值时间和糊化温度则显著上升。流变实验表明，CK 共混物糊化液为典型的触变性流体，滞后面积、屈服应力、表观黏度、损耗模量和储能模量均随 CAR 比例的增加而显著下降。凝胶 TPA 测试表明，添加 CAR 后 CK 凝胶硬度、弹性、胶着性和咀嚼性显著降低，回复性显著增加。DSC 测试结果显示，添加 CAR 后，CK 共混物 T_0 、 T_p 和 T_c 均显著增加，但 ΔH 无显著变化。XRD 和 SEM 检测结果显示，CAR 的添加使得 CK 混合物凝胶回生过程中的重结晶被抑制，凝胶呈现均一的多孔结构。但值得注意的是，本文流变和质构测试中，CK2 相对于 CK0 的滞后面积、屈服应力、凝胶强度等均出现断崖式的下降，而 CK2~CK10 变化幅度不大，因此当 CAR 混入比例较低时（0~2%），其对共混物物化特性的影响还有待进一步研究。

综上，在本文共混比例下，CAR 的添加对 CK 共混物的糊化、流变和凝胶特性有显著的影响。CAR 的添加提升了 CK 共混物的糊化温度，增强了糊化液的剪切稳定性和流动性，降低了黏度和黏弹性，使得凝胶质地更加柔软。研究结果为葛根淀粉食品加工提供了参考。

参考文献

[1] 范春华,常磊.葛根的化学成分、生物活性及加工利用研究进展[J].中国果菜,2022,42(10):36-40,84.

[2] 张超,邓艳琴,李书艺,等.高场强超声影响葛根淀粉溶解性与冻融稳定性的作用机制[J].食品科技,2022,47(11):205-212.

[3] 莫琰,杨尚威,赵灿,等.普鲁兰酶酶解对葛根淀粉理化特性的影响[J].食品工业科技,2022,43(13):79-85.

[4] YANG Y F, LI M X, WANG Q, et al. Pueraria lobata starch regulates gut microbiota and alleviates high-fat high-cholesterol diet induced non-alcoholic fatty liver disease in mice [J]. Food Research International, 2022, 157: 111401.

[5] GUO L, LI J H, YUAN Y H, et al. Structural and functional modification of kudzu starch using α -amylase and transglucosidase [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 169: 67-74.

[6] ZHAO Y G, ZHU X Y, FANG Y P. Structure, properties and applications of kudzu starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106817

[7] ZHENG Y X, SUN W X, YANG W H, 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.

[8] ZHANG X M, ZHANG K, YANG N, et al. Effect of natural gums on pasting, rheological, structural and hydrolysis properties of kudzu starch [J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100607.

[9] JIANG J L, ZHANG W Z, NI W X, et al. Insight on structure-property relationships of carrageenan from marine red algal: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 257: 117642.

[10] 胡方洋,陈金玉,张坤生,等.薯类淀粉与卡拉胶共混体系特性及其对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J].食品工业科技,2020,41(2):1-8,15.

[11] 李淑月,林江涛,岳清华,等.小麦淀粉与马铃薯淀粉、豌豆淀粉共混物的糊化与凝胶特性[J].现代食品科技,2024,40(5):181-188.

[12] 赵灿,陶星宇,汤尚文,等.甘薯淀粉对山药凝胶肠理化特性的影响[J].中国粮油学报,2023,38(2):58-65.

[13] LIN J H, LIANG C W, CHANG Y H. Effect of starch source on gel properties of kappa-carrageenan-starch

- dispersions [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 509-515.
- [14] KRYSZYJAN M, ADAMCZYK G, SIKORA M, et al. Long-term storage stability of selected potato starch-Non-starchy hydrocolloid binary gels [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(2): 270-276.
- [15] KIM H S, BEMILLER N J. Effects of hydrocolloids on the pasting and paste properties of commercial pea starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(4): 1164-1171.
- [16] YOU K M, MURRAY B S, SARKAR A. Rheology and tribology of starch+ κ -carrageenan mixtures [J]. Journal of Texture Studies, 2020, 52 (1): 16-24.
- [17] HUC D, MATIGNON A, BAREY P, et al. Interactions between modified starch and carrageenan during pasting [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36: 355-361.
- [18] BO L, SONG Z, FANG Z, et al. Modulating storage stability of binary gel by adjusting the ratios of starch and kappa-carrageenan [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 268: 118264.
- [19] MATIGNON A, BAREY P, DESPRAIRIES M, et al. Starch/carrageenan mixed systems: Penetration in, adsorption on or exclusion of carrageenan chains by granules? [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 597-605.
- [20] 韩雪琴,黄立新,郝娟,等.没食子酸与大米淀粉的相互作用[J].现代食品科技,2021,37(10):103-111.
- [21] 罗芳会,刘传菊,聂荣祖,等.玉米淀粉和马铃薯淀粉共混糊化及凝胶特性的研究[J].中国粮油学报,2022,37(8): 159-165.
- [22] DUAN X T, GUAN Y M, DONG H H, et al. Study on structural characteristics and physicochemical properties of starches extracted from three varieties of kudzu root (*Pueraria lobata* starch) [J]. Journal of Food Science, 2023, 88 (3): 1048-1059.
- [23] WANG S J, LI C L, ZHANG X, et al. Retrogradation enthalpy does not always reflect the retrogradation behavior of gelatinized starch [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 20965.
- [24] LI H, CUI B, JANASWAMY S, et al. Structural and functional modifications of kudzu starch modified by branching enzyme [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22 (1): 952-966.
- [25] FENG L, WU J N, CAI L, et al. Effects of different hydrocolloids on the water migration, rheological and 3D printing characteristics of β -carotene loaded yam starch-based hydrogel [J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133422.