

亲水性胶体对大米淀粉流变与回生性的影响

柳艳梅, 左小博, 房升*, 陈杰, 孟岳成
(浙江工商大学食品与生物工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为改善基于大米淀粉的食品品质和抑制其回生, 系统研究了卡拉胶、阿拉伯胶和果胶对大米淀粉糊化、流变和回生性的影响。卡拉胶和果胶的添加显著增大了大米淀粉峰值与谷值黏度; 所有胶体均降低淀粉的最终黏度和回生值, 果胶最为明显。动态黏弹性结果表明, 淀粉凝胶为典型弱凝胶体系, 卡拉胶和果胶对储能模量 G' 和损耗模量 G'' 的影响大于阿拉伯胶。采用幂率模型拟合了稳态流动曲线, 淀粉与亲水性胶体共混体系表现为典型的假塑性流体特性。差示扫描量热结果表明, 所有胶体均提高了大米淀粉凝胶在冷藏条件下的稳定性, 阿拉伯胶降低凝胶长期回生度的趋势最为明显。综合来看, 果胶和卡拉胶可能与直链淀粉分子形成氢键作用和相互缠绕, 减弱体系流动性; 阿拉伯胶在结构上形成阻隔作用并减弱分子间氢键, 减缓淀粉分子的缔合和回生。

关键词: 亲水性胶体; 大米淀粉; 流变; 回生; 糊化

Effect of Hydrocolloids on the Rheology and Retrogradation of Rice Starch

LIU Yanmei, ZUO Xiaobo, FANG Sheng*, CHEN Jie, MENG Yuecheng
(School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to improve the quality and retard the retrogradation of rice starch based foods, the effects of carrageenan, pectin and gum arabic on pasting, rheological and retrogradation properties of rice starch were studied. The addition of carrageenan and pectin significantly increased the peak and trough viscosities of rice starch. All the hydrocolloids especially pectin decreased the final and setback viscosities of rice starch. Dynamic viscoelastic measurements showed that the rice starch gel studied in this work was a typical weak gel system. The influence of pectin and carrageenan on the storage modulus G' and the loss modulus G'' was greater than that of gum arabic. The obtained steady shear flow curves were fitted with the power law model. The rice starch and hydrocolloid blends exhibited a typical pseudoplastic flow behavior. DSC experiments showed that the addition of hydrocolloids increased the stability of rice starch gel under refrigerated conditions. The long-term retrogradation of rice starch was mostly retarded with the addition of arabic gum. The effects of pectin and carrageenan may attribute to the intramolecular associations between hydrocolloids and solubilized starches by intertwining and hydrogen bonding, while arabic gum may weaken the hydrogen bonding network between starch molecules and delay their associations by its volumetric exclusion effect.

Key words: hydrocolloids; rice starch; rheological property; retrogradation; pasting

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201701008

中图分类号: TS201.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2017) 01-0047-06

引文格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201701008. <http://www.spkx.net.cn>

LIU Yanmei, ZUO Xiaobo, FANG Sheng, et al. Effect of hydrocolloids on the rheology and retrogradation of rice starch[J]. Food Science, 2017, 38(1): 47-52. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201701008. <http://www.spkx.net.cn>

大米是我国的主要粮食作物之一, 也常用于生产多种传统糕点类食品。在国外, 大米淀粉已被用于替代小麦淀粉生产适用于乳糖不耐受者的无麸质食品。但大米淀

粉易发生老化回生, 使产品的黏弹性降低, 质构与消化性变差。因此, 有关大米粉物化特性及延缓其淀粉老化的课题, 一直是国内外学者研究的热点和难点之一^[1]。

收稿日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31571889); 食品科学与工程浙江省重中之重一级学科资助项目 (JYTsp20141092)

作者简介: 柳艳梅 (1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为现代食品制造。E-mail: Liuyanc1990@163.com

*通信作者: 房升 (1980—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品工程。E-mail: fszjgsu@163.com

近年来,国内外学者关于大米粉制品,特别是无麸质大米粉面包的品质和抑制回生做了较多研究,添加亲水性胶体被认为是一种良好的解决方法^[2-3]。亲水性胶体是常见的食品添加剂,其添加可以改善产品质构和抑制淀粉回生。该领域研究主要集中在胶体对大米淀粉糊化和流变性的影响上,而对于抑制淀粉回生研究较少。Chen Long等^[1,4]系统研究了普鲁兰多糖对大米淀粉糊化、流变及回生性的影响;Sasaki等^[2]比较了琼胶、黄原胶和魔芋葡甘露聚糖对大米淀粉流变与体外消化特性影响;Meng Yuecheng等^[5]研究了不同亲水亲油值的蔗糖酯对大米淀粉物化和冻融稳定性的影响。

本实验系统研究了卡拉胶、阿拉伯胶和果胶对大米淀粉物化特性及回生的影响,从糊化性质、流变学和热力学特性等结果探讨了不同亲水性胶体与大米淀粉之间可能的相互作用模式,为基于大米粉的传统食品和无麸质食品的开发和品质改良提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

果胶(半乳糖醛酸含量 $\geq 74\%$)、阿拉伯胶(医药级) 上海阿拉丁试剂公司;κ型卡拉胶(食品级) 郑州帝斯曼科技有限公司。

1.2 仪器与设备

TechMaster快速黏度仪(rapid visco analyser, RVA) 瑞典Pertent公司;C80差示扫描量热仪(differential scanning calorimetry, DSC) 法国Setaram公司;AR-G2动态流变仪 美国TA仪器公司。

1.3 方法

1.3.1 大米淀粉RVA糊化测定

参照文献[5]的方法,分别将卡拉胶、果胶、阿拉伯胶在80℃条件下加热搅拌1h充分溶解,冷却后配成0.1%质量浓度的胶体水溶液。取溶液25g与3g大米淀粉于RVA测量铝桶内。RVA程序如下:50℃条件下保持1min,经3min45s升温至95℃,恒温2min30s,在3min45s内匀速降温至50℃保持90s。测试前10s转速为960r/min,后保持160r/min。以等量蒸馏水作对照测定,实验重复3次,特征参数以 $\bar{x} \pm s$ 形式表示。

1.3.2 大米淀粉动态黏弹性测定

按1.3.1节糊化方法进行淀粉糊制备,糊化的样品密封并冷却至室温后迅速移至流变仪上测定。采用平板-平板测量系统,平板直径为40mm,平板间距1mm;实验中用硅油密封,防止水分蒸发。在25℃、0.1~10Hz频率条件下测定样品黏弹性。每个数量级取10个点,得到储能模量及损耗模量随角频率的变化趋势。

1.3.3 大米淀粉稳态流变性测定

参照文献[6]的方法测定样品稳态流变性,测量剪切速率(τ)从0~300s⁻¹递增,再从300~0s⁻¹递减范围内变化情况。采用幂率方程模型对数据点回归拟合,方程如下:

$$\sigma = K \times r^n$$

式中: σ 为剪切应力/Pa; K 为稠度系数/(Pa·sⁿ); r 为剪切速率/s⁻¹; n 为流体指数。

1.3.4 大米淀粉蠕变特性测定

将样品加载到干净的流变仪上,采用Creep-recovery测定模式,测定间隔3mm。首先施加30Pa恒定应力持续120s后,释放应力恢复180s,记录应变恢复数据。样品在测试前平衡5min,以卸去加样过程中残存的应力并使温度恒定。

1.3.5 大米淀粉DSC测定

样品于DSC测量池中,在4℃条件下平衡5、12d后测定其热力学性质^[7]。DSC测定条件:以0.5℃/min速率从30℃升温至100℃,恒温5min,后以2℃/min速率降温至30℃。利用热流曲线分析得到样品的老化焓值、回生度等参数。

2 结果与分析

2.1 卡拉胶、阿拉伯胶和果胶对大米淀粉糊化的影响

表1 不同胶体对大米淀粉糊化特性参数的影响
Table 1 Effects of different food hydrocolloids on the pasting parameters of rice starch

样品	峰值黏度/ (mPa·s)	谷值黏度/ (mPa·s)	衰减值/ (mPa·s)	最终黏度/ (mPa·s)	回生值/ (mPa·s)	糊化 温度/℃
大米淀粉	3 680±18 ^a	2 791±8 ^a	889±19 ^a	5 287±26 ^a	2 497±27 ^a	82.43±0.42 ^c
大米淀粉+卡拉胶	3 874±10 ^b	3 318±34 ^a	555±28 ^a	5 208±31 ^b	1 889±53 ^c	83.48±0.03 ^b
大米淀粉+果胶	4 084±13 ^a	3 308±32 ^a	776±41 ^b	5 002±56 ^c	1 694±46 ^d	84.38±0.03 ^a
大米淀粉+阿拉伯胶	3 464±33 ^d	2 700±32 ^c	764±8 ^b	5 033±33 ^c	2 333±3 ^b	82.75±0.01 ^c

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

由表1可知,卡拉胶和果胶的添加显著增大了大米淀粉峰值黏度与谷值黏度($P < 0.05$),而阿拉伯胶的添加则降低了峰值黏度与谷值黏度。3种胶体均不同程度地降低了大米淀粉的衰减值,其中卡拉胶降低程度最大。同时,所有胶体均能降低大米淀粉的最终黏度和短期回生值,果胶效果较为显著。淀粉的糊化是淀粉颗粒在水溶液中受热后吸水溶胀,伴随分子间以及分子内氢键的断裂,部分淀粉分子溶出的过程^[8]。表1结果显示,胶体与淀粉之间的相互作用能影响大米淀粉的糊化过程。胶体的分子结构和性质不同,使得其与淀粉分子和颗粒间相互作用的方式不同,从而对糊化过程产生了不同的影响。

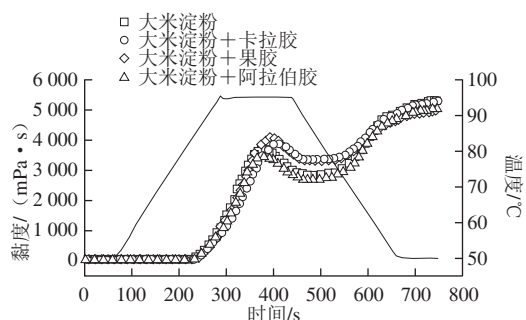


图1 不同胶体对大米淀粉RVA糊化特性的影响

Fig. 1 Effects of different food hydrocolloids on the RVA pasting properties of rice starch

图1直观反映了不同胶体对大米淀粉糊化特性的影响。由图1和表1可知,果胶对大米淀粉糊峰值黏度、谷值黏度影响最大,分别增大了约11%和18%。糊化过程中,随着支链淀粉颗粒膨胀和直链淀粉分子的溶出,体系的表现黏度迅速上升;加入的亲水性胶体可与溶出的直链淀粉及支链淀粉(低分子质量)形成复合物,进一步增加了体系的表现黏度。果胶和卡拉胶是线形的多糖聚合物,分别含有较多的半乳糖醛酸残基和硫酸酯基团,能更强地与直链淀粉分子和溶胀的支链淀粉颗粒形成氢键作用和相互缠绕,进而减弱体系的流动性。果胶具有更长的分子链和更强的亲水性,因而对大米淀粉的糊化黏度作用最大。结果显示,阿拉伯胶的影响刚好相反,其降低了大米淀粉糊的峰值黏度和谷值黏度。前人研究了阿拉伯胶对马铃薯淀粉^[9]、木薯淀粉^[10]和玉米淀粉^[11]糊化和流变的影响,均发现了降低淀粉糊峰值黏度的现象。阿拉伯胶是以糖苷键连接的具有高度支链结构的大分子,其与直链淀粉分子和支链淀粉颗粒作用机理可能与其他两种胶体不同。阿拉伯胶的多支链结构和球状形态,使其能够穿插于水化淀粉分子之间,形成阻隔作用,妨碍淀粉分子间的链缠结并减弱淀粉分子间氢键,导致峰值黏度的降低^[9,11]。淀粉糊的回生值结果表明,所有胶体均对大米淀粉的短期回生具有一定的抑制作用,果胶和卡拉胶的效果较为明显。淀粉的短期回生主要由直链淀粉分子的凝胶有序和脱水结晶引起的。如上推断,果胶和卡拉胶能与直链淀粉分子形成缠绕和氢键,减缓了直链淀粉有序凝胶的形成,并使得体系结合水的能力增强,从而抑制直链淀粉的短期回生^[12]。

2.2 不同胶体对大米淀粉糊动态黏弹性的影响

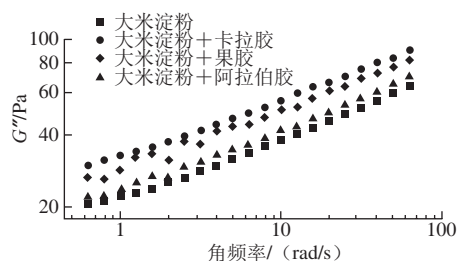
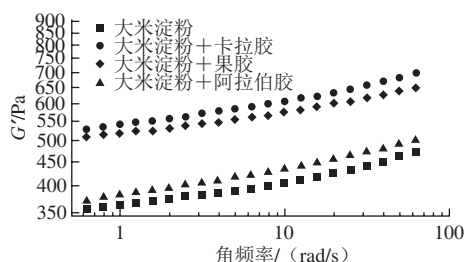
图2 不同胶体对大米淀粉糊储能模量 G' 和损耗模量 G'' 的影响Fig. 2 Effects of different food hydrocolloids on the storage modulus G' and the loss modulus G'' of rice starch paste

图2为胶体-淀粉糊的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随角频率的变化关系。由图2可见,所有淀粉凝胶体系的 G' 均远大于 G'' ,且 G' 和 G'' 随角频率增大而增大,呈现出对角频率依赖性,说明大米淀粉凝胶表现出典型的弱凝胶特性^[13]。相比于空白,胶体对 G' 和 G'' 的影响按以下顺序:卡拉胶>果胶>阿拉伯胶。其中,卡拉胶和果胶对 G' 和 G'' 的影响要显著大于阿拉伯胶,即卡拉胶、果胶在对淀粉动态流变性上与阿拉伯胶存在差异较大。损耗因子 $\tan\delta$ 值为 G'' 与 G' 的比值,它反映了样品弹性性质和黏性性质的相对强弱。由表2可知,所有样品 $\tan\delta$ 值小于1,表明凝胶体系表现出较强的弹性性质。果胶的添加降低了大米淀粉糊的损耗因子 $\tan\delta$ 值,表明体系的弹性比例增大,流动性减弱,这与糊化得到的结果相符合。Meneguín等^[14]在研究淀粉-果胶成膜材料的流变学特性中也得到了类似的结果。

表2 不同胶体对淀粉凝胶在1 Hz频率下储能模量 G' 和损耗模量 G'' 和损耗因子 $\tan\delta$ 值的影响Table 2 Storage moduli G' , loss moduli G'' and dielectric loss factor $\tan\delta$ at 1 Hz for starch gels with different hydrocolloids added

样品	G'/Pa	G''/Pa	$\tan\delta$
大米淀粉	394.5 ± 21.3^b	33.7 ± 1.4^d	0.085 ± 0.003^a
大米淀粉+卡拉胶	591.6 ± 18.5^a	49.5 ± 0.8^b	0.084 ± 0.004^b
大米淀粉+果胶	563.2 ± 13.6^a	44.8 ± 1.8^b	0.080 ± 0.005^a
大米淀粉+阿拉伯胶	423.2 ± 24.8^b	36.6 ± 2.0^c	0.086 ± 0.003^b

Ahmad等^[15]指出,淀粉凝胶体系可看作是溶胀的淀粉颗粒作为分散相嵌入以直链淀粉为主的流动相所形成的三维网络结构。果胶和卡拉胶的添加,增强了大米凝胶的黏弹性,其原因可能是:由于卡拉胶和果胶是线形的多糖聚合物,分子残基中存在交链扭结,在与溶出的直链淀粉加热形成凝胶过程中,这种线性的亲水性胶体与直链淀粉通过范德华力、氢键和静电作用,形成比原淀粉更强的弹性胶体^[16]。损耗因子 $\tan\delta$ 值显示,阿拉伯胶对于大米淀粉的黏弹性影响不显著。特别是阿拉伯胶对大米淀粉凝胶 G' 的影响明显小于果胶和卡拉胶(表2)。结果进一步说明了阿拉伯胶在作用机理上与果胶和卡拉胶存在差异。阿拉伯胶的支链结构能够穿插于连续相的淀粉分子之间,对溶胀的支链淀粉颗粒形成阻隔作用,使得形成的胶体网络结构较弱^[11]。周子丹等^[10]研究阿拉伯胶对木薯淀粉流变特性作用时也得到了类似结果。

2.3 不同胶体对大米淀粉糊稳态流变性的影响

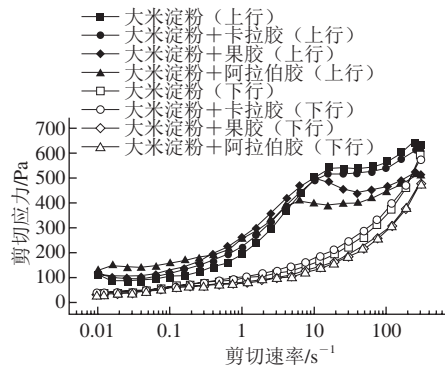


图3 添加不同胶体的大米淀粉凝胶的稳态流变特性曲线

Fig. 3 Steady flow curves of rice starch gels with addition of different food hydrocolloids

图3显示了3种不同亲水性胶体对大米淀粉糊稳态流变性的影响。由图3可知,所有样品剪应力随着剪切速率上升而升高,具有明显的假塑性流体特征,结果与文献报道的大米淀粉稳态流变相符^[17]。当剪切速率处于 10 s^{-1} 左右时,淀粉凝胶流动过程中所需要的剪切应力较大,在曲线上表现为向上的凸起,表明在这一剪切速率附近,淀粉糊流动的阻力增大。

表3 不同胶体对大米淀粉凝胶稳态流动曲线拟合参数的影响
Table 3 Effects of different food hydrocolloids on the fitting parameters of steady flow curves of rice starch gels

样品	黏度系数 $K/(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$		流体指数 n		R^2		触变环面积/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
	上行线 拟合	下行线 拟合	上行线 拟合	下行线 拟合	上行线 拟合	下行线 拟合	
大米淀粉	$236.6 \pm 2.4^{\text{a}}$	$81.8 \pm 1.6^{\text{b}}$	$0.187 \pm 0.004^{\text{c}}$	$0.334 \pm 0.002^{\text{d}}$	0.909	0.976	53 245
大米淀粉+卡拉胶	$261.4 \pm 2.6^{\text{a}}$	$98.0 \pm 2.9^{\text{a}}$	$0.181 \pm 0.001^{\text{c}}$	$0.311 \pm 0.001^{\text{e}}$	0.918	0.988	48 995
大米淀粉+果胶	$273.7 \pm 7.0^{\text{a}}$	$76.1 \pm 4.8^{\text{b}}$	$0.135 \pm 0.004^{\text{d}}$	$0.318 \pm 0.002^{\text{b}}$	0.860	0.978	46 007
大米淀粉+阿拉伯胶	$269.1 \pm 4.0^{\text{a}}$	$74.3 \pm 5.3^{\text{b}}$	$0.149 \pm 0.009^{\text{b}}$	$0.334 \pm 0.001^{\text{d}}$	0.926	0.974	48 150

采用幂率模型对稳态流变曲线进行拟合,参数列于表3。由表3可知,流体特性指数 n 都小于1,说明淀粉与亲水性胶体所形成的共混体系为典型的假塑性流体^[18]。上行线中,果胶对淀粉凝胶流体特征指数 n 的影响最显著。这可能是由于胶体分子与直链淀粉分子间产生一定的相互作用,形成氢键,从而使其支链淀粉分子含量相对提高,体系表现为假塑性增强。阿拉伯胶的 n 值降低程度小于果胶,进一步说明了由于其存在较多支链结构,使其与直链淀粉分子间产生的作用力较弱。同时,在外力剪切下,体系部分氢键受到破坏,使得不同胶体对下行线 n 值的影响小于对上行线的影响。黏度系数 K 反映样品的黏稠性,胶体添加增大了体系上行的 K 系数,表明这些胶体的加入降低了淀粉凝胶的流动性。下行线的黏度系数 K 远低于上行线黏稠系数,揭示了大米淀粉凝胶是假塑性流体^[19]。触变环面积可以表征样品的形成和破坏能力,由表3可知,胶体的添加不同程度地降低了淀粉凝胶的触变性,表明亲水性胶体的添加提高了淀粉糊三维结构的黏弹性,使其不易受到剪切力破坏。

2.4 不同胶体对淀粉糊剪切结构恢复力的影响

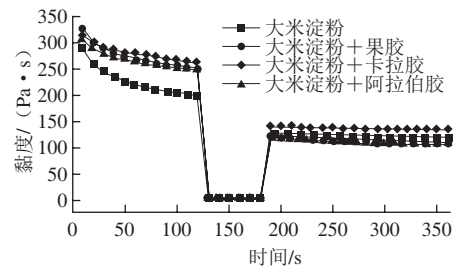


图4 不同亲水性胶体对大米淀粉凝胶在不同剪切阶段中表观黏度的影响

Fig. 4 Effects of various food hydrocolloids on the apparent viscosity of rice starch gel at different shear stages

剪切结构恢复力表征样品在经高速剪切后恢复到低速剪切原始结构的能力。添加不同亲水性胶体后,淀粉凝胶在3个阶段中表观黏度随时间变化如图4所示。从图4可知,所有淀粉凝胶在第3剪切阶段表观黏度明显小于第1剪切阶段,表明高速剪切在一定程度上破坏了淀粉凝胶内部结构,导致结构恢复能力减小。结果显示,3种亲水性胶体的添加均减小了淀粉凝胶的剪切恢复力,表明胶体能够提高淀粉凝胶高速剪切后内部结构恢复的速率。阿拉伯胶和果胶的添加,导致凝胶体系的剪切结构恢复力明显减小,说明这两种胶体使得淀粉糊所形成的凝胶结构比较刚硬,在剪切过程中越容易受到破坏且不易恢复^[20]。

2.5 亲水性胶体对大米淀粉凝胶蠕变-恢复特性的影响

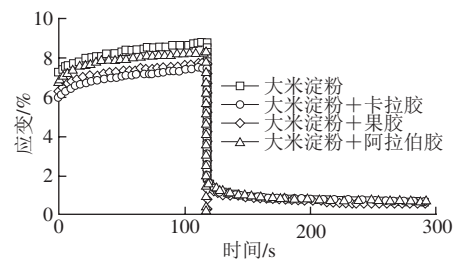


图5 不同胶体对大米淀粉凝胶蠕变-恢复曲线的影响

Fig. 5 Effects of different food hydrocolloids on the representative creep-recovery curves of rice starch

由图5可知,在持续施加30 Pa应力的情况下,卡拉胶和果胶降低淀粉凝胶形变量的趋势明显,而阿拉伯胶对淀粉凝胶型变量的影响则比较小。这表明果胶和卡拉胶的添加较大地增强了淀粉凝胶网络结构的稳定性,提高了凝胶内部体系的抗挤压性能,这与其对大米淀粉凝胶黏弹性的影响结果一致^[21]。

2.6 不同胶体对大米淀粉凝胶回生的影响

淀粉回生本质是糊化后淀粉颗粒在降温过程中分子重新排布和缔合,分子间相互聚拢形成氢键,使淀粉分子再次结晶的过程^[22]。回生后淀粉凝胶在DSC热力分析中会出现老化吸收峰,吸收峰的面积代表老化焓值^[23]。不同胶体对大米淀粉凝胶回生热力学参数影响列于表4。

由表4可知,随着冷藏时间延长,淀粉凝胶老化焓值逐渐增加,表明老化程度随时间的延长越来越严重,这与大多数大米淀粉回生结果一致^[24-25]。冷藏5~12 d的回生度增加幅度比1~5 d的变化幅度大。添加了亲水性胶体淀粉凝胶的回生度比空白对照组小,这与冷藏条件下胶体分子与淀粉颗粒之间的相互作用有关。

表4 不同胶体对大米淀粉凝胶回生热力学参数的影响
Table 4 Effects of different hydrocolloids on thermodynamic parameters for the retrogradation of rice starch gels

样品	冷藏时间/d	老化焓值 ΔH (J/g)	回生度/%
大米淀粉	5	1.481	55.7
	12	2.315	87.0
大米淀粉+卡拉胶	5	1.042	36.4
	12	2.156	75.4
大米淀粉+果胶	5	0.456	17.2
	12	1.997	75.4
大米淀粉+阿拉伯胶	5	0.498	19.3
	12	1.391	53.9

由表4可见,亲水性胶体均不同程度降低了大米淀粉凝胶在冷藏条件下的稳定性。一方面,胶体的添加避免了淀粉体系内海绵状结状结构的形成发展,从淀粉颗粒中溶出的直链淀粉与胶体分子结合,减少了淀粉分子之间的结合。另一方面,水作为增塑剂有助于淀粉分子链的迁移并参与淀粉分子链的重结晶;胶体具有较强的亲水性,能较强的结合游离水分,减缓了体系中水分的迁移^[1]。因此,复配体系内的淀粉分子链由于自由水含量的减少,重排变得困难,从而降低了淀粉的回生程度^[12]。结果显示,冷藏5 d后,果胶对大米淀粉凝胶的回生抑制最好,阿拉伯胶次之。但冷藏12 d后,阿拉伯胶降低淀粉凝胶回生度的趋势最明显。结合胶体对大米淀粉糊化结果可知,果胶对大米淀粉短期回生抑制效果最好。这是由于果胶和阿拉伯胶与大米淀粉相互作用模式不同引起的。果胶和卡拉胶主要和溶出的直链淀粉作用,影响直链淀粉的短期回生。而对于长期回生,支链淀粉往往起主导作用,由于阿拉伯胶的多分枝结构,使阿拉伯胶穿插于支链淀粉分子之间,形成缠绕阻隔作用,减缓了支链淀粉分子的结晶回生。

3 结 论

卡拉胶和果胶的添加增大了大米淀粉峰值与谷值黏度,阿拉伯胶结果则相反。所有胶体均降低淀粉的最终黏度和回生值,果胶效果较为明显。采用幂率模型能很好拟合稳态流变曲线,淀粉与亲水性胶体共混体系为典型的假塑性流体。动态黏弹性结果表明,淀粉凝胶为典型的弱凝胶体系,卡拉胶和果胶对 G' 和 G'' 的影响要显著大于阿拉伯胶,果胶降低了淀粉凝胶的损耗因子 $\tan\delta$ 值。

卡拉胶和果胶降低淀粉凝胶形变量趋势明显,而阿拉伯胶则影响较小。所有胶体均不同程度降低了大米淀粉凝胶在冷藏条件下的稳定性,阿拉伯胶降低凝胶长期回生度的趋势最为明显。综合来看,果胶和卡拉胶能更强的与直链淀粉分子形成氢键作用和相互缠绕,减弱体系流动性;阿拉伯胶则形成阻隔作用并减弱分子间氢键,妨碍淀粉分子间的缔合和有序排布。

参考文献:

- [1] CHEN L, REN F, ZHANG Z, et al. Effect of pullulan on the short-term and long-term retrogradation of rice starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 415-421. DOI:10.1016/j.carbpol.2014.09.006.
- [2] SASAKI T, KOHYAMA K. Effect of non-starch polysaccharides on the *in vitro* digestibility and rheological properties of rice starch gel[J]. Food Chemistry, 2011, 127(2): 541-546. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.01.038.
- [3] 林鸳鸯, 曾绍校, 张怡, 等. 瓜尔豆胶对莲子淀粉糊特性影响的研究[J]. 中国食品学报, 2011, 11(4): 87-90. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2011.02.012.
- [4] CHEN L, TONG Q Y, REN F, et al. Pasting and rheological properties of rice starch as affected by pullulan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 66: 325-331. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2014.02.052.
- [5] MENG Y C, SUN M H, FANG S, et al. Effect of sucrose fatty acid esters on pasting, rheological properties and freeze-thaw stability of rice flour[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 64-70. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.02.004.
- [6] WANG B, WANG L J, LI D, et al. Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 77: 472-481. DOI:10.1016/j.carbpol.2009.01.017.
- [7] WU Y, CHEN Z X, LI X X, et al. Effect of tea polyphenols on the retrogradation of rice starch[J]. Food Research International, 2009, 42(2): 221-225. DOI:10.1016/j.foodres.2008.11.001.
- [8] ZHEN F, JUN C, LUO S J, et al. Effect of food additives on starch retrogradation: a review[J]. Starch-Stärke, 2015, 67(1/2): 69-78. DOI:10.1002/star.201300278.
- [9] VIGNESHWARAN N, AMMAYAPPAN L, HUANG Q. Effect of gum arabic on distribution behavior of nanocellulose fillers in starch film[J]. Applied Nanoscience, 2011, 1(3): 137-142. DOI:10.1007/s13204-011-0020-5.
- [10] 周子丹, 罗志刚, 王颖. 多糖胶对木薯淀粉糊冻融稳定性影响[J]. 粮食与油脂, 2011, 24(9): 18-21. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2011.0.006.
- [11] 石点, 温演庆, 吴孟茹, 等. 阿拉伯胶对玉米淀粉的共混改性[J]. 产业用纺织品, 2012, 30(2): 28-31. DOI:10.3969/j.issn.1004-7093.2012.02.009.
- [12] LEE M H, BAEK M H, CHA D S, et al. Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums[J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16(4): 345-352. DOI:10.1016/S0268-005X(01)00107-2.
- [13] 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. DOI:10.1016/j.carbpol.2008.11.023.

- [14] MENEGUIN A B, CURY B S F, EVANGELISTA R C. Films from resistant starch-pectin dispersions intended for colonic drug delivery[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 99: 140-149. DOI:10.1016/j.carbpol.2013.07.077.
- [15] AHMAD F B, WILLIAMS P A. Effect of galactomannans on the thermal and rheological properties of sago starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(3): 1578-1586. DOI:10.1021/jf000744w.
- [16] CHRASTIL J. Improved colorimetric determination of amylose in starches or flours[J]. Carbohydrate Research, 1987, 159(1): 154-158. DOI:10.1016/S0008-6215(00)90013-2.
- [17] BANCHATHANAKIJ R, SUPHANTHARIKA M. Effect of different β -glucans on gelatinization and retrogradation of rice starch[J]. Food Chemistry, 2009, 114: 5-14. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.09.016.
- [18] ZHANG F, FU S L, TONG J, et al. Rheological properties of maize starch pastes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 294-297. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2008.9.053.
- [19] 孙明辉. 蔗糖酯对大米粉物性及冷冻米饭品质影响研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2013: 23-33.
- [20] SHI X, BEMILLER J N. Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 50(1): 7-18. DOI:10.1016/S0144-8617(01)00369-1.
- [21] PTASZEK P, PTASZEK A. The time evolution of the viscoelastic retardation in starch pastes with guar gum[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(1): 14-22. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2010.11.020.
- [22] 谭薇, 李珂, 卢晓黎. 大米糊化特性及回生机理研究[J]. 食品科学, 2008, 29(3): 167-171. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2008.03.030.
- [23] LI W W, LI C M, GU Z B, et al. Relationship between structure and retrogradation properties of corn starch treated with 1,4- α -glucan branching enzyme[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 868-875. DOI:10.1016/j.foodhyd.2015.09.009.
- [24] 周国燕, 胡琦伟, 李红卫, 等. 水分含量对淀粉糊化和老化特性影响的差示扫描量热法研究[J]. 食品科学, 2009, 30(19): 89-92. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2009.19.018.
- [25] LEE S, YOO B. Effect of sucrose addition on rheological and thermal properties of rice starch-gum mixtures[J]. International Journal of Food Engineering, 2014, 10(4): 849-856. DOI:10.1515/ijfe-2014-0072.