

陈海华教授主持“淀粉改性和品质改善”特约专栏文章之五

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.05.010

刘文会, 陈海华, 王雨生. 海藻酸钠和刺槐豆胶对小麦淀粉流变学及质构性质的影响[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(5): 149-157.

LIU W H, CHEN H H, WANG Y S. Effects of sodium alginate and locust bean gum on rheological and texture properties of wheat starch[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(5): 149-157.

海藻酸钠和刺槐豆胶对小麦淀粉流变学及质构性质的影响

刘文会¹, 陈海华^{1,2}✉, 王雨生¹

(1. 青岛农业大学 食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109;

2. 青岛农业大学 巴瑟斯未来农业科技学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 为进一步改善小麦淀粉凝胶性质, 通过动态流变学、静态流变学、光学微流变等方法探讨海藻酸钠(AG)和刺槐豆胶(LBG)两种亲水胶体的复配对小麦淀粉黏弹性和凝胶质构的影响。结果表明, 添加不同配比的AG和LBG均能提高小麦淀粉凝胶的储能模量、损耗模量和稠度系数, 降低损耗因子, AG与LBG复配物具有良好的增稠效果。小麦淀粉-亲水胶体复配体系的黏度随剪切速率升高而降低, 表现出剪切变稀的假塑性行为, 符合幂定律模型。光学微流变结果证实, AG和LBG的加入提高了小麦淀粉凝胶的弹性指数和黏性指数, 降低固液平衡指数。当AG与LBG质量比为1:1时, AG和LBG之间存在协同作用, 小麦淀粉凝胶更为致密、弹性更强, 表现出最优的黏弹性。

关键词: 小麦淀粉; 海藻酸钠; 刺槐豆胶; 协同作用; 流变学特性

中图分类号: TS201.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)05-0149-09

网络首发时间: 2022-09-01 13:31:03

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20220901.1055.003.html>

Effects of Sodium Alginate and Locust Bean Gum on Rheological and Texture Properties of Wheat Starch

LIU Wen-hui¹, CHEN Hai-hua^{1,2}✉, WANG Yu-sheng¹

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China;
2. Barthurst Future Agri-Tech Institute of Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: To further improve the gel properties of wheat starch, the effects of sodium alginate (AG) to locust bean gum (LBG) ratio on the viscoelasticity and gel texture of wheat starch were investigated by

收稿日期: 2022-06-26

基金项目: 日照市创新领军人才(团队)(日政字[2021]64号); 山东省自然科学基金项目(ZR2016CM17); 青岛农业大学研究生创新立项(QNYCX20029)

Supported by: Innovation Leader Talent (team) of Rizhao City (No. 2021-64); Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016CM17); Qingdao Agricultural University Postgraduate Creative Education Program (No. QNYCX20029)

作者简介: 刘文会, 女, 1996年出生, 硕士, 研究方向为食品化学。E-mail: wen186786jiang@163.com.

通讯作者: 陈海华, 女, 1973年出生, 博士, 教授, 研究方向为食品化学。E-mail: haihchen@163.com.

dynamic rheology, steady rheology and diffusing wave spectroscopy. The results showed that storage modulus, loss modulus and consistency coefficient of wheat starch gel were increased, while loss factor was decreased with the addition of AG and LBG with different ratio. The viscosity of wheat starch-gum blends decreased with the increase of shear rate, showing pseudoplastic behavior of shear thinning. This was in line with the power law model. The results of diffusing wave spectroscopy confirmed that elastic index and viscosity index of wheat starch gel were increased, while solid-liquid index was decreased with the addition of AG and LBG. When the mass ratio of AG to LBG was 1 : 1, there was a synergistic effect between AG and LBG that could cause wheat starch forming dense and elastic gels with optimal viscoelasticity.

Key words: wheat starch; sodium alginate; locust bean gum; synergistic effect; rheological properties

小麦淀粉是一种来源丰富、价格低廉的碳水化合物资源,在食品工业中常用作黏合剂、增稠剂、成膜剂^[1]。然而,小麦淀粉凝胶黏弹性差、口感发黏、不耐储藏,在很大程度上影响面制食品的加工性能和最终产品的质量,是制约小麦淀粉食品加工业的瓶颈问题^[2]。添加亲水胶体可以改善淀粉凝胶质构,是食品工业中改善食品品质最常用的方法之一^[3]。亲水胶体通常具有绿色、安全、可再生等优点,已被广泛应用于淀粉类食品生产中。海藻酸钠(AG)是一种阴离子亲水胶体,具有良好的增稠性、稳定性和凝胶性^[4]。Kim等^[5]研究表明AG能够提高豌豆淀粉-海藻酸钠复合体系的黏度和动态流变特性。Fang等^[6]发现AG能够增强蜡质马铃薯淀粉凝胶强度。与AG不同,刺槐豆胶(LBG)是一种中性半乳甘露聚糖,也常应用于淀粉质食品,改善产品的凝胶性质。Hussain等^[7]和Yoo等^[8]发现LBG可以提高抗性玉米淀粉和小米淀粉的凝胶网络结构。另外,LBG还可与卡拉胶、黄原胶等亲水胶体产生协同作用,形成更高弹性和强度的凝胶结构^[9]。

单一亲水胶体对淀粉的流变学、糊化和质构等性质的影响已经有了大量研究。Lee等^[10]研究发现塔拉胶能够提高大米淀粉凝胶的黏度和黏弹性。Pourfarzad等^[11]发现鼠尾草胶可提高小麦淀粉凝胶的弹性模量和黏性模量,改善小麦淀粉凝胶的流变学性能。Zhang等^[11]报道黄原胶可以改善葛根淀粉的糊化特性和流变特性。然而,单一亲水胶体的黏度较低,只能在一定程度上提高淀粉的凝胶强度。实际生产中,人们通常添加不同种类的亲水胶体,通过亲水胶体之间的协同作用进

一步改善淀粉凝胶的口感和质地。例如,米粉加工中常添加果胶、鱼皮明胶和AG增强米粉的光滑程度和弹性;果冻生产中常添加卡拉胶、魔芋胶和柠檬酸等来改善果冻的质地和口感。

然而,淀粉体系中添加的几种亲水胶体之间如何发生相互作用以提高淀粉凝胶性质,目前还未见较系统的研究;而明确几种亲水胶体与淀粉间的相互作用机制,有利于进一步拓展亲水胶体在食品工业中的应用。笔者前期研究发现,AG和LBG之间存在着协同作用,能与绿豆支链淀粉侧链通过氢键相互作用,抑制淀粉的重结晶,进而延缓绿豆淀粉老化。但AG和LBG之间的协同作用对小麦淀粉的糊化特性和流变特性的影响尚没有深入研究。因此,本文采用动态流变学、静态流变学、光学微流变等方法,评价不同比例的AG-LBG复配物对小麦淀粉黏弹性和凝胶质构的影响,以期为AG和LBG在淀粉类食品中的应用提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

小麦淀粉(WS,直链淀粉含量为29.9%):江苏南京甘之源有限公司;海藻酸钠(AG):青岛明月海藻有限公司;刺槐豆胶(LBG):北京Solarbol科技有限公司。

1.2 仪器与设备

MCR302型动态流变仪:奥地利安东帕公司;Rhrolaser Master光学流变仪:法国Formulation公司;RVA Starchmaster快速黏度分析仪:澳大利亚New-port公司;TA-XT-Plus物性测定仪:

英国 Stable Micro Systems 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

首先, 制备 2% (w/w, 基于淀粉干基质量) 的 AG、LBG、AG 与 LBG 不同比例组合 (AG 与 LBG 比例如表 1 所示) 溶液。其次, 将小麦淀粉分散于上述溶液中, 制备质量分数为 10% 的小麦淀粉-亲水胶体悬浮液, 沸水浴加热 15 min, 连续搅拌至淀粉糊化, 所得样品分别记为 WS-A₂、WS-A_{1.5}L_{0.5}、WS-A₁L₁、WS-A_{0.5}L_{1.5}、WS-L₂。WS-A_nL_m (n=0~2, m=0~2) 为添加不同比例 AG 与 LBG 的小麦淀粉-亲水胶体复配物。

上述样品迅速冷却至室温, 用于动态流变学性质测试。

取 4 mL 上述样品, 迅速加入微流变样品瓶中 (直径 14.7 mm), 用于光学微流变学性质的测试。

上述样品置于高度 4 cm、直径 3.5 cm 的圆柱形容器中, 迅速冷却至室温, 并于 (4±1) °C 下放置 1 d, 用于凝胶硬度的测定。

制备质量分数为 5% 的小麦淀粉-亲水胶体悬浮液, 按照上述方法糊化后, 迅速冷却至室温, 用于静态流变学性质和时间扫描测试。

制备质量分数为 10.7% (w/w) 的小麦淀粉-亲水胶体悬浮液, 用于 RVA 糊化特性的测定。

表 1 样品组成和样品名称缩写

Table 1 Compositions and abbreviations of all samples

样品名称	AG 浓度 (% w/w 淀粉干基质量)	LBG 浓度 (% w/w 淀粉干基质量)
WS	0	0
WS-A ₂	2	0
WS-A _{1.5} L _{0.5}	1.5	0.5
WS-A ₁ L ₁	1.0	1.0
WS-A _{0.5} L _{1.5}	0.5	1.5
WS-L ₂	0	2

1.3.2 动态流变学特性测定

用流变仪测定样品的动态流变学特性, 称取 3 g 淀粉凝胶样品, 置于流变仪样品台, 用塑料刮刀刮去多余样品, 在样品周围覆盖一层硅油, 防止水分蒸发。测量夹具为直径 25 mm 的平行

板, 间隙 1 mm, 测试温度 25 °C, 分别进行线性黏弹区扫描、频率扫描和时间扫描。

(1) 频率扫描

根据线性黏弹区范围, 确定应变 0.5%, 设定频率范围 0.1~10 Hz, 记录频率扫描过程中, 样品储能模量 (G')、损耗模量 (G'') 和损耗因子 (tanδ) 随频率变化的流变学图谱。

(2) 时间扫描

根据线性黏弹区范围, 确定应变 0.5%, 频率 1 Hz, 测试温度 4 °C, 扫描时间 2 h, 记录 tanδ 随时间变化的流变学图谱。

1.3.3 稳态剪切特性测定

根据 Sun 等^[12]的实验方法, 取 3 g 左右冷却至室温的小麦淀粉糊, 置于流变仪样品台, 用塑料刮刀刮去多余样品, 在样品周围覆盖一层硅油, 防止水分蒸发。测量夹具为直径 25 mm 的平行板, 间隙 1 mm, 测试温度 25 °C, 分别在 0.1~300 s⁻¹ 和 300~0.1 s⁻¹ 的剪切速率范围内进行测试, 记录样品剪切应力 (σ) 随剪切速率 (γ) 变化的流变学图谱。σ 与 γ 的关系用幂定律方程 (方程 1) 拟合, 计算稠度系数 (K) 和流动特征指数 (n)。触变环面积为上行曲线和下行曲线所围成的面积。

$$\sigma = K \cdot \gamma^n \quad (1)$$

1.3.4 微流变学特性测定

用光学微流变仪测试样品的微流变学特性, 测试温度 25 °C, 记录粒子均方根位移 (MSD) 与去相关时间的曲线, 用仪器自带的 RheoSoft Master1.4.0.0 软件计算微流变学特性参数, 包括弹性指数 (EI)、宏观黏度指数 (MVI) 和固液平衡指数 (SLB)。

1.3.5 糊化特性测定

参照 Li 等^[13]方法略做修改, 将小麦淀粉-亲水胶体悬浮液转移至铝罐中, 用 RVA 快速黏度仪测定样品的糊化特性, 记录加热过程中的样品黏度随加热温度变化的曲线, 计算峰值黏度 (PV)、末值黏度 (FV)、衰减值 (BD)、回生值 (SB) 等参数。

1.3.6 硬度测定

测量前, 将 4 °C 储藏的样品取出, 并平衡至

室温, 使用质构分析仪测定样品的硬度, 采用一次压缩法, P/0.5 圆柱形探头 (直径 1.27 cm), 测试速度 1.0 mm/s, 压缩高度 10 mm, 记录压缩过程中力随压缩高度变化的关系图, 压缩过程中的最大力记为凝胶硬度。

1.4 数据分析

所有实验均重复 3 次。利用 Microsoft Office Excel 2010 软件作图, SPSS 17.0 对数据进行显著性分析, $P < 0.05$, 差异显著。

2 结果与讨论

2.1 动态流变学性质分析

如图 1 所示, 所有样品的 G' 和 G'' 随振荡频率的增加呈升高趋势; 测试频率范围内, 所有样品的 G' 始终高于 G'' , $\tan\delta$ 值远小于 1, 表明小麦淀粉及小麦淀粉-亲水胶体复合体系凝胶均呈现

黏弹性的类固体特征^[1,14]。这与 Zhang 等^[15]和 Sun 等^[12]研究小麦淀粉和豌豆淀粉动态流变学结果一致。加入 AG 和 LBG 后, 样品的 G' 和 G'' 明显增加, $\tan\delta$ 降低, 表明添加亲水胶体可以增强淀粉凝胶的刚性和弹性。相同频率下, WS-A₁L₁ 的 G' 和 G'' 值最高, $\tan\delta$ 值最低, 振荡频率为 10 Hz 时, 对应的 G' 、 G'' 和 $\tan\delta$ 值分别为 2 599 Pa、203 Pa 和 0.076。Pourfarzad 等^[11]报道鼠尾草胶的加入提高了小麦淀粉的 G' 和 G'' 值, 降低了小麦淀粉凝胶的 $\tan\delta$ 值。Hussain 等^[7]发现与对照样品相比, 添加 LBG 的抗性玉米淀粉表现出更高的 G' 和 G'' 值。Yadav 等^[16]证实添加瓜尔胶和黄原胶提高了芋头淀粉的 G' 和 G'' 值。Zheng 等^[17]表明添加黄原胶降低了葛根淀粉凝胶的 $\tan\delta$ 值。这可能是冷却过程中, 直链淀粉和亲水胶体通过氢键结合, 增加了缠结点的数量, 形成更稳定的三维网络^[16,12]。

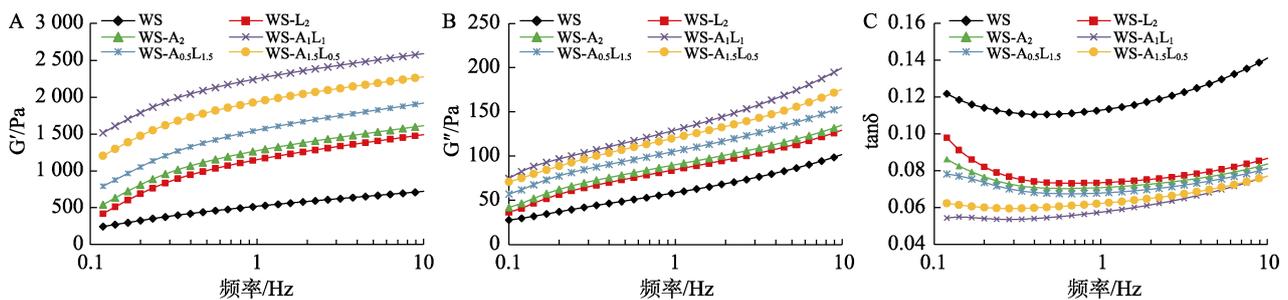


图 1 小麦淀粉-亲水胶体复合体系储能模量 (A)、损耗模量 (B) 和损耗因子 (C) 与频率的关系图

Fig. 1 Frequency dependence of storage modulus (A), loss modulus (B), and loss tangent (C) of WS and WS-gum blends

相同振荡频率下, WS-A₂ 的 G' 和 G'' 均高于 WS-L₂, 频率为 10 Hz 时, G' 和 G'' 分别升高了约 122 Pa 和 11 Pa, 表明 WS-AG 样品的凝胶网络比 WS-LBG 更致密。这与 Lin 等^[18]的结果一致, 他们发现绿豆抗性淀粉-黄原胶复合凝胶的弹性比绿豆抗性淀粉-魔芋胶复合凝胶更强。Fang 等^[6]发现添加糯马铃薯淀粉-黄原胶凝胶的 G' 高于添加糯马铃薯淀粉-瓜尔胶凝胶。与 WS-A₂ 和 WS-L₂ 相比, WS-A_nL_m 表现出更高的 G' 和 G'' 以及更低的 $\tan\delta$ 。由上述结果可以看出, AG 对 WS 凝胶黏弹性的改善能力优于 LBG, AG 和 LBG 之间存在协同作用, 能明显提高小麦淀粉凝胶的黏弹性。

如图 2 所示, 随着扫描时间延长, 所有样品的 $\tan\delta$ 均降低, 表明随冷却时间的延长, 小麦淀粉-亲水胶体复合体系的凝胶网络结构更致密。这

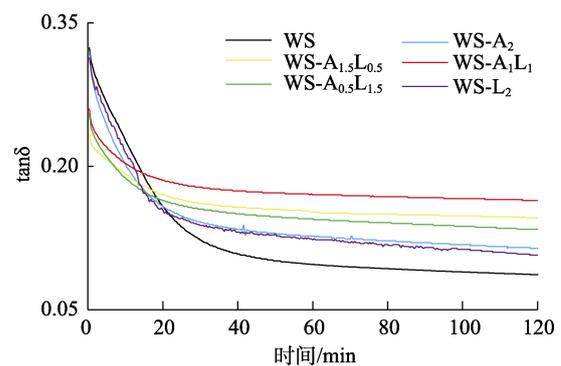


图 2 小麦淀粉-亲水胶体复合体系的时间扫描图

Fig. 2 Time sweep rheograms of WS and WS-gum blends

与 Yu 等^[19]和 Li 等^[13]的研究结果一致。这可能是冷却过程中, 直链淀粉通过氢键作用形成了双螺旋结构, 然后聚集形成有弹性的淀粉凝胶^[3]。添加亲水胶体使样品的 $\tan\delta$ 显著提高, 表明亲水胶体阻碍了直链淀粉分子链的聚集。Zhang 等^[20]表

明添加大米蛋白水解物后小麦淀粉的 $\tan\delta$ 高于对照。Shahzad 等^[21]指出黄原胶的加入使甘薯淀粉表现出更高的 $\tan\delta$ 。这可能是亲水胶体和直链淀粉分子之间的相互作用阻碍了直链淀粉渗漏,从而干扰凝胶网络的形成^[13]。WS-A₂ 的 $\tan\delta$ 高于 WS-L₂, 所有样品中, WS-A₁L₁ 的 $\tan\delta$ 值最高, 比 WS 高出约 90%, 表明 AG 与 LBG 复配比例 1 : 1 时具有协同作用, 能干扰小麦淀粉凝胶网络结构的形成, 表现出柔软的凝胶质地。

2.2 静态流变学性质

如图 3 所示, 上行曲线阶段, 所有样品的剪切应力随着剪切速率的增加而增加, 表现出典型的假塑性, 即剪切稀化的流动特征^[18]。这与 Pourfarzad 等^[1]和 Lin 等^[18]研究小麦淀粉糊和抗性绿豆淀粉糊的稳态流变学结果一致。加入亲水胶体后, 样品的剪切应力明显增加。与 WS-A₂ 和 WS-L₂ 相比, WS-A_nL_m 表现出更高的剪切应力。相同剪切速率下, WS-A₁L₁ 的剪切应力最高, 剪切速率为 300 s⁻¹ 时, 对应的剪切应力为 43.2 Pa。

这与 Cai 等^[22]和 Sun 等^[12]研究趋势一致, 他们发现添加黄原胶或魔芋胶能显著提高马铃薯淀粉糊和大米淀粉糊的剪切应力。这可能是亲水胶体与渗漏直链淀粉或支链淀粉之间通过氢键发生交联, 使复合体系网络结构增强, 具有更强的耐剪切能力^[12]。

为进一步描述复合体系的流动特性, 用幂定律方程拟合稳态剪切的实验数据, 计算得到相应的流变学参数, 包括稠度系数 (K)、流动特征指数 (n) 和相关系数 (R²)。如表 2 所示, 所有样品的相关系数 (R²) 均处于 R²=0.90~0.99 之间, 表明幂定律方程可用于稳态剪切曲线的拟合。流动特征指数 n 反映了与牛顿流体的相近程度, n=1 表示样品属于牛顿流体, n<1 表示样品属于假塑性流体。流体指数 n 越小, 其假塑性越强^[7]。所有样品的 n 值均低于 1, 表现为典型的假塑性^[18,23]。这可能是低剪切速率时, 聚合物分子链缠结的破坏与形成之间存在动态平衡; 但高剪切速率时, 聚合物分子链缠结的破坏与形成的动态平衡被打

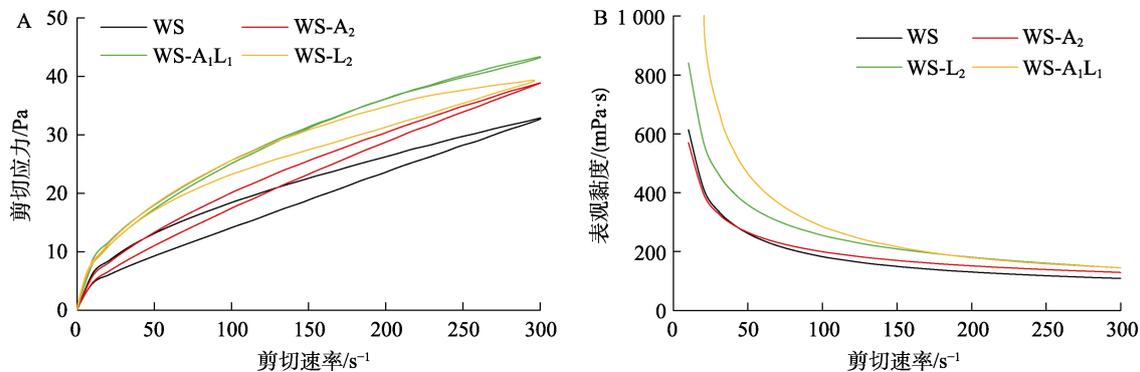


图 3 小麦淀粉-亲水胶体复合体系的剪切应力和表观黏度随剪切速率变化的曲线

Fig. 3 Flow behaviors of WS and WS-gum blends

表 2 小麦淀粉-亲水胶体复合体系的幂定律参数

Table 2 Steady flow parameters of WS and WS-gums blends

样品名称	上行曲线			下行曲线			触变环面积/ (Pa·s ⁻¹)
	K ₁ /(Pa·s ⁿ)	n ₁	R ²	K ₂ /(Pa·s ⁿ)	n ₂	R ²	
WS	1.00	0.63	0.99	0.28	0.82	0.99	844.15
WS-A ₂	1.15	0.58	0.95	0.51	0.75	0.96	518.31
WS-A _{1.5} L _{0.5}	2.51	0.47	0.90	1.07	0.57	0.99	109.13
WS-A ₁ L ₁	2.55	0.42	0.91	2.43	0.50	0.99	108.60
WS-A _{0.5} L _{1.5}	2.47	0.51	0.90	1.62	0.63	0.98	109.91
WS-L ₂	2.36	0.49	0.99	0.93	0.69	0.96	649.62

注: K₁、n₁ 为上行曲线对应的稠度系数和流动特征指数; K₂、n₂ 为下行曲线对应的稠度系数和流动特征指数; R² 为相关系数。

Note: K₁ and n₁ were the consistency coefficient and flow behavior index corresponding to the upward curve; K₂ and n₂ were the consistency coefficient and flow behavior index corresponding to the downward curve; R² was the correlation coefficient.

破,以前者(即分子链缠结的破坏)为主,其作用超过了新缠结的形成,导致分子间流动阻力减小,表观黏度降低^[10]。加入亲水胶体后,样品的 n_1 降低了0.05~0.21,表明添加亲水胶体可以增强淀粉糊的假塑性。与WS-A₂和WS-L₂相比,WS-A_nL_m表现出更低的 n_1 值。WS-A₁L₁的 n_1 值最低,为0.42。这与Hussain等^[7]和Liu等^[24]报道的添加阿拉伯胶和黄原胶降低木薯淀粉糊或马铃薯糊的 n 值的趋势一致。

K值是样品黏稠度的指标,K值越大,表明样品越黏稠。如表2所示,加入AG和LBG后,样品的 K_1 明显增加,表明添加亲水胶体可以提高小麦淀粉糊的黏稠度。与WS-A₂和WS-L₂相比,WS-A_nL_m的 K_1 值更高。WS-A₁L₁的 K_1 值最高为2.55 Pa·sⁿ。Zheng等^[17]报道添加黄原胶提高了葛根淀粉糊的K值。Sun等^[12]发现与对照样品相比,添加魔芋胶的大米淀粉糊表现出更高的K值。

如图3所示,下行曲线阶段,所有样品的剪切应力均随着剪切速率的降低而减小。所有样品的上行曲线始终位于下行曲线的上方,上行曲线和下行曲线不能完全重叠,形成一个闭合的触变环,表明撤去剪切速率后,样品不能迅速恢复到初始状态^[12]。触变环面积反映样品触变性和抗剪切能力的强弱。触变环面积越小,触变性越弱,抗剪切能力越强,结构恢复能力也越强^[3]。如表2所示,添加亲水胶体使小麦淀粉糊的触变环面积从844.15 Pa·s⁻¹显著降低到108.60 Pa·s⁻¹,表明添加亲水胶体减弱了小麦淀粉糊的触变性^[12]。与WS-A₂和WS-L₂相比,WS-A_nL_m触变环面积明显变小。WS-A₁L₁的触变面积最低,为108.60 Pa·s⁻¹,表明AG和LBG之间存在协同作用,能使高剪切速率破坏的网络结构又重新形成,弱化了淀粉糊的触变性,增强了淀粉糊抗剪切能力。Sun等^[12]和Lee等^[10]报道添加魔芋胶和黄原胶降低了马铃薯淀粉糊和葛根淀粉糊的触变环面积。这可能是亲水胶体与渗透直链淀粉分子、支链淀粉分子之间相互作用或缠结,强化了样品的结构^[17]。

2.3 微流变学性质分析

光学微流变技术通过跟踪粒子的布朗运动来计算粒子的均方根位移(MSD),能在无损条件

下表征样品的黏弹特性^[25-26]。对于纯黏性流体,粒子可以自由运动,MSD曲线呈现线性。相反,对于黏弹性样品,液滴之间相互作用形成“笼”状网络结构,粒子受到“笼”的限制不能自由移动,MSD曲线呈非线性^[26]。图4显示了小麦淀粉-亲水胶体复配物的均方根位移与去相关时间关系曲线。由图4可以看出,所有样品的MSD曲线呈非线性,可以分为三个区域:斜率区I(0.001~0.01 s)、平台区(0.01~10 s)、斜率区II(10~100 s)。在斜率区I(0.001~0.01 s),淀粉糊MSD曲线近似直线状,淀粉粒子的MSD随去相关时间呈线性增加,说明初始阶段淀粉糊尚未形成网络结构。随着时间延长(0.01~10 s),MSD曲线出现平台区,单位去相关时间内淀粉粒子的运动范围逐渐缩小,表明淀粉链相互作用逐渐形成凝胶网络结构,限制了淀粉粒子的运动。平台区的高度(即MSD值)可以反映样品的弹性指数(EI),表征样品网络结构的致密程度。平台区的斜率反映样品类固体或类液体的特征,用固液平衡指数(SLB)表征^[27]。0.5<SLB<1时,黏性行为占主导;0<SLB<0.5时,弹性行为占主导。

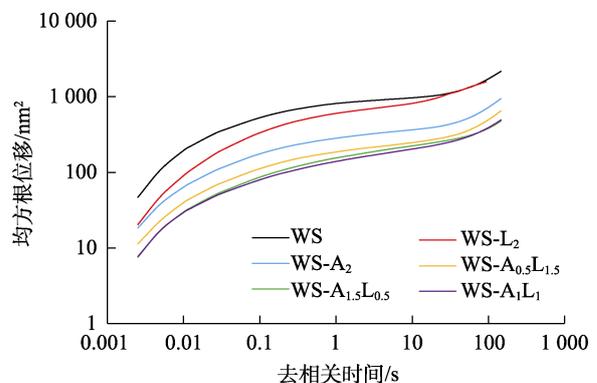


图4 小麦淀粉-亲水胶体复合体系的均方根位移与去相关时间关系图

Fig. 4 Relationship between mean square displacement and decorrelation time of WS and WS-gum blends

平台区之后,在较长去相关时间(10~100 s),MSD再次出现斜率区II,斜率区II的斜率明显高于斜率区I,表明淀粉粒子能够摆脱凝胶网络束缚,出现粒子迁移现象。斜率区II的斜率,反映样品的宏观黏度(MVI),斜率越大,粒子运动的平均速度越大,样品的宏观黏度越小。添加亲水胶体后,平台区的高度MSD值显著降低,

WS-A₁L₁表现出最低的 MSD 值,复合体系的弹性增强^[28]。添加亲水胶体后,斜率区 II 的斜率降低,粒子运动的平均速度减小,表明小麦淀粉-亲水胶体复合体系的宏观黏度更高。

如表 3 所示,加入亲水胶体后,复合体系的 EI 和 MVI 值均升高,WS-A₂表现出比 WS-L₂ 更高的 EI 和 MVI 值。与 WS-A₂ 和 WS-L₂ 相比,WS-A_nL_m表现出更高的 EI 和 MVI 值。WS-A₁L₁ 的 EI 和 MVI 值最高分别为 $15.5 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-2}$ 和 $0.41 \text{ nm}^{-2} \cdot \text{s}$ 。相反,加入亲水胶体后,复合体系的 SLB 值由 0.53 降低到 0.39。Xu 等^[29]研究表明添加微晶纤维素能提高姜黄素乳液凝胶的 EI 和 MVI 值。He 等^[27]发现添加抗性玉米淀粉和蔗糖能提高酪蛋白凝胶的 MVI 值,降低 SLB 值。这可能是小麦淀粉和亲水胶体之间通过氢键或离子键发生相互作用,增强了粒子运动的阻力,粒子需要更长的时间才能摆脱凝胶网络束缚,表现出更高的 EI 和 MVI 值^[26]。

表 3 小麦淀粉-亲水胶体复合体系的微流变学特性参数

Table 3 Micro-rheological parameters of WS and WS-gum blends

样品名称	弹性指数 (10^{-3} nm^{-2})	固液平衡指数	宏观黏度指数 ($\text{nm}^{-2} \cdot \text{s}$)
WS	2.30±0.01 ^e	0.53±0.01 ^a	0.04±0.01 ^e
WS-A ₂	6.70±0.01 ^c	0.43±0.02 ^c	0.19±0.02 ^c
WS-A _{1.5} -L _{0.5}	14.8±0.02 ^a	0.40±0.01 ^d	0.40±0.02 ^a
WS-A ₁ -L ₁	15.5±0.01 ^a	0.39±0.01 ^d	0.41±0.00 ^a
WS-A _{0.5} -L _{1.5}	10.4±0.01 ^b	0.41±0.02 ^d	0.31±0.02 ^b
WS-L ₂	3.60±0.01 ^d	0.47±0.01 ^b	0.09±0.01 ^d

注:同一列数据中不同小写字母表示数据间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Different lower case letters in the same column indicated the mean values were significantly different ($P < 0.05$).

2.4 RVA 性质分析

如表 4 所示,加入亲水胶体后,样品的峰值黏度(PV)和末值黏度(FV)明显增加,分别提高了 1 060~1 394 cP 和 581~1 456 cP。WS-A₂ 的 PV 和 FV 值均高于 WS-L₂。与 WS-A₂ 和 WS-L₂ 相比,WS-A_nL_m表现出更高的 PV 值。所有样品中,WS-A₁L₁具有很高的 FV 值,为 6 449 cP。这与 Zhang 等^[11]和 da Silva Costa 等^[30]报道的添加瓜尔胶和黄原胶提高了玉米淀粉和木薯淀粉黏

度的趋势一致。Zhang 等^[15]报道改性淀粉和田菁胶比例为 1:4 时的小麦淀粉-胶体复配物体系具有最高的黏度。这可能是糊化过程中,亲水胶体溶于水形成黏稠的溶液,同时直链淀粉渗漏,使复合体系黏度增加^[31]。另一个原因可能是亲水胶体与渗漏直链淀粉或支链淀粉之间通过氢键相互作用,相互缠结或交联,使复合体系黏度增大^[11]。

表 4 小麦淀粉-亲水胶体复合体系的糊化参数

Table 4 Pasting parameters of WS and WS-gum blends

样品名称	PV/cP	FV/cP	BD/cP	SB/cP
WS	4 092±13 ^d	5 210±6 ^e	1 615±8 ^e	1 733±1 ^f
WS-A ₂	5 298±4 ^b	6 666±5 ^a	1 659±2 ^d	3 026±3 ^a
WS-A _{1.5} -L _{0.5}	5 479±8 ^a	6 432±16 ^b	1 892±1 ^b	2 845±7 ^c
WS-A ₁ -L ₁	5 486±8 ^a	6 449±7 ^b	1 942±11 ^a	2 901±11 ^b
WS-A _{0.5} -L _{1.5}	5 313±6 ^b	6 042±11 ^c	1 841±11 ^c	2 570±16 ^d
WS-L ₂	5 152±5 ^c	5 791±3 ^d	1 458±7 ^f	2 098±1 ^e

注:同一列数据中不同小写字母表示数据间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Different lower case letters in the same column indicated the mean values were significantly different ($P < 0.05$).

衰减值(BD)表征持续加热过程和剪切力作用下膨胀的淀粉颗粒抗剪切稀化能力的强弱^[31]。回生值(SB)代表冷却时淀粉链重结晶的程度。添加亲水胶体可提高小麦淀粉的 BD 值和 SB 值分别达 327 cP 和 1 293 cP,WS-A₁L₁表现出最高的 BD 值。Liu 等^[31]也发现添加木瓜籽胶显著提高了虎杖淀粉的 BD 值。Zhang 等^[11]证实添加瓜尔胶和黄原胶,小麦淀粉的 BD 值和 SB 值呈上升趋势。Lin 等^[18]报道添加黄原胶和魔芋胶显著提高了抗性绿豆淀粉的 BD 值和 SB 值。这可能是小麦淀粉-亲水胶体复合体系黏度增加,使得施加在膨胀淀粉颗粒上的剪切力远大于淀粉-水悬浮液中的剪切力,导致复合体系的 BD 值更高^[31]。SB 值增加的原因可能是亲水胶体与淀粉之间具有不相容性,导致渗漏直链淀粉的有效浓度增加,直链淀粉和亲水胶体间的相互作用增强^[30]。

2.5 硬度分析

如图 5 所示,添加亲水胶体可降低小麦淀粉样品的凝胶硬度。与 WS 凝胶相比,WS-A₂ 和 WS-L₂ 的凝胶硬度分别降低 28%和 16%,表明添加亲水胶体可以使淀粉凝胶质地变得更柔软。Liu

等^[24]和 Zheng 等^[17]也发现了类似的变化趋势,他们报道添加大豆可溶性多糖和黄原胶降低了莲子淀粉和葛根淀粉的凝胶硬度。这可能是亲水胶体在淀粉三维网状组织中形成屏障,阻止了淀粉羟基之间的缔结^[13]。WS-A₂ 的凝胶硬度比 WS-L₂ 约低 23 g。与 WS-A₂ 和 WS-L₂ 相比, WS-A_nL_m 表现出更低的凝胶硬度。所有淀粉凝胶中, WS-A₁L₁ 的凝胶硬度最低, 为 96 g, 比 WS-A₂ 和 WS-L₂ 的凝胶硬度分别降低了 24%和 36%, 表明 AG 和 LBG 之间存在协同效应, 明显阻止了小麦淀粉凝胶网络结构的形成。Zhang 等^[15]研究表明添加田菁胶和改性淀粉复配物使小麦淀粉具有最低的凝胶硬度。

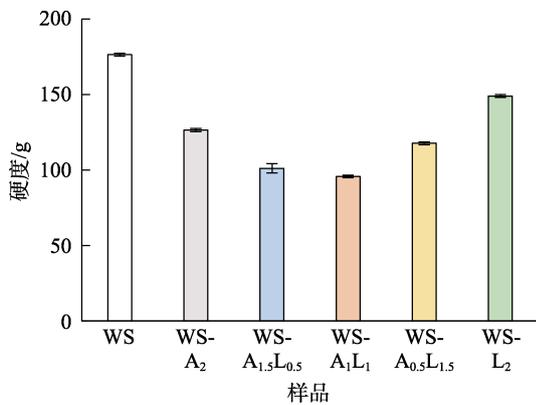


图 5 小麦淀粉-亲水胶体复合体系的凝胶硬度
Fig. 5 Gel firmness of WS and WS-gum blends

3 结论

添加海藻酸钠 (AG) 和刺槐豆胶 (LBG) 可以提高小麦淀粉凝胶的 G'、G''、EI、MVI 和 K 值, 增强小麦淀粉-亲水胶体复合体系凝胶的黏弹性和稠度。不同配比的 AG 和 LBG 对小麦淀粉凝胶的流变学特性和质构特性影响不同。AG 和 LBG 质量比为 1 : 1 时, AG 和 LBG 之间存在协同作用, 可以改善小麦淀粉凝胶的流变学特性, 增强小麦淀粉凝胶网络结构。本文的研究结果可为 AG-LBG 复配物在淀粉凝胶类食品中的应用提供理论参考。

参考文献:

[1] POURFARZAD A, YOUSEFI A, AKO K. Steady/dynamic rheological characterization and FTIR study on wheat starch-

sage seed gum blends[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: e106380.

[2] ZHANG C, LIM S T. Physical modification of various starches by partial gelatinization and freeze-thawing with xanthan gum[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: e106210.

[3] LUO Y, XIAO Y H, SHEN M Y, et al. Effect of mesona chinensis polysaccharide on the retrogradation properties of maize and waxy maize starches during storage[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: e105538.

[4] KANG Z L, WANG T T, LI Y P, et al. Effect of sodium alginate on physical-chemical, protein conformation and sensory of low-fat frankfurters[J]. Meat Science, 2020, 162: e108043.

[5] KIM H S, BEMILLER J N. Effects of hydrocolloids on the pasting and paste properties of commercial pea starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(4): 1164-1171.

[6] FANG F, LUO X, BEMILLER J N, et al. Neutral hydrocolloids promote shear-induced elasticity and gel strength of gelatinized waxy potato starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: e105923.

[7] HUSSAIN R, SINGH A, VATANKHAH H, et al. Effects of locust bean gum on the structural and rheological properties of resistant corn starch[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(3): 650-658.

[8] YOO D, KIM C, YOO B. Steady and dynamic shear rheology of rice starch-galactomannan mixtures[J]. Starch-Stärke, 2005, 57(7): 310-318.

[9] PRAJAPATI V D, JANI G K, MORADIYA N G, et al. Locust bean gum: A versatile biopolymer[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 94(2): 814-821.

[10] LEE H Y, JO W, YOO B. Rheological and microstructural characteristics of rice starch-tara gum mixtures[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup2): 1879-1889.

[11] ZHANG Y Y, LI M J, YOU X G, et al. Impacts of guar and xanthan gums on pasting and gel properties of high-amylose corn starches[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 146: 1060-1068.

[12] SUN Y, WANG M C, MA S P, et al. Physicochemical characterization of rice, potato, and pea starches, each with different crystalline pattern, when incorporated with konjac glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: e105499.

[13] LI Q Q, WANG Y S, CHEN H H, et al. Retardant effect of sodium alginate on the retrogradation properties of normal cornstarch and anti-retrogradation mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 1-9.

[14] ZHANG Y, ZHAO X T, BAO X Y, et al. Effects of pectin and heat-moisture treatment on structural characteristics and physicochemical properties of corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: e106664.

[15] ZHANG D X, LIN Z T, LEI W, et al. Synergistic effects of acetylated distarch adipate and sesbania gum on gelatinization and retrogradation of wheat starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156: 171-179.

[16] YADAV K, YADAV B S, YADAV R B, et al. Physicochemical,

- pasting and rheological properties of colocasia starch as influenced by the addition of guar gum and xanthan gum[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(4): 2666-2676.
- [17] 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): e1900139.
- [18] LIN S Y, LIU X E, CAO Y, et al. Effects of xanthan and konjac gums on pasting, rheology, microstructure, crystallinity and *in vitro* digestibility of mung bean resistant starch[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: e128001.
- [19] YU Z, WANG Y S, CHEN H H, et al. The gelatinization and retrogradation properties of wheat starch with the addition of stearic acid and sodium alginate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 81: 77-86.
- [20] ZHANG M, SUN C, WANG X R, et al. Effect of rice protein hydrolysates on the short-term and long-term retrogradation of wheat starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 155: 1169-1175.
- [21] SHAHZAD S A, HUSSAIN S, ALAMRI M S, et al. Use of hydrocolloid gums to modify the pasting, thermal, rheological, and textural properties of sweet potato starch[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2019, 2019: e6308591.
- [22] CAI X R, DU X F, ZHU G L, et al. The use of potato starch/xanthan gum combinations as a thickening agent in the formulation of tomato ketchup[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2020, 18(1): 401-408.
- [23] DANGI N, YADAV B S, YADAV R B. Pasting, rheological, thermal and gel textural properties of pearl millet starch as modified by guar gum and its acid hydrolysate[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 139: 387-396.
- [24] LIU D, LI Z, FAN Z W, et al. Effect of soybean soluble polysaccharide on the pasting, gels, and rheological properties of kudzu and lotus starches[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 443-452.
- [25] ZHU Q M, QIU S, ZHANG H W, et al. Physical stability, microstructure and micro-rheological properties of water-in-oil-in-water (w/o/w) emulsions stabilized by porcine gelatin[J]. *Food Chemistry*, 2018, 253: 63-70.
- [26] SU J Q, GUO Q, CHEN Y L, et al. Characterization and formation mechanism of lutein pickering emulsion gels stabilized by β -lactoglobulin-gum arabic composite colloidal nanoparticles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: e105276.
- [27] HE J, HAN Y M, LIU M, et al. Effect of 2 types of resistant starches on the quality of yogurt[J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(5): 3956-3964.
- [28] TISSERAND C, FLEURY M, BRUNEL L, et al. Passive microrheology for measurement of the concentrated dispersions stability[M]//STAROV V, GRIFFITHS P. *UK Colloids 2011*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 101-105.
- [29] XU D X, ZHANG J J, CAO Y P, et al. Influence of microcrystalline cellulose on the microrheological property and freeze-thaw stability of soybean protein hydrolysate stabilized curcumin emulsion[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 66: 590-597.
- [30] da SILVA COSTA R A, BONOMO R C F, RODRIGUES L B, et al. Improvement of texture properties and syneresis of arrowroot starch (*Maranta arundinacea*) gels by using hydrocolloids (guar gum and xanthan gum)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(7): 3204-3211.
- [31] LIU H M, MIAO W B, WANG R, et al. Improvement of functional and rheological features of tigernut tuber starch by using gum derived from Chinese quince seeds[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: e111180. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。