

鱼肌动球蛋白与不同来源天然淀粉共混面团的流变特性

王甜^{1,4}, 密更^{2*}, 劳敏军³, 励建荣¹, 李学鹏¹, 谢晶⁴

(¹渤海大学食品科学与工程学院 辽宁省食品安全重点实验室

生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心 辽宁锦州 121013

²广西民族师范学院化学与生物工程学院 广西崇左 532200

³浙江兴业集团有限公司 浙江舟山 316120

⁴上海海洋大学食品学院 上海 201306)

摘要 选取 3 类不同来源的 6 种天然淀粉与带鱼肌动球蛋白,依照传统制芡工艺制备共混面团,对比它们的流变特性。结果表明,所有共混面团均存在明显的剪切稀化现象($n < 1$)。共混物的触变性呈现豆类源>禾谷源>薯类源的趋势。BS-AP(豌豆-肌动球蛋白)共混物的刚度值(K)最大,为 17.23, PS-AP(土豆-肌动球蛋白)对应值最低,为 4.02。共混物中分子相互作用强度显示肌动球蛋白和淀粉之间仅存在物理键连接($Z > 0$)。蠕变分析结果与流动性结果一致。回复结果显示豆类源共混物面团弹性回复性能明显高于其它组,其中 BS-AP 共混物的 J/J_{\max} 值最大,达到了 71.14%,显著高于 MS-AP(绿豆-肌动球蛋白)共混物(64.45%)。温度阶升扫描结果显示肌动球蛋白和淀粉在共混物凝胶过程中相互作用较弱,凝胶网络是独立的。综合来看,豆类淀粉-鱼肌动球蛋白共混物面团更适合采用滴漏法生产,而薯类淀粉-鱼肌动球蛋白共混物面团更适合采用挤出法生产。

关键词 肌动球蛋白;天然淀粉;流变特性

文章编号 1009-7848(2023)09-0099-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.09.011

以天然淀粉制作而成的凝胶食品具有种类多样,制作方便,口感爽弹等优点,是人们餐桌上常见的传统食品之一。较多的研究表明,摄入过多的纯淀粉凝胶食品有增加糖尿病、过度肥胖等疾病的风险^[1-2]。添加其它物质作为辅料来强化纯淀粉食品的营养结构和降低相对摄入量是改善以上问题的有效方法。现有研究中最常见的添加物是水胶体、壳聚糖、硬脂酸甘油酯等化合物^[3-5]。消费者普遍对这些物质不太了解,认为是非天然物质,接受度较差。天然蛋白是另一类较为理想的选择,近年的相关研究多集中在大豆蛋白、蛋清蛋白和乳清蛋白等几个种类上^[6-8]。鱼盐溶性蛋白有着独特的成胶能力和营养价值,相关研究多集中在以鱼糜制品为代表,以蛋白为凝胶主体、以淀粉为添加物的体系,而以淀粉为凝胶主体、以鱼糜蛋白为添

加物的体系研究较少,相关理论尚欠缺。由于它们的凝胶机制完全不同,这就导致这两种体系的凝胶主体网络结构不同,在微观结构和性质上也有本质区别。

对于淀粉基共混物,相关研究多基于简单的蛋白-淀粉两相混合模型^[9-10],虽便于分析,但实际生产应用相对较弱。实际传统淀粉食品,尤其是粉丝制作过程中,加入黏合剂(binder)是一道重要工序,其所起的重要作用:一方面使共混物形成类似小麦面团的黏弹性体系,另一方面极大地改善面团的流变特征。在粉丝生产工艺中,最常见的有 3 种方法:挤出法(extruding)、切条法(cutting)和滴漏法(dropping),其中滴漏法是最常用的,也是目前商业生产的主要方法^[11]。滴漏法对于共混物的流动特征和触变性等流变特性有着特殊的要求,深入研究淀粉基蛋白共混物的流变学特性有着其特殊的现实意义。添加蛋白后的共混物面团更贴近于一种由淀粉颗粒-黏合剂-蛋白组成的 3 相体系,而目前有关这 3 相体系的流变特性研究较少。不同来源的淀粉颗粒有着不同的晶型,一般来说,禾谷淀粉为 A 型,薯类淀粉为 B 型,而豆类淀粉

收稿日期: 2022-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972107);国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U20A2067)

第一作者: 王甜,女,博士生

通信作者: 密更 E-mail: migeng1979@163.com

为C型^[12]。淀粉的晶型对淀粉流变有较大影响^[13-16]。本研究采用传统的淀粉面团中的制芡工艺,选择3类晶型共6种不同来源的天然淀粉,添加带鱼肌球蛋白后复配为共混物,对共混物面团流动特性做深入探讨,以期对淀粉强化粉丝生产提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

带鱼 (*Trichiurus lepturus*) 购于当地水产市场。6种天然淀粉购于本地淀粉公司,均不含蛋白和脂质,经过碘结合比色法^[17]分别测定了其直链淀粉含量(amylose content, AC)。薯类源淀粉:马铃薯淀粉, AC=27.4%, 红薯淀粉, AC=28.5%; 豆类源淀粉:绿豆淀粉, AC=33.1%, 豌豆淀粉, AC=32.8%; 禾谷源淀粉:小麦淀粉 AC=27.7%, 玉米淀粉, AC=19.5%。所有试剂均为分析纯,所用水为去离子水。

1.2 仪器与设备

Sorvall Stratos 冷冻高速离心机,美国 Thermo 公司;UV-2550 紫外可见光分光光度计,岛津仪器(苏州)有限公司;DHR-1 旋转流变仪,美国 TA 仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 肌球蛋白的提取 根据 Panpipat 等^[18]的方法提取肌球蛋白。用双缩脲法测定肌球蛋白的质量浓度,为(43.61±3.22) mg/mL。所提取蛋白置于4℃冰箱内并于2d内用完。

1.3.2 共混物的制备 共混物的制备参考了 Sandhu 等^[19]的方法并结合了中国传统粉丝制芡生产工艺。将10g干淀粉加入90mL蒸馏水搅拌预混合2min,加入100℃的水并不停搅拌1min制成黏合剂(芡糊, binder)。取黏合剂与生淀粉以1:1(质量比)混合均匀,然后添加淀粉总量30%(质量比)的肌球蛋白在搅拌机中混合5min。依次将豌豆、绿豆、马铃薯、红薯、小麦、玉米纯淀粉与肌球蛋白形成的共混物标记为BS-AP、MS-AP、PS-AP、SS-AP、WS-AP和CS-AP。所有的共混物均现用现配,并置于常温密封针筒内待用。

1.3.3 稳态剪切测试 流变仪夹具为 $\Phi=40$ mm的平行板,间隙400 μm 。测试前共混物在室温(25

℃)下平衡2min,带有加热程序的扫描,在间隙周围涂硅油以防蒸发。其它流变测试中均与该设置相同。

稳态测试参考了 Chen 等^[20]的方法并略有改动。温度设定为40℃,剪切速率从0.01 s⁻¹增加至300 s⁻¹(上行曲线),之后立即从300 s⁻¹下降至0.01 s⁻¹(下行曲线)。扫描过程中采集剪切应力(τ)和剪切速率($\dot{\gamma}$)。共混物的屈服应力(τ_0 , Pa)、流动行为指数(n)和稳定性系数(K , Pa·s ^{n})使用 Herschel-Bulkley 模型(方程1)进行拟合计算。

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

1.3.4 动态应变扫描 在应变范围为0.01%~1000%内进行扫描测试,温度25℃,角频率10 s⁻¹。扫描期间采集存储模量(G')和损耗模量(G'')的相应数据。

1.3.5 动态频率扫描 参考了 Feng 等^[21]的方法并略有改动。在应变为0.15%和25℃的温度下,从0.1到100 rad/s进行频率扫描,采集 G' 和 G'' 随角频率 ω 的变化曲线。采用幂律模型(公式2)进行曲线拟合计算。式中 Z' 代表分子间相互作用力类型, K 代表共混物强度。

$$G' = K(\omega)^{Z'} \quad (2)$$

1.3.6 蠕变-回复试验 参考 Fu 等^[22]的方法进行蠕变回复测试。温度25℃,剪切应力20 Pa,蠕变时间300 s,之后撤去应力回复300 s。将蠕变回复曲线使用 Burgers 模型进行拟合,公式3用于蠕变阶段,公式4用于回复阶段。式中: J 表示柔量,可以通过 $J(t) = \gamma/\sigma$ 进行计算, γ 为应变(γ), σ 为应力(σ)。 J_{\max} 表示最大蠕变柔量(Pa⁻¹), η_0 表示零剪切黏度(Pa·s), λ 表示迟滞时间(s)。

$$J(t) = J_0 + J_m(1 - \exp(-t/\lambda)) + t/\eta_0 \quad (3)$$

$$J(t) = J_{\max} - J_0 - J_m(1 - \exp(-t/\lambda)) \quad (4)$$

1.3.7 温度扫描 温度扫描中,频率设定为1 Hz,应变0.10%,从25℃到90℃以5℃/min的加热速率进行,记录过程中记录 G' 、 G'' 和损耗因子($\tan\delta$)随温度变化的曲线。

1.4 统计分析

所有结果均用平均值±std(标准差)表示。统计分析使用统计软件包(SPSS 19.0)进行。拟合计算采用 Origin 2018 进行。采用单因素方差分析、平均多重比较检验和邓肯多重极差检验对数据进

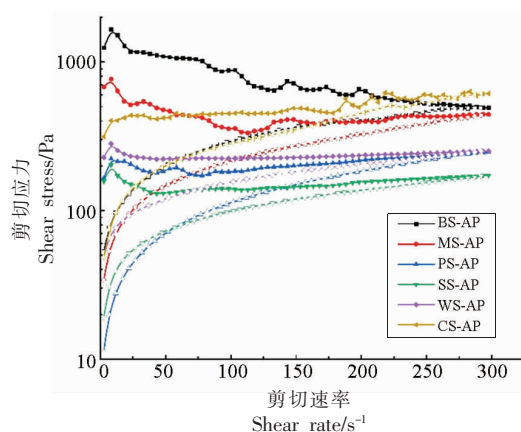
行统计学意义分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。所有试验至少重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 共混物面团的流动特性

在传统的粉条生产工艺中,滴漏法是一个重要的生产方法,生产时,将面团放入底部有孔洞的漏勺内,之后在容器周围拍打振动,使面条开始流动,进而流入开水锅内熟化制成粉条。对共混物的静态剪切实则模拟了该工艺过程中的拍打动作。共混物面团的静态剪切曲线如图 1 所示,图中的实心点代表上行曲线,模拟从慢至快的拍打过程;空心点代表下行曲线,模拟从快到慢的拍打过程。从图中可以看出,所有样品的上行曲线应力变化都较为平稳,而下行曲线中的应力变化均较为剧烈,说明其流动性变化较大,且变得越来越容易流动了。上行、下行曲线不同的流动行为说明了这些共混物面团在实际生产中,较为理想的拍打方式为由快到慢。

为了进一步探究不同淀粉-肌球蛋白流动性的差异,对图 1 中下行曲线进行了 Herschel-Bulkley 模型拟合计算,结果见表 1。需要说明的是,上行曲线存在较多的波动区,无法进行拟合,这一点和已有的相关研究情况一致^[23]。从结果来看,所有样品的拟合相关系数 R^2 均大于 0.99,证实了 Herschel-Bulkley 模型在拟合当前数据中的适用性。屈服应力 τ_0 可代表稳态剪切测试中破坏共混物结构所需的力,该值越大,表示共混物振荡后越难流动,反之亦然。从结果可以看出, τ_0 值呈现如下规律: $WS-AP > CS-AP = BS-AP > MS-AP > PS-AP = SS-AP$ 。这些结果说明薯类源共混物面团的流



注:实心点为上行曲线,空心点为下行曲线。

图 1 共混物的稳态剪切流动曲线

Fig.1 The steady shear flow curve of blends

动性较强,而禾谷源面团的流动性则较差。因此时淀粉面团是非热体系,并未形成凝胶,内部的网络结构仅仅由较弱的黏合剂维持,因此推测原因除了直链淀粉含量以及晶型等关系外,主要可能和面团组分的质壁滑移(wall slip)有较大关系。Wang 等^[23]也报道了此类体系中存在质壁滑移现象,他们认为在剪切中,binder 形成的连续相会形成类似薄膜的结构滑动于淀粉粒以及蛋白形成的分散相上,从而使共混物发生流动。由此来看,薯类源共混物的黏合剂可能更容易形成结构完整的薄膜相,从而更易发生流动。

K 值代表共混物面团的刚度且与之呈正比关系。从结果来看,豆类源面团相对较高,其中 BS-AP 共混物的 K 值最大,达到 17.23,而薯类源面团较低,其中 PS-AP 该值最低,只有 4.02。另外从结果可以看出,所有共混物的流动行为指数(n)均低于 1,说明共混物是假塑性流体,会发生剪切稀化的情况,这和已有的相关研究结果一致^[24]。

表 1 共混物的 Herschel-Bulkley 参数和触变性

Table 1 Herschel-Bulkley and thixotropy parameters of blends

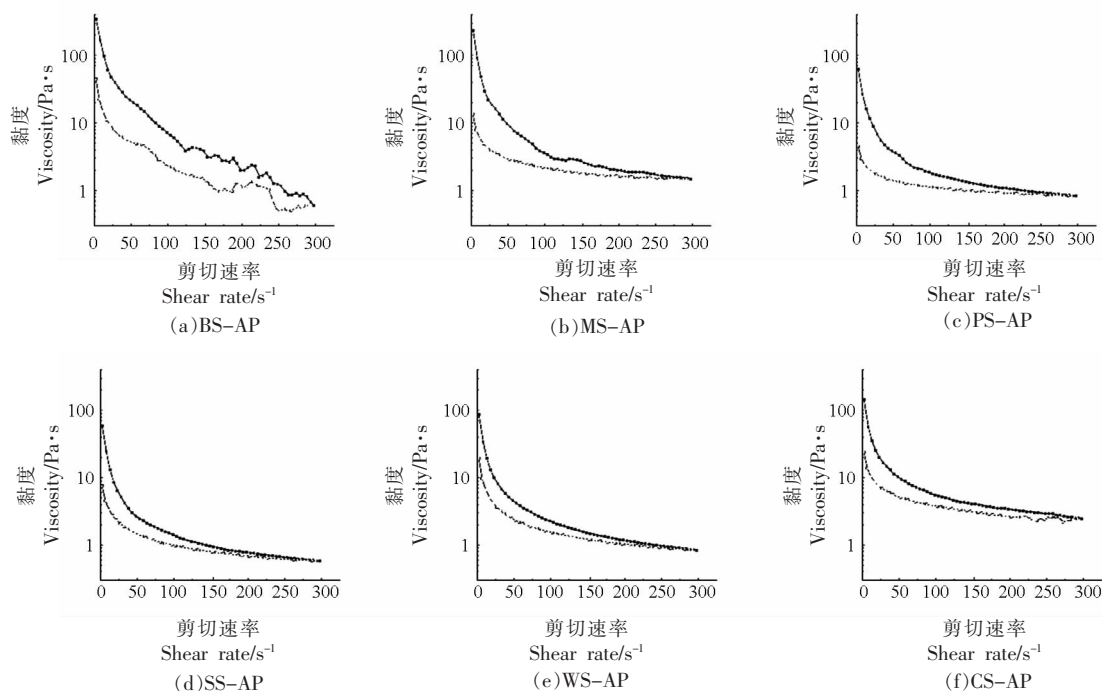
共混物	τ_0/Pa	$K/\text{Pa} \cdot \text{sn}$	n	R^2	$D_t/\text{s}^{-1} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$
BS-AP	21.68 ± 1.36^b	17.23 ± 0.45^a	0.60 ± 0.00^c	0.999	$3\ 566.03 \pm 142.31^a$
MS-AP	13.01 ± 0.72^c	12.71 ± 0.24^b	0.60 ± 0.00^c	0.999	$1\ 910.74 \pm 45.63^b$
PS-AP	4.05 ± 0.17^d	4.02 ± 0.04^d	0.72 ± 0.00^a	0.999	607.26 ± 15.86^d
SS-AP	4.47 ± 0.98^d	10.61 ± 0.43^c	0.47 ± 0.01^d	0.999	446.57 ± 25.76^c
WS-AP	38.62 ± 7.91^a	11.89 ± 0.85^{bc}	0.48 ± 0.01^d	0.999	615.41 ± 61.83^d
CS-AP	25.54 ± 1.78^b	11.57 ± 1.94^{bc}	0.66 ± 0.03^b	0.994	$1\ 212.33 \pm 80.23^c$

注:同列小写字母不同表示存在差异显著性($P < 0.05$)。

2.2 共混物面团的触变性

6种淀粉源共混物的黏度-剪切速率曲线如图2所示。从顺时针方向的滞后环可以看出,所有共混物均有明显的剪切变稀的特性,与前一节结果一致。另外,不同淀粉源共混物在不同剪切速率下的黏度下降情况有明显不同,豆类淀粉源共混物面团在 $0\sim 100\text{ s}^{-1}$ 范围内出现急剧下降,之后出现明显的振荡区,这表明共混物面团的结构被严重破坏,推测面团内部可能出现了裂缝。而禾谷源共混物则在 $0\sim 50\text{ s}^{-1}$ 的剪切速率范围内出现急剧下降,之后变得相对平缓,且未出现明显振荡区,这表明共混物内部虽然有微观上的结构破坏,但宏观上仍有保持均相的能力。

触变性是凝胶体在振荡、压迫等机械力的作用下发生的可逆溶胶现象,是淀粉面团采用滴漏法生产的重要依据。触变性的大小可以通过对滞后环的面积来表示,为了方便比较,取非振荡区域($0\sim 123\text{ s}^{-1}$)的面积进行积分计算,结果如表1中 Dt 值所示。从结果中来看,豆类源共混物面团的 Dt 值较高,这表明他们更加适合采用滴漏法进行生产制备共混物面条。薯类源的对应值相对较低,其与豆类源的明显不同可能和直链淀粉含量的不同有较大关系^[25]。由此来看,豆类淀粉-鱼肌动球蛋白共混物面团更适合采用滴漏法进行生产。而薯类淀粉源共混物面团则适合采用挤出法进行生产。



注:实心点代表上行曲线;空心点代表下行曲线。

图2 共混物的滞后环

Fig.2 The hysteresis loops of blends

2.3 共混物面团的线性黏弹性

动态应变扫描提供了面团内部结区(junction zone)的相对强度(用 G' 表示),以及面团对流动的相对阻力(用 G'' 表示)。通过动态应变扫描来测定共混物面团的线性黏弹性区间(Linear viscoelastic range, LVR),结果如图3所示。首先,从结果中可以看出,所有共混物面团的LVR上限均小于

0.1%,说明在此形变范围以内共混物能保持其结构的稳定性。超出此范围,可以看到所有共混物的黏弹性均出现急剧下降。其次,已有的研究表明,普通小麦面团的LVR均在0.1%~0.25%范围内^[26],大多数要高于淀粉和肌动球蛋白形成的共混物的LVR水平。这可能是因为小麦面团由强劲而稳定的面筋网络构成,而共混物中起主要作用的是脆

弱的由直链淀粉糊化形成的多糖网络。另外,从组间来看,豆类源面团的黏弹性区间较小,而薯类源面团的 LVR 则明显升高,尤其是在 SS-AP 中,这

一情况更加显著,推测是薯类源共混物中支链淀粉的较大黏度使得共混物的微结构不易被破坏所致。

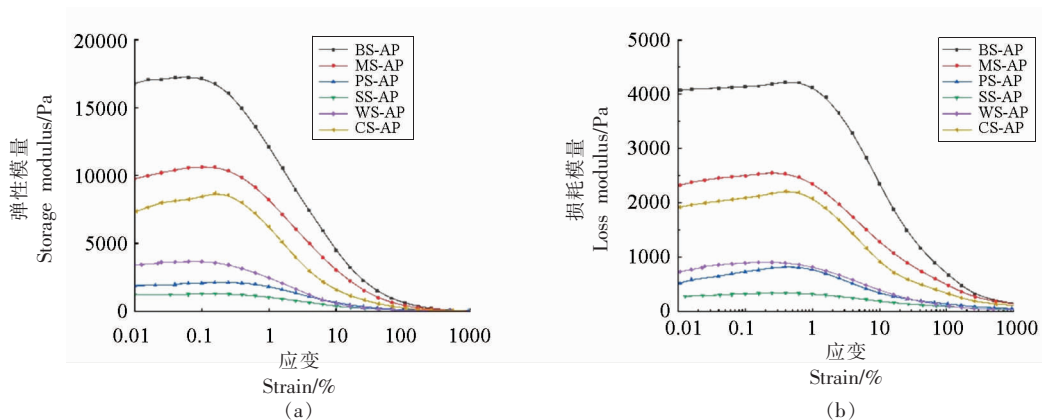


图 3 共混物的动态应变扫描曲线

Fig.3 Dynamic strain sweep curve of blends

2.4 共混物面团中分子相互作用强度分析

幂律模型中 Z' 表示 G' 和 G'' 对频率的依赖程度,可以反映共混物中分子间相互作用的类型, $Z'=0$ 为共价键连接, $Z'>0$,则表示存在物理键连接^[27]。从表 2 的结果来看,所有共混物的 G' 和 G'' 的 Z' 值均大于 0,这说明所有共混物中蛋白和天然淀粉之间均不存在共价键,而是以物理键例如氢键进行连接的。从组间来看,CS-AP 的 Z' 值最

大,说明该共混物的分子间相互作用最弱。而 BS-AP 的 Z' 值最小,在 G' 和 G'' 分别为 0.14 和 0.10,说明其内部肌动球蛋白和 binder 中的淀粉分子相互作用较强。 K 值表示共混物的刚度, K 值越高表示共混物的刚度越大。豆类源面团具有较高的 K 值,其中 BS-AP 共混物在 G' 和 G'' 中具有最大的 K 值,分别为 5.85 和 5.24。薯类共混物的 K 值均较小,且 SS-AP 和 PS-AP 之间差别不显著。

表 2 共混物在动态频率扫描中幂律模型拟合参数

Table 2 The power-law parameters of the blends in dynamic frequency sweep

共混物	G'			G''		
	Z'	K	R^2	Z'	K	R^2
BS-AP	0.14 ± 0.01^c	5.85 ± 0.03^a	0.998	0.10 ± 0.01^d	5.24 ± 0.05^a	0.947
MS-AP	0.15 ± 0.01^{bc}	5.42 ± 0.05^b	0.998	0.11 ± 0.01^d	4.56 ± 0.01^c	0.939
PS-AP	0.17 ± 0.02^b	4.62 ± 0.01^c	0.998	0.15 ± 0.01^c	4.19 ± 0.01^d	0.982
SS-AP	0.17 ± 0.02^b	4.13 ± 0.05^f	0.984	0.17 ± 0.01^{bc}	4.20 ± 0.02^d	0.941
WS-AP	0.22 ± 0.01^a	5.12 ± 0.02^c	0.996	0.19 ± 0.02^{ab}	4.89 ± 0.01^b	0.933
CS-AP	0.24 ± 0.01^a	4.69 ± 0.03^d	0.991	0.21 ± 0.02^a	3.69 ± 0.02^e	0.955

注: G' :弹性模量; G'' :损耗模量; Z' :分子间相互作用种类; K :面团刚度。同列小写字母不同表示存在差异显著性($P<0.05$)。

2.5 共混物面团的蠕变回复特性

对共混物面团在蠕变阶段的曲线进行分段拟合,得到的流变学参数如表 3 所示。 J_0 、 J_m 和 J_{max} 分别表示蠕变阶段的瞬时柔量、高弹柔量和最大蠕变柔量,它们分别和瞬时形变、延迟形变和塑性形

变期间共混物面团的刚度呈反比关系^[28]。从结果可以看出,不同淀粉来源共混物面团的 3 个柔量值存在明显的不同,豆类淀粉源共混物具有最低的柔量,而薯类源共混物的柔量相对较高。这表明豆类源面团更为坚实,而薯类源面团则相对比较

稀软。零剪切黏度(η_0)是用来表征应力去除时,共混物的流动难易程度。从表3中的结果可知,BS-AP和MS-AP共混物的 η_0 值较高,说明共混物保持原有形状的阻力较大。而PS-AP和SS-AP共混

物的 η_0 值最小,说明薯类淀粉和肌球蛋白形成的共混物在加工过程中难以维持其形状。Zhang等^[29]在5种不同来源的植物淀粉对淀粉-谷蛋白面团影响的研究中也有类似的发现。

表3 共混物在蠕变回复测试中的流变学参数

Table 3 Rheological parameters of blends in creep-recovery test

共混物	蠕变阶段					回复阶段		
	$J_0 \times 10^{-4}$	$J_m \times 10^{-4}$	λ	$\eta_0 \times 10^{-4}$	$J_{max} \times 10^{-4}$	$J_0 \times 10^{-4}$	$J_m \times 10^{-4}$	λ
BS-AP	0.53 ± 0.03^f	1.56 ± 0.02^c	6.19 ± 0.09^c	330.08 ± 0.04^a	2.56 ± 0.01^f	0.33 ± 0.01^c	1.03 ± 0.01^f	5.87 ± 0.09^c
MS-AP	1.60 ± 0.01^e	4.68 ± 0.07^d	5.83 ± 0.09^f	103.89 ± 0.05^b	7.70 ± 0.04^e	0.95 ± 0.01^d	3.04 ± 0.04^c	5.69 ± 0.08^d
PS-AP	10.03 ± 0.06^a	34.10 ± 0.50^a	6.52 ± 0.08^d	12.27 ± 0.37^f	58.20 ± 0.30^a	6.16 ± 0.05^a	18.70 ± 0.22^a	4.40 ± 0.10^f
SS-AP	8.75 ± 0.03^b	34.30 ± 0.51^a	9.00 ± 0.05^b	14.05 ± 0.66^e	55.77 ± 0.25^b	5.45 ± 0.04^b	16.50 ± 0.20^b	5.10 ± 0.09^e
WS-AP	3.67 ± 0.03^c	15.00 ± 0.22^b	9.50 ± 0.05^a	33.65 ± 0.28^d	23.90 ± 0.10^c	2.30 ± 0.01^c	7.57 ± 0.10^c	6.07 ± 0.07^b
CS-AP	2.02 ± 0.03^d	7.91 ± 0.12^c	8.79 ± 0.06^c	38.69 ± 0.18^c	14.43 ± 0.15^d	0.99 ± 0.01^d	4.12 ± 0.05^d	7.73 ± 0.05^a

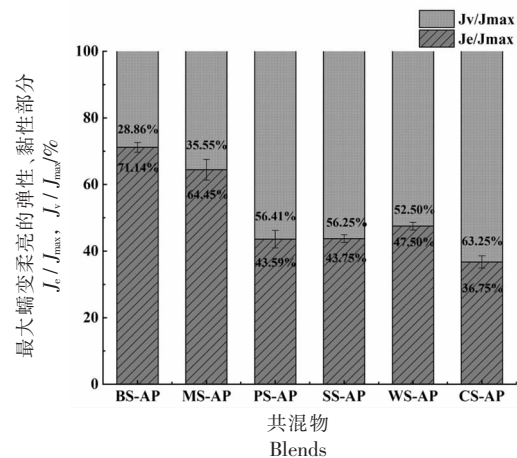
注: J_0 :瞬时柔量(Pa⁻¹); J_m :黏弹性柔量(Pa⁻¹); λ :迟滞时间(s); η_0 :零剪切黏度(Pa·s); J_{max} :最大蠕变柔量(Pa⁻¹)。同列小写字母不同表示存在差异显著性($P < 0.05$)。

共混物回复测试可以用来模拟并表征面团在用手或器械施加压力后其回复原有形状的能力。回复能力越强,说明共混物形成的结构越稳定。由此我们分析了最大柔量 J_{max} 中黏性部分 J_v 和弹性部分 J_e 的占比,结果如图4所示。发现豆类源共混物面团的 J_e/J_{max} 显著高于其它组,其中BS-AP共混物的 J_e/J_{max} 值最大,达到了71.14%,显著高于MS-AP共混物(64.45%),说明其具有更好的回弹能力。薯类源共混物面团SS-AP和PS-AP之间没有显著差别。禾谷源中,WS-AP的值明显高于薯类源和同组的玉米源,推测原因可能和其直链淀粉较高有一定的关系。

2.6 共混物在加热过程中的黏弹性变化

通过温度扫描测定了共混物形成凝胶过程中的黏弹性变化,结果如图5a、5b所示。6种共混物的 G' 和 G'' 均在65℃时开始增加,在70~80℃范围内分别达到最大值,然后快速下降。不同淀粉来源共混物的模量最大值对应的温度均不同,初步推断这些峰可能是不同淀粉的糊化峰,而这些温度则对应糊化温度。为了进一步验证这一推测,将 $\tan\delta$ 对温度作图,结果如图5c。

从结果来看所有共混物的 $\tan\delta$ 值在加热过程除了之前出现的峰,在左边均出现了或弱或强的两个峰,这两个峰分别在40℃和56℃出现。推测这两个峰很可能是肌球蛋白在加热过程中肌动



注: J_e/J_{max} :最大蠕变柔量的弹性部分; J_v/J_{max} :最大蠕变柔量的黏性部分。

图4 共混物在回复阶段的最大蠕变柔量的相对弹性和黏性部分占比

Fig.4 The relative elastic (J_e) and viscous (J_v) part of the maximum creep compliance (J_{max}) of the blends in the recovery test

球蛋白头部和尾部变性解旋所致。实际上,一些其它鱼类盐溶蛋白的变性温度研究也证实了这一推测,例如Liu等^[30]在鲢鱼肌动蛋白热诱导凝胶研究中也发现对应肌球蛋白头部和尾部的解旋温度分别是40℃和55℃。另外,从图中可以看出所有共混物中这两个峰的位置除了小麦淀粉源均在同一温度位置出现。结合它们相隔出现且温度距离较

远, 这里可以推测共混物中蛋白和淀粉的相互作用是较弱的, 蛋白和淀粉的网络形成相对较为独立。一些已有的相关研究也发现了类似的结果, 证实了该推论^[31-33]。WS-AP 中的第 2 个蛋白峰很弱且明显向低温区移动, 其原因还有待进一步研究揭示。

整体来看, 所有共混物在热处理过程中, 其 $\tan\delta$ 值均小于 1, 在接近 90 °C 附近时, 均迅速下降至 0.05~0.15 附近, 这表明所有共混物在热处理后均表现出更多的固体黏弹性特征^[34], 即形成了一定弹性的凝胶体。从组间来看, 薯类淀粉源共混物的黏性较大, 而禾谷源共混物的黏性较小。

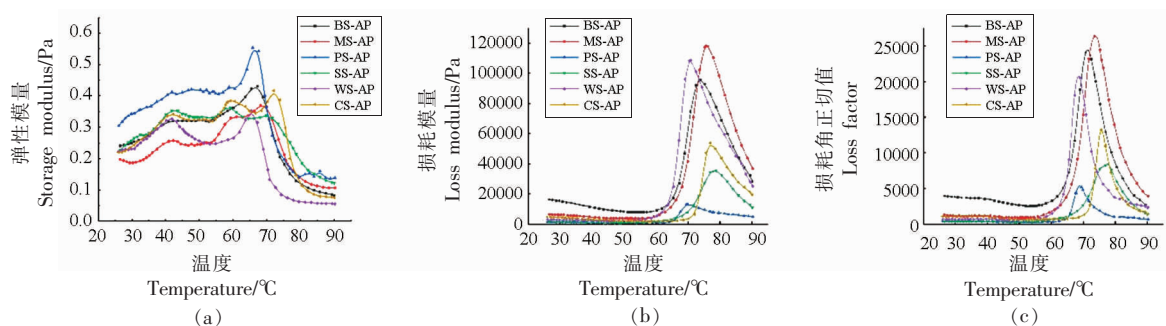


图 5 共混物的动态温度扫描曲线

Fig.5 Dynamic temperature sweep curve of blends

3 结论

本研究评估了 3 种晶型共 6 种不同来源天然淀粉和肌动球蛋白形成的共混物面团的流变特性。研究发现所有共混物均有剪切变稀的特性。剪切过程中面团流动性方面的测试结果显示, 薯类淀粉源共混物面团的流动性较强, 而禾谷源面团的流动性则较差。BS-AP 共混物刚度最大, 为 17.23, 而 PS-AP 值最低, 为 4.02。共混物的触变大小呈现如下趋势: 豆类源 > 禾谷源 > 薯类源。动态应变扫描的结果显示所有共混物的 LVR 值均小于 0.1%, 小于大部分普通小麦面团的对应值。从组间来看, 豆类源面团的 LVR 较小, 而薯类源面团对应值有明显增加。共混物中分子相互作用强度的结果显示肌动球蛋白和淀粉之间不存在共价键连接, 只存在物理键连接。蠕变回复特性是面团的一种重要流变特性, 柔量分析结果和静态剪切分析结果一致。另外研究发现, 豆类源共混物面团的 J/J_{\max} 显著高于其它组, 其中 BS-AP 共混物的 J/J_{\max} 值最大, 达到了 71.14%, 显著高于 MS-AP 共混物 (64.45%), 说明其具有更好的回弹能力。温度扫描测试结果显示, 共混物面团在加热过程中, 均可形成弹性较好的凝胶。整体来看, 共混物加热过程中除了凝胶峰出现了另外两个独立的峰, 依据已有研究推测球蛋白和淀粉在共混物凝胶过程中相互

作用较弱, 凝胶网络的形成也是独立的。综合来看, 豆类淀粉-鱼肌动球蛋白共混物面团更适合用滴漏法进行生产。

本研究尚可在以下几方面深入探讨: ①共混物中肌动球蛋白和淀粉在面团和凝胶中的相互作用。②进一步观察共混物面团中蛋白和淀粉的微结构, 验证相关推测, 阐述流变特征中机理。③共混物中蛋白和淀粉均为高分子物质, 极有可能因热力学不相容发生相分离。可进一步对共混物的相结构和相行为进行深入研究和探讨。

参 考 文 献

- [1] 施万英, 吕婵, 张译文, 等. 以低碳水化合物饮食模式为主的体重管理对超重及肥胖人群的干预研究[J]. 中华健康管理学杂志, 2019, 13(4): 335-338. SHI W Y, LÜ C, ZHANG Y W, et al. Intervention study of weight management based on a low-carbohydrate diet for overweight and obese patients[J]. Chinese Journal of Health Management, 2019, 13(4): 335-338.
- [2] SAINSBURY E, KIZIRIAN N V, PARTRIDGE S R, et al. Effect of dietary carbohydrate restriction on glycemic control in adults with diabetes: a systematic review and meta-analysis[J]. Diabetes Research and

- Clinical Practice, 2018, 139(5): 239–252.
- [3] MARTI A, PAGANI M A. What can play the role of gluten in gluten free pasta? [J]. Trends in Food Science and Technology, 2013, 31(1): 63–71.
- [4] SAITO H, TAMURA M, OGAWA Y, et al. Starch digestibility of various Japanese commercial noodles made from different starch sources [J]. Food Chemistry, 2019, 283(15): 390–396.
- [5] KAUR L, SINGH J, SINGH N, et al. Effect of glycerol monostearate on the physico-chemical, thermal, rheological and noodle making properties of corn and potato starches [J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(5): 839–849.
- [6] PHONGTHAI S, DAMICO S, SCHOENLECHNER R, et al. Effects of protein enrichment on the properties of rice flour based gluten-free pasta [J]. LWT—Food Science and Technology, 2017, 80(7): 378–385.
- [7] RACHMAN A, BRENNAN M A, MORTON J, et al. Effect of egg white protein and soy protein fortification on physicochemical characteristics of banana pasta [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(9): e14081.1–e14081.7.
- [8] MENON R, PADMAJA G, JYOTHI A N, et al. Gluten-free starch noodles from sweet potato with reduced starch digestibility and enhanced protein content [J]. Journal of Food Science & Technology, 2016, 53(9): 3532–3542.
- [9] BASIAK E, LENART A, DEBEAUFORT F. Effects of carbohydrate/protein ratio on the microstructure and the barrier and sorption properties of wheat starch-whey protein blend edible films [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(3): 858–867.
- [10] LU Z H, DONNER E, YADA R Y, et al. Physicochemical properties and in vitro starch digestibility of potato starch/protein blends [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 154(10): 214–222.
- [11] TAN H Z, LI Z G, TAN B. Starch noodles: History, classification, materials, processing, structure, nutrition, quality evaluating and improving [J]. Food Research International, 2009, 42(5/6): 551–576.
- [12] BOGRACHEVA T Y, RING S, MORRIS V, et al. The use of mutants to study the structural and functional properties of pea starch [J]. Royal Society of Chemistry, 1997, 205(1): 230–237.
- [13] 张静祎, 翟爱华, 张东杰. 氯化钠对不同品种红小豆淀粉特性的影响 [J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 34–38.
- ZHANG J Y, ZHAI A H, ZHANG D J. Effect of sodium chloride on starch properties from different adzuki bean varieties [J]. Food and Machinery, 2020, 36(5): 34–38.
- [14] SAHLSTROM S, BÆVRE A B, GRAYBOSCH R. Impact of waxy, partial waxy, and wildtype wheat starch fraction properties on hearth bread characteristics [J]. Cereal Chemistry, 2006, 83(6): 647–654.
- [15] BERTOLINI A C, SOUZA E, NELSON J E, et al. Composition and reactivity of A and B type starch granules of normal, partial waxy, and waxy wheat [J]. Cereal Chemistry, 2003, 80(5): 544–549.
- [16] ŠEBEČIĆ B, ŠEBEČIĆ B D. Wheat flour starch granule-size distribution and rheological properties of dough. Part 4. Farinographic measurements [J]. Food/Nahrung, 1996, 40(5): 256–260.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 大米直链淀粉含量的测定: GB/T15683–2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 2–4.
- Standardization Administration of China. Determination of amylose content in rice: GB/T15683–2008 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd. 2009: 2–4.
- [18] PANPIPAT W, CHAIJAN M. Effect of atmospheric pressure cold plasma on biophysical properties and aggregation of natural actomyosin from threadfin bream (*Nemipterus bleekeri*) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(5): 851–859.
- [19] SANDHU K S, KAUR M. Studies on noodle quality of potato and rice starches and their blends in relation to their physicochemical, pasting and gel textural properties [J]. LWT—Food Science and Technology, 2010, 43(8): 1289–1293.
- [20] CHEN L, TIAN Y Q, BAI Y X, et al. Effect of frying on the pasting and rheological properties of normal maize starch [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77(4): 85–95.
- [21] FENG Y Y, MU T H, ZHANG M, et al. Effects of different polysaccharides and proteins on dough rheological properties, texture, structure and in vitro starch digestibility of wet sweet potato vermicelli [J]. International Journal of Biological Macromolecules,

- 2020, 148(4): 1–10.
- [22] FU Z Q, CHE L M, LI D, et al. Effect of partially gelatinized corn starch on the rheological properties of wheat dough [J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2016, 66(3): 324–331.
- [23] WANG Y, YE F Y, LIU J, et al. Rheological nature and dropping performance of sweet potato starch dough as influenced by the binder pastes [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 85(12): 39–50.
- [24] XIAO W H, SHEN M Y, REN Y M, et al. Controlling the pasting, rheological, gel, and structural properties of corn starch by incorporation of debranched waxy corn starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 123(2): 1–11.
- [25] JI N, QIU C, XU Y C, et al. Differences in rheological behavior between normal and waxy corn starches modified by dry heating with hydrocolloids [J]. *Starch–Stärke*, 2017, 69(9/10): 1–27.
- [26] PHAN–THIEN N, SAFARI–ARDI M. Linear viscoelastic properties of flour–water doughs at different water concentrations [J]. *Journal of Non–Newtonian Fluid Mechanics*, 1998, 74(1/2/3): 137–150.
- [27] RENARD D, VAN DE VELDE F, VISSCHERS R W. The gap between food gel structure, texture and perception [J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(4): 423–431.
- [28] ROUILLE J, DELLA VALLE G, LEFEBVRE J, et al. Shear and extensional properties of bread doughs affected by their minor components [J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42(1): 45–57.
- [29] ZHANG D, MU T, SUN H. Effects of starch from five different botanical sources on the rheological and structural properties of starch–gluten model doughs [J]. *Food Research International*, 2018, 103(1): 156–162.
- [30] LIU H M, XIONG S B, ZHANG L, et al. Studies on heat–induced setting temperature of myosin from silver carp [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(4): 643–647.
- [31] MORRIS V J. *Weak and strong polysaccharide gels [M]//Food Polymers, Gels and Colloids*. Norwich: Woodhead Publishing, 1991: 310–321.
- [32] AGUILERA J M, ROJAS E. Rheological, thermal and microstructural properties of whey protein–cassava starch gels [J]. *Journal of Food Science*, 1996, 61(5): 962–966.
- [33] ZENG M, WU Y Q, GAO H N, et al. Influence of dehydration treatment on intermolecular interaction and morphology of pills prepared from proteins and corn starch [J]. *Science of Advanced Materials*, 2010, 2(4): 514–521.
- [34] GUNASEKARAN S, AK M M. Dynamic oscillatory shear testing of foods–selected applications [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2000, 11(3): 115–127.

The Rheological Properties of Blend Doughs of Hairtail Actomyosin and Natural Starch from Different Sources

Wang Tian^{1,4}, Mi Geng^{2*}, Lao Minjun³, Li Jianrong¹, Li Xuepeng¹, Xie Jing⁴

(¹College of Food Science and Technology, Bohai University, Food Safety Key Lab of Liaoning Province; National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou 121013, Liaoning

²College of Chemistry and Biological Engineering, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo 532200, Guangxi

³Zhejiang Xingye Industrial Group Co., Ltd., Zhoushan 316120, Zhejiang

⁴College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

Abstract In this study, three types of natural starch from different sources were selected and mixed with actomyosin (AP) according to the binder method of traditional vermicelli production process. The rheological properties of blend doughs were comparative studied ($n < 1$). It was found that all blends had shear thinning characteristics. In terms of dough rigidity (K), the BS–AP (bean starch–actomyosin) dough appeared highest value 17.23, while the PS–AP (potato starch–

actomyosin) had the lowest value 4.02. The thixotropy of the blends showed the following trend: bean source>cereal source>potato source. The results of molecular interaction intensity in the blends showed that there was no covalent bond connection between actomyosin and starch, but only physical connection($Z>0$). The results of creep and fluidity are consistent. The J/J_{\max} value of the BS-AP blend was the highest, reaching 71.14%, which is significantly higher than that of the MS-AP blend (64.45%), indicating that it had better resilience. The results of temperature ramp indicated that the interaction between actomyosin and starch in the gel process is weak, and the formation of gel network is also independent. In conclusion, bean starch-actomyosin dough is more suitable for production by dropping method, while potato starch-actomyosin dough is more suitable for production by extrusion method.

Keywords actomyosin; natural starch; rheological properties