

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.81028

# 唾液 $\alpha$ -淀粉酶对淀粉基增稠流体流变及质构特性的影响

苏渭 刘芸 陈伊琳 王鑫淼 陈建设 胡小雪

(浙江工商大学食品科学与生物工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** [目的] 探索唾液中的  $\alpha$ -淀粉酶对淀粉基增稠流体的质构感知机制。[方法] 开展了针对真实唾液、添加  $\alpha$ -淀粉酶的人造唾液对淀粉基增稠流体的流变学和质构性质的表征。[结果] 动态流变学测试结果表明, 唾液中的  $\alpha$ -淀粉酶可降低淀粉基增稠流体的黏弹性, 且随着  $\alpha$ -淀粉酶质量浓度的增加, 凝胶体系损耗因子增加。静态流变测试结果表明,  $\alpha$ -淀粉酶会增加淀粉基增稠流体的表观黏度系数  $K$  以及触变环面积。质构测试结果表明, 真实唾液 (未灭酶/灭酶) 组质构未表现出显著差异, 而人造唾液 (无酶/加酶) 组差异显著, 加酶后的体系硬度、咀嚼性显著下降。[结论]  $\alpha$ -淀粉酶分解淀粉基增稠流体中的淀粉大分子成为低聚糖等小分子, 使得淀粉分子与果胶分子之间的三维凝胶网络崩塌。

**关键词:** 唾液;  $\alpha$ -淀粉酶; 淀粉—果胶复配流体; 流变学行为; 质构指标

## Influence of $\alpha$ -amylase in saliva on rheological and textural properties of starch-containing thickened fluid

SU Wei LIU Yun CHEN Yilin WANG Xinmiao CHEN Jianshe HU Xiaoxue

(School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the mechanism underlying perception of texture of starch-containing thickened fluids by  $\alpha$ -amylase in saliva. [Methods] This work characterizes the rheological and textural properties of a starch-containing thickened fluid in the presence of authentic saliva or artificial saliva containing  $\alpha$ -amylase. [Results] Dynamic rheological test results show that the presence of  $\alpha$ -amylase in saliva can reduce the viscoelasticity of the starch-containing thickened fluid, and the loss factor of the gel system increases with an increase in the concentration of  $\alpha$ -amylase. Static rheological test results reveal that  $\alpha$ -amylase enhances both the apparent viscosity coefficient  $K$  and the thixotropic loop area of the starch-containing thickened fluid. Examination of texture reveals no notable disparities in the texture of the authentic saliva (without/with enzyme inactivation) group, in contrast to the significant variances seen in the artificial saliva (without/with enzyme) group. There is a marked reduction in the hardness and chewiness of the enzyme-added system. [Conclusion] The findings indicate that  $\alpha$ -amylase decomposes starch in the starch-containing thickened fluid into small molecules such as oligosaccharides, resulting in the disintegration of the three-dimensional gel network linking starch and pectin.

**Keywords:** saliva;  $\alpha$ -amylase; starch-pectin mixed fluid; rheological properties; textural properties

吞咽障碍是各种吞咽困难的临床总称, 所影响的人群包括从婴儿到老年人的所有年龄段。《“健康中国 2030”规划纲要》中突出强调了要解决好老年人的健康问题。

食物的质构调整常被用于吞咽障碍的临床治疗, 添加食品增稠剂是食品质构调整中解决吞咽困难、降低呛咳的最有效方法之一<sup>[1]</sup>。增稠剂能改变食品的质地特性 (如增

**基金项目:** 国家一流专业 (食品质量与安全专业) 平台校级教学项目 (编号: 1110XJ0520120); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (编号: 202310353046); 浙江工商大学省属高校基本科研业务费项目 (编号: QRK22007)

**通信作者:** 胡小雪 (1993—), 女, 浙江工商大学实验师, 博士在读。E-mail: huxiaoxue@zjgsu.edu.cn

**收稿日期:** 2024-10-12 **改回日期:** 2025-01-31

**引用格式:** 苏渭, 刘芸, 陈伊琳, 等. 唾液  $\alpha$ -淀粉酶对淀粉基增稠流体流变及质构特性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 9-16.

**Citation:** SU Wei, LIU Yun, CHEN Yilin, et al. Influence of  $\alpha$ -amylase in saliva on rheological and textural properties of starch-containing thickened fluid[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 9-16.

加食团的黏度和内聚性<sup>[2]</sup>),减缓吞咽时长,给予咽部充足的反应时间,减少误吸,保证患者吞咽安全<sup>[3]</sup>。复配凝胶在物理、化学、生物、食品等众多领域备受关注,在增加流体黏稠度方面功效显著,因而常被用于老年膳食中。淀粉在食品加工中被广泛用作稳定剂、增稠剂和胶凝剂<sup>[4]</sup>。近年来有关淀粉和非淀粉多糖间的各种相互作用(如物理纠缠、范德华力和疏水相互作用)研究较多<sup>[5-7]</sup>,淀粉与多糖间的复杂相互作用可改变食品的结构、质地和稳定性。胡小雪<sup>[8]</sup>研究表明,淀粉—果胶复配会显著提高增稠流体的黏稠度,促进液体成团,达到延缓吞咽时间的效果。而马铃薯淀粉作为常用的食品增稠剂,具有保水性好、口味良好等优点。

在增稠流体的口腔加工过程中,唾液扮演着不可或缺的角色,作为与食物接触的第一种消化液,唾液由蛋白质、电解质和小分子有机化合物组成,是帮助食物口腔加工的关键因素。其中, $\alpha$ -淀粉酶是含量占唾液蛋白质总量最多的部分,其对淀粉的水解作用在咀嚼过程中开始,唾液使食物润湿,在短时间内水解溶解在唾液中的淀粉分子形成麦芽糖和糊精<sup>[9]</sup>,淀粉增稠体系的物理结构因此遭到一定程度的破坏,从而改变增稠体系整体的流变和质构性质。Anaïs 等<sup>[10]</sup>研究发现,在淀粉基厚化饮品(IDDSI 等级 3)的口腔消化模拟试验中,人类唾液中的 $\alpha$ -淀粉酶会使厚化水样品的初始黏度在 5 s 的体外口腔消化后降低 80%。这种黏度的下降归因于 $\alpha$ -淀粉酶对淀粉颗粒结构的破坏。唾液 $\alpha$ -淀粉酶酶活由于个体以及刺激方式的不同而表现出显著差异,老年人唾液分泌能力的下降会使得用于初步消化淀粉的 $\alpha$ -淀粉酶含量不足从而影响其对淀粉的消化能力<sup>[11]</sup>,进而影响增稠流体在口腔环境中的动态变化。同时,不同个体间 $\alpha$ -淀粉酶酶活差异也会造成质构感知的巨大差别,从而增加吞咽障碍风险。因此,在适用于老年群体和吞咽障碍患者群体的质构调整食品的研发中,需要考虑个体差异导致不同的唾液 $\alpha$ -淀粉酶对淀粉的作用,合理调整食物的黏稠度和质构性质,以确保吞咽安全。

研究拟以淀粉—果胶增稠流体为对象,对比真实唾液(灭酶/未灭酶)以及添加 $\alpha$ -淀粉酶的人造唾液对淀粉基增稠流体的流变以及质构特性的影响,明确唾液 $\alpha$ -淀粉酶差异在淀粉基质调整食品中的关键作用,确保增稠流体的安全性和有效性,以期唾液分泌较少和呛/误吸风险高的老年人设计开发出更加安全、稳定、有效的增稠流体产品提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

柑橘果胶(酯化度为 80.63%,半乳糖醛酸含量为

81.23%,HMP)、马铃薯淀粉、 $\alpha$ -淀粉酶:西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;

柠檬酸、二水合柠檬酸钠:分析纯,阿拉丁试剂(上海)有限公司;

$\alpha$ -淀粉酶测试盒 100T/96 样:南京建成生物工程研究所;

人造唾液 PH1843:福州飞净生物科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

剪切流变仪:Discovery HR-2 型,美国 TA 公司;

质地分析仪:TA.XT plus 型,英国 Stable Micro System 公司;

多功能酶标仪:BioTek Synergy H1 型,美国伯腾仪器有限公司;

恒温加热磁力搅拌器:DF-101S 型,巩义市予华仪器有限公司;

超低温冰箱:BCD-241TMBA 型,青岛海尔股份有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 淀粉—果胶复配增稠流体的制备 称取一定量通过 Henderson-Hasselbalch 方程计算一定体积 pH 为 3 的柠檬酸缓冲液所需的二水合柠檬酸钠及柠檬酸,溶解于水中,磁力搅拌至溶解,配制后的溶液使用 pH 计测量实际 pH 值。再称取一定量果胶溶于 pH 为 3 的柠檬酸缓冲溶液中(0.1 mol/L),磁力搅拌至溶解备用。称取淀粉加入已溶解好的果胶中,配成果胶(质量分数 2%)—淀粉(质量分数 6%)复配流体,搅拌均匀,95 °C 水浴搅拌 20 min 至淀粉完全糊化。冷却至 37 °C 备用<sup>[8]</sup>。淀粉—果胶复配增稠流体现配现用。

1.3.2 人体全唾液采集 共招募 8 名健康青年志愿者,4 男 4 女,平均年龄(23.25±1.09)岁,平均 BMI 为(20.40±2.12) kg/m<sup>2</sup>,均在完全自愿的情况下,充分了解试验程序并在试验前签署知情同意书。志愿者均为非吸烟者和非素食主义者,没有已知的口腔或其他健康问题,试验前至少 1 个月内未接受任何手术和药物治疗。此外,所有志愿者在过去 6 个月内均没有进行减肥/增重计划或其他特殊膳食经历。参照刘欢<sup>[12]</sup>的方法采集刺激性唾液(SS),收集适量唾液后转入离心管中,4 °C、2 680 r/min 离心 30 min 后取上清液,每位受试者取 1.5 mL 唾液,将所有受试者的唾液混匀后备用。唾液当天采集当天使用。

1.3.3 人造唾液及配制 人造唾液根据 ISO/TR10271 制得,pH 为 6.8,成分包含六水合氯化镁、二水合氯化钙、氯化钠、氯化钾和碳酸钾等。参照蔡慧芳<sup>[13]</sup>的人造唾液成分配方,在已购买的人造唾液中加入 2 g/L 的 $\alpha$ -淀粉酶溶液作为“人造唾液(加酶)”样品的酶含量。以此为基准,配制 $\alpha$ -淀粉酶质量浓度分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 g/L 加

酶—人造唾液。

1.3.4 唾液—淀粉增稠体系的配制 取 1 mL 淀粉—果胶复配流体,按体积比 10:1 加入 100  $\mu$ L 的新鲜唾液(灭酶/未灭酶)以及人造唾液(加酶/未加酶)样品,37  $^{\circ}$ C 孵育 1 min 以保持淀粉酶的最佳活性。其中,人造唾液加淀粉酶组配比为 2 g/L;真实唾液灭酶组使用 15 min 沸水浴加热灭酶。

1.3.5 唾液中淀粉酶活性测定 使用碘—淀粉比色法试剂盒配合酶标仪测定吸光度值(OD 值)。在测定管中加入 25  $\mu$ L 已 37  $^{\circ}$ C 温浴的 0.4 mg/mL 的底物缓冲液,待测样品 5  $\mu$ L,混匀后 37  $^{\circ}$ C 温浴 7.5 min,加入 25  $\mu$ L 0.01 mol/L 的碘液和 150  $\mu$ L 超纯水(空白管不加样品,加 5  $\mu$ L 超纯水)。混匀后测定 660 nm 处吸光度,按式(1)计算酶活。

$$\alpha = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times \frac{c_1 \times c_2}{1} \times \frac{30}{h} \times N, \quad (1)$$

式中:

$\alpha$ ——淀粉酶活性,U/mL;

$A_1$ ——空白孔吸光度值;

$A_2$ ——测量孔吸光度值;

$c_1$ ——底物缓冲液质量浓度,mg/mL;

$c_2$ ——底物缓冲液体积,mL;

$h$ ——淀粉酶温浴所需时间,min;

$N$ ——样品稀释倍数。

### 1.3.6 流变学测试

(1) 动态流变:取 1 mL 淀粉—果胶复配流体,按体积比 10:1 加入 100  $\mu$ L 新鲜唾液以及人造唾液样品,37  $^{\circ}$ C 孵育 1 min,立即将样品冷却后转移至流变仪样品台上。采用  $\theta$  夹角为 1 $^{\circ}$  的 CP50-1 锥板,温度 28  $^{\circ}$ C,扫描范围 0.1~100.0 rad/s,弛豫时间 120 s,测定样品的损耗模量、储能模量和损耗因子。其中损耗因子  $\tan \delta = G''/G'$ ,每组样品重复 3 次。

(2) 静态流变:采用与动态流变测试相同的夹具,温

度 28  $^{\circ}$ C,Flow-Sweep 稳态流动模式下,加入 1.2.1 中样品与唾液样品混合后,弛豫时间 120 s,设定 0.1~1 000.0  $s^{-1}$  的剪切速率,采集 21 个数据点(每个对数梯度采集 5 个数据点),每个数据点 30 s。每组样品重复 3 次,按式(2)计算剪切黏度。

$$\eta_s = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (2)$$

式中:

$\eta_s$ ——剪切黏度,Pa·s;

$\tau$ ——剪切应力,Pa;

$\gamma$ ——剪切速率, $s^{-1}$ 。

利用流变仪测定增稠流体/唾液混合物的剪切黏度,使用锥形板夹具(直径 40 mm,角度 2.017 $^{\circ}$ ),温度设定为 28  $^{\circ}$ C<sup>[14]</sup>,模拟口腔剪切速率 50  $s^{-1}$ <sup>[15]</sup>。

1.3.7 质构测试 取样品置于培养皿中,固定于质构仪台面上,使样品表面平整均匀,厚度控制在 5 mm。采用 P/50 探头,触发力为 0.05 N,测前速度为 1.00 mm/s,测试速度为 5.00 mm/s,测后速度为 5.00 mm/s,接触样品后下落距离为 3.000 mm,两次下落时间间隔为 5 s,模拟人的两次咀嚼动作。每个样品重复 3 次,采用 TPA 软件分析结果。

### 1.4 数据处理

采用 Origin 9.0 软件绘图,采用 SPSS 17.0 软件处理数据并进行显著性分析,其中  $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 真实唾液与人造唾液淀粉—果胶复配流体的流变与质构

2.1.1 唾液与淀粉—果胶复配流体的动态流变结果 动态黏度不仅与产品的实际性能直接相关,还可用于表征果胶与淀粉之间的三维网络结构<sup>[16]</sup>。由图 1 可知,添加真

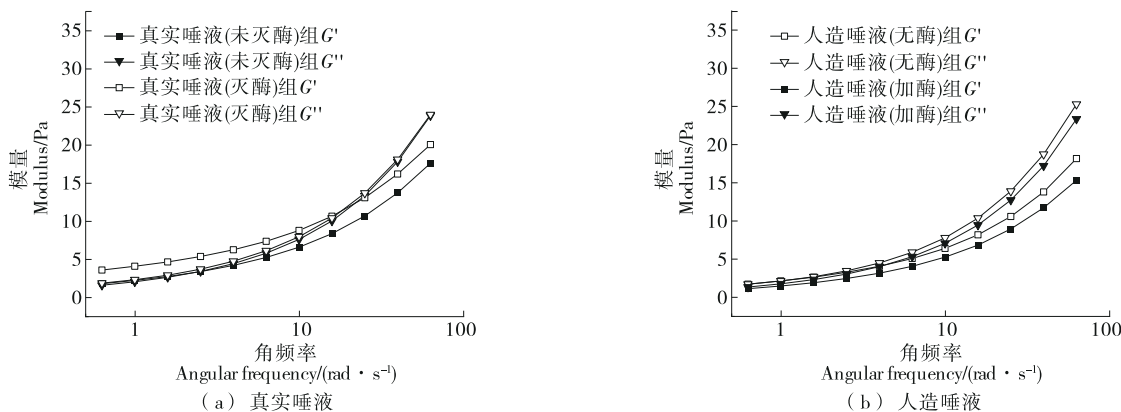


图 1 唾液与淀粉—果胶复配流体混合后的动态流变图谱

Figure 1 Dynamic rheology curves of starch-pectin mixed fluid after blending with saliva

实唾液(未灭酶/灭酶)后,淀粉—果胶复配流体的混合体系的储能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  均随着角频率的上升而增加,可归因于凝胶内部的摩擦增强,其黏弹性存在频率依赖,且灭酶唾液混合体系的  $G'$  和  $G''$  均大于未灭酶唾液混合体系。相较于灭酶后的唾液,未灭酶唾液整体的黏弹性更强。添加人造唾液(无酶/加酶)后,淀粉—果胶复配流体的混合体系的储能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  均随着角频率的上升而增加,其趋势与真实唾液(未灭酶/灭酶)组一致。添加人造唾液(无酶/加酶)组的  $G''$  均高于  $G'$ ,且随着角频率的增加, $G''$  与  $G'$  之间的距离增大,凝胶体系表现出较好的黏性,而无酶体系的曲线均低于有酶体系的,这可能是因为更多的淀粉酶分解了淀粉分子,产生了更多的小分子链段以及低聚糖,使得体系的分子间相互作用减弱。线性淀粉可以促进凝胶体系三维网络的形成,从而增加凝胶的弹性行为<sup>[17]</sup>,体系中更多的长链支链淀粉含量也会使得体系更富有弹性<sup>[18]</sup>。而淀粉酶通过切断  $\alpha$ -1,4 糖苷键来降低支链淀粉侧链长度,产生更多低相对分子质量的多糖和糊精<sup>[19]</sup>,最终结果表现为体系的黏弹性下降。

由图 2 可知,无论是人造唾液还是真实唾液,淀粉酶的存在均降低了混合体系的损耗因子( $\tan \delta$ ),随着淀粉分子被淀粉酶水解,淀粉的分子结构发生改变,原本能够形成凝胶网络结构的长链淀粉分子被切断成较短的片段,这些短片段无法提供足够的相互作用力并像长链淀粉那样相互缠绕和交联来维持凝胶结构,从而使凝胶网络结构崩解。

2.1.2 真实唾液与淀粉—果胶复配流体的静态流变结果 图 3 为真实唾液(未灭酶/灭酶)和人造唾液(无酶/加酶)与淀粉—果胶复配流体混合后的静态剪切流变曲线,

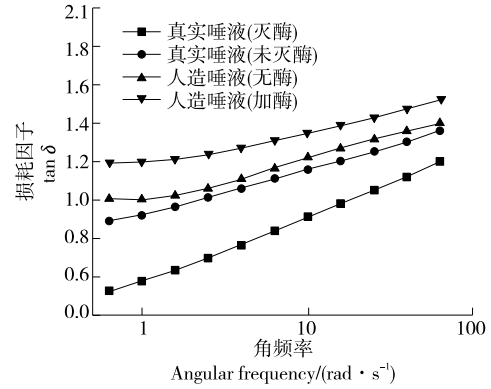


图 2 唾液与淀粉—果胶复配流体混合后的损耗因子  
Figure 2 Loss factor of starch-pectin mixed fluid after blending with saliva

各曲线对 Power law 模型的拟合结果见表 1。

由表 1 可知,所有  $R^2 > 0.97$ ,较接近于 1,说明样品混合体系对 Power law 具有较高的拟合度。稠度系数( $K$ )和流动行为指数( $n$ )代表凝胶的弹性特性, $n < 1$ ,体系均表现为剪切变稀<sup>[20]</sup>。灭酶唾液体系的  $K$  值比真实唾液混合体系的更高,可能是因为灭酶过程中高温处理使得唾液蛋白失去酶活,其对淀粉的酶解作用受到抑制,因此体系的  $K$  值较真实唾液体系更高<sup>[21]</sup>,与 Barranco 等<sup>[22]</sup>的结果类似。与添加真实唾液的体系相比,添加  $\alpha$ -淀粉酶的人造唾液混合体系的  $K$  值无显著性变化,可能是因为真实唾液体系中包含 1 000 多种蛋白质,远比人造唾液体系复杂得多。相比于高温灭酶处理后的唾液,未处理唾液中黏蛋白以及血清白蛋白、球蛋白等蛋白的存在降低了口腔中流体的湍流,增加了混合体系的总体黏度<sup>[23]</sup>。唾液中含有包括  $\alpha$ -淀粉酶在内的黏蛋白、溶菌酶、富酪蛋白、

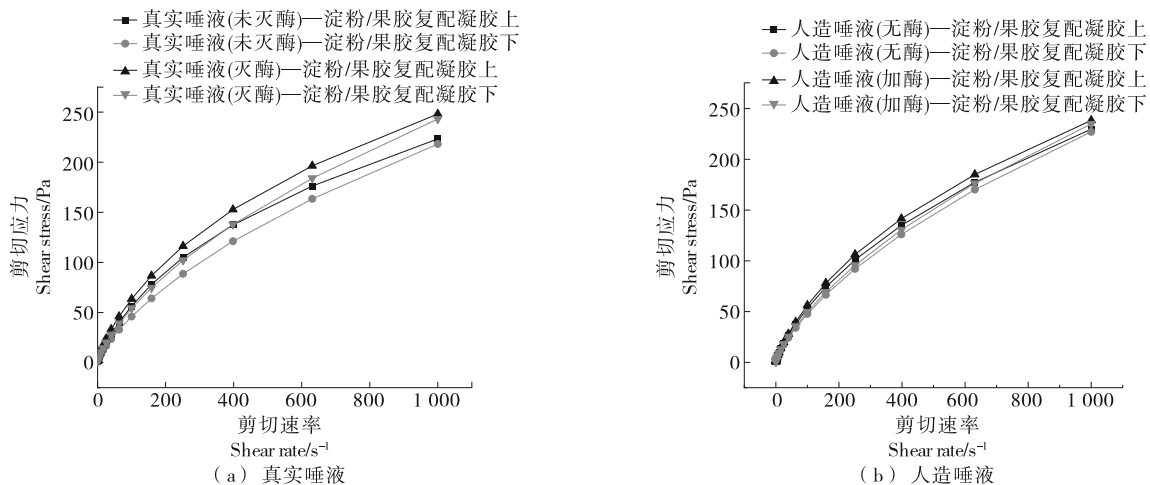


图 3 唾液与淀粉—果胶复配流体混合后的静态流变谱

Figure 3 Static rheology curves of starch-pectin mixed fluid after blending with saliva



表1 唾液与淀粉—果胶复配流体混合后的静态剪切曲线拟合结果<sup>†</sup>

Table 1 Fitting results of static shear curves of starch-pectin mixed fluid after blending with saliva

样品	触变环面积/ (Pa·s <sup>-1</sup> )	上行线			下行线		
		K/(Pa·s <sup>n</sup> )	n	R <sup>2</sup>	K/(Pa·s <sup>n</sup> )	n	R <sup>2</sup>
真实唾液(未灭酶)	11 805.49±134.44 <sup>a</sup>	2.10±0.05 <sup>c</sup>	0.70±0.01 <sup>b</sup>	0.997 5	1.59±0.02 <sup>d</sup>	0.73±0.00 <sup>a</sup>	0.999 9
真实唾液(灭酶)	10 940.88±798.69 <sup>b</sup>	4.07±0.22 <sup>a</sup>	0.59±0.01 <sup>d</sup>	0.972 5	2.65±0.14 <sup>a</sup>	0.65±0.01 <sup>d</sup>	0.973 9
人造唾液(加酶)	10 931.72±205.43 <sup>c</sup>	2.37±0.07 <sup>b</sup>	0.67±0.01 <sup>c</sup>	0.993 3	2.04±0.08 <sup>b</sup>	0.69±0.01 <sup>b</sup>	0.992 3
人造唾液(无酶)	7 721.27±450.16 <sup>d</sup>	2.29±0.14 <sup>b</sup>	0.71±0.01 <sup>a</sup>	0.996 6	2.02±0.08 <sup>c</sup>	0.68±0.01 <sup>c</sup>	0.986 6

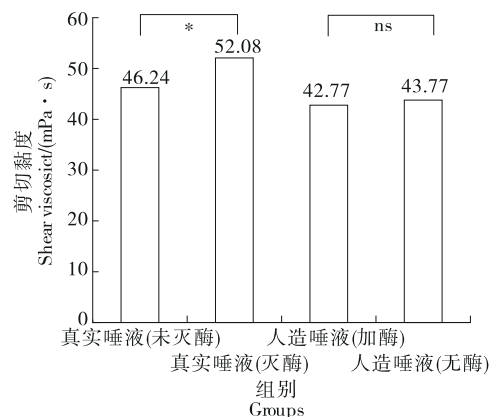
† 同列字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

脂肪酶等上千种蛋白质以及无机盐离子、代谢产物等<sup>[24]</sup>,其他唾液蛋白在食品口腔加工过程中对食品—唾液体系的黏度也起到了重要的影响。Beatriz等<sup>[25]</sup>研究表明,天然唾液的添加会降低淀粉增稠流体的稠度系数K值。

凝胶体系的流体曲线中上行线与下行线围合产生触变环面积,可以用来判断流体的稳定性,触变环面积越大,表明凝胶结构在剪切力的作用下所受到的破坏程度越大<sup>[26]</sup>。添加 $\alpha$ -淀粉酶后,唾液体系的触变环面积增大,表明加酶后体系的触变性增强,混合体系结构的形成与恢复能力更弱。淀粉分子被酶切后产生更短链的小分子,增加了淀粉的纠缠分子网络结构的复杂性,其混合体系的网状结构需更大的机械能以恢复<sup>[27]</sup>。这与真实唾液情况一致,即未加酶的体系和灭酶的体系的触变环面积均小于含酶体系。因此, $\alpha$ -淀粉酶是影响淀粉—果胶复配流体体系结构稳定性的重要因素。

由图4可知,灭酶唾液体系的剪切黏度比真实唾液混合体系的更高,而添加 $\alpha$ -淀粉酶的人造唾液混合体系的剪切黏度并无显著变化。

2.1.3 人造唾液与淀粉—果胶复配流体的质构性质 由表2可知,人造唾液混合体系(加酶)的硬度显著低于人造唾液(无酶)混合体系的,这与添加真实唾液(灭酶/未灭酶)的混合体系的趋势一致。体系中适当含量的支链淀粉的存在可助于凝胶体系形成更致密的网络结构,增强体系的硬度<sup>[28]</sup>。分子间相互作用程度越大,凝胶体系硬度越大<sup>[29]</sup>。因此,硬度的降低可能是淀粉被酶解为短链分子后,其结构分解,很难与果胶形成相互缠绕的三维网



\*表示差异显著( $P<0.05$ );ns表示差异不显著( $P>0.05$ )

图4 50 s<sup>-1</sup>剪切速率下唾液与淀粉—果胶复配流体混合体系的剪切黏度

Figure 4 Shear viscosity of mixture system of saliva and starch-pectin mixed fluid at shear rate of 50 s<sup>-1</sup>

络结构。

黏附性是指不同材料之间的物理吸引力强度<sup>[30]</sup>,可以表示为凝聚性和硬度的乘积<sup>[31]</sup>。真实唾液和灭酶唾液的淀粉—果胶复配流体在黏附性上无显著性差异,这与真实唾液中包括 $\alpha$ -淀粉酶在内的黏蛋白、溶菌酶、富酪蛋白、脂肪酶等上千种蛋白质有关,而在人造唾液模拟体系中,加入人造唾液(无酶)体系黏附性显著高于人造唾液(加酶)体系,淀粉被分解成糊精等低聚糖增多引起体系黏附性变小<sup>[29]</sup>。

咀嚼性可以表示为弹性和凝聚性的乘积,实质上是

表2 唾液与淀粉—果胶复配流体的质构性质<sup>†</sup>

Table 2 Textural properties of starch-pectin mixed fluid after blending with saliva

样品	硬度/N	黏附性/(N·s)	咀嚼性
真实唾液(未灭酶)—淀粉/果胶复配流体	1.463±0.145	1.152±0.045	116.52±14.29
真实唾液(灭酶)—淀粉/果胶复配流体	1.506±0.173	1.136±0.047	119.36±18.06
人造唾液(加酶)—淀粉/果胶复配流体	1.475±0.160	1.108±0.043	112.48±17.87
人造唾液(无酶)—淀粉/果胶复配流体	1.591±0.111 <sup>*</sup>	1.209±0.497 <sup>*</sup>	124.77±14.03 <sup>*</sup>

† \*表示 $P<0.05$ 。

将食品咀嚼到可吞咽的形态需要做的功<sup>[31]</sup>。咀嚼性高说明需要做的功多,更不容易咀嚼。添加真实唾液和灭酶唾液的淀粉—果胶复配流体的咀嚼性无显著性差异,而在人造唾液模拟体系中,加入 $\alpha$ -淀粉酶人造唾液的混合体系的咀嚼性显著低于未添加 $\alpha$ -淀粉酶的人造唾液体系,这与真实唾液的趋势一致,表明唾液中的淀粉酶分解了淀粉因而降低了混合体系的咀嚼性。

### 2.2 $\alpha$ -淀粉酶与淀粉—果胶复配流体的流变性

人在静息状态下和受刺激(如模拟咀嚼活动、口含刺激性液体等)状态下所分泌的唾液成分有所差异<sup>[32]</sup>,不同的唾液腺所分泌的分泌物差异较大<sup>[32]</sup>,且受到昼夜节律的影响,下午的唾液蛋白质浓度高于上午<sup>[33]</sup>。由于人在性别、年龄、生活习惯、饮食喜好以及是否摄入药物等方面存在差异,单个指标不能代表所有群体的情况<sup>[11]</sup>。因此,选取不同浓度的 $\alpha$ -淀粉酶溶液与淀粉—果胶流体进行混合,探究其流变、质构性质。

2.2.1  $\alpha$ -淀粉酶质量浓度与酶活性的关系 由图 5 可知,不同浓度下的 $\alpha$ -淀粉酶质量浓度与酶活呈良好的线性相关( $R^2=0.937\ 13$ ),且酶活随淀粉酶质量浓度的增加而增加。

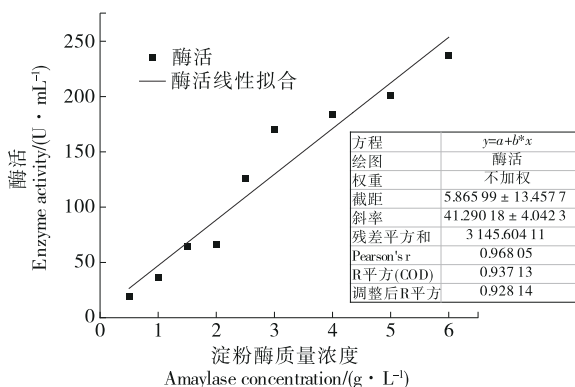


图 5  $\alpha$ -淀粉酶质量浓度与酶活的关系

Figure 5 Relationship between  $\alpha$ -amylase concentration and enzyme activity

2.2.2  $\alpha$ -淀粉酶质量浓度对淀粉—果胶复配流体流变性的影响 由图 6 可知,添加 $\alpha$ -淀粉酶后体系的损耗因子显著增加( $P>0.05$ )。损耗因子越小显示为更有弹性的流体性质,而分子间的强相互作用会表现出更高的弹性,因此,添加淀粉酶可将大分子淀粉分解为小分子的糊精等低聚糖,使得体系凝胶网络结构崩塌,弹性急剧降低。添加天然唾液会破坏增稠体系的结构,使体系的网络结构发生物理变化,变得不耐变形, $\tan \delta$ 也显著增加,这可能是唾液中的 $\alpha$ -淀粉酶导致的<sup>[25]</sup>。较低扫描频率(0.1~10.0 rad/s)下,损耗因子( $\tan \delta$ )的变化曲线无显

著性差异( $P>0.05$ )。较高扫描频率(10~100 rad/s)下,添加 3 g/L 的酶溶液可使混合体系的  $\tan \delta$  变化较其他浓度显著增加,而其他添加浓度下, $\tan \delta$  的变化曲线无显著性差异。表明添加高浓度的淀粉酶会使混合体系显示出更显著的黏性。酶可水解直链淀粉和支链淀粉的(1—4)键,使其形成更小的分子,破坏其结构<sup>[34]</sup>,产生更多的小分子链段,从而降低淀粉的相对浓度,使淀粉与果胶之间的三维网络结构倾向于崩解。

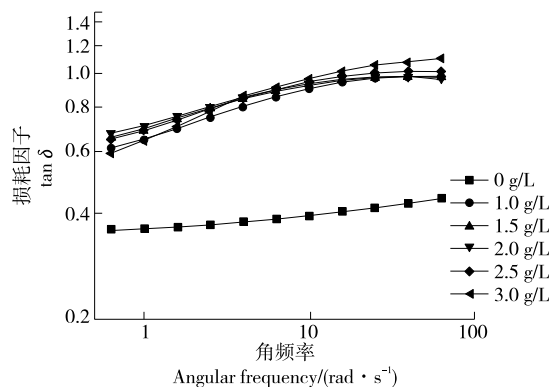


图 6 不同质量浓度 $\alpha$ -淀粉酶与淀粉—果胶流体体系混合后的损耗因子

Figure 6 Loss factor of starch-pectin mixed fluid after blending with  $\alpha$ -amylase concentrations

2.2.3  $\alpha$ -淀粉酶质量浓度与淀粉—果胶复配流体的质构性质 由表 3 可知,添加淀粉酶后,混合体系的凝胶硬度显著降低,且随着淀粉酶质量浓度的增加而减少。凝胶的硬度与分子间的相互作用以及纠缠程度成正比,淀粉酶可将淀粉酶解成糊精等低聚糖分子,由于短链之间的纠缠程度较低,淀粉链形成的网络结构不稳定,凝胶结构松散,因此体系硬度降低<sup>[35]</sup>。随着淀粉酶质量浓度的增加,体系的黏附性也降低,与前文结果一致。

表 3  $\alpha$ -淀粉酶添加量与淀粉—果胶复配流体的质构性质<sup>†</sup>  
Table 3 Textural properties of starch-pectin mixed fluid at different adding amounts of  $\alpha$ -amylase

酶质量浓度/ (g·L <sup>-1</sup> )	硬度/N	黏附性/ (N·s)	咀嚼性
0.0	$1.59 \pm 0.05^*$	$1.59 \pm 0.05^*$	$124.77 \pm 14.03^*$
1.0	$1.51 \pm 0.05^*$	$1.51 \pm 0.05^*$	$118.28 \pm 13.23^*$
1.5	$1.48 \pm 0.02^*$	$1.48 \pm 0.02^*$	$119.42 \pm 16.98^*$
2.0	$1.47 \pm 0.04^*$	$1.47 \pm 0.04^*$	$112.48 \pm 17.87^*$
2.5	$1.42 \pm 0.02^*$	$1.42 \pm 0.02^*$	$115.21 \pm 12.39^*$
3.0	$1.41 \pm 0.06^*$	$1.41 \pm 0.06^*$	$109.59 \pm 18.57^*$

<sup>†</sup> \*表示  $P<0.05$ 。

### 3 结论

研究探讨了唾液中 $\alpha$ -淀粉酶对淀粉基增稠流体的流变及质构性质的影响。结果表明,唾液淀粉酶可以通过分解含淀粉基增稠流体中的淀粉成小分子链段或低聚糖,使得淀粉分子与果胶分子之间的三维凝胶网络崩塌。随着 $\alpha$ -淀粉酶质量浓度的增加,淀粉基增稠流体的黏性、硬度、黏附性和咀嚼性降低,淀粉酶酶解淀粉使得淀粉大分子分解为小分子糊精等低聚糖,改变其网络结构。唾液中 $\alpha$ -淀粉酶会显著影响含淀粉增稠剂的吞咽困难产品的黏度,而黏稠度与吞咽障碍患者的吞咽安全息息相关。该研究仅考察了唾液中 $\alpha$ -淀粉酶对果胶—淀粉混合体系流变及质构性质的影响,后续可进一步探究真实唾液中其他成分对混合体系的流变学行为和质构指标的影响。

#### 参考文献

- [1] 陈建设, 吕治宏. 老年饮食障碍与老年食品:食品工业的挑战与机遇[J]. 食品科学, 2015, 36(21): 310-315.  
CHEN J S, LÜ Z H. Eating disorders of elderly: challenges and opportunities of food industry[J]. Food Science, 2015, 36(21): 310-315.
- [2] TORRES O, YAMADA A, RIGBY N M, et al. Gellan gum: a new member in the dysphagia thickener family[J]. Biotribology, 2019, 17: 8-18.
- [3] 陈伟, 陈建设. 食品的质构及其性质[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 377-384.  
CHEN W, CHEN J S. Food texture and properties[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(1): 377-384.
- [4] LIU W M, WANG R R, LI J W, et al. Effects of different hydrocolloids on gelatinization and gels structure of chestnut starch[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106925.
- [5] 满昊, 刘富俊, 葛静慧, 等. 基于质构特性对复合虾糜凝胶性状的优化[J]. 食品与机械, 2023, 39(6): 186-194.  
MAN H, LIU F F J, GE J H, et al. Optimization of compound shrimp mince gel based on texture properties[J]. Food & Machinery, 2023, 39(6): 186-194.
- [6] 薛山, 林靖娟. 菊苣多糖对蓝圆鲹鱼丸质构与贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 106-115.  
XUE S, LIN J J. Effect of chicory polysaccharide on the texture and storage quality of round scad fish ball[J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 106-115.
- [7] 李铭, 盛政, 杨亚雯, 等. 椰子粉—小麦粉混合面团的质构和发酵流变学特性[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 14-18.  
LI M, SHEN Z, YANG Y W, et al. Study on properties of the texture and fermentation rheology of coconut flour-wheat flour mixed dough[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 14-18.
- [8] 胡小雪. 果胶—淀粉混合体系的凝胶及消化性质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018: 21-34.  
HU X X. Research on gel and digestion properties of pectin-starch mixed system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018: 21-24.
- [9] FRIED M, ABRAMSON S, MEYER J H. Passage of salivary amylase through the stomach in humans[J]. Digestive Diseases and Sciences, 1987, 32(10): 1 097-1 103.
- [10] LAVOISIER A, BOUDRAG S, RAMAIOLI M. Effect of  $\alpha$ -amylase and pH on the rheological properties of thickened liquids containing starch in *in vitro* conditions relevant to oral processing and swallowing[J]. Journal of Texture Studies, 2022, 53(4): 550-557.
- [11] 覃兰茜. 唾液分泌与饮食喜好相关性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2019: 34-36.  
QIN L X. Investigation of the correlation between salivary secretion and food preference[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019: 34-36.
- [12] 刘欢. 口腔生理特征、唾液流变特性及其与咀嚼能力的关系研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2019: 27-29.  
LIU H. Relationship study between oral physiological characteristics, salivary rheological properties and chewing ability[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019: 27-29.
- [13] 蔡慧芳. “口腔”摩擦学在质构感知上的应用研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017: 28-31.  
CAI H F. Applications of "Oral" Tribology in studying texture and sensory perception[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017: 28-31.
- [14] YUAN B, RITZOULIS C, CHEN J S. Extensional and shear rheology of okra hydrocolloid-saliva mixtures[J]. Food Research International, 2018, 106: 204-212.
- [15] SHAMA F, SHERMAN P. Identification of stimuli controlling the sensory evaluation of viscosity ii. *oral methods*[J]. Journal of Texture Studies, 1973, 4(1): 111-118.
- [16] CHAISAWANG M, SUPHANTHARIKA M. Effects of guar gum and xanthan gum additions on physical and rheological properties of cationic tapioca starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 61(3): 288-295.
- [17] LI G T, ZHU F. Rheological properties in relation to molecular structure of quinoa starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 767-775.
- [18] XING B, YANG X S, ZOU L, et al. Starch chain-length distributions determine cooked foxtail millet texture and starch physicochemical properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 320: 121240.

- [19] LEÓN A, DURÁN E, DE BARBER C B. Firming of starch gels and amylopectin retrogradation as related to dextrin production by  $\alpha$ -amylase[J]. *Zeitschrift Für Lebensmitteluntersuchung und -Forschung A*, 1997, 205(2): 131-134.
- [20] TECHAWIPHARAT J, SUPHANTHARIKA M, BEMILLER J N. Effects of cellulose derivatives and carrageenans on the pasting, paste, and gel properties of rice starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 73(3): 417-426.
- [21] KASIM N, ARIFFIN S, SHAHIDAN M, et al. Stability of lactate dehydrogenase, aspartate aminotransferase, alkaline phosphatase and tartrate resistant acid phosphatase in human saliva and gingival crevicular fluid in the presence of protease inhibitor[J]. *Archives of Biological Sciences*, 2013, 65(3): 1 131-1 140.
- [22] BARRANCO T, RUBIO C P, TVARIJONAVICIUTE A, et al. Changes of salivary biomarkers under different storage conditions: effects of temperature and length of storage[J]. *Biochemia Medica*, 2019, 29(1): 010706.
- [23] PARKINSON C, SHERMAN P. The influence of turbulent flow on the sensory assessment of viscosity in the mouth[J]. *Journal of Texture Studies*, 1971, 2(4): 451-459.
- [24] DENNY P, HAGEN F K, HARDT M, et al. The proteomes of human parotid and submandibular/sublingual gland salivas collected as the ductal secretions[J]. *Journal of Proteome Research*, 2008, 7(5): 1 994-2 006.
- [25] HERRANZ B, CRIADO C, POZO-BAYON M A, et al. Effect of addition of human saliva on steady and viscoelastic rheological properties of some commercial dysphagia-oriented products[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106403.
- [26] 吴其晔, 巫静安. 高分子材料流变学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 27-33.  
WU Q Y, WU J A. *Polymer rheology*[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014: 27-33.
- [27] 董贝贝. 八种淀粉糊化和流变特性及其与凝胶特性的关系[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017: 44-47.  
DONG B B. Pasting, rheological properties and the relationship with gel properties of eight kinds of starch[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2017: 44-47.
- [28] JIANG C Y, YANG X, LIN S Y, et al. Impact of corn starch molecular structures on texture, water dynamics, microstructure, and protein structure in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gel[J]. *Foods*, 2024, 13(5): 675.
- [29] KAUR L, SINGH J, SINGH H, et al. Starch-cassia gum interactions: a microstructure-rheology study[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111(1): 1-10.
- [30] PELEG M. The instrumental texture profile analysis revisited[J]. *Journal of Texture Studies*, 2019, 50(5): 362-368.
- [31] 马莹. 马铃薯全粉蛋糕工艺研究及品质分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2018: 27-28.  
MA Y. Study on the process and quality of potato podwer cake[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018: 27-28.
- [32] EKSTRÖM J, KHOSRAVANI N, CASTAGNOLA M, et al. Saliva and the control of its secretion[M]// *Dysphagia*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 19-47.
- [33] DODDS M W J, JOHNSON D A, YEH C K. Health benefits of saliva: a review[J]. *Journal of Dentistry*, 2005, 33(3): 223-233.
- [34] LAGUNA L, MANICKAM I, ARANCIBIA C, et al. Viscosity decay of hydrocolloids under oral conditions[J]. *Food Research International*, 2020, 136: 109300.
- [35] WANG N, WU L R, YANG J L, et al. Lotus starch/bamboo shoot polysaccharide composite system treated *via* ultrasound: Pasting, gelling properties and multiscale structure[J]. *Food Research International*, 2023, 174: 113605.