

改善吞咽障碍饮食安全的海藻酸-Ca²⁺增稠剂的制备及其流变特性

文梦婷¹,彭双阳¹,董红兵²,倪学文^{1*}

(1. 湖北工业大学 生命科学与健康工程学院,湖北 武汉 430068;2. 武汉商学院 食品科技学院,湖北 武汉 430056)

摘要: 为保证吞咽障碍者饮食的安全,通常会选择在食物中添加增稠剂,而增稠剂的流变特性对于定制和开发吞咽障碍者饮食至关重要。该文通过在0.2%的海藻酸钠溶液中添加少量柠檬酸钙和D-葡萄糖- δ -内酯开发海藻酸-Ca²⁺结构流体增稠剂,制备轻度、中度和极度黏稠的海藻酸-Ca²⁺溶液,并对其流变特性进行评估。结果表明,所有海藻酸-Ca²⁺溶液均表现出显著的剪切稀化行为($n<0.25$),主要由柠檬酸钙驱动。温度和放置时间是影响黏度的主要因素,黏度随温度的升高而降低,放置12h内溶液黏度稳定;海藻酸-Ca²⁺溶液表现出弱凝胶特性,与黄原胶相似,具有一般黏弹性特征以及有限的屈服应力,可满足安全吞咽的要求。

关键词: 海藻酸钠;增稠剂;流变特性;屈服应力;吞咽障碍

Preparation and Rheological Properties of Alginate-Ca²⁺ Thickeners for Improving Dietary Safety in Dysphagia

WEN Mengting¹, PENG Shuangyang¹, DONG Hongbing², NI Xuewen^{1*}

(1. School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China;

2. College of Food Science and Technology, Wuhan Business University, Wuhan 430056, Hubei, China)

Abstract: Thickeners are often added to food to ensure the dietary safety of patients with dysphagia, and the rheological properties of thickeners are critical for customizing and developing diets for patients with dysphagia. In this paper, the alginate-Ca²⁺ structural fluid thickeners were developed by adding small amounts of calcium citrate and D-glucose- δ -lactone to 0.2% sodium alginate solutions. As a result, mildly, moderately, and extremely thick alginate-Ca²⁺ solutions were prepared. In addition, their rheological properties were evaluated. The results showed that all alginate-Ca²⁺ solutions exhibited significant shear-thinning behavior ($n<0.25$), which was mainly driven by calcium citrate. Temperature and placement time were the main factors affecting the viscosity, which decreased with increasing temperature and stabilized within 12 hours of placement. The alginate-Ca²⁺ solutions exhibited weak gel properties, similar to xanthan gum, with general viscoelastic characteristics and limited yield stress, which could ensure safe swallowing.

Key words: sodium alginate; thickener; rheological property; yield stress; dysphagia

引文格式:

文梦婷,彭双阳,董红兵,等.改善吞咽障碍饮食安全的海藻酸-Ca²⁺增稠剂的制备及其流变特性[J].食品研究与开发,2025,46(4):126-132.

WEN Mengting, PENG Shuangyang, DONG Hongbing, et al. Preparation and Rheological Properties of Alginate-Ca²⁺ Thickeners for Improving Dietary Safety in Dysphagia[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 126-132.

基金项目:中国高校产学研创新基金项目(2022BL024);湖北工业大学绿色工业科技引领计划项目(CPYF2018004)

作者简介:文梦婷(1998—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食品化学及天然高分子材料。

*通信作者:倪学文(1977—),女(汉),教授,博士,研究方向:食品化学及天然高分子材料。

吞咽障碍者难以将食物从口腔安全地送到胃部,严重者因呛水导致窒息或吸入性肺炎而死亡。增稠剂常被应用于吞咽障碍者饮食,以改善吞咽的安全性^[1]。这是因为增稠的食物在吞咽过程中流动缓慢,可为患者提供足够的时间来控制会厌软骨,防止食物误吸入肺部^[2]。黏度是吞咽障碍者食物的重要流变参数,了解和控制增稠剂的流变特性是其在吞咽障碍者饮食中应用的基础^[3]。

海藻酸钠(sodium alginate, SA)是从褐藻类的海带中提取的天然高分子多糖,由1,4-糖苷键连接的 α -L-古洛糖醛酸和 β -D-甘露糖醛酸组成。SA具有胶凝能力和良好的生物相容性,可作为食品添加剂,也可用于生物医学材料^[4]。SA易与一些二价阳离子结合(如 Ca^{2+}),形成凝胶。SA的大多数应用都是基于其与 Ca^{2+} 结合形成凝胶的能力。例如,海藻酸- Ca^{2+} 凝胶系统可作为软骨再生的支架,用于工程骨科组织的3D生物打印^[5]。将益生菌悬浮液与SA溶液混合,然后滴入氯化钙溶液形成微珠,封装益生菌,可提高其存活率和稳定性^[6]。SA凝胶的形成有两种方法:外凝胶化和内凝胶化。外凝胶化是直接SA溶液中加入活性 Ca^{2+} (如氯化钙),由于 Ca^{2+} 与SA之间的相互作用迅速,这种离子交联具有简单、成本低等优点;然而,在交联的区域会嵌入非交联的海藻酸,通常会形成具有较差机械性能的非均匀凝胶^[7]。内凝胶化是通过酸诱导,将惰性 Ca^{2+} (如柠檬酸钙)转化为活性 Ca^{2+} ,并缓慢扩散到SA溶液中形成均匀的凝胶^[8-9]。将海藻酸- Ca^{2+} 作为增稠剂用于吞咽障碍者的饮食,目前鲜见相关研究。

本文采用内凝胶化方法,实现 Ca^{2+} 和SA结合形成凝胶的速率与 Ca^{2+} 扩散的时间相匹配,制备结构均匀的流体凝胶。利用D-葡萄糖- δ -内酯诱导柠檬酸钙中 Ca^{2+} 释放,通过调节钙含量,制备不同稠度海藻酸- Ca^{2+} 增稠溶液,探讨海藻酸- Ca^{2+} 的增稠效果、黏弹性、屈服应力和触变性等流变行为,以期为其在吞咽障碍者饮食中的应用提供理论数据。

1 材料与方法

1.1 材料

海藻酸钠(分子量为 5.61×10^5 g/mol):青岛明月海藻集团有限公司;黄原胶(xanthan gum, XG):Axelis(上海)有限公司;D-葡萄糖- δ -内酯(食品级):上海洛洛食品添加剂有限公司;柠檬酸钙(分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

滚轴式搅拌机(MX-T6-S):龙腾实验室仪器有限公司;磁力搅拌机(ZNCL-S-5D):武汉科尔仪器设备有限公司;流变仪(Haake RheoStress6000):美国 Thermo Scientific 公司。

1.3 样品制备

在纯水中加入SA粉末,搅拌24 h,制得SA溶液(0.2%,质量分数)。向SA溶液中加入适量柠檬酸钙(0.032~0.040 g),充分混合后,再加入相应比例的D-葡萄糖- δ -内酯,搅拌均匀后静置24 h,制得海藻酸- Ca^{2+} 溶液。根据日本吞咽障碍康复协会的黏度分类标准^[10],制备的海藻酸- Ca^{2+} 溶液分为3个稠度:轻度(50~150 mPa·s)、中度(150~300 mPa·s)和极度黏稠(300~500 mPa·s),分别记为Alg- Ca^{2+} 1、Alg- Ca^{2+} 2和Alg- Ca^{2+} 3。XG作为针对吞咽障碍者饮食常用的多糖增稠剂,设置为对照样品,相应稠度的XG溶液分别记为XG1、XG2和XG3。

1.4 稳态剪切扫描测量

使用流变仪进行稳态剪切扫描测量,选择直径为40 mm、锥角为 1° 、间隙为0.052 mm的锥板。试验前,所有样品均在 50 s^{-1} 的剪切速率下预剪切30 s,然后进行至少5 min的平衡,使样品处于相同的初始状态。样品的剪切速率范围为 $0.1 \sim 1\,000 \text{ s}^{-1}$,测量温度为10、20 $^\circ\text{C}$ 和50 $^\circ\text{C}$ 。稳态剪切扫描的数据用幂律模型拟合,公式如下。

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}$$

式中: K 为稠度指数, $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流动指数(无量纲); η 为黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

进一步评估黏度的稳定性,在20 $^\circ\text{C}$ 下,测量不同放置时间样品的 η_{50} (剪切速率为 50 s^{-1} 时的黏度)。

1.5 动态频率扫描测量

使用流变仪,在线性黏弹区内,应变恒定为1%,角频率扫描范围为0.62~62.83 rad/s。作为凝胶性能的衡量标准,测定样品的储能模量(G')和损耗模量(G'')。

1.6 屈服应力测量

在0.1~60 Pa的应力范围内,恒定角频率为6.28 rad/s,对样品进行应力扫描,线性黏弹区范围内的极限应力值为屈服应力。

1.7 触变性测量

在旋转连续模式下,将剪切速率从 0.1 s^{-1} 提高到 400 s^{-1} ,然后再从 400 s^{-1} 降低到 0.1 s^{-1} ,监测黏度的变化,并计算相对触变面积(relative thixotropic area, RTA)。

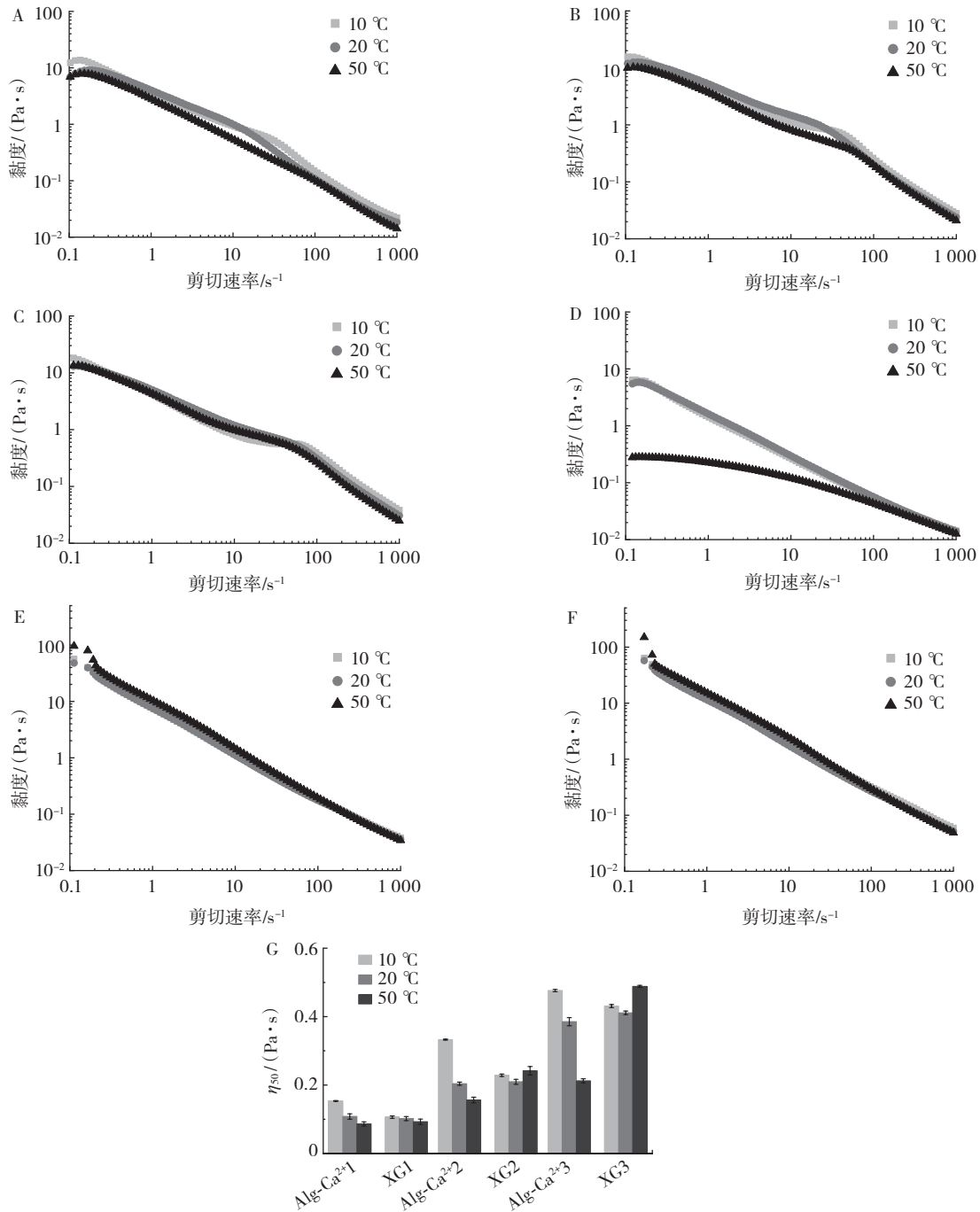
1.8 数据分析

每个试验至少进行3次重复。采用Origin 2021进行图表绘制,SPSS软件对数据进行显著性差异分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 温度对黏度的影响

海藻酸- Ca^{2+} 溶液和XG溶液在10、20 $^\circ\text{C}$ 和50 $^\circ\text{C}$ 时的稳态剪切曲线和 η_{50} 变化如图1所示。对样品的稳态剪切数据进行幂律模型拟合,结果见表1。



A. Alg-Ca²⁺1; B. Alg-Ca²⁺2; C. Alg-Ca²⁺3; D. XG1; E. XG2; F. XG3; G. 不同温度下海藻酸-Ca²⁺溶液和 XG 溶液的 η_{50} 。

图 1 不同温度下海藻酸-Ca²⁺溶液和 XG 溶液的稳态剪切曲线

Fig.1 Steady-state shear curves for alginate-Ca²⁺ and XG solutions at different temperatures

表 1 不同温度下海藻酸-Ca²⁺溶液和 XG 溶液的幂律参数(K,n)

Table 1 Power-law parameters (K,n) for alginate-Ca²⁺ and XG solutions at different temperatures

增稠剂	幂律参数								
	$K_1/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n_1	R_1^2	$K_2/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n_2	R_2^2	$K_3/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n_3	R_3^2
Alg-Ca ²⁺ 1	5.435	0.208 ^{Ad}	0.938	3.460	0.256 ^{Aab}	0.994	3.166	0.222 ^{Ab}	0.986
Alg-Ca ²⁺ 2	7.625	0.215 ^{Ad}	0.984	6.293	0.214 ^{Ab}	0.960	5.384	0.227 ^{Ab}	0.927
Alg-Ca ²⁺ 3	8.071	0.250 ^{Abc}	0.921	7.281	0.236 ^{Ab}	0.961	6.838	0.226 ^{Ab}	0.904
XG1	1.120	0.358 ^{Ba}	0.994	1.181	0.340 ^{Ba}	0.996	0.613	0.469 ^{Aa}	0.999
XG2	4.261	0.261 ^{Ab}	0.971	5.064	0.262 ^{Aab}	0.989	4.912	0.250 ^{Ab}	0.994
XG3	12.080	0.221 ^{Acd}	0.996	11.581	0.225 ^{Ab}	0.993	15.640	0.158 ^{Bc}	0.986

注:下标“1”、“2”和“3”分别代表 10、20 °C 和 50 °C;同行不同大写字母、同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

由图 1 可知,所有样品的黏度随着剪切速率的增加而降低,表现出剪切稀化行为。由表 1 可知,所有样品 n 值均小于 1,为假塑性流体,即剪切速率增加时黏度会降低。剪切力的施加破坏了海藻酸- Ca^{2+} 溶液中的部分键桥及三维网络结构,导致其黏度的下降^[11]。对于 XG 溶液,剪切作用破坏了分子间氢键和分子缠结形成的聚集体,且聚集体被破坏的速度大于其恢复速度,造成黏度下降^[12]。剪切稀化(假塑性流体)是一种有利于吞咽障碍者饮食的特性,因为食物可在稳定状态下保持高黏度,在施加特定的力时可轻松倾倒和吞咽^[13]。海藻酸- Ca^{2+} 溶液的 n 值不受温度(10、20 °C 和 50 °C)的影响,而 XG 溶液的 n 值会随着温度和浓度的变化而改变。在轻度和中度黏稠水平,海藻酸- Ca^{2+} 溶液的 n 值低于 XG 溶液。研究发现,高 n 值会导致口感黏稠,而低 n 值会导致口感光滑并有利于吞咽障碍者吞咽,从而带来愉悦和轻盈的感觉^[14]。

由图 1G 可知,海藻酸- Ca^{2+} 溶液的 η_{50} 随温度升高而降低,这可能是由于温度升高导致分子运动加快,引起交联区域的二聚体解体,从而降低了黏度^[15]。不同稠度的海藻酸- Ca^{2+} 溶液对温度的依赖性不同,当温度从 10 °C 升至 50 °C 时,Alg- Ca^{2+} 1 的 η_{50} 下降了 43.79%,而 Alg- Ca^{2+} 2 和 Alg- Ca^{2+} 3 的 η_{50} 则分别下降了 53.01% 和 55.46%。温度对 XG1 的 η_{50} 的影响与海藻酸- Ca^{2+} 溶液相同,而对 XG2 和 XG3 的 η_{50} 的影响与海藻酸- Ca^{2+} 溶液不同。当温度升至 20 °C 时,XG2 和 XG3 的黏度降低;而在 20~50 °C 之间,其黏度随温度升高而增加,这表明温度对 XG 溶液黏度的影响与浓度有关。

2.2 黏度的稳定性

海藻酸- Ca^{2+} 溶液和 XG 溶液的黏度随放置时间的变化见表 2。

表 2 不同放置时间的海藻酸- Ca^{2+} 溶液和 XG 溶液的 η_{50}
Table 2 η_{50} of alginate- Ca^{2+} and XG solutions with different placement time

放置 时间/h	$\eta_{50}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$						
	0.2% SA	Alg- Ca^{2+} 1	Alg- Ca^{2+} 2	Alg- Ca^{2+} 3	XG1	XG2	XG3
0	0.015 0 ^b	0.106 ^d	0.199 ^d	0.385 ^e	0.102 ^a	0.206 ^b	0.405 ^a
12	0.015 1 ^b	0.107 ^{cd}	0.200 ^d	0.386 ^e	0.103 ^a	0.207 ^{ab}	0.403 ^a
24	0.015 1 ^b	0.108 ^e	0.203 ^e	0.385 ^e	0.102 ^a	0.209 ^a	0.404 ^a
48	0.015 2 ^{ab}	0.158 ^b	0.256 ^b	0.420 ^b	0.090 2 ^b	0.184 ^c	0.387 ^b
72	0.015 6 ^{ab}	0.185 ^a	0.341 ^a	0.482 ^a	0.088 2 ^{bc}	0.181 ^{cd}	0.389 ^{ab}
96	0.015 9 ^a	0.182 ^a	0.344 ^a	0.497 ^a	0.086 1 ^c	0.179 ^d	0.380 ^b

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

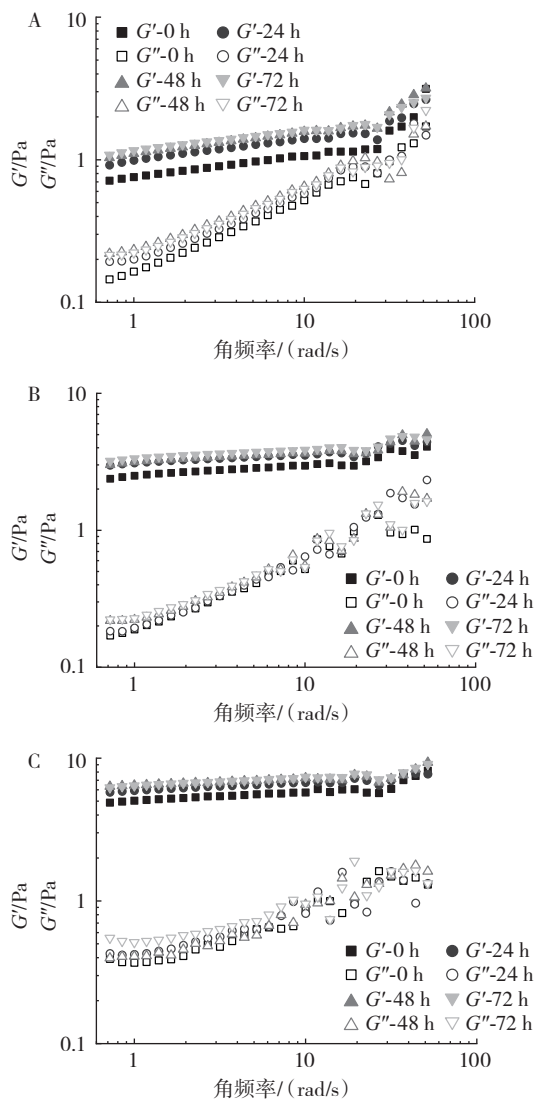
由表 2 可知,在 12 h 内,所有海藻酸- Ca^{2+} 溶液的 η_{50} 都保持相对一致,表明至少在 12 h 内具有良好的黏度稳定性,XG 溶液也显示了相同的结果。0.2% SA 溶液的黏度非常低,显然不适合用于吞咽障碍者饮食。海藻酸- Ca^{2+} 溶液的 η_{50} 在 24~72 h 内增加,然后趋于稳

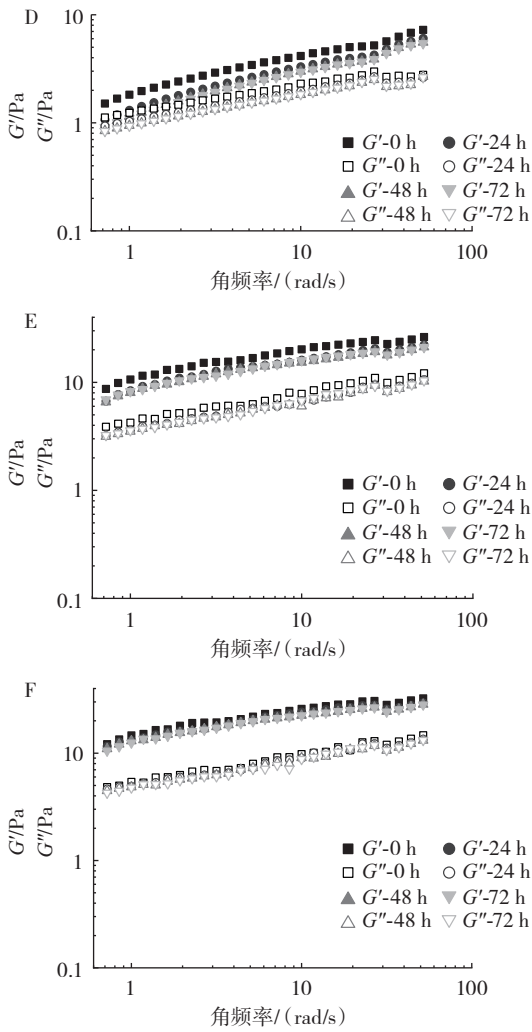
定。不同海藻酸- Ca^{2+} 溶液的黏度变化程度不同,Alg- Ca^{2+} 1、Alg- Ca^{2+} 2 和 Alg- Ca^{2+} 3 的 η_{50} 分别增加了 71.30%、67.98% 和 25.19%。黏度随放置时间发生变化,这可能是因为 Ca^{2+} 与 SA 交联后,放置时间影响了海藻酸- Ca^{2+} 溶液的内部结构。不同的海藻酸- Ca^{2+} 溶液黏度上升的差异是由于高浓度柠檬酸钙释放更多的 Ca^{2+} 与 SA 快速交联,分子流动性随着交联度的增加而降低,导致 Ca^{2+} 扩散的速率降低^[16]。因此,随着柠檬酸钙含量的增加,黏度增加的百分比下降。随着放置时间的延长,所有 XG 溶液的黏度整体呈逐渐下降趋势。

2.3 黏弹特性

虽然对吞咽障碍者食物的研究大多集中在黏度上,但食物的黏弹性对吞咽的难易程度也很重要,它可以揭示对安全吞咽的整体影响。海藻酸- Ca^{2+} 溶液和 XG 溶液的动态频率扫描曲线见图 2。

由图 2 可知,所有样品的 G' 和 G'' 值都随着角频率的增加而增加,没有出现交点, $\tan\delta(G''/G')$ 值大于 0.1,这是典型的弱凝胶行为^[17]。根据 Jo 等^[14]的研究,弱凝





A. Alg-Ca²⁺1; B. Alg-Ca²⁺2; C. Alg-Ca²⁺3; D. XG1; E. XG2; F. XG3。

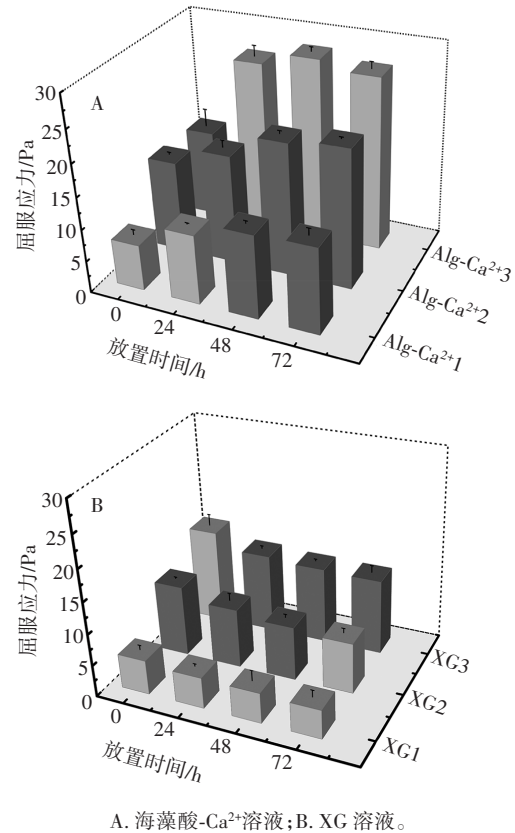
图2 海藻酸-Ca²⁺溶液和 XG 溶液的动态频率扫描曲线
Fig.2 Dynamic frequency sweeps of alginate-Ca²⁺ and XG solutions

胶被认为是安全吞咽的流变学标准。海藻酸-Ca²⁺溶液的 G' 和 G'' 值随柠檬酸钙含量的增加而增加。Ca²⁺ 导致藻酸盐链的聚葡萄糖酸盐序列二聚化, 形成含有 Ca²⁺ 空腔的带状聚合物(即蛋盒二聚体); 随着有序二聚体的聚合, 簇的尺寸不断增大, 最终形成连续的三维交联网络^[9, 18]。随着释放的 Ca²⁺ 增加, 更多的藻酸盐链在交联区形成二聚体, 导致每个分子的结合强度增加^[4], 表现为模量的增加。XG 溶液随着浓度的增加, G' 和 G'' 值也随之增加, 这是因为更多分子链的缠结增加了机械强度。此外, 海藻酸-Ca²⁺ 溶液的 G' 和 G'' 值随着放置时间的延长缓慢增加, 这是因为 Ca²⁺ 在较长时间的扩散与新交联的形成之间的平衡^[16]。XG 溶液的 G' 和 G'' 值随着放置时间的延长而下降。

2.4 屈服行为

“结构流体”的定义为具有屈服应力的流体, 它是一种流变特性, 与人们吞咽流质食物的感觉难度有

关^[19]。屈服应力是启动流体流动所需的最小剪切力, 可预测食物在口中的处理过程。作为破坏材料结构所需的单位面积力, 屈服应力可与材料中连续网络结构的强度联系起来^[20]。当施加的力低于屈服应力时, 舌头就不能有效地传送食物。因此, 吞咽障碍者必须注意到即将吞咽的食物的屈服行为。海藻酸-Ca²⁺ 溶液和 XG 溶液的屈服应力值随浓度和放置时间的变化如图 3 所示。



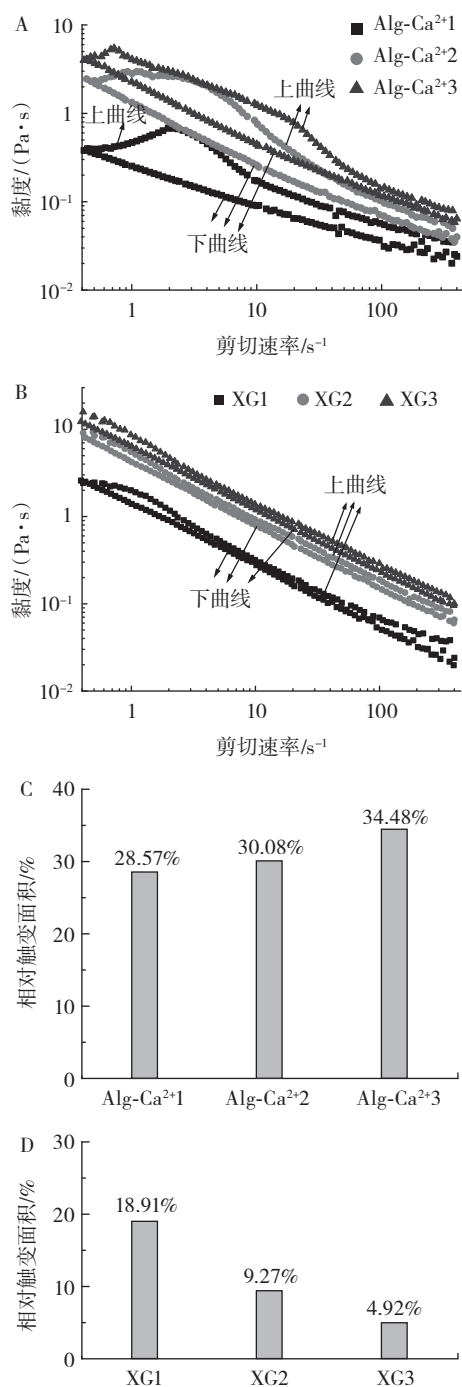
A. 海藻酸-Ca²⁺ 溶液; B. XG 溶液。

图3 海藻酸-Ca²⁺ 溶液和 XG 溶液的屈服应力值
Fig.3 Yield stress values of alginate-Ca²⁺ and XG solutions

由图 3 可知, 在 0 h, 海藻酸-Ca²⁺ 溶液的屈服应力值与 XG 溶液相似, Alg-Ca²⁺1、Alg-Ca²⁺2 和 Alg-Ca²⁺3 的屈服应力分别为 7.14、14.11 Pa 和 13.63 Pa; 对应相同稠度的 XG1 溶液, 屈服应力分别为 5.44、11.08 Pa 和 14.63 Pa。随着放置时间的延长, 海藻酸-Ca²⁺ 溶液和 XG 溶液的屈服应力值呈现出不同的变化趋势。海藻酸-Ca²⁺ 溶液的屈服应力值整体随着放置时间的延长而增加, 而 XG 溶液的屈服应力值则降低; 增减程度分别由柠檬酸钙含量和 XG 溶液浓度决定。

2.5 触变性分析

触变性是指流体在受到剪切、搅拌或其他作用力时, 其黏度会随着时间的推移而降低, 并在作用结束时逐渐恢复, 这与结构的破坏和随后的部分建立相对应, 表明搅拌或静置可用于帮助调整食物的质地^[21]。海藻酸-Ca²⁺ 溶液和 XG 溶液的滞后环和 RTA 值见图 4。



A. 海藻酸- Ca^{2+} 溶液的滞后环; B. XG溶液的滞后环; C. 海藻酸- Ca^{2+} 溶液的相对触变面积; D. XG溶液的相对触变面积。

图4 海藻酸- Ca^{2+} 溶液和XG溶液的滞后环和相对触变面积
Fig.4 Hysteresis loop and relative thixotropic area of alginate- Ca^{2+} and XG solutions

由图4A可知,当剪切速率从 0.1 s^{-1} 增加到 400 s^{-1} (上曲线)时,海藻酸- Ca^{2+} 溶液的黏度先轻微上升,然后下降;当剪切速率从 400 s^{-1} 下降到 0.1 s^{-1} (下曲线)时,黏度逐渐上升并恢复到初始状态。上曲线和下曲线没有重叠,形成滞后环,而且上曲线的黏度大于下曲线的黏度。这是因为如果使用剪切力, Ca^{2+} 和SA

分子产生的紧密聚集体会解离成小实体;当剪切力停止时,小实体转变为松散聚集体;如果给松散聚集体足够的休息时间,由于排水效应,松散聚集体会再次被压缩,转变为紧密聚集体。因此,从低剪切速率到高剪切速率的剪切过程是一个连续的聚集体解离过程,黏度随解离同步降低。当剪切速率降低到低水平时,结构平衡恢复到聚集状态,在此期间,聚集体的结构得到重建,黏度增加。关联平衡的来回移动会改变聚集体的结构,因此下曲线的黏度很难恢复到与上曲线相同的水平^[22]。从图4B可以看出,XG溶液下曲线的黏度接近于上曲线的黏度,这意味着XG溶液在剪切后可以恢复其大部分结构。

利用RTA值评估时间依赖性的影响^[23]。由图4C可知,随着柠檬酸钙含量的增加,RTA值也随之增加,表明海藻酸- Ca^{2+} 溶液的触变性发生了变化。Tabeei等^[11]在不同浓度的SA溶液中也观察到了相同的趋势,SA溶液的滞后环随其浓度的增加而增大。此外,海藻酸- Ca^{2+} 溶液的RTA值大于XG溶液,RTA值越大表明在搅拌或剪切后的黏度恢复时间越长^[24]。

3 结论

通过在 0.2% SA溶液中添加少量柠檬酸钙,明显提高了溶液的黏度,制备了不同稠度的海藻酸- Ca^{2+} 溶液。流变性能分析表明,海藻酸- Ca^{2+} 溶液具有与XG溶液类似的强剪切稀化行为、弱凝胶特性和屈服应力。海藻酸- Ca^{2+} 溶液的黏度随温度的升高而降低,在 12 h 内具有良好的黏度稳定性。放置 24 h 后,海藻酸- Ca^{2+} 溶液的黏度、模量和屈服应力呈上升趋势,而XG溶液则呈下降趋势。在相同稠度下,海藻酸- Ca^{2+} 溶液的RTA值比XG溶液大,表明其结构在受到剪切力作用后的恢复速度较慢。海藻酸- Ca^{2+} 是一种潜在的可用于吞咽障碍者饮食管理的增稠剂,除流变学评估外,后续研究将在口腔摩擦特性和视频荧光吞咽调查等方面提供有关生理反应的进一步信息。

参考文献:

- [1] 方亚鹏,赵一果,孙翠霞,等. 食品胶体研究进展与未来趋势:组分互作、未来食品结构设计及胶体营养学视角[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 1-20.
FANG Yapeng, ZHAO Yiguo, SUN Cuixia, et al. Recent progress and future trends of food colloids: Component interactions, future food structure design and colloidal nutrition[J]. Food Science, 2022, 43(15): 1-20.
- [2] BOLIVAR-PRADOS M, ROFES L, ARREOLA V, et al. Effect of a gum-based thickener on the safety of swallowing in patients with poststroke oropharyngeal dysphagia[J]. Neurogastroenterology and Motility, 2019, 31(11): e13695.
- [3] METHACANON P, GAMONPILAS C, KONGJAROEN A, et al. Food polysaccharides and roles of rheology and tribology in rational design of thickened liquids for oropharyngeal dysphagia: A review

- [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 4101-4119.
- [4] BESIRI I N, GOUDOULAS T B, GERMANN N. Custom - made rheological setup for *in situ* real-time fast alginate-Ca²⁺ gelation[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 246: 116615.
- [5] MURAB S, GUPTA A, WŁODARCZYK-BIEGUN M K, et al. Alginate based hydrogel inks for 3D bioprinting of engineered orthopedic tissues[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 296: 119964.
- [6] AFZAAL M, KHAN A U, SAEED F, et al. Survival and stability of free and encapsulated probiotic bacteria under simulated gastrointestinal conditions and in ice cream[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(3): 1649-1656.
- [7] CAO L Q, LU W, MATA A, et al. Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 242: 116389.
- [8] HU C H, LU W, MATA A, et al. Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 177: 578-588.
- [9] FERNÁNDEZ FARRÉS I, NORTON I T. Formation kinetics and rheology of alginate fluid gels produced by *in situ* calcium release [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 76-84.
- [10] KAYASHITA J, FUJITANI J, UYAMA R, et al. The classification of modified diet for dysphagic persons in 2013 in the Japanese society of dysphagia rehabilitation[J]. Journal of the Japan Dietetic Association, 2013, 56(12): 833-839.
- [11] TABEELI A, SAMIMI A, KHORRAM M, et al. Study pulsating electro spray of non-Newtonian and thixotropic sodium alginate solution [J]. Journal of Electrostatics, 2012, 70(1): 77-82.
- [12] 李慧, 关键, 盛桂华, 等. 适用于吞咽困难的特定全营养医用食品 的流变特性研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(3): 106-110, 94. LI Hui, GUAN Jian, SHENG Guihua, et al. Rheological properties of specific complete nutrition medical foods for dysphagia[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(3): 106-110, 94.
- [13] WEI Y Y, GUO Y L, LI R Q, et al. Rheological characterization of polysaccharide thickeners oriented for dysphagia management: Carboxymethylated curdlan, konjac glucomannan and their mixtures compared to xanthan gum[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106198.
- [14] JO W, BAK J H, YOO B. Rheological characterizations of concentrated binary gum mixtures with xanthan gum and galactomannans [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 263-269.
- [15] MARCOS B, GOU P, ARNAU J, et al. Influence of processing conditions on the properties of alginate solutions and wet edible calcium alginate coatings[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 74: 271-279.
- [16] PATEL M A, ABOUGHALY M H H, SCHRYER-PRAGA J V, et al. The effect of ionotropic gelation residence time on alginate cross-linking and properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 155: 362-371.
- [17] IKEDA S, NISHINARI K. 'Weak gel'-type rheological properties of aqueous dispersions of nonaggregated kappa-carrageenan helices [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(9): 4436-4441.
- [18] GRANT G T, MORRIS E R, REES D A, et al. Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The egg-box model[J]. FEBS Letters, 1973, 32(1): 195-198.
- [19] NAKAUMA M, ISHIHARA S, FUNAMI T, et al. Swallowing profiles of food polysaccharide solutions with different flow behaviors [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 1165-1173.
- [20] SUN A, GUNASEKARAN S. Yield stress in foods: Measurements and applications[J]. International Journal of Food Properties, 2009, 12(1): 70-101.
- [21] ONG E E S, O'BYRNE S, LIOW J L. Yield stress measurement of a thixotropic colloid[J]. Rheologica Acta, 2019, 58(6): 383-401.
- [22] LI X B, FANG Y P, AL-ASSAF S, et al. Rheological study of gum Arabic solutions: Interpretation based on molecular self-association [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2394-2402.
- [23] BADIA-OLMOS C, LAGUNA L, RIZO A, et al. Dysphagia thickeners in context of use: Changes in thickened drinks viscosity and thixotropy with temperature and time of consumption[J]. Journal of Texture Studies, 2022, 53(3): 383-395.
- [24] 陈金玉, 张坤生, 王轻, 等. 马铃薯淀粉与食用胶共混体系流变特性与冻融稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 17-22. CHEN Jinyu, ZHANG Kunsheng, WANG Qing, et al. Rheological properties and freeze-thaw stability of potato starch and edible gum mixed system[J]. Food Research and Development, 2020, 41(11): 17-22.

责任编辑:王艳
收稿日期:2024-01-27