

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.042

不同超声条件下结冷胶酸性凝胶的凝胶特性研究

陈青 程红梅 周涛涛 岳志敏 韩晓祥

(浙江工商大学食品与生物工程学院, 杭州 310018)

摘要: 利用高能超声波处理低酰基结冷胶 (Low acyl gellan gum, LA) 水溶液, 并以葡萄糖酸- δ -内酯 (Glucono- δ -lactone, GDL) 为酸诱导剂制备了结冷胶酸性凝胶, 以不透明指数、断裂应力、断裂应变、杨氏模量、保水性指数为指标, 考察了超声作用对结冷胶酸性凝胶凝胶特性的影响。结果表明, 结冷胶浓度越高, 断裂应力、杨氏模量、不透明指数和保水性越大, 断裂应变则越小。超声时间越长, 超声功率越大, 凝胶的断裂应变越大, 但断裂应力、杨氏模量则越小。断裂应力、杨氏模量随着 GDL/LA 质量比的增大出现了先增加后降低的变化趋势, 当 GDL/LA 质量比为 1 时取得最大值。GDL/LA 质量比增大, 酸性凝胶的断裂应变和保水性减小, 而不透明指数增大。保水性随着超声功率的增大而降低, 但随着超声时间的延长, 保水性出现了小幅提高, 当超声时间为 30 min 时, 保水性最大。超声处理使结冷胶分子链断链, 凝胶三维网络结构中形成了悬挂链, 凝胶强度降低。结冷胶浓度越大, 凝胶的微观结构越致密。超声处理可用于结冷胶改性以改善其凝胶特性。

关键词: 结冷胶; 酸性凝胶; 凝胶特性; 微观结构; 高能超声波

中图分类号: TS201.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)10-0402-07

OSID:



Effects of High Intensity Ultrasound on Acid Induced Gelation Properties of Gellan Gels

CHEN Qing CHENG Hongmei ZHOU Taotao YUE Zhimin HAN Xiaoxiang

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

Abstract: Gellan gum is commonly used as a food ingredient because of its gelling and thickening properties. Application of high intensity ultrasound (HIUS) in food industry is currently attracting much attention because it can be used to alter food physical or chemical properties with a low impact on the environment. Gellan gum solution was subjected to high intensity ultrasound at 55°C (above the sol-gel transition temperature) before acidification to determine the effects of HIUS on glucono- δ -lactone (GDL) induced gelation properties of low acyl gellan gels (LA). The results showed that with the increase of gellan concentration, fracture stress, initial Young's modulus, the opacity index and water holding capacity were increased, but fracture strain was decreased. With the increase of ultrasonic time and ultrasonic power, the fracture stress and initial Young's modulus were decreased, while the fracture strain was increased. The fracture stress and initial Young's modulus were firstly increased and then decreased with the increase of GDL/LA weight ratio. The optimum GDL/LA weight ratio to the gel strength for the acid gels was about 1. As the GDL/LA weight ratio was increased, fracture strain and the water holding capacity were decreased while the opacity index was increased. The reduction in gel strength was attributed to the reduced chain length of the gellan polymer molecules and the gel network may include dangling chains which did not contribute to elasticity. The higher the gellan concentration was, the more dense microstructures were. The results indicated that high intensity ultrasound could be used for modifying gellan gum to improve its gelling properties.

Key words: gellan gum; acid gels; gelation property; microstructure; high intensity ultrasound

收稿日期: 2020-10-29 修回日期: 2021-03-02

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2019YFD0901604)和国家自然科学基金项目(51103131)

作者简介: 陈青(1976—), 女, 副教授, 博士, 主要从事食品物性学研究, E-mail: qingchen@mail.zjgsu.edu.cn

0 引言

蛋白质和多糖是食品体系中两类重要的生物大分子,也是赋予食品良好质构特性和加工性能的主要因素。凝胶性质是多糖和蛋白质的重要功能特性,通过凝胶结构的调控可实现食品质构、感官、营养和风味的调节^[1-3]。

近年来,环境友好的加工技术,如超声波处理技术成为世界各国研究者的关注热点^[4-6]。超声波是指频率大于 20 kHz 的声波,同时拥有波动与能量双重性。超声波会产生空化作用、机械效应以及热效应等,对多糖和蛋白质的微观结构、物理化学性质和功能特性影响显著,目前已广泛用于多糖和蛋白质的提取、降解、改性和加工等方面^[7-12]。超声波处理可以通过改变生物大分子的微观结构,增加流动性,增强多糖、蛋白质、水之间的相互作用,有利于改善凝胶品质和保水性。如文献[13]发现,菜籽分离蛋白在超声波和碱处理作用下,蛋白质的游离巯基含量和表面疏水性增大, α -螺旋和无规线团含量减少,当超声频率为 20 kHz 和 pH 值为 12.5 时,改性蛋白质的溶解度最大,超声波处理有望成为蛋白质改性的有效手段。文献[14]发现超声处理同时辅以漆酶交联可提高 α -乳白蛋白乳液稳定性,适中的超声时间可增强 α -乳白蛋白乳液凝胶的凝胶强度。文献[15]考察了超声处理对转谷氨酰胺酶(TG 酶)诱导花生分离蛋白(PPI)-燕麦膳食纤维(ODF)混合凝胶的影响,发现超声处理会减少 α -螺旋的含量,增大 β -螺旋和无规线团含量,有利于 PPI-ODF 体系形成连续致密的凝胶结构,凝胶强度增强。

结冷胶是一种水溶性的阴离子多糖,在食品、化工、医药等行业中应用广泛^[16-19]。在医药领域中,结冷胶可用于骨修复材料、抗菌药物载体、基因转染和基因治疗。在食品工业中可作为稳定剂、乳化剂、胶凝剂、成膜剂等用于糖果、果酱、水凝胶、面制品以及乳制品的生产,还可作为新型清洗剂用于造纸行业。凝胶性质是结冷胶在食品工业中使用最受关注的特性之一,目前关于超声波处理对结冷胶凝胶性质的影响研究还鲜有报道。本文以低酰基结冷胶(LA)为研究对象,考察超声处理对结冷胶酸性凝胶凝胶特性的影响,以期对结冷胶改性提供新思路,为结冷胶在食品工业及其它领域中的应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

低酰基结冷胶(LA) Kelcogel,美国 Kelco 公司;

葡萄糖酸- δ -内酯(GDL),阿拉丁生化科技股份有限公司,食品级;去离子水,实验室自制;戊二醛 25% 水溶液,上海化学试剂采购供应五联化工厂;十二水合磷酸氢二钠,二水和磷酸二氢钠,无水乙醇,氢氧化钠,分析纯,西陇科学股份有限公司。

XH-300A 型微波超声萃取仪,北京祥鹤科技发展有限公司;JZ78-1 型磁力搅拌器,杭州通用电子仪表厂;电子天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司;TG16-WS 型台式高速离心机,长沙湘仪离心机仪器有限公司;CR-400 型色差计,日本 Konica Minolta Sensing 公司;新芝 SCIENTE-10N 型冷冻干燥机,宁波新芝生物科技有限公司;TA-XT 2i 型质构分析仪,英国 SMS 公司;E-1010 型喷金仪, TM-1010 型扫描电子显微镜,日本 Hitachi 公司;BL-180 型集成防爆冷柜,上海亿思科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 结冷胶凝胶制备

在室温(20℃)下将适量结冷胶粉末加入去离子水中并溶胀 24 h,于 90℃ 下进行磁力搅拌,直至结冷胶粉末完全溶解得到结冷胶溶液。将结冷胶溶液(100 mL)倒入微波专用三颈瓶,利用微波超声波萃取仪进行超声处理,超声探头浸入结冷胶溶液液面以下 10 mm 处,超声循环模式设置为 1:0(超声探头一直振动),超声处理温度恒定为(55±1)℃。超声处理完成后,在结冷胶溶液中加入 GDL,磁力搅拌 3 min,将溶液分装在 $\Phi 30$ mm×20 mm 模具中,用 15℃ 的冷水浴冷却 10 min 后,在 4℃ 的冰箱中放置 36 h 后脱模,进行测试分析。在进行测试前,凝胶试样均在室温下放置 0.5 h 进行平衡。

配制的结冷胶溶液质量浓度为 0.004、0.006、0.008、0.01 g/mL, GDL/LA 质量比分别为 0.25、0.5、1、2 和 4。超声功率为 100、300、500、700 W,超声时间为 0、10、20、30、40 min。

1.2.2 不透明指数测试

利用实验室自制的切片工具从凝胶的中间部分切出厚度 2 mm 的薄片,用色差计测试样品的明亮度。样品置于黑色背景下测得明亮度 L_b ,样品置于白色背景下测得明亮度 L_w 。则凝胶的不透明指数(OI)为: $L_b/L_w \times 100\%$ 。

1.2.3 力学性能测试

凝胶的力学性能使用 TA-XT 2i 型质构分析仪测试。测试模式为 compression,探头型号为 P/45(直径为 45 mm 的圆柱探头)。测试前探头下压速度为 1 mm/s,测试时探头速度为 0.5 mm/s,测定后探头回复速度为 1 mm/s,压缩应变为 80%,触发力为 0.049 N。

测试过程中凝胶样品截面会发生改变,参照文献[20]对测定的力和应变进行校正,公式为

$$\varepsilon = -\ln \frac{L(t)}{L_0} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{F(t)L(t)}{L_0 S_0} \quad (2)$$

式中 ε ——真实应变

σ ——真实应力

$F(t)$ —— t 时刻的力

$L(t)$ —— t 时刻的试样高度

L_0 ——样品的初始高度

S_0 ——样品的初始横截面积

从 $\varepsilon - \sigma$ 曲线上可以获得表征凝胶力学性能的参数,如断裂应力、断裂应变和杨氏模量。

1.2.4 保水性测试

在脱模后的凝胶中部切出 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的小方块,放入 50 mL 离心管中,测出空离心管的质量 W_0 ,加入凝胶后离心管和凝胶的总质量为 W_1 。在 $10\,000 \text{ r/min}$ 的条件下离心 15 min ,去除水后离心管和凝胶的总质量为 W_2 ,凝胶保水性指数(WHC)为: $(W_2 - W_0)/(W_1 - W_0) \times 100\%$ 。

1.2.5 微观结构分析

在脱模后的凝胶中部切出 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的长方体,用 pH 值为 7.2 的质量分数 2.5% 的 0.1 mol/L 戊二醛 PBS(磷酸盐缓冲液)溶液固定 24 h ,间隔 12 h 换一次固定液。之后用 0.1 mol/L 、pH 值 7.2 的 PBS 冲洗试样 3 次,每次 15 min 。用 1% 的锍酸溶液固定样品 2 h ,再用 0.1 mol/L 、pH 值 7.0 的 PBS 漂洗样品 3 次,每次 15 min 。用体积分数为 50%、70%、80%、90%、95% 的乙醇脱水一次,每次 15 min ,再用 100% 的乙醇处理 2 次,每次 20 min 。然后用液氮将试样冷冻,置于真空冷冻干燥机中干燥,经真空喷金后,采用扫描电子显微镜观察试样断面的微观形貌,加速电压 3 kV 。

1.3 数据统计分析

所有数据均利用 Origin 8.0 和 SPSS 17.0 进行数据处理和分析。在实验中为了减少实验误差,提高数据可信度,每组实验重复测定 3~5 次,文中所用数据为多次重复测量的平均值。

2 结果与讨论

2.1 凝胶的光学性质

图 1(图中不同字母表示 $p < 0.01$ 水平差异显著,下同)给出了超声处理对结冷胶酸性凝胶不透明指数的影响。显然,随着超声功率提高和超声时间延长,结冷胶酸性凝胶的不透明性略有减小,这是因为超声波在液体中传播时,存在空化效应,产生的剪切力会改变材料的结构、相态和性质^[12]。超声作用可能会使结冷胶分子链断裂,形成的聚集态尺寸略有减小,故而凝胶的不透明性略有降低。结冷胶浓度越高,酸性凝胶的不透明性越强。浓度增大,溶液中结冷胶分子之间的距离减小,分子链与分子链发生碰撞的几率增大,分子链更容易聚集形成链接区,聚集态尺寸增大,凝胶不透明性增大^[21]。酸性凝胶的不透明性随着 GDL/LA 质量比的升高而增大,这是因为 GDL 在水溶液中水解产生葡萄糖酸,释放的氢离子会与结冷胶分子链上带负电的羧基结合,促进了结冷胶双螺旋链的聚集。随着体系内 GDL 含量增高,释放氢离子的速度和数量增大,使得链接区数量和尺寸增大,凝胶的不透明性增加。这与文献[22]对钙离子诱导结冷胶凝胶的不透明性研究结果类似。

相对而言,结冷胶浓度改变对不透明性的影响程度更大,这也与凝胶宏观形貌的观察结果一致。

2.2 凝胶的力学性能

超声处理结冷胶酸性凝胶的应力-应变关系曲线如图 2 所示,可见,该曲线可分为 3 个变化区域:①线性粘弹区。当应变在 0.05 以内时,应力与应变

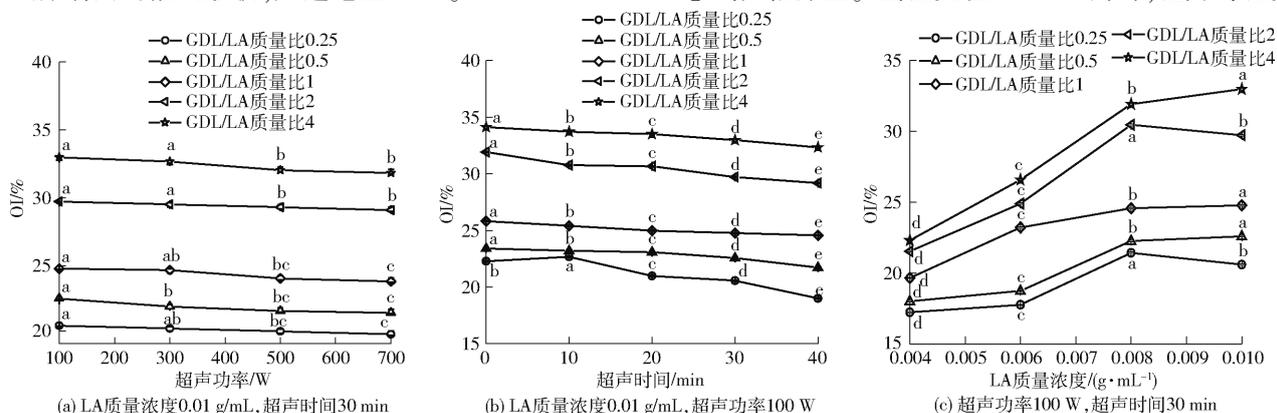


图1 超声处理对结冷胶酸性凝胶不透明指数的影响

Fig. 1 Effects of ultrasonication on OI index of acid gellan gels

之间符合线性关系。②非线性粘弹区。该区域主要是凝胶样品的塑性变形,在测试时可以看到凝胶样品中有水分渗出,此区域内应力增加速率大于应变增加速率。③断裂临界区。该区域内应力和应变达到最大值,之后凝胶样品发生断裂。

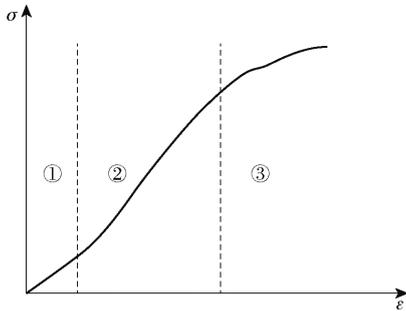


图 2 超声处理结冷胶酸性凝胶的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress - strain curve of acid gellan gels

2.2.1 断裂应力

图 3 给出了超声处理对结冷胶酸性凝胶断裂应力的影响,显然,结冷胶浓度越高,凝胶的断裂应力越大,这是因为浓度增大,单位体积内结冷胶分子链数目增多,形成的凝胶结构更为致密。随着超声功率的增大,凝胶的断裂应力逐渐减小。当结冷胶质

量浓度为 0.01 g/mL 时,在不同的 GDL/LA 质量比下,超声功率从 100 W 增大到 700 W 时,断裂应力减小为初始值的 73% ~ 82%。随着超声时间的延长,断裂应力则逐渐减小,当超声时间延长到 40 min 时,凝胶的断裂应力降低到初始值(未超声处理)的 71% ~ 92%。说明超声处理会弱化结冷胶酸性凝胶的形成。GDL/LA 质量比对超声处理结冷胶酸性凝胶断裂应力影响显著,当 GDL/LA 质量比为 1 时,断裂应力最大。这是因为 pH 值会影响结冷胶分子构象^[23],溶液中的氢离子会与结冷胶分子链上带负电的羧基结合,屏蔽了羧基间的静电排斥作用,同时氢离子浓度也会影响结冷胶分子链上羧基的解离度。在结冷胶酸化体系中,存在着酸化和凝胶两个竞争作用,如果体系酸化速率过快,结冷胶分子链聚集速度也过快,不容易形成均匀结构。现有研究表明^[24],凝胶速率越慢,越容易形成均匀凝胶。对于超声处理的结冷胶酸化体系而言,当 GDL/LA 质量比为 1 时,凝胶速率和酸化速率均较为适中,体系内部可形成相对完整的网络结构,凝胶强度最大。此外还可发现,当 GDL/LA 质量比为 1 时,超声功率和超声时间对凝胶断裂应力的影响程度最小。

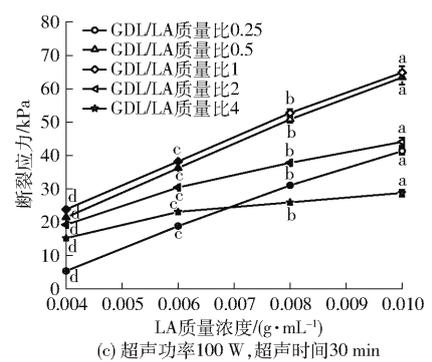
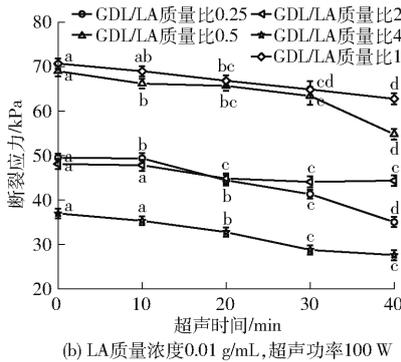
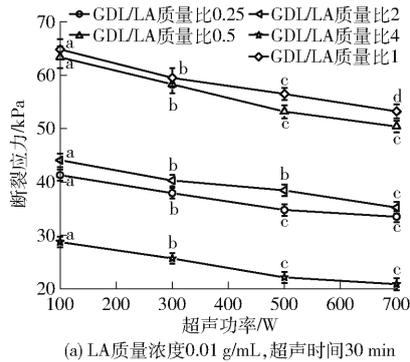


图 3 超声处理对结冷胶酸性凝胶断裂应力的影响

Fig. 3 Effects of ultrasonication on fracture stress of acid gellan gels

2.2.2 断裂应变

图 4 给出了超声处理对结冷胶酸性凝胶断裂应变的影响,断裂应变是凝胶破断时产生的变形量,断裂应变越大,说明凝胶变形性越好,凝胶越软。由图

可知,随着超声功率增大和超声时间延长,断裂应变会略有增大,说明超声作用使凝胶变软。超声作用对断裂应变的影响程度与 GDL/LA 质量比密切相关,GDL/LA 质量比越小,超声时间和超声功率对断

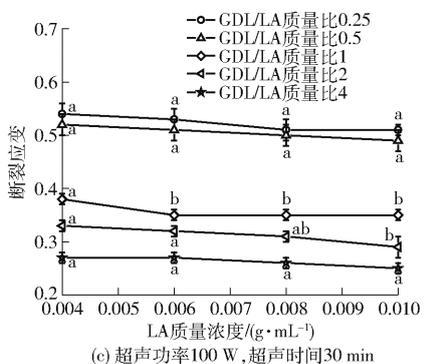
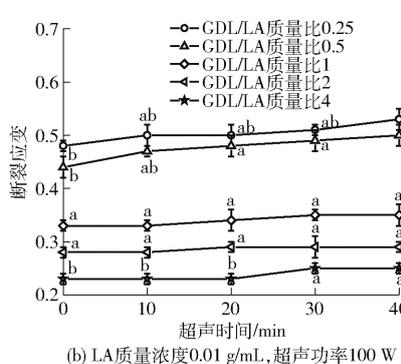
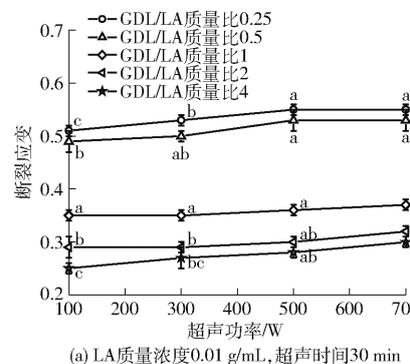


图 4 超声处理对结冷胶酸性凝胶断裂应变的影响

Fig. 4 Effects of ultrasonication on fracture strain of acid gellan gels

裂应变的影响程度越大,当 GDL/LA 质量比大于 1 时,超声时间和超声功率对凝胶断裂应变的影响较小。结冷胶浓度越低,凝胶的断裂应变越大,说明结冷胶浓度越低,超声处理后形成的酸性凝胶变形性越大,凝胶越软。此外,凝胶的断裂应变随着 GDL/LA 质量比的增大而减小。

2.2.3 杨氏模量

杨氏模量是材料刚性的表现,可用来表征凝胶的坚实度。图 5 给出了超声处理对结冷胶酸性凝胶杨氏模量的影响,显然,超声功率和超声时间对杨氏模量影响显著,随着超声功率的增大和超声时间的

延长,杨氏模量均出现了下降,相对于超声功率而言,超声时间的影响更为明显。当超声时间延长到 40 min 时,杨氏模量降低到初始值的 60% ~ 68%,这与超声作用对断裂应力的影响结果类似。由图 5c 可知,结冷胶浓度越高,凝胶的杨氏模量也越大。此外,酸性凝胶的杨氏模量均在 GDL/LA 质量比为 1 时达到最大值,说明合适的 GDL/LA 质量比会使结冷胶凝胶强度提高,但体系中酸含量过高或过低均会影响结冷胶分子链的聚集速率,不易形成均匀致密凝胶,使得凝胶强度降低。

根据结冷胶凝胶力学性能的变化规律,提出了

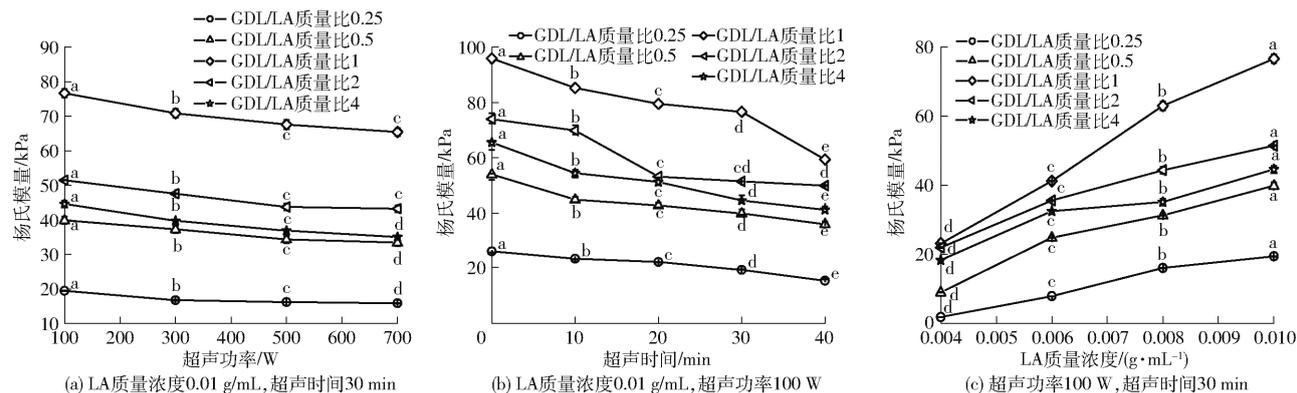


图 5 超声处理对结冷胶酸性凝胶杨氏模量的影响

Fig. 5 Effects of ultrasonication on initial Young's modulus of acid gellan gels

超声处理下结冷胶酸性凝胶的形成机理,如图 6 所示。对于未超声处理的结冷胶溶液而言,当温度较高时(高于凝胶温度),结冷胶分子链呈无规线团构象,随着温度的降低,结冷胶分子链发生聚集而形成三维网络结构。对超声处理的结冷胶溶液而言,超声处理温度为 55℃,高于结冷胶的凝胶温度(0.01 g/mL 结冷胶溶液的凝胶温度约为 33℃),在该温度下结冷胶分子链呈无规线团构象,超声处理使结冷胶分子链断链,产生较多的结冷胶短链分子。

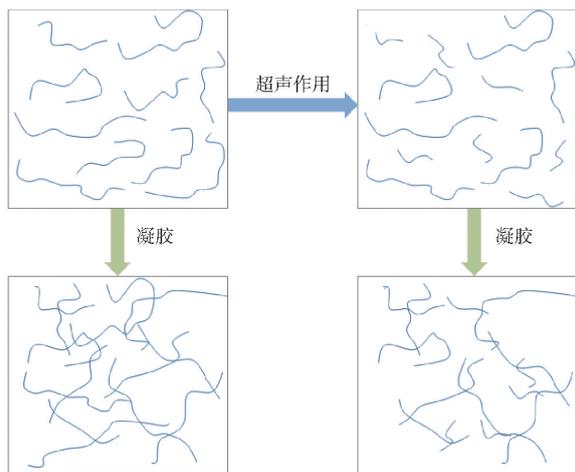


图 6 超声作用下结冷胶酸性凝胶的形成机理

Fig. 6 Schematic illustration of mechanism of acid gellan gels

温度降低,结冷胶分子链聚集形成网络结构,与未超声处理体系相比,此时分子链间的缠结交联点减少,产生较多短的悬挂链,凝胶结构弱化,因此超声处理后凝胶的断裂应力和杨氏模量降低。

2.3 凝胶的保水性

超声处理对结冷胶酸性凝胶保水性的影响如图 7 所示,超声功率增大,凝胶保水性降低,当超声功率超过 500 W 后,超声功率对凝胶保水性几乎无影响。这可能是因为超声功率增大,凝胶结构的致密度略有降低。随着超声时间延长,保水性先是略有增大,之后则略有降低,保水性在超声时间为 30 min 时获得最大值。文献[25]认为结冷胶酸性凝胶会形成均匀的海绵状网络结构,网络结构中的孔隙大小和数量决定了凝胶样品的保水性。根据上文提出的凝胶机理,随着超声时间的延长,形成的凝胶结构中产生了较多的悬挂链,微孔结构增多,保水性得到了一定程度的增强。文献[26]发现一定条件的高强度超声处理,会增强 GDL 诱导的大豆分离蛋白凝胶的保水性,与本文结果类似。

凝胶样品的保水性随着基体浓度的增加而逐渐增大,其变化规律与断裂应力和杨氏模量相似。结冷胶浓度越高,体系内部形成的网络结构更致密,离心时微观结构更难被破坏,保水性更大。酸性凝胶

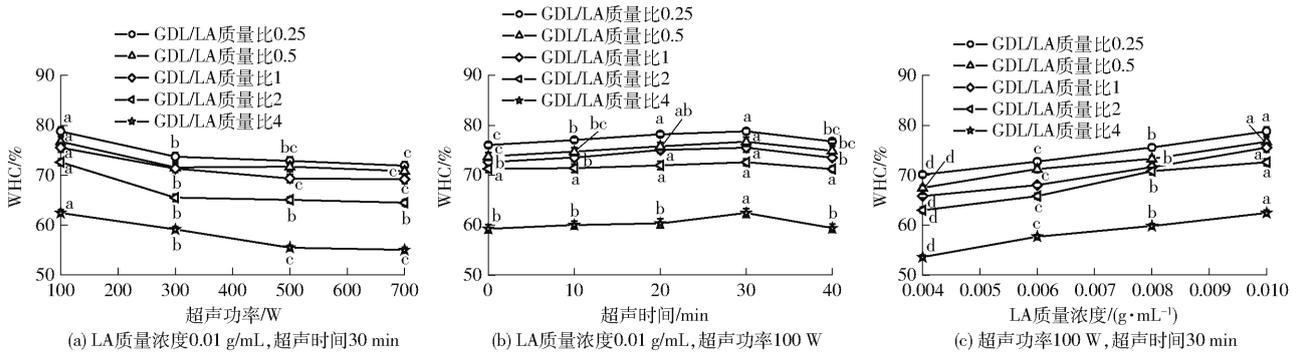


图 7 超声处理对结冷胶酸性凝胶保水性的影响

Fig. 7 Effects of ultrasonication on WHC of acid gellan gels

的保水性随着 GDL/LA 质量比的增大而减小,当 GDL/LA 质量比为 4 时,酸性凝胶保水性最小,这可能是由于此时酸性凝胶断裂应变最小,在受到较大离心力作用时,网络结构更容易破坏,从而导致酸性凝胶的保水性降低。综上所述,如果能合理控制超声处理条件,可使结冷胶酸性凝胶获得较好的持水能力。

2.4 凝胶的微观结构

图 8 给出了超声作用后结冷胶酸性凝胶的微观结构,随着基体浓度的升高,凝胶的结构更为致密,这与上文对酸性凝胶力学性质、光学性质和保水性的研究结果一致。超声处理和酸化会使得凝胶形成

海绵状的网络结构,随着超声功率增大,凝胶网络结构中孔洞较多且较小,结构变得不均匀,更不容易锁住水分,凝胶强度也较低。超声处理后结冷胶网络结构中会形成较多的小纤维束,这是因为超声作用下结冷胶形成较多短链,在形成网络结构时因无法与其他分子链之间形成有效的联结,会以悬挂链的形式在孔洞的内部形成细小纤维束微结构。当超声功率为 500 W 和 700 W 时,细小纤维状结构非常明显,小纤维束可以通过毛细管力将水束缚在凝胶的网络结构,这也说明了当超声功率超过 500 W 后凝胶保水性相差不大的原因。

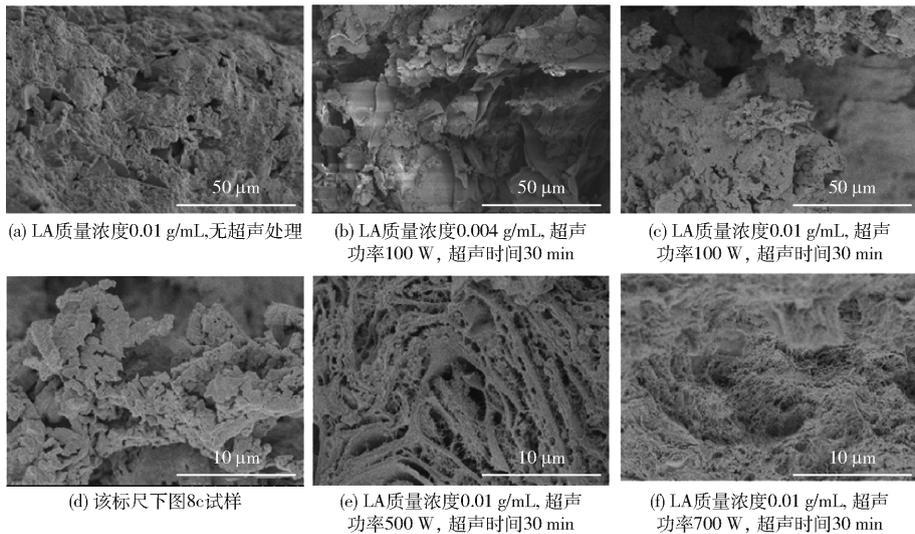


图 8 超声作用后结冷胶酸性凝胶的扫描电镜图像

Fig. 8 SEM of acid gellan gel samples under different ultrasonic treatments

3 结论

(1) 超声处理对结冷胶酸性凝胶凝胶特性影响显著。断裂应变随着超声时间延长和超声功率增加而逐渐增大,断裂应力和杨氏模量则随着超声时间延长和超声功率增加而逐渐减小,说明超声处理会使结冷胶酸性凝胶弱化。

(2) 结冷胶浓度越高,不透明指数、断裂应力、杨氏模量和保水性越大,断裂应变则越小。GDL/LA

质量比越大,酸性凝胶的断裂应变和保水性越低,不透明指数越大。断裂应力、杨氏模量随着 GDL/LA 质量比的增大出现了先增大后降低的变化趋势,当 GDL/LA 质量比为 1 时获得最大值。

(3) 超声处理使得结冷胶分子链断链,三维网络结构中形成了细小的纤维束,适中的超声处理时间(30 min)可以提高凝胶的保水性。

(4) 超声波处理技术可用于结冷胶改性,适当的超声波处理可改善结冷胶酸性凝胶的凝胶特性。

参考文献

- [1] CAO L Q, LU W, GE J, et al. Modulation of oligogulonate on the microstructure and properties of Ca-dependent soy protein gels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 250: 116920.
- [2] SONG X, SUN X M, BAN Q F, et al. Gelation and microstructural properties of a millet-based yogurt-like product using polymerized whey protein and xanthan gum as thickening agents[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(11): 3927–3933.
- [3] 曹云刚, 王凡, 艾娜丝, 等. 苹果膳食纤维对猪肉肌原纤维蛋白凝胶性能的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 365–371.
CAO Yungang, WANG Fan, AI Nasi, et al. Effect of apple dietary fiber on gel properties of porcine myofibrillar protein[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(7): 365–371. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200741&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.041. (in Chinese)
- [4] 许细薇, 李治宇, 庄文俞, 等. 超声波与添加醇和乳化剂乳化提质热解生物油研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(5): 320–326, 274.
XU Xiwei, LI Zhiyu, ZHUANG Wenyu, et al. Upgrading of bio-oil and its heavy composition by using emulsification[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5): 320–326, 274. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170540&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.040. (in Chinese)
- [5] JIANG Q Y, ZHANG M, XU B G. Application of ultrasonic technology in postharvested fruits and vegetables storage: a review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 69: 105261.
- [6] SIEWE F B, KUDRE T G, NARAYAN B. Optimisation of ultrasound-assisted enzymatic extraction conditions of umami compounds from fish by-products using the combination of fractional factorial design and central composite design[J]. *Food Chemistry*, 2021, 334: 127498.
- [7] 崔璐, 冯艳芸, 胡亚云, 等. 探头式超声波处理对糙米理化特性和食用品质的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 266–273.
CUI Lu, FENG Yanyun, HU Yayun, et al. Effect of ultrasonic probe treatment on physicochemical properties and taste quality of brown rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 266–273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151035&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.035. (in Chinese)
- [8] YOUSOUF L, LALLEMAND L, GIRAUD P, et al. Ultrasound-assisted extraction and structural characterization by NMR of alginates and carrageenans from seaweeds[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 166: 55–63.
- [9] DELEZUK J A M, CARDOSO M B, DOMARD A, et al. Ultrasound-assisted deacetylation of beta-chitin: influence of processing parameters[J]. *Polymer International*, 2011, 60(6): 903–909.
- [10] QIU W, CAI W, WANG M, et al. Effect of ultrasonic intensity on the conformational changes in citrus pectin under ultrasonic processing[J]. *Food Chemistry*, 2019, 297(29): 125021.
- [11] DODERO A, VICINI S, CASTELLANO M. Depolymerization of sodium alginate in saline solutions via ultrasonic treatments: a rheological characterization[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106128.
- [12] 王周利, 冯艳芸, 岳田利, 等. 槽式超声波处理对糙米理化特性与感官品质的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 264–270.
WANG Zhouli, FENG Yanyun, YUE Tianli, et al. Effect of ultrasonic treatment on quality and taste properties of brown rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 264–270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161232&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.032. (in Chinese)
- [13] LI Y H, CHENG Y, ZHANG Z L, et al. Modification of rapeseed protein by ultrasound-assisted pH shift treatment: ultrasonic mode and frequency screening, changes in protein solubility and structural characteristics[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 69: 105240.
- [14] QAYUM A, HUSSAIN M, LI M, et al. Gelling, microstructure and water-holding properties of alpha-lactalbumin emulsion gel: impact of combined ultrasound pretreatment and laccase cross-linking[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106122.
- [15] NIU X, ZHAO C B, SHI Q K, et al. Effect of ultrasonic treatment on peanut protein isolate-oat dietary fibre mixture gels induced by transglutaminase[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2021, 56(5): 2233–2243.
- [16] ZIA K M, TABASUM S, KHAN M F, et al. Recent trends on gellan gum blends with natural and synthetic polymers: a review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 109: 1068–1087.
- [17] NAIR R, CHOUDHURY A R. Synthesis and rheological characterization of a novel shear thinning levan gellan hydrogel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 159: 922–930.
- [18] ZHAO X, WANG Z. A pH-sensitive microemulsion-filled gellan gum hydrogel encapsulated apigenin: characterization and in vitro release kinetics[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, 178(6): 245–252.
- [19] LEONE G, CONSUMI M, PEPI S, et al. Enriched gellan gum hydrogel as visco-supplement[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 227: 115347.
- [20] EVAGELIOU V, MAZIOTI M, MANDALA I, et al. Compression of gellan gels. Part II: effect of sugars[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(4): 392–397.
- [21] BANERJEE S, BHATTACHARYA S. Compressive textural attributes, opacity and syneresis of gels prepared from gellan, agar and their mixtures[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(3): 287–292.
- [22] LAU M H, TANG J, PAULSON A T. Texture profile and turbidity of gellan/gelatin mixed gels[J]. *Food Research International*, 2000, 33(8): 665–671.
- [23] HORINAKA J, KANI K, HORI Y, et al. Effect of pH on the conformation of gellan chains in aqueous systems[J]. *Biophysical Chemistry*, 2004, 111(3): 223–227.
- [24] VILELA J A P, CAVALLIERI A L F, DA CUNHA R L. The influence of gelation rate on the physical properties/structure of salt-induced gels of soy protein isolate gellan gum[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(7): 1710–1718.
- [25] PICONE C S F, DA CUNHA R L. Interactions between milk proteins and gellan gum in acidified gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(5): 502–511.
- [26] HU H, FAN X, ZHOU Z, et al. Acid-induced gelation behavior of soybean protein isolate with high intensity ultrasonic pretreatments[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(1): 187–195.