

超声对大豆 11S 蛋白-葡聚糖共混溶液冷致凝胶流变性质的影响

朱建华¹, 杨晓泉², 齐军茹², 赖富饶², 单斌¹, 邹秀容¹

(1. 韶关学院英东食品科学与工程学院, 广东韶关 512005) (2. 华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

摘要: 本文采用稳态剪切和小变形振荡流变分析方法研究了超声时间、超声功率对大豆 11S 蛋白-葡聚糖共混溶液的稳态剪切粘度和及其冷致凝胶过程动态流变性质的影响。实验结果表明: 对照样及超声处理后的共混溶液均为假塑性流体, 共混溶液的表观粘度随超声时间或超声功率增加呈降低趋势。与对照样相比, 经 237.5 W 超声处理 6 min 后, 粘度的下降幅度达 46.6%。当超声处理时间或功率分别位于 0~9 min 或 0~142.5 W 范围时, 共混溶液经超声处理后均可冷致形成非共价三维网络共混凝胶, 凝胶的 G' 和 G'' 随时间或功率增加呈增加趋势。当超声时间或功率分别增加到 12 min 或 237.5 W 时, 共混凝胶的 G' 分别由峰值的 954.7 Pa 和 609.9 Pa 降低为 367.3 Pa 和 507.8 Pa, 同时凝胶起始时间被迟滞。超声处理对凝胶线性粘弹区域影响不显著。

关键词: 超声; 大豆 11S 蛋白; 葡聚糖; 共混; 流变性能

文章编号: 1673-9078(2013)12-2844-2849

Effect of Ultrasonic Treatment on Rheological Properties of Cold-set Soybean 11S Protein-dextran Blending Gel

ZHU Jian-hua¹, YANG Xiao-quan², QI Jun-ru², LAI Fu-rao², SHAN Bin¹, ZOU Xiu-rong¹

(1. Yingdong Food Science and Technology College, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China)

(2. College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The effects of ultrasonic time and power on the steady shear viscosity of soybean 11S protein-dextran blend solution and dynamic rheological properties of the cold blend gels were investigated with analysis of steady shear and low amplitude dynamic oscillatory. The results showed that both the blend and the control with ultrasonic treatment were pseudoplastic fluids, and the apparent viscosity of the blend was decreased with the increase of ultrasonic time or ultrasonic power. Compared to the control, the viscosity of the blend decreased by 46.6% after ultrasonic treatment with 237.5 W for 6 min. When the ultrasonic treatment time or power was in range of 0~9 min or 0~142.5 W, the blend solution could be formed non-covalent three dimensional network by cold treatment. G' and G'' displayed an increased trend with increasing ultrasonic time or power. However as the time or power further increased to 12 min or 237.5 W respectively, G' of blending gel reduced from the peak of 609.9 Pa and 954.7 Pa to 367.3 Pa and 507.8 Pa, respectively, while the initial gelation time was delayed. After ultrasonic treatment, the linear viscoelastic region of the blend gel was not significantly influenced.

Key words: ultrasound; soybean 11S protein; dextran; blending; rheological properties

食品工业所囊括的各式食品种类中半固体凝胶态食品占据极为广泛的市场份额, 对食品产业经济推动和满足民众消费意义重大。市场常见的软糖、肉丸、果冻及新兴素食系列产品等均为食品凝胶材料产品^[1-3]。食品凝胶材料的性能受制于食品天然高分子多相

软物质的微结构, 因此通过构建微结构可实现调控食品品质、风味释放及生物活性物质高效控释等控形控性目的, 从而使食品加工摆脱经验束缚, 进入食品高端科技制造通道^[4-5]。目前食品材料结构与功能的关系正成为国际食品科学研究领域的新兴研究热点, 该领域的研究对拓展食品科学的理论内涵和技术外延极具学术和经济意义^[6-7]。

蛋白与多糖是最常见存在于食品体系中的天然高分子物质, 二者为构建食品凝胶材料微结构的两大重要基材, 其共混体系具热力学不相容特征^[8-10]。对于热力学不相容的两相或多相生物聚合物共混体系, 有

收稿日期: 2013-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(31101215); 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目资助(LYM10120); 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室开放课题(201204)

作者简介: 朱建华(1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品材料结构与功能

效地改善聚合物组分之间的相容性,控制分散相的形态及其相互凝聚,以及减小分散相的尺度,是实现食品凝胶材料功能性优化的关键^[11-13]。超声场处理指利用功率超声波调制体系中的物理或化学反应作用,因可以在液态体系中产生空化、剪切、剧烈搅拌等作用而具突出的分散效应,极大地均匀了共混液内部的浓度场,为实现将目标物质分散到液态体系的过程提供了一种高效分散的物理场环境,并可达到调控蛋白-多糖组分间的相行为的目的^[14-15]。迄今国内鲜见从材料学视角开展食品凝胶材料方面研究,也未见其他研究人员关于应用超声场调制蛋白-多糖共混冷致凝胶的相关文献报道。

本文利用大豆 11S 蛋白-葡聚糖作为蛋白-多糖溶液共混体系模型,系统研究超声场功率及作用时间对共混溶液体系稳态剪切及动态流变粘弹特性的影响,实验结果以期后续将超声场应用于天然高分子共混食品凝胶产品的物性设计提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

低温脱溶大豆胚片:山东禹王蛋白厂,蛋白(干基)质量分数为 55%,水分质量分数为 7.3%;葡聚糖($M_w=100$ ku):美国 Sigma 公司;葡萄糖酸内酯(GDL)及其余试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器和设备

超声处理仪(scientz-IIID),宁波新芝生物科技股份有限公司;冷冻干燥机(Alpha-4),MATRIN CHRIST 公司,德国;RHS600 哈克流变仪,德国 HAKKE 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 大豆 11S 蛋白的分离制备

采用 Nagano 法提取大豆豆粕中的 11S 蛋白质^[16],制备出的 11S 蛋白经冷冻干燥备用。

1.3.2 蛋白、多糖储备液及共混溶液的制备

冻干后的 11 S 蛋白室温下搅拌 2 h 并用 2 M 的 NaOH 溶液调节 pH 至 7.6 溶解,放置 4 °C 冰箱中充分水化过夜配制为的蛋白溶液,然后在 95 °C 下加热 30 min 制备得蛋白热变性溶液(88 mg/mL)。葡聚糖溶液(3.3 mg/mL)经 60 °C 加热慢速搅拌 20 min 使得多糖完全溶解制备。等体积比例混合 11S 蛋白和葡聚糖多糖溶液制得蛋白多糖共混液,然后取适量共混液按预设条件进行超声处理。

1.3.3 超声处理

将超声探头置于液面中间并浸入蛋白多糖共混液样品液面以下 2 cm,同时将盛放样品的烧杯置于冰水浴中。超声处理时间为超声作用主变量时,功率固定为 142.5 W,超声时间梯度为 0 min、3 min、6 min、9 min、12 min。超声功率为主变量时,超声时间固定为 6 min,功率梯度为 0 W、47.5 W、142.5 W 及 237.5 W。

1.3.4 稳态剪切实验

采用锥角为 4°哈克 RS600 流变仪,在控制速率模式下,每个测量点停留 10 s,测定样品溶液粘度(η)随剪切速率($\dot{\gamma}$)的变化关系。实验在 25 °C 下进行,剪切速率范围为 0.1~600 s^{-1} ,每个样品平行测试 3 次。

1.3.5 冷致共混凝胶流变性质测定

采用平行板(直径为 27.83 mm)哈克 RS600 流变仪测定共混溶液冷致成胶过程粘弹性质变化。超声处理完毕后于室温下按每 1 mL 样品加入 100 μ L 2.5 mg/mL GDL 溶液制备冷致凝胶。加入 GDL 振荡均匀后迅速取 1 mL 蛋白多糖共混液置于间隙设置为 1 mm 为平行板之间,在样品裸露部位添加一薄层硅化油防水分蒸发。采用控制应变($\gamma=0.5\%$)模式,频率 $\omega=1$ rad/s。平衡后溶液恒温 25 °C 测量 3 h,记录此过程中的弹性模量(G')和粘性模量(G'')随时间的变化趋势。频率扫描及振幅扫描测试均于 25 °C 条件下进行,其中频率扫描范围为 0.1~100 rad/s,分别监控复合粘度(η^*)、 G' 及 G'' 对频率的依赖性。振幅扫描范围为 0.0001~1,用于监测冷致凝胶的线性粘弹区域变化趋势。

1.3.6 数据处理

应用 Origin 7.5 软件对试验结果数据进行统计处理,样品组和对照组之间的差异显著性采用 One way Anova 方法分析。 $p<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 超声处理对共混体系稳态剪切性质的影响

图 1 a和图 1b分别为不同超声时间和功率处理的大豆 11S 蛋白-葡聚糖共混溶液流动曲线。由图 1a可知,未经超声处理的对照样当剪切速率为 93.92 s^{-1} 时,粘度为 199×10^{-3} mPa·s,剪切速率增加到 328.6 s^{-1} 时 4.28×10^{-3} Pa·s。随着剪切速率的增加,溶液的粘度呈降低趋势,此为高分子溶液典型的假塑性流体的特性。大豆 11S 蛋白-葡聚糖共混溶液共混体系中两组分为蛋白和多糖大分子成分,蛋白-蛋白、蛋白-多糖及多糖-多糖的分子

链间相互缠结, 随测试用剪切速率的递增, 蛋白和多糖大分子链段经剪切力诱导发生重取向, 被剪切力扰乱的大分子物理缠结点来不及被重构, 从而宏观上表现为剪切稀化现象^[17]。

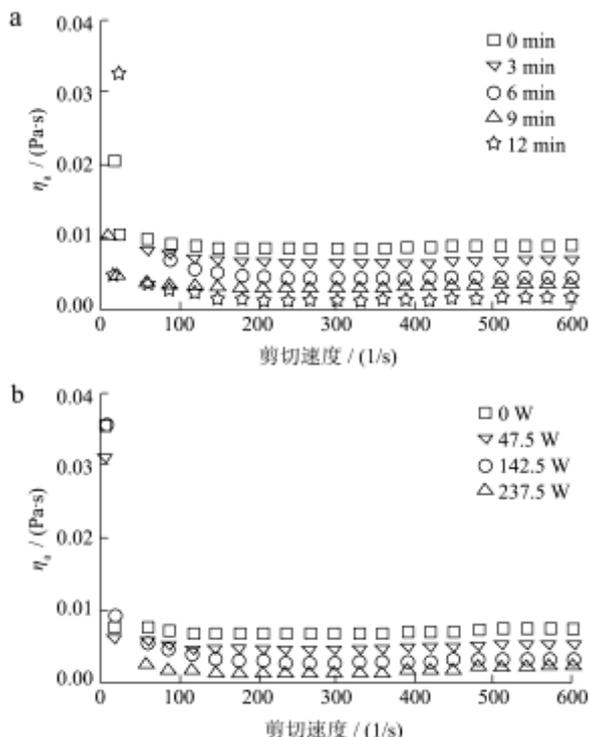


图1 大豆11S蛋白-DT100K 共混溶液稳态剪切流变曲线
Fig.1 Steady shear flow curves of soybean 11S protein-DT100k blends

在大豆11S蛋白-葡聚糖共混溶液中引入超声场处理后, 共混溶液的稳态剪切流变曲线均符合表观粘度随剪切速率的增加而变小的趋势, 均表现为假塑性流体的特性。与对照样相比, 超声处理后引起共混溶液体系的粘度显著地减小, 当剪切速率为 93.92 s^{-1} 时, 超声处理时间梯度(0、3、6、9、12 min)对应样品粘度值依次为 7.62×10^{-3} 、 6.74×10^{-3} 、 6.13×10^{-3} 、 5.50×10^{-3} 、 $5.21 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 而超声处理功率梯度(0、47.5、142.5及237.5 W)对应样品粘度值依次为 7.91×10^{-3} 、 6.14×10^{-3} 、 5.11×10^{-3} 、 $4.23 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。表明同一剪切速率下, 共混溶液的表现粘度随超声时间或超声功率增加呈降低趋势。增加超声场作用强度可造成溶液中大分子间相互作用减弱, 同质大分子或异质大分子链间缠结数减少, 表现出粘度降低的现象, 剪切速率为 93.92 s^{-1} 条件下, 与对照样相比, 经142.5 W超声处理12 min及237.5 W超声处理6 min后, 粘度的下降幅度分别达31.7%及46.6%。共混溶液在超声场作用下, 由于超声产生空化、剪切、剧烈搅拌效应导致大分子链段应力来不及松弛, 在流场中发生取向, 从而降低体系的粘度。Seyed(2013)等人将超声场引入 β -乳球蛋白-海藻酸

钠溶液共混体系时发现了类似结果, 超声显著降低了共混溶液体系的粘度值, 并通过粒度分布测量证实了主要因为超声的均质剪切作用引起^[18]。因此, 可以通过选择超声场强度对蛋白-多糖共混体系的粘度进行调制。

2.2 超声处理对共混溶液冷致凝胶过程流变

性质的影响

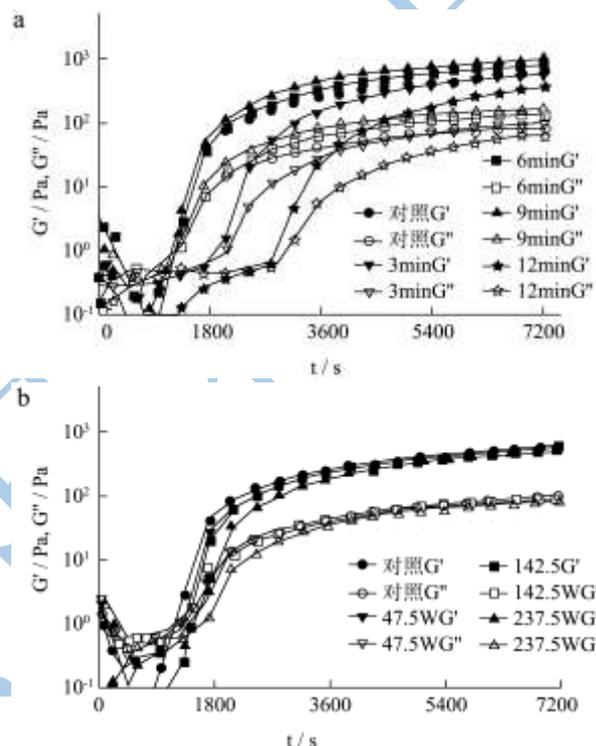


图2 11S-DT100k冷致共混凝胶粘弹模量-凝胶时间关系图

Fig.2 Curves for G' , G'' -t of 11S-DT100k cold-set blend gel

表1 不同超声时间对应凝胶起始时间及温控终点粘弹模量值

Table 1 t_{gel} , G' , G'' and δ at the T procedure end with different

ultrasonic time				
超声时间	t_{gel}^a/s	G'/Pa	G''/Pa	$\delta/-$
对照	1344.00	571.42	85.41	8.50
3 min	1709.00	632.31	105.02	9.42
6 min	1343.00	787.94	135.82	9.78
9 min	1343.00	954.77	161.23	9.58
12 min	2204.00	367.36	69.65	10.73

注: ^a凝胶起始点, 定义为初始 $G' > G''$ 的时间。

本文用非破坏性小振幅流变仪器测试了共混溶液凝胶过程的流变性质, 整个流变测试过程在恒温 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下进行。图 3a 为不同超声时间(功率固定为 142.5 W)对 11S-葡聚糖共混溶液体系冷致凝胶过程粘弹模量跟踪测定结果, 表 1 对应为不同超声处理时间共混凝胶起始点及温控程序终点粘弹

模量值。实验结果表明,与对照样相比,超声处理 0~9 min 时间范围内,冷致凝胶温控程序终点粘弹模量值随处理时间延长而增加,超声处理 9 min 时,终点弹性模量值由对照的 571.4 Pa 显著增加到 954.7 Pa,凝胶起始点几乎没有发生变化。当超声处理时间延长到 12 min 时,共混凝胶的终点粘弹模量值由峰值 954.7 Pa,突降低到 367.3 Pa,伴随胶凝时间由对照样的 1344 s 延长到 2204 s。

以上实验结果表明当施加固定功率给共混溶液处理过程,随时间延长,粘弹模量值呈先升高后降低趋势,且当处理时间足够长时,凝胶粘弹模量值可低于未经超声处理的对照样。图 3b 和表 2 分别为超声功率对 11S-葡聚糖共混溶液体系冷致凝胶过程动态粘弹模量及温控程序终点流变测定结果。结果表明与对照相比,经超声功率 47.5 W、142.5 W 处理 6 min 后,11S-葡聚糖共混溶液体系胶凝过程的凝胶起始时间无显著变化,粘弹模量曲线变化趋势基本一致,但经超声处理后温控程序终点模量值均有显著提高,且随功率增加粘性模量和弹性模量值呈增加趋势。超声功率进一步增加到 237.5 W 后,粘弹模量分别骤降至低于对照样的 507.80 Pa 和 84.18 Pa,凝胶起始时间伴随由对照样的 1345 s 迟滞至 1709 s。

表 2 不同超声功率对应凝胶起始时间及温控终点粘弹模量值

Table 2 t_{gel} , G' , G'' and δ at the T procedure end with different

ultrasonic power				
超声功率/W	t_{gel}/s	G'/Pa	G''/Pa	$\delta/^\circ$
对照	1345.00	563.21	84.31	8.51
47.5	1466.00	581.63	89.51	8.75
142.5	1467.00	609.92	99.15	9.23
237.5	1709.00	507.81	84.18	9.41

综合超声时间和功率主变量对凝胶过程粘弹模量及凝胶起始时间的影响结果发现,对 11S-葡聚糖共混溶液体系施加超声场处理后,当超声强度超过一定限值后,反而会迟滞胶凝时间和降低胶凝强度,我们研究超声对大豆 11S 蛋白-刺槐豆胶冷致共混凝胶流变性质时发现了类似结果^[19]。Farahnakya (2013) 在应用超声处理卡拉胶冷致凝胶时发现凝胶的机械力学特性随超声时间延长先成增加趋势,但超过一定水平后,继续延长超声时间反而降低了凝胶的机械强度^[20]。11S-葡聚糖共混溶液体系胶凝过程,凝胶的微结构与蛋白和多糖比例相关,当多糖浓度较低时可形成蛋白为连续相而多糖为分散相的微结构。超声处理过程同时对蛋白和多糖大分子产生物

理剪切和崩解作用,但相对而言对多糖的作用更大些。合适的超声强度可降低多糖分子量但对热变性大豆 11S 蛋白链分型结构影响较小,促使共混体系形成了更牢固的三维网络结构。但当超声强度过大时,如实验过程采用的 142.5 W、12 min 和 237.5 W、6 min 组合时,超声使热变性大豆 11S 蛋白链分型结构尺度降低到胶凝临界阈值或者更低,削弱了大豆 11S 蛋白的净凝胶能力,而加入的多糖此时因热力学不相容进一步起到了松散化作用,宏观上表现为胶凝起始点滞后和粘弹模量值降低。

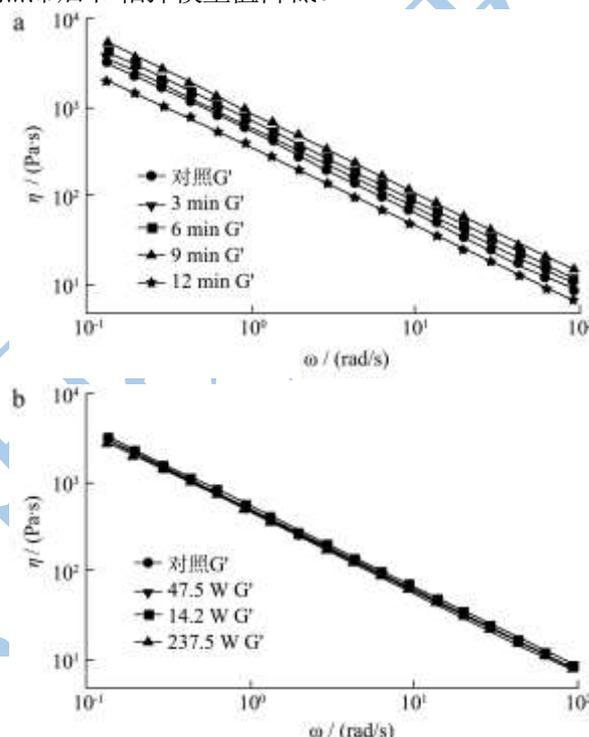


图 3 11S-DT100k 冷致共混凝胶复合粘度-频率关系图

Fig.3 Curves for $\eta^*-\omega$ of 11S-DT100k cold-set blend gel

图 3a 和图 3b 分别为超声时间和超声功率变化对凝胶复合粘度与角频率关联关系影响结果。复合粘度 η^* 是 G' 、 G'' 的综合表现,复合黏度 $\eta^* = \{ (G'/\omega)^2 + (G''/\omega)^2 \}^{1/2}$, 通常情况下, η^* 在整个扫描区域几乎呈斜直线下降趋势, η^* 与 ω 是线性关系且斜率接近 -1, 表明该凝胶体系形成的凝胶为非共价交联网络结构。由图 3a 和图 3b 可知,实验过程所采用的不同超声时间和功率处理的大豆 11S 蛋白-葡聚糖共混体系,均形成了非共价键网络结构,蛋白和多糖两种大分子只存在物理拓扑上的相互作用,多糖以空间占位作用抑制或促进胶凝过程。Fitzsimons 等在研究未经超声处理的蛋白多糖共混体系时也曾发现类似结果^[21]。

图 4a 和图 4b 分别为超声时间和超声功率主变量对应共混大豆 11S 蛋白-葡聚糖共混冷致凝胶频率扫描结

果。

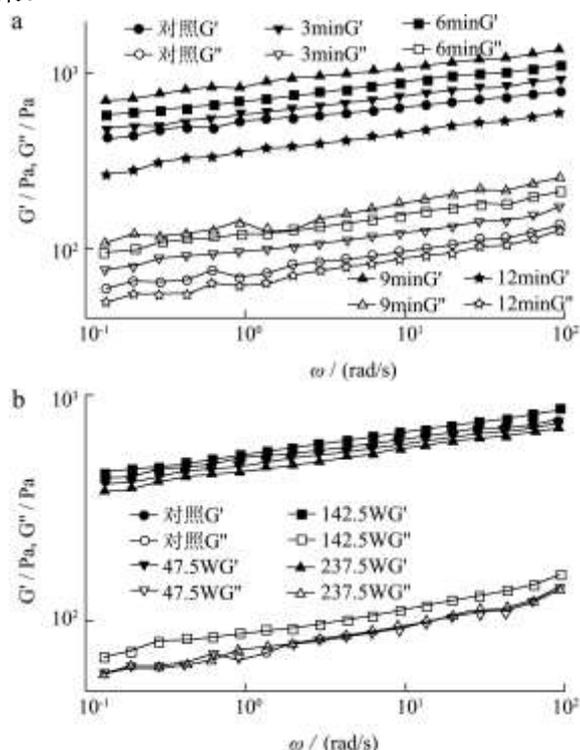


图4 11S-DT100k冷致共混凝胶粘弹模量-频率关系图

Fig.4 Curves for G' , G'' - ω of 11S-DT100k cold-set blend gel

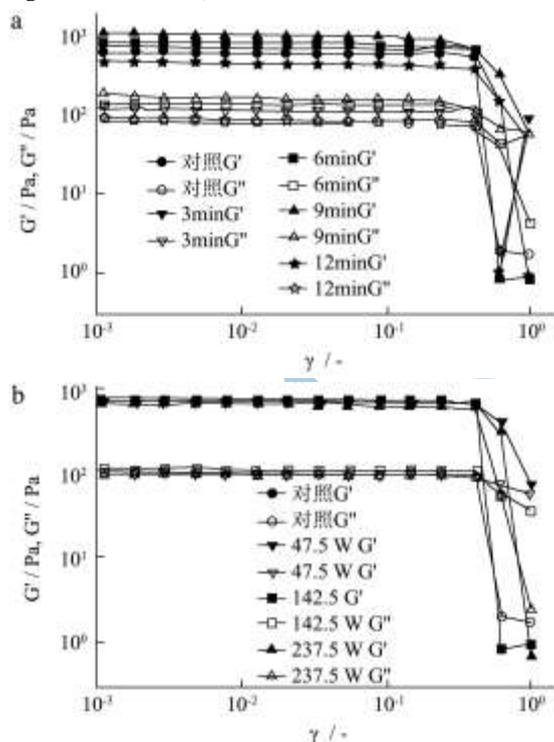


图5 11S-DT100k冷致共混凝胶粘弹模量-应变关系图

Fig.5 Curves for G' , G'' - γ of 11S-DT100k cold-set blend gel

由图4可知整个扫描过程所有测试样品的 G' 、 G'' 均随频率的升高呈升高趋势，且整个扫描过程粘弹模量值 $G' > G''$ ，此为凝胶的典型特征，表明所测试的样品均已形成较好的凝胶网络结构^[22]。且随超声时间和超声

功率的增加，整个扫描区域一方面 G' 、 G'' 均随分子量的增加至峰值后降低至低于对对照样，另一方面在扫描区域高频阶段，随加载频率的增加图4a和图4b中最强超声作用对应样品与相对低超声作用或对对照样品相比凝胶的 G' 、 G'' 相对最低，表明超声强度超过一定量后不利于形成抗破坏能力相对较高的凝胶网络结构，此结果与共混溶液冷致凝胶过程流变性质监测结果是一致的。

图5为超声作用对大豆11S蛋白-葡聚糖振幅扫描结果。由图可知，随超声时间和功率的变化，整个扫描区域一方面 G' 、 G'' 相对不变的区域无显著变化，即线性粘弹区域变化不明显，且线性粘弹区域均应变值均大于0.5%，表明实验过程选用应变值0.5%位于所测定样品形成凝胶的线性粘弹范围内，整个测试过程均在非破坏性的小振幅条件下进行。

3 结论

超声场对大豆11S蛋白-葡聚糖共混溶液体系存在剪切变稀作用，且粘度降低程度且随超声功率和时间增加而增加。超声场6 min、0~234.5 W及超声场142.5 W、0~12 min处理大豆11S蛋白-葡聚糖共混溶液后，均可经GDL诱导成冷致非共价交联凝胶，但给定浓度蛋白多糖共混溶液体系，施加超声场处理过程存在边值超声强度，当时间功率复合效应超过该强度时，凝胶强度消弱、凝胶起始时间迟滞。超声作用对线性粘弹区域影响较弱。

参考文献

[1] 刘波,李丹丹,李汴生,等.软糖用 κ -卡拉胶与明胶溶液及其复配液的表现粘度研究[J].现代食品科技,2012,28(11):1466-1470
 LIU Bo, LI Dan-dan, LI Bian-sheng, et al. Study on Viscosity of κ -Carrageenan and Gelatin Solutions and Their Mixture using for Candy [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(11): 1466-1470

[2] 黄玉平,翁武银,张希春,等.鱼皮明胶蛋白对淡水鱼糜凝胶特性的影响[J].中国食品学报,2012,12(11):51-58
 HUANG Yu ping, WENG Wuyin, ZHANG Xichun, et al. Effects of Fish Skin Gelatin on Gel Property of Surimi from Freshwater Fish [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(11): 51-58

[3] 涂勇刚,赵燕,徐明生,等.皮蛋加工过程中流变与凝胶特性的变化规律[J].食品科学,2012,33(19):21-24
 TU Yong-gang, ZHAO Yan, XU Ming-sheng, et al. Variations in Rheological and Gel Properties of Preserved

- Eggs during Processing [J]. Food Science, 2012, 33(19): 21-24
- [4] van der Sman R G M, van der Goot A J. The science of food structuring [J]. Soft Matter, 2009, 3(5):501-510
- [5] Donald A. Food for thought [J]. Nature Mater, 2004, 3(9): 579-581
- [6] Mezzenga R, Schurtenberger P, Burbidge A, et al. Understanding foods as soft materials [J]. Nature Mater, 2005, 4(10): 729-740
- [7] Ubbink J, Burbidge A, Mezzenga R. Food structure and functionality: a soft matter perspective [J]. Soft Matter, 2008, 8(4): 1569-1581
- [8] Polyakov V I, Grinberg V Ya, Tolstoguzov V B. Thermodynamic incompatibility of proteins [J]. Food Hydrocolloids, 1997, 11(2): 171-180
- [9] Tolstoguzov V B. Some thermodynamic considerations in food formulation [J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(1): 1-23
- [10] Kasapis Stefan. Phase Separation in Biopolymer Gels: A Low- to High-Solid Exploration of Structural Morphology and Functionality [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2008, 48(4):341- 359
- [11] Milner S T. How do copolymer compatibilizers really work [J]. Materials Research Society, 1997, 22(1): 38-42
- [12] Rabotyagova O S, Cebe P, Kaplan D L. Protein-Based Block Copolymers [J]. Biomacromolecules, 2011, 12(2): 269-289
- [13] Coliver C M, Melton L D, Stanley R A. Creating Proteins with Novel Functionality via the Maillard Reaction: A Review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2006, 46(4): 337-350
- [14] Suslick K S. The chemical effects of ultrasound [J]. Sci. Am., 1989, 2: 80-86
- [15] Seyed M H H, Zahra E-D, Seyed H R. Complex coacervation of β -lactoglobulin - κ -Carrageenan aqueous mixtures as affected by polysaccharide sonication [J]. Food Chemistry, 2013, 141(1): 215-222
- [16] Nagano T, Hirotsuka M, Mori H, et al. Dynamic viscoelastic study on the gelation of 7S globulin from soybeans [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40(6): 941- 944
- [17] 何平笙编著.新编高聚物的结构与性能[M].北京:科学出版社,2009
- HE Ping-Sheng. Eds. New structure and properties of polymers [M]. Beijing: Science Press, 2009
- [18] Seyed M H H, Zahra E D, Seyed H R. β -Lactoglobulin-sodium alginate interaction as affected by polysaccharide depolymerization using high intensity ultrasound [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 32(2): 235-244
- [19] 朱建华,杨晓泉.大豆 11S 蛋白-刺槐豆胶冷致共混凝胶控释核黄素性能研究[J].现代食品科技, 2012, 28(12): 1612-1616
- ZHU Jian-hua, YANG Xiao-quan. Study on control release property of riboflavin with cold-set soybean 11S protein-locust bean gum blend gel matrix [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(12): 1612-1616
- [20] Farahnakya A, Azizia R, Majzoobia M. Using power ultrasound for cold gelation of kappa-carrageenan in presence of sodium ions [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 7, In Press, Corrected Proof
- [21] Fitzsimons S M, Mulvihill D M, Morris E R. Large enhancements in thermogelation of whey protein isolate by incorporation of very low concentrations of guar gum [J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(4): 576-586
- [22] Ross-Murphy S B. Rheological methods. In: Biophysical Methods in Food Research (edited by H.W.S. Chan) [M]. London: SCI, 1984