

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.02.004

# $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的超高压/热诱导制备技术及其性状评价

The ultrahigh-pressure/thermally induced technologies of the  $\beta$ -glucan mixed gel and the evaluation system for their properties

樊蕊

FAN Rui

(北京大学公共卫生学院营养与食品卫生学系, 北京 100191)

(Department of Nutrition and Food Hygiene, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China)

**摘要:**采用流变学、质构、扫描电镜等分析方法,将新型超高压诱导技术和传统热处理技术制备的 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的表观和功能性质进行比较。结果表明,超高压诱导和热诱导成胶浓度分别为7%和8%,超高压诱导的 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的持水性、凝胶硬度、弹性、咀嚼性和内聚性强于热诱导的,其中,超高压诱导的 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶硬度显著高于热诱导的( $P < 0.05$ ),但其持油性显著低于热诱导制备的( $P < 0.05$ )。另外,超高压诱导的 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的冻融稳定性优于热诱导的。且其微观结构较为光滑、致密,孔洞分布均匀且数量和体积均小于热诱导的。

**关键词:**热诱导;超高压;燕麦 $\beta$ -葡聚糖;复合凝胶;凝胶性质

**Abstract:** The apparent and functional properties of the mixed gel prepared with the thermal and ultrahigh-pressure were compared by rheological, texture, scanning electron microscopy and other analytical methods. The results showed that the  $\beta$ -glucan typical gels formed by ultra-high pressure and thermally induced at the total concentration of 7% and 8%, respectively, and the properties in water hold capacity, gel hardness, elasticity, chewiness and internality of  $\beta$ -glucan mixed gel formed by ultra-high pressure showed the more superior, in which the hardness of gel formed by ultrahigh pressure was significantly stronger than gel formed by thermal-induced gel ( $P < 0.05$ ), while the oil hold capacity of the ultrahigh-pressure induced gel was obviously lower than that of thermally induced gel ( $P < 0.05$ ). In addition, the ultrahigh-pressure induced gel showed better freeze-thaw stability,

and a smooth, dense microstructure, which contained an uniform pore with a smaller volume than the thermally induced gel.

**Keywords:** thermally induced; ultra high pressure; oat beta-glucan; mixed gel; gel properties

燕麦 $\beta$ -葡聚糖是一种通过 $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3)和 $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)糖苷键连接而成的线性非淀粉多糖,其在一定条件下可以形成凝胶。凝胶性也被认为是燕麦 $\beta$ -葡聚糖的基本性质之一。燕麦 $\beta$ -葡聚糖可作为一种新型的功能性食品配料、营养增补剂、化妆品和医用原料,引起了广泛关注<sup>[1]</sup>。但燕麦 $\beta$ -葡聚糖添加到这些食品中不仅会影响食品的感官性能,而且还会影响食品的质地和营养功能等,同时,还可与食品体系中的脂肪、蛋白质、淀粉以及其他多糖等功能性大分子共同作用,影响加工食品的特性和功能。因而,燕麦 $\beta$ -葡聚糖研究已成为热点。

从20世纪末起,对燕麦 $\beta$ -葡聚糖的溶液流变性能和凝胶性能已有研究<sup>[2-3]</sup>。燕麦 $\beta$ -葡聚糖溶液显示出典型的无规则卷曲的流动特性,在低剪切率下,溶液显示出剪切稀化流动特性,而分子量较大的葡聚糖显示出假塑性流动特性<sup>[4]</sup>。随着储存时间的延长, $\beta$ -葡聚糖溶液显示出类似凝胶的结构,在凝胶固化过程的后期,溶液转变为典型的弹性凝胶<sup>[5]</sup>。但是到目前为止,对于燕麦 $\beta$ -葡聚糖凝胶特性的研究不够完善,不同制备方法对凝胶特性的研究未见报道。

目前常用的制备凝胶的方法包括:热处理、凝固剂、酶法、交联剂,不同制备方法得到的凝胶其性质和形成机理不同,因此,可以满足不同的应用目的。超高压(Ultrahigh pressure, UHP)作为一种新型的非热加工食品新技术近年来被广泛地研究与应用。超高压会使其分子结构

**作者简介:**樊蕊(1985—),女,北京大学医学部主管技师,博士。

E-mail: rfcaubj@126.com

**收稿日期:**2018-11-12

和空间构象发生改变,从而影响其物理化学性质,如流变学性质等<sup>[6]</sup>。以前有关超高压对多糖性质的研究<sup>[7-9]</sup>相对较少,多集中在淀粉和食品胶方面,从超高压对食品多糖凝胶特性的研究结果来看,将超高压技术应用于食品多糖凝胶是一个十分值得关注的方向。

为了更好地理解葡聚糖凝胶在食品以及医药领域的应用,本试验拟对传统热诱导和新型超高压技术诱导制备的葡聚糖的凝胶性质、质构以及微观结构进行系统的比较和分析,以期明确超高压技术在 $\beta$ -葡聚糖凝胶制备方面的优越性,为 $\beta$ -葡聚糖凝胶对食品口感、稳定性的影响以及工艺参数的设计等提供理论支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 设备与试剂

分析天平:AR1140 型,美国奥豪斯公司;

冷冻干燥:Alpha 1-2 D Plus 型,德国 Marin Christ 公司;

流变仪:AR-1500ex 型,美国 TA 公司;

质构仪:TA-XT Plus 型,英国 Stable Micro Systems 公司;

扫描电镜:JSM-6701F 型,日本 JEOL 公司;

超高压设备:HPP L2-700/1 型,天津华泰森森生物 工程技术有限公司;

恒温磁力搅拌器:78HW-1 型,江苏省金坛市荣华仪 器制造有限公司;

冷冻干燥:Alpha 1-2 D Plus 型,德国 Marin Christ 公司;

真空包装机:DZ-260B 型,北京恺欣世纪科技有 限公司;

旋涡混合/振荡器:HAVDRTEX-5 型,北京恒奥德科 技有限公司;

燕麦 $\beta$ -葡聚糖:OG  $2.0 \times 10^5$ 、LOG  $1.0 \times 10^5$ ,广州中 康食品有限公司。

### 1.2 制备方法

1.2.1 热诱导制备葡聚糖复合凝胶 分别称取一定量的燕麦 $\beta$ -葡聚糖 LOG 和燕麦 $\beta$ -葡聚糖 OG,按质量比 1:1 混合,在一定温度下于磁力搅拌器搅拌至完全溶解制成复合 $\beta$ -葡聚糖溶液,放置于 4℃的冰箱过夜,观察 $\beta$ -葡聚糖凝胶的形成和外观特性,研究温度、总质量分数对 $\beta$ -葡聚糖凝胶形成的影响。将每份溶液倒入 50 mL 小烧杯中,当小烧杯倾斜 60°时样品无流动性即认为形成凝胶。

1.2.2 超高压诱导制备葡聚糖复合凝胶 分别称取一定量的燕麦 $\beta$ -葡聚糖 LOG 和燕麦 $\beta$ -葡聚糖 OG,按质量比 1:1 混合,40℃下于磁力搅拌器搅拌至完全溶解后,冷却至室温,得到复合燕麦 $\beta$ -葡聚糖溶液。将制备的复合燕麦 $\beta$ -葡聚糖溶液装入 50 mL 离心管中,然后将离心管

放入聚乙烯袋后真空封口,并将样品置于压力腔内,浸没于传压介质中,以水为传压介质,设置一定的压力进行超高压处理,保压时间 30 min,升压速率 6.5 MPa/s,降压速率 20 MPa/s。处理后的样品置于 4℃冰箱保藏,所有性质的测定均在 24 h 后进行。

### 1.3 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的表现特征

样品经冷却后,通过肉眼观察各个样品的组织状态。

### 1.4 持水性测定

根据 Zhang 等<sup>[10]</sup>的方法,并稍作修改。称取 3 g 凝胶样品于 10 mL 离心管中,离心(10 000 r/min,20 min),用滤纸小心地吸除离心出来的水分,20 min 后再次离心称重,直至 2 次离心排水后离心管和样品的总重量之差 $<0.05$  g,按式(1)计算持水性。试验 3 次取平均值。

$$WHC = \frac{W_1 - W_0}{W_2 - W_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

WHC——持水性,%;

$W_1$ ——离心后离心管和样品的总重量,g;

$W_0$ ——离心管的重量,g;

$W_2$ ——离心前离心管和样品总重量,g。

### 1.5 持油性测定

采用左锋等<sup>[11]</sup>的方法,并进行改进。准确称取 1 g 凝胶置于 10 mL 离心管中,再加入 5 mL 大豆色拉油,漩涡混合(手动点振方式)5 min,分散均匀后于室温下静置 30 min,离心(3 000 r/min,20 min),倒掉上清色拉油,再称重。直至 2 次离心排油后离心管和样品的总重量之差 $<0.05$  g,按式(2)计算持油性。试验 3 次取平均值。

$$OHC = \frac{W_1 - W_0}{W_2 - W_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

OHC——持油性,%;

$W_1$ ——离心后离心管和样品的总重量,g;

$W_0$ ——离心管的重量,g;

$W_2$ ——离心前离心管和样品总重量,g。

### 1.6 流变特性测定

凝胶的特殊结构使其同时具有固体和液体的性质,即在力学上表现为固体的性质而在热动力学上表现出浓溶液的性质。利用流变仪对 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶进行流变测试,选择平板系统(型号:PP-40,直径 40 mm,设置间隙 5 mm),恒温 25℃由循环水系统精确控制。将凝胶进行频率扫描测试,设置频率范围 0.1~100.0 rad/s,温度 25℃,平衡时间 2 min,为保证所有样品在线性黏弹范围内,应变选择 1%。

### 1.7 质构特性测定

测试前,将样品切成高度为 1 cm 的圆柱形,并置于室温下平衡 2 h,然后利用质构仪进行测量,主要参数:运

行模式 Texture profile analysis (TPA); 探头 P/0.25; 测试速度保持恒定, 为 60 mm/min; 压缩变形为样品的 30%; 起始力 0.4 N。选取的质构指标包括硬度、内聚性、弹性、咀嚼性。每个处理重复 6 次。

### 1.8 冻融稳定性

将  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶置于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  冰箱, 每隔 3 d 取出置于  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  冰箱解冻 12 h, 测定后将剩余解冻后的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶继续放入  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  冻藏, 以此往复 5 次<sup>[12]</sup>。

### 1.9 扫描电镜

将制备的凝胶样品冷冻干燥, 喷金, 通过扫描电镜观察, 加速电压 5 kV, 每个样品观察 5~10 个区域。

### 1.10 数据统计

每组试验至少重复 3 次, 结果通过 Origin 8.6 处理后用平均值(M)±标准差(SD)表示。运用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析(ANOVA), 若方差分析效果显著, 则使用 Duncan 进行多重比较( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶表观特征

表 1 可以看出, 温度  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  处理的  $\beta$ -葡聚糖溶液均无法形成凝胶, 而温度高于  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,  $\beta$ -葡聚糖溶液总浓度高于 11% 均可以形成凝胶。 $\beta$ -葡聚糖在溶液中以无规则线团存在, 属于黏弹性体系, 并且和质量分数有一定关系, 这就使得在一定条件下能形成凝胶<sup>[13]</sup>。随着温度升高至  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\beta$ -葡聚糖成胶浓度降低, 总浓度为 8% 便可形成稳定的凝胶, 此结论与前人<sup>[14]</sup>报道结果一致。从表 1 还可看出,  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  形成的凝胶结构较松散; 而  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  形成的凝胶表面平整光滑, 结构紧实。对于超高压诱导方法, 压力  $<400\text{ MPa}$  处理的  $\beta$ -葡聚糖溶液基本不能形成凝胶, 而压力  $>400\text{ MPa}$  时, 高于 12% 的  $\beta$ -葡聚糖可形成凝胶, 当压力增加到 500 MPa, 成胶浓度为 7%。但 400 MPa 时凝胶不易成形, 表面粗糙, 结构松散; 而 600 MPa 形成的凝胶表面平整光滑, 结构紧实。超高压可使多糖的分子结构和空间构象发生改变, 影响其物理化学性质, 如流变学性

质, 从而影响其凝胶性<sup>[15-16]</sup>。

### 2.2 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶流变性能

酸奶质地、口感、乳清析出等许多宏观特性与其流变学, 微观结构之间存在着很大的相关性。为了将  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶作为脂肪模拟物添加在乳制品中, 本试验对复合凝胶的流变、质构、微观结构以及加工特性进行了分析。由图 1(b) 可看出, 当热诱导制备  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的,  $\beta$ -葡聚糖总浓度  $<8\%$  时, 其  $G'$ 、 $G''$  随着  $\omega$  增加, 呈现增加的趋势, Winte 等<sup>[17]</sup>发现对于典型的凝胶体系,  $G'$  和  $G''$  相互平行且  $G'>G''$ , 因此, 当  $\beta$ -葡聚糖总浓度在  $8\% \sim 14\%$  时, 热诱导制备的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶可形成典型凝胶。但是, 超高压诱导的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶, 即使  $\beta$ -葡聚糖总浓度低于 8%, 依然形成典型的凝胶, 并且随着浓度增加,  $G'$ 、 $G''$  呈增加的趋势。当总浓度进一步升高到 15% 时, 超压诱导的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶均形成典型凝胶。这是因为超高压和热处理的凝胶形成机理不同, 其化学键破坏的方式不同, 因此形成的凝胶具有不同的特性。

### 2.3 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶持水持油性测定

由图 2 可以看出, 无论是超高压还是热诱导的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶, 其持水性和持油性随着浓度的增加而增加。超高压诱导的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶持水性的增加较为平缓, 当  $\beta$ -葡聚糖总浓度增加至 12% 后, 其持水性基本保持恒定。而热诱导的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶持水性随着  $\beta$ -葡聚糖总浓度的增加呈持续增加的趋势。超高压诱导的  $\beta$ -葡聚糖凝胶持水性始终高于热诱导的, 可能是高压在促进凝胶形成凝胶网络结构的同时, 水分充填在网络结构中, 有利于束缚住更多的水分, 使持水性增加, 同时也增加了凝胶强度<sup>[18]</sup>。2 种诱导方法制备的葡聚糖复合凝胶持油性如图 2(b) 所示。热诱导的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶持油性显著高于超高压诱导的, 且两者的变化趋势也不同。热诱导的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶随着  $\beta$ -葡聚糖浓度的增加呈先增加后降低的趋势。欲将  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶添加在乳制品中, 必须考虑其本身的流变特性。但将  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶应用在酸乳中的研究还未见报道, 在后续试验中

表 1 不同处理和  $\beta$ -葡聚糖浓度制备的复合凝胶状态<sup>†</sup>

Table 1 The surface of  $\beta$ -glucan mixed gel prepared at different concentrations by two treatments

方法	条件	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%
热诱导	$60\text{ }^{\circ}\text{C}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	$70\text{ }^{\circ}\text{C}$	—	—	—	—	—	—	+	+	++	++	++
	$80\text{ }^{\circ}\text{C}$	—	—	—	+	+	+	++	++	++	+++	+++
超高压诱导	200 MPa	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+
	400 MPa	—	—	—	—	—	—	—	+	+	+	+
	500 MPa	—	—	+	+	++	++	++	+++	+++	+++	+++

<sup>†</sup> “—”表示样品未形成凝胶; “+”表示样品形成凝胶, 但是较粗糙, 不够紧实; “++”表示凝胶较平整光滑; “+++”表示凝胶更光滑紧实。

可进一步开展研究。目前有报道<sup>[19]</sup>将明胶、果胶添加至牛乳中,明胶具有明显的吸水膨胀性,并且粘附于酪蛋白的表面加强了乳蛋白连接,可以有效地束缚水分。并且形成了弱的凝胶,利用极性基团吸附大量的水包裹到明胶凝胶中,粘附于酪蛋白表面,使得持水性升高<sup>[20-21]</sup>,但少量果胶的加入与酪蛋白发生“架桥絮凝”反应,使持水性降低,导致蛋白质过度重组产生了大块的酪蛋白聚集体<sup>[22]</sup>。

#### 2.4 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶质构性能测定

由图 3 可以看出, $\beta$ -葡聚糖总浓度以及制备方法对复合凝胶的质构特性影响显著。超高压诱导的 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的硬度、内聚性、弹性和咀嚼性高于热诱导的。热诱导的 $\beta$ -葡聚糖凝胶的硬度随着葡聚糖浓度的增加呈显

著先增加后降低的趋势( $P < 0.05$ ),当 $\beta$ -葡聚糖浓度达到 14% 时,其硬度最大,为 1.8 N,但显著低于超高压诱导的 $\beta$ -葡聚糖凝胶( $P < 0.05$ )。此现象与前人<sup>[23]</sup>研究结果相似。学者<sup>[24]</sup><sup>[32]</sup>指出,随着多糖浓度的上升,其耐压性越好。可能是随着多糖浓度的上升,更多分子间的非共价键形成,使得整个网络结构能够承受的压力越来越大。报道<sup>[25]</sup>指出,在酸乳中适当添加阿拉伯胶可以增加酸乳的硬度,但是添加过多由于空间位阻会破坏酪蛋白的交联,阻碍网络结构构建,引起抵抗外力性能变弱,从而导致凝乳硬度、内聚性都降低。

超高压诱导的 $\beta$ -葡聚糖凝胶,其内聚性随着 $\beta$ -葡聚糖浓度的增加保持恒定的趋势,而热诱导的 $\beta$ -葡聚糖凝胶其内聚性随着浓度的增加呈微小下降趋势[图 3(b)]。

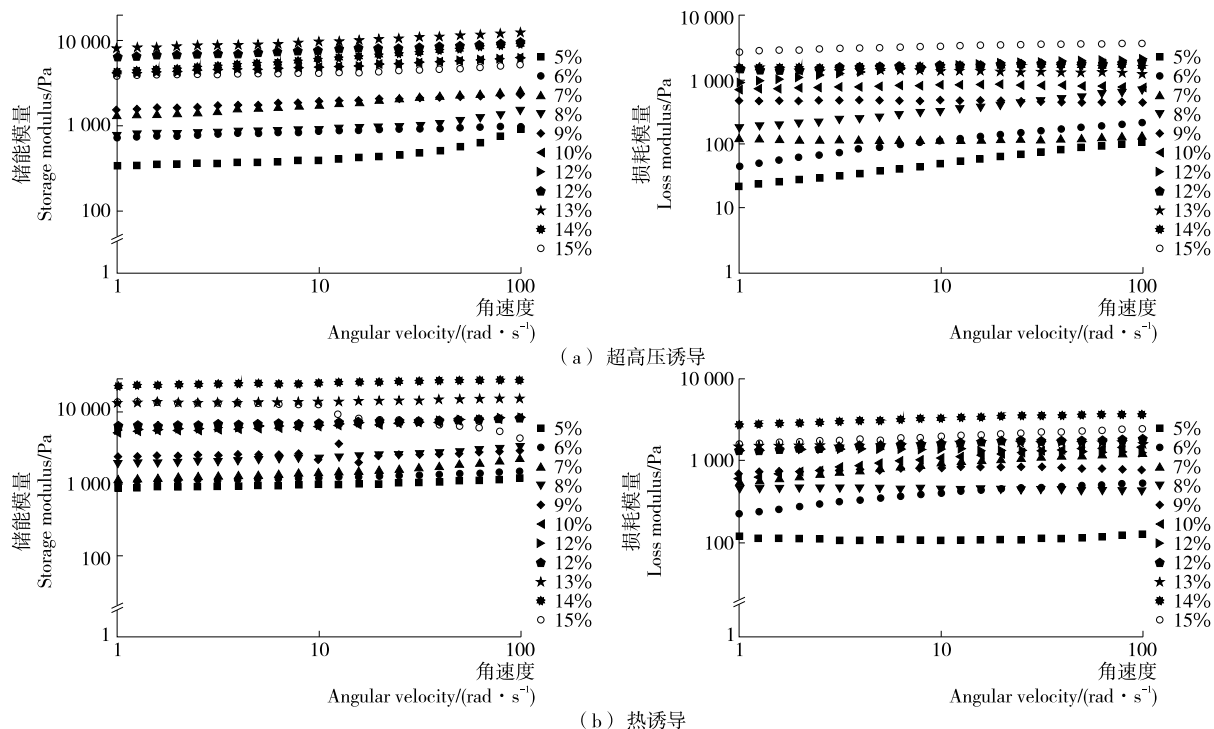


图 1 超高压诱导/热诱导的 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的频率扫描曲线

Figure 1 The frequency sweep curves of  $\beta$ -glucan mixed gels prepared with different treatments

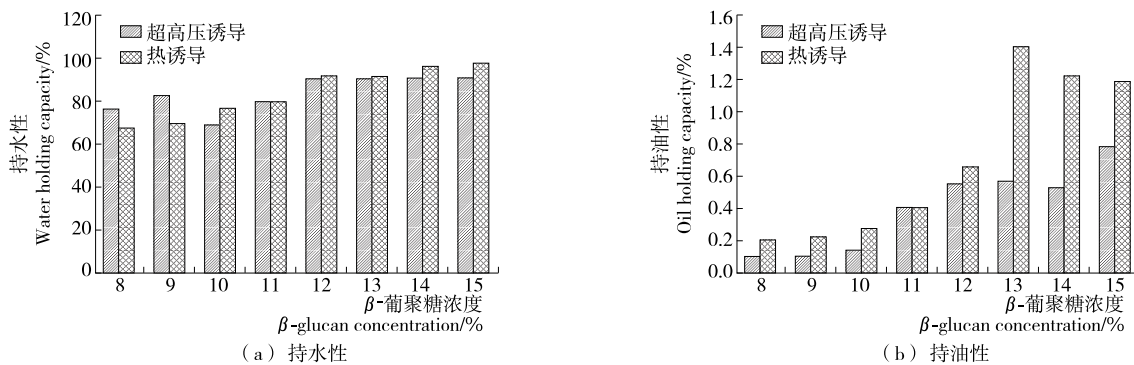


图 2 超高压诱导/热诱导的 $\beta$ -葡聚复合糖凝胶的持水持油性

Figure 2 The water and oil hold capacities of  $\beta$ -glucan mixed gels prepared with different treatments

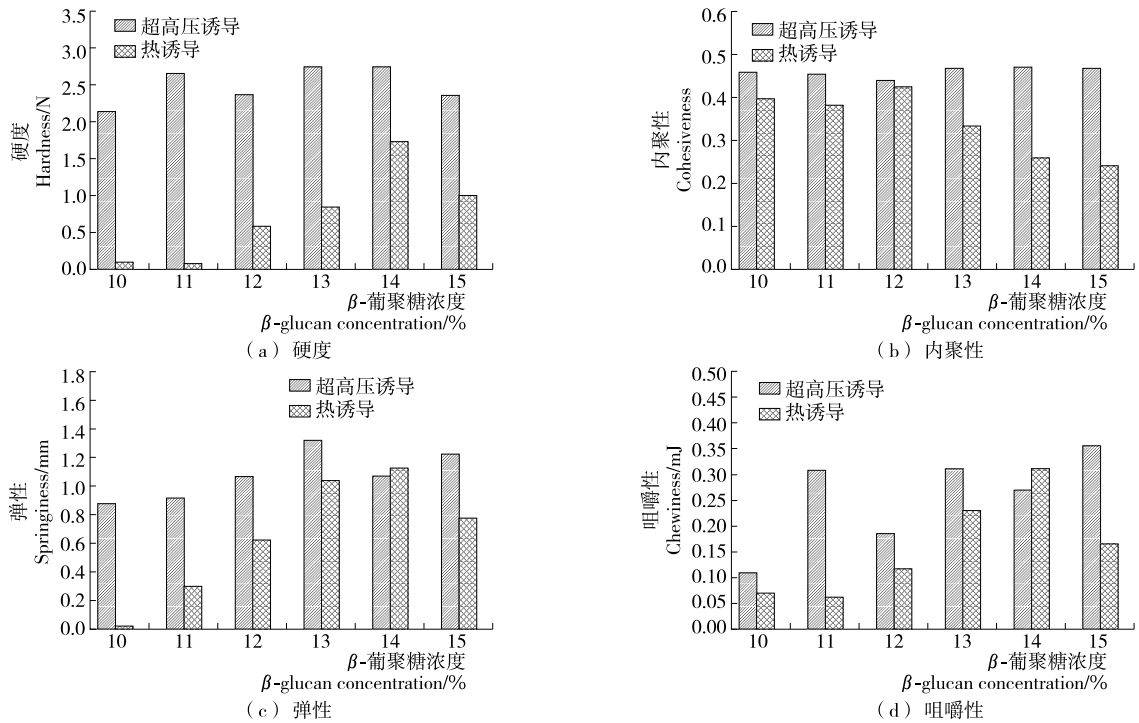


图3 超高压诱导/热诱导的β-葡聚糖复合凝胶的质构特征

Figure 3 Textural properties of β-glucan mixed gels prepared with different treatments

王锐<sup>[24]</sup><sup>35</sup>报道,随着玉米麸皮添加量的增加,鸭肉凝胶的凝聚性降低。

由图2(c)、(d)可看出,随着β-葡聚糖浓度的增加,β-葡聚糖凝胶的弹性和咀嚼性均呈先增后降趋势,此结果与卡拉胶-魔芋胶复合凝胶<sup>[26]</sup>的弹性和咀嚼性变化趋势相似。超高压诱导的β-葡聚糖复合凝胶弹性高于热诱导的,其结论与陆海霞等<sup>[27]</sup>研究结果一致。

### 2.5 β-葡聚糖复合凝胶冻融稳定性测定

对于特殊的食品乳液体系,冷冻是必备加工工序,如冰淇淋。乳液冷冻涉及到一系列物理化学变化,包括水和脂肪结晶、界面相转变和生物大分子构象改变及由此引起的连锁反应<sup>[28]</sup>,因此,探讨β-葡聚糖复合凝胶冻融循

环的持水性变化,对其应用在冷冻食品中是非常有必要的。图4显示不同诱导方式制备的凝胶在冻融循环中对β-葡聚糖凝胶持水性的影响。随着β-葡聚糖浓度增加,β-葡聚糖凝胶持水性增加,且超高压制备的持水性高于热诱导的。高压促使多糖发生解聚,溶解性升高,使更多的自由水与多糖形成结合水,增强了持水性能<sup>[29]</sup>;但不同方法诱导制备的β-葡聚糖,随着冻融循环次数的增加,其持水力均呈下降趋势。这是因为在反复冻融中,温度不断变化,冰晶不断消失和形成,对凝胶的网络有一定的破坏作用,使其截留水分的能力降低。经过5次冻融循环后,超高压诱导制备的15%的β-葡聚糖凝胶持水性降低至初始持水性的91%,而热诱导制备的β-葡聚糖凝胶持水性

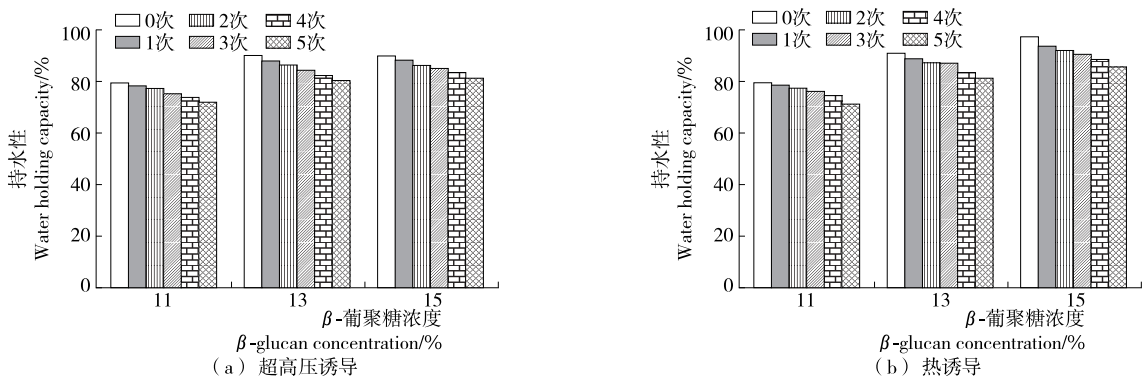


图4 超高压诱导/热诱导的β-葡聚糖复合凝胶的冻融循环的持水性特征

Figure 4 The water hold capacities of β-glucan mixed gels by different treatments in freeze-thaw cycle

降低至初始持水性的 87%，表明超高压诱导的  $\beta$ -葡聚糖凝胶的稳定性略优于热诱导的。因此，超高压诱导的  $\beta$ -葡聚糖凝胶为水包油乳液型冷冻食品、热敏性生物活性物质和低温储存药品的制备和研发提供一条有效的技术途径。

### 2.6 $\beta$ -葡聚糖复合凝胶微观结构表征

将  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶添加到酸奶中，改变了酸奶凝胶固有的微观结构，酸奶凝胶微孔的大小与其保水性及乳清析出的敏感性有关，微孔越均匀越细小，其保水性越好<sup>[30]</sup>。由图 5 可以看出，当  $\beta$ -葡聚糖总浓度较低时（10%），超高压诱导的  $\beta$ -葡聚糖凝胶表面较为光滑，而热诱导的  $\beta$ -葡聚糖凝胶表面粗糙，不均匀。当增加  $\beta$ -葡聚糖总浓度，超高压诱导的  $\beta$ -葡聚糖凝胶由簇状转化为团块状，且表面孔洞数量和体积均减少。通过比较发现，超高压诱导的  $\beta$ -葡聚糖凝胶表面较热诱导的均匀、致密，孔洞较小且分布均匀。综上所述，超高压诱导的  $\beta$ -葡聚糖凝胶更加适合应用在酸乳中。

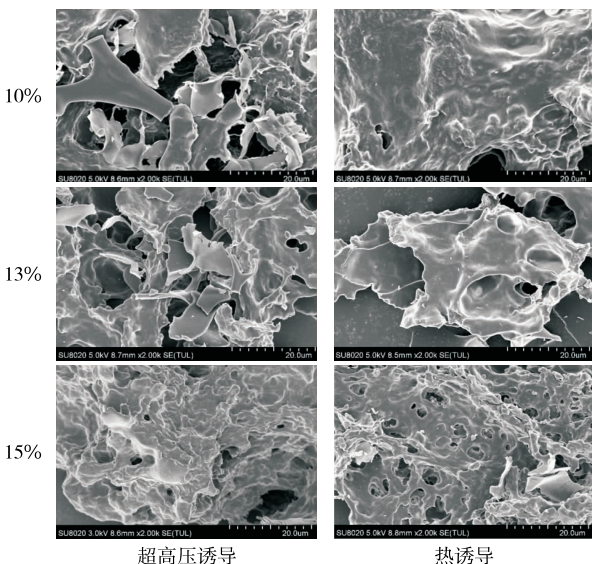


图 5 超高压诱导/热诱导的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的扫描电镜

Figure 5 SEM images of  $\beta$ -glucan mixed gel

## 3 结论

本试验系统分析了热诱导和超高压诱导制备的不同分子量的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的性质和微观结构，结果显示超高压诱导制备的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的凝胶强度、质构特征、微观结构以及持水性均优于热诱导制备的。此结论为推广超高压技术在多糖凝胶的制备方面以及优化  $\beta$ -葡聚糖凝胶，扩大其在食品中的应用提供了理论依据。在后期研究中，将对不同方法制备的  $\beta$ -葡聚糖复合凝胶的机理和应用进行深入研究。

## 参考文献

- [1] 董吉林, 田广瑞, 李建光, 等. 燕麦  $\beta$ -葡聚糖/大豆分离蛋白混合体系凝胶性研究[J]. 轻工学报, 2011, 26(1): 30-33.
- [2] IZYDORCZYK M S, BILIADERIS C G, MACRI L J, et al. Fractionation of oat (1 leads to 3), (1 leads to 4)-beta-D-glucans and characterisation of the fractions[J]. Journal of Cereal Science, 1998, 27(3): 321-325.
- [3] ZHANG D, DOEHLERT D C, MOORE W R. Factors Affecting Viscosity of Slurries of Oat Groat Flours[J]. Cereal Chemistry, 1997, 74(6): 722-726.
- [4] LAZARIDOU A, BILIADERIS C G, IZYDORCZYK M S. Molecular size effects on rheological properties of oat  $\beta$ -glucans in solution and gels[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(5): 693-712.
- [5] BÖHM N, KULICKE W M. Rheological studies of barley (1→3)(1→4)- $\beta$ -glucan in concentrated solution: mechanistic and kinetic investigation of the gel formation [J]. Carbohydrate Research, 1999, 315(3/4): 302-311.
- [6] TRUJILLO A J, CAPELLAS M, SALDO J, et al. Applications of high-hydrostatic pressure on milk and dairy products: a review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2002, 3(4): 619-626
- [7] YANG Zhi, GU Qin-fen, HEMAR Y. In situ study of maize starch gelatinization under ultra-high hydrostatic pressure using X-ray diffraction[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 97(1): 235-238.
- [8] LI Wen-hao, BAI Yun-fei, MOUSAA S A S, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical and structural properties of rice starch [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(6): 2 233-2 241.
- [9] YANG Bao, JIANG Yue-ming, WANG Rui, et al. Ultra-high pressure treatment effects on polysaccharides and lignins of longan fruit pericarp[J]. Food Chemistry, 2009, 112(2): 428-431.
- [10] ZHANG Zi-ye, YANG Yu-ling, TANG Xiao-zhi, et al. Chemical forces and water holding capacity study of heat-induced myofibrillar protein gel as affected by high pressure[J]. Food Chemistry, 2015, 188: 111-118.
- [11] 左锋, 李雪, 杨舒, 等. 肉桂酸基油脂凝胶的制备及其流变特性和结晶特性分析[J]. 食品科学, 2018(14): 1-10.
- [12] 彭晶. 菜籽蛋白的制备及其对白鲢鱼糜凝胶特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017: 34-37.
- [13] DOUBLIER J L, WOOD P J. Rheological properties of aqueous solutions of (1-3)(1-4)-B-D-Glucan from oats(AvenasativaL1) [J]. Cereal Chemistry, 1995, 72(4): 335-340.
- [14] 申瑞玲, 姚惠源. 裸燕麦麸  $\beta$  葡聚糖的流变学特性及凝胶形成[J]. 食品与生物技术学报, 2005, 24(1): 41-44.
- [15] ABBASI S, DICKINSON E. Gelation of  $\kappa$ -carrageenan and micellar casein mixtures under high hydrostatic pressure[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(6): 1 705-1 714.

(下转第 61 页)

- 汁脱色效率的研究[J]. 甘蔗糖业, 2000(1): 33-37.
- [10] 刘和清. PSAZ-亚硫酸法澄清新工艺试验[J]. 广西蔗糖, 1996(3): 51-54.
- [11] 刘淑云. 聚硅酸硫酸铜锌絮凝剂的制备及其在造纸废水中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006: 31-32.
- [12] 李璠, 郑长庚. 甘蔗制糖化学管理分析方法[M]. 北京: 轻工业出版社, 1995: 59-76.
- [13] 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 等. 聚合铝基复合絮凝剂的电荷特性及絮凝作用[J]. 环境科学, 2003(1): 103-106.
- [14] YE Lan-lan, LI Feng, WU Tao, et al. Rapid and effective removal of sodium lignosulfonate from aqueous solutions by in-situ formed magnesium hydroxide[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2016, 33(12): 1-9.
- [15] LEE K E, MORAD N, TENG T T, et al. Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 203(5): 370-386.
- [16] 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 等. 聚合铝基复合絮凝剂的电荷特性及絮凝作用[J]. 环境科学, 2003(1): 103-106.
- [17] SASKA M, ZOSSI B S, 刘慧霞, 等. 石灰法、亚硫酸法和碳酸法清净对蔗汁脱色(下)[J]. 甘蔗糖业, 2013(4): 31-35.
- [18] LEE K E, MORAD N, TENG T T, et al. Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 203(5): 370-386.
- [19] 王雪枫, 黄雪莉, 李培. 聚硅酸锌絮凝剂的制备工艺及絮凝性能研究[J]. 水处理技术, 2013, 39(1): 33-36.
- [20] WU Can, LIU Wei-zhen, ZHANG Jing, et al. Mechanisms of synergistic removal of low concentration As(V) by nZVI@Mg(OH)<sub>2</sub> nanocomposite[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2017, DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b06356.
- [21] WANG Zhi-ping, LI Chun-hui, MU Yan, et al. Nanoadduct relieves: Alleviation of developmental toxicity of Cr(VI) due to its spontaneous adsorption to Mg(OH)<sub>2</sub> nanoflakes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 287: 296-305.
- [22] GRADY Hanrahan, KENNETH Lu. Application of factorial and response surface methodology in modern experimental design and optimization[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2006, 36(3/4): 141-151.
- [23] SALEEM M M, SOMÁ A. Design of experiments based factorial design and response surface methodology for MEMS optimization[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(1): 263-276.
- [24] 何惠欢, 梁贤慧, 陆登俊. 亚硫酸法甘蔗糖厂澄清工艺条件对蔗汁除酚和脱色效果的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(5): 112-115.
- [25] SASKA M, ZOSSI B S, 刘慧霞, 等. 石灰法、亚硫酸法和碳酸法清净对蔗汁脱色(上)[J]. 甘蔗糖业, 2013(2): 33-36.
- [26] LI Hai-yan, LIU Shi-yu, ZHAO Jian-hai, et al. Removal of reactive dyes from wastewater assisted with kaolin clay by magnesium hydroxide coagulation process[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2016, 494: 222-227.
- [27] 许小洁, 吴纯德, 叶健, 等. 基于 Zeta 电位的硅藻土复配剂强化混凝研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 151-153.
- (上接第 20 页)
- [16] 李汴生, 曾庆孝, 芮汉明, 等. 高压对食品胶溶液流变特性的影响[J]. 高压物理学报, 2001(1): 64-69.
- [17] WINTER H H, CHAMBON F. Analysis of linear viscoelasticity of a crosslinking polymer at the gel point[J]. Journal of Rheology, 1986, 30(2): 367-382.
- [18] OH H E, PINDER D N, HEMAR Y, et al. Effect of high-pressure treatment on various starch-in-water suspensions[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(1): 150-155.
- [19] SUPAVITIPATANA P, WIRJANTORO T I, APICHTARTSRANGKON A, et al. Addition of gelatin enhanced gelation of corn-milk yogurt[J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 211-216.
- [20] 熊丹丹, 易敏之, 熊恩智, 等. 明胶的凝胶化及凝胶强度的影响因素研究[J]. 江西中医药大学学报, 2015(2): 94-96.
- [21] FISZMAN S M, LLUCH M A, SALVADOR A. Effect of addition of gelatin on microstructure of acidic milk gels and yoghurt and on their rheological properties[J]. International Dairy Journal, 1999, 9(12): 895-901.
- [22] KUMAR P, MISHRA H N. Mango soy fortified set yoghurt: Effect of stabilizer addition on physicochemical, sensory and textural properties[J]. Food Chemistry, 2004, 87(4): 501-507.
- [23] CHEN Xing, CHEN Cong-gui, ZHOU Yan-zi, et al. Effects of high pressure processing on the thermal gelling properties of chicken breast myosin containing  $\kappa$ -carrageenan[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 262-272.
- [24] 王锐. 膳食纤维和超高压对重组鸭肉凝胶品质特性的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [25] 曾令鹤, 钱方, 姜淑娟, 等. 酸乳体系中乳酸菌胞外多糖与蛋白相互作用研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 246-249.
- [26] 陈梓铠. 超高压对多糖凝胶的性能影响及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 45-48.
- [27] 陆海霞, 张蕾, 李学鹏, 等. 超高压对秘鲁鲑鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 1107-1114.
- [28] WANG L L, XIONG You-ling. Inhibition of lipid oxidation in cooked beef patties by hydrolyzed potato protein is related to its reducing and radical scavenging ability [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(23): 9186-9192.
- [29] YANG Jian, DUNKER A K, POWERS J R, et al.  $\beta$ -Lactoglobulin molten globule induced by high pressure [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(7): 2363-2368.
- [30] LUCEY J A. Formation and Physical Properties of Milk Protein Gels[J]. Journal of Dairy Science, 2002, 85(2): 281-294.