

羧甲基纤维素钠对大豆蛋白凝胶特性的影响

Effect of Sodiuncarboxy methyl cellulose on the gel properties of soybean protein

苗钟化¹ 辛宜聪¹ 曾瑞琪¹ 郑炯^{1,2}

MIAO Zhong-hua¹ XIN Yi-cong¹ ZENG Rui-qi¹ ZHENG Jiong^{1,2}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆市特色食品工程技术研究中心, 重庆 400715)

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Engineering Research Center of Regional Food, Chongqing 400715, China)

摘要: 为探究羧甲基纤维素钠 (Sodiuncarboxy methyl cellulose, CMC) 对大豆蛋白凝胶特性的影响, 向质量分数为 5% 的大豆分离蛋白凝胶中, 分别加入 0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% 的 CMC, 研究凝胶体系的流变、质构、持水性及微观结构的变化。结果表明: 凝胶体系的动态黏弹性会随着 CMC 的加入量增加, 出现明显变化, 凝胶体系的储能模量随着 CMC 的加入持续升高, 但损耗角正切逐渐减小。当 CMC 用量超过 0.3% 后体系的储能模量略有降低, 损耗角正切出现回升。随着 CMC 的加入, 凝胶的硬度、弹性、内聚性、持水性和咀嚼性都在逐渐提升, 并在 CMC 的添加量达到 0.3% 时最大。微观结构表明: CMC 的加入有助于凝胶多孔的形成, 在 CMC 的加入量达到 0.3% 时凝胶的孔隙较多, 凝胶结构更为致密, 继续加入 CMC 会导致凝胶网络结构受到影响。

关键词: 羧甲基纤维素钠; 大豆蛋白; 流变特性; 凝胶结构

Abstract: In order to investigate the influence of sodiuncarboxy methyl cellulose on the gel properties of soybean protein, CMC of 0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, and 0.4% were added, respectively, to soybean protein with a mass fraction of 5%, and the change of the rheological properties, gelation and microstructure were also studied. The results showed that the dynamic viscoelasticity of the gel system changed, and the storage modulus of the gel system increased with the addition of CMC. However, the loss tangent decreased gradually with the addition of CMC. When the amount of CMC exceeded 0.3%, the storage modulus of the system decreased slightly and the loss tangent rose. With the addition of CMC, the hardness, elasticity, cohesion, water retention and chewiness of the gel in-

creased, and these properties reached maximum when the addition of CMC was 0.3%. The microstructure showed that the addition of CMC contributed to the formation of the gel. In addition, when the amount of CMC was 0.3%, the gel has more pores with more dense structure, nevertheless, too much CMC could influence the stability of the gel network.

Keywords: sodiuncarboxy methyl cellulose; soybean protein; rheological properties; quality and structure

大豆蛋白被认为是可以媲美动物蛋白营养价值的植物蛋白^[1], 因其含有 8 种必须氨基酸, 且其含量接近于 FAO/WHO 的理想建议值, 所以大豆蛋白已在世界范围内被各个国家用作食品原料开发产品, 据报道^{[2]15-16} 美国已有大豆蛋白食品高达 2 500 多种。除被用作食品原料外, 由于大豆蛋白还具有良好的凝胶性、起泡性、乳化性和持水性等功能特性^[3], 因此在食品工业中常将其添加入产品, 以改良产品的流变或质构特性, 保持良好的吸水性或稳定性^[4-5]。据报道, 李维瑶等^[6]使用了大豆蛋白与乳化剂复配得到了高起泡性的植物蛋白起泡剂; Matulis 等^[7]发现在肠中添加 3% 的大豆蛋白可以显著改善凝胶硬度。目前中国主要生产普通凝胶型大豆蛋白, 因其产品功能性和稳定性较差, 在食品加工中容易变性, 分散性差因此应用领域窄, 高档功能性蛋白仍主要依靠进口^{[2]15}。将多糖加入大豆蛋白凝胶体系以改善大豆蛋白的性能, 得到高专用性能的大豆蛋白如高起泡型、高凝胶型和高乳化型的大豆蛋白是目前的研究热点之一。

羧甲基纤维素钠 (Sodiuncarboxy methyl cellulose, CMC) 是一种纤维素衍生物, 也是最主要的离子型纤维素胶。由于具有独特的悬浮性、增稠性和黏合性等^[8], 在食品行业中常将其用作增稠剂、稳定剂、乳化剂或持水剂添加于食品中。李静等^[9]报道, CMC 添加于乳饮料中可以明显改善溶液的稳定性; 刘梅等^[10]发现在软冰淇淋中添加 CMC 可以有效降低冰

基金项目: 中央高校基本科研业务费 (编号: XDJK2016B035, SWU20161702001)

作者简介: 苗钟化, 男, 西南大学在读本科生。

通信作者: 郑炯 (1982—), 男, 西南大学副教授, 博士。

E-mail: zhengjiong_swu@126.com

收稿日期: 2017-02-14

淇淋的硬度。此外由于食品复合胶不仅可以发挥单种胶体的优良性能,还可以同其他胶体互补,因此也有关于 CMC 同其他食品胶复配的研究。如李新新等^[11]报道了果胶与 CMC 复配后显著地提升了酸豆乳的稳定性;刘彦等^[12]报道了阿拉伯胶与 CMC 的加入可以改良面团的流变学特性。

目前有研究^[13]使用 CMC 与大豆分离蛋白,制成了良好的包装材料。还有研究报道^[14-15]使用 CMC 与大豆蛋白可以制得性能良好的复合膜。但将 CMC 添加到大豆蛋白中,制备多糖-蛋白质的复合凝胶用于食品加工中的报道较少。本试验以大豆蛋白为原料,考察不同添加量的 CMC 对凝胶流变性能、质构特性、持水性以及微观结构的影响,为 CMC/大豆蛋白凝胶体系的研究与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

羧甲基纤维素钠:食品级,杭州普修化工产品有限公司;
大豆蛋白:食品级,河南千志商贸有限公司;
葡萄糖酸内酯:食品级,江西新黄海医药食品化工有限公司。

1.2 仪器与设备

电子分析天平:FA2004A 型,上海精天电子仪器有限公司;
旋转流变仪:AR-G2 型,美国 TA 公司;
物性测定仪:TA.XT2i 型,英国 Stable Micro Systems 公司;
钨灯丝扫描电子显微镜:JSM-6510LV 型,日本电子株式会社(JEOL);
高速台式离心机:TGL-16B 型,上海安亭科学仪器厂。

1.3 试验方法

1.3.1 凝胶的制备 参考李向红等^[16]的方法,称取一定量的大豆分离蛋白和 CMC,加入不同质量的去离子水,使得大豆蛋白含量为 5%,CMC 的含量分别为 0%,0.1%,0.2%,0.3%,0.4%。混合后置于 80℃的水浴锅中,搅拌加热 30 min,取出置于冰水浴中降至室温,加入 0.60%的葡萄糖酸内酯作为凝固剂,搅拌 1 min 使凝固剂在溶液中分散均匀,再用保鲜膜覆盖后置于水浴锅中 80℃静置加热 30 min。随后取出烧杯,待溶液稳定冷却到室温后置于 4℃冰箱中保存备用。

1.3.2 流变特性的测定 根据文献^[17]修改后如下:

(1) 动态黏弹性测定:设置扫描应变值为 1%,振荡频率设定从 0.1~10 Hz,保留时间 300 s,在 25℃下观察不同样品的储能模量 G' 、损耗模量 G'' 的变化情况。

(2) 动态温度扫描测定:设置温度扫描范围 25~80℃,每分钟降温 2℃,固定振荡频率 1 Hz,保留时间 300 s,观察不同样品的储能模量 G' 与损耗角正切 $\tan \delta$ 随温度的变化情况。

(3) 动态时间扫描测定:设置温度 30℃,固定振荡频率 1 rad/s,扫描应变 1%,保留时间 300 s,观察不同样品的储能模量 G' 、损耗角正切 $\tan \delta$ 在 1 h 内的变化。

1.3.3 持水性的测定 将凝胶切成大小 3 mm×3 mm×

3 mm,体积均一的小块,加入到离心管中进行持水性测定,离心条件为:在室温下,5 000 r/min 离心 20 min,每个样品测量 3 次取平均值。通过式(1)计算持水性:

$$WHC = \frac{W_1 - W_0}{W_2 - W_0}, \tag{1}$$

式中:
 WHC ——凝胶的持水性,g/g;
 W_0 ——50 mL 空离心管的质量,g;
 W_1 ——离心后去除上层水之后的离心管重量,g;
 W_2 ——称量前总质量,g。

1.3.4 质构的测定 参考金郁葱^[18]的方法制备凝胶样品,静置 12 h,采用 TA.XT2i 型物性测定仪对样品进行质地剖面分析(TPA)测试。测定条件为:探头 P/0.5;测前速度 1.00 mm/s;测试速率 1.00 mm/s;返回速度 1.00 mm/s;触发力 5.0 g;压缩形变程度 20%。

1.3.5 微观结构的观察 采用扫描电子显微镜(SEM)对所制备的样品进行微观结构的观察。进行电镜扫描前,将制备好的凝胶样品进行真空冷冻干燥,方便获得更清晰的图片。处理步骤:将制备好的凝胶放置在冰箱冷冻 24 h,再进行冷冻干燥 24 h。制备好的样品固定在样品台上,经离子溅射仪喷金后,在 15 kV 的电压和 2 000 放大倍率下进行扫描电镜的观察,选择有代表性并且清晰的视野进行拍摄记录。

1.4 数据处理

使用 SPSS 18.0、Microcal Origin 9.0 软件进行图表的绘制和数据的处理,数据结果用“平均值±标准差(Mean±S.E)”表示,使用 LSD 法($P<0.05$)比较平均值之间的差异性。

2 结果与分析

2.1 CMC 对大豆蛋白凝胶流变特性的影响

2.1.1 动态黏弹性流变特性 凝胶体系的动态黏弹性质实际上可以反映出物质的三维空间网络结构,其中储能模量又称为弹性模量反映了材料的弹性大小,损耗模量又称黏性模量反映了材料的黏性大小^[19]。损耗角正切是损耗模量 G'' 同储能模量 G' 的比值,损耗角正切越大则体系表现出更明显的流体特征,黏性越大,损耗角正切越小则体系表现出更明显的固体特征,弹性越大。由图 1 可知,随着 CMC 添加量的增大,大豆蛋白凝胶体系的储能模量 G' 逐渐上升,且在不同角频率下,添加了 CMC 的凝胶体系的储能模量,均比单一大豆蛋白的大。而图 2 表明随剪切频率的增大,体系的损耗角正切始终小于 1,因此凝胶体系表现出明显的固体特征,但随剪切频率的增大损耗角正切不断上升,可能是较高的剪切频率破坏了凝胶分子间的吸引作用。

添加 CMC 后的凝胶体系,其储能模量增加可能是大豆蛋白中含有大量的氨基、羧基、羟基等基团,会同 CMC 糖苷上的一OH 结合形成氢键,因此加大了凝胶的储能模量。而张超等^[14]通过红外光谱分析,也证明了在大豆蛋白中添加 CMC,会促使分子间发生交联反应,通过氢键结合形成更强的凝胶。但当 CMC 的加入量超过 0.3%后,凝胶体系的储能

模量有所下降,而损耗正切值也出现一定回升,可能是添加少量的 CMC 后,大豆蛋白分子会同 CMC 相连接,利于形成更多的孔洞以提升凝胶的弹性。姚玉静等^[20]认为大豆蛋白凝胶的强度与 pH 有重要关系,而添加量过多后,由于 CMC 是阴离子型多糖,它可能会中和葡萄糖酸内酯溶解后的 H^+ 离子,使得变性大豆蛋白质表面所带的负电荷增多,不利于蛋白质与蛋白质、蛋白质与 CMC 之间的交联结合形成空间网络结构^[21-22]。此时对凝胶体系而言由于静电斥力导致的不利因素起主导作用,因此凝胶体系的弹性有所下降,进而引起了损耗角正切略微的上升^[23]。

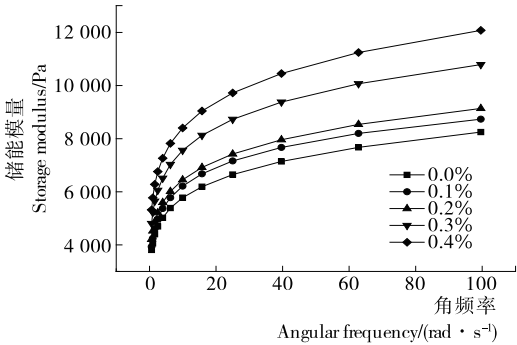


图 1 凝胶体系储能模量随角频率变化曲线

Figure 1 Curves of storage modulus with angular frequency of gel system

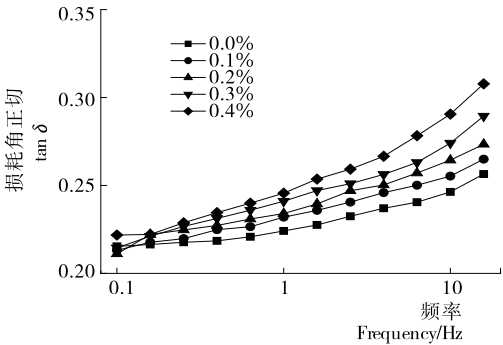


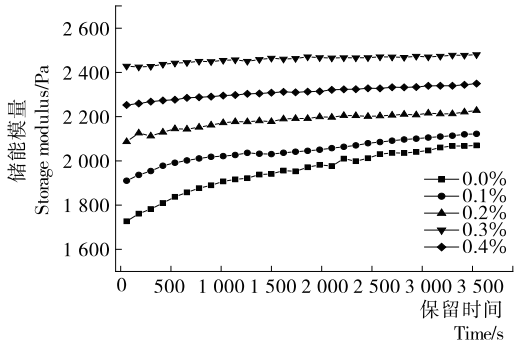
图 2 凝胶体系损耗角正切随频率变化曲线

Figure 2 Curves of $\tan \delta$ with frequency of gel system

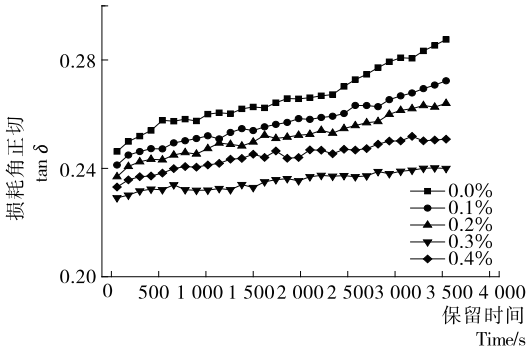
2.1.2 动态时间扫描 图 3(a)和(b)可显示大豆蛋白凝胶体系储能模量和损耗角正切在 1 h 内随时间的变化趋势。可以看出,添加了 CMC 的凝胶体系在 1 h 的时间扫描过程中,其储能模量与损耗角正切变化幅度较小,且在 CMC 添加量为 0.3% 时凝胶体系的储能模量和损耗角正切变化最为平稳。根据张逸婧等^[24]报道,CMC 添加后大豆蛋白的二级出现明显变化,其中 α -螺旋的含量降低, β -折叠和 β -转角的含量上升。而 α -螺旋主要依靠分子内氢键形成, β -折叠主要依靠分子间氢键形成^[25],因此推测在 CMC 添加量为 0.3% 时,蛋白质分子间以及蛋白质分子与 CMC 之间的氢键结合较多,此时氢键对凝胶形成的有利作用比 CMC 加入引起的静电斥力作用更强烈,因此储能模量达到最大值,同时损耗角正切也达到最小值,凝胶表现出更多的固体特征。但继续增加 CMC 的用量,CMC 引起的静电斥力作用会起主导作用,

导致凝胶的抗应变能力降低,储能模量有所下降,损耗角正切以及其变化程度也增大。

2.1.3 动态温度扫描 图 4(a)和(b)反映了凝胶体系在不同温度下储能模量和损耗正切值变化趋势,图 5 则是不同



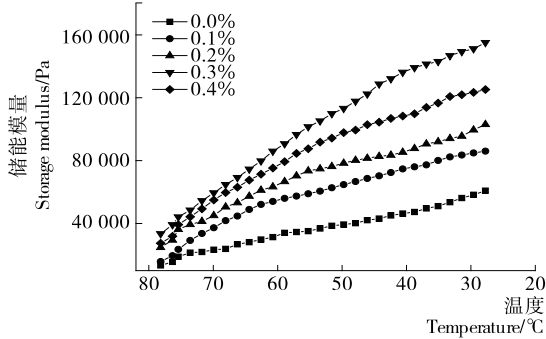
(a) 储能模量



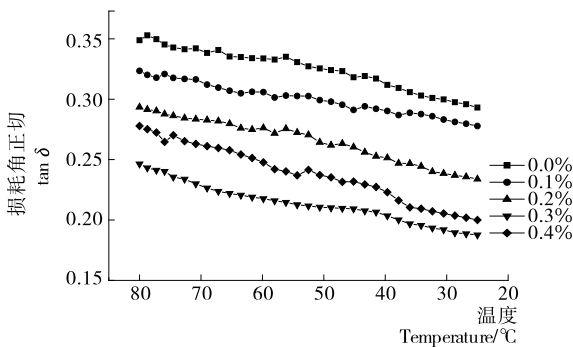
(b) 损耗角正切

图 3 凝胶体系储能模量及损耗角正切随保留时间变化曲线

Figure 3 Curves of storage modulus and $\tan \delta$ with time of gel systems



(a) 储能模量



(b) 损耗角正切

图 4 凝胶体系储能模量及损耗角正切随温度变化曲线

Figure 4 Curves of storage modulus and $\tan \delta$ with temperature of gel systems

CMC添加量下凝胶体系的储能模量峰值。图4表明,随着温度的降低,凝胶的储能模量在不断增加,而损耗正切值也在逐渐降低。

张海瑞^[26]认为,大豆蛋白在加热条件下,大豆蛋白质分子会解离、变性,分子间与分子内的氢键断裂,分子内部基团被打开,此时蛋白质功能基团暴露,蛋白质分子充分展开,因此凝胶体系的弹性模量低。在降温初期,由于温度还较高,氢键不易形成,因此凝胶体系的弹性模量增加缓慢。随着温度的下降,可以看出弹性模量迅速增加,可能是加入的葡萄糖酸内酯,已经降低了蛋白质分子中负电荷基团间的静电斥力,使得温度下降后蛋白质分子内、蛋白质分子间、蛋白质分子与CMC可以迅速形成氢键。因此在降温后期氢键的迅速形成可能导致了凝胶弹性模量的上升,以及损耗角正切的降低,此时凝胶的固体特征越来越明显。但当温度继续下降,凝胶体系的弹性模量上升趋势变缓,可能是此时凝胶体系的结构逐渐趋于稳定,分子间与分子内的氢键大部分已经形成,因此导致了曲线的变化速度减小。

图5表明,添加了CMC后的凝胶体系,其储能模量的峰值均大于未添加CMC的单一大豆蛋白凝胶体系,且当CMC添加量达到0.3%时凝胶体系的储能模量达到峰值。研究^[27]表明,大豆蛋白凝胶形成的主要作用力为疏水相互作用和氢键,凝胶结构的维持则主要靠二硫键和氢键的作用。而CMC的添加,加强了凝胶体系中的氢键^[13],因此随着CMC的用量增加体系的储能模量峰值不断上升。但熊振^[28]指出多糖与蛋白质的凝胶过程还会受到体系中电荷数目的影响,当添加过多的CMC后,由于体系中负电荷数目的

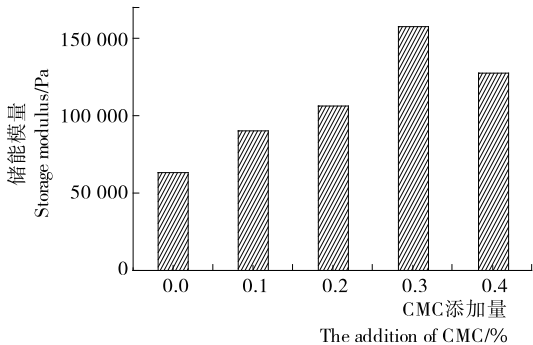


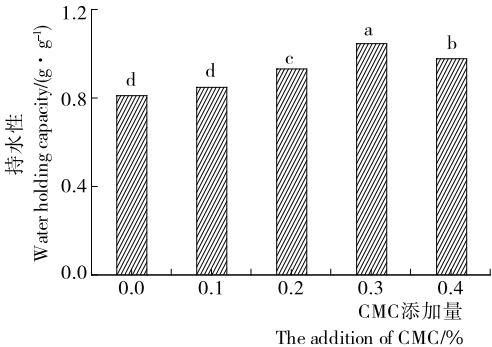
图5 凝胶体系储能模量峰值

Figure 5 The peak of the storage modulus of the gel systems

增多,阴离子多糖与蛋白质之间的静电斥力逐渐加大,使凝胶的形成受到影响,反而降低了凝胶体系的储能模量峰值。

2.2 CMC对大豆蛋白凝胶持水性的影响

图6为不同CMC添加量的大豆蛋白凝胶持水性的变化趋势。可以看出添加适量CMC后的凝胶体系持水性有不同程度的上升,并且在CMC添加量达到0.3%时其持水性达到最大,继续添加CMC后,凝胶体系的持水性稍有下降。谭慧^[29]指出在静压力的作用下添加了CMC的大豆蛋白凝胶体系的持水性会显著提升,且远高于单一大豆蛋白的持水性。这印证了CMC—大豆蛋白复合体系的空间网络结构更加致密,因此在压力的作用下凝胶仍然能够保持较好的持水性。



不同字母代表显著性差异(P<0.05)

图6 凝胶体系持水性随CMC添加量变化曲线

Figure 6 The change of the water holding capacity of the gel system with the addition of CMC

2.3 CMC对大豆蛋白凝胶质构特性的影响

表1是添加CMC后大豆蛋白凝胶体系的质构参数,可以看出,硬度、弹性和咀嚼性在CMC添加量为0.3%时达到最大,但黏度和内聚性则在不断上升。由表1可知,大豆蛋白单一成胶,其各方面机械强度与形变性能都较差,可能是大豆蛋白形成的单一凝胶结构简单。金郁葱^[17]认为凝胶网络结构中的孔隙大小和数目会对凝胶的机械性能有影响,适当的孔洞数目与孔隙大小会增加凝胶的硬度、咀嚼性和内聚性。因此推测少量CMC的加入会优化大豆蛋白的空间网络结构,由于其与大豆蛋白的交联作用,可能形成拥有更多更致密孔洞的凝胶结构,进而导致弹性、硬度、咀嚼性以及内聚性的增加。再继续增加CMC的用量,可能会导致不利于形

表1 添加CMC后大豆蛋白凝胶体系质构参数[†]

Table 1 Parameters of texture profile of soybean protein gel system after adding CMC					
CMC添加量/%	硬度/g	弹性	黏着性	咀嚼性	内聚性
0.0	60.56±2.58 ^d	0.717±0.13 ^e	19.39±2.08 ^e	15.46±1.93 ^e	0.409±0.001 ^d
0.1	75.14±3.48 ^c	0.755±0.13 ^d	22.60±1.15 ^d	22.60±1.15 ^d	0.426±0.003 ^c
0.2	86.73±5.22 ^b	0.840±0.14 ^c	36.58±3.67 ^c	36.59±3.67 ^c	0.453±0.007 ^b
0.3	119.56±4.20 ^a	0.941±0.20 ^a	43.78±3.31 ^b	54.56±2.26 ^a	0.493±0.002 ^a
0.4	93.68±4.32 ^b	0.894±0.01 ^b	54.56±2.26 ^a	43.78±3.31 ^b	0.495±0.004 ^a

[†] 同列不同字母代表显著性差异(P<0.05)。

成凝胶网络结构的因素居于主导地位,此时凝胶的网络结构可能会劣变,这解释了当 CMC 添加量超过 0.3%后硬度、弹性和咀嚼性下降的原因。同时试验发现,由于 CMC 的加入,在降温凝胶后复合凝胶会有更多的水析出,这可能导致了凝胶体系的黏性物质被浓缩,因而凝胶体系的黏着性不断上升。

2.4 CMC 对大豆蛋白凝胶微观结构的影响

图 7 为不同 CMC 添加量的大豆蛋白凝胶体系在 2 000 倍下的扫描电镜观察图。图 7(a)表明,未添加 CMC 的凝胶体系,其胶束表面凹凸较多,不平整光滑,凝胶结构较为简单,形成的凝胶网络与孔洞较少,且可以看出孔洞的孔径较小。而图 7(b)则为 0.1%添加量的观察图,可以看出随 CMC 的加入,凝胶体系的胶束逐渐平整光滑,胶束上的凹坑和突起逐渐较少,并开始形成细小的孔洞与立体的空间结构。图 7(c)和(d)分别显示 0.2%和 0.3% CMC 添加量的大豆蛋白凝胶体系,可以看出凝胶的胶束表面更为光滑,突起凹坑较少,其凝胶网络在逐渐优化,出现了更多的立体空间结构,形成了更多的凝胶多孔结构,且其孔洞孔径也在逐渐变大。而图 7(e)显示出,随 CMC 的继续添加,凝胶胶束虽然仍然平整光滑,但是其网络结构中的孔洞数目有所减少,胶束之间的距离增大,使得凝胶的孔径变大,导致部分空间间隔较大无法形成凝胶网络。此时凝胶体系中的 CMC 添加量已经超过 0.3%,因此推测过多的 CMC 加入后可能由于其所带的负电荷过多,同蛋白质分子展开后的某些基团相互排斥,造成胶束之间的距离变大,进而导致形成的凝胶网络结构受到影响。

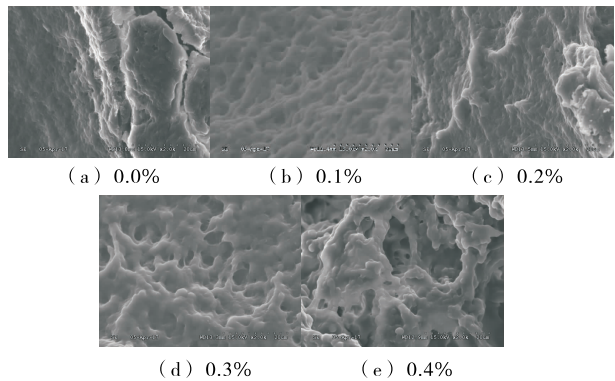


图 7 不同 CMC 添加量的大豆蛋白凝胶体系电镜扫描图
Figure 7 Scanning electron microscope images of different content CMC in soybean protein gel system

3 结论

(1) CMC 的加入使得大豆蛋白凝胶的流变性有所改善,其弹性、黏性等流变学特征得到了优化,凝胶体系抗应变能力也得到了提升,但加入过多的 CMC 后,反而会导致凝胶的流变学特性下降。

(2) 随 CMC 的用量增加,大豆蛋白凝胶的硬度、弹性、黏性、咀嚼性以及持水性都得到了不同程度的改善。除黏度外这些性能在 CMC 添加量为 0.3%时达到最大,但黏度仍然没有出现下降的趋势。微观结果表明,适量 CMC 的添加利

于凝胶体系的空间网络形成,但添加过多则会导致凝胶网络结构受到影响。

(3) 综合考虑以上结果,可以看出适量添加 CMC,对大豆蛋白凝胶体系有着明显的优化作用。这种凝胶体系或许可以在肉制品、焙烤制品以及豆腐制品中发挥其功能作用。但中国关于 CMC 对大豆蛋白凝胶体系的研究报道较少,还需要进一步的研究以便拓宽 CMC-大豆蛋白复合凝胶在食品行业中的应用。

参考文献

[1] BAINY E M, TOSH S M, CORREDIGM, et al. Protein Subunit Composition Effects on the Thermal Denaturation at Different Stages During the Soy Protein Isolate Processing and Gelation Profiles of Soy Protein Isolates[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2008, 85(6): 581-590.

[2] 罗东辉. 均质改性大豆蛋白功能特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 15-16.

[3] WENG Wu-yin, ZHENG Hui-bin. Effect of transglutaminase on properties of tilapia scale gelatin films incorporated with soy protein isolate[J]. Food Chemistry, 2015, 169: 255-260.

[4] TANG Chuan-he H, WU Hui, CHEN Zhong, et al. Formation and properties of glycinin-rich and β -conglycinin-rich soy protein isolate gels induced by microbial transglutaminase[J]. Food Research International, 2006, 39(1): 87-97.

[5] 张秋会, 李苗云, 黄现青, 等. 肉制品的质构特性及其评价[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 36-39.

[6] 李维瑶. 高起泡性大豆分离蛋白的研究及其在蛋糕中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 35-36.

[7] MATULIS R J, MCKEITH F K, SUTHERLAND J W, et al. Sensory Characteristics of Frankfurters as Affected by Salt, Fat, Soy Protein, and Carrageenan[J]. Journal of Food Science, 1994, 60(1): 48-54.

[8] CHENG L H, KARIM A A, SEOW C C. Characterisation of composite films made of konjac glucomannan (KGM), carboxymethyl cellulose (CMC) and lipid[J]. Food Chemistry, 2008, 107(1): 411-418.

[9] 李静, 杜柏桥, 黄龙, 等. 羧甲基纤维素钠溶液的流变性质及其在酸性乳饮料中的应用[J]. 食品科学, 2007, 28(11): 56-59.

[10] 刘梅森, 何唯平, 陈胜利. 稳定剂对软冰淇淋品质影响研究[J]. 食品科学, 2006, 27(5): 124-128.

[11] 李新新, 刘志胜, 邬娟, 等. 响应面试验优化果胶和羧甲基纤维素钠复配稳定酸豆乳体系[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 51-55.

[12] 刘彦, 黄卫宁, 贾春利, 等. 阿拉伯胶和羧甲基纤维素钠对荞麦面团发酵流变学及烘焙特性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(17): 5-9.

[13] 张超, 郭晓飞, 李武, 等. 羧甲基纤维素含量对大豆分离蛋白复合包装材料结构和性能的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(2): 187-192.

[14] 张超, 郭晓飞, 李武, 等. 干燥温度对大豆分离蛋白/羧甲基纤维素复合膜性能的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(10): 317-319.

[9] DOMINGUEZ T E, PLAZA G P, DIAZMORCILLO A, et al. Optimizations of electric field uniformity in microwave heating systems by means of multi-feeding and genetic algorithms[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2007, 29(1): 149-162.

[10] ROMANO V R, MARRA F, TAMMARO U. Modelling of microwave heating of foodstuff: study on the influence of sample dimensions with a FEM approach[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(3): 233-241.

[11] PITCHAI K, CHEN J J, BIRLA S, et al. Multiphysics modeling of microwave heating of a frozen heterogeneous meal rotating on a turntable[J]. Journal of Food Science, 2015(80): 2 803-2 814.

[12] 宋文瀚, 王瑞芳, 李占勇, 等. 导电粒子对改善微波加热食品中局部过热现象的研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 15-20.

[13] KOSKINIEMI C B, TRUONG V D, SIMUNOVIC J, et al. Improvement of heating uniformity in packaged acidified vegetables pasteurized with a 915 MHz continuous microwave system[J]. Journal of Food Engineering, 2011,105(1): 149-160.

[14] SCHUBERT H, REGIER M. The microwave processing of foods [M]. Cambridge: Woodhead Publishing in Food Science, 2005: 112.

[15] PU Yuan-yuan, SUN Da-wen. Prediction of moisture content uniformity of microwave-vacuum dried mangoes as affected by different shapes using NIR hyperspectral imaging[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 348-356.

[16] 姚斌, 郑勤红, 钟汝能, 等. 馈口位置及负载对微波加热效率的影响及其优化[J]. 材料导报, 2012, 26(8): 161-163.

[17] LIU Shi-xiong, FUKUOKA M. Modeling of fish boiling under microwave irradiation[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 140: 9-18.

[18] PITCHAI K, CHEN Ji-jian, BIRLA S, et al. Modeling microwave heating of frozen mashed potato in a domestic oven incorporating electromagnetic Journal of Food Engineering[J]. Frequency Spectrum, 2016, 173(7): 124-131.

[19] MADHUCHHANDA B, TANMAY B. A comprehensive analysis on the effect of shape on the microwave heating dynamics of food materials [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 39: 247-266.

[20] ITYAY Y, UCHIYAMA S, HATANO S, et al. Effect of Scattering by Fluidization of Electrically Conductive Beads on Electrical Field Intensity Profile in Microwave Dryers [J]. Drying Technology, 2005, 23(1/2): 273-287.

[21] 戴辉明, 郭雯, 程裕东, 等. 不同形状包装食品在微波加热过程中的三维温度分布[J]. 食品工业科技, 2015, 36(13): 82-86.

[22] ZHOU Rong, YANG Xiao-qing, SUN Di, et al. Multiple tube structure for heating uniformity and efficiency optimization of microwave ovens[J]. European Physical Journal Applied Physics, 2015, 69(2): 20-21.

[23] HONG Yi-du, LIN Bai-quan, LI He, et al. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 93: 1 145-1 154.

[24] PENG Zhi-wei, HWANG J Y, PARK C L, et al. Numerical analysis of heat transfer characteristics in microwave heating of magnetic dielectrics [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(3): 1 070-1 078.

[25] GEEDIPALLI S SR, RAKESH V, DATTA A K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(3): 359-368.

[26] 张成怀, 魏光辉. 混响室测试区域均匀性分布规律仿真分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1 537-1 541.

[27] PEDREÑO-MOLINA J L, MONZÓ-CABRERA J, PINZO-LAS. A new procedure for power efficiency optimization in microwave ovens based on thermographic measurements and load location search[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2007, 15(5): 564-569.

(上接第 65 页)

[15] 白绘宇, 王娟勤, 陈耀, 等. 大豆分离蛋白/透明质酸/羧甲基纤维素钠复合膜及其制备方法: 中国, CN102807681A[P]. 2012-12-05.

[16] 李向红, 华欲飞, 刘展, 等. 大豆蛋白/葡聚糖混合体系相行为及流变性质的研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(2): 40-44.

[17] 朱建华, 杨晓泉, 龚倩, 等. 葡聚糖对大豆 7S 蛋白凝胶流变性质及微观结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(8): 21-27.

[18] 金郁葱. 大豆蛋白凝胶结构和质构的控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 38-39.

[19] 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, 1(3): 288-295.

[20] 姚玉静, 杨晓泉, 唐传核, 等. 酰化对大豆分离蛋白凝胶性质的影响[J]. 食品与机械, 2008, 24(5): 9-11.

[21] 钟芳, 王璋, 许时婴. 葡萄糖酸内酯为凝固剂时大豆蛋白的凝胶特性[J]. 食品与生物技术学报, 2003, 22(5): 1-4.

[22] 于国萍, 安静, 韩宗元. 热处理及葡萄糖酸- δ -内酯对大豆分离蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 21-25.

[23] LAKEMONDC M M, JONGH H H J D, PAQUES M, et al. Gelation of soy glycinin; influence of pH and ionic strength on network structure in relation to protein conformation[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(3): 365-377.

[24] 张逸婧, 陈海娟, 吕奕, 等. 羧甲基纤维素钠对大豆分离蛋白骨粘合性能的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(8): 1 550-1 558.

[25] 黄汉昌, 姜招峰, 朱宏吉. 紫外圆二色光谱预测蛋白质结构的研究方法[J]. 化学通报, 2007, 70(7): 501-506.

[26] 张海瑞. 提高大豆蛋白凝胶性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 7-8.

[27] KOHYAMA K, SANO Y, DOI E. Rheological Characteristics and Gelation Mechanism of Tofu (Soybean Curd)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(7): 1 808-1 812.

[28] 熊拯. 阴离子多糖对大豆分离蛋白功能特性的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2007: 43-45.

[29] 谭慧. 高压处理对大豆分离蛋白-多糖体系功能特性及结构影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 32-34.