

黄原胶对面筋蛋白流变特性的影响

李冰¹, 范鹏辉¹, 赵雷², 赵迪¹, 徐振波¹, 张霞¹, 安怡宣³, 李琳^{1, 4}

(1. 华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640) (2. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

(3. 华南农业大学数学与信息学院, 广东广州 510642) (4. 东莞理工学院, 广东东莞 52300)

摘要: 冷冻面制品在冻藏过程中由于冰晶迁移及重结晶导致面筋蛋白网络结构弱化, 从而降低其品质。黄原胶作为一种优良的面团改良剂, 其在冷冻面团中的应用受到越来越多的关注。本论文主要研究了黄原胶对面筋蛋白持水性、溶解度、流变特性及超微网络结构的影响。结果表明: 黄原胶的添加能显著提高面筋蛋白持水性, 当使用浓度为 0.25% (*m/m*) 黄原胶溶液与面筋蛋白进行混合时, 面筋蛋白的持水性比原来提高 9.1%, 达到 131.8%; 面筋蛋白溶解度随黄原胶添加量的增大先升高后降低, 当黄原胶/面筋蛋白比例为 0.075% 时, 面筋蛋白溶解度为 4.08 mg/mL, 比原面筋蛋白增加了 0.77 mg/mL; 添加一定量的黄原胶, 导致面筋蛋白弹性减弱, 而黏性增强 (储能模量 G' 下降, 损耗模量 G'' 和损耗角正切值 $\tan \delta$ 升高); 面筋蛋白网络结构, 也随黄原胶的添加而更加的均匀, 当黄原胶/面筋蛋白比例为 0.375% 时, 面筋蛋白复配体系孔径大小由近 100 μm 减至 20 μm 左右。

关键词: 面筋蛋白; 黄原胶; 网络结构; 相互作用

文章编号: 1673-9078(2016)2-33-39

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.2.006

Effect of Xanthan Gums on the Rheological Properties of Gluten Proteins

LI Bing¹, FAN Peng-hui¹, ZHAO Lei², ZHAO Di¹, XU Zhen-bo¹, ZHANG Xia¹, AN Yi-xuan³, LI Lin^{1,4}

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

of Food, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (3. College of Mathematics and Informatics, South

China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (4. Dongguan University of Technology, Dongguan 52300, China)

Abstract: The gluten network structure of wheat flour-based products is weakened during cold storage owing to ice crystal migration and recrystallization, resulting in reduced quality. Xanthan gum is an excellent food additive, and its application in frozen dough has attracted increasing attention. The effects of xanthan gum on the rheological properties, water-holding capacity, solubility, and the ultramicro network structure of gluten proteins were studied. The results showed that the water-holding capacity significantly increased when xanthan gum was added. When 0.25% (*m/m*) xanthan solution was mixed with gluten, the water-holding capacity reached 131.8%, which was 9.1% higher than that of the original gluten proteins. The solubility of gluten declined after the initial increase with the increasing amount of added xanthan gum. When the ratio of xanthan/gluten was 0.075%, the solubility of gluten was 4.08 mg/mL, 0.77 mg/mL higher than that of the original gluten. The addition of a certain amount of xanthan gum led to a decreased gluten elasticity and an increased viscosity (decreased storage modulus G' , increased loss modulus G'' , and loss tangent $\tan \delta$). The gluten network structure became more uniform with the addition of xanthan gum; when the xanthan/gluten ratio was 0.375%, the pore size of the gluten/xanthan complex system decreased from 100 μm to approximately 20 μm .

Key words: gluten; xanthan; network structure; interaction

随着人们的生活节奏逐渐加快, 方便食品受到越来越多人喜爱。冷冻食品作为方便食品中的一类, 以其安全、便捷的优点而得到了迅速发展。面制品是我国国民的主食之一, 冷冻面制品占冷冻食品总量的一半以上, 包括冷冻饺子、馒头、面条及生产面包的冷冻面团等。随着冷冻技术的不断提高, 冷冻面制品工艺逐渐成熟, 但是冷冻面制品仍存在着冷冻饺子开

收稿日期: 2015-01-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31301412; 31130042); 国家科技支撑计划 (2012BAD37B01)

通讯作者: 李琳, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 食品与生物化工方向

裂, 面条失去咀嚼性, 面包体积减小、货架期短、口感下降等问题, 仍是冷冻面制品工业化生产急需解决的大难题。

近年来, 针对如何提高冷冻面制品品质的研究越来越多, 主要集中以下几个方向: (1) 冷冻工艺优化^[1], 主要从冷冻速率、冻藏温度、解冻方法及超声强化^[2]在冷冻工艺中的应用等方面着手研究; (2) 添加抗冷冻酵母, 主要研究酵母在低温冻藏条件下的存活率, 以期选育出在冻藏条件下仍具有较高存活率的抗冷冻酵母。(3) 面团改良剂的添加, 主要包括酶制剂^[3]、变性淀粉^[4]及食品胶^[5-9]等的添加。添加面团改良

剂在工业生产中方便可行,因此,越来越多的关注投向了面团改良剂的研究。食品胶作为一类优良的食品改良剂,对于提高冷冻面团品质具有良好的效果。食品胶大多是蛋白质和天然多糖及其衍生物,广泛分布于自然界,其分子结构中含有大量的亲水基团,如羧基、羟基、氨基等,能与水、蛋白质、淀粉、脂质等分子发生作用^[10],如瓜尔豆胶、卡拉胶、果胶、黄原胶等的添加能够减缓冷冻面团品质劣化的速度,提高冷冻面团面包的品质。但是目前大多数的研究主要集中在食品胶对冷冻面制品宏观性质变化的影响,对于食品胶与面团之间的微观相互作用研究较少。

黄原胶是非常重要的—种食品胶,是在食品生产中用量仅次于淀粉的一种高聚糖,其主链为 β -1,4糖苷键连接的D-吡喃葡萄糖,并具有两个甘露糖分子和一个葡萄糖醛酸分子组成的三糖侧链,具有杆状构型,对热、酸、碱有很好的稳定性。鉴于黄原胶在提高冷冻面制品中具有良好的效果,本文选取黄原胶为研究对象,研究黄原胶对面筋蛋白流变特性及微观网络结构的影响,以期从宏观和微观两个方面研究黄原胶与面筋蛋白之间的相互作用,为进一步揭示食品胶在冷冻面团中的作用机理提供重要的研究基础。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

面筋蛋白(蛋白含量>80%),美国Sigma公司;黄原胶(USP级),阿拉丁试剂有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS),上海润捷化学试剂有限公司;丙烯酰胺,天津科密欧化学试剂有限公司;考马斯亮蓝R250,Fluka进口分装;剩余试剂均为分析纯。

德国HAKKE公司RHS600哈克流变仪,美国UNICO紫外-可见分光光度计,集热式磁力搅拌器,德国Sigma公司3K30高速冷冻离心机,德国Zeiss公司扫描电子显微镜,电子天平、漩涡振荡器等均为实验室常用实验设备。

1.2 实验方法

1.2.1 黄原胶对面筋蛋白持水性的影响

分别配置浓度为0.00%、0.05%、0.15%和0.25%(m/m)黄原胶溶液,配置过程采用磁力搅拌器搅拌3h。取面筋蛋白粉1g,然后缓慢加入到10mL黄原胶溶液中,蛋白加入过程中采用漩涡震荡的方式,避免面筋蛋白结块。面筋蛋白与黄原胶溶液混匀后置于20℃恒温箱中静置3h,在4000r/min下离心15min,弃去上清液后称重。面筋蛋白的持水性按公式(1)计

算。

$$\text{面筋蛋白持水性} = \frac{M3 - M2}{M1} \times 100\% \quad (1)$$

注: M1: 面筋蛋白粉重(g); M2: 离心管重(g); M3: 离心管+湿面筋蛋白重量(g)。

1.2.2 黄原胶对面筋蛋白流变学特性的影响

使用RHS600哈克流变仪对样品的流变特性进行测定,所用夹具为平板夹具(直径为25mm圆盘),测试时平行板间距为1mm。测试过程中为防止水分挥发影响试验结果,需在夹具边缘涂上一层硅油。

准确称取20g面筋蛋白置于和面机中,加入30mL黄原胶溶液,在和面机中搅拌15min后取出(此时黄原胶-面筋蛋白体系中黄原胶与面筋蛋白的质量比分别为0.000%、0.075%、0.225%、0.375%),覆盖保鲜膜,置于20℃恒温箱中静置45min,切成大小相同的圆片,质量为1g左右,待测。

湿面筋蛋白小振幅振荡测试:在25℃和85℃条件下分别对样品进行了小振幅震荡测试(即频率扫描),采用的频率范围为0.1~10.0Hz(0.628~62.8rad/s);应变振幅设置为1%,该值在所测样品的线性黏弹性区域范围内。该测试能够得到储能模量(G')、损耗模量(G'')与损耗角正切值($\tan\delta=G''/G'$)随频率的变化曲线。

湿面筋蛋白温度扫描测试:首先将样品在25℃条件下平衡2min,随后用30min升温至85℃,平衡2min,再用30min降温至25℃,并记录样品的相关模量随温度的变化。测试频率固定为1Hz,应变振幅值设置为1%。

1.2.3 黄原胶对面筋蛋白溶解度的影响

湿面筋蛋白制备方法同1.2.2。湿面筋蛋白切片后经过冷冻干燥,粉碎过120目筛备用。

取0.5g过筛后的面筋蛋白,缓慢加入到50mL 500mM的乙酸溶液中,10℃条件下,磁力搅拌24h。溶解后的面筋蛋白在4℃条件下,转速10000r/min,冷冻离心30min,取上清液测定面筋蛋白浓度,以此值表示所测面筋蛋白溶解度。

1.2.4 聚丙烯酰胺凝胶电泳法(SDS-PAGE)对面筋蛋白分子量分布进行研究

利用单向一步电泳方法分析面筋蛋白中高分子量麦谷蛋白亚基(HMW-GS)和低分子量麦谷蛋白亚基(LMW-GS)的组成。分离胶丙烯酰胺浓度为12%,浓缩胶浓度为2.5%,交联度为2.6%,样品提取液为:0.0625mol/L Tris-HCl, 5%(V/V)巯基乙醇、2%(m/V) SDS、10%丙三醇、0.002%(V/V)溴酚蓝、pH 6.8。

1.2.5 面筋蛋白显微结构观察

将不同黄原胶添加量的面筋蛋白样品切片后, 迅速进行冷冻干燥后, 先用 2.5% 戊二醛固定, 0.1 mol/L 磷酸缓冲液漂洗, 再用 1% 四氧化二锇固定, 0.1 mol/L 磷酸缓冲液冲洗, 用 30%、50%、70%、90%、100% 乙醇梯度洗脱。再用醋酸异戊酯置换出乙醇后, 采用临界点干燥法进行干燥, 将干燥后的样品置于液氮中切断, 经离子溅射喷金后, 置于扫描电子显微镜下观察样品横断面的结构。

1.2.6 统计与分析

所有试验结果表示为平均值±标准偏差 (n=3), 通过 IBM SPSS Statistics 20.0 对面筋蛋白持水性、面筋蛋白溶解度进行了单因素方差分析。当 $P < 0.05$ 时, 差异性显著。

2 结果与讨论

2.1 黄原胶对面筋蛋白持水性的影响

蛋白质持水性是蛋白质的重要功能性质, 决定着蛋白质与食品体系中水分的相互作用。食品体系中水分含量和分布对食品的结构、质地、风味和外观等有着极大的影响, 而面筋蛋白持水性的大小间接反映了面筋蛋白内部网络结构均一性及其稳定性。

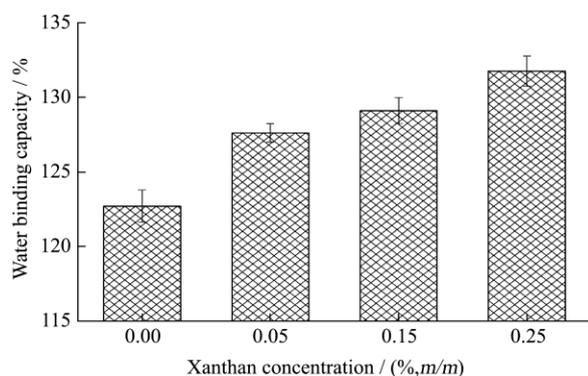


图1 不同浓度黄原胶溶液对面筋蛋白持水性的影响

Fig.1 Water-binding capacity of gluten affected by different concentrations of xanthan solutions

图1为不同浓度黄原胶溶液对面筋蛋白质持水性的影响。可以看出, 黄原胶的加入明显增强了面筋蛋白的持水性, 随着黄原胶溶液浓度的增大, 面筋蛋白持水量由 122.7% 增大到了 131.8% ($P < 0.05$)。黄原胶本身具有非常强的吸水性, 其大约可以吸收自身重量 40 倍的水分, 所以, 黄原胶的添加必然会增大面筋蛋白的持水性。但是, 当黄原胶浓度为 0.05% (m/m) 时, 面筋蛋白的持水性增加了 4.92%, 远远高于面筋蛋白体系中所含黄原胶本身的吸水量。而当黄原胶浓度为 0.15% (m/m) 时, 面筋蛋白的持水性增加了 6.41%, 这说明面筋蛋白持水性的增加量不与黄原胶的浓度成正

比。面筋蛋白持水性的增加与黄原胶的强吸水性有关, 同时与面筋蛋白和黄原胶之间的相互作用有关^[10]。黄原胶与面筋蛋白作用形成黄原胶-水-面筋蛋白复合网络结构, 可以束缚更多的水分子, 从而使得面筋蛋白持水性增大。黄原胶作为面团改良剂添加到面团中, 其不仅仅充当一个吸水性的填充物分散与面筋网络结构中, 而会与面筋蛋白产生复杂的相互作用从而影响面团品质。

2.2 黄原胶对面筋蛋白流变学特性的影响

面筋蛋白主要包括麦谷蛋白和醇溶蛋白, 吸水后麦谷蛋白分子链逐渐展开, 相互交织, 醇溶蛋白为球状蛋白填充与麦谷蛋白形成的网络结构, 麦谷蛋白和醇溶蛋白相互作用, 共同形成具有黏弹特性的空间网络结构^[11-12]。而麦谷蛋白主要决定面筋网络结构弹性性能, 醇溶蛋白决定黏性性能, 黏性和弹性是面团的两个重要性质, 这两个重要性质共同赋予面团独特的加工工艺。运用旋转流变仪测量黄原胶对面筋蛋白储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 的影响, 从宏观上反应出面筋蛋白黏弹特性的变化。而面筋蛋白黏弹特性的变化是其微观结构相互影响、相互作用的结果, 以此研究黄原胶在面筋蛋白中的作用机制具有重要意义。

2.2.1 恒温下黄原胶对面筋蛋白黏弹特性的影响

图2和图3给出了面筋蛋白样品在黏弹特性测试中的储能模量 (G')、损耗模量 (G'')、以及损耗角正切值 ($\tan \delta$) 随频率的变化曲线; 所用测试温度分别为 25 °C 和 85 °C, 固定应变值大小为 1%, 可以看出, 当黄原胶添加量不同时, 面筋蛋白体系的流变学特性也不同。由图2和图3可以看出, 在不同温度、不同黄原胶添加量的情况下, 面筋蛋白体系的 G' 值均大于 G'' , 表明面筋蛋白体系表现出类固体特性, 这与前人的研究结果一致^[12-13]。由图2a和图3a可见, 在 25 °C 和 85 °C 条件下, 当黄原胶/面筋蛋白比例为 0.075% 时, 面筋蛋白复配体系的 G' 值明显下降, 而随着黄原胶添加量的增大, 面筋蛋白复配体系的 G' 值有所增大, 但始终小于未添加黄原胶时面筋蛋白的 G' 值。所不同的是, 在 25 °C 时, 当黄原胶/面筋蛋白比例为 0.075% 时, 面筋蛋白复配体系的 G' 值最小; 而在 85 °C 时, 当黄原胶/面筋蛋白比例为 0.15% 时, 面筋蛋白复配体系的 G' 值最小。可见, 少量黄原胶的存在能够明显减弱面筋蛋白的弹性性能。黄原胶与面筋蛋白的相互作用影响了面筋蛋白的流变特性, 并且这种相互作用受到温度的影响^[14]。

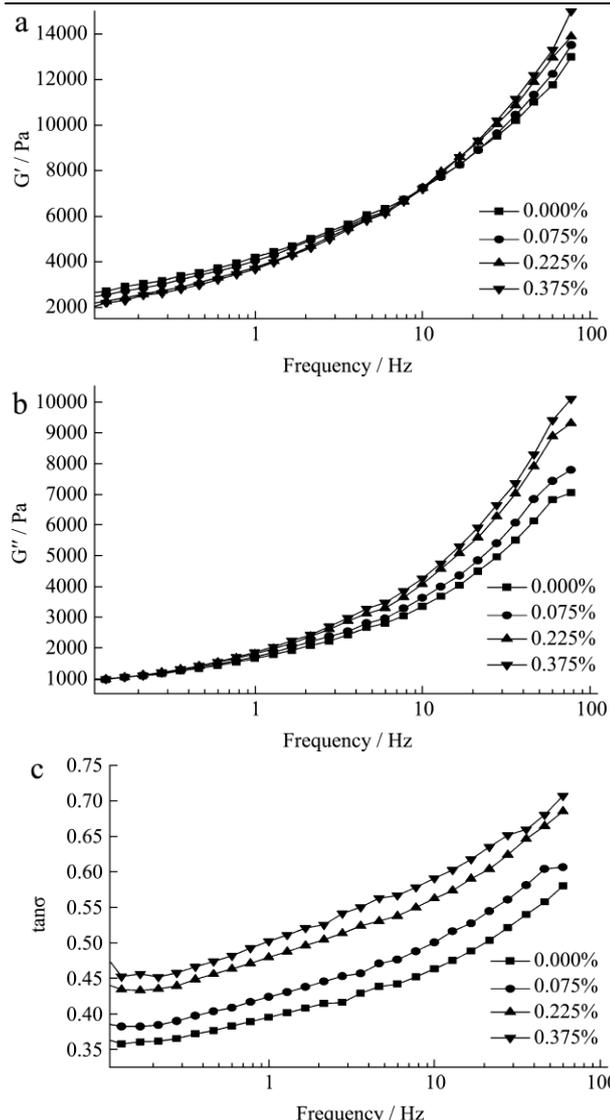


图2 25 °C下黄原胶/面筋蛋白比例不同时面筋蛋白复配体系黏弹特性参数随频率变化曲线图

Fig.2 Plots of characteristic viscoelastic parameters of gluten/xanthan complex systems with different xanthan/gluten ratios versus frequency at 25 °C

注: a: 储能模量 G' ; b: 损耗模量 G'' ; c: 损耗角正切值 $\tan \delta$ 。

图2b和图3b以及图2c和图3c可以看出,在不同温度下,面筋蛋白的 G'' 值及 $\tan \delta$ 值均随黄原胶添加量的增加而逐渐增大,并且 $\tan \delta$ 值始终小于1,表明黄原胶的添加使得面筋蛋白体系的类固体特性减弱,但始终没有改变面筋蛋白体系的类固体性质^[15]。面筋蛋白体系中,黄原胶与麦谷蛋白和醇溶蛋白相互作用,共同影响着面筋蛋白流变特性。黄原胶与麦谷蛋白相互作用形成了黄原胶-麦谷蛋白网络结构,阻碍了麦谷蛋白分子链之间的相互交联,减少了麦谷蛋白-麦谷蛋白网络结构^[14],从而降低了面筋蛋白的 G' 值;而麦谷蛋白-麦谷蛋白交联结构的减少,又增加了醇溶

蛋白的流动性,同时黄原胶与醇溶蛋白相互作用,加上黄原胶自身的强黏性,从而增大了面筋蛋白的 G'' 值,提高了面筋蛋白的黏性性能。

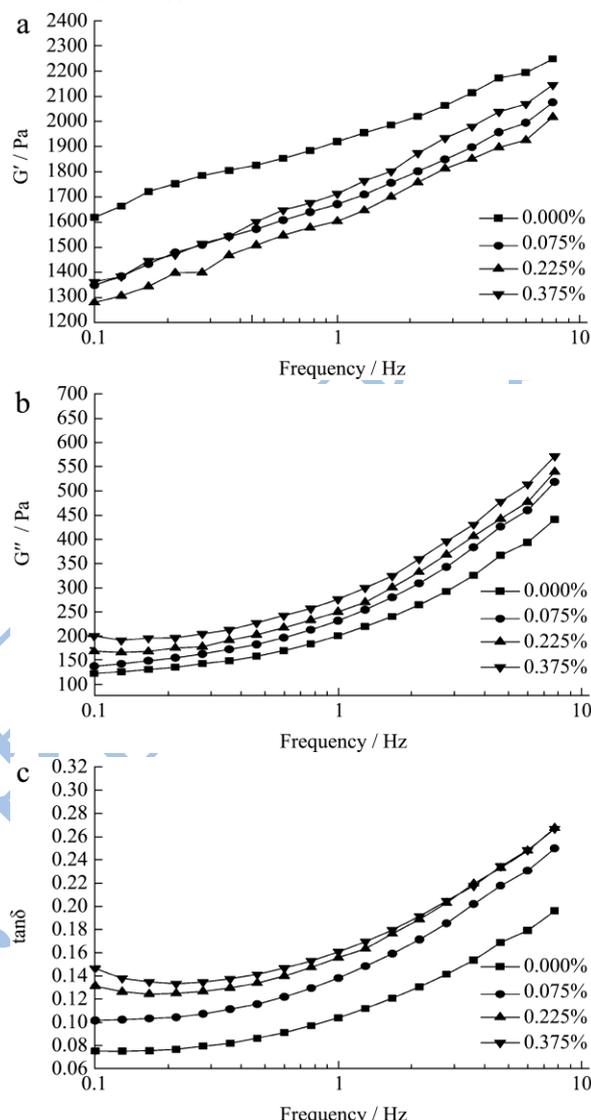


图3 85 °C下黄原胶/面筋蛋白比例不同时面筋蛋白复配体系黏弹特性参数随频率变化曲线图

Fig.3 Plots of characteristic viscoelastic parameters of gluten/xanthan complex systems with different xanthan/gluten ratios versus frequency at 85 °C

注: a: 储能模量 G' ; b: 损耗模量 G'' ; c: 损耗角正切值 $\tan \delta$ 。

图2和图3可以看出,在85 °C时,面筋蛋白的 G' 、 G'' 及 $\tan \delta$ 值均明显低于25 °C时,并且85 °C下,黄原胶对面筋蛋白模量的影响明显高于25 °C时。一方面,这可能是由于温度本身对面筋的影响造成的,较高的温度使面筋蛋白分子链柔化,降低了面筋蛋白黏弹特性。另一方面,这可能是由于较高的温度加剧了黄原胶与面筋蛋白分子链的运动,从而增强了黄原胶与面筋蛋白分子间的相互作用。

2.2.2 温度扫描下面筋蛋白储能模量和损耗模量的变化

升温和降温是面团在烘焙加工过程中必须经历的两个重要过程,在这一过程中伴随着一系列的物理化学反应,包括蛋白质的变性、水分流失等。研究升温和降温过程中黄原胶对面筋蛋白流变学特性变化的影响,对于揭开黄原胶在面筋蛋白中的作用机制具有重要作用。

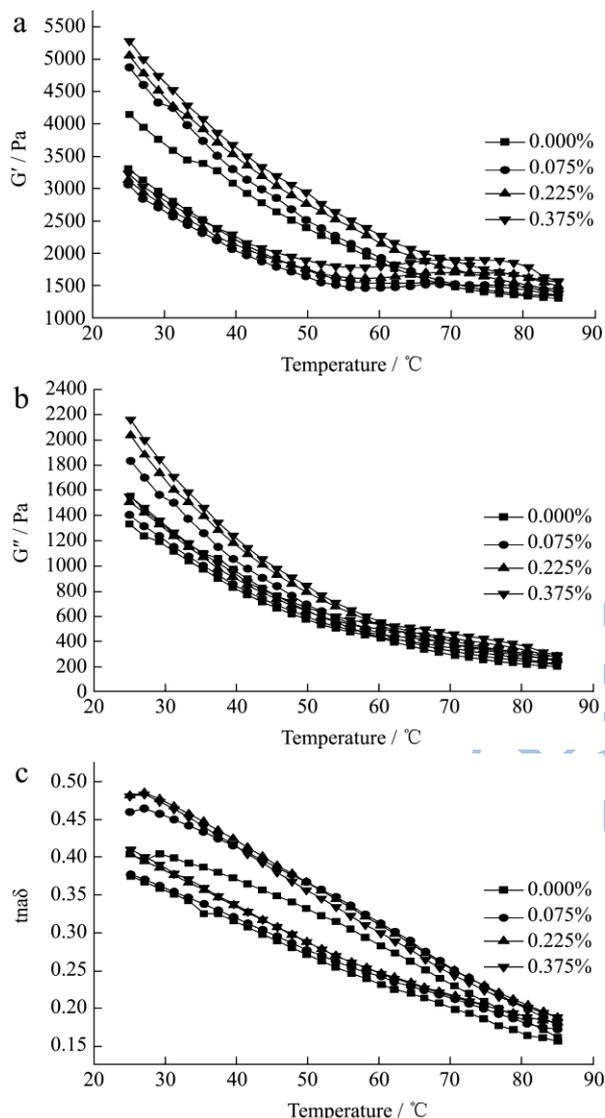


图4 不同黄原胶/面筋蛋白比例时面筋蛋白复配体系黏弹性参数随温度扫描中的变化趋势图

Fig.4 Plots of characteristic viscoelastic parameters of gluten/xanthan complex systems with different xanthan/gluten ratios versus temperature

注: a: 储能模量 G' ; b: 损耗模量 G'' ; c: 损耗角正切值 $\tan \delta$ 。

图4可以看出,在升温过程中,面筋蛋白的 G' 、 G'' 、以及 $\tan \delta$ 值均随温度的升高而逐渐降低;在降温过程中,面筋蛋白的 G' 、 G'' 、以及 $\tan \delta$ 值均随温度

的降低而逐渐升高。表明面筋蛋白黏弹性受温度影响非常明显。升温过程中,面筋蛋白储能模量在 25~55 °C 之间和 75~85 °C 之间逐渐下降,在 55~75 °C 之间有一个上升的趋势,而面筋蛋白黏性模量一直保持下降趋势。而黄原胶的添加并不影响面筋蛋白相应模量随温度变化的整体趋势。随着温度的升高,面筋蛋白分子链逐渐展开,导致麦谷蛋白-麦谷蛋白分子间交联程度减弱,从而导致面筋蛋白储能模量降低^[16]。在 55~75 °C 之间,面筋蛋白开始变性,麦谷蛋白中巯基(S-H)向二硫键(S-S)转变,以及疏水相互作用导致麦谷蛋白交联和聚集,从而使面筋蛋白储能模量出现一个上升趋势^[11]。而随着黄原胶添加量的增大,这一趋势明显增强,这一方面可能是由于在 55~75 °C 之间,温度升高使得面筋蛋白分子链与黄原胶分子运动更加剧烈,又伴随着面筋蛋白的变性,黄原胶与面筋蛋白相互作用增强,从而加大了面筋蛋白储能模量上升的趋势^[14,17],另一方面可能是由于黄原胶的一个胶凝化反应。在降温过程中,当温度降至 70 °C 以后,面筋蛋白储能模量均明显高于升温过程中面筋蛋白储能模量,并且随着黄原胶添加量的增大,面筋蛋白储能模量逐渐升高。表明,部分面筋蛋白由于温度升高和水分流失而产生的热转变是不可逆的,以及黄原胶与面筋蛋白的相互作用过程是不完全可逆的。而在降温过程中面筋蛋白和黄原胶之间的相态分离也更为显著,这一方面也造成了混合物黏弹特性的增强^[18]。

2.3 黄原胶对面筋蛋白溶解度的影响

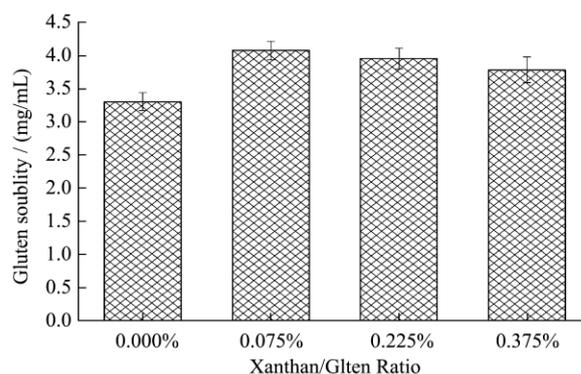


图5 面筋蛋白溶解度随黄原胶添加量变化图

Fig.5 Effect of the amount of added xanthan on the solubility of gluten

为了更好的研究黄原胶与面筋蛋白之间可能的相互作用,本实验对面筋蛋白的溶解度进行了研究。面筋蛋白是自然界中发现的分子量最大的蛋白质,主要由醇溶蛋白和麦谷蛋白组成。面筋蛋白总体上溶解性差,不易溶解,在溶液中容易产生聚集而沉淀,而这也是目前进一步深入研究面筋蛋白最大的难题。本

文通过研究黄原胶对面筋蛋白溶解性的影响，从而研究黄原胶与面筋蛋白的相互作用。图 5 可以看出，当面筋蛋白复配体系中黄原胶/面筋蛋白比例为 0.075% 时，面筋蛋白的溶解度由 3.30 mg/mL 上升到 4.08 mg/mL ($P < 0.05$)，而后再随着黄原胶添加量的增加，面筋蛋白溶解度下降到 3.78 mg/mL。表明在溶液中，少量黄原胶的存在可以减少面筋蛋白的聚集，增大面筋蛋白溶解度。有研究指出，阴离子的黄原胶分子能够进入面筋蛋白分子内部，与面筋蛋白分子形成“黄原胶-面筋蛋白”可溶性复合物^[17]，黄原胶-面筋蛋白复合物的存在，减少了面筋蛋白分子间的聚集，从而增大面筋蛋白溶解度。

2.4 面筋蛋白亚基 SDS-PAGE 分析

为进一步研究黄原胶对面筋蛋白分子结构的影响，本实验对面筋蛋白进行了 SDS-PAGE 分析。面筋蛋白主要由醇溶蛋白和麦谷蛋白组成，醇溶蛋白是球状蛋白，相对分子质量在 30~80 ku 之间。麦谷蛋白是多肽链的线性结构，其相对分子质量在 100~10000 ku 之间^[9]。本实验主要研究黄原胶对可溶性面筋蛋白亚基的影响，从图 6 中可以看出，面筋蛋白根据其亚基分子量的不同在电泳图上主要分成 HMW-GS (66~200 ku) 和 LMW-GS (低于 66 ku) 两个区域^[20]。添加不同量黄原胶的面筋蛋白其电泳泳带数目、相对迁移速率等都没有明显差异，说明黄原胶的添加对面筋蛋白亚基没有明显的影响。

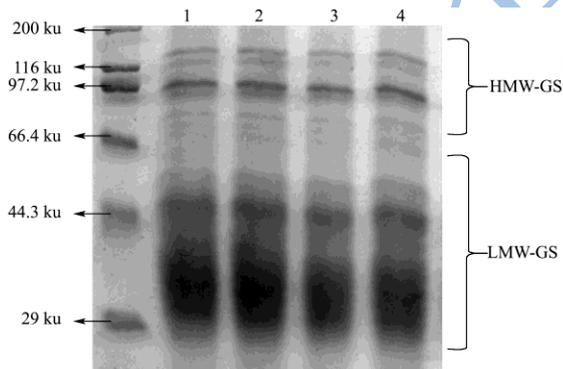


图 6 面筋蛋白 SDS-PAGE 图

Fig.6 SDS-PAGE pattern of gluten

注: 1, 2, 3, 4 泳道中黄原胶/面筋蛋白比例分别为 0.000%, 0.075%, 0.225%, 0.375%。

2.5 面筋蛋白超微结构

面筋蛋白宏观特性反映了其微观结构及组成，同样其微观结构也决定了其宏观特性。为更加直观的了解黄原胶对面筋蛋白网络结构的影响，本研究对面筋蛋白进行了扫描电镜观察。

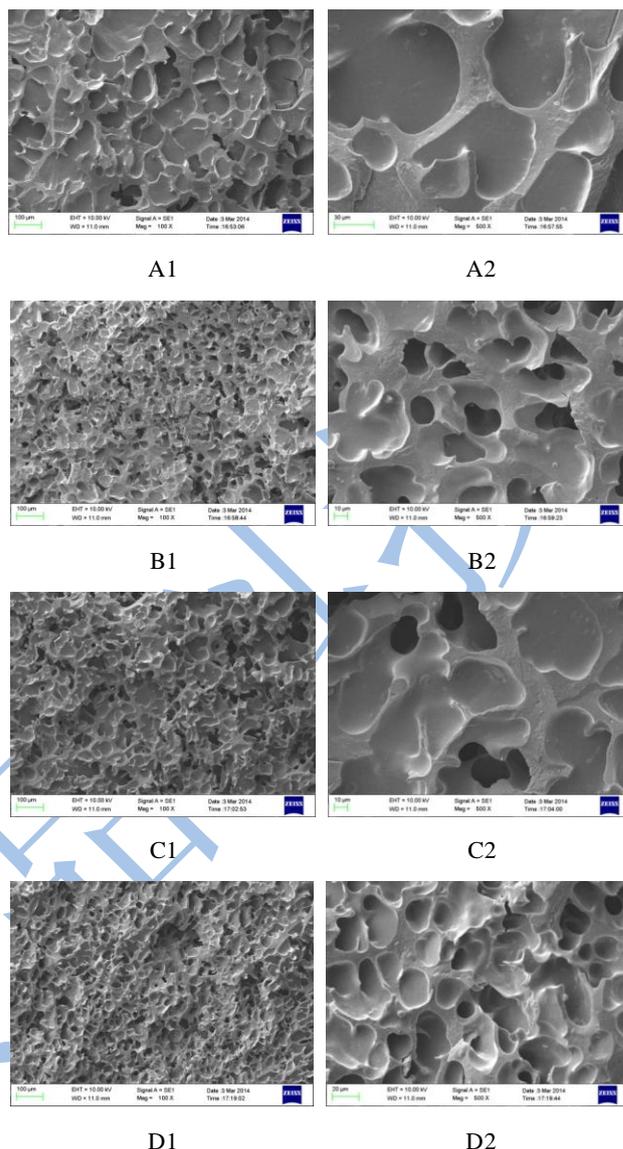


图 7 黄原胶对面筋蛋白显微结构的影响

Fig.7 Effect of xanthan on the microstructures of gluten

注: A1、B1、C1、D1 为面筋蛋白体系 (其中黄原胶/面筋蛋白比例分别为 0.000%、0.075%、0.225%、0.375%) 放大 100 倍的显微结构; A2、B2、C2、D2 为面筋蛋白体系 (其中黄原胶/面筋蛋白比例分别为 0.000%、0.075%、0.225%、0.375%) 放大 500 倍的显微结构。

图 7 中可以看出，面筋蛋白超微结构呈多孔的三维网络状，孔径大小及分布相对均匀^[21]。网络中孔洞是面筋蛋白在速冻，及冷冻干燥过程中冰晶升华后形成的。经过对比可以发现，未添加黄原胶时，面筋蛋白网孔孔径大多在 100 μm 左右；当面筋蛋白体系中黄原胶/面筋蛋白的比例为 0.375% 时，面筋蛋白体系网孔孔径大多在 20 μm 左右，且分布较为均匀。可见，黄原胶的添加明显减小了面筋蛋白网孔结构中孔径的大小；并且随着黄原胶添加量的增加，面筋蛋白网孔结构分布更加均匀、密集。这也是随着黄原胶的添加

量增大,面筋蛋白持水性改变的主要原因。在面筋网络结构中,黄原胶的强吸水性能够充分分散面筋蛋白中的水分,使得水分在面筋蛋白网络结构中分布的更加均匀。在速冻或冻藏过程中,不易产生较大的冰晶,减小了冰晶对面筋蛋白网络结构的破坏及影响。这与面筋蛋白流变学测试结果并不矛盾,黄原胶的添加使得湿面筋蛋白网孔结构更加均匀,却反而降低了面筋蛋白的储能模量,表明黄原胶并不是简单的填充于面筋蛋白结构中,而是与面筋蛋白发生复杂的相互作用,一方面充分分散了面筋蛋白体系中的水分,另一方面,黄原胶与面筋蛋白中麦谷蛋白和醇溶蛋白相互作用,弱化了面筋蛋白网络结构,降低了面筋蛋白的储能模量^[14]。

3 结论

研究发现黄原胶的添加能够明显增加面筋蛋白持水性,当使用浓度为0.25%的黄原胶溶液与面筋蛋白混合复配时,面筋蛋白持水性提高了9.1%。并且面筋蛋白持水性的增加量不与黄原胶溶液的浓度成正比。而在水分含量相同时,黄原胶的存在改变了面筋蛋白流变学特性,从频率扫描中可以看出,黄原胶的存在导致面筋蛋白储能模量 G' 下降,损耗模量 G'' 和损耗角正切值 $\tan\delta$ 升高;并且面筋蛋白流变学特性受温度变化的影响,当温度升高时黄原胶与面筋蛋白分子间的相互作用增强。对面筋蛋白溶解度的研究发现,当黄原胶添加量为面筋蛋白质量的0.075%时,面筋蛋白的溶解度由3.30 mg/mL上升到4.08 mg/mL,表明少量黄原胶的存在可以增大面筋蛋白的溶解度,减少面筋蛋白大分子之间的聚集。从面筋蛋白超微网络结构可以看出,当添加少量黄原胶时,面筋网络孔径大小由100 μm 下降到20 μm 左右,且分布更加均匀。综合以上研究结果,黄原胶作为面团改良剂添加到面团中,能够与面团中的面筋蛋白产生复杂的相互作用,形成面筋蛋白-水-黄原胶复合网络结构,从而影响面团持水性、流变特性和面团超微网络结构,并且这种相互作用受到温度的影响。

参考文献

- [1] S Zounis, K J Quail, M Wootton, et al. Effect of final dough temperature on the microstructure of frozen bread dough [J]. Journal of Cereal Science, 2002, 36(2): 135-146
- [2] Song G, Hu S, Li L, et al. Structural and physical changes in ultrasound-assisted frozen wet gluten [J]. Cereals Chemistry, 2009, 86(3): 333-338
- [3] Decamps K, Joye I J, Rakotozafy L, et al. The bread dough stability improving effect of pyranose oxidase from *Trametes multicolor* and glucose oxidase from *Aspergillus niger* unraveling the molecular mechanism [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(32): 7848-7854
- [4] 赵凯,张守文,杨春华,等.抗性淀粉对面粉品质及面团流变学特性影响研究[J].食品科学,2005,26(4):37-40
ZHAO Kai, ZHANG Shou-wen, YANG Chun-hua, et al. Effect of resistant starch on flour quality and rheological properties of dough [J]. Food Science, 2005, 26(4): 37-40
- [5] 王雨生,陈海华,王坤.亲水胶体对面包品质和面团流变学特性的影响[J].食品科学,2013,34(13):105-109
WANG Yu-sheng, CHEN Hai-hua, WANG Kun. Effect of hydrocolloids on bread quality and rheological properties of dough [J]. Food Science, 2013, 34(13): 105-109
- [6] Matuda T G, Chevallier S, et al. Impact of guar and xanthan gums on proofing and calorimetric parameters of frozen bread dough [J]. Journal of Cereal Science, 2008, 48(3): 741-746
- [7] B árcenas M E, Benedito C, Rosell C M. Use of hydrocolloids as bread improvers in interrupted baking process with frozen storage [J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(5): 769-774
- [8] Selomulyo V O, Zhou W. Frozen bread dough: Effects of freezing storage and dough improvers [J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(1): 1-17
- [9] Matuda T G, Chevallier S, de Alcântara Pess ôa Filho P, et al. Impact of guar and xanthan gums on proofing and calorimetric parameters of frozen bread dough [J]. Journal of Cereal Science, 2008, 48(3): 741-746
- [10] Linlaud N, Ferrer E, Puppo M C, et al. Hydrocolloid interaction with water, protein, and starch in wheat dough [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 59(2): 713-719
- [11] Kokini J L, Cocero A M, Madeka H, et al. The development of state diagrams for cereal proteins [J]. Trends in Food Science & Technology, 1994, 5: 281-288
- [12] BS K, AE B, JD S. The dynamic rheological properties of glutes and gluten sub-fractions from wheats of good and poor bread making quality [J]. Journal of Cereal Science, 1995, 22(1):29-44
- [13] Hayta M, Schofield J D. Dynamic rheological behavior of wheat glutes during heating [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85: 1992-1998
- [14] B árcenas M E. Influence of different hydrocolloids on major wheat dough components (gluten and starch) [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 94(3): 241-247

- [15] Dobraszczyk B J, Morgenstem M P. Rheology and the breadmaking process [J]. *Journal of Food Science*, 2003, 38(3): 229-245
- [16] Hayta M, David Schofield J. Heat and additive induced biochemical transitions in gluten from good and poor breadmaking quality wheats [J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 40(3):245-256
- [17] Rosell C M, Foegeding A. Interaction of hydroxypropylmethylcellulose with gluten proteins: Small deformation properties during thermal treatment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(7): 1092-1100
- [18] Wang B, Wang L J, Li D, et al. Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77(3): 472-481
- [19] Bietz J A, Wall J S. Wheat gluten subunits: Molecular weights determined by sodium dodecyl sulfate- polyacrylamide gel electrophoresis [J]. *Cereal Chemistry*, 1972
- [20] Correa M J, Ferrer E, Añón M C, et al. Interaction of modified celluloses and pectins with gluten proteins [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35: 91-99
- [21] 李玲玲,贾春利,黄卫宁,等.冰结构蛋白对湿面筋蛋白冻藏稳定性的影响[J].*食品科学*,2010, 31(19): 25-28
LI Ling-ling, JIA Chun-li, HUANG Wei-ning, et al. Effect of Ice-structuring Protein on the Stability of Frozen Hydrated Gluten [J]. *Food Science*, 2010, 31(19): 25-28