

低酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶特性影响因素分析*

陈青 王磊 向琪瑞

(浙江工商大学食品与生物工程学院, 杭州 310018)

摘要: 采用压缩模式研究了离子价态、离子浓度、基体总质量分数、低酰基结冷胶/酪蛋白酸钠(LA/SC)配比对低酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶凝胶特性的影响。研究表明,离子价态和离子浓度对 LA/SC 复合凝胶凝胶强度影响显著,复合凝胶的断裂应变随着离子浓度的升高而降低,基体总质量分数和 LA/SC 配比对复合凝胶断裂应变基本无影响。复合凝胶的断裂应力和杨氏模量随着基体总质量分数和 LA/SC 配比的增大而升高。在确定的基体总质量分数和 LA/SC 配比下,断裂应力和杨氏模量则随着离子浓度的升高先增大后降低。相对于一价离子(Na^+)而言,二价离子(Mg^{2+})形成的凝胶强度更高,且用量更少。复合凝胶的保水性随着离子浓度的升高而降低。基体质量分数越高,低酰基结冷胶含量越高,复合凝胶的保水性越好。

关键词: 低酰基结冷胶 酪蛋白酸钠 凝胶特性 影响因素 保水性

中图分类号: TS201.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)06-0226-07

Factors Influencing Gelling Properties of Low Acyl Gellan/Sodium Caseinate Mixtures

Chen Qing Wang Lei Xiang Qirui

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

Abstract: The effect of low acyl gellan (LA)/sodium caseinate (SC) weight ratio, total polymer concentration, ion valence and cation concentration on the gelling properties of low acyl gellan-sodium caseinate mixtures were investigated by using compression tests. The results showed that ion valence and cation concentrations had a pronounced effect on the gel strength of low acyl gellan-sodium caseinate mixed gels. The failure strain of mixed gels decreased with the increase of cation concentrations. Moreover, the failure strain was less sensitive to LA/SC weight ratios and total polymer concentrations. The failure stress and Young's modulus of mixed gels increased with the increase of total polymer concentrations and the proportion of low acyl gellan. Moreover, at each LA/SC weight ratio and total polymer concentration, the failure stress and Young's modulus increased with the increase of cation until cation concentration reached a critical level, after which further increases in cation resulted in a reduction of failure stress and Young's modulus. At optimum cation levels, mixed gels with Mg^{2+} were stronger than that with Na^+ . Water holding capacity of mixed gels decreased as cation concentrations increased. The higher the total polymer concentration and LA/SC weight ratio, the better the water holding capacity.

Key words: Low acyl gellan Sodium caseinate Gelling properties Influence factors Water holding capacity

引言

近年来,随着人民生活水平的提高,我国乳制品

的发展非常迅猛^[1]。牛奶含水率约为 88% 左右,是包含真溶液、高分子溶液、胶体悬浮液、乳浊液及其过渡状态的复杂分散体系。其中,碳水化合物和矿

物质呈真溶液状态,脂肪以脂肪球的形式分散于牛乳中形成乳浊液,蛋白质则以胶体悬浮液分散在其中。蛋白质总含量的80%为酪蛋白。由于乳浊液和真溶液之间存在着密度差异,因此在乳制品的生产中会出现制品不稳定的现象,通常,都是利用多糖的凝胶特性来解决不稳定的问题^[2]。蛋白质和多糖类添加剂均能形成凝胶,由于它们在热力学上具有不相容性,混合体系很容易发生相分离,蛋白质和多糖是构成食品体系两类重要的高分子材料,也是决定食品微观结构、质构特性和感官特性的重要因素,故而蛋白质和多糖的相互作用研究一直是食品科学的研究重点^[3-6]。

目前,对于酪蛋白和多糖的相互作用研究主要集中在卡拉胶、明胶、淀粉等对牛乳中的酪蛋白稳定性作用方面^[7-11]。Snoern研究发现,卡拉胶只能和 κ -酪蛋白产生静电吸引,沿 κ -酪蛋白多肽链存在非统计性分布的氨基酸正电荷基团,会形成正电荷与卡拉胶作用的双电偶合反应。Dalgleish则发现 γ -卡拉胶和 ν -卡拉胶会吸附在酪蛋白胶束上而将其整个表面包裹住,而 κ -卡拉胶虽然能强烈吸附胶束,但仅能部分包裹胶束。还有研究者发现卡拉胶仅部分吸附在胶束表面,复合体系冷却后,自由存在的卡拉胶仍能形成双螺旋。Keogh等研究发现,酪蛋白和明胶会形成复合凝胶,酪蛋白的添加可以增加复合凝胶的粘性,而明胶对复合凝胶的粘弹行为则没有影响,当盐浓度较高时,淀粉和酪蛋白的混合体系会发生相分离。

结冷胶是继黄原胶之后开发出的另一种可应用于食品的新型微生物胞外多糖,是由 β -1、3-D葡萄糖, β -1、4-D葡萄糖酸和 α -1、4-L-鼠李糖按摩尔比2:1:1构成的阴离子型多糖,分子量约为 5×10^4 Da,其多糖链平行排列成半交错的互相缠绕的螺旋结构。结冷胶与现有的卡拉胶、明胶、黄原胶等相比,具有稳定性好、耐酸、耐热、用量少等优点,目前已逐步取代琼脂、卡拉胶,广泛应用于食品工业中^[12-15]。市售结冷胶根据分子主链上酰基含量不同可分为两种,分别是高酰基结冷胶(HA)和低酰基结冷胶(LA)。迄今,结冷胶与酪蛋白的相互作用研究则鲜有报道。本文以低酰基结冷胶/酪蛋白酸钠(SC)复合凝胶为研究对象,考察聚合物基体总质量分数、LA/SC配比、离子价态和离子强度对复合凝胶凝胶特性的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

低酰基结冷胶 Kelcogel,美国 Kelco 公司;酪蛋

白酸钠,美国 Sigma 公司;叠氮化钠,东阳市天宇化工有限公司;氯化钠、氯化镁、氢氧化钠等化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

TA-XT Plus 型质构分析仪,英国 SMS 公司; Allegra X-30R 型超高速离心机,美国 Beckman 公司;JZ78-1 型磁力搅拌器,杭州通用电子仪表厂; DELTA 320 型 pH 测定仪,瑞士 MELLT TOLEDT 公司;BS224S 型电子天平,德国赛多利斯仪器公司。

1.3 实验方法

1.3.1 复合凝胶的制备

酪蛋白酸钠溶液的配制:在室温(20℃)下将适量酪蛋白酸钠粉末加入到去离子水中,磁力搅拌 5 h 直至酪蛋白酸钠全部溶解,添加 3 mmol/L 的叠氮化钠作为抑菌剂。

低酰基结冷胶溶液的配制:在室温下将适量低酰基结冷胶粉末加入到去离子水中,室温下溶胀 24 h,于 80℃ 下进行磁力搅拌,直至结冷胶粉末完全溶解形成透明、澄清的溶液,并用 80℃ 去离子水补偿由于蒸发而损失的质量。

LA/SC 复合凝胶的制备:将酪蛋白酸钠溶液和低酰基结冷胶溶液在 70℃ 混合,并趁热加入一定量的 $MgCl_2$ 、NaCl 溶液,分装在 $\Phi 30$ mm \times 20 mm 模具中,用 15℃ 的冷水浴冷却 10 min,在 4℃ 冰箱中放置 24 h 后进行力学性能测定。体系中的 pH 值,用 pH 测定仪经 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液处理后调至 6.7。本实验中所制备复合凝胶的基体总质量分数分别为 1.0%、2.0%、3.0%,一价钠离子浓度 50~250 mmol/L,二价镁离子浓度为 2~20 mmol/L,LA/SC 配比(体积比)分别为:25/75、50/50 和 75/25。

1.3.2 力学性能测定

采用质构分析仪进行测试,选用的夹具为 P/45 (直径为 45 mm 的圆柱探头),测试模式为 compression。具体测试参数为:下压速度为 2 mm/s,压缩应变为 80%,直到凝胶破碎。根据得到的力-时间关系曲线,计算出相应参数。本研究中用于表征复合凝胶力学性能的参数主要有断裂应变、断裂应力和杨氏模量。

考虑到在压缩测试中试样的横截面积会发生改变,将测得的数据进行校正,将测得的力和形变转化为 Hencky 应力和 Hencky 应变,即

$$\sigma_H = \frac{F(t)H(t)}{H_0A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_H = -\ln \frac{H(t)}{H_0} \quad (2)$$

式中 $F(t)$ —— t 时刻的应力

$H(t)$ —— t 时刻试样的长度

A_0 、 H_0 ——试样的初始横截面积和长度

断裂应力 (Failure stress) 和断裂应变 (Failure strain) 分别是 Hencky 应力- Hencky 应变曲线最高点所对应的应力和应变。杨氏模量 (Young's modulus) 则可以从 Hencky 应力- Hencky 应变曲线初始阶段呈直线关系变化部分的斜率求得, 具体确定方法如图 1 所示。

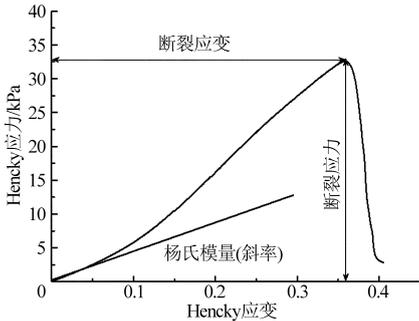


图 1 断裂应力、断裂应变和杨氏模量的确定

Fig. 1 Determination of failure stress, failure strain and Young's modulus from compression tests

本研究中每组实验重复测定 3 次, 文中所用数据为 3 次重复测量的平均值。

1.3.3 保水性测定

保水性测试采用超高速离心机测定^[16]。将按照 1.3.1 节方法制备的复合凝胶脱模, 在其中部切出尺寸为 20 mm × 20 mm × 15 mm 的样品。称量 50 mL 空离心管的质量为 W_0 , 在离心管中加入切好的凝胶, 称量 W_1 , 于 12 000 g 下离心 10 min, 去除水, 称量 W_2 , 保水性计算式为

$$W_{\text{HC}} = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100\% \quad (3)$$

每组实验重复测定 3 次, 文中所用数据为 3 次重复测量的平均值。

2 结果与分析

2.1 复合凝胶的宏观形貌

图 2 给出了低酰基结冷胶和 LA/SC 复合凝胶的照片。可见, 含有一价离子的低酰基结冷胶会形成透明凝胶, 含有二价离子的低酰基结冷胶则会形成半透明凝胶。对于 LA/SC 复合凝胶而言, 添加一价离子会形成透明凝胶, 而二价离子则会使复合体系形成不透明凝胶。

De Jong 等^[17]研究发现, 在酸诱导凝胶体系中, 凝胶的最终结构是由相分离行为和凝胶行为两者的竞争所决定, 并与凝胶速度以及多糖上电荷密度紧密相关。当以葡萄糖酸内酯 (GDL) 为酸诱导剂的凝胶时, 其酸化速率较慢, 凝胶作用占据主导地位,

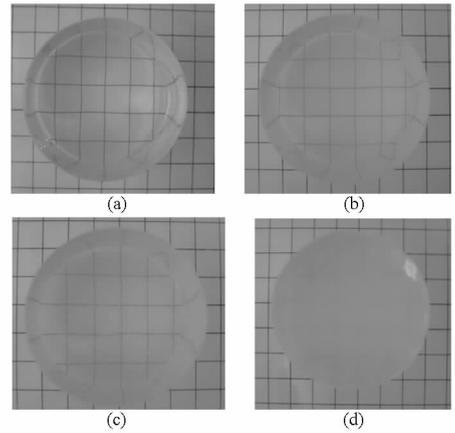


图 2 凝胶照片

Fig. 2 Typical macroscopic aspect of gels

- (a) 含有 150 mmol/L Na^+ 的结冷胶凝胶
- (b) 含有 10 mmol/L Mg^{2+} 的结冷胶凝胶
- (c) 含有 150 mmol/L Na^+ 的复合凝胶
- (d) 含有 10 mmol/L Mg^{2+} 的复合凝胶

通常不会观察到宏观相分离, 因而会得到透明凝胶。钠离子诱导的复合凝胶宏观形貌和缓慢酸诱导凝胶类似, 说明复合凝胶形成过程中凝胶作用占据了主导地位, 得到透明凝胶。而二价镁离子诱导凝胶在离子浓度较高时, 观察到了宏观相分离, 相分离行为占据主导地位, 凝胶呈现不透明性, 和快速酸诱导凝胶结果类似。

2.2 复合凝胶的力学性质

2.2.1 断裂应变

断裂应变越大, 说明材料变形性越强。图 3 给出了 LA/SC 比例、聚合物总质量分数及离子浓度对复合凝胶断裂应变的影响。显然, 无论是一价离子还是二价离子, LA/SC 配比以及基体总质量分数对断裂应变几乎无影响。在每一个复配比例和基体总质量分数下, 复合凝胶的断裂应变则随着离子浓度的增大而减小。对于二价镁离子诱导凝胶而言, 在体系内镁离子浓度超过 8 mmol/L 时, 断裂应变趋于定值 0.18。该变化趋势与 Tang 等^[18]对低酰基结冷胶凝胶的研究结果类似。相对于镁离子诱导的复合凝胶而言, 一价钠离子更易形成变形性大的复合凝胶, 这与对复合凝胶的宏观形貌观察结果一致, 在离子浓度较低时, 钠离子诱导的复合凝胶更为柔软。

2.2.2 断裂应力

断裂应力反映了体系的强度, 断裂应力越大表明凝胶的强度越大。图 4 给出了复合凝胶断裂应力的变化, 不难发现, LA/SC 对比对复合凝胶断裂应力影响显著, 体系内低酰基结冷胶含量越高, 复合凝胶断裂应力越大, 这可能是因为低酰基结冷胶通常会形成硬而脆的凝胶, 因此体系内结冷胶含量越高,

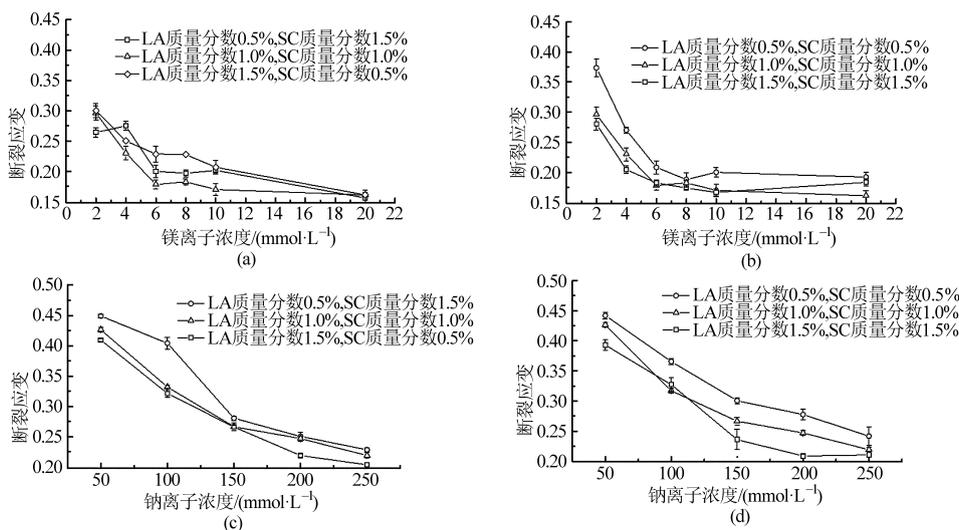


图3 离子浓度对复合凝胶断裂应变的影响

Fig. 3 Failure strain of mixed gels vs cation concentrations

- (a) LA/SC 比例对镁离子诱导凝胶的影响 (b) 基体总质量分数对镁离子诱导凝胶的影响
(c) LA/SC 比例对钠离子诱导凝胶的影响 (d) 基体总质量分数对钠离子诱导凝胶的影响

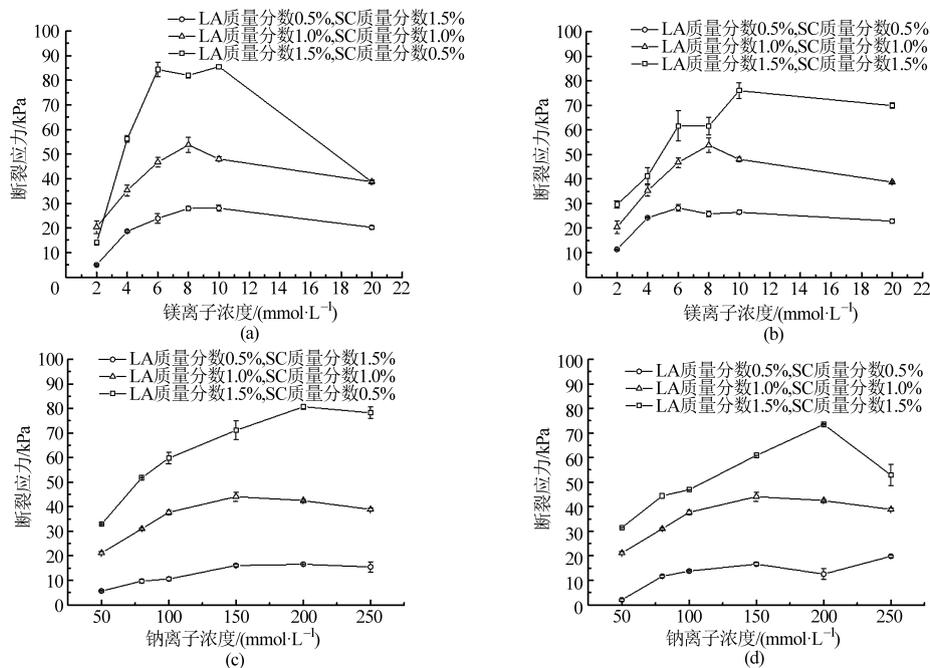


图4 离子浓度对复合凝胶断裂应力的影响

Fig. 4 Failure stress of mixed gels vs cation concentrations

- (a) LA/SC 比例对镁离子诱导凝胶的影响 (b) 基体总质量分数对镁离子诱导凝胶的影响
(c) LA/SC 比例对钠离子诱导凝胶的影响 (d) 基体总质量分数对钠离子诱导凝胶的影响

体系的强度就越大。基体总质量分数越大,复合凝胶的断裂应力也越大。这要归因于体系内聚合物总量增加,单位体系内高分子的缠结和碰撞增加,相互作用越强,形成的网络结构越致密^[19]。

在每一个基体总质量分数和 LA/SC 配比下,复合凝胶的断裂应力均随着离子浓度的升高呈现先增大后下降的趋势。在所研究的浓度范围内,一价 Na⁺ 的最佳浓度约为 200 mmol/L,二价 Mg²⁺ 的最佳浓度则约为 10 mmol/L。对于 Na⁺、Mg²⁺,形成相同

强度的凝胶时一价离子用量约为二价离子的 20 倍,说明一价离子凝胶能力弱于二价离子。根据阳离子凝胶理论,结冷胶分子的羧基侧链由于静电作用而互相排斥,阻碍了双螺旋的紧密聚集,而体系中阳离子的介入能屏蔽静电排斥作用,二价阳离子如 Mg²⁺ 通过离子键链接葡萄糖残基上的羧基,构架双螺旋结构,一价阳离子如 Na⁺ 则是通过水分子的架桥作用连接两条螺旋链,因此随着阳离子浓度的提高,凝胶强度也随之提高,形成相同强度凝胶所需的一价

离子比二价离子多;但过多的阳离子又会阻碍结冷胶分子的双螺旋结构的有序聚集,因此当含量超过一定的值以后,又会使凝胶强度下降^[20]。

2.2.3 杨氏模量

图5给出了复合凝胶杨氏模量的变化曲线。由图可见,离子价态和离子强度对杨氏模量的影响规律和断裂应力相似。当离子浓度较低时,复合凝胶

的杨氏模量会随着离子浓度的升高而增大,并在临界值达到最大值,之后则随着离子浓度的降低而减小。最大杨氏模量对应的最佳离子浓度和断裂应力对应的离子浓度基本一致。基体总质量分数越高,复合体系中低酰基结冷胶含量越高,复合凝胶的杨氏模量越大。

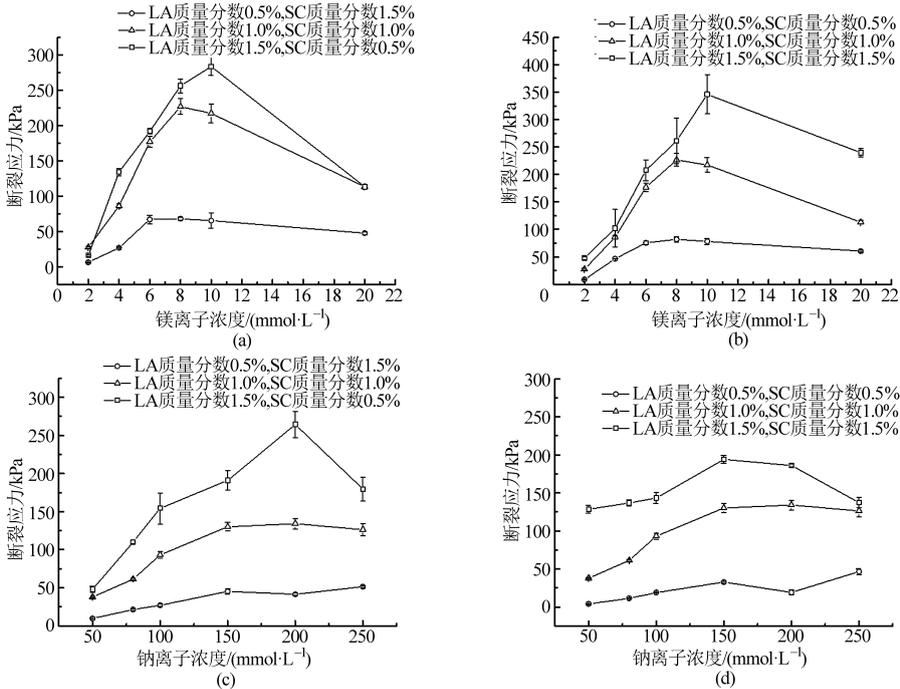


图5 离子浓度对复合凝胶杨氏模量的影响

Fig. 5 Young's modulus of mixed gels vs cation concentrations

- (a) LA/SC 比例对镁离子诱导凝胶的影响 (b) 基体总质量分数对镁离子诱导凝胶的影响
(c) LA/SC 比例对钠离子诱导凝胶的影响 (d) 基体总质量分数对钠离子诱导凝胶的影响

2.3 复合凝胶保水性

多糖类胶体很容易出现脱水的现象,会降低凝胶的品质,故而凝胶保水性的研究非常重要。众多学者^[21-22]对低酰基和高酰基结冷胶保水性的研究结果表明,结冷胶保水性质优异,高酰基结冷胶保水性在98%以上,且对离子种类和离子浓度不敏感。而低酰基保水性会受到离子价态和离子浓度的影响。

图6给出了LA/SC复合凝胶保水性。可见,LA/SC配比越高,即体系内低酰基结冷胶含量越高,复合凝胶的保水性越好,这可能与其微观结构有关。有学者研究发现^[23],对于卡拉胶/酪蛋白体系而言,体系中主要是由卡拉胶形成了三维网络结构,而酪蛋白则吸附在卡拉胶的网络结构上。前期的研究中发现,LA/SC复合凝胶中,低酰基结冷胶形成了类似海绵状的三维网络结构,酪蛋白则呈球形镶嵌在低酰基结冷胶形成的网络中,且低酰基结冷胶含量越高,形成的网络结构越致密,酪蛋白酸钠聚集

体体积越小,数量越少。

当LA/SC配比相等时,复合凝胶的保水性随着基体总质量分数的升高而增大,在每一个聚合物总浓度和LA/SC复配比例下,复合凝胶的保水性则均随着离子浓度的升高而降低。

3 结论

(1) 离子价态和离子浓度对LA/SC复合凝胶凝胶强度影响显著。一价离子(Na⁺)诱导形成凝胶的能力弱于二价离子(Mg²⁺)。复合凝胶的断裂应变随着离子强度的增大而降低,而其对基体总质量分数和LA/SC配比不敏感。基体总质量分数越大、结冷胶含量越高,复合凝胶的断裂应力和杨氏模量越大。在确定的基体总质量分数、LA/SC配比下,存在一个最佳离子浓度,使得复合凝胶的断裂应力和杨氏模量最高。

(2) 复合凝胶的保水性随着离子浓度的升高而降低。基体总质量分数越高,低酰基结冷胶含量越

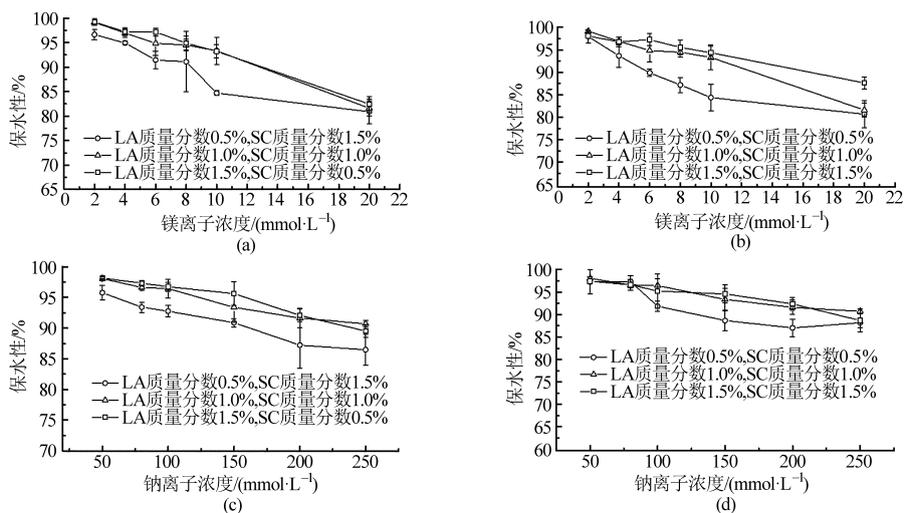


图6 离子浓度对复合凝胶保水性的影响

Fig. 6 Water holding capacity of mixed gels vs cation concentrations

- (a) LA/SC 比例对镁离子诱导凝胶的影响 (b) 基体总质量分数对镁离子诱导凝胶的影响
(c) LA/SC 比例对钠离子诱导凝胶的影响 (d) 基体总质量分数对钠离子诱导凝胶的影响

高,复合凝胶的保水性越好。

(3) 凝胶是食品的常见形态之一,凝胶状态的力学性质是食品感官品质的重要影响因素。因此多

糖、蛋白质等可以形成凝胶的高分子常被用作口感改良剂,或是溶胶食品的增稠剂或稳定剂,其在农产品加工及食品工业中有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 周光宏. 畜产品加工现状与趋势[J]. 中国食品学报, 2011, 11(9): 231-240.
Zhou Guanghong. Animal products processing; status and trends[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2011, 11(9): 231-240. (in Chinese)
- 2 汪立君, 黄鑫, 毕崇浩, 等. 亚麻胶-琼脂混合凝胶体系物理和流变性质[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 193-197, 247.
Wang Lijun, Huang Xin, Bi Chonghao, et al. Physical properties and rheological properties of flax Gum-agar mixed gel system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 193-197, 247. (in Chinese)
- 3 Schmitt C, Turgeon S L. Protein/polysaccharide complexes and coacervates in food systems[J]. Advanced in Colloid and Interface Science, 2011, 167(1-2): 63-70.
- 4 Nishinari K, Takahashi R. Interaction in polysaccharide solutions and gels[J]. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 2003, 8(4-5): 396-400.
- 5 Andrade R J, Azevedo A G, Musampa R M, et al. Thermo-rheological behavior of model protein-polysaccharide mixtures[J]. Rheologica Acta, 2010, 49(4): 401-410.
- 6 朱巧梅, 酃金龙, 范鑫, 等. W/O 乳液凝固剂对 SPI 冷凝胶流变特性与微观结构的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 240-246.
Zhu Qiaomei, Li Jinlong, Fan Xin, et al. Effect of W/O emulsion coagulants on rheological properties and microstructure of cold-set SPI gels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 240-246. (in Chinese)
- 7 Thaiudom S, Goff H D. Effect of k-carrageenan on milk protein polysaccharide mixtures[J]. International Dairy Journal, 2003, 13(9): 763-771.
- 8 Bourriot S, Garnier C, Doublier J L. Micellar-casein-k-carrageenan mixtures. I. Phase separation and ultrastructure[J]. Carbohydrate Polymers, 1999, 40(2): 145-157.
- 9 de Jong S, Klok H J, van de Velde F. The mechanism behind microstructure formation in mixed whey protein-polysaccharide cold-set gels[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23: 755-764.
- 10 Kelly R J, Wagenberg M V, Latham J, et al. A rheological comparison between the effects of sodium caseinate on potato and maize starch[J]. Carbohydrate Polymers, 1995, 28(4): 347-350.
- 11 Keogh M K, Galazka V B, O'Kennedy B T, et al. Rheology of sodium caseinate-gelatin mixtures[J]. Irish Journal of Agricultural and Food Research, 1998, 37: 209-218.
- 12 Banerjee S, Bhattacharya S. Food gels: gelling process and new applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(4): 334-346.
- 13 Coronato R, Biasutti E A R, Carvalho C W P, et al. Gellan gum/cassava starch mixtures in water systems and in milk systems[J]. Starch-Starke, 2012, 64(5): 359-366.

- 14 Prajapati V D, Jani G K, Zala B S, et al. An insight into the emerging exopolysaccharide gellan gum as a novel polymer[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 93(2): 670 – 678.
- 15 Kang K S, Veeder G T, Cottrell I W. Some novel bacterial polysaccharides of recent development[J]. *Progress in Industrial Microbiology*, 1983, 18: 231 – 253.
- 16 罗登林,刘娟,许威,等. 菊粉在酸性条件下的凝胶特性[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 185 – 190.
Luo Denglin, Liu Juan, Xu Wei, et al. Gelatin properties of inulin in acidic solution[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 185 – 190. (in Chinese)
- 17 de Jong S, Klok H J, van de Velde F. The mechanism behind microstructure formation in mixed whey protein-polysaccharide cold-set gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(3): 755 – 764.
- 18 Tang J, Tung M A, Zeng Y. Compression strength and deformation of gellan gels formed with mono-and divalent cations[J]. *Carbohydrate Polymers*, 1996, 29(1): 11 – 16.
- 19 王伟,徐德时,李素清,等. 聚电解质-壳聚糖浓溶液流变学性质研究[J]. *高分子学报*, 1994(3): 328 – 333.
Wang Wei, Xu Deshi, Li Suqing, et al. Polyelectrolyte-rheological properties for concentrated solution of chitosan[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 1994(3): 328 – 333. (in Chinese)
- 20 Morris E R, Nishinari K, Rinaudo M. Gelation of gellan—a review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 28(2): 373 – 411.
- 21 Mao R, Tang J, Swanson B G. Water holding capacity and microstructure of gellan gels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2001, 46(4): 365 – 371.
- 22 Huang Y, Tang J, Swanson B G, et al. Effect of calcium concentration on textural properties of high and low acyl mixed gellan gels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 54(4): 517 – 522.
- 23 Nono M, Nicolai T, Durand D. Gel formation of mixtures of κ -carrageenan and sodium caseinate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(4): 750 – 757.

~~~~~  
(上接第 211 页)

- 14 Aguilera J M, Cadoche L, Lopez C, et al. Microstructural changes of potato cells and starch granules heated in oil[J]. *Food Research International*, 2001, 34(10): 939 – 947.
- 15 计红芳,张令文,杨铭铎,等. 藕片水焯工艺优化[J]. *食品科学*, 2011, 32(18): 108 – 111.  
Ji Hongfang, Zhang Lingwen, Yang Mingduo, et al. Optimization of quick-boiling process for lotus root slices[J]. *Food Science*, 2011, 32(18): 108 – 111. (in Chinese)
- 16 肖功年,杜卫华,周乐群,等. 不同烫漂时间对真空油炸毛豆仁品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2005(7): 147 – 149.
- 17 Lambert M A, Moss C W. Comparison of the effects of acid and base hydrolyses on hydroxy and cyclopropane fatty acids in bacteria[J]. *Journal of Clinical Microbiology*, 1983, 18(6): 1370 – 1377.
- 18 Diaz G, Melis M, Batetta B, et al. Hydrophobic characterization of intracellular lipids in situ by Nile Red red/yellow emission ratio[J]. *Micron*, 2008, 39(7): 819 – 824.
- 19 林义,钟添华,骆祝华,等. 尼罗红染色法筛选产油酵母及定量检测胞内油脂含量的研究[J]. *微生物学通报*, 2012, 39(1): 125 – 137.  
Lin Yi, Zhong Tianhua, Luo Zhuhua, et al. Study on screening of oleaginous yeast and determination of intracellular lipid content by nile red dyeing [J]. *Microbiology*, 2012, 39(1): 125 – 137. (in Chinese)
- 20 阎晓倩,朱武. 真空油炸技术[J]. *真空*, 2007, 44(1): 35 – 38.  
Yan Xiaoqian, Zhu Wu. On the frying in vacuum[J]. *Vacuum*, 2007, 44(1): 35 – 38. (in Chinese)
- 21 Mariscal M, Bouchon P. Comparison between atmospheric and vacuum frying of apple slices[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(4): 1561 – 1569.
- 22 Achir N, Vitrac O, Trystram G. Direct observation of the surface structure of French fries by UV – VIS confocal laser scanning microscopy[J]. *Food Research International*, 2010, 43(1): 307 – 314.