高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶粘弹行为的研究

陈青，马慧婷，王磊，谭力
（浙江工商大学食品与生物工程学院，浙江杭州 310018）

摘要：本文研究了酪蛋白酸钠浓度、结冷胶浓度、离子和测试条件对高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶粘弹性的影响。结果表明：高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠共混体系为典型的切力变稀流体，表观粘度随着酪蛋白酸钠浓度的升高而降低，而随着阳离子浓度的增大出现先增大后减小的变化趋势。压缩速度对复合凝胶硬度几乎无影响，而内聚性和弹性则随着压缩速度的增加而增大。内聚性随着压缩应变的增大出现先增大后减小的变化趋势。复合凝胶的硬度和弹性随着酪蛋白酸钠浓度的增加而下降，但复合凝胶的内聚性对酪蛋白酸钠浓度不敏感。高酰基结冷胶浓度越高，复合凝胶的硬度和弹性越大。相对于一价离子而言，二价离子形成的凝胶更强且用量更少。钾离子的添加对复合凝胶保水性影响较弱，而钙离子的添加则可以提高复合凝胶的保水性。

关键词：高酰基结冷胶；酪蛋白酸钠；粘弹性；凝胶；硬度
文章篇号：1673-9078(2017)4-101-107 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.4.016

Viscoelastic Behavior of High Acyl Gellan/Sodium Caseinate Mixed Gel

CHEN Qing, MA Hui-ting, WANG Lei, TAN Li
(School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The effects of sodium caseinate concentration, high acyl gellan concentration, ion valence (potassium and calcium ions), cation concentration, and test conditions (compression speed and compression strain) on the viscoelasticity of high acyl gellan/sodium caseinate mixed gels were evaluated. The results suggested that high acyl gellan/sodium caseinate mixtures were typical shear-thinning fluids, and the apparent viscosity decreased with increasing high acyl gellan concentration. With increasing cation concentration, the apparent viscosity of mixtures first increased and then decreased. Compression speed had almost no influence on the hardness of mixed gels. Cohesiveness and springiness of mixed gels increased with increased compression speed. The cohesiveness of mixed gels increased to a maximum and then decreased with increasing compression strain. The hardness and springiness of mixed gels decreased with increasing sodium caseinate concentration. The concentration of sodium caseinate had almost no effect on the cohesiveness of mixed gels. The higher the concentration of high acyl gellan, the greater hardness and springiness of mixed gels. The gel formed with divalent ions was stronger and required less material compared with that formed with monovalent ions. The addition of potassium ions had a weak effect on the water-holding capacity of mixed gels, while the addition of calcium ions enhanced the water holding capacity.

Key words: high-acyl gellan gum; sodium caseinate; viscoelasticity; gels; hardness

蛋白质和多糖是食品体系中最重要的两类生物大分子，它们除了作为营养物质发挥功能特性之外，还可通过凝胶性、增稠性和表面稳定性在产品的微观结构、质构特性和稳定性方面起着重要作用[1,2]。

酪蛋白酸钠是将牛乳中的酪蛋白胶束去除胶体磷酸钙后得到的产品，具有很强的乳化、增稠作用，在食品工业中广泛使用[3]。结冷胶是一种新型阴离子型微生物多糖，其具有用量少，耐热耐酸、持水性好，复配性强等独特的理化特性，在食品、医药、化工和石油等行业有着广阔的应用前景[4]。

对于单一的生物大分子凝胶而言，研究者很容易将凝胶结构与性能相关联，但在双组份生物大分子体系中，组分间的相互作用可导致凝胶化或产生沉淀，但其结构与性能的关系非常复杂。例如，明胶/乳清蛋白体系在凝胶初期就会发生相分离，明胶形成连续相而乳清蛋白则以液滴状分散于连续相中。乳清蛋白与卡拉胶、明胶、结冷胶混合体系的相形态是多糖凝胶化与蛋白质聚集两个过程相互竞争的结果[5]。κ-卡拉胶/glycinin 复合凝胶弹性模量高于单一浓度的 κ-卡拉胶和glycinin凝胶，且卡拉胶和变性glycinin浓度越高，复合凝胶强度则越大[6]。在酸性介质中，酪蛋白酸钠和海藻酸盐之间的静电作用会增强海藻酸盐-酪蛋白酸钠复合胶囊的稳定性及力学强度[7]。卡拉胶和酪蛋

收稿日期：2016-04-17
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51103131）；食品科学与工程浙江省重中之重一级学科开放基金项目（JYTSP20142091）；浙江大学高分子合成与功能构造教育部重点实验室开放课题（2015MSF002）
作者简介：陈青（1976-），女，博士，副教授，研究方向：食品流变学

白之间会发生吸附作用，卡拉胶的加入会使得酪蛋白胶束粒径增大，且卡拉胶和酪蛋白分子之间会发生交联反应[8]。以上研究说明，生物大分子间相互作用具有针对性、特征性，凝胶形成及结构与性能强烈依赖于分子间相互作用。对于生物大分子凝胶而言，独特的流变行为是其本质特征之一。对牛奶蛋白质/多糖凝胶体系结构与流变特征研究的缺乏，是导致我国乳品加工业落后于国际先进水平的根本原因。因此，本文以高酰基结冷胶-酪蛋白酸钠复合凝胶为研究对象，考察复合体系粘弹行为随浓度、离子强度和离子种类的变化规律，以期为我国乳品饮料工业加工与质量的调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

高酰基结冷胶 HF-B，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；氯化钾，东阳市天宇化工有限公司；氯化钙，东阳市天宇化工有限公司。

1.2 主要仪器设备

AR-G2 流变仪，美国 TA 公司；TA-XT 2*i* 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；数显恒温水浴锅(HH-4)，国华电器有限公司；BS224S 型电子天平，德国赛多利斯仪器公司。

1.3 试验方法

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 mM 的叠氮化钠作为抑菌剂。

结冷胶溶液的配制：在室温下将适量结冷胶粉末加入到去离子水中，室温下溶胀24 h，于90 ℃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90 ℃去离子水补偿由于蒸发而损失的质量。

结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶的制备：将酪蛋白酸钠溶液和结冷胶溶液在80 ℃混合5 min，并趁热加入计量的氯化钙或氯化钾，分装在Φ30 mm×20 mm模具中，用15 ℃的冷水浴冷却10 min，在4 ℃冰箱中放置固定的时间后进行力学特性分析。

本实验中所制备的复合凝胶中高酰基结冷胶浓度为0.4%、0.6%、0.8%和1.0% (*m/V*)，酪蛋白酸钠浓度为1.5%、3.0%、4.5%和6.0% (*m/V*)。钾离子浓度为50 mM、100 mM和150 mM，钙离子浓度为2 mM、6 mM和10 mM。

1.3.2 流变特性测定

将按照 1.3.1 方法制备的复合溶液趁热加入流变仪预热好的夹具中，复合溶液的流变特性采用 AR-G2 旋转流变仪进行测试。锥板模式，锥板直径 40 mm，锥角 1 °。稳态剪切的剪切速率范围为 0.1~100 s^{-1}，温度为 30~70 ℃。测试前将暴露在夹具外表面涂一层甲基硅油，以防止测试过程中水分挥发。

1.3.3 复合凝胶力学性能测定

复合凝胶力学特性测试采用质构分析仪（型号 TA-XT 2*i*，英国 SMS 公司）。选用的夹具为 P/0.5 s，测试模式为 TPA(Texture Profile Analysis)。具体测试参数为：预压速度为 1.0 mm/s，下压速度为 1.0 mm/s，回复速度为 1.0 mm/s，变形量为 40%，两次压缩之间的停留时间为 5 s，触发力为 5 g。在研究测试参数对复合凝胶力学性能影响时，压缩速度分别为 1 mm/s、2 mm/s 和 3 mm/s，压缩应变为 30%、40%和 50%。

每组实验重复测定 5 次，文中所用数据为 5 次重复测量的平均值±标准偏差。

1.3.4 保水性测试

保水性测试采用超高速离心机测定。将按照 1.3.1 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，称量质量 W_1，于 12000 g 下离心 10 min，去除水，称量重量 W_2，根据下式计算保水性：

$$WHC = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100\%$$

每组实验重复测定 5 次，文中所用数据为 5 次重复测量的平均值±标准偏差。

2 结果与讨论

2.1 复合溶液体系流变行为研究

图1给出了30 ℃，高酰基结冷胶浓度为0.6% *m/V* 时，酪蛋白酸钠浓度对复合体系表观粘度的影响，可见，在特定的酪蛋白酸钠浓度下，复合体系的表观黏度随着剪切速率的增加而下降，呈现出典型的切力变稀的流体特性。复合体系的表观黏度则随着酪蛋白酸钠浓度的升高而减小，这可能要归因于酪蛋白酸钠浓度的增大会阻碍高酰基结冷胶分子之间缠结和碰撞的几率，使得复合体系表观粘度减小。我们还发现复合

体系的粘度随着温度的升高而降低，这是因为温度升高，体系内大分子热运动加剧，溶液的流动阻力减小，抵抗形变能力降低，流动性增强，粘度降低。此外，复合体系中高酰基结冷胶浓度越高，复合体系的粘度越大，这是因为单位体积内大分子碰撞和缠结的几率增大所致。

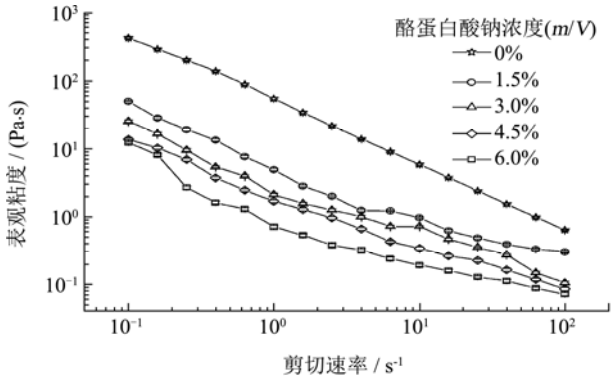


图 1 高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合体系表观粘度-剪切速率关系

Fig.1 Viscosity as a function of shear rate for high acyl gellan gum/sodium caseinate mixtures

注：高酰基结冷胶浓度为 0.6%（*m/V*），测试温度为 30 ℃。

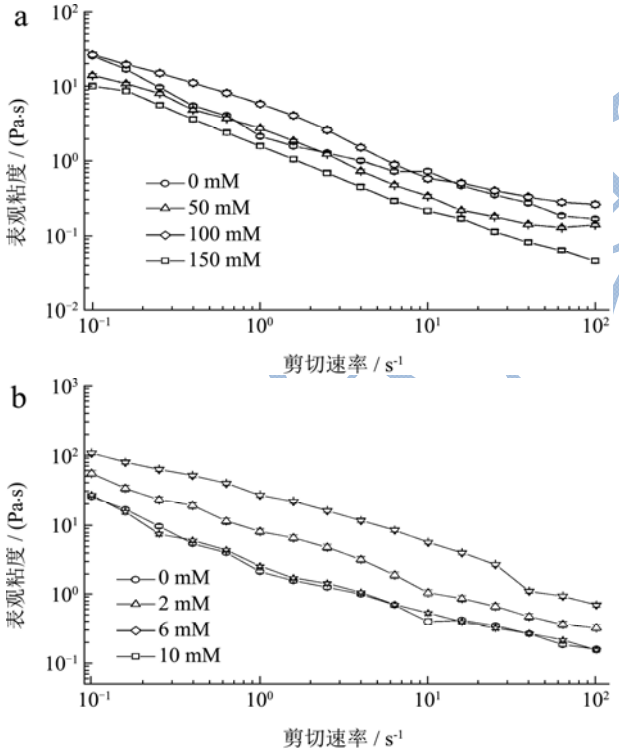


图 2 离子对高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合体系表观粘度的影响

Fig.2 Apparent viscosity of high acyl gellan gum/sodium caseinate mixtures with different cation concentrations

注：a，钾离子；b，钙离子；高酰基结冷胶浓度为 0.6% *m/V*；酪蛋白酸钠含量为 3.0%（*m/V*）。

图2给出了离子对复合体系（高酰基结冷胶浓度为0.6% *m/V*，酪蛋白酸钠浓度为3.0% *m/V*表观粘度的影响。显然，不管是添加钾离子还是钙离子，复合体系的粘度均随着离子浓度的增加出现先增大后减小的变化趋势，这是因为阳离子可以有效屏蔽结冷胶羧基侧链间的静电排斥作用，促进结冷胶分子螺旋结构的紧密聚集[9]，但过量阳离子又会阻碍结冷胶双螺旋结构的有序聚集。从而造成体系黏度的降低。

2.2 测试条件和高酰基结冷胶浓度对复合凝胶力学特性的影响

高酰基结冷胶形成的凝胶软而弹，很难压断，故而在本研究中我们采用 TPA 方法考察了高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶的力学性能[10]。TPA 测试结果和测试参数紧密相关，为了更全面地分析高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶体系的力学特性以及更好地选取测试参数，首先对测试条件进行了研究。

2.2.1 硬度

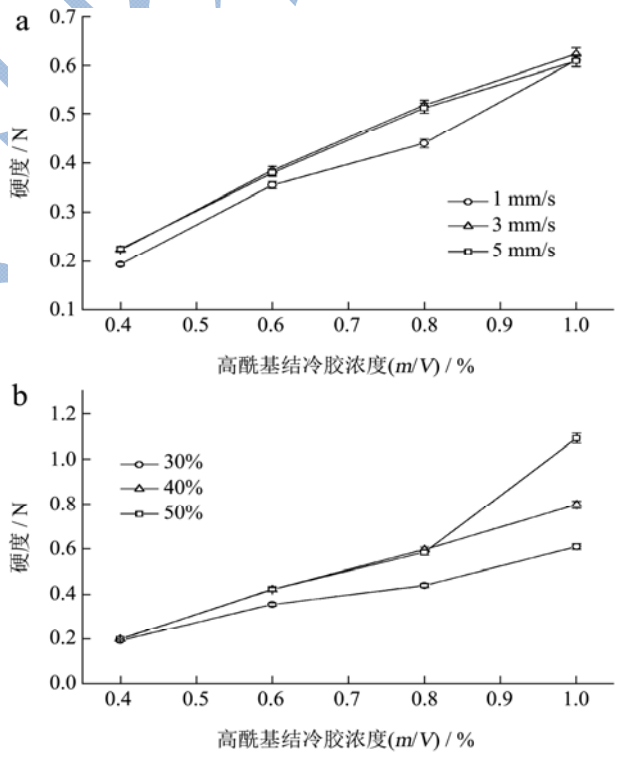


图3 测试条件和高酰基结冷胶浓度对复合凝胶强度的影响

Fig.3 Effect of test conditions and high acyl gellan concentration on the hardness of mixed gels

注：a，压缩速度；b，压缩应变；酪蛋白酸钠含量为1.5%（*m/V*）。

图 3 给出了酪蛋白酸钠含量为 1.5% *m/V* 的复合凝胶硬度与测试条件以及高酰基结冷胶浓度的关系。

可以发现，复合凝胶的硬度随高酰基结冷胶浓度的增大而增大，这是因为复合凝胶在形成的过程中，高酰基结冷胶会形成海绵状的网络结构，而酪蛋白酸钠则以聚集体的形式填充在其内部，多糖浓度越高，形成的网络结构则越致密，硬度也越大。在所研究的结冷胶浓度范围内，压缩速度对复合凝胶硬度几乎无影响，说明高酰基结冷胶具有较好的弹性，这与 Ravi 等的研究结果一致，材料弹性越好，受探头速率的影响越小。压缩应变对硬度的影响则表现出相反的趋势，当结冷胶浓度低于 1.0% *m/V* 时，当压缩应变增至 40%时，压缩应变对硬度无影响，当结冷胶浓度为 1.0% *m/V* 时，压缩应变越大，硬度值越高。

2.2.2 内聚性

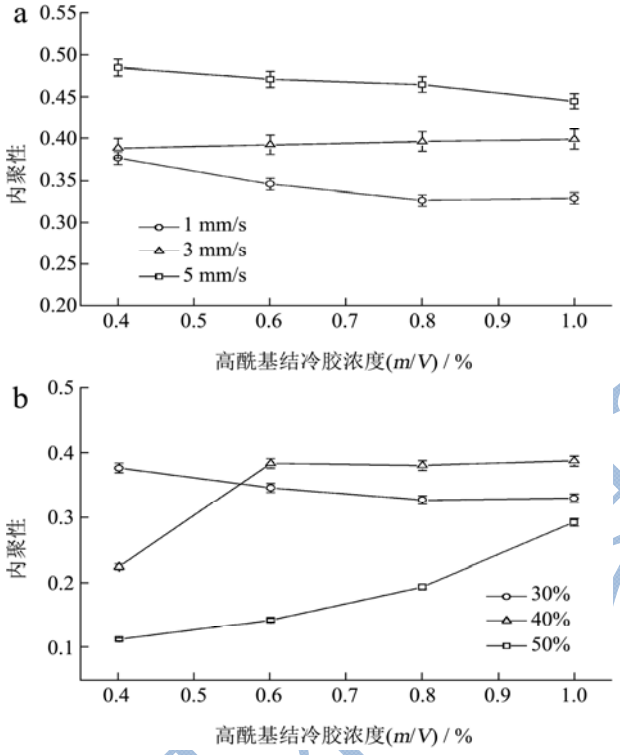


图4 测试条件和高酰基结冷胶浓度对复合凝胶内聚性的影响

Fig.4 Effects of test conditions and high acyl gellan concentration on the cohesiveness of mixed gels

注：a，压缩速度；b，压缩应变；酪蛋白酸钠含量为1.5%（*m/V*）。

图 4 给出了测试条件和高酰基结冷胶浓度对复合凝胶内聚性的影响。可知，压缩速度对于体系的内聚性影响较大，压缩速度越大，内聚性越高。高酰基结冷胶浓度对复合凝胶内聚性影响较小。在较低浓度的复合体系中，内聚性随压缩应变的增大而减小，当体系中高酰基结冷胶浓度高于 0.6% *m/V* 时，复合凝胶的内聚性随压缩应变的增大先增大后减小，当压缩应变为 40%时取得最大值。

2.2.3 弹性

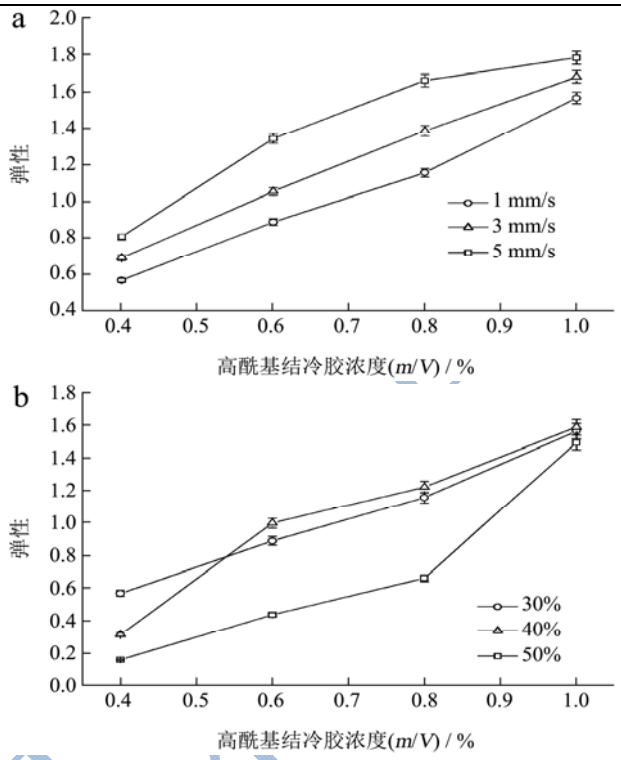


图5 压缩测试条件和高酰基结冷胶浓度对复合凝胶弹性的影响

Fig.5 Effect of test conditions and high acyl gellan concentration on the springiness of mixed gels

注：a，压缩速度；b，压缩应变；酪蛋白酸钠含量为1.5%（*m/V*）。

图 5 给出了测试条件和高酰基结冷胶浓度对复合凝胶弹性的影响。可以发现，复合凝胶的弹性随高酰基结冷胶浓度和压缩速度的增大而增大。当结冷胶浓度较低时，弹性随着压缩应变的增加而减小，当结冷胶浓度高于 0.6% *m/V* 时，弹性则随着压缩应变的增大出现先增大后减小的趋势，当压缩应变为 40%时获得最大值。当结冷胶浓度增大至 1.0% *m/V* 时，压缩应变对弹性则无影响。综合考虑，在进行复合凝胶力学性能测试时，选取测试速度为 1 mm/s，而压缩应变为 40%。

2.3 复合凝胶力学性能研究

2.3.1 硬度

硬度可用来表征凝胶结构在压缩状态下的强度特性，通常，硬度越大表明凝胶强度越高。图6给出了高酰基结冷胶含量为0.6% *m/V*的复合凝胶硬度与离子浓度和酪蛋白酸钠浓度的关系。可见，在所研究的浓度范围内，复合凝胶的硬度随着酪蛋白酸钠浓度的升高而减小，这可能是因为体系中高酰基结冷胶与酪蛋白酸钠没有有效交联，我们在对低酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶进行研究时发现，低酰基结冷胶会形成海绵状的三维网络结构，而酪蛋白酸钠则聚集为球形镶

嵌在网络结构中。对于高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠体系而言，有效的网络骨架主要是由高酰基结冷胶分子形成的，酪蛋白酸钠的球形结构及其整体所带的负电荷反而会弱化高酰基结冷胶分子形成的网络结构。

复合凝胶硬度随着离子浓度的增大出现了先增大后降低的变化趋势，当钾离子和钙离子浓度分别为100 mM和6 mM时，复合凝胶的硬度最大。这是因为阳离子能结合结冷胶分子侧链上的羧基，屏蔽静电排斥作用，促进结冷胶双螺旋结构的聚集，钾离子通过双螺旋结构-钾离子-水-钾离子-双螺旋结构间接交联，而钙离子则是通过离子键链接羧基，形成双螺旋结构[11]。故而随着阳离子浓度的升高，复合凝胶的硬度也增大，但当体系内部离子浓度过高时，又会阻碍结冷胶分子的聚集，因此离子增强有一个最佳值，超过这个值之后，离子的添加对复合凝胶硬度则会起到弱化的作用。高酰基结冷胶浓度为0.4%、0.8%和1.0% (*m/V*)的体系也得到了类似的结果。相对于钾离子，钙离子诱导形成的凝胶更强且用量更少。

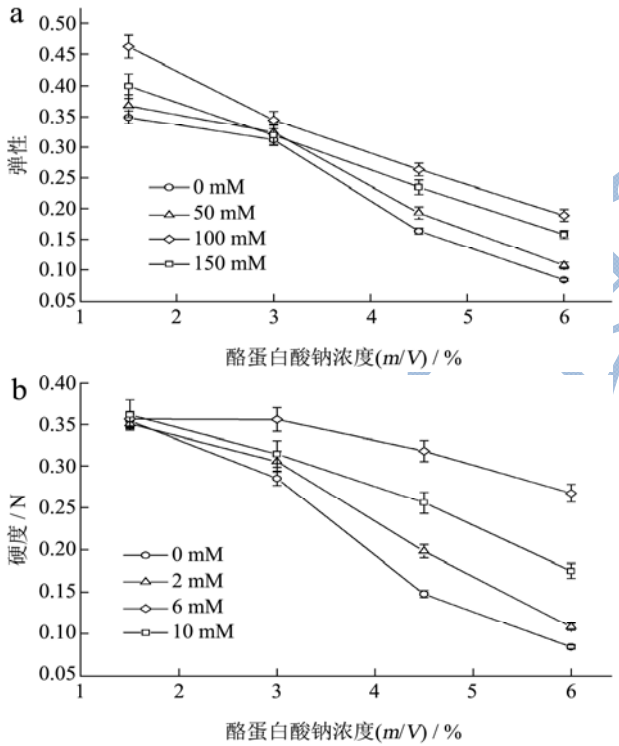


图6 离子浓度和酪蛋白酸钠浓度对复合凝胶硬度的影响

Fig.6 Effect of cation concentration and sodium caseinate concentration on the hardness of mixed gels

注：a，钾离子诱导凝胶；b，钙离子诱导凝胶；高酰基结冷胶含量为0.6%（*m/V*）。

2.3.2 内聚性

内聚性可以反映破坏凝胶内部结构的难易程度。图 7 给出了离子浓度和酪蛋白酸钠浓度对复合凝胶内聚性的影响。不难发现，酪蛋白酸钠的添加对复合凝胶内聚性几乎无影响。当钾离子浓度低于 100 mM，钙离子浓度低于 2 mM 时，复合凝胶内聚性基本保持不变，之后则随着离子浓度的升高而减小。这可能是因为当体系内阳离子浓度较低时，电荷数量较少，聚合物形成的凝胶软且较为透明，当阳离子浓度较高时，离子间会出现相互排斥，形成的凝胶脆而白，表现为保持凝胶完整性的能力下降。这也说明了当离子浓度较低时，形成的凝胶在一次压缩中凝胶结构不易被破坏，因此在二次压缩中就需要更多的能量破坏，可以认为该凝胶在咀嚼时感觉比较坚硬。复合凝胶的内聚性随着体系内高酰基结冷胶含量的升高而略有增大，这和 Lau 等人对结冷胶/果胶复合凝胶的研究结果类似[12]。

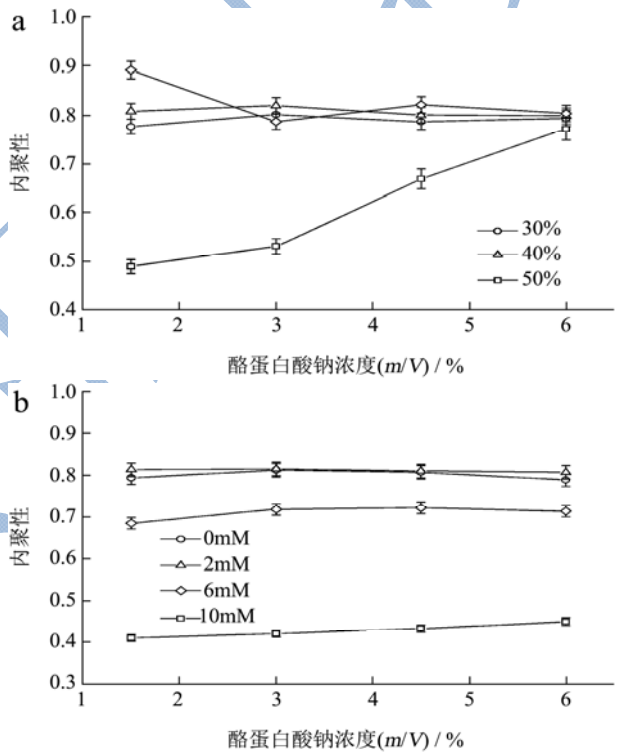


图7 离子浓度和酪蛋白酸钠浓度对复合凝胶内聚性的影响

Fig.7 Effect of cation concentration and sodium caseinate concentration on the cohesiveness of mixed gels

注：a，钾离子诱导凝胶；b，钙离子诱导凝胶；高酰基结冷胶含量为0.6%（*m/V*）。

2.3.3 弹性

弹性反映了凝胶结构在初次压缩后的破坏程度。弹性大的凝胶通常在一次压缩中破碎成大块结构；弹性小的凝胶则会在一次压缩中破碎成很多小块[13]。图 8 给出了离子浓度和酪蛋白酸钠浓度对高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶弹性的影响。可知，离子种类对高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶弹性影响显著。对于钾离子诱导凝胶而言，复合凝胶的弹性随着酪蛋白浓度的增加呈现先增加后降低的变化趋势，当酪蛋白

含量为 3.0%（*m/V*）时，复合体系的弹性最好。对于钙离子诱导凝胶而言，复合凝胶的弹性随着酪蛋白含量的增加逐渐下降。复合凝胶的弹性则随着离子浓度的升高出现先增大后减小的变化趋势，当钙离子浓度为 6 mM 时，钾离子浓度为 100 mM 时，体系的弹性最大。在最佳离子浓度下，钾离子诱导凝胶比钙离子诱导凝胶的弹性大。高酰基结冷胶浓度为 0.4%、0.8%和 1.0%（*m/V*）的体系也得到了类似的结果。

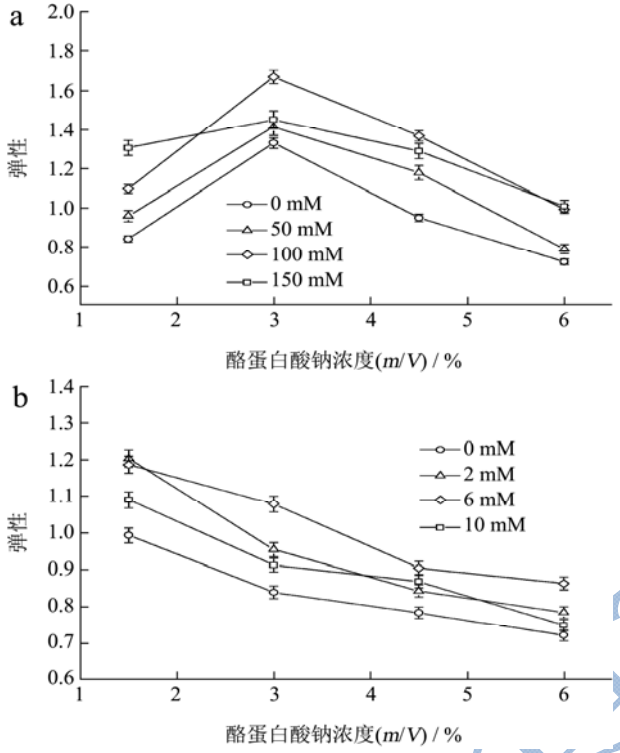


图8 离子浓度和酪蛋白酸钠浓度对复合凝胶弹性的影响

Fig.8 Effect of cation concentration and sodium caseinate concentration on the springiness of mixed gels

注：a，钾离子诱导凝胶；b，钙离子诱导凝胶；高酰基结冷胶含量为0.6%（*m/V*）。

2.4 复合凝胶保水性

图 9 给出了离子浓度、酪蛋白酸钠浓度与高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶保水性的关系。由图可见，当酪蛋白酸钠浓度低于 3.0% *m/V* 时，复合凝胶的保水性几乎不受离子种类和离子浓度的影响。当酪蛋白酸钠浓度高于 3.0% *m/V* 时，复合凝胶的保水性则均随着酪蛋白酸钠含量的升高而急剧下降。对于钾离子诱导凝胶而言，当体系内酪蛋白酸钠浓度相同时，复合凝胶的保水性随着钾离子浓度的增大略有降低。这是因为高酰基结冷胶的甘油酰基会屏蔽分子侧链上的羧基基团，影响了凝胶对离子的敏感度，使其保水性对离子的敏感度降低[14]。当酪蛋白酸钠浓度较高时，钙离子的添加能提高复合凝胶的保水性。体系内高酰基结冷胶含量越高，复合凝胶保水性越好，这要归因于体系微观结构的影响，高酰基结冷胶含量越高，形成的三维网络结构越致密，复合凝胶保水性越好。

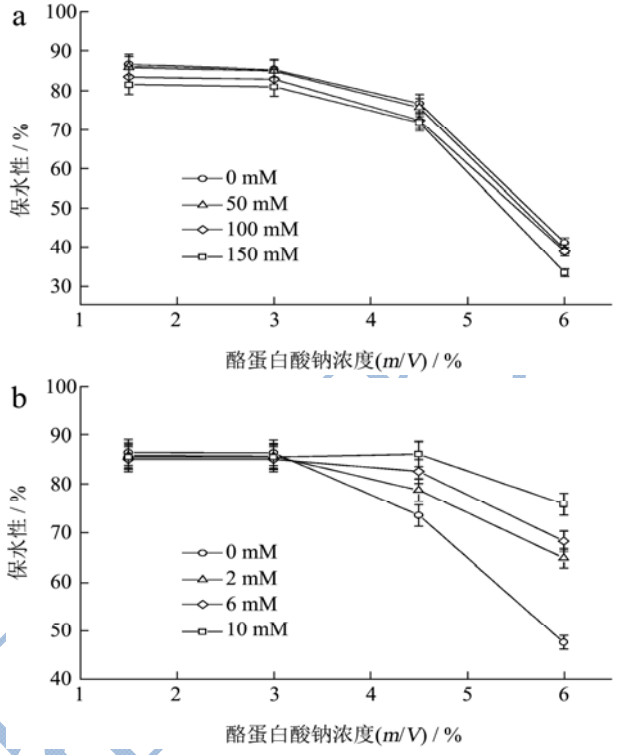


图9 离子浓度和酪蛋白酸钠浓度对复合凝胶保水性的影响

Fig.9 Effect of cation concentrations and sodium caseinate concentration on the water holding capacity of mixed gels

注：a，钾离子诱导凝胶；b，钙离子诱导凝胶；高酰基结冷胶含量为0.6%（*m/V*）。

3 结论

3.1 高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合溶液体系为切力变稀流体，复合溶液体系的表观黏度随着酪蛋白酸钠浓度的升高而减小，随着离子浓度的增大出现先增大后减小的变化趋势。

3.2 复合凝胶的硬度和弹性随着酪蛋白酸钠浓度的增加而下降，但内聚性对酪蛋白酸钠浓度不敏感。结冷胶含量越高，复合凝胶的硬度和弹性越大。相对于一价离子而言，二价离子形成的凝胶更强且用量更少。

3.3 压缩速度对复合凝胶硬度几乎无影响，而内聚性和弹性则随着压缩速度的升高而增大。内聚性随着压缩应变的增大出现先增大后减小的变化趋势，当压缩应变为 40%时达到最大值。

3.4 钾离子的添加对高酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶保水性影响性较弱，钙离子的添加则可以提高复合凝胶的保水性。

参考文献

[1] 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

[2] Sadahira M S, Rodrigues M I, Akhtar M, et al. Effect of egg white protein-pectin electrostatic interactions in a high sugar content system on foaming and foam rheological properties [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 58: 1-10

[3] Martin A H, Jimenez M L D, Pouvreaua L. Modulating the aggregation behaviour to restore the mechanical response of acid induced mixed gels of sodium caseinate and soy proteins [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 58: 215-223

[4] Morris E R, Nishinari K, Rinaudo M. Gelation of gellan-A review [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 28(2): 373-411

[5] 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

[6] 王晓园,杨晓泉,朱建华.大豆蛋白组分与κ-卡拉胶混合凝胶的流变学研究[J].现代食品科技,2008,24(3):501-505
WANG Xiao-yuan, YANG Xiao-quan, ZHU Jian-hua. Rheological properties of soybean glycinin/κ- carrageenan gel [J]. Modern Food Science and Technology, 2008, 24(3): 501-505

[7] Messaoud G B, Sánchez-González L, Jacquot A, et al. Alginate/sodium caseinate aqueous-core capsules: A pH-responsive matrix [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2015, 440: 1-8

[8] 刘安军,胡颖娜,刘彩红,等.酪蛋白-卡拉胶体系流变性及作用机理的研究[J].现代食品科技,2014,30:23-27
LIU An-jun, HU Ying-na, LIU Cai-hong, et al, Study on rheology and interactional mechanism of casein/carrageenan mixtures [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30: 23-27

[9] Yuguchi Y, Urakawa H, Kajiwara K. The effect of potassium salt on the structural characteristics of gellan gum gel [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16(3): 191-195

[10] Danalache F, Beirao-da-Costa S, Mata P, et al. Texture, microstructure and consumer preference of mango bars jellified with gellan gum [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62: 584-591

[11] Morris E R, Gothard M G E, Hember M W N, et al. Conformational and rheological transitions of welan, rhamsan and acylated gellan [J]. Carbonhydrate Polymers, 1996, 30(2-3): 165-175

[12] Lau M H, Tang J, Paulson A T. Texture profile and turbidity of gellan/gelatin mixed gels [J]. Food Research International, 2000, 33(8): 665-671

[13] Yildiz O, Yurt B, Basturk A, et al. Pasting properties, texture profile and stress-relaxation behavior of wheat starch/dietary fiber systems [J]. Food Research International, 2013, 53(1): 278-290

[14] Tang J, Tung M A, Zeng Y. Compression strength and deformation of gellan gels formed with mono-and divalent cations [J]. Carbohydrate Polymer, 1996, 29(1): 11-16

现代食品科技