

# 电场对魔芋葡甘聚糖与卡拉胶相互作用的影响

王淑娜, 谭小丹, 陈涵, 黄荣勋, 王敏, 谢丙清, 林海斌, 庞杰

(福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002)

**摘要:** 为了研究电场对魔芋葡甘聚糖与卡拉胶相互作用机理的影响, 本研究采用 5 kV 直流高压 (氧负离子) 处理魔芋葡甘聚糖与卡拉胶粉末, 将粉末配制样品进行试验; 结果表明: 经电场处理 9 min 的 KGM 与卡拉胶复合胶的弹性模量  $G'$  始终明显大于黏性模量  $G''$ , 此时的凝胶网络富有弹性, 分子链缠结贯穿效应明显。KGM 与卡拉胶复合胶在频率扫描范围内, 弹性模量  $G'$  明显大于黏性模量  $G''$ , 表明此时已经具有一定强度的凝胶网络结构; 当多糖浓度为 1%, 魔芋葡甘聚糖与卡拉胶的共混比例为 1:4 时, 凝胶强度达到最大值; 电场处理时间为 6 min 时, 凝胶强度最大; 在 75 °C 下加热 30 min 的凝胶强度最大; 进行傅里叶红外光谱扫描, 从红外吸收谱图中, 吸收峰仅有强度的变化, 未检测到新的吸收峰, 说明电场处理未能显著改变其化学结构, 引起性质的显著变化。

**关键词:** 魔芋葡甘聚糖; 卡拉胶; 电场; 凝胶强度; 作用机理

文章编号: 1673-9078(2016)11-209-214

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.11.032

## Influence of an Electric Field on the Interaction between Konjac-derived Glucomannan and Carrageenan

WANG Shu-na, TAN Xiao-dan, CHEN Han, HUANG Rong-xun, WANG Min, XIE Bing-qing, LIN Hai-bin, PANG Jie

(College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** In order to study the influence of an electric field on the mechanism underlying the interaction of konjac glucomannan and carrageenan, 5 kV high-voltage direct current (oxygen anion) was used to treat konjac-derived glucomannan (KGM) and carrageenan powders, and samples were prepared from the two powders for testing. The results showed that the elastic modulus  $G'$  of the composite gel of KGM and carrageenan treated by the electric field for 9 min was significantly greater than the viscous modulus  $G''$  all the time. The gel network was flexible, and the entanglement and penetration of the molecular chains were significant. In the frequency scan range, the elastic modulus  $G'$  of KGM and carrageenan composite gel was significantly greater than the viscous modulus  $G''$ , suggesting that the gel network structure already had a certain strength. When the concentration of polysaccharide was 1% and the blending ratio of konjac-derived glucomannan and carrageenan was 1:4, the maximum gel strength was reached. The maximum gel strength was also achieved when the sample was treated by the electric field for 6 min or heated at 75 °C for 30 min. Fourier infrared spectroscopy analysis was performed. The infrared absorption spectra showed only changes in the intensity of absorption peaks and no new absorption peaks, suggesting that the electric field did not significantly change the chemical structure or properties.

**Key words:** konjac-derived glucomannan; carrageenan; electric field; gel strength; interaction mechanism

传统的高分子凝胶通常形成化学交联。化学交联剂分散的不均匀性, 导致不均匀的凝胶网络, 这种凝胶很脆弱, 大大限制了其应用。许多凝胶缺乏强度和韧性, 因此, 为了提高凝胶材料的生物活性、强度和韧

收稿日期: 2015-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (3127837, 31471704); 福建省高校产学研重大专项 (2013N5003); 福建省自然科学基金 (2011J0101); 福建省教育厅科技计划项目 (JA13439, JA13440); 福建省林业厅科技计划项目 (20135) 资助

作者简介: 王淑娜 (1989-), 女, 硕士研究生; 谭小丹, 共同第一作者

通讯作者: 庞杰 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与营养

性, 克服传统凝胶力学性能的缺陷, 通常需要功能化地修饰理化特性, 即水凝胶材料的物理和化学改性(如氢键、静电相互作用), 使其拥有特定功能<sup>[1]</sup>。

在制备多糖凝胶的过程中, 因魔芋葡甘聚糖含有乙酰基, 其单体胶水溶液不能形成凝胶, 卡拉胶单独配制形成的凝胶因具有脆性大、弹性小、保水性差和易收缩, 限制了卡拉胶的广泛应用。魔芋葡甘聚糖常用的提高凝胶强度的方法存在以下问题: (1) 加碱脱乙酰基形成热不可逆凝胶, 但加碱会形成难以去除的碱味<sup>[2]</sup>; (2) 添加硼砂与KGM分子链发生配位作用, 形成热稳定性凝胶, 硼砂是有毒物质, 无法广泛应用

到生产加工中<sup>[3-4]</sup>；(3) 复配形成凝胶，魔芋葡甘聚糖与亲水胶卡拉胶进行复配后，产生协同效应，增加黏稠、黏附力和紧密性等性能应用在食品加工中<sup>[5-6]</sup>，但经简单的物理共混而得到的魔芋葡甘聚糖与卡拉胶凝胶凝胶体系，因其热不稳定、易脱水的性能，局限于应用在布丁、果冻和软糖等塑性产品中<sup>[7]</sup>。多糖凝胶大多存在凝胶稳定性差的问题<sup>[8,9]</sup>，如何提高多糖凝胶的稳定性成为食品科学家的重要研究方向。而利用电场技术制备KGM稳定凝胶，并探索其凝胶机理是克服现有KGM凝胶局限的重要途径之一。

近年来，新技术高压电场处理法发展迅速，应用于众多领域中。作为一种物理方式应用在中糖等结构特性的改性中；利用电场诱导聚合物自组装，从而对物质结构进行设计和控制，以便物质在食品与生物学等领域更广泛地应用<sup>[10]</sup>。确定电场与卡拉胶对魔芋葡甘聚糖相互作用机理的影响，以扩大其应用领域，为后续的开发和发展魔芋葡甘聚糖与卡拉胶的产品奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

魔芋精粉（含 KGM 88%）（云南昭通三艾有限公司），卡拉胶（阿拉丁试剂（上海）有限公司）。

MCR301 高级食品流变仪（奥地利安东帕有限公司），TA.XT.Plus 质构仪（英国 Stable Micro System 公司），冷冻干燥机 FDU-1200（上海爱朗仪器有限公司），傅里叶变换红外光谱仪 AVATAR 360（美国 Nicolet 尼高力公司），电子天平（赛多利斯科学仪器（北京）有限公司），JJ-4 六连电动搅拌器（国华电器有限公司）HH-4 型数显恒温水浴锅（国华电器有限公司），5 kV 直流高压（氧负离子）设备（实验室研发设备）。

### 1.2 实验过程

#### 1.2.1 理论方法<sup>[11]</sup>

魔芋葡甘聚糖达到缠结浓度时，大分子链在溶液中形成链式错综复杂的网络，每个时期的大致均匀的溶液变成浓溶液，其中最著名的是在浓厚系统中，系统的零剪切黏度呈现约 3.4 次方在幂律急剧上升，而这一性质与发生分子链之间的缠结有关。高分子线团完全相互渗透，成为构造符合高斯分布的高斯型线团。缠结是长链分子之间相互作用的特点。微观上看，缠结的作用主要有两个。

为了说明大分子链的缠结，Genes 提出一种分子链串滴模型（blob model），该模型指出在浓溶液或亚

浓溶液中，一条分子链含有 N 个单体数，也可以视为由一串尺寸为  $\xi$  的滴组成。滴中是溶胀的链段，每一滴相当于一个统计链段，含有 g 个单体数，则有  $\xi \approx g^{0.6}$ ，又由于：

$$\xi = c, \quad g \approx c - \frac{5}{4}$$

即  $g \approx \xi^3 c$ ，那么小滴内的浓度为：

$$\frac{g}{\xi^3}$$

c 为整个溶液的浓度，整个分子链的均方回转半径为：

$$\langle R_g^2 \rangle = \frac{N}{g} \xi^2 \propto c^{-1/4}$$

Genes 认为，在溶液中高分子链缠结网络形式相互渗透，彼此是通过由串滴链的相互拓扑穿绕形成。缠结的套环缠结的一个重要特征是套环的位置可以改变和滑动，而不是一个死结。基于这种理解，“缠结”分子链的概念提升到一条分子链在其他分子链形成的环或管中滑动。这个新的“缠结”限制了分子链的运动，提高分子链之间的相互作用，又可以打开缠结，在新的平衡条件下形成新的缠结网络。

凝胶的形变具有时间依赖性，凝胶的黏弹性介于理想弹性体和理想黏性体之间，黏弹性是一种力学松弛行为。弹性模量 G' 反映了凝胶中分子链间的相互作用，弹性模量越大，说明凝胶网络结构越能抵抗外力作用；黏性模量 G'' 反映了凝胶网络结构的流动性能，黏性模量 G'' 越大，表明凝胶网络结构流动性大，消耗外力成为不可逆的热能散失能量的趋向大。

应力的变化为  $\sigma(t) = \sigma_0 \sin \omega t$

应变的变化为  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \delta)$

式中， $\sigma_0$ 、 $\varepsilon_0$  为最大应力和最大应变； $\omega$  为角频率， $\delta$  为力学损耗角。 $\delta$  越大，说明链运动越难，常用  $\tan \delta$  来表示内耗的大小。

交变应力下的弹性模量为复数模量，由弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 组成。

$$G^* = G' + iG''$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad \sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t - \delta)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos \delta \sin \omega t + \sigma_0 \sin \delta \cos \omega t$$

令：

$$G' = \left( \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) \cos \delta \quad G'' = \left( \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) \sin \delta$$

则有：

$$\frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t$$

式中，G' 与应变同相位，所以反映材料形变的回弹能力，

是弹性分量;  $G''$  与应变不同相位, 反映材料形变时的内耗程度, 是黏性分量。

### 1.2.2 实验方法

1.2.2.1 电场处理装置对卡拉胶与魔芋葡甘聚糖粉末进行直流高压(氧负离子)处理。

电压为 5 kV, 电场处理时间为 3、6、9、12、15 min, 魔芋葡甘聚糖与卡拉胶的比例为 5:0、4:1、3:2、2:3、1:4、0:5 进行处理。

1.2.2.2 KGM-卡拉胶溶胶制备

称取魔芋葡甘聚糖与卡拉胶粉末 1 g, 往置于 75 °C 的水浴中加热并用电动搅拌器搅拌着的 99 mL RO 水中, 缓慢加入粉末, 搅拌 30 min, 备用。

1.2.2.3 凝胶制备

将 1.2.2.2 得到的溶胶样品放入 4 °C 冰箱中冷藏 12 h, 得到凝胶。

1.2.2.4 红外光谱分析

将 1.2.2.2 搅拌后得到的样品, 制成薄膜, 放入冰箱冷冻 12 h 后, 在 -18 °C 冷冻干燥 10 h, 得到充分干燥的样品。

### 1.2.3 测定方法

1.2.3.1 流变特性测试

选用 50 mm 平板, 平行板间距 1 mm, 进行如下测定:

(1) 应力扫描: 频率 1 Hz, 扫描范围: 1~100 Pa, 扫描温度: 25 °C;

(2) 频率扫描: 应变为 1%, 扫描范围: 0.1~100 Hz, 扫描温度: 25 °C。

1.2.3.2 凝胶强度测定

采用 compression 模式, 选用 P/0.5 1/2" Diameter Cylinder Probe(柱形探头); 质构参数设置: 测前速度 2.0 mm/s, 测试速度 1.00 mm/s, 测后速度 1.00 mm/s, 形变量 40%, 触发力 5.00 g。

1.2.3.3 傅里叶红外光谱测定电场对 KGM 复合胶的影响

称取 0.01 g 经冷冻干燥的粉碎样品(0.01 g/mL 的复合胶浓度, 魔芋葡甘聚糖:卡拉胶为 3:2) 与溴化钾按 1:100 的比例混合研磨, 研磨至粉末状、无颗粒感后, 进行压片, 傅里叶红外光谱测定。

### 1.2.4 数据统计分析

利用 SAS V8 软件对数据进行统计学分析, 使用 OriginLab 软件进行绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电场处理与卡拉胶对魔芋葡甘聚糖凝胶

#### 的分析

电场与卡拉胶对魔芋葡甘聚糖形成凝胶的过程中, 卡拉胶与魔芋葡甘聚糖相互作用, 分子链发生缠结, 分子互相连接, 形成空间网状结构, 缠结使 KGM 分子兼具有流体和弹性体的性质。

基于分子缠结模型、凝胶的黏弹, 得到了:

$$\frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} = G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t$$

从而可以得到凝胶的弹性模量  $G'$  和黏性模量  $G''$ , 经电场处理的 KGM-卡拉胶的黏弹性性质相较于未处理的 KGM-卡拉胶相较于 KGM, 更容易形成凝胶, 说明电场与卡拉胶对 KGM 的凝胶性质起到了促进作用, 提高了其凝胶能力。

### 2.2 电场处理与卡拉胶对魔芋葡甘聚糖凝胶

#### 特性分析

#### 2.2.1 电场对 KGM-卡拉胶凝胶特性中剪切应力与黏弹性的影响

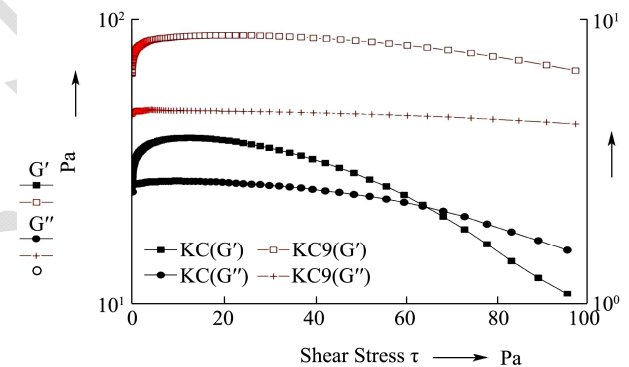


图 1 KGM-卡拉胶剪切应力与黏弹性的关系

Fig.1 Relationship between shear stress and viscoelasticity of KGM-carrageenan gel

表 1 KGM-卡拉胶的弹性模量  $G'$  和黏性模量  $G''$  的平均值数据  
Table 1 Average elastic modulus  $G'$  and viscous modulus  $G''$  of KGM-carrageenan gel

KGM-carrageenan gel		
样品类型	KGM-卡拉胶	KGM-卡拉胶(电场)
$G'/\text{Pa}$	31.887	79.468
$G''/\text{Pa}$	25.844	47.203

从图 1, 可以得到 KGM-卡拉胶和经电场处理的 KGM-卡拉胶的弹性模量  $G'$  和黏性模量  $G''$ , 如表 1 所示; KGM-卡拉胶在剪切应力 0~65 Pa 左右, 弹性模量  $G'$  稍大于黏性模量  $G''$ , 说明此时的网络结构是连续的, 有支撑连续网络结构的强度; 而 65 Pa 之后的弹性模量  $G'$  小于黏性模量  $G''$ , 说明此时要形成连续结构的凝胶网络难度大; 经电场处理的 KGM-卡拉胶的

弹性模量  $G'$  始终明显大于黏性模量  $G''$ ，此时的凝胶网络富有弹性，分子链缠结贯穿效应非常明显。由此可推断得出，经电场处理的 KGM-卡拉胶凝胶相较于未处理的 KGM-卡拉胶缠结效果好，具有连续结构的凝胶网络。

### 2.2.2 电场与卡拉胶对 KGM 凝胶特性中频率与黏弹性的影响

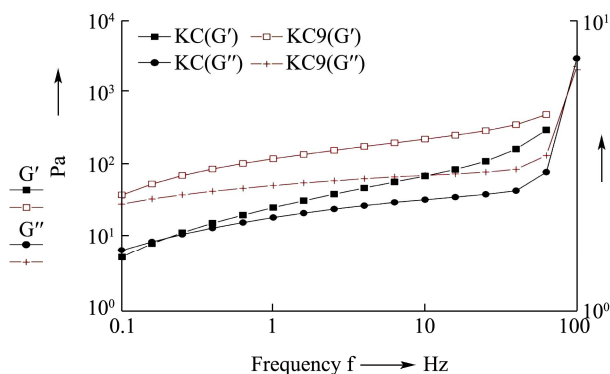


图2 KGM-卡拉胶频率与黏弹性的关系

Fig.2 Relationship between frequency and viscoelasticity of KGM-carrageenan gel

频率与黏弹性的动态频率扫描图如图2所示。频率扫描范围为0.1~100 Hz，从图2中可以看出KGM-卡拉胶在低频率区，黏性模量  $G''$  比弹性模量  $G'$  大，说明在长时间外力作用下，分子链段取向趋于一致，它容易流动，网络结构或片段遭到破坏；在高频区，外力产生的作用时间短，分子链段还未完全取向，分子链段呈现弹性，弹性模量  $G'$  大于黏性模量  $G''$ ；过程表现出频率依赖性，呈溶胶性质。经电场处理过的KGM-卡拉胶在频率扫描范围内，弹性模量  $G'$  明显大于黏性模量  $G''$ ，表明此时已经具有一定强度的凝胶网络结构，形成了真正的凝胶。

## 2.3 电场与卡拉胶对 KGM 凝胶强度的分析

### 2.3.1 浓度对 KGM-卡拉胶凝胶强度的影响

经电场处理后的卡拉胶与 KGM 浓度对凝胶强度的影响，结果见图3。

从图中可以看出，魔芋葡甘聚糖与卡拉胶的比例为3:2，电场处理时间为9 min的凝胶体系的凝胶强度随着浓度的增大呈现增强趋势，浓度的增大使凝胶体系卡拉胶与魔芋葡甘聚糖分子产生更多的相互缠结作用，协同作用增强，使分子的结合更牢固，从而使凝胶强度增大；且随着浓度的增大，溶液会越来越粘稠，较难搅拌均匀，对设备性能的损耗也较大，故本研究的实验样品选用凝胶强度最大的浓度0.01 g/mL。

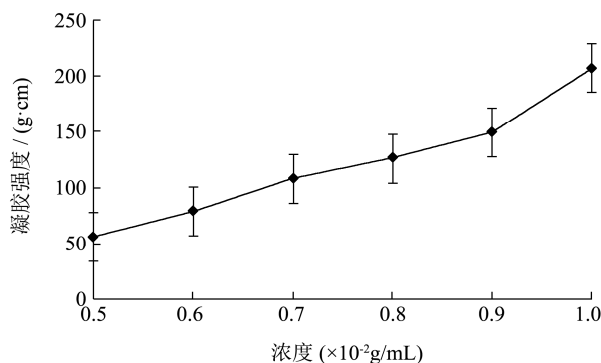


图3 浓度对凝胶强度的影响

Fig.3 Effect of concentration on gel strength

### 2.3.2 KGM-卡拉胶比例对 KGM-卡拉胶凝胶强度的影响

多糖浓度为1%，在75 °C的水浴中加热搅拌30 min，经4 °C冷藏12 h得到复配凝胶，考察电场处理的魔芋葡甘聚糖与卡拉胶的比例对复配胶凝胶强度的影响，如图4所示。未经复配的单体胶在性能上存在一定的不足，可通过两种或以上的物质与之进行复配，改善其增稠、保水与凝胶等性能。卡拉胶与魔芋葡甘聚糖大分子间相互缠绕、相互作用的协同作用，使两者的复配效果好；研究发现，魔芋葡甘聚糖与卡拉胶的比例为4.5:5.5时，得到的复配胶质特性有明显的改善；从图4可以看出，经过电场处理的样品，卡拉胶的比例从大到小，卡拉胶的单体胶不及复配胶的凝胶强度大，随着卡拉胶比例的减小，凝胶强度逐渐降低。卡拉胶比例为0的魔芋葡甘聚糖的单体胶冷藏后无法形成凝胶，处于溶胶状态。经直流电场处理的复配胶在魔芋葡甘聚糖与卡拉胶比例在1:4时凝胶强度最大。表面直流电场可能引起了复配体系的分子结构的破坏和重排，从而导致凝胶强度的变化。

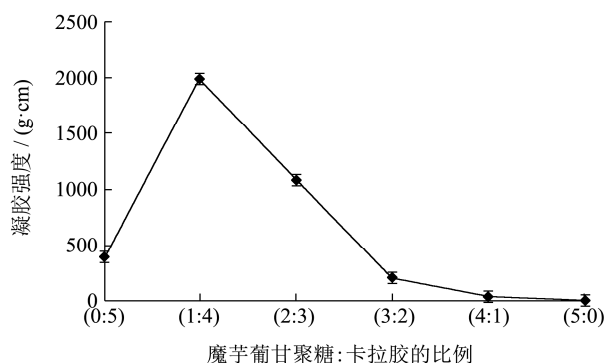


图4 比例对凝胶强度的影响

Fig.4 Effect of proportion on gel strength

### 2.3.3 电场处理时间对 KGM-卡拉胶凝胶强度的影响

电场处理时间对复配胶强度的影响，如图5所示。

本研究采用直流高压（氧负离子）设备对均质后的魔芋葡甘聚糖与卡拉胶比例为3:2的粉末进行处理，使样品粉末置于5 kV的高压下的设备中分别处理3 min、6 min、9 min、12 min和15 min，电场处理时间从3 min增加至12 min时，复配胶凝胶强度呈现一定的变化趋势；电场可能诱导分子链平行于电场方向有序取向，使分子链的缠结的套环的位置发生改变或滑动，引起分子偶极矩的变化，分子对称性越好，则分子间堆砌地越紧密，要拆开分子就越不易，从而凝胶强度增加，当处理时间为6 min时，复配胶凝胶强度达到最大值，当电场处理时间超过6 min后，复配胶凝胶强度先降低后升高；这说明电场处理对复配胶的相互作用产生一定的作用，影响复配体系的凝胶强度。

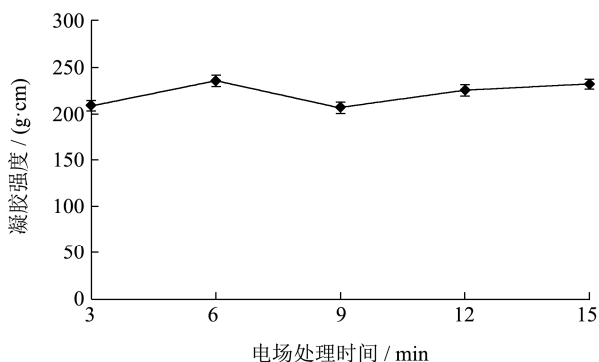


图5 电场处理时间对凝胶强度的影响

Fig.5 Effects of electric field treatment duration on gel strength

### 2.3.4 加热温度与加热时间对电场处理的KGM-卡拉胶凝胶强度的影响

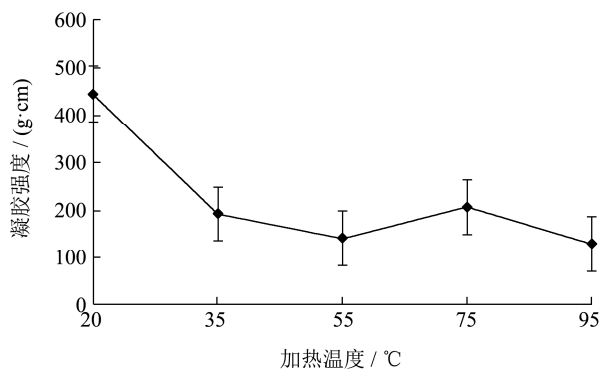


图6 加热温度对凝胶强度的影响

Fig.6 Effect of heating temperature on gel strength

加热温度和加热时间影响样品的溶胀过程，加热温度和加热时间对魔芋葡甘聚糖与卡拉胶比例为3:2的样品影响分别如图6和图7所示。加热温度20 °C时，由于温度过低，样品未能很好的溶胀，在搅拌过程中形成不均匀的、呈块状分布的胶状物质，且胶体内部含有大量气泡，因此在测试过程中，可能导致数值偏高；魔芋葡甘聚糖凝胶的热固特性是魔芋葡甘聚糖可

以热成型的基础<sup>[12]</sup>。卡拉胶从有序态到无序态需要一定的温度，随着温度的升高，卡拉胶无序态的分子越来越多，从而凝胶强度也逐渐增大，而恰当的加热时间也会促进这种变化；从图6可知，应是在75 °C的加热温度下进行样品的配制，得到的凝胶强度较高。而加热时间在30 min时，其凝胶的效果也是较好的。

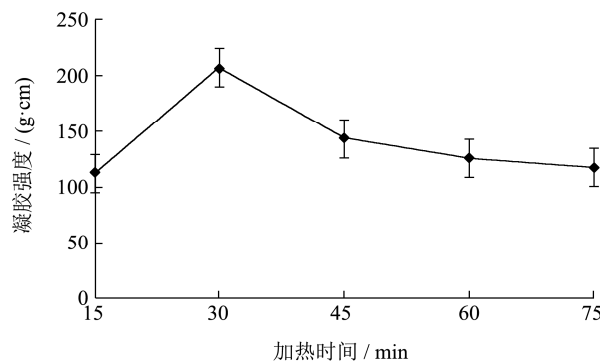


图7 加热时间对凝胶强度的影响

Fig.7 Effect of heating time on gel strength

### 2.4 傅里叶红外光谱测定结果分析

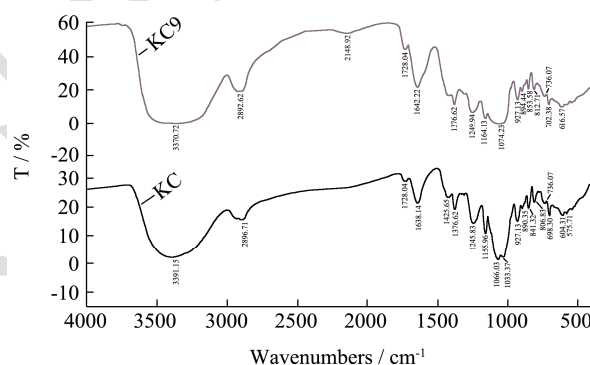


图8 复配胶的红外吸收光谱图 5 kV 直流高压电场处理样品 (KC9)；未经电场处理样品 (KC)

Fig.8 Fourier transform infrared (FTIR) spectra of composite gels: Sample treated by 5 kV DC high electric field (KC9); Sample without the electric field (KC) treatment

傅里叶红外光谱如图8所示。图8是KC9经过5千伏直流高压处理KGM-卡拉胶复合胶的红外光谱图，KC是未经电场处理的对照样品KGM-卡拉胶复合胶的红外光谱图；从图上我们可以看出，对照样品KC与样品KC9的羟基伸缩振动峰分别是3391.15  $\text{cm}^{-1}$ 、3370.72  $\text{cm}^{-1}$ ； $-\text{CH}_2-$ 烃基的伸缩振动吸收峰，未经电场处理样品和电场处理后样品分别为2896.71  $\text{cm}^{-1}$ 、2892.62  $\text{cm}^{-1}$ ；在图谱中，我们可以看到，有电场进行处理和对照样品相比，图谱峰型相似，主要的特征吸收峰没有明显差异，谱线的波数部分较明显的区别就是2148.92  $\text{cm}^{-1}$ 波数左右的吸收，这个可能是假性二氧化碳的峰。其他波数范围的吸收均相同，只有强度的变

化不能表征基团的变化。而偶极矩会改变吸收峰的强弱程度,对称性差的偶极矩改变大,吸收峰强,从图4-2中的KC、KC9的红外光谱图的对比中我们可以看出,经电场处理的复配体系吸收峰强度比未经处理的小,说明经电场处理的复配体系的对称性变好,分子间更紧密堆砌,要重新拆开分子越不容易。因此,可以判断这两者的官能团类似,经电场处理的样品未检测到新的吸收峰,但分子对称性变好,偶极矩发生变化,吸收峰强度变小。

## 2.5 讨论

凝胶作为食品基质、软骨支架与药物/营养素载体等,在食品和生物医学等领域中有着广泛的应用。决定凝胶应用的一个关键因素是其稳定性,而稳定性与其结构(如交联点和凝胶强度)密切相关。由于凝胶非平衡以及亚稳的本质,其结构很大程度上取决于制备的方法和条件。

从理论上,凝胶强度与分子链缠结形成连续的、稳定的网络结构有关,分子链的缠结越紧密,越难打开缠结的“结点”,凝胶的稳定性越高。从微观上看,缠结可看成一种拓扑性或纯粹几何性的分子链之间的相互缠绕,所谓拓扑性是指纯粹研究点、线、面在空间的次序关系而舍去其确切的物理几何特性;两条分子链发生缠结就是两条分子链相互缠绕、打结或套环。从凝胶特性测试流变实验中,弹性模量 $G'$ 与黏性模量 $G''$ 的对比看出,当弹性模量 $G'$ 大于黏性模量 $G''$ 时,形成的有足够强度、连续的结构网络,这种网络结构可以形成凝胶,而结构网络欠缺强度时,呈现溶胶性质,不能形成真正的凝胶。卡拉胶发生凝胶化的前提条件是形成螺旋结构,螺旋结构会在电解质的作用下发生溶解,因此,螺旋结构本身不足以形成凝胶,只有在螺旋结构发生聚合作用才会凝胶。卡拉胶螺旋与KGM发生缔合形成协同凝胶,卡拉胶分子之间形成较强的交联区域,KGM与卡拉胶之间形成较弱的交联区域;KGM的支链少,分子链的长度与相对分子质量成正比,KGM相对分子质量的增加,弹性活性链数目和伸直长度都增加<sup>[13]</sup>。电场对KGM凝胶强度的影响,从理论方法推测可能与电场影响KGM-卡拉胶的网络结构有关。

探讨新技术或新的替代物制备热稳定凝胶,扩大凝胶应用范围具有重要意义。探讨场效应对网络结构的影响是开发新的具有可控结构与性能的凝胶物质最具前景的方法之一<sup>[14]</sup>。高压电场作为一种新技术,可作为一种物理改性方法应用在改性多糖结构的方法,这种方法除了应用在本研究用于提高KGM的凝胶强

度外,还可以作为一种研究方法对其他物质进行结构改性的研究,如淀粉和琼脂等多糖。

## 3 结论

经过5 kV千伏高压直流电场处理的KGM-卡拉胶样品,与未经处理的样品在红外光谱特征基团的表征中,没有发现新的吸收峰;但在测试凝胶特性的流变实验中,经电场处理的KGM-卡拉胶黏弹性与未处理KGM-卡拉胶黏弹性相比,更容易形成连续、稳定的凝胶网络结构;同时,在凝胶强度的测定中,以不同的电场处理时间为变量,配制KGM-卡拉胶样品,凝胶强度呈现出一些变化,说明经电场处理的样品,虽未能在红外吸收光谱特征基团表征中发现新的吸收峰,却可能对其物理性质产生了一定的影响,如电场可能使分子链的缠结的套环的位置发生改变或滑动,影响其分子链之间的缠结网络、作用力、水溶过程与凝胶过程等,对改善凝胶体系的凝胶化能力有一定的影响。

## 参考文献

- [1] Zhao X. Multi-scale multi-mechanism design of tough hydrogels: Building dissipation into stretchy networks [J]. *Soft Matter*, 2014, 10(5): 672-687
- [2] P F S Pereira, I C Nogueira, E Longo, et al. Rietveld refinement and optical properties of SrWO<sub>4</sub>: Eu<sup>3+</sup> powders prepared by the non-hydrolytic sol-gel method [J]. *Journal of Rare Earths*, 2015, 33(2): 113-128
- [3] Oishi K, Maehata Y. Removal properties of dissolved boron by glucomannan gel [J]. *Chemosphere*, 2013, 91(3): 302-306
- [4] Huang Y C, Chu H W, Huang C C, et al. Alkali-treated konjacglucomannan film as a novel wound dressing [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117(117): 778-787
- [5] Rohart A, Michon C. Designing microstructure into xanthan gum-enriched acid milk gels [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2014, 25: 53-57
- [6] Yamazaki E, Sago T, Kasubuchi Y, et al. Improvement on the freeze-thaw stability of corn starch gel by the polysaccharide from leaves of *Corchorusolitorius*. L [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 94(1): 555-560
- [7] Necas J, Bartosikova L. Carrageenan: a review [J]. *Veterinani Medicina*, 2013, 58(4): 187-205
- [8] Ventura I, Bianco-Peled, H. Small-angle X-ray scattering study on pectin-chitosan mixed solutions and thermoreversible gels [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 123: 122-129

- [9] Pongsawatmani R, Chantaro P, Nishinari K. Thermal and rheological properties of tapioca starch gels with and without xanthan gum under cold storage [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 117(3): 333-341
- [10] Farmanzadeh D, Tabari L. Electric field effects on the adsorption of formaldehyde molecule on the ZnO nanotube surface: A theoretical investigation [J]. *Computational and Theoretical Chemistry*, 2013, 1016(28): 1-7
- [11] 罗学刚.高纯魔芋葡甘聚糖制备与热塑改性[M].北京:科学出版社,2012  
LUO Xue-gang. The preparation of High pure konjac cglucomanan and thermoplastic modification [M]. Beijing: Science Press, 2012
- [12] PANG Jie, MA Zhen, SHEN Ben-Shu, et al. hydrogen bond networks' qsar and topological analysis of konjac glueomannan chains [J]. *Journal of Structural Chemistry*, 2014, 33(3): 480-489
- [13] J M Schwartz, K L Bail, C Garnier, et al. Available water in konjacglucomanan-starch mixtures. Influence on the gelatinization, retrogradation and complexation properties of two starches [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41(20): 71-78
- [14] Tasoglu S, Yu C H, Gungordu H I, et al. Guided and magnetic self-assembly of tunable magnetoceptive gels [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4702