第 39 卷 第 2 期
2024 年 4 月

天津科技大学学报
Journal of Tianjin University of Science & Technology

Vol. 39 No. 2
Apr. 2024

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230018
数字出版日期：2023-09-28；数字出版网址：http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20230928.1055.001

亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系的制备及特性研究

杨振东，李文博，程 婕，钟添宇，杨 晨，汪建明
（天津科技大学食品科学与工程学院，天津 300457）

摘 要：亚麻籽胶（flaxseed gum，FG）的凝胶性较弱，魔芋胶（konjac glucomannan，KGM）有较高的黏度和良好的持水性，可提高所形成亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系（flaxseed gum-konjac glucomannan system，FKG）的特性。以亚麻籽胶和魔芋胶为原料，研究不同比例下 FKG 的形成过程及其特性。结果表明：随着魔芋胶添加比例逐渐增大，FKG 的凝胶强度和凝胶性能逐渐增强，并在亚麻籽胶与魔芋胶的质量比为 6∶4 时达到最大，且 FKG 的硬度、咀嚼性、胶着性和弹性均优于其他比例样品，相较于亚麻籽胶分别提升了 10.00 倍、6.25 倍、5.29 倍和 1.61 倍；其表观黏度和剪切应力表现出较强的协同增效作用；Zeta 电位绝对值为 13.85 mV，稳定性相对较高；通过红外光谱 3 425.13 cm^{-1} 附近的羟基伸缩振动峰观察到 FG 与 KGM 之间可能产生了分子间氢键；扫描电子显微镜结果证实，FKG 具有较为致密的空间网状结构，说明亚麻籽胶经过与魔芋胶复合后有效改善了凝胶特性，为进一步推进亚麻籽胶的研究与应用提供了基础。

关键词：亚麻籽胶；魔芋胶；复合凝胶；凝胶特性；凝胶结构
中图分类号：TS201.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1672-6510（2024）02-0008-08

Preparation and Characteristics of Flaxseed Gum-Konjac Glucomannan System

YANG Zhendong，LI Wenbo，CHENG Jie，ZHONG Tianyu，YANG Chen，WANG Jianming
（College of Food Science and Engineering，Tianjin University of Science & Technology，Tianjin 300457，China）

Abstract：As the gel property of flaxseed gum（FG） is weak，while the viscosity and good water holding property of konjac glucomannan（KGM）is high，which can improve the characteristics of the flaxseed gum-konjac glucomannan system（FKG）. In our current study，FG and KGM were used as raw materials to study the formation process and characteristics of FKG at different ratios. The results showed that the gel strength and properties of FKG gradually increased with the increasing proportion of KGM. These characteristics would reach the maximum when the mass ratio of FG to KGM was 6∶4，and the hardness，chewiness，adhesion and elasticity of the FKG were better than those of other proportions，which were about 10.00 times，6.25 times，5.29 times and 1.61 times higher than FG，respectively. The apparent viscosity and shear stress reflected strong synergy. The absolute value of Zeta potential was 13.85 mV，with relatively high stability. The intermolecular hydrogen bond between FG and KGM was observed by the hydroxyl stretching vibration peak near 3 425.13 cm^{-1} in the infrared spectrum. The scanning electron microscope results confirmed that FKG had a relatively dense spatial network structure，indicating that FG and KGM composite effectively improved the gel performance，which has provided a basis for further promoting the research and application of flaxseed gum.

Key words：flaxseed gum；konjac glucomannan；composite gel；gel characteristics；gel structure

引文格式：
杨振东，李文博，程婕，等. 亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系的制备及特性研究[J]. 天津科技大学学报，2024，39(2)：8-15.

收稿日期：2023-02-06；**修回日期**：2023-05-26
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(32001626)
作者简介：杨振东（1997—），男，山西人，硕士研究生；**通信作者**：汪建明，教授，wangjianming@tust.edu.cn

YANG Z D, LI W B, CHENG J, et al. Preparation and characteristics of flaxseed gum-konjac glucomannan system[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(2): 8–15.

亚麻籽胶(flaxseed gum, FG)是从亚麻籽外壳中提取的一种新型天然植物亲水胶体[1]。亚麻籽胶具备改善食品原料的流变性、乳化性和凝胶性等优良功能[2], 因此在食品和非食品应用中具有潜力[1]。研究[3]表明, 由于亚麻籽胶本身的弱凝胶性, 使其在加热过后只能形成半凝胶产品, 限制了亚麻籽胶的应用, 因此需要添加其他物质增强其凝胶性能, 使其拥有更广阔的应用空间。

魔芋胶(konjac glucomannan, KGM), 别名魔芋粉、葡甘露聚糖[4–5], 具有较强的吸水能力和较好的理化性能, 广泛用于食品、医药、化工、石油、化妆品、纺织印染等领域[4, 6–7]。魔芋胶作为一种水溶性多糖具有较高的黏度和良好的持水能力[6], 但低浓度的魔芋胶不具有凝胶性。研究[7–9]表明, 通过添加魔芋胶可使果胶、黄原胶和阿拉伯胶的凝胶性能显著增强, 这是因为魔芋胶的分子链能够很好地穿插在胶体的凝胶网络结构中, 同时与这些胶体相互作用形成分子间氢键。因此, 通过添加魔芋胶有望增强亚麻籽胶的凝胶性能[10–11]。亚麻籽胶与魔芋胶的化学组成与结构不同, 不同的魔芋胶添加比例也会对亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系(flaxseed gum-konjac glucomannan system, FKG)的凝胶特性和凝胶结构产生不同的影响。亚麻籽胶是由酸性多糖与中性多糖构成的酸性杂多糖[12], 魔芋胶是一种水溶性非离子型多糖[6]。魔芋胶能够交联在亚麻籽胶的凝胶网络中, 并且魔芋胶分子链上的乙酰基可能与亚麻籽胶中的多糖产生相互作用, 形成分子间氢键, 从而增强分子间作用力, 达到增强复合凝胶的凝胶强度和凝胶性能的目的。目前增强亚麻籽胶凝胶性能的相关研究较少, 且大多停留在多种胶复配工艺的改善上[13–15], 针对亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系的凝胶特性变化的研究还不够深入。

为了研究亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系的凝胶特性, 本研究以食品级的亚麻籽胶和魔芋胶为原料, 通过宏观方法[9,11](凝胶强度测定、流变学分析)和微观方法[11,13](傅里叶变换红外光谱、Zeta 电位和扫描电子显微镜)对亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系的变化进行测定与分析, 分析不同的魔芋胶添加比例对亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系的凝胶特性和凝胶结构产生的影响, 旨在为进一步拓展亚麻籽胶的应用途径提供一定的理论基础。

1　材料与方法

1.1　原料

亚麻籽胶(纯度≥99%), 食品级, 河南万邦实业有限公司; 魔芋胶(纯度≥96%), 食品级, 嘉合生物科技有限公司。

1.2　主要仪器

HJ–6A 型恒温磁力搅拌器, 上海易友仪器有限公司; FD–1A–50 型冷冻干燥机, 上海博医康医疗设备有限公司; TA.XT2 型质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; HAAKE MARS 60 型动态流变仪, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; IS 50 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 美国尼高利公司; Zetasizer Nano ZS 型纳米粒度电位仪, 上海思百吉仪器系统有限公司; SU 1510 型扫描电子显微镜, 日本日立公司。

1.3　实验方法

1.3.1　亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系的制备

参考已有的实验方法[9,11]制备亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系。先准确称量总量 2% 的亚麻籽胶与魔芋胶粉末, 亚麻籽胶与魔芋胶原料的质量比为 10∶0、9∶1、8∶2、7∶3、6∶4、5∶5、4∶6、3∶7、2∶8、1∶9、0∶10, 将混合粉末缓慢加入 45 ℃的水中, 边搅拌边加入, 直至完全溶解, 同时水浴加热至 85 ℃, 搅拌 45 min 后, 放入 4 ℃医用冷藏保温箱中静置 12 h, 即得到亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系样品, 分别命名为 FKG 1、FKG 2、FKG 3、FKG 4、FKG 5、FKG 6、FKG 7、FKG 8、FKG 9、FKG 10、FKG 11。

1.3.2　质构特性的测定

使用质构仪对 FKG 样品的质构特性进行测定。将 FKG 样品制成高度为 25 mm、直径为 20 mm 的圆柱体, 并且确保上表面与下底面的平整, 采用 P/36R 探头进行全质构分析, 测定凝胶强度。设定实验参数: 测定前速度为 5 mm/s, 测定速度为 1 mm/s, 测定后速度为 5 mm/s, 应变位移为 60%, 引发力为 5 g, 引发类型为自动。

1.3.3　表观黏度的测定

使用动态流变仪对 FKG 样品的表观黏度进行测定。使用 P–100/Ti 转子和 P35 底板, 设置转子与底板的距离为 1.000 mm, 将 FKG 样品切成厚度为 1 mm 的薄片, 置于动态流变仪的底板上, 待转子完全与样

品接触时，刮掉周围多余的样品后再进行测量。参数设置：模式为 CR，开始剪切速率为 0.1 s^{-1}，终止剪切速率为 100 s^{-1}，时间为 30 s，温度为 25 ℃。

1.3.4　流变学特性的测定

使用动态流变仪对 FKG 样品的流变学特性进行测定。使用 P-100/Ti 转子和 P35 底板，设置转子与底板的距离为 1.000 mm，将 FKG 样品切成厚度为 1 mm 的薄片，置于动态流变仪的底板上，待转子完全与样品接触时，刮掉周围多余的样品后再进行测量。参数设置：模式为 CD，应变 γ_0 为 1.000 s^{-1}，开始频率为 0.1 Hz，终止频率为 100 Hz，温度为 25 ℃。

1.3.5　Zeta 电位的测定

将 FKG 样品溶液进行 100 倍稀释，然后进行电位分析测试。设置实验参数：散射角为 90°，时间为 60 s，测试温度为 25 ℃。样品连续进行 3 次测试取平均值。得到的电位测试数据可以反映静电相互作用。

1.3.6　红外光谱分析

采用溴化钾压片法测定 FKG 的傅里叶变换红外光谱，将溴化钾粉末与 FKG 样品混合后进行测量。将 FKG 样品冻干粉末与溴化钾粉末以 1∶150 的质量比进行混合后置于研钵中，不断研磨混合均匀至粉末贴壁后，放入压片模具中，使用压片机进行手动压片，压片时间为 30 s，压片完成后得到透明薄片，将其放入扫描室进行全波段扫描测定。参数设置：波数为 400 ~ 4 000 cm^{-1}，分辨率为 2 cm^{-1}，扫描次数为 16 次，背景为空气。通过使用 OMNIC 8.2 软件对样品的红外光谱图进行分析处理。

1.3.7　微观结构观察

将不同的凝胶样品切成厚度为 2 ~ 3 mm 的薄片，–80 ℃冷冻 12 h 后进行冷冻干燥。将处理好的凝胶冻干样品放置在导电胶带上，经过表面喷金处理后固定在样品台上，在低真空模式下，利用扫描电子显微镜在 25 ℃时观察其微观结构。

1.4　数据处理

在实验过程中，样品参与的全部实验均平行测定 3 次，计算平均值，使用 SPSS 27 软件进行显著性分析，不同字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

2　结果与分析

2.1　FKG 凝胶强度的分析

质构分析是测定凝胶强度最常用的方法，可将食品的多种质构参数（硬度、咀嚼性、胶着性和弹性）定量表示，能够直观模拟人的咬合动作，并将这些特性分类为客观定性的模量，通过这些模量综合判断对食品的期望和整体描述[16]。根据 1.3.2 节的方法进行实验，测定不同魔芋胶添加比例下 FKG 样品的凝胶强度。由于亚麻籽胶凝胶（FKG1）和魔芋胶凝胶（FKG11）单独成凝胶能力太弱，不能进行凝胶强度的测定，因此只选用了 FKG2—FKG10 样品进行相关指标的测定，结果如图 1 所示。

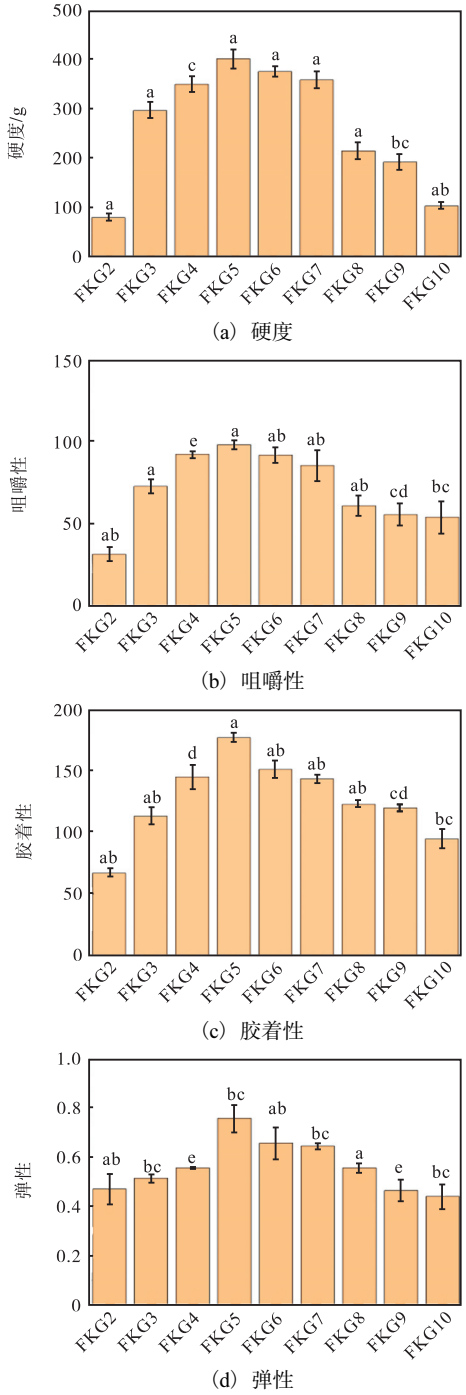


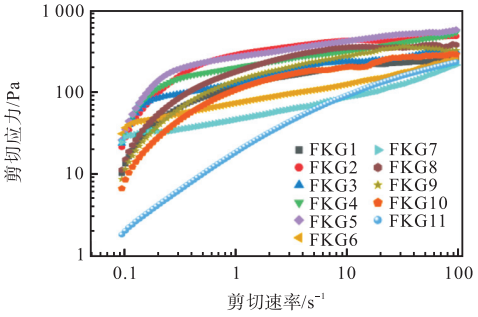
图 1　不同比例的亚麻籽胶和魔芋胶对 FKG 凝胶强度的影响

Fig. 1　Effect of FG and KGM with different ratios on strength of FKG

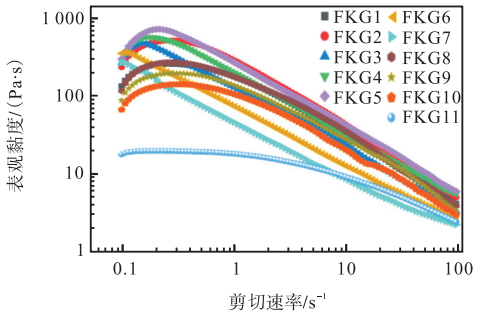
由图 1 可知：FKG5 的凝胶强度较高，硬度、咀嚼性、胶着性和弹性分别达到了 399.11 g、97.40、176.36 和 0.78。随着魔芋胶添加比例的增大，FKG 样品的硬度、咀嚼性、胶着性和弹性都呈现先增大后减小的趋势。单独的亚麻籽胶呈现弱凝胶性[17]，单独的魔芋胶不具备凝胶性[4,18]，但当 FG 与 KGM 复配后，FKG 样品的凝胶强度明显提高。这可能是因为 KGM 穿插在 FG 的凝胶网络中[11]，并且能够与 FG 分子链上的结合位点形成分子间氢键[13]，增强了 FG 的网络结构，使 FKG 样品具备了较强的凝胶性能[16]。在 KGM 添加比例超过 40% 时，FKG 样品的凝胶强度逐渐降低，说明 KGM 添加比例在达到某一临界值后，FG 分子链上的结合位点不足以与越来越多的 KGM 分子交联，FKG 样品的网络结构逐渐开始崩溃，在宏观方面表现为其机械强度和凝胶强度的减小[16,19]。FKG5 样品表现出更为优良的凝胶特性，由此推测 FG 与 KGM 的质量比为 6∶4 时（FKG5），KGM 分子能够更加均匀地交联在 FG 形成的网络结构中[13,20]，从而提高了 FKG 样品的硬度、咀嚼性、胶着性和弹性[14,19,21]。

2.2　FKG 表观黏度的分析

剪切应力体现了凝胶体系维持内部网络结构的能力，剪切应力与剪切速率关系曲线模型能够描述不同样品偏离牛顿行为的程度[9]。FKG 在不同剪切速率下剪切应力和表观黏度的变化如图 2 所示。



（a）剪切应力



（b）表观黏度

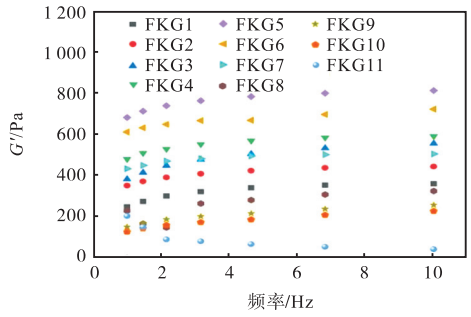
图 2　FKG 在不同剪切速率下剪切应力和表观黏度的变化

Fig. 2　Changes in shear stress and apparent viscosity of FKG at different shear rates

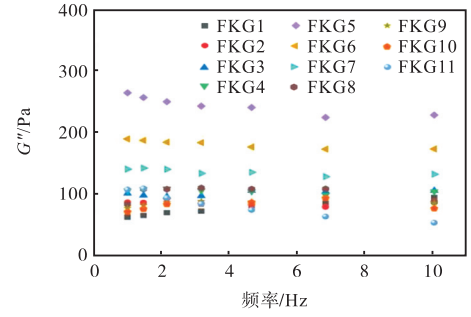
由图 2(a) 可知：凝胶的剪切应力在较低的剪切速率（0.1 ~ 0.2 s^{-1}）下迅速增大。这可能是因为在低剪切速率范围内，分子在剪切力作用下凝胶结构解缠结[22-23]。随着时间的延长，内部的分子有机会恢复刚开始的缠结状态[9]，从而使凝胶的网络结构得以维持，在高剪切速率范围内则无法恢复[24]。表观黏度随着剪切速率的提高而迅速降低，说明其对剪切速率的依赖性较强，这种剪切变稀的现象是聚合物固有的特征，但不同聚合物剪切变稀的程度不同[7]。FKG 的表观黏度在较低的剪切速率（0.1 ~ 1 s^{-1}）下缓慢降低，但是在较高的剪切速率下迅速下降，说明在高剪切速率范围内，凝胶重构速度小于链缠结点被破坏的速度[20]，从而导致分子的结构无法恢复[5]。表观黏度反映了凝胶内部结构被破坏的难易程度[25]。由图 2 可知，破坏 FKG5 形成的网络结构最难，说明 FG 与 KGM 的质量比为 6∶4 时形成的复合凝胶协同增效作用最强[19]。

2.3　FKG 流变学特性的分析

复合凝胶的性质可以通过在线性黏弹区内进行频率扫描得到的储能模量（G'）和损耗模量（G''）进行表征[26]。不同比例的亚麻籽胶和魔芋胶对 FKG 流变学特性的影响如图 3 所示。



（a）储能模量（G'）



（b）损耗模量（G''）

图 3　不同比例的亚麻籽胶和魔芋胶对 FKG 流变学特性的影响

Fig. 3　Effect of FG and KGM with different ratios on FKG rheological properties

由图 3 可知：FG 样品（FKG1）与 FKG 样品在稳定状态下的储能模量 G'均大于其损耗模量 G''，说明这些样品均具有显著的凝胶特性[5]；但 KGM（FKG11）的储能模量略小于其损耗模量，说明 KGM 无法单独形成凝胶结构[9]，凝胶强度无法测定。图 3（a）中 FKG 的储能模量 G'随着 KGM 添加比例的增大逐渐增大[19]，FKG5 的储能模量 G'最大，为 810 Pa，之后呈现逐渐下降的趋势[23]；图 3（b）中 FKG 损耗模量 G''与储能模量 G'的变化趋势基本相同。FKG5 的储能模量 G'和损耗模量 G''远远大于 FKG7 的储能模量 G'和损耗模量 G''，说明在 FKG 中 FG 的凝胶结构起主导作用[9,26]。图 3 中不同 KGM 添加比例 FKG 的储能模量 G'及损耗模量 G''随着振荡频率的变化趋势与图 2 中剪切应力和表观黏度随 KGM 添加比例的变化趋势一致[5,24,27]。

2.4　FKG Zeta 电位的分析

亚麻籽胶与魔芋胶的配比关系对复合凝胶聚合体的氢键数量和电荷平衡有着一定的影响，其在稳定复合体方面起着重要的作用[19]。不同比例的亚麻籽胶和魔芋胶对 FKG Zeta 电位的影响如图 4 所示。

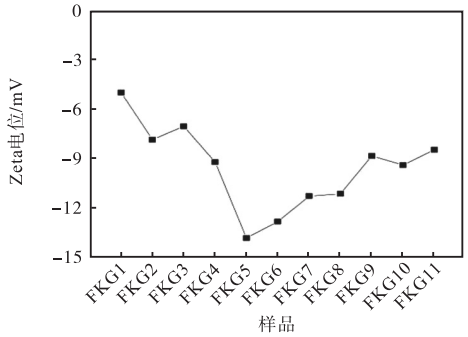


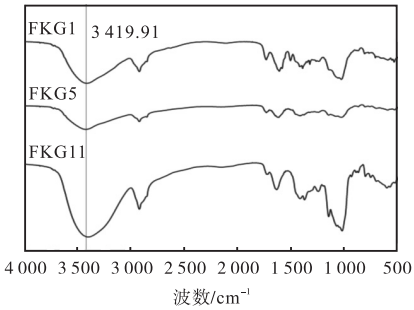
图 4　不同比例的亚麻籽胶和魔芋胶对 FKG Zeta 电位的影响

Fig. 4　Effect of FG and KGM with different ratios on FKG Zeta potential

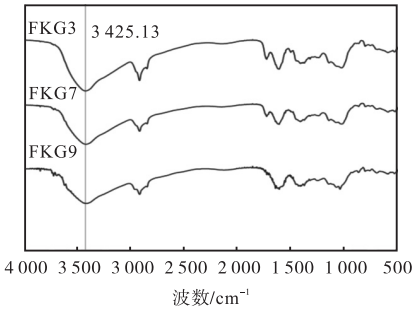
FKG 样品的稳定性可以通过 Zeta 电位的绝对值进行判断[11]，正负代表了粒子所带电荷的属性[29-31]。与 FG（FKG1）和 KGM（FKG11）相比，不同魔芋胶添加比例能够对 FKG 样品 Zeta 电位绝对值产生影响，即魔芋胶的添加能够影响 FKG 样品的稳定性。随着魔芋胶添加比例的增加，FKG 样品的 Zeta 电位绝对值呈现先增大后减小的趋势。FG 样品（FKG1）的 Zeta 电位绝对值为 5.04 mV，在添加 KGM 后，FKG 样品的 Zeta 电位绝对值出现了明显的变化，FKG2 样品的 Zeta 电位绝对值达到了 7.90 mV；在 KGM 添加比例为 40% 时，即 FKG5 样品的 Zeta 电位绝对值达到最大，为 13.85 mV，这说明 FKG5 的稳定性可能是 FKG 样品中相对较高的。这证明了 KGM 的添加对 FKG 样品的微观结构有一定的影响。

2.5　FKG 中官能团的分析

FTIR 通常用于鉴定多糖结构中的官能团，可以通过红外光谱中的差异了解化学基团在分子水平上的相互作用，例如吸收带的移动、吸收峰的增强或减弱[25]。为了更能体现不同的配比关系对 FKG 官能团组成的影响，只对 FKG1、FKG3、FKG5、FKG7、FKG9 和 FKG11 样品的官能团进行分析，得到的红外光谱如图 5 所示。



（a）FKG1（亚麻籽胶）、FKG5（复合凝胶）和 FKG11（魔芋胶）



（b）FKG3（8∶2）、FKG7（4∶6）和 FKG9（2∶8）

图 5　不同比例的亚麻籽胶和魔芋胶的 FKG 红外光谱图

Fig. 5　Infrared spectra of FKG with different FG and KGM ratios

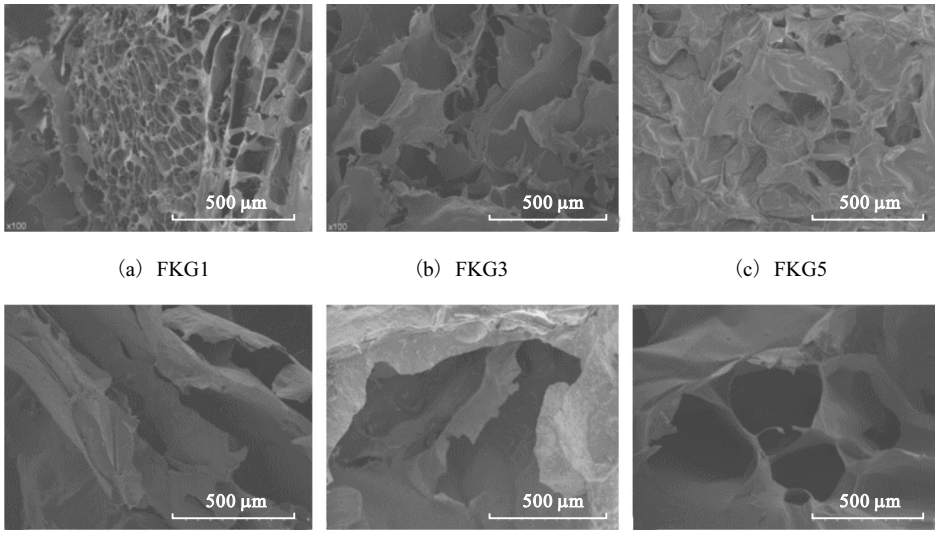
O—H 的伸缩振动吸收频谱带[11,25,30]位于 3 200 ~ 3 600 cm^{-1}。由图 5（a）可知，在 3 419.91 cm^{-1} 附近 FKG5 样品的羟基伸缩振动峰介于 FG（FKG1）与 KGM（FKG11）之间，表明 FG 与 KGM 之间产生了相互作用，宏观表现为随着魔芋胶添加比例的增大，FKG 样品在接近某一临界点时凝胶强度逐渐增大[32]，凝胶稳定性逐渐增强，与之前的测试结果一致，并印证了加入一定比例 KGM 会增强 FKG 样品凝胶特性的猜想。由图 5（b）可知，在 3 425.13 cm^{-1} 附近 FKG3、FKG5 和 FKG7 样品的羟基伸缩振动峰逐渐减小，表明 FG 与 KGM 之间产生了相互作用，但

是随着 KGM 添加比例的增大，这种相互作用先增大后减小，宏观表现为随着魔芋胶添加比例的增大，FKG 样品的凝胶强度和凝胶稳定性呈现先增大后减小的趋势[20]，与之前的测试结果一致，并印证了加入 KGM 对 FKG 样品凝胶特性的增强是有极限的，并且达到临界值后 KGM 的增强作用会越来越弱的猜想。

综上所述，可以推测 KGM 与 FG 结合后能够形成分子间的氢键，从而增加了分子间的作用力，主要表现为在一定比例范围内，KGM 与 FG 之间存在协同增效作用[16,19-20]。KGM 分子能够较好地分散、穿插在 FG 形成的空间网络中，并且能够与 FG 上的结合位点结合，产生分子间氢键，大大加强了凝胶网络结构[33]，从而提高了凝胶强度。

2.6　FKG 微观结构的分析

通过扫描电子显微镜可以观察到不同魔芋胶添加比例 FKG 样品的微观结构，样品的形态以及孔洞的大小、分布、数量和排列顺序等都可以表明不同分子间的相互作用情况[13]。为了更加凸显不同的配比关系对 FKG 微观结构的影响，故只对 FKG1、FKG3、FKG5、FKG7、FKG9 和 FKG11 的微观结构进行观察，结果如图 6 所示。



（a）FKG1　（b）FKG3　（c）FKG5

（d）FKG7　（e）FKG9　（f）FKG11

图 6　不同比例的亚麻籽胶和魔芋胶的 FKG 扫描电子显微镜图

Fig. 6　Scanning electron microscopy of FKG with different FG and KGM ratios

从图 6(a)可以观察到亚麻籽胶能够独自形成空间网络结构，具有弱凝胶性，但凝胶结构较为松散，宏观表现为凝胶强度较低。从图 6(f)能够看到魔芋胶的中间空隙较大，基本上没有规则的凝胶网络结构，宏观表现为无法形成凝胶。由图 6(b)可以明显看出，KGM 的添加能够明显改变 FKG 样品的空间网络结构，KGM 分子填充在 FG 凝胶网络中，并且与 FG 结合形成了致密的网络结构。当 KGM 添加比例增大到 40%，从图 6(c)能够观察到 FKG5 所形成的凝胶结构最为致密，空隙减小，说明在此添加比例下，KGM 与 FG 之间的结合能力更好，协同增效作用更强，从而在宏观方面表现为拥有更强的凝胶强度。但是，当 KGM 添加比例逐渐增大时，如图 6(d)、图 6(e)所示，FKG 样品的凝胶网络结构之间的空隙变得更大，结构变得越来越松散，宏观表现为凝胶强度降低，各方面性能逐渐与 KGM 趋同。这说明 KGM 与 FG 之间的协同增效作用逐渐降低，导致 FKG 样品的网络结构无法包裹住过量的 KGM，从而导致 FKG 的凝胶结构逐渐崩溃[34]，这个进程随着到达临界点后 KGM 的添加比例增大而加快。

3　结　语

以食品工业中常见的食品级亚麻籽胶与魔芋胶为原料，通过宏观方法和微观方法对亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系的凝胶特性进行了初步研究。FG 与 KGM 之间存在着协同增效作用。在 KGM 添加比例达到 40% 时，FG 与 KGM 形成的 FKG 样品的凝胶强度较大，所形成的凝胶稳定性较强，相较于亚麻籽胶，FKG 样品的硬度、咀嚼性、胶着性、弹性分别提升了 10.00 倍、6.25 倍、5.29 倍、1.61 倍。KGM 分子能够更好地与 FG 网络结构结合，产生分子间氢键，

形成更加致密稳定的凝胶结构，说明 KGM 与 FG 之间具有协同增效作用。当 KGM 添加超过 40% 时，FKG 样品的凝胶强度和稳定性都开始逐渐下降，凝胶网络也变得更加松散，空隙也逐渐增大。这说明 KGM 添加比例超过 40% 时，KGM 与 FG 之间的协同增效作用逐渐减小，FG 的凝胶结构在 FKG 样品中占主导地位。

本研究构建亚麻籽胶–魔芋胶复合凝胶体系的原料为符合国家标准 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》的食品级天然多糖，安全可靠，在适当比例条件下，如 FG 与 KGM 质量比为 6∶4 时，能够形成性能优良的凝胶。

复合凝胶体系，尤其是多糖复合凝胶体系，因其来源广、储量丰富、安全性高、可设计性强、结构多样和生物相容性优良等特点而在食品领域的研究和应用中备受关注。新型的复合凝胶体系在未来不仅能够作为增稠剂、保水剂、乳化稳定剂等应用于果冻、饮料、冰淇淋、肉制品、乳制品、冷冻食品和罐头食品等食品加工中，而且能够作为药物载体应用于医药产品中。

参考文献：

[1] LIU J, SHIM Y Y, TSE T J, et al. Flaxseed gum a versatile natural hydrocolloid for food and non-food applications[J]. Trends in food science & technology, 2018, 75(12): 146–157.

[2] 马兰雪，李曦，邹玉峰，等. 亚麻籽胶功能性质及其在食品中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报，2021，12(7)：2722–2727.

[3] 禹晓，黄沙沙，聂成镇，等. 亚麻籽胶结构及功能应用研究进展[J]. 食品研究与开发，2020，41(1)：212–217.

[4] HUANG Q, LIU Z S, PEI Y Q, et al. Gelation behaviors of the konjac gum from different origins: *A. guripingensis* and *A. rivirei*[J]. Food hydrocolloids, 2021, 111(8): 106152.

[5] GUO J, LIU F, GAN C, et al. Effects of konjac glucomannan with different viscosities on the rheological and microstructural properties of dough and the performance of steamed bread[J]. Food chemistry, 2022, 368(11): 130853.

[6] 唐晓东，张立君，夏曾润. 魔芋胶的黏度改性及其在食品中的应用研究现状[J]. 粮食加工，2022，47(5)：55–57.

[7] WANG Y, CHEN B W, XIONG T, et al. Highly efficient uranium capture from wastewater by hydroxyapatite aerogels prepared with konjac gum as template[J]. Journal of water process engineering, 2022, 48(13): 102919.

[8] LI Z, ZHANG L, MAO C, et al. Preparation and characterization of konjac glucomannan and gum arabic composite gel[J]. International journal of biological macromolecules, 2021, 183(10): 2121–2130.

[9] LIN S, LIU X, CAO Y, et al. Effects of xanthan and konjac gums on pasting, rheology, microstructure, crystallinity and in vitro digestibility of mung bean resistant starch[J]. Food chemistry, 2021, 339(7): 128001.

[10] MA S P, ZHU P L, WANG M C, et al. Effect of konjac glucomannan with different molecular weights on physicochemical properties of corn starch[J]. Food hydrocolloids, 2019, 96(8): 663–670.

[11] ZHU J S, EID M, LI J, et al. Synergistic interactions between konjac glucomannan and welan gum mixtures[J]. LWT-Food science and technology, 2022, 162(12): 113425.

[12] QIAN K Y, CUI S W, WU Y, et al. Flaxseed gum from flaxseed hulls: extraction, fractionation, and characterization[J]. Food hydrocolloids, 2012, 28(2): 275–283.

[13] JIANG Y, REDDY C K, HUANG K, et al. Hydrocolloidal properties of flaxseed gum/konjac glucomannan compound gel[J]. International journal of biological macromolecules, 2019, 133(8): 1156–1163.

[14] 李丹，刘涛，汪秀妹，等. 亚麻籽复配胶体系性质分析[J]. 食品科技，2020，45(1)：330–337.

[15] 祝竞芳，聂曼曼，陈洁，等. 卡拉胶与亚麻籽胶复配在枸杞果冻中的应用研究[J]. 中国食品添加剂，2019，30(7)：162–167.

[16] HAN Z T, LONG W M, ZHANG T H, et al. Application of xanthan gum and konjac gum to improve the texture, rheological properties and microstructure of *Oviductus ranae* gel[J]. International journal of biological macromolecules, 2022, 222(10): 2709–2718.

[17] YANG C, HU C, ZHANG H, et al. Optimation for preparation of oligosaccharides from flaxseed gum and evaluation of antioxidant and antitumor activities in vitro[J]. International journal of biological macromolecules, 2020, 153(10): 1107–1116.

[18] LIANG S, LI B, DING Y, et al. Comparative investigation of the molecular interactions in konjac gum/hydrocolloid blends: concentration addition method (CAM) *versus* viscosity addition method (VAM)[J]. Carbohy-

drate polymers, 2011, 83(3): 1062–1067.

[19] WANG X Y, XU R, WANG Y X, et al. Physicochemical and rheological properties of pomelo albedo pectin and its interaction with konjac glucomannan[J]. International journal of biological macromolecules, 2020, 151(13): 1205–1212.

[20] LI J H, ZHUANG Q, CHANG C H, et al. The slow release behavior of soy protein isolate carrageenan composite hydrogel: effect of konjac glucomannan[J]. European polymer journal, 2022, 173(8): 111242.

[21] 孙乐常, 周典颖, 杜瀚, 等. 魔芋胶对南美白对虾肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 42–50.

[22] HELLEBOIS T, GAIANNI C, CAMBIER S, et al. Exploration of the co-structuring and stabilising role of flaxseed gum in whey protein isolate based cryo-hydrogels [J]. Carbohydrate polymers, 2022, 289(14): 119424.

[23] 吴伟都, 姜建, 徐玲玲, 等. 魔芋胶溶液浓度对其流变学特性的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7403–7409.

[24] VIEIRA J M, MANTOVANI R A, RAPOSO M F J, et al. Effect of extraction temperature on rheological behavior and antioxidant capacity of flaxseed gum[J]. Carbohydrate polymers, 2019, 213(11): 217–227.

[25] ZHANG Z, CHEN W, ZHOU X, et al. Astaxanthin-loaded emulsion gels stabilized by Maillard reaction products of whey protein and flaxseed gum: physicochemical characterization and in vitro digestibility[J]. Food research international, 2021, 144(11): 110–321.

[26] 王旭, 马宁宁, 李昕, 等. 亚麻籽胶–大豆分离蛋白乳状液微滴聚集体的制备及其流变特性[J]. 中国食品学报, 2019, 19(5): 93–100.

[27] GUO Q B, ZHU X R, ZHEN W Q, et al. Rheological properties and stabilizing effects of high-temperature extracted flaxseed gum on oil/water emulsion systems[J]. Food hydrocolloids, 2021, 112(10): 1217–1230.

[28] 余依敏, 夏强, 杨林林, 等. 魔芋葡甘聚糖–可得然胶共混凝胶替代动物脂肪对乳化肠品质特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 46–53.

[29] FENG M Q, PAN L H, YANG X, et al. Thermal gelling properties and mechanism of porcine myofibrillar protein containing flaxseed gum at different NaCl concentrations [J]. LWT-Food science and technology, 2018, 87(7): 361–367.

[30] QIAO D L, SHI W J, LUO M, et al. Increasing xanthan gum content could enhance the performance of agar/konjac glucomannan-based system[J]. Food hydrocolloids, 2022, 132(8): 107845.

[31] 刘旺, 冯美琴, 孙健, 等. 超高压条件下亚麻籽胶对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 101–107.

[32] YU X, HUANG S S, YANG F, et al. Effect of microwave exposure to flaxseed on the composition, structure and techno-functionality of gum polysaccharides[J]. Food hydrocolloids, 2022, 125(14): 107447.

[33] 李振宇. 阿拉伯胶对魔芋葡甘聚糖凝胶性质的影响研究[D]. 长春: 吉林大学.

[34] GARCIA-SEGOVIA P, GARCIA-ALCARAZ V, BALASCH-PARISI S, et al. 3D printing of gels based on xanthan/konjac gums[J]. Innovative food science and emerging technologies, 2020, 64(9): 102343.

责任编辑：郎婧