覃海丽, 赵巧丽, 张杰良, 等. 亚麻籽胶对甲基纤维素泡沫模板气凝胶孔隙结构和机械性能的调控作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 155−165. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080149
QIN Haili, ZHAO Qiaoli, Kit-Leong Cheong, et al. Modulation of Pore Structure and Mechanical Properties of Methylcellulose Foam Template Aerogel by Linseed Gum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 155−165. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080149

· 研究与探讨 ·

亚麻籽胶对甲基纤维素泡沫模板气凝胶孔隙结构和机械性能的调控作用

覃海丽[1], 赵巧丽[1,*], 张杰良[1], 李　瑞[1], 汪　卓[1], 刘晓菲[1], 宋兵兵[1], 贾学静[1], 钟赛意[1,2,*]
（1.广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋生物制品工程实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东省亚热带果蔬加工科技创新中心, 广东湛江 524088;
2.广东海洋大学深圳研究院, 广东深圳 518108）

摘　要: 本研究将不同浓度亚麻籽胶（Linseed gum，LG）和甲基纤维素（Methylcellulose，MC）混合，系统分析了 LG 浓度对复合多糖水泡沫性质的影响，并通过傅里叶变换红外光谱、扫描电镜、热重分析等技术对复合多糖气凝胶（MC-LG）的微观形貌、孔隙结构、热稳定性和机械性能进行表征。结果表明，复合多糖溶液粘度随 LG 浓度（0.1wt%~0.5wt%）增加显著提高，而泡沫膨胀率呈先降低后升高趋势，并在 0.4wt% 时达到最大值（7.59%）。与纯 MC 水泡沫（76.40 μm）相比，MC-0.4wt% LG 水泡沫气泡分布更加均匀，平均尺寸减小至 59.11 μm，且储存 48 h 后仍保持较好的稳定性。扫描电镜和红外光谱分析表明，MC 与 LG 分子间形成了氢键相互作用，且含 0.4wt% LG 的 MC-LG 气凝胶呈现较为均匀的蜂窝状多孔结构。机械性能结果显示，MC-0.4wt% LG 气凝胶杨氏模量达到 0.0982 MPa，显著高于单一 MC 气凝胶（0.0288 MPa），屈服强度和抗压强度也得到显著提升。综上所述，LG 浓度为 0.4wt% 时，MC-LG 气凝胶具有均匀致密的孔隙结构、良好的热稳定性和优异的机械性能，整体性能较为理想。本研究可为高性能多糖基气凝胶在食品和生物医药等领域的应用提供技术参考。

关键词: 气凝胶, 甲基纤维素, 亚麻籽胶, 泡沫模板法, 孔隙结构, 机械性能
中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0155−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080149
本文网刊:

Modulation of Pore Structure and Mechanical Properties of Methylcellulose Foam Template Aerogel by Linseed Gum

QIN Haili[1], ZHAO Qiaoli[1,*], Kit-Leong Cheong[1], LI Rui[1], WANG Zhuo[1], LIU Xiaofei[1], SONG Bingbing[1], JIA Xuejing[1], ZHONG Saiyi[1,2,*]
（1.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Marine Food, Guangdong Provincial Science and Technology Innovation Center for Subtropical Fruit and Vegetable Processing, Zhanjiang 524088, China;
2.Shenzhen Institute, Guangdong Ocean University, Shenzhen 518108, China）

Abstract: In this study, different concentrations of Linseed gum (LG) and Methylcellulose (MC) were mixed, and the effects of LG concentration on the properties of composite polysaccharide water foam were systematically analyzed. The microstructure, pore structure, thermal stability and mechanical properties of composite polysaccharide aerogel (MC-LG)

收稿日期: 2025−08−13
基金项目: 国家自然科学基金（32402136）; 广东省基础与应用基础研究基金（2023A1515010005）; 广东省高校生物医药与健康重点领域专项资金（2023ZDZX2025）。
作者简介: 覃海丽（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: 987049561@qq.com。
*** 通信作者:** 赵巧丽（1990−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 功能因子稳态化, E-mail: zql2819557995@163.com。
钟赛意（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品功能因子开发与功效评价, E-mail: zsylxc@126.com。

were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, scanning electron microscopy and thermogravimetric analysis. The results showed that the viscosity of complex polysaccharide solution increased significantly with the increase of LG concentration (0.1wt%~0.5wt%), while the foam expansion rate first decreased and then increased, and reached the maximum value (7.59%) at 0.4wt%. Compared with pure MC water foam (76.40 μm), the bubble distribution of MC-0.4wt% LG water foam was more uniform, and the average size was reduced to 59.11 μm, and it still maintained good stability after 48 h storage. Scanning electron microscope and infrared spectrum analysis showed that hydrogen bond interaction was formed between MC and LG molecules, and MC-LG aerogel containing 0.4wt% LG presented a relatively uniform honeycomb porous structure. The results of mechanical properties showed that the Young's modulus of MC-0.4wt% LG aerogel reached 0.0982 MPa, which was significantly higher than that of single MC aerogel (0.0288 MPa), and the yield strength and compressive strength were also significantly improved. To sum up, when the concentration of LG was 0.4wt%, MC-LG aerogel had uniform and compact pore structure, good thermal stability and excellent mechanical properties, and the overall performance was ideal. This study can provide technical reference for the application of high-performance polysaccharide-based aerogels in food and biomedicine.

Key words: aerogel; methyl cellulose; linseed gum; foam template method; pore structure; mechanical properties

气凝胶作为一种新兴的纳米多孔固体材料，具有独特的三维网络结构、超高的孔隙率及优越的吸附性能[1]，在药物缓释、食品新鲜度检测、油凝胶体系构建等多个领域展现出广阔的应用前景[2]。目前，常用的气凝胶制备方法包括水凝胶模板法和泡沫模板法。水凝胶模板法主要通过溶胶-凝胶过程使前驱体在催化剂作用下经水解缩聚反应形成三维网络结构，再经干燥去除溶剂制得气凝胶[3]，然而，所得气凝胶通常存在机械强度低和弹性差等问题[4]。泡沫模板法通过将原料均匀分散并水化，再经高速充气形成稳定的水泡沫，后经快速预冻固定泡沫结构并借助冷冻干燥技术制得气凝胶。相较于水凝胶模板气凝胶，其具有孔隙结构可调控、机械韧性好、操作简单和高效环保的优势[5]。

在泡沫模板法制备气凝胶的过程中，基质材料的选择是调控其孔隙结构和机械性能的关键。天然生物聚合物尤其是多糖类物质，因其原料来源广泛、可再生且可生物降解等优势，成为当前的研究热点[6]。甲基纤维素（MC）是纤维素的醚衍生物，主要通过甲氧基取代羟基氢原子获得[7]，具有良好的界面活性[8]和凝胶特性[9]，可作为泡沫模板法制备气凝胶的理想基材。然而，团队前期研究发现，仅由单一甲基纤维素制备的水泡沫在冷冻过程中易出现气泡粗化现象，导致泡沫稳定性较差，所制备的气凝胶机械性能较差，整个体系容易坍塌，严重限制了其在食品和生物医药等领域的实际应用。因此，通过组分间的协同作用或结构调控等技术手段改善 MC 气凝胶的机械性能和孔隙结构，对于提升其实际应用价值至关重要。

近期研究表明，采用两种或两种以上多糖复合制备的气凝胶可以改善单一多糖基气凝胶的机械性能，稳定多孔网络结构并降低其亲水性[10]。如 Zhang 等[11]通过复合羧甲基纤维素（CMC）和海藻酸钠（SA），成功制备了基于黑枸杞花青素（BGA）的智能比色气凝胶。研究发现，当 CMC/SA 与 BGA 配比为 1:2 时，所形成的复合气凝胶呈现出均匀的孔径分布、较大的比表面积以及较高的机械强度。Wu 等[12]以柑橘果胶（PC）为基材，纤维素纳米纤维（CNF）为增强剂，制备了 PC/CNF 复合气凝胶。与单一 PC 气凝胶相比，复合气凝胶的压缩应力和拉伸应力显著提高，并表现为较为致密的纤维网络结构及较大的孔径。亚麻籽胶是从亚麻籽中提取的一种多糖，其含量约占亚麻籽胶总重量的 8%[13]。因其具有良好的粘性、保水性和凝胶特性，在食品工业中常被用作增稠剂、稳定剂和乳化剂[14]。Chen 等[15]研究证实，适量添加亚麻籽胶可显著改善鱼糜凝胶的微观结构，同时增强其凝胶强度、质构特性和持水能力。然而，目前关于亚麻籽胶调控甲基纤维素泡沫模板气凝胶机械性能的研究尚未见系统报道，两者间的协同作用尚不明确。

基于此，本研究以甲基纤维素（MC）与亚麻籽胶（LG）为原料，采用泡沫模板法制备复合多糖气凝胶，重点探究 LG 浓度对复合多糖溶液性质及泡沫稳定性的影响规律，并系统阐明其在调控气凝胶微观结构、热稳定性与机械性能中的作用机制。研究旨在为优化多糖基气凝胶功能特性提供新策略，并为该类材料在食品、医药等领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

甲基纤维素（MC，40000 mPa·s） 上海麦克林生化科技有限公司；亚麻籽胶（LG） 北京库来博科技有限公司；溴化钾 上海源叶生物科技有限公司；其余试剂均为分析纯。

HH-8 数显恒温水浴锅 常州国华电器有限公司；T18 高速分散器 广州艾卡仪器设备有限公司；LGJ-10 真空冷冻干燥机 北京松源华兴科技发展有限公司；DV2T LV 旋转粘度计 美国 Brookfield 公司；XPH-25C 热台偏光显微镜 上海普丹光学仪器有限公司；JSM IT800 扫描电子显微镜 日本 HITACHI 公司；Autosorb-IQ 全自动比表面积和孔隙率分析仪 美国康塔仪器公司；TA.XT plusC 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司；BRUKER

TENSOR-27 傅里叶变换红外光谱仪　德国 Bruker 公司；SmartLab SE X 射线衍射仪　日本 Rigaku 公司；STA 449 F3 Jupiter®同步热分析仪　德国 NETZSCH 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　MC-LG 复合多糖气凝胶的制备　准确称取 1.6 g MC，溶于 100 mL 热水中，在 70 ℃ 下持续搅拌至完全溶解，制备形成 MC 水溶液。随后，在相同温度的热水中分别加入 1.6wt% 的 MC 和不同浓度的 LG(0.1wt%、0.2wt%、0.3wt%、0.4wt%、0.5wt%)，充分混合直至完全溶解，得到复合多糖水溶液。然后使用 T18 高速分散机对复合多糖水溶液以 10000 r/min 均质充气 5 min 得到水泡沫，接着将泡沫转移到 6 孔板模具中，进行预冻处理后经冷冻干燥 72 h，最终制得复合多糖气凝胶。将所得到的气凝胶分别命名为 MC-0.1wt% LG、MC-0.2wt% LG、MC-0.3wt% LG、MC-0.4wt% LG 和 MC-0.5wt% LG。

1.2.2　MC-LG 复合多糖水溶液的粘度测定　使用旋转粘度计测定 MC-LG 复合多糖水溶液的粘度。选取 LV-03(63)转子，将其插入 200 mL 复合多糖水溶液中，调节转速为 100 r/min，于室温下进行粘度测试，确保扭矩保持在仪器工作范围的 10%~90% 之间。

1.2.3　MC-LG 复合多糖水泡沫的膨胀率测定　使用量筒测量初始多糖溶液的体积(V_0)，然后测量充气后的水泡沫的体积(V_1)。水泡沫的膨胀率可通过公式(1)计算得出。

$$膨胀率(\%) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中：V_0 表示初始多糖溶液体积，mL；V_1 表示充气后水泡沫体积，mL。

1.2.4　MC-LG 复合多糖水泡沫的稳定性、微观形态及尺寸大小分析　将复合多糖水泡沫置于 15 mL 透明玻璃瓶中，通过拍摄水泡沫在储存 0、0.3、0.6、1.0、2.0、4.0、8.0、12.0、24.0、48.0 和 72.0 h 后的图像，根据气泡消失程度来评价水泡沫的稳定性。采用热台偏光显微镜在 50×的放大倍数下观察复合多糖水泡沫的微观形态，借助 Image J 软件计算气泡的尺寸。

1.2.5　MC-LG 复合多糖气凝胶的物理性质分析　MC-LG 复合多糖气凝胶的网络密度 ρ_a(g/cm^3)可通过公式(2)计算得出。

$$\rho_a = \frac{m}{v} \qquad 式（2）$$

式中：m 表示 MC-LG 复合多糖气凝凝胶的质量，g；v 表示 MC-LG 复合多糖气凝胶的体积，mL。

气凝胶中 MC-LG 复合多糖混合粉末的真实密度 ρ_s(g/cm^3)可通过公式(3)确定。

$$\rho_s = \frac{M}{M_h/\rho_h + M_x/\rho_x} \qquad 式（3）$$

式中：M 表示多糖混合物的总质量，g；M_h 和 M_x 分别表示两种不同多糖的质量，g；ρ_h 和 ρ_x 分别表示两种不同多糖的密度，g/cm^3。

MC-LG 复合多糖气凝胶的孔隙率 P(%)可通过公式(4)计算。

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \times 100 \qquad 式（4）$$

式中：ρ_a 表示复合多糖气凝胶的网络密度，g/cm^3；ρ_s 表示复合多糖混合粉末的真实密度，g/cm^3。

采用全自动比表面积和孔隙率分析仪，以介孔模式对 MC-LG 复合多糖气凝胶样品进行测试。测试前，样品经 105 ℃ 真空脱气处理 6 h，随后进行氮气吸附-解吸实验，以评估其平均孔径和孔体积。

1.2.6　MC-LG 复合多糖气凝胶的硬度测定　使用配备 P/36R 圆柱形探头的质构仪对 MC-LG 复合多糖气凝胶样品进行压缩测试，以评估其硬度。测试条件设定为：测前速率 5 mm/s，测中速率 2 mm/s，触发力 5 g，压缩形变 50%。

1.2.7　MC-LG 复合多糖气凝胶的微观结构观察　利用扫描电子显微镜(SEM)对复合多糖气凝胶样品的内部微观结构进行观察。将样品切割成适当大小的横截面薄片，固定于样品台后经溅射镀金处理。观察条件设定为加速电压 10 kV，分别在 40×和 100×放大倍数下对气凝胶的横截面形貌进行表征。

1.2.8　MC-LG 复合多糖气凝胶的红外光谱分析　使用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)对气凝胶样品进行化学结构表征。将气凝胶样品与溴化钾(KBr)粉末按 1∶100 的质量比混合，研磨均匀压成透明薄片。将制备好的薄片置于红外光谱仪的样品室中，在 4000~400 cm^{-1} 波数范围内进行光谱扫描，获取气凝胶的红外吸收光谱。

1.2.9　MC-LG 复合多糖气凝胶的 X 射线衍射分析　使用 X 射线衍射仪分析复合多糖气凝胶样品的结晶特性。测试条件为扫描范围 10°~90°，扫描速率 5°/min。

1.2.10　MC-LG 复合多糖气凝胶的热稳定性分析　采用同步热分析仪对气凝胶样品的热稳定性进行表征。称取 5.0 mg 样品置于氧化铝坩埚中，在氮气环境下，以 10 ℃/min 的升温速率从 30 ℃ 升温至 800 ℃，实时监测样品的热失重行为。

1.2.11　MC-LG 复合多糖气凝胶的机械性能分析　利用配备 P/36R 圆柱形探头的质构仪对气凝胶的机械性能进行研究。将直径约为 2 cm、高度约为 2 cm 的圆柱形气凝胶以 3 mm/min 的恒定压缩速率进行压缩，直至达到 80% 的应变。基于应力-应变曲线的初始线性阶段(0~8% 应变范围)，计算样品的杨氏模量。

1.3　数据处理

所有实验均进行 3 次平行，结果以平均值±标准偏差的形式呈现。利用 IBM SPSS Statistics 27.0 软

件对数据结果进行单因素方差分析(ANOVA),并采用邓肯多重比较检验进行事后检验,以确定组间的显著性差异。$P<0.05$ 表示有统计学差异。采用 Origin 2024 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 MC-LG 复合多糖水溶液的粘度和膨胀率

多糖水溶液的粘度与水泡沫的形成和稳定密切相关,通过调控多糖溶液的粘度可以改善水泡沫体系的稳定性,进而影响后续气凝胶的孔隙结构和机械性能[16]。由表 1 可知,纯 MC 水溶液的粘度仅为 27266.67 mPa·s,较低的粘度导致溶液中的气泡迅速聚集融合,从而增加了气泡破裂的风险[17]。当向体系中引入亚麻籽胶后,复合多糖水溶液的粘度随着 LG 浓度的增加而显著升高,并在 MC-0.5wt% LG 形成的水溶液中达到最高值(40433.33 mPa·s)。高粘度的溶液能够在一定程度上延缓液膜排水过程,抑制气泡的聚集现象,同时有效防止膨胀过程中气泡的粗化,进而提升泡沫的稳定性。

表 1 不同 LG 浓度的 MC-LG 复合多糖溶液的粘度和膨胀率

Table 1 Viscosity and swelling of MC-LG complex polysaccharide solutions with different LG concentrations

组分	粘度(mPa·s)	膨胀率(%)
MC	27266.67±251.66^{f}	11.23±0.21^{a}
MC-0.1wt% LG	29966.67±57.74^{e}	3.77±0.22^{d}
MC-0.2wt% LG	34500.00±100.00^{d}	3.45±0.13^{d}
MC-0.3wt% LG	36866.67±115.47^{c}	5.85±0.13^{c}
MC-0.4wt% LG	38766.67±57.74^{b}	7.59±0.22^{b}
MC-0.5wt% LG	40433.33±152.75^{a}	7.42±0.21^{b}

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

膨胀率是评估气体截留效率或充气效果的重要指标[18]。一般来说,较高的膨胀率意味着体系能够更有效地截留并稳定气体,反映出更强的气体保持能力。与单一 MC 水溶液(膨胀率为 11.23%)相比,引入 0.1wt%~0.2wt% LG 后,体系膨胀率下降至 3.45%,这可能是由于低浓度 LG 分子渗透并填充到了 MC 网络结构的孔隙中,从而在一定程度上限制了空气的渗透,导致膨胀率降低。然而,当 LG 浓度增加至 0.3wt%~0.5wt% 时,膨胀率出现回升,并在 LG 浓度为 0.4wt% 时达到最大值(7.59%)。该现象表明,当 LG 浓度为 0.4wt% 时,体系能有效增强气-液界面膜的强度与稳定性,从而提升气体截留能力。而当 LG 浓度继续增至 0.5wt% 时,由于体系粘度过高,在充气过程中产生较大的能量耗散,不利于气泡的均匀分散与稳定,致使膨胀率略有下降。Suet 等[19] 在研究阿拉伯胶浓度对哈密瓜泥泡沫膨胀率的影响时也发现类似的现象,膨胀率在阿拉伯胶浓度为 10% 时达到最大值 126.58%,而当阿拉伯胶浓度增加到 15% 时,则因体系粘度过高超出了泡沫可维持的最大空气体积,导致膨胀率显著下降至 31.11%。

2.2 MC-LG 复合多糖水泡沫的稳定性

在运用泡沫模板法制备气凝胶的过程中,水泡沫的稳定性起着决定性作用。维持良好的泡沫稳定性不仅能够确保冷冻过程中泡沫结构的完整性,还将直接影响冷冻干燥后所得气凝胶的多孔结构[18]。图 1 显示了 MC-LG 复合多糖水泡沫在长期储存过程中稳定性的变化规律。结果表明,单一 MC 水泡沫的稳定性较差,静置 2 h 即出现分层现象,24 h 内气泡几乎完全消失。当向 MC 体系中引入 LG 后,水泡沫体系的稳定性得到显著改善。具体地,在 LG 浓度为 0.1wt% 时,虽然体系的气泡尺寸较大且粘度较低,静置 4 h 后出现轻微分层,但其稳定性仍优于单一 MC 体系,储存 12 h 后才出现明显的气泡粗化现象。当 LG 浓度增加至 0.2wt% 和 0.3wt% 时,体系粘度的增加使气泡粗化延迟至 24 h 后才出现。随着 LG 浓度继续增加至 0.4wt% 和 0.5wt%,水泡沫整体稳定性进一步提高,然而 MC-0.5wt% LG 水泡沫因粘度过高导致充气过程中能量耗散加剧,引发气泡聚集与合并,使其稳定性略低于 MC-0.4wt% LG 水泡沫。综合上述结果,MC-0.4wt% LG 水泡沫呈现出最佳的气泡稳定性,在储存 48 h 内未观察到明显的分层现象。这种泡沫稳定性的提升主要源于 LG 和 MC 分子间的协同相互作用,该相互作用有效增强了水泡沫的气-液界面强度,并抑制了液膜层内的气体扩散,从而显著提高了泡沫的稳定性[16]。Zhu

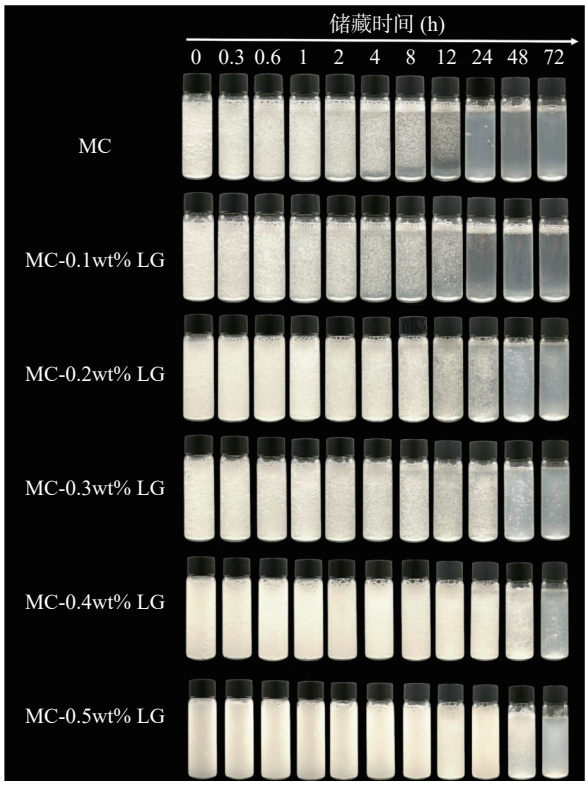


图 1 不同 LG 浓度的 MC-LG 复合多糖溶液形成的水泡沫随时间的变化

Fig.1 Images of aqueous foam formed by MC-LG complex polysaccharide solutions with different LG concentrations over time

等[20]也报道了类似现象，纯羟丙基甲基纤维素（HPMC）溶液的泡沫稳定性较差，其气泡在 0.5 h 内全部破裂，而加入黄原胶（WL）后，因 HPMC 和 WL 分子间的物理相互作用，泡沫稳定时间可延长至 8 h。

2.3　MC-LG 复合多糖水泡沫的微观形态及尺寸分布

借助泡沫模板法制备多糖气凝胶时，水泡沫的微观形态及尺寸分布是影响气凝胶网络结构和性能的主要因素，其中水泡沫的直径大小和分布情况与气凝胶的孔隙结构密切相关[21]。图 2 展示了含有不同浓度 LG 的 MC-LG 复合水泡沫的光学显微镜照片与尺寸分布，其对应的气泡尺寸参数汇总于表 2。结果表明，不同体系水泡沫的气泡直径分布范围为 10~220 μm。其中，单一 MC 水泡沫的尺寸分布均匀性较差，其平均气泡尺寸为 76.70 μm。与单一 MC 水泡沫相比，加入 0.1wt% LG 后气泡平均尺寸增加至 82.16 μm，这可能是因为低浓度的 LG 加入 MC 水溶液后，混合体系的粘度仍相对较低，且 LG 分子的表面活性降低了体系表面张力。表面张力的降低

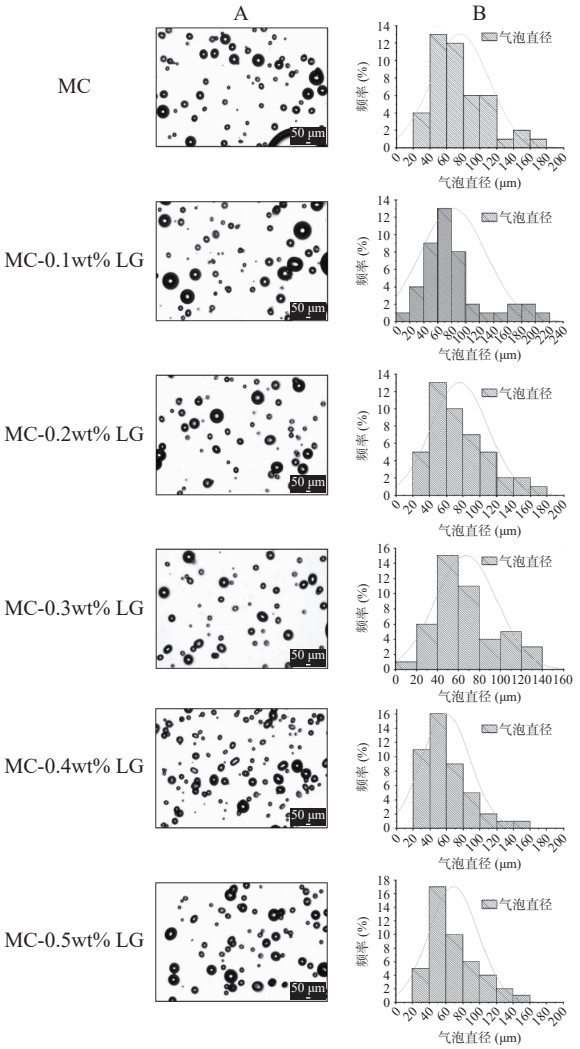


图 2　不同 LG 浓度的 MC-LG 复合多糖水泡沫的显微照片（A）和气泡尺寸大小分布（B）

Fig.2　Micrographs (A) and bubble size distribution (B) of MC-LG complex polysaccharide aqueous foams with different LG concentrations

表 2　不同 LG 浓度下 MC-LG 复合水泡沫的气泡尺寸参数

Table 2　Bubble size parameters of MC-LG composite aqueous foams at different LG concentrations

组分	气泡尺寸平均值（μm）	气泡尺寸中位数（μm）
MC	76.70	70.48
MC-0.1wt% LG	82.16	70.13
MC-0.2wt% LG	75.75	64.78
MC-0.3wt% LG	67.34	61.01
MC-0.4wt% LG	59.11	51.64
MC-0.5wt% LG	68.96	60.23

使得气泡内部的压力减小，气泡更容易发生膨胀，最终导致气泡尺寸的增大[22]。随着 LG 浓度增至 0.2wt%~0.4wt%，体系中的气泡尺寸呈现逐渐减小的趋势，这归因于 LG 分子通过增强气-水界面膜的粘弹性，从而有效抑制了气体从较小气泡向较大气泡的转移以及气泡的聚集[23]。其中，MC-0.4wt% LG 水泡沫中的平均气泡尺寸最小，仅为 59.11 μm。这一发现与 Kubbutat 等[24]的研究相似，山梨醇浓度从 30% 升至 60% 时，气泡尺寸（d_{50}）从 330 μm 显著减小至 33 μm。这是因为较高浓度的山梨糖醇通过增强界面吸附抑制气泡合并，从而获得较小的气泡尺寸。然而，当 LG 浓度继续增至 0.5wt%，过高的体系粘度加剧了充气过程中的能量耗散，阻碍了气泡的有效分散并促进了合并，致使平均气泡直径增大至 68.96 μm。综上所述，MC-0.4wt% LG 水泡沫的气泡平均尺寸最小且分布最为均匀，充分证明了适当浓度的 LG 能够降低气-液界面张力，并通过增强界面膜粘弹性显著提升泡沫体系的稳定性，为后续冷冻干燥过程中形成理想的多孔网络结构奠定基础[16]。

2.4　MC-LG 复合多糖气凝胶的物理性质分析

气凝胶网络结构的宏观特性可以通过网络密度和硬度进行表征。如表 3 所示，MC 气凝胶的网络密度为 0.0561 g/cm^3。随着 LG 的加入，气凝胶的网络密度显著（P<0.05）增加。具体地，当 LG 浓度从 0.1wt% 增加到 0.5wt% 时，复合多糖气凝胶的网络密度从 0.0663 g/cm^3 增加至 0.0981 g/cm^3。值得注意的是，气凝胶的硬度变化趋势与网络密度的变化趋势相似，随着 LG 浓度的增加，复合多糖气凝胶的硬度逐渐从 273.65 g 增加到 878.60 g。造成这种现象的原因可能是 MC 和 LG 之间存在氢键相互作用，促使气凝胶形成了更为致密的网络结构，进而使得气凝胶的网络密度和硬度都得到了提升[25]。

气凝胶的孔隙特征主要通过孔隙度、孔体积和平均孔径这三个关键参数表征。由表 3 可知，纯 MC 气凝胶的孔隙度为 96.43%，引入 LG 后，MC 与 LG 分子链间的相互作用显著增强，促使复合多糖气凝胶网络结构致密化，导致其孔隙度逐步降低至 93.37%。此结果与 Wang 等[26]的报道一致，他们发现，纯玉米秸秆纤维素纳米晶体（CSCNC）气凝胶的孔隙率为 96.01%，而随着淀粉（AS）含量的增加，CSCNC/AS 气凝胶的孔隙率逐渐下降，这主要归因

表 3 含有不同浓度 LG 的 MC-LG 复合多糖气凝胶的物理性质

Table 3 Physical properties of MC-LG complex polysaccharide aerogels containing different LG concentrations

组分	密度(g/cm³)	硬度(g)	孔隙度(%)	孔体积(cm³/g)	平均孔径(nm)
MC	0.0561±0.0066^{e}	207.79±13.77^{f}	96.43±0.42^{a}	0.0109±0.0008^{c}	11.10±0.52^{c}
MC-0.1wt% LG	0.0663±0.0011^{d}	273.65±6.95^{e}	95.53±0.10^{b}	0.0138±0.0001^{a}	13.15±1.88^{bc}
MC-0.2wt% LG	0.0726±0.0013^{cd}	367.03±26.51^{d}	95.09±0.08^{b}	0.0125±0.0002^{b}	15.20±1.7^{ab}
MC-0.3wt% LG	0.0802±0.0045^{c}	542.62±22.48^{c}	94.58±0.30^{c}	0.0111±0.0006^{c}	18.00±0.57^{a}
MC-0.4wt% LG	0.0893±0.0062^{b}	593.98±9.59^{b}	93.96±0.42^{d}	0.0098±0.0002^{d}	14.22±1.03^{b}
MC-0.5wt% LG	0.0981±0.0030^{a}	878.60±16.46^{a}	93.37±0.21^{e}	0.0093±0.0001^{d}	14.85±0.72^{b}

注: 同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

于淀粉与纤维素分子链之间的交联作用形成了更致密的内部结构。此外, 纯 MC 气凝胶的孔体积为 0.0109 cm³/g, 平均孔径为 11.10 nm。低浓度 LG (0.1wt%~0.3wt%)的引入可能会使复合多糖气凝胶形成更多连通性的孔隙结构, 即气凝胶内部拥有更多的孔隙空间, 从而使孔体积增大; 其中 0.1wt% LG 复合多糖气凝胶的孔体积达到最大值 0.0138 cm³/g。然而, 当 LG 浓度继续提升至 0.4wt%~0.5wt% 时, LG 在气凝胶基质中所占的体积比例增加, 形成了更为致密的网络结构, 导致平均孔径和孔体积减小, 但孔隙数量增多[27]。值得注意的是, MC-0.4wt% LG 和 MC-0.5wt% LG 气凝胶的孔径分布相似, 但 MC-0.4wt% LG 气凝胶显示出更小的平均孔径(14.22 nm)和更为均匀密集的孔隙结构。

2.5 MC-LG 复合多糖气凝胶的微观结构观察

通过扫描电子显微镜观察了不同浓度 LG 对复合多糖气凝胶微观结构的影响。如图 3 所示, 所有样品均呈现出典型的多孔网络结构, 其结构差异主要表现在孔隙分布均匀性和孔洞闭合程度方面。具体来看, 纯 MC 气凝胶呈现出松散无序的孔结构, 表明其结构稳定性较差, 在受到外界作用时极易遭受损伤[28]。随着 LG 的加入, 复合气凝胶的结构呈现出明显浓度依赖性的趋势: 当 LG 浓度为 0.1wt%~0.4wt% 时, LG 的加入促使气凝胶从无序结构向规则的蜂窝状多孔结构转变, 且随着浓度提升, 孔壁厚度逐渐增大, 三维网络结构也更加致密[16]。其中, MC-0.4wt% LG 复合多糖气凝胶由于分子间的均匀分布而展现出更均匀的孔隙分布和较为理想的三维网络结构[11]。然而, 当 LG 浓度继续增加至 0.5wt% 时, 复合多糖气凝胶的闭孔数量增加, 部分闭合孔隙相互叠加, 最终形成了不规则的层状堆叠结构。综上所述, 当 LG 添加量为 0.4wt% 时, 复合多糖气凝胶形成了具有均匀孔隙分布、结构较为理想的蜂窝状多孔网络。

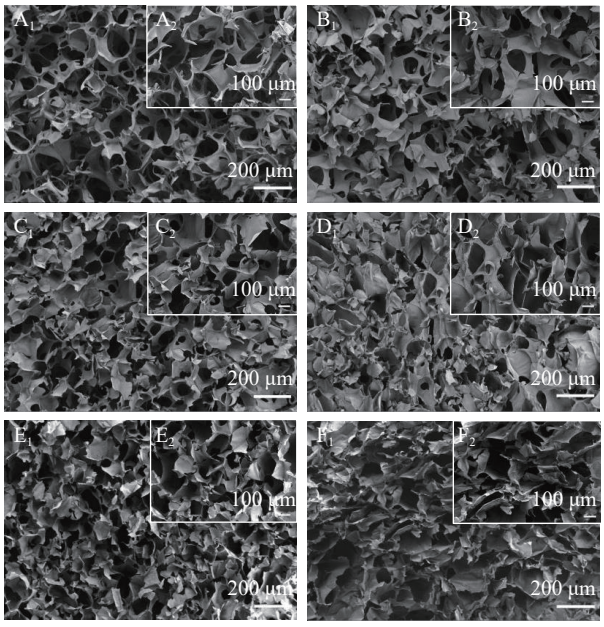


图 3 含有不同浓度 LG 的 MC-LG 复合多糖气凝胶的扫描电镜图像

Fig.3 Scanning electron microscope images of MC-LG complex polysaccharide aerogels containing different concentrations of LG

注: A 表示 MC; B 表示 MC-0.1wt% LG; C 表示 MC-0.2wt% LG; D 表示 MC-0.3wt% LG; E 表示 MC-0.4wt% LG; F 表示 MC-0.5wt% LG; A_1~F_1 表示放大倍数为 40×; A_2~F_2 表示放大倍数为 100×。

2.6 MC-LG 复合多糖气凝胶的红外光谱分析

傅里叶变换红外光谱能够根据特征吸收峰的特性揭示 MC 和 LG 的官能团组成和分子间相互作用[29]。含有不同浓度 LG 的 MC-LG 复合多糖气凝胶的红外光谱图如图 4 所示。从图 4 可以看出, 单一 MC 气凝胶在 3434 cm^{-1} 处的宽峰对应于 O-H 伸缩振动, 在 2925、1630 和 1068 cm^{-1} 处的特征吸收峰分别与 C-H 伸缩振动、O-H 弯曲振动和 C-O-C 伸缩振动有关[30]。LG 气凝胶在 3430 cm^{-1} 处的宽峰与 O-H 伸缩振动有关, 2931、1637 和 1031 cm^{-1} 处的特

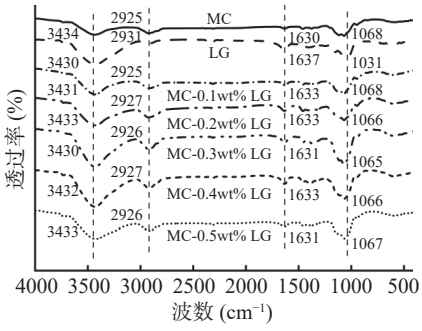


图 4 含有不同浓度 LG 的 MC-LG 复合多糖气凝胶的红外光谱图

Fig.4 Infrared spectra of MC-LG complex polysaccharide aerogels containing different concentrations of LG

征吸收峰分别对应于 C-H 伸缩振动、O-H 弯曲振动和 C-O 伸缩振动。与 MC 气凝胶和 LG 气凝胶相比，MC-LG 复合多糖气凝胶保留了两者的特征吸收峰，但部分峰值发生了移动，其中，在3434 cm^{-1} 处的 O-H 伸缩振动峰红移至 3430 cm^{-1}，这表明氢键参与了气凝胶网络结构的形成[31]。此外，MC-LG 复合多糖气凝胶在 1630 和 1068 cm^{-1}处的吸收峰也发生了轻微偏移，分别移动到1633 和 1065 cm^{-1}，进一步表明 LG 通过氢键与MC 发生相互作用[32]。这一相互作用通过提高多糖溶液粘度和泡沫液膜强度有效改善了泡沫的稳定性以及复合多糖气凝胶的孔隙结构[33]。图 3 扫描电镜图像所呈现均匀致密的蜂窝状多孔网络结构同样印证了氢键在调控气凝胶多孔结构形成中的关键作用。

2.7　MC-LG 复合多糖气凝胶的 X 射线衍射分析

X 射线衍射图谱被广泛用于分析样品的结晶度并确定其非晶态或晶态特征[34]。如图 5 所示，MC 气凝胶和 MC-LG 复合多糖气凝胶均显示出明显的特征衍射峰，表明其内部存在晶体结构。纯 MC 气凝胶在 31.64°和 45.36°(2θ)处显示出对应于纤维素 I 型(200)和(220)晶面的特征衍射峰。与纯 MC 气凝胶相比，添加 0.1wt%~0.2wt% LG 的复合多糖气凝胶在相应位置的衍射峰强度明显降低，表明结晶度下降；当 LG 浓度增至 0.3wt% 时，特征峰发生偏移且强度增强，暗示形成了更有序的晶体结构；而在 0.4wt%~0.5wt% LG 浓度下，衍射峰强度再次减弱，这表明 MC 和 LG 分子间的氢键相互作用对复合多糖气凝胶的晶体结构产生了影响。该现象与 Zheng 等[35] 的报道相符，他们发现与蓝莓花青素-没食子酸复合物和越橘花青素-咖啡酸复合物相比，蓝莓花青素-没食子酸-海藻酸钠复合气凝胶和越橘花青素-咖啡酸-海藻酸钠复合气凝胶的 XRD 特征衍射峰明显减弱，这表明合成过程中分子间的强相互作用改变了复合材料的结晶度，导致结晶度下降。

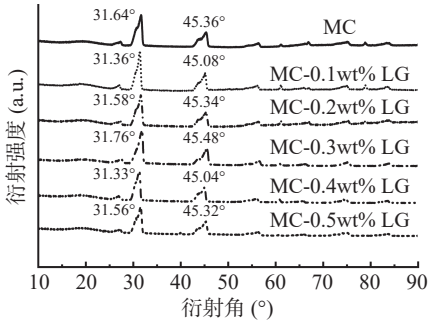


图 5　含有不同浓度 LG 的 MC-LG 复合多糖气凝胶的 X 射线衍射图谱

Fig.5　X-ray diffraction patterns of MC-LG complex polysaccharide aerogels containing different concentrations of LG

2.8　MC-LG 复合多糖气凝胶的热稳定性分析

通过热重曲线(TGA)和微熵热重(DTG)曲线对气凝胶的热稳定性和热力学降解行为进行了分析，以验证其在外界环境温度波动条件下的结构完整性[36]。如图 6 中的热失重曲线所示，所有样品在加热过程中均呈现出三个阶段的热降解过程[37]。初始降解阶段(30~145 ℃)样品质量减少主要归因于吸附水和其他松散结合在气凝胶基质中的挥发性物质的蒸发，这一阶段的质量损失范围在 6.62%~15.7% 之间。第二阶段(145~402 ℃)是气凝胶的主要热分解阶段。此阶段多糖的糖苷键发生降解[38]，导致重量损失达 25.36%~54.81%。其中纯 MC 气凝胶的质量损失最高，为 54.81%。随着 LG 的引入及其浓度的增加(0.1wt%~0.4wt%)，复合多糖气凝胶在该阶段的质量损失逐渐减少，表明 MC 和 LG 分子间的相互作用形成了更稳定的网络结构，从而显著提高了复合多糖气凝胶的热稳定性。其中，MC-0.4wt% LG 复合多糖气凝胶的质量损失最低，仅为 25.36%，表明了最佳的热稳定性。然而，MC-0.5wt% LG 复合多糖气凝胶的质量损失(26.55%)略高于 MC-0.4wt% LG 复合多糖气凝胶，说明过高的 LG 浓度可能因局部聚集，从而在一定程度上削弱气凝胶的结构稳定性，使其在高温下更易发生分解。第三阶段始于 402 ℃ 后，此阶段质量损失主要归因于高度热稳定性残留物的碳化和分解，最终导致灰分形成[39]。结合图 7 所示的微熵

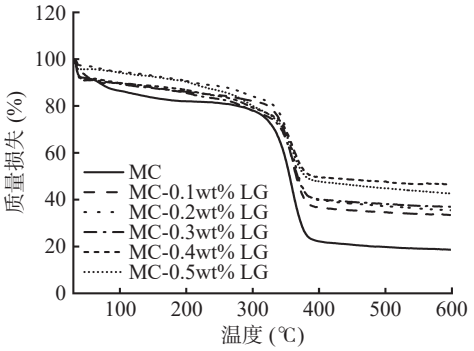


图 6　含有不同浓度 LG 的 MC-LG 复合多糖气凝胶的热失重曲线

Fig.6　Thermal weight loss curve of MC-LG complex polysaccharide aerogels with different concentrations of LG

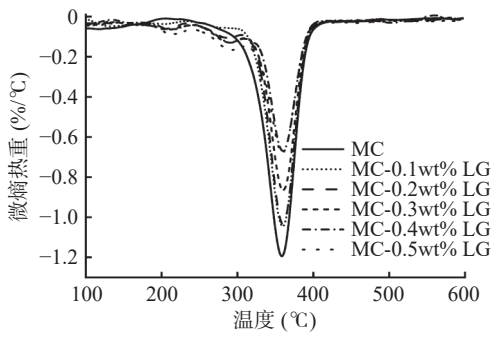


图 7　含有不同浓度 LG 的 MC-LG 复合多糖气凝胶的微熵热重曲线

Fig.7　Microentropy thermogravimetric curve of MC-LG composite polysaccharide aerogels with different concentrations of LG

热重曲线分析进一步发现，复合多糖气凝胶的峰值强度（即最大失重速率）均低于纯 MC 气凝胶，说明其分解过程更为平缓，这可能是由于更致密的网络结构延缓了热分解的链式反应。同样地，Sohrabi 等[40] 研究发现，淀粉纳米颗粒的引入能显著改善纯壳聚糖纳米纤维气凝胶的热稳定性，这主要归因于其与壳聚糖分子链间增强的相互作用。综合热重分析结果表明，MC-0.4wt% LG 复合多糖气凝胶在热降解阶段呈现最低的质量损失率，表明其网络结构在高温条件下具有较高的稳定性，难以被彻底分解，展现出优异的热稳定性。

2.9 MC-LG 复合多糖气凝胶的机械强度

气凝胶优异的机械性能可以显著提高其对外部机械损伤的抵抗力[41]。图 8A 显示了气凝胶样品的压缩应力-应变行为。由图可知，所有气凝胶样品的应力-应变曲线均表现出三个不同的阶段：在低应变水平（0~40%）阶段，曲线呈现出初始线性弹性特征，在这一阶段，气凝胶主要发生弹性变形，应力与应变呈线性关系。当进入中等应变（40%~60%）区间时，曲线出现塑性屈服平台。这一阶段对应着气凝胶孔隙结构的渐进坍塌，随着应变的增加，孔隙逐渐被压缩破坏。而在高应变区（60%~80%），应力呈现急剧增加的趋势。这表明在高应力作用下，气凝胶致密的网络骨架结构遭到破坏，进而导致应力急剧增加[42]。此外，与单一 MC 气凝胶相比，含有 LG 的复合多糖气凝胶在所有应变区间均表现出更高的应力水平。其中，MC-0.4wt% LG 和 MC-0.5wt% LG 气凝胶的应力表现尤为突出，显示出更好的抗压能力。

杨氏模量是衡量材料在弹性变形过程中单位截面积应力-应变关系（σ/ε）的重要参数[43]。由图 8B 可知，单一 MC 气凝胶的杨氏模量为 0.0288 MPa。随着 LG 浓度的增加，复合多糖气凝胶的杨氏模量均呈现浓度依赖性增加，具体表现为从 0.1wt% 的 0.0982 MPa 增加至 0.5wt% 的 0.3084 MPa。此外，与单一 MC 气凝胶相比，图 8C 和图 8D 中复合多糖气凝胶的屈服强度和抗压强度也得到显著提高，当 LG 含量增加到 0.5wt%，复合多糖气凝胶的屈服强度和抗压强度分别达到最高值 0.0724 MPa 和 0.1748 MPa。上述结果表明，LG 的引入通过增强分子间相互作用，构建了更致密的三维网络结构。类似地，Li 等[44] 发现，单宁酸能在壳聚糖-明胶复合体系中通过增强分子间相互作用，形成更稳定的交联网络，从而使该体系的杨氏模量、屈服强度和抗压强度分别显著提高至 330.67 kPa、25.04 kPa 和 115.78 kPa。总体而言，0.4wt% LG 的添加量在提升气凝胶机械性能和保持结构均匀性之间实现了最佳平衡，这一发现为开发高性能气凝胶材料提供了重要参考。

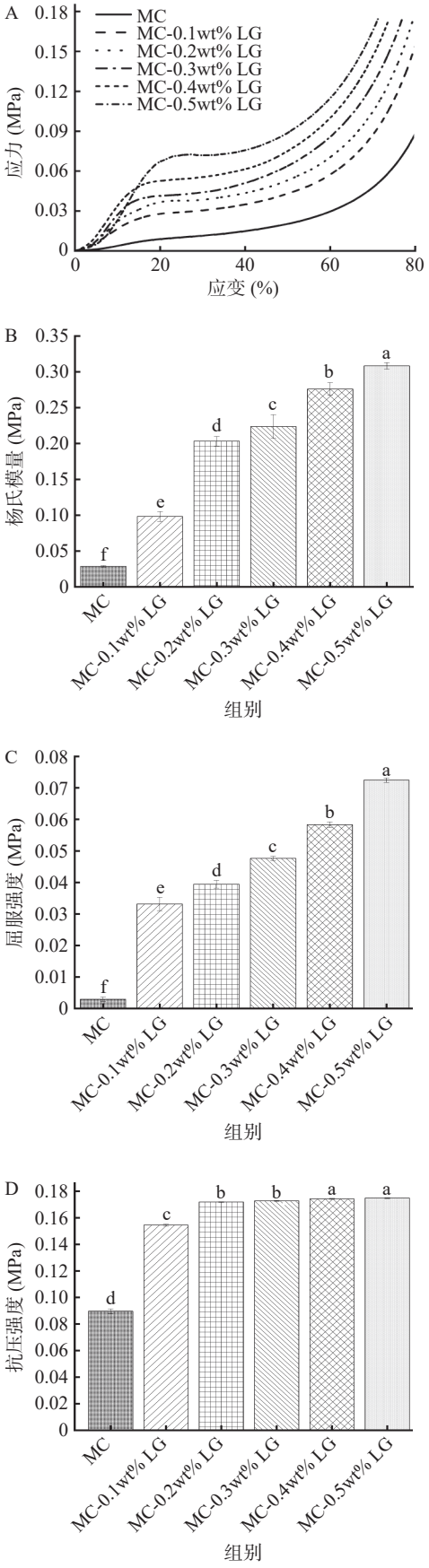


图 8 含有不同浓度 LG 的 MC-LG 复合多糖气凝胶的应力-应变曲线（A）、杨氏模量（B）、屈服强度（C）和抗压强度（D）

Fig. 8 Stress strain curve (A), Young's modulus (B), yield strength (C) and compressive strength (D) of MC-LG complex polysaccharide aerogels with different concentrations of LG

注：同一柱状图中的不同字母表示显著差异（$P<0.05$）。

2.10　基于泡沫模板法的 MC-LG 复合多糖气凝胶的形成机理探究

基于上述实验研究结果，图 9 系统阐述了基于泡沫模板法的 MC 气凝胶和 MC-LG 复合多糖气凝胶形成机理。整体而言，气凝胶的形成经历了从复合多糖水溶液到水泡沫，最终到气凝胶的转变过程，其中复合多糖水溶液和水泡沫的性质直接决定了最终气凝胶的性能表现。研究表明，纯 MC 溶液均质充气的泡沫尺寸分布均匀性差，导致 MC 气凝胶孔隙较大。LG 的加入后显著提升了泡沫体系的稳定性并优化了孔隙结构的均匀性。在均质充气过程中，MC 分子延伸并附着在空气-水界面上以产生气泡。同时，LG 通过氢键与 MC 相互作用，在气泡周围形成一层内聚膜，该膜使气泡能够抵抗应力下的变形或破裂，从而保持泡沫结构的完整性[21]。在后续冷冻干燥过程中稳定的泡沫结构被完整保留，形成了气凝胶的多孔结构[17]。此外，LG 的加入还通过增强分子间作用力显著提升了 MC-LG 复合多糖气凝胶的机械性能。

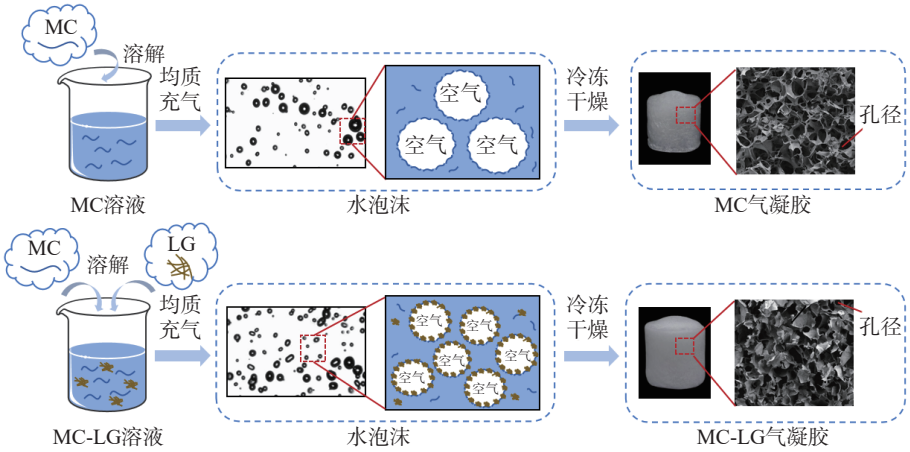


图 9　使用 MC 和 LG 通过泡沫模板法制备的气凝胶的示意图

Fig.9　Schematic diagram of aerogel prepared by foam template method using MC and LG

3　结论

本研究成功采用泡沫模板法制备了 MC-LG 复合多糖气凝胶，系统探讨了 LG 浓度对复合多糖气凝胶孔隙结构与机械性能的调控规律。结果表明，与单一 MC 气凝胶相比，复合多糖气凝胶的各项性能均得到显著改善。其中，MC-0.4wt% LG 复合多糖气凝胶表现出最佳的气泡稳定性和均匀致密的多孔网络结构，这一结构特性归因于 MC 与 LG 分子间的氢键相互作用。机械性能分析结果表明，0.4wt% LG 的加入显著提升了复合多糖气凝胶的压缩应力和抗压性能。该研究阐明了多糖组分间的协同作用，改善了单一 MC 气凝胶的孔隙结构和机械性能，为高性能多糖基气凝胶材料在食品和生物医药等领域的应用提供了理论依据和技术支持。然而，本研究尚未系统评估复合多糖气凝胶在复杂环境下的长期稳定性。因此，后续研究可以进一步探索复合多糖气凝胶在不同应用场景下的性能表现，并结合应用需求优化制备工艺，以期推动其在食品和生物医药等领域的实际应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 杨景雯. 纳米银活性气凝胶垫的制备及其在牛肉保鲜中的应用[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2022. [YANG Jingwen. Preparation of nano-silver active aerogel pads and their application in beef preservation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.]

[2] DOGENSKI M, NAVARRO-DÍAZ H J, de OLIVEIRA J V, et al. Properties of starch-based aerogels incorporated with agar or microcrystalline cellulose[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106033.

[3] RAFIEIAN F, DUFRESNE A, ASKARI G, et al. Aerogels as novel ingredients: Production, properties and applications in medical, food and environmental sectors[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 687: 133410.

[4] PANG Kai, XIA Yuxing, LIU Xiaoting, et al. Dome-celled aerogels with ultrahigh-temperature superelasticity over 2273 K[J]. Science, 2025, 389(6757): 290−294.

[5] 鲍玉格，王启明，冉娅琳，等. 生物聚合物油凝胶制备及其在食品领域的应用[J]. 食品与发酵工业，2025, 51(8): 351−358. [BAO Yuge, WANG Qiming, RAN Yalin, et al. Preparation of biopolymer oil gels and their applications in the food industry[J]. Food and Fermentation Industry, 2025, 51(8): 351−358.]

[6] ZHU Yong, LI Hailun, PENG Can, et al. Application of protein/polysaccharide aerogels in drug delivery system: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 247: 125727.

[7] HAO Liang, LI Yan, GONG Ping, et al. Material, process and business development for 3D chocolate printing[M]//Fundamentals of 3D food printing and applications. New York: Academic Press, 2019: 207−255.

[8] WU Yingmei, SUN Shuaihao, LI Xin, et al. Effect of gel composition interaction on rheological, physicochemical and textural properties of methyl cellulose oleogels and lard replacement in ham

sausage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135902.
[9] NIU Siyu, LIU Chengsheng, SUN Ao, et al. Preparation and characterization of thermosensitive phase-transition hydrogel based on decanoic acid-modified chitosan and methyl cellulose for wound healing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 308: 142725.
[10] 王谖阳, 王飞杰, 马淑凤, 等. 多糖基气凝胶食品包装的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 340−349. [WANG Shunyang, WANG Feijie, MA Shufeng, et al. Research progress on polysaccharide-based aerogel food packaging[J]. Food Science, 2023, 44(19): 340−349.]
[11] ZHANG Ke, LI Zhihua, ZHAO Wanying, et al. Aerogel colorimetric label sensors based on carboxymethyl cellulose/sodium alginate with black goji anthocyanin for monitoring fish freshness [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 265: 130466.
[12] WU Weina, WU Yingying, LIN Yang, et al. Facile fabrication of multifunctional *Citrus* pectin aerogel fortified with cellulose nanofiber as controlled packaging of edible fungi[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131763.
[13] WANG Yong, LI Dong, WANG Lijun, et al. Effects of drying methods on the functional properties of flaxseed gum powders [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(1): 128−133.
[14] JIANG Youyou, REDDY C K, HUANG Kehao, et al. Hydrocolloidal properties of flaxseed gum/konjac glucomannan compound gel[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 1156−1163.
[15] CHEN Mengting, YANG Lifeng, WANG Jie, et al. Towards healthier surimi: Quality and nutritional benefits of flaxseed gum as a fat replacer in grass carp surimi gels[J]. Food Chemistry, 2025, 492: 145570.
[16] SUN Chang, WEI Zihao, XUE Changhu. Construction of foam-templated Antarctic krill oil oleogel based on pea protein fibril and ι-carrageenan[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 347: 122729.
[17] JIANG Qinbo, LI Peiyuan, JI Meiru, et al. Synergetic effects of water-soluble polysaccharides for intensifying performances of oleogels fabricated by oil-absorbing cryogels[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131357.
[18] JIANG Qinbo, DU Liyang, LI Shaoyang, et al. Polysaccharide-stabilized aqueous foams to fabricate highly oil-absorbing cryogels: Application and formation process for preparation of edible oleogels[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106901.
[19] SUET LI T, SULAIMAN R, RUKAYADI Y, et al. Effect of gum Arabic concentrations on foam properties, drying kinetics and physicochemical properties of foam mat drying of cantaloupe[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 116: 106492.
[20] ZHU Jingsong, QIAN Zhuojia, EID M, et al. Foaming and rheological properties of hydroxypropyl methylcellulose and welan gum composite system: The stabilizing mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106275.
[21] YU Ningxiang, WEI Zhiyuan, GAO Kaili, et al. Development of a novel foam-templated oleogel based on xanthan gum-modified *Torreya grandis* nut protein[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 309: 142869.
[22] WANG Zhaojun, ZHANG Lu, ZHANG Xiaomin, et al. Interfacial rheology and foaming properties of soy protein and hydrolysates under acid condition[J]. Food Biophysics, 2021, 16(4): 484−491.
[23] SALAHI M R, MOHEBBI M. Development of soy milk in the form of wet foam in the presences of whey protein concentrate and polysaccharides at different whipping temperatures: Study of physical, rheological and microstructural properties[J]. LWT, 2021, 137: 110444.
[24] KUBBUTAT P, KULOZIK U. Interactions of sugar alcohol, di-saccharides and polysaccharides with polysorbate 80 as surfactant in the stabilization of foams[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 616: 126349.
[25] DAI Hongjie, LV Tianyi, DAI Difei, et al. Preparation and physicochemical properties of nanocellulose lightweight porous materials: The regulating effect of gelatin[J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136497.
[26] WANG Nan, ZHENG Dongyang, HE Jialu, et al. Preparation and characterization of a thymol nanoemulsion-loaded multifunctional sustained-release corn straw cellulose nanocrystal/acetylated starch-based aerogel and its application in chilled meat preservation[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122758.
[27] ZHAO Wanjun, WEI Zihao, XUE Changhu, et al. Development of food-grade oleogel via the aerogel-templated method: Oxidation stability, astaxanthin delivery and emulsifying application[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108058.
[28] CHEN Kailun, ZHANG Hui. Alginate/pectin aerogel microspheres for controlled release of proanthocyanidins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136: 936−943.
[29] WU Yuan, LAN Yutian, GAN Tian, et al. Ultrasound-assisted freezing for the preparation of aerogel-based intelligent packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 158: 110534.
[30] LI Ling, ZHOU Chaomei, XU Yongju, et al. An intelligent biomass aerogel label loaded with anthocyanin from wasted peanut seed coat for monitoring chilled chicken freshness[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110731.
[31] ZHENG Jiabao, GAO Qing, TANG Chuanhe, et al. Heteroprotein complex formation of soy protein isolate and lactoferrin: Thermodynamic formation mechanism and morphologic structure [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105415.
[32] ZHANG Handan, YE Jiarui, SHI Yuexing, et al. Sodium alginate-konjac glucomannan-based aerogel preservation pad with the quercetin-stabilized Pickering emulsion: Preparation, characterization and application in beef preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172: 112121.
[33] KANG Wendong, YAN Long, DING Faxing, et al. Effect of polysaccharide polymers on the surface and foam properties of aqueous film-forming foam[J]. Colloid and Interface Science Communications, 2021, 45: 100540.
[34] WANG Hailin, RAO Pingfan, XIE Zongding, et al. Exploring the interaction between *Lycium barbarum* polysaccharide and gelatin: Insights into gelation behaviors, water mobility, and structural changes[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109415.
[35] ZHENG Shiwei, WANG Dangfeng, REN Likun, et al. A new paradigm for smart packaging: A dual-channel freshness monitoring platform based on aerogels of sodium alginate-anthocyanin complex with high colorimetric sensitivity and stability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131485.
[36] WEN Xinru, ZHEN Yixiang, YANG Ruizhi, et al. Anthocyanin-functionalized hydrophobic cellulose aerogels as sensitive colorimetric indicators to monitor shrimp freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 316: 144604.
[37] WANG Yun, MCCLEMENTS D J, PENG Xinwen, et al.

Effects of crosslinking agents on properties of starch-based intelligent labels for food freshness detection[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261: 129822.

[38] LI Binghang, CHEN Miaomiao, WU Yuan, et al. Effects of glycerol and PVA on gelatin/gum Arabic aerogels: Microstructure, mechanical properties, and applications for food monitoring[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109515.

[39] ZHANG Ke, LI Zhihua, KHAN S, et al. An intelligent aerogel composed of anthocyanins, natural fiber, carboxymethyl cellulose, and sodium alginate for monitoring fish freshness[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 297: 138198.

[40] SOHRABI N, ALMASI H, MORADI M. Controlled porosity intelligent aerogel based on chitosan nanofiber, anthocyanins and starch nanoparticles: Preparation, characterization and application in monitoring food spoilage[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110261.

[41] MIAO Wenbo, ZHOU Weijie, MCCLEMENTS D J, et al. Oleogels derived from modified starch-gelatin-tannic acid aerogel templates: Fabrication, characterization and application[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 162: 110903.

[42] SHAN Guancheng, XU Zejian, JIANG Lianzhou, et al. Fabrication and characterization of glycerin-plasticized soy protein amyloid fibril scaffolds by unidirectional freeze casting method[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109400.

[43] ZHANG Lixian, GE Zhenzhen, ZHANG Lihua, et al. Dual stabilization, phase inversion and mechanical properties of a novel bigels system based on myofibrillar protein hydrogel and glycerol monostearate oleogel[J]. Journal of Food Engineering, 2025, 393: 112500.

[44] LI Jiawen, ZHAO Shunan, ZHU Qinyi, et al. Characterization of chitosan-gelatin cryogel templates developed by chemical crosslinking and oxidation resistance of *Camellia* oil cryogel-templated oleogels[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 315: 120971.