

凝胶多糖基复合材料的构建及其在食品领域的应用研究进展

王星燕, 胡文梅, 徐 薇, 李宇亭, 马廷鸿, 陈 山

Research Progress on Synthetic Method of Curdlan Composite and Its Application in Food Industry

WANG Xingyan, HU Wenmei, XU Wei, LI Yuting, MA Tinghong, and CHEN Shan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

热凝胶的结构、功能、改性方法及在食品领域的应用进展

The Structure, Function, Modification Methods and Application in Food Field of Curdlan

食品工业科技. 2023, 44(20): 475-482 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120186>

聚多巴胺功能化复合材料的研究及在食品安全检测中的应用

Research on Polydopamine Functionalized Composite and Its Application in Food Safety Detection

食品工业科技. 2020, 41(14): 344-348 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.14.055>

纤维素纳米纤维复合膜的制备及其作为食品包装材料的优异性能研究进展

Research Progress on Preparation of Composite Film Based on Cellulose Nanofibrils and Its Excellent Properties as Food Packaging Materials

食品工业科技. 2024, 45(17): 436-444 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090299>

魔芋葡甘聚糖/可得然胶复合气凝胶的生物降解性研究

Study on the Biodegradability of Konjac Glucomannan/Curdlan Composite Aerogel

食品工业科技. 2023, 44(7): 143-151 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060095>

纳米纤维素的制备及其在食品包装材料中应用的研究进展

Research Progress of Fabrication of Nano-Cellulose and Its Application in Food Packaging Materials

食品工业科技. 2022, 43(3): 430-437 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020094>

MIL-88A功能化聚氨酯复合材料脱除海带多糖中砷的研究

Removal of Arsenic from Kelp Polysaccharide by MIL-88A Functionalized Polyurethane

食品工业科技. 2022, 43(24): 54-61 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030073>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王星燕, 胡文梅, 徐薇, 等. 凝胶多糖基复合材料的构建及其在食品领域的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 441-449. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070054

WANG Xingyan, HU Wenmei, XU Wei, et al. Research Progress on Synthetic Method of Curdlan Composite and Its Application in Food Industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 441-449. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070054

· 专题综述 ·

凝胶多糖基复合材料的构建及其在食品领域的应用研究进展

王星燕, 胡文梅, 徐薇, 李宇亭, 马廷鸿, 陈山*
(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 凝胶多糖是来源于微生物的一种天然三螺旋多糖, 因其安全性和独特的链构象转变, 受到了食品领域的广泛关注。与其他天然三螺旋多糖相比, 凝胶多糖多羟基、无支链的线性结构, 使其更适合与其他功能性物质形成复合材料。通过不同方法构建的凝胶多糖基复合材料作为一种安全、高效、多功能的食品添加剂, 在食品领域的研究逐渐成为热点。本文通过综述凝胶多糖的基本结构与特性, 论述凝胶多糖基复合材料的物理交联、化学交联、双网络交联、自组装作用等构建方法, 同时讨论了构建方法与其结构、性能和应用之间的关联, 并概述凝胶多糖基复合材料在食品领域的应用现状, 最后提出该研究领域存在的问题及未来研究方向, 以期凝胶多糖基复合材料在食品领域的应用提供重要参考。

关键词: 凝胶多糖, 复合材料, 构建方法, 功能特性, 食品应用

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)10-0441-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070054

本文网刊:



Research Progress on Synthetic Method of Curdlan Composite and Its Application in Food Industry

WANG Xingyan, HU Wenmei, XU Wei, LI Yuting, MA Tinghong, CHEN Shan*

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Curdlan, a triple-helical polysaccharide, produced by microorganisms, is received extensive attention in the food industry owing to its safety and unique chain conformational transformation capability. Compared with other natural triple-helical polysaccharides, curdlan exhibits superior suitability for forming composites due to its abundant hydroxyl groups and unbranched structure. Curdlan-based composite materials constructed using different methods are safe, efficient, and multifunctional food additives, rendering them a hot topic in food research. Herein, the basic structure and features of curdlans are systematically analyzed in this review. Additionally, different synthesis methods for curdlan-based composite materials are described, including physical crosslinking, chemical crosslinking, double-network crosslinking, and self-assembly. Furthermore, relationships between the synthesis methods of curdlan-based composite materials, their structural properties, and applications in the food industry are examined. Finally, the application status of these materials is summarized, existing challenges are presented, and future research directions for their use in the food industry are suggested. This review provides important references and serves as a guide for the applications of curdlan-based composite materials in the food industry.

Key words: curdlan; composite materials; synthetic method; functional properties; food applications

收稿日期: 2024-07-05

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金 (32260561)。

作者简介: 王星燕 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 多糖结构及其功能化应用, E-mail: wxy799265126@163.com。

* 通信作者: 陈山 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 糖类药物制备及其构效关系, E-mail: chenshan@gxu.edu.cn。

凝胶多糖(curdlan, CUR)是从粪肠球菌等微生物中被发现的一种线性 β -1,3-葡聚糖,由300~500个葡萄糖单元组成,具有独特的三螺旋结构^[1-3]。虽然凝胶多糖的水溶性差,但这一特性并未限制其在食品工业中的应用^[4]。相反,凝胶多糖多羟基、无支链的线性结构和独特的链构象转变以及较优的凝胶特性、稳定性、成膜性、生物活性等功能性特性,使其成为构建复合材料的理想原料^[5-7]。近年来,利用凝胶多糖构建的复合材料逐渐应用于食品领域的各个方面,如鱼糜制品^[8]、肉肠类^[9]、糖果^[10]、面粉制品^[11]等,以达到改善食品质地、增加稳定性、改善口感、延长保质期等目的。通过不同的构建方法(如物理交联、化学交联、双网络交联、自组装作用等),凝胶多糖基复合材料不仅改善了凝胶多糖水溶性差,还利用复合物间的相互作用,赋予了材料更好的功能特性,包括胶凝性、持水性、稳定性及机械性能等^[4,12-13]。在食品领域中,通过利用以上特性不仅能够改善食品的质地和稳定性,还能增强食品的营养价值和延长保质期,从而在食品加工和产品创新中扮演着至关重要的角色。

由此可见,深入研究并理解构建方法的基本原理、优劣性以及适用的场景等,对进一步优化和开发凝胶多糖基复合材料在食品领域的应用至关重要。然而,目前关于凝胶多糖的综述主要集中在其构象、生物合成、功能特性及其衍生物等方面^[2,14-16],对其复合材料的综述性文章较少,尤其是构建凝胶多糖基复合材料的不同方法对比分析,以及不同构建方法适合的食品应用场合。因此,本综述在总结凝胶多糖结构层次、构象转变及基本特性的基础上,主要讨论常见凝胶多糖基复合材料构建方法、特性以及与应用之间的关联,并对其在食品领域的应用现状进行了综述,同时探讨了其在未来应用中的发展趋势与潜力。

1 凝胶多糖的结构与功能特性

1.1 凝胶多糖的结构

凝胶多糖由多个葡萄糖单元组成高分子聚合物,其中,一级结构由1,3- β -葡萄糖的重复单元组成,呈现出线性、非支链的结构^[17]。这种结构能被免疫细胞如巨噬细胞特异性识别,触发免疫反应^[18]。研究发现,在特定溶液中(如碱性溶液),这种线性结构可以转变为无规卷曲状构象,而不改变其一级结构^[19-20]。二级结构是由一条 β -1,3-葡聚糖链与垂直于三螺旋轴线的另外两条链通过C₂上的羟基形成链间氢键构成^[21-22]。三级结构由主链葡萄糖残基C₄和C₆上羟基的分子内氢键形成,并由葡萄糖残基C₂上疏水羟基的链间氢键稳定^[23-24],且根据制备条件的不同,凝胶多糖分子在空间上会形成不同的晶体形态(如晶型I由含有大量水分的右手6/1单螺旋组成,晶型II和III则是由右手6/1螺旋组成的三螺旋结构)^[25]。四级结构是凝胶多糖分子通过非共价作用的三螺旋聚集形成的超分子结构,赋予凝胶多糖三

维网络结构和独特的理化特性,从而广泛应用于食品、医药、组织工程等领域^[14,26]。

与其他 β -1,3葡聚糖相比,凝胶多糖是唯一没有任何支链,且具有单螺旋、三螺旋和无规螺旋三种构象的多糖^[17,22]。这三种构象会因为一些诱导条件(pH诱导、温度诱导、二甲基亚砷诱导)的改变,会以凝胶多糖分子间及分子内氢键被破坏或形成新氢键的方式发生构象转变而不涉及一级结构的变化^[27-30]。利用这些诱导条件下凝胶多糖的构象转变,可以高效调控其体系中二、三、四级结构的占比,进而人为控制复合材料的构建及部分生物活性和功能特征。

此外,高水分挤压是植物蛋白纤维肉制造的有效方法和途径,在挤压的过程中,凝胶多糖也会发生由单链到三螺旋链的构象转变^[31-32]。此过程包括原始凝胶、过渡态和再生凝胶三个阶段,再生凝胶呈现更高结晶度和更紧密交联的网络,该技术在高温下进行,提高了纤维肉的质量和能源效率,是食品工业的潜在研究方向^[33-34]。

1.2 凝胶多糖的功能特性

1.2.1 凝胶特性 凝胶多糖在温度诱导下,能够形成低强度的热可逆凝胶和高强度的热不可逆凝胶,凝胶特性主要取决于其最终加热温度,即当水溶液的温度升高到55℃然后冷却时,形成热可逆凝胶,而当溶液在80℃左右并随后冷却时,形成热不可逆凝胶^[35]。Jiang等^[36]改变最终加热温度发现凝胶多糖热可逆凝胶和热不可逆凝胶均有效地提高了乳化香肠的胶凝特性。此外,适当浓度的凝胶多糖和诱导方式可以改善其凝胶特性,促进成分优化,改善复合食品的性能^[37]。例如,含有浓度为0.6%凝胶多糖的肌原纤维蛋白复合凝胶具有紧密有序的网络结构,且其能够将水分子保留在网络结构中,从而具有优异的持水性,且凝胶的凝胶强度和弹性最高^[38]。通过利用凝胶多糖的凝胶特性构建其复合材料,进一步提高功能因子的凝胶特性,拓展其应用范围,为食品工业创造更多可能性。

1.2.2 稳定性 凝胶多糖在加热和冻融循环过程中均展现出独特的稳定性。当温度升高时,凝胶多糖分子间的氢键相互作用增强,促使它们形成稳定的三螺旋结构^[26]。在面粉产品,如面包、蛋糕等的制作过程中,凝胶多糖能够在面团形成的同时,通过其三螺旋结构的稳定作用,帮助维持产品的形状和质地^[11]。另外,冻融循环对面团的麸质结构有破坏作用,导致其水合性质较差,面团会形成较多冰晶并在循环过程中再结晶^[39]。而凝胶多糖出色的稳定性,可以在冷冻过程中限制结合水向可冻结水的转化,抑制冷冻面团中水分的迁移,有效缓解冷冻面团在储存过程中的质量劣化^[26,40-41]。此外,凝胶多糖也会以凝胶小颗粒的形式均匀分布冷冻食品中,可以增强其耐冷冻能力,提高其稳定性^[42]。

1.2.3 成膜性 凝胶多糖具有良好的成膜性,能够在食品表面形成均匀的膜层,保护食品免受外界环境的影响,延长其保质期,被广泛研究并应用于食品包装领域。相比于单一的凝胶多糖膜,其含有功能因子的复合薄膜更展现出抗菌和抗氧化能力,延长食品保质期。例如,具有卓越机械强度的凝胶多糖/细菌纤维素/肉桂精油复合薄膜,不仅抑制腐败微生物的生长,同时保持肉表面的视觉吸引力并增强了其感官特性^[43-44]。凝胶多糖作为一种生物可降解的多糖,其薄膜在环境友好性方面具有优势,减少了塑料包装对环境的影响,这些优势使得凝胶多糖在食品包装中有着广泛的应用前景。

1.2.4 生物活性 凝胶多糖作为天然活性物质,由于不易被胃肠道中的酶消化,具有防止因高脂肪饮食引起的一系列疾病的生物活性^[45]。例如,急性补充凝胶多糖可防止高脂肪饮食诱导的肠道微生物组成变化,而长期补充凝胶多糖可防止高脂肪饮食引起的认知能力下降^[46]。此外,凝胶多糖还可防止高脂肪饮食引起的结肠通透性、高内毒素血症和结肠炎症的异常,同样地,在前额叶皮层和海马体中,凝胶多糖减轻了高脂肪饮食引起的小胶质细胞增生、神经炎症和突触损伤^[46-47]。随着凝胶多糖基复合材料的研究不断深入,期待未来能够通过食品的摄入,实现其在调节肠道微生态、保护认知功能、预防代谢性疾病等方面的广泛应用。

2 凝胶多糖基复合材料的构建方法

基于凝胶多糖结构、构象转变及其功能特性,通过与其他高分子材料(如蛋白质材料、聚乙烯醇(PVA)、聚谷氨酸(PGA)等)或功能性成分(如药物分子、生物活性分子或纳米材料等)构建的凝胶多糖基复合材料,通过互补和协同效应实现性能的显著提升和功能的多样化。本节主要对凝胶多糖基复合材料不同构建方法(如物理交联、化学交联、双网络交联、自组装作用、离子交联、可重交联)的基本原理、影响因素、对复合物特性的影响以及优劣势进行归纳。

2.1 物理交联

物理交联的复合材料是凝胶多糖在二级结构的基础上通过分子间氢键、疏水相互作用、离子键等非共价相互作用,主要与氨基酸聚合物形成杂化复合物。通过物理交联的凝胶多糖基复合材料不仅具有更强的凝胶特性、持水能力和稳定性等特性,同时其生物学功能和生物利用度也得到了提升。例如,凝胶多糖与大豆分离蛋白通过氢键和疏水作用形成稳定的复合凝胶(图 1),随着凝胶多糖浓度增加(0.1%~1.6%),复合凝胶的凝胶强度和持水能力分别增加了 39.57 g、21.46%,且储能模量(G')和损耗模量(G'')均呈现增长的趋势,显著提高了热诱导大豆分离蛋白凝胶的凝胶特性、持水能力和稳定性^[48]。Heo 等^[49]研究表明凝胶多糖和聚谷氨酸(PGA)利用氢键进行物

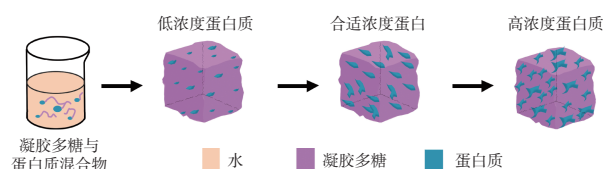


图 1 凝胶多糖与不同浓度大豆分离蛋白的物理交联示意图^[53]

Fig.1 Physical cross-linking of curdlan with potato protein isolate at different concentrations^[53]

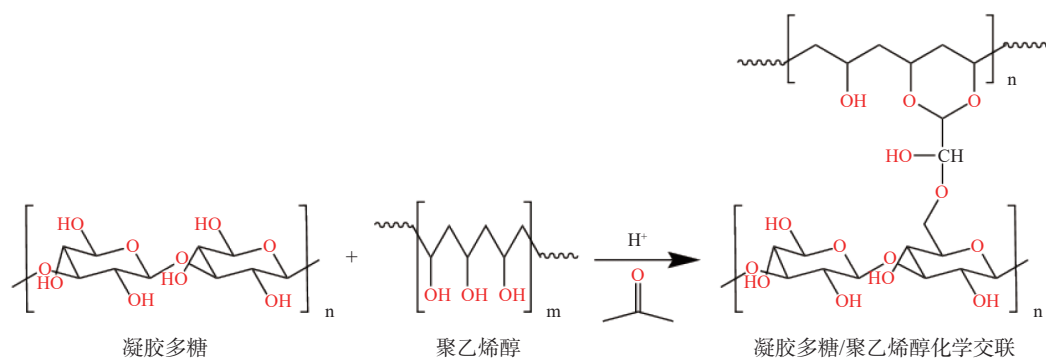
理交联,形成的纳米粒子表现出更致密和均匀的微观结构,这有助于形成更紧凑的凝胶网络,从而增强凝胶的稳定性和持水能力。此外,Xu 等^[50]发现,在低盐条件下,凝胶多糖与肌原纤维蛋白通过复杂的分子相互作用,如氢键、疏水作用和离子键,阻碍蛋白质降解为小分子肽和氨基酸,显著降低其体外消化率,从而提高其生物利用度。

然而,在物理交联的过程中,多种因素(如温度、混合比例、pH、离子强度等)对凝胶多糖基复合材料的凝胶特性起着关键作用,尤其是温度的影响^[50-54]。随着温度的升高,凝胶多糖复合水凝胶的分子间氢键断裂,导致三螺旋结构逐渐转变为无规卷曲,使原本紧密的聚集体开始解离,网络结构被破坏,从而降低了其机械强度,而当样品在冷却时达到临界温度时,聚合物网络中的结点会迅速形成,赋予了水凝胶独特的热响应性质^[10]。利用此性质,凝胶多糖基复合材料可通过温度控制调节其机械性能,适应食品加工和包装需求。同时,也会因为其刺激响应性较强而难以精确控制其三螺旋与单链之间的独特构象转变^[22],使这种方法制备的凝胶多糖基复合材料在一定程度上受到结构的限制。

综上,物理交联优化了凝胶多糖基复合材料的凝胶特性和稳定性。而且,通过与生物活性分子的物理交联,其生物利用度也得到了提升。物理交联具有操作简便、成本效益高和生物相容性好等优势,但它可能不适用于那些需要精细控制复合材料微观结构的应用场景。在实际生产中,为了克服这些结构上的限制并拓展其在食品行业的应用,需要进行更深入的研究和开发。

2.2 化学交联

化学交联是凝胶多糖与生物大分子物质(如多核苷酸)、交联剂等发生分子间的共价交联而形成凝胶多糖基复合材料。化学交联赋予了高分子复合材料以优异的稳定性和力学性能^[55-56]。例如,凝胶多糖的 β -1,3-葡聚糖结构能够与特定多核苷酸发生分子间交联,即两条多糖链和一条多核苷酸链通过两者间的分子交联形成稳定的三螺旋复合物,可用作各种功能性多核苷酸的载体,是生物技术领域的理想材料^[57-58]。Su 等^[59]研究发现以凝胶多糖与聚乙烯醇分子间交联的复合水凝胶可在 1 min 内迅速膨胀,且经过反复冻融处理后,仍能保持原有的机械强度,因

图2 凝胶多糖与聚乙烯醇的化学交联示意图^[59]Fig.2 Chemical cross-linking of curdlan with poly (vinyl alcohol)^[59]

而长期储存也不会导致其性能下降(图2)。化学交联形成的凝胶多糖复合水凝胶的热稳定性之所以更高,是因为其分子链间通过共价键紧密结合,提高了分子间的交联度,赋予了材料可拉伸性和形状恢复性,这为开发新型多糖基材料提供了可能^[60]。

在化学交联的凝胶多糖复合水凝胶中,网络结构的可扩展性在很大程度上决定了其膨胀和伸长特性,这主要归因于交联剂的有效交联能力及其亲水性^[61]。研究发现,三种不同长度的交联剂(乙二醇二缩水甘油醚、1,4-丁二醇二缩水甘油醚和1,6-己二醇二缩水甘油醚)与凝胶多糖分子间交联而构建的复合水凝胶均展现出良好的伸长性能,其伸长应变为原始长度的600%~900%^[62]。然而,化学交联凝胶多糖基复合材料因为对外加应力的耗散不足,在拉伸性能上可能存在局限^[63],这需要在未来的研究中进一步探索。

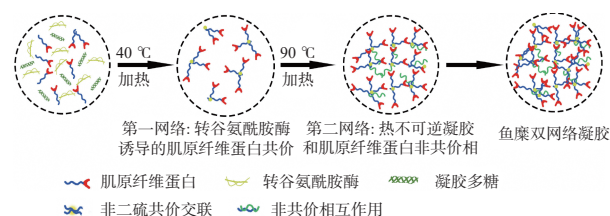
综上,化学交联构建的凝胶多糖基复合材料的网络结构在交联后是稳定且不可逆的,但引入的交联剂或残留物可能具有一定毒性,导致凝胶多糖基复合材料在食品领域的应用还有局限性。因此,在选择适合食品领域的凝胶多糖基复合材料时,具备良好的理化特性和相对安全性的交联剂显得尤为重要。

2.3 双网络交联

双网络交联即构建具有两种互相贯穿但不同特性的网络结构,第一网络为高度交联的刚性网络,第二网络为低度交联的柔性网络,这种结构可以提高材料的机械强度,同时保持柔韧性^[64]。由于凝胶多糖独特的成凝胶性,可以通过控制加热温度形成具有刚性的三螺旋网络,在此基础上,通过物理或化学手段引入第二网络。在双网络交联中,第一网络作为牺牲键,在受到外力时通过共价键的断裂来吸收能量,从而增强材料的韧性和自愈合能力^[65-66]。Zhu等^[8]通过转谷氨酰胺酶共价交联作用和凝胶多糖与肌原纤维蛋白的非共价相互作用获得双网络交联的鱼糜凝胶(图3),形成有序的网络结构,从而提高了复合凝胶的持水性和流变特性^[67]。

综上,双网络交联的凝胶多糖复合材料因主要通过共价键进行结合,具有较高的热稳定性,适合于

需要在高温条件下进行处理的食物应用场景。但此方法合成存在形成时间长,操作复杂,还需要大量的第二单体浸泡液等不足^[68],在食品领域的研究方面,仍需进一步探索解决这些挑战的方法,包括简化制备工艺、提高成本效益以及优化复合凝胶的性能等,以实现凝胶多糖基复合材料在食品领域的更广泛应用。

图3 双网络鱼糜凝胶构建示意图^[8]Fig.3 Double network strategies of surimi gels^[8]

2.4 自组合作用

自组合作用构建的复合材料是基于凝胶多糖三螺旋的自组装特性,在特定条件下将功能性分子(如药物分子、生物活性分子或纳米材料等)通过物理组装和化学键合作用与凝胶多糖进行结合,以改善或强化原有物质的某些缺点或优势^[69-70]。此自组合作用以螺旋链构象为模板诱导自组装构建的凝胶多糖基功能复合材料(图4),不仅为药物的稳态化提供了新的思路,三螺旋的构象特殊性也为提升药物的递送创造了条件。例如,Bao等^[71]研究发现凝胶多糖聚合物通过非共价相互作用自组装形成的纳米粒子能够高效地包裹小干扰RNA,形成具有肿瘤靶向能力的复合材料。此外,凝胶多糖通过自组装形成具有特定功能的纳米颗粒,不仅增强其作为递送载体的性能,还为生物活性分子的高效输送提供了一种新的方式。水溶液中,季铵化的凝胶多糖显示出阳离子性质,在其自组装过程中与带负电的物质通过静电相互作用形成复合纳米颗粒,这些纳米颗粒可作为生物相容性载体,用于输送各种生物活性分子^[42]。

综上,相较于其他方法构建的复合材料,利用凝胶多糖自组合作用构建的凝胶多糖纳米基复合材料具有更优的精确性,但所需要的技术要求和工业生产的经济要求较高。此外,这些纳米基复合材料在储存或应用过程中易发生聚集,这可能会影响其性能和稳

定性。因此,通过自组装作用构建的凝胶多糖纳米基复合材料在食品领域的应用仍需进一步探索。

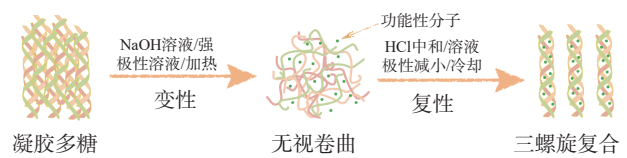


图 4 凝胶多糖的三螺旋自组装示意图
Fig.4 Triple helix self-assembly of curdlan

2.5 其他构建方法

2.5.1 离子交联 离子交联是指含有一定数量离子键侧基的线性或支化有机高分子链,可以通过离子键的相互作用而发生交联。对于中性的凝胶多糖,需要结合物理交联或化学交联等进行离子交联。例如,利用金属离子(如钙离子 Ca^{2+})与改性的凝胶多糖羧基结合形成离子交联复合材料,增强其网络间的相互作用,从而形成更稳定的结构^[72]。但是,由于其对溶液成分的高敏感性,通过离子交联法构建的凝胶多糖基复合材料,会受 pH 和离子强度影响而不稳定^[73]。

2.5.2 可重交联 可重交联是基于氢键和疏水作用的自愈合聚合物网络,通过疏水缔合、离子配位键和氢键来实现再交联的不可逆凝胶的过程。可重交联复合凝胶首先通过物理交联形成凝胶,当复合凝胶受损后主要通过可逆共价键或非共价键的相互作用实现重新交联或自我修复,以恢复其结构和功能^[74-75]。例如,凝胶多糖和疏水缔合聚合物(甲基丙烯酸硬脂酯、丙烯酰胺和丙烯酸的聚合物)构建的复合水凝胶在受损后,凝胶粒子可以通过疏水作用、离子配位键和氢键在高温下重新交联成不可逆凝胶结构,并具有更优异的凝胶强度和耐热性^[76](图 5)。然而,温度、可再交联颗粒浓度以及引入凝胶或离子等因素都会影响凝胶多糖复合凝胶的再交联时间、流变强度和热稳定性^[76]。

综上所述,凝胶多糖基复合材料的不同构建方法对其结构及特性的影响都有其独特的优势和局限性,选择合适的方法构建凝胶多糖基复合材料对于扩

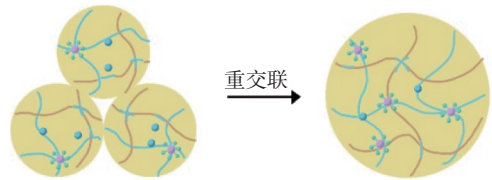


图 5 凝胶多糖基复合材料的可重交联^[76]
Fig.5 Re-crosslinking of curdlan composites^[76]

展凝胶多糖在食品领域的应用价值及适用性具有重要意义。例如,物理交联法适合大规模生产和改善食品质地,化学交联法更侧重于通过共价键改变材料的内部结构,双网络交联形成的两种网络结构使材料的稳定性和力学性能较强,基于纳米尺度的三螺旋自组装作用虽然能够提供独特的性质,但技术要求较高等。如表 1 所示,通过不同的构建方法,凝胶多糖基复合材料在食品领域展现出广泛的应用潜力。

3 凝胶多糖基复合材料在食品领域应用

随着时代发展、社会需求与疾病谱的改变,大健康逐渐被人们重视,健康、安全、可溯源的食品越来越成为人们的追求。目前,凝胶多糖由于具有安全性、高效地调控性以及凝胶特性、稳定性、成膜性、生物活性等,被广泛利用为复合材料应用于改善食品质构、开发低脂食品、功能性食品及食品载体、食品包装材料等方面。

3.1 改善食品质构

近年来,凝胶多糖基复合材料作为一种重要的改良剂,在增强食品凝胶特性和改善质构方面具有巨大潜力。其主要通过调节食品的韧性、黏度和流变性等,改善食品的口感、质地和稳定性,从而在食品质构方面具有广泛应用。例如,将凝胶多糖与转谷氨酰胺酶结合应用于鱼糜,不仅增强了其凝胶特性,尤其是在韧性方面的提升,还改善了新型水产调理食品的质量^[8]。凝胶多糖基复合材料的持水能力同样在食品质构改善中发挥着关键作用。它们能够限制水分子在冻融循环期间的迁移,减少冷冻食品品质的下降,这对于提升冷冻食品的口感和延长其保质期具有重要意义^[39,80]。此外,凝胶多糖与其他成分如结冷胶

表 1 凝胶多糖基复合材料构建方法的优劣势、主要性能改善及食品应用

Table 1 Advantages, disadvantages, main performance improvements and food applications of different construction methods of curdlan composites

构建方法	优势	劣势	性能改善	食品应用	参考文献
物理交联	复合操作简单、材料具有可逆性	复合过程中需要控制各成分的添加量	持水能力、凝胶强度、流变特性、热稳定性	改善食品质构、开发低脂食品、功能性食品、食品包装材料	[50,77-78]
化学交联	复合材料稳定、机械性能高	交联剂的选择具有难度、部分交联剂有毒性	持水能力、机械性能、	改善食品质构、食品包装材料	[61-62,79]
双网络交联	复合材料具有高韧性和强度	复合时间较长、操作复杂、成本较高	热稳定性;机械性能	改善食品质构、食品包装材料	[8,66]
自组装作用	复合材料具有高度有序的结构	操作技术要求较高、操作复杂、不易储存	机械性能、与功能因子复合的相应功能特性	功能性食品及食品载体	[70-71]
离子交联	复合材料耐受多种化学环境	复合过程复杂、稳定性受限(如高盐环境)	热稳定性、储存稳定性	改善食品质构	[72]
可重交联	复合材料具有自我修复功能	复合过程复杂、再交联过程难控制	凝胶强度、耐热性、承载能力	需自我修复能力的食品应用	[76]

和麦芽糖醇结合形成的杂化糖果凝胶,展现出更致密的微观结构和更佳的质地,这些特性不仅增强了糖果的咀嚼性,也满足了消费者对高品质食品的追求^[10]。综上,凝胶多糖基复合材料通过改善食品的质构特性,为食品的创新和品质提升提供了新的方向和可能性。

3.2 开发低脂食品

凝胶多糖基复合材料在开发低脂食品方面展现出显著的应用潜力,主要得益于其低热量和高纤维的特性,能够有效模拟脂肪的口感和质地。这些复合物不仅可作为低热量或无脂肪食品中的脂肪替代品,还能通过其触变特性,模仿调料、酱汁、乳制品和肉汁等低脂产品中的脂肪流变特性,为消费者提供相似的口感体验^[12,31]。例如,Zhang等^[81]利用凝胶多糖、乳清分离蛋白和玉米油制备的乳液微凝胶颗粒,能够在不牺牲感官接受度的前提下,替代高达40%的脂肪,用于生产低脂猪肉香肠。此外,Tan等^[82]构建的凝胶多糖乳液凝胶物理交联复合材料,在模拟猪肚脂肪和熟动物皮等动物脂肪方面取得了进展。Wang等^[83]研究表明,含有凝胶多糖的低脂肉面糊在物理化学和口服加工特性上与猪油肉面糊相似,为健康肉类生产提供了新途径。此外,通过创新的油包水油凝胶技术,结合蜂蜡和凝胶多糖,制造的低脂沙拉酱不仅稳定性高,还提供了与传统全脂产品相媲美的口感^[84]。综上,凝胶多糖基复合材料在低脂食品开发中的多功能性和有效性,为食品工业提供了创新的解决方案,以满足消费者对健康、美味和低热量食品的需求。

3.3 功能性食品及食品载体

凝胶多糖基复合材料在功能性食品及食品载体中的应用潜力显著,这主要得益于其独特的自组装作用对活性物质的有效负载与控制释放。在这些复合材料中,活性成分(例如抗氧化剂和抑菌剂)与凝胶多糖通过氢键和疏水作用相结合,并借助凝胶多糖的构象变化来调节这些活性成分的释放,进而在食品体系中实现其预定的生物活性。研究表明,凝胶多糖通过自组装作用与鞣花素复合后,不仅抗氧化活性得到增强,还能通过影响肠道微生物群的组成,如促进普雷沃茨菌(*Prevotella*)的增殖和抑制志贺氏菌(*Escherichia Shigella*)的生长,进而对肠道健康产生积极影响^[85]。此外,凝胶多糖本身具有一定的热稳定性和抗氧化活性,且与多酚物质(如姜黄素、绿原酸等)复合后具有更强的抗氧化活性,并促进产生短链脂肪酸,特别是丙酸和丁酸,显著改变了人体肠道微生物群的组成^[85]。Jiang等^[86]发现肌原纤维蛋白与凝胶多糖构建的复合材料在功能性食品中发挥多种作用,包括调节消化率、增强蛋白质结构稳定性和改善食品的质构特性。这些特性使得这种复合材料在开发新型功能性食品时具有潜在的应用价值。此外,官能团化的凝胶多糖与姜黄素络合的复合材料具有pH敏感

的缓释行为,显示出有效的载体递送的作用^[87],这为开发新型功能性食品提供了新途径。综上,凝胶多糖基复合材料在功能性食品及食品载体中的应用潜力巨大,它们不仅能够提升食品的营养价值和健康效益,还能作为安全有效的递送载体,为食品工业带来创新和突破。

3.4 食品包装材料

食品包装对于延长保质期、防止食品受微生物、挥发性有机化合物、水分和氧气影响至关重要^[88-89]。目前,凝胶多糖基复合材料不仅提供了一种环保的绿色保鲜技术,还具备改善食品保质期和质量等多重功能。例如,Zhou等^[90]开发了一种由凝胶多糖/细菌纤维素/肉桂精油结合的新型天然复合薄膜,具有良好的抗菌活性和抗氧化性,可有效抑制冷冻鸡在防腐期的细菌生长和脂质氧化,延长其保鲜期。另外,通过将凝胶多糖与二甲醛交联的明胶结合,制备出的复合薄膜在机械性能、紫外线阻隔以及水蒸气阻隔方面均显示出作为优质食用薄膜在食品包装中的潜力^[42]。同样地,壳聚糖/凝胶多糖复合涂层的研究表明,通过改善水蒸气、氧气和二氧化碳的渗透性以及提高透光率,使收获后水果和蔬菜的新鲜度保持方面具有显著效果^[91]。此外,Mohsin等^[89]证实黄原胶和凝胶多糖混合薄膜具有防潮性能,为可食用包装材料的开发提供了新思路。综上,凝胶多糖基复合材料在食品保鲜领域的应用不仅能够提供有效的微生物抑制和氧化保护,还能够通过改善薄膜的物理性能,增强食品包装的功能性和环保性,为食品保鲜技术的发展开辟了新的道路。

4 结论与展望

近年来,随着消费者对食品的安全性和健康性要求的提高,凝胶多糖基复合材料因其安全性和生物可降解性而成为食品科学研究的热点。本文通过总结凝胶多糖的结构特征、链构象转变及其基本特性,对比分析了不同方法构建的凝胶多糖基复合材料,包括物理交联、化学交联、双网络交联以及基于纳米尺度自组装作用等的原理、优势、局限性和性能提升。这些方法在改善凝胶特性、增强力学性能、优化表面化学性质等方面各有侧重。最后概述了目前凝胶多糖基复合材料在食品添加剂、改善食品质构、开发低脂食品、功能性食品及食品载体、食品包装材料等食品领域的应用现状,指出其在推动食品工业向更健康、更可持续方向发展中的重要性。

但由于各种构建方法均存在其局限性,这个方向的研究还有很多空白与不足需要填补与完善,仍需解决以下几个难题以扩大其应用规模: a. 尽管凝胶多糖被广泛应用于食品添加剂,但对于一些方法(如化学交联)构建的凝胶多糖基复合材料的安全性和可控性尚不确定,建立合理的生物相容性评估和安全性测试系统和探索更多绿色、简便的方法显得尤为重要; b. 随着大健康逐渐被人们重视,通过三螺旋自组装作

用构建的凝胶多糖纳米基复合材料,在保护食品功能因子并建立靶向运送体系的研究还有待探索;c.目前各种方法构建的凝胶多糖基复合材料的大多数研究还在实验阶段,但从实验室走向食品工厂的过程中还需要解决一些关键的问题,如生产成本、环境友好、方法简便等问题。总之,凝胶多糖基复合材料作为一种安全、高效、多功能的食品添加剂,其在食品领域的应用潜力将持续增长,在未来发展中还应对其现有的构建方法进行优化和改进,探索新的构建方法,并对不同方法构建凝胶多糖基复合材料的研究更加细化,进一步探索凝胶多糖基复合材料在食品领域的应用,拓宽其使用范围,推动食品工业向更健康、更可持续发展的方向发展。

© The Author(s) 2025. 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] ZHAI W J, DANJO T, IWATA T. Synthesis and physical properties of Curdlan branched Ester derivatives[J]. *Journal of Polymer Research*, 2018, 25(3): 181.
- [2] MCINTOSH M, STONE B A, STANISICH V A. Curdlan and other bacterial (1→3)- β -D-glucans[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, 68(2): 163–173.
- [3] NURZYNSKA A, KLIMEK K, PALKA K, et al. Curdlan-based hydrogels for potential application as dressings for promotion of skin wound healing-preliminary *in vitro* studies[J]. *Materials*, 2021, 14(9): 2344.
- [4] LÜ T H, FENG J J, JIA X Y, et al. Structural insights into curdlan degradation via a glycoside hydrolase containing a disruptive carbohydrate-binding module[J]. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 2024, 17(1): 45.
- [5] WEI H, MA Q, GAO R, et al. Tailoring hydroxypropyl starch films with curdlan for enhanced properties for edible packaging[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 274 (Pt 1): 133260.
- [6] HE L Y, ZHU Z C, QI C J. β -Glucan-A promising immune-cyete-targeting drug delivery vehicle: Superiority, applications and future prospects[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 339: 122252.
- [7] FU J, CAI X, YANG Y, et al. Application of various polysaccharide gums to improve gelation and rheological properties of hydroxypropyl starch hydrocolloids[J]. *Food Hydrocolloid*, 2024, 154: 110043.
- [8] ZHU S C, WANG Y Y, DING Y C, et al. Improved texture properties and toughening mechanisms of surimi gels by double network strategies[J]. *Food Hydrocolloid*, 2024, 152: 109900.
- [9] 陈道春, 陆志娟, 齐自元. 可得然胶预处理及其对低脂牛肉肠品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(13): 111–117. [CHEN D C, LU Z J, QI Z Y. Pretreatment of curdlan and its effect on the quality of low fat beef sausage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(13): 111–117.]
- [10] DAI M Q, WANG X C, GAO L Y, et al. Effect of black wolfberry anthocyanin and maltitol on the gelation and microstructural properties of curdlan/gellan gum hybrid gels[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(6): 3749–3756.
- [11] LIU H, LIANG Y, CHEN Z L, et al. Effect of curdlan on the aggregation behavior of gluten protein in frozen cooked noodles during cooking[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 103: 103395.
- [12] ZHANG R R, EDGAR K J. Properties, chemistry, and applications of the bioactive polysaccharide curdlan[J]. *Biomacromolecules*, 2014, 15(4): 1079–1096.
- [13] SHOKRANI H, SHOKRANI A, SAJADI S M, et al. Polysaccharide-based nanocomposites for biomedical applications: A critical review[J]. *Nanoscale Horizons*, 2022, 7(10): 1136–1160.
- [14] FU Y L, SHI L. Methods of study on conformation of polysaccharides from natural products: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 263(Pt 1): 130275.
- [15] VERMA D K, NIAMAH A K, PATEL A R, et al. Chemistry and microbial sources of curdlan with potential application and safety regulations as prebiotic in food and health[J]. *Food Research International*, 2020, 133: 109136.
- [16] WEST T P. Production of the polysaccharide curdlan by species on processing coproducts and plant lignocellulosic hydrolysates[J]. *Fermentation*, 2020, 6(1): 16.
- [17] AQUINAS N, BHAT M R, SELVARAJ S. A review presenting production, characterization, and applications of biopolymer curdlan in food and pharmaceutical sectors[J]. *Polymer Bulletin*, 2022, 79(9): 6905–6927.
- [18] YUAN M, FU G, SUN Y M, et al. Biosynthesis and applications of curdlan[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 273: 118597.
- [19] TAO H T, WANG B Z, WEN H C, et al. Improvement of the textural characteristics of curdlan gel by the formation of hydrogen bonds with erythritol[J]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 117: 106648.
- [20] OKOBIRA T, MIYOSHI K, UEZU K, et al. Molecular dynamics studies of side chain effect on the β -1,3-D-glucan triple helix in aqueous solution[J]. *Biomacromolecules*, 2008, 9(3): 783–788.
- [21] QIN Z, YANG D, YOU X, et al. The recognition mechanism of triple-helical β -1,3-glucan by a β -1,3-glucanase[J]. *Chemical Communications*, 2017, 53(67): 9368–9371.
- [22] MENG Y, LYU F Z, XU X J, et al. Recent advances in chain conformation and bioactivities of triple-helix polysaccharides[J]. *Biomacromolecules*, 2020, 21(5): 1653–1677.
- [23] GUO X Y, KANG J, XU Z Y, et al. Triple-helix polysaccharides: Formation mechanisms and analytical methods[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 262: 117962.
- [24] FENG X, LI F, DING M M, et al. Molecular dynamic simulation: Structural insights of multi-stranded curdlan in aqueous solution[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 261: 117844.
- [25] MARUBAYASHI H, YUKINAKA K, ENOMOTO-ROGERS Y, et al. Curdlan ester derivatives: Synthesis, structure, and properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 103: 427–433.
- [26] ZHAO B B, LIU T, HOU L Y, et al. Cryoprotective effect of curdlan on frozen wheat gluten: With respect to physicochemical properties and molecular structure[J]. *LWT- Food Science and Technology*, 2024, 192: 115715.
- [27] HUANG Y Z, CHEN H, ZHANG K F, et al. Extraction, purification, structural characterization, and gut microbiota relationship of polysaccharides: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 213: 967–986.
- [28] 潘玉雪, 徐欣东, 张润峰, 等. 凝胶多糖自组装作用及其应用研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(15): 265–274. [PAN Y X, XU X D, ZHANG R F, et al. Progress in research on self-assembly of curdlan and its application[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 265–274.]
- [29] TAMAI N, TADA T, TATSUMI D, et al. Role of water in

- gelation of Curdlan/DMSO/water ternary system[J]. *Nihon Reoroji Gakkaishi*, 2017, 45(1): 49–56.
- [30] SASAKI M, RYOSON Y, NUMATA M, et al. Oligosaccharide sensing in aqueous media using porphyrin-curdlan conjugates: an allosteric signal-amplification system[J]. *The Journal of Organic Chemistry*, 2019, 84(10): 6017–6027.
- [31] FU J L, ZHENG Y X, GAO Y X, et al. Effect of different polysaccharides on the texture and fibrous structure of high-moisture extruded pea protein isolate[J]. *Food Biophysics*, 2023, 18(4): 606–618.
- [32] SCHMID E M, FARAHNAKY A, ADHIKARI B, et al. High moisture extrusion cooking of meat analogs: A review of mechanisms of protein texturization[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(6): 4573–4609.
- [33] YANG R, WANG S R, SUN C X, et al. High-moisture extrusion of curdlan: Texture and structure[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 258(Pt 2): 129109.
- [34] ZHANG J C, LIU L, LIU H Z, et al. Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(20): 3267–3280.
- [35] CAI Z X, WU J, WU M, et al. Rheological characterization of novel carboxymethylated curdlan-silica hybrid hydrogels with tunable mechanical properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 230: 115578.
- [36] JIANG S, CAO C A, XIA X F, et al. Enhancement of the textural and gel properties of frankfurters by adding thermo-reversible or thermo-irreversible curdlan gels[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(5): 1068–1077.
- [37] ZHANG C, LU M X, AI C, et al. Ultrasonic treatment combined with curdlan improves the gelation properties of low-salt surimi[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 248: 125899.
- [38] ZHANG C, CHEN L, TENG H. Phase behavior of the gelation process of myofibrillar protein-curdlan blended system: Discussion based on rheology and gel properties[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437(Pt 2): 137839.
- [39] LIANG Y, CAO Z H, WANG J Y, et al. Effects of sanxan on water and ice crystal status of salt free frozen cooked noodles during freeze-thaw cycles[J]. *Food Chemistry*, 2024, 448: 139137.
- [40] LIANG Y, CHEN Z L, LIU M, et al. Effect of curdlan on the aggregation behavior and structure of gluten in frozen-cooked noodles during frozen storage[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 205: 274–282.
- [41] ZHAO B B, HOU L Y, LIU T, et al. Insight into curdlan alleviating quality deterioration of frozen dough during storage: Fermentation properties, water state and gluten structure[J]. *Food Chemistry*, 2023, 19: 100832.
- [42] GANIE S A, RATHER L J, ASSIRI M A, et al. Recent innovations (2020–2023) in the approaches for the chemical functionalization of curdlan and pullulan: A mini-review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 260(Pt 2): 129412.
- [43] WANG K Q, DU L C, ZHANG C, et al. Preparation of chitosan/curdlan/carboxymethyl cellulose blended film and its characterization[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(12): 5396–5404.
- [44] BIAN L Y, FU J C, CHANG T T, et al. Study of alkali-soluble curdlan/bacterial cellulose/cinnamon essential oil blend films with enhanced mechanical properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253(Pt 6): 127332.
- [45] MARTINEZ C O, RUIZ S P, FENELON V C, et al. Characterization of curdlan produced by sp IFO 13140 cells immobilized in a loofa sponge matrix, and application of this biopolymer in the development of functional yogurt[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(7): 2410–2417.
- [46] YANG X Y, ZHENG M X, HAO S S, et al. Curdlan prevents the cognitive deficits induced by a high-fat diet in mice via the gut-brain axis[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2020, 14: 384.
- [47] YAMANO M, WATANABE K, MASUJIMA Y, et al. Curdlan intake changes gut microbial composition, short-chain fatty acid production, and bile acid transformation in mice[J]. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 2023, 79: 1035–1035.
- [48] LIU S Y, LEI H T, LI L Q, et al. Effects of direct addition of curdlan on the gelling characteristics of thermally induced soy protein isolate gels[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253(Pt 4): 127092.
- [49] HEO J, SOBIECH T A, KUTSCHER H L, et al. Hybrid curdlan poly (γ -Glutamic acid) nanoassembly for immune modulation in macrophage[J]. *Macromolecular Bioscience*, 2021, 21(1): 2000358.
- [50] XU Y N, LIANG X, KONG B H, et al. Evaluating the effect of thermo-reversible and thermo-irreversible curdlan gels on the gelling properties and digestibility of myofibrillar protein gels under low-salt condition[J]. *Food Research International*, 2024, 181: 114115.
- [51] TONG X Q, QI X L, MAO R T, et al. Construction of functional curdlan hydrogels with bio-inspired polydopamine for synergistic periodontal antibacterial therapeutics[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 245: 116585.
- [52] CUI C L, LI D, WANG L J, et al. Curdlan/sodium carboxymethylcellulose composite adsorbents: A biodegradable solution for organic dye removal from water[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 328: 121737.
- [53] TENG W X, YANG Z Q, WANG N, et al. Modulating the textural and structural characteristics of curdlan-potato protein gel with different concentrations[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 149: 109638.
- [54] 徐一宁, 曹传爱, 孔保华, 等. 不同形态的可得然凝胶对肌原纤维蛋白凝胶特性和体外消化特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(16): 73–84. [XU Y N, CAO C A, KONG B H, et al. Effects of incorporation of different forms of curdlan gels on the gelling properties and *in vitro* digestibility of myofibrillar protein gels[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(16): 73–84.]
- [55] ZHANG Y S, KHADEMHOSEINI A. Advances in engineering hydrogels[J]. *Science*, 2017, 356(6337): eaaf3627.
- [56] GAO Y S, PENG K, MITRAGOTRI S. Covalently cross-linked hydrogels via step-growth reactions: crosslinking chemistries, polymers, and clinical impact[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(25): 2006362.
- [57] ITAGAKI H, KOSHINO T, ITO T, et al. Volume phase transition of chemically cross-linked curdlan hydrogels dependent on pH[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2016, 2(5): 752–757.
- [58] SAKURAI K, UEZU K, NUMATA M, et al. β -1,3-glucan polysaccharides as novel one-dimensional hosts for DNA/RNA, conjugated polymers and nanoparticles[J]. *Chemical Communications*, 2005(35): 4383–4398.
- [59] SU Y C, CHANG Y, LEE W C, et al. Study of chondrogenesis of umbilical cord mesenchymal stem cells in curdlan-poly (vinyl alcohol) composite hydrogels and its mechanical properties of freez-

- ing-thawing treatments[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 265(Pt 1): 130792.
- [60] MATSUMOTO Y, ENOMOTO Y, KIMURA S, et al. Highly deformable and recoverable cross-linked hydrogels of 1,3- α -D and 1,3- β -D-glucans[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 251: 116794.
- [61] MATSUMOTO Y, ENOMOTO Y, KABE T, et al. Static and in situ small-angle X-ray scattering analyses of the effect of molecular structure on the tensile properties of cross-linked curdlan hydrogels and stretched, dried gel-films[J]. *Polymer*, 2023, 272: 125843.
- [62] MATSUMOTO Y, ENOMOTO Y, KIMURA S, et al. Highly stretchable curdlan hydrogels and mechanically strong stretched-dried-gel-films obtained by strain-induced crystallization[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 269: 118312.
- [63] HUANG H Y, DONG Z C, REN X Y, et al. High-strength hydrogels: Fabrication, reinforcement mechanisms, and applications[J]. *Nano Research*, 2023, 16(2): 3475–3515.
- [64] XU X W, JERCA V V, HOOGENBOOM R. Bioinspired double network hydrogels: from covalent double network hydrogels hybrid double network hydrogels to physical double network hydrogels[J]. *Materials Horizons*, 2021, 8(4): 1173–1188.
- [65] 刘霄莹, 张润峰, 潘玉雪, 等. 可得然胶基水凝胶及其应用研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(17): 248–257. [LIU X Y, ZHANG R F, PAN Y X, et al. Research progress on curdlan hydrogel and its application[J]. *Food Science*, 2023, 44(17): 248–257.]
- [66] REN Y, HUANG T, ZHAO X Y, et al. Double network hydrogel based on curdlan and flaxseed gum with photothermal antibacterial properties for accelerating infectious wound healing[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242(Pt 1): 124715.
- [67] YE L, LÜ Q, SUN X Y, et al. Fully physically cross-linked double network hydrogels with strong mechanical properties, good recovery and self-healing properties[J]. *Soft Matter*, 2020, 16(7): 1840–1849.
- [68] YANG J, LI K, TANG C, et al. Recent progress in double network elastomers: One plus one is greater than two[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(19): 2110244.
- [69] LI H L, TIAN F, LIU H H, et al. Novel positively-charged bioderived polymer nanofilms for nuclear wastewater decontamination[J]. *Desalination*, 2024, 576: 117389.
- [70] LIANG M T, LIU Q Y, CHEN Q J, et al. Self-assembling gelatin-curdlan fibril hydrogels for oriented neural cell growth[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(13): 15741–15751.
- [71] BAO Q M, GANBOLD T, BAO M M, et al. Tumor targeted siRNA delivery by adenosine receptor-specific curdlan nanoparticles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253(Pt 3): 126845.
- [72] ZHANG Y F, QI X H, YAO S, et al. Construction of novel curdlan-based and Ca^{2+} -chelated magnetic microspheres (CCMM) for efficient protein purification and oriented immobilization[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2021, 148: 109802.
- [73] YAN J K, QIU W Y, WANG Y Y, et al. Formation and characterization of polyelectrolyte complex synthesized by chitosan and carboxylic curdlan for 5-fluorouracil delivery[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107(Pt A): 397–405.
- [74] BAI Y R, ZHANG Q T, SUN J S, et al. Self-healing hydrogels and their action mechanism in oil-gas drilling and development engineering: A systematic review and prospect[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 96: 104250.
- [75] TAYLOR D L, IN H P M. Self-healing hydrogels[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(41): 9060–9093.
- [76] WANG C, SUN J S, LONG Y F, et al. A re-crosslinkable composite gel based on curdlan for lost circulation control[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 371: 121010.
- [77] HU W M, XU X D, WANG X Y, et al. Effect of curdlan on the gel properties and interactions of whey protein isolate gels[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 277(Pt 3): 134161.
- [78] TIAN R, YUAN S, JIANG J, et al. Improvement of mechanical, barrier properties, and water resistance of konjac glucomannan/curdlan film by zein addition and the coating for cherry tomato preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 276(Pt 1): 134132.
- [79] ENOMOTO-ROGERS Y, KIMURA S, IWATA T. Soft, tough, and flexible curdlan hydrogels and organogels fabricated by covalent cross-linking[J]. *Polymer*, 2016, 100: 143–148.
- [80] GUO X, GU F Y, LI Y, et al. Precooking treatments affect the sensory and tensile properties of autoclaved recooked noodles via moisture distribution and protein structure[J]. *Food Chemistry*, 2023, 421: 136218.
- [81] ZHANG X R, GUO Y X, LIU H, et al. Preparation, characterization of curdlan-based emulsion micro-gel particles and its application in low-fat pork sausages[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2023, 185: 115160.
- [82] TAN Z L A, PHOON P Y. Developing concentrated emulsion gel hybrids structured by natural food fibres[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109037.
- [83] WANG B L, CHEN J S, WANG Q, et al. Functional performance of a novel emulsion gel-based pork fat mimics in low-fat meat batter system: Incorporation of physicochemical and oral processing[J]. *Food Structure*, 2023, 37(SUP): 100335.
- [84] WANG F Y, GUO L, LIU H, et al. Water-in-oil oleogel with biphasic stabilization for fabrication of low-fat salad dressing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 142: 108805.
- [85] LI H, XU S, XIE Y, et al. Curdlan-polyphenol complexes prepared by pH-driven effectively enhanced their physicochemical stability, antioxidant and prebiotic activities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 267(Pt 1): 131579.
- [86] JIANG S, MO F, LIU Q, et al. Insights into the *in vitro* digestibility and rheology properties of myofibrillar protein with different incorporation types of curdlan[J]. *Food Chemistry*, 2024, 459: 140255.
- [87] GANIE S A, NAIK R A, DAR O A, et al. Design and fabrication of functionalized curdlan-curcumin delivery system to facilitate the therapeutic effects of curcumin on breast cancer[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 267(Pt 1): 131388.
- [88] GARAVAND F, ROUHI M, RAZAVI S H, et al. Improving the integrity of natural biopolymer films used in food packaging by crosslinking approach: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 104(Pt A): 687–707.
- [89] MOHSIN A, ZAMAN W Q, GUO M J, et al. Xanthan-curdlan nexus for synthesizing edible food packaging films[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 162: 43–49.
- [90] ZHOU L B, FU J C, BIAN L Y, et al. Preparation of a novel curdlan/bacterial cellulose/cinnamon essential oil blending film for food packaging application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 212: 211–219.
- [91] YU Y W, LIU K Y, ZHANG S Y, et al. Characterizations of water-soluble chitosan/curdlan edible coatings and the inhibitory effect on postharvest pathogenic fungi[J]. *Foods*, 2024, 13(3): 441.