文章编号:1674-2869(2024)01-0055-06

多糖基可降解膜的疏水性质强化研究进展

曾 洋,李 欣,吴 考*,肖 满,姜发堂
湖北工业大学生物工程与食品学院,湖北 武汉 430068

摘 要:多糖基可降解膜因具备无毒、环境友好、力学强度较好等特点,是替换传统石油基塑料膜的潜在选择。但大多数多糖的亲水性较强,使其形成的薄膜耐水性较弱,不利于实际应用。展示了近年来多糖基可降解复合膜疏水性质强化的研究进展。基于多糖化学改性方法,介绍了常见多糖膜的疏水改性效果,包括改性淀粉膜、改性魔芋葡甘聚糖膜和改性壳聚糖膜;从物理共混的角度总结了多糖与其他天然成分复合成膜的疏水增强机理;从多层复合的角度说明了层层自组装、静电纺丝等离子体等技术对多糖基复合膜疏水效果的提升效果。建议今后从改性膜的分子组装结构及其组装过程等方面阐明改性膜的疏水结构形成机理,为其稳定生产提供理论指导。同时,探究结合多种成膜技术同步强化多糖基可降解膜的疏水和力学性能的可行性,提升多糖基可降解膜在包装上的应用效果与体验。

关键词:多糖;可降解;复合膜;疏水强化
中图分类号:TB484.9 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202106013

Research progress in enhancing hydrophobicity of polysaccharide-based degradable film

ZENG Yang, *LI Xin*, *WU Kao**, *XIAO Man*, *JIANG Fatang*
School of Biological Engineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

Abstract: Polysaccharide-based degradable packaging films are potential choices to replace traditional petroleum-based plastic film due to the characteristics of non-toxicity, environmental friendliness, and good mechanical strength. However, the hydrophilicity of most polysaccharides is strong, leading to weak water resistance property of films of them, hindering practical application. In this paper, the recent research progress in the enhancement of hydrophobic properties of polysaccharide-based degradable composite films was presented. According to chemically-modified methods of polysaccharides, the hydrophobic modification effect on typical chemically modified polysaccharide films was introduced, including modified-starch film, modified-konjac glucomannan film, and modified-chitosan film; from the viewpoint of physical blending, the mechanism of hydrophobic enhancement of composite film formed by polysaccharide and other natural components was summarized; from the perspective of multilayer composite, the effect of layer-by-layer self-assembly and electrospinning, and plasma technology on the hydrophobic effect of the polysaccharide-based composite film was explained. It is necessary to elucidate the formation mechanism of the hydrophobic structure of the modified film from the aspects of molecular assembly structure and assembly process of the modified film in the future, to provide theoretical guidance for stable production of the films. Also, the feasibility of simultaneously enhancing the hydrophobicity and mechanical properties of the polysaccharide-based degradable films by combining various film-producing technologies should be explored, which would

收稿日期:2021-06-17
基金项目:国家自然科学基金(31901655、31972156)
作者简介:曾 洋,硕士研究生。Email:1127329910@qq.com
***通信作者**:吴 考,博士,教授。Email:wukao@mail.hbut.edu.cn
引文格式:曾洋,李欣,吴考,等. 多糖基可降解膜的疏水性质强化研究进展[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(1):55-60.

improve the application effect and consumption experience of polysaccharide-based degradable film in packaging.

Keywords: polysaccharide; degradable; composite film; hydrophobicity enhancement

随着国家对生态环境保护力度的不断加大，以石油基聚合物为基材的不可降解塑料制品的用途逐渐受到限制。作为塑料薄膜的可替代品，可降解多糖基薄膜受到了越来越多的关注[1-2]。多糖在自然界中广泛存在，来源丰富，种类繁多。当前壳聚糖、魔芋葡甘聚糖、琼脂、海藻酸盐、黄原胶等多糖均常被用于可降解生物聚合物膜材料的研发，其形成的薄膜力学性质较好，具备替换传统塑料包装膜的潜力[3]。但大多数多糖亲水性较强，其形成的薄膜耐水性较弱，不利于实际应用。因此，强化多糖基可降解膜的疏水性是近些年的研究热点。本文将从化学改性、物理共混、多层复合等三个方面总结目前常见的多糖基复合膜疏水强化方法。

1 多糖化学改性膜

多糖是指由10个以上单糖分子通过糖苷键连接而成的高聚物，其分子链富含羟基，通常具备较强的亲水性。在食品工业特定的应用中，可以使用化学方法对多糖改性，提升多糖疏水性，例如置换型修饰（例如乙酰化、羧甲基化、酸化等）、链延长型修饰（交联和接枝）、降解型修饰（脱乙酰和氧化）等，如表1所示。常见多糖化学改性膜主要涉及淀粉、魔芋葡甘聚糖、壳聚糖等多糖的改性。

1.1 淀粉改性膜

淀粉是一类最常见的天然多糖，也是食品工业的重要原材料。天然淀粉的成膜性质较差且亲水性较强，可通过化学改性方法强化淀粉膜性质，以增强其功能特性。淀粉分子疏水性化学修饰包括淀粉的酯化、醚化、接枝[10]。酯化是将三个可用的羟基转化为烷基或芳基衍生物，这种修饰可以改善淀粉的疏水性、可加工性以及薄膜的亲疏水性。例如当取代度为1.9、2.5、2.9时，醋酸酯淀粉膜的水接触角（water contact angle，WCA）分别为65.26°、75.40°、82.54°[11]。接枝是一种通过共价键将聚合物或其他单体引入淀粉主链，提升其疏水性的改性方法。有研究[12]用不同分子量的聚乙二醇异氰酸酯（polyethylene glycol-isocyanate，PEG-iso）作为交联剂，接枝了甘油糊化的高直链淀粉（glycerol plasticized high amylose starch，HAGS）制备淀粉-聚氨酯（polyurethane，PU）膜，结果表明，HAGS-PEG-PU薄膜的WCA值随PEG-iso含量的增加而增加；当PEG-iso分子量为1 500 Da时，HAGS-PEG-PU膜具有最高WCA值为125°，疏水效果明显提升。

1.2 魔芋葡甘聚糖改性膜

魔芋葡甘聚糖（konjac glucomannan，KGM）是一种天然线性高分子中性多糖，成膜性好，力学强度高，适于可降解膜材料制备，亲水性极强，纯KGM膜的水蒸气透过率高达9.61 g·mm/(m²·h·kPa)，WCA低至35.5°[13]。通常通过脱乙酰、交联和接枝共聚等化学改性方法提升KGM的疏水性能。例如KGM的羧甲基改性是在C-6位置引入羧甲基基团，同时伴随着部分乙酰基的脱除，可降低水的吸附，吸收和溶解度，该效果与取代度直接相

表1 常见的化学改性多糖膜及其疏水强化特点

Tab. 1 Typical chemically modified polysaccharide films and characteristics of hydrophobicity enhancement

改性方法	类型	实例	效果和特点	参考文献
置换型修饰	乙酰化	乙酰化木薯淀粉膜	疏水性和力学性能均提升	[4]
	羧甲基化	羧甲基魔芋葡甘聚糖/大豆分离蛋白复合膜	羧甲基化取代度越高，则吸湿性越弱，耐水性越强	[5]
链延长型修饰	接枝	烷醇（己醇/十二烷醇/十八醇）/淀粉复合膜	烷基链长度的增加增强了淀粉基薄膜的表面疏水性	[6]
	交联	氧化脱支淀粉/壳聚糖纳米颗粒复合膜	通过席夫碱交联反应使水接触角从19.4°提升至70°	[7]
降解型修饰	脱乙酰	脱乙酰魔芋葡甘聚糖/琼脂复合膜	乙酰基团的脱除程度越高，薄膜疏水效果越强	[8]
		脱乙酰壳聚糖/半乳甘露聚糖复合膜	薄膜阻水性能和拉伸强度提升	[9]

关[5]。脱乙酰KGM（deacetylated konjac glucomannan，DKGM）是KGM化学改性中研究最广泛的一种。KGM在碱性溶液中会失去乙酰基，然后通过DKGM分子之间的氢键形成稳定的水凝胶[8]。乙酰基团的脱除程度显著影响了DKGM亲水性的强弱，例如Du等[14]通过凝胶渗透色谱和红外光谱测定了DKGM分子参数和结构，发现DKGM的脱乙酰度与1 730 cm^{-1}处吸收峰的强度成正比，同时发现乙酰基的脱除可能抑制了分子间氢键作用，减弱其亲水性。

1.3　壳聚糖改性膜

壳聚糖是一种阳离子可再生多糖，具备良好成膜性和特有的抗菌活性，因此是食品包装膜的绝佳原料选择之一[15]。但壳聚糖不溶于水，不耐酸，这对其复合成膜工艺有较大限制。对壳聚糖进行化学改性可强化壳聚糖膜的疏水及成膜性质。壳聚糖常见的改性方法包括交联、接枝、络合，其主要作用位置在于其分子结构上的三种类型的活性基团：氨基，伯羟基和仲羟基[16]。近年来，交联被视为一类有效提升壳聚糖膜疏水性的方法。Yeamsuksawat等[17]通过流延溶液法制备原位交联乳化壳聚糖膜，发现当该壳聚糖与三聚磷酸钠、柠檬酸钠、戊二醛交联成膜时，其WCA分别增至79.21°，80.27°和96.75°，这是因为离子交联剂可能会导致壳聚糖网络内部发生疏水相互作用，从而增强薄膜的疏水性。

2　共混复合膜

将多种具备一定疏水性的可降解成分与多糖复合成膜，实现多糖基膜疏水性的提升是多糖基膜疏水性研究的一大思路。该方法作为一种绿色复合方式，避免了化学试剂的使用，减少了制备过程对环境的潜在污染。多糖其他物质共混可以总结为两类情况：（1）小分子油相（蜡、脂肪酸、单酰基甘油等）与多糖共混。该情况下，小分子油相能够自组装并形成稳定油相[18]，其与多糖共混过程中可能由范德华力、小分子之间的疏水键和氢键等相互作用形成共混膜。（2）高分子疏水物质（如蛋白质）与多糖共混，且二者能够通过相互作用（例如氢键、乳化作用等）形成稳定膜结构。根据成膜组分差异，目前相关研究报道主要分为多糖/多糖复合膜、多糖/蛋白复合膜、多糖/脂类复合膜和多糖/无机纳米粒子复合膜。

2.1　多糖/多糖复合膜

多糖富含羟基，部分含有羰基等疏水官能团，呈现不同的亲疏水性。多糖间可共混形成复配增效体系，其分子间通常存在着氢键、范德华力等相互作用。常用于制膜的多糖有：魔芋葡甘聚糖、淀粉、纤维素及其衍生物、黄芪胶、卡拉胶、琼脂胶、黄原胶等[19]。

亲水性多糖的复配成膜因协同效应通常可带来力学性质的提升，但在亲疏水性上不会带来较大改变，而亲水与较为疏水的多糖复配可以一定程度强化复合膜疏水性，如Wu等[20]将KGM与可得然胶复合成膜，发现当KGM占比达质量分数70%时，二者相容性最佳且分子间相互作用增强，成膜各项性质显著提升。进一步的研究表明，可得然胶在不同温度条件下的构象和解链差异造成了复合膜亲疏水性的变化，因此该复合膜的疏水性质与加热温度和烘干温度相关[21]。乙基纤维素（ethyl cellulose，EC）是应用最广泛的水不溶性纤维素衍生物之一，Wu等[22]以水和乙醇为溶剂，将KGM与EC在不添加小分子乳化剂的情况下复合成膜，实现了复合膜疏水性的较大提升。相关研究[23]表明，KGM和EC的自身乳化作用是二者能够形成成膜乳液的原因，且该乳液的稳定性与所使用溶剂的用量密切相关。

2.2　多糖/蛋白复合膜

多糖/蛋白质相互作用可能通过物理方式（如范德华力、静电、疏水、氢键等），也可能通过化学键发生键合（如美拉德反应）。蛋白质可分为醇溶性蛋白（玉米醇溶蛋白、小麦醇溶蛋白等）和水溶性蛋白（酪蛋白、明胶、大豆蛋白等）。明胶在食品加工中常用作增稠剂和乳化剂，是一种具有良好胶凝特性的天然水溶性蛋白质，但明胶膜易吸水、稳定性差[24]，因此，不少研究者尝试将明胶与多糖共混，提高其疏水性。例如Yu等[25]将香草醛作为交联剂通过希夫碱反应制备了壳聚糖/明胶复合膜，适度的交联显著提高了薄膜的机械强度、疏水性，降低了水蒸气透过率、溶胀率和水溶性，这可能是壳聚糖分子中有大量的羟基和氨基，很容易与明胶分子中的羟基、氨基、羰基形成较强的氢键相互作用。醇溶性蛋白-玉米醇溶蛋白（zein）源于玉米，分子呈球状，主要蛋白质是α-醇溶蛋白（占醇溶蛋白总量的70%~85%），纯zein膜的机械性能较差，但耐水性强，非极性氨基酸含量高[26]，可添加到多糖膜中（如KGM膜）用于提升疏水性。KGM和zein纯膜的水接触角分别为35.5°和75.0°，二者共混成膜后最大水接触角可达68.1°，已有报道制备了KGM/zein共混膜，发现该膜的力

学、水分阻隔、耐水等性能均显著优于KGM膜[27-29]，其疏水性的增强可能是由于KGM和zein之间的氢键相互作用以及美拉德反应[30]。

2.3 多糖/脂类复合膜

脂质是一类在自然界中广泛存在的疏水性化合物，可添加到多糖膜中提升膜的疏水性和耐水性，常用的脂质包括油脂和蜡。油脂会阻碍水分子与多糖羟基的相互作用，提高薄膜的耐水性。例如Zhou等[31]向KGM/κ-角叉菜胶共混膜掺入山茶油（质量分数2%，4%和6%）制备的疏水膜，水蒸气透过率从（KGM/κ-角叉菜胶）0.836降至0.497 g·mm/(m^2·h·kPa)（KGM/κ-角叉菜胶/山茶油）。蜂蜡主要成分为十六烷酸与三十烷醇形成的酯类，其化学性质稳定，具有较强的疏水性、耐酸碱和分散性。将蜂蜡与多糖膜复合，可提高多糖膜的阻水性能[32]，但力学性能有所下降[33]。Luchesi等[34]通过连续浇筑法实现了淀粉/蜂蜡疏水性的规模化生产，并发现蜂蜡可以均一地分布在薄膜中，且当蜂蜡含量为质量分数30%时，复合膜的WCA可提升100%。

2.4 多糖/无机纳米粒子复合膜

近年，含纳米粒子的食品包装材料相关研究报道显著增多。纳米颗粒不仅能改善纯聚合物膜的疏水性能，亦能提供许多新功能。例如董增等[35]以壳聚糖和木薯淀粉为基本成膜材料，以甘油为增塑剂，以改性纳米二氧化硅为增强剂，采用流延法制备壳聚糖-淀粉基复合膜，水蒸气透过率1.053 g·mm/(m^2·h·kPa)，比未加纳米二氧化硅的复合膜下降13.48%。其机理可能是纳米粒子与果胶、淀粉等大分子交联，同时基于共价键和氢键增强了分子间的相互作用，降低了膜的吸湿性。同时，二氧化硅、二氧化钛、氧化锌等可控表面特性的纳米粒子可提高Pickering乳液[36]的稳定性并用于多糖膜的制备。

3 多层复合膜

将不同单膜层制备成多层膜，充分发挥不同膜的优势，是提高多糖基复合膜疏水性的重要方法。多层膜结合主要分为层层自组装、静电纺丝、等离子体等方法（如表2所示）。若成膜组分自身结合力强，一般通过层层自组装方式制备多层复合膜；若成膜组分间结合力较差，则主要通过静电纺丝、等离子体技术制备成多层膜。

表2 常见多层膜复合技术

Tab. 2 Typical techniques for multi-layer film preparation

多层复合技术	原理	示例	参考文献
层层自组装	在适宜的模板上，通过组分间的相互作用驱使目标化合物自发地在模板上形成结构完整、性能稳定、具有独特功能的薄膜	壳聚糖/普鲁兰/海藻酸钠多层膜	[37]
静电纺丝	利用高比表面积的超细纤维赋予不同膜层之间的强物理附着力	聚3-羟基丁酸酯/纳米纤维素/聚3-羟基丁酸-3-羟基戊酸酯多层膜	[38]
等离子体	利用不同等离子体材料改变基质的化学组成和形态	纤维素/三硅醇异丁基-多面体低聚倍半硅烷多层膜	[39]

3.1 层层自组装

同类物质膜层往往因相互作用较强具有较好的结合度，可形成紧密结合的双（多）层膜。李秋莹等[37]以壳聚糖、海藻酸钠、普鲁兰多糖作基质，采用层层自组装技术[40]并结合流延法制备B_1双层膜（将壳聚糖/普鲁兰溶液流延在未完全干燥的海藻酸钠膜上）及B_2双层膜（将壳聚糖/普鲁兰溶液流延在未完全干燥的海藻酸钠/普鲁兰膜上），并通过X射线衍射及红外光谱发现，双层膜间存在氨基和羧基的氢键相互作用，B_1、B_2的水蒸气透过率介于单层海藻酸钠与壳聚糖/普鲁兰多糖层膜之间，这说明多层膜的水蒸气透过率由各膜层的水蒸气透过率所决定，即多层膜可将某一膜层的疏水优势用于提升整个膜的疏水性能。层层自组装技术成膜的作用力有静电力作用、氢键作用、电荷转移作用、共价键作用、主客体作用等，这几种作用力之间具有密切联系，又有各自的特点。

3.2 静电纺丝/等离子体技术

近年来，静电纺丝成为一种改膜疏水性的有效手段，其可用疏水成分包裹亲水层多糖制备可生物降解膜，在保持良好阻隔性能的同时提升复合膜的耐水性[41]。Cherpinski等[38]研究发现使用

静电纺丝涂布技术制备聚3-羟基丁酸酯/纳米纤维素/聚3-羟基丁酸-3-羟基戊酸酯多层膜，可将水接触角从39.1°（纳米纤维素膜）提升至81.4°（多层膜）。等离子体技术制备多层超疏水膜也是近些年的研究热点[42]，如Yao等[39]将纤维素与三硅醇异丁基-多面体低聚倍半硅氧烷（TS-POSS）缩合反应后再经过等离子体处理，观察到TS-POSS均匀分散在纤维素中形成纳米结构，并使得膜粗糙度增加。同时，膜的表面羟基数增加，膜的表面自由能降低，水接触角达152.9°，表现出超疏水性。

4　展　望

本文从化学改性、物理共混、多层复合3个角度出发，总结多糖可降解膜疏水强化的研究进展。建议未来多糖基疏水膜的研究从以下方面深入拓展：（1）深入研究多糖共混物质的组成特征，分析多糖/蛋白、多糖/脂质等复合膜的分子组装结构形成机理。（2）完善多糖改性膜结构的形成理论，探究制备参数对成膜过程中分子组装过程的影响及其机制，为复合膜的稳定生产提供理论指导。（3）结合多种疏水改性膜制备技术，探究实现疏水性能和力学特性的同步增强的可行性，提升多糖可降解膜的实际包装上的应用效果与体验。

参考文献

[1] GROH K J, BACKHAUS T, CARNEY A B, et al. Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards[J]. Science of The Total Environment, 2019, 651: 3253-3268.

[2] 陈凯. 食品包装材料对食品安全的影响[J]. 食品安全导刊, 2020(3): 29-29.

[3] RODRIGUE M O, ABRANTES N, GONCALVES F J M, et al. Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: what is known? [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2019, 72: 103239.

[4] COLIVET J, CARVALHO R A. Hydrophilicity and physicochemical properties of chemically modified cassava starch films[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 95: 599-607.

[5] XIAO M, DAI S H, WANG L, et al. Carboxymethyl modification of konjac glucomannan affects water binding properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 130: 1-8.

[6] QIAO D L, LI S, YU L, et al. Effect of alkanol surface grafting on the hydrophobicity of starch-based films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 761-766.

[7] LIU Q, GAO L, QIN Y, et al. Incorporation of oxidized debranched starch/chitosan nanoparticles for enhanced hydrophobicity of corn starch films[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 35: 101032.

[8] QIAO D L, LU J Y, SHI W J, et al. Deacetylation enhances the properties of konjac glucomannan/agar composites[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 276: 118776.

[9] LIU W Y, LING Z, HUANG C X, et al. Investigation of galactomannan/deacetylated chitosan nanocomposite films and their anti-bacterial capabilities[J]. Materials Today Communications, 2022, 30: 103002.

[10] WANG X, HUANG L X, ZHANG C H, et al. Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 240: 116292.

[11] 刘志军, 郭婷婷. 醋酸酯淀粉/PVA共混膜性能研究[J]. 安徽化工, 2021, 47(6): 86-89.

[12] TAI N L, ADHIKARI R, SHANKS R, et al. Flexible starch-polyurethane films: physiochemical characteristics and hydrophobicity[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 163: 236-246.

[13] 王恒, 肖满, 吴考, 等. 甘油对中试魔芋葡甘聚糖流延膜性能的影响[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 59-63.

[14] DU X Z, LI J, CHEN J, et al. Effect of degree of deacetylation on physicochemical and gelation properties of konjac glucomannan[J]. Food Research International, 2012, 46: 270-278.

[15] CHEN X N, LAN W Q, XIE J. Characterization of active films based on chitosan/polyvinyl alcohol integrated with ginger essential oil-loaded bacterial cellulose and application in sea bass (lateolabrax japonicas) packaging[J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138343.

[16] WANG W J, XUE C H, MAO X Z. Chitosan: structural modification, biological activity and application[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 4532-4546.

[17] YEAMSUKSAWAT T, LIANG J. Characterization and release kinetic of crosslinked chitosan film incorporated with α-tocopherol[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 22: 100415.

[18] DAVIDOVICH P M. Oil structuring using polysaccharides[J]. Current Opinion in Food Science, 2019, 27: 29-35.

[19] VATANPOUR V, YAVUZTURK G B, ZEYTUNCU B, et al. Polysaccharides in fabrication of membranes: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 281: 119041.

[20] WU K, WAN Y, LI X, et al. Impact of heating and drying temperatures on the properties of konjac glucomannan/curdlan blend films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 167: 1544−1551.

[21] XIAO M, JIANG M F, WU K, et al. Investigation on curdlan dissociation by heating in water[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 70: 57−64.

[22] WU K, YAN X, ZHU D D, et al. Formation and characterization of konjac glucomannan/ethyl cellulose films by using ethanol and water as the solvents[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 241: 124629.

[23] WU K, ZHU Q, QIAN H, et al. Controllable hydrophilicity-hydrophobicity and related properties of konjac glucomannan and ethyl cellulose composite films[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 301−309.

[24] LI X, SHA X M, YANG H S, et al. Ultrasonic treatment regulates the properties of gelatin emulsion to obtain high-quality gelatin film [J]. Food Chemistry: X, 2023, 18: 100673.

[25] YU H Y, GE Y Q, DING H Q, et al. Vanillin cross-linked chitosan/gelatin bio-polymer film with antioxidant, water resistance and ultraviolet-proof properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126726.

[26] 鄢煦, 陶宇轩, 叶子健, 等. 魔芋葡甘聚糖/乙基纤维素/玉米醇溶蛋白复合膜的制备与性能表征[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 285−292.

[27] LI C, WU K, SU Y H, et al. Effect of drying temperature on structural and thermomechanical properties of konjac glucomannan-zein blend films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 138: 135−143.

[28] NI X W, WANG K, WU K, et al. Stability, microstructure and rheological behavior of konjac glucomannan-zein mixed systems [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 188: 260−267.

[29] WANG K, WU K, XIAO M, et al. Structural characterization and properties of konjac glucomannan and zein blend films [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105: 1096−1104.

[30] DU Y Y, ZHANG S K, SHENG L J, et al. Food packaging films based on ionically crosslinked konjac glucomannan incorporating zein-pectin nanoparticle-stabilized corn germ oil-oregano oil Pickering emulsion[J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136874.

[31] ZHOU X, ZONG X X, WANG S L, et al. Emulsified blend film based on konjac glucomannan/carrageenan/ camellia oil: physical, structural, and water barrier properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117100.

[32] SHI S, XU X W, REN Y M, et al. Beeswax coating improves the hydrophobicity of sodium alginate/ anthocyanin/ cellulose nanocrystal indicator film[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108930.

[33] BETANCUR-D AMBROSIO M C, PEREZ C C E, BARRERA-Maktinez C, et al. Antimicrobial activity, mechanical and thermal properties of cassava starch films incorporated with beeswax and propolis [J]. Journal of Food Science and Technology, 2023:05828-x.

[34] LUCHESI B R, MOREIRA F K V, MARCONCINI J M. Scalable production of hydrophobic starch/ beeswax films by continuous solution casting [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 141(1): 54730.

[35] 董增, 宋也好, 余明, 等. 纳米SiO_2/壳聚糖/淀粉复合包装膜的制备及性能[J]. 塑料工业, 2017, 45(9): 135−139.

[36] PANG B, LIU H, ZHANG K. Recent progress on pickering emulsions stabilized by polysaccharides-based micro/nanoparticles [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2021, 296: 102522.

[37] 李秋莹, 徐瑾秀, 高明君, 等. 普鲁兰/壳聚糖/海藻酸钠双层膜的制备及表征[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 96−102.

[38] CHERPINSKI A, TORRES G S, VARTIAINEN J, et al. Improving the water resistance of nanocellulose-based films with polyhydroxyalkanoates processed by the electrospinning coating technique [J]. Cellulose, 2018, 25(2): 1291−1307.

[39] YAO M Z, LIU Y, QIN C N, et al. Facile fabrication of hydrophobic cellulose-based organic/inorganic nanomaterial modified with POSS by plasma treatment [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 253: 117193.

[40] 张仲达, 杨文芳. 层层自组装技术的研究进展及应用情况[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 40−45.

[41] MISHRA R K, MISHRA P, VERMA K, et al. Electrospinning production of nanofibrous membranes [J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, 17(2): 767−800.

[42] FUNARI R, BHALLA N, CHU K Y, et al. Nanoplasmonics for real-time and label-free monitoring of microbial biofilm formation [J]. ACS Sensors, 2018, 3(8): 1499−1509.

本文编辑:张 瑞