

玉米淀粉/卡拉胶/甘油复合膜的最佳成膜工艺研究

王存堂^{1*}, 李子钰¹, 林新², 张爱军², 沈桃花², 汪思宏¹, 陈攀羽¹

(1. 齐齐哈尔大学食品与生物工程学院, 齐齐哈尔 161006; 2. 甘肃祁连葡萄酒业有限责任公司, 张掖 734304)

摘要: **目的** 确定玉米淀粉/卡拉胶/甘油复合膜的最佳成膜工艺。**方法** 以玉米淀粉为基材, 与卡拉胶和甘油共混, 通过流延法制备复合膜, 以薄膜的机械性能为评价指标, 通过单因素实验及正交实验来确定最佳成膜工艺。**结果** 正交实验结果表明当玉米淀粉添加量为3%、卡拉胶添加量为30%、甘油添加量为25%时, 玉米淀粉薄膜的机械性能最佳。**结论** 本研究确定了玉米淀粉、卡拉胶和甘油的最佳成膜配比, 为玉米淀粉膜的生产及应用提供理论基础。

关键词: 玉米淀粉; 增塑剂; 复合膜; 机械性能; 正交实验

Study on the optimal film forming process of corn starch/carrageenan/glycerol composite film

WANG Cun-Tang^{1*}, LI Zi-Yu¹, LIN Xin², ZHANG Ai-Jun², SHEN Tao-Hua²,
WANG Si-Hong¹, CHEN Pan-Yu¹

(1. College of Food and Bioengineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China;
2. Gansu Qilian Wine Industry Co., Ltd., Zhangye 734304, China)

ABSTRACT: Objective To determine the optimal film forming process of corn starch/carrageenan/glycerol composite film. **Methods** Corn starch was used as substrate, blended with carrageenan and glycerol, and the composite film was prepared by tape casting. Taking the mechanical properties of the film as the evaluation index, the optimal film forming process was determined by single factor experiment and orthogonal experiment. **Results** The orthogonal experimental results showed that the mechanical properties of corn starch film were the best when the addition of corn starch was 3%, carrageenan was 30% and glycerol was 25%. **Conclusion** This study determines the optimal film forming ratio of corn starch, catageenan and glycerol, providing the theoretical basis for the production and application of corn starch film.

KEY WORDS: corn starch; plasticizer; composite film; mechanical properties; orthogonal experiments

0 引言

近年来, 随着科技的日渐发展、生活质量的提高, 人

们开始愈发重视食品的质量与安全。目前, 市面上使用的食品包装材料主要以塑料为基材, 而塑料制品极难降解, 容易造成白色污染, 严重危害自然环境。此外, 塑料制品

基金项目: 大学生创新训练项目(202110232027、202110232197)

Fund: Supported by the Innovation Training Program for College Students (202110232027, 202110232197)

*通信作者: 王存堂, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。E-mail: robbertwang@163.com

*Corresponding author: WANG Cun-Tang, Ph.D, Professor, College of Food and Bioengineering, Qiqihar University, No.42, Zhonghuaxilu, Jianhua District, Qiqihar 161006, China. E-mail: robbertwang@163.com

经过加热等条件处理后容易分解出有害物质,危害人体健康。因此,开发以天然聚合物为基础的环保型包装材料代替传统的塑料包装已经成为当下的研究热点。目前,常见的天然聚合物包装材料主要有脂质类^[1]、多糖类^[2]、蛋白类^[3]及复合类^[4]。其中,淀粉基材料与其他天然聚合物材料相比,其具有成本低、阻气好、溶解性高、降解性好等特点,是目前天然聚合物食品包装材料领域的研究热点。GUJRAL 等^[5]以马铃薯淀粉为基材,加入淀粉纳米颗粒,制备复合淀粉膜,发现淀粉纳米颗粒的加入可以改善薄膜的机械性能。OTHMAN 等^[6]研究发现,纳米纤维素和百里香酚可以改善玉米淀粉膜的热稳定性和柔韧性。而我国作为淀粉生产大国,淀粉资源充足,可为淀粉活性包装材料的开发及生产提供保障。

然而,淀粉膜在机械性能上有所缺陷。由于淀粉薄膜具有脆性结构,单一淀粉膜的力学性能较差、质地较脆。因此,需要添加增塑剂来改善薄膜的柔韧性。甘油(glycerol)作为一种常用的增塑剂,在天然聚合物包装材料上广泛应用。HAZRATI 等^[7]以白薯淀粉为基材,制备淀粉膜,发现甘油可以提高薄膜的柔韧性以及热稳定性。此外,卡拉胶(carrageenan)作为一种主要来源于海洋藻类的天然多糖,常用于食品的胶凝、乳化、增稠等,与淀粉共混,可改善淀粉膜的机械性能^[8-9]。AHADI 等^[10]以竹芋淀粉和 I 型卡拉胶为原料制备薄膜,发现 I 型卡拉胶的加入可提高薄膜的抗拉强度,降低水蒸气透过率,对薄膜的物理性能有所改善。而目前国内外还鲜有关于玉米淀粉、卡拉胶、甘油复合膜最佳成膜工艺的报道,因此本研究以玉米淀粉为基材,以卡拉胶及甘油作为增塑剂,通过单因素实验及正交实验设计,以抗拉强度和断裂伸长率为评定指标,确定薄膜的最佳成膜配比,为玉米淀粉膜的生产及应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

玉米淀粉(黑龙江玉凤玉米开发有限公司);卡拉胶(食品级,青岛德慧海洋生物技术有限公司);丙三醇(分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

DF 系列数显集热式磁力搅拌器(常州丹瑞实验仪器设备有限公司);T114 电子分析天平(美国 Denver 丹佛仪器公司);KQ-300E 型超声波水浴振荡器(昆山市超声仪器有限公司);TF-4030 测厚计(江都市天发实验机械厂);TA-TX PlusC 质构仪(英国 Surface Measurement Systems 公司)。

1.3 方 法

1.3.1 玉米淀粉膜的制备

取一定质量的玉米淀粉配制成玉米淀粉悬浊液,在

80℃下糊化 1 h。在玉米淀粉质量的基础上加入一定质量的卡拉胶及甘油,继续在 80℃下加热搅拌 1 h,并用热水补足蒸发掉的水分。将溶玉米淀粉糊化液在 80℃下超声 30 min 以除去气泡,制得玉米淀粉膜液。将直径为 120 mm 的聚乙烯环固定在铺有离型纸的玻璃板上,将 25 g 膜液倾倒在聚乙烯环内,在 40℃下烘干 12 h,揭膜。将制得的薄膜放入干燥器中,在 25℃相对湿度 56.8%(NaBr 饱和溶液)的条件下平衡 72 h,得到最终测试所需要的薄膜样品。

1.3.2 单因素实验

(1)玉米淀粉添加量的确定

根据预实验结果表明,在玉米淀粉添加量为 3%、卡拉胶添加量为 20%、甘油添加量为 30%的条件下,复合膜的抗拉强度为 7.34 MPa,断裂伸长率为 30.86%,具有较好的成膜性,因此在此条件下设定单因素实验添加量范围。

卡拉胶添加量设置为 20%,甘油添加量设置为 30%,将玉米淀粉的添加量设置为 1%、2%、3%、4%、5%,研究玉米淀粉的添加量对实验指标的影响。

(2)卡拉胶添加量的确定

玉米淀粉添加量设置为 3%,甘油添加量设置为 30%,将卡拉胶的添加量设置为 0、10%、20%、30%、40%,研究卡拉胶的添加量对实验指标的影响。

(3)甘油添加量的确定

玉米淀粉添加量设置为 3%,卡拉胶添加量设置为 20%,将甘油的添加量设置为 20%、25%、30%、35%、40%,研究甘油的添加量对实验指标的影响。

1.3.3 正交实验设计

为了进一步确定成膜配方的最佳配比,使得制备出的玉米淀粉复合膜具有更加理想的机械性能,设计了以玉米淀粉添加量、卡拉胶添加量、甘油添加量 3 个因素为考察对象,各因素分别取 3 个水平,进行 3 因素 3 水平 $L_9(3^3)$ 的正交实验。并以复合膜的抗拉强度和断裂伸长率为评价指标,确定添加剂的最佳配比。以复合膜的抗拉强度为优选指标,在此基础上综合考虑复合膜的断裂伸长率,以保证复合膜具备一定的韧性。正交实验因素水平表如表 1 所示。

表 1 正交实验因素水平表
Table 1 Factor level table of orthogonal experiment

水平	因素		
	A(玉米淀粉)/%	B(卡拉胶)/%	C(甘油)/%
1	2	10	25
2	3	20	30
3	4	30	35

1.3.4 厚度的测定

参照 GB/T 6672—2001《塑料薄膜和薄片 厚度测定 机械测量法》的方法,采用厚度计(测量精度为 0.001 mm)

进行测量,测量前确保薄膜表面洁净,无污染物,测量时缓慢放下厚度计测量头,避免薄膜因挤压发生形变,在薄膜样品上随机选择10个测量点,计算平均值。

1.3.5 机械性能的测定

薄膜的机械性能参考 MU 等^[11]方法并对薄膜样品尺寸稍做修改。将薄膜样品切成 2 cm×6 cm 的长方形,使用质构仪来测定薄膜的抗拉强度及断裂伸长率,测试速度设置为 2 mm/s,初始夹距设置为 20 mm。每种薄膜样品测量 3 次,取平均值。玉米淀粉复合膜的抗拉强度和断裂伸长率分别按公式(1)、(2)计算:

$$T_s = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式中: T_s , 抗拉强度, Mpa; F , 断裂时的最大拉力, N; S , 横截面积, mm^2 。

$$EB = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: EB , 断裂伸长率, %; l_1 , 最终长度, mm; l_0 , 初始长度, mm。

1.4 数据处理

实验结果用平均值±标准偏差表示,采用 SPSS 25 中的 Duncan's 进行显著性分析,采用 Origin 8.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果分析

2.1.1 玉米淀粉添加量对薄膜机械性能的影响

机械性能由抗拉强度和断裂伸长率表示,反映了食品包装膜在加工、处理或贮藏期间在收到拉伸应力的情况下保持完整性的能力^[12]。图 1 显示了不同玉米淀粉添加量对薄膜机械性能的影响。由图 1 可知,当玉米淀粉添加量为 1% 和 2% 时,由于此时玉米淀粉膜的厚度极低,因此此时淀粉膜的机械性能极为脆弱,抗拉强度和断裂伸长率均较低;当玉米淀粉的添加量为 3% 时,玉米淀粉膜具有最高的断裂伸长率,达到 30.86%;而当淀粉添加量超过 3% 后,薄膜的断裂伸长率逐渐减小,当淀粉添加量达到 5%,薄膜的断裂伸长率减小为 6.15%。与断裂伸长率不同,随着玉米淀粉添加量的增加,薄膜的抗拉强度随之增大,当玉米淀粉的添加量为 5% 时,薄膜的抗拉强度达到 11.39 MPa。

淀粉经过糊化后,糊化液在干燥的过程中形成网络结构,从而形成薄膜结构。当玉米淀粉添加量为 1% 和 2% 时,薄膜中固形物的含量较低,可形成网络结构的淀粉分子较少,导致薄膜的厚度较低,薄膜的机械性能也较低。而随着淀粉添加量的增大,淀粉分子数量也随之增加,网络结构更加致密,从而增大了复合膜的抗拉强度^[13]。然而,这种致密的网络结构也影响了薄膜的韧性,使得分子链的

活性降低,薄膜的断裂伸长率也随之降低。此外,玉米淀粉作为一种刚性聚合物,其含量越高,薄膜的刚性越强,韧性越差,断裂伸长率也随之降低^[14]。由此可见,当玉米淀粉添加量在 1% 时,复合膜的抗拉强度较差;当玉米淀粉添加量为 5% 时,虽然复合膜具有最大的抗拉强度,但复合膜的断裂伸长率较低,韧性较差,所制备的复合膜极易折断;而玉米淀粉添加量在 3% 左右具备较为适宜的抗拉强度和断裂伸长率。

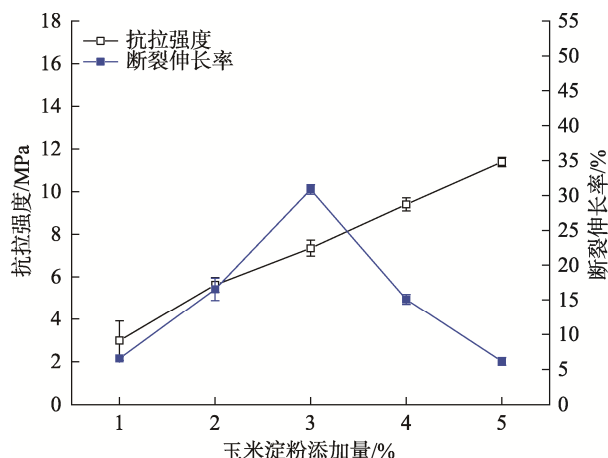


图 1 不同玉米淀粉添加量对薄膜机械性能的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of different corn starch dosages on the mechanical properties of the film ($n=3$)

2.1.2 卡拉胶添加量对薄膜机械性能的影响

图 2 为不同卡拉胶添加量对玉米淀粉膜抗拉强度及断裂伸长率的影响。如图 2 所示,随着卡拉胶添加量的增加,薄膜的抗拉强度也随之提高,当卡拉胶的添加量为 40% 时,薄膜具有最佳的抗拉强度,由 0% 时的 3.47 MPa 增加到 10.14 MPa;与抗拉强度不同,薄膜的断裂伸长率随着卡拉胶添加量的增加而减小,未添加卡拉胶时,玉米淀粉膜的断裂伸长率为 44.30%,当卡拉胶添加量为 40% 时,薄膜的断裂伸长率下降为 15.44%。

随着卡拉胶添加量的增加,薄膜的抗拉强度逐渐增大,表明在一定范围内卡拉胶与淀粉之间具有良好的相容性,卡拉胶分子与淀粉分子结合,具有良好的协同效果,使得原有的空间结构更加致密^[15]。而卡拉胶与淀粉二者之间相互作用,分子间的紧密联络阻碍了分子的活动,使得分子链的活性降低,导致韧性降低,断裂伸长率因而减小^[16]。敬翔等^[17]的研究也得到了类似的结果。由此可见,当未添加卡拉胶时,薄膜的抗拉强度较低;当卡拉胶添加量为 5% 时,虽然复合膜的抗拉强度最高,但断裂伸长率较低,所制备的复合膜的延展性较差;而卡拉胶添加量在 20% 左右具备较为适宜的抗拉强度和断裂伸长率。

2.1.3 甘油添加量对薄膜机械性能的影响

图 3 为不同甘油添加量对薄膜抗拉强度及断裂伸长率

的影响。如图 3 所示, 随着甘油添加量的增加, 薄膜的抗拉强度也随之减小, 当甘油的添加量为 40%时, 薄膜的抗拉强度最小, 由 20%时的 13.42 MPa 减小为 3.46 MPa; 与抗拉强度不同, 薄膜的断裂伸长率随着甘油添加量的增加而增大, 当甘油添加量为 20%, 薄膜的断裂伸长率最低, 为 5.37%, 当甘油添加量为 40%, 薄膜的断裂伸长率增大到 42.65%。

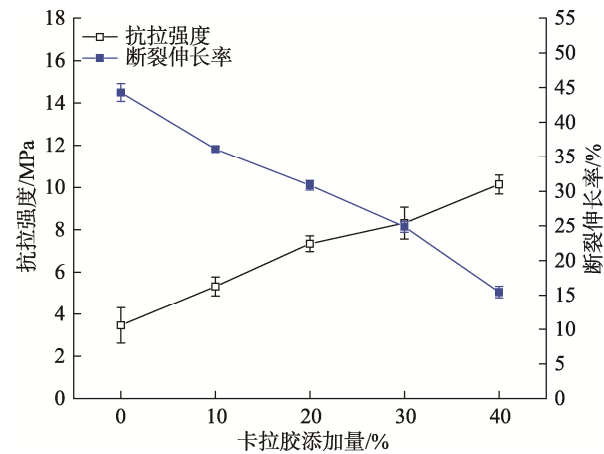


图 2 不同卡拉胶添加量对薄膜机械性能的影响(n=3)
Fig.2 Effects of different carrageenan dosages on the mechanical properties of the film (n=3)

这可能由于甘油的加入使得淀粉分子间的氢键联结点减少, 而甘油与淀粉分子之间的氢键联结点增多, 开始形成氢键, 改善了淀粉分子的流动性, 使得分子链的韧性增强, 从而薄膜的断裂伸长率增大^[18]; 但由于淀粉分子间的氢键联结点减少, 影响了网络结构的致密性, 分子间的作用力变差, 使得薄膜的抗拉强度降低^[19]。NORDIN 等^[20]也得到了类似的结果。由此可见, 当甘油添加量为 20%时, 复合膜的断裂伸长率较低, 韧性较差, 所制备的复合膜极易折断; 当甘油添加量为 40%时, 复合膜的抗拉强度较低; 而甘油添加量在 30%左右具备较为适宜的抗拉强度和断裂伸长率。

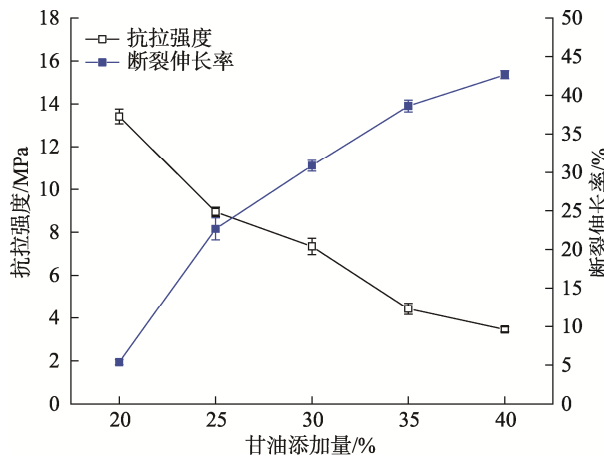


图 3 不同甘油添加量对薄膜机械性能的影响(n=3)
Fig.3 Effects of different glycerol dosage on the mechanical properties of the film (n=3)

2.1.4 正交实验结果分析

在单因素实验结果基础上, 考察玉米淀粉添加量 A、卡拉胶添加量 B、甘油添加量 C 3 个因素, 采用正交实验进一步优化玉米淀粉可食性薄膜的工艺条件, 正交实验因素水平表和结果分析表如表 2 所示。

对于因素 A(玉米淀粉)而言, 对复合膜抗拉强度的影响大小排第 3 位(根据极差 R 值大小, B、C 同), 其影响效果不显著, 选 A₃ 为佳(根据 K 值大小, B、C 同); 因素 A 对断裂伸长率的影响排第 1 位, 取 A₂ 为佳, 且极差为 14.40, 远高于抗拉强度。因此, 以抗拉强度为优选指标, 并综合考虑断裂伸长率, 取 A₂ 较佳。

对于因素 B(卡拉胶)而言, 对复合膜抗拉强度的影响大小排第 1 位, 其影响效果显著, 此时选 B₃ 为佳; 其对断裂伸长率的影响大小排第 3 位, 对断裂伸长率的影响效果不显著, 此时选 B₂ 为佳。薄膜在制备时以抗拉强度为优选指标, 并综合考虑薄膜的断裂伸长率, 选 B₃ 较佳。

对于因素 C(甘油)而言, 对复合膜抗拉强度的影响大小排第 2 位, 属于较次要因素, 此时选 C₁ 为佳; 其对断裂伸长率的影响大小排第 2 位, 属于较次要因素, 此时选 C₃ 为佳。薄膜在制备时以抗拉强度为优选指标, 并综合考虑断裂伸长率, 选 C₁ 较佳。

经极差分析后, 添加剂的最佳配比为 A₂B₃C₁, 即玉米淀粉添加量 3%、卡拉胶添加量 30%、甘油添加量 25%。以此条件制备的玉米淀粉可食性薄膜的机械性能为抗拉强度 9.07 MPa、断裂伸长率 22.37%, 具备较高的机械性能。

表 2 正交实验因素水平表
Table 2 Factor levels table of orthogonal experiment

编号	A	B	C	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
1	1	1	1	4.21	12.54
2	1	2	2	5.58	16.53
3	1	3	3	4.31	24.84
4	2	1	2	5.32	36.13
5	2	2	3	4.42	38.62
6	2	3	1	9.07	22.37
7	3	1	3	4.49	21.89
8	3	2	1	6.17	18.47
9	3	3	2	8.23	18.87
K ₁	14.10	14.02	19.45		
K ₂	18.81	16.17	19.13		
K ₃	18.89	21.61	13.22		
Ts	k ₁	4.70	4.67	6.48	
	k ₂	6.27	5.39	6.38	
	k ₃	6.30	7.20	4.41	
	R	1.60	2.53	2.07	

表 2(续)

编号	A	B	C	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
优水平	A ₃	B ₃	C ₁		
主次因素		B>C>A			
最优组合		B ₃ C ₁ A ₃			
EB	K ₁	53.91	70.56	53.38	
	K ₂	97.12	73.62	74.55	
	K ₃	59.23	66.08	85.35	
	k ₁	17.97	23.52	17.79	
	k ₂	32.37	24.54	24.85	
	k ₃	19.74	22.03	28.45	
	R	14.40	2.51	10.66	
优水平	A ₂	B ₂	C ₃		
主次因素		A>C>B			
最优组合		A ₂ C ₃ B ₂			

3 结论与讨论

本研究以玉米淀粉为基材, 卡拉胶和甘油作为添加剂, 制备玉米淀粉复合膜。以薄膜的抗拉强度和断裂伸长率为评定指标, 通过单因素实验及正交实验确定薄膜的最佳成膜工艺。单因素实验结果显示, 薄膜的抗拉强度随着玉米淀粉添加量的增加而增大; 当玉米淀粉的添加量为 3% 时, 薄膜具有最大的断裂伸长率; 随着卡拉胶添加量的增加, 薄膜的抗拉强度逐渐增大, 而断裂伸长率逐渐减小; 随着甘油添加量的增加, 薄膜的抗拉强度逐渐减小, 而断裂伸长率逐渐增大。最终获得的最佳成膜配比为 A₂B₃C₁, 即玉米淀粉添加量 3%、卡拉胶添加量 30%、甘油添加量 25%。以此条件制备的玉米淀粉可食性薄膜的机械性能为抗拉强度 9.07 MPa、断裂伸长率 22.37%, 具备较好的机械性能。本研究可为玉米淀粉复合膜的开发提供理论基础。

参考文献

[1] KHORRAMI NK, RADI M, AMIRI S, *et al.* Fabrication and characterization of alginate-based films functionalized with nanostructured lipid carriers [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 182: 373–384.

[2] KUMAR N, KAUR P, BHATIA S. Advances in bio-nanocomposite materials for food packaging: A review [J]. *Nutr Food Sci*, 2017, 47(4): 591–606.

[3] HOSSEINI SN, PIRSA S, FARZI J. Biodegradable nano composite film based on modified starch-albumin/MgO; antibacterial, antioxidant and structural properties [J]. *Polymer Test*, 2021, 97: 107182.

[4] NA YG, HUH HW, KIM MK, *et al.* Development and evaluation of a film-forming system hybridized with econazole-loaded nanostructured

lipid carriers for enhanced antifungal activity against dermatophytes [J]. *Acta Biomater*, 2020, 101: 507–518.

[5] GUJRAL H, SINHMAR A, NEHRA M, *et al.* Synthesis, characterization, and utilization of potato starch nanoparticles as a filler in nanocomposite films [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 186: 155–162.

[6] OTHMAN SH, NORDIN N, AZMAN NAA, *et al.* Effects of nanocellulose fiber and thymol on mechanical, thermal, and barrier properties of corn starch films [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 183: 1352–1361.

[7] HAZRATI KZ, SAPUAN SM, ZUHRI MYM, *et al.* Effect of plasticizers on physical, thermal, and tensile properties of thermoplastic films based on *Dioscorea hispida* starch [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 185: 219–228.

[8] HAMDAN MA, RAMLI NA, OTHMAN NA, *et al.* Characterization and property investigation of microcrystalline cellulose (MCC) and carboxymethyl cellulose (CMC) filler on the carrageenan-based biocomposite film [J]. *Mater Today*, 2021, 42: 56–62.

[9] LIU Y, QIN Y, BAI R, *et al.* Preparation of pH-sensitive and antioxidant packaging films based on κ-carrageenan and mulberry polyphenolic extract [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 134: 993–1001.

[10] AHADI AA, LINTON CA. Characterization of a natural biodegradable edible film obtained from arrowroot starch and iota-carrageenan and application in food packaging [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 191(30): 618–626.

[11] MU C, GUO J, LI X, *et al.* Preparation and properties of dialdehyde carboxymethyl cellulose crosslinked gelatin edible films [J]. *Food Hydrocoll*, 2012, 27(1): 22–29.

[12] SALMIERI S, ISLAM F, KHAN RA, *et al.* Antimicrobial nanocomposite films made of poly (lactic acid)-cellulose nanocrystals (PLA-CNC) in food applications-Part B: Effect of oregano essential oil release on the inactivation of *Listeria monocytogenes* in mixed vegetables [J]. *Cellulose*, 2014, 21(6): 4271–4285.

[13] CHANVRIER H, COLONNA P, DELLA VG, *et al.* Structure and mechanical behaviour of corn flour and starch-zein based materials in the glassy state [J]. *Carbohydr Polym*, 2005, 59(1): 109–119.

[14] 孙玉廷. 番茄皮渣可食性包装材料的制备与研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.

SUN YT. Preparation and research of tomato peel waste edible packaging materials [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015.

[15] 王虹霞, 丁克毅, 刘军. 果胶/壳聚糖/魔芋胶三元复合膜的结构及应用性能分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2015, 34(4): 407–412.

WANG HX, DING KY, LIU J. Analysis studie on the structure and application of pectin-chitosan-konjacgum composite membrane [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2015, 34(4): 407–412.

[16] 肖力源, 余国贤, 雷晏琳, 等. 玉米淀粉/壳聚糖/魔芋葡甘露聚糖复合膜的制备及物性研究[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(4): 86–92, 100.

XIAO LY, YU GX, LEI YL, *et al.* Preparation and physical properties of corn/chitosan/konjac glucomannan composite film [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2018, 33(4): 86–92, 100.

[17] 敬翔, 谭颖, 徐昆, 等. 氧化淀粉/卡拉胶复合膜制备与性能研究[J].

化工新型材料, 2016, 44(1): 77–79.

JING X, TAN Y, XU K, *et al.* Study on preparation and performance of oxidized starch-carrageenan blend film [J]. *New Chem Mater*, 2016, 44(1): 77–79.

- [18] GHASEMLOU M, KHODAIYAN F, OROMIEHIE A. Physical, mechanical, barrier, and thermal properties of polyol-plasticized biodegradable edible film made from kefiran [J]. *Carbohydr Polym*, 2011, 84(1): 477–483.

- [19] 冯明月. 茶多酚/淀粉活性膜的制备及性能表征[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

FENG MY. Preparation and characterization of tea polyphenol/starch active film [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

- [20] NORDIN N, OTHMAN SH, RASHID SA, *et al.* Effects of glycerol and thymol on physical, mechanical, and thermal properties of corn starch films [J]. *Food Hydrocoll*, 2020, 106: 105884.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



王存堂, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。

E-mail: robbertwang@163.com