

新材料技术

淀粉基食品包装膜材料的研究进展

张晓晓, 黄丽婕, 陈杰, 徐铭梓, 黄崇杏, 柴坤刚
(广西大学, 南宁 530004)

摘要: **目的** 将淀粉应用于绿色包装领域, 开发出具有良好生物降解性的淀粉基食品包装膜材料。**方法** 综述淀粉种类、增塑剂、多糖、脂质及类脂物质、蛋白质、交联剂、无机物和活性物质等对淀粉膜性能的影响。**结果** 在淀粉膜的制备中, 选用高直链淀粉含量的淀粉, 并加入增塑剂和交联剂可以改善淀粉膜的力学性能, 降低薄膜的水蒸气渗透性; 淀粉与多糖或蛋白质复合后, 不同成膜材料优势互补, 薄膜性能会得到改善, 加入脂质或类脂物质可改善薄膜的阻水性。**结论** 随着研究的深入, 淀粉基食品包装膜材料在很多领域都会有广阔的应用前景。

关键词: 淀粉; 食品包装膜; 生物降解

中图分类号: TB484.6; TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0083-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.016

Research Progress of Starch-based Food Packaging Film

ZHANG Xiao-xiao, HUANG Li-jie, CHEN Jie, XU Ming-zi, HUANG Chong-xing, CHAI Kun-gang
(Guangxi University, Nanning 530004, China)

ABSTRACT: The work aims to apply the starch in the field of green packaging, and develop starch-based food packaging films with good biodegradability. The effects of starch types, plasticizers, polysaccharides, lipids and lipid substances, proteins, crosslinking agents, inorganic substances and active substances on the properties of starch films were reviewed. In the preparation of starch film, the use of high amylose content of starch, and the addition of plasticizer and crosslinking agent could improve the mechanical properties of starch film and reduce the film's water vapor permeability. Starch was combined with polysaccharide or protein to make the advantages of different film-forming materials complement each other, thus the performance of film was improved. The addition of lipid or lipid substances could improve the film's water resistance. With the deepening of research, the starch-based food packaging film will have a very broad application prospect in many fields.

KEY WORDS: starch; food packaging film; biodegradation

淀粉是一种具有很好生物相容性的可再生资源, 来源广泛、价廉且可生物降解, 淀粉膜具有良好的透明度、可食性、安全性和耐折性, 因此淀粉被认为是最具有发展前景的绿色包装材料之一^[1-7]。由于纯淀粉膜具有脆性大、力学性能不高和阻水性能较差等缺点, 限制了淀粉基食品包装膜的进一步发展。为了改善淀粉膜的性能, 进而扩大其使用范围, 近些年来,

国内外的研究人员大量研究了淀粉的种类、增塑剂、多糖、脂质和交联剂等因素对淀粉膜性能的影响, 并取得了很大的进展。

1 淀粉种类

研究人员用于制备食品包装的淀粉原料主要有

收稿日期: 2017-07-23

基金项目: 制浆造纸科学与技术教育部/山东省重点实验室(齐鲁工业大学)开放基金(KF201628); 广西清洁化制浆造纸与污染控制重点实验室开放课题(ZR201602)

作者简介: 张晓晓(1992—), 女, 广西大学硕士生, 主攻淀粉基可降解材料。

通信作者: 黄丽婕(1983—), 女, 博士, 广西大学副研究员, 主要研究方向为淀粉基可降解材料。

大米、甘薯、马铃薯、木薯、玉米、蜡质玉米和小麦,此外,山药^[8]、菱角、燕麦、芋头、洋芋、绿豆、豌豆^[9-10]等也逐渐被开发利用,在这些原料中,研究最多的还是木薯淀粉、玉米淀粉和马铃薯淀粉。淀粉植物品种和生长环境的差异使得淀粉原料的结晶类型、支链淀粉和直链淀粉的含量、相对分子质量大小以及淀粉颗粒的结构和大小都会有所不同,而这些因素会影响由这些淀粉原料制成的薄膜的性能^[11-14]。

Li 等^[15]研究了具有不同直链淀粉和支链淀粉含量的 4 种玉米淀粉薄膜的加工性能和力学性能。研究结果表明,高直链淀粉含量膜表现出更好的力学性能,如较高的弹性模量和拉伸强度,以及非常高的冲击强度,且膜的玻璃化转变温度也随着直链淀粉含量的增加而升高。Chaudhary 等^[16]研究发现,糯玉米淀粉和蜡质玉米淀粉分别有较高的弹性模量和拉伸强

度,直链淀粉含量越高,薄膜压缩成型后达到水分含量平衡的速率越快,断裂应变越高,且淀粉颗粒形状比较规则、尺寸较小。Chaudhary 等^[17]还发现具有低直链淀粉含量的淀粉膜具有较低的扭矩和模具压力值,能够经受的机械加工次数较少。从以上这些研究中可以看出,直链淀粉含量会直接影响淀粉颗粒形状,进而影响薄膜的力学性能和加工性能,因此,在淀粉薄膜的制备中,研究人员必须要考虑直链淀粉的含量。

不同淀粉膜的力学性能见表 1^[18],可以看出,当甘油的含量很低时,即可以忽略增塑剂对淀粉膜力学性能的影响时,直链淀粉含量越高,制成的淀粉膜抗拉强度越高,断裂伸长率越小。绿豆淀粉、菱角淀粉和甘薯淀粉所加甘油含量相同,直链淀粉含量与抗拉强度和断裂伸长率之间的关系仍然符合上述规律。

表 1 不同淀粉膜的力学性能
Tab.1 Mechanical properties of different starch films

淀粉种类	直链淀粉质量分数/%	增塑剂质量分数/%	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
高直链玉米淀粉	70	0	56.8	6
高直链玉米淀粉	70	0.6	30.9	9.8
豌豆淀粉	34	0.6+0.1	26.5	13.2
玉米淀粉	27	0.6+0.1	23.5	14.3
木薯淀粉	19	0	20±6	—
马铃薯淀粉	14	1	17±6	20±4
绿豆淀粉	30	2.5	19.0±2.2	42.2±7.7
菱角淀粉	24	2.5	13.1±1.3	42.8±8.7
甘薯淀粉	17	2.5	12.1±0.7	79.4±9.2

注:豌豆淀粉和玉米淀粉的增塑剂为质量分数为 0.6%的聚乙二醇(400)和质量分数为 0.1%的硬脂酸-软脂酸(体积比为 1:1),其余淀粉的增塑剂均为甘油

2 增塑剂对淀粉膜性能的影响

纯淀粉膜很脆、容易折断,为了解决这一问题,可以在淀粉膜的制备过程中加入增塑剂,增塑剂可以减小淀粉分子间的相互作用力、降低膜的抗张强度、减小膜的刚度和增加成膜液的流动性,从而减小淀粉膜的结晶度,赋予膜良好的弹性、柔软性和可加工性^[19],薄膜的各项性能随之得到改善。淀粉基食品包装膜用到的增塑剂种类很多,其中最常见的是甘油和山梨醇。不同的增塑剂对淀粉膜性能的影响见表 2^[20-22]。

甘油化学式为 $C_3H_8O_3$, 分子较小,具有较高的单分子所含羟基与分子质量比值和较低的玻璃化转变温度($-52\text{ }^{\circ}\text{C}$),因此甘油具有良好的渗透力,很容易进入淀粉颗粒之间,并与淀粉形成氢键。这些特点使甘油成为淀粉基薄膜制备中应用最为广泛的增塑剂^[23]。

Talja 等^[24]研究了增塑剂(甘油、木糖醇和山梨糖醇)对马铃薯淀粉基可食用膜物理和力学性能的影响。

研究表明,随着增塑剂含量的增加,薄膜的拉伸强度、含水量和水蒸气渗透性增加,而弹性模量和玻璃化转变温度降低。3 种增塑剂中甘油对淀粉膜物理和力学性能的影响最大,山梨醇对其产生的影响最小。

Garcia 等^[25]分析了制剂(脂质、淀粉类型和增塑剂)对玉米淀粉薄膜和涂层的显微结构、水蒸气和气体渗透性的影响。研究表明,增塑剂可以保持膜和涂层的完整性,避免毛孔和裂缝。由高直链淀粉制成的薄膜比常规玉米淀粉薄膜具有更低的水蒸气渗透性和气体渗透性,具有山梨醇(20 g/L)的膜的渗透率低于具有甘油的膜的渗透率,向配方中加入向日葵油(2 g/L)可以降低淀粉膜的水蒸气渗透性。

Zhang 等^[26]研究结果表明增塑剂(多元醇和单糖)的质量分数为 0%~20%时,豌豆淀粉薄膜的结晶度随着增塑剂含量的增加而升高,而水分含量、水蒸气渗透性、氧气渗透性和伸长率随着增塑剂含量的增加而下降。

表 2 不同的增塑剂对淀粉膜性能的影响
Tab.2 Effects of different plasticizers on the properties of starch film

淀粉	增塑剂	分子质量/ (g·mol ⁻¹)	单分子 羟基数	平衡水质 量分数/%	断裂伸 长率/%	弹性模 量/MPa	水蒸气透过率/ (g·mm·m ⁻² ·h ⁻¹ ·kPa ⁻¹)
豌豆淀粉	乙二醇	62.07	2	12.1	4.2	1584.6	1.99
豌豆淀粉	果糖	180.16	5	13.9	30.3	188.6	1.96
豌豆淀粉	葡萄糖	180.16	5	11.7	54.6	110.9	1.90
豌豆淀粉	甘露糖	180.16	5	12.5	70.7	111.2	2.27
豌豆淀粉	甘油	92.09	3	25.3	36.4	97.5	2.75
豌豆淀粉	山梨醇	182.17	6	10.8	61.2	106.6	2.61
豌豆淀粉	麦芽糖醇	344	9	9.6	93.7	40.7	2.28
蜡质玉米淀粉	甘油	92	3	16.9	14	38	—
蜡质玉米淀粉	木糖醇	152	5	15.6	6.4	93	—
蜡质玉米淀粉	山梨醇	182	6	15.3	13.3	112	—

注：1 g 豌豆淀粉需使用 4.34 mmol 增塑剂，在相对湿度为 50%的条件下保存并测试；1 g 蜡质玉米淀粉需使用 0.5 g 增塑剂，在相对湿度为 58%的条件下保存并测试

从以上的研究中可以看出，增塑剂可以提高薄膜的完整性，从而提高薄膜的力学性能，甘油对薄膜的增塑效果比较好，而山梨醇能改善薄膜的水蒸气渗透性，在实际应用中，可以考虑结合 2 种增塑剂进行使用。

3 其他添加剂对淀粉膜性能的影响

纯淀粉膜作为食品包装材料在力学性能和阻水性方面还有很大不足，因此，研究人员尝试在纯淀粉膜中加入其他物质来改善淀粉膜的性能。

3.1 多糖

纤维素是自然界储量最大的多糖，具有可再生性和生物降解性，与淀粉也有很好的生物相容性，因此，在淀粉膜的制备中经常加入纤维素或纤维素衍生物^[27]。Lu 等^[28]将苕麻纤维素纳米晶体（RN）作为填料，成功制备了一系列环保型甘油增塑淀粉（PS）生物复合材料。研究发现，当填料质量分数从 0%增加到 40%时，材料的弹性模量和拉伸强度分别从 56，2.8 MPa 增加到 480，6.9 MPa。随着 RN 填料在 PS 基体中的增加，复合材料显示出更高的耐水性。生物复合材料的性能改善可能归因于填料和填料之间以及填料与 PS 基体之间的分子间氢键相互作用。

壳聚糖在自然界中的储量仅次于纤维素，除了具有纤维素的可再生性、生物降解性和生物相容性这些优点外，还具有抗菌和抗氧化作用，在食品领域应用非常广泛^[29]。Ji 等^[30]研究了壳聚糖对玉米淀粉纳米复合膜抗菌性和物理性能的影响，研究表明，随着壳聚糖含量的增加，纳米复合膜对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和蜡状芽孢杆菌的抗菌活性显著提高，对革兰氏阴性细菌的抑制作用更为有效。随着壳聚糖含量的增

加，壳聚糖质量分数为 30%时，纳米复合膜的拉伸强度从 2.24 MPa 增加到 10.71 MPa，断裂伸长率最高为 134.31%。傅里叶变换红外光谱分析表明，壳聚糖和淀粉之间形成了氢键。壳聚糖的加入不仅起到抗菌的效果，同时也增强了薄膜的力学性能。

海藻酸钠是一种储量丰富的天然多糖，具有生物降解性、可再生性、稳定性和安全性，并且可制成薄膜，在食品和医药领域得到了广泛的应用。毕会敏等^[31]在马铃薯淀粉膜的制备中分别加入了海藻酸钠、羧甲基纤维素、甲基纤维素和琼脂作为增强剂，研究其对薄膜的影响，结果表明，加入羧甲基纤维素的淀粉膜透明度最高，柔韧性最好。

普鲁兰多糖是一种特殊的微生物多糖，制成的薄膜透明、无味、无毒、无色，具有高抗油性、韧性，能食用，因此常被用来改善淀粉膜性能。刘鹏飞等^[32]研究了普鲁兰多糖对氧化酯化淀粉基可食性薄膜性能的影响，结果表明，随着普鲁兰多糖用量的增加，薄膜透湿性增大，白度降低，水溶性增加，氧气透过率下降，薄膜表面变得光滑、平整。

多糖的加入可以明显改善薄膜的性能，根据实际需要选用具有相应效果的多糖，从而制得具有良好抗菌性、力学性能、安全性和经济性的淀粉薄膜。

3.2 脂质及类脂物质

为了降低纯淀粉膜的水蒸气透过率，通常在薄膜制备中加入脂质或类脂物质。Petersson 等^[33]研究了乙酰化单甘油酯（Acetem）的添加量对天然马铃薯淀粉（NPS）膜水蒸气渗透性和力学性能的影响。结果表明，膜厚度随着 Acetem 含量的增加而增加。与纯 NPS 膜相比，添加质量分数为 10%的 Acetem 后，薄膜水蒸气渗透性降低了 27%，而当 Acetem 添加量较大时，会降低薄膜的弹性模量、断裂应力和应变。Liu

等^[34]充分探讨了花生酸、硬脂酸、棕榈酸、肉豆蔻酸和月桂酸这5种饱和脂肪酸(SFAs)对甘薯淀粉膜的影响。结果表明,具有SFA的膜呈现连续且均匀的结构,但SFA的添加对薄膜热封性有负面影响。与对照膜相比,复合膜的拉伸强度升高,断裂伸长率、透光率和水蒸气渗透性下降。脂质的加入对薄膜阻水性的改善最为明显,但也会影响薄膜的其他性能,脂质加入量过大会降低薄膜的力学性能。

3.3 蛋白质

蛋白质是自然界常见的一种生物大分子,也是人体不可缺少的物质。淀粉膜制备中常用的蛋白质有大豆蛋白、小麦蛋白和玉米蛋白,其中,大豆蛋白来源最为丰富^[35]。蛋白质的加入不仅可以改善淀粉膜的耐水性,还具有一定的营养价值,不同来源的蛋白质对淀粉膜力学性能的影响不同。

Ban等^[36]研究表明,纤维素和壳聚糖的加入使淀粉膜的力学性能得到很大改善,明胶对淀粉膜力学性能的增强作用不明显,但可以明显增强淀粉膜的耐水性。Jagannath等^[37]研究了3种蛋白质(酪蛋白、明胶和清蛋白)与淀粉的复合膜,研究表明,与含有明胶和清蛋白的淀粉膜相比,酪蛋白膜在不同相对湿度条件下均显示出较低的水蒸气透过率、较高的拉伸强度和断裂伸长率。

3.4 交联剂

交联剂可以加强各种成膜材料分子间和分子内的相互作用,使膜的结构变得紧凑、均匀,从而改善淀粉膜的力学性能和阻湿性能^[23]。Lee等^[38]使用三偏磷酸钠和三聚磷酸钠作为交联剂对天然玉米淀粉进行改性,发现与PVA-普通淀粉复合膜相比,用交联剂处理过的PVA-淀粉复合膜的拉伸强度和断裂伸长率都有所提高,交联淀粉的溶胀行为和溶解度也比普通淀粉低。Mathew等^[39]研究了掺入阿魏酸的淀粉-壳聚糖复合膜的特性,研究发现阿魏酸的加入使膜的表面更加光滑和均匀,提高了复合膜的阻隔性能和拉伸强度,并显著提高了复合膜抑制脂质氧化的能力。

3.5 无机物

在淀粉膜的制备中,有时也会添加一些无机物,最常见的是蒙脱石和纳米二氧化硅。Nordqvist等^[40]发现将蒙脱石加入支链玉米淀粉中,具有提高复合膜的强度、刚度和阻隔性能的综合作用。Kampeerapappun等^[41]通过铸造制备木薯淀粉/蒙脱石/壳聚糖复合膜,发现当蒙脱石含量较少时,可以提高复合膜的拉伸性能。

Xiong等^[42]研究发现薄膜的力学性能、透光率和耐水性均随纳米SiO₂含量的增加而显著提高,其中,

薄膜的拉伸强度、断裂伸长率和透光率分别提高了79.4%,18%和15%,吸水率下降了70%。生物降解性达到了ISO 14855—1999的要求,淀粉和PVA之间的混溶性和相容性提高。

3.6 活性物质

将抗菌剂和抗氧化剂等活性物质加入淀粉膜中可以制成具有一定抗菌性和抗氧化活性的可食性膜,所添加的活性物质对淀粉膜的性能也会产生一定的影响^[7]。目前,可食性薄膜使用的抗菌剂主要是壳聚糖、山梨酸钾^[6]和茶多酚,使用的抗氧化剂主要是丁基羟基茴香醚。

Maizura等^[43]用部分水解的西米淀粉和藻酸盐的混合物制备食用膜,将柠檬草油(体积分数为0.1%~0.4%)和甘油(质量分数为0%和20%)分别作为天然抗微生物剂和增塑剂加入膜中。结果表明,含有柠檬草油的薄膜能够有效抑制大肠杆菌O157:H7的生长。在不存在甘油的情况下,膜的拉伸强度随柠檬草油含量的增加而降低,但伸长率无显著差异。甘油质量分数为20%的薄膜的断裂伸长率和水蒸气透过率随着柠檬草油含量的增加而显著增加。Vásconez等^[44]研究了壳聚糖和山梨酸钾对木薯淀粉基可食性薄膜和涂层性能的影响,研究发现,壳聚糖在涂层溶液中比在膜基质中更有效,将壳聚糖添加到淀粉基质中会降低薄膜的水蒸气渗透性和在水中的溶解度,山梨酸钾的添加未改变薄膜溶解度,但提高了其水蒸气渗透性。

4 结语

就目前来说,淀粉基食品包装膜材料主要存在两方面的问题,即力学性能不足和阻水性能较差,结合前文分析,可以通过以下几个途径来解决:选择高直链淀粉含量的淀粉制备淀粉膜;用增塑剂和交联剂改善淀粉膜的力学性能,并降低薄膜水蒸气渗透性;加入脂质或类脂物质,改善薄膜阻水性;与多糖或蛋白质复合,使不同成膜材料优势互补,从而改善薄膜性能;在薄膜的制备中添加无机物。

淀粉基食品包装膜材料的研究主要应集中在以下几个方面:改善薄膜力学性能,提高其阻水性;降低成本;抗菌膜和抗氧化膜等多功能性薄膜的研发;开发工业化生产淀粉膜的机械设备和优化淀粉膜生产工艺;制定相关的性能和卫生检测标准。相信通过今后的研究发展,日常生活中将会出现越来越多的淀粉基材料。

参考文献:

- [1] 朱杰,李晓玺,黄晨,等.食品模拟体系中疏水性淀

- 粉基膜材的结构变化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 111—116.
- ZHU Jie, LI Xiao-xi, HUANG Chen, et al. Structural Changes of Hydrophobic Starch-based Film in Food Simulation System[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(3): 111—116.
- [2] 海棠. 马铃薯原淀粉膜与交联淀粉膜性能比较[J]. 保鲜与加工, 2007, 7(2): 38—40.
- HAI Tang. Comparison of Properties of Potato Starch and Cross-linked Starch Film[J]. Preservation and Processing, 2007, 7(2): 38—40.
- [3] PRANAMUDA H, TOKIWA Y, TANAKA H. Physical Properties and Biodegradability of Blends Containing Poly(ϵ -Caprolactone) and Tropical Starches[J]. Journal of Polymers and the Environment, 1996, 4(1): 1—7.
- [4] RÖPER H, KOCH H. The Role of Starch in Biodegradable Thermoplastic Materials[J]. Starch-Stärke, 1990, 42(4): 123—130.
- [5] KOENIG M F, HUANG S J. Biodegradable Blends and Composites of Polycaprolactone and Starch Derivatives[J]. Polymer, 1995, 36(9): 1877—1882.
- [6] GRIFFIN G J L. Biodegradable Fillers in Thermoplastics[J]. Advanced Chemistry Series, 1973, 33(2): 88.
- [7] 王赟. 淀粉基绿色建筑材料的应用研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2012, 21(1): 57—60.
- WANG Yun. Study on the Application of Starch-based Green Building Materials[J]. Chinese Journal of Adhesives, 2012, 21(1): 57—60.
- [8] MALI S, GROSSMANN M V E, GARCÍA M A, et al. Barrier, Mechanical and Optical Properties of Plasticized Yam Starch Films[J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 56(2): 129—135.
- [9] MA X, CHANG P R, YU J, et al. Properties of Biodegradable Citric Acid-modified Granular Starch/Thermoplastic Pea Starch Composites[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(1): 1—8.
- [10] 阚建全, 陈宗道. 可食包装膜与合成包装膜综合性质的对比研究[J]. 食品与发酵工业, 1999(6): 10—12.
- KAN Jian-quan, CHEN Zong-dao. Comparative Study on the Synthetic Properties of Edible Packaging Film and Synthetic Packaging Film[J]. Food and Fermentation Industry, 1999(6): 10—12.
- [11] 吴颖, 于九皋, 耿凤英. 淀粉基食品包装膜材料的研究进展[J]. 信息记录材料, 2008, 9(6): 36—43.
- WU Ying, YU Jiu-gao, GENG Feng-ying. Study on the Development of Starch-based Food Packaging Film Materials[J]. Information Recording Materials, 2008, 9(6): 36—43.
- [12] BASTIOLI C. Properties and Applications of Mater-Bi Starch-based Materials[J]. Polymer Degradation and Stability, 1998, 59(1—3): 263—272.
- [13] 李林, 万玲艳, 李新法, 等. 淀粉基生物降解塑料的研究进展[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 117—120.
- LI Lin, WAN Ling-yan, LI Xin-fa, et al. Study on Progress of Starch-based Biodegradable Plastics[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 117—120.
- [14] 何乐, 郭宁, 陈复生, 等. 我国淀粉基生物可降解材料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2015, 43(4): 4—5.
- HE Le, GUO Ning, CHEN Fu-sheng, et al. Study on the Progress of Starch-based Biodegradable Materials in China[J]. New Materials for Chemical Engineering, 2015, 43(4): 4—5.
- [15] LI Ming, LIU Peng, ZOU Wei, et al. Extrusion Processing and Characterization of Edible Starch Films with Different Amylose Contents[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106: 95—101.
- [16] CHAUDHARY A L, TORLEY P J, HALLEY P J, et al. Amylose Content and Chemical Modification Effects on Thermoplastic Starch from Maize-Processing and Characterization Using Conventional Polymer Equipment[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(4): 917—925.
- [17] CHAUDHARY A L, MILER M, TORLEY P J, et al. Amylose Content and Chemical Modification Effects on the Extrusion of Thermoplastic Starch from Maize[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(4): 907—913.
- [18] 湛小立, 赵国华. 影响可食性淀粉膜性能的因素研究[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(2): 100—103.
- CHEN Xiao-li, ZHAO Guo-hua. Studies on the Factors Affecting the Performance of Edible Starch Films[J]. Food and Fermentation Industries, 2008, 34(2): 100—103.
- [19] 贾超, 王利强, 卢立新. 淀粉基可食膜研究进展[J]. 食品科学, 2013, 34(5): 289—292.
- JIA Chao, WANG Li-qiang, LU Li-xin. Advances in Starch-based Edible Film[J]. Food Science, 2013, 34(5): 289—292.
- [20] ZHANG Y, HAN J H. Mechanical and Thermal Characteristics of Pea Starch Films Plasticized with Monosaccharides and Polyols[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(2): 109—118.
- [21] ZHANG Y, HAN J H. Plasticization of Pea Starch Films with Monosaccharides and Polyols[J]. Journal of Food Science, 2006, 71(6): 253—261.
- [22] MATHEW A P, DUFRESNE A. Plasticized Waxy Maize Starch: Effect of Polyols and Relative Humidity on Material Properties[J]. Biomacromolecules, 2002, 3(5): 1101—1108.
- [23] 陈翠莲, 李清亮, 邱林叔. 淀粉基食品包装材料的研究进展[J]. 四川农业科技, 2015(11): 53—55.
- CHEN Cui-lian, LI Qing-liang, QIU Lin-shu. Research Progress of Starch-based Food Packaging Materials[J]. Journal of Sichuan Agricultural Sciences, 2015(11): 53—55.
- [24] TALJA R A, HELÉN H, ROOS Y H, et al. Effect of Various Polyols and Polyol Contents on Physical and Mechanical Properties of Potato Starch-based Films[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 67(3): 288—295.

- [25] GARCIA M A, MARTINO M N, ZARITZKY N E. Lipid Addition to Improve Barrier Properties of Edible Starch-based Films and Coatings[J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(6): 941—944.
- [26] ZHANG Y, HAN J H. Crystallization of High-amylose Starch by the Addition of Plasticizers at Low and Intermediate Concentrations[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(1): 8.
- [27] 郑譔, 侯袁婧, 龚春丽, 等. 耐水型热塑性淀粉基生物降解复合材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(2): 389—395.
ZHENG Xuan, HOU Yuan-jing, GONG Chun-li, et al. Research Progress of Water-resistant Thermoplastic Starch-based Biodegradable Composites[J]. *Materials Review: Nano and New Materials*, 2016, 30(2): 389—395.
- [28] LU Y, WENG L, CAO X. Morphological, Thermal and Mechanical Properties of Ramie Crystallites-reinforced Plasticized Starch Biocomposites[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 63(2): 198—204.
- [29] 何乐, 陈复生, 刘伯业, 等. 天然高分子可降解材料的研究与发展[J]. *化工新型材料*, 2011, 39(5): 4—6.
HE Le, CHEN Fu-sheng, LIU Bo-ye, et al. Research and Development of Natural Polymer Biodegradable Materials[J]. *New Materials for Chemical Engineering*, 2011, 39(5): 4—6.
- [30] JI N, QIN Y, XI T, et al. Effect of Chitosan on the Antibacterial and Physical Properties of Corn Starch Nanocomposite Films[J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(1): 55—58.
- [31] 毕会敏, 马中苏, 闫革华, 等. 马铃薯淀粉基可食薄膜的研究[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2003, 33(4): 109—112.
BI Hui-min, MA Zhong-su, YAN Ge-hua, et al. Study on Potato Starch-based Edible Film[J]. *Journal of Jilin University (Engineering Science)*, 2003, 33(4): 109—112.
- [32] 刘鹏飞, 董海洲, 侯汉学, 等. 普鲁兰多糖对挤压流延法制备淀粉膜性能的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(2): 37—40.
LIU Peng-fei, DONG Hai-zhou, HOU Han-xue, et al. Effects of Pullulan Polysaccharides on Properties of Starch Films Prepared by Extrusion Casting[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2011, 37(2): 37—40.
- [33] PETERSSON M, STADING M. Water Vapour Permeability and Mechanical Properties of Mixed Starch-monoglyceride Films and Effect of Film Forming Conditions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2005, 19(1): 123—132.
- [34] LIU P, SUN S, HOU H, et al. Effect of Five Saturated Fatty Acids on the Properties of Sweet-potato-starch-based Films[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(5): 55—58.
- [35] SWAIN S N, BISWAL S M, NANDA P K, et al. Biodegradable Soy-based Plastics: Opportunities and Challenges[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2004, 12(1): 35—42.
- [36] BAN W, SONG J, ARGYROPOULOS D S, et al. Improving the Physical and Chemical Functionality of Starch-derived Films with Biopolymers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 100(3): 2542—2548.
- [37] JAGANNATH J H, NANJAPPA C, DAS GUPTA D K, et al. Mechanical and Barrier Properties of Edible Starch-protein-based Films[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2003, 88(1): 64—71.
- [38] LEE W J, YOUN Y N, YUN Y H, et al. Physical Properties of Chemically Modified Starch(RS4)/PVA Blend Films-Part 1[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2007, 15(1): 35—42.
- [39] MATHEW S, ABRAHAM T E. Characterisation of Ferulic Acid Incorporated Starch-chitosan Blend Films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(5): 826—835.
- [40] NORDQVIST D, HEDENQVIST M S. Properties of Amylopectin/Montmorillonite Composite Films Containing a Coupling Agent[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 104(6): 4160—4167.
- [41] KAMPEERAPAPPUN P, AHT-ONG D, PENTRAKOON D, et al. Preparation of Cassava Starch/Montmorillonite Composite Film[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 67(2): 155—163.
- [42] XIONG H G, TANG S W, TANG H L, et al. The Structure and Properties of a Starch-based Biodegradable Film[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 71(2): 263—268.
- [43] MAIZURA M, FAZILAH A, NORZIAH M H, et al. Antibacterial Activity and Mechanical Properties of Partially Hydrolyzed Sago Starch-alginate Edible Film Containing Lemongrass Oil[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(6): 324.
- [44] VÁSCONEZ M B, FLORES S K, CAMPOS C A, et al. Antimicrobial Activity and Physical Properties of Chitosan-tapioca Starch Based Edible Films and Coatings [J]. *Food Research International*, 2009, 42(7): 762—769.