

纳米 SiO₂ 改性生物降解复合薄膜研究

陈志周, 牟建楼, 刘玮佳, 于志彬, 孙兰芳

(河北农业大学 食品科技学院, 保定 071001)

摘要: **目的** 以壳聚糖(chitosan)、木薯淀粉和聚乙烯醇(PVA)为基础成膜原料, 探究纳米 SiO₂ 改性木薯淀粉/PVA/壳聚糖薄膜的制备工艺过程。**方法** 以薄膜断裂伸长率、抗张强度、透光率和吸水率为评判标准, 在单因子试验基础上, 设计 L₉(3⁴) 正交试验, 研究纳米 SiO₂ 含量、分散剂十二烷基苯磺酸钠含量、膜液 pH 值等 3 个因素对纳米 SiO₂ 改性木薯淀粉/聚乙烯醇/壳聚糖薄膜性能的影响。**结果** 得出了制备纳米 SiO₂ 改性木薯淀粉/PVA/壳聚糖薄膜的最佳工艺参数, 纳米 SiO₂ 质量分数为 2.0%、十二烷基苯磺酸钠质量分数为 2.0%、膜液 pH 值为 3.0, 3 个因素对改性薄膜性能的影响程度大小排序为分散剂含量>纳米 SiO₂ 含量>pH 值。**结论** 获得了纳米 SiO₂ 改性木薯淀粉/PVA/壳聚糖薄膜的最佳生产工艺参数。

关键词: 纳米 SiO₂; 壳聚糖; 木薯淀粉; 聚乙烯醇(PVA); 生物降解

中图分类号: TB383 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)03-0086-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.012

Nano SiO₂ Modified Biodegradable Composite Films

CHEN Zhi-zhou, MOU Jian-lou, LIU Wei-jia, YU Zhi-bin, SUN Lan-fang

(College of Food Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

ABSTRACT: The work aims to study the preparation technology process of Nano-SiO₂ modified cassava starch/PVA/chitosan film, with chitosan, cassava starch and polyvinyl alcohol (PVA) as basic film-forming materials. With elongation at break, tensile strength, transmittance and water absorption as evaluation index, based on single factor test, the influences of the Nano-SiO₂ content, the content of dispersant SDBS and the pH value of casting solution on properties of Nano-SiO₂ modified cassava starch/PVA/chitosan films were studied through the design of L₉(3⁴) orthogonal experiment. The best process parameters for the preparation of Nano-SiO₂ modified cassava starch/PVA/chitosan film were obtained. The mass fraction of Nano-SiO₂ was 2.0%, the mass fraction of SDBS was 2.0%, and the pH value of casting solution was 3.0. The ranking of three factors affecting the modified film performance was dispersant content>Nano-SiO₂ content>pH value. The best production process parameters of Nano-SiO₂ modified cassava starch/PVA/chitosan films are obtained.

KEY WORDS: nano-SiO₂; chitosan; cassava starch; polyvinyl alcohol (PVA); biodegradation

随着经济水平的提高,节能环保已成为当今社会的主流,生物可降解薄膜应运而生。近几年,针对生物可降解薄膜的研究越来越深入,应用也越来越广泛。生物可降解薄膜不仅具有普通薄膜的功效,且在

达到使用寿命可自然分解(土壤微生物作用、光照、紫外线作用等)并重回自然界,无毒无害^[1]。

木薯是世界三大薯之一,产量丰富,价格低廉,在中国南方地区多有种植。木薯与小麦、玉米等作物

收稿日期: 2018-10-14

基金项目: 河北省科技计划(17227117D); 河北省食品科学与工程学科“双一流”建设资金项目(2016SPGCA18)

作者简介: 陈志周(1968—),男,河北农业大学教授,主要研究方向为包装材料与技术。

相比,淀粉含量最高,是优良的淀粉生产来源^[2]。木薯淀粉以木薯为基料,经过淀粉提取、脱水干燥等步骤制成无毒、无味、可食用的白色粉末,其成膜性好、粘度高,是良好的成膜基础物质。与其他淀粉相比,木薯淀粉具有蛋白质、灰分含量低及渗透力强等性质,可大大提高复合薄膜的性能。此外,其成本低廉、应用广泛,在众多领域都发挥着重要的作用^[3-5]。聚乙烯醇为白色、无味、易溶于水呈粉末状或片状的合成高分子材料,且易于降解^[6-7],常用作化工原料。通过一定工序可将其加工成粘合剂、乳化剂、胶水等物质,因此将其应用于薄膜的制备,可使薄膜的生物相容性和力学性能增强,在一定条件下具有优良的生物可降解性和水溶性^[8]。壳聚糖是一种天然高分子物质,具备优异的安全性、相容性等性能,广泛应用于化工、医药、金属、化妆品等领域。壳聚糖易成膜,且成膜后性能优异,有良好的韧性、抗张强度及透气性^[9]。木薯淀粉和壳聚糖是天然高分子,聚乙烯醇是化学合成可生物降解的高分子,3者都具有可相互结合的基团,容易形成交互作用的化学连接。综上所述,以木薯淀粉、聚乙烯醇和壳聚糖为基材制备复合薄膜可以综合各组成材料的优势,以得到性能较优异的材料。

纳米材料中分散相尺寸是传统的分散相尺寸(0.1~1 μm)的1/100,加入纳米材料后复合包装材料比原包装材料性能更加优异^[10]。纳米 SiO₂ 是一种化工材料,应用广泛,可改善其他材料耐化学、抗老化及强度性能^[11],可用于制作药物载体、涂料、塑料、化妆品、陶瓷、粘结剂、密封胶和电子封装材料等物料^[12-13]。目前,国内已有关于纳米 SiO₂ 薄膜的制备及性能、纳米 SiO₂ 对聚乙烯醇/淀粉熔融吹塑薄膜性能的影响等研究^[14-16],但纳米 SiO₂ 对木薯淀粉/聚乙烯醇/壳聚糖薄膜性能影响的研究鲜有报道。

近些年,一些学者使用淀粉、PVA、壳聚糖制备复合薄膜,但是关于制备木薯淀粉/PVA/壳聚糖复合薄膜的研究较少^[17],这是因为与其他淀粉相比,木薯淀粉中支链淀粉的含量偏高,使得成膜后的力学性能普遍较差。综上所述,文中拟进一步研究纳米材料改性木薯淀粉/PVA/壳聚糖生物可降解复合薄膜的制备工艺过程。

1 实验

1.1 材料与设备

实验材料主要有木薯淀粉,食用级;聚乙烯醇(PVA, 1799),化学纯;壳聚糖,分析纯;冰醋酸,分析纯;无水乙醇,分析纯;丙三醇,分析纯;戊二醛,分析纯;HCL,分析纯;NaOH,分析纯;溴化钠(NaBr),分析纯;纳米 SiO₂,纳米级;十二烷基

苯磺酸钠,分析纯;聚乙二醇,分析纯;六偏磷酸钠,分析纯;PVPK-30,分析纯。

主要设备有紫外分光光度计(TU-1810),北京普析通用仪器;电动搅拌器(JB-1),上海人和科学仪器;循环水式多用真空泵(SD-III),保定北市区太阳科教仪器厂;恒温水浴锅(H-3),河南博达电器有限公司;精密电子天平(ATU-214),北京普析通用仪器有限公司;精密酸度测试仪(PS-2C),上海精工实业;薄膜厚度测量仪(YW-4型),科美仪器;智能电子拉力试验机(XLW-PC),济南兰光机电技术有限公司;数显鼓风干燥箱(GZX-9140MBE),上海博讯实业有限公司;数控超声波清洗器(HT-300BQ),济宁恒通超声电子设备有限公司。

1.2 实验方案

1.2.1 复合薄膜的制备方法

称取壳聚糖 2.0 g,加入 100 mL 体积分数为 1.0% 的醋酸溶液;称取 6.0 g 木薯淀粉,加入 100 mL 蒸馏水;称取 6.0 g 聚乙烯醇,加入 100 mL 蒸馏水;称取适量纳米材料和分散剂,混合后加入 50 mL 蒸馏水。将木薯淀粉溶液放入恒温(90 °C)水浴锅中加热搅拌 0.5 h;将壳聚糖溶液放入超声清洗机中震荡 0.5 h;将聚乙烯醇溶液放入恒温(90 °C)水浴锅中加热搅拌 0.5 h;将纳米材料溶液放入超声清洗机中加热震荡。将上述溶液混合,加入 10 mL 无水乙醇,调节 pH。10 min 后加入 10.0 mL 甘油和 1.5 mL 戊二醛,最后定容到 300 mL。抽滤到溶液中不含气泡时立刻将其涂覆在洁净的玻璃板上,随后在烘箱中进行恒温干燥。当其干燥成膜后,取下薄膜,在含有饱和 NaBr 溶液的干燥器中进行平衡处理,24 h 后取出,最后对薄膜特性进行测试。

1.2.2 单因素对木薯淀粉/PVA/壳聚糖复合薄膜性能影响

选取纳米 SiO₂ 粒径为 15, 30, 50 nm, 确定最佳的纳米 SiO₂ 粒径;选取纳米 SiO₂ 质量分数为 0, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% (复合薄膜干质量为 100%), 确定最佳纳米 SiO₂ 质量分数;不加分散剂为对照,选取 PVPK-30、六偏磷酸钠、十二烷基苯磺酸钠、聚乙二醇等 4 种分散剂,确定最佳分散剂种类;分散剂十二烷基苯磺酸钠质量分数为 0, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% (纳米 SiO₂ 干质量为 100%), 确定最佳十二烷基苯磺酸钠的含量;膜液 pH 分别为 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 得到适宜的膜液 pH 值。参照 1.2.1 节制备薄膜,试验重复 3 次,测其性能。

1.2.3 纳米 SiO₂ 改性复合薄膜正交优化试验

该 L₉ (3⁴) 正交试验以纳米 SiO₂ 质量分数、分散剂十二烷基苯磺酸钠质量分数和膜液 pH 为试验因

子。试验因子水平见表1。

表1 $L_9(3^4)$ 正交试验因子水平
Tab.1 Factor levels of $L_9(3^4)$ orthogonal test

水平	因子		
	纳米SiO ₂ 质量 分数/%	十二烷基苯磺酸钠 质量分数/%	pH
1	1.0	0.5	3.5
2	1.5	1.0	4.0
3	2.0	1.5	4.5

1.3 薄膜性能指标及测定方法

1.3.1 薄膜厚度的测定

参照 GB/T 6672—2001, 用厚度测定仪在尺寸为 150 mm×15 mm 的矩形待测薄膜上随机测 10 个点, 求其平均值作为薄膜厚度。

1.3.2 薄膜抗张强度和断裂伸长率测定

参照 GB/T 13022—1991, 取 3 条尺寸为 150 mm×15 mm 的矩形待测薄膜, 用 XLW-PC 型智能电子拉力试验机来测试薄膜的力学性能。

1.3.3 薄膜透光率测定

取 3 条尺寸为 100 mm×15 mm 的矩形待测薄膜, 放置于比色皿表面, 以空比色皿作对照测定其透光率, 求其平均值, 即为薄膜透光率。

1.3.4 薄膜吸水率测定

参照 GB 1034—70, 取 3 片尺寸为 100 mm×100 mm 的正方形待测薄膜放在温度为 100 °C 的恒温鼓风干燥箱中烘干至质量不变, 称其此时质量为 m_1 。然后分别放入盛有 300 mL 蒸馏水且标有相对应标签的烧杯浸泡 24 h, 随后将膜捞出, 用滤纸吸干称其此时质量为 m_2 。计算公式为:

$$\text{吸水率} = (m_2 - m_1) / m_1 \times 100\% \quad (1)$$

1.3.5 对各物理性能进行模糊综合评价

该试验中, 需要同时考虑多个物理指标才能对纳米 SiO₂ 改性复合薄膜进行质量评价, 于是参考下面的隶属度函数来进行模糊综合评价。

$$X_0 = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (\text{正效应}) \quad (2)$$

$$X_1 = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (\text{负效应}) \quad (3)$$

式中: X_0, X_1 为评价该性能的隶属度函数值; X_i 为该性能评价的数据值; X_{\max} 为该性能评价的最大值; X_{\min} 为该性能评价的最小值。

该试验把薄膜断裂伸长率、透光率、抗张强度以及吸水率对薄膜性能影响所占的权重模糊变成累加加权隶属度值。综合评分为 1, 则断裂伸长率占 0.3, 透光率占 0.1, 抗张强度占 0.4, 吸水率占 0.2。

2 结果与分析

2.1 纳米 SiO₂ 粒径对木薯淀粉/PVA/壳聚糖复合薄膜性能的影响

纳米 SiO₂ 粒径对复合薄膜力学性能的影响见图 1。由图 1 可知, 抗张强度和断裂伸长率在粒径为 30 nm 时最佳, 分别为 18.45 MPa 和 77.43%。课题组前期得到木薯淀粉/PVA/壳聚糖复合薄膜最佳抗张强度和断裂伸长率为 6.87 MPa 和 45.53%, 与其相比, 纳米 SiO₂ 的添加增强了复合薄膜的力学性能。纳米 SiO₂ 粒径对复合薄膜透光率和吸水率的影响见图 2。由图 2 可知, 当粒径为 30 nm 时, 薄膜的透光率最高, 吸水率最低。纳米 SiO₂ 粒径对复合薄膜综合评分的影响见图 3。由图 3 可知, 当纳米 SiO₂ 粒径为 30 nm 时, 综合评分最高。综上所述, 最佳的纳米 SiO₂ 粒径为 30 nm。

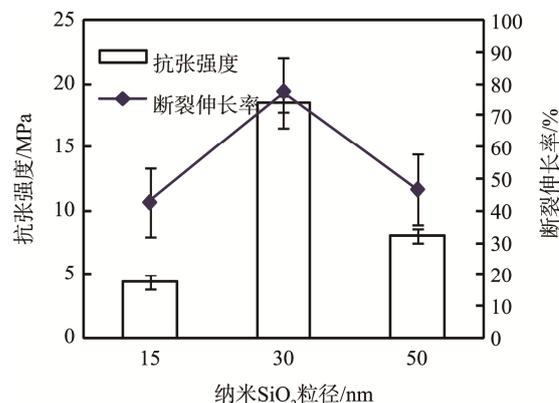


图1 纳米 SiO₂ 粒径对复合薄膜力学性能的影响
Fig.1 Effects of nano-SiO₂ size on mechanical character of composite film

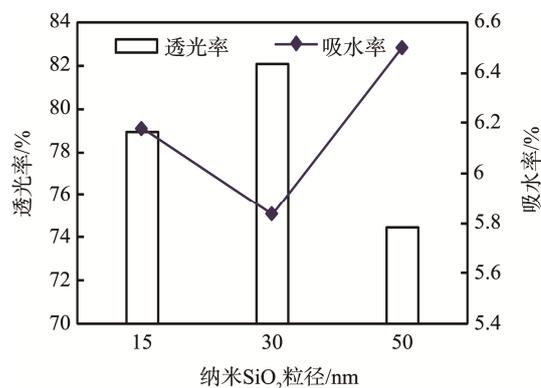


图2 纳米 SiO₂ 粒径对复合薄膜透光率和吸水率的影响
Fig.2 Effects of nano-SiO₂ size on transparency and water absorption of composite film

2.2 纳米 SiO₂ 含量对木薯淀粉/PVA/壳聚糖复合薄膜性能的影响

纳米 SiO₂ 质量分数对复合薄膜力学性能的影响

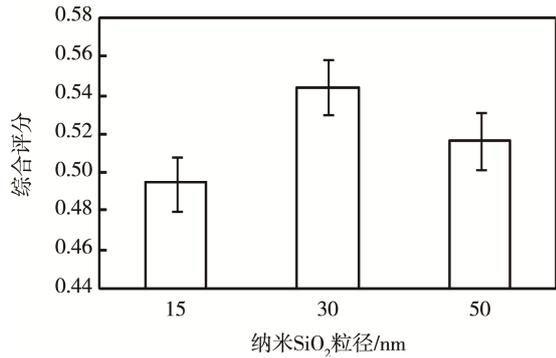


图 3 纳米 SiO₂ 粒径对复合薄膜综合评分的影响
Fig.3 Effect of nano-SiO₂ size on comprehensive evaluation of composite film

见图 4。由图 4 可知，抗张强度在纳米 SiO₂ 质量分数为 1.5% 时最大，和其他含量相比差异显著。纳米 SiO₂ 质量分数对复合薄膜透光率和吸水率的影响见图 5。由图 5 可知，添加纳米 SiO₂ 对薄膜透光率影响差异不显著，纳米 SiO₂ 质量分数为 2.0% 时吸水率最高。纳米 SiO₂ 质量分数对复合薄膜综合评分的影响见图 6。由图 6 先增长后减少的趋势可知，当质量分数为

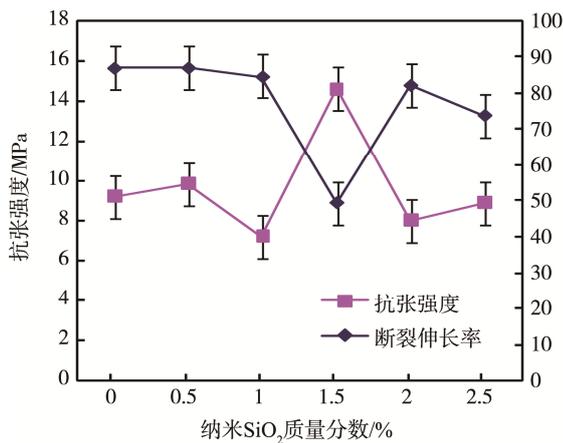


图 4 纳米 SiO₂ 质量分数对复合薄膜力学性能的影响
Fig.4 Effects of nano-SiO₂ mass fraction on mechanical character of composite film

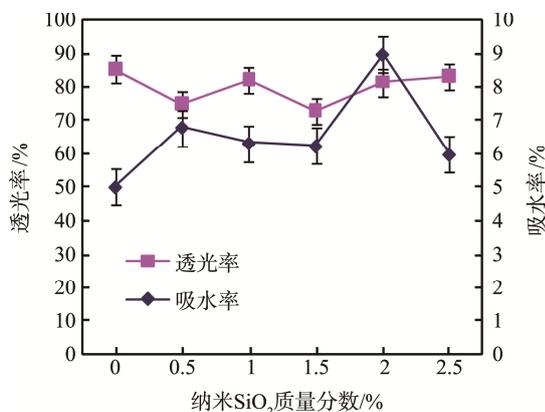


图 5 纳米 SiO₂ 质量分数对复合薄膜透光率和吸水率的影响
Fig.5 Effects of nano-SiO₂ mass fraction on transparency and water absorption of composite film

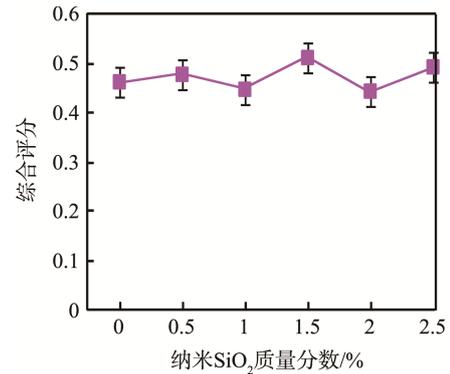


图 6 纳米 SiO₂ 质量分数对复合薄膜综合评分的影响
Fig.6 Effect of nano-SiO₂ mass fraction on comprehensive evaluation of composite film

1.5% 时综合评分最高，为 0.5106，这是因为此时纳米 SiO₂ 粒子均匀的分散于木薯淀粉粒子中，交互作用显著。综上所述，确定纳米 SiO₂ 的质量分数为 1.5%。

2.3 分散剂种类对木薯淀粉/PVA/壳聚糖复合薄膜性能的影响

添加分散剂的目的是使纳米 SiO₂ 更好地分散于溶液中，与溶液中其他成分的交互作用更加显著。分散剂种类对复合薄膜力学性能的影响见图 7。由图 7 可知，复合薄膜的抗张强度和断裂伸长率在分散剂是十二烷基磺酸钠时出现最大值。分散剂种类对复合薄膜透光率和吸水率的影响见图 8。由图 8 可知，六偏磷酸钠大大降低了薄膜的吸水率，说明添加六偏磷酸钠的复合薄膜吸水率得到较好改善。分散剂种类对复合薄膜综合评分的影响见图 9。由图 9 可知，十二烷基磺酸钠的综合评分最高，为 0.6095。这是由于十二烷基磺酸钠中的磺酸根亲水，扩散到水溶液中；基长链亲油，吸附在纳米颗粒表面，从而抵抗颗粒团聚，使分散体系具有较好的分散稳定性。综上所述，十二烷基磺酸钠为适宜的纳米 SiO₂ 分散剂。

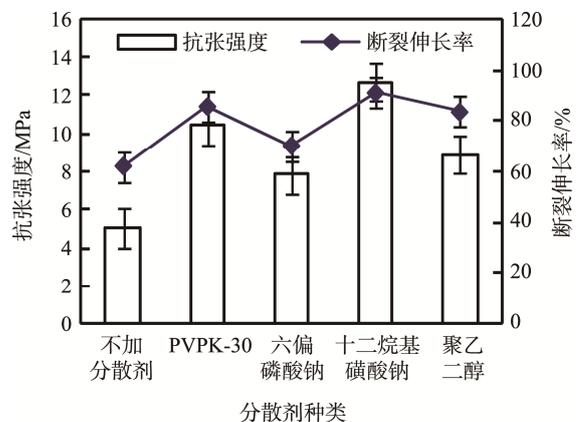


图 7 分散剂种类对复合薄膜力学性能的影响
Fig.7 Effects of dispersant type on mechanical character of composite film

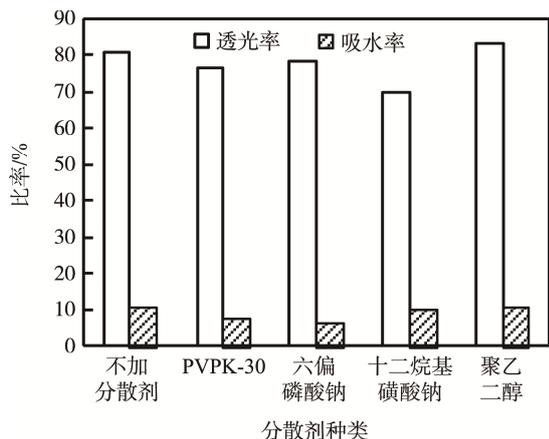


图8 分散剂种类对复合薄膜透光率和吸水率的影响
Fig.8 Effect of dispersant type on transparency and water absorption of composite film

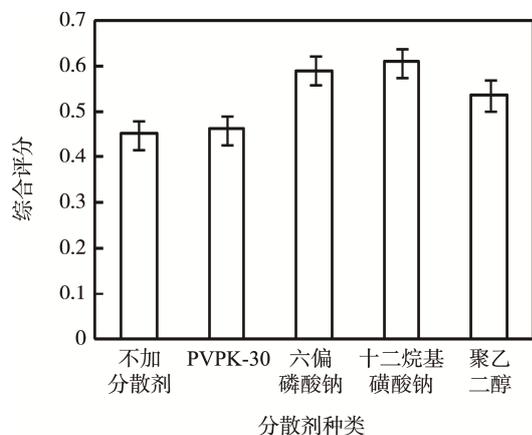


图9 分散剂种类对复合薄膜综合评分的影响
Fig.9 Effect of dispersant type on comprehensive evaluation of composite film

2.4 分散剂十二烷基苯磺酸钠含量对木薯淀粉/PVA/壳聚糖复合薄膜性能影响

十二烷基苯磺酸钠的含量对复合薄膜力学性能的影响见图10。由图10可知，在分散剂质量分数为

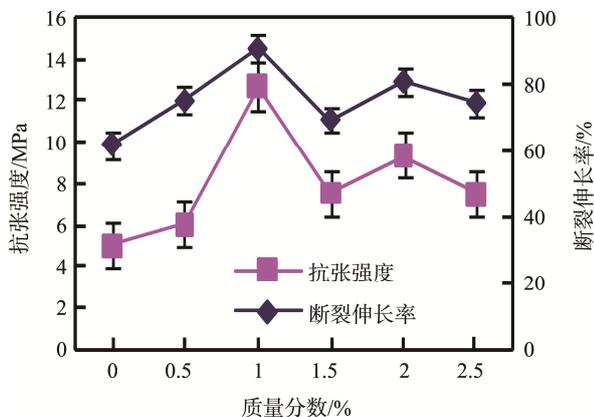


图10 十二烷基苯磺酸钠的含量对复合薄膜力学性能的影响
Fig.10 Effects of SDBS content on mechanical character of composite film

1.0%时，大大提高了复合薄膜的力学性能，此时抗张强度和断裂伸长率最佳，和其他含量的相比差异显著。这说明分散剂质量分数为1.0%时，纳米SiO₂在薄膜中分散均匀，和溶液中其他成分交互作用显著。十二烷基苯磺酸钠的含量对复合薄膜透光率和吸水率的影响见图11。由图11可知，分散剂质量分数为0.5%时，透光率较好，为1.0%时吸水率较低。分散剂十二烷基苯磺酸钠的含量对复合薄膜综合评分的影响见图12。由图12可知，当十二烷基苯磺酸钠质量分数为1.0%时，综合评分最高，为0.6095。综上所述，十二烷基苯磺酸钠的示意质量分数为1.0%。

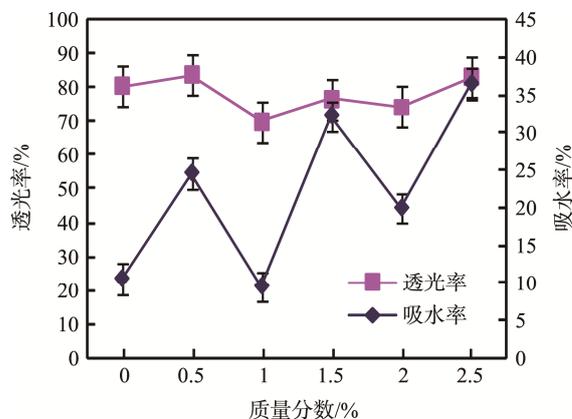


图11 十二烷基苯磺酸钠的含量对复合薄膜透光率和吸水率的影响

Fig.11 Effects of SDBS content on transparency and water absorption of composite film

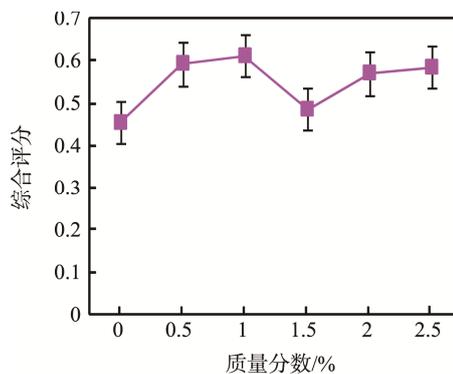


图12 分散剂十二烷基苯磺酸钠的含量对复合薄膜综合评分的影响

Fig.12 Effect of dispersant SDBS content on comprehensive evaluation of composite film

2.5 膜液 pH 值对木薯淀粉/PVA/壳聚糖复合薄膜性能的影响

pH 值对复合薄膜力学性能的影响见图13。由图13可知，当pH为4.0时，复合薄膜的抗张强度最高，为9.42 MPa，和其他pH的相比差异显著。当pH为3.0时，断裂伸长率出现最大值，为78.2%。pH值对复合薄膜透光率和吸水率的影响见图14。由图14可

知，当膜液 pH 是 3.5 时，透光率较大。当膜液 pH 是 4.0 时，吸水率在较低。pH 值对复合薄膜综合评分的影响见图 15。由图 15 先增长后下降的趋势可知，在 pH 为 4.0 时，复合薄膜的综合评分最高，为 0.52。

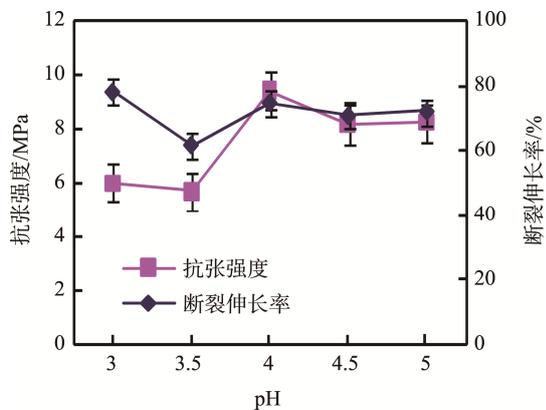


图 13 pH 值对复合薄膜力学性能的影响

Fig.13 Effects of pH value on mechanical character of composite film

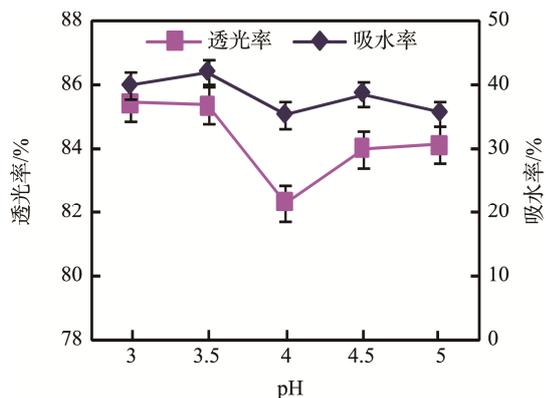


图 14 pH 值对复合薄膜透光率和吸水率的影响

Fig.14 Effects of pH value on transparency and water absorption of composite film

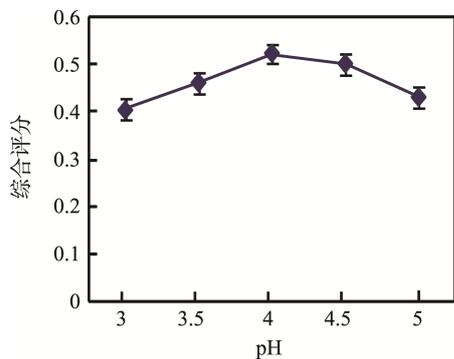


图 15 pH 值对复合薄膜综合评分的影响

Fig.15 Effects of pH value on comprehensive evaluation of composite film

3 纳米 SiO₂ 改性复合薄膜正交优化试验

通过单因素试验研究表明，纳米 SiO₂ 含量、十

二烷基苯磺酸钠含量、膜液 pH 值变化对复合薄膜的性能影响较大。以纳米 SiO₂ 含量、十二烷基苯磺酸钠含量、膜液 pH 值为试验因子，以薄膜的综合评分为评价标准，设计 L₉ (3⁴) 正交优化试验。

3.1 正交试验结果与分析

L₉ (3⁴) 正交优化试验结果见表 2，表 2 中 T 为各水平表示综合评分之和，K 为 T/3。方差分析结果见表 3。从表 2 可以看出，当纳米 SiO₂ 质量分数为 2.0%、分散剂质量分数为 2.0%、膜液 pH 值为 3.0 时，纳米 SiO₂ 改性木薯淀粉/聚乙烯醇/壳聚糖复合薄膜的性能最优；分散剂十二烷基苯磺酸钠的含量对复合薄膜性能影响最为显著，pH 值次之，纳米二氧化硅质量分数对复合薄膜的影响最小，3 因素对改性薄膜性能的影响程度大小排序为：分散剂十二烷基苯磺酸钠含量>纳米二氧化硅含量>膜液 pH 值。由表 3 可知，纳米 SiO₂ 的质量分数显著水平为 0.070，pH 值显著水平为 0.052，二者大于 0.050，对试验结果影响不显著；分散剂质量分数显著水平为 0.018，小于 0.050，对结果影响显著。

表 2 L₉ (3⁴) 正交试验结果
Tab.2 Orthogonal experiment results of L₉ (3⁴)

试验号	因素			误差	综合评分
	纳米SiO ₂ 质量分数/%	十二烷基苯磺酸钠质量分数/%	pH值		
1	1(1.0)	1(0.5)	1(3.5)	1	0.48
2	1	2(1.0)	2(4.0)	2	0.56
3	1	3(1.5)	3(4.5)	3	0.53
4	2(1.5)	1	2	3	0.48
5	2	2	3	1	0.66
6	2	3	1	2	0.58
7	3(2.0)	1	3	2	0.49
8	3	2	1	3	0.61
9	3	3	2	1	0.44
T ₁	1.57	1.45	1.67	1.48	
T ₂	1.62	1.83	1.48	1.63	
T ₃	1.54	1.55	1.58	1.62	
K ₁	0.52	0.48	0.56	0.52	
K ₂	0.57	0.61	0.52	0.54	
K ₃	0.51	0.52	0.53	0.54	
R	0.06	0.13	0.04	0.02	

表3 $L_9(3^4)$ 正交试验结果方差分析
Tab.3 Analysis of variance analysis of $L_9(3^4)$ orthogonal experiment

源	III型平方和	自由度	均方	F	显著性水平
校正模型	0.041a	6	0.007	28.952	0.034
截距	2.592	1	2.592	11109.000	0.000
纳米SiO ₂ 质量分数	0.006	2	0.003	13.286	0.070
分散剂质量分数	0.026	2	0.013	55.429	0.018
pH值	0.008	2	0.004	18.143	0.052
误差	0.000	2	0.000		
总计	2.633	9			
校正的总计	0.041	8			

$R^2=0.989$ (调整 $R^2=0.954$)

4 结语

以壳聚糖、木薯淀粉和聚乙烯醇为基础成膜原料,研究了纳米 SiO₂ 改性木薯淀粉/聚乙烯醇/壳聚糖薄膜的制备工艺。实验结果表明,当纳米 SiO₂ 粒径为 30 nm、质量分数为 2.0%,十二烷基磺酸钠质量分数为 2.0%,膜液 pH 值为 3.0 时,纳米 SiO₂ 改性木薯淀粉/聚乙烯醇/壳聚糖复合薄膜的性能最好。纳米 SiO₂ 含量、分散剂含量、膜液 pH 值等 3 因素对改性薄膜性能的影响程度大小排序为:十二烷基磺酸钠含量>纳米二氧化硅含量>膜液 pH 值。

参考文献:

- MARINIELLO L, PIERRO P D, ESPOSITO C, et al. Preparation and Mechanical Properties of Edible Pectin-soy Flour Films Obtained in the Absence or Presence of Transglutaminase[J]. Journal of Biotechnology, 2003, 102: 191—198.
- RHIM J W, GENNADIOS A, HANDA A, et al. Solubility, Tensile and Color Properties of Modified Soy Protein Films[J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 2002, 48: 4937—4941.
- 王梅. 可降解塑料的绿色环保发展路径探索[J]. 资源节约与环保, 2016(5): 11—15.
WANG Mei. Research on the Development Path of Green Environmental Protection of Degradable Plastics[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2016(5): 11—15.
- 罗培敏. 我国木薯现状分析与发展研究[J]. 耕作与栽培, 2002(3): 51—52.
LUO Pei-min. Analysis and Development of Cassava in China[J]. Tillage and Cultivation, 2002(3): 51—52.
- 安永超. 木薯淀粉/聚乙烯醇/壳聚糖生物降解薄膜制备及性能研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.
AN Yong-chao. Preparation and Properties of Tapioca Starch/Polyvinyl Alcohol/Chitosan Biodegradable Film [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2015.
- MORI M, SAKIMOTO M, KAGI T, et al. Isolation and Characterization of a Strain of Bacillus Megaterium that Degrades Poly (Vinyl Alcohol)[J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 1996, 60: 330—332.
- SEUNG Y C, CHUL R. Sorption Characteristics of Soy Protein Films and Their Relation to Mechanical Properties[J]. Lebensm. Wiss. u. Technol., 2002, 35: 151—157.
- 周秋娟, 张根义. 可食性木薯淀粉成膜特性的研究[J]. 食品与发酵工业, 2006(12): 52—56.
ZHOU Qiu-juan, ZHANG Gen-yi. Study on the Film-forming Characteristics of Edible Cassava Starch [J]. Food and Fermentation Industry, 2006(12): 52—56.
- 范杵兰. 浅议白色污染与废塑料的回收利用[J]. 高分子材料研究, 2007(10): 17—18.
FAN Chu-lan. Discussion on White Pollution and Recycling of Waste Plastics[J]. Study on Polymer Materials, 2007(10): 17—18.
- 殷俊. 改性 SiO₂ 纳米粒子/聚醚砜复合超滤膜的制备及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
YIN Jun. Preparation and Application of Modified SiO₂ Nanoparticles/Polyethersulfone Composite Ultrafiltration Membrane[D]. Nanjing: Southeast China University, 2016.
- 陈志周, 牟建楼, 王林. 聚乙烯醇水溶性薄膜生产工艺研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 247—250.
CHEN Zhi-zhou, MU Jian-lou, WANG Lin. Study on the Production Process of Polyvinyl Alcohol Water-soluble Thin Film[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 247—250.
- 吴敏, 程秀萍, 葛明桥. 纳米 SiO₂ 的分散研究[J]. 纺织学报, 2006, 27(4): 80—82.
WU Min, CHENG Xiu-ping, GE Ming-qiao. Study on Dispersion of Nano SiO₂[J]. Journal of Textile, 2006, 27(4): 80—82.
- 刘吉延, 邱骥, 索相波. 不同分散剂对纳米 SiO₂ 水中分散的影响[J]. 装甲兵工程学院学报, 2008(1):

- 80—82.
LIU Ji-yan, QIU Ji, SUO Xiang-bo. Effect of Different Dispersants on Dispersion of Nano SiO₂ in Water[J]. Journal of The Academy of Armored Forces Engineering, 2008(1): 80—82.
- [14] 贾云芝, 陈志周, 迟建. 纳米 SiO₂ 改性玉米淀粉/聚乙烯醇复合薄膜研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(1): 59—63.
JIA Yun-zhi, CHEN Zhi-zhou, CHI Jian. Study on Nano SiO₂ Modified Corn Starch/Polyvinyl Alcohol Composite Film[J]. Chinese Journal of Food Science, 2012, 12(1): 59—63.
- [15] 吴春蕾, 章明秋, 容敏智, 等. 低填充 SiO₂/聚丙烯纳米复合材料的拉伸特性[J]. 材料工程, 2001(5): 30—33.
WU Chun-lei, ZHANG Ming-qiu, RONG Min-zhi, et al. Tensile Properties of Low Filled SiO₂/Polypropylene Nanocomposites[J]. Material Engineering, 2001(5): 30—33.
- [16] 颜东洲. 纳米 SiO₂ 薄膜的制备及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2003.
YAN Dong-zhou. Preparation and Properties of Nano SiO₂ Thin Films[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2003.
- [17] 王春雨, 陈志周, 赵博宇, 等. 响应面法优化木薯淀粉/聚乙烯醇/壳聚糖复合薄膜制备工艺[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(5): 66—71.
WANG Chun-yu, CHEN Zhi-zhou, ZHAO Bo-yu, et al. Optimization of Preparation Technology of Cassava Starch/Polyvinyl Alcohol/Chitosan Composite Film by Response Surface Methodology[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, 40(5): 66—71.