

# 膨润土含量对淀粉膜性能的影响

柴依情, 王纪恒, 余作龙\*

浙江树人学院生物与环境工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年7月5日; 录用日期: 2022年8月11日; 发布日期: 2022年8月19日

## 摘要

膨润土是指的一种是指以天然碳酸盐矿物和蒙脱石为主要微观结构成分矿物的黏土, 是目前较具典型形态的层状硅酸盐矿物之一。研究淀粉膜的制备过程及膨润土含量对淀粉膜各种性能的影响, 添加2%、4%、6%、8%、10% (以淀粉质量计)浓度膨润土, 通过测定抗拉强度, 断裂延展率, 透水蒸气性, 透油性, 透光性, 透红外性分析膨润土浓度与淀粉膜性能的关系。结果表明: 随着膨润土浓度的提高, 淀粉复合膜的抗拉强度由384.23 Mpa提升到1056.59 Mpa, 断裂延展率由13.85%降低到8.53%, 透水系数由2.7019 g·mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa)降低到了2.7019 g·mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa), 透油系数由0.5929 g·m/(d·m<sup>2</sup>)降低到0.1317 g·m/(d·m<sup>2</sup>), 透光率由47.50%降低到14.35%。膨润土的加入降低了淀粉膜的透过性与断裂延展率, 提升了淀粉膜的抗拉强度, 红外检测官能团化学键共振强度降低。

## 关键词

膨润土, 淀粉膜, 膜性能

# Effect of Bentonite Content on Properties of Starch Film

Yiqing Chai, Jiheng Wang, Zuolong Yu\*

College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

Received: Jul. 5<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 11<sup>th</sup>, 2022; published: Aug. 19<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Bentonite is a kind of clay with natural carbonate minerals and montmorillonite as the main microstructure components. It is one of the layered silicate minerals with typical forms at present. The preparation process of starch film and the influence of bentonite content on various proper-

\*通讯作者。

ties of starch film were illustrated. Bentonite concentration of 2%, 4%, 6%, 8% and 10% (calculated by starch quality) was added, and the relationship between bentonite concentration and properties of starch film was analyzed by measuring tensile strength, fracture elongation, water vapor permeability, oil permeability, light permeability and infrared permeability. The results show that: With the increase of bentonite concentration, the tensile strength of starch composite membrane increased from 384.23 Mpa to 1056.59 Mpa, the fracture elongation decreased from 13.85% to 8.53%, and the permeability coefficient decreased from 2.7019 g·mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa) to 0.1317 g·m/(d·m<sup>2</sup>), and the transmittance decreased from 47.50% to 14.35%. The addition of bentonite reduces the transmittance and fracture elongation of starch film, improves the tensile strength of starch film, and reduces the chemical bond resonance strength of functional groups detected by infrared.

## Keywords

Montmorillonite, Starch Film, Properties

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

淀粉是一种高分子聚合物，具有可再生和可降解的特性，具有结晶和糊化作用，糊化作用是淀粉由有序结构向无序结构转变的实质；淀粉老化是一个可逆的糊化过程，但老化过程是不可逆的。因此，淀粉具有良好的成膜性能[1]。以淀粉为基础，添加不同的抗菌剂、增塑剂、防腐剂等，具有多种功能，主要用于食品保鲜。但淀粉膜还有很多缺点，如难以长时间保鲜，保鲜密度不够，容易破损，必须通过试验寻找一些配方加以改进淀粉膜的机械性能并降低其渗透性，以更好地使用和保存食物[2]。

膨润土主要指由天然的蒙脱土所组成的一种粘土。它又是另外一种质地类似于金属铝硅酸盐的水基矿物，含有少量强碱金属钠和亚碱土金属，也是比较典型的层状硅酸盐矿物之一[3]。然而，与很多其他的层状硅酸盐矿物都不同，其层中与层底之间形成的晶格间隙密度特别之大，因此几乎每隔一层空隙都可以同时包含有无限大数量的水分子和许多可供交换之阳离子[4]。膨润土颗粒具有极强的吸水性，其体积吸水率可相当于其本身体积重量的8倍，体积膨胀率大约为其10到30倍。

蒙脱石晶属矿物属单斜晶系，通常其集合体均呈白色粘土状小块体，白色，有时亦可稍带有少许浅红、浅绿、淡灰乳黄粉灰等杂色。光泽稍略暗淡，硬度为约为1~2，密度大约为2~3 g/cm<sup>3</sup>。它本身即是我国较有典型特点的层状硅酸盐砂土矿物种类之一，常含有较少量的伊利石、高岭石、埃洛石、绿泥石、沸石、石英、长石、方解石等。一般的质地主要为浅灰白色、淡黄色，由于在其中所含铜锌铁量大小等的细微差异的变化而又分为有浅灰色、浅绿色、粉红色、棕红色、砖红色、灰黑色等多种颜色、光泽各异的块体；或有石蜡状、泥土状光泽的，或有略带油腻状的光泽的块体；还有些疏松的膨润土其表面就像一般普通砂质土壤表层结构一样显得干燥和松散，而在其中又有另少数一些表层组织则是很难密实或过于坚硬。它同时具有吸水、粘附、吸附、矿物颗粒含量小、比表面积较大、化学性质较为稳定、无毒的特性。

研究膨润土含量对淀粉膜性能的影响。当把膨润土粉加入到淀粉膜溶液中，膨润土淀粉膜分子结构中的氢键分子将被羟基化，羟基淀粉膜分子之间形成一个氢键所取代，而羟基膨润土也可以同时与几个

羟基分子发生吸附反应, 淀粉分子会有个很强的吸附作用, 提高膜分子的密度, 从而提高膜的力学性能和渗透性[5]。本实验研究膨润土对淀粉膜性能及不同浓度膨润土含量的影响, 对膜的抗拉强度(Ts)与断裂延展率(E)、透油性、透水蒸气性、透光性, 红外光谱分析等比较, 使用 origin 软件绘图研究不同膨润土浓度淀粉膜的各项参数差异, 找到最适合的浓度配方。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 实验材料与设备

豌豆淀粉(食品级)广州美懿生物科技有限公司; 膨润土(食品级)上海麦克林生化技术有限公司; 海藻酸钠(分析纯)上海麦克林生化技术有限公司; 丙三酮(分析纯)上海麦克林生化技术有限公司; 蒸馏水(分析纯)杭州永洁达净化有限公司。

ME204E 电子分析天平梅特勒托利多仪器(上海)有限公司; SMS-TA.XT plus 物性测试仪超技仪器有限公司; JHS-2/90 数显恒温磁力搅拌器杭州仪表电机有限公司; MB45 卤素水分仪杭州仪表电机有限公司; DUG-9076 电热恒温鼓风干燥箱常州市金坛勒普仪器有限公司; UV-765 紫外分光光度计上海精科电子有限公司。

### 2.2. 实验方法

#### 2.2.1. 复合膜的制备流程

使用电子天平, 称量 20g 豌豆淀粉, 0.4 g 海藻酸钠, 根据豌豆淀粉质量称量浓度为 0%、2%、4%、6%、8%、10% 的膨润土, 用 200ml 的蒸馏水分别溶解, 使用玻璃棒引流, 加入三颈烧瓶中, 润洗残留到三颈烧瓶里。然后加入 10 ml 甘油, 将三颈烧瓶固定并放置在恒速数显搅拌机的底座支架上, 三颈烧瓶底座放入恒温水浴锅内水胆槽中, 采用数显恒温磁力搅拌器加热恒温水浴锅加热至设定温度为 95℃, 以转速 300 转每分钟速度搅拌, 恒温下半小时, 完成后维持水温准备刮膜。

将膜液倒在铁板的左侧(要充足, 不然膜会不平整), 用 0.5 mm 刮板将糊状的膜液刮向右侧(不要来回涂抹, 以防厚度差别大)。涂抹完成后, 将膜板放入准备好的电热恒温鼓风干燥箱中, 以 60℃ 的条件烘干, 大约九十分钟后, 至表面不再有浑浊的白浆后取出, 将膜放置 24 h 后, 揭膜。

#### 2.2.2. 复合膜性能测定

含水量测定: 用卤素水分计测量用于测量渗透性的膨润土薄膜的不同浓度, 并测量其废弃边角料的含水量。其具体工作原理即是通过采用冻干失重法, 通过真空加热系统来对样品实施快速蒸发加热, 使样品空气中包含的所有水分均在一个最短的冷却时间范围内进行完全地蒸发, 使样品溶液中含的任何水分可以在这很简短的干燥时间范围内迅速被仪器检测出来。在对样品快速干燥测量的操作过程中, 快速干水分测定仪还能实时持续精确地记录测量所得水份量并同时可以即时精确的计算显示测量出的样品及其可能有丢失水份部分中的实际水分含量百分比, 干燥和测定等程序的执行程序完成计算后, 最终所要测定出产品中的实际水分含量值即自动的被计算机自动锁定储存和显示[6]。

力学性能研究: 使用物性测试仪进行检测实验, 打开软件, 找到混合物, 加载选项完成后打开物性测试仪, Ta 设置中设置测试模式为拉伸, 测试速度 100 mm/min, 位移 80 mm。随后将探头间距设置为 35 mm 作为力学性能实验的初始探头间距[7]。

抗拉强度, 将做好的淀粉膜平整得撕下后, 在膜上一块厚度合适平均的地方用水笔画出 1 × 5 cm 的试样条, 连在一起选取三条用于测定, 即剪下一个标记好的 3 × 5 cm 样品。先在四个角处用螺旋测微仪测量厚度, 再在中间测量厚度, 得到样品的平均厚度备用。将 1 × 5 cm 的试样条固定在两个探头上, 运

行试验, 得到断裂曲线。曲线会告知试样条断裂时候的拉力  $F$  与探头移动距离  $L$  (mm), 横截面积  $S$  ( $m^2$ ) 为厚度乘以 10 mm, 使用公式(1):

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

式中:  $F$ ——断裂时拉力(N);  $S$ ——膜的横截面积( $m^2$ );  $T_s$ ——抗拉强度结果(MPa)。

另外, 为了实验的严谨性, 将被裁剪的膜旋转  $90^\circ$ , 取同样  $3 \times 5$  cm 的试样条, 同样测量平均厚度, 再将其变成  $1 \times 5$  cm 的试样条, 测量断裂曲线。综上, 一共有六个  $1 \times 5$  cm 试样条需要测试[8]。

断裂延展率, 同抗拉强度所得的方式, 截取试样条, 同样的测试方式可以得到如上所说的断裂时探头移动距离, 由于初始距离  $L_0$  为 35 mm, 所以由公式(2)进行计算[8]:

$$E = \frac{L - L_0}{L} \times 100 \quad (2)$$

式中:  $L$ ——探头移动距离(mm);  $L_0$ ——初始距离(mm);  $E$ ——断裂延展率结果(%)。

透过性测定: 渗透性是细胞膜允许或阻止某些物质通过的能力。为了研究淀粉膜在生产应用中的包装和阻隔作用, 有必要对淀粉膜的透光率进行测试, 得到膨润土浓度与透光率的关系。不同的参数需要不同的测试方法, 根据下面的实验方法。

透水蒸气性, 取三个小锥形瓶备用, 将一张膜剪成  $5 \times 5$  cm 左右大小(将瓶口封住并可以贴到瓶身)。称取 50 g 无水氯化钙, 装在密封袋中, 用特殊的坚硬工具粉碎, 依次在每个锥形瓶中加入 15 g 左右, 用剪下的膜封口, 瓶身处用胶带纸缠住, 然后用熔化的石蜡完全密封[8]。之后将三个锥形瓶分别测量总质量, 放入底部装有水的干燥皿中, 每隔一天测量一次质量, 取平均质量七天后, 使用公式(3)计算透水系数:

$$WVP = \frac{\Delta m \times d}{(A \times t \times \Delta P)} \quad (3)$$

式中:  $\Delta m$ ——稳定的质量增量(g);  $d$ ——膜的厚度(mm);  $A$ ——有效测定面积( $m^2$ );  $t$ ——测量时间间隔(7天);  $\Delta P$ ——试样两侧的水蒸气的压差(3.5 kPa)。

WVP 即为其透水系数为  $g \cdot mm / (m^2 \cdot d \cdot kPa)$ , 将对这 6 种土不同的水浓度状态下形成的土膜厚度分别进行测量并计算后再分别绘制以膨润土中的水分浓度即为其横坐标, WVP 值即为测量其的纵坐标值并据此绘制曲线。

透油性, 取三支试管, 加入 1/2 的食用油备用。将一张膜(最好是测了透水蒸气性那张)剪下  $3 \times 3$  cm 左右大小(将瓶口封住并可以贴到试管壁)。用剪下的膜封住试管口, 用胶带纸缠住, 然后用熔化的石蜡完全密封。取三个培养皿, 用培养皿盖进行实验(直径大的那个), 每个培养皿放一片滤纸, 称量其质量。将试管倒过来固定在试管架上, 试管口的膜接触滤纸, 等待一天, 每天测量培养皿的质量, 持续七天, 用公式(4)计算透油系数[8]:

$$Poil = \frac{\Delta m \times d}{A \times T} \quad (4)$$

式中:  $\Delta m$ ——滤纸质量的变化(g);  $d$ ——膜厚(mm);  $A$ ——膜的面积( $m^2$ );  $T$ ——放置时间(7天)。

Poil 即为透油系数  $g \cdot m / (d \cdot m^2)$ , 将 6 种不同浓度的膜分别测量后以膨润土浓度为横坐标, Poil 为纵坐标绘制曲线。

透光性, 采用紫外分光光度计, 设置波长为 270 nm。将光度计用空的比色皿调零, 取出后将膜剪裁到刚好贴住内壁的大小, 分别测量六种膜的透光性, 然后以膨润土浓度为横坐标, 以透光性为纵坐标绘

制曲线其基本原理即是通过利用有一定反射频率范围的强紫外可见光直接照射能被分析出来的各种有机大分子物质，引起它们分子中价电子能级的能级跃迁，它最终将能有从选择程度地被吸收[9]。随吸收波长方向变化的并可反映出样品特性变化的是一组吸收光谱。在紫外波段可见温度范围内，特定可见光波长内的光吸收度水平通常与标准样品中的已知浓度参数水平成正比，因此紫外测量的光谱参数既是可以做定性分析，又是可以同时根据对标准样品光的实际吸收强度和其已知的浓度参数进行的定量地探索测量和分析。

透红外性测定：使用红外分析仪，将淀粉膜烘干约 12 h 至可以研成粉末，以备用。取约 10 mg 溴化钾，用玛瑙研钵研成粉末，放入挤压容器里面，压扁，再使用液压机，20 Mpa 液压 1 min，备用。使用 opus 软件，将软件加载完成之后取出液压机中的溴化钾，应被压成薄片状。将薄片放在载玻片上，放入红外分析仪，作为调零背景。再将烘干的淀粉膜取少量，与溴化钾一起粉碎，以同样的方法压扁，放入红外分析仪，得到曲线，按此方法测量 6 个不同浓度淀粉膜的红外透过率[10]。

数据分析：使用仪器在实验过程中测的数据后，使用 Excel 软件计算平均值和标准偏差，采用 origin 绘图软件绘制折线图分析结果。

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 含水量

各个浓度膨润土淀粉膜含水量如表 1 所示。

**Table 1.** Water content of bentonite with films at different concentrations  
**表 1.** 不同浓度膨润土膜含水量

浓度(%)	含水量(%)
0	14.82
2	16.03
4	18.81
6	22.85
8	22.80
10	22.55

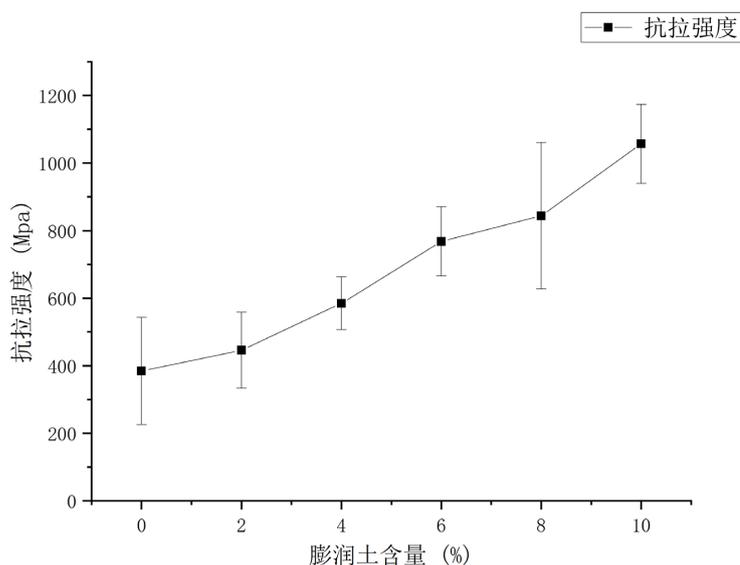
膨润土的浓度与含水量在 6% 之前呈上升趋势，到达 6% 以后比较平稳，这是由于在加入膨润土后，膨润土分子与淀粉分子结合生成的颗粒与水分子的结合能力降低，从而使吸水量变小，而含水量提高。当淀粉膜中膨润土的含量达到了 6% 以后，淀粉分子与膨润土分子的结合能力达到最高，从而导致分子含水量没有大幅度变化，因此含水量变化不明显。

#### 3.2. 力学性能结果

##### 3.2.1. 抗拉强度

由图 1 可知，随着膨润土含量的逐渐增加，淀粉膜的抗拉强度也呈上升趋势，在没有添加膨润土的膜中，抗拉强度仅为 384.23 Mpa，在逐渐添加膨润土到达 10% 浓度后，抗拉强度达到 1056.59 Mpa。这表明了膨润土具有提高淀粉膜抗拉强度的功效。这主要都是由于原膨润土淀粉分子链羟基中的一个羟基基团可与其它原淀粉分子链羟基中羟基的一个羟基反应后形成一种新类型的羟基氢键并最终取代掉了其它原淀粉分子链羟基中一个羟基上的一个羟基氢键，同时由于原淀粉膨润土淀粉分子链中一个

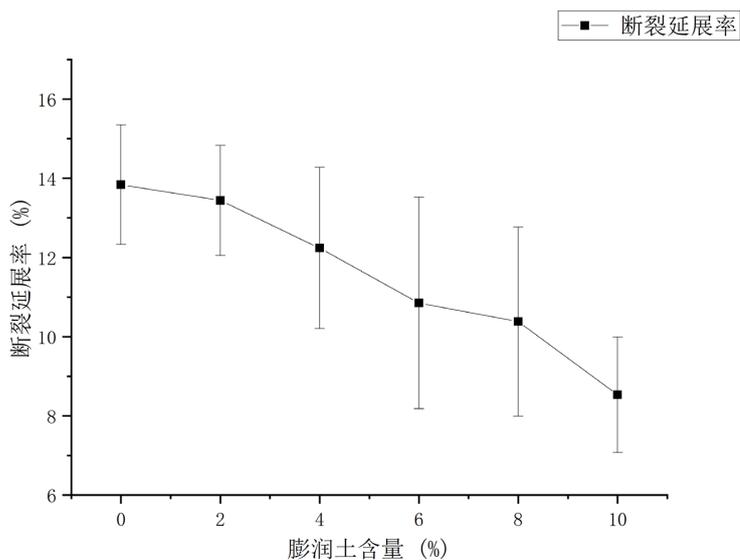
羟基中的一个可反应羟基和其他原淀粉分子链羟基之间存在的两个羟基之间存在有的相互的较强的相互的吸附作用，提高了界面吸附力。也有可能这是因为淀粉分子链被过度地脱支，形成数目较多的短链淀粉分子，分子间作用力减弱，导致膜强度下降，因此抗拉强度得到显著提升[11]。



**Figure 1.** Relationship between bentonite content and the tensile strength of starch films

**图 1.** 膨润土含量与淀粉膜抗拉强度关系

### 3.2.2. 断裂延展率



**Figure 2.** Relationship between bentonite content and fracture extension rate

**图 2.** 膨润土含量与断裂延展率的关系

由图 2 可知，随着膨润土含量的提升，复合淀粉膜的断裂位移下降，淀粉膜的断裂延展率下降。在不添加膨润土的情况下，淀粉膜的断裂延展率为 13.85%，当淀粉膜中膨润土的含量逐渐升高到 10% 时，

淀粉膜的断裂延展率降低到了 8.54%，这说明随着膨润土含量的逐渐提高，淀粉膜的断裂延展率呈降低趋势，正如前文所说，这是由于膨润土的阻隔作用，使得淀粉分子链柔顺性变差。另外，由于线性结构的增多，线性分子链间交换作用也增强，会造成有可能更多的水分被挤出，导致淀粉膜的断裂伸长率逐渐下降[12]。

### 3.3. 透过性

#### 3.3.1. 透水性

由图 3 可知，在未添加膨润土的淀粉膜中，透水系数较高，有 2.7019  $\text{g}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa})$ ，而在加入到了 10% 浓度膨润土时，淀粉膜的透水系数达到 1.3259  $\text{g}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{kPa})$ ，并且在 6% 浓度时跨度开始变大。通过实验表明，随着膨润土的含量逐渐增加，淀粉膜透水蒸气的的能力逐渐降低，这是因为随着膨润土的加入，膨润土和淀粉分子形成良好的界面结合，膜的致密性得到增强，外界分子不易渗透进去。并且在膨润土浓度大于 6% 时，淀粉膜的透水系数开始明显变化，说明浓度到了 6% 时可以更好地提升分子间致密性。本实验结果说明膨润土的加入有效的改善了淀粉膜的耐水性。

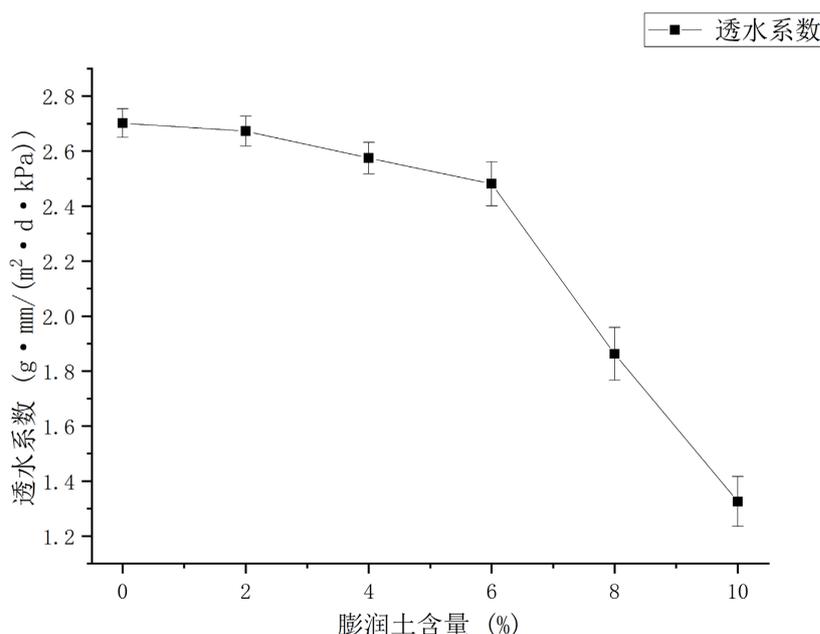
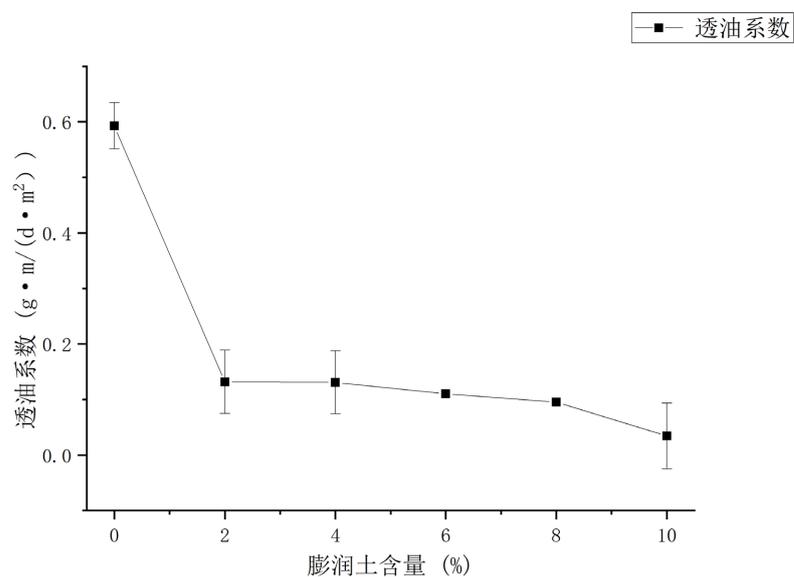


Figure 3. Relationship between bentonite concentration and water permeability coefficient of starch films

图 3. 膨润土浓度与淀粉膜透水系数的关系

#### 3.3.2. 透油性

由图 4 可知，在不添加膨润土时，膜的透油系数为 0.5929  $\text{g}\cdot\text{m}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ ，但是在添加仅为 2% 膨润土上，淀粉膜的透油系数急剧降低到 0.1317  $\text{g}\cdot\text{m}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ ，之后稳定下降到 10% 浓度时的 0.0341  $\text{g}\cdot\text{m}/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ 。实验结果表明，淀粉膜的油渗透系数随膨润土浓度的增加而减小，与水蒸气的渗透性一样。这是因为膨润土与淀粉分子形成了良好的界面，提高了膜密度和外部分子的不渗透性。另外，从图中可以看出，淀粉膜配方中加入膨润土后，透油系数明显降低。膨润土的存在与否对油渗透系数有显著影响，但不同膨润土用量之间的差异不显著，因为油分子的活性与水分子的活性不同。实验表明，膨润土能提高淀粉膜对油的阻隔性。

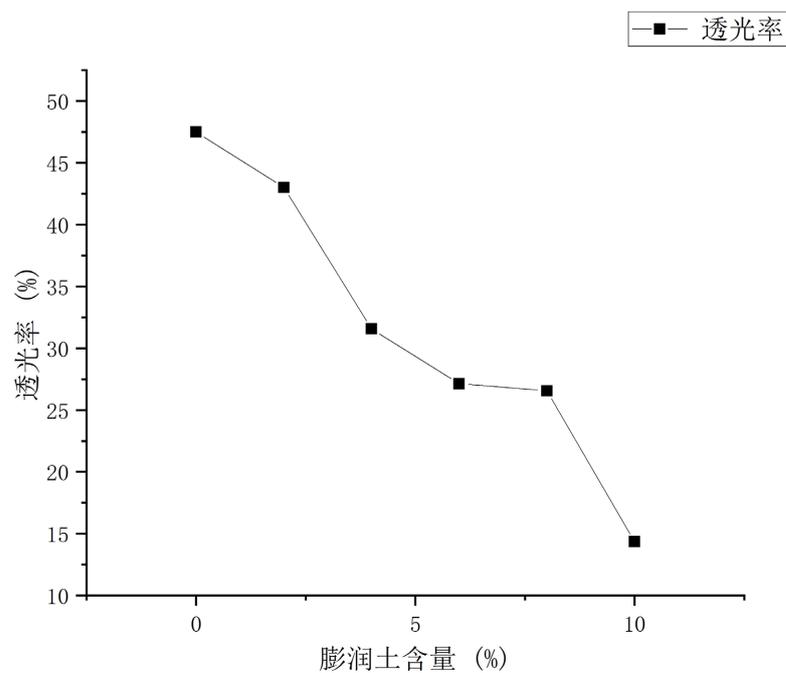


**Figure 4.** Relationship between bentonite concentration and oil permeability coefficient of starch films

**图 4.** 膨润土浓度与淀粉膜透油系数的关系

### 3.3.3. 透光性

由图 5 可知，未充分添加的膨润土样品的膜透光率一般为小于 47.5%，而随着膨润土样品含量浓度的增加，淀粉膜的透光性降低，到 10% 浓度膨润土时仅透过 14.35%，表明随着膨润土浓度的增加，透光率呈降低趋势。



**Figure 5.** Relationship between bentonite concentration and light transmittance of starch films

**图 5.** 膨润土浓度与淀粉膜透光性的关系

### 3.4. 透红外性

由图6可知,分子之间吸受强度由强到弱,化学键和官能团共振强度逐渐降低。主要是分子中C=O、-CH<sub>2</sub>、-CH<sub>3</sub>的伸缩振动。C-O-C在多醇类糖系统中的强极性吸收,C-O在多糖分子系中的对称伸缩振动,C-O-H在多糖体系中的振动,乙酸取代乙醇酸中C-O-C位置的振动和乙基纤维素等膜组分降解产生的一些新基团的不对称和对称的伸缩振动吸收。不添加膨润土时,淀粉膜的吸光度值较高,但随着膨润土浓度的增加,淀粉膜的吸光度值逐渐降低。-OH吸收峰在波数3400 cm<sup>-1</sup>附近。从图中可以看出,未加膨润土的薄膜的吸收峰更高。随着膨润土浓度的增加,吸附峰逐渐减小,在膨润土浓度为10%时达到最低。此外,淀粉膜含有氢键。与水分子和淀粉分子链上的两个羟基结合形成另一个羟基氢键,会使电子云中的碳氢密度降低接近分子平均,伸缩强度和分子振动产生的振荡频率相应也得到降低,氢键能量增加。显然,拉伸振动吸收峰移到了较低的波段。在波数约为2900 cm<sup>-1</sup>附近所形成的吸收峰即为亚甲基吸收峰,亚甲基吸收峰随膨润土浓度的增加而减小,与-OH相似。另外,500~1000 cm<sup>-1</sup>之间的吸收峰是C/N/C/O伸缩振动产生的吸收峰。随着膨润土含量的增加,拉伸峰逐渐减小。

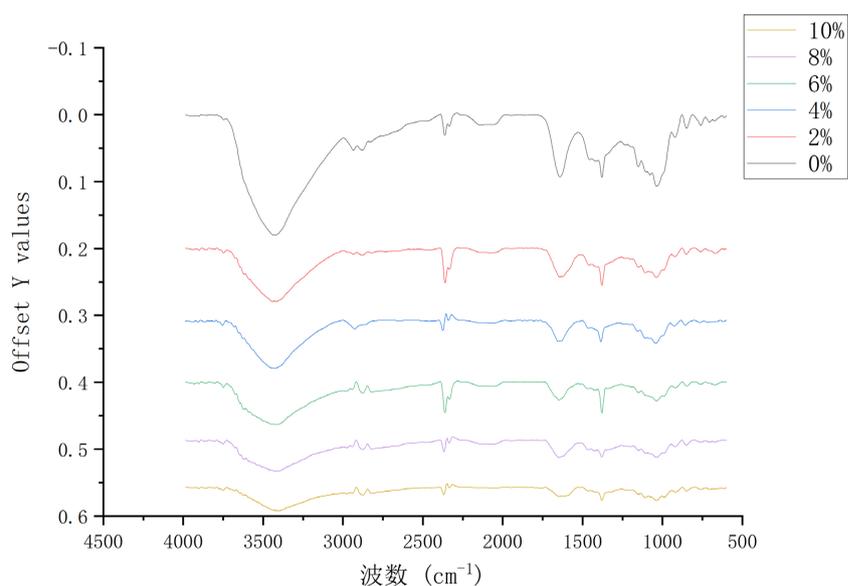


Figure 6. Spectrum of different concentrations of starch films

图6. 不同浓度淀粉膜红外光谱图

## 4. 结论

选用豌豆淀粉制成的淀粉膜因为加入了不同浓度膨润土的关系,降低了膜的透过性与断裂延展率,但提升了其抗拉强度。在工业生产和生活中,如若制作保鲜膜等为了隔离而生产的膜则可以添加适量膨润土,海藻酸钠作为粘联剂,提高其保鲜效率。由实验结果得出,在制膜过程中,所有的膨润土含量淀粉膜均能成膜。随着膨润土含量增加,吸水逐渐增加,膜的相对抗拉紧强度随之提高,从384.23 Pa提高到1056.60 Pa,断裂的延展率明显降低,从13.85%降低到8.54%;膜的透水蒸气性从2.7019 g·mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa)降低到1.3259 g·mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa),透油性从0.5929 g·m/(d·m<sup>2</sup>)降低到0.0341 g·m/(d·m<sup>2</sup>),透光性从47.50%降低到14.35%。

## 基金项目

浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2021R421008)。

## 参考文献

- [1] 邱肖华, 吴依莎, 朱政泽, 等.  $\epsilon$ -聚赖氨酸/淀粉抑菌膜的制备及性能检测[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(1): 154-159.
- [2] 覃寒珍, 毛剑轲, 余文怡, 等. 三种淀粉基可食膜的性能比较[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(21): 117-120.
- [3] 郑玉婴, 王灿耀, 傅明连. 膨润土有机改性的 FTIR 和 XRD 研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(11): 1813-1816.
- [4] 米红英, 郭小川, 杨庭栋, 等. 新型膨润土润滑脂的研制[J]. 石油学报(石油加工), 2009, 25(z1): 26-31.
- [5] 王连军, 黄中华, 刘晓东, 等. 膨润土的改性研究[J]. 应用化工, 2017, 46(4): 775-779.
- [6] 汪学荣, 周玲, 阚建全. 可食性交联淀粉膜的制膜工艺研究[J]. 食品工业科技, 2009(6): 298-301.
- [7] 谌小立, 赵国华. 增塑剂对甘薯淀粉膜机械及渗透性能的影响[J]. 食品工业科技, 2009(9): 255-258.
- [8] 钟宇, 李云飞. 表面活性剂对可食性葛根淀粉膜性能的影响[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(5): 813-818.
- [9] 黄振华, 徐晶晶, 杨万泰. 紫外光引发的玉米淀粉在软材料表面的改性[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2007, 34(2): 159-163.
- [10] 李东坡, 武志杰, 梁成华, 等. 红外光谱分析醋酸酯淀粉包膜尿素膜降解特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1519-1525.
- [11] Kirsi, S.M., Hannu, R. and Harry, H. (2007) Effect of Polysaccharide Structure on Mechanical and Thermal Properties of Galactomannan-Based Films[J]. *Biomacromolecules*, **8**, 3198-3205. <https://doi.org/10.1021/bm700538c>
- [12] Shihil, V. (2001) The Production of Poly-(gamma glutamic acid) from Microorganisms and Its Various Applications [J]. *Bioresource Technology*, **79**, 207-225. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00074-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00074-8)