微波对大豆分离蛋白结构及其膜性能的影响

李颖,陈惠,李黎,李建章

(北京林业大学,北京 100083)

摘要:目的 探究微波和离子型表面活性剂处理对大豆分离蛋白结构及其膜性能的影响。方法 应用 微波以及离子型表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)对大豆分离蛋白成膜液进行处理,并采用倾倒法成 膜。结果 微波处理可以使大豆分离蛋白(SPI)紧凑有序的结构在一定程度上舒展,暴露出更多的活 性基团,同时,也可以使隐藏于大豆蛋白内部的疏水基团暴露,促进大豆分离蛋白侧链之间形成氢键, 与SDS形成疏水键,并产生静电结合,形成空间网络结构。同时,甘油与SPI之间形成的氢键可以使这 种结构更加稳定。与对照组相比,经过微波处理的大豆分离蛋白膜具有更高的机械强度以及更好的 表面疏水性。当微波功率为400 W时,膜的抗张强度较对照组提高了61.91%,断裂伸长率提高了 453.75%,同时,膜也呈现出较好的表面疏水性。结论微波以及离子型表面活性剂处理可以使大豆分 离蛋白膜具有更高的力学性能和表面疏水性。

关键词: 大豆分离蛋白; 微波; 表面活性剂; 力学性能; 表面疏水性 中图分类号: TB484.6: TB487 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2016)05-0078-06

Effects of Microwave on the Structure of Soy Protein Isolate and Its **Film-forming Properties**

LI Ying, CHEN Hui, LI Li, LI Jian-zhang (Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: This study aimed to explore the effects of microwave and anionic surfactant sodium dodecyl sulfate (SDS) modification on the structure of soy protein isolate and its film-forming properties. Microwave and SDS were used to treat soy protein isolate (SPI) film-forming solution and films were prepared by casting method. The results demonstrated that microwave treatment led to partial unfolding in the structure of SPI, exposing more reactive groups and the hydrophobic groups hidden inside SPI. This change promoted formation of hydrogen bonds among the side chains of SPI as well as hydrophobic bonds and electrostatic bonds between SPI and SDS, forming cross-linked spatial network structure. Meanwhile, hydrogen bonds formed between glycerol and SPI stabilized this network structure. SPI-based films treated by microwave exhibited higher mechanical properties and better surface hydrophobicity than the untreated ones. Film with microwave treatment at the power of 400 W displayed the highest tensile strength and elongation at break, which were increased by 61.91% and 453.75%, respectively. In addition, these films also showed relatively high surface hydrophobicity. Microwave and SDS modified SPI-based films showed improved mechanical properties and better surface hydrophobicity. KEY WORDS: soy protein isolate; microwave; surfactant; mechanical properties; surface hydrophobicity

从21世纪开始,以石油为原材料的塑料包装在给 人们生活带来便利的同时,也渐渐开始展现出越来越

收稿日期: 2015-07-17 基金项目:北京自然科学基金(2151003)

作者简介:李颖(1991一),女,河北人,北京林业大学硕士生,主攻大豆分离蛋白膜的改性研究。

通讯作者:李黎(1963—),男,河北人,博士,北京林业大学教授、博导,主要研究方向为木材胶黏剂、木工机械和切削刀具。

多的问题,如环境污染与不可持续性^[1]。为了改善这 一状况,一些学者开始研究以天然聚合物为基础的包 装材料,如糖类、蛋白质类以及脂质,以这些材料为原 材料制备的膜具有良好的可生物降解性[2]。在这些天 然聚合物中,大豆分离蛋白以其价廉、可加工性强、成 膜性好,以及含有人体必需氨基酸等优点受到广泛重 视。大豆分离蛋白本身具有的紧凑的四级结构使其 表面一些活性官能团以及疏水基团隐藏于其结构内 部,相互之间不能形成充分的交联,进而造成了大豆 分离蛋白膜的一些缺点,如易脆、强度低以及耐水性 差14-61,因此对其结构进行改性处理十分必要。大豆分 离蛋白膜的改性方法主要分为3种:添加增塑剂(如甘 油和山梨醇)以及表面活性剂^[7-8];与一些物质混合,依 靠其表面的官能团以及填充作用增强膜的机械强度, 如蒙脱土、SiO2以及纤维素等[9-11];通过超声或者微波 方法对膜进行处理,使其再交联[12]。

微波是指频率为0.3~300 GHz的电磁波。当用微 波对大豆分离蛋白成膜液进行处理时,大豆分离蛋白 中的极性分子可以吸收电磁能,加速分子链的振动, 隐藏于大豆分离蛋白内部分子链末端氨基酸残基上 的活性基团以及内部的疏水基团被暴露出来¹¹³。与传 统的加热方式(水浴、油浴等)相比,微波可以大大加 快反应速率。表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)是一 种阴离子型表面活性剂,在水溶液中电离后,阴离子 部分的饱和烷烃链一端可以与大豆分离蛋白分子链 上的疏水基团形成疏水键,另一端可以与大豆分离蛋 白形成静电结合,进而形成网络结构,可提高大豆分 离蛋白膜的机械强度与表面疏水性。

这里以大豆分离蛋白为原料,甘油作为增塑剂, 通过微波以及表面活性剂对大豆分离蛋白成膜液进 行处理,以探究大豆分离蛋白成膜液经微波和表面活 性剂处理后,膜的结构以及最终性能的变化。

1 实验

1.1 原料与试剂

原料与试剂:大豆分离蛋白(SPI,蛋白质含量≥ 90%)、甘油(AR级)、十二烷基硫酸钠(SDS,AR级)、 氢氧化钠(AR级)。

1.2 大豆分离蛋白膜的制备

1) 十二烷基硫酸钠(SDS)溶液的制备。准确称量0.6g SDS粉末溶于100 mL蒸馏水中,匀速搅拌至完

全溶解。研究中用到表面活性剂 SDS,其意义有两方 面:降低溶剂水的表面张力,促进溶质大豆分离蛋白 在溶剂水中的溶解度;利用离子型表面活性剂 SDS 在 溶剂水中电离的特性,SDS 饱和烷烃链部分与大豆分 离蛋白疏水基团形成疏水键,带电荷部分与大豆分离 蛋白之间形成静电结合。

2) 微波改性大豆分离蛋白(SPI)溶液的制备。准确称取 20g SPI 粉末溶于 240 mL 蒸馏水中,磁力搅拌 30 min,平均分成 5 份。用不同功率的微波(240,400, 640,800 W)分别对其进行处理,处理时间为 1 min,并分别标记为 SPI240, SPI400, SPI640 和 SPI800,未经微 波处理的标记为 SPI0。

3)大豆分离蛋白膜的制备。取20 mL的SDS溶液与微波改性大豆分离蛋白溶液进行混合,磁力搅拌,然后加入1.2g甘油,用1.0 mol/L的NaOH溶液来调节pH值,使混合溶液的pH值达到9.0。85℃水浴处理30 min,形成透明溶液,脱气,量取40g液体倒入定制的聚四氟乙烯盘中,放入45℃真空干燥箱进行干燥处理(五氧化二磷吸收水蒸气)。膜成形后,立即揭膜,放入干燥器中(温度为25℃,相对湿度为50%)平衡处理7d后,然后进行性能检测。

1.3 结构表征

1.3.1 全反射红外光谱(ATR-FTIR)分析

采用美国热点公司的Nicolet670型傅里叶红外光 谱仪,在ATR模式下测定膜的红外吸收光谱。扫描范 围为4000~600 cm⁻¹,扫描次数为32。

1.3.2 X射线衍射(XRD)分析

采用美国布鲁克公司的 D8 Advance型 X 射线衍 射仪分析膜内部大豆分离蛋白的结晶情况,铜靶辐 射,辐射管电压40 kV,辐射管电流40 mA,扫描范围 θ 为5°~60°,扫描速度2(°)/min。

1.3.3 扫描电镜(SEM)

采用日本日立公司的S-3400N型扫描电镜观察 膜的断面,加速电压为5kV,观察前进行镀金处理。

1.4 性能测试

1) 膜厚度。采用电子数显外径千分尺测量膜的 厚度。

2)含水率。将平衡处理后的膜剪成 20 mm × 20 mm 的试样,称量并记为m。;将其放入烘箱中,105 ℃烘 至绝干,称量并记为m,每个样品重复测量 5次求得平 均值。含水率的计算公式如下:

含水率= $(m_0 - m_f)/m_0 \times 100\%$ (1)

3) 力学性能。采用四川长江公司的DCP-KZ300 型拉力机,参照ISO 527-3:1995(E),对膜进行拉伸 性能测试,拉伸速度为5 mm/min。每个样品重复测量 5次,求得抗张强度和断裂伸长率的平均值。

4) 表面疏水性。采用德国德菲公司的OCA20型 接触角测定仪测定膜表面接触角的变化,并绘制曲线。

1.5 数据分析

采用SPSS软件对数据进行单因素方差分析,采用 Student-Newman-Keuls test(S-N-K)进行差异显著性 检验。

2 结果与讨论

2.1 结构分析

2.1.1 ATR-FTIR分析

不同微波功率条件下制得的大豆分离蛋白膜的 红外谱图见图1,可以看出,实验组与对照组在 4000~600 cm⁻¹波数范围内呈现出相似的红外谱图。 其中,1630,1538,1240 cm⁻¹处的峰分别对应大豆分 离蛋白中酰胺Ⅰ(C=O伸缩振动)、酰胺Ⅱ(N-H弯 曲振动)以及酰胺Ⅲ(C---H伸缩振动和N---H伸缩 振动)^[3,14-15]。从图1可以看出,当微波功率为240和 400 W时,相比于对照组 SPIO, 酰胺 I 键发生了红移, 这说明微波使大豆分离蛋白的结构发生了变化,紧凑 结构变得舒展¹⁰;当微波功率高于400 W时,酰胺 I 键发生了蓝移,说明舒展的结构在较高功率微波的 作用下向紧凑转变。3600~3000 cm⁻¹处的吸收峰是由 于一OH振动引起的。当微波功率为240和400W 时,相比于对照组,该峰向较低的波数移动,说明大 豆分离蛋白与甘油之间形成了大量的氢键结合,从 而导致极性降低^[17]。2980~2950 cm⁻¹处的峰是由饱和 烷烃链的振动引起的,这是由于表面活性剂SDS中存 在饱和烷烃链部分。从以上结果可以得出,微波可 以使大豆分离蛋白的结构发生变化,较低功率微波 (240和400W)可以使大豆分离蛋白结构由紧凑变得 舒展;在较高功率微波的作用下,舒展的结构又向紧 凑转变。同时,在微波的作用下,大豆分离蛋白内部 分子之间,以及大豆分离蛋白与甘油、SDS之间并没 有形成化学交联。

2.1.2 XRD分析

不同功率微波条件下制得的大豆分离蛋白膜的 XRD结果见图2a,可以看出,不同条件下制得的大豆



- 图1 对照组及不同微波功率条件下制得的大豆分离蛋白膜的 ATR-FTIR 图
- Fig.1 ATR-FTIR spectra of SPI films untreated and treated at different levels of microwave power

分离蛋白膜都在2θ=21°处有一个衍射峰,其对应于 大豆分离蛋白二级结构中β有序折叠18,此时各组的 结晶度见图 2b。对照组 SPI0 在 2 θ=9°处有一个衍 射峰,对应于大豆分离蛋白二级结构中α螺旋有序结 构188,然而经过微波处理后实验组中没有出现此峰,这 说明,微波使大豆分离蛋白的结构发生了变化,有序 结构减少。从图 2a 中还可以看出, SPI400 在 2 θ = 21° 处衍射峰的强度最低,其结晶度为32.3%,如图2b,而 对照组SPI0的结晶度为33.9%。结晶度降低的主要原 因有以下两点:大豆分离蛋白具有紧凑的四级球形结 构,其中 α 螺旋和 β 折叠有序结构构成大豆分离蛋白 的二级结构;二级结构主要被其内部主链上形成的氢 键所稳定,较低功率微波使大豆分离蛋白分子链振 动,破坏了大豆分离蛋白中的次级键氢键,导致α螺 旋有序结构消失以及β折叠有序结构的减少,紧凑、 有序的四级球形结构变成舒展、无序的结构^[10]。当微 波功率较高时,在微波的作用下,大豆分离蛋白分子 链振动加剧,分子链之间产热及其机械作用使大豆分 离蛋白在高温下发生热变性形成聚集体,舒展、无序 结构减少,结晶度增加。XRD的分析结果与 ATR-FTIR测试分析结果相一致。

2.1.3 SEM分析

不同功率微波条件下制得的大豆分离蛋白膜的 断面结构见图3,对照组断面结构疏松,如图3a,这导 致膜的力学性能以及表面疏水性较差,见表1^[8]。经过 低功率微波处理后,SPI240组和SPI400组的断面变得 密实,裂隙减少,说明网状交联程度增加。这主要是 由于大豆分离蛋白、甘油以及SDS之间形成的氢键、 疏水键以及静电结合,同时,密实的断面也保证了较 高的强度,见表1,还保证了较好的表面疏水性,见图





- 图 2 对照组及不同微波功率条件下制得的大豆分离蛋白膜的 XRD结果分析
- Fig.2 XRD analysis of SPI films untreated and treated at different levels of microwave power



Fig.3 SEM photographs of the fracture surface of SPI films untreated and treated at different levels of microwave power at $2000 \times$ 4。较高功率微波处理后的膜,如SPI640组和SPI800 组,断面相比于SPI400变得粗糙,交联程度降低,强度 降低。从SEM的结果可以看出,微波处理对膜内部的 网络交联程度有很大影响。

表1 对照组及不同微波功率条件下处理的大豆分离蛋白膜的 力学性能

Tab.1 Mechanical properties of SPI films untreated and treated at different levels of microwave power

样品	含水率/%	膜厚度/mm	抗张强度/MPa	断裂伸长率/%
SPI0	11.07 ± 0.23^{ab}	$0.25\pm0.005^{\rm b}$	$3.65\pm0.20^{\rm d}$	$50.10 \pm 3.86^{\circ}$
SPI240	$10.96 \pm 0.78^{\circ}$	$0.33\pm0.005^{\scriptscriptstyle a}$	$4.37 \pm 0.21^{\circ}$	$222.53 \pm 13.66^{\text{b}}$
SPI400	$10.53\pm0.46^{\circ}$	$0.34\pm0.008^{\scriptscriptstyle a}$	$5.91\pm0.15^{\rm a}$	$277.43 \pm 11.17^{\circ}$
SPI640	$10.79\pm0.49^{\rm bc}$	$0.32\pm0.006^{\scriptscriptstyle a}$	$5.85 \pm 0.23^{\circ}$	119.6 ± 11.59^{d}
SPI800	$11.10 \pm 0.66^{\circ}$	$0.33\pm0.008^{\scriptscriptstyle a}$	$5.04\pm0.17^{\rm b}$	198.65 ± 4.38°

注:采用不同字母(a—e)表示显著性差异,其中同列数据后面同 一字母表示差异不显著(P<0.05,S-N-K(S)检测)。



图4 对照组及不同微波功率条件下处理的大豆分离蛋白膜的 表面接触角曲线

Fig.4 Contact angles of SPI films untreated and treated at different levels of microwave power

2.2 性能分析

2.2.1 表面疏水性

一般来说,当表面接触角动态曲线达到平衡时, 角度越大说明表面疏水性越好^[19]。从图4可以看出, 不同条件下制得的大豆分离蛋白膜,其接触角变化均 存在2个阶段,即快速下降阶段和趋于平缓阶段,这就 意味着膜表面的水分吸收达到了平衡状态^[8]。当微波 功率为400 W时,膜(SPI400)表面吸水平衡时接触角 最大(180 s,28.65°)。探究其原因主要有3个方面: 首先,大豆分离蛋白经较低功率微波处理后,暴露出 的疏水基团使其表面疏水性提高;其次,从ATR-FTIR 结果来看,—OH峰位的移动(由官能团之间形成的氢 键引起),导致膜表面的亲水位点数量降低;最后,大 豆分离蛋白与SDS、甘油之间形成的互穿网络结构使 大豆分离蛋白基质中的空隙减少[20]。

2.2.2 力学性能

从表1可以看出,不同条件下制得的膜的含水率 差别不大(P>0.05)。在膜厚度方面,对照组与实验组 之间有明显差别(P<0.05),而实验组之间差别不大 (P>0.05),这是由于微波使大豆分离蛋白的结构变得 舒展,相互之间形成的网状交联使其空间结构更加延 展。当微波功率为400 W时,膜的抗张强度和断裂伸 长率最大,较对照组(SPI0)分别增加了61.91%和 453.75%;随着微波功率的进一步增大(640,800 W), 膜的抗张强度和断裂伸长率开始降低,结果与SEM结 果相一致。以上结果说明,微波处理对膜的抗张强度 和断裂伸长率有显著影响。

2.3 微波及表面活性剂对大豆分离蛋白改性机理分析

天然状态下,大豆分离蛋白分子具有紧凑的四级 球形结构;大豆分离蛋白氨基酸残基上的活性基团以 及疏水键隐藏于大豆分离蛋白内部;如图1和图2所 示,微波对大豆分离蛋白的结构有很大影响,这主要 是由于在微波作用下,蛋白分子链振动,分子之间频 繁碰撞,产生的热和机械作用使大豆分离蛋白分子结 构发生变化。

当微波功率较低时(240,400 W),微波的能量使 大豆分离蛋白极性分子产生振动,破坏之前维系大豆 分离蛋白紧凑球形结构的次级键(二硫键、氢键、范德 华力等),使蛋白质有序的螺旋和折叠结构被破坏,紧 凑、有序的四级球形结构变成舒展、无序的结构,结晶 度降低并暴露出之前隐藏于紧凑结构内部的基团(--NH2,一OH,一COOH)以及疏水基团^[21],使大豆分离蛋 白分子之间以及大豆分离蛋白与甘油、SDS之间的作 用位点增多。大豆分离蛋白分子链暴露出来的末端 活性基团(-NH2,-OH,-COOH)之间形成分子内和 分子间的氢键结合,形成网状结构;亲水官能团的减 少(氢键的形成)使膜表面的亲水位点数量减少,表面 疏水性提高;大豆分离蛋白疏水基团与SDS饱和烷烃 链部分形成疏水键,带电荷部分与大豆分离蛋白之间 形成静电结合,进一步形成致密的网状结构;甘油中 的—OH与大豆分离蛋白活性氨基酸侧链上的基团 (-NH2,-OH,-COOH)之间形成的氢键稳固了网状 结构。微波作用机理见图5,微波处理后的SPI结构舒 展,相互之间形成网络结构,网络结构使膜的断面结 构变得密实,空隙减少,强度增加,表面疏水性提高。

当微波功率较高时(640,800 W),相同处理时间 条件下,较高功率微波具有的高能量使大豆分离蛋白



图 5 微波作用机理 Fig.5 Principle of microwave treatment of SPI

极性分子振动进一步加剧,分子链之间的摩擦碰撞热 效应增强,大豆分离蛋白在高温下发生的热变性破坏 了之前形成的分子内和分子间氢键以及大豆分离蛋 白与甘油之间的氢键。同时,较高功率微波会促进二 硫键的形成,二硫键的形成促进了大豆分离蛋白向紧 凑结构的转变,使暴露的内部活性基团以及疏水键大 大减少。活性基团、疏水键的减少以及各物质之间形 成的氢键作用、疏水键作用和静电结合作用在分子链 振动以及热效应过程中连续断裂,导致构筑的立体网 状结构被破坏¹³,分子间交联程度降低,分子间空隙增 大,断面密实度降低,导致膜的力学性能以及表面疏 水性降低。

3 结语

大豆分离蛋白成膜液经过微波以及表面活性剂处理后,大豆分离蛋白结构变得舒展,暴露了氨基酸侧链上的活性官能团以及隐藏于内部的疏水键,这些变化促进了大豆分离蛋白内部分子之间以及大豆分离蛋白分子与SDS、甘油之间的交联,使得经过改性后的大豆分离蛋白膜的断面空隙减少,更加密实。当微波处理功率为400 W时,大豆分离蛋白膜的抗张强度较未处理组提高了61.91%,断裂伸长率提高了453.75%,并且改性后的大豆分离蛋白膜具有较好的表面疏水性。

参考文献:

- [1] TIAN H F, XU G Z, YANG B, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Soy Protein/Agar Blend Films: Effect of Composition and Processing Methods[J]. Journal of Food Engineering, 2011(1):21-26.
- [2] SONG F, TANG D L, WANG X L, et al. Biodegradable Soy Protein Isolate-based Materials: a Review[J]. Biomacromolecules, 2011, 12(10): 3369-3380.
- [3] GARRIDO T, ETXABIDE A, PENALBA M, et al. Preparation

and Characterization of Soy Protein Thin Films: Processing-Properties Correlation[J]. Materials Letters, 2013 (16) : 110—112.

- [4] GUERRERO P, LECETA I, PENALBA M, et al. Optical and Mechanical Properties of Thin Films Based on Proteins[J]. Materials Letters, 2014(6):286-288.
- [5] RODRIGUEZ M, OSES J, ZIANI K, et al. Combined Effect of Plasticizers and Surfactants on the Physical Properties of Starch Based Edible Films[J]. Food Research International, 2006,39(8):840-846.
- [6] TUMMALA P, LIU W J, DRZAL LT, et al. Influence of Plasticizers on Thermal and Mechanical Properties and Morphology of Soy-Based Bioplastics[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(22):7491-7496.
- [7] COUPLAND J N, SHAW N B, MONAHAN F J, et al. Modeling the Effect of Glycerol on the Moisture Sorption Behavior of Whey Protein Edible Films[J]. Journal of Food Engineering, 2000,43(1):25-30.
- [8] ZHONG Z K, SUN X S. Thermal and Mechanical Properties and Water Absorption of Sodium Dodecyl Sulfate-Modified Soy Protein 11S[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2000, 81(1):166-175.
- [9] KUMAR P, SANDEEP K P, ALAVI S, et al. Preparation and Characterization of Bio-Nanocomposite Films Based on Soy Protein Isolate and Montmorillonite Using Melt Extrusion[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3):480–489.
- [10] AI F J, ZHENG H, WEI M, et al. Soy Protein Plastics Reinforced and Toughened by SiO₂ Nanoparticles[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 105(3):1597–1604.
- [11] WU R L, WANG X L, WANG Y Z, et al. Cellulose/Soy Protein Isolate Blend Films Prepared via Room-Temperature Ionic Liquid[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(15):7132-7236.
- [12] WANG Z, SUN X X, LIAN Z X, et al. The Effects of Ultrasonic/Microwave Assisted Treatment on the Properties of Soy Protein Isolate/Microcrystalline Wheat-Bran Cellulose Film[J], Journal of Food Engineering, 2013, 114(2):183—191.

- [13] 卞科,陶平平,崔贵金,等. 微波改性大豆蛋白制备啤酒标签胶的研究[J]. 粮食与饲料工业,2011(8):21—28.
 BIAN Ke, TAO Ping-ping, CUI Gui-jin, et al. Study on Soybean Protein Modified by Microwave Used as Beer Label Adhesive[J]. Cereal & Feed Industry,2011(8):21—28.
- [14] CIANNAMEA E M, STEFANI P M, RUSECKAITE R. Physical and Mechanical Properties of Compression Molded and Solution Casting Soybean Protein Concentrate Based Films[J]. Food Hydrocolloids, 2014(8):193—204.
- [15] CHEN L Y, SUBIRADE M. Elaboration and Characterization of Soy/Zeinprotein Microspheres for Controlled Nutraceutical Delivery[J]. Biomacromolecules, 2009, 10(12):3327—3334.
- [16] GAO Q, LI J Z. Soybean Meal-Based Wood Adhesives Enhanced by Modified Polyacrylic Acid Solution[J]. BioResources, 2012, 1(7):946—956.
- [17] ARFAT Y, BENJAKUL S, PRODPRAN T, et al. Development and Characterisation of Blend Films Based on Fish Protein Isolate and Fish Skin Gelatin[J]. Food Hydrocolloids, 2014 (39):58-67.
- [18] CHEN J, CHEN X Y, ZHU Q J, et al. Determination of the Domain Structure of the 7S and 11S Globulins from Soy Proteins by XRD and FTIR[J]. Journal of Science of Food and Agriculture, 2013, 93(7): 1687—1691.
- [19] KOKOSZKA S, DEBEAUFORT F, HAMBLETON A, et al. Protein and Glycerol Contents Affect Physico-Chemical Properties of Soy Protein Isolate-Based Edible Films[J]. Innovative Food Science & Emerging Technology, 2010(3):503-510.
- [20] SU J F, HUANG Z, ZHAO Y H, et al. Moisture Sorption and Water Vapor Permeability of Soy Protein Isolate/Poly (Vinyl Alcohol)/Glycerol Blend Films[J]. Industrial Crops and Products, 2010, 31(2):266-276.
- [21] MO X J, SUN X Z. Thermal and Mechanical Properties of Plastics Molded from Sodium Dodecyl Sulfate–Modified Soy Protein Isolates[J]. Journal of Environmental Polymer, 2000, 8 (4):161–166.