新材料技术

表面活性剂对壳聚糖成膜体系物理特性的影响

于力，邓云，王丹凤，钟宇
（上海交通大学 农业与生物学院，上海 200240）

摘要：目的 为研究不同表面活性剂对壳聚糖成膜体系物理与力学性能的影响，以期制备性能优良的壳聚糖膜。**方法** 文中配制质量分数为 1%的壳聚糖膜液，以壳聚糖质量分数为 30%的甘油为增塑剂，分别以质量分数为 0.05%的吐温 20、40、80，司盘 20、40、80 为表面活性剂，采用流延法制备可食膜。考察膜液流变性质、表面张力、Zeta 电位，成膜力学性能、水分敏感性（水蒸气透过率、溶胀性、溶解性）、透光性，并利用 AHP–CRITIC 联合评价法对膜性能进行综合评价。**结果** 在质量分数为 1%时，壳聚糖膜液表现为弱胀塑性；表面活性剂的加入能够有效降低膜液表面张力，使其保持稳定状态（Zeta 电位>30 mV）；成膜均为淡黄色半透明状，透光范围为 45%~77%；对同一系列表面活性剂，随着亲水亲油平衡值（HLB）的增加，成膜力学性能下降，但阻水能力增强，同时，吐温添加组膜的力学性能均优于司盘添加组，而阻水性能则相反。**结论** 综合评价膜体系性能发现，加入司盘 20 的壳聚糖膜得分最高，吐温系列最高分为吐温 20。研究结果为成膜体系中表面活性剂的选择提供了理论依据。

关键词：表面活性剂；壳聚糖；膜液性能；成膜性质
中图分类号：TS205 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2022)11-0001-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.11.001

Effect of Surfactants on Physical Properties of Chitosan Film-forming System

YU Li, *DENG Yun*, *WANG Dan-feng*, *ZHONG Yu*
(School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the effect of different surfactants on the physical and mechanical properties of chitosan film-forming system to prepare chitosan film with good properties. 1% chitosan film-forming solution was prepared in this paper. And 30wt.% (chitosan) glycerin was used as the plasticizer, while 0.05% Tween 20, 40, 80, and Span 20, 40, 80 were added respectively as surfactant. Chitosan film was made by casting method. The rheological properties, surface tension and Zeta potential of film-forming solution, and mechanical properties, moisture sensitivity (water vapor transmission rate, swelling, solubility) and light transmittance of chitosan film were investigated. AHP-CRITIC method was applied to comprehensively evaluate the performance of the film-forming system. The results showed that the film-forming solution exhibited weak swelling plasticity at a concentration of 1%; the addition of surfactants could effectively reduce the surface tension of the solution and keep it in a stable state (Zeta potential>30 mV); the formed film was light yellow and translucent with light transmission range of 45%-77%; for the same series of surfactants, the mechanical properties of the film decreased but the moisture barrier capacity increased by the increase of hydrophil-

收稿日期：2021–11–12
基金项目：国家自然科学基金（32072270）
作者简介：于力（1997—），女，上海交通大学硕士生，主攻食品包装与保鲜。
通信作者：钟宇（1983—），女，博士，上海交通大学副教授，主要研究方向为绿色活性包装开发与应用、食品/农产品保鲜加工、新型加工技术对食品大分子结构变化及构效关系影响。

ic-lipophilic balance (HLB); in addition, film with Tween series had better mechanical properties, while moisture barrier performance displayed the opposite trend. The comprehensive evaluation of the film-forming performance shows that the chitosan film with Span 20 has the highest score. For chitosan film adding Tween series, the one with Tween 20 has higher score. The results from present study provide a theoretical basis for the selection of surfactants in the film-forming system.

KEY WORDS: surfactant; chitosan; property of film-forming solution; film-forming performance

壳聚糖（Chitosan，CTS）是几丁质的部分或全部脱乙酰化产物，是自然界中唯一的碱性多糖[1]。它一般不能直接溶于水，但可溶于大多数稀酸，如乙酸、盐酸，苯甲酸等。因其分子中含有大量氨基和羟基，壳聚糖具有良好的成膜性，可以通过浸渍、刷涂、喷涂等手段在食品的表面形成无色透明的半渗透膜，从而达到保鲜食物、抑制腐败的作用[2]。此外，它还具有良好的抑菌性、生物相容性等，是最具应用前景的天然涂膜聚合物之一。

为使壳聚糖成膜体系更好地附着于食品表面、均匀铺展、并形成连续一致的膜，充分发挥其保鲜效果，需要向成膜体系中添加合适的表面活性剂，降低体系表面张力的同时增加成膜体系在食品表面的黏附性[3]。吐温（Tween，TW）和司盘（Span，SP）是 2 种常见的非离子型表面活性剂，TW 为 O/W 型亲水乳化剂；而后者则为 W/O 型亲油乳化剂。Zhong 等[4]研究表明表面活性剂可以降低葛根淀粉复合膜溶液的表面张力，延迟复合膜中抗坏血酸的释放，同时添加不同种类的表面活性剂也会影响膜表面形态。王琦等[5]研究表明，添加表面活性剂后，壳聚糖–乳清分离蛋白–纳米二氧化钛复合膜表面的光滑度相比对照组有不同程度的劣变，其中添加 TW20 的复合膜力学性能和透水性能最佳，适宜的体积分数为 0.1%。

表面活性剂除能够降低膜液表面张力，增大固－液界面的吸附外，与聚合物分子间还存在静电作用、疏水作用、氢键作用等，其在大分子链上的缔合会进一步改变膜液表面吸附、界面流变性等[6]。此外，表面活性剂的 HLB 值对成膜效果影响较大，低平衡值（HLB）能够增强聚合物与脂质的相互作用，提高脂质分布均匀性与膜网络稳定性，而高 HLB 值使膜内部结构规则、紧密[7]。

为深入了解表面活性剂与成膜基材的相互作用，及其对成膜效果的影响，该研究分别选择 TW20、TW40、TW80、SP20、SP40、SP80 作为表面活性剂，添加至 CTS 溶液中，并流延成壳聚糖膜（Chitosan Film，CF）。通过测定膜液和 CF 膜的理化性质，探究不同的表面活性剂对成膜体系的影响，并引入层次分析 AHP–CRITIC（Analytic Hierarchy Process and Criteria Importance Through Intercriteria Correlation）联合评价机制，通过分析指标间相关性显示指标重要性，选择最优表面活性剂。

1 实验

1.1 材料与试剂

CTS（脱乙酰度为 88.1%）由山东奥康生物科技有限公司提供；甘油、乙酸、TW20、TW40、TW80、SP20、SP40、SP80（皆为分析纯）购自上海凌峰化学试剂有限公司；异硫氰酸荧光素（FITC，D–9801）购自 bioss；芘（BD149655）购自毕得医药。

1.2 仪器与设备

BZY–2 表面张力仪，德国 KRUSS 公司；DHR1 流变仪，美国 TA 仪器（沃特世科技（上海）有限公司）；STAR 搅拌机，上海标本模型厂；BioTek 酶标仪，美国 Winooski 公司；TA.XT PLUS 质构仪，英国 Stable Micro System 公司；ZS90 型 Zeta 电位仪，英国 Malvern Panalytical 公司。

1.3 方法

1.3.1 CF 的制备

将 CTS 溶于质量分数为 0.5%的乙酸溶液中，配制成质量分数为 1%的溶液，将 CTS 质量分数为 30%的甘油增塑剂[8]和质量分数为 0.05%的不同表面活性剂（HLB 值见表 1）配制成系列膜液体系，分别标记为 CF–TW20、CF–TW40、CF–TW80、CF–SP20、CF–SP40、CF–SP80。将膜液采用流延法制备成膜，干燥、剥离后置于温度为 25 ℃、相对湿度为 50%的环境中平衡 48 h 备用。

1.3.2 膜液流变性质测试

采用 DHR1 旋转流变仪测定膜液表观黏度[4]，利用恒温循环水浴装置控制膜液体系温度在（25±0.5）℃内，设定测试程序为 10 min 内转子从 10^{-3} ~ 10^{3} s^{-1} 速率依次增加，然后再降至 10^{-3} s^{-1}，全程设 20 个取样点。对数据进行 POWER LAW 分布拟合，非时间依赖的流体剪切应力和剪切速率满足关系式：

$$\tau=K\cdot\gamma^{n}$$

式中：τ 为剪切应力，Pa；γ 为剪切速率，s^{-1}；K 为稠度系数；n 为牛顿指数。拟合过程中形成相关系数为 R^2。

表 1　不同表面活性剂对壳聚糖膜的透光性能及力学性能的影响
Tab.1 Effects of different surfactants on transparency and mechanical behavior of CF

表面活性剂	HLB 值	透光率/%	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
CF–TW20	16.7	63.33±11,11[b]	31.40±1.95[b]	80.96±9.23[a]
CF–TW40	15.6	55.89±19.21[b]	32.77±4.31[ab]	45.94±3.13[c]
CF–TW80	15	60.04±15.62[b]	21.43±3.68[c]	36.01±3.42[d]
CF–SP20	8.6	77.13±10.50[a]	34.36±2.68[a]	62.90±6.24[b]
CF–SP40	6.7	53.53±19.92[c]	12.70±0.90[d]	35.73±5.92[d]
CF–SP80	4.3	45.64±7.28[d]	24.78±3.39[c]	42.03±3.83[c]

注：同行标有不同小写字母者表示组间差异显著（$P<0.05$）。

1.3.3　膜液表面张力测试

利用 BZY–2 全自动表面张力仪，采用吊片法测定膜液表面张力。吊片型号为 PT11，尺寸参数分别为：长度 10.0 mm、宽度 19.9 mm、厚度 0.2 mm，每个样品做 3 组平行[9]。

1.3.4　膜液 Zeta 电位

取 1 mL 左右的 CF 膜液，倒入标准比色皿中，使用 ZS90 型 Zeta 电位仪测定膜液的电位值，每个样品做 3 组平行。

1.3.5　膜力学性能测试

参考 Zhuang 等[10]的方法，将 1.5 cm×8 cm 的膜片固定在质构仪 A/TG 拉伸探头上，探头标距为 50 mm，测试中以 0.5 mm/s 的速度恒速拉伸至膜断裂。每个样品测定 8 组平行，计算抗拉强度（Tensile Strength，TS）和断裂伸长率（Elongation at Break，EB）。

1.3.6　膜透湿性能测试

参考美国材料实验协会（American Society of Testing Materials，ASTM）[11]的拟杯子法测量水蒸气透过系数（Water Vapor Permeability, WVP）。透湿杯内径为 57 mm，内部深度为 15 mm。在透湿杯中加入无水氯化钙，放置膜样品（1.5 cm×8 cm）后，置于相对湿度为 50%、温度为 25 ℃的恒温恒湿箱中，每隔 1 h 取出测量质量。每个样品测 3 组平行。

水蒸气透过系数（P_v）计算式为：

$$P_v = \Delta m \cdot d / (A \cdot t \cdot \Delta p) \tag{1}$$

式中：P_v 为水蒸气透过系数，g·cm/（cm^2·s·Pa）；t 为间隔时间，s；Δm 为 t 时间内的质量增量，g；d 为试样厚度，cm；A 为水蒸气透过面积，cm^2；Δp 为试样两侧的水蒸气压差，Pa。

1.3.7　膜溶胀性及水溶性测试

按照 Rambabu 等[12]的方法，称量 2 cm×2 cm 的膜置于 105 ℃的烘箱干燥至质量不变，测量质量为记为 m_1，将干燥膜样品置于去离子水中，于室温下放置 24 h 取出吸去表面水分后称量为 m_2，将取出膜样品再次干燥至质量不变，称量记为 m_3。每个样品测 3 次平行。

膜溶胀性、水溶性计算式分别见式（2）—（3）。

$$溶胀性 = (m_2 - m_1) / m_1 \tag{2}$$

$$溶解度 = (m_2 - m_3) / m_1 \tag{3}$$

1.3.8　膜透光率测试

按照 GB/T 2410—2008《透明塑料透光率和雾度的测定标准》[13]，采用 UV–1800 紫外可见分光光度计测定厚度为 60~80 μm 膜的透光率（T_{600}），每组测定 3 个平行。

1.3.9　膜性能指标评价

以膜液及成膜特性作为评价指标，应用 AHP–CRITIC 联合评价法[14]对膜性能进行综合评价。AHP 法通过主观进行各指标重要性判断，构建判断矩阵。通过一致性检验的判断矩阵，以其归一化的特征向量作为权向量，求得权重 ϕ_j（j=1，2，3，…，n），以归一化指标数值和 ϕ_j 计算累加加权得分 $\sum_1$。CRITIC 法各个指标的客观权重是通过指标数据中标准差和相关系数计算而得，将某个指标的信息量占总信息量的比重作为该指标的客观权重 σ_j，以归一化指标数值和 σ_j 计算累加加权得分 $\sum_2$。膜性能综合评价得分计算见式（4）。综合得分数值越大，说明膜的性能越好。

$$\sum = (\sum_1 + \sum_2) / 2 \tag{4}$$

1.4　数据统计分析

数据结果表示为平均值±标准偏差的形式，采用 IBM SPSS Statistics 24 进行方差分析，$P \leq 0.05$ 则认为数据有显著性差异。

2　结果与分析

2.1　表面活性剂对壳聚糖膜液流变性质的影响

膜液的流动性能够影响涂膜过程的铺展性、成膜厚度、均匀性、力学性能等[15]。CF 膜液体系的表观

黏度变化见图 1，流变学参数见表 2。由图 1 可知，在 0.01~1 s^{-1} 区间，随着剪切速率的增加，体系表观黏度均呈剪切稀化的特点。张利铭等[16]研究发现 CTS 与玉米醇溶蛋白共混膜液亦在初始阶段存在黏度降低的现象，原因可能是从静止到开始接收剪切应力，原本彼此缠绕的大分子聚合物在溶液中缠结点被部分解开，大分子收拢成团，纠缠度下降，分子沿流动剪切的方向排列使得自由空间增大，表观黏度下降。剪切速率在 2~1 000 s^{-1} 时，体系表观黏度趋于平稳，这是由于此时大分子已充分解缠绕的缘故。在一定剪切速率下，添加 SP 的 CF 膜液体系黏度均显著高于添加 TW 实验组，可能是由于亲油性表面活性剂与 CTS 分子的结合较弱，分子间作用力低，CTS 分子间的缠绕更多；而 TW 与 CTS 分子间作用力强，CTS 分子之间的纠缠节点密度低，因而黏度更低[17]。

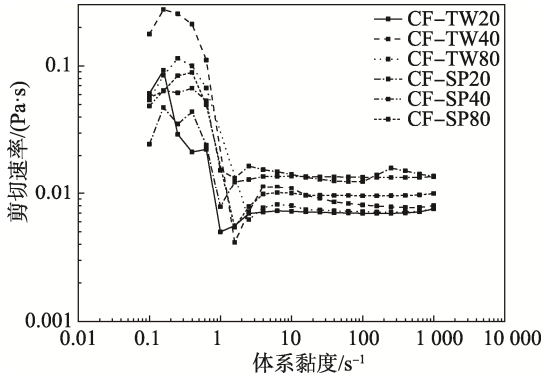

图 1 不同表面活性剂对壳聚糖膜液黏度的影响
Fig.1 Effect of different surfactants on viscosity of CTS film-forming solutions

表 2 不同表面活性剂对壳聚糖膜液流变性能的影响
Tab.2 Effect of different surfactants on rheological property of CTS film-forming solutions

种类	非牛顿指数 n	稠度系数 $K/10^3$	相关系数 R^2
CF–TW20	1.069 9	4.621	0.999 7
CF–TW40	1.030 3	6.412	0.999 6
CF–TW80	1.055 5	5.12	0.999 8
CF–SP20	1.012 9	12.49	0.999 9
CF–SP40	0.952 9	19.303	0.998 6
CF–SP80	1.033 1	7.865	0.999 9

非牛顿指数 n 表示流体偏离牛顿流体的程度，稠度系数 K 值能够反映流体的增黏性。除添加 SP40 的实验组外其他实验组 n 值略大于 1，表现为弱胀塑性流体。前期研究也表明，CF 膜液在较低分子量和浓度条件下，呈现剪切变稠特性[18]。此外，添加 SP40 的实验组呈弱假塑性且稠度系数显著高于其他实验组。推测是由于 SP40 常温为固体形态，溶解性差，与 CTS 的分子间相对作用最弱。

2.2 表面活性剂对壳聚糖膜液表面张力、Zeta 电位及极性环境的影响

膜液体系在固体食品表面上的润湿过程是从液–气界面和固–气界面过渡到固–液界面的过程，膜液体系的润湿性能直接影响涂膜的均匀性和黏附性，进而影响膜的保护效果[4]。对于相同的固体食物，膜液体系的表面张力越小，润湿过程越容易进行[19]。由图 2a 可知，表面活性剂加入膜液体系后，亲水基团使其具有进入水相的趋势，而亲油基团则在体系表面富集，导致膜液表面张力下降。对于 TW 系列，随 HLB 值增大，膜液表面张力下降。疏水性 SP20 及 SP80 的加入使膜液表面张力下降更为明显，而添加 SP40 的膜液体系表面张力最大，这可能归因于 SP40 分子在常温下为固态，与 CTS 分子融合性差，导致两亲分子在体系中发挥的作用小。

Zeta 电位是连续相与附着在分散粒子上的流体稳定层之间的电势差，能够反映胶态分散的稳定性。Zeta 电位大于 30 mV 的膜液通常较为稳定[20]。由图 2b 可知，除 CF–TW40 体系外，膜液电位均大于 30 mV，具有良好的稳定性。此外，CF–TW20、CF–SP20、CF–SP80 体系电位在 35 mV 左右，且之间无显著性差异

2.3 表面活性剂对壳聚糖膜力学性能和透光性能的影响

CF 膜的力学性能见表 1，添加不同表面活性剂的膜力学性能差异显著。在同一类型的表面活性剂添加组中，膜抗拉强度及断裂伸长率均呈现随表面活性剂 HLB 值增加，数值呈下降的趋势；同时 TW 组力学性能整体优于 SP 组。原因可能为 HLB 值增加意味着表面活性剂亲油性增强，对成膜连续分子网络结构破坏增强，表现为力学性能下降。在所有实验组中，CF–TW20 呈现最好出的力学性能，CF–SP40 性能最差。王琦等[5]亦指出，表面活性剂的添加均会一定程度降低膜的力学性能，而其中 TW20 对力学性能影响最少，可能由于 TW20 与 CTS 分子融合能力最好。

添加不同表面活性剂的 CF 膜均为淡黄色半透明状，其透光性数值见表 1。CF 膜透光范围为 45%~77%，其中 CF–SP20 透光性最强，CF–SP80 透光性最弱，而添加 TW 组膜的透光率差异较小。这可能由于亲油性表面活性剂与亲水性 CTS 分子的相互作用差异更为显著，HLB 值增高，亲油性增强，使得 CTS 分子局部聚集性增强，透光率显著降低。

2.4 表面活性剂对壳聚糖膜溶解度和溶胀性的影响

溶解度是可生物降解薄膜的一个重要特征，它与薄膜在潮湿环境中的耐水性相关。CF 膜水溶性与

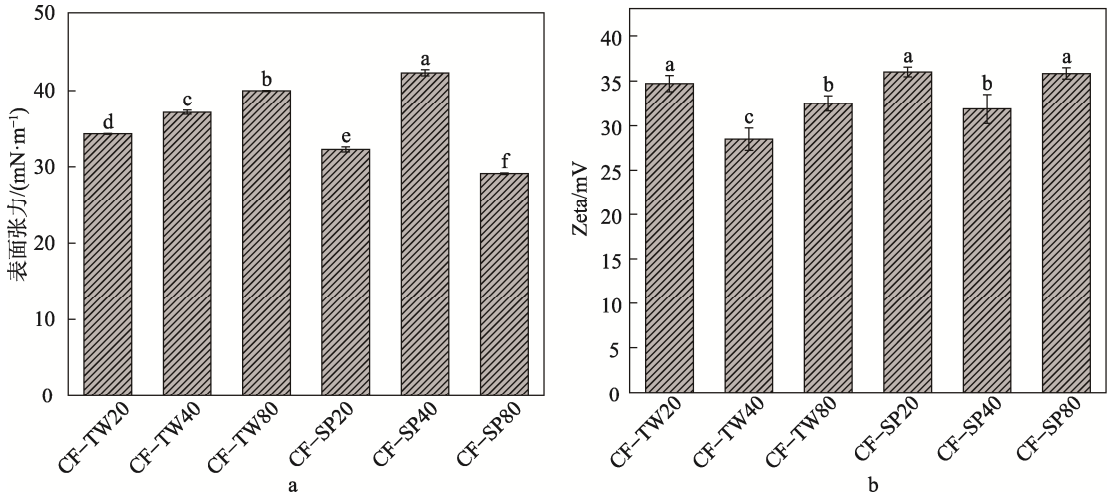

图 2　不同表面活性剂对壳聚糖膜液表面张力与 Zeta 电位的影响

Fig.2 Effects of different surfactants on surface tension and zeta potential of CTS film-forming solution

HLB 值呈正相关，相关系数为 0.849（$P<0.01$）（表 3），这是由于表面活性剂的亲油性逐渐增强以及其与 CTS 分子的相互作用降低了膜水溶性，能一定程度上起到耐水效果。此实验中，CF 膜溶胀性与表面活性剂 HLB 值呈负相关，相关系数为−0.60（$P<0.01$）。CF–SP80 的溶胀性最高，为 126.69%，比最低的 CF–TW80 增加了 32.62%，一般来讲，分子间作用力越强，膜越致密，使得溶胀率降低[21]。由于不同表面活性剂分子与 CTS 的氨基和羟基等基团结合的情况不同，导致分子间作用力具有差异。

2.5　表面活性剂对壳聚糖膜水蒸气透过率的影响

添加不同表面活性剂的 CF 膜透湿性能见表 3。CTS 为亲水性物质，随着添加表面活性剂的 HLB 值降低，亲油性增强，CF 膜的阻水性能也增强，表现为 WVP 值降低。经相关性分析二者呈负相关，相关系数为−0.98（$P<0.01$）。该实验中，CF–TW80 的 WVP 值最高，比最低的 CF–SP40 高出 121.55%，该结果与 Song 等[22]的研究结果一致。生物聚合物膜的水蒸气透过率主要受膜对水分的吸收和水分在膜中扩散行为的双重控制，SP40 的添加能显著降低 CF 膜的亲水性，其常温时的固体形态亦增加了水分子的扩散孔道，使其 WVP 值显著降低。据报道，TW20 质量分数增加可使淀粉膜的 WVP 值增大；少量 SP80 会减弱膜的阻水性，而高质量分数的 SP80 则可降低 WVP 值[19]。这表明表面活性剂对薄膜 WVP 值的影响与表面活性剂种类、质量分数以及膜基材特性都相关。

2.6　AHP–CRITIC 联合评价法选择表面活性剂

AHP 的打分见表 4，依据主观打分，各性能重要性依从大到小次为 CF 膜抗拉强度、断裂伸长率、CF 膜液 Zeta 电位、表面张力、CF 透湿性、溶胀性、溶解度、透光率。该主观打分表通过了一致性检验，可据此计算各表征指标的权重。CRITIC 综合评价法计算过程参数及最终性质权重见表 4，由表 4 可知，CF 膜 WVP 值客观权重最高，在不同实验组中数据差异性最为显著。按照 2 种评价体制得分各占比 50% 计算不同质量分数表面活性剂的成膜体系的综合得分情况，见表 5。由表 5 可知，CF–SP20 得分最高（0.746 分），其次为 TW20（0.583 分），表明 SP20、TW20 这 2 种表面活性剂的添加能使膜具有较优的综合性质。

表 3　不同表面活性剂对壳聚糖膜溶解度、溶胀性及水蒸气透过系数的影响

Tab.3 Effects of different surfactants on solubility, swelling and WVP of CF

表面活性剂	溶解度/%	溶胀性/%	水蒸气透过系数/（10^{-13} g·cm^{-1}·s^{-1}·Pa^{-1}）
CF–TW20	31.99±0.45^{a}	116.83±7.49^{b}	8.02±0.89^{a}
CF–TW40	28.14±0.23^{b}	96.35±5.55^{d}	6.03±0.78^{b}
CF–TW80	27.31±0.88^{b}	95.53±1.92^{d}	6.36±0.23^{b}
CF–SP20	25.52±0.34^{c}	119.34±5.75^{b}	4.25±0.28^{c}
CF–SP40	25.36±1.20^{c}	106.71±7.82^{c}	3.62±0.11^{d}
CF–SP80	24.89±1.09^{c}	126.69±5.53^{a}	4.29±0.49^{c}

注：同一行中标有不同小写字母者表示组间差异显著（$P<0.05$）。

表 4 添加不同表面活性剂的壳聚糖成膜体系综合评价参数

Tab.4 Comprehensive evaluation parameters of CTS film-forming system with different surfactants

性质	AHP 分析重要性系数								AHP 权重/%	CRITIC 指标变异	CRITIC 指标冲突	CRITIC 信息量	CRITIC 权重/%
透光率	1								3.61	0.332	6.223	2.068	9.81
溶解度	1.2	1							6.83	0.375	7.12	2.672	12.68
溶胀性	1.5	1.2	1						6.83	0.383	7.227	2.765	13.12
WVP	1.5	1.2	1	1					12.71	0.419	10.065	4.215	20.00
表面张力	3	2	1.5	1.5	1				12.71	0.371	5.884	2.182	10.35
Zeta 电位	4	3	2	2	1.5	1			12.71	0.383	5.834	2.236	10.61
TS	5	4.5	4	4	3	2	1		22.30	0.383	6.079	2.326	11.04
EB	5	4.5	4	4	3	2	1	1	22.30	0.396	6.6	2.612	12.39

表 5 不同表面活性剂的壳聚糖成膜体系综合评价得分

Tab.5 Comprehensive evaluation score of CTS film-forming system with different surfactants

表面活性剂	AHP 得分	CRITIC 得分	综合得分
CF–TW20	0.701	0.466	0.583
CF–TW40	0.444	0.48	0.462
CF–TW80	0.32	0.462	0.391
CF–SP20	0.786	0.706	0.746
CF–SP40	0.232	0.439	0.336
CF–SP80	0.568	0.524	0.546

3 结语

将不同类型的非离子表面活性剂加入壳聚糖膜液体系中，其在壳聚糖分子链上的缔合行为存在差异。实验中表面活性剂的加入能够有效降低膜液表面张力，并使膜液保持稳定，除司盘 40 常温下的固体形态会引起膜液性能较大变化外，吐温系列对膜液作用更为明显。成膜后，吐温系列表面活性剂对机械强度具有明显的正面效果，而司盘系列使膜具有更为良好的阻水能力。此外，对同一系列表面活性剂，成膜力学性能与 HLB 值呈现负相关关系，而阻水能力则呈正相关关系。通过 AH–CRITIC 联合评价法评估膜体系性能发现，司盘 20 的加入使膜得分最高，而吐温系列得分最高的为吐温 20。综合考量表面活性剂的亲水、亲油性质，后续实验将考虑复配司盘 20、吐温 20，以期获得性能更加优良的壳聚糖膜。

参考文献：

[1] 黄东业，张扬，刘鸿，等. 壳聚糖/琼脂糖双组份水凝胶的制备及其保湿缓释性能研究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(11): 145-150.
HUANG Dong-ye, ZHANG Yang, LIU Hong, et al. Preparation of Chitosan/Agarose Two-Component Hydrogels and Its Water Holding and Sustained Release Properties[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(11): 145-150.

[2] ESHETU A, IBRAHIM A M, FORSIDO S F, et al. Effect of Beeswax and Chitosan Treatments on Quality and Shelf Life of Selected Mango (*Mangifera Indica* L.) Cultivars[J]. PLoS One, 2019, 5(1): 146-149.

[3] 彭勇. 可食性壳聚糖活性包装膜成膜组分研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 38-39.
PENG Yong. Study on the Critical Components of Active Chitosan-Based Edible Packaging Films[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 38-39.

[4] 钟宇. 葛根淀粉基可食性包装膜物化与抗菌性能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012: 45-46.
ZHONG Yu. Physichemical and Antibacterial Properties of Kudzu Starch (Pueraria Lobata) Based Edible Films[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 45-46.

[5] 王琦，陈季旺，陈悦，等. 表面活性剂对壳聚糖–乳清分离蛋白–纳米 TiO_2 复合膜保鲜性能的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(12): 264-269.

WANG Qi, CHEN Ji-wang, CHEN Yue, et al. Effect of Surfactant on Chitosan-WPI-Nano TiO_2 Composite Film on Preservative Performance[J]. Food Science, 2015, 36(12): 264-269.

[6] 苑再武，苑敬，吕鑫，等. 多糖类大分子与表面活性剂相互作用的研究进展[J]. 物理化学学报，2013, 29(3): 449-459.
YUAN Zai-wu, YUAN Jing, LU Xin, et al. Research Progress on the Interactions between Polysaccharides and Surfactants[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2013, 29(3): 449-459.

[7] ESPITIA P J P, FUENMAYOR C A, OTONI C G. Nanoemulsions: Synthesis, Characterization, and Application in Bio-Based Active Food Packaging[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(1): 264-285.

[8] JIANG Y, YU L, HU Y, et al. The Preservation Performance of Chitosan Coating with Different Molecular Weight on Strawberry Using Electrostatic Spraying Technique[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151: 278-285.

[9] CHEN C H, KUO W S, LAI L S. Effect of Surfactants on Water Barrier and Physical Properties of Tapioca Starch/Decolorized Hsian-Tsao Leaf Gum Films[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 23(3): 714-721.

[10] ZHUANG Chen-jun, JIANG Yong-li, ZHONG Yu, et al. Development and Characterization of Nano-Bilayer Films Composed of Polyvinyl Alcohol, Chitosan and Alginate[J]. Food Control, 2018, 86: 191-199.

[11] ASTM E96/E96M—05, Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials[S].

[12] RAMBABUAB K, BHARATHB G, BANAT F, et al. Mango Leaf Extract Incorporated Chitosan Antioxidant Film for Active Food Packaging[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 1234-1243.

[13] GB/T 2410—2008, 透明塑料透光率和雾度的测定标准[S].
GB/T 2410—2008, Determination of the Luminous Transmittance and Haze of Transpar ent Plastics[S].

[14] 罗宁，贺墨琳，高华，等. 基于改进的 AHP–CRITIC 组合赋权与可拓评估模型的配电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 86-96.
LUO Ning, HE Mo-lin, GAO Hua, et al. Comprehensive Evaluation Method for a Distribution Network Based on Improved AHP-CRITIC Combination Weighting and an Extension Evaluation Model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 86-96.

[15] CHEN C H, KUO W S, LAI L S. Rheological and Physical Characterization of Film-Forming Solutions and Edible Films from Tapioca Starch/Decolorized Hsian-Tsao Leaf Gum[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2132-2140.

[16] 张利铭，刘战丽，王相友，等. 壳聚糖/玉米醇溶蛋白膜液的流变与膜热性能[J]. 精细化工，2019, 36(3): 374-379.
ZHANG Li-ming, LIU Zhan-li, WANG Xiang-you, et al. Rheological Properties of Chitosan/Zein Blend Solutions and Thermal Behaviour of Blend Films[J]. Fine Chemicals, 2019, 36(3): 374-379.

[17] BU X, WANG X, DAI L, et al. The Combination of Starch Nanoparticles and Tween 80 Results in Enhanced Emulsion Stability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 2048-2059.

[18] 庄晨俊，钟宇. 分子量、脱乙酰度与浓度对壳聚糖流变性影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(7): 1-6.
ZHUANG Chen-jun, ZHONG Yu. Effect of Molecular Weight, Degree of Deacetylation and Concentration on Rheological Properties of Chitosan[J]. Food Research and Development, 2019, 40(7): 1-6.

[19] RODRÍGUEZ M, OSÉS 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.

[20] 孙阳，张利铭，刘战丽，等. 油酸对壳聚糖/玉米醇溶蛋白膜性能的影响[J]. 精细化工，2019, 36(12): 2378-2384.
SUN Yang, ZHANG Li-ming, LIU Zhan-li, et al. Effect of Oleic Acid on the Properties of Chitosan/Zein Blend Film[J]. Fine Chemicals, 2019, 36(12): 2378-2384.

[21] 俞杨销，宋功吉，张子凡，等. 壳聚糖/明胶/茶多酚复合膜的溶胀溶失性能[J]. 现代纺织技术，2022, 30(1): 70-77.
YU Yang-xiao, SONG Gong-ji, ZHANG Zi-fan, et al. Study on the Swelling and Weight Loss of Chitosan/Gelatin/Tea Polyphenol Composite Film[J]. Advanced Textile Technology, 2022, 30(1): 70-77.

[22] SONG Xiao-yong, ZUO Guan-jie, CHEN Fu-sheng. Effect of Essential Oil and Surfactant on the Physical and Antimicrobial Properties of Corn and Wheat Starch Films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 107: 1302-1309.

责任编辑：曾钰婵