

微胶囊技术在食品包装中的研究进展

刘晓伟¹, 王利强^{1,2}, 廖祝胜¹, 卢立新^{1,2}, 张新昌^{1,2}

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: **目的** 综述微胶囊技术在食品包装领域的研究进展, 为进一步开发微胶囊技术在食品包装中的应用提供科学的研究基础。**方法** 通过对国内外研究现状和研究成果的分析 and 总结, 介绍了微胶囊的功能、作用机理、制备和表征方法, 概括了微胶囊技术在食品包装中(包括抗菌包装、防虫包装、果蔬保鲜包装、可食膜、冷鲜肉包装、相变材料-控温包装、生物质包装材料)的研究进展。**结果** 分析表明微胶囊技术能够增加活性成分的稳定性, 与包装系统结合能够达到缓释抗菌或控制温度等效果, 提高了产品的货架期, 其与包装系统的结合主要有4种方法(原料共混、涂覆、装入小袋置于包装系统、固载纤维法)。**结论** 研究微胶囊与聚合物原料的最佳加入比例能够获得综合性能较好的包装膜, 微胶囊技术在可食膜、相变材料-控温包装、生物质包装材料方面的发展潜力较大。

关键词: 微胶囊; 缓释; 食品包装; 抗菌; 相变材料

中图分类号: TB484.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)01-0149-07

Research Progress of Microencapsulation Technology in Food Packaging

LIU Xiao-wei¹, WANG Li-qiang^{1,2}, LIAO Zhu-sheng¹, LU Li-xin^{1,2}, ZHANG Xin-chang^{1,2}

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the research progress of microcapsule technology in food packaging to provide the foundation for the scientific research on the application of the further developed microcapsule technology in food packaging. Through the analysis and summary of the present research situation and research results at home and abroad, the function, mechanism, preparation methods and characterization of microcapsules were introduced, and the research progress of microcapsule technology in food packaging was outlined, including antimicrobial packaging, insect control packaging, fruit and vegetable fresh-keeping packaging, edible film, chilled meat packaging, phase change material-temperature control packaging and biomass packaging materials, etc. The analysis showed that the microcapsule technology could increase the stability of the active components, and the combination with the packaging system could achieve the effect of slow antibacterial release or temperature control, which improved the shelf life of the product. There are mainly four methods for its combination with the packaging system (raw material blending, coating, putting into the small bag to be placed into the packaging system, solid-borne fiber). By studying the best proportion of microcapsule and raw polymer materials, the packaging film with a better comprehensive performance can be obtained. There will be great potentials in respect of microcapsule technology applied in edible film, phase change materials-temperature control packaging and biomass packaging material.

KEY WORDS: microcapsule; sustained release; food packaging; antimicrobial; phase change material

微胶囊技术是一种利用成膜材料把固体、液体或气体包埋成具有功能性核壳结构包合物的技术。所制

备的包合物称为微胶囊, 微胶囊的粒径通常在几微米至上千微米, 其中, 内部被包裹的物质称作芯材, 也

收稿日期: 2016-05-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP21115); 2014 江苏省研究生实践创新项目(1075210232141410); 2015 江苏省研究生实践创新项目(1075210232158110)

作者简介: 刘晓伟(1993—), 男, 江南大学硕士生, 主攻食品包装技术。

通讯作者: 王利强(1977—), 男, 博士, 江南大学副教授, 主要研究方向为食品包装技术。

叫客体分子,外部的包被材料称作壁材,也叫主体分子,壁材一般为天然或合成高分子材料,芯材可以是液体、固体、也可是气体,可以是一种或几种物质的混合物^[1-2]。作为一门新兴技术,已经在食品、化工、农业^[3]等领域有了广泛的应用,近年来,国内外研究人员对微胶囊技术在食品包装领域的应用进行了很多探索,并取得了重要进展,将制备好的微胶囊与聚合物基材进行混合制备功能包装材料是微胶囊技术与包装结合的主要方式。文中对近几年国内外微胶囊技术在食品包装中的研究进展进行综述,从而为微胶囊技术在食品包装领域的理论研究和实际应用提供重要的参考。

1 微胶囊技术概况

1.1 微胶囊分类及功能

目前微胶囊的种类有 200 多种,其分类方法有很多,如根据微胶囊的形貌分球状、簇状和不规则形状;根据微胶囊的芯材分单核和多核形式;根据造壁次数分单层、双层和多层结构微胶囊^[4]。在食品包装中,根据微胶囊的作用机理不同,可以将其分为缓释型微胶囊和相变材料微胶囊等。

缓释型微胶囊的本质是壁材包埋活性成分,从而达到保护和控制活性成分稳定释放的目的。例如包埋抗菌剂、抗氧化剂等。相变材料微胶囊的本质是壁材包埋相变材料,从而达到保护、密封相变材料,提供一个稳定的相变空间的目的。

微胶囊技术在食品包装中的功能可以总结为以下几点:保护敏感成分,例如芯材是多酚类抗氧化剂,应用微胶囊技术可以增加其稳定性^[5];控制芯材缓慢释放,可制得具有缓释性能的材料;可将液体甚至气体物质转化为固体,方便储存和使用;保护包装材料,在加工包装材料时,延缓聚合物本身的氧化降解^[6];延长产品货架期。

1.2 微胶囊壁材选择

微胶囊的壁材应满足以下要求:具有良好的成膜性和流动性;不应与芯材发生化学反应;价格合理,容易制备。不同种类芯材需要选用不同种类的壁材,油性芯材一般选用水溶性壁材,水溶性芯材选用油性壁材^[7]。壁材一般分为以下几类:天然高分子材料,如淀粉、壳聚糖等;半合成高分子材料,如羧甲基纤维素等;合成高分子材料,如聚丙烯酸等^[2]。

食品包装中应用较多的壁材是环糊精。环糊精具有外亲水、内疏水的特性,能够与多种客体分子形成微胶囊,携带客体分子,微胶囊与聚合物基材混合制作包装材料能够拓展聚合物在食品和药品包装方面的应用^[8-9]。微胶囊技术可以包埋相变材料,比如应

用较多的直链烷烃类。也可以包埋天然成分比如精油、含有多酚类物质的植物提取物等抗菌剂,应用于食品包装^[10]。例如 Rubén O, Bustos C 等^[11]以酪蛋白酸钠为壁材,柠檬草精油为芯材,海藻酸钠为基材成膜物质,制备可食抗菌膜。

1.3 微胶囊作用机理

在缓释包装中微胶囊的作用机理是芯材通过壁材上的微孔、裂缝或半透膜进行扩散,从而释放出芯材物质^[12]。当微胶囊与包装基材结合后,芯材物质先从微胶囊中缓慢释放,再从包装材料中迁移,最后达到被包装物表面起功能性作用^[13]。Abel Guarda 等^[14]采用微胶囊技术包埋香芹酚和百里香酚,结合聚合物基材制备包装材料,并研究了其释放动力学,结果表明微胶囊结合包装材料之后(对比不包埋直接将抗菌成分加入包装材料)抗菌成分的释放速率降低,证明达到了缓释的效果。翟秀超^[15]制备 β -环糊精-异硫氰酸烯丙酯(AITC)微胶囊,以聚乳酸作为包装基材,采用挤出吹塑法制得抗菌膜,同时分析了包装中 AITC 的释放规律,在加速环境试验条件下,没有经过环糊精包埋的 AITC 在第 10 天就消耗完了,而经过环糊精包埋的 AITC 在第 20 天仍有残留,1 个月后仍能继续保持缓慢释放,这表明微胶囊混合聚乳酸制备的抗菌包装膜能缓慢释放抗菌剂,达到持久杀菌效果。该研究并没有深入分析抗菌剂的释放机理。钱亮亮^[13]制备环糊精-肉桂醛微胶囊,以聚乳酸为包装基材,研究了肉桂醛环糊精微胶囊在聚乳酸膜中的迁移行为。研究表明,可用 Fickian 公式进行预测肉桂醛微胶囊在膜中的释放过程,通过测定不同时间的迁移质量比,用 Matlab 软件计算出迁移系数 D ,建立相应数学模型,深入分析其释放机理,为后续研究提供量化参考。

在相变材料-控温包装中,相变材料微胶囊的作用机理是当外界条件达到芯材相变所需要的条件时,芯材相变材料发生状态改变,相变过程中芯材温度始终保持不变,或从外界吸收能量,转化成本体潜热,或将本体潜热散发到周围环境中,从而使外界温度保持稳定,发挥蓄热调温功能,并且相变过程中微胶囊外形可保持不变^[16]。相变材料微胶囊是芯材物质状态改变过程中与外界的能量传递,所以与缓释微胶囊芯材通过壁材的微孔、裂缝或半透膜扩散释放机理是有区别的,但利用它们不同的作用机理均可以应用于食品包装领域。

2 微胶囊制备及表征方法

2.1 微胶囊制备

制备微胶囊的方法有很多,但是在食品包装领域

中常用的方法是共沉淀法（饱和水溶液法）、超声波法、乳化-固化法、原位聚合法等。其中，共沉淀法因其操作简单在实验室应用最为广泛，超声波法包埋效果好、时间短，应用也较为广泛，原位聚合法主要用于相变微胶囊材料的制备。以下主要介绍在食品包装中常用的方法。

2.1.1 共沉淀法

共沉淀法是指将芯材以溶液或者固体的形式加入到饱和的壁材水溶液中，在适当温度下搅拌，包埋一定时间后冷却结晶、过滤、干燥即得微胶囊。翟秀超等^[17]采用共沉淀法制备 β -环糊精-异硫氰酸烯丙酯微胶囊，与聚乳酸基材混合制得包装膜。Fatma Kayaci 等^[18]采用共沉淀法制备环糊精-三氯生微胶囊。JOHN L. KOONTZ 等^[19]采用共沉淀法制备环糊精- α -生育酚、环糊精-槲皮素微胶囊，但 JOHN L. KOONTZ 仅是设想将制得的微胶囊应用于控制释放活性包装中以增强食品的抗氧化性。

2.1.2 超声波法

超声波法是将芯材以溶液或固体的形式加入到壁材的水溶液中，在适当超声功率下处理一定时间，最后将包合物过滤、干燥即得微胶囊。朱艳巧^[20]通过超声波法制备淀粉-肉桂醛微胶囊，并将其应用到聚乳酸基材中。

2.1.3 乳化-固化法

乳化-固化法是将壁材加入乳化剂溶液中，充分搅拌，再加入交联剂，洗涤，冷冻，干燥；然后将粉末状壁材溶于水制成溶液，加入芯材，包埋一定时间，制成微胶囊。薛琼等^[21]采用乳化-固化法制备了壳聚糖-活性炭微胶囊，并将其与聚乙烯醇复合制得复合膜。

2.1.4 原位聚合法

原位聚合法是先将聚合物单体溶解在含乳化剂的水溶液中，之后加入不溶于水的芯材物质，经过剧烈搅拌使单体均匀分散在溶液中，单体定向排列在芯材表面，经过一定条件处理单体交联而形成微胶囊。应用的原理是单体在均一相中可溶而聚合物在反应体系中不可溶^[22]。Wei Li 等^[23]采用原位聚合法制备三聚氰胺甲醛树脂-正十八烷相变微胶囊材料。

2.2 包埋率的测定

微胶囊制备好后，为了获得最好的包埋效果，要测定计算微胶囊的包埋率，再通过正交试验等方法确定其最佳包埋条件。包埋率的一般计算方法是^[24-25]：包埋率=包合物中芯材的量/初始投入的芯材量 \times 100%。其中，包合物中芯材的量是通过初始投入的量减去未被包合洗涤出来的芯材的量得到。朱艳巧^[20]

制备淀粉-肉桂醛微胶囊，通过正交实验研究表明包埋最佳条件为主客摩尔比 10:1，超声功率 250 W，超声处理时间 10 min，包埋时间 12 h，包埋温度 35 $^{\circ}$ C，该条件下的包埋率为 39.54%。

2.3 微胶囊的表征

微胶囊制备好之后要对其进行表征，以确保其芯材被壁材所包含，既不是单纯的物理共混，也不是壁材和芯材化学反应后的合成物。一般通过扫描电镜（SEM）观察微胶囊外表面，通过傅里叶红外光谱仪（FTIR）、示差扫描热分析仪（DSC）、X-衍射、固体核磁共振等分析其内部结构。其中，FTIR 是利用壁材和芯材的特征吸收峰形状、位置以及强度的变化来推测微胶囊的形成。核磁共振法是通过壁材和芯材中氢或碳原子在固体核磁共振波谱上的化学位移变化来推测微胶囊的形成。X-衍射法根据壁材和芯材的晶形、晶面间间距的变化推断微胶囊的形成。热分析法是根据壁材和芯材的挥发或热降解温度变化推测微胶囊的形成^[20]。

曹胜男等^[26]利用扫描电镜、红外光谱、X-衍射、固体核磁共振对环糊精与丙酸乙酯之间的关系进行分析。Seong Kyun Chung 等^[24]采用三聚氰胺甲醛预聚物包埋百里香精油，用傅里叶红外光谱仪测量微胶囊的红外光谱证明微胶囊的形成，用扫描电子显微镜观察微胶囊的表面结构，用示差扫描量热分析微胶囊，为防虫食品包装材料的制备做参考。

3 微胶囊技术在食品包装中的应用

将微胶囊与包装系统结合主要有 4 种形式：将微胶囊与包装基材原料混合，通过挤出吹塑或流延等方法制得包装材料；将微胶囊在液体中分散，并涂覆在包装材料表面；将微胶囊封入无纺布小袋，并放置在被包物和包装材料之间的包装环境中；先将壁材固载于纤维基材料上，再将芯材包埋进入壁材。国内外目前关注的焦点是如何增加微胶囊与聚合物基材的相容性，以及如何最大程度降低微胶囊的加入对包装膜性能的影响。

3.1 抗菌、防虫包装

微胶囊技术在抗菌、防虫包装中的机理均为缓释机理。在抗菌包装中，植物精油作为安全的天然抗菌剂具有广谱的抗微生物活性，但是精油易挥发、耐热性差，且难溶于水，很难与极性包装材料相容，造成加工困难。利用微胶囊技术先对精油进行包埋，提高精油的物化稳定性，再添加到包装材料中，能够表现出有效的控制释放杀菌效果^[27]。国外也有通过生物活性纳米胶囊包埋活性成分的例子^[28]。

翟秀超等^[17]采用共沉淀法制备 β -环糊精-异硫氰

酸烯丙酯微胶囊,通过挤压吹塑法将微胶囊与聚乳酸、聚乙二醇共混制备包装膜,该薄膜具有缓释抗菌作用,并且微胶囊技术提高了挥发性抗菌剂的耐热性。孙森^[29]采用饱和水溶液法制备 β -环糊精-丁香精油微胶囊,以聚乙烯醇为基材,通过流延法制得包装膜,将该膜置于多层复合膜的中间层,具有长效缓释抗菌效果,但是微胶囊加入量的多少会在一定程度上影响薄膜的性能。

通过微胶囊壁材包埋功能物质,再与树脂或纤维基材共混制得包装膜在包装领域应用的越来越广泛。加入一定量的微胶囊对包装薄膜的物理力学性能影响不显著,同时还赋予了包装薄膜特定的功能(如缓释抗菌性能),但是随着微胶囊加入量的增加会影响膜的性能。应综合考虑成本、抗菌性能、膜的力学性能等各方面因素来决定微胶囊的最佳加入量。

邓靖等^[30]采用 β -环糊精-丁香精油微胶囊混合聚乙烯醇(PVA)使用流延法制备包装膜。研究表明,微胶囊的加入使得PVA膜具有了抗霉菌性能,添加质量分数为10%的微胶囊可制得力学性能和抗菌性能均较好的包装膜。张敏等^[31]研究了 β -环糊精-聚丁二酸丁二醇酯微胶囊存在时PBS的结晶行为。研究表明,微胶囊的加入可有效提高PBS的结晶能力,制得的复合膜拉伸强度得到提高,但是断裂伸长率却大幅度下降。周春禾等^[32]制备 β -环糊精-尤加利精油微胶囊,添加到纤维素溶液中以沉浸凝胶法制备抗菌纤维素膜。纤维素膜具有可降解性,但是在环境中容易吸水溶胀,加入微胶囊和乳清蛋白粉的方法同时赋予了纤维素膜的抗菌性和吸水稳定性,具有很好的发展前景。闫丹丹等^[33]研究了微胶囊的质量分数等因素对淀粉膜综合性能影响,制得的薄膜具有抗菌性能,但需进一步研究来提高含微胶囊的淀粉膜的力学性能。

In-Hah Kim等^[34]将油墨、PVA-肉桂精油微胶囊乳液作为印刷层涂覆在LDPE膜上,制得的膜具有缓释防虫性能,微胶囊的加入并没有改变薄膜的拉伸性能。In-Hah Kim等^[35]将PVA-肉桂精油微胶囊混入油墨,涂覆在LDPE膜表面作为印刷涂层,涂覆的LDPE膜表面再复合一层PP膜,制成多层复合膜,具有缓释防虫性能,并且微胶囊增加了肉桂醛的热稳定性,薄膜可以使用商业生产线在高温下生产,在食品包装中具有很大的应用前景。

3.2 果蔬保鲜包装

微胶囊技术应用在果蔬保鲜方面,能够延长果蔬保鲜期,同时还可以防止有害物质直接与果蔬接触,保持果蔬的抗氧化潜力,延缓果蔬的衰老腐败^[36]。微胶囊技术与果蔬保鲜包装结合的主要方法包括无纺布小袋包封微胶囊放入包装系统中、微胶囊混合树脂

基材制成抗菌涂液涂覆在保鲜纸上、与成膜性能好的壳聚糖等直接制成抗菌涂层。国外在果蔬保鲜包装方面的应用是结合可食膜包装鲜切水果。

张洪军等^[37]将丁香微胶囊通过无纺布包装制成小袋,结合PE包装膜与瓦楞纸箱,对鲜桃进行保鲜研究,实验结果表明该方法可延长鲜桃的保鲜期。岳淑丽等^[38]制备了 β -环糊精-肉桂醛微胶囊,与聚乙烯醇溶液混合制备抗菌涂料,随后采用涂布的方法将制备的抗菌涂料涂布在保鲜纸上,并对圣女果进行包装,研究表明微胶囊抗菌纸的使用可有效提高圣女果的货架寿命。薛琼等^[39]制备了壳聚糖/海藻酸钠-肉桂精油微胶囊,并采用涂膜法将其应用于水果保鲜中。

3.3 可食膜

采用环境友好型的可食膜取代石油基塑料包装材料已经成为食品包装发展的新趋势,可食膜的应用可以减少对环境的污染,同时减少对食品品质的影响^[40]。目前国内对微胶囊技术结合可食膜的研究较少。国外有将微胶囊与淀粉等基材混合制成可食膜,对水果进行涂覆,既能减少水果的水分流失,又能提高水果货架期^[41]。

采用一定方法制备以乳清蛋白为壁材的微胶囊,可以包埋多种功能成分,然后制备可食性蛋白膜,比如可以包埋钙等营养成分直接食用,也可以包埋其他成分作为食品包装提高食品的货架期^[42]。乳清蛋白作为壁材在食品包装中的应用尚处于研究阶段。

Tanara Sartori等^[43]采用微胶囊技术将抗坏血酸包埋入固体脂质颗粒,与生香蕉淀粉混合,采用流延法制成可食膜,具有很好的抗氧化性能,在鲜切水果表面涂覆可食膜有很大的应用前景。

3.4 冷鲜肉包装

随着人们生活水平的不断提高,冷鲜肉越来越受消费者欢迎,需求量也在不断增加,但是单纯低温保存并不能完全抑制微生物,所以国内开始研究使用天然抗菌剂微胶囊材料包装冷鲜肉。主要方式有2种:制成涂膜液混合保鲜纸进行包装;通过将壁材固载在纤维基材上,再包埋芯材制成包装。陆宽等^[44]采用 β -环糊精包埋异硫氰酸烯丙酯和壳聚糖涂膜液混合制成的保鲜纸对冷鲜肉进行包装,能将冷鲜肉一级保鲜期延长至8天。李学红^[45]通过先将环糊精固载于纤维基包装材料上,然后通过固载环糊精包埋异硫氰酸烯丙酯,制成缓释抗菌包装材料,并研究将其用于冷鲜肉的模拟包装,结果表明,对细菌具有杀灭作用。

3.5 生物质包装材料

合成塑料对于生态环境影响的问题越来越突出,开发环境友好型可降解材料可有效解决这一问题。大量研究已经将微胶囊技术与生物降解材料结合起来,

制成具有可生物降解的抗菌包装材料,例如 MinJung Joo 将微胶囊技术与聚乳酸结合制备生物可降解包装材料^[46]。另外也有研究将酶作为芯材制成微胶囊,然后与纸浆混合制成生物活性纸,可用于生物传感器和指示器。叶友鑫等^[47]制备 β -环糊精-茴香烯微胶囊,以明胶为包装基材,加入增塑剂和交联剂,制得抗菌型可生物降解包装材料。Yufen Zhang 等^[48]采用聚乙烯亚胺包埋葡萄糖氧化酶制成微胶囊,混合纸浆制成生物活性纸,可以用作生物传感器和指示器,在食品包装中有广阔的应用前景。

3.6 相变材料-控温包装

随着能源问题的日益突出,对相变储能材料的研究也越来越多。相变微胶囊蓄能材料是使用微胶囊技术,采用结构稳定的高分子膜包埋相变储能材料,而制得的一类具有功能核壳结构的材料^[49]。相变微胶囊材料已经在冷链运输控温包装中发挥着越来越重要的作用,特别适用于包装对温度变化比较敏感的食品,比如低温奶制品等。于党伟^[16]采用原位聚合法制备聚甲基丙烯酸甲酯-正十四烷相变微胶囊材料,置于发泡聚乙烯保温箱中,并对酸奶进行了保温实验,结果表明相变微胶囊材料能有效维护低温奶的品质。Rocío Pérez-Masiá 等^[50]采用玉米醇蛋白包埋相变材料十二烷,制得相变微胶囊材料,用于食品温控包装领域。

4 结语

随着人们对食品卫生性和安全性的关注,对食品包装的要求也越来越高,微胶囊技术是拓展聚合物材料在食品包装领域应用的新兴技术,理论也较为成熟,但是也存在以下几点问题:微胶囊与聚合物基材的相容性以及加入微胶囊对包装膜性能的影响问题;对微胶囊释放机理研究不深入,同时,对抗菌微胶囊的加入能够最大程度地保持食品风味、营养成分以及延长保质期等方面缺乏定量分析和作用机理研究;包装材料加工过程对微胶囊芯材抗菌等多种性能造成的影响;对相变材料的研究仍然处于探索阶段,仍需进一步研究优化其制备工艺等。针对以上问题,可以从以下几个方面进行研究:挑选与聚合物基材相容性好的合适壁材,或加入其它相容剂,或研究微胶囊与聚合物基材的最佳加入比例,或改变包装材料的制备方法;研究发展相应的控释技术;研究开发工业化生产微胶囊及其复合包装材料的生产设备和生产线。相信在相关科研人员的努力下,这些问题都会得到解决,并且随着能源和环境问题的日益突出,微胶囊技术在食品包装、相变材料-控温包装和生物质包装中的应用也将会越来越广泛。

参考文献:

- [1] 沈宇燕,王洪海.微胶囊技术及其研究进展[J].广东化工,2013,40(22):77—78.
SHEN Yu-yan, WANG Hong-hai. Technology and Progress of Microcapsulation[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(22): 77—78.
- [2] 刘金文,孔繁东,刘兆芳,等.食品工业中微胶囊技术的应用研究[J].中国食品添加剂,2014(6):148—151.
LIU Jin-wen, KONG Fan-dong, LIU Zhao-fang, et al. Application Research on Microcapsule Technology in Food Industry[J]. China Food Additives, 2014(6): 148—151.
- [3] 洪柯江,滕斌,李宜,等.微胶囊技术及其在农产品加工领域中的应用[J].中国农机化,2010(2):60—64.
HONG Ke-jiang, TENG Bin, LI Yi, et al. Microencapsulated Technology and Its Application in Agriculture Products Processing[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2010(2): 60—64.
- [4] 倪昭玉,王瑄,王建华,等.缓释型芳香微胶囊的制备及其应用进展[J].上海纺织科技,2015,43(8):1—4.
NI Zhao-yu, WANG Xuan, WANG Jian-hua, et al. The Preparation and Application of Sustained Fragrant Microcapsules[J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2015, 43(8): 1—4.
- [5] FILOMENA S, ANA F, EUGENIA G, et al. Strategies to Improve the Solubility and Stability of Stilbene Antioxidants: A Comparative Study between Cyclodextrins and Bile Acids[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 115—125.
- [6] KOONTZ J L, MARCY J E, O'KEEFE S F, et al. Polymer Processing and Characterization of LLDPE Films Loaded with α -tocopherol, Quercetin, and Their Cyclodextrin Inclusion Complexes[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 117(4): 2299—2309.
- [7] 吴秋敏.黄秋葵花总黄酮的微胶囊化及其应用在冷鲜肉保鲜上的研究[D].杭州:浙江大学,2015.
WU Qiu-min. The Research of the Microencapsulation of Flavones of Okra's Flowers and Its Application on Preservation of Chilled Meat[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [8] MINJUNG J, RAFAEL A, EVA A. Preparation and Characterization of Blends Made of Poly(L-lactic acid) and β -cyclodextrin: Improvement of the Blend Properties by Using a Masterbatch[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(2): 1022—1030.
- [9] CAROL L, MIRIAM G, RAMÓN C, et al. Immobilization of β -cyclodextrin in Ethylene-vinyl Alcohol Copolymer for Active Food Packaging Applications[J]. Journal of Membrane Science, 2010, 353: 184—191.
- [10] FILOMENA N, PIERANGELO O, FLORINDA F, et al. Microencapsulation in Food Science and Biotechnology[J]. Current Opinion In Biotechnology, 2012, 23(2): 182—186.
- [11] RUBÉN O, BUSTOS C, FRANCESCA V, et al. Edible

- Antimicrobial Films Based on Microencapsulated Lemongrass Oil[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(1): 832—839.
- [12] 李光水, 雍国平, 肖凌. 香味微胶囊的释放模型及机理探讨[J]. *食品工业科技*, 1998(2): 7—8.
LI Guang-shui, YONG Guo-ping, XIAO Ling. Fragrance Microcapsules Release Model and Its Mechanism[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 1998(2): 7—8.
- [13] 钱亮亮. β -环糊精肉桂醛包合物在食品包装中的基础研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
QIAN Liang-liang. Basic Research on the Application of CIN- β -CD Inclusion Complex in Food Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [14] ABEL G, JAVIERA F R, JOSEPH M, et al. The Antimicrobial Activity of Microencapsulated Thymol and Carvacrol[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2011, 146(2): 144—150.
- [15] 翟秀超. 挤压法制备抗菌包装膜及其性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
ZHAI Xiu-chao. Preparation and Characterization of Antibacterial packaging Film by Extrusion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [16] 于党伟. 冷藏用控温包装微胶囊相变蓄冷材料的制备及性能优化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
YU Dang-wei. Preparation and Performance Optimization Research of Microencapsulated Phase Change Materials with Refrigeration Temperature Control Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [17] 翟秀超, 王金鹏, 焦爱权, 等. 抗菌包装膜对异硫氰酸烯丙酯的释放规律研究[J]. *食品工业科技*, 2013(13): 260—320.
ZHAI Xiu-chao, WANG Jin-peng, JIAO Ai-quan, et al. Study on the Release Behavior of Allyl Isothiocyanate in Antimicrobial Packaging[J]. *Science and Technology Food Industry*, 2013(13): 260—320.
- [18] FATMA K, OZGUN C O U, TURGAY T, et al. Antibacterial Electrospun Poly(lactic acid) (PLA) Nanofibrous Webs Incorporating Triclosan/Cyclodextrin Inclusion Complexes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(16): 3901—3908.
- [19] KOONTZ J L, JOSEPH E M, SEAN F O'K, et al. Cyclodextrin Inclusion Complex Formation and Solid-State Characterization of the Natural Antioxidants α -Tocopherol and Quercetin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(4): 1162—1171.
- [20] 朱艳巧. 淀粉-肉桂醛包合物的超声波法制备及其在聚乳酸膜中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
ZHU Yan-qiao. Preparation of Starch-cinnamaldehyde Inclusion Complex by the Ultrasound and Its Application in Polylactic Acid-based Film[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [21] 薛琼, 邓婧, 言峥嵘, 等. PVA/活性炭微胶囊复合膜的制备与性能研究[J]. *塑料科技*, 2015, 43(4): 80—85.
XUE Qiong, DENG Jing, YAN Zheng-rong, et al. Study on Properties of PVA/Microencapsulated Activated Carbon Composite Films and Its Preparation[J]. *Plastics Science and Technology*, 2015, 43(4): 80—85.
- [22] 邱水来, 朱雨露, 黄峥琦, 等. 聚合物微胶囊的研究与应用进展[J]. *化工新型材料*, 2014, 42(9): 204—206.
QIU Shui-lai, ZHU Yu-lu, HUANG Zheng-qi, et al. Advances in Preparation and Application of Polymeric Microcapsules[J]. *New Chemical Materials*, 2014, 42(9): 204—206.
- [23] LI Wei, ZHANG Xing-Xiang, LIU Cai-Feng. Fabrication and Characterization of Microencapsulated Phase Change Material with Large Diameter Range[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2010, 49(1): 90—94.
- [24] SEONG K C, JI Y S, JUNG H L, et al. Microencapsulation of Essential Oil for Insect Repellent in Food Packaging System[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(5): E709—E714.
- [25] 刘光发, 王建清, 赵亚珠. 牛至精油微胶囊的制备及其抑菌效果研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(3): 19—22.
LIU Guang-fa, WANG Jian-qing, ZHAO Ya-zhu. Preparation and Antimicrobial Activity Study of Oregano Oil Microcapsule[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(3): 19—22.
- [26] 曹胜男, 张扬, 金姗姗, 等. β -环糊精丙酸乙酯包合物的制备及表征[J]. *食品工业科技*, 2015(20): 124—132.
CAO Sheng-nan, ZHANG Yang, JIN Shan-shan, et al. Preparation and Release Characterization of Inclusion Complex of Ethyl Propionate with β -cyclodextrin[J]. *Science and Technology Food Industry*, 2015(20): 124—132.
- [27] 王卉, 张明凯, 胡锐, 等. 精油在食品抗菌包装中的应用研究进展[J]. *食品工业*, 2015, 36(7): 219—222.
WANG Hui, ZHANG Ming-kai, HU Rui, et al. Application Research Development of Plant Essential Oil in Food Antibacterial Packaging[J]. *The Food Industry*, 2015, 36(7): 219—222.
- [28] FRANCESCO D, MARIANNA A, MARIARENATA S, et al. Nanoencapsulation of Essential Oils to Enhance Their Antimicrobial Activity in Foods[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(9): 1908—1914.
- [29] 孙森. 基于丁香精油/ β -环糊精包合物的聚乙烯醇抗菌膜的制备及性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2012.
SUN Miao. The Preparation and Properties Research on the Antimicrobial Films of Polyvinyl Alcohol Based on Clove Oil β -cyclodextrin Inclusion[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2012.
- [30] 邓婧, 李文, 郝喜海, 等. 基于丁香精油/ β -CD包合物的PVA活性包装膜制备及性能研究[J]. *化工新型材料*, 2014, 42(9): 58—60.
DENG Jing, LI Wen, HAO Xi-hai, et al. Study on Preparation and Performance of Polyvinyl Alcohol Active Packaging Film Based on Clove Essential Oil/ β -

- cyclodextrin Inclusion Complex[J]. *New Chemical Materials*, 2014, 42(9): 58—60.
- [31] 张敏, 宋洁, 葛正浩, 等. β -环糊精与聚丁二酸丁二醇酯(PBS)包合物对PBS结晶性的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(5): 96—104.
ZHANG Min, SONG Jie, GE Zheng-hao, et al. Influence of β -CD and PBS Inclusion Complex on Crystallinity of PBS[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2012, 28(5): 96—104.
- [32] 周春禾, 王建清, 金政伟. 尤加利精油制备微胶囊抗菌纤维素薄膜[J]. *包装工程*, 2011, 32(1): 40—49.
ZHOU Chun-he, WANG Jian-qing, JIN Zheng-wei. Preparation of Microcapsule Antibacterial Cellulose Film from Eucalyptus Oil[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(1): 40—49.
- [33] 闫丹丹, 钱怡. 含微胶囊的抗菌淀粉膜制备工艺及性能研究[J]. *包装工程*, 2016, 37(9): 26—30.
YAN Dan-dan, QIAN Yi. Preparation and Properties of Starch-based Antimicrobial Films Containing Microcapsules[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(9): 26—30.
- [34] IN-HAH K, JAEJOON H, JA H N, et al. Insect-Resistant Food Packaging Film Development Using Cinnamon Oil and Microencapsulation Technologies[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(2): E229—E237.
- [35] IN-HAH K, AH Y S, JAEJOON H, et al. Indian Meal Moth (*Plodia interpunctella*)-Resistant Food Packaging Film Development Using Microencapsulated Cinnamon Oil[J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(10): E2023—E2030.
- [36] JOSE A V-R, PALAFOX-C H, ELHADI M Y, et al. Maintaining Antioxidant Potential of Fresh Fruits and Vegetables after Harvest[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 55(6): 806—822.
- [37] 张洪军, 高康. 丁香精油微胶囊对桃果实保鲜效果的研究[J]. *包装与食品机械*, 2015(3): 19—23.
ZHANG Hong-jun, GAO Kang. The Research on the Preservation Effect of Peach Fruit by Clove Essential Oil Microcapsule[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2015(3): 19—23.
- [38] 岳淑丽, 万达, 张义柯, 等. 肉桂精油微胶囊抗菌纸的研制及对圣女果的保鲜效果研究[J]. *包装工程*, 2015, 36(13): 47—51.
YUE Shu-li, WANG Da, ZHANG Yi-ke, et al. Development of Microcapsule Antibacterial Paper Made of Cinnamon Oil and Its Application for Preservation of Cherry Tomato[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(13): 47—51.
- [39] 薛琼, 刘跃军, 向贤伟, 等. 肉桂精油微囊化及其在果蔬保鲜中的应用[J]. *包装工程*, 2016, 37(5): 50—88.
XUE Qiong, LIU Yue-jun, XIANG Xian-wei, et al. Microencapsulation of Cinnamon Essential Oil and Its Application in Preservation of Fruits and Vegetables[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(5): 50—88.
- [40] 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. Research Progress of Starch-based Edible Film[J]. *Food Science*, 2013, 34(5): 289—292.
- [41] MARIA V, CLARA P, AMPARO C, et al. Recent Advances in Edible Coatings for Fresh and Minimally Processed Fruits[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2008, 48(6): 496—511.
- [42] 刘飞, 杜秉健, 张春月, 等. 乳清蛋白胶体物化特性的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2014, 5(6): 1577—1582.
LIU Fei, DU Bing-jian, ZHANG Chun-yue, et al. Application Progress of the Physico-chemical Properties of Whey Protein Colloids[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2014, 5(6): 1577—1582.
- [43] TANARA S, FLORENCIA C M. Development and Characterization of Unripe Banana Starch Films Incorporated with Solid Lipid Microparticles Containing Ascorbic Acid [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 55: 210—219.
- [44] 陆宽, 黄运安, 武剑, 等. 异硫氰酸烯丙酯包合物壳聚糖复合保鲜纸对冷鲜肉的保鲜效果[J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(4): 117—119.
LU Kuan, HUANG Yun-an, WU Jian, et al. Preservation Effects of Allyl Isothiocyanate Inclusion Compound Chitosan Tin Foil on Chilled Meat[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(4): 117—119.
- [45] 李学红. 环糊精在抗菌食品包装中的基础研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007.
LI Xue-hong. Basic Research on the Application of Cyclodextrins in Antimicrobial Food Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.
- [46] JOO Minjung. Improvement of Active Packaging Materials Based on Poly(lactic acid) Carrying Encapsulated Antimicrobial Volatiles[D]. East Lansing: Michigan State University, 2010.
- [47] 叶友鑫, 何雨航, 郑程光, 等. 抗菌型明胶-茴香烯/ β -环糊精包合物复合膜的性能研究[C]// 2015年中国化工学会年会论文集, 北京, 2015.
YE You-xin, HE Yu-hang, ZHENG Cheng-guang, et al. Properties of Gelatin Based Films Incorporated with the Inclusion Complex of Trans-anethole and β -cyclodextrin[C]// In 2015 the Chinese Chemical Society Annual Meeting Proceedings. Beijing, 2015.
- [48] ZHANG Yu-fen. Activity, Conformation and Thermal Stability of Laccase and Glucose Oxidase in Poly(ethyleneimine) Microcapsules for Immobilization in Paper[J]. *Process Biochemistry*, 2011, 46(4): 993—1000.
- [49] 于党伟, 卢立新. 乙烯基微胶囊相变材料的研究进展[J]. *包装工程*, 2013, 34(23): 127—131.
YU Dang-wei, LU Li-xin. Research Progress in Vinyl Microencapsulated Phase Change Materials[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(23): 127—131.
- [50] ROCÍO P-M, AMPARO L-R, JOSE M L. Development of Zein-based Heat-management Structures for Smart Food Packaging[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(1): 182—191.