

## 研究进展

# 微胶囊技术在抗菌包装中的研究进展

张保东, 黄崇杏, 柳英, 宗宝

(广西大学, 南宁 530004)

**摘要:** **目的** 综述了微胶囊技术在抗菌包装领域的研究进展, 为进一步开发微胶囊技术在抗菌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和总结, 介绍微胶囊制备方法、表征方法和缓释机理; 抗菌包装抗菌剂的种类及特点, 概括微胶囊技术在抗菌包装的研究进展。**结果** 分析表明微胶囊技术能够增加抗菌成分的稳定性, 与包装系统结合能够达到缓释抗菌效果, 提高了产品的货架期。**结论** 大量研究结果表明, 运用微胶囊技术能够稳定芯材, 达到持久抗菌的效果, 微胶囊技术在抗菌包装方面的发展潜力较大, 但是微胶囊技术在抗菌方面的缓释机理还有待进一步研究。

**关键词:** 微胶囊技术; 抗菌包装; 缓释; 机理

**中图分类号:** TB485.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)19-0115-06

## Research Progress of Microcapsule Technology in Antibacterial Packaging

ZHANG Bao-dong, HUANG Chong-xing, LIU Ying, ZONG Bao

(Guangxi University, Nanning 530004, China)

**ABSTRACT:** The work aims to summarize the research progress of microcapsule technology in the field of antibacterial packaging to provide scientific research basis for the further development of microcapsule technology in the antibacterial packaging. The microcapsule preparation method, characterization method and sustained release mechanism were introduced based on the analysis and summary of the research status and findings at home and abroad. The types and characteristics of antibacterial packaging antibacterial agents were introduced. The research progress of microcapsule technology in antibacterial packaging was summarized. The results showed that the microcapsule technology could increase the stability of antimicrobial components and achieve the sustained release antibacterial effect combined with the packaging system, so as to improve the product's shelf life. A large number of studies have shown that the use of microcapsule technology can stabilize the core material to achieve the lasting antibacterial effects. The microcapsule technology has great potential in the development of antibacterial packaging, but the microcapsule technology in the anti-bacterial sustained release mechanism remains to be further studied.

**KEY WORDS:** microcapsule technology; antibacterial packaging; sustained release; mechanism

随着经济发展, 人们的生活质量得到了极大提高, 越来越多的人关注日常饮食的质量、食物的品质和安全问题。食品会因为微生物滋生和自身的氧化变质等不良变化, 使其品质下降<sup>[1]</sup>, 因此, 如何保持食物的品质, 控制其中微生物的滋生成为了当今食品研究领域的重要课题。抗菌包装是一种以抑制食物表面微生物生长繁殖为目的的活性包装, 广泛应用于现今

的食品保鲜领域, 并且成本较低, 效果出众。抗菌包装可以在食品和外界接触中起到保护的作用, 防止微生物进入食品, 调节内外气体等, 进而可以保护食品的安全<sup>[2]</sup>。

微胶囊是指由高分子材料制成的具有蛋壳式的微型容器或包装物。微胶囊技术是利用成膜材料将芯材包埋形成半透性或密封性蛋壳式物质的技术, 是一

收稿日期: 2017-05-12

基金项目: 广西自然科学基金 (2013GXNSFFA019005)

作者简介: 张保东 (1990—), 男, 广西大学硕士生, 主攻抗菌包装材料。

通讯作者: 黄崇杏 (1977—), 女, 广西大学教授, 主要研究方向为包装材料及食品包装安全。

种储存固体、液体、气体的微型包装技术。这种蛋壳式结构使微胶囊具有提高物质稳定性的作用和良好的阻隔性能<sup>[3]</sup>。应用微胶囊技术的目的主要有 5 点：提高芯材的稳定性，保护有效成分；降低防腐剂和保鲜剂的毒性，防止其直接对食品或人体的伤害；隔离组分，将相互反应的物质稳定在一起；改变芯材的存在状态，将液体或气体稳定成固体；控制芯材释放，调控缓释速率、缓释时间和缓释的含量<sup>[4]</sup>。采用微胶囊技术制备的产品具有优异的性能，可以将稳定性差的抗菌剂、毒副作用大的抗菌剂和抗菌耐久性差的抗菌剂制备成微胶囊型抗菌剂，改善抗菌剂一系列的缺点，提高抗菌持久性，扩大应用范围。将抗菌剂制备成微胶囊，微胶囊型抗菌剂也是近几年才发展起来的，产品的评价指标主要有微胶囊粒径大小、包埋率和抗菌持久性。

## 1 微胶囊技术

### 1.1 微胶囊制备方法

从制备的方法属性来分，一般有物理方法，化学方法和物理化学方法三大类，其中，物理化学法在微胶囊的制备中较常用到。在抗菌包装领域较常用的方法有复相乳液法（物理化学法）、饱和水溶液法（物理法）、复凝聚法（物理化学法）、乳化-固化法（物理化学法）。复相乳液法通常适用于初乳不稳定，需要分散到另一种连续相中，以提高稳定性；饱和水溶液法又称分子包埋法，是利用  $\beta$ -环糊精的空腔结构包埋芯材，芯材分子大小和理化性质要适应  $\beta$ -环糊精的空腔结构，这对芯材有一定的限制；复凝聚法利用 2 种带相反电荷的材料结合形成囊壁，在这一过程包埋芯材，形成微胶囊；乳化-固化法一般借助机械搅拌，形成乳液，加入交联剂或固化剂形成沉淀析出，洗涤干燥得微胶囊。

#### 1.1.1 复相乳液法

复相乳液法又叫双重乳液法，一般有 W/O/W 双重乳液法和 O/W/O 双重乳液。W.K.Leung 等<sup>[5]</sup>采用复相乳液法制备了  $\text{ClO}_2$  微胶囊并研究其抗菌性。在 28 d 的研究期间，气态  $\text{ClO}_2$  的释放对枯草芽孢杆菌保持约 90% 的去除率。水溶性芯材适宜采用 W/O/W 双重乳液法，油性芯材适宜采用 O/W/O 双重乳液法，复相乳液法要求设备简单，但影响因素很多，包埋率偏低。

#### 1.1.2 饱和水溶液法

李林建<sup>[6]</sup>采用饱和水溶液法制备了肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物，将肉桂醛/ $\beta$ -环糊精包合物添加到 PLA 溶液中，制备肉桂醛微胶囊/PLA 纳米纤维抗菌膜，并应用于鲜猪肉的冷冻保鲜。当抗菌剂质量分数

为 5%，能使冷却猪肉在 12 d 内保持次鲜肉的指标，比对照组延长 6 d 以上。卢燕霞等<sup>[7]</sup>采用饱和水溶液法以  $\beta$ -CD 为壁材包埋牛至精油，成功制得微胶囊，其包埋率为 73%，并且该包埋物具有较好的抑菌效果。达到了保留牛至精油抑菌性能的同时，也使得液体的牛至精油固体粉末化的效果。饱和水溶液法操作简单，易于掌握，但  $\beta$ -CD 的水溶性不是很好，并且随温度的变化比较大，温度升高时，其溶解性增大，但过高的温度会导致  $\beta$ -CD 变性，制备的包合物不易控制，形状不规则。

#### 1.1.3 复凝聚法

Minjie Chen 等<sup>[8]</sup>用复凝聚法制备了含有广藿香油的微胶囊，制备的微胶囊粒径均匀，并研究了微胶囊对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌性，具有良好的抗菌持久性。Ana C. G. Moreira 等<sup>[9]</sup>用复凝聚法，以聚（乳酸-共-乙醇酸）（PLGA）为壁材，百里香油为芯材，制备百里香油微胶囊。制备的微胶囊表面光滑，粒径均匀，并有持续的释放性。复凝聚法操作简单，在实验室较易操作，但制备的微胶囊粒径偏大。

#### 1.1.4 乳化-固化法

薛琼等<sup>[10]</sup>以壳聚糖为壁材、活性炭为芯材，采用乳化-固化法制备了壳聚糖包覆的活性炭微胶囊，并将其与聚乙烯醇(PVA)复合，得到 PVA/活性炭微胶囊复合抗菌膜。薛琼等<sup>[11]</sup>以壳聚糖为壁材、肉桂精油为芯材，采用乳化-固化法制备了壳聚糖微胶囊，微胶囊在壳聚糖溶液中的添加质量分数为 4% 时，保鲜葡萄和芒果的效果最好。吴文果等<sup>[12]</sup>采用乳化-固化法，制备海藻酸钙/聚精氨酸微胶囊，载药率较高，并具有良好的缓释性能。乳化-固化法操作简单，制得的样品易分离，但是，样品固化需要的时间较长，耗时多。

### 1.2 微胶囊表征

表征微胶囊最常用的指标有表观形貌、粒径大小及分布、化学结构和热稳定性。粒径大小决定比表面积大小，比表面积越大，芯材缓释越均匀，彰显了小粒径的优越性；包埋率决定芯材含量的多少，包埋率越高，有效物质越多，作用时间越长。文中归纳总结了表征微胶囊指标常用的技术设备或方法及测试目的，见表 1<sup>[13-17]</sup>。

### 1.3 微胶囊缓释机理

目前微胶囊缓释机理研究还不够透彻，有待进一步研究。微胶囊壁材一般分为可生物降解和非可生物降解材料，根据壁材的理化性质，抗菌剂从微胶囊中的释放机制主要分为 3 类：抗菌剂从微胶囊壁材中扩散释放（扩散控释系统）<sup>[18-19]</sup>，微胶囊壁材溶胀促进抗菌剂的释放（溶胀控释系统）<sup>[20]</sup>，微胶囊壁材降解和溶蚀产生抗菌剂释放（溶蚀控释系统）<sup>[21]</sup>。对于

表 1 微胶囊的表征  
Tab.1 Characterization of microcapsules

| 表征指标      | 技术设备或方法        | 测试目的                 |
|-----------|----------------|----------------------|
| 表观形貌、粒径大小 | 扫描电子显微镜 (SEM)  | 表面结构分析, 以及微胶囊的微观形态表征 |
|           | 激光纳米粒度仪        | 粒度分布规律               |
| 化学结构      | 红外光谱仪 (FT-IR)  | 分析微胶囊芯材的包埋程度         |
|           | X 射线衍射仪 (XRD)  | 研究微囊的内部结构            |
| 热稳定性      | 热重分析仪 (TG)     | 判定微胶囊对芯材的包埋效果        |
|           | 差示扫描量热仪 (DSC)  | 判断包埋效果               |
| 包埋率       | 色谱分析技术或紫外分光光度法 | 计算包埋率大小              |

以生物降解材料为壁材的微胶囊, 芯材抗菌剂的释放过程比较复杂, 扩散控释始终存在于微胶囊的释放过程中。壁材降解较慢的微胶囊, 芯材释放主要受控于扩散释放及壁材的溶胀, 壁材降解较快的微胶囊, 芯材释放则受控于壁材的溶蚀及扩散共同作用。影响微胶囊释放的因素主要包括微胶囊壁材厚度和渗透性、温度、湿度、pH 值、微胶囊尺寸<sup>[22]</sup>。

2 微胶囊技术在抗菌包装的应用

2.1 抗菌包装

抗菌包装是活性包装的重要形式, 可以释放抗菌物质, 以提高食品在储存期间的质量和安全性。抗菌包装中的抗菌剂种类一般分为 3 种: 有机抗菌剂、无机抗菌剂和天然抗菌剂。介绍了抗菌剂种类、优缺点和抗菌机理<sup>[23]</sup>。

有机抗菌剂种类主要有醇类、酚类、双胍类、季胺盐类、噻吩类、卤化物类、吡啶类、咪唑类等。优点: 来源广、杀菌快、抗菌广谱。缺点: 稳定性差、易挥发分解、耐药性差。抗菌机理主要为抗菌剂进入微生物细胞与之反应, 使蛋白质变性, 阻碍代谢繁殖, 起到抗菌作用<sup>[24-25]</sup>。

无机抗菌剂种类主要有银、铜、锌、钛等金属离子及氧化物。优点: 稳定性较好、抗菌广谱、抗菌持久性好。缺点: 难制备, 高成本。抗菌机理分为含金属氧化物抗菌剂的活性氧抗菌和含金属离子抗菌剂的接触反应抗菌。金属离子与微生物细胞反应, 阻碍正常代谢, 抑制其生长和繁殖, 起到抗菌作用<sup>[26-27]</sup>。

天然抗菌剂种类主要有壳聚糖、溶菌酶、植物精油及其提取物等。优点: 来源广, 安全性高。缺点: 稳定性较差。抗菌机理较复杂, 还有待进一步研究。植物精油主要通过破坏微生物细胞, 使其内部代谢紊乱, 发挥抗菌作用<sup>[28-29]</sup>。

2.2 微胶囊化抗菌剂

2.2.1 微胶囊化有机抗菌剂

有机抗菌剂的种类齐全, 抗菌具有强力、光谱性, 在抗菌包装中广泛应用, 但其不稳定性限制了抗菌剂的效果。微胶囊技术具有稳定芯材的作用, 对延长保鲜效果具有重大意义。

翟秀超<sup>[30]</sup>以饱和水溶液法制备了  $\beta$ -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, 但是抗菌剂的缓释机理及动力学并没有深入研究。

有机抗菌剂广谱高效, 但是易挥发, 耐热性差, 研究表明采用微胶囊技术后, 显著提高了抗菌剂的稳定性, 使其缓慢释放, 具有持久杀菌和防止食品腐败的效果。

2.2.2 微胶囊化无机抗菌剂

无机抗菌剂在抗菌包装中的应用久远, 古代就有银针试毒的应用。无机抗菌剂主要是接触杀菌的机理, 但是无限制地接触食品会引发食品安全问题, 利用微胶囊技术的缓释作用很好地解决了这一问题。

Hui Yang 等<sup>[31]</sup>制备了介孔二氧化硅微胶囊支撑的银纳米颗粒, 水型抗菌膜, 具有持久的抗菌活性。李洪广等<sup>[32]</sup>采用 W/O/W 复相乳液法, 制备了  $\text{TiO}_2$  微胶囊, 探讨了多种因素对微胶囊形成的影响, 所制备的微胶囊粒径均匀, 分散性好, 微胶囊中  $\text{TiO}_2$  的质量分数约为 35%。Xiaoyu Zhang 等<sup>[33]</sup>通过界面聚合成了一种基于正二氧化硅相变材料(PCM)芯和银/二氧化硅双层壳的新型多功能微胶囊, 这些微胶囊对金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌具有高抗菌活性, 在 4 h 的接触时间下具有良好的抗菌效果, 灭菌率高于 95%。Luxiao Chai 等<sup>[34]</sup>采用原位聚合法制备了二氧化钛微胶囊, 这些微胶囊显示出对于一些革兰氏阴性细菌的化学降解和抗微生物功能的良好光催化效果。张岩等<sup>[35]</sup>利用干燥浴法, 以焦亚硫酸钠为芯材、乙基纤维素为壁材, 成功制得了缓释型微胶囊保鲜剂。该微胶囊型保鲜剂释药稳定、对葡萄有较好的保鲜效果。邢亚阁<sup>[36]</sup>采用相分离法和溶化分散冷凝法制备亚硫酸盐微胶囊, 通过微胶囊化, 提高了焦亚硫酸钠的稳定性和环境适应性, 并具有缓慢释放性。应用于玫瑰香葡萄的长期贮藏保鲜上, 与对照组相比, 腐烂率降低 80% 以上。与市售保鲜剂相比, 漂白率降低了 35%, 腐烂率降低了 10%, 二氧化硫残留量降低 20%。

无机抗菌剂本身耐热性好, 抗菌持久, 微胶囊无

机抗菌剂的研究也比较少,微胶囊无机抗菌剂的目的是减少无机抗菌剂接触食品时产生的毒性,减小抗菌剂对人体的影响,保障食品的安全。

### 2.2.3 微胶囊化天然抗菌剂

田永强等<sup>[37]</sup>采用复凝聚法以明胶和阿拉伯胶作为壁材制备牛至精油微胶囊,并利用单因素实验和正交实验优化其工艺条件,最优工艺制得的微胶囊包埋率可达83.1%,同时研究牛至精油微胶囊的抑菌效果,牛至精油经微胶囊化后显著地提高了其抑菌的持久性。闫丹丹等<sup>[38]</sup>以淀粉作为成膜基材,加入具有抗菌性的丁香精油微胶囊,以及明胶、甘油、 $\text{CaCl}_2$ 等助剂,采用流延法制备出含微胶囊的抗菌淀粉膜。通过加入丁香精油微胶囊,制得的淀粉基薄膜具有抗菌性。岳淑丽等<sup>[39]</sup>采用饱和水溶液法以 $\beta$ -环糊精为壁材制备肉桂精油微胶囊,与聚乙烯醇(PVA)溶液混合制备抗菌涂料,采用涂布的方法将制备的抗菌涂料均匀涂布在保鲜纸上,使用肉桂精油胶囊抗菌纸可明显提高圣女果的货架寿命。

Abel Guarda等<sup>[40]</sup>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。Sanjaysinh Makwana等<sup>[41]</sup>制备了肉桂醛纳米微胶囊并用于开发抗菌食品包装材料,对大肠杆菌和蜡状芽孢杆菌抗菌效果明显。Muhammad Imran等<sup>[42]</sup>以脂质体包埋了乳链菌肽,并制成抗菌活性生物降解薄膜,具有良好的抗菌性。Rubén O. Bustos C.等<sup>[43]</sup>采用乳化分离法以酪蛋白酸钠作为壁材,制备柠檬草油(LMO)微胶囊。研究了微胶囊和含微胶囊的膜的改性活性成分的释放动力学,含微胶囊的膜能够很好的抑制大肠杆菌ATCC25922和单核细胞增多性李斯特氏菌ISP65-08的生长。Yang Hu等<sup>[44]</sup>制备了含有蒿油(AAO)的抗菌微胶囊,微胶囊在热稳定性,控制释放活性,抗菌效果和长期抗菌活性方面具有优异的性能。微胶囊具有长期的抗微生物作用,即使在保存60 d后,对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的细菌抑制率仍高达83%。

天然抗菌剂资源丰富,无毒无害,具有良好的生物相容性,研究较多,用作食品包装的有较好的前景,但是天然抗菌剂稳定性较差,易受光照、温度、湿度等外在环境条件的影响,导致药效期较短。实验研究证明,利用微胶囊技术显著改善了天然抗菌剂的稳定性,增长了抗菌剂的作用时间,延长了食品的货架期,提高了经济效益。

## 3 结语

微胶囊技术在食品工业、生物医药行业和化学化

工行业已经广泛应用,但在包装行业还处于初步的研究阶段,并没有实现大规模的工厂化应用。微胶囊技术应用于包装行业可以延长食品的保质期,减小防腐剂对人体的危害,提高抗菌剂的利用效率,提高产品的附加值,提高企业经济利益。要使微胶囊技术广泛应用于包装行业,还需要进一步研究微胶囊的缓释机理及数学模型,以便进行系统的参数控制操作;研究微胶囊与包装系统、被包装物的相容性,以更好保障食品的安全性;研究环境条件、被包装物与微胶囊界面对微胶囊释放的影响,使其更好地发挥效果,延长食品的保质期。

虽然现在的抗菌剂各种各样,但是利用效率低,抗菌持久性差,利用微胶囊技术的靶向性和控释性,制备出具有温度敏感性、湿度敏感性、pH 敏感性等各种需求的智能微胶囊抗菌包装,使包装更智能化和可控化,为被包装物保驾护航。随着人们对微胶囊技术在抗菌包装方面的深入研究,将会为包装行业带来一股新的活力。

## 参考文献:

- [1] DUTTA P K, TRIPATHI S, MEHROTRA G K, et al. Perspectives for Chitosan Based Antimicrobial Films in Food Applications[J]. Food Chemistry, 2009, 114(4): 1173—1182.
- [2] 许文才,付亚波,李东立,等. 食品活性包装与智能标签的研究及应用进展[J]. 包装工程, 2015, 36(5): 1—10.  
XU Wen-cai, FU Ya-bo, LI Dong-li, et al. Research and Application Progress of Food Active Packaging and Smart Labels[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(5): 1—10.
- [3] 徐焱煊. 微胶囊的制备及其应用[J]. 化工新型材料, 2005, 33(11): 78—81.  
XU Zhi-huan. Preparation of Microcapsules and Its Application[J]. New Chemical Materials, 2005, 33(11): 78—81.
- [4] 蔡涛,王丹,宋志祥,等. 微胶囊的制备技术及其国内应用进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2010, 8(2): 20—26.  
CAI Tao, WANG Dan, SONG Zhi-xiang, et al. Microcapsule Preparation Technology and Its Domestic Application Progress[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2010, 8(2): 20—26.
- [5] LEUNG W K, LAU A P S, YEUNG K L. Bactericidal and Sporocidal Performance of a Polymer-encapsulated Chlorine Dioxide-coated Surface[J]. Journal of Applied Microbiology, 2009, 106(5): 1463—1472.
- [6] 李林建. 肉桂醛/聚乳酸纳米纤维抗菌膜的制备[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.  
LI Lin-jian. Preparation of Cinnamaldehyde/Poly(lactic Acid) Nanofiber Antimicrobial Membrane[D]. Chang-

- chun: Jilin Agricultural University, 2014.
- [7] 卢燕霞, 田永强, 刘惠琴, 等. 牛至精油  $\beta$  环糊精微胶囊的制备及其抑菌效果研究[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 84—88.
- LU Yan-xia, TIAN Yong-qiang, LIU Hui-qin, et al. Preparation of Oregano Essential Oil/ $\beta$ -cyclodextrin Microcapsule and Its Antimicrobial Activity[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(5): 84—88.
- [8] CHEN M, LIU J, LIU Y, et al. Preparation and Characterization of Alginate-N-2-hydroxypropyl Trimethyl Ammonium Chloride Chitosan Microcapsules Loaded with Patchouli Oil[J]. RSC ADVANCES, 2015, 5(19): 14522—14530.
- [9] MOREIRA A C G, MARTINS I M, FERNANDES I, et al. Microencapsulation of Red and White Thyme Oil in Poly(lactic-co-glycolic) Acid: Assessment of Encapsulation Efficiency and Antimicrobial Capacity of the Produced Microcapsules[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2015, 94(3): 469—475.
- [10] 薛琼, 邓靖, 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, 36(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]. Plastic Technology, 2015, 36(4): 80—85.
- [11] 薛琼, 邓靖, 赵德坚, 等. 壳聚糖包覆肉桂精油对葡萄保鲜的应用研究[J]. 包装学报, 2015, 36(1): 12—17.
- XUE Qiong, DENG Jing, ZHAO De-jian, et al. Research on Effects of Chitosan-coated Cinnamon Essential Oil Applied in Grape Storage[J]. Packaging Journal, 2015, 36(1): 12—17.
- [12] 吴文果, 刘伟, 王士斌, 等. 海藻酸钙/聚精氨酸微胶囊的载药和缓释性能[J]. 化工进展, 2014, 33(5): 1271—1275.
- WU Wen-guo, LIU Wei, WANG Shi-bin, et al. Drug Loading and Release of Poly-L-arginine/Calcium Alginate Microcapsules[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(5): 1271—1275.
- [13] 马琼, 王军. 不同芯材比对相变微胶囊的制备和性能影响[J]. 包装工程, 2016, 37(17): 59—63.
- MA Qiong, WANG Jun. Effects on Preparation and Performance of Phase Change Microcapsule with Different Core Material Ratios[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(17): 59—63.
- [14] 马琼, 王军, 张小英. 二元复合芯材相变微胶囊性能的影响因素[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 44—49.
- MA Qiong, WANG Jun, ZHANG Xiao-ying. Influential Factors of Performance of Binary Composite Core Material Phase Change Microcapsule[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 44—49.
- [15] 张小英, 王军, 马琼. 乳化剂 HLB 值对蜜胺树脂微胶囊团聚现象的影响[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 1—7.
- ZHANG Xiao-ying, WANG Jun, MA Qiong. Effect of Emulsifier's HLB on Agglomeration Phenomenon of Melamine-formaldehyde Shell Microcapsules[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(21): 1—7.
- [16] LIU J, LIU C, LIU Y, et al. Study on the Grafting of Chitosan-gelatin Microcapsules onto Cotton Fabrics and Its Antibacterial Effect[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, 109: 103—108.
- [17] CHEN M, HU Y, ZHOU J, et al. Facile Fabrication of Tea Tree Oil-loaded Antibacterial Microcapsules by Complex Coacervation of Sodium Alginate/Quaternary Ammonium Salt of Chitosan[J]. RSC Advances, 2016, 6(16): 13032—13039.
- [18] ZANDI M, DARDMEH N, PIRSA S, et al. Identification of Cardamom Encapsulated Alginate-Whey Protein Concentrates Microcapsule Release Kinetics and Mechanism during Storage, Stew Process and Oral Consumption[J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 47(47): 386—392.
- [19] ZANDI M. Simulation of Ascorbic Acid Release from Alginate-Whey Protein Concentrates Microspheres at the Simulated Gastrointestinal Condition Using Netlogo Platform[J]. Journal of Food Process Engineering, 2015, 40(1): 1—9.
- [20] SUPPER S, ANTON N, BOISCLAIR J, et al. Chitosan/glucose 1-phosphate as New Stable in Situ Forming Depot System for Controlled Drug Delivery[J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2014, 88(2): 361—373.
- [21] KHODABANDEHLOU K, KUMBHAR A S, HABIBI S, et al. Silylated Precision Particles for Controlled Release of Proteins[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(10): 5756—5767.
- [22] YOW H N, ROUTH A F. Release Profiles of Encapsulated Actives from Colloidosomes Sintered for Various Durations[J]. Langmuir: the ACS journal of Surfaces and Colloids, 2009, 25(1): 159—166.
- [23] TAMAYO L, AZÓCAR M, KOGAN M, et al. Copper-polymer Nanocomposites: An Excellent and Cost-effective Biocide for Use on Antibacterial Surfaces[J]. Materials Science and Engineering: C, 2016, 69: 1391—1409.
- [24] SINGH S, LEE M H, PARK L, et al. Antimicrobial Seafood Packaging: A Review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(6): 2505—2518.
- [25] ZHAO X, LI Y, YUAN H, et al. Antibacterial Mechanism of Octamethylene-1, 8-Bis(Dodecyl-dimethylammonium Bromide) Against *E. coli*[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2017, 20(3): 717—723.
- [26] BILE J, BOLZINGER M A, VALOUR J P, et al. Antibacterial Films Containing Microparticles for the Enhancement of Long-term Sustained Release[J]. Drug Development and Industrial Pharmacy, 2016, 42(5): 818—824.
- [27] ARFAT Y A, BENJAKUL S, VONGKAMJAN K, et al. Shelf-life Extension of Refrigerated Sea Bass Slices

- Wrapped with Fish Protein Isolate/Fish Skin Gelatin-ZnO Nanocomposite Film Incorporated with Basil Leaf Essential Oil[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(10): 6182—6193.
- [28] IRKIN R, ESMER O K. Novel Food Packaging Systems with Natural Antimicrobial Agents[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(10): 6095—6111.
- [29] FRIEDMAN M. Chemistry and Multibeneficial Bioactivities of Carvacrol (4-isopropyl-2-methylphenol), a Component of Essential Oils Produced by Aromatic Plants and Spices[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(31): 7652—7670.
- [30] 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.
- [31] YANG H, YOU W, SHEN Q, et al. Preparation of Lotus-leaf-like Antibacterial Film Based on Mesoporous Silica Microcapsule-supported Ag Nanoparticles[J]. *Rsc Advances*, 2014, 4(6): 2793—2796.
- [32] 李洪广, 闫军, 杜仕国, 等. 纳米  $\text{TiO}_2$  溶胶 W/O 型乳液的稳定性及其微胶囊化研究[J]. *高校化学工程学报*, 2014(4): 858—863.
- LI Hong-guang, YAN Jun, DU Shi-guo, et al. Investigation on the Stability of W/O Emulsion and Microencapsulation of Nano- $\text{TiO}_2$  Sol[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2014(4): 858—863.
- [33] ZHANG X, WANG X, WU D. Design and Synthesis of Multifunctional Microencapsulated Phase Change Materials with Silver/Silica Double-layered Shell for Thermal Energy Storage, Electrical Conduction and Antimicrobial Effectiveness[J]. *Energy*, 2016, 111: 498—512.
- [34] CHAI L, WANG X, WU D. Development of Bifunctional Microencapsulated Phase Change Materials with Crystalline Titanium Dioxide Shell for Latent-heat Storage and Photocatalytic Effectiveness[J]. *Applied Energy*, 2015, 138: 661—674.
- [35] 张岩, 王春玉, 姜文利, 等. 微胶囊型保鲜剂制备及葡萄保鲜的研究[J]. *食品科技*, 2014(11): 288—292.
- ZHANG Yan, WANG Chun-yu, JIANG Wen-li, et al. Preparation Technique on Microencapsulation Antistaling Agent and Preservation of Grape[J]. *Food Science and Technology*, 2014(11): 288—292.
- [36] 邢亚阁. 微囊化亚硫酸盐防腐保鲜剂的研制与应用[D]. 天津: 天津科技大学, 2009.
- XING Ya-ge. Preparation and Application of Microcapsuled Sulphite as Preservative[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2009.
- [37] 田永强, 卢燕霞, 张维, 等. 牛至精油微胶囊包埋工艺及抑菌效果的测定[J]. *包装工程*, 2016, 37(17): 102—107.
- TIAN Yong-qiang, LU Yan-xia, ZHANG Wei, et al. Microencapsulation of Oregano Oil and Its Antibacterial Effects[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(17): 102—107.
- [38] 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.
- [39] 岳淑丽, 万达, 张义珂. 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, WAN Da, ZHANG Yi-ke. 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.
- [40] GUARDA A, RUBILAR J F, MILTZ J, et al. The Antimicrobial Activity of Microencapsulated Thymol and Carvacrol[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2011, 146(2): 144—150.
- [41] MAKWANA S, CHOUDHARY R, DOGRA N, et al. Nanoencapsulation and Immobilization of Cinnamaldehyde for Developing Antimicrobial Food Packaging Material[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 57(2): 470—476.
- [42] IMRAN M, REVOL-JUNELLES A-M, RENÉ N, et al. Microstructure and Physico-chemical Evaluation of Nano-emulsion-based Antimicrobial Peptides Embedded in Bioactive Packaging Films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29(2): 407—419.
- [43] BUSTOS C R O, ALBERTI R F V, MATIACEVICH S B. Edible Antimicrobial Films Based on Microencapsulated Lemongrass Oil[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(1): 832—839.
- [44] HU Y, YANG Y, NING Y, et al. Facile Preparation of Artemisia Argyi Oil-loaded Antibacterial Microcapsules by Hydroxyapatite-stabilized Pickering Emulsion Templating[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, 112: 96—102.