

高薇, 韦昀珊, 朱广素, 等. 静电喷涂技术及在食品领域的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 418–430. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070001

GAO Wei, WEI Yunshan, ZHU Guangsu, et al. Electro spraying Technology and Its Research Progress in Food Field[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 418–430. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070001

· 专题综述 ·

静电喷涂技术及在食品领域的研究进展

高薇^{1,2}, 韦昀珊¹, 朱广素¹, 刘昆仑^{1,2,*}, 张辉艳³

(1.河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001;

2.河南工业大学粮食和物资储备学院, 河南郑州 450001;

3.郑州瑞普生物工程有限公司, 河南郑州 450001)

摘要:静电喷涂是一种利用高压静电场连续制备微/纳米颗粒的非热加工技术, 具有操作简便、条件温和、包封效率高优势, 在食品市场受到极大的关注。然而, 其在食品领域的研究尚处于起步阶段, 仍需要广泛研究者的深入探索。因此, 本文简要概述了静电喷涂技术的工作原理, 重点介绍了聚合物溶液条件、工艺参数和环境条件对静电喷涂效果的影响。对常用的包埋材料, 包括蛋白质类(如玉米醇溶蛋白、乳清蛋白、明胶等)、多糖类(如藻酸盐、壳聚糖、普鲁兰多糖等)进行总结。综述了该技术在活性物质包埋和食品包装方面的应用现状。最后讨论了静电喷涂技术现有的局限性及未来的发展趋势, 以期为该技术在食品领域的相关研究提供参考和启发。

关键词:静电喷涂, 微纳米颗粒, 非热加工技术, 活性物质包埋, 食品包装

中图分类号: TS205

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)10-0418-13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070001

本文网刊:



Electro spraying Technology and Its Research Progress in Food Field

GAO Wei^{1,2}, WEI Yunshan¹, ZHU Guangsu¹, LIU Kunlun^{1,2,*}, ZHANG Huiyan³

(1.College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2.School of Food and Strategic Reserves, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

3.Zhengzhou Ruipu Biological Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The non-thermophysical nature of electro spraying has been extensively documented, with high-voltage electrostatic fields being employed to achieve continuous fabrication of micro/nano particulates. Significant attention has been garnered within the food sector, particularly due to the operational advantages including facile processing protocols, ambient condition compatibility, and exceptional encapsulation performance. Therefore, this review systematically reviews the underlying mechanisms of electro spraying, with particular emphasis on the interdependent effects of polymer solution properties, process parameters, and environmental parameters on particulate morphology and encapsulation efficiency. This review systematically categorizes commonly utilized encapsulation materials, encompassing proteins (e.g., zein, whey protein, gelatin) and polysaccharides (e.g., alginate, chitosan, pullulan), with their respective functional properties and application scenarios being comparatively analyzed. Additionally, this review systematically outlines the current applications of electro spraying technology in both bioactive compound encapsulation and advanced food packaging systems. Furthermore, critical analysis is provided on existing technical limitations and future research directions, which aims to establish a theoretical foundation and inspire innovative developments in food-oriented electro spraying research.

Key words: electro spraying; micro/nano particles; non-thermophysical processing technology; bioactive compounds encapsulation; food packaging

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172259); 河南省重点研发专项(231111111800); 河南工业大学创新基金支持计划专项(2021ZKCJ03); 河南工业大学谷物资源转化与利用省级重点实验室开放课题(GO202313)。

作者简介: 高薇(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品组分与营养, E-mail: gaowei100526@126.com。

* 通信作者: 刘昆仑(1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品组分与营养, E-mail: knlnliu@126.com。

生物活性物质如多酚类、黄酮类、鱼油等,广泛存在于各种植物、动物、微生物性食品中。随着其结构和多样化生理活性的阐释,生物活性物质在功能性食品开发、食品活性包装等领域受到广泛关注。但大多数生物活性物质因溶解度差、理化稳定性欠佳、在加工、储存和胃肠道递送过程中易受苛刻环境因素的影响等,发生结构变化和生物活性丧失、生物利用度降低。因此,亟需有效的封装和递送方法来维持生物活性,实现生物活性物质的可控释放,提高其生物利用度。微/纳米材料的快速发展及其功能优势的不断发现,使其逐渐成为食品工业领域的研究热点。传统的微/纳米材料制备技术包括喷雾干燥、挤出法、自组装法、溶剂蒸发法等,然而上述技术所涉及的高温、有机溶剂残留等问题,不利于所包封物质的生物活性,在一定程度上限制了其应用^[1]。

静电喷涂技术是近些年来用于连续制备多尺度、多结构微/纳米颗粒的一种高效、简便的非热加工技术。通过对含活性物质的聚合物溶液施加高压静电场作用,促使聚合物溶液在电场中喷射、拉伸、劈裂、固化,最终获得粒径小且粒径分布窄的微/纳米颗粒。并且,高电荷液滴由于静电斥力在电场空间中相互排斥,有效避免了液滴聚集。由于静电喷涂过程条件温和、不涉及高温,能够较好地保持封装物质的生物活性且包封率较高,在食品行业具有广泛应用前景。并且,通过调控静电喷涂工艺条件,可形成固体、多孔、核壳和多核颗粒等多种颗粒形状,在生物活性物质的稳态化和缓控释方面发挥重要作用^[2-3]。相对于“兄弟技术”——静电纺丝,静电喷涂技术在食品领域的研究及应用尚处于起步阶段。目前,仅冯坤等^[4]综述了静电纺丝及静电喷涂技术在食品领域的研究及应用现状,但缺乏对上述两者技术的对比分析。因此,本文首先介绍了静电喷涂的原理以及影响因素,然后综述了静电喷涂的常用包埋材料,并与静电纺丝进行对比,展示出静电喷涂在食品领域的应用优势,最后总结了该技术目前所存在的局限性及未来的发展方向。

1 静电喷涂技术及其影响因素

1.1 静电喷涂介绍

1.1.1 基本原理 静电喷涂属于电流体动力学过程,

利用高压静电场实现聚合物在电场中喷涂的方式达到接收装置上,进而获得微/纳米颗粒。聚集在针头处的聚合物溶液由于与高压电源的正极连接,会首先带正电。并且,正电荷在聚合物溶液液滴的表面聚集,随着电压的增加,在针头尖端产生的液滴的半月形会变成一个锥形,称为泰勒锥。自由表面电荷被加速并集中到锥尖,当液滴表面的电荷斥力逐渐增加并超过表面张力时,会形成一个电场方向的加速射流^[5]。在静电喷涂过程中,所使用的聚合物溶液浓度较低,射流会因曲张不稳定(“Varicose instability”)而发生库伦裂变、形成细小的高电荷液滴,带电的液滴经过溶剂的蒸发和固化,最终在接收装置上(接收板或接收液)形成微/纳米颗粒(图 1A)^[5]。与静电喷涂不同的是,静电纺丝所使用的聚合物溶液浓度相对较高,聚合物之间缠结作用较强,聚合物射流主要存在轴对称瑞利不稳定性(“Rayleigh instability”),使得射流在电场中发生鞭打或弯曲运动,聚合物射流迅速伸长、溶剂快速蒸发,在接地的接收板上以固化纤维的形式存在(图 1B)^[6]。

1.1.2 静电喷涂的分类 根据接收装置的不同,静电喷涂主要分为干法静电喷涂、湿法静电喷涂两种。干法静电喷涂(图 2A)采用接受板接收喷涂颗粒,接受装置有水平式和垂直式。所制备的微粒往往在接收板上堆积形成薄膜状,可作为食品包装膜使用。湿法静电喷涂(图 2B)一般是采用垂直式的接受液作为接受装置。接受液多由聚电解质化合物(例如壳聚糖、乳清分离蛋白)和/或交联剂(如氯化钙)组成,有助于进一步改善喷涂颗粒的结构或一步制备多层复杂结构的载体颗粒,在食品活性物质包埋及口服递送领域具有较大的应用潜力^[4]。

根据喷涂流体的种类,静电喷涂主要分为溶液静电喷涂和乳液静电喷涂。溶液静电喷涂用来负载与聚合物基材溶液相混溶的生物活性物质,乳液静电喷涂主要用来负载与聚合物基材溶液不混溶的生物活性物质^[7]。以水包油乳液静电纺丝为例,其可实现亲水性聚合物对疏水性活性物质的包埋与递送,提升疏水性活性物质溶解性、靶向性、缓释性及生物利用度。该技术首先是将含活性物质溶液和聚合物溶液分别作为分散相和连续相,在乳化剂的作用下制备得

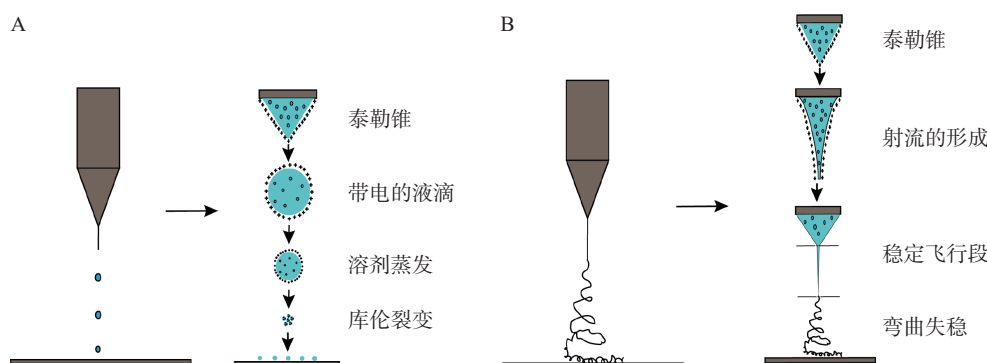


图 1 静电喷涂(A)和静电纺丝(B)的工作过程

Fig.1 Working process of electrospraying (A) and electrospinning (B)

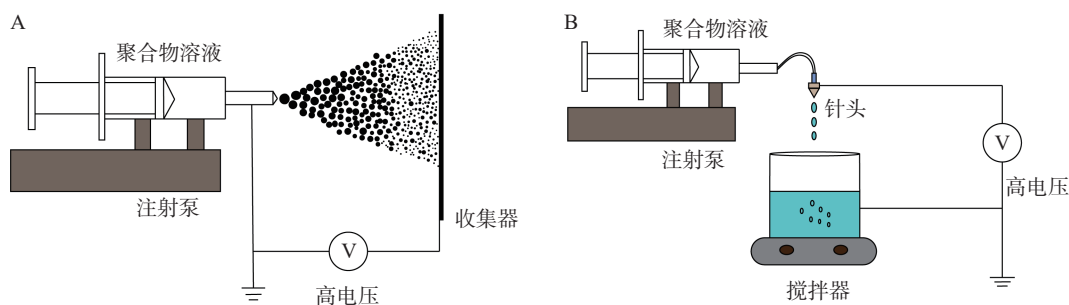


图2 干法静电喷涂(A)和湿法静电喷涂(B)

Fig.2 Dry electrostatic spraying (A) and wet electrostatic spraying (B)

到均一的乳液^[8]。然后,在喷涂过程中,随着溶剂的蒸发、电场的拉伸作用,乳液的连续相和分散相发生相分离并不断劈裂细化,最终固化在接收装置上,得到负载活性物质的壳核微粒(图3)。

根据喷涂针头的结构,静电喷涂主要分为单轴静电喷涂和同轴静电喷涂。前者是将含生物活性物质的均一溶液或多相乳液通过单轴针头进行静电喷涂,实现对活性物质的单层或双层包埋。同轴静电喷涂是将包含有活性物质的核层流体和保护性壳层流体经注射泵送入双层同轴针头。在喷涂针头的尖端,核壳喷涂流体形成双层半月形液滴,在电场作用下进一步形成泰勒锥,然后从泰勒锥的尖端喷射并不断劈裂细化。根据核壳喷涂流体及接收液的理化性质,可以最终获得双层、三层甚至四层结构的微/纳米颗粒^[1,9-10](表1)。因此,相对于单轴静电喷涂技术,同轴静电喷涂可用于一步法制备复杂结构的封装体系。并且,通过调整核壳喷涂流体的溶液条件和过程条件,可实现对活性物质的负载量、释放速率等的有效调控。

1.1.3 静电喷涂的特点 从工业应用角度上,将生物

活性分子可重复地封装到聚合物微/纳米颗粒中普遍被认为是一项具有挑战性的技术难题。而静电喷涂技术所展现出的连续制备形貌及结构可控的微/纳米颗粒或颗粒堆积膜的特性,使其有望在功能性食品配料、功能性食品开发、食品活性包装等领域发挥重要作用。除了载体形式之外,与静电纺丝技术相比,静电喷涂在聚合物的选择、纺丝电压等方面也具有独特之处(表2)。

聚合物溶液的性质是其能否适用于静电纺丝/静电喷涂过程的决定性因素。从聚合物分子链缠结的角度来说,静电纺丝要求聚合物分子具有充足的链缠结,避免电场力拉伸导致的射流断裂,最终获得形貌良好的微/纳米连续纤维。因此,适用于静电纺丝过程的聚合物通常是高分子量聚合物或浓缩聚合物溶液。这相应会导致纺丝纤维对活性物质的负载量较低^[15]。而静电喷涂对聚合物之间的相互作用要求较低,低分子量聚合物和低浓度聚合物溶液会通过静电喷涂产生负载量较高的微/纳米颗粒^[16-17]。从聚合物溶液/熔体电导率的角度来说,静电纺丝要求聚合物溶液的电导率与粘度(在一定程度上取决于聚合物分

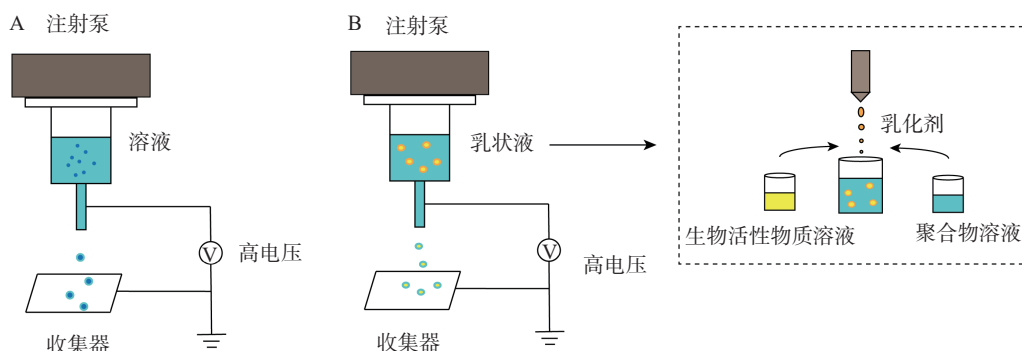


图3 溶液静电喷涂(A)和乳液静电喷涂(B)

Fig.3 Solution electrostatic spraying (A) and emulsion electrostatic spraying (B)

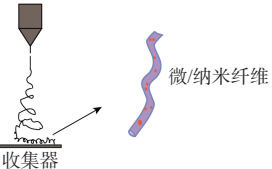
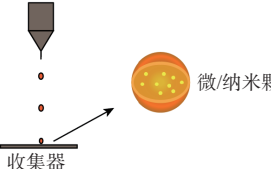
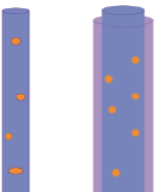
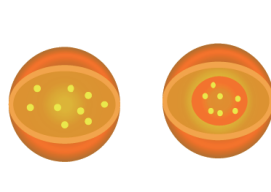
表1 利用单轴和同轴静电喷涂制备多层结构载体的典型研究

Table 1 Typical researches on the preparation of multi-unit carriers by uniaxial and coaxial electrostatic spraying

核层	壳层	接收装置	颗粒结构	静电喷涂分类	文献
乳清蛋白/细菌纤维素/儿茶素混合溶液	—	接收板	单层结构	干法单轴静电喷涂	[11]
高粱醇溶蛋白/鱼油水包油乳液	—	接收板	多核结构	干法乳液静电喷涂	[12]
载胰岛素的壳聚糖纳米颗粒/海藻酸钠溶液	—	壳聚糖/氯化钙溶液	双层结构	湿法单轴静电喷涂	[13]
海藻酸钠/植物乳杆菌/鱼油分散液	海藻酸钠/果胶溶液	大豆分离蛋白溶液	三层结构	湿法同轴静电喷涂	[14]
鱼油	葡萄糖浆/麦芽糖糊精混合物	接收板	双层结构	干法同轴静电喷涂	[9]

表 2 多层面对比静电纺丝和静电喷涂技术

Table 2 Multi-layer comparison of electrospinning and electrospraying techniques

方面	静电纺丝	静电喷涂
聚合物种类	仅数百种 (天然生物聚合物难以单独适用于静电纺丝过程)	种类较多 (天然生物聚合物可单独适用于静电喷涂过程)
纺丝电压	电压相对较高(10~30 kV)	电压相对较低(8~15 kV)
载体形式	 微/纳米纤维	 微/纳米颗粒
载体微结构		

子量)达到平衡。因此,电导率较高的天然聚合物,如壳聚糖、蛋白质往往难以单独适用于静电纺丝过程,需要辅助以合微/纳米成聚合物(如聚乙烯醇、聚氧化乙烯)。而单独采用天然聚合物通过静电喷涂过程制备颗粒载体则被广泛报道。因此,静电纺丝对聚合物溶液的性质要求更高,目前仅限数百种聚合物适用于静电纺丝过程^[18]。

电场强度直接干预聚合物射流/液滴在电场中运动、劈裂行为等,是微/纳米纤维/颗粒形貌的重要影响因素。由于静电纺丝所使用的聚合物溶液浓度较高、分子链缠结程度较充分,因此静电纺丝的过程电压相对于静电喷涂更高(10~30 kV vs. 8~15 kV)。

最后,静电纺丝和静电喷涂制备的载体形式不同(分别是微/纳米纤维和颗粒)。通常,微/纳米纤维较多应用于过滤、纺织、药物递送、控释封装、纳米复合材料和催化剂/酶固定化等。静电纺丝技术制备的类似于无纺布结构的纳米纤维膜,具有增强的表面活性、高孔隙率和良好的机械性能,在食品领域中被广泛应用于食品活性包装膜的制备。静电喷涂制备的微/纳米颗粒可以颗粒膜和分散型颗粒的形式存在,因此在生物活性物质的口服递送、功能性食品配料的开发及食品包装领域均具有较好的应用前景。从载体微结构层面,单轴或同轴静电纺丝用于制备具有单层和双层结构的纤维。对于湿法单轴/同轴静电喷涂,可用于制备具有双层、三层甚至四层结构的微/纳米颗粒。即静电喷涂在制备多单元复合载体方面具有更大的技术优势。

1.2 静电喷涂效果的影响因素

通过静电喷涂技术制备得到的小尺寸颗粒具有更大的表面积,从而提高包封物质的溶解度和生物利用度^[19]。因此对于影响颗粒粒径形态因素的研究十分必要,一般通过调节聚合物溶液及电流体动力学的工艺参数对微/纳米粒子粒径形态进行优化^[20-21]。

1.2.1 聚合物的溶液条件 聚合物的选择是静电喷

涂时首要考虑的因素,一般分为天然聚合物和合成聚合物,它们在静电喷涂方面各有优势。天然聚合物具有更高的安全性,更适用于食品领域。聚合物溶液的溶剂种类、粘度、表面张力及电场力等均会影响喷涂颗粒的形貌特征^[5]。一般来说,溶剂应具有良好的挥发性和保持聚合物溶液均匀稳定的能力。溶剂的挥发性过低会导致液滴在飞行过程中溶剂挥发不充分,在接收板形成性症状不规则的聚集颗粒;溶剂挥发性太高,喷涂溶液则很难形成持续稳定的泰勒锥,导致喷涂过程不稳定^[22]。溶液的粘度是影响静电喷涂颗粒形成的另一重要因素。当聚合物基材的分子量或浓度较低时,喷涂溶液的粘度相应较低,喷涂液滴受电场力作用劈裂细化程度过高,所得到的静电喷涂颗粒形貌不规则、难以有效包埋活性成分;在适当的粘度范围内,喷涂液滴在电场中经历劈裂、细化、溶剂挥发过程,进而制备得到形貌良好、粒径分布均一的微/纳米颗粒;进一步增加聚合物溶液的浓度或使用高分子量的聚合物基材时,由于喷涂液滴中聚合物缠结作用较强,其在电场中的拉伸和劈裂细化难以充分,往往得到粒径较大的喷涂颗粒甚至串珠状纤维^[19]。表面张力会与其他作用力共同影响泰勒锥的形成及射流的稳定性,进而影响喷涂颗粒的形成及其形貌^[13]。为形成稳定泰勒锥,所施加高压静电所产生的电场力必须要克服液滴表面张力。在一定的电场强度条件下,当表面张力过低时,喷涂溶液在电场中运动速率过快,导致其拉伸劈裂程度降低,进而制备得到粒径较大且分布不均匀的喷涂颗粒;进一步增加表面张力直至其与液滴所受电场力达到平衡,静电喷涂即发生,并且溶液的电导率越高、表面张力较低的情况下,得到的静电喷涂颗粒的粒径越小;但当表面张力过高时,电场强度难以克服表面张力,针头处则无法形成稳定泰勒锥^[23]。

1.2.2 静电喷涂过程中的工艺条件 喷涂电压决定聚合物溶液所受的电场力大小。当喷涂电压小于临

界值时, 聚合物溶液所受电场力小于表面张力, 难以形成泰勒锥, 从而导致液滴在针头处聚集并以“滴落”模式被损耗。进一步增加电压, 聚合物溶液由泰勒锥喷射首先直线射流, 并在电场作用下不断拉伸、劈裂细化, 最终沉积到接收板上形成微/纳米颗粒。然而, 电压过高时, 喷涂溶液所受电场强度过强, 这减少了液滴在针头和接收板之间的飞行时间, 导致聚合物液滴拉伸和劈裂不充分, 形成较大粒径和较宽粒径分布的喷涂微粒。

喷涂流速决定了微/纳米颗粒的制备效率, 当流速过低时, 针头处难以形成持续的泰勒锥结构, 降低了静电喷涂效率; 当流速过大时, 聚合物溶液供应过量, 针头上的液滴同样会发生“滴落”损耗^[24]。为了在更大的流速范围内维持静电喷涂过程, 研究者使用圆形保护电极在针尖附近产生强电场。这种圆形屏蔽电极可以稳定从针中喷出的低电导率溶液组成的半月型液滴。

喷涂针头和接受容器之间的距离被称为接收距离。在恒定电压下, 降低接收距离可以产生更高强度的静电场, 有利于喷涂液滴的劈裂细化。但当接收距离过低时, 喷涂液滴在电场中的运动路径和时间被缩短, 溶剂难以充分挥发, 导致湿润颗粒之间的聚集、颗粒粒径大且粒径分布宽。另一方面, 当接收距离过长时, 电场强度相应降低, 喷涂液滴难以有效地发生劈裂细化, 进而产生较大尺寸的喷涂微粒^[25]。一般认为, 15~20 cm 是最合适的接收距离。

1.2.3 静电喷涂过程中的环境条件 环境条件会影响聚合物溶液的性质, 进而影响静电喷涂的效果。例如溶剂蒸发和温度之间存在直接关系, 一般来说, 随着温度升高, 液体的分子迁移速率和电导率增加, 而粘度和表面张力降低, 聚合物液滴在电场中得到充分拉伸和劈裂, 因此可制备得到粒径较小的微/纳米颗粒。湿度的变化会对液体电导率和溶剂蒸发速率产生影响。当使用静电喷涂制备聚合物颗粒时, 高湿度可能会使溶剂蒸发缓慢, 最终导致颗粒的堆积以及表面粗糙和孔隙的产生^[22]。综上所述, 影响静电喷涂效果的因素是相互关联的, 应根据具体情况进行优化。静电喷涂主要在环境温度、适宜湿度下进行。因此, 该方法不涉及高温过程, 适用于对高温或剪切力敏感的脆弱活性物质。

2 静电喷涂常用的包埋材料

包埋材料的选择需要考虑其功能性、安全性、自组装能力及成本等因素。目前, 已有各种各样的聚合物基材被用于捕获、包覆或封装活性物质。对于食品活性成分的包埋与递送, 理想的基材应是被认定为 GRAS(Generally Recognized as Safe)的食品级聚合物。此外, 微/纳米载体的尺寸、形态、电荷、渗透性、生物粘附性和环境稳定性等因素也是聚合物基材选用时需要考虑的重要因素。通常, 天然来源的聚合物是首选, 其更容易满足生物相容性、生物可降解

性和无毒性的要求。最近, 研究热点主要集中在利用蛋白质、碳水化合物等生物基聚合物开发功能性包埋和递送载体, 以防止成型材料可能造成的环境和健康风险。值得注意的是, 天然来源的聚合物基材中, 仅玉米醇溶蛋白、普鲁兰多糖可单独适用于静电纺丝过程。而壳聚糖、海藻酸钠等大多数天然聚合物由于电导率高及独特的粘度特性, 可纺性差, 需要在静电纺丝制程中加入成型助纺剂如聚乙烯醇(PVA)、聚氧化乙烯(PEO)等。与静电纺丝相比, 天然来源的聚合物广泛适用于静电喷涂过程^[22]。本节将对静电喷涂中常用的包埋材料进行介绍并总结(表 3)。

2.1 蛋白质

蛋白质的官能团使它能够与多种活性物质相互作用并起到一定的保护作用, 是用于食品封装的生物基聚合物之一。在静电喷涂过程中, 常用的蛋白质基包埋材料主要有乳清蛋白、大豆分离蛋白、明胶、玉米醇溶蛋白等^[15]。由于氨基酸组成及分子结构的影响, 大豆分离蛋白兼具非极性和极性功能, 适合封装各种活性物质。与其他水溶性蛋白相比, 大豆分离蛋白在酸性条件下更稳定, 且与肠壁的粘附作用更强, 有利于提升活性物质的生物利用度。如黄如梦^[26]以大豆分离蛋白、海藻酸钠、果胶为复合基材制备的植物乳杆菌静电喷涂微粒, 实现了 90% 包埋益生菌在结肠的定位释放。明胶具有易获得、生物相容性好、可生物降解等优点。如 Karimi 等^[27]将熊果酸(UA)成功封装在静电喷涂明胶纳米颗粒中, UA 通过与蛋白链分子建立氢键相互作用而稳定存在于载体中。明胶纳米颗粒的保护作用使 UA 在高达 90 ℃ 的加工温度下仍保持结构稳定。体外释放实验表明, 包埋在明胶纳米颗粒中的 UA 在胃肠道环境中呈现缓控释行为, 生物可及性得到显著提高。玉米醇溶蛋白是一种生物可降解的疏水性蛋白质, 通常用于疏水性活性成分的稳态化包埋和递送。研究表明, 生物活性物质的添加往往会对玉米醇溶蛋白溶液的理化性质和静电喷涂的稳定性造成影响。如 Tapia-Hernández 等^[28]理清了没食子酸(GA)的添加浓度与玉米醇溶蛋白溶液的流变性能、泰勒锥的形成及喷涂颗粒形貌结构之间的内在联系, 优化了基于静电喷涂制备负载 GA 的玉米醇溶蛋白纳米颗粒的制备工艺。傅里叶红外光谱分析表明, GA 与玉米醇溶蛋白之间存在氢键相互作用, 为提升 GA 的环境稳定性提供了分子基础。为避免生物活性物质的添加对玉米醇溶蛋白喷涂性能的影响, Bhushani 等^[29]以玉米醇溶蛋白作为壳材料, 采用同轴静电喷涂包埋儿茶素。结果发现, 与普通玉米醇溶蛋白纳米粒相比, 包埋儿茶素的颗粒粒径增加了约 30 nm。体外实验表明, 静电喷涂包埋提升了儿茶素的胃肠道稳定性及其对肠细胞单层的渗透性。

表 3 静电喷涂使用的壳材料以及包埋物质
Table 3 Embedded materials and embedded substances used in electrospraying

种类	包埋材料	包埋物质	包封率	文献
蛋白质	高粱醇溶蛋白	鱼油	94.0%	[12]
	玉米醇溶蛋白	鱼油	83%	[35]
	玉米醇溶蛋白	甜菊糖苷	67.47%	[36]
	玉米醇溶蛋白	维生素B	82.9%	[37]
	玉米蛋白	叶酸	80%	[38]
	乳清蛋白	富含二十碳五烯酸的油	—	[39]
	乳清浓缩蛋白	叶酸	80.8%	[40]
	乳清浓缩蛋白	橄榄叶提取物	80%	[41]
	乳清蛋白	β -胡萝卜素	—	[42]
	明胶	没食子儿茶素没食子酸酯	100%	[43]
多糖	辛烯基琥珀酸酐淀粉	迷迭香精油	98%	[44]
	醋酸纤维素	尿素	—	[45]
	海藻酸钠和 κ -卡拉胶	紫罗勒叶提取物	87.89%	[46]
	葡萄糖浆和普鲁兰多糖	L-5-甲基四氢叶酸	—	[47]
	乳清蛋白和碳水化合物	鱼油	—	[48]
混合	2-羟丙基环糊精和Soluplus®	虾青素	94.25%	[49]
	聚乙烯醇和壳聚糖	鼠尾草精油	73.3%	[50]
	细菌纤维素和蛋白质	没食子儿茶素没食子酸酯	97%	[7]
	明胶和羟丙基甲基纤维素	甜菜内酯	69.3%	[34]
	葡聚糖、乳清蛋白和壳聚糖	番茄红素	75%	[51]
其他	聚乙烯吡咯烷酮K30	辣椒素	97.30%	[52]
	聚乙烯吡咯烷酮	山竹果皮提取物	—	[53]
	共聚维酮	辅酶Q10	100%	[54]

注: —: 文献中未说明。

2.2 多糖

多糖因其生物相容性、生物可降解性和极高的表面可修饰性而被广泛应用于生物活性物质包封^[5,22]。用于静电喷涂的多糖基材主要有海藻酸钠、壳聚糖、麦芽糖糊精、葡聚糖、普鲁兰多糖等。其中,海藻酸钠中的钠离子易与氯化钙中的钙离子发生交换,形成钙离子与海藻酸钠分子之间的交联键。这些交联键将海藻酸钠分子连接在一起,形成三维网状结构,从而使溶液转变为凝胶状态。Tao 等^[30]以氯化钙溶液作为接受液,以海藻酸钠/鱼油水包油乳液为喷涂流体,采用单轴静电喷涂-离子凝胶相结合的方法制备海藻酸钠凝胶稳定的鱼油胶囊。该方法简单易行,制备出微胶囊形状可控、稳定性良好、呈现多核复杂结构,在食品工业中具有广阔的应用前景。双层纳米载体是另外一种多单元复合载体,相对于单层结构载体,能够更好的保护生物活性物质,提高生物利用度^[26]。利用海藻酸盐和壳聚糖之间的静电相互作用,Tsai 等^[31]采用同轴静电喷涂技术一步制备了负载壳聚糖/海藻酸钠双层纳米载体,并创新性地将中心复合设计-响应面方法应用到同轴电喷涂的工艺优化过程中。除了上述应用较多的多糖基材外,研究者也在不断开发扩展静电喷涂的多糖基材种类。如来源于龙舌兰的果聚糖是一种新型封装材料,其包封性能与分子聚合度有很大的关系。Ramos-Hernández 等^[32]以 β -胡萝卜素为模型物质,较早验

证了龙舌兰果聚糖适用于静电喷涂性能包埋生物活性物质的可行性,进一步扩展了静电喷涂的生物聚合物基材类型。

2.3 多糖-蛋白复合

普鲁兰多糖是一种水溶性多糖,具有高附着力和优异的纤维成膜能力,作为基质已广泛应用于静电纺丝/静电喷涂过程中。尽管其具有无毒性、生物相容性、高溶解度和低粘度等优点,但其乳化能力较差。使用纯普鲁兰多糖包封活性物质时,颗粒表面存在较多的活性成分,导致封装效率低。因此为了提高包封物质的稳定性和包封率,Niu 等^[33]将普鲁兰多糖和乳清分离蛋白结合使用作为基质对胡萝卜素进行封装。普鲁兰多糖-WPI 颗粒呈球形、结构致密,该结构保护 β -胡萝卜素免受潮湿和加热处理的影响,并且具有较高的包封率。De 等^[34]以明胶和羟丙基甲基纤维素作为包封聚合物,通过同轴静电喷涂工艺对富含甜菜碱的甜菜根提取物进行包封,获得具有核/壳结构的胶囊。在核中加入甜菜根提取物、明胶,在壳中加入羟丙基甲基纤维素,使得结构对甜菜红素具有更好的保护作用。此外,还分别进行了甜菜红素在明胶、羟丙基甲基纤维素中的单轴包封作为对照。结果显示同轴封装结构比单轴获得的结构对甜菜红素有更好的保护作用。多糖和蛋白质复合的优越性以及核/壳结构的有效性在未来食品应用中得到了证实。

3 静电喷涂技术在食品领域的应用

3.1 包埋生物活性物质在功能性食品方面的应用

静电喷涂技术可用于包埋多种生物活性物质(图4)。生物活性物质在暴露于氧气、光、热或其他极端条件下易失活,在食品工业中的应用受到限制。通过静电喷涂产生的微/纳米颗粒能够保护生物活性物质免受环境影响并提高其长期稳定性,因此该技术在食品领域有巨大的应用潜力^[17]。

3.1.1 益生菌的稳态化 近年来,益生菌因其健康促进功效而迸发出巨大的市场潜力。然而,如何最大限度地提高益生菌在食品加工、贮藏和胃肠消化等苛刻环境中的稳定性,是益生菌产业面临的严峻挑战。传统包封技术(喷雾干燥、挤压法等)虽已被广泛应用,然而部分技术往往会涉及到苛刻条件(高温、高剪切力等)的使用,易造成菌活力损失^[55];另外单层包埋结构的载体往往无法保证益生菌在苛刻环境条件下的稳定性,或无法实现益生菌的结肠高活递送,而具有多层结构的载体可以较大程度上减少外界因素对益生菌的损害。目前,研究者多采用凝聚法或层层自组装法来构建负载益生菌的多层结构载体,该技术能够避免高能操作,且制备的多层载体可以解决单一载体的保护性能差问题,但是其需要反复包覆操作来构建多层载体,步骤相对繁琐^[26]。

静电喷涂是利用高压电场连续制备多尺度、多结构载体的非热加工技术。益生菌稳态化成为近几

年静电喷涂的一个新兴应用领域(表4)。Alehosseini等^[56]以WPC/WPI为基材(混合比例为7:3),制备了负载干酪乳杆菌的静电喷涂微粒。结果发现干酪乳杆菌在静电喷涂过程中几乎没有发生活力损失,说明使用静电喷涂高活包埋益生菌具有可行性。但单轴静电喷涂过程难以避免益生菌在单层载体表面的暴露,这些菌在胃肠道递送过程中会受到苛刻消化条件的影响而失活。Huang等^[14]采用一步同轴静电喷涂法制备以植物乳杆菌为模型益生菌的新型多层微胶囊,该微胶囊由芯层(海藻酸钠/益生菌/鱼油)、壳层(海藻酸钠/果胶)和最外层组成(大豆分离蛋白涂层)。在微胶囊中添加微量鱼油不仅可以显著提高益生菌的包封率,还可以增强益生菌在模拟胃肠道条件下的活力。含有鱼油的微胶囊中的益生菌通过模拟胃肠道后的存活率高达92.53%。并且该微胶囊具有更好的热稳定性和更强的抵抗恶劣条件的能力。

3.1.2 多肽和蛋白的稳态化 食源性活性物质来源广泛、种类丰富。其中,多肽(如抗体)和蛋白质(如乳铁蛋白、藻蓝蛋白、溶菌酶、超氧化物歧化酶)是以大分子存在的食源性活性物质的典型代表,广泛参与生物体的多种生理过程。与低分子量活性成分相比,多肽和蛋白类活性物质特异性高,脱靶效应少等特点,在增强机体免疫力、促进神经发育和调控肠道菌群等方面发挥重要潜力^[64]。然而,多肽和蛋白是动力学不稳定的分子,易受外界环境因素如温度、pH、

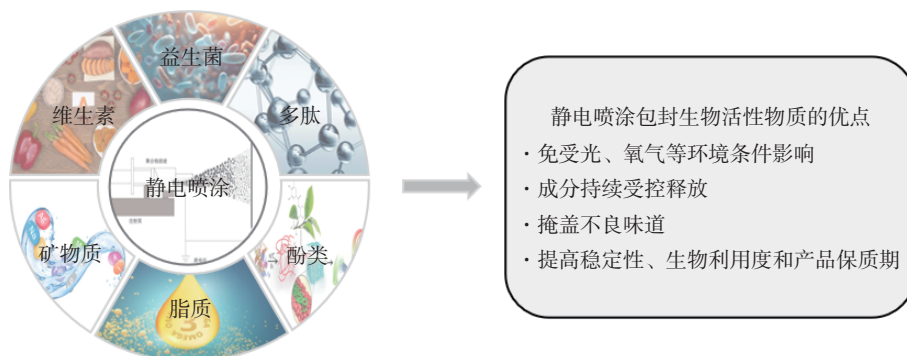


图4 静电喷涂技术包封的多种生物活性物质及其优点

Fig.4 Encapsulation of diverse bioactive compounds via electro-spraying technology and their functional advantages

表4 静电喷涂技术包埋益生菌

Table 4 Encapsulation of probiotics via electro-spraying technology

益生菌	静电喷涂类型	包埋基材	主要结论	文献
乳酸明串珠菌	单轴	大豆分离蛋白和葵花籽油	包封率最高为92.93%,对益生菌具有保护作用。	[57]
植物乳杆菌	单轴	葵花籽油、菊粉、海藻酸盐、乳清分离蛋白	提高了植物乳杆菌的热稳定性和胃肠道稳定性。	[58]
植物乳杆菌	单轴	浓缩乳清蛋白和麦芽糊精	得到的具有益生元特性的混合纳米胶囊对益生菌具有保护固定作用,提高了胶囊在模拟胃肠道应激下的存活率。	[55]
嗜热链球菌	单轴	大豆分离蛋白	得到的胶囊具有较高的包封率和较低活力损失,增强了益生菌在胃肠道条件下的存活率。	[59]
嗜酸乳杆菌	单轴	乳清分离蛋白和乳糖	包封率最高为63.39%。储存28 d,封装后细菌的细胞活力无显著变化。	[60]
嗜酸乳杆菌	同轴	海藻酸钠和明胶	进行体外消化时,微胶囊化的样品具有更高的嗜酸乳杆菌活力。	[61]
双歧杆菌亚种	同轴	乙基纤维素	延长了封装在核壳静电喷涂胶囊内的双歧杆菌益生菌的活力。	[62]
植物乳杆菌	单轴、同轴	乳清蛋白浓缩物(WPC)、明胶	因为酸性明胶的损害作用,单轴静电喷涂WPC-胶囊显示出较高的存活率,提高了其对体外消化的抵抗力。	[63]

搅拌、剪切及胃肠道消化因素如胃酸、消化酶等的影响,发生结构破坏。此外,蛋白和多肽类活性物质多通过主动转运的形式进入血液循环以发挥系统性作用,受肠道黏膜的屏障作用及外排泵机制的影响,多肽和蛋白类活性物质往往吸收效率低、生物利用度普遍低于 1%^[65]。稳态化包埋在提升蛋白和多肽类物质的生物活性、实现其在靶向部位的释放、促进其肠道吸收等方面具有重要意义。

如 Zhang 等^[66]以葡聚糖为聚合物基质,研究了一种食品级静电喷涂封装木聚糖酶的方法。结果表明,木聚糖酶的包封率和活性回收率均超过 90%,木聚糖酶均匀分布在葡聚糖基质中。葡聚糖基载体和静电喷涂方法均不会对木聚糖酶的活性造成影响,与游离酶相比,前者表现出更好的热降解性和储存稳定性。静电喷涂技术因操作条件温和还可用于封装热敏化合物,如抗氧化剂藻蓝蛋白(PC)。Schmatz 等^[67]以聚乙烯醇(PVA)为聚合物基质,使用静电喷涂技术对藻蓝蛋白进行高效封装(75.1%±0.2%)。所制备的 PC-PVA 超细颗粒显著提升了 PC 的热稳定性,在 216 ℃ 的温度条件下对 PC 仍保持其抗氧化活性。He 等^[68]通过静电喷涂技术制备葡聚糖-乳清分离蛋白-硒多肽(DX-WPI-SP)微胶囊,在最佳条件下制备得到的 DX-WPI-SP 载药率在 37%~46% 之间。微胶囊化显著提升了 SP 的热稳定性,扩展了 SP 在多样化食品加工过程的适用性。体外模拟释放实验结果表明,微胶囊具有优异的胃肠溶出特性,能保证 DX-WPI-SP 经口服释放 SP 以发挥其抗氧化活性。冯坤等^[13]使用静电喷涂分别制备了负载胰岛素的 pH 响应溶解性小肠递送载体和菌群触发型结肠递送载体,对比研究不同肠道递送载体的药代动力学,结果发现胰岛素经结肠定位释放后,其肠道吸收效率显著提升(13.1% vs. 7.5%)。

3.1.3 植物提取物的包埋 近年来,为了满足人们对功能性食品和饮料日益增长的需求,对植物提取物进行食品浓缩或强化的应用受到广泛关注。植物提取物种类繁多,主要包括抗氧化剂类、天然色素类、多酚类等,因其具有天然、安全、有效等优势而得到广泛应用。然而,大多数植物提取物对环境因素(如高温、光照、氧气、某些 pH 条件等)敏感,因此它们在食品加工、储存过程中会失去预期的有益生物活性^[69]。通过静电喷涂技术对植物提取物进行封装,提高它们的稳定性以及生物利用度,为植物提取物在创新性功能食品开发中的应用提供了方法。

Bayraktar 等^[70]使用同轴静电喷涂技术将反式白藜芦醇分别封装在由蛋壳膜蛋白和丝素蛋白组成的核/壳纳米粒子中,并将中心复合设计和响应面法用于制备反式白藜芦醇核/壳纳米颗粒的工艺优化中。通过改变封装参数,改善纳米颗粒的性质并保护生物活性物质的稳定性。Biduski 等^[44]通过静电喷涂技术将迷迭香精油封装在辛烯基琥珀酸酐淀粉

(OSA 淀粉)胶囊中。考察 OSA 淀粉、不同体积分数的乙醇溶液和不同浓度的精油形成的乳液对静电喷涂胶囊形态和包封效率的影响。实验结果表明,最优条件下制备得到的胶囊形状光滑,呈球形,其包封率高于 82%。此外,由于迷迭香精油具有抗菌性,OSA 淀粉胶囊有望成为传递抗菌剂的新载体,但该精油胶囊在真实食品体系中的抗菌活性还需进一步探究。Asadi 等^[71]以核桃分离蛋白(WPI)为包封基质,采用静电喷涂技术制备姜黄素-WPI 纳米粒子。红外光谱结果显示,姜黄素与 WPI 的疏水核心之间形成了氢键和疏水键,这提高了姜黄素在载体系统中的稳定性。进一步对纳米粒子的体外释放行为进行研究,发现纳米粒子成功将姜黄素从胃相转移到小肠,在小肠中介质将 WPI 消化分解成其生物活性肽,并释放姜黄素。这些纳米粒子的制备不涉及极端操作条件和危险试剂的使用,并且具有合适的尺寸和包封效率,可用于提高姜黄素等非极性化合物的溶解度和生物利用度。Karakas 等^[72]通过静电喷涂技术制备负载鞣花酸(EA)的藻酸盐-果胶珠,并用低分子量和高分子量的壳聚糖(LC/HC)对其进行包被。与未包被的相比,包被后的藻酸盐-果胶珠显示更高的 EA 包封率(49.53%~69.85% vs. 86.50%)。在模拟胃肠道消化实验中发现,LC 包被的藻酸盐-果胶珠具有延长的持续释放 EA 的优势。这是因为制备的封装系统对 EA 产生保护效果,限制其在胃和小肠直接被吸收,并将更多的 EA 递送至大肠,由人体结肠的微生物群代谢,产生生物利用度更高的尿石素。

3.1.4 功能性脂类的包埋 功能性脂类主要包括二十碳五烯酸(EPA)、二十二碳六烯酸(DHA)、亚油酸、 α -亚麻酸、藻油等,它们具有降胆固醇、降血压、抗炎、抗癌、抗氧化等优点。特别是 DHA 还可改善大脑学习和记忆能力,具有促进智力发育、防止老年痴呆等优势,对人体健康有益。但是由于其氧化稳定性差,易产生令人不愉快的气味,限制了其作为功能性食品的应用。Torres-giner 等^[73]为克服这一缺点,将该物质包埋在静电喷涂制备的玉米醇溶蛋白胶囊中。研究发现,玉米醇溶蛋白的保护可以显著延缓 DHA 在高相对湿度和高温下的降解,并减少了 DHA 异味的释放。Busolo 等^[74]首次将高压电场和气动喷雾结合,利用创新的静电喷涂技术将富含 DHA 的鱼油包裹在平均尺寸为 1.4 μm 的半球形玉米醇溶蛋白胶囊中。由于该工艺具有低温和快速蒸发的特性,可成功将 DHA 稳定在微胶囊中,且包封率高达 84%。对其进行感官测试实验发现,与游离的鱼油相比,将包埋后的鱼油微胶囊浓缩到重组奶制剂中可显著降低感官影响。综上所述,静电喷涂的封装技术以及聚合物基质的保护能够显著提高 DHA 的稳定性并隐藏其气味,为 DHA 在食品领域的广泛应用提供方法。

此外,另一功能性脂类—藻油,也有相应的研究

报道。藻油具有抗氧化、抗凝血、抗病毒和抗炎特性,能够刺激免疫系统,对多种疾病有治疗作用,但其生物活性在酸性条件下会部分丧失,因此需对其进行封装以保护藻类提取物的有益活性。Karakas 等^[75]采用静电喷涂和微乳液两种技术对藻油进行封装并比较。用海藻酸钠和壳聚糖对小球藻油进行胶囊化,考察两种方法的操作参数对粒径和负载效率的影响。结果发现,与微乳液法(756.9~1128.2 nm 和 57%~73%)相比,静电喷涂法更适合制备粒径更小(123~610 nm)和载油效率更高(60%~77%)的纳米粒子。

3.2 在食品抑菌保鲜方面的应用

食品在贮藏流通过程中易受微生物污染,导致其质量降低、货架期缩短,甚至引发食品安全问题。随着经济社会的发展和人民生活水平的提升,食品安全问题被空前重视。开发兼具抗菌、保鲜和新鲜度指示效果的抗菌活性包装膜一直是食品贮藏保鲜方向的研究热点。通过膜中抗菌剂的释放、指示因子的颜色变化,达到延长货架期和提供食品新鲜度信息的目的,对于降低食品安全风险及减少食品浪费具有重要意义。在保证膜材料安全性的基础上,如何实现抗菌剂从膜材中缓慢释放,进而提升膜的长效抗菌性是该技术领域的难点。近年来,纳米材料以其比表面积大、负载效率高、缓控释性能可调等优势,在抗菌膜的开发领域受到了广泛的关注。特别地,静电纺丝

和静电喷涂在制备纳米纤维/颗粒膜方面,相较于流延膜、热挤出膜来说具有技术和膜结构优势^[18]。而对比静电纺丝纳米纤维膜,静电喷涂纳米颗粒膜在机械性能方面仍存在不足。为解决这一问题,研究者较多将静电喷涂颗粒涂覆到机械性能较好的接收膜上制备食品包装膜(表 5),或直接喷涂到食品表面作为抗菌保鲜涂层(表 6)。

3.2.1 食品包装膜 理想的食品包装膜可以抑制食品表面微生物的生长,防止食品氧化,延迟新鲜食品的成熟和变质。静电喷涂因其技术优势可制备得到具有良好均匀性和较小厚度的薄膜,同时具有抗菌效果好和节省原料等优势。Ormanli 等^[76]通过在纸质包装上静电喷涂黄腐酸(FA)和丝胶(S)颗粒,制备得到一种新型食品活性包装膜。将这种包装膜应用到梨储存过程中,结果发现梨在储存期间的颜色、质地和微生物负荷的变化程度小于用无涂层纸包装和未包装的梨,含有 FA 和 S 的活性包装材料显著延长了梨的保质期。Stoleru 等^[77]则采用静电喷涂技术将兼具抗菌和抗氧化活性的壳聚糖/维生素 E 复合颗粒固定在聚乙烯(PE)表面。壳聚糖/维生素 E 修饰的 PE 膜对革兰氏阴性和革兰氏阳性菌株的生长具有抑制作用,并同时表现出良好的清除 DPPH 自由基的作用。此外,由于各组分之间相对强的静电和氢键相互作用,所制备的活性膜即使在恶劣介质中也具有良好的稳定性和抗氧化能力。Schmatz 等^[78]通过静电

表 5 静电喷涂技术在食品包装膜方面的应用

Table 5 Application of electrostatic spraying technology in food packaging films

添加剂	膜基质	重要结论	文献
玉米醇溶蛋白、树脂	纸巾	赋予膜良好的孔隙率、疏水性和力学性能,提高了膜的寿命。	[81]
壳聚糖(CS)	聚乙烯醇(PVA)	PVA-CS膜具有更高的断裂伸长率、更低的透氧率、更高的阻水性和更强的抗菌活性。	[82]
向日葵蜡	果胶	在成膜溶液中添加葵花蜡降低了电导率,同时提高了膜的表面张力和密度。	[83]
紫甘蓝花青素、明胶	乙基纤维素(EC)	所开发的pH敏感膜中使用的所有成分都是生物材料,为安全测量食品腐败及其pH的变化提供了方法。	[84]
ϵ -己内酯(PCL)纤维/二氧化硅(SiO_2)	低密度聚乙烯(LDPE)薄膜	SiO_2 微粒提高了LDPE/PCL薄膜的热稳定性,得到一种具有较高热稳定性的超疏水薄膜。	[85]
新塔花精油(ZEO)壳聚糖纳米颗粒(CSNPs-ZEO)	醋酸纤维素纳米纤维(CA)	CA-CSNPs-ZEO纳米结构显示出较低的水蒸气阻隔性、较高的拉伸强度和较强的抗菌活性。	[86]

表 6 静电喷涂技术在食品抗菌保鲜涂层方面的应用

Table 6 Application of electrospraying technology in bacteriostatic preservation

应用对象	抗菌剂涂层	聚合物基材	抑制菌类	文献
哈密瓜	苹果酸、乳酸	—	沙门氏菌	[90]
甜菜根叶	西番莲果皮提取物	—	大肠杆菌和李斯特氏菌	[91]
玉米	丁香油	变性乳清蛋白	伏马菌素	[92]
番茄	丁香油	海藻酸盐和纤维素	真菌	[93]
草莓	香芹酚和肉桂酸甲酯	海藻酸盐	霉菌	[94]
草莓	—	壳聚糖	霉菌	[95]
草莓	小叶红果提取物	羟丙基甲基纤维素	真菌	[96]
蓝莓	厚朴酚	虫胶和玉米醇溶蛋白	青霉、灰葡萄孢等霉菌	[97]
番石榴	番石榴籽油	—	匍匐根霉、黑曲霉等真菌	[98]
蛋糕	山梨酸钾	—	霉菌	[99]
猪腰肉	牛至、百里香植物精油等	金盏花聚糖和壳聚糖	细菌和真菌	[100]

喷涂过程,将负载效率 75% 藻蓝蛋白的聚乙烯醇纳米颗粒(PC-PVAn)沉降在聚己内酯(PCL)/聚 L-乳酸(PLLA)静电纺丝纳米纤维膜上。结果表明静电纺丝和静电喷涂技术联合生产的纳米材料具有良好的热学和机械特性以及抗氧化能力,在它们可以防止食品变质并延长其保质期方面具有应用潜力。Wu 等^[79]以无机抗菌剂银纳米颗粒为活性成分,在静电纺丝聚乳酸(PLA)-热塑性聚氨酯(TPU)纳米纤维薄膜上采用电喷涂的方法制备了 AgNPs-PLA 微球/PLA-TPU 分层抗菌膜,抗菌膜具有良好的力学性能,AgNPs 含量为 0.6wt%,抗菌膜最高抑菌率可达 99%,且细菌粘附最小。该复合薄膜将新鲜草莓的保质期延长至 7 d 以上。Pires 等^[80]以生物质资源木薯淀粉作为唯一基材,通过调节木薯淀粉的糊化时间、静置过程、浓度等条件制备了姜黄素-木薯淀粉微球与木薯淀粉静电纺丝膜复合的抗菌膜。负载姜黄素的木薯淀粉微粒、木薯淀粉纤维的平均直径分别为 1373~1787 nm 和 108~142 nm,姜黄素的负载率为 79.01%~97.09%。与未包封的姜黄素相比,包封在复合抗菌膜材中的姜黄素表现出较强的热稳定性。含有 1% 姜黄素的复合膜的抗氧化能力最强,对 ABTS⁺ 自由基有 45% 的清除作用。这些材料有望用于食品活性包装。

3.2.2 食品涂层 可食用食品涂层在食品抑菌保鲜方面也发挥着重要作用。静电喷涂制备食品涂层的新兴技术,与传统技术相比,其在抑制微生物生长、节约药剂、保持食品风味等方面具有显著优势^[87]。Cakmak 等^[88]分别采用静电喷涂法和浸渍涂层法对苹果片进行涂布处理,比较了两种方法的涂层效率、物料吸收率、颜色变化和涂层表面的微观结构。实验结果显示静电喷涂苹果片的表面更均匀、失重率较低,且颜色变化不明显。另外,采用静电喷涂法减少了涂层材料的使用量,并且苹果表面涂层具有更好的均匀性。精油是从不同芳香植物中提取的具有重要抑菌活性的生物活性物质之一。Yilmaz^[89]利用静电喷涂技术制备牛耳草精油(EO)负载效率为 77.2% 的聚乙烯醇(PVA)-壳聚糖纳米颗粒(ONPs)。控释试验表明,ONPs 能释放 82.78% 的 EO。经 PVA-壳聚糖 NPs 包埋后,EO 对黑曲霉和灰霉菌的抑菌效果得到显著提升,可作为涂层剂在食品贮藏过程中达到长效防腐的目的。

4 结论与展望

静电喷涂技术是一种简单高效的微/纳米颗粒生产技术,具有生物活性的物质可以被包封在静电喷涂颗粒中,以实现更好的生物利用和受控释放,这在新型功能性食品 and 食品包装材料方面显示出巨大的应用潜力。本文对该技术在包埋生物活性物质和食品抑菌保鲜方面的最新研究进展进行综述,展现了该技术在食品领域发挥的重要作用。然而,仍有一些挑战需要克服。首先,需要进一步探究操作参数对颗粒尺

寸形态的影响,目前对于包埋各种生物活性物质的微/纳米颗粒研究已十分广泛,但对于更小粒径纳米颗粒的制备仍需进一步试验。其次,需要进一步探寻适用于静电喷涂封装生物活性物质的包埋材料,玉米醇溶蛋白、壳聚糖是静电喷涂中使用最广泛的天然聚合物。但这些聚合物的价格相对昂贵,限制了其在食品中的应用,另外有些包埋材料需要溶解在有机溶剂中(如明胶需要溶解在酸中),这存在一定的食品安全隐患。因此,需要寻找更多的聚合物用于静电喷涂。最后,相较于静电纺丝技术产生的纤维,静电喷涂技术形成的颗粒在食品领域中有更理想和更广阔的应用,但这一领域还没有深入探索,并且大部分研究仍停留在实验室阶段,目前只有少数研究将封装的生物活性物质应用于食品体系中,实际应用研究尚不充分。因此,需要更多有关食品体系中颗粒的氧化稳定性和感官特性的研究,推进静电喷涂技术在食品行业中的深入应用,以开发更多健康且新颖的食品营养和包装应用产品。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] NIU B, SHAO P, LUO Y C, et al. Recent advances of electro-sprayed particles as encapsulation systems of bioactives for food application[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105376.
- [2] WANG P P, DING M Z, ZHANG T, et al. Electro spraying technique and its recent application advances for biological macromolecule encapsulation of food bioactive substances[J]. *Food Reviews International*, 2022, 38(4): 566–588.
- [3] DHIMAN A, SUHAG R, SINGH A, et al. Mechanistic understanding and potential application of electro spraying in food processing: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(30): 8288–8306.
- [4] 冯坤, 韦昀姗, 吴虹. 基于静电流体的静电纺丝/喷涂技术在食品领域中的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 231–241. [FENG K, WEI Y S, WU H. Progress in applications of electro-spinning/electrospraying based on electrohydrodynamics in the food field[J]. *Food Science*, 2021, 42(15): 231–241.]
- [5] TOMADONI B, FABRA M J, LOPEZ-RUBIO A. Electrohydrodynamic processing of phycocolloids for food-related applications: Recent advances and future prospects[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 125: 114–125.
- [6] ALEHOSSEINI A, GÓMEZ-MASCARAQUE L G, GHORANI B, et al. Stabilization of a saffron extract through its encapsulation within electrospun/electrosprayed zein structures[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 113: 108280.
- [7] PAXIMADA P, ECHEGOYEN Y, KOUTINAS A A, et al. Encapsulation of hydrophilic and lipophilized catechin into nanoparticles through emulsion electro spraying[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 64: 123–132.
- [8] 冯坤, 皇甫露露, 相启森, 等. 静电纺丝技术在食品抗菌保鲜中的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(20): 6554–6562. [FENG K, HUANG PU L L, XIANG Q S, et al. Research progress on the application of electro spinning technology in food antibacterial preservation[J]. *Journal of Food Safety and Qual-*

- ity, 2022, 13(20): 6554–6562.]
- [9] RAHMANI-MANGLANO N E, GUADIX E M, JACOBSEN C, et al. Comparative study on the oxidative stability of encapsulated fish oil by monoaxial or coaxial electrospraying and spray-drying[J]. *Antioxidants*, 2023, 12(2): 266.
- [10] TANHAEI A, MOHAMMADI M, HAMISHEHKAR H, et al. Electrospraying as a novel method of particle engineering for drug delivery vehicles[J]. *Journal of Controlled Release*, 2021, 330: 851–865.
- [11] PARASKEVI P, EUGENIA K, EFTYCHIOS A, et al. Encapsulation of catechin in electrosprayed food-grade particles[J]. *Food Hydrocolloids for Health*, 2021, 1: 100021.
- [12] CETINKAYA T, MENDES A C, JACOBSEN C, et al. Development of kafirin-based nanocapsules by electrospraying for encapsulation of fish oil[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 136: 110297.
- [13] 冯坤. 基于静电流体技术的胰岛素肠道递送体系的构建及其血糖调控机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. [FENG K. Development of intestinal delivery systems of insulin by electrohydrodynamics technique and their blood glucose regulation mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.]
- [14] HUANG R M, FENG K, LI S F, et al. Enhanced survival of probiotics in the electrosprayed microcapsule by addition of fish oil[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 307: 110650.
- [15] PIRES J B, DOS SANTOS F N, COSTA I H D, et al. Essential oil encapsulation by electrospinning and electrospraying using food proteins: A review[J]. *Food Research International*, 2023, 170: 112970.
- [16] 李金磊. 基于静电纺丝/静电喷雾构筑荷叶效应纳米纤维及性能研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2023. [LI J L. Construction and properties of lotus leaf effect nanofibers based on electrostatic spinning/electrostatic spray[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2023.]
- [17] JACOBSEN C, GARCÍA-MORENO P J, MENDES A C, et al. Use of electrohydrodynamic processing for encapsulation of sensitive bioactive compounds and applications in food[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2018: 525–549.
- [18] LIU Z P, ZHANG L L, YANG Y Y, et al. Preparing composite nanoparticles for immediate drug release by modifying electrohydrodynamic interfaces during electrospraying[J]. *Powder Technology*, 2018, 327: 179–187.
- [19] COELHO S C, ESTEVINHO B N, ROCHA F. Encapsulation in food industry with emerging electrohydrodynamic techniques: Electrospinning and electrospraying - A review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 127850.
- [20] NGUYEN D N, PALANGETIC L, CLASEN C, et al. One-step production of darunavir solid dispersion nanoparticles coated with enteric polymers using electrospraying[J]. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2016, 68(5): 625–633.
- [21] JAYAPRAKASH P, MAUDHUIT A, GAIANI C, et al. Encapsulation of bioactive compounds using competitive emerging techniques: Electrospraying, nano spray drying, and electrostatic spray drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 339: 111260.
- [22] ALEHOSSEINI A, GHORANI B, SARABI-JAMAB M, et al. Principles of electrospraying: A new approach in protection of bioactive compounds in foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(14): 2346–2363.
- [23] ROSTAMI M, YOUSEFI M, KHEZERLOU A, et al. Application of different biopolymers for nanoencapsulation of antioxidants via electrohydrodynamic processes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 97: 105170.
- [24] KURAKULA M, NAVEEN N R. Electrospraying: A facile technology unfolding the chitosan based drug delivery and biomedical applications[J]. *European Polymer Journal*, 2021, 147: 110326.
- [25] MORAIS A I S, VIEIRA E G, AFEWERKI S, et al. Fabrication of polymeric microparticles by electrospray: The impact of experimental parameters[J]. *Journal of Functional Biomaterials*, 2020, 11(1): 4.
- [26] 黄如梦. 基于静电喷涂的益生菌包埋体系的构建及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. [HUANG R M. Construction and performance of encapsulation system of probiotics based on electrospraying technology[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.]
- [27] KARIMI A, ASKARI G, YARMAND M S, et al. Development, modification and characterization of ursolic acid-loaded gelatin nanoparticles through electrospraying technique[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2020, 124: 329–341.
- [28] TAPIA-HERNÁNDEZ J A, DEL-TORO-SÁNCHEZ C L, CINCO-MOROYOQUI F J, et al. Gallic acid-loaded zein nanoparticles by electrospraying process[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(4): 818–831.
- [29] BHUSHANI J A, KURREY N K, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Nanoencapsulation of green tea catechins by electrospraying technique and its effect on controlled release and *in vitro* permeability[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 199: 82–92.
- [30] TAO L N, ZHANG T, WANG P P, et al. Shape control and stability of multicore millimetre-sized capsules using a combined monoaxial dispersion electrospraying-ionotropic gelation technique[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2021, 56(10): 5150–5159.
- [31] TSAI S, TING Y W. Synthesize of alginate/chitosan bilayer nanocarrier by CCD-RSM guided co-axial electrospray: A novel and versatile approach[J]. *Food Research International*, 2019, 116: 1163–1172.
- [32] RAMOS-HERNÁNDEZ J A, RAGAZZO-SÁNCHEZ J A, CALDERÓN-SANTOYO M, et al. Use of electrosprayed agave fructans as nanoencapsulating hydrocolloids for bioactives[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(11): 868.
- [33] NIU B, SHAO P, FENG S M, et al. Rheological aspects in fabricating pullulan-whey protein isolate emulsion suitable for electrospraying: Application in improving β -carotene stability[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 129: 109581.
- [34] DE D C L, VELÁQUEZ E, ROJAS A, et al. Developing core/shell capsules based on hydroxypropyl methylcellulose and gelatin through electrodynamic atomization for betalain encapsulation[J]. *Polymers*, 2023, 15(2): 361.
- [35] MIGUEL G A, JACOBSEN C, PRIETO C, et al. Oxidative stability and physical properties of mayonnaise fortified with zein electrosprayed capsules loaded with fish oil[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 263: 348–358.
- [36] OIKONOMOPOULOU V, STRAMARKOU M, PLAKIDA A, et al. Optimization of encapsulation of stevia glycosides through electrospraying and spray drying[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 131: 107854.
- [37] COELHO S C, GIRON A, ROCHA F, et al. Electrosprayed B-complex vitamins/zein microparticles for drug sustained release and antioxidant applications[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2024, 99(1): 217–226.
- [38] DO E J A, CRIZEL R L, CHAVES F C, et al. Thermal and irradiation resistance of folic acid encapsulated in zein ultrafine fibers or nanocapsules produced by electrospinning and electrospraying[J]. *Food Research International*, 2019, 124: 137–146.
- [39] ESCOBAR-GARCÍA J D, PRIETO C, PARDO-FIGUEREZ M, et al. Room temperature nanoencapsulation of bioactive eicosapentaenoic acid rich oil within whey protein microparticles[J].

Nanomaterials, 2021, 11(3): 575.

[40] PÉREZ-MASIÁ R, LÓPEZ-NICOLÁS R, PERIAGO M J, et al. Encapsulation of folic acid in food hydrocolloids through nanospray drying and electrospraying for nutraceutical applications [J]. *Food Chemistry*, 2015, 168: 124–133.

[41] SOLEIMANIFAR M, JAFARI S M, ASSADPOUR E. Encapsulation of olive leaf phenolics within electrosprayed whey protein nanoparticles; Production and characterization [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105572.

[42] RODRIGUES R M, RAMOS P E, CERQUEIRA M F, et al. Electrosprayed whey protein-based nanocapsules for β -carotene encapsulation [J]. *Food Chemistry*, 2020, 314: 126157.

[43] GÓMEZ-MASCARAQUE L G, LAGARÓN J M, LÓPEZ-RUBIO A. Electrosprayed gelatin submicroparticles as edible carriers for the encapsulation of polyphenols of interest in functional foods [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 49: 42–52.

[44] BIDUSKI B, KRINGEL D H, COLUSSI R, et al. Electrosprayed octenyl succinic anhydride starch capsules for rosemary essential oil encapsulation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 132: 300–307.

[45] SEVERGNINI V L S, RENGIFO A F C, DEBACHER N A, et al. Urea entrapment in cellulose acetate microparticles obtained by electrospraying [J]. *Journal of Polymer Research*, 2020, 27(12): 378.

[46] OZCAN B E, SAROGLU O, KARAKAS C Y, et al. Encapsulation of purple basil leaf extract by electrospraying in double emulsion (W/O/W) filled alginate-carrageenan beads to improve the bioaccessibility of anthocyanins [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 250: 126207.

[47] SVARC P L, GARCIA-MORENO P J, MENDES A C, et al. Encapsulation of L-5-methyltetrahydrofolate by electrospraying for food applications [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 277: 109901.

[48] GARCÍA-MORENO P J, PELAYO A, YU S, et al. Physicochemical characterization and oxidative stability of fish oil-loaded electrosprayed capsules; Combined use of whey protein and carbohydrates as wall materials [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 231: 42–53.

[49] XUE Y Y, LIAO Y W, WANG H Q, et al. Preparation and evaluation of astaxanthin-loaded 2-hydroxypropyl-beta-cyclodextrin and Soluplus® nanoparticles based on electrospray technology [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(7): 3628–3637.

[50] ERARSLAN A, KARAKAS C Y, BOZKURT F, et al. Enhanced antifungal activity of electrosprayed poly (vinyl alcohol)/chitosan nanospheres loaded with sage essential oil on the viability of *aspergillus niger* and *botrytis cinerea* [J]. *Chemistryselect*, 2023, 8(21): 296.

[51] PÉREZ-MASIÁ R, LAGARÓN J M, LOPEZ-RUBIO A. Morphology and stability of edible lycopene-containing micro- and nanocapsules produced through electrospraying and spray drying [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(2): 459–470.

[52] ZHU Y, LI S, WANG H Q, et al. Enhanced oral bioavailability of capsaicin-loaded microencapsulation complex via electrospray technology; Preparation, *in vitro* and *in vivo* evaluation [J]. *Biopharmaceutics & Drug Disposition*, 2023, 44(2): 137–146.

[53] REZEKI Y A, HAPIDIN D A, RACHMAWATI H, et al. Formation of electrosprayed composite nanoparticles from polyvinylpyrrolidone/mangosteen pericarp extract [J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31(5): 1811–1824.

[54] FUNG W Y, LIONG M T, YUEN K H. Preparation, *in vitro* and *in vivo* characterisation of CoQ10 microparticles; Electrospraying-enhanced bioavailability [J]. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2016, 68(2): 159–169.

[55] MA J G, LI T Z, WANG Q Y, et al. Enhanced viability of probiotics encapsulated within synthetic/natural biopolymers by the addition of gum arabic via electrohydrodynamic processing [J]. *Food Chemistry*, 2023, 413: 135680.

[56] ALEHOSSEINI A, SARABI-JAMAB M, GHORANI B, et al. Electro-encapsulation of *Lactobacillus casei* in high-resistant capsules of whey protein containing transglutaminase enzyme [J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2019, 102: 150–158.

[57] PREMJI Y, MITRA J. Optimization of electrospray-assisted microencapsulation of probiotics (*Leuconostoc lactis*) in soy protein isolate-oil particles using Box-Behnken experimental design [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14(9): 1712–1729.

[58] KARAKAS C Y, YILDIRIM R M, KARADAG A. Encapsulation of *Lactobacillus plantarum* ELB90 by electrospraying in a double emulsion (W1/O/W2) loaded alginate beads to improve the gastrointestinal survival and thermal stability [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(7): 3427–3436.

[59] PREMJI Y, MITRA J. Synthesis, characterization, and *in vitro* digestion of electrosprayed and freeze-dried probiotics encapsulated in soy protein isolate-sunflower oil emulsions [J]. *Food Bioscience*, 2023, 53: 102532.

[60] AMIRI S, TEYMORLOUEI M J, BARI M R, et al. Development of *Lactobacillus acidophilus* LA5-loaded whey protein isolate/lactose bionanocomposite powder by electrospraying: A strategy for entrapment [J]. *Food Bioscience*, 2021, 43: 101222.

[61] ZHANG Y F, LI B G, HAN L. Microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* KLDS 1.0391 by electrostatic spray increases viability after *in vitro* digestibility [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(2): 12416.

[62] MORENO J S, DIMA P, CHRONAKIS I S, et al. Electrosprayed ethyl cellulose core-shell microcapsules for the encapsulation of probiotics [J]. *Pharmaceutics*, 2022, 14(1): 7.

[63] GÓMEZ-MASCARAQUE L G, AMBROSIO-MARTÍN J, PEREZ-MASIÁ R, et al. Impact of acetic acid on the survival of *L. plantarum* upon microencapsulation by coaxial electrospraying [J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2017, 2017(1): 1–6.

[64] MOREIRA A, LAWSON D, ONYEKURU L, et al. Protein encapsulation by electrospinning and electrospraying [J]. *Journal of Controlled Release*, 2021, 329: 1172–1197.

[65] BERRAQUERO-GARCÍA C, PÉREZ-GÁLVEZ R, ESPEJO-CARPIO F J, et al. Encapsulation of bioactive peptides by spray-drying and electrospraying [J]. *Foods*, 2023, 12(10): 2005.

[66] ZHANG Y P, LIU C, LIN Y J, et al. Development of food-grade xylanase encapsulation using electrospray dextran microparticles [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 150: 109716.

[67] SCHMATZ D A, MASTRANTONIO D J D, COSTA J A V, et al. Encapsulation of phycocyanin by electrospraying: A promising approach for the protection of sensitive compounds [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 119: 206–215.

[68] HE J L, WANG Z Y, WEI L F, et al. Electrospray-assisted fabrication of dextran-whey protein isolation microcapsules for the encapsulation of selenium-enriched peptide [J]. *Foods*, 2023, 12(5): 1008.

[69] GÓMEZ-MASCARAQUE L G, LOPEZ-RUBIO A. Encapsulation of plant-derived bioactive ingredients through electrospraying for nutraceuticals and functional foods applications [J]. *Current Medicinal Chemistry*, 2020, 27(17): 2872–2886.

[70] BAYRAKTAR O, YAHSI Y, KÖSE M D. Electroencapsulation of trans-resveratrol in nanoparticles composed of silk fibroin and soluble eggshell membrane protein [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14(2): 334–351.

[71] ASADI M, SALAMI M, HAJIKHANI M, et al. Electrospray production of curcumin-walnut protein nanoparticles [J]. *Food Bio-*

physics, 2021, 16(1): 15–26.

[72] KARAKAS C Y, ORDU H R, BOZKURT F, et al. Electro-sprayed chitosan-coated alginate-pectin beads as potential system for colon-targeted delivery of ellagic acid[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(3): 965–975.

[73] TORRES-GINER S, MARTINEZ-ABAD A, OCIO M J, et al. Stabilization of a nutraceutical omega-3 fatty acid by encapsulation in ultrathin electrosprayed zein prolamine[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(6): N69–N79.

[74] BUSOLO M A, TORRES-GINER S, PRIETO C, et al. Electro-spraying assisted by pressurized gas as an innovative high-throughput process for the microencapsulation and stabilization of docosahexaenoic acid-enriched fish oil in zein prolamine[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 51: 12–19.

[75] KARAKAS C Y, ÖZÇİMEN D. A novel approach to production of *Chlorella protothecoides* oil-loaded nanoparticles via electro-spraying method: Modeling of critical parameters for particle sizing[J]. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 2021, 68(3): 659–668.

[76] ORMANLI E, ULUTURK B A, BOZDOĞAN N, et al. Development of a novel, sustainable, cellulose-based food packaging material and its application for pears[J]. *Food Chemistry*, 2023, 429: 136719.

[77] STOLERU E, MUNTEANU S B, DUMITRIU R P, et al. Polyethylene materials with multifunctional surface properties by electro-spraying chitosan/vitamin E formulation destined to biomedical and food packaging applications[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2016, 25(4): 295–307.

[78] SCHMATZ D A, COSTA J A V, DE M M G. A novel nanocomposite for food packaging developed by electrospinning and electro-spraying[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 20: 100314.

[79] WU Z C, ZHANG Z J, SONG X L, et al. A silver nanoparticles-poly(lactic acid) microspheres/poly(lactic acid)-thermoplastic polyurethane nanofibers hierarchical antibacterial film[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 207(2): 117773.

[80] PIRES J B, FONSECA L M, SIEBENEICHLER T J, et al. Curcumin encapsulation in capsules and fibers of potato starch by electro-spraying and electrospinning: Thermal resistance and antioxidant activity[J]. *Food Research International*, 2022, 162(8): 112111.

[81] FAN X, RONG L S, LI Y X, et al. Fabrication of bio-based hierarchically structured ethylene scavenger films via electro-spraying for fruit preservation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107837.

[82] LIU Y W, WANG S Y, LAN W T. Fabrication of antibacterial chitosan-PVA blended film using electro-spray technique for food packaging applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107: 848–854.

[83] CHALAPUD M C, BAÜMLER E R, CARELLI A A, et al. Pectin films with recovered sunflower waxes produced by electro-spraying[J]. *Membranes*, 2022, 12(6): 560.

[84] NATH V A, RAJA V, LEENA M M, et al. Co-electrospun-electrosprayed ethyl cellulose-gelatin nanocomposite pH-sensitive membrane for food quality applications[J]. *Food Chemistry*, 2022, 394: 133420.

[85] LASPRILLA-BOTERO J, TORRES-GINER S, PARDO-FIGUEREZ M, et al. Superhydrophobic bilayer coating based on annealed electrospun ultrathin poly(ϵ -caprolactone) fibers and electro-sprayed nanostructured silica microparticles for easy emptying packaging applications[J]. *Coatings*, 2018, 8(5): 173.

[86] NAZARI M, MAJDI H, GHOLIZADEH P, et al. An eco-friendly chitosan/cellulose acetate hybrid nanostructure containing *Ziziphora clinopodioides* essential oils for active food packaging applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 235: 123885.

[87] 庄晨俊, 钟宇. 静电喷涂技术及其在食品工业中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(10): 195–200. [ZHUANG C J, ZHONG Y. Electrostatic spraying and its application in food industry[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(10): 195–200.]

[88] ÇAKMAK H, KUMCUOĞLU S, TAVMAN S. Production of edible coatings with twin-nozzle electro-spraying equipment and the effects on shelf-life stability of fresh-cut apple slices[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, 41(1): 12627.

[89] YILMAZ A. Synthesis and characterization of nanoparticles possessing bioactive properties[J]. *Emerging Materials Research*, 2021, 10(2): 158–167.

[90] MASSEY L M, HETTIARACHCHY N S, HORAX R, et al. Efficacy of organic acid electrostatic spray for decontaminating *Salmonella* on cantaloupe cubes and cherry tomatoes[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(10): 13748.

[91] LEE C H, WOO H J, KANG J H, et al. Electrostatic spraying of passion fruit (*Passiflora edulis* L.) peel extract for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on fresh-cut *Lollo rossa* and beetroot leaves[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14(5): 898–908.

[92] SINGH P, DASGUPTA N, SINGH V, et al. Inhibitory effect of clove oil nanoemulsion on fumonisin isolated from maize kernels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 134: 110237.

[93] MEHTA D, SAHU G, PATEL M K, et al. Quality evaluation of tomatoes coated by an advanced electrostatic spray coating system[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2023: 6351–6361.

[94] PERETTO G, DU W X, AVENA-BUSTILLOS R J, et al. Electrostatic and conventional spraying of alginate-based edible coating with natural antimicrobials for preserving fresh strawberry quality[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(1): 165–174.

[95] JIANG Y L, YU L, HU Y W, et al. Electrostatic spraying of chitosan coating with different deacetylation degree for strawberry preservation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 139: 1232–1238.

[96] IÑIGUEZ-MORENO M, RAGAZZO-SÁNCHEZ J A, CALDERÓN-SANTOYO M. An extensive review of natural polymers used as coatings for postharvest shelf-life extension: Trends and challenges[J]. *Polymers*, 2021, 13(19): 3271.

[97] XUEDONG G, JUAN L, LIN Y, et al. Preparation of natural complex waxy structure for the evaluation of preservation performance of blueberry[J]. *Food Bioscience*, 2023, 55: 102990.

[98] KAPOOR S, GANDHI N, KAUR G, et al. Electro-spray application of guava seed oil for shelf life extension of guava fruit[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2023, 58(5): 2669–2678.

[99] KERR W L, KERR C A. Electrostatic spraying of potassium sorbate for the reduction of yeast and molds on cakes[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 2171–2179.

[100] KULAWIK P, JAMRÓZ E, KRUK T, et al. Active edible multi-layer chitosan/furcellaran micro/nanoemulsions with plant essential oils and antimicrobial peptides: Biological properties and consumer acceptance[J]. *Food Control*, 2023, 150: 109767.