

静电纺丝技术在食品抗菌保鲜中的应用研究进展

冯 坤^{1,2}, 皇甫露露^{1,2}, 相启森^{1,2}, 程 腾^{1,2}, 牛力源^{1,2}, 李 波^{1,2}, 白艳红^{1,2*}

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 郑州 450001; 2. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 郑州 450001)

摘 要: 近年来, 微/纳米功能材料在食品包装领域发挥着重要作用。静电纺丝作为一种非热物理加工手段, 以操作简便、条件温和、制备高效等特征在微/纳米材料的开发及应用方面受到研究者的青睐。特别地, 随着静电纺丝技术的发展, 以纳米纤维膜为基础开发食品抗菌包装膜材取得了较多新的研究进展。本文在简要介绍了静电纺丝技术的工作原理、影响因素、常用的基质材料、常用抗菌剂类型的基础上, 更新了静电纺丝技术在各类食品抗菌保鲜领域的研究进展; 重点综述了静电纺丝技术在肉类食品抗菌保鲜方面的研究现状; 此外, 讨论了现有研究的局限性及今后的研究方向, 以期静电纺丝技术在食品保鲜中的深入研究提供参考。

关键词: 静电纺丝; 活性包装; 抗菌剂; 肉类; 抗菌; 保鲜

Research progress on the application of electrospinning technology in food antibacterial preservation

FENG Kun^{1,2}, HUANGFU Lu-Lu^{1,2}, XIANG Qi-Sen^{1,2}, CHENG Teng^{1,2},
NIU Li-Yuan^{1,2}, LI Bo^{1,2}, BAI Yan-Hong^{1,2*}

(1. College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: Recently, functional micro/nano materials have played an important role in the field of food packaging. Electrospinning technology, as a non-thermophysical processing method, has attracted great attention of researchers in the development and application of micro/nano materials due to various advantages, such as easy operation, mild conditions, and efficient preparation. In particular, with the development of electrospinning technology, many new research progress has been made in the development of nanofiber mat-based food antibacterial packaging materials in recent years. This paper briefly overviewed the working principle, influencing factors, commonly used matrix materials and commonly used antibacterial agents of electrospinning technology, updated the research progress of electrospinning technology in the field of antibacterial preservation of various kinds of food, and mainly reviewed the research status of electrospinning technology in the antibacterial preservation of meat food. In addition, this paper discussed the limitations of existing research and future research directions, hoping to provide a reference for the in-depth research of electrospinning technology in food preservation.

KEY WORDS: electrospinning; active packaging; antibacterial agent; meat; antibacterial; preservation

基金项目: 河南省重大公益专项(201300110100)、河南省高等学校重点科研项目(23A550003)

Fund: Supported by the Major Special Project on Public Welfare of Henan Province (201300110100), and the Key Scientific Research Projects of Henan Province Colleges and Universities (23A550003)

*通信作者: 白艳红, 教授, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品安全快速检测理论与技术。E-mail: baiyh212@163.com

*Corresponding author: BAI Yan-Hong, Professor, Zhengzhou University of Light Industry, No.136 Ke Xue Avenue, Zhengzhou 450001 China. E-mail: baiyh212@163.com

0 引言

食品中富含多种营养物质,在适宜的环境条件下极易受到微生物的污染,进而发生腐败变质,甚至引发食源性疾病,对人体健康造成严重威胁^[1-2]。包装可以通过隔绝或减少食品与外界环境的接触,避免食品在运输、储藏和销售过程中受到二次污染,进而较好地保持食品的品质,延长食品的货架期^[1]。近年来,抗菌活性包装备受国内外学者的关注,其原理是通过向包装材料表面或内部添加活性物质,并以包装材料为载体释放活性物质至食品表面,以抑制微生物的生长繁殖,进而维持食品的品质及保证食品的安全性^[3-4]。静电纺丝是一种基于静电作用力的微/纳米纤维材料制备技术,其相较于传统的抗菌活性包装材料制备技术(如挤压、铸造和涂层等),具有操作简单、条件温和和可控等优势,所制备的微/纳米纤维材料具有比表面积大、孔隙率高、对活性物质包埋率高等优点,因而被广泛研究以作为禽畜肉、水产品、果蔬等食品的抗菌活性包装材料^[5-7]。目前,虽已有静电纺丝在食品抗菌保鲜方面的相关综述报道,但是多以介绍静电纺丝原理、分类及影响因素为主,概括性论述静电纺丝技术在各类食品中的应用研究。近年来,本团队一直聚焦于非热加工在肉制品抗菌保鲜方面的应用研究,且对于静电纺丝在功能因子包埋体系的构建、表征等方面开展了系列研究,深入探讨静电纺丝技术在肉类食品抗菌保鲜中的应用将是未来研究的重要方向^[8-12]。因此,本文在简要概述静电纺丝技术的基础上,综述了静电纺丝技术在食品抗菌活性包装领域的国内外最新研究进展。特别地,对静电纺丝膜在肉类食品抗菌保鲜方面的研究进行了重点论述,并对当前研究所存在的局限性和未来需要探索的方向进行了总结和展望。这不仅有利于增强研究者对静电纺丝技术在各类食品抗菌保鲜中的研究现状的了解,同时,对于进一步推动静电纺丝技术在食品抗菌保鲜中的深入研究和应用具有重要意义。

1 静电纺丝技术概述

1.1 静电纺丝的工作原理

如图 1A 所示,静电纺丝装置一般由高压电源、恒流注射泵、接收装置 3 部分构成。静电纺丝的原理是在高压静电场作用下,电场力和表面张力的共同作用使得纺丝溶液在针头处形成“泰勒(Taylor)锥”;当电场力进一步增大,液滴被拉伸形成带电射流喷向接收板,射流飞行过程中在静电斥力等相互作用力的作用下进一步劈裂、细化,经过溶剂蒸发,最终在接收板上固化成纳米纤维膜^[13-17]。静电纺丝按照纺丝溶液或针头的不同主要可以分为单轴(共混)静电纺丝、同轴静电纺丝和乳液静电纺丝,如图 1B 所示。其中,单轴静电纺丝是最常用的纺丝方法,将纺丝基质和

活性物质混合形成均一溶液后通过单一针头进行静电纺丝;与单轴静电纺丝相比,同轴静电纺丝所采用的针头为同轴针头,能够制备具有“核-壳”结构的纳米纤维;乳液静电纺丝是将预先制备的稳定乳液(油包水或水包油乳液)直接进行纺丝^[1]。

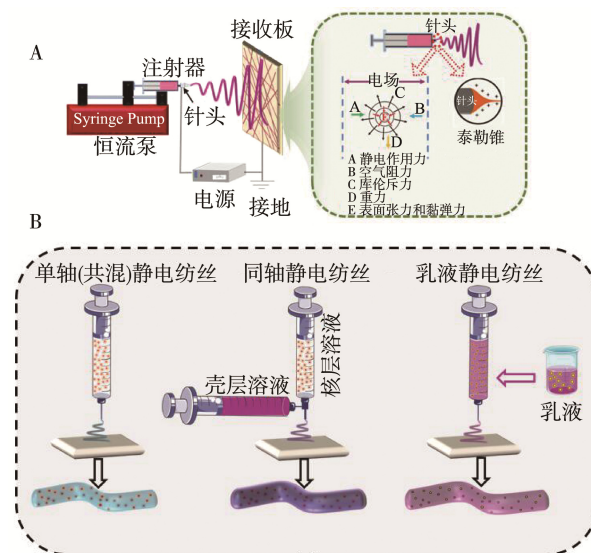


图1 静电纺丝设备(A)及分类(B)示意图

Fig.1 Schematic diagrams of electrospinning device (A) and classification (B)

1.2 静电纺丝的影响因素

聚合物溶液性质、纺丝工艺条件和环境条件是影响静电纺丝纤维直径和形貌的主要因素^[18]。确定最适的纺丝参数条件有助于制备形貌完整、直径均一的纳米纤维,进而提升其应用性能。

1.2.1 聚合物溶液性质

在静电纺丝过程中,聚合物溶液的性质(主要包括聚合物溶液的黏度、表面张力与电导率)直接影响溶液的可纺性及所得纳米纤维的形貌^[19]。一般来说,聚合物基材的分子量越大、溶液浓度越高,纺丝流体的黏度相应较高^[20-22]。如图 2 所示,低黏性纺丝射流易发生“瑞利泰勒不稳定”现象,表现为纺丝射流倾向于发生静电喷涂而形成微纳颗粒^[23]。随着聚合物溶液黏度的增加,纺丝射流逐渐由粒状转变为形貌良好的纳米纤维。但当聚合物黏度过高时,纺丝射流因未得到充分拉伸,会形成串珠状纤维^[24]。表面张力是影响聚合物溶液可纺性的另一重要因素,研究表明降低聚合物溶液的表面张力有利于连续生产直径分布均匀的纳米纤维^[25]。这主要是因为聚合物溶液的表面张力与电场力达到平衡时,泰勒锥才会形成。而进一步增加电场力,泰勒锥会形成纺丝射流,以连续均匀地制备纳米纤维^[26]。纺丝射流所受的电场力大小与聚合物溶液的电导率直接相关。在一定的纺丝电压条件下,聚合物溶液电导率过低往往导致其所受电场力不

能克服表面张力,无法形成稳定的纺丝射流^[27]。向聚合物溶液中添加一定量的盐或聚电解质会增加溶液的电导率,进而有助于静电纺丝的顺利进行。但是当溶液的电导率过高时,纺丝射流在电场中得到运动时间被缩短,纺丝溶剂不能得到充分蒸发,进而导致串珠状纤维的形成^[28]。

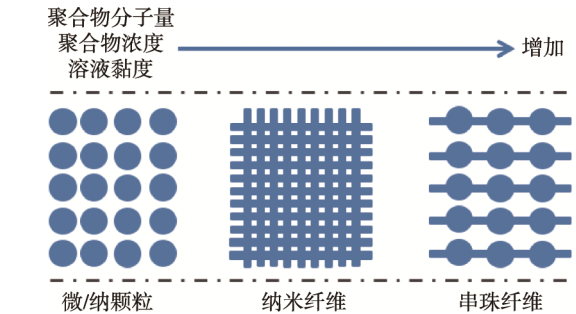


图 2 聚合物溶液性质对纳米纤维形态的影响
Fig.2 Effects of polymer solution properties on nanofiber morphology

1.2.2 工艺条件

可纺性聚合物溶液只有在适宜的纺丝工艺条件下(主要包括纺丝电压、溶液流速、接收距离)才能得到形貌完整的纳米纤维(图 3)。其中,纺丝电压直接影响纺丝针头和接收板之间的电场强度。相应地,纺丝电压过低时,聚集在“泰勒锥”处的聚合物溶液无法形成纺丝射流;纺丝电压过高时,纺丝溶液所受电场力过高,这会缩短纺丝射流在电场中的运动时间,不利于纺丝溶剂的有效挥发,从而形成串珠状纤维^[26]。相似地,在一定的纺丝电压及流速条件下,接收距离的大小也会影响电场力大小^[29-30]。而溶液流速是影响纺丝纤维产量的重要因素,适宜的溶液流速可以保证静电纺丝过程稳定持续发生^[31]。

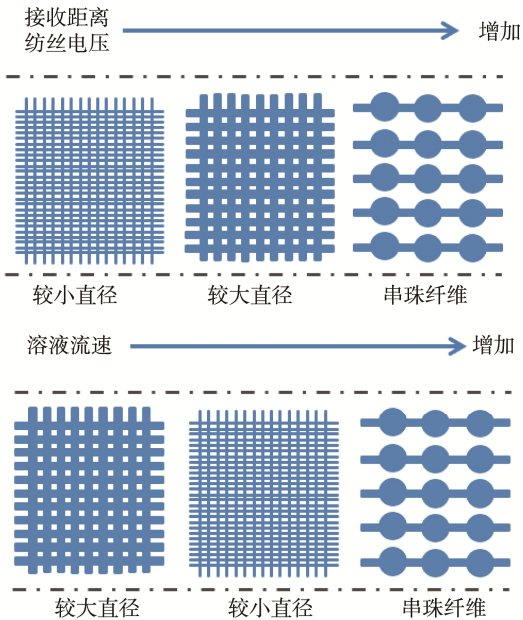


图 3 工艺条件对纳米纤维形态的影响
Fig.3 Effects of process conditions on nanofiber morphology

1.2.3 环境条件

纺丝环境的温度主要通过影响聚合物溶液的黏度来调控纺丝进程。如温度越高、纺丝液的黏度越低,纺丝射流在电场中得到充分拉伸,因此所制备的纳米纤维的直径越小;其次,纺丝过程中溶剂的挥发速率随温度的升高而逐渐增加,这同样会导致纳米纤维直径的减小^[18,32]。另外,纺丝环境的相对湿度也会影响静电纺丝纳米纤维直径的大小。比如,BAK 等^[33]对比研究了在不同相对湿度条件下(30%和 60%)所制备的胶原蛋白静电纺丝纳米纤维的形貌特征。结果发现当相对湿度为 60%时,所制备的纳米纤维直径更低。而进一步增大环境湿度,纺丝射流的溶剂因不能得到充分挥发,会引起纳米纤维直径的显著增加^[28]。

1.3 静电纺丝抗菌纤维膜基材

基于静电纺丝技术制备食品接触材料(如抗菌保鲜膜),一般是将聚合物基材和活性物质共溶于适宜的溶剂体系中,通过优化纺丝参数得到形貌良好的纳米纤维膜(见表 1)。目前,已发现的具有可纺性的聚合物基材数量不足 100 种。其中,天然来源的可纺性聚合物基材数量更是少之甚少,主要包括普鲁兰糖、玉米醇溶蛋白等^[46-47]。基于天然聚合物的静电纺丝纳米纤维膜具有生物安全性高、可生物降解等特点,但天然高分子聚合物由于亲水性强、结构稳定性弱等特点,所制备的纤维膜机械性能欠佳,这限制了其在食品包装等领域中的应用^[28]。为解决上述问题,研究者探索了具有生物相容性的合成型可纺聚合物,如 PVA、PEO 等^[15,28]。合成聚合物基材可单独或作为纺丝助剂与天然聚合物共同制备静电纺丝纳米纤维,所得纳米纤维膜具备更好的力学性能,可用于开发性能优异的食品活性包装材料。

表 1 静电纺丝制备抗菌保鲜材料常用的基材
Table 1 Substrates of preparing electrospun nanofibers

类别	名称	溶剂	助纺剂	文献
多糖类	壳聚糖	1%乙酸	PEO	[34]
	普鲁兰多糖	水	PVA	[35]
	海藻酸钠	水	PVA	[36]
	透明质酸	50%乙酸	PEO	[37]
	醋酸纤维素	乙酸/无水乙醇/水(12:4:4)	PVP	[38]
蛋白质类	瓜尔豆胶	水	PVA	[39]
	玉米醇溶蛋白	80%乙醇	PEO	[40]
	大豆分离蛋白	80%醋酸	PVA	[41]
	明胶	0.5%乙酸	PCL	[42]
	丝素蛋白	5%甲酸	PCL	[43]
	酪蛋白	5% TEA	PEO	[44]
	胶原蛋白	2%乙酸	PVA	[45]

注:聚氧化乙烯[poly(ethylene oxide), PEO]; 聚乙烯醇[poly(vinyl alcohol), PVA]; 聚乙烯吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone, PVP); 聚己内酯(polycaprolactone, PCL); 三羟乙基胺(tri-ethanol-amine, TEA)。

在食品储藏过程中, 抗菌包装材料可通过将抗菌剂不断释放到食品表面, 以抑制腐败微生物的滋生, 从而达到长时保鲜的效果^[48]。近年来, 静电纺丝技术在食品抗菌包装材料研究领域备受研究者青睐。然而, 目前的研究主要聚焦于选择不同的抗菌剂构建抗菌包装材料并验证其抗菌保鲜效果, 关于从纺丝过程出发探究纺丝条件如何影响抗菌剂释放和抗菌效果的研究尚且不足; 此外, 基于消费者食品安全意识的不断提高, 开发天然、安全的聚合物材料, 构建兼具优良机械性能与抗菌性能的食品抗菌包装材料将是未来的一个重点研究方向。

2 常用的抗菌剂类型

抗菌剂是抗菌包装材料发挥防腐保鲜效果的关键, 按照来源可将其分为合成抗菌剂和天然抗菌剂^[49]。合成抗菌剂主要包括苯甲酸及其钠盐、丙酸及其钠盐、对羟基苯甲酸酯类等化学物质; 天然抗菌剂根据其来源不同可分为动物源抗菌剂(壳聚糖、溶菌酶等)、微生物源抗菌剂[如 ϵ -聚赖氨酸(ϵ -polylysine, ϵ -PL)、乳酸链球菌素(Nisin)、纳他霉素等]和植物源抗菌剂(如植物精油、多酚类、二酮类、生物碱类等植物提取物)^[50-51]。

天然抗菌剂主要是指由动物、微生物、植物体内提取的具有抗菌活性的成分, 该类抗菌剂以其抑菌性强、来源广泛、安全性高等特点, 在抗菌包装材料研究中备受关注^[1,51]。然而, 天然抗菌剂固有的稳定性低、水溶性差等缺陷限制了其在食品中的直接使用。静电纺丝技术可以通过负载抗菌剂有效提高其稳定性, 实现其控制释放, 进而有助于其长效抗菌效果的发挥。目前, 植物精油、活性多肽、多酚是静电纺丝抗菌包装材料研究中应用最多的天然抗菌剂。植物精油作为植物源抗菌剂的代表物质, 可抑制大部分微生物的生长繁殖。GHASEMI 等^[52]采用静电纺丝技术成功地将孜然精油包埋在玉米醇溶蛋白纳米纤维中, 结果发现纤维膜具有抗菌效果, 且随着负载孜然精油浓度的提高, 纤维膜对金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)、蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)和沙门氏菌(*Salmonella enterica*)的抑菌作用显著增强; 为了降低精油的用量和挥发、提高其水溶性, 研究者还采用环糊精、脂质体等来包埋精油或通过抗菌剂复配、乳液静电纺丝等方式来制备抗菌包装膜。同样, 对于一些多酚、二酮类(姜黄素等)抗菌剂, 前期研究往往采用抗菌剂或抗菌剂/环糊精包合物与纺丝基质共混纺丝, 所得抗菌纤维膜可以实现抗菌剂的缓慢释放^[11,53-55]。Nisin 和 ϵ -PL 是两种研究较多的阳离子活性多肽。为避免该类抗菌剂与食品介质中蛋白质和脂质结合而影响其抗菌活性, 通过静电纺丝包埋不但能够提高其稳定性, 同时能够有助于抗菌剂的可控释放, 进而有效延长食品货架期^[56-57]。此外, 与上述天然抗菌剂不同, 壳聚糖作为一种阳离子多糖, 其在静电纺

丝抗菌材料研究领域的应用不但依赖其固有的抗菌性, 更重要的是其可以作为纺丝基材直接制备抗菌纤维膜。刘永旭等^[58]研究发现当壳聚糖在纺丝液中的比例由 10%增加到 30%时, 壳聚糖/PVA 纳米纤维膜对 *S. aureus* 的抑菌圈直径从 11.34 mm 增大到 14.58 mm, 抑菌效果明显增强。

目前, 以天然抗菌剂为活性成分构建静电纺丝抗菌纤维膜是食品抗菌保鲜领域的研究热点。虽然大多数天然抗菌剂的抗菌机制已被系统研究, 然而, 现有报道中尚缺乏关于静电纺丝抗菌纤维膜发挥抗菌作用的机制研究; 其次, 天然抗菌剂具有抗菌性好、生物安全性高等优点, 以天然抗菌剂为活性成分开发食品抗菌包装材料符合人们日益增长的食品安全消费需求, 未来需要进一步加大对天然抗菌剂的开发及其在食品抗菌保鲜领域的应用。

3 静电纺丝在食品保鲜中的应用

相比于传统抗菌材料制备技术, 静电纺丝以操作简单、制备高效等特点成为开发食品活性包装膜的热点技术^[59]。直接以具有抗菌功效的聚合物为纺丝基材或将抗菌剂(如植物精油、多酚类化合物、活性多肽、植物色素)添加到可纺性聚合物溶液中是利用静电纺丝技术制备食品抗菌包装膜的两种主要方式^[27]。根据所应用的产品类型, 本节重点综述了静电纺丝抗菌纳米纤维膜在禽畜肉、水产品保鲜中的应用研究。另外, 也简要更新了静电纺丝抗菌纳米纤维膜在果蔬及其他类型食品保鲜中的研究进展。

3.1 静电纺丝在禽畜肉保鲜中的应用

截止到 2020 年, 我国禽畜肉的市场需求量达到 1 亿 t, 畜牧业产值占农业总产值比重超 30%。保证禽畜肉的品质安全是维系禽畜肉市场健康发展的重要基础^[60]。禽畜肉在微生物的污染、脂肪的氧化和酸败等因素的综合作用下会发生一系列变化, 导致其丧失食用价值。其中, 微生物的繁殖是造成禽畜肉腐败变质的最主要原因^[61]。基于静电纺丝技术开发食品抗菌包装膜可作为禽畜肉保鲜的重要策略。壳聚糖是一种阳离子生物絮凝剂, 通过阻滞细菌对营养物的吸收及其代谢废物排泄来发挥杀菌和抑菌作用。 ϵ -PL 直接破坏菌体细胞结构, 导致细胞坏死。基于此, CHEN 等^[37]联合使用壳聚糖和 ϵ -PL 为纺丝基材所制备的纳米纤维膜, 可延缓鸡肉腐败进程。在 25℃条件下包裹鸡肉储藏 7 d 后, 鸡肉表面接种的鼠伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*)和肠炎沙门氏菌(*Salmonella enteritidis*)的数量分别降低了 3.17、3.12 lg CFU/g, 且鸡肉的色泽、风味等感官指标均优于对照组。ARKOUN 等^[62]利用静电纺丝技术成功制备了壳聚糖基抗菌纳米纤维膜, 并将其应用于牛肉的保鲜, 结果发现, 经 4℃储存 7 d 后, 对照组牛肉已发生变质, 而纳米纤维处理牛肉仍保持较好的品质。从各种芳香植物中提取的精油是一种具有广谱

抗菌活性的植物提取物。植物精油及其成分(如肉桂醛、香芹酚)的抗菌机理主要包括:破坏细胞膜,干扰能量代谢系统,影响全细胞蛋白质、DNA等^[63]。制备负载植物精油或其单组分的静电纺丝纳米纤维膜在解决植物精油在应用过程中易挥发、有异味的缺陷的同时发挥较好的抗菌保鲜效果。如GÖKSEN等^[64]以PVA为纺丝基材制备了PVA/月桂精油和PVA/迷迭香精油纳米纤维膜。将其应用于鸡胸肉的保鲜中,在4℃、7 d的储藏期内,PVA/月桂精油和PVA/迷迭香精油纳米纤维膜处理的鸡肉,其表面接种的*L. monocytogenes*存活量均降低了2个对数值以上,且pH、色泽等指标也优于对照组。同样,其他基于静电纺丝技术制备的负载其他精油(菊花精油^[65]、高良姜根精油^[66]、肉桂精油^[67]、百里香精油^[68])或精油单组分(紫苏醛^[69]、丁香酚^[70])的抗菌活性包装也均能有效延长原料畜肉的货架期^[71-72]。除了新鲜肉,静电纺丝抗菌膜也被用于加工肉制品的保鲜。比如,KARIM等^[73]以玉米醇溶蛋白为基材制备了负载肉桂醛的静电纺丝纳米纤维,将其应用于分别接种了5个对数值的*E. coli* O157:H7和*S. aureus* PTCC 1337的香肠中,结果发现在4℃储存10 d后,香肠样品中均未检出微生物,香肠仍保持良好的色泽、质地和感官特性。近年来,为实现废物的高值化应用,研究者也从果皮、种子、枝叶中提取抗菌活性物质,并将其用于静电纺丝抗菌膜的制备。如SURENDRHIRAN等^[74]以PEO和壳聚糖制备了负载石榴皮提取物的静电纺丝纳米纤维膜。将该纤维膜用于牛肉保鲜,经4℃储藏10 d后,纳米纤维膜可将处理组的牛肉表面菌落数由3.60 lg CFU/g降低至2.96 lg CFU/g,而对照组牛肉表面的菌落数高达6.60 lg CFU/g。

3.2 静电纺丝在水产品保鲜中的应用

水产品中营养物质丰富,但因其水分含量过高,极易滋生微生物,造成其品质发生劣变甚至引发食源性疾病^[75]。因此,水产品是常用于验证静电纺丝抗菌包装材料性能的另一重要肉类食品。例如,LI等^[76]以PLA为基材制备了负载柚皮苷的静电纺丝纳米纤维膜,并用于包裹三文鱼片(20℃),结果发现与对照组相比纳米纤维处理组的三文鱼片货架期延长了4 d。同时,该组三文鱼片的挥发性盐基氮、质构等指标均优于对照组。相似地,SHAHBAZI等^[77]利用静电纺丝技术制备了负载薄荷精油的羧甲基纤维素-明胶纳米纤维薄膜活性包装,将其应用于淡水虾虾仁的储藏保鲜(4℃),结果发现对照组在第6 d时乳酸菌(lactic acid bacteria, LAB)的数量已超过可接受限度(>6 lg CFU/g),而含2%薄荷精油纳米纤维处理组在第14 d时LAB的数量仅为4.2 lg CFU/g,且纳米纤维处理组的淡水虾虾仁的气味、色泽、质地和总体接受度等指标均优于对照组。除了单一抗菌剂纤维膜,有研究表明静电纺丝纳米纤维可以同时负载多种抗菌剂,并在水产品抗菌保鲜过程中发挥协同增效

的作用。MERAL等^[78]以PVA为基材制备了同时负载姜黄素和Nisin的静电纺丝纳米纤维膜,并将其应用于虹鳟鱼片的保鲜。结果发现4℃储藏4 d后,对照组中总需氧嗜温菌的存活量达6.61 lg CFU/g,而纳米纤维处理组仅为3.28 lg CFU/g,且纳米纤维处理组的硬度、色泽等指标均优于对照组。同样,PIRI等^[79]以壳聚糖和芦丁为抗菌剂制备复合抗菌纤维膜,所得复合纤维膜的抗菌效果明显优于单一抗菌剂纤维膜,通过两种抗菌剂的协同作用能够有效提高虹鳟鱼的储藏稳定性。此外,多单元载体体系是用于水产品抗菌保鲜的另一重要策略。该体系主要是通过静电纺丝技术与其他活性物质包埋技术(脂质体、纳米粒子等)相结合制备而得。比如,NAZARI等^[80]将制备的肉桂精油脂质体通过静电纺丝技术嵌入交联的PVA纳米纤维中,之后将复合纳米纤维应用于虾的保鲜中。结果发现4℃储藏7 d后,对照组菌落总数增加了5个对数值以上,而复合纳米纤维处理组菌落总数与初始菌落总数相比并未发生显著性变化。CEYLAN^[81]制备了负载壳聚糖纳米粒子的PVA静电纺丝纳米纤维,将其应用于虹鳟鱼鱼丸的保鲜中,于7℃储藏3 d后发现对照组中总嗜冷菌的存活量达5 lg CFU/g,而纳米纤维处理组仅为4.34 lg CFU/g,且纳米纤维处理组的pH、挥发性盐基氮等指标均优于对照组。

3.3 静电纺丝在果蔬保鲜中的应用

果品蔬菜是世界上需求量仅次于粮食的农产品。相较于发达国家果蔬贮藏能力达到总产量的70%~80%,我国的果蔬贮藏占比不足50%。且贮藏过程中由于微生物污染等原因造成的腐烂损失率更是高达总产量的25%~30%^[82]。值得注意的是,与禽畜肉及水产品不同,果蔬的可食用部分往往不直接接触抗菌涂层、活性包装材料等。因此,果蔬类生鲜食品具有更加多样化的保鲜策略。因此,本节简要综述了近几年来静电纺丝纳米纤维膜在果蔬保鲜中的应用进展。经文献分析发现,当前的研究主要侧重于以植物精油为抗菌剂的静电纺丝抗菌性纳米纤维膜的研发和应用。例如,周云令等^[83]以香罗勒精油为油相、以羧甲基壳聚糖溶液为水相所制备的水包油乳液作为纺丝流体,通过乳液静电纺丝过程开发抗菌性纳米纤维包装膜,将其应用于车厘子的常温保鲜(25℃),结果发现所开发的纳米纤维包装膜延迟了车厘子出现霉斑的时间(较对照组延迟了近2 d)、降低了车厘子的失重比例及腐烂率。LI等^[84]以聚乙烯吡咯烷酮和丁香酚的混合溶液为核层流体,以紫胶溶液为壳层流体,采用同轴静电纺丝制备了载丁香酚的核壳纳米纤维包装膜。所得到核壳纳米纤维膜可有效实现对挥发性丁香酚的有效荷载及可控释放。将其应用于草莓的常温储藏,结果发现6 d后对照组已完全腐烂,而纳米纤维膜保藏组的草莓未出现腐烂的迹象,且该组草莓样品的硬度值、可溶性固形物含量值等均优于对照组。另外,

YAO 等^[85]利用同轴静电纺丝技术将玫瑰精油包埋于玉米醇溶蛋白纳米纤维中,并探究了所制备的同轴静电纺丝纳米纤维膜在鲜切水果(金桔和香蕉)保鲜中的应用效果,结果发现与对照组相比纳米纤维处理组的鲜切金桔和鲜切香蕉的货架期分别延长了4 d和2 d。

3.4 静电纺丝在其他食品保鲜中的应用

静电纺丝制备的抗菌活性包装不仅可以延长肉制品、水产品、果蔬等的货架期,还可应用于其他食品的抗菌保鲜中。SILVA 等^[86]制备了负载12%生姜精油的大豆分离蛋白/PEO/玉米醇溶蛋白静电纺丝膜,将其包裹接种 *L. monocytogenes* 的奶酪,然后于4℃条件下进行储藏实验,结果发现第9 d时无纤维包装组中 *L. monocytogenes* 的存活量为4.39 lg CFU/g,而纳米纤维处理组仅为3.62 lg CFU/g。以上结果表明,负载抗菌剂的静电纺丝纳米纤维可以抑制奶酪中微生物的生长,进而延长奶酪的货架期。此外,静电纺丝活性包装材料还可用于烘焙食品的保藏中。FONSECA 等^[87]制备了淀粉/香芹酚静电纺丝纳米纤维,将其包裹面包后于22℃进行储藏实验,结果发现负载30%浓度的香芹酚处理组样品在第7 d时未检出微生物,而对照组已超过150 CFU/g。

4 总结与展望

静电纺丝技术可以有效地包埋抗菌物质并保持其抗菌活性,且制备的纳米纤维膜具有高比表面积、高孔隙率以及可调控的纤维形貌等优点,在食品抗菌保鲜领域中具有广阔的应用前景。通过静电纺丝技术负载天然抗菌剂能够有效提高抗菌剂的稳定性,实现抗菌剂的控缓释,进而延长食品货架期。然而,目前的研究多集中于静电纺丝制备工艺的优化及抗菌活性的验证等方面,对于抗菌剂的释放机制和抗菌机制的研究及二者之间的影响关系的探索较少,今后应通过数学模型进一步加大对抗菌剂释放动力学行为的研究;其次,为顺应人们对安全食品的消费需求,有必要探索新的天然抗菌剂或聚合物来构建高安全性的食品抗菌包装材料;另外,利用静电纺丝技术制备的纳米纤维膜的机械性能有待加强,未来可通过基材选择或表面修饰等手段来强化纤维,以满足食品包装材料的特性要求;最后,为接轨食品保鲜发展的新理念,开发兼具抗菌与新鲜度指示的智能包装材料将是未来的重点研究方向。本文通过对前期研究的论述及对当前所存在问题的剖析,以期能够为深入拓展静电纺丝技术在食品抗菌保鲜领域的应用提供参考。

参考文献

- [1] 杨宇帆. 静电纺丝技术制备肉桂醛活性纳米纤维膜及在冷却肉保鲜中的应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- YANG YF. Fabrication of cinnamaldehyde active nanofiber film by

electrospinning and its application in chilled meat preservation [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.

- [2] BATIHA GE, HUSSEIN DE, ALGAMMAL AM, *et al.* Application of natural antimicrobials in food preservation: Recent views [J]. Food Control, 2021, 126: 108066.
- [3] 李青青, 刘桂伶, 任田. 肉桂醛在食品活性包装中的抗菌应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(4): 161–168.
- LI QQ, LIU GL, REN T. Research progress on antimicrobial applications of cinnamaldehyde in food active packaging [J]. J Cere Oils Ass, 2021, 36(4): 161–168.
- [4] 杨春香, 王易芬, 李立. 活性包装释放控制的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 389–393.
- YANG CX, WANG YF, LI L. Progress in controlled release for active packaging [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37 (22): 389–393.
- [5] KUMAR TSM, KUMAR KS, RAJINI N, *et al.* A comprehensive review of electrospun nanofibers: Food and packaging perspective [J]. Compos Part B Eng, 2019, 175: 107074.
- [6] ALEHOSSEINI A, GÓMEZ-MASCARAQUE LG, MARTÍNEZ-SANZ M, *et al.* Electrospun curcumin-loaded protein nanofiber mats as active/bioactive coatings for food packaging applications [J]. Food Hydrocolloid, 2019, 87: 758–771.
- [7] VIDAL CP, VELÁSQUEZ E, GALOTTO MJ, *et al.* Antimicrobial food packaging system based on ethyl lauroyl arginate-loaded core/shell electrospun structures by using hydrophilic and hydrophobic polymers [J]. Polym Test, 2021, 93: 106937.
- [8] 杜曼婷, 黄俐, 高梦丽, 等. 介质阻挡放电低温等离子体处理对宰后羊肉品质的影响[J/OL]. 食品科学: 1-10. [2022-08-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220119.0938.002.html>
- DU MT, HUANG L, GAO ML, *et al.* Effect of dielectric barrier discharge low temperature plasma treatment on mutton quality [J/OL]. Food Sci: 1-10. [2022-08-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220119.0938.002.html>
- [9] 牛力源, 张艺林, 刘静飞, 等. 高压二氧化碳在肉品杀菌保鲜中的应用研究进展[J/OL]. 食品工业科技: 1-13. [2022-08-23]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120233.
- NIU LY, ZHANG YL, LIU JF, *et al.* Research progress on the application of high pressure carbon dioxide in meat pasteurization and preservation [J/OL]. Sci Technol Food Ind: 1-13. [2022-08-23]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120233
- [10] LIU X, LI YF, WANG SD, *et al.* Synergistic antimicrobial activity of plasma-activated water and propylparaben: Mechanism and applications for fresh produce sanitation [J]. LWT, 2021, 146: 111447.
- [11] FENG K, WEN P, YANG H, *et al.* Enhancement of the antimicrobial activity of cinnamon essential oil-loaded electrospun nanofilm by the incorporation of lysozyme [J]. RSC Adv, 2017, 7(3): 1572–1580.
- [12] FENG K, HUANG RM, WU RQ, *et al.* A novel route for double-layered encapsulation of probiotics with improved viability under adverse conditions [J]. Food Chem, 2020, 310: 125977.
- [13] 冯坤, 韦昀娜, 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 YS, WU H. Progress in applications of electrospinning/

- electrospraying based on electrohydrodynamics in the food field [J]. Food Sci, 2021, 42(15): 231–241.
- [14] MENDES AC, STEPHANSEN K, CHRONAKIS IS. Electrospinning of food proteins and polysaccharides [J]. Food Hydrocolloid, 2017, 68: 53–68.
- [15] HUANG H, SONG YD, ZHANG YQ, *et al.* Electrospun nanofibers: Current progress and applications in food systems [J]. J Agric Food Chem, 2022, 70(5): 1391–1409.
- [16] ZHANG C, LI Y, WANG P, *et al.* Electrospinning of nanofibers: Potentials and perspectives for active food packaging [J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2020, 19(2): 479–502.
- [17] LI HH, CHEN X, LU WP, *et al.* Application of electrospinning in antibacterial field [J]. Nanomaterials, 2021, 11(7): 1822.
- [18] HAIDER A, HAIDER S, KANG IK. A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology [J]. Arab J Chem, 2015, 11(8): 1165–1188.
- [19] 邓伶俐. 静电纺丝技术包埋姜黄素研究进展[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 378–387.
- DENG LL. Research progress of curcumin entrapment by electrospinning [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2022, 22(3): 378–387.
- [20] 徐聪, 李同燮, 钱珊珊, 等. 静电纺丝技术在食品领域应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(2): 370–378.
- XU C, LI TX, QIAN SS, *et al.* Advances in the application of electrospinning technology in food industry [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(2): 370–378.
- [21] 贾惜文, 王浩, 康辉, 等. 豌豆分离蛋白-普鲁兰多糖共混溶液性质及静电纺丝纳米纤维形貌的研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 8–13.
- JIA XW, WANG H, KANG H, *et al.* Properties of pea protein isolate-pullulan blended solutions and the morphology of electrospun nanofibers [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(18): 8–13.
- [22] SHAO P, NIU B, CHEN HJ, *et al.* Fabrication and characterization of tea polyphenols loaded pullulan-CMC electrospun nanofiber for fruit preservation [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 107: 1908–1914.
- [23] HOHMAN MM, SHIN M, RUTLEDGE G, *et al.* Electrospinning and electrically forced jets. I. stability theory [J]. Phys Fluids, 2001, 13(8): 2201–2220.
- [24] LEI L, CHEN SS, NACHTIGAL CJ, *et al.* Homogeneous gelation leads to nanowire forests in the transition between electrospray and electrospinning [J]. Mater Horiz, 2020, 7: 2643–2650.
- [25] 孙继帅, 段孟霞, 姜海鑫, 等. 静电纺丝技术包埋生物活性物质用于食品活性包装的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 299–306.
- SUN JS, DUAN MX, JIANG HX, *et al.* Research progress in the encapsulation of bioactive by electrospinning technique for active food packaging [J]. Food Sci, 2021, 42(19): 299–306.
- [26] WEN P, WEN Y, HUANG X, *et al.* Preparation and characterization of protein-loaded electrospun fiber mat and its release kinetics [J]. J Agric Food Chem, 2017, 65(23): 4786–4796.
- [27] 邓伶俐, 张辉. 静电纺丝技术在食品领域的应用[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 283–290.
- DENG LL, ZHANG H. Electrospinning: Application in food industry [J]. Food Sci, 2020, 41(13): 283–290.
- [28] 袁文波, 张群华, 刘媛, 等. 静电纺丝制备生物基食品活性包装纤维膜及其应用[J]. 包装工程, 2021, 42(5): 13–22.
- YUAN WB, ZAHNG QH, LIU Y, *et al.* Preparation of bio-based active food packaging fiber membrane via electrospinning and its application [J]. Packag Eng, 2021, 42(5): 13–22.
- [29] BANIKAZEMI S, REZAEI M, REZAEI P, *et al.* Preparation of electrospun shape memory polyurethane fibers in optimized electrospinning conditions via response surface methodology [J]. Polym Adv Technol, 2020, 31(10): 2199–2208.
- [30] 荣令爽, 李宇鑫, 曹云刚, 等. 静电纺丝蛋白基纳米纤维的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 450–457.
- RONG LS, LI YX, CAO YG, *et al.* Research progress on electrospun protein-based nanofibers [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(10): 450–457.
- [31] BHARDWAJ N, KUNDU SC. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique [J]. Biotechnol Adv, 2010, 28(3): 325–347.
- [32] LIU Q, ZHU JH, ZHANG LW, *et al.* Recent advances in energy materials by electrospinning [J]. Renew Sust Energ Rev, 2018, 81: 1825–1858.
- [33] BAK SY, YOON GJ, LEE SW, *et al.* Effect of humidity and benign solvent composition on electrospinning of collagen nanofibrous sheets [J]. Mater Lett, 2016, 181: 136–139.
- [34] LIN L, LIAO X, SURENDRHIRAN D, *et al.* Preparation of ϵ -polylysine/chitosan nanofibers for food packaging against *Salmonella* on chicken [J]. Food Packag Shelf Life, 2018, 17: 134–141.
- [35] QIAN YF, QI MJ, ZHENG LJ, *et al.* Incorporation of rutin in electrospun pullulan/PVA nanofibers for novel UV-resistant properties [J]. Materials, 2016, 9(7): E504.
- [36] FU RQ, LI CW, YU CP, *et al.* A novel electrospun membrane based on moxifloxacin hydrochloride/poly(vinyl alcohol)/sodium alginate for antibacterial wound dressings in practical application [J]. Drug Deliv, 2016, 23(3): 818–829.
- [37] CHEN GK, GUO JX, NIE J, *et al.* Preparation, characterization, and application of PEO/HA core shell nanofibers based on electric field induced phase separation during electrospinning [J]. Polymer, 2016, 83: 12–19.
- [38] 李可儿, 朱静文, 谢玲珑, 等. 醋酸纤维素/聚乙烯吡咯烷酮/ ϵ -聚赖氨酸纳米纤维膜的制备及其抗菌性能[J/OL]. 现代食品科技: 1–9. [2022-05-24]. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.5.0830
- LI KE, ZHU JW, XIE LL, *et al.* Preparation of cellulose acetate/polyvinylpyrrolidone/ ϵ -polylysine nanofibrous membrane and its antibacterial property [J/OL]. Mod Food Sci Technol: 1–9. [2022-05-24]. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.5.0830
- [39] LUBAMBO AF, ONO L, DRAGO V, *et al.* Tuning Fe_3O_4 nanoparticle dispersion through pH in PVA/guar gum/electrospun membranes [J]. Carbohydr Polym, 2015, 134: 775–783.
- [40] 金晓春, 安琪, 王心雅, 等. 玉米醇溶蛋白/聚环氧乙烷同轴静电纺丝负载姜黄素及其释放特性[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 61–69.
- JIN XC, AN Q, WANG XY, *et al.* Release characteristics of curcumin loaded on zein/poly(ethylene oxide) by coaxial electrospinning [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(14): 61–69.
- [41] SOUZANDEH H, JOHNSON KS, WANG Y, *et al.* Soy-protein-based

- nanofabrics for highly efficient and multifunctional air filtration [J]. *ACS Appl Mater Interf*, 2016, 8(31): 20023–20031.
- [42] 杨意鸣. 骨修复用电纺PCL基复合纤维支架的制备与性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- YANG YM. Preparation and Properties of electrospun PCL-based composite fiber scaffold for bone repair [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [43] ROY T, MAITY PP, RAMESHBABU AP, *et al.* Core-shell nanofibrous scaffold based on polycaprolactone-silk fibroin emulsion electrospinning for tissue engineering applications [J]. *Bioengineering*, 2018, 5(3): 68.
- [44] MINAEI F, RAVANDI SAH, HEJAZI SM, *et al.* The fabrication and characterization of casein/PEO nanofibrous yarn via electrospinning [J]. *Polymers*, 2019, 19(1): 154–167.
- [45] KAN Y, SALIMON AI, KORSUNSKY AM. On the electrospinning of nanostructured collagen-PVA fiber mats [J]. *Mater Today: Proc*, 2020, 33: 2013–2019.
- [46] 吴虹, 冯坤, 朱定和, 等. 静电纺蛋白质和多糖纳米纤维及其在食品行业的应用进展[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(7): 295–303.
- WU H, FENG K, ZHU DH, *et al.* Progress of electrospun protein and polysaccharide nanofiber application in food industry [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2016, 32(7): 295–303.
- [47] 石元玥, 杨宇帆, 孔保华, 等. 静电纺丝技术包埋天然酚类化合物研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 319–327.
- SHI YY, YANG YF, KONG BH, *et al.* Progress in the encapsulation of natural phenolic compounds by electrospinning [J]. *Food Sci*, 2021, 42(9): 319–327.
- [48] SAMEEN DE, AHMED S, LU R, *et al.* Electrospun nanofibers food packaging: Trends and applications in food systems [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2022, 62(22): 6238–6251.
- [49] MUNEKATA P, ROCCHETTI G, PATEIRO M, *et al.* Addition of plant extracts to meat and meat products to extend shelf-life and health-promoting attributes: An overview [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2020, 31: 81–87.
- [50] HUANG TQ, QIAN YS, WEI J, *et al.* Polymeric antimicrobial food packaging and its applications [J]. *Polymers*, 2019, 11(3): 560.
- [51] FENG K, WEN P, YANG H, *et al.* Enhancement of the antimicrobial activity of cinnamon essential oil-loaded electrospun nanofilm by the incorporation of lysozyme [J]. *RSC Adv*, 2017, 7(3): 1572–1580.
- [52] GHASEMI M, MIRI MA, NAJAFI MA, *et al.* Encapsulation of cumin essential oil in zein electrospun fibers: Characterization and antibacterial effect [J]. *J Food Meas Charact*, 2022, 16: 1613–1624.
- [53] AMIRI S, RAHIMI A. Poly(ϵ -caprolactone) electrospun nanofibers containing cinnamon essential oil nanocapsules: A promising technique for controlled release and high solubility [J]. *J Ind Text*, 2019, 48(10): 1527–1544.
- [54] ÇALLIOĞLU FC, GÜLER HK. Production of essential oil-based composite nanofibers by emulsion electrospinning [J]. *J Eng Sci*, 2020, 26(7): 1178–1185.
- [55] AYTAC Z, UYAR T. Core-shell nanofibers of curcumin/cyclodextrin inclusion complex and polylactic acid: Enhanced water solubility and slow release of curcumin [J]. *Int J Pharm*, 2017, 518(1/2): 177–184.
- [56] OPÁLKOVÁ ŠA, MOSNÁČKOVÁ K, MUSIOŁ M, *et al.* Electrospun Nisin-loaded poly(ϵ -caprolactone)-based active food packaging [J]. *Materials*, 2022, 15(13): 4540.
- [57] RAZAVI R, TAJIK H, MORADI M, *et al.* Antimicrobial, microscopic and spectroscopic properties of cellulose paper coated with chitosan sol-gel solution formulated by epsilon-poly-L-lysine and its application in active food packaging [J]. *Carbohydr Res*, 2020, 489: 107912.
- [58] 刘永旭, 张大伟. 壳聚糖/聚乙烯醇/壳寡糖抑菌纳米纤维膜的制备和性能研究[J]. *生物质化学工程*, 2020, 54(4): 30–36.
- LIU YX, ZHANG DW. Preparation and properties of bacteriostatic chitosan/PVA/chitosan oligosaccharide nanofibrous membranes [J]. *Biomass Chem Eng*, 2020, 54(4): 30–36.
- [59] 王洪江, 宋雪健, 李志江, 等. 抗菌包装材料及其在食品包装领域的研究进展[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2018, 30(4): 69–74.
- WANG HJ, SONG XJ, LI ZJ, *et al.* Research progress of antimicrobial packaging materials in food packaging [J]. *J Heilongjiang Bayi Agric Univ*, 2018, 30(4): 69–74.
- [60] CHACHA JS, OFOEDU CE, XIAO K. Essential oil-based active polymer-based packaging system: A review on its effect on the antimicrobial, antioxidant, and sensory properties of beef and chicken meat [J]. *J Food Process Preserv*, 2022. DOI: 10.1111/jfpp.16933
- [61] SMAOUI S, HLIMA HB, TAVARES L, *et al.* Application of eco-friendly active films and coatings based on natural antioxidant in meat products: A review [J]. *Prog Org Coat*, 2022, 166: 106780.
- [62] ARKOUN M, DAIGLE F, HOLLEY RA, *et al.* Chitosan-based nanofibers as bioactive meat packaging materials [J]. *Packag Technol Sci*, 2018, 31(4): 185–195.
- [63] 萨仁高娃, 胡文忠, 冯可, 等. 植物精油及其成分对病原微生物抗菌机理的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 285–294.
- SARENGAOWA, HU WZ, FENG K, *et al.* Antimicrobial mechanisms of essential oils and their components on pathogenic bacteria: A review [J]. *Food Sci*, 2020, 41(11): 285–294.
- [64] GÖKSEN G, FABRA MJ, PÉREZ-CATALUÑA A, *et al.* Biodegradable active food packaging structures based on hybrid cross-linked electrospun polyvinyl alcohol fibers containing essential oils and their application in the preservation of chicken breast fillets [J]. *Food Packag Shelf Life*, 2021, 27: 100613.
- [65] LIN L, MAO XF, SUN YH, *et al.* Antibacterial properties of nanofibers containing chrysanthemum essential oil and their application as beef packaging [J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 292: 21–30.
- [66] ZHOU CQ, ABDEL-SAMIE MA, LI CZ, *et al.* Active packaging based on swim bladder gelatin/galangal root oil nanofibers: Preparation, properties and antibacterial application [J]. *Food Packag Shelf Life*, 2020, 26: 100586.
- [67] ZHANG JJ, HUANG XW, ZHANG JN, *et al.* Development of nanofiber indicator with high sensitivity for pork preservation and freshness monitoring [J]. *Food Chem*, 2022, 381: 132224.
- [68] LIN L, ZHU YL, CUI HY. Electrospun thyme essential oil/gelatin nanofibers for active packaging against *Campylobacter jejuni* in chicken [J]. *LWT*, 2018, 97: 711–718.
- [69] WANG DB, LIU YN, SUN JY, *et al.* Fabrication and characterization of gelatin/zein nanofiber films loading perillaldehyde for the preservation of chilled chicken [J]. *Foods*, 2021, 10(6): 1277.

- [70] 王芳, 刘寒, 于栋, 等. 静电纺丝纳米纤维抑菌吸水衬垫对气调包装中冷却肉贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 357–364.
- WANG F, LIU Q, YU D, *et al.* Effect of antibacterial nanofiber water-absorbent mats prepared by electrospinning on the preservation of modified atmosphere packaged chilled meat [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(10): 357–364.
- [71] GUO M, WANG HL, WANG Q, *et al.* Intelligent double-layer fiber mats with high colorimetric response sensitivity for food freshness monitoring and preservation [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 101: 105468.
- [72] WANG C, WU LL, ZHANG Y, *et al.* A water-absorbent mat incorporating β -cyclodextrin/eugenol inclusion complex for preservation of cold fresh mutton [J]. *Food Biophys*, 2022. DOI: 10.1007/s11483-022-09734-x
- [73] KARIM M, FATHI M, SOLEIMANIAN-ZAD S. Nanoencapsulation of cinnamic aldehyde using zein nanofibers by novel needle-less electrospinning: Production, characterization and their application to reduce nitrite in sausages [J]. *J Food Eng*, 2021, 288: 110140.
- [74] SURENDRHIRAN D, LI CZ, CUI HY, *et al.* Fabrication of high stability active nanofibers encapsulated with pomegranate peel extract using chitosan/PEO for meat preservation [J]. *Food Packag Shelf Life*, 2020, 23: 100439.
- [75] 徐宇辰. 阿魏酸甲酯对腐败希瓦氏菌的抑菌机制及其同轴静电纺丝膜的制备与保鲜应用[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.
- XU YC. Antibacterial mechanism of methyl ferulate against shewanella putrefaciens and its application in coaxial electrospinning membrane [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.
- [76] LI TT, WANG DF, REN LK, *et al.* Preparation of pH-sensitive polylactic acid-naringin coaxial electrospun fiber membranes for maintaining and monitoring salmon freshness [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 188: 708–718.
- [77] SHAHBAZI Y, SHAVISI N, KARAMI N, *et al.* Electrospun carboxymethyl cellulose-gelatin nanofibrous films encapsulated with *Mentha longifolia* L. essential oil for active packaging of peeled giant freshwater prawn [J]. *LWT*, 2021, 152: 112322.
- [78] MERAL R, ALAV A, KARAKAS CY, *et al.* Effect of electrospun nisin and curcumin loaded nanomats on the microbial quality, hardness and sensory characteristics of rainbow trout fillet [J]. *LWT*, 2019, 113: 108292.
- [79] PIRI H, MORADI S, AMIRI R. The fabrication of a novel film based on polycaprolactone incorporated with chitosan and rutin: potential as an antibacterial carrier for rainbow trout packaging [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2021, 30(5): 683–690.
- [80] NAZARI M, MAJDI H, MILANI M, *et al.* Cinnamon nanophytosomes embedded electrospun nanofiber: Its effects on microbial quality and shelf-life of shrimp as a novel packaging [J]. *Food Packag Shelf Life*, 2019, 21: 100349.
- [81] CEYLAN Z. Use of characterized chitosan nanoparticles integrated in poly(vinyl alcohol) nanofibers as an alternative nanoscale material for fish balls [J]. *J Food Saf*, 2018, 38(6): e12551.
- [82] 许超群, 梁旭茹, 岳淑丽, 等. 基于果蔬保鲜的活性包装技术研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-7. [2022-05-22]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029803
- XU CQ, LIANG XR, YUE SL, *et al.* Research progress on the application of active packaging technology for fruit and vegetable preservation [J/OL]. *Food Ferment Ind*: 1-7. [2022-05-22]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029803
- [83] 周云令, 魏娜, 仇洪涛, 等. 乳液静电纺丝纤维膜在车厘子保鲜中的应用[J]. 数字印刷, 2021, (2): 91–96.
- ZHOU YL, WEI N, QIU HT, *et al.* Application of emulsion electrospinning nanoscale films for cherry preservation [J]. *Digit Print*, 2021, (2): 91–96.
- [84] LI YY, DONG QF, CHEN JW, *et al.* Effects of coaxial electrospun eugenol loaded core-sheath PVP/shellac fibrous films on postharvest quality and shelf life of strawberries [J]. *Postharv Biol Technol*, 2020, 159: 111028.
- [85] YAO ZC, CHANG MW, AHMAD Z, *et al.* Encapsulation of rose hip seed oil into fibrous zein films for ambient and on demand food preservation via coaxial electrospinning [J]. *J Food Eng*, 2016, 191: 115–123.
- [86] SILVA FT, CUNHA KF, FONSECA LM, *et al.* Action of ginger essential oil (*Zingiber officinale*) encapsulated in proteins ultrafine fibers on the antimicrobial control in situ [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 118: 107–115.
- [87] FONSECA LM, SOUZA EJD, RADÜNZ M, *et al.* Suitability of starch/carvacrol nanofibers as biopreservatives for minimizing the fungal spoilage of bread [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 252: 117166.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介



冯 坤, 讲师, 主要研究方向为基于静电流体技术的食品微纳米材料的制备与应用研究, 涉及活性物质包埋与递送、食品活性包装及安全检测材料构建等。

E-mail: fengkun_89@163.com



白艳红, 教授, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品安全快速检测理论与技术。

E-mail: baiyh212@163.com