

静电纺丝制备抗氧化纳米材料在食品中的应用

赵汝霞, 王文娟, 杨维巧*, 段晓亮, 张智航, 李喜宏

(天津科技大学食品科学与工程学院 天津 300450)

摘要 因人工合成抗氧化剂易造成潜在致癌、致畸等健康风险,故开发天然、安全、高效的植物源抗氧化剂替代合成抗氧化剂,已成为食品保鲜领域的发展趋势。然而,多数抗氧化活性组分存在稳定性差、持效性短等应用缺陷。将功能组分包埋在纳米递送载体,是实现药物或食品活性组分高效利用的国际前沿技术。将多学科交叉、基础理论与新型产品开发紧密联系,利用纳米材料极高的比表面积和多样的表面控释结构,实现功能因子微量添加高效利用的效果,展现出巨大的研发与应用价值,已成为近年来国内外研究的热点。本文概述静电纺丝技术的原理,重点阐述近年来静电纺丝制备抗氧化纳米功能材料在食品领域的最新研究进展及所面临的问题,为今后抗氧化材料的研发提供信息支持。

关键词 静电纺丝; 食品保鲜; 抗氧化剂; 纳米纤维; 综述

文章编号 1009-7848(2024)10-0425-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.10.039

天然抗氧化剂来源广泛、使用安全,具有抗氧化、抗炎、抗癌和抗衰老等功效,被广泛应用于食品、医药等多个领域。其通过有效释放氢离子,抑制氧化过程产生的过氧化物或阻碍活性氧自由基的生成,可最大限度地减少氧化应激和活性氧(ROS)对食品介质或人体细胞造成的不必要损害,对于提升食品品质与营养价值,保证人民生命健康具有至关重要的作用^[1]。然而,多数天然来源抗氧化剂存在稳定性差、易降解、生物利用度低的缺陷^[2]。近年来,封装技术(微胶囊化或制备抗氧化活性薄膜)成为提升抗氧化剂稳定性的重要方式。其中,微胶囊化包埋技术主要通过将抗氧化剂包裹在以天然或合成高分子聚合物为壁材的胶囊结构中,形成具有密封囊膜的微小粒子,进而保护抗氧化剂免受外界环境破坏,然而,现阶段微胶囊制备工艺,如逐层自组装、超临界等,存在包埋率低,工艺繁琐复杂,产品稳定性差等缺陷^[3]。将抗氧化剂包封在以聚合物为基质形成的薄膜基材中,可以提高抗氧化剂稳定性。然而,传统膜制备工艺,如溶剂浇铸、熔融挤出等均为高温制备方式(100~300℃),极易造成热敏性组分活性破坏。此外,膜

界面阻隔性和有限比表面积限制了抗氧化活性成分与食品介质的充分接触^[4]。随着纳米技术的发展,将功能组分包埋在纳米递送载体,是实现药物或食品活性组分高效利用的重要方式。因其极高的比表面积和多样的表面控释结构,故可以实现功能因子微量添加及高效利用,展现出巨大的应用价值,成为近年来国内外研究热点。

在已报道的抗氧化纳米材料制备技术中(静电纺丝法、自组装法、模板合成法、相转化法等),静电纺丝技术属于低温成型技术,是现阶段唯一能够实现连续制备微纳米尺度超细纤维的微纳米材料制备方法,具有制备工艺简便,纺丝形貌稳定可控,可规模化生产,成本低廉等优势。制备的纳米材料具有以下特点:首先,纤维直径分布在低至几十至几百纳米尺度,形成独特的“蛛网”状结构,具有极高的比表面积,可发挥纳米材料小尺寸效应,大幅提高活性功能组分表面能和反应效率^[5];其次,多孔状载体界面促进功能因子与食品介质的有效渗入和扩散,有利于其与食品介质充分接触^[6-7];再次,大量研究证实聚合物为成纤基体包埋活性因子,为功能因子提供“保护层”,显著提高抗氧化活性成分的稳定性。最后,聚合物表面易功能化,通过改性、接枝修饰高分子表面官能团,可以实现活性因子缓控释放,有效克服活性成分持效性短、稳定性差的问题,同时满足个性化定制与功能调控需求。与传统膜材料相比,抗氧化纳米纤维材料展现出无可比拟的优越性。

收稿日期: 2023-10-15

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2021CXGC010809);

中央级公益性科研院所基本科研项目(zx2211)

第一作者: 赵汝霞,女,硕士

通信作者: 杨维巧 E-mail: ywq@ags.ac.cn

近年来,有大量关于抗氧化纳米材料研制的相关报道。如 Cheng 等^[8]汇总了应用纳米技术(纳米颗粒、纳米纤维、纳米晶体和纳米乳液)制备抗氧化纳米材料的最新进展,重点综述纳米抗氧化材料在肉类、海鲜、水果、蔬菜等食品保鲜中的应用,提出纳米材料在食品领域应用的展望与挑战。Brito 等^[9]以多酚抗氧化剂为对象,对比分析普通薄膜、静电纺丝纳米纤维膜和自组装涂层技术制备抗氧化材料的优缺点,并详细阐述3种技术在食品包装上的应用现状。目前,关于抗氧化材料的综述主要集中于抗氧化纳米材料制备方法、纳米材料制备工艺以及抗氧化作用研究进展。依据抗氧化剂来源不同,天然抗氧化剂主要分为维生素类、多酚类、抗氧化肽类等。虽然超过150种天然提取物应用于抗氧化领域,但是,从抗氧化剂分类角度综述静电纺丝制备抗氧化纳米功能材料在食品领域的应用鲜有报道。本文概述静电纺丝技术的原理,重点阐述近年来静电纺丝制备抗氧化纳米功能材料在食品领域的最新研究进展及所面临的问题,为今后研发功能性纳米新材料提供重要依据。

1 静电纺丝技术

1.1 静电纺丝技术历史及原理

20世纪30年代,Formhals公司首次利用高压静电原理制备纤维。1964年到1969年,Taylor通过数学建模和理论计算阐明了模拟流体静电纺丝的形成机制。20世纪90年代,Reneker课题组以较高分子质量的聚环氧乙烷/水溶液为纺丝溶液,制备出平均直径分布在 $0.05\sim 5\ \mu\text{m}$ 之间且具有不同形态的微纳米纤维^[10]。自此,静电纺丝技术逐渐成熟。

静电纺丝属于非热加工技术,根据调控对象的目标需求,可灵活选择成纤基材及功能因子,从而设计、制备多功能于一体的复合型材料,具有可纺材料多样化,纺丝成本低,操作工艺简单,材料一体成型等多项优势。纺丝装置主要由高压电源、注射器/泵和接收器三部分组成(如图1所示)。静电纺丝过程中流体匀速推注至进样针头,在末端呈现半球状带电液滴,随着电场强度不断增大至临界阈值后,带电液滴克服其表面张力,发生弹性形变,沿电场力方向呈螺旋状拉伸形成Taylor锥^[11],其间伴随着纤维束的劈裂细化和弯曲移动。在纺丝射流喷射过程中,溶剂逐渐挥发,溶质固化,最

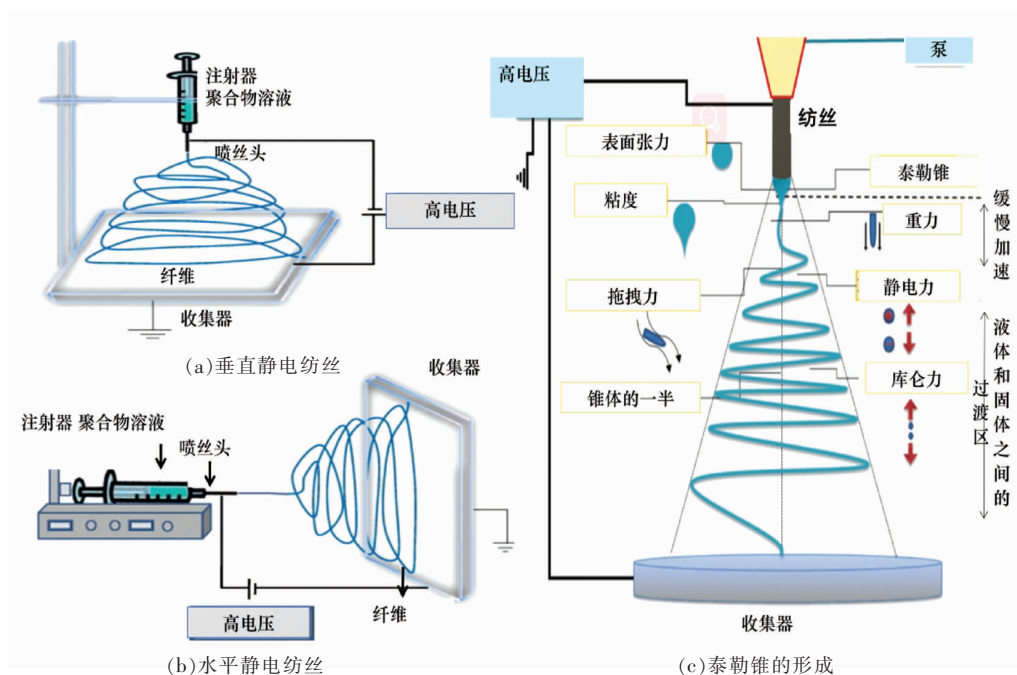


图1 静电纺丝原理图^[13-14]

Fig.1 Schematic diagram of electrospinning^[13-14]

终在金属收集器表面形成纳米纤维薄膜结构^[12]。目前,其已广泛应用于生物医学工程、可再生能源、传感器、过滤分离以及食品工程等领域(如图 2 所示)。

1.2 静电纺丝技术分类

依据进样类型、接收装置、原料类别不同,静电纺丝有多种分类方式(如图 3 所示)。根据进样类型分为单轴、同轴、三轴和多轴静电纺丝^[15];根据接收装置分为平板静电纺丝、滚筒静电纺丝和多电极式静电纺丝;根据原料类别分为熔体静电纺丝、乳液静电纺丝和共混静电纺丝^[16]。目前关于静电纺丝技术的报道主要集中在单轴静电纺丝和同轴静电纺丝方面。

1.2.1 单轴静电纺丝 单轴静电纺丝是将聚合物和活性物质溶解在同一溶剂体系中,使用单针头进样方式制备功能性纳米纤维膜的方法^[17],因其具有一次成型、操作简便的特点,利用单轴静电纺丝技术已成为现阶段开展功能性新材料最主要的制备方式。通常情况下,将生物活性物质均匀包埋高分子聚合物构建的纳米纤维载体中,可较好地控制活性物质释放速率。诸如对姜黄素、月桂酸盐、精油、抗氧化肽类等活性物质进行包埋封装,均显著性提高天然活性组分的缓释速度和环境稳定性^[18]。

1.2.2 同轴静电纺丝 同轴静电纺丝是制备具有核-壳结构的纳米纤维的常用手段,解决单纤维封装活性物质迸发性释放的问题。其溶液喷射装置由两根同轴不同内径的毛细管组成,分别用于储存核层溶液和壳层溶液(如图 4 所示)^[19]。纺丝时两种溶液同时注入同心喷丝头,通过内外毛细管输送,在高压下形成复合 Talor 锥和稳定的同轴射流。同轴射流通过静电力拉伸形成具有核-壳结构的纳米纤维,可将生物活性物质包埋在纳米纤维核层,通过壳层保护活性物质,使其免受外界环境的影响,提高了纳米纤维对活性物质的保护作用^[20]。

1.2.3 三轴静电纺丝 三轴静电纺丝的喷丝板由 3 个同心针组成,通过不同注射泵输送不同聚合物溶液,使其在喷丝板的尖端汇合,在静电场力作用下实现三轴射流,最终形成具有核-芯-壳结构的纳米纤维(图 5)^[13]。三轴纳米纤维的核-芯-壳结构为功能因子提供更强的保护作用,使活性物质

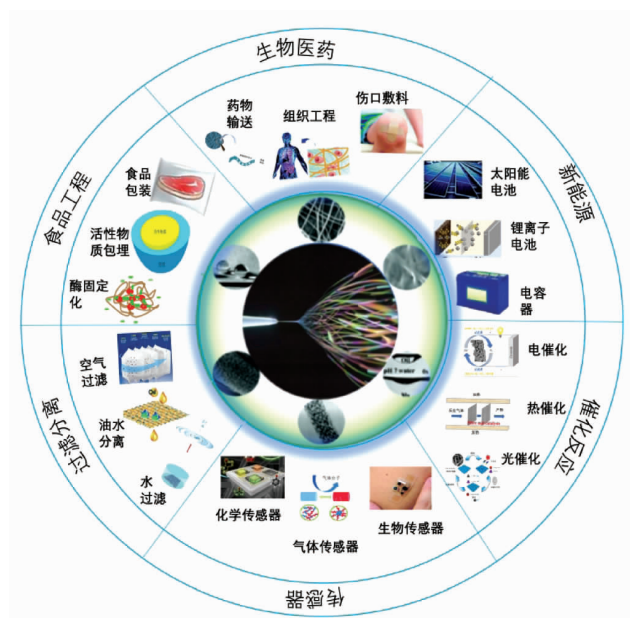


图 2 静电纺丝的应用

Fig.2 Application of electrospinning

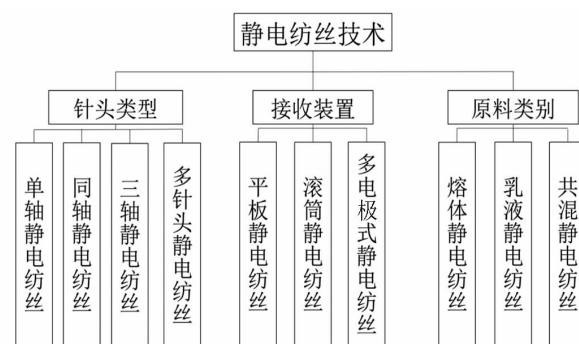


图 3 静电纺丝分类示意图

Fig.3 Schematic diagram of classifications of electrospinning

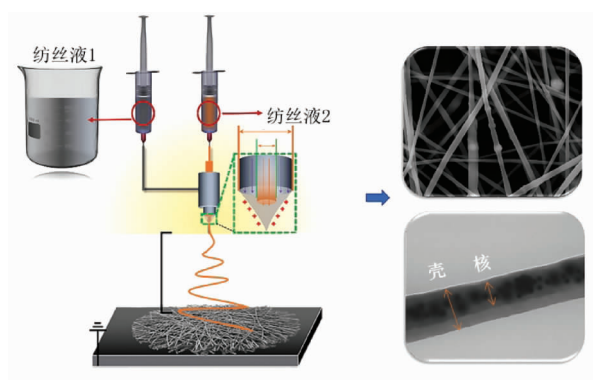


图 4 同轴静电纺丝示意图^[21]

Fig.4 Schematic diagram of coaxial electrospinning^[21]

更稳定,作用时间更持久。Daewoo 等^[22]分别使用单轴、同轴以及三轴静电纺丝技术制备了含有乳链菌肽的纳米纤维,其中单轴电纺纤维和同轴电纺纤维显示出相对较弱的杀菌活性,灭菌效果仅维持 1~2 d[细菌灭活率>99% (2 lg kill)],而三轴电

纺纤维膜可提供长达 5 d 的杀菌活性 [细菌灭活率>99.99% (4 lg kill)]。然而,由于其制备工艺相对复杂繁琐,目前关于三轴静电纺丝的研究报道较少。

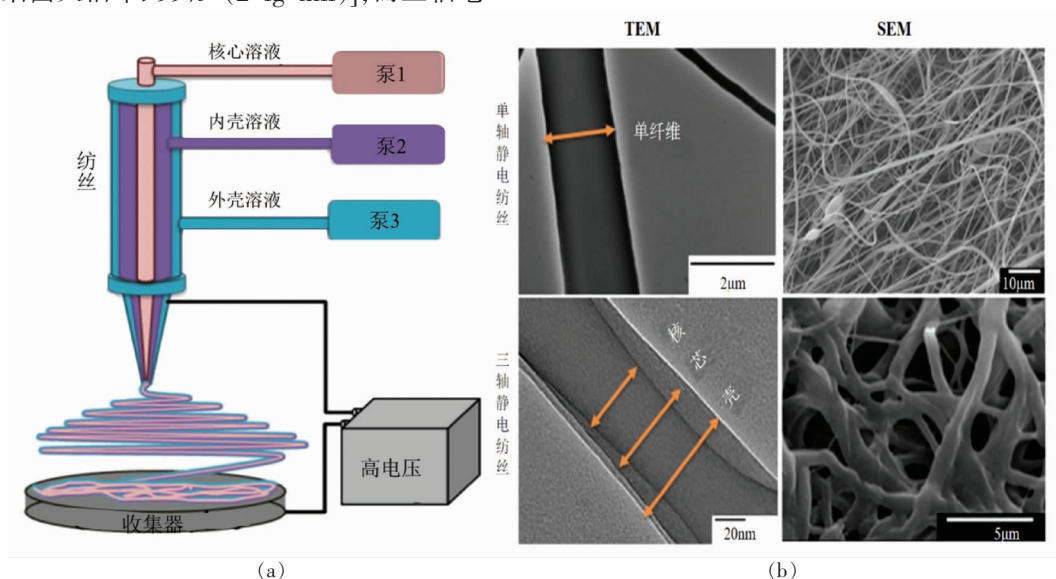


图 5 三轴静电纺丝示意图(a)和单轴和三轴纳米纤维的透射电子显微镜和扫描电子显微镜图(b)^[13]

Fig.5 Schematic diagram of triaxial electrospinning (a) and transmission and scanning electron microscopy images of uniaxial and triaxial nanofibers (b)^[13]

2 静电纺丝制备抗氧化纳米功能材料

抗氧化剂依据来源不同,主要分为合成抗氧化剂和天然抗氧化剂,通常作为食品添加剂以单一或复合形式被使用。合成抗氧化剂例如 BHA、PG 均属于酚型抗氧化剂,通过提供氢原子(H)与自动氧化产生的游离基 R·结合生成分子(RH),本身则形成稳定、低能量的氧化剂自由基,从而抑制氧化。具有来源丰富、价格低廉、清除效率高的特点,已广泛应用于食品工业^[23]。Li 等^[24]针对 BHA 易氧化的问题,利用静电纺丝技术将 BHA 封装在明胶(Gelatin, GA)形成的纤维载体中,成功研制出包封率 90%的功能化 BHA/GA 纤维膜,提高了 BHA 抗氧化活性实现缓慢释放。Wang 等^[25]为延长 PG 的释放时间,将 PG 包封在明胶、葡萄糖制备的多层复合纤维膜中,其释放时间延长了 2 倍且表现出持续的抗氧化活性。然而,合成抗氧化剂存在潜在食用安全风险,已报道的研究发现 BHA 对人类星形胶质细胞具有高度细胞毒性,导致大脑和神经发育中断;特丁基对苯二酚(Tert-butyl hy-

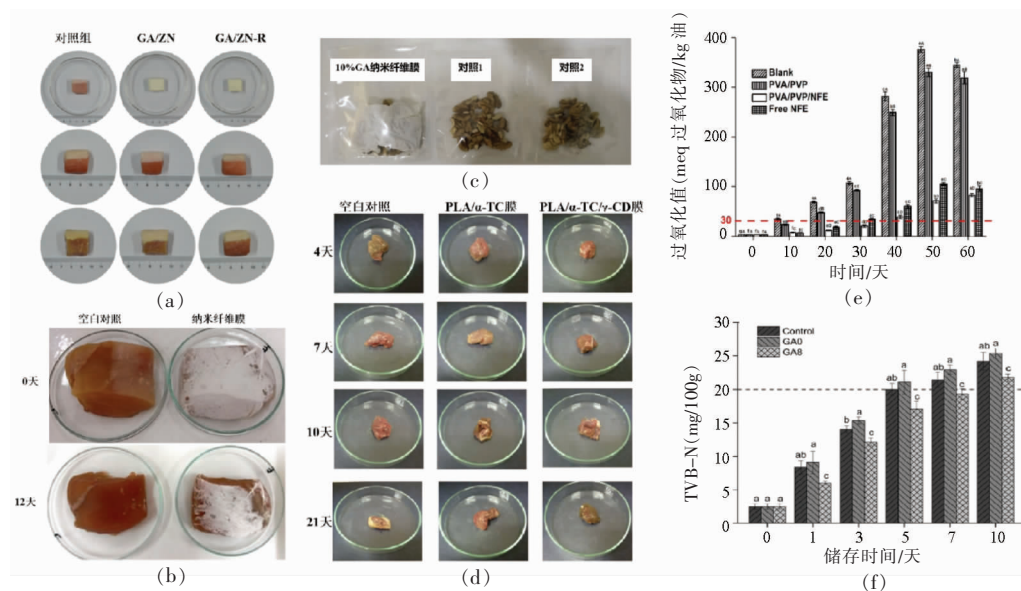
droquinone, TBHQ)及其代谢产物 2-叔丁基-对二醌攻击细胞核内 DNA,降低谷胱甘肽水平,增加活性氧含量,诱导氧化应激反应,极易诱导人体发生癌变^[26]。美国食品药品监督管理局(FDA)已于 1997 年将 2, 6-二叔丁基-4-甲基苯酚(2,6-Bis(1,1-dimethylethyl)-4-methylphenol, BHT)从食品添加剂公认安全一览表“GRAS 认证”中删除;欧盟禁止 BHA 应用于油脂抗氧化;日本、欧盟等国家尚未批准使用 TBHQ。针对合成抗氧化剂添加引起的潜在食品安全危害,开发天然来源高效、安全的抗氧化剂已成为今后必然发展趋势。

天然抗氧化剂安全无毒,低剂量添加能实现高抗氧化活性的调控作用,是合成抗氧化剂的理想替代品^[27]。然而,多数天然抗氧化剂自身存在溶解度低、稳定性差等缺陷,在实际应用中半衰期短,易降解。此外,以抗氧化剂形式直接添加往往造成短时间快速释放的效果,往往无法达到长期高效的抗氧化效果。某些天然抗氧化剂如没食子酸、茶多酚自身具有苦涩味,过量添加会破坏食品

原有风味。如何解决抗氧化剂在实际应用中的问题是食品抗氧化剂开发中长期面临的一项重要而紧迫的任务。

利用静电纺丝技术将抗氧化剂与聚合物基质相结合制备抗氧化纳米功能材料,为抗氧化剂的高效利用提供了一种全新思路。其制备的纳米材料具有多孔状纤维结构和极高比表面积,为活性成分到达目标氧化位点提供了较低的渗透阻力。相对于其它包埋技术,静电纺丝技术制备的纳米纤维对抗氧化活性物质具有更高的封装效率以及可控释放的技术优势,能显著提高抗氧化剂活性。

功能性纳米材料作为食品领域的新兴技术,其研究与应用发展迅速,目前已涵盖食品包装、活性物质包埋、酶固定化、饮料过滤以及食品检测等多个方向^[12]。目前已报道的抗氧化纳米纤维中包埋的天然抗氧化成份,主要包括维生素、多酚(槲皮素、白藜芦醇、没食子酸、香芹酚等)、抗氧化肽(藻类生物肽、鱼蛋白源抗氧化肽等)、天然色素(姜黄素、 β -胡萝卜素)以及精油(八角茴香精油、当归精油、月桂和迷迭香精油)等。下文详细阐述静电纺丝包埋天然抗氧化剂制备的抗氧化纳米功能材料在食品领域的研究进展。



注:(a) GA/ZN 与 GA/ZN-R 纳米纤维膜在猪肉保鲜中的应用^[39]; (b) 生物肽/PCL 纳米纤维在鸡肉保鲜中的应用^[47]; (c) 负载 10% 没食子酸纳米纤维包装在核桃中的应用^[40]; (d) PLA/a-TC、PLA/a-TC/γ-CD 纳米纤维包装在牛肉保鲜中的应用^[29]; (e) 用 PVA/PVP/NFE 纳米纤维膜保存鱼油的过氧化值^[37]; (f) 用 COL/GA/ZN 纳米纤维膜保存罗非鱼的 TVB-N 值^[41]。

图 6 静电纺丝膜在食品保鲜中的应用

Fig.6 Application of electrospinning film in food preservation

2.1 维生素

维生素 E(Vitamin E, VE), 又称为 α -生育酚(α -Tocopherol, α -TC), 是食品抗氧化调控中广泛使用的抗氧化剂之一, 在自然界中分布广泛、含量丰富且抗氧化活性强^[28]。主要通过阻断自由基的链式反应, 与过氧自由基作用生成过氧化氢和 α -TC 自由基, 从而达到抗氧化调控作用。

Aytac 等^[29]利用环状糊精(γ -Cyclodextrin, γ -CD)内部疏水、外部亲水的筒形结构特性, 将 α -TC 与 γ -CD 络合增强 α -TC 的溶解度, PLA 作为纺丝基材制备 α -TC/γ-CD/PLA 纳米纤维膜(α -TC

含量相对于聚合物 5%), 该纤维膜对 DPPH 自由基清除率高达 97%, 包封牛肉储存 21 d 后牛肉中硫代巴比妥酸反应物质含量为 0.78 mg/kg, 显著低于未包装肉样(1.55 mg/kg)(图 6d)。Dumitriu 等^[30]研发了一种具有高抗氧化活性的聚己内酯/VE 纤维膜。VE 包埋量为 10 wt% 时, 该纳米纤维膜 DPPH 自由基清除率达到 90%, 可用于食品抗氧化包装, 延长食品保质期。

2.2 多酚

多酚是天然抗氧化剂中来源最为丰富的生物活性物质, 通常以糖苷形式存在, 目前在植物中已

鉴定出超过 8 000 种酚类结构,可分为黄酮、二苯乙烯、酚酸三大类^[31-32]。依据作用机制不同,多酚抗氧化剂作用机制主要分为以下 3 种(如图 7 所示):1)氢原子转移机制:酚类抗氧化剂(AH)向自由基底物提供 1 个 H 原子,产生非自由基底物(RH/ROH 或 ROOH)和抗氧化自由基(Ao)以阻断氧化反应;2)单电子转移机制:抗氧化剂转移一个电子到氧化剂分子上,形成具有偶数电子能量稳定的 R(阴离子)基团以及活性较低的 ArOH(阳离子自由基)基团;3)过渡金属螯合:酚类化合物通过与金属离子形成络合物,直接抑制 Fe³⁺的还原,减少活性氧自由基的形成^[33]。

目前应用在抗氧化功能纳米纤维材料中的多酚化合物主要有青天葵乙酸乙酯提取物、槲皮素、白藜芦醇、没食子酸、单宁酸、香芹酚以及茶多酚等。

2.2.1 黄酮 黄酮是多酚中最常见的一类物质,占人类膳食总多酚的 60%^[34]。在植物体内大部分黄酮以黄酮糖苷的形式存在,通过氢原子转移机制或与金属离子形成螯合物以阻碍氧化反应的发生。槲皮素、高良姜精以及芹菜素等都属于黄酮类化合物。

槲皮素(Quercetin, QUE)是黄酮类抗氧化剂的主要代表物质,多存在于槐米、侧柏叶、高良姜、三七、银杏等植物中。Aytac 等^[35]为提高 QUE 的水溶性和稳定性,利用静电纺丝技术将物质的量比 1:1 的 QUE 与 γ -CD 络合物封装到玉米醇溶蛋白(Zein, ZN)中,制备了 QUE/ γ -CD - IC/ZN 纳米纤维膜。该纤维膜 DPPH 自由基清除率达到 97%,显著高于 ZN 纳米纤维和 QUE/ZN 纳米纤维(不含 γ -CD);为延缓 QUE 的释放速率,Stoyanova 等^[36]制备了醋酸纤维素(Cellulose acetate, CA)/QUE/聚乙二醇(Polyethylene glycol, PEG)纤维材料。CA/QUE/PEG 纤维中 QUE 可持续释放 24 h,释放量达 85.30%;当 QUE 浓度为 10 wt%时,抗氧化活性高达 94.40%。Wen 等^[37]为提高青天葵乙酸乙酯提取物(*Nervilia fordii*, NFE)的稳定性及抗氧化活性,利用静电纺丝技术成功将 NFE 包埋在聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)和聚乙烯吡咯烷酮(Polyvinyl pyrrolidone, PVP)多孔状纳米纤维载体中,并将该材料应用于鱼油抗氧化调控(图

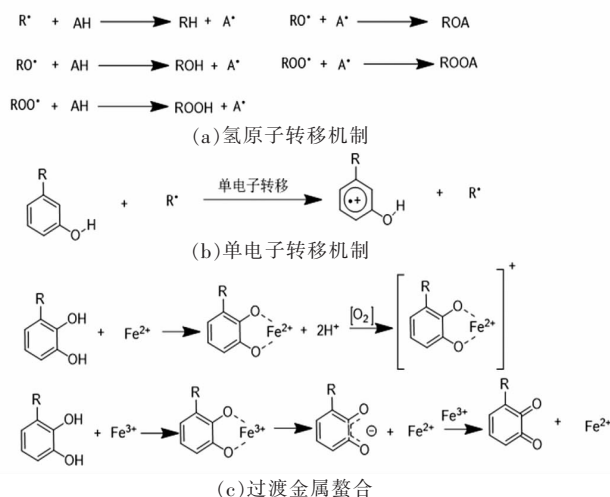


图 7 多酚类化合物抗氧化机制^[33]

Fig.7 Antioxidant mechanism of polyphenols^[33]

6e)。结果显示,膜处理组比游离 NFE 处理组,鱼油保质期延长 10 d,证实静电纺丝纳米包埋技术能够有效提高 NFE 稳定性及抗氧化活性。

2.2.2 二苯乙烯 二苯乙烯分布广泛,目前至少在 21 个科 31 个属的几十种植物中发现了此类化合物。二苯乙烯类抗氧化剂作用机制主要通过氢原子转移机制或单电子转移机制发挥抗氧化作用。其中,白藜芦醇(Resveratrol, R)是二苯乙烯类化合物的代表性活性组分,与维生素 C、维生素 E 等其它抗氧化剂相比具更强的抗氧化活性。针对白藜芦醇生物利用度低,化学性质不稳定的问题,Seethu 等^[38]以乳清分离蛋白/普鲁兰共混物为基材,采用静电纺丝技术包埋白藜芦醇制备抗氧化功能材料,包埋后的白藜芦醇能维持原有抗氧化活性并实现较高稳定性。采用透析袋法进行体外模拟消化试验,结果显示消化 7 h 后,乳清分离蛋白/普鲁兰-白藜芦醇释放率与对照组(未包埋)相比,释放速率显著性降低 25.30%,以乳清分离蛋白/普鲁兰为纳米递送载体能成功实现白藜芦醇缓控释放;Li 等^[39]以明胶/玉米醇溶蛋白复合物高效包埋白藜芦醇制备 GA/ZN-R 静电纺丝纳米纤维膜材料,将其用于猪肉保鲜(图 6a),检测各组猪肉总挥发性碱性氮水平(TVB-N)发现空白组在第 6 天 TVB-N 为 16.3 mg/100 g 腐烂严重(根据 GB 2707-2016,猪肉 TVB-N 限量 15 mg/100 g),

而GA/ZN-R对猪肉的腐烂有明显的抑制作用(第9天时TVB-N为15.0 mg/100 g),即GA/ZN-R可有效延长猪肉的保质期3 d,可见该材料在食品保鲜方面表现出良好的应用前景。

2.2.3 酚酸 酚酸类化合物主要以糖、酯类以及有机酸的形式存在于苍耳草、东方肉穗草等某些禾本科中药中,通过氢原子转移机制实现抗氧化作用。没食子酸(Gallic acid, GA)、茶多酚、香芹酚、桂皮酸等均属于酚酸类化合物。

GA具有强烈的苦涩味,对温度、pH值、氧和光等环境条件敏感,很大程度上制约了其在食品抗氧化中的应用。Aydogdu等^[40]通过将GA封装在羟丙基甲基纤维素/聚环氧乙烷(Polyethylene oxide, PEO)复合纳米纤维中,以改善GA的不良风味并提高其稳定性,核桃保鲜研究表明,使用含10%GA纳米纤维包装的核桃21 d后,核桃中的过氧化氢值和对茴香胺值均显著低于单纯采用GA保存的核桃($P<0.05$)(图6c)。酚酸类抗氧化纳米纤维已应用于生鲜肉类保鲜研究中,例如Song等^[41]将不同浓度的GA包埋于胶原蛋白(Collagen, COL)/ZN基质中制备COL/GA/ZN纳米纤维膜,结果显示,含8%GA的COL/GA/ZN纤维膜能显著抑制罗非鱼肉品质劣变($P<0.05$),能使罗非鱼的货架期延长2 d(图6f)。作者所在课题组在国内率先开展了新型油脂抗氧化膜材料成型机理、调控工艺、效果评价与应用全方位技术攻关。食用油氧化是导致油脂哈败变质最主要原因,针对传统抗氧化剂添加时效性短、油脂抗氧化效果差的问题。本课题组利用静电纺丝技术将单宁酸(Tannic acid, TA)这一具有极高的抗氧化能力同时被美国FDA认定为GRAS级食品添加剂封装于植物基天然多糖瓜尔胶(Guar gum, GG)中,制备了100%食品级可食性抗氧化纳米纤维膜。通过油脂简单接触功能膜材料,有效抑制有害初级氧化及次级氧化产物生成,当负载TA浓度从5%增加到20%时,该纤维膜对DPPH的清除活性增强(从16.60%增加到80%),20 wt% TA负载浓度与纯TA颗粒相比,纤维膜抗氧化能力提高22倍($P<0.05$)。将其用于亚麻籽油保鲜,与未包封的TA颗粒相比,GG/TA复合纤维膜可延缓亚麻籽油的一级和二级氧化产物生成^[42-44],显著提高食用油不饱

和脂肪酸储存稳定性。Liu等^[45]通过静电纺丝法制备了PLA/TP复合纳米纤维膜,当PLA:TP为3:1时,抗氧化能力最高,DPPH自由基清除能力可达95.07%,纯PLA纳米纤维没有表现出任何抗氧化作用(4.58%),仅是抗氧化剂的储存库和保护系统。此外,受包封工艺条件的影响,PLA/TP-3:1复合纳米纤维纤维直径均匀,具有良好的整体形态,随着TP含量的进一步增加,纳米纤维的形态恶化,不能进一步促进复合纳米纤维中TP的释放,因此TP含量的进一步增加并没有导致DPPH自由基清除能力的显著增加。

2.3 抗氧化肽

抗氧化肽由5~16个氨基酸残基组成,是一类重要的生物活性肽,具有抑制、延缓食品氧化,保护人体组织器官免受自由基侵害等重要作用。抗氧化肽中氨基酸残基,如半胱氨酸的巯基、酪氨酸苯环上的羟基等,可通过供氢和供电子作用直接清除活性氧;侧链上的其它基团,如组氨酸的咪唑基、色氨酸的吲哚基和苏氨酸的羟基等,可与金属离子螯合,通过改变金属的化学反应,形成不溶性金属配合物或在空间上阻碍金属-脂质相互作用,从而阻止自由基的形成,实现抗氧化作用。其抗氧化活性与分子质量、氨基酸组成及侧链基团相关,通常短肽或当肽链中存在酪氨酸、色氨酸、蛋氨酸、赖氨酸和组氨酸时,表现的抗氧化活性较高^[46]。

Gonçalves等^[47]开发微藻源抗氧化肽纳米纤维替代合成抗氧化剂,将具有GRAS认证、蛋白质含量高、具有抗氧化活性的螺旋藻与聚己内酯(Polycaprolactone, PCL)相结合,采用静电纺丝法获得了直径为428 nm的生物肽/PCL纳米纤维并用于鸡肉保鲜。该纳米纤维包装的鸡肉在6℃下可延长保存期至12 d(图6b)。Hosseini等^[48]为减少鱼蛋白源抗氧化肽在成膜或包装过程中抗氧化活性的损失,首次利用静电纺丝技术将鱼蛋白源抗氧化肽包埋于壳聚糖(Chitosan, CS)/PVA纳米纤维中,获得安全性高的纤维基生物活性包装材料——CS/AOP/PVA复合抗氧化肽纳米纤维毡,包封率高达94%,显著减少生物活性成分的初始爆发释放,该纤维毡拉伸强度约为纯PVA的3倍,采用MTT法对L929细胞系进行体外细胞毒性试

验表明,负载 AOP 的纳米纤维具有良好的细胞相容性,在一定的剂量和暴露时间内不具有任何显著的体外毒性。

2.4 天然色素

天然色素即从天然资源(动物和植物组织及微生物)中提取获得的食用色素,其中植物性着色剂占多数。天然色素不仅具有给食品着色的作用,相当部分天然色素中还含大量的酚羟基,具有高效的羟基自由基和过氧自由基清除能力,还具有强还原性,可以猝灭单线态氧,是极具潜力的天然抗氧化剂。

β -胡萝卜素属于类胡萝卜素,是一种橘黄色亲脂性化合物。 β -胡萝卜素通过清除自由基、猝灭单线态氧的活性从而减少脂质过氧化,在食品中可作为抗氧化剂使用。食物中内源性胡萝卜素一般是稳定的,而外源性胡萝卜素水溶性差,在热、光、氧的存在下不稳定,在食品加工和储存过程中容易发生化学降解。为延长其发挥作用的时间,Graziella 等^[49]把 β -胡萝卜素包裹在大豆分离蛋白和聚乙烯醇的混合物中,而后采用静电纺丝技术将其包埋在聚羟基丁酸酯-共戊酸酯薄膜上,在大豆油(模拟脂肪食物)中进行体外释放试验,结果显示,包封后的 β -胡萝卜素持续释放 5 h 后,释放率为 25%。为进一步提高其释放率,对电纺纤维增加退火处理,即将电纺纤维膜置于 2 个特氟隆图层之间,并在低于 PVA 熔化温度的热压机中压缩 1 min。退火处理后电纺丝纤维中聚乙烯醇结晶度提高,孔隙率减少,体外释放率提升到了 50%,这表明纤维形态的变化在释放过程中发挥积极作用,提高了生物活性物质的利用率。姜黄素是从姜科、天南星科等植物根茎中分离提取的一种黄色粉末化合物。其分子中的酚羟基和 β -二酮结构能够与多种自由基结合,阻断自由基反应,以抑制脂质过氧化,同时反应生成的降解产物香草醛和阿魏酸也具有抗氧化活性。然而,其不溶于水的特性导致其生物利用度极低。Asli 等^[50]采用静电纺丝技术将姜黄素包埋在环状糊精中,制备了姜黄素/羟丙基- γ -环糊精包合物纳米纤维毡,在相同条件下,姜黄素在纳米纤维毡的溶解度是纯姜黄素的 123 倍,当姜黄素含量为 333 $\mu\text{g/mL}$ 时,DPPH 自由基清除率可接近 100%,最大程度上发挥了姜黄

素的抗氧化活性。

2.5 精油

精油(Essential oils, EO)是通过蒸馏、冷压、吸脂或溶剂萃取等方式从香料植物或泌香动物中加工提取所得到的挥发性含香物质的总称,精油富含酚类、酯类、萜烯、醛类、醚类、过氧化物等多种成分,可直接作用于自由基或间接消耗自由基生成物质以防止氧化反应的发生。目前已报道的精油有牛至精油、丁香精油、八角茴香精油、当归精油等。然而精油热稳定性差,水溶性低,一旦接触空气会立刻挥发,限制了其在食品保鲜中的应用^[51]。为提高精油的生物利用度,实现其可控释并保持高抗氧化活性,静电纺丝包封技术已应用于多种精油,以期提高精油的使用稳定性。

八角茴香精油(Star anise sential oil, SAEO)是从八角茴香果实中提取的植物精油,可作为抗菌剂和抗氧化剂广泛应用于烘焙食品、糖果和饮料中。然而其气味强烈,理化性质不稳定,应用范围受限。包封技术可以掩盖 SAEO 的气味并提高其稳定性,Zhang 等^[52]采用流延法制备了 SAEO/HP- β -CD 薄膜,该薄膜 70 min 后释放率开始呈现下降趋势,释放率最高仅为 35%,为进一步延长其发挥作用的时间,Zhang 等^[53]采用先进的静电纺丝技术将 SAEO 包埋制备了 SAEO/ β -CD/ZN 纳米纤维,SAEO 可持续释放 72 h,累计释放率可达 71.6%,在 SAEO 处理分别为 24 h 和 72 h 时,SAEO 对自由基的清除活性达到了 77.1%和 81.6%,具有良好的持续抗氧化活性;当归精油(Angelica essential oil, AEO)即从当归中提炼出的精油,为了避免传统浇铸工艺中 AEO 的快速挥发损失,Zhou 等^[54]采用静电纺丝法封装 AEO 制备了明胶/AEO 纳米纤维,含 9%AEO 的纳米纤维膜自由基清除活性为 85%,对微生物引起的食品腐烂变质具有显著抑制作用,是极具潜力的食品包装材料。月桂和迷迭香精油同样具有良好的抗氧化性能,Göksen 等^[55]将月桂和迷迭香精油包封制备了的 PVOH-EOs 静电纺丝纳米纤维膜。然而,PVOH 作为包含精油的基质,缺点之一是水溶性高,无法应用于高水活性食品。采用柠檬酸作为交联剂并将静电纺丝膜置于 170 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中固化 10 min,以进一步促进交联,可以降低 PVOH 的水溶性,保持与

高水分食品接触时纳米纤维的完整性。经交联优化后的静电纺 PVOH-EOs 膜具有良好的水溶性和热稳定性,且脂质氧化抑制率为 65%,可显著延长鸡胸肉的保质期。

3 存在的问题与挑战

静电纺丝制备纳米功能材料属于国际前沿技术,近几年得到持续关注,然而现阶段静电纺丝制备抗氧化纳米功能材料作为新兴技术仍处于研发阶段,在产量、材料特性、内在调控机制等方面仍面临如下挑战:

首先,现阶段静电纺丝制备抗氧化纳米功能材料仍处于初期研发阶段,材料研发、工艺技术、设备规模等都不完善,仍需开展大量基础与应用研究。虽然国内已具有静电纺丝量产化设备,但多数设备生产速率低(0.01~0.10 g/h)、产量少、生产成本过高,对其产业化、规模化及纳米纤维的广泛应用均造成了极大的障碍^[56]。

其次,与其它领域相比,食品领域对材料加工提出了更为苛刻与严格的技术要求,材料从制备工艺到最终成品均需满足食品安全要求,虽然可用于静电纺丝的聚合物众多,但是食品级功能纳米纤维材料的研究仍然较少。天然植物源高分子聚合物具有来源丰富、无毒、生物相容性良好的特点,是今后食品抗氧化功能递送载体重要发展趋势。而功能性因子与聚合物纺丝体复合将从根本上改变聚合物纺丝体剪切流变性、电场导电性、复合纺丝体表面张力等流体特性,造成大量食品级聚合物基质(特别是天然高分子材料如淀粉、多糖)可纺性差、纤维稳定性低和机械性能弱的缺陷^[57]。因此,亟需开展天然来源聚合物基质物理特性与可纺性相关机制研究,以及纺丝材料交联改性等优化设计,以提高最终产品的广泛适用性。

此外,抗氧化纳米材料界面调控的内在机制仍不明确,抗氧化纳米功能材料与食品调控是典型的界面反应,宏观功能因子转变为超微功能粒子后,在食品界面调控机理的报道较少,目前,国内外对于活性功能因子从膜材料向食品介质扩散的动态变化规律研究尚不深入^[58]。

4 总结与展望

食品氧化变质是长期困扰食品工业高质量发展的技术难题,抗氧化剂在食品抗氧化中发挥着重要作用,然而,目前存在稳定性较差,易受环境因素影响等缺陷,限制了抗氧化剂在食品领域的应用。利用静电纺丝技术制备的抗氧化纳米功能材料,具有孔隙率高、比表面积大、形态可调控等诸多优势,为抗氧化剂的高效利用提供创新思路,所构建的递送载体可以有效实现抗氧化剂在特定条件下缓控释放,提高抗氧化剂在加工、贮存等不良环境下自身稳定性,提高抗氧化剂的生物利用度,在食品抗氧化保鲜领域中具有广阔的应用前景。本文详细介绍了静电纺丝技术的发展沿革与制备原理,重点概述抗氧化纳米功能材料在食品领域的研究进展,分析了现阶段抗氧化纳米材料发展所面临的问题。静电纺丝技术作为制备微米级纤维的技术之一,具有操作简便、通用、高效等优势,未来必将为开发安全、稳定、高品质的抗氧化功能材料提供新的发展契机。

参 考 文 献

- [1] HUANG X, AHN D U. Lipid oxidation and its implications to meat quality and human health[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(5): 1275-1285.
- [2] ATEFE M, ELHAM A, HOSSEIN M, et al. Improving the efficiency of natural antioxidant compounds via different nanocarriers [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2020, 278 (C): 102122.
- [3] MEHTA N, KUMAR P, VERMA A K, et al. Microencapsulation as a noble technique for the application of bioactive compounds in the food industry: A comprehensive review[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1424.
- [4] MISHRA R K, MISHRA P, VERMA K, et al. Electrospinning production of nanofibrous membranes [J]. Environmental Chemistry, 2018, 17(2): 767-800.
- [5] MARCUS R, EMANUEL K, IRENA S, et al. High surface area carbide derived carbon fibers produced by electrospinning of polycarbosilane precursors [J]. Carbon, 2009, 48(2): 403-407.

- [6] MUNTEANU B S, SACARESCU L, VASILIU A, et al. Antioxidant/antibacterial electrospun nanocoatings applied onto PLA films[J]. *Material*, 2018, 11(10): 1973.
- [7] YANG X L, WANG J W, GUO H T, et al. Structural design toward functional materials by electrospinning: A review [J]. *Polymers*, 2020, 20 (1): 682–712.
- [8] CHENG H, CHEN L, MCCLEMENTS D J L, et al. Recent advances in the application of nanotechnology to create antioxidant active food packaging materials[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 64(10): 11–16.
- [9] BRITO J, HLUSHKO H, ABBOTT A, et al. Integrating antioxidant functionality into polymer materials: Fundamentals, strategies, and applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13 (35): 41372–41395.
- [10] MOHAMMAD M, SALAR Z. Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry[J]. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 2016, 6(3): 207–213.
- [11] SHEPA I, MUDRA E, DUSZA J. Electrospinning through the prism of time[J]. *Materials Today Chemistry*, 2021, 21: 100543.
- [12] AYODELE T O. Basic principles of electrospinning, mechanisms, nanofibre production, and anticancer drug delivery[J]. *Journal of Chemistry*, 2022, 15: 9283325.
- [13] KHALF A, MADIHALLY S V. Recent advances in multiaxial electrospinning for drug delivery[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2016, 112: 1–17.
- [14] SENTHIL M K T, SENTHIL K K, RAJINI N, et al. A comprehensive review of electrospun nanofibers: Food and packaging perspective[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 175: 107074.
- [15] 冯坤, 韦昀姗, 吴虹. 基于静电流体的静电纺丝/喷涂技术在食品行业中的研究进展[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 231–241.
- FENG K, WEI Y S, WU H. Research progress of electrospinning/spraying technology based on electrostatic fluid in food industry[J]. *Food Science*, 2021, 42(15): 231–241.
- [16] ZHAO L Y, DUAN G G, ZHANG G Y, et al. Electrospun functional materials toward food packaging applications: A review[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(1): 150.
- [17] ZHANG C, LI Y, WANG P, et al. Electrospinning of nanofibers: Potentials and perspectives for active food packaging[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 479–502.
- [18] BARDONOVA L, KOTZIANOVA A, SKUHROVCOVA K, et al. Effects of emulsion, dispersion, and blend electrospinning on hyaluronic acid nanofibers with incorporated antiseptics[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 194: 726–735.
- [19] 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 J S, DUAN M X, JIANG H X, et al. Research progress in embedding bioactive substances in food active packaging by electrospinning [J]. *Food Science*, 2021, 42(19): 299–306.
- [20] 薛聪, 胡影影, 黄争鸣. 静电纺丝原理研究进展[J]. *高分子通报*, 2009(6): 38–47.
- XUE C, HU Y Y, HUANG Z M. Research progress of electrospinning principle[J]. *Polymer Bulletin*, 2009(6): 38–47.
- [21] WANG Y T, XU J B, SHEN Y, et al. Fabrication of energetic aluminum core/hydrophobic shell nanofibers via coaxial electrospinning[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 2–10.
- [22] DAEWOO H, SHALLI S, SHAUN F, et al. Long-term antimicrobial effect of nisin released from electrospun triaxial fiber membranes[J]. *Acta Biomaterialia*, 2017, 53: 242–249.
- [23] ABEYRATHNE E D N S, NAM K, HUANG X, et al. Plant and animal-based antioxidants' s structure, efficacy, mechanisms, and applications: A review[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(5): 1025.
- [24] LI L L, WANG H L, CHEN M M, et al. Butylated hydroxyanisole encapsulated in gelatin fiber mats: Volatile release kinetics, functional effectiveness and application to strawberry preservation[J]. *Food Chemistry*, 2018, 269: 142–149.
- [25] WANG P, LI Y, ZHANG C, et al. Characterization and antioxidant activity of trilayer gelatin/dextran-propyl gallate/gelatin films: Electrospinning versus solvent casting[J]. *LWT-Food Science and Technology*

- gy, 2020, 308: 109536.
- [26] XU X Q, LIU A M, HU S Y, et al. Synthetic phenolic antioxidants: Metabolism, hazards and mechanism of action[J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129488.
- [27] ZHANG C, FENG F Q, ZHANG H. Emulsion electrospinning: Fundamentals, food applications and prospects[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 80: 175–186.
- [28] ANETA B, JAKUB C, EWA O, et al. Synthesis, DFT calculations and *in vitro* antioxidant study on novel carba-analogs of vitamin E[J]. Antioxidants, 2019, 8(12): 589.
- [29] AYTAC Z, KESKIN N O S, TEKINAY T, et al. Antioxidant α -tocopherol/ γ -cyclodextrin-inclusion complex encapsulated poly-(lactic acid) electrospun nanofibrous web for food packaging[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(21): 44858.
- [30] DUMITRIU R P, MITCHELL G R, DAVIS J, et al. Functionalized coatings by electrospinning for anti-oxidant food packaging[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 12: 59–65.
- [31] FERREIDON S, PRIYATHARINI A. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects: A review[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 18: 820–897.
- [32] MONICA L, NINO R, MARIROSA T. The molecular basis of working mechanism of natural polyphenolic antioxidants[J]. Food Chemistry, 2010, 125(2): 288–306.
- [33] ZEB A. Concept, mechanism, and applications of phenolic antioxidants in foods[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(9): 13394.
- [34] VIDAL-CASANELLA O, NÚÑEZ O, GRANADOS M, et al. Analytical methods for exploring nutraceuticals based on phenolic acids and polyphenols[J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8276.
- [35] AYTAC Z, IPEK S, DURGUN E, et al. Antioxidant electrospun zein nanofibrous web encapsulating quercetin/cyclodextrin inclusion complex[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(2): 1527–1539.
- [36] STOYANOVA N, SPASOVA M, MANOLOVA N, et al. Antioxidant and antitumor activities of novel quercetin-loaded electrospun cellulose acetate/polyethylene glycol fibrous materials[J]. Antioxidants, 2020, 9(3): 232.
- [37] WEN P, HU T G, WEN Y, et al. Development of nervilia fordii extract-loaded electrospun PVA/PVP nanocomposite for antioxidant packaging[J]. Foods, 2021, 10(8): 1728.
- [38] SEETHU B G, HEARTWIN A P. Electrohydrodynamic encapsulation of resveratrol using food-grade nanofibres: Process optimization, characterization and fortification[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(2): 341–354.
- [39] LI L L, WANG H L, CHEN M M, et al. Gelatin/zein fiber mats encapsulated with resveratrol: Kinetics, antibacterial activity and application for pork preservation[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101(C): 105577.
- [40] AYDOĞDU A, SUMNU G, SAHIN S. Fabrication of gallic acid loaded hydroxypropyl methylcellulose nanofibers by electrospinning technique as active packaging material[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 208(15): 241–250.
- [41] SONG Z L, LIU H M, HUANG A L, et al. Collagen/zein electrospun films incorporated with gallic acid for tilapia (*Oreochromis niloticus*) muscle preservation[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 317: 110860.
- [42] YANG W Q, LI X H, JIANG J N, et al. Improvement in the oxidative stability of flaxseed oil using an edible guar gum-tannic acid nanofibrous mat[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2019, 121(10): 1800438.
- [43] YANG W Q, ZHANG M, LI X H, et al. Incorporation of tannic acid in food-grade guar gum fibrous mats by electrospinning technique[J]. Polymers, 2019, 11(1): 141.
- [44] YANG W Q, DUAN X L, SUN H, et al. Encapsulation of TA in edible nanofibrous mat improves antioxidant efficiency and their modulation of fatty acids profile in flaxseed oil[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(12): 16137.
- [45] LIU Y W, LIANG X, WANG S Y, et al. Electrospun antimicrobial polylactic acid/tea polyphenol nanofibers for food-packaging applications[J]. Polymers, 2018, 10(5): 561.
- [46] OLSEN T H, YESILTAS B, MARIN F I, et al.

- AnOxPePred: Using deep learning for the prediction of antioxidative properties of peptides[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 21471.
- [47] GONCALVES C F, SCHMATZ D A, UEBEL L S, et al. Microalgae biopeptides applied in nanofibers for the development of active packaging[J]. *Polímeros*, 2017, 27(4): 290–297.
- [48] HOSSEINI S F, NAHVI Z, ZANDI M. Antioxidant peptide-loaded electrospun chitosan/poly (vinyl alcohol) nanofibrous mat intended for food biopackaging purposes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 89: 637–648.
- [49] GRAZIELLA P B, JEAN P D O, LAURA G, et al. Eleessandra da rosa zavareze, amparo lópez-rubio, electrospun β -carotene-loaded SPI:PVA fiber mats produced by emulsion-electrospinning as bioactive coatings for food packaging[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020, 23(C): 100426.
- [50] ASLI C, TAMER U. Fast-dissolving antioxidant curcumin/cyclodextrin inclusion complex electrospun nanofibrous webs[J]. *Food Chemistry*, 2020, 317(C): 126397.
- [51] MUNTEANU B S, VASILE C. Encapsulation of natural bioactive compounds by electrospinning-applications in food storage and safety[J]. *Polymers*, 2021, 13(21): 3771.
- [52] ZHANG G J, YUAN C, SUN Y H. Effect of selective encapsulation of hydroxypropyl- β -cyclodextrin on components and antibacterial properties of star anise essential oil[J]. *Molecules*, 2018, 23(5): 1126.
- [53] ZHANG Y P, YANG K L, QIN Z Y, et al. Cross-linked gluten/zein nanofibers via Maillard reaction with the loading of star anise essential oil/ β -cyclodextrin inclusions for food-active packaging[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 34: 100950.
- [54] ZHOU Y, MIAO X M, LAN X Z, et al. Angelica essential oil loaded electrospun gelatin nanofibers for active food packaging application[J]. *Polymers*, 2020, 12(2): 299.
- [55] GÖKSEN G, FABRA M J, 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 Packaging and Shelf Life*, 2021, 27: 100613.
- [56] YU M, DONG R H, YAN X, et al. Recent advances in needleless electrospinning of ultrathin fibers: From academia to industrial production[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2017, 302(7): 170002.
- [57] ROSANE M D S, NATALY M S, MOLAMMA P P, et al. Electrospinning and electrospray of bio-based and natural polymers for biomaterials development[J]. *Materials Science & Engineering C*, 2018, 92(1): 969–982.
- [58] PERERA K Y, JAISWAL S, JAISWAL A K. A review on nanomaterials and nanohybrids based bio-nanocomposites for food packaging[J]. *Food Chemistry*, 2022, 376(15): 131912.

Application of Antioxidant Nanomaterials by Electrospinning Prepared in Food

Zhao Ruxia, Wang Wenjuan, Yang Weiqiao*, Duan Xiaoliang, Zhang Zhihang, Li Xihong
(School of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300450)

Abstract Due to the potential carcinogenic and teratogenic health risks caused by synthetic antioxidants, it has become a research hotspot and development trend in food preservation to develop natural, safe and efficient plant-derived antioxidants to replace synthetic antioxidants. However, most antioxidant active components have application defects, such as poor stability and short persistence. Functional groups in nano delivery carriers are an international frontier technology to realize efficient utilization of active components of drugs or food. It integrates interdisciplinary, basic theoretical research and new product development closely. Due to its extremely high specific surface area and diverse surface controlled release structure, it can realize the effect of micro-addition of functional factors and efficient utilization, showing great research and application value. It has become a research hotspot at home and abroad in recent years. This paper summarizes the development and principle of electrospinning technology, focuses on the latest research progress of electrospin-

ning preparation of antioxidant nano-functional materials in the food field in recent years, and puts forward the current development status and problems of electrospinning preparation of antioxidant nano-functional materials, in order to grasp the development trend of antioxidant regulation at home and abroad in time. This study provides essential information support for the development of antioxidant materials in the future.

Keywords electrospinning; food preservation; antioxidants; nanofiber; summary