

静电纺缓释抗菌纳米纤维的制备及抗菌性能研究

魏娜¹, 张金珊², 张金虎¹, 刘芮铭², 张正健², 周云令¹, 赵亚珠¹

(1.天津职业大学 包装与印刷工程学院, 天津 300410; 2. 天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: **目的** 解决天然抗菌剂精油封装到聚合物中的受控释放问题。**方法** 选用聚乙烯醇和纳米纤维素为主体材料, 采用百里香精油为活性物质, 通过静电纺丝技术制备纳米纤维。**结果** 采用质量比为3:4的纳米纤维素水凝胶(质量分数1%)和聚乙烯醇水溶液(质量分数6%), 并加入质量分数为4%~10%的百里香精油制备纺丝液, 在纺丝电压为16 kV、纺丝速率为0.8 mL/h、纺丝距离为11 cm、针头直径为0.7 mm的条件下制备了直径为100~150 nm的纳米纤维, 并成功将百里香精油包埋在纳米纤维中。**结论** 所制备的纳米纤维可以达到百里香精油缓慢释放的效果, 对大肠杆菌、金黄葡萄球菌、黑曲霉和橘青霉均有抑制作用。

关键词: 纳米纤维素; 静电纺丝; 百里香精油; 抗菌

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)21-0089-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.011

Preparation and Antibacterial Properties of Electrospun Slow-Release Antibacterial Nanofibers

WEI Na¹, ZHANG Jin-shan², ZHANG Jin-hu¹, LIU Rui-ming², ZHANG Zheng-jian²,
ZHOU Yun-ling¹, ZHAO Ya-zhu¹

(1. College of Packaging and Printing, Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China; 2. College of Light Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of controlled release of essential oil encapsulated in polymer as a natural antibacterial agent. With polyvinyl alcohol and nanoscale cellulose as the main materials and thyme essential oil as active material, nanofibers were prepared by electrospinning technology. 1wt.% nanofibers hydrogel and 6wt.% polyvinyl alcohol with mass ratio of 3 : 4 were added to thyme essential oil of 4wt.%-10wt.% to prepare spinning solution. The nanofibers with a diameter of 100-150 nm were prepared at a mass fraction of 16 kV, a spinning speed of 0.8 mL/h, a spinning distance of 11 cm, and a needle diameter of 0.7 mm. The thyme essential oil was successfully embedded in the nanofibers. The results show that the prepared nanofibers can achieve the effect of slow release of thyme essential oil, and has inhibitory effects on Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Aspergillus niger and Penicillium tangerine.

KEY WORDS: cellulose nanofibers; electrospinning; thyme essential oil; bacterial inhibition

纤维素作为一种来源广泛、地球上最丰富的天然聚合物, 受到了越来越广泛的关注和应用^[1-2]。采用纤维素

制成的纳米纤维功能性材料常被应用于食品、医药、生物、工业等多个领域, 其中结合抗菌剂制成的抗菌

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYBJC18100); 天津市教委科研计划(2020KJ068); 天津市科委科技特派员项目(22YDTPJC00800)

作者简介: 魏娜(1981—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为静电纺丝功能性包装材料。

材料在食品包装方面也被广泛关注^[3-4]。植物精油作为抗菌剂,具有绿色无污染、毒性低、易挥发、活性较高和应用范围广等优势^[5],但将其应用在包装材料时需要对其释放速度加以控制,否则易出现精油释放过快问题,从而导致在短时间内包装中精油的有效成分过高。这样虽然能延长食品的货架期,但是可能会引发食品安全问题^[6]。由此,人们为了开发新型包装材料,将精油封装到天然聚合物中,使其具有受控释放、改善稳定性和防止降解等优点。在众多封装技术中,静电纺丝可以在室温下通过天然聚合物包裹精油制造食品包装用纳米/微米级材料^[3, 7-8]。通过对比发现,如果精油被紧密地封装在聚合物中,无法实现对释放速率的控制,现有研究中主要通过添加增孔材料等方式来控制精油的释放速率^[9]。文中将纳米纤维素水凝胶^[10]作为天然聚合物,实现对精油的包裹,且对致密的聚乙烯醇表面形成裂纹孔隙^[11-13],从而达到缓释的目的。

1 实验

1.1 材料

主要材料:纳米纤维素水凝胶(质量分数为1%,粒径为349.7 nm),实验室自制;1788型聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;百里香精油(Thyme Oil, TEO),吉安市青原区绿源天然香料油提炼厂。

1.2 设备

主要设备:JDFSS-2型静电纺丝机,自主研发;FA25model高速剪切机,布鲁克流体机械制造公司;DV2T的旋转式黏度计,BROOKFIELD美国公司;JYW-200D表面张力仪,承德市科承试验机有限公司;DDS-307电导率仪,上海精密科学仪器有限公司雷磁仪器厂;Delsa Nano纳米粒度分析仪,美国贝克曼库尔特公司;FPA型Zeta电位仪,德国AFG有限公司;JSM-IT300LV型扫描电子显微镜,日本电子公司;Tallos F200X G2型透射电子显微镜,Thermo Fisher Scientific公司;GCMS-QP2010型气相色谱质谱联用仪,岛津国际贸易有限公司;MEA1504-014型恒温培养箱,巨孚仪器(北京)有限公司。

1.3 方法

1.3.1 静电纺丝液的制备及其性能测试

首先将固含量(质量分数)为1%的纳米纤维素水凝胶^[14]与质量分数为6%的聚乙烯醇水溶液,按照质量比3:4混合均匀;然后按照纺丝液总质量的4%~10%添加百里香精油,并在1000 r/min下高速剪切10 min,使精油均匀乳化分散,经离心消泡后得到纺丝液。对得到的纺丝液进行性能测试,具体测试方

法如下^[15]。

1)黏度。采用旋转黏度计中的LV-4(64)转子进行测试,测试时间为1 min,重复测试3次,取平均值。

2)电导率。采用电极电导率测量法,电导率常数为0.997,并用温度计测量待测样品的温度,开始测量时将温度输入仪器中,将导电棒浸入待测样品中,待温度稳定后记录数据,重复测试3次,取平均值。

3)表面张力。首先对待测液体的密度进行测定,将液体密度输入设备进行表面张力测量,重复测试3次,取平均值。

4)粒径。先将待测样品在去离子水中进行稀释,在稀释到质量分数0.1%后再进行测量,重复测试3次,取平均值。

5)Zeta电位和电位绝对值。先将待测样品在去离子水中进行稀释,在稀释到质量分数为0.01%后,将稀释后的溶液超声分散,然后进行测试,重复测试3次,取平均值。

1.3.2 静电纺丝纳米纤维的制备

使用静电纺丝机设备,在设定纺丝条件(电压为16 kV,纺丝速率为0.8 mL/h,纺丝距离为11 cm,针头内直径为0.7 mm,接收装置为滚筒)下制备纳米纤维^[16-19]。

1.3.3 扫描电子显微镜

采用日本电子公司的JSM-IT300LV型扫描电子显微镜(SEM)观察分析静电纺丝纳米纤维的形貌,然后采用Image J软件在样品图像上随机采样50个,取其平均值,从而得到纳米纤维的平均直径,并分析纳米纤维直径的分布情况。

1.3.4 透射电子显微镜

使用400目铜网接收纳米纤维,采用Thermo Fisher Scientific公司的Tallos F200X G2型透射电子显微镜(TEM)分析纳米纤维的透射电镜测试结果。

1.3.5 缓释性能测试

采用气相色谱质谱联用仪(GC-MS)对百里香精油的主要成分百里香酚进行检测,通过峰面积来表征精油的释放量^[20]。

将制备的纳米纤维放入顶空瓶中,并进行密封。将顶空瓶在同一条件下保存,在1个周期内(此次实验为20 d)每2 d对顶空瓶内的气体进行气相分析,每组样品的实验条件、实验参数均保持一致,测试条件与百里香酚的标准曲线分析一致。

1.3.6 抗菌性能测试

此次实验以黑曲霉、橘青霉、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌为供试菌种,在90 mm的培养基内进行抗菌实验。首先,将配置好的乳液采用静电纺丝制备纳米纤维,将制备的纳米纤维裁成直径为6 mm的圆形片,并以6 mm空白铝箔片为空白对照组,然后进行抗菌

实验。每组样品设置 3 个平行样, 将霉菌组的培养基置于 28 °C 的恒温培养箱中 36 h, 将细菌组的培养基置于 37 °C 恒温培养箱中 24 h, 观察培养基上菌落的生长情况和抗菌圈直径, 并记录、测量^[21-22]。

2 结果与讨论

2.1 静电纺丝液的性能分析

静电纺丝过程中的影响因素主要为溶液性质和纺丝条件。其中, 溶液性质 (例如黏度、电导率、表面张力、粒径) 对所制备的纳米纤维有较大影响, 因此对其进行测试分析。这里针对 4 种不同百里香精油含量 (质量分数 4%、6%、8%、10%) 纺丝液的黏度进行了测量, 具体数据见图 1a。从图 1a 中可以看出, 随着百里香精油用量的增加, 纺丝液的黏度也随之增大。这是由于加入百里香精油后, 它与聚乙烯醇分子间的相互作用力逐渐增强, 分子间的缠结力也逐渐增强^[23]。

精油含量的增加对纺丝液表面张力的影响见图 1b。从图 1b 中可以看出, 增加百里香精油的用量可以提高纺丝液的表面张力, 但是其变化趋势不明显。在精油浓度较低的情况下, 聚合物间的相互作用较弱, 表面张力也随之减小。在静电纺丝过程中, 射流的形成主要依靠电场力的动力, 当电场力大于表

面张力时, 乳液才会形成稳定的射流, 才能顺利完成纺丝^[23]。

精油含量的增加对纺丝液电导率的影响见图 1c。从图 1c 中可以看出, 随着百里香精油含量的增加, 电导率也呈现上升趋势, 但变化趋势不明显。在静电纺丝过程中, 聚合物溶液受到静电斥力的拉伸作用, 会产生聚合物微小射流, 进而固化形成纤维, 高电导率的聚合物受到的电场力作用更大^[24]。

精油含量的增加对纺丝液粒径的影响见图 1d。不同的百里香精油含量 (质量分数 4%、6%、8%、10%) 对应的平均粒径分别为 368.8、375.3、371.4、394.4 nm, 从这些数据可以看出, 增加百里香精油的用量可以提高纺丝液的颗粒直径, 分布曲线均呈现单峰, 颗粒直径为 100~600 nm, 表明纺丝液的颗粒分散性较好、大小均一。当百里香精油的含量增加时, 颗粒直径逐步增大, 但是当精油的质量分数增加到 10% 时, 颗粒直径突然增大, 说明百里香精油的含量对颗粒直径有较大的影响^[25]。

加入百里香精油后纺丝液的 Zeta 电位值和 Zeta 电位绝对值见图 1e。研究表明, Zeta 电位的绝对值为 30~60 mV 时, 乳液呈稳定状态, 绝对值越大则体系越稳定。从图 1e 中可以看出, 不同百里香精油含量 (质量分数 4%、6%、8%、10%) 对应的 Zeta 电位绝对值为 40~50 mV, 说明纺丝液呈稳定状态^[26]。

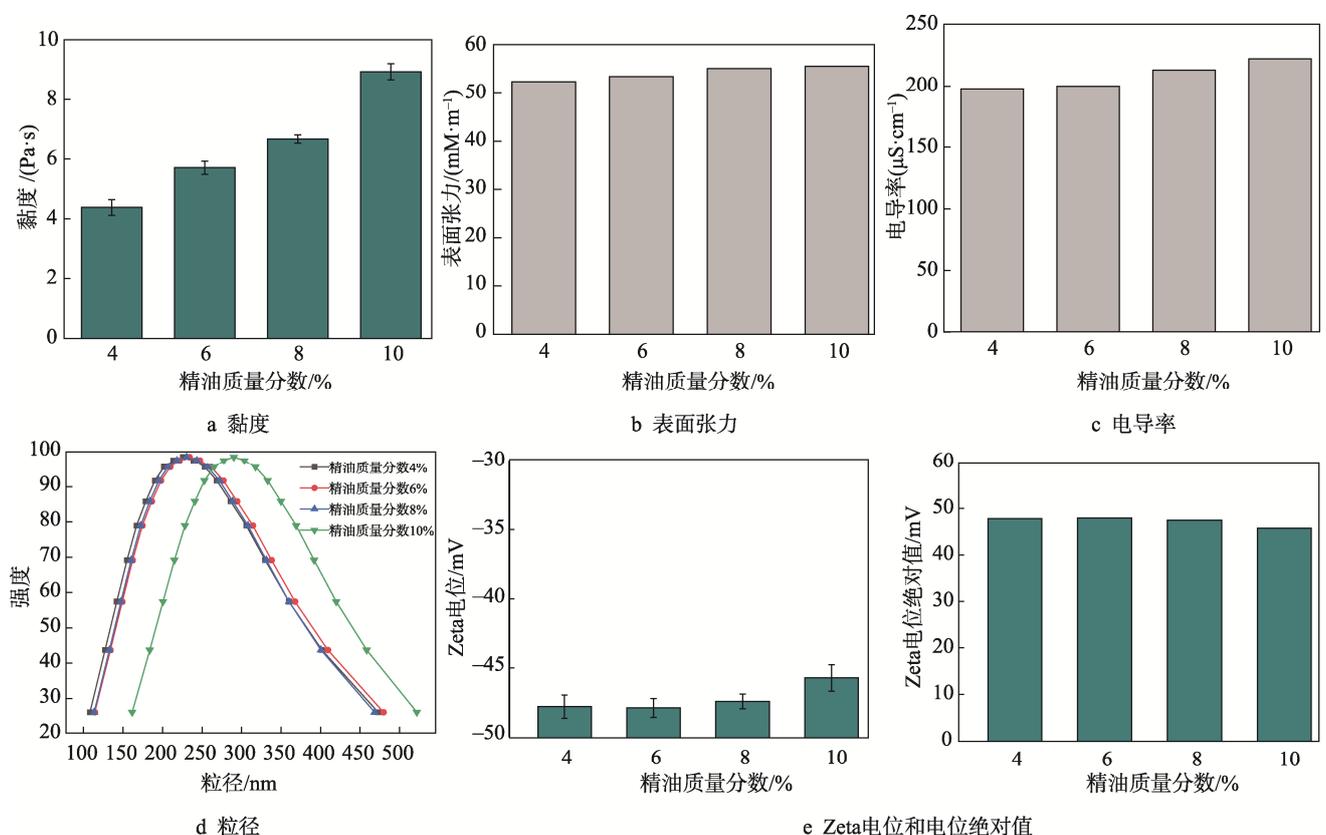


图 1 静电纺丝液各项性能测试
Fig.1 Performance test of electrospinning solution

2.2 静电纺丝纳米纤维形貌分析

在保证静电纺丝过程中工艺参数不变的情况下,研究了百里香精油的含量变化对纳米纤维形貌的影响。4种精油含量的纺丝液所制备的纳米纤维的形貌如图2所示。从图2中可以看出,在工艺参数条件一定的前提下,随着百里香精油含量的增加,纳米纤维的直径也随着增大。在百里香精油的质量分数为4%、10%时,纳米纤维拉伸不均匀,且出现了部分断裂现象。同时发现,

在百里香精油的质量分数为6%、8%时,纳米纤维的均匀性达到相对最好的状态。主要原因:精油的含量过高或过低,均会对纺丝液的物理性能造成影响,进而对纳米纤维的表面形态造成影响。同时还发现,4种精油含量的纳米纤维表面均出现了不规则裂纹,而未添加纳米纤维素水凝胶的纳米纤维(如图3所示)并未出现此现象,说明纳米纤维素水凝胶的加入使得纳米纤维表面出现了裂纹,从而达到了精油可控释放的目的。

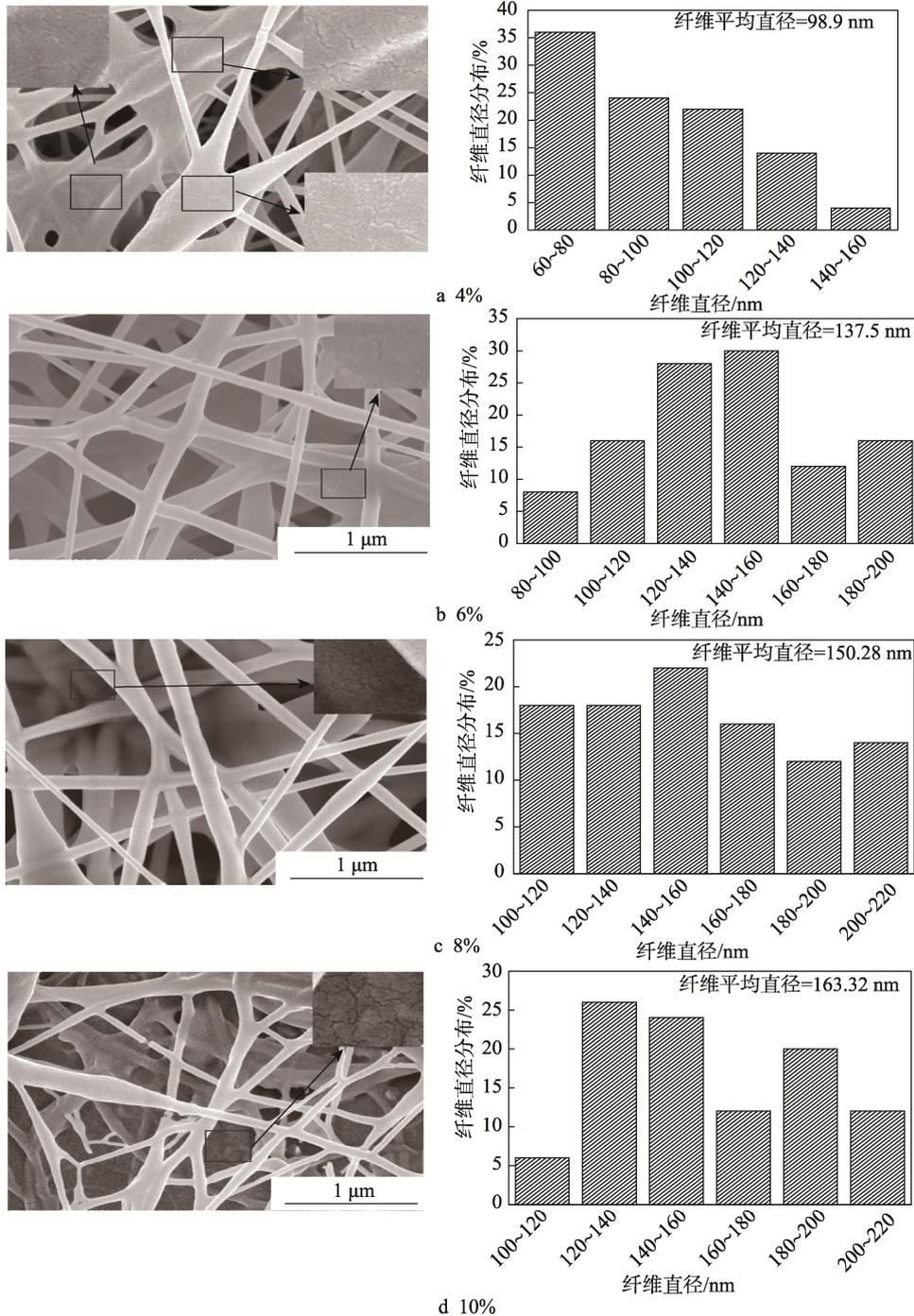


图2 精油含量不同的静电纺丝纳米纤维 SEM 图
Fig.2 SEM image of electrospun nanofibers with different essential oil content

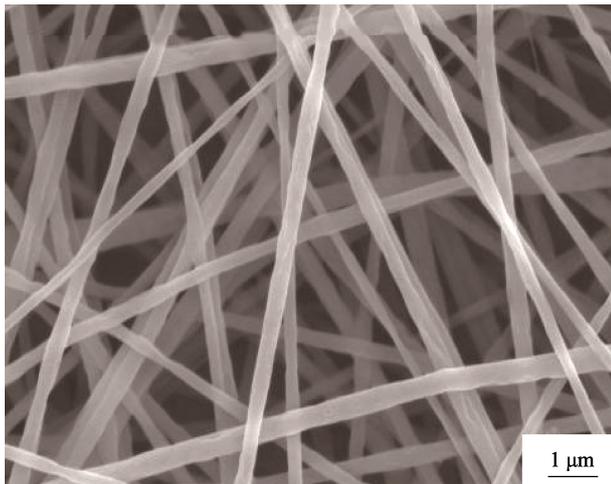


图 3 未添加纤维素纳米纤维纺液静电纺丝纳米纤维 SEM 图

Fig.3 SEM image of electrospun nanofibers without cellulose nanofiber spinning solution

不同精油含量的静电纺丝纳米纤维透射电镜图见图 4。由图 4 可知, 纤维的分布较均匀, 未出现精油聚集现象。说明将聚乙烯醇、纤维素纳米纤维和百里香精油混合均匀, 随着精油含量的增加, 纳米纤维的直径呈现逐渐增大的趋势。

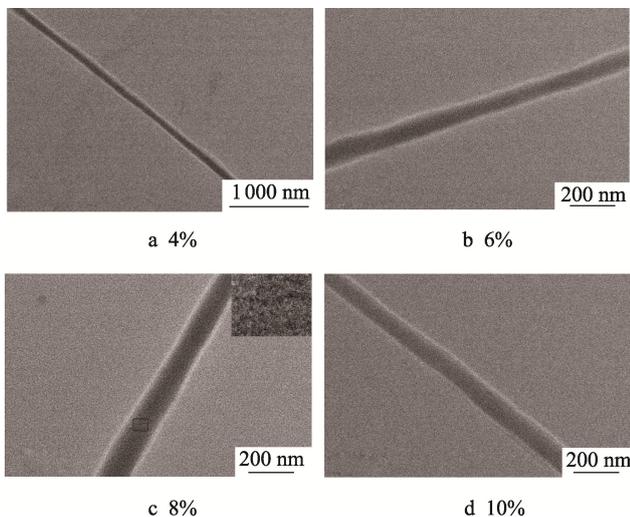


图 4 精油含量不同的静电纺丝纳米纤维 TEM 图
Fig.4 TEM image of electrospun nanofibers with different essential oil content

2.3 静电纺丝纳米纤维的缓释性能分析

通过气相色谱质谱分析百里香精油的主要化学成分和总离子流图, 如图 5 所示。结果表明, 百里香精油中主要含有 4 种物质: 百里香酚、临异丙基苯甲烷、反式香叶醇、松油醇等。百里香酚是含量最多的成分, 也是百里香精油的主要抗菌成分, 出峰时间为 17.5 min^[17]。

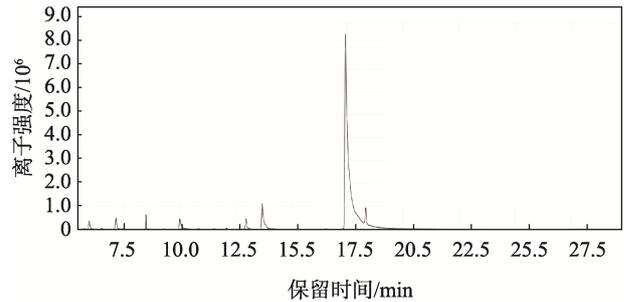


图 5 百里香精油的总离子流图
Fig.5 GC chromatogram of thyme essential oil

百里香精油的质量分数分别为 4%、6%、8%、10%时, 纳米纤维中的百里香酚在 1 个周期内(20 d)的释放面积曲线见图 6。每 2 d 对百里香酚的释放面积进行测定, 随着时间的延长, 百里香酚的出峰面积随之增大, 在 14~16 d 时达到最大释放量。通过查阅文献可知, 百里香精油直接释放百里香酚会在第 8 天达到最大释放量^[27]。由此可知, 通过静电纺丝技术将百里香精油进行包裹制备的纳米纤维可以有效减缓百里香酚的释放速率, 从而有效延长水果的货架期。

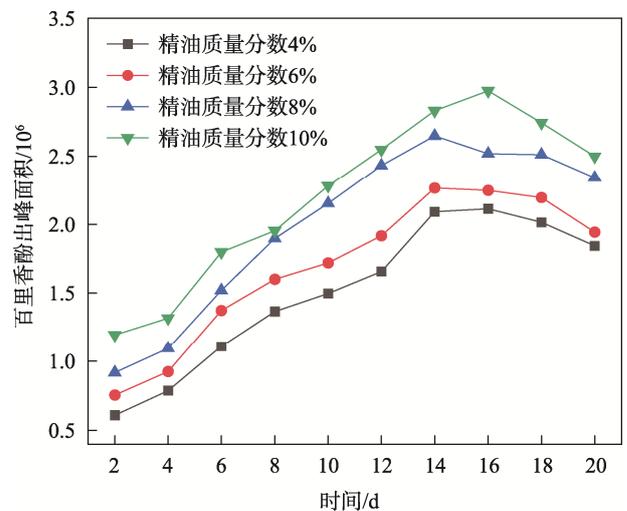


图 6 百里香酚出峰面积随时间变化的情况
Fig.6 Variation of thymol peak area with time

2.4 静电纺丝纳米纤维的抗菌实验

此次实验以黑曲霉、橘青霉、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌为供试菌种。实验结果表明, 放置纳米纤维组均对菌种表现出抑制作用, 且随着百里香精油含量的增加, 抗菌圈直径也逐渐增大。不同精油含量下霉菌和细菌的抗菌圈直径见表 1。从表 1 可以看出, 百里香精油对霉菌和细菌的抗菌效果都较明显, 且随着百里香精油含量的增加, 抗菌效果越明显。这是因为百里香精油中的有效成分——百里香酚的抗菌性较强, 它可以抑制菌落的生长。

表1 不同精油含量下霉菌和细菌的抗菌圈直径
Tab.1 Diameter of inhibition zone of mold and bacteria under different content of essential oil mm

百里香精油的 质量分数/%	霉菌		细菌	
	黑曲霉	橘青霉	大肠杆菌	金黄葡萄球菌
0	0	0	0	0
4	20.729	26.398	12.680	22.501
6	38.091	35.791	25.536	28.878
8	43.937	46.596	31.428	40.571
10	54.747	53.882	38.435	46.594

3 结语

将纳米纤维素水凝胶、聚乙烯醇水溶液和百里香精油按照一定比例制备纺丝液,通过测试纺丝液的黏度、表面张力、电导率和粒径等,分析了百里香精油含量对纳米纤维形态的影响。

在纺丝条件和外部条件一定时,随着纺丝液中百里香精油含量的增加,纳米纤维的形态和直径也随之变化,在百里香精油的质量分数为4%和10%时,纳米纤维拉伸不均匀,且纤维出现了部分断裂现象。同时发现,在精油的质量分数达到6%时,纳米纤维的均匀性达到最佳状态,此时纳米纤维的直径为137.5 nm。

气相色谱质谱分析仪的结果表明,采用静电纺丝法将百里香精油包裹在纳米纤维中,其中的百里香酚在14~16 d时达到最大释放量,而百里香精油直接释放百里香酚在第8天达到最大释放量。在抗菌实验中,纳米纤维对大肠杆菌、金黄葡萄球菌、黑曲霉和橘青霉均有持续的抑制作用,其抑制作用随着百里香精油含量的增加而增强。

参考文献:

- [1] CHEN Wen-shuai, YU Hai-peng, LEE S Y, et al. Nanocellulose: A Promising Nanomaterial for Advanced Electrochemical Energy Storage[J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(8): 2837-2872.
- [2] 杨陈, 林燕萍, 李永贵. 纳米纤维素材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(10): 232-235.
YANG Chen, LIN Yan-ping, LI Yong-gui. Research on Advance in Nanocellulose Material[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(10): 232-235.
- [3] HEMMATI F, BAHRAMI A, ESFANJANI A F, et al. Electrospun Antimicrobial Materials: Advanced Packaging Materials for Food Applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 520-533.
- [4] 赵冬梅, 初小宇, 魏丽娜, 等. 纳米纤维素在食品包装材料中的应用研究进展[J]. *高分子通报*, 2021(11): 11-20.
ZHAO Dong-mei, CHU Xiao-yu, WEI Li-na, et al. Application and Research Progress of Nano Cellulose in Food Packaging Materials[J]. *Polymer Bulletin*, 2021(11): 11-20.
- [5] 王广要, 周虎, 曾晓峰. 植物精油应用研究进展[J]. *食品科技*, 2006, 31(5): 11-14.
WANG Guang-yao, ZHOU Hu, ZENG Xiao-feng. Advances in the Research and the Development of Plant Essential Oils[J]. *Food Science and Technology*, 2006, 31(5): 11-14.
- [6] 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 Yuan-yue, YANG Yu-fan, KONG Bao-hua, et al. Progress in the Encapsulation of Natural Phenolic Compounds by Electrospinning[J]. *Food Science*, 2021, 42(9): 319-327.
- [7] CHARLES A P R, JIN T Z, MU R, et al. Electrohydrodynamic Processing of Natural Polymers for Active Food Packaging: A Comprehensive Review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(6): 6027-6056.
- [8] 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 Yun-ling, WEI Na, QIU Hong-tao, et al. Application of Emulsion Electrospinning Nanoscale Films for Cherry Preservation[J]. *Digital Printing*, 2021(2): 91-96.
- [9] 张有林, 张润光, 钟玉. 百里香精油的化学成分、抑菌作用、抗氧化活性及毒理学特性[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(9): 1888-1897.
ZHANG You-lin, ZHANG Run-guang, ZHONG Yu. Chemical Component, Antimicrobial Effect, Antioxidation Activity and Toxicological Character of Thyme Essential Oil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(9): 1888-1897.
- [10] 路洁, 李明星, 周奕杨, 等. 纳米纤维素的制备及其在水凝胶领域的应用研究进展[J]. *中国造纸*, 2021, 40(11): 107-117.
LU Jie, LI Ming-xing, ZHOU Yi-yang, et al. Research Advances in the Preparation of Nanocellulose and Its Applications in the Field of Hydrogels[J]. *China Pulp & Paper*, 2021, 40(11): 107-117.
- [11] 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 Ji-shuai, DUAN Meng-xia, JIANG Hai-xin, et al. Research Progress in the Encapsulation of Bioactive by Electrospinning Technique for Active Food Packaging[J]. Food Science, 2021, 42(19): 299-306.
- [12] XU Wen-long, XIN Bin-jie, YANG Xue. Carbonization of Electrospun Polyacrylonitrile (PAN)/Cellulose Nanofibril (CNF) Hybrid Membranes and Its Mechanism[J]. Cellulose, 2020, 27(7): 3789-3804.
- [13] 王建清, 刘光发, 金政伟, 等. 百里香精油的抑菌作用及其对鲜切冬瓜的保鲜效果[J]. 包装工程, 2009, 30(10): 1-4.
- WANG Jian-qing, LIU Guang-fa, JIN Zheng-wei, et al. Antimicrobial Activity of Thyme Oil and Its Preservation Effect on Fresh-Cut Wax Gourd[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(10): 1-4.
- [14] LATONEN R M, CABRERA J A W, LUND S, et al. Electrospinning of Electroconductive Water-Resistant Nanofibers of PEDOT-PSS, Cellulose Nanofibrils and PEO: Fabrication, Characterization, and Cytocompatibility[J]. ACS Applied Bio Materials, 2021, 4(1): 483-493.
- [15] BHARDWAJ N, KUNDU S C. Electrospinning: A Fascinating Fiber Fabrication Technique[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28: 325-347.
- [16] 周建华, 陈锋, 丁珂. 静电纺丝技术制备纳米纤维的影响参数研究进展[J]. 科技与创新, 2019(16): 34-35.
- ZHOU Jian-hua, CHEN Feng, DING Ding. Research Progress on Influencing Parameters of Electrospinning Nanofibers[J]. Science and Technology & Innovation, 2019(16): 34-35.
- [17] 司军辉, 洪艺鸣, 林禄银, 等. 静电纺丝制备聚乙烯醇/纳米纤维素复合纤维及其作为载体的释药性能[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(6): 916-920.
- SI Jun-hui, HONG Yi-ming, LIN Lu-yin, et al. Fabrication of Polyvinyl Alcohol/Nano Cellulose Composite Fiber by Electrospinning and Its Drug Release[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2018, 36(6): 916-920.
- [18] 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 Wen-bo, ZHANG Qun-hua, LIU Yuan, et al. Preparation of Bio-Based Active Food Packaging Fiber Membrane via Electrospinning and Its Application[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(5): 13-22.
- [19] 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 Ling-li, ZHANG Hui. Electrospinning: Application in Food Industry[J]. Food Science, 2020, 41(13): 283-290.
- [20] 裴海闰, 韩笑, 曹学丽. 百里香精油的成分分析及其抗氧化和抑菌活性评价[J]. 中国食品学报, 2011, 11(5): 182-188.
- PEI Hai-run, HAN Xiao, CAO Xue-li. Analysis of the Components of Thymus Essential Oil and Its Antioxidant and Antibacterial Activity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2011, 11(5): 182-188.
- [21] 李学红, 马庆一, 彭雪萍, 等. 香辛料抑菌活性研究及其在草莓保鲜中的应用[J]. 食品研究与开发, 2003, 24(1): 96-99.
- LI Xue-hong, MA Qing-yi, PENG Xue-ping, et al. Study on Antibacterial Activity of Spices and Its Application in Strawberry Preservation[J]. Food Research and Development, 2003, 24(1): 96-99.
- [22] 刘光发, 宋海燕, 罗婉如, 等. 百里香-丁香罗勒精油抗菌纸对草莓的防腐保鲜效果[J]. 包装工程, 2018, 39(19): 91-97.
- LIU Guang-fa, SONG Hai-yan, LUO Wan-ru, et al. Effect of Antimicrobial Paper Coated with *Thymus Vulgaris* L and *Ocimum Gratissimum* L Essential Oil on Preservation of Strawberry[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(19): 91-97.
- [23] 仇洪涛. 乳液静电纺丝核壳纳米纤维模型的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020: 28-30.
- QIU Hong-tao. Study on the Core Shell Nanofiber Model of Emulsion Electrospinning[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020: 28-30.
- [24] 丁彬, 余建勇. 静电纺丝与纳米纤维[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2011: 41.
- DING Bin, YU Jian-yong. Electrospinning and Nanofibers[M]. Beijing: China Textiles Press, 2011: 41.
- [25] 王丽超. 静电纺丝包装材料的制备与研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 38-39.
- WANG Li-chao. The Preparation and Research of Electrospinning Packaging Material[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2017: 38-39.
- [26] 徐明进, 李明远, 彭勃, 等. Zeta 电位和界面膜强度对水包油乳状液稳定性影响[J]. 应用化学, 2007, 24(6): 623-627.
- XU Ming-jin, LI Ming-yuan, PENG Bo, et al. Effects of Strength of Interfacial Film and Zeta Potential on Oil-in-water Emulsion Stability[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2007, 24(6): 623-627.
- [27] 陈品品, 蔡锦铃, 马晓娟, 等. 3 种百里香精油成分的 GC-MS 分析[J]. 热带生物学报, 2020, 11(4): 470-478.
- CHEN Pin-pin, CAI Jin-ling, MA Xiao-juan, et al. GC-MS Analysis of Components of Essential Oil from Three Thymus Species[J]. Journal of Tropical Biology, 2020, 11(4): 470-478.