

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.011

文章编号:1672-9331(2022)04-0108-10

引用格式:秦自强,沈超怡,吴迪,等.溶液吹纺技术在生命科学领域中的应用[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(4):108-117.

Citation:QIN Ziqiang,SHEN Chaoyi,WU Di,et al.Application of solution blow spinning technology in the field of life science [J].Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2022,19(4):108-117.

溶液吹纺技术在生命科学领域中的应用

秦自强¹,沈超怡²,吴迪^{1,2,3},陈昆松¹

(1.浙江大学 农业与生物技术学院,浙江 杭州 310058;2.浙江大学 生物系统工程与食品科学学院,浙江 杭州 310058;

3.浙江大学中原研究院,河南 郑州 450000)

摘 要:溶液吹纺技术是利用高速气流对聚合物溶液拉伸细化使其形成纳米纤维的新技术,具有制备效率高、设备结构简单、制备过程安全性高等特点。本文在介绍溶液吹纺技术的基础上,阐述了溶液吹纺纳米纤维的制备过程并分析了影响吹纺纳米纤维结构和形态的主要因素,重点介绍了溶液吹纺纳米纤维在组织工程、伤口敷料、药物缓释和果蔬保鲜材料等生命科学领域中的应用,最后展望了溶液吹纺技术的发展趋势。

关键词:溶液吹纺;纳米纤维;组织工程;伤口敷料;药物缓释;果蔬包装

中图分类号:TS104.7;TS17

文献标志码:A

0 引言

随着纳米时代的到来,纳米技术正深刻影响着人类的生活和现代科学,对科学和经济的发展具有不可或缺的重要意义^[1]。将纳米技术应用于生命科学领域,可有效推动纳米技术创新并为生命科学领域提供新技术和新材料,充分展示了学科交叉对创新迭代升级的推动力。将三维材料的维度减小为一维或二维,可以获得低维材料的新特性^[2],而纳米纤维^[3]由于具有独特的结构特征、超高的比表面积^[4]和较高的孔隙率等,一直受到广泛关注^[5]。

近年来,人们研发出了多种纳米纤维制备方法,如静电纺丝^[6]、离心纺丝^[7-8]、熔喷法^[9]、自组装技术^[10]和溶液吹纺等。其中,溶液吹纺为近年来新兴的纳米纤维制备技术,该技术对设备的要求低,不需要电场,制备方法简单方便、安全性高,纺丝原料来源广泛,同时纤维细度可控性高,具有良

好的规模化生产前景;但溶液吹纺技术目前主要处于研究阶段,在基础理论、材料制备和产业化应用等方面还需要进一步研究。表1列举了主要纳米纤维制备技术的优缺点。

表1 主要纳米纤维制备技术的优缺点^[2,6-9]

Table 1 Advantages and disadvantages of main nanofiber preparation techniques^[2,6-9]

制备方法	优点	缺点
静电纺丝	成本低,具有规模化生产前景	制备需要高电压,存在安全隐患,易产生随机沉淀
离心纺丝	不需电压,可控沉积	机制不成熟,设备不完善
熔喷法	原料来源广泛	制备需要高温处理
溶液吹纺	不需电压,纺丝原料来源广泛,具有规模化生产前景	不适合不易挥发的溶剂,喷嘴易堵塞,无规则沉积

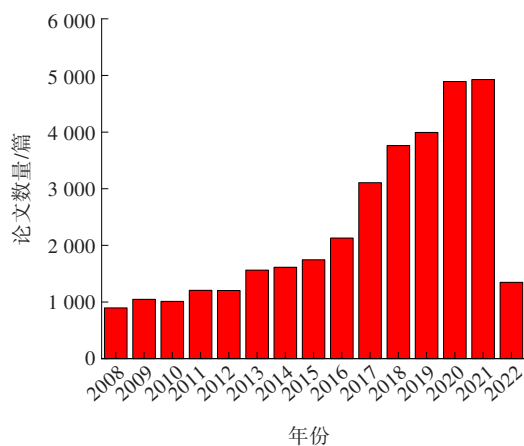
由于采用溶液吹纺技术制备的纳米纤维材料对环境友好,聚合物溶液原料安全无毒,且制备过程无须高温、高电压条件等,溶液吹纺技术在生命科学领

收稿日期:2022-12-01;修回日期:2022-12-14;接受日期:2022-12-17

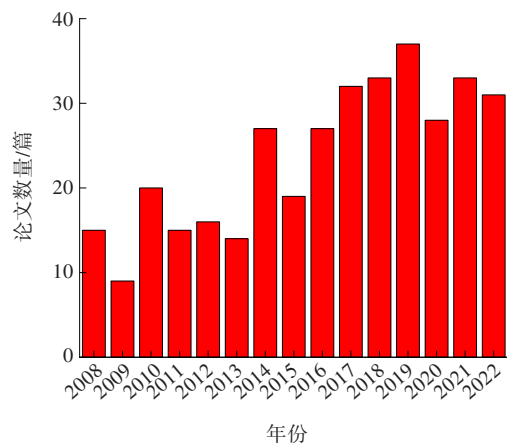
基金项目:中央高校基本科研基金资助项目(2021FZZX001-55)

通信作者:吴迪(1984—)(ORCID: 0000-0002-4997-5082),男,教授,主要从事果实采后贮藏保鲜与冷链物流方面的研究。E-mail: di_wu@zju.edu.cn

域受到广泛关注,涉及的领域主要包括组织工程、伤口敷料、药物缓释和果蔬包装材料等。Web of Science 数据库(检索式:solution blow spinning or solution blow or air-jet spinning or airbrushing)的检索结果显示:在2008—2022年有关溶液吹纺技术的论文累计超过34 000篇,统计情况如图1(a)所示。对于生命科学领域,通过 Web of Science 数据库中的 BIOSIS Citation Index(检索式:solution blow spinning or solution blow or air-jet spinning or airbrushing)检索发现:在2008—2022年与生命科学有关的溶液吹纺技术论文共356篇,统计情况如图1(b)所示。由此可见,相比溶液吹纺技术在其他领域的研究,其在生命科学领域的相关研究仍较少,占比不到1.05%。



(a) Web of Science 数据库中溶液吹纺技术论文数量



(b) BIOSIS Citation Index 数据库中在生命科学领域溶液吹纺技术论文数量

图1 溶液吹纺技术相关论文数量统计(2008—2022年)

Fig.1 Quantitative statistics of published papers related to solution blow spinning technology (2008—2022)

根据不同的应用场景和功能需求,溶液吹纺技术在生命科学应用中通常会添加功能性材料,

例如,在组织工程应用方面,在组织纤维支架中加入聚偏氟乙烯或聚氨酯等材料可以提高所得支架的润湿性,增强其对细胞的黏附性,使支架的应用性能得到明显改善;在伤口敷料应用方面,在敷料中加入抑菌剂或愈合剂可以在愈合过程中滋润伤口床,加速伤口愈合;在药物缓释应用方面,将药物与可降解材料直接封装在纤维中,可以起到药物缓释的效果;在果蔬包装材料应用方面,在纳米纤维膜中加入抑菌材料,可以达到保鲜和抗菌效果。

本文在介绍溶液吹纺技术原理和制备方法的基础上,分析了影响溶液吹纺纳米纤维结构和形态的主要因素,综述了其在组织纤维支架、血管移植植物、伤口抗菌敷料、皮肤愈合材料、愈合检测纤维材料、伤口止血材料、药物缓释及果蔬保鲜包装等方面的最新研究进展,并对其未来研究趋势进行了展望。

1 溶液吹纺技术概述

1.1 溶液吹纺技术原理和制备方法

溶液吹纺是一种利用高速气流拉伸纺丝的技术,最早是由 MEDEIROS 等^[11]结合熔喷技术和干法纺丝技术特点提出的。该技术的基本原理是利用高速气流将聚合物溶液拉伸成细丝,然后,随着溶剂的蒸发细丝沉积到收集器上形成纤维^[12]。

溶液吹纺设备的核心部件包括注射泵、喷嘴和收集器,如图2所示。在纺丝过程中,首先通过注射泵利用一定的压力将聚合物溶液以稳定的注射速率输送到喷嘴,再经由喷嘴的喷丝孔挤出;在喷丝孔周围设置稳定的高速气流,带动溶液细流快速拉伸;与此同时,溶液中的溶剂快速蒸发,在收集器上沉积并形成纳米纤维膜^[13]。

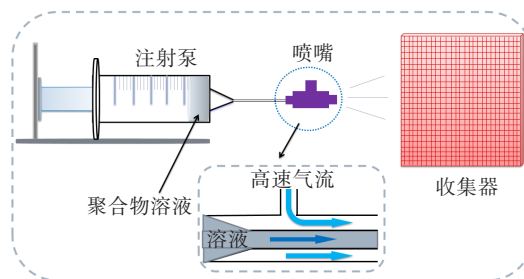


图2 典型的溶液吹纺装置

Fig.2 Typical device of solution blow spinning

1.2 溶液吹纺纳米纤维结构的主要影响因素

溶液吹纺纳米纤维结构和形态受多种因素影响,主要包括聚合物浓度、溶剂蒸发速率、接收距离和喷嘴尺寸等。

1.2.1 聚合物浓度

聚合物浓度是影响材料可纺性的关键因素,是决定纤维直径和纤维整体结构的关键变量,随着聚合物浓度的增加,溶液的黏度逐渐增加,从而对纤维形态、纹理和尺寸产生较大的影响^[14]。VIANA等^[15]基于不同溶剂采用溶液吹纺技术制备了聚乙烯醇超细纤维,并分析了影响纤维制备的关键因素,发现聚乙烯醇容易受溶剂介质的影响,溶液黏度过高会阻止纤维的形成。KASIRI等^[16]利用溶液吹纺技术制备出了具有定制形貌的聚苯乙烯基材料,并发现通过改变聚合物的浓度可以获得更多直径更小的纤维。其中,使用低质量浓度(8 g/mL)的聚苯乙烯基聚合物进行溶液吹纺时,会出现不稳定的纤维射流,导致收集器上形成液滴,最终产生串珠状微结构;而当其质量浓度达到10 g/mL时,溶液黏度增加,最终产生直径较大的光滑纤维。DENEFF等^[14]在利用溶液吹纺技术合成金属有机框架(metal-organic framework, MOF)聚合物复合纤维时发现,当聚合物浓度较高时产生的纤维直径更大,纤维尺寸分布更广;相反,当聚合物浓度较低时则不会产生纤维,而是分解成液滴,并在收集器表面沉积形成薄膜。LI等^[17]采用溶液吹纺技术制备得到了氧化铝纤维膜,并发现溶液黏度越高,纤维直径越大。当溶液黏度较低时(0.70 Pa·s),纤维的平均直径为2.78 μm;当黏度为1.25 Pa·s时,纤维的平均直径为3.18 μm;当黏度为1.55 Pa·s时,纤维的平均直径增加到4.53 μm;当黏度增加到1.65 Pa·s时,纤维的平均直径达到4.72 μm。

1.2.2 溶剂蒸发速率

将高速气流作为纤维形成驱动力从聚合物溶液中纺制纳米纤维是溶液吹纺技术的一个重要环节。不同的溶剂具有不同的蒸发特性,因此,溶剂蒸发速率是制备溶液吹纺纤维的一个重要指标。蒸发速率过慢会导致串珠、液滴的出现,影响纤维的制备。ZHUANG等^[18]在利用溶液吹纺技术制备亚微米级纤维素纤维的研究中,安装了一个加热

纺丝柜来提高空气温度,从而加速溶剂的蒸发,有助于纤维的形成。但也有研究发现如果在吹纺过程中溶剂快速且不平衡地蒸发,会造成纤维中出现许多劈理和裂纹^[19]。GONZALEZ-BENITO等^[20]通过溶液吹纺技术成功制备了基于聚偏氟乙烯的TiO₂纳米复合材料薄膜,并通过改变TiO₂的含量来直接影响溶剂蒸发速率,从而改变薄膜的形貌。

1.2.3 接收距离

溶液吹纺工艺中的接收距离一般是指从喷嘴口到收集器的距离,这个距离在很大程度上决定了纤维是形成薄膜还是形成相互缠结的纤维网。因此,接收距离也是影响纤维结构形态和纤维直径的因素之一。LI等^[21]在通过溶液吹纺技术制备聚酰胺酸纳米纤维的研究中发现,当接收距离过短(10或15 cm)时,溶液射流快速撞击收集器表面,伴随着大量非挥发性溶剂,纤维在到达收集器之前没有足够的时间完全干燥,易形成由纤维和溶液混合物组成的薄膜状结构膜;随着接收距离的增加,液滴现象消失,纤维的整体形态逐渐改善;然而当接收距离超过最佳范围(30 cm)后,收集的纳米纤维数量开始减少,纤维开始向各个方向飞行,相当一部分纳米纤维飞出收集器的范围。ZHANG等^[22]在使用溶液吹纺技术制备聚乳酸纤维膜的研究中发现,在一定范围内,随着接收距离的增加,纤维直径逐渐增大。

1.2.4 喷嘴尺寸

优化溶液吹纺装置中喷嘴的几何参数也是改善纳米纤维形态和直径的主要途径。HAN等^[23]采用正交试验和数值模拟相结合的方法研究了喷嘴的几何参数对壳聚糖纳米纤维直径的影响,研究结果表明:当针头伸出长度为5.0 mm,针头直径为0.8 mm,喷嘴直径为4.0 mm时,制备的壳聚糖纳米纤维表面光滑、形态均匀。VASIREDDI等^[24]创新性地采用气体动态虚拟喷嘴,连续、重复地制造出了稳定、均匀、表面形貌和整体形状可控的纳米纤维,并且将纤维直径精准控制在250 nm至15 μm之间。

1.2.5 其他因素

收集器的转速和外界辅助电极也会影响溶液吹纺中纤维的形态和直径。SIMBARA等^[25]在使用溶液吹纺技术生产聚己内酯纤维膜时,为圆柱

形收集器设置了不同的转速,分别为0、150和300 r/min,并对纤维的排列和直径等进行表征,发现当转速为300 r/min时纤维直径更加合适,排列更加一致。ZHENG等^[26]采用圆柱形电极辅助溶液吹纺的新型工艺成功制备了聚环氧乙烷纳米纤维,所制备的纳米纤维的平均直径降低了6.17%,纤维更均匀、形貌更规则,该纤维适用于过滤或其他用途。

2 溶液吹纺技术在生命科学领域中的应用

在生命科学领域应用溶液吹纺技术制备的纳米纤维材料主要包括组织纤维支架、血管移植植物、伤口抗菌敷料、皮肤愈合材料、愈合检测纤维材料、伤口止血材料、药物缓释和果蔬抑菌保鲜材料等(图3)。

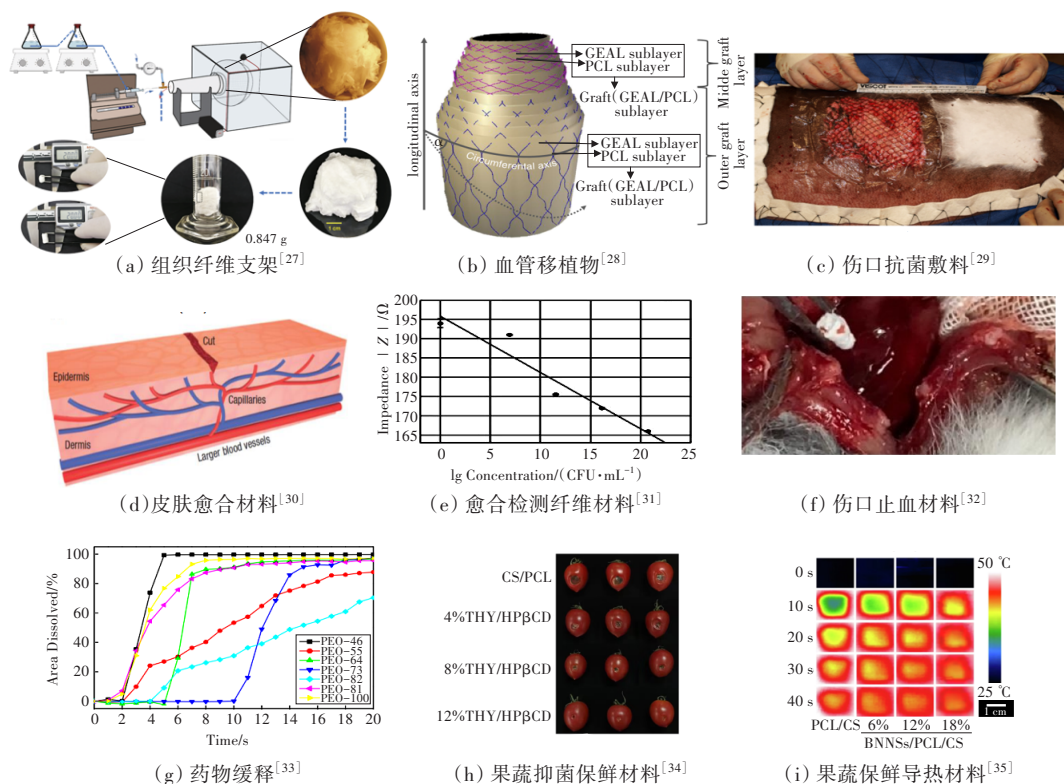


图3 溶液吹纺技术在生命科学领域中的应用

Fig.3 Application of solution blow spinning technology in life science

2.1 组织工程领域

2.1.1 组织纤维支架

近年来,采用溶液吹纺技术制备适于组织的纤维支架、开发纳米和超细纤维结构的研究受到深度关注。采用溶液吹纺技术,MEDEIROS等^[27]制备了生物活性玻璃纳米纤维3D支架,并通过研究支架的物理性质、生物活性和细胞相容性,发现其可以作为细胞附着、分化、增殖和生长新骨组织的适宜架构,且生物活性和降解性能优异;TANDON等^[36]制备了不同纤维直径的聚偏氟乙烯纤维膜,并发现纤维直径的差异会影响支架的粗糙度,且直接影响细胞的黏附、增殖和分化;KOPEĆ

等^[37]制备了聚氨酯纳米纤维材料,该材料能够加速细胞的黏附和扩散,并能改善所得支架的润湿性;GREENHALGH等^[38]制备了溶胶-凝胶二氧化硅纤维,并在将该复合纤维加工成组织支架的过程中实现了对纤维直径、形态、机械性能、离子释放、降解和细胞反应等方面的调控。

2.1.2 血管移植植物

溶液吹纺技术也被用于制备血管移植植物。AKENTJEW等^[28]结合浸渍纺丝与溶液吹纺技术,采用明胶-海藻酸盐和聚己内酯亚层成功制备了与人类冠状动脉力学行为相似的血管移植植物,并通过调整纤维角度和血管厚度,使其与人类冠状

动脉的轮廓和顺应性相似,并实现了其与原生组织的机械匹配。KOPEC等^[39]通过溶液吹纺技术制备了医用级聚氨酯纳米纤维膜和具有确定性能(包括厚度)的血管移植模型,并用聚多巴胺和凝胶对其进行高效、直接的表面修饰,从而改善了血管移植物的细胞附着和扩散性能,增强了移植物表面的内皮化。

2.2 伤口敷料领域

2.2.1 伤口抗菌敷料

溶液吹纺技术被用于制备可以添加抗菌剂的伤口敷料。DARISTOTLE等^[40]通过溶液吹纺技术研制了一种负载抗菌银的可喷涂且具有高黏性的伤口敷料,该敷料可以通过对 AgNO_3 的持续可控释放,获得长时间抗菌效果,并且不会产生高细胞毒性,在应用验证中也没有出现明显的伤口并发症或愈合延迟现象。CARNEY等^[29]基于聚乳酸-聚己内酯共聚物二元醇和乳酸-乙醇酸共聚物,采用溶液吹纺技术制备了一种生物可降解、具有高黏性和抗菌性的新型多功能伤口敷料,该敷料可改善不规则伤口的形态,适用于部分或全厚度烧伤的伤口应用。

2.2.2 皮肤愈合材料

通过溶液吹纺技术制备的皮肤愈合材料在快速修复皮肤和愈合伤口方面展现出了良好效果。SZYMAŃSKA等^[41]基于聚环氧乙烷和壳聚糖通过溶液吹纺技术生产出了均匀、无珠及多孔的纳米材料,其对伤口渗出液表现出较强的吸收能力,有利于在伤口愈合过程中滋润伤口床,被认为是皮肤愈合和再生的有价值材料。LEE等^[30]通过溶液吹纺技术制备出了工程自愈合材料,该材料通过皮肤切口进入微血管系统,并借助其网状结构使伤口愈合,且可以快速持续地被运输到受损部位。

2.2.3 愈合检测纤维材料

愈合检测纤维材料可以实时监测伤口微生物的情况。MILLER等^[31]通过溶液吹纺技术制备了聚乳酸/多壁碳纳米管纳米纤维复合材料,其可用于检测培养基中细菌活性的实时定量数据,如细菌的浓度等,进而被用于研发能够检测感染的生物传感器,为伤口护理的有效分析和诊断提供数据支撑。

2.2.4 伤口止血材料

将溶液吹纺技术与止血药物结合后用于研制

能够快速止血并可生物降解的伤口止血材料。高原^[32]设计了一种便携式溶液吹纺装置,该装置能够将多种聚合物纺成超细纤维,该纤维在结合腹腔镜进行微创手术的术后止血等方面展现出了良好的稳定性和可行性;同时,采用一种基于溶液吹纺的新型复合方式,将医用止血药物和可生物降解材料相结合制备了一种可生物降解的新型纳米止血材料,其对于缓解心脏出血问题有一定的积极作用。BEHRENS等^[42]通过溶液吹纺技术制备了聚乳酸纳米纤维膜,并将其直接沉积在猪肺切除和肝表面损伤的部位,发现该纳米纤维膜可以有效阻止术后出血。

2.3 药物缓释领域

通过溶液吹纺技术制备的纳米纤维材料可用于药物的缓慢释放。主要实现路径有两类:第一类是将药物混合在纳米纤维内或封装在纤维中形成核壳结构,在一定酸碱度或温度等条件下,包裹材料逐渐分解,达到药物缓慢裸露并长时间释放的效果^[43]。ZHUANG等^[44]通过溶液吹纺技术成功将抗炎药物——氨基水杨酸封装在甲基丙烯酸和甲基丙烯酸酯共聚物的壳体材料中,并发现抗炎药物在模拟胃液($\text{pH}=1.2$)和十二指肠液($\text{pH}=6.0$)环境中几乎不释放,而在模拟小肠和结肠液($\text{pH}=7.2$)环境中稳定释放。该方法可以有效保护药物不受胃部环境的影响,使药物在结肠内缓慢释放。BONAN等^[45]采用溶液吹纺技术制备了负载Copaiba油的聚乳酸和聚乙烯吡咯烷酮微纳米纤维膜,并发现由含有较多聚乙烯吡咯烷酮的共混物制成的纤维膜对Copaiba油的释放速率更高,释放时间更长,同时表现出对金黄色葡萄球菌的长时间抑菌效果。第二类是将药物包封在纤维材料中,通过控制药物与外界环境接触面积的大小来达到药物缓释的效果^[43]。LORENTE等^[33]采用溶液吹纺技术制备了由亚微米纤维构成的环氧乙烷基材料,发现环氧乙烷与水接触后发生水合反应和溶胀反应,并产生一层水凝胶来调节水的亚连续入口,从而改变聚合物内部活性剂的溶解速率,该方法适于制药工业中药物控制释放应用方面。

2.4 果蔬包装材料领域

2.4.1 果蔬抑菌保鲜材料

包装为最常见的果蔬保鲜方式,起着物理隔

离的作用,可以保护果蔬免受潮湿、灰尘和冲击等的不利影响,同时在包装中加入抑菌物质,通过对病原微生物生长的有效抑制减缓果蔬腐烂变质。利用溶液吹纺技术制备果蔬纳米纤维包装材料具有生产效率更高、制备环境更安全等优点。SHEN等^[34]通过溶液吹纺技术将百里酚/2-羟丙基- β -环糊精包合物负载到绿色可降解的壳聚糖/聚己内酯纳米纤维膜中,实现了纳米纤维膜中的百里酚在240 h内长期稳定连续释放,并发现这样做可以有效抑制番茄表面灰葡萄孢的生长。另外,SHEN等^[46]利用溶液吹纺技术将纳他霉素包裹在明胶/玉米醇溶蛋白/聚氨酯抗菌纳米纤维中,这样做不仅可以有效提高抑菌物质的利用率,而且对灰霉病菌和链格孢菌也展现出良好的抗菌活性。此外,还有一些采用溶液吹纺技术制备的用来封装抗菌物质的纳米纤维膜也表现出良好的抑菌效果,如采用聚己内酯/聚乙烯吡咯烷酮纳米纤维膜封装绿原酸对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌展现了良好的抑菌活性^[47],采用聚氨酯/聚乙烯吡咯烷酮/聚氨酯纳米纤维薄膜封装绿原酸对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和蜡样芽孢杆菌具有良好的抑菌活性^[48],采用聚乳酸纳米纤维膜包封罗勒精油和丁香罗勒精油对炭黑曲霉和黑曲霉均有良好的抑菌活性^[49],采用鱼皮明胶纳米纤维膜包封香芹酚^[50]或肉桂醛^[51]对大肠杆菌、沙门氏菌和李斯特菌具有良好的抑菌活性等。

2.4.2 其他果蔬保鲜包装材料

果蔬在采后贮运过程中会产生呼吸热,导致果蔬温度升高,影响冷链贮运效率。提高包装材料的导热性可以有效将果蔬呼吸热传导出来,从而提高保鲜效果,减少损失。SHEN等^[35]使用溶液吹纺技术制备了氮化硼/聚己内酯/壳聚糖纳米纤维垫,其不仅具有良好的导热性能,还对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有良好的抑菌活性。

3 产业化面临的挑战分析

近年来,溶液吹纺技术凭借其独特的优势在生命科学领域迅速发展。但由于其开发时间较短,目前还主要停留在实验室研究阶段。溶液吹纺纳米纤维的工业化生产主要面临以下挑战^[2]:

1) 溶液吹纺技术相关理论与设备尚不成熟,大规模工业化生产纳米纤维的制备方法仍处于研究阶段。

2) 在工业化生产中,制备大量的纤维会导致大量的溶剂挥发,这不仅使生产成本提高而且易造成环境污染,因此在溶剂完全挥发和有效回收方面还需进一步优化。

3) 虽然溶液吹纺的原材料来源广泛,但要实现工业化长期稳定生产的目标,可能还需要添加一些特殊的材料。

4) 更多原材料的探索和多功能应用方面的研究可能会促进溶液吹纺技术的产业化应用。

4 结论与展望

溶液吹纺技术作为一种利用高速气流快速制备纳米纤维的新型技术,其制备装置包含注射泵、喷嘴和收集器,制备过程受聚合物浓度、溶剂蒸发速率、接收距离和喷嘴尺寸等因素的影响。溶液吹纺技术具有制备效率高、原材料来源广和安全性高等优点,近年来在生命科学领域得到广泛关注。其应用主要涉及医学方面,包括制备组织纤维支架、血管移植物和伤口敷料,或将药物包装在纤维材料中用于药物缓释。此外,也应用于农业领域,主要用于制备果蔬保鲜包装材料等。

未来,溶液吹纺技术在生命科学领域的主要研究方向如下:

1) 加强不同材料溶液吹纺纤维形成机制的基础研究,进而优化溶液吹纺纳米纤维制备工艺。

2) 关注溶液吹纺纳米纤维的安全性,确保溶剂成分安全无毒,对制备的纳米纤维进行安全性评价。

3) 强化溶液吹纺纳米纤维的多功能性,制备同时具有多种功能的包装材料。

4) 提高溶液吹纺纳米纤维的制备效率,满足生命科学领域对纤维膜或纤维支架等材料的需求。

5) 根据实际应用优化溶液吹纺纳米材料的生物降解性,使其既能在应用中保持材料的稳定性,又能在使用后快速降解,减少环境污染。

〔参考文献〕

- [1] CHEN R X, LI Y, HE J H. Mini-review on bubbl spinning process for mass-production of nanofibers[J]. *Materia-Rio De Janeiro*, 2014, 19(4): 325-343. DOI: 10.1590/S1517-70762014000400002.
- [2] GAO Y, ZHANG J, SU Y, et al. Recent progress and challenges in solution blow spinning[J]. *Materials Horizons*, 2021, 8(2): 426-446. DOI: 10.1039/d0mh01096k.
- [3] 杨宇晨,覃小红,俞建勇.静电纺纳米纤维功能性纱线的研究进展[J]. *纺织学报*, 2021, 42(1): 1-9. DOI: 10.13475/j.fzxb.20201205809.
YANG Yuchen, QIN Xiaohong, YU Jianyong. Research progress of transforming electrospun nanofibers into functional yarns[J]. *Journal of Textile Research*, 2021, 42(1): 1-9. DOI: 10.13475/j.fzxb.20201205809.
- [4] 严国荣,廖喜林,刘让同等.静电纺丝纳米纤维的应用研究进展[J]. *上海纺织科技*, 2018, 46(5): 1-6. DOI: 10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2018.05.001.
YAN Guorong, LIAO Xilin, LIU Rangtong, et al. Advances in application of electrostatic spinning nanofibers[J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2018, 46(5): 1-6. DOI: 10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2018.05.001.
- [5] KENRY, LIM C T. Nanofiber technology: current status and emerging developments[J]. *Progress in Polymer Science*, 2017, 70: 1-17. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2017.03.002.
- [6] 肖迎波,何佳城,袁凯,等.基于静电纺丝碳纳米纤维的超级电容器电极材料研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(1): 317-326, 342. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2021.0027.
XIAO Yingbo, HE Jiacheng, YUAN Kai, et al. Recent progress on electrospun carbon nanofiber-based electrode materials for supercapacitors[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37(1): 317-326, 342. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2021.0027.
- [7] 徐淮中,陈欢欢,李祥龙,等.离心纺:一种高效制备微/纳米纤维的纺丝方法(一)[J]. *产业用纺织品*, 2016, 34(1): 25-33, 38. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7093.2016.01.006.
XU Huaizhong, CHEN Huanhuan, LI Xianglong, et al. Centrifugal spinning: a high-efficient approach to fabricate micro-/nano-fibers (part 1) [J]. *Technical Textiles*, 2016, 34(1): 25-33, 38. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7093.2016.01.006.
- [8] 徐淮中,陈欢欢,李祥龙,等.离心纺:一种高效制备微/纳米纤维的纺丝方法(二)[J]. *产业用纺织品*, 2016, 34(3): 21-28, 38. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7093.2016.03.005.
XU Huaizhong, CHEN Huanhuan, LI Xianglong, et al. Centrifugal spinning: a high-efficient approach to fabricate micro-/nano-fibers(part 2) [J]. *Technical Textiles*, 2016, 34(3): 21-28, 38. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7093.2016.03.005.
- [9] 谷英姝,汪滨,董振峰,等.聚乳酸熔喷非织造材料用于空气过滤领域的研究进展[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(1): 214-217, 222. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.01.047.
GU Yingshu, WANG Bin, DONG Zhenfeng, et al. Research progress on PLA melt-blown nonwoven applied in air filtration[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(1): 214-217, 222. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2021.01.047.
- [10] GUAN Y S, QIN Y K, SUN Y H, et al. Donor-acceptor co-assembled supramolecular nanofibers with high and well-balanced ambipolar charge transport properties under ambient conditions[J]. *Chemical Communications*, 2016, 52(25): 4648-4651. DOI: 10.1039/c6cc01300g.
- [11] MEDEIROS E S, GLENN G M, KLAMCZYNSKI A P, et al. Solution blow spinning: a new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 113(4): 2322-2330. DOI: 10.1002/app.30275.
- [12] 胡艳丽,何诗琪,李凤艳,等.溶液喷射纺纳米纤维的工艺研究及应用进展[J]. *功能材料*, 2022, 53(1): 1048-1054. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2022.01.008.
HU Yanli, HE Shiqi, LI Fengyan, et al. The process research and application progress of solution blow spinning nanofibers[J]. *Journal of Functional Materials*, 2022, 53(1): 1048-1054. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2022.01.008.
- [13] 王航,庄旭品,董锋,等.溶液喷射纺纳米纤维制备技术及其应用进展[J]. *纺织学报*, 2018, 39(7): 165-173. DOI: 10.13475/j.fzxb.20170802509.
WANG Hang, ZHUANG Xupin, DONG Feng, et al. Preparation technology and application progress of solution blown nanofibers[J]. *Journal of Textile Research*, 2018, 39(7): 165-173. DOI: 10.13475/j.fzxb.20170802509.
- [14] DENEFF J I, WALTON K S. Production of metal-organic framework-bearing polystyrene fibers by solution blow spinning[J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 203: 220-227. DOI: 10.1016/j.ces.2019.03.012.
- [15] VIANA J L, FRANCA T, CENA C. Solution blow spinning poly (vinyl alcohol) sub-microfibers produced from different solvents[J]. *Orbital: the Electronic Journal of Chemistry*, 2020, 12(1): 1-6. DOI: 10.17807/orbital.v12i1.1169.
- [16] KASIRI A, DOMINGUEZ J E, GONZALEZ-BENITO J.

- Morphology optimization of solution blow spun polystyrene to obtain superhydrophobic materials with high ability of oil absorption[J]. *Polymer Testing*, 2020, 91:106859. DOI:10.1016/j.polymertesting.2020.106859.
- [17] LI L, KANG W, ZHAO Y, et al. Preparation of flexible ultra-fine Al_2O_3 fiber mats via the solution blowing method[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(1): 409–415. DOI:10.1016/j.ceramint.2014.08.085.
- [18] ZHUANG X, YANG X, SHI L, et al. Solution blowing of submicron-scale cellulose fibers[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 90(2): 982–987. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.06.031.
- [19] CHENG B, TAO X, SHI L, et al. Fabrication of ZrO_2 ceramic fiber mats by solution blowing process[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(9): 15013–15018. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.06.104.
- [20] GONZALEZ-BENITO J, TENO J, GONZALEZ-GAITANO G, et al. PVDF/ TiO_2 nanocomposites prepared by solution blow spinning: surface properties and their relation with *S. Mutans* adhesion[J]. *Polymer Testing*, 2017, 58: 21–30. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.12.005.
- [21] LI J, SONG G, YU J, et al. Preparation of solution blown polyamic acid nanofibers and their imidization into polyimide nanofiber mats[J]. *Nanomaterials*, 2017, 7(11): 359. DOI:10.3390/nano7110395.
- [22] ZHANG T T, TIAN H, YIN X Q, et al. Solution blow spinning of polylactic acid to prepare fibrous oil adsorbents through morphology optimization with response surface methodology[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2020, 28(3): 812–825. DOI:10.1007/s10924-019-01617-6.
- [23] HAN W L, XIE S, SUN X X, et al. Optimization of airflow field via solution blowing for chitosan/peo nanofiber formation[J]. *Fibers and Polymers*, 2017, 18(8): 1554–1560. DOI:10.1007/s12221-017-7213-9.
- [24] VASIREDDI R, KRUSE J, VAKILI M, et al. Solution blow spinning of polymer/nanocomposite micro-/nanofibers with tunable diameters and morphologies using a gas dynamic virtual nozzle[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 14297. DOI:10.1038/s41598-019-50477-6.
- [25] SIMBARA M M O, SANTOS A R, ANDRADE A J P, et al. Comparative study of aligned and nonaligned poly (ϵ -caprolactone) fibrous scaffolds prepared by solution blow spinning[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2019, 107(5): 1462–1470. DOI:10.1002/jbm.b.34238.
- [26] ZHENG W X, ZHENG W Y, SHI C W, et al. Cylindrical-electrode-assisted solution blowing for nanofiber spinning[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(8): 47087. DOI:10.1002/app.47087.
- [27] MEDEIROS E L G, GOMES D S, SANTOS A M C, et al. 3D nanofibrous bioactive glass scaffolds produced by one-step spinning process[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(1): 102–110. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.08.112.
- [28] AKENTJEW T L, TERRAZA C, SUAZO C, et al. Rapid fabrication of reinforced and cell-laden vascular grafts structurally inspired by human coronary arteries[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3098. DOI: 10.1038/s41467-019-11446-9.
- [29] CARNEY B C, OLIVER M A, ERDI M, et al. Evaluation of healing outcomes combining a novel polymer formulation with autologous skin cell suspension to treat deep partial and full thickness wounds in a porcine model: a pilot study[J]. *Burns*, 2022, 48(8): 1950–1965. DOI:10.1016/j.burns.2022.01.012.
- [30] LEE M W, AN S, YOON S S, et al. Advances in self-healing materials based on vascular networks with mechanical self-repair characteristics[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2018, 252: 21–37. DOI: 10.1016/j.cis.2017.12.010.
- [31] MILLER C, STIGLICH M, LIVINGSTONE M, et al. Impedance-based biosensing of *pseudomonas putida* via solution blow spun PLA: MWCNT composite nanofibers [J]. *Micromachines*, 2019, 10(12): 876. DOI: 10.3390/mi10120876.
- [32] 高原. 溶液喷射纺丝技术在肝脏及心脏止血方面的应用研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021. DOI: 10.27262/d.cnki.gqdau.2021.001016.
- GAO Yuan. Application of solution blow spinning technology in liver and heart hemostasis[D]. Qingdao: Qingdao University, 2021. DOI: 10.27262/d.cnki.gqdau.2021.001016.
- [33] LORENTE M Á, GONZÁLEZ-GAITANO G, GONZÁLEZ-BENITO J. Preparation, properties and water dissolution behavior of polyethylene oxide mats prepared by solution blow spinning[J]. *Polymers*, 2022, 14(7): 1299. DOI:10.3390/polym14071299.
- [34] SHEN C Y, WU M L, SUN C, et al. Chitosan/PCL nanofibrous films developed by SBS to encapsulate thymol/HP β CD inclusion complexes for fruit packaging [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 286: 119267. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119267.
- [35] SHEN C Y, YANG Z C, RAO J S, et al. Development of a thermally conductive and antimicrobial nanofibrous mat for the cold chain packaging of fruits and vegetables[J]. *Materials & Design*, 2022, 221: 110931. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110931.
- [36] TANDON B, KAMBLE P, OLSSON R T, et al. Fabrication and characterisation of stimuli responsive piezoelectric PVDF and hydroxyapatite-filled PVDF fibrous

- membranes[J]. *Molecules*, 2019, 24(10): 1903. DOI: 10.3390/molecules24101903.
- [37] KOPEĆ K, WOJASIŃSKI M, CIACH T. Superhydrophilic polyurethane/polydopamine nanofibrous materials enhancing cell adhesion for application in tissue engineering[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(18): 6798. DOI: 10.3390/ijms21186798.
- [38] GREENHALGH R D, AMBLER W S, QUINN S J, et al. Hybrid sol-gel inorganic/gelatin porous fibres via solution blow spinning[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(15): 9066–9081. DOI: 10.1007/s10853-017-0868-1.
- [39] KOPEC K, WOJASINSKI M, EICHLER M, et al. Polydopamine and gelatin coating for rapid endothelialization of vascular scaffolds[J]. *Biomaterials Advances*, 2022, 134: 112544. DOI: 10.1016/j.msec.2021.112544.
- [40] DARISTOTLE J L, LAU L W, ERDI M, et al. Sprayable and biodegradable, intrinsically adhesive wound dressing with antimicrobial properties[J]. *Bioengineering & Translational Medicine*, 2019, 5(1): e10149. DOI: 10.1002/btm2.10149.
- [41] SZYMAŃSKA E, WOJASIŃSKI M, CZARNOMYSY R, et al. Chitosan-enriched solution blow spun poly (ethylene oxide) nanofibers with poly (dimethylsiloxane) hydrophobic outer layer for skin healing and regeneration[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(9): 5135. DOI: 10.3390/ijms23095135.
- [42] BEHRENS A M, CASEY B J, SIKORSKI M J, et al. In situ deposition of PLGA nanofibers via solution blow spinning[J]. *ACS Macro Letters*, 2014, 3(3): 249–254. DOI: 10.1021/mz500049x.
- [43] 郑作保, 冯洋洋, 贾姣, 等. 溶液喷射纺丝及其在生物医用材料中的应用[J]. *五邑大学学报(自然科学版)*, 2021, 35(4): 68–76. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7302.2021.04.010.
- ZHENG Zuobao, FENG Yangyang, JIA Jiao, et al. Solution blowing spinning technology and its application in the biomedical field[J]. *Journal of Wuyi University (Natural Science Edition)*, 2021, 35(4): 68–76. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7302.2021.04.010.
- [44] ZHUANG X P, SHI L, ZHANG B, et al. Coaxial solution blown core-shell structure nanofibers for drug delivery [J]. *Macromolecular Research*, 2013, 21(4): 346–348. DOI: 10.1007/s13233-013-1039-0.
- [45] BONAN R F, BONAN P R F, BTISTA A U D, et al. In vitro antimicrobial activity of solution blow spun poly (lactic acid)/polyvinylpyrrolidone nanofibers loaded with *Copaiba* (*Copaifera* sp.) oil[J]. *Materials Science & Engineering C: Materials for Biological Applications*, 2015, 48: 372–377. DOI: 10.1016/j.msec.2014.12.021.
- [46] SHEN C Y, YANG Z C, RAO J S, et al. Application of solution blow spinning to rapidly fabricate natamycin-loaded gelatin/zein/polyurethane antimicrobial nanofibers for food packaging[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, 29: 100721. DOI: 10.1016/j.fpsl.2021.100721.
- [47] CAO Y, SHEN C Y, YANG Z C, et al. Polycaprolactone/polyvinyl pyrrolidone nanofibers developed by solution blow spinning for encapsulation of chlorogenic acid[J]. *Food Quality and Safety*, 2022, 6: fyac014. DOI: 10.1093/fqsafe/fyac014.
- [48] SHEN C Y, YANG Z C, RAO J S, et al. Chlorogenic acid-loaded sandwich-structured nanofibrous film developed by solution blow spinning: characterization, release behavior and antimicrobial activity[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 32: 100854. DOI: 10.1016/j.fpsl.2022.100854.
- [49] BRANDAO R M, BATISTA L R, DE OLIVEIRA J E, et al. In vitro and in vivo efficacy of poly (lactic acid) nanofiber packaging containing essential oils from *Ocimum basilicum* L. and *Ocimum gratissimum* L. against *Aspergillus carbonarius* and *Aspergillus niger* in table grapes[J]. *Food Chemistry*, 2023, 400: 134087. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134087.
- [50] LIU F, SARICA OGLU F T, AVENA-BUSTILLOS R J, et al. Antimicrobial carvacrol in solution blow-spun fish-skin gelatin nanofibers[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(4): 984–991. DOI: 10.1111/1750-3841.14076.
- [51] LIU F, SARICA OGLU F T, AVENA-BUSTILLOS R J, et al. Preparation of fish skin gelatin-based nanofibers incorporating cinnamaldehyde by solution blow spinning [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(2): 618. DOI: 10.3390/ijms19020618.

Application of solution blow spinning technology in the field of life science

QIN Ziqiang¹, SHEN Chaoyi², WU Di^{1,2,3}, CHEN Kunsong¹

(1.College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2.College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. Zhejiang University Zhongyuan Institute, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Solution blowing is a new technology that uses high-speed air flow to stretch and refine polymer solution to form nanofibers, which has the characteristics of high preparation efficiency, simple equipment structure and high preparation safety, etc. In this review, based on the introduction of solution blow spinning technology, the preparation process of solution blowing nanofiber was described, and the main factors affecting its structure and morphology were analyzed. Moreover, the application of solution blow spinning nanofiber in life science fields was emphasized, including tissue engineering, wound dressing, drug release, and fruit and vegetable preservation materials, and the development trend of solution blowing technology was also prospected.

Key words: solution blow spinning; nanofiber; tissue engineering; wound dressing; sustained drug release; fruit and vegetable packaging

Manuscript received: 2022-12-01; **revised:** 2022-12-14; **accepted:** 2022-12-17

Foundation item: Project (2021FZZX001-55) supported by Basic Research Foundation for Central Universities

Corresponding author: WU Di (1984—) (ORCID: 0000-0002-4997-5082), male, professor, research interest: storage and preservation of fruit after harvest and cold chain logistics. E-mail: di_wu@zju.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:文李)