

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.11.025

熔体静电纺丝技术及其应用研究进展

童俊¹, 关竣荣¹, 王志锋¹, 李伟¹, 张海琛²

(1. 佛山大学机电工程与自动化学院, 广东佛山 528000; 2. 佛山大学材料与能源学院, 广东佛山 528000)

摘要: 回顾了熔体静电纺丝技术的发展历程, 简述了熔体静电纺丝工艺参数及材料特性对纤维沉积特性的影响。重点介绍了基于熔体微分静电纺丝、熔体静电纺丝直写和熔体同轴静电纺丝等技术制备纤维的技术原理及其在相变储能、生物医疗、环保过滤、光/电子器件和非织造布领域的应用, 阐述了熔体静电纺丝的研究成果, 并指出了该技术在实际应用中亟待解决的问题。

关键词: 静电纺丝; 纳米纤维; 熔体微分; 熔体直写; 熔体同轴

中图分类号: TQ340.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)11-0171-06

Research progress on melt electrospinning technology and its applications

TONG Jun¹, GUAN Junrong¹, WANG Zhifeng¹, LI Wei¹, ZHANG Haichen²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. School of Materials and Energy, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: The development process of melt electrospinning technology was reviewed, along with a brief discussion on how process parameters and material properties affect fiber deposition characteristics. The technical principles of fiber preparation using melt differential electrospinning, melt electrospinning direct writing, and melt coaxial electrospinning were emphasized, along with their applications in phase change energy storage, biomedical fields, environmental filtration, optical/electronic devices, and nonwoven fabrics. The research achievements of melt electrospinning were detailed, and the urgent issues that need to be addressed in its practical applications were highlighted.

Keywords: electrospinning; nanofiber; melt differential; melt writing; melt coaxial

近年来,随着社会经济的繁荣和科学技术的进步,纳米技术得到了极大发展,特别是静电纺丝技术,被广泛应用于制备聚合物纳米纤维等领域。静电纺丝常分为溶液静电纺丝和熔体静电纺丝两种类型。其中,溶液静电纺丝的研究相对较早,已经实现了批量化生产^[1],但是溶液静电纺丝存在溶剂具有毒性且难以回收、所制备的纤维表面不光滑、强度较低和纤维转化率较低等缺点^[2]。而熔体静电纺丝作为一种绿色高效的纺丝技术,具有无需使用溶剂的优势,越来越受到重视。笔者简述了熔体静电纺丝的工艺参数和材料特性对制备纤维的影响,并总结了该技术在相变、医疗和过滤等不同领域的应用及发展趋势。同时,重点介绍了熔体静电纺丝技术若干典型类型的原理及特点,为拓展熔体静电纺丝技术及其应用提供了理论依据,也为熔体静电纺丝相关行业的发展奠定基础。

1 熔体静电纺丝技术

熔体静电纺丝是一种将聚合物加热到熔融状态,在高压电场下克服表面张力,形成射流并拉伸成纳米纤维,最后沉积到收集模块上的增材制造技术^[3-4]。熔体静电纺丝虽然具有诸多优势,但其制备效率较低、纤维功能单一是制约该技术发展及应用的主要难题。因此,学者们优化改进了纺丝设备及工艺,并提出了多种不同熔体静电纺丝技术,丰富了该技术的原理和工艺,探究了影响纤维沉积特性的主要因素。

1.1 技术原理与工艺特点

1.1.1 熔体微分静电纺丝

如何提升熔体纺丝效率一直是众多学者的研究重点, Koenig 等^[5]研制出具有 600 个针头的静电纺丝装置(图 1a),显著提升了纤维的产量。另一些学者提出了无针熔体静电纺丝技术。Komarek 等^[6]设计出了狭缝式无针熔体静电纺丝装置,在电场作用下,熔体在狭缝处形成了多射流,但该方法

通信作者: 李伟, 博士研究生, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为高分子材料加工成型与装备

收稿日期: 2024-08-30

引用格式: 童俊, 关竣荣, 王志锋, 等. 熔体静电纺丝技术及其应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(11): 171-176.

TONG Jun, GUAN Junrong, WANG Zhifeng, et al. Research progress on melt electrospinning technology and its applications[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(11): 171-176.

难以实现均匀的射流控制。Fang等^[7]提出了盘式熔体静电纺丝装置(图1b),通过盘式纺丝头蘸取熔体进行纺丝,但其对熔体黏度要求较高且纺丝过程不稳定。

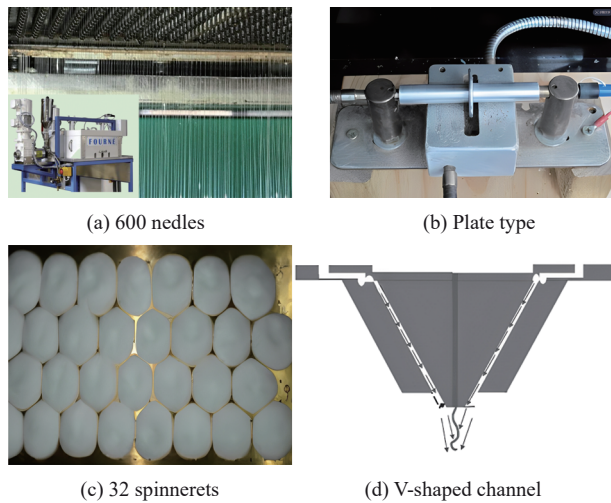


图1 不同的熔体微分静电纺丝装置^[5,7-9]

Fig. 1 Different melt differential electrospinning devices

杨卫民等^[10]受到大自然中瀑布“水溢自流”自然现象的启发,基于高分子先进制造微积分思想,提出了“熔体微分静电纺丝”概念,并设计了一种熔体微分喷头,实现了纳米纤维的高效制备。其工作原理如图2所示,聚合物熔体在微分喷头表面展薄后,在电场力的牵引作用下,微分喷头的下表面成型数十个泰勒锥,并形成多个射流喷射出来。与毛细管喷头相比,纺丝效率得到大大提升^[11]。Chen等^[11]将伞形微分喷头进行阵列排序(图1c),构建了产量为300~600 g/h的规模化生产线。而陈明军^[12]提出了直线狭缝熔体微分静电纺丝喷头,其纺丝效率相较单喷头提高了4倍。

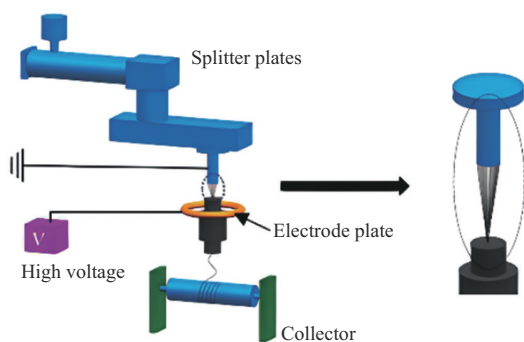


图2 熔体微分静电纺丝示意图

Fig. 2 Schematic diagram of melt differential electrospinning

在熔体微分静电纺丝制造过程中,熔体射流会被周边的空气迅速淬灭,抑制了初始射流衰减。马小路^[13]使用“上吹风”气体辅助法,利用高速气流使聚合物熔体得到充分拉伸,有效降低了纤维直径。而王循等^[14]使用“下吹风”气体辅助法,利用抽吸风装置,在微分喷头下方形成负压,该方法气流没有直接接触到微分喷头,纺丝过程更稳定。陈明军等^[8]设计了V形流道(图1d),通过气流对射流进行二次牵伸,实现

了超细纤维的批量生产。

1.1.2 熔体静电纺丝直写

熔体静电纺丝直写技术也是学者们的研究热点,它结合了熔融沉积成型(FDM)和熔体静电纺丝的优点^[15],运用了计算机辅助设计和控制,使其在实现纤维逐层精确沉积和支架3D结构构建方面更具优势^[16]。Brown等^[17]首次使用了熔体静电纺丝直写技术,并基于方波轨迹纵横堆叠来构建三维结构支架(图3a)。Hochleitner等^[18]通过优化纺丝参数,提出了新的沉积方案,并成功制备出规则的网格状支架。Wu等^[19]使用熔体静电纺丝直写打印出具有蜿蜒结构的纤维图案(图3b)。Mccoll等^[20]设计开发出一个应用于熔体静电纺丝直写的程序,可自动调节实验参数,极大地提高了三维支架的生产效率和可控性。Liang等^[21]使用熔体静电纺丝直写技术制备了梯度间距纤维微阵列,建立了细胞取向诱导新方法。

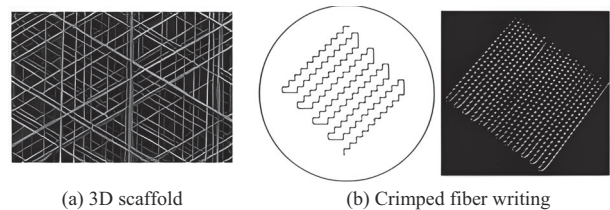


图3 熔体静电纺丝直写制备的纤维结构^[17,19]

Fig. 3 Fiber structure prepared by melt electrospinning writing

1.1.3 熔体同轴静电纺丝

熔体同轴静电纺丝工作原理如图4所示,它是将传统单一的纺丝喷头更换成同轴不同直径的复合喷头,内流道和外流道分别连接不同的供料模块和加热模块,以实现单独的流量控制和温度控制。Mccann等^[22]通过熔体同轴静电纺丝实现了固体材料的一步电纺和包封,拓展了熔体静电纺丝的应用范围。Li等^[23]使用了将内外纺丝液同时加热的方法,制备了具有良好形态的壳芯结构纤维。何万林等^[24]利用熔体同轴静电纺丝装置,通过控制壳层与芯层的流量大小,可以制备出不同结构和功能的同轴纤维。

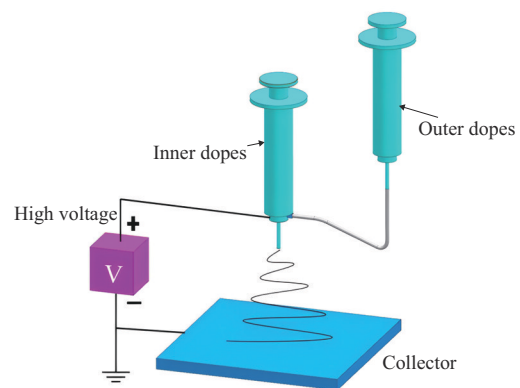


图4 熔体同轴静电纺丝示意图

Fig. 4 Schematic diagram of melt coaxial electrospinning

1.2 纤维成型影响因素

1.2.1 工艺参数

熔体静电纺丝主要工艺参数有熔体流动指数、熔体温

度、纺丝距离和纺丝电压,这些工艺参数对纤维的形成和质量有显著影响。熔体静电纺丝施加的电压范围通常在7~50 kV间,具体取决于电纺的技术和材料^[25]。电压过高,纤维直径反而变大,这可能是施加在纤维上的拉伸力过大,导致下降速度过高,纤维在完全拉伸前已沉积到收集装置^[26]。另外,高电压往往存在电场击穿、电晕和局部放电等安全隐患^[27-28]。当熔体温度升高时,分子链间的运动加快,促进分子链的解缠,从而使得熔体黏度降低、纤维变细^[29]。Morikawa等^[30]通过将喷嘴温度从300℃升高到360℃,使得纤维直径从(33±5) μm减少到(10±4) μm。

1.2.2 材料特性

相关研究发现,材料特性在不同程度上影响着射流形态及最终纤维的沉积特性。当分子量过高时,熔体黏度会过大,导致射流难以拉伸;而分子量降低时,纤维直径也减少,直至射流因分子链纠缠而发生断裂^[31-32]。当聚丙烯(PP)的分子量从580 000降低到12 000时,也会使得纤维的平均直径从466 μm减少到3.5 μm^[31]。鉴于聚合物熔体比聚合物溶液具有更高的黏度和更低的体积收缩的特点^[33],熔体静电纺丝所制备的纤维平均直径一般会更大。另外,若黏度过高,可能存在电场力无法克服黏度阻力而进行纺丝的问题^[27]。为了解决该问题,一般多通过提高工艺温度和添加流变改性剂等方法来有效地降低聚合物黏度^[34]。Nayak等^[35]探索了纺丝过程中使用导电添加剂油酸钠和氯化钠(NaCl)对制备PP纳米纤维的影响,发现了NaCl的小离子尺寸有助于提高离子的迁移率,增加熔体射流上的电荷密度。同时,相关报告指出熔体的导电性还在形成稳定射流的过程中起着重要作用,在低电导率下,内部电流扰动较小,避免了射流在初始阶段的剧烈波动和不稳定问题^[36-37]。

2 熔体静电纺丝的应用

2.1 相变储能

相变纤维(图5)是指在一定温度范围内,当外界环境温度升高时能吸收存储热量,而当外界环境温度降低时能释放存储热量的智能调温材料^[38-39]。然而,相变材料易泄漏的问题限制了其发展^[40],而同轴静电纺丝技术有效解决了上述问题,该技术通过一步制备出壳芯结构的纤维,并将直接将相变材料包裹在聚合物外壳内。与溶液同轴静电纺丝相比,熔体同轴静电纺丝具有芯内无溶剂的特点,从而极大地提高了相变材料的封装效率^[40]。

Cong等^[41]使用熔体同轴静电纺丝技术成功制备出二十烷/聚偏氟乙烯(PVDF)复合纳米纤维(熔点39.2℃时,潜热系数为77 J/g),其制备过程:首先将二十烷放入不锈钢预热至55℃,把溶解在N,N-二甲基甲酰胺中的PVDF(16%)放入塑料注射器中,然后将熔融的二十烷和PVDF溶液注入由两个同心毛细管组成的同轴复合喷丝头中,两条毛细管连接同一高压电源,芯层和壳层材料的进料速率分别由两个独立的泵控制。另外,Cong等^[42]还利用熔体同轴静电纺丝技术成功制备出聚乙二醇(PEG)/PVDF复合纤维。这些复合纤维具备

温度调节能力,并且还具有较高的力学强度和良好的热稳定性,是制备智能温控纺织品的储热材料。

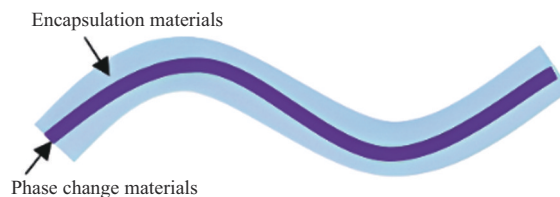


图5 相变复合纤维示意图

Fig. 5 Schematic diagram of coaxial fiber

Wang等^[40]制备了以PVDF包封结晶紫内酯、双酚A和1-十四醇(CBT)的可逆热致变色复合纤维,其潜热系数高达88.71 J/g。经过100次热循环测试显示,该纳米纤维有效地克服了相变材料泄漏问题,具备良好的热致变色性能。同时,热致变色复合材料封装和固定的成功实现,使其在热防护服和热响应式传感器中具有潜在的应用价值。

同轴电纺制备出复合纤维后,可通过煅烧或洗涤去除芯层材料得到中空纤维管,该技术所制备的复合纤维常用于催化剂、单分子检测、微固相萃取等^[43];制备出具有自修复功能的纤维薄膜并应用于光电子设备^[44]。

2.2 生物医疗

组织工程是一种先进的医学方法,用于治疗或重建受损的组织^[45],组织工程支架作为该技术的关键要素之一,可为细胞活化、细胞间通讯和诱导细胞组织提供良好的环境^[46]。组织工程支架必须具有良好的生物相容性,合适的表面结构和化学性能以促进细胞附着,还应具有多孔结构和渗透性以允许细胞和营养物质进入,与此同时,足够的力学性能和生物降解性也是必不可少的。

溶液静电纺丝射流严重的“鞭动”现象会导致聚合物的沉积难以预测,从而影响支架结构。相比之下,熔体静电纺丝射流的运行路径更稳定^[47]。此外,通过熔体静电纺丝制备的高孔隙率支架具有更高的力学性能^[48],有利于细胞的黏附生长分化,是制备组织工程支架的理想技术。

Meng等^[49]采用熔体静电纺丝直写技术成功制备了孔径为200 μm,丝径为40 μm的左旋聚乳酸(PLLA)支架,研究分析了加热时间、施加电压和收集速度等工艺参数对支架质量的影响,并在体外实验中通过对KUSA-A1细胞的观察发现,所制备的PLLA支架不仅展示了良好的细胞相容性,还促进了细胞的黏附和增殖能力。Bertlein等^[49]采用熔体静电纺丝直写制造出聚己内酯(PCL)血管组织支架,再通过细胞积累技术控制支架中毛细血管样结构方向,采用该支架组织结构的厚度显著提升,并具备良好的力学稳定性和处理性能。Farag等^[50]利用熔体静电纺丝直写制备了一种用于牙周组织再生的多功能三维支架,再通过仿生工艺在支架表面形成磷酸钙层,增强了支架的生物活性,可促进骨的快速形成。Hewitt等^[51]利用该技术开发出含有生物活性乳蛋白、乳铁蛋白和乳清蛋白添加剂的PCL皮肤组织支架,其微孔支架具有

良好的蛋白质释放特性,生物活性添加剂可促进组织再生。

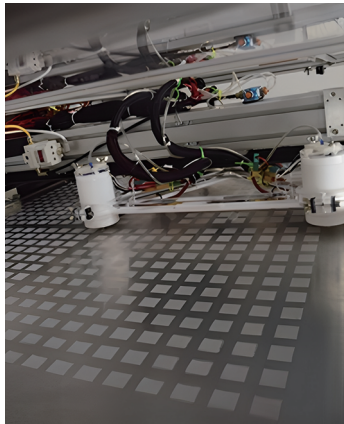


图6 熔体静电纺丝直写装置^[52]

Fig. 6 Melt electrospinning writing device

熔体静电纺丝直写技术(图6)还可以应用于制备软骨组织支架^[53]、心脏组织支架^[54]和微流道支架^[55]等,这些研究都显示出熔体静电纺丝直写技术在制备高精度医用支架的应用潜力。而熔体同轴静电纺丝被不少学者认为是一种很有前景的用于制备生长因子和药物载体的有效方法^[36],并有望应用在医用缝线来促进伤口愈合^[56]、抗菌同轴多孔载药纤维用于药物缓释^[57]等方面。

2.3 环保过滤

随着工业化和城市化进程的不断推进,环境污染成为制约可持续发展的重要障碍之一,环保过滤领域的重要性愈发凸显。聚合物纳米纤维膜具有高比表面积、高孔隙率,在环保过滤方面应用较广。

杜琳等^[58]利用熔体微分静电纺丝技术制备出聚乳酸(PLA)/乙酰柠檬酸三丁酯(ATBC)空气滤膜,实验结果表明增塑剂ATBC用量为10%条件下制得空气滤膜的孔隙率最大,过滤效率最高达99.95%,达到欧标EN779中高效滤膜的过滤等级H13,过滤阻力为195.2 Pa。王循等^[59]成功制备出PLA/有机改性蒙脱土(OMMT)纳米纤维膜,研究发现OMMT质量分数为2%时,纤维直径为450 nm,纤维膜吸油倍率为133.5 g/g,保油倍率为84.2 g/g,均达到最佳水平。通过5次重复吸/放油过程后,仍可继续进行吸油,吸油倍率为初次吸油倍率的70%。许浩^[60]制备了PP/PEG超细纤维,再通过折叠、裁切、冷压等步骤处理,加工成具有优良中低频吸声性能的吸声棉,纤维直径为1.8 μm,共振频率为376 Hz,吸声系数为0.82,降噪系数达0.52。

Li等^[61]使用溶液静电纺丝制备的聚乙烯醇(PVA)纤维膜作为表层,熔体静电纺丝制备的PP纤维膜作为支撑层。PVA/PP复合膜对500 nm颗粒截留率可达96%以上,且在0.024 MPa压力下仍能保持32 346 L/(m²·h)的高渗透通量。

2.4 光/电子器件

在物联网和高新设备快速发展的背景下,对多功能、高性能和高灵敏度传感器的需求呈指数倍增长,这推动了新材

料新技术的探索及应用。Lee等^[62]提出了一种基于熔体静电纺丝技术制备微结构薄膜的电阻式压力传感器。首先,通过熔体静电纺丝制备垂直排列的聚醚嵌段聚酰胺圆柱形微结构薄膜,再使用[聚(3,4-乙炔二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS)](PEDOT:PSS)涂覆薄膜,最后将薄电阻膜夹在上下电极之间,从而制备出压力传感器(图7)。研究团队把该传感器应用在中点触控界面,展示出可靠、成本效益和可重复性的优势,并展望了其在制备柔性电子和可穿戴产品中的应用前景。

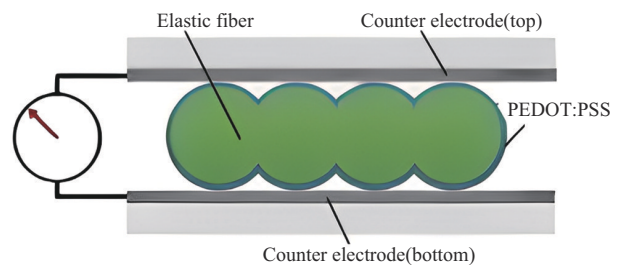


图7 压力传感器工作示意图^[62]

Fig. 7 Schematic diagram of the pressure sensor working principle

Kim等^[63]利用熔体静电纺丝制备了沥青基碳纤维(PCFs),并将其用于一氧化氮(NO)检测。研究了通过不同的活化条件和热处理温度对PCFs进行改性的影响。结果表明,化学活化提高了纤维的表面粗糙度和比表面积,热处理温度的升高则促进了石墨结构的形成,最终形成了更多的气体吸附位点并改善了电子传输效率。经过优化的PCFs对NO气体的传感能力有显著提高。

Ko等^[64]利用熔体静电纺丝开发了一种用于辅助手部康复的可拉伸力传感器,成功测试并表征了四种不同结构传感器的拉伸和电阻性能。将传感器贴附于人体手腕监测手部动作,实验结果表明传感器能够灵敏地响应手部的微小运动和弯曲,表现出优异的实时监测能力。

当前电子电路和元件正趋向小型化、高集成化发展,减少光子结构和元件显得尤为重要。微/纳米光纤(MNOFs)可应用于光通信^[65]、光捕获/操控^[66]和激光直写^[67]等方面。传统制备MNOFs过程表现出较差的重复性,设备昂贵,无法用于大规模生产。Chen等^[68]提出了一种基于熔体近场静电纺丝制备MNOFs的方法,采用聚甲基丙烯酸甲酯成功制备了直径从500 nm~6 μm的单根光纤,这些光纤具有表面光滑、直径均匀和损耗低等优点。

2.5 非织造布

非织造布是一种通过将纤维或长丝直接形成网状结构的织物,其制备过程不需要传统的纺纱或编织工艺。通过熔体静电纺丝可以制备具有超疏水性和超亲油性的非织造布,满足医疗或军事领域对防护服的需求,也可以用于开发轻薄的吸水性运动服^[27]。Lee等^[69]将电纺的聚氨酯纤维网层附着在非织造布上,以提高其屏障性能。在高密度的情况下,仍

保持了较高的空气渗透性和水蒸气传输性,保持了材料热舒适性的同时,还显著提高了防护性能,缓解了传统防护服材料因高阻隔性而导致的透气性差的问题。

Li等^[70]采用激光熔体静电纺丝装置制备了直径为3~12 μm的PCL非织造布。通过X射线衍射和差示扫描量热法测定,PCL纤维的结晶度与退火纤维的结晶度相似,形成的晶体结构稳定。纤维垫具有三维网络结构,纤维间存在黏结,有利于提高力学性能,拉伸强度为(1.96±0.1) MPa,拉伸弹性模量为(40.4±1.6) MPa,断裂应变为(122.2±45)%。

Malakhov等^[71]利用熔体静电纺丝制备了碳酸钙填充的PP非织布,表现出超疏水特性,但纤维平均直径随着碳酸钙含量的增加而增加。他们团队还在纺丝过程中分别向聚酰胺6中加入低分子添加剂和蒙脱土,也获得了具有疏水特性的非织造布^[72-73]。

3 总结与展望

熔体静电纺丝制备纳米纤维有着独特的优势,在许多领域都具有广阔的应用前景,但同时其也面临着不少难题和挑战亟待解决。

(1)材料选择的局限性是熔体静电纺丝面临的一大难题。溶液静电纺丝可使用多种有机溶剂来溶解不同类型的聚合物形成纺丝液,而熔体静电纺丝主要适用于热塑性聚合物,一些聚合物的热稳定性较差,在纺丝过程中可能会发生降解。

(2)针对熔体静电纺丝的理论模型和纺丝机理的基础性研究仍然不足,如何解决纤维断裂、喷头易堵塞等常见问题,实现纤维连续稳定喷射仍然是一个挑战。

(3)在制备高精度微纳器件时,由于熔体黏度较大,制备纳米级的纤维较为困难。通过控制喷头与收集模块之间的相对运动引起的拉伸作用,可在一定程度上减小纤维尺寸,但这对实现纤维沉积位置的精准控制带来了新的挑战。

(4)设备与成本问题。在加热聚合物时需要高温控制技术,使用水浴或油浴加热可精确调控温度,但加热温度范围有限制;热风加热设备简单、成本较低,但是气流的存在容易对射流的运动和沉积造成干扰;电加热可实时调控温度,但加热时间较长,而且还存在着电压干扰的安全问题。此外,高电压设备的维护和纺丝装置需精密制造,均导致了生产成本较高。

在未来,研究者们应着重于材料创新、工艺优化及多功能便携式设备开发,建立完整的熔体静电纺丝射流控制及沉积科学理论体系,使熔体静电纺丝技术从实验室研究走向大规模工业化生产制造,为纳米技术的开发和应用注入新的活力。

参考文献

[1] PERSANO L, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2013, 298(5):504-520.
[2] 王紫行,等. *化工新型材料*, 2020, 48(3):29-32, 36.
WANG Zihang, et al. *New Chemical Materials*, 2020, 48(3): 29-

32, 36.
[3] OBEID M A, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2023, 309(4). DOI:10.1002/mame.202300376.
[4] OSTHELLER M E, et al. *Polymers (Basel)*, 2022, 14(14). DOI: 10.3390/polym14142865.
[5] KOENIG K, et al. *Biomater Res*, 2019, 23. DOI: 10.1186/s40824-019-0159-9.
[6] KOMAREK M, et al. *Proceedings of the 2nd Nanocon International Conference*, Tanger Ltd., Czech Republic, EU, 2010:72-77.
[7] FANG J, et al. *Journal of Nanomaterials*, 2012. DOI:10.1155/2012/382639.
[8] 陈明军,等. *工程塑料应用*, 2021, 49(1):86-90.
CHEN Mingjun, et al. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49 (1):86-90.
[9] MINGJUN C, et al. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2019, 2(3):110-115.
[10] 杨卫民,等. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(4):1-13.
YANG Weimin, et al. *Journal of Beijing University of Chemical Technology:Natural Science*, 2014, 41(4): 1-13.
[11] CHEN Q, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(11): 2 887-2 894.
[12] 陈明军. *直线狭缝熔体微分电纺超细纤维及其空气过滤组件的研究[D]*.北京:北京化工大学, 2020.
CHEN Mingjun. *Ultra-fine fibers fabricated from linear slot melt differential electrospinning and its air filtration components[D]*. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2020.
[13] 马小路. *聚合物熔体微分静电纺丝纳米捻线的制备研究[D]*.北京:北京化工大学, 2017.
MA Xiaolu. *Continuous manufacturing of nanofiber yarn via polymer melt electrospinning[D]*. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
[14] 王循,等. *化工进展*, 2018, 37(11):4 390-4 396.
WANG Xun, et al. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(11):4 390-4 396.
[15] MENG J, et al. *Materials & Design*, 2021, 210. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110063.
[16] 姜玉,等. *中国组织工程研究*, 2024, 28(10):1 606-1 612.
JIANG Yu, et al. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2024, 28(10):1 606-1 612.
[17] BROWN T D, et al. *Adv Mater*, 2011, 23(47):5 651-5 657.
[18] HOCHLEITNER G, et al. *Biofabrication*, 2015, 7(3). DOI: 10.1088/1758-5090/7/3/035002.
[19] WU Y, et al. *Materials & Design*, 2017, 131:384-393.
[20] MCCOLL E, et al. *Materials & Design*, 2018, 155:46-58.
[21] LIANG F, et al. *Materials Research Express*, 2018, 6(1). DOI: 10.1088/2053-1591/aac6f3.
[22] MCCANN J T, et al. *Nano Letters*, 2006, 6(12):2 868-2 872.
[23] LI F, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 112(1): 269-274.

- [24] 何万林,等.工程塑料应用,2016,44(11):48-52.
HE Wanlin, et al. Engineering Plastics Application, 2016, 44(11): 48-52.
- [25] BACHS-HERRERA A, et al. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(4). DOI:10.3390/app11041808.
- [26] HAO M F, et al. Advanced Materials Research, 2011, 221: 129-134.
- [27] BUBAKIR M M, et al. Handbook of Nanofibers. 2019:125-156.
- [28] ZHANG K, et al. Sci Rep, 2021, 11(1). DOI:10.1038/s41598-021-88520-0.
- [29] 王宇航,等.高分子材料科学与工程,2024. DOI:10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0150.
WANG Yuhang, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2024. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0150.
- [30] MORIKAWA K, et al. Macromolecular Materials and Engineering, 2020, 305(12). DOI:10.1002/mame.202000106.
- [31] LYONS J, et al. Polymer, 2004, 45(22):7 597-7 603.
- [32] LIU Y, et al. Polymer Engineering & Science, 2010, 50(10): 2 074-2 078.
- [33] KADOMAE Y, et al. Fibers and Polymers, 2009, 10(3):275-279.
- [34] NAYAK R, et al. Electrospun Nanofibers, 2017:11-40.
- [35] NAYAK R, et al. Journal of Materials Science, 2012, 47(17): 6 387-6 396.
- [36] BROWN T D, et al. Progress in Polymer Science, 2016, 56: 116-166.
- [37] ZHMAIEV E, et al. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2008, 153(2-3):95-108.
- [38] 陈家东,等.化工新型材料,2023,51(4):51-57,65.
CHEN Jiadong, et al. New Chemical Materials, 2023, 51(4):51-57,65.
- [39] 张锟,等.合成纤维,2022,51(9):16-21.
ZHANG Kun, et al. Synthetic Fiber in China, 2022, 51(9):16-21.
- [40] WANG S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(21). DOI:10.1002/app.50465.
- [41] CONG V D, et al. Korean Journal of Chemical Engineering, 2013, 30(7):1 403-1 409.
- [42] CONG V D, et al. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 104:131-139.
- [43] RATHORE P, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2021, 13(1): 48-66.
- [44] HAN D, et al. Chempluschem, 2019, 84(10):1 453-1 497.
- [45] KHAN M U A, et al. Int J Biol Macromol, 2024, 254(Pt3). DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.127882.
- [46] SUGIAMAN V K, et al. Polymers, 2023, 15(5). DOI: 10.3390/polym15051082.
- [47] WUNNER F M, et al. Adv Mater, 2018, 30(20). DOI: 10.1002/adma.201706570.
- [48] 张墅野,等.中国医疗器械信息,2019,25(9):41-42.
ZHANG Shuye, et al. China Medical Device Information, 2019, 25(9):41-42.
- [49] BERTLEIN S, et al. Small, 2018, 14(2). DOI: 10.1002/smll.201701521.
- [50] FARAG A, et al. Ceramics International, 2023, 49(5):8 015-8 021.
- [51] HEWITT E, et al. Biomed Mater, 2019, 14(5). DOI:10.1088/1748-605X/ab3344.
- [52] ROBINSON T M, et al. Advanced Functional Materials, 2019, 29(44). DOI:10.1002/adfm.201904664.
- [53] PEIFFER Q C, et al. Mater Des, 2020, 195. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109025.
- [54] CASTILHO M, et al. Adv Healthc Mater, 2017, 6(18). DOI: 10.1002/adhm.201700311.
- [55] ZENG J, et al. Microfluidics and Nanofluidics, 2018, 22(2). DOI: 10.1007/s10404-018-2043-7.
- [56] XU L, et al. Polymers (Basel), 2022, 14(9). DOI: 10.3390/polym14091637.
- [57] CHEN X, et al. Nanomaterials (Basel), 2021, 11(5). DOI:10.3390/nano11051316.
- [58] 杜琳,等.化工新型材料,2019,47(12):82-86.
DU Lin, et al. New Chemical Materials, 2019, 47(12):82-86.
- [59] 王循,等.材料工程,2019,47(7):99-105.
WANG Xun, et al. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(7): 99-105.
- [60] 许浩.高性能熔体微分电纺超细纤维吸声棉制备及性能研究[D].北京:北京化工大学,2021.
XU Hao. Study on preparation and performance of high-performance melt differential ultrafine fiber sound-absorbing cotton[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [61] LI X, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 132(10). DOI:10.1002/app.41601.
- [62] LEE G-Y, et al. Smart Materials and Structures, 2018, 27(11). DOI:10.1088/1361-665X/aae041.
- [63] KIM J, et al. Research on Chemical Intermediates, 2014, 40(7): 2 571-2 581.
- [64] KO J, et al. Smart Materials and Structures, 2015, 24(7). DOI: 10.1088/0964-1726/24/7/075027.
- [65] HE H, et al. Light Sci Appl, 2023, 12(1). DOI: 10.1038/s41377-022-01067-1.
- [66] XIN H, et al. Frontiers of Optoelectronics, 2017, 12(1):97-110.
- [67] TIAN F, et al. Optics Express, 2009, 17(22):19 960-19 968.
- [68] CHEN Q, et al. Opt Lett, 2017, 42(24):5 106-5 109.
- [69] LEE S, et al. Textile Research Journal, 2016, 77(9):696-702.
- [70] LI X, et al. Polymer, 2012, 53(1):248-253.
- [71] MALAKHOV S N, et al. Polymers, 2020, 12(12). DOI:10.3390/polym12122981.
- [72] MALAKHOV S N, et al. Russian Journal of Applied Chemistry, 2016, 89(1):165-172.
- [73] MALAKHOV S N, et al. Polymer Science Series A, 2016, 58(2): 236-245.