

静电纺取向纳米纤维的制备及在组织工程中的应用进展

周歆如¹, 胡铖焯¹, 范梦晶¹, 韩 潇^{1,2}, 洪剑寒^{1,2,3,*}

(1. 绍兴文理学院 纺织服装学院, 浙江 绍兴 312000;

2. 浙江省清洁染整技术研究重点实验室, 浙江 绍兴 312000;

3. 纤维基复合材料国家工程研究中心绍兴分中心, 浙江 绍兴 312000)

摘要:为拓展静电纺取向纳米纤维的应用领域,进一步提高收集静电纺取向纳米纤维的取向度和效率,综述了利用改变接收装置来制备取向纳米纤维的多种方法,根据接收装置的不同,主要分为旋转式收集法、水浴收集法和平行板收集法。简单分析了各种方法的基本原理和优缺点,阐述了取向纳米纤维在生物组织工程领域的重要应用,通过研究人员一系列的研究成果证实了取向纳米纤维可用于生物组织工程中的修复和再生。对静电纺取向纳米纤维的发展做了展望,为取向纳米纤维的制备和应用提供参考。

关键词:静电纺丝;取向纳米纤维;应用;组织工程

中图分类号:TQ340.64

文献标识码:A

文章编号:1673-0356(2022)02-0001-07

随着科技的进步,纳米技术的发展更加迅速,合成纳米纤维逐渐被人们熟知。在众多合成纳米纤维的制备方法中,静电纺丝以其简单快捷、经济高效的特点被重视起来。该技术通过在设定的参数条件下对高分子聚合物进行加工从而得到具有纳米级尺寸的纤维支架,主要具有以下优点:设备成本低,装置简单,易于操作,可实现纤维取向、结构、形貌调控,可一步合成复合/多功能纳米纤维材料。典型的静电纺装置主要由高压电源、注射泵、喷丝头和接收器组成^[1]。在静电纺丝过程中,喷丝头与接收器之间会存在高压静电场,从注射泵推出的聚合物液体(或熔体)经过喷丝头时,液体表面产生的静电排斥作用会克服表面张力使得液体被拉伸为圆锥状,形成射流。射流在喷发进程中直径减小、溶剂挥发,最终固化为非织造纤维毡并收集在接收器上。通过静电纺丝成功制备的聚合物纳米纤维的性能是由溶剂、聚合物溶液、环境条件和电压、流速、接收距离等工艺参数共同决定的^[2]。由于具有比表面积大、孔隙率高、易于修饰等优良特性,静电纺纳米纤维最早被用作过滤材料以捕获溶胶粒子^[3]。现如今静电纺纳米纤维在生物医药、组织工程、智能纺织品、电子器件等领域都引起了极大的关注。纳米纤维材料已成

为我国未来战略发展的重要材料,具有广阔的市场前景^[4]。

近几十年来,研究者们通过改进接收装置、针头结构等制备了一系列不同堆积方式的纳米纤维结构,高取向纳米纤维因其特殊的光学、电学和力学性能而受到广泛关注。详细介绍了静电纺丝制备取向纳米纤维的方法和取向纳米纤维的应用,并对取向纳米纤维的未来发展进行了展望。鉴于定向纳米纤维在生物组织工程领域的重要性,本文进行了重点介绍。

1 静电纺取向纳米纤维的制备方法

静电纺丝是将处于电场中的聚合物在静电力的影响下克服表面张力产生射流,以纤维的形态收集的过程^[5]。静电纺取向纳米纤维是具有好的取向性和高度规则排列的纤维,它是通过改进收集设备、增加辅助电极等方式调节电场分布,来改变射流在特定区域内的电场中的运动轨迹而得到的。将获得的纳米纤维通过加捻、集束等方法处理后还可获得纳米纤维纱线,有利于扩展静电纺纳米纤维的应用。早期人们使用铝箔和金属网格作为收集装置只能接收到无序的纤维,因而通过改进收集装置制备取向纳米纤维是当前比较常见的方法。根据收集装置的不同,可将静电纺纳米取向纤维的制备方法分为旋转式收集法、水浴收集法、平行板收集法3类。

1.1 旋转式收集法

旋转式收集法是最为普遍的制备取向纳米纤维的

收稿日期:2021-10-14

基金项目:浙江省公益技术研究计划项目(LGG20E030002)

作者简介:周歆如(1998-),女,硕士,主要研究方向为功能纺织品的开发与应用。

*通信作者:洪剑寒(1982-),男,副教授,博士,主要研究方向为新型纺织材料的制备与应用,E-mail:jhhong@usx.edu.cn。

方法,它是利用旋转器对射流的机械牵伸来达到静电纺纳米纤维取向收集的目的。利用高速旋转的滚筒收集装置可将纳米纤维平行取向排列。理论上,滚筒表面的线速度不小于纤维的沉积速度时,即可以制备出单轴取向的纳米纤维。

旋转式收集法早在20世纪末被Doshi^[6]用于研究静电纺制备聚合物纳米纤维的试验中,试验表明高取向纤维可以通过高速旋转的滚筒收集装置,使射流中的分子结晶延伸来得到,但受一些包括表面电荷、电场强度、空气和喷流之间界面张力参数的影响,并不能稳定得到高取向纤维。

Mathew等^[7]发现滚筒式收集器的转速存在一个最佳点,在滚筒速度为1 200 r/min时,纤维的取向度最高;若滚筒速度达到1 600 r/min时,纤维会呈现出波浪状。可知,只有在旋转滚筒表面线速度与射流沉积速度相匹配时,纤维的取向度才会高。随着滚筒速度的增加,纤维直径分布变得更窄,这是因为直径较大的纤维部分减少了。表面速度越高,其对拉伸性能的影响越明显,在0°角下,随着滚筒速度的增加,性能提高了近4倍。虽然旋转式滚筒收集法操作简易,但耗时耗能取向度不高,受其装置的启迪,相关研究人员开展了新的研究。

Theron等^[8]设计了一个圆盘作为收集装置,它有着锋利的边缘,根据尖端放电原理电荷容易在上面聚集,随着转盘的高速转动,射流在机械作用下形成取向排列的纳米纤维,如图1所示。利用这个设备纺制了取向聚氧化乙烯(PEO)纳米纤维。但因圆盘的边缘只有5 mm厚,有效面积较小,因此该装置不可用于取向纳米纤维的大量收集,无法得到广泛应用。

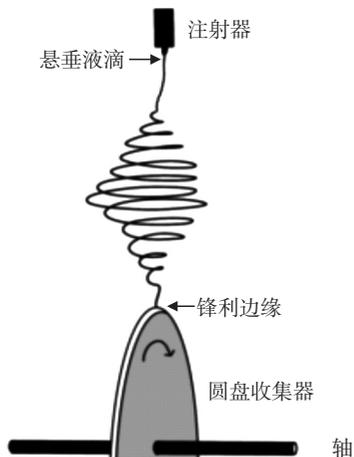


图1 圆盘式收集装置示意图

1.2 水浴收集法

由于旋转式收集法装置的辊轴转速较高,相关研究人员发明了一种带有水槽的辊轴收集装置,它只需要辊轴较低的转速便可得到取向度更高的纳米纤维。水浴纺纱是利用液体独有的特性和机械拉伸的作用力共同作用于纤维使其凝聚在一起,其中液体的表面张力对纤维的凝聚起着关键作用,射流在液体这一接收凝固浴里可以直接沉积。在水浴中纺丝有利于纳米纤维上的剩余电荷通过导电液体快速逃逸,减弱射流间的排斥力,有效解决电荷在空气介质里逸散缓慢的问题,之后再汇聚在转轴表面制备出取向纳米纤维。

1.2.1 静态水浴

Smit^[9]等在原来传统的装置上进行了改造,将圆形的玻璃皿作为收集装置,玻璃皿里装满了水,底部放置一个圆形金属片,并通过一根导线接地,纺丝后水面上凝聚着无序的纤维,通过机械拉伸作用被拉到转轴上进行收集。用静电纺丝法在静态液体收集器上可获得连续的单轴纤维束纱线。Smit利用该方法制备了聚醋酸乙烯酯、聚偏二氟乙烯和聚丙烯腈的电纺纳米纤维。该装置操作技术易于使用,所得纱线排列整齐且纤维取向度高,但纤维之间易出现粘连且要求所用材料不溶于水且收集速率较低,因而应用较少。

1.2.2 动态水浴

Teo等^[10]用动态的水作为支撑和工作介质组成静电纺纤维的新系统,如图2所示。该系统包括上下平行的2个水槽和一个低速旋转的卷筒,沉积在上方水槽里的电纺纤维可以通过底部中心直径为5 mm的小孔,小孔外围的漩涡带动沉积的纤维做圆周运动,随后流到下方的水槽。在离心力和水流的作用下纤维产生牵伸汇聚成纤维束再卷绕到卷筒表面,上方水槽的水流至下方水槽后通过水泵输送回去,水循环由此产生。上水槽与一根导线相连,导线接地起到去除多余电荷的作用。通过该装置可以制备成连续的取向纳米纤维,但纱线直径的变化不太稳定,纤维间的缠结现象较为明显,可归因于不同进料速率所使用的恒定卷取速度,不同进给率的卷取速度、涡流中水的速度、聚合物的性质、外加电压等其他参数有待优化。

1.2.3 旋转水浴

Li等^[11]介绍了一种静电纺丝过程中使用的旋转水收集器。利用该工艺成功制备了沿周向排列的纳米纤维。液体收集器的运动和导电性被认为是研究静电

纺丝纳米纤维与液体表面相互作用的两个主要因素。通过对液体收集器运动理论的分析,证实液体流速从旋涡中心向容器边缘呈下降趋势。试验结果表明,随着流体流速的增加,纳米纤维的取向度也随之增加。

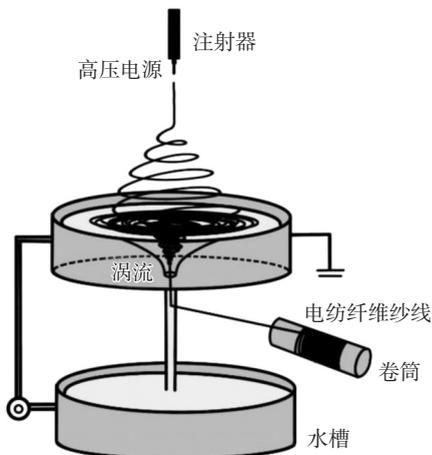


图2 动态水浴收集装置示意图

1.3 平行板收集法

平行板收集法是研究者制备取向纳米纤维的常用方法,该方法针对旋转收集法不能大量收集的缺点做出了改进,用到的收集装置是两个处于电场中的平行电极,因为电场力对带有电荷的射流起到一定影响,射流会改变其运动轨迹,形成悬垂在电极板之间的取向纳米纤维。

Li等^[12]提出了一种基于静电纺丝制备聚合物、陶瓷和复合材料单轴取向纳米纤维的简单易行的方法。该方法成功的关键是使用了一个集电体,集电体由两块接地的导电收集板组成一个接收装置,如图3所示,两块收集板之间有一个宽度从数百微米到几厘米不等的间隙。由于两个平行的电极板电位相同,对射流的作用力也相同,受拉伸的射流最终在两个电极之间的空隙沉积。处于悬浮状态的纳米纤维转移方便,用途较为广泛,被拉伸后跨越间隙的纳米纤维还能够产生更大面积的取向排列。但是该方法也有一些局限,它不能制备一些尺寸很小的纳米纤维,只能制备直径较大的纳米纤维,直径太小的纳米纤维会因为自身太轻而受到纤维之间库仑力的干扰,从而会发生断裂。而纳米纤维的取向与排列程度也会随着自身厚度超过某数值之后而产生变差的趋势。

Yang等^[13]提出一种用具有相反磁性的平行永磁体作为收集装置制备取向纳米纤维的方法,装置如图4所示,并用此方法制备了取向排列的PVA纳米纤维。

在该装置中,2个相距5 cm的磁体之间有着磁场作用力,当纤维落在磁铁上时,磁场将纤维拉伸穿过间隙,形成平行阵列。纺丝时纤维束落下,靠近磁铁的纤维段被吸引到磁铁表面,最后纤维落在2个磁铁上并悬浮在间隙上方。添加了磁性纳米粒子被磁化的纺丝溶液会受到磁场的影响并沿着磁场线按规律排列,可以得到取向排列的纳米纤维,并且由此产生的纤维可以转移到基板表面,如铝箔和玻璃载玻片,可应用于电子和光子器件、聚合物复合材料和组织工程中。该方法设备简单,操作容易,且能得到较大面积、取向度高的纳米纤维。

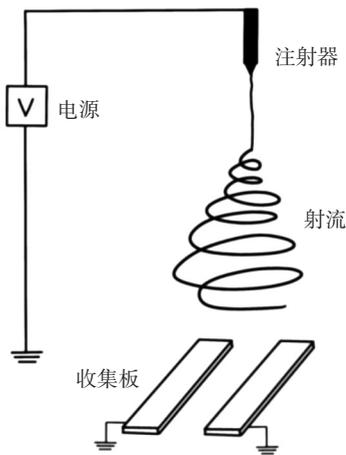


图3 平行板电极收集装置示意图

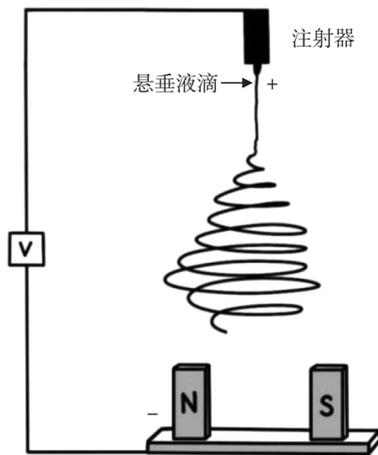


图4 平行永磁体收集装置示意图

Katta等^[14]设计了一种带平行铜线框的圆筒收集装置,该装置结合了平行板收集法和旋转收集法的特点,如图5所示。两边的圆盘通过一根杆子相连,铜线卷筒与带2个滑轮的电机相连且接地,并以1 r/min的速度旋转。当滚筒缓慢旋转时,下一根铜线吸引纳米纤维,纳米纤维垂直于铜线拉伸以跨越铜线之间的间

隙。纳米纤维的排列由静电相互作用驱动,静电相互作用允许带电的纳米纤维在电线之间的缝隙中伸展和跨越,并在大面积上形成轴向排列的阵列。但随着纺丝的进行,电荷积累得越来越多且难以消除,纤维开始以随机模式旋转,形成缠结,纤维的定向排列受到干扰,无法得到所有部分都是取向排列的纤维。

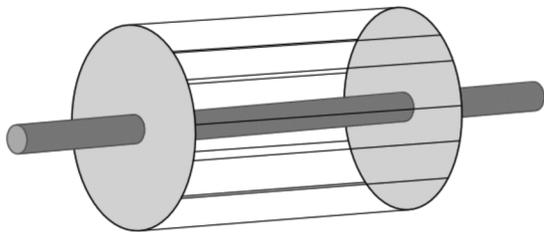


图5 平行铜线框圆筒收集装置

Su等^[15]用平行感应板辅助静电纺丝(PIES)获得高效定向纳米纤维,在这种新型静电纺丝装置中,静电纺丝板包含在一对平行感应板中,可以改变静电纺丝过程中电场线的形状和方向,从而控制纺丝纳米纤维的飞行轨迹和空间定向。这种静电纺丝装置可以将电场线分成两部分,分别指向上下感应板的边缘。然后纳米纤维沿着电场线移动,悬浮并排列在平行的感应板之间。最后,这种排列良好的纳米纤维可以很容易地转移到其他基底上进行进一步的表征和应用。利用PIES技术成功实现了平均直径为 (469 ± 115) nm、长度为140 mm的取向纳米纤维。此外,还可以方便地得到不同交角的纳米纤维阵列和由排列的纳米纤维形成的三维薄膜。

2 取向纳米纤维在组织工程领域的应用研究

组织工程是当今比较热门的跨学科和多学科研究领域之一。它涉及使用活细胞,通过细胞外环境或基因控制,以开发植入体内的生物替代物或以某种积极的方式促进组织重塑。组织工程的核心技术可分为3个领域:细胞技术、支架构建技术和体内集成技术。支架构建技术专注于设计、制造和表征用于细胞接种和体外或体内培养的三维支架。组织工程中理想的支架材料应满足以下要求:(1)具有高孔隙率和适当的孔径分布;(2)需要高表面积;(3)通常需要生物降解性,降解速率应与新组织形成速率相匹配;(4)支架必须具有所需的结构完整性,以防止支架孔隙在新组织形成过程中坍塌,并具有适当的机械性能。除此之外,支架还应具有无毒、生物相容的特点,与细胞之间有着积极的相互作用,以促进细胞在支架中的粘附、增殖、迁移和

分化^[16]。

人体具有各种组织,它们微观结构有序,细胞排列规整,如肌肉、骨骼肌、血管、皮肤、神经等。近年来,静电纺取向纳米纤维因其超细直径、超高比表面积、超高孔隙率、良好的力学性能和尺寸稳定性等特点,在组织工程领域的应用取得较大进展。凭借着这些特性它可以代替天然的细胞外基质纤维,能够起到促进细胞生长、引导组织再生有序排列的作用^[17]。随着研究的不断深入,目前已证实取向纳米纤维可用于组织工程中的修复和再生。

2.1 血管组织

心血管类疾病给人们带来的危害不可小觑,因而血管重建的研究非常重要。临床外科针对血管组织工程研究提出两种主要的重建方法:自体血管移植和假体血管移植,但两种方法都存在一定的问题。自体血管移植会受到患者血管疾病或血管缺失等方面的限制,且术后发病率较高。而假体血管移植会出现生物相容性问题且可能会形成血栓。因而用组织工程方法制造的小口径血管,有望解决以上问题^[18]。

Xu等^[19]研究了在静电纺纳米纤维垫上培养血管内皮细胞。通过比较电纺PLLA纳米纤维和铸造光滑PLLA膜上的细胞生长,发现血管内皮细胞在光滑PLLA膜上功能增强。由于静电纺纳米纤维垫能够很好地支持血管平滑肌细胞的生长,因此,平滑膜与静电纺纳米纤维垫结合在一起可以形成用于血管组织工程的良好3D支架。

Xu等^[20]通过静电纺丝制备了一种独特的可生物降解的聚合物纳米纤维支架。细胞形态学、粘附和增殖研究表明,冠状动脉平滑肌细胞与该支架之间存在良好的相互作用,细胞沿纤维方向定向生长。与平面聚合物膜相比,平滑肌细胞在定向纳米纤维支架上的粘附和增殖率显著提高。试验结果表明这种合成的定向基质结合了合成的可生物降解聚合物、模仿天然平滑肌细胞的纳米尺寸和复制血管特定结构的优点,是一种理想的组织工程支架,尤其是在血管组织领域。

2.2 神经组织

神经组织是取向纳米纤维在组织工程领域中应用最为广泛的。神经系统结构和功能的复杂性,以及其缓慢的再生速度,使得在发生损伤时,与人体其他组织相比,治疗难度更大。如今研发的对于神经系统的治疗方法包括自体移植、异体移植和药理学药物的使用,

都存在一些问题,不能完全修复损伤^[21]。近年来,纳米技术应用于组织工程的方法吸引了许多研究者以有效的方式指导组织再生。

WANG等^[22]通过一种先进的干湿静电纺丝方法制备了定向导电纳米纤维束,并组装成定向纳米纤维纱后与水凝胶复合,形成水凝胶为“壳”,导电纳米纤维纱线为“芯”的“芯-壳”结构支架,以模拟天然神经组织的3D层次排列结构,水凝胶壳模拟神经外膜层,在3D环境中起到保护神经细胞组织的作用。这种纳米纤维结构的三维定向支架具有在三维环境中诱导神经突起定向延伸及诱导神经细胞沿纳米纤维方向迁移的能力。

JIA等^[23]通过研究首次证明纳米纤维排列差异调节巨噬细胞的形状和极化,从而影响周围神经再生的结果。研究表明,排列整齐的纳米纤维支架可显著诱导巨噬细胞伸长,并使巨噬细胞极化,形成促进愈合的表型。此外,经定向纳米纤维支架极化的巨噬细胞在体外可以促进雪旺细胞的增殖和迁移,由取向纳米纤维构建的神经引导导管在体内能显著提高促愈合巨噬细胞、雪旺细胞浸润和轴突再生的比例。这些发现表明,至少有部分取向纳米纤维通过调节巨噬细胞表型来促进周围神经再生。

2.3 骨骼肌组织

体外骨骼肌组织的创建是近年来生物医学研究领域最感兴趣的课题之一,使用生物材料支撑结构或支架促进体外肌肉的形成也是一个活跃的研究领域。骨骼肌疾病的性质是复杂的,包括影响骨骼系统不同结缔组织的广泛病理学,包括骨骼、软骨、肌肉、肌腱和韧带。由于对许多此类疾病的病因缺乏了解,在大多数情况下,治疗选择仅限于控制症状,而非治疗或预防^[24]。一种可能的解决方案是使用电纺支架,因为其用于肌肉可能满足骨骼肌疾病的需要,突出可能促进细胞组织的排列。

Park等^[25]开发了一种用来评估随机排列和定向排列的电纺纳米纤维的渗透性和取向对骨骼肌细胞的影响的策略,制备了随机排列和定向排列的纳米纤维的杂化支架,定向排列的纳米纤维在支架表层指引细胞生长,随机排列的纳米纤维在支架底层起到支撑稳定的作用,有效模拟了由排列整齐的细胞外基质原纤维和随机的胶原纤维网组成的结缔组织。通过小鼠成肌细胞的研究表明该支架具有高孔隙率和渗透性,适

用于骨骼肌组织工程。Thiers等^[26]通过静电纺丝和氧化石墨烯进一步表面改性制备了具有随机取向和定向取向的可生物降解聚己内酯纳米纤维,并将其用作骨骼肌细胞支架。通过扫描电镜观察细胞形态,研究表明,氧化石墨烯改性聚己内酯纳米纤维支架影响细胞伸长,骨骼肌细胞与用氧化石墨烯修饰的生物相容性聚合物纳米纤维的相互作用,可用于细胞支架和组织工程。

Perez Puyana等^[27]选用聚己内酯作为制备支架的合成聚合物,显示了其在组织工程中的应用潜力。研究人员选择不同浓度的胶原和明胶作为蛋白质,与胶原支架相比,明胶支架的蛋白质含量更高。由于蛋白质的亲水性,在初始配方中添加明胶可以增强支架的亲水性,降低支架的纤维尺寸和力学性能,因此孔隙率较低,较低的纤维尺寸也更适合获得更大的细胞粘附表面。根据形态学、力学和生物学评价,揭示了使用生物反应器制造离体骨骼肌组织的可能性,可促进细胞的增殖和分化。纤维排列不影响细胞体外增殖且纤维的排列对细胞的生长和活力起着重要作用。

2.4 骨组织

骨组织是人体的主要结构及支撑性结缔组织,具有高度复杂的层次结构,以矿化胶原纤维为主要构建块^[28]。如今人们出现骨病骨损伤的情况比较普遍,组织工程技术结合纳米技术和细胞再生功能为骨组织的修复再生提供了方法,通过静电纺丝构建的新型支架为外科医生提供了新的选择。

Shao等^[29]通过静电纺丝和传统纺织方法制备了聚乳酸/柞蚕丝素蛋白的纳米纤维新型支架,模拟天然板层骨中胶原纤维基质的层次结构。当该混合物中聚乳酸和柞蚕丝素蛋白的比例为9:1时,可以连续电纺成具有均匀直径分布和良好拉伸强度的纳米纤维纱线。基于该混合物的支架,力学性能非常优异,杨氏模量为417.65 MPa,抗拉强度为180.36 MPa。由相同材料制成的非织造支架的杨氏模量和拉伸强度分别为该编织支架的1/2和1/4。除此之外复合支架具有良好的细胞相容性、骨诱导性和再生活性,它不仅支持充质干细胞的粘附和增殖,也能促进成骨、碱性磷酸酶活性和矿化,重要的是它还能显著促进兔股骨髁部损伤后新骨的形成,有望广泛应用于骨组织工程。

Elkhouly等^[30]将纳米技术与骨组织工程相结合,以聚己内酯和明胶为基础纳米纤维层制备具有增强生

物、物理和力学性能的双层支架。分析表明,成功形成了无珠状的均匀纤维,并在纤维内部掺入了纳米颗粒。与复合单层支架相比,双层支架的比表面积和总孔容均有所提高,而且增强了支架的性能,为骨组织工程领域的发展提供了潜在的途径。

3 结语与展望

随着纳米技术的发展与进步,静电纺丝作为一种简便有效的纳米材料制备技术在组织工程等领域中扮演了重要角色。通过科学家和研究工作者的努力,现有多种可以进行静电纺和制备取向纳米纤维的工艺和方法,但目前尚存在一些困难和问题。静电纺取向纳米纱线的力学性能会因为纺丝液浓度的增加而变差,因为在低浓度时出现的粘连现象会起到增大纱线强度的作用^[31]。目前大多数制备纳米纤维的方法仍处于实验室阶段,难以进行大规模批量化生产。相信研究人员今后通过一系列的技术改进能有效解决以上问题,利用取向纳米纤维的特性和纺织结构优势,丰富纱线类纺织品的种类,提升传统纺织品附加值和内涵,在更多领域显示出良好的应用前景。静电纺丝取向纳米纤维作为一种复杂的多功能纳米材料,凭借着它自身纤维整齐有序的排列结构、良好的生物相容性促使纳米纤维与细胞相互作用,有望在血管组织、神经组织、骨组织等领域中取得更好的进展,有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] SILL T J, RECUM H A. Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering[J]. *Biomaterials*, 2008, 29(13): 1 989—2 006.
- [2] LI D, XIA Y. Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel[J]. *Advanced Materials*, 2004, 16(14): 1 151—1 170.
- [3] XUE J, WU T, DAI Y, *et al.* Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications [J]. *Chemical Reviews*, 2019, 119(8): 5 298—5 415.
- [4] 万振凯, 李 鹏, 贾敏瑞, 等. 智能复合材料中碳纳米管纱线参数设计及其变化特征[J]. *纺织学报*, 2018, 39(6): 58—63.
- [5] BHARDWAJ N, KUNDU S C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(3): 325—347.
- [6] DOSHI J, RENEKER D H. Electrospinning process and applications of electrospun fibers[J]. *Journal of Electrostatics*, 1995, 35(2): 151—160.
- [7] MATHEW G, HONG J P, RHEE J M, *et al.* Preparation and anisotropic mechanical behavior of highly-oriented electrospun poly(butylene terephthalate) fibers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 101(3): 2 017—2 021.
- [8] THERON A, ZUSSMAN E, YARIN A L. Electrostatic field-assisted alignment of electrospun nanofibres [J]. *Nanotechnology*, 2001, 12(3): 384—390.
- [9] SMIT E, BUTTNER U, SANDERSON R D. Continuous yarns from electrospun fiber[J]. *Polymer*, 2005, 46(8): 2 419—2 423.
- [10] TEO W E, GOPAL R, RAMAKRISHNA S, *et al.* A dynamic liquid support system for continuous electrospun yarn fabrication[J]. *Polymer*, 2007, 48(12): 3 400—3 405.
- [11] LI S, LEE B K. Electrospinning of circumferentially aligned polymer nanofibers floating on rotating water collector[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(22): 48 759.
- [12] LI D, WANG Y, XIA Y. Electrospinning of polymeric and ceramic nanofibers as uniaxially aligned arrays [J]. *Nano Letters*, 2003, 3(8): 1 167—1 171.
- [13] YANG D, LU B, ZHAO Y, *et al.* Fabrication of aligned fibrous arrays by magnetic electrospinning[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(21): 3 702—3 706.
- [14] KATTA P, ALESSANDRO M, RAMSIEER R D, *et al.* Continuous electrospinning of aligned polymer nanofibers onto a wire drum collector [J]. *Nano Letters*, 2004, 4(11): 2 215—2 218.
- [15] SU S, LIANG J, XU S, *et al.* Preparation of aligned nanofibers using parallel inductive-plates assisted electrospinning[J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(26): 265 303.
- [16] MA P X. *Encyclopedia of polymer science and technology* [M]. NJ: John Wiley & Sons Inc, 2004.
- [17] RANGASAMY J, SHANTIKUMAR N. *Biomedical applications of polymeric nanofibers* [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [18] 范晓丽, 邹远文. 组织工程血管构建中支架材料的特征 [J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2009, 13(29): 5 732—5 734.
- [19] XU C, YANG F, WANG S, *et al.* In vitro study of human vascular endothelial cell function on materials with various surface roughness[J]. *Journal of Biomedical Mate-*

- rials Research Part A, 2004, 71(1): 154–161.
- [20] MO X M, XU C Y, KOTAKI M, *et al.* Electrospun P (LLA-CL) nanofiber: A biomimetic extracellular matrix for smooth muscle cell and endothelial cell proliferation [J]. *Biomaterials*, 2004, 25(10): 1 883–1 890.
- [21] HALIM A, QU K Y, ZHANG X F, *et al.* Recent advances in the application of two-dimensional nanomaterials for neural tissue engineering and regeneration[J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2021, 7(8): 3 503–3 529.
- [22] WANG L, WU Y, HU T, *et al.* Aligned conductive core-shell biomimetic scaffolds based on nanofiber yarns/hydrogel for enhanced 3D neurite outgrowth alignment and elongation[J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 96: 175–187.
- [23] JIA Y, YANG W, ZHANG K, *et al.* Nanofiber arrangement regulates peripheral nerve regeneration through differential modulation of macrophage phenotypes[J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 83: 291–301.
- [24] PIMENTENL M R, FALCONE S, CADOT B, *et al.* In vitro differentiation of mature myofibers for live imaging [J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2017, (119): e55141.
- [25] PARK S H, KIM M S, LEE B, *et al.* Creation of a hybrid scaffold with dual configuration of aligned and random electrospun fibers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(4): 2 826–2 832.
- [26] UEHARA T M, PAINO I M M, SANTOS F A, *et al.* Fabrication of random and aligned electrospun nanofibers containing graphene oxide for skeletal muscle cells scaffold[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2020, 31 (6): 1 437–1 443.
- [27] PEREZ-PUYANA V, WIERINGA P, YUSTE Y, *et al.* Fabrication of hybrid scaffolds obtained from combinations of PCL with gelatin or collagen via electrospinning for skeletal muscle tissue engineering[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2021, 109(9): 1 600–1 612.
- [28] LIU S, WU J, LIU X, *et al.* Osteochondral regeneration using an oriented nanofiber yarn-collagen type I/hyaluronate hybrid/TCP biphasic scaffold [J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2015, 103(2): 581–592.
- [29] SHAO W, HE J, HAN Q, *et al.* A biomimetic multilayer nanofiber fabric fabricated by electrospinning and textile technology from polylactic acid and Tussah silk fibroin as a scaffold for bone tissue engineering [J]. *Materials Science & Engineering C*, 2016, 67: 599–610.
- [30] ELKHOULY H, MAMDOUH W, EL-KORASHY D. Electrospun nano-fibrous bilayer scaffold prepared from polycaprolactone/gelatin and bioactive glass for bone tissue engineering [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2021, 32(9): 111.
- [31] 吴韶华, 张彩丹, 覃小红, 等. 静电纺取向纳米纤维束及纳米纤维纱线的研究进展 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(6): 182–186.

Preparation of Electrospun Oriented Nanofibers and Its Application in Tissue Engineering

ZHOU Xin-ru¹, HU Cheng-ye¹, FAN Meng-jing¹, HAN Xiao^{1,2}, HONG Jian-han^{1,2,3,*}

(1. School of Textile and Apparel, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;

2. Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China;

3. Shaoxing Branch of National Engineering Research Center for Fiber Matrix Composites, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to expand the application field of electrospun oriented nanofibers and further improve the orientation degree and efficiency of collecting electrospun oriented nanofibers, various methods of preparing oriented nanofibers by changing the receiving device were summarized. According to the different receiving devices, they were mainly divided into rotary collection method, water bath collection method and parallel plate collection method. The basic principles, advantages and disadvantages of various methods were briefly analyzed, and the important applications of oriented nanofibers in the field of biological tissue engineering were described. Through a series of research results of researchers, it was confirmed that oriented nanofibers could be used for repair and regeneration in biological tissue engineering. Finally, the development of electrospun oriented nanofibers was briefly prospected, which provided references for the preparation and application of oriented nanofibers.

Key words: electrospinning; oriented nanofiber; application; tissue engineering