http://pmse.scu.edu.cn

异形纤维及其制造技术进展

范春峰，何鉴峰，王 建
(北京化工大学 机电工程学院，北京 100029)

摘要：异形纤维是指横截面形状为非圆形的纤维，可弥补圆形纤维在抗扭强度、粗糙度、弹性、表观等性能方面的不足，并具有良好的光泽、染色、抗污、阻燃、隔热、隔音等性能，在纺织、复合材料、建筑、生物医学、汽车、航空航天、光学等领域得到了广泛应用。文中介绍了异形纤维的类型、特点、应用领域，总结了异形纤维的制造技术及其影响因素，分析了异形纤维横截面形态表征方法及对性能的影响。相关综述可为异形纤维的研究开发提供科学参考和技术借鉴。

关键词：异形纤维；制造方法；力学性能；复合材料
中图分类号：TQ340.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555(2024)03-0172-08

异形纤维又称异形截面纤维，是经过一定特殊形状的喷丝孔制备的具有特殊截面形状的纤维。20世纪50年代，美国杜邦公司推出三角形截面的异形纤维，德国进一步开发了五角形截面的异形纤维[1]。60年代初，中空纤维在保暖性方面具有优势而得到推广。随后，日本、英国、意大利等国相继研制了多种异形纤维产品。我国异形纤维的开发在喷丝板改造和可纺性技术等方面已具备了成熟完整的工艺。随着新材料的不断涌现，异形纤维成型制造及应用技术也得到了快速发展。异形纤维具有多样性，其形状和尺寸可以根据不同的应用需求设计成各种不同的形式来提高并改善材料的特性。异形纤维在复合材料、建筑、生物医疗、汽车、航空航天、光学等领域中具有优越性，现已被广泛研究和应用。本文梳理总结了异形纤维的类型、特点及应用领域，综述了异形纤维制造技术及影响因素，特别归纳了异形纤维截面形态的表征方法及对纤维性能的影响。本文可为异形纤维的更新发展和研究提供技术参考。

1 异形纤维的类型、特点及应用领域

1.1 异形纤维的类型及特点

异形纤维是特殊的非线性纤维，具有不对称的横截面形状及特殊的性能。根据截面形状的不同，异形纤维包括叶形纤维、环状纤维、三角形纤维、星形纤维和多孔形纤维等多种类型。异形纤维形状特点可以弥补圆形纤维在抗扭强度、粗糙度、弹性、表观等性能上的不足[1,2]。异形纤维比圆形截面纤维抗形变抗褶皱效果更好，具有更好的缝纫性能，能够增加服装的新颖感和表面光洁度。异形纤维表面积更大，还可增加空隙，可增加服装织物的回潮率。此外，异形纤维还具有良好的染色、抗污、阻燃、隔热、隔音等性能。根据材质的不同，异形纤维主要包括聚酯纤维、玻璃纤维、碳纤维、纳米纤维等，聚丙烯(PP)、聚酯、聚酰胺、聚丙烯腈、聚苯乙烯、聚乙烯、尼龙、醋酸纤维素以及各种尼纶、涤纶、腈纶、丙纶等化学材料都可以通过合适的纺丝工艺制成异形纤维。

1.2 异形纤维的应用

近年来，异形纤维的应用日益广泛，在服装、装饰等纺织品行业具有广阔的市场。例如，扁平形纤维具有优异的抗弯刚度，且其编织产品具有柔软的

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0040
收稿日期：2023-05-08
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51873021)；中央高校基本科研业务费专项资金(buctrc202005)
通讯联系人：王建，主要从事塑料及其复合材料先进成形技术研究，E-mail: wjj_0107@163.com

手感及干爽感,使其能与天然丝和麻类织物在性能和风格上相媲美;十字形纤维一般具有较大的比表面积,并且它表面具有众多的微孔或沟槽,能够达到快速吸水、扩散和挥发的效果[1,3],能迅速将皮肤表面的湿气和汗水释放到外层并迅速蒸发。

用异形纤维作为增强体来制备复合材料是其应用的一个热点。聚合物纤维增强复合材料的力学性能在很大程度上取决于纤维横截面形状[1,4],从结构力学的角度来看,异形纤维增强的复合材料在某些力学性能方面要优于传统的聚合物纤维增强复合材料[1,4]。

在建筑领域,水泥浆体在水化过程(塑性收缩)或外部机械载荷作用下会出现裂纹,纤维在混凝土中使用可以起到桥接作用来控制裂缝[1,5]。异形纤维的几何形状加强了纤维与水泥复合材料的黏结,使水泥基复合材料有更高的强度、延展性、断裂能和能量吸收能力,更适合承受地面震动、弯曲和剪切荷载[1,6]。

在生物医学领域,表面具有更多微纹理和孔隙结构的异形纤维可以提供更好的生物相容性、细胞黏附和增殖,在相同条件下可以承受更大的应变和剪切力,更能支撑人体组织[1,7]。此外,使用中空纳米纤维可以准确控制药物的量和靶点,对受影响的大脑区域进行局部给药。

在汽车工业领域,汽车行业需要开发轻质、高性能及减噪的材料。中空纤维复合材料可以在减轻汽车整体质量的同时保持车身强度,从而达到提高汽车的燃油经济性和性能的目的。声波能量在通过多孔材料时与多孔内壁摩擦耗散,所以使用多孔纤维声学材料可以减少噪音的传递[1,8]。

在航空航天领域,用三角形、Y形、中空三角形等形状的碳纤维与玻璃纤维混杂编织制造的复合材料有着像消声器一样的微观结构,可以多次反射入射微波,达到吸收电磁波的作用,有助于提高电磁波的吸收率[9]。以此独特的性能可以用来制作航空航天设备,不仅可以满足轻质的需求,还可以达到雷达隐身的效果。

在光学领域,异形横截面的新型光纤具有定向和可控的辐射模式,特殊的形状可以形成不对称辐射路线,将侧面发射的光更好地导向传感光纤以增加发射强度[1,10]。此外,三叶形光纤具有更高的传感灵敏度,可以应用在纺织品触摸传感器方面,还可以用作具有不同照明模式的照明元件及光学天线。

异形纤维具有更优异的过滤性能和吸附能力,在烟草行业中,不规则形状的异形纤维能够增强过滤器尖端对有害物质的吸收能力并增加气体渗透性,从而减少吸烟期间的压降并提高过滤效率[1,11]。

2　异形纤维的制造技术及其影响因素

2.1　异形纤维制造工艺

制备异形纤维最常见的工艺是异形喷丝板法,包括熔融纺丝、溶液纺丝和静电纺丝等,此外还有制备共混物的相分离技术。

熔融纺丝工艺是一种常见的高分子材料制备方法。其工艺原理是将原材料加入机筒中加热至融化状态,然后通过螺杆的推动将熔体输送到喷丝头。最后使用牵引机以一定的速度拉伸熔体,并在拉伸过程中通过冷却装置对其进行降温冷却,制成纤维。熔融纺丝工艺适用于多种高分子材料,包括聚丙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚乳酸、聚乙烯醇和聚乙烯等。这些材料通常具有可熔性、黏度适中、熔体稳定性好、可塑性好、热稳定性好等特点。通过熔融纺丝工艺可以制备成不同形状和结构的纤维,如多孔中空形、十字形、扁平形等截面形状的纤维,从而实现不同领域的应用。熔融纺丝制备的纤维截面形状受喷丝头尺寸、熔体黏度、表面张力、模具壁厚、熔融温度、拉伸比、卷绕速度和冷却条件等多个因素综合的影响[1,12]。

溶液纺丝工艺主要包括湿纺、干纺和干喷湿纺3种类型。湿纺工艺是把一定比例的溶剂添加到聚合物中制作成高分子浓溶液,再通过螺杆、旋转锥等设备将浓溶液从喷丝板上的异形喷丝孔挤出。经过拉伸牵引进入液体凝固浴中,冷却的同时溶出之前添加的溶剂,最终形成异形纤维[1,13]。干纺工艺是浓溶液从喷丝板挤出后直接在空气中进行自然冷却并挥发出溶剂。干喷湿纺工艺是浓溶液从异形喷丝孔挤出后经过牵引拉伸在空气中短时间冷却,之后进入凝固浴中再进行冷却并溶出溶剂,最终制成异形纤维。干喷湿纺工艺可以生成表面更光滑、力学性能更好的纤维,能够减少因凝固而产生的纤维空隙和

表面塌陷，原因是在空气中可以释放应力并允许溶剂向外扩散。在溶液纺丝工艺中，影响纤维截面形状及表面形态的因素有喷丝头尺寸、纺丝原液黏度、湿纺比、原液固体含量、浴中溶剂含量、凝固浴温度、质量净通量、固化表面层的刚度等[1,14]。

静电纺丝分为溶液静电纺丝和熔体静电纺丝，它是一种利用聚合物溶液或熔体在强电场下形成喷射流进行纺丝加工的工艺。溶液静电纺丝是将溶于溶剂中的高分子材料溶液作为纺丝材料，熔融静电纺丝是将加热到熔融状态的高分子材料作为纺丝材料。在溶液静电纺丝过程中，选择合适的溶剂对制备溶液至关重要，不同的溶剂会使溶液黏度、表面张力等性能不同。黏度决定着纤维的尺寸和形态，低黏度溶液不具备形成纤维结构的能力，而黏度过高会使喷嘴堵塞导致射流效率降低[1,15]。在熔融静电纺丝过程中，需要较高的电场强度以克服聚合物熔体的表面张力和黏弹力形成纤维。在静电纺丝工艺中，影响纤维形态的因素有喷丝孔形状及尺寸、电场强度、溶剂类型、聚合物导电性以及喷嘴到收集板之间的工作距离等[1,16]。

对多组分纤维进行相分离是一种基于热力学的异形纤维制造方法，基本原理是基于聚合物热稳定性差异[1,17]。根据相分离机制不同分为溶剂法相分离与热诱导相分离。溶剂法相分离是指在2种组分材料不发生相容和化学反应的基础上，利用溶剂溶解纤维中的一种组分，使剩下的组分成为异形纤维[1,18]。热诱导相分离工艺是指在高温下使具有不同热稳定性混合后的2种聚合物，一种交联另一种熔化并从纤维内流动，最终形成具有核壳形态的纤维[1,19]。双组分纤维结构可以通过同轴静电纺丝方法制备，包括双流体静电纺丝和熔融静电纺丝。熔融静电纺丝使用加热系统来熔化聚合物。这些聚合物包括合成材料（聚酯、聚酰胺、聚碳酸酯等），天然材料（壳聚糖、丝绸、弹性蛋白等），以及合成的可生物降解聚合物（聚乳酸、聚乙醇酸、PCL等）[1,20]。在溶剂诱导相分离工艺中，影响纤维形态的因素有高分子聚合物种类、溶液浓度、溶剂性质、拉伸速率及拉伸温度等。影响热诱导相分离工艺制备异形纤维的因素有2种聚合物性质差异程度、加热速率、温度和拉伸速率等[1,21]。

2.2 影响异形纤维成型的因素

2.2.1 喷丝头的影响：喷丝头是异形纤维制备的关键零部件。喷丝孔形状是影响异形纤维截面形状最重要的因素，喷丝孔的形状和面积变化会对模具中聚合物熔体的流动速率、剪切应力产生影响，进而影响聚合物熔体的黏度和挤出胀大现象。为了满足不同纤维的要求以及提高纤维的力学性能，应特别设计和加工异形纤维的喷丝孔。

在熔融纺丝工艺中，加工参数和模具壁厚都会影响纤维的尺寸和结构。模具壁厚约束喷丝孔的设计加工，并且模具几何形状会影响纤维尺寸和性质。不同壁厚的模具对壁剪切速率、凝固速率、可纺性、聚合物黏性响应和模头膨胀都有影响[1,22]。例如，中空纤维的外径和内径会随着模具壁厚的减小而增大，导致中空度增加和纤维壁厚减小。较薄的模具会导致较高的剪切速率以及纺丝稳定性差[1,23]。

在静电纺丝工艺中，丝头的几何形状极大地影响电场强度的分布，而电场强度直接影响无针静电纺丝过程以及制备的纤维性能。例如，无针静电纺丝的电场强度影响电放大的液体波产生多股射流[1,24]。

2.2.2 工艺参数的影响：在熔融纺丝工艺中，纺丝温度、纺丝速度、冷却速度、卷绕速率等工艺参数都会对纤维的最终形态产生影响。在熔融纺丝制备中空纤维时，纤维中空度在喷丝孔挤出之后会产生变化。纤维中空度在喷丝孔和纤维膨胀点之间保持不变，但是在纤维膨胀点之后中空度会开始降低，直到纤维凝固[1,25]。虽然较高的冷却速度会使纤维外径和内径增加，使纤维中空度提高，但是也同样会影响纤维结晶度和分子取向。在其他工艺参数相同时，纤维在越接近喷丝头的位置凝固，越有可能保留喷丝孔的形状从而得到更高的异形度。所以凝固点的位置一部分定义了纤维的异形度，异形度随着凝固点与模具之间距离的缩短而增加。可以得到结论，异形度随冷却速度、纺丝速度增加而增加。冷却速度直接控制凝固点，对异形度有最直接的影响。通过降低纺丝温度和提高冷却速度可以使纤维快速达到凝固点，以此得到具有较高异形度的异形纤维。

在湿法纺丝中，凝固速率是导致纤维横截面形状变化的一个重要因素。较高的凝固速率可以使纤

维横截面形状和喷丝孔形状保持较高的相似度,纤维的凝固速率可以通过凝固浴的浓度和温度来控制[1,26]。凝固浴温度升高,纤维中的分子会更快地运动和扩散,从而加快纤维的形成和凝固速度。凝固浴温度的升高和凝固浴浓度的降低对纤维的影响是一样的。在一定范围内,凝固速度通常随着凝固浴温度的升高或凝固浴浓度的降低而增加。

在静电纺丝工艺中,纺丝电压和溶液浓度对纤维直径、尺寸分布等形态有重要影响,它们共同决定了纤维最终尺寸[1,27]。不同的纺丝电压会使液体射流产生不同的表面形状和缺陷,并对液滴尺寸产生显著影响。溶液浓度不仅会影响纤维直径还会影响起始液滴形状和射流轨迹,纤维直径会随着溶液浓度的增加而增加[1,28]。喷丝孔到收集板之间的工作距离会影响电场的强度,进而影响结构的尺寸和形态。工作距离太短,溶剂没有完全蒸发,太长则会导致样品流失到空气中[1,29]。

在相分离工艺中,拉伸比、拉伸速度和拉伸距离会影响相分离过程中液滴的变形和拉伸,拉伸温度会影响液滴的熔化和流动,这些工艺参数共同影响异形纤维的形态[1,30]。较高的拉伸速率对应较高的拉伸流场,对共混物相位的连续性有影响。在合适的聚合物比例的基础上,较高的拉伸速率使相互渗透的程度得以保持,从而导致连续性增加[1,31]。

2.2.3 原料特性的影响:在熔融纺丝工艺中,不同原材料的熔融黏度、表面张力、结晶温度等性质的差异会使纤维最终形态发生变化[1,32]。在熔融制备异形纤维时,随着纺丝温度的逐渐提高,纤维呈现出从异形到圆形的变化趋势。表面张力与熔体黏度和结晶温度有关,纤维截面的变化取决于表面张力与熔体黏度之比。较高的表面张力增加了纤维截面的圆度,而较高的熔体黏度和快速结晶的性质有助于防止表面张力引起的形状变化[1,33]。例如,由于PP的表面张力较低而熔体黏度较高,所以PET的表面张力/熔体黏度比值高于PP。而对于PP,该比率相对不受温度的影响,表明PP横截面比PET对表面张力的依赖更小。因此表明熔融纺丝制备的PET三叶纤维比PP三叶纤维更圆。

在相分离工艺中,溶液性质、溶剂种类及聚合物共混比等也会影响纤维制造及最终形态。2种不混溶聚合物中孔的大小和形状可以通过共混比、加工温度等工艺参数的调节得到调整。在制备双组份纤维时,2种物料之间的黏度差异也会对异形纤维截面产生很大影响。黏度较大的高聚物容易被黏度小的熔体包覆,黏度差异越大,包覆性越好,最终得到壳核截面的纤维[1,34]。具有较高熔体黏度的材料会导致共混体系非牛顿性增加,进而限制另一材料的流动,导致共混体系的流动性降低,并且黏度的增加会减缓相转化过程,抑制空隙率[35,36]。而溶液的黏度主要取决于溶剂的选择,为了制备好的共混纤维,应注意控制其组成比例及选择合适的溶剂。避免共混体系的流动性能过度波动,导致树脂的可纺性不足[1,37]。

3　异形纤维截面形态的表征方法及截面形态对性能的影响

3.1　异形纤维表征方法

横截面参数是异形纤维的重要指标,截面非圆度的轻微偏差会导致纤维加工过程和纤维结构性能的显著差异。对于异形纤维,横截面形状的定量表征是其成分分析和质量控制的一个非常重要的方法[1,38]。形状因子(非圆度)被视为描述纤维表面几何形状的指标。形状因子有多种表示方法,包括质心到边界的最小距离与最大距离之比、截面内切圆直径与外切圆直径之比、横截面的长边与短边之比、外圈面积与内圈面积之比、横截面的平方周长与面积之比、横截面积和等周长圆面积之比等[1,39~42]。目前,关于异形度表征的检测方法主要有2类:一是直接测量法,用显微镜观察纤维样品的横截面,之后利用计算机描绘出形状并计算异形度;二是利用不同纤维横截面其力学、光学和表面特性不同的原理总结的测量方法,主要有光学法(观察纤维转动时表面亮度的变化)、力学法(测量纤维在不同方向抗扭、抗弯等力学性能的变化)、气流仪法(测量纤维的比表面积和填充密度)。

Wang等提出了一种表征异形纤维形状因子的新方法[1,43]。这个方法利用横截面边界中的形状信息,也就是每个角度间隔处横截面面积的变化系数。这种方法适用于任何具有实心截面的任意形状。

3.2　纤维截面形状对性能的影响

3.2.1 截面形状对纤维性能的影响：横截面不同会导致纤维在力学性能及物理性能方面存在一些差异。相比于圆形纤维，具有高比表面积的异形纤维在熔融纺丝过程中的冷却速率更高。异形纤维结晶焓低于圆形纤维，而结晶度略高[1,44,45]。具有较大比表面积的异形碳纤维活化率和吸附性能要高于圆形碳纤维，并且吸附容量也较大。另外，异形纤维在光泽、染色性能和回潮率方面都具有优势。

异形纤维在制造时会形成不均匀的纤维结构，使纤维表面产生较多的应力集中，使其断裂伸长率普遍低于圆形纤维。异形纤维与圆形纤维相比，其拉伸强度和模量没有太大差异，但扭转刚度和硬度有明显提高[1,46]。另外，异形纤维具有更高的屈服应力、模量、沸水中的收缩和无定形取向，而最大应变值明显低于圆形纤维[1,47]。

3.2.2 纤维截面对复合材料性能的影响：在纤维增强复合材料中，界面黏结强度与纤维增强复合材料的破坏模式、弹性模量、层间剪切强度和压缩强度有关，界面脱黏和基体中剪切带的形成是影响复合材料强度的2种关键损伤机制[1,48]。在横向张力下，在异形纤维排列方向上的拉伸强度有所增加，垂直方向上拉伸强度下降，并且表现出高正交各向异性行为[1,49]。

纤维横截面形状对纤维编织结构复合材料的压缩性能有很大的影响，纤维编织物的压缩率取决于纤维之间空隙率的大小[1,50]。相比于圆形纤维，多叶形纤维编织结构中空气间隙率更高，可压缩性更高。而扁平纤维编织物的结构相邻纤维紧紧贴合，使得可压缩性较小[1,51]。

在异形纤维增强的复合材料结构中，基体充分填充到异形纤维的中空区域，使纤维与基体能够确保更多的黏结，可以有效地传递所施加的载荷并增强界面结合力[1,52]。在拉伸强度和拉伸模量没有降低的同时，异形纤维增强材料表现出更高的弯曲强度和弯曲模量[1,53]。

4 结语

异形纤维作为功能性纤维，其形状特点可以弥补圆形纤维在抗扭强度、弹性等性能上的不足，在纺织品行业得到了广泛应用。异形纤维增强复合材料拥有良好的力学性能，并且还具有轻质、隔音、吸收电磁波等功能，在生物医学、汽车工业及航空航天等领域也得到了快速发展及应用。异形纤维制造工艺主要是熔融纺丝和溶液纺丝。在制造异形纤维的过程中，需要根据产品应用需求和性能指标选择合适的纺丝原料、喷丝头，同时调整优化纺丝温度、纺丝速度、冷却速度等纺丝工艺参数，从而保证纤维具有理想的形态及性能。对异形纤维进行横截面表征是观察纤维形态以及后续控制纤维制造参数的重要方法，横截面的差异是异形纤维本身性能及异形纤维复合材料力学性能差异的重要原因。因此，异形纤维的制造需要结合材料、工艺和设备之间的相关关联性，注重优化发展异形纤维的横截面形态调控方法及技术，最终实现产品性能的优化和提高。

参考文献：

[1] Agrawal A K, Bhalla R. Advances in the production of poly(lactic acid) fibers. a review [J]. Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews, 2003, 43: 479-503.

[2] Dhamija S, Kothari V K, Varshney R K. Effect of polyester fibre fineness and cross-sectional shape on physical characteristics of yarns [J]. Journal of the Textile Institute, 2011, 102: 293-307.

[3] Qin Q, Zhou T, Wang M, *et al*. Structure evolution and performance of poly (vinyl alcohol) fibers with controllable cross-section fabricated using a combination of melt-spinning and stretching [J]. Polymer Testing, 2023, 117:107867.

[4] Yang L, Liu X, Wu Z, *et al*. Effects of triangle-shape fiber on the transverse mechanical properties of unidirectional carbon fiber reinforced plastics [J]. Composite Structures, 2016, 152: 617-25.

[5] Huang S, Jin W, Ye M, *et al*. A vision based method for automated measurement of circular fiber cross- sections [J]. Measurement, 2020, 162:107913

[6] Zhang Y, Ding J, Qi B, *et al*. Multifunctional fibers to shape future biomedical devices [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29: 1902834.

[7] Saffari M R, Kamali D M, Rashidi A, *et al*. Sound absorption of weft knitted fabrics: influence of fibers cross-section shape, stitch density and mechanical modification of surface [J]. International Journal of Clothing Science and Technology, 2020, 33: 606-618.

[8] Lee J W, Park S W. Effect of fiber cross section shape on the

sound absorption and the sound insulation [J]. Fibers and Polymers, 2021, 22: 2937-2945.

[9] Bunge C A, Kallweit J P, Al Houri M, *et al*. Directed illumination by side-emitting fibers with trilobal cross section [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37: 5714-5721.

[10] Kallweit J, Bunge C A, Al-Houri M, *et al*. Textile touch-sensor array based on circular and non-circular polymer optical fibers [C]. Glasgow, UK: 2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS), 2019.

[11] Yang Z, Dou F, Yu T, *et al*. On the cross-section of shaped fibers in the dry spinning process: physical explanation by the geometric potential theory [J]. Results in Physics, 2019, 14: 102347.

[12] Puppi D, Zhang X, Yang L, *et al*. Nano/microfibrous polymeric constructs loaded with bioactive agents and designed for tissue engineering applications: a review [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 2014, 102: 1562-1579.

[13] Azimi B, Nourpanah P, Rabiee M, *et al*. Poly (ε-caprolactone) fiber: an overview [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2014, 9: 74-90.

[14] Sharifi F, Sooriyarachchi A C, Altural H, *et al*. Fiber based approaches as medicine delivery systems [J]. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2016, 2: 1411-1431.

[15] Wang H, Xu Y, Wei Q, *et al*. Preparation of bamboo-hat-shaped deposition of a poly(ethylene terephthalate) fiber web by melt-electrospinning [J]. Textile Research Journal, 2015, 85: 1838-1848.

[16] Rajesh N, Phanendra K, Dineshkumar H, *et al*. Influence of fibre cross-section profile on the multi-physical properties of uni-directional composites [J]. Composite Structures, 2023, 321: 117321.

[17] Yao T, Baker M B, Moroni L. Strategies to improve nanofibrous scaffolds for vascular tissue engineering [J]. Nanomaterials, 2020, 10: 887.

[18] Fujii T, Mizutani Y, Nakane K. Melt-electrospun fibers obtained from polypropylene/poly(ethylene-co-vinyl alcohol)/polypropylene three-layer films [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135: 46393.

[19] Feng P, Wu Y W, Liu T O, *et al*. Non-uniform fiber-resin distributions of pultruded GFRP profiles [J]. Composites Part B, 2022, 231: 109543.

[20] Góra A, Sahay R, Thavasi V, *et al*. Melt-electrospun fibers for advances in biomedical engineering, clean energy, filtration, and separation [J]. Polymer Reviews, 2011, 51: 265-287.

[21] Wang S, Li X, Yi X, *et al*. Morphological changes of nanofiber cross-sections due to surface tension [J]. Extreme Mechanics Letters, 2021, 44: 101211.

[22] Jung J T, Kim J F, Wang H H, *et al*. Understanding the non-solvent induced phase separation (NIPS) effect during the fabrication of microporous PVDF membranes via thermally induced phase separation (TIPS) [J]. Journal of Membrane Science, 2016, 514: 250-263.

[23] Wei H, Suo X, Lu C, *et al*. A comparison of coagulation and gelation on the structures and stabilization behaviors of polyacrylonitrile fibers [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 137: 48671.

[24] Lyu L H, Lyu T T, Wang J J, *et al*. Lateral compression properties of special-shaped 3D tubular woven composites [J]. Textile and Apparel, 2022, 32: 77 - 85.

[25] Ruckdashel R, Shim E. Hollowness variation with die wall thickness in melt-spinning of polypropylene hollow fibers [J]. Fibers and Polymers, 2022, 23: 1256-1265.

[26] Suriani M J, Sapuan S M, Ruzaidi C M, *et al*. Correlation of manufacturing defects and impact behaviors of kenaf fiber reinforced hybrid fiberglass/Kevlar polyester composite [J]. Polimery, 2021, 66: 30-35.

[27] Wang Y, Tong Y J, Zhang B W, *et al*. Formation of surface morphology in polyacrylonitrile (PAN) fibers during wet-spinning [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2018, 13. doi: 10.1177/155892501801300208.

[28] Meng N, Zheng Y, Xin B. Surface morphologies of electrospun polystyrene fibers induced by an electric field [J]. Textile Research Journal, 2019, 89: 3850-3859.

[29] Aulova A, Bek M, Kossovich L, *et al*. Needleless electrospinning of PA6 fibers: the effect of solution concentration and electrospinning voltage on fiber diameter [J]. Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, 2020, 66: 421-430.

[30] Hossain M F, Gong R H, Rigout M. Optimization of the process variables for electrospinning of poly(ethylene oxide)-loaded hydroxypropyl-β-cyclodextrin nanofibres [J]. The Journal of The Textile Institute, 2015, 107: 1-11.

[31] Manul A, Hussain A, Shervanthi H V, *et al*. Environmental impact of polymer fiber manufacture [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2022, 307: 2200356.

[32] Zhong T, Li J, Yan X, *et al*. Preparation and structural control of

polyphenylene sulfide porous fibers via thermally induced phase separation method [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138: 50859.

[33] Ruckdashel R, Shim E. Effects of melt spinning parameters on polypropylene hollow fiber formation [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2020, 15. doi: 10.1177/1558925019899680.

[34] Ding S T, Guo Y S, Yu H, *et al.* Preparation of shell/core atypical spiral conductive microfibers and composite membrane with good conductivity and mechanical properties [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2022, 307: 2200400.

[35] Prahsarn C, Roungpaisan N, Klinsukhon W, *et al*. Study on parameters influencing shape change of melt spun cross-shaped polypropylene and poly (lactic acid) fibers [J]. Journal of Polymer Research, 2014, 21: 574.

[36] Ren X H, Zhang C, Zhang J H, *et al*. Mechanical properties of special-shaped Mo fiber reinforced mineral-filled polymer composite [J]. Fibers and Polymers, 2021, 22:451-459.

[37] Zhao J, Zhao Q, Wang C, *et al*. High thermal insulation and compressive strength polypropylene foams fabricated by high-pressure foam injection molding and mold opening of nano-fibrillar composites [J]. Materials & Design, 2017, 131: 1-11.

[38] Ursino C, Russo F, Ferrari R M, *et al*. Polyethersulfone hollow fiber membranes prepared with Polarclean® as a more sustainable solvent [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 608: 118216.

[39] Randová A, Bartovská L, Morávek P, *et al*. A fundamental study of the physicochemical properties of Rhodiasolv®Polarclean: a promising alternative to common and hazardous solvents [J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 224: 1163-1171.

[40] Jung W, Lee S, Woo P, *et al*. Effect of fiber cross section shape on the sound absorption and the sound insulation [J]. Fibers and Polymers, 2021, 22: 2937-2945.

[41] Zhou F L, Parker G J, Eichhorn S J, *et al*. Production and cross-sectional characterization of aligned co-electrospun hollow microfibrous bulk assemblies [J]. Materials Characterization, 2015, 109: 25-35.

[42] Conforti A, Minelli F, Plizzari G A, *et al*. Comparing test methods for the mechanical characterization of fiber reinforced concrete [J]. Structural Concrete, 2018, 19: 656-669.

[43] Wang Z, Zhong Y, Wang S，*et al*. A new shape factor measure for characterizing the cross-section of profiled fiber [J]. Textile Research Journal, 2011, 82: 454-462.

[44] Jamiluddin J, Januar P S, Salwani M S, *et al*. Important considerations in manufacturing of natural fiber composites: a review [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2019, 6: 647-664.

[45] Wang Y, Tong Y J, Zhang B W, *et al*. Experimental and theoretical study of rectangular fiber melt spinning [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2018, 13: 52-57.

[46] Feng P, Feng P, Pan J, *et al*. Studies on the melt spinning process of square 8-hole hollow polyester fibre [J]. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 2018, 26: 14-16.

[47] Gao T Q, Ding J J. Multifunctional structural composite fibers in energy storage by extrusion-based manufacturing [J]. Journal of Materials Research, 2023, 38: 2615-2630.

[48] Zhang H, Shen Y, Edgar K J, *et al*. Influence of cross-section shape on structure and properties of Lyocell fibers [J]. Cellulose, 2020, 28: 1191-1201.

[49] Babaarslan O, Hacioğullari S Ö. Effect of fibre cross-sectional shape on the properties of POY continuous filaments yarns [J]. Fibers and Polymers, 2013, 14: 146-151.

[50] Christian A B, Jan P K, Mohmmed A H, *et al*. Textile multitouch force-sensor array based on circular and non-circular polymer optical fibers [J]. IEEE Sensors Journal, 2020,20: 7548-7555.

[51] Herráez M, González C, Lopes C S, *et al*. Computational micromechanics evaluation of the effect of fibre shape on the transverse strength of unidirectional composites: an approach to virtual materials design [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 91: 484-492.

[52] Thomason J L. Flat glass fibres: the influence of fibre cross section shape on composite micromechanics and composite strength [J]. Composites Part A, 2023, 169: 107503.

[53] Zhang H H, Shen Y, Kevin J. E, *et al.* Influence of cross-section shape on structure and properties of Lyocell fibers [J]. Cellulose, 2021, 28: 1191-1201.

Progress in Shaped Fibers and Their Manufacturing Techniques: A Review

Chunfeng Fan, Jianfeng He, Jian Wang
(*College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*)

ABSTRACT: Shaped fibers are fibers with non-circular cross-sectional shapes. They can compensate for the limitations of circular fibers in terms of torsional strength, roughness, elasticity, and apparent properties. Additionally, shaped fibers exhibit excellent properties such as luster, dyeability, stain resistance, flame retardancy, thermal insulation, and sound insulation. As a result, they have found extensive applications in various fields including textiles, composite materials, construction, biomedical, automotive, aerospace, and optics. This article reviewed the literatures on shaped fibers, providing an overview of their types, characteristics, and application areas. It also summarized the manufacturing techniques and influencing factors of shaped fibers, and analyzed the characterization methods of their cross-sectional morphology and their impact on performance. This comprehensive review aimed to provide scientific guidance and technical references for the research and development of shaped fibers.

Keywords: shaped fibers; fabrication method; mechanical properties; composite materials