

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.011

基于收敛口模诱导纤维取向的碳纤维复合材料制备方法

王治辉¹, 陈占春¹, 刘江林², 梁建国²

(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学先进成型与智能装备研究院, 太原 030024)

摘要: 直接复合压缩成型(DCCM)技术因其高效和低成本的特点越来越多地被应用于汽车行业碳纤维复合材料复杂零部件的生产制造。为解决由DCCM技术制备的碳纤维/尼龙6(CF/PA6)复合材料制品力学性能差、纤维取向紊乱的问题,使用收敛口模,采用熔体剪切流动诱导纤维取向的方法,制备具有良好纤维取向的坯料,然后通过压缩成型制备具有良好力学性能的CF/PA6复合材料。对复合材料中心截面抛光,使用ImageJ软件中的OrientationJ插件对抛光平面显微图中纤维取向角分布进行识别提取。通过对纤维取向角统计分布数据进行正态分布拟合来表征纤维取向程度,定量分析了CF/PA6复合材料在挤出过程中纤维质量分数、纤维长度和挤出宽度对纤维取向分布的影响。结果表明,纤维长度对纤维取向影响较小,纤维质量分数对纤维取向影响较大,而挤出宽度对复合材料中的纤维取向影响最大。当挤出宽度从8 mm增加到14 mm时,纤维沿挤出方向取向角正态分布方差增加了26.05,纤维取向程度被严重削弱。与随机取向的复合材料相比,当纤维质量分数为30%、纤维取向角为0°、挤出宽度为8 mm、纤维长度为212 μm时,复合材料的拉伸强度提高了23.94%。

关键词: 直接复合压缩成型;碳纤维;复合材料;收敛口模;纤维取向

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0079-10

Preparation method of carbon fiber composites based on convergent die induce fiber orientation

WANG Zhihui¹, CHEN Zhanchun¹, LIU Jianglin², LIANG Jianguo²

(1. College of Mechanical, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Advanced Forming and Intelligent Equipment Research Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract : Direct composite compression molding (DCCM) technology is increasingly used in the automotive industry for the production of carbon fiber composite complex parts due to its high efficiency and low cost. To solve the problem of poor mechanical properties and disordered fiber orientation of the carbon fiber/nylon 6 (CF/PA6) composite products prepared by DCCM technology, a converging die was used to induce fiber orientation through melt shear flow for preparing blank with good fiber orientation, then the CF/PA6 composites with good mechanical properties were produced through compression molding. The center section of the composite was polished and the fiber orientation angle distribution in the polished planar micrographs was identified and extracted using the OrientationJ plug-in in ImageJ software. The degree of fiber orientation was characterized by fitting a normal distribution to the statistical distribution data of the fiber orientation angles, and the effects of the fiber mass fraction, fiber length, and extrusion width on the distribution of the fiber orientation were quantitatively analyzed during the extrusion process of CF/PA6 composites. The results show that, fiber length has a small effect on fiber orientation, fiber mass fraction has a large effect on fiber orientation and the extrusion width has the greatest influence on fiber orientation in composites. When the extrusion width is increased from 8 mm to 14 mm, the variance of the normal distribution of the fiber orientation angles along the extrusion direction is increased by 26.05, and fiber orientation is severely weakened. Compared with the randomly oriented composites, the tensile strength of the composites is increased by 23.94% when the fiber mass fraction is 30%, the fiber orientation angle is 0°, the extrusion width is 8 mm, and the fiber length is 212 μm.

Keywords : direct composite compression molding ; carbon fiber ; composite ; convergence die ; fiber orientation

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075361,52075359), 山西省科技重大专项(20201102003), 山西浙大新材料与化工研究院技术开发项目(2022SX-TD021)

通信作者: 刘江林, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为碳纤维复合材料制备

收稿日期: 2025-01-09

引用格式: 王治辉, 陈占春, 刘江林, 等. 基于收敛口模诱导纤维取向的碳纤维复合材料制备方法[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 79-88.

WANG Zhihui, CHEN Zhanchun, LIU Jianglin, et al. Preparation method of carbon fiber composites based on convergent die induce fiber orientation[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 79-88.

轻量化是汽车行业降低油耗、减少碳排放和提高汽车有限续航里程的关键途径^[1-2]。碳纤维(CF)复合材料具有高比强度、高比刚度和低密度的特点,在汽车轻量化目标中发挥着举足轻重的作用^[3-5]。直接复合压缩成型(DCCM)通过挤出机螺杆的高速旋转将树脂与纤维均匀混合,然后将挤出的高温坯料置于模具中,通过高温、高压成型复杂制品。该技术以其生产周期短、制造成本低、易于加工复杂部件脱颖而出^[6]。通过这种方法生产出的轻质复合材料结构广泛应用于汽车和航空航天等行业^[7]。与传统注射成型相比,DCCM能更好地保留纤维长度,但纤维取向的效果相对较差,复合材料的力学性能较低。而纤维的高度取向可以有效提高复合材料的力学性能,使复合材料沿纤维取向方向具有更高的刚度和拉伸强度^[8-10]。在DCCM工艺生产的基础上,开发能够有效提升纤维取向的复合材料的制备方法具有重要意义。

控制纤维取向主要使用超声波、电场、磁场和流场等方法。当超声波在树脂基体中传播时,会产生声辐射力,从而使纤维在空间上定向排列^[11]。电场利用纤维和树脂基体之间的介电性质差异,使纤维极化并最终沿电场方向排列^[12]。磁场通过磁化复合材料中的磁性颗粒,使纤维沿磁场方向排列^[13]。然而,上述方法都有一定的局限性:超声波控制纤维取向仅限于低纤维含量;电场需要极高的场强;磁场则需要在纤维表面附着磁性颗粒以控制取向^[14]。此外,还有一种利用剪切流动使大量纤维沿熔体流动方向取向的方法。这种方法高效、方便、经济,适用于各种纤维状态,包括较高的纤维质量分数和黏度较高的树脂^[15-16]。因此,流动诱导纤维取向的方法可有效控制短纤维的空间排列。在DCCM过程中,通过设计挤出出口处的流场,使流场沿挤出方向诱导树脂中的纤维取向。但是,目前大多数关于热塑性复合材料纤维取向的研究主要集中在3D打印机上,无法大规模、大批量制备。

因此,为了进一步提高DCCM复合材料的性能,必须找到一种能在DCCM过程中使纤维定向的方法。笔者将流动诱导纤维取向的方法应用于双螺杆挤出机中。为了实现纤维的取向,在挤出机出口处使用收敛口模。研究了双螺杆挤出机在该口模下稳态挤出时,单根挤出样条及压缩成型样品中纤维的取向分布。深入研究了纤维长度、纤维质量

分数和挤出宽度对复合材料内纤维取向的影响。根据实验设计,对不同挤出条件下的成型样品进行了拉伸测试和内部结构评估。

1 实验部分

1.1 主要原料

尼龙6 (PA6): Ultramid® B3S, 拉伸强度为75 MPa, 德国巴斯夫有限公司;

CF: SYT49S, 纤维直径为7 μm , 密度为1.8 g/cm^3 , 中复神鹰碳纤维股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机: KTE-T-36B, 南京科尔科挤出设备有限公司;

模压机: YQ32-400T, 山东儒工数控机床有限公司;

电子万能材料试验机: INSTRON5969, 美国ITW集团英斯特朗公司;

形状测量激光显微镜: Keyence VK-X1100, 基恩士日本株式会社;

扫描电子显微镜(SEM): JEOL-JSM-IT500, 日本电子株式会社。

1.3 CF/PA6复合材料制备

图1为CF/PA6复合材料的制备流程。首先将PA6与CF进行熔融共混,如图1a所示,双螺杆挤出机的温度设置为220~250 $^{\circ}\text{C}$, PA6颗粒的喂料速度为100 r/min, 挤出机主螺杆转速为150 r/min, CF通过纤维喂料口送入双螺杆挤出机。通过改变加入的CF根数来改变纤维的质量分数,以避免主螺杆转速变化对纤维长度的影响。通过改变纤维喂料口后的螺杆剪切元件数量,可调节复合材料中纤维的长度分布^[17]。在挤出机出口处设计了一个锥形汇聚流道,由此得到收敛口模,如图1d和图2所示,在锥形流道中,越靠近口模中心轴线的位置,流体的速度就越大。由于口模内不同位置的速度不同,在具有不同速度的两个相邻流体层之间会形成剪切应力,剪切应力随着速度梯度的增加而增加。这些

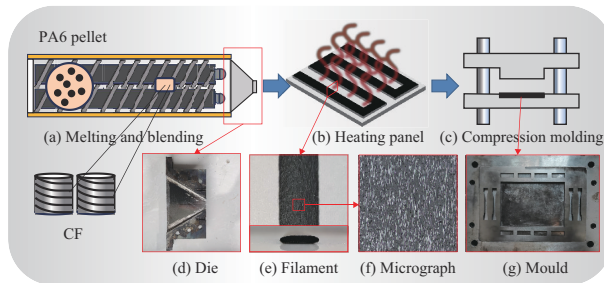


图1 CF/PA6复合材料的制备流程

Fig. 1 Preparation process of CF/PA6 composites

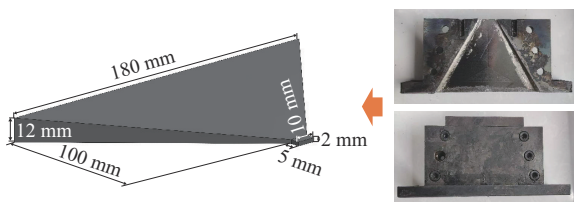


图2 挤出机收敛口模结构及内部锥形流道尺寸

Fig. 2 Extruder converging die structure and internal conical runner size
剪切应力施加在短CF上会产生逆时针耦合力矩,使纤维逆时针旋转,直到纤维与熔体流动方向平行,从而确保CF在出口处沿挤出方向排列。锥形流道的入口长度为180 mm,厚度为12 mm;锥形流道出口的长度为10 mm,厚度为2 mm;锥形流道的整体长度为105 mm。

从口模挤出的样条如图1e所示,其纤维取向效果如图1f所示。控制挤出口处可移动的加热面板,使挤出的熔融复合材料以图1b所示的方形波形路径排列形成坯料(方形波形路径的整体形状是产品的形状,以便填充模具)。利用加热面板将复合材料坯料保持在250 °C的温度下,以确保其保持熔融状态。将具有良好取向的坯料放入图1g所示的模具中进行压缩成型,如图1c所示,上、下模具的温度保持在160 °C,模具保压时间为5 min,保压的压力为10 MPa,最终制得具有一定取向的板材。

1.4 测试与表征

将CF/PA6复合材料挤出样条切割成适当的尺寸,使用镶嵌液对切割后的样条进行镶嵌和固化,然后进行纤维取向表征,如图3所示。将镶嵌件置于自动抛光机上对需要观察的平面进行抛光。在载物台上使用形状测量激光显微镜对抛光面进行拍照。使

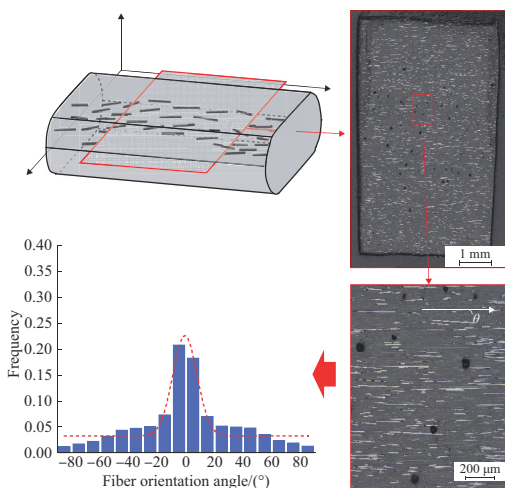


图3 纤维取向表征示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fiber orientation characterization

用ImageJ中的OrientationJ插件识别并统计图像中各个纤维在平面中的取向角度,即纤维取向角 θ 的分布。在Origin中通过拟合纤维取向角 θ 的正态分布,计算正态分布曲线的参数正态分布均值(μ)与正态分布方差(σ^2),以此表征纤维的取向分布程度^[18-19]。

根据GB/T 1040.2-2022制备了不同取向状态下的拉伸试样,每个试样的标距长度为50 mm。为了评估试样的力学性能,在带有50 kN负载传感器的电子万能材料试验机上进行拉伸试验。将试样夹在试验机的楔形夹具上,对试样施加单轴拉伸载荷。拉伸速度保持在10 mm/min。

使用SEM分析CF/PA6复合材料拉伸试样的断面,在观察断面之前,需要使用自动溅射镀膜机在断面表面进行喷金处理。

2 结果与讨论

2.1 纤维质量分数对纤维取向的影响

双螺杆挤出机的各种参数不变,控制喂入的纤维根数来制备不同纤维质量分数的复合材料。图4显示了不同纤维质量分数的CF/PA6复合材料抛光表面的显微图。使用OrientationJ插件对图4中不同纤维质量分数的复合材料抛光平面进行识别统计,获得图5的不同纤维质量分数下纤维取向角 θ 的统计直方图及正态分布拟合曲线。将拟合曲线汇总至图6,对比可知,随着纤维质量分数从10%增加到

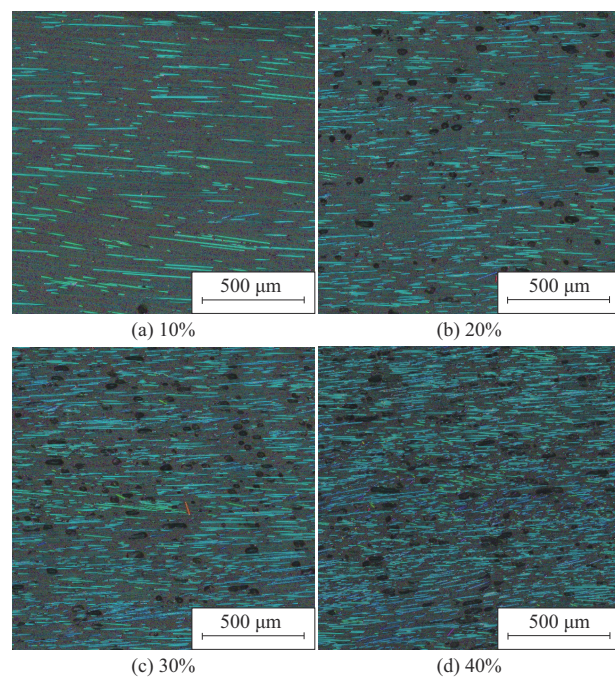


图4 不同纤维质量分数的CF/PA6复合材料抛光平面显微图

Fig. 4 Polished planar micrographs of CF/PA6 composites with different fiber mass fractions

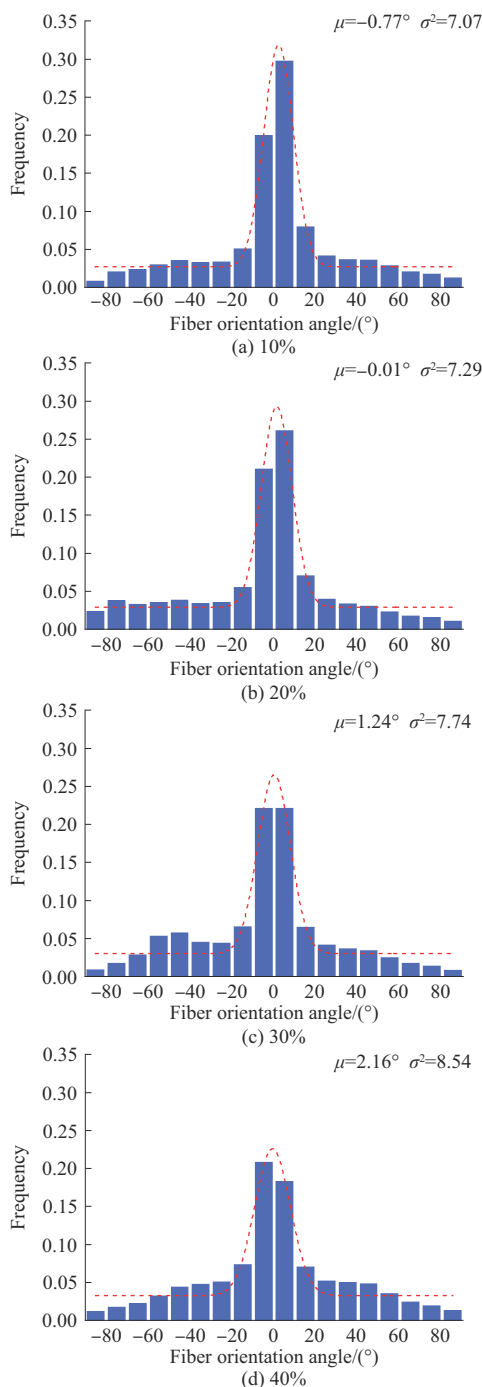


图5 不同纤维质量分数下纤维取向角 θ 的统计分布直方图及其正态分布拟合曲线

Fig. 5 Histograms of statistical distributions of fiber orientation angle θ under different fiber mass fractions and their normal distribution fitting curves

40%,直方图频率的峰值从0.32减小至0.23。峰值的减小主要是因为纤维的取向效果降低,导致纤维分布杂乱,直方图拟合曲线分布变宽。纤维质量分数从10%增大到40%, σ^2 由7.07增加至8.54,特别是30%变化至40%的过程中变化较大, σ^2 增加了

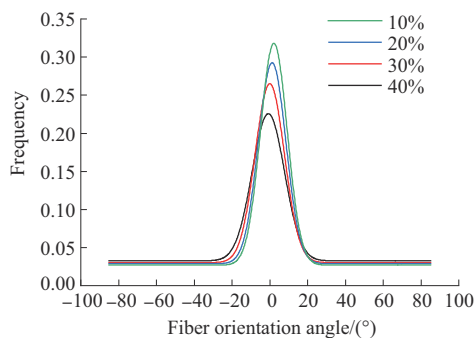


图6 不同纤维质量分数下纤维取向角 θ 的正态分布拟合曲线汇总

Fig. 6 Summary of fitting curves of normal distribution of fiber orientation angle θ under different fiber mass fractions

10.33%。这表明随着纤维质量分数的增加,沿挤出方向纤维取向效果逐渐变差。但总体而言,CF大体仍沿挤出方向取向。

在复合材料挤出的过程中,纤维取向分布主要取决于流动状态的类型和复合材料熔体的流变特性。随着纤维质量分数的增加,CF/PA6复合材料的黏度增加,流体中剪切流场的剪切效应减弱,纤维的取向能力降低。此外,随着纤维质量分数的增加,纤维与纤维之间的相互作用也会逐渐增加,这可能会增加纤维取向的难度。同时,纤维之间的空间减小,限制了纤维的运动和排列,导致纤维取向更加困难。

2.2 挤出宽度对纤维取向的影响

通过控制加热面板的移动速度,控制挤出样条的宽度从8 mm到14 mm变化,并对不同挤出宽度的CF/PA6复合材料进行抛光,获得的抛光平面显微图如图7所示。统计不同挤出宽度下纤维取向角 θ 的直方图并进行正态曲线拟合,如图8所示。在图8中,观察拟合曲线的变化趋势可知,当宽度增加至12 mm时,纤维取向效果明显变差。挤出宽度为8 mm时, σ^2 为8.73,当挤出宽度由10 mm增加至12 mm时, σ^2 急剧增大,由9.24变化至34.00,当挤出宽度增加至14 mm时, σ^2 为34.78,相比挤出宽度为8 mm时增加了26.05。直方图频率的峰值从0.24降低到0.09。在不同挤出宽度下的直方图基本都为0°取向角对称。正态分布曲线 μ 的范围为 $-0.40^\circ \sim 0.71^\circ$,表明纤维取向始终与挤出方向紧密对齐(0°取向角)。图9为不同挤出宽度下纤维取向角 θ 的正态分布拟合曲线汇总图。从图9可以看到,随着挤出宽度的增加,纤维角度的直方图拟合曲线分布逐渐变宽。挤出宽度为8 mm时,纤维大部分沿挤出方向上对齐,只有少数纤维未对齐。但是,挤出宽度为

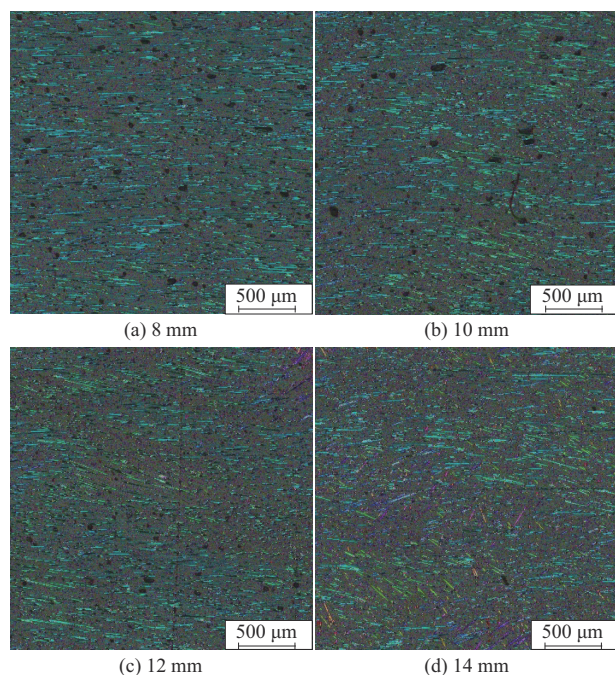


图7 不同挤出宽度的CF/PA6复合材料抛光平面显微图

Fig. 7 Polished planar micrographs of CF/PA6 composites with different extruded widths

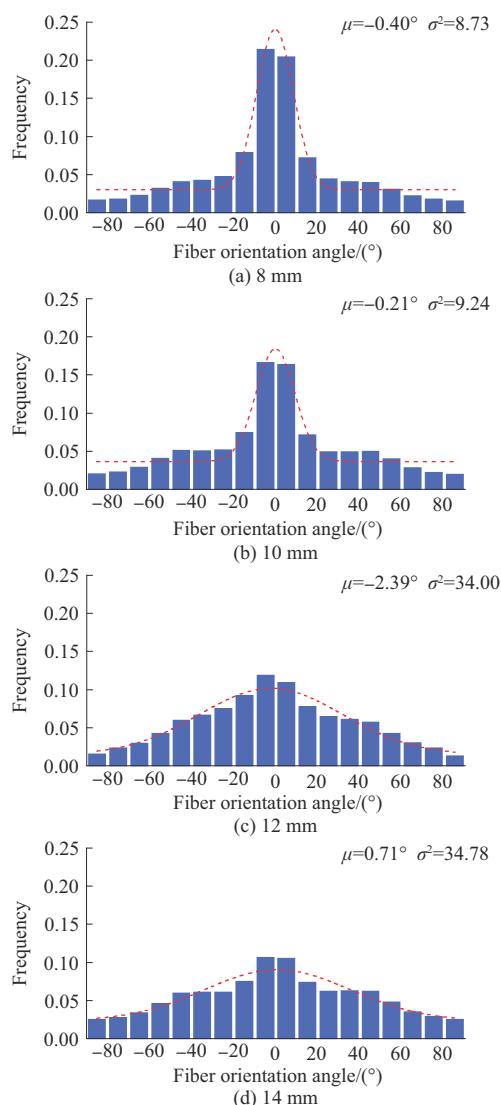
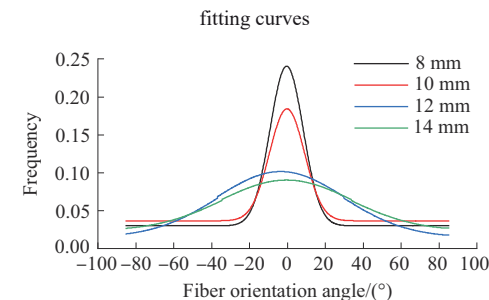
14 mm时,沿挤出方向定向的纤维较少,如图7d中有许多未水平对齐的纤维。由纤维分布图及相关正态分布曲线参数可知,挤出宽度对纤维取向的影响显著,较宽的挤出宽度会严重减弱纤维的取向效果。

熔融复合材料在口模处的流动直接影响纤维的取向分布。在挤出机出口处使用收敛口模,通过缩减口径,来增加熔体在流动过程中的剪切效应。在挤出之后,当挤出样条宽度大于挤出口模宽度时,复合材料在挤出口模出口处膨胀,导致挤出纤维的横向排列增多^[20](挤出方向上的纤维排列减少)。当挤出样条宽度小于或等于口模宽度时,纤维在空间上受到限制,通过流体的剪切效应,实现纤维的偏转。因此在较窄挤出宽度的挤出过程中,纤维在挤出方向上的排列较多。

2.3 纤维长度对纤维取向的影响

纤维送入双螺杆挤出机后,螺杆的高速旋转会在挤出机腔内产生高剪切力,导致纤维长度显著缩短。不同的纤维长度也会影响复合材料中纤维的取向。使用纤维质量分数为30%的CF/PA6复合材料,并通过改变螺杆上的剪切元件数量来控制纤维长度。将复合材料置于马沸炉中在650℃下加热3 h去除PA6,然后在显微镜下测得纤维的长度分布,以其峰值来代表纤维长度的集中分布。

纤维长度从158 μm到212 μm变化时复合材料

图8 不同挤出宽度下纤维取向角 θ 的统计分布直方图及其正态分布拟合曲线Fig. 8 Histograms of statistical distribution of fiber orientation angle θ under different extruded widths and their normal distribution图9 不同挤出宽度下纤维取向角 θ 的正态分布拟合曲线汇总Fig. 9 Summary of fitting curves of normal distribution of fiber orientation angle θ under different extrusion widths

抛光平面显微图如图10所示。统计了不同纤维长度下纤维取向角 θ 的直方图并进行正态曲线拟合,如图11所示。不同纤维长度下纤维取向角 θ 的正态

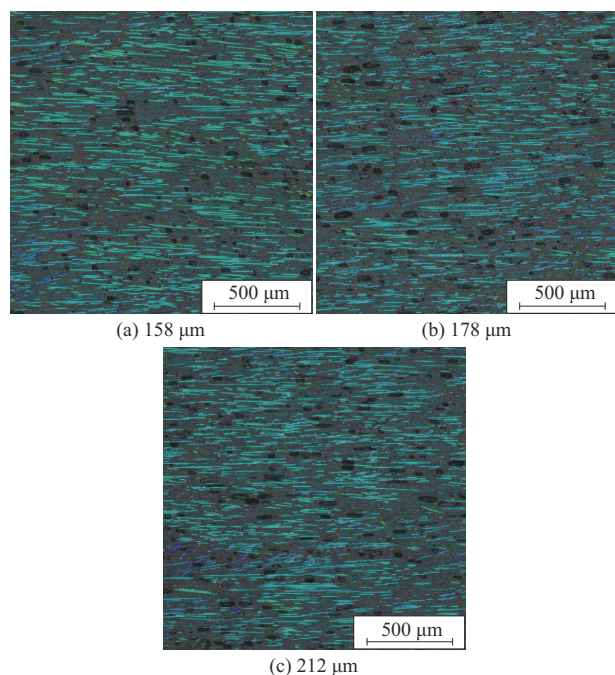


图10 不同纤维长度的CF/PA6复合材料抛光平面显微图

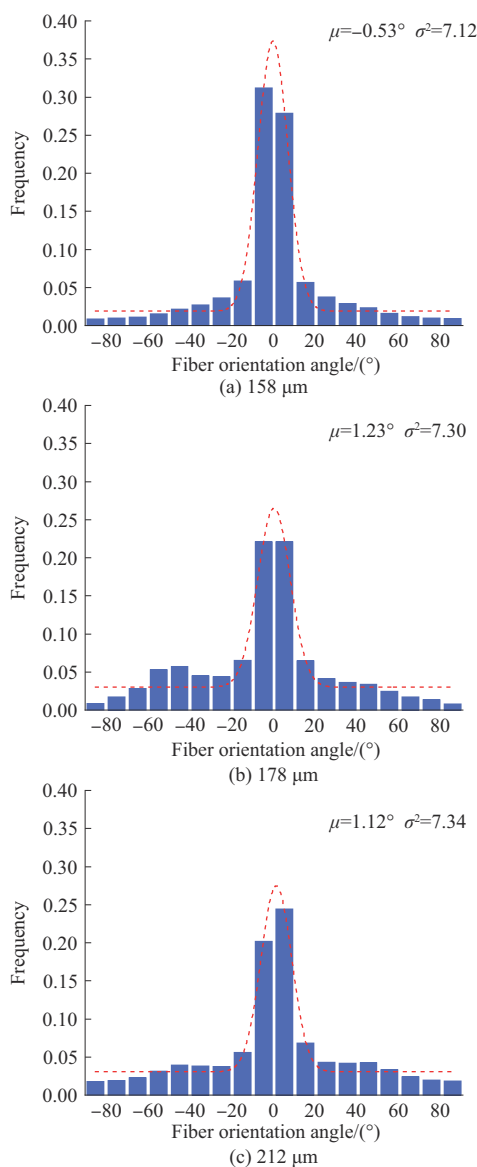
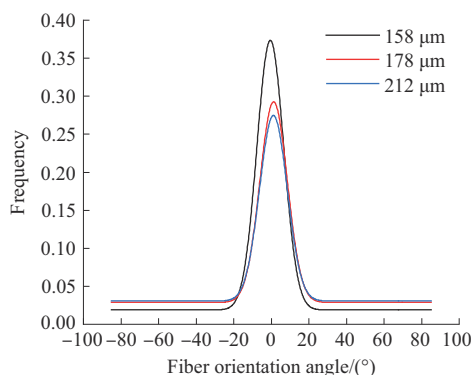
Fig. 10 Polished planar micrographs of CF/PA6 composites with different fiber lengths

分布拟合曲线汇总图如图12所示。从图11和图12可以看出,当纤维长度从158 μm 增加至212 μm 时,纤维取向逐渐变得紊乱。纤维长度为158 μm 时, σ^2 为7.12,当纤维长度增加至212 μm 时, σ^2 增加至7.34。直方图频率的峰值从0.37降低到0.27。在不同纤维长度下的直方图基本都为 0° 取向角对称。正态分布曲线 μ 范围为 $-0.53^\circ \sim 1.23^\circ$,数值的变化都较小。可以看出纤维长度在158~212 μm 范围内对纤维取向的影响较小。

在相同的挤出参数下,随着纤维长度的增加,纤维长度对复合材料整体流动性逐渐产生影响。较长的纤维会增加复合材料的黏度,这在一定程度上会减弱出口处的剪切流动^[21]。当纤维的长径比变大时,纤维在剪切流场中会受到更多力的作用,但纤维长径比越大,刚度越小,越容易弯曲,导致纤维取向效果差。同时,纤维长度的增加也会使纤维与纤维之间的相互作用变得复杂,从而降低纤维的取向效果。但根据上述结果可以看出,由于纤维长度只变化了54 μm ,纤维长度变化较小,导致在本次实验中纤维长度对纤维取向的影响并不特别明显。

2.4 复合材料在压缩成型中纤维取向的变化

挤出样条顺序排列形成具有良好取向的坯料,但样条与样条之间存在间隙。通过压缩成型填充间隙并成型板材。如图13所示,将单个样条接触部

图11 不同纤维长度下纤维取向角 θ 的统计分布直方图及其正态分布拟合曲线Fig. 11 Histograms of statistical distribution of fiber orientation angle θ under different fiber lengths and their normal distribution fitting curves图12 不同纤维长度下纤维取向角 θ 的正态分布拟合曲线汇总Fig. 12 Summary of fitting curves of normal distribution of fiber orientation angle θ under different fiber lengths

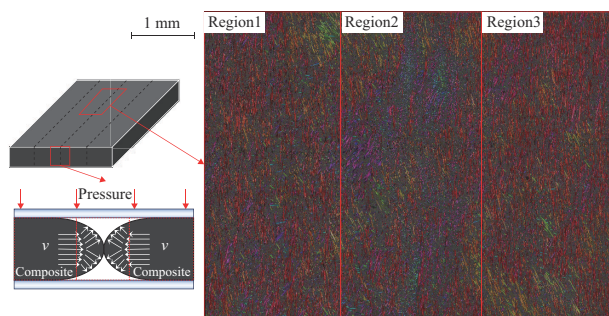


图13 压缩成型过程中的碳纤维复合材料抛光平面区域划分显微图

Fig. 13 Micrographs of polished planar region delineation of carbon fiber composites during compression molding process

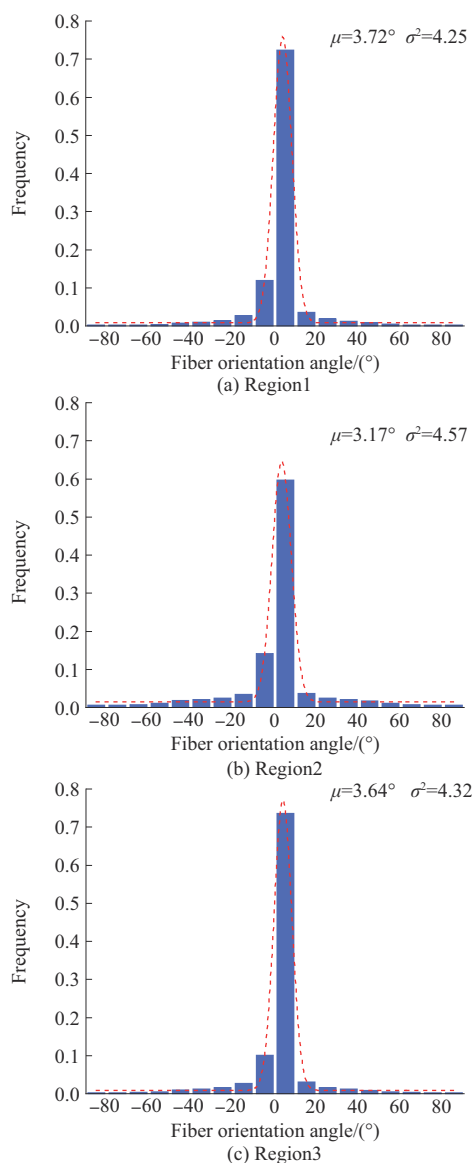
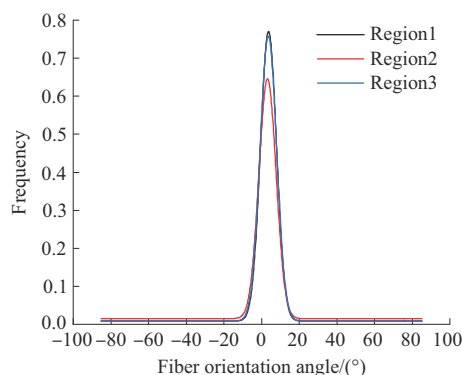
分划分为3个区域。在区域1与区域3中,方差 σ^2 如图14所示,分别为4.25与4.32。而中间接触区域2的方差 σ^2 为4.57。将拟合曲线汇总后,如图15所示,区域2的拟合曲线峰值明显低于其他区域,表明区域2的纤维取向效果明显差于区域1与区域3。

距离接触区较远的区域,即区域1和区域3,在压缩过程中受流动的影响较小,可以保持原有的纤维取向状态。在区域2中,样条与样条接触,由于接触不充分,上下两层存在间隙。在上模向下挤压的过程中,复合材料的熔融部分被向上/向下挤压以填充空隙。由于温度差异,温度较高的区域黏度较低,温度较低的区域黏度较高,在流动过程中,由于温差会产生剪切流,因此中间部分的纤维会沿厚度方向发生偏移,从而使纤维取向发生较大的变化。在区域1和区域3中,在上部模具逐渐向下压缩的过程中,与上下模具接触的复合材料经历了显著的温差(熔体温度为250℃,而模腔温度为160℃)。纤维复合材料的表面接触区域迅速冷却到熔点以下,导致树脂迅速结晶,并在表面保持原有的纤维取向。随着上模腔继续下压,中间的熔融复合材料受到上下两层的挤压,从中间向外围的挤压流会破坏中间部分原有的纤维取向。在实验中,合理控制坯料的厚度可以减少压缩成型时熔融材料的流动,使其保持原有的纤维取向。

2.5 不同取向条件下复合材料的拉伸强度

短纤维增强热塑性复合材料的力学性能主要取决于增强纤维的纤维长度和纤维取向。在纤维长度变化极小的范围内,纤维的取向对复合材料的力学性能有着重要的影响。沿承载方向排列的纤维可有效增强基体,从而改善复合材料在承载方向上的力学性能。

使用压缩成型获得具有一定纤维取向的板材

图14 不同区域的纤维取向角 θ 的统计分布直方图及其正态分布拟合曲线Fig. 14 Histograms of statistical distribution of fiber orientation angle θ in different regions and their normal distribution fitting curves图15 不同区域的纤维取向角 θ 的正态分布拟合曲线汇总Fig. 15 Summary of fitting curves of normal distribution of fiber orientation angle θ in different regions

后,使用水刀根据 GB/T 1040.2-2022 切割制备沿拉伸方向取向角为 0° 和 90° 的标准拉伸试样以及使用普通口模的随机取向的标准拉伸试样,获得了3种纤维取向。在挤出宽度为8 mm时,测试了不同纤维质量分数条件下3种不同纤维取向的CF/PA6复合材料的拉伸强度,如图16所示。此外,还评估了纤维质量分数为30%、挤出宽度为8 mm时,3种不同纤维取向的CF/PA6复合材料在不同纤维长度下的拉伸强度,如图17所示。由图16和图17可知,短纤维复合材料的拉伸强度与纤维取向密切相关。

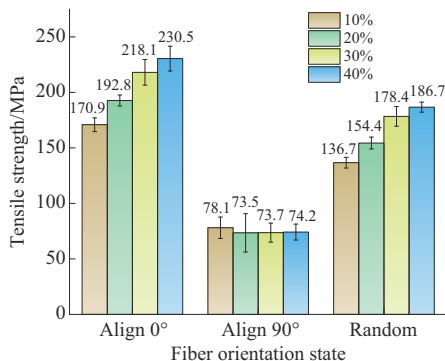


图16 不同纤维质量分数下3种纤维取向状态的CF/PA6复合材料拉伸强度

Fig. 16 Tensile strength of CF/PA6 composites in three fiber orientation states with different fiber mass fractions

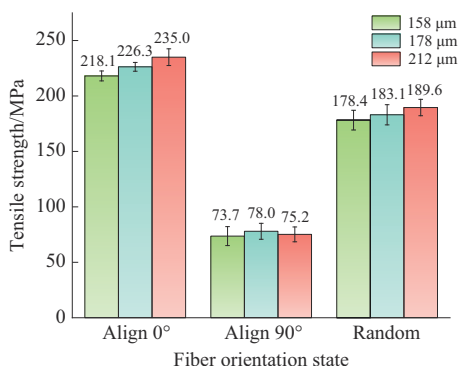


图17 不同纤维长度下3种纤维取向状态的CF/PA6复合材料拉伸强度

Fig. 17 Tensile strength of CF/PA6 composites with three fiber orientation states at different fiber lengths

由图16看出,随着纤维质量分数从10%增加到40%,在不同的取向状态下,CF/PA6复合材料拉伸强度会出现显著差异。在纤维质量分数为10%~40%范围内,纤维取向角为 0° 的复合材料的拉伸强度最高,纤维质量分数为10%时,拉伸强度可达170.9 MPa,纤维质量分数为40%时,拉伸强度可达230.5 MPa。当纤维取向角为 0° 时,拉伸方向与纤维取向一致,大部分拉伸载荷可通过纤维-基体界面有

效地传递到短纤维上,从而产生各向异性的增强效果。由于短纤维的各向异性强化效应,纤维质量分数从10%增加到40%,纤维取向角为 90° 的复合材料的拉伸强度几乎没有提高,接近PA6基体强度(75 MPa)。此外,未使用收敛口模制备的复合材料纤维排列较为随机,但也会在一定程度上提高拉伸强度,纤维质量分数为10%时,拉伸强度可达136.7 MPa,纤维质量分数为40%时,拉伸强度可达186.7 MPa。这说明了纤维取向对复合材料力学性能提升至关重要。

由图17看出,在纤维质量分数为30%的条件下,当纤维取向角为 0° 时,随着纤维长度从158 μm 增加到178 μm ,以及从178 μm 增加到212 μm ,拉伸强度分别增加了8.2 MPa和8.7 MPa,而随机取向情况下,拉伸强度分别提高了4.7 MPa和6.5 MPa。在纤维取向角为 90° 的情况下,复合材料的力学性能几乎没有改善,相较于随机取向,当纤维取向角为 0° ,纤维长度为212 μm 时,复合材料的拉伸强度可提高23.94%。这表明纤维在取向良好的状态下能更有效地发挥纤维长度提升复合材料力学性能的优势。

2.6 复合材料的断面形貌分析

不同取向状态下,纤维质量分数为30%的CF/PA6复合材料的断面形貌如图18所示。由图18a看出,在纤维取向角为 0° 的复合材料中,可以观察到在断裂过程中有相当数量的纤维沿拉伸方向断裂,表明材料承受了相当大的拉伸载荷,同时有少量纤维剥离。与此相反,由图18b可以看出,在纤维取向角为 90° 的复合材料断裂过程中,短纤维在横向上排列整齐,大部分纤维水平剥离而非断裂,表明纤维在断裂过程中不承受载荷,只有基体承受载荷。由图18c看出,在随机纤维取向的复合材料断裂部位,短纤维的分布更为混乱。一些纤维断裂,更多的纤维脱落,在基体表面留下孔洞。这导致纤维在断裂过程中承受更大的载荷。根据CF/PA6复合材料的拉伸强度测试结果和断面形貌,可以得出,复合材料的拉伸强度与承载纤维的数量密切相关。承重纤维越多,CF/PA6复合材料的拉伸强度就越高。

3 结论

(1)在挤出过程中,相对于纤维含量和纤维长度,挤出宽度是影响纤维取向的主要因素。当纤维质量分数从10%增加到40%时,沿挤出方向的纤维取向程度逐步下降,纤维质量分数越高,下降趋势

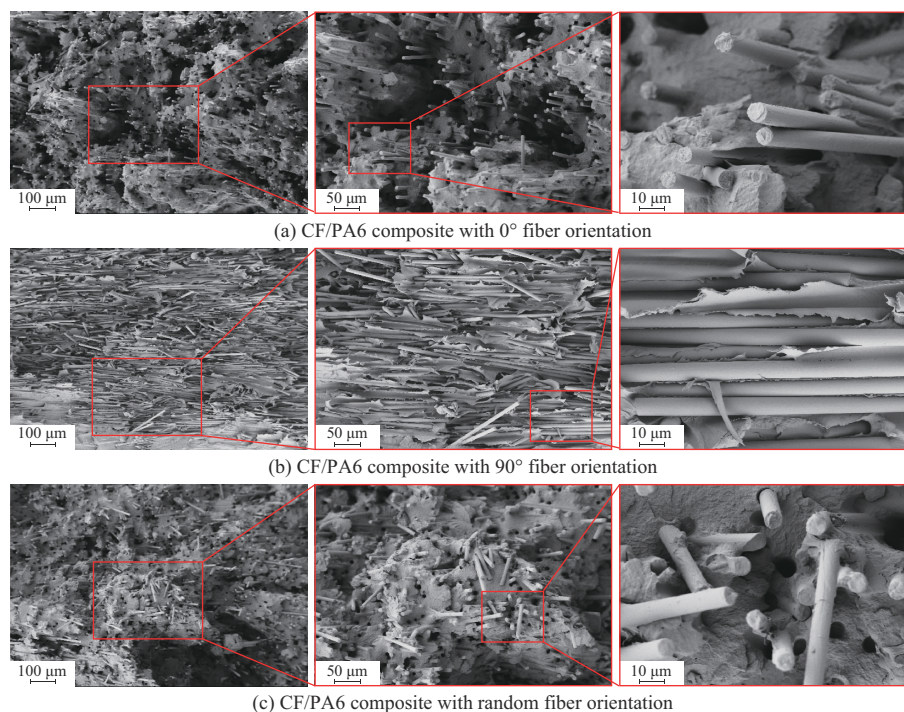


图 18 3种纤维取向状态的CF/PA6复合材料的断面形貌

Fig. 18 Fracture morphology of CF/PA6 composites with three fiber orientation states

越明显。当纤维长度从158 μm 增加到212 μm 时,纤维沿挤出方向的取向变化相对其他因素下的变化较小。然而,当挤出宽度从8 mm增加到14 mm时,挤出宽度会明显破坏纤维沿挤出方向的取向, σ^2 由8.73变化至34.78,纤维取向被急剧破坏。

(2)由于挤出样条之间的不完全接触,在压缩成型过程中坯料中间熔化部分被填充到空隙中,导致纤维在空隙中碰撞,取向受到严重破坏,而未接触区保持原有的纤维取向。因此,合理控制初始坯料的厚度和形状,减少熔体在压缩成型时的流动,从而能更好地保留初始的良好纤维取向。

(3)与普通口模相比,当纤维质量分数从10%增加到40%时,收敛口模能更有效地使纤维沿挤出方向排列。经过DCCM成型后,纤维取向角为0°(挤出宽度为8 mm)、纤维质量分数为30%和纤维长度为212 μm 的复合材料的拉伸强度较随机取向的复合材料可提高23.94%。此外,在纤维具有良好取向的条件下,还能更好地发挥纤维长度增强的优势。

参考文献

- [1] NICOLETTI L, ROMANO A, KÖNIG A, et al. An Estimation of the lightweight potential of battery electric vehicles[J]. *Energies*, 2021, 14(15). DOI:10.3390/en14154655.
- [2] 尚玉芬,李超,刘洪岩,等.新能源汽车轻量化[J]. *重型汽车*, 2024 (4):36–37.
- SHANG Yufen, LI Chao, LIU Hongyan, et al. Lightweight of new

energy vehicles[J]. *Heavy Truck*, 2024(4):36–37.

- [3] 柳嗣琪.碳纤维复合材料成型工艺在汽车制造中的创新与应用[J]. *时代汽车*, 2024(21):124–126.
- LIU Siqu. Innovation and application of carbon fiber composite molding process in automobile manufacturing[J]. *Auto Time*, 2024 (21):124–126.
- [4] NGUYEN-TRAN H D, HOANG V T, DO V T, et al. Effect of multiwalled carbon nanotubes on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced polyamide-6/polypropylene composites for lightweight automotive parts[J]. *Materials*, 2018, 11(3). DOI: 10.3390/ma11030429.
- [5] 王峰,张家辉,孙文革,等.用于汽车轻量化领域的碳纤维增强尼龙66复合材料的制备与研究[J]. *塑料科技*, 2024, 52(7):101–104.
- WANG Feng, ZHANG Jiahui, SUN Wenge, et al. Preparation and research of carbon fiber reinforced nylon 66 composites for automotive light weighting[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(7):101–104.
- [6] ISHIKAWA T, AMAOKA K, MASUBUCHI Y, et al. Overview of automotive structural composites technology developments in Japan [J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 155:221–246.
- [7] MISHRA S, DUBEY A, AGARWAL S, et al. The effect of chopped carbon fiber on morphology, electromagnetic, and mechanical properties of glass/epoxy composites for aerospace application[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2023, 76(8):2 231–2 242.
- [8] 张可.热塑性短纤维复合材料力学行为与性能表征[D].大连:大连理工大学,2018.

- ZHANG Ke. Mechanical behavior and characterization of short fiber thermoplastic composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [9] FU S Y, LAUKE B. Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers[J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(10):1 179–1 190.
- [10] LEE J, LEE H, KIM N. Fiber orientation and strain rate-dependent tensile and compressive behavior of injection molded polyamide-6 reinforced with 20% short carbon fiber[J]. *Polymers*, 2023, 15(3). DOI:10.3390/polym15030738.
- [11] WADSWORTH P, NELSON I, PORTER D L, et al. Manufacturing bioinspired flexible materials using ultrasound directed self-assembly and 3D printing[J]. *Materials & Design*, 2020, 185. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108243.
- [12] 黄华云,李想,曾泳春.电场分布对静电纺PEO纤维取向度的影响[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(5):628–635.
- HUANG Huayun, LI Xiang, ZENG Yongchun. Effect of electric field distribution on molecular orientation in electrospun PEO nanofibers[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2016, 42(5):628–635.
- [13] 李元哲.磁性碳纤维在氧化铝/硅橡胶导热垫片中取向排列及导热性能机制研究[D].上海:上海师范大学, 2023.
- LI Yuanzhe. Magnetic carbon fiber orientation arrangement and thermal conductivity mechanism in alumina/silicone rubber thermal conductive spacer[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2023.
- [14] MARKANDAN K, LAI C Q. Fabrication, properties and applications of polymer composites additively manufactured with filler alignment control: A review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 256. DOI:10.1016/j.compositesb.2023.110661.
- [15] 阚峻峰,黄海鸿,刘威豪,等.柔性再生碳纤维湿法取向仿真模拟及其复合材料性能研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(7): 389–397.
- KAN Junfeng, HUANG Haihong, LIU Weihao, et al. Simulation of flexible recycled carbon fiber wet orientation and its composite properties[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(7): 389–397.
- [16] WANG Z G, FANG Z Y, XIE Z Q, et al. A review on microstructural formations of discontinuous fiber-reinforced polymer composites prepared via material extrusion additive manufacturing: Fiber orientation, fiber attrition, and micro-voids distribution [J]. *Polymers*, 2022, 14(22). DOI:10.3390/polym14224941.
- [17] RÜPPEL A, WOLFF S, OLDEMEIER J P, et al. Influence of processing glass-fiber filled plastics on different twin-screw extruders and varying screw designs on fiber length and particle distribution[J]. *Polymers*, 2022, 14(15). DOI:10.3390/polym14153113.
- [18] YAN J Y, DEMIRCI E, GANESAN A, et al. Extrusion width critically affects fibre orientation in short fibre reinforced material extrusion additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 49. DOI:10.1016/j.addma.2021.102496.
- [19] RANEY J R, COMPTON B G, MUELLER J, et al. Rotational 3D printing of damage-tolerant composites with programmable mechanics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(6):1 198–1 203.
- [20] 李新宇.基于光固化3D打印的纤维取向与分布研究[D].南京:南京航空航天大学, 2021.
- LI Xinyu. Research on fiber orientation and distribution based on stereolithography[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [21] ASOODEH F, AGHVAMI-PANAH M, SALIMIAN S, et al. The effect of fibers' length distribution and concentration on rheological and mechanical properties of glass fiber-reinforced polypropylene composite[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51(5_suppl): 8 452S–8 471S.