复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

缠绕张力对T800级碳纤维力学性能转化率的影响

吴俊勇 顾轶卓 杨中甲 刘新宇 曾慧 王绍凯 李敏

Effect of winding tension on conversion rate for mechanical property of T800 grade carbon fiber

WU Junyong, GU Yizhuo, YANG Zhongjia, LIU Xinyu, ZENG Hui, WANG Shaokai, LI Min

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240418.005

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于微波固化工艺的碳纤维T800/环氧树脂复合材料固化反应动力学

Kinetics modeling of carbon fiber T800/epoxy resin composites based on microwave curing process

复合材料学报. 2018, 35(9): 2458–2464 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171207.001

玄武岩纤维–碳纤维混杂平纹织物增强环氧树脂基复合材料的制备与力学性能

Preparation and mechanical property of carbon–basalt hybrid fiber plain fabric reinforced epoxy resin matrix composites

复合材料学报. 2018, 35(4): 767–773 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170704.001

低温暴露对碳纤维/环氧树脂复合材料拉伸力学性能的影响

Effect of low temperature exposure on tensile mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(12): 3091–3101 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200629.001

胶层厚度对碳纤维/双马来酰亚胺树脂复合材料平–折–平混合连接接头力学性能的影响

Effect of adhesive thickness on mechanical properties of carbon fiber/bismaleimide resin composite flat–joggle–flat hybrid (bonded–bolted) joint

复合材料学报. 2020, 37(11): 2825–2832 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200121.003

单向连续碳纤维–玻璃纤维层间混杂增强环氧树脂基复合材料的力学性能

Mechanical properties of unidirectional carbon fiber–glass fiber hybrid reinforced epoxy composites in interlaminar layer

复合材料学报. 2018, 35(7): 1857–1863 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180402.003

预应力碳纤维缠绕制造重型压机机架的强度分析

Strength analysis of heavy press frame made by prestressed carbon fiber winding

复合材料学报. 2017, 34(9): 2106–2113 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161216.004

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 42 卷 第 1 期 1 月 2025 年
Vol. 42 No. 1 Jan 2025

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20240418.005

缠绕张力对 T800 级碳纤维力学性能转化率的影响

分享本文

吴俊勇[1]，顾轶卓*[1]，杨中甲[2,3]，刘新宇[1]，曾慧[3]，王绍凯[4]，李敏[4]

（1. 北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院，北京 100191；2. 北京航空航天大学 化学学院，北京 100191；3. 四川玄武岩纤维新材料研究院 (创新中心)，广安 611138；4. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院，北京 100191）

摘 要：为探究碳纤维在缠绕工艺中纤维性能转化率的影响因素，对 3 种 T800 级碳纤维进行了 NOL 环性能测试，研究了缠绕张力对环氧树脂基复合材料力学性能及纤维性能转化率的影响，进一步测试了缠绕损伤纤维的力学性能及微结构参数。结果表明：缠绕张力变化引起了 NOL 环纤维含量、孔隙率、拉伸性能及破坏模式的变化；采用 X 射线衍射、拉曼光谱、小角 X 射线散射表征了纤维的结晶结构、石墨结构完整程度及微观缺陷，发现缠绕损伤纤维微晶结构参数未发生明显变化，故纤维拉伸模量下降较少；张力增大，损伤纤维孔洞缺陷增多，导致纤维和复合材料拉伸强度下降；进口纤维较国产纤维有更高的性能转化率，在相同张力水平下纤维损伤较小。

关键词：碳纤维；环氧树脂基复合材料；缠绕成型；NOL 环；微结构

中图分类号：TB332 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3851(2025)01-0200-10

Effect of winding tension on conversion rate for mechanical property of T800 grade carbon fiber

WU Junyong[1], GU Yizhuo*[1], YANG Zhongjia[2,3], LIU Xinyu[1], ZENG Hui[3], WANG Shaokai[4], LI Min[4]

(1. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. School of Chemistry, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Sichuan Basalt Fiber New Material Research Institute, Guang'an 611138, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to explore the influencing factors of conversion rate for mechanical property of carbon fiber using winding process, NOL ring properties with three kinds of T800 grade carbon fibers were tested. The effects of winding tension on the mechanical properties of epoxy resin matrix composites and conversion rate of fiber were studied. Moreover, mechanical property and microstructure parameters of damaged fibers after winding process were measured. The results show that winding tension changes fiber content, porosity, tensile property and failure mode of NOL ring. Crystalline structure, completeness of graphite structure and micro-defect of carbon fiber were characterized by means of X-ray diffraction, Raman spectrum and small angle X-ray scattering. The results demonstrate that the microcrystalline structure parameters of the damaged fibers don't change significantly, so the tensile modulus of the damaged fibers decreases negligibly. Pore defect of the damaged fibers increases with increasing tension, resulting in the decreases of tensile strength for fiber and the composite. The conversion rate of imported fiber is higher than those of domestic fibers, and the damage of fiber is weaker under the same tension level.

Keywords: carbon fiber; epoxy resin matrix composite; winding molding; NOL ring; microstructure

---

收稿日期：2024-02-27; **修回日期**：2024-03-20；**录用日期**：2024-03-24；**网络首发时间**：2024-04-21 17:42:29
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240418.005
基金项目：四川玄武岩纤维新材料研究院 (创新中心) 复合材料板簧开发项目 (A03-01)
Sichuan Basalt Fiber New Materials Research Institute (Innovation Center) Composite Spring Development Project (A03-01)
通信作者：顾轶卓，博士，副教授，博士生导师，研究方向为树脂基复合材料、碳纤维、纳米复合材料 E-mail: benniegu@buaa.edu.cn
引用格式：吴俊勇，顾轶卓，杨中甲，等. 缠绕张力对 T800 级碳纤维力学性能转化率的影响 [J]. 复合材料学报，2025, 42(1): 200-209.
WU Junyong, GU Yizhuo, YANG Zhongjia, et al. Effect of winding tension on conversion rate for mechanical property of T800 grade carbon fiber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(1): 200-209(in Chinese).

碳纤维是一种高比强、高比模、耐高温、耐腐蚀、耐疲劳的高性能纤维，因此以碳纤维为增强体的复合材料在航空航天等领域得到了广泛应用[1]。碳纤维按原料不同可分为聚丙烯腈 (PAN) 基碳纤维、沥青基碳纤维及粘胶基碳纤维。PAN 基碳纤维是以 PAN 为原料生产制备的一类碳纤维，是目前使用范围最广的一类碳纤维，由丙烯腈经过聚合、纺丝、氧化稳定、碳化和石墨化等一系列工序后得到，每个过程涉及复杂的物理化学变化，而碳纤维最终的结构也由其制备工艺所决定[2-3]。

近几年国产高强碳纤维发展迅速，从 T300、T700 级发展至 T800、T1000、T1100 级，并有多种牌号的高强碳纤维开始在航空航天领域批量应用；国产 T800 级碳纤维在应用中经常发现复合材料性能偏低的现象，例如采用国产 T800 级碳纤维通过湿法缠绕工艺制备航天用复合材料压力壳体时，发现纤维性能发挥率低，认为这与纤维工艺性差、纤维与树脂不匹配等因素有关，但是相关的材料研究不深入、不系统，尤其是碳纤维缠绕过程中结构变化对复合材料制件性能的影响规律未掌握，不利于缠绕成型工艺的优化和碳纤维的改进提高。为此科学评价国产 T800 级碳纤维及其与树脂的匹配性，研究缠绕工艺碳纤维性能发挥率的影响因素有重要意义。

碳纤维的性能主要取决于其微观结构，因此对碳纤维微观结构的表征就显得尤为重要。碳纤维的表征技术有很多，对碳纤维结构的研究主要针对碳纤维形态结构表征和纤维聚集态结构表征[4-8]。以电子显微镜为主的纤维形态结构的表征可以直观获取碳纤维的结构信息，但是由于纤维沿轴向的不均匀尺度大于显微表征手段的微观观测区域，导致所获得结构信息随机性比较大。碳纤维的聚集态结构是一种统计意义的信息，包括碳元素的堆积形式，如石墨片层的取向度、堆积缺陷和微晶晶格参数等信息[9-16]。本文针对两种国产 T800 级碳纤维和一种进口 T800 级碳纤维，研究缠绕工艺不同张力下 3 种碳纤维聚集态微观结构的变化及其对碳纤维性能的影响，研究缠绕成型复合材料 NOL 环的力学性能，分析碳纤维缠绕过程中结构变化对复合材料中纤维性能转化率的影响。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

碳纤维丝束包括 GC800A-12K、GC800B-12K 和 T800SC-24K 这 3 种中模高强纤维，均为干喷湿纺法工艺制备的 PAN 基碳纤维，碳纤维力学性能和物理性能见表 1。树脂体系包括环氧树脂 E-51 (蓝星化工新材料股份有限公司)、环氧树脂 EGA-90 (上海华谊树脂有限公司)、固化剂甲基纳迪克酸酐 (上海华谊树脂有限公司)。

表 1 碳纤维的力学性能和物理性能

Table 1 Mechanical and physical properties of carbon fiber

Fiber	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Density/ ($g\cdot cm^{-3}$)	Tex/ ($g\cdot m^{-1}$)
GC800A	6 551	293	1.79	0.449
GC800B	6 151	310	1.78	0.445
T800SC	6 112	293	1.80	1.021

1.2 NOL 环试样制备及测试

NOL 环依据标准《纤维缠绕增强塑料环形试样力学性能试验方法》(GB/T 1458—2008)[17] 进行试样制备及性能测试，NOL 环实验是一种评价缠绕成型复合材料综合性能的测试方法，因其试样通常仅需在小型缠绕机上即可完成制备，制样测试过程较为简便、成本较低，因此，常用 NOL 环实验评价缠绕成型工艺的材料性能。

本文采用的 NOL 环制备方法为组合的单环模具制样，NOL 缠绕模具由大小圆盘交替装配在芯轴上组合而成，圆盘之间通过螺栓紧固，大圆盘半径为 78 mm、厚度为 10 mm，小圆盘半径为 75 mm、厚度为 6 mm。GC800A、GC800B 纤维制备缠绕张力为 40、50、60、70、80 N 这 5 种不同缠绕张力的 NOL 环拉伸试样，T800SC 纤维制备缠绕张力为 80、100、120、140、160 N 这 5 种不同缠绕张力的 NOL 环拉伸试样 (丝束单丝根数为国产纤维的 2 倍，故张力为国产纤维的 2 倍)，为便于表示，将 3 种纤维 NOL 环样品依缠绕张力由小到大依此编号为 1、2、3、4、5；缠绕时控制环境温度为 (25±3)℃，相对湿度 RH 为 (35±5)%。固化工艺制度为：室温升温至 110℃，恒温 2 h，继续升温至 150℃，恒温 4 h，随后随炉降温，取出 NOL 环模具，将芯模拆分成圆盘，脱模，即可得到 NOL 环试样；将脱模后 NOL 环使用砂纸对其表面打磨，使表面平整。

依据标准 GB/T 1458—2008[17] 采用万能力学试验机 (INSTRON 3344) 进行 NOL 环拉伸性能测试；沿垂直于纤维方向截取一段试样，封入金相，使用金相显微镜 (Leica DM2700M) 观察 NOL 环截面

并计算纤维体积分数及孔隙率。纤维性能转化率依据下式计算：

$$\eta = \frac{\sigma_t}{\sigma_f V_f} \tag{1}$$

其中：η为纤维性能转化率；V_f为 NOL 环中纤维的体积分数；σ_t为 NOL 环的拉伸强度；σ_f为碳纤维的复丝拉伸强度。

1.3 碳纤维微结构测试

使用 X 射线衍射 (XRD)、小角 X 射线散射 (SAXS) 和拉曼光谱表征纤维在缠绕前后微结构参数变化。缠绕损伤纤维取样方法：在制备 NOL 环试验的基础上，将经过不同张力缠绕在 NOL 环模具上的纤维收集，并进行微结构测试。

石墨结构中相邻碳网平面内的碳原子在相反方向发生强振动，在 1 580 cm^{-1} 附近会出现强共振峰，称之为 G 峰，G 峰强度可用来表征碳纤维中 sp^2 杂化键的完整程度，而对于石墨化程度较低的碳石墨材料，除了 G 峰外，还会在 1 358 cm^{-1} 附近产生一个 D 峰。这是由于其取向度低、石墨微晶不完整、结构缺陷多、边缘不饱和碳原子数目多而引起的。常用两者的相对强度比值 R 来判断碳纤维石墨化程度和石墨结构完整程度。R 值越小，其石墨化程度越高[18]。使用日本 HORIBA 公司生产的 LabRAM HR Evolution 高分辨激光拉曼光谱仪对纤维进行石墨化程度表征；测试时将纤维丝束两端粘贴在载玻片上，激光源波长为 532 nm，光谱范围为 3 000~500 cm^{-1}，共焦针孔尺寸是 100 nm，物镜倍数为 50 X，物镜数值孔径 (NA) 为 0.5，光斑大小为 1.298 μm，扫描次数为 4，总扫描时长为 54 s。

晶体是由原子规则排列成的晶胞组成，当一束单色 X 射线入射到晶体时，由于晶体内部原子间的距离与 X 射线波长相当，X 射线会在晶体中产生散射。这些散射的 X 射线相互干涉，在某些方向上产生加强或减弱的现象，形成特定的衍射图案。通过分析衍射图案的位置、强度和形状，可以确定晶体结构、晶格常数以及晶体中原子的位置和排列等信息。沿碳纤维赤道扫描可得到碳纤维石墨微晶层间距 $d_{(002)}$ 和堆叠尺寸 L_c，沿纤维 (100) 晶面的子午扫描可得到表观晶粒尺寸 L_a，沿纤维 (002) 晶面方位角扫描可得到取向度 Π。层间距 $d_{(002)}$ 由布拉格定律计算，微晶尺寸 L_a 和 L_c 由 Scherrer 方程 (式 (3)) 计算。

$$\lambda = 2d\sin\theta \tag{2}$$

$$L = \frac{K\lambda}{\beta\cos\theta} \tag{3}$$

其中：λ 为 X 射线波长；d 是晶面间距；θ为衍射角；L 为微晶尺寸；β为衍射峰半高宽；K 为谢乐几何因子，求解 L_c 时，K 取 0.89，求解 L_a 时，K 取 1.84[19]。

使用瑞士 Bruker 公司生产的 D8 DISCOVER 二维 X 射线衍射仪对纤维石墨化结构进行表征；测试条件为：Cu 靶，波长为 0.154184 nm，扫描电压为 50 kV，扫描电流为 1 mA，0.5 mm 准直管，扫描范围为 20°~80°，步进式扫描，步长为 20°，单步时间 30 s。

PAN 基碳纤维的结构可近似看作由沿纤维轴高度取向的乱层石墨微晶和微孔洞组成的二相体系。小角 X 射线散射是一种常用的、简易而不具破坏性的表征材料内部孔洞结构的有效手段。X 射线与物质发生相互作用时会被吸收或散射，当发生弹性散射时，X 射线在小角度的散射信号能够反映样品的电子密度不均匀性。孔洞结构即是非常典型的电子密度不均匀结构。小角 X 射线的角度和强度与孔洞的尺寸、形状和分布有关。一般来说，孔洞越大，散射角度就越小；孔洞越小，散射角度就越大。通过测量这些散射角度和强度分布，可以得到样品中孔洞尺寸和分布的统计性信息，即纤维孔洞的回旋半径 R_g 和分形维数 D，是一种研究碳纤维微孔洞的重要测试手段[20-21]。使用法国 Xenocs 公司生产的 Xeuss 3.0 HR 小角 X 射线散射仪对纤维孔洞信息进行表征；测试条件为：Cu 靶，波长为 0.154184 nm，扫描电压为 50 kV，扫描电流为 0.6 mA，光斑尺寸为 0.9 mm。

使用 Foxtrot 软件对小角 X 射线散射数据进行处理，根据 Guinier 公式:

$$I(q) = I_0 \exp\left(-\frac{q^2 R_g^2}{3}\right) \tag{4}$$

式中：$I(q)$为散射光强度；I_0为入射光强度；定义 $q = 4\pi\sin\theta/\lambda$为散射矢量；$R_g$ 为回旋半径。取样品距离为 1 800 nm 下，小角 X 射线散射一维原始数据 ($I(q)$~q 关系)，通过对 $\ln[I(q)]$~q^2 作图，取趋近于 0 处的斜率 k，即可求得旋转半径 R_g。

分形维数 D 测试：当体系电子密度变化不连续时，对应于各 q 值的散射光强 $I(q)$ 服从下述关系：

$$I(q) = I_0 q^{-\alpha} \tag{5}$$

$$\ln(I(q)) = \ln(I_0) - \alpha \ln q \tag{6}$$

式中，α是与分形维数有关的参数，当$3<\alpha<4$时，分形维数$D=6-\alpha$；当$0<\alpha<3$时，$D=\alpha$。取小角 X 射线散射一维原始数据，作$\ln(I(q))$~$\ln q$曲线，依据线性区域的斜率即可获得纤维的分形维数，在广角模式下 (样品距离为 55 mm)，小角 X 射线散射结果图由中心的小角散射以及周围的晶区衍射圆弧两部分组成，碳纤维典型的二维小角 X 射线散射图如图 1 所示，根据晶区衍射区域，一般选取积分环范围在$1<q<2$之间，对该环沿着方位角进行强度积分即可得到强度-方位角曲线，依据下式即可计算纤维取向度 Π：

$$\Pi = \frac{180^\circ - H}{180^\circ} \times 100\% \tag{7}$$

式中，H 为曲线半高宽。

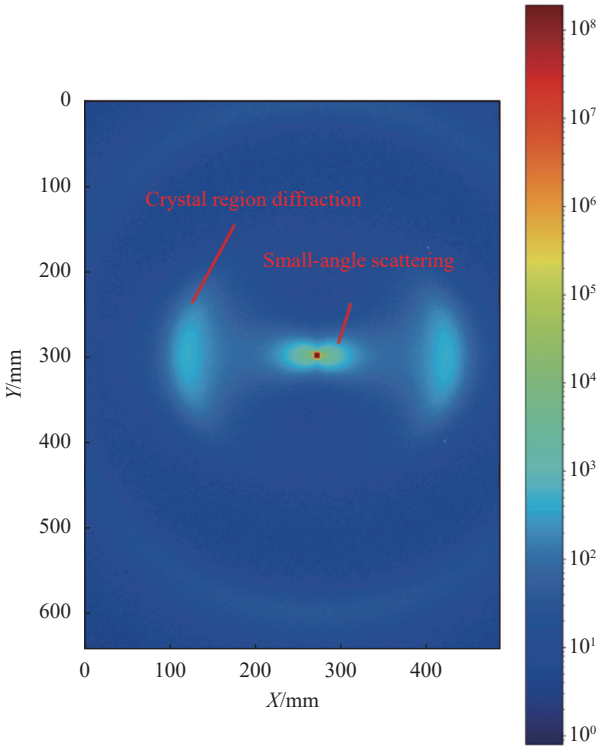

图 1　T800SC 碳纤维广角模式下 SAXS 二维散射图

Fig. 1　SAXS 2D scattering diagram of T800SC carbon fiber in wide-angle mode

2　结果与讨论

2.1　缠绕张力对 NOL 环性能的影响

选取了两种国产 T800 级碳纤维以及一种进口 T800 级碳纤维在不同张力下制备 NOL 环。3 种纤维不同缠绕张力下制备的 NOL 环纤维体积分数及孔隙率见图 2、图 3。

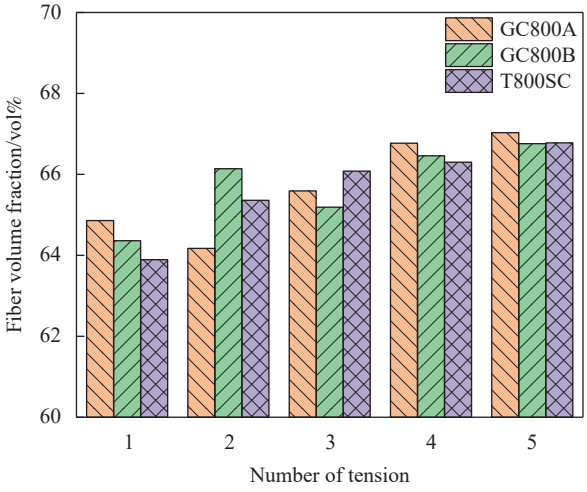

图 2　缠绕张力对 T800 级碳纤维体积分数的影响

Fig. 2　Effect of winding tension on volume fraction of T800 grade carbon fiber

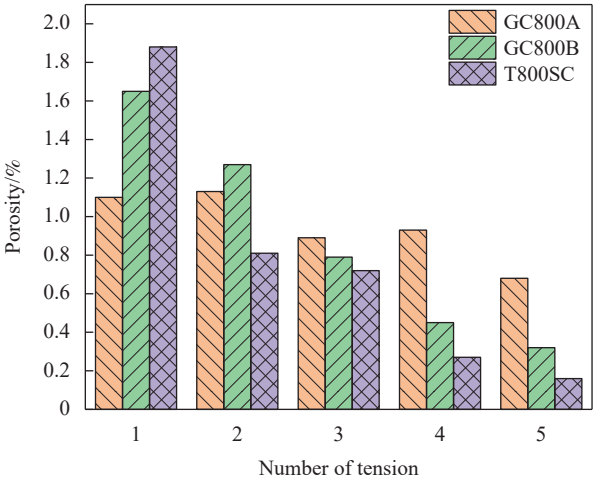

图 3　缠绕张力对 T800 级碳纤维孔隙率的影响

Fig. 3　Effect of winding tension on porosity of T800 grade carbon fiber

随着缠绕张力的增大，每层纤维之间挤出的树脂更多，富树脂区域也逐渐变小，3 种纤维的纤维体积分数也逐渐增大，且在较低张力时的增大幅度要高于高张力的增大幅度，即缠绕张力的增大对 NOL 环纤维体积分数的提高作用越来越小；复合材料制件中的孔隙主要形成原因是在加热固化过程中，内部的水分及空气未及时排出，而张力的增大，在缠绕过程中有利于气体的排出，从而其孔隙率随缠绕张力的增大而逐渐减小。

NOL 环拉伸破坏模式有散环式、分段式以及散环、分段混合式破坏 3 种。如图 4 所示。

3 种 T800 级碳纤维拉伸性能及破坏模式如表 2 所示。整体来看，国产 GC800A 纤维的 NOL 环拉伸强度要高于另外两种纤维，这是由于

(a) Extensive scattered failure

(b) Segmented destruction

(c) Extensive scattered ring and segmented mixed failure

图 4　NOL 环拉伸破坏的 3 种模式

Fig. 4　Three modes of tensile failure of NOL rings

GC800A 纤维本身的复丝拉伸性能要高于另外两种纤维的拉伸强度，在制备成 NOL 环后，其强度也高于另外两种纤维；国产 GC800B 纤维的 NOL 环拉伸模量要高于另外两种纤维的模量，这与 GC800B 纤维自身的模量较高有关；进口纤维 T800SC 强度与 GC800B 较为接近，模量与 GC800A 纤维较为接近，但其制备的 NOL 环拉伸强度高于 GC800B 纤维，模量高于 GC800A 纤维，表明进口纤维较国产纤维在复合材料中有更高的性能转化率。破坏形式的差异与纤维/树脂界面强度有关，例如对于 GC800B 纤维，当界面强度较低时，拉伸 NOL 还未完全破坏，部分纤维与树脂界面已经破坏，不能共同承载拉力，并逐渐导致附近纤维发生断裂破坏，最终形成散环式破坏，此时拉伸强度较低；当缠绕张力增大时，纤维与树脂界面强度提高，每层纤维可共同承载拉力，当有纤维发生断裂破坏时，裂纹沿着树脂基体迅速发生扩展，导致 NOL 环整体发生脆性断裂，最终形成分段式破坏模式；而当缠绕张力进一步增大时，一方面 NOL 环树脂含量下降，导致界面强度有所下降，树脂传递应力作用变弱，另一方面，纤维损伤也随之增大，纤维强度离散性变高，因此纤维破坏形式复杂多样， NOL 环并非单一的散环破坏或是脆性分段破坏，破坏时能够吸收较多的能量。

表 2　3 种 T800 级碳纤维制备的 NOL 环拉伸性能及破坏模式

Table 2　Tensile properties and failure modes of NOL rings prepared from three kinds of T800 grade carbon fibers

Fiber	Number of tension	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Destruction mode
GC800A	1	2 734	191.4	(1)
	2	3 149	199.2	(1)
	3	3 361	195.1	(1)
	4	3 325	202.3	(1)
	5	3 457	204.6	(1)
GC800B	1	2 493	199.3	(1)
	2	2 695	207.2	(1)
	3	2 697	203.5	(2)
	4	2 776	196.4	(2)
	5	2 815	198.6	(3)
T800SC	1	2 887	191.6	(1)
	2	2 944	192.3	(1)
	3	3 031	198.3	(1)
	4	3 154	196.4	(2)
	5	3 224	198.6	(3)

Note: Destruction modes (1), (2) and (3) denote extensive scattered, segmented and mixed failure modes, respectively.

同种牌号纤维制备的 NOL 环，随着缠绕张力的增大，其拉伸强度也随之增大，且在较低张力时，NOL 环强度增大幅度要高于高张力时，这与不同张力下的纤维体积分数变化趋势一致，根据复合材料的混合定律，复合材料的力学性能主要受纤维自身强度及纤维体积分数的影响，因此初步推断 NOL 环在张力较大时拉伸性能提高幅度降低是受纤维体积分数所影响；拉伸模量随着缠绕张力的增大出现先增大后降低的趋势，推测是纤维在较大张力时摩擦受损，因此其模量有所下降。

2.2　缠绕张力对碳纤维性能的影响

在碳纤维缠绕过程中，缠绕张力是影响缠绕成型质量的重要工艺参数之一，随着缠绕张力增

大，纤维与导向辊间的摩擦增大，纤维受到的损伤也会增大，而缠绕过程中纤维磨损是影响纤维强度转换的重要因素，为研究不同张力下纤维在缠绕过程中受到的损伤对复合材料性能的影响，测试分析了不同张力缠绕后碳纤维的性能。

张力损伤后碳纤维复丝性能及密度测试结果如表 3~表 5 所示，可以看到，缠绕张力增大，纤维体密度基本不变，而纤维线密度因缠绕过程中的起毛断丝而随之减小。不同张力下纤维损伤强度变化如图 5~图 7 所示，由图可知，纤维模量随缠绕张力的增大而下降，但其下降并不明显，纤维拉伸强度随着张力的增大而下降，且性能离散度也随之增大。

表 3　GC800A 碳纤维缠绕损伤后力学性能及密度

Table 3　Mechanical properties and density of GC800A carbon fiber after winding damage

Number of tension	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Density/($g\cdot cm^{-3}$)	Tex/($g\cdot m^{-1}$)
1	6 257	288	1.794	0.443
2	6 163	289	1.794	0.442
3	6 160	290	1.794	0.441
4	6 251	286	1.794	0.440
5	6 067	288	1.794	0.440

表 4　GC800B 碳纤维缠绕损伤后力学性能及密度

Table 4　Mechanical properties and density of GC800B carbon fiber after winding damage

Number of tension	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Density/($g\cdot cm^{-3}$)	Tex/($g\cdot m^{-1}$)
1	5 870	301	1.784	0.439
2	5 590	298	1.784	0.437
3	5 266	293	1.784	0.436
4	5 275	300	1.784	0.434
5	5 161	300	1.784	0.433

表 5　T800SC 碳纤维缠绕损伤后力学性能及密度

Table 5　Mechanical properties and density of T800SC carbon fiber after winding damage

Number of tension	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Density/($g\cdot cm^{-3}$)	Tex/($g\cdot m^{-1}$)
1	5 572	286	1.799	1.005
2	5 463	288	1.799	1.000
3	5 520	282	1.799	0.999
4	5 283	288	1.799	0.999
5	5 311	286	1.799	0.999

进一步依据式 (8) 计算不同工艺条件下考虑纤维性能损伤影响的 NOL 环的性能转化率。

$$\eta' = \frac{\sigma_t}{\sigma'_f V_f} \tag{8}$$

其中：η'为纤维性能转化率；σ'_f为干缠损伤纤维的复丝拉伸强度。

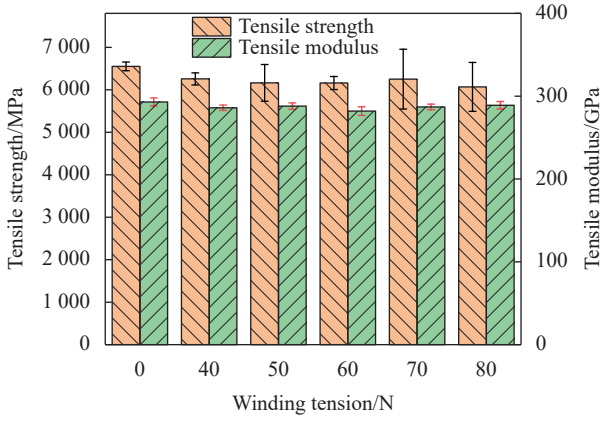

图 5　缠绕张力对 GC800A 碳纤维力学性能的影响

Fig. 5　Effect of winding tension on mechanical properties of GC800A carbon fiber

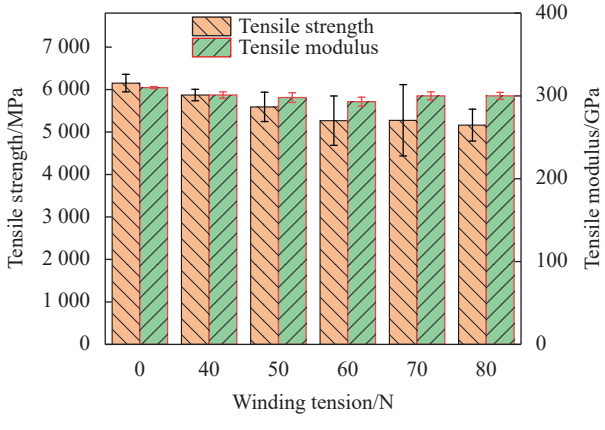

图 6　缠绕张力对 GC800B 碳纤维力学性能的影响

Fig. 6　Effect of winding tension on mechanical properties of GC800B carbon fiber

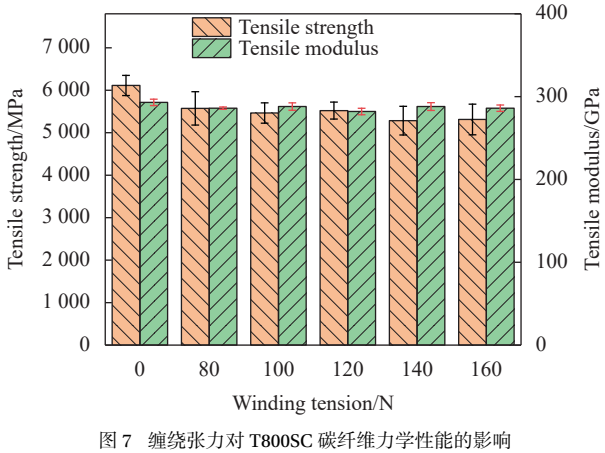

图 7　缠绕张力对 T800SC 碳纤维力学性能的影响

Fig. 7　Effect of winding tension on mechanical properties of T800SC carbon fiber

计算结果如图 8 所示，由图可知，随着缠绕张力的增大，纤维的性能转化率总体上随之提高，且进口纤维 T800SC 的纤维性能转化率高于两种国产纤维，表明 T800SC 纤维对缠绕成型工艺的变化有更小的敏感性，即对缠绕工艺有更高的适用性。

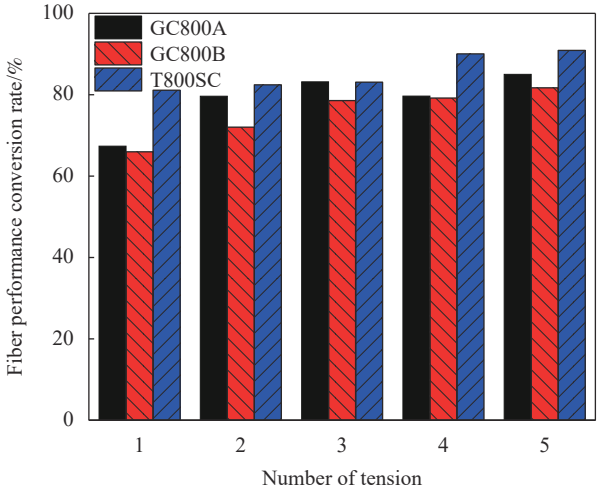

图 8　缠绕张力对 3 种 T800 级碳纤维性能转化率的影响

Fig. 8　Effect of winding tensions on performance conversion of three kinds of T800 grade carbon fibers

依据 NOL 环力学性能、纤维体积分数以及损伤纤维拉伸性能数据分析可知：缠绕张力的提高，一方面能提高复合材料中纤维体积分数和纤维在复合材料中的力学性能转化率，从而提高复合材料的力学性能；而另一方面，纤维损伤程度也随着缠绕张力的增大而增大，使得缠绕纤维的力学性能下降，从而降低复合材料的力学性能；两者共同作用而决定复合材料力学性能的变化趋势。

2.3　缠绕张力对碳纤维微结构的影响

取不同缠绕张力下的干缠纤维进行微观结构测试，测试碳纤维的石墨化程度、微晶结构和微观缺陷。拉曼测试和 XRD 测试结果见图 9~图 11。

由图可知，3 种损伤纤维微晶结构参数随缠绕张力的增大几乎不变，说明纤维在缠绕过程损伤并未改变纤维的石墨微晶结构。纤维拉曼光谱测试结果表明，纤维在经过缠绕摩擦损伤后，其峰强比 R 比未损伤纤维有所增大，且随着缠绕张力的增大，R 增大的也越多，R 表征的是碳纤维中不完全结晶石墨微晶、结构缺陷等在碳纤维中的比例，因此碳纤维在缠绕损伤后，其内部结构缺陷、边缘不饱和碳原子含量增多导致纤维性能有所下降。

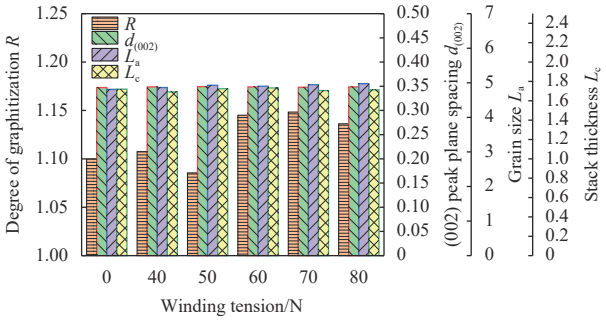

图 9　缠绕张力对 GC800A 碳纤维微晶结构及石墨化度的影响

Fig. 9　Effect of winding tension on crystallite structure and graphitization degree of GC800A carbon fiber

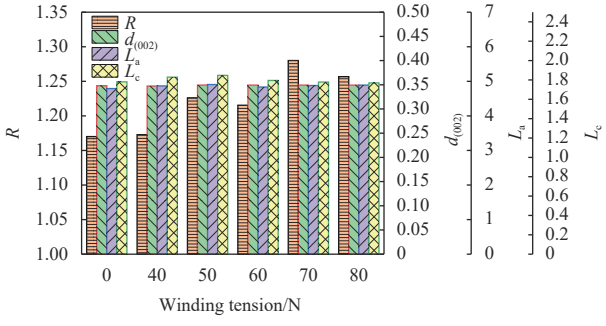

图 10　缠绕张力对 GC800B 碳纤维微晶结构及石墨化度的影响

Fig. 10　Effect of winding tension on crystallite structure and graphitization degree of GC800B carbon fiber

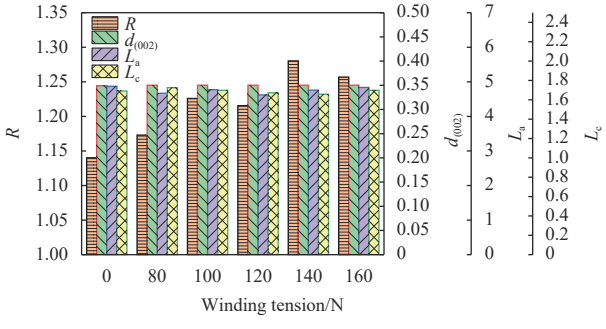

图 11　缠绕张力对 T800SC 碳纤维微晶结构及石墨化度的影响

Fig. 11　Effect of winding tension on crystallite structure and graphitization degree of T800SC carbon fiber

损伤纤维 SAXS 测试结果如图 12~图 14 所示，对于 3 种不同牌号的 T800 级碳纤维，GC800A 纤维的 R 值最低，即 D 峰相对强度较低，这表明纤维中石墨微晶完整程度较高，GC800A 的拉伸强度也较其他两种纤维略高，不同纤维间 R 值与拉伸强度呈反比关系；3 种 800 级碳纤维的 (002) 晶面间距较为接近，GC800B 的微晶尺寸 L_a 最小，T800SC 微晶尺寸 L_a 最大，随着碳纤维微晶尺寸 L_a 的增大，其纤维微晶结构也越完善，T800 级纤维中 T800SC 纤维的晶粒尺寸最大，而 GC800B 纤

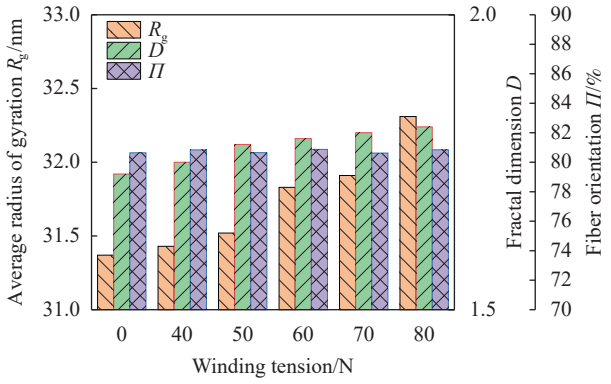

图 12　缠绕张力对 GC800A 碳纤维孔洞及取向度的影响

Fig. 12　Effect of winding tension on pores and orientation of GC800A carbon fiber

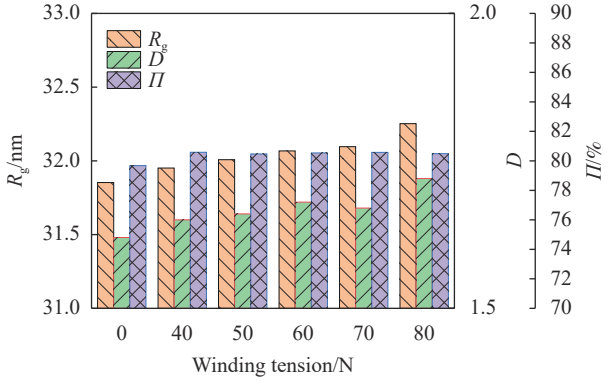

图 13　缠绕张力对 GC800B 碳纤维孔洞及取向度的影响

Fig. 13　Effect of winding tension on pores and orientation of GC800B carbon fiber

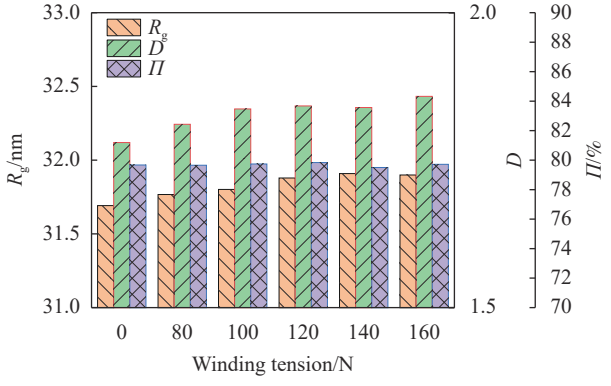

图 14　缠绕张力对 T800SC 碳纤维孔洞及取向度的影响

Fig. 14　Effect of winding tension on pores and orientation of T800SC carbon fiber

维最低，表明 3 种 T800 级纤维中 T800SC 纤维微晶完整程度最高，而 GC800B 纤维微晶完整程度最低；GC800A 与 T800SC 的堆叠厚度 L_c 较为接近，GC800B 纤维高于两者，而 PAN 基碳纤维的模量与微晶堆叠尺寸 L_c 基本呈线形关系，这与 3 种纤维拉伸模量结果相符；3 种 T800 级纤维中，GC800A 纤维回旋半径最小，代表其微孔平均尺寸较小，相应的其拉伸强度也最大，显示了微观缺陷对纤维强度的重要影响。

由测试结果可知，纤维取向度随缠绕张力的增大，其值几乎不变，而纤维取向度本质上是纤维内部石墨微晶的取向，此结果再次说明纤维结晶结构未受到缠绕磨损的影响；纤维的分形维数与回旋半径随缠绕张力的增大基本呈现上升的趋势，说明在纤维磨损后，其表面的孔洞更发达，则缠绕对纤维造成的损伤一方面表现在纤维起毛断丝，另一方面则是使得其孔洞缺陷变多；本节测试结果表明损伤纤维模量变化幅度较小，微晶结构参数也几乎不变，损伤纤维随张力的增大，其拉伸强度下降越多，孔洞回旋半径也随缠绕张力的增大而增大。测试结果表明 GC800A 损伤纤维回旋半径随缠绕张力变化的幅度较大，GC800B 损伤纤维分形维数随缠绕张力变化的幅度较大，T800SC 损伤纤维微结构参数随缠绕张力的变化幅度较小，表现出了更好的缠绕工艺适用性。

3　结 论

(1) 采用 3 种干喷湿纺法 T800 级碳纤维和环氧树脂制备了 5 种不同缠绕张力条件的 NOL 环，随着缠绕张力的增大，其拉伸强度也随之增大，且在较低张力时，NOL 环强度增大幅度要高于高张力，这与不同张力下的纤维体积分数和孔隙率变化趋势一致。

(2) 测试了纤维缠绕损伤后结晶结构、石墨结构完整程度及孔洞缺陷等微观结构参数变化趋势，结果表明纤维微晶结构参数随缠绕张力的增大几乎不变，说明纤维在缠绕过程并未改变纤维的石墨微晶结构；拉曼测试结果中峰强比 (I_D/I_G) 对比未损伤纤维有所增大，且随着缠绕张力的增大，峰强比增大更明显，说明碳纤维在缠绕损伤后，其内部结构缺陷、边缘不饱和碳原子含量增多，导致纤维性能有所下降；小角 X 射线散射测试结果表明，纤维缠绕损伤后孔洞缺陷也随之增多，导致纤维拉伸强度下降明显。

(3) 依据纤维力学性能以及复合材料成型质量的变化，发现张力对复合材料拉伸性能的影响体现为两方面，一方面缠绕张力增大，纤维体积分数增大，孔隙率降低，NOL 环力学性能上升；另一方面缠绕张力增大，纤维损伤程度增大，导致 NOL 环力学性能下降，且后者影响要大于前者，

故大缠绕张力下 NOL 环力学性能较低。进口碳纤维表现出对张力较小的敏感性，其纤维损伤程度最小，复合材料中纤维性能转化率最高。

参考文献：

[1] 贺福. 碳纤维及石墨纤维 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 252-253.
HE Fu. Carbon fiber and graphite fiber[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010: 252-253(in Chinese).

[2] 彭公秋, 李国丽, 曹正华, 等. 国产聚丙烯腈基碳纤维发展现状与建议 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(14): 68-73.
PENG Gongqiu, LI Guoli, CAO Zhenghua, et al. Development status and suggestion of domestic PAN-based carbon fiber[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(14): 68-73(in Chinese).

[3] 董雪梅, 管欣, 王延相. 聚丙烯腈碳纤维及其原丝纺丝工艺的新发展 [J]. 莱阳农学院学报, 2003(1): 32-35.
DONG Xuemei, GUAN Xin, WANG Yanxiang. New development of polyacrylonitrile carbon fiber and its precursor spinning process[J]. Journal of Qingdao Agricultural University, 2003(1): 32-35(in Chinese).

[4] 侯锋辉, 邓红兵, 李崇俊, 等. 碳纤维结构的常用表征技术 [J]. 纤维复合材料, 2008(3): 18-20, 31.
HOU Fenghui, DENG Hongbing, LI Chongjun, et al. Comon characterization methods of carbon-fiber structures[J]. Fiber Composites, 2008(3): 18-20, 31(in Chinese).

[5] KUMAR A K, OLUWASEYI S O, JOHN H, et al. Correlating microstructure-property relationships in carbon fiber-expanded graphite hybrid composites for synergistic improvements in thermal and mechanical properties[J]. Composites Science and Technology, 2023, 244: 110293.

[6] SONG L C, XIE W H, YU D, et al. Study of microstructure evolution and mechanical behaviour changes of PAN-based carbon fibers after high-temperature heat treatment (up to 2 950℃)[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2023, 124: 462-473.

[7] SUN S C, CAO W Y. Evolution of microstructure within carbon fiber during pre-carbonization revealed by mean field theory[J]. Composites Communications, 2022, 34: 101272.

[8] HAO J J, LU C X, LI D H. A comparative analysis of polyacrylonitrile-based carbon fibers: (II) Relationship between the microstructures and properties[J]. Carbon, 2021, 176: 653-654.

[9] 曹伟伟, 朱波, 井敏, 等. PAN 基碳纤维在表面处理中的拉曼光谱研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(12): 2885-2889.
CAO Weiwei, ZHU Bo, JING Min, et al. Raman spectra of PAN-based carbon fibers during suface treatment[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(12): 2885-2889(in Chinese).

[10] 张新, 马雷, 李常清, 等. PAN 基碳纤维微结构特征的研究 [J]. 北京化工大学学报 (自然科学版), 2008(5): 57-60.
ZHANG Xin, MA Lei, LI Changqing, et al. Study of the microstructure of PAN-based carbon fibers[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2008(5): 57-60(in Chinese).

[11] 季敏霞, 王成国. 聚丙烯腈基碳纤维制备过程中微观结构的演变 [J]. 材料导报, 2007(5): 111-114.
JI Minxia, WANG Chengguo. Evolution of microstructure in the preparation of PAN-based carbon fibers[J]. Materials Reports, 2007(5): 111-114(in Chinese).

[12] 高权. 干喷湿纺过程中聚丙烯腈纤维微原纤形成及转变机理的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
GAO Quan. Formation and evolution mechanisms of microfibrils of polyacrylonitrile fiber during dry-jet wet spinning process[D]. Jinan: Shandong University, 2021(in Chinese).

[13] 王鑫杰. 碳纤维微观结构表征及力学性能分子动力学模拟 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
WANG Xinjie. Carbon fibers' characterization of microstructure and molecular dynamics simulation of mechanical properties[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022(in Chinese).

[14] 郝俊杰, 吕春祥, 李登华. 碳纤维微观结构表征: Raman 光谱 [J]. 化工进展, 2020, 39(S2): 227-233.
HAO Junjie, LYU Chunxiang, LI Denghua. Characterization of microstructure of carbon fibers: Raman spectroscopy[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(S2): 227-233(in Chinese).

[15] 王政. 碳纤维微结构特征对拉伸性能的影响规律研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
WANG Zheng. Characterization of carbon fiber microstructure and its influence on tensile properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022(in Chinese).

[16] 张泽. 高性能碳纤维微观结构与性能关系研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
ZHANG Ze. Investigation on the relationship between microstructure and properties of high performance carbon fiber[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021(in Chinese).

[17] 中国国家标准化管理委员会. 纤维缠绕增强塑料环形试样力学性能试验方法: GB/T 1458—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for mechanical properties of ring of filament-winding reinforced plastics: GB/T 1458—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008(in Chinese).

[18] 贺福. 用拉曼光谱研究碳纤维的结构 [J]. 高科技纤维与应用, 2005(6): 20-25.

HE Fu. Raman spectroscopy was used to study the structure of carbon fibers[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2005(6): 20-25(in Chinese).

[19] 李伟伟, 康宏亮, 徐坚, 等. 高强高模型碳纤维与高模型碳纤维微观结构分析 [J]. 高分子学报, 2018(3): 380-388.
LI Weiwei, KANG Hongliang, XU Jian, et al. Microstructure analysis of high-strength and high-model carbon fibers and high-model carbon fibers[J]. Acta Polymerica Sinica, 2018(3): 380-388(in Chinese).

[20] 李登华, 吕春祥, 杨禹, 等. 碳纤维微观结构表征: 小角 X 射线散射 [J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7077-7086.
LI Denghua, LYU Chunxiang, YANG Yu, et al. Characterization of the microstructure of carbon fibers: Small angle X-ray scattering[J]. Materials Reports, 2021, 35(7): 7077-7086(in Chinese).

[21] LI D, LU C, DU S, et al. Structural features of various kinds of carbon fibers as determined by small-angle X-ray scattering[J]. Applied Physics A, 2016, 122(11): 1-10.