

# 两种国产 T800 级碳纤维/双马复合材料性能对比研究

王超 阙伟婧 周金岑 石佩洛 凌辉

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**文 摘** 针对湿法纺丝的 TG800 和干喷湿纺的 SYT55 两种国产 T800 级碳纤维, 采用扫描电子显微镜表征碳纤维微观形貌, 并将两种碳纤维与双马树脂 802 复合, 制备热熔预浸料及碳纤维/双马复合材料, 测试分析其拉伸、压缩、剪切等力学性能以及微观破坏形貌。研究表明, SYT55 纤维表面光滑, 其碳纤维/双马树脂复合材料拉伸强度更高, 且高温力学性能良好; TG800 纤维复合材料界面强度更高。

**关键词** T800 级碳纤维, 纺丝工艺, 双马树脂, 树脂基复合材料

中图分类号: TB33

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2025.01.017

## Comparative Study on Properties of Two Types of Domestic T800-grade Carbon Fiber/Bismaleimide Composites

WANG Chao QUE Weijing ZHOU Jincen SHI Peiluo LING Hui

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** For the two types of domestic T800-grade carbon fibers, which T800 made by wet spinning and SYT55 made by dry-jet wet spinning, the microstructure of the carbon fibers was characterized by using a scanning electron microscope. Both types of carbon fibers were combined with bismaleimide resin 802 to prepare hot-melt prepreg and carbon fiber/bismaleimide composites. The tensile, compressive, and shear mechanical properties, as well as the microscopic failure morphology, were tested and analyzed. The results show that the surface of SYT55 fiber is smooth, and its carbon fiber/bismaleimide resin composite has higher tensile strength and good high-temperature mechanical properties. The TG800 fiber composite has higher interfacial strength.

**Key words** T800-grade carbon fiber, Spinning process, Bismaleimide resin, Resin matrix composite

### 0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料由于具有高比强度和高比模量的优异特性, 对于结构减重有突出贡献, 在航天航空等领域的应用日益广泛<sup>[1-3]</sup>。碳纤维经历了以 T300、T700 为代表的第一代先进复合材料、以 T800 为代表的第二代先进复合材料成熟发展和应用。相比于 T300 级和 T700 级碳纤维复合材料, 以 T800 级碳纤维为增强体的第二代先进复合材料抗拉强度、模量等性能具有大幅提高, 其中抗拉强度至少提高了 20% 以上, 模量也提高了近 30%, T800 级碳纤维复合材料的工程化应用必然导致复合材料结构件轻质化水平与结构效率的大幅提升<sup>[4-7]</sup>。近年来, 国产高强高模碳纤维技术迅速发展, 国产 TG800 高强

中模碳纤维实现工程化制备技术的重大突破, 成功开发出高强中模碳纤维增强树脂基复合材料<sup>[8-11]</sup>。

碳纤维工业化生产路线基本采用原丝碳化工艺路线, 根据碳纤维原丝制备来源, 可分为沥青基碳纤维、聚丙烯腈 (PAN) 基碳纤维和粘胶基碳纤维, 原丝经历氧化、碳化等过程后, 形成类石墨微观结构, 上浆后得到成品碳纤维。其中聚丙烯腈纤维应用广泛, 其原丝制备一般采用溶液法纺丝, 包括湿法纺丝和干喷湿纺两种工艺。湿法纺丝与干喷湿纺工艺特点的差异在于, 湿法纺丝纤维原丝经过喷丝板后直接进入由溶剂和水组成的凝固浴, 典型代表为东丽公司 T800H 碳纤维; 而干喷湿法原丝需先经历一段空气层, 再进入凝固浴, 典型代表为东丽公司 T800S 碳纤维。由此两种纺丝方式

收稿日期: 2023-06-03

第一作者简介: 王超, 博士, 高级工程师, 主要从事树脂基结构复合材料的研究工作。E-mail: 15652585691@163.com

造成纤维形成的差异:湿法纺丝碳纤维具有明显的沟槽结构,有利于与复合材料界面结合,但不利于碳纤维发挥其力学性能;干喷湿纺碳纤维表面缺陷少,光滑无沟槽,有利于提升复合材料拉伸强度,但不利于复合材料界面结合。近年来,国产碳纤维制造技术突飞猛进,各院所、企业相继研制出了国产T800H和T800S级的高强中模碳纤维<sup>[12-18]</sup>。

双马来酰亚胺(BMI)树脂具有耐高温、耐辐射、耐湿热、热膨胀系数小的特点,克服了环氧树脂耐热性差以及聚酰亚胺树脂固化温度高的缺点,广泛应用于航空航天耐高温树脂基结构复合材料。目前国内针对不同国产T800级碳纤维双马树脂基耐高温复合材料对比研究较少<sup>[19-20]</sup>。

本文选取两种纺丝工艺制备的国产T800碳纤维,并制备碳纤维/双马树脂热熔预浸料和复合材料,研究纺丝工艺对碳纤维/双马树脂复合材料力学性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 材料

国产T800H碳纤维,牌号TG800,山西钢科碳材料有限公司;国产T800S碳纤维,牌号SYT55,中复神鹰碳纤维股份有限公司;耐高温双马树脂体系,牌号802,航天材料及工艺研究所。上述碳纤维和树脂基体制成预浸料,裁剪铺层,210℃固化4h,制备碳纤维体积分数为60%的TG800/802和SYT55/802两种碳纤维/双马树脂复合材料单向板。

### 1.2 测试

碳纤维拉伸测试方法按照GB/T3362—2005执行,碳纤维上浆剂含量测试方法按照GB/T 29761—2022执行。

扫描电子显微镜(SEM):采用德国ZEISS热场发射扫描电子显微镜进行碳纤维表面形貌分析及复合材料断面的微观形貌。

材料力学性能测试:复合材料单向板拉伸按照GB/T3354—2014执行;复合材料压缩性能测试按照GB/T3856—2005执行;弯曲性能测试按照GB/T3356—1999执行;面内剪切性能测试按照GB/T3355—2005执行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳纤维性能

#### 2.1.1 碳纤维力学性能

两种碳纤维力学性能如表1所示。结果表明: TG800碳纤维强度为5 820 MPa,模量为292 GPa,断裂延伸率为2.21%;SYT55碳纤维强度为5 790 MPa,模量为288 GPa,断裂延伸率为2.27%。两种碳纤维力学性能接近,说明通过干喷湿纺的纺丝工艺制备的国产T800S碳纤维力学性能已经与T800H级纤维相当。两种纤维的上浆剂均为缩水甘油醚环氧树脂,二者差异性仅在于表面上浆剂含量不同,其中TG800碳纤维上浆剂含量为

1.2%,SYT55碳纤维上浆剂含量为0.6%。原因在于TG800碳纤维纺丝工艺为湿法纺丝,原丝由喷丝板直接进入凝固浴,制得碳纤维表面有一定的沟槽等,由此造成TG800碳纤维表面积增大,能吸附环氧树脂上浆剂位点更多,浸润性能更好,使得在同纤维直径的情况下, TG800碳纤维上浆剂含量高于SYT55碳纤维。

表1 两种碳纤维力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of two carbon fibers

纤维种类	强度/ MPa	模量/ GPa	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	断裂延 伸率/%	上浆剂 含量/%
TG800(国产T800H)	5 820	292	1.8	2.21	1.2
SYT55(国产T800S)	5 790	288	1.81	2.27	0.6

#### 2.1.2 碳纤维微观形貌

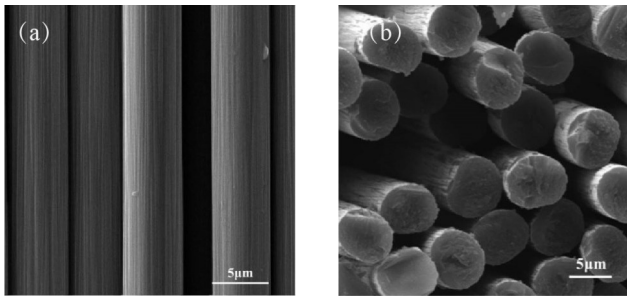
两种碳纤维微观结构参数如表2所示。使用热场发射扫描电子显微镜获得两种纤维表面与截面形貌如图1、图2所示。由图可以看出,制备工艺的改变对碳纤维表面及截面形貌均有较大程度的影响。传统湿法纺丝制得的TG800碳纤维表面有明显的沟槽,且其截面形状近似椭圆,这是因为原丝直接浸入凝固浴,原丝即与溶液发生双扩散作用,由于本身强度较低,受液体压强的作用,在挤压下转变为椭圆形截面,且在后续碳化演变过程中,由于纤维内部乱层石墨结构从芯部向皮层辐射,能在纤维表面看到明显凹槽。而SYT55碳纤维表面光滑,截面形状为正圆,是典型的干喷湿纺工艺制备得来。干喷湿纺工艺中,原丝在空气段会挥发掉大量表层的溶剂,形成一个薄的致密层,具有一定强度,后续不仅可在凝固浴中起到维持纤维界面形状的作用,还能控制双扩散的速度,减少在原丝氧化-碳化时形成沟槽等表面形貌。

表2 两种碳纤维微观结构参数

Tab. 2 Microstructural properties of two carbon fibers

纤维种类	截面形状	表面形貌	直径/μm
TG800(国产T800H)	圆形	粗糙	5
SYT55(国产T800S)	圆形	光滑	5

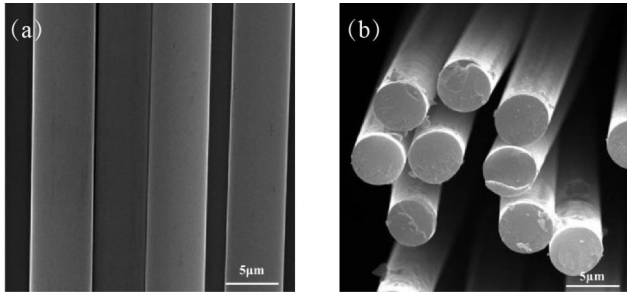
从图1(a)、图2(a)可以看出,两种碳纤维上浆均匀,没有明显增加纤维表面粗糙度。从图1(b)、图2(b)可以看出,两种T800碳纤维截面完整,没有明显的径向分层和微缺陷,碳纤维内部致密。碳纤维微观形貌对纤维性能和复合材料力学性能有明显影响,如湿法纺丝纤维表面的沟槽在承受载荷时,容易发生应力集中,降低了纤维本身的力学性能,但增加了与树脂基体的界面结合,能提升复合材料的层间结合力;干喷湿纺碳纤维则通过减少本身的缺陷,提升了纤维的强度,避免了应力集中,但是光滑表面使复合材料界面结合较差。两纺丝工艺制得的碳纤维主要是纤维-树脂界面影响复合材料力学性能。



注：(a) Surface; (b) Section。

图1 TG800碳纤维SEM表面与截面形貌

Fig. 1 Surface and cross-section microstructure of TG800



注：(a) Surface; (b) Section。

图2 SYT55碳纤维SEM表面与截面形貌

Fig. 2 Surface and cross-section microstructure of SYT55

## 2.2 碳纤维/双马树脂复合材料性能

### 2.2.1 拉伸性能

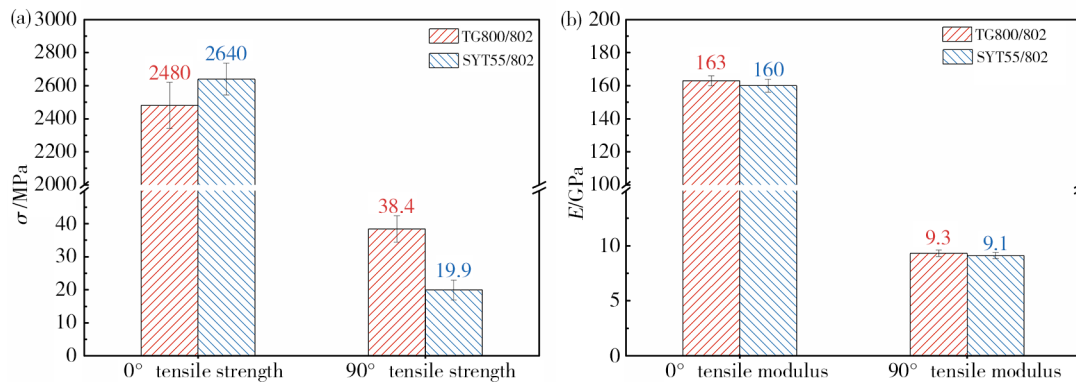
两种复合材料的拉伸性能如图3、表3所示。SYT55/802复合材料0°拉伸强度更高，TG800/802复合材料90°拉伸强度更高，拉伸强度提高了6%。SYT55碳纤维由干喷湿纺工艺制得，表面光滑，相交于湿法纺丝TG800碳纤维不易产生因应力集中而造成的纤维破坏，因此其复合材料具有更优异的0°拉伸性能。

通过混合率可计算碳纤维性能发挥率：

$$\eta = \frac{\sigma_c}{\sigma_f \times V_f} \times 100\%$$

式中， $\eta$ 为碳纤维性能发挥率， $\sigma_c$ 为复合材料0°拉伸强度， $\sigma_f$ 为纤维拉伸强度， $V_f$ 为纤维体积分。

国产T800S碳纤维(SYT55/802)复合材料碳纤维性能发挥率为76%，高于国产T800H(TG800/802)碳纤维复合材料(拉伸强度发挥率71%)。可能是因为干喷湿纺碳纤维表面光滑在制备复合材料过程中碳纤维毛丝断丝较少，另外国产T800S碳纤维与双马树脂基体间的界面较弱更有利于拉伸载荷传递，因此其SYT55/802复合材料碳纤维性能发挥率更高。



注：(a)拉伸强度；(b)拉伸模量。

图3 两种复合材料0°和90°拉伸性能对比

Fig. 3 The comparison of 0° and 90° tensile properties of two kinds of composites

表3 两种碳纤维双马树脂复合材料拉性能

Tab. 3 Tensile properties of two carbon fiber/bismaleimide composites

复合材料	0°拉伸强度 /MPa	0°拉伸模量 /GPa	90°拉伸强度 /MPa	90°拉伸模量 /GPa	碳纤维性能发挥率/%
TG800/802	2 480±140	163±3.1	38.4±4.2	9.3±0.30	71
SYT55/802	2 640±96	160±4.0	19.9±3.5	9.1±0.28	76

两种复合材料90°拉伸强度变化规律与0°拉伸强度相反，TG800/802复合材料90°拉伸强度为38.4 MPa，远高于SYT55/802复合材料的19.9 MPa。单向复合材料90°拉伸时，树脂基体和纤维-树脂界面占主导作用。两种复合材料均使用802双马树脂基体，差异体现在纤维-树脂界面，SYT55碳纤维表面光滑，仅依靠双马树脂与环氧上浆剂的界面结合，强度较低，而TG800表面的沟槽能大幅度提升纤维的比表面积，提升树脂基体与纤维的浸润性，机械结合效果明显，界面强度更高，因此90°拉伸强度较高。两种复合材料的拉伸模量均

维-树脂界面，SYT55碳纤维表面光滑，仅依靠双马树脂与环氧上浆剂的界面结合，强度较低，而TG800表面的沟槽能大幅度提升纤维的比表面积，提升树脂基体与纤维的浸润性，机械结合效果明显，界面强度更高，因此90°拉伸强度较高。两种复合材料的拉伸模量均

未表现出明显差异, 纺丝工艺仅改变纤维的表面形貌和截面形状, 纤维内部均为致密的乱层石墨结构, 纤维作为主要承力部分, 纵向拉伸抵抗变形的能力没有差异。

### 2.2.2 压缩性能

两种复合材料室温0°压缩强度如表4所示, TG800/802压缩强度为1 580 MPa, 模量为151 GPa, SYT55/802压缩强度为1 590 MPa, 模量为149 GPa。影响复合材料0°压缩性能的因素为纤维、树脂基体, 由于两种复合材料中碳纤维强度、模量、直径、体积分数均接近, 且基体树脂均为同种双马树脂, 故二者压缩性能接近。

表4 两种碳纤维双马树脂基复合材料压缩性能  
Tab. 4 Compressive properties of two carbon fiber/bismaleimide composites

复合材料种类	0°压缩强度/MPa	0°压缩模量/GPa
TG800/802	1580±138	1590±95
SYT55/802	1590±95	149±11.2

### 2.2.3 弯曲性能

两种复合材料的弯曲性能如图4、表5所示。室温下TG800/802弯曲强度为1 700 MPa, 模量为158 GPa, SYT55/802弯曲强度为1 660 MPa, 模量为159 GPa, 弯曲性能接近。双马树脂耐高温性好, 针对高

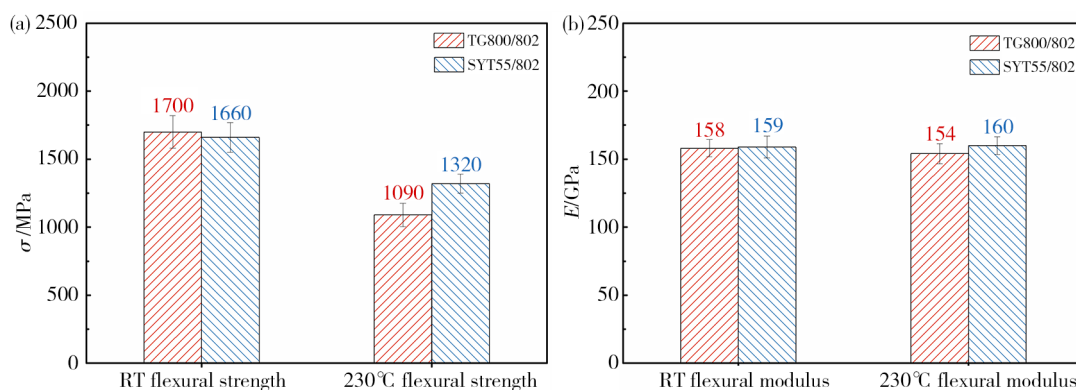
温服役环境, 本文测试了两种复合材料在230 °C下的弯曲性能, 结果显示干喷湿纺SYT55碳纤维/双马复合材料高温弯曲强度更优。

复合材料高温强度保持率:

$$\eta_T = \frac{\sigma_{f,T}}{\sigma_{f,RT}} \times 100\%$$

式中,  $\eta_T$ 为复合材料高温强度保持率,  $\sigma_{f,T}$ 为复合材料温度为 $T$ 时的弯曲强度,  $\sigma_{f,RT}$ 为复合材料室温弯曲强度。

TG800/802高温强度保持率64%, SYT55/802为79%, 干喷湿纺碳纤维与双马树脂基体在高温环境下表现出优异的适配性。湿法纺丝TG800碳纤维含有大量沟槽, 附着环氧树脂上浆剂较大, 环氧-双马树脂界面相所占体积比较干喷湿纺的SYT55碳纤维多, 在高温环境下, 环氧树脂发生分解, 破坏了原有的碳纤维-双马树脂界面, TG800/802复合材料失去了双马树脂对碳纤维的机械结合作用, 高温力学性能损失较大; 而干喷湿纺纤维表面光滑, 环氧上浆剂含量少, 在高温测试环境下对界面影响相对较小, 力学性能保持良好。另外也可能是不同的碳纤维上浆剂种类对高温性能的匹配性有差异导致。综合来看, 通过干喷湿纺工艺制备的国产T800S级碳纤维, 在高温环境下与双马树脂表现出更优异的适配性, 力学性能保持率高。



注: (a)为弯曲强度; (b)为弯曲模量。  
图4 两种复合材料室温和230 °C高温弯曲性能对比

Fig. 4 Room temperature and 230 °C flexural properties of two composites

表5 两种碳纤维双马树脂基复合材料弯曲性能

Tab. 5 Flexural properties of two carbon fiber/bismaleimide composites

复合材料种类	0°弯曲强度(RT)/MPa	0°弯曲模量(RT)/GPa	0°弯曲强度(230 °C)/MPa	0°弯曲模量(230 °C)/GPa	高温强度保持率 $\eta_T$ /%
TG800/802	1 700±120	158±6.3	1 090±87	154±7.3	64
SYT55/802	1 660±110	159±8.0	1 320±70	160±6.5	79

### 2.2.4 面内剪切性能

两种碳纤维/双马树脂复合材料面内剪切性能如图5所示, TG800/802面内剪切强度为86 MPa, SYT55/802面内剪切强度为64 MPa, 湿法纺丝TG800

碳纤维拥有更加粗糙的纤维表面, 对双马树脂浸润良好, 有一定的机械结合作用, 使得复合材料表现出良好的面内剪切性能, 干喷湿纺纤维界面性能较低, 这个结果与90°拉伸强度规律是一致的。

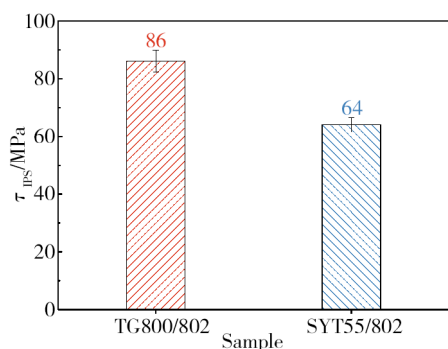


图5 复合材料面内剪切性能

Fig. 5 In-plane shear properties of composites

### 2.3 碳纤维/双马树脂复合材料断口形貌

复合材料中,界面作为第三相,界面性能将直接影响树脂与纤维之间载荷的分布和传递,由纤维表面形貌和碳纤维/双马树脂复合材料的力学性能看出,干喷湿纺碳纤维界面性能较低。为了进一步证明上述论断,采用SEM观察两种复合材料破坏面中碳纤维与双马树脂基体界面的形貌特征,如图6所示。干喷湿纺(SYT55/802)体系的破坏面比较光滑,双马树脂碎片呈现颗粒状附着在碳纤维表面,表明纤维和树脂间的界面粘结力较弱;湿法纺丝(TG800/802)体系的破坏面粗糙呈现波浪状,纤维与树脂有明显的粘连现象,说明两者界面结合紧密。两种复合材料体系的微观形貌与力学性能分析结果表现出一致的规律。

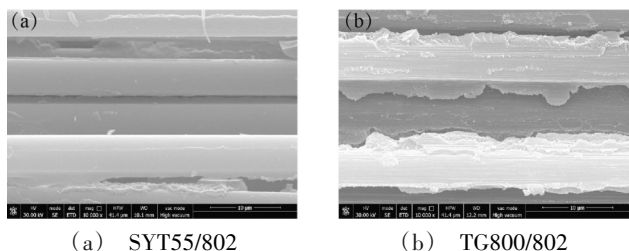


图6 复合材料破坏后微观形貌对比

Fig. 6 Comparison of microstructures of two composites after failure

### 3 结论

(1) 国产 T800S 碳纤维(SYT55)表面光滑缺陷少,其碳纤维/双马树脂复合材料拉伸强度发挥率为76%,较国产 T800H 碳纤维(TG800)拉伸强度发挥率更高。

(2) 国产 T800S 碳纤维/双马树脂复合材料(SYT55/802)高温性能良好,230 °C弯曲强度保持率高达79%,可能与碳纤维上浆剂的含量或与耐高温树脂的高温匹配性有关。

(3) 国产 T800H 碳纤维界表面沟槽更显著,增加

了碳纤维与双马树脂间的机械结合作用,因此与界面强度相关的面剪强度和90°拉伸强度更高。

### 参考文献

[1] 陈祥宝,张宝艳,邢丽英. 先进树脂基复合材料技术发展及应用现状[J]. 中国材料进展,2009,28(6):2-12.

CHEN X B, ZHANG B Y, XING L Y. Application and development of advanced polymer matrix composites [J]. Materials China,2009,28(6):2-12.

[2] 彭金涛,任天赋. 碳纤维增强树脂基复合材料的最新应用现状[J]. 中国胶粘剂,2014,23(8):48-52.

PENG J T, REN T B. The latest application status of carbon fiber reinforced resin matrix composites [J]. China Adhesives,2014,23(8):48-52.

[3] 李威,郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学,2011,4(3):201-212.

LI W, FUO Q F. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Optics,2011,4(3):201-212.

[4] NEWCOMB B A. Processing, structure, and properties of carbon fibers [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,2016,91:262-282.

[5] MURALIDHARA B, KUMARESH BABU S P, SURESHA B. The effect of fiber architecture on the mechanical properties of carbon/epoxy composites [J]. Materials Today: Proceedings,2020,22:1755-1764.

[6] LIU L, WU F, YAO H, et al. Investigation of surface properties of pristine and  $\gamma$ -irradiated PAN-based carbon fibers: Effects of fiber instinct structure and radiation medium [J]. Applied Surface Science,2015,337:241-248.

[7] SWANSON S R, QIAN Y. Multiaxial characterization of T800/3900-2 carbon/epoxy composites [J]. Composites Science and Technology,1992,43(2):197-203.

[8] 顾红星. 国产T800碳纤维表征分析及树脂基复合材料性能研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2015.

GU H X. Characterization and Property Analysis of HKT00 Carbon Fiber and Its Composite[D]. Xi'an:Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics),2015.

[9] 王芬,刘亮,刘府,等. T800级碳纤维及复合材料性能对比研究[J]. 高科技纤维与应用,2020,45(5):8-14.

WANG F, LIU L, LIU F, et al. Comparative study on the properties of T800 grade fiber and composite materials [J]. Hi-Tech Fiber and Application,2020,45(5):8-14.

[10] 欧秋仁,嵇培军,肖军,等. T800碳纤维/9518氰酸酯复合材料的性能[J]. 复合材料学报,2018,35(7):1775-1782.

OU Q R, JI P J, XIAO J, et al. Properties of T800 carbon fiber/9518 cyanate ester composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2018,35(7):1775-1782.

[11] 隋晓东,熊舒,朱亮,等. 国产T800级碳纤维/环氧树脂复合材料湿热性能[J]. 航空材料学报,2019,39(3):

88-93.

SUI X D, XIONG S, ZHU L, et al. Hygrothermal properties of domestic T800 carbon fiber/epoxy composites [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(3): 88-93.

[12] 井敏, 谭婷婷, 王成国, 等. 东丽T800H与T800S碳纤维的微观结构比较[J]. *材料科学与工艺*, 2015, 23(2): 45-52.

JING M, TAN T T, WANG C G, et al. Comparison on the microstructure of Toray T800H and T800S carbon fiber [J]. *Materials Science & Technology*, 2015, 23(2): 45-52.

[13] ZHANG S J, WANG R M, LIAO Y Q. A comparative study of two kinds of T800 carbon fibers produced by different spinning methods for the production of filament-wound pressure vessels [J]. *New Carbon Materials*, 2019, 34(6): 578-586.

[14] 王莉, 拜斌, 张璋, 等. 国产T800H碳纤维/环氧树脂复合材料化学结合及特性研究[J]. *粘接*, 2023, 50(5): 73-76.

WANG L, BAI B, ZHANG Z, et al. Studies on chemical bonding and characteristics of domestic T800H carbon fiber/epoxy resin composites [J]. *Adhesion*, 2023, 50(5): 73-76.

[15] 徐牛牛, 杭传伟, 张淑斌, 等. 纺丝工艺对T700级碳纤维及其复合材料性能的影响[J]. *合成纤维*, 2023, 52(5): 29-33.

XU N N, HANG C W, ZHANG S B, et al. Effect of spinning process on the properties of T700 carbon fibers and its reinforced composites [J]. *Synthetic Fiber in China*, 2023, 52(5): 29-33.

[16] 王先锋, 曹正华, 彭公秋, 等. 不同纺丝工艺国产高强中模碳纤维及其复合材料性能对比[J]. *表面技术*, 2023, 52(4): 446-457.

WANG X F, CAO Z H, PENG G Q, et al. Characterization of different types domestic T800 carbon fibers and their composites [J]. *Surface Technology*, 2023, 52(4): 446-457.

[17] 刘艳艳, 邱伟峰, 马全胜, 等. 上浆剂含量对碳纤维性能的影响[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(7): 111-117.

LIU Y Y, QIU W F, MA Q S, et al. Effect of sizing agent content on properties of domestic high-strength middle-mode carbon fiber [J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(7): 111-117.

[18] 谈昆仑, 司钟雨, 孙忠霄, 等. 碳纤维表面物理结构对树脂浸润性的影响[J]. *石油化工*, 2021, 50(7): 650-656.

TAN K L, SI Z Y, SUN Z X, et al. The effect of surface physical structure of carbon fiber on its resin impregnation [J]. *Petrochemical Technology*, 2021, 50(7): 650-656.

[19] 李伟东, 张金栋, 刘刚, 等. 国产T800碳纤维/双马来酰亚胺复合材料的界面及力学性能[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(7): 1484-1491.

LI W D, ZHANG J D, LIU G, et al. Interfacial and mechanical properties of domestic T800 carbon fiber/bismaleimide composites [J]. *Acta Materiae Composites Sinica*, 2016, 33(7): 1484-1491.

[20] 牛越, 矫维成, 郝立峰, 等. T800碳纤维/5428双马树脂复合材料界面性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012(S1): 84-88.

NIU Y, JIAO W C, HAO L F, et al. A study of the interfacial performance of carbon fiber reinforced T800 CF/5228 BMI composites [J]. *Composites Science & Engineering*, 2012(S1): 84-88.