

# 国产 M55J 级碳纤维与两种典型树脂界面性能研究

徐小魁<sup>1,2</sup> 刘千立<sup>1,2</sup> 戴晶滨<sup>1,2</sup> 董斌<sup>1,2</sup> 谢钟清<sup>1,2</sup>

(1 上海复合材料科技有限公司, 上海 201112)

(2 上海航天树脂基复合材料工程技术研究中心, 上海 201112)

**文 摘** 为了夯实国产 M55J 级碳纤维在航天构件中的应用基础, 重点研究了国产 M55J 级碳纤维与航天环氧和氰酸酯树脂的界面性能, 并与进口 M55J 碳纤维进行对比。采用扫描电子显微镜、原子力显微镜对碳纤维的微观形貌进行表征, 通过接触角测量、红外光谱分析和微脱粘测试对碳纤维与航天树脂的粘附功、浸润性、化学反应特性和界面剪切强度进行测定。结果显示, 国产 M55J 级碳纤维表面存在大量沟槽, 上浆剂形成少量突起; 国产 M55J 级碳纤维与两种树脂的浸润性优于 M55J 碳纤维与树脂浸润性, 国产 M55J 级碳纤维与两种航天树脂的粘附功分别为 55.76 和 48.61 mN/m, 均高于进口碳纤维的粘附功; 国产 M55J 级碳纤维上浆剂与两种航天树脂经高温固化后反应程度达到 100%; 国产 M55J 级碳纤维与两种航天树脂的界面剪切强度分别为 74.62 和 62.99 MPa, 均高于 M55J 碳纤维。

**关键词** 国产, M55J 级碳纤维, 树脂, 界面性能

中图分类号: TB332

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.007

## The Interfacial Properties of Domestic M55J Carbon Fiber and Two Typical Resins

XU Xiaokui<sup>1,2</sup> LIU Qianli<sup>1,2</sup> DAI Jingbin<sup>1,2</sup> DONG Bin<sup>1,2</sup> XIE Zhongqing<sup>1,2</sup>

(1 Shanghai Composites Science and Technology Limited Company, Shanghai 201112)

(2 Shanghai Engineering Research Center of Aerospace Resin Based Composite, Shanghai 201112)

**Abstract** In order to strengthen the application foundation of domestic M55J carbon fiber in aerospace components, the interfacial properties of domestic M55J carbon fiber, aerospace epoxy resin and cyanate ester resin were significantly investigated, and compared with the import M55J carbon fiber. The surface morphology of carbon fiber was characterized by using scanning electron microscope and atomic force microscope. Furthermore, work of adhesion, wettability, chemical reaction characteristics and interfacial shear strength were examined by contact angle method, infrared spectroscopy and micro debonding test. The results show that there are a lot of grooves and a spot of sizing agent protuberance on the surface of domestic M55J carbon fiber. The wettability of domestic M55J carbon fiber with two kinds of aerospace resin is more superior than that of imported M55J carbon fiber, and the adhesion work between domestic M55J carbon fiber and two kinds of resin are 55.76 and 48.61 mN/m, respectively, which are higher than that of imported M55J carbon fiber. The extent of reaction of domestic M55J carbon fiber sizing agent with two kinds of aerospace resin can reach up to 100% after high-temperature curing. The interfacial shear strengths of domestic M55J carbon fiber and two kinds of aerospace resin are 74.62 and 62.99 MPa, respectively, which are higher than that of M55J carbon fiber.

**Key words** Domestic, M55J carbon fiber, Resin, Interfacial properties

收稿日期: 2021-08-10

第一作者简介: 徐小魁, 1990 年出生, 工程师, 主要从事航天复合材料国产化研究工作。E-mail: xkxu2015@sinano.ac.cn

通信作者: 刘千立, 博士, 高级工程师, 主要从事航天复合材料领域新材料新配方研究工作。E-mail: liuqianli1609@163.com

## 0 引言

高模碳纤维复合材料具有高比强度、高比模量、性能可设计和易于整体成形等诸多优点,还兼具高导电、高导热、低膨胀和耐疲劳等优异特性<sup>[1-2]</sup>,可很好地满足卫星高结构效率的要求,是作为航天器承力结构和功能结构理想的复合材料增强体<sup>[3-5]</sup>。

高强高模型碳纤维在国内外卫星结构上的应用较为广泛,复合材料的使用有利于卫星结构的轻量化,这些机构要求材料具有较高的尺寸稳定性和刚度,高模型碳纤维复合材料在这方面显示出独特的优越性,可通过零膨胀设计较小的热膨胀,在卫星结构上有着不可替代的作用<sup>[6-7]</sup>。近年来,国内逐步在国产M55J级高模型碳纤维的攻关上取得了一定的突破<sup>[8-10]</sup>,但距离在航天构件上的大规模应用仍有较大差距。由于高模碳纤维高度惰性的结构表面,要发挥碳纤维高模量的优势,必须保证碳纤维与树脂的良好界面匹配性。复合材料树脂与纤维之间的界面作为树脂与纤维之间传递应力的桥梁和纽带,其结构、组成、性质以及粘结强度等对复合材料的整体力学性能和破坏模式存在至关重要的影响<sup>[11-13]</sup>。目前,国产M55J级高模碳纤维与航天树脂匹配性研究的内容较少<sup>[14-15]</sup>,亟需对其进行与航天树脂间的匹配性研究。

本文重点考察国产M55J级高模碳纤维与航天用树脂体系的界面匹配性,航天体系树脂选取热熔环氧与热熔氰酸酯树脂。评价国产高模碳纤维自身结构,研究国产M55J级碳纤维与两种航天树脂的粘附功、浸润特性、上浆剂和树脂的化学反应和界面剪切强度,拟为后续国产M55J级高模碳纤维复合材料在航天产品中的进一步应用奠定基础。

## 1 实验

### 1.1 材料

国产高模碳纤维:牌号为CCM55J,规格为6K,威海光威拓展有限公司。树脂选用航天体系环氧体系树脂和氰酸酯体系树脂,两种树脂为自制,分别记作“A01”和“C01”。以丙酮为溶剂,采用索氏萃取法将碳纤维在80℃处理48h,提取纤维表面上浆剂并得到去除上浆剂的碳纤维,简称“去剂碳纤维”。

### 1.2 测试表征

采用扫描电子显微镜评价碳纤维的表面和截面形貌,采用原子力显微镜评价碳纤维的表面粗糙度。由表面/界面张力测试仪,基于Wilhelmy吊片法<sup>[16]</sup>的原理测试3种液体与纤维单丝的动态接触角,利用OWRK理论评价去除上浆剂前后碳纤维的表面能及其色散、极性分量和粘附功。采用接触角测量仪评

价不同温度下碳纤维与树脂的浸润特性。采用红外光谱表征碳纤维表面上浆剂的红外谱图和碳纤维与树脂的化学反应。采用界面剪切仪利用微脱粘法表征碳纤维与树脂的界面剪切强度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳纤维微观结构

#### 2.1.1 表面和截面形貌

图1为碳纤维的表面和截面形貌的扫描电子显微镜(SEM)图。由图可知,M55J和CCM55J表面均存在沿纤维轴向分布的深浅不一的沟槽,沟槽的存在增强碳纤维与树脂基体的结合强度。上浆剂在M55J纤维表面均匀分散,但在CCM55J表面存在大量凸起。采用溶液萃取法去剂后,两种纤维表面沟槽结构更加清晰。从两种纤维截面图可知,M55J多为腰果形,而CCM55J圆形和腰果形各半。

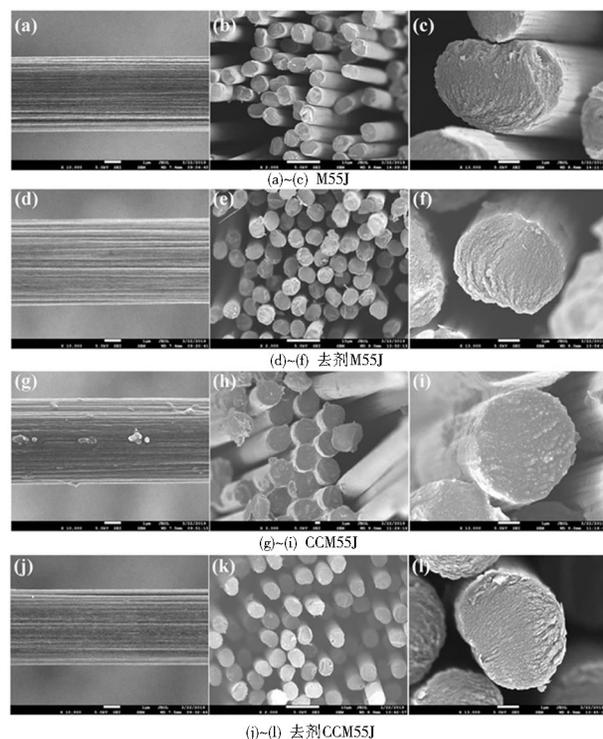


图1 碳纤维表面及横截面SEM图

Fig. 1 SEM images of surface and cross section of carbon fiber

#### 2.1.2 表面粗糙度

利用原子力显微镜(AFM)表征碳纤维的表面粗糙度,如图2所示,M55J和CCM55J纤维表面粗糙度相同,均为33.7nm,但上浆剂在CCM55J纤维表面不能均匀分布,这一点与图1(g)的SEM图结果相同,造成CCM55J纤维表面粗糙度的离散系数高于M55J。去剂后,两种纤维表面粗糙度均降低,去剂CCM55J纤维表面粗糙度为23.4nm,去剂CCM55J为27.0nm。

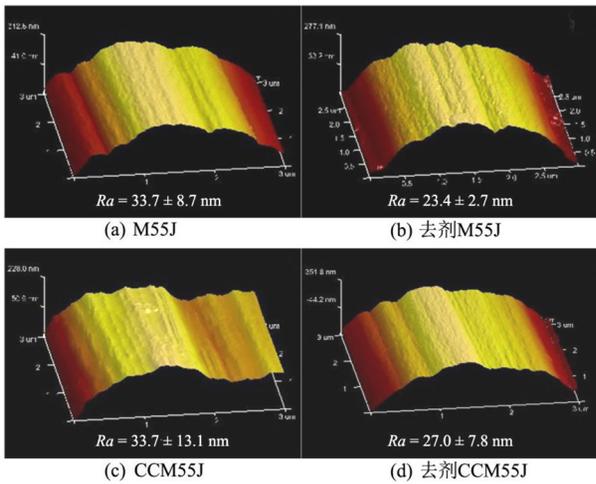


图2 碳纤维表面AFM图

Fig. 2 AFM diagrams of carbon fiber surface

## 2.2 纤维和树脂的表面能及两者间的粘附功

基于Wilhelmy原理,选用具有中等、较高表面张力和极性分量的3种小分子(二碘甲烷、甲酰胺、去离子水)作为探测液体,测试纤维单丝与小分子探测液体的动态前进接触角,实验结果如表1所示。

表1 碳纤维与三种液体的动态接触角

Tab. 1 Dynamic contact angles between carbon fiber and liquids (°)

纤维	水	甲酰胺	二碘甲烷
M55J	56.9±6.3	44.1±4.8	32.7±4.8
去剂M55J	57.8±3.6	40.7±3.1	30.6±1.6
CCM55J	55.6±6.8	42.0±7.7	30.1±5.0
去剂CCM55J	57.3±1.5	41.3±5.4	28.0±1.3

依据OWRK理论计算得到纤维的表面能<sup>[17]</sup>,OWRK方法计算固体表面能的公式如下:

$$\gamma_l(1+\cos\theta)=2(\gamma_s^d\gamma_l^d)^{1/2}+2(\gamma_s^p\gamma_l^p)^{1/2} \quad (1)$$

式中, $\gamma_l$ 为液体的表面张力, $\gamma_l^d$ 为液体的色散, $\gamma_l^p$ 为液体的极性分量, $\gamma_s^d$ 为固体的色散, $\gamma_s^p$ 为固体的极性分量, $\theta$ 为液体与固体的接触角。计算纤维的表面能结果如表2所示。

表2 碳纤维表面能及其极性色散分量

Tab. 2 Surface energy of carbon fiber and its polar dispersion component mJ/m<sup>2</sup>

碳纤维	表面能	色散分量	极性分量
M55J	27.5±3.4	14.6±1.0	12.9±3.3
去剂M55J	19.5±1.0	12.9±1.0	6.7±2.1
CCM55J	22.8±3.0	16.3±1.2	6.5±2.6
去剂CCM55J	19.5±1.7	13.9±1.7	5.9±0.7

由表2可以看出,M55J具有最高的表面能,为27.5 mJ/m<sup>2</sup>,相比之下,CCM55J的表面能较低,色散分量略微升高,这可能与纤维表面上浆剂包覆不均匀有关。去剂后,两种纤维表面能及极性和色散分量均降低,去剂M55J和去剂CCM55J的表面能相等。

表3为根据推荐固化工艺处理后的A01和C01树脂的表面能及其极性色散分量,由表3可知固化后树脂的表面极性分量均较低,色散分量均较高,A01和C01树脂的表面能分别为41.3和30.3 mJ/m<sup>2</sup>。

采用粘附功这一参数来表征碳纤维-树脂的分子间物理作用,计算公式如下:

$$W_a=2(\gamma_s^d\gamma_l^d)^{1/2}+2(\gamma_s^p\gamma_l^p)^{1/2} \quad (2)$$

根据该公式计算得到纤维与树脂的粘附功结果如表4所示。

相比M55J,CCM55J纤维与A01和C01树脂的粘附功较高,从热力学上分析,当两相之间的粘附功较大时,其相互粘附的作用力较强,浸润性可能更好。此外,一般来讲,两相粘附功越大,破坏两相界面所需的能量也越高,界面剪切强度越高,但具体界面性能还与纤维和上浆剂间的粘附性能有关。去剂后,两种纤维与两种树脂的粘附功降低。

表3 固化后树脂表面能及其极性色散分量

Tab. 3 Surface energy of cured resin and its polar dispersion component mJ/m<sup>2</sup>

树脂	表面能	色散分量	极性分量
A01树脂	41.3±1.8	40.2±1.8	0.8±0.1
C01树脂	30.3±2.1	28.7±2.6	1.1±0.2

表4 纤维-树脂粘附功

Tab. 4 Fiber-resin adhesion work mN/m

碳纤维	A01树脂	C01树脂
M55J	54.88	48.47
去剂M55J	50.18	43.91
CCM55J	55.76	48.61
去剂CCM55J	51.62	45.01

## 2.3 碳纤维和树脂的浸润性

### 2.3.1 碳纤维和热熔环氧树脂的浸润性

表5为两种碳纤维与A01树脂在90~110℃的接触角浸润测试结果,可知两种碳纤维与A01树脂的接触角均随着温度的升高而降低,表明温度升高后浸润性变好。在相同温度条件下,CCM55J的接触角更低,浸润性更好。除去上浆剂后,两种碳纤维的接触角均大幅度增加,浸润性变差。

表5 碳纤维与热熔环氧树脂在90~110℃的接触角  
Tab. 5 Contact angle between carbon fiber and hot melt epoxy resin at 90 to 110 °C (°)

碳纤维	90°C	100°C	110°C
M55J	72.7±5.7	68.1±4.0	63.1±4.3
去剂M55J	98.7±3.6	93.3±5.5	89.8±4.5
CCM55J	66.5±3.7	62.8±3.5	57.4±3.6
去剂CCM55J	90.3±5.7	84.2±6.4	79.8±3.4

表6 碳纤维与热熔氰酸酯树脂在70~90℃的接触角  
Tab. 6 Contact Angle between carbon fiber and hot-melted cyanate resin at 70 to 90 °C (°)

碳纤维	70°C	80°C	90°C
M55J	70.4±3.1	64.9±1.8	61.8±2.3
去剂M55J	63.3±2.8	57.9±3.2	55.6±4.3
CCM55J	65.2±2.3	61.2±3.2	56.7±2.8
去剂CCM55J	73.8±2.0	68.1±1.9	64.7±2.5

### 2.3.2 碳纤维和热熔氰酸酯树脂的浸润性

M55J和CCM55J纤维与C01树脂的接触角如表6所示,在70、80和90℃三种温度下,CCM55J与C01树脂的接触角均略低于M55J纤维的。去剂后,三种温度下去剂M55J纤维与C01树脂的接触角都降低,浸润性增加,去剂CCM55J纤维相比CCM55J接触角增加。

### 2.4 上浆剂和树脂的化学反应

上浆剂与航天树脂的化学反应特性直接影响了界面性能,因此通过红外光谱分析对碳纤维上浆剂与航天树脂的化学反应特性进行研究。

#### 2.4.1 碳纤维上浆剂和热熔环氧树脂的化学反应

M55J和CCM55J上浆剂与A01树脂混合物的红外谱图分别如图3(a)和图3(b)所示。

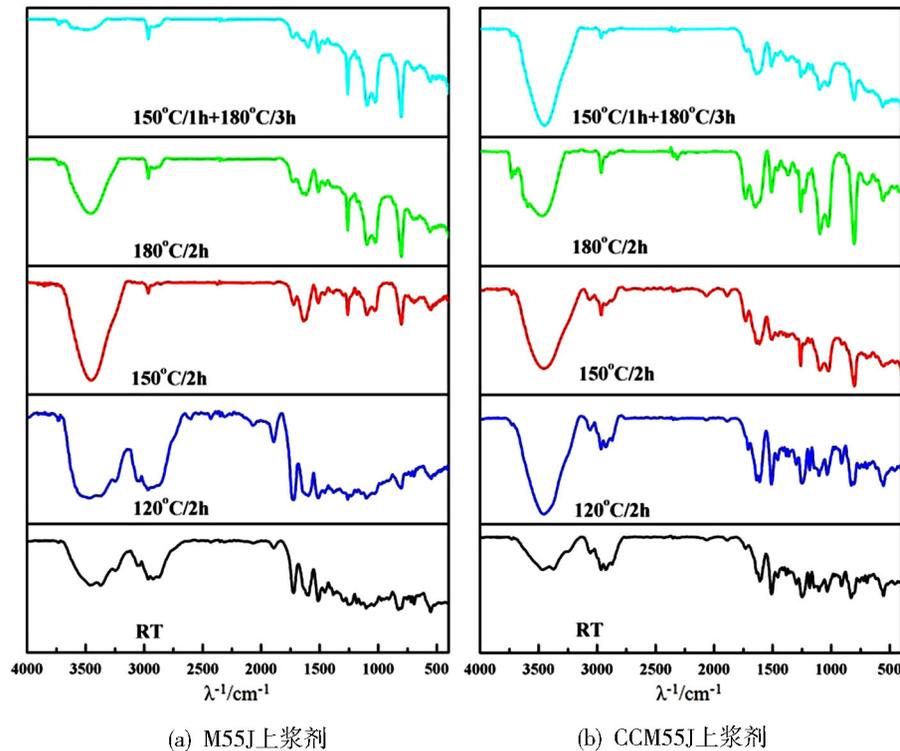


图3 M55J和CCM55J上浆剂与热熔环氧树脂在不同处理温度下的红外谱图

Fig. 3 Infrared spectra of M55J and CCM55J sizing agent and hot melt epoxy resin at different treatment temperatures

将等量纤维上浆剂和A01树脂在室温混合均匀后,分别在120、150和180℃处理2h及按A01树脂标准固化工艺(150℃/1h+180℃/3h)处理,将处理前后的混合物进行红外分析。920 cm<sup>-1</sup>的环氧基团特征峰作为分析基团以考察上浆剂与树脂的反应性,并将混合物经温度处理后环氧基团浓度与混合物未经温度处理中环氧基团浓度之比定义为上浆剂与树脂的反应程度而进行后续分析。

根据920 cm<sup>-1</sup>的环氧基团在不同温度下的浓度,计

算得到不同温度下上浆剂与A01树脂的反应程度,M55J和CCM55J上浆剂与A01树脂混合物在不同温度下的化学反应程度分别如图4(a)和图4(b)所示。

结果显示,温度处理后,两种上浆剂与树脂的混合物中环氧基团浓度均随温度升高而降低。对于M55J上浆剂而言,150℃处理2h后,混合物中环氧基团浓度即大幅降低,此时反应程度达到96.80%,如图4(a)所示,180℃处理2h后,混合物中环氧基团消失,反应程度100%;随处理温度的增加,M55J上浆剂与A01树脂的

反应程度增加。混合物按 A01 树脂固化工艺制度处理后,反应程度达到 100%。

CCM55J 上浆剂与 A01 树脂混合物的红外谱图如图 4(b)所示。不同温度处理后,环氧基团浓度均 CCM55J

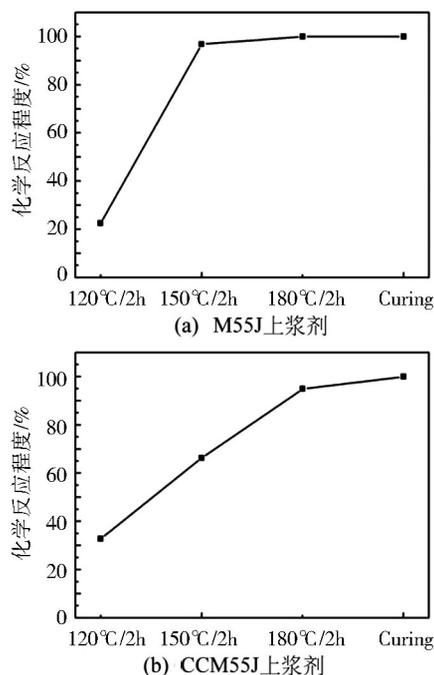


图 4 M55J 和 CCM55J 上浆剂与热熔环氧在不同温度下的反应程度

Fig. 4 Reaction degree of M55J and CCM55J sizing agent with hot melt epoxy at different temperatures

上浆剂与 A01 树脂的反应程度为 94.87%。按固化工艺制度处理后,反应程度为 100%。相比降低,且 CCM55J 上浆剂与 A01 树脂的反应程度随处理温度的增加而逐渐提高,180 °C 处理 2 h 后, M55J 上浆剂与 A01 树脂在 150 °C 处理后已基本完全反 CCM55J 上浆剂与 A01 树脂的反应进程较缓慢,有利于促进 CCM55J 裸纤与其上浆剂的反应,相比之下,这种情况可能对提高纤维与复合材料的界面性能更为有利。

#### 2.4.2 纤维上浆剂和热熔氰酸酯树脂的化学反应

将等量纤维上浆剂和 C01 树脂在室温混合均匀后,分别在 90、120 和 180 °C 处理 2 h 及按 C01 树脂标准固化工艺(120 °C/1 h+180 °C/4 h)处理,将处理前后的混合物进行红外分析。920  $\text{cm}^{-1}$  的环氧基团特征峰作为分析基团以考察上浆剂与树脂的反应性。M55J 和 CCM55J 上浆剂与 A01 树脂混合物的红外谱图分别如图 5(a)和图 5(b)所示。

结果显示,针对 M55J 上浆剂,温度处理后,环氧基团浓度均降低,如图 6(a)所示,混合物在 90、120 和 180 °C 处理 2 h 后,随处理温度的增加,反应程度逐渐降低,按标准固化工艺处理后,反应程度达到 95.58%,这可能是对于 M55J 上浆剂与 C01 树脂的混合物,预扩散及预固化阶段非常重要,有利于提高上浆剂与树脂的反应程度。

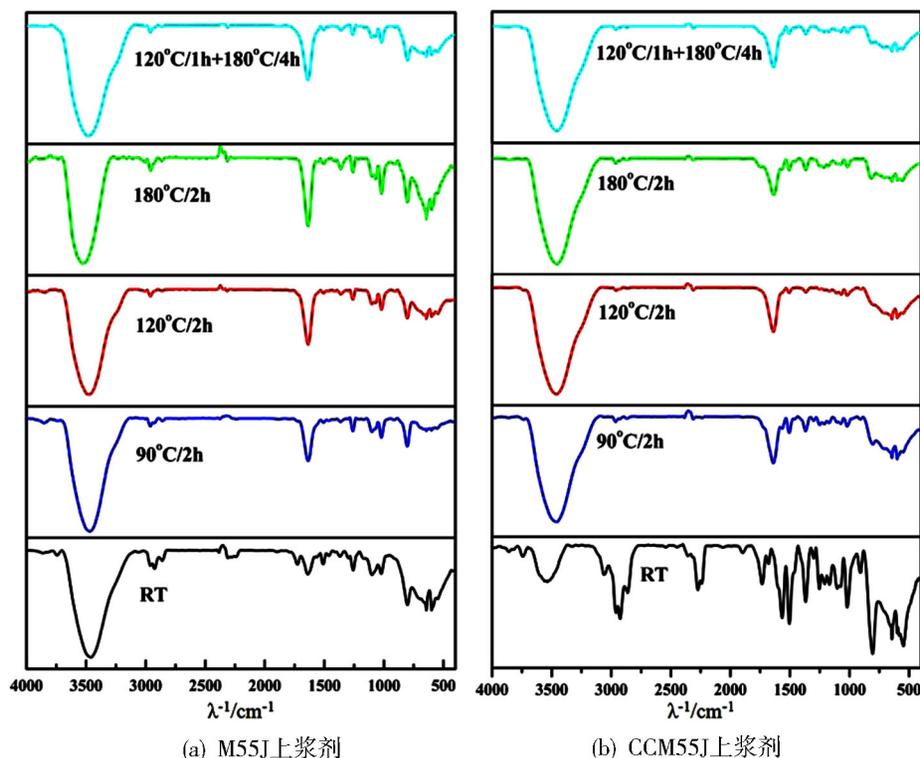


图 5 M55J 和 CCM55J 上浆剂和热熔氰酸酯树脂在不同处理温度下的红外谱图

Fig. 5 Infrared spectra of M55J and CCM55J sizing agent and hot melt cyanate resin at different treatment temperatures

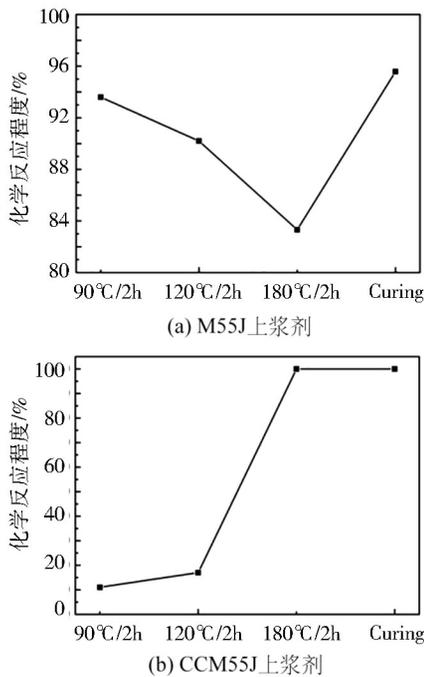


图6 M55J和CCM55J上浆剂与热熔氰酸酯在不同温度下的反应程度

Fig. 6 Reaction degree of M55J and CCM55J sizing agent with hot-melt cyanate ester at different temperatures

针对CCM55J上浆剂,经90和120℃处理后,环氧基团浓度降低,但降低幅度不大,如图6(b)所示,继续提高温度至180℃,环氧基团浓度为0,反应程度为100%,同样在经120℃/1h+180℃/4h处理后,环氧基团浓度为0,反应程度为100%,说明对于CCM55J上浆剂与C01树脂,180℃是引发两者充分反应的温度。这说明180℃之前,CCM55J上浆剂与C01树脂较低的反应程度同样有利于裸纤与上浆剂的反应,有利于平衡纤维与上浆剂及上浆剂与树脂间的化学键合平衡,对提升CCM55J纤维与C01树脂的粘结性能有益。

## 2.5 纤维和树脂的界面剪切强度

界面剪切强度(IFSS)最能直接反映碳纤维与树脂的界面匹配程度,通过微脱粘测试表征了两种碳纤维与航天树脂的界面剪切强度,结果如表7所示。

表7 纤维与树脂的界面剪切强度

Tab. 7 Interfacial shear strength of fibers and resins MPa

纤维	A01树脂	C01树脂
M55J	62.01±3.25	54.28±2.31
去剂M55J	53.00±4.75	58.32±7.06
CCM55J	74.62±3.79	62.99±4.45
去剂CCM55J	48.75±7.42	46.34±8.56

对于A01树脂,相比M55J,CCM55J与A01树脂的IFSS较高,这与CCM55J与A01树脂较高的粘附功及CCM55J纤维与其上浆剂及上浆剂与A01树脂间

的化学键合平衡有关。对于CCM55J,其IFSS的离散系数更高,一方面可能与纤维表面上浆剂分布不均匀有关,另一方面与CCM55J较易起毛断丝有关。去剂后,两种纤维与A01树脂的IFSS均降低。对于C01树脂,同样相比M55J,CCM55J与C01树脂的IFSS较高,这与CCM55J与C01树脂较高的粘附功及CCM55J纤维与其上浆剂、较好的浸润性及上浆剂与C01树脂间的化学键合平衡有关。此外,CCM55J与C01树脂IFSS的离散系数也很大。去剂后M55J与C01树脂的接触角减小,浸润性增加,对应去剂后M55J与C01树脂的IFSS升高;去剂后CCM55J与C01树脂的IFSS降低。

## 3 结论

(1)国产M55J级碳纤维表面存在大量沿纤维轴向分布、深浅不一的沟槽,圆形和腰果形截面各半,碳纤维表面上浆剂形成突起。

(2)国产M55J级碳纤维与两种树脂的浸润性优于M55J碳纤维与树脂浸润性,国产M55J级碳纤维与两种航天树脂的粘附功分别为55.76和48.61 mN/m,均高于进口碳纤维的粘附功。

(3)国产M55J级碳纤维上浆剂与两种航天树脂经高温固化后反应程度达到100%,国产M55J级碳纤维与两种航天树脂的界面剪切强度分别为74.62和62.99 MPa,均高于M55J碳纤维。

(4)国产M55J级高模碳纤维与航天树脂匹配性的基础数据,将进一步提高高模碳纤维的国产化应用进程,拟为后续国产M55J级高模碳纤维在航天结构产品上的工程应用提供指导意义。

## 参考文献

[1] GIBSON R F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures [J]. Composite Structures, 2010, 92(12): 2793-2810.

[2] NAITO K, YANG J M, KAGAWA Y. Tensile properties of high strength polyacrylonitrile (PAN)-based and high modulus pitch-based hybrid carbon fibers-reinforced epoxy matrix composite [J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(6): 2743-2751.

[3] 夏英伟,沃西源. 对中国高模量碳纤维应用中工艺性能问题的分析[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(3): 83-87.

XIA Yingwei, WO Xiyuan. The operation performance analysis on high-module carbon fiber application in China [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(3): 83-87.

[4] 石文静,高峰,柴洪友. 复合材料在航天器结构中的应用与展望[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(4): 1-6.

SHI Wenjing, GAO Feng, CHAI Hongyou. Application and expectation of composite in spacecraft structure [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(4): 1-6.

[5] 王浩攀,高令飞,李学林. 碳纤维材料在我国卫星制造领域的应用及国产化需求[J]. 化工新型材料, 2020, 48(9): 20-23.

WANG Haopan, GAO Lingfei, LI Xuelin. Applications of carbon fiber composites to satellite manufacturing fields and demand for localization[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(9): 20-23.

[6] 张芳,许文彬,殷永霞,等. 国产BHM3碳纤维在卫星结构中的应用研究[J]. 航天制造技术, 2015(5): 26-29.

ZHANG Fang, XU Wenbin, YIN Yongxia, et al. Application of BHM3 carbon fiber in satellite structures [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(5): 26-29.

[7] 李莺歌,张玉生,宫项,等. 国产高模量碳纤维制备蜂窝夹层结构件的性能评价[J]. 航天制造技术, 2015(3): 8-11, 15.

LI Yingge, ZHANG Yusheng, GONG Xu, et al. Performance evaluation of honeycomb sandwich structural parts manufactured by domestic high-modulus carbon fiber [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(3): 8-11, 15.

[8] 邹豪,李伟东,彭公秋,等. 高模型碳纤维的发展现状及其在航天领域的应用[J]. 合成纤维, 2017, 46(6): 17-22.

ZOU Hao, LI Weidong, PENG Gongqiu, et al. The development situation of high modulus carbon fiber and its applications in aerospace [J]. Synthetic Fiber in China, 2017, 46(6): 17-22.

[9] 张月义,陈洞,丛宗杰,等. QM4055级碳纤维结构与性能分析[J]. 高科技纤维与应用, 2019, 44(4): 52-58, 45.

ZHANG Yueyi, CHEN Dong, CONG Zongjie, et al. Structure and properties analysis of QM4055 carbon fiber [J]. Analytic Study, 2019, 44(4): 52-58, 45.

[10] 钱鑫,王雪飞,郑凯杰,等. PAN基高模量碳纤维成型过程中的结构性能关联性[J]. 化工进展, 2019, 38(5): 2276-2283.

QIAN Xin, WANG Xuefei, ZHENG Kaijie, et al. Relationship between micro-structure and macro-properties during the formation of PAN-based high modulus carbon fibers [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(5): 2276-2283.

[11] 李兆彤,李龙,王在铎,等. 碳纤维表面特征对碳/环

氧复合材料界面性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(2): 47-51.

LI Zhaotong, LI Long, WANG Zaiduo, et al. Effect of carbon fiber surface characteristics on interfacial properties of carbon/epoxy composite [J]. Aerospace Materials & Technology, 2021, 51(2): 47-51.

[12] 许昆鹏,潘书刚. 表面改性高模高强碳纤维与环氧树脂界面相容性研究[J]. 热固性树脂, 2021, 36(2): 43-46.

XU Kunpeng, PAN Shugang. Study on interfacial compatibility of surface modified high modulus and high strength carbon fiber and epoxy resin [J]. Thermosetting Resin, 2021, 36(2): 43-46.

[13] 李健芳,张娅婷,孙宏杰,等. 国产高性能碳纤维复合材料界面性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(5): 28-31.

LI Jianfang, ZHANG Yating, SUN Hongjie, et al. Study on interface of high performance carbon fiber composites [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(5): 28-31.

[14] 冯俊. 碳纤维的改性及其界面性能[J]. 合成树脂及塑料, 2019, 36(6): 27-30, 35.

FENG Jun. Modification and interface properties of CF [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2019, 36(6): 27-30, 35.

[15] BEDI H S, Billing K, Agnihotri P K. Interfacial shear strength of carbon nanotubes based hybrid composites: Effect of loading rate [J]. Frattura ed Integrita Strutturale, 2019, 13(48): 571-576.

[16] 徐永新,顾铁卓,马全胜,等. 几种国产高模碳纤维特性实验分析[J]. 复合材料学报, 2016, 33(9): 1905-1914.

XU Yongxin, GU Yizhuo, MA Quansheng, et al. Experimental analysis of properties of several domestic high-modulus carbon fibers [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(9): 1905-1914.

[17] 马金瑞,李敏,张佐光. 典型碳纤维的表面能差异性研究[J]. 航空制造技术, 2014(11): 73-75, 79.

MA Jinrui, LI Min, ZHANG Zuoguang. Study on the difference of surface free energy of typical carbon fiber [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(11): 73-75, 79.