# 国产 CCF700-12K 碳纤维及其复合材料的性能研究

张　芳　　殷永霞　　夏英伟

（北京空间机电研究所，北京　100094）

**文　摘**　以某重要型号产品高强碳纤维材料国产化为研究背景，开展了 CCF700-12K 碳纤维及其复合材料力学性能、耐空间环境性能以及热性能研究。结果表明，国产 CCF700-12K 碳纤维拉伸强度为 4 706 MPa，拉伸模量为 268 GPa；CCF700-12K/F46 复合材料单向板拉伸强度为 1 958.8 MPa，拉伸模量为 144.79 GPa；CCF700-12K 碳纤维的力学性能优异，工艺性能稳定，能够满足复合材料结构工程应用要求。

**关键词**　CCF700-12K 碳纤维，复合材料，性能研究

中图分类号：TB332　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2019.06.006

# Research on the Performance of CCF700-12K Carbon Fibers and Their Composites

ZHANG Fang　　YIN Yongxia　　XIA Yingwei

（Bejing Institute of Space Mechanics & Electricity，Beijing　100094）

**Abstract**　The mechanical properties，survivability of space environment，and thermal properties of CCF700-12K carbon fibers and their composites，are studied based on the localization research of high-strength carbon fiber materials for a major product. The tensile strength of domestic CCF700-12K carbon fibers is 4 706 MPa，with a tensile modulus of 268 GPa. The tensile strength of one-way slabs containing CCF700-12K/F46 composite is 1958.8 MPa，and with a tensile modulus of 144.79 GPa. The results confirm that CCF700-12K carbon fibers show excellent mechanical properties，stable process performance，which can meet the requirements for structrural engineering applications of composite materials.

**Key words**　CCF700-12K carbon fiber；Composite，Performance research

## 0　引言

高强型碳纤维及其复合材料具有高比强度、性能/功能可设计、良好的尺寸稳定性、良好的耐空间环境等多种优异性能，在我国卫星、航天器结构上得到广泛应用，是卫星各级主次结构和遥感载荷的主要原材料，也是未来航天材料发展的趋势[1-4]。

目前，国外以日本东丽公司为代表的多家碳纤维生产厂家研制的高强碳纤维已达到相当高的水平。我国航天航空领域应用的大量的高强度碳纤维主要依赖于进口，但国外已开始对我国实行高强高模先进碳纤维的禁运。为了摆脱关键材料受制于人的局面，近年来国家开始加大国产碳纤维的投入力度，大力支持军品材料配套项目的自主研制，促进国产高强碳纤维研制快速发展[5-8]。

本文以某重要型号产品高强碳纤维材料国产化为研究背景，以国产 CCF700-12K 碳纤维为研究对象，分别研究了 CCF700-12K 碳纤维的性能、CCF700-12K/F46 复合材料的力学性能、耐空间环境性能以及热性能，各项性能均满足复合材料结构工程应用要求，为国产 CCF700-12K 碳纤维在航天航空领域的应用奠定了坚实的基础。

## 1　实验

### 1.1　原材料

环氧树脂，F46，上海树脂厂有限公司；高强碳纤维，CCF700-12K，威海拓展纤维有限公司。

### 1.2　试样制备

#### 1.2.1　CCF700-12K/F46 无纬布制备

选用国产高强碳纤维 CCF700-12K 和环氧 F46 分别作为增强材料和树脂基体，采用常规的湿法辊筒式排布法，根据 CCF700-12K 碳纤维的线密度设置排布机螺距为 3.68 mm，制备面密度为（216±3）g/m$^2$，含胶量为（38±3）%，挥发份含量≤2%，厚度为 0.2 mm 的预浸无纬布。

#### 1.2.2　CCF700-12K/F46 单向板制备

将厚度为 0.2 mm 的 CCF700-12K/F46 无纬布预浸料裁剪成尺寸为 500 mm×500 mm 的单向布，参照

收稿日期：2019-03-04

第一作者简介：张芳，1987 年出生，工程师，主要从事复合材料结构设计及成型工艺研究。E-mile：zhangfangnnn@163.com

Q/WB150—2002《碳纤维/环氧树脂复合材料层合板制备工艺规范》,采用手工铺层(确保纤维角度偏差不超过±1°),真空袋-热压罐成型方式制备厚度为2 mm的单向板。脱模后按照力学性能、热性能和耐空间环境性能测试标准加工成测试用的标准试件。

### 1.3 性能测试

#### 1.3.1 CCF700-12K碳纤维性能测试

参照《航天器常用非金属材料复验规定》(Q/W—Q—70—3003—2012),对国产CCF700-12K碳纤维的外观质量、线密度、拉伸强度、弹性模量、断裂伸长率等性能进行测试。

#### 1.3.2 CCF700-12K/F46复合材料单向板性能测试

##### 1.3.2.1 单向板力学性能测试

国产CCF700-12K/F46复合材料单向板0°拉伸强度、模量和泊松比按照《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》(GB/T3354—2014)测试;弯曲强度、弯曲模量按照《定向纤维增强聚合物基复合材料弯曲性能试验方法》(GB3356—2014)测试;层间剪切强度按照《纤维增强塑料 短梁法测定层间剪切强度》JC/T773—2010测试。

##### 1.3.2.2 耐带电粒子辐照测试

国产CCF700-12K/F46复合材料单向板耐带电粒子辐照试验条件为总吸收剂量为$2.25\times10^4$GY(Si)(按试验规范考虑3倍余量);模拟源为电子加速器、质子加速器或γ源($^{60}$Co)。试验完成后,按照上述单向板力学性能测试标准测试CCF700/环氧0°单向板辐照前后弯曲强度、弯曲模量和层间剪切强度。

##### 1.3.2.3 真空条件下材料质量损失和可凝挥发物测试

国产CCF700-12K/F46复合材料单向板真空条件下材料质量损失和可凝挥发物试验分别参照QJ1558—1988《真空中材料挥发性能测试方法》和QJ1371—1988《真空中材料可凝挥发物测试方法》进行。真空试验测试前需对试件进行预处理,预处理的条件为在45%的湿度条件下放置3天。测试时,样品室的温度为(125±1)℃,搜集板的温度为(25±1)℃,真空度优于7 mPa,测试时间24 h。测试其总质量损失(TML)、收集到的可凝挥发物(CVCM)和水蒸气回收量(WVR)。

##### 1.3.2.4 热性能测试

按照GJB 330A—2000《固体材料60-2 773 K比热容测试方法》测试CCF700-12K/F46复合材料比热容,采用美国Solar Spectrum Reflectometer Devices & Services Co.吸收率测试设备和AE-RD1发射率测试仪进行吸收率和发射率测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 国产CCF700-12K碳纤维性能

表1为国产CCF700-12K碳纤维性能测试结果,由此可见国产CCF700碳纤维外观质量良好、纤维束粗细均匀,纤维束间无粘连,无外来物,无毛丝团,CCF700-12K碳纤维的拉伸强度为4 706 MPa,弹性模量为268 GPa,断裂伸长率为1.76,线密度为802 g/km,纤维的各项性能均满足要求。这说明国产CCF700-12K碳纤维研制生产过程中采用的原丝性能良好,工艺过程控制稳定。

**表1 国产CCF700-12K碳纤维性能测试结果**

**Tab.1 Performance test results of domestic CCF700-12K carbon fiber**

| 项目 | 外观质量 | 拉伸强度/MPa | 弹性模量/GPa | 断裂伸长率/% | 线密度/g·km$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 性能指标 | 纤维为无捻碳纤维,颜色为黑色,有光泽,纤维束粗细均匀,纤维束间无粘连,无外来物,无毛丝团 | ≥4165 | ≥245 | ≥1.5 | 800±8 |
| 实测数据 | 外观质量良好、纤维束粗细均匀,纤维束间无粘连,无外来物,无毛丝团 | 4706 | 268 | 1.76 | 802 |

### 2.2 国产CCF700-12K/F46复合材料单向板性能

表2为国产CCF700-12K/F46和进口T700/F46单向板力学性能测试结果,由此可见,国产CCF700-12K/F46复合材料单向板0°拉伸强度、0°拉伸模量、弯曲模量、层间剪切强度均高于进口T700/F46复合材料单向板。试验采用的基体材料相同均为环氧F46树脂,增强材料分别为进口高强碳纤维T700和国产CCF700,其力学性能不同的主要原因为纤维表面使用的上浆剂不同,从而造成树脂对这两种纤维的润湿性不同,国产CCF700碳纤维与环氧F46的界面结合力高于进口T700碳纤维与环氧F46的界面结合力。

**表2 国产CCF700和进口T700/F46单向板力学性能**

**Tab.2 Mechanical properties of domestic CCF700 and imported T700/F46 unidirectional plates**

| 单向板 | 0°拉伸性能 | | 泊松比/% | 弯曲性能 | | 层间剪切强度/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 强度/MPa | 模量/GPa | | 强度/MPa | 模量/GPa | |
| 进口T700 | 1502.2 | 105.46 | 0.32 | 1549.3 | 109.9 | 69.32 |
| 国产CCF700 | 1958.8 | 144.79 | 0.32 | 1505.4 | 141.65 | 76.37 |

### 2.3 CCF700-12K/F46 复合材料耐带电粒子辐照试验结果

CCF700-12K/F46 复合材料经带电粒子辐照前后力学性能数据如表 3 所示，由此可见，经带电粒子辐照后弯曲强度变化-6.19%，弯曲弹性模量变化-6.76%，层间剪切强度变化-5.17%，力学性能均有所下降。这是由于树脂基体受真空电子辐照后表面局部化学键断裂，使复合材料界面局部脱粘，从而导致界面强度略有降低[9]。

**表 3 带电粒子辐射前后 CCF700 单向板的力学性能**

**Tab.3 Mechanical properties of CCF700 unidirectional plates before and after charged particle irradiation**

| 弯曲强度 | | | 弯曲弹性模量 | | | 层间剪切强度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 辐射前/MPa | 辐射后/MPa | 变化量% | 辐射前/GPa | 辐射后/GPa | 变化量% | 辐射前/MPa | 辐射后/MPa | 变化量% |
| 1518.5 | 1424.5 | -6.19 | 142.65 | 133.01 | -6.76 | 76.8 | 72.83 | -5.17 |

### 2.4 真空条件下材料质量损失和可凝挥发物试验结果

从表 4 可以看出 CCF700-12K/F46 复合材料总质量损失 0.21%、可凝挥发物含量 0.001%、水蒸汽回收量 0.110%，均满足指标要求。说明 CCF700-12K/F46 复合材料在真空条件下有质量损失，质量损失是复合材料所吸附的水分及复合材料制备时残留的微量有机溶剂在真空环境下逐渐挥发所导致的[10]。

**表 4 CCF700 单向板材料真空性能测试数据**

**Tab.4 Vacuum performance test data of CCF700 unidirectional plate material**

| 数据来源 | 总质量损失/% | 可凝挥发物/% | 水蒸汽回吸量/% |
|---|---|---|---|
| 指标要求 | ≤1 | ≤0.1 | ≤1 |
| 实测值 | 0.21 | 0.001 | 0.110 |

### 2.5 CCF700-12K/F46 复合材料热性能

CCF700-12K/F46 复合材料的比热容、发射率以及吸收率数据见表 5 所示。从表中可以看出 CCF700-12K/F46 复合材料的比热容随着温度的升高而升高，CCF700-12K/F46 复合材料的发射率为 0.838，吸收率为 0.928。

**表 5 CCF700-12K/F46 复合材料热性能测试数据**

**Tab.5 Thermal performance test data of CCF700-12K/F46 composite**

| 试件 | 比热容/J·(g·K)$^{-1}$ | | | | 发射率 | 吸收率 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | -50℃ | 5℃ | 20℃ | 70℃ | | |
| 1 | 0.901 | 0.975 | 1.127 | 1.219 | 0.833 | 0.928 |
| 2 | 0.862 | 0.905 | 0.975 | 1.024 | 0.835 | 0.927 |
| 3 | 0.904 | 0.925 | 0.998 | 1.079 | 0.840 | 0.928 |
| 均值 | 0.889 | 0.935 | 1.033 | 1.107 | 0.838 | 0.928 |

## 3 结论

(1)国产 CCF700-12K 碳纤维性能满足《航天器常用非金属材料复验规定》(Q/W—Q—70—3003—2012)要求，拉伸强度为 4 706 MPa，弹性模量为 268 GPa，断裂伸长率为 1.76，线密度为 802 g/km。

(2)采用国产 CCF700-12K 碳纤维作为增强材料，环氧 F46 作为树脂基体，制备的无纬布铺层、裁剪、模压等工艺可行性良好，制备出的单向板平整、厚度均匀，内部结构致密、无疏松现象，其拉伸强度 1 958.8 MPa，拉伸模量 144.79 GPa，且其余力学性能均能够满足要求。

(3)国产 CCF700-12K 碳纤维复合材料耐空间环境性能和热性能良好，能够满足型号产品的需求。

**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(6)：2-12.

[2] 李斌太，邢丽英，包建文，等.先进复合材料国防科技重点实验室的航空树脂基复合材料研发进展[J].航空材料学报，2016，36(3)：92-100.

[3] 罗益锋.世界高科技纤维形成三足鼎立之势(二)[J]高科技纤维与应用，2003(2)：1-6.

[4] 王自柯.国产碳纤维及其增强树脂基复合材料的结构与性能研究[D].哈尔滨工业大学，2012.

[5] 王自柯，咸贵军，等. 国产碳纤维拉伸性能研究.工业建筑，2013，43(6)：1-4.

[6] 徐樑华.国产碳纤维质量状况分析及对策建议[J].新材料产业，2010(9)：5-8.

[7] 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.

[8] 盛磊，陈萍. 碳纤维复合材料在光学遥感器中的应用探讨[J]. 航天返回与遥感，2008，29(3)：33-37.

[9] 王皎倩.真空热循环条件下 T700/3234 复合材料的损伤效应[D].沈阳航空航天大学，2011.

[10] 张明.真空电子辐照对碳纤维/氰酸酯复合材料的影响.宇航材料工艺，2010，40(6)：62-64.