

# 大载荷缠绕杆件的拉伸和压缩性能

林松<sup>1,2</sup> 王俊锋<sup>2</sup> 张建宝<sup>2</sup> 孙红卫<sup>2</sup> 杨小平<sup>1</sup>

(1 北京化工大学有机无机复合材料国家重点实验室,北京 100029)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 采用缠绕成型的方法制备了碳纤维/环氧树脂复合材料杆件,对杆件进行了拉伸、压缩试验,并且对缠绕用原材料的性能进行测试。结果表明:缠绕原材料的拉伸及层剪性能优异,缠绕成型的复合材料杆件力学性能较高,压缩与拉伸强度分别大于400与240 MPa,杆件端头是应力集中区域,端头的设计连接以及复合材料的层间性能是影响复合材料杆件拉伸、压缩性能的重要因素。

**关键词** 缠绕,杆件,拉伸试验,压缩试验

## Axial Compression and Tensile Investigation of Large Load Filament Winding Tubes

Lin Song<sup>1,2</sup> Wang Junfeng<sup>2</sup> Zhang Jianbao<sup>2</sup> Sun Hongwei<sup>2</sup> Yang Xiaoping<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

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

**Abstract** Filament winding process was adopted to fabricate the carbon/epoxy tubes and the tubes were tested by axial compression and tensile experiment. Besides, the mechanical properties of the filament winding composites was also tested. The results show that the tensile and interlaminar shear strengths of composite are outstanding. The composite tubes provide excellent axial compression and tensile strength, which are more than 400 MPa and 240 MPa respectively. The connecting form of the tubes and composites laminar shearing strength play important roles in affecting the axial compression and tensile strength of the tubes.

**Key words** Filament winding, Tubes, Tensile experiment, Compression experiment

### 0 引言

碳/环氧复合材料在航空航天上已经获得了广泛的应用,并且由次承力构件开始逐步应用于主承力构件<sup>[1-3]</sup>,特别是空间运载器上由复合材料杆件连接而成的推力支架应用较多,如火箭和导弹的级间段、可重复使用运载器的发动机与飞行器燃料储箱之间的推力支架等<sup>[4-5]</sup>。复合材料杆件是推力支架最主要的大载荷主承力构件,自20世纪90年代以来,国外少数先进运载器的推力结构开始采用聚合物基复合材料来制备,起到了良好的减重效果,显著提高了运载器的效率<sup>[6-8]</sup>。

航天运载器上的复合材料杆件不但要承受飞行器本身的质量,而且需要将发动机产生的巨大推力传递给飞行器主结构,从而推动飞行器前进。因而复合材料杆件需要承受较为复杂的大载荷作用,其中,大载荷压缩与拉伸作用是飞行器推力结构的最主要载

荷形式,在大载荷作用下,复合材料杆件不仅要保证不发生失效破坏,而且结构变形也要控制在一定的范围之内,对杆件的力学性能要求较高。本文采用缠绕成型的方法制备了复合材料杆件,对杆件进行了轴向拉伸以及压缩试验,研究杆件在大载荷作用下的破坏模式。

### 1 实验

#### 1.1 材料和设备

材料:TDE-85 环氧树脂,天津津东化工厂;环氧树脂稀释剂、胺类固化剂,自制;T700 碳纤维,12K,日本东丽公司。

设备:万能材料试验机(Instron 3119-407);载荷坐力器及试验工装;缠绕设备:4轴联动缠绕机(江南机器);应变测试仪(BA382);高倍电子显微镜(ZEISS-SEVO 60)。

#### 1.2 试样制备

收稿日期:2011-10-21

作者简介:林松,1983年出生,工程师,主要从事结构复合材料成型工艺研究。E-mail:linsong28@126.com

### 1.2.1 树脂及其复合材料 NOL 试样

将树脂各组分按照一定的配比混合均匀,真空脱泡,然后浇铸到事先预热的拉伸试样模具中,加温固化,脱模制得试样。按照 GB/T2578—1989 制备复合材料 NOL 环拉伸及层剪试样。

### 1.2.2 复合材料杆件缠绕成型

将 TDE-85 环氧树脂、环氧稀释剂以及自制胺类固化剂按照一定比例搅拌均匀,配置成缠绕树脂,采用 T700 碳纤维缠绕成型复合材料杆件。复合材料杆件内径 54 mm,外径 65 mm,长度为 1 231 mm,杆件两端预埋有金属接头,成型后加工螺纹用于杆件的拉伸以及压缩试验。共缠绕成型复合材料杆件 4 件分别用于轴向拉伸以及压缩试验。

### 1.3 试验

由两部分组成:原材料试验,包括树脂试验和 NOL 环拉伸、剪切试验;杆件试验包括杆件拉伸、压缩试验和杆件中间段压缩试验。

#### 1.3.1 原材料性能测试

按照 GB/T2568—1995 测试拉伸性能。分别按照 GB1458—1988、GB1461—1988 测试 NOL 环试样的拉伸以及层剪性能。

#### 1.3.2 复合材料杆件拉伸和压缩性能测试

分别对复合材料杆件按照 GB/T 5349—2005 以及 GB/T 5350—2005 进行了轴向拉伸和压缩试验,并且按照以上标准分别计算杆件的模量以及强度。复合材料杆件轴向拉伸试验:安装试件时应使试件的轴线与试验机加载中心线对准,杆件两端处于固支状态并施加集中载荷,如图 1(a)所示。复合材料杆件轴向压缩性能试验:安装试件时应使试件的轴线与试验机加载中心线对准,杆件一端处于固支状态,另一端安装一个球阀处于铰支状态,从上端施加集中载荷,如图 1(b)所示。复合材料杆件拉伸、压缩载荷级别为 1, 2, 3, …,  $n$ , 载荷分别为 10, 20, 30 kN, …直到破坏。

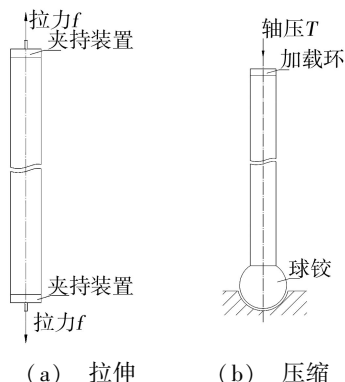


图 1 单管试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the composite tube's experiment: tensile experiment and compression experiment

复合材料杆件做轴向拉伸以及压缩静力试验时,测量圆管的轴向应变,如图 2 所示。测试每一级别杆件的应变。测点在管子两端处、管中端 3 个位置,每个位置对称贴 1 个轴向应变花。

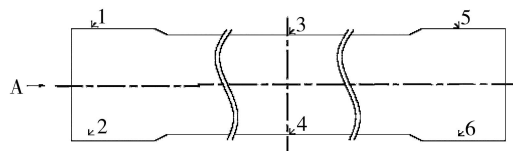


图 2 复合材料杆件应变测点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of strain foil's positions on composite tube

#### 1.3.3 复合材料杆件中间段取样压缩试验

从做完压缩试验的 2 件杆件中间部位分别截取 260 mm 长的杆件,杆件两端粘结外部金属接头,并且在杆件两端距离端头位置 30 mm 处粘贴对称轴向应变片 2 片,进行试样的压缩试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原材料性能

本文采用了一种高韧性的 TDE-85/自制胺类环氧树脂体系,性能如表 1 所示,树脂体系不仅具有较高的拉伸强度,而且韧性较高,是一种强而韧的基体。

表 1 树脂浇注体的力学性能

Tab. 1 Mechanical perposites of cure resin

试样	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	断裂伸长率 /%
1#	85.1	3.6	5.7
2#	78.0	3.4	5.5
3#	79.5	3.6	6.4
4#	80.2	3.6	6.3
5#	85.4	3.2	4.4
$\bar{X}$	81.6	3.5	5.7

纤维采用缠绕工艺及力学性能较好的 T700 碳纤维,NOL 环复合材料性能数据如表 2 所示,可以看出 T700 碳纤维 NOL 环具有较高的拉伸及层剪性能,并且其纤维强度转化率超过 70%,采用此复合材料体系有利于充分发挥纤维的强度。

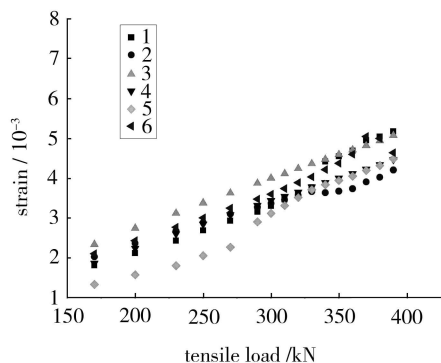
表 2 T700 复合材料 NOL 环性能

Tab. 2 Machanical perposites of NOL ring

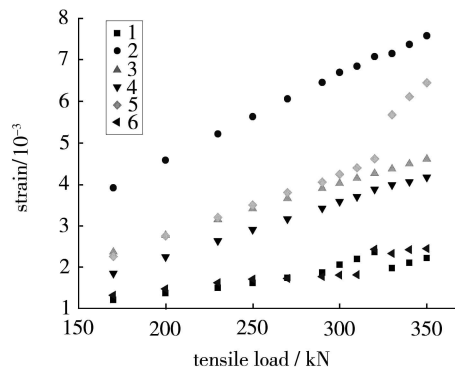
试样	拉伸强度 /MPa	层剪强度 /MPa	纤维强度转化率 /%
1#	2480	55.8	84.3
2#	2440	52.8	83.0
3#	2150	53.8	73.1
4#	2650	64.2	90.0
5#	2290	54.8	74.3
$\bar{X}$	2402	56.3	80.9

## 2.2 复合材料杆件拉伸性能

复合材料杆件在拉伸试验过程中采用逐级加载的形式,每级载荷增加为 10 kN,共成型复合材料杆件 2 件进行拉伸试验。表 3 为复合材料杆件的拉伸试验数据,可以看出 1<sup>#</sup>杆件的拉伸强度以及模量大于 2<sup>#</sup>杆件,杆件的拉伸强度均大于 400 MPa,拉伸模量大于 80 GPa,复合材料杆件承受轴向拉伸载荷较大。



(a) 1<sup>#</sup>



(b) 2<sup>#</sup>

图 3 复合材料杆件轴向拉伸应力—应变关系图

Fig. 3 Tensile strain curves of composite tube

可以看出复合材料杆件在 350 kN 的载荷下,没有塑性变形,应变随着应力的增加而增大,基本上呈现线性关系。1<sup>#</sup>杆件位于端头位置的应变略大于管身段位置,杆件 390 kN 下的最大应变为 5.14,位于端头位置,而 2<sup>#</sup>杆件的端头位置的应变值明显大于管身段,杆件 350 kN 下的最大应变值为 7.59,也位于端头位置,而 2<sup>#</sup>杆件管身段的应变仅为 4.2。杆件端头位置由于内置金属接头,在承受拉伸载荷的过程中,金属接头除了对端头位置的复合材料有轴向拉伸作用力外,同时还会挤压外层的复合材料层,对端头位置的复合材料层还具有周向的膨胀作用力,这样会导致复合材料杆件在承受拉伸载荷过程中,端头位置的受力比较复杂,容易造成应力集中。2<sup>#</sup>杆件端头在承受载荷时,应变量较大,说明杆件端头部位应力集中程度远大于 1<sup>#</sup>管件,这是导致 2<sup>#</sup>杆件的破坏载荷低于 1<sup>#</sup>杆件的原因。图 4 所示为复合材料杆件拉伸的破坏形式。



(a) 1<sup>#</sup>

(b) 2<sup>#</sup>

图 4 复合材料杆件拉伸破坏模式

Fig. 4 Breakage mode of composite tube after tensile experiment

表 3 复合材料杆件拉伸试验结果

Tab. 3 Tensile perposites of composite tubes

试样	尺寸 /mm	破坏载荷 /kN	拉伸模量 /GPa	拉伸强度 /MPa
1 <sup>#</sup>	Φ65×1231	396.5	85.2	463.8
2 <sup>#</sup>	Φ65×1231	359.4	83.1	420.4

在复合材料杆件承受拉伸载荷的过程中,对其应变进行了测试,图 3 所示的为复合材料杆件的轴向拉伸与应变关系图。

可以看出,1<sup>#</sup>与 2<sup>#</sup>杆件在承受拉伸载荷下的破坏形式相同,均是复合材料杆件端头金属接头部位拔出,管身段没有破坏,破坏的端头部位外层复合材料有纤维断裂。从杆件破坏形式上看,说明杆件端头部位的环向强度不足,复合材料杆件在承受轴向拉伸载荷过程中,挤压外部复合材料层,致使端头纤维断裂,杆件提前失效,但是管身段并没有达到拉伸载荷的极限。

## 2.3 复合材料杆件压缩性能

### 2.3.1 复合材料整个杆件压缩性能

复合材料杆件的压缩试验结果如表 4 所示,可以看出复合材料杆件的压缩强度与模量明显低于拉伸强度与模量。

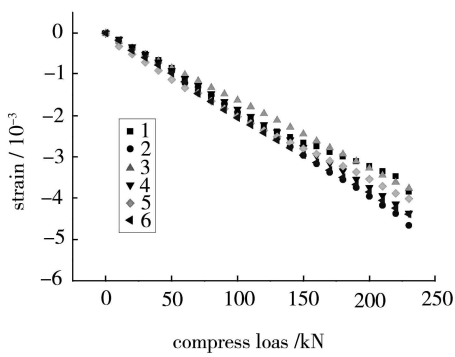
表 4 复合材料杆件压缩试验结果

Tab. 4 Compression results of the composite tube

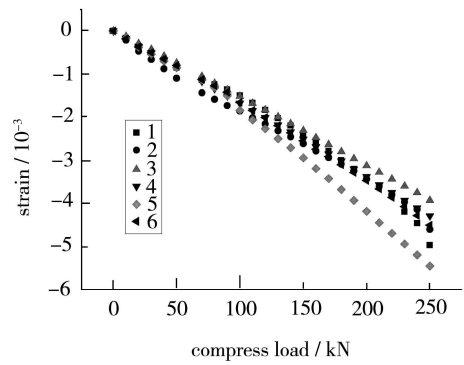
试样	尺寸 /mm	破坏载荷 /kN	压缩模量 /GPa	压缩强度 /MPa
1 <sup>#</sup>	Φ65×1231	230	55	240
2 <sup>#</sup>	Φ65×1231	250	65	261

图 5 所示的为复合材料杆件的压缩应力与应变关系图,可以看出,杆件压缩载荷与应变基本呈现线性关系,并且在 100 kN 以后,1<sup>#</sup>与 2<sup>#</sup>杆件在一端端头的应变值高于管身段。1<sup>#</sup>杆件在 230 kN 下的最大应变为 4.657,在端头;2<sup>#</sup>杆件在 250 kN 下的最大应变为 5.449,也在端头,说明复合材料杆件在承受压缩载荷过程中,端头部位是应力集中区域。





(a) 1<sup>#</sup>



(b) 2<sup>#</sup>

图5 复合材料杆件轴向压缩载荷与应变关系图

Fig.5 Compress strain curves of composite tube

如图6所示为复合材料杆件压缩试验破坏模式,可以看出,破坏位置为端头部位金属预埋件下方,纤维沿着管周向呈现撕裂状破坏,纤维层崩裂,管身段并无明显破坏。与纤维复合材料杆件受拉伸情况不同,复合材料杆件在承受压缩载荷过程中,若层间性能较差,复合材料在受压过程中容易层间过早破坏而导致复合材料的整体压缩性能下降,杆件上取样的金相观察,如图7所示,平均孔隙率为2.5%。

在受力过程中层间先破坏,压缩性能下降。金属预埋件与复合材料连接处存在刚度梯度变化,承受载荷过程中,造成应力集中,导致端头下端挤压破坏。

### 2.3.2 复合材料杆件中间段取样压缩性能

测试碳管实际承载性能如表5所示,可以看出杆件的压缩强度与模量与复合材料单管相比提高约20%。

表5 杆件取样压缩试验结果

Tab.5 Compression results of samples fabricated from composite tube

试样	尺寸/mm	破坏载荷 /kN	压缩模量 /GPa	压缩强度 /MPa
1 <sup>#</sup>	Φ65×260	280	71	292
2 <sup>#</sup>	Φ65×260	290	70	302



图6 复合材料杆件压缩破坏模式

Fig.6 Breakage mode of the composite tube after compress experiment

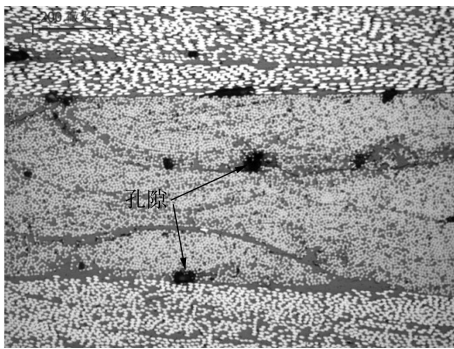


图7 复合材料管身段取样金相照片

Fig.7 SEM picture of sample prepared from middle section of composite tube

这主要是由于复合材料缠绕杆件固化时采用旋转固化,气泡只能自己缓慢排出,导致复合材料孔隙率较高,造成复合材料的层剪性能下降,杆件宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012年 第3期

如图8所示1<sup>#</sup>取样杆件280kN下的压缩的最大应变值为4.91,2<sup>#</sup>取样杆件在290kN下的最大应变值为5.12,取样段的应变与复合材料单管的应变值在相同载荷下的应变值比较接近。从结构形式上看,与预埋金属接头形式相比,杆件取样后两端头用金属接头外部加固,可以在一定程度上降低由于材料刚度突变导致的应力集中现象,提高杆件的抗压性能。

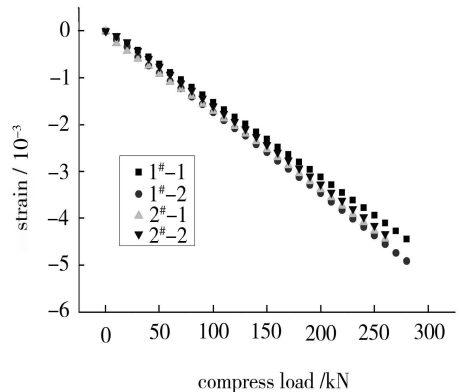
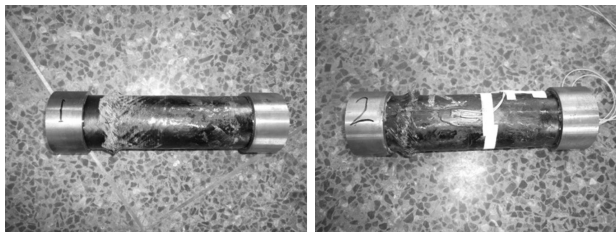


图8 杆件管身段取样轴向压缩应力与应变关系

Fig.8 Compress strain curves of sample fabricated from the composite tube



(a) 1# (b) 2#

图9 复合材料拉杆取样压缩试验破坏模式

Fig.9 Breakage mode of the composite tube sample after compress experiment

从图9所示的破坏形式上看,杆件在一端距离端头部位 20 ~ 25 mm 呈现纤维层向外崩裂破坏,与杆件的破坏模式相同。

### 3 结论

采用缠绕成型制备的复合材料杆件具有较好的拉伸以及压缩性能,杆件的拉伸强度大于 400 MPa,杆件的压缩强度大于 240 MPa,复合材料杆件的拉伸能力大于压缩能力。从复合材料杆件的拉伸及压缩试验的应变以及破坏形式上分析,金属接头部位复合材料的环向强度偏低是导致端头部位承受拉伸载荷杆件提前破坏的主要原因,而降低复合材料的孔隙

率,提高层剪性能以及优化金属接头的连接形式,有利于进一步提高复合材料杆件的压缩能力。

### 参考文献

[1] 赵稼祥. 先进复合材料的发展与展望[J]. 材料工程, 2002(10):40-43

[2] Lawrence A G. Resin transfer molding for affordable primary structure[J]. AIAA-95-3889,1995

[3] 江辉. 国外航天结构新材料发展简述[J]. 宇航材料工艺,1998,28(4):1-8

[4] Foster J L, Tracy J J, Elizondo C A. Application of ultra-high modulus composites to primary structures[J]. AIAA-93-1405-CP,1993

[5] Smith J J. Evolved composite structures for Atlas V [J]. AIAA-2002-4201,2002

[6] 陈汝训. 复合材料壳体的轴压稳定性[J]. 固体火箭技术,2001,24(1):13-15

[7] 彭超义. 空间运载器推力支架用复合材料杆件轴压性能研究[D]. 国防科学技术大学,2006

[8] 彭超义,杜刚,曾竟成. 大载荷下空间桁架结构主承力用碳/环氧推力管的重量优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料,2003(6):33

(编辑 李洪泉)

## 《宇航材料工艺》征稿简则

- 1 来稿不宜过长,著作稿一般不超过 5000 字,综述稿一般不超过 7000 字(包括图表在内)。
- 2 来稿应有 100 ~ 300 字中、英文文摘,3 ~ 8 个关键词,并附英文文题、作者姓名的汉语拼音、对外英文单位名称,英文图题、表题,同时标注中图法分类号及文献标识码。
- 3 来稿一律用 word 文档的打印稿,外文字母、数学符号、大小写、正斜体,上下角标要清晰可辨。
- 4 严格采用国家最新颁布的法定计量单位,数字后面单位均用符号表示(如 100 kg)。
- 5 插图最大尺寸不超过 160 mm×120 mm,墨线及金相照片均为黑白图,且均放在首次提到该图的正文后面,用\*.TIF(\*.JPG)格式插入文中,在图正下方写出图号、图题和图注。物理量坐标标目以“物理量符号/单位符号”的形式表示,例如速度的表示方法应为  $V/m \cdot s^{-1}$ ,表格中的量和单位也用同样的方法表示。
- 6 表格一律用三线表,表中数据的有效数字应保持一致,表格应放在首次提到该表的正文后面。
- 7 来稿请附本单位情报或科技部门推荐书,说明稿件内容真实,确为作者成果,无泄密和侵权问题,可以公开发表,并默认可在 CA、IAA、METADEX 等国内外文摘刊物上及文摘型数据库中无偿摘录。
- 8 请勿一稿两投,本编辑部收到稿件后即函告作者,3 个月内决定取舍再告作者,一经刊出即付一次性稿酬,并赠送当期刊物 3 本。