

Φ10 mm 碳纤维复合材料管成型工艺及性能研究

赵锐霞 尹亮 潘玲英 董波

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 对外径为 Φ10 mm 碳纤维复合材料管成型工艺及性能进行了研究。结果表明,采用热缩工艺成型的碳纤维复合材料管工艺简单、质量可靠,Φ10 mm 碳纤维复合材料管件弯曲刚度与不锈钢管相当,弯曲强度为不锈钢的 3 倍以上,质量仅为不锈钢的 50%,尺寸精度满足设计要求。

关键词 碳纤维复合材料管,成型工艺,性能

Forming Process and Properties of Φ10 mm Carbon Fiber Reinforced Composite Pipe

Zhao Ruixia Yin Liang Pan Lingying Dong Bo

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

Abstract The forming process and properties of carbon fiber reinforced composite pipe with the diameter of 10mm were investigated. The results show that the carbon fiber reinforced composite pipe fabricated by the thermal shrinkage process has the advantages of simple forming process and better quality reliability. Compared to the stainless steel pipe with the diamemer of 10 mm, the carbon fiber reinforced composite pipe with the same diameter has the equivalent flexural stiffness. While the flexural strength of composite pipe is more than three times of the stainless steel with the same diameter, and its weight is only half of the stainless steel pipe. In addition, the composite has good dimension precision which can meet the design requirements.

Key words Carbon fiber reinforced composite pipe, Forming process, Property

0 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)杆、管结构是组成复合材料构件的一种典型单元,是航空、航天器结构中常用的结构组件,大型卫星天线支架等大多采用 CFRP 圆管。

CFRP 管材成型一般采用纤维缠绕、预浸料铺层、拉挤成型、热缩成型等工艺,针对不同结构形式及尺寸的复合材料管工艺及性能已有大量研究^[1-4],但对于小尺寸复合材料管,这些成型工艺方法都有一定的局限性。通过铺缠结合热缩成型工艺新技术,解决了小尺寸 CFRP 管的表面质量及尺寸精度问题。

热缩工艺是采用热收缩带的热缩特性对复合材料施加均压。热收缩塑料是指某些聚合物分子经过电离辐射后,其分子键间形成化学键,由线性结构变成三维网状结构。将交联后的结晶高分子材料加热到其熔点以上则成为弹性体橡胶,在此状态下施加外力作用进行拉伸、扩张并迅速冷却,此拉伸状态就被保留下来。使用时只需将其加热至一定温度,依靠弹

性作用又收缩至扩张前状态^[5]。本试验中选材主要依据:(1)热收缩带耐温满足复合材料的固化工艺要求;(2)固化过程中达到收缩压紧、改变复合材料表面状态的目的。

本文研究的碳纤维复合材料管外径尺寸小(外径为 Φ10 mm),且内径尺寸精度要求较高,根据设计要求对碳纤维复合材料管进行了结构设计,并对其成型工艺及其弯曲、剪切等性能进行研究。

1 实验

1.1 原材料

MT300/603 热熔法预浸料,航天材料及工艺研究所生产。

1.2 复合材料平板性能测试

采用岛津国际贸易有限公司 AG-X300kN 型数控电子万能试验机进行,拉伸、压缩、弯曲、层剪性能分别按 GB/T3354—1999、GB/T3856—2005、GB/T3356—1999、JC/T773—96 进行测试。

1.3 复合材料管性能测试

收稿日期:2012-06-01

作者简介:赵锐霞,1971 年出生,高级工程师,主要从事树脂基复合材料方面的研究工作。E-mail:htyyzrx@sina.com

采用 ZEISS EVO60 型扫描电镜观察试样微观形貌,扫描电压为 20 kV;采用 GJB332A—2004 进行平均线胀系数测试,试样长度取 65 mm;采用岛津国际贸易有限公司 AG-X300kN 型数控电子万能试验机进行,弯曲性能参照 DqESJ23—2001 测试,剪切性能在自制圆管扭转原理工装上测试,跨距 320 mm。

2 结果与讨论

2.1 MT300/603 单向板性能

根据卫星天线系统在轨工作环境温度 -70 ~ 120℃ 的要求,选用 MT300/603 热熔法预浸料,控制预浸料树脂含量 (34±3) wt%,预浸料挥发份含量 ≤ 1%,单向板性能见表 1。

表 1 MT300/603 单向板 0° 力学性能

Tab. 1 The 0° mechanical properties of unidirectional laminate prepared by MT300/603 prepreg

温度 /℃	σ_t /GPa	E_t /GPa	σ_c /GPa	E_c /GPa	σ_f /GPa	E_f /GPa	τ /MPa
室温	1.81	137	1.54	153	1.79	119	118
-70	1.45	146	1.78	150	1.98	120	129
+120	1.51	131	1.25	139	1.58	119	92

2.2 复合材料管结构设计

碳纤维复合材料管以弯曲性能为主,满足与外径相同的不锈钢管结构刚度相当要求进行设计,两种材料参数见表 2。

表 2 两种材料参数

Tab. 2 Parameters for two different materials

材料	$\Phi_{外}/mm$	$\delta_{壁}/mm$	$D_{中}/mm$	σ/MPa	E/GPa
不锈钢	10	0.3	9.7	205	206
碳纤维复合材料	10	δ	10- δ	1750	124

天线支架主要受力状态为弯曲,受力类似简支梁,梁的弯曲刚度即梁抵抗弯曲变形的能力,工程中梁的刚度是用其位移控制的,梁的位移是伴随梁的弯曲变形所引起的横截面形心的竖直位移(挠度)与横截面绕中性轴转过的角度(转角)^[6]。鉴于不锈钢管 $\delta < 0.1R_{中}$,为薄壁圆管,按碳纤维复合材料管与不锈钢管等刚度设计要求,即碳纤维复合材料管挠度不大于不锈钢管,按挠度计算公式:

$$\omega = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (1)$$

式中, F —荷载; l —跨度; I —惯性矩。

$$I = \frac{\pi}{8} D_{中}^3 \delta$$

同等荷载、同等跨距情况下,将表 2 参数代入,得碳纤维复合材料管壁厚 $\delta_{复} \geq 0.54$ mm。

碳纤维复合材料管结构设计不但要满足性能要求,而且适应复合材料制造工艺水平,综合考虑碳纤

维复合材料管表面质量状况及铺层工艺控制要求,返算后复合材料管壁厚 $\delta_{复}$ 取 0.63 mm。

同时,对碳环氧管端部进行了局部加强设计,端部的加强可以弥补端部缺陷,降低端部碳纤维的曲屈,避免因应力集中引起端部失稳破坏,可以有效提高碳纤维复合材料薄壁管的轴向压缩强度^[7]。

2.3 复合材料管成型工艺

2.3.1 复合材料管成型工艺方案

碳纤维复合材料管采用预浸料铺层后缠绕热收缩带辅助成型,首先在钢芯模表面按铺层顺序铺放预浸料,然后在预浸料表面直接缠绕热收缩带,最后整体一次固化成型,成型后进行长度加工,得到制品,具体流程见图 1。

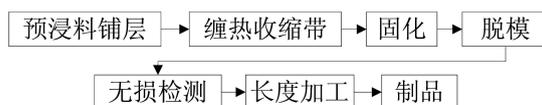


图 1 碳纤维复合材料管成型工艺流程图

Fig. 1 Forming process flow diagram of carbon fiber reinforced composite pipe

2.3.2 复合材料管铺层工艺

碳纤维复合材料管铺层采用铺缠结合的方法,0°、90°采用搓管机进行铺覆,±45°采用预浸带缠绕方法,对铺层工艺来讲,单层预浸料的铺覆质量尤为关键,预浸料铺覆质量直接影响产品最终质量及性能,铺放过程需控制预浸料层间包裹的空气,铺覆后需要进行放气处理,避免在后续固化过程中因包裹空气造成局部疏松或鼓起现象;预浸带缠绕过程中需严格控制缠绕角度,避免因纤维屈曲而影响复合材料管最终力学性能。

2.3.3 复合材料管热收缩带工艺

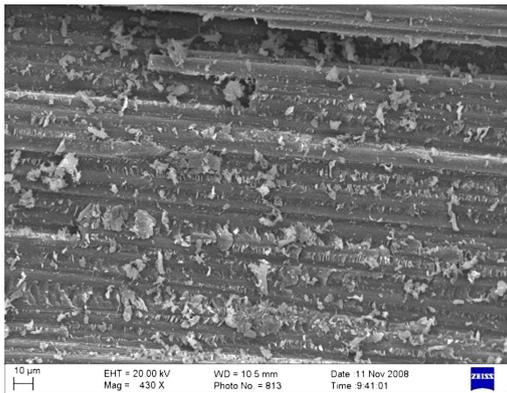
碳纤维复合材料管热收缩带采用在铺覆的预浸料表面进行缠绕的工艺方法,关键在于热收缩带缠绕预紧张力和均质性等方面控制。热收缩带缠绕质量是决定产品最终质量的前提保证,在产品固化过程中,收缩带紧张力尽量保持均衡,且满足产品固化要求,热收缩带缠绕过程中,若预紧力不够,则产品固化时,局部收缩力小,加压不足,可能会造成产品局部出现疏松或鼓起现象。

2.4 复合材料管质量分析

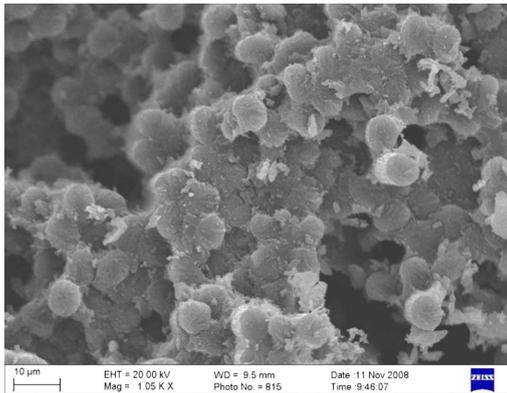
产品成型后发现,碳纤维复合材料管局部加强区与中间直线段部分连接处有部分管件出现了局部鼓起现象。分析原因,主要是由于纤维层厚度不一致,固化过程中在局部加强区轴向收缩量过大使热收缩带在收缩时拉动复合材料管的表面纤维,使纤维错位,改变了纤维的铺层方向,造成不同厚度铺层过渡处出现局部鼓起现象,也有分析认为^[8],加热方式不当,也会导致受热不均匀,轴向、环向收缩量、收缩率不一致导致纤维错位。

在上述原因分析的基础上,进行了热收缩带缠绕张力调整、不同厚度铺层过渡处工艺处理及固化工艺优化,优化后成型的复合材料管质量良好,尺寸满足设计使用要求。

为验证复合材料管纤维与基体界面粘接质量情况,对所用复合材料层间进行了电镜扫描,见图2。



(1) 表面



(2) 断面

图2 层间扫描电镜照片

Fig.2 SEM photograph of composite interlaminar

从层间扫描电镜照片可以看出,热收缩带成型的复合材料管纤维、树脂界面粘接良好。

同时对成型的碳纤维复合材料管进行了无损检测,结果显示,管件无损检测未发现缺陷,说明热收缩工艺成型的碳纤维复合材料管质量良好,复合材料管成型过程中所采用的热收缩带收缩力和固化条件合适。

2.5 复合材料管性能

复合材料管纤维体积分数测试结果为60.1%, RT-120℃条件下轴向线胀系数为 $0.25 \times 10^{-6}/K$ 。

试验结果表明,复合材料管纤维体积分数较为理想,满足 $(60 \pm 3)\%$ 的控制指标,同时也充分展现了碳纤维复合材料低膨胀特点。

不同铺层设计碳纤维复合材料管的弯曲性能试验结果见表3。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012年 第4期

表3 不同铺层碳纤维复合材料管弯曲性能

Tab.3 Flexural properties of carbon fiber reinforced composite pipes with different ply stackings

铺层	弯曲强度/MPa	弯曲刚度/ $N \cdot m^2$	弯曲模量/GPa
铺层1	1100	24.4	102
铺层2	805	18.8	78.9

铺层板的弯曲性能较为复杂,主要是由于铺层沿板厚的位置不同引起的,单层沿板厚的位置在弯曲刚度中起很大作用,铺层顺序对层压板的弯曲性能有很大影响^[9],铺层顺序是铺层方向沿层压板厚度分布的描述,层压复合材料结构的性能,诸如刚度、尺寸稳定性和强度等都与层压板的铺层顺序有关,每一种性能与铺层顺序的关系并不相同,在每一种给定的设计应用中,都包含了对铺层顺序的折中考虑。试验中考虑与不锈钢管等刚度设计,铺层1复合材料管性能明显优于铺层2,主要取决于 0° 铺层是优先铺设在靠近复合材料的表面。

从试验结果可以看出,不同铺层对碳纤维复合材料管弯曲性能影响明显,主要表现在外层 0° 层的设计,即在弯曲试验中外层 0° 层对弯曲的贡献很大,优选铺层1进行了碳纤维复合材料管的研制。 $\Phi 10$ mm碳纤维复合材料管与 $\Phi 10$ mm不锈钢管(壁厚0.3 mm)弯曲、剪切性能平行对比试验结果见表4。

表4 碳纤维复合材料管/不锈钢管弯曲、剪切性能

Tab.4 Flexural and shear properties of carbon fiber reinforced composite and stainless steel pipes

管材	弯曲强度 /MPa	弯曲刚度 / $N \cdot m^2$	弯曲模量 /GPa	剪切强度 /MPa
复合材料管	1100	24.4	102	184
不锈钢管	302	22.6	165	163

在进行弯曲性能试验时发现,不锈钢管表现为管件受弯后材料屈服现象,而碳纤维复合材料管则表现为纤维屈服处断裂及层间分层破坏。可以看出, $\Phi 10$ mm碳纤维复合材料管弯曲刚度与不锈钢相当,弯曲强度为不锈钢的3倍以上,质量仅为不锈钢的50%,采用碳纤维复合材料管大幅减轻了质量,提高了性能,达到了轻质高强的目的。

利用热收缩工艺已成型不同批次、不同规格碳纤维复合材料管件,并通过了振动、热真空等相关试验,满足设计使用要求。

3 结论

采用铺层后缠绕热收缩带辅助成型的工艺方法成型 $\Phi 10$ mm碳纤维复合材料管,该方法工艺简单、可操作性强,能有效保证复合材料管的成型质量及尺寸精度控制要求,其弯曲刚度与不锈钢管相当,弯曲强度为不锈钢管的3倍以上,结构质量仅为不锈钢的50%。

(下转第74页)