

全缠绕碳纤维树脂基复合材料方杆的工艺研究

李世成^{1,2} 郭金海^{1,2} 叶周军^{1,2} 温凯^{1,2} 师璐^{1,2}

(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 传统的碳纤维复合材料方杆成型是采用预浸料铺层加缠绕方式,为改善其工艺性,采用小角度缠绕实现全缠绕的方式代替传统方法成型。通过全缠绕制备方杆的工艺方法和辅助工装设计,测试了全缠绕法和传统方法制备的方杆的力学性能。工艺研究表明:全缠绕的方杆力学性能和离散系数均优于传统方法的方杆,特别是采用4°缠绕的方杆拉伸强度和模量分别为899.74 MPa和235.22 GPa,弯曲强度和模量分别为823.57 MPa和220.22 GPa,离散系数为2.8%,是代替0°铺层的最佳选择。

关键词 全缠绕,小角度缠绕,方杆,复合材料,工艺,力学性能

中图分类号:TB33

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.04.015

Processing of Fully-Wrapped Carbon Fiber Resin-Based Composite Square Tubes

LI Shicheng^{1,2} GUO Jinhai^{1,2} YE Zhoujun^{1,2} WEN Kai^{1,2} SHI Lu^{1,2}

(1 Shanghai Composites Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 201112)

(2 Shanghai Engineering Technology & Research Center of Aerospace Resin Based Composites, Shanghai 201112)

Abstract Filament winding is traditionally applied together with prepreg layer to prepared the square tube of the carbon fiber reinforced composite. To improve the manufacturability, fully-wrapped process based on the small angle filament winding was studied in this paper. This work introduced the winding process and the design of the auxiliary frock. The mechanical properties of the prepared tubes by two above methods were measured. The results showed that both the mechanical properties and the C_v value of fully-wrapped composite are better than the traditional method. Especially, for the fully-wrapped composites with 4°, the tensile strength and modulus are 899.74 MPa and 235.22 GPa, respectively; the flexural strength and modulus are 823.57 MPa and 220.22 GPa, respectively; and the C_v value is 2.8%. The 4° filament winding is the best choice to replace 0° overlay.

Key words Fully-wrapped, Small angle filament winding, Square tube, Composite materials, Process, Mechanical properties

0 引言

纤维缠绕成型与其他成型方法比较,具有下述特点:纤维伸直和按规定方向排列的整齐和精确度高于其他任何工艺方法,制品能充分发挥纤维的强度,因此比强度和比刚度均较高。缠绕工艺的机械化程度比较高,可以成型各种尺寸的制品,而且制品质量较好,生产效率也较高。目前缠绕成型工艺主要用于缠绕两端带封头的圆柱形、球形及某些外凸型回转体容

器等^[1]。

基于碳纤维树脂基复合材料方杆的可设计性和轻量化,且能承受高载荷和强振动,已经发展成为卫星、运载等高端科技领域的主承力结构件之一。由于方杆结构不是严格的回转体结构,小角度缠绕过程中,更容易出现纱线滑移、线型不均等问题。侯传礼等论证了小角度缠绕矩形复合材料管方法可行,设计出挂线工装一定程度上改善了纤维缠绕线型滑线问

收稿日期:2016-03-04

基金项目:国家科技部863项目(2015AA03A201);上海市经信委产学研项目(沪CXY-2013-8)

作者简介:李世成,1987年出生,硕士,工程师,主要从事复合材料成型与加工技术工作。E-mail:lishicheng1987@126.com

题^[2]。穆建桥等采用相对运动原理,假设芯模不动,研究绕丝嘴的运动,分析绕丝嘴与芯模之间的几何关系,得出纱线不打滑的条件,实现丝嘴运动的测地线缠绕程序设计^[3]。本文通过改进工装结构,完善小角度缠绕的工艺参数,实现方杆的全缠绕成型。并对比传统方法,验证全缠绕成型方杆的质量稳定性和性能优越性。

1 实验

1.1 材料

增强材料:选取高模量碳纤维,其主要性能参数包括:拉伸强度 $\geq 3\ 500\ \text{MPa}$,拉伸模量 $\geq 500\ \text{GPa}$,延伸率 $\approx 0.7\%$ 。

基体材料:选取改性的 AG-80 环氧树脂体系,AG-80 树脂由上海华谊树脂有限公司生产。

1.2 制备工艺

分别采用全缠绕法和传统法制备复合材料方杆,缠绕设备为 FWA 1/4/1 数控缠绕机(BSD),制备工艺流程见图 1。与传统法相比,全缠绕法无需排布(即制备单向预浸料),无需手工铺层,工序过程简单,自动化程度高。

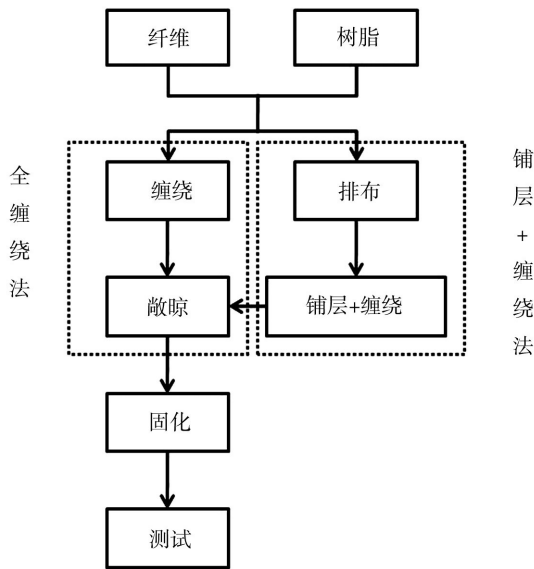


图 1 全缠绕法和传统法的工艺流程

Fig.1 Process of fully-wrapped method and traditional method

1.2.1 全缠绕法

采用全缠绕法制备三组试验件,缠绕顺序如表 1 所示。 90° 采用环向缠绕, $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$ 、 $\pm 4^\circ$ 和 $\pm 6^\circ$ 均采用螺旋缠绕,其中 $\pm 2^\circ$ 、 $\pm 4^\circ$ 和 $\pm 6^\circ$ 缠绕过程中须借助辅助工装,保证纤维缠绕线型稳定。三组试验件分别缠绕不同的角度($\pm 2^\circ$ 、 $\pm 4^\circ$ 、 $\pm 6^\circ$),用于对比不同缠绕角试验件的力学性能变化。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 4 期

表 1 全缠绕法制备不同缠绕角的试验件

Tab.1 Fully-wrapped method prepared test pieces with different winding angles

试样	缠绕顺序
1#	$\pm 45^\circ/\pm 2^\circ/90^\circ/(\pm 2^\circ)_2/90^\circ/\pm 2^\circ/\pm 45^\circ$
2#	$\pm 45^\circ/\pm 4^\circ/90^\circ/(\pm 4^\circ)_2/90^\circ/\pm 4^\circ/\pm 45^\circ$
3#	$\pm 45^\circ/\pm 6^\circ/90^\circ/(\pm 6^\circ)_2/90^\circ/\pm 6^\circ/\pm 45^\circ$

1.2.2 传统法

采用传统法制备四组试验件,缠绕顺序如表 2 所示。 90° 和 $\pm 45^\circ$ 的缠绕方式同全缠绕法, 0° 、 $\pm 2^\circ$ 、 $\pm 4^\circ$ 和 $\pm 6^\circ$ 采用预浸料手工铺层。该方法为传统的方杆成型方法,即预浸料手工铺层与纤维缠绕相结合。通过该组试验件可以对比全缠绕和传统成型方法的优缺点。

表 2 传统法制备不同铺层/缠绕角的试验件

Tab.2 Traditional method prepared test pieces of different overlay/winding angles

试样	缠绕顺序
4#	$\pm 45^\circ/(0^\circ)_2/90^\circ/(0^\circ)_4/90^\circ/(0^\circ)_2/\pm 45^\circ$
5#	$\pm 45^\circ/\pm 2^\circ/90^\circ/(\pm 2^\circ)_2/90^\circ/\pm 2^\circ/\pm 45^\circ$
6#	$\pm 45^\circ/\pm 4^\circ/90^\circ/(\pm 4^\circ)_2/90^\circ/\pm 4^\circ/\pm 45^\circ$
7#	$\pm 45^\circ/\pm 6^\circ/90^\circ/(\pm 6^\circ)_2/90^\circ/\pm 6^\circ/\pm 45^\circ$

1.2.3 固化参数

采用分段加压的热压罐固化制度对方杆试验件进行固化,热压罐口径为 $\Phi 1.5\ \text{m}$ (德国肖茨)。方杆成型模采用特定的八瓣模结构,该结构可以精确控制方杆截面尺寸。固化制度采取分段加压的方式,是为了防止方杆面内压力梯度不明显无法排出气泡而形成内部缺陷。固化制度见图 2。

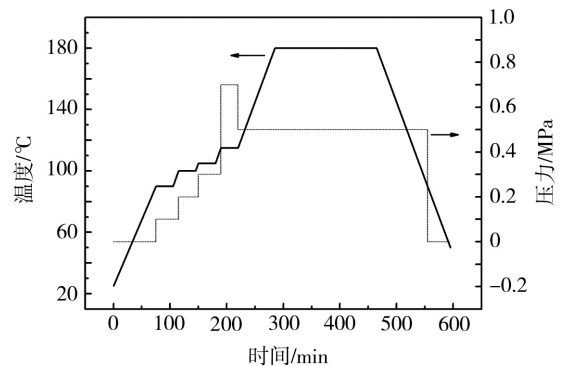


图 2 固化制度

Fig.2 Curing system

1.3 工装设计

1.3.1 挂线工装

挂线工装用于小角度缠绕($\pm 2^\circ$ 、 $\pm 4^\circ$ 和 $\pm 6^\circ$),该工装采用底盘和圆柱销的结构,该结构无棱角,不损伤纤维,且易加工和易更换。圆柱销中心间距按公式(1)计算。

$$d = \frac{T}{\cos\alpha} \quad (1)$$

式中, d 为圆柱销中心间距, T 为纤维纱片宽, α 为纤维缠绕角。

1.3.2 接长杆

接长杆采用圆锥加圆柱的结构, 圆锥结构类似于压力容器的封头结构, 保证纤维在端部稳定缠绕。接长杆与挂线工装配合使用, 圆锥大端直径与挂线工装底盘边长一致, 半圆锥角约为 45° , 圆柱段直径保证满足线型设计要求。

1.4 线型设计

90° 和 $\pm 45^\circ$ 的缠绕线型可直接采用“相当圆”理论计算。对于小角度缠绕, 线型设计起到关键作用。方杆的缠绕与圆杆缠绕不同, 丝嘴与落纱点的几何关系复杂。方杆缠绕线型设计先采用“相当圆”理论, 得出最初的缠绕程序。而方杆实际的缠绕角由芯模截面某一点至轴心的距离决定, 如公式(2)所示。

$$\sin \alpha_i = \frac{D}{2R_i} \quad (2)$$

式中, D 为“相当圆”直径, R_i 为芯模截面某点到轴心的距离, α_i 为对应点处纤维缠绕角。

将纱线起点固定在芯模的角点上, 起始纱线与芯模表面在同一平面内, 当落纱点过渡到另一个平面时, 中心转角为 90° , 该过程定义为一个周期。该过程中落纱点处的纤维缠绕角先增大后减小, 即缠绕角偏离测地线。当纤维与芯模的摩擦力小于纤维向测地线位置回归的作用力时, 将出现纤维滑移现象, 如公式(3)所示^[4]。

$$T < 2F \sin\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

式中, T 为阻止纤维滑移的摩擦力, F 为纤维的张紧力, $\Delta\alpha$ 为纤维偏离测地线的缠绕角。

在一个周期内中心转角与丝嘴前进距离近似呈线性关系, 在中心转角差值 $\Delta\beta$ 一定时, 丝嘴前进距离 ΔZ 是近似一定的^[3]。根据缠绕机的精度范围, 选

取 $\Delta\beta = 5^\circ$, 在一定程度上补偿 ΔZ 的偏差, 减少纤维滑移。

由于小角度缠绕所需超越长度较长, 如公式(4)所示, 在其他参数一定的情况下, 缠绕角 α_i 越小, 超越长度 $L_{\text{超}}$ 越长^[4]。

$$L_{\text{超}} = \cot \alpha_i \sqrt{\Delta s_1 (\Delta s_1 + 2R)} + \Delta s_2 + \Delta s_3 \quad (4)$$

式中, Δs_1 为丝嘴到芯模表面距离, Δs_2 为丝嘴所需距离, Δs_3 为丝杆摆臂所需距离, α_i 为缠绕角。从公式(4)中可以看出, Δs_2 和 Δs_3 为设备所需的距离, 若要缩短超越长度, 需减小 Δs_1 的值。采用缠绕机 z 轴伸缩来减小 Δs_1 , 设计接长杆时需考虑 z 轴伸缩量, 保证 Δs_1 尽可能小。在实际缠绕过程中, 设定 z 轴伸缩量, 使 $\Delta s_1 = 0$, 即超越长度 $L_{\text{超}} = \Delta s_2 + \Delta s_3 \approx 60 \text{ mm}$ 。通过以上的线型设计, 可以得出小角度缠绕所需稳定线型。

1.5 分析测试

拉伸性能测试标准 GB/T1447—2005, 试样型式为 II 型试样, 厚度为 1 mm。弯曲性能测试标准 GB/T1449—2005, 规格为 $80 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 测试仪器为电子万能试验机 Instron 5982。

2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

试验件拉伸性能和弯曲性能测试结果如表 3 所示。不同成型方法的试验件的拉伸强度和模量对比见图 3。

表 3 试验件的实测力学性能

Tab.3 Mechanical properties of test pieces

试样	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /GPa
1#	897.25	234.95	824.54	219.53
2#	899.74	235.22	823.57	220.22
3#	833.42	220.29	772.62	206.46
4#	900.31	235.81	801.86	221.95
5#	884.95	233.77	781.14	218.37
6#	843.23	220.17	742.85	211.59
7#	781.56	212.21	680.64	196.71

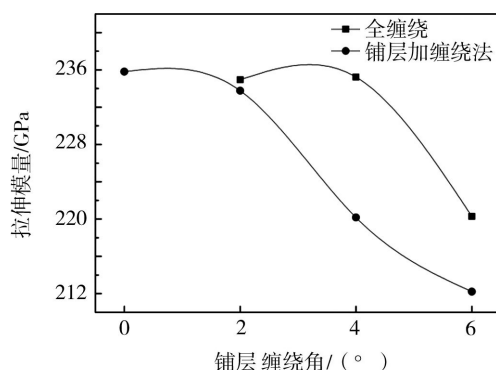
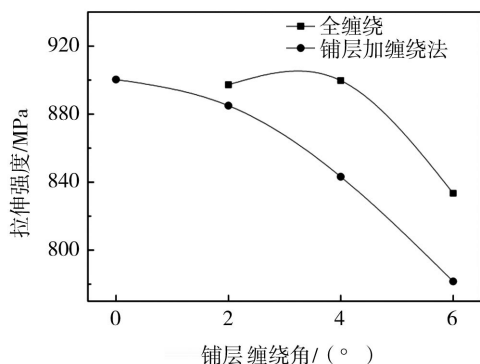


图 3 不同成型方法的试验件的拉伸强度和模量对比

Fig.3 Comparison of tensile strength and tensile modulus of test piece prepared by different molding methods

从图3中可以看出,在相同铺层缠绕角度的试验件中,采用全缠绕法制备的试验件的拉伸性能普遍优于采用传统法制备的试验件。表3中所列的2#试样采用全缠绕法,缠绕角为 $\pm 45^\circ/\pm 4^\circ/90^\circ/(\pm 4^\circ)_2/90^\circ/\pm 4^\circ/\pm 45^\circ$,4#试样采用传统法,缠绕角为 $\pm 45^\circ/(0^\circ)_2/90^\circ/(0^\circ)_4/90^\circ/(0^\circ)_2/\pm 45^\circ$,从数据可以看出,2#试样和4#试样的拉伸性能基本相当,说明采用 $\pm 4^\circ$ 缠绕可以达到采用 0° 铺层一样的效果。1#试样和2#试样均采用全缠绕法,2#试样拉伸性能优于1#试样。试验结果表明,全缠绕法比传统法制备的方杆的纤维力学性能利用率高,采用 $\pm 4^\circ$ 缠绕代替 0° 铺层是最好的一种方法。

利用Tsai-Hill准则,提供 x 向载荷,估算出层合板理论强度和模量见表4。

表4 试验件的理论力学性能

Tab.4 Theoretical mechanical properties of test pieces

试样	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa
1#	901	236.27
2#	859	227.67
3#	798	214.71

对比表3和表4,全缠绕法制备的方杆实测力学性能与理论力学性能相符,表明全缠绕法具有工艺可行性。

2.2 质量稳定性分析

不同方法制备的试验件力学性能的离散系数进行对比分析,通过计算试验件的弯曲强度和模量的离散系数 C_v ,计算方法如公式(5)所示,进而对比各试验件力学性能的离散系数差异。虽然弯曲试验应力状态较为复杂,但断裂总是发生在试样的中部(即最大正应力处),并且数据分散性小,所以可以用弯曲性能的离散性来判断试验件的质量稳定性^[5]。

$$C_v = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中, X_i 为每个试样的测量值, \bar{X} 为平均值, n 为试样的个数。

从图4中可以看出,采用全缠绕法制备的方杆试验件比传统法制备的弯曲强度的离散系数小。在传

统法制备的试验件中, 0° 铺层的试样比其他角度铺层的试样离散系数小,说明 0° 铺层的工艺性更优。全缠绕法制备的试验件中, $\pm 4^\circ$ 缠绕的试样的离散系数为2.8%,比 $\pm 2^\circ$ 和 $\pm 6^\circ$ 缠绕的试样都小,说明 $\pm 4^\circ$ 缠绕的工艺性最好。总体来看,全缠绕法制备的方杆的质量稳定性较好,且 $\pm 4^\circ$ 缠绕的方杆质量稳定性比其他缠绕角度的方杆更好。

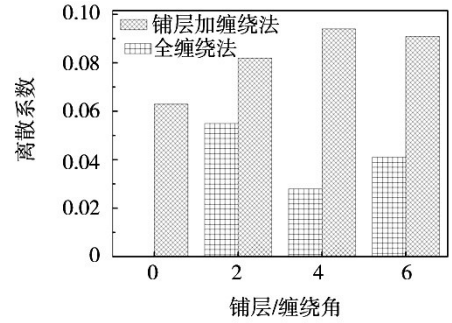


图4 不同方法制备的试验件的弯曲强度离散系数对比

Fig.4 Comparison of bending strength C_v of test piece prepared by different molding methods

3 结论

全缠绕法制备的方杆试验件的力学性能和质量稳定性均优于传统法,在全缠绕法制备的方杆中,采用 4° 缠绕的方杆工艺性和力学性能更优。总之,在工艺性和力学性能方面,全缠绕法比传统法更优越,采用 4° 缠绕的方杆拉伸强度和模量分别为899.74 MPa和235.22 GPa、弯曲强度和模量分别为823.57 MPa和220.22 GPa、离散系数为2.8%,是代替 0° 铺层的最佳选择。

参考文献

- [1] 肖翠蓉,唐羽章. 复合材料工艺学[M]. 长沙:国防科技大学,1991:10.
- [2] 侯传礼,王永伟,娄小杰,等. 小角度缠绕矩形复合材料管的研究[J]. 纤维复合材料,2011(2):14-16.
- [3] 穆建桥,祖磊,王继辉,等. 纤维缠绕复合材料方管设计研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(7):22-26.
- [4] 冷兴武. 纤维缠绕原理[M]. 济南:山东科学技术出版社,1990:2.
- [5] 阎龙,史耀耀,莫蓉. 复合材料缠绕制品性能测试[J]. 航天制造技术,2012(4):69-84.