

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.04.013

复合材料柔性导向三维织造防变形方法^{*}

李平礼,单忠德,战丽,刘丰,吴晓川

(机械科学研究总院先进成形技术与装备国家重点实验室,北京 100083)

摘要:针对三维结构复合材料预制体成型工艺,提出一种复合材料柔性导向三维分段织造和防变形方法,通过有限元分析得到一定预紧力条件下导向棒变形情况,确定每段织造区域的织造纤维层数,对导向棒做防变形处理,从最下段逐段织造逐段压实预制体。通过预制体织造对比试验发现,分段式织造和防变形处理能够有效地防止预制体织造过程中导向棒阵列的变形、控制预制体外形尺寸;分段压实预制体压实力减小,并能获得层密度较高的预制体。

关键词: 三维织造; 预制体; 分段压实; 防变形

中图分类号: 中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)04-0064-05

Deformation Preventing Method of Flexible Oriented 3D Composite Woven Process

Li Pingli, Shan Zhongde, Zhan Li, Liu Feng, Wu Xiaochuan

(State Key Lab of Advanced Forming Technology & Equipment of China, China Academy of Machinery Science & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: A flexible oriented 3D composites subsection weaving and deformation preventing method were put forward for 3D composite preform forming process. It uses finite element analysis method to analysis oriented bar deformation in condition of controlled pretightening load, gets suitable fiber layers in each section and prevents oriented bar deformation, weaves and presses section by section from bottom section. Preform weaving comparative experiment is designed and results show that subsection weaving and deformation preventing effectively prevent oriented bar array deformation in the process of preform forming and control preform boundary dimension, and that subsection pressing reduces preform pressing force and obtains higher layer density preform.

Keywords: 3D weaving; preform; subsection pressing; deformation preventing

三维结构复合材料是以具有三维结构的纤维预制体为增强骨架的高性能复合材料,纤维束在材料内部相互交错,构成空间互锁网状结构,形成一个整体结构,具有优良的抗冲击韧性、抗疲劳性和耐烧蚀性,已成为航空航天领域的重要结构材料^[1-3]。

三维复合材料的核心制造工艺包括纤维预制体制作和致密化成型两方面,纤维预制体作为增强体的骨架,很大程度上决定了三维复合材料的性能^[4];纤维预制体能够直接成型许多具有复杂形状的结构件,如树脂基、碳基、陶瓷基、金属基复合材料,为设计和制造净尺寸复合材料部件提供了可能^[5-7]。

机械科学研究总院单忠德等^[8-15]提出柔性导向三维织造技术,沿织物厚度方向上引入导向套或纤维束,实现复合材料复杂件的降维织造,有效地解决了复合材料复杂变截面零件的三维织造和近净成型,研究了柔性导向三维织造成型原理,以及结构参数对力学性能的影响规律。

目前,对三维结构复合材料的研究主要集中于力学性能方面,而对预制体成型过程中变形的控制

研究较少,预制体的变形直接影响复合材料的近净成型,预制体织造过程中的变形可导致纤维束损伤,最终影响三维结构复合材料的力学性能。笔者以柔性导向三维结构复合材料为研究对象,提出一种分段织造和防变形方法,通过试验研究分段压实和防变形工艺。

1 柔性导向三维分段织造试验研究

以外形尺寸 26 mm×18 mm×110 mm 的长条状预制体为例,织造纤维选用 2 束 3K 的 T300 碳纤维束,导向棒为直径 1.5 mm 不锈钢棒,中心距 2.7 mm,导向阵列 7×10,采用分段式织造和防变形方法,防变形结构采用与导向阵列间隙相同的不锈钢棒材。

分段织造过程如下:(1) 织造针携带纤维束在

^{*} 国家自然科学基金项目面上项目 (51675213),国家重点研发计划 (2016YFB1100900)

联系人: 单忠德,博士,研究员,博士研究生导师,主要研究方向为先进成形制造技术与装备、绿色成形制造工艺及装备

收稿日期: 2017-01-20

织造区域导向棒阵列中沿 $0^\circ/90^\circ$ 方向交替织造;
(2) 织造一定纤维层数,插入防变形结构,实现第一次分段;(3) 用导向结构将织造纤维层沿导向棒下移一定距离;(4) 在防变形结构上方继续织造一定纤维层数,插入防变形结构进行第二次分段;(5) 将第一段、第二段已织造纤维层依次下移一定距离;(6) 在第二段防变形结构上方继续织造一定距离插入防变形结构……;依次织造至预定高度。预制体压实时,作用力施加在防变形结构上,从预制体下端开始逐段压实,逐次撤掉防变形结构。压实完成后用纤维束替代导向棒,锁住压实纤维层完成预制体制作。

在一定织造预紧力条件下,随着织造区域织造纤维层高度增加,导向棒变形增加。如图 1 所示,设定导向棒变形量为 L ,阵列一侧纤维束的初始长度为 $2(0.5a-L)+\pi R$,防变形结构插入后,导向棒变形回复纤维束被拉长,纤维束拉长后的长度为 $a+\pi R$,不能超过其断裂伸长率,则有

$$[2(0.5a-L)+\pi R]\times(1+\delta)>a+\pi R \quad (1)$$

$$\text{即 } L < (a\delta + \pi R\delta)/2(1+\delta) \quad (2)$$

式中: R 为导向棒半径; a 为导向棒阵列最短边; δ 为纤维伸长率。

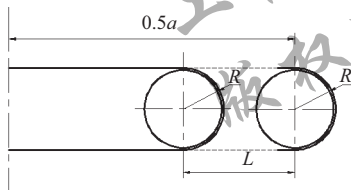


图 1 纤维伸长量计算示意图

试验采用 3K 的 T300 纤维束,其断裂伸长率为 $\delta=1.5\%$,导向棒阵列最短边 a 取 17.7 mm, R 为 0.75 mm,求得允许导向棒最大变形量为 $L\approx 0.148$ mm。导向结构用牌号为 304 不锈钢棒材,其密度为 7.93 g/cm^3 ,直径 1.2 mm,弹性模量为 193 GPa,泊松比为 0.28,在一定预紧力 f 条件下,通过有限元模拟分析得到导向棒随预紧力和织造层高度变形情况,如图 2 所示。

在导向结构变形量 L 低于 0.148 mm,即图中虚线以下,预紧力和织造区域织造纤维层数理论上均可选择;变形量高于 0.148 mm,在导向棒阵列中插入防变形结构时导向棒变形回复使纤维束受拉产生的伸长量超过断裂伸长率,纤维束中单丝会产生拉断,影响最终复合材料制件力学性能。

由图 2 中模拟结果可知,织造区域预留高度一

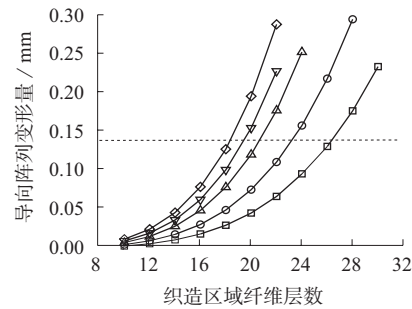


图 2 导向棒变形量与预紧力、织造纤维层数之间关系

定时,预紧力越大,织造纤维层数越多,导向棒变形越大。分段层数越少,预制体外形控制越好,但防变形结构相应增加,分层压实次数也增加,导致压实效率降低;分段层数过多时,导向棒与防变形结构相互作用力增加,同时,压实的纤维束也对导向结构产生摩擦力大,压实力增加。结合数值仿真结果,并考虑织造压实效率,实验工艺参数设定为:织造区域高度为 25 mm, $f=0.5\text{ N}$,分段时织造层数为 20 层。

2 三维分段织造试验测试结果

2.1 织造区域导向棒变形测试

织造过程中,为方便织造持续进行,会对已织造完成的纤维层进行预压实,在预紧力和预压实力的共同作用下,导向棒产生变形。研究用防变形结构对导向棒阵列变形的控制,织造一定层数时测量织造区域导向棒阵列变形量,测量区域如图 3 所示,测量结果如表 1 所示。

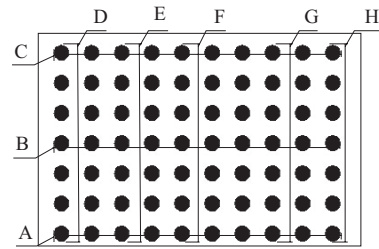


图 3 织造区域导向棒变形测量位置

表 1 导向棒阵列变形量测量值

测量位置	导向棒阵列长度值/mm			导向棒阵列宽度值/mm		
	A	B	C	D	F	H
40 层	26.2	26	26.2	18.1	17.7	18.1
60 层	26.1	25.8	26.3	18	17.6	17.8
80 层	26	25.7	25.8	17.8	17.5	17.9
100 层	26.1	25.6	25.6	17.6	17.7	17.7
120 层	25.8	25.5	25.6	17.6	17.6	17.6
140 层	25.9	25.5	25.6	17.7	17.5	17.7
160 层	26	25.6	25.7	17.7	17.7	17.7
180 层	25.9	25.7	25.8	17.6	17.5	17.6
200 层	25.8	25.7	25.7	17.7	17.7	17.8
220 层	26	25.6	25.8	17.7	17.6	17.7

2.2 导向棒上升力和压实力变化测试

预制体要达到较高的纤维体积分数,需要对预制体进行压实,致密到预期层密度,因此需要研究分段织造对导向棒上升力和压实力的影响。预制体织造完成,从下端开始逐段压实纤维层,试验采用量程为 5 kN 的 MIK-LCLY 型压力传感器,精度为 0.05%,防变形结构下压(导向棒相对上升)距离由伺服电机驱动电动缸精确控制,压至每段防变形结构间距 1 cm,此时层密度为 20 层/cm。采用 MIK-R5000D 无纸记录仪记录压实力数值,测量结果如表 2 所示。

表 2 压实力和导向棒上升力变化值

层高度	摩擦力 / N	压实力 / N	层高度	摩擦力 / N	压实力 / N
40 层			140 层	93	163
60 层	25		160 层	126	205
80 层	40		180 层	150	208
100 层	90		200 层	153	200
120 层	83	143	220 层	151	199

2.3 预制体外形尺寸变化测试

导向棒阵列的变形,直接影响最终预置体的成型尺寸。预制体织造完成后,用多束纤维替代导向棒,完成预制体制作。使用 3D 扫描仪,生成预制体轮廓点云,在逆向工程软件 Geomagic Studio 中生成预制体数字模型,导入预制体理论 CAD 模型,在 Geomagic Control 软件中与理论 CAD 模型轮廓尺寸进行对比;沿高度方向上对截面进行对比分析,如图 4 和表 3 所示。

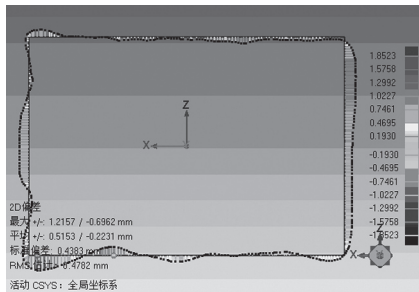


图 4 预制体截面偏差

表 3 预制体高度方向上各截面尺寸与理论值偏差

位置高度 / mm	2D 最大偏差	2D 平均偏差	标准偏差	RMS 估计
10	+1.483 / -0.342	+0.59 / -0.063	0.421	0.465
30	+0.78 / -0.499	+0.24 / -0.17	0.26	0.26
50	+0.764 / -0.336	+0.219 / -0.09	0.211	0.248
70	+1.01 / -0.439	+0.235 / -0.185	0.275	0.292
90	+1.023 / -0.502	+0.316 / -0.295	0.38	0.381

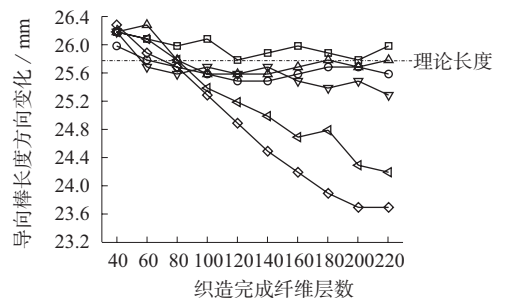
3 三维分段 & 不分段织造试验对比分析

试验设置了不分段织造对比试验组,不分段织造是通过压住织造纤维层通过阵列模板上升导向棒

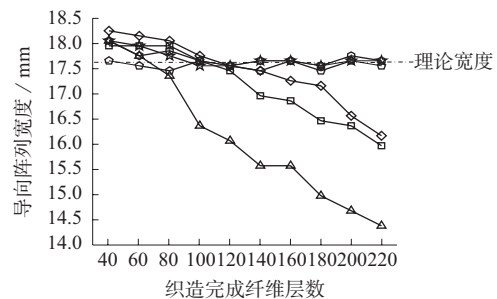
阵列,压实是从上面整体进行压实预制体。织造用相同织造参数在相同装置上进行,对比分析分段织造和防变形方法对于导向棒阵列防变形、预制体防变形、降低压实力的效果。

3.1 织造区域导向棒变形对比分析

分段式织造法和不分段织造法导向阵列变化如图 5 所示, a', b', c', d', f, h' 为不分段织造方式, A', B', C', D', F', H' 为分段式织造方式织造区域导向棒阵列(图 3 所示)A, B, C, D, F, H 处的数值变化曲线。不分段方法织造的导向棒阵列,随着织造层数的增加,导向棒变形加剧,导向棒阵列边部中间(B, F 处)变形比两侧(A, C, D, H)严重,整体呈向阵列内部收紧趋势;织造过程中,发现织造高度达到 200 层纤维时,导向阵列边部最外侧一行(一列)已经贴近里面一行(一列),导致织造针很难通过导向阵列间隙,影响预制体后续织造。而分段防变形处理的导向棒阵列变形较小,织造后期基本保持稳定,导向阵列清晰,织造针始终能顺利通过。不分段织造法阵列长度方向最大变形值为 -2.6 mm,变形 9.9%;宽度方向最大变形值为 -3.7 mm,变形 20.4%。分段织造法阵列长度方向最大变形值为 -0.5 mm,变形 1.9%;宽度方向最大变形值 -0.5 mm,变形 2.8%。分段织造能够有效地减少导



□—A'; ○—B'; △—C'; ▽—a'; ◇—b'; ◁—c'



☆—D'; ○—F'; ○—H'; □—d'; △—f; ◇—h'

a—导向棒阵列长度方向变化; b—导向棒阵列宽度方向变化

图 5 分段式织造法和不分段织造法导向阵列变化

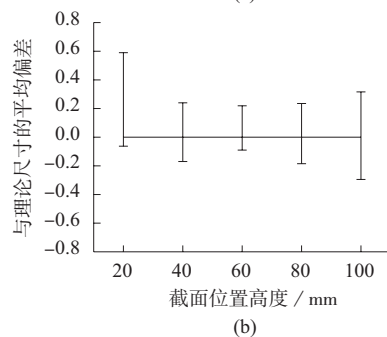
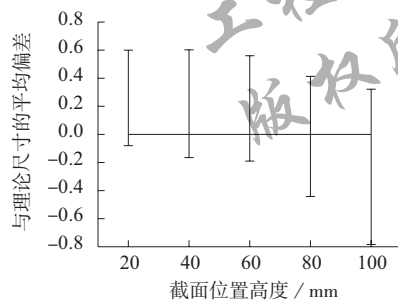
向阵列变形。

3.2 预制体外形尺寸偏差对比分析

导向棒阵列变形,直接导致织造完成的预制体外形尺寸变化,影响其复合材料制件的近净成型。对上述两种织造方法织造完成的预制体,分别使用 Geomagic Control 分析软件对外形进行测量和分析,分别与理论截面尺寸 $26\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 进行对比,结果如表 4 所示。不分段织造方法织造的预制体与理论尺寸的 3D 偏差较大,分段式织造方法织造的预制体尺寸 3D 偏差比直接织造方法成型的预制体偏差小,更接近预制体的理论尺寸。预制体各截面的 2D 偏差如图 6 所示,随着织造层高度的增加,不分段织造方法成型的预制体截面与理论值的平均偏差变化较大,负偏差加剧,截面向预制体内部收缩;而分段式织造成型预制体,截面尺寸比较稳定,且处于较小变化范围之内。三维分段织造方法比不分段织造方法更有利于实现复合材料的近净成型。

表 4 导向棒阵列变形量测量值

织造方法	3D 最大偏差 / mm	3D 平均偏差 / mm	标准 偏差	RMS 估计
不分段织造	+2.183 / -3.377	+0.605 / -0.498	0.679	0.712
分段织造	+1.852 / -1.427	+0.369 / -0.212	0.372	0.419



a—不分段制造法; b—分段制造法

图 6 预制体不同截面位置偏差对比

3.3 织造过程中导向棒上升力和压实力对比

导向棒阵列变形会导致织造截面发生变化,根据织造情况,截面变化呈缩小趋势。如果变形得不到有效控制,截面随高度变形加剧,再进行压实时,

纤维层从截面小的区域移动到截面较大的区域,导向棒受纤维拉力变形加剧;同时,纤维束受力拉长,拉长较大时会产生纤维单丝断裂,对导向棒的摩擦力也增加,上升导向棒需要较大的力,导向棒的摩擦力大也会对纤维造成损伤,直接影响成型复合材料制件的力学性能。

设置预制体层密度为 20 层 / cm,分别采用三维分段织造和不分段织造方法,测量达到设定层密度时的压实力 (分段织造时为 P_1 ,不分段织造时为 P_2),及上升导向棒 (分段织造法中导向棒相对已织造纤维层上升) 作用力 (分段织造时为 F_1 ,不分段织造时为 F_2),结果见图 7。如图 7 所示,分段织造时,每段压实纤维层数 20 层,压实力 P_1 处于 200 N 左右的较小范围,由于每段纤维层数较少,上升导向棒作用力主要来自防变形结构与导向棒挤压作用产生的摩擦力和纤维层与导向棒之间的摩擦力,两者均小,分段织造方法所需上升导向棒作用力 F_1 处于很小范围内。而使用不分段织造方法,随着织造层数的增加,需要较大的压实力 P_2 才能达到预期层密度 (截面变形导致);压实的纤维层与导向棒摩擦力 F_2 随着织造纤维层数的增加而增加,上升导向棒也越来越困难。相对于不分段织造方法,分段织造和压实方法能够用较小的压实力获得纤维束损伤小且层密度较高的预制体。

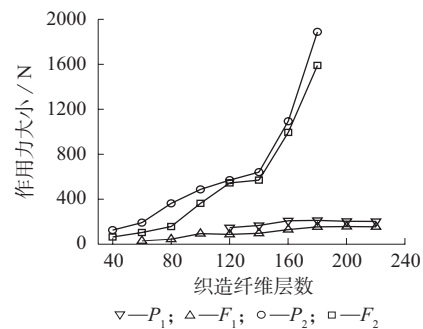


图 7 上升导向棒作用力与压实力随织造纤维层数变化

3.4 预制体层密度对比分析

纤维体积含量是纤维增强复合材料力学性能强弱的关键因素之一,层密度较大的预制体纤维体积含量越高。为研究分段织造法对预制体层密度的影响,试验设置压实力为 1 kN,分别用分段织造方法和不分段织造方法完成预制体制作。使用显微镜观测预制体各段纤维层密度,如图 8、表 5 所示,分段织造方法相对于不分段织造方法织造的预制体,上下层密度均匀,且层密度较高。由于纤维束是各向异性材料,与纤维束垂直方向上承力效果差,上层

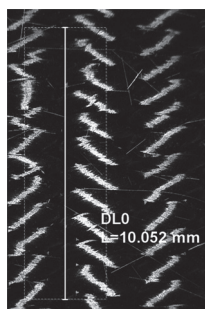


图8 分段织造纤维层密度观察照片

表5 预制体层密度比较

织造方法	上部层密度	中部层密度	下部层密度	整体层密度
直接织造	21.6	19.1	17.7	18.3
分段递进式织造	21.4	21.1	21.3	21.3

蓬松状态的纤维层达到密实状态时才能压到下层纤维,导致预制体上下层密度不均匀,成型后的复合材料各部位性能也会产生差异。由此可推出,相对于不分段织造,分段织造方法织造的预制体成型后的复合材料力学性能优越。

4 结论

(1) 柔性导向三维织造防变形工艺,使用防变形结构进行分段织造,有效地降低了导向棒阵列变形,进而控制了预制体外形尺寸的变化,有利于实现复合材料的近净成型。

(2) 分段织造分段压实导向棒所受摩擦力小,减小了纤维的损伤,成型复合材料的纤维增强性能得到保证;能够用较小的压实力获得层密度较高的预制体,将直接体现到复合材料的力学性能提高,同时也降低了对压实设备性能的要求。

参考文献

- [1] 汪星明,邢誉峰. 三维编织复合材料研究进展[J]. 航空学报, 2010,31(5):914-927.
Wang Xingming, Xing Yufeng. Developments in research on 3D braided composites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010,31(5):914-927.
- [2] Walker L, Sohn M S, Hu X Z. Improving impact resistance of carbon-fiber composites through interlaminar reinforcement[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(6):893-902.
- [3] Chiu Changhsuan, Cheng Chaochuan. Weaving method of 3D woven preforms for advanced composite materials[J]. Textile Research Journal, 2003, 73(1):37-41.
- [4] 吴志凯,江五贵,夏宇峰. 均匀化有限元法预测双向纤维增强复合材料力学性能[J]. 南昌航空大学学报:自然科学版, 2015, 29(4):51-56.
Wu Zhikai, Jiang Wugui, Xia Yufeng. Mechanical preformance of the bi-directional-fiber-reinforced compsite material by homogenization finite element method[J]. Journal of Nanchang Hangkong University:Natural Sciences, 2015, 29(4):51-56.
- [5] Mouritz A P, Cox B N. A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(6):709-728.
- [6] Tong L, Mourtia A P, Bannister M K. 3D fiber reinforced polymer composites[M]. UK:Elsevier Science, 2002:153-161.
- [7] 曹作喧. PAN基碳纤维针刺毡制备工艺及性能的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
Cao Zuoxuan. Research on prepare process and performance of pan carbon fiber needled felt[D]. Dalian:Dalian Institute of Technology, 2012.
- [8] 吴晓川,单忠德,刘丰,等. 三维织造复合材料用导向套的表面结构研究[J]. 材料导报, 2014, 28(11):1-4.
Wu Xiaochuan, Shan Zhongde, Liu Feng, et al. Research on surface strctures of guide sleeves for 3D woven compsites[J]. Materials Review, 2014, 28(11):1-4.
- [9] 师有玲. 三维织造复合材料细观结构与力学性能关系研究[D]. 北京:机械科学研究总院, 2015.
Shi Youling. Research on the relationship between mircostrcture and mechanical properties of the 3D woven composites[D]. Beijing:China Academy of Machinery Science and Technology, 2015.
- [10] Shan Zhongde, Liu Feng, Qiao Juanjuan, et al. 3D weaving forming technology and equipment for composites[J]. IET Digital Library, 2011, 10(7):87-89.
- [11] 单忠德,康怀镭,臧勇,等. 三维织造层间增强的纤维棒复合材料细观结构模型及力学性能有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1):138-149.
Shan Zhongde, Kang Huairong, Zang Yong, et al. Microscopic structure model and finite element simulation of mechanical properties of fiber bar composites reinforced by three dimensional weaving[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1):138-149.
- [12] Wu Xiaochuan, Shan Zhongde, Liu Feng. Fundamental research of guide sleeves in 3D weaving composites[J]. Advanced Materials and Engineering Materials III, 2014, 893:213-220.
- [13] Wu Xiaochuan, Shan Zhongde, Liu Feng. Mechanical properties of 3D woven composites with guide sleeves[J]. Journal of Composites Materials, 2016, 2(1):1-8.
- [14] Qiao Juanjuan, Shan Zhongde, Liu Feng, et al. Study on choice of guide sleeve material based on 3D hybrid woven forming of comp osites[C]. Changzhou:Proceedings of the International Conference on Advanced Technology of Design and Manufccture, 2011.
- [15] Kang Huairong, Shan Zhongde, Zang Yong, et al. Effect of yarn distortion of the mechanical properties of fiber-bar composites reinforced by three-dimensional weaving[J]. Applied composites materials, 2016, 23(2):119-138.