DOI: 10.3901/JME.2019.09.191

复合材料构件预制体压实致密工艺研究*

胡培利 单忠德 刘云志 刘 丰 侯卓健

(机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室 北京 100083)

摘要: 为实现柔性导向三维织造复合材料构件预制体织造过程中结构的致密化,采用数字化压实致密系统对三维织造复合材料构件进行压实特性研究,测量并记录压实过程中压实位移、压实载荷及构件回弹量与成形工艺参数之间的作用规律,揭示了纤维体积分数与压缩应力的关系。研究表明数字化柔性导向三维织造复合材料构件致密化压实过程可分为低应力线性预压实、非线性过渡压实和高应力紧密压实三个阶段,并建立复合材料构件预制体结构致密化特性的理论公式。在压实致密过程中对构件进行保压处理,分析压实载荷与保压时间的关系,表明柔性导向三维织造构件的可压缩性随着织造层数的增多而逐渐降低,回弹量与织造层数正相关,平均每层纤维回弹量逐渐降低并趋于稳定。

关键词: 复合材料构件; 数字化三维织造; Z 向压实; 预制体回弹

中图分类号: TB332

Compaction and Densification Process of Composite Component Preforms

HU Peili SHAN Zhongde LIU Yunzhi LIU Feng HOU Zhuojian

(State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment,
China Academy of Machinery Science and Technology Group Co. Ltd, Beijing 100083)

Abstract: In order to achieve the densification of the structure of the flexible guided three-dimensional weaving composite prefabricated component during the weaving process, a digital compaction system is used to study the compaction characteristics of the three-dimensional woven composite component, and the compaction displacement and compaction during the compaction process are measured and recorded. The relationship between the load and the spring-back of the component and the forming process parameters reveals the relationship between fiber volume fraction and compressive stress. It shows that the densification and compaction process of digital flexible oriented three-dimensional weaving composites can be divided into three stages: low-stress linear pre-compaction, non-linear transitional compaction and high-stress compaction, and the densification of the composite preform structure are established. The theoretical formula of the characteristic, in the process of compaction and densification, the components are subjected to pressure maintaining treatment, and the relationship between compaction load and holding time is analyzed. It shows that the compressibility of the flexible guided three-dimensional weaving components gradually decreases with the increase of the number of layers, the rebound amount and weaving. The number of layers is positively correlated, and the average fiber rebound per layer gradually decreases and tends to be stable.

Key words: composites parts; digital three-dimensional weaving; Z-direction compaction; spring-back of preforms

0 前言

随着复合材料构件被越来越多的应用于航空航天、军工等领域,对复合材料结构和性能的要求也在不断提高,由于三维结构复合材料构件在厚度方向上引入了增强纤维,与二维叠层结构相比,有利于解决复合材料厚度方向层间强度低、易分层且冲击韧性和损伤容限较低等问题,同时通过纤维在空

间内不同的铺放走向,可实现复合材料构件结构与性能的可设计性^[1],极大地扩展了复合材料构件的应用范围。复合材料构件内部结构会直接影响基体材料在成形过程中的流动性和浸润性,并对成形后的复合材料构件尺寸精度和力学性能产生重要影响,因此调控构件内部结构就显得尤为重要^[2,3]。在复合材料构件成形过程中,厚度方向的致密化程度决定了其内部结构,需要进一步研究三维结构复合材料构件的致密化压实机理及工艺。

目前,对三维结构复合材料构件在沿厚度方向的压缩性能研究主要有试验分析和模型预测两种方

* 国家自然科学基金资助项目(51790173)。20180319 收到初稿,20180711 收到修改稿

法。GREEN 等^[4-5]利用建立的三维机织复合材料有限元模型,模拟了构件的织造和压实的过程,并评估和验证了织物在压实过程中横截面的变形情况;RAHALI 等^[6]建立了平纹、斜纹和 3D 角联锁织物精确的三维及二维模型,并对不同织物单元间的受力后的应力耦合和位移进行了模拟分析;CHEN 等^[7-9]建立了预测树脂传递模塑过程中平纹织物的非线性压实模型,分析了影响构件压实行为的因素、织物厚度和压缩应力的关系。CHEN 等^[10-12]建立了单层、多层机织构件细观压实模型,认为织造纱线具有椭圆形横截面,在压实过程中应用梁弯曲理论描述织物在压实过程中的纱线变形。蒋建军等^[13]对纤维单向布叠层构成的三维预制体,在压缩过程中的嵌套效应进行了理论模型和试验研究;机械科学研究总院单忠德等^[14]提出的柔性导向三维织造复合材料预制体成形技术,在厚度方向上通过致密化压实工艺控制其内部结构,实现层间致密化,进而获得较高纤维体积分数的预制体。

本文基于数字化柔性导向三维织造技术,通过致密化压实试验对复合材料构件预制体厚度方向压实工艺进行了详细研究,旨在为柔性导向三维织造复合材料构件形性调控提供必要的工艺参数和理论指导。

1 试验材料及方法

1.1 试样制备

选用日本东丽 T300 系列 3K 和 6K 的碳纤维束完成柔性导向三维结构复合材料构件预制体的织造。图 1 为柔性导向三维正交复合材料构件的结构示意图, XOY 平面为水平织造面,在织造面内分别沿 X 向和 Y 向进行 3K 纤维束的轮流铺放,其中正交铺放一个循环后,定义为一个织造层,最后采用自制携纱器将 Z 向导向结构移出,同时将 6K 纤维束植入预制体构件内部,完成导向套的原位替换,实现复合材料构件预制体整体的约束增强。

图 1 柔性导向三维正交预制体结构示意图

1.2 压实试验

复合材料构件预制体织造过程中,每铺放 10 层,采用自制的压实系统进行一次预制体压实处理,以实现均匀的层密度和较高的纤维体积分数,压实原理如图 2 所示,在电动缸的驱动下,顶部压实模板按预定位移挤压已铺放纤维层,使预制体厚度沿 z 向缓慢降低,逐步实现压实。

图 2 预制体压实原理图

2 结果与分析

2.1 复合材料构件预制体压实过程分析

纤维体积分数是表征复合材料性能的一个重要指标,在复合材料构件预制体致密化过程中可以作为一个重要参数用来表征预制体的成形质量。试验测得预制体压实厚度,采用柔性导向三维织造复合材料构件预制体最小单元模型^[15],计算得出预制体的纤维体积分数,如式(1)所示。 S_x 、 S_y 、 S_z 分别为 x 向、y 向和 z 向纤维束横截面积; d_x 、 d_y 分别为 x 向、y 向的导向套中心距; h 为压实后纤维层厚度。

$$V_f = \frac{S_x}{2d_y h} + \frac{S_y}{2d_x h} + \frac{S_z}{2d_x d_y} \quad (1)$$

柔性导向三维织造复合材料构件预制体纤维体积分数在压实过程中由沿厚度方向(Z 向)的压缩应力控制,在不同织造层数下,纤维体积分数和压缩应力的测试关系如图 3 所示。从图 3 中看出,预制

图 3 压缩应力和纤维体积分量关系

体在Z向压缩载荷作用下,纤维体积分数随压缩应力的变化过程可分为3个阶段:低应力线性预压实阶段、非线性过渡阶段和高应力线性紧密压实阶段。

第一阶段为低应力线性预压实阶段,压缩应力在0~0.03 MPa之间,织造该阶段预制体时,纤维束主要受沿织造方向的张紧力,纤维层之间在重力的作用下处于自由接触状态,铺放的纤维层比较松散。在第一阶段的初始压实过程中,较小的压缩应力就可以使纤维层迅速贴合,实现纤维体积分数的明显增加,纤维体积分数的范围从19%迅速增加到41%。

第二阶段属于非线性过渡阶段,压缩应力变化范围为0.03~0.21 MPa。纤维层之间经过第一阶段的压实已经贴合在一起,但织造层内的纤维束还存在波形弯曲结构,随着压缩应力的不断增大,织造层内纤维束相互贴合,纤维层内间隙不断被消除,纤维体积分数呈现出非线性变化趋势,变化范围从41%到47.5%。

第三阶段是高应力线性紧密压实阶段,压缩应力增加较多,纤维体积分数变化不大,仅从47.5%增长到最大值52.5%,而且增长逐渐变平缓。在预制体压缩过程中,纤维束内部纤维之间不断相互挤压,降低了纤维束内部空间,单层纤维束宏观变薄,织造层厚度随之降低,紧密压实阶段从0.21 MPa开始,直至达到预定的压实厚度。预制体致密化压实过程的主要模型图和局部扫描图如图4所示。

图4 预制体致密化流程及局部扫描图

2.2 高应力线性紧密压实阶段分析

2.2.1 紧密压实理论公式

第三阶段的高应力线性紧密压实决定了预制体的最终纤维体积含量,是预制体压实过程中的关键阶段,也是本文的研究重点。为了导出压实规律,本文研究了预制体在不同织造层数下紧密压实阶段的纤维体积分数与压缩应力关系,并进行了线性拟合处理,如图5所示,线性拟合后的关系式如表1所示。

图5 紧密压实阶段纤维体积含量与压缩应力关系

表1 不同层数下紧密压实阶段拟合直线

层数/层	拟合直线
20	$y = 21.137x + 38.768$
40	$y = 14.142x + 43.747$
60	$y = 7.783x + 45.198$
80	$y = 5.431x + 46.980$
100	$y = 4.218x + 47.936$

由图5和表1可知,纤维体积含量随压缩应力增加而增大,织造层数较少时,预制体压实时纤维体积分数变化较大、较快,随着织造层数的增多,增长趋势逐渐平缓,从总体变化趋势可以看出,预制体纤维体积分数随压缩应力呈线性变化,可用线性方程 $y = ax + b$ 表示其总体变化规律。

为了获得柔性导向三维织造复合材料构件预制体紧密压实阶段纤维体积含量与压缩应力及织造层数的普遍规律,首先对表1中拟合直线斜率与纤维织造层数的关系进行统计并采用 ExpAssoc 函数模型进行拟合分析,结果如图6所示。

图6 拟合直线斜率与层数关系

经过统计分析后拟合直线斜率与纤维织造层数的关系如下式

$$a = 35.995 - 33.588 \times \left(1 - \exp\left(\frac{-n}{34.245}\right)\right) \quad (2)$$

对拟合直线截距与纤维织造层数进行统计并采用 ExpAssoc 模型进行拟合分析,结果如图7所示。

图7 拟合直线截距与层数关系

经过统计分析后拟合直线截距与纤维织造层数的关系如下式

$$b = 31.207 + 17.871 \times \left(1 - \exp\left(\frac{-n}{36.359}\right) \right) \quad (3)$$

综上,不同织造层数下,紧密压实阶段预制体纤维体积分数随压缩应力的变化关系为

$$y = \left(2.407 + \frac{33.588}{\exp\left(\frac{-n}{34.245}\right)} \right) x + 49.078 - \frac{17.871}{\exp\left(\frac{-n}{36.359}\right)} \quad (4)$$

表2 不同织造层数紧密压实阶段偏差率

压实应力/MPa	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
30层	-0.296	0.183	0.630	1.047	1.437	1.803	2.147
50层	1.336	1.043	0.761	0.488	0.232	-0.015	-0.255
90层	-0.228	-0.266	-0.303	-0.339	-0.374	-0.408	-0.442

2.2.2 压实载荷随保压时间分析

预制体压缩到第三阶段后,为了对织造纤维层进行充分压实以及探究保压时间对压实载荷的影响规律,对预制体进行了相应的保压处理。试验中预制体每次向下压缩1 mm后,然后间隔1 min记录一

为验证式(4)的准确性及适用性,分别选取预制体织造层数为30层、50层和90层的试验值对该变化关系式进行验证,如图8所示。

图8 试验值与理论值比较

对图8中试验值和理论模型直线进行偏差分析,首先规定柔性导向三维织造预制体不同织造层数下紧密压实阶段偏差率为:试验值与理论值的差值比上理论值,计算结果如表2所示。预制体纤维体积分数的试验值与理论模型的总体误差较小,最大偏差率为2.147%,说明了柔性导向三维织造预制体,在高应力线性紧密压实阶段纤维体积分数与压缩应力理论模型的准确性及可行性。

(a) 40层

(b) 60层

次压实载荷,连续保压15 min后再进行下一个1 mm的压缩试验,试验结果如图9所示,表明随着保压时间的延长,预制体压缩载荷从最初较快的非线性下降,逐渐变为缓慢降低。对其中缓慢降低阶段进行线性分析后,得到拟合直线也同时显示在图9中。

图 9 载荷与保压时间关系

图中线性缓慢降低阶段拟合直线的斜率为预制体压缩载荷与保压时间的比值，斜率的绝对值越大，说明保压过程中载荷随时间下降的越快，即预制体对载荷“吸收”的越多，反应出预制体越难被压实。所以预制体在不同织造层数、不同压实厚度下直线斜率绝对值的大小可以用来反映柔性导向三维织造复合材料构件预制体紧密压实阶段的可压缩性，定义为预制体可压缩性。对预制体在不同层数、不同压实厚度下拟合直线斜率的分析计算结果如表 3 所示。

表 3 预制体在不同层数、厚度下的可压缩性

织造层数/层	压实厚度/mm	直线拟合斜率	斜率平均值
40	23	-41.991	-50.693
	22	-46.964	
	21	-52.436	
	20	-61.382	
60	34	-46.809	-51.225
	33	-50.582	
	32	-52.464	
	31	-55.045	
80	44	-49.873	-53.296
	43	-53.000	
	42	-54.300	
	41	-56.009	
100	54	-53.636	-55.259
	53	-55.772	
	52	-55.809	
	51	-55.818	

表中预制体在不同压实厚度下直线拟合斜率是按预制体厚度降低的顺序排列，从表 3 及图 9 中得出，随着织造层数的增多，直线拟合斜率平均值的绝对值逐渐增大，即预制体可压缩性逐渐降低；预制体在同一织造层数下，随着预制体厚度的不断降低，压实载荷迅速变大，拟合直线斜率绝对值也逐

渐增大，即预制体可压缩性逐渐降低。

2.3 预制体回弹分析

柔性导向三维织造预制体经过前面三个阶段的压实，并充分保压后卸除载荷会发生回弹。预制体回弹量及平均每层的回弹量如表 4 所示。

表 4 预制体回弹与织造层数关系

层数/层	回弹量/mm	平均每层回弹量/mm
20	6.8	0.340
40	9.3	0.233
60	11.2	0.187
80	13.3	0.166
100	16.5	0.165

从图 10 可知，预制体卸除载荷后沿 Z 向回弹量随着纤维铺放层数的增加而增大，通过对试验值分析，得出回弹高度和纤维织造层数的线性关系，如下式所示。

$$y = 0.117x + 4.400 \quad (5)$$

图 10 回弹量与织造层数关系

回弹量与纤维织造层数呈正相关，即每织造 10 层后进行压实，预制体的回弹量总体稳定，说明预

制体致密化较为均匀。从图 11 可知,平均每层的回弹量逐渐变小,并趋于平稳,说明随着织造层数的增多,预制体经过多次循环压实后,内部纤维层厚度逐渐趋于稳定,对三维织造预制体 Z 向的稳定和精确控制具有重要实际应用。

图 11 每层回弹量与织造层数关系

3 结论

(1) 通过对柔性导向三维织造复合材料预制体构件 Z 向压缩性能测试,得出预制体纤维体积含量随压缩应力的变化关系,主要分成三个阶段。对高应力线性紧密压实阶段进行分析,建立了压实致密化理论模型,并与预制体实际的纤维体积分数进行对比,误差在 3%以内。

(2) 通过对复合材料预制体构件不同织造层数、不同压实厚度下保压时间对压实载荷影响规律的分析,发现层数越多、预制体压实后厚度变化越小,预制体的可压缩性就越小。

(3) 通过对复合材料构件预制体进行充分的压实和保压处理,发现预制体卸压后沿 Z 向回弹量与纤维铺放层数呈正相关,而平均每层纤维束的回弹量在逐渐降低并趋于稳定。

参 考 文 献

[1] 梁军, 方国东. 三维编织复合材料力学性能分析方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
LIANG Jun, FANG Guodong. Mechanical properties analysis method of three-dimensional braided composites [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2014.

[2] 庞生洋, 胡成龙, 杨鹭, 等. 预制体结构对 C/C 复合材料力学性能_断裂行为以及热物性能的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 97-107.
PANG Shengyang, HU Chenglong, YANG Zhi, et al. Effects of preform structure on mechanical properties, fracture behavior and thermal properties of C/C

composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(9): 97-107.

[3] 王奔, 高航, 郭东明. 树脂固化温度与纤维铺设方式对 C/E 复合材料制孔质量的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 19-25.
WANG Ben, GAO Hang, GUO Dongming. Effect of resin curing temperature and fiber laying method on hole quality of C/E composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 19-25.

[4] GREEN S D, LONG A C, SAID B S F E, et al. Numerical modelling of 3D woven preform deformations[J]. Composite Structures, 2014, 108: 747-756.

[5] ISART N, SAID B E, IVANOV D S. Internal geometric modelling of 3D woven composites a comparison[J]. Composite Structures, 2015, 232: 1219-1230.

[6] RAHALI Y, GODA I, GANGHOFFER J F. Numerical identification of classical and nonclassical moduli of 3D woven textiles and analysis of scale effects[J]. Composite Structures, 2016, 135: 122-139.

[7] CHEN B, CHENG A, CHOU T. A nonlinear compaction model for fibrous preforms[J]. Composites: Part A, 2001(32): 701-707.

[8] CHEN B, CHOU T. Compaction of woven fabric preforms nesting and multi-layer deformation[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 2223-2231.

[9] CHEN B, LANG E J, CHOU T. Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding[J]. Materials Science and Engineering, 2001, 317: 188-196.

[10] CHEN Z, YE L, KRUCKENBERG T. A micromechanical compaction model for woven fabric preforms Part I: Single layer[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66: 3254-3262.

[11] CHEN Z, YE L. A micromechanical compaction model for woven fabric preforms. Part II: multilayer[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66: 3263-3272.

[12] POTLURI P, SAGAR T V. Compaction modelling of textile preforms for composite structures[J]. Composite Structures, 2008, 86: 177-185.

[13] 蒋建军, 陈星, 邓国力, 等. 嵌套效应对单向织物压缩行为的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(11): 2463-2472.
JIANG Jianjun, CHEN Xing, DENG Guoli, et al. Effect of nesting effect on the compression behavior of unidirectional fabrics[J]. Journal of Composites, 2017, 34(11): 2463-2472.

[14] 单忠德, 康怀镨, 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 Huaiyu, ZANG Yong, et al. Microstructure model and mechanical properties finite element simulation of reinforced fiber rod composites reinforced by three-dimensional weave layers[J]. Journal of Composites, 2015, 32(1): 138-149.

- [15] 刘云志, 单忠德, 战丽, 等. 柔性导向三维正交结构复合材料预制体建模研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(6): 63-66.

LIU Yunzhi, SHAN Zhongde, ZHAN Li, et al. Modeling of flexible guided three-dimensional orthogonal composite preforms[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6): 63-66.

作者简介: 胡培利, 女, 1991 年出生。主要研究方向为复合材料成形技术。

E-mail: xinyuanpeili163@163.com

单忠德(通信作者), 男, 1970 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为数字化成形制造技术与装备及复合材料成形技术。

E-mail: shanzd@cam.com.cn