

大型复合材料筒形结构自动铺带技术

张蕾 王俊锋 刘伟 熊艳丽 范佳

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文摘 采用国产 T300/605 热熔法预浸料,对大型复合材料筒形结构自动铺带技术进行了研究。通过对自动铺带角度的工艺优化,铺带角度进行微调,实现了复合材料筒形结构的满覆盖铺放。在此基础上进行了大型复合材料筒形结构的自动铺带工艺试验,对自动铺带工艺试验件进行无损检测及取样性能测试。结果表明:预浸料铺覆性良好,自动铺带成型的预浸带间隙或重叠 ≤ 1 mm,铺带角度与理论铺带角度偏差 $\leq 0.2^\circ$ 。试验件成型质量良好,自动铺带技术可以满足大型复合材料结构高质量成型需求。

关键词 自动铺带,筒形结构,复合材料

Automated Tape Placement in Large Composite Cylinder Structure

Zhang Lei Wang Junfeng Liu Wei Xiong Yanli Fan Jia

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

Abstract Automated tape placement in large cylinder structure was studied with domestic T300/605 melting prepared prepreg. The ply angle was optimized to achieve the full-scale laying in large cylinder structure, which would avoid the gap or overlaps. On the basis of the optimization, the process experiment of large cylinder structure with automated tape placement was carried out and the result indicated that the adhesion of the prepreg tape was fit for automated tape placement. The gap or overlap between the tapes were less than 1mm and the error of ply angle was less than 0.2° . Nondestructive testing of the composite cylinder and test of mechanical and physical performance was carried out. The result showed that the property of the composite cylinder was eligible, which indicated that automated tape placement satisfied the moulding of the large cylinder structure.

Key words Automated tape placement, Cylinder structure, Composite

0 引言

自动铺带技术起源于 20 世纪 60 年代,第一台计算机全自动控制铺带机由 General Dynamics 公司和 Conrac 公司合作完成,用于铺放飞机的复合材料机翼部件^[1]。随着复合材料用量的增加,专业设备制造商开始研制自动铺带设备,专业化后形成自己的知识产权,如自适应压靴技术、辅助压辊技术、自适应跟踪技术、铺放质量在线检测与控制技术等,尤其在 Natural path 轨迹规划等软件技术方面有了长足进步。

自动铺带技术的应用,大大提高了复合材料结构件的成型效率和质量稳定性,减少了原材料的浪费^[2],已经用于航空复合材料结构件制造,如机翼蒙皮、壁板等小曲率大型构件^[3-5]。近年来,自动铺带技术在飞机制造中所占比例越来越高,特别是 B787,其复合材料结构质量约占 50%,有将近 80% 采用自动铺带技术制造。国内自动铺带技术的研究已开展

数年,研究主要集中在设备技术方面,尚未见到在大型筒形结构件上应用的报道。本文采用自行研制的热熔法预浸带和 5 坐标轴自动铺带设备,对大型复合材料筒形结构的自动铺放技术进行了研究。

1 原材料与自动铺带系统

1.1 材料

采用自行研制的国产 T300/605 热熔法预浸料厚度 0.15 mm,可以根据需要分切为 30 ~ 200 mm 宽的预浸带。

1.2 试验方法及设备

1.2.1 预浸料铺覆性试验

借鉴 GB/T2791—1995 胶黏剂 T 型剥离强度试验方法(挠性材料对挠性材料),使用电子万能试验机 WD40025,测试预浸料的剥离强度。试样制备:两块预浸料相同方向铺层,一侧预留 5 cm 用隔离材料隔开。裁切尺寸为 20 cm \times 2.5 cm(试样长度沿纤维

方向)。

1.2.2 性能测试

大型复合材料筒形结构取样按 DqES279—97、DqES339—2001 和 GB3365—82 进行挤压和层间剪切和孔隙率测试,用莱卡金相显微镜观察显微结构。

1.3 自动铺带系统

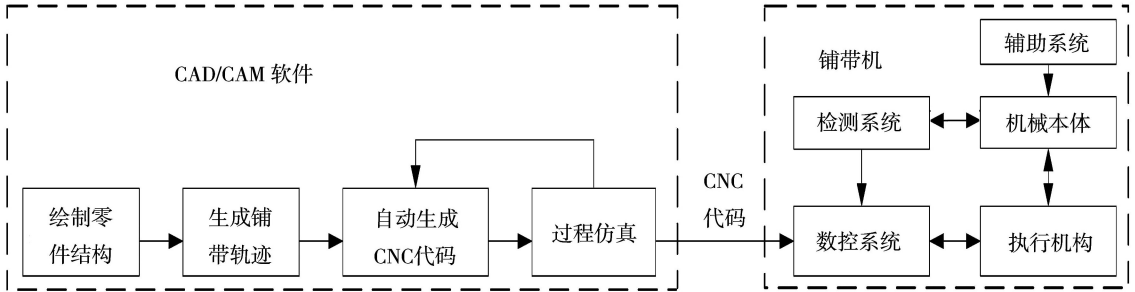


图 1 自动铺带系统构成

Fig. 1 System of automated tape placement

自动铺带头(图 2)主要由预浸带切割系统、质量检测系统、预浸带输送系统、加热系统、压实系统等组成。其中,预浸带切割系统采用精密超声切割装置,具有切割横向进给轴、切刀转动轴与送带进给轴三轴切割轨迹控制功能。



图 2 自动铺带头

Fig. 2 Head of automated tape placement equipment

2 自动铺带工艺试验

2.1 预浸料的铺覆性

预浸料的铺覆性对自动铺带工艺影响很大,良好的铺覆性可以有效提高铺带效率及质量。国产 T300/605 热熔法预浸料的性能见表 1。

表 1 国产 T300/605 热熔法预浸料性能

Tab. 1 Quality of prepreg tape

纤维面密度/g·m ⁻²	树脂含量/wt%	挥发份含量/wt%
165±5	34±3	≤0.2

目前国内还没有较为优异的预浸料铺覆性表征方法,通常采用定性的粘贴分离法和定量的 T 型剥离强度法等来表征预浸料的铺覆性。本文采用预浸料的剥离强度,并结合自动铺带试验来评价预浸带的铺覆性。预浸料剥离强度试验结果见表 2。对国产 T300/605 预浸料进行自动铺带试验,预浸料贴合良好,铺带平整,衬纸衬膜完全去除,没有粘辊现象发

自动铺带系统由自动铺带机和 CAD/CAM 软件两大部分构成(图 1)。自动铺带机运动轨迹控制部分包括 5 个自由度:芯模转动(C 轴)、铺带头小车移动(Z 轴)、铺带头伸臂(X 轴)、铺带头转动(A 轴)、铺带头升降(Y 轴)。

生,表明适合自动铺带工艺。

表 2 国产 T300/605 预浸料的剥离强度

Tab. 2 Racking strength of T300/605

试样号	剥离强度/N·cm ⁻¹
1#	2.9
2#	2.1
3#	3.2
4#	3.1
5#	3.1
6#	3.0
7#	2.8
8#	3.2
9#	3.1
10#	2.5
平均值	2.9

2.2 铺带角度优化

自动铺带理论上能够实现任何角度铺层,但预浸带切割角 β 与铺带的可操作性有关,铺层角度 α 越大, β 越小(图 3)。一般 α 为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 。

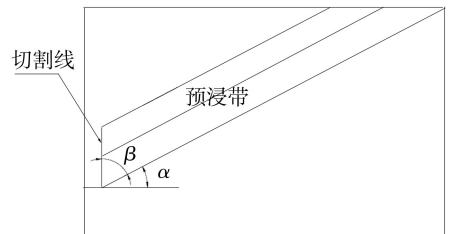


图 3 铺层角度与预浸带切割角度

Fig. 3 Tape angle and cutting angle in placement

自动铺带时,为了实现筒体结构每层铺放整数条预浸带,避免铺放时预浸带出现间隙或搭接现象,需

要对 α 进行微调。随铺层厚度的增加,筒体结构自动铺带的 α 适当减小。当铺层壁厚增加到一定程度,铺带角度与设计要求的偏差较大时,在适当增加铺带条数的基础上对 α 进行微调,以实现 α 与设计角度接近。 α 的求取过程如下。

$$\alpha = \arccos \frac{W \times n}{2\pi[R + h \times (i - 1)]}$$

式中, W 为预浸带的宽度, n 为每个铺层预浸带的条数, R 为筒段模具半径, h 为预浸带铺叠后的实际厚度, i 为铺带层数。

据此,可得到铺带机小车移动和芯模旋转的速度比值,并求得铺带头转角。根据铺层角度和铺放轨迹的往复特性,可将铺层铺放角度分为: α , $180^\circ + \alpha$ 或 $180^\circ - \alpha$ 。假定筒段模具直径 2 m, 壁厚 20 mm, 预浸

带单层厚度 0.15 mm, 计算优化后的角度见表 3。

表 3 铺带条数、角度优化结果

Tab. 3 Optimization of tape number and angle

预浸带宽 /mm	理论每层 铺带数	设计铺带 角度/(°)	优化后铺带条数		优化后铺带角度/(°)	
			首层	末层	首层	末层
100	29.6	45	30	30	44.25	45.39
150	44.4	45	44	45	45.54	45.39
100	41.9	0	42	43	0.14	0.35
150	62.8	0	63	64	0.14	-0.10

2.3 筒型结构自动铺带试验

采用直径为 1 和 2 m 的两种筒形模具, 进行 0° 、 45° 自动铺带试验。预浸带宽度分别为 75、100 和 150 mm。自动铺带工艺流程见图 4。

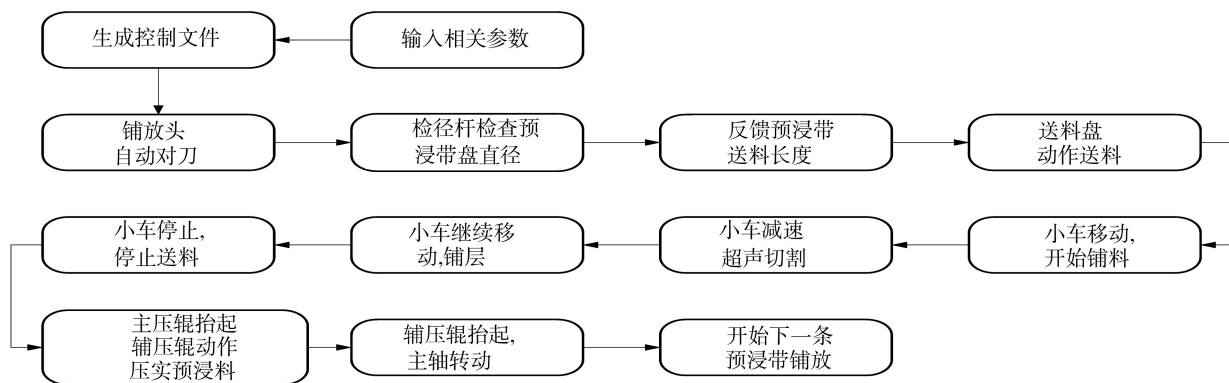


图 4 自动铺带流程

Fig. 4 Flow chart of automated tape placement

自动铺带头对刀是指铺带头由原点或轨迹上一点运动到铺带起始点;送料盘动作送料是指铺带头保持原有位置不变,送带并使预浸带移动一定距离之后,铺带头在铺带起始位置主压辊下压,随后铺带头由铺带起点移动到铺带终点;当铺带头运动到切割位置处时,保持铺带头位置不变,切刀转动预定角度切割预浸带,切割完毕后切刀回复到起始状态,在整个切割过程中,切刀需要将预浸带有效切断而保持背衬纸的连续。自动铺带的试验见图 5,结果见表 4。

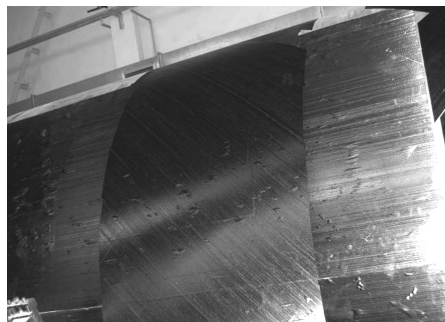


图 5 自动铺带试验

Fig. 5 Experimentation of automated tape placement

表 4 自动铺带试验结果

Tab. 4 Results of automated tape placement

模具直径 /m	带宽 /mm	弦高 /mm	铺带 质量	预浸带间隙 /mm	铺层角度 误差/(°)	铺带效率 /kg·h ⁻¹
1	75	5.6	平整	≤1	≤0.2	≤10.0
1	100	10	平整	≤1	≤0.2	≤13.5
1	150	23	不可铺	-	-	-
2	75	2.8	平整	≤1	≤0.2	≤5.50
2	100	5.0	平整	≤1	≤0.2	≤13.5
2	150	11	平整	≤1	≤0.2	≤20.0

由表 4 看出,相同的带宽下,筒形模具直径越小,则预浸带在模具圆周方向上形成的弧线弦高越大。由于压靴变形范围固定,因此模具直径越大,则筒形结构可以铺放的预浸带越宽。

自动铺带预浸带间隙或重叠 ≤1 mm, 铺带角度与理论铺带角度误差 ≤0.2°。在机械运行速率相同的情况下,理论自动铺带效率与预浸带宽度成正比。

(下转第 37 页)