

自动铺带技术在复合材料机翼蒙皮的应用

黄当明, 聂海平

(中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 对某型机复合材料机翼蒙皮的结构、材料进行分析, 制定了某型机机翼蒙皮的铺带制造工艺方案。通过精确铺放控制设计、同向铺带与交叉异向铺带设计、自动铺放与激光投影、自动下料技术配合使用, 成功将铺带机技术应用到某型机复合材料机翼蒙皮的制造, 制造出的机翼蒙皮, 其无损检测内部质量合格, 铺带间隙和表面质量满足设计要求, 为铺带机技术在复合材料铺带的应用奠定了坚实的基础。

关键词: 复合材料; 机翼蒙皮; 自动铺带; 预浸料

Application of Automatic Tape Laying Technology in the Composites Wing Skin

HUANG Dangming, NIE Haiping

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] This text is about to analyze the structure and material of the composites wing skin of a certain type airplane and make tape laying project. Combined with the accurate controlling design, parallel and cross laying, automated placement and laser projection, and the automatic blanking technology, it successfully applied the tape laying technology to produce composites wing skin, which is accepted by the internal quality test, and meets the requirements of the tape gap and surface quality, laying a solid foundation for the laying machine technology application in composites.

Keywords: Composites; Wing skin; Automatic tape-laying; Prepreg tape

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.04.097

自动铺带机是小曲率、翼面结构的典型制造装备。自动铺带技术是复合材料行业从手工铺叠加工向自动化加工发展的一个里程碑, 它在欧美国家取得了工程化应用, 在国内也逐渐应用于复合材料铺叠^[1-4], 以此推动复合材料行业向自动化、数字化、信息化数控加工技术方向发展, 解决了手工铺叠大尺寸、小曲率带来的零件铺叠质量不稳定、效率低等问题。

自动铺带技术的裁剪、加热、定位、铺叠、辊压均采用数控技术自动完成, 它涉及自动铺带复合材料铺层设计、铺带工装设计、预浸料裁剪技术、铺放 CAD/CAM 技术、自动铺放工艺技术、铺放监控、成本分析等多个研究方向^[5-7]。本文主要以自动铺放工艺技术应用为研究方向, 采用西班牙 M.Torres 公司制造的龙门式十一轴自动铺带机, 将预浸料在铺带头中完成特定形状的切割, 加热后在压辊的作用下铺贴到模具表面, 完成预浸料的裁剪、加热、定位、铺叠、辊压等工艺流程。

在机翼蒙皮的制造当中, 预浸料的黏性、加热温度、背衬纸厚度及强度、铺放速度、压辊压力、铺带工艺参数的设置, 以及铺带方式的处理技巧, 这对能否成功应用

自动铺带技术制造出高质量的零件有直接影响。

本文通过对某型机复合材料机翼蒙皮的结构和材料进行分析和试验, 制定了某型机机翼蒙皮的铺带制造工艺方案, 采用自动铺放、激光投影与自动下料技术, 制造出某型机机翼蒙皮。经多件产品铺带制造验证, 机翼蒙皮无损检测内部质量合格, 铺带间隙和表面质量满足设计要求, 实现了自动铺带技术在某型机机翼蒙皮自动铺带应用, 为铺带机技术在复合材料铺带的应用奠定了坚实的基础。

1 某型机机翼蒙皮结构特点及制造方案

该蒙皮选用 T700/LT-03 A 高强度碳纤维 / 中温固化环氧树脂干法预浸料, 材料幅宽为 150mm。该产品尺寸较大, 纵向最长 9.6m, 最宽位置 0.95m, 应用自动铺带技术完成该蒙皮零件的铺带, 需要根据零件结构特点, 做相应的铺带程序设计, 完成零件的铺带, 如图 1 所示。

根据机翼蒙皮的特点, 采取的工艺流程为: 自动铺带 + 手工铺叠, 结合自动下料和激光投影技术, 完成此次零件铺带, 流程图如图 2 所示。

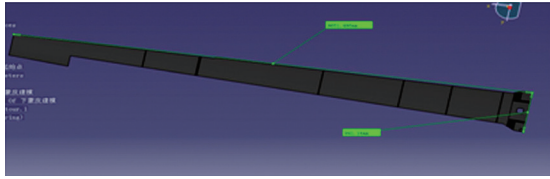


图1 机翼蒙皮
Fig.1 Wing skin

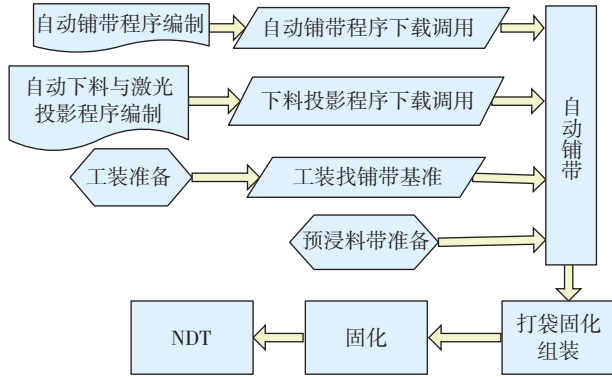


图2 机翼蒙皮自动铺带流程图

Fig.2 Flow chart of automatic tape laying of wing skin

2 自动铺带技术的应用和关键控制点分析

在应用自动铺带技术铺带机翼蒙皮零件过程中,须控制好影响到铺带质量的以下几点关键因素。

2.1 预浸料的选择

自动铺带技术所铺放的复合材料称为预浸料,它作为复合材料制造过程中的中间产品,直接影响到复合材料构件的质量。预浸料主要由树脂与碳纤维构成,缠绕成卷,因初始有一定的黏性,为防止保存时相邻的预浸料带相互粘结,预浸料背后有一层背衬纸,背衬纸起着传递预浸料带的作用。预浸料带的技术指标主要包括黏性、铺覆性、树脂含量、单位面积纤维质量、存储期等,其中黏性与铺覆性对铺带机铺放成功与否至关重要。

预浸料带黏性是指预浸料带与模具或其他预浸料带之间形成粘结的能力,预浸料带黏性必须适中。黏性过小,相邻料带之间无法顺利贴合,料带将无法精确铺放;黏性过大,铺带出现失误后,修改困难。

预浸料带的铺覆性是指预浸料带与不同曲率的模具表面之间的适应性,其中纤维和背衬纸是影响铺覆性的主要因素,若预浸料带铺覆性较差,料带则易断裂,或形成架桥、褶皱,导致自动铺带受阻,不易形成生产力。

此次蒙皮铺带的预浸料为 T700/LT-03 A 高强碳纤维 / 中温固化环氧树脂干法预浸料,铺带温度的设置会影响预浸料的黏性和铺覆性。

一方面,在铺带加热温度范围内,随着温度升高,树脂粘度下降而流动性上升。随着树脂流动性上升,树脂对预浸料界面的浸润能力提高,这样可以提高预浸料

之间或者预浸料与模具之间的贴合能力,有利于铺放过程顺利进行。但另一方面,随着温度的上升,预浸料变“软”,这样在铺放过程中增大预浸料在复杂模具表面形成架桥的机会,温度越高,预浸料越容易老化^[8-9]。

因此,在机翼蒙皮自动铺带中,加热温度的选取倾向于防止褶皱、架桥的产生和预浸料老化,一般设置在 40℃~60℃。

2.2 精确铺放控制

将铺层的每一片料带精确铺贴到位,针对自动铺带做控制设计,这是自动铺带技术应用的基础。精确铺放控制需要做好以下几点工作,方能保证蒙皮按设计数模精确铺带出来,并达到工艺要求^[10-11]。

2.2.1 铺带模具涂刷微量树脂

首先用丙酮浸润料带,将稀释出的微量树脂混合丙酮均匀涂刷于模具上,保证模具具有一定黏性,目的是将第一层按程序精确铺带至模具上。第一层料带是否精确铺带,直接影响后续铺层的精确铺带、准确定位和间隙控制。

2.2.2 超声切割刀调整

调整好超声切割刀 B1、B2 的切割深度,防止过切导致料带断裂。调整的方法应根据现场切割情况再做适应性调整,切割刀见图 3。

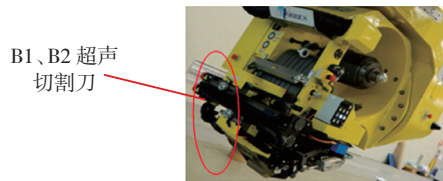


图3 B1、B2超声切割刀

Fig.3 B1、B2 Ultrasonic cutting tool

2.2.3 最小切割角度设置

机翼蒙皮在切割形状时,最小切割角度的设计是否精准,将直接影响程序生成后置加工代码,零件铺层能否铺放成功。

通过选取材料 T700/LT03A,分别进行 1°、2°、3°、4°、5° 切割角料带切割试验,其中铺放温度 50℃,重复 5 次记录切割及铺放成功次数如表 1 所示。

由表 1 分析得出,复杂形状切割铺放时,最小切割角度越小,切割及铺放成功率越低, T700/LT03A 最小切割角度至少应大于等于 3°。

表1 切割角度以及切割与铺带成功次数

切割角度	1°		2°		3°		4°		5°	
	切割	铺放	切割	铺放	切割	铺放	切割	铺放	切割	铺放
成功次数	1	0	3	4	4	5	5	5	5	5

为保证铺带效率和成功率,该蒙皮选用 T700/LT-03 A 高强碳纤维 / 中温固化环氧树脂干法预浸料,在程序设置的切割角度为 4°。

2.2.4 Z轴零点的调整, U轴、K轴张力的调整

在 Fanuc 30i 宏变量 (MACRO) 面板中调整宏变量 #518 (U 轴施加的张力)、#519 (K 轴施加的张力) 的数值,以及 Z 轴绝对坐标值,以防止料带背衬纸断裂和铺叠面与工装拟合不够。宏变量功能如表 2 所示,设置如图 4。

表2 宏变量功能

宏变量	功能描述
#518	TAPE ROLLER TORQUE (#589) U 施加的张力
#519	PAPER ROLLER TORQUE (#1132) (#587) K 施加的张力

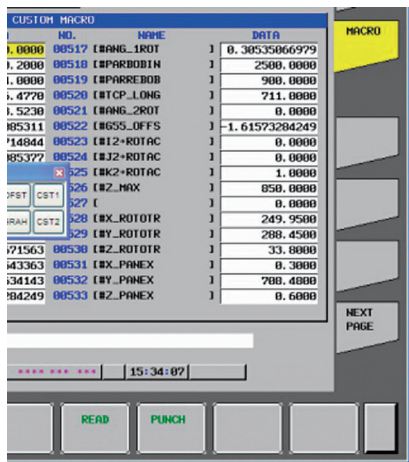


图4 宏变量设置

Fig.4 Settings of macro-variable

2.2.5 铺带程序设计

铺带机由 150mm 幅宽的预浸料带逐块铺满一个铺层,每一块的初始铺放和准确定位直接关系到该条料片能否成功铺带,否则褶皱、搭接、间隙超差、定位不准,将导致料片裁剪变短或作废,并需重新再次铺叠。因此在程序设计时,采取如下措施:

- (1) 对于铺带足够长(目前经验参数约为 200mm 以上)或者料片有一端在零件余量线上的,加长 SHOE 的工作长度,以加大料片与工装或上一铺层的接触面积;
- (2) 铺带尾端为直角,且长度较短(约 400mm 以下)的可以不使用 ROLLER 的,不进行 ROLLER 切换,改为 SHOE 铺放后根据实际情况,单独进行二次压实;
- (3) 对于长度短于 200mm 的复杂图形或特殊图形,铺叠难度较大,改用手铺或加长铺层长度。

2.2.6 铺带速度的设置

铺带速度与层间剪切强度成反比,在压辊压力作用下,树脂与纤维之间充分浸润是需要一定时间的,速

度越小,树脂与纤维之间的浸润越充分,层间剪切强度越高;反之,铺放速度越快,层间剪切强度越低,铺带成功率也随之降低,但生产效率高。因此,为了保证生产效率和铺带的质量,一般设置 20~40m/min (铺带机最大铺带机速度为 50m/min)。

2.2.7 铺带间隙的控制设置

在平板工装和双曲工装上,铺叠长 1m 的料带 3 条,自动铺带程序分别设置间隙 1mm、2mm 和 3mm,测量间隙值见表 3 和图 5。

表3 间隙值

间隙设定值 /mm		1	2	3
间隙实测值 /mm	平板工装	0.9~1.1	1.9~2.0	2.8~3.0
	双曲工装	0.5~1.4	0.8~2.5	1.6~3.4

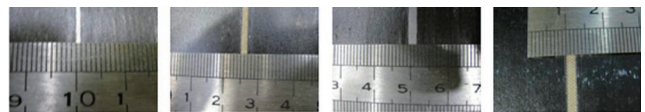


图5 铺带间隙

Fig.5 Tape laying gap

铺带机间隙设定为 1.0mm,间隙可控制在 2mm 以内,且没有搭接现象,满足工艺铺带要求。

2.2.8 自动铺带辊压压力设置

选取平板工装,铺叠厚度为 2mm 的单向板,选取橡胶辊压实压力分别为 1、2、3...7Bar。按 JC/T773 测试层间剪切强度;按 GB/T 3356 测试弯曲强度和弯曲模量;同辊压下试验件的性能数据见表 4。

表4 辊压压力与力学性能

辊压压力 /bar	1	2	3	4	5	6	7
拉伸强度 /MPa	740.62	710.34	712.04	730	716.66	710.56	686.04
层剪强度 /MPa	75.24	70.92	65.44	72.49	67.94	69.64	68.34
弯曲强度 /MPa	889.4	815.2	820.7	883.2	861.4	938.3	907.4
弯曲模量 /MPa	551.5	422.1	323.6	345.6	341.7	331.6	347.8

自动铺带辊压测试结论:

- (1) 自动铺带时,铺放的层压板拉伸强度、剪切强度和弯曲强度随橡胶辊压的变化不大;
- (2) 自动铺带时,弯曲模量在辊压超过 3Bar 时,趋于稳定。在低于 3Bar 下,由于内部压实不理想,在受到外力时,应变产生在内部,外部应变较小,因此表现出模量成负的线性关系;
- (3) 自动铺带时,弯曲强度随辊压增大而上升,但上升幅度有限;
- (4) 使用 T700/LT03A 自动铺带时,该零件选用橡

胶辊压力为 7Bar, 一般建议设置为 4~7Bar。

2.3 将程序默认的交叉异向铺带设计改为同向铺带

将默认的交叉异向铺带改进为同向铺带, 提高了设备运行的可控性和安全性。交叉异向铺带每铺带完成一个料带, 均会沿 C 轴旋转 180°, 持续操作设备时间较长的操作者, 忽略此设备动作易造成工伤事故。而同向铺带正好避免了这个问题, 铺带均朝同一方向, 提高了可控性和安全性。

2.4 自动铺放与激光投影、自动下料技术配合使用

自动下料与激光投影技术配合使用^[12-14], 针对小铺层手工铺叠, 解决了料片小、铺带定位难的问题, 保证了零件制造的精确性。

采用上述的铺带设计和工艺方案, 应用于某型无人机复合材料机翼蒙皮的制造, 经过多架份的制造验证, 机翼蒙皮的内部质量经超声检测合格, 表面质量与随炉件力学性能合格, 满足设计技术要求。

3 结论

通过自动铺带技术应用于某型机机翼蒙皮铺带, 得到以下结论:

(1) 通过对某型机机翼蒙皮的材料和结构进行分析, 可以采用自动铺带技术, 实现自动化制造, 并符合工艺制造要求, 无损检测合格, 随炉件性能合格;

(2) 采用自动下料 + 激光投影技术, 混合自动铺带技术, 应用于复合材料小曲率大尺寸零件的制造, 可以提高零件的精确制造;

(3) 自动铺带技术自有其局限性, 我们需要控制好预浸料的各项技术指标, 提高预浸料带的可铺覆性, 根据零件的结构需要不断总结调整铺带参数, 才能够应用自动铺带技术制造复合材料零件。

虽然自动铺带技术已成功应用于某型无人机复合材料机翼蒙皮的制造, 但铺带工装、零件铺层的设计会影响自动铺带技术的应用, 所以要想自动铺带技术推广应用于各型机的铺带, 需要与飞机设计单位协调沟通好铺层的设计, 与工装设计单位协商好自动铺带机运行对工装型面的要求。

参考文献

[1] 郭金树. 复合材料件可制造性技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.

GUO Jinshu. Composite parts manufacturability technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009.

[2] T G 古托夫斯基. 先进复合材料制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

TIMOTHY G Gutowski. Advanced composites manufacturing technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.

[3] 肖军, 李勇, 李建龙. 自动铺放技术在大型飞机复合材料结构件制造中的应用 [J]. 航空制造技术, 2008(1):50-53.

XIAO Jun, LI Yong, LEE Jianlong. Automatic laying technology application in large aircraft composite structures manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(1):50-53.

[4] 赵稼祥. 碳纤维复合材料在民用航空上的应用 [J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(3):1-4.

ZHAO Jiexiang. The application of carbon fiber composites in civil aviation [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2003, 28(3):1-4.

[5] 孙成. 复合材料翼梁自动铺丝技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

SUN Cheng. Composite wing beam automatic wire technology research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[6] 何东晓. 先进复合材料在航空航天的应用综述 [J]. 高科技纤维与应用, 2006(2):9-11,19.

HE Dongxiao. The application of advanced composite materials in aerospace were summarized [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2006(2):9-11,19.

[7] 杜善义. 先进复合材料与航空航天 [J]. 复合材料学报, 2007(1):1-12.

DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace [J]. Journal of Composite Materials, 2007(1):1-12.

[8] 赵渠森. 先进复合材料手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

ZHAO Qusen. Advanced composite materials handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.

[9] 陈绍杰. 先进复合材料的近期发展趋势 [J]. 材料工程, 2004(9):9-13,18.

CHEN Shaolie. Recent development trends of advanced composite materials [J]. Materials Engineering, 2004(9):9-13,18.

[10] 范玉青, 梅中义, 陶剑. 大型飞机数字化制造工程 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.

FAN Yuqing, MEI Zhongyi, TAO Jian. Digital manufacturing engineering of large aircraft [M]. Beijing: Aviation Industrial Press, 2011.

[11] 叶进. 自动铺带 CAM 技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

YE Jin. Automatic tape-laying CAM technology research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.

[12] 尤春风. CATIA V5 曲面造型 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

YOU Chunfeng. CATIA V5 surface modeling [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[13] 胜选禹. CATIA V5 基础与实例教程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

SHENG Xuanyu. CATIA V5 Basic tutorial and examples [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.

[14] 李平建. 计算机图形学原理教程. 成都: 电子科技大学出版社, 1998.

LI Jianping. Computer graphics principle tutorial. Chengdu: UEST Press, 1998.

通讯作者: 黄当明, 工艺师 / 工程师, 研究方向为复合材料数字化制造技术, E-mail: huangdangming@163.com。

(责编 叶枫)