

自动铺带技术在复合材料小尺寸低曲率制件 批量化制造上的应用

任卫安, 马 军, 王钰淇, 刘 斌

(航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024)

[摘要] 通过 FiberSim 软件对低曲率三维复合材料零件铺层进行二维化展开, 再利用 CATIA 进行多零件二维排版, 完成批量制造零件再设计工作。采用自动铺带编程技术进行多零件编程, 最后通过铺带机实现小尺寸、低曲率结构零件的批量化制造。该方法为小尺寸、低曲率结构复合材料制件批量自动化制造提供了一种技术途径, 解决了以往只能依靠手工铺贴的问题, 大大提高零件制造质量及效率, 提高了材料利用率, 降低制造成本, 同时也为自动铺带机拓展了一个非常好的新应用场景, 推动自动铺带技术的应用发展。

关键词: 复合材料; 铺层展开; 铺带编程; 小尺寸; 低曲率; 自动铺带批量制造

Application of Automatic Tape Laying Technology in Quantity Production of Composite Part With Small Size and Low Curvature

REN Weian, MA Jun, WANG Yuqi, LIU Bin

(AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry (Group) Co., Ltd., Nanchang 330024, China)

[ABSTRACT] FiberSim software was used for two-dimensional expansion of low-curvature 3D composite parts layer. CATIA was used for two-dimensional layout composing of multi-parts, and completing the redesign of batch manufacturing parts. This paper adopts automatic tape laying (ATL) programming technology to carry out multi-part programming, and finally realized the quantity production of small size and low curvature structural parts through ATL machine. The technique provides a means of quantity production for small size, low curvature structure composite parts, and solves the problems that a large number of small size, low curvature composite components, which can only relied on hand laying, so greatly improves the quality and efficiency of parts manufactures, improves the material utilization, and reduces the manufacturing cost. ATL technology provides a very good new application scenarios for composite manufacturing, and promotes the application and development of ATL.

Keyword: Composites; Layer expansion; ATL programming; Small size; Low curvature; Quantity production with ATL technology

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.13.083

20 世纪 60 年代美国率先研发出复合材料自动铺带技术, 并应用于军用飞机复合材料结构件自动化生产^[1-2]。复合材料自动铺带技术具有高效、高质量、高精度的特点, 已广泛应用于大型民用飞机、运载火箭等航空航天飞行器, 成为发达国家航空航天领域中大型复合材料构件的成熟制造工艺^[3-5]。自动铺带技术运用数控技术实现预浸带铺叠的连续自动化生产, 其生产效率为传统手工铺叠的 10 倍以上^[6-8], 适用于制造翼面类等大尺寸、低曲率壁板构件, 如美国 F-22 战斗机机翼、C-17 运输机的水平安定面蒙皮和 波音 787 客机机翼; 欧洲

A340 客机水平安定面蒙皮、尾翼蒙皮, A380 客机的安定面蒙皮和中央翼盒等均采用自动铺带技术制造^[9-12]。自动铺带机主要适用于大型制件、大批量、规模化的自动化制造, 但目前国内航空复合材料制造还是多以小批量、多品种的生产模式, 大多制件因为产品结构复杂、尺寸较小, 很难适应自动铺带制造要求。这种模式的存在限制了自动化制造的需求, 这也是国内自动铺带机应用不足的一个重要原因。为解决自动铺带机的利用率问题, 解决产品自动化制造的需求, 采取将复合材料零件三维铺层展开为二维结构, 再重新将零散结构片层进行

整体化设计,以满足自动铺带要求。FiberSim 铺层展开为二维结构,是一种成熟的技术,传统的下料裁切就是通过 FiberSim 下料机接口模块将铺层展开为二维结构后导入下料机设备进行自动裁剪,随后手工铺贴^[13-15]。通过 CATIA 模块进行零件排版优化,自动铺带编程技术优化设计,实现多零件组合铺层编程设计,实现了小尺寸结构翼面类蒙皮的批量化、自动化制造,大大提高制造质量及制造效率,探索出了一条小尺寸、低曲率结构零件批量化自动铺带制造技术路径。

1 产品及设备信息

选取一个典型小尺寸结构复合材料翼面制件,长度约 1500mm,宽约 500mm,曲率较小,内部结构有多层加强梯层,梯层间距最小的只有 2.5mm,且加强层有圆弧过渡特征(图 1),手工铺贴时较难切割准确。自动铺带机可以将加强层直接裁切铺贴到位,准确性很高。测试采用自动铺带机进行编程和铺贴。铺带材料选用成熟 XX104/XX300 环氧树脂预浸料,材料与设备适应性较好,适宜自动铺放要求。

2 再设计及优化

首先将零件三维 FiberSim 铺层信息展开为二维结构,通过 CATIA 进行零件铺层再设计工作,完成零件铺层二维化排版及优化。随后通过铺带机自带编程软件进行编程及优化工作。零件铺带编程完成 2 个零件、4 个零件自动化编程及优化工作,如图 2 所示。本测试选取了 2 块蒙皮进行组合编程及优化。按照设备行程,可同时完成约 60 个零件的组合铺放,鉴于制造成本,本文测试同时铺贴 2 块蒙皮。

3 自动铺带制造

选取 2 个零件同时制造,如图 3 (a) 所示,设备自动化铺贴零件整层及加强层,完成所有铺贴及裁切,无需人工干预,最终完成 2 个零件一次性铺贴,形成一块包含两个零件的层合板预制体,如图 3 (b) 所示。通过自动铺带机超声裁切刀根据零件结构尺寸进行裁切(图 3 (c)),得到零件二维平板预浸料(图 3 (d)),因为铺贴按照零件的展开数模进行铺贴,裁切完成的单件预制体

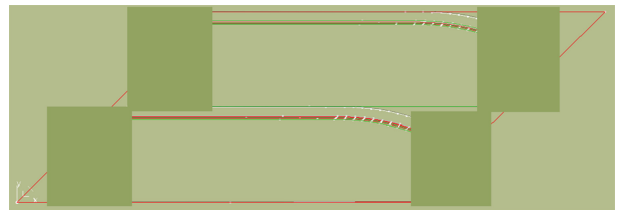


图1 零件结构示意图 (经处理)
Fig.1 Schematic diagram of part structure (processed)

就是零件毛坯预制体,各个整层及加强层尺寸即为零件要求尺寸。铺贴零件越多,产生废料越少,材料利用率越高,同时铺贴效率也越高,有利于大批量的生产。

4 零件固化及检测

裁切好的零件平板预制体移至成型模上,根据零件边线进行定位,从图 4 (a) 可以看出由于零件本身 3D 结构属性,平板预制体不能很好地贴合模具,通过抽真空预压实,零件表面有轻微褶皱。将零件进热压罐固化成型,升温开始加外压至 0.60MPa,以 $\leq 3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$,保温保压 120min,随后以 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率或自然降温至 60°C 以下卸压、出罐脱模。固化后零件表面质量良好,从图 4 (c) 可以看出零件表面无褶皱出现,除了铺贴本身存在的间隙及错层间隙,质量良好。为了进一步确认预压实褶皱是否会影响纤维的走向,进行了剖切测试,选取零件完



(a) 2个零件



(b) 4个零件

图2 多零件排版示意图 (经处理)

Fig.2 Layout diagrams of multiple parts (processed)



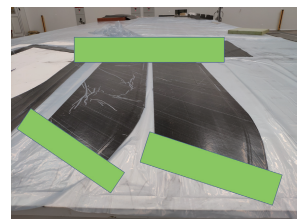
(a) 零件铺贴中间图



(b) 零件铺贴最终图



(c) 零件切割余料图



(d) 最终零件切割图

图3 多零件铺贴图

Fig.3 Tape laying diagrams of multiple parts

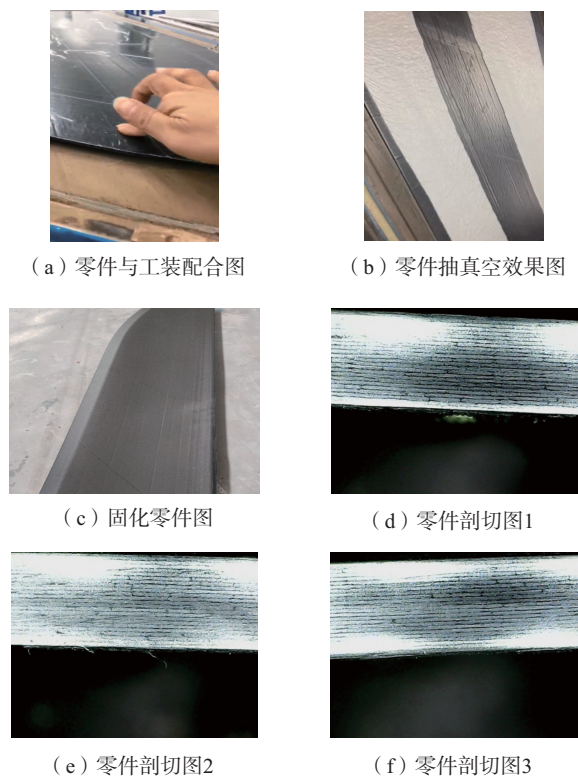


图4 零件固化及剖切图

Fig.4 Curing and sectioning diagrams of part

整截面不同处进行剖切取样,并通过显微镜观察,如图4(d)~(f)零件内部纤维平顺,未发现屈曲现象,证明零件在固化时没有出现内部褶皱现象。随后采用超声CTS-9008设备进行手工无损检测,制件内部质量合格,无空隙、气泡、分层等缺陷,满足质量要求。

5 结论

通过对三维结构复合材料零件铺层二维化展开,再利用CATIA进行零件重新排版、铺层设计,铺带编程技术进行编程设计,可以完成零件大批量的同时排版设计及制造,从而实现小尺寸、低曲率结构零件的批量化制造,为小尺寸、低曲率结构复合材料制件批量自动化制造提供了一种技术途径,同时也为复合材料自动铺带技术提供了一个很好的应用场景,解决了大量该类零件只能依靠人工铺贴的问题,大大提高零件制造质量及效率,提高了材料利用率,降低制造成本。

参考文献

- [1] 肖军,李勇,李建龙.自动铺带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,2008,51(1):50-53.
- XIAO Jun, LI Yong, LI Jianlong. Application of automatic placement technology in the manufacture of composite structural parts of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(1):

50-53

[2] 王天玉,梁宪珠,杨进军.飞机复合材料构件自动铺带/丝束铺放典型设备[J].航空制造技术,2008,51(4):42-44.

WANG Tianyu, LIANG Xianzhu, YANG Jinjun. Typical equipment for automatic tape/fiber laying of aircraft composite components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(4): 42-44

[3] 肖军,李勇,文立伟,等.树脂基复合材料自动铺放技术进展[J].中国材料进展,2009,28(6):28-32.

XIAO Jun, LI Yong, WEN Liwei, et al. Progress of automated placement technology for polymer composites[J]. Materials China, 2009, 28(6): 28-32.

[4] 还大军,肖军,李勇.复合材料自动铺放CAD/CAM软件技术[J].航空制造技术,2010,53(17):42-45.

XUAN Dajun, XIAO Jun, LI Yong. CAD/CAM software technology for composites automated placement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(17): 42-45.

[5] 徐福泉,高大伟,杨楠楠.复合材料自动铺带技术应用及方案示例[J].航空制造技术,2009,52(22):50-52,54.

XU Fuquan, GAO Dawei, YANG Nannan. Application and proposal sample of composite automatic tape-laying technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(22): 50-52, 54.

[6] 周晓芹,曹正华,郑广强,等.复合材料自动铺带技术研究与应用[J].航空制造技术,2011,54(15):40-41.

ZHOU Xiaolin, CAO Zhenghua, ZHENG Guangqiang, et al. Research and application of automated tape laying technology of composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(15): 40-41.

[7] 杜善义.先进复合材料与航空航天[J].复合材料学报,2007,24(1):1-12.

DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.

[8] 梁滨.航空级树脂基复合材料的低成本制造技术[J].材料导报,2009,23(7):77-80,85.

LIANG Bin. Low cost manufacturing technology of resin matrix composites for aeronautical application[J]. Materials Review, 2009, 23(7): 77-80, 85.

[9] 林胜.自动铺带机/铺丝机(ATL/AFP)——现代大型飞机制造的关键设备(中)[J].世界制造技术与装备市场,2009(5):90-95.

LIN Sheng. The ATL/AFP-the key machine for manufacturing of modern large airplane(B)[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2009(5): 90-95.

[10] 姚俊,孙达,姚振强,等.复合材料自动铺带技术现状与研究进展[J].机械设计与研究,2011,27(4):60-65.

YAO Jun, SUN Da, YAO Zhenqiang, et al. Current situation and research progress of automated tape-laying technology for composites[J]. Machine Design & Research, 2011, 27(4): 60-65.

[11] 陈利平,曹正华.大型复合材料构件数字化制造技术的研究[J].航空制造技术,2008,51(S1):158-159.

CHEN Liping, CAO Zhenghua. Research on digital manufacturing technologies of large composite structure part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(S1): 158-159.

[12] 梁宪珠,曹正华,常海峰,等.数字技术在机身复合材料上壁板制造中的应用[J].航空制造技术,2008,51(3):46-48.

LIANG Xianzhu, CAO Zhenghua, CHANG Haifeng, et al. Application of digital technology in the manufacture of fuselage composite panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(3): 46-48.

(下转第91页)

综上所述,即使显著增大切深及工具外径,工具端部绝缘层也能大幅提高工件底面的平整程度,并可有效改善工件底面的表面质量。此外,根据文献[11]可知,对于外径与切深均为10mm的工具基体,当采用工具端部喷液方法时,底面轮廓坐标最大差值由783.9 μm 降低至470.8 μm ,底面粗糙度 R_a 从1.705 μm 下降至1.09 μm 。相比之下,采用工具端部绝缘方法获得的工件底面更为平整,而且表面质量也更好,所以更适合于电解铣磨加工的大余量去除过程。

4 结论

(1) 工具端部绝缘层能够有效抑制沟槽底面材料的电学溶解,使得沟槽底面的平均过切变小,平均槽深从10.61mm降低至10.32mm。

(2) 工具端部绝缘层可以大幅提高沟槽底面的平整程度,使得底面轮廓坐标最大差值也由783.9 μm 下降至352.5 μm ,从而显著缩短了后续精加工的时间。

(3) 工具端部绝缘层能够有效减弱沟槽底面的杂散腐蚀,使得表面质量明显好转,表面粗糙度 R_a 从1.705 μm 减小至0.811 μm 。

参考文献

- [1] KLOCKE F, KLINK A, VESELOVAC D, et al. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical and electro-physical and photonic processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(2): 703-726.
- [2] AKHTAR W, SUN J F, CHEN W Y. Effect of machining parameters on surface integrity in high speed milling of super alloy GH4169/Inconel 718[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(5): 620-627.
- [3] YANG Y, LI M, LI K R. Comparison and analysis of main effect elements of machining distortion for aluminum alloy and titanium alloy aircraft monolithic component[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(9-12): 1803-1811.
- [4] HUANG X M, SUN J, LI J F. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5-8): 1035-1041.
- [5] 叶而康. GH4169合金电解磨铣加工试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- YE Erkang. Experimental investigation of electrochemical grinding and milling on GH4169[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [6] QU N S, ZHANG Q L, FANG X L, et al. Experimental investigation on electrochemical grinding of Inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2015, 35: 16-19.

[7] 张庆良. 内喷液电解磨铣加工 GH4169 试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

ZHANG Qingliang. Experimental investigation of inner-jet electrochemical grinding and milling on GH4169[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[8] LI H S, FU S X, ZHANG Q L, et al. Simulation and experimental investigation of inner-jet electrochemical grinding of GH4169 alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(3): 608-616.

[9] LI H S, NIU S, ZHANG Q L, et al. Investigation of material removal in inner-jet electrochemical grinding of GH4169 alloy[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 3482.

[10] NIU S, QU N S, YUE X K, et al. Effect of tool-sidewall outlet hole design on machining performance in electrochemical mill-grinding of Inconel 718[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 41: 10-22.

[11] YUE X K, QU N S, NIU S, et al. Improving the machined bottom surface in electrochemical mill-grinding by adjusting the electrolyte flow field[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 276: 116413.

[12] NIU S, QU N S, LI H S. Investigation of electrochemical mill-grinding using abrasive tools with bottom insulation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4): 1371-1382.

通讯作者: 曲宁松, 博士, 长江学者特聘教授, 研究方向为电化学加工技术及装备, E-mail: nsqu@nuaa.edu.cn.

(责编 阳光)

(上接第85页)

[13] 李薇, 杨楠楠, 高大伟. 飞机复合材料构件数字化生产线技术[J]. 航空制造技术, 2008, 51(3): 42-45.

LI Wei, YANG Nannan, GAO Dawei. Digital production line technology for aircraft composite components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(3): 42-45.

[14] 张丽华, 范玉青. 复合材料构件数字化设计制造解决方案[J]. 航空制造技术, 2007, 50(8): 56-59.

ZHANG Lihua, FAN Yuqing. Composite material components digital design and manufacturing solutions[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 50(8): 56-59.

[15] 齐德胜, 刘秀芝, 宫少波, 等. 基于FiberSIM的复合材料构件数字化设计与制造技术研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(3): 52-55.

QI Desheng, LIU Xiuzhi, GONG Shaobo, et al. Digital design and manufacturing technology of composites structure based on FiberSIM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(3): 52-55.

通讯作者: 任卫安, 硕士, 工程师, 研究方向为先进复合材料自动化制造技术, E-mail: rwahao@126.com.

(责编 阳光)