

机器人自动钻铆技术在卫星整流罩上的应用

张 军 熊艳艳 陈长江 雷湘衡 吴 敏

(上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

文 摘 为保证运载火箭舱段钻铆过程质量稳定性,减少人为因素造成的缺陷,开展了机器人自动钻铆技术在卫星整流罩应用技术研究。针对机器人自动钻铆设备,通过阐述结构组成及相应的关键技术、开展钻孔和铆接等工艺研究为手段,实现了某运载火箭 $\Phi 3\ 800\ \text{mm}$ 卫星整流罩的试制。结果表明,采用主轴转速 $12\ 000\ \text{r/min}$,进给速度 $500\ \text{mm/min}$ 时,能有效控制钻孔出口毛刺高度;通过控制插钉深度、扭矩、悬停时间等工艺参数,可提高铆钉送钉成功率;试制产品加工精度均满足设计要求,验证了机器人自动钻铆技术在运载火箭舱体研制中的可行性与可靠性。

关键词 机器人,自动钻铆,运载火箭,卫星整流罩

中图分类号:V462

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.019

The Application of Robot Automatic Drilling and Riveting Technology in Payload Fairing

ZHANG Jun XIONG Yanyan CHEN Changjiang LEI Xiangheng WU Min

(Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer Co., Ltd, Shanghai 200245)

Abstract In order to ensure riveting stability and reduce the defects caused by human operations, the research on the application of robot automatic drilling and riveting technology has been carried out in the payload fairing. The structure composition and related process research are introduced in this paper. The drilling and riveting process parameters are analyzed. The trial product of $\Phi 3\ 800\ \text{mm}$ payload fairing is manufactured. The results show that the height of the burr when drilling exit can be controlled effectively at a $12\ 000\ \text{r/min}$ spindle speed and a $500\ \text{mm/min}$ feed speed. The rivet feeding quality can be improved by controlling the process parameters such as insert depth, torque, and hovering time. The dimensions accuracy is qualified. The application of robot automatic drilling and riveting technology in the development of the launch vehicle cabin is proved to be feasible and reliable.

Key words Robot, Automatic drilling and riveting, Launch vehicle, Payload fairing

0 引言

自动铆接技术从20世纪70年代起就在国外普遍采用,其发展一直未曾间断。自动钻铆技术是指在装配过程中自动完成装配件的定位、夹紧、钻孔/镗窝、涂胶、送钉、铆接/安装等工作的过程^[1]。国外铆接装配技术几十年的应用证明,采用自动钻铆技术后装配效率至少比手工铆接装配提高10倍^[2]。自动钻铆技术已在海外波音、空客等航空企业广泛应用。20世纪90年代中期,Electroimpact公司将电磁铆接技术用于自动钻铆机,并开始计算机控制的低电压电磁铆接设备工程化的研究^[3]。波音和美国EI公司联合研制了自动化装配系统,用于B787飞机机身第

43段的复合材料整体筒体与钛合金框件的自动化钻铆^[4]。GEMCOR公司研制的机翼壁板自动铆接设备,该设备由传统的液压力驱动,配套有面向产品的数控托架^[5]。除此之外,西班牙M. TORRES-GONG公司和法国ALEMA公司也开发自己的自动钻铆设备^[6-8]。国内西安飞机工业(集团)有限公司、成都飞机工业(集团)有限公司、沈阳飞机工业(集团)有限公司等航空企业通过引进国外自动钻铆机,自行研制与之配套的数控托架并将其用于实际生产中。在航天领域,上海航天精密机械研究所、首都航天机械有限公司、天津航天长征火箭制造有限公司等单位已先后实现自动钻铆技术在型号上的应用^[9-10]。为

收稿日期:2021-08-18

基金项目:上海市科技计划项目(21XD1431800)

第一作者简介:张军,1986年出生,硕士,高级工程师,研究方向为数字化装配与先进连接技术。E-mail:535712411@qq.com

提高生产效率和质量,实现某运载火箭卫星整流罩的自动钻孔、送钉、铆接,本文对一种自动钻铆设备研制与工艺进行研究。

1 自动钻铆设备及其关键技术

1.1 自动钻铆设备结构

针对铆接对象的特点以及后期产品扩展性要求,整个铆接系统结构组成如图1所示,包括舱体自动对接系统和装夹定位系统两大部分。舱体自动对

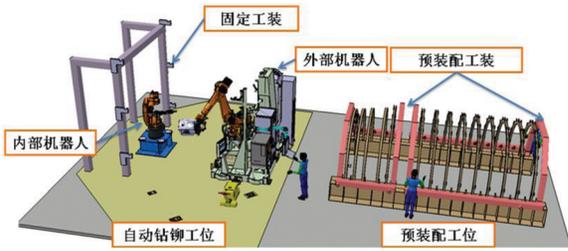


图1 舱体自动化钻铆设备结构组成

Fig. 1 Structure of automatic drilling and riveting equipment

接系统由外部机器人分系统、内部机器人分系统以及相应的软件和控制分系统组成,能够完成自动钻孔、送钉、铆接、测量、调整、铝屑收集等功能。装夹定位系统由预装配型架、铆接定位型架组成。

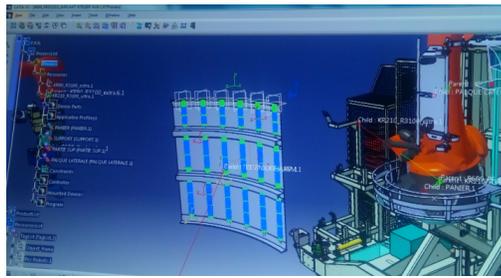
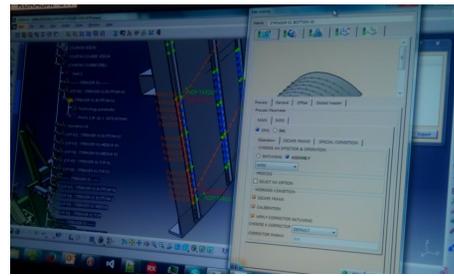


图2 钻铆加工轨迹规划

Fig. 2 Track planning of drilling and riveting



1.2.2 铆钉孔位累积误差精确控制

针对铆接过程主轴对中调整与法向调姿不同时段的控制要求,利用图像传感器与线位移传感器的良好互补性,设计由一个视觉传感器和三个线位移传感器构成的法向检测系统。采用CCD相机识别制

1.2 自动钻铆设备关键技术

针对某运载火箭卫星整流罩产品,在自动钻铆设备研制过程中先后突破了自动钻铆加工路径规划、铆钉孔位累积误差精确控制、机器人与工装集成控制、铆接接头质量控制系统开发与应用等关键技术,成功实现机器人自动化钻铆技术应用。

1.2.1 自动钻铆加工路径规划

针对舱体装配CAD模型,借助DEMIA软件,合理规划铆接区域,生成面向西门子控制器的XML数控代码。工作线路,也叫轨迹(trajjectory),如图2所示,是由一组工作点构成的线路,机械臂必须在这些点上停留作业、装配、视觉系统。接近和离开点是与作业相关的运动动作,目的在于避免与笛卡尔点发生碰撞,笛卡尔点在CART运动的试运行工艺中定义的。工作点是笛卡尔坐标系上的点。每一段桁条的加工轨迹均已设置接近(Approach)、离开点(Escape)和工作点(Working),共计约400条加工轨迹。为了减少后续调试工作量,接近和离开点以参考点的形式出现为宜,参考点选取过程可能会出现反复迭代的情形。

孔标志点,建立工件坐标系和自动钻铆设备坐标系之间的对应关系。在制孔标志点之间,控制系统进行制孔位插值,按预先规划的流程进行制孔。如图3所示。

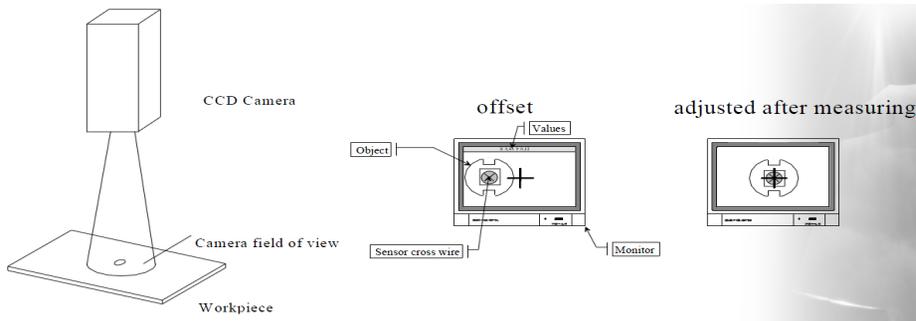


图3 铆钉孔位找正工作原理

Fig. 3 Alignment principle of fastener holes

1.2.3 机器人与柔性装夹工装集成控制

在智能化自动钻铆系统中,采用PC-based (Personal Computer based)控制技术确保模块化装夹工装、高效率机器人钻铆设备等设备间能够安全地完成各自的运行,并实现安全、高效、高节拍的生产。

控制系统能够与离线仿真编程系统配合,协调、稳定工作。具有自动铆接加工全过程的自动监控功能,工艺参数超限时可自动报警,并能实时显示全部加工数据,如图4所示。

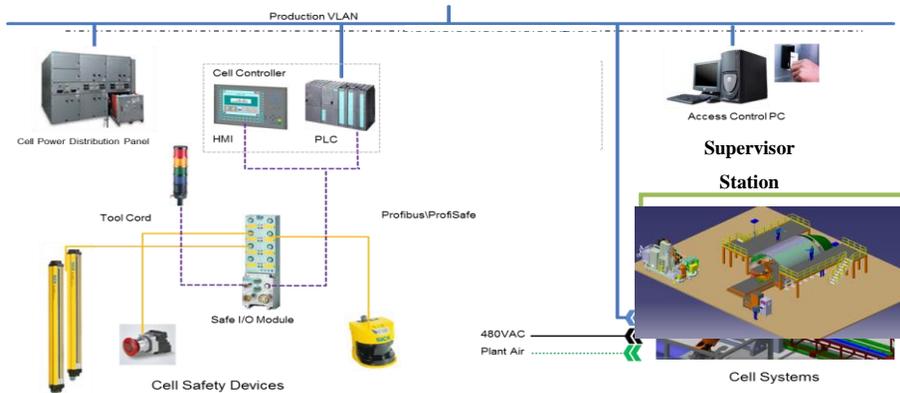


图4 机器人自动钻铆控制系统

Fig. 4 Robot automatic drilling and riveting control system

1.2.4 铆接接头质量控制系统开发与应用

在自动钻铆机压铆过程中,为了实现对铆接质量的实时监控,开发了对铆缸压铆力-位移数据的实时采集程序,此程序内部嵌入铆接力-位移特征点识别算法和镦头尺寸的经验求解算法,可以计算铆接后铆钉镦头尺寸和最大压铆力等参数,并由此来判断铆接质量是否合格,如图5所示。

糙度。钻头采用的 $\Phi 4.2$ mm三尖两刃钻钻头,钻头材料为硬质合金,如图6所示。

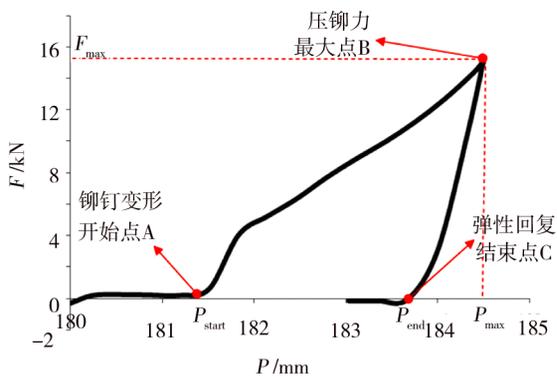


图5 压铆力与铆头位置曲线

Fig. 5 Relation curve between riveting force and rivet head position

2 自动钻铆工艺研究

为验证各机构和自动钻铆设备的工作情况,测量出不同规格铆钉的钻铆工艺参数,开展了相关的工艺试验。

2.1 钻孔工艺试验

针对3 mm 2A01铝板(与产品工况一致),采用设备自带钻削工艺参数库进行了钻削工艺参数实验,得到有效控制出口毛刺、镗窝深度和内孔表面粗



图6 钻孔工艺试验

Fig. 6 Drilling test

图7为钻孔试验的实物,目视毛刺高度小于0.1 mm,符合QJ 782A—2005要求。试验采用的最优工艺参数为主轴转速12 000 r/min,进给速度500 mm/min。



图7 钻孔试板检测

Fig. 7 Measure drilling test sample

2.2 送钉工艺试验

在自动钻铆设备使用过程中,插钉模块送钉不到位是影响自动钻铆工作效率的主要原因之一。一旦插钉模块送钉不到位,会导致设备停机并报警,故

障排除后才能继续加工,增加了后续铆钉拆除以及补铆的时间。为了减少上述故障出现的次数,需通过钻孔直径、镗窝深度和插钉工艺参数控制等手段进行控制,如图8所示。



(a) 插钉模块



(b) 送钉工艺试验

图8 送钉工艺试验

Fig. 8 Fastener feeding test

Insert_BACB30_Step1				
Parameters	0	1	2	Unit
ANTICIPATED	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
LIBERATED	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
ENABLED	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
FeedPosition	10	96	99.35	mm
FeedSpeed	12000	6000	6000	mm/
FeedTorque	50	60	60	%
FeedTorqueITType	0	0	0	
EndingTempo	0	200	200	ms
MaxAxialForce	150	150	150	daN

图9 送钉工艺参数

Fig. 9 Fastener feeding parameters

如图9所示,送钉可控制的工艺参数主要包括插钉深度、进给速度、扭矩、悬停时间等。试验结果显示,当按图9所示的工艺参数进行送钉,可达到较好的效果,成功率达99%以上。

2.3 铆接工艺试验

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 增刊 I

为与产品状态一致,试件采用1/4产品样件进行,铆钉选用HB6230-4×8、-4×9。图10为铆接工艺试验样件实物图。



图10 铆接工艺试验样件

Fig. 10 Riveting test sample

试验完成后,采用专用工具对铆头高度进行抽样测量,范围为2.0~2.1 mm,符合QJ 782A—2005 1.6~2.4 mm的要求。

3 产品试制

基于现有的机器人自动钻铆设备,结合钻孔工艺、送钉工艺以及铆接工艺试验成果,完成了某运载火箭卫星整流罩产品试制,验证了该项技术在卫星整流罩产品上应用的可行性和必要性,也满足航天制造企业对产品质量和效益的高要求,如图11所示。

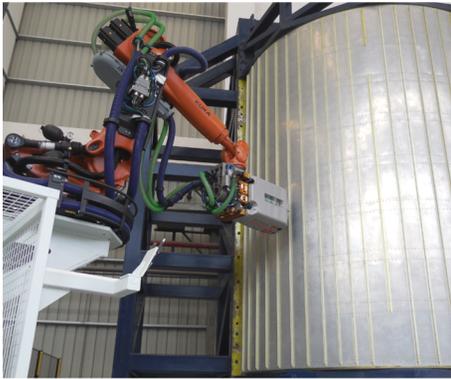


图11 自动钻铆加工过程

Fig. 11 Automatic drilling and riveting process

表1为设备加工后的产品精度测量结果。结果显示,自动钻铆设备加工后,舱体的精度指标符合设计要求。另外,单个铆钉的铆接质量也符合QJ782A—2005《铆接通用技术要求》。

表1 舱体精度测量结果

Tab. 1 Accuracy measurement results of cabin body

序号	测量内容	要求值/mm	实测值/mm
1	舱体结构高度	4112±2	4112.1
2	框环间距	530±1	529.8
3	框环间距	1028±1	1027.6
4	框环间距	1542±1	1541.9
5	框环间距	2056±1	2055.8
6	框环间距	2570±1	2569.7
7	框环间距	3084±1	3083.8
8	框环间距	3598±1	3597.6
9	铆钉头表面划伤	≤0.1	0.08
10	铆头直径	6±0.4	5.8~6.1
11	铆头高度	2±0.4	1.9~2.2

4 结论

(1)针对3 mm 2A01铝板,采用 $\Phi 4.2$ mm硬质合金三尖两刃钻,采用主轴转速12 000 r/min,进给速度500 mm/min钻孔时,孔口毛刺高度小于0.1 mm。

(2)通过控制插钉深度、进给速度、扭矩、悬停时间等工艺参数,可达到较好的送钉效果,成功率达99%以上。

(3)通过对直径4 mm铆钉的铆头高度进行抽样测量,机器人铆接后的铆头高度范围为2.0~2.1 mm,符合QJ 782A—2005 1.6~2.4 mm的要求。

(4)采用机器人自动钻铆技术后,试制产品的精度指标符合设计要求,极大地提高了钻铆质量与效率,同时降低了工人劳动强度,改善了劳动环境。

参考文献

- [1] 张开富,杨殿国,李原,等. 壁板自动钻铆行为及变形分析技术综述[J]. 航空制造技术,2010(23): 67-72.
ZHANG Kaifu, YANG Dianguo, LI Yuan, et al. Deformation analysis and application of automatic riveting for wing panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(23): 67-72.
- [2] 叶顺坚,梁莹,等. 自动钻铆技术在某运载火箭助推模块箱间段研制中的应用[J]. 上海航天, 2014, 31: 15-19.
YE Shunjian, LIANG Ying, et al. Application of automatic drilling and riveting technology in inter-tank section of some rocket booster[J]. Aerospace Shanghai, 2014, 31: 15-19.
- [3] PETER Zieve, JOHN Hartmann, STEVE Howard. Design of the automatic electromagnetic riveting assembly cell[J]. Paper 902045 for Sae Aerofast 90.
- [4] 马兴海,刘琦. 电磁铆接技术在航天产品上的应用[J]. 航天制造技术, 2009(4): 40-43.
MA Xinghai, LIU Qi. Application of electromagnetic riveting technology on aerospace products[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009(4): 40-43.
- [5] 曹增强. 应对我国大飞机研制的装配连接技术[J]. 航空制造技术,2009(2): 88-91.
CAO Zengqiang. Assembly connecting technology for the research of China large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(2): 88-91.
- [6] 张辉. 飞机装配设备及供应商一览[J]. 航空制造技术, 2008(11): 71-73.
ZHANG Hui. Introduction of aircraft assembly equipment and suppliers[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(11): 71-73.
- [7] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用[J]. 空制造技术,2005(6): 50-52.
LOU Ali. Development and application of automatic drilling and riveting technology at home and abroad [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(6): 50-52.
- [8] 陈平,赵振,李华,等. 复合材料壳段自动钻铆技术研究[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(5): 8-12.
CHEN Ping, ZHAO Zhen, LI Hua, et al. Research of Automatic drilling-riveting technology for composite shell [J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(5): 8-12.
- [9] 于渊,臧建新,张奇野,等. 锥体壳段壁板自动钻铆技术研究及应用. 航空精密制造技术,2020,56(1): 40-43.
YU Yuan, ZANG Jianxin, ZHANG Qiye, et al. Research and application of automatic drilling & riveting technology in cone segment panel[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2020, 56(1): 40-43.
- [10] 章茂云,侯东旭,孙立强,等. 运载火箭筒体壳段自动钻铆技术研究[J]. 航空精密制造技术,2018,54(5): 36-39.
ZHANG Maoyun, HOU Dongxu, SUN Liqiang. Research on automatic drilling & riveting technology in launch vehicle shell product [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2018, 54(5): 36-39.