

# 机器人自适应砂带磨削空速管关键技术研究\*

安寅平<sup>1</sup>, 胡昌浩<sup>2</sup>, 刘 帅<sup>2</sup>, 邹 莱<sup>2</sup>, 黄 云<sup>2</sup>

(1. 太原航空仪表有限公司, 太原 030012;

2. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

**[摘要]** 空速管材料 2A12 铝合金属于 Al-Mg-Cu-Si 系锻铝合金。此合金耐蚀能力好, 焊接性优良, 冷加工性较好, 主要是以铜为强化项的经加热预拉伸工艺铝合金。因主要合金元素含有 Mg、Si, 并形成 Mg<sub>2</sub>Si, 加工性能比较好, 具有较高的抗拉、屈服强度和硬度。强化铜含量相对较高、硬度适中、导热性大, 益于切削加工。同时易造成切削热变形, 因此不易控制尺寸精度。采用机器人砂带磨削方式并结合自适应加工技术, 对硬铝合金航空空速管进行磨削。通过蓝光对零件点位信息识别, 并导入到 Polyworks 软件中基于标准化模型进行余量添加, 根据腹板焊接空速管部件提取的点位信息, 建立四阶齐次矩阵反求出机器人运动轨迹, 保证磨削位姿和磨削参数; 基于腹板焊接空速管部件添加的型面余量信息, 自适应地对腹板焊接空速管部件的材料余量进行去除, 保证砂带磨削后的空速管加工精度。

**关键词:** 砂带磨削; 空速管; 蓝光; 自适应加工; 加工精度

## Research on Key Technologies of Robot Adaptive Belt Grinding Pitot Tube

AN Yinping<sup>1</sup>, HU Changhao<sup>2</sup>, LIU Shuai<sup>2</sup>, ZOU Lai<sup>2</sup>, HUANG Yun<sup>2</sup>

(1. Taiyuan Aviation Instrument Co., Ltd., Taiyuan 030012, China;

2. School of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**[ABSTRACT]** The pitot tubes' material is 2A12 aluminum alloy, belongs to Al-Mg-Cu-Si-series wrought aluminum alloy. The alloy has good corrosion resistance, weld ability and cold working ability. It is mainly made of aluminum alloy with copper as the strengthening term. Because the main alloy elements contain Mg, Si, and form Mg<sub>2</sub>Si, they have better processing properties and higher tensile strength, yield strength and hardness. Strengthened copper content is relatively high, hardness is moderate, thermal conductivity is large, beneficial to cutting. At the same time, it is easy to cause hot deformation in cutting. Therefore, it is difficult to control the dimensional accuracy. In this paper, the robot belt grinding method and adaptive machining technology was used to grind the pitot tubes of aluminum alloy. The point position in formation of parts was identified by blue light and added into Polyworks software based on standardized model. According to the point position information extracted from the web welded airspeed tube parts, the fourth-order homogeneous matrix was established to inversely calculate the motion trajectory of the robot to ensure the grinding posture and grinding parameters. Finally, the adaptive processing method is adopted, according to the surface allowance information of the web welded pitot tube parts. Then, the material removal of web welded pitot tube parts is quantitatively carried out to ensure the processing accuracy.

**Keywords:** Abrasive belt grinding; Pitot tube; Blue light; Adaptive machining; Processing accuracy

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.20.087

硬铝合金是一种高性能材料, 具有高强度、导电导热性以及抗腐蚀的优越性能, 在航空航天领域有着极其广泛地运用, 特别是用于制造燃气涡轮发动机中高温区

域的构件, 如叶片、涡轮盘、燃烧室等<sup>[1-2]</sup>。空速管又叫皮托管、总静-压管, 它的主要功能是测量飞机速度, 同时还兼具其他多种功能。一旦空速管损坏导致其不能提供正确的大气参数, 飞行器的飞行安全很难得到保障。空速管上的总压孔通常和静压孔布置在一起, 而

\* 基金项目: 中国航发自主创新专项资金项目(ZZCX-2017-C040)。

空速管本身通常处于飞机前端两侧,因此在飞行和停放过程中,长期遭受气流和沙尘的撞击,空速管本身连接结构易出现相对微动损伤故障。此外,如果飞机长期在沿海地区或者空气质量不好的地区飞行,由于沿海地区空气的湿度太大,气体中的杂质过多,空速管上的金属表层十分容易受到腐蚀、损伤。同时空速管内部装有精密电子元件,不允许液体浸入。因此空速管的可靠性、稳定性、安全性显得尤为重要。通过铣削的腹板件和焊接加工工艺制造的空速管,表面余量大、表面粗糙度大,焊接部位容易形成裂纹损伤,因此需要进一步加工<sup>[3-4]</sup>。但是由于焊接而成,导致难以找到空速管进一步磨削抛光的加工基准,同时,焊接后的空速管的加工余量并不沿表面均匀分布,尤其在焊缝处余量分布不均匀,存在余量过大的现象,因此空速管的加工精度很难得到保证。目前,对于硬铝合金空速管的加工通常采用人工通过砂轮进行焊缝的修磨和空速管整体的抛光。缺陷在于其工人作业环境恶劣,加工效率低,最后空速管的加工精度很难达标,报废率较高。而目前在一些重要场合,相对于采用数控机床等加工,采用工业机器人进行加工具有灵活、成本低的优势,因此机器人加工的工业应用越来越广泛,尤其是在航空航天行业<sup>[5]</sup>。

砂带磨削是一种弹性磨削,磨削时工件不易变形,还具有“冷态”磨削特性<sup>[6]</sup>,磨削低热导率的材料时,被磨削工件表面不易出现烧伤,同时砂带还有磨削、研磨和抛光多重作用,磨削后的工件表面质量较高。砂带磨削加工后的工件通常表面粗糙度值较小,表面残余应力状态好,没有较明显的微观裂纹或金相组织变化<sup>[7]</sup>。

本文采用机器人砂带磨削硬铝合金空速管,并结合自适应加工方法,保证最终的加工精度。机器人砂带研磨加工系统由PC机、机器人系统、砂带研磨系统等组成。加工系统工作时,将砂带研磨机构位置固定,空速管安装在机器人腕部的法兰盘上,通过控制机械臂的运动来控制空速管末端的运动轨迹,实现对空速管自由曲面的加工。

## 1 试验装置与参数

砂带磨削装置如图1<sup>[8]</sup>所示,空速管磨削图如2所示,机器人手臂末端装有气动装置,通过气动装置夹持夹具。砂带磨头上装配有外部轴,外部轴中有丝杆传动机构,用于实现磨削空速管时的压力控制,同时丝杆机构顶部装有电磁阀控制的气缸,通过气缸的伸缩实现磨头的抬刀与下刀,从而达到局部磨削的效果,并去除焊接表面余量。

由于砂带磨削时温度较低和加工环境的影响,本试验采用干磨方式。同时为了保证空速管磨削表面质量,

磨削方式选逆磨。砂带使用VSM公司生产的XK870F超涂层式陶瓷氧化铝砂带进行去量,用尼龙整体抛光,这种砂带的材料去除特性较好,磨削时温度较低,使用寿命长。试验时磨削用量和接触轮参数如表1所示。

## 2 余量加工迭代优化流程

采用新型三维建模软件进行二次参数化模型重构,利用AutodeskFusion360软件对空速管零件模型进行局部分割化、参数化修改,此软件的T样条联结功能满足此要求,最终得到标准参数化模型。

另外,用HEXAGON蓝光扫描仪,如图3所示扫描实际待加工空速管试件获取其点位信息,保存STL格式文件并导入到Polyworks软件中基于标准化模型进行余量添加,如图4所示。



图1 砂带磨削装置  
Fig.1 Belt grinding device



图2 空速管磨削实物图  
Fig.2 Physical drawing of pitot tube grinding

表1 试验磨削参数

Table 1 Parameters of grinding test

磨削参数	数值
砂带线速度	10~30m/s
磨粒粒度	800#
磨削压力	5~10N
接触轮直径	30mm
接触轮宽度	10mm

同时,设计机器人自动化打磨在线示教标定方法,设计适应的测量方法来计算夹具、砂带机实际空间安装位置的相对误差,计算出的相对误差可以保证运用离线编程仿真软件进行模型再现时的位置准确度,提高虚拟再现环境中设备位置与真实环境的一致性,从而实现移植和重复利用打磨编译轨迹;与 SolidWorks 对砂带机系统的模型进行组建,利用 AutodeskFusion360 的直接建模功能对腹板焊接空速管模型的局部边角圆柱度锥度等进行参数化处理,利用 UGNX9.0 对腹板焊接空速管部件表面进行导入离线编程软件前的等参数化处理,并结合 ABB 公司的 (ABBRobotStudio) 软件离线编程仿真功能,采用相应的四阶齐次矩阵计算后,坐标系的理论位置与实际位

置达成一致;然后对空速管模型进行加工轨迹规划,将加工轨迹离散成点位,根据相应的加工点位信息对机器人运动求逆解,实现机器人的运动轨迹控制;最后基于添加的空速管面余量信息,自适应地对腹板焊接空速管部件的材料余量进行去除,保证砂带磨削后的空速管加工精度,如图 5 所示。

将空速管腹板焊接构件分别标记为 A(腹板)、B(焊缝)、C(管件),如图 6 所示,并针对构件 3 个位置各取 9 个截面点位特征识别提取以便粗糙度值的测量。

### 3 机器人自动化打磨应用控制方法设计

机器人编程方法<sup>[9]</sup>分为在线示教编程与离线编程。其中利用在线示教编程对机器人的高精加工进行编

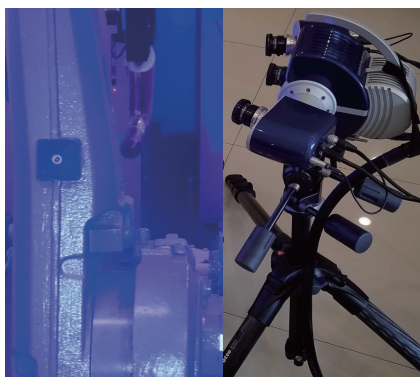


图3 HEXAGON蓝光扫描仪  
Fig.3 HEXAGON blu-ray scanner

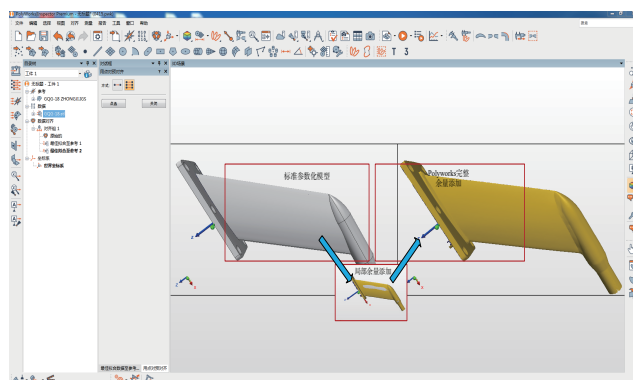


图4 Polyworks余量添加平台  
Fig.4 Polyworks residual addition platform

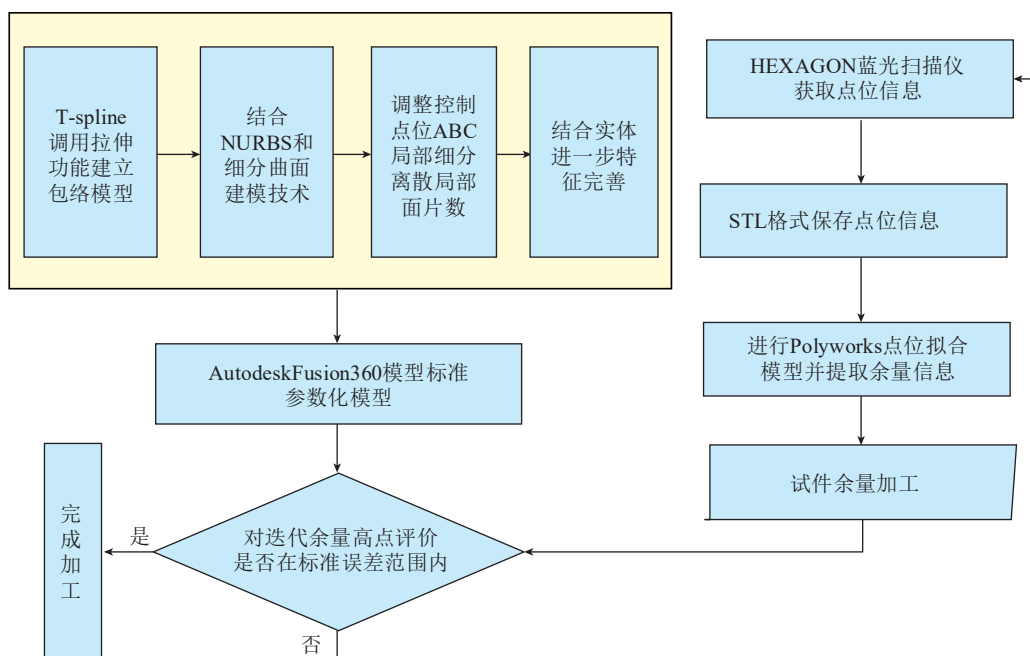


图5 余量加工迭代优化流程图  
Fig.5 Process optimization of modifying progress

程还具有很大的局限性,并且这种编程方式受到人为影响较大。对几何形状复杂的工件的精密磨削加工时,通常采用离线编程的方式进行编程。因此本文中采用离线编程的方式对空速管机器人砂带磨削加工进行编程。由于砂带磨削时是线接触,目前没有能够特定的直接的生成机器人磨削加工路径的软件。而UG软件中有许多二次开发的接口函数,可以利用这些函数开发相应的功能。因此,本研究利用这种方式来实现对空速管加工轨迹规划和刀位点提取。本文利用UG二次开发中的UG/Open API来进行飞机空速管砂带磨削轨迹规划。由于需要加工的飞机空速管的型面容易被破坏,曲面曲率变化大,因此规划的加工路径一定要合理,合理的加工路径是飞机空速管加工后质量的保证,同时也是飞机空速管加工的难题所在。要进行轨迹规划首先要生成相应的加工轨迹,而进行轨迹生成的方法有很多种,其中最常用的轨迹生成方法主要有等参数法、投影法、截面线法、和偏置面法等。在对飞机空速管的模型进行修改时,发现空速管型面的等参数线顺滑,且分布均匀,故本文选择等参数法提取空速管加工轨迹。等参数法有两种走刀方式,不同的走刀方式的加工效果是截然不同的。由于纵向运动时磨削加工的效率更高且磨削后工件表面的疲劳强度更高,所以本文选择纵向运动的方式对空速管进行磨削。

如上文所述,对UG二次开发的环境进行配置,调

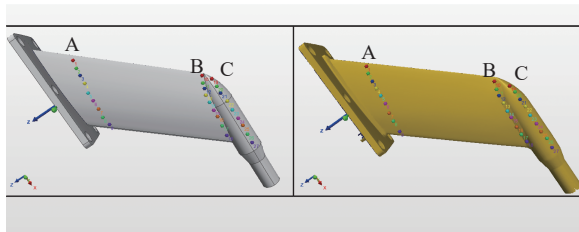


图6 模型点位特征识别

Fig.6 Model point feature recognition



图7 机器人各坐标系

Fig.7 Robot coordinate system

用UF\_PART\_Open()打开飞机空速管的三维模型,再调用函数UF\_UI\_select\_with\_class\_dialog对需要加工的空速管曲面进行选择,再调用函数UF\_MODL\_create\_isocurve生成空速管的 $u$ 、 $v$ 等参数线,等参数线就是相应的砂带加工时的刀触点轨迹。UG二次开发可以提供许多轨迹线离散成点位的函数,本文中直接通过调用API函数UF\_MODL\_ask\_curve\_points(tag\_t\_curve\_id, double ctol, double atol, double stol, int \*numpts, double \*\*pts),设置相应参数以提取出曲线上的点位,将相应的等参数线离散,得到加工点位信息,通过机器人运动学求逆解得到相应的实现机器人运动轨迹的各轴的转角信息,实现机器人砂带磨削空速管的轨迹运动,完成空速管磨削加工图7。在ABB机器人的控制系统中,remoteljogMOVE指令是让机器人以关节运动的方式运动到指定点,通过控制各个关节转角数值可以控制机器人实现相应的运动。remoteljogMOVE指令是控制机器人以直线插补的运动规律完成点到点的运动,所以在前期轨迹离散时需特别注意等误差法的误差值设置<sup>[10]</sup>。

根据上文选用的点位离散函数,得到相应的加工点位信息,根据相应的加工点位信息求解机器人相应的六个关节转角,编写相应的控制程序,其结果如图8所示,将程序导入机器人控制器,通过显示器界面操作,执行上传程序即可完成机器人磨削加工轨迹运动。

#### 4 砂带磨削表面粗糙度试验结果

选取磨削后的硬铝合金空速管的九个截面测量其粗糙度值。测量装置为Taylor Hobson公司生产的FTS Intra表面粗糙度轮廓仪。由于沿垂直磨削方向进行测量结果更为准确,因此本文中沿着垂直磨削方向对腹板、焊缝、管材3个位置各取9个点分别进行3次测量取平均值,测量长度为4mm,评定长度为0.8mm。

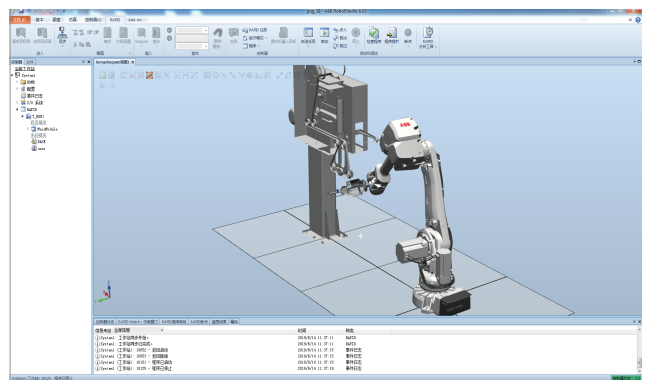


图8 机器人ABB RobotStudio界面控制

Fig.8 ABB RobotStudio interface control



图9 硬铝合金磨削后的表面

Fig.9 Surface after grinding duralumin

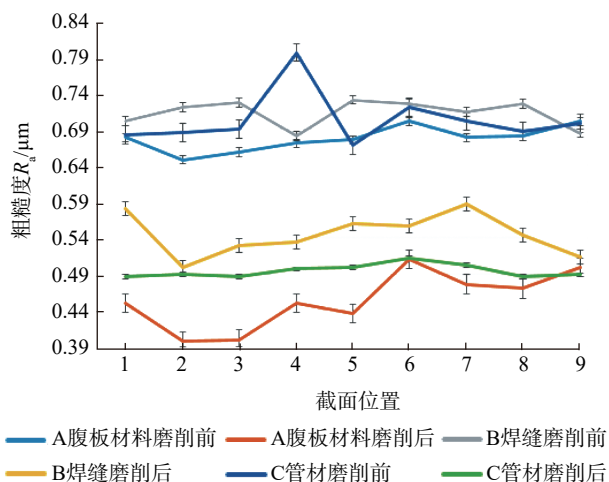


图10 截面粗糙度

Fig.10 Profile roughness

最终磨削完成的空速管如图9所示,粗糙度的测量结果如图10所示(砂带线速度经验值26m/s)。本次试验采用的是用陶瓷XK870F进行去量尼龙整体抛光,对硬铝合金空速管自适应磨削后,其腹板表面稳定粗糙度值 $R_a$ 为 $0.454\mu\text{m}$ ,焊缝和管材粗糙度值分别为 $0.544\mu\text{m}$ 、 $0.494\mu\text{m}$ 。经过机器人抛光的飞机空速管表面质量得到了很大的提升,焊缝余量已经完全磨除,抛光后的工件表面光滑并且纹路整齐,最终粗糙度满足技术要求。

## 5 结论

(1)通过AutodeskFusion360和UG二次开发API模块,确定硬铝合金风速管相对与夹具的实际位置,并以此为基准为后续加工提供依据。

(2)运用HEXAGON蓝光扫描仪扫描实际待加工空速管试件获取其点位信息, Polyworks软件进行余量包覆,并进行迭代加工,保证了良好的加工精度和表面粗糙度。

(3)采用自适应加工方式对空速管进行磨削,在确定磨削参数后,空速管表面焊缝余量精准地去除了,提

高了空速管的表面一致性,最后测量空速管表面的各点粗糙度,最终空速管的腹板表面粗糙度 $R_a$ 为 $0.454\mu\text{m}$ ,焊缝和管材 $0.544\mu\text{m}$ 、 $0.494\mu\text{m}$ 。

## 参考文献

- [1] SHARMAN A R C, HUGHES J I, RIDGWAY K. Workpiece surface integrity and tool life issues when turning Inconel 718 (TM) nickel based superalloy[J]. Machining Science and Technology, 2004, 8(3): 399-414.
- [2] 姚倡锋,沈雪红,张定华. GH4169高温合金端面车削表面变质层的形成机理[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 50-58.
- [3] YAO Changfeng, SHEN Xuehong, ZHANG Dinghua. Formation mechanism of surface deterioration layer on GH4169 superalloy surface turning[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(6): 50-58.
- [4] 庄绪华,张家军,褚春祥,等. 镍基高温合金叶片高效加工研究[J]. 金属加工(冷加工), 2017(14): 8-12.
- [5] ZHUANG Xuhua, ZHANG Jiajun, ZHU Chunxiang, et al. Study on efficient processing of nickel-based superalloy blades[J]. Metal Working, 2017(14): 8-12.
- [6] 吴清雨. 高温合金薄壁叶片铣削加工变形基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [7] WU Qingyu. Basic research on machining deformation of superalloy thin-walled blades[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [8] ADEL O, RICHARD B, OLIVIER G, et al. Feedrate planning for machining with industrial six-axis robots[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(5): 471-482.
- [9] 黄云,黄智. 现代砂带磨削技术及工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.
- [10] HUANG Yun, HUANG Zhi. Modern abrasive belt grinding technology and engineering application[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2009.
- [11] 黄云,黄智. 砂带磨削的发展及关键技术[J]. 中国机械工程, 2007, 18(18): 2263-2267.
- [12] HUANG Yun, HUANG Zhi. Belt grinding development and key Technologies[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(18): 2263-2267.
- [13] 熊有伦,丁汉,刘恩沧. 机器人学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [14] XIONG Youlun, DING Han, LIU Encang. Robotics[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [15] 任旭,黄云,杨仲升,等. 机器人砂带磨削船用螺旋桨关键技术[J]. 工艺与检测, 2015(11): 127-131.
- [16] REN Xu, HUANG Yun, YANG Zhongsheng, et al. Key technologies for propeller of robot belt grinding[J]. Process and Inspection, 2015(11): 127-131.
- [17] 任旭. 航发叶片机器人砂带磨削关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [18] REN Xu. Study on key techniques for robot belt grinding of aero engine blade[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

通讯作者: 安寅平, 工程师, 研究方向为机械制造, E-mail: THPWZ@163.com。

(责编 涛山)