

整体叶盘数控砂带磨削技术及其试验

刘智武¹,陈贵林¹,黄云²,邹莱²,刘秀梅¹,肖贵坚²,张美²

(1. 中国航发西安航空发动机有限公司,西安 710021;

2. 重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

[摘要] 针对航空发动机整体叶盘结构复杂、材料难加工,铣削加工后粗糙度无法达到设计要求,铣削纹理明显,目前的手工抛光难以满足整体叶盘表面质量和型面精度要求的现状,提出了整体叶盘数控砂带磨削技术及其工艺试验。概述了整体叶盘砂带磨削研究进展,分别从新型砂带磨削技术和自适应砂带磨削技术等方面阐述了整体叶盘全型面数控砂带磨削技术。介绍了整体叶盘全型面数控砂带磨削试验装置及其数控磨削加工软件,利用该装置完成了4种不同级别的整体叶盘精密磨削加工试验。结果表明:整体叶盘磨削后,表面粗糙度小于 $0.4\mu\text{m}$,型线精度小于 0.05mm ,同时型面精度一致性显著提高。

关键词: 整体叶盘; 数控; 砂带; 磨削; 抛光

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.21.093



刘智武

研究员级高级工程师,中航发动机机械加工技术领域首席技术专家,长期从事航空发动机盘环、机匣等关键零部件的制造及航空先进制造技术的研究工作,曾获中航工业技术奖10项,国防及省部级技术奖3项。

航空发动机整体叶盘是新一代先进航空发动机实现结构创新与技术跨越的核心关键零部件^[1]。这种创新结构大大降低了整体叶盘重量、减少了气流的泄露,对于改善压气机的稳定性、减少了轮盘沿径向的温度梯度、降低发动机故障率、提高其耐久性与可靠性具有重要影响^[2-3]。

目前整体叶盘叶型加工的主流工艺是数控精密铣削加工→手工抛光→振动(或磨粒流)光饰,由于铣削加工存在切削刀痕,仅靠振动(或磨粒流)光饰工艺无法有效去除铣削刀痕,手工抛磨预处理仍是目前国内主要的整体叶盘加工方式,存在形状尺寸可控性差,型面精度、表面质量一致性差,表面纹理不一致问题,同时存在工人劳动强度大,加工效率低,对操作人员的技能水平要求高,难以满足四、五代机整体叶盘的产品要求^[4-5]。

在国外,美国 ACME、Huck 等公司采用机器人夹持抛光轮和砂带磨头的方法实现了整体叶盘的精密加工,并且取得良好的效果。德国的 Metabo 公司采用六轴联动砂带磨削技术实现了航空发动机叶片型面的加工,但是目前仍然没有解决叶片根部及边缘的加工,而且对于整体叶盘的加工,还鲜见报道^[2]。

重庆大学黄云等针对国内整体叶盘的设计、制造工艺的需求,运用七轴六轴联动数控砂带磨削技术实现整体叶盘的抛光加工,提出了一种适用于航空航天整体叶盘叶片内、外弧面的砂带磨削装置^[6-7]。在此基础上魏和平^[8]对整体叶盘叶片内外弧型面砂带磨削技术进行了研究。刘召洋^[9]对整体叶盘叶片型面砂带磨削路径规划与机床空间轴系进行了分析。同时, Xiao 和 Huang^[10]通过对整体叶盘定载荷自适应数控砂带

磨削加工方法以及进排气边砂带磨削技术的研究,提高了整体叶盘单个叶片型面磨削精度以及表面质量。

吉林大学张雷等设计了一种用于整体叶盘自动磨抛的砂带工具系统,可以实现对整体叶盘叶片凸面和凹面的磨抛,有效避免磨抛过程中砂带与相邻非磨抛叶片的干涉^[11]。在此基础上,提出了用于整体叶盘叶片进排气边和叶根磨抛的集成式工具系统,并对其进行了研究^[12]。张福庆^[13]对整体叶盘磨抛机床虚拟样机结构静动力学分析来研究其静动态特性,并建立了整机多柔体动力学模型。张小光^[14]采用 CATIA 建立机床的三维模型,并运用 ANSYS Workbench 对立柱和床身结构进行了优化。孙振江^[15]和徐义程^[16]对整体叶盘磨抛力/位解耦控制进行了研究,建立了永磁同步电动机和机械传动系统的数学模型,并设计了基于干扰观测器的磨抛力 PID 控制器和模糊 PID 控制器。

可见,针对整体叶盘的数控抛磨技术国内外做了很多的研究工作,但是磨料磨损、表面质量一致性等关键技术的未突破制约了该技术的进一步推广应用。

整体叶盘全型面数控砂带磨削技术

1 新型砂带磨削技术

砂带磨削是将砂带通过张紧机构张紧,在压力作用下使得砂带与工件表面接触,并利用驱动轮驱动使之高速运转产生相对运动,实现高精密砂带磨削加工。根据砂带磨削的机理可以将砂带磨削分为开式砂带磨削和闭式砂带磨削(图 1)。图 1 (a) 是典型的闭式砂带磨削的基本形式,此种形式应用最为广泛。图 1 (b) 所示的开式砂带磨削在精密加工和超精密加工之中有很好的应用,由于将砂带缠绕在卷轮上,可使用的砂带很长,可以节省换带时间。

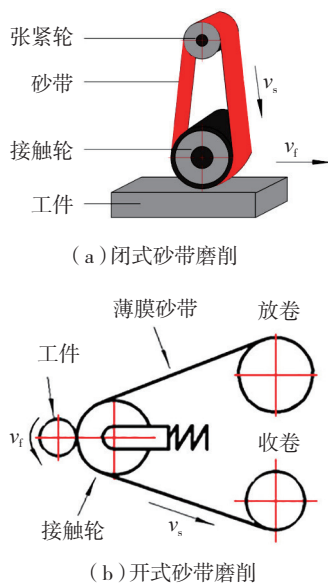


图 1 砂带磨削示意图

Fig.1 Schematic diagram of abrasive belt grinding

闭式砂带磨削形式在磨削过程中砂带的磨损会影响整体叶盘表面质量及型面精度,然而现有的开式砂带磨削仅用于轴类零部件的精密加工,对于具有复杂曲面特征的整体叶盘的精密加工,存在一定的局限性。为了提高型面精度一致性,减小砂带磨损对表面质量以及型面精度的影响,提出了新型砂带磨削方法(图

2)。

新型开式砂带磨削主要包括卷带轮 1、10,过渡轮 2、4,张紧轮 3,接触轮 6,接触杆 7。初始砂带缠绕在卷带轮 1 上作为储带轮,砂带依次绕过渡轮 2、张紧轮 4、过渡轮 3、接触轮 6,最后缠绕在卷带轮 9 上。

该方法通过压力控制轴 7 控制砂带与工件型面的接触压力 F_a ,在磨削进给速度为 V_f 的同时,储带轮与卷带轮的同步运动保证在带轮半径 R_L 和 R_R 不断变化的情况下通过控制同步运动转速 n_L 和 n_R 以及转角 θ_L 和 θ_R 保证砂带同步线速度 V_{sL} 和 V_{sR} 以及砂带拉力 T_L 和 T_R 相同,进而形成砂带往复运动线速度 V_s 。

新型砂带磨削方法对实现型面精度一致性具有如下优势:一方面通过收卷轮驱动轮系的运动,实现砂带不间断自动更新;另一方面在轮系的共同作用下,砂带能够产生一定速率的磨削运动(振动频率 f 和振动幅度 b),在工件只做进给运动的条件下,利用砂带微切削快速累积效应,实现铣削残差层的高效去除加工。由于叶盘单个叶片加工砂带损耗少(3~5mm/cm²,其中分子为砂

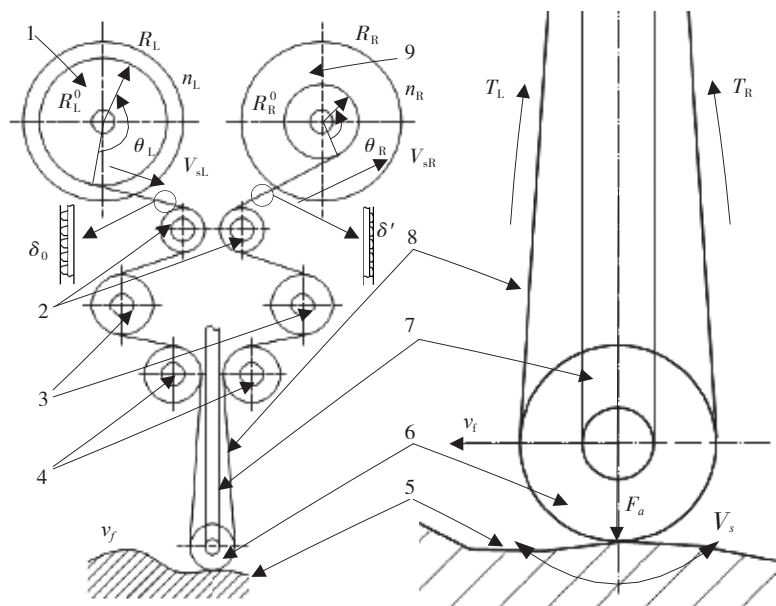


图 2 新型砂带磨削方法

Fig.2 New method of belt grinding

带损耗长度,分母为叶盘抛磨面积),长卷砂带耐用性强,通常,一卷砂带(200~300m)便能够满足整个叶盘的加工需要。

2 整体叶盘型面压力自适应砂带磨削技术

由于整体叶盘流道面深而窄,在磨削过程中,需要把接触轮部件深入到两叶片之间,为了避免磨削过程中与其他叶片发生干涉,同时实现流道、叶根与盘体转接圆角过渡段等部位的磨削,接触轮要做到足够的小,直径约为8mm,砂带与接触轮的包角也要很小。接触轮的轴线要与叶片型面法线之间呈一定的角度 α ,避免产生侧刃干涉,随着叶片型面的变化,接触轮轴线与叶片型面法线之间有微小的角度变量 $\Delta\gamma$,并在加工过程中对该变量进行修正保证接触的最佳状态。图3是整体叶盘磨削磨头结构受力简图,磨削压力 F 是气缸通过杠杆原理传给接触轮,砂带张紧边的拉力为 F_s ,松边的拉力为 F_s' ,砂带与工件之间的摩擦力为 F_t ,砂带与接触轮轴线之间的角度为 β 。

根据图3所示,接触轮受到多个方向的力,其大小不一。为保持整体

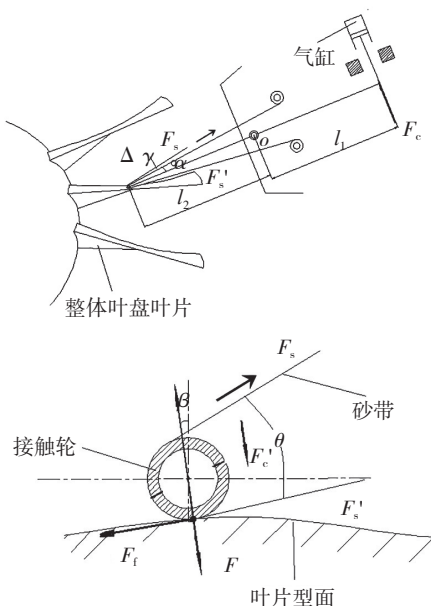


图3 磨头机构受力简图

Fig.3 Stress diagram of the grinding head

结构的稳定性,受力平衡方程为:

$$F = F_c' - (F_s \cos(\alpha - \beta) - F_s' \cos(\alpha + \beta)) \cos \Delta\gamma, \quad (1)$$

由于叶片型面的变化量非常小,因此 $\Delta\gamma$ 趋于零,即 $\cos \Delta\gamma \approx 1$,式(1)可以简化为:

$$F = F_c' - F_s \cos(\alpha - \beta) + F_s' \cos(\alpha + \beta), \quad (2)$$

其中:

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta, \quad (3)$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta. \quad (4)$$

通过杠杆原理,气缸的输出力为 F_c ,活塞到旋转点的距离 l_1 与接触轮到旋转点的距离 l_2 ,3者决定了接触轮处压力 F_c 的值,即:

$$F_c' \cdot l_2 = F_c \cdot l_1. \quad (5)$$

根据带传动的相关知识,在砂带临界打滑的状态时,紧边拉力 F_s 和松边拉力 F_s' 的比值是恒定的,由欧拉公式得:

$$\frac{F_s}{F_s'} = e^{f\theta}, \quad (6)$$

式中, f 为接触轮与砂带之间的摩擦系数, θ 为接触轮处的包角。把式(5)和式(6)带入式(2)可得:

$$F = F_c' \frac{l_1}{l_2} (s) - F_s \cos(\alpha - \beta) + F_s \cos(\alpha + \beta) \cdot e^{f\theta}. \quad (7)$$

在实际的整体叶盘叶片型面磨削过程中,接触轮轴线与叶片型面的法线之间的角度变量 $\Delta\gamma$ 是随型面变化的,磨削压力 F 也随之作微小的变化,能够更好地保证叶片型面的一致性。

整体叶盘全型面数控砂带磨削装置

针对发动机整体叶盘设计、制造工艺的需求及叶盘的结构特点,用户单位和重庆大学联合开展了整体叶盘全型面数控砂带磨削工艺试验方案及其试验装置(图4)的研发,该装置包含新型砂带磨头、床身、高精度

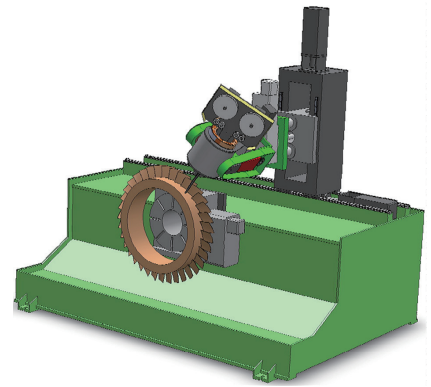


图4 整体叶盘数控新型砂带磨削装置

Fig.4 New-belt grinding CNC equipment for blisk

旋转转台和导轨等组成。该装置保证整体叶盘在一次装夹的情况下完成全型面的数控精密砂带磨削,减少由于工件重复装夹误差对整体叶盘砂带磨削表面精度及一致性的影响。

磨削加工时,将整体叶盘定位装夹在转台工装上,磨头安装在三轴回转和三坐标移动的主机上,根据叶片型面数据,采用高档数控系统控制,实现砂带与叶片型面的定点接触,同时通过同步运动控制,实现整体叶盘的砂带磨削。

整体叶盘砂带磨削装置采用西门子840D数控系统;数控加工软件是自行研发的砂带磨削加工软件系统TBGS,该软件能完成数控加工代码生成、模拟仿真以及向数控砂带磨床传输数控代码等任务,具有精度高、系统稳定等特点。

试验研究及结果分析

选取4个钛合金整体叶盘试件,试件编号为1#、2#、3#、4#,在完成数控精密铣削加工的基础上开展砂带磨削试验研究,砂带磨削完成后分别在不同编号的整体叶盘上选取一个叶片,测量叶片叶型上3个截面的型面精度及其表面粗糙度。

1 整体叶盘表面质量分析

图5所示为整体叶盘型面的数控砂带磨削前后对比图。可以明显看出,在采用新型开式砂带磨削以

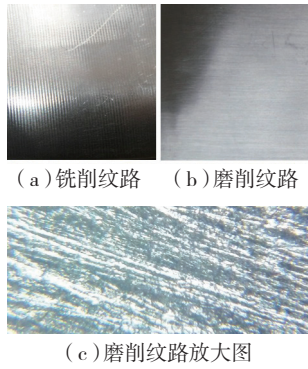


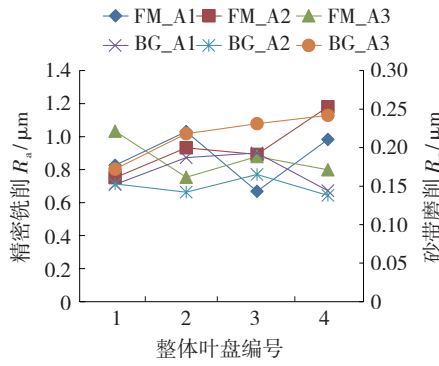
图5 整体叶盘磨削前后对比

Fig.5 Comparing between after and before belt grinding for blisk

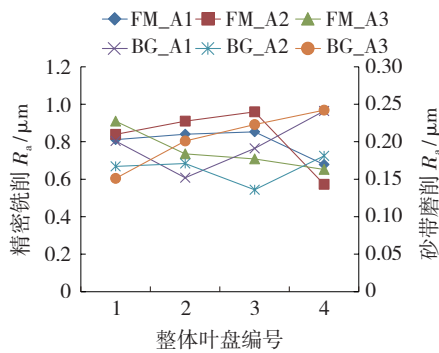
后,加工表面为典型的塑性磨削痕迹,无粘附物存在,叶片表面质量显著提高,基本消除了铣削刀痕及过渡区域的接刀,叶片表面无烧伤、刮痕等缺陷,表面质量一致性好。同时为了直观地分析整体表面局部特征,对叶片磨削后的局部点进行了放大,可以看出,在整体叶盘开式砂带磨削以后,叶片表面纹路细腻,形成方向一致可控的磨削纹路,且该磨削纹路沿着叶片纵向方向,有利于提升整体叶盘叶片的抗疲劳性能。

图6所示为整体叶盘砂带磨削(Belt Grinding, BG)前后叶背型面与叶盆型面的表面粗糙度,图6(a)为整体叶盘叶盆型面表面粗糙度;图6(b)为整体叶盘叶背型面表面粗糙度。可以看出,精密铣削(Finish Milling, FM),整体叶盘叶盆型面表面粗糙度 R_a 在 $0.52\sim 1.09\mu\text{m}$ 之间,整体叶盘叶背型面表面粗糙度 R_a 在 $0.64\sim 0.99\mu\text{m}$ 之间,表面粗糙度一致性较差,不能满足设计 $R_a 0.4\mu\text{m}$ 的要求。采用砂带磨削以后,整体叶盘叶盆型面表面粗糙度 R_a 在 $0.12\sim 0.25\mu\text{m}$ 之间,整体叶盘叶背型面表面粗糙度 R_a 在 $0.16\sim 0.25\mu\text{m}$ 之间,达到设计 $R_a 0.4\mu\text{m}$ 的要求。

图7所示为整体叶盘砂带磨削表面残余应力测试。可以看出,整体叶盘叶片表面残余应力在 $-200\sim -400\text{MPa}$ 之间,呈压应力状态。



(a) 叶盆表面粗糙度



(b) 叶背表面粗糙度

图6 整体叶盘表面粗糙度分析

Fig.6 Analysis of surface roughness on blisk

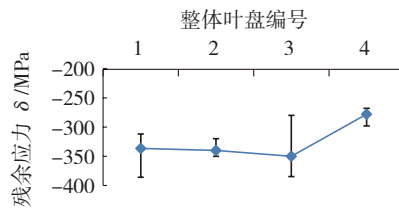


图7 整体叶盘叶片残余应力分析

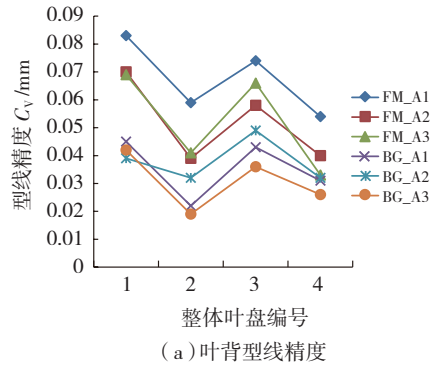
Fig.7 Analysis of residual stress on blisk blade

2 整体叶盘型线精度分析

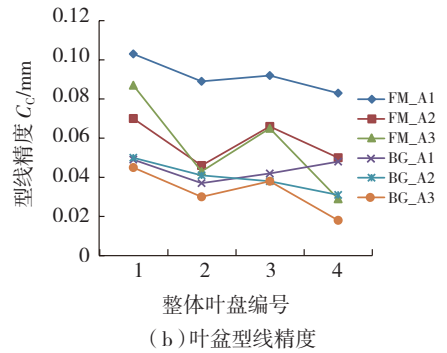
如图8所示,整体叶盘精密铣削后,叶片叶背型线精度在 $0.036\sim 0.082\text{mm}$ 之间,整体叶盘叶盆型线精度在 $0.029\sim 0.103\text{mm}$ 之间。在磨削以后,整体叶盘叶背型线精度在 $0.019\sim 0.038\text{mm}$ 之间,整体叶盘叶盆型线精度在 $0.025\sim 0.042\text{mm}$ 之间。由此可以看出,经过砂带磨削以后,能够明显地提高整体叶盘全型面的型线精度及其一致性要求。

结束语

(1) 通过采用合作单位重庆大



(a) 叶背型线精度



(b) 叶盆型线精度

图8 整体叶盘型线精度分析

Fig.8 Analysis of profile precision on blisk

学在新型砂带磨削理论及磨削控制技术上的最新研究成果,在定制研发的整体叶盘专用磨削装置上实现了叶盘叶型表面的全型面磨削,验证了新型砂带磨削理论及控制技术的工程可行性。

(2) 整体叶盘采用新型砂带磨削后,整体叶盘叶背和叶盆型面无刮痕、烧伤等表面质量缺陷,表面纹路细腻且纹路方向一致性高,基本消除精密铣削缺陷以及过渡区域刀痕。

(3) 整体叶盘磨削后,表面粗糙度小于 $R_a 0.4\mu\text{m}$,型线精度小于 0.05mm ,表面残余应力为压力应状态,表面残余应力在 $-200\sim -400\text{MPa}$ 之间,同时型面精度一致性有所提高。

参考文献

[1] 王增强. 先进航空发动机关键制造技术[J]. 航空制造技术, 2015 (22):34-38.

WANG Zengqiang. Key manufacturing technology of advanced aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015 (22):34-38.

[2] 黄云,肖贵坚,邹莱. 整体叶盘抛

光技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2016, 37(7):1401-1419.

HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of polishing technology for blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7):1401-1419.

[3] 任军学, 张定华, 王增强, 等. 整体叶盘数控加工技术研究[J]. 航空学报, 2004, 25(2):205-208.

REN Junxue, ZHANG Dinghua, WANG Zengqiang, et al. Research on the NC machining technique of blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2): 205-208.

[4] 肖贵坚, 黄云, 伊浩. 面向型面精度一致性的整体叶盘砂带磨削新方法及实验研究[J]. 航空学报, 2016, 37(5):1666-1676.

XIAO Guijian, HUANG Yun, YI Hao. Experimental research on the new belt grinding method for the consistency of the blisk profile and surface precision[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(5):1666-1676.

[5] 程荣凯. 整体叶盘型面磨削加工工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

CHENG Rongkai. Research on the grinding process of the blisk moulding surface[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[6] 黄云, 杨俊峰, 叶潇潇, 等. 一种适用于航空航天整体叶盘叶片内外弧面的砂带磨削装置: ZL2012102340507[P]. 2014-06-18.

HUANG Yun, YANG Junfeng, YE Xiaoxiao,

et al. A belt grinding equipment used for blisk blade edge-R: ZL2012102340507[P]. 2014-06-18.

[7] 肖贵坚, 黄云, 路勇, 等. 离散型空间焊道 CBN 砂带当量随行磨削技术[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9):191-198.

XIAO Guijian, HUANG Yun, LU Yong, et al. Discrete spatial welding machining using equivalent follow CNB belt grinding technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(9):191-198.

[8] 魏和平. 整体叶盘叶片内外弧型面砂带磨削技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

WEI Heping. Research on abrasive belt grinding of blisk blade inner and outer profile[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[9] 刘召洋. 整体叶盘叶片型面砂带磨削路径规划与机床空间轴系分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

LIU Zhaoyang. Path planning for blisk blade surface belt grinding and spatial axis analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[10] XIAO G J, HUANG Y. Constant load adaptive belt polishing of the weak-rigidity blisk blade [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12): 1473-1484.

[11] 张雷, 贺昌龙, 唐洪峰, 等. 用于整体叶盘叶片进排气边和叶根磨抛的集成式工具系统: ZL201410126559.9[P]. 2014-06-04.

ZHANG Lei, HE Changlong, TANG Hongfeng, et al. Integrated tool system for the grinding and polishing of edge and root of blisk blade: ZL201410126559.9[P]. 2014-06-04.

[12] 赵怀祥. 抛磨整体叶盘工具系统研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011.

ZHAO Huaixiang. Development of polishing tool for blisk[D]. Jilin: Jilin University, 2011.

[13] 张福庆. 整体叶盘磨抛机床虚拟样机研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.

ZHANG Fuqing. Research on virtual prototype of grinding and polishing machine tool for blisk finishing [D]. Jilin: Jilin University, 2013.

[14] 张小光. 整体叶盘磨抛测机床结构优化与分析[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.

ZHANG Xiaoguang. Structure optimization and analysis of grinding polishing and measurement machine tool for blisk finishing[D]. Jilin: Jilin University, 2014.

[15] 孙振江. 整体叶盘砂带磨抛加工轨迹规划研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.

SUN Zhenjiang. Research on belt polishing path planning process for blisk[D]. Jilin: Jilin University, 2014.

[16] 徐义程. 整体叶盘磨抛力/位解耦控制研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.

XU Yicheng. Research on force/position decoupling control for blisk grinding and polishing [D]. Jilin: Jilin University, 2014.

Experimental on the Computer Numerical Control of Belt Grinding Technology for Blisk

LIU Zhiwu¹, CHEN Guilin¹, HUANG Yun², ZOU Lai², LIU Xiumei¹, XIAO Guijian², ZHANG Mei²

(1. AECC Xi'an Aero-Engine Ltd., Xi'an 710021, China;

2. The State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[ABSTRACT] For complex surface structure and difficult to machining materials for aeroengine blisk, the surface roughness is outer design requirements by precision milling, and the milling texture is obvious. The experiment on the computer numerical control (CNC) of belt grinding technology for blisk is proposed for the surface quality and profile accuracy requirements, which is difficult to meet by the method of manual polishing. Firstly, the current belt polishing for blisk is studied, and then, the CNC belt grinding for blisk is studied from the new belt grinding technology, force adaptive belt grinding technology and six-axis principle. Secondly, the CNC belt grinding equipment and software are introduced. Finally, four different blisks are used to experiment research. The results show that the surface roughness is less than $0.4\mu\text{m}$, the profile accuracy is less than 0.05mm and the precision consistency is significantly improved.

Keywords: Blisk; Computer numerical control; Abrasive belt; Grinding; Polishing

(责编 大漠)