

航空发动机叶片数控加工 新技术及应用

吴志新, 昂给拉玛, 甘丽君

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

[摘要] 针对航空发动机压气机叶片数控加工技术的发展现状,着重阐述了数控集成一体化加工、叶片快换装夹、局部自适应加工、数控机械抛光等技术的特点以及这些技术在国内航空发动机叶片制造领域的应用现状。介绍这些技术在航空发动机叶片制造领域的技术需求及重要作用,通过试验分析和应用验证,不断跟进新工艺、新技术、新装备发展的进程,加速航空发动机叶片制造技术的发展。

关键词: 完整加工; 自适应加工; 零点定位; 快换装夹; 数控机械抛光

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.15.063



吴志新

高级工程师,长期从事航空发动机叶片类零件的工艺研制、数控铣削、数控抛光、工艺装备等方面的研究工作。

零件结构越来越复杂,压气机叶片设计结构发生很多变化,成型加工难度大,零件的几何精度和表面完整性难以保证。叶片的这些特性变化以及新型材料的应用,使叶片的切削加工性更差,保证其成型加工和质量要求变得越来越困难。随着叶片产品更频繁的更新换代,对数控加工技术提出了更高的要求,给予更高的期望,今后叶片数控加工工艺将面临巨大的挑战。本文从4方面论述叶片生产现场对数控加工技术的实际需求,并对研究应用情况进行分析与总结,以探索压气机叶片数控加工领域正确的发展方向,加速叶片制造技术的发展。

一次装夹完整加工

叶片生产方式的特征是工序分散,按节拍组织流水生产,是一种刚性的生产自动化。众所周知,在激烈的市场竞争环境中,缩短和保证交货周期十分重要。一个产品的加工过程链越长,生产周期越难以控制^[1]。

此外,由于数控机床性能的提高,机动时间越来越短,影响交货期的瓶颈往往在于机床辅助时间和工件之间的滞留,减少工序的数量就意味着缩短生产周期,创造巨大的利润空间。集成加工,通常也称为复合加工或完整加工,是指在一台机床上能加工完成一个零件的所有工序。工序集成加工,提高了工艺的有效性,由于零件在整个加工过程中只有一次装夹,加工的精度更容易获得保证。新型发动机的研制,叶片品种不断更新且批量需求小,设计方面更看重供货的周期以便试验整机的性能。这就对生产过程的柔性化提出越来越迫切的需要。利用加工中心实现集成加工^[2],是叶片新机研制阶段的发展趋势。图1所示为某机转子叶片通过一体化完整加工,一次装夹,完成叶身型面与榫头的全部加工。

叶片数控加工时,以标准的轴颈或方形工艺台,作为贯穿于制造全过程的工艺基准,一次装夹,完成榫头和叶身型面全部加工,减少了专用复

过去的10~20年间,我国航空发动机压气机叶片多采用数控加工的方式来完成,数控加工技术水平获得了长足进步。近年来,随着高性能航空发动机的研制和生产,先进航空发动机性能水平的不断提高,发动机

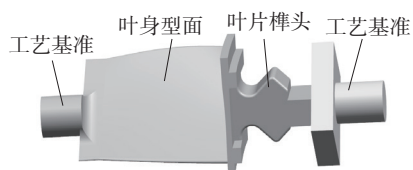


图1 某机转子叶片一体化加工工艺
Fig.1 A machine rotor blade integration process

杂结构工装的设计制造,避免了多次安装和机床定位误差的积累,缩短了叶片研制周期,从而大大提高叶片加工精度,降低制造成本。完整加工改变了传统叶片加工工艺模式,也需要改变毛坯的结构形式。所以,冷工艺技术人员要把握整个叶片制造过程,特别重视叶片毛坯设计阶段的早期介入与规划。叶片一体化完整加工,适用于叶片研制阶段小批量快速反应的制造模式,缩短研制周期以快速为设计部门提供叶片实物用于装配整机及性能验证。

局部自适应加工

随着叶片毛坯精化程度的提高,中小型精锻叶片毛坯日益增加,而精锻叶片工艺,无法实现叶片前、后缘的精密锻造成型,需通过机械加工的方法完成加工,且需与已锻造好的型面很好的光滑连接。叶片型面的局部加工还涉及到叶片的修理领域。高精度锻件叶片的局部加工对数控加工系统要求很高。为了保证光滑过渡加工,必须对每个叶片在机进行锻件周线的精确测量,随后才能个别加工。叶片前缘、后缘与榫头转接半径 R 以及阻尼台等特征部位,要求与已成型的周线充分融合,即加工轨迹需同每个在公差范围内变化的锻件相吻合,我们称这种方法叫适应性切削,适应性切削消除了误差以及耗时的手工作业。

国外专用的五坐标叶片加工中心具有了适应性切削的新技术——专用软件中的加工模块 Adaptive milling 及叶片修复技术。该技术在

国外叶片修理厂已得到成熟应用,可广泛应用于精锻叶片的前缘、后缘和榫头转接半径 R 等部位的局部加工,也可用于叶片的修复。在机床工位上的零件测量采用盘型测头,围绕叶身型面轮廓测量一周,一个叶片测量几个截面,然后根据测得的叶片实际情况,自动生成前后缘加工程序,进行加工。虽然每件叶片均需测量,但速度很快,长约 100mm 的叶片,采用该技术单独加工叶片的前后缘,可控制在 10min 之内,过渡区域接刀很精确。

国内部分单位已掌握叶片自适应加工技术,并在某型号辊轧静子叶片上完成试验验证,该叶片型面全长约 45mm,宽约 26 mm,曲率变化剧烈。在叶片五坐标铣床上安装非接触式光学测头,检测点的区域及密度如图 2 所示。其中前缘叶盆型面处、前缘叶背型面处、后缘叶盆型面处、后缘背型面处各测 40 条截面,每个截面扫描长度约为 3mm,采集 10 个点,用时共计 28min。此过程均由程序自动执行,无需人工干预。

测量软件回传测量点给自适应加工软件,经过后台的开发计算,自动构建被测叶片前、后缘 R 处的局部型面,进而重新生成前、后缘数控加工程序^[3]。实物加工及检测结果如图 3 所示,前、后缘局部加工部位与已有型面光滑过渡,解决了手工抛光无法满足的设计轮廓公差要求。

由于叶片自适应加工技术需要每片叶片均实施在机检测,再依据实际检测点云构建数字化模型,重新生成加工轨迹,所以,在机测量的效率与精度、软件计算速度、重构模型的精度与数据传递的信息化流程技术均是其中的核心技术,若这个过程中速度与精度达不到用户的需求,该项技术很难在叶片的大批量生产中得到广泛应用。但是,对于需求进行局部精密加工或修复的叶片,自适应加工技术是最有效的解决方案^[4]。

零点定位快换装夹技术

与其他发动机零件相比,叶片具有许多鲜明的特点,形状与结构多样,级数多,尺寸极化现象十分严重。因此,叶片使用的专用夹具数量也众多。叶片的装夹方式、夹具结构是否合理是解决叶片数控加工变形,保证数控加工精度的重要环节。叶片制造过程需应用多种类型的机床,如图 4 所示。目前,常用的国内外叶片五轴加工中心机床就有 5 种以上,不同机床厂家设计装夹接口也不同,针对不同机床的专用夹具,长期积累就会堆积如山。实现叶片夹具快速更换、不同机床之间快速切换、多种叶片共用的目的,解决新机研制小批量、换装频繁生产加工,机床利用率低的问题,发展高效率的快速、精确定位夹具系统已成为提升叶片研制效率、降低成本的重要手段和趋势^[5]。

通过应用研究发现,为叶片多种机床配备零点定位快换卡盘,使不同机床上的卡盘接口实现标准统一,再将专用夹具通过气动控制装置与卡盘快速精确定位连接,如图 5 所示,减少了机床辅助时间和设备故障带来的一系列生产停滞问题,可提高生产现场管理的柔性自动化程度^[6]。

零点定位快换卡盘,也可应用于三坐标数控机床上,通过配备立

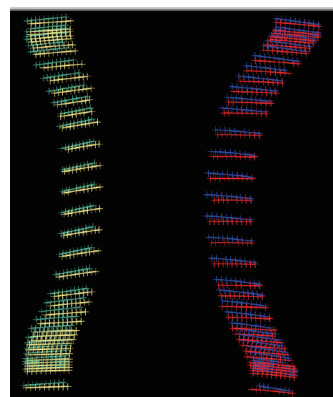


图2 采集前、后缘测量数据点
Fig.2 Acquisition front and rear measuring data points

式、卧式 90° 分度的快换卡盘,如图 6 所示,可实现叶片一次装夹完成多部位集成加工。零点定位快换卡盘重复定位精度高,理论定位精度约达 5 μ m,改变了过去在机床上装夹夹具,打表找正的手工操作方式,实现了快速精确定位装夹,若配备多套夹具,叶片装夹也可在机外完成预调试安装,按次序进行加工时,只需通过气动装置将其与卡盘锁紧连接,就可直接进入加工状态。快换装置也可模拟在线检测,在三坐标测量机上也安装与机床工作台上同样的卡盘,叶片加工后将夹具与叶片一起拿下,移动到三坐标测量机的卡盘上进行叶身型面及相关尺寸的检测,但又不占用机床的有效工作时间,如有可修复的误差,移回到机床上直接进行尺寸补加工。

多年来,叶片产品数据信息零散,工艺装备数量庞大,存在无规划,盲目投入的现象,致使设计数据,工装数据,工艺数据等成为信息孤岛。随着信息化管理技术的发展与工艺资源平台的搭建,促进我们思考对叶片进行系列化、模块化分类,按类进行工艺设计规划,从而实现叶片各工序工装的模块化及标准化设计,这种更优越的工艺思路及更快的制造反应速度,使多品种、小批量叶片的快速研制交付成为可能。

叶片型面数控机械抛光技术

先进发动机所具有的高转速、高压缩比,对叶片技术指标与工作性能要求更加严格。新型叶片设计结构形状复杂,叶身型面呈现大扭角、端弯状态,如图 7 所示;叶身型面薄,前、后缘半径达 0.15mm 左右;叶片尺寸、形位公差精度要求高,对叶片表面完整性指标要求也非常严格。传统的叶身型面手工抛光工艺已无法保证压气机叶片叶身型面的成型加工质量,叶片专业化生产厂对于无人干预的自动化机械抛光技术需求

强烈。

叶片型面数控机械抛光是一项复杂的加工工艺,需与前工序数控铣削型面有效结合,需对前工序铣削叶身型面的加工余量、表面粗糙度、铣削接刀痕等技术条件提出控制要求,才能进行稳定的自动化机械抛光,达到设计最终的表面质量要求。从手工抛光的工艺方法分析,叶片不同抛光区域选用的抛光方式、抛光工具及工艺参数均有所不同。每种叶片开展机械抛光前,需分析前工序的技术状态,再制定抛光的工艺方案,经过试验验证合格后,方可投入批产加工。

机械抛光过程中,由于叶片的变形作用及系统刚度的时变性,叶片型面与砂带之间为变力接触,使得加工后叶片型面精度低于预期精度,同时切削力的变化加剧了砂带的损耗。因此,控制加工过程中接触抛光力,实现恒力抛光,及时补偿抛光工具的磨耗量,其关键核心技术之一,也就是柔性抛光力控制技术^[7]。这种技术要求数控抛光设备同人的手工抛光一样需要有感知,会随着叶身型面余量大小或轮廓形状调整抛光力量,从而实现接触压力的高精度控制。机床设计厂家从两个方面进行柔性抛光力的控制,首先,设计非刚性的

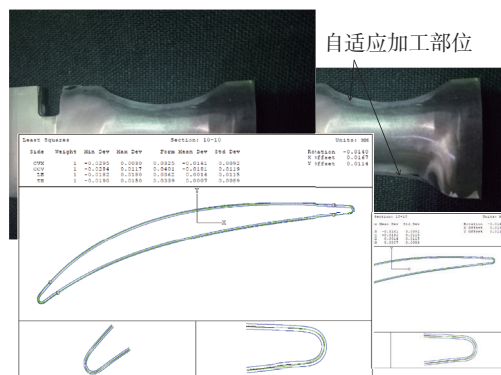


图3 前、后缘自适应加工及检测结果

Fig.3 Before and after derived from adaptive processing and testing results

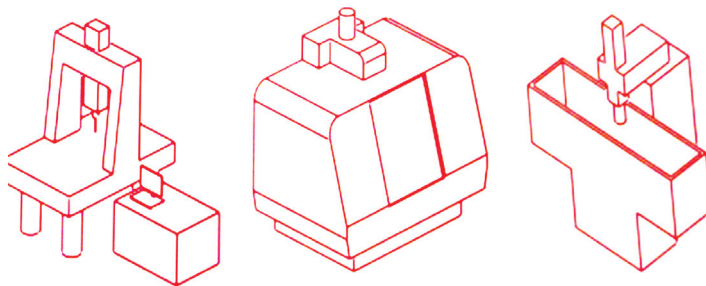


图4 叶片常用机床种类

Fig.4 Leaf common machine tool types

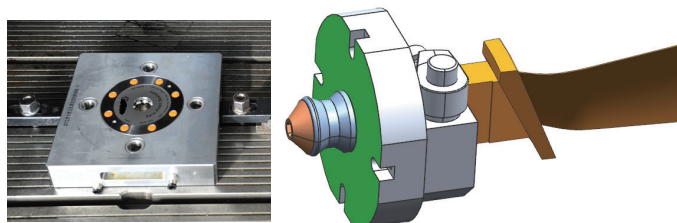


图5 零点定位快换卡盘与叶片专用夹具

Fig.5 Zero positioning quick change chuck and blade special fixture

弹性抛光轮或砂带导带轮。其次,数控抛光设备配置磨头浮动轴压力控制装置,该传感装置的基本功能是根据各区域的抛光条件不同,主动控制抛光力的大小。在编制的抛光程序中,可设置一个抛光压力值 H_1 ,抛光时砂带与叶片实时保持该接触压力,从而保证抛光去除量的大小。当砂带与叶片的接触力大于此压力值时,抛光动作会自动停止,避免产生过抛叶片的现象。所以,不仅是砂带的粒度,抛光压力值也是保证自动化机械抛光质量的重要参数^[8]。

本试验使用德国产的 IBS 六轴砂带抛光机 MTS1000-400-6NC,程序中的压力值 H_1 与设备控制系统压力对应关系如图 8 所示。

航空发动机叶片型面厚度设计非常薄,有的叶片前、后边厚度仅为 0.3mm 左右,抛光压力值 H_1 设置非常重要。若刚性很好的叶片,可以选取大一些的压力值,对于薄型叶片,抛光仅是要求去除铣削刀痕,保证设计要求的粗糙度,程序中设置压力值 3000 为宜。抛光后的叶片,需要进行三坐标测量机检测型面轮廓度,若前、后缘局部有抛光量过大的现象,可对叶片该部位的抛光轨迹进行不同的压力值设定,如设置 H_1 为 3500,也达到了减小抛光量的效果。所以,需根据叶片具体情况,进行试抛、检测,最后得出优化的各项工艺参数。

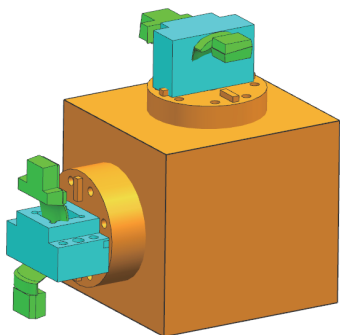


图6 零点定位、卧转换卡盘使用示意图
Fig.6 Zero position, lie transformation chuck using schematic diagram

以某型号一级静子叶片叶身型面机械抛光试验为例,叶片材料为钛合金,全长约 230mm。经过试验分析,前工序数控铣削保证被加工叶片表面粗糙度达 $R_a 1.6 \sim 2.0 \mu\text{m}$,余量控制在设计理论叶片型面轮廓公差带上方平移 0.03mm 范围内。在抛光过程中,通过路径规划、过程参数控制等实现给定磨削量的磨削,使被加工叶片通过抛光加工达到设计尺寸公差。如图 9 所示,抛光过程分粗抛和精抛两个步骤,粗抛工序的目的是进行预抛光,去除铣削加工后叶片表面铣刀痕;精抛工序则为了保证表面粗糙度,最终满足叶片表面的完整性要求^[9]。试验所用工具及工艺参数如表 1 所示。

图 10 为抛光前后叶片表面质量对比图,图 10 (a) 所示为铣削表面的叶片,有很明显的铣削刀痕,经过砂带抛光后的叶片如图 10 (b) 所示,叶片表面铣削刀痕消失,经检测表面粗糙度 $R_a 0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$,各截面间转接光滑。抛光一片约为 15min,较手工抛光效率提高 3~4 倍。抛光去除量可控制在 0.01~0.03mm 之间,抛光后叶型相对扭转误差、位置度误差较抛光前无明显差异。

叶片自动化机械抛光技术需求前景广阔,近两年来国内外该项技术与设备的研制取得很大的进展,实践证明,无人干预的自动化机械抛光加工效率高,叶片抛光表面质量明显提高,解决了手工抛光形状轮廓控制难度大,质量不稳定的问题^[10]。通过国内外一些研究结果可见,叶片难加工的特征部位如前、后缘,扭曲端弯曲面,叶身型面与榫头(或安装板)转接半径 R 处的自动化机械抛光技

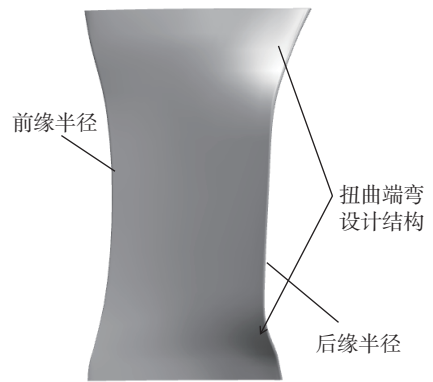


图7 扭曲端弯的叶身型面
Fig.7 Twisted curved blade body type surface

Messprotokoll für MTS Test certificate for MTS Protocole de mesure pour MTS	
Druckmessung Pressure measurement Mesurage Pression	
Engagement Situations Value of the controller Valeur de demande à commande	
1111	kg
0	39.3
500	34.7
1000	29.7
1500	22.5
2000	16.5
2500	10.7
3000	4.7
3500	0
4000	
4100	
4200	
4250	
4270	
4280	
4300	
4400	

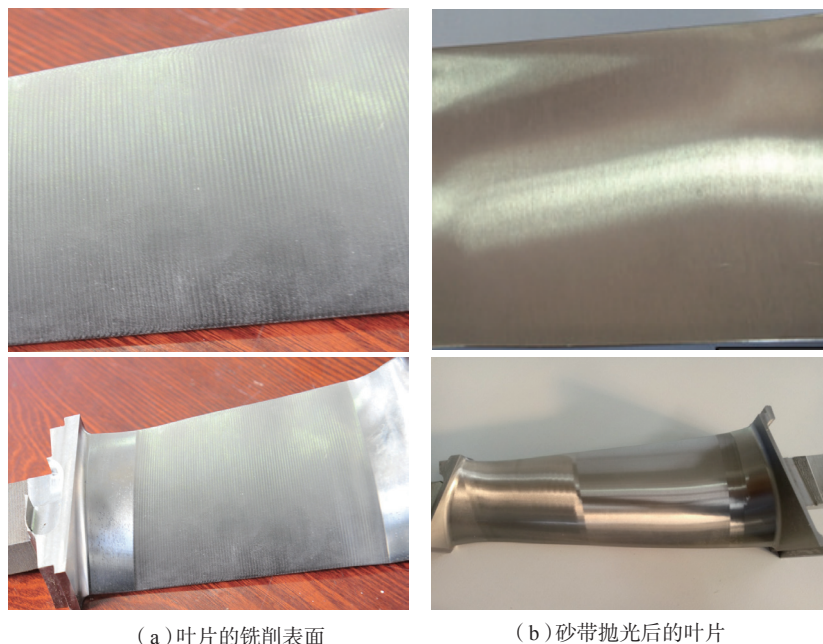
图8 压力值 H_1 与设备控制系统压力对应关系表
Fig.8 Pressure values H_1 and equipment control system corresponding to relational tables



图9 砂带抛光叶身型面
Fig.9 Type abrasive belt polishing blade body surface

表1 数控动梁龙门移动镗铣床工作切削参数

导带轮直径 × 宽度 / (mm × mm)	砂带粒度 / μm	砂带线速度 V_f / (m · s ⁻¹)	步距 / mm	曲面连续步距 / mm	抛光压力值 H_1 / kg
60 × 25	23	6	2	0.1	3000(4.7kg)



(a) 叶片的铣削表面

(b) 砂带抛光后的叶片

图10 抛光前后叶片表面质量对比图

Fig.10 Blade surface before and after polishing quality comparison chart

术也取得突破,砂带与抛光轮的有效结合,数控抛光装备水平的不断提升,使叶片多特征部位全型面自动化机械抛光成为可能,未来将在工厂得到批量应用。

结论

叶片的结构特征使叶片制造技术成为透平机械制造业中最复杂的技术之一,一种高性能新型航空发动机的出现,最显著的变化之一就是叶片的改进与发展。数控装备与技术不仅仅意味着现代化、自动化与高速化,还蕴藏着许多有价值的观念、技术路线、管理方法和举措,需要我们不断提升周围配套的软、硬件条件建设与自身的工艺制造技术水平,使自动化技术更为实际。我们无法预见航空发动机叶片行业未来可能发生的所有技术变革,但是不断监视技术发展的进程,及时调整研究方向,加速持续发展,不固守陈旧的经验,促进技术的创新,才能够在行业中取得领先地位,才能研制和生产出世界一流的透平机械叶片。

参考文献

- [1] 张曙. 新一代数控机床与展望[J]. 数控机床市场, 2007(8): 42-44.
ZHANG Shu. New generation NC machine tool and its prospect[J]. CNC Machine Tool Market, 2007(8): 42-44.
- [2] 杨莉, 赵松涛, 吴伟. 汽轮机叶片集成加工工艺研究与实践[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(2): 134-137.
YANG Li, ZHAO Songtao, WU Wei. Research and practice of integrated processing technology for steam turbine blade[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(2): 134-137.
- [3] 王文理, 袁士平. 自适应加工技术在数控加工领域的分类与应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(6): 26-29.
WANG Wenli, YUAN Shiping. Category and application of adaptive machining technology in NC machining field[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(6): 26-29.
- [4] 余靖华. 自适应加工技术在叶盘类零件修复加工中的应用[J]. 机电信息, 2016(15): 82-83.
YU Jinghua. Application of adaptive machining technology in blisk repair[J]. Electromechanical Information, 2016(15): 82-83.
- [5] 唐林, 周良明, 刘卫武, 等. 基于零点定位技术的中小航空结构件快速换装技术研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(11): 19-21.
TANG Lin, ZHOU Liangming, LIU Weiwu, et al. Based on zero positioning technology of small and medium-sized aircraft structure metamorphosis technology research[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(11): 19-21.
- [6] 陈思涛, 温良. 基于零点定位系统缩短数控机床停机时间[J]. 制造技术与机床, 2015(11): 40-42, 57.
CHEN Sitao, WEN liang. Based on zero point positioning system to shorten CNC machine downtime[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2015(11): 40-42, 57.
- [7] 崔一辉, 负超, 李成群, 等. 基于复杂曲面加工的机器人砂带磨削系统的设计及其试验分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1144-1154.
CUI Yihui, YUAN Chao, LI Chengqun, et al. Design of robotic belt grinding system based on complex shade surface and its experimental analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(10): 1144-1154.
- [8] 李小彪, 史耀耀, 赵鹏兵, 等. 航空发动机叶片砂带抛光力控制技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(6): 1209-1214.
LI Xiaobiao, SHI Yaoyao, ZHAO Pengbing et al. Polishing force control technology of aero-engine blade in belt polishing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(6): 1209-1214.
- [9] 李小彪, 史耀耀, 段继豪, 等. 叶片数控砂带抛光关键技术研究[J]. 制造业自动化, 2011, 33(10): 113-115.
LI Xiaobiao, SHI Yaoyao, DUAN Jihao, et al. Research on key technology for NC belt polishing of blade[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(10): 113-115.
- [10] 蔺小军, 杨艳, 吴广, 等. 面向叶片型面的五轴联动柔性数控砂带抛光技术[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 2074-2082.
LIN Xiaojun, YANG Yan, WU Guang, et al. Flexible polishing technology of five-axis NC abrasive belt for blade surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 2074-2082.

通讯作者: 吴志新, E-mail: 2540669919@qq.com.

New Technology and Application of Numerical Control Machining for Aero-Engine Blade

WU Zhixin, ANGGEI Lama, GAN Lijun

(AECC Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

[ABSTRACT] In view of the development status of numerical control machining technology of aero-engine compressor blade, development and the application of several new processes, new equipments in blade NC machining field are expounded in recent years. The integration manufacturing, quick-change fixture, adaptive machining, NC polishing are introduced, analyzed and discussed. Through continuous monitoring and tracking the development process of NC machining technology of aero-engine compressor blade, breaking the limitation of technology development, adjusting research direction, widening ideas of development and innovation, speeding up the development of aero-engine blade manufacturing technology can be realized.

Keywords: Integration manufacturing; Adaptive machining; Zero point system; Quick-change fixture; NC polishing

(责编 大漠)

(上接第 62 页)

ZHAN Mei. Research on 3-D FEM numerical simulation of precision forging process oriented to blade with a damper platform[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2000.

[7] 吕丽萍. 有限元法及其在锻压工程中的应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1989.

LÜ Liping. FEM and its application in forging engineering[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press Co, Ltd., 1989.

[8] 李尚健. 金属塑性成形过程模拟[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

LI Shangjian. Metal plastic forming simulation[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.

[9] 汪波, 曾卫东, 彭雯雯. 不同锻造工艺对 TC4 钛合金棒材显微组织与力学性能的影响[J]. 钛工业进展, 2014, 31(5): 15-17.

WANG Bo, ZENG Weidong, PENG Wenwen. Effect of different forging process on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy bars[J]. Titanium, 2014, 31(5): 15-17.

[10] 张莉, 李升军. Deform 在金属塑性成形中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

ZHANG Li, LI Shengjun. The application of Deform in metal plastic forming[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

[11] 李传民, 王向丽, 闫华军. Deform

金属成形有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

LI Chuanmin, WANG Xiangli, YAN Huajun. The application of Deform in metal plastic forming[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.

[12] 陆璐, 王照旭, 崔红霞, 等. 塑性有限元在金属体积成形过程中应用的进展[J]. 材料导报, 2016, 30(1): 107-108.

LU Lu, WANG Zhaoxu, CUI Hongxia, et al. Progress of application of finite element method in metals massive forming process[J]. Materials Review, 2016, 30(1): 107-108.

通讯作者: 李娜, E-mail: a332474612@163.com。

Application of Forging Simulation and Thermal Simulation Technology in Precision Forging of Aero-Engine Blade

LI Na, YIN Xigang, LIU Jing, WANG Zhoutao, YAO Gui

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

[ABSTRACT] Because of the complicated shape, the slight profile dimension and the bad formability of superalloy, defects such as folds, cracks and surface damages are usually existed during precision forging process. Thermal parameters compromised of stress field, strain field and temperature field could be obtained using Deform software, the trial production time can be shortened exactly by optimized FEA results. It has been found that Deform could guide the precision forging design and actual production process for airfoils.

Keywords: Deform software; Aero-engine blade; Precision forging; Forging simulation; Thermal simulation

(责编 大漠)