

大型钛合金精铸件数控加工技术研究与应用

刘元吉,陈清良,骆金威,张 娜

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

[摘要] 为解决大型钛合金精铸件零件加工工艺流程繁琐、局部刚性差、加工变形控制难、局部特征加工困难等问题,从工艺装备、定位方式、变形控制、余量检测、加工刀具、切削参数、加工策略等方面提出了解决方案,并在项目研制中得到了工程应用,为今后钛合金精铸件的加工以及航空飞机上类似结构零件的加工打下坚实基础,有着良好的推广实用价值。

关键词: 钛合金精铸件;变形控制;工艺装备;加工刀具;加工策略

Research and Application of NC Machining Technology for Large-Scale Precise Casting Titanium Alloy Components

LIU Yuanji, CHEN Qingliang, LUO Jinwei, ZHANG Na

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] To solve the machining problems of large-scale precise casting titanium alloy components, such as complicated manufacturing processing, poor stiffness, hard-controlled deformation, and difficult processing features, the article finds out an efficient solving processing, which has been implemented in real manufacturing project, from fixing equipment, location technology, deformation control, allowance measurement, cutting tools, cutting parameters, manufacturing strategy, etc. This process lays a solid foundation for the machining of precise casting titanium alloy components and similar structural parts on aircraft, and has good popularization and practical value.

Keywords: Precise casting titanium alloy components; Deformation control; Fixing equipment; Cutting tools; Manufacturing strategy

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.06.097

钛合金以其比强度高、机械性能好和耐腐蚀性强等特点在现代飞机上的应用越来越广泛,尤其在高性能战斗机中,钛合金所占的比例已高达40%^[1]。而钛合金精铸件不仅具备钛合金材料自身的诸多优异性能,同时能够实现大型薄壁复杂结构的精确成型,有效提高材料利用率,减少机械加工量,从而降低生产成本及生产周期^[2]。这类铸件因其质量轻、整体比强度高、可靠性高,在航空航天领域内得到越来越广泛的应用。

但钛合金精铸件结构复杂、局部刚性较弱,加工过程中协调关系多,变形控制难度大,对工艺方案以及加工过程控制要求高,主要表现在以下3个方面:(1)零件结构复杂,工序流程长;(2)局部余量及材料去除量不均匀,如加工中易产生切变形及加工振动;(3)需要多工序重复定位加工,加工过程装夹难,典型零件如图1所示。

目前,国内部分航空制造企业已经实现了该类精铸件加工,满足了基本的飞机性能需求^[3],但加工方案存在工艺流程繁琐、钳工打磨量多、加工过程人工干预多等问题,影响了零件的加工质量及效率。

以图1中的典型零件为例,根据该零件的结构特点,本文制定了加工工艺方案。针对其工艺流程繁琐、

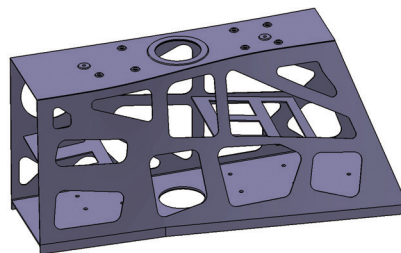


图1 大型钛合金精铸件示意图

Fig.1 Large titanium alloy casting

局部刚性弱、加工变形控制难、局部特征加工困难(如大直径协调台阶孔、深窄槽腔)等问题,从零件装夹、刀具应用、切削参数、加工策略等方面提出了相应的工艺技术解决方案。

1 零件分析

1.1 毛坯特点

钛合金精铸件毛坯,多处尺寸已经到位,由于铸造精度的不稳定会带来以下加工问题:非加工面与加工面之间的协调关系难以保证,易形成加工台阶,钳工打磨量大;加工余量不均匀,零件在加工过程中易产生变形。

1.2 零件结构特点

零件为整体框架结构,Z向净高大于650mm,内部支撑较少,局部刚性差;薄壁结构多,大部分筋缘条厚度为2~2.5mm,可加工性较差;有深槽腔耳片、4个大直径台阶交点孔等难加工结构,槽宽、孔径及同轴度要求较高,典型复杂结构及部位如图2所示。

1.3 零件变形分析

该零件受铸件成型后受残余应力、毛坯热处理残余应力以及加工应力分布不均等因素的影响,易变形。为半封闭的框架式结构,内部支撑少,后端面呈敞开结构,无加强工艺筋条,结构刚性差,导致加工中易形成高度方向错位、型面弯曲、开口端护张等变形,主要的变形因素为:毛坯铸造成型后组织结构分布不均造成

的热应力释放不均衡;局部材料去除量大,内应力释放不均匀。

2 数控加工工艺方案

通过对零件的结构特点以及加工难点进行分析,制定工艺方案,包括快速定位、装夹、变形控制以及尺寸精度控制。

2.1 总体工艺流程

原数控工艺流程共包括25道工序,存在多次装夹、修基准、检查余量、钳工打磨等重复工序内容,零件周转次数多,加工效率低。结合新型数控设备、工艺装备以及工艺方法,对原工艺流程进行优化,优化后仅有12道工序,工艺流程如图3所示。

2.2 快速定位

2.2.1 粗加工基准确定

零件数模中A面(图4)要求是平面,但铸造不能保证其平面度,需在零件外部增加新基准(工艺凸台),通过加工工艺凸台来调整加工的余量,解决零件定位问题。在设计数模上增加工艺凸台及辅助定位孔,即制作工艺数模,并将此工艺数模作为铸造、加工、检查的原始依据。

2.2.2 快速定位

在工装上设置两处固定定位销,零件工艺凸台对应位置制定定位孔,形成孔轴间隙配合,实现快速定位。工装上原点端定位销为圆柱形,远端为六边形插销,为零件变形预留余量,便于现场装夹,快速定位原理及模型如图5所示。

2.3 装夹技术

零件上半部分处于自由状态,两端开口及中间大孔等区域刚性较弱,加工中易产生振动,影响加工质量。通过设计3套带有可调支撑的工装,加强零件被加工部位的刚性,保证零件的表面质量和尺寸精度(图6)。

为保证零件局部刚性要求,工装上存在多处增钢设计,如可调式支撑、悬臂式装夹装置。以MF2为例,工装中共有4种类型的压紧装置如图7所示:端头开敞区

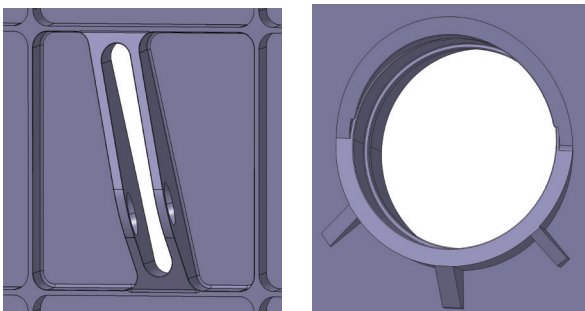


图2 难加工结构示意图

Fig.2 Difficult processing structure diagram

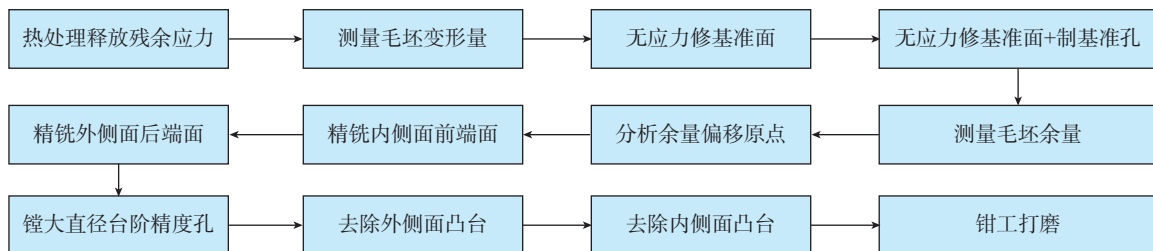


图3 数控加工总体工艺流程

Fig.3 NC machining process as a whole

域压紧装置①、底面定位凸台压紧装置②、顶面凸台压紧装置③、中间腹板孔区域压紧装置④,零件装夹顺序为:预压紧中间腹板孔区域压紧装置④;压紧顶面凸台压紧装置③;压紧中间腹板孔区域压紧装置④;压紧端头开敞区域压紧装置①;压紧底面定位凸台压紧装置②,工装装夹顺序及压紧装置如图7所示。

2.4 变形控制

本文主要从工艺方案、无应力修面、切削刀具及参数等3个方面进行变形控制。

2.4.1 工艺方案优化

通过工艺流程优化、工序合并,新的工艺方案仅12道工序,工序加工内容相对集中,装夹次数及钳工打磨内容减少,加工周期及周转次数减少,降低了零件变形风险。

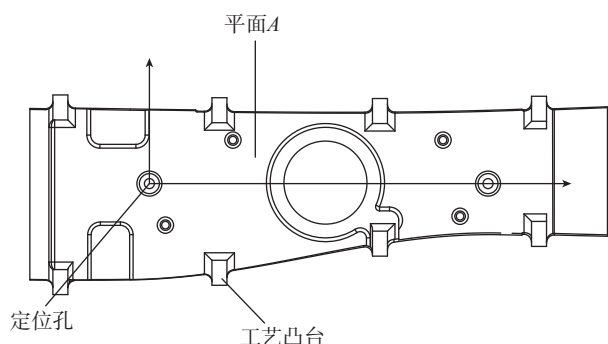


图4 零件工艺模型
Fig.4 Parts process model

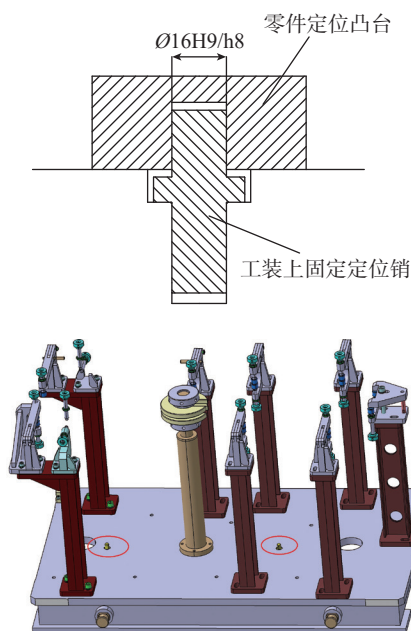


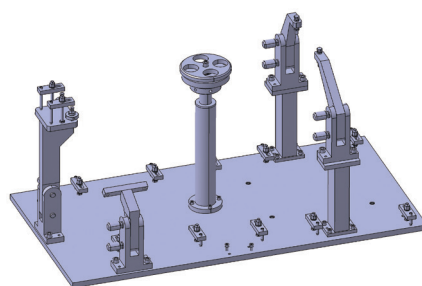
图5 零件快速定位方式
Fig.5 Quick parts localization way

2.4.2 无应力修面

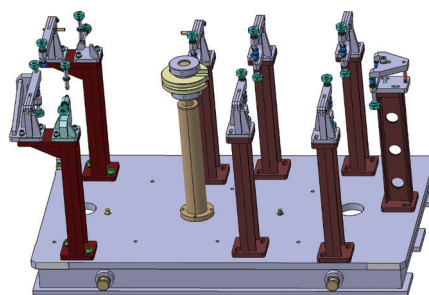
受铸件成型、毛坯热处理残余应力以及加工应力分布不均等众多因素的影响,零件存在一定的变形,需通过无应力装夹并修面的方式逐步减少零件变形。在自由状态下,使用铜垫片将定位凸台底面垫实,保证压紧时定位凸台无变形、零件无应力装夹^[4],并进行加工基准修正,逐步消除零件加工过程中的变形及装夹应力。

2.4.3 切削刀具及参数优化

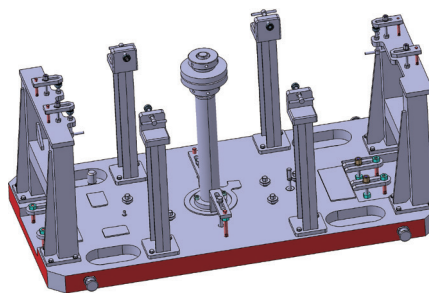
切削力是切削加工中的一个非常重要的物理现象,对切削过程有着重要影响,切削力的大小将直接影响切削功率、切削热和加工变形^[5]。选择刃口锋利及较大前角刀具,降低切削深度采用小切深分层加工,可有效降低加工过程中的切削力及零件变形。本文选取了大进给铣刀、新型整体硬质合金刀具、插铣刀等代替原焊接、



(a) MF2



(b) MF3



(c) MF4

图6 3套工装示意图
Fig.6 3 sets of toolings

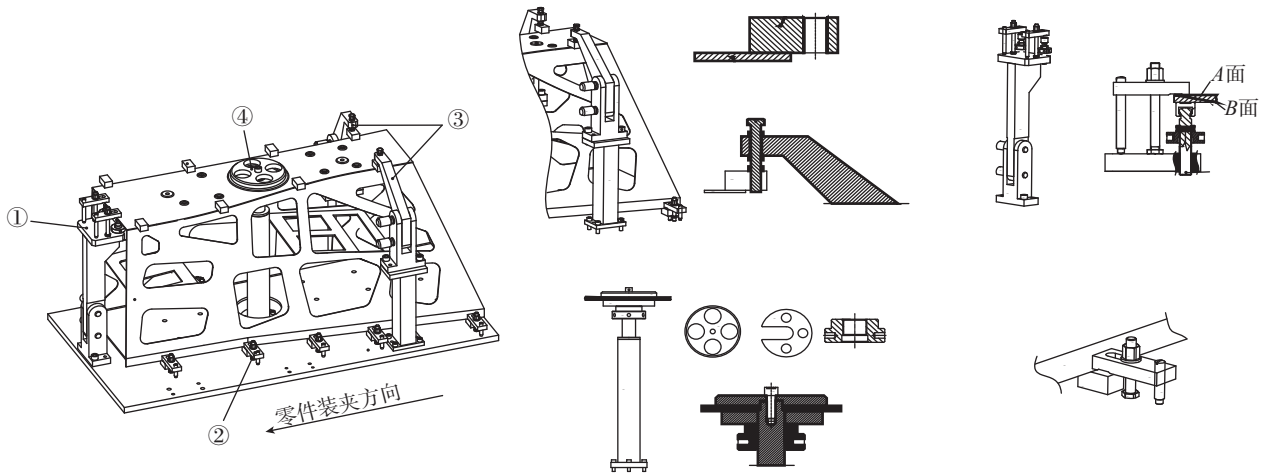


图7 MF2装夹顺序及各压紧装置示意图
Fig.7 MF2 clamping sequence and the compaction device

高速钢等刀具,减少切削量、提高切削速度,控制零件局部特征的变形量^[6]。

2.4.4 变形及余量检测技术

加工前对非加工面和加工面进行测量,用于检查加工余量和变形量,并据检测结果确定程序加工余量。在加工过程中,由于钛合金薄壁结构存在让刀问题,影响零件加工精度,导致局部余量不均匀及尺寸超差。本文应用探头自动补偿技术,测量实际加工尺寸与理论尺寸的差值,并将差值补偿到加工原点中去,从而实现加工过程变形、让刀的自动补偿。

3 难加工结构数控加工策

该零件存在深窄槽腔、高精度交点孔等复杂结构,此类结构精度要求高,加工难度大,对刀具的选择及艺方法要求较高。

3.1 交点孔加工策略研究

该铸件上存在4处较高精度要求的交点孔,精度要求为H7,孔径均不小于200mm,其中 $D_4 < D_3 < D_1 < D_2$,具体如图8所示。

由于4处孔同轴度要求过高($\Phi 0.08\text{mm}$),需从一面完成所有孔的加工才能满足精度要求;由于孔最大有效深度大于500mm,加工刀具过长导致震动较大,常规的制孔方式无法满足加工要求。镗孔一般以加工速度镗进、镗出,容易在孔壁上留下退刀痕迹,无法满足孔壁 $R_a=1.6\mu\text{m}$ 的要求。加工的4处交点孔,第2个孔 D_2 孔径大于第1孔 D_1 ,导致无法使用一般镗孔方式,因此,必须探索出一种适合于该类特征大孔的特殊镗孔工艺。

针对镗进、镗出方式下孔壁表面粗糙度较低的问题,在本文采取定镗的方式,即镗完孔后,主轴停止转

动,向镗刀刀头的反方向退刀并退出零件,避免二次切削,保证孔壁质量,并大大地提高了镗孔的加工效率。针对图8中的台阶孔2,运用定镗和反镗技术^[7],将镗刀刀片反装,合理设计走刀轨迹,并新订具有减震效果的镗刀杆,完成台阶交点孔的加工。孔1、孔2的加工工艺具体如图9所示。

图9(a)为镗孔加工顺序:(1)立铣刀粗铣孔1,侧面留0.5~1mm余量;(2)镗孔,走刀轨迹由C→F,其中,在点D时,机床停止转动,镗刀刀尖指向如图9(a)所示(机床SPOS=0),然镗刀向刀尖反向移动 L_1 到点E,最后快速退出零件到点F。图9(b)为反镗孔加工顺序:(1)立铣刀粗铣孔2、孔3;(2)T型刀粗铣孔3,侧面留0.05~1mm余量;(3)镗孔,主轴停转,镗刀刀尖指向如图所示(机床SPOS=0),镗刀向刀尖反向从孔轴心运

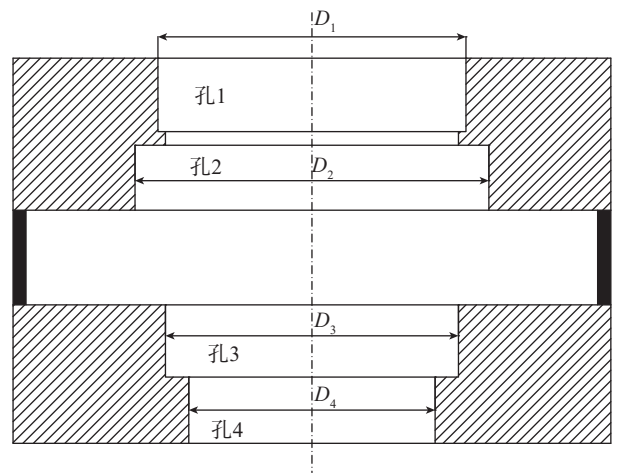


图8 高精度交点孔尺寸及公差要求
Fig.8 High precision intersection hole size and tolerance requirements

动到 $H, H \rightarrow I, I \rightarrow J$; 主轴反转, 从点 $J \rightarrow K$, 镗完孔后, 以镗孔速度退出零件, 轨迹按 $K \rightarrow J$; 主轴停转, 此时刀尖指向为 $SPOS=0$, 然后镗刀从点 J 分别依次移动到点 I 、点 H , 最终完成下沉孔的反镗。

定镗、反镗的加工技术的成功应用不仅可以解决孔壁表面质量的问题, 也提供了一种新的镗孔工艺, 具有一定的推广价值。

3.2 深窄槽腔加工策略研究

除了高精度的大直径交点孔, 零件上还存在深窄、不规则槽腔等难加工结构。以零件上的一处深槽腔为例, 该处槽口宽度尺寸精度为 $H11$, 深度大于 100mm , 开敞性较差。一般采用 U 钻钻下刀孔、传统层铣或插铣去除大余量的加工方式, 存在加工效率低、震动大、刀具磨损快等问题。本文采用大进给铣刀粗加工及整体硬质合金刀具精铣到位的加工方式, 粗加工效率大幅提升, 已加工表面纹理均匀, 加工过程排屑顺畅、刀具磨损平稳^[8]; 采用小切深、大进给的切削方式, 可有效降低刀具切削力、减少零件振动, 参数为 $D_c=40\text{mm}$, $V_c=50\text{m/min}$, $F_z=0.6\text{mm/z}$, $n=400\text{rpm}$, $F=960\text{mm/min}$, $a_c=30\text{mm}$, $a_p=0.5\text{mm}$ 。加工轨迹如图 10 所示。典型结构加工效果如图 11 所示。

3.3 T型槽腔加工

根据 T 型槽腔结构定制专用槽铣刀, 并制定相应的工艺方案及走刀轨迹。槽铣刀具的设计以及使用方法对其他类似结构零件的加工均具有一定的借鉴指导意义。图 12 为专用槽铣刀以及加工轨迹。

4 结论

本文以大型钛合金精铸件零件为例, 针对该类精铸件结构复杂、变形控制难、制造精度要求高等加工难点, 分析了影响加工变形、加工精度的因素, 提出了总体加工流程, 从快速定位、装夹、变形控制以及尺寸精度控制等方面详细介绍该零件加工方案; 针对其难加工结构, 如大直径协

调台阶孔、深窄槽腔等, 提出了稳定、高效的加工策略。

本文提出的大型钛合金精铸件的加工方案实现了该类零件的高效、稳定加工, 体现了国内数控加工技术水平的提升。同时, 本文提出的变形控制、定位装夹方案以及关键的数控加工技术也同样适用于类似结构或相似工艺特点的零件, 为今后钛合金精铸件的加工以及航空飞机上类似结构零件的加工打下坚实基础, 有着良好的推广应用价值。

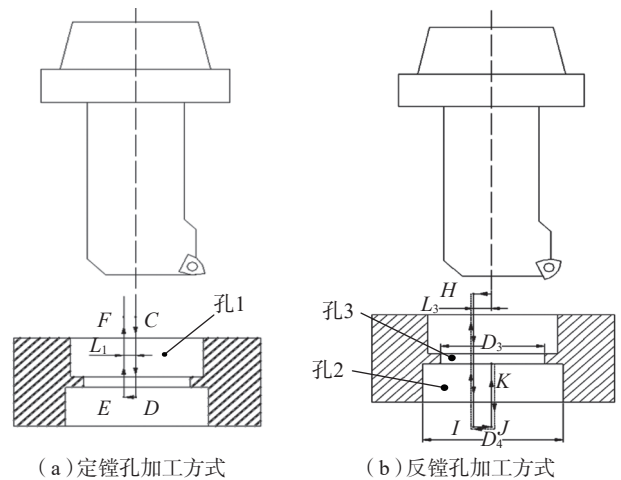


图9 大直径台阶孔加工方式
Fig.9 Large diameter step hole processing way

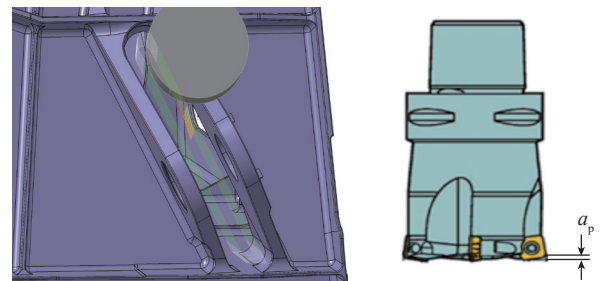


图10 精铣到位加工轨迹及大进给铣刀切削参数
Fig.10 Fine milling in place process track, and a large feed milling cutter cutting parameters

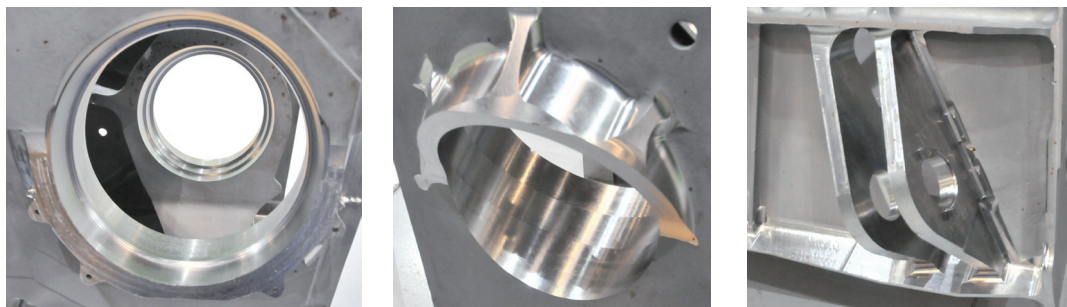


图11 零件局部特征加工效果图
Fig.11 Partial feature of parts processing and rendering

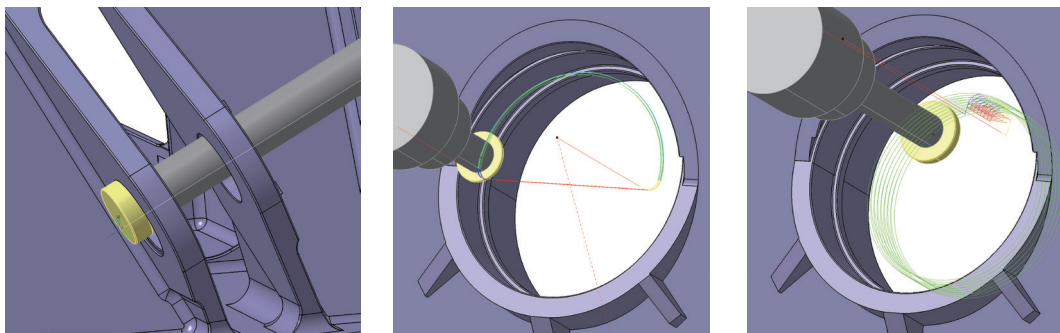


图12 槽铣刀及走刀轨迹示意图
Fig.12 Slot milling cutter and the feeding path diagram

参考文献

[1] 宋智勇, 牟文平. 钛合金航空结构件的高效数控加工[J]. 航空制造技术, 2009, 52(19): 40-45.

SONG Zhiyong, MOU Wenping. High-performance NC machining of Ti-alloy aircraft structure part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(19): 40-45.

[2] 王红红, 刘振军. 钛合金铸件的应用及发展[J]. 新材料产业, 2009(11): 25-30.

WANG Honghong, LIU Zhenjun. Application and development of titanium casting components[J]. Advanced Materials Industry, 2009(11): 25-30.

[3] 王金海, 张伟. 框架式钛合金铸件加工技术探析[J]. 装备制造技术, 2012, 46(5): 145-150.

WANG Jinhai, ZHANG Wei. Study on processing technology of frame titanium alloy castings[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012, 46(5): 145-150.

[4] 熊青春, 宋戈. 钛合金飞机结构件切削技术发展趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 56(14): 40-47.

XIONG Qingchun, SONG Ge. Cutting technology development of titanium alloy aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(14): 40-47.

[5] 宋戈. 基于切削力精确建模的钛合金薄壁件让刀变形预测研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.

SONG Ge. Research on surface error prediction in milling process of thin wall part based on accurate cutting force modeling[D]. Jinan: Shandong University, 2012.

[6] 周文东, 尹佳. 航空钛合金结构件的加工刀具选型及铣削方法[J]. 航空精密制造技术, 2018, 61(5): 57-60.

ZHOU Wendong, YIN Jia. Research on tool-selection & milling strategy of titanium-alloy aircraft structure part[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2018, 54(5): 57-60.

[7] 王志龙, 王宏睿. 不规则台阶孔加工方法的研究[J]. 精密制造与自动化, 2005(1): 29-31.

WANG Zhilong, WANG Hongrui. Research on machining method of irregular step hole[J]. Precise Manufacturing & Automation, 2005(1): 29-31.

[8] 鲁康平, 姜增辉. 基于快走刀层铣的 TC4 钛合金高效开槽加工[J]. 制造技术与机床, 2016(2): 115-118.

LU Kangping, JIANG Zenghui. High-efficiency slotting TC4 titanium alloy based on fast-feed layer milling[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(2): 115-118.

通讯作者: 刘元吉, 研究方向为数控加工工艺技术、数字化装配工艺技术, E-mail: 2490045410@qq.com。

(责编 大漠)

(上接第89页)

[64] WRBANEK J, FRALICK G, HUNTER G, et al. Thin film heat flux sensor development for ceramic matrix composite (CMC) Systems[C]//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010: 50-66.

[65] 刘海军. In₂O₃/ITO集成薄膜热电偶的制备及性能研究[D]. 北京: 电子科技大学, 2015.

LIU Haijun. Preparation and performance study of In₂O₃/ITO integrated thin film thermocouple [D]. Beijing: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

[66] MATUS L G. Instrumentation for aerospace applications: electronic-based technologies[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(2): 409-421.

通讯作者: 孙道恒, 教授, 博士生导师, 研究领域包括微纳机电系统 (MEMS/NEMS)、聚合物纳米结构及其应用、柔性电子制造技术、纳米纤维制造及应用、微纳 3D 打印技术等, E-mail: sundh@xmu.edu.cn。

(责编 大漠)