

# 整体叶盘铣削数控编程与加工技术\*

赵文明,沈琦,王兵,刘战强

(山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室,济南 250061)

**[摘要]** 整体叶盘有良好的结构完整性、轻质化、装配环节少、装配精度高等优点,已被广泛应用于航空发动机中。根据整体叶盘的切削加工特征,将其简化为整体叶盘基准件,从数控编程和加工技术两方面实现整体叶盘的高质量加工。首先,利用 HyperMILL 软件对整体叶盘基准件进行数控编程,优化获得理想的刀具路径,保证高效高质量的零件加工。然后,利用 DMU-70V 五轴加工中心对钛合金 TC4 整体叶盘基准件进行切削加工,在整体叶盘基准件叶片和流道几何特征的精加工时,选用不同型号的立铣刀,并监测加工过程中的切削力。最后,对加工后叶片和流道加工表面形貌进行测试分析,并结合切削力对比分析国产刀具和进口刀具对钛合金整体叶盘的切削加工性能。

**关键词:** 整体叶盘;数控编程;五轴加工;切削力;表面形貌

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.15.058



赵文明

山东大学机械工程学院硕士研究生,研究方向为切削加工。

随着航空技术的进步发展,航空发动机作为飞行器的动力核心,对其零部件性能的要求越来越高。整体叶盘为了满足新型航空发动机的要求而设计,采用了新结构<sup>[1-2]</sup>,图1为一种结构形式的整体叶盘。与传统的叶片和轮毂装配式叶盘相比,整体叶盘具有以下优点:(1)省去了传统连接的榫头和榫槽形式,简化了发动机结构,使整体结构减重30%,提高了发动机的推重比;(2)提高了结构的气动效率;(3)整体叶盘的刚性好,平衡精度高,可延长转子使用寿命,可靠性高<sup>[3]</sup>。但是,整体叶盘在加工制造方面存在诸多难点:(1)整体尺寸较大,对加工设备的要求较高;(2)叶片和流道表面均为自由曲面,要求的加工精度高,加工过程中易出现过切、欠切和干涉等问题;(3)整体叶盘多采用钛合金和高温合金制造。其中,钛合金

由于具有比强度高、耐热性和耐腐蚀性好等优良性能而被广泛应用于航空航天工业中。但钛合金在切削时呈现出变形系数小、单位面积上切削力大、切削温度高、冷硬现象严重、刀具易磨损等特点,使它成为一种典型的难加工材料。因此需要选择合适的刀具和加工参数以满足高效高质量的加工要求<sup>[4-5]</sup>。

五轴联动数控加工方法加工整体叶盘具有加工效率高、加工可靠、加工柔性好等优点,因此该加工方法在整体叶盘加工中将被普遍采用。目前,国外整体叶盘制造方法一般为精锻毛坯+精密数控加工和焊接毛坯+精密数控加工等方法<sup>[6]</sup>,如美国GE、P & W公司以及英国R·R公司已采用五轴联动数控铣削加工整体叶盘<sup>[7]</sup>。在国内,西北工业大学开发了“叶轮类零件多坐标NC编程专用软件系统”,并且研发

\* 基金项目: 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项资助项目(2014ZX04012-014)。

了高效盘铣-插铣复合铣削加工中心<sup>[1]</sup>,是国内对整体叶盘铣削加工研究的重要进展。任军学等<sup>[5]</sup>提出了包括叶盘通道分析与加工区域划分、最佳刀轴方向的确定与光顺处理、通道的高效粗加工技术、型面的精确加工技术等整体叶盘制造工艺方案及数控加工关键技术。整体叶盘结构复杂,数控编程过程较为繁琐,且加工过程中需要选择合适的刀具,加工质量与加工效率仍需提高以满足航空发动机的技术要求。

本文以整体叶盘基准件为研究对象,利用HyperMILL软件对零件进行数控编程,得到加工代码,利用DMU-70V数控加工中心进行钛合金TC4整体叶盘基准件的切削加工。叶片和流道几何特征的精加工时采用不同的刀具,测试分析加工过程中的切削力和加工后叶片和流道的表面质量,对比两种刀具对钛合金零件的切削加工性能。

### 整体叶盘基准件几何模型

根据整体叶盘的叶片和流道加工特征,建立图2所示的整体叶盘基准件实体几何模型,包含叶片和流道两种主要的典型加工特征<sup>[8]</sup>。该模型中,叶片高度为30mm,叶片最薄处为2mm,流道为圆弧表面,半径为480mm,叶片与流道连接处的圆角半径为4mm。

### 整体叶盘基准件数控编程

#### 1 刀具参数选择

选择合适的刀具可以提高加工效率、保证零件加工质量。粗加工时,在工件几何尺寸允许的情况下,选择大直径刀具可以保证加工效率;精加工时,在满足叶片高度的前提下,为保证刀具具有足够刚度,刀具悬伸要尽可能短<sup>[9]</sup>。钛合金TC4为难加工材料,需要选择适合加工的刀具。综合考虑整体叶盘基准件的几何形状、材料、零件加工质量和加

工效率等因素,选择株洲钻石PM-4E-D20系列和伊斯卡EC-A4 200-38C20系列整体式硬质合金平底立铣刀进行粗加工,分别选择株洲钻石PM-2BL-R4系列球头立铣刀与伊斯卡EB-A2 08-08系列进行叶片和流道的精加工。刀具参数如表1所示。

### 2 数控编程

#### 2.1 加工参数选择

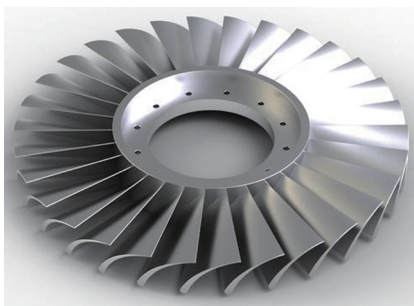


图1 整体叶盘结构

Fig.1 Geometric structure of turbine blisk

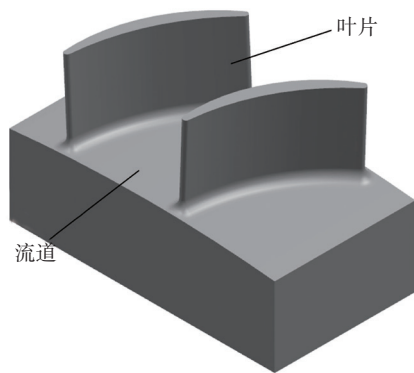


图2 整体叶盘基准件几何模型

Fig.2 Geometric model of the turbine blisk benchmark

将整体叶盘基准件模型导入到HyperMILL软件中进行数控编程。航空结构件的数控加工一般分为粗加工、半精加工和精加工三道工序,但对于结构性好、变形小的零件可以不采用半精加工<sup>[10]</sup>。整体叶盘基准件的叶片较短,加工时的变形小,因此其加工可以按照粗加工和精加工顺序进行。各加工工序使用的刀具和加工参数如表2所示。

#### 2.2 粗加工工艺规划

整体叶盘基准件粗加工主要是去除叶片间的材料,得到叶片和流道的基本形状。因此采用三轴加工完成。为了提高加工效率,粗加工选用直径为20mm的平底立铣刀,采用三轴加工的“任意毛坯粗加工”循环方式进行编程。粗加工的刀具路径如图3所示。

#### 2.3 精加工工艺规划

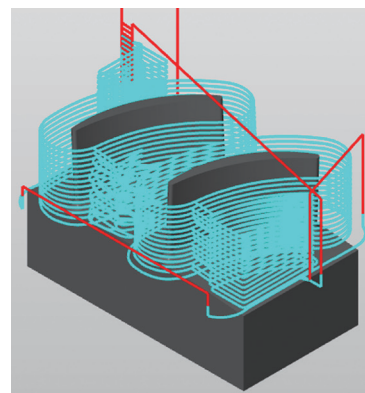


图3 粗加工刀具路径

Fig.3 Toolpath in roughing operation

表1 选用刀具的类型及其参数

刀具类型	直径/mm	切削刃长度/mm	刀具长度/mm	齿数	涂层	螺旋角/(°)
平底立铣刀	20	45	100	4	TiAlN	45
球头铣刀	8	16	100	2	TiAlN	30

表2 各加工工序使用的刀具及加工参数

工序名称	刀具	主轴转速/(r·min <sup>-1</sup> )	进给速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	水平步距/mm	垂直步距/mm
粗加工	Φ20 平底立铣刀	1000	200	8	0.3
叶片顶面精加工	Φ20 平底立铣刀	1000	200	8	0.2
叶片精加工	Φ8 球头铣刀	2800	300	0.2	0.2
流道精加工	Φ8 球头铣刀	2800	400	0.2	0.2

整体叶盘基准件精加工的目的是去除工件表面剩余的较小余量,达到要求的尺寸精度和表面质量。精加工包括叶片、流道和叶片顶面3部分曲面的加工。叶片曲面加工采用点加工的方式进行。刀具球头部分切削刃参与切削,与待加工表面点接触。点加工方式适用于叶片曲面扭曲较大的情况,且对刀具刃长没有严格要求<sup>[11-12]</sup>。由于叶片顶面与加工坐标系的XY平面不平行,若采用五轴型腔循环的“等高精加工”方式会在叶片顶部和底部圆角处出现多次抬刀,如图4所示。该刀具路径降低了加工效率,而且底部多次的进退刀会使叶片底部转接圆角的加工质量非常差,如图5所示。开式整体叶盘的叶片为悬臂结构,叶片底部圆角处承受弯矩,容易出现裂纹等缺陷,降低叶盘的使用寿命,同时粗糙的表面还会增大流体流动的损失。因此,加工中一定要保证叶片表面和底部圆角的加工质量。

为了得到理想的刀具路径,在HyperMILL软件中采用坐标转换与五轴再加工相结合的方法。五轴型腔循环“再加工”为HyperMILL软件中的一种五轴加工编程方式,该编程方式参考已生成的三轴刀具路径,对其进行处理,赋予刀具倾角,达到干涉避让的目的。生成的刀具路径虽然是对三轴刀具路径的处理,但在零件加工过程中依然是五

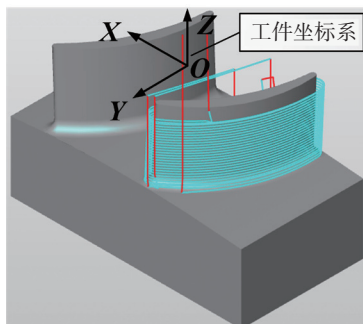


图4 等高精加工循环方式生成的刀具路径  
Fig.4 Toolpath generated by Z-level shape finishing

轴联动,而非“3+2”方式。

首先,在编程时将叶片顶面设置为工作平面,建立直角坐标系,如图6(a)所示,坐标原点在叶片顶面上,z轴与叶片顶面垂直。在该坐标系下进行三轴加工的“U/V曲面加工”或者“轮廓加工”方式,得到该坐标系下叶片表面的三轴加工刀具路径,如图6(b)所示。刀具轴线与叶片母线之间的夹角为0°。利用五轴型腔循环的“再加工”方式将生成的三轴刀具路径转化为五轴刀具路径,在该循环方式下进行五轴加工设置,包括刀具相对于工件表面的倾角等参数。生成的刀具路径如图6(c)所示,叶片顶部和底部均没有多次进退刀,底部圆角由刀具连续加工完成,可以获得较好的加工质量。在生成NC代码时,后处理器自动识别转换坐标系与定义的工件坐标系,并在原始工件坐标系下生成每一步加工的NC代码。利用坐标转换和再加工相结合的方法完成叶片叶身的加工编程可以提高编程效率,得到理想的刀具路径,解决了因多次进退刀造成的底部圆角加工质量差的问题。

流道的精加工用五轴曲面循环的“U/V曲面加工”方式,平滑双向

的走刀策略,按照流道表面两侧的边界曲线进行刀具路径规划。由于两叶片向外侧倾斜,存在倒扣结构,因此需要设置刀具侧倾角,避免加工到靠近叶片根部时刀具与叶片上部发生干涉。流道精加工的刀具路径如图7所示。

叶片顶面的加工余量小,用五轴曲面循环的“端面加工”方式一次走刀即可完成。叶片顶面精加工的刀具路径如图8所示。

在HyperMILL软件中进行刀具路径的几何仿真,仿真效果如图9所示,刀路仿真模拟过程中刀具、工件、刀柄、夹具和机床之间无干涉碰撞。

### 整体叶盘基准件的加工

利用DMU-70V五轴加工中心进行钛合金TC4整体叶盘基准件的切削加工,同时用测力仪(Kistler

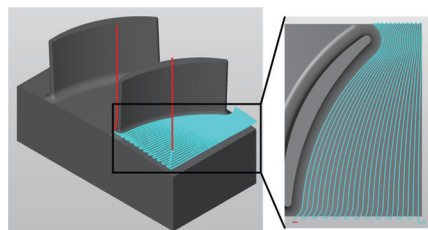


图7 流道精加工刀具路径  
Fig.7 Finishing toolpath for hub surfaces

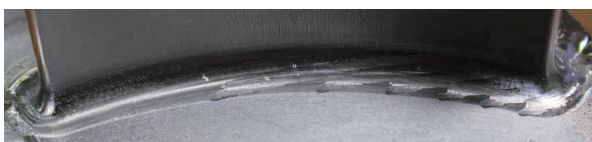
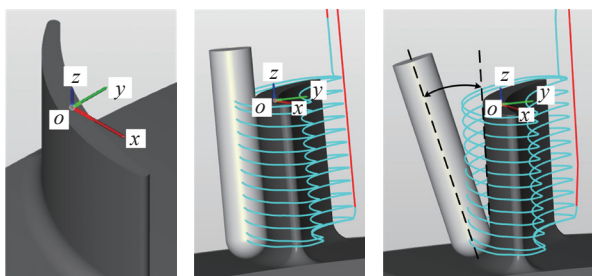


图5 预加工零件圆角不完整性  
Fig.5 Pre-processed corner



(a)坐标转换 (b)三轴刀具路径 (c)五轴刀具路径

图6 坐标转换与5轴再加工

Fig.6 Coordinate transformation and 5-axis re-machining

9257B)对加工过程中的切削力进行测量。整体叶盘基准件通过螺栓与测力仪连接,用设计的夹具固定在机床工作台上,如图10所示。由于钛合金的弹性模量较小,工件在加工中易发生夹紧变形,所以工件装夹时夹紧力不宜过大,否则会降低工件的加工精度。加工前测量使用的刀具长度,即图11所示尺寸 $L$ ,将各把刀具的长度 $L$ 和半径 $R$ 分别输入到机床刀具列表对应的刀号

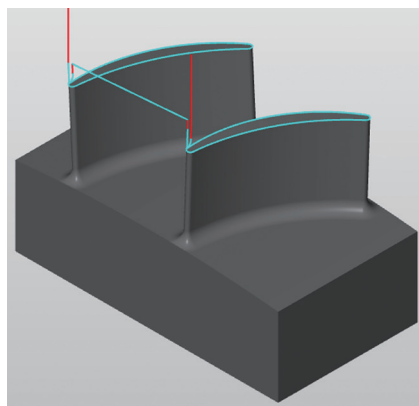


图8 叶片顶面精加工路径

Fig.8 Finishing toolpath for top surfaces

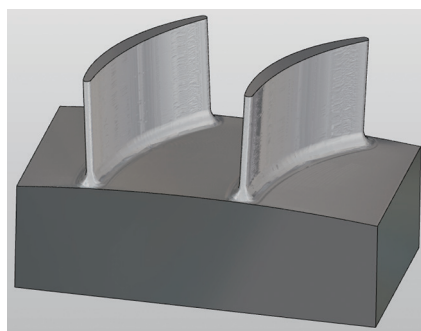


图9 精加工刀具路径几何仿真效果

Fig.9 Simulation of finishing toolpath

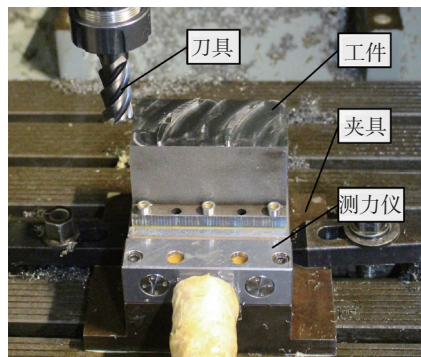


图10 切削力测试装置

Fig.10 Testing device of cutting force

下。在加工时仅需在粗加工前进行对刀操作,其他工序在换刀后无需进行二次对刀,节省了换刀与对刀时间,同时可以减少因多次对刀引起的加工误差。

如图12所示,叶片1型面及叶片两侧流道采用国产刀具PM-2BL-R4(即图12中刀具1)进行加工,叶片2型面及两侧流道采用进口刀具EB-A2 08-08(即图12中的刀具2)进行加工。以整体叶盘基准件精加工工艺为例,分别在叶片1与叶片2的叶身表面及流道1与流道2表面对应选取相同位置,测量两种刀具在精加工过程中的切削力,对比两种刀具的切削力大小,以验证国产刀具和进口刀具在TC4整体叶盘加工中的切削性能。两种刀具加工叶片1、2表面和流道1、2表面相同位置处的一段连续刀具路径上的切削力测量结果分别如图13所示,其中切削分力 $F_x$ 、 $F_y$ 和 $F_z$ 的



图11 刀具的长度和半径

Fig.11 Length and radius of cutting tool

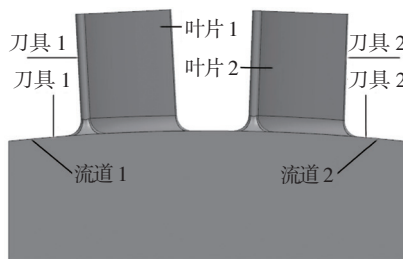
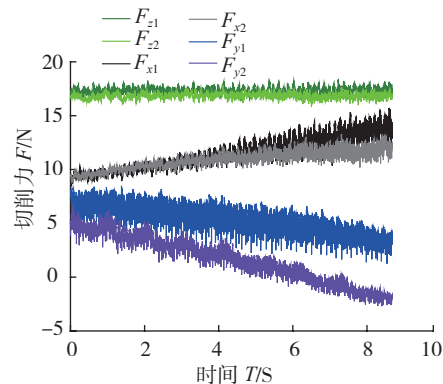
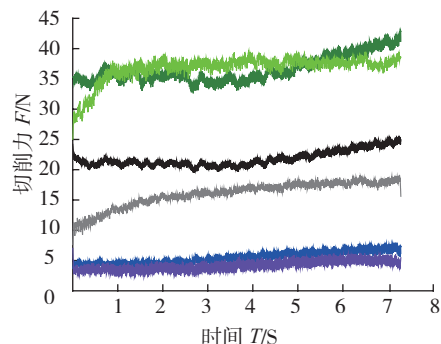


图12 不同刀具加工的区域

Fig.12 Processing area of different tools



(a) 两把刀具精加工叶片时的切削力



(b) 两把刀具精加工流道时的切削力

图13 精加工过程中的切削力

Fig.13 Cutting forces during finishing operation

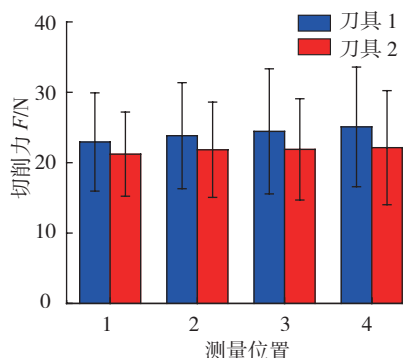
方向如图10所示,下标1、2分别对应表示刀具1、2。从图13中可以看出,加工过程中的切削力比较稳定。两把刀具的切削力吻合度较好。随着加工的进行,刀具1的磨损量增大,使得切削力大于刀具2的切削力。由于叶片外侧及流道表面在粗加工之后留下的余量不均匀且加工过程中刀具轴线相对于工件表面的角度不断变化,因此刀具受到的各个方向上的分力会发生变化。

计算每个测量位置处的切削力,求得两把刀具在加工过程中每个测量位置的平均切削力,如图14所示。在叶片精加工过程中,4个测量位置处,刀具1受到的切削力均大于刀具2受到的切削力,但不超过15%。随着刀具沿螺旋形刀具路径向下加工,两种刀具在各个测量位置的切削力比较平稳。在流道精加工过程中,两把刀具受到的切削力基本相同,相差在10%以内,且

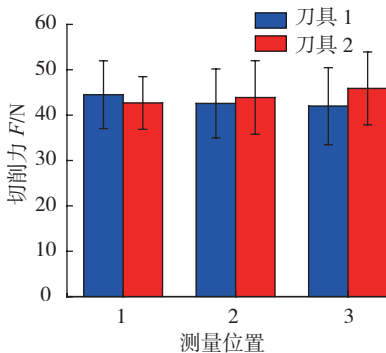
在不同的测量位置,切削力的变化非常小。

加工完成的整体叶盘基准件如图 15 所示。加工过程稳定,没有出现切、欠切和干涉等问题,叶片底部圆角加工效果良好,与图 5 中的加工效果相比,叶片底部圆角加工不完整的问题得到了明显的改善。

利用激光共聚焦显微镜对精加工后的叶片叶身和流道的表面进行测试观察,得到加工表面的显微形貌。两种刀具加工后的叶片和流道的表面显微形貌如图 16 所示,其表面粗糙度  $R_a$  如表 3 所示。



(a) 叶片精加工各位置切削力对比



(b) 流道精加工各位置切削力对比

图 14 不同测量位置处的切削力对比  
Fig.14 Comparison of cutting forces at different measurement locations

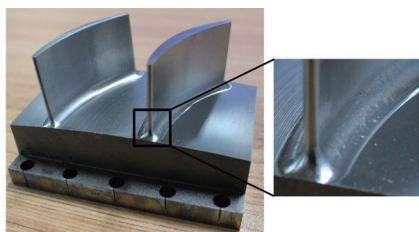


图 15 加工完成的整体叶盘基准件  
Fig.15 Machined turbine blisk benchmark

从加工结果可以看出用刀具 1 与刀具 2 在加工叶片表面时,得到的已加工表面形貌基本相同,用刀具 2 加工的表面粗糙度  $R_a$  较小。但对于精加工后的流道表面,用刀具 2 加工的表面质量优于刀具 1,用刀具 1 加工的表面切削痕迹较明显,且表面粗糙度  $R_a$  大于用刀具 2 的加工表面。总体而言,刀具 1 和刀具 2 均能够满足对钛合金整体叶盘的加工,且国产刀具可以得到较好的加工质量。结果证明国产刀具在 TC4 整体叶盘加工中的可应用性。

### 结论

(1) 整体叶盘基准件对整体叶盘的复杂结构进行了简化,保留了叶片与流道等典型加工特征,可以更方便地进行加工验证分析。

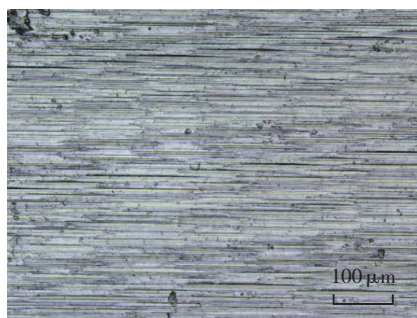
(2) 在 HyperMILL 软件中进行

基准件的数控编程,将加工过程分为粗加工和精加工两个阶段,其中叶片叶身的数控编程用坐标转换和五轴再加工相结合的方式,避免了刀具路径在叶片顶部和底部出现多次的拾刀,底部圆角由刀具连续加工完成,改善了加工质量。

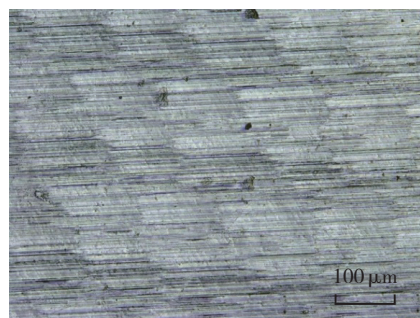
(3) 在 DMU-70V 五轴加工中心上对钛合金 TC4 整体叶盘基准件进行了加工。两个叶片和两侧流道分别用不同刀具加工完成,测量了加工过程中部分刀路上的切削力,并观察了加工后叶片和流道的表面形貌。结果显示加工效果较好,两种刀具的加工性能基本相同,所用刀具能达到钛合金整体叶盘零件加工的技术要求。

### 参考文献

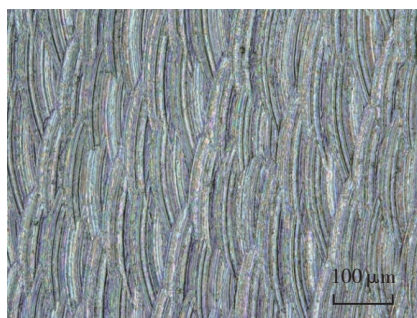
[1] 史耀耀,段继豪,张军锋,等. 整体



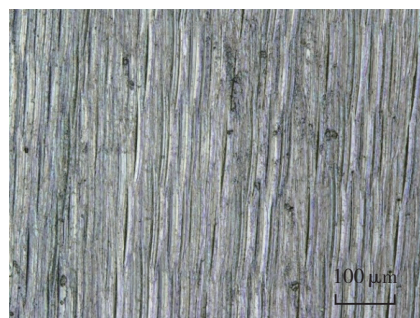
(a) 刀具 1 精加工叶片表面



(b) 刀具 2 精加工叶片表面



(c) 刀具 1 精加工流道表面



(d) 刀具 2 精加工流道表面

图 16 叶片与流道的加工表面显微形貌

Fig.16 Micro-morphology of blade and hub machined surfaces

表 3 精加工表面粗糙度  $R_a$

位置	刀具 1	刀具 2
叶片表面	1.337	1.298
流道表面	1.324	1.220

叶盘制造工艺技术综述[J]. 航空制造技术, 2012(3): 26-31.

SHI Yaoyao, DUAN Jihao, ZHANG Junfeng, et al. Blisk disc manufacturing process technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(3): 26-31.

[2] WANG M H, SUN Y. Error prediction and compensation based on interference-free tool paths in blade milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(5-8): 1309-1318.

[3] 陆山, 鲁冯杰. 基于 ANSYS 的整体叶盘结构优化设计[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1218-1224.

LU Shan, LU Fengjie. Structure optimization design for blisk based on ANSYS[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1218-1224.

[4] 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.

[5] 任军学, 姜振南, 姚倡锋, 等. 开式整体叶盘四坐标高效开槽插铣工艺方法[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1692-1698.

REN Junxue, JIANG Zhennan, YAO Changfeng, et al. Process for 4-axis high

efficiency slot plunge milling of open blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1692-1698.

[6] 张明岐, 张志金, 黄明涛. 航空发动机压气机整体叶盘电解加工技术[J]. 航空制造技术, 2016(21): 86-92.

ZHANG Mingqi, ZHANG Zhijin, HUANG Mingtao. Electrochemical machining technology of aeroengine compressor blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(21): 86-92.

[7] YANG S H, LEE S G. CNC tool-path planning for high-speed high-resolution machining using a new tool-path calculation algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 20(5): 326-333.

[8] 贾玉佩, 赵威, 李亮. 航空发动机整体叶盘刀具性能灰色综合评价[J]. 中国机械工程, 2016, 27(12): 1621-1625.

JIA Yupei, ZHAO Wei, LI Liang. Grey comprehensive evaluation of cutting tool performance for aero-engine blisk[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(12): 1621-1625.

[9] 张文祥, 韩江. 基于 HyperMILL 的整体叶轮五轴数控加工[J]. 制造技术与机床, 2012(6): 125-128.

ZHANG Wenxiang, HAN Jiang. 5-axis CNC processing for integrated impeller based

on hyperMILL[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(6): 125-128.

[10] 王晓平, 郭初阳, 周亮. 钛合金零件的机械加工工艺和质量控制[J]. 新技术新工艺, 2013(9): 91-93.

WANG Xiaoping, GUO Chuyang, ZHOU Liang. Machining process and quality control of titanium alloy parts[J]. New Technology & New Process, 2013(9): 91-93.

[11] 张为民, 宋学坤, 郝小忠, 等. 基于特征的开式整体叶盘插铣粗加工刀轴矢量优化生成方法[J]. 航空制造技术, 2014(7): 76-79.

ZHANG Weimin, SONG Xuekun, HAO Xiaozhong, et al. Feature based optimal tool axis generation method for plunge milling in rough machining of open blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(7): 76-79.

[12] 陈章伟, 曲鹏文. 开闭式叶轮加工专业解决方案 hyperMILL[J]. 智能制造, 2010(4): 37-40.

CHEN Zhangwei, QU Pengwen. Open closed impeller processing professional solution hyperMILL [J]. Intelligent Manufacturing, 2010(4): 37-40.

通讯作者: 刘战强, 博士、教授、博导, 研究方向为切削加工理论与刀具技术等, E-mail: melius@sdu.edu.cn.

## CNC Programming and Machining Technology for 5-Axis Milling of Turbine Blisk

ZHAO Wenming, SHEN Qi, WANG Bing, LIU Zhanqiang

(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

**[ABSTRACT]** Turbine blisk has been widely applied in aero-engine due to its many advantages such as good structural integrity, light weight, less assembling link and high assembling precision. Based on the machining characteristics of the turbine blisk, it is simplified as a benchmark workpiece which can be investigated from two aspects of CNC programming and cutting operation. Firstly, CNC programming of the benchmark workpiece was conducted with HyperMILL software. The ideal tool path were obtained, which can be ensured high efficient and high quality machining of the workpiece. Then, the benchmark workpiece material used TC4 titanium alloy which was milled with DMU-70V five-axis machining center. During the finishing of the blades and the hub surfaces, the cutting forces were on-line measured for different end milling-tools. Finally, the surface morphology of the blades and hub machined surfaces were observed. The machining performance of the different milling tools for the benchmark workpiece of TC4 titanium alloy is evaluated with the measured cutting forces and surface morphology.

**Keywords:** Turbine blisk; CNC programming; Five-axis machining; Cutting force; Surface morphology

(责编 铃兰)