

GH4169G 整体叶盘阶梯铣削稳定性研究

刘 强¹, 柳万珠^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 西安航空发动机(集团)有限公司 工艺技术中心 西安 710021)

摘 要: 为解决高强高温合金 GH4169G 整体叶盘叶片铣削加工不稳定问题,通过有限元分析的方法,分析了沿大径方向(叶片宽度)和轴向(叶身方向)两种逐层铣削方案对加工稳定性的影响,研究了阶梯铣削工艺和传统双面对称铣削工艺对整体叶盘叶片铣削稳定性的影响.结果表明:沿大径方向逐层加工时,其理论绝对稳定极限切削深度小于实际加工中可能的最大切削深度,主轴转速、切削深度等切削参数选择范围较小;而沿轴向逐层加工时,其理论绝对稳定极限切削深度大于实际加工中可能的最大切削深度.与传统双面对称铣削工艺相比,阶梯铣削工艺使整体叶盘叶片的刚度得到提高,相同载荷下叶片的最大变形量降低了 60%,其前 6 阶模态频率均较高,加工过程更稳定,加工出的叶片能满足设计要求.

关 键 词: 高温合金; 整体叶盘; 颤振; 阶梯铣削; 铣削稳定性

中图分类号: V214.4; TG506.9

文献标志码: A

Stability research on step milling of GH4169G blisk

LIU Qiang¹, LIU Wan-zhu^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Process and Technology Center,

Xi'an Aero-Engine (Group) Limited Company,

Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710021, China)

Abstract: Finite element analysis was applied to solve the problem of instability during milling blisk blade made of high strength superalloy GH4169G. Both methods of milling along the major diameter and axial direction were studied to analyze the machining stability. The effects of both the step milling and general symmetry milling on the machining stability were analyzed in the milling process of the blisk blade. Results show that the limit cutting depth in the stability lobe is less than the probable maximum cutting depth, the machining parameters such as the spindle speed and cutting depth can be chosen in a small range when the blade is cut by layers along the major diameter. The limit cutting depth in the stability lobe is larger than the probable maximum cutting depth when the blade is milled axially by layers. The rigidity of the blisk blade is improved by the step milling method. The maximum deformation of blade is 60% lower than that of the general symmetry milling in the same load. Compared with the general symmetry milling, the step milling method has the higher frequencies at the first six modes and the better stability, and the blades machined can meet the design requirements.

Key words: superalloy; blisk; chatter; step milling; milling stability

收稿日期:2014-09-13

基金项目:高档数控机床与基础制造装备科技重大专项(2013ZX04001-081)

作者简介:刘强(1963—),男,湖南耒阳人,教授、博士生导师,博士,主要从事数控加工过程仿真优化等方面研究.

高强高温合金整体叶盘具有高稳定性、高可靠性且质量轻的特点,已被广泛应用于航空发动机上,其制造质量的好坏直接影响着航空发动机能否稳定、可靠地工作^[1-3].整体叶盘制造困难,欧美航空强国将其核心技术对外封锁,而国内对整体叶盘制造的研究刚起步,公开的研究成果主要集中在整体叶盘数控铣加工^[4-7]、电解加工^[8-10]、线性摩擦焊^[11-12]等方面.数控铣加工是目前研究较多且整体叶盘制造常用的一种方法,但整体叶盘叶片是复杂薄壁件,且属于典型的悬臂梁结构,其刚性差.因此,在铣削加工过程中,叶片受到切削力后经常产生弯曲、变形^[2];尤其是 GH4169G 属于难加工合金,不合理的铣削工艺往往容易产生加工颤振,严重影响整体叶盘加工质量.

针对上述问题,白万金等^[13]通过数值仿真的方法对工字型薄壁件对称铣削进行了分析,研究了减少让刀变形的办法.陈蔚芳等^[14]通过主动补偿方法研究了航空薄壁件的误差控制.单晨伟等^[15]研究了非均匀余量补偿方法,减小了薄壁悬臂叶片加工中的变形.Wang 等^[16]针对整体叶盘叶片螺旋铣削轨迹,研究了基于无干涉轨迹进行误差预测和补偿的方法.从以上研究可以看出,很多学者在薄壁件铣削变形控制方面取得了一些重要成果,但对整体叶盘铣削加工稳定性的研究不够深入,而抑制加工颤振对保证整体叶盘的稳定加工有着重要的意义^[17].

Altintas 等^[18]通过研究建立了插铣工艺的颤振稳定域,Ren 等^[5]研究了开式整体叶盘粗加工插铣轨迹生成方法,李忠群等^[19]通过动力学仿真技术对钛合金整体叶轮铣削参数进行了优化,避免了加工过程中的颤振现象.虽然通过系统动态特性分析进行切削参数优化能够避免加工颤振,但该方法主要是针对成熟的工艺方案.而 GH4169G 是一种难加工合金,对该合金整体叶盘半精加工、精加工的研究较少,尚未建立成熟的工艺方案.所以选择合理加工方案,提高整体叶盘加工过程中系统的刚性,对 GH4169G 整体叶盘的稳定铣削尤为重要.

因此,本文从工艺优化角度出发,针对整体叶盘叶片的半精、精加工过程的稳定性问题,分析了不同铣削方案对整体叶盘加工稳定性的影响,研究了阶梯铣削工艺方法与传统方法对整体叶盘薄壁叶片刚性状态的影响,以便为 GH4169G 整体叶盘铣削加工方案的制定提供依据.

1 不同铣削方案对稳定性的影响

不同的铣削策略下,走刀方式影响着整体叶盘薄壁叶片所受的切削力及系统的固有频率,从而导致加工稳定性不同.本节对整体叶盘薄壁叶片铣削常用的两种加工方案的稳定性进行分析.

假设刀具为立铣刀,为研究不同方案下叶片模态频率及模态刚度的变化,将整体叶盘叶片简化为如图 1 所示的薄壁零件.

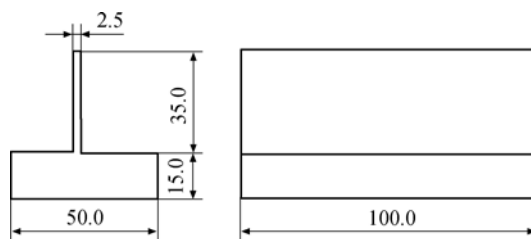


图1 零件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Part size (unit:mm)

1.1 大径向铣削方案

为了便于分析与计算,将连续的加工过程离散为 10 个阶段,并用这 10 个中间阶段的特性来揭示连续加工过程动态特性的变化规律.在待加工表面的长度方向(大径向)划分 10 个阶段,其中各阶段已切削的长度分别为:0,12,24,36,48,60,72,84,96,100 mm.如图 2 为该方案 4 个中间阶段的工件模型示意图,其加工特点为轴向切深直接为待加工表面的高度,每个单独的阶段径向逐层加工至待加工表面,径向切深保持为 0.1 mm,刀具直径 10 mm.图 3 所示为测试零件的毛坯尺寸.

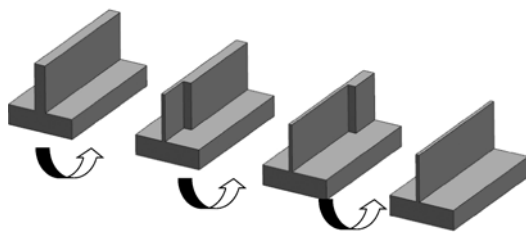


图2 大径向铣削方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of milling along major diameter

1.2 轴向铣削方案

为了简化分析与计算,将连续的加工过程离散为 8 个阶段,并用这 8 个中间阶段的特性来揭

示连续加工过程动态特性的变化规律. 如下为 4 个中间阶段的工件模型示意图(图 4),其加工特点为径向切深为欲切除部分的宽度,轴向分为 8 个中间阶段加工至待加工表面的底部,其中已切削的高度分别为:5,10,15,20,25,30,35 mm.

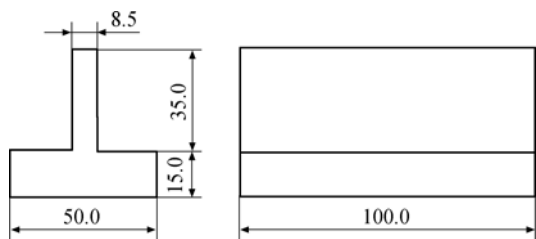


图 3 毛坯尺寸(单位:mm)
Fig. 3 Blank size (unit:mm)

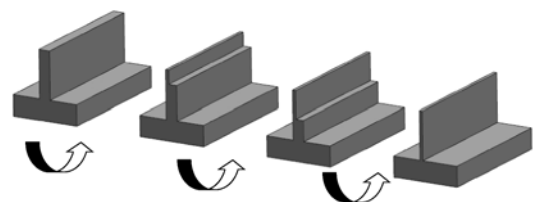


图 4 轴向铣削方案示意图
Fig. 4 Schematic diagram of axial milling

1.3 方案评估

对于上述两个加工方案,均采用底面固定的装夹方式,分别对两种方案进行数值仿真,得到工件上各加工位置的 1 阶模态频率及模态刚度等仿真结果,如表 1、表 2 所示.

表 1 1 阶模态仿真结果(大径向铣削)

Table 1 Simulation result at first mode
(milling along major diameter)

切削位 置/mm	模态 频率/kHz	模态刚度/ 10 ⁹	最大 模态位移	刚度/ 10 ¹³ (N/m)
0	5.25	1.10	6.749	2.41
12	5.22	1.08	7.731	1.80
24	4.42	0.773	43.3	0.0413
36	2.90	0.332	40.7	0.0200
48	2.24	0.197	34.9	0.0162
60	1.98	0.154	30.7	0.0163
72	1.75	0.121	27.3	0.0163
84	1.67	0.110	24.8	0.0179
96	1.59	0.0993	21.5	0.0214
100	1.80	0.127	13.0	0.0752

表 2 1 阶模态仿真结果(轴向铣削)

Table 2 Simulation result at first mode (axial milling)

切削位 置/mm	模态 频率/kHz	模态刚度/ 10 ⁹	最大 模态位移	刚度/ 10 ¹³ (N/m)
0	5.21	1.07	6.743	2.35
5	6.23	1.53	8.043	2.37
10	7.21	2.05	10.7	1.81
15	6.75	1.80	16.4	0.669
20	4.87	0.938	16.2	0.359
25	3.33	0.436	15.2	0.189
30	2.48	0.243	14.0	0.124
35	1.80	0.127	13.0	0.0752

图 5 和图 6 所示为采用大径向铣削方案时,1 阶模态频率及模态刚度随切削位置的变化曲线,从中可明显看出,1 阶模态频率及模态刚度随着径向切削位置的变化而逐步降低.

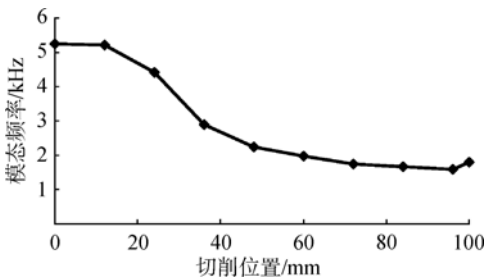


图 5 大径向铣削 1 阶模态频率变化曲线
Fig. 5 Curves of first modal frequency by milling
along major diameter

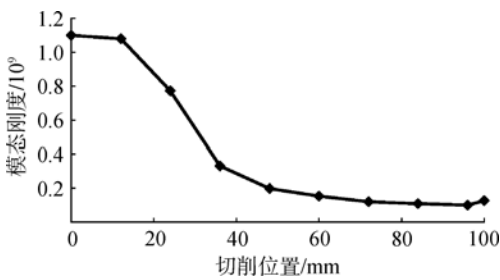


图 6 大径向铣削 1 阶模态刚度变化曲线
Fig. 6 Curves of first modal stiffness by milling
along major diameter

图 7 和图 8 所示为采用轴向铣削方案时,1 阶模态频率及模态刚度随切削位置的变化曲线,与大径向铣削时不同,其 1 阶模态频率及模态刚度随轴向不同切削位置的变化呈现先增大后降低的趋势.

通过对大径向铣削方案进行数值仿真,得到1阶模态稳定性叶瓣图,如图9所示,由图可知,理论极限切削深度约为12 mm,小于实际加工中的最大切削深度35 mm(薄壁高度),故实际加工时要取大于12 mm的切削深度时,需要根据叶瓣图选择合适转速。

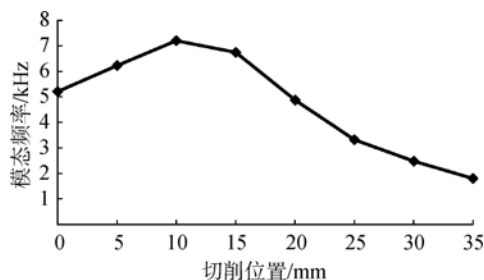


图7 轴向铣削1阶模态频率变化曲线

Fig. 7 Curves of first modal frequency by axial milling

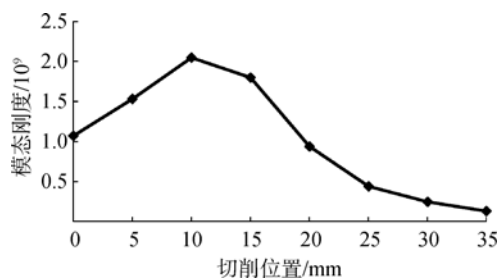


图8 轴向铣削1阶模态刚度变化曲线

Fig. 8 Curves of first modal stiffness by axial milling

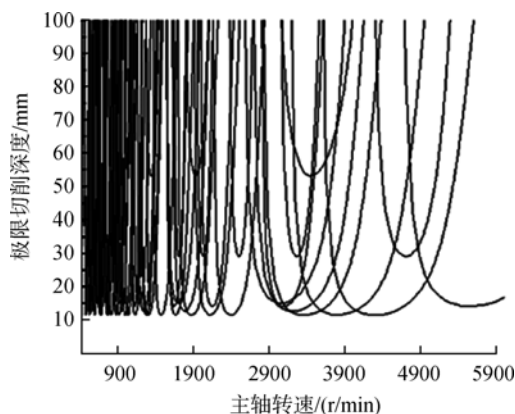


图9 大径向铣削过程的二维稳定性叶瓣图

Fig. 9 Two-dimensional stability lobes diagram of milling process along major diameter

对轴向铣削方案进行数值仿真,得到加工过程二维稳定性叶瓣图,如图10所示,理论绝对稳定极限切削深度大于实际加工中的最大切削深度35 mm(薄壁高度),故实际加工时取任意转速时,均不发生颤振。

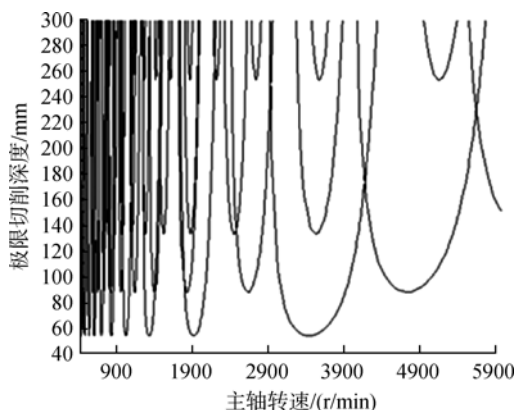


图10 轴向铣削过程的二维稳定性叶瓣图

Fig. 10 Two-dimensional stability lobes diagram of axial milling process

综合比较大径向铣削和轴向铣削两个方案可发现,对于本零件,当采用轴向方案时,不管选择多大转速与轴向切削深度,均不会发生颤振;而若采用大径向加工方案,则需要结合稳定性叶瓣图选择合适转速,以避免发生颤振。

2 阶梯铣削工艺对稳定性的影响

采用轴向铣削方案对整体叶盘叶片加工时,加工过程稳定性较好,但对叶片进行精加工时,叶盘余量较小,叶片刚性较差。当整体叶盘叶片加工到一定程度时,作为激振力的铣削力,如果其频率与叶片任意1阶的固有频率接近,则整体叶盘叶片很容易就发生颤振,从而严重影响加工质量。为保证精加工过程的稳定性,避免发生颤振,在上述研究的基础上,采用整体叶盘叶片阶梯铣削工艺方法,即沿着叶片高度方向分阶梯区域进行加工。如图11所示,当对1阶梯A区进行精加工时,由于2阶梯区域尚未进行半精加工,仍有较大加工余量B,C区,从而能保证叶片具有较强的刚性。

为分析不同工艺方法对叶片刚度的影响,将整体叶盘叶片简化为薄壁矩形板,模型尺寸如图12所示。采用有限元法分别对传统双面对称铣削、阶梯铣削两种工艺方案下的叶片变形及应力进行模拟分析,研究加工至叶片同一位置时(叶身方向距离叶尖10 mm处),相同载荷下叶片的变形及应力分布情况。

图13是采用传统双面对称铣削法加工完距离叶片叶尖10 mm处后的叶片的整体变形情况,其中叶片叶尖处的最大变形为0.39 mm;图14是相应的叶片应力分布情况,其中叶片根部最大应力为104.51 MPa。

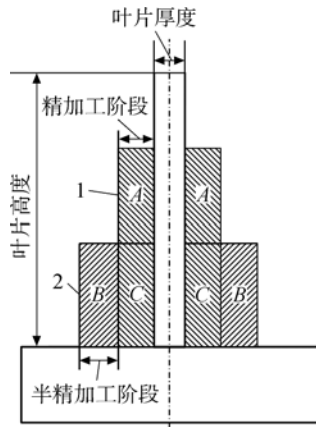


图 11 整体叶盘叶片阶梯铣削
Fig. 11 Step milling of blisk blade

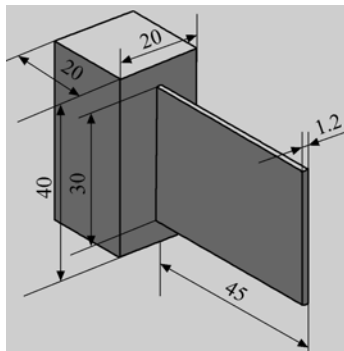


图 12 模型尺寸(单位:mm)
Fig. 12 Model size (unit:mm)

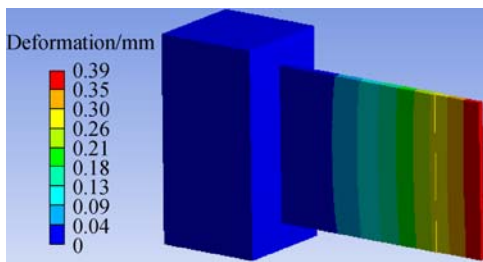


图 13 传统双面对称铣削法叶片变形情况
Fig. 13 Deformation distribution of blade by general symmetry milling

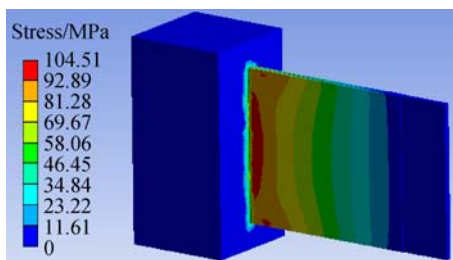


图 14 传统双面对称铣削法叶片应力分布
Fig. 14 Stress distribution of blade by general symmetry milling

采用阶梯铣削法加工完叶片相同位置处后,叶片变形情况如图 15 所示,其中叶片叶尖处最大变形为 0.17 mm;图 16 是相应的叶片应力分布情况,其中叶片根部最大应力为 56.4 MPa.

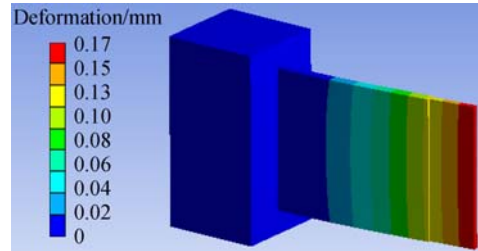


图 15 阶梯铣削法叶片变形情况
Fig. 15 Deformation distribution of blade by step milling

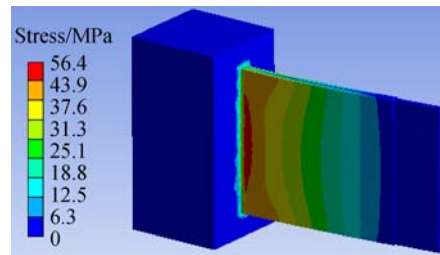


图 16 阶梯铣削法叶片应力分布
Fig. 16 Stress distribution of blade by step milling

图 17 所示为对两种方法仿真得到的前 6 阶模态频率,可看出,采用阶梯铣削方法时,叶片前 6 阶模态频率均高于传统双面对称铣削的情况.

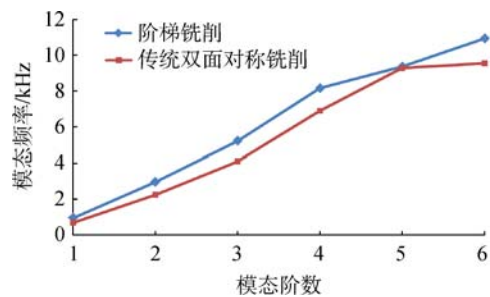


图 17 模态频率对比
Fig. 17 Contrast of modal frequency

通过对比传统方法加工和阶梯铣削时叶片的变形情况、应力分布、模态频率(图 13~图 17),可以看出,采取传统双面对称铣削法加工叶片时,由于整个叶片叶身的加工余量较小,叶片刚性较差,在切削力的作用下,产生了较大的变形;而采用阶梯铣削法加工叶片时,其最大变形量较传统方法降低了近 60%,最大应力降低了约 46%。这是由

于采用阶梯铣削方法时,叶身中、根部仍有较大加工余量,叶片厚度的增加提高了叶身刚度。

3 应用实例

在斯达拉格 STC800 五轴加工中心上对图 18 所示某型发动机 GH4169G 整体叶盘叶片加工进行了应用验证。

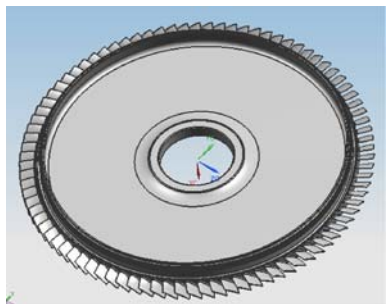


图 18 整体叶盘模型

Fig. 18 Blisk model

叶片铣削加工采用直径为 8 mm 的整体硬质合金铣刀,齿数为 4. 整体叶盘外径约为 630 mm,轴向厚度约为 65 mm,叶身长度约 30 mm,叶身宽度约为 17 mm. 主轴转速为 1600 r/min,对应切削速度为 40.192 m/min,轴向切削深度为 0.2 mm. 整体叶盘精铣加工后,为保证叶片具有更高表面质量,一般安排抛光、振动光饰等工序,整体叶盘叶片加工效果如图 19 所示。

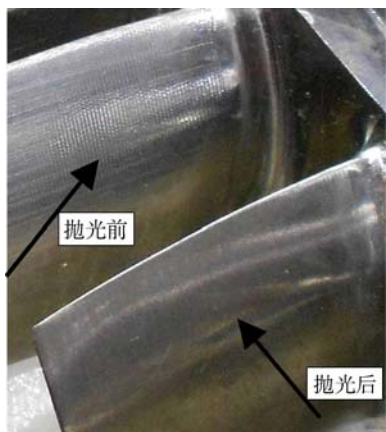


图 19 整体叶盘加工效果图

Fig. 19 Effect picture of blisk machining

表 3 为采用传统方法和阶梯铣削法加工整体叶盘叶片时,两方法对叶型轮廓度、铣削稳定性及后续工艺的影响. 按照本文提出的加工策略,整体叶盘叶片铣削加工过程稳定,无颤振现象,精铣加工后叶片表面无振刀纹,叶型轮廓度为 0.08 ~

0.12 mm,表面粗糙度为 $3.2\ \mu\text{m}$,抛光余量较小,而经过抛光后表面粗糙度为 $0.6\ \mu\text{m}$,最终经振动光饰后叶片表面粗糙度为 $0.4\ \mu\text{m}$,能够满足零件设计图纸要求。

表 3 两种方法的比较

Table 3 Comparison of two methods

对比项	传统方法	阶梯法
轮廓度/mm	0.08~0.15	0.08~0.12
稳定性	易颤振,易产生振刀纹	无颤振,无振刀纹
后续工艺	抛光余量大,全型面抛光需 50 h,光饰需 30 h,轮廓精度损失大	抛光余量小,局部抛光去除刀痕仅需 20 h,光饰需 20 h,轮廓精度损失小

4 结 论

1) 对整体叶盘叶片加工采用轴向铣削方案时,稳定域范围较广,切削参数选择范围大,在最大限度防止工件在加工中颤振的方面,比大径向铣削方案好。

2) 在整体叶盘叶片半精铣和精铣加工时,随着叶片加工余量的减少,叶片的固有频率逐步降低,其刚性也越来越差. 阶梯铣削方法增加了整体叶盘叶片精加工时的相对厚度,提高了叶身刚度,相同载荷下,叶片抗变形能力增强. 阶梯铣削过程中,叶片各阶模态频率均高于传统双面对称铣削方式,整体叶盘的刚性得到明显改善。

参考文献:

- [1] Kumar B V R R. A review on blisk technology[J]. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 2013, 2(5): 1353-1358.
- [2] 王增强. 航空发动机整体叶盘加工技术[J]. 航空制造技术, 2013(9): 40-43.
WANG Zengqiang. Machining technology of aeroengine blisk[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013 (9): 40-43. (in Chinese)
- [3] 陆山, 鲁冯. 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 Feng. Structure optimization design for blisk based on ANSYS[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1218-1224. (in Chinese)
- [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

- Aeronoutica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2): 205-208. (in Chinese)
- [5] Ren J X, Yao C F, Zhang D H, et al. Research on tool path planning method of four-axis high-efficiency slot plunge milling for open blisk[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(1/2): 101-109.
- [6] 梁全, 王永章, 富宏亚, 等. 直纹面叶轮插铣加工关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 182-187.
- LIANG Quan, WANG Yongzhang, FU Hongya, et al. Key technologies in ruling surface impeller plunge milling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 182-187. (in Chinese)
- [7] 李湉, 陈五一, 陈彩红. 整体叶轮插铣粗加工算法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1696-1701.
- LI Tian, CHEN Wuyi, CHEN Caihong. Rough machining method for blisk plunge milling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1696-1701. (in Chinese)
- [8] 徐庆, 朱获, 徐正扬, 等. 整体叶盘通道电解加工电极多维运动轨迹优化[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1548-1554
- XU Qing, ZHU Di, XU Zhengyang, et al. Optimization of cathode multidimensional movement path in electrochemical machining of blisk channels[J]. Acta Aeronoutica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1548-1554. (in Chinese)
- [9] 孙伦业, 徐正扬, 朱获. 叶盘通道径向电解加工的流场设计及试验[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41(3): 95-100.
- SUN Lunye, XU Zhengyang, ZHU Di. Flow field design and experimental investigation of radial electrochemical machining of blisk channels[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(3): 95-100. (in Chinese)
- [10] Klocke F, Zeis M, Klink A. Technological and economical capabilities of manufacturing titanium-and nickel-based alloys via electrochemical machining (ECM)[J]. Key Engineering Materials, 2012, 504/505/506: 1237-1242.
- [11] 季亚娟, 刘燕冰, 张田仓, 等. TC4/TC17 线性摩擦焊接头组织及力学性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 109-112.
- JI Yajuan, LIU Yanbing, ZHANG Tiancang, et al. Structure and mechanical properties of TC4/TC17 linear friction welding joint[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2012, 33(10): 109-112. (in Chinese)
- [12] 姚希珍, 胡泽. 钛合金整体叶盘线性摩擦焊技术综述[J]. 航空制造技术, 2011(16): 43-47.
- YAO Xizhen, HU Ze. Linear friction welding technology for titanium alloy disc[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(16): 43-47. (in Chinese)
- [13] 白万金, 柯映林, 吴红兵, 等. 航空薄壁件对称及阶梯对称铣削的数值仿真与分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(2): 214-217.
- BAI Wanjin, KE Yinglin, WU Hongbing, et al. Numerical simulation analysis of symmetry and step-symmetry milling of aerospace thin-walled workpiece[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(2): 214-217. (in Chinese)
- [14] 陈蔚芳, 楼佩煌, 陈华. 薄壁件加工变形主动补偿方法[J]. 航空学报, 2009, 30(3): 570-576.
- CHEN Weifang, LOU Peihuang, CHEN Hua. Active compensation methods of machining deformation of thin-walled parts[J]. Acta Aeronoutica et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 570-576. (in Chinese)
- [15] 单晨伟, 赵颖, 刘维伟, 等. 一种薄壁悬臂叶片数控加工非均匀余量刚度补偿方法[J]. 航空学报, 2013, 34(3): 686-693.
- SHAN Chenwei, ZHAO Ying, LIU Weiwei, et al. A non-uniform offset surface rigidity compensation strategy in numerical controlled machining of thin-valled cantilever blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 686-693. (in Chinese)
- [16] Wang M H, Sun Y. Error prediction and compensation based on interference-free tool paths in blade milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(5/6/7/8): 1309-1318.
- [17] Gomes J O, Almeida A R, Jr, Silva A S A, et al. Evaluation of 5-axis HSC dynamic behavior when milling TiAl6V4 blades[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2010, 32(3): 208-217.
- [18] Altintas Y, Ko J H. Chatter stability of plunge milling[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2006, 55(1): 361-364.
- [19] 李忠群, 刘强. 基于动力学仿真技术的 TC4 整体叶轮铣削参数优化[J]. 航空制造技术, 2008(24): 80-85.
- LI Zhongqun, LIU Qiang. Optimization of milling parameters for TC4 integrated impeller based on dynamic simulation technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(24): 80-85. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)