

薄壁件多点柔性加工变形的分析和控制研究*

于金, 高彦梁

(沈阳航空航天大学机电工程学院, 沈阳 110136)

[摘要] 针对开发薄壁件多点柔性工装系统的需求, 研究薄壁件多点柔性铣削加工中的变形问题, 运用有限元软件 ABAQUS 对零件的实际加工过程进行模拟仿真。多点柔性工装系统采用布局, 分析吸盘边距和吸盘真空度对薄壁件加工变形的影响。通过改变 A、B、C 三组吸盘的真空度建立三因素四水平正交试验, 总结出 A、B、C 三组吸盘分别调整真空度至 -0.5bar、-0.8bar、-0.5bar 能够获得更小的平均变形量, 对多点柔性工装系统控制薄壁件的加工变形方面给出了建议。

关键词: 薄壁件; 多点柔性工装; 正交试验; 加工变形

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.14.052



于金

教授, 研究方向为精密、超精密数控加工、机电一体化技术。

飞机大型薄壁件的特点是尺寸轮廓大, 尺寸变化范围大, 刚度低。在铣削加工过程中极易产生加工变形, 零件的加工精度直接影响到后续

* 基金项目: 辽宁省自然科学基金 (2014024006)。

的装配生产, 因此控制飞机大型薄壁件的加工变形是亟待解决的工艺问题。近年来, 随着自动化水平的不断提高, 研制数字化支撑单元多点柔性工装系统能够有效地解决大型薄壁件在铣削加工中的变形问题^[1]。

在欧美国家, 柔性工装系统的设计、制造和应用已经较为成熟。在设计方面, 具有代表意义的是欧洲的 JAM 和 ADFAST 项目; 在制造方面, 其中最突出的代表是西班牙的 MTorres 公司研发的 TORRESTOOL 柔性工装系统和美国 CAN 制造系统公司研发的基于 POGO 柱单元的柔性工装系统; 在应用方面, 具有代表性的当属世界两大飞机制造公司——波音航空航天公司和欧洲航空防务航天公司 (EADS)^[2-5]。

在柔性工装系统的研发和应用上, 国内还只是停留在应用研究和实验上, 而国外已经把其大量应用在飞机的生产和新型飞机的研制过程中, 差距明显。将多支承柔性夹具国产

化势在必行, 各大高校和研究院已经着手对相关工装技术的研究和试验。吉林大学已经成功研制出了蒙皮展型专用多点支承柔性装置, 多点技术在国内处于领先地位^[6]。清华大学和北京航空制造工程研究所重点研究柔性工装的整体系统构造和制造, 经过几年的不断探究, 已经突破了定位器、夹持单元、多轴控制和离线仿真等关键技术, 即将进入工艺试验阶段^[7]。

本文在以上的基础上, 利用有限元法进一步研究在铣削加工过程中夹持边距、夹持力对薄壁件加工变形的影响规律, 并利用正交试验方法对不同装夹点施加不同的装夹力分析其对薄壁件加工变形的影响, 为解决柔性工装优化设计提供重要依据。

柔性工装系统的工作原理及有限元模型的建立

1 柔性工装系统的工作原理

图 1 为多点柔性工装系统的结

构简图,该系统主要由底座、X向导轨、Y向导轨、Z向调整支柱、万向真空吸盘和真空发生器等组成,该系统通过真空吸盘对薄壁件进行定位夹紧,根据实际需要布置 $m \times n$ 方阵阵列的支撑单元,X向导轨上的 m 个支撑单元沿 X 轴移动,Y向导轨 n 个动梁(每个动梁上有 m 个支撑单元)沿 Y 轴移动^[8]。

将结构模型简化得到图 2 所示薄壁件加工时的受力示意图。图中: F 为铣削力; F_x 为真空吸盘吸力,作用于整个吸盘范围内,单位面积上的吸力取决于真空度的大小; F_N 为支撑反力作用于接触点,沿接触面法线方向向外; δ 为薄壁件加工时的最大变形; Δ 为工件厚度; d 为两个支撑单元间的距离^[9]。

2 有限元模型的建立

本文选取飞机机身舱门零件的局部结构进行分析,基于上述模型,利用 ABAQUS 对薄壁件、刀具和柔

性夹具的装配模型简化并进行非线性动态加工变形分析^[10],建立 3×6 多点实体支撑模型如图 3 所示,Path-X 和 Path-Y 在工件背面,为加工变形主要测量线。零件材料选用 7050-T7451 铝合金板,长 \times 宽 \times 厚 = $300 \times 150 \times 4$,需要加工两个长 \times 宽 \times 深 = $60 \times 80 \times 1$ 的凹槽,材料各项属性如表 1 所示。

表1 7050-T7451铝合金材料属性

密度 / $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$	弹性模量 / GPa	压缩模量 / GPa	泊松比
2820	71.7	73.8	0.33

刀具采用螺旋角 $\beta=30^\circ$,前角 $\gamma=10^\circ$ 的四齿直柄立铣刀,刀具直径 $d=12\text{mm}$ 。刀具材料为硬质合金 YG8,材料属性如表 2 所示,加工过程中,主轴速度设定为 8000r/min,进给量设定为 $0.2\text{mm}/z$,背吃刀量为 1mm ,铣削宽度为 8mm 。

吸盘内部支撑体选用直径

为 10mm 的中碳钢,弹性模量 $E=2.09 \times 10^5\text{MPa}$,泊松比 $\lambda=0.3$,密度 $\rho=7.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。

多点柔性加工变形分析

在实际加工中,尤其是薄壁零件的铣削加工过程中,夹持力和装夹方案的不同对加工精度的影响是非常重要的,因此有必要研究夹持力和装夹方案对航空结构件加工变形的影响规律。

1 夹持边距对加工变形的影响

吸盘夹具的布局采用均匀分布,考虑到铣削加工和吸盘吸附效果的问题,选择吸盘夹具的边距变化范围为 $15\text{mm} \leq d \leq 45\text{mm}$,故选取边距为 15mm 、 22.5mm 、 30mm 、 37.5mm 、 45mm 进行加工,得到如图 4 所示的 X、Y 路径的加工变形图。

通过对加工变形的分析可知:对于该零件夹持边距的大小对整体的变形影响不是很大,但边距过大时工件仍会产生轻微的纵向正翘曲,边距过小时工件会产生轻微的纵向反翘曲,合理的选择吸盘边距对工件的加工变形亦能得到一定的作用。该零件选择吸盘边距 $d=25\text{mm}$ 。

2 夹持力对加工变形的影响

在铣削加工过程中,由于铣削力的作用对单个吸盘最低吸附力的要求是,本文选取直径为 20mm 的波状圆形吸盘,1.5 圈褶,当真空度达到 -0.7bar 时其理论脱离力为 16.3N ,侧向力为 23N 。采用真空发生器时吸盘能达到的真空度最高为 -0.88bar ^[11],故本文选取吸盘真空度为 -0.5bar 、 -0.6bar 、 -0.7bar 和 -0.8bar 进行铣削加工,铣削加工变形的影响如图 5 所示。

由数据分析可知:吸盘真空度对薄壁件的整体变形影响较大,尤其是在路径 Path-Y 上。吸盘的真空度过小,不能对薄壁件有较稳定的夹持力,切削过程中振动较大,使工件的变形量很大,当吸盘真空度过大时夹

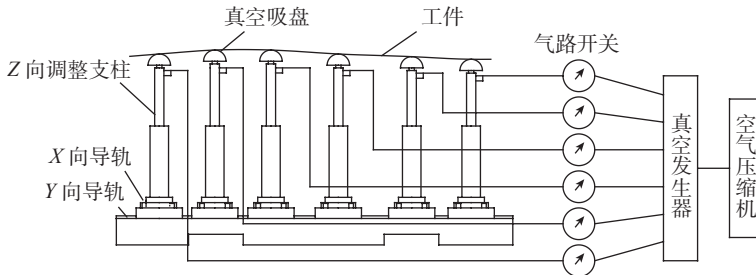


图1 多点柔性工装系统的结构简图

Fig.1 Structure diagram of multi-point flexible fixture system

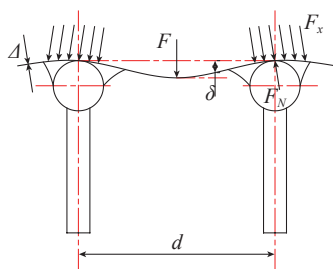


图2 受力示意图

Fig.2 Force sketch map

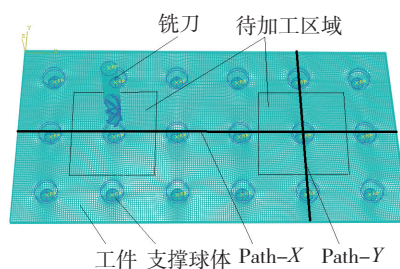


图3 装配图

Fig.3 Assembly drawing

表2 硬质合金 YG8 材料属性

材料	弹性模量 / GPa	泊松比	线性膨胀系数 / $(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	比热容 / $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	导热系数 / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1}\text{k}^{-1})$
YG8	64	0.22	4.5	220	75.4

持力又会对薄壁件的变形产生影响,因此选择合适的夹持力对薄壁件的加工变形控制至关重要。

3 多种装夹力装夹对加工变形的影响和优选

由于吸盘的真空度对薄壁件的加工变形有着很大的影响,因此通过对吸盘采取不同的真空度设计三因素四水平的正交试验以寻求控制加工变形的办法。由于零件的对称性,如图6所示,将A1、A2、B1、B2、C1、C2六列吸盘分为3组:A(A1、A2)、B(B1、B2)、C(C1、C2),将A、B、C

计如表3所示,试验方案如表4所示,极差分析如表5所示。

对模拟所得实验数据进行分析,表4中I~IV为各因素各水平对应的Path-X路径平均变形量的和,其中最小者对应的水平即为该因素的较好水平。对某一因素各水平下变形量的最大值和最小值的差称为极差,用R表示,极差的大小反应了各因素由于选取水平不同而对变形量影响的大小。

由极差分析表可知在A、B、C3组吸盘的真空度分别取-0.5bar、-0.8bar、-0.5bar时对其进行切削加工

能得到更小的加工变形量,在该组吸盘真空度的夹持下模拟加工过程如图7所示,Path-X路径上的变形图如图8所示,加工后得到的平均变形量为0.112mm。在控制加工变形方面吸盘真空度的取值对加工变形的影响程度C>A>B。由此可知在真空吸盘进行装夹的过程中对主要加工区域采取相对较大的真空度能够有

表4 正交试验方案及变形结果

Σ与极差	因素		
	A	B	C
I	303.1482	522.6273	311.0557
II	511.6534	472.2738	507.8668
III	373.7563	601.0812	689.1095
IV	670.0913	262.6669	350.6171
R	366.9431	338.4143	378.0538

表5 极差分析

实验序号	因素			平均变形量/μm
	A	B	C	Path-X
1	1	1	4	85.68213
2	1	2	3	103.9782
3	1	3	2	94.55913
4	1	4	1	18.92870
5	2	1	3	136.9187
6	2	2	2	205.5432
7	2	3	1	83.27516
8	2	4	4	85.91636
9	3	1	2	147.4455
10	3	2	1	56.27088
11	3	3	4	72.53706
12	3	4	3	97.50284
13	4	1	1	152.5810
14	4	2	4	106.4815
15	4	3	3	350.7098
16	4	4	2	60.31900

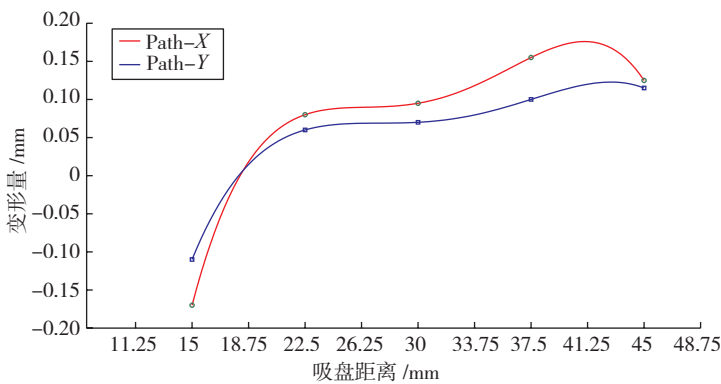


图4 吸盘边距对工件变形的影响

Fig.4 Influence of sucker margin on workpiece deformation

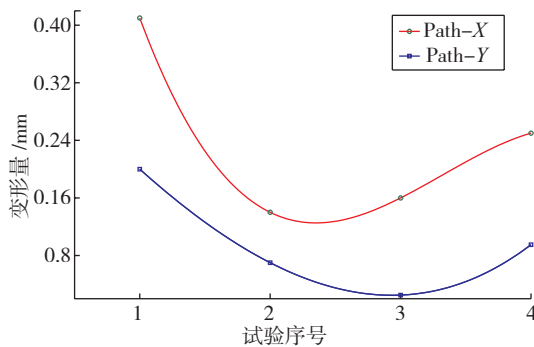


图5 吸盘真空度对加工变形的影响

Fig.5 Influence of sucker vacuum degree on machining deformation

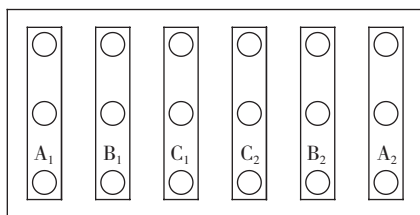


图6 吸盘分组

Fig.6 Sucker grouping

表3 正交表设计

实验序号	因素		
	A/bar	B/bar	C/bar
1	-0.5	-0.5	-0.5
2	-0.6	-0.6	-0.6
3	-0.7	-0.7	-0.7
4	-0.8	-0.8	-0.8

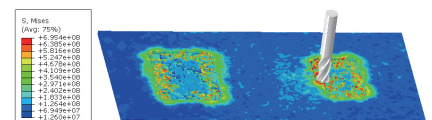


图7 模拟加工过程

Fig.7 Simulation process

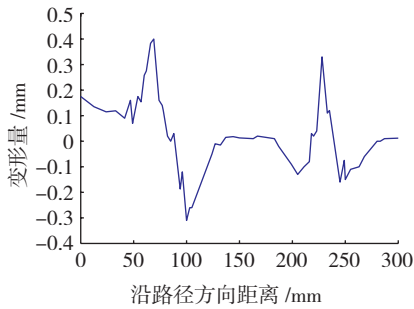


图8 Path-X路径变形图

Fig.8 Path-X path deformation map

效的控制工件的加工变形。

结论

(1) 相比试验研究和分析, 本文采用有限元仿真模拟技术节省大量的时间成本和设备成本, 并能够获得试验难以测量的物理力学参数。得到在多点柔性工装下的夹持边距和夹持力对薄壁件铣削加工变形的影响规律。

(2) 通过改变 A、B、C 3 组吸盘夹具的真空度设计三因素四水平的正交试验, 得到最优夹持力的组合 A、B、C 的真空度分别为 -0.5bar、-0.8bar、-0.5bar, 并在最优组合的夹持下获得了满足条件的最小变形量。同时得到了三组吸盘的真空度对加工变形的影响程度: C>A>B。验证了

在多点柔性工装下这是一种可靠的控制加工变形的办法。

参考文献

[1] 邹方. 柔性工装关键技术与发展前景[J]. 航空制造技术, 2009(10):34-38.

ZOU Fang. Key technology of flexible fixture and its development future[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(10):34-38.

[2] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

ZENG Pan. Finite element analysis and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[3] LI D S, HU F W. Key technologies and development of aircraft skins CNC trimming based on reconfigurable flexible tooling. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 23:26-29.

[4] HURTADO J F, MELKOTE S N. A model for synthesis of the fixturing configuration in pin-array type flexible machining fixtures[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002(42): 837-849.

[5] 丁韬. TORRESMILL和TORRESTOOL系统蒙皮切边钻铣床及柔性夹具装置[J]. 航空制造技术, 2007(2):108-109.

DING Tao. TORRESMILL and TORRESTOOL system skin trimming drilling and milling machine and soft fixture device[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(2):108-109.

[6] 李明哲, 韩奇钢. 多点浮动式柔性支撑装置[P]. 中国专利: CN201120129041.2. 2011-10-19.

LI Mingzhe, HAN Qigang. Multi point

floating flexible supporting device[P]. Chinese patent:CN201120129041.2. 2011-10-19.

[7] ZHOU K, ZHAO J S, MAO D Z. Research on an intelligent manufacturing system based on an information-localizing machining mode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002,129: 597-602.

[8] 陆俊百, 周凯, 张伯鹏. 飞行器薄壁件柔性工装定位/支撑阵列优化自生成研究[J]. 中国机械工程, 2010,19(21):2369-2378.

LU Junbai, ZHOU Kai, ZHANG Bopeng. Flexible tooling positioning / support array for aircraft thin wall parts study on optimal self generation of column[J]. China Mechanical Engineering, 2010,19(21):2369-2378.

[9] 张晓峰, 周凯, 赵加清. 薄壁件多点柔性加工变形的有限元分析[J]. 制造技术与机床, 2009(4): 103-107.

ZHANG Xiaofeng, ZHOU Kai, ZHAO Jiaqing. Finite element analysis on the deformation of multi point flexible machining of thin wall parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(4):103-107.

[10] GUO Hun, ZUO Dunwen, WANG Shuhong, et al. Effect of tool-path on milling accuracy under clamping[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005,22(3):234-239.

[11] 张洪双, 何晖, 郑东阳. 柔性真空吸附夹具的设计与研究[J]. 机械设计与制造, 2014,9(9):252-254.

ZHANG Hongshuang, HE Hui, ZHENG Dongyang. Design and research of flexible vacuum adsorption fixture[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2014,9(9):252-254.

Research on Analysis and Improvement of Thin-Walled Components Multi-Point Flexible Machining Distortion

YU Jin, GAO Yanliang

(School of Mechatronic Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] According to the requirement of developing multi-point flexible processing equipment of thin-walled components, the issue of milling distortion of thin-walled components with multi-point flexible fixture is studied, the actual machining process is simulated by finite element method with commercial software ABAQUS. Multi-point flexible fixture system adopted layout. To analyze the influence of vacuum and edge distance of suckers on the machining distortion of thin-walled parts. By respectively changing the vacuum of A, B, C three sets of suckers to establish three factors and four levels orthogonal experiment. The vacuum of the A, B, C three set of suckers are adjusted to -0.5 bar, -0.8 bar, -0.5 bar can get smaller average distortion is summed up, the advice in terms of multi-point flexible fixture system control machine distortion of thin-walled components is put forward.

Keywords: Thin-walled components; Multi-point flexible fixture system; Orthogonal experiment; Machining deformation

(责编 冬月)