

【工程与技术研究】

薄壁环形件装夹变形有限元分析与夹具设计

周元枝, 赵文英, 张国政

(安徽机电职业技术学院 机械工程学院, 安徽 芜湖 241002)

摘 要:薄壁件装夹变形是影响工件加工质量的重要因素,以 6061 铝合金材料所加工的薄壁环形件为分析对象,针对其镗孔、螺纹加工、钻孔和铤孔等多工序装夹问题,在保持相同装夹总力基础上,分别采用三爪式、六爪式和九爪式三种装夹布局,运用三维有限元方法分析不同装夹布局位置的应力应变情况,得出装夹变形控制规律。结果表明:采用九爪式均匀装夹布局,设计一种弹性薄膜盘九爪式夹具,完成薄壁环形件镗孔、螺纹加工、钻孔和铤孔等多道加工工序,可有效降低装夹变形量,从而保证工件加工精度。

关键词:薄壁环形件;装夹变形;三维有限元;装夹布局;弹性夹具

中图分类号: TG 75 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.04.013

0 引言

薄壁工件的装夹变形是工件加工精度的重要影响因素之一,其中 20%~60% 的加工误差是由装夹造成的^[1]。为了控制薄壁件装夹变形量,研究人员一直致力于薄壁件装夹力、装夹布局的优化,及夹具体和辅助支撑的模块化与柔性化研究^[2-3]。装夹包括定位和夹紧两大功能,其中,定位所产生的误差是原理性误差,主要由工件定位面与定位元件自身制造公差在装配过程中产生,通常以假定工件为刚性体,以解析法进行定位精度分析和优化。夹紧是保证工件在加工过程中不会因为外界因素(如切削力、振动力、重力、惯性力等)影响而破坏工件被定位后的位置所施加的装夹力。环形件主要特征是以圆柱表面为主,外圆柱表面定位多采用三爪卡盘、V 型块、半圆套、套筒等方式,内圆柱表面定位多采用芯轴等。环形件是 $L/D < 1$ (L 为工件长度, D 为工件直径)刚性较差的工件,无论是轴向夹紧还是径向夹紧都会产生装夹变形,因此,优化装夹力及装夹布局是避免薄壁件装夹变形的关键。

针对薄壁环形件装夹变形问题,采用三维有限元分析方法,分析其应力、应变及变形情况,进而优化装夹布局^[4],设计合理夹具完成薄壁件装夹加工。考虑到薄壁环形件直径尺寸较大,在保持相同装夹总力基础上,采用多爪装夹结构。由于卡爪数量越多,每个卡爪承担的夹紧力越小,薄壁环形件受力越均匀,变形就越均匀,应力、应变及变形就越小,但夹具结构设计就越复杂,本文选择三爪式、六爪式和九爪式三种装夹布局,并运用三维有限元分析比较,得出这三种装夹布局造成薄壁环形件变形情况,进而设计一种弹性薄膜盘九爪式夹具,可实现在车削中心机床上装夹加工,解决薄壁环形件装夹变形问题,从而保证工件加

收稿日期:2022-09-29

基金项目:安徽省教育厅高校自然科学研究重点项目(KJ2021A1519);安徽省高校学科(专业)拔尖人才学术资助项目(GXBJZD2020108);芜湖市科技成果转化项目(2022cg21);安徽机电职业技术学院横向技术项目(HX2022043)

第一作者简介:周元枝(1968—),男,安徽庐江人,副教授,高级工程师,硕士,主要从事精密制造及夹具设计研究。

E-mail:skjsjys@163.com

工质量。

1 薄壁环形件工艺分析

毛坯件为 6061 铝合金环形结构件,直径 174 mm,长 25 mm。毛坯件加工后的薄壁环形件最大外径为 164 mm,故该件壁薄,外圆柱表面粗糙度为 $12.5 \mu\text{m}$,其余表面粗糙度为 $3.2 \mu\text{m}$,圆周面上有 4 个均布的台阶通孔(通孔直径 2.2 mm,台阶孔径 3.0 mm、深 1.0 mm),轴向长度 22 mm,内孔圆柱度为 0.12 mm。首先对该件的特征加工面进行定义,然后结合常用机械加工方法,拟定工艺路线。其中薄壁环形件的外圆柱面及两个端面为自由加工尺寸,精度要求低,因此可在普通车床上完成直径 164 mm 的外圆柱面及其两端面加工。

根据特征加工面外单位矢量判别工位方法^[5-6],特征加工面(包括直径 164 mm 的外圆柱面、直径 160 mm 的内圆柱面、直径 153 mm 的内圆柱面、外螺纹)的矢量方向为 +Z,4 个均布的台阶通孔的矢量方向为 +X 且相互之间夹角为 90° (图 1)。为了发挥数控加工的工序集中特点,根据基面先行原则,在完成直径 164 mm 外圆柱面及其两端面后,以直径 164 mm 外圆柱面及下端面为定位基准,可在带有动力头的具有 C 轴控制功能的数控车床(车削中心)上完成其他所有特征加工面的加工。若以直径 164 mm 的外圆柱面为定位基准,采用传统三爪卡盘进行装夹,容易导致薄壁环形件变形,从而影响其加工精度,以下通过三维有限元分析方法,设计一种弹性薄膜盘夹具来解决装夹问题。

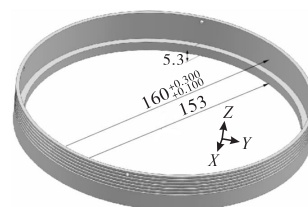


图 1 薄壁环形件三维模型图

2 薄壁环形件装夹有限元分析

在保持装夹总力为 270 N 的基础上,分别采用三爪式、六爪式和九爪式装夹布局,运用三维有限元方法分析不同装夹布局位置的应力应变情况,得出装夹变形规律,进而选择合理装夹布局设计夹具装置。采用 ANSYS12.0 分析,通过读取 *.stp 格式模型;定义材料属性分别是杨式模量 $E=69\ 000 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.33$,密度 $\rho=2.82 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$;六面体网格单元尺寸为 0.8 mm,单元总数 542 005,节点总数 85 631;采用 Mises 应力评价。

2.1 三爪式装夹有限元分析

三爪式装夹模型如图 2 所示,A、B、C 均布在薄壁环形件下端圆周面上,每处装夹力为 90 N,图 2 中工件下端面为约束面,后文中所完成的施加载荷和约束方式以此类推。在完成装夹模型后,需要进行网格划分,采用设置参数进行自适应网格划分(图 3),后文中对其他装夹模型的网格划分采用同样方式。

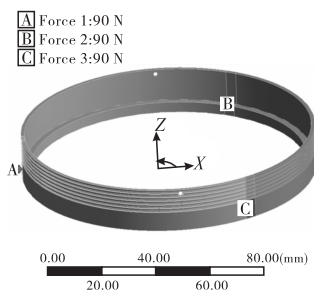


图 2 三爪式装夹模型

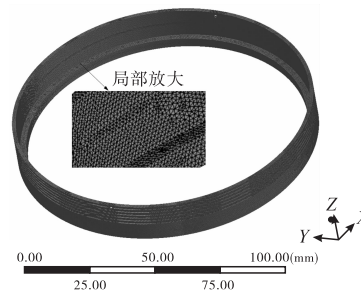


图 3 薄壁环形件网格划分

通过 ANSYS 12.0 版本软件进行应力、应变及变形分析,分别得出薄壁环形件的应力云图、应变云图及变形模型,具体见图 4~图 6。通过三爪式装夹后最大应力为 21.18 MPa(图 4),其最大应力点分布在三个卡爪装夹工件的圆周表面部位。三爪式装夹应变最大为 $2.722 \times 10^{-4} \text{ mm}$ (图 5),主要集中在三个

卡爪装夹部位,这是由于此处应力最大而产生的情况,符合应变规律。

图 6 是工件装夹后实际变形模型,不仅反映实际变形量数值变化情况,还反映工件形状变形情况,该件三爪式装夹而产生的最大变形量为 $0.067\ 28\ \text{mm}$,主要分布在三爪装夹的部位相邻卡爪中间部位。可以明显发现薄壁环形件被装夹的三处变形情况。根据夹具设计基本要求可知,工件的装夹精度需小于工件精度的 $1/3\sim 1/5^{[4]}$,尺寸精度较低的工件要求装夹精度至少小于工件精度的 $1/3$,薄壁环形件圆柱度为 $0.12\ \text{mm}$,其装夹精度至少应小于 $0.04\ \text{mm}$,由此可见,采用三爪装夹其变形量不能满足装夹精度要求。

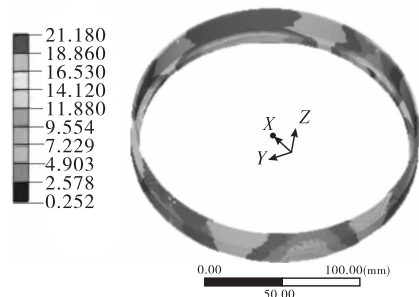


图 4 三爪式装夹薄壁环形件的应力云图

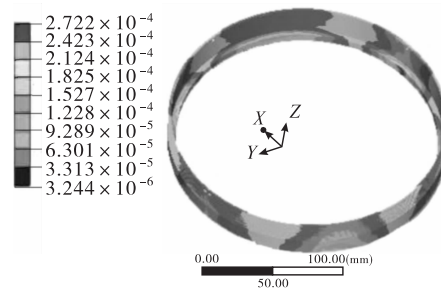


图 5 三爪式装夹薄壁环形件的应变云图

2.2 六爪与九爪式装夹变形有限元分析

六爪式与九爪式装夹通过三维有限元分析的流程与以上三爪式装夹分析相同。六爪装夹总力为 $270\ \text{N}$,每爪装夹力为 $45\ \text{N}$,通过三维有限元分析,薄壁环形件产生的最大变形量为 $0.008\ 219\ \text{mm} < 0.04\ \text{mm}$,由此,六爪式装夹精度已经达到工件精度的 $1/3$ 要求,但实际加工后的零件出现废品,这就需要进一步分析施加钻削力时有限元变形情况。

在此基础上,保持装夹总力 $270\ \text{N}$ 不变,设计一种均布在薄壁环形件圆周面上的九爪装夹方式,每爪装夹力为 $30\ \text{N}$,通过三维有限元软件分析,采用九爪式装夹后工件最大变形量为 $0.005\ 483\ \text{mm}$ 。采用九爪式装夹时,薄壁环形件没有明显变形,其最大变形量远小于工件精度的 $1/3(0.04\ \text{mm})$,表明采用九爪式装夹满足工件装夹精度要求。九爪式装夹的最大应力为 $2.681\ \text{MPa}$,最大应变是 $3.445 \times 10^{-5}\ \text{mm}$ 。因此,九爪式均匀装夹应力、应变及变形都最小,是满足该件在车削中心机床上使用的最佳装夹方案。

2.3 施加钻削力装夹变形有限元分析

上文分析了未施加钻削力时的三种装夹布局的装夹变形情况,其中,六爪式和九爪式都满足装夹精度要求,零件圆周面上有 4 个均布的台阶通孔加工时,钻孔切削力最大,按照经验预估钻削力为 $36\ \text{N}$,施加在某一孔上,通过有限元得出九爪式装夹后工件变形量满足要求,如图 7 所示。

由图 7 可知,施加钻削力后,采用九爪式装夹的薄壁环形件最大变形量发生在钻孔部位,且最大变形量为 $0.036\ 853\ \text{mm} < 0.04\ \text{mm}$,故九爪式装夹满足薄壁环形件装夹要求。施加钻削力后,采用六爪式装夹的薄壁环形件最大变形量也发生在钻孔部位,且最大变形量为 $0.044\ 289\ \text{mm} > 0.04\ \text{mm}$ 。由此可见,在没有施加钻削力时,采用六爪式装夹能够满足装夹精度要求,但是在施加钻削力后,由于钻削力的动态变化,薄壁环形件的装夹变形量与零件

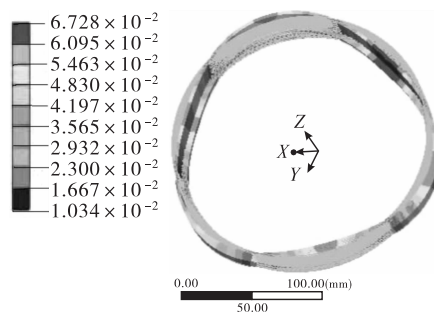


图 6 三爪式装夹薄壁环形件的变形模型

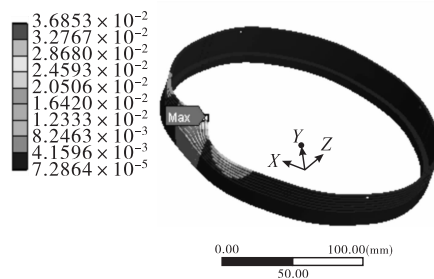


图 7 施加钻削力后九爪式装夹薄壁环形件的变形云图

精度控制量接近,理论上加工的零件精度是达不到设计要求的,因此,在实际加工过程中会出现废品,故而六爪式装夹不满足薄壁环形件装夹要求。

3 薄壁环形件夹具设计

通过以上薄壁环形件装夹的三维有限元分析,得出九爪式均匀装夹布局是最佳方案,尤其是施加钻削力后,九爪式装夹布局能够满足其加工精度要求。为了保证九爪式夹具顺利装夹零件,设计一种弹性薄膜盘夹具结构,通过薄膜盘的弹性变形产生夹紧力,进而均匀装夹薄壁环形件表面,采用车削后的台阶式软爪对工件进行装夹,避免夹伤工件表面,具体结构如图 8 所示。夹具通过气动(或液压)方式拉动拉杆,由拉杆带动九个均布的弹性薄膜盘发生弹性变形,每个弹性薄膜盘上安装软爪,由于薄膜盘发生弹性变形而产生夹紧力,进而通过九个软爪装夹薄壁环形件(图 8 中双点虚线轮廓所示)实现装夹,夹具体部分具有法兰结构,以便于安装在机床主轴上。在实际生产中,通过弹性薄膜盘夹具装置安装在车削中心机床主轴上,可完成薄壁环形件镗孔、螺纹加工、钻孔和铰孔等多工序加工,可大幅度提高该件生产效率,经检测完成的加工件满足图纸要求。

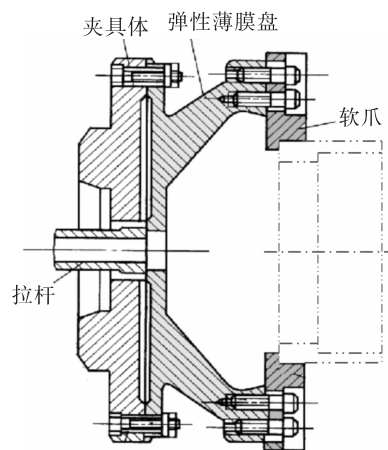


图 8 薄壁环形件弹性薄膜盘夹具结构图

4 结论

为了解决薄壁环形件装夹变形问题,在普通车床上完成基准外圆柱面及其端面加工后,考虑到其他特征加工面能够在车削中心上一次装夹完成加工,通过三维有限元分析方法,分析了三爪式、六爪式和九爪式装夹变形情况,比较分析了施加钻削力后六爪式和九爪式装夹工件的变形情况,得出以下结论。

(1)三爪式装夹布局的装夹精度不能满足工件最高精度的装夹要求。在没有施加钻削力时,六爪式和九爪式均匀装夹薄壁环形件都能满足要求。其中,九爪式装夹的工件所产生的应力、应变及变形最小。在施加钻削力时,只有九爪式均匀装夹布局的装夹精度满足薄壁环形件装夹要求。

(2)在装夹布局设计过程中,卡爪数量越多,薄壁环形件受力越均匀,变形越均匀,应力、应变及变形越小,但夹具结构设计也越复杂,且每个卡爪承担的夹紧力变小,需要通过弹性薄膜盘等元件作为主要夹紧元件。

参考文献:

[1] 秦国华,吴竹溪,张卫红.薄壁件的装夹变形机理分析与控制技术[J].机械工程学报,2007,43(4):211-216.

[2] 吴宝海,郑志阳,张阳,等.面向薄壁零件加工变形与振动控制的智能装夹技术研究进展[J].机械工程学报,2021,57(17):21-34.

[3] 王壮.弱刚性薄壁环形工件装夹布局优化与振动控制[D].大连:大连理工大学,2020.

[4] 张国政,赵文英,孙灏,等.精密轴套件装夹变形有限元分析与控制[J].制造业自动化,2018,40(1):40-44.

[5] ZHANG G Z,ZHOU Y Z,HAN J,et al. The design of turn-mill process planning for mass customization wheel rim[J]. Key engineering materials,2016,693:936-943.

[6] 张国政,韩江.多工序加工系统的数控夹具设计与应用研究[J].机械设计,2012,29(11):75-79.

Finite Element Analysis and Fixture Design of Clamping Deformation of Thin-walled Annular Part

ZHOU Yuanzhi, ZHAO Wenying, ZHANG Guozheng

(Mechanical Engineering College, Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241002, China)

Abstract: The clamping deformation of thin-walled parts is an important factor affecting the processing quality of workpieces. Taking a thin-walled ring part processed by 6061 aluminum alloy as the analysis object, aiming at its multi process clamping problems such as boring, thread processing, drilling and spot facer, on the basis of maintaining the same total clamping force, three clamping layouts such as 3-jaw, 6-jaw and 9-jaw are adopted respectively, the three-dimensional finite element method is used to analyze the stress and strain of different clamping layout positions, and the law of clamping deformation control is obtained. The results show that the clamping deformation can be effectively reduced by adopting the 9-point uniform clamping layout. The results show that the 9-point uniform clamping layout is adopted to design a flexible film disk 9-claw type fixture to complete multiple processes such as boring, thread processing, drilling and countersinking of thin-walled annular parts, which can effectively reduce the clamping deformation and ensure the workpiece processing accuracy.

Keywords: thin-walled annular part; clamping deformation; three-dimensional finite element; clamping layout; elastic fixture (责任编辑:王新亮)

~~~~~  
(上接第 86 页)

## An Optimization Algorithm for Critical Load of Vertical and Horizontal Bending Members

YOU Chao<sup>1,2</sup>, SHEN Chenshu<sup>3</sup>, LIANG Guanjun<sup>1</sup>, YU Long<sup>1</sup>

(1. College of Architectural Engineering, Chuzhou Polytechnic, Chuzhou 239000, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230009, China)

**Abstract:** Based on the principle of solving the initial value problem of differential equations, the internal force calculation of the vertical and horizontal bending members under static equilibrium state is studied by using the optimization algorithm, and the deformation and rotation angle of the vertical and horizontal bending members under different loads are calculated. The correctness and effectiveness of the optimization algorithm have been verified through case analysis and comparison with the calculation results of finite element program software in this paper.

**Keywords:** differential equation; optimization algorithm; equilibrium state; load action

(责任编辑:王新亮)