

DOI: 10.7652/xjtuxb201904005

薄壁平面件真空多孔吸具的力学特性与优化设计

杨金川^{1,2}, 张建富¹, 李杰², 谢强², 冯平法¹

(1. 清华大学机械工程系, 100084, 北京; 2. 中国工程物理研究院材料研究所, 621700, 四川绵阳)

摘要: 针对薄壁平面件刚性差、装夹易变形、装夹困难等问题, 基于圆周简支平板变形理论, 提出了薄壁平面件在切削状态下吸附力学特性的数学模型及其真空平面多孔吸具优化设计方法, 分析了吸附装夹的吸具吸孔设计布局与真空度对薄壁平面件加工中的变形耦合影响规律。理论分析表明, 加工确定尺寸薄壁件吸孔的数量越少, 孔径越小, 则所需真空度越大; 对于优化确定的吸孔设计布局, 真空度越大则薄壁平面件装夹及切削过程变形越大。通过有限元仿真和 6061 铝合金薄壁平面件装夹试验, 验证了多孔吸具优化设计的有效性。优化设计的有限元分析表明, 工件静态装夹变形能够控制在纳米量级。吸具样件加工试验结果表明, 采用优化后的吸具装夹, 可使加工后的薄壁件平面度公差控制在 500 nm 以内。此设计方法可为薄壁类零部件的吸具设计与装夹提供参考。

关键词: 工装优化设计; 薄壁件加工; 吸附装夹; 装夹变形; 装夹稳定性

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)04-0031-07

Optimum Design and Mechanical Analysis for Flat Fixture of Thin-Walled Wafer Workpiece under Vacuum Adsorption in Ultra-Precision Machining

YANG Jinchuan^{1,2}, ZHANG Jianfu¹, LI Jie², XIE Qiang², FENG Pingfa¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621700, China)

Abstract: For solving bad rigidity, easy distortion and clamping difficulty of thin-walled wafer workpiece, a mathematical model for clamping design of thin-walled wafer is established following the deformation theory of circular simply-supported plate, and an optimization design strategy of planar vacuum suction with holes is proposed. The coupling influence mechanism of design layout of absorbing holes and vacuum degree on fixture of wafer is defined. For thin-walled parts with definite size, the theoretical analysis shows that the fewer the suction holes, the smaller the aperture and the higher the vacuum degree. After determining design layout of holes, it is found that larger deformation is deduced as vacuum degree increases. By means of FE simulation optimization and taking a 6061 aluminum alloy wafer as an example, the effectiveness of the optimal design strategy is validated. FE simulation for new design indicates that static clamping deformation can be reduced to nanometer scale. Machining test shows that the flatness tolerance of thin-walled wafer workpiece is limited below 500 nm.

Keywords: optimal design of fixture; thin-walled wafer machining; vacuum adsorption clamping; clamping deformation; clamping stability

收稿日期: 2018-09-19。 作者简介: 杨金川(1988—),男,博士生;张建富(通信作者),男,副教授。 基金项目: 中国工程物理研究院材料研究院重点基金资助项目(SJZ201501);装备“十二五”预研资助项目(42601070202)。

网络出版时间: 2018-12-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181203.0910.002.html>

薄壁平面件(径厚比大于 50 或壁厚小于等于 2 mm),特别是精密物理实验超精密零件,具有刚度低、壁厚小(大于 0.1 mm,小于 2 mm)等特点。卡盘或卡爪等在装夹中存在限制,易产生严重的装夹变形,从而影响工件加工质量^[1-3]。对于高压微喷、爆轰性能检测等精密物理实验所需超精密薄壁平面件,装夹变形引起的形位偏差将直接影响实验效果^[4-5]。

为了克服薄壁类零部件装夹过程的难点,多数情况下,需根据零部件形貌尺寸并结合制造工艺路线,进行特定工装的开发,通用性较低^[6-8]。其中,最常用的是采用数值仿真模拟薄壁类零部件的装夹状态并规划装夹工艺流程,然后根据仿真结果研发相应工装^[9-11]。早期 King 等基于工装的刚体化,利用非线性技术优化工件装夹定位布局^[12]。针对薄壁件加工的特定区域定位误差及变形,王少锋等提出了一种跟随加工区域布置定位点的定位新方法,为支承和定位点布局全局优化提供优化初值^[13]。为避免传统机械工装在装夹时引入较大装夹变形,真空吸附技术已经在小型或规则形状薄壁零部件装夹中开始较大范围应用^[14-16]。此外,刘春青等提出了一种确定薄壁件在多点柔性定位时参数选择和吸附压力的寻优算法,以实现最优选择^[17]。

上述各方法基于弹性力学均提出了优化算法或模型,明确了局部以及特定设计变量。但是,对于超精密加工薄壁平面件真空吸附装夹过程,仍需进一步分析在任一瞬时切削力(在一个切削点处)作用下的变形,并将吸具研制、零件材料及切削力状态纳入整体考虑。本文结合材料力学与有限元法,建立真空平面多孔吸具的优化设计方法,才能更全面建立整个表面的变形加工误差控制模型。

1 薄壁平面件吸附装夹受力分析

1.1 平面件静止受力状态

加工前,将薄壁平面件采用真空多孔平面吸附方式装夹于吸盘,装配过程及装夹状态如图 1 所示。薄壁平面件吸附于吸盘平面后,在吸孔区域的受力

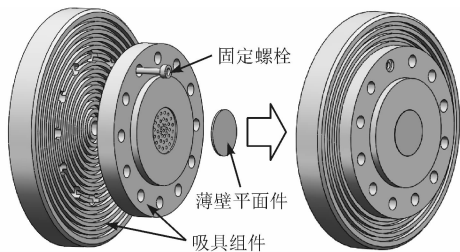
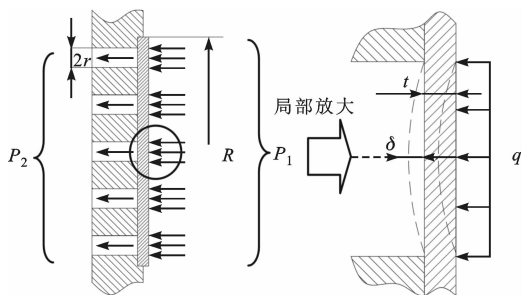


图1 多孔平面真空吸附装夹状态

状态如图 2 所示。



q 为真空度,即大气压强 P_1 和真空负压 P_2 的差值, $q = P_1 - P_2$;

δ 为工件受压变形后的挠度; t 为工件厚度;

r 为真空吸孔半径; R 为薄壁件半径

图2 平面件受力分布状态

由图 2 可知,平面件内接触面受到负压 P_2 ,待加工面受到空气压强 P_1 。平面件可等效为圆周简支平面圆板模型。根据轴对称载荷圆周简支平板变形理论^[18],可得出均布载荷作用下的平面件吸孔区域的静态变形挠度方程为

$$\delta_0 = \frac{q}{64D'} \left[(r^2 - r_x^2)^2 + \frac{4r^2(r^2 - r_x^2)}{1 + \mu} \right] \quad (1)$$

式中: r_x 为孔中心到计算点的径向距离; μ 为材料泊松比; D' 为平面件等效抗弯刚度,公式为

$$D' = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (2)$$

其中 E 为材料弹性模量。

如图 2 所示,薄壁平面件在吸孔处发生径向和轴向变形,并产生径向和轴向应力,分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} &= \pm \frac{3qr^2}{8t^2} (3 + \mu) (r^2 - r_x^2) \\ \sigma_{rz} &= \pm \frac{3qr^2}{8t^2} [r^2 (3 + \mu) - r_x^2 (1 + 3\mu)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上述各式即可表征薄壁平面件加工前初始吸附固定后的静力学状态。

1.2 平面件切削受力状态

薄壁平面件采用单点金刚石超精密车床进行横车加工。在超精密切削条件下,进给量 f 远大于切削深度 a_p ,因此可用典型单点金刚石切削模型来研究切削过程^[19]。切削过程存在 3 个切削分力,即主切削力 F_c 、切深抗力 F_p 与进给力 F_f ,如图 3 所示。

由于超精密加工时的切深抗力 F_p 在切削合力中占较大比例,因此切深抗力 F_p 对薄壁平面件的变形影响不可忽略^[20]。根据经验公式,可得出单点金刚石恒线速车削 6061 铝合金的 F_c 、 F_f 与 F_p 的计算公式为^[21-22]

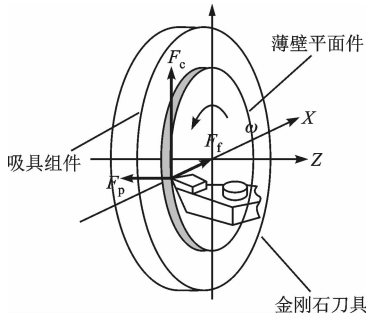


图3 横向车削及切削力状态

$$\left. \begin{aligned} F_c &= 4.214 \, 9 \omega^{-0.269 \, 0} f^{0.765 \, 4} a_p^{0.471 \, 8} \\ F_f &= 9.471 \, 3 \omega^{-0.156 \, 6} f^{0.109 \, 2} a_p^{0.285 \, 1} \\ F_p &= 2.928 \, 4 \omega^{-0.317 \, 2} f^{0.317 \, 2} a_p^{0.755 \, 1} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: \$\omega\$ 为主轴转速, r/min; \$f\$ 为进给量, mm/s; \$a_p\$ 为切削深度, \$\mu\$m; \$F_p\$ 取最大比率 0.7 进行验证计算。

刀尖产生的切深抗力 \$F_p\$ 作为集中力引起的变形可采用直角三角形进行拟合, 得出吸孔刀尖切削区域的动态变形挠度为^[23]

$$\delta_Q = \frac{F_p}{16\pi D'} \frac{3 + \mu}{1 + \mu} \frac{r - r_x}{r} \quad (5)$$

由此可知切削力最大处在平面件边缘位置。同理, 切深抗力 \$F_p\$ 作用于吸孔中心时, 切削过程也产生径向应力 \$\sigma_{Qj}\$ 和轴向应力 \$\sigma_{Qz}\$, 表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Qj} &= \pm \frac{3F_p}{\pi t^2} (1 + \mu) \ln \frac{r}{r_b} \\ \sigma_{Qz} &= \pm \frac{3F_p}{\pi t^2} \left[(1 + \mu) \ln \frac{r}{r_b} + (1 - \mu) \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: \$r_b\$ 为最大应力位置距真空吸孔边缘的距离, 值为

$$r_b = r - b \quad (7)$$

其中 \$b\$ 为刀尖与工件接触半径, \$\mu\$m。根据超精密车削微观表面形成机理^[24], 刀尖与工件接触半径 \$b\$ 的理论值为

$$b = \sqrt{r_D^2 - (r_D - a_p)^2} \quad (8)$$

式中: \$r_D\$ 为刀尖圆弧半径, \$\mu\$m。

式(1)~式(8)即可表征薄壁平面件真空平面吸附装夹的切削及非切削时的受力变形状态。

2 吸附装夹与切削稳定性

对于半径为 \$R\$ 的吸附平面, 在表面加工半径为 \$r\$ 的真空吸孔, 令径向各孔圆心位置距离为 \$s_1\$, 同一径向位置上相邻两孔的距离为 \$s_2\$, 如图4所示。

图4所示的尺寸与几何参数与圆平面内可加工的吸孔圈数 \$n\$ 之间的关系为

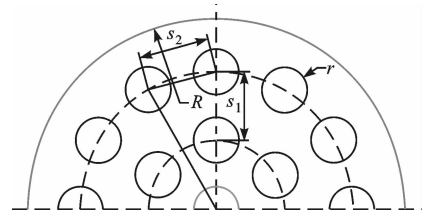


图4 圆平面吸孔位置布局

$$1 < \min \left[\frac{R}{(n-1)s_1 + r} \right], \quad s_1 > 2r \quad (9)$$

式中: \$n=1, 2, 3, \dots\$。当 \$n=1\$ 时, 仅存在一个中心吸孔; 使式(9)成立的 \$n\$ 的最大正整数即为圆平面可加工的最大吸孔圈数。

在 \$360^\circ\$ 圆周范围内, 第 \$i\$ 圈能够加工的均匀分布的最大吸孔数 \$m_{i\max}\$, 可根据圆心角弦长公式得出

$$m_{i\max} = 2\pi/\theta = 2\pi/2\arcsin \frac{s_2}{2(i-1)s_1} \quad (10)$$

由式(9)(10), 可得平面上可加工的吸孔总数为

$$N = \sum_{i=1}^n m_i \quad (11)$$

式中: \$m_i\$ 是第 \$i\$ 圈实际加工吸孔数。加工后的圆平面与工件表面接触时, 实际接触总面积为

$$A = \pi R^2 - \pi r^2 N \quad (12)$$

接触区域受到的实际接触压强为

$$P = \frac{q\pi R^2}{A} \quad (13)$$

已知薄壁平面件保持平衡的充要条件是任意瞬时所受力及力矩均平衡, 数学表达^[25]为

$$\left. \begin{aligned} F_i + F_j &= 0 \\ \sum F_m r_m &\geq F_c R \\ F_m &\geq F_c + G \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: \$F_i\$ 为支撑力; \$F_j\$ 为大气压力; \$F_m\$ 为径向静摩擦力; \$r_m\$ 为任意点距工件中心轴距离。

2.1 切削状态夹装稳定性

(1)在明确切削周向稳定性条件之前, 需要明确平面件周向所受力及力矩作用。吸孔区域微圆弧静摩擦力矩计算区域见图5。

由图5可知, \$y\$ 方向 \$dy\$ 所属微圆弧段部分的面积为

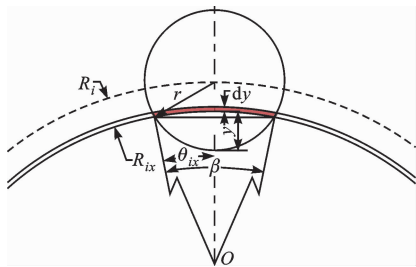
$$dA_0 = R_{ix} \beta dy \quad (15)$$

该微圆弧一圈的实际接触面积为

$$dA_i = 2\pi R_{ix} dy - m_i R_{ix} \beta dy \quad (16)$$

在均布压强 \$P\$, 则任微圆实际接触面积 \$dA_i\$ 所产生的摩擦力矩为

$$dL_{ifm} = dA_i P R_{ix} \eta \quad (17)$$



R_i 为第 i 圈吸孔圆心所在虚拟圆半径; R_{ix} 为以圆平面圆心在径向距离吸孔 y 处的虚拟圆半径; β 为微圆弧段所对应的圆心角

图5 吸孔区域微圆弧静摩擦力矩计算区域

式中: η 为铝合金之间摩擦系数。第 i 圈吸孔所在圆环区域产生的摩擦力矩为

$$L_{ifm} = \int_0^{2r} dA_i P R_{ix} \eta \quad (18)$$

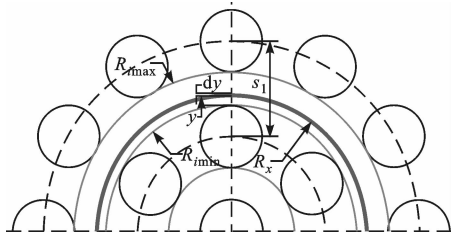
所有吸孔在区域产生的总摩擦力矩为

$$L_{f1} = \sum_{i=1}^n L_{ifm} \quad (19)$$

可得工件实际接触区域的总摩擦力矩为

$$L_{f1} = \sum_{i=1}^n \left[\int_0^{2r} (P\eta) \left[2\pi R_{ix}^2 - 2m_i R_{ix}^2 \arccos \frac{R_{ix}^2 + R_i^2 - r^2}{2R_{ix}R_i} \right] dy \right] \quad (20)$$

相邻吸孔圈之间的区域如图6所示。该类区域需区分内圆环面与单一吸孔及最外圈吸孔的外围部分, 即 $2 \leq i \leq n-1$ 与 $i=1$ 或 n 两种情况。



R_{imin} 为第 i 圈的最小半径值; R_{imax} 为第 i 圈的最大半径值;

R_x 为环接触区域中 y 处的半径

图6 圆环接触静摩擦力矩计算区域

计算得到圆环接触面的总静摩擦力矩为

$$L_{f2} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n-1} \left[\int_0^{s_1-2r} (2\pi P\eta) (R_{imin} + y)^2 dy \right] + \int_0^{R-(n-1)s_1-r} (2\pi P\eta) R_x^2 dy, & i \geq 2 \\ \int_0^{R-r} (2\pi P\eta) (r + y)^2 dy, & i = 1 \end{cases} \quad (21)$$

又知周向产生的总摩擦力矩 L_{f1} 由吸孔所在圆环带的实际接触面积产生的总摩擦力矩 L_{f1} 与圆环接触面的总摩擦力矩 L_{f2} 之和组成, 即

$$L_f = L_{f1} + L_{f2} \quad (22)$$

由图3及式(14)可知, 工件保持周向稳定需要保证实际接触面产生的静摩擦力矩 L_f 与工件周向所受到的外作用力矩平衡, 即需要满足条件为

$$L_f \geq F_c R S \quad (23)$$

式中: S 为吸附稳定系数, 取值为 2。

(2) 工件所受径向力有主切削力 F_c 、重力 G 、静摩擦力 F_m 以及进给力 F_f 。加工过程需要保持竖直径向与水平径向的力平衡, 根据式(14), 有

$$\left. \begin{aligned} F_m &\geq (F_c + G) S \\ F_m &\geq F_f S \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

由式(24)便可判定薄壁平面件的径向稳定性。其中, 静摩擦力 F_m 为

$$F_m = P A \eta \quad (25)$$

根据式(23)~式(25), 获得使用真空度 q'_{min} 的验证条件为

$$q'_{min} \geq \max\{[q = f^{-1}(L_f)], [q = f^{-1}(F_m)]\} \quad (26)$$

式中: $f^{-1}(L_f)$ 和 $f^{-1}(F_m)$ 分别为式(24)和式(25)中真空度 q 的反函数。

2.2 设计目标函数及其约束条件

薄壁件装夹状态与真空吸具的孔径 r 、真空度 q 二者有关。因此, 以最小切削深度 a_{pmin} 等效为平面度要求 δ_p 、平面件厚度 t 为前置设计变量, 真空度 q 为过程设计变量, 设计过程如下。

(1) 由式(1), 可得吸孔半径 r 设计目标函数为

$$\max(r) = \sqrt[4]{\frac{a_{pmin} 64 D' (1 + \mu)}{(5 + \mu) q}} \quad (27)$$

对于任意真空度 q , r 的设计约束条件为

$$r \leq \max(r) \quad (28)$$

(2) 预设 s_1 与 s_2 确定平面吸孔数量。

(3) 根据式(26)验证可使用真空度 q'_{min} , 若不足式(26), 重新预设吸孔半径 r 。

(4) 变形约束条件: 超精密加工切削深度最小值 a_{pmin} 与加工后平面度限制 δ_p 比较, 取二者最小值。因此, 加工前静态吸附变形 δ_j 限制条件为

$$\delta_{jmax} \leq \min(a_{pmin}, \delta_p) \quad (29)$$

(5) 加工应力约束条件: 在切深抗力 F_p 与均布载荷 q 的双重作用下, 为了防止加工中轴向应力引起吸孔区域的轴向塑性变形, 加工过程的动态应力最大值 σ_{max} 的约束条件为

$$\sigma_{max} = \max(\sigma_{jz} + \sigma_{qz}) \leq \sigma_e \quad (30)$$

其中 6061 铝合金在温度为 240°C 时的弹性极限 $\sigma_e = 240 \text{ MPa}$ [26]。根据式(30)验证并限制其切削状态下的装夹与加工应力, 以控制工件外形精度。

综上,式(27)~式(30)构成了真空多孔吸具吸孔孔径 $2r$ 、真空度 q 的共同设计准则与验证方法。

3 吸具优化设计

前置设计变量及工艺参数:薄壁平面件材料为 6061 铝合金,泊松比 $\mu=0.33$,弹性模量 $E=68$ GPa,半径 $R=25$ mm,坯件厚度 $t=2$ mm;吸具材料为 2A12 铝合金;铝合金之间的摩擦系数 $\eta=0.22$;切削深度 $a_p=(1\sim10)\text{ }\mu\text{m}$;进给量 $f=(5\sim20)$ mm/min;恒线速走刀,主轴初始转速 $\omega=5\text{ }000\text{ r/min}$,最大转速 $15\text{ }000\text{ r/min}$;加工后表面平面度 $\delta_P\leqslant1\text{ }\mu\text{m}$ 。

优化设计步骤如下。

(1)根据实际操作规程,真空度 q 的实际可调范围是 $(0.001\sim0.1)\text{ MPa}$ 。由式(28),可得 a_{pmin} 条件下,当真空度分别为 0.1 MPa 和 0.001 MPa 时,吸孔最大可选半径 $r_{q0.1}=7.984\text{ mm}$ 和 $r_{q0.001}=25.246\text{ mm}$ 。根据式(28),可得吸孔半径优化设计范围,即

$$r\leqslant\min(r_{q0.1},r_{q0.001})$$

因此,可预设吸孔孔径 $r=1\text{ mm}$ 。

(2)根据图 6,初设 $s_1=4\text{ mm}$, $s_2=4\text{ mm}$,可得平面内吸孔总圈数 $n=6$,各圈分别可加工的最大吸孔数分别为 1、6、12、18、25、31。数控编程优化后,各圈加工吸孔数 $m_i=1,8,12,16,21,24$ 。

(3)由式(4),可得各切削分力的理论最大值 $F_{\text{cmax}}=0.545\text{ N}$, $F_{\text{fmax}}=4.267\text{ N}$, $F_{\text{pmax}}=0.789\text{ N}$ 。

(4)将上述理论值带入式(30)及式(28),验证动态应力最大值 σ_{max} 的约束条件,可得

$$\sigma_{\text{max}}=(0.32\times10^{-6}q+0.55)\ll\sigma_e$$

由结果可知,切深抗力和均布载荷引起的轴向动态应力小于弹性极限,变形属于弹性应变。考虑真空度控制范围,可以认为上述判定合理。

(5)根据预设加工吸孔尺寸和吸孔数量以及式(23)(24)(26),分别验证周向及径向稳定性,可得真空度 q 的控制下限 $q_{\text{min}}=0.0198\text{ MPa}$,由此可预设真空度 q 的控制值为 $q=0.03\text{ MPa}$ 。

(6)通过有限元验证工件装夹变形。薄壁件与真空吸具均采用 C3D10(六面体)三维应力实体单元,且吸具简化为刚体。负压均布载荷 q 作用下的状态以及真空吸附加载后的仿真变形效果分别如图 7 和图 8 所示。

由图 8 可知,在真空度 $q=0.03\text{ MPa}$ 时,吸孔区域的静态最大变形量 $\delta_{\text{jmax}}\leqslant2.125\text{ nm}$,吸孔中心平均变形量为 1.539 nm 。

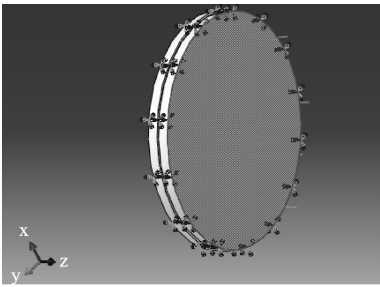


图 7 吸附受力状态的有限元模型

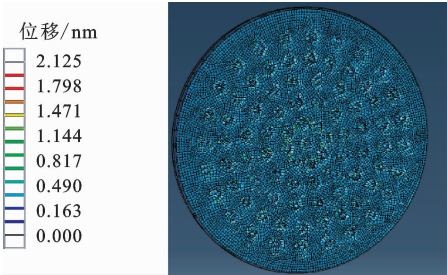
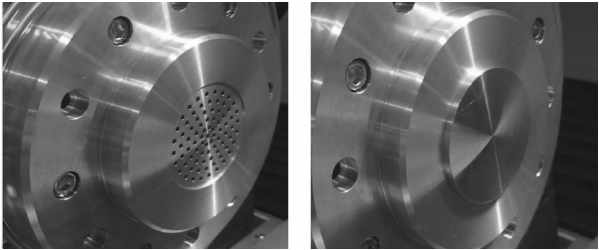


图 8 吸附受力状态仿真结果

采用理论计算和仿真分别得到的变形量均在 nm 量级,基于激光传感器精度并结合理论与仿真误差以及材料接触等因素,可认为计算和仿真结果基本一致。由此基于该优化设计方案研制的吸具样件及吸附装夹效果如图 9 所示。



(a)装夹前吸具样件 (b)装夹后吸附状态

图 9 吸具样件与吸附状态

车削试验完成后采用 Form Talysurf PGI1240 (分辨率为 0.8 nm)测量加工后厚度为 1.8 mm 的薄壁平面件,测量点分布位置如图 10 所示。

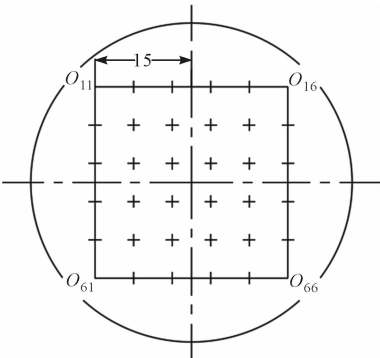


图 10 平面件测量点分布位置

图 10 中,一共布点 36 个,测量时首先测量 O_{11} 并以该值为基准 0 点,相对值为 0,后续测量各点与 O_{11} 取差值,获得的各点高度差数据如表 1 所示。

表 1 平面件各测量点与 O_{11} 测量数据差

竖直方向测点	各点高度差/nm					
	1	2	3	4	5	6
1	0.00	6.50	43.32	30.43	-5.28	-8.05
2	13.53	63.39	85.73	93.29	59.43	24.16
3	49.50	92.96	339.80	385.85	126.19	57.11
4	43.75	85.17	366.96	403.72	139.54	45.59
5	20.39	61.51	156.65	147.50	75.38	36.92
6	-14.43	10.12	30.42	49.56	10.39	6.39

经计算得出,平面度实际公差为 418.15 nm。位于同一同心圆位置的测量点高度差小于 30 nm,靠近中心位置,由于线速度减小,高度差出现增大。

根据图 8 和表 1 所示,考虑加工及测量误差,可以认为该真空吸具的结构优化设计是合理有效的,满足薄壁平面件超精密加工安装定位的变形控制与平面度需求,能够实现稳定吸附装夹。

4 结 论

(1)吸具吸孔设计布局与真空度影响薄壁平面件加工的静态力学变形。在工件尺寸确定的情况下,吸孔的数量越少,孔径越小,所需真空度越大;吸孔布局确定之后,真空度越大则薄壁平面件装夹及切削过程变形越大。

(2)在吸附装夹与切削过程中,工件变形主要产生在吸孔区域,越靠近吸孔中心,工件变形量越大,且吸孔中心位置的变形量最大。

(3)吸孔设计以及吸具的设计布局额外受到实际加工能力的制约。因此,在对吸具进行优化设计时,必须将吸孔实际加工能力纳入设计考量。

参考文献:

[1] 郑联语,汪叔淳. 薄壁零件数控加工工艺质量改进方法 [J]. 航空学报, 2001, 22(5): 424-428.
ZHENG Lianyu, WANG Shuchun. Approaches to improve the process quality of thin-walled workpiece in NC machining [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(5): 424-428.

[2] 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.
QIN Guohua, WU Zhuxi, ZHANG Weihong. Analy-

sis and control technique of fixturing deformation mechanism of thin-walled workpiece [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 211-216.

[3] 李晖,张林林,常永乐,等. 约束层阻尼对薄壁圆柱模态参数的影响研究 [J]. 兵工学报, 2016, 37(7): 1338-1344.
LI Hui, ZHANG Linlin, CHANG Yongle, et al. The influence of constrained layer damping on modal parameters of thin cylindrical shell [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(7): 1338-1344.

[4] VOGAN W S, ANDERSON W W, GROVER M, et al. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(11):113508.

[5] 刘坤,李蕾,袁帅,等. 球面微喷气-粒混合的物理建模与三维数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2015, 29(2): 143-148.
LIU Kun, LI Lei, YUAN Shuai. Modeling and three-dimension numerical simulation of particle-gas mixing in ejection with spherical sample surface [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2015, 29(2): 143-148.

[6] CALABRESE M, PRIMO T, PRETE A D. Optimization of machining fixture for aeronautical thin-walled components [J]. Procedia CIRP, 2017, 60: 32-37.

[7] 丁彩平. 车削薄壁零件的弹性夹具设计 [J]. 机电工程技术, 2005, 34(12): 85-86.
DING Caiping. Design of the elastic jig of the thin wall part [J]. Machine Development, 2005, 34(12): 85-86.

[8] DO M D, SON Y, CHOI H J. Optimal workpiece positioning in flexible fixtures for thin-walled components [J]. Computer-Aided Design, 2018, 95: 14-23.

[9] MENASSA R J, DEVRIES W R. Optimization methods applied to selecting support positions in fixture design [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 1991, 113(4): 412-418.

[10] KASHYAP S, DEVRIES W R. Finite element analysis and optimization in fixture design [J]. Structural Optimization, 1999, 18(2/3): 193-201.

[11] 董辉跃,柯映林. 铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟 [J]. 浙江大学学报, 2004, 38(1): 17-21.
DONG Yuehui, KE Yinglin. Finite element simulation for optimal clamping scheme of thin-walled workpiece in milling process [J]. Journal of Zhejiang University, 2004, 38(1): 17-21.

[12] KING S B, HUTTER I. Theoretical approach for

- generating optimal fixturing locations for prismatic workparts in automated assembly [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 1993, 12(5): 409-416.
- [13] 王少锋, 洪军, 王建国, 等. 大型薄壁件多点定位的初始布局优化算法研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(5): 38-44.
- WANG Shaofeng, HONG Jun, WANG Jianguo, et al. Initial distribution optimization for multi-point location of large thin-walled components [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(5): 38-44.
- [14] 史国权, 刘景和. 铌酸锂晶体平面镜的金刚石飞切加工 [J]. *人工晶体学报*, 2000, 29(5): 226-234.
- SHI Guoquan, LIU Jinghe. Diamond fly-cutting processing of LiNbO₃ crystal mirror [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2000, 29(5): 226-234.
- [15] 陈华男, 李显凌, 孙振. 光学加工中真空夹具设计及分析 [J]. *真空*, 2013, 50(4): 78-82.
- CHEN Huanan, LI Xianling, SUN Zhen. Design and analysis of vacuum fixture in optical processing [J]. *Vacuum*, 2013, 50(4): 78-82.
- [16] 何泽地, 田东宁, 杨金川, 等. 薄壁球壳真空吸附装夹变形力学分析与控制 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(7): 1409-1415.
- HE Zedi, TIAN Dongning, YANG Jinchuan, et al. Control and mechanical analysis of clamping deformation of thin-walled spherical shell workpiece during vacuum suction [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(7): 1409-1415.
- [17] 刘春青, 洪军, 冯葵, 等. 飞机薄壁件多点柔性定位变形控制寻优算法 [J]. *上海交通大学学报*, 2013, 47(8): 1191-1197.
- LIU Chunqing, HONG Jun, FENG Yan, et al. Searching optimization algorithm for deformation control of aircraft thin-walled parts in multi-point flexible tooling system [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2013, 47(8): 1191-1197.
- [18] 杨桂通. 弹性力学简明教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 238-257.
- [19] 姚英学, 袁哲俊, 王彪. 金属单晶材料精密切削时切削力的研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1995, 27(2): 94-100.
- YAO Yingxue, YUAN Zhejun, WANG Biao, et al. Study on cutting force of cutting metal single crystal in precision machining [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1995, 27(2): 94-100.
- [20] 袁哲俊, 姚英学, 周明, 等. SPDT 超精密切削时切削变形与切削力的研究 [J]. *机械工程学报*, 1996, 32(5): 1-6.
- YUAN Zhejun, YAO Yingxue, ZHOU Ming, et al. Study on the cutting deformation and cutting force in ultra-precision machining with SPDT [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1996, 32(5): 1-6.
- [21] RAMESH M V, LEE W B, CHEUNG C F, et al. A parametric analysis of cutting forces in single-point diamond turning of Al6061/SiCp metal matrix composites (MMCs) [J]. *Advanced Manufacturing Processes*, 2001, 16(1): 61-78.
- [22] 袁跃峰. 硅铝合金切削加工性研究 [D]. 太原: 中北大学, 2006: 26-30.
- [23] 蔡长安. 周边简支厚圆板受偏心集中力弯曲问题的 Fourier 级数解 [J]. *贵州工业大学学报(自然科学版)*, 2000, 29(4): 17-22.
- CAI Chang'an. Fourier series solution for bending of a circular thick plate with simple supported edges and loaded by an eccentric concentrated force [J]. *Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition)*, 2000, 29(4): 17-22.
- [24] 王洪祥, 董小瑛, 董申. 金刚石车削表面微观形貌形成机理的研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2002, 34(4): 509-517.
- WANG Hongxiang, DONG Xiaoying, DONG Shen. Generation of surface micro-topography in diamond turning [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(4): 509-517.
- [25] 董辉跃, 柯映林. 铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38(1): 17-21.
- DONG Huiyue, KE Yinglin. Finite element simulation for optimal clamping scheme of thin-walled workpiece in milling process [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2004, 38(1): 17-21.
- [26] 彭航, 蒋首超, 赵媛媛. 建筑用 6061-T6 系铝合金高温下力学性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2009, 4(7): 46-49.
- PENG Hang, JIANG Shouchao, ZHAO Yuanyuan. Experimental study on the mechanical property of structural Al-alloy at elevated temperature [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 4(7): 46-49.

(编辑 杜秀杰)