

刀具刚度对钛合金超薄侧壁加工变形的影响*

Influence of Cutting Tool Stiffness on Milling Deformation of Titanium Alloy Super-Thin-Wall

南京航空航天大学机电学院 章熠鑫 李亮
中航飞机西安飞机分公司 王涛 马梁栋 崔生富

[摘要] 以控制钛合金超薄结构件的加工变形、获得良好的表面加工质量为目标,基于薄壁零件加工变形理论模型与铣削加工试验,研究分析了刀具刚度对钛合金超薄侧壁结构加工受力变形及表面粗糙度的影响。通过对比分析刚度刀具铣削钛合金超薄侧壁结构时的加工尺寸精度、表面粗糙度以及切削力,发现合理增加刀具刚度可以有效改善超薄壁结构的加工尺寸精度及表面质量。

关键词: 钛合金 超薄结构 刀具刚度 加工变形

[ABSTRACT] The goal is to control the deformation of milling titanium alloy super-thin-wall and obtain excellent finished surface. Based on theoretically analysis and confirming the experiment result, when milling the titanium alloy super-thin-wall, much attention is payed on the influence of the tool stiffness on the whole process stiffness. Two cutting tools with different stiffnesses are used in the experiments, and the machining accuracy, the quality of the finished surface and the cutting force are compromised. The result of the research indicates that, if the stiffness of the cutting tool is increased in a certain scale, the whole process stiffness is better, and the machining accuracy and surface quality could be improved.

Keywords: Titanium alloy Super-thin structure Cutting tool stiffness Machining deformation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.08.070

钛合金作为一种综合性能优良的轻合金材料,具有比强度高、耐腐蚀、耐热等优良特性,是航空、航天飞行器轻量化和提高综合性能的最佳用材,在航空航天工业中有着广泛的应用^[1]。但是钛合金超薄结构的加工变形问题一直困扰着航空工业,控制钛合金加工变形主要受到以下两方面因素的制约:(1)钛合金属于典型的难加工材料,切削力大,刀具易磨损;(2)超薄壁结构零件

加工余量大、相对刚度较低,加工工艺性差,容易产生让刀变形和加工振动^[2-3]。

近年来,国内外学者针对如何提高钛合金薄壁件加工刚度展开了大量工作,在利用工件自身结构提高刚度、优化刀具走刀路径及采用各种辅助支撑提高系统刚度等方面取得一定进展^[4-8]。但目前研究普遍认为薄壁件自身的弱刚度结构是影响加工精度的主要原因,刀具刚度对加工变形的影响往往被忽略。因此,本文着重研究刀具刚度对薄壁结构零件尤其是超薄结构件加工尺寸精度和表面粗糙度的影响。

1 薄壁零件加工变形理论分析

机床-夹具-工件-刀具组成的工艺系统是一个弹性系统,机械加工过程中工艺系统会在切削力、夹紧力、传动力、重力或惯性力等的综合作用下产生变形,从而破坏刀具和工件间已调整好的相对位置,造成尺寸误差或表面几何形状误差,影响加工精度^[9]。在加工过程中,机床的有关部件和夹具、刀具、工件在切削力作用下,都会有不同程度的变形,导致刀具相对工件在加工表面法向产生位移,本文取直径分别为12mm和20mm的刀具进行试验,研究刀具刚度对总工艺系统刚度的影响。

2 试验方案

2.1 典型试样

用线切割加工2件TC4钛合金薄壁毛坯,尺寸为65mm×5mm×40mm,工件厚度从5mm到0.8mm,加工高度为25mm,如图1所示。

2.2 试验刀具和工艺参数

本试验选择2把整体硬质合金四刃不等齿距立铣刀,直径分别为12mm和20mm的刀具1、刀具2,保证刀具齿数、前角、后角、螺旋角及齿距分布等其他参数尽可能相同,分别加工薄壁件1、薄壁件2。切削工艺参数:切削速度为40m/min;轴向切深为5mm;径向切深为0.8mm;每齿进给量为0.06mm/z;铣削方式为顺铣、周铣。

* 国家科技重大专项(2012ZX04003021),国防技术基础科研项目(C152012C002)资助。

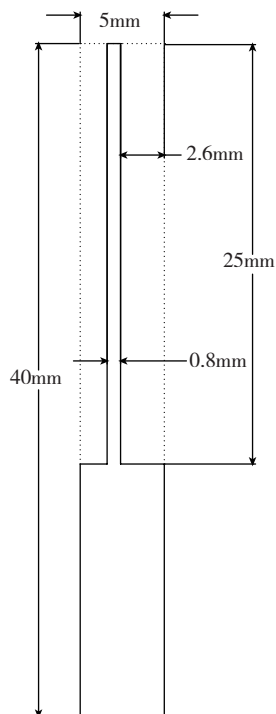


图1 薄壁件初始尺寸及加工后尺寸示意图
Fig.1 Original and machined sizes of thin-wall part

2.3 测量方法

采用 Kistler 9265B 动态测力仪对铣削过程中的切削力进行测量；采用便携式 Mahr S3P 粗糙度仪对加工面的表面粗糙度进行测量；采用三坐标测量仪对加工表面进行测量，测量方法如图 2 所示。三坐标测量仪测量

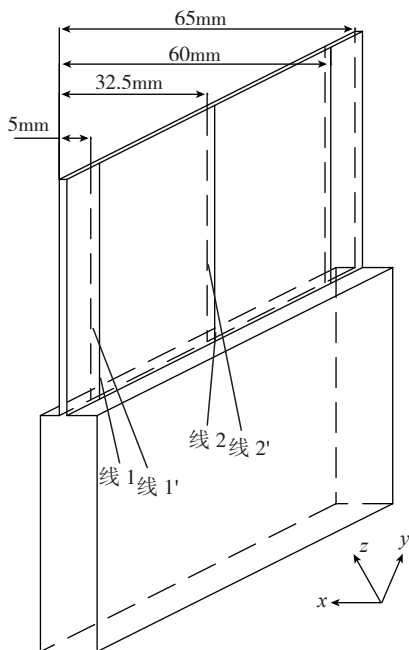


图2 三坐标测量方法示意图
Fig.2 Method of measuring on three coordinate machine

时，在超薄侧壁正反面取图 2 中线 1、线 1'、线 2、线 2'，尽量保证线 1、线 1' 及线 2、线 2' 在同一横截面内，使三坐标测量仪测头沿 4 条直线从上至下进行扫描测量，三坐标测量仪测得的对应两条线的 x 轴坐标差即为超薄零件此处的厚度。

3 试验分析

3.1 加工尺寸精度对比分析

由三坐标测量仪测量数据可知，加工后两个薄壁件均产生倾斜变形。其中，用直径为 12mm 的刀具加工完成的超薄壁件 1 最终倾斜量为 0.08mm，直径为 20mm 刀具所加工的薄壁件 2 倾斜量为 0.13mm，薄壁件 1 让刀变形量小于薄壁件 2。

三坐标测量仪测得薄侧壁 1、2 厚度数据如图 3 所示。

由三坐标测量数据可知，薄壁件 1 最终的加工厚度尺寸为 0.89~0.905mm，薄壁件上端的累计让刀量为 0.105mm，下端让刀量为 0.09mm，上下厚度差 $\delta_1=0.015\text{mm}$ ；薄壁件 2 最终加工厚度尺寸为 0.895mm~0.95mm，薄壁件上端的累计让刀量为 0.15mm，下端让刀量为 0.095mm，上下厚度差 $\delta_2=0.055\text{mm}$ 。刀具刚度提高，让刀量减小，薄壁件上下厚度差减小。此外，两薄壁件均呈现倒梯形，即随着侧壁高度的增加，薄壁件厚度增大，这主要是由于薄壁件上端刚度小于下端，导致加工过程中让刀现象更明显。

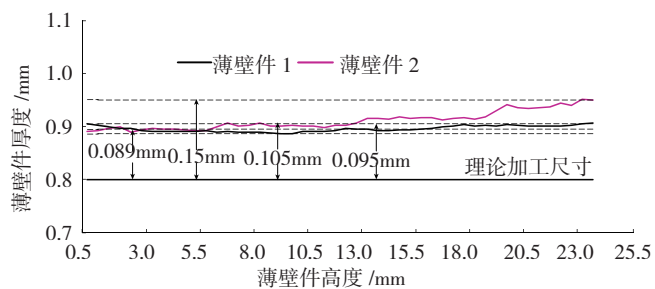


图3 薄壁件 1、2 加工厚度对比图
Fig.3 Processing thickness comparison of thin-wall parts 1, 2

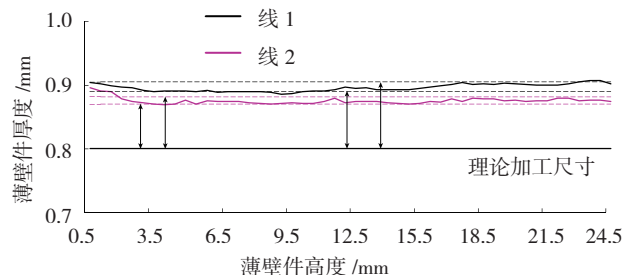


图4 薄壁件 1 不同位置处加工厚度对比图
Fig.4 Processing thickness comparison of thin-wall part 1 at different position

图4为薄壁件1不同位置处加工厚度测量值,由测量数据可知,薄壁件1位置线1处的最终加工厚度尺寸为0.89~0.905mm,上下端厚度差 $\delta_{11}=0.015\text{mm}$,位置线2处的最终加工厚度尺寸为0.87~0.882mm,上下端厚度差 $\delta_{12}=0.012\text{mm}$,线2处的加工尺寸更接近理论加工尺寸0.8mm,且上下厚度差比线1位置处小,这主要是由于薄壁件中部的刚度大于两端;此外,中部“倒梯形”现象并不明显,由此可以推断,优化薄壁件装夹或增加辅助支撑可以减小或消除薄壁件上下厚度差。

3.2 表面粗糙度对比分析

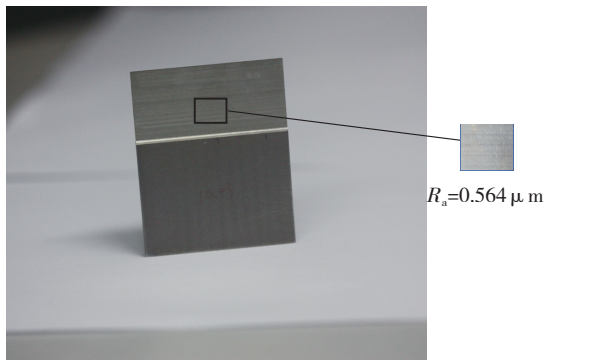
采用便携式 Mahr S3P 粗糙度仪对加工表面粗糙度进行测量,薄壁件加工表面实物图如图5所示。

由粗糙度数据看出,薄壁件1粗糙度值明显小于薄壁件2。图5中薄壁件2表面可以明显看到加工波纹和分刀层纹路,因此,提高刀具刚度有利于提高薄壁件表面加工质量,主要原因是随着刀具刚度的提高,刀具固有频率远离薄壁件固有频率,减小加工振动。

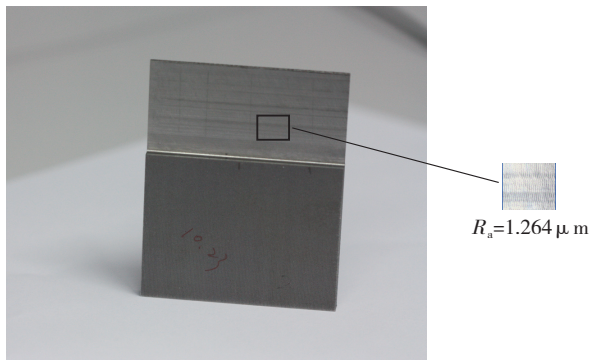
3.3 切削力对比分析

取切削过程中的第一刀的切削力作为研究对象,图6所示为每齿切削力峰值包络线。

由图6可知,在切削过程中,随着薄壁件刚度的不断变化,切削力也不断变化,但在相同切削用量和相同



(a)薄壁件1(D20刀具加工)



(b)薄壁件2(D12刀具加工)

图5 薄壁件表面加工纹路对比

Fig.5 Processing line comparison of thin-wall parts

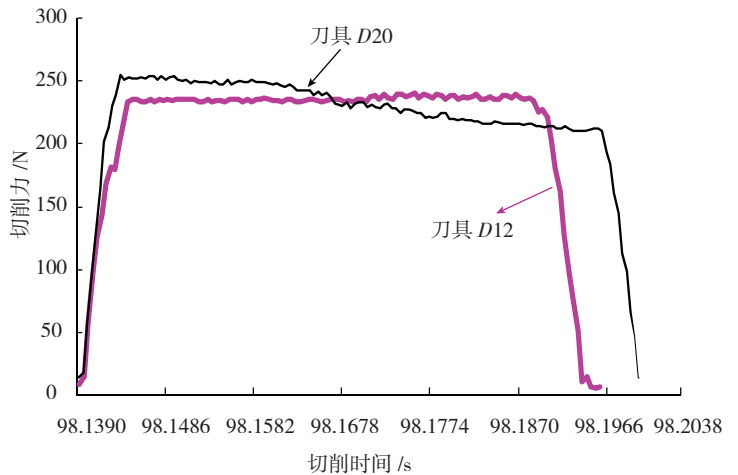


图6 切削力对比

Fig.6 Comparison of cutting force

切削位置处,刀具1的切削力普遍大于刀具2,表明在加工过程中,刀具1的实际切削深度大于刀具2,让刀变形较小,最终所加工的薄壁件加工精度更高,也进一步解释了图3所示的薄壁件厚度差异。

4 结论

(1)在一定工件与刀具刚度比范围内,刀具刚度提高,总工艺系统刚度提高,使得实际切削量与理论切削量之间的差值减小,超薄壁件加工尺寸精度提高。

(2)刀具刚度提高,刀具固有频率远离薄壁件的固有频率,减小加工振动及发生振动的可能性,超薄壁件表面加工粗糙度明显减小,表面加工质量得以改善。

参考文献

[1] Tlustý J, Smith S, Bsdrawy J. Design of a high speed machine for aluminum aircraft parts. *Manufacturing Science and Technology*, 1997(2):253-259.

[2] Zeng S S, Wan X J, Li W L, et al. A novel approach to fixture design on suppressing machining vibration of flexible workpiece. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012 (58): 29-43.

[3] Smith S. Sacrificial structure preforms for thin part machining. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2012(61): 379-382.

[4] 吴琼,张以都,张洪伟,等.航空薄壁件与铣刀的加工变形误差补偿研究. *武汉理工大学学报*, 2008,9(30):116-119.

[5] 武凯,何宁,姜澄宇.有限元技术在航空薄壁件立铣变形分析中的应用. *应用科学学报*, 2003, 21(1): 68-71.

[6] 赵威,何宁,李亮,等.薄壁结构的高效铣削加工. *航空精密制造技术*, 2002(6):12-15.

[7] 张以都,张洪伟.航空整体结构件加工变形有限元数值仿真. *北京航空航天大学学报*, 2009 (2): 68-72.

[8] 葛茂杰,孙杰,李剑峰.石蜡辅助加固钛合金薄壁件铣削稳定性研究. *山东大学学报(工学版)*, 2011,41(1):76-82.

[9] 孔金星.低刚度薄壁零件的精密加工. *工具技术*, 2003 (12):29-32.

(责编 深蓝 谷雨)