

石蜡辅助加固钛合金薄壁件加工质量分析*

Processing Quality Analysis of Thin-Walled Titanium Alloy Component
With Paraffin Reinforcement

山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室 葛茂杰 孙杰 高彪
中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司 熊青春 王伟 阮超

[摘要] 建立了钛合金-石蜡系统静力学模型,从静力学角度研究钛合金薄壁框类零件在瞬态切削力作用下工件的受力特点和变形情况;设计石蜡填充钛合金框类薄壁件铣削试验,对试验过程中的振动加速度信号和已加工表面质量进行分析对比,并研究石蜡辅助加固对钛合金薄壁件加工性能改善的作用机理。研究表明:采用石蜡辅助加固能显著降低钛合金薄壁件加工让刀变形,提高切削加工稳定性,改善加工表面质量。

关键词: 石蜡加固 钛合金 薄壁件 稳定性

[ABSTRACT] The static model of titanium-paraffin system is established. Based on the static analysis, mechanical and deformation characteristics of the thin-walled component are studied under transient force. Milling experiments with and without paraffin reinforcement are conducted. The acceleration signals in the milling process are measured and analyzed. The surface roughness of the finished part is also investigated. It is showed that paraffin reinforcement milling thin-walled component can reduce part deflection, improve the machining stability and surface finish significantly.

Keywords: Paraffin reinforcement Titanium alloy Thin-wall component Stability

钛合金薄壁件因结构紧凑、节约材料、质量轻、整体性能优越等特性,被广泛应用于在航天、航空等工业部门。但是钛合金薄壁件具有壁厚薄、相对刚度低、外形协调要求高、加工工艺性差等特点,导致钛合金薄壁件加工过程中出现让刀、振动等问题,严重影响加工质量^[1]。

针对薄壁类零件刚度较弱、加工变形大、精度难以保证的问题,李尚政等^[2]提出一种加固装夹技术来提高加工过程中薄壁

类工件的刚度,以减小工件加工变形,所用加固材料类型有低熔点合金、尿素、石蜡等;钟康民、刘璇、崔金岭等^[3-5]介绍了基于相变材料的柔性夹具;肖璐和汪振华等^[6-7]对磁流变液夹具在薄壁件加工中的应用进行了研究。然而,磁流变液等相变材料成本较高、实施困难,目前仍处于研究试验阶段;低熔点合金重量较大,易引起工件变形,清除回收困难;尿素所释放的氨味会造成不良嗅觉刺激,对环境有一定的影响。相比之下,石蜡成本较低,熔点较低,回收利用性好,较适合钛合金薄壁类零件的辅助装夹。

本文以铣削钛合金薄壁件为研究对象,利用有限元分析软件对典型钛合金薄壁框类零件进行静力学分析,研究钛合金薄壁件在瞬态切削力峰值载荷作用下工件的位移变形;针对钛合金薄壁件加工振动的特点,进行有、无石蜡辅助加固的铣削试验,通过对加速度振动信号的频谱分析和已加工表面的表面测量,研究石蜡辅助对切削稳定性和工件表面质量的影响,为石蜡辅助加固技术在薄壁类零件高效加工提供技术支持。

1 石蜡辅助加固薄壁件加工静力学分析

腹板是薄壁件的重要特征之一,钛合金薄壁件腹板加工过程中,加工精度难以控制,为此进行瞬态切削力载荷作用下腹板加工变形的静力学分析。钛合金薄壁腹板零件分析模型如图1所示。

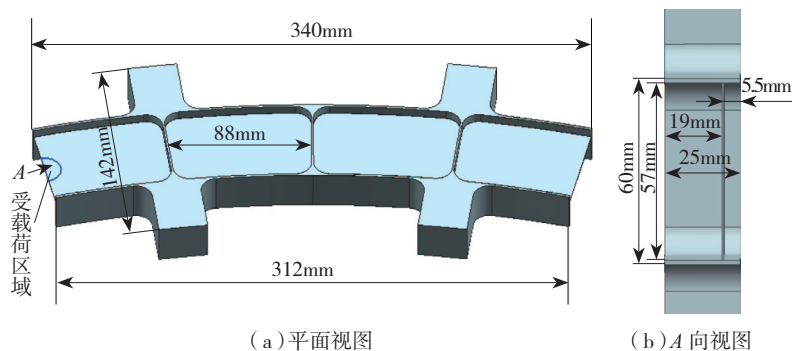


图1 钛合金双面框三维示意图

Fig.1 3D graphic of titanium alloy double-sided frame

* 山东大学自主创新基金自然科学基金专项
(2011JC015),山东省泰山学者建设工程资助。

工件为双面框,加工时一侧腹板悬空,刚度差,工件左右两边的小框相对而言刚度更差,因此选择如图1所标注的位置来进行施加载荷,该区域为半径 $R=10\text{mm}$ 的半圆。通过计算,可以得出施加载荷的区域面积 $A=157.08\text{mm}^2$,分析时选用的施加载荷值为 120N ,设定边界条件为工艺凸台全约束。

图2和3分别为钛合金薄壁双面框在有无石蜡情况下的位移云图,由于无石蜡填充工件腹板刚度较弱,在静载荷的作用下,工件发生较大的应变,其中位移变形最大值为 $3.791\text{e-}2\text{mm}$;采用石蜡辅助加固方式时,工件腹板的最大位移变形为 $2.152\text{e-}2\text{mm}$,比无石蜡填充工件变形减小了 43.2% 。

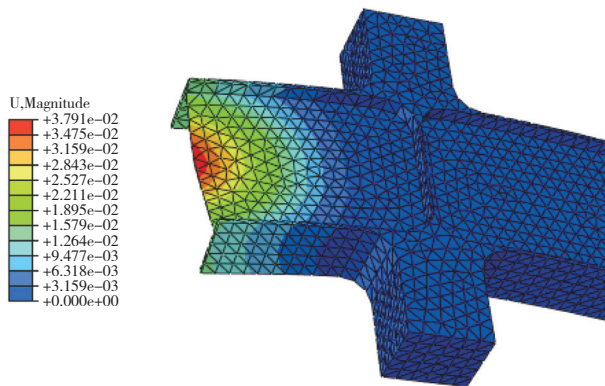


图2 无石蜡辅助加固工件位移云图

Fig. 2 Displacement nephogram without paraffin reinforcement

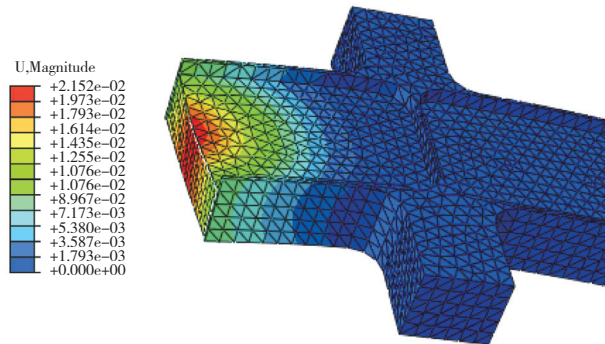


图3 石蜡辅助加固工件位移云图

Fig. 3 Displacement nephogram with paraffin reinforcement

在 abaqus 仿真分析过程中,将腹板边线设置为一条 path,然后导出 path 路径上位移变形曲线,如图4、图5所示。图4为未采用石蜡辅助加固时工件 path 位移云图,可见变形主要发生在中心位置,变形量向工件两端递减。图5为采用石蜡辅助加固时工件 path 上位移云图,工件变形规律与无石蜡辅助情况下规律相同,但变化范围小。通过钛合金-石蜡系统静力学建模与分析发现,采用石蜡辅助加固方式可以提高薄壁件的刚

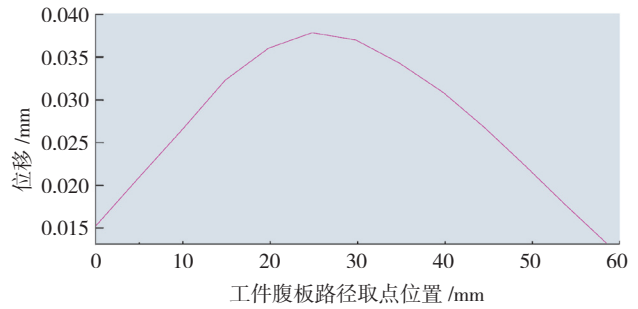


图4 未采用石蜡辅助加固时位移曲线

Fig.4 Displacement deformation curve without paraffin reinforcement

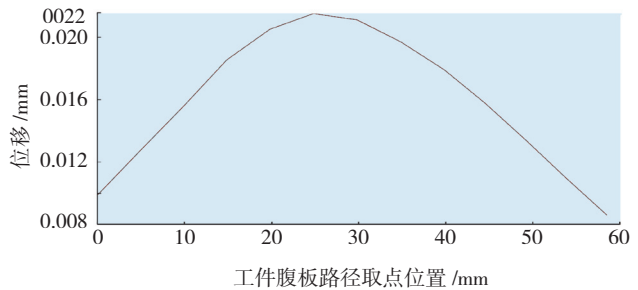


图5 采用石蜡辅助加固时位移曲线

Fig.5 Displacement deformation curve with paraffin reinforcement

度,减少工件在加工过程中的受力变形,能够提高工件加工精度。

2 石蜡辅助加固薄壁件腹板铣削试验设计

(1) 仪器设备。

机床:意大利蓝苞蒂机床 RAMMATIC1201/L;

数据采集系统:丹麦 BK3560-C 振动测试系统;

传感器:3 向加速度传感器、单向加速度传感器;

粗糙度:Wyko NT9300 白光干涉仪;

刀具:直径为 20mm 的 4 齿焊接刀具,具体参数见表 1。

表1 $\phi 20$ 国产4齿焊接刀具

工作长度/mm	螺旋角	刀尖圆弧半径/mm	周齿			底齿		
			法向前角	第一后角	第二后角	前角	第一后角	第二后角
50	30°	3	8°	10°	20°	5°	8°	15°

试验过程中采用切削液进行冷却,铣削方式为顺铣。钛合金薄壁腹板工件结构如图6所示,装夹工件前使用石蜡填充 B 框和 D 框。

(2) 试验参数。

试验过程中主轴转速 n 始终为 400r/min ,下刀时进给速度 v_f 为 41mm/min ,正常切削时走刀时进给速度 v_f

为 81mm/min,采用分层铣削加工的方式,每层切削厚度如表 2 所示;加工过程中采用坡走铣的下刀方法,刀具由工件表层下到指定位置,停止下刀,采用螺旋走刀的方式,由里向外逐层将框内材料去除,达到最终加工要求。



图6 钛合金薄壁双面框工件结构图

Fig.6 Workpiece structure of titanium alloy double-sided frame

表2 各框每层切削厚度 mm

层数	A框(未填充石蜡)	B框(填充石蜡)	C框(未填充石蜡)	D框(填充石蜡)
第1层	3.5	3.5	5.5	5.5
第2层	2	2	0.5	0.3
第3层	0.5	0.5	0.2	0.5
第4层	0.3	0.3	0.1	

(3)测试过程。

图 7 所示为振动试验仪器及连接情况,试验时同步测量刀具加速度信号和腹板加速度信号。分别在机床主轴和工件上安装加速度传感器,钛合金材料工件无磁性,为此在腹板上粘结厚度为 1mm 的传感器固定片,将加速度传感器吸附在上面。

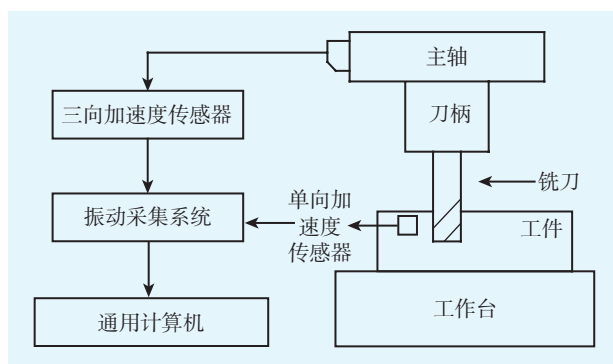


图7 试验系统连接图

Fig.7 Diagram of experimental system connection

3 铣削试验结果分析及讨论

3.1 有、无石蜡辅助两种情况下振动加速度比较

图 8、图 9 是有、无石蜡两种情况下 A、B 两框在铣

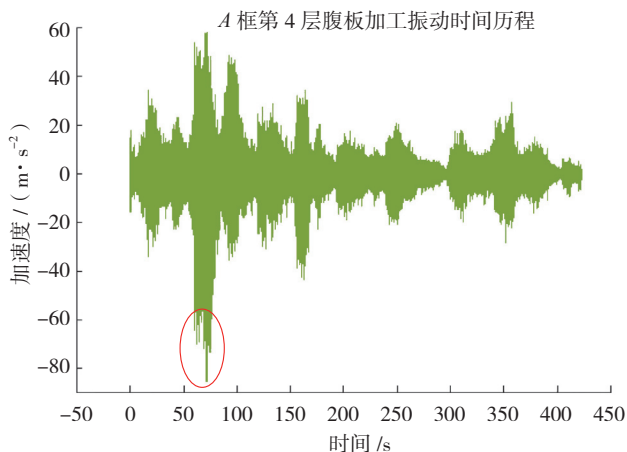


图8 A框第4层腹板振动时间历程图

Fig.8 Vibration of the fourth layer of A frame

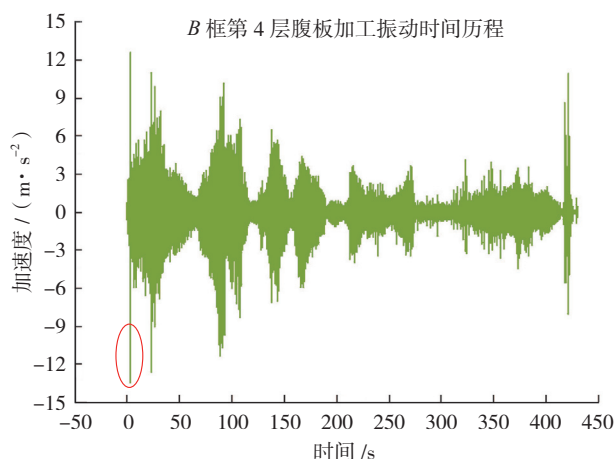


图9 B框第4层腹板振动时间历程图

Fig.9 Vibration of the fourth layer of B frame

削第 4 层时振动加速度特性。

在铣削腹板第 4 层过程中, A 框的振动信号幅值均大于 B 框。图 8、图 9 中圈出部分是工件振动的最大幅值,石蜡加固条件下 B 框的加速度最大振动幅值比 A 框的最大振动幅值降低了 80%。

对整个加工过程中的腹板振动加速度信号进行采集,将采集到的振动信号进行傅立叶变换,可以得到腹板振动信号的频域特性。图 10、图 11 是有、无石蜡 2

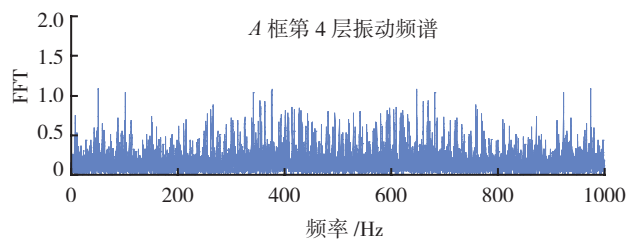


图10 A框第4层频谱

Fig.10 Vibration spectrum of the fourth layer of A frame

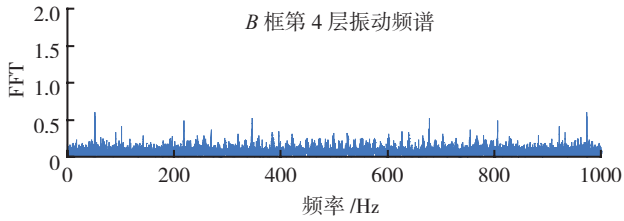


图11 B框第4层频谱

Fig.11 Vibration spectrum of the fourth layer of B frame

种情况下 A、B 2 框在铣削第 4 层时振动信号的频谱图。

对比 A 框和 B 框第 4 层腹板振动加速度信号频谱, 无石蜡填充时工件刚度较差, 振动幅值大, 在加工中容易发生颤振; 填充石蜡增加工件刚度可以有效抑制颤振的发生。因此, 在弱刚度件的加工过程中, 采用石蜡辅助加固技术, 可以有效解决加工过程中的振动问题, 进而提高加工精度, 提高加工效率。

3.2 加工表面质量分析

图 12 和图 13 分别为未采用石蜡辅助加固和采用石蜡辅助加固 2 种方式下工件腹板的表面形貌, A 框腹板粗糙度值 R_a 为 466.27nm, B 框腹板粗糙度值 R_a 达到 250.04nm, 对粗糙度的其余各项指标 (R_q, R_z, R_t) 进行分析, A 框也远高于填充石蜡 B 框。

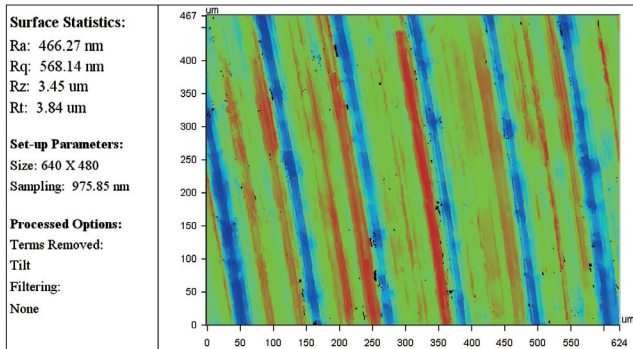


图12 未填充石蜡下A框腹板表面粗糙度平面图

Fig.12 Floor plan of roughness of A frame without paraffin

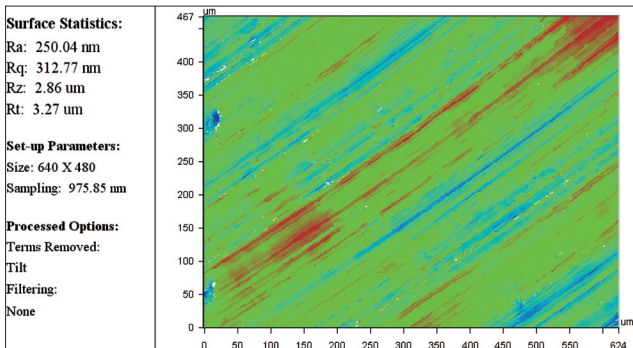


图13 填充石蜡下B框腹板表面粗糙度平面图

Fig.13 Floor plan of roughness of B frame with paraffin

图 14 和图 15 分别为未采用石蜡辅助加固和采用石蜡辅助加固 2 种方式下工件腹板的表面粗糙度三维图, 在没有石蜡辅助加固的情况下, A 框腹板三维图中已加工表面的刀痕非常清晰, 采用石蜡辅助加固的 B 框, 走刀痕迹变小, 表面相对较为平滑。由此, 利用石蜡辅助加固可以有效的减小已加工面的走刀痕迹, 进而提高薄壁件加工的表面质量。

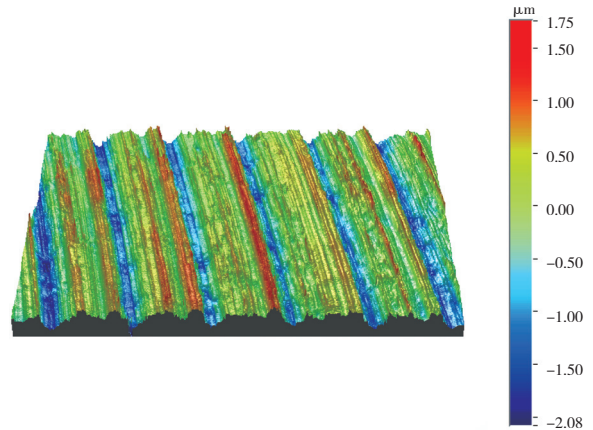


图14 未填充石蜡下A框腹板表面粗糙度三维图

Fig.14 Three-dimensional roughness graph of A frame without paraffin

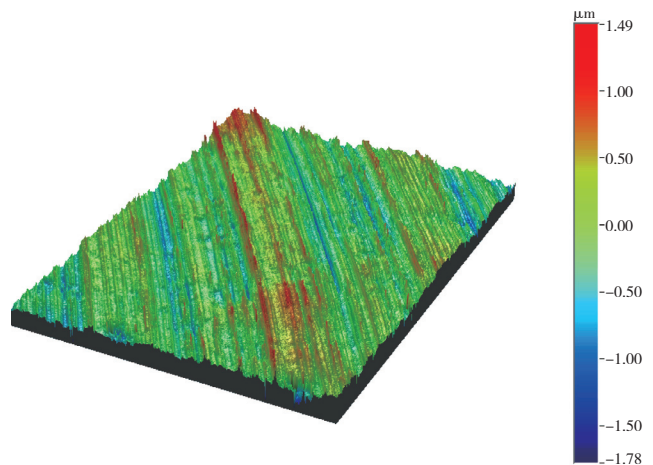


图15 填充石蜡下B框腹板表面粗糙度三维图

Fig.15 Three-dimensional roughness graph of B frame with paraffin

3.3 加工精度分析

对加工后的工件腹板厚度进行测量, 腹板宽度为 57mm, 对工件 10 个点位进行测量, 每两个点位之间距离为 6mm, 具体测量位置及加工结束工件截面形状如图 16 和图 17 所示, 其中 A 框为未采用石蜡辅助加固下加工出的工件腹板, B 框为采用石蜡辅助加固加工出的工件腹板。从已加工工件截面外形观测, A 框厚度变化明

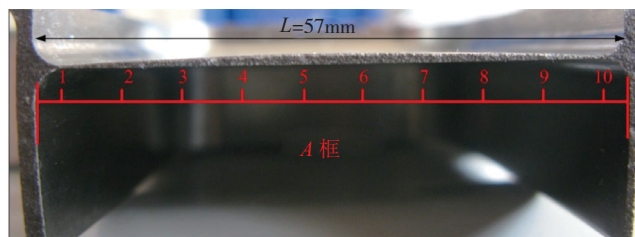


图16 未填充石蜡时腹板测量结果
Fig.16 Measuring result without paraffin

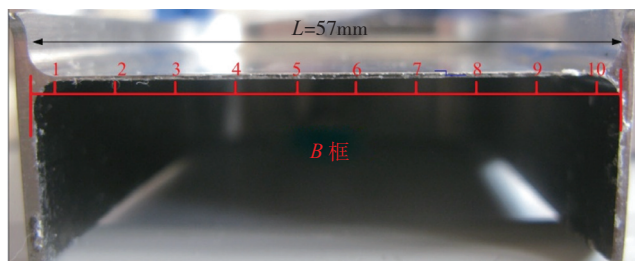


图17 填充石蜡时腹板测量结果
Fig.17 Measuring result with paraffin

显大于 B 框。

A 框和 B 框的的 10 个点位的的具体测量结果如表 3 所示。结果显示,两种情况下的腹板厚度越靠近中心位置,数值越大,腹板两边厚度值较小,呈典型“凸”型结构。

表3 腹板厚度测量结果 mm

位置	A 框(未填石蜡)	B 框(填充石蜡)
1	0.36	0.32
2	0.62	0.35
3	0.7	0.36
4	0.88	0.42
5	1.16	0.48
6	1.04	0.46
7	0.84	0.4
8	0.7	0.37
9	0.62	0.36
10	0.38	0.32

图 18 为有无石蜡辅助加固下腹板厚度的对比结果,可以看到,两种情况下腹板厚度的变化曲线与图 4 和图 5 的变化趋势相同,采用石蜡填充的方式, B 框加工效果明显好于 A 框, A 框由于无石蜡加固刚度较差,在切削力的作用下,腹板产生一定的弹性变形,实际切削加工面与理论加工面不在同一位置,导致切削深度发生改变,从而在加工过程中出现非常严重的让刀现象,最终导致工件两边薄、中间厚,呈“凸”型结构,中间厚

度约是两边的 4 倍,达不到工艺要求的加工精度。采用石蜡填充的 B 框,相比之下优越性,加工效果良好,虽然腹板中部与两边仍存在一定的厚度差,但是这个误差完全在工艺要求范围内,能够提升钛合金薄壁件的加工精度。因此,采用石蜡辅助加固技术,可以有效的提高弱刚性零件加工过程中的稳定性,改善加工质量,减小加工误差。

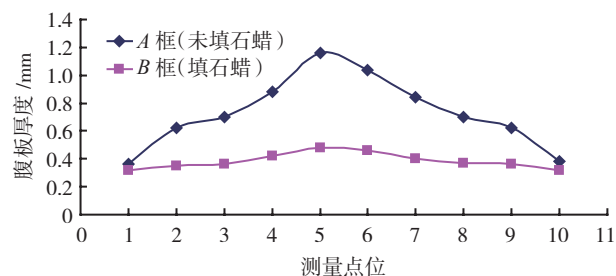


图18 A 框和 B 框腹板厚度测量结果
Fig.18 Measuring results of thickness of frame A and B

4 结论

通过对钛合金双面框零件静力学分析,同时对有无石蜡填充情况下腹板加工过程中振动频谱和表面质量分析,可以得到以下结论。

(1) 采用石蜡辅助加固方式能够有效提供钛合金-石蜡系统刚度,降低切削加工过程中的让刀变形。

(2) 通过对各框腹板振动加速度信号频谱进行分析,无石蜡时钛合金薄壁件加工加工中非常容易发生颤振,而采用石蜡填充时加工相对比较稳定。

(3) 采用石蜡辅助加固下的腹板表面粗糙度值明显降低,工件表面变得平滑,工件的表面质量得到有效改善。

参考文献

- [1] 胡创国. 薄壁件精密切削变形控制与误差补偿技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [2] 李尚政, 刘宏. 弱刚度件加固装夹技术研究. 组合机床与自动化加工技术. 2003(11):3-5.
- [3] 钟康民, 郭培全, 王红岩. 基于液固两相转变的夹具技术. 制造技术与机床, 1998(8):5-6.
- [4] 刘璇, 王小北. 基于相变材料的柔性夹具. 机械设计与制造工程, 2000(5):53-56.
- [5] 崔金岭. 柔性夹具技术的研究与创新设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
- [6] 肖璐, 王凡. 用于薄壁件加工的磁流变夹具. 新技术新工艺, 2007(1):26-27.
- [7] 汪振华, 袁军堂, 郑雷, 等. 弱刚度件加工变形分析与控制对策研究. 制造技术与机床, 2008(12):109-112.

(责编 亦非)