

端铣速度对钛合金 TB6 表面完整性的影响

杨后川, 卿 华, 黄浩然, 赵振峰

(空军工程大学航空机务士官学校, 河南信阳, 464000)

摘要 钛合金 TB6 铣削表面完整性对其使用性能具有重要影响, 试验研究了端铣速度对表面完整性的影响规律。研究表明: 在 20~60 m/min 范围内的低速铣削时, 表面粗糙度随铣削速度增大先减小而后增大, 表面显微硬度值随铣削速度增大而增大, 残余应力数值随速度增大而减小; 在 100~300 m/min 范围内的高速铣削时, 表面粗糙度随铣削速度增大而减小, 表面显微硬度随着铣削速度增大而变小, 表面残余应力数值随速度增大而减小, 残余应力沿深度方向分布大致呈“勺”型, 高速铣削表面观察到了熔滴缺陷。

关键词 铣削速度; 粗糙度; 表面缺陷; 加工硬化; 残余应力; 钛合金 TB6

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.02.002

中图分类号 V263; TG501.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)02-0008-07

The Influence of Milling Speed on the Surface Integrity of TB6 Titanium Alloy during Face Milling

YANG Houchuan, QING Hua, HUANG Haoran, ZHAO Zhenfeng

(Air Technical Sergeant School, Air Force Engineering University, Xinyang 464000, Henan, China)

Abstract: The milling speed affects its surface integrity when TB6 titanium alloy is being machined. The experimental results show that the surface roughness decreases first and then increases, the work hardening increases, and the residual stress value decreases respectively with the increase of milling speed when the cutting is at a low speed from 20 to 60 m/min; And the surface roughness, the work hardening and the residual stress value decrease respectively when cutting is at a high speed from 100 to 300 m/min. With the depth of residual stress profile being “spoon” pattern, the deposited materials or the pitting corrossions are observed on machined surface samples.

Key words: milling speed; surface roughness; surface defects; work hardening; residual stress; TB6 titanium alloy

钛合金 TB6(Ti-10V-2Fe-3Al)在现代飞机结构中具有重要地位^[1-2]。表面完整性是指加工工艺方法造成的零件表面及亚表面材料的物理和化学特性, 主要针对零件加工表面层 0.2~0.5 mm 以内的微观几何特征和材料组织特性及其变化规律^[3], 其

主要指标有: 表面粗糙度、表面波纹度、表面层的加工硬化程度及深度、残余应力、金相组织变化、表面纹理缺陷等^[4]。加工表面完整性是评价产品表面质量的重要指标, 零部件加工表面完整性的好坏对其耐磨性能、疲劳性能、应力腐蚀性能等具有重要作用^[5-6]。因

收稿日期: 2017-10-20

作者简介: 杨后川(1971—), 男, 四川广安人, 副教授, 博士, 主要从事数控加工过程参数优化研究。E-mail: xyyanghc@126.com

引用格式: 杨后川, 卿华, 黄浩然, 等. 端铣速度对钛合金 TB6 表面完整性的影响 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(2): 8-14. YANG Houchuan, QING Hua, HUANG Haoran, et al. The Influence of Milling Speed on the Surface Integrity of TB6 Titanium Alloy during Face Milling [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(2): 8-14.

此,在高强度钛合金材料的铣削加工时,必须重视表面完整性的控制,做出质量合格的零部件。

目前国内外对钛合金铣削加工表面完整性进行着积极研究。Sharman^[7]等人通过精车钛合金 TiAl 实验,得到在 25~40 m/min 铣削速度内可提高加工表面质量。姚倡锋^[8]等在研究参数对 TB6 表面粗糙度影响时,每齿进给量变化对粗糙度最为敏感,铣削速度的变化敏感次之。耿国盛^[9]等对高速铣削钛合金表面粗糙度实验研究表明:高速铣削钛合金可以得到较小的表面粗糙度值。常文春^[10]等通过正交实验研究了铣削参数对加工表面粗糙度的影响规律,得到结论:在高速铣削钛合金 TB6 时,铣削速度对加工表面粗糙度影响显著。J. Sun 和 Y. B. Guo^[11]等通过铣削 TC4 实验,得到结论:铣削速度对加工硬化有重要影响,并非铣削速度越大加工硬化及硬化层深度就越大,在一定速度范围内,可得到合适的加工硬化。北航周子同^[12]等通过铣削钛合金 TB6 实验表明:铣削速度在 30~90 m/min 范围内,加工硬化随铣削速度增大而降低。陈建玲^[13]在铣削 TC4 时,铣削速度在 40~80 m/min 中低速范围内,硬化程度范围为 110~130%,表面硬度随铣削速度的增加呈下降趋势;而在 80~140 m/min 高速范围内变化时,随着铣削速度增加,加工硬化有增加趋势。罗扬^[14]等人对钛合金 TB6 铣抛喷组合工艺研究得到:在 40~50 m/min 速度范围内,加工硬化随铣削速度增大而增大。杨振朝^[15]等人高速铣削钛合金 TC4 时发现加工硬化随铣削速度升高而增大,硬化层深度随铣削速度升高先减小后略有增大。J. Sun 和 Y. B. Guo^[11]研究了端铣钛合金时铣削速度对表面残余应力的影响,指出表面残余应力随铣削速度增大而先减少后增大。J. D. Puerta Velasquez^[16]研究了高速数控车削加工时,铣削速度对表面残余应力分布的影响,随铣削速度的增大表面残余压应力减小,拉应力增加,继续随着铣削速度的增大,表面残余拉应力有减少趋势。铣削速度还可以引起铣削表面积削瘤、犁耕、孔洞和熔滴等缺陷^[17]。总之,铣削速度对表面粗糙度、表面纹理缺陷、加工硬化和残余应力等表面完整性影响很大。本文通过高、低速对比实验研究铣削速度对表面完整性的影响,为 TB6 铣削加工表面质量控制提供技术基础。

1 钛合金 TB6 铣削试验

1.1 试验方案

钛合金 TB6 的化学成分组成及力学性能见文

献[18]。

钛合金 TB6 铣削实验均在三坐标立式数控铣床上进行,机床功率为 22 kW,主轴转速范围为 0~10 000 r/min。用型号为 R390-50Q22-17L 的山特维克盘铣刀,刀片型号为 R390-170431E-PM S30T,刀尖圆弧半径 R 为 3~3.2 mm,每次安装一个新刀片进行顺铣实验。为研究端铣铣削速度对 TB6 钛合金表面完整性的影响,实验参数为:铣削速度 v_c 分别为 20、40、60、100、200、300 m/min,进给量、切深和切宽分别为: $f_z=0.08$ mm, $a_p=1$ mm, $a_e=20$ mm,乳化液冷却。在同一试件上采用阶梯铣削方式,实验结果见图 1。



图 1 加工试件

Fig. 1 Machining specimen

1.2 测试设备

加工后的表面粗糙度测量采用 Taylor Hobson 粗糙度仪,在铣削面沿进给方向,等距选取 5 个点,测量每点表面粗糙度 R_a 值并求取平均值作为测试结果。用 JSM 6010 扫描电镜对表面缺陷进行观察。残余应力采用 PROTO 公司的 iXRD 型号 X 射线衍射仪测量,测试靶材为 Cu 靶, θ 为 130° ,倾角为 45° ,残余应力深度测试采用腐蚀剥层法进行逐层剥离测量。显微硬度测量用 FM-800 型显微硬度计,测试载荷为 100 g 用 HV(维氏硬度)表示硬度值。显微硬度深度测试采用斜切法,在斜切面上逐点测量显微硬度,直到出现基体材料的硬度为止,从而得到显微硬度值及硬化层深度。

2 试验结果与讨论

2.1 表面粗糙度与表面形貌

从图 2(a)可看出在 20~60 m/min 范围内低速端铣时,铣削速度在垂直进给方向和进给方向粗糙度随铣削速度的增加先减小而后略微增大;从图 2(b)可看出在 100~300 m/min 范围高速端铣时,铣削速度在垂直进给方向和进给方向粗糙度随铣削速度的增加均呈现减小趋势。铣削速度在 20~40 m/min 范围内稳态铣削时,已加工表面粗糙度的 2 个重要因素影响是积屑瘤和鳞刺,一般认为鳞刺是积屑瘤的脱落碎片,鳞刺相伴积屑瘤而生^[19]。积屑瘤生成除受铣削速度影响外,还受工件材料的塑性和

硬度等影响,材料塑性越小、硬度越大,积屑瘤生成机率也越小,因而铣削速度对表面粗糙度影响不大;铣削速度在 40~60 m/min 范围内铣削时,很容易产生鳞刺和形成积屑瘤,粗糙度也大。当铣削速度超过 100 m/min 的范围后,随着铣削速度增大,铣削温度会随之升高,热软化作用导致材料软化易铣削,铣削力也有所降低,鳞刺和积屑瘤都不易产生,切屑变形小与流屑方向稳定,表面形成顺畅,表面粗糙度减小。

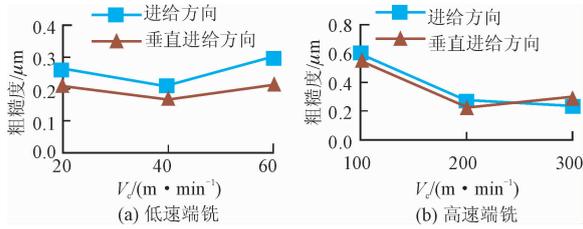


图2 表面粗糙度

Fig. 2 Surface roughness

图3为铣削试验件的表面形貌测试结果。发现所有铣削表面都存在沿铣削方向的波纹状的表面纹理,它是铣刀与工件相对移动后最终形成的表面形貌,清晰地反映出了铣刀铣削刃的运动轨迹。图3(a)中表面形貌清晰干净,沿着铣削速度方向上的表面纹理较规则、平滑,其原因是低速铣削时,铣削温度低,塑性变形小,刀具后刀面对塑性金属起到很好的“挤压”与“熨烫”作用^[19],后刀面轮廓与加工表面形貌之间形成了良好的映射关系。图3(b)所示加工表面沟纹锋锐并有微细切屑熔化物或氧化物粘附,其原因是300 m/min的高速铣削时,工件材料被快速切除,切屑形成快且变形小,表面形貌沟痕尖锐;此外,铣削温度高,材料表面软化效应增强,流动应力降低,部分微熔金属沿刀痕微细沟槽产生塑性流动,熔融涂抹、材料粘附在已加工表面上,同时高的铣削温度使得微细切屑熔化或氧化,生成大量的氧化钛或氮化钛等熔敷物附着在已加工表面,影响加工表面质量。因此,钛合金TB6在乳化液冷却下用40 m/min左右速度低速铣削加工,可以达到最理想的加工表面光洁度;而高速铣削时,加工表面可能会出现熔敷物。

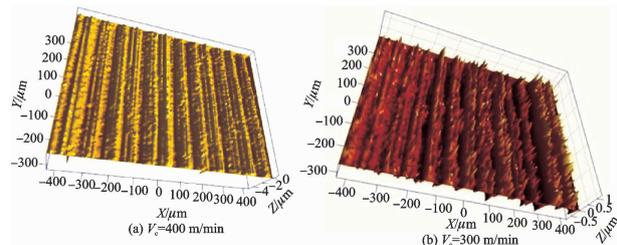


图3 表面形貌

Fig. 3 Surface topography

2.2 表面缺陷

表面缺陷是指在加工前、加工中或加工后在工件加工表面形成的正常刀痕或遗留在工件表面的不正常痕迹。除表面粗糙度外,表面缺陷同样是判定铣削后表面质量的重要参数。表面缺陷会在零件表面产生应力集中,恶化表面质量,降低零件间配合的密封性,增加零件接触面间的局部磨损、降低零件抗疲劳和抗腐蚀的能力,影响零件的使用寿命和使用性能^[20]。本文研究了不同铣削速度下已加工表面的刀痕、积屑瘤、熔滴和毛刺等缺陷。

2.2.1 刀痕与积屑瘤

在低的铣削速度情况下,可见非常明显的有规律的刀痕,见图4,刀痕是加工时刀具旋转、刀具与工件在进给方向移动共同作用产生的痕迹,是所有加工表面的固有缺陷^[20]。图4还可见表面零星附着积屑瘤,是因为钛合金的塑性好,在合适的铣削速度下,刀刃上生存的积屑瘤脱落粘附表面所致。

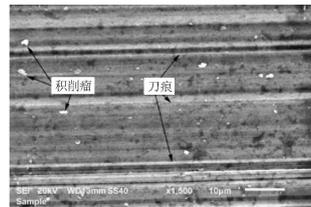
图4 刀痕与积屑瘤($V_c = 40$ m/min)

Fig. 4 Feed mark and BUE

2.2.2 熔滴

图5为高速铣削TB6表面的熔滴缺陷,高速铣削时,刀-工区产生急剧高温,甚高的铣削温度,加之钛合金TB6导热系数低,使一些细小的钛合金切屑熔融,滴落在已加工表面,形成熔滴。熔滴缺陷会对表面质量产生严重影响,恶化表面性能^[21]。用Advant Edge有限元软件仿真解算铣削温度,其仿真输入参数见表1,仿真解算结果见图6,由图6(c)可见,铣削温度随铣削速度的增加而变高,铣削速度为40 m/min时的铣削温度最高不超过450℃,而铣削速度为300 m/min时的铣削温度超过了800℃,急剧高温导致微小切屑熔融滴落粘附在已加工表面而出现熔滴。

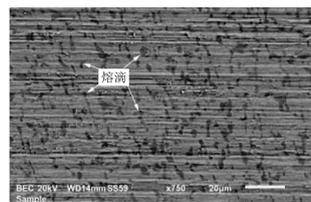
图5 熔滴($V_c = 300$ m/min)

Fig. 5 Pitting corrosion

表 1 铣削温度有限元仿真参数

Tab.1 Cutting temperature finite element analysis parameters

| | |
|-----------------------------|--|
| 工件尺寸/mm | 3.0×8.0×2.0 |
| 工件材料 | TB6(Ti-1023) |
| 刀具前角/(°) | 12 |
| 刀具后角/(°) | 7 |
| 铣削刃圆弧半径/mm | 0.02 |
| 刀具材料 | 硬质合金 |
| 刀具涂层(2层)/mm | TiAlN:0.02, TiC:0.015 |
| 刀具模型 | SOLIDWORKS 建模 |
| 轴向铣削深度/mm | 1.0 |
| 铣削旋转角度/(°) | 5 |
| 进给量/(mm·z ⁻¹) | 0.08 |
| 铣削速度/(m·min ⁻¹) | 60 |
| 铣削方式 | 面铣,顺铣 |
| 冷却方式 | 无 |
| 仿真模型 | $\sigma(\epsilon^p, \dot{\epsilon}, T) = g(\epsilon^p) \Gamma(\dot{\epsilon}) \Theta(T)$ |

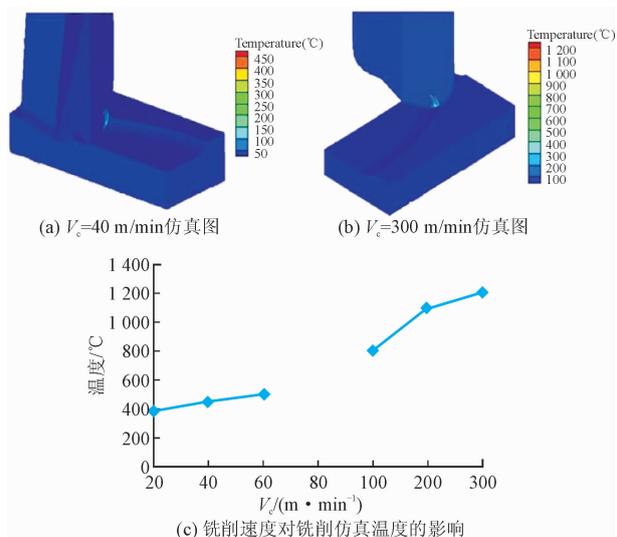


图 6 温度仿真结果

Fig. 6 Temperature simulation

2.2.3 毛刺

毛刺缺陷经常出现在刀具切离工件的区域,毛刺容易引起应力集中,降低零部件的疲劳寿命^[23-26],因此,铣削时必须抑制毛刺的形成。加工毛刺由铣削刃边缘和机械变形引起,铣削加工时,刀具在轴向和径向双向铣削挤压力作用下,材料被铣削压缩,向零件表面边缘产生永久侧倾凸出塑性变形,形成毛刺。毛刺的尺寸大小与材料的特性、刀尖圆弧半径、刀具后刀面摩擦力大小等密切相关。因此,铣削压力大、导热率低、弹性模量小的材料特别容易产生毛刺^[24]。图 7(a)、(b)为不同速度铣削 TB6 照片,在试件表面边缘区域均出现了毛刺,且低速铣削毛刺大,高速铣削毛刺小。这是因为在 40 m/min 低速

铣削时,铣削压力大,刀尖与工件间挤压作用强,试件边缘材料易被铣削压缩形成毛刺;300 m/min 高速铣削时,由于铣削速度非常快,铣削区温度高,铣削力降低,刀尖机械冲击作用减小,塑性变形下降,铣削变形时间短,毛刺减少。因此,毛刺会随着铣削速度增加而减少。

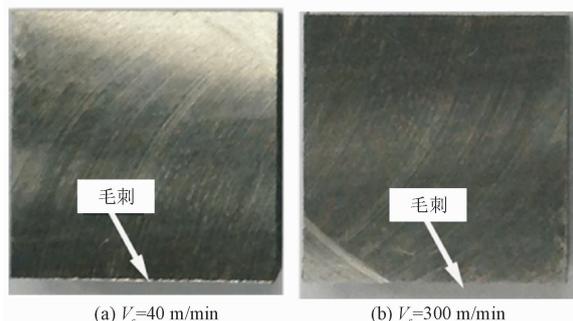


图 7 毛刺

Fig. 7 Burr formation

2.3 加工硬化

图 8 为铣削速度对表面显微硬度的影响规律。图 8(a)所示为 20~60 m/min 低速端铣时,表面显微硬度值随铣削速度增大略微上升。这是因为在低速铣削时,塑性变形随着铣削速度的增加而增大,塑性变形导致的应变硬化增大。图 8(b)所示为 100~300 m/min 高速端铣时,表面显微硬度值随铣削速度增大略微下降。这是因为高速铣削时刀具后刀面与工件材料的接触时间缩短,试件材料塑性变形小,应变硬化降低;此外,铣削速度提高,铣削区温度高,材料热软化作用增强。因此,应变硬化降低和热软化作用增强的双重影响下,工件表面显微硬度随着铣削速度增大而变小。可见,高速铣削能在一定程度上有效减小表面加工硬化。

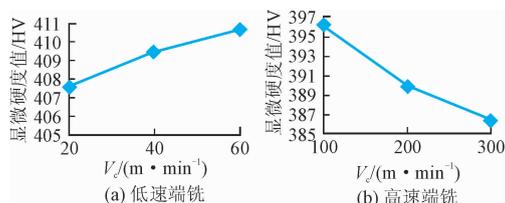


图 8 铣削速度对表面硬化的影响

Fig. 8 The influence of milling speed on surface work hardening

通过斜切法测得铣削速度对硬化层深度的影响曲线见图 9。可见,最大硬度值均出现在加工表面,硬化层深度随铣削速度增加而逐步减小,直至基体硬度,硬化层深度大体在 15~35 μm 之间。在 20~60 m/min 低速端铣加工时,硬化层深度在 25~35 μm 之间,显微硬度值在硬化层深度范围内逐渐减小到基体材料,即加工表面呈现“表面硬化-趋于基

体硬度”的过程,没有出现加工软化区域。这是因为:低速端铣过程中,一方面,工件表层材料塑性变形充分,加工硬化明显;另一方面,刀刃与工件间挤压摩擦产生的热量积聚在刀-工接触区,铣削热一部分被切屑带走,一部分由铣削液冷却,剩余的铣削热使工件表层金属温度升高,铣削热在表层很浅的深度内被保留一段时间,并逐渐传散,在铣削液快速致冷作用下,显微硬度由表及里逐渐降低。此外,铣削是断续过程,当铣削刀具切入时,刀具与工件间挤压摩擦,铣削热产生热胀;相应地,当铣削刀具退出时,已加工表面出现冷却收缩^[27],这种冷热循环,在加工表面及内部出现循环积累应力冲击扩展,产生由表及里的硬化过程。在100~300 m/min高速端铣过程中,硬化层深度在15~30 μm 之间,加工表面同样呈现“表面硬化-趋于基体硬度”的过程。这是因为:在高速铣削时,刀-工接触区虽然挤压和摩擦剧烈,但接触时间短,表层来不及塑性变形,晶粒歪扭和破碎少,表面硬化作用和硬化层深度减小^[28]。此外,高速铣削时,如图6所示,铣削温度较高,铣削热使钛合金表层金属出现软化,同时受冷却液冷却作用,表面发生冷硬,两者共同作用的结果,导致表面显微硬度稍大于基体硬度,硬化层深度总体减小。可见,高速铣削能在一定程度上有效减小表面加工硬化层深度。

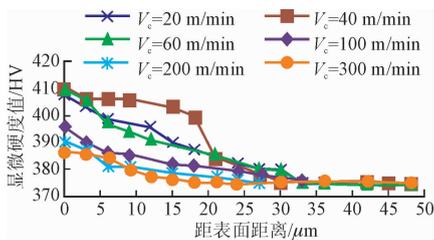


图9 铣削速度对表面硬化层深度的影响

Fig. 9 The influence of milling speed on surface work hardening depth

2.4 残余应力

由图10可以看出TB6铣削速度对表面残余应力的影响规律。从图10(a)可见,在20~60 m/min低速端铣时,应力值的变化不大,2个方向的应力值均在-400~-500 MPa之间,这是因为在低速端铣时,随着铣削速度的增加,铣削力增大,钛合金TB6弹性模量小,已加工表面弹性恢复大,刀具后刀面对工件表面的挤压作用强,即“挤压效应”增强,此外,铣削层的塑性变形区域增大、变形程度严重,“塑性突出效应”也增强,“挤压效应”引起的残余压应力较“塑性突出效应”引起的残余拉应力大^[28],总残余应力表现为残余压应力,残余压应力值随速度增大而增大;同时,工件表面铣削温度的变化不够明

显,乳化液冷却情况下,加工表面温度不超过500 $^{\circ}\text{C}$ (如图6所示),“热效应”引起的残余拉应力不十分明显。因此,在钛合金TB6在低速铣削加工过程中,在铣削力、工件表面塑性变形和铣削温度综合作用,加工表面呈现残余压应力,且铣削“挤压效应”引起残余压应力较为明显。此外,刀具进给方向与工件材料剪切方向的夹角小,在进给方向上挤压、摩擦、延展作用强于垂直进给方向,因此,在进给方向出现较大的残余压应力,垂直进给方向上呈现出较小的残余压应力。

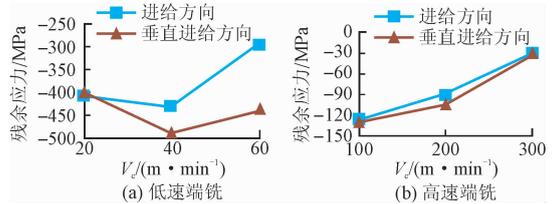


图10 铣削速度对残余应力的影响

Fig. 10 The influence of milling speed on surface residual stress

从图10(b)可见,在100~300 m/min高速端铣时,进给方向和垂直进给方向的应力值突降到-130 MPa以下。这是因为铣削速度为100 m/min时,铣削力还较大,工件表面受挤压作用还很强,引起的残余压应力很大,此时铣削温度超过600 $^{\circ}\text{C}$ (如图6所示),工件表面温度高于相邻里层温度,温度引起的“热效应”使表面产生大的拉应力,拉、压残余力叠加结果,进给方向的残余压应力值减小,垂直进给方向残余应力大体维持不变。当铣削速度达到或超过300 m/min的时候,进给方向和垂直进给方向的压应力值突降到-30 MPa以下,是因为铣削温度超过800 $^{\circ}\text{C}$,达到了钛合金TB6的相变温度(钛合金相变温度约为760 $^{\circ}\text{C}$)^[13,20],因相变温度冲击,局部晶粒体积变化而引起残余拉应力;同时较高的切削温度,引起铣削后的表层金属收缩,即“热效应”引起的表面残余拉应力增大;此外,因铣削热而致铣削力减小,工件表面受挤压作用减弱,“挤压效应”引起的残余压应力减小。在“挤压效应”和“热效应”共同作用下,表面残余压应力值减小,残余压应力值随速度增大而减小。这与Sun和Guo^[11]的研究结果基本相同。

研究残余应力深度方向分布规律,采用腐蚀剥层法进行逐层剥离测量。腐蚀剥层液用氢氟酸(HF)、浓硝酸(HNO_3)和水(H_2O)配比得到,其配比为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=4:10:36$ 。测试时,首先将加工好的工件用iXRD型号X射线衍射仪测试加工表面残余应力,然后用配比好的剥层腐蚀液腐蚀,每次腐蚀深度平均为10 μm ,再用iXRD型号X射线

衍射仪测量表面残余应力,直到表面残余应力变化在 $-30\sim-100$ MPa 范围内为止。测试残余应力深度梯度方向应力值,表面残余应力深度方向的应力分布情况见图 11。在铣削速度为 20 m/min 或 300 m/min,在乳化液冷却情况下,端铣加工导致的残余应力深度不超过 30 μm ,最大残余应力值出现在表面或者表面以下 10 μm 范围之内,残余应力沿深度方向分布大致呈“勺”型,基体的残余应力值大致在 $-50\sim-100$ MPa 之间。这说明钛合金 TB6 在铣削过程中,残余应力影响层深度较浅。

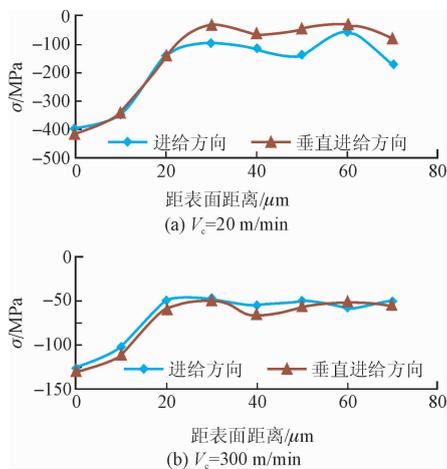


图 11 残余应力沿深度方向分布

Fig. 11 Surface residual stress depth profile

2.5 金相组织

用单刃新刀端铣时,在不同铣削速度下的金相组织见图 12,低速铣削和高速铣削后表面层晶粒与材料内部晶粒形貌相同,没有发生明显的扭曲变形。这主要是由于新刀铣削刃锋利,刀-工接触区挤压、摩擦作用小,工件表面层晶粒没有发生明显的扭曲变形,也没有相变发生。

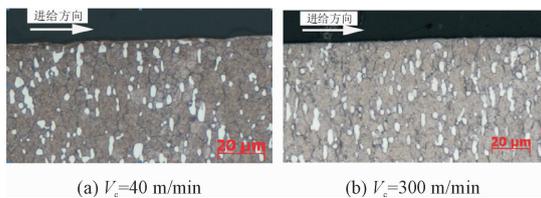


图 12 铣削速度对表面金相组织的影响

Fig. 12 The influence of milling speed on surface metallographic structure

3 结论

通过铣削速度对钛合金 TB6 铣削表面完整性影响研究,得出以下结论:

1) TB6 端铣加工时:在低速铣削时,表面粗糙度随铣削速度增大先减小而后增大;在高速铣削时,表面粗糙度随铣削速度增大而减小。

2) 在低速端铣时,已加工表面存在刀痕和少量积屑瘤等缺陷;在高速端铣时,已加工表面会出现熔滴缺陷。高低速铣削均存在毛刺,且毛刺会随着铣削速度增加而减少。

3) 在低速端铣时,表面显微硬度值随铣削速度增大而增大;在高速铣削时,表面显微硬度随着铣削速度增大而变小。不同速度铣削时,加工表面硬化均呈现“表面硬化-趋于基体硬度”变化趋势。

4) 在低速端铣时,“挤压效应”引起的残余压应力较“塑性突出效应”引起的残余拉应力大,总残余应力表现为残余压应力,残余应力数值随速度增大而减小;在高速端铣时,“热效应”引起的表面残余拉应力增大;“挤压效应”引起的残余压应力减小。在“挤压效应”和“热效应”共同作用下,表面残余压应力值减小,残余压应力值随速度增大而减小。端铣加工导致的残余应力深度不超过 30 μm ,残余应力沿深度方向分布大致呈“勺”型。

参考文献 (References):

- [1] 沙爱学,王庆如,李兴无. 航空用高强度结构钛合金的研究及应用 [J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 239-242. SHA A X, WANG Q R, LI X W. Research and Application of High Strength Titanium Alloys Used in Airplane Structure [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 239-242. (in Chinese)
- [2] 张平平,王庆娟,高硕,等. 高强 β 钛合金研究和应用现状 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(14): 51-55. ZHANG P P, WANG Q J, GAO Q, et al. Research and Application of High-Strength β Ti Alloy [M]. Material & Heat Treatment, 2012, 41(14): 51-54. (in Chinese)
- [3] DAVIM J P. Surface Integrity in Machining [M]. London: Springer, 2010.
- [4] ANSI. American National Standard for Surface Integrity B211.1-1986; Society of Manufacturing Engineers USA [J]. Materials & Design, 1987, 8(6): 361-377.
- [5] AROLA D, WILLIAMS C L. Estimating the Fatigue Stress Concentration Factor of Machined Surfaces [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 923-930.
- [6] YAO C F, WU D X. Influence of High-Speed Milling Parameter on 3D Surface Topography and Fatigue Behavior of TB6 Titanium Alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2013, 23: 650-660.
- [7] SHARMAN A R C, ASPINGUALL D K. Workpiece Surface Integrity Considerations when Finish Turning Gamma Titanium Aluminide [J]. Wear, 2001, 249 (5-6): 473-481.
- [8] 姚倡锋,武导侠,靳淇超,等. TB6 钛合金高速铣削表面粗糙度与表面形貌研究 [J]. 航空制造技术, 2012(21): 90-93.

- YAO C F, WU D X, JIN Q C, et al. Research on Surface Roughness and Surface Topography of High-Speed Milling TB6 Titanium Alloy [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012(21): 90-93. (in Chinese)
- [9] 耿国盛. 钛合金高速铣削技术的基础研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
GENG G S. *Fundamental Research on High Speed Milling of Titanium Alloys* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [10] 常文春, 易湘斌, 李宝栋, 等. 高速铣削 TB6 钛合金切削力和表面粗糙度预测模型 [J]. *工艺与检测*, 2017(4): 102-107.
CHANG W C, YI X B, LI B D, et al. Prediction Model of Cutting Force and Surface Roughness in High-Speed Milling TB6 Titanium Alloy [J]. *Technology and Test*, 2017(4): 102-107. (in Chinese)
- [11] SUN J, GUO Y B. A Comprehensive Experimental Study on Surface Integrity by End Milling TC4 [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 4036-4042.
- [12] 周子同, 陈志同, 蒋理科, 等. 钛合金 TB6 铣削加工硬化实验 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(1): 135-140.
ZHOU Z T, CHEN Z T, JIANG L K, et al. Experiment on Work Hardening of Milling TB6 [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(1): 135-140. (in Chinese)
- [13] 陈建岭. 钛合金高速铣削加工机理及铣削参数优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009.
CHEN J L. *Study on the Machining Mechanism and Parameters Optimization during High Speed Milling of Titanium Alloys* [D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese)
- [14] 罗扬, 赵鹏, 李勋. 基于铣抛喷组合工艺的 TB6 钛合金精铣参数优化 [J]. *航空制造技术*, 2017(12): 64-69.
LUO Y, ZHAO P, LI X. Parameters Optimization of Fine Milling Titanium Alloy TB6 Based on Combined Process of Milling Polishing and Shot Peening [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(12): 64-69. (in Chinese)
- [15] 杨振朝, 张定华, 姚倡锋, 等. TC4 钛合金高速铣削参数对表面完整性影响研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2009, 27(4): 1-2.
YANG Z C, ZHANG D H, YAO C F, et al. Effects of High-Speed Milling Parameters on Surface Integrity of TC4 Titanium Alloy [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2009, 27(4): 1-2. (in Chinese)
- [16] VELASQUEZ J D P, TIDU A, BOLLE B, et al. Sub-Surface and Surface Analysis of High Speed Machined TC4 Alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(10): 2572-2578.
- [17] GINTING A, NOUARI M. Surface Integrity of Dry Machined Titanium Alloys [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(3-4): 325-332.
- [18] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社: 253-273.
China Aeronautical Materials Handbook Editorial. *China Aeronautical Materials Handbook* [M]. Beijing: China Standard Press, 2002: 253-273. (in Chinese)
- [19] 陈日曜. 金属铣削原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
CHEN R Y. *Principles of Metal Cutting* [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 艾剑波, 郭俊贤, 覃海鹰, 等. Ti1023 主桨毂中央件的微动疲劳及其防护 [J]. *直升机技术*, 2011(2): 25-29.
AI J B, GUO J X, QIN H Y, et al. Fretting Fatigue of Ti1023 Main Rotor Hub Central Part and Protection [J]. *Helicopter Technique*, 2011(2): 25-29. (in Chinese)
- [21] ULUTAN D, OZEL T. Machining Induced Surface Integrity in Titanium and Nickel Alloys: A Review [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51(3): 250-280.
- [22] 雷景文, 曾卫东, 吴欢, 等. 热机械处理对 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金组织和性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(S1): 603-605.
LEI J W, ZENG W D, WU H, et al. Effects of Mechanical Heat-Treatment on Microstructure and Properties of Ti-10V-2Fe-3Al Titanium Alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(S1): 603-605. (in Chinese)
- [23] NAKAYAMA K, ARAI M. Burr Formation in Metal Cutting [J]. *Ann CIRP*, 1987, 36(1): 33-36.
- [24] GILLESPIE L K, BLOTTER P T. The Formation and Properties of Machining Burrs [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 1976, 98(1): 66-74.
- [25] HASHIMURA M, HASSAMONTR J, DOMFELD D A. Effect of In-Plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 1999, 121(1): 13-19.
- [26] DORMFELD D, MIN S. A Review of Burr Formation in Machining. In: *Burrs-Analysis, Control And Removal* [M]. Berlin: Springer, 2010: 3-11.
- [27] YANG X Y, REN C Z, WANG Y, et al. Experimental Study on Surface Integrity of Ti-6Al-4V in High Speed Side Milling [J]. *Trans Tianjin Univ*, 2012, 18(3): 206-212.
- [28] 王素玉. 高速铣削加工表面质量的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
WANG S Y. *Machined Surface Quality for High-Speed Milling* [D]. Jinan: Shandong University, 2006. (in Chinese)