

钛合金 TB6 铣削参数对表面完整性的影响研究^{*}

Effect of Milling Parameter on Surface Integrity of TB6 Titanium Alloy

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 史恺宁 靳琪超 武导侠 任军学 姚倡锋

[摘要] 通过 TB6 钛合金的侧铣加工试验,研究了工艺参数对钛合金加工表面完整性的影响规律。试验结果表明:每齿进给量的变化对加工表面形貌和粗糙度的影响最大;增大每齿进给量和铣削宽度,表面残余压应力有所增大,残余应力影响层变深,材料的硬化深度和硬化程度也有所增大;每齿进给量和铣削宽度的变化对塑性变形层的深度影响较小。

关键词: TB6 钛合金 铣削工艺参数 表面完整性

[ABSTRACT] By the experiments of flank milling of TC4 titanium alloy, the influence of the milling parameters on machined surface integrity is investigated. The results show that the surface roughness and surface topography is affected most by the feed per tooth. By increasing the feed per tooth and milling width, the residual stress of surface is enhanced; the layer of residual stress is deeper. The hardening depth and hardening degree of the material becomes more. Changing the feed per tooth and milling width makes very little difference to the depth of plastic deformation layer.

Keywords: TB6 titanium alloy Milling parameter Surface integrity

钛合金作为高强度材料,以其优异的综合力学性能、低密度以及良好的耐腐蚀性和耐热性,在航空航天工业和生物材料制造业上得到了广泛应用。而随着航空航天工业对高强度、高韧度、低质量及热稳定性和抗蚀性日益增长的要求,近 β 型和 β 型钛合金虽然价格较高但应用越来越广泛。TB6 钛合金是美国钛金属公司 (TIMET) 于 20 世纪 70 年代初研制成功的高强、高韧、并具有优良热加工性的近 β 型钛合金。该合金能有效减轻结构件的重量,在飞机机身、机翼和起落架结构中使用该合金代替同等强度的 30CrMnSiA 的结构钢,可减轻重量约 40%,用 TB6 钛合金代替 TC4 可减轻结构重量约 20%,因此对于航空航天领域,该合金具有广泛的应用

空间^[1]。但是钛合金的切削加工性较差,不利于获得好的加工表面质量,影响钛合金构件的服役使用性能。

国内外学者对钛合金铣削加工表面完整性进行了大量的研究。I.S.Jawahir^[2] 等对零件制造材料去除过程中的表面完整性特征研究的最新进展进行了综述性报道。A.L.Mantle^[3] 等对高速铣削 γ -TiAl 合金表面完整性进行了研究,采用其所选择的加工参数可以使表面粗糙度均低于 $1.5\mu\text{m}$,硬化层深度达到 $300\mu\text{m}$,表面具有残余压应力且大于 500MPa ,后刀面磨损和切削速度对残余应力影响最大。J.Sun 和 Y.B.Guo^[4] 对端铣 TC4 钛合金表面完整性进行了研究,进给速度和切宽增加,表面粗糙度值升高,切削速度对粗糙度的影响较小,进给方向和切削方向上都为残余压应力,但是切削速度和进给速度对残余应力的影响不一致。微观组织分析显示 β 相减少,并有部分畸变,表层显微硬度最大值比机体的高出 70%~90%。C.H.Che-Harona^[5-6] 等对高速铣削 TC4 从表面粗糙度、残余应力、微观组织和显微硬度等几方面进行了系统研究。J.D.Puerta Velasquez^[7] 针对 TC4 钛合金研究了铣削速度从 20~660 m/min 的情况下,表面残余应力和表层微观组织的变化,随着铣削速度的增加,较大的塑性变形层的厚度也在增加。杜随更^[8] 等在对平底刀铣削 TC4 钛合金时研究发现,铣削速度在一定范围内提高时,表面质量越来越好。杨振朝^[9-10] 等初步研究了 TC4 高速铣削加工时,铣削参数对表面完整性的影响机理。

从目前国内外对钛合金铣削加工的表面完整性研究现状来看,主要集中在对 TC4 这种 $\alpha+\beta$ 相钛合金进行研究,而对于相对更难加工的 β 相钛合金 TB6 的表面完整性研究较少。

机械加工表面质量对零件尤其对高强度钢零件的使用性能具有重要的影响,具体表现为对零件疲劳性能、腐蚀性能、耐磨性、稳定性和可靠性的影响。研究表面完整性是控制机械加工表面质量的有效方法,表面完整性主要包括 2 个方面的内容:(1)加工表面几何特征,主要包括表面粗糙度和表面纹理等;(2)加工表面层的物理力学性能,主要包括表面残余应力、表面组织、表面加工硬化等方面。因此,本文选用表面完整性评价体系对

^{*} 国家自然科学基金 (50975237,51005184)、国家科技重大专项 (2009ZX04014-053) 资助。

TB6 钛合金铣削参数对表面完整性的影响进行了研究。

1 TB6 表面完整性铣削试验

1.1 试件材料

试验材料 TB6 (Ti-10V-2Fe-3Al) 钛合金具有比强度高、断裂韧度好、各向异性小、锻造温度低和抗应力腐蚀性能强,主要用于制造飞机机身、机翼和起落架结构中的锻造零件。TB6 钛合金主要化学成分如表 1 所示,力学性能如表 2 所示。

表1 TB6钛合金化学成分 %

H	O	N	Fe	Al	V	Ti
0.01	0.03	0.03	1.93	2.95	10.15	余量

表2 TB6钛合金的力学性能

室温力学性能 ≥	抗拉强度 σ_b /MPa	1005
	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	1035
	伸长率 δ /%	6
	收缩率 ψ /%	10
	冲击韧性 a_k /(J·cm ⁻²)	60
高温力学性能 ≥	试验温度/°C	350
	抗拉强度 σ_b /MPa	963
	持久强度 σ_{100} /MPa	840
	伸长率 δ /%	16.8
	收缩率 ψ /%	70.8

1.2 试验条件及试验过程

试验机床为 VMC-850 三坐标立式数控加工中心,其主轴最大转速为 8000r/min,采用水溶液冷却。刀具选用四齿整体硬质合金立铣刀,直径为 10mm,前角 6°,后角 12°,螺旋角 30°,刀具长 72mm,刃长 22mm。试验方案如图 1 所示,选择刀具周刃铣削,走刀方式采用顺铣,切削深度 $a_p=10$ mm。本文旨在研究铣削参数对表面完整性的影响规律,正交工艺参数及加工表面粗糙度测试结果如表 3 所示,试件尺寸如图 1 所示。

1.3 测试方法

对试样表面粗糙度和表面形貌测试采用三维光学表面形貌测试仪 Veeco 测量。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,测量时放大倍数为 10,测量分辨率为 736×480,测量点取样大小为 830.22nm×830.22nm。

对加工试样表面残余应力用 XStress3000 射线应力分析仪进行测量。在加工表面沿进给方向取 3 个点,分别测量 3 个点处沿进给方向和垂直进给方向的残余应

表3 正交工艺参数及表面粗糙度值测试结果

序号	每齿进给量 f_z /(mm·z ⁻¹)	切削速度 v_c /(m·min ⁻¹)	切削宽度 a_e /mm	R_a /μm
1	0.02	60	0.2	0.36
2	0.02	100	0.4	0.494
3	0.02	140	0.6	0.455
4	0.06	60	0.6	0.713
5	0.06	140	0.4	0.565
6	0.06	100	0.2	0.507
7	0.1	60	0.4	1.311
8	0.1	100	0.6	1.273
9	0.1	140	0.2	0.911

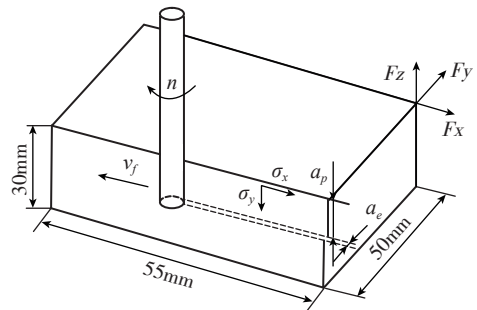


图1 侧铣实验方案示意图

Fig.1 Diagram of side milling

力。并对试样利用电化学减薄仪剥层,每次剥层最小深度控制为 5~10μm,然后进行残余应力测试,直至接近零残余应力。

显微硬度的测量采用斜切面法,在已加工表面上距端面 2mm 处切割出一个 3°的斜角,如图 2 所示。然后对斜切面进行粗磨、精磨、抛光。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,从而求出硬度程度及其深度。显微硬度的测量采用 MHT-4 显微硬度计,试验力选择 300gf,保持载荷时间 10s。

将已加工试样沿铣削方向切割,制备金相试样,将切割断面研磨、抛光后进行腐蚀,腐蚀剂配比为硝酸:氢氟酸:水=1:1:10。采用 DMI 5000M 倒置金相显微

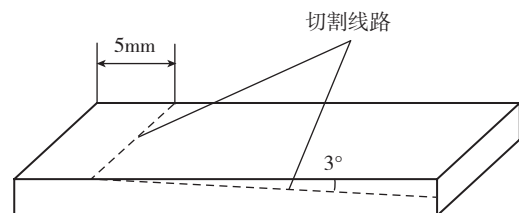


图2 测量显微硬度试件切割方法

Fig.2 Cutting method of measuring microhardness of workpiece

镜对断面微观组织进行观察。

2 试验结果及分析

2.1 表面粗糙度与表面形貌

根据正交试验铣削参数对表面粗糙度进行极差分析,得到不同铣削工艺参数对表面粗糙度的影响规律。

如图3所示,每齿进给量和铣削厚度与表面粗糙度正相关,而铣削速度与表面粗糙度负相关,且每齿进给量对粗糙度影响较大,而铣削速度和宽度对其影响较小。减小每齿进给量可以降低铣削加工残留材料的高度和残余材料间距,其参数的变化对粗糙度的影响较大,但每齿进给量对铣削力的影响较大,切削过程同时伴随着刀具的震动,因此粗糙度值不会无限减小。图3(a)是每齿进给量对表面粗糙度的影响规律,每齿进给量的变化范围为0.02~0.1mm/z,表面粗糙度由0.436 μm 升高到1.157 μm ,升幅为0.721 μm ,变化幅度最大。

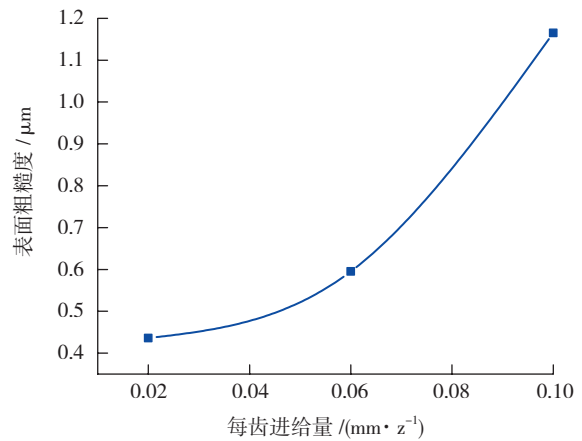
高速切削时,铣削温度升高会使材料软化易于切削,并且切削区材料的塑性变形小,切削过程中鳞刺和积屑瘤均不易产生,表面的缺陷较少,因此随着铣削速度的升高,表面粗糙度的值下降。图3(b)是铣削速度对表面粗糙度的影响规律,铣削速度的变化范围为60~140m/min,表面粗糙度由0.795 μm 降低到0.644 μm ,降幅为0.151 μm ,变化幅度最小。

铣削宽度的增大会使法向切削力和铣削温度增大,容易产生鳞刺和形成积屑瘤,同时会使侧铣时的铣削颤振加剧,因此切削宽度变大表面粗糙度降低。图3(c)是铣削宽度对表面粗糙度的影响规律,铣削宽度的变化范围为0.2~0.6mm,表面粗糙度由0.593 μm 升高到0.806 μm ,升幅为0.231 μm ,升幅较小,是每齿进给量影响效果的1/3。因此进行铣削粗加工时选用较大的铣削宽度和适当的每齿进给量,精加工时选用较小的每齿进给量和铣削宽度。

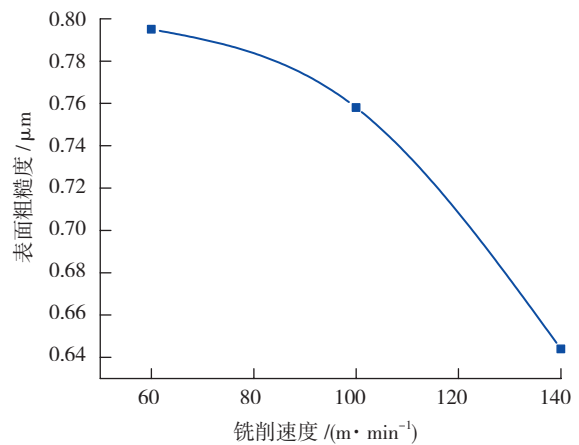
2.2 表面形貌

图4为正交铣削试验中9个试样铣削表面中心位置表面形貌测试图片。由于侧铣加工是非连续切削加工,随着加工参数的变化和切削刀的切入切出,加工表面沿进给方向呈波纹状,表面垂直进给方向上有脊形残留材料,随着每齿进给量的增加,残余材料的间距和高度升高,但其高度不会变化太大。刀具为非刚性,脊形残余材料截面沿刀轴方向有较大的变化。

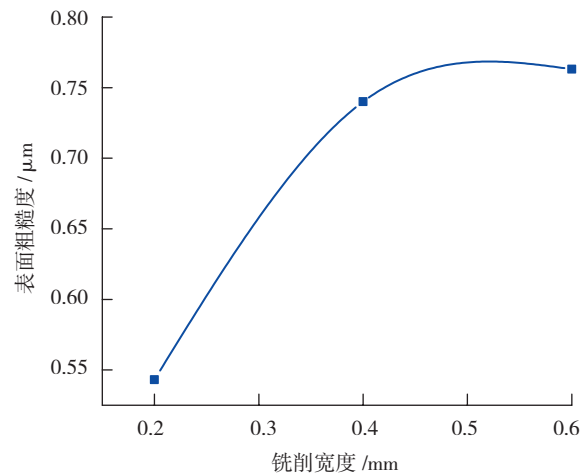
由图4(a)~图4(i)可以看出,当每齿进给量升高时,残余材料量变化明显,脊形残余材料对粗糙度的影响显著;铣削速度升高时,表面形貌沿进给方向上的变化比较规律,残留材料量分布较规律,因此粗糙度的值减小;铣削宽度升高时,沿刀轴方向上的残余材料量



(a) 每齿进给量对表面粗糙度的影响



(b) 铣削速度对表面粗糙度的影响



(c) 铣削宽度对表面粗糙度的影响

图3 铣削工艺参数对表面粗糙度的影响

Fig.3 Effect of milling parameters on surface roughness

变化明显,铣削宽度较大时沿进给方向上的波纹状表面出现较大的波动如图4(c)、4(d)、4(h)所示,这种现象主要是由刀具的震动引起。当每齿进给量和铣削宽度同时增大时,表面波纹状起伏较大,表面粗糙度随之

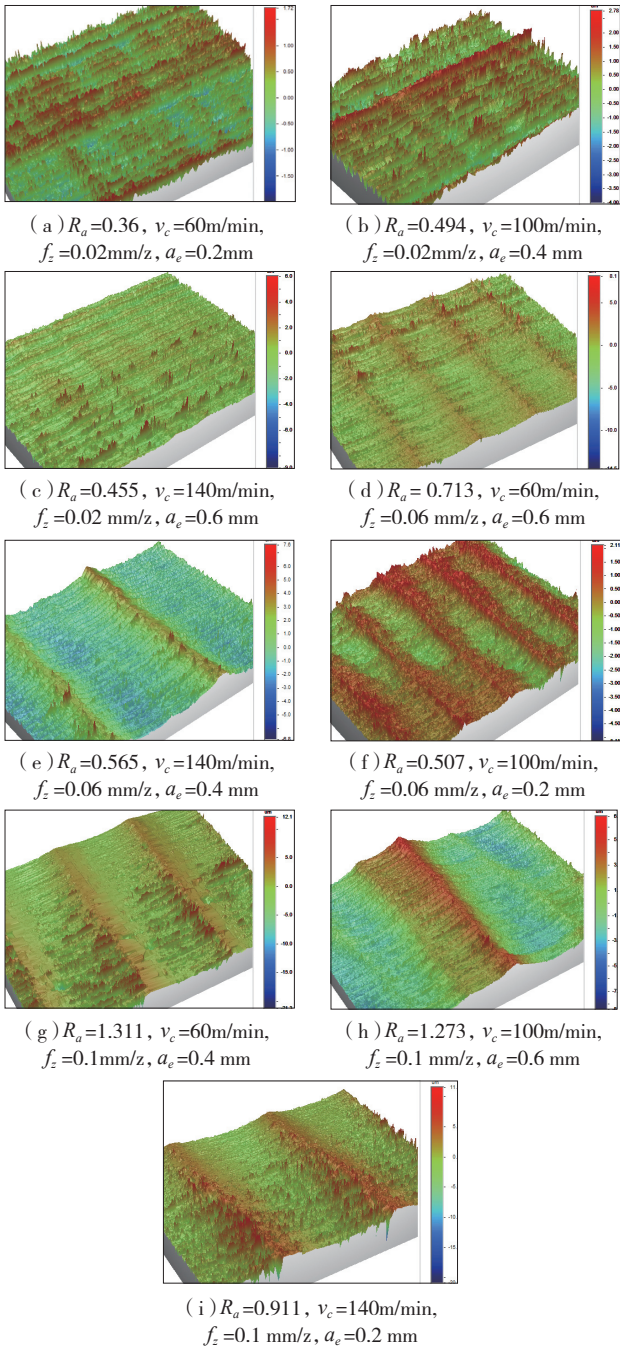


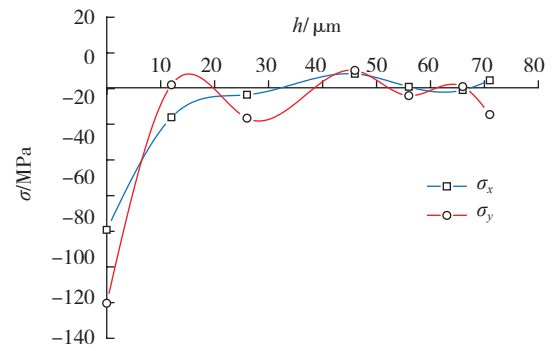
图4 工件铣削三维表面形貌

Fig.4 3D surface morphology of workpiece

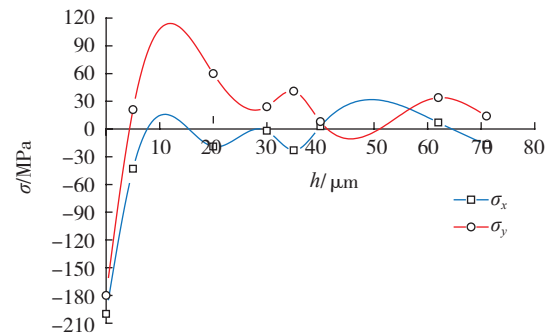
增大。因此,为了得到较好的加工表面形貌,宜采用每齿进给量小、铣削宽度较小、铣削速度大的加工参数。

2.3 残余应力场

图5为在相同铣削速度的情况下,每齿进给量和铣削宽度对残余应力沿深度变化曲线,两组参数加工的试样表面粗糙度经测试分别为 $R_a=0.45\mu\text{m}$ 和 $R_a=0.91\mu\text{m}$ 。侧铣加工时铣削速度不变的情况下,每齿进给量和铣削宽度增大,铣削力也随之增大,沿进给方向和垂直进给方向的残余压应力都升高。



(a) $R_a=0.36, v_c=60\text{m/min}, f_z=0.02\text{mm/z}, a_e=0.2\text{mm}$



(b) $R_a=1.311, v_c=60\text{m/min}, f_z=0.1\text{mm/z}, a_e=0.4\text{mm}$

图5 表层残余应力分布状态

Fig.5 Residual stress of surface layer

图5中(a)、(b)为铣削速度均为60m/min时,每齿进给量分别为0.02mm/z和0.1mm/z、铣削深度分别为0.2mm和0.4mm的表层残余应力沿深度分布规律,其中 h 为距离表面的表层深度。由图5(a)可知,当 $f_z=0.02\text{mm/z}, a_e=0.2\text{mm}$ 时,表面 x 和 y 方向的残余应力分别为-80MPa和-120MPa,表层基本呈残余压应力状态分布,残余应力影响层深度约为20~30 μm 。由图5(b)可知,当 $f_z=0.1\text{mm/z}, a_e=0.4\text{mm}$ 时,表面 x 和 y 方向的残余应力分别为-200MPa和-180MPa,在表面以下约10 μm 处 y 方向出现最大拉应力约为100MPa,之后随着表层深度增加,残余拉应力逐步减小,残余应力层深度约为40~50 μm 。由此可见,当每齿进给量和铣削深度增加时,虽然表面残余压应力增大,但表层却出现残余拉应力,实际应用中会给构件带来潜在的安全隐患。

2.4 表层显微硬度

图6为在不同每齿进给量和铣削宽度,表层显微硬度 H 沿深度 h 变化曲线。从图中可以看出,两种工艺参数下,最大显微硬度均出现在加工试件的表层部分,随后显微硬度逐渐下降,最终趋于材料基体硬度值,约为320HV。由图6硬度沿深度变化曲线可知,当铣削速度不变时,增大每齿进给量,第一变形区变大,刀具刃口圆弧半径的作用会加强,因此硬化深度和硬化程度均随之

增加;增大铣削宽度,其影响基本与每齿进给量类似,虽然硬化深度和硬化程度逐渐上升,但是影响较不明显。

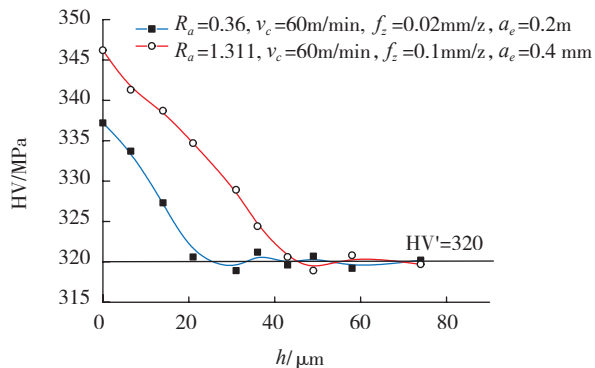
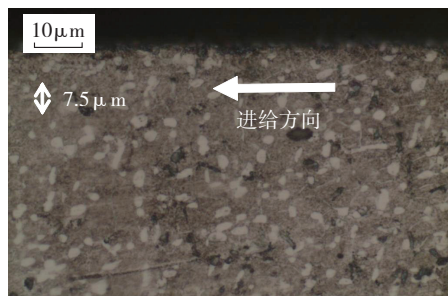


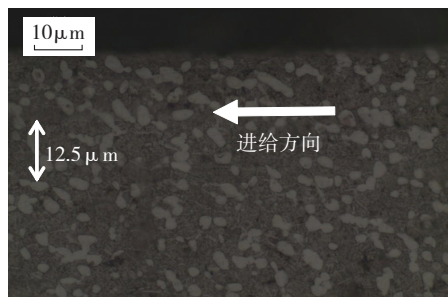
图6 表层硬度分布状态

Fig.6 Microhardness of surface layer

图7为不同工艺参数下沿铣削方向的纵断面通过金相显微镜观测的铣削表层微观组织结构图。在铣削过程中,铣削速度不变时,切屑由带状切屑转变为单元切屑,虽然切削点产生了瞬时最大升温,但在进给方向上即将被切削但尚未切削的部位,由于热源的迅速运动缩短了切削热向工件传导时间,因而切削前部位升温甚微,向工件传热较少,所以其铣削表层微观组织变化不大,其塑性变形层厚约 $7.5\mu\text{m}$;随着每齿进给量和侧铣宽度的增加,铣削力加大,切削点处瞬时温度升高,工件表面温度增高,因此材料表层塑性变形的作用有所增大,塑性变形层达到约 $12.5\mu\text{m}$,但是每齿进给量和铣削



(a) $R_a=0.36, v_c=60\text{m/min}, f_z=0.02\text{mm/z}, a_e=0.2\text{mm}$



(b) $R_a=1.311, v_c=60\text{m/min}, f_z=0.1\text{mm/z}, a_e=0.4\text{mm}$

图7 表层微观组织

Fig.7 Microstructure of surface layer

宽度的改变对材料微观组织产生的变化不明显。

3 结论

(1) 每齿进给量对侧铣加工表面粗糙度和形貌的质量影响较大,而铣削速度和铣削宽度对侧铣加工表面粗糙度和形貌的质量影响较小。因此,为了得到较好的加工表面粗糙度和形貌,应取用较小的每齿进给量。

(2) 侧铣加工表层残余应力主要呈压应力状态。在保证铣削速度不变的情况下,当每齿进给量和铣削宽度增大到一定程度时,表面残余压应力有所增大,但在表层出现残余拉应力,且残余应力层变深。

(3) 显微硬度最大值通常出现在试件的表层部分,随后呈下降趋势最终达到基体材料的硬度。当每齿进给量和铣削宽度增大时,材料的硬化深度和硬化程度有所增大。

(4) 侧铣加工表层有较小的塑性变形层,而每齿进给量和铣削宽度对塑性变形层的深度变化影响较小。

(5) 在试验参数范围内,当每齿进给量为 0.06mm/z 、铣削速度为 100m/min 、铣削宽度为 0.2mm 时,可以获得最好的表面完整性。

参考文献

- [1] 王美娇,孟祥军,廖志谦,等. Ti-1023 合金的研究现状. 材料开发与应用, 2009, 24(5): 66-69.
- [2] Jawahir I S, Brinksmeier E, Saoubi R M, et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60: 603-626.
- [3] Mantle A L, Aspinwall A E K. Surface integrity of a high-speed milled gamma titanium aluminide. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118: 143-150.
- [4] Sun J, Guo Y B. A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 4036-4042.
- [5] Che-Haron C H, Jawaid A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6%Al-4%V. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166: 188-192.
- [6] Che-Haron C H. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118: 231-237.
- [7] Velasquez J D P, Tidua A, Chevriert B B P, et al. Sub-surface and surface analysis of high speed machined Ti-6Al-4V alloy. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 2572-2578.
- [8] 杜随更,吕超,任军学,等. 钛合金 TC4 高速铣削表面形貌及表层组织研究. 航空学报, 2008, 29(6): 1710-1715.
- [9] 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. 西北工业大学学报, 2009, 27(4): 538-543.
- [10] 杨振朝,张定华,姚倡锋,等. 高速铣削速度对 TC4 钛合金表面完整性影响机理. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(5): 644-648.

(责编 亦非)