

球头铣刀结构参数对钛合金铣削表面完整性的影响*

Effect of Ball-End Milling Structural Parameters on Surface Integrity for Titanium Alloy Milling

西北工业大学 任军学 姚倡锋 田卫军 梁永收 杨碧琦

[摘要] 针对硬质合金球头铣刀铣削钛合金 TC17, 研究了不同刀具结构参数对表面粗糙度、表面形貌、残余应力和微观组织的影响。结果表明: 刀具参数选择前角 $\gamma_0=8^\circ$, 后角 $\alpha_0=12^\circ$, 螺旋角 $\beta=35^\circ$, 可获得最好的表面完整性, 表面粗糙度为 $0.40\mu\text{m}$, x 向残余压应力为 324MPa , y 向残余压应力为 218MPa , 表层组织无明显变化。

关键词: 钛合金 表面完整性 刀具结构参数

[ABSTRACT] Aiming at milling TC17 titanium alloy materials with carbide ball-end mill, effects of different ball-end cutter structural parameters on surface roughness, surface morphology, residual stress and micro-organizations are studied. The results show that when the rake $\gamma_0=8^\circ$, flank $\alpha_0=12^\circ$ and helix angle $\beta=35^\circ$, the best surface integrity for test pieces can be obtained. The surface roughness is about $0.40\mu\text{m}$, the residual compressive stress in x direction is 324MPa , the residual compressive stress in y direction is 218MPa . And surface integrity doesn't obviously change.

Keywords: Titanium alloy Surface integrity Structural parameters of ball-end milling

在航空发动机整体叶盘、机匣以及飞机的关键件中大量采用具有比强度高、热强度高、耐腐蚀等优良特性的钛合金材料, 但此类航空结构加工的一个共同特点就是材料切削加工性差, 具有切削温度高、单位面积上的切削力大、冷硬现象严重、刀具易磨损等问题, 这些会对已加工表面的完整性造成不利影响, 如表面粗糙度影响零件表面的耐磨性、抗腐蚀性、零件配合性质及疲劳强度和表面层的冷作硬化、尤其针对薄壁件, 残余应力极易引起变形, 使零件产生疲劳断裂, 影响零件使用寿命。

* 国家自然科学基金(50975237)、国家科技重大专项(2009ZX04014-053)、国家科技支撑计划(2008BAF32B10)、西北工业大学科技创新基金(2008KJ02018)、教育部重大项目(309026)资助项目。

因此, 十分必要开展钛合金加工表面完整性的研究。

国外对钛合金切削加工的表面完整性进行了积极的研究, Che-Haron^[1-2] 对车削钛合金的表面完整性进行了研究, 结果表明已加工表面存在微观组织的变化和显微硬度的增加。Rao^[3] 对高速切削钛合金的表面粗糙度进行了研究, 随着转速的提高表面粗糙度略有提高。Sridha^[4] 对铣削钛合金残余应力进行了研究, 结果表明在切削速度为 $11\sim 56\text{m}/\text{min}$ 内残余应力基本处于压应力状态, 且随铣削参数变化规律不能用线性来描述。国内史兴宽等^[5] 发现在钛合金高速切削条件下所获得的已加工表面粗糙度和残余应力明显低于常规速度。大量研究表明, 目前关于钛合金切削加工表面完整性的研究比较零散, 多集中在切削用量等方面, 对刀具几何参数对表面完整性的影响规律和机理研究还需要继续进行深入的分析和探讨。

本课题以球头铣刀的刀具参数为着眼点, 针对 TC17 钛合金的精密铣削, 展开精加工过程中刀具几何角度对表面完整性影响试验研究, 为 TC17 钛合金航空结构件的精加工提供加工参数选择依据。

1 钛合金铣削试验与表面完整性测试

1.1 钛合金铣削试验

本课题主要分析铣削过程中球头铣刀几何参数对 TC17 表面完整性的影响。为了反映球头刀实际切削状态, 试验方案规划如图 1 (a) 所示, 将整个试件分割成 A、B、C、D 区 4 个加工区域, 各加工区域对应的刀具几何参数如表 1 所示。铣削在 JOHNFOR D VMC-850 三坐标加工中心进行, 采用顺铣, 乳化液冷却方式, 试验现场如图 1 (b) 所示。

铣削参数在保证相同铣削速度 $v_c=110\text{m}/\text{min}$ 的条件下进行选择, 切削试验采用 8 把 4 齿整体硬质合金刀具, 刀具直径为 $\phi 5$ 、 $\phi 7$ 、 $\phi 10$, 对应主轴转速选择为: $n_{\phi 7}=5\ 000\text{r}/\text{min}$, $n_{\phi 10}=3\ 500\text{r}/\text{min}$, $n_{\phi 5}=7\ 000\text{r}/\text{min}$; 侧吃刀量选为 $a_e=0.3\text{mm}$, 背吃刀量为 $a_p=0.2\text{mm}$; 每齿进给量均为 $F_z=0.05\text{mm}/z$ 。

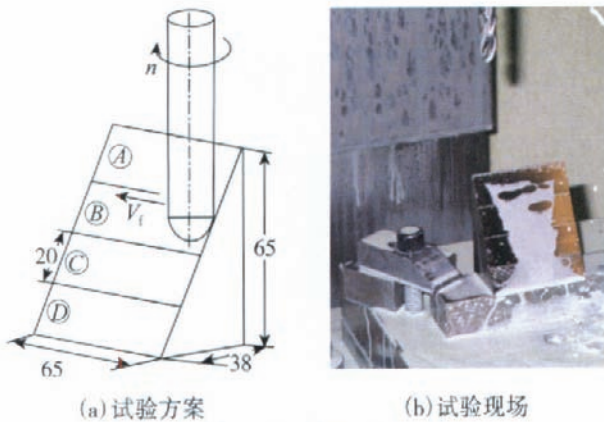


图1 切削试验方案

Fig.1 Cutting experiment scheme

表1 球头铣刀几何参数选取

试件	工况	区号	直径/mm	前角/(°)	后角/(°)	螺旋角/(°)
1号	1	A	7	6	10	35
	2	B	7	8	10	35
	3	C	7	12	10	35
	4	D	7	8	12	35
2号	5	A	7	8	10	25
	6	B	7	8	10	40
	7	C	5	8	10	35
	8	D	10	8	10	35

1.2 表面完整性测试

表面完整性是由美国金属切削研究协会1964年首次提出的,主要包含2方面:①与表面形貌或表面纹理组织相关,包括表面几何形状、表面粗糙度、波度、表面缺陷等;②与加工表层物理力学性能状态相关,包括表面变质层成分和组织、表层残余应力、表层显微硬度等。长期以来,人们一直把表面几何特征(如表面粗糙度等)作为衡量表面加工质量的主要依据,并普遍认为表面粗糙度与零件的使用性能之间存在着直接关系;实际上,许多重要零件结构的损坏多是从表面之下几十微米范围内开始的,表面之下的冶金物理和机械性能变化对零件使用性能的影响很大。根据美国表面完整性指南,对表面完整性评价可用3个级别标准,即最少数据组、标准数据组和扩展数据组^[6]。

本课题选用最少数据组作为评价钛合金铣削的表面完整性的标准,主要进行表面粗糙度、表面形貌、残余应力和微观组织的测试和分析。表面粗糙度采用了英国TAYOR-HOBSON粗糙度测试仪,在铣削区域中间处各取5个点测量粗糙度取平均值,取样长度为0.8mm,

评定长度为5.6mm;加工表面残余应力采用日本理学D/max-2200PC型X射线衍射仪,对铣削后沿进给和垂直方向的表面进行了测量;表面形貌和微观组织采用德国DMI5000M倒置金像显微镜图像仪测试。

2 试验结果与分析

2.1 表面粗糙度及表面形貌

表面粗糙度是指加工表面具有的较小间距和微小峰谷不平度。其两波峰或两波谷之间的距离(波距)很小(在1mm以下),用肉眼是难以区别的,因此它属于微观几何形状误差。表面粗糙度越小,则表面越光滑。

图2为表面粗糙度测量结果,从图中可以看出对刀具前角和后角增大时,粗糙度略有下降,而刀具直径和螺旋角则不同,随着刀具直径的增加,粗糙度值 R_a 会出现转折点,呈现出先减小后增大的趋势。

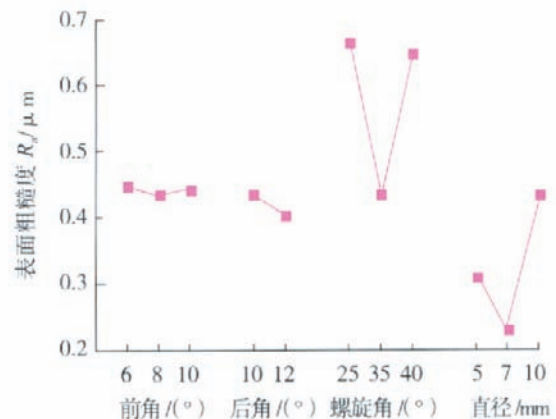


图2 粗糙度随刀具结构参数的变化

Fig.2 Variation of roughness with tool structural parameters

前角 γ_0 由 $6^\circ \sim 12^\circ$ 逐渐增大时,使刀刃变得锋利,切削更为轻快,切削力减小,系统的振动减小,切削变形和摩擦减小,所以表面粗糙度具有减小的趋势。后角 α_0 的主要功用是减小后刀面与工件间的摩擦和后刀面的磨损,并配合前角调整切削刃的强度和锋利程度,当后角 α_0 由 $10^\circ \sim 12^\circ$ 增大时,后角后刀面与已加工表面弹性恢复层的摩擦减小,加工表面的冷作硬化程度减小,所以有利于工件的表面粗糙度减小。螺旋角和刀具直径对粗糙度影响都出现了转折点,当螺旋角 β 由 $25^\circ \sim 35^\circ$ 增大时,可以减少振动,增大了实际工作前角和切屑卷曲半径,从而排屑顺畅,有利于提高表面质量。但是当螺旋角 β 由 $35^\circ \sim 40^\circ$ 增大时,引起轴向力增大,零件表面质量有所下降。当刀具直径由 $5 \sim 7$ mm增大时,使得铣刀轴心强度和刚度增强,使切削过程平稳,所以可以获

得较小的表面粗糙度,但是当刀具直径过大时,不仅增大了铣削转矩,增加动力消耗,而且还会引起振动,所以降低了表面粗糙度。

图3是不同刀具几何参数下的铣削表面中间部位的表面形貌,可以看出表面形貌在工况4时,刀具几何参数选择前角 $\gamma_0=8^\circ$,后角 $\alpha_0=12^\circ$,螺旋角 $\beta=35^\circ$,每刀纹理相对均匀、两刀之间纹理的一致性最好,与表面粗糙度的测量结果一致。工况5和工况6在螺旋角的2个边缘时,已加工表面明显出现了振纹。工况7时,振纹更加明显,这主要是由于刀具直径的减小,引起了切削

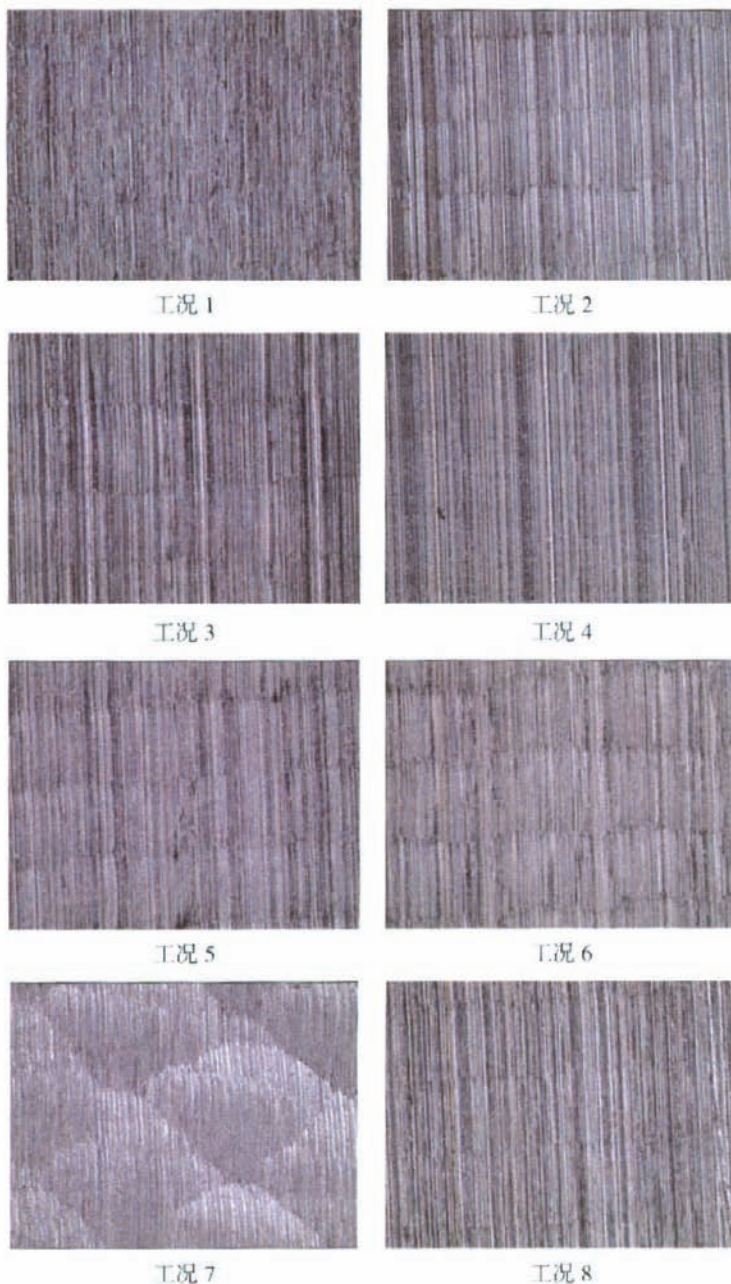


图3 表面形貌
Fig.3 Surface profile

过程的振动而造成的。工况1和工况8未出现明显振纹,切削过程相对稳定,但是纹理分布不是很均匀,两侧纹理较粗,中间分布较密,两刀之间纹理的一致性很差。

2.2 表面残余应力

铣削加工中加工表面不同位置其残余应力也是不同的,具有一定的分散性,本研究测试了每一试件同一位置的 x 和 y 向的表面残余应力,图4为不同刀具几何参数下的残余应力。

从图中可以看出,在刀具前角由 $6^\circ\sim 12^\circ$ 增大过程中,残余应力在 x 方向都表现出压应力, y 方向的残余应力由拉应力向压应力状态过渡,但是总体在2个方向随着前角的增大呈现出增大的趋势。刀具前角的变化,影响到刀具表面应力分布,即影响到表面机械力载荷和热载荷特性和大小,从而最终影响到已加工表面的残余应力,

随着后角的增大, x 和 y 向的残余压应力呈现线性增大的趋势,并均表面出压应力。在切削过程中,刀具后刀面对工件表面的法向力和摩擦力作用占据主导作用,随着刀具后角的变化,刀具后刀面与已加工表面的接触长度及其摩擦特性也随之变化,即会影响到已加工(分离表面的一部分)分布力载荷和热载荷,从而最终影响到已加工表面残余应力,后角越小,该接触长度增大,后刀面摩擦加剧。

当螺旋角增大时,出现了转折点。在 35° 时, y 方向的残余压应力减小很快。

刀具直径在增大的过程中可以看出残余应力出现减小的趋势。

2.3 微观组织

图5是不同刀具几何参数下,试件中心位置表层微观组织照片(放大500倍)。从图中可以看出,工况1、2基体为网篮组织,边缘看不到热影响区。3号区基体为网篮组织,热影响区很明显。热影响区应该是温度过高,发生氧化的原因。温度过高会引起金属与空气中的一些气体发生反应,其中主要是氧化反应。氧为 α 相稳定元素,它渗入金属中会促使 α 相的形成,从而在组织中观测到更多的呈现白色的 α 相。5号基体组织比较杂乱,有大块 α 相存在,但在试样表面没有观察到热影响区,铣削对组织影响不大。8号热影响区不大。工况4的铣削表面表层微观组织变化不大,没发现热影响区。

在高速切削条件下,切屑会由带状切屑转

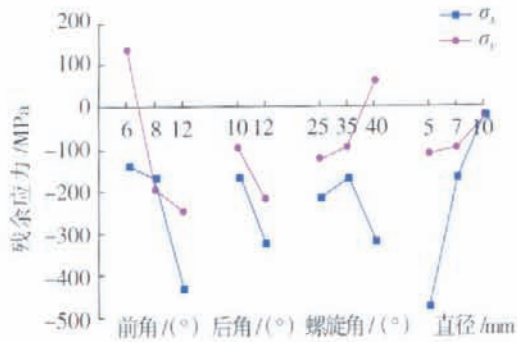


图4 表面残余应力随刀具结构参数的变化

Fig.4 Variation of residual stress with tool structural parameters

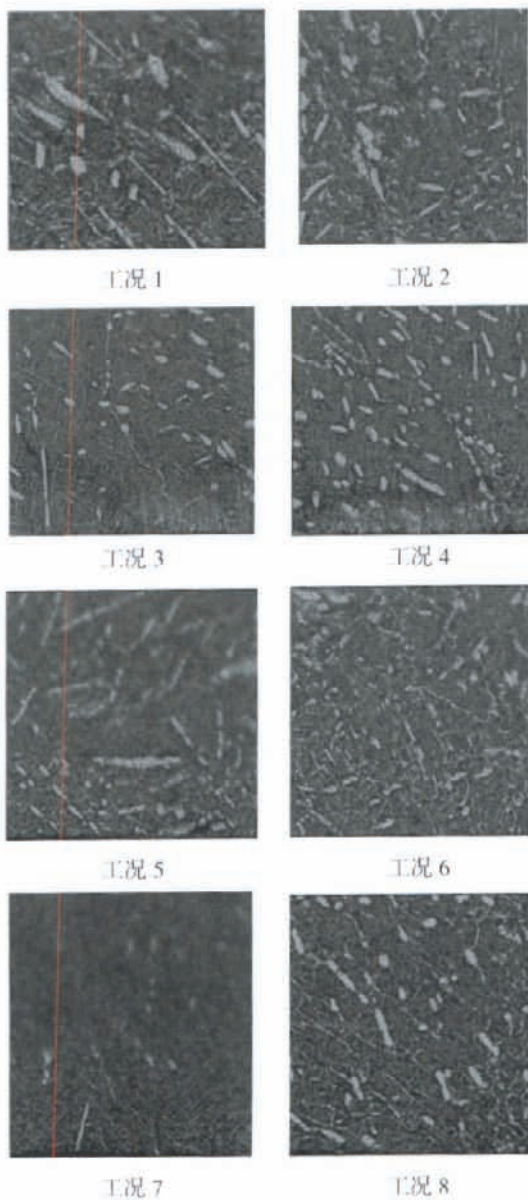


图5 不同刀具几何参数下的微观组织

Fig.5 Microstructure in different tool structural parameters

变为单元切屑,切屑与前刀面的摩擦不再是切削力和切削热的主要来源之一。虽然切削点产生了瞬时最大温升,切屑和刀具的温度很高,但由于主要的切削热由切屑带走,刀尖和切屑的热在进给方向给工件已加工面的传导时间非常短,因此切削表面的升温还不能使钛合金产生相变,微观组织没有产生明显变化。

3 结论

① 球头铣刀螺旋角和直径对表面粗糙度影响显著,而前角和后角对表面粗糙度影响不大。以表面粗糙度为追求目标,可选择螺旋角 35°,直径 7mm;前角和后可选择试验范围内的任意参数。

② 表面残余应力在 x 方向都呈现为压应力状态,在前角和螺旋角发生变化时, y 方向的残余压应力出现明显的“拐点”。前角和螺旋角对残余压应力影响最大,如果选择不当,会产生拉应力。以“低应力”为追求目标,可以选择 8° 或者 12° 的刀具前角; 10° 或者 12° 的刀具后角; 25° 或者 35° 的螺旋角; 刀具直径选择 5mm 或者 7mm。

③ 球头铣刀的结构参数对表层微观组织的影响不大,表面组织基本呈网篮状,与材料基体组织状态基本保持一致。

④ 在试验参数范围内,为获得最好的表面完整性,可选择前角 $\gamma_0=8^\circ$,后角 $\alpha_0=12^\circ$,螺旋角 $\beta=35^\circ$,刀具直径为 7mm。在该组切削参数下,表面粗糙度可以达到 0.40 μ m, x 向残余压应力为 324MPa, y 向残余压应力为 218MPa。

参 考 文 献

[1] Che-Haron C H. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy. Journal of Materials Processing Technology, 2000(18) 231-237.

[2] Che-Harona C H, Jawaid A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6Al-4V. Journal of Materials Processing Technology, 2005 (166) : 188-192.

[3] Balkrishna Rao. Modeling and analysis of high speed machining of aerospace alloys[D], Indiana: Purdue University, 2004.

[4] Sridhar B R, Devananda G, Ramachandra K, et al. Effect of machining parameters and heat treatment on the residual stress distribution in titanium alloy IMI-834 Journal of Materials Processing Technology, 2003 (139): 628-634.

[5] 史兴宽,杨巧凤. 钛合金 TC4 高速铣削表面完整性的研究. 航空制造技术,2001 (1) : 30-35.

[6] 美国可切削性数据中心. 机械加工切削数据手册第三版第二卷. 北京:机械工业出版社,1989. (责编 岩石)