

切削速度对钛合金高速铣削加工表面层相变的影响

薛超义, 李安海, 周咏辉, 吕明航, 葛德俊

山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点试验室;
机械工程国家级实验教学示范中心(山东大学)

摘要: 加工过程中材料的局部相变会直接影响表面完整性的变化。本文研究了 Ti-6Al-4V 钛合金加工过程中相变与切削参数的关系,通过对 Ti-6Al-4V 合金进行铣削加工,分析了不同切削速度下铣削力的变化规律。分析了 X 射线衍射(XRD)图谱和扫描电镜(SEM)图像,研究了铣削参数对加工表面物相比例和塑性变形的影响。结果表明:加工表面发生了相变且 XRD 图谱中的峰值向右偏移;与基体相比,加工表面的 α 相比例减小, β 相比例增加;在高速切削过程中,切削力、表面硬度和表面残余应力随切削速度的增加而减小,塑性变形层的厚度逐渐增大。在 Ti-6Al-4V 合金的高速铣削过程中,加工表面层是由热-机械-微观组织耦合作用产生,包括高温软化、强应力和塑性变形以及微观组织相变。

关键词: 钛合金;相变;硬度;残余应力

中图分类号: TG506;TH161.14

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2021.11.004

Phase Transformation Influence of Machined Surface Layer in High-speed Milling of Ti-6Al-4V Alloy

Xue Chaoyi, Li Anhai, Zhou Yonghui, Lv Minghang, Ge Dejun

Abstract: Changes in surface integrity are directly affected by the local phase transformations of materials during machining process. This work investigates the relationship between the cutting parameters and phase transformations during machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. The milling experiments of Ti-6Al-4V alloy is conducted, and the variation of milling force under different cutting speeds is analyzed. By observing X-ray diffraction (XRD) patterns and scanning electron microscopy (SEM) images, the effects of milling parameters on the dual-phase ratio and plastic deformation of machined surfaces are studied. The results show that phase transformations occur on the machined surface and the peak values in the XRD patterns are shifted to the right. Compared with the substrate, the α phase on the machined surface layer decreases, whereas the β phase increases. In high-speed machining process, the cutting force, surface hardness and surface residual stress decrease with the increase of cutting speed. With the increase of cutting speed, the thickness of the plastic deformation layer increases gradually. In high-speed milling of Ti-6Al-4V alloy, the machined surface layers are generated by the synergistic interactions among the thermo-mechanical-microstructural effects in terms of the high temperature softening, the intense stress and deformation evolution, the microstructural phase transformation of workpiece material.

Keywords: titanium alloy; phase transformation; hardness; residual stress

1 引言

Ti-6Al-4V 钛合金因具有耐高温、耐腐蚀性强、机械强度高、生物相容性好等优良性能,被广泛应用于航空航天、船舶、生物医学等领域^[1]。然而, Ti-6Al-4V 导热系数低和弹性模量低的特性使其成为难加工材料^[2]。

高速加工是一种强塑性变形过程,并通过剧烈的热-机械耦合作用诱发相变和动态再结晶^[3]。钛

合金切削过程中,刀具对加工表面的作用可以分为快速加压升温阶段和卸载冷却阶段,在这两个阶段, Ti-6Al-4V 的表面组织发生相变,导致其力学性能发生变化,进而影响钛合金零件的使用性能和寿命。

目前, Ti-6Al-4V 的相变研究主要集中在锻造、焊接、激光加工等热变形过程,对切削过程中的相变研究较少。Bayoumi A. E. 等^[4]利用 X 射线衍射(XRD)分析 Ti-6Al-4V 切屑剪切带内的物相发现,切屑的剪切带中可以观察到非扩散相变($\beta \rightarrow \alpha$)过程。而 Puerta Velásquez J. D. 等^[5]研究发现在剪切带中未发生相变。Wan Z. P. 等^[6]利用透射电子显微镜(TEM)观察到剪切带中 β 相转变为 α' 相的马氏体相变。Liang X. 等^[7]研究发现, β 相的相对峰

基金项目: 国家自然科学基金(51605260);山东省重点研发计划—重大科技创新工程(2019JZZY010114);山东大学青年学者未来计划(2018WLJH57)

收稿日期: 2021年4月

值强度和相体积分数的下降是因为刀具磨损引起的马氏体相变所致。Xu X. 等^[8]发现 β 相的析出对位错有明显的钉扎效应。Pan Z. 等^[9]基于 Avrami 方程建立了不考虑 Ti-6Al-4V 切削过程中应力状态的相变模型。Wang Q. 等^[10]为了模拟 Ti-6Al-4V 高速切削过程中的相变现象,基于相变动力学建立了快速加热和冷却相变模型。文献[11-14]开发了马氏体相变相场模型来预测相应的组织演变。Wan M. 等^[15]发现残余应力是工件在热-机耦合作用下内应力的副产物,在切削过程结束后并没有完全释放。Liang X. 等^[16]研究证明,残余应力是表面完整性的重要组成部分,会影响工件的强度、使用寿命和耐腐蚀性。Song X. 等^[17]研究发现多步切割和预应力切割都能显著增加残余压应力。

本文对 Ti-6Al-4V 合金进行了铣削试验,研究了相变对铣削过程中切削力、残余应力和表面变形层的影响。

2 铣削试验

试验材料为 Ti-6Al-4V 合金,其元素组成及物理力学性能分别见表 1 和表 2。Ti-6Al-4V 合金的初始组织由 α 相和 β 相晶粒组成,其含量分别为 92.3% 和 7.7%。试验所用机床为 ACE-500 三轴立式加工中心,铣削刀具为硬质合金涂层刀具,型号为 XOMX090308TR-M08, F40M, 刀具前角为 10.5° , 后角为 15° 。刀柄直径为 25mm, 型号为 R217. 69-2525. 0-09-3AN。采用干切削顺铣方式,使用 Kistler9257B 测力仪采集加工过程中的铣削力。图 1 为铣削试验装置及加工原理。

表 1 Ti-6Al-4V 合金化学成分

元素	Ti	Al	V	Fe	O+N
含量(wt.%)	余量	4.83~6.85	2.31~4.2	0.17	0.19

表 2 钛合金在室温下的力学性能

密度 (kg/m^3)	热导率 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比
4430	7.3	≥ 875	≥ 782	108	0.33

以切削速度为变量,速度变化范围为 80~320m/min,具体切削参数见表 3。为了避免刀具磨损对试验结果造成影响,每次切削都使用新刀具。对加工后的工件进行线切割得到 $15\text{mm}\times 8\text{mm}\times 8\text{mm}$ 的检测试样。利用 XRD 对加工表面进行表征,得到 X 射线衍射图谱并测得物相比例。使用扫描电镜(SEM)拍得样品截面图像进行分析。在进行 SEM 试验前,先对样品进行研磨抛光,然后用腐

蚀溶液(3mL HF, 5mL HNO_3 , 100mL 水)腐蚀 20s, 以得到试验观察表面。

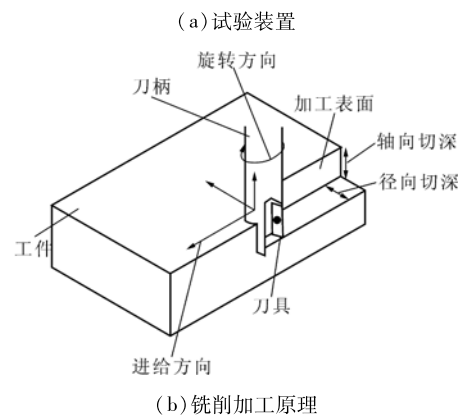
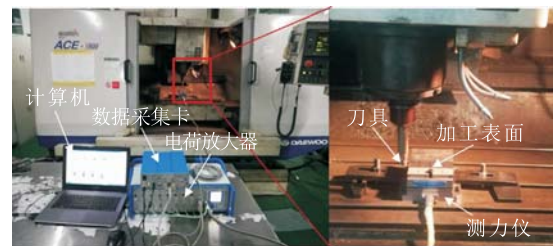


图 1 铣削试验装置以及加工原理

表 3 铣削试验参数

切削参数	轴向切深 a_p (mm)	径向切深 a_e (mm)	每齿进给量 f_z (mm/z)	切削速度 v_c (m/min)
参数范围	1	1	0.05	80, 120, 160, 200, 240, 280, 320

3 试验结果与分析

3.1 切削速度对切削力的影响

图 2 为不同切削速度下测得的平均切削力 F_y , 可见,当切削速度从 80m/min 增至 120m/min 时,切削力 F_y 增加;当切削速度从 120m/min 增至 320m/min 时,切削力 F_y 减小。切削力这一变化趋势与 Zang J. 等^[18]的研究结果一致。这主要是因为低速切削时,随着切削速度的增加,钛合金的塑性变形逐渐增大,进而增大了切削力。随着切削速度的进一步提高,钛合金切削层的热量不能及时释放,导致切削热积聚,温度升高。较高的切削温度使 Ti-6Al-4V 的加工表面软化,流动塑性增加,切削力降低。Zhang X. 等^[19]研究发现,切削力随着切削速度的增加而减小。Li A. 等^[20]研究表明,在低速切削时温度升高不明显。由图 2 可以发现,当切削速度从 160m/min 增至 240m/min 时,切削力的变化幅度相对较小,这是因为钛合金的加工表面热软化变化幅度较低,导致切削力变化幅度较小。当切削速度从 240m/min 增加到 320m/min 时,加工表面的切削温

度升高使得软化程度增加,提高了加工表层的流动性,切削力也随之明显降低。

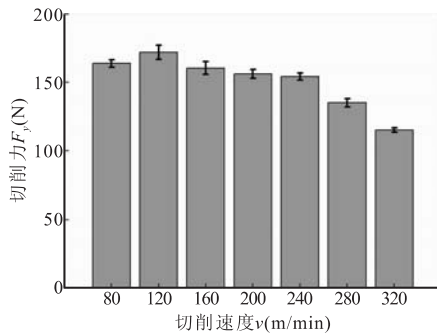


图2 不同切削速度下的平均切削力

3.2 切削速度对残余应力的影响

残余应力产生的原因包括:材料塑性变形不均匀;不同的冷却速率导致材料不同部位的热变形不同;相变使得材料体积发生相应的变化^[21]。试验通过X射线衍射法测定工件铣削表面的残余应力,在钛合金切削加工表面随机选取3个点进行测量,并取平均值。

图3为切削速度对Ti-6Al-4V加工表面残余应力的影响。由于测量的应力为负值,所以切削表面的残余应力是压应力。由图可见,在200~320m/min范围内,表面残余压应力随切削速度的增加而增大。这是因为残余应力的最终状态是由热-力耦合作用产生,随着切削速度的增加,加剧工件表面塑性变形,从而导致残余压应力增大。此外,切削过程中的相变使得加工表面物相比例发生变化,由于钛合金中 α 相和 β 相的晶体结构不同, α 相是密排六方结构, β 相是体心立方结构,加工表面物相的变化使晶格发生畸变,从而产生残余应力。因此,切削过程中的相变也会对残余应力产生影响。

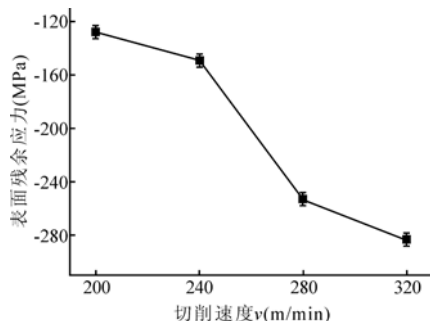


图3 Ti-6Al-4V 铣削表面残余应力

3.3 切削速度对显微硬度的影响

在切削加工过程中,钛合金表层受刀具的挤压和摩擦产生剧烈的塑性变形,使工件的晶粒严重扭曲、拉长和纤维化,阻碍了工件进一步变形,使加工表面硬度提高,塑性降低。Hou G. 等^[22]研究发现,

较高的切削温度对软化深度有很大影响,在切削过程中,加工表面发生剧烈的塑性变形,产生的大量切削热使加工表面软化,降低加工表面的硬化程度。根据Hall-Petch公式^[23],硬度变化可以反映晶粒尺寸的演变,硬度越大,晶粒尺寸越小。

图4为不同切削速度下工件的加工表面和亚表面的显微硬度。从图中可以看到,当切削速度从80m/min增至320m/min时,显微硬度值在深度方向上的变化趋势相同,加工硬化层深度约为120 μ m。在20~160 μ m范围内,显微硬度值逐渐下降;在120~160 μ m范围内,硬度值基本稳定,达到基体硬度;在0~20 μ m范围内,硬度有增大的趋势。这是因为切削过程中加工表面温度较高,使得加工表面软化,硬度降低,因此表层硬度低于20 μ m处的硬度。而在20~160 μ m范围内,亚表面温度低于表层温度,热软化程度降低,显微硬度主要受塑性变形的影响。随着切削深度的增加,塑性变形程度逐渐降低。因此,显微硬度值随着切削深度的增加而逐渐降低,直至达到基体硬度。

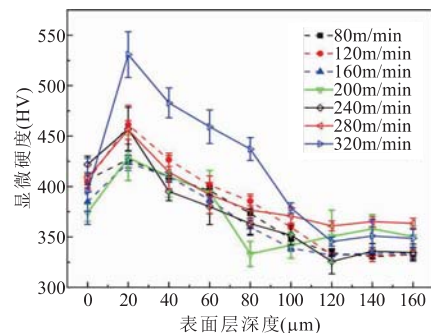


图4 不同切削速度下的显微硬度

图5为高速切削过程中切削速度对钛合金加工表面硬度的影响。可以看出,在240~320m/min范围内,表面硬度值随着切削速度的增加而降低。这是因为在高速加工中,虽然提高切削速度会加剧加工表面的塑性变形,但也产生了更高的切削温度,导致加工表面的热软化程度增加,硬度降低。

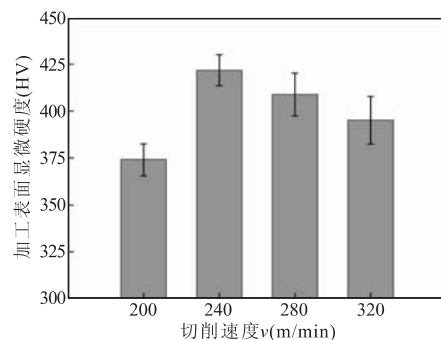


图5 钛合金高速切削表面硬度

3.4 切削速度对微观组织的影响

由于钛合金加工表面受到热-力耦合作用,加工后局部变形层的微观结构发生了变化。Li A. 等^[24,25]发现,工件加工表面主要发生剪切应变,而且随着切削速度的增加,剪切应变逐渐减小,最大应变速率增大。

图6为通过扫描电镜观察到的钛合金变形层显微组织。从图中可以看出,在刀具作用下,钛合金的加工表面发生了严重的塑性变形,晶粒塑性变形程度自基体向加工表面方向逐渐加剧,加工表面晶粒沿切削方向被严重扭曲和拉伸,呈纤维状,并产生晶粒细化。通过比较图6a~图6c可以看出,当切削速度从200m/min增至280m/min时,钛合金的塑性变形层深度增加,因为在切削过程中,切削速度的增加使得切削刃附近局部温度升高,在高温作用下,加工表面发生热软化,热软化的影响层深度会随着切削温度的提高而增加,从而增加塑性变形层深度。

Ti-6Al-4V是一种双相($\alpha + \beta$)合金,其 α 相和 β 相分别为密排六方结构和体心立方结构, α -Ti独立滑移系数目为4, β -Ti的独立滑移系数目为12。由于 β -Ti独立滑移系较多,在切削过程中更容易发生塑性变形。随着切削速度的增加,切削温度升高,加工表面发生相变,大量的 α 相转变为 β 相,从而加剧切削层塑性变形程度。因此,当切削速度增加时,工件表面发生热软化和相变,从而加剧晶粒扭曲拉伸程度和塑性变形层深度。

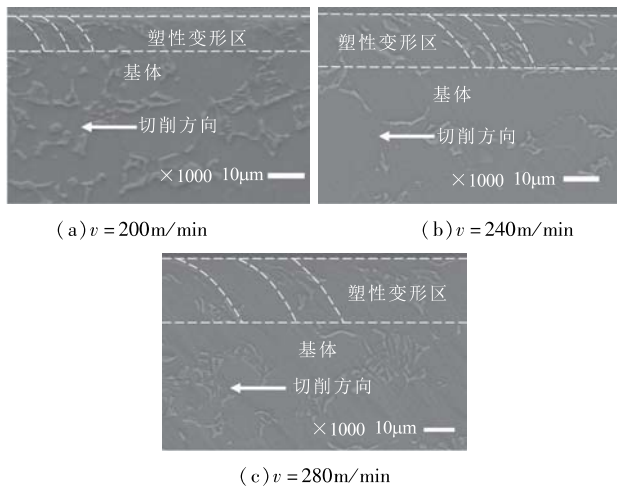


图6 切削层微观组织

3.5 切削速度对加工表面层相变的影响

由于Ti-6Al-4V合金是双相($\alpha + \beta$)钛合金, α 相和 β 相晶体结构不同,物理力学性能存在差异,因此了解加工过程中的相变至关重要,高应力和快速加热可以促进 α 相向 β 相的转变过程^[26]。然而,

切削过程中的相变机制与常规热处理不同,这主要归因于以下原因:机械载荷和剧烈的变形;快速加热和冷却过程;被加工表面与环境之间的热交换^[27]。图7为不同切削速度时的工件加工表面 α 相和 β 相的物相比例。结果表明,与基体相比,加工表面的 α 相减少, β 相增加。加工表面物相比例发生改变,表明在切削加工过程中发生了相变。

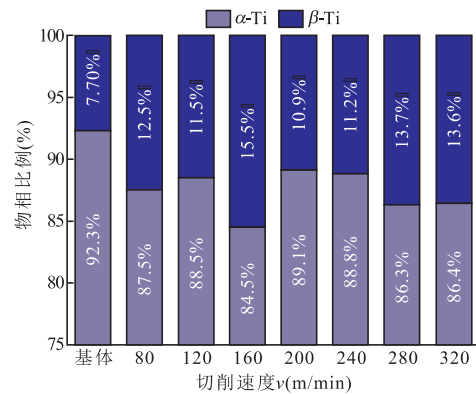


图7 不同切削速度下的加工表面物相比例

在热-力耦合作用下,切削过程中的相变可以分为两个阶段:加工过程中的瞬时加压升温阶段和切削完成后的快速冷却阶段。切削过程中,刀具作用下的加工表面产生剧烈的塑性变形,切削刃附近局部温度升高,加工表面发生相变,大量的 α 相转变为 β 相。切削完成后,工件表面快速冷却,当表面温度低于 β 相转变温度时, β 相开始转变为 α 相,冷却速率影响 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变结果。由于 β 相的独立滑移系数量多于 α 相,因此 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变过程加剧了切削层的塑性变形,在热软化和相变的共同作用下降低了切削力。由图7可知,加工表面 β 相的比例高于基体,而 α 相为硬相, β 相为软相,钛合金加工表面 β 相的增加降低了加工表面的显微硬度。因此加工表面显微硬度是塑性变形、热软化和相变共同作用的结果。

图8为Ti-6Al-4V在不同切削速度下加工表面的XRD衍射图谱。根据 α 相、 β 相衍射角的对应关系以及衍射强度确定各衍射峰对应的物相类型。从XRD衍射谱图中可以看出,与基体材料相比,加工表面的衍射峰向右偏移,这是由于钛合金加工表面晶格畸变所致。切削速度为80m/min,120m/min,160m/min,320m/min时,峰值向右偏移距离较大。切削速度在200m/min,240m/min,280m/min之间时,峰值向右偏移距离较小。峰值的偏移与晶格参数的变化有关。根据布拉格定律, θ 值越大,晶面间距 d 越小,表明切削加工引发晶格收缩,产生了残余

压应力。

综上所述,在铣削过程中,Ti-6Al-4V合金加工表面在热-力耦合作用下发生相变,降低了加工表面硬度,影响了切削力和残余应力的变化。在高温软化、微观组织塑性变形以及工件材料的相变协同作用下对加工表面层产生影响。

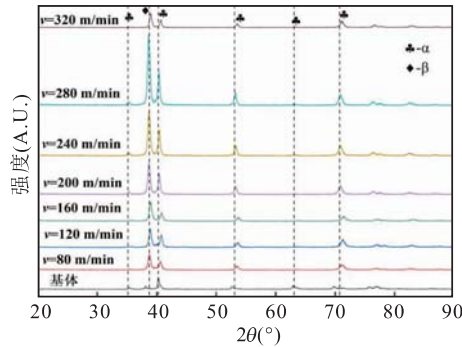


图8 Ti-6Al-4V基体和加工表面XRD衍射图谱

4 结语

通过对Ti-6Al-4V钛合金进行铣削试验,分析了不同切削速度对加工表面微观组织的影响,得出以下结论:

(1)当切削速度从80m/min增至120m/min时,切削力增加;但当切削速度为120~320m/min时,在相变和热软化的共同作用下,切削力随着切削速度的增加而减小。

(2)与基体相比,加工表面 α 相比例减少, β 相比例增加,降低了加工表面的硬化程度。在20~160 μm 范围内,硬度值随切削深度的增加而进一步降低,直至趋于稳定并达到基体硬度值。在热软化和相变的共同作用下,加工表面硬度值低于20 μm 处的硬度值。

(3)Ti-6Al-4V加工表面的XRD衍射峰相对于基体的衍射峰向右偏移,偏移原因主要由残余压应力、塑性变形和相变引起的晶格收缩引起。

(4)在高温软化、微观组织塑性变形以及工件材料相变协同作用下对加工表面层产生影响。

参考文献

[1] Veiga C, Devim J P, Loureiro A J R. Properties and applications of titanium alloys: a brief review [J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2012, 32(2): 133-148.
 [2] Ezugwu E O, Wang Z M. Titanium alloys and their machinability—a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 68(3): 262-274.
 [3] Wan Z P, Zhu Y E, Liu H W, et al. Microstructure evolution

of adiabatic shear bands and mechanisms of saw-tooth chip formation in machining Ti6Al4V [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 531: 155-163.
 [4] Bayoumi A E, Xie J Q. Some metallurgical aspects of chip formation in cutting Ti-6wt. % Al-4wt. % V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 1995, 190(1): 173-180.
 [5] Puerta Velázquez J D, Bolle B, Chevrier P, et al. Metallurgical study on chips obtained by high speed machining of a Ti-6wt. % Al-4wt. % V alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 452-453: 469-474.
 [6] Wan Z P, Zhu Y E, Liu H W, et al. Microstructure evolution of adiabatic shear bands and mechanisms of saw-tooth chip formation in machining Ti-6Al-4V [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 531: 155-163.
 [7] Liang X, Liu Z, Wang Q, et al. Tool wear-induced microstructure evolution in localized deformation layer of machined Ti-6Al-4V [J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(8): 3636-3651.
 [8] Xu X, Zhang J, Liu H, et al. Grain refinement mechanism under high strain-rate deformation in machined surface during high speed machining Ti6Al4V [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 752: 167-179.
 [9] Pan Z, Liang S Y, Garmestani H, et al. Prediction of machining-induced phase transformation and grain growth of Ti-6Al-4V alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1-4): 859-866.
 [10] Wang Q, Liu Z, Yang D, et al. Metallurgical-based prediction of stress-temperature induced rapid heating and cooling phase transformations for high speed machining Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials & Design, 2017, 119: 208-218.
 [11] Levitas V I, Javanbakht M. Surface tension and energy in multivariant martensitic transformations: phase-field theory, simulations, and model of coherent interface [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(16): 165701.
 [12] Levitas V I, Javanbakht M. Surface-induced phase transformations: multiple scale and mechanics effects and morphological transitions [J]. Physical review letters, 2011, 107(17): 175701.
 [13] Levitas V I, Roy A M. Multiphase phase field theory for temperature and stress-induced phase transformations [J]. Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics, 2015, 91(17): 174109.
 [14] Levitas V I, Roy A M, Preston D L. Multiple twinning and variant-variant transformations in martensite: Phase-field approach [J]. Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics, 2013, 88(5): 054113.
 [15] Wan M, Ye X, Wen D, et al. Modeling of machining-induced residual stresses [J]. Journal of Materials Science,

- 2019,54(1):1-35.
- [16] Liang X, Liu Z, Wang B. State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys; a review [J]. *Measurement*, 2019, 132:150-181.
- [17] Song X, Li A, Lv M, et al. Finite element simulation study on prestress multi-step cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(5-8):2761-2771.
- [18] Zang J, Zhao J, Li A, et al. Serrated chip formation mechanism analysis for machining of titanium alloy Ti-6Al-4V based on thermal property [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(1-4):119-127.
- [19] Zhang X, Luo M, Zhang D. High performance cutting of titanium alloy based on the thermo-mechanical coupling effect [J]. *Procedia CIRP*, 2018, 77:126-129.
- [20] Li A, Zang J, Zhao J. Effect of cutting parameters and tool rake angle on the chip formation and adiabatic shear characteristics in machining Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(7-8):3077-3091.
- [21] Rossini N S, Dassisti M, Benyounis K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components [J]. *Materials & Design*, 2012, 35:572-588.
- [22] Hou G, Li A, Song X, et al. Effect of cutting parameters on surface quality in multi-step turning of Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(5-8):1355-1365.
- [23] Hughes G D, Smith S D, Pande C S, et al. Hall-petch strengthening for the microhardness of 12 nanometer grain diameter electrodeposited nickel [J]. *Scripta Metallurgica*, 1986, 20(1):93-97.
- [24] Li A, Pang J, Zhao J. Crystallographic texture evolution and tribological behavior of machined surface layer in orthogonal cutting of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5):4598-4611.
- [25] Li A, Pang J, Zhao J, et al. FEM-simulation of machining induced surface plastic deformation and microstructural texture evolution of Ti-6Al-4V alloy [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 123:214-223.
- [26] Wan Z P, Zhu Y E, Liu H W, et al. Microstructure evolution of adiabatic shear bands and mechanisms of saw-tooth chip formation in machining Ti6Al4V [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 531:155-163.
- [27] Liang X, Liu Z. Experimental investigations on effects of tool flank wear on surface integrity during orthogonal dry cutting of Ti-6Al-4V [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(5-8):1617-1626.
- 第一作者:薛超义, 硕士研究生, 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, 250061 济南市
First Author: Xue Chaoyi, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of MOE, Jinan 250061, China
- 通信作者:李安海, 博士, 副教授, 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, 250061 济南市
Corresponding Author: Li Anhai, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of MOE, Jinan 250061, China