

基于净切削比能的钛合金清洁切削 加工表面完整性研究

李安海^{1a,1b,1c}, 张茹凤^{1c,1b,1c}, 赵军^{1a,1b,1c}, 周咏辉^{1a,1b,1c}, 魏书雷²

(1.山东大学 a.机械工程学院 b.高效洁净机械制造教育部重点实验室 c.机械工程国家级实验教学示范中心, 济南 250061; 2.德州大陆架石油工程技术有限公司, 山东 德州 253034)

摘要: **目的** 探究钛合金清洁切削过程中能量消耗的变化与加工表面完整性的关系, 通过切削参数优化选择, 以实现加工表面质量的控制, 从而提高钛合金高效洁净制造零件的使用寿命和服役性能。**方法** 本文提出一种基于能量消耗的过程签名方法, 来描述多工步清洁切削加工过程与加工表面完整性的相互影响。建立了净切削比能计算模型, 结合钛合金两工步铣削试验, 分析了粗加工参数变化对粗加工、精加工切削力, 以及净切削比能的影响规律, 并进一步对两工步加工过程中的净切削比能展开研究。本文研究了不同粗加工参数条件下粗加工和精加工表面残余应力及微晶尺寸的变化规律。**结果** 切削力和切削参数的变化均会影响净切削比能的大小。多工步切削加工过程中, 粗加工和精加工切削参数的不同会改变净切削比能, 进而引起表面完整性的变化。对切削比能影响最大的是径向切深, 其次是进给量、切削速度。随着进给量和径向切深的增大, 切削比能降低; 随着切削速度的升高, 净切削比能先增大后减小。净切削比能较大时, 加工表面层残余应力较大, 微晶尺寸较小。**结论** 在保证加工质量的前提下, 从节能降耗的角度出发, 选取合适的切削速度、较大的切削深度、进给量, 从而降低净切削比能、减少能量消耗, 提高加工表面完整性。

关键词: 过程签名; 净切削比能; 表面完整性; 铣削; 清洁切削; 钛合金

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)12-0057-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.12.004

Surface Integrity of Clean Machined Titanium Alloy Based on Net Specific Cutting Energy

LI An-hai^{1a,1b,1c}, ZHANG Ru-feng^{1a,1b,1c}, ZHAO Jun^{1a,1b,1c}, ZHOU Yong-hui^{1a,1c,1c}, WEI Shu-lei²

(1. a. School of Mechanical Engineering, b. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of MOE, c. National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shelfoil Petroleum Equipment & Services Co., Ltd., Shandong Dezhou 253034, China)

ABSTRACT: There is a process signature problem related to clean machining surface integrity in metal cutting, which is extremely important to the service life and service performance of high efficiency and clean manufactured parts. Exploring the relationship between energy consumption changes and machined surface integrity during clean cutting of titanium alloy, will help optimize the cutting parameters to control the machined surface quality, and eventually improve

收稿日期: 2023-07-21; 修订日期: 2023-11-13

Received: 2023-07-21; Revised: 2023-11-13

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2021ME043); 国家自然科学基金资助项目 (51605260)

Fund: The Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021ME043); The National Natural Science Foundation of China (51605260)

引文格式: 李安海, 张茹凤, 赵军, 等. 基于净切削比能的钛合金清洁切削加工表面完整性研究[J]. 表面技术, 2023, 52(12): 57-64.

LI An-hai, ZHANG Ru-feng, ZHAO Jun, et al. Surface Integrity of Clean Machined Titanium Alloy Based on Net Specific Cutting Energy[J]. Surface Technology, 2023, 52(12): 57-64.

the service life and performance efficient and clean manufacturing parts of titanium alloy.

In this paper, a process signature method based on energy consumption was proposed to describe the interaction between multi-step clean machining process and machined surface integrity. The calculation model of specific cutting energy was established related to the process field parameters and cutting parameters. Combined with the two-step milling experiments of titanium alloy, the influence of the variation of rough machining parameters on the cutting force and specific cutting energy of rough machining and finish machining was analyzed, and the specific cutting energy of the machined surface of two-step machining was further studied, the variation laws of residual stress and crystallite size of rough machined and finish machined surfaces under different rough machining parameters were studied. The results showed that the changes in cutting force and cutting parameters could both affect the magnitude of specific cutting energy. In the multi-step machining process, the cutting speed in rough machining had the most significant impact on the cutting force, residual stress, and surface microcrystalline size of finish machining. The selection of cutting parameters for rough and finish machining in multi-step cutting processes could cause changes in surface integrity by changing the specific cutting energy. The radial cutting depth had the greatest influence on the specific cutting energy, followed by the feed rate and cutting speed. With the increase of feed rate and radial cutting depth, the specific cutting energy decreased. With the increase of cutting speed, the specific cutting energy first increased and then decreased. The microcrystalline size on the surface of precision machining was larger under higher cutting speed range, indicating that the larger rough machining cutting speed weakened the phenomenon of microcrystalline refinement on the surface of precision machining. As the radial cutting depth of rough machining and the feed rate per tooth increased, the surface microcrystalline refinement of precision machining showed a trend of weakening and then strengthening. When the specific cutting energy was large, the residual stress was large and the crystallite size was small.

The establishment of a prediction relationship model for specific cutting energy consumption and machined surface quality is beneficial for process planning before actual machining process, and is of great significance for the reasonable selection of cutting parameters and the improvement of energy efficiency. On the premise of ensuring the machining quality, from the perspective of energy saving and consumption reduction, appropriate cutting speed, large cutting depth and feed rate should be selected, so as to reduce the specific cutting energy, reduce energy consumption and improve the machined surface integrity, which will help advancing the realization of clean and energy-saving manufacturing.

KEY WORDS: process signature; net specific cutting energy; surface integrity; milling; clean cutting; titanium alloy

钛合金材料由于其高比强度、高延展性、好的抗腐蚀性能及抗疲劳性能等优良特性,被作为航空领域发动机典型结构件而广泛应用^[1]。在钛合金结构件的生产和加工制造过程中,确保良好的加工表面质量及预测加工表面完整性是需要亟需解决的主要问题。制造工艺过程签名是指建立切削加工表面形成过程中内部材料负载与表面完整性特征参数的相关性。每个加工过程都有独特的,与表面完整性相关的过程特征,对零件的使用寿命和服役性能至关重要。表面完整性可用表面粗糙度、加工硬化、残余应力等特征参数来表征^[2]。过程签名旨在建立一种新的基于能量的方法来描述加工过程与表面完整性的相互作用^[3]。近年来,随着绿色节能制造理念的广泛推广^[4],切削比能在加工能耗计算、预测表面质量、参数优化等方面具有良好的应用前景。研究切削比能变化规律可有助于进一步理解金属切削的加工过程。切削比能是指切削加工过程中去除单位体积材料所消耗的能量,可以反映切削能耗与材料去除效率(MRR)之间的对应关系^[5]。切削比能往往会受到切削加工参数、刀具磨

损、材料性能的影响^[6],对评价金属加工性能^[7]至关重要。由于机械加工是一种能量转换过程,基于切削比能的过程签名可以用来建立表面完整性和能耗之间的相关性。

Liu 等^[8]提出切削比能包括三部分,分别是:机床比能、主轴比能、净切削比能。Gutowski 等^[9]根据切削比能与材料去除率之间的关系,建立了基于单位材料切除率的正比例函数计算公式。Kara 等^[10]和 Li 等^[11]通过车削和铣削试验建立了在机床层面上的切削比能模型,并进一步分析了切削比能与切削参数之间的关系。Draganescu 等^[12]采用响应曲面法建立了基于材料去除率和主轴转速的切削比能模型,研究了铣削参数对切削比能的影响规律并进行了切削参数优化。Liu 等^[13]根据切削力解析模型,进一步推导出切削功率,进而建立切削比能模型,结合试验数据进行拟合,其研究表明该模型较现有模型具有较高的预测精度。孔露露^[14]根据切削力经验公式建立了切削比能模型,并结合车削试验结果研究了切削参数对切削比能的影响规律,其研究表明,对切削比能影响最大的

参数是进给量, 最小的是背吃刀量。苏宇^[15]综合考虑车削参数和刀具磨损对净去除材料比能的影响, 建立了切削比能预测模型, 发现刀具磨损对数控车削净去除材料比能影响较大。Ismail 等^[16]研究了在热加工和干切削条件下车削 AISI 4340 试验中不同切削参数对切削比能数值及表面粗糙度的影响规律, 结果表明, 进给量对表面粗糙度值和比切削能值的影响最大。根据热加工和干切削的比较, 热加工比干切削的比切削能量值更低。

Brinksmeier 等于 2011 年首次提出了过程签名的概念, 并提出了一种基于能量的方法, 主要研究工件材料中的热机械载荷与最终材料改性之间的过程相关性^[3]。机械、热和化学作用会影响新表面的产生, 导致硬度和残余应力的改变。但它们都是基于能量转换和耗散的共同基础。由于施加到工作材料上的内部负载是通过能量转换来实现的, 因此反映所施加内部负载的基于能量的过程特性负责表面完整性。从那时起, 许多研究者将过程签名方法应用于机械加工, 例如铣削、车削、激光微加工、电化学机械加工等。Neugebauer 等^[17]和 Guo 等^[18]的研究表明, 当车削过程中加工能量减少时, 表面粗糙度增加。Li 等^[19]已经表明, 随着磨削比能耗的降低, 表面粗糙度会恶化。Sealy 等^[20]建立了一种新的基于能量的“过程特征”方法来描述表面完整性对能量的消耗。他分析了在锋利和磨损的刀具条件下铣削时, 总比能、主轴比能、净切削比能和表面完整性(如表面粗糙度、显微硬度、残余应力等)之间的相关性。经试验验证净切削比能与加工表面粗糙度、显微硬度、残余应力具有较强的相关性, 可作为研究表面完整性的有效工艺特征。Zhu 等^[21]提出了数值大于 1 的无量纲指数, 称为比切削能量指数(SCEI), 将其作为切削加工过程中的过程签名, 以研究 SCEI 与切屑形态、刀具磨损率和表面粗糙度之间的关系。结果表明 SCEI 值越接近 1, 材料去除过程中的剪切效果越明显。当一组加工参数的 SCEI 接近临界值时, 剪切和犁削效应是主要的材料去除模式。由于犁耕作用可产生较大的径向力, 具有改善加工表面的效果, 故可以获得较好的表面粗糙度。

本文通过多工步铣削钛合金试验, 建立一种基于切削力的铣削加工过程净切削比能的计算公式, 并提出基于净切削比能的过程签名, 以研究切削性能与比能的相关性, 揭示了比能量与残余应力、微晶尺寸之间的基本关系。净切削比能耗预测模型的建立, 在实际加工前对工艺方案的能耗与切削质量关系进行研究, 进行表面完整性分析, 这对切削参数合理选择, 提高的能量效率, 提高加工表面质量, 对实现清洁节能制造具有重要意义。

1 钛合金清洁切削试验

加工工件选用 $\alpha+\beta$ 两相 100 mm×75 mm×30 mm Ti-6Al-4V 钛合金块料, 其化学成分见表 1。图 1 所示为试验装置和试验方法示意图, 铣削条件为顺铣, 清洁干切削加工, 加工过程示意图如图 1a 所示。试验设备为大宇 DAEWOO ACE V500 机床, 如图 1b 所示为试验现场装置设置。切削刀具采用 SECO 公司生产的 R217.69-2525.0-09-3AN 型铣刀杆(如图 1c 所示)安装, 刀片型号为 XOMX090308TR-M08 MP2500, 涂层 CVD Ti(C, N)-Al₂O₃, 刀具几何形状及几何参数如图 1d 所示, 刀具直径为 25 mm, 前角为 16°、后角为 15°。

表 2 所示为钛合金两工步铣削加工试验参数, 保持第二工步精切削参数不变, 两工步轴向切深 a_{p1} 和 a_{p2} 均为 1 mm, 分别变化第一工步粗加工的切削速度、径向切深、每齿进给量, 进而探究切削力、加工表面残余应力和微晶尺寸的变化规律。每次切削试验均使用新刀片以减少刀具磨损的影响, 每组试验进行四次切削并取试验结果的平均值, 以减少试验误差, 保证

表 1 Ti-6Al-4V 钛合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ti-6Al-4V titanium alloy
wt. %

元素	Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O
含量	基体	5.6	3.86	0.18	<0.01	0.02	0.023	<0.01	0.17

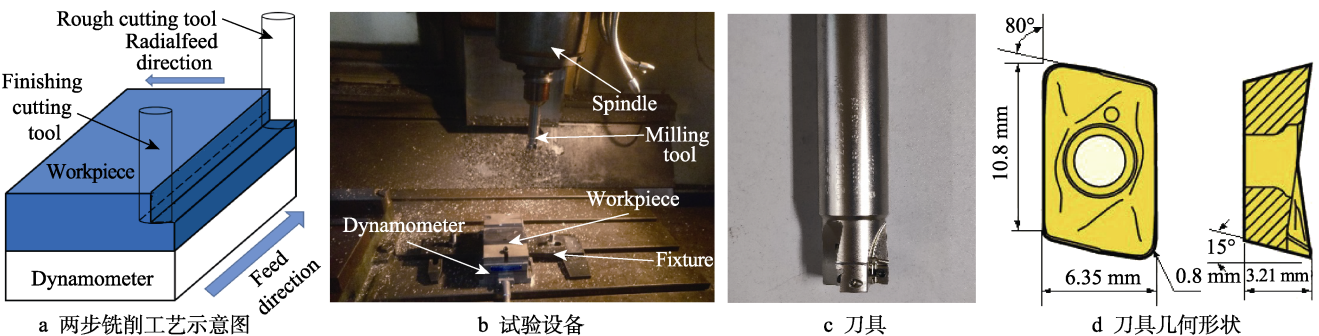


图 1 试验装置

Fig.1 Experimental setups: a) schematic diagram of two-step milling process; b) experimental equipment; c) cutting tool; d) tool geometry

表 2 钛合金两工步铣削试验加工参数
Tab.2 Processing parameters of two-step milling test for titanium alloy

No.	The first cutting step			The second cutting step		
	Cutting speed $v_1/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	Radial cutting depth a_{e1}/mm	Feed per tooth $f_{z1}/\text{mm}\cdot\text{z}^{-1}$	Cutting speed $v_2/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	Radial cutting depth a_{e2}/mm	Feed per tooth $f_{z2}/\text{mm}\cdot\text{z}^{-1}$
1	80	1	0.05			
2	120	1	0.05			
3	160	1	0.05			
4	200	1	0.05			
5	240	1	0.05			
6	280	1	0.05			
7	320	1	0.05	280	0.2	0.05
8	280	0.5	0.05			
9	280	1.5	0.05			
10	280	2	0.05			
11	280	1	0.03			
12	280	1	0.07			

试验数据可靠。铣削过程中三个方向上的铣削分力由 Kistler 9257B 测力仪测得,通过 5070A 电荷放大器放大,5697A 信号采集器采集后经 DynoWare 信号分析软件记录。采用 Xstress 3000X 型 X 射线应力分析仪以测量残余应力。采用德国 Bruke 公司生产的 D8 Advance 型 X 射线衍射仪测量加工表面,用获得的材料 XRD 衍射谱数据来计算加工表面层材料的微晶尺寸。采用 XRD 图谱数据计算材料微晶尺寸的步骤大致为:衍射峰校正、提取半峰宽 FWHM、单位转换、代入 Scherrer 公式计算微晶尺寸。Scherrer 公式主要是将与晶面方向 (hkl) 垂直的微晶直径 D_{hkl} 和衍射数据建立联系^[7],具体见式 (1)。

$$D_{hkl} = k\lambda / \omega \cos\theta \quad (1)$$

式中: k 为 Scherrer 常数; λ 为入射 X 射线波长; ω 为衍射峰的半峰宽高 (FWHM, rad); θ 为布拉格衍射角 ($^\circ$)。根据 XRD 衍射峰确定材料半峰宽 FWHM 和衍射角 2θ ($^\circ$) 的方法示意图,见图 2。

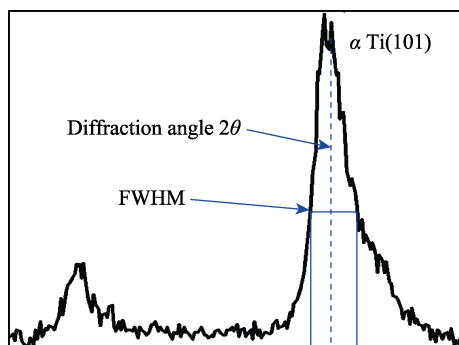


图 2 钛合金材料 XRD 衍射图谱半峰宽 FWHM 和衍射角示意图

Fig.2 Diagram of FWHM and diffraction angle of XRD patterns for titanium alloy

2 结果与讨论

2.1 切削比能模型的建立

金属切削过程中的比能耗可从机床比能、主轴比能与净去除材料比能三个层面来分析^[8]。钛合金切削过程是一种能量转换过程,与新表面形成的能量密切相关的是净切削比能。尽管净切削能量消耗主要用于材料去除阶段,以产生切屑和形成加工表面层,可能只占切削过程总能量的 15% 以下,但其与机床设备无关^[22]。这部分切削比能受工件材料特性、刀具,以及采用的工艺参数等影响。本文以切削力为切入点,建立净切削比能模型。

切削比能 (SEC), 在文中用 S_{EC} 表示, 是指去除单位体积材料所需要的能量, 其计算表达见式 (2)。

$$S_{EC} = \frac{E}{V} = \int \frac{P_i}{M_{RR}} dt = \frac{P}{M_{RR}} \quad (2)$$

式中: E 为加工过程能耗; V 为加工过程中的材料去除部分的体积; M_{RR} 为材料去除率 (MRR) 在公式中的表达; P 为材料去除功率。

切削功率常常根据切削速度和切削力的乘积来计算, 具体见式 (3)。

$$P_c = \frac{F_c V}{60} \quad (3)$$

式中: P_c 是材料去除过程的功率; v 是切削速度; F_c 是主切削力。

而铣削材料去除率计算, 见式 (4)。

$$M_{RR} = \frac{1000}{60} \times \frac{V}{\pi d} \times Z \times f_z \times a_p \times a_e \quad (4)$$

可得净切削比能计算, 见式 (5)。

$$S_{EC} = \frac{F_c \pi d}{1000 f a_p a_e} \quad (5)$$

2.2 切削力与净切削比能

切削过程中切削力通常与材料塑性变形和切削热量的耗散同步产生, 进而影响刀具磨损过程、加工表面质量和刀具寿命^[23]。切削力主要来源于材料去除过程中产生的塑性变形抗力及刀具前刀面-切屑、刀具后刀面-已加工表面材料之间的摩擦力。相同切削参数条件下, 工件硬度和剪切屈服强度越大、韧性越好, 则切削力越大。根据切削力或切削功率计算净切削比能, 可以更加直观地研究切削参数四要素(每齿进给量、径向切深、轴向切深和切削速度)、刀具结构参数、工件材料参数等工艺参数的对净切削比能的影响。本文通过多工步切削试验, 分析钛合金两工步切削过程中主切削力变化情况, 进而研究清洁切削工艺参数对切削过程净切削比能的影响规律。

不同粗加工切削参数下主切削力如图 3 所示, F_1 和 F_2 分别为粗加工和精加工过程测量的切削力, S_{EC1} 和 S_{EC2} 分别为粗加工和精加工过程中计算得到的净切削比能。由图 3a 可以看出, 在低速范围内, 随着粗加工切削速度的增大, 粗加工和精加工切削力均呈明显上升趋势, 粗加工切削速度不断增大, 切削力继而基本呈下降趋势。净切削比能的大小变化趋势与切削力的变化趋势相似, 均呈现出先增加后减小的趋势。粗加工过程中已加工表面层材料在塑性变形和切削热的共同作用下强度和硬度提高, 引起加工硬化。则可知低速范围内, 加工硬化程度逐渐加强, 导致加工开始时工件表面硬度增大, 进而导致切削力增大, 且去除材料所需要的能量增加。当切削速度继续增大时, 切削热大量增加, 热软化作用使加工硬化程度减弱, 工件表面硬度减小, 进而导致切削力及净切削比能下降。因此, 高速切削时应选取大的切削速度, 以便获得较低的精加工切削力及净切削比能, 从而减少能量消耗。

由图 3b 可知, 随粗加工径向切深增大, 加工切削力均呈增大趋势, 而净切削比能呈下降趋势。径向切削深度增加导致工件表面及一定深度下加工硬化效应加剧, 硬度提高。随着侧吃刀量的增加, 加工硬化作用明显, 切削力增加, 尺寸效应减弱, 整体切削力增速低于加工体积的增速, 因此单位面积平均切削力减小, 导致单位体积金属切削能耗降低。

如图 3c 所示每齿进给量对切削力和净切削比能的影响规律图。随着粗加工每齿进给量的增大, 精加工切削力呈先下降后上升的趋势, 且随着进给量的增加, 净切削比能呈减小趋势。这是因为随着进给量的增大, 使得切削面积增加, 切削力随着增大, 但其增加趋势并不成正比。然而, 随着每齿进给量的增大, 切削厚度也会成比例地增加, 摩擦因数降低, 切削过程中的摩擦力减小。同时摩擦角的减小使得剪切角增大, 材料的变形程度减小, 使得净切削比能降低。

分析精加工过程切削力的变化, 粗加工切削参数

变化引起的加工硬化会影响下一工步精加工过程切削力的大小, 其中切削速度的影响最大, 进给量的影响较小。在保证加工质量的前提下, 从节能的角度出发, 应选取较大的粗加工切削速度、切削深度、进给量, 从而降低净切削比能, 减少能量消耗, 提高加工表面质量。

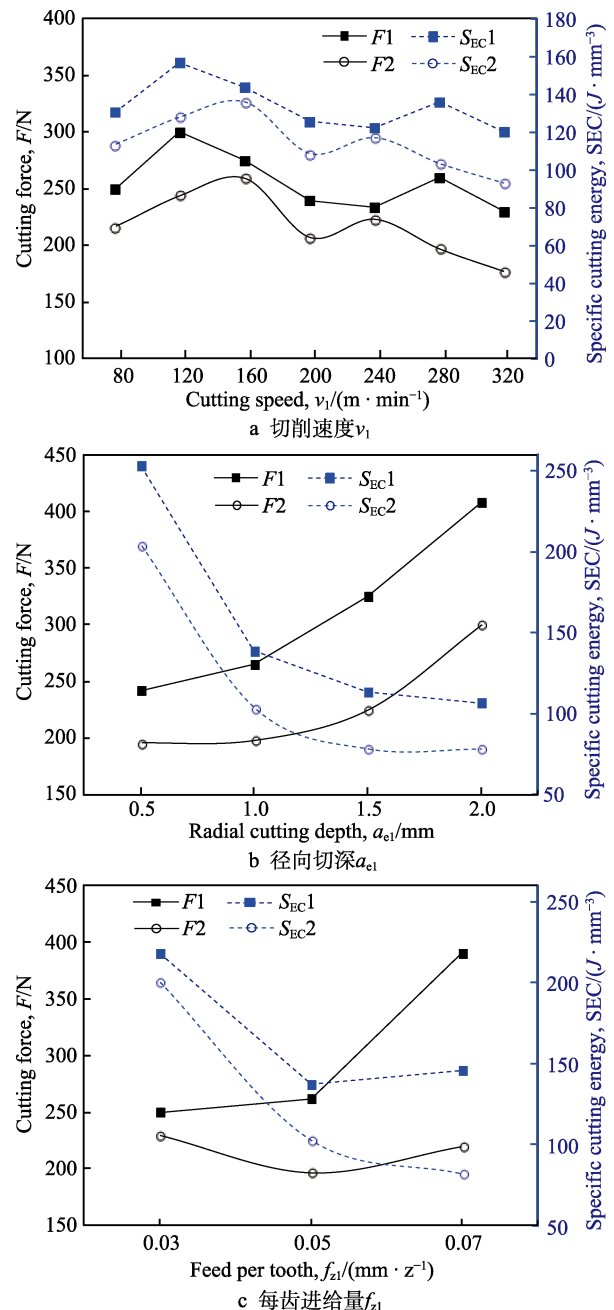


图 3 粗加工参数对粗、精加工主切削力及净切削比能影响

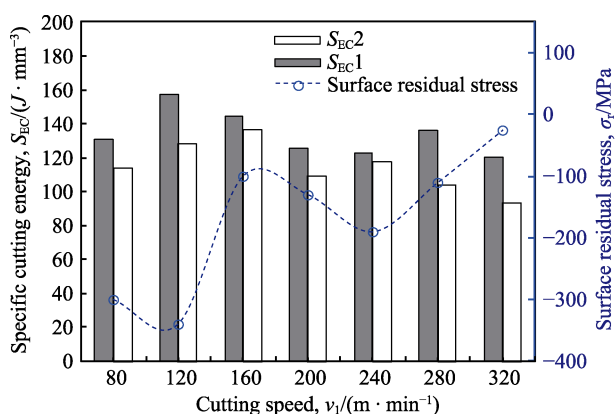
Fig.3 Effect of rough machining parameters on main cutting force and cutting specific energy of rough and finish machining: a) cutting speed v_1 ; b) radial cutting depth a_{e1} ; c) feed per tooth f_{z1}

2.3 表面残余应力

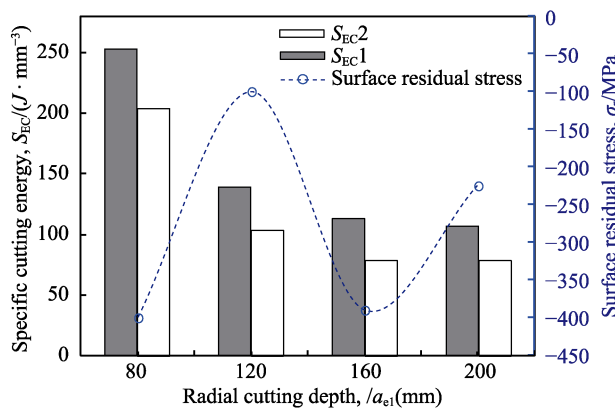
精加工表面残余应力主要受两方面的影响, 首先

粗加工塑性应变和切削热会造成精加工待加工表面产生加工硬化和热软化作用。另一方面,粗加工残余应力也对已加工表面残余应力也会产生相应的影响。

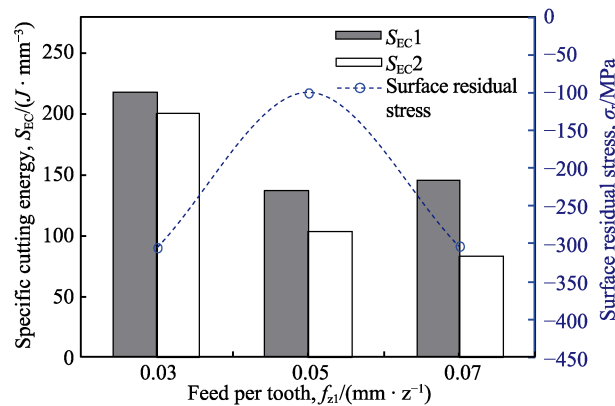
图4所示为粗加工参数对精加工表面残余应力的影响。由图4a可以看出,在80~120 m/min切削速度范围内进行切削加工时,精加工表面残余压应力较大,达到-333.94 MPa,且此时净切削比能也达到最大值。在高速切削时,残余压应力数值相对较小,且呈先增大后减小趋势。这主要是由于随着粗加工切削速度增大,塑性变形产生的加工硬化作用减弱,因此精加工待加工表面受其影响减弱,残余压应力数值减小。



a 切削速度 v_1



b 径向切深 a_{e1}



c 每齿进给量 f_{z1}

图4 粗加工参数对精加工表面残余应力影响

Fig.4 Effect of rough machining parameters on surface residual stress of finish machining: a) cutting speed v_1 ; b) radial cutting depth a_{e1} ; c) feed per tooth f_{z1}

由图4b可知,残余应力数值呈现明显的波动变化,最大残余压应力出现在0.5 mm切深处,为-381.90 MPa,此时粗加工对精加工待加工表面的加工硬化程度最小,热软化效应明显,残余应力较大^[24]。由图4c中精加工表面残余应力变化规律分析可知,随着进给量的增大,加工表面残余压应力呈减小后增大的趋势。在每齿进给量为0.03 mm/z时残余应力达到最大值,此时对应的净切削比能数值较小。

通过两工步铣削试验分析可知,在低速范围内残余压应力较大,更高的切削速度则导致残余压应力显著减少。两工步切削过程中,若需得到较大的精加工表面残余压应力,则需采用较低的粗加工径向切深(0.5 mm),且试验结果表明残余压应力值较大处,净切削比能越大,基本呈现正比例关系。

2.4 加工表面微晶尺寸

图5为粗加工切削参数对加工表面微晶尺寸影响。由图5a可知,切削过程中随着切削速度增大,粗加工与精加工过程中微晶尺寸逐渐增大。切削速度增大,加工表面加工硬化程度较小,而切削温度不断升高^[25],热软化效应增强,微晶细化作用减弱,微晶尺寸变大。在切削速度较大时,微晶尺寸无明显的波动,主要是随切削速度升高,切削温度升高,切削热增加,大部分热量传入切屑^[26],不足以使工件加工表面晶粒长大,导致微晶细化减弱,微晶尺寸变化不明显。

由图5b可知,随径向切深增大,粗加工及精加工的加工表面微晶尺寸变化趋势大致相同,均呈现先增大后减小趋势,最大微晶尺寸均出现在1 mm径向切深处。由切削力变化分析可知,径向切深增大,切削力增大,产生明显的加工硬化,从而产生的塑性变形抑制了微晶细化,同时切削温度上升,促进了晶粒的长大。径向切深增加至1 mm的加工过程中,切削力无明显变化,此时为切削温度对微晶尺寸的影响占据主导地位,晶粒长大,微晶细化程度减弱。而当径向切深继续增加至2 mm时,切削力增加,而切削温度随切深增大变化较小,加工表面硬化程度增加,塑性变形作用显著增大,微晶尺寸明显减小。

图5c为加工表面微晶尺寸随进给量变化的趋势。随着进给量的增大,粗加工精加工表面微晶尺寸先是增大后减小,在进给量为0.05 mm/z时微晶尺寸达到最大值。这是由于进给量增大,加工硬化程度显著,由此促进了加工表面晶粒细化,而受到加工过程中切削温度逐渐升高的影响,在一定程度上抑制了微晶细化。整个加工过程受到塑性变形和切削温度的共同影响。因此,微晶尺寸的变化情况需要综合考虑两因素的相互作用。精加工过程中粗加工每齿进给量较小(0.03 mm/z)时微晶尺寸最小,说明此时粗加工参数对精加工表面塑性应变影响较切削温度更为显著。

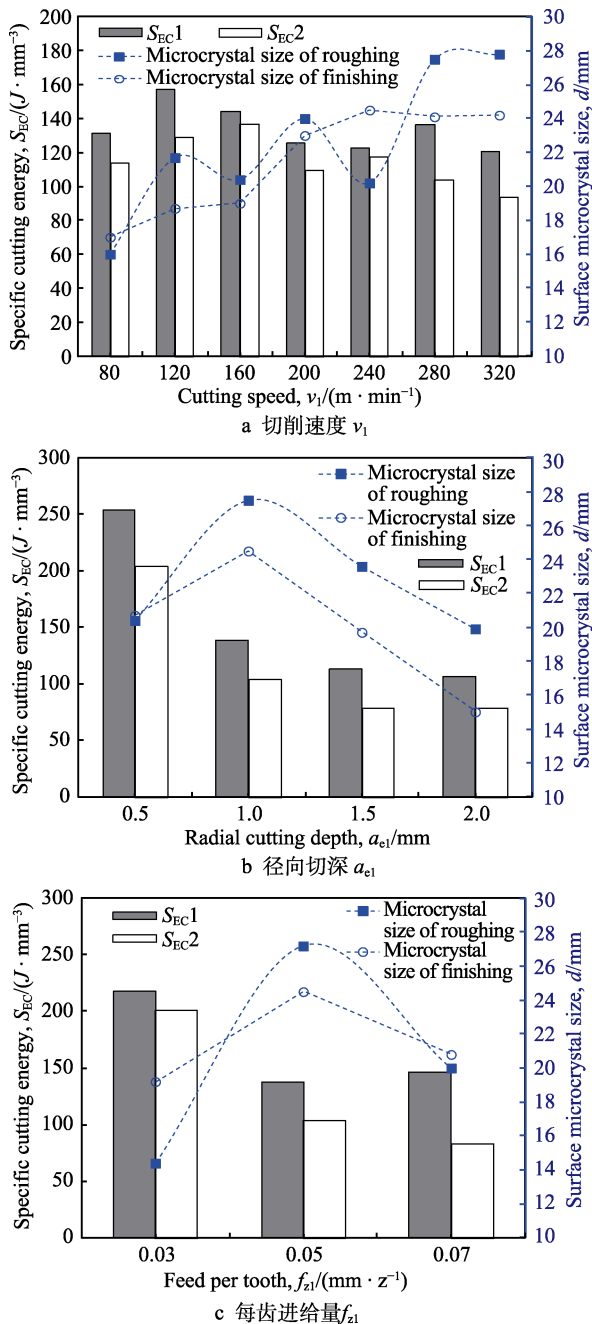


图 5 粗加工参数对加工表面微晶尺寸影响
Fig.5 Effect of rough machining parameters on surface microcrystal size of rough and finish machining: a) cutting speed v_1 ; b) radial cutting depth a_{e1} ; c) feed per tooth f_{z1}

综上所述,塑性变形和切削温度的共同作用对微晶尺寸的大小产生影响,即塑性变形作用增强促进微晶细化,切削温度升高,晶粒长大,晶粒细化作用减弱^[27]。根据精加工表面微晶尺寸与加工参数之间的关系,在切削速度较低时,切削力增大,残余压应力数值增大,净切削比能增加,微晶尺寸较小。切削速度升高时,塑性变形影响较小,切削温度升高,使得精加工表面微晶尺寸较大,切削力减小,这有利于提高加工表面质量。

3 结论

本文建立了切削比能模型,结合钛合金两工步铣试验,研究粗加工参数变化对粗加工和精加工切削力、净切削比能的影响规律,并进一步对两工步加工的加工过程中的净切削比能展开研究,揭示不同粗加工参数条件下粗加工和精加工表面残余应力、微晶尺寸变化规律。所得出的结论如下。

1) 多工步加工过程中,粗加工切削速度对精加工切削力影响最为显著。低粗加工切削速度下,精加工切削力随切削速度增大而递增,在 160 m/min 处达到最大值。在高速切削时,切削力基本呈下降趋势。随进给量、径向切深增加,精加工时主切削力呈增大趋势;与多工步切削加工相比,单工步精加工时主切削力偏小。

2) 切削速度对残余应力的影响更为显著,进给量次之,径向切深最小。在低速切削范围内残余应力达到最大值,之后随粗加工切削速度增大,残余压应力先增大后减小。粗加工径向切深和进给量较小时,残余压应力值较大。

3) 单工步加工过程中,随切削速度增大,微晶尺寸增大,随径向切深及每齿进给量增大先增大后减小。切削速度较大时精加工表面微晶尺寸最大,说明较大的粗加工切削速度使得精加工表面微晶细化现象减弱。而随粗加工径向切深和每齿进给量增大精加工表面微晶细化均呈现减弱后增强的趋势。

4) 净切削比能受切削参数的影响,对净切削比能影响最大的是径向切深,其次是进给量、切削速度。随着进给量和径向切深的增大,净切削比能降低。随着切削速度的升高,净切削比能先增大后减小。且研究表明净切削比能较大时,残余应力较大,微晶尺寸较小,则净切削比能可作为有效的过程签名用以研究切削性能。从节能角度出发,在保证加工质量的前提下进行切削加工时,应选择大的进给量,大的背吃刀量,以及符合生产加工要求的切削速度。

参考文献:

- [1] WILLIAMS J C, BOYER R R. Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components[J]. Metals, 2020, 10(6): 705.
- [2] LI An-hai, ZHANG Ru-feng, LIU Jin-yuan, et al. Effect of Cutting Process Adjustment on Crystal Orientation Texture of Machined Surface Layer of Titanium Alloy[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(1): 19.
- [3] BRINKSMIEIER E, GLABE R, KLOCKE F, et al. Process Signatures-an Alternative Approach to Predicting Functional Workpiece Properties[J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 44-52.

- [4] 张洪潮, 孔露露, 李涛, 等. 切削比能模型的建立及参数影响分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(8): 1098-1104. ZHANG Hong-chao, KONG Lu-lu, LI Tao, et al. SEC Modeling and Influencing Trend Analysis of Cutting Parameters[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(8): 1098-1104.
- [5] ZHONG Qian-qian, TANG Ren-zhong, PENG Tao. Decision Rules for Energy Consumption Minimization during Material Removal Process in Turning[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140(3): 1819-1827.
- [6] PIMENOV D Y, ABBAS A T, GUPTA M K, et al. Investigations of Surface Quality and Energy Consumption Associated with Costs and Material Removal Rate during Face Milling of AISI 1045 Steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107: 3511-3525.
- [7] ZHANG Ru-feng, LI An-hai, SONG Xu-hao. Surface Quality Adjustment and Controlling Mechanism of Machined Surface Layer in Two-Step Milling of Titanium Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(4): 2691-2707.
- [8] LIU Z Y, SEALY M P, GUO Y B, et al. Energy Consumption Characteristics in Finish Hard Milling of Tool Steels[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 1: 477-486.
- [9] GUTOWSKI T, DAHMUS J, THIRIEZ A. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes[C]//Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE2006), Leuven: CIRP, 2006, 31(1): 623-638.
- [10] KARA S, LI W. Unit Process Energy Consumption Models for Material Removal Processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 37-40.
- [11] LI W, KARA S. An Empirical Model for Predicting Energy Consumption of Manufacturing Processes: a Case of Turning Process[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225: 1636-1646.
- [12] DRAGANESCU F, GHEORGHE M, DOICIN C V. Models of Machine Tool Efficiency and Specific Consumed Energy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(1): 9-15.
- [13] LIU N, ZHANG Y F, LU W F. A Hybrid Approach to Energy Consumption Modelling Based on Cutting Power: a Milling Case[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 264-272.
- [14] 孔露露. 数控机床能耗建模与参数影响分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. KONG Lu-lu. Research on CNC Machine Tool Energy Modeling and Analysis of Its Influential Parameters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [15] 苏宇. 数控车削能效评价模型及工艺优化[D]. 淄博: 山东理工大学, 2020. SU Yu. Energy Efficiency Evaluation Model and Process Optimization for CNC Turning[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2020.
- [16] ISMAIL T, DYOS S, JONI Y, et al. Experimental Research of the Influence of Hot Machining Method on AISI 4340 Lathe Machine Process Towards Specific Cutting Energy and Surface Roughness[C]//Proceedings of the 4th Forum in Research, Science, and Technology (FIRST-T1-T2-2020), Paris: Atlantis Press, 2021: 129-134.
- [17] NEUGEBAUER R, SCHUBERT A, REICHMANN B, et al. Influence Exerted by Tool Properties on the Energy Efficiency during Drilling and Turning Operations[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2011, 4(2): 161-169.
- [18] GUO Yan-song, LOENDERS J, DUFLOU J, et al. Optimization of Energy Consumption and Surface Quality in Finish Turning[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 512-517.
- [19] LI W, WINTER M, KARA S, et al. Eco-efficiency of Manufacturing Processes: A Grinding Case[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 59-62.
- [20] SEALY M P, LIU Z Y, GUO Y B, et al. Energy Based Process Signature for Surface Integrity in Hard Milling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 284-289.
- [21] ZHU Ze-run, PENG Fang-yu, TANG Xiao-wei, et al. Specific Cutting Energy Index (SCEI)-Based Process Signature for High-Performance Milling of Hardened Steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103: 1-13.
- [22] ZHAO G Y, LIU Z Y, HE Y, et al. Energy Consumption in Machining: Classification, Prediction, and Reduction Strategy[J]. Energy, 2017, 133: 142-157.
- [23] DEHMANI H, SALVATORE F, HAMDI H. Multistep Hybrid Approach Applied to Material Removal Operation Using Cutting Tool[C]// Proceedings of the 21st French Congress of Mechanics, Bordeaux: French Congress of Mechanics, 2013.
- [24] 米谷·茂. 残余应力的产生和对策[M]. 朱荆璞, 邵会孟, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983: 181-190. GOMETANI M. The Generation and Countermeasures of Residual Stress[M]. ZHU Jing-pu, SHAO Hui-meng, translated. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983: 181-190.
- [25] LI An-hai, ZHAO Jun, LUO Han-bing, et al. Progressive Tool Failure in High-Speed Dry Milling of Ti-6Al-4V Alloy with Coated Carbide Tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58: 465-478.
- [26] LIU J Y, LI A H, ZHANG J C, et al. Performance of High-Speed Steel Drills in Wet Drilling Inconel 718 Superalloy[J]. Experimental Techniques, 2023, 47(2): 395-406.
- [27] LV Ming-hang, LI An-hai, GE De-jun, et al. Step-dependent Grain Refinement and Micro-harness Evolution during Chip Formation Process in Orthogonal Cutting of Titanium Alloy Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(8): 4219-4236.