

超声椭圆振动切削 SiCp/Al 复合材料仿真研究

王文浩, 王大中

上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620

摘要: SiCp/Al 复合材料具有优异的物理性能, 但颗粒的存在导致其加工困难。颗粒材料的超硬性和耐磨性、加工表面的损伤以及刀具的磨损被认为是该类颗粒复合材料加工的主要障碍。目的 针对 SiCp/Al 复合材料难加工特性, 通过对比常规切削(CC)与超声椭圆振动切削(UEVC)来研究其加工机理, 分析两种加工方式下颗粒的损伤对切屑形成以及表面质量的影响。方法 基于 SiCp/Al 复合材料的实际微观结构建立切削模型, 采用有限元仿真的方法从微观层面展现其切削过程, 能够直观呈现两种加工方式下颗粒损伤对切屑形成、刀具磨损以及表面质量的影响, 进而预测复合材料在实际加工过程中可能遇到的问题, 提出相应的解决方案。结果 CC 加工为锯齿状切屑, 切削过程中主要为颗粒对刀具的两体滑动摩擦以及铝基体粘着摩擦, 加工中导致的地下损伤严重。而 UEVC 加工时切屑易成段分离, 切削过程中主要为颗粒对刀具的三体滚动摩擦, 切屑根部聚集的颗粒相较 CC 加工过程较少, 弱化了加工表面的损伤。在两种加工方式下, 加工表面存在以下缺陷: 颗粒破碎、颗粒凸起、大空腔、凹坑以及沟槽等。结论 总体来说, UEVC 加工有利于断屑, 导致的损伤缺陷更少, 颗粒破损程度更小, 能大幅降低切削力, 对改善 SiCp/Al 复合材料加工表面质量有一定效果。

关键词: SiCp/Al 复合材料; 有限元仿真; 超声椭圆振动切削; 表面质量

中图分类号: TG506.5 文献标识码: A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0005.009

Simulation Study of Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting SiCp/Al Composites

WANG Wenhao, WANG Dazhong

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: SiCp/Al composites have excellent physical properties, but it is difficult to process SiCp/Al composites due to the presence of particles. The superhardness and wear resistance of particle materials, damage to the machined surface, and tool wear are considered to be main obstacles to the processing of such particle composites. **Objective** To address the challenging machinability of SiCp/Al composites, the machining mechanism was studied by comparing conventional cutting (CC) with ultrasonic elliptical vibration cutting (UEVC), and the effects of particle damage on chip formation and surface quality under the two machining methods were analyzed. **Methods** The cutting model was established based on the actual microstructure of SiCp/Al composites, and the finite element simulation method was used to show the cutting process from the microscopic level, which was able to intuitively show the effects of particle damage on chip formation, tool wear, and surface quality under the two machining methods, so as to predict the problems that may be encountered in the actual machining process of composite materials and to propose corresponding solutions. **Results** CC machining is serrated chips, the cutting process is mainly two-body sliding friction of particles to the tool and adhesion friction of the aluminum matrix, and the underground damage caused by the machining is serious. However, during UEVC machining, the chips are easily separated into segments, the cutting process is mainly three-body rolling friction of particles to the

收稿日期: 2023-03-05 修回日期: 2023-05-18 文章编号: 1672-058X(2024)05-0072-08

作者简介: 王文浩(1997—), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 从事金属复合材料加工研究。

通讯作者: 王大中(1966—), 男, 吉林人, 教授, 从事复合材料智能制造与健康监测、刀具优化设计与开发等研究。Email: wdzh168@126.com.

引用格式: 王文浩, 王大中. 超声椭圆振动切削 SiCp/Al 复合材料仿真研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(5): 72—79.

WANG Wenhao, WANG Dazhong. Simulation study of ultrasonic elliptical vibration cutting SiCp/Al composites[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(5): 72—79.

tool, and particles gathered at the root of the chip are less compared with the CC processing, weakening the damage to the machined surface. Under the two machining methods, the machined surface has the following defects: particle breakage, particle protrusion, large cavities, pits, and grooves. **Conclusion** Overall, UEVC machining is beneficial to chip breaking, resulting in fewer damage defects and smaller particle damage, and can significantly reduce cutting force, which has a certain effect on improving the machining surface quality of SiCp/Al composites.

Keywords: SiCp/Al composites; finite element simulation; ultrasonic elliptical vibration cutting; surface quality

1 引言

SiCp/Al 复合材料的物理和机械性能非常出色,具有高比强度、高比刚度、高耐磨性、低密度、低热膨胀系数以及优良的抗疲劳特性等优点,在医疗器械、光学精密仪器、汽车制造以及航空航天等领域得到广泛应用^[1-3]。在 SiCp/Al 复合材料的加工过程中,由于 SiC 增强颗粒的硬度较高,会导致严重的刀具磨损,还会对工件的亚表面造成一定的损伤。其次,增强颗粒在金属铝基体中难以均匀分散,小尺寸的颗粒比表面能大容易发生聚集形成团簇,严重影响切削加工表面质量,制约了 SiCp/Al 复合材料的进一步应用及发展。

高硬度增强颗粒的加入使 SiCp/Al 复合材料具有优异的物理性能,但导致其切削加工困难^[4],加工过程中主要的问题包括刀具磨损严重和加工表面质量难以把控^[5]。SiC 增强颗粒对切削刀具的磨损主要为磨粒磨损,铝基体对切削刀具的磨损主要为粘着磨损^[6-7]。切削加工中 SiC 颗粒的破损、脱粘以及碎片滑擦会在加工表面留下裂纹、凹槽以及沟槽等,颗粒挤压基体材料会对次表面造成损伤,这些缺陷会导致加工表面质量差。针对上述问题,许多研究者通过改进加工方式来提高加工 SiCp/Al 复合材料的表面质量以降低刀具磨损。超声椭圆振动切削已被应用在多种难加工材料的加工过程中,将其应用在 SiCp/Al 复合材料的切削中能够获得较好的可加工性。

Peng 等^[3]结合超声椭圆振动加工和激光加热辅助加工对 70%SiCp/Al 复合材料进行车削实验。结果表明,在两种加工工艺的结合下能够有效降低切削力和表面粗糙度,提高塑性去除能力,抑制表面损伤,但在实验的基础上很难研究颗粒损伤行为对表面缺陷的影响。Zhou 等^[8]采用有限元模拟的方法对 SiCp/Al 复合材料的常规切削和超声振动辅助切削过程进行模拟。分析在两种加工方法中,当刀具的切削路径位于 SiC 颗粒的不同位置时颗粒的损伤特性,并且探讨了常规切削和超声振动辅助切削的刀具磨损机理。结果表明:超声振动辅助切削技术能够减少刀具磨损,改善 SiCp/Al 复合材料的加工表面质量,加工过程中切削力降低约 40%,表面粗糙度降低了 34%,但在切削仿真研究中忽视了颗粒之间的相互作用,不能很好地揭示表面缺陷形成机理。Shi 等^[9]研究表明:在加工中高频超声辅助切削能够软化 SiCp/Al 复合材料,在适当的振幅下有

助于维持颗粒结构的完整性,降低颗粒碎裂的概率,材料的去除方式主要为塑性去除或破碎成小颗粒,降低了铣削力和表面粗糙度值,提高了加工 SiCp/Al 复合材料的表面质量。但缺乏颗粒对刀具摩擦行为的研究,颗粒-刀具界面的摩擦行为对材料的去除有重要影响。

综合上述分析,超声振动加工 SiCp/Al 复合材料能够降低切削过程中的切削力,改善加工表面质量以及减少刀具磨损。但加工中多颗粒的损伤行为对表面质量的影响以及对颗粒-刀具界面的摩擦作用却很少研究。因此,本文基于有限元仿真研究,从微观层面分析两种加工方式(CC 和 UEVC)对 SiCp/Al 复合材料切削的影响。重点研究颗粒的损伤行为对切屑形成的影响、颗粒-刀具界面的摩擦行为以及表面缺陷形成机理。

2 超声椭圆振动切削原理

超声椭圆振动轨迹由切削速度方向与切削深度方向上存在一定相位差的高频振动叠加形成,如式(1)所示。

$$\begin{cases} X(t) = A \cos(2\pi ft) \\ Y(t) = B \cos(2\pi ft + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $X(t)$ 和 $Y(t)$ 分别表示刀具的刀尖在椭圆轨迹上沿切削速度方向和切削深度方向上移动的坐标; A 和 B 分别为两个方向上的振幅(μm); f 、 t 以及 φ 分别表示为振动的频率(Hz)、时间(s)和相位差($^\circ$)。其中相位差 φ 的数值会影响椭圆轨迹的形状,在本研究中沿切削速度方向与切削深度方向的振动相位差为 $\pi/2$ 。

考虑 UEVC 的运动特性,刀具相对于工件的运动轨迹方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} X(t) = A \cos(2\pi ft) + vt \\ Y(t) = -B \sin(2\pi ft) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, v 为切削速度。对式(2)求导,得到刀具相对工件的速度方程,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = -2\pi f A \sin(2\pi ft) + v \\ \dot{Y}(t) = -2\pi f B \cos(2\pi ft) \end{cases} \quad (3)$$

在有限元软件中沿切削速度方向与切削深度方向通过设定周期型幅值曲线来实现刀具椭圆切削轨迹。

如图 1 所示,选取一个周期(T_2)来分析 UEVC 的加工过程。 ap 为标称切削深度, B 为刀具在切削深度方向上的振幅。图 1 中标明了 3 个切削周期,分别是上一个切削周期 T_1 、当前切削周期 T_2 以及下一个切削周期 T_3 。 T_2 周期,刀具运动轨迹为 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow (a)$ 。此过程中,刀具由 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ 的运动为有效切

削阶段,刀具去除材料;刀具由 $d \rightarrow e \rightarrow (a)$ 的运动为分离阶段,刀具与工件分离,这是一个空的切削阶段,该阶段有利于刀具的散热,减少切削中刀具与加工表面之间的摩擦,能够减少切削热量,提高加工质量。

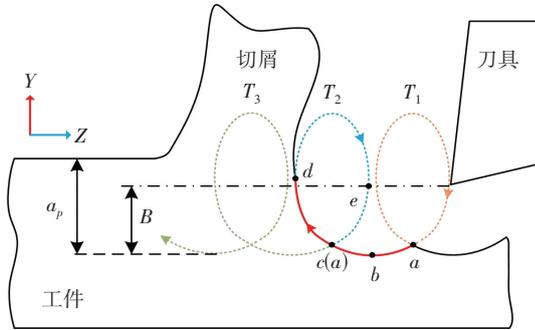


图 1 UEVC 加工过程
Fig. 1 UEVC processing process

3 SiCp/Al 复合材料有限元建模

3.1 三维模型的建立

为了更加真实的反映 SiCp/Al 复合材料的切削过程,建立 SiCp/Al 复合材料三维有限元模型,如图 2 所示。设定 SiC 颗粒形状为棱柱体,颗粒平均尺寸为 $12 \mu\text{m}$,体积分数为 25%,其中部分颗粒聚集形成团簇,如图 2(a) 所示。铝基体的尺寸如图 2(b) 所示:长 $180 \mu\text{m}$ 、宽 $80 \mu\text{m}$ 以及高 $100 \mu\text{m}$ 。在有限元切削模型中,工件上的所有自由度都受到限制,SiC 颗粒随机分布在基体中,如图 2(c) 所示。对建立的模型进行有限元仿真切削分析,鉴于 PCD 刀具的硬度为 8 000 HV,远高于 SiCp/Al 复合材料的硬度,在仿真中将 PCD 刀具设置为刚体,在刀具上建立参考点用来施加加速度和超声波振动的振幅,能够减少求解计算的时间。铝基体和 SiC 颗粒的网格划分均采用 C3D10M 元素属性,刀具采用 C3D8R 元素属性,SiC 颗粒与铝基体之间采用 tie 约束进行绑定。分别对三维 SiCp/Al 复合材料模型进行 CC 和 UEVC 加工,从切屑形成以及加工表面质量等方面进行对比分析。

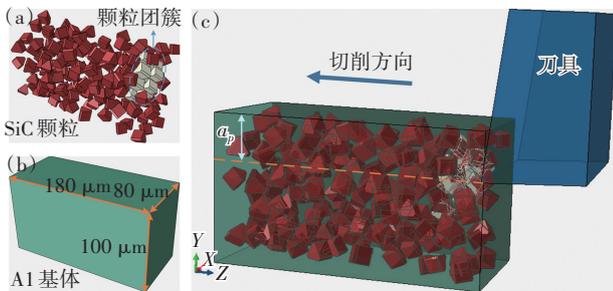


图 2 三维 SiCp/Al 复合材料模型

Fig. 2 Three-dimensional SiCp/Al composites model

在 CC 加工的条件下,切削速度及深度分别是 60 m/min 和 $30 \mu\text{m}$,对于 UEVC 加工,切削速度保持不变,在切削速度方向 (Z 向) 和切削深度方向 (Y 向) 施加振幅, Z 向振幅为 $8 \mu\text{m}$, Y 向振幅为 $4 \mu\text{m}$,刀具初始

切削深度设定为 $26 \mu\text{m}$,超声振动频率为 60 kHz 。刀具在该条件下的运动轨迹如图 3 所示。

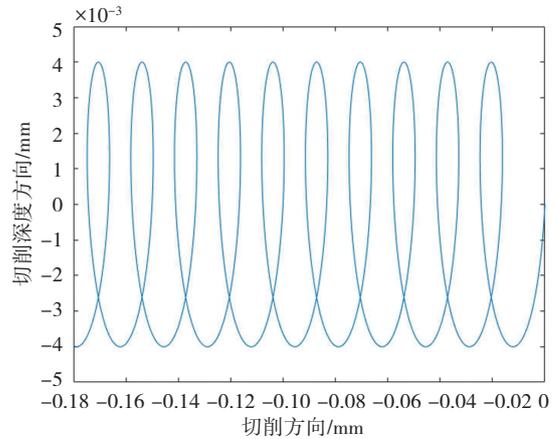


图 3 UEVC 过程中刀具的模拟轨迹

Fig. 3 Simulated tool trajectory during UEVC process

3.2 基体材料本构模型

材料本构模型是描述材料力学特性(应力-应变-强度-时间关系)的数学表达式,分析材料加工变形的基础前提是要建立准确度高的本构模型。SiCp/Al 复合材料中颗粒与基体两种材料属性参数如表 1 所示。在有限元多相建模时,根据两者的材料属性对 SiC 颗粒与金属铝基体分别采用合适的材料本构模型。铝作为一种延性金属,在高应变以及高应变率的切削加工中易发生弹塑性变形,可认为是一种热弹塑性材料。Johnson-Cook 本构模型对动态载荷作用下的高应变、高应变率以及高温条件下材料的塑性变形行为能够很好描述。因此,在本研究中对铝基体材料的变形行为通过 Johnson-Cook 本构模型来表征,本构方程如式(4)所示:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right) \quad (4)$$

式(4)中, σ 为流动应力; ε_p 为塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p$ 为塑性应变速率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变速率; A 为屈服应力; B 为硬化模量; C 为应变率敏感系数; m 为温度敏感系数; n 为硬化系数。此外, T_{room} 、 T_{melt} 以及 T 分别为室温、材料的熔化温度和工件温度,材料常数 A 、 B 、 C 、 m 和 n 的数值如表 2 所示。

表 1 2024Al 基体、SiC 颗粒和 PCD 刀具的物理参数^[10-11]

Table 1 Physical parameters of 2024 Al matrix, SiC particles and PCD tool^[10-11]

材料参数(单位)	2024 铝基体	SiC 颗粒	PCD 刀具
密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 770	3 130	4 250
杨氏模量(GPa)	73	420	1 147
泊松比	0.33	0.14	0.08
热膨胀系数($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	23.6	4.9	4
导热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	190	81	2 100
比热容($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	880	427	525

表 2 2024 铝基体 J-C 模型的参数^[11]

Table 2 Parameters of J-C model for 2024 Al matrix^[11]

A/MPa	B/MPa	C	m	n	T _{melt} /°C	T _{room} /°C
352	440	0.008 3	1	0.42	520	25

金属铝基体材料的失效采用 Johnson-Cook 损伤模型来描述,其损伤方程用于定义加工过程中的切屑分离标准^[12],引入单元损伤参数 d ,当 $d=1$ 时,单元失效删除,如式(5)所示:

$$d = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_0^p} \quad (5)$$

式(5)中, $\Delta \varepsilon_p$ 为每个积分步骤中等效塑性应变增量; ε_0^p 为材料失效时的等效塑性应变, ε_0^p 如式(6)所示:

$$\varepsilon_0^p = (d_1 + d_2 e^{d_3 \eta}) \left(1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - d_5 \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right) \right) \quad (6)$$

式(6)中, η 为应力三轴比; $d_1 \sim d_5$ 为材料损伤参数,如表 3 所示。

表 3 2024 铝基体 J-C 断裂模型参数^[11]

Table 3 Parameters of J-C fracture model for 2024 Al matrix^[11]

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0.13	0.13	-1.5	0.011	0

3.3 颗粒材料本构模型

SiC 颗粒是共价键很强的化合物,具有超强的抗晶格畸变能力,但其脆性较高。外部作用使得颗粒上的应力大于本身强度极限时发生脆性断裂。SiC 颗粒的脆性破坏及失效演化过程在 Abaqus 用脆性断裂准则来描述, SiC 颗粒是否产生断裂通过最大正应力准则判定^[13],如式(7)所示:

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_0 \quad (7)$$

式(7)中, σ_1, σ_2 和 σ_3 为主应力分量; σ_0 为 SiC 颗粒的抗拉强度。

在脆性材料的失效判据中, SiC 颗粒的开裂和裂纹扩展是通过能量标准模型来衡量的,破坏过程中的裂纹位移如式(8)所示:

$$u_{n0} = 2 \frac{G_f^I}{\sigma_{tu}^I} \quad (8)$$

式(8)中, u_{n0} 为破坏时的法向位移; G_f^I 为 I 型断裂能; σ_{tu}^I 为 I 型断裂的临界应力。

剪切应力会引起裂纹的扩展,剪切保留模型是裂纹张开应变的函数,开裂后剪切模量 G_c 如式(9)所示:

$$G_c = \rho(e_{nm}^{ck}) G \quad (9)$$

式(9)中, G 为未损坏材料的剪切模量; $\rho(e_{nm}^{ck})$ 为剪切保留因子。 $\rho(e_{nm}^{ck})$ 根据式(10)计算得出。

$$\rho(e_{nm}^{ck}) = \left(1 - \frac{e_{nm}^{ck}}{e_{max}^{ck}} \right)^P \quad (10)$$

式(10)中, e_{nm}^{ck} 为开裂开口应变; P 和 e_{max}^{ck} 为材料常量参数。上述描述 SiC 颗粒脆性开裂的材料参数如表 4 所示。

表 4 SiC 颗粒脆性开裂参数^[14]

Table 4 Brittle cracking parameters of SiC particles^[14]

σ_0 /MPa	G_f^I /J · m ⁻²	P	e_{max}^{ck}
1 500	30	1	0.001

3.4 刀具-切屑界面摩擦

SiCp/Al 复合材料由金属铝基体和硬质 SiC 颗粒组合而成,相较于切削单一金属材料,其刀具与切屑之间的相互作用是一个复杂的变化过程,同时刀具磨损也较为严重。基于前人对刀具-切屑界面的研究,在其加工过程中主要存在两种摩擦形式:基体材料-刀具之间的摩擦,颗粒-刀具之间的摩擦^[15]。颗粒对刀具的摩擦分为两体滑动摩擦和三体滚动摩擦,前者是切削过程中切屑底部残留的颗粒对前刀面的滑擦,后者是脱粘的颗粒在切屑与前刀面之间来回滚动导致的(后刀面与加工表面脱落的颗粒也存在滚动摩擦)。根据上述分析,为了描述切削 SiCp/Al 复合材料时刀具-切屑界面的三种摩擦形式,建立如图 4 所示的三相接触摩擦模型。

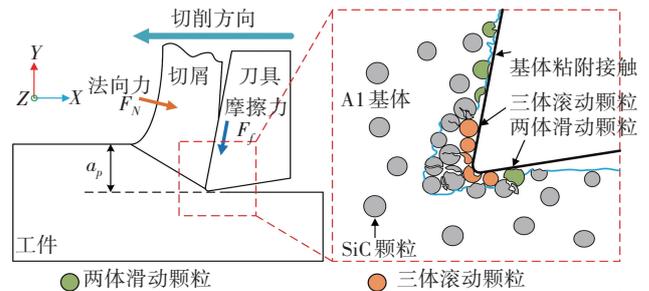


图 4 SiCp/Al 复合材料加工中刀具-切屑界面示意图

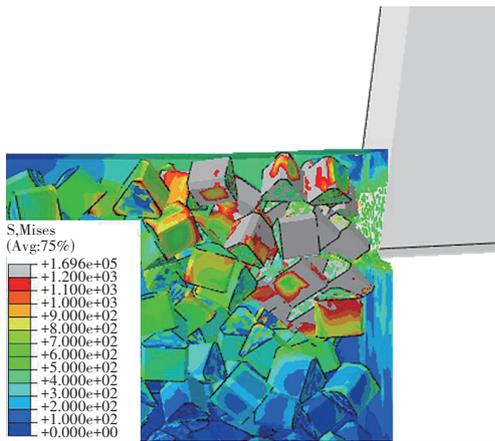
Fig. 4 Schematic diagram of tool-chip interface in SiCp/Al composite machining

4 SiCp/Al 复合材料切削分析

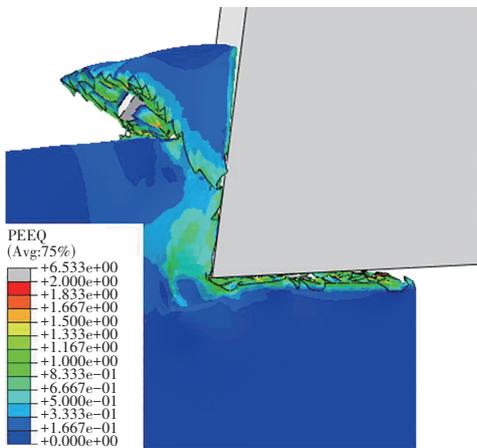
4.1 断屑机理及摩擦分析

如图 5 所示,刀具切入 SiCp/Al 复合材料,由于铝基体与 SiC 颗粒的弹性模量存在显著差异,颗粒承担主要载荷,应力集中严重,如图 5(a)所示。随着刀具推进,在切屑形成的初始阶段,铝基体的塑性变形会受到剪切区中的 SiC 颗粒的影响,剪切区的颗粒出现破损以及颗粒-基体界面开始失效,这导致了微裂纹以及孔洞的萌生。刀具继续运动,在剪切作用下,破损颗粒处的微裂纹与界面失效处的微裂纹聚合并发展成宏观断裂,与此同时,剪切带中裂纹未扩展的区域继续发生塑性变形,由于宏观断裂和剪切变形,材料发生相对滑动变形,导致裂纹上部分区域的材料向无屑表面的方向上挤出,从而形成锯齿切屑,如图 5(b)所示。刀具进一步的运动,锯齿块切屑沿前刀面滑移,刀具去除后续切削路径上未加工的材料,裂纹再次萌发于颗粒损伤的集中区域,切屑的形成进入一个新的周期。此过程反复地进行,最后形成明显的锯齿状切屑,如图 6(a)所示。UEVC 加工 SiCp/Al 复合材料时,刀具的运动轨迹为椭圆形,在切削深度方向上的速度会逐步增大,当高于切屑排出速度时,刀具-切屑界面的摩擦力方向出现

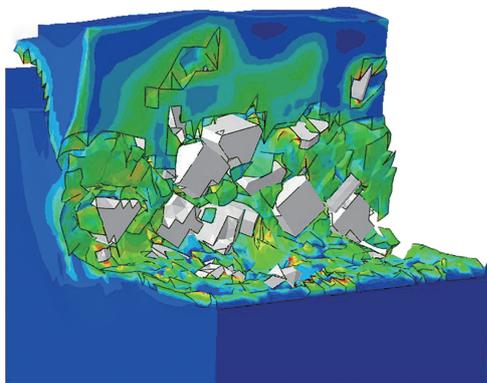
“180°反转”,由沿刀具-切屑界面向下变为向上,对于切屑的排出,可视为是一个推动力。此外,刀具与切屑间歇性的接触分离,刀具沿纵向运动时冲击力较强,促进了切屑的分离,如图 6(b)所示。值得注意的是,El-Gallab 等^[16]认为,当铝基体发生塑性变形时,剪切区的 SiC 颗粒周围会出现裂纹和空洞,由于颗粒的高度随机分布,裂缝的位置是随机和分散的,如图 5(c)所示。因此,被切削的材料沿剪切带断裂,这会导致不规则的锯齿状切屑形成。



(a) 应力分布



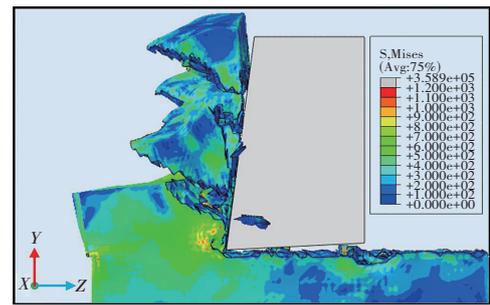
(b) 锯齿切屑



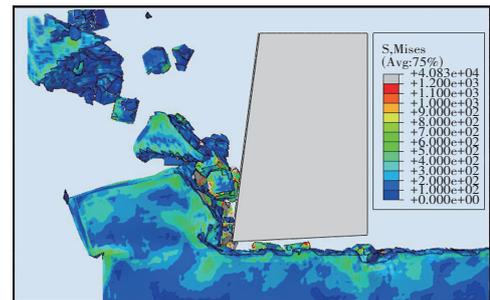
(c) 颗粒-基体界面裂纹

图 5 切削中切屑形成过程

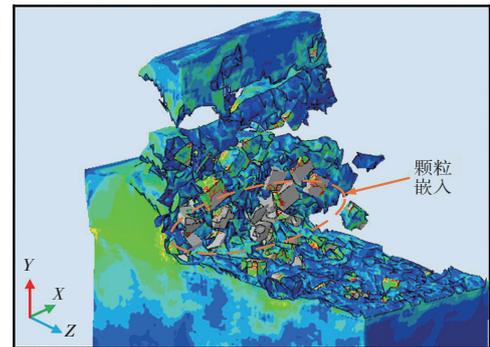
Fig. 5 Chip formation process in cutting



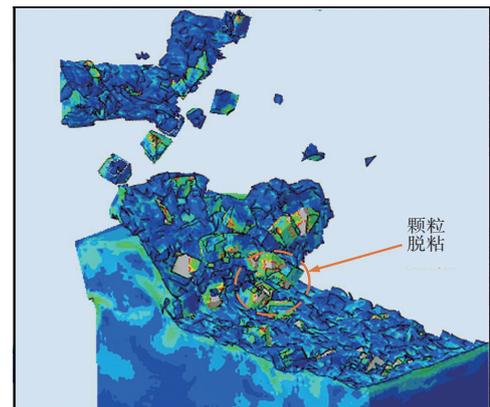
(a) 基于 CC 加工呈连续锯齿状的切屑



(b) 基于 UEVC 加工呈断裂的切屑



(c) 基于 CC 加工颗粒嵌入的切屑



(d) 基于 UEVC 加工颗粒脱粉的切屑

图 6 两种加工模式下切屑形貌

Fig. 6 Chip morphology under two machining modes

比较两种加工方法得到的切屑形貌,如图 6 所示。CC 加工的切屑呈锯齿状,较为连续,如图 6(a)所示。从图 6(c)中可以观察到切屑根部嵌有大量的破碎颗粒,切削过程中切削路径上的颗粒一直积累在切削刃与切屑根部之间难以排出。相比 CC 加工,UEVC 加工过程中切屑更容易断裂,如图 6(b)所示。由于刀具与切屑进行间歇

性的分离,刀具-切屑界面的主要为脱粘的破碎颗粒,如图 6(d)所示。在切削中发现,切屑主要在颗粒聚集的区域分离。一方面在该区域颗粒之间的相互作用更加明显;另一方面,具有不规则形状的 SiC 颗粒在切削过程中不利于应力的均匀传递,在颗粒的棱角区域更容易形成应力集中。此外,与 CC 加工相比,UEVC 的瞬时切削速度远高于标称切削速度。因此,未变形的切屑在切削刃的挤压下发生剧烈的塑性变形,刀具对颗粒的撞击更加剧烈,促进了颗粒从基体界面脱粘。对模型进行刨切处理,能观察到如图 7(a)和图 7(b)所示的 SiCp/Al 复合材料切削过程中刀具-切屑摩擦接触。在刀具-切屑界面存在 3 种接触摩擦形式:颗粒两体滑动划擦、颗粒三体滚动摩擦和铝基体粘着摩擦。对于 CC 加工,主要为颗粒两体滑动划擦以及基体粘着摩擦,UEVC 加工过程中主要为颗粒三体滚动摩擦。

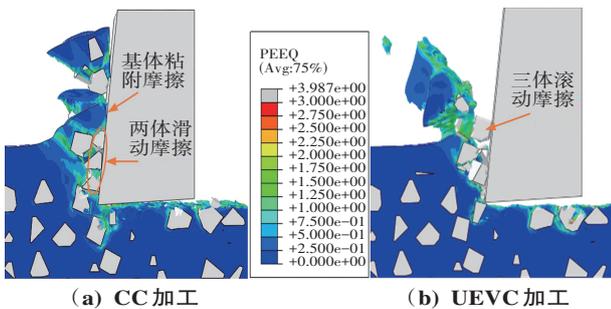


图 7 刀具-切屑摩擦作用
Fig. 7 Tool-chip friction

4.2 切削力分析

SiCp/Al 复合材料在两种加工方式下的切削力曲线如图 8 所示,切削过程中主切削力(Z 向)和推力(Y 向)的波动受到刀具-颗粒相对位置的影响。CC 加工时,刀具刚切入工件材料,主切削力急剧增大,随后在 28 N 上下小范围波动,其加工过程中平均主切削力为 28.4 N,平均推力为 5.1 N。UEVC 加工过程中整体切削力波动幅度较大且呈周期性变化,其原因在于刀具轨迹为椭圆形,刀具与工件存在周期性的分离与接触,刀具接触工件时,切削力增大;刀具与工件分离时,切削力急剧减小。UEVC 加工过程中平均主切削力为 16.8 N,平均推力为 4.2 N,相比 CC 加工,平均主切削力降低了 40.8%;平均推力降低了 17.6%。UEVC 加工中刀具与工件的间歇分离以及瞬时未变形切屑厚度的降低是平均主切削力大幅降低的一个重要原因。另外,UEVC 加工促进了切屑的分离,能够减小切削阻力,这对降低平均主切削力与推力有一定的效果。

从图 8 可以观察到 UEVC 加工时推力曲线正负交替。其原因如下:将刀具轨迹的最低点作为刀具在切削深度方向上的起点,刀具在初始阶段的切削速度小

于切屑的排出速度,且方向与切屑排出方向相反,从而阻碍了切屑排出。随后,刀具在切削深度方向上的切削速度逐渐增大,超过切屑的排出速度时,切屑与刀具之间的摩擦力方向发生 180° 逆转,这一特性不同于 CC 加工,切屑受到的摩擦力方向与其排出方向相同,能够促进切屑快速排出,导致切削周期内(Y 向)推力为负值。从上述分析可以得出,UEVC 加工 SiCp/Al 复合材料的切削机理与 CC 加工不同,在相同的切削速度以及切削深度的条件下,高频的振动使得 UEVC 的切削力呈现周期性变化,降低了平均切削力。

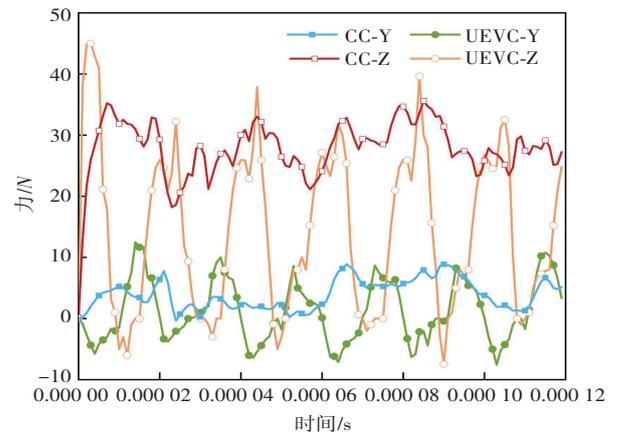


图 8 两种加工模式下切削力曲线
Fig. 8 Cutting force curves for two machining modes

4.3 表面质量分析

SiCp/Al 复合材料在 CC 和 UEVC 加工下的表面形貌如图 9 所示。对加工表面进行刨切处理,在 X 向沿 X_1-X_2 线切面,在 Z 向沿 Z_1-Z_2 线切面。可以明显观察到,相比 UEVC 加工,CC 加工 SiCp/Al 复合材料后,表面缺陷较多,次表面损伤严重,颗粒周围的基体材料塑性变形也较为严重。切削路径上的颗粒被破坏,裂纹从表面扩展到次表面,基体撕裂发生在加工表面。切削路径下方的颗粒发生脱粘,裂纹从颗粒-基体界面向材料内部扩展形成微裂纹。

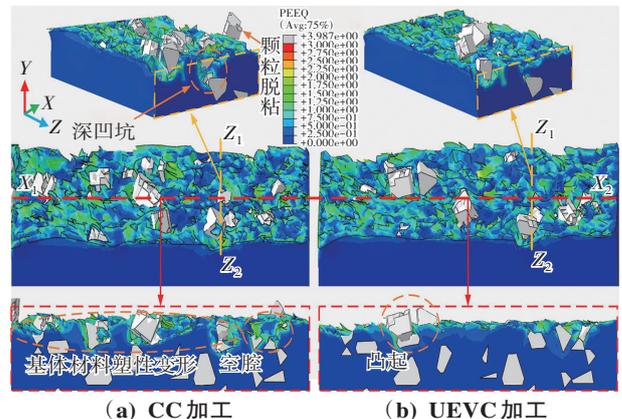


图 9 颗粒行为导致加工缺陷
Fig. 9 Particle behavior leading to processing defects

总体来看,UEVC 加工降低了次表面损伤的程度,然而表面缺陷也同样明显,由于刀具的冲击作用,切削路径上的颗粒更加倾向于拔出形成凸起。在切削 SiCp/Al 复合材料时,由于较软铝基体和高硬度 SiC 颗粒的去除机制存在显著差异,在刀具推进过程中颗粒与铝基体之间的相互作用很大程度上导致了多种加工表面缺陷的形成。在其加工过程中,已加工表面常见的缺陷形式分别是:颗粒开裂破碎、颗粒凸起、大空腔、凹坑以及沟槽等,如图 9 和图 10 所示。切削过程中, SiC 颗粒在刀具的挤压作用下从基体材料中脱离,导致切削表面形成凹坑;此外,部分破碎脱粘的颗粒会堆积在刀刃与切屑根部区域,在刀具得推动作用向前运动,犁耕加工表面,形成沟槽;部分脱粘的颗粒在后刀面的挤压作用下,颗粒会再次压入加工表面,形成凸起;对于颗粒聚集的区域,由于刀具的挤压,颗粒之间的碰撞加剧,颗粒聚集区域易整体破碎进而形成大空腔;在 UEVC 加工颗粒聚集区时,颗粒破碎度较高进而

形成了颗粒碎屑。界面孔隙的形成可归结为细小的 SiC 颗粒从铝基体中分离,或者是切削时颗粒的旋转来适应其周围铝基体的变形。在所有的缺陷中,凹坑是 SiCp/Al 复合材料切削加工表面最普遍存在的缺陷,整个颗粒的脱粘、颗粒被压入基体材料后弹出以及颗粒在挤压中破碎排出都会形成凹坑。

如图 10 所示,在两种加工方式下都导致了地下颗粒损伤。切削路径上的颗粒破损断裂会导致切削力急剧增大以及刀具磨损加重,其破损断裂主要有两方面的原因。一方面,在剪切面上,铝基体发生位错滑移,会导致部分 SiC 颗粒发生损伤,但由于铝基体较软,位错滑移导致的颗粒损伤较少。另一方面,在犁耕区域,切削路径上的颗粒在切削刃的作用下破损断裂,以这种方式破损的颗粒数量相对较多。由于破损的颗粒在犁耕区域,因而对表面质量影响较大,可以明显看出 UEVC 加工中破损的颗粒较少,其破坏程度更低。此外,加工中基体涂覆有助于表面质量的提高。

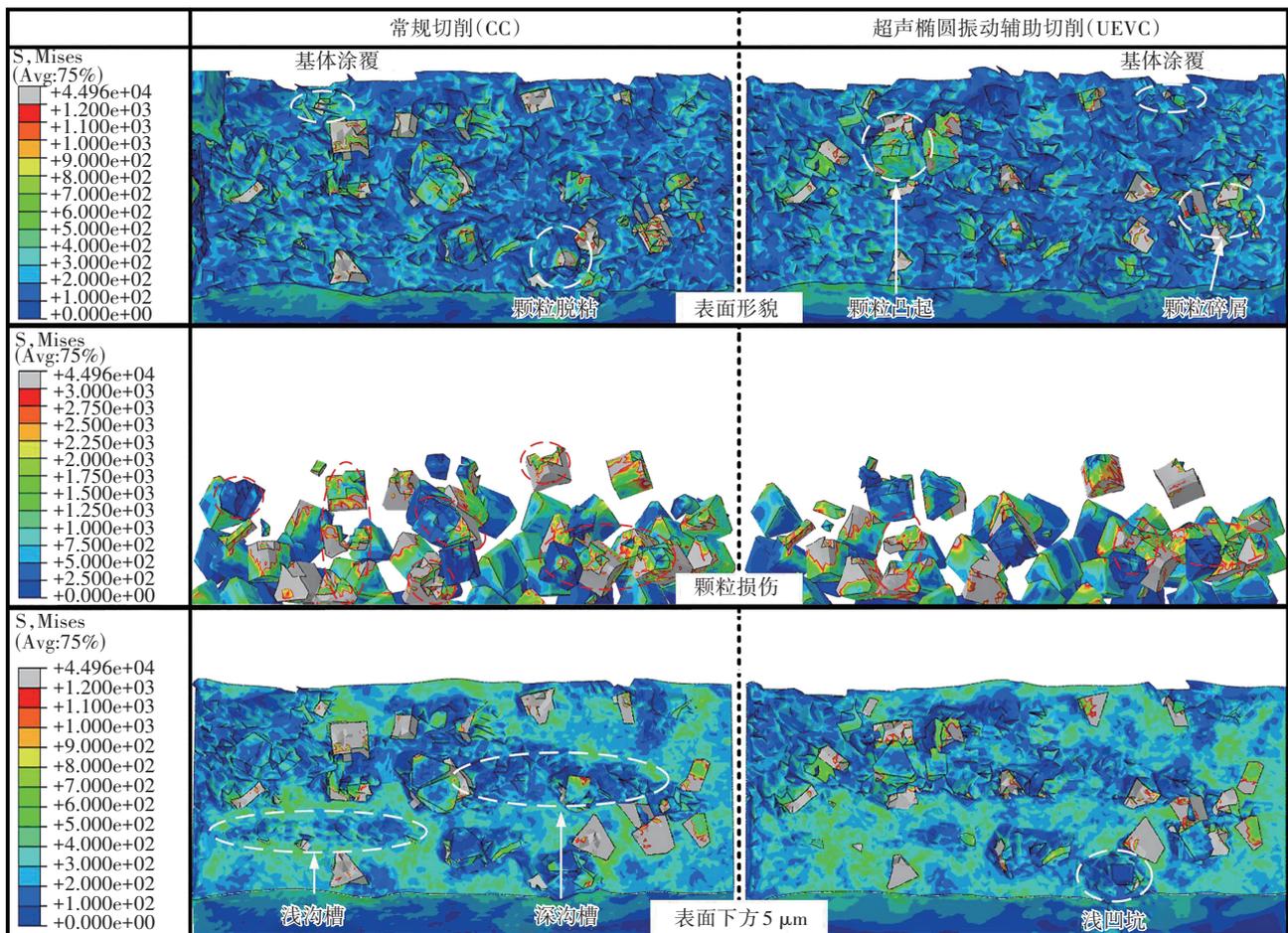


图 10 颗粒损伤及表面缺陷

Fig. 10 Particle damages and surface defects

综上所述,采用 UEVC 的加工方式,切削过程中只有较少的破损颗粒进入刀具-工件界面对加工表面造

成损伤。此外,刀具与工件的间歇性分离释放了刀具与工件之间的相互作用,减少了切削刃对加工表面的

连续挤压。在 UEVC 加工过程中,随时间变化的切削厚度会改变刀具切削路径与颗粒之间的相对位置,使得颗粒位于切削路径上方或下方的概率增加。导致 SiC 颗粒要么破裂拔出,要么被挤压到铝基体中。因此,在 SiCp/Al 复合材料的 UEVC 加工过程中,颗粒断裂拔出和挤压到铝基体中是 SiC 颗粒去除的主要方式。

5 结 论

基于三维 SiCp/Al 复合材料模型进行切削研究,对比分析了 CC 与 UEVC 加工 SiCp/Al 复合材料时刀具-颗粒界面的摩擦作用、切削力、表面缺陷形成机制以及断屑的影响,形成主要结论如下:

(1) CC 加工为锯齿状切屑,切削中主要为基体粘着摩擦以及颗粒两体滑动划擦;UEVC 加工促进切屑成段分离,切削过程中主要为颗粒对刀具的三体滚动摩擦。

(2) UEVC 加工因其分离式切削特性以及刀具-切屑摩擦力方向“180°反转”特性,大幅降低了切削力,减少了与颗粒间的相互作用,弱化了加工表面的损伤。

(3) 在两种加工方式下,加工表面存在以下缺陷:颗粒破碎、颗粒凸起、大空腔、凹坑以及沟槽等。CC 加工导致地下损伤更严重,表层颗粒破损程度更大。

(4) UEVC 加工过程中,颗粒断裂拔出和挤压到铝基体中是 SiC 颗粒去除的主要方式。

参考文献(References):

- [1] LU S, ZHANG J, LI Z, et al. Cutting path-dependent machinability of SiCp/Al composite under multi-step ultra-precision diamond cutting[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(4): 241—252.
- [2] WANG X, POPOV V L, YU Z, et al. Evaluation of the cutting performance of micro-groove-textured PCD tool on SiCp/Al composites [J]. Ceramics International, 2022, 48(21): 32389—32398.
- [3] PENG P, XIANG D, LI Y, et al. Experimental study on laser assisted ultrasonic elliptical vibration turning (LA-UEVT) of 70% SiCp/Al composites[J]. Ceramics International, 2022, 48(22): 33538—33552.
- [4] SHI Z L, XIANG D H, FENG H R, et al. Finite element and experimental analysis of ultrasonic vibration milling of high-volume fraction SiCp/Al composites[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22(10): 1777—1789.
- [5] GE Y, XU J, YANG H. Diamond tools wear and their applicability when ultra-precision turning of SiCp/2009Al

- matrix composite[J]. Wear, 2010, 269(11-12): 699—708.
- [6] HAKAMI F, PRAMANIK A, BASAK A K. Tool wear and surface quality of metal matrix composites due to machining: A review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(5): 739—752.
- [7] LI X, SEAH W K H. Tool wear acceleration in relation to workpiece reinforcement percentage in cutting of metal matrix composites[J]. Wear, 2001, 247(2): 161—171.
- [8] ZHOU Y, GU Y, LIN J, et al. Finite element analysis and experimental study on the cutting mechanism of SiCp/Al composites by ultrasonic vibration-assisted cutting[J]. Ceramics International, 2022, 48(23): 35406—35421.
- [9] SHI Z L, XIANG D H, FENG H R, et al. Finite element and experimental analysis of ultrasonic vibration milling of high-volume fraction SiCp/Al composites[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22(10): 1777—1789.
- [10] FANG Y, WANG Y, ZHANG P, et al. Research on chip formation mechanism and surface morphology of particle-reinforced metal matrix composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(11-12): 3793—3804.
- [11] YU W, CHEN J, MING W, et al. Experimental and FEM study of cutting mechanism and damage behavior of ceramic particles in orthogonal cutting SiCp/Al composites[J]. Ceramics International, 2021, 47(5): 7183—7194.
- [12] WU Q, XU W, ZHANG L. A micromechanics analysis of the material removal mechanisms in the cutting of ceramic particle reinforced metal matrix composites[J]. Machining Science and Technology, 2018, 22(4): 638—651.
- [13] CHEN W, ZHANG X. Investigation on the cutting mechanism of SiCp/Al composites in ultrasonic elliptical vibration machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(7-8): 4707—4722.
- [14] WANG Y, LIAO W, YANG K, et al. Investigation on cutting mechanism of SiC p/Al composites in precision turning [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(1-4): 963—972.
- [15] DABADE U A, DAPKEKAR D, JOSHI S S. Modeling of chip-tool interface friction to predict cutting forces in machining of Al/SiCp composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(9): 690—700.
- [16] EL-GALLAB M, SKLAD M. Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites: Part II: Workpiece surface integrity[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83(1-3): 277—285.

责任编辑:陈 芳