

增强颗粒团聚分布 SiC_p/Al 复合材料切削模拟研究

谢朝雨 张旭 程耀天 林旭东 王若瑾

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201600)

文 摘 为了研究增强颗粒团聚分布对 SiC_p/Al 复合材料切削加工过程的影响,建立了三种不同 SiC 颗粒团聚尺寸比的正交切削有限元模型,并对模型进行了验证。结果表明:随着颗粒团聚尺寸比的增大,锯齿状切屑连续性降低且形状更加不规则,相应地切削力的波动程度、平均值和峰值均增大。颗粒聚集区域的切削应力随着团聚尺寸比的增大而加剧。较大的颗粒团聚尺寸比会导致亚表面损伤深度和最大轮廓峰谷高度增加。

关键词 团聚分布, SiC_p/Al 复合材料, 有限元仿真, 应力分布, 亚表面损伤

中图分类号: TG506

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.04.005

Study on Cutting Simulation of SiC_p/Al Composites With Reinforced Particle Agglomeration Distribution

XIE Chaoyu ZHANG Xu CHENG Yaotian LIN Xudong WANG Ruojin

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600)

Abstract In order to study the effect of reinforced particle agglomeration distribution on the cutting process of SiC_p/Al composites, three orthogonal cutting finite element models with different SiC particle agglomeration size ratios were established and verified. The results show that with the increase of particle agglomeration size ratio, the continuity of sawtooth chip decreases and the shape becomes more irregular, and correspondingly the fluctuation degree, average value and peak value of cutting force increase. The cutting stress in the agglomeration area increases with the agglomeration size ratio increasing. Larger particle agglomeration size ratio leads to an increase in subsurface damage depth and maximum contour peak and valley height.

Key words Agglomeration distribution, SiC_p/Al composites, Finite element simulation, Stress distribution, Subsurface damage

0 引言

因比强度高、比刚度高、耐磨性高等特点,金属基复合材料在军事、航空航天等领域应用广泛^[1-2]。其中, SiC_p/Al 是一种典型的金属基复合材料。然而,传统的颗粒均匀分布金属基复合材料无法达到预定的强化效果。研究表明,复合材料的增强效果不仅与增强体的体积分数有关,还与增强体的空间分布有关^[3]。其中,增强体的团聚分布一直受到研究人员的关注。然而,目前已有研究仅仅侧重于增强体的团聚分布对复合材料力学性能的影响,关于增强体团聚分布对复合材料切削加工影响的研究甚少。SiC_p/Al 复合材料是一种典型的难加工材料,增强颗粒在刀具的作用下容易断裂和拔出,在加工表面上产生大量缺陷,因此难以获得良好的表面质量^[4-5]。颗粒的团聚分布在增强复合材料

力学性能的同时必定会对其切削加工性能产生影响。因此,研究增强颗粒团聚分布 SiC_p/Al 复合材料的切削加工过程对其结构设计也具有一定的指导意义。数值模型是研究 SiC_p/Al 复合材料的切削加工过程的有效方法。黄树涛等^[6]通过建立二维仿真模型研究了 SiC_p/Al 复合材料的切屑形成、表面缺陷特征。PRAMANIK 等人^[7]通过有限元法分析了 SiC_p/Al 复合材料加工过程中的切削机理。WANG^[8]建立了多种体积分数的颗粒随机分布有限元模型,得到了 SiC_p/Al 复合材料的切削表面质量与体积分数之间的关系。然而,目前关于增强颗粒团聚分布 SiC_p/Al 复合材料切削加工的研究甚少,尤其是团聚体参数变化对切削加工过程的影响机理还不够清晰。

本文基于 Al 基体、SiC 颗粒及内聚力单元的三相

收稿日期: 2022-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(51775328)

第一作者简介: 谢朝雨, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事复合材料加工工艺的研究工作。Email: 2895321331@qq.com

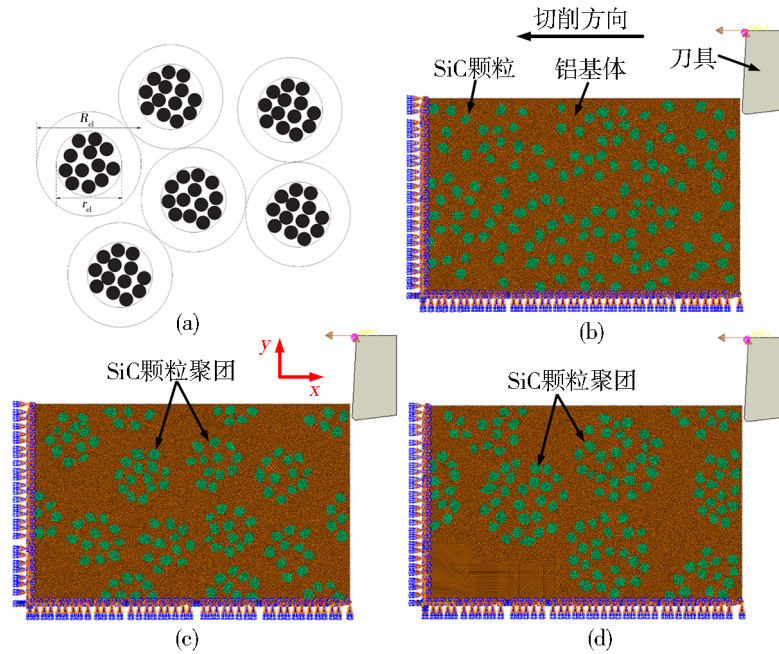
混合模型,采用ABAQUS 2020软件构建三种不同SiC颗粒团聚尺寸比的SiC_p/Al复合材料正交切削有限元模型,比较不同的颗粒团聚程度对切削加工过程中切屑、切削力、应力分布及表面质量的影响。

1 增强颗粒团聚分布的SiC_p/Al复合材料切削仿真

1.1 团聚模型的生成及有限元模型的构建

为了实现SiC颗粒的团聚分布,借鉴SEGURADO等人^[9]生成非均匀微观结构的算法。如图1(a)所示,首先在矩形基体内随机生成直径为 R_d 的互不干涉的圆形簇及直径为 r_d 的同心圆。接着将固定体积分数的SiC颗粒集中投放到同心圆内,各团

聚体形成孤立结构。颗粒平均直径及体积分数分别为15 μm,18%。本文在整体颗粒体积分数及粒径不变的条件下通过减小同心圆的直径 r_d 来控制颗粒的团聚程度。建立的有限元如图1所示,团聚颗粒呈现周期性。团聚尺寸比(r_d 与SiC颗粒直径之比)分别为5.3:1[图1(c)]和8:1[图1(d)],随机分布的团聚尺寸比为1:1[图1(b)],各团聚区域的局部颗粒体积均为30%。工件模型的尺寸为400 μm×250 μm,单元类型采用CPE4R。采用多边形模拟SiC颗粒,在颗粒和基体之间插入零厚度的内聚力单元作为界面。



注:(a) 颗粒团聚示意图^[9]; (b) 团聚尺寸比1:1; (c) 团聚尺寸比5.3:1; (d) 团聚尺寸比8:1。

图1 不同颗粒团聚程度的SiC_p/Al复合材料二维正交切削模型

Fig. 1 Two-dimensional orthogonal cutting model of SiCp/Al composites with different particle agglomeration degree

1.2 材料的本构模型

基体、SiC颗粒和PCD刀具的物理参数如表1所示。采用Johnson-Cook本构模型来表征Al2024的动态力学性能:

$$\sigma_{JC} = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中, σ_{JC} 、 ε 分别表示等效流动应力和等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 、 ε_0 分别表示等效塑性应变率和参考塑性应变率; T_r 、 T_m 分别表示参考温度和材料熔化温度;A、B和n表示材料的应变强化系数;C为应变率强化系数;m为热软化系数。铝基体的Johnson-Cook本构模型参数如表2所示。

表1 Al2024、SiC和PCD刀具的物理参数^[10]

Tab. 1 The physical parameters of Al2024, SiC and PCD cutting tools^[10]

材料属性	$k/(W \cdot mm^{-1} \cdot K^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	E/MPa	ν
Al2024	190	2.77	73 000	0.33
SiC	81	3.13	420 000	0.25
PCD	35	11.9	640 000	0.08

表2 Al2024的Johnson-Cook参数^[10]

Tab. 2 Johnson-Cook parameters of Al2024

A/MPa	B/MPa	C	n	m
352	440	0.008 3	0.42	1

1.3 SiC颗粒本构模型的构建

采用Brittle cracking模型来模拟SiC颗粒在切削过程中的损伤演化过程。颗粒在断裂前处于弹性状

态,断裂应力由最大正应力准则判断^[11]:

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_0 \quad (2)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力分量, σ_0 为颗粒的破碎应力。颗粒断裂后,采用断裂能准则控制其损伤演化,开裂位移 u_{n0} 可表示为:

$$u_{n0} = 2G_f^I / \sigma_u^I \quad (3)$$

式中, G_f^I 为材料的 I 型断裂能, σ_u^I 为 I 型裂纹形成时的失效力。

颗粒断裂之后的裂纹扩展由剪切应力控制,剪切模量 G_s 为:

$$G_s = \rho(\varepsilon_{nn}^{ck})G \quad (4)$$

式中, G 为材料失效前的剪切模量, $\rho(\varepsilon_{nn}^{ck})$ 为材料的剪切保留因子,其计算公式如下:

$$\rho(\varepsilon_{nn}^{ck}) = (1 - \frac{\varepsilon_{nn}^{ck}}{\varepsilon_{max}^{ck}})^p \quad (5)$$

式中, ε_{nn}^{ck} 为 SiC 颗粒的开裂应变, p 和 ε_{max}^{ck} 为材料参数。材料脆性断裂参数如表 3。

表 3 SiC 颗粒的脆性断裂参数^[11]

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

1.4 内聚力模型的构建

图 2 为内聚力单元的本构模型,采用最大名义应力准则判断初始损伤^[12]:

$$\max\left\{\frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_n^0}, \frac{\sigma_s}{\sigma_s^0}\right\} = 1 \quad (6)$$

式中 σ_n, σ_s 分别是应力的法向和切向分量; σ_n^0, σ_s^0 分别是最大名义法向应力及切向应力。内聚力层的开裂过程通过界面层强度 σ_{max} (图 2 曲线的应力最大值) 和界面断裂能 G^C (图 2 曲线和 x 轴围成的面积) 的参数值确定,界面断裂能由式(7)计算。

$$G^C = \frac{1}{2} (\sigma_{max} \times d_{fail}) \quad (7)$$

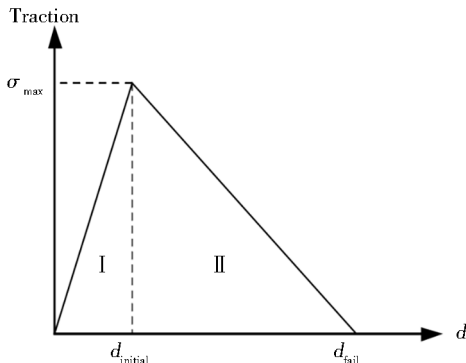


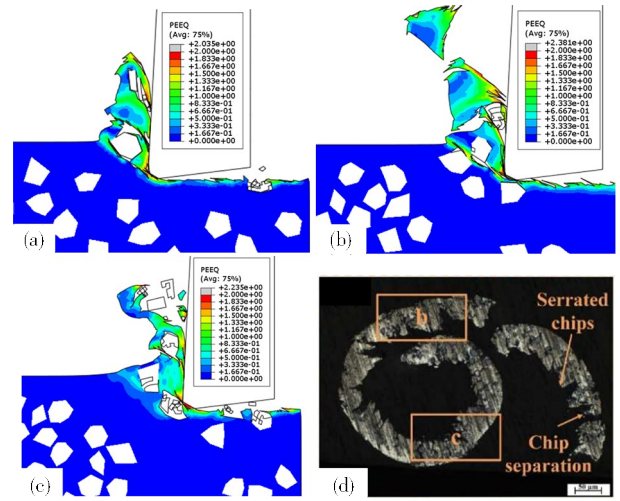
图 2 内聚力单元牵引力与位移的关系^[12]

Fig. 2 The relation between traction force and displacement of cohesive element^[12]

2 结果分析

2.1 切屑形貌

不同颗粒团聚程度的 SiC_p/Al 复合材料切屑形貌如图 3 所示,在相同的切削参数下模拟和实验得到的切屑均为典型的锯齿状,说明了仿真模型的准确性。在切削过程中,由于刀具的挤压作用,软相基体发生塑性变形,并逐渐形成剪切带。然而,硬质颗粒的存在会阻碍基体剪切带的形成,因此切屑的锯齿状不规则。从图中还可以看出,随着团聚尺寸比的增大,切屑变得更加不连续且形状更加不规则。这是因为刀具经过大的颗粒聚集区域时切削路径上的颗粒数量较多,切屑中会夹杂着更多破碎的颗粒,从而导致切屑更容易断裂分离。



注:(a) 团聚尺寸比 1:1; (b) 团聚尺寸比 5.3:1; (c) 团聚尺寸比 8:1; (d) 实验切屑形貌^[10]。

图 3 不同颗粒团聚程度的 SiC_p/Al 复合材料切屑形貌

Fig. 3 Chip morphology of SiC_p/Al composites with different agglomeration

2.2 切削应力分布及材料去除过程

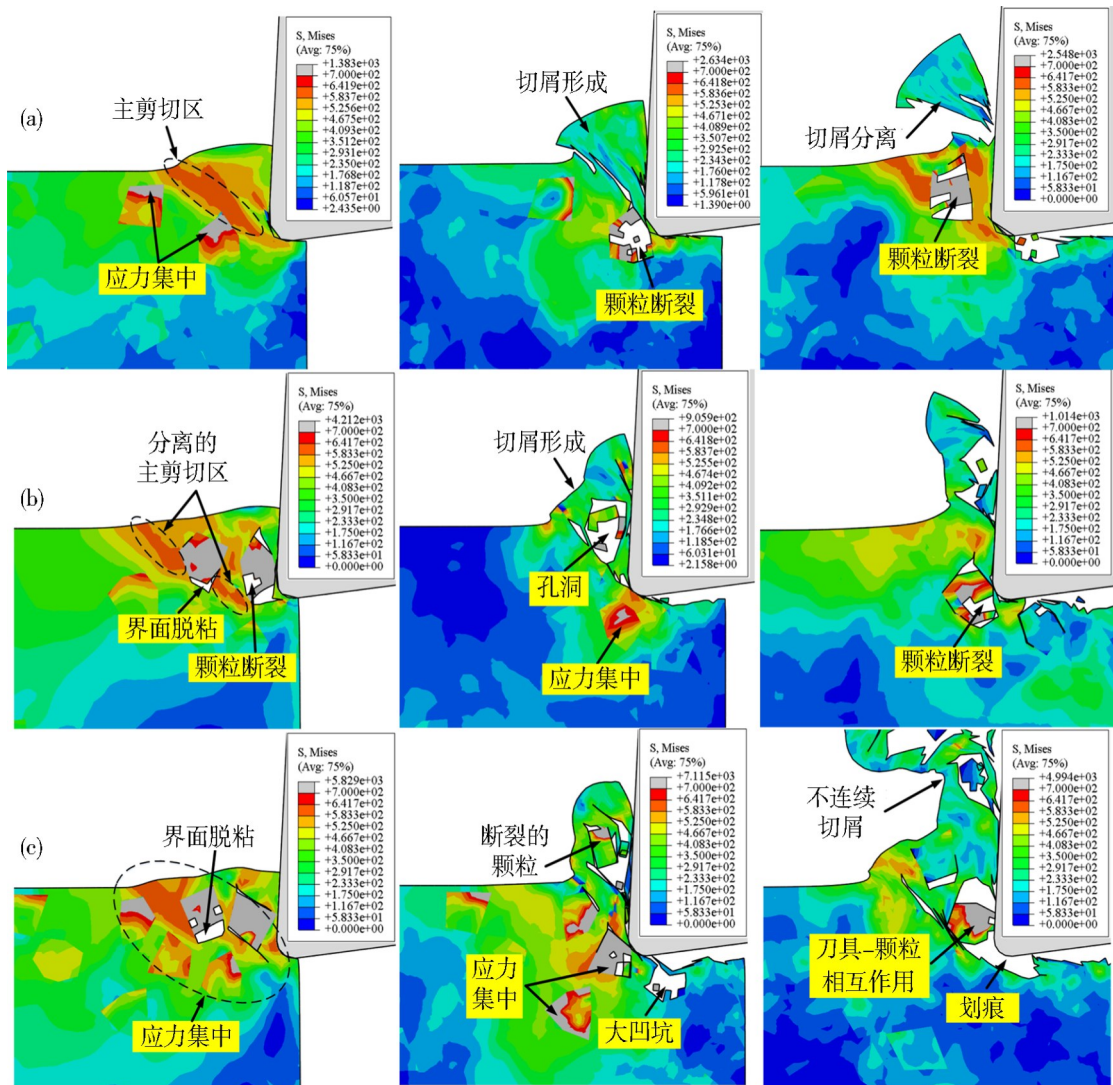
图 4 展示了颗粒团聚程度 SiC_p/Al 复合材料切削过程中的应力分布及材料去除过程。当团聚尺寸比为 1:1 [图 4(a)] 时,刀具切入工件,基体发生塑性变形并形成较为规则的剪切带。随着刀具的前进,切屑逐渐形成,切削路径上的颗粒受到刀具的挤压作用而发生断裂。而后,切屑与工件分离,在基体材料的挤压作用下,位于切削路上方的颗粒发生断裂,但不会影响加工表面质量。

当团聚尺寸比为 5.3:1 [图 4(b)] 时,颗粒呈聚集分布,切削的初始阶段刀具就与颗粒发生相互作用,导致颗粒脱粘和断裂。由于颗粒的分隔作用,应力剪切带被截断。刀具继续前进,切屑中夹杂的颗粒断裂并形成孔洞。随着刀具进一步切削,颗粒在刀

具的作用下与基体脱粘并转动,而后发生段断裂。

当团聚尺寸比增加至8:1[图4(c)]时,剪切带更加不规则,颗粒产生更大的应力集中,剪切区域产生界面脱粘损伤。随着刀具进一步切削,切屑形成并夹杂着破碎的颗粒。切削路径下方的颗粒断裂,产生大的凹坑缺陷。而后在刀具的作用下,颗粒脱粘并滚动,在加

工表面形成划痕,刀具-颗粒发生严重的相互作用。由于夹杂着更多数量的颗粒,切屑形态更加不连续。以上分析说明,随着颗粒团聚尺寸比的增大,刀具-颗粒产生了更强的相互作用,切削应力加剧。同时,加工表面易产生凹坑和划痕缺陷,从而降低加工表面质量。



注:(a) 团聚尺寸比1:1; (b) 团聚尺寸比5.3:1; (c) 团聚尺寸比8:1。

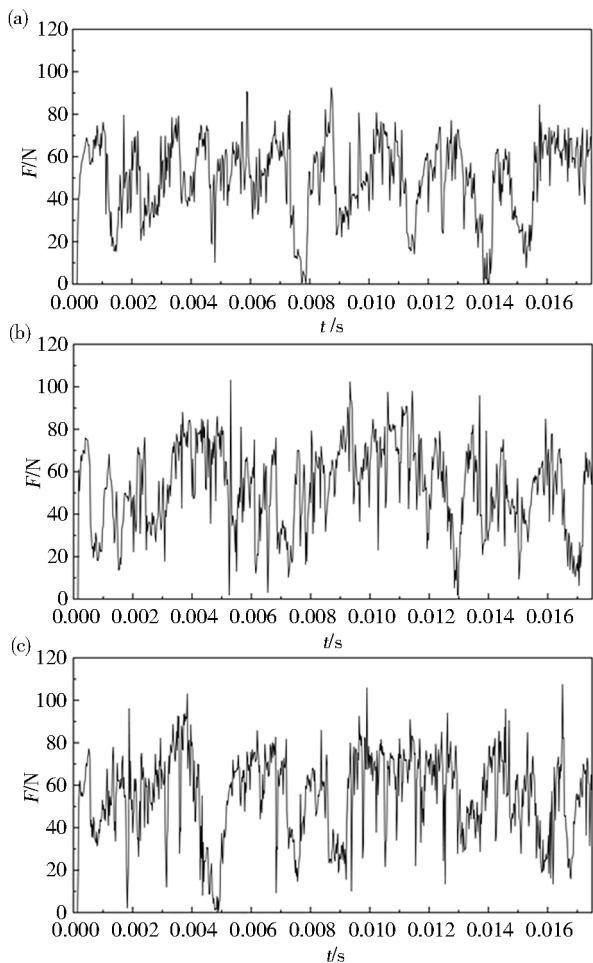
图4 切削应力分布及材料去除过程

Fig. 4 Stress distribution of SiC with different particle agglomeration degree

2.3 切削力特征

图5为颗粒团聚尺寸比分别为1:1、5.3:1和8:1时主切削力的变化特征。由于刀具和颗粒间的相互作用,三种SiC_p/Al复合材料的切削力波动程度都较大。如图6所示,颗粒团聚尺寸比为1:1时的主切削力为49.8 N,与实验^[10]测得切削力52 N的相对误差为4.2%,在合理误差范围内。将三者切削力进行对比可以看出,随着颗粒团聚尺寸比的增大,切削力波动程度增加,平均值和峰值增大。团聚尺寸比为8:1

时,复合材料平均切削力及最大切削力分别为55.1、107.4 N,相较于团聚尺寸比1:1的复合材料增加了10.6%、16.1%。这是因为团聚尺寸比增大时,团聚区域的颗粒数量增加,刀具与颗粒间更容易产生相互作用,团聚体对刀具的作用力增强,切削力也相应增加。而当刀具切削塑性较好的基体区域时,材料对刀具的作用力减弱,切削力相应降低。因此,大的颗粒团聚尺寸比会使切削力产生更大的波动,切削力值也相应增加。



注:(a) 团聚尺寸比1:1; (b) 团聚尺寸比5.3:1; (c) 团聚尺寸比8:1。

图5 不同颗粒团聚程度的SiC_p/Al复合材料切削力特征
Fig. 5 Cutting force characteristics of SiC_p/Al composites with different particle agglomeration

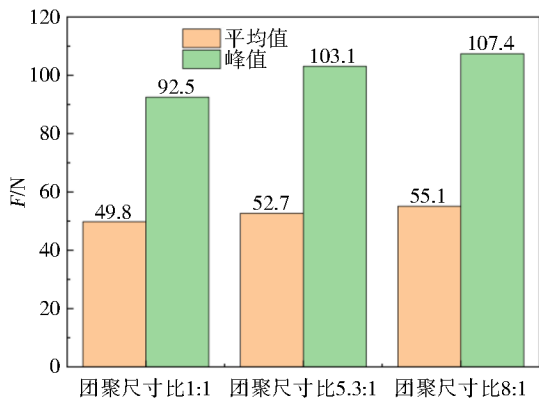


图6 主切削力的平均值和峰值

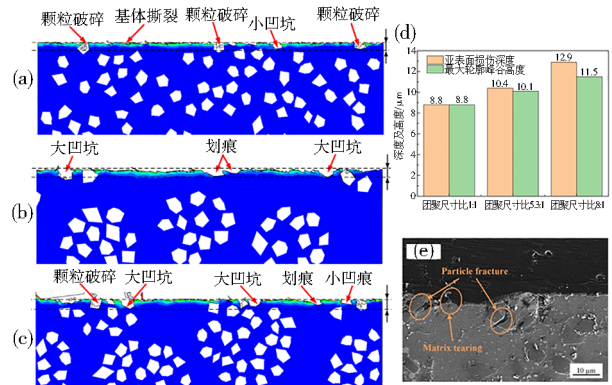
Fig. 6 Average and peak values of the main cutting forces

2.4 切削加工表面质量

图7为在相同切削条件下获得的三种颗粒团聚程度SiC_p/Al复合材料的切削表面形貌。从图中可以看出,加工表面存在多种缺陷,如颗粒破碎、基体撕裂、凹坑、划痕等,与在实验^[10]中观察到的缺陷种类相同[图7(e)]。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第4期

凹坑缺陷是由于颗粒从基体中脱粘所致,而划痕缺陷是脱粘的颗粒在刀具的推挤下沿着切削方向运动并在基体上留下的划刻痕迹。随着颗粒团聚尺寸比的增大,加工表面凹坑数量增多,缺陷深度增加。这是因为当团聚尺寸比增大时,较强的刀具-颗粒相互作用使得颗粒更容易脱粘和破碎,且更多数量的颗粒产生损伤,导致加工表面的缺陷数量和深度均增加。为了定量分析加工表面质量,现提取三种模型的亚表面损伤深度和最大轮廓峰谷高度。如图7(d)所示,团聚尺寸比为1:1时的亚表面损伤深度值为8.8 μm,与实验^[10]中测得的亚表面损伤深度9.5 μm接近,相对误差为7.4%。然而,随着颗粒团聚尺寸比的增大,亚表面损伤深度和最大轮廓峰谷高度均增大,加工表面质量恶化。颗粒团聚尺寸比由1:1增加至8:1时,亚表面损伤深度和最大轮廓峰谷高度分别增加了46.6%,30.7%。颗粒团聚程度的增加降低了SiC_p/Al复合材料的加工表面质量。



注:(a)团聚尺寸比1:1; (b)团聚尺寸比5.3:1; (c)团聚尺寸比8:1; (d)表面质量的表征参数; (e)加工表面截面^[10]。

图7 不同颗粒团聚程度的SiC_p/Al复合材料加工表面
Fig. 7 The machined surface of SiC_p/Al composites with different particle agglomeration

因此在SiC_p/Al复合材料的结构设计中应充分考虑颗粒团聚对其切削加工的影响,合理设计团聚体参数。

3 结论

(1) 建立了三种不同颗粒团聚程度的SiC_p/Al复合材料正交切削有限元模型,模拟得到的切削力值与实验值在误差范围之内。随着颗粒团聚尺寸比的增大,切屑中会夹杂着更多破碎的颗粒,使得切屑连续性降低且锯齿形状更加不规则。

(2) 颗粒团聚尺寸比增大,团聚体对刀具的阻力增加,切削力的波动程度、平均值及峰值均增大。团聚尺寸比由1:1增加至8:1,复合材料切削力平均值及峰值分别增加了10.6%、16.1%。大的颗粒团聚尺寸比会导致团聚区域的切削应力集中更加严重。

(3) 刀具与颗粒间的相互作用随团聚尺寸比的增大而增强,颗粒易于发生脱粘和破碎。团聚尺寸

比由 1:1 增加至 8:1, 亚表面损伤深度和最大轮廓峰谷高度相应增加 46.6%, 30.7%。较大的颗粒团聚尺寸比降低了 SiC_p/Al 复合材料的加工表面质量。

参考文献

[1] 张文毓. 铝基复合材料国内外技术水平及应用状况[J]. 航空制造技术, 2015(3): 82-85.

ZHANG W Y. Domestic and foreign technical level and application condition of aluminum matrix composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015 (3): 82-85.

[2] 刘海波, 王成辉, 周茜, 等. 石墨烯在金属基复合材料中的应用研究与进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(24): 8-20.

LIU H B, WANG C H, ZHOU Q, et al. Application research and progress of graphene in metal matrix composite [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(24): 8-20.

[3] HUANG L J, GENG L, PENG H X. Microstructurally inhomogeneous composites: Is a homogeneous reinforcement distribution optimal? [J]. Progress in Materials Science, 2015, 71: 93-168.

[4] 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.

[5] KANNAN S, KISHAWY H A. Surface characteristics of machined aluminium metal matrix composites [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(15): 2017-2025.

[6] 黄树涛, 王泽亮, 焦可如, 等. 高速正交切削 SiC_p/Al 复合材料的切屑形成及边界损伤仿真研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(10): 2717-2725.

HUANG S T, WANG Z L, JIAO K R, et al. Simulation study of chip forming and boundary damage on high speed orthogonal cutting SiC_p/Al composites [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(10): 2717-2725.

[7] PRAMANIK A, ZHANG L C, ARSECULARATNE J A. An FEM investigation into the behavior of metal matrix composites: Tool - particle interaction during orthogonal cutting [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(10): 1497-1506.

[8] WANG B B, XIE L J, WANG X B, et al. Simulation studies of the cutting process on SiC_p/Al composites with different volume fraction of reinforced SiC particles [J]. Materials Science Forum, 2014, 800-801: 321-326.

[9] SEGURADO J, GONZÁLEZ C, LLORCA J. A numerical investigation of the effect of particle clustering on the mechanical properties of composites [J]. Acta Materialia, 2003, 51(8): 2355-2369.

[10] YU W W, CHEN J, MING W W, et al. Experimental and FEM study of cutting mechanism and damage behavior of ceramic particles in orthogonal cutting SiC_p/Al composites [J]. Ceramics International, 2021, 47(5): 7183-7194.

[11] WANG Y, LIAO W, YANG K, et al. Investigation on cutting mechanism of SiC_p/Al composites in precision turning [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 100: 963-972.

[12] 王旭. 铝基碳化硅微切削仿真方法及表面完整性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.

WANG X. Research on Micro Cutting Simulation Method and Surface Integrity of SiC_p/Al [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.