

SiC_p/Al 复合材料切削仿真研究

李桂金

(江西科技学院机械工程学院,南昌 330098)

文 摘 针对 SiC_p/Al 复合材料的难加工性,建立了二维有限元切削模型,利用 ABAQUS 完成复合材料正交切削的动态物理仿真。通过仿真与实验结果比较,验证模型的准确性。同时,利用该切削模型分析颗粒分布形式、直径及刀尖圆弧半径对切削力的影响。结果表明, SiC 颗粒的分布形式对切屑形态和切削力具有明显的影响,颗粒形成团簇不利于复合材料加工。切削力随颗粒直径的增大而减小,随刀尖圆弧半径的增大而增大。

关键词 SiC_p/Al 复合材料,微观结构,有限元仿真, SiC 颗粒,加工参数

中图分类号:TB333;TG501

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.06.003

Cutting Simulation of SiC_p/Al Composite Materials

LI Guijin

(School of Mechanical Engineering, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098)

Abstract Based on the difficult machinability of Al/SiC_p composite materials, a two dimensional finite element cutting model was developed in this paper. By using ABAQUS, the dynamic simulation of the cutting model was performed. Comparison of the result of simulation and experiment, the accuracy of the cutting model was verified. And then, the distribution form of SiC particle, the diameter of particle and the edge radius of tool effect on the cutting force were analyzed based on the model. The results show that the distribution form of SiC affects the chip morphology and the cutting forces are obvious, and particle clusters is not helpful for composite materials machining. The cutting force decreases with the increase of particle diameter, while increases with edge radius of tool.

Key words SiC_p/Al composite materials, Microstructure, Finite element simulation, SiC particle, Processing parameters

0 引言

SiC_p/Al 复合材料因其优异的力学性能而在航空航天等领域广泛应用^[1-2],也因其难加工性限制了发展应用。因此,许多学者致力于研究 SiC_p/Al 复合材料的切削过程。KISHAWY 等^[3]采用正交方法,研究了切削参数对切削力的影响规律;PRAMANIK 和 ZHANG^[4]通过车削试验分析了 SiC_p/Al 复合材料的切削机理;EI-GALLAB 和 SKLAD^[5]研究了三种刀具前角对 SiC_p/Al 复合材料的切削影响;KILICKAP 等^[6]利用车削试验,研究了 SiC_p/Al 复合材料的表面质量;JOSH 等^[7]分析了 SiC 颗粒的体积分数对切屑形成的

影响;DAVIM^[8]探讨了切削速度、进给速率等对 SiC_p/Al 复合材料加工的影响;DANDEKAR 和 SHIN^[9]通过一种多尺度建模的方法分析了颗粒分布对切屑形成、颗粒间剪切带的影响;王阳俊^[10]探讨了高体积分数比 SiC_p/Al 复合材料在高速切削下加工表面缺陷的形成机制;黄树涛等^[11]研究了高速切削 SiC_p/Al 复合材料中切削用量对边界损伤的影响规律;刘闯等^[12]则仿真分析了高速铣削 SiC_p/Al 复合材料的温度场、切屑形状及切削参数对切削力的影响。

以上研究大部分侧重于实验,在一定程度上揭示了材料的切削机理和刀具磨损现象。本文基于 SiC 颗

收稿日期:2017-03-16;修回日期:2017-06-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51563010)

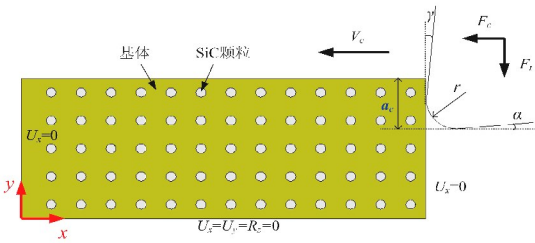
第一作者简介:李桂金,1974 年出生,讲师,主要从事材料加工成型研究工作。E-mail:530378816@qq.com

粒和 Al 基微观结构,采用数值模拟,建立 SiC_p/Al 复合材料微观有限元动态切削仿真模型,预测其切削过程中的切削力、切屑形态,并探讨了 SiC 颗粒分布方式,颗粒尺寸和刀具圆弧半径对切削力的影响。

1 SiC_p/Al 复合材料有限元切削仿真

1.1 有限元切削模型的建立

基于两种不同材料属性的微观结构(即基体和 SiC 颗粒),建立了 SiC_p/Al 复合材料二维有限元切削力学模型,如图 1 所示。考虑切削过程具有大应变、非线性的特征,采用 ABAQUS/Explicit 模块进行有限元的切削仿真。模型中单元采用四节点缩减应变单元(CPE4R)和自动沙漏控制,模型的尺寸为 1 mm×0.5 mm。刀具设定为刚体,在仿真过程中给予 x 方向上的载荷。设置模型底部为固定约束($U_x = U_y = R_z = 0$),模型左右两侧为 x 方向的位移约束($U_x = 0$)。基于罚函数的原理,定义刀具与工件之间的接触,并基体和 SiC 颗粒之间定义自接触,以避免单元在切削过程中互相渗透。同时,采用库仑摩擦定律描述模型中刀具与工件的摩擦作用,摩擦因数为 0.45。仿真所用的两种材料性能参数^[2,13]见表 1。



注: v_c 为切削速度, a_c 为切削深度, γ 为刀具前角, α 为刀具后角, r 为刀尖圆弧半径, F_c 为主切削力, F_t 为切深抗力。

图 1 SiC_p/Al 复合材料正交切削模型

Fig.1 Orthogonal cutting model of Al/SiC_p composites

表 1 切削仿真中所用材料的性能参数^[2,13]

Tab.1 Properties of material used in the cutting simulation

材料	$E/$ GPa	ν	$\rho/$ $g \cdot cm^{-3}$	$\alpha/$ $10^{-6} K^{-1}$	$\lambda/$ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	$C_p/$ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
Al1100	70	0.27	2700	23.6	180	880
SiC	400	0.17	3200	4.9	81	427

1.2 材料本构模型及失效分离准则

考虑到 SiC 颗粒在切削仿真中很难变形,因此只设置其材料性能,材料模型为 $\sigma = E\epsilon$ 。Al 是弹塑性材料,采用 Johnson-Cook 本构方程^[14]对其进行定义:

$$\sigma_f = \left[A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中, A 为材料在准静态下的屈服强度, B 和 n 为应变硬化的影响系数, C 为应变率敏感指数; m 为温度软化系数; $\bar{\epsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为准静态参考应变率; T_m 为材料的熔点温度; T_r 为材料所处环境温度。采用 Johnson-Cook 剪切失效准则^[14]来反映切屑与工件的失效分离情况,具体表达式为

$$\omega = \Sigma \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \right) \quad (2)$$

式中, $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变增量, $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 为当前条件下的失效应变。当材料失效参数 ω 超过 1 时,材料发生失效并删除相关单元。 $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 可由下式确定:

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (3)$$

式中, $d_1 \sim d_5$ 为失效参数,是在 \leq 转变温度的情况下测得的; p/q 为无量纲偏压应力比(p 为压应力, q 为 Miss 应力),仿真所用的材料参数和失效参数^[13]见表 2。

表 2 Al1100 基体的 Johnson-Cook 参数^[13]

Tab.2 Material parameters of Al1100 used in

Johnson-Cook model

$A/$ MPa	$B/$ MPa	n	C	m	$T_m/$ K	$T_r/$ K	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
148	361	0.183	0.001	0.859	1220	298	0.071	1.248	-1.142	0.147	0.1

2 结果分析

2.1 切削力验证

仿真分析中所用的加工参数如表 3 所示。

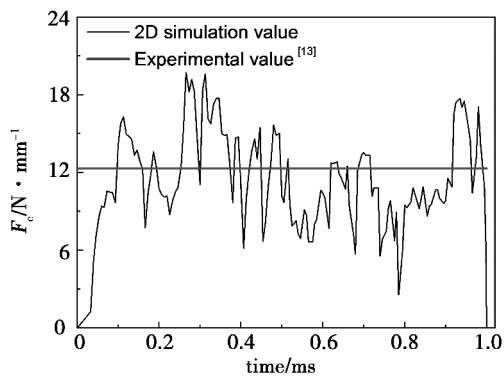
表 3 切削仿真中所用的加工参数

Tab.3 Processing parameters used in the cutting simulation

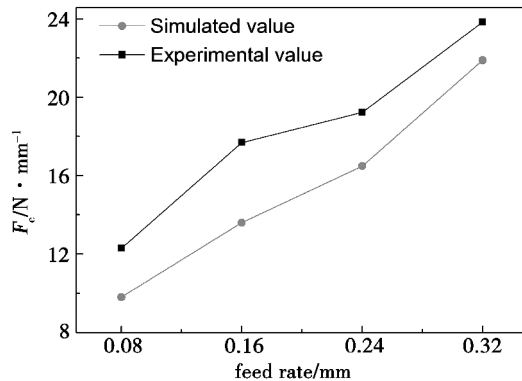
方案	前角 γ /(°)	后角 α /(°)	刀尖圆弧半 径 $r/\mu m$	切削速度 $v_c/m \cdot min^{-1}$	切深深度 a_c/mm
1#	5	5	60	60	0.08
2#	5	5	50	60	0.08
3#	5	5	40	60	0.08

为验证模型的准确性,采用与实验^[13]相同的切削条件(方案 1)模拟 SiC_p/Al 复合材料的切削过程。图 2 为 SiC_p/Al 复合材料切削时主切削力 F_c 仿真值与实验值的比较。由图 2(a)可知,在切削初始阶段 F_c 线性增加,当进入稳定切削状态后, F_c 存在一定范围的波动。这是由于在复合材料切削时,颗粒与刀具间发生不连续的相互碰撞。图 2(b)为 4 种不同切削厚度下 F_c 的仿真值与实验值^[13],可以看到,两者的最大误差为 15.7%。由此,可以验证该有限元切削模型的正确性。利用该模型,还分析了不同颗粒直径和刀

尖圆弧半径对切削力变化规律的影响。



(a) 主切削力随时间的变化



(b) 主切削力随切削厚度的变化

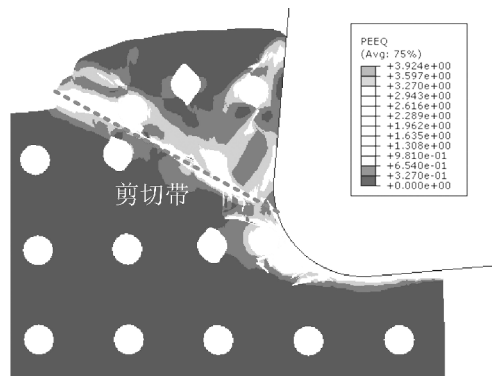
图2 SiC_p/Al 复合材料主切削力仿真值与实验值^[13]的比较

Fig.2 Comparison of cutting force between simulation and experiment^[13] in Al/SiC_p composites machining

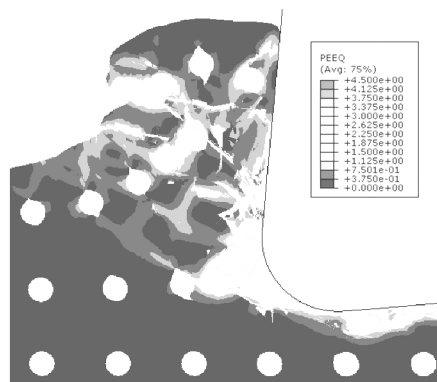
2.2 切屑形成机理

SiC_p/Al 复合材料的切屑形成过程如图 3 所示。在 $t=0.2$ ms 时,即刀具切入工件后基体先发生塑性变形,最大塑性应变出现在主变形区并形成第一个剪切带,如图 3(a) 所示;在 $t=0.4$ ms,最大塑性应变出现在 SiC 颗粒与基体间的界面,颗粒出现明显的应力集中,但不会破碎,而基体发生剪切滑移,如图 3(b)

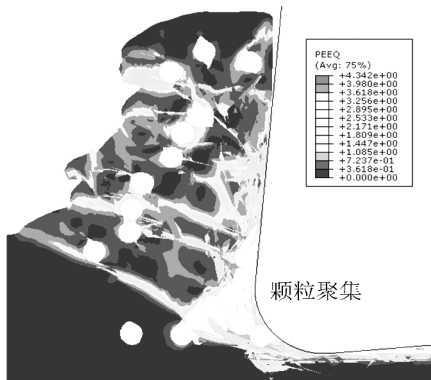
所示;随着刀具进一步进给 ($t=0.8$ ms),未破碎的 SiC 颗粒慢慢聚集在刀尖处并有孔隙生成,颗粒周围的基体材料则发生失效撕裂,使得剪切带上的各段微裂纹连接成一体,最终形成含有 SiC 颗粒的锯齿状切屑,如图 3(c) 所示。对比实验测得的切屑形貌^[13],仿真和实验切屑都能明显观察到锯齿状切屑。



(a) $t=0.2$ ms



(b) $t=0.4$ ms



(c) $t=0.8$ ms



(d) 切屑形貌^[13]

图3 SiC_p/Al 复合材料的切屑形成过程

Fig.3 Process of chip formation during cutting of Al/SiC_p composites

2.3 颗粒分布形式的仿真分析

实际上, SiC 颗粒在基体中的分布不一定会遵从均匀分布的方式。图 4 为不同 SiC 颗粒分布方式的

仿真分析。其中,颗粒均匀分布的切削过程较为平稳,产生的锯齿状切屑比较均匀,尺寸也较小;颗粒随机分布的切削过程较不平稳,形成的切屑较大且锯齿

状不明显;而随机带团簇分布的仿真中,由于基体材料易在颗粒团簇处断裂,因此其切削过程最不平衡,形成的切屑差异最明显。同时,不同的颗粒分布方式对切削力的影响不同,如图4(d)所示。其中,随机带

团簇分布的切削仿真产生了最大的切削力,而随机分布的切削力最小。这说明,颗粒的团簇不利于SiC_p/Al复合材料的切削加工。

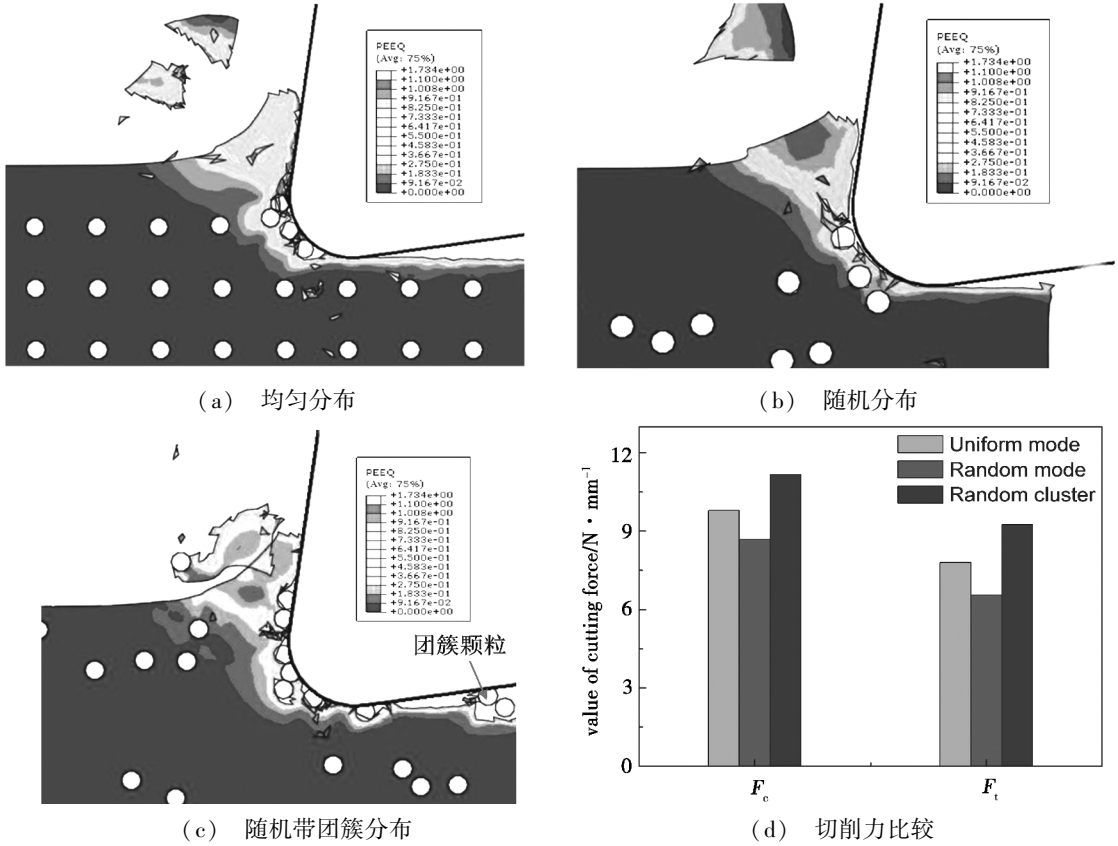


图4 不同颗粒分布方式的仿真分析

Fig.4 Simulated analysis of different particle distributions

2.4 加工参数对切削力的影响

图5(a)为颗粒均匀分布条件下颗粒直径对切削力变化规律的影响。可以看出,在10~20 μm,切削力随着颗粒直径的增加而减小。分析发现,在颗粒体积分数比一定的情况下,颗粒直径的增大使得切屑更易出现断屑,减小了切屑与刀具的作用,导致了切削

力下降。图5(b)为颗粒均布条件下刀尖圆弧半径对切削力变化规律的影响。可以看到,切削力随着刀尖圆弧半径的增加而增加。这是因为刀尖圆弧半径越大,其对材料的挤压作用越大,说明大的刀尖圆弧半径不利于SiC_p/Al复合材料的切削。

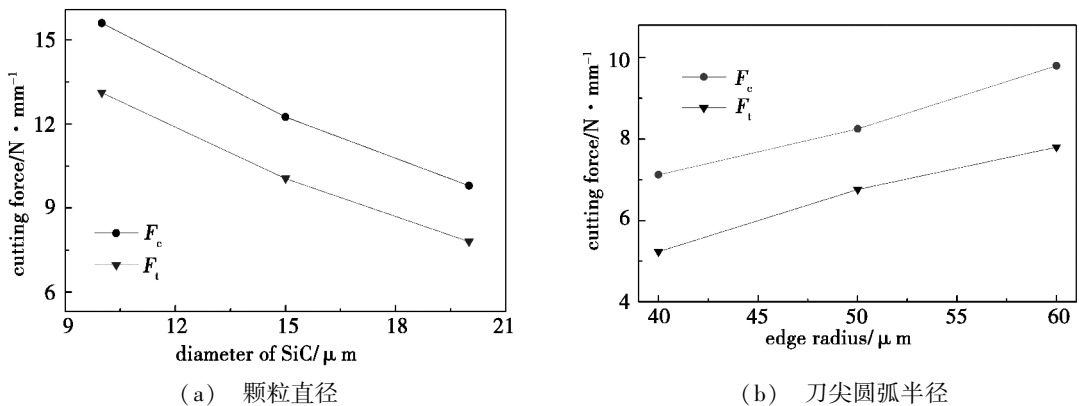


图5 不同加工工艺参数对切削力的影响

Fig.5 Effect of processing parameters on the cutting force

3 结论

(1)建立了 SiC_p/Al 复合材料二维动态有限元切削模型,该模型能很好的模拟复合材料的切削过程;分析了 SiC_p/Al 复合材料的材料去除过程,得到的仿真切屑与实验结果基本一致。

(2)模拟了 3 种不同 SiC 颗粒分布形式的切屑和切削力,得到均匀分布产生的锯齿状切屑比较均匀;颗粒随机分布形成的切屑较大且锯齿状不明显;随机带团簇分布产生的切屑形状差异最明显。对比 3 种颗粒分布的切削力发现,随机带团簇分布的切削力最大,说明颗粒形成团簇不利于复合材料加工。

(3)通过加工工艺参数对切削力的影响分析发现,切削力随着刀尖圆弧半径的增大而增大,相反,切削力随颗粒直径的增大而减小。

参考文献

[1] 王进峰,储开宇,赵久兰,等.SiC_p/Al 复合材料切削仿真及实验研究[J].人工晶体学报,2016,45(7):1756-1764.

[2] 戴志成,常国瑞,周丽.SiC_p/Al 复合材料钻削加工棱边缺陷影响因素的研究[J].工具技术,2016,50(4):50-54.

[3] KISHAWY H A, KANNAN S, BALAZINSKI M. An energy based analytical force model for orthogonal cutting of metal matrix composites[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 91-94.

[4] PRAMANIK A, ZHANG L C. Prediction of cutting forces in machining of metal matrix composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14): 795-803.

[5] EI-GALLAB M, SKLAD M. Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites: Part I: Tool performance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83(1/3): 151-158.

[6] KILICKAP E, CAKIR O, AKSOY M. Study of tool wear

and surface roughness in machining of homogenized SiC_p reinforced aluminum metal matrix composite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164: 862-867.

[7] JOSHI S S, RAMAKRISHNAN N, RAMAKRISHNAN P. Micro-structural analysis of chip formation during orthogonal machining of Al/SiC_p composites[J]. Journal of Engineering Materials and Technology-Transaction of The ASME, 2001, 123(3): 315-321.

[8] DAVIM J P. Design of optimization of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal arrays [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132(1/3): 340-344.

[9] DANDEKAR C R, SHIN Y C. Multi-step 3-D finite element modeling of subsurface damage in machining particulate reinforced metal matrix composites[J]. Composites: Part A. 2009, 40(8): 1231-1239.

[10] 王阳俊. SiC_p/Al 复合材料高速铣削表面质量及刀具磨损研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.

[11] 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.

[12] 刘闯, 黄树涛, 周丽, 等. SiC_p/Al 复合材料高速铣削的有限元仿真研究[J]. 工具技术, 2013, 47(9): 34-38.

[13] FATHIPOUR M, HAMED M, YOUSEFI R. Numerical and experimental analysis of machining of Al (20vol% SiC) composite by the use of ABAQUS software[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2013, 44(1): 14-20.

[14] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.