

# 不同SiC颗粒本构模型在SiC<sub>p</sub>/Al复合材料切削仿真中的应用

林洁琼 孟繁昊 卢明明 杜永盛 高 强

(长春工业大学机电工程学院, 长春 130012)

**文 摘** 基于有限元仿真软件建立SiC颗粒为JH2本构模型的SiC<sub>p</sub>/Al复合材料切削模型,并与前人的切削试验进行了对比,研究不同SiC颗粒本构模型的变化规律以及其切屑、表面形貌和切削力。结果表明,切削JH2模型SiC颗粒的SiC<sub>p</sub>/Al复合材料所产生的切屑较为破碎,材料表面不同位置的颗粒更接近实际切削实验中会出现挤出、碎断和凸起的情况,整体切削力波动较为平缓。JH2本构模型的SiC颗粒适用于SiC<sub>p</sub>/Al复合材料切削仿真。

**关键词** SiC<sub>p</sub>/Al复合材料, SiC颗粒, 本构模型, 有限元仿真

中图分类号: TG506

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.06.005

## Application of Different SiC Particle Constitutive Models in Cutting Simulation of SiC<sub>p</sub>/Al Composites

LIN Jieqiong MENG Fanhao LU Mingming DU Yongsheng GAO qiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technolog, Changchun 130012)

**Abstract** A cutting model for SiC<sub>p</sub>/Al composite material with SiC particles as JH2 constitutive model was established based on finite element simulation software, and was compared with previous cutting experiments. The research studied the trends associated with various SiC particle constitutive models, as well as the chip, surface morphology, and cutting force. The results show that the chips produced when cutting the SiC particles use the JH2 model in SiC<sub>p</sub>/Al composite material are more fragmented, and the particles at different positions on the material surface are closer to the actual cutting experiment, where there are extrusion, fracture, and protrusion. The overall cutting force fluctuates more gently. It is concluded that the JH2 constitutive model of SiC particles is suitable for cutting simulation of SiC<sub>p</sub>/Al composite material.

**Key words** SiC<sub>p</sub>/Al composites, SiC particles, Constitutive model, Finite element simulation

### 0 引言

SiC<sub>p</sub>/Al复合材料具有密度低、比强度及比模量高、尺寸稳定性及热稳定性好等优点,而成为航空航天、光学元器件和汽车等领域的关键材料,不可替代<sup>[1]</sup>,但其难加工,应用受到了限制。

相较于传统的实验方法,有限元方法能够准确得到切削实验中难以获取的数据,进而为实际加工提供理论指导,为此必须选择正确的仿真模型。W. XU利用有限元仿真软件建立了SiC<sub>p</sub>/Al复合材料等效均匀模型、多相混合物模型和多相混合物粘性模

型,并对三种模型进行了比较分析<sup>[2]</sup>。X. GAO建立了具有网络颗粒结构的三维模型,并对其强化和断裂行为进行了数值研究;结果表明平行于外载荷方向的SiC颗粒壁具有较高的承载能力,而垂直于外载荷方向的SiC颗粒壁具有与均质复合材料相似的应力<sup>[3]</sup>。C. Y. XIE建立了综合考虑颗粒分布、颗粒-基体界面模型及颗粒损伤行为的切削仿真模型;研究了SiC<sub>p</sub>/Al复合材料的切削机理以及切削参数对加工表面质量的影响规律<sup>[4]</sup>。Y. WANG通过有限元模拟和精密车削实验研究了SiC颗粒在车削过程中可能的断

收稿日期: 2022-09-13

基金项目: 热弹激励-超声冲击耦合切削颗粒增强金属基复合材料新原理与新方法(U19A20104)

第一作者简介: 林洁琼, 1969年出生, 教授, 研究方向为微纳与精密制造。E-mail: linjieqiong@ccut.edu.cn

通信作者: 卢明明, 1985年出生, 教授。E-mail: lummm@ccut.edu.cn

裂过程和SiC颗粒增强铝基复合材料的切削机理<sup>[5]</sup>。

本文基于有限元仿真软件建立SiC颗粒为JH2本构模型的SiCp/Al复合材料切削有限元仿真模型对比不同SiC颗粒本构模型切削后的结果<sup>[6-8]</sup>，再与前人论文中的切削试验对比<sup>[9]</sup>，研究SiCp/Al复合材料切削时不同SiC颗粒本构模型的变化规律以及其切屑、表面形貌和切削力，分析不同SiC颗粒本构模型对其变化规律的影响。

## 1 建立仿真模型

由于需要充分考虑SiC增强颗粒的随机性，本文以Python脚本语言编写相关程序，完成空间内生成随机SiC颗粒的程序编写，利用有限元仿真软件建立Al基体、SiC颗粒部件以及刀具模型，如图1所示。工件长0.6 mm，宽0.3 mm的矩形，其中SiC颗粒直径为30.0 μm，颗粒体积分数为35%。刀具前角 $\gamma=7^\circ$ 、后角 $\alpha=8^\circ$ ，仿真是对SiCp/Al复合材料进行研究，故切削过程中可不考虑刀面磨损，因此将刀具设置为刚体。设置RP为刀具的参考点。Al基体和SiC颗粒均采用四面体单元网格划分技术，采用拉格朗日自适应网格划分技术对模型进行网格划分。网格单元类型选择四节点双线性平面应变单元(CPE4R)，在Al基体和SiC颗粒之间添加内聚力单元，来模拟Al基体与SiC颗粒之间的粘性连接。设置刀具面-工件面相接触，且存在切向摩擦和法向摩擦，切向摩擦因数设置为0.3；法向摩擦用于避免仿真切削过程中出现刀具与工件穿透现象。同时采用库伦摩擦定律描述模型中刀具与工件的摩擦作用，摩擦因数为0.3。模型

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

式中， $d_1 \sim d_5$ 为铝基体材料断裂准则失效参数； $p$ 为压应力； $q$ 为冯米塞斯应力； $\frac{p}{q}$ 为无量纲偏压应力比。

基体材料主要物理力学性能和本构模型中相关参数及仿真所用失效参数见表1和表2<sup>[11]</sup>。

表1 Al基体主要物理力学性能参数

Tab. 1 Main physical and mechanical properties of Al matrix

$\rho$	$E$	$\nu$	$A$	$B$	$C$	$N$	$M$	$T_m$	$T_r$
/kg·m <sup>-3</sup>	/GPa		/MPa	/MPa				/°C	/°C
2828	70.6	0.35	224	426	0.02	0.2	0.869	630	25

表2 Al基体仿真所用失效参数

Tab. 2 Failure parameters for Al matrix simulation

$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
0.13	0.13	-1.5	0.011	0

SiC材质硬脆，当刀具与SiCp/Al复合材料中SiC颗粒接触时，SiC颗粒在受到碰撞，内部会产生横向、

底部为固定约束( $U_x=U_y=R_z=0$ )。

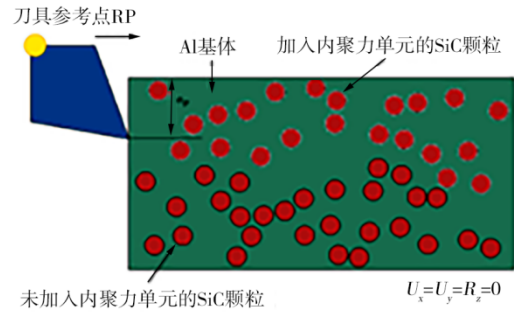


图1 SiCp/Al复合材料切削模型

Fig. 1 Cutting model of SiCp/Al composites

## 2 材料本构模型和断裂准则

铝基体被视为可变形的且具有破坏准则的热弹塑性材料，故可采用Johnson-Cook模型表征<sup>[10]</sup>。

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

式中， $\sigma$ 为等效流动应力， $A$ 为屈服强度， $B$ 为硬化模量， $C$ 为应变率敏感系数， $n$ 为硬化系数， $m$ 为热软化系数。 $\varepsilon$ 为塑性应变， $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率， $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率， $T_m$ 为融化温度， $T_r$ 为室温。

利用JC本构方程定义切削加工过程中铝基体材料的切屑分离准则，当损伤参数 $D=1$ 时，材料开始失效，具体表达式为：

$$D = \frac{\Delta\varepsilon^n}{\varepsilon^n} \quad (2)$$

式中， $\Delta\varepsilon^n$ 为等效塑性应变增量，断裂时初始等效塑性应变的定义为：

纵向两种裂纹，还会随着裂纹的生长演化成脆性断裂<sup>[12]</sup>。根据硬脆材料的去除机理，本文使用子程序建立JH2本构模型。

JH2强度模型中运用损伤参数 $D$ 来调整面与面之间的等效应力，其中定义的归一化强度模型为<sup>[13]</sup>：

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (4)$$

式中， $\sigma^*$ 为量纲一等效力。

当材料未发生损伤 $D=0$ 时，量纲一等效力可以表示为：

$$\sigma_i^* = A(p^* + \sigma_{lm}^*)^N \cdot [1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \quad (5)$$

当材料完全破碎 $D=1$ 时，量纲一等效力为：

$$\sigma_f^* = B(p^*)^M \cdot [1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \quad (6)$$

式中， $p^*$ 为归一化静水压力，为：

$$p^* = p/p_{HEIL} \quad (7)$$

仿真所使用的SiC颗粒主要物理力学性能参数

和本构模型中相关参数和仿真所用SiC颗粒失效参数如表3和表4所示<sup>[14]</sup>。

表3 SiC颗粒主要物理力学性能参数

Tab. 3 Main physical and mechanical properties of SiC particles

$\rho$	$G$	$A$	$B$	$C$	$N$	$M$	$T^*$	SFMAX	HEL	$p_{HEL}$
/kg·m <sup>-3</sup>	/GPa	/MPa	/MPa				/°C	/MPa	/GPa	/MPa
3215	193	0.96	0.35	1	0.65	1	750	1.237	11.7	5130

表4 SiC颗粒仿真所用失效参数

Tab. 4 Failure parameters for SiC particle simulation

$D_1$	$D_2$	$K_1/10^5$	$K_2/10^5$	$K_3$
0.48	0.48	2.2	3.61	0

由裂纹导致的损伤参数 $D$ 的定义如下:

$$D = \sum(\Delta\varepsilon_p^{eff}/\varepsilon_p^f) \quad (8)$$

式中,  $\varepsilon_p^f = D_1(p^* + \sigma_{tm}^*)/D_2 \quad (9)$

裂纹产生前静水压力为:

$$p = K_1\mu + K_2\mu^2 + K_3\mu^3 + \Delta p \quad (10)$$

式中, $K_1, K_2, K_3$ 为弹性常数,用于表述SiC的受力变形程度:

$$\Delta p_{t+\Delta t} = -K_1\mu_{t+\Delta t} + \sqrt{(K_1\mu_{t+\Delta t} + \Delta p_t)^2 + 2\beta\Delta UK_1} \quad (11)$$

### 3 仿真分析

在Al基体本构模型和刀具几何参数(刀具前角 $20^\circ$ ,刀具后角 $10^\circ$ )不变的条件下,将不使用本构模型的SiC<sub>p</sub>/Al复合材料和3种不同SiC颗粒本构模型SiC<sub>p</sub>/Al复合材料进行仿真。

#### 3.1 不同SiC颗粒本构模型破损情况对比

在SiC<sub>p</sub>/Al复合材料发生动态变形行为时会出现脆硬颗粒发生断裂和从基体界面中脱粘这两种形式的损伤<sup>[15]</sup>。在进行有限元仿真的过程中当刀具切削SiC<sub>p</sub>/Al复合材料时,铝基体由于塑性变形而拱起,颗粒由于不同的本构模型,因而出现的效果也如同图2所示。

无SiC颗粒本构模型时,颗粒无法被破坏,因而SiC颗粒只能在刀具的作用下对Al基体进行挤压或刀具把SiC颗粒从Al基体中拨出。

SiC颗粒本构模型为D-P模型时,颗粒与Al基体颗粒整体有因刀具的挤压下与Al基体有分离的趋势。刀具与SiC颗粒接触后没有产生裂纹,SiC颗粒在刀具的作用下进行切除。颗粒在刀具的作用下与Al基体挤压,会在颗粒与Al基体之间产生缝隙。

SiC颗粒本构模型为脆性开裂模型时,SiC颗粒整体有因内部裂纹变大而使颗粒破碎的趋势,刀具作用在SiC颗粒上,颗粒与刀具的接触点以及SiC颗粒的内部产生裂纹。随着时间增加,刀具与SiC颗粒的接触面产生的裂纹与颗粒内部产生的裂纹不断扩

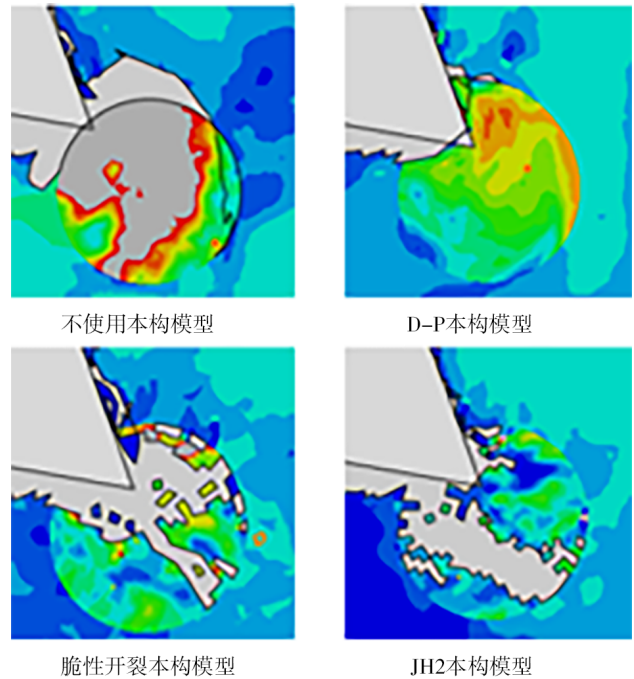


图2 SiC<sub>p</sub>/Al复合材料切削模型

Fig. 2 Cutting model of SiC<sub>p</sub>/Al composites

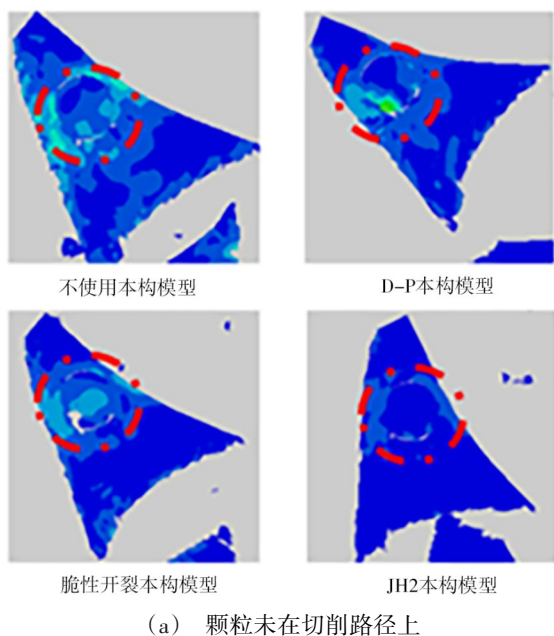
展并且裂纹逐渐变大。

SiC颗粒本构模型为JH2模型时,颗粒整体有因表面裂纹扩展而颗粒断裂的趋势,刀具与SiC颗粒接触后,裂纹产生的位置只有颗粒与刀具接触的表面,SiC颗粒本身不会产生裂纹。随着时间增加,刀具与SiC颗粒的接触面产生的裂纹不断扩展并且裂纹逐渐变大更贴合实际情况。

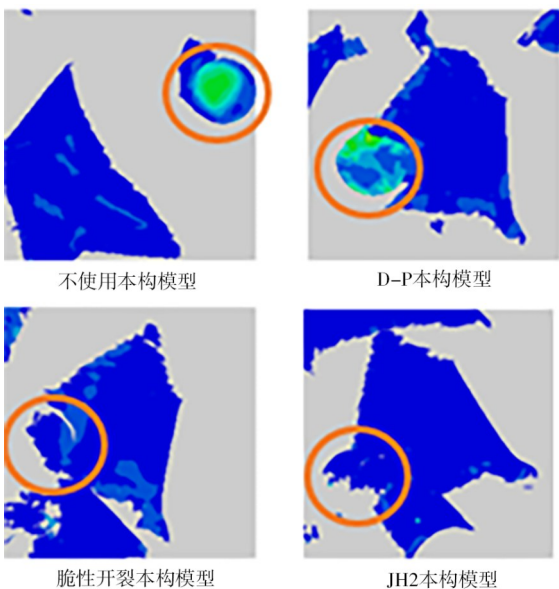
#### 3.2 不同SiC颗粒本构模型所产生的切屑分析

SiC<sub>p</sub>/Al复合材料中的颗粒对切屑形成有重要影响,试验中可以看出切屑形态整体呈现不规则锯齿状<sup>[16]</sup>。在仿真过程中,刀具对复合材料的去除量较大时,在切削的过程中产生单个锯齿形的切屑。

无SiC颗粒本构和3种不同本构的SiC颗粒断裂方式不同,从而所产生的切屑表现也不尽相同,如图3所示。当SiC颗粒未在切削路径上时,不使用本构模型和三种不同本构的SiC颗粒所产生的切屑均表现为单个锯齿节状,但当SiC颗粒在切削路径上时,不使用本构模型的SiC颗粒和D-P模型的SiC颗粒相似,SiC颗粒在与刀具切削刃接触后颗粒被挤出,切屑在被挤出的SiC颗粒作用下进而变得破碎,而SiC颗粒本构模型脆性开裂模型和JH2模型时刀具切削刃与SiC颗粒接触后,达SiC颗粒的最大应力值,SiC颗粒产生裂纹并不断扩展,最终断裂。由于SiC颗粒与Al基体之间存在内聚力单元,SiC颗粒的上半部分同Al基体一同形成切屑与工件分离,下半部分则留在工件中影响加工后SiC<sub>p</sub>/Al复合材料的表面形貌。



(a) 颗粒未在切削路径上



(b) 颗粒在切削路径上

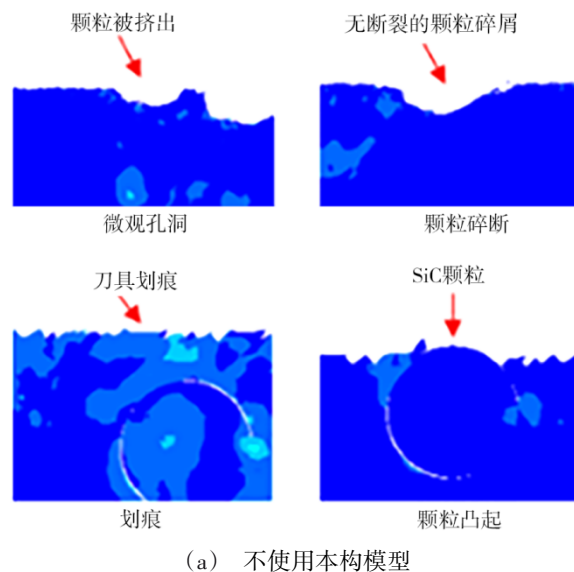
图3 不同SiC颗粒本构模型破损情况

Fig. 3 Damage of different SiC particle constitutive models

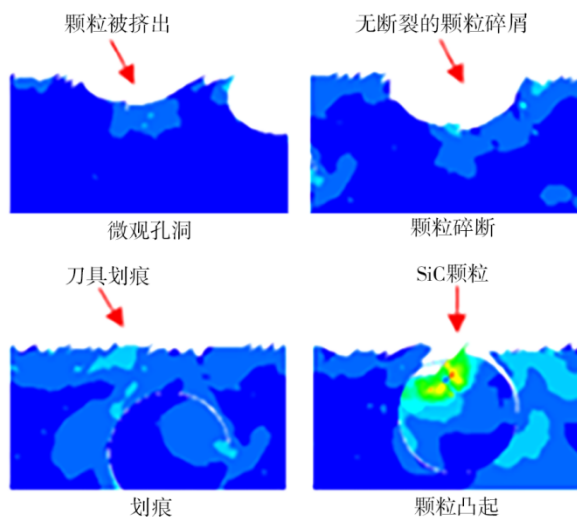
### 3.3 不同SiC颗粒本构模型所产生的表面缺陷

由于高强度的SiC颗粒存在,通常在实验时复合材料表面上出现4种特征形貌<sup>[17]</sup>:(1)由于SiC颗粒从Al基体挤出,从而在复合材料表面造成的微观孔洞;(2)由于SiC颗粒碎断,在复合材料表面造成的微观缺陷;(3)脱离Al基体或者碎断的SiC颗粒在工件表面上造成的划痕;(4)为刀具切削后,依然留在Al基体表面的SiC颗粒造成的凸起。如图4所示可以看出,不使用本构模型的SiC颗粒和D-P模型下SiC颗粒不会产生裂纹,大部分颗粒都是被刀具切走,几乎不存在第二种特征形貌;脆性开裂模型和JH2模型在仿真中4种表面形貌都能较完整地体现出来,但

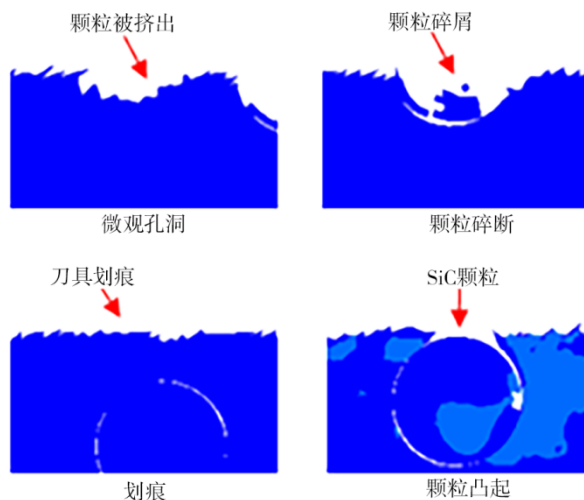
JH2模型考虑了大部分陶瓷材料的影响因素,包括静水压力、应变率和压缩损伤的影响,更贴合实际切削后的表面形貌。



(a) 不使用本构模型



(b) D-P本构模型



(c) 脆性开裂本构模型

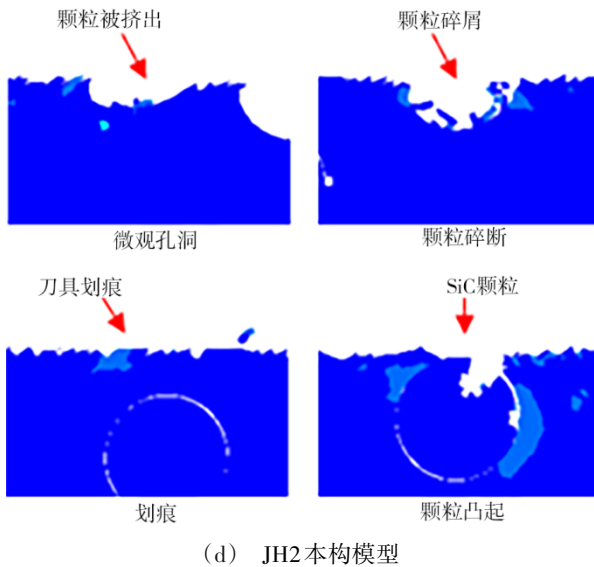
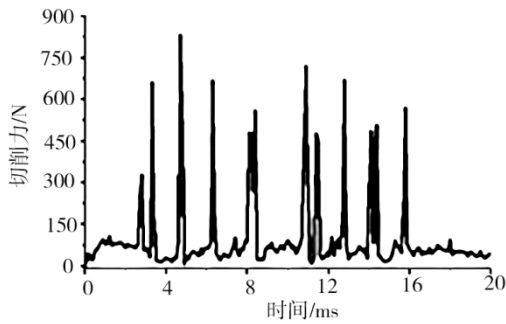


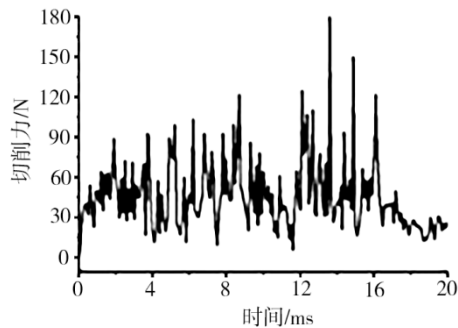
图4 不同SiC颗粒本构模型生成的切屑  
Fig. 4 Chips generated by different SiC particle constitutive models

### 3.4 不同SiC本构模型的切削力分析

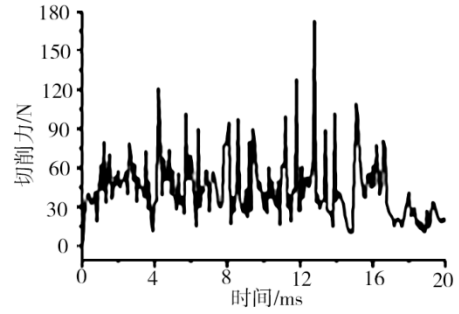
主切削力的仿真输出结果如图5所示,由于SiC颗粒硬度比较大,导致SiC颗粒受到的刀具冲击力比较大,且刀具在切削基体与颗粒之间相互变换,故切削力波动明显。在不使用本构模型时,切削力波动最大;这是因为刀具在切除SiC颗粒时,颗粒不会断裂而是对Al基体进行挤压,直到颗粒被挤出或压入Al基体。这与实际切削时并不相符,几乎不能作为参考。



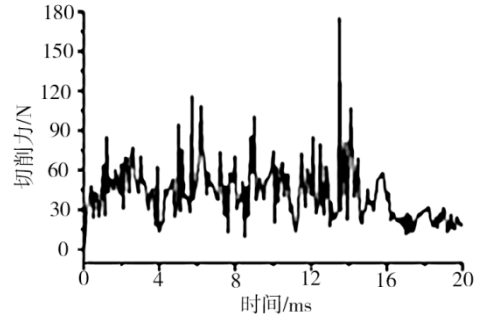
(a) 不使用本构模型



(b) D-P本构模型



(c) 脆性开裂本构模型



(d) JH2本构模型

图5 不同SiC本构模型的主切削力仿真结果

Fig. 5 Simulation results of main cutting force with different SiC constitutive models

其他不同SiC颗粒本构模型的主切削力上下波动的幅度相差不大,D-P模型所对应的切削力峰值最大为185.66 N;脆性开裂模型所对应的切削力峰值最小为173.27 N;JH2模型所对应的切削力峰值为175.38 N。

## 4 结论

本文采用有限元仿真模拟了4种不同SiC颗粒本构SiC<sub>p</sub>/Al复合材料模型的切削过程,具体结论如下:

(1)颗粒未在切削路径上时4种不同的SiC<sub>p</sub>/Al复合材料有限元仿真模型下的切屑基本相同,但颗粒在切削路径上时脆性材料模型和JH2模型下的切屑更为破碎,大部分为破碎的SiC颗粒同Al基体一同分离,而D-P模型会有出现较多完整的SiC颗粒随着切屑一同分离,JH2模型更贴合实际情况;

(2)4种不同的SiC<sub>p</sub>/Al复合材料有限元仿真模型下的表面形貌差异较大,只设置材料性能的SiC颗粒不会断裂,故只会产生颗粒拔出和被压入基体的两种情况,而其他3种不同SiC本构模型的SiC<sub>p</sub>/Al复合材料表面形貌中使用JH2模型更贴合实际情况;

(3)除不使用本构模型时,切削力波动最大,其他3种不同本构模型下的主切削力相差不大,D-P模型下的平均切削力为45.937 N,脆性开裂模型下的平均切削力为44.331 N,JH2模型下的平均切削力最

小为42.763 N,且3种SiC颗粒本构模型的最大切削力相差12.39 N。

### 参考文献

[1] 李震,侯守明. 碳化硅增强铝基复合材料切削加工研究进展[J]. 工具技术,2017,51(01):9-13.

LI Zhen, HOU Shouming. Research progress of silicon carbide reinforced aluminum matrix composites cutting[J]. Tool technology,2017,51(01):9-13.

[2] XU W, YIQUAN L, JINKAI X. et al. Comparison and research on simulation models of aluminum-based silicon carbide micro-cutting [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2020,109(1):589-605.

[3] GAO X, ZHANG X, GENG L. Strengthening and fracture behaviors in SiC<sub>p</sub>/Al composites with network particle distribution architecture [J]. Materials Science & Engineering, 2019,740-741(JAN. 7):353-362.

[4] 谢朝雨,张旭,程耀天,等. 基于有限元的SiC<sub>p</sub>/Al复合材料切削机理及表面质量研究[J]. 工具技术,2022,56(04):59-63.

XIE Chaoyu, ZHANG Xu, CHENG Yaotian. et al. Research on cutting mechanism and surface quality of SiC<sub>p</sub>/Al composites based on finite element method [J]. Tool Technology, 2022, 56(04):59-63.

[5] WANG Y, LIAO W, YANG K. et al. Investigation on cutting mechanism of SiC<sub>p</sub>/Al composites in precision turning[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 100.

[6] 李桂金. SiC<sub>p</sub>/Al复合材料切削仿真研究[J]. 宇航材料工艺,2017,47(6):5.

LI Guijin. Simulation study on SiC<sub>p</sub>/Al composite cutting [J]. Aerospace Materials Technology,2017, 47(6):5.

[7] ZHOU J, LU M, LIN J, et al. Investigation and simulation based on mesoscopic model of SiC<sub>p</sub>/Al composites during precision machining: deformation mechanism and surface quality [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2022,119(4):2173-2186.

[8] 范依航,霍志倩,郝兆朋. SiC<sub>p</sub>/Al复合材料切削仿真与实验研究[J]. 制造技术与机床,2022(02):43-49.

FAN Yihang, HUO Zhiqian, HAO Zhaopeng. Simulation and experimental study on SiC<sub>p</sub>/Al composite cutting [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool,2022(02):43-49.

[9] 邹财勇,闫承磊,李杰,等. 低体分SiC<sub>p</sub>/Al复合材料切削切屑形貌及孔壁损伤实验研究[J]. 复合材料科学与工程,2022(07):111-114.

ZOU Caiyong, YAN Chenglei, LI Jie. et al. Experimental study on chip morphology and hole wall damage of low volume SiC<sub>p</sub>/Al composites [J]. Composites Science and Engineering, 2022(07):111-114.

[10] LIN J, WANG C, LU M. et al. Modeling and investigation of cutting force for SiC<sub>p</sub>/Al composites during ultrasonic vibration-assisted turning [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2022;236(3):1013-1022.

[11] NIU Q, JING L, WANG C. et al. Study on effect of vibration amplitude on cutting performance of SiC<sub>p</sub>/Al composites during ultrasonic vibration-assisted milling[J]. 2020,106:2219-2225.

[12] ZHANG F, MENG B, GENG Y. et al. Study on the machined depth when nanoscratching on 6H-SiC using Berkovich indenter: modelling and experimental study [J]. Applied Surface Science,2016,368(15):449-455.

[13] JOHNSON G, BEISSEL S, HOLMQUIST T, et al. Computed radial stresses in a concrete target penetrated by a steel projectile[J]. Structures Under Shock & Impact V,1970,35:14.

[14] 杨震琦,庞宝君,王立闻,等. JH-2模型及其在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷低速撞击数值模拟中的应用[J]. 爆炸与冲击,2010,30(05):463-471.

YANG Zhenqi, PANG Baojun, WANG Liwen. et al. Jh-2 model and its application in numerical simulation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic impact at low speed [J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(05):463-471.

[15] LEE H, CHOI J H, JO M C, et al. Effects of SiC particulate size on dynamic compressive properties in 7075-T6 Al-SiC<sub>p</sub> composites [J]. Materials Science and Engineering A, 2018,738(19):412-419.

[16] 段春争,刘玉敏,孙伟,等. 增强颗粒对切削SiC<sub>p</sub>/Al复合材料切屑形成过程的影响机理[J]. 兵工学报,2019,40(01):208-218.

DUAN Chunzheng, LIU Yumin, SUN Wei, et al. Influence mechanism of reinforced particles on chip formation in cutting SiC<sub>p</sub>/Al composites [J]. Acta armamentarii, 2019, 40(01):208-218.

[17] 刘泉鹏,牛秋林,陈明,等. 20vol%SiC<sub>p</sub>/Al复合材料—硬质合金摩擦磨损表面形貌研究[J]. 工具技术,2019,53(04):33-37.

LIU Xiaopeng, LIU Qiulin, CHEN Ming. et al. Friction and wear surface morphology of 20vol% SiC<sub>p</sub>/Al composites and cemented carbide [J]. Tool Technology,2019,53(04):33-37.